

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE D'ORAN

**MOHAMED BOUDIAF**



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

MÉMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE  
DOCTEUR EN SCIENCE

SPÉCIALITÉ: RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Présenté par

**Mr. SEBAA Morsli**

Sujet de mémoire

**Commande Robuste d'un UPFC dans un Réseau d'Énergie Électrique Multi  
Machines**

**SOUTENUE LE 2012**

**DEVANT LE JURY COMPOSE DE:**

Mr. M. RAHLI	<i>Président</i>	Professeur, USTOran
Mr. A. CHAKER	<i>Rapporteur</i>	Professeur, ENSET - Oran
Mr. M. ZERIKAT	<i>Examineur</i>	Professeur, ENSET d'ORAN
Mr. B. AZOUI	<i>Examineur</i>	Professeur, UHLBatna
Mr. S. FLAZI	<i>Examineur</i>	Professeur, USTOran
Mr. M. BOUHAMIDA	<i>Examineur</i>	MCA, USTOran

## *Résumé*

Le contrôleur de flux de puissance universel (UPFC) est le dispositif le plus polyvalent parmi les systèmes de transmission flexibles à courant alternatif (FACTS) en raison de sa capacité de contrôler les flux des puissances active et réactive sur les lignes de transmission tout en contrôlant la tension du bus auquel l'UPFC est connecté. Cependant du fait que l'UPFC est un contrôleur multi variables, l'analyse de son effet sur le fonctionnement du système d'alimentation devient nécessaire.

Pour étudier les performances de l'UPFC pour l'amortissement des oscillations de la puissance à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, un système de commande découplée a été conçu pour l'onduleur shunt afin de contrôler la tension du bus de l'UPFC et la tension continue du condensateur de liaison. Quant à l'onduleur série, il contrôle le flux de la puissance active dans la ligne de transmission. Cependant, les analyses fréquentielle et temporelle ont montrées que l'utilisation d'un régulateur classique de type PI (proportionnel et intégral) à gain élevé pour l'onduleur série afin de réaliser un contrôle rapide du flux de la puissance active est associée par le problème de la présence d'un amortissement faible. Ce problème est résolu dans cette recherche en utilisant un contrôleur PI-flou adaptatif pour l'onduleur série.

Les études de la réponse transitoire ont été menées en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink pour montrer l'amélioration de l'amortissement des oscillations de la puissance avec UPFC doté d'un contrôleur PI-flou adaptatif. Ces simulations ont été menées sur un bus infini mono machine et après sur un réseau électrique multi machine. Les résultats de simulations montrent la viabilité de l'UPFC, doté par un contrôleur PI-flou adaptatif pour l'onduleur série, d'amortir les oscillations de la puissance dans les réseaux électriques par rapport à un UPFC doté d'un contrôleur classique de type PI.

## *Abstract*

Unified power flow controller (UPFC) has been the most versatile Flexible AC Transmission System (FACTS) device due to its ability to control real and reactive power on transmission lines while controlling the voltage of the bus to which it is connected. UPFC being a multi-variable power system controller it is necessary to analyze its effect on power system operation.

To study the performance of the UPFC in damping power oscillations using MATLAB/Simulink software, a de-coupled control system has been designed for the shunt inverter to control the UPFC bus voltage and the DC link capacitor voltage. The series inverter of a UPFC controls the real power flow in the transmission line. One problem associated with using a high gain PI controller (used to achieve fast control) for the series inverter of a UPFC to control the real power flow in a transmission line is the presence of low damping. This problem is solved in this research by using an adaptive fuzzy PI controller for the series inverter of UPFC.

Transient response studies have been conducted using MATLAB/Simulink software to show the improvement in power oscillation damping with UPFC in a single machine infinite bus and then in a multi machine power system in two cases, the first one when the series inverter is equipped with a conventional PI controller, the second one when it is equipped with an adaptive fuzzy PI controller. The simulation results have been conducted in MATLAB/Simulink software show the viability of the proposed control strategy in damping power oscillations.

*À la mémoire de mon père*

*à ma mère*

*à mon épouse*

*à mes fils*

*et*

*à mes frères et sœurs*

## ***Remerciements***

*Mes remerciement les plus vifs et chaleureux, vont à mon directeur de thèse monsieur Abdelkader CHAKER, Professeur à l'ENSET d'Oran pour son aide, son orientation et sa disponibilité, aussi pour la confiance et la compréhension qu'il ma toujours manifesté.*

*Je remercie monsieur M. RAHLI, Professeur à l'université Mohamed BOUDIAF d'Oran, d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.*

*J'adresse mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner cette thèse en lui apportant de l'intérêt, monsieur M. ZERIKAT, Professeur à l'ENSET d'Oran, monsieur B. AZOUI, Professeur à l'université de Batna, monsieur S. FLAZI, Professeur à l'université Mohamed BOUDIAF d'Oran et monsieur M. BOUHAMIDA maitre de conférences à l'université Mohamed BOUDIAF d'Oran.*

*Enfin, mes sincères remerciements à mes collègues les enseignants de la filière de génie électrique à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, plus particulièrement messieurs T. ALLAOUI maitre de conférence en Automatique, D. NASRI, maitre de conférences en physique et Y. MIHOUB, maitre de conférences en génie électrique pour la patience, le soutien inconditionnel, les conseils lors de la rédaction de cette thèse et le dévouement dont ils ont fait preuve.*

# Table des matières

<i>Liste des figures</i> .....	1
<i>Liste des Tableaux</i> .....	4
<i>Introduction générale</i> .....	5
<b>Chapitre I: État de l'art sur le contrôle de flux de puissance</b> .....	<b>11</b>
1.1 Introduction .....	12
1.2 Présentation des contrôleurs de flux de puissance .....	12
1.3 Conception de l'UPFC .....	16
1.4 L'UPFC: construction et exploitation .....	19
1.5 Complexité de la conception et du fonctionnement de l'UPFC .....	21
1.5.1 La complexité de la conception du système de contrôle d'un UPFC .....	21
1.5.2 La complexité de fonctionnement d'un UPFC dans un réseau électrique intégré .....	22
1.6 État de l'art sur les FACTS .....	22
1.6.1 Introduction .....	22
1.6.2 Étude bibliographique .....	23
1.7 Conclusion .....	35
<b>Chapitre II: Modélisation d'un UPFC pour une ligne de transmission</b> .....	<b>37</b>
2.1 Introduction .....	38
2.2 Modèle d'un UPFC pour un flux de charges .....	39
2.3 Circuit équivalent de Norton d'un UPFC .....	40
2.4 Équations des puissances active et réactive de l'UPFC .....	41
2.5 Procédure de flux de charge .....	42
2.6 Modélisation de l'UPFC .....	44
2.6.1 Modélisation du bus continu de l'UPFC .....	44
2.6.2 Modélisation et conception du système de contrôle de l'onduleur shunt .....	47
2.6.3 Modélisation et conception du système de contrôle de l'onduleur série .....	60
2.7 Performance du système de contrôle d'un UPFC avec onduleur série contrôlant le flux de la puissance active dans une ligne de transmission avec un régulateur PI .....	65
2.7.1 Description du réseau électrique étudié: .....	65
2.7.2 Réponse à un échelon d'entrée .....	66
2.8 Conclusion .....	69
<b>Chapitre III: Amélioration de la stabilité d'un réseau par UPFC</b> .....	<b>71</b>
3.1 Introduction .....	72
3.2 Analyse de stabilité aux petites perturbations .....	72
3.2.1 Formulation de la matrice d'état .....	72
3.3 Évaluation de la stabilité aux petites perturbations .....	74

3.3.1 1 <sup>er</sup> Cas: Bus d'alimentation infini mono machine.....	74
3.3.2. 2 <sup>ème</sup> Cas: système d'alimentation multi-machine.....	77
3.4 Évaluation de la stabilité transitoire:.....	80
3.4.1 Bus d'alimentation infini mono machine .....	81
3.3.2 Réseau électrique multi-machines (REMM).....	83
3.5 Conclusion.....	89
<b>Chapitre IV : Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique avec un UPFC doté d'un contrôleur flou pour l'onduleur série .....</b>	<b>91</b>
4.1 Introduction :.....	92
4.2 Notions de base de la théorie floue .....	93
4.2.1 Introduction .....	93
4.2.2 Principe fondamental de la logique floue .....	93
4.2.3 Bases générales de la logique floue .....	94
4.2.4 Réglage et commande par la logique floue .....	95
4.3 Contrôle de l'onduleur série par un contrôleur PI- flou adaptatif : .....	102
4.4 Conception d'une base de connaissances pour l'onduleur série .....	103
4.5 Performance du système de contrôle de l'UPFC avec onduleur série contrôlant le flux de puissance active dans une ligne de transmission avec un contrôleur PI-flou adaptatif .....	107
4.5.1 Réponse à un échelon d'entrée avec contrôleur flou.....	107
4.5.2 L'amortissement des oscillations de puissance avec un contrôleur flou .....	110
4.6 Études comparatives entre les résultats de simulation d'un système électrique avec un UPFC doté d'un PI avec ceux d'un système avec un UPFC doté d'un contrôleur PI-flou Adaptatif pour l'onduleur série.....	114
4.6.1 Cas d'un bus infini mono machine (BIMM).....	114
4.6.2 Cas d'un Réseau Électrique Multi Machines (REMM).....	117
4.7 Conclusion.....	121
<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>123</b>
1- Conclusion .....	124
2-Perspectives .....	126
<b>Annexes.....</b>	<b>127</b>
Annexe I.....	128
Annexe II .....	138
Annexe III.....	140
<b>Références.....</b>	<b>142</b>

# *Liste des figures*

<i>Fig. 1. 1 Réseau électrique à deux machines connectées par une ligne de transmission avec deux sources de tension représentant l'UPFC.....</i>	<i>16</i>
<i>Fig. 1. 2 La relation vectorielle entre la tension série <math>V_{se}</math> et le courant de ligne <math>I_{se}</math> .....</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 1. 3 Relation entre la tension du point milieu <math>V_M</math> et la source de tension série <math>V_{se}</math> pour l'opération de déphasage.....</i>	<i>19</i>
<i>Fig. 1. 4 Construction de l'UPFC .....</i>	<i>20</i>
<i>Fig. 1. 5 (a):Un UPFC connecté à la ligne de transmission, (b): Modèle à sources couplées d'un UPFC</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 1. 6 (a) Réseau électrique avec UPFC, (b) Modèle de flux de l'UPFC .....</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 2. 1 Configuration d'un contrôleur de flux de puissance unifié "UPFC" .....</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 2. 2 Modèle d'un UPFC .....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 2. 3 Circuit équivalent de Norton d'un UPFC .....</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 2. 4 Diagramme de phase présentant les deux composantes de la source de tension .....</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 2. 5 L'UPFC avec ses éléments et les flux des courants .....</i>	<i>44</i>
<i>Fig. 2. 6 Circuit équivalent d'un VSC connecté à une source de tension constante .....</i>	<i>48</i>
<i>Fig. 2. 7 Diagramme de phase d'un module VSC connecté à une source de tension constante.....</i>	<i>48</i>
<i>Fig. 2. 8 Système de contrôle découplé.....</i>	<i>50</i>
<i>Fig. 2. 9 Performances du module SVC.....</i>	<i>60</i>
<i>Fig. 2. 10 Réseau électrique pour la conception du contrôleur de l'onduleur série .....</i>	<i>61</i>
<i>Fig. 2. 11 Contrôleur de la puissance active de l'onduleur série.....</i>	<i>63</i>
<i>Fig. 2. 12 Réseau à deux machines avec un UPFC.....</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 2. 13 Réponse du système électrique aux changements brusques dans la puissance active de référence de l'UPFC.....</i>	<i>69</i>
<i>Fig. 3. 1 Réseau électrique composé d'un bus infini mono machine.....</i>	<i>74</i>
<i>Fig. 3. 2 Réseau électrique à deux zones avec UPFC.....</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 3. 3 Amortissement des oscillations de la vitesse rotorique (<math>\Delta\omega_r</math>) avec et sans UPFC.....</i>	<i>81</i>
<i>Fig. 3. 4 Amortissement des oscillations de la puissance électrique (<math>P_e</math>) fourni par l'alternateur avec et sans UPFC. ....</i>	<i>82</i>
<i>Fig. 3. 5 les oscillations de la variations de la tension continue (<math>\Delta V_{dc}</math>).....</i>	<i>82</i>
<i>Fig. 3. 6 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur <math>G_2</math> (<math>\delta_{21}</math>) avec et sans UPFC.....</i>	<i>84</i>

<i>Fig. 3. 7 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur <math>G_3</math> (<math>\delta_{31}</math>) avec et sans UPFC.....</i>	<i>85</i>
<i>Fig. 3. 8 Les oscillations de la puissance interzones avec et sans UPFC.....</i>	<i>85</i>
<i>Fig. 3. 9 Les oscillations de la puissance de la ligne de l'UPFC avec et sans UPFC .....</i>	<i>86</i>
<i>Fig. 3. 10 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur <math>G_2</math> (<math>\delta_{21}</math>) avec et sans UPFC.....</i>	<i>87</i>
<i>Fig. 3. 11 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur <math>G_3</math> (<math>\delta_{31}</math>) avec et sans UPFC.....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. 3. 12 Les oscillations de la puissance interzones avec et sans UPFC.....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. 3. 13 Les oscillations de la puissance de la ligne de l'UPFC avec et sans UPFC .....</i>	<i>89</i>
<i>Fig. 4. 1 Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique .....</i>	<i>94</i>
<i>Fig. 4. 2 Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.....</i>	<i>94</i>
<i>Fig. 4. 3 Structure du réglage par la logique floue.....</i>	<i>95</i>
<i>Fig. 4. 4 Configuration interne d'un contrôleur flou. ....</i>	<i>96</i>
<i>Fig. 4. 5 Fuzzification d'une variable linguistique avec sept fonctions d'appartenance .....</i>	<i>97</i>
<i>Fig. 4. 6 Fuzzification de la variable de sortie, cinq fonctions d'appartenance. ....</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 4. 7 La défuzzification par la méthode de centre de gravité.....</i>	<i>101</i>
<i>Fig. 4. 8 Schéma bloc du contrôleur PI-flou adaptatif pour l'onduleur série.....</i>	<i>103</i>
<i>Fig. 4. 9 Schéma bloc du contrôleur flou utilisé pour le mécanisme d'adaptation .....</i>	<i>104</i>
<i>Fig. 4. 10 Erreur de la puissance active de la ligne de transmission (cas d'un BIMM) .....</i>	<i>105</i>
<i>Fig. 4. 11 Variation de l'erreur de la puissance active (cas d'un BIMM).....</i>	<i>105</i>
<i>Fig. 4. 12 les fonctions d'appartenances des variables d'entrée et de sortie; a) fonctions d'appartenances de l'erreur et sa dérivée, b) les fonctions d'appartenances de <math>\Delta K_p</math> et <math>\Delta K_i</math> (cas d'un BIMM) .....</i>	<i>106</i>
<i>Fig. 4. 13 Réponse du réseau électrique vis-à-vis les changements de la puissance de référence pour un UPFC doté d'un contrôleur PI-flou adaptatif.....</i>	<i>110</i>
<i>Fig. 4. 14 Système électrique à deux machines avec un UPFC .....</i>	<i>110</i>
<i>Fig. 4. 15 Réponse du réseau électrique vis-à-vis un défaut sans UPFC .....</i>	<i>111</i>
<i>Fig. 4. 16 Réponse du réseau électrique vis-à-vis un défaut avec UPFC (avec PI-flou adaptatif).....</i>	<i>113</i>
<i>Fig. 4. 17 Réseau électrique composé d'un bus infini mono machine.....</i>	<i>115</i>
<i>Fig. 4. 18 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur .....</i>	<i>115</i>
<i>Fig. 4. 19 Amortissement des oscillations de la vitesse rotorique de générateur .....</i>	<i>116</i>
<i>Fig. 4. 20 La puissance électrique de sortie du générateur .....</i>	<i>116</i>
<i>Fig. 4. 21 Flux de la puissance active dans la ligne de l'UPFC .....</i>	<i>117</i>



<i>Fig. 4. 22 Réseau électrique à deux zones avec UPFC.....</i>	<i>118</i>
<i>Fig. 4. 23 Différence de l'angle rotorique entre les générateurs <math>G_2</math> et <math>G_1</math>. Défaut au bus-5. ....</i>	<i>119</i>
<i>Fig. 4. 24 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur <math>G_3</math> par rapport à <math>G_1</math>.....</i>	<i>120</i>
<i>Fig. 4. 25 Les oscillations de flux de la puissance active inter zones.....</i>	<i>120</i>
<i>Fig. 4. 26 Flux de la puissance active dans la ligne de transmission de l'UPFC.....</i>	<i>121</i>

# *Liste des Tableaux*

<i>Tableau 3. 1 Valeurs propres avec PSS (BIMM).....</i>	<i>75</i>
<i>Tableau 3. 2 Valeurs propres avec PSS et UPFC (BIMM).....</i>	<i>75</i>
<i>Tableau 3. 3 Valeurs propres avec UPFC pour différentes valeurs de la tension <math>V_{sed}</math> (BIMM).....</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 3. 4 Valeurs propres lorsque l'onduleur shunt contrôle la tension de bus coté ligne de transmission (BIMM) .....</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 3. 5 valeurs propres avec PSS (REMM).....</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 3. 6 Valeurs propres avec PSS et UPFC (REMM).....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 3. 7 Valeurs propres avec UPFC pour différentes valeurs de la tension <math>V_{sed}</math> (REMM).....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 3. 8 Valeurs propres lorsque l'onduleur shunt contrôle la tension de bus coté ligne de transmission (REMM) .....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 4. 1 Base de connaissance floue pour l'onduleur série .....</i>	<i>107</i>
<i>Tableau A1. 1 Données du réseau pour un Bus Infini Mono Machine .....</i>	<i>128</i>
<i>Tableau A1. 2 Données des bus pour BIMM.....</i>	<i>128</i>
<i>Tableau A2. 1 Données du réseau multi Machine.....</i>	<i>138</i>
<i>Tableau A2. 2 Données des bus pour RMM.....</i>	<i>138</i>
<i>Tableau A3. 1 La liste complète des valeurs propres sans UPFC pour un REMM .....</i>	<i>140</i>
<i>Tableau A3. 2 La liste complète des valeurs propres avec UPFC pour un REMM.....</i>	<i>141</i>

## *Introduction générale*

Au cours des dernières années, l'augmentation croissante de la demande d'énergie, les contraintes également croissantes de la préservation de l'environnement, les difficultés d'obtention des droits de bâtir ainsi que les coûts relatifs à la construction de nouvelles lignes et centrales posent de nouveaux défis aux exploitants des réseaux. Cette situation a entraîné des recherches intensives pour optimiser l'exploitation des réseaux électriques, et tenter d'atteindre les limites thermiques des lignes.

Pour contrôler le flux de puissance sur les lignes d'interconnexion dans un réseau électrique, des équipements de contrôle de l'écoulement de puissance tels que les transformateurs déphaseurs sont installés, ils gèrent l'écoulement de la puissance active entre les différentes zones formant le réseau électrique. L'échange de cette puissance active se fait généralement sur une base de temps importante. D'autre part, le contrôle du flux de puissance réactive sur ces lignes est également très important. Ce contrôle est nécessaire sur les lignes de transmission qui relient les différentes zones pour régler la tension à l'arrivée. Bien que des mesures de contrôle locales dans une zone sont de plus en plus efficaces au cours des éventualités, des occasions peuvent surgir lorsque les zones adjacentes peuvent être appelées à fournir de la puissance réactive pour compenser les chutes de tensions et pour améliorer la sécurité du système [1].

Pour résoudre les problèmes de contrôle de la tension dans les stations ou à proximité de terminaux de lignes d'interconnexion, les équipements de régulation de flux de puissance sont appelés non seulement d'être en mesure de contrôler la puissance active, mais aussi et simultanément, de contrôler rapidement le flux de la puissance réactive. En outre, cette tension doit être régulée dans ses limites.

Le transit de puissance dans un réseau électrique n'est pas facile à contrôler en raison de la complexité de contrôler les paramètres de ligne qui déterminent le flux de puissance dans cette ligne [2]. Les moyens classiques de compensation et de contrôle du flux de puissance dans les réseaux tel que le transformateur à prises réglables, les transformateurs déphaseurs, les compensateurs séries ou parallèles commutés par disjoncteurs, s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux nouvelles exigences.

Heureusement, la capacité de contrôler le flux de puissance au niveau des lignes de transmission a été grandement influencée par les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance [3,4,5], des dispositifs de puissance à commutation élevée fournis à la fonction de transmission, la souplesse nécessaire pour contrôler le flux de puissances dans les réseaux électriques. Aujourd'hui, avec la disponibilité des thyristors de puissance (GTO), il est

devenu possible de regarder au-delà du domaine limité des thyristors classiques pour le contrôle des flux de puissance.

En 1988, Hingorani [6] présente, lors d'une conférence d'IEEE, un nouveau concept: "Flexible AC Transmission Systems (FACTS) ", qui met en relief les nouvelles possibilités de l'électronique de puissance dans la commande et le contrôle du transport de l'énergie électrique en courant alternatif(AC). Selon IEEE, le terme FACTS désigne les systèmes de transport et de distribution d'énergie électrique, en courant alternatif, qui font appel à l'électronique de puissance pour améliorer leur flexibilité d'exploitation et leur capacité de transport [7].

Le terme flexible fait référence à la capacité du réseau de s'ajuster automatiquement en fonction des conditions d'exploitation pour garder une bonne marge de sécurité statique et dynamique.

La compensation shunt agit sur le profil de la tension, la compensation série quant à elle modifie la réactance de la ligne et le déphaseur modifie l'écart angulaire entre les tensions. La plupart des dispositifs de commande actuels de ces compensateurs, hormis les compensateurs statiques, sont mécaniques ou électromécaniques. Leur inconvénient majeur est leur faible vitesse de réaction, ainsi que leur faible fréquence de manœuvre pouvant être initiée sans risque de vieillissement accéléré. L'idée des FACTS vient pour combler cette lacune.

Les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau. Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions, de réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements. Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Les études de flux de charges à travers une ligne de transmission ont montré que le contrôle de la réactance et l'angle de phase de la ligne de transmission sont des moyens efficaces pour contrôler le flux de puissance dans les systèmes de transmission à courant alternatif. En principe, le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitors) et le TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer) peuvent fournir un contrôle rapide de la puissance active dans une ligne de transmission. Les deux dispositifs injectent une tension série dans la ligne. Pour les capacités séries, la tension injectée est en avance par rapport au courant de la ligne de  $90^\circ$ .

Quant à le transformateur déphaseur, la tension injectée est en quadrature avec la tension de bus auquel il est connecté. Les nouvelles progressions dans la technologie ont permis l'implantation des contrôleurs de flux de puissance en utilisant des convertisseurs à base d'interrupteurs électroniques de puissance.

Le contrôleur de flux de puissance universel (Unified Power Flow Controller: UPFC) est un nouveau dispositif dans la famille des FACTS qui consiste en deux convertisseurs connectés dos à dos à travers un condensateur, un convertisseur série et l'autre shunt. L'UPFC peut fournir le fonctionnement flexible nécessaire pour un contrôle de flux de puissance optimal. Cette approche permet de combiner l'application du contrôle de l'angle de phase avec la compensation série et la compensation shunt de la puissance réactive contrôlée. De plus, la transition en temps réel d'un mode de compensation à un autre mode se fait par manipulation d'un système particulier de conditions d'une manière optimale [8,9,10,11].

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les performances d'un UPFC dans un système électrique et d'examiner son apport au contrôle de flux de charges/de l'écoulement de puissances à travers une ligne de transmission. Étant donné que l'UPFC est un contrôleur multi-variable, donc il est nécessaire de se pencher sur son effet global sur la stabilité du système électrique. Des analyses dans le domaine fréquentiel (stabilité aux petites perturbations) et dans le domaine temporel (la stabilité transitoire) ont été menées pour étudier l'amélioration de la stabilité avec l'UPFC. L'analyse de stabilité aux petites perturbations pour les systèmes d'alimentation avec UPFC contrôlant la puissance active, le flux de la puissance réactive dans la ligne de transmission/la tension du bus coté ligne de transmission, la tension continue du condensateur de liaison et la tension du bus UPFC a été menée simultanément pour examiner son effet sur les systèmes électriques interconnectés. Pour ce faire, un modèle approprié pour l'UPFC a été choisi. Cela inclut à la fois le flux de charge et le modèle dynamique.

Cette thèse a été scindée en 4 chapitres. Dans Le premier chapitre on a examiné les différents flux de charges et les modèles dynamiques présentés dans la littérature. Toutefois, une condition de fonctionnement initiale stable est la base pour mener des études dans le domaine fréquentiel ou temporel. Cette condition initiale est obtenue en réalisant des études de flux de charges. L'importance du contrôle de flux de puissance réactive sur la ligne de transmission a été brièvement discutée. Un bref aperçu de divers dispositifs FACTS a également été accompli en matière de contrôle de l'écoulement de la puissance active et de la puissance réactive. Ce chapitre décrit également la construction et l'exploitation d'un UPFC, de plus, la complexité de la conception du système de commande d'un UPFC a été brièvement abordée. Le chapitre-1

dégage, dans sa dernière partie, les avantages et les limites des différentes stratégies de commande et leurs systèmes de commande utilisés pour contrôler le flux de puissances et l'amortissement des oscillations de puissance.

Le second chapitre est consacré à l'analyse des flux de charges avec UPFC. Dans la première partie de ce chapitre est fourni les détails sur le modèle de flux de charges utilisé pour l'UPFC.

La seconde partie est concentrée à la construction, l'exploitation et le contrôle d'un onduleur shunt. La procédure de la conception du système de contrôle de l'onduleur shunt est également expliquée. Des études de performances seront réalisées afin de valider cette conception.

Également, dans ce chapitre est fourni le contexte de la construction, l'exploitation et le contrôle d'un onduleur série. La tension de sortie de l'onduleur série a été scindée en deux parties. Une tension en quadrature et une tension directe en phase avec la tension du bus de l'UPFC, ce qui leurs permet un contrôle indépendant.

Une analyse des valeurs propres a été effectuée afin d'examiner l'apport d'un contrôleur proportionnel et intégral (PI) dans la boucle de contrôle de l'onduleur série dans le but de contrôler le flux de la puissance active dans une ligne de transmission sur l'amortissement des oscillations de la puissance. L'analyse prend en considération le fonctionnement de l'onduleur shunt, la dynamique du condensateur de liaison et la dynamique de la ligne de transmission. Le but de ce chapitre est de développer l'ensemble des équations nécessaires qui comprend la dynamique de l'UPFC pour effectuer des simulations numériques dans le domaine temporel pour montrer l'amélioration de la stabilité du système électrique avec un UPFC.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse de la stabilité aux petites perturbations avec un UPFC. En effectuant des analyses de stabilité aux petites perturbations, l'ensemble de systèmes d'équations nécessaire pour procéder à des simulations numériques dans le domaine temporel est vérifié. Également, les résultats de l'analyse du système électrique avec UPFC dans le domaine temporel en utilisant le logiciel *MATLAB/Simulink* seront présentés dans ce chapitre.

Un contrôleur PI-flou adaptatif, pour surmonter le problème du faible amortissement associé au gain élevé du contrôleur PI, est conçu et décrit dans le quatrième chapitre. Les simulations d'un système électrique avec UPFC fournissent les bases nécessaires à la conception de la base de connaissances de l'onduleur série. L'information concernant la base de

connaissances floues est obtenue en réalisant des études de défauts sur le réseau électrique. La base de connaissances conçues sera utilisée dans le chapitre-4 tout en menant des études utilisant des simulations sur un réseau électrique par le logiciel *Simulink* sous l'environnement *MATLAB*. En complément, l'amélioration de l'amortissement des oscillations de puissance en utilisant la base de connaissances floues conçu pour le contrôleur flou de l'onduleur série d'un UPFC a été traité dans ce chapitre.

Les performances du système de contrôle complet ont été effectuées et les avantages d'utiliser un contrôleur PI-flou adaptatif pour l'onduleur série ont été introduits dans cette thèse.

Une conclusion et des perspectives sont présentées à la fin de cette thèse.



*Chapitre I:État de l'art sur le contrôle  
de flux de puissance*

## 1.1 Introduction

Le flux de puissance dans une ligne de transmission est une fonction de la tension de la source ( $V_s$ ), la tension du récepteur ( $V_R$ ), la différence de l'angle de phase ( $\delta$ ) entre les tensions et l'impédance de la ligne ( $X$ ). Le contrôle de l'un des paramètres ci-dessus peut aider à contrôler le flux de puissance et le processus est connu sous le nom de compensation. Ces dispositifs peuvent être placés soit en série ou en parallèle avec la ligne de transmission dans l'intention de contrôler le flux de puissance dans cette ligne.

Si l'impédance de la ligne de transmission est modifiée par le fait de l'addition d'un tel dispositif FACTS, la compensation est appelée compensation série. Si l'angle de phase est modifiée, elle est appelée compensation de l'angle de phase. La compensation shunt, dans laquelle le dispositif FACTS est placé en parallèle, est principalement utilisée pour améliorer les caractéristiques de tension du système.

## 1.2 Présentation des contrôleurs de flux de puissance

La compensation série des longues lignes de transport a été proposée pour la première fois, dans les années 60 pour augmenter les transits de puissance sur une ligne. L'importance de la compensation série, dans le but d'améliorer la capacité de transport des lignes, a été reconnue et n'a fait que croître au cours des années suivantes. Hydro-Québec [13] a procédé dans les années 60 à l'installation des bancs de condensateurs séries sur son réseau de transport pour ainsi augmenter la capacité de transport et la fiabilité de son réseau. Actuellement, Les batteries de condensateurs sont le moyen le plus économique et le plus simple de production de l'énergie réactive dans les installations industrielles aussi bien que dans le réseau public [14]. Ces condensateurs série et fixes aident à augmenter les limites de la stabilité d'un système électrique interconnecté. Ces condensateurs qui peuvent atteindre quelques MVar sont utilisés pour corriger le facteur de puissance dans le cas de fortes charges inductives. Cette solution est généralement utilisée pour la compensation réactive de flux de puissance dans le réseau, mais elle pourrait être envisagée quand le plan de tension est bas afin de le corriger. Le but est de compenser la puissance réactive absorbée par le réseau et par les transformateurs. Ainsi, Les batteries de condensateurs permet de compenser cette puissance réactive consommée en mettant en service le bon nombre d'éléments pour une compensation optimale [15].

En compensation série, la quantité d'énergie réactive consommée par la ligne est diminuée ce qui augmente la quantité de la puissance réactive transférée et améliore le profil de la tension au récepteur. C'est l'un des bénéfices secondaires de l'utilisation de la compensation série. Sous conditions de perturbation du système tel que un défaut triphasé ou un déclenchement

de ligne, la compensation série peut aider à amortir les oscillations qui peuvent provoquées l'instabilité du système globale [16].

Le contrôle du flux de puissance par la compensation série signifie que, en changeant la valeur de l'impédance dans le circuit, le courant dans les lignes de transport va se varier provoquant la variation du flux de puissance dans cette ligne. Globalement, elle ne contrôle que l'intensité du courant dans une ligne de transmission. Cependant, la demande de la puissance réactive au niveau des récepteurs est déterminée par la puissance active transmise de la même manière que si la ligne était sans compensation mais avec une impédance de ligne plus petite [8]. L'inconvénient lié à cette compensation est l'augmentation des pertes dans le système qui peuvent être considérables. Cela est dû à l'intensité élevée du courant crée par l'impédance réduite de la ligne.

En outre, la compensation série ne peut pas contrôler le flux de la puissance réactive dans une ligne de transmission. Les directives économiques exigent l'utilisation de la compensation fixe et variable pour le transfert croissant de la puissance. Or, l'utilisation de la compensation série fixe pour augmenter la capacité de transits de puissance a longtemps été utilisée. Cependant, l'augmentation de la capacité de transits par la compensation fixe conduit à l'apparition éventuelle de résonance sous-synchrone (SSR) [16]. Le risque potentiel de résonance sous synchrone, conduisant à des dommages de rupture de l'arbre du turbogénérateurs et de l'instabilité électrique à des fréquences d'oscillation inférieure à la fréquence normale du système, a découragé fortement l'application de la compensation série fixe.

Toutefois, la compensation série contrôlée par thyristor (TCSC ; Thyristor Controlled Series Compensation) [12] fournit une amélioration d'atténuation des conséquences SSR, ne peut pas, dans certaines conditions de fonctionnement, amortir tous les modes de résonance sous-synchrone [9]. A partir des caractéristiques d'impédance d'un TCSC, le changement du mode capacitif au mode inductif est discontinue, et de plus, il ya une région (la région de résonance), où l'opération est limitée [10,17].

La compensation shunt consiste en l'installation de réactances ou bancs de condensateurs connectés entre les phases du réseau et la terre en général par le biais de disjoncteurs en différents endroits sur les réseaux pour modifier l'impédance des lignes, dans le but de compenser ces réseaux en puissance réactive et maintenir la tension dans les limites contractuelles [18].

Lorsque le réseau n'est pas ou peu chargé, c'est-à-dire que l'impédance de la charge est très élevée, la tension au bout de la ligne est supérieure à la tension du générateur (effet Ferranti).

Cette augmentation de tension est d'autant plus importante que le réseau est exploité à tension élevée et que les lignes sont longues. Pour réduire la tension au bout de la ligne, il faut augmenter artificiellement l'impédance caractéristique de la ligne en diminuant sa capacité shunt. Pour ce faire, une ou plusieurs réactances sont connectées en parallèle. Cependant, lorsque le réseau est fortement chargé, les réactances shunt deviennent inutiles. Pour maintenir la tension dans les limites contractuelles, le gestionnaire du réseau doit donc connecter ou déconnecter les réactances selon la charge du réseau. Ces opérations sont généralement assurées par des disjoncteurs. D'autre part, une charge qui absorbe de la puissance réactive va provoquer une chute de tension, dans ce cas la connexion d'un ou plusieurs bancs de condensateurs en parallèle avec la charge permet de maintenir la tension. Les bancs de condensateurs vont compenser la puissance réactive absorbée par la charge et ainsi éviter la transmission de puissance réactive sur de longues distances. De même que les réactances, ces bancs de condensateurs doivent être connectés/déconnectés selon la charge du réseau, on utilise cette fois encore des disjoncteurs [19].

Cependant du fait du nombre limité d'opérations et des délais d'ouverture/fermeture des disjoncteurs, ces réactances et condensateurs parallèle ne doivent pas être commutés trop souvent et ne peuvent pas être utilisés pour une compensation dynamique des réseaux. Dans le cas où le contrôle de réseau nécessite des commutations nombreuses et/ou rapides, on fera appel à des équipements contrôlés par thyristors [19].

Le Static Var Compensator (SVC) aussi appelé Compensateur Statique de Puissance Réactive est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau. Il permet entre autres la connexion de charges éloignées des centres de production et la diminution des effets des défauts ou des fluctuations de charges.

Il existe deux types de SVC : les SVC industriels et les SVC de transmission. Les SVC industriels sont souvent associés à des charges déséquilibrées qui peuvent varier très rapidement telles que les laminoirs ou les fours à arcs pour lesquels les fluctuations rapides de puissance réactive limitent les capacités de production et provoquent du flicker. Ils sont aussi très utiles pour réduire les déséquilibres de phases générés par la traction ferroviaire. Les SVC de transmission ont pour fonction de réduire la tension des réseaux peu chargés en absorbant de la puissance réactive, d'augmenter la tension des réseaux fortement chargés en fournissant de la puissance réactive et d'aider le système à récupérer sa stabilité après un défaut. Cette dernière fonction est particulièrement importante car, suite à une perte de tension lors d'un défaut, les

moteurs connectés accélèrent et appellent de la puissance réactive en même temps. Si cette puissance n'est pas fournie localement, elle doit être transmise sur de longues distances et entraîne une chute de tension sur le réseau. Le système ne trouve alors jamais sa stabilité et il faut déconnecter toutes les charges avant de les reconnecter une par une. Un SVC connecté au réseau peut fournir toute sa puissance réactive de dimensionnement pour aider les charges à accélérer et garantir la stabilité du système [19,20].

La compensation de l'angle de phase, réalisée par l'insertion des inductances en série via des transformateurs de liaisons dans la ligne de transmission, est une méthode de contrôle de flux de puissance. Elle a été utilisée dans de nombreux systèmes de transmission. Ce dispositif déphaseur par lui-même ne cause pas de SSR. Il a l'avantage d'atténuer les résonances sous-synchrones causées par les condensateurs série. Un tel dispositif ne peut en aucun cas augmenter le niveau maximal de transfert de puissance active, mais peut améliorer la stabilité transitoire du système. Son principe de fonctionnement est basé sur la faible inductance qu'il présente en série avec la ligne de transmission, ce qui mène la consommation d'énergie réactive a augmentée dans cette ligne [8], toutefois, l'augmentation de la consommation de la puissance réactive conduit à favoriser en plus les pertes dans le système [17].

Le transformateur déphaseur a donc la possibilité d'accroître ou de réduire les transits de la puissance active sur la ligne où il est installé en fonction de la valeur du déphasage. Il peut par conséquent être installé sur une ligne à faible capacité thermique pour y limiter les transits de puissance, ou sur une ligne à forte capacité thermique pour y augmenter les transits de puissance. L'une des principales applications de transformateur déphaseur se trouve lorsque deux réseaux sont connectés par des lignes parallèles d'impédances différentes. Dans ce cas, le transfert de puissance et sa répartition sont directement liés aux impédances de chaque branche et ne tiennent pas compte des capacités thermiques de chaque liaison. L'installation d'un transformateur déphaseur dans l'une quelconque des branches permet de modifier artificiellement la répartition naturelle des transits et d'obtenir une nouvelle distribution de la charge entre les deux branches. En particulier un tel équipement permet d'exploiter deux lignes parallèles au maximum de leurs capacités thermiques indépendamment de leurs impédances respectives [21,22].

En outre, ces déphaseurs ne peuvent pas contrôler le flux de puissance réactive dans une ligne de transmission.

La coordination entre les équipements de différentes compensations à savoir la compensation série, la compensation shunt et la compensation de l'angle de phase est un aspect important à considérer lors de l'exploitation d'un réseau électrique intégré et complexe. Les

opérateurs ont rencontré des interactions indésirables entre ces divers dispositifs, ce qui leur conduit à reconsidérer leurs stratégies de contrôle pour avoir un bon fonctionnement du réseau électrique [11,23,24].

Les progrès réalisés dans le domaine des dispositifs à semi-conducteurs a permis à combiner les fonctionnalités de la compensation série, shunt et la compensation de l'angle de phase en un seul dispositif. Ce dispositif a été appelé le contrôleur de flux de puissance universel (UPFC : Unified Power Flow Controller). Il a la capacité de contrôler les flux de puissance active et réactive dans une ligne de transmission, tout en réglant la tension du bus auquel ce dispositif est connecté sans aucun risque de causer de SSR. En utilisant un UPFC, de nombreux dispositifs pourraient être éliminés, réduisant ainsi le coût principal. En outre, le problème des interactions indésirables entre les dispositifs FACTS pourrait être réduit au minimum, voir éliminé complètement. Comme on le voit du point de vue industriel, cette approche promet de simplifier la conception, la réduction de la taille des équipements et de l'installation, et des améliorations dans les performances du système [8].

### 1.3 Conception de l'UPFC

Le concept de l'UPFC a été proposé par Gyugyi et al [8]. Pour comprendre la notion de l'UPFC, considérons un réseau électrique à deux machines reliées par une ligne de transmission de réactance  $X$ , (purement inductive) ainsi que deux sources de tension  $V_{se}$ , et  $V_{sh}$ , représentant l'UPFC comme le montre la Figure 1.1.

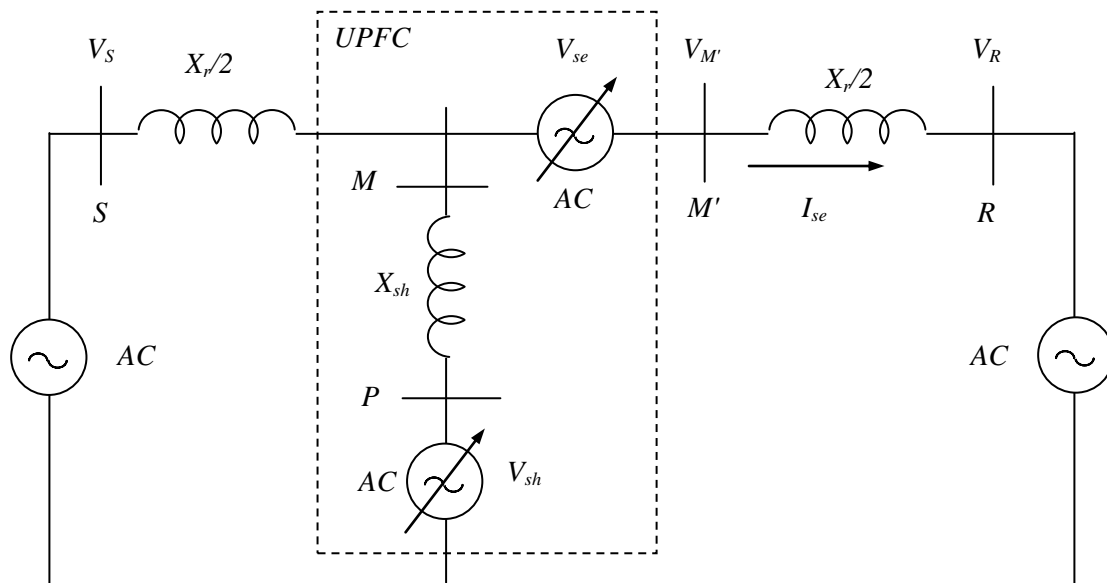


Fig. 1. 1 Réseau électrique à deux machines connectées par une ligne de transmission avec deux sources de tension représentant l'UPFC

Les sources de tension notée  $V_{se}$ , et  $V_{sh}$ , dans cette figure sont connectés en série et en parallèle respectivement au point milieu de la ligne de transmission. La source de tension  $V_{sh}$ , est reliée à la ligne de transmission à travers un transformateur représenté par une réactance,  $X_{sh}$ . On suppose que les sources de tension notée  $V_{sh}$ , et  $V_{se}$ , ont la capacité de faire varier leur amplitudes et leurs angles de phase.

Pour comprendre le fonctionnement de la source de tension  $V_{sh}$ , la source  $V_{se}$  est supposée déconnectée. La puissance réactive découlera de la source de tension  $V_{sh}$  vers le bus M si l'amplitude de la tension  $V_{sh}$  est supérieure à la tension du point milieu, et leurs angles de phase sont les mêmes. Si l'angle de phase de la tension  $V_{sh}$ , est en avance par rapport à l'angle de phase de la tension  $V_M$ , et l'amplitude de  $V_{sh}$ , est supérieure à celle de  $V_M$ , alors les puissances active et réactive découleront de la source  $V_{sh}$  vers le bus M.

Inversement, si l'amplitude de la tension shunt est inférieure à la tension  $V_M$ , mais la différence d'angle de phase entre eux est zéro, alors la puissance réactive va transitée à partir du bus M vers le bus P. Dans ce processus, la source de tension  $V_{sh}$  consomme de la puissance réactive. Si l'angle de phase de  $V_M$  est en avance par rapport à l'angle de phase de  $V_{sh}$  alors, les deux puissances active et réactive découleront du bus M vers le bus P et la source de tension shunt  $V_{sh}$  va consommer, à la fois, les deux puissances.

En résumé, en contrôlant l'amplitude et la phase de la tension shunt  $V_{sh}$ , le sens de flux de la puissance active et la puissance réactive dans le bus M peut être contrôlé.

Alternativement, la source de tension  $V_{sh}$  peut être faite pour fonctionner dans un réseau électrique, soit comme une charge, soit comme un générateur. En effet, si la différence de l'angle de phase entre la tension du bus M et celle de  $V_{sh}$  est maintenue à zéro, la puissance réactive peut être consommée ou produite par la source de tension shunt  $V_{sh}$  en variant son amplitude.

Cette opération peut être comparée au principe de fonctionnement d'un compensateur shunt de type TCRC (thyristor controlled reactor with fixed capacitor), qui génère ou absorbe de la puissance réactive en modifiant son impédance réactive shunt. Il est à noter que la fonction d'un compensateur shunt est dupliquée par la source de tension  $V_{sh}$ .

Maintenant, considérons que la source de tension série  $V_{se}$  de la Figure 1.1, la source de tension shunt  $V_{sh}$  est inactive. Supposons que l'amplitude et la phase de la source de tension série  $V_{se}$  peuvent être modifiée. Le courant de la ligne de transmission  $I_{se}$  interagit avec la source de tension série  $V_{se}$ , provoquant les puissances active et réactive d'être échangées entre la source de tension série et la ligne de transmission. Si la source de tension  $V_{se}$  et le courant de la ligne de transmission  $I_{se}$  sont à 90 degrés de différence de phase et que le vecteur de tension  $V_{se}$  précède

le vecteur courant, la source de tension  $V_{se}$  ne génère alors que de la puissance réactive. Le diagramme de phase est montré dans la figure 1.2.

Inversement, si le vecteur de la tension  $V_{se}$  est en retard par rapport au vecteur de courant  $I_{se}$  de 90 degrés, donc la source de tension  $V_{se}$  consomme de la puissance réactive. Le fonctionnement ci-dessus peut être comparé à celle d'une batterie de condensateurs séries/inductances séries dans une ligne de transmission. Lorsque les condensateurs sont placés en série avec la ligne de transmission, elles génèrent de la puissance réactive. La quantité d'énergie réactive produite dépend de la quantité de compensation série et le courant de la ligne. Lorsque les inductances sont placées en série avec la ligne de transmission, elles consomment de la puissance réactive.

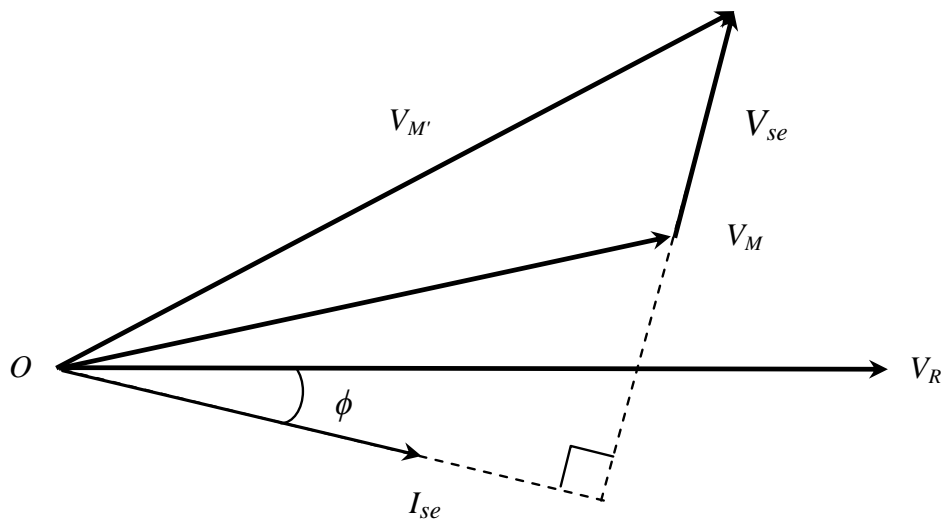


Fig. 1. 2 La relation vectorielle entre la tension série  $V_{se}$  et le courant de ligne  $I_{se}$ .

En résumé, la fonction de condensateurs séries pourrait être effectuée par la source de tension série  $V_{se}$  en maintenant sa phase en avance de 90 degrés par rapport à la phase du courant de ligne  $I_{se}$ . En revanche, la fonction des inductances séries pourrait être réalisée par la source de tension série  $V_{se}$  en ajustant l'angle de phase de telle sorte qu'elle soit en retard de 90 degrés à l'angle de phase du courant de ligne.

En ajustant correctement l'angle de phase de la source de tension série  $V_{se}$ , le fonctionnement d'un déphaseur pu être obtenue. Dans ce cas, l'angle de phase de la source de tension série  $V_{se}$  est en avance ou en retard par 90 degrés sur la tension du bus auquel elle est connectée. Cela provoque le décalage de la phase de tension d'une quantité en fonction de l'amplitude de la tension injectée. Dans ce cas, si la source de tension série  $V_{se}$  est à 90 degrés en avance ou en retard avec la tension du bus  $V_M$ , donc un décalage de phase  $\alpha = \tan^{-1}(V_{se}/V_M)$  pourrait être obtenu.



La Figure 1.3 montre le diagramme vectoriel qui décrit la relation entre la tension série  $V_{se}$  et la tension de bus  $V_M$  pour l'opération de déphasage. En résumé, en ajustant l'angle de phase de la source de tension série  $V_{se}$  pour être soit avancé ou retardé à la tension de bus  $V_M$  de 90 degrés, une opération de déphaseur pu être obtenue. Pour faire varier la valeur de décalage de la phase, l'amplitude de la source de tension série  $V_{se}$  peut être modifiée.

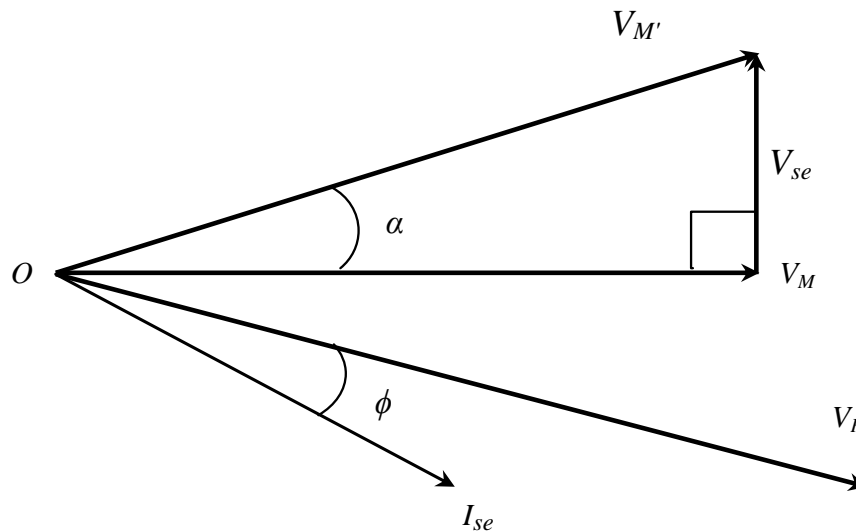


Fig. 1. 3 Relation entre la tension du point milieu  $V_M$  et la source de tension série  $V_{se}$  pour l'opération de déphasage

L'illustration ci-dessus a montré toutes les fonctions possibles, à savoir la compensation shunt, la compensation série et la compensation de l'angle de phase, qui pourrait être obtenue par manipulation de l'amplitude des sources de tension série et shunt et de l'angle de phase d'un UPFC.

#### 1.4 L'UPFC: construction et exploitation

Les sources de tension  $V_{sh}$  et  $V_{se}$  mentionné dans la section 1.2 sont obtenues en convertissant la tension continue en tension alternative. La conversion du continue en alternative est obtenue en utilisant des circuits à pont standard. Ces circuits utilisent des thyristors GTO comme blocs de construction. Étant donné que ces circuits convertis la tension continue en tension alternative, elles sont définies comme des convertisseurs de source de tension (VSC). Le système de contrôle associé au VSC lui permet d'ajuster son amplitude et son angle de phase. Le terme "convertisseur" a également été utilisé pour désigner le VSC.

Considérons maintenant la connexion de deux VSC connectés dos à dos avec un condensateur de liaison continue "C", comme le montre la Figure 1.4. Une telle disposition permet d'assurer les trois fonctions à savoir la compensation série, la compensation shunt et la

compensation de l'angle de phase et de les unifiés en un seul appareil. L'onduleur 1 est relié à un transformateur shunt T1 et l'onduleur 2 est connecté à un transformateur série T2.

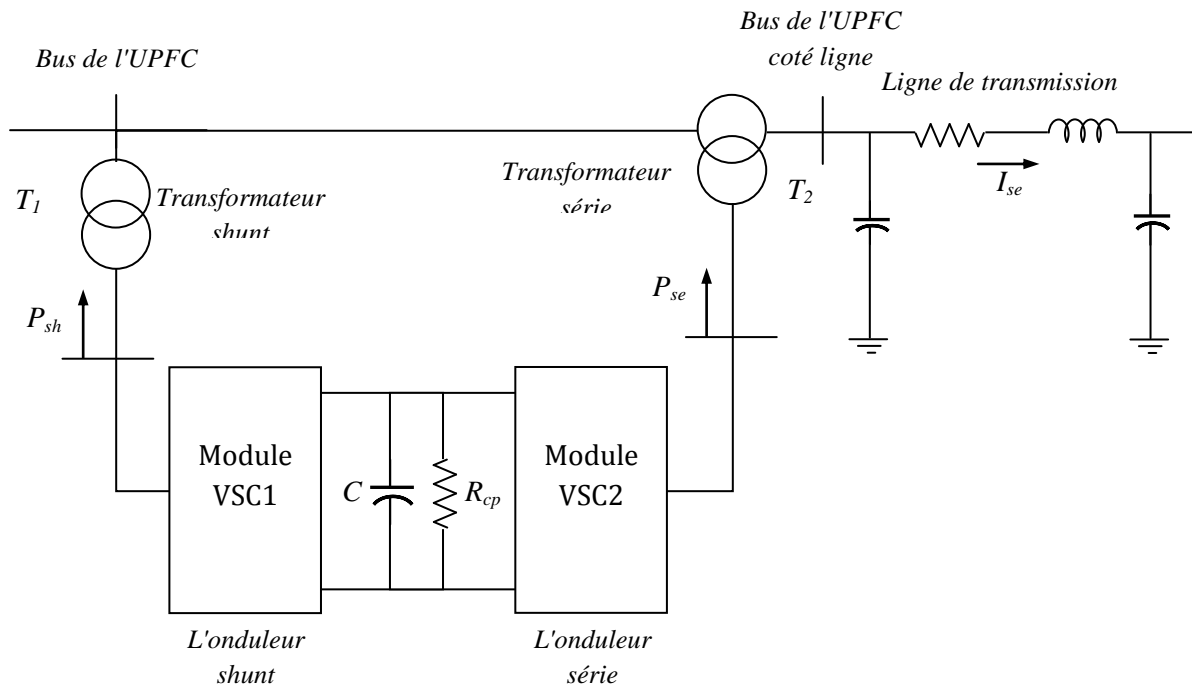


Fig. 1. 4 Construction de l'UPFC

Il est facile de remarquer que le VSC relié au transformateur shunt peut jouer le rôle d'une source de puissance réactive variable semblable à celle du compensateur shunt. En outre, l'onduleur 1 peut charger le condensateur de liaison. L'onduleur 2 peut fournir de la compensation série ou la compensation de l'angle de phase par injection d'une tension série suivant une propre relation vectorielle. Dans le cas de la compensation série, l'onduleur 2 peut fonctionner indépendamment de l'onduleur 1 dès le moment que l'onduleur 2 ne fournit/consomme que la puissance réactive et n'a aucune puissance réelle échangée avec l'onduleur 1. Dans un tel cas, la tension du condensateur de liaison sera idéalement constante.

Dans le cas de la compensation de l'angle de phase, la source de tension série  $V_{se}$  a une relation de phase arbitraire avec le courant de la ligne de transmission  $I_{se}$ , et n'a aucun échange de puissance active ou réactive avec la ligne de transmission. En vertu de ce mode de fonctionnement, la puissance active produite ou consommée par l'onduleur 2 ( $P_{SE}$ ) conduira à la décharge ou à la charge du condensateur de liaison, respectivement. Dans le cas de production de la puissance active par l'onduleur 2 ( $P_{SE}$ ), le condensateur se décharge, et la diminution de la tension reflétera comme une charge sur l'onduleur 1.

Dans cette circonstance, l'onduleur 1 fournira de la puissance active nécessaire ( $P_{SH}$ ) et charge le condensateur de liaison. Dans le cas où l'onduleur 2 consomme de la puissance active

( $P_{SE}$ ) conduisant à la charge du condensateur de liaison, par conséquent une augmentation de sa tension, l'onduleur 1 fournira l'excès de la puissance active ( $P_{SH}$ ) vers la ligne de transmission à travers le transformateur shunt. En effet, l'UPFC fournit une autre voie au transit de la puissance active ; Du bus où le transformateur shunt est connecté, à travers l'onduleur 1 à la capacité, et à travers l'onduleur 2 et la ligne de transmission via le transformateur série. L'onduleur 1 et l'onduleur 2 peuvent générer de la puissance réactive de manière indépendante.

En résumé, l'arrangement ci-dessus de deux VSC connectés dos à dos et couplés par un condensateur de liaison peuvent accomplir le fonctionnement des trois types de compensation.

## **1.5 Complexité de la conception et du fonctionnement de l'UPFC**

### **1.5.1 La complexité de la conception du système de contrôle d'un UPFC**

L'aspect de contrôle d'un UPFC est un domaine de recherche important. Comme le montre le principe de fonctionnement, l'UPFC est un contrôleur multi-variable. La conception du système de contrôle doit être telle que l'UPFC est capable de fonctionner de manière stable, de contrôler le flux d'énergie et de contrôler l'amortissement des oscillations de puissance. L'onduleur série d'un UPFC contrôle le flux de puissance dans une ligne de transmission. L'interaction entre la tension série injectée et le courant de la ligne de transmission provoque l'onduleur série d'échanger de l'énergie active et réactive avec la ligne de transmission. L'échange est fourni/absorbé par le condensateur de liaison, ce qui provoque une diminution/augmentation de la tension continue aux bornes du condensateur.

Pour le bon fonctionnement de l'UPFC, la tension continue doit être régulée. En effet, la diminution/augmentation de cette tension est détectée par le système de commande de l'onduleur shunt. Ce système fonctionne pour satisfaire la demande de la diminution/augmentation de la tension continue en absorbant/fournissant de la puissance active au système d'alimentation par l'onduleur shunt pour maintenir cette tension à un niveau spécifié. Si le système de contrôle des onduleurs shunt et série est tel que l'onduleur shunt n'est pas en mesure de répondre à la demande de puissance active de l'onduleur série, alors la tension continue du condensateur pourrait s'effondrer entraînant la suppression de l'UPFC du système d'alimentation. C'est un problème qui sera examiné dans ce travail lors de la conception du système de contrôle de l'UPFC. Cela demande une coordination dans le fonctionnement entre les systèmes de contrôle des onduleurs shunt et série à l'égard du flux de puissance active à travers la liaison continue de l'UPFC.

L'autre problème avec la conception du système de commande d'un UPFC est lorsque l'onduleur shunt contrôle la tension du bus où il est connecté (bus UPFC), en plus de la tension du condensateur de liaison. Cela est dû au fait que la tension du bus (bus UPFC) affecte le flux

de puissance active et réactive dans la ligne de transmission. Puisque l'onduleur shunt contrôle la tension du bus UPFC et la tension du condensateur, en effet, il n'affecte pas seulement le flux des puissances active et réactive dans la ligne de transmission, mais affecte également le flux des puissances active et réactive à travers l'onduleur shunt, ce qui affecte, par conséquent, la tension du condensateur de liaison. Si le système de contrôle n'est pas conçu correctement, il pourrait conduire à des oscillations de puissance dans la ligne de transmission de plus en plus croissantes entraînant des perturbations dans le système entier. Cela exige une bonne conception du système de contrôle pour un UPFC.

Le problème devient encore plus compliqué lorsque l'onduleur série contrôle le flux de la puissance active et le flux de la puissance réactive dans la ligne de transmission en plus de contrôler la tension du bus UPFC et la tension du condensateur de liaison. Cela est dû au fait que tout changement dans le flux de la puissance réactive dans la ligne de transmission affecte la tension du bus UPFC et cela se répercute sur toutes les autres variables.

### ***1.5.2 La complexité de fonctionnement d'un UPFC dans un réseau électrique intégré.***

Un des problèmes existant dans l'environnement d'un réseau électrique intégré est la présence d'oscillations interzones. Ces oscillations impliquent des groupes générateurs dans une zone se balançant contre d'autres groupes générateurs dans une zone différente. Lorsqu'un UPFC est placé dans une ligne d'interconnexion reliant les deux zones, il devrait être en mesure d'amortir ces oscillations interzones et d'améliorer la stabilité dynamique du réseau.

Ainsi bien que le concept d'un UPFC est élégant, la conception de son système de commande est très complexe car elle implique un contrôle multi-variable simultané, une mauvaise conception du système de contrôle va certainement conduire à une instabilité. Ainsi, une vigilance extrême doit être exercée au cours du processus de conception du système de contrôle d'un UPFC pour permettre un contrôle rapide de flux de puissance et un amortissement efficace des oscillations de la puissance.

## **1.6 État de l'art sur les FACTS**

### ***1.6.1 Introduction***

Bien qu'un nombre considérable de recherche a été effectué dans le domaine des FACTS, peu de documentation existe avec une référence spécifique à l'UPFC. C'est parce que l'UPFC est un dispositif FACTS relativement nouveau et les problèmes du système de puissance qui lui sont associés n'ont pas été étudiés à fond. Les avantages d'un UPFC par rapport aux d'autres dispositifs FACTS dans le contrôle de l'écoulement des puissances active et réactive ont été

brièvement discutés dans la partie précédente. De même, la nécessité de contrôler l'écoulement de puissance réactive tout en contrôlant le flux de puissance active dans les lignes d'interconnexion a également été décrite.

L'UPFC a la possibilité d'incorporer toutes les fonctionnalités. Par exemple, comme il a été expliqué précédemment, l'UPFC peut être utilisé pour fonctionner, selon la stratégie utilisée, comme un compensateur synchrone statique série (SSSC) ou un déphaseur. Différentes stratégies de commande pour l'UPFC et leurs systèmes de commande pour le contrôle de flux de puissance ont été discutées dans la littérature. Cette partie présente les avantages et les inconvénients des différentes stratégies de contrôle de l'UPFC pour le contrôle de flux de puissance publiés dans la littérature [25,27,30,31,38].

### **1.6.2 Étude bibliographique**

Compte tenu de la nature intégrée de la recherche, l'étude pertinente de la littérature a été divisée en deux sections. Une première section présente l'étude des systèmes de contrôle de l'UPFC et leurs stratégies, la seconde section expose les flux de charge et les modèles dynamiques pour l'UPFC.

#### **1.6.2.1 Étude des systèmes de commande pour l'UPFC et leurs stratégies**

Très peu de travaux ont été publiés dans le but de réaliser une stratégie de commande d'un UPFC pour le contrôle de flux de puissance et pour la conception des systèmes de commande. Cependant, trois différents types de stratégies ont été pris en considération conformément aux différentes études bibliographique, elles sont décrites ci-dessous.

##### *1.6.2.1.1 Stratégies du compensateur statique synchrone série (SSSC)*

Cette stratégie est basée sur l'injection d'une tension série en quadrature avec le courant de la ligne de transmission ce qui lui permet un fonctionnement similaire à ce d'un condensateur variable série. Cette version corrige l'angle de phase de la tension série injecté en quadrature avec le courant de la ligne. En variant l'amplitude de la tension série injecté qui doit être en quadrature avec le courant de ligne, le flux de puissance active peut être contrôlée [25-30]. Le flux de puissance réactive/la tension côté ligne de transmission est contrôlée en ajustant l'angle de phase de la tension série injecté. Cela est réalisé en introduisant une composante de la tension série de façon qu'elle soit en phase avec le courant de la ligne de transmission [25,27,29].

L'amplitude et l'angle de phase de la tension série injecté peuvent être obtenus par La combinaison de la composante en quadrature et la composante en phase de cette tension. En se concentrant sur le contrôle simultané de flux des puissances active et réactive/tension côté

ligne de transmission en utilisant la stratégie décrite ci-dessus, plusieurs systèmes de commande basés sur des techniques de contrôle linéaires ont été utilisés [27,29]. La conception du système de commande basé sur cette stratégie nécessite un contrôleur supplémentaire pour amortir les oscillations de puissance lors du contrôle de la tension côté ligne de transmission en utilisant simultanément un régulateur PI avec un gain élevé [29]. La conception d'une rétroaction de coordination entre les systèmes de commande des onduleurs shunt et série n'a pas été prise en compte [29]. La nécessité d'un contrôleur de coordination vient du fait que la puissance active de l'onduleur série doit être fournie par l'onduleur shunt. S'il n'y a pas de coordination de fonctionnement entre les onduleurs série et shunt, la tension continue du condensateur pourrait s'effondrer conduisant à la suppression de l'UPFC du système électrique. Cette stratégie a aussi un autre problème, si la composante en phase de la tension injectée série est hors service, la tension côté ligne pourrait être très élevée entraînant des problèmes de flux de puissance réactive. En outre, il faut prendre en considération le problème de la détérioration des performances du système de commande aux points de fonctionnement autre que celui auquel il a été conçu.

#### 1.6.2.1.2 Stratégie de déphaseurs

Cette stratégie est basée sur l'injection de la tension série en quadrature avec le bus UPFC (la tension du bus où l'onduleur shunt est connecté) [31-35]. En agissant ainsi, l'angle de phase du bus côté ligne de transmission peut être ajusté pour un flux de puissance active spécifié. Le flux de puissance réactive est contrôlée pour avoir une composante de la tension injectée série en phase avec la tension de bus UPFC [35]. Ceci est similaire à celle d'une stratégie de changeur de prises. Cela permet à l'angle de phase de la tension injectée série de déroger à partir de sa position en quadrature initiale, ce qui modifie le flux de puissance réactive/tension côté ligne. La conception du système de commande complet de flux de puissance active et réactive/le contrôle de la tension côté ligne qui utilise la stratégie ci-dessus n'a pas été bien documenté.

Bien que l'effet propre à chaque mode à savoir, l'injection de la tension série en quadrature, l'injection de la tension série en phase et la compensation shunt, sur la stabilité transitoire a été étudié, l'effet de l'opération combinée entre ces différents modes n'a pas été étudié [31,32]. Cependant, l'opération combinée a été ensuite étudié sur la stabilité transitoire par Limiycheron et.al [33]. Dans cette étude, trois entrées de commande, à savoir la composante en quadrature de la tension injectée série, la composante en phase de la tension injectée série et la compensation shunt ont été coordonnées pour améliorer la stabilité transitoire, cette coordination a été assurée par la théorie de la logique floue. Le modèle choisi pour l'UPFC pour

montrer l'effet de coordination sur la stabilité transitoire n'a pas été tout à fait exacte. L'onduleur shunt a été modélisé comme un condensateur variable shunt en parallèle avec une source de courant. Ce condensateur représente la capacité de la compensation de l'onduleur shunt et la source de courant parallèle représente la capacité de la puissance active de charger/décharger le condensateur de liaison.

En procédant ainsi, ils ont négligé le modèle du transformateur de l'onduleur shunt et ont supposé que les flux de puissances active et réactive dans le transformateur shunt sont séparés. En outre, leur stratégie de coordination a été effectuée seulement sur un système électrique composé par un bus infini mono machine. De plus, aucune coordination n'existe entre les systèmes de commande des onduleurs shunt et série en termes de puissance active échangée entre les onduleurs, ce qui jette de sérieux doutes sur la validité d'un tel mécanisme de coordination.

#### *1.6.2.1.3 Stratégie de commande dans le plan D-Q*

Dans cette stratégie, les courants du référentiel D-Q dans la ligne de transmission sont réglés individuellement permettant un contrôle indépendant de flux des puissances active et réactive [36-39]. Le plan D-Q pourrait être référencé soit par rapport à la tension du bus UPFC, soit par rapport à la tension du bus coté récepteur. Dans cette stratégie, la tension série injectée est divisée en deux composantes. L'une est en phase avec l'axe D et l'autre en phase avec l'axe Q.

De même, le courant de la ligne de transmission est divisé en courants d'axe D et d'axe Q. La tension d'axes D contrôle la puissance active en variant le courant d'axes D dans la ligne de transmission et la tension d'axe Q contrôle la puissance réactive en variant le courant d'axe Q. Ainsi, la composante d'axe D de la tension série injectée qui contrôle le flux de puissance active dans la ligne de transmission varie la tension de bus côté ligne de transmission et sa composante d'axe-Q qui contrôle la puissance réactive varie l'angle de phase du bus UPFC.

Pour réaliser ce type de stratégie, le système de contrôle en cascade emploie des contrôleurs linéaires. Des contrôleurs proportionnel-intégral (PI) ont été utilisés pour mettre en œuvre la stratégie de commande d'axes D-Q pour l'onduleur série [36]. La coordination entre les systèmes de contrôle des onduleurs série et shunt a été considérée [36]. Le problème avec cette stratégie est la complexité du système de commande, deux boucles de régulation sont nécessaires pour réguler le flux de puissance active et réactive. Une boucle externe pour définir la référence de la boucle interne et celle-ci fournit, en poursuivant la référence, les entrées de commande de l'onduleur série. En outre le problème de la détérioration de performance du système de commande aux points de fonctionnement autres que celui auquel le système est conçu est un

point à considérer. Le système de commande de l'onduleur shunt est également basé sur la stratégie d'axes D-Q, il contrôle la puissance réactive et la puissance active de l'onduleur shunt. Le contrôle de la tension DC du condensateur de liaison qui est très important pour le bon fonctionnement de l'UPFC, se fait par une autre boucle de régulation qui ajuste la puissance active de référence de l'onduleur shunt. Cela complique encore plus le système de contrôle. En outre, ils ont négligé la dynamique du condensateur de liaison lors de la conception de leur système de contrôle. Par la suite, cette conception ne pouvait pas fournir les meilleurs gains du contrôleur PI.

Un système de commande basé sur la théorie d'axes D-Q a été publiée dans la littérature par Rourid *et.al.*[39]. La stratégie qui a été utilisée est que la composante d'axe D et la composante d'axes Q de la tension série injectée contrôlent la puissance réactive et la puissance active de la ligne de transmission respectivement. Cette stratégie est en contraste avec celle utilisée par Papic *et.al* [36] où les flux de la puissance active et de la puissance réactive de la ligne de transmission ont été contrôlés respectivement par la composante d'axe D et la composante d'axe Q de la tension injectée série. Dans ce cas, l'UPFC a été placé à l'extrémité réceptrice. Sur la base des puissances active et réactive et les tensions d'axes D-Q du récepteur, les références de courant de l'onduleur série ont été générés. Deux contrôleurs PI ont été utilisés pour générer les tensions de commande d'axe D-Q nécessaires à l'onduleur série pour obtenir le débit souhaité des puissances active et réactive dans la ligne de transmission.

Pour le convertisseur shunt, les courant de références d'axes D-Q de la source ont été générés en se basant sur les références des puissances active et réactive et les tensions d'axes D-Q de cette source. Les courants de références de la source et du récepteur ont été utilisés pour générer les références du courant de l'onduleur shunt, ceci, permet de contrôler la puissance réactive shunt et la tension continue du condensateur de liaison. La mesure des différents signaux des deux extrémités source et récepteur est nécessaire pour le fonctionnement de ce type de système de commande. Cela nécessiterait des unités de détection à distance qui seront installés à l'extrémité source. En outre, la coordination entre les systèmes de commande des convertisseurs série et shunt n'a pas été considérée par les auteurs [39].

D'autres types de systèmes de contrôle ont été conçus basés sur la même stratégie de contrôle représentée ci-dessus qui ont négligé les systèmes de commande de la tension continue du condensateur de liaison [40,41,42]. Les systèmes de commande de l'onduleur shunt ont été conçus basé sur la méthode de contrôle dite linéaire-quadratique (L-Q), cependant, ces articles n'ont pas montré la façon dont cette méthode peut être appliquée au système de commande de



l'onduleur série [43]. Le problème avec la commande L-Q est qu'elle nécessite la mesure de tous les états utilisés pour concevoir le contrôleur [43].

Dans toutes les stratégies discutées ci-dessus pour l'UPFC, l'onduleur série contrôle le flux de la puissance active dans une ligne de transmission par un système de contrôle à boucle de retour. Le problème dans la conception d'un système de commande doté d'une rétroaction de la sortie utilisant un contrôleur de type PI pour un UPFC est la présence de la faible marge de stabilité associée à l'inductance série de la ligne de transmission [29]. Des contrôleurs intelligents avec une référence spécifique aux contrôleurs flous ont été étudiés dans cette thèse pour résoudre ce problème. En outre, les stratégies de contrôle ci-dessus souffrent soit par leur complexité du système de commande soit par la non-inclusion de contrôleur de coordination de la puissance active entre les systèmes de commande des onduleurs séries et shunt, ou les deux.

Une capacité très fascinante de l'UPFC a été signalée dans la référence [44]. Toute variation de flux de puissance réactive dans la ligne de transmission est compensée par une variation égale et opposée de puissance réactive produite par l'onduleur shunt lorsqu'il contrôle la tension du bus auquel il est connecté. Cela signifie que tout changement de puissance réactive sollicité par l'onduleur série est effectivement fourni par l'onduleur shunt.

Compte tenu de cette capacité fascinante, il est nécessaire d'étudier le mécanisme par lequel les changements dans le flux de puissance réactive dans une ligne de transmission sont liés au flux de puissance réactive de l'onduleur shunt. En outre, l'effet des changements progressifs du flux de puissance réactive dans une ligne de transmission sur la tension du bus UPFC doit être étudié. Toutes les stratégies publiées dans la littérature se sont concentrées sur l'utilisation de l'onduleur série pour contrôler le flux de la puissance réactive de la ligne de transmission. Compte tenu de cette qualité où l'onduleur shunt répond à la demande de la puissance réactive du système de commande de l'onduleur série, il est intéressant d'examiner la possibilité d'utiliser un contrôleur de coordination de puissance réactive en plus d'un contrôleur de coordination de puissance active.

Cette capacité mène à un autre point qui doit être considéré. Comme mentionné précédemment, toutes les stratégies publiées se concentrent sur l'utilisation de l'onduleur série pour le contrôle de la puissance réactive. Les variations de la puissance réactive de la ligne de transmission sont reflétées comme une variation équivalente dans le flux de puissance réactive de l'onduleur shunt. Ainsi, toutes les stratégies discutées s'allongeraient dans la catégorie de contrôle indirect par rapport au flux de la puissance réactive.

### **1.6.2.2 Littérature sur les flux de charge et les modèles dynamiques de l'UPFC**

Le but d'examiner la littérature pour l'écoulement de charge et des modèles dynamiques pour l'UPFC comporte deux volets. Tout d'abord, dans toutes les stratégies discutés ci-dessus pour l'UPFC dans la section 1.5.1.1, le flux de la puissance active dans une ligne de transmission est contrôlé par l'onduleur série par un système de commande avec boucle de retour. Le problème dans la conception d'un tel système pour l'UPFC est la présence de faible marge de stabilité associée à l'inductance série de la ligne de transmission [29]. Des contrôleurs intelligents avec une référence spécifique aux contrôleurs flous ont été étudiés pour résoudre ce problème. Afin d'obtenir les informations nécessaires à la conception du contrôleur flou, un modèle approprié pour l'UPFC doit être utilisé dans les simulations numériques. Cela inclut à la fois le flux de charge et les modèles dynamiques. Toutefois, les modèles de flux de charge sont nécessaires car ils forment la colonne vertébrale de toutes simulations d'un réseau électrique dynamique, en outre, Les modèles dynamiques sont nécessaires pour saisir l'interaction entre les onduleurs série et shunt et fournir des informations susceptibles de faciliter la conception du contrôleur flou. L'étude de la littérature a été menée, à la fois, dans les domaines de flux de charges et la modélisation dynamique de l'UPFC.

D'autre part, l'UPFC est un contrôleur multi-variable, il est nécessaire d'évaluer son impact sur la stabilité du réseau. Cependant, l'analyse de la stabilité des réseaux électriques interconnectés avec l'UPFC exige que le flux de charge et le modèle dynamique soient appropriés pour l'UPFC. Étant donné que les analyses, fréquentiel et temporel, exigent un modèle pour l'UPFC qui modélise avec précision l'interaction entre l'onduleur série et l'onduleur shunt. Ainsi, avec un flux de charge et modèle dynamique correctes pour l'UPFC, on peut analyser l'impact de l'UPFC sur la stabilité du système électrique.

#### *1.6.2.2.1 Modélisation de l'UPFC*

##### **1.6.2.2.1.1 Modèles de flux de charge**

Différents modèles de flux de charge ont été utilisés pour modéliser un UPFC à des degrés divers de complexité et ont été brièvement abordés dans ce chapitre. Comme mentionné dans la partie précédente, un UPFC se compose de deux onduleurs connectés dos à dos par un condensateur de liaison à courant continu. Un onduleur est connecté en parallèle et l'autre en série avec la ligne de transmission comme le montre la Figure 1.5-a. Les premières efforts de modélisation de l'UPFC ont été portés sur la modélisation de l'onduleur série, ça était une conséquence des logiciels de simulation existant qui n'ont pas des modèles de la tension de source série. Un modèle de flux de charge a été proposé par American Electric Power (AEP) et

Westinghouse [45]. L'inclusion du modèle exige que le flux de charge doit être une solution. Fondamentalement, les tensions et les angles des bus du système électrique devaient être connus nécessairement à l'avance pour inclure le modèle de l'UPFC. Le modèle de flux de charge pour l'UPFC se composait de deux groupes électrogènes, un représentant l'onduleur shunt et l'autre l'onduleur série. Différentes configurations de ces groupes électrogènes ont été nécessaires pour modéliser différentes conditions de fonctionnement. La Figure 1.5-b montre le modèle qui a été utilisé pour inclure l'UPFC dans les études de flux de charge [45].

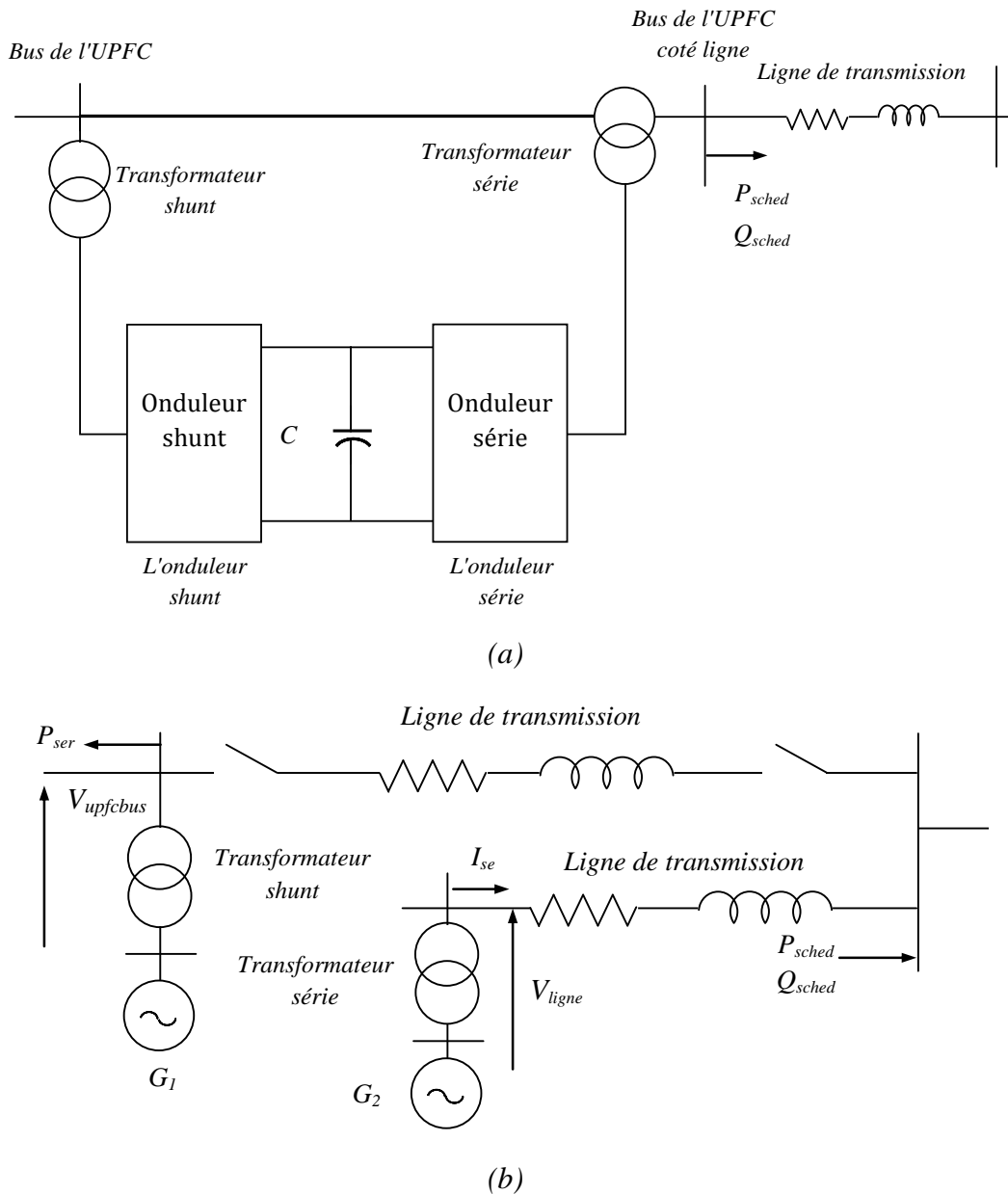


Fig. 1. 5 (a):Un UPFC connecté à la ligne de transmission, (b): Modèle à sources couplées d'un UPFC

Ici le processus de résolution commence avec l'ouverture de la ligne série, et le générateur  $G_2$  génère les puissances active et réactive prévues. La puissance prévue dans la ligne

de transmission est convertie en une charge équivalente dans le terminal où le générateur  $G_1$  est branché. Le générateur  $G_1$  génère la puissance réactive requise pour maintenir la tension de bus régulière. Le générateur  $G_2$  fournit également la demande à la puissance active de l'onduleur série. La tension injectée série est la différence entre les tensions de phases  $V_{ligne}$ , et  $V_{UPFCbus}$ . Le produit de la tension injectée série et le courant  $I_{se}$  détermine la quantité des volt-ampères, i.e. la puissance apparente, de l'onduleur série. La partie active  $P_{ser}$  de cette quantité est ajoutée comme une charge dans le bus de l'onduleur shunt. L'algorithme qui effectue l'addition des charges équivalentes dans le bus de l'onduleur shunt, pour ouvrir les lignes appropriées, a été inclus dans leur programme. Le problème, c'est qu'il a besoin d'un cas résolu de flux de charge. Le but de résoudre un flux de charge avec un UPFC est d'obtenir les tensions injectées des onduleurs shunt et série pour une condition d'exploitation donnée. Cette procédure est brute pour la résolution d'un flux de charge avec UPFC.

Un autre modèle pour l'UPFC a été utilisé pour résoudre le flux de puissance [46], l'onduleur shunt est modélisé comme une source de courant et l'onduleur série est modélisé comme une source de tension en série avec la ligne de transmission. Le modèle assure l'équilibre de la puissance active entre les onduleurs série et shunt. Bien que ce modèle soit assez bon pour faire des études paramétriques, ils n'est pas bien pour la résolution du flux de charge. En effet, la modélisation de l'onduleur shunt par une source de courant ne révèle pas la tension et l'angle de phase de l'onduleur shunt, également, le modèle néglige le transformateur de l'onduleur shunt dans les études de flux de charge.

Un autre modèle a été utilisé pour résoudre les flux de charge [47]. Dans ce modèle, les onduleurs shunt et série ont été modélisés sous forme d'injections de puissances active et réactive. Dans ce cas, la tension série a été transformée en injections de puissances active et réactive aux deux extrémités de l'onduleur série. L'onduleur shunt a également été converti en équivalentes injections des puissances active et réactive. L'hypothèse de base qui a été utilisée ici est que la puissance active de l'onduleur série est fournie par le condensateur de liaison. Cependant, la puissance active de l'onduleur série devrait en fait être fournie par l'onduleur shunt dans un état stable. Ce modèle néglige l'interaction entre l'onduleur série et l'onduleur shunt.

Un modèle, où le bus auquel l'onduleur shunt est connecté, est modélisé comme un bus P-Q et l'onduleur série est modélisé comme un bus P-V, a également été utilisé pour les études de flux de charge [48]. La Figure 1.6 montre ce modèle pour les études de flux de puissances.

Ici, le bus où l'onduleur shunt est connecté, a été modélisé comme un bus PQ (bus-E) et l'autre extrémité de l'UPFC est convertie en un bus PV (bus-B). Le générateur connecté au bus-B

génère de la puissance active prévue et maintient la tension nécessaire de la ligne de l'UPFC. Le flux de puissance est résolu et les tensions du bus-E et bus-B sont utilisées pour résoudre un autre ensemble d'équations pour contrôler la tension et l'angle de phase de l'onduleur shunt et l'onduleur série. Ce modèle néglige l'interaction entre les deux onduleurs séries et shunt durant la première phase des études.

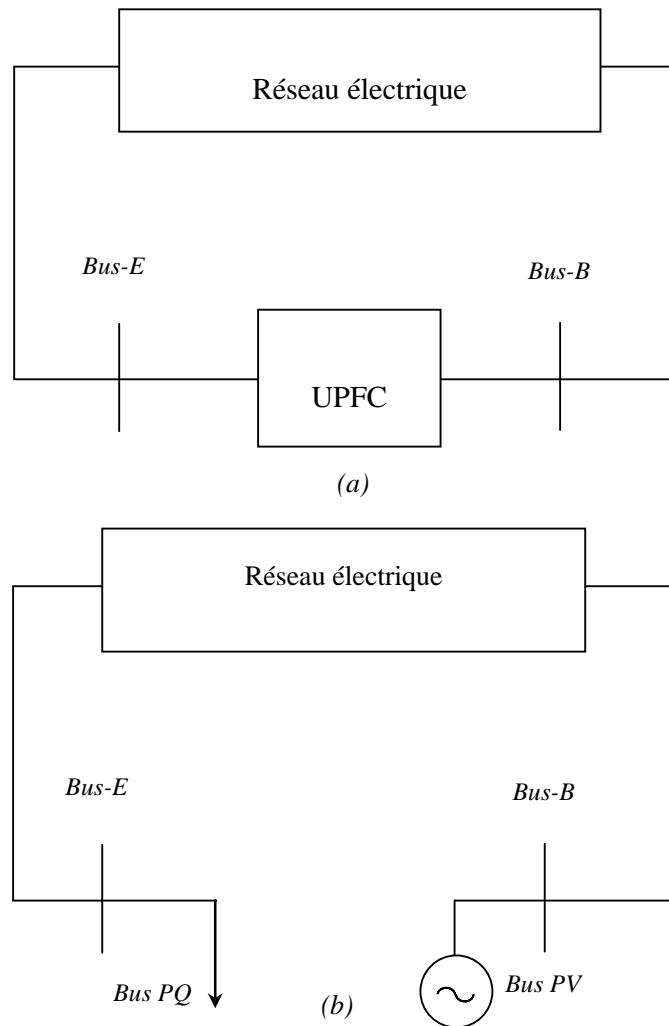


Fig. 1. 6 (a) Réseau électrique avec UPFC, (b) Modèle de flux de l'UPFC

En plus, la façon d'inclure la demande en puissance active par l'onduleur série qui est fournie par l'onduleur shunt durant l'écoulement de charge n'est pas tout à fait claire. Le processus de résolution du flux de charge est fondamentalement un processus à deux étapes et par conséquent aucune méthode intégrée n'est nécessaire. Ce processus pourrait être utilisé pour effectuer le flux de charge si toutes les variables à savoir, la tension du bus-B, le flux de la puissance active dans la ligne et la puissance réactive de l'onduleur shunt, doivent être contrôlées. En outre, si l'on veut contrôler seulement le flux de la puissance active dans la ligne de transmission, il serait difficile à réaliser en utilisant ce modèle.

Un autre modèle de flux de charge a été utilisé pour l'UPFC, où l'onduleur shunt est modélisé comme une source de tension distincte et l'onduleur série comme un ensemble d'injections de puissance complexe [49]. La source de tension shunt est modélisée comme un bus PQ dans le flux de charge. Ce modèle assure que la puissance active de l'onduleur série est fournie par l'onduleur shunt. Aussi, ce modèle de flux de charge est adapté pour une solution unifiée en utilisant la méthode Newton-Raphson (NR) ou la méthode de Gauss-Seidel (GS). Le seul problème avec ce modèle lorsqu'il utilise la méthode NR, c'est qu'il a besoin d'une bonne estimation initiale des tensions shunt et série et de l'angle de phase. Dans ce modèle, la puissance réactive shunt est disponible comme une variable supplémentaire qui peut être configurée pour fournir une tension prévue au bus où l'onduleur shunt est connecté.

Parmi les modèles de flux de charge décrite ci-dessus, le dernier modèle [49], où l'onduleur shunt est modélisé comme un bus PQ et le l'onduleur série est modélisé comme un ensemble d'injections de la puissance complexe est le plus simple et le plus complet de tous les modèles disponibles jusqu'à maintenant. Le modèle prévoit une interaction approfondie entre les onduleurs séries et shunt. Aussi son processus de solution unifiée en utilisant le modèle ci-dessus le rend attrayant.

Dans cette thèse, le modèle ci-dessus [49] sera utilisé pour mener les études de l'écoulement de puissance et d'obtenir un état d'équilibre du point de fonctionnement. L'onduleur shunt est modélisé comme une source de tension distincte et l'onduleur série est modélisé comme un ensemble d'injections de puissance complexe. Le programme contrôle essentiellement le flux de puissance active dans la ligne. Il prend également en compte l'interaction entre les sources de tension shunt et série. Dans toutes les procédures de résolution de flux de charge abordées dans cette section, la stratégie de commande pour contrôler la puissance active et la puissance réactive n'a pas été incluse. Cela signifie que la solution de flux de charge est obtenue par la définition des contraintes sur le bus UPFC ou sur la tension de bus côté ligne de transmission ou sur le flux de puissance active dans la ligne de transmission. Il est à noter qu'il y a une possibilité de multiple solution de flux de charge avec un UPFC [48,49]. Il devient donc impératif d'inclure une stratégie pour l'UPFC tout en résolvant les flux de charge pour obtenir une condition de fonctionnement raisonnable. Pour cette raison, la tension injectée série est divisée en deux composantes en quadrature. De façon que l'une des composantes est forcée d'être en phase avec la tension de bus UPFC. Dans le programme de flux de charge, la composante en quadrature, qui contrôle le flux de puissance active, est automatiquement ajustée au sein du programme. La composante en phase qui contrôle la tension côté ligne de transmission/puissance réactive est également réglée automatiquement. L'avantage de cette stratégie, c'est que le contrôle de flux de

puissance active n'affecte pas le flux de puissance réactive et vice versa d'une manière significative. Ainsi, la procédure de solution de flux de charges peut être découplée.

#### **1.6.2.2.1.2 Modèle dynamique de l'UPFC**

Le modèle dynamique pour un UPFC est centré autour de la dynamique du condensateur de liaison continue. Il est bien connu que la dynamique du condensateur est une fonction des variables de commande des onduleurs série et shunt. La nécessité d'inclure cette dynamique dans les études résulte du fait qu'elle assure le lien entre le fonctionnement de l'onduleur série et l'onduleur shunt en terme de bilan de la puissance active. L'échange de la puissance active entre la tension injectée série par l'onduleur série et le courant de la ligne de transmission provoque la tension sur la liaison continue d'accroître ou de diminuer en fonction du sens de variation de la puissance active entre eux. La diminution/augmentation de la tension continue est détectée par l'onduleur shunt qui absorbe/fournit de la puissance active nécessaire via le transformateur shunt. Les modèles présents dans la littérature varient sur la base utilisée des modèles des onduleurs shunt et série. Les modèles dynamiques de l'UPFC disponibles dans la littérature ont été divisés à la modélisation en onduleur shunt et onduleur série.

##### ***A) La modélisation de l'onduleur Shunt:***

La modélisation d'onduleur shunt d'un UPFC peut être divisée en 4 modèles différents.

A.1) *Modèle de courant* [25,27,28,32,53]: Dans ce modèle l'onduleur shunt est supposé être constitué de deux sources de courant. Une pour le courant d'axe D et l'autre pour le courant d'axe Q connecté au bus UPFC. Le courant d'axe D en interaction avec la tension de bus modélise l'injection de la puissance active. En variant le courant d'axe Q, la quantité de la puissance réactive injectée dans le bus peut être modifiée. Ce modèle néglige l'interaction entre les courants d'axe D et d'axe Q puisque le flux de puissance active dans le VSI (Voltage Source Inverter) est une fonction des deux courants. En outre, le modèle néglige la dynamique du condensateur de liaison. Le modèle néglige également la modélisation du transformateur shunt. Notamment, le modèle ne tient pas en compte de la tension générée par l'onduleur shunt afin de produire les courants d'axes D et Q. Il suppose simplement que l'onduleur shunt est capable de produire des courants variables d'axes D et Q et modélise l'onduleur comme deux sources de courant.

A.2) *Modèle à injections de puissances active et réactive* [26,47]: Dans ce modèle, l'onduleur shunt est modélisé comme deux sources séparées connectées au bus UPFC. Une source modélise la puissance active et l'autre source modélise la puissance réactive, injectées au bus UPFC. Ce

modèle ne prend pas en considération la tension générée par l'onduleur shunt. En outre, la façon par laquelle la dynamique du condensateur de liaison a été modélisée n'est pas tout à fait claire.

*A.3) Modèle à source de courant en parallèle avec une susceptance shunt [31,33,52]:* Dans ce modèle, l'onduleur shunt est modélisé comme une susceptance shunt variable en parallèle avec une source de courant. La susceptance shunt modélise la puissance réactive qui peut être modifiée en changeant l'amplitude de la susceptance. Le flux de la puissance active à travers l'onduleur shunt est modélisé comme une source de courant. Ce modèle néglige la modélisation du transformateur shunt. Ce modèle suppose que la puissance réactive est une fonction de la susceptance shunt et donc dépendant de l'amplitude de la tension de bus UPFC. En réalité, l'onduleur shunt peut produire de la puissance réactive, indépendamment de l'amplitude de la tension de bus UPFC. Le flux de la puissance active à travers l'onduleur shunt devrait être fonction des courants d'axes D-Q. Encore une fois, l'interaction entre les courants actif et réactif est négligée. Bien que la dynamique du condensateur a été modélisée, elle est considérée comme une fonction seulement de la tension du bus UPFC et de la source de courant. Au contraire, elle devrait être une fonction des courants actif et réactif qui circulent à travers l'onduleur shunt.

*A.4) Modèle à source de tension [13,45,48,50,51]:* Ici, l'onduleur shunt est modélisé comme une source de tension séparée en dérivation avec le bus UPFC. La réactance du transformateur a été incluse dans ce modèle. En modélisant l'onduleur shunt comme une source de tension séparée en série avec la réactance du transformateur shunt, la modélisation de l'interaction entre les courants actif et réactif a été considérée. Ce modèle de l'onduleur shunt est approprié pour mener des études dynamiques.

***B) la modélisation d'onduleur série [13,25-28,31-33,45,50-53]:***

L'onduleur série est modélisé comme une source de tension en série avec l'impédance du transformateur série. C'est le modèle le plus approprié du fait qu'en réalité l'onduleur série injecte une tension en série avec la ligne de transmission et donc peut être modélisé comme une source de tension en série avec cette ligne. En outre, le modèle source de tension série peut être converti en modèle équivalent à injection de courant pour mener des études dynamiques [45].

En résumant l'état de l'art sur la modélisation de l'UPFC, le modèle le plus approprié pour mener des études dynamiques est celui où l'onduleur shunt est modélisé comme une source de tension en série avec la réactance du transformateur shunt [13,45,48,50,54] et l'onduleur série est modélisé comme une source de tension en série avec la réactance du transformateur série [13,25,45,51,53]. Ce modèle inclut l'interaction entre les opérations de fonctionnement des onduleurs série et shunt. En outre, le modèle inclut la dynamique du condensateur de liaison.



## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, l'importance du contrôle de flux de puissance réactive sur la ligne de transmission a été brièvement discutée. Un bref aperçu de divers dispositifs FACTS a également été accompli en matière de contrôle de l'écoulement des puissances active et réactive. Il a été conclu qu'aucun de dispositifs FACTS existants à savoir, les compensateurs statiques de puissance réactive (SVC), TCSC ou les déphaseurs, ne peut fournir le contrôle de la puissance réactive sur les lignes de transmission. À cet égard, l'UPFC a l'avantage sur le SVC, le TCSC et les déphaseurs de contrôler non seulement la puissance active, mais aussi et simultanément le flux de la puissance réactive sur les lignes de transmission. La capacité d'un UPFC de contrôler le flux de puissance réactive soutenue la régulation à distance de la tension de l'arrivée d'une ligne de transmission et l'amélioration de la sécurité du système.

La construction et l'exploitation d'un UPFC ont été également décrites. L'UPFC est le dispositif FACTS le plus polyvalent car il combine les fonctionnalités de tous les dispositifs FACTS existants. Cette combinaison des fonctionnalités de plusieurs dispositifs, peut éliminer de nombreux dispositifs FACTS dispersés sur le réseau électrique réduisant ainsi les coûts principaux. En outre, l'interaction entre les divers dispositifs FACTS pourrait être réduite en une faible mesure, voire éliminée complètement. La complexité de la conception du système de commande d'un UPFC a été brièvement abordée. Il faut comprendre ici que l'UPFC est un contrôleur multi-variable et toutes les variables de contrôle interagissent les uns avec les autres. Ceci rend la conception du système de commande d'un UPFC très difficiles.

La dernière partie du chapitre a dégagé les avantages et les limites de différentes stratégies de commande et leurs systèmes de commande utilisés pour contrôler le flux de puissances et l'amortissement des oscillations de puissance.

Un bref aperçu sur les stratégies de contrôle et sur la conception du système de contrôle pour l'UPFC a été effectué et résumé dans ce qui suit.

1. Le problème dans la conception d'un système de contrôle à boucle de retour pour un UPFC est la présence de la faible marge de stabilité liés à l'inductance série de la ligne de transmission. Pour surmonter ce problème, des contrôleurs intelligents avec une référence spécifique aux contrôleurs flous ont été étudiés. Pour obtenir des informations pour la conception d'un contrôleur flou, une étude de littérature sur différents flux de charges et des modèles dynamiques pour l'UPFC a été menée.

2. Toutes les stratégies de contrôle pour l'UPFC discutées dans la littérature souffrent, soit par la complexité de leur système de contrôle, soit par la non-inclusion du contrôleur de coordination de la puissance active entre les systèmes de contrôle des onduleurs série et shunt ou les deux. La non-inclusion de ce type de contrôleur pourrait conduire à la perte de la tension continue du condensateur et par conséquent l'éloignement de l'UPFC du fonctionnement.
3. Tout changement dans le flux de la puissance réactive dans la ligne de transmission est traduit par une variation égale et opposée de la puissance réactive à la sortie de l'onduleur shunt lorsque celui-ci contrôle la tension du bus auquel il est connecté. Cela signifie que tout changement de puissance réactive dans la ligne de transmission exigé par l'onduleur série est en fait alimenté par l'onduleur shunt. Cela pourrait conduire à des problèmes de coordination par rapport au contrôle de flux de la puissance réactive dans la ligne de transmission.

## ***Chapitre II: Modélisation d'un UPFC pour une ligne de transmission***

## 2.1 Introduction

L'analyse de l'état d'équilibre d'un réseau électrique en présence d'un contrôleur de flux de puissance unifié (UPFC) nécessiterait un modèle de l'UPFC pour être inclus dans les études de flux de charge. Évidemment, pour résoudre les flux de charge, les puissances active et réactive sur les jeux de barres de charges, la puissance active et la tension aux bus des alternateurs, la tension et l'angle de phase du jeu de barres doivent être précisés. Un modèle approprié pour l'UPFC en terme de puissances active et réactive doit être mis au point pour l'intégrer dans le flux de charge.

L'UPFC comme décrit dans le chapitre 1 se compose de deux onduleurs raccordés dos à dos via un condensateur de liaison continue avec un onduleur raccordé en dérivation avec la ligne de transmission à travers un transformateur shunt et l'autre onduleur en série avec la ligne de transmission à travers un transformateur série.

L'onduleur shunt joue un rôle important en fournissant de la puissance réactive pour soutenir la tension du bus auquel il est connecté et maintenir la tension continue crédible du condensateur de liaison qui est nécessaire pour le bon fonctionnement des deux onduleurs shunt et série. En outre, il fournit la puissance active nécessaire de l'onduleur série. De même, l'onduleur série joue un rôle important dans le contrôle de flux de puissance dans la ligne de transmission par l'injection d'une tension d'amplitude et d'angle de phase réglables en série avec cette ligne.

Ce chapitre fournit, dans sa première partie, les détails sur le modèle de flux de charges utilisé pour l'UPFC.

La deuxième partie s'est concentrée sur la construction, l'exploitation et le contrôle d'un onduleur shunt. La procédure de la conception du système de contrôle de l'onduleur shunt a été également expliquée. Des études de performances seront réalisées afin de valider cette conception.

La construction, l'exploitation et le contrôle de l'onduleur série seront présentés dans la troisième partie du chapitre. Dans cette partie, le condensateur de liaison fait partie de la construction, l'exploitation et le contrôle des onduleurs shunt et série. La conception d'un contrôleur PI pour l'onduleur série pour contrôler le flux de la puissance active dans une ligne de transmission a été également étudiée.

Les résultats obtenus sont importants, car ils fournissent les conditions initiales pour réaliser les études aux petites perturbations et sur la stabilité transitoire. En outre, la conception

de la base de connaissance floue pour le convertisseur série est basée sur des simulations numériques qui exigent des solutions de flux de charges précises.

## 2.2 Modèle d'un UPFC pour un flux de charges

La construction et le fonctionnement d'un contrôleur de flux de puissance unifiée (UPFC) ont été discutés dans le chapitre-1, section 1.3. En bref, un UPFC se compose de deux onduleurs de tension (en anglais Voltage Source Converter : VSC) relié dos à dos par un condensateur de liaison continu comme le montre la Figure 2.1. Une telle disposition permet à tous les trois fonctions à savoir : la compensation série, la compensation shunt et la compensation de l'angle de phase d'être unifiées en une seule unité.

L'onduleur-1 est relié au réseau électrique par un transformateur T1 en parallèle et l'onduleur-2 est relié au réseau électrique par un autre transformateur T2 tels que le secondaire du transformateur T2 est en série avec la ligne de transmission. Les transformateurs T1 et T2 serait appelés, pour des raisons de clarté, transformateur shunt et transformateur série, respectivement.

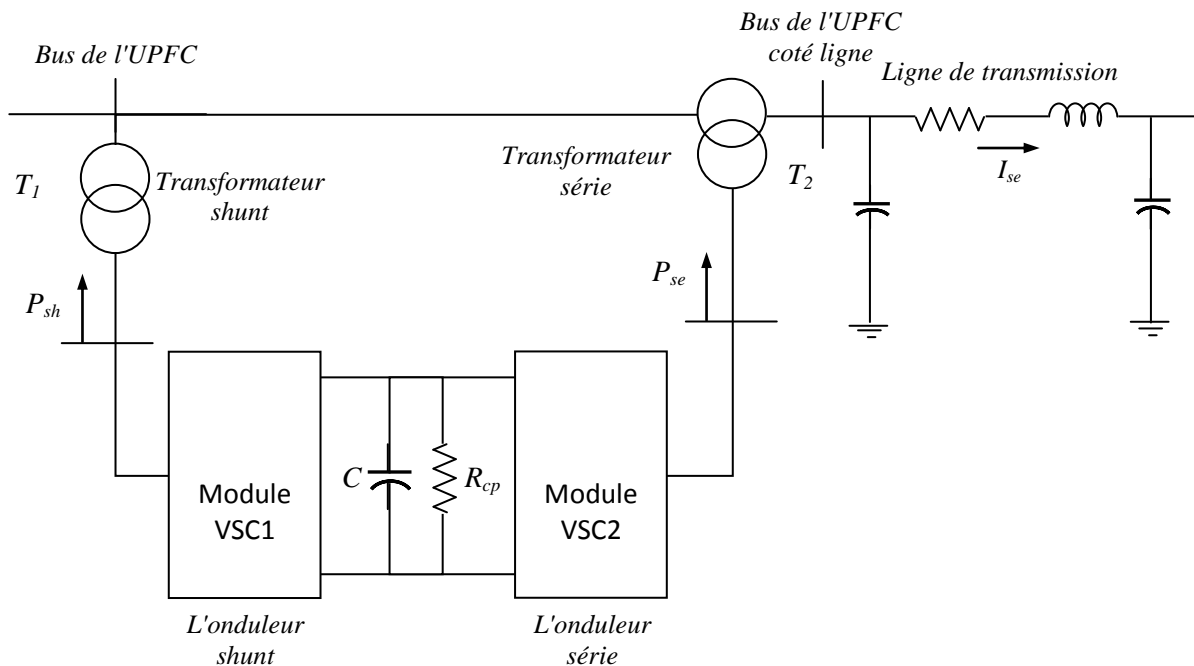


Fig. 2. 1 Configuration d'un contrôleur de flux de puissance unifié "UPFC"

Parmi les modèles de flux de charge décrit dans le chapitre-1, le modèle donné dans la référence [49], où le convertisseur shunt et le convertisseur série sont modélisés comme une source de tension en série avec les réactances de leurs transformateurs, est le plus simple. Le modèle prévoit une interaction approfondie entre le convertisseur série et le convertisseur shunt, il est présenté dans la Figure 2.2.  $X_{sh}$  et  $X_{se}$  représentent les réactances des transformateurs T1 et

T2, respectivement.  $V_{sh}$  et  $V_{se}$  représentent les tensions générées par les convertisseurs shunt et série respectivement. Le bus-E et le bus-F représentent le bus de l'UPFC coté source et le bus de l'UPFC côté ligne de transmission, respectivement.

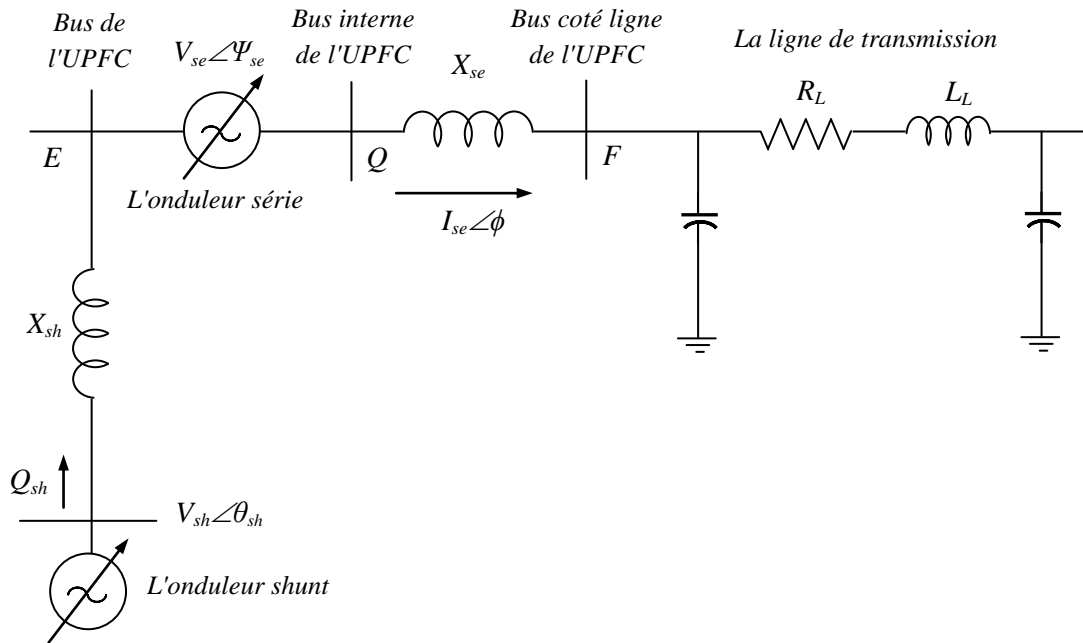


Fig. 2. 2 Modèle d'un UPFC

Pour effectuer des études sur le flux de charges avec UPFC, les onduleurs série et shunt sont supposés des sources de tensions équilibrées d'une fréquence de 50 Hz, avec amplitude et angle de phase variables. Ces sources de tensions peuvent être représentées par :

$$\begin{aligned}\bar{V}_{sh} &= V_{sh} (\cos \theta_{sh} + j \sin \theta_{sh}) \\ \bar{V}_{se} &= V_{se} (\cos \psi_{se} + j \sin \psi_{se})\end{aligned}\quad (2.1)$$

où  $V_{sh}$  et  $V_{se}$  sont les amplitudes des sources de tension shunt et série,  $\theta_{sh}$  et  $\psi_{se}$  sont leurs angles de phase par rapport à un plan de référence.

### 2.3 Circuit équivalent de Norton d'un UPFC

La source de tension série avec la réactance série du transformateur associé  $X_{se}$  peuvent être converties en courants équivalents injectés au bus-E et au bus-F. La Figure 2.3 montre le circuit équivalent de Norton.

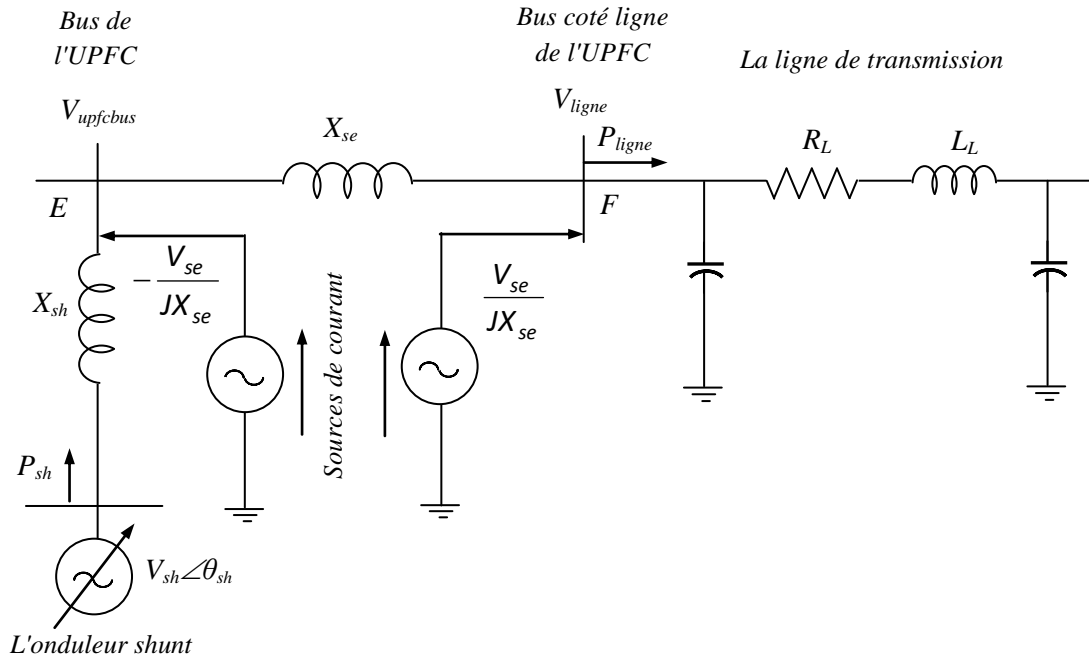


Fig. 2. 3 Circuit équivalent de Norton d'un UPFC

## 2.4 Équations des puissances active et réactive de l'UPFC

Les courants injectés comme le montre la Figure 2.3 peuvent être converti en puissances active et réactive injectées appropriées à leurs bus respectifs. Les puissances active et réactive injectées au bus E sont :

$$\begin{aligned} P_E &= -V_{se} Y_{EF} V_E \cos(\theta_E - \psi_{se} - \varphi_{EF}) \\ Q_E &= -V_{se} Y_{EF} V_E \sin(\theta_E - \psi_{se} - \varphi_{EF}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

De même dans le bus F, les puissances active et réactive injectées sont :

$$\begin{aligned} P_F &= -V_{se} Y_{EF} V_F \cos(\theta_F - \psi_{se} - \varphi_{EF}) \\ Q_F &= -V_{se} Y_{EF} V_F \sin(\theta_F - \psi_{se} - \varphi_{EF}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

où  $Y_{EF}$  est l'admittance entre le bus-E et le bus-F et  $\varphi_{EF}$  son angle de phase.

Dans ce cas  $Y_{EF}$  est l'inverse de  $X_{se}$ . L'angle de phase  $\varphi_{EF}$  est égale à -90 degrés si le transformateur série est modélisée comme une réactance pure.

Pour maintenir constante la tension continue aux bornes du condensateur, la relation suivante doit être respectée :

$$P_{sh} + P_{se} + P_{pertes} = 0 \quad (2.4)$$

où  $P_{sh}$  et le  $P_{se}$ , sont les puissances actives échangées avec le réseau électrique par les sources de tension shunt et série respectivement.  $P_{pertes}$  représente les pertes dans l'UPFC.

L'équation 2.4 signifie que la source de tension shunt compense la demande de la puissance active par la source de tension série. La relation ci-dessus donne une équation de la puissance active demandée par la source de tension shunt. Cette puissance serait alors l'opposée de la puissance échangée par la source de tension série avec le réseau électrique. La puissance active totale de la source de tension shunt devrait inclure les pertes dues à la résistance du condensateur  $R_{cap}$ . La puissance active  $P_{sh}$  demandée par la source de tension shunt est donnée par :

$$P_{sh} = -V_{se} V_K y_{km} \cos(-\theta_K + \psi_{se} - \varphi_{km}) + V_{se} V_M y_{km} \cos(-\theta_M + \psi_{se} - \varphi_{km}) - \frac{V_{dc}^2}{R_{cap}} \quad (2.5)$$

La source de tension shunt fournit également de la puissance réactive variable dont l'amplitude peut être réglée indépendamment pour obtenir une tension requise au bus-E. Les équations (2.2), (2.3) et (2.5) sont utilisées pour les études de performances de flux de charges afin d'obtenir les conditions du régime permanent pour l'écoulement des puissances.

## 2.5 Procédure de flux de charge

Il est bien connu que l'analyse des flux de charge est un processus de type itératif. L'UPFC a la capacité de contrôler la puissance active et la tension du bus côté ligne de transmission/le flux de la puissance réactive dans une ligne de transmission. La référence [9] fournit une méthode très simple pour résoudre le flux de charge qui est seulement applicable aux systèmes de petite puissance. Le procédé nécessite des informations concernant l'impédance de court-circuit sur le bus où l'UPFC doit être installé. L'algorithme prévu pour réaliser l'étude de flux de charge est applicable seulement pour évaluer l'impact de l'UPFC sur les réseaux électriques de façon localisée. Niaki et.al [11] ont fourni une méthode plus simple pour effectuer des flux de charge avec l'UPFC, le bus auquel l'onduleur shunt est connecté est modélisé comme un bus P-Q et le bus côté ligne de transmission est modélisé comme un bus P-V. Cette méthode ne fonctionne que lorsque les variables à savoir, la tension de bus 'UPFC, le flux de la puissance active dans la ligne de transmission, la tension du bus côté ligne de transmission, sont contrôlés simultanément. Cette méthode va échouer si l'on veut contrôler un sous-ensemble d'entre eux tout seul.

En outre, la solution obtenue est multi-valeur, ce qui signifie que l'on pourrait obtenir une solution de flux de charge qui pourrait ne pas être réalisable ou les paramètres de l'UPFC pourraient être hors des limites acceptables. Cela nécessite que les variables soient confinés dans des limites acceptables pour obtenir des solutions réalisables. Arabi et.al [10] ont modélisé l'onduleur shunt et l'onduleur série come un ensemble des injections de PQ aux bus appropriés.



Ce modèle néglige toutefois l'interaction entre l'onduleur série et shunt. Esquivel et.al [12] ont amélioré les limitations sur le modèle proposé par Niaki et.al [11] et fournit une solution au problème de la limitation des paramètres de l'UPFC en fixant le paramètre qui a violé ces limites et en libérant la variable régulée. Dans ce cas, la nécessité de bonnes conditions initiales sont mis en évidence.

Pour obtenir une solution de flux de charge avec un flux de puissance active dans la ligne de transmission et une tension de bus côté ligne de transmission spécifiées avec l'UPFC, la tension de la source série  $V_{SE}$  est décomposée en deux phases. La Figure 2.4 montre le diagramme de phase avec les deux composantes de la source de tension série. Le vecteur de la tension de bus UPFC est noté  $V_E$ . Le vecteur désigné par  $V_{seq}$  est en quadrature et l'autre vecteur désigné par  $V_{sed}$  est en phase avec le vecteur de la tension ( $V_E$ ).

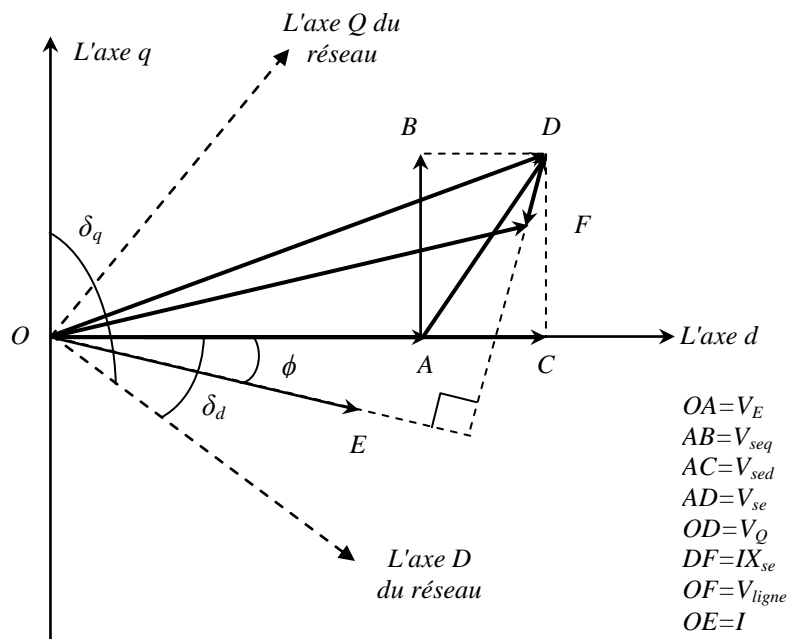


Fig. 2. 4 Diagramme de phase présentant les deux composantes de la source de tension

La fonction de la composante en quadrature  $V_{seq}$  est de faire varier l'angle de phase de  $V_E$  pour obtenir un flux de puissance active spécifié dans la ligne de transmission. La fonction de la composante en phase (ou directe) du  $V_{sed}$  est d'achever la tension coté ligne de transmission spécifiée. Le vecteur de la tension net  $V_{se}$  (la somme vectorielle de  $V_{sed}$  et  $V_{seq}$ ) est noté par le vecteur AD dans la Figure 2.4. Les axes D et Q se réfèrent aux axes du réseau. Puisque le vecteur de la tension série  $V_{se}$  est ajouté au vecteur de la tension  $V_E$ , la composante en quadrature de la tension série qui contrôle la puissance active a peu d'effet sur la puissance réactive, c'est parce que la composante en quadrature de la tension série change l'angle de phase avec peu de changement dans l'amplitude de la tension du bus sur le côté de la ligne de transmission ( $V_{ligne}$ ). La composante en phase (ou directe) contrôlant la tension du bus côté ligne

de transmission ( $V_{ligne}$ ) a un grand impact sur la puissance réactive que sur la puissance active, c'est parce que la composante en phase a peu d'effet sur l'angle de phase. Ainsi l'interaction entre le contrôle du flux de la puissance active et de la puissance réactive dans une ligne de transmission, dans une large mesure, est réduite. Ceci permet de séparer le procédé de la solution du flux de charge pour atteindre un flux de puissance active spécifié dans la ligne de transmission d'une part, et d'autre part la tension coté ligne de transmission.

## 2.6 Modélisation de l'UPFC

### 2.6.1 Modélisation du bus continu de l'UPFC

Dans cette section, une procédure détaillée permettant de déterminer les équations de la dynamique associée à l'UPFC a été réalisée. Cette dynamique est celle du condensateur de liaison du bus continu. La Figure 2.5 présente l'UPFC avec ses éléments associés, le bus continu et les flux des courants continus et alternatifs.

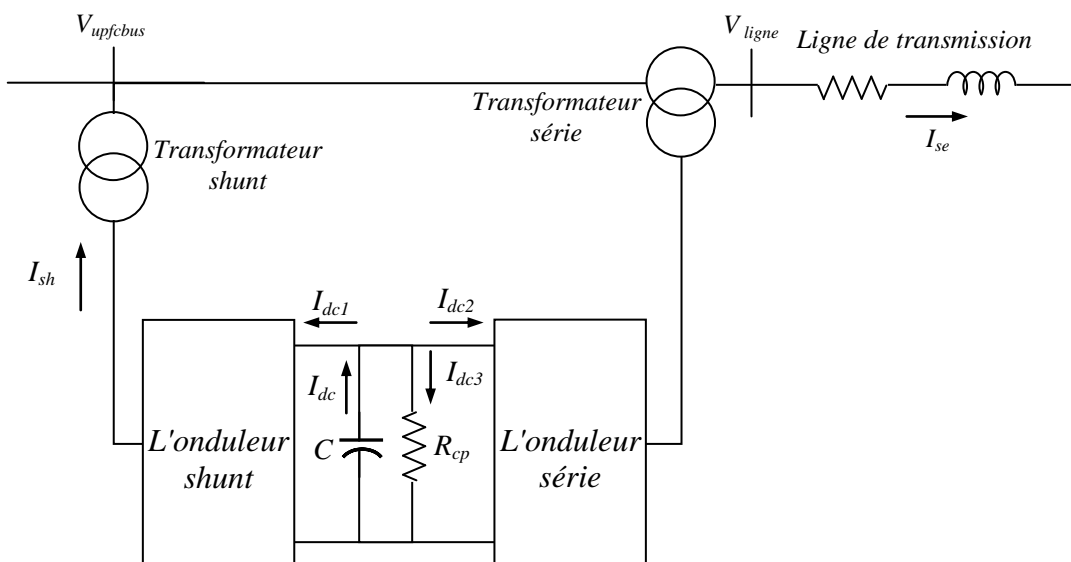


Fig. 2. 5 L'UPFC avec ses éléments et les flux des courants

Soit  $V_{upfcbus}$  la tension du bus UPFC coté source et  $V_{ligne}$  la tension de bus côté ligne de transmission. Soit  $I_{dc}$  le courant continu sortant du condensateur.  $I_{dc1}$  et  $I_{dc2}$  sont les courants continus sortant du convertisseur shunt et du convertisseur série, respectivement sur le côté du bus continu. Soit  $I_{dc3}$  le courant à travers la résistance shunt connectée en parallèle avec le condensateur de liaison.

Selon la loi de Kirchhoff, nous avons

$$\hat{I}_{dc} = \hat{I}_{dc1} + \hat{I}_{dc2} + \hat{I}_{dc3} \quad (2.6)$$

« $\hat{\phantom{x}}$ », représente la valeur instantanée.

Ces valeurs seront converties en représentation pu par la suite.

Considérons maintenant le flux de puissance active sur le côté AC à travers le transformateur shunt. Le courant du transformateur shunt  $I_{sh}$  et la tension de l'onduleur shunt  $V_{sh}$  sont divisés en leurs composantes d'axe D-Q. soit  $I_{shD}$  et  $I_{shQ}$  les courants des axes D et Q traversant le transformateur shunt et  $V_{shD}$  et  $V_{shQ}$  les tensions de l'onduleur shunt dans le plan D-Q. La puissance triphasée active qui découle de l'onduleur shunt est donnée par

$$\hat{P}_{sh} = 3\text{Réel}\left[\left(\hat{V}_{shD} + j\hat{V}_{shQ}\right)\left(\hat{I}_{shD} + j\hat{I}_{shQ}\right)^*\right] \quad (2.7)$$

avec: '\*' indique le conjugué.

En représentant les variables d'axes D-Q avec leurs valeurs crêtes, nous obtenons :

$$\hat{P}_{sh} = \frac{3}{2}\left(\hat{V}_{shDpk}\hat{I}_{shDpk} + \hat{V}_{shQpk}\hat{I}_{shQpk}\right) \quad (2.8)$$

Dans le bus continu la puissance active sortante de l'onduleur shunt est donnée par :

$$\hat{P}_{DCsh} = \hat{V}_{dc}\hat{I}_{dc1} \quad (2.9)$$

En supposant que les pertes dans l'onduleur shunt sont négligeables, on a :

$$\hat{P}_{DCsh} = \hat{P}_{sh} \quad (2.10)$$

Ainsi, en assimilant les deux termes, nous obtenons :

$$\hat{V}_{dc}\hat{I}_{dc1} = \frac{3}{2}\left(\hat{V}_{shDpk}\hat{I}_{shDpk} + \hat{V}_{shQpk}\hat{I}_{shQpk}\right) \quad (2.11)$$

Afin de mettre l'équation 2.11 dans une représentation en pu, supposons que la crête de la tension de phase soit la tension de base et la crête du courant alternatif soit le courant de base. La puissance de base est donnée par

$$\hat{P}_{ACbase} = \frac{3}{2}\hat{V}_{pk\phi}\hat{I}_{pk\phi} \quad (2.12)$$

Mettons l'équation 2.11 dans le système pu, nous obtenons,

$$I_{dc1} = \frac{3}{2V_{dc}}\left(V_{shD}I_{shD} + V_{shQ}I_{shQ}\right) \quad (2.13)$$

De même, on considère que les pertes dans l'onduleur série sont négligeables, le flux de la puissance sur le bus continu par l'onduleur série est donnée par :

$$\hat{P}_{DCse} = \hat{V}_{dc}\hat{I}_{dc2} \quad (2.14)$$

Soit  $I_{seD}$  et  $I_{seQ}$  les courants du plan d'axe D-Q traversant le transformateur série et  $V_{seD}$  et  $V_{seQ}$  les tensions dans le plan d'axe D-Q de l'onduleur série. La puissance triphasée réelle

générée par le convertisseur série en raison de l'interaction entre la tension série injectée  $V_{se}$ , et le courant de la ligne de transmission  $I_{se}$ , est donnée par

$$\hat{P}_{se} = 3\text{Réel}\left[\left(\hat{V}_{seD} + j\hat{V}_{seQ}\right)\left(\hat{I}_{seD} + j\hat{I}_{seQ}\right)^*\right] \quad (2.15)$$

où '\*' indique le conjugué.

Représentons les variables des axes D-Q par leurs valeurs maximales, nous obtenons

$$\hat{P}_{se} = \frac{3}{2}\left(\hat{V}_{seDpk}\hat{I}_{seDpk} + \hat{V}_{seQpk}\hat{I}_{seQpk}\right) \quad (2.16)$$

En assimilant 2.14 et 2.16, on obtient,

$$\hat{V}_{dc}\hat{I}_{dc2} = \frac{3}{2}\left(\hat{V}_{seDpk}\hat{I}_{seDpk} + \hat{V}_{seQpk}\hat{I}_{seQpk}\right) \quad (2.17)$$

Représentons l'équation 2.17 en per unit, nous obtenons :

$$I_{dc2} = \frac{3}{2V_{dc}}\left(V_{seD}I_{seD} + V_{seQ}I_{seQ}\right) \quad (2.18)$$

Le courant traversant la résistance en parallèle avec le condensateur de liaison est donnée par :

$$\hat{I}_{dc3} = \frac{\hat{V}_{dc}}{\hat{R}_{cap}} \quad (2.19)$$

En représentant l'équation 2.19 en pu, nous obtenons :

$$I_{dc3} = \frac{V_{dc}}{R_{cap}} \quad (2.20)$$

La dynamique du lien continu est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{d\hat{V}_{dc}}{dt} = -\frac{\hat{I}_{dc}}{C} \quad (2.21)$$

où  $V_{dc}$  est la tension du condensateur de liaison et 'C' est sa capacité en farads. Le temps 't' est exprimé en secondes.

Mettant l'équation 2.21 en per unit, nous obtenons :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\omega_0 C' I_{dc} \quad (2.22)$$

où (C') est donnée par :

$$C' = \frac{1}{\omega_0 Z_{base} C}$$

Exprimons  $I_{dc}$  en fonction de  $I_{dc1}$ ,  $I_{dc2}$  et  $I_{dc3}$  en utilisant l'équation 2.13, 2.18 et 2.20, nous obtenons :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\omega_0 C' \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{V_{shD} I_{shD} + V_{shQ} I_{shQ} + V_{seD} I_{seD} + V_{seQ} I_{seQ}}{V_{dc}} \right) + \frac{V_{dc}}{R_{cap}} \right] \quad (2.23)$$

L'équation 2.23 représente la dynamique de la tension continue aux bornes du condensateur du modèle de l'UPFC.

### 2.6.2 Modélisation et conception du système de contrôle de l'onduleur shunt

L'objectif de l'onduleur shunt est de fournir un contrôle rapide de la puissance réactive ( $Q_{SH}$ ) et de maintenir une tension continue constante ( $V_{dc}$ ) aux bornes du condensateur de liaison. La puissance réactive fournie/absorbée par l'onduleur shunt est contrôlée en ajustant l'amplitude de sa tension générée. La tension continue ( $V_{dc}$ ) est contrôlée en ajustant l'angle de phase de la tension générée par l'onduleur shunt. Cet ajustement de l'angle de phase permet à la puissance active d'être soit consommée ou générée rendant ainsi possible de contrôler la tension  $V_{dc}$ . L'objectif de maintenir la tension  $V_{dc}$  constante est de fournir à l'onduleur série la tension continue nécessaire pour son fonctionnement et de satisfaire sa demande en puissance active. Afin de contrôler ces deux variables, à savoir la tension  $V_{dc}$  et la puissance réactive ( $Q_{SH}$ ), l'onduleur shunt est exploité en utilisant un système de contrôle découplé.

#### 2.6.2.1 Modélisation du système de contrôle de l'onduleur shunt

L'objectif du système de contrôle découplé est de contrôler la puissance active ( $P_{sh}$ ) et la puissance réactive ( $Q_{sh}$ ) simultanément avec le moins d'interaction entre eux. En contrôlant le flux de la puissance  $P_{sh}$  de/vers l'onduleur shunt, la tension  $V_{dc}$  peut être contrôlée. Pour comprendre les bases du système de contrôle découplé, considérons un module VSC de 160 MVA connecté à une source de tension constante de 345 kV à travers un transformateur élévateur 66/345 KV. La Figure 2.6 présente le circuit équivalent de cette configuration.

Soit  $V_{sh}$  la tension en per unit produite par le module VSC et  $\theta_{sh}$  son angle de phase. Soit  $V$  la tension en per unit de la source de tension constante.  $L_{sh}$  et  $R_{sh}$  représentent la réactance et la résistance en per unit de l'onduleur et son transformateur associé et  $C$  représente la capacité en per unit du condensateur de liaison. La source de tension constante est considérée comme référence.

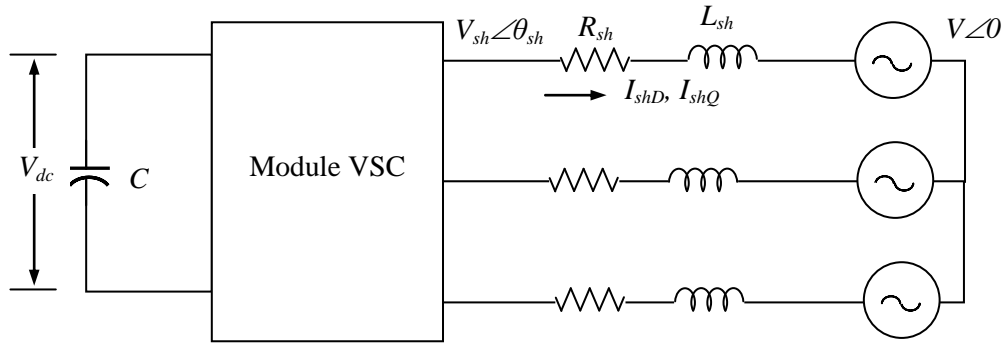


Fig. 2. 6 Circuit équivalent d'un VSC connecté à une source de tension constante

La Figure 2.7 montre le diagramme de phase associée au module VSC. L'axe D coïncide avec la phase de la source de tension constante ( $V$ ) et l'axe Q est en avance de 90 degrés.

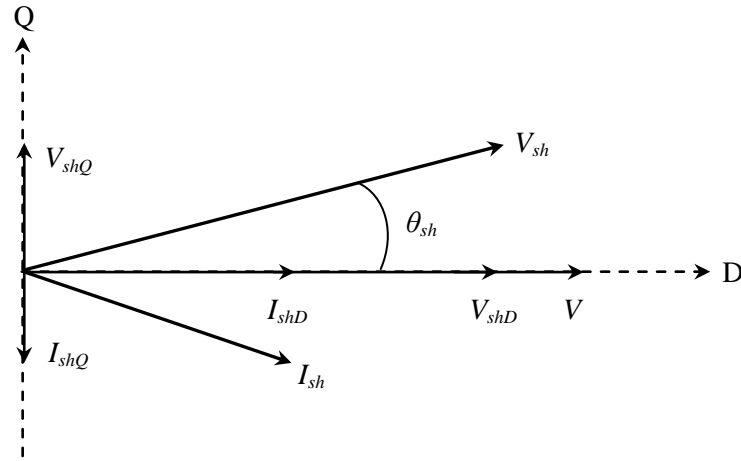


Fig. 2. 7 Diagramme de phase d'un module VSC connecté à une source de tension constante

Soit  $I_{shD}$  et  $I_{shQ}$  les courants d'axe D et d'axe Q en per unit de la source de tension constante,  $V_{shD}$  et  $V_{shQ}$  représentent les tensions des axes D et Q du module VSC respectivement.

En supposant que la tension de base est la crête de la tension de phase et le courant de base est la crête du courant de phase sur le côté 345 kV, les puissances active et réactive triphasées en per unit sont données par l'équation 2.24.

$$\begin{aligned} P_{sh} &= \frac{3}{2} V I_{shD} \\ Q_{sh} &= -\frac{3}{2} V I_{shQ} \end{aligned} \quad (2.24)$$

C'est évident d'après l'équation 2.24 que la puissance active ( $P_{sh}$ ) est une fonction de  $I_{shD}$  et la puissance réactive ( $Q_{sh}$ ) est une fonction de  $I_{shQ}$ . Ainsi en régulant  $I_{shD}$  et  $I_{shQ}$ , la puissance active ( $P_{sh}$ ) et la puissance réactive ( $Q_{sh}$ ) de/vers l'onduleur shunt peuvent être contrôlées indépendamment. Cela constitue la base de la conception d'un système de contrôle découplé [57].

Le système de contrôle découplé permet un contrôle indépendant des courants d'axes D-Q. Dans le but de découpler le contrôle de la puissance active ( $P_{sh}$ ) et la puissance réactive ( $Q_{sh}$ ), on considère le circuit équivalent du module VSC connecté à une source de tension constante comme indiqué dans la Figure 2.5. Le système d'équations du circuit équivalent dans le plan d'axe D-Q est;

$$\begin{aligned} \frac{dI_{shD}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shD}}{L_{sh}} + \omega\omega_0 I_{shQ} + \frac{\omega_0}{L_{sh}}(V_{shD} - V) \\ \frac{dI_{shQ}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shQ}}{L_{sh}} - \omega\omega_0 I_{shD} + \frac{\omega_0}{L_{sh}}(V_{shQ}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

où:  $\omega_0$  représente la fréquence du système, 314 rad/sec, et  $\omega$  représente sa fréquence de 1,0 en per unit.

Pour parvenir à un découplage des courants d'axes D-Q, les variables de contrôle  $V_{shD}$  et  $V_{shQ}$  dans l'équation 2.25 sont modifiées comme indiqué dans l'équation 2.26.

$$\begin{aligned} V_{shD} &= V + \frac{L_{sh}}{\omega_0}(u_1 - \omega\omega_0 I_{shQ}) \\ V_{shQ} &= \frac{L_{sh}}{\omega_0}(u_2 + \omega\omega_0 I_{shD}) \end{aligned} \quad (2.26)$$

où  $u_1$  et  $u_2$  sont des variables de commande auxiliaires.

Combinant l'équation 2.25 et 2.26, ainsi nous obtenons l'équation 2.27.

$$\begin{aligned} \frac{dI_{shD}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shD}}{L_{sh}} + u_1 \\ \frac{dI_{shQ}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shQ}}{L_{sh}} + u_2 \end{aligned} \quad (2.27)$$

Ainsi, il est claire de l'équation 2.27 qu'en contrôlant  $u_1$  et  $u_2$ , on peut régler indépendamment  $I_{shD}$  et  $I_{shQ}$  contrôlant ainsi les flux de la puissance active ( $P_{sh}$ ) et de la puissance réactive ( $Q_{sh}$ ) du module VSC. Donc, en contrôlant  $u_1$  le flux de la puissance active ( $P_{sh}$ ) et donc la tension continue du condensateur de liaison ( $V_{dc}$ ) peuvent être régulées, alors qu'en contrôlant  $u_2$  le flux de la puissance réactive ( $Q_{sh}$ ) peut être réglé. Pour fermer la boucle de rétroaction, les variables auxiliaires  $u_1$  et  $u_2$  sont contrôlés par des contrôleurs proportionnel et intégral (PI) comme il est donné ci-dessous dans l'équation 2.28. Le courant d'axe-D est contrôlé par  $u_1$  et le courant d'axe-Q est contrôlé par  $u_2$ .

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \left(K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s}\right)(I_{shDref} - I_{shD}) \\
 u_2 &= \left(K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s}\right)(I_{shQref} - I_{shQ})
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

La variable 's' dans l'équation 2.28 représente l'opérateur de Laplace. Cette équation constitue le système de contrôle de la boucle interne.

La Figure 2.8 montre le système de contrôle découplé du module VSC. Ce système de commande sera utilisé pour l'onduleur shunt lorsqu'on considère le fonctionnement complet d'un UPFC.

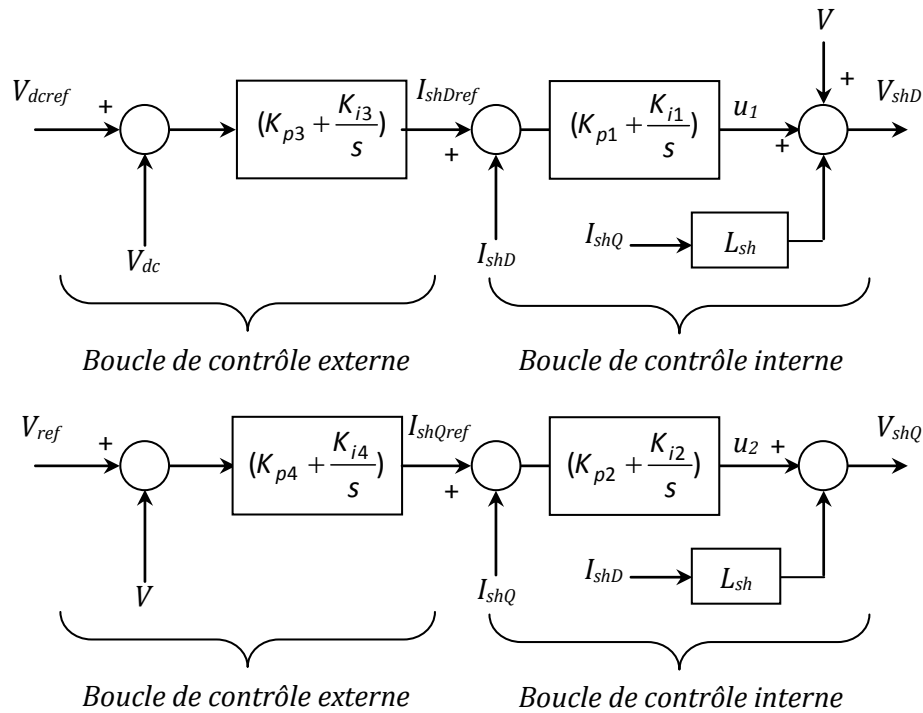


Fig. 2. 8 Système de contrôle découplé

En effet, la variable  $I_{shDref}$  peut être contrôlée par une boucle externe qui contrôle la tension continue  $V_{dc}$ . Si le module VSC est utilisé comme un contrôleur de tension du bus, la variable  $I_{shQref}$  peut être contrôlée par une boucle externe qui contrôle la tension du bus auquel il est connecté. En effet, les contrôleurs PI sont utilisés pour le contrôle de la boucle externe dont le système de contrôle est donné par l'équation 2.29.

$$\begin{aligned}
 I_{shDref} &= \left(K_{p3} + \frac{K_{i3}}{s}\right)(V_{dcref} - V_{dc}) \\
 I_{shQref} &= \left(K_{p4} + \frac{K_{i4}}{s}\right)(V_{ref} - V)
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$



### 2.6.2.2 La conception du système de contrôle découplé pour un VSC

La conception du système de contrôle découplé nécessite de quantifier les gains des régulateurs *PI*. Elle est basé sur des techniques de contrôle linéaire. Pour le VSC connecté à une source de tension constante (Figure 2.6), les équations différentielles qui y sont associées sont données dans l'équation 2.25 et ont été reproduites ici par commodité.

$$\begin{aligned} \frac{dI_{shD}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shD}}{L_{sh}} + \omega\omega_0 I_{shQ} + \frac{\omega_0}{L_{sh}}(V_{shD} - V) \\ \frac{dI_{shQ}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shQ}}{L_{sh}} + \omega\omega_0 I_{shD} + \frac{\omega_0}{L_{sh}}(V_{shQ}) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Parmi les éléments importants qui influent sur la conception d'un contrôleur découplé est le condensateur de liaison (*C*). Les références [29,34,36] ont négligées cet effet lors de la conception du système de contrôle de l'onduleur shunt. Cela pourrait conduire à des gains inexacts du régulateur *PI* et donc un système de contrôle inefficace.

La dynamique du condensateur de liaison est donnée par l'équation 2.23 a été reproduite dans l'équation 2.31 pour plus de commodité.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\omega_0 C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{V_{shD} I_{shD} + V_{shQ} I_{shQ} + V_{seD} I_{seD} + V_{seQ} I_{seQ}}{V_{dc}} \right) + \frac{V_{dc}}{R_{cap}} \right] \quad (2.31)$$

Puisque la conception du système de contrôle a été mise au point ici pour le fonctionnement du module VSC comme un onduleur shunt, les deux autres variables de contrôle  $V_{seD}$  et  $V_{seQ}$  associés à l'onduleur série ont été négligées. L'équation 2.31 peut maintenant être représentée comme suit

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\omega_0 C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{V_{shD} I_{shD} + V_{shQ} I_{shQ}}{V_{dc}} \right) + \frac{V_{dc}}{R_{cap}} \right] \quad (2.32)$$

Ainsi, l'ensemble complet du système d'équations correspondant à la conception du système de contrôle du module VSC est donné par les équations 2.30 et 2.32. Pour parvenir à un découplage des courants d'axes D-Q, les tensions d'axe D-Q de l'onduleur shunt  $V_{shD}$  et  $V_{shQ}$  définies dans l'équation 2.30 sont remplacées par les expressions de l'équation 2.26. La relation 2.33 montre le système d'équations en termes des variables de commande auxiliaires  $u_1$  et  $u_2$ .

$$\begin{aligned}
 \frac{dI_{shD}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shD}}{L_{sh}} + u_1 \\
 \frac{dI_{shQ}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shQ}}{L_{sh}} + u_2 \\
 \frac{dV_{dc}}{dt} &= -\frac{3\omega_0 C'}{2} \left( \frac{u_1 I_{shD} \left( \frac{L_{sh}}{\omega_0} \right) + |V| I_{shD} + u_2 I_{shQ} \left( \frac{L_{sh}}{\omega_0} \right)}{V_{dc}} \right) - \omega_0 C' \frac{V_{dc}}{R_{cap}}
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

En linéarisant l'équation 2.33 autour d'un point de fonctionnement, nous obtenons,

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Delta I_{shD}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 \Delta I_{shD}}{L_{sh}} + \Delta u_1 \\
 \frac{d\Delta I_{shQ}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 \Delta I_{shQ}}{L_{sh}} + \Delta u_2 \\
 \frac{d\Delta V_{dc}}{dt} &= -\frac{3\omega_0 C'}{2} \frac{\left[ (a_1 u_{10} \Delta I_{shD} + a_1 I_{shD0} \Delta u_1) + |V| \Delta I_{shD} + (a_1 u_{20} \Delta I_{shQ} + a_1 I_{shQ0} \Delta u_2) \right]}{V_{dc0}} \\
 &\quad + \frac{3\omega_0 C'}{2} \frac{\left[ a_1 u_{10} I_{shD0} + |V| I_{shD0} + a_1 u_{20} I_{shQ0} \right] \Delta V_{dc}}{V_{dc0}^2} - \omega_0 C' \frac{\Delta V_{dc}}{R_{cap}}
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

où,  $a_1 = L_{sh}/\omega_0$

Sous forme matricielle, l'équation 2.34 devient,

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_{shD} \\ \Delta \dot{I}_{shQ} \\ \Delta \dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R\omega_0}{L_{sh}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R\omega_0}{L_{sh}} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{shD} \\ \Delta I_{shQ} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix} \tag{2.35}$$

où

$$\begin{aligned}
 a_{31} &= -\frac{3\omega_0 C' (a_1 u_{10} + |V|)}{2V_{dc0}} \\
 a_{32} &= -\frac{3\omega_0 C' (a_1 u_{20})}{2V_{dc0}} \\
 a_{33} &= \frac{3\omega_0 C' (a_1 u_{10} I_{shD0} + |V| I_{shD0} + a_1 u_{20} I_{shQ0})}{2V_{dc0}^2} - \frac{\omega_0 C'}{R_{cap}} \\
 b_{31} &= -\frac{3\omega_0 C' (a_1 I_{shD0})}{2V_{dc0}} \\
 b_{32} &= -\frac{3\omega_0 C' (a_1 I_{shQ0})}{2V_{dc0}}
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

On observe de l'équation 2.35 que les courants d'axes D-Q sont découplés et donc il est possible de concevoir des contrôleurs PI pour la régulation des courants d'axe D-Q d'une façon séparée. La procédure de la conception commence par les contrôleurs découplés qui utilisent uniquement les équations d'axes D-Q (les deux premières dans le système d'équation 2.34). Une fois les contrôleurs PI interne ( $K_{P1}$ ,  $K_{i1}$ ,  $K_{P2}$ ,  $K_{i2}$ ) sont conçus, l'équation du condensateur de liaison est utilisée pour la conception d'un régulateur PI ( $K_{P3}$ ,  $K_{i3}$ ) pour la tension du condensateur formant la boucle externe pour le contrôle de la tension d'axe D. Pour l'axe Q, et puisque le VSC est connecté à une source de tension constante, le contrôleur PI ( $K_{P4}$ ,  $K_{i4}$ ) de la boucle externe qui est généralement utilisé pour contrôler la tension du bus auquel le VSC est connecté n'a pas été considéré au cours du processus de la conception. Néanmoins, il sera utilisé ultérieurement lors de l'exploitation du VSC comme un onduleur shunt.

Pour commencer avec la conception découplée du système de contrôle, envisageons la représentation d'axe D des équations différentielles données dans le système 2.34. Après la conversion dans le domaine de Laplace et en introduisant la fonction de transfert du contrôleur PI donnée par l'équation 2.28 dans l'équation d'axe D, nous obtenons

$$s\Delta I_{shD}(s) = -\frac{R_{sh}\omega_0}{L_{sh}}\Delta I_{shD}(s) + \left[ K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s} \right] \left[ \Delta(I_{shDref} - I_{shD}) \right] \quad (2.37)$$

La résolution de l'équation ci-dessus donne

$$\left( s^2 + \left[ \frac{R_{sh}\omega_0}{L_{sh}} + K_{p1} \right] s + K_{i1} \right) \Delta I_{shD}(s) = 0 \quad (2.38)$$

Donc l'équation caractéristique d'axe D est donnée par

$$\left( s^2 + \left[ \frac{R_{sh}\omega_0}{L_{sh}} + K_{p1} \right] s + K_{i1} \right) = 0 \quad (2.39)$$

L'équation (2.39) est du second ordre. En Plaçant les racines de l'équation caractéristique à des lieux spécifiques, on peut trouver les valeurs des gains du régulateur PI. Une procédure similaire a été appliquée sur l'axe Q. Les paramètres et les conditions initiales de l'opération de la conception sont donnés ci-dessous.

$$R_{sh} = 0.0014, L_{sh} = 0.2, C' = 0.0324, I_{shD0} = -0.042, I_{shQ0} = 0.18, u_{10} = -0.004, u_{20} = 0.05, \omega_0 = 314, V_{dc0} = 2.22.$$

Les pôles pour le contrôleur PI ( $K_{P1}$ ,  $K_{i1}$ ) d'axe D ont été mis à  $(-3.9 \pm j2.5)$ , par conséquent, les gains correspondants sont  $K_{P1} = 5,0$  et  $K_{i1} = 21,4$ . Les pôles pour le contrôleur PI

( $K_{p2}$ ,  $K_{i2}$ ) d'axe Q ont été mis à  $(-1.5 \pm j1.7)$ , par conséquent, les gains correspondants sont  $K_{p2} = 0,2$  et  $K_{i2} = 5,0$ . Après avoir conçu les contrôleurs de la boucle interne pour les courants d'axes D-Q, le régulateur PI ( $K_{p3}$ ,  $K_{i3}$ ) de la tension continue ( $V_{dc}$ ) doit être conçu. Pour se faire, les informations concernant les contrôleurs PI ( $K_{p1}$ ,  $K_{i1}$ ,  $K_{p2}$ ,  $K_{i2}$ ) des boucles internes doivent être inclus dans les équations du système complet.

En représentant l'équation 2.35 dans l'espace d'état, nous obtenons

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU \end{aligned} \quad (2.40)$$

où les matrices A et B sont donnée dans l'équation 2.35, les matrices C et D sont donnés ci-dessous.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

L'équation 2.40 forme la représentation des entrées-sorties du module VSC connecté à une source de tension constante. Les contrôleurs PI ( $K_{p1}$ ,  $K_{i1}$ ,  $K_{p2}$ ,  $K_{i2}$ ) peuvent être inclus dans la matrice d'état A pour obtenir un nouveau ensemble d'équations d'entrées-sorties comme il est indiqué par l'équation 2.41.

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= A_1 X_1 + B_1 U_1 \\ Y_1 &= C_1 X_1 + D_1 U_1 \end{aligned} \quad (2.41)$$

où

$$X_1 = [\Delta I_{shD}, \Delta I_{shQ}, \Delta V_{dc}, \Delta x_{c1}, \Delta x_{c2}] \quad (2.42)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} A - BK_{pt}C & -BK_{it} \\ MC & -DK_{it} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} BK_{pt} \\ -M \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$C_1 = [MC \quad -DK_{it}] \quad (2.45)$$

$$D_1 = DK_{pt} \quad (2.46)$$

$$M = (I + DK_p)^{-1} \quad (2.47)$$

$$K_{pt} = (I + K_p D)^{-1} K_p \quad (2.48)$$

$$K_{it} = (I + K_p D)^{-1} K_i \quad (2.49)$$

$$U_1 = \begin{bmatrix} I_{shDref} \\ I_{shQref} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

avec  $x_{C1}$  et  $x_{C2}$  sont les variables d'état associées aux contrôleurs de courants d'axes D-Q.

Puisque l'onduleur est connecté à une source de tension constante, la référence de courant d'axe Q n'est pas régulée et donc  $\Delta I_{shQref} = 0$ . Ainsi, le vecteur  $U_1$  ne contient que  $\Delta I_{shDref}$ . Nous pouvons maintenant concevoir la boucle externe pour le contrôleur de la tension continue ( $V_{dc}$ ) en utilisant l'approche ci-dessus. On introduit le contrôleur PI ( $K_{p3}$ ,  $K_{i3}$ ) pour la tension continue ( $V_{dc}$ ) dans la matrice d'état, nous obtenons l'équation en boucle fermée,

$$\dot{X}_2 = A_2 X_2 \quad (2.51)$$

où

$$X_2 = [\Delta I_{shD}, \Delta I_{shQ}, \Delta V_{dc}, \Delta x_{c1}, \Delta x_{c2}, \Delta x_{c3}] \quad (2.52)$$

avec  $x_{C3}$  est la variable d'état du contrôleur PI de la tension continue du condensateur ( $V_{dc}$ ).

Les valeurs propres du système avec tous les contrôleurs inclus, en utilisant les gains  $K_{p3} = -1,0$  et  $K_{i3} = -2,0$  pour le contrôleur PI de la boucle externe de la tension du condensateur ( $V_{dc}$ ), sont:

$$\begin{aligned} & -1.10 \pm j6.46 \\ & -2.83 \pm j0.42 \\ & -1.46 \pm j1.69 \end{aligned}$$

Les valeurs des gains du contrôleur PI obtenues ci-dessus ont été déterminées en utilisant la méthode de placement de pôles. Le système de contrôle découplé conçu pour un module VSC sera utilisé quand il fonctionne comme un onduleur shunt pour l'UPFC.

### 2.6.2.3 Simulation du Module VSC et son système de contrôle sous MATLAB/Simulink®

Le système de contrôle découplé désigné précédemment, est utilisé pour contrôler la puissance réactive fournie par le module VSC et son condensateur de tension continue. Les signaux de commande des tensions d'axes D-Q  $V_{shD}$  et  $V_{shQ}$  générées par le système de contrôle (Figure 2.8) doivent être convertis en signaux prêts à l'exploitation par le VSC. Les variables associées à tout VSC sont son indice de modulation ( $mi$ ) et son angle de phase ( $\theta_{SH}$ ). Dans le cas d'un contrôle basé sur la technique MLI, un signal de référence sinusoïdal est comparé à une forme d'onde triangulaire pour générer les instants convenables à la fermeture des interrupteurs du VSC. Le rapport de la valeur crête du signal sinusoïdal à la valeur crête de l'onde triangulaire est appelé indice de modulation  $mi$ . L'angle de phase  $\theta_{SH}$  est la différence entre l'angle de phase de la tension générée par l'onduleur shunt et l'angle de phase de la tension de référence. En se

référant à la Figure 2.6, l'angle de référence sera celui de la source de tension constante. La valeur de l'indice de modulation  $mi$  et l'angle de phase  $\theta_{SH}$ , dépend de l'amplitude de la tension  $V_{dc}$ . Toutefois, la tension entre deux lignes générée par un module VSC basé sur MLI, est liée à la tension  $V_{dc}$  du condensateur de liaison par l'équation 2.53 [56].

$$\hat{V}_{sh} = 0.612mi\hat{V}_{dc} \quad (2.53)$$

En réorganisant l'équation 2.53, nous obtenons l'indice de modulation

$$mi = \frac{\hat{V}_{sh}}{0.612\hat{V}_{dc}} \quad (2.54)$$

Les signaux de commande  $V_{shD}$  et  $V_{shQ}$  des tensions d'axes D-Q générées par le système de contrôle figurant en Figure 2.8 sont en per unit. L'amplitude de la tension qui doit être générées par le VSC en per unit est donnée par l'équation 2.55.

$$V_{sh} = \sqrt{V_{shD}^2 + V_{shQ}^2} \quad (2.55)$$

Puisque le module est connecté sur le côté 66 kV du transformateur shunt, la valeur en per unit de la tension générée par le module ( $V_{sh}$ ) est multiplié par 66 pour obtenir sa valeur réelle en kV. En multipliant l'équation 2.55 par 66, la tension réelle qui doit être générée par le VSC est obtenue.

En substituant  $V_{SH}$  dans l'équation 2.54 en fonction de sa valeur en per unit, nous obtenons,

$$mi = \frac{66.V_{sh}}{0.612\hat{V}_{dc}} \quad (2.56)$$

L'angle de phase de la tension générée est obtenu à partir du rapport des signaux de commande comme indiqué dans l'équation 2.57.

$$\theta_{sh} = \tan^{-1}\left(\frac{V_{shQ}}{V_{shD}}\right) \quad (2.57)$$

#### 2.6.2.4 Études de performances du Module VSC

Un module VSC avec son système de contrôle associé a été simulé sous le logiciel *MATLAB/Simulink*<sup>®</sup> pour étudier les performances du système de contrôle vis à vis des changements en échelon de l'entrée. Le VSC était connecté à une source de tension constante comme indiqué dans Figure 2.6. La Figure 2.9 présente la réponse de l'onduleur shunt pour des changements de forme échelon dans la référence de la puissance réactive. Puisque l'entrée du

régulateur d'axe Q est  $I_{shQref}$ , le changement de la référence de puissance réactive est traduit en un courant de référence équivalent d'axe Q  $I_{shQref}$ , en divisant la référence de la puissance réactive ( $Q_{shref}$ ) par l'amplitude de la source de tension constante ( $|V|$ ). Ainsi

$$I_{shQref} = \frac{Q_{shref}}{|V|} \quad (2.58)$$

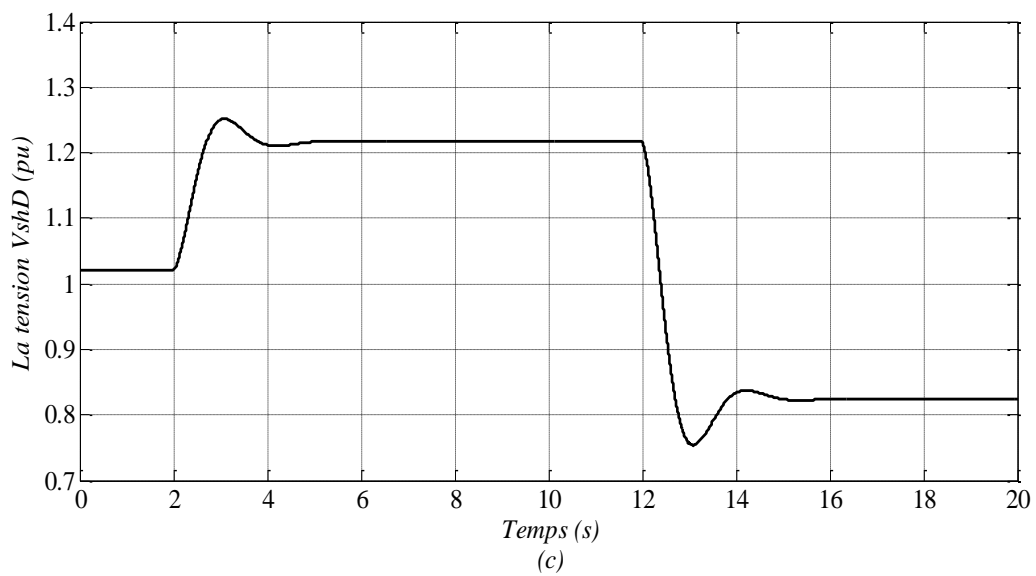
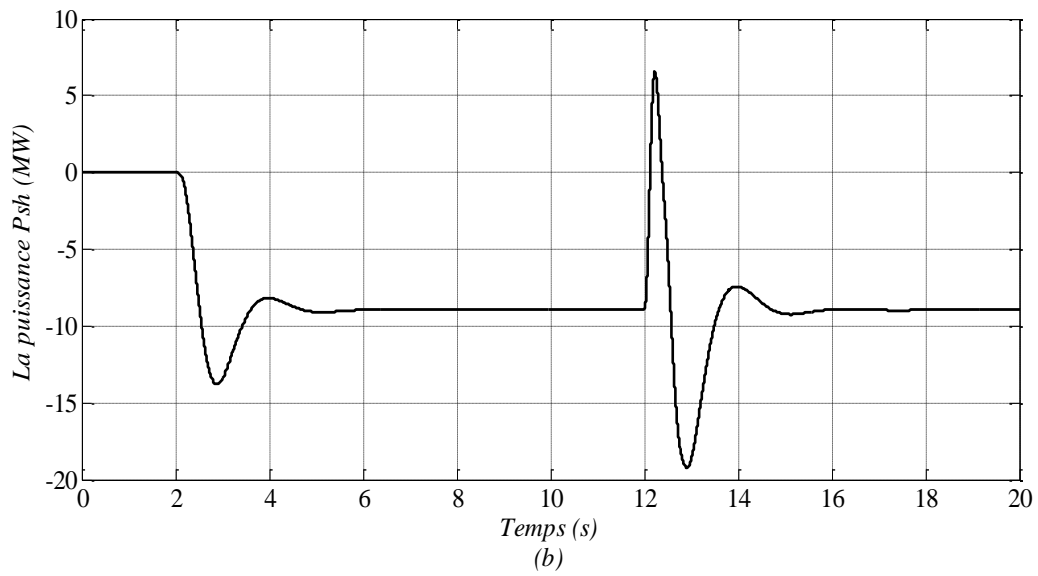
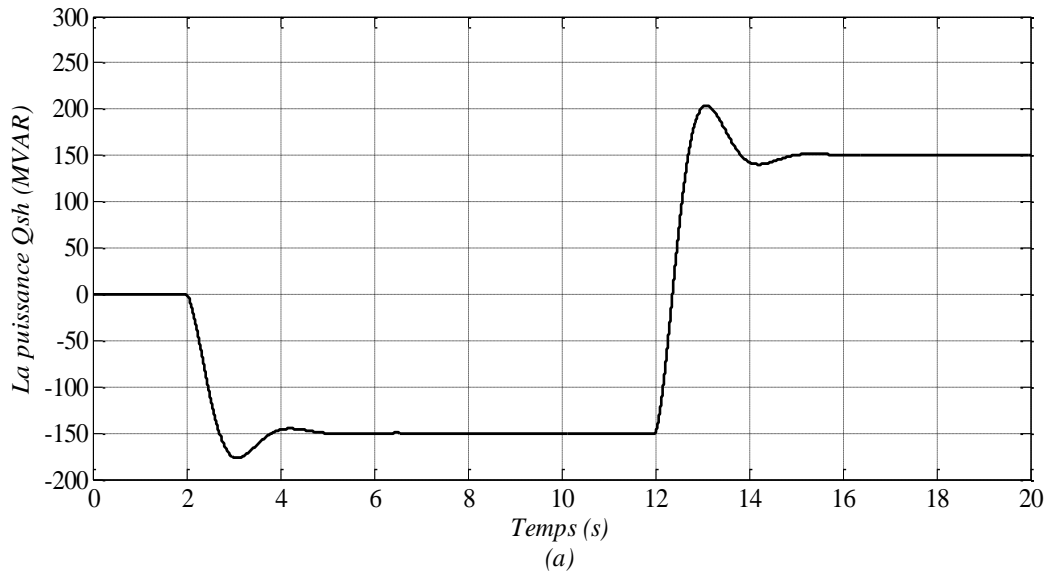
### A- Variation d'échelon de la puissance réactive de 0 à -130 MVR

À 2,0 sec, un changement brusque de 0,0 à -150 MVAR dans la référence de la puissance réactive ( $Q_{shref}$ ) est appliqué (module VSC consomme de la puissance réactive). Ce changement provoque la variable  $u_2$  qui contrôle  $I_{shq}$  à se changer rapidement, qui va entraîner à son tour la variable  $V_{shQ}$  à être négative, comme le montre la Figure 2.9, ainsi  $\theta_{sh}$  devenu négatif par rapport à la référence de tension de la source constante. Cependant, L'angle de phase négatif  $\theta_{sh}$  provoque le VSC à délivrer une quantité de sa puissance active provoquant ainsi la tension continue du condensateur ( $V_{dc}$ ) de se baisser (Figure 2.9-e) à 2,0 sec environ. Cette baisse de la tension continue est détectée par le contrôleur de la tension continue  $V_{dc}$  et provoque la variable  $V_{shD}$  d'augmenter, comme indiqué dans la Figure 2.9-c. Cela permet au VSC à consommer plus de puissance active ( $P_{sh}$ ) pour maintenir la tension du condensateur à 60 kV. La puissance active ( $P_{sh}$ ) consommée est d'environ 9 MW.

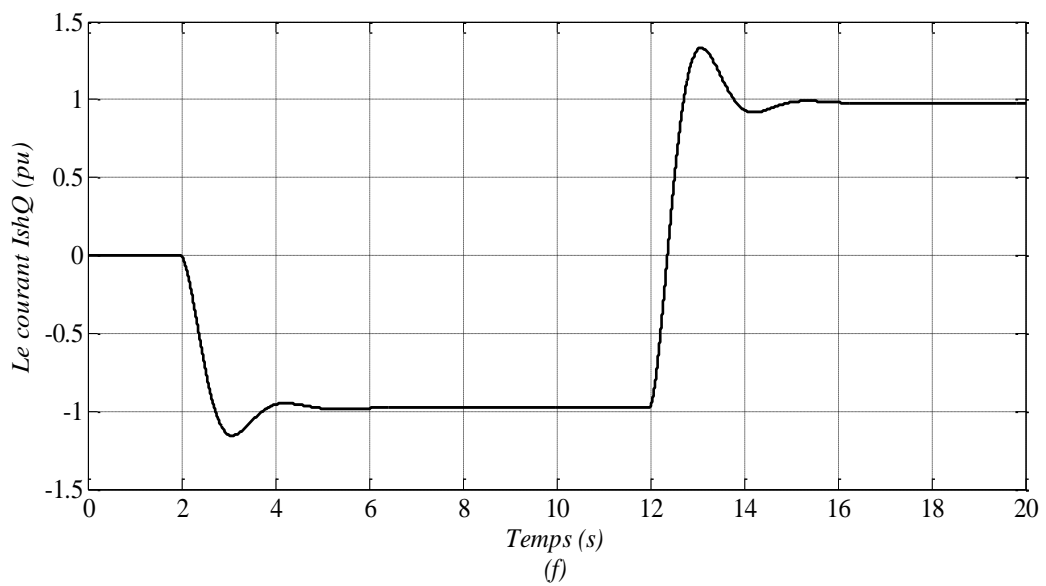
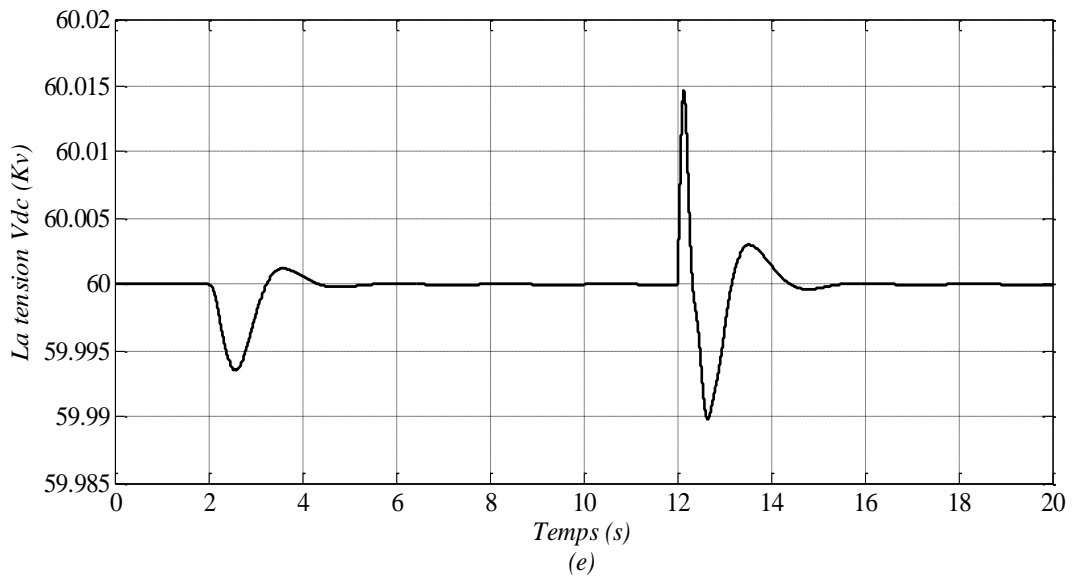
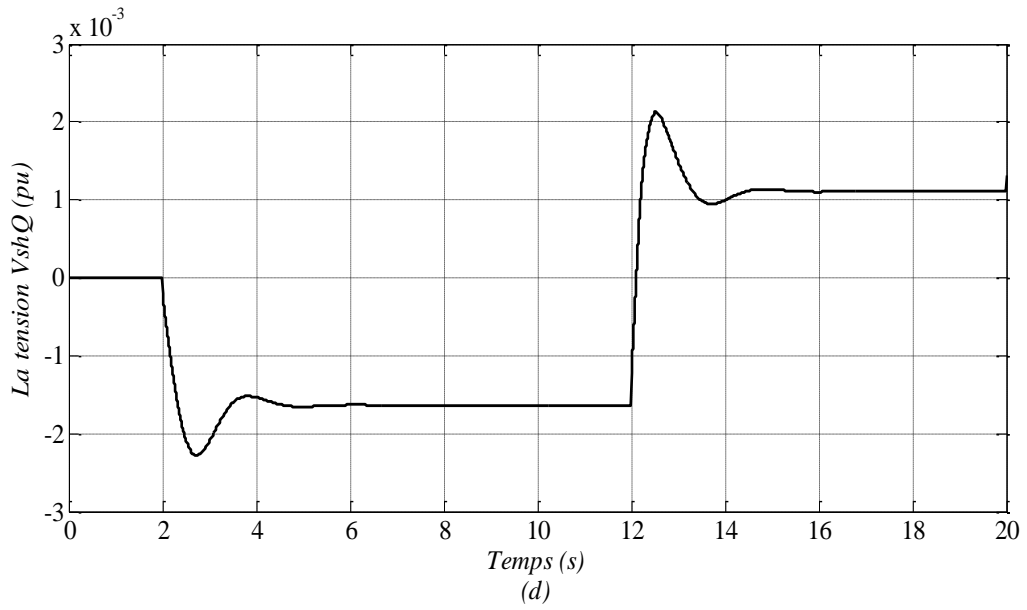
La Figure 2.9-a montre la réponse de la puissance réactive ( $Q_{sh}$ ) vis-à-vis d'un changement dans la référence de la puissance réactive ( $Q_{shref}$ ) de 0 à -150 MVAR. Il est clair d'après cette figure que le VSC offre un temps de réponse très court de l'ordre de quelques cycles.

### B- Variation en échelon de la puissance réactive de -150 à 150 MVAR

À 12 sec, un changement de forme échelon de -150 à +150 MVAR dans la référence de la puissance réactive ( $Q_{shref}$ ) provoque la variable auxiliaire  $u_2$  qui contrôle  $I_{shQ}$  de se changer rapidement et devenir positive provoquant  $V_{shQ}$  à devenir positive comme l'indique la Figure.2.9-d à 12 secs. Il est clair que les courants  $I_{shQ}$  (figure 2.9-f) et  $I_{shD}$  (figure 2.9-g), sont les images des puissances  $Q_{sh}$  (figure 2.9-a) et  $P_{sh}$  (figure 2.9-b), respectivement. La variation de la tension continue  $V_{dc}$  du condensateur de liaison est représentée par la figure 2.9-e.







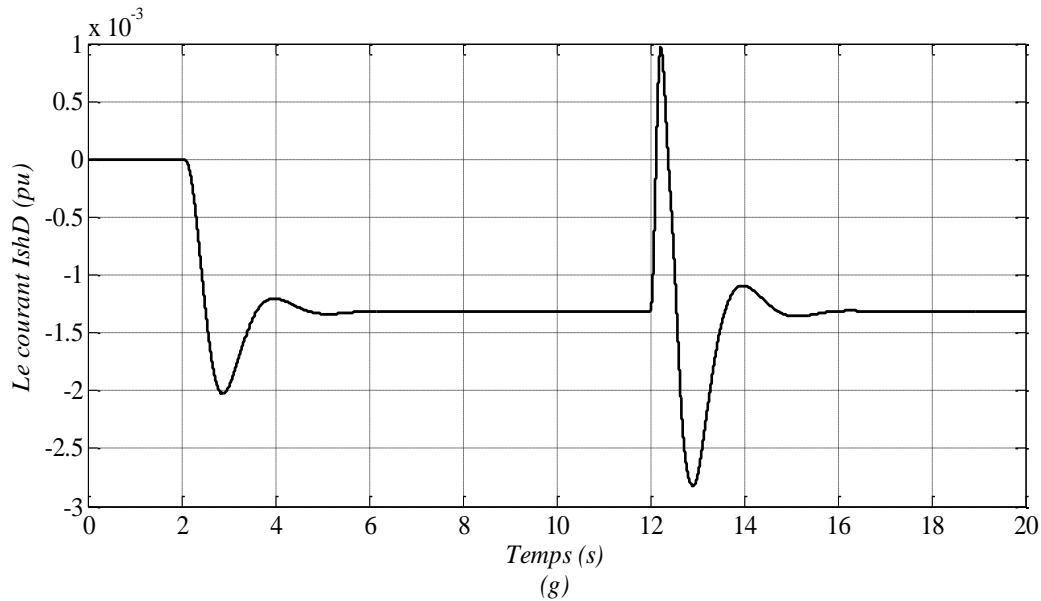


Fig. 2. 9 Performances du module SVC.

### 2.6.3 Modélisation et conception du système de contrôle de l'onduleur série

L'onduleur série d'un UPFC a la capacité de contrôler le flux des puissances active et réactive dans une ligne de transmission. Dans cette section, un régulateur PI sera conçu pour le contrôle de flux de puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ). L'analyse effectuée par Padiyar et al [29] et Papic et al [36] néglige le fonctionnement de l'onduleur shunt et la dynamique du condensateur de liaison lors de la conception du contrôleur de l'onduleur série. Dans cette section, le processus de conception pour ce contrôleur prend en considération les contrôleurs de l'onduleur shunt et de la dynamique du condensateur de liaison. L'onduleur shunt contrôle sa puissance réactive ( $Q_{sh}$ ) et la tension continue ( $V_{dc}$ ), alors que l'onduleur série contrôle le flux de la puissance active de la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ). La conception du contrôleur PI pour l'onduleur série est réalisée par l'analyse des valeurs propres. Pour le faire, considérons le système d'alimentation présenté dans la Figure 2.10.

Le système d'alimentation se compose de deux sources de tension  $V_S$  et  $V_R$  reliées par une ligne de transmission. La résistance de la ligne est représentée par  $R_L$  et son inductance par  $L_L$ . L'onduleur shunt est modélisé par une source de tension  $V_{sh}$  connectée à la ligne de transmission par une résistance  $R_{sh}$  et une inductance  $L_{sh}$  représentant la résistance et l'inductance du transformateur shunt. L'onduleur série est modélisée par une source de tension  $V_{se}$  en série avec la ligne de transmission.

Le système d'alimentation indiqué dans la Figure 2.10 peut être représenté par deux ensembles d'équations. Un ensemble pour l'onduleur shunt associé avec le condensateur de

liaison et l'autre ensemble pour l'onduleur série. Les équations de l'onduleur shunt associé avec le condensateur dans la représentation d'axe D-Q sont

$$\begin{aligned}
 \frac{dI_{shD}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shD}}{L_{sh}} + \omega\omega_0 I_{shQ} + \frac{\omega_0}{L_{sh}}(V_{shD} - V) \\
 \frac{dI_{shQ}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shQ}}{L_{sh}} + \omega\omega_0 I_{shD} + \frac{\omega_0}{L_{sh}}(V_{shQ}) \\
 \frac{dV_{dc}}{dt} &= -\omega_0 C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{V_{shD}I_{shD} + V_{shQ}I_{shQ} + V_{seD}I_{seD} + V_{seQ}I_{seQ}}{V_{dc}} \right) + \frac{V_{dc}}{R_{cap}} \right]
 \end{aligned} \tag{2.59}$$

où  $\omega = 1,0$  et  $\omega_0 = 314$  rad / sec.

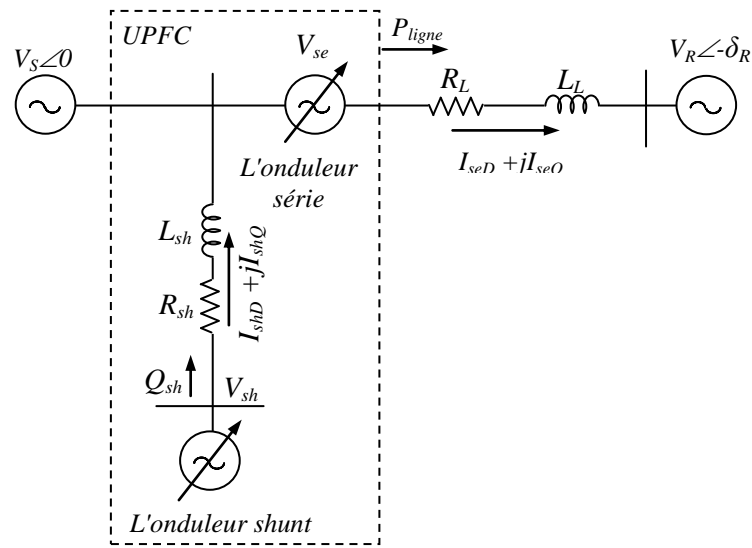


Fig. 2. 10 Réseau électrique pour la conception du contrôleur de l'onduleur série

Pour parvenir à un découplage des courants d'axe D-Q, les variables de contrôle  $V_{shD}$  et  $V_{shQ}$  dans l'équation 2.59 sont modifiées comme est indiqué dans l'équation 2.26 et reproduites ici par l'équation 2.60.

$$\begin{aligned}
 V_{shD} &= V + \frac{L_{sh}}{\omega_0}(u_1 - \omega\omega_0 I_{shQ}) \\
 V_{shQ} &= \frac{L_{sh}}{\omega_0}(u_2 + \omega\omega_0 I_{shD})
 \end{aligned} \tag{2.60}$$

où  $u_1$  et  $u_2$  sont les variables de commande auxiliaires. En combinant l'équation 2.59 et 2.60, ainsi nous obtenons l'équation 2.61.

$$\begin{aligned}
 \frac{dI_{shD}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shD}}{L_{sh}} + u_1 \\
 \frac{dI_{shQ}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 I_{shQ}}{L_{sh}} + u_2 \\
 \frac{dV_{dc}}{dt} &= -\frac{3\omega_0 C}{2} \left( \frac{u_1 I_{shD} \left( \frac{L_{sh}}{\omega_0} \right) + |V_S| I_{shD} + u_2 I_{shQ} \left( \frac{L_{sh}}{\omega_0} \right) + V_{seD} I_{seD} + V_{seQ} I_{seQ}}{V_{dc}} \right) - \omega_0 C \frac{V_{dc}}{R_{cap}}
 \end{aligned} \tag{2.61}$$

Les équations de l'onduleur série sont aussi donnée par l'équation 2.62.

$$\begin{aligned}
 \frac{dI_{seD}}{dt} &= -\frac{R_L\omega_0 I_{seD}}{L_L} + \omega\omega_0 I_{seQ} + \frac{\omega_0}{L_L} (V_S + V_{seD} - V_{RD}) \\
 \frac{dI_{seQ}}{dt} &= -\frac{R_L\omega_0 I_{seQ}}{L_L} + \omega\omega_0 I_{seD} + \frac{\omega_0}{L_L} (V_{seQ} - V_{RQ})
 \end{aligned} \tag{2.62}$$

La linéarisation des équations 2.61 et 2.62 donne l'équation 2.63

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Delta I_{shD}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 \Delta I_{shD}}{L_{sh}} + \Delta u_1 \\
 \frac{d\Delta I_{shQ}}{dt} &= -\frac{R_{sh}\omega_0 \Delta I_{shQ}}{L_{sh}} + \Delta u_2 \\
 \frac{d\Delta V_{dc}}{dt} &= -\frac{3\omega_0 C}{2} \left[ \frac{\left[ (a_1 u_{10} \Delta I_{shD} + a_1 I_{shD0} \Delta u_1) + |V_S| \Delta I_{shD} + (a_1 u_{20} \Delta I_{shQ} + a_1 I_{shQ0} \Delta u_2) \right]}{V_{dc0}} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{3\omega_0 C}{2} \frac{\left[ a_1 u_{10} I_{shD0} + |V_S| I_{shD0} + a_1 u_{20} I_{shQ0} + V_{seD0} I_{seD0} + V_{seQ0} I_{seQ0} \right] \Delta V_{dc}}{V_{dc0}^2} \right] \\
 &\quad - \omega_0 C \frac{\Delta V_{dc}}{R_{cap}} \\
 \frac{d\Delta I_{seD}}{dt} &= -\frac{R_L\omega_0 \Delta I_{seD}}{L_L} + \omega\omega_0 \Delta I_{seQ} + \omega_0 \frac{\Delta V_{seD}}{L_L} \\
 \frac{d\Delta I_{seQ}}{dt} &= -\frac{R_L\omega_0 \Delta I_{seQ}}{L_L} - \omega\omega_0 \Delta I_{seD} + \omega_0 \frac{\Delta V_{seQ}}{L_L}
 \end{aligned} \tag{2.63}$$

où  $a_1 = L_{sh}/\omega_0$

L'équation 2.63 peut être mise dans un format d'entrées-sorties standard comme donner par l'équation 2.64.

$$\dot{X} = AX + BU \tag{2.64}$$

où,  $X = [\Delta I_{shD}, \Delta I_{shQ}, \Delta V_{dc}, \Delta I_{seD}, \Delta I_{seQ}]$

$$U = [\Delta I_{shDref}, \Delta I_{shQref}, \Delta V_{seQ}]$$

$$\Delta V_{sed} = 0, \quad V_{sed0} = 0$$

Les variables de sortie sont

$$Y = [\Delta I_{shD}, \Delta I_{shQ}, \Delta P_{ligne}]$$

L'expression de la puissance active dans la ligne de transmission est donnée par l'équation 2.65

$$P_{ligne} = (|V_s| + V_{seD})I_{seD} + V_{seQ}I_{seQ} \quad (2.65)$$

En linéarisant l'équation 2.65 nous obtenons l'équation 2.66

$$\Delta P_{ligne} = (|V_s| + V_{seD0})\Delta I_{seD} + I_{seD0}\Delta V_{seD} + V_{seQ0}\Delta I_{seQ} + I_{seQ0}\Delta V_{seQ} \quad (2.66)$$

La matrice de sortie  $Y$  peut être donnée sous la forme suivante

$$Y = CX + DU \quad (2.67)$$

Le contrôleur PI de l'onduleur série contrôlant le flux de la puissance active dans la ligne de transmission est illustré par la Figure 2.11

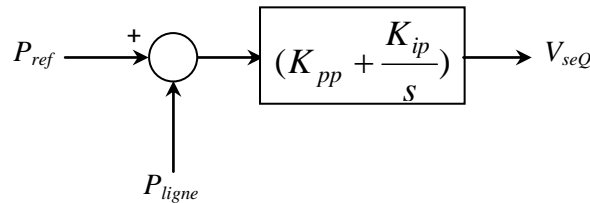


Fig. 2. 11 Contrôleur de la puissance active de l'onduleur série

En regroupant les contrôleurs PI de la boucle interne de l'onduleur shunt avec le contrôleur PI du flux de la puissance active de l'onduleur série, l'équation d'état peut être modifiée (l'équation 2.68)

$$\dot{X}_1 = A_1 X_1 + B_1 U_1 \quad (2.68)$$

Où,

$$X_1 = [\Delta I_{shD}, \Delta I_{shQ}, \Delta V_{dc}, \Delta I_{seD}, \Delta I_{seQ}, \Delta x_{c1}, \Delta x_{c2}, \Delta x_{c3}]$$

$x_{c1}$  et  $x_{c2}$  sont les variables d'état associées aux contrôleurs des courants d'axe D-Q,  $x_{c3}$  est la variable d'état associée au contrôleur PI de l'onduleur série. La matrice d'état est

$$A_1 = \begin{bmatrix} A - BK_{pt}C & -BK_{it} \\ MC & -DK_{it} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} BK_{pt} \\ -M \end{bmatrix}$$

$$K_{pt} = (I + K_p D)^{-1} K_p, \quad K_{it} = (I + K_p D)^{-1} K_i, \quad M = (I + DK_p)^{-1}$$

$$K_p = \begin{bmatrix} 5.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.2 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.2 \end{bmatrix}, \quad K_i = \begin{bmatrix} 21.367 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 5.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 40.0 \end{bmatrix}$$

Les gains des contrôleurs PI des courants de la boucle interne de l'onduleur shunt d'axes D-Q sont  $K_{p1}=5.0$ ,  $K_{i1}=21.367$  et  $K_{p2}=0.2$ ,  $K_{i2}=5.0$  respectivement. Les gains du contrôleur PI de flux de puissance active de l'onduleur série ont été sélectionnés à  $K_{pp}=0.2$  et  $K_{ip}=40.0$  pour assurer un suivi rapide aux changements de la puissance active de référence dans la ligne de transmission. Pour vérifier la stabilité du système avec ces gains, il est nécessaire d'évaluer la matrice A, qui est une fonction des différents paramètres et des conditions initiales de fonctionnement. Des simulations ont été menées pour déterminer les conditions initiales de l'exploitation. À cet effet, une base de tension de 345 kV et une base de puissance de 160 MVA ont été choisies pour obtenir ces conditions en p.u. Ils sont donnés ci-dessous.

$$R_{sh} = 0.0014, L_{sh} = 0.2, C' = 0.0324, I_{shD0} = -0.11, I_{shQ0} = 0.1875, u_{10} = -0.02, u_{20} = 0.044, \\ \omega_0 = 314, V_{dc0} = 2.22, V_{seQ0} = 0.144, I_{seQ0} = 0.198, I_{seD0} = 2.5, R_L = 0.01, L_L = 0.15$$

En intégrant les valeurs des variables indiquées ci-dessus avec les gains des contrôleurs PI dans la matrice  $A_1$ , les valeurs propres obtenues sont données ci-dessous

$$\begin{aligned} & -0.3 \\ & -3.86 \pm j2.54 \\ & -1.46 \pm j1.69 \\ & -8.09 \pm j583.97 \\ & -112.08 \end{aligned}$$

En introduisant les gains de  $K_{p3}=-1.0$  et  $K_{i3}=-2.0$  du contrôleur PI de la tension continue, et formant la matrice d'état, les valeurs propres sont

$-1.18 \pm j6.48$   
 $-2.83 \pm j0.32$   
 $-1.46 \pm j1.69$   
 $-8.09 \pm j583.97$   
 $-112.08$

Comme il ressort de la liste des valeurs propres, les gains des régulateurs PI utilisés pour les deux onduleurs shunt et série prévoient un fonctionnement stable puisque toutes les valeurs propres sont à parties réelles négatives. Cependant, la valeur propre  $(-8,09 + j 583,97)$  détermine une réponse oscillatoire par rapport aux changements des entrées de référence, ce qui définit un facteur d'amortissement, qui lui est associé, de 0.013. Ce problème est dû en fait de l'utilisation d'un gain élevé pour le contrôleur PI de l'onduleur série. Pour contourner ce problème, Un contrôleur flou sera conçu et décrit dans le chapitre 4.

## 2.7 Performance du système de contrôle d'un UPFC avec onduleur série contrôlant le flux de la puissance active dans une ligne de transmission avec un régulateur PI

### 2.7.1 Description du réseau électrique étudié:

Un système électrique à deux machines avec un UPFC situé au centre d'une ligne de 200 km 345 kV, illustré à la Figure 2.12, a été considéré pour étudier les performances de l'UPFC vis-à-vis les changements en échelon de la puissance active de référence.

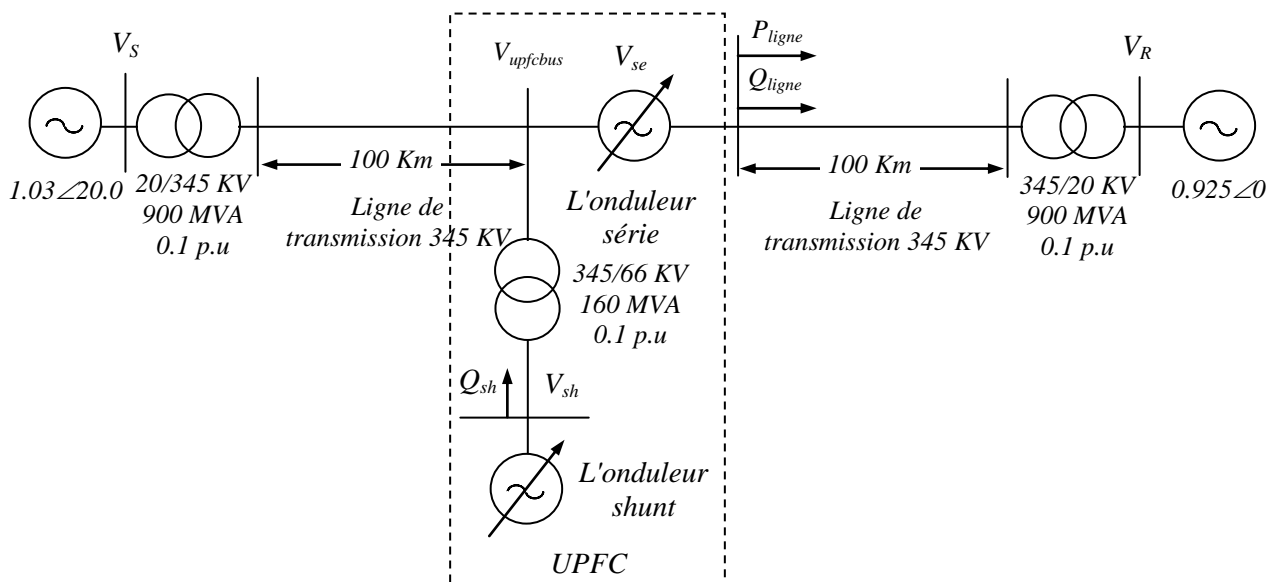


Fig. 2. 12 Réseau à deux machines avec un UPFC

Les deux machines ont été modélisées comme des sources de tension constante. L'onduleur shunt contrôle la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ) à 1,0 pu et la tension continue ( $V_{dc}$ ) à 60 kV. L'onduleur série contrôle le flux de puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) en injectant une tension d'amplitude réglable en quadrature ( $V_{seQ}$ ) avec la tension  $V_{upfcbus}$ . Le flux

initial de la puissance dans la ligne de transmission est de 450 MW. La tension de la source ( $V_S$ ) est fixée à 1.03 pu et la tension du récepteur ( $V_R$ ) est fixée à 0.925 pu. La différence de l'angle de phase entre les deux machines est de 20 degrés.

L'onduleur shunt est un module VSC connecté à la ligne 345 kV à travers un transformateur 160 MVA 66/345 kV. Le fonctionnement du module VSC est expliqué dans la section 2.6.2. L'onduleur shunt est exploité en utilisant le système de contrôle découplé dont la conception est donnée à la section 2.6.2.1. Dans cette conception, le système de contrôle de la boucle externe de l'axe Q désigné par le régulateur PI ( $K_{p4}$ ,  $K_{i4}$ ) n'a pas été conçu, c'est parce que la conception de ce système a été réalisée sur un module connecté à une source de tension constante. Le système de contrôle de la boucle externe de l'axe Q a été incluí ici tout en menant des études de performance sur l'UPFC. Les gains du régulateur PI ont été choisis de sorte que  $K_{p4} = -1.0$  et  $K_{i4} = -133.0$  afin de fournir un suivi rapide de la tension de référence du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ). L'onduleur série contrôle le flux de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) en injectant une tension en quadrature ( $V_{seQ}$ ) avec la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ). La composante directe ( $V_{seD}$ ) de la tension injectée série n'a été négligée que pour étudier l'effet de l'onduleur série contrôlé par un PI sur le contrôle de flux de la puissance active.

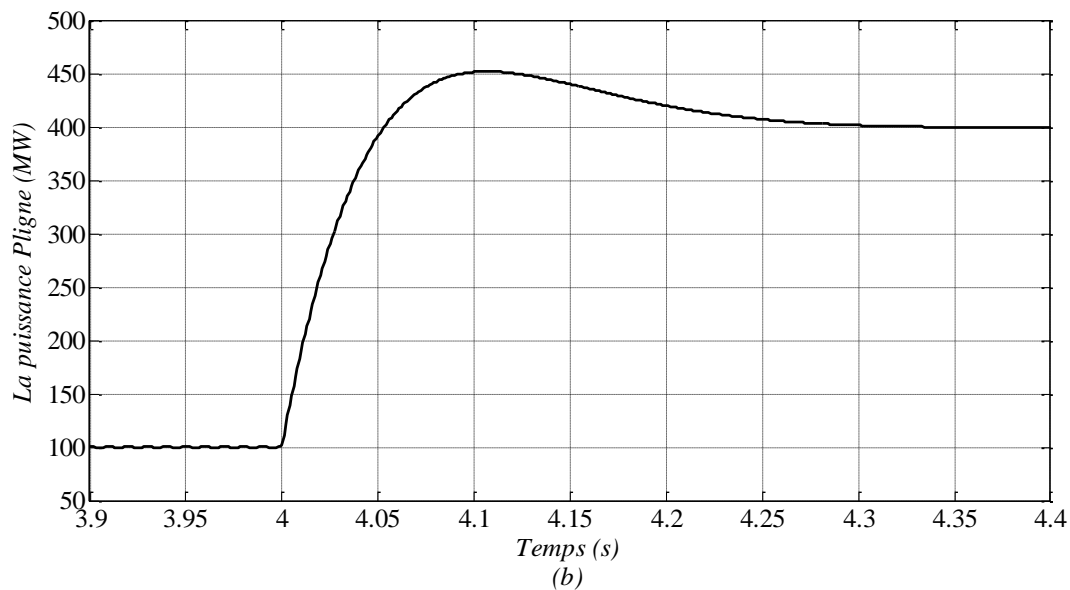
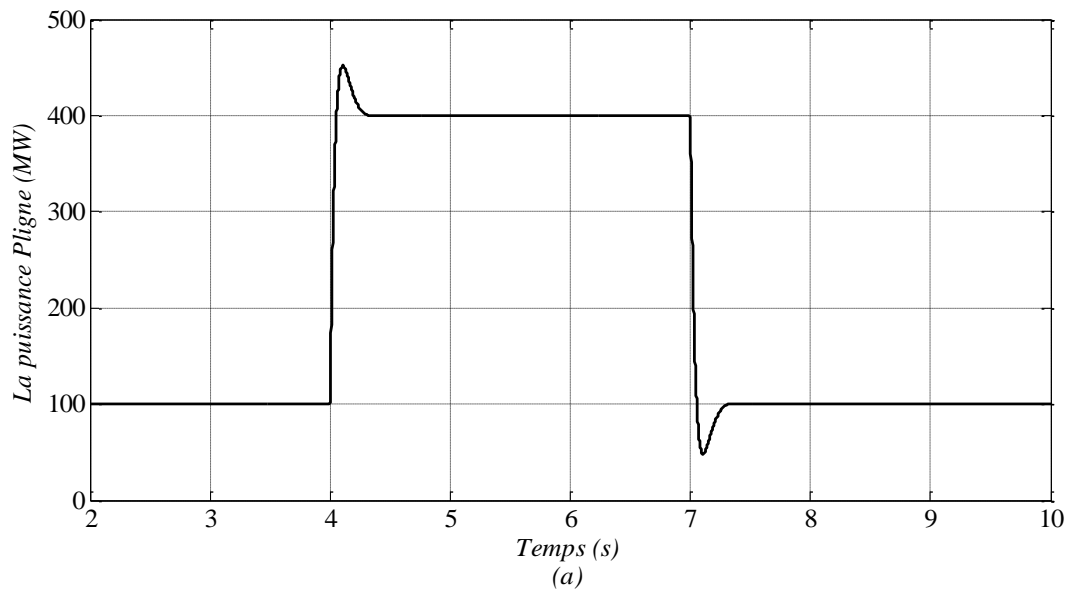
### 2.7.2 Réponse à un échelon d'entrée

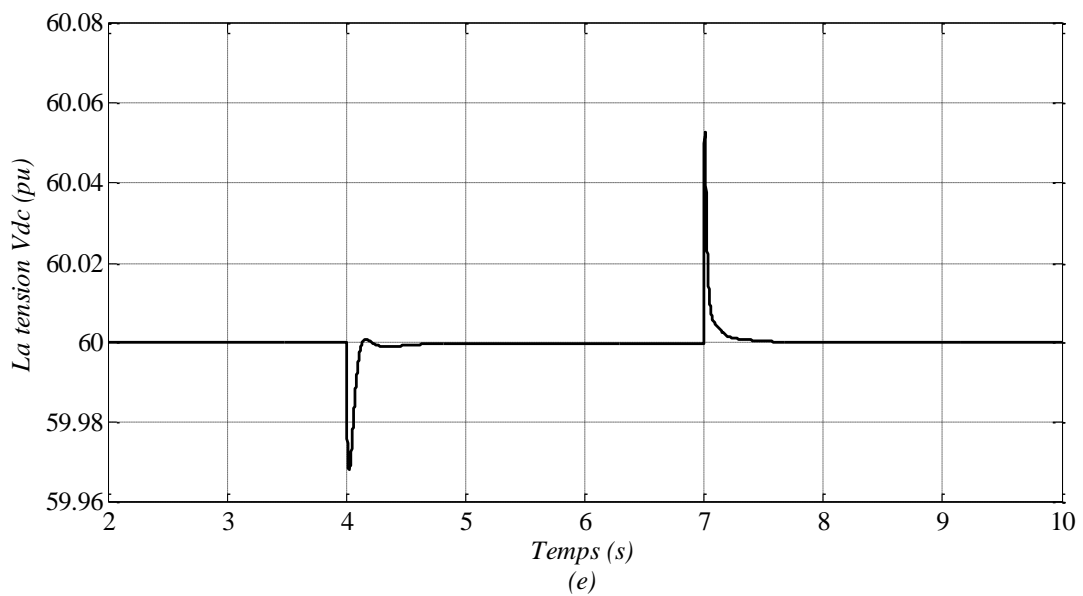
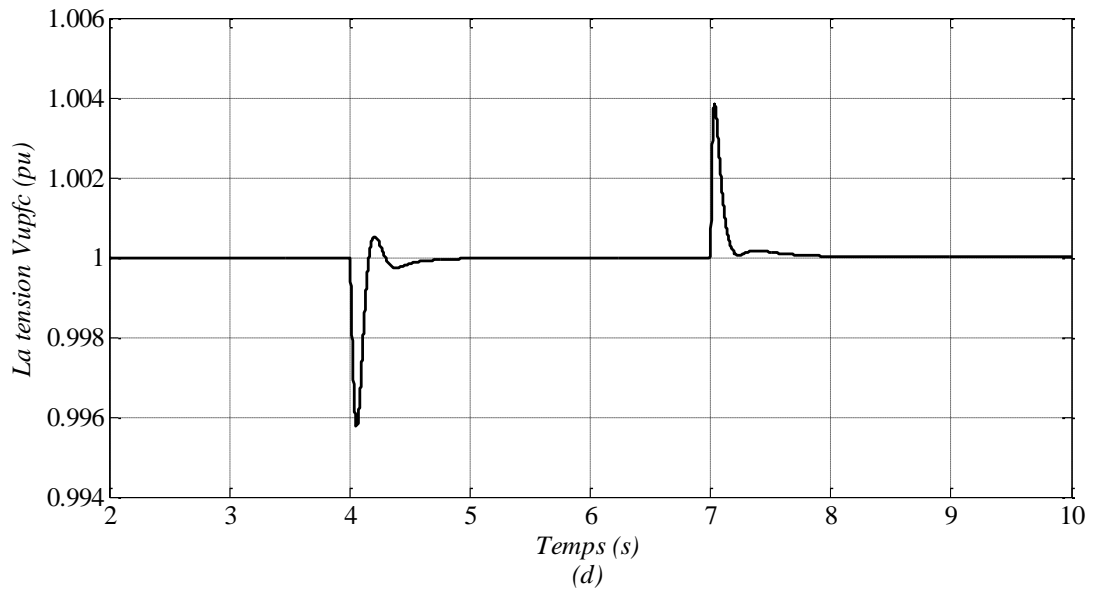
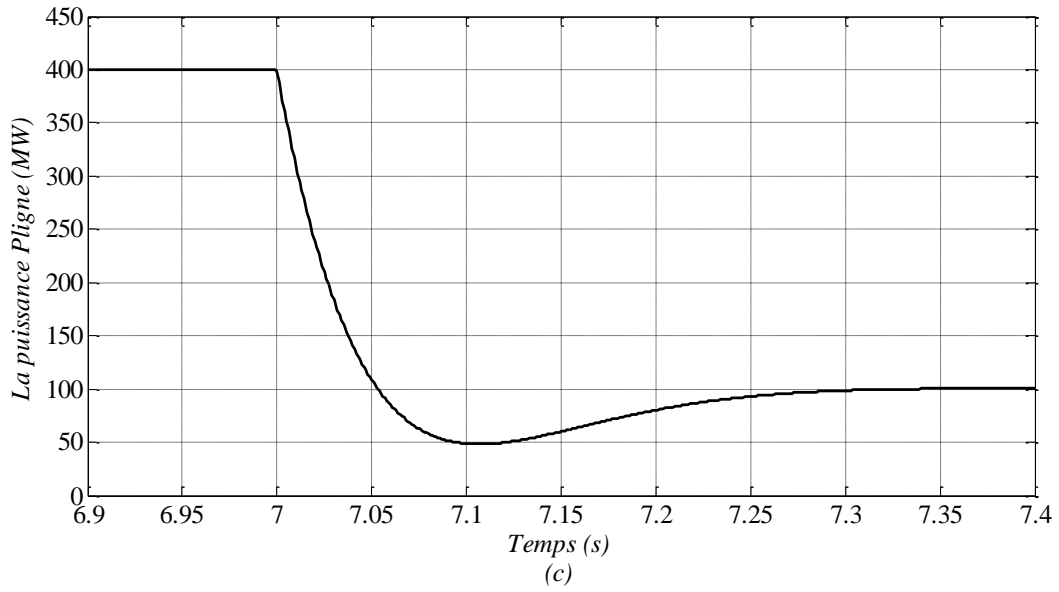
L'analyse effectuée dans la section 2.6.3 a montré qu'un gain élevé du régulateur PI pour l'onduleur série fournit un faible amortissement des oscillations du flux de puissance active. Dans cette section, l'effet combiné des deux systèmes de contrôle, à savoir, le système de contrôle de l'onduleur shunt et le système de contrôle de l'onduleur série sur le niveau d'amortissement des oscillations de puissance active de la ligne de transmission sera étudié. Le système électrique indiqué dans la Figure 2.12 a été considéré dans cette étude. Les gains du régulateur PI de l'onduleur série présenté dans le schéma bloc de la Figure 2.11 ont été fixés à  $K_{pp} = 0,2$  et  $K_{ip} = 40,0$ .

La Figure 2.13 présente la réponse du système à un changement en échelon dans la puissance active de référence ( $P_{ref}$ ) avec un régulateur PI de l'onduleur série à gain élevé. En effet, un changement brusque dans le flux de la puissance active de référence ( $P_{ref}$ ) a été réalisé à 4s et 6s. À 4s, la puissance  $P_{ref}$  a été changée de 100 MW à 400 MW. La Figure 2.13-a illustre les variations de flux de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ). De la Figure 2.13-b, on observe que la puissance  $P_{ligne}$  présente un dépassement important (presque 50 MW), ce qui signifie un amortissement faible. À 7s, la référence a été changée de 400 MW à 100 MW. La version zoomée de la Figure 2.13-a à environ 7s est présentée dans la Figure 2.13-c. Le flux de la puissance  $P_{ligne}$  présente lui aussi un dépassement important. La Figure 2.13-d présente le



profil de la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ). L'onduleur shunt contrôle la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ) à 1,0 p.u. À 4s et 7s, le changement brusque dans la référence de puissance active ( $P_{ref}$ ) a présenté peu de variation dans la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ) ainsi l'onduleur shunt a très efficacement contrôlé la tension continue en variant sa production de puissance réactive. La Figure 2.13-e présente les variations de la tension continue ( $V_{dc}$ ) vis-à-vis les changements brusques de la puissance de référence. Les pics observés dans la courbe de la tension ( $V_{dc}$ ) à 4s et 7s sont dûs aux changements brusques de la puissance active demandée par l'onduleur série ( $P_{se}$ ) à cause de l'interaction entre la tension injectée de l'onduleur série ( $V_{se}$ ) et le courant de la ligne de transmission ( $I_{se}$ ). La puissance active de l'onduleur série ( $P_{se}$ ) est rapidement transmise au système de contrôle de l'onduleur shunt et la tension continue est rapidement régulée à 60 kV par l'onduleur shunt.





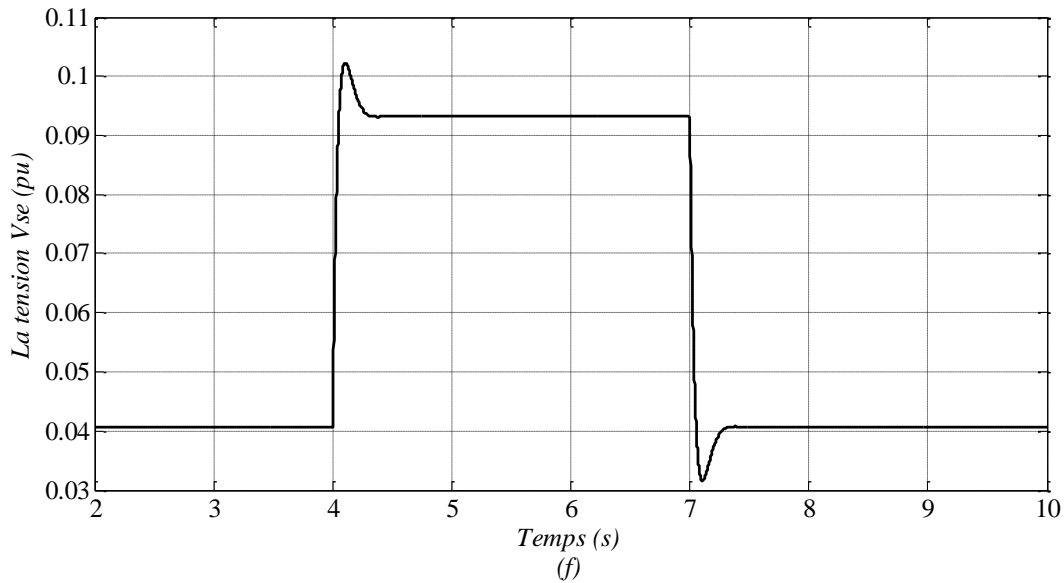


Fig. 2. 13 Réponse du système électrique aux changements brusques dans la puissance active de référence de l'UPFC.

Cette simulation a validé l'analyse par les valeurs propres menée dans la section 2.6.3 où il a été démontré que l'utilisation d'un régulateur PI à gain élevé conduit à un mode à faible amortissement. Des contrôleurs supplémentaires linéaires ont été proposés pour résoudre le problème du faible amortissement du réseau [29], mais la réponse du système peut se dégrader à d'autres conditions de fonctionnement, même avec des contrôleurs supplémentaires linéaires.

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre a été décrit la construction et l'exploitation d'un module VSC en vue de son utilisation comme un onduleur shunt ou série. L'onduleur shunt joue un rôle important dans le fonctionnement d'un UPFC. Il maintient un niveau requis de la tension continue du condensateur de liaison pour le fonctionnement des onduleurs shunt et série. Il fournit également la puissance active nécessaire à l'onduleur série. Il peut également fournir de la puissance réactive nécessaire au bus auquel il est connecté.

Les bases du système de contrôle découplé pour la régulation des puissances active et réactive de manière indépendante ont été décrites dans ce chapitre. Le système de contrôle découplé a été conçu sur la base des techniques de contrôle linéaire qui comprend la dynamique de condensateur.

Une procédure détaillée a été présentée pour identifier les gains des régulateurs PI. Le système de contrôle découplé est constitué de deux boucles. Une boucle interne des courants d'axes D-Q et une boucle externe qui définit la référence de la boucle interne.

La procédure de conception a été basée sur la conception de la boucle interne en premier lieu ensuite la boucle externe. Les informations concernant les gains des régulateurs PI de la boucle interne sont utilisées lors de la conception du régulateur PI de la boucle externe.

Les performances du système de contrôle découplé conçu ont été testées en utilisant le logiciel *MATLAB/Simulink*<sup>®</sup>. Des tests de la réponse indicielle ont été menés pour non seulement montrer la validité du système de contrôle, mais aussi de mettre en évidence la capacité du système pour une réponse rapide à la puissance réactive demandée tout en régulant la tension continue du condensateur de liaison.

Ce chapitre a fourni également le contexte de la construction, l'exploitation et le contrôle d'un onduleur série. La tension de sortie de l'onduleur série a été scindée en deux parties. Une tension en quadrature ( $V_{seQ}$ ) et une tension directe ( $V_{seD}$ ) en phase avec la tension du bus de l'UPFC ( $V_{upfcbus}$ ), ce qui leur permet un contrôle indépendant.

L'analyse des valeurs propres a montré que l'utilisation d'un gain élevé pour le contrôleur PI dans la boucle de contrôle de l'onduleur série dans le but de contrôler le flux de la puissance active dans une ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) assure un amortissement faible. L'analyse prend en considération le fonctionnement de l'onduleur shunt, la dynamique du condensateur de liaison et la dynamique de la ligne de transmission. Un contrôleur flou pour surmonter le problème du faible amortissement associé à gain élevé du contrôleur PI sera conçu et décrit dans le chapitre 4.

***Chapitre III: Amélioration de la stabilité  
d'un réseau par UPFC***

### 3.1 Introduction

Du fait que l'UPFC est un contrôleur multi-variable, il devient nécessaire d'évaluer son impact sur la stabilité du réseau. L'analyse du régime permanent du système avec UPFC décrit dans le chapitre-2 constitue le fondement de base pour la réalisation des études de stabilité dynamique avec UPFC.

Les études de stabilité dynamique comprennent le domaine fréquentiel (stabilité aux petites perturbations) et l'analyse temporelle qui comprend des études de défauts triphasés (stabilité transitoire). L'analyse du domaine fréquentiel nécessite l'élaboration d'une matrice d'état qui comprend toutes les équations différentielles algébriques associés au système électrique.

Les équations différentielles/algébriques du système électrique incluent celles du générateur, l'excitation, les stabilisateurs de puissance (PSS) et le réseau électrique. Dans ce contexte, il est important d'inclure la dynamique du condensateur de la liaison continue de l'UPFC tout en analysant la stabilité du réseau. En fait, le condensateur de liaison forme un lien commun entre l'onduleur série et l'onduleur shunt, donc pour modéliser l'interaction entre le fonctionnement de l'onduleur série et l'onduleur shunt, il devient nécessaire d'inclure la dynamique du condensateur.

Afin d'effectuer une analyse du domaine fréquentiel et temporel, un modèle dynamique approprié pour UPFC devrait comprendre la dynamique du condensateur de liaison. Ce chapitre fournit une procédure aboutissant à l'élaboration de la matrice d'état qui comprend la dynamique du condensateur de liaison de l'UPFC pour analyser la stabilité aux petites perturbations.

Donc le but de ce chapitre est de développer l'ensemble des équations nécessaires qui comprend la dynamique de l'UPFC pour effectuer des analyses aux petites perturbations et des simulations numériques dans le domaine temporel pour montrer l'amélioration de la stabilité du système électrique.

En outre, les simulations dans le domaine temporel fournit des informations précieuses pour la conception d'un contrôleur flou pour l'UPFC.

### 3.2 Analyse de stabilité aux petites perturbations

#### 3.2.1 Formulation de la matrice d'état

L'analyse de la stabilité aux petites perturbations fournit des informations par rapport à l'amortissement/la fréquence associée aux appareils présents dans le système de transmission. Par exemple, la gamme de la fréquence dans laquelle se produisent des oscillations

électromécaniques pour les générateurs dans un système infini mono machine est compris entre 0,7 et 2 Hz, dans le cas d'un système électrique multi machine impliquant plusieurs zones, la plage sur laquelle les oscillations inter zones entre les groupes de générateurs se situent entre 0,2 et 0,7 Hz.

L'analyse de la stabilité aux petites perturbations avec un UPFC dépend de la modélisation de l'UPFC. L'analyse de la stabilité sans modéliser la dynamique du condensateur de liaison du bus continu pourrait conduire à des résultats inexacts [25]. C'est parce que toute interaction entre la tension série injectée et le courant de la ligne de transmission conduit à échanger de la puissance active entre le convertisseur série de l'UPFC et la ligne de transmission. L'échange de la puissance active conduit à augmenter/diminuer la tension  $V_{dc}$  du condensateur de liaison. Ainsi, en négligeant la dynamique du condensateur de liaison du bus continu pourrait conduire à des résultats inexacts. La dynamique du condensateur de liaison a été envisagée, mais les variables n'ont pas été toutes utilisées pour les études de la stabilité [48,50].

Des travaux de recherche indépendants ont été réalisés par [35] et [55] pour modéliser l'interaction entre l'onduleur série et shunt en incluant la dynamique du condensateur de liaison dans l'analyse de stabilité aux petites perturbations. Bien que la dynamique du condensateur ait été incluse dans l'analyse de la stabilité, la référence [26] a négligé l'effet combiné des stabilisateurs de puissance et l'UPFC sur les performances du système électrique. L'effet du fonctionnement combiné des PSS et UPFC avec la dynamique du condensateur incluse seront étudiés à l'aide de l'analyse de la stabilité aux petites perturbations. En outre, il faut prendre au sérieux le choix des variables d'entrée pour mener ces études. Dans la référence [35], l'indice de modulation et les angles de phase des onduleurs shunt et série ont été envisagées pour la réalisation des études de stabilité. Au contraire, la sortie des systèmes de contrôle pour les onduleurs shunt et série sont les tensions de référence qui doivent être générés par les onduleurs shunt et série. Sur la base de ces tensions de référence, l'indice de modulation correspondant est calculé. Ainsi, il serait approprié d'utiliser les tensions et leurs angles de phase comme variables d'entrée pour évaluer correctement l'impact de l'UPFC sur la stabilité du système électrique.

La stabilité aux petites perturbations implique la formulation d'une équation d'état linéaire qui prend en considération les dynamiques des éléments du système électrique, comme : les générateurs, les excitations et les stabilisateurs de puissance. En présence d'un UPFC, les équations régissant son fonctionnement devraient être incluses dans l'équation d'état linéaire et l'ensemble du système devrait ensuite être analysée. Dans ce contexte, il serait nécessaire de développer un modèle dynamique pour l'UPFC et l'inclure dans les modèles de générateur, excitation et PSS pour former l'équation d'état et analyser la stabilité aux petites perturbations.

### 3.3 Évaluation de la stabilité aux petites perturbations

#### 3.3.1 1<sup>er</sup> Cas: Bus d'alimentation infini mono machine

##### a- Amélioration du mode d'amortissement de l'angle rotorique

L'annexe-1 présente le détail de la formulation de la matrice d'état pour l'étude de la stabilité d'un système électrique aux petites perturbations. Dans cette section, la procédure pour la formulation de la matrice d'état, comme expliquée dans l'Annexe-1 sera appliquée à un système d'alimentation formé d'un bus infini mono machine (BIMM). L'amélioration du mode d'amortissement de l'angle rotorique dans le cas d'un BIMM sera présentée et basée sur l'analyse des valeurs propres. La Figure 3.1 montre un bus infini mono machine d'un système d'alimentation. Le générateur est évalué à 900MVA et il est relié à un bus infini grâce à un circuit à double ligne de 230 kV et un transformateur élévateur. La longueur totale de la ligne est de 220 km. L'onduleur série de l'UPFC est connecté entre le bus-3 et le bus-4. L'onduleur shunt est connecté entre le bus-3 et le bus-5 (non représenté sur la Figure 3.1). L'UPFC est utilisé pour contrôler le flux de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) et de fournir l'amortissement des oscillations de puissance.

Aussi la tension de bus côté ligne de transmission ( $V_{ligne}$ ), c. à d. la tension de bus-4, est contrôlée. L'onduleur shunt contrôle la tension continue ( $V_{dc}$ ) du condensateur de liaison et la tension ( $V_{upfcbus}$ ) du bus de l'UPFC (le bus-3 représente le bus de l'UPFC).

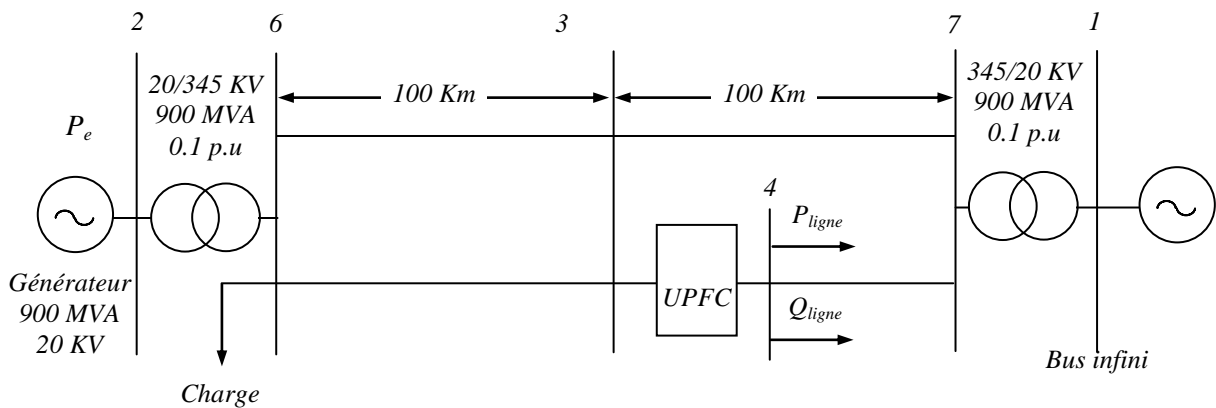


Fig. 3. 1 Réseau électrique composé d'un bus infini mono machine

Le flux de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) est contrôlé par l'injection d'une tension série en quadrature ( $V_{seq}$ ) et la tension de bus-4 ( $V_{ligne}$ ) est contrôlée par l'injection d'une tension série en phase ( $V_{sed}$ ). L'injection des tensions  $V_{sed}$  et  $V_{seq}$  permettent à l'onduleur série ayant une amplitude et un angle de phase appropriés de contrôler  $P_{ligne}$  et  $V_{ligne}$ . Le générateur est équipé d'un stabilisateur de puissance (PSS) et une excitation statique. Les paramètres du générateur, PSS, excitatrice, UPFC et le réseau sont donnés dans l'Annexe-1. Les



matrices A, B, C et D du système d'alimentation mono machine est données dans l'Annexe-1. Les conditions initiales pour l'UPFC sont telles que l'onduleur série injecte une tension série en quadrature ( $V_{seq}$ ) de 0,08 pu. La tension série directe ( $V_{sed}$ ) est de 0,01 pu. Le condensateur est évalué à 1000  $\mu$ F. Le débit de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) ayant l'UPFC est de 269 MW. La charge sur le bus-3 est de (200 +j50 MVA). L'onduleur shunt fournit initialement 150 MVAR. Les valeurs propres sans UPFC sont données dans le tableau 3.1. D'après ce tableau, il est clair que toutes les valeurs propres sont sur la moitié gauche du plan complexe. Le tableau 3.2 présente les valeurs propres du système d'alimentation avec un UPFC. En comparant le tableau 3.1 et le tableau 3.2, le mode d'amortissement de l'angle rotorique est amélioré avec l'inclusion de l'UPFC.

**Tableau 3. 1 Valeurs propres avec PSS (BIMM)**

N°	Valeur propre
1	-50.6872
2	-50.0
3	-31.733
4	-14.85±j16.41
5	-0.4505±j6.1 ( $\xi=0.073$ , l'amortissement de l'angle rotorique)
6	-3.5484
7	-0.10
8	-0.1832

**Tableau 3. 2 Valeurs propres avec PSS et UPFC (BIMM)**

N°	Valeur propre
1	-54.4671
2	-50.0
3	-32.22
4	-15.455±j14.156
5	-0.8963±j6.33 ( $\xi=0.14$ , l'amortissement de l'angle rotorique)
6	-3.4316
7	-1.1316
8	-0.1011
9	-0.1827
10	-0.438
11	-104.28
12	-2.04
13	-0.7007

Avec l'ajout de l'UPFC, le facteur d'amortissement des oscillations de l'angle rotorique a augmenté, passant de 0,0736 (tableau 3.1) à 0,140 (tableau 3.2). La fréquence des oscillations a

augmenté de 0,97 Hz à 1,0 Hz. Cette étude a montré que l'UPFC aide dans l'amélioration de l'amortissement des oscillations de l'angle rotorique du générateur.

*b- Effet de la composante directe ( $V_{sed}$ ) sur le mode d'amortissement de l'angle rotorique:*

Dans cette section, l'effet de la composante ( $V_{sed}$ ) de la tension série sur le mode d'amortissement de l'angle rotorique sera analysé. Les valeurs propres de l'angle rotorique du générateur du système d'alimentation avec UPFC ont été analysées pour les différentes conditions de fonctionnement du flux de puissance réactive dans la ligne de transmission. Le tableau 3.3 montre les valeurs propres pour différentes valeurs de la composante directe de la tension série ( $V_{sed}$ ).

**Tableau 3. 3 Valeurs propres avec UPFC pour différentes valeurs de la tension  $V_{sed}$  (BIMM)**

N°	$V_{seq}$	$V_{sed}$	$P_{ligne}$ (MW)	$Q_{ligne}$ (MVAR)	Valeur propre associée avec le mode rotorique
1	0.03	-0.050	260	0	-0.8952±j6.3302
2	0.03	-0.025	264	15	-0.8958±j6.3315
3	0.03	-0.010	266	25	-0.8960±j6.3322
4	0.03	0.010	270	38	-0.8963±j6.3331
5	0.03	0.025	272	48	-0.8964±j6.3337
6	0.03	0.050	275	65	-0.8964±j6.3346

On voit d'après le tableau 3.3 que la composante directe ( $V_{sed}$ ) a un effet négligeable sur le mode d'amortissement de l'angle rotorique. Cela est dû en fait que la composante ( $V_{sed}$ ) a plus d'effet sur le flux de la puissance réactive dans la ligne de transmission ( $Q_{ligne}$ ) que sur le flux de la puissance active ( $P_{ligne}$ ).

*c- Effet de l'onduleur shunt contrôlant la tension de bus côté ligne de transmission sur le mode d'amortissement de l'angle rotorique:*

La stabilité du réseau électrique avec l'onduleur shunt d'un UPFC contrôlant la tension de bus côté ligne de transmission a été évaluée. Dans cette analyse, la stratégie utilisée pour l'UPFC est que l'onduleur shunt contrôle la tension continue du condensateur de liaison et la tension de bus côté ligne de transmission. Le convertisseur série contrôle la tension du bus UPFC et le flux de la puissance active dans la ligne de transmission. Le tableau 3.4 montre l'effet de l'onduleur shunt contrôlant la tension de bus coté ligne de transmission.

Le tableau 3.4 montre que le contrôle de la tension du bus côté ligne de transmission, par l'onduleur shunt d'un UPFC ne provoque pas d'instabilité. En fait, il améliore la stabilité du système par rapport à un autre système sans UPFC. Ainsi, la stratégie de contrôle de la tension

bus côté ligne de transmission par l'onduleur shunt d'un UPFC est possible et permet un fonctionnement stable.

**Tableau 3. 4 Valeurs propres lorsque l'onduleur shunt contrôle la tension de bus coté ligne de transmission (BIMM)**

N°	$V_{seq}$	$V_{sed}$	$P_{ligne}$ (MW)	$Q_{ligne}$ (MVAR)	Valeur propre associée avec le mode rotorique
1	0.03	-0.050	260	0	-0.8995±j6.34
2	0.03	-0.025	264	15	-0.8986±j6.34
3	0.03	-0.010	266	25	-0.8980±j6.34
4	0.03	0.010	270	38	-0.8974±j6.333
5	0.03	0.025	272	48	-0.8963±j6.33
6	0.03	0.050	275	65	-0.8949±j6.33

### 3.3.2. 2<sup>ème</sup> Cas: système d'alimentation multi-machine

#### a- L'amélioration des oscillations inter zone

Les oscillations de basse fréquence sont inhérentes à un système électrique interconnecté. Ces oscillations peuvent être spontanées ou dues à des pertes soudaines dans les lignes de transmission ou à raison des perturbations de charge. Des stabilisateurs de puissance (PSS) ont été utilisés sur les générateurs pour amortir ces oscillations de basse fréquence. L'UPFC placé dans un réseau, où les échanges de puissances sur les lignes d'interconnexion aura lieu, peut être utile dans l'amélioration de l'amortissement de ces oscillations. Dans cette étude, un système électrique multi-machine (SEMM) représentant deux zones a été considéré pour analyser les oscillations inter zone. La Figure 3.2 montre un système d'alimentation multi-machine [56]. Les générateurs 2 et 3 fournissent la puissance à la zone-1 et les générateurs 1 et 4 fournissent la puissance à la zone-2. La puissance générée dans la zone 1 est de 1400 MW et sa charge est (967+j100MVA).

La zone-2 a une carence dans la production d'environ 400 MW et par conséquent elle importe de la puissance active à partir de la Zone-1. Les deux zones sont reliées par trois lignes de transmission. L'UPFC est situé dans la zone-1. Cette zone exporte environ 400 MW de puissance ( $P_{inter-zone}$ ) à la zone-2, cette zone a une charge de (1767+j100 MVA). Un condensateur shunt de 350 MVAR est installé sur le bus-8.

L'UPFC fournit 200 MVAR de la puissance réactive shunt pour soutenir la tension du bus-5. Le convertisseur série injecte une tension en quadrature ( $V_{seq}$ ) de 0,03 pu et une tension directe ( $V_{sed}$ ) de 0,01 pu. Le flux de la puissance active ( $P_{ligne}$ ) dans la ligne de l'UPFC est de 229 MW. Les générateurs, l'excitation, PSS, le réseau et les paramètres de l'UPFC sont donnés à l'annexe-2.

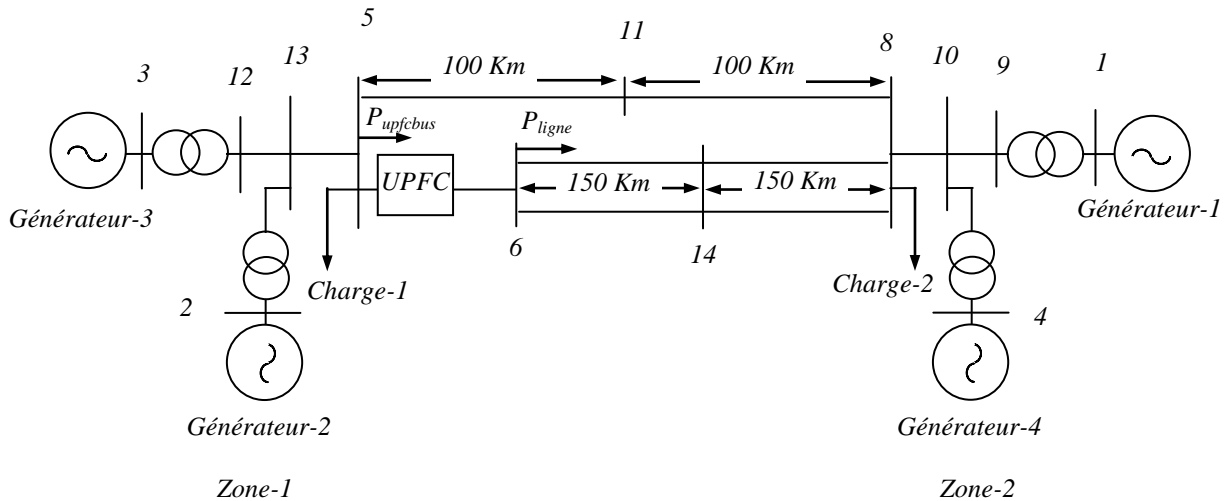


Fig. 3. 2 Réseau électrique à deux zones avec UPFC

Le générateur-1 a été considéré comme le générateur de référence. Les angles rotoriques de différents générateurs ont été référencés à l'angle rotorique du générateur-1 ( $\delta_1$ ). La matrice d'état est formée selon la méthode décrite à l'Annexe-1. Puisque le générateur-1 est considéré comme générateur de référence, la matrice est réduite par la suppression de la ligne et la colonne correspondant à  $\Delta\delta_1$ , et d'exprimer les angles de rotor des autres générateurs par rapport au générateur-1. La matrice est modifiée par l'introduction de  $-w_0$ , dans la colonne de  $\Delta w_1$  dans la ligne correspondant aux angles rotoriques des générateurs 2, 3 et 4. Les charges ont été modélisées par une impédance constante.

Pour un système d'alimentation à deux zones, il existe trois modes d'oscillations. Deux d'entre eux sont des modes locaux et un mode inter zones. Le Tableau 3.5 montre les modes d'oscillations du système d'alimentation à deux zones avec PSS seulement. La liste complète des valeurs propres avec et sans UPFC est donnée en annexe-3. Il serait observé de l'Annexe-3 que la valeur propre n°29 dans le tableau A3-1 et la valeur propre n°32 dans tableau A3-2 sont des valeurs propres nulles. Cela est dû à l'hypothèse que les couples des générateurs sont indépendants de la variation de vitesse, ce qui signifie que l'amortissement dû à l'action responsable est nul.

Tableau 3. 5 valeurs propres avec PSS (REMM)

N°	Valeur propre	Facteur d'amortissement ( $\xi$ )	Fréquence (Hz)	Description
1	$-1.77 \pm j11.3$	0.154	1.79	Mode local zone-1
2	$-1.7066 \pm j10.872$	0.155	1.73	Mode local zone-2
3	$-0.5674 \pm j6.009$	0.09	0.95	Mode inter zones

Le tableau 3.6 présente les modes d'oscillations du système d'alimentation à deux zones avec UPFC. En comparant le tableau 3.5 et le tableau 3.6, on voit que grâce à l'ajout de l'UPFC, le mode d'amortissement local est resté presque le même, mais les modes d'amortissement interzones sont améliorés. La fréquence d'oscillation entre le mode local et inter zones est restée presque la même. Cette étude a prouvé par l'analyse de la stabilité aux petites perturbations que l'UPFC contribue à amortir les oscillations inter zone.

**Tableau 3. 6 Valeurs propres avec PSS et UPFC (REMM)**

N°	Valeur propre	Facteur d'amortissement ( $\xi$ )	Fréquence (Hz)	Description
1	-1.808±j11.4	0.1566	1.814	Mode local zone-1
2	-1.645±j10.72	0.1516	1.706	Mode local zone-2
3	-0.8586±j5.8963	0.1440	0.938	Mode inter zones

*b- Effet de la composante directe ( $V_{sed}$ ) sur le mode d'amortissement inter zones*

Les valeurs propres du mode oscillant d'un système électrique multi-machines avec UPFC ont été analysées pour les différentes conditions de fonctionnement de la composante directe ( $V_{sed}$ ) de la tension série. Le tableau 3.7 montre les valeurs propres inter zones pour différentes valeurs de la composante directe ( $V_{sed}$ ) de la tension série. On voit sur le tableau 3.7 que la composante ( $V_{sed}$ ) a un effet négligeable sur le mode d'amortissement inter zones. Cela est dû au fait que cette composante a plus d'effet sur le flux de la puissance réactive dans une ligne de transmission ( $Q_{ligne}$ ) que sur le flux de la puissance active ( $P_{ligne}$ ) de cette ligne.

**Tableau 3. 7 Valeurs propres avec UPFC pour différentes valeurs de la tension  $V_{sed}$  (REMM)**

N°	$V_{seq}$	$V_{sed}$	$P_{ligne}$ (MW)	$Q_{ligne}$ (MVAR)	Valeur propre associée avec le mode inter zones
1	0.03	-0.050	222.10	-55.36	-0.8505±j5.816
2	0.03	-0.025	225.30	-46.60	-0.8540±j5.850
3	0.03	-0.010	227.15	-41.20	-0.8560±j5.870
4	0.03	0.010	229.50	-33.50	-0.8586±j5.8963
5	0.03	0.025	231.40	-27.65	-0.8605±j5.9158
6	0.03	0.050	234.35	-17.45	-0.8634±j5.9479

*c- Effet de l'onduleur shunt contrôlant la tension de bus côté ligne de transmission sur le mode d'amortissement inter zone*

La stabilité du système d'alimentation multi-machine en contrôlant la tension de bus côté la ligne de transmission par l'onduleur shunt d'un UPFC a été évaluée. Dans cette analyse, la stratégie utilisée pour l'UPFC est que l'onduleur shunt contrôle la tension continue du condensateur de liaison et la tension de bus côté ligne de transmission. L'onduleur série contrôle la tension du bus UPFC et le flux de la puissance active de la ligne de transmission. Le tableau

3.8 montre l'effet du convertisseur shunt qui contrôle la tension de bus côté ligne de transmission.

**Tableau 3. 8 Valeurs propres lorsque l'onduleur shunt contrôle la tension de bus coté ligne de transmission (REMM)**

N°	$V_{seq}$	$V_{sed}$	$P_{ligne}$ (MW)	$Q_{ligne}$ (MVAR)	Valeur propre associée avec le mode inter zones
1	0.03	-0.050	222	-55	-0.855±j5.81
2	0.03	-0.025	225	-46	-0.858±j5.85
3	0.03	-0.010	227	-41	-0.8506±j5.87
4	0.03	0.010	229	-33	-0.8631±j5.89
5	0.03	0.025	231	-27	-0.865±j5.91
6	0.03	0.050	234	-17	-0.8677±j5.95

Le tableau 3.8 montre que le contrôle de la tension de bus du coté de la ligne de transmission via l'onduleur shunt ne provoque pas d'instabilité, donc la stratégie de contrôle de la tension de bus par l'onduleur shunt d'un UPFC est possible et permet un fonctionnement stable.

### 3.4 Évaluation de la stabilité transitoire:

La section 3.2 a montré par l'analyse fréquentielle que l'UPFC contribue dans l'amortissement des oscillations en mode local et en mode inter zones.

Cette section va confirmer l'amélioration de l'amortissement avec UPFC en mode local et en mode inter zones par l'analyse dans le domaine temporel. Pour ce faire, les équations différentielles algébriques associées des générateurs, leurs excitations, PSS et l'UPFC sont résolues simultanément en utilisant la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. La dynamique du condensateur de liaison joue un rôle important lors de l'examen du fonctionnement simultané des onduleurs shunt et série d'un UPFC. Cette dynamique a été négligée par la plupart des chercheurs tout en effectuant des simulations numériques [26,27,32,52].

Puisque l'UPFC est un contrôleur multi-variable, il est nécessaire que toutes les variables figurent tout en effectuant les simulations numériques. Dans la référence [50], les variables n'ont pas été toutes incluses en effectuant ces simulations. Dans les références [31,33], le modèle de l'UPFC utilisé n'est pas tout à fait exact; Ils modélisent la capacité de la puissance réactive du convertisseur shunt comme un condensateur shunt variable, et la capacité de la puissance active en tant qu'une source de courant parallèle. Ils ont exclu la modélisation du transformateur de l'onduleur shunt lors des simulations numériques. En négligeant le modèle de ce transformateur, l'interaction entre la puissance active et réactive shunt sera absente.

Dans toutes les simulations numériques réalisées, la dynamique du condensateur de liaison a été incluse. Également, les variables à savoir  $P_{ligne}$ ,  $V_{dc}$  et  $V_{upfcbus}$  ont été contrôlées

simultanément. Comme le montre le tableau 3.3 et tableau 3.7, l'effet de la composante directe ( $V_{sed}$ ) de la tension série sur le mode d'amortissement de l'angle rotorique/inter zones est insignifiant et donc la désactivation du contrôleur de tension côté ligne de transmission dans toutes les simulations dans le domaine temporel est justifiée. En outre, l'onduleur shunt est modélisé comme une source de tension variable permettant à son amplitude et son angle de phase d'être modifiés. Le transformateur de l'onduleur shunt a été inclus durant les simulations numériques dans le domaine temporel.

### 3.4.1 Bus d'alimentation infini mono machine

#### a- L'amélioration du mode d'amortissement de l'angle rotorique du générateur

Le système BIMM représenté dans la Figure 3.1 est simulé en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink®. L'excitation est modélisée comme un gain constant. L'excitation et schéma bloc du diagramme de PSS figure à l'Annexe-1. La dynamique de l'UPFC est représentée par l'équation 2.18.

Un défaut triphasé de 100 ms a été appliqué au terminal de l'alternateur (bus-2) sans aucune modification de la configuration du réseau. La Figure 3.3 montre les oscillations de la variation de la vitesse rotorique ( $\Delta\omega_r$ ) de l'alternateur avec et sans UPFC. L'ajout de l'UPFC a amélioré l'amortissement des oscillations de la vitesse rotorique ( $\Delta\omega_r$ ). En effet, sans UPFC ces oscillations prennent environ 5 secondes pour être amorties, alors qu'avec l'UPFC inclus, il faut environ 2 secondes seulement pour les amortir.

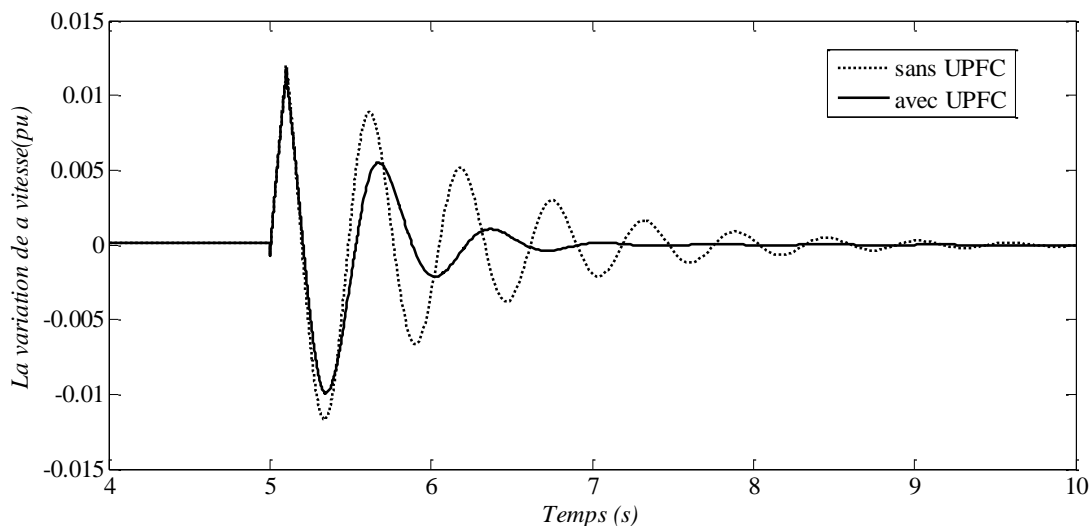


Fig. 3. 3 Amortissement des oscillations de la vitesse rotorique ( $\Delta\omega_r$ ) avec et sans UPFC.

La Figure 3.4 montre les oscillations de la puissance électrique ( $P_e$ ) fourni par l'alternateur avec et sans UPFC.

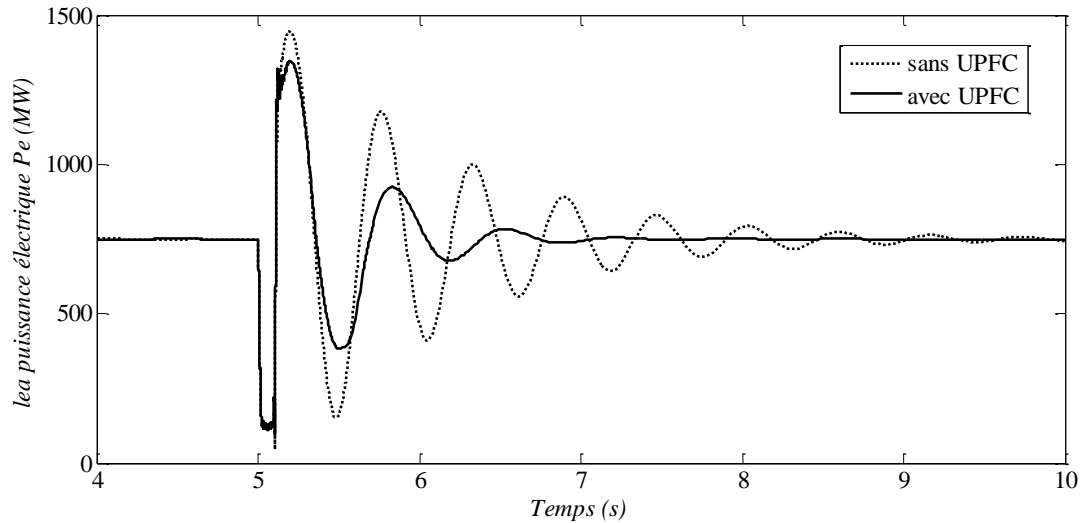


Fig. 3. 4 Amortissement des oscillations de la puissance électrique ( $P_e$ ) fourni par l'alternateur avec et sans UPFC.

Les oscillations de la puissance électrique de l'alternateur ( $P_e$ ) montrent une amélioration dans l'amortissement avec l'UPFC. Le pic de la puissance électrique ( $P_e$ ) est d'environ 1500 MW peu de temps après l'annulation du défaut, cependant, les oscillations de la puissance électrique ( $P_e$ ) s'amortissent rapidement avec l'UPFC.

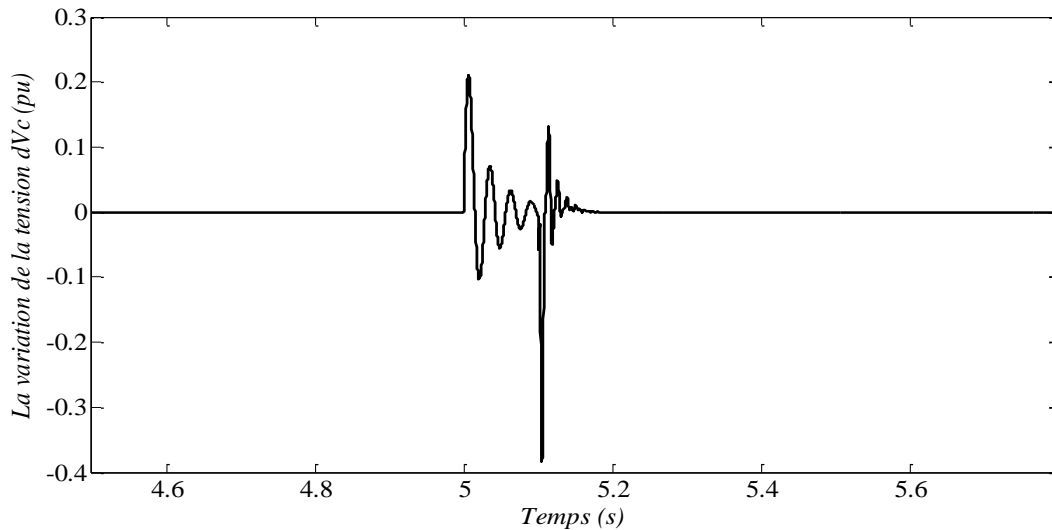


Fig. 3. 5 les oscillations de la variations de la tension continue ( $\Delta V_{dc}$ )

Les simulations numériques sur le réseau électrique mono machine ont confirmées les résultats obtenus par analyse de la stabilité aux petites perturbations. Ces simulations montrent qu'avec l'UPFC inclus dans le système électrique, l'amortissement des oscillations du rotor de l'alternateur s'améliorent.



La Figure 3.5 montre les oscillations de la tension  $V_{dc}$  dues au défaut triphasé à la sortie de l'alternateur. La tension ( $V_{dc}$ ) présente très peu d'oscillations, ça c'est parce que l'onduleur shunt a efficacement contrôlé la tension ( $V_{dc}$ ). À l'instant de déclenchement du défaut, la tension ( $V_{dc}$ ) du condensateur va chuter du fait qu'une partie de son énergie stockée sera fournie au défaut. Après l'annulation du défaut, l'onduleur shunt ajuste sa consommation en puissance active et contrôle la tension ( $V_{dc}$ ) à sa valeur de référence.

### 3.3.2 Réseau électrique multi-machines (REMM)

#### a- Amélioration de l'amortissement inter zones

Le système électrique indiqué dans la Figure 3.2 a été simulé à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink<sup>®</sup>. Le flux de charges, comme expliqué dans le chapitre-2, a été réalisé avec l'UPFC. Les résultats de l'écoulement des puissances sont utilisés comme conditions initiales pour effectuer des simulations transitoires. Les alternateurs sont équipés de PSS et des excitations statiques. Les générateurs sont modélisés dans le repère biphasé d-q. Chacun de ces générateurs est modélisé par un enroulement amortisseur sur l'axe d et deux enroulements amortisseurs sur l'axe q. Les équations différentielles algébriques du générateur sont données à l'Annexe-1. Pour le système électrique multi machines, le générateur G1 est considéré comme générateur de référence. Pour l'UPFC, l'onduleur shunt contrôle la tension du bus-5 ( $V_{upfcbus}$ ) et la tension ( $V_{dc}$ ). Le convertisseur série contrôle le flux de la puissance active de la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) par injection d'une tension en quadrature ( $V_{seq}$ ) d'amplitude réglable avec la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ); Cependant, l'injection de la tension ( $V_{sed}$ ) a été désactivée car elle n'a que très peu d'effet sur les modes oscillants (Tableau 3.7). Deux cas différents concernant la localisation de défauts ont été simulés pour montrer l'amélioration de l'amortissement des oscillations avec l'UPFC. Cette étude a été basée sur l'hypothèse que la structure du réseau ne doit pas être modifiée lorsque la zone-1 alimente la zone-2 par une puissance de 400 MW et un défaut de 100 ms se produit dans les deux cas suivants:

#### a- 1<sup>er</sup> cas: Défaut triphasé au bus -5 (zone d'exportation)

Dans cette simulation, un défaut triphasé de 100 ms est supposé se déclencher dans la zone-1 au bus-5 avec aucun changement dans la structure du système d'alimentation. Le défaut triphasé a été simulé en connectant une résistance de faible valeur (0.01  $\Omega$ ) en parallèle avec le bus-5. Le flux de la puissance active dans la ligne ( $P_{ligne}$ ) (bus-6 au bus-14) sans UPFC est 228MW. L'onduleur shunt de l'UPFC contrôle la tension du bus-5 ( $V_{upfcbus}$ ) et la tension ( $V_{dc}$ ) du condensateur de liaison. Donc, pour être en mesure de comparer les performances dynamiques avec l'UPFC, le flux de la puissance active dans la ligne de l'UPFC ( $P_{ligne}$ ) est ajusté à 228MW. Ceci est réalisé par injection d'une tension série en quadrature ( $V_{seq}$ ) de 0,03 pu avec la tension

du bus de l'UPFC (bus-5). Pendant et après le défaut les condensateurs shunt aux bus des charges ne sont pas déconnectés. Aussi l'UPFC n'est pas déconnecté pendant la période de défaut. La tension initiale du condensateur de liaison ( $V_{dc}$ ) est de 2,0 p.u.

La Figure 3.6 montre les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_2$  par rapport au générateur  $G_1$ . Comme on le voit, le point de fonctionnement initial de générateur  $G_2$  par rapport au générateur  $G_1$  ( $\delta_{21}$ ) est d'environ 10 degrés. Avec le défaut triphasé au bus-5, les puissances électriques des générateurs ( $G_3$  et  $G_2$ ) dans la zone-1 peuvent prendre des valeurs très basses, causant les angles rotoriques des générateurs  $G_3$  et  $G_2$  d'augmenter dans la première oscillation. Pour l'hypothèse de défaut présumée, la première oscillation de l'angle rotorique ( $\delta_{21}$ ) du générateur ( $G_2$ ) par rapport au générateur ( $G_1$ ) sans UPFC est presque de 20 degrés. En effet, l'accroissement de la première oscillation est une conséquence du déclenchement et l'annulation du défaut, les angles rotoriques ( $\delta_3$ ) et ( $\delta_2$ ) du générateur  $G_3$  et  $G_2$ , respectivement, augmentent beaucoup plus rapidement que celle du  $G_1$  ( $\delta_1$ ). Puisque  $G_1$  est considéré comme un générateur de référence, la différence de l'angle rotorique ( $\delta_{21}$ ) entre  $G_2$  et  $G_1$  augmente. Les simulations avec le PSS (sans UPFC) montrent un amortissement faible des oscillations de l'angle rotorique ( $\delta_{21}$ ). En outre, les oscillations de l'angle du générateur  $G_2$  ( $\delta_{21}$ ), sans UPFC, s'amortissent après près de 5 secondes. Avec l'UPFC, les oscillations de l'angle ( $\delta_{21}$ ) s'amortissent beaucoup plus vite avec la première oscillation de près de 17 degrés. En effet, avec UPFC, il faut environ 2s pour amortir les oscillations consécutives de l'angle rotorique du générateur  $G_2$  ( $\delta_{21}$ ).

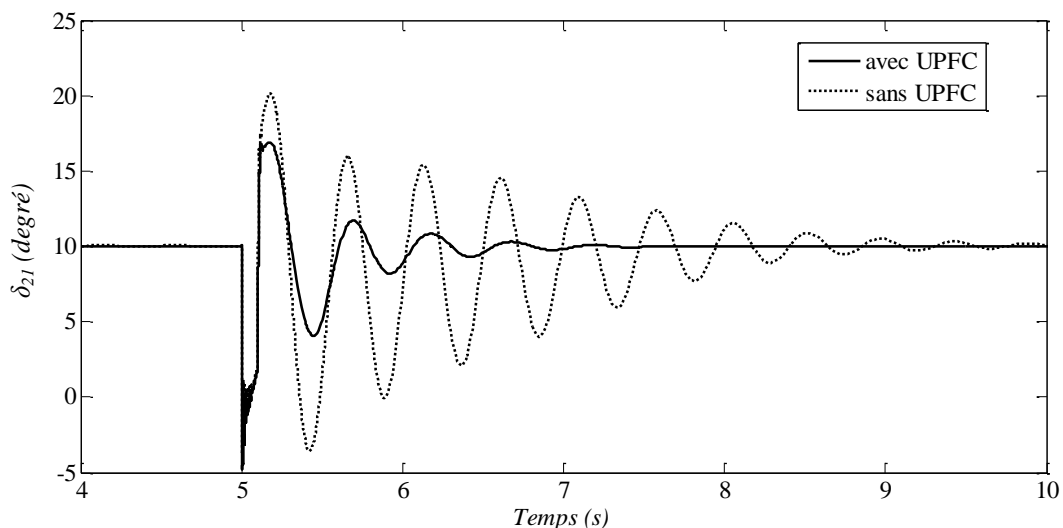


Fig. 3. 6 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_2$  ( $\delta_{21}$ ) avec et sans UPFC

La Figure 3.7 montre les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_3$  par rapport au générateur  $G_1$  ( $\delta_{31}$ ). La différence de l'angle initial entre les générateurs  $G_3$  et  $G_1$  est d'environ 20

degrés. La première oscillation du générateur  $G_3$  par rapport au générateur  $G_1$ , sans UPFC, est d'environ 30 degrés.

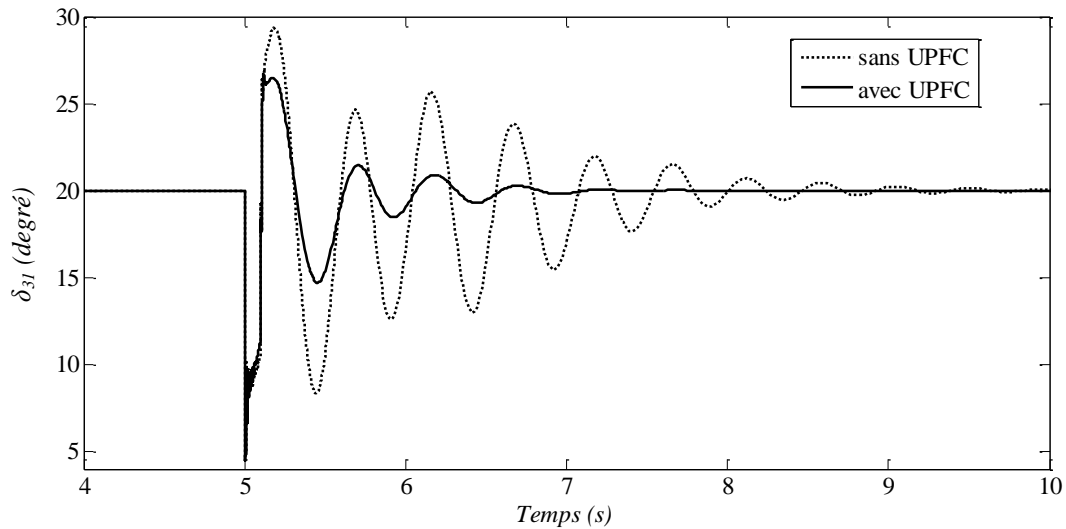


Fig. 3. 7 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_3$  ( $\delta_{31}$ ) avec et sans UPFC

Comme on le voit, l'amortissement des oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_3$  par rapport au  $G_1$  ( $\delta_{31}$ ) est faible. Il faut compter environ 5 secondes pour amortir ces oscillations. Avec l'UPFC inclus, la première oscillation est réduite à moins de 27 degrés, en outre, le temps d'amortissement des oscillations est réduit à 2 secondes.

La Figure 3.8 montre les oscillations de l'écoulement de puissance active pour le même défaut triphasé. Le flux de puissance initiale ( $P_{inter-zones}$ ) est de 400 MW. Cette quantité d'énergie active est exportée à la zone-2 à partir de la Zone-1 par une double ligne de 300 km de longueur et une ligne unique de 200 km de longueur.

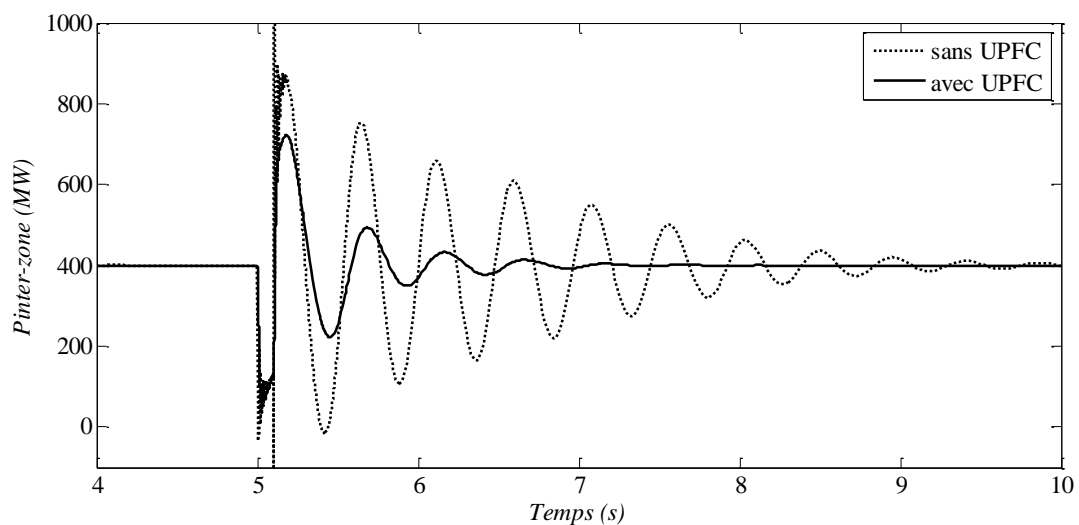


Fig. 3. 8 Les oscillations de la puissance interzones avec et sans UPFC

L'application du défaut triphasé provoque la puissance électrique générée totale de  $G_3$  et  $G_2$  ( $P_e$ ) à chuter à près de zéro. Cela provoque aussi le flux de la puissance active ( $P_{interzones}$ ) de tomber à presque zéro. Après l'annulation du défaut, le flux de la puissance active inter zones ( $P_{interzones}$ ) peut aller jusqu'à environ 900 MW sans UPFC, alors qu'avec l'UPFC installé il est d'environ 700 MW. L'amortissement des oscillations de la puissance active inter zones ( $P_{interzones}$ ) est amélioré avec l'UPFC.

La Figure 3.9 montre le flux de la puissance active dans la ligne de transmission avec UPFC ( $P_{ligne}$ ). Le flux de puissance initiale de la ligne de l'UPFC ( $P_{ligne}$ ) est d'environ 228 MW. Le défaut triphasé provoque le flux de puissance active de la ligne de l'UPFC ( $P_{ligne}$ ) de décroître à environ 0 MW pendant la période du défaut. Après l'enlèvement de défaut, le flux de la puissance active dans cette ligne augmente à environ 500 MW sans UPFC. Avec l'UPFC installé, le flux de puissance active ( $P_{ligne}$ ) augmente dans la première oscillation à presque 400 MW. Par la suite, les oscillations consécutives de la puissance  $P_{ligne}$  sont bien amorties.

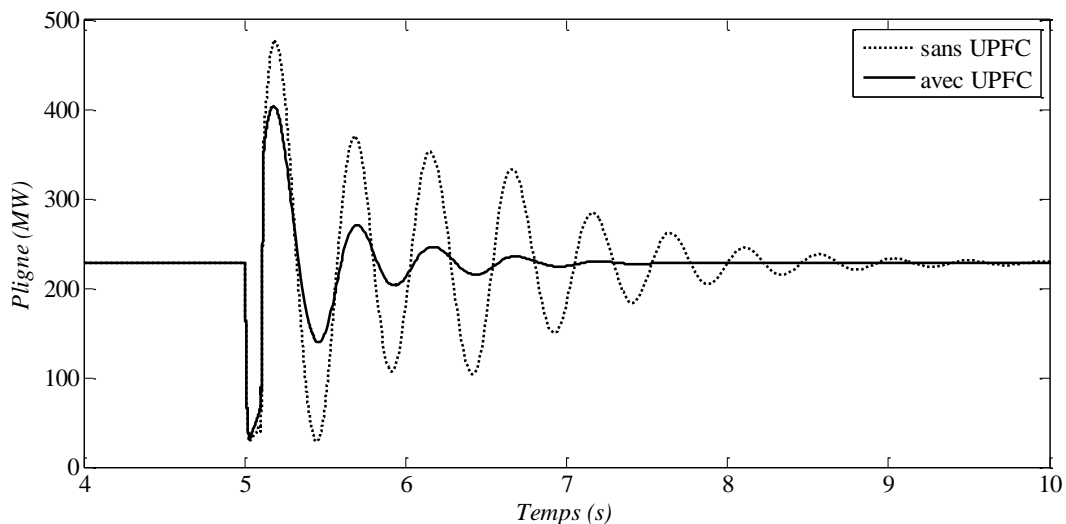


Fig. 3. 9 Les oscillations de la puissance de la ligne de l'UPFC avec et sans UPFC

#### **b- 2ème cas: défaut triphasé au bus-10 (zone de l'importation)**

Dans ce cas, un défaut triphasé est supposé se déclencher pendant 100 ms dans la zone-2. Après la suppression de défaut, aucun changement n'est apporté à la structure du système d'alimentation. Aussi les condensateurs shunt sont supposés être en service avant et après la suppression de défaut. L'état de fonctionnement initial du système de puissance est tel que la Zone-1 exporte 400 MW de puissance active à la zone-2. Sous cette condition, le flux de puissance active dans la ligne de transmission avec l'UPFC ( $P_{ligne}$ ) est 228 MW. L'onduleur série injecte une tension en quadrature ( $V_{seq}$ ) de 0.03 pu avec la tension du bus UPFC (bus-5).

L'onduleur shunt contrôle la tension de bus-5 ( $V_{upfcbus}$ ) et la tension du condensateur de liaison ( $V_{dc}$ ).

La Figure 3.10 montre les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_2$  par rapport au générateur  $G_1$  ( $\delta_{21}$ ). Les conditions de fonctionnement sont les mêmes que dans le cas précédent. Le défaut triphasé est simulé par la connexion shunt d'une résistance faible de (0.01  $\Omega$ ) au bus-10. Ce défaut provoque les rotors des générateurs  $G_1$  et  $G_4$  à accélérer rapidement augmentant ainsi la différence de l'angle rotorique entre les générateurs  $G_2$  et  $G_1$  ( $\delta_{21}$ ). Elle atteint une valeur de 22 degrés environ dans la première oscillation sans UPFC, avec l'UPFC, elle atteint une valeur de 17 degrés environ. L'écartement de l'angle rotorique est de près de 7 degrés avec UPFC. La raison qui pourrait être attribuée à cet effet est, tant que le défaut est dans la zone-2, l'écartement de l'angle rotorique du générateur  $G_2$  est réduit en raison de la présence d'un UPFC (fournir de l'amortissement positive aux générateurs de la zone-1) et donc la différence entre les angles des alternateurs  $G_2$  et  $G_1$  ( $\delta_{21}$ ) a augmentée. Les oscillations subséquentes sont bien amorties.

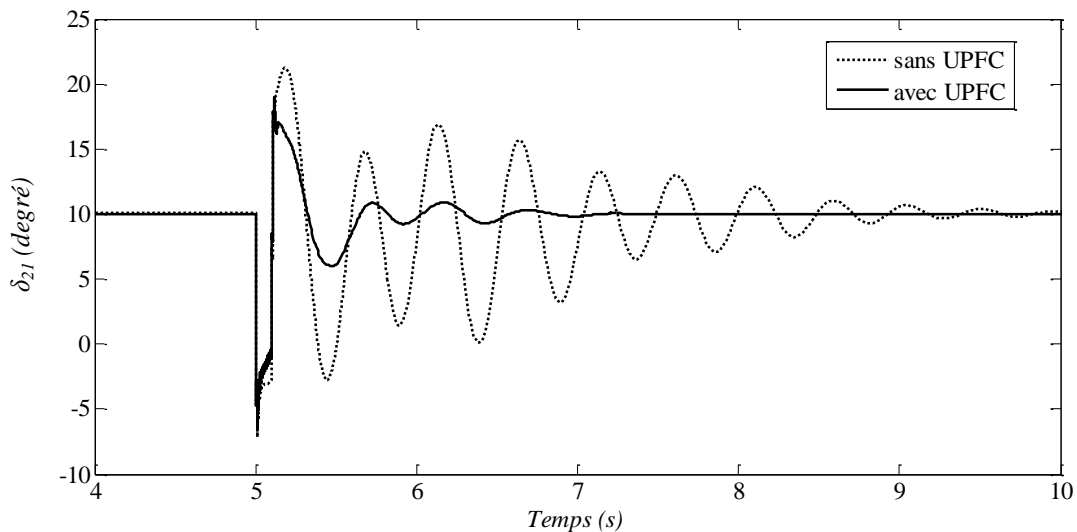


Fig. 3. 10 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_2$  ( $\delta_{21}$ ) avec et sans UPFC

La Figure 3.11 montre les oscillations de l'angle rotorique entre les générateurs  $G_3$  et  $G_1$  ( $\delta_{31}$ ). De même, les fluctuations sont bien amorties avec l'UPFC à cause de la raison mentionnée ci-dessus.

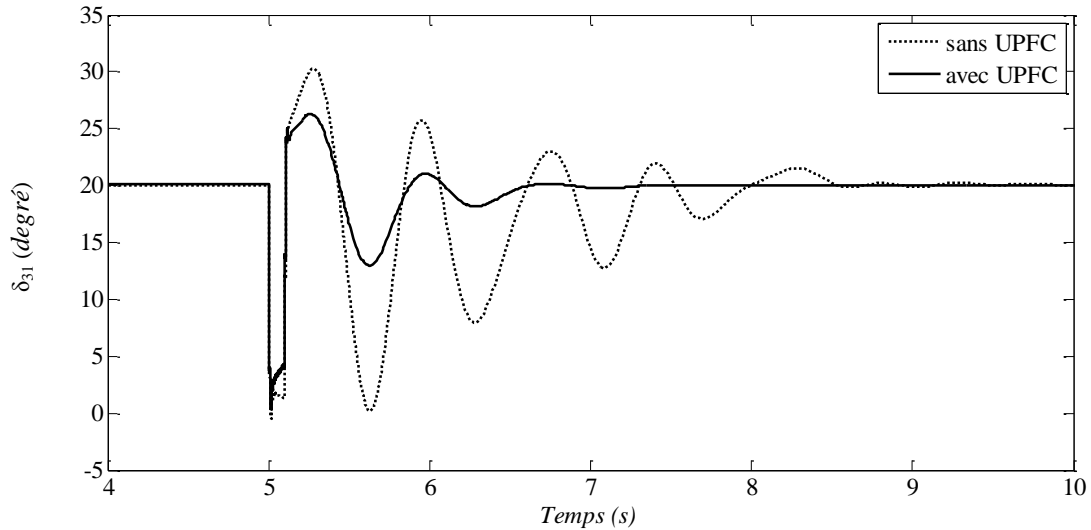


Fig. 3. 11 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_3$  ( $\delta_{31}$ ) avec et sans UPFC

La Figure 3.12 montre les oscillations de flux de puissance active ( $P_{inter-zones}$ ) pour un défaut dans la zone-2. Il est évident à partir de la Figure 3.12 que l'amortissement des oscillations est amélioré avec l'UPFC. La première oscillation de flux de la puissance ( $P_{inter-zones}$ ) sans UPFC est plus de 1000 MW, alors qu'avec UPFC elle est d'environ 800 MW.

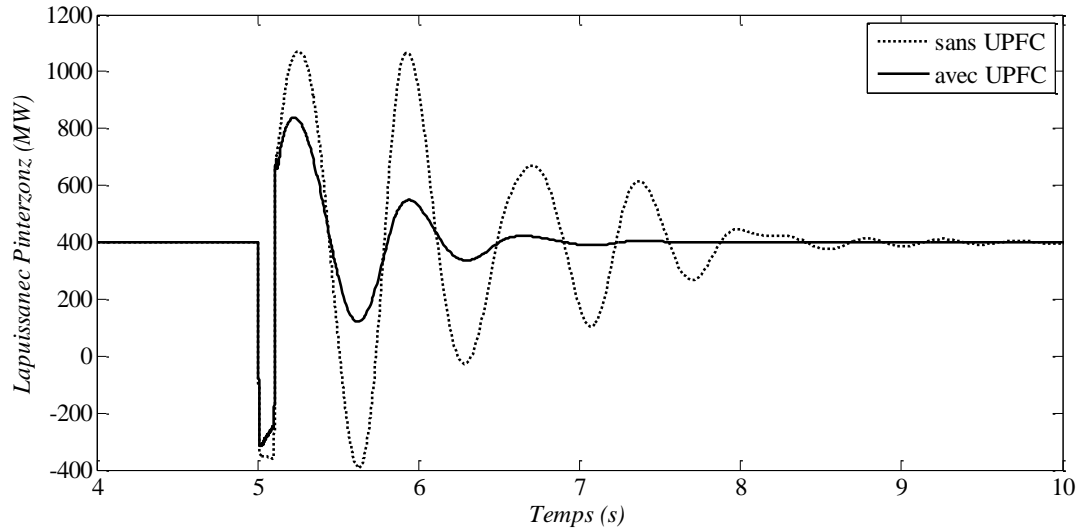


Fig. 3. 12 Les oscillations de la puissance interzones avec et sans UPFC

Les Fluctuations ultérieures de cette puissance montrent une amélioration de l'amortissement avec l'UPFC. L'UPFC fournit ainsi un amortissement croissant au flux de la puissance inter zones, comme il a été étudié par l'analyse de la stabilité aux petites perturbations.

La Figure 3.13 montre le flux de la puissance active dans la ligne de transmission avec UPFC ( $P_{ligne}$ ).

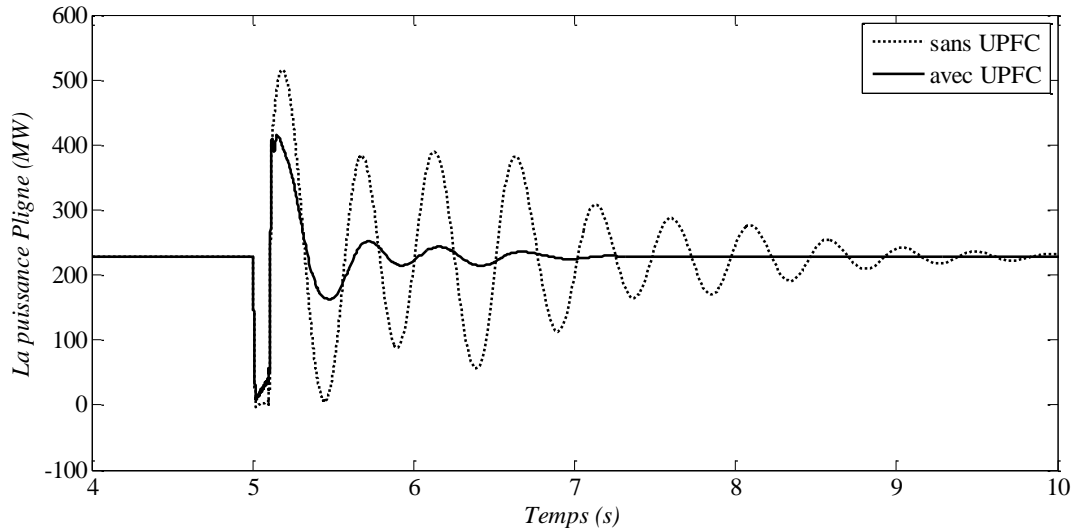


Fig. 3. 13 Les oscillations de la puissance de la ligne de l'UPFC avec et sans UPFC

Le flux de puissance active initiale ( $P_{ligne}$ ) dans la ligne de l'UPFC est d'environ 228 MW. Pendant le défaut, le flux de la puissance active ( $P_{ligne}$ ) dans la ligne de l'UPFC descend à environ 0 MW. La divergence maximale de la puissance ( $P_{ligne}$ ) est d'environ 500 MW sans UPFC. Le pic de la première oscillation du flux de puissance active ( $P_{ligne}$ ) avec l'UPFC est diminué à environ 400 MW. L'amélioration de l'amortissement des oscillations du flux de puissance active avec l'UPFC est évidente dans les fluctuations ultérieures. Les oscillations de la puissance active ( $P_{ligne}$ ) sans UPFC montrent un faible amortissement par rapport aux oscillations de puissance avec l'UPFC.

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre a été présentée une procédure détaillée menant à la formulation de la matrice d'état avec l'UPFC où le flux de puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) est contrôlé par injection d'une tension en quadrature ( $V_{seq}$ ) en série avec la tension du bus. La tension de bus UPFC côté ligne de transmission a été contrôlée par injection d'une tension en phase ( $V_{sed}$ ) avec la tension du bus UPFC. L'onduleur shunt contrôle la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ) et la tension du condensateur de liaison ( $V_{dc}$ ). La dynamique du condensateur a été incluse en effectuant les analyses aux petites perturbations et sur la stabilité transitoire. L'inclusion de la dynamique du condensateur de liaison tout en effectuant la stabilité aux petites perturbations et la stabilité transitoire modélise avec précision l'interaction entre le fonctionnement de l'onduleur série et l'onduleur shunt.

L'analyse de stabilité aux petites perturbations et la stabilité transitoire ont été réalisées sur un système mono machine et un système électrique multi-machine. L'amélioration de l'amortissement en mode local et en mode inter zones a été apportée suite à l'inclusion de

l'UPFC. L'effet de l'opération combinée des PSS et UPFC a été étudiée dans ce chapitre par le biais de l'analyse de la stabilité aux petites perturbations et la stabilité transitoire. Cette analyse a montré que l'UPFC contribue positivement à l'amortissement en mode local et en mode inter zones. Dans le cas d'un bus infini mono machine, l'amortissement du mode local a augmenté de 0,073 à 0,14. Dans le cas d'un système électrique multi-machine, l'amortissement du mode inter zones a augmenté de 0,09 à 0,144.

La stabilité du réseau électrique avec l'onduleur shunt contrôlant la tension de bus coté ligne de transmission/le flux de la puissance réactive de la ligne de transmission, la tension continue du condensateur de liaison et l'onduleur série contrôlant le flux de la puissance active de la ligne de transmission, le bus UPFC été évaluée. En effet, il a été constaté que cette stratégie est possible et ne provoque pas d'instabilité.



***Chapitre IV : Amélioration de la  
stabilité d'un réseau électrique avec un  
UPFC doté d'un contrôleur flou pour  
l'onduleur série***

#### 4.1 Introduction :

Le chapitre précédent a montré, par analyse de la stabilité aux petites perturbations et l'analyse dans le domaine temporel, que l'UPFC améliore la stabilité sur l'ensemble du système électrique. Pour ce faire, des contrôleurs de type PI ont été utilisés pour contrôler trois variables, à savoir, le flux de la puissance active de la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ), la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ) et la tension continue du condensateur de liaison ( $V_{dc}$ ). La simulation dans le domaine temporel avec UPFC fournit des informations précieuses pour la conception de contrôleur flou pour un UPFC.

Une littérature considérable existe dans le champ de l'application de la logique floue à des problèmes des réseaux électriques. Les contrôleurs basés sur la logique floue ont fourni de meilleures solutions par rapport aux contrôleurs classiques [58-62]. Récemment, la logique floue a été utilisée pour coordonner les variables de contrôle d'un UPFC pour améliorer la stabilité transitoire [33,62].

Ce chapitre est consacré à l'étude des contrôleurs basés sur la logique floue en tenant compte de deux objectifs à savoir:

- 1- L'onduleur série d'un UPFC joue un rôle majeur dans la fourniture de contrôle de flux de puissance et de l'amortissement des oscillations de puissance. Un des objectifs de ce chapitre est de concevoir un contrôleur flou pour l'onduleur série pour contrôler la puissance active de la ligne de transmission et de fournir de l'amortissement pour ses oscillations. L'amélioration des performances en utilisant un contrôleur flou par rapport à un contrôleur PI sera mise en évidence par des simulations numériques sur un réseau infini mono-machine et un réseau multi-machines. La complexité dans la conception d'un contrôleur flou pour l'onduleur série réside dans le fait que le contrôleur flou ne doit pas seulement apporter une amélioration à l'amortissement des oscillations de puissance, mais voir aussi, à ne pas créer de l'instabilité qui pourrait surgir en raison de la non-coordination de fonctionnement des onduleurs série et shunt conduit à l'effondrement possible de la tension  $V_{dc}$  du bus continu.
- 2- L'analyse effectuée par Padiyar et.al [29] montre que l'utilisation d'un contrôleur PI à gain élevé pour contrôler le flux de la puissance active de la ligne de transmission pourrait conduire à un faible amortissement. Pour surmonter ce problème, un contrôleur flou a été proposé pour contrôler le flux de la puissance active de la ligne de transmission.

La base de connaissance floue développée dans ce chapitre fournit les fondations nécessaires pour résoudre le problème du faible amortissement résultant, lorsqu'un contrôleur PI

à gain élevé est utilisé pour contrôler le flux de la puissance active de la ligne de transmission. La base de connaissance acquise sera utilisée pour montrer l'amélioration de la réponse à un échelon avec un contrôleur flou par rapport au contrôleur de type PI.

Dans ce contexte, les bases de la logique floue et comment elles sont mis en œuvre dans un contrôleur flou a été brièvement étudiés.

## **4.2 Notions de base de la théorie floue**

### **4.2.1 Introduction**

La commande basée sur la logique floue, est un excellent complément à la technique de régulation classique, et est une méthode servant à la conception basée sur des connaissances de stratégies de régulation et de commande non linéaire [63-69].

Aujourd'hui, la logique floue est de grande actualité, il s'agit d'une nouvelle technique traitant la commande numérique des processus et de prise de décision. Cependant, les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh de l'Université de Californie de Berkeley. A cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise en sérieux. En effet, les ordinateurs avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 ou 0) ont commencé à se répandre à une large échelle. Par contre, la logique floue permet de traiter des variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0.

Initialement, cette théorie a été appliquée dans des domaines non techniques, comme le commerce, la jurisprudence ou la médecine, dans le but de compléter les systèmes experts, et afin de leur donner l'aptitude de prise de décision. Dès 1975, on trouve les premières applications au niveau des systèmes de réglage [64]. A partir de 1985 environ, ce sont les Japonais qui commencent à utiliser la logique floue dans des produits industriels pour résoudre les problèmes de réglage et de commande. Tout récemment, aussi en Europe, une intense activité de recherche a débuté afin d'introduire le principe de réglage par la logique floue.

### **4.2.2 Principe fondamental de la logique floue**

Afin de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, on présente un exemple simple [65], celui de la classification des personnes en trois ensembles « jeune », « entre deux âges » et « âgé ».

Selon la logique classique (logique de boole), qui n'admet pour les variables que les deux valeurs 0 et 1, une telle classification pourrait se faire comme le montre la figure (4.1). Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble « jeune » et toutes les personnes âgées de plus de 50 ans comme appartenant à l'ensemble « âgé ».

Cependant, une telle logique de classification n'est même pas logique. Pourquoi une personne, lorsqu'elle a eu 50 ans, doit-elle être considérée comme appartenant à l'ensemble « âgé » ? En réalité, un tel passage se fait progressivement et individuellement.

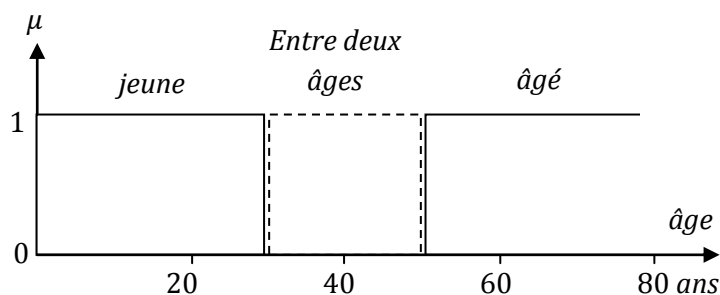


Fig. 4. 1 Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique

La logique floue, dont les variables peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1 (on parle alors de fonction d'appartenance  $\mu$ ), permet de tenir compte de cette réalité. Les limites ne varient pas soudainement, mais progressivement. La figure 4.2 montre une classification possible pour l'exemple précédent, cette fois-ci, à l'aide de la logique floue.

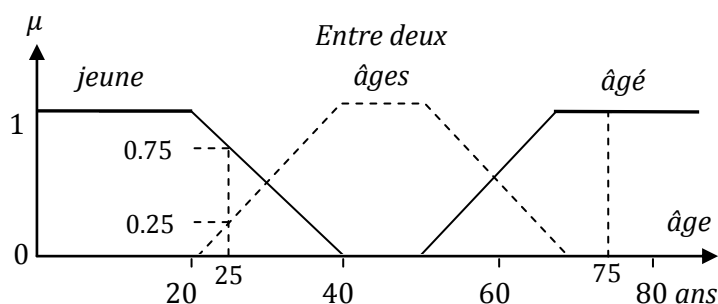


Fig. 4. 2 Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue

Ainsi, une personne de 25 ans appartient à l'ensemble « jeune » avec une valeur  $\mu=0,75$  de la fonction d'appartenance et à l'ensemble « entre deux âges » avec  $\mu=0,25$ . Par contre, une personne de 75 ans appartient avec une valeur  $\mu = 1$  de la fonction d'appartenance à l'ensemble « âgé ». Évidemment, la forme des fonctions d'appartenance n'est pas rigide et peut dépendre du contexte envisagé, à savoir professionnel, sportif ou autre.

#### 4.2.3 Bases générales de la logique floue

Les éléments de base de la logique floue sont [65-68]:

- Les variables linguistiques,
- La définition des variables linguistiques (les fonctions d'appartenance),
- Les déductions floues (inférences),

- Les opérateurs.

#### 4.2.4 Réglage et commande par la logique floue

Comme on a déjà mentionné auparavant, un domaine d'application de la logique floue qui devient de plus en plus important, est celui du réglage et de la commande des processus industriels [67,68]. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des études théoriques approfondies. Par des inférences avec plusieurs règles, il est possible de tenir compte des expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique. Dans la section qui suit, on présente les bases générales du réglage et de commande par logique floue.

##### 4.2.4.1 Structure d'un réglage par la logique floue

La figure 4.3 présente la structure d'un réglage par la logique floue.

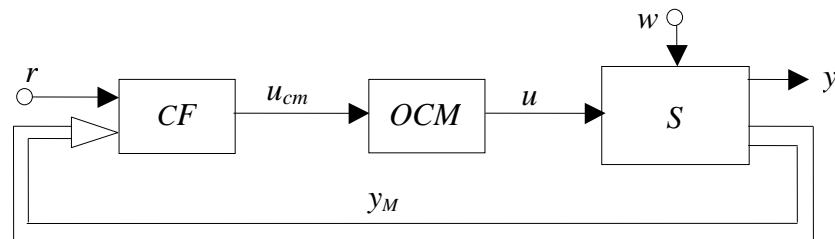


Fig. 4. 3 Structure du réglage par la logique floue

Sur le système à régler "S" deux grandeurs interviennent à la fois, une grandeur de commande  $u$  et une grandeur de perturbation  $w$ . A la sortie apparaît la grandeur à régler  $y$ . La grandeur de commande  $u$  est fournie par l'organe de commande  $OCM$ , commandé par le signal de commande  $u_{cm}$ , celui-ci provient du régulateur flou  $CF$ , sur lequel intervient la grandeur de consigne  $r$  et une ou plusieurs grandeurs mesurées, réunies dans le vecteur  $y_M$ . Ce dernier contient en générale la grandeur à régler  $y$  et d'autres grandeurs mesurées qui sont déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du système à régler.

##### 4.2.4.2 Configuration d'un contrôleur flou

La figure 4.4 montre la configuration interne d'un régulateur par logique floue.

On peut noter que le calcul de la commande  $u_{cm}$ , s'effectue à partir de trois étapes fondamentales :

- Fuzzification ;
- Inférences ;
- Défuzzification.

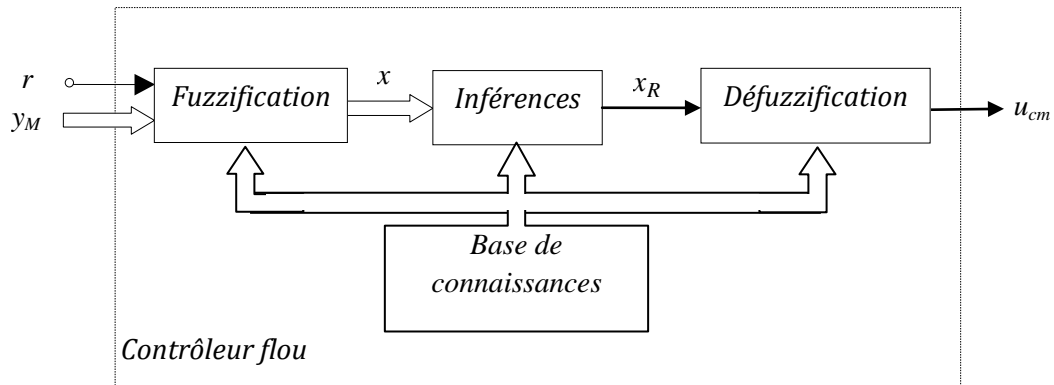


Fig. 4. 4 Configuration interne d'un contrôleur flou.

#### 4.2.4.2.1 Fuzzification

Le bloc fuzzification contient en général un traitement de données préliminaire, par exemple la formation de l'écart de réglage  $e = r - y$  ou la détermination de la variation d'une certaine grandeur. Les grandeurs sont alors traitées par des variables linguistiques, ce qui nécessite leur définition par des fonctions d'appartenance.

##### 4.2.4.2.1.1 Les fonctions d'appartenance pour les entrées

La fuzzification proprement dite consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables, en particulier pour les variables d'entrée. On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques (grandeurs déterminées) en variables linguistiques (variables floues) qui peuvent alors être traitées par les inférences.

Dans le cas du réglage par logique floue, on utilise en générale, bien qu'il n'existe pas de règles précises pour la définition des fonctions d'appartenance, des formes trapézoïdales et triangulaires.

Dans ce but, les grandeurs physiques  $X$  (par exemple écart de réglage, dérivée approximative d'une grandeur,...) sont réduites à des grandeurs normalisées  $x$ . On suppose que ces dernières varient normalement dans le domaine  $-1 \leq x \leq 1$ . Le facteur d'échelle entre  $x$  et  $X$  doit être choisi sur la base de l'étude de système de sorte que, lors de petits phénomènes transitoires, le domaine admissible pour que la grandeur  $x$  ne soit pas dépassée.

Lors de grands phénomènes transitoires, le domaine admissible  $-1 \leq x \leq 1$  sera dépassé. Il existe alors deux possibilités pour pallier cet inconvénient. La première solution est d'appliquer une limitation sur la valeur numérique à  $|x| \leq 1$  et définir les fonctions d'appartenance dans l'intervalle fermé  $-1 \leq x \leq 1$ . Une autre solution consiste à prolonger les fonctions d'appartenance

en dehors du domaine  $-1 \leq x \leq 1$ , dans ce cas, la limitation de la valeur numérique de  $x$  n'est pas nécessaire.

En général, on introduit pour une variable  $x$  trois, cinq ou sept ensembles, représentés par des fonctions d'appartenance, comme le montre la figure (4.5). Le nombre des ensembles dépend de la résolution et de l'intervention du réglage désiré. Une subdivision plus fine, c'est-à-dire plus de sept ensembles, n'apporte en générale aucune amélioration du comportement dynamique du réglage par la logique floue. Par contre, un tel choix compliquerait la formulation des règles d'inférence.

Il faut éviter des lacunes ou un chevauchement insuffisant entre les fonctions d'appartenance de deux ensembles voisins. En effet, cela provoque des zones de non-intervention du régulateur (zones mortes), ce qui conduit le plus souvent à une instabilité du réglage. De même, on doit éviter un chevauchement trop important, surtout avec  $\mu=1$  entre deux ensembles voisins. Un tel chevauchement conduit à un aplatissement de la caractéristique du régulateur.

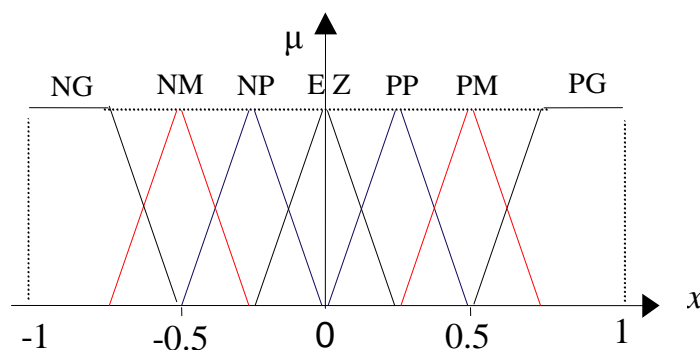


Fig. 4. 5 Fuzzification d'une variable linguistique avec sept fonctions d'appartenance

#### 4.2.4.2.1.2 Les fonctions d'appartenance de la variable de sortie

Il est aussi indispensable de fuzzifier la variable de sortie  $x_R$  du régulateur par logique floue. On a besoin de ces ensembles flous au niveau de la formulation des inférences et lors de la fuzzification.

La figure (4.6) montre un exemple typique pour la fuzzification de la variable de sortie, où l'on a employé cinq fonctions d'appartenance. Dans cet exemple, la variable de sortie est normalisée entre  $-1 \leq x \leq 1$ , ce qui nécessite l'introduction d'un facteur d'échelle adéquat. Dans un cas concret, on doit tenir compte de la variation maximale admissible qui dépend de l'organe de commande. Au lieu d'utiliser la désignation standard, on peut caractériser les ensembles flous par une désignation adaptée à un cas concret.

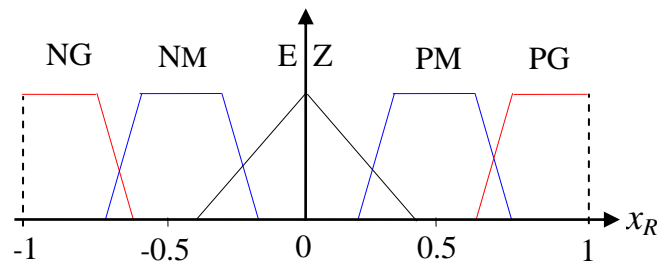


Fig. 4. 6 Fuzzification de la variable de sortie, cinq fonctions d'appartenance.

En ce qui concerne le nombre d'ensembles flous ainsi que la forme des fonctions d'appartenance, les remarques faites aux paragraphes précédents sont aussi valables. Cependant, les lacunes sont admissibles au niveau de la fuzzification de la variable de sortie  $x_R$ .

#### 4.2.4.2.2 Inférences

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Elles lient les grandeurs mesurées, qui sont les variables  $x$  (transformées en variables linguistiques à l'aide de la fuzzification), à la variable de sortie  $x_R$ . Cette dernière est également exprimée comme variable linguistique. Dans le cas du réglage par la logique floue, il s'agit d'inférences avec plusieurs règles.

La formulation concrète des inférences dépend évidemment du comportement statique et dynamique du système à régler et de l'organe de commande, ainsi que des buts de réglage envisagés. Il n'est pas possible d'indiquer des règles précises. L'expérience joue un rôle important. L'établissement des inférences peut avoir lieu itérativement par une modification de la stratégie de réglage.

Dans cette section on va présenter, tout d'abord, différentes possibilités d'exprimer les inférences, à savoir, la description linguistique et symbolique, ainsi que l'utilisation des matrices et tableaux d'inférences.

##### 4.2.4.2.2.1 Description linguistique des inférences de réglages

Pour la présentation de différentes possibilités d'exprimer les inférences, on choisit un système à régler hypothétique avec deux grandeurs mesurées  $y_{M1}$  et  $y_{M2}$ , convenablement transformées en variables linguistiques  $x_1$  et  $x_2$ . Elles forment les variables d'entrée de l'inférence. La variable de sortie, c'est-à-dire l'opération déterminée par l'inférence, est désignée par  $x_R$ , elle est exprimée également comme variable linguistique.

On peut décrire l'inférence de manière explicite par la description linguistique à l'aide d'un certain nombre de règle. Chaque règle possède une condition, précédée du symbole SI et



une conclusion, action ou opération, précédée du symbole ALORS. Selon la stratégie de réglage adoptée, l'inférence, à titre d'exemple, peut être la suivante :

Opération de réglage  $x_R :=$

SI ( $x_1$  est négatif grand ET  $x_2$  est environ zéro),  
ALORS ( $x_R$  égal positif grand), OU

SI ( $x_1$  est négatif grand ET  $x_2$  est positif moyen),  
ALORS ( $x_R$  égal positif moyen), OU

SI ( $x_1$  est négatif moyen ET  $x_2$  est environ zéro),  
ALORS ( $x_R$  égal positif grand), OU

SI ( $x_1$  est négatif moyen ET  $x_2$  est positif moyen),  
ALORS ( $x_R$  égal environ zéro), OU

.  
. .  
.

#### 4.2.4.1.2.2 Autres descriptions des inférences

La description linguistique des inférences de réglage est en générale assez lourde, on obtient une certaine simplification de l'écriture par la description symbolique. Les ensembles sont alors désignés de manière abrégée par leur symbole, (par exemple, négatif grand : NG, positif moyen : PM). Cette description est en générale préférable à la description linguistique, surtout lorsque plusieurs variables sont en jeu. On peut également faire la description des inférences de réglage à l'aide d'une représentation graphique, appelée matrice d'inférence, ou à l'aide d'un tableau d'inférence [62].

#### 4.2.4.2.2.3 Traitement numérique des inférences

Pour le traitement numérique des inférences, on utilise en générale une des méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence max-min,
- Méthode d'inférence max-prod,
- Méthode d'inférence somme-prod.

Chacune de ces méthodes citées, permet un traitement numérique des inférences.

À partir de certaines valeurs pour les fonctions d'appartenance des variables d'entrée (données par la fuzzification à partir de valeurs déterminées des variables d'entrée), on obtient ainsi l'allure de la fonction d'appartenance de la variable de sortie. À cette fonction d'appartenance résultante, il faut alors appliquer la défuzzification, afin d'obtenir une valeur déterminée pour la variable de sortie  $x_R$ .

***Méthode d'inférence max-min :***

La méthode d'inférence max-min, réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par ALORS, lie les facteurs d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie  $x_R$  par l'opérateur ET, réalisé dans le cas présent par la formation du minimum. Enfin, l'opérateur OU qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum.

La désignation de la méthode par «la méthode d'inférence max-min » se rapporte à la réalisation de "OU" liant les règles (max) et la réalisation de: "ALORS" (min).

***Méthode d'inférence max-prod :***

La méthode d'inférence max-prod réalise en générale, au niveau de la condition, l'opérateur "OU" par la formation du maximum et l'opérateur "ET" par la formation du minimum. Par contre, la conclusion dans chaque règle, introduite par "ALORS", qui lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie  $x_R$  par l'opérateur "ET", est réalisé cette fois-ci par la formation du produit. L'opérateur "OU" qui lie les différentes règles est réalisé de nouveau par la formation du maximum. Comme on le voit, l'opérateur "OU", liant les différentes règles est réalisé par la formation du maximum et "ALORS" est réalisé par la formation du produit, d'où la désignation de cette méthode d'inférence par max-prod.

***Méthode d'inférence somme-produit :***

Par opposition aux méthodes d'inférence précédentes, la méthode d'inférence somme-prod réalise, au niveau de la condition, l'opérateur "OU" par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opérateur "ET" est réalisé par la formation du produit. La conclusion de chaque règle, précédée par "ALORS", liant le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur "ET", est réalisé par la formation du produit. L'opérateur "OU" qui lie les différentes règles est réalisé par la formation de la somme, donc de la valeur moyenne. Dans ce cas, l'opérateur "OU" liant les

règles est réalisé par la formation de la somme et "ALORS" est réalisé par la formation du produit ; ainsi s'explique la désignation par somme-prod de cette méthode d'inférence.

#### 4.2.4.2.3 Défuzzification

Comme on l'a vu, les méthodes d'inférence fournissent une fonction d'appartenance résultante  $\mu_{RES}(x_R)$  pour la variable de sortie  $x_R$ . Il s'agit donc d'une information floue. Etant donné que l'organe de commande nécessite un signal de commande  $u_{cm}$  précis à son entrée, il faut prévoir une transformation de cette information floue en une information déterminée. Cette transformation est appelée défuzzification. De plus, on doit souvent prévoir un traitement du signal et la conversion digitale/analogique.

#### Défuzzification par centre de gravité :

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_{RES}(x_R)$ . Dans ce contexte, il suffit de calculer l'abscisse  $x_R^*$ . La figure (4.7) montre le principe de la défuzzification.

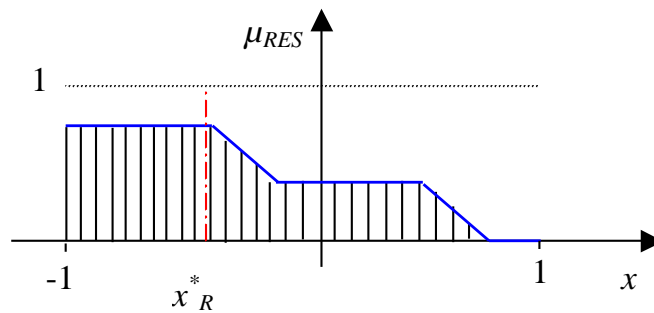


Fig. 4. 7 La défuzzification par la méthode de centre de gravité.

L'abscisse du centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante :

$$x_R^* = \frac{\int_{-1}^{+1} x_R \mu_{RES}(x_R) dx_R}{\int_{-1}^{+1} \mu_{RES}(x_R) dx_R} \quad (4.1)$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface. L'abscisse  $x_R^*$  du centre de gravité forme ainsi le signal de sortie qui, en générale, doit être soumis à un traitement.

Notons qu'il faut distinguer, d'une part, la variable de sortie  $x_R$ , tel que,  $-1 \leq x_R \leq 1$ , comme étant l'argument de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_{RES}(x_R)$  et, d'autre part, le signal de

sortie  $x_R^*$  qui possède une valeur bien déterminée, grâce à la défuzzification. La détermination de  $x_R^*$  nécessite une envergure de calcul assez important, surtout pour l'exécution en temps réel.

Lorsque la fonction d'appartenance est composée par morceaux de droites, comme c'est en générale le cas lors du réglage par logique floue, il est possible de faire les intégrations analytiquement. Avec les coordonnées  $x_j, \mu_j$  des points d'intersection des  $p$  segments de droites, l'abscisse du centre de gravité peut être calculée par la relation suivante :

$$x_R^* = \frac{\sum_{j=1}^P (x_{j+1}) [(2x_{j+1} + x_j)\mu_{j+1} + (2x_j + x_{j+1})\mu_j]}{3 \sum_{j=1}^P (x_{j+1} - x_j)(\mu_j + \mu_{j+1})} \quad (4.2)$$

Cependant, la détermination des coordonnées  $x_j, \mu_j$  des points d'intersection qui doit être faite en temps réel avant l'élaboration de la relation (4.2), nécessite un temps de calcul non négligeable. Le calcul de l'abscisse du centre de gravité est notablement simplifié lorsque la fonction d'appartenance résultante est déterminée par la méthode d'inférence somme-prod.

#### 4.3 Contrôle de l'onduleur série par un contrôleur PI- flou adaptatif :

La structure du contrôleur PI-flou adaptatif que nous allons proposer dans ce qui suit, utilise une solution de structures semblables à celles utilisées pour l'établissement des contrôleurs adaptatifs. Le but est de réduire la complexité du régulateur, tout en gardant, un niveau élevé des performances dynamique et statique du processus dont la modélisation est difficile ou les paramètres sont inaccessibles [58].

La différence principale entre le contrôleur présenté dans cette étude et un contrôleur adaptatif, réside fondamentalement dans le mécanisme conduisant le choix instantané des paramètres de commande. Ceux-ci, au lieu d'être tirés d'une matrice donnée, seront fournis par un système flou établi sur un ensemble de règles dérivant de la connaissance et de la perception intuitive d'un opérateur habile et générique. Le régulateur flou a pour objectif d'adapter les paramètres du contrôleur PI de l'onduleur série contrôlant le flux de la puissance  $P_{ligne}$  afin de réduire, au minimum, certaines caractéristiques inhérentes (dépassement, temps de réponse...) de l'erreur liée à la réponse du système [58-62].

L'expérience prolongée dérivant de l'analyse de la réaction du processus générique sous l'action effectuée par un régulateur PID, a été employée pour la définition des règles pour la variation des paramètres. La considération heuristique suivante peut être dérivée de l'observation du comportement du processus [70,71]:

1) L'action intégrale à une tendance à augmenter les oscillations de la variable commandée (apparition de dépassements), une légère diminution de celle-ci, au moment où la réponse du système excède la consigne, peut avoir comme conséquence une réduction significative du dépassement;

2) L'effet bénéfique de la présence du terme dérivatif, est l'amélioration du régime transitoire. En général, avec cette action on obtient un système avec un temps de montée rapide et un faible dépassement;

3) Les performances en régime permanent et la vitesse de la réponse de la grandeur de sortie du système peuvent être améliorées en augmentant le terme proportionnel. L'augmentation du gain peut cependant détériorer la marge de stabilité.

Le contrôleur flou, utilisé, effectuera exclusivement sa commande sur les actions proportionnelle et intégrale du contrôleur PI de l'onduleur série [58].

#### 4.4 Conception d'une base de connaissances pour l'onduleur série

Dans cette section, une base de connaissances floue pour un contrôleur flou a été développée pour l'onduleur série qui contrôle le flux de la puissance active de la ligne de transmission. La partie la plus importante d'un contrôleur flou est sa base de connaissances. Ce sont essentiellement les règles linguistiques qui présentent la relation entre les variables d'entrée et les variables de sortie. Les variables d'entrée choisies sont l'erreur de flux de la puissance active de la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) où l'UPFC est installé et le taux de sa variation. Les variables de sortie de la base de connaissances sont les variations dans les paramètres du contrôleur PI de l'onduleur série  $\Delta K_p$  et  $\Delta K_i$ .

La Figure 4.8 présente la structure du contrôleur PI-flou adaptatif pour l'onduleur série contrôlant le flux de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ).

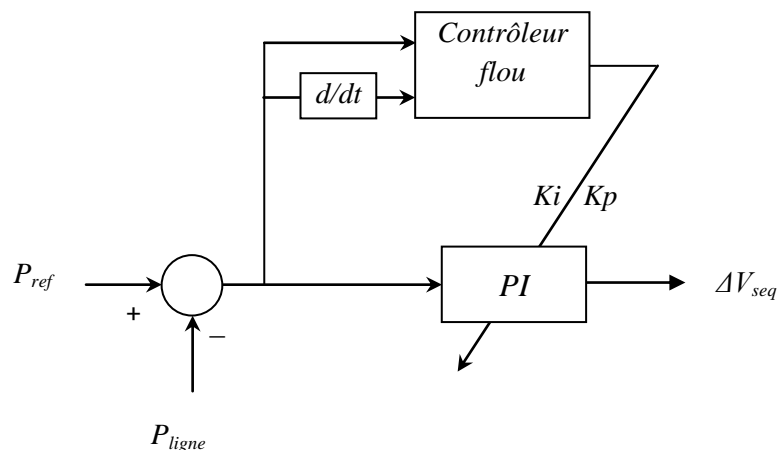


Fig. 4. 8 Schéma bloc du contrôleur PI-flou adaptatif pour l'onduleur série

La figure 4.9 présente le schéma bloc du contrôleur flou utilisé pour adapter les paramètres du contrôleur PI de l'onduleur série de l'UPFC.

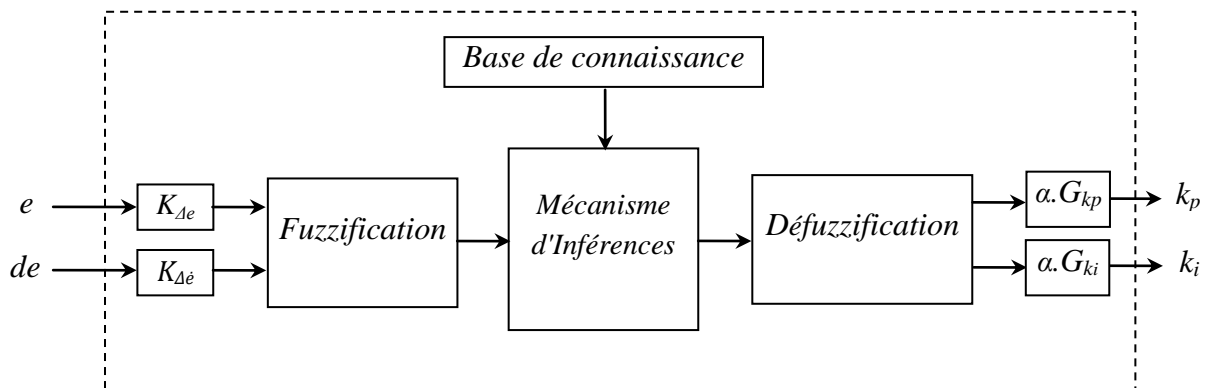


Fig. 4. 9 Schéma bloc du contrôleur flou utilisé pour le mécanisme d'adaptation

$K_{\Delta e}$  et  $K_{\Delta \dot{e}}$  sont des constantes utilisées pour donner le poids nécessaire aux signaux d'entrée  $\Delta e$  et  $\Delta \dot{e}$ , respectivement, pour s'adapter à l'intérieur de leurs univers de discours. Les gains de sorties  $G_{k_p}$  et  $G_{k_i}$  sont utilisés pour normaliser les sorties  $\Delta K_p$  et  $\Delta K_i$ , et le coefficient  $\alpha$  est utilisé pour affiner les signaux de sortie.

Trois ensembles flous ont été utilisés pour les variables d'entrée, à savoir, l'erreur de flux de la puissance active et le taux de sa variation, ces ensembles sont, Positive (P), Zéro (Z), Négatif (N). Pour les variables de sortie cinq ensembles flous ont été utilisés, Positive Grand (PG), Positive Moyen (PM), Zéro (ZE), Négatif Moyen (NM) et Négatif Grand (NG). Les fonctions d'appartenance ont été prises de forme Gaussienne pour les variables d'entrée, quant à les variables de sortie une forme triangulaire a été choisie. La méthode "somme-produit" a été utilisée pour le processus de prise de décision. La méthode du centre de gravité a été utilisée pour la défuzzification.

En effectuant des simulations numériques sur un bus d'alimentation infini mono machine, les variables d'entrée, à savoir, l'erreur de la puissance active dans la ligne de transmission et la variation de cette erreur ont été régulées et les plages sur lesquelles ils variaient ont été notées. Sur la base de ces constatations l'univers de discours de chaque variable a été défini. La Figure 4.10 présente l'erreur de flux de la puissance active obtenue à partir des simulations réalisées dans le chapitre 3 sur un bus infini mono machine. Comme on le voit sur la Figure 4.10, la plage sur laquelle ils oscillent est  $\pm 0,15$ . Ainsi, pour l'erreur de flux de la puissance active, l'univers de discours a été choisi égal à  $\pm 1$ . Le gain d'entrée pour l'erreur  $K_{\Delta e}$  a été choisi égal à 0,2. Les centres de gravité des sous-ensembles flous pour l'erreur de flux de la puissance active sont 1,0 (P), 0,0 (Z), -1,0 (N).

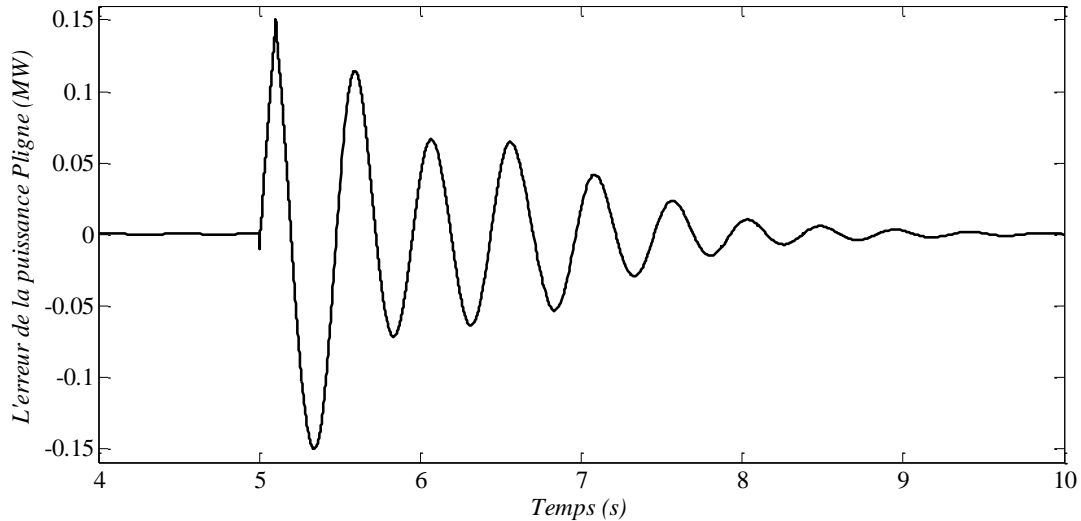


Fig. 4. 10 Erreur de la puissance active de la ligne de transmission (cas d'un BIMM)

La Figure 4.11 montre la variation de l'erreur de flux de la puissance active pour le cas d'un BIMM. On voit que la plage de la variation de l'erreur est comprise entre 0,5 et -0,5. L'univers de discours pour la variation de l'erreur a été choisie inférieure à +0,5 et supérieure à -0,5 en effet il a été choisi égal à  $\pm 1$  avec un gain d'entrée  $K_{\Delta e}$  égal à 0,02, ainsi les règles de la base de connaissances seront tirées au cours des périodes initiales après la perturbation. Cela aide à fournir plus d'efforts de contrôle (la variation de la tension en quadrature injectée  $\Delta V_{seq}$ ) au cours des périodes initiales pour amortir les oscillations de la puissance. Les centres de gravité des sous-ensembles flous pour la variation de l'erreur de flux de la puissance active sont 1,0 (P), 0,0 (Z), -1,0 (N).

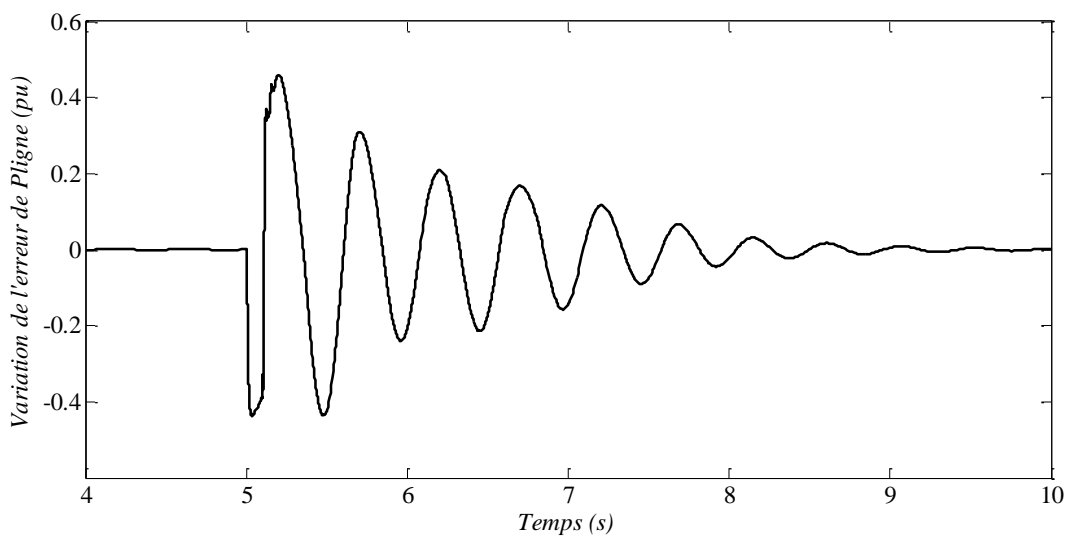


Fig. 4. 11 Variation de l'erreur de la puissance active (cas d'un BIMM)

Quant à les variables de sortie  $\Delta K_p$  et  $\Delta K_i$ , un univers de discours de  $\pm 1$  est utilisé. Les centres de gravité des ensembles flous sont 1,0 (PG), 0,5 (PM), 0,0 (ZE), -0,5 (NM), -1,0 (NG).

Des gains de sortie  $G_{K_p}$  et  $G_{K_i}$  de 1,0 et 5,0, respectivement, ont été utilisés pour le cas d'un BIMM.

La Figure 4.12 montre les fonctions d'appartenances des variables d'entrée à savoir l'erreur de flux de la puissance active et sa dérivée, et les fonctions d'appartenances des variables de sortie à savoir les paramètres  $\Delta K_p$  et  $\Delta K_i$ .

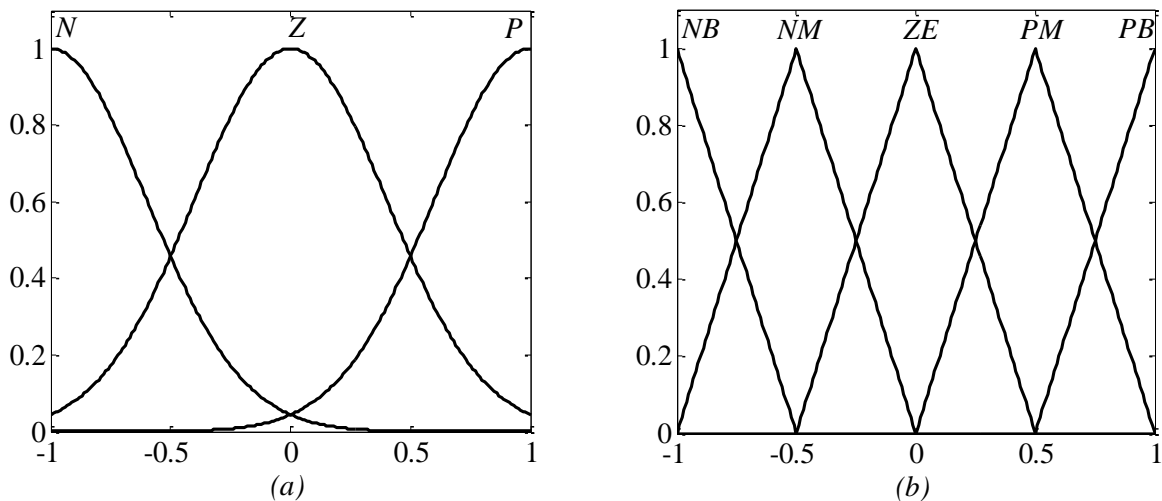


Fig. 4. 12 les fonctions d'appartenances des variables d'entrée et de sortie; a) fonctions d'appartenances de l'erreur et sa dérivée, b) les fonctions d'appartenances de  $\Delta K_p$  et  $\Delta K_i$  (cas d'un BIMM)

Il est à noter que les valeurs initiales des paramètres  $K_p$  et  $K_i$  du contrôleur PI de l'onduleur série contrôlant le flux de la puissance active dans la ligne de transmission sont les mêmes que le cas précédent (chapitre 3).

Le Tableau 4.1 présente les bases de connaissances développé pour le contrôle du flux de la puissance active.

Le contrôleur flou est simplement heuristique; Il est censé de suivre le processus et de trouver les entrées flous et produire les sorties floues appropriées. Par fois, malgré la solidité de ses qualifications, l'opérateur du processus est incapable de transposer son expérience pour la définition correcte des facteurs d'appartenances des entrées et de sortie, qui est nécessaire strictement pour réaliser correctement un système de commande expert. Pour ces raisons, la disponibilité des contrôleurs basés sur un nombre limité de règles pourraient être de grand intérêt en s'occupant de la réalisation de système près de la limitation de quantité, les règles pourront correctement réglées et faire face uniformément aux phénomènes impliqués dans le processus à commander [72-79].



Les règles soutenant le contrôleur, dérivant des critères d'après ce qui est précédemment avoués, sont exprimées en cette étude dans le tableau 4.1:

Tableau 4. 1 Base de connaissance floue pour l'onduleur série

$e$	$de$	$\Delta K_i$	$\Delta K_p$
$N$		$ZE$	$PB$
$Z$	$N$	$NM$	$PB$
$Z$	$N$	$ZE$	$PM$
$Z$	$P$	$PM$	$NB$
$P$		$ZE$	$PB$

La base de connaissances développée dans le tableau 4.1 vient du fait que lorsque l'erreur dans la ligne de transmission de puissance active est positive, ce qui signifie que le flux de la puissance active dans la ligne de transmission est inférieur à sa valeur de référence, la tension séries en quadrature injectée ( $V_{seq}$ ) est augmentée pour réduire l'erreur, ce qui signifie, que les variations  $\Delta K_p$  et  $\Delta K_i$  doivent être augmentés. En agissant ainsi, la différence entre les angles de phase de la source et du récepteur augmente provoquant l'augmentation du débit de la puissance active dans la ligne de transmission et réduire ainsi l'erreur. Inversement et quand l'erreur de flux de la puissance active dans la ligne de transmission est négatif, la tension séries en quadrature injectée ( $V_{seq}$ ) est diminué, afin de la réduire rapidement, il faut diminuer les variations  $\Delta K_p$  et  $\Delta K_i$ , ainsi l'erreur est diminuée.

#### 4.5 Performance du système de contrôle de l'UPFC avec onduleur série contrôlant le flux de puissance active dans une ligne de transmission avec un contrôleur PI-flou adaptatif

##### 4.5.1 Réponse à un échelon d'entrée avec contrôleur flou

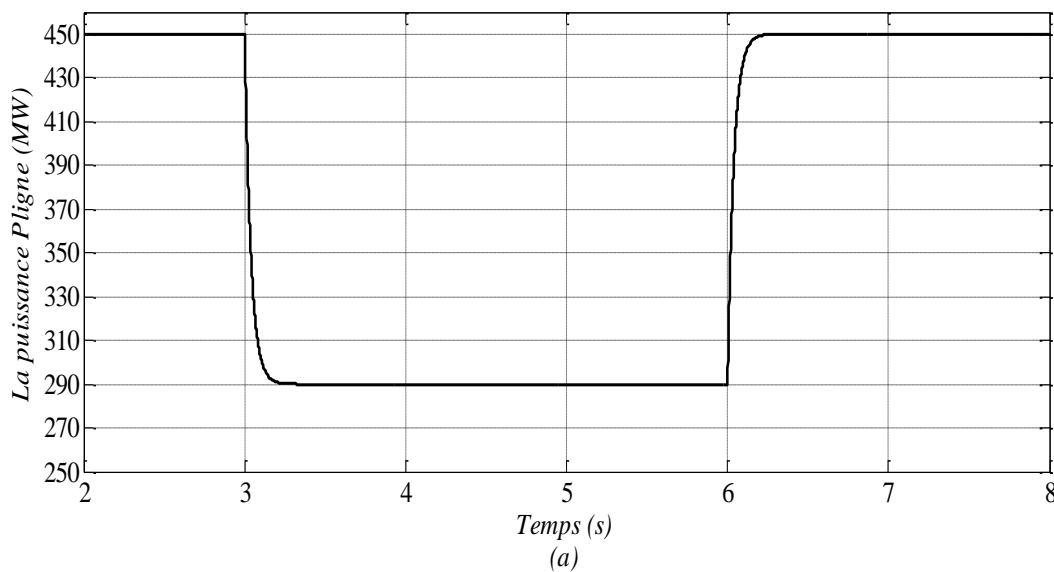
Le système d'alimentation avec UPFC indiqué dans Fig.2.12 (chapitre 2) a été considéré pour étudier les performances du système de contrôle de l'UPFC vis-à-vis les changements brusques de la puissance active de référence ( $P_{ref}$ ) dans la ligne de transmission. Le système de contrôle de l'onduleur shunt et le contrôleur de l'onduleur série ont été inclus dans cette simulation. Les gains des régulateurs PI pour les systèmes de contrôle des onduleurs série et shunt indiqués dans la Fig.2.7 (chapitre 2) sont  $K_{p1} = 5.0$ ,  $K_{i1} = 21.367$ ,  $K_{p2} = 0.2$ ,  $K_{i2} = 5.0$ ,  $K_{p3} = -1.0$ ,  $K_{i3} = -2.0$ ,  $K_{p4} = -1.0$  et  $K_{i4} = -133.0$ . Les gains d'entrée pour l'erreur ( $K_e$ ) et le changement de l'erreur ( $K_{\dot{e}}$ ) du contrôleur flou sont 0.25 et 0.025 respectivement. Les gains de sortie  $G_{K_p}$  et  $G_{K_i}$  ont été choisi égaux à 1 et 2,5 respectivement. Ces gains ont été sélectionnés après avoir obtenu une réponse satisfaisante à partir d'un certain nombre de simulations.

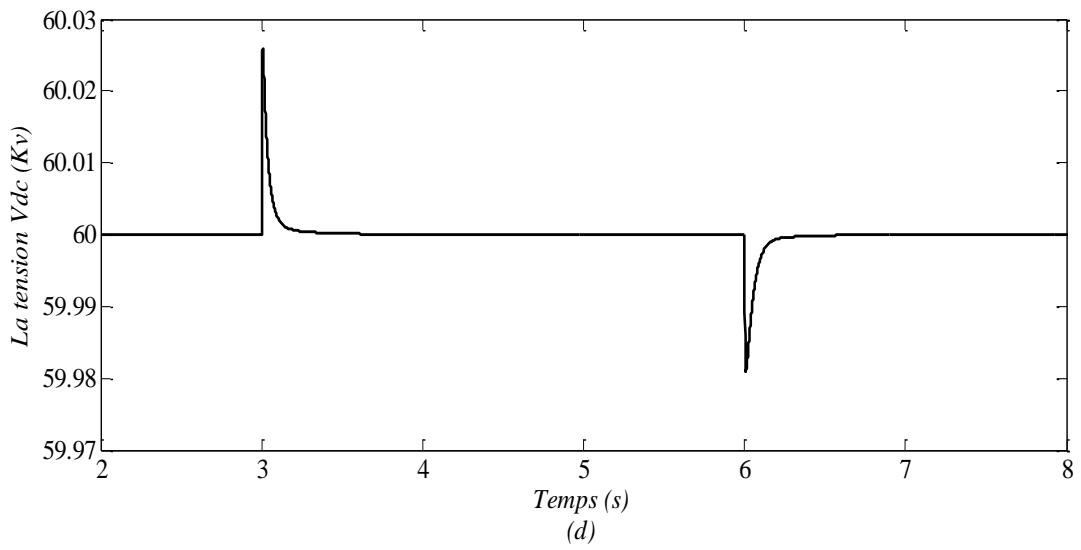
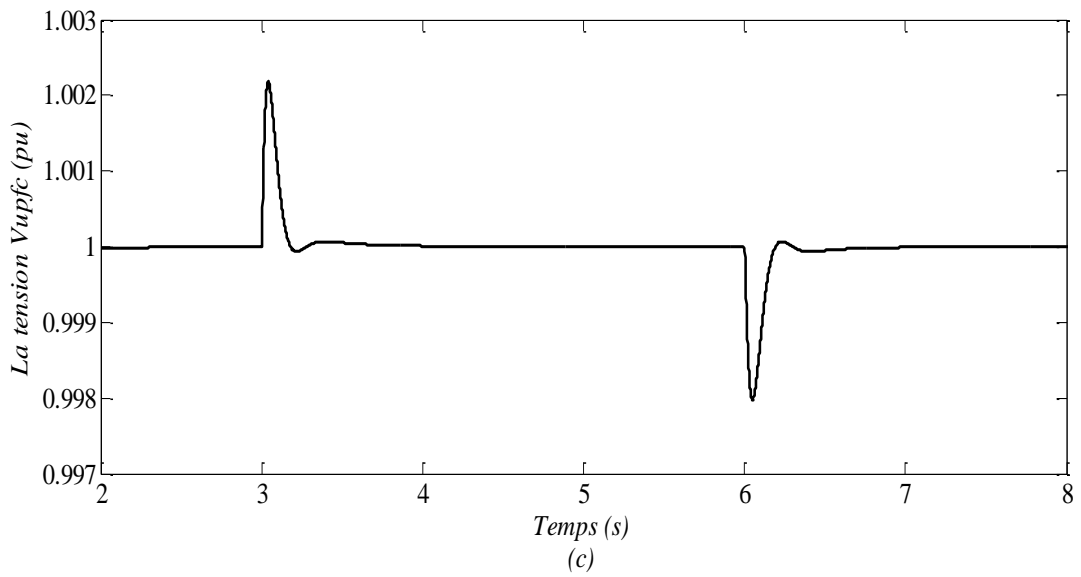
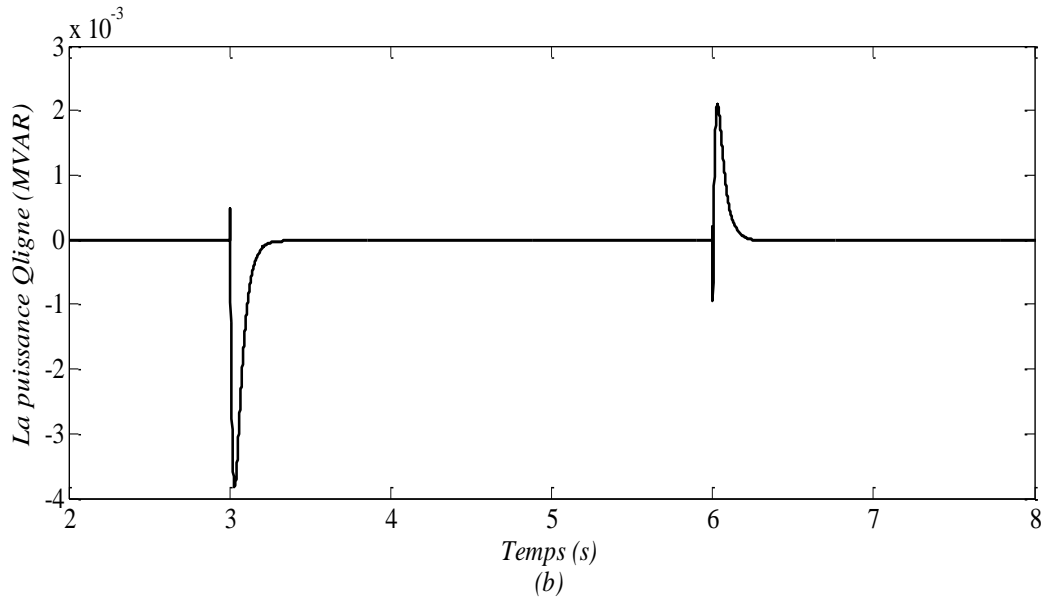
Le flux initial de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) est de 450 MW. Les changements brusques de la puissance  $P_{ref}$  ont été réalisés à 3s et 6s. La Figure 4.13-a présente le flux de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) avec un contrôleur flou. A 3s, la puissance de référence ( $P_{ref}$ ) passe de 450 MW à 290 MW et à 6s elle passe de 290 MW à 450 MW. Il est clair que le flux de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) suit le changement de la référence dans un temps très court. La Fig.4.13-b montre le flux de la puissance réactive dans la ligne de transmission, cette puissance a été contrôlée à une valeur nulle, de même, on remarque que le flux de la puissance réactive ( $Q_{ligne}$ ) suit parfaitement le flux de la puissance de référence ( $Q_{ref}$ ).

L'onduleur shunt contrôle la tension continue du condensateur de liaison ( $V_{dc}$ ) et la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ). La Figure 4.13-c et la Figure 4.13-d montrent les variations de la tension  $V_{upfcbus}$  et les variations de la tension  $V_{dc}$  dues au changement brusque de la puissance de référence ( $P_{ref}$ ) respectivement. On observe que la tension  $V_{upfcbus}$  est contrôlée à 1,0 p.u et la tension continue  $V_{dc}$  a été contrôlée à 60 kV.

La figure 4.13-e représente la variation de la tension série ( $V_{se}$ ) injectée en série avec la tension du bus UPFC coté ligne de transmission par l'onduleur série.

On voit aisément à partir de la Figure 4.13 que le problème du faible amortissement dû à l'utilisation d'un contrôleur PI à gain élevé a été résolu par l'utilisation d'un contrôleur flou. Cette simulation a également validé la base de connaissances conçue pour le contrôleur flou développé précédemment.





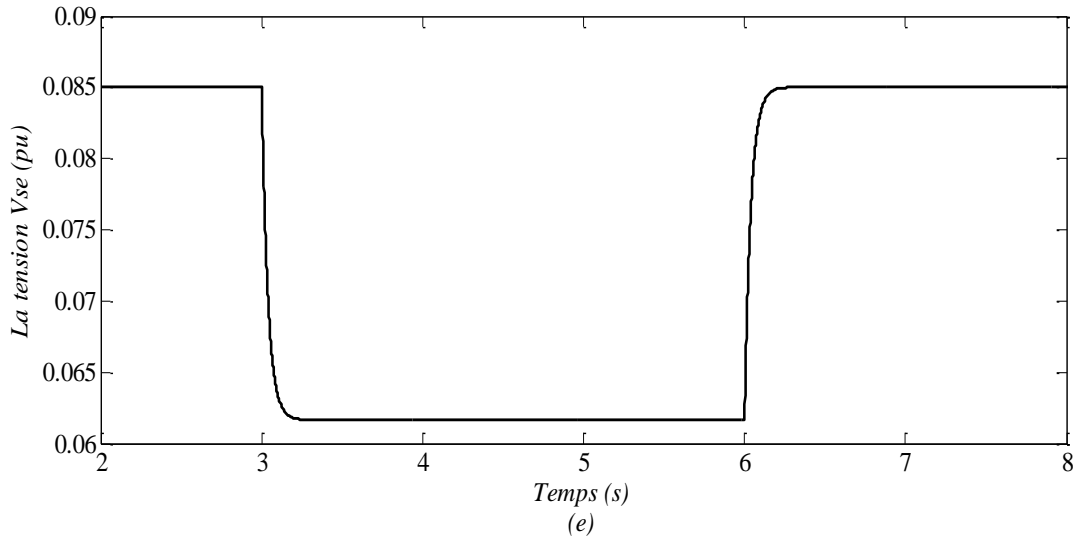


Fig. 4. 13 Réponse du réseau électrique vis-à-vis les changements de la puissance de référence pour un UPFC doté d'un contrôleur PI-flou adaptatif

#### 4.5.2 L'amortissement des oscillations de puissance avec un contrôleur flou

Un système d'alimentation à deux machines a été modélisé pour étudier l'amélioration de l'amortissement des oscillations de puissance en utilisant un UPFC. La Figure 4.14 montre un système d'alimentation à deux machines avec un UPFC.

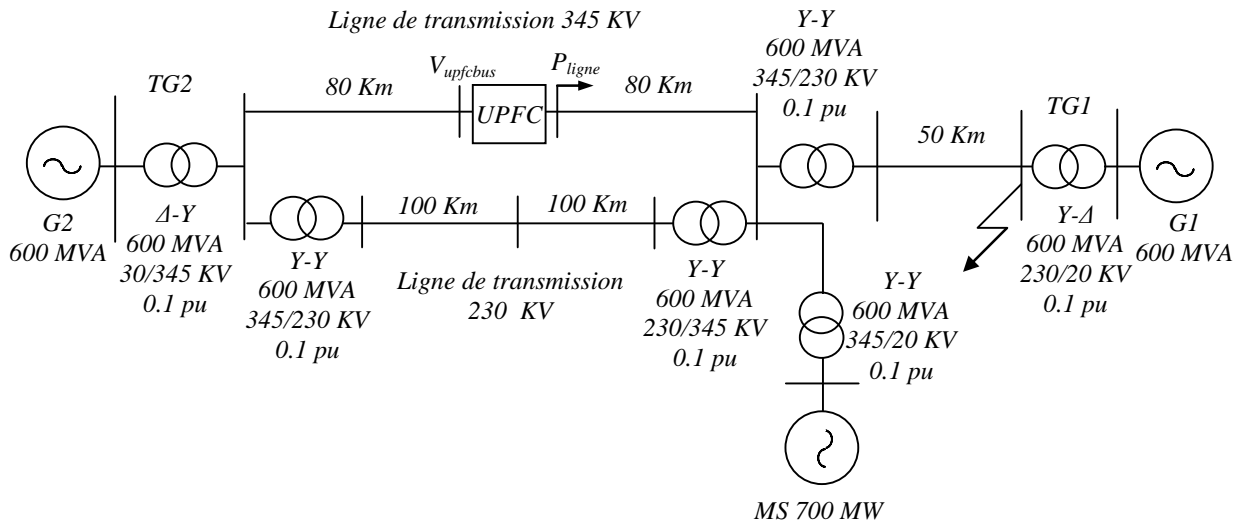


Fig. 4. 14 Système électrique à deux machines avec un UPFC

Les machines sont équipées avec des excitatrices statiques et PSS. Le générateur, l'excitatrice, PSS, le moteur synchrone de charge et les paramètres de l'UPFC sont donnés dans l'annexe-4 [58].

La charge totale dans le système d'alimentation est de 700 MW. La charge a été modélisée par un moteur synchrone. Le générateur  $G_2$  fournit 500 MW de puissance et le reste de

l'énergie est générée par  $G_1$  qui fournit également la puissance des pertes du système. Le générateur  $G_2$  transmet 500 MW de puissance à travers deux lignes de transmission de 345 kV et de 230 kV. Le flux de puissance à l'état d'équilibre dans la ligne de transmission de 345 kV est de 400 MW, alors que la ligne de transmission de 230 kV transporte 100 MW de puissance. L'UPFC est placé au centre de la ligne de 160 km 345 kV. L'onduleur shunt et l'onduleur série de l'UPFC sont évalués à 160 MVA. L'onduleur shunt contrôle la tension continue ( $V_{dc}$ ) et la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ).

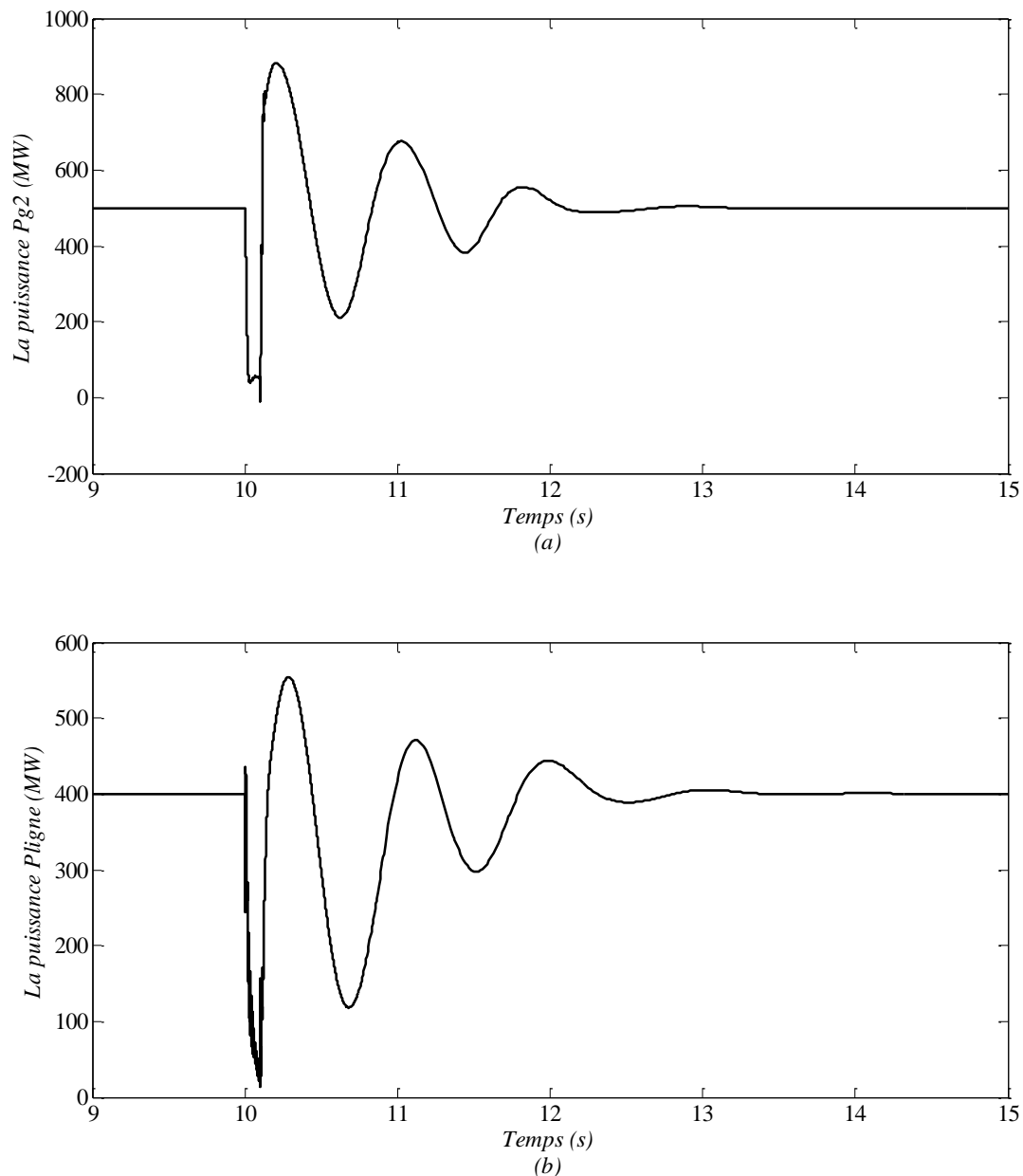


Fig. 4. 15 Réponse du réseau électrique vis-à-vis un défaut sans UPFC

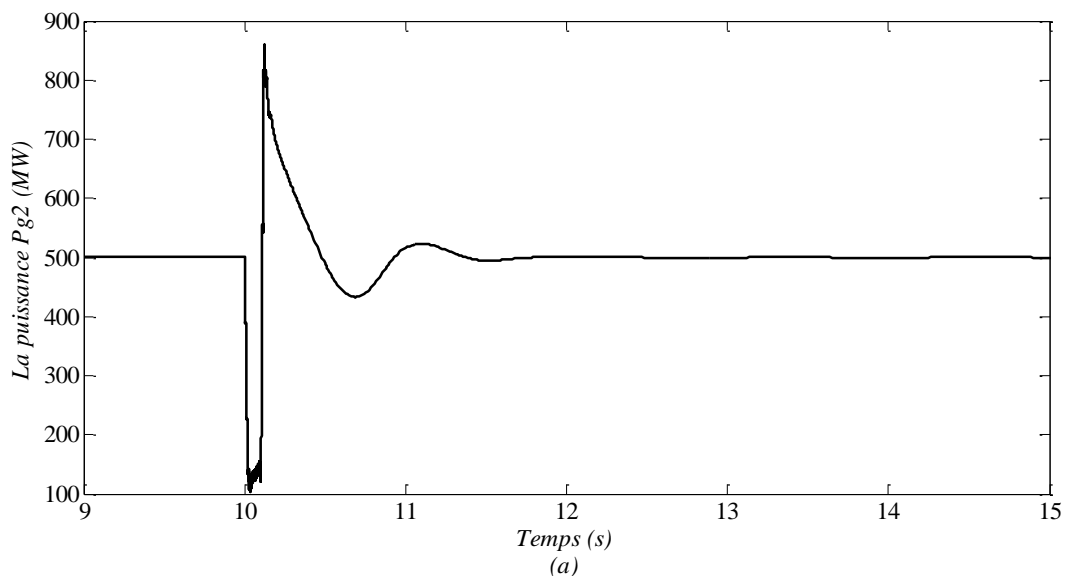
L'onduleur série contrôle le flux de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) à 400 MW. Un défaut triphasé de 100 ms est appliqué au bus de haute tension du

générateur  $G_1$  à 5s sans aucun changement dans la configuration du réseau. La réponse du système a été étudié avec et sans UPFC. La Figure 4.15 montre la réponse du système vis-à-vis le défaut triphasé, sans UPFC. La Figure 4.15-a montre les oscillations de la puissance électrique ( $P_{g2}$ ) du générateur  $G_2$  dues au défaut triphasé. La Figure 4.15-b montre les oscillations de la puissance active ( $P_{ligne}$ ) dans la ligne de transmission de 345 kV sans UPFC pour le même défaut triphasé.

Suite à ce défaut triphasé, la puissance active produite par le générateur  $G_1$  tombe à presque zéro. Le déséquilibre dans la production et de la charge provoque le générateur  $G_2$  de faire varier sa puissance électrique. Le pic de la puissance électrique du générateur  $G_2$  ( $P_{g2}$ ) est d'environ 900 MW.

Les oscillations de puissance électrique du générateur  $G_2$  s'amortissent dans environ 3s. Le pic de l'écoulement de la puissance dans la ligne de 345 kV ( $P_{ligne}$ ) est d'environ 550 MW. Les oscillations de cette puissance ont été également amorties dans les 3s. Afin d'étudier l'amélioration de l'amortissement des oscillations de puissance avec UPFC et aussi de valider la conception de son système de contrôle dans des conditions dynamiques, un UPFC était placé au milieu de la ligne de 345 kV, comme l'indique la Figure 4.15. Le flux de la puissance active dans cette ligne ( $P_{ligne}$ ) est contrôlé à 400 MW. La tension du bus UPFC ( $V_{upfbus}$ ) est régulée à 1,0 p.u. La tension continue du condensateur de liaison ( $V_{dc}$ ) est contrôlée à 60 kV. Un défaut triphasé de 100 ms a été crée sur le côté haute tension du générateur  $G_1$ .

La Figure 4.16 présente la réponse du système électrique vis-à-vis ce défaut triphasé avec UPFC. La Figure 4.16-a montre la puissance électrique du générateur  $G_2$  ( $P_{g2}$ ), et la Fig. 4.16-b montre le flux de la puissance active dans la ligne de 345 kV ( $P_{ligne}$ ).



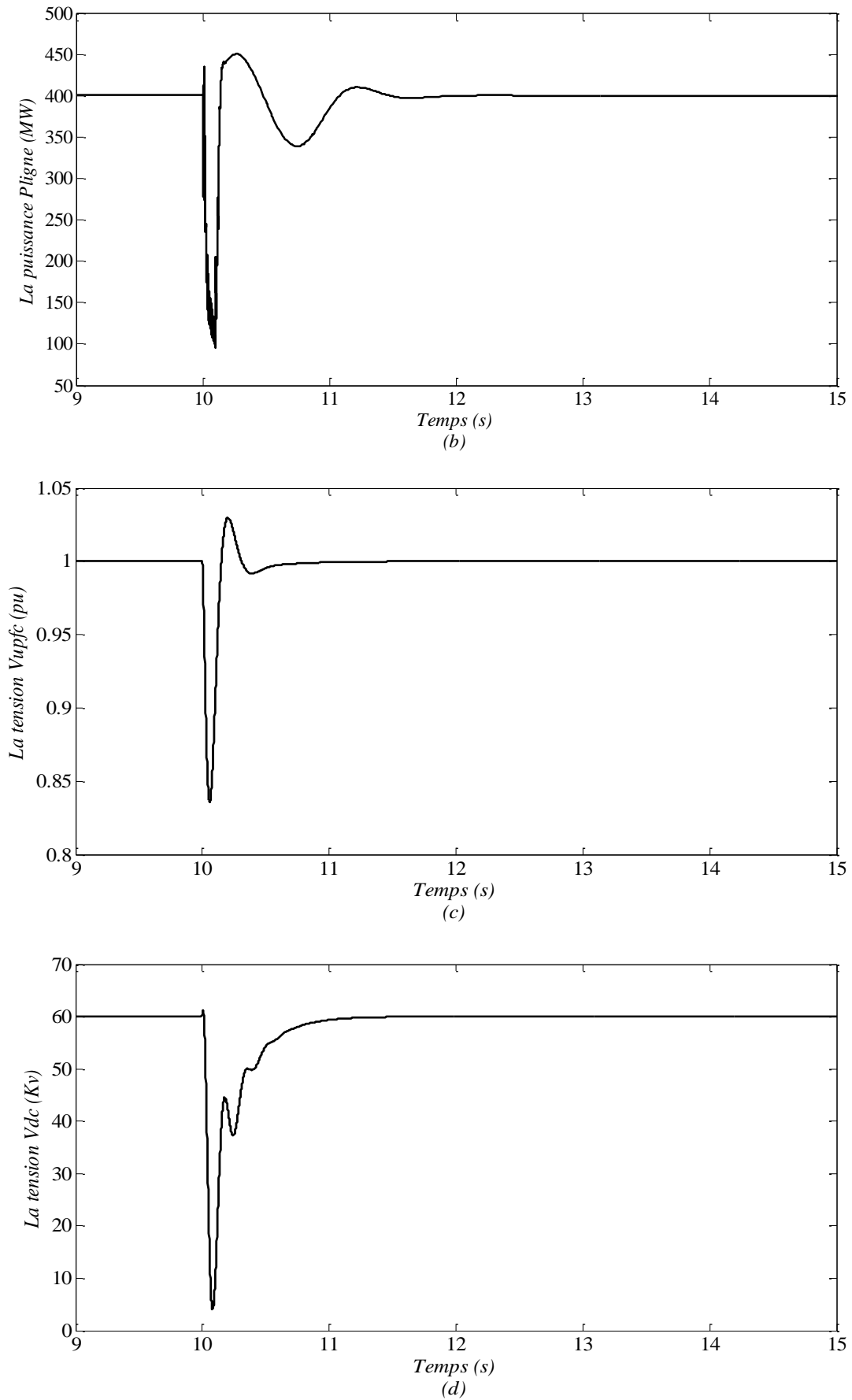


Fig. 4. 16 Réponse du réseau électrique vis-à-vis un défaut avec UPFC (avec PI-flou adaptatif)

En comparant la Figure 4.15-a avec la Figure 4.16-a, on voit que l'UPFC a réduit le pic de l'oscillation de puissance électrique du générateur  $G_2$  ( $P_{g2}$ ). Sans l'UPFC, le pic de la puissance électrique ( $P_{g2}$ ) générée par  $G_2$  a été d'environ 900 MW, mais avec l'UPFC, le pic de puissance électrique  $P_{G2}$  est d'environ 600 MW. Cette simulation a montré que l'UPFC a contribué à l'amortissement des oscillations du générateur  $G_2$ .

En comparant l'allure dans la Figure 4.15-b avec celle dans la Figure 4.16-b, on voit que le flux de la puissance active dans la ligne de 345 kV ( $P_{ligne}$ ) a été contrôlé à 400 MW. Le pic des oscillations sans UPFC est d'environ 550 MW, tandis qu'avec UPFC, le flux de puissance ne présente aucune oscillation. En effet l'UPFC a effectivement contrôlé les oscillations de flux de puissance dans la ligne de 345 kV et améliore l'amortissement des oscillations de puissance électrique du générateur  $G_2$ . La figure 4.16-c montre les oscillations de la tension de bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ) due à la perturbation du défaut triphasé, il provoque la tension  $V_{upfcbus}$  de chuter à environ 0,84 p.u. Cela conduit l'onduleur shunt à fournir de la puissance réactive pour le bus UPFC et de pousser sa tension à 1,0 p.u. Le système de contrôle de l'onduleur shunt régule la tension du bus UPFC à 1,0 p.u.

La Figure 4.16-d montre les oscillations de la tension continue  $V_{dc}$ , en effet le défaut triphasé provoque l'UPFC de libérer une quantité de son énergie stockée ce qui va conduire à diminuer la tension continue  $V_{dc}$  d'environ 5 kV. Cette diminution va être détectée par l'onduleur shunt et par la suite il va la réguler à 60 kV.

Cette simulation a permis de valider la conception du système de la commande floue et le système de contrôle de l'UPFC tout ensemble. Il a été également montré que l'UPFC peut fournir un amortissement efficace des oscillations de puissance. En outre, la capacité de fournir un contrôle simultané et coordonné de toutes les variables à savoir ( $P_{ligne}$ ), ( $V_{upfcbus}$ ) et ( $V_{dc}$ ) dans des conditions dynamiques a été mise en évidence grâce à cette simulation.

#### **4.6 Études comparatives entre les résultats de simulation d'un système électrique avec un UPFC doté d'un PI avec ceux d'un système avec un UPFC doté d'un contrôleur PI-flou Adaptatif pour l'onduleur série.**

##### **4.6.1 Cas d'un bus infini mono machine (BIMM)**

Le bus infini mono machine du système d'alimentation indiqué dans Figure 4.17 a été considéré pour montrer l'amélioration de l'amortissement des oscillations de l'angle rotorique de l'alternateur, sa vitesse rotorique et le flux de la puissance active dans la ligne de transmission en utilisant un contrôleur flou qui utilise la base de connaissances développée dans le tableau 4.1



pour adapter les paramètres du contrôleur. Le générateur, l'excitation, le PSS, l'UPFC et les paramètres du réseau sont donnés en Annexe-1.

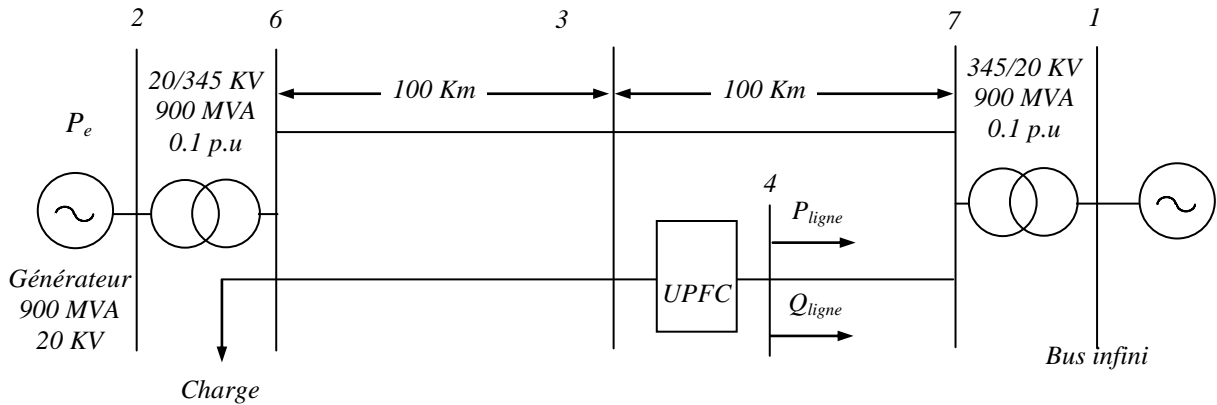


Fig. 4. 17 Réseau électrique composé d'un bus infini mono machine

L'UPFC est représentée par l'équation différentielle décrivant la dynamique du condensateur de liaison (équation 2.23). La perturbation est un défaut de 100 msec appliquée aux bornes du générateur sans aucun changement dans la structure du système d'alimentation.

La Figure 4.18 illustre les oscillations de l'angle rotorique du générateur avec UPFC (régulateur PI) et avec UPFC (Contrôleur flou). L'angle rotorique initial du générateur ( $\delta$ ) est d'environ 80 degrés. Le défaut triphasé est appliqué comme une admittance très élevée aux bornes du générateur puis elle est retirée après 100 msec.

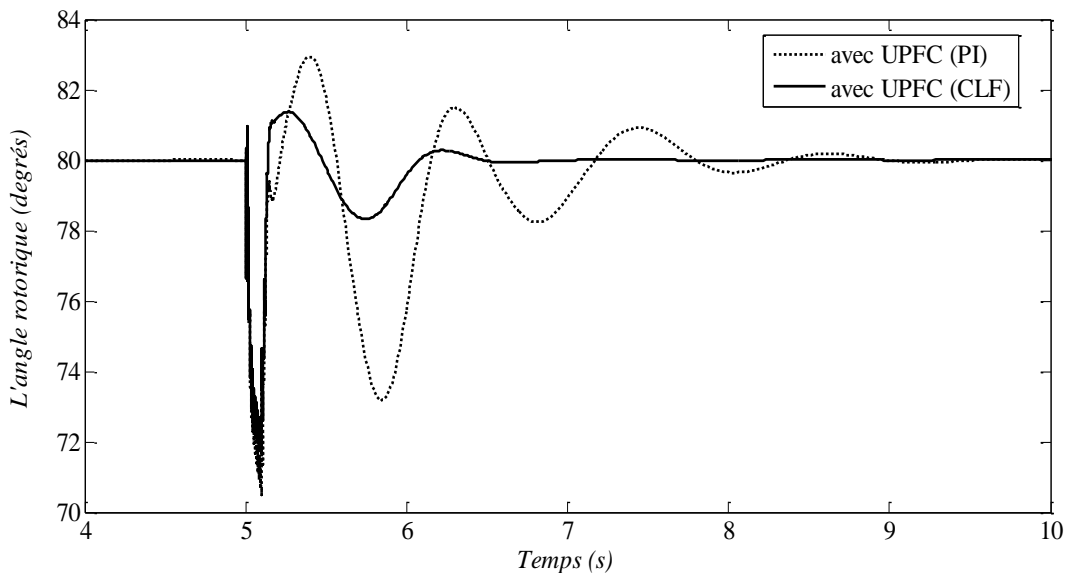


Fig. 4. 18 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur

On voit dans la Figure 4.18 que la première oscillation avec l'UPFC après la suppression du défaut est presque 83 degrés en utilisant le contrôleur PI, avec le contrôleur flou elle est

environ 81.5 degrés. Les oscillations ultérieures avec le régulateur flou montre plus d'amortissement par rapport au cas où l'UPFC est équipé d'un régulateur PI. Les simulations avec UPFC équipé d'un contrôleur PI-flou pour l'onduleur série ont effectivement montré que la base de connaissances utilisée pour le contrôleur flou est appropriée et fournissent de l'amélioration d'amortissement des oscillations de l'angle rotorique du générateur.

La Figure 4.19 présente les oscillations de la vitesse rotorique du générateur ( $\Delta\omega_r$ ) pour un défaut triphasé aux bornes du générateur. Les oscillations de la vitesse rotorique ( $\Delta\omega_r$ ) avec UPFC équipé d'un contrôleur PI-flou montre que l'amortissement est amélioré par rapport à celui quand l'UPFC est équipé d'un régulateur PI. La différence de l'amortissement est évidente dans les oscillations ultérieures.

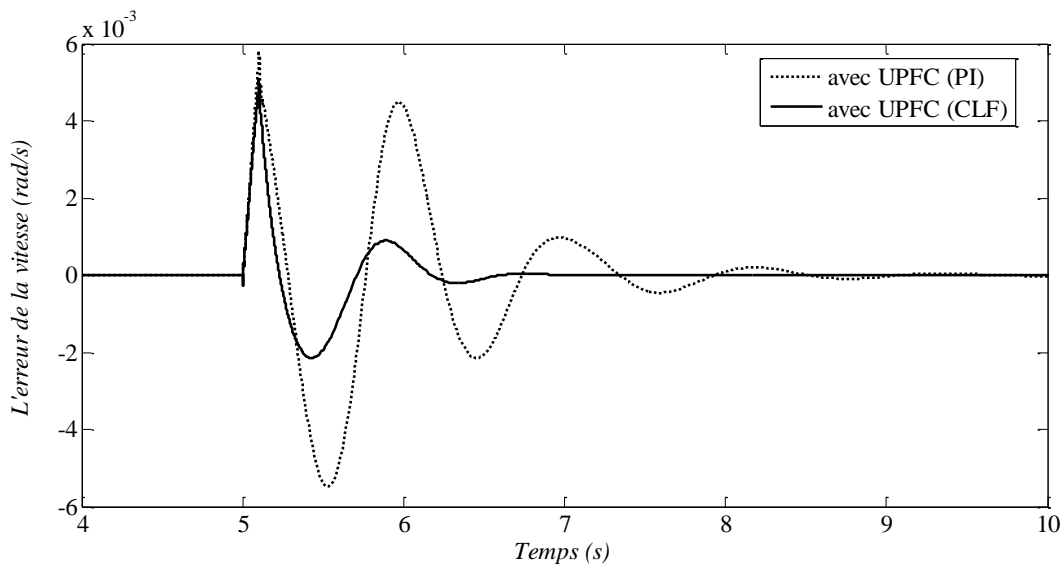


Fig. 4. 19 Amortissement des oscillations de la vitesse rotorique de générateur

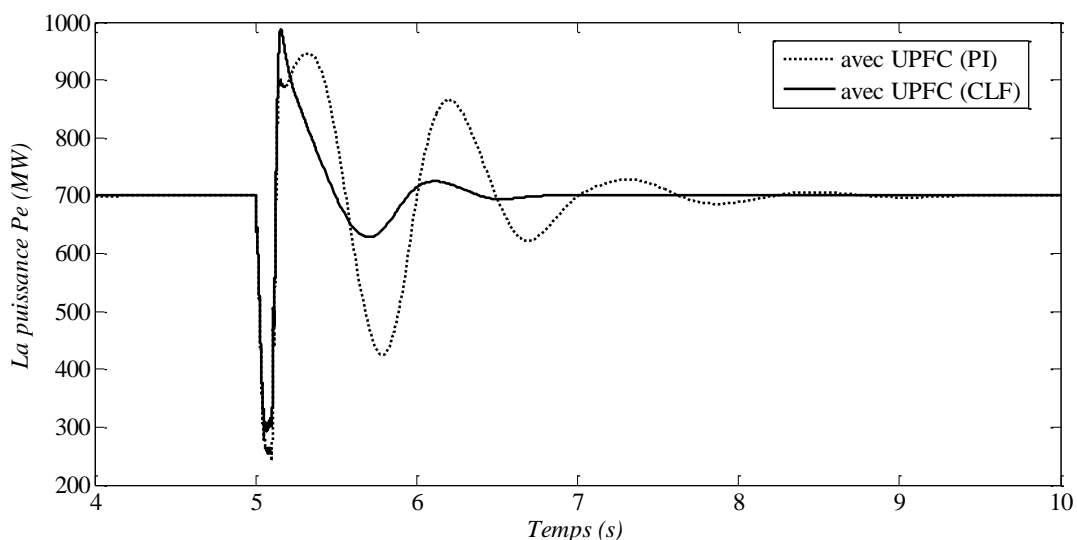


Fig. 4. 20 La puissance électrique de sortie du générateur

La Figure 4.20 présente la puissance électrique de sortie ( $P_e$ ) du générateur pour le même défaut triphasé. La première oscillation de la puissance du générateur électrique atteint un pic de 950 MW à partir de la valeur initiale de 700 MW. L'amortissement de la puissance électrique du générateur est beaucoup mieux avec le contrôleur flou qu'avec le contrôleur PI. Avec le contrôleur PI-flou il faut environ 2 secondes pour amortir les oscillations de la puissance électrique du générateur alors qu'avec le contrôleur PI il faut environ 4 secondes.

La Figure 4.21 représente le flux de la puissance active dans la ligne de transmission contenant l'UPFC ( $P_{\text{ligne}}$ ).

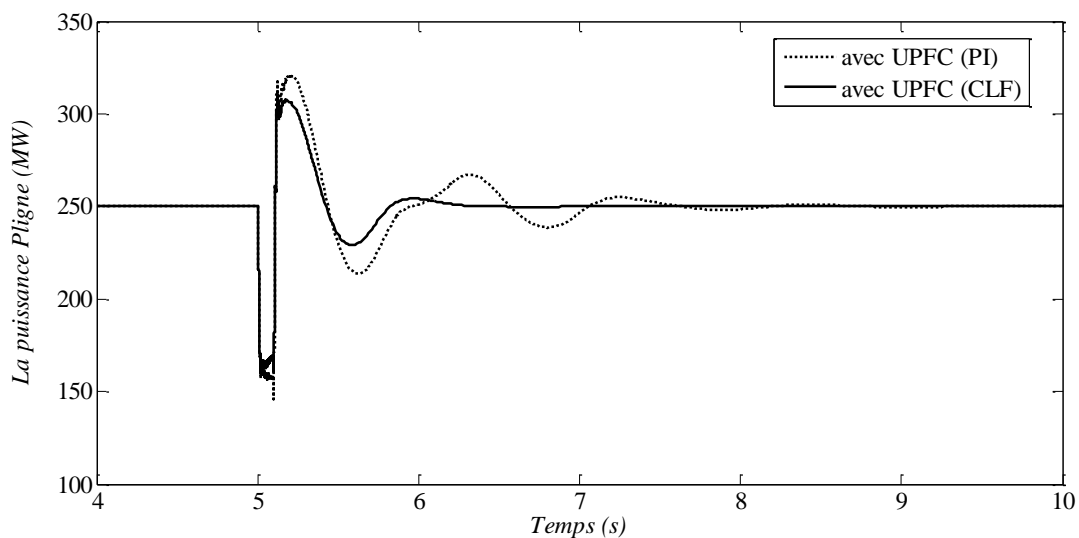


Fig. 4. 21 Flux de la puissance active dans la ligne de l'UPFC

Le flux initial de la puissance  $P_{\text{ligne}}$  est d'environ 250 MW. La première oscillation atteint une valeur de 325 MW lorsque l'UPFC contrôle le flux de puissance réelle avec un régulateur PI, alors lorsque l'UPFC est équipé d'un contrôleur PI-flou, elle est réduite à 300 MW, de plus les oscillations ultérieures sont mieux amorties avec le contrôleur flou.

#### 4.6.2 Cas d'un Réseau Électrique Multi Machines (REMM)

La figure 4.22 présente un système électrique multi-machine. Les générateurs 2 et 3 fournissent la puissance aux charges de la zone-1 et les générateurs 1 et 4 fournissent la puissance aux charges de la zone-2. La puissance générée dans la zone-1 est de 1400 MW alors que sa charge est  $(967 + j100)$  MVA. La zone-2 a une carence dans la production d'environ 400 MW, par la suite, elle importe de la puissance active à partir de la zone-1. Donc la zone-1 doit exporter vers la zone-2, dont la charge est  $(1767 + j100)$  MVA, une puissance active de 400MW. Un condensateur shunt de 350 MVAR est installé au bus 8. L'UPFC fournit 200 MVAR de puissance réactive shunt pour soutenir la tension du bus-5. L'onduleur série injecte

une tension en quadrature de 0,03 pu avec la tension du bus-5. Le flux de la puissance active dans la ligne de l'UPFC est de 228 MW. Les paramètres des générateurs, excitatrice / PSS, le réseau et l'UPFC sont donnés en annexe-2.

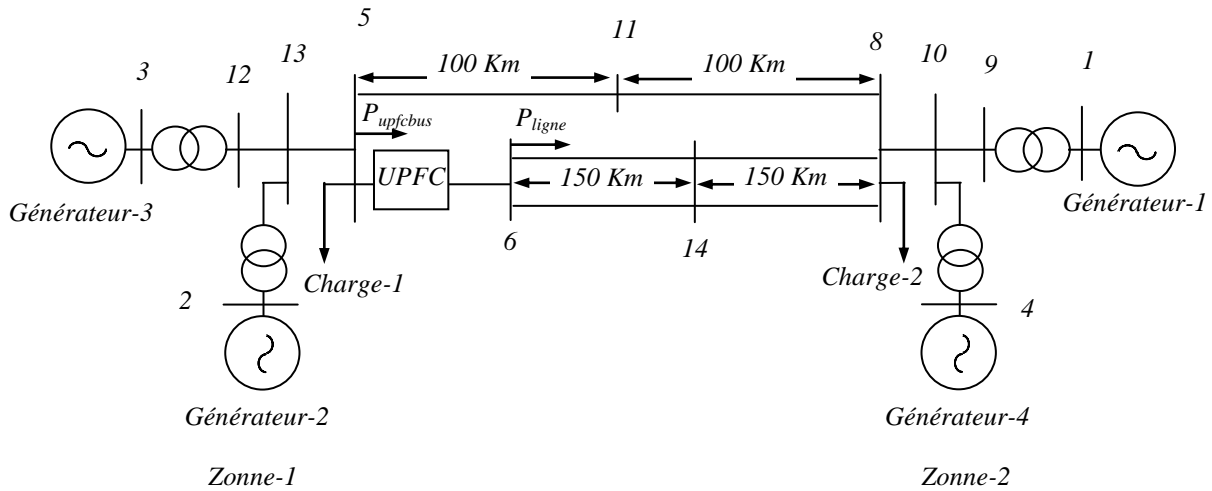


Fig. 4. 22 Réseau électrique à deux zones avec UPFC

Dans cette simulation, un défaut triphasé de 100 ms est supposé avoir lieu au bus-5 de la zone-1 sans aucun changement dans la structure du système d'alimentation. Le flux de puissance dans la ligne de transmission à double circuit (du bus 6 au bus 14 dans la Figure 4.22) sans UPFC est de 228MW. Donc, pour être en mesure de comparer les performances dynamiques avec un UPFC, le flux de puissance dans la ligne de l'UPFC est ajusté à 228MW. Ceci est réalisé en injectant une tension de 0,03 p.u en quadrature avec la tension du bus UPFC (Bus-5). De plus, les condensateurs shunt aux bus de charges ne sont pas déconnectés pendant et après le défaut, de même, l'UPFC n'est pas déconnecté pendant la période de défaut. La tension initiale du condensateur de liaison de l'UPFC est de 2,0 p.u.

Pour le cas d'un REMM, sept ensembles flous ont été utilisés pour chaque variable, à savoir, l'erreur le flux de puissance active, la variation de l'erreur de flux de puissance active et la variation de la tension série en quadrature injectée.

Le tableau 4.1 présente la base de connaissances floue utilisée pour le cas REMM, un univers de discours de  $\pm 1,0$  a été utilisé pour l'erreur de flux de puissance active et le gain d'entrée a été fixé à 2,0. Pour la variation de l'erreur de flux de puissance active, un univers de discours de  $\pm 1,0$  a été utilisé avec un gain d'entrée égal à 0,02. L'univers de discours pour la variation des variables de sortie a été choisie égal à  $\pm 1$ , et leurs gains utilisés sont respectivement 1,0 et 5,0.

La Figure 4.23 présente les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_2$  par rapport au générateur  $G_1$  pour le défaut de 100 ms au bus 5. Le générateur  $G_1$  est supposé la référence pour toutes les simulations.

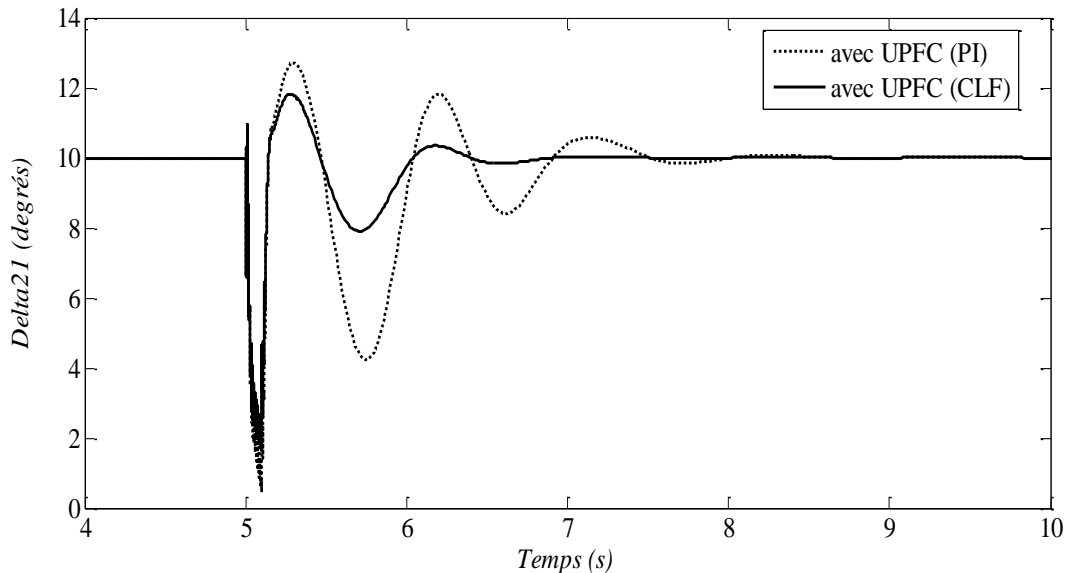


Fig. 4. 23 Différence de l'angle rotorique entre les générateurs  $G_2$  et  $G_1$ . Défaut au bus-5.

Le point de fonctionnement initial du générateur  $G_2$  par rapport au générateur  $G_1$  ( $\delta_{21}$ ) est d'environ 10 degrés (Figure 4.23). Avec le défaut triphasé au bus 5, l'énergie électrique dans la zone-1 se rend à une valeur très faible provoquant les angles rotoriques des générateurs  $G_3$  et  $G_2$  d'augmenter dans la première oscillation par rapport au  $G_1$ . Avec un UPFC équipé d'un régulateur PI, les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_2$  ( $\delta_{21}$ ) s'amortissent dès la première oscillation qui est près de 13 degrés d'environ 3 secondes. Alors qu'avec un UPFC équipé d'un contrôleur PI-flou adaptatif, les oscillations s'amortissent très rapidement dans presque 1.5 secondes avec un dépassement plus faible (environ 12 degrés).

La Figure 4.24 montre les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_3$  par rapport au générateur  $G_1$  ( $\delta_{31}$ ). La différence initiale de l'angle rotorique est d'environ 20 degrés. Avec un UPFC équipé d'un régulateur PI, la première oscillation atteint une valeur de 25 degrés et prend environ 3 secondes pour amortir les oscillations. Mais avec un UPFC équipé d'un contrôleur PI-flou adaptatif, les oscillations de l'angle ( $\delta_{31}$ ) s'amortissent beaucoup plus rapidement dans presque 1.5 secondes.

La Figure 4.25 montre le total des oscillations de flux de puissance inter-zones ( $P_{inter-zones}$ ) pour un défaut triphasé au bus-5. Le flux initial de la puissance active est de 400 MW exportée à la zone-2 à travers les trois lignes de transmission. L'application d'un défaut triphasé provoque le

total de la puissance active inter zones ( $P_{interzones}$ ) de tomber à une valeur très basse. Après la suppression du défaut, le dépassement dans le flux de la puissance active inter zones ( $P_{interzones}$ ) avec UPFC est d'environ 575MW. L'amortissement des oscillations de flux de la puissance active inter zones ( $P_{interzones}$ ) dans la double ligne de transmission (bus 6 au bus 14 dans la Figure 4.25) contrôlée par un UPFC équipé d'un contrôleur PI-flou est amélioré par rapport au cas où celui-là est équipé par un contrôleur PI.

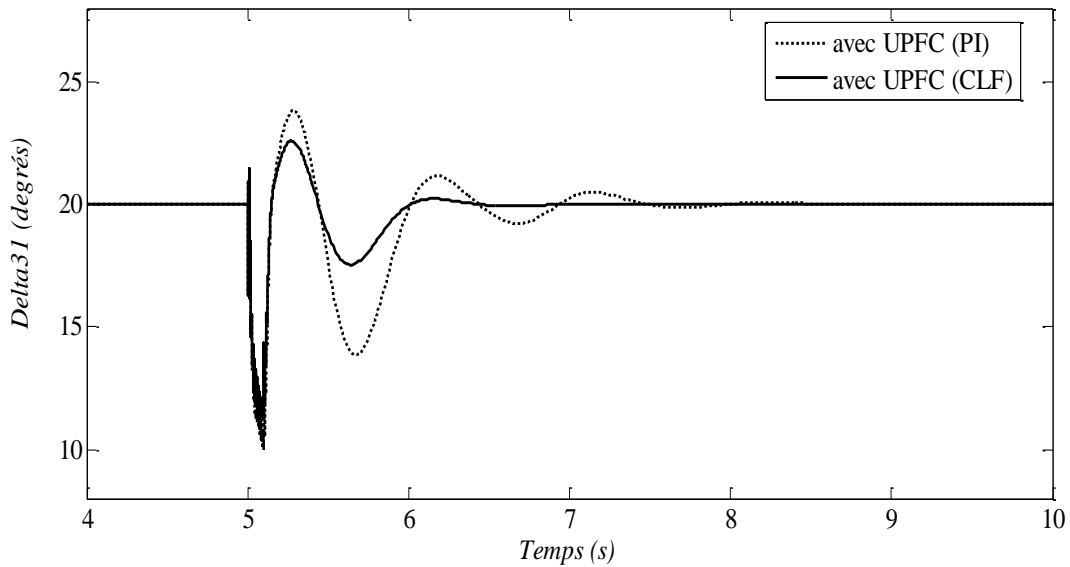


Fig. 4. 24 Les oscillations de l'angle rotorique du générateur  $G_3$  par rapport à  $G_1$

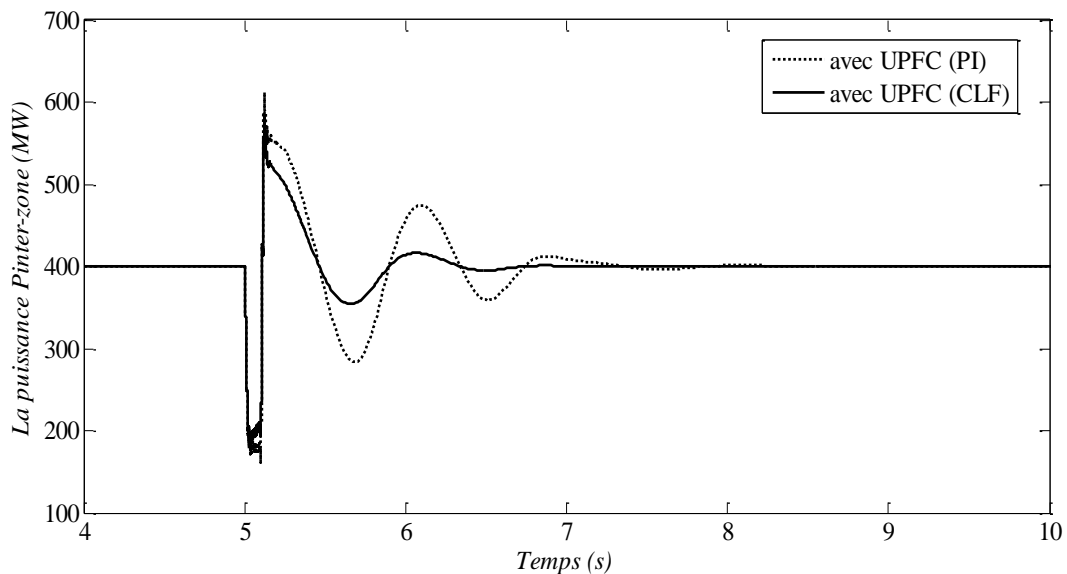


Fig. 4. 25 Les oscillations de flux de la puissance active inter zones

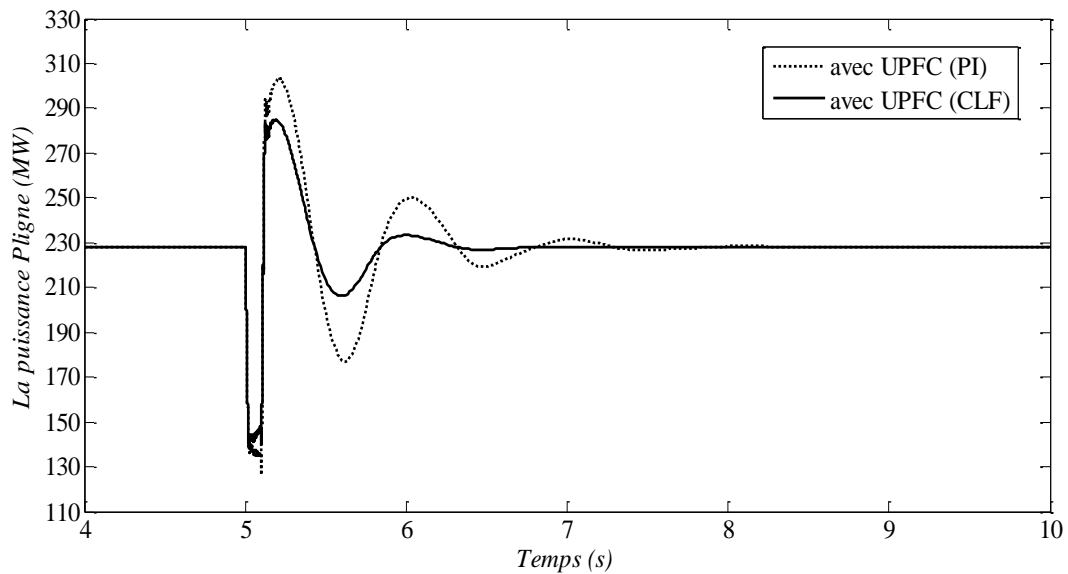


Fig. 4. 26 Flux de la puissance active dans la ligne de transmission de l'UPFC

La Figure 4.26 montre le flux de la puissance active dans la ligne de transmission avec UPFC ( $P_{ligne}$ ). Le flux initial de la puissance dans la ligne de transmission de l'UPFC ( $P_{ligne}$ ) est d'environ 228MW. Le défaut triphasé provoque le flux de puissance de tomber à environ 180 MW pendant la période de défaut.

Avec un UPFC équipé d'un régulateur PI, les oscillations de flux de la puissance active dans la ligne de transmission de l'UPFC ( $P_{ligne}$ ) sont amorties en environ 3 secondes, cependant avec un UPFC équipé d'un contrôleur flou, ces oscillations s'amortissent efficacement dans les 1,5 secondes.

#### 4.7 Conclusion

Les simulations réalisées dans le chapitre précédent ont montré que l'utilisation d'un contrôleur PI pour l'onduleur série pour contrôler le flux de la puissance active dans la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) fournit une réponse oscillatoire pour un changement en échelon du flux de la puissance de référence ( $P_{ref}$ ). Le problème du faible amortissement a été résolu en utilisant un contrôleur flou pour l'onduleur série pour contrôler le flux de la puissance active dans une ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ). L'amélioration de la réponse à un échelon d'entrée de la puissance active de référence ( $P_{ref}$ ) avec un contrôleur flou par rapport à celle avec un contrôleur PI pour l'onduleur série a été mise en évidence dans ce chapitre.

Une base de connaissances pour un contrôleur flou a été développé pour l'onduleur série pour améliorer l'amortissement des oscillations en mode local et en mode inter zones. La base de connaissances développée comprend des informations sur les univers de discours de l'erreur de

flux de la puissance active et la variation de l'erreur de flux de puissance active qui ont été obtenues à partir des simulations réalisées au chapitre-3.

L'amélioration de l'amortissement des oscillations de puissance en utilisant un UPFC avec contrôleur PI-flou adaptatif a été introduite par le biais des simulations par le logiciel *MATLAB/Simulink*<sup>®</sup>. Ces simulations ont également validées la conception du système de contrôle de l'onduleur shunt et l'onduleur série. En outre, la simulation de l'amortissement des oscillations de puissance a montré que le système de contrôle de l'UPFC désigné fonctionne d'une manière unifiée et stable. Dans des conditions transitoires, le système de contrôle de l'UPFC a été en mesure de contrôler le flux de la puissance active de la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ), la tension du bus UPFC ( $V_{upfcbus}$ ) et la tension continue du condensateur de liaison ( $V_{dc}$ ) simultanément.

Deux conclusions importantes peuvent être tirées à partir des simulations faites sur un BIMM et un REMM avec UPFC équipé d'un contrôleur flou.

1. L'UPFC équipé d'un contrôleur PI-flou adaptatif pour l'onduleur série peut offrir de meilleures performances par rapport à l'UPFC équipé d'un contrôleur PI.
2. Ces simulations ont montré que la base de connaissances développée pour le contrôleur flou pour être appliquée au système de contrôle de l'onduleur série est justifiée et ne pose pas de problème de la stabilité.



## *Conclusion et perspectives*

## 1- Conclusion

Dans le but d'évaluer les performances d'un UPFC dans un système électrique et d'examiner son apport au contrôle de flux de charges/de l'écoulement de puissances à travers une ligne de transmission, une stratégie de contrôle pour l'UPFC a été conçue dans ce mémoire.

Un bref aperçu sur les stratégies de contrôle et la conception du système de contrôle pour l'UPFC dans la littérature a été, également, effectué et analysé.

Des simulations numériques par le logiciel *MATLAB/Simulink*<sup>®</sup> ont été menées pour montrer l'amélioration de l'amortissement du système électrique avec un UPFC en utilisant la stratégie de commande conçue.

Les trois principales composantes de l'UPFC sont l'onduleur shunt et son transformateur, l'onduleur série et son transformateur, et le condensateur de liaison du bus continu. Cependant, le condensateur de la liaison continue constitue un élément crucial pour le bon fonctionnement de l'UPFC. Il fournit la tension continue nécessaire à l'exploitation simultanée de l'onduleur shunt et l'onduleur série. Cependant la perte de la tension continue lors des perturbations pourrait conduire à l'instabilité du système et le retrait subséquent de l'UPFC du fonctionnement. En outre, la puissance active de l'onduleur série est alimentée par l'onduleur shunt. Cette puissance est due en raison de l'interaction entre la tension injectée de l'onduleur série et le courant de la ligne de transmission. Si le fonctionnement de l'onduleur shunt et celui de l'onduleur série ne sont pas coordonnés à l'égard de la demande de la puissance active de l'onduleur série, il pourrait conduire à une perte de la tension continue. C'est un problème important rencontré pendant le processus de la conception du système de contrôle de l'UPFC impliquant ainsi la conception d'un système de contrôle intégré de flux de puissances active et réactive dans les lignes de transmission tout en contrôlant la tension du bus UPFC et la tension continue du condensateur de liaison.

Pour faire fonctionner l'UPFC, une stratégie de contrôle appropriée doit être définie pour contrôler le flux de puissances active et réactive dans la ligne de transmission tout en contrôlant la tension du bus UPFC et la tension continue simultanément. Par la suite, pour atteindre la stratégie de contrôle, les systèmes de contrôle appropriés pour les onduleurs shunt et série doivent être conçus.

Dans le cas de l'onduleur shunt, et pour but de contrôler la tension du bus UPFC et la tension continue simultanément, un système de contrôle découplé a été conçu et présenté dans cette thèse. Ce système permet de contrôler indépendamment les boucles de contrôle de la

tension du bus UPFC et de la tension continue via des contrôleurs de type Proportionnel-Intégral. Le système de contrôle découplé a été conçu sur la base des techniques du contrôle linéaire qui comprend la dynamique du condensateur de liaison. En outre, une procédure détaillée a été présentée pour identifier les gains des régulateurs PI. Le système de contrôle découplé est constitué de deux boucles; une boucle interne des courants d'axes D-Q et une boucle externe qui définit la référence de la boucle interne.

La procédure de la conception a été basée sur la conception de la boucle interne en premier lieu ensuite la boucle externe. Les informations concernant les gains des régulateurs PI de la boucle interne sont utilisées lors de la conception du régulateur PI de la boucle externe. En effet, la conception du système de contrôle a été effectuée sur un système où l'onduleur est connecté à une source de tension constante, il s'agissait de la linéarisation du système d'alimentation en tension continue de l'onduleur shunt.

Les performances du système de contrôle découplé conçu ont été testées en utilisant le logiciel *MATLAB/Simulink*<sup>®</sup>. Des tests de la réponse indicielle ont été menés pour non seulement montrer la validité du système de contrôle, mais aussi de mettre en évidence la capacité du système pour une réponse rapide à la puissance réactive demandée tout en régulant la tension continue du condensateur de liaison.

Quant à l'onduleur série, le problème du faible amortissement qui lui est associé lors du contrôle de flux de la puissance active dans une ligne de transmission a été résolu en utilisant un contrôleur PI-flou adaptatif. La base de connaissances pour le contrôleur flou a été développée en se basant sur un processus logique qui inclut la modélisation de l'UPFC, en menant des études aux petites perturbations et ensuite effectuant des simulations dans le domaine temporel. Les simulations numériques dans le domaine temporel fournissent une grande quantité d'informations sur laquelle des règles pour le régulateur flou ont été développées. La complexité de la conception du contrôleur flou pour l'onduleur série réside dans le fait que le contrôleur flou devrait non seulement améliorer les performances de l'UPFC mais aussi il ne devrait pas causer de l'instabilité qui pourraient découler de la non-coordination de fonctionnement de l'onduleur série avec l'onduleur shunt. Ce double problème a été pris en considération lors de la conception du contrôleur flou pour l'onduleur série.

L'analyse des performances qui implique des études de la réponse indicielle et de défaut triphasé a été menée pour montrer la validité du système de contrôle flou conçu.

Des simulations, sous logiciel MATLAB/Sumilink, ont été menées, avec l'onduleur shunt contrôlant la tension du bus UPFC et la tension continue du condensateur de liaison et l'onduleur série contrôlant le flux des puissances active et réactive dans la ligne de transmission, ces simulations ont montrées l'amélioration de l'amortissement des oscillations de puissance avec et sans UPFC. Avec cette stratégie, il a été mentionné que l'augmentation/la diminution de la puissance réactive dans la ligne de transmission réalisée par l'injection d'une tension en phase par l'onduleur série est en fait alimentée par l'onduleur shunt.

Les résultats de simulations montrent bien la validité de la stratégie de contrôle proposée et l'amélioration de l'amortissement des oscillations de la puissance.

## **2-Perspectives**

Les travaux réalisés dans cette thèse comprennent une conception du système de contrôle complète pour UPFC et étudient ses performances. A l'heure actuelle, tous les travaux réalisés considère que le système est équilibré. Cependant les systèmes de puissance en général, peuvent être déséquilibrés dans le sens où les courants et les tensions sont à composants de séquence négative et zéro. Très peu de recherches ont été effectuées dans le domaine de la conception d'un système de contrôle et de l'exploitation d'un UPFC sous condition de déséquilibre. Les futurs travaux de recherche tiendront compte de la conception d'un système de contrôle qui permet à l'UPFC de fonctionner de manière fiable dans les systèmes d'alimentation sous des conditions déséquilibrées.

# *Annexes*

## Annexe I

Tableau A1. 1 Données du réseau pour un Bus Infini Mono Machine

Du bus	Au bus	R	X	Bc/2
2	6	0.0	0.1	0.0
6	3	0.04675	0.4566	0.02178
3	4	0.0	0.1	0.0
4	7	0.0935	0.9132	0.01089
3	5	0.0	0.1	0.0
3	7	0.0935	0.9132	0.01089
7	1	0.0	0.1	0.0

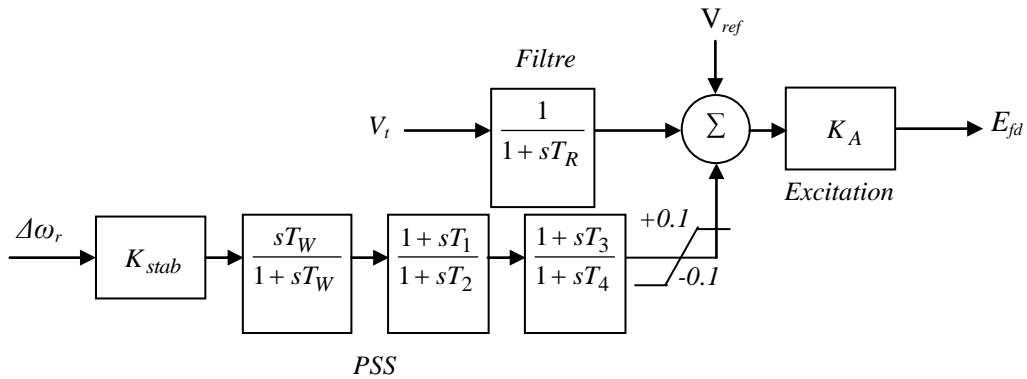
Tableau A1. 2 Données des bus pour BIMM

N° de bus/Type	tension de bus	$P_{gen}+jQ_{gen}$	$P_{char}+jQ_{char}$
1(Bus infini)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0
2(Bus P-V)	1.03	700+j0.0	0.0+j0.0
3(Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0
4(Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0
5(Bus charge)	1.0	0.0+j150	0.0+j0.0
6(Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	200+j50
7(Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0

## A1.3. Paramètres du générateur

$L_{adu} = 1.6$ ,  $L_{aqu} = 1.5$ ,  $l = 0.2$ ,  $L_{ad} = 0.835L_{adu}$ ,  $L_{aq} = 0.835L_{aqu}$ ,  $L_{fd} = 0.10667$ ,  $r_{fd} = 0.0005658$ ,  
 $L_{ld} = 0.1$ ,  $r_{ld} = 0.01297$ ,  $L_{1q} = 0.45652$ ,  $r_{1q} = 0.01297$ ,  $L_{2q} = 0.05833$ ,  $r_{2q} = 0.021662$ .

## A1.4 Modèle et paramètres de PSS et l'excitation



$$K_{stab}=9.5, T_w=10.0, T_1=0.05, T_2=0.02, T_3=3.0, T_4=5.4.$$

## A 1.5. Paramètres de l'UPFC

Capacité du lien continu = 1000 p.F,  $R_{cap} = 48400 \Omega$ .

Le transformateur de l'onduleur Shunt est évalué à 200 MVA, 230/66 kV,  $X_t = 0,0222$  per unit,

Le transformateur de l'onduleur séries est évalué à 44 MVA, 40/69 kV,  $X_t = 0.005$  per unit.

### A.1.6. Analyse aux petites perturbations

#### a) Modélisation du générateur:

La machine synchrone a été modélisée dans le repère rotorique d'axes d-q avec deux enroulements amortisseurs sur l'axe q et un amortisseur sur l'axe d. Les variables d'état de la machine ainsi que ses équations algébriques sont aussi donnés dans la référence [68]. Les équations mécaniques de la machine sont:

$$\begin{aligned}\frac{d\delta}{dt} &= \omega_0 \Delta\omega_r \\ \frac{d\Delta\omega_r}{dt} &= \frac{1}{2H} (T_m - T_e)\end{aligned}\tag{A1.6.1}$$

Les équations de tensions rotoriques sont données par le système suivant:

$$\begin{aligned}e_{fd} &= p\psi_{fd} + R_{fd}i_{fd} \\ 0 &= p\psi_{1d} + R_{1d}i_{1d} \\ 0 &= p\psi_{1q} + R_{1q}i_{1q} \\ 0 &= p\psi_{2q} + R_{2q}i_{2q}\end{aligned}$$

Les équations statoriques sont liées aux flux statoriques par

$$\begin{aligned}e_d &= -\psi_q \omega_r - R_a i_d \\ e_q &= \psi_d \omega_r - R_a i_q\end{aligned}$$

Les flux statoriques sont liées aux courants par:

$$\begin{aligned}\psi_d &= -(L_{ad} + ll)i_d + L_{ad}i_{fd} + L_{ad}i_{1d} \\ \psi_q &= -(L_{aq} + ll)i_q + L_{aq}i_{1q} + L_{aq}i_{2q}\end{aligned}$$

Les flux rotoriques et le couple électromagnétique du générateur sont:

$$\begin{aligned}\psi_{fd} &= L_{ffd}i_{fd} + L_{f1d}i_{1d} - L_{ad}i_d \\ \psi_{1q} &= L_{11q}i_{1q} + L_{aq}i_{2q} - L_{aq}i_q \\ \psi_{2q} &= L_{22q}i_{2q} + L_{aq}i_{1q} - L_{aq}i_q \\ T_e &= \psi_d i_q - \psi_q i_d\end{aligned}$$

L'ensemble ci-dessus des équations différentielles et algébriques sont linéarisés pour obtenir la matrice d'état de la machine sous la forme

$$\Delta\dot{X}_G = A_G \Delta X_G + B_G \Delta e_{Mdq}\tag{A1.6.2}$$

Où

$$\begin{aligned}\Delta X_G &= (\Delta\delta, \Delta\omega_r, \Delta\psi_{fd}, \Delta\psi_{1d}, \Delta\psi_{1q}, \Delta\psi_{2q}) \\ \Delta e_{Mdq} &= (\Delta e_d, \Delta e_q)\end{aligned}$$

$A_G$ ,  $B_G$  sont deux matrices constantes.

**b) Modèle du PSS (stabilisateur du système électrique):**

Le stabilisateur du système électrique est représenté avec deux blocks lead-lag.

Le block diagramme avec la fonction de transfert du PSS est donné dans l'Annexe-1. L'équation linéarisée du PSS peut être mettre sous la forme

$$\Delta \dot{X}_{pss} = A_{pss} \Delta X_{pss} + B_{pss} \Delta e_{Mdq} \quad (A1.6.3)$$

Les variables d'état correspondantes au PSS sont

$$\Delta X_{pss} = (\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta V_s)$$

Linéarisant l'équation 5.18 et combinant la avec les équations (A 1.6.3) et (A 1.6.3), nous obtenons:

$$\Delta \dot{X}_M = A_M \Delta X_M + B_M \Delta e_{Mdq} \quad (A 1.6.4)$$

où

$$\Delta \dot{X}_M = (\Delta \dot{X}_G, \Delta \dot{X}_{pss}, \Delta \dot{V}_{dc})$$

AM et BM sont deux matrices constantes.

**c) Modélisation du réseau:**

La marge de fréquence considérée dans cette étude est entre 0.1 Hz and 2.0 Hz. D'autre coté, pour réduire la complexité de la formulation du problème, les dynamiques du réseau sont négligées. Les charges sont représentées par une admittance constante shunt combinée dans la matrice des admittances du réseau. Le réseau est ensuite réduit pour inclure que les nœuds des machines et les nœuds de l'UPFC. À ce moment, des simplifications par rapport aux données de la tension du bus UPFC ( $V_{busupfc}$ ) et la tension du bus coté ligne de transmission ( $V_{ligne}$ ) ont été considérées afin de construire la matrice d'état complète. La tension du bus UPFC ( $V_{busupfc}$ ) a été représentée par VE et la tension du bus coté ligne de transmission ( $V_{ligne}$ ) par  $V_F$ . Linéarisant les équations du réseau, nous obtenons:

$$\begin{aligned} \Delta I_{MDQ} &= K \Delta V_{MDQ} + L \Delta V_{EFDQ} + M \Delta V_{shDQ} \\ \Delta I_{EFDQ} &= O \Delta V_{MDQ} + P \Delta V_{EFDQ} + Q \Delta V_{shDQ} \\ \Delta I_{shDQ} &= R \Delta V_{MDQ} + S \Delta V_{EFDQ} + U \Delta V_{shDQ} \end{aligned} \quad (A 1.6.5)$$

Les indices D et Q représentent l'axe réel et l'axe imaginaire du réseau. Les équations du réseau ont été écrites dans le format suivant, où les indices M, EF et sh se réfèrent aux nœuds de la machine, les nœuds entre lesquels l'onduleur série est placé et les nœuds de l'onduleur shunt respectivement. Les matrices K, L, M, O, P, Q, R, S et U sont les éléments correspond à l a matrice des admittances du réseau.

Les matrices de connections entre les axes d q de la machine et le plan d'axes D-Q sont données par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} e_d &= V_D \sin \delta - V_Q \cos \delta \\ e_q &= V_Q \sin \delta + V_D \cos \delta \end{aligned} \quad (A 1.6.6)$$



Où  $V_D$  et  $V_Q$  sont les tensions du réseau. La matrice de transformation peut être écrite comme suit:

$$T = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \quad (\text{A 1.6.7})$$

Donc l'équation (A 1.6.6) peut être écrite sous la forme suivante:

$$e_{Mdq} = TV_{MDQ} \quad (\text{A 1.6.8})$$

Linéarisant l'équation (A 1.6.8), on obtient,

$$\Delta e_{Mdq} = T_o \Delta V_{MDQ} + T_V \Delta X_M \quad (\text{A 1.6.9})$$

L'indice 'O' se réfère au point de fonctionnement dans lequel l'équation a été linéarisée.  $T_V$  est une matrice constante.

Les courants d'axes d-q de la machine sont associés au plan de référence par la matrice de transformation T:

$$\begin{aligned} i_{Md} &= I_{MD} \sin \delta - I_{MQ} \cos \delta \\ i_{Mq} &= I_{MQ} \sin \delta + I_{MD} \cos \delta \end{aligned} \quad (\text{A 1.6.10})$$

Linéarisant l'équation (A 1.6.10), nous obtenons:

$$\Delta i_{Mdq} = T_o \Delta I_{MDQ} \sin \delta + T_i \Delta X_M \quad (\text{A 1.6.11})$$

L'indice 'O' se réfère au point de fonctionnement dans lequel l'équation a été linéarisée.  $T_i$  est une matrice constante.

Combinant les équations (A1.6.4) et (A 1.6.9) associant les nœuds de la machine aux nœuds du réseau, nous obtenons:

$$\Delta \dot{X}_M = A_{MT} \Delta X_M + B_{MT} \Delta V_{MDQ} \quad (\text{A 1.6.12})$$

La tension de l'onduleur shunt ( $V_{sh}$ ) de l'UPFC est aussi divisée en deux composantes, une composante en phase noté ( $V_{shd}$ ) et l'autre en quadrature noté ( $V_{shq}$ ) avec la tension de phase du bus UPFC ( $V_E$ ).

La tension  $V_{sh}$  peut être s'exprimée sous la forme:

$$\begin{aligned} V_{shD} &= V_{shd} \cos \delta_d + V_{shq} \cos \delta_q \\ V_{shQ} &= V_{shd} \sin \delta_d + V_{shq} \sin \delta_q \end{aligned} \quad (\text{A 1.6.13})$$

$\delta_d$  et  $\delta_q$  sont les angles formés par les axes d et q avec le plan D-Q respectivement. (Voir chapitre 2, Fig. 2.4).

linéarisant l'équation (A 1.6.13) on obtient:

$$\Delta V_{shDQ} = SH_1 \Delta \delta_{dq} + SH_2 \Delta u \quad (\text{A 1.6.14})$$

La tension de l'onduleur série peut être s'exprimée dans la forme suivante

$$\begin{aligned} V_{seD} &= V_{sed} \cos \delta_d + V_{seq} \cos \delta_q \\ V_{seQ} &= V_{sed} \sin \delta_d + V_{seq} \sin \delta_q \end{aligned} \quad (\text{A 1.6.15})$$

Linéarisant l'équation (A 1.6.15)

$$\Delta V_{seDQ} = SE_1 \Delta \delta_{dq} + SE_2 \Delta u \quad (\text{A 1.6.16})$$

Avec SH1 SH2, SE1 et SE2 sont des matrices constantes et

$$\Delta u = (\Delta V_{shd}, \Delta V_{shq}, \Delta V_{seq}, \Delta V_{sed})$$

Les expressions des variables  $\delta_d$  et  $\delta_q$  peut être données sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} \delta_d &= \text{phase}(V_E) \\ \delta_q &= \text{phase}(V_E) + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (\text{A 1.6.17})$$

Où  $V_E$ , la tension du bus UPFC.

Linéarisant l'équation (A 1.6.17)

$$\Delta \delta_{dq} = KPC \Delta V_{EFDQ} \quad (\text{A 1.6.18})$$

Avec  $KPC$  est une matrice constante.

Il est nécessaire de rappeler que la variable  $I_{EFDQ}$  est les courants injectés aux bus entre lesquels l'UPFC est connecté. On se réfère au modèle équivalent de Norton de l'UPFC comme indiqué dans le chapitre 2 fig. 2.3, les courants injectés au bus E sont représentés par le terme ' $jV_{sem}Y_{EF}$ ' et les courants injectés au bus F sont donnés par ' $-jV_{sem}Y_{EF}$ ', où  $Y_{EF}$  est l'admittance entre le bus E et le bus F dans le modèle de Norton, en principe c'est l'admittance du transformateur série. Ainsi l'expression du courant injecté au bus E est donnée par:

$$I_{ED} + jI_{EQ} = (V_{seD} + jV_{seQ})jY_{EF} \quad (\text{A 1.6.19})$$

De même, le courant injecté au bus F

$$I_{FD} + jI_{FQ} = -(V_{seD} + jV_{seQ})jY_{EF} \quad (\text{A 1.6.20})$$

Linéarisant les equations (A 1.6.19) et (A 1.6.20),

$$\Delta I_{EFDQ} = I_{EFDQ1} \Delta V_{seDQ} \quad (\text{A 1.6.21})$$

Où  $I_{EFDQ1}$ : une matrice constant

Remplaçant  $\Delta V_{seDQ}$  de l'aquation (A 1.6.16) dans l'équation (A 1.6.21), on obtient

$$\Delta I_{EFDQ} = I_{EFDQ2} \Delta \delta_{dq} + I_{EFDQ3} \Delta u \quad (\text{A 1.6.22})$$

Avec  $I_{EFDQ2}$  et  $I_{EFDQ3}$  sont deux matrices constantes.

De l'équation (A 1.6.5) on a:

$$\Delta I_{EFDQ} = O\Delta V_{MDQ} + P\Delta V_{EFDQ} + Q\Delta V_{shDQ} \quad (A 1.6.23)$$

L'équation (A 1.6.23) peut être s'exprimé

$$\Delta V_{EFDQ} = P^{-1}\Delta I_{EFDQ} - P^{-1}O\Delta V_{MDQ} - P^{-1}Q\Delta V_{shDQ} \quad (A 1.6.24)$$

Combinant les équations (A 1.6.14, (A 1.6.22) et (A 1.6.24), on obtient

$$\Delta V_{EFDQ} = V_{EFDQ1}\Delta\delta_{dq} + V_{EFDQ2}\Delta u + V_{EFDQ3}\Delta V_{MDQ} \quad (A 1.6.25)$$

Avec  $V_{EFDQ1}$ ,  $V_{EFDQ2}$  et  $V_{EFDQ3}$  sont des matrices constantes

De l'équation (A 1.6.1) on peut exprimer les courants de la machine d'axes d-q de la manière suivante:

$$\Delta I_{Mdq} = IN_1\Delta X_M + IN_2\Delta e_{Mdq} \quad (A 1.6.26)$$

Avec  $IN_1$  et  $IN_2$  sont deux matrices.

Par identification des deux équations (A 1.6.11) et (A 1.6.26) et remplaçant  $\Delta e_{Mdq}$  par l'équation (A 1.6.9), nous obtenons:

$$\Delta I_{MDQ} = IN_5\Delta X_M + IN_6\Delta V_{Mdq} \quad (A 1.6.27)$$

Avec  $IN_5$  et  $IN_6$  sont deux matrices.

Par identification de l'équation  $\Delta I_{MDQ}$  de (A 1.6.5) avec (A 1.6.27) et remplaçant  $\Delta V_{EFDQ}$  et  $\Delta V_{shDQ}$  de l'équation (A 1.6.14) et (A 1.6.25) on peut écrire:

$$\Delta V_{MDQ} = V_{MDQ1}\Delta X_M + V_{MDQ2}\Delta\delta_{dq} + V_{MDQ3}\Delta u \quad (A 1.6.28)$$

Avec  $V_{MDQ1}$ ,  $V_{MDQ2}$  et  $V_{MDQ3}$  sont des matrices.

Remplaçant  $\Delta V_{MDQ}$  de l'équation (A 1.6.28) dans (A 1.6.25) on obtient:

$$\Delta V_{EFDQ} = V_{EFDQ4}\Delta\delta_{dq} + V_{EFDQ5}\Delta u + V_{EFDQ6}\Delta X_M \quad (A 1.6.29)$$

Avec  $V_{EFDQ4}$ ,  $V_{EFDQ5}$  et  $V_{EFDQ6}$  sont des matrices.

Remplaçant  $\Delta V_{EFDQ}$  dans (A 1.6.18) on obtient

$$\Delta\delta_{dq} = DQ_1\Delta u + DQ_2\Delta X_M \quad (A 1.6.30)$$

Avec  $DQ_1$  et  $DQ_2$  sont deux matrices.

Remplaçant  $\Delta\delta_{dq}$  dans l'équation (A 1.6.14) on obtient:

$$\Delta V_{shDQ} = SH_3\Delta u + SH_4\Delta X_M \quad (A 1.6.31)$$

$SH_3$  et  $SH_4$  sont des matrices

Remplaçant  $\Delta\delta_{dq}$  dans l'équation (A 1.6.16) on obtient:

$$\Delta V_{seDQ} = SE_3\Delta u + SE_4\Delta X_M \quad (A 1.6.32)$$

$SH_3$  et  $SH_4$  sont deux matrices.

Remplaçant  $\Delta\delta_{dq}$  de l'équation (A 1.6.30) dans l'équation (A 1.6.29), on peut écrire

$$\Delta V_{EFDQ} = V_{EFDQ7} \Delta X_M + V_{EFDQ8} \Delta u \quad (\text{A 1.6.33})$$

$V_{EFDQ7}$  et  $V_{EFDQ8}$  sont deux matrices.

Remplaçant  $\Delta\delta_{dq}$  de l'équation (A 1.6.30) dans l'équation (A 1.6.28), on peut écrire

$$\Delta V_{MDQ} = V_{MDQ4} \Delta X_M + V_{MDQ5} \Delta u \quad (\text{A 1.6.34})$$

$V_{MDQ4}$  et  $V_{MDQ5}$  sont deux matrices.

Linéarisant l'équation 2.23 exprimant la dynamique du condensateur de liaison, on obtient

$$\Delta \dot{V}_{dc} = W_1 \Delta X_M + W_2 \Delta I_{seDQ} + W_3 \Delta I_{shDQ} + W_4 \Delta V_{seDQ} + W_5 \Delta V_{shDQ} \quad (\text{A 1.6.35})$$

Avec  $W_1$  à  $W_5$  sont des matrices,  $I_{seDQ}$  sont les courants de la ligne de transmission dans la plan d'axes D-Q.

Pour trouver une expression du courant de la ligne de transmission  $I_{seDQ}$ , on a:

$$I_{seDQ} = [(V_{ED} + jV_{EQ}) + (V_{seD} + jV_{seQ}) - (V_{FD} + jV_{FQ})] (-jY_{EF}) \quad (\text{A 1.6.36})$$

Linéarisant l'équation (A 1.6.36)

$$\Delta I_{seDQ} = I_{SEDQ1} \Delta V_{EFDQ} + I_{SEDQ2} \Delta V_{seDQ} \quad (\text{A 1.6.37})$$

Combinant les équations (A 1.6.32), (A 1.6.33) et (A 1.6.37) on obtient

$$\Delta I_{seDQ} = I_{SEDQ3} \Delta X_M + I_{SEDQ4} \Delta u \quad (\text{A 1.6.38})$$

$I_{SEDQ1}$ ,  $I_{SEDQ2}$ ,  $I_{SEDQ3}$  et  $I_{SEDQ4}$  sont des matrices.

Pour déterminer l'expression du courant  $I_{shDQ}$  on a de l'équation (A 1.6.5)

$$\Delta I_{shDQ} = R \Delta V_{MDQ} + S \Delta V_{EFDQ} + U \Delta V_{shDQ} \quad (\text{A 1.6.39})$$

Combinant les équations (A 1.6.31), (A 1.6.33), (A 1.6.34) et (A 1.6.39) on obtient

$$\Delta I_{shDQ} = I_{SHDQ1} \Delta X_M + I_{SHDQ2} \Delta u \quad (\text{A 1.6.40})$$

$I_{SHDQ1}$  et  $I_{SHDQ2}$  sont deux matrices.

Combinant les équations (A 1.6.31), (A 1.6.32), (A 1.6.35), (A 1.6.38) et (A 1.6.40) on obtient

$$\Delta \dot{V}_{dc} = W_6 \Delta X_M + W_7 \Delta u \quad (\text{A 1.6.41})$$

$W_6$  et  $W_7$  sont deux matrices.

Combinant les équations (A 1.6.12), (A 1.6.34) et (A 1.6.41) on obtient

$$\Delta \dot{X}_M = A \Delta X_M + B \Delta u \quad (\text{A 1.6.42})$$

A et B sont deux matrices.

**d) les variables de sortie:**

Les variables de sortie considérées sont la tension de bus de l'UPFC ( $V_E$ ), la tension continue du condensateur de liaison ( $V_{dc}$ ), le flux de la puissance active de la ligne de transmission ( $P_{ligne}$ ) et la tension de bus coté ligne de transmission ( $V_F$ ).

$$\Delta Y = [\Delta V_E, \Delta V_{dc}, \Delta P_{ligne}, \Delta V_F] \quad (\text{A 1.6.43})$$

Les expressions de ces variables seront données après. Puisque  $\Delta V_{dc}$  est une variable d'état, il y aura aucun besoin de son expression.

L'expression de la tension du bus UPFC  $V_E$  et donnée la formule suivante:

$$V_E = \sqrt{(V_{ED})^2 + (V_{EQ})^2} \quad (\text{A 1.6.44})$$

La linéarisation de cette équation donne

$$\Delta V_E = \left( \frac{V_{ED0}}{V_{E0}} \right)^2 \Delta V_{ED} + \left( \frac{V_{EQ0}}{V_{E0}} \right)^2 \Delta V_{EQ} \quad (\text{A 1.6.45})$$

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante:

$$\Delta V_E = OP_1 \Delta V_{EFDQ} \quad (\text{A 1.6.46})$$

$OP_1$  est une matrice

Combinant les équations (A 1.6.33) et (A 1.6.46) on obtient

$$\Delta V_E = OP_2 \Delta X_M + OP_3 \Delta u \quad (\text{A 1.6.47})$$

$OP_2$  et  $OP_3$  sont deux matrices.

L'expression de la puissance active  $P_{ligne}$  est donnée par

$$P_{ligne} = V_{FD} I_{seD} + V_{FQ} I_{seQ} \quad (\text{A 1.6.48})$$

Linéarisant cette équation, on obtient

$$\Delta P_{ligne} = V_{FD0} \Delta I_{seD} + \Delta V_{FD} I_{seD0} + V_{FQ0} \Delta I_{seQ} + \Delta V_{FQ} I_{seQ0} \quad (\text{A 1.6.49})$$

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante

$$\Delta P_{ligne} = OP_4 \Delta I_{seDQ} + OP_5 \Delta V_{EFDQ} \quad (\text{A 1.6.50})$$

$OP_4$  et  $OP_5$  sont deux matrices

Combinant les équations (A 1.6.33), (A 1.6.38) et (A 1.6.50)

$$\Delta P_{\text{ligne}} = OP_6 \Delta X_M + OP_7 \Delta u \quad (\text{A 1.6.51})$$

$OP_6$  et  $OP_7$  sont deux matrices.

L'expression de la tension de bus coté ligne de transmission est

$$V_F = \sqrt{(V_{FD})^2 + (V_{FQ})^2} \quad (\text{A 1.6.52})$$

Linéarisant l'équation (A 1.6.52)

$$\Delta V_F = \left( \frac{V_{FD0}}{V_{F0}} \right)^2 \Delta V_{FD} + \left( \frac{V_{FQ0}}{V_{F0}} \right)^2 \Delta V_{FQ} \quad (\text{A 1.6.53})$$

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante

$$\Delta V_F = OP_8 \Delta V_{EFDQ} \quad (\text{A 1.6.54})$$

$OP_8$  est une matrice.

Combinant les équations (A 1.6.33) et (A 1.6.54), on peut écrire

$$\Delta V_F = OP_9 \Delta X_M + OP_{10} \Delta u \quad (\text{A 1.6.54})$$

$OP_9$  et  $OP_{10}$  sont deux matrices.

Les équations de sortie peuvent être écrites sous la forme standard

$$\Delta Y = C \Delta X_M + D \Delta u \quad (\text{A 1.6.56})$$

C et D sont deux matrices.

### **e) Structure du contrôleur et description:**

Dans cette structure de commande, l'onduleur série contrôle le flux de la puissance active par injection d'une tension série ( $V_{\text{seq}}$ ) d'amplitude contrôlable en quadrature avec la tension du bus de l'UPFC ( $V_E$ ). La tension du bus coté ligne de transmission ( $V_F$ ) est contrôlée par injection de la composante ( $V_{\text{sed}}$ ) en phase avec la tension du bus de l'UPFC ( $V_E$ ). L'onduleur shunt contrôle la tension continue du condensateur de liaison par la tension variable  $V_{\text{shq}}$ . La tension du bus de l'UPFC est contrôlée par ajustement de la tension  $V_{\text{shd}}$ . Quatre régulateurs de type PI ont été utilisés pour contrôler la tension du bus de l'UPFC, la tension  $V_{\text{dc}}$ , le flux de la puissance active dans la ligne de transmission et la tension du bus coté ligne de transmission. Les contrôleurs PI ont été inclus lors de la formulation de la matrice d'état complète.

Le contrôleur PI est donné par les équations suivantes [69]:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X}_C &= \Delta Y - \Delta v \\ \Delta u &= -K_p (\Delta Y - \Delta v) - K_i \Delta X_C \end{aligned} \quad (\text{A.6.57})$$

$\Delta v$  représente la variation de la référence, dans notre cas elle est nulle,  $K_p$  et  $P_i$  sont respectivement le gain proportionnel et le gain intégral, ils sont des matrices constantes diagonales.

**f) les équations d'état de la boucle fermée:**

Combinant les équations suivantes (A.1.6.42), (A.1.6.56) et (A.1.6.57) on peut écrire

$$\Delta \dot{X}_T = \begin{pmatrix} A - BK_{pt}C & -BK_{it} \\ MC & -DK_{it} \end{pmatrix} \Delta X_M + \begin{pmatrix} BK_{pt} \\ -M \end{pmatrix} \Delta v \quad (\text{A.1.6.58})$$

$$\Delta Y = (MC \quad -DK_{it}) \Delta X_M + DK_{pt} \Delta v$$

Avec

$$\Delta X_T = (\Delta X_M, \Delta X_C)$$

$$M = (I + DK_p)^{-1}$$

$$K_{pt} = (I + K_p D)^{-1} K_p$$

$$K_{it} = (I + K_p D)^{-1} K_i \quad (\text{A.1.6.59})$$

$I$  est la matrice d'identité.

La stabilité de la boucle fermée exige que les valeurs propres de la matrice d'état possèdent des parties réelles négatives.

$$\Delta \dot{X}_T = \begin{pmatrix} A - BK_{pt}C & -BK_{it} \\ MC & -DK_{it} \end{pmatrix} \Delta X_M \quad (\text{A.1.6.60})$$

## Annexe II

**Tableau A2. 1** Données du réseau multi Machine

Du bus	Au bus	R	X	Bc/2
3	12	0.0	0.15	0.0
12	13	0.0225	0.225	0.0
13	2	0.0	0.15	0.0
13	5	0.009	0.09	0.0
5	6	0.0	0.15	0.0
5	7	0.0	0.15	0.0
5	11	0.09	0.09	0.00972
11	8	0.09	0.09	0.00972
6	14(1)	0.135	1.35	0.01458
6	14(2)	0.135	1.35	0.01458
14	8(1)	0.135	1.35	0.01458
14	8(2)	0.135	1.35	0.01458
8	10	0.009	0.09	0.0
10	9	0.0225	0.225	0.0
9	1	0.0	0.15	0.0
4	10	0.0	0.15	0.0

**Tableau A2. 2** Données des bus pour RMM

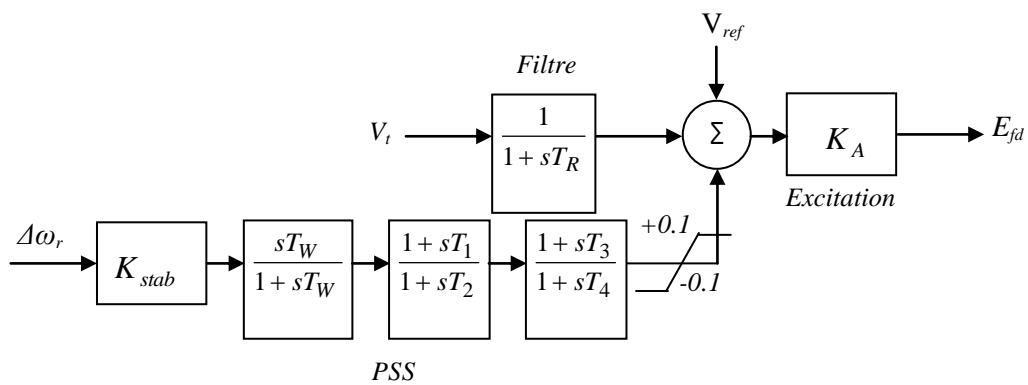
N° de bus/Type	tension bus	$P_{gen}+jQ_{gen}$	$P_{char}+jQ_{char}$
1 (Bus P-V)	1.03	0.0+j0.0	0.0+j0.0
2 (Bus P-V)	1.01	700+j0.0	0.0+j0.0
3 (Bus P-V)	1.03	700+j0.0	0.0+j0.0
4 (Bus P-V)	1.01	700+j0.0	0.0+j0.0
5 (Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	967+j100
6 (Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0
7 (Bus charge)	1.0	0.0+j200	0.0+j0.0
8 (Bus charge)	1.0	0.0+j350	1767+j100
9 (Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0
10 (Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0
11 (Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0
12 (Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0
13 (Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0
14 (Bus charge)	1.0	0.0+j0.0	0.0+j0.0

### A2.3 Paramètres du générateur

$L_{adu} = 1.6$ ,  $L_{aqu} = 1.5$ ,  $l = 0.2$ ,  $L_{ad} = 0.835L_{adu}$ ,  $L_{aq} = 0.835L_{aqu}$ ,  $L_{fd} = 0.10667$ ,  $r_{fd} = 0.0005658$ ,  
 $L_{1d} = 0.1$ ,  $r_{1d} = 0.01768$ ,  $L_{1q} = 0.45652$ ,  $r_{1q} = 0.01297$ ,  $L_{2q} = 0.05833$ ,  $r_{2q} = 0.021662$ .  
 $H(1)=3.175$   $H(2)=3.5$   $H(3)=3.5$   $H(4)=3.175$



### A2.4 Modèle et paramètres de PSS et l'excitation



$$K_{stab}=9.5, T_w=10.0, T_1=0.05, T_2=0.02, T_3=3.0, T_4=5.4.$$

Chaque générateur est équipé par une excitation et un PSS.

#### A 1-5. Paramètres de l'UPFC

Capacité du condensateur de liaison = 1500  $\mu$ F

Le transformateur de l'onduleur shunt est évalué à 200 MVA, 230/66 kV,  $X_t = 0,0333$  pu,

Le transformateur de l'onduleur séries est évalué à 100 MVA, 40/69 kV,  $X_t = 0.01666$  pu.

*Annexe III***Tableau A3. 1** *La liste complète des valeurs propres sans UPFC pour un REMM*

N° de la valeur propre	Partie réelles	Partie imaginaire
1	-55.001541	0,000000
2	-54.689795	0,000000
3	-53.951804	0,000000
4	53.802533	0,000000
5	-13.200828	20 .105156
6	-13.200828	-20 .105156
7	-14,582910	16.710678
8	-14,582910	-16.710678
9	-36.409321	0.004691
10	-36.409321	-0.004691
11	-32.010030	0,000000
12	-31.047178	0,000000
13	-16.501603	6.261937
14	-16.501603	-6.261937
15	-16.677649	4,478219
16	-16.677649	-4,478219
17	-1.766684	11,308897
18	-1.766684	-11,308897
19	-1.706468	10.873114
20	-1.706468	-10.873114
21	-0.566010	6.011237
22	-0.566010	-6.011237
23	-3.778084	0,000000
24	-3,601547	0,000000
25	-3,077977	0,000000
26	-3.226662	0,000000
27	-1,048338	0,000000
28	-0,380414	0,000000
29	-0,000003	0,000000
30	-0,182976	0,000000
31	-0.101026	0,000000
32	-0, 182533	0,000000
33	-0.101220	0,000000
34	-0.101315	0,000000
35	-0.182309	0,000000
36	-50,000000	0,000000
37	-50,000000	0,000000
38	-50,000000	0,000000
39	-50,000000	0,000000

**Tableau A3. 2** *La liste complète des valeurs propres avec UPFC pour un REMM*

N° de la valeur propre	Partie réelles	Partie imaginaire
1	-54.888022	0,000000
2	-54.645614	0,000000
3	-53.881961	0,000000
4	-53.844345	0,000000
5	-36.491042	0.000000
6	-36.319191	0.000000
7	-32,111936	0.000000
8	-30,926111	0.000000
9	-13.656558	18.831364
10	-13.656558	-18.831364
11	-15.426986	15.771713
12	-15.426986	-15.771713
13	-16.551671	5.277632
14	-16.551671	-5.277632
15	-16.811923	4,505802
16	-16.811923	-4,505802
17	-1.807984	11,401098
18	-1.807984	-11,401098
19	-3.383374	11.095405
20	-3.383374	-11.095405
21	-1.643468	10.724337
22	-1.643468	-10.724337
23	-0.858612	5.896302
24	-0.858612	-5.896302
25	-3,688253	0,000000
26	-3.475911	0,000000
27	-3.110412	0,000000
28	-3.130289	0,000000
29	-0,913055	0,000000
30	-0,372795	0,033815
31	-0.372795	-0,033815
32	0,000000	0,000000
33	-0.193056	0,000000
34	-0.193056	0,011402
35	-0.182315	-0,011402
36	-0,182315	0,000072
37	-0,097051	-0,000072
38	-0,101334	0,000061
39	-0,101334	-0,000061
40	-0.100052	0.000000
41	-50.000000	0.000000
42	-50.000000	0.000000
43	-50.000000	0.000000
44	-50.000000	0.000000

## *Références*

- [1] K. R. Padiyar, "Power System Dynamics—Stability and Control", Bangalore, India: Interline 1996.
- [2] F. Iliceto, E. Cinieri, "Comparative analysis of series and shunt compensation schemes for AC transmission systems", *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 96, n° 6, pp. 1819 – 1830, Nov. 1977.
- [3] Y.L. Tan, "Analysis of line compensation by shunt-connected FACTS controllers: a comparison between SVC and STATCOM", *Power Engineering Review, IEEE*, Vol. 19, n° 8, pp. 57-58, Aug. 2002
- [4] E.W. Kimbark, "A New Look at Shunt Compensation", *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, V PAS-102, n° 1, pp. 212 – 218, Jan. 1983
- [5] K. N. Shubhanga and Anil M. Kulkarni, "Application of Structure Preserving Energy Margin Sensitivity to Determine the Effectiveness of Shunt and Series FACTS Devices", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, n°. 3, pp.730-738,AUG 2002
- [6] N. G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems", *Proceeding of the IEEE*, vol. 76, n°. 4, April 1988.
- [7] CIGRE TASK FORCE 38-01 .06 "Load Flow control in high voltage power systems using FACTS controllers", CIGRE, January 1996.
- [8] L. Gyugyi, "Unified power-flow concept for flexible ac transmission systems," *IEE Proceedings-C*, Vol. 139, No.4, July 1992, pp. 323-331.
- [9] E. Larsen, C. Bowier, "Benefits of thyristor controlled series compensation," CIGRE, 1992, 14/37/38-04,
- [10] E.V. Larsen, K. Clark, S.A. Miske, J. Urbanek, "Characteristics and ratings considerations of thyristor controlled series compensation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 2, April 1994.
- [11] K. Clark, B. Farannesh, "Thyristor controlled series compensation application study-control interaction considerations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, No.2, April 1995, pp. 1031-1036.
- [12] N.G. Hingorani, "Flexible AC Transmission," *IEEE Spectrum*, April 1993, pp. 40-45.
- [13] A. VALETTE et al. "Programme de stabilité: ST 600", Manuel d'usager, IREQ, Janvier 1987
- [14] D.N, Kosterev, W.A. Mittelstadt, R.R. Mohler, W.J. Kolodziej, "An Application study for sizing and rating controlled and conventional series compensation" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No.2, April 1996, pp. 1105-1111.
- [15] G. Rami, "contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution", thèse de Doctorat DE L'INP Grenoble, 09 Novembre 2006.
- [16] N. Jerome, "contribution à l'analyse de la compensation série avancée dans les réseaux de transport d'énergie électrique", thèse de PHD de Montréal, décembre 1996
- [17] IEEE Special Stability Controls Working Group, "Static var compensator models for power flow and dynamic performance simulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, pp. 229–239, Feb. 1994.
- [18] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS", New York, IEEE Press, 2000.
- [19] J. Loughran, "ALSTOM relocatable SVCs for National Grid Company", AREVA T&D, UK 1999.
- [20] D. J. Hanson, C. Horwill, J. Loughan, D. R. Monkhouse, "The Application of a Relocatable STATCOM-Based SVC on the UK's National Grid System", *IEEE*
- [21] J. C. Riboud, "Transformateurs Déphaseurs",
- [22] D. Lachenal, D. Daniel, "Nouveaux matériels pour réguler les flux de puissance: transformateurs déphaseur et moyens de compensations série", RTE MAG, automne 2002.
- [23] L.G. Lajoie, E.V. Larsen, " Hydro-quebec multiple SVC application control stability study," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No.3, July 1990, pp. 1543-1550.

- [24] N. Martins, N.J.P. Macedo, " Control strategies for multiple static var compensation in long distance voltage supported transmission systems," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No.3, August 1993, pp. 1107- 1117.
- [25] K.S. Smith, L. Ran, J. Penman, " Dynamic Modeling of a Unified Power Flow Controller", IEE proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144, No. 1, January 1997, pp. 7-12.
- [26] E. Lerch, D. Povh, R. Witzmann, H. Hlebcar, R.Mihilac " Simulation and performance analysis of unified power flow controllers", CIGRE 1994, 14-205, pp. 1-6.
- [27] K.R.Padiyar, K.Uma Rao, " Modeling and Control of Unified power flow controller for Transient stability" Electrical Power & Energy Systems, Vol.21, 1999, pp.1-11.
- [28] K.K.Sen, E.J.Stacey " UPFC-Unified power flow controller: theory, Modeling and Applications", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No.4, October 1998, pp. 1453-1459.
- [29] K.R.Padiyar, A.M.Kulkarni, " Control design and Simulations of Unified Power Flow Controller", IEEE transactions on Power Delivery, Vol.13, No.4, October 1998, pp. 1348- 1354.
- [30] Y.Morioka, M.Kato, Y.Nakachi, M.Asada, K.Tokuhara, " Implementation of Unified Power Flow Controller and Verification for Transmission capability improvement", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No.2, May 1 999, pp-575-581.
- [31] S.Limyingcharoen, U.D.Annakage, N.C.Pahalawaththa, "Effects of Unified power flow Controller", IEE proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, No.2, March 1998, pp. 182-188.
- [32] S.Wu, Z.Xiaoxin, Zhao He, Zhang Wento, "Analysis and control simulation of unified power flow controller", Proceedings of the first international power electronics and motion control conference, IPEMC-94, pp. 1105-1100.
- [33] S.Limyingcharoen, U.D.Annakage, N.C.Pahalawaththa "Fuzzy Logic based Unified power flow controllers for transient stability improvement" IEE proceedings-Generation and Distribution. Vol.145, No.3, May 1998, pp. 225- 232.
- [34] M.Toufan, U.D.Annakage "Simulations of the Unified Power Flow Controller performance using PSCAD-EMTDC", Electric Power Systems Research, Vol.46, 1998, pp. 67-75.
- [35] Z.Huang, Y.Ni, F.Wu, S.Chen, B.Zhang, " Application of Unified power flow controller in interconnected power systems-Modeling, interface, control strategy and case study", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No.2. May 2000, pp.8 17-824.
- [36] L. Papic, P.Zunko, D.Povh, "Basic Control of Unified Power Flow Controller", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No.4- November 1997, pp. 1734-1739.
- [37] J.Bian, D.G.ramey, R.J.Nelson, A.Edris, "A study of equipment sizes and constraints for a Unified power flow controller", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No.3. July 1997, pp. 1385-1391.
- [38] C.D.Schauder, D.M.hamai, A.Edris, L.Gyugyi, T.R.reitman, M.R.Lund, D.R.Torgerson, "Operation of the Unified power flow controller (UPFC) under practical constraints", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No.2, April 1998, pp. 630-639.
- [39] S.D.Round, Q.Yu, L.E.Norum, T.M.Undeland, "Performance of a Unified Power flow controller using a D-Q Control system", Sixth International Conference on AC & DC Transmission, No.423. 1997, pp. 357-362.
- [40] R.J.Nelson, J.Bian, D.G.Ramey, T.A.Lemak, T.R.Reitman, J.E.Hill, "Transient Stability enhancement with FACTS controllers", Sixth International Conference on AC & DC Transmission, No.423, 1997, pp. 269-273.

- [41] S.A.Al-mawasawi, A.Coonick, "Analysis, Simulation and implementation of PWM based UPFC", Sixth International Conference on AC & DC Transmission, No.423, 1997, pp. 220-225.
- [42] [35]L.Hu, R.E.Morrison, "Simulation study of a transmission system containing two unequally rated parallel lines and a UPFC", Sixth International Conference on AC & DC Transmission, No.423, 1997, pp. 346-350.
- [43] X.Lombard, P.G.Thernod, " Control of Unified power flow controller: Comparison of methods on the basis of a detailed numerical model", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.12, No.2, May 1997, pp.824-830.
- [44] N.G.Hingorani, L.Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and technology of Flexible AC Transmission systems", IEEE Press, 2000.
- [45] Manzar Rahman, M.Ahmed, R.Gutmna, R.J.O'Keefe, R.Nelson, J.Bian, " UPFC application on the AEP system: Planning Considerations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No.4. November 1997, pp. 1695-1701.
- [46] A.J.F.Keri, X.Lombard, A.A.Edris, A.S.Mehraban, A.Elriachy, " Unified Power Flow Controller (UPFC): Modeling and Analysis," PE-423-PWRD-046-1998.
- [47] A.Arab, P.Kundur, "A Versatile FACTS Device Model for Power flow And Stability Simulations," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No.4. November 1996, pp. 1994-1950.
- [48] A.Nabavi-Niaki, M.R.Iravani, " Steady-State and Dynamic Model of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No.4, November 1996, pp. 1937- 1934.
- [49] C.R.Fuerte-Esquivel, E.Acha, " Unified Power Flow Controller: A Critical Comparison of Newton-Raphson UPFC Algorithms in Power Flow Studies," IEE Proceedings-C Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144, No.5, September 1997, pp.437-444.
- [50] H.F.Wang, "Damping Function of a Unified Power Row Controller" IEE proceedings-Generation, Transmission and Distribution. Vol. 146, No. 1, January 1999, pp. 8 1-87.
- [51] E.Uzunovic, C.Canizeres, J.Reeve, " EMTD Studies of UPFC power oscillation damping", North American Power Symposium (NAPS), San Luis Obispo, California, October 1999.
- [52] R.Mihilac, P.Zunko, D.Povh, " Improvement of Transient Stability Using Unified Power Flow Controller", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996, pp. 485-49 1.
- [53] L.Gyugyi, C.D.Schauder, S.L.Williams, T.R.Reitman, D.R.Torgerson, A.Edris, " The Unified Power Flow Controller: A new approach to power transmission control", IEEE Transactions on Power delivery, Vol. 10, No.2, April 1995, pp. 1085- 1097.
- [54] P.Kundur, "Power system stability and control", EPRI, Power system Engineering series. 1994.
- [55] K.Sreenivasachar, S.Jayaram, M.M.A.Salama, "Dynamic Stability improvement of multi-machine power system with UPFC", Electric Power System Research, Vol.55, 2000, pp. 27-37.
- [56] Mohan.N, T.M.Undeland, W.P.Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications and design", Second edition 1995.
- [57] C-Schauder "Vector analysis and control of advanced static var compensators" IEE proceedings -C, Vol. 140, 1993, pp, 299-306.
- [58] M. Sebaa, T. Allaoui, A. M. denai, A. Chaker, " Adaptive Control for Unified Power Flow Controller", Turkish Journal of Engineering Electrical and Computer Sciences, Vol. 20, N° 01, 20012.

- [59] M.A. Denaï, T. Allaoui, "Adaptive fuzzy decoupling of UPFC-power flow compensation", 37th UPEC2002, Staffordshire University, UK.
- [60] A. Kazemi, M.V. Sohrforouzani, "Power system damping using fuzzy controlled FACTS devices", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 28, pp. 349-357, 2006.
- [61] S. Hameed, B. Das, V. Pant, "A self-tuning fuzzy PI controller for TCSC to improve power system stability", Electric Power Systems Research, Vol. 78, 1726-1735, 2008.
- [62] S. Hameed, B. Das, V. Pant, "Reduced rule base self-tuning fuzzy PI controller for TCSC", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, 2010, pp. 1005–1013.
- [63] C.C.Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller Part-1 and part-II", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 20, No.2, March 1990, pp. 404-435.
- [64] E.H.Mamdani, « Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamics plant », IEE proc N°21, 1974.
- [65] H. Bühler, « réglage par logique floue », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne,1999.
- [66] H.P. Geering, « Introduction to Fuzzy Control », Institut für Mess-und Regeltechnik, ETH, IMRT-Bericht 24, Zürich, 1992.
- [67] H.J. Zimmermann, « Fuzzy sets Theory and its applications », Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London 1991.
- [68] T.J. Ross, "Fuzzy Logic with Engineering Applications", 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., 2005.
- [69] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank, "An Introduction to Fuzzy Control", Springer-Verlag, New York, 1993.
- [70] Aström, K. and T. Hagglund, "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning", 2nd Edition, Instrument Society of America, 1995.
- [71] Knospe, C.R., "PID Control: Tuning and Anti-Windup Techniques, "Practical Control Techniques for Control Engineering" , workshop at the 2000 American Control Conference.
- [72] D.Z. Fang, Y. Xiaodong, S.Wennan, H.F.Wang, "Oscillation transient energy function applied to the design of a TCSC fuzzy logic damping controller to suppress power system inter-area mode oscillations", IEE Proc. C. Generat. Transm. Distrib. Vol. 150, N° 2, March 2003, pp. 233–238.
- [73] Xiaobo. Tan, Naiyao. Zhang, Luyuan. Tong, Zhonghong. Wang, "Fuzzy control of thyristor-controlled series compensator in power system transients", Fuzzy Sets Syst. Vol. 110, N° 3, 2000, pp. 429–436.
- [74] P.K. Dash, S. Mishra, "Damping of multimodal power system oscillations by FACTS devices using non-linear Takagi-Sugeno fuzzy controller", Electric. Power Energy Syst. Vol. 25, N° 6, 2003, pp.481–490.
- [75] Chun-Feng. Lu, Chia-Feng. Juang, "Evolutionary fuzzy control of flexible AC transmission system", IEE Proc. C, Generat. Transm. Distrib. 152 (4) (2005) 441–448.
- [76] R.K. Mudi, N.R. Pal, "A robust self-tuning scheme for PI- and PD-type fuzzy controllers", IEEE Trans. Fuzzy Syst. Vol. 7, N° 1, 1999, pp. 2–16.
- [77] K. Pal, R.K. Mudi, N.R. Pal, "A new scheme for fuzzy rule-based system identification and its application to self-tuning fuzzy controllers", IEEE Trans. Syst. Man, Cybernet. B: Cybernet. Vol. 32, N° 4, 2002, pp. 470–482.
- [78] Han-Xiong Li, H.B. Gatland, "Conventional fuzzy control and its enhancement", IEEE Trans. Syst. Man, Cybernet. B: Cybernet. 26 (5) (1996) 791–796.