

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire

Présenté au Laboratoire de Haute Tension
en vue de l'obtention du titre de

Magister

en Electrotechnique
Option: Réseaux Electriques et Haute Tension
par

BEKKI Brahim

Ingénieur en Electrotechnique de l'Université de Tiaret

Thème

**Contribution du SMES, Dispositif FACTS,
à la Stabilisation d'un Réseau Electrique
Haute Tension**

Soutenu le 20/09/2006, devant le jury composé de:

Président :	A. BOUBAKEUR	Professeur à l'ENP
Rapporteurs :	M. MOUDJAHED	Maître de Conférence à l'Université de Tiaret
	A. MEKHALDI	Professeur à l'ENP
Examineurs :	M. TEGUAR	Maître de Conférence à l'ENP
	L. NEZLI	Docteur d'état
	M. AMOUROUAYECHE	Docteur, SONELGAZ

Mémoire préparé au sein du Laboratoire de Haute Tension de l'ENP
10, avenue pasteur BP 182 EL- Harrach Alger

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire

Présenté au Laboratoire de Haute Tension
en vue de l'obtention du titre de

Magister

en Electrotechnique
Option: Réseaux Electriques et Haute Tension
par

BEKKI Brahim

Ingénieur en Electrotechnique de l'Université de Tiaret

Thème

**Contribution du SMES, Dispositif FACTS,
à la Stabilisation d'un Réseau Electrique
Haute Tension**

Soutenue le 20/09/2006, devant le jury composé de:

Président :	A. BOUBAKEUR	Professeur à l'ENP
Rapporteurs :	M. MOUDJAHED	Maître de Conférence à l'Université de Tiaret
	A. MEKHALDI	Professeur à l'ENP
Examineurs :	M. TEGUAR	Maître de Conférence à l'ENP
	L. NEZLI	Docteur d'état
	M. AMOUROUAYECHE	Docteur, SONELGAZ

Mémoire préparé au sein du Laboratoire de Haute Tension de l'ENP
10, avenue pasteur BP 182 EL- Harrach Alger

à mes parents

à mes frères

à tous ceux que j'aime et qui sauront se reconnaître

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé sous la direction de Monsieur M. MOUDJAHED Maître de Conférence à l'Université de Tiaret et Monsieur A. MEKHALDI Professeur à l'E.N.P. Alger Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour leurs conseils et leur patience. Je tiens à les remercier chaleureusement de l'aide précieuse et des conseils éclairés qu'ils m'ont apportés tout au long de cette étude.

Je remercie sincèrement Monsieur A. BOUBAKEUR, Professeur à l'E.N.P. Alger, de l'honneur qu'il me fait de présider le jury de soutenance.

Mes vifs remerciements vont également à monsieur M. TEGUAR, Maître de Conférence à l'E.N.P. Alger, Mademoiselle M. AMOUROUAYECHE, Docteur en Electrotechnique à Sonelgaz et Monsieur L. NEZLI, Docteur d'Etat en Electrotechnique et Chargé de Cours à l'E.N.P-Alger d'avoir accepté d'examiner mon travail et d'être membres du jury de soutenance.

Je remercie également tous les collègues du Laboratoire Réseau Electrique de l'Université de TIARET pour leur aide et leur soutien.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------	----------

CHAPITRE I

Systèmes flexibles de transmission à courant alternatif

<i>1.1 Introduction</i>	<i>6</i>
<i>1.2 Compensateur statique de puissance réactive</i>	<i>6</i>
<i>1.2.1 Configuration du système</i>	<i>6</i>
<i>1.2.2 Principe de fonctionnement</i>	<i>8</i>
<i>1.2.3 Applications</i>	<i>10</i>
<i>1.3 Condensateur série commandé par thyristors</i>	<i>10</i>
<i>1.3.1 Configuration du système</i>	<i>10</i>
<i>1.3.2 Principe de fonctionnement</i>	<i>11</i>
<i>1.3.3 Applications</i>	<i>14</i>
<i>1.4 Contrôleur de puissance universel</i>	<i>14</i>
<i>1.4.1 Configuration du système</i>	<i>14</i>
<i>1.4.2 Principe de fonctionnement</i>	<i>15</i>
<i>1.4.3 Applications</i>	<i>18</i>
<i>1.5 Bobine magnétique supraconductrice de stockage d'énergie</i>	<i>18</i>
<i>1.6 Conclusion</i>	<i>21</i>

CHAPITRE II

Etude de la stabilité transitoire par la régulation conventionnelle

<i>2.1 Introduction</i>	23
<i>2.2 Modélisation de la machine synchrone</i>	23
<i>2.2.1 Equations de flux et de tensions dans le repère statorique</i>	24
<i>2.2.2 Transformation de Park</i>	25
<i>2.2.3 Equations de flux et de tensions dans le repère de Park</i>	26
<i>2.2.4 Equations électriques suivant les axes d, q</i>	29
<i>2.2.5 Équation du mouvement de la machine synchrone</i>	30
<i>2.2.6 Modèle de la ligne</i>	31
<i>2.2.7 Modèle de la charge</i>	32
<i>2.3 Présentation de réseau test</i>	32
<i>2.4 Moyens conventionnels de stabilisation du réseau</i>	34
<i>2.4.1 Régulateur de tension</i>	34
<i>2.4.2 Régulateur de vitesse</i>	35
<i>2.4.3 Étude de la stabilité transitoire du réseau test</i>	36
<i>2.4.4 Résultats de simulation</i>	37
<i>2.4.5 Influence de la durée du défaut sur le comportement du réseau</i>	40
<i>2.5 Conclusion</i>	40

CHAPITRE III

Configuration et dimensionnement du SMES

<i>3.1 Introduction</i>	42
<i>3.2 Modulation de la charge</i>	42
<i>3.3 Historique du SMES</i>	43
<i>3.4 Constitution du dispositif SMES</i>	45
<i>3.4.1 Bobine supraconductrice</i>	46
<i>3.4.2 Systèmes de protection et de refroidissement</i>	47
<i>3.4.3 Configuration et commande du convertisseur</i>	48

<i>3.4.3.1 Montage en pont simple</i>	48
<i>3.4.3.2 Montage en pont double</i>	50
<i>3.4.3.3 Couplage des transformateurs</i>	53
<i>3.4.3.4 Choix des angles d'amorçage du convertisseur</i>	55
<i>3.5 Dimensionnement du SMES</i>	59
<i>3.6 Conclusion</i>	62

CHAPITRE IV

Etude des performances du SMES

<i>4.1 Introduction</i>	64
<i>4.2 Fonction de transfert du SMES</i>	64
<i>4.3 Détermination des gains optimaux du régulateur SMES</i>	65
<i>4.3.1 Détermination du gain K_d</i>	65
<i>4.3.2 Détermination du gain K_V</i>	68
<i>4.4 Détermination de la position optimale du SMES</i>	69
<i>4.5 Influence de la durée du défaut sur le réseau</i>	72
<i>4.6 Comparaison de la régulation SMES et de la régulation classique</i>	73
<i>4.7 Installation de plusieurs SMES</i>	75
<i>4.7.1 Installation d'un deuxième SMES</i>	76
<i>4.7.2 Installation d'un troisième SMES</i>	80
<i>4.8 Conclusion</i>	83

CONCLUSION GENERALE	85
----------------------------	-----------

BIBLIOGRAPHIE	87
----------------------	-----------

Nomenclature

FACTS :	Flexible A.C Transmission Systems
SVC :	Static Var Compensator
TCSC :	Thyristor Controlled Serie Capacitor
UPFC :	Unified Power Flow Controller
SMES :	Superconducting Magnetic Energy Storage
GTO :	Gate Turn Off
IGBT :	Insulated Gate Bipolar Transistor
SCR :	Silicon Controlled Rectifiers

Introduction Générale

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux d'énergie électriques ont pris une importance considérable. Les contraintes de plus en plus sévères (protection de l'environnement, concurrence,.....) auxquelles sont soumis les réseaux et la recherche d'une amélioration constante de la continuité et de la qualité de service font que ces derniers deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Par ailleurs l'utilisation optimale de leur capacité fait que les équipements fonctionnent avec une faible marge de manœuvre. Cette utilisation du réseau proche de ses limites n'est pas sans conséquences sur son fonctionnement en cas de perturbation. Celle-ci affecte alors sa stabilité dont l'évaluation est primordiale pour la sécurité d'alimentation.

La continuité de service et l'utilisation optimale des réseaux nécessitent des réserves conséquentes. Un des moyens auquel on a pensé comme réserve est une bobine supraconductrice de stockage d'énergie, ceci en raison des possibilités qu'offre la supraconductivité. En effet, l'avancée technologique réalisée ces dernières années dans le domaine de la supraconductivité a conduit à examiner de plus près la propriété de stockage que peut avoir une bobine supraconductrice. Installée dans le réseau, la bobine stockera de l'énergie qu'elle absorbera du réseau durant les périodes creuses et le lui restituera durant les périodes de pointe contribuant ainsi à moduler la charge du réseau et permettant l'utilisation optimale des capacités de production installées. Cet échange d'énergie entre le réseau et la bobine se fait par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance convenablement dimensionnés.

Malgré un rendement élevé, une densité d'énergie importante et un temps de réponse extrêmement rapide dû aux dispositifs à base de thyristors GTO actuellement utilisés en électronique de puissance, une expérimentation à échelle significative se heurte au gigantisme des bobines dont seules des structures adaptées peuvent supporter les contraintes mécaniques.

Cependant, une bobine supraconductrice de dimension plus réduite que celle nécessaire pour la modulation de la charge peut être utilisée dans l'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique et ce par l'échange contrôlé d'énergie entre lui et la bobine via un convertisseur à thyristors GTO.

Bonneville Power Administration, une compagnie américaine d'électricité, fut la pionnière dans l'installation d'un tel système appelé Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) pour résoudre les problèmes de stabilité qui se posaient à son réseau.

Le SMES fait partie des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) qui s'intègrent de plus en plus dans les systèmes de réglage des réseaux et contribuent à l'augmentation de la marge de manœuvre de leur exploitation dans des conditions optimales. La plupart des études faites sur l'utilisation des SMES dans un réseau concernent des systèmes monomachine, c'est-à-dire un alternateur connecté à travers une ligne de transport à un réseau de puissance infinie. Ces travaux portent sur les régulations de vitesse et de tension de la machine perturbée et la localisation optimale du SMES le long de la ligne [YON97],[EDR00], [WOO03], [HIN93].

Dans ce travail, nous avons étudié les avantages que peut présenter un dispositif SMES sur le comportement d'un réseau multimachine. Le réseau 3 machines – 9 Noeuds de la Western Systems Council Coordinating (USA) a été retenu comme réseau test [MOU96], [IEE73].

Dans le premier chapitre, nous introduisons quelques dispositifs FACTS et citons le rôle important qu'ils jouent dans l'exploitation et la gestion des réseaux électriques, en donnant pour chacun d'entre eux sa configuration, son principe de fonctionnement et ses applications. En fin de ce chapitre, le dispositif SMES qui sera étudié avec plus de détail dans le troisième chapitre est évoqué sommairement.

Dans le deuxième chapitre, l'étude du réseau en régime transitoire est effectuée en l'absence de toute régulation puis en considérant les alternateurs munis de leurs régulations conventionnelles de tension et de vitesse. Les paramètres de régulation optimale de tension et de vitesse sont déterminés et les performances de ce type de régulation établies [MOU96].

Dans le troisième chapitre, on évoque l'état actuel de l'art concernant le SMES, on décrit son principe de fonctionnement, ses différents constituants et le rôle joué par chacun de ces derniers. Nous nous intéressons à la configuration et à la commande de l'interface d'échange de l'énergie entre le SMES et le réseau. Le dimensionnement du dispositif est établi en fonction du réseau test retenu.

Dans le quatrième chapitre, l'étude de l'influence du SMES sur le réseau est faite quand le réseau est perturbé en grands mouvements. Différents paramètres de régulation sont testés et la

position optimale du SMES dans le réseau est déterminée. Les performances du SMES sont comparées à celles de la régulation conventionnelle établies au chapitre 2. Enfin, la possibilité d'utilisation de plusieurs SMES est examinée.

CHAPITRE I

Les Systèmes Flexibles de Transmission à Courant Alternatif

1.1 Introduction

L'évolution de l'électronique de puissance a commencé à engendrer des changements majeurs dans les réseaux électriques. A l'exception de quelques appareils utilisant l'électronique de puissance (disjoncteurs, transformateurs à prises variables et compensateur statique à thyristors.), les réseaux électriques comportaient jusqu'à récemment des appareillages passifs. Par ailleurs le maillage des lignes exigent de plus en plus le contrôle des puissances transitées. La complexité des réseaux exigent des marges de sécurité accrues afin que les perturbations locales ne provoquent pas des instabilités qui pourraient se répandre sur tout le réseau.

Les FACTS (Flexible A.C Transmission Systems) développés à partir des années 1990 augmentent les marges de manœuvre des réseaux en exploitant les possibilités offertes par l'électronique de puissance en particulier les nouveaux composants contrôlables (GTO, IGBT...).

Nous examinons dans ce chapitre quatre types de FACTS utilisés dans les réseaux électriques à savoir :

- Compensateur statique de puissance réactive (SVC).
- Condensateur série commandé par thyristors (TCSC).
- Contrôleur de puissance universel ou variateur de charge universel (UPFC).
- Bobine magnétique supraconductrice de stockage d'énergie (SMES).

1.2 Compensateur statique de puissance réactive

1.2.1 Configuration du système

Pour augmenter ou diminuer la tension d'une ligne de transport, on peut brancher un condensateur ou une inductance shunt qui génère ou absorbe de la puissance réactive [WIL00] [EDR00]. Cette manœuvre peut se faire automatiquement en utilisant un compensateur statique.

La figure 1.1 ci-dessous montre le schéma descriptif d'un compensateur statique de puissance réactive monté en parallèle sur le réseau. Le compensateur statique est constitué d'un transformateur abaisseur de tension connecté à un élément inductif variable L et un élément

capacitif C . Ces charges réactives sont respectivement branchées et débranchées par des contacteurs S_C et S_L composés de thyristors tête-bêche. Sur ce réseau, les enroulements primaires sont raccordés en étoile alors que les enroulements secondaires sont en triangle.

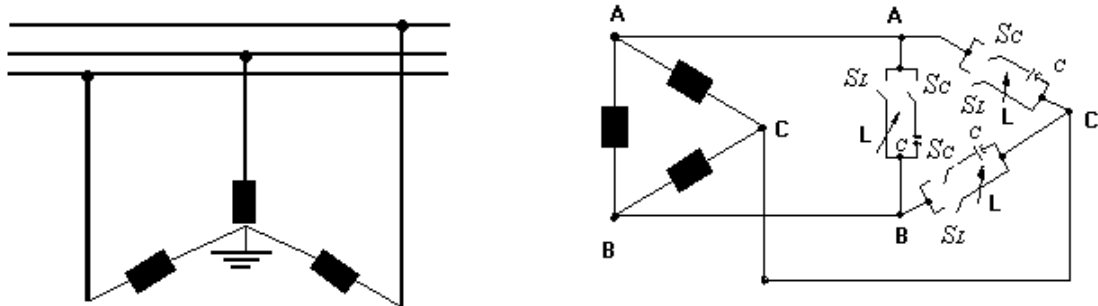


Figure 1.1 Schéma d'un compensateur statique de puissance réactive

La figure 1.2 montre en détail la branche AB de la charge réactive triphasée branchée au secondaire du transformateur de couplage. Cette branche est composée d'une inductance et de deux condensateurs. L'inductance L est connectée en série avec deux thyristors montés en tête-bêche. En faisant varier l'angle d'amorçage α de 90° à 180° , on peut varier le courant inductif entre zéro et sa valeurs nominale.

Le condensateur C_1 est connecté en série avec deux thyristors et un circuit d'amortissement composé d'une inductance L_1 en parallèle avec une résistance r_1 .

Contrairement à la branche inductive où le courant peut être ajusté de façon continue entre zéro et sa valeur nominale, les branches capacitives sont commandées en tout ou rien. Selon que les thyristors conduisent ou non, il existe ou non un courant capacitif. Un circuit identique contenant un condensateur C_2 permet de doubler la puissance capacitive avec un circuit d'amortissement de résistance r_2 et d'inductance L_2 [WIL00], [EDR00].

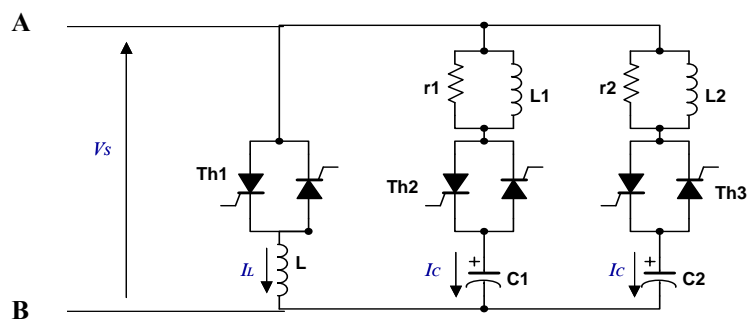


Figure 1.2 Schéma détaillé d'une branche

1.2.2 Principe de fonctionnement

Le compensateur statique de puissance réactive est considéré comme un commutateur qui peut fixer le signe de la puissance réactive. Cette dernière est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif). Par contre lorsque le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), le courant et la puissance réactive prennent un signe négatif.

Les compensateurs statiques de puissance réactive (SVC) permettent de stabiliser très rapidement la tension de réseau à la valeur de consigne. Le système de commande lit en permanence la tension mesurée au primaire du transformateur de couplage (Fig.1.1). Cette tension est comparée avec la valeur de consigne. Si la tension change à la suite d'une manœuvre ou d'une instabilité de réseau, l'erreur est détectée par le système de commande. Celui-ci réajuste automatiquement la puissance réactive absorbée ou générée, en sélectionnant le nombre approprié de condensateurs à mettre en service et la valeur de l'angle α commandant l'inductance. Ceci a pour effet d'améliorer la qualité de service et contribue à l'amélioration de la stabilité du réseau.

L'action rapide des thyristors fait que le temps de réponse du compensateur statique (SVC) est très court [VIJ04].

Le modèle d'un SVC est donné dans la figure 1.3

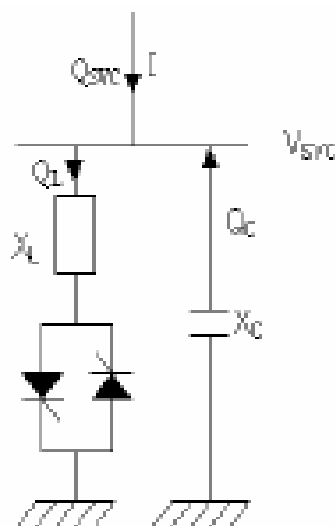


Figure 1.3 Modèle d'un compensateur statique de puissance réactive (SVC).

Q_{svc} est la puissance réactive absorbée par le compensateur. Celui-ci est composé de :

- Une branche capacitive de réactance X_c telle que :

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (1.1)$$

La puissance réactive Q_c fournit par cette branche est :

$$Q_c = \frac{V_s^2}{X_c} \quad (1.2)$$

- Une branche inductive de réactance X_L telle que :

$$X_L = 2\pi fL \quad (1.3)$$

La puissance réactive absorbée sur cette branche est telle que :

$$Q_L = \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_s^2}{X_c} \quad (1.4)$$

Le courant qui circule dans l'inductance est réglé de façon continue par les thyristors. En pratique l'effet inductif du SVC est petit par rapport à son effet capacitif. La figure 1.4 représente la caractéristique tension /courant du SVC. Si on débranche le condensateur du compensateur statique le courant dans les inductances est alors à sa valeur maximale.

La droite L montre la relation entre la tension V_s et le courant I. Lorsque l'inductance est débranchée et que le condensateur est en service, on donne au courant capacitif le signe (-) pour le distinguer du courant inductif. La relation entre le courant et la tension est une nouvelle droite désignée C (Fig 1.4).

Les droites L et C forment une courbe en V qui correspond aux limites inductives et capacitives du compensateur statique.

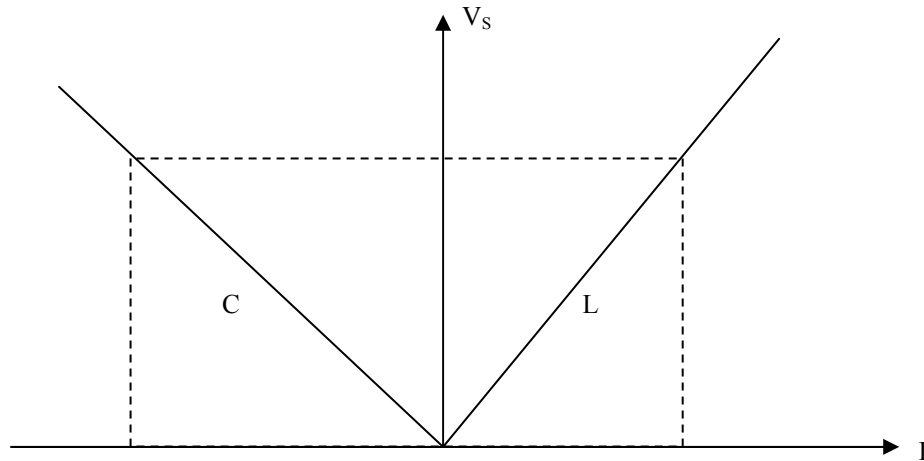


Figure 1.4 Caractéristique « courbe en V » du compensateur statique.

1.2.3 Applications

Les principales applications du compensateur statique de puissance réactive sont :

- Soutien de la tension en régime permanent,
- Compensation rapide de la puissance réactive,
- Stabilisation statique et transitoire de la tension,
- Réduction des risques de résonance hyposynchrone,
- Equilibrage dynamique des charges,
- Amélioration de la stabilité synchrone.

L'un des exemples d'implantation de ce type de FACTS dans le réseau électrique est celui de Ross Substation, en Australie. Cette installation est dimensionnée pour ± 230 MVAR et branchée sur le réseau 275 kV.

1.3 Condensateur série commandé par thyristors

1.3.1 Configuration du système

Pour augmenter la puissance transitée par une ligne triphasée, on doit ajouter un condensateur de capacité fixe en série dans chaque phase de la ligne. Ce qui a pour effet de réduire la réactance inductive de celle-ci.

Le condensateur série commandé par thyristors permet de faire varier le transit de puissance P en agissant sur la nouvelle valeur de la réactance de la ligne qu'on notera X_{eff} .

La figure 1.5 donne le schéma bloc de ce type de FACTS introduit dans une ligne A-B de réactance X [LAC96], [WIL00].

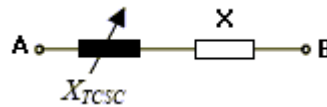


Figure 1.5 Schéma d'une ligne équipée d'un condensateur série commandé par thyristors.

Le schéma du condensateur série commandé par thyristors de la figure 1.5 noté X_{TCSC} est représenté par le schéma de la figure 1.6

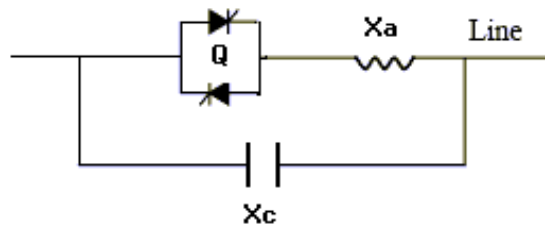


Figure 1.6 Schéma du condensateur série commandé par thyristors (X_{TCSC}).

Le condensateur X_c est connecté en parallèle avec une réactance inductive X_a au moyen d'une valve Q qui est composée de deux thyristors tête-bêche.

1.3.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du condensateur série commandé par thyristors est décrit en indiquant son effet sur le transit de puissance active entre deux extrémités d'une ligne A-B donnée par la figure 1.7 ci-dessous.

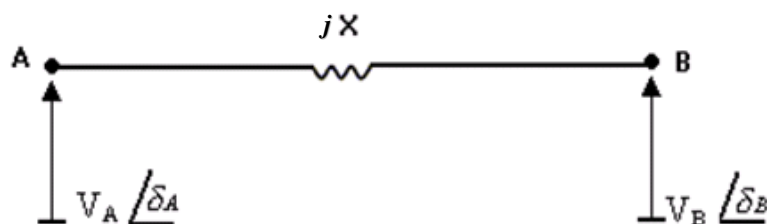


Figure 1.7 Schéma de la ligne A-B

La puissance active totale transportée entre les deux régions A et B est donnée par l'expression :

$$P = \frac{V_A V_B}{X} \sin \delta \quad (1.5)$$

P : puissance active totale transmise par la ligne

\bar{V}_A : Potentiel au point A

\bar{V}_B : Potentiel au point B

X : réactance de la ligne

$\delta = \delta_A - \delta_B$: déphasage relatif entre la tension \bar{V}_A et \bar{V}_B

Pour illustrer le principe de fonctionnement d'un condensateur série commandé par thyristors, nous utilisons ce type de dispositif avec deux valves Q1 et Q2. La figure 1.8 montre le condensateur série introduit dans la ligne A-B.

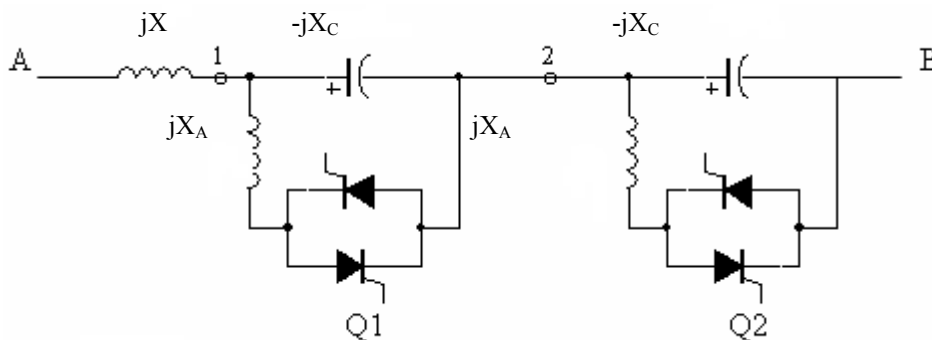


Figure 1.8 Schéma d'une phase de ligne triphasée avec compensation série TCSC

L'introduction du condensateur série commandé par thyristors dans la ligne A-B tel que montré par la figure 1.8 modifie le transit de puissance P dans la ligne. Cette puissance s'écrit sous la forme de l'expression (1.6) ci-dessous :

$$P = \frac{V_A V_B}{X_{eff}} \sin \delta \quad (1.6)$$

X_{eff} est la réactance effective de la liaison A-B

La ligne de réactance X relie deux réseaux représentés par les nœuds A et B. Deux condensateurs, possédant une réactance X_C , sont connectés en série avec la ligne. Chaque condensateur peut être aussi connecté en parallèle avec une réactance inductive X_A au moyen d'une valve Q. Celle-ci est composée de deux thyristors tête-bêche. La valeur de X_A est conçue pour être sensiblement inférieure à la réactance capacitive X_C .

i) Lorsque les valves Q1 et Q2 sont bloquées, seuls les condensateurs sont en série avec la ligne de sorte que sa réactance effective soit :

$$X_{eff} = X - 2X_C \quad (1.7)$$

ii) Si Q₁ est amorcée de sorte qu'elle conduise en tout temps et Q₂ reste bloquée, X_A sera en parallèle avec X_C . L'impédance entre les points 1 et 2 devient inductive, elle a comme valeur :

$$X_P = j \frac{X_C X_A}{X_C - X_A} \quad (1.8)$$

La réactance effective de la ligne est alors donnée par l'expression (1.9) ci-dessous.

$$X_{eff} = X + \frac{X_C X_A}{X_C - X_A} - X_C \quad (1.9)$$

iii) Si Q₂ est amorcée de sorte qu'elle conduise en tout temps et Q₁ reste bloquée, X_A sera en parallèle avec X_C . L'impédance entre les points 2 et B devient inductive et on aura la même valeur X_{eff} donnée par l'expression 1.9.

iv) Si les valves Q₁ et Q₂ sont amorcées en même temps, la réactance effective est donnée par la l'expression (1.10):

$$X_{eff} = X + 2 \frac{X_C X_A}{X_C - X_A} \quad (1.10)$$

Le condensateur série commandé par thyristors peut donc produire trois valeurs distinctes de X_{eff} . Par conséquent, pour un angle de déphasage δ donné, la puissance active P peut aussi avoir trois valeurs distinctes. Le changement d'une puissance à l'autre se fait presque instantanément car l'amorçage des valves s'effectue en moins d'un demi cycle. Ce

changement ultra-rapide de la puissance constitue un avantage lorsqu'on doit maintenir la stabilité de l'un ou l'autre des deux réseaux connectés aux deux extrémités de la ligne.

1.3.3 Applications

Les principales applications du condensateur série commandé par thyristors sont :

- L'augmentation du transit de puissance sur les lignes,
- La compensation du déséquilibre des courants de charge,
- L'amélioration de la stabilité dynamique,
- L'amortissement des oscillations de puissance,
- La réduction des risques de résonance hyposynchrone,
- L'interconnexion des réseaux,
- La stabilisation de la tension.

Un exemple d'application de ce type de FACTS est celui permettant l'interconnexion des réseaux 500kV nord et sud du Brésil [ALL02].

1.4 Contrôleur de puissance universel

1.4.1 Configuration du système

Le contrôleur de puissance universel UPFC (Unified Power Flow Controler) appelé aussi variateur de charge universel est représenté par la figure 1.9. Il est constitué de deux onduleurs triphasés de tension : l'onduleur 1 qui est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur T1 fonctionne comme un redresseur quatre quadrants afin de maintenir la tension fixe sur les condensateurs, l'onduleur 2 est connecté en série avec le réseau et permet d'injecter une tension série avec la ligne à travers le transformateur T2 [SHA03].

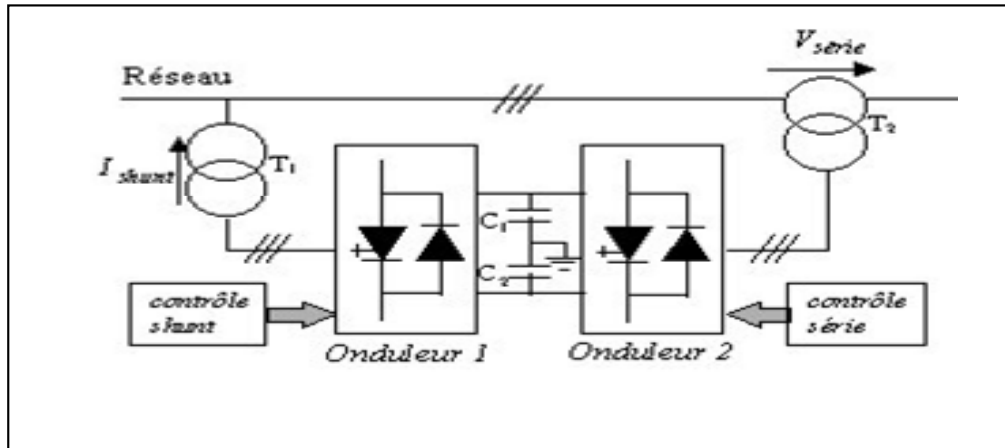


Figure 1.9 Schéma de principe d'un contrôleur de puissance universel.

1.4.2 Principe de fonctionnement

Le contrôleur de puissance universel permet de commander la puissance active et réactive transportées sur une ligne. Pour expliquer son fonctionnement, considérons la figure 1.10 où on a deux régions A et B qui sont tellement puissantes que leurs angles respectifs ne s'influencent pas, c'est à dire qu'en régime normal, ce qui se passe dans la région A n'affecte pas la région B, et vice versa.

Considérons que les tensions \bar{V}_A et \bar{V}_B soient égales en module et en phase. Dans ces conditions, si les régions sont réunies par une ligne ayant une impédance X , le courant de ligne sera nul car la différence de potentiel entre les deux extrémités est nulle. Il n'y aura donc pas d'échange de puissance active ou réactive entre les deux régions.

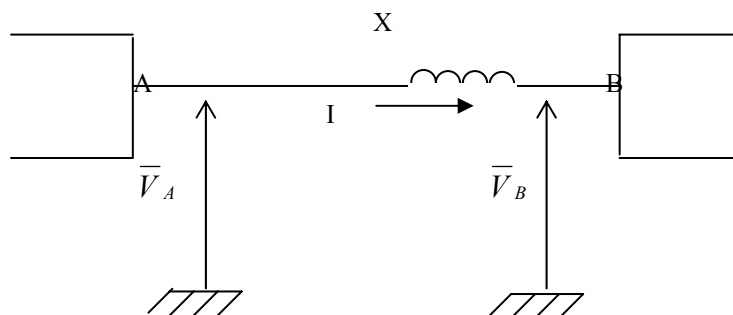


Figure 1.10 Ligne reliant deux régions A et B

Cela veut dire que si la région A est soumise à une perturbation, la région B ne peut pas lui venir en aide. Durant ces moments critiques, une réponse immédiate s'impose. Les puissances actives et réactives appropriées doivent être transitées sur la ligne rapidement. Afin d'atteindre

ces objectifs, on dispose d'une source de tension V_C branchée en série avec la ligne et dont le module et l'angle sont variables.

Une façon de faire est d'intercaler un convertisseur cc/ac du côté de la région A, comme le montre la figure 1.11.a. La tension résultante V_T en amont de la réactance X est alors égale à la somme vectorielle de V_A et V_C au lieu de la valeur originale V_A . Si l'angle entre V_T et V_B est alors δ degrés, il s'ensuit qu'une puissance active sera transportée sur la ligne. Cette puissance est donnée par :

$$P = \frac{V_T V_B}{X} \sin \delta \quad (1.11)$$

Le diagramme vectoriel de la figure 1.11.b montre les conditions lorsque V_C est en avance sur V_A et V_B d'un angle φ . Il s'ensuit que V_T sera en avance sur V_B d'un angle δ . Si l'on fait varier l'angle φ du convertisseur tout en gardant V_C constante, l'extrémité de V_C décrira un cercle. L'extrémité du vecteur V_T suivra ce cercle en pointillé.

Par conséquent, l'angle δ changera progressivement d'une valeur maximale positive à une valeur maximale négative en passant par une valeur nulle. Ainsi, selon l'équation (1.11), la puissance active transmise par la ligne peut être positive ou négative, ce qui revient à dire qu'elle peut circuler dans les deux sens. De plus on peut faire varier la puissance en faisant varier l'amplitude de V_C .

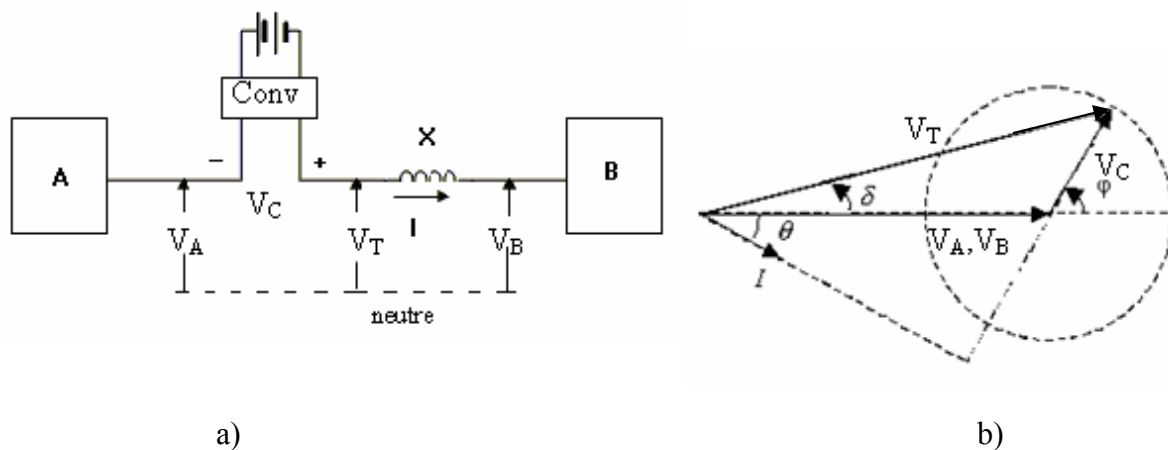


Figure 1.11 Schéma de principe de contrôleur de puissance universel.

Comme le convertisseur fournit de la puissance active au système, il doit en absorber autant de l'accumulateur. A moins d'être surdimensionné, celui-ci se déchargera rapidement. Donc au

lieu d'utiliser un accumulateur (figure 1.11 a), on le remplace par un redresseur qui tire son énergie de la région A. Cette solution demande l'installation de deux convertisseurs connectés par une liaison à c.c. La figure (1.12) montre la configuration du système qui résout ce problème.

Le convertisseur 1 redresse la puissance à c.a provenant du transformateur T_1 et l'envoie au circuit de liaison à c.c. Le convertisseur 2 transforme cette puissance en puissance à c.a et l'injecte dans la ligne de transport sous la tension V_C .

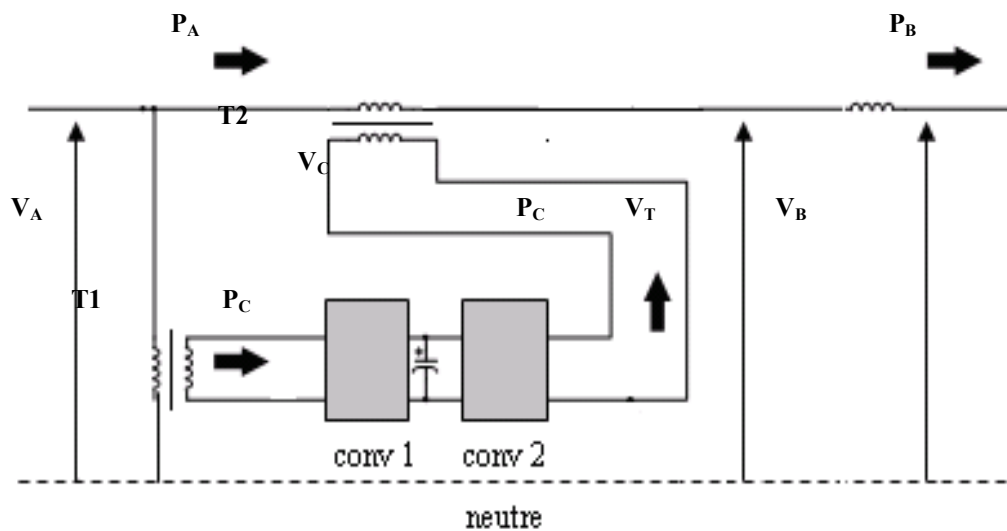


Figure 1.12 Schéma d'un contrôleur de puissance universel (UPFC)

La configuration décrite par la figure 1.12 montre la relation entre puissances P_A , P_B et P_C . Elle est telle que :

$$P_B = P_A + P_C \quad (1.12)$$

L'UPFC peut imposer la valeur et la direction de la puissance active transportée sur la ligne. Lorsque la puissance P_C du convertisseur 2 change de sens, la puissance du convertisseur 1 change aussi de sens. Selon le besoin, et à l'intérieur de leurs limites de fonctionnement, les convertisseurs 1 et 2 peuvent donc imposer la circulation de n'importe quelle puissance, active ou réactive, entre les deux régions. Pour cela, il suffit de contrôler l'amplitude et l'angle de la tension V_C .

En plus de cela le convertisseur 1 peut simultanément absorber ou débiteur de la puissance réactive selon les besoins de la région A.

On constate que l'UPFC de la figure 1.12 est un contrôleur de puissance extrêmement flexible.

Étant donné qu'il peut commander le flux de puissance sur la ligne et lors d'un changement sur les réseaux, l'UPFC peut réagir en quelques millisecondes.

A cause de sa réponse ultra rapide, qui dépend uniquement de la vitesse de commutation des GTO, ce contrôleur peut réagir efficacement à n'importe quelle contingence.

1.4.3 Applications

Les principales applications du contrôleur de puissance universel sont :

- La commande des transits de puissances sur les lignes,
- L'amélioration de la stabilité des réseaux électriques,
- L'exploitation à pleine capacité des équipements et des lignes,
- L'interconnexion des réseaux.

L'Institut de Recherche de l'Energie Electrique (EPRI) en collaboration avec SIEMENS a développé au USA le premier dispositif UPFC dans le but de maximiser l'utilisation des lignes à haute tension existantes et différer la construction de nouvelles lignes [ALL02].

1.5 Bobine magnétique supraconductrice de stockage d'énergie

Ce système stocke de l'énergie dans le champ magnétique créé par un courant continu parcourant une bobine faite de matériaux supraconducteurs. Afin de maintenir le conducteur dans son état supraconducteur, il convient de l'immerger dans un bain d'azote liquide ou d'hélium liquide dont la température est maintenue par un cryostat.

Nous entendons par SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) tout le dispositif FACTS, c'est à dire la bobine supraconductrice de stockage d'énergie et les convertisseurs qui lui sont associés permettant l'échange d'énergie entre la bobine et le réseau alternatif haute tension. Le SMES comprend deux transformateurs de couplage ($\Delta.Y/\Delta.\Delta$), deux convertisseurs à base de thyristors SCR ou GTO associés à une bobine supraconductrice de stockage d'énergie coté continu. Ce système est schématisé par la figure 1.13 ci-dessous.

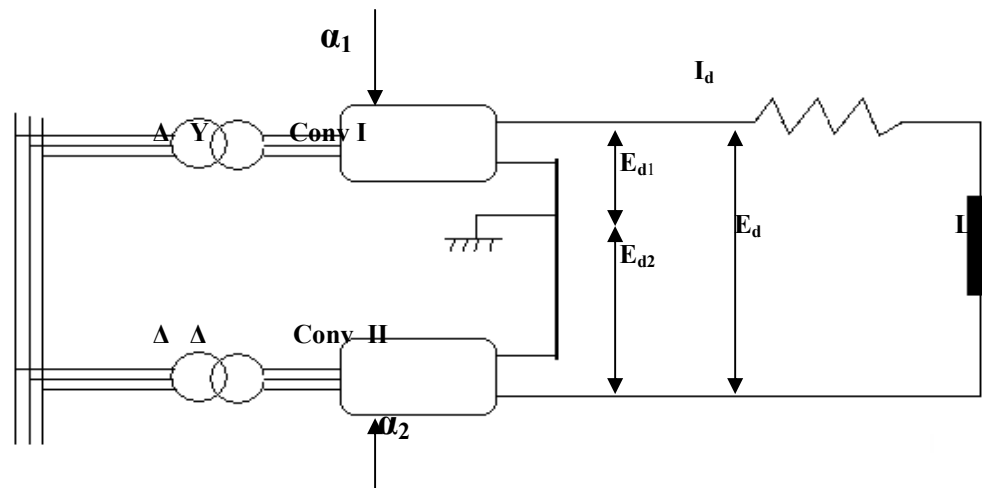


Figure 1.13 Schéma bloc du SMES

L'interface entre le réseau et la bobine est constituée de deux convertisseurs à thyristors et à angles d'amorçages α_1 et α_2 . Ces convertisseurs permettent l'échange de puissances entre le réseau et la bobine dans les deux sens et dans les quatre quadrants.

Des transformateurs d'alimentation permettent pour une puissance échangée avec le réseau donné, d'avoir un degré de liberté supplémentaire sur le choix des caractéristiques des thyristors et de la bobine supraconductrice. A partir de grandeurs mesurées : puissance active ou réactive, fréquence, tension, courant, le SMES définit une puissance active et réactive à injecter dans le réseau.

Il existe actuellement plusieurs firmes dans le monde qui s'intéressent au SMES et à sa réalisation. ACCEL, une firme allemande, en est une. L'une de ses équipes de recherche a mis au point un SMES de 2MJ pour l'amélioration de la qualité de la puissance du laboratoire The Dortmunder Elektrizitäts und Wasserwerke en Allemagne. La figure 1.14 donne un aperçu de ce dispositif [DET 05].



Avec l'autorisation de « ACCEL INSTRUMENTS »

Figure 1.14 Une bobine Supraconductrice de Stockage d'Énergie de 2MJ.

Les caractéristiques de ce dispositif sont les suivantes :

- Le courant du SMES: 1000 A
- L'énergie stockée: 2.1MJ
- Puissance max: 300 kW
- Temps de tenue du dispositif: 8s
- Tension côté continu: >800V
- Champ magnétique généré: 4.5 T

Les différents avantages que peut présenter le SMES sont :

- Temps de réponse très court,
- Opération de charge et de décharge très rapide,
- Possibilité de décharge totale de la bobine,
- Contrôle des puissances active et réactive,

- Rendement très élevé,
- Longue durée de vie (cyclabilité presque infinie),
- Pas de problèmes environnementaux (les champs magnétiques parasites pouvant être réduits voire éliminés avec une géométrie adéquate).

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé d'une manière générale l'état de l'art des dispositifs FACTS (Flexible A C Transmission Systems) et montré leur importance dans la conduite des réseaux électriques.

Les trois types de compensation série, parallèle et série- parallèle ont été passés en revue. Nous avons évoqué brièvement un type particulier de FACTS, le SMES composé d'une bobine supraconductrice de stockage d'énergie associée à un convertisseur de puissance. Ce type de FACTS sera étudié en détail à partir du chapitre 3.

CHAPITRE II

Etude de la Stabilité Transitoire par la Régulation Conventionnelle

2.1 Introduction

La stabilité transitoire d'un réseau électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre, lorsqu'il a été écarté de sa position de fonctionnement stable par une perturbation de grande amplitude (court circuit, perte d'un ouvrage, etc...).

Dans ce chapitre nous modélisons les différentes parties du réseau test retenu à savoir : alternateurs, lignes, transformateurs et charges. Nous décrivons ensuite le réseau test.

Un court circuit triphasé sur une ligne est simulé. Il est éliminé par ouverture des disjoncteurs d'extrémités de la ligne. Le comportement du système est étudié quand le réseau n'est pas régulé d'abord et quand il l'est ensuite.

2.2 Modélisation de la machine synchrone

L'alternateur du réseau électrique multimachine est une machine synchrone triphasée à pôles saillants, elle est constituée principalement de trois enroulements statoriques identiques a, b et c régulièrement distribués, déphasés de $\frac{2\pi}{3}$, et généralement couplés en étoile, d'un enroulement rotorique d'excitation **f** et de deux circuits amortisseurs représentés par deux enroulements en court-circuit équivalents **D** et **Q** en quadrature [MOU96], [ARR83], [STA68] [BER86].

La figure 2.1 ci dessous nous donne une représentation schématique de la machine synchrone triphasée.

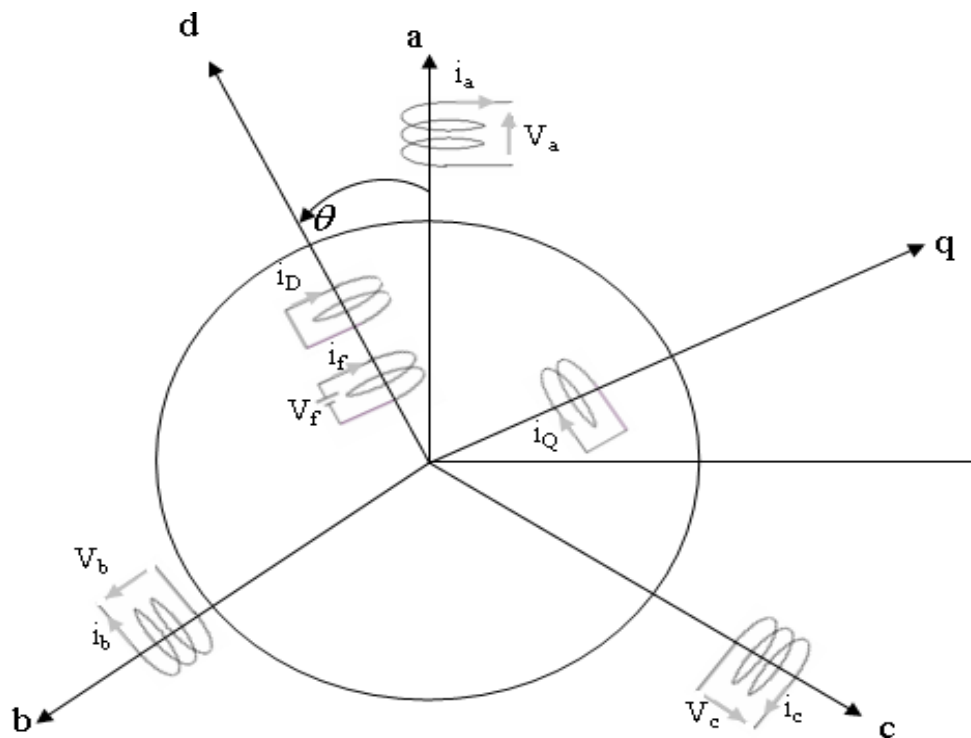


Figure 2.1 : Représentation schématique de la machine synchrone

2.2.1 Equations de flux et de tensions dans le repère statorique

Sur la base des hypothèses de non saturation de la machine et de circuit magnétique feuilleté, la relation flux- courants s'exprime sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \\ \Phi_f \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{Qf} & L_{Qd} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Avec :

- L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} : inductances propres au stator.
- L_{ff}, L_{DD}, L_{QQ} : inductances propres au rotor.
- L_{ab}, L_{bc}, L_{cf} : inductances mutuelles au stator.
- L_{fd}, L_{fQ}, L_{DQ} : Inductances mutuelles au rotor

$$\left. \begin{array}{l} L_{af}, L_{bf}, L_{cf} \\ L_{aD}, L_{bD}, L_{cD} \\ L_{aQ}, L_{bQ}, L_{cQ} \end{array} \right\} \text{Inductances mutuelles stator-rotor.}$$

Les équations de tension de la machine écrite sous forme matricielle sont données par l'expression (2.2) suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ -V_f \\ V_D = 0 \\ V_Q = 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\Phi}_a \\ \dot{\Phi}_b \\ \dot{\Phi}_c \\ \dot{\Phi}_f \\ \dot{\Phi}_D \\ \dot{\Phi}_Q \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

r, r_f, r_D et r_Q sont respectivement la résistance de l'induit, la résistance de l'inducteur, la résistance de l'amortisseur d'axe **d** et la résistance de l'amortisseur d'axe **q**.

2.2.2 Transformation de Park

La transformation de Park permet de passer des grandeurs statoriques a, b, c à de nouvelles grandeurs liées au rotor et tournant avec lui. Ces nouvelles grandeurs sont repérées dans un nouveau système de référence lié au rotor dit repère de Park constitué de 3 axes o, d et q. Le passage de la grandeur \mathbf{g}_{abc} dans le repère statorique à la grandeur \mathbf{g}_{odq} dans le repère de Park se fait par la relation [AND77], [ARR83], [BAR87] :

$$\mathbf{g}_{odq} = \mathbf{P} \mathbf{g}_{abc} \quad (2.3)$$

$$\text{Où } \mathbf{g}_{abc} = \begin{bmatrix} g_a \\ g_b \\ g_c \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{g}_{odq} = \begin{bmatrix} g_o \\ g_d \\ g_q \end{bmatrix}$$

La matrice de transformation de Park est définie par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2.3 Equations de flux et de tensions dans le repère de Park

L'expression (2.1) s'écrit sous la forme compacte suivante :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{abc} \\ \Phi_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{abc} \\ \dot{i}_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

où

$$L_{SS} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

$$L_{SR} = \begin{bmatrix} L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \end{bmatrix}$$

$$L_{RR} = \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{abc} = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \Phi_{fDQ} = \begin{bmatrix} \Phi_f \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix}$$

$$\dot{i}_{abc} = \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \dot{i}_{fDQ} = \begin{bmatrix} \dot{i}_f \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_Q \end{bmatrix}$$

A partir de l'expression (2.5) ci-dessous, on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{abc} \\ \Phi_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{abc} \\ \dot{i}_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

où

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Tenant compte de l'équilibre du système, les équations de flux s'écrivent dans le repère de Park sous la forme (2.8) ci-dessous

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \\ \Phi_F \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & KM_F & KM_D & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & KM_Q \\ KM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ KM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & KM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Les expressions de tensions s'écrivent alors sous la forme (2.9) ci-dessous

$$\begin{bmatrix} V_d \\ -V_F \\ V_D \\ V_q \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & -\omega L_q & -\omega KM_Q \\ 0 & r_F & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 \\ -\omega L_d & -\omega KM_F & -\omega KM_D & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & KM_F & KM_D & 0 & 0 \\ KM_F & L_F & M_R & 0 & 0 \\ KM_D & M_R & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & KM_Q \\ 0 & 0 & 0 & KM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_F \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_Q \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Ces équations donnent lieu au schéma électrique de la machine synchrone dans le repère de Park représenté par la figure (2.2) ci-dessous

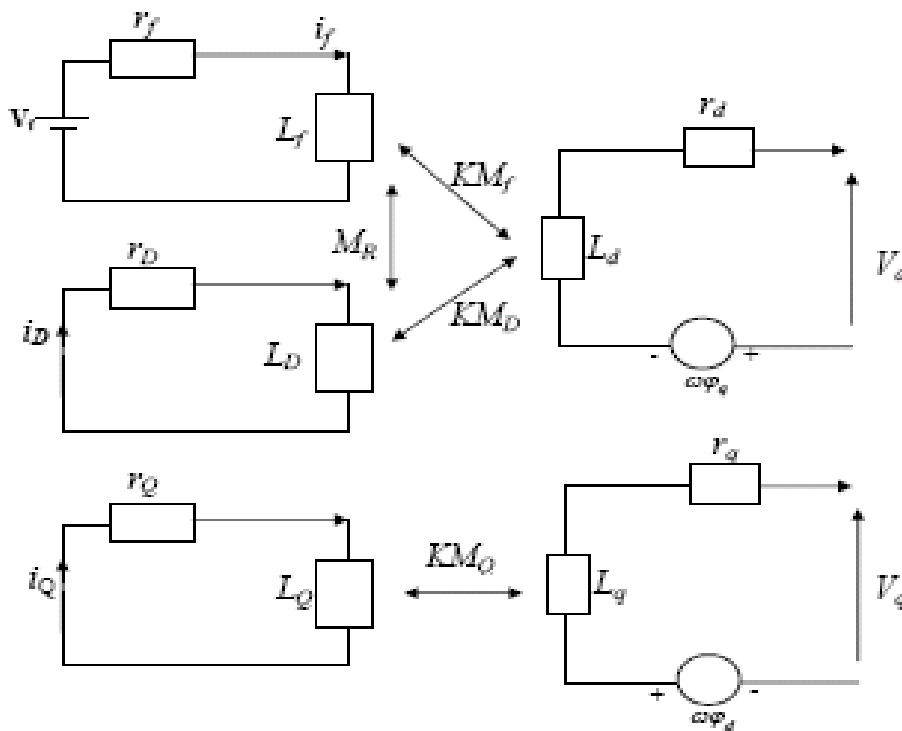


Figure 2.2 Schéma électrique de la machine synchrone dans le repère de Park

La transformation de PARK permet une représentation bipolaire équivalente de la machine synchrone triphasée.

La figure 2.3 illustre le modèle de Park de la machine :

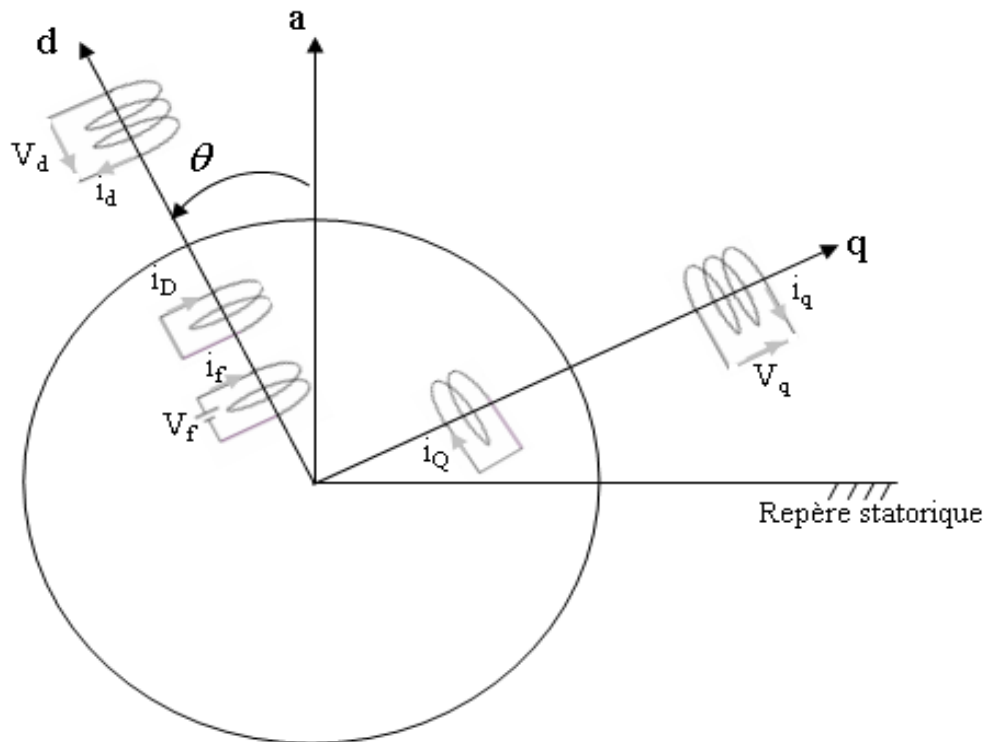


Figure 2.3 : Modèle de Park de la machine synchrone.

2.2.4 Equations électriques suivant les axes d ,q

Nous utiliserons pour l'étude de la machine le modèle à deux axes donné par la transformation de Park. Les composantes de la tension V_t aux bornes de la machine suivant les axes q et d sont :

$$V_q = E'_q - rI_q + X'_d I_d \quad (2.10)$$

$$V_d = E'_d - rI_d - X'_q I_q \quad (2.11)$$

Ou $X'_d = \omega L'_d$ et $X'_q = \omega L'_q$ sont respectivement les réactances transitoires directe et en quadrature de l'alternateur. Les inductances transitoires sont définies par les expressions ci-dessous :

$$L'_d = L_d - \frac{K^2 M_F^2}{L_F} \quad (2.12)$$

$$L'_q = L_q - \frac{K^2 M_Q^2}{L_Q} \quad (2.13)$$

La variation de la f.e.m selon les axes d et q est donnée par :

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{[-E'_d - (X_q - X'_q)I_q]}{T'_{q0}} \quad (2.14)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{[E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d)I_d]}{T'_{d0}} \quad (2.15)$$

Où $X_d = \omega L_d$ et $X_q = \omega L_q$ sont les réactances synchrones directe et en quadrature. Les constantes de temps transitoires selon les axes d et q sont définies par les expressions suivantes :

$$T'_{d0} = \frac{L_F}{r_F} \quad (2.16)$$

$$T'_{q0} = \frac{L_Q}{r_Q} \quad (2.17)$$

E_{fd} est la tension d'excitation. Elle est liée à la f.e.m induite E_q suivant l'axe q par la relation :

$$E_{fd} = E_q + j(X_d - X_q)I_d \quad (2.18)$$

La f.e.m induite selon l'axe q est telle que :

$$E_q = V + (r + jX_q)I \quad (2.19)$$

Où V est la tension aux bornes de la machine.

2.2.5 Équation du mouvement de la machine synchrone

L'équation du mouvement du rotor de la machine est donnée par la relation :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e - T_d \quad (2.20)$$

J : moment d'inertie de l'ensemble des masses rotorique.

θ_m : Position angulaire du rotor par rapport à un axe de référence fixe lié au stator.

T_m : couple mécanique d'entraînement de la machine sans les pertes dues à la rotation.

T_e : couple électromagnétique.

T_d : couple d'amortissement tenant compte des frottements.

On désigne respectivement par ω_{sm} et ω_m les pulsations mécaniques (vitesses de rotation) des champs statorique et rotorique et par δ_m la position angulaire du champ rotorique par rapport au champ statorique.

La figure 2.4 indique la position de chacun des champs par rapport à une référence fixe. La position angulaire θ_m est telle que :

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.21)$$

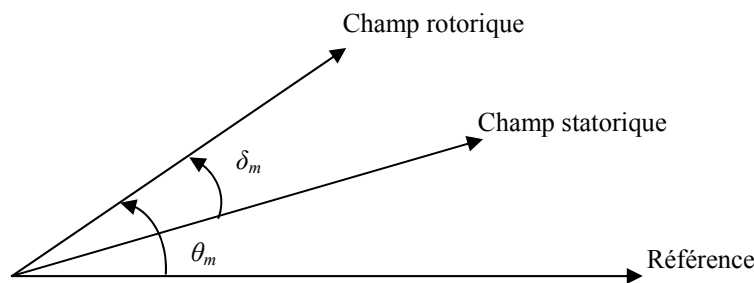


Figure 2.4 Disposition vectorielle des champs statorique et rotorique.

On définit la constante d'inertie de la machine par la relation (2.22) ci-dessous :

$$H = \frac{W_c}{S_{mach}} \quad (2.22)$$

Où W_c est l'énergie cinétique de la machine à la vitesse de synchronisme. Elle est donnée par :

$$W_c = \frac{1}{2} J \omega_{sm}^2 \quad (2.23)$$

S_{mach} désigne la puissance apparente nominale de la machine.

Tenant compte de la relation (2.22), les expressions (2.20) et (2.21) s'écrivent sous la forme :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e - D\omega) \quad (2.24)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.25)$$

$$\text{Avec} \quad \omega = p\omega_m$$

$$\omega_s = p\omega_{sm}$$

$$\delta = p\delta_m$$

p est le nombre de paires de pôles de la machine. $D\omega$ est la puissance tenant compte des frottements.

D est le coefficient d'amortissement.

2.2.6 Modèle de la ligne

Les lignes sont représentées par un quadripôle symétrique donné par un schéma en π . La figure 2.5 illustre le schéma en π de la ligne, où r_{ij} , x_{ij} et b_{ij} sont respectivement la résistance, la réactance et la demi-susceptance transversale (coté i) de la ligne i - j .

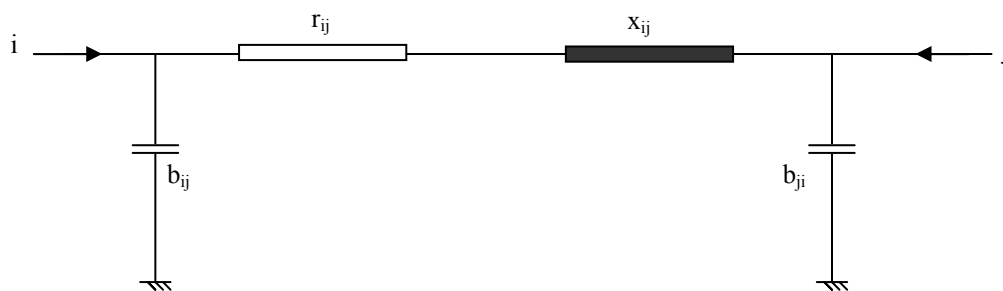


Figure 2.5 Schéma en π d'une ligne de transmission.

L'admittance élémentaire de la ligne i - j est donnée par la relation :

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (2.26)$$

2.2.7 Modèle de la charge

Une charge de puissance S_L connectée à un nœud de tension V_L est représentée par son admittance équivalente Y_L telle que :

$$Y_L = G_L + j B_L$$

$$\text{Où :} \quad G_L = \frac{P_L}{V_L^2} \quad \text{et} \quad B_L = \frac{-Q_L}{V_L^2}$$

La figure 2.6 schématise l'admittance équivalente de la charge



Figure 2.6 Schéma de l'admittance équivalente d'une charge.

2.3 Présentation du réseau test

En considérant uniquement les régimes équilibrés, le réseau peut être représenté par un schéma unifilaire correspondant à une phase. Le réseau de la Western Systems Council Coordinating de la figure 2.7 souvent utilisé dans les études de stabilité de réseau est pris comme réseau test dans notre étude. Ce réseau comporte 3 alternateurs connectés aux jeux de barres 1, 2 et 3 à travers des transformateurs de puissance représentés par leurs réactances équivalentes 1-4, 2-7 et 3-9. Les charges A, B et C du réseau sont connectées respectivement aux nœuds 5, 6 et 8 [MOU96] [IEE73].

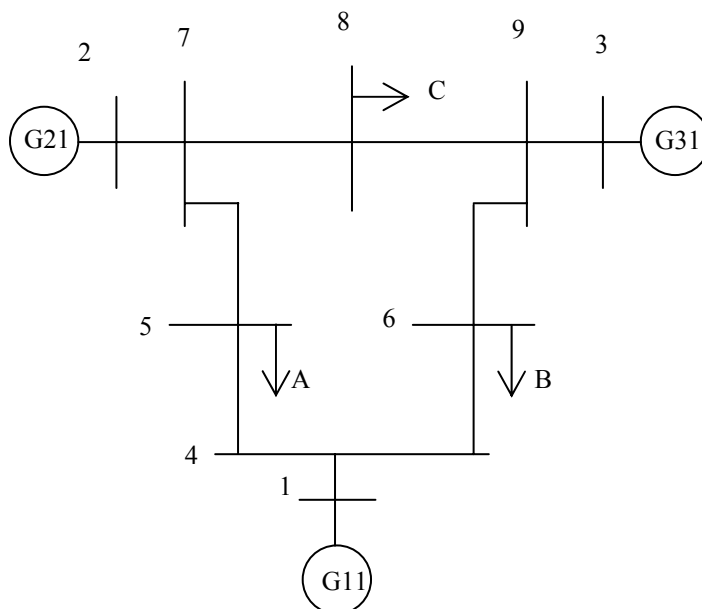


Figure 2.7 Schéma du réseau 3 machines – 9 nœuds

Les tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 donnent respectivement les caractéristiques du réseau relatives aux

alternateurs, aux lignes et transformateurs et aux charges. Les grandeurs données en p.u sont calculées selon les puissance et tension de base égales respectivement à 100 MVA et 230kV.

Alternateur	Machine G1	Machine G2	Machine G3
Puissance apparente nominale (MVA)	247.5	192.0	128.0
Energie cinétique (J)	2364.0	640.0	300.0
Constante d'inertie H (s)	9.55	3.33	2.34
Coefficient d'amortissement D	0.0	0.0	0.0
Réactance transitoire directe X'_d (p.u)	0.0608	0.1198	0.1813
Réactance transitoire transversale X'_q (p.u)	0.0969	0.1969	0.25
T'_{d0} (s)	8.96	6.00	5.89
T'_{q0} (s)	0.500	0.535	0.600

Tableau 2.1 Caractéristiques des alternateurs.

Ligne i-j	R(p.u)	X(p.u)	B/2 (p.u)
1-4	0.0000	0.0576	0.0
2-7	0.0000	0.0625	0.0
3-9	0.0000	0.0586	0.0
4-5	0.0100	0.0850	0.0880
4-6	0.0170	0.0920	0.0790
5-7	0.0320	0.1610	0.1530
6-9	0.0390	0.1700	0.1790
7-8	0.0085	0.0720	0.0745
8-9	0.0119	0.1000	0.1045

Tableau 2.2 Caractéristiques des lignes et des transformateurs.

	Charge A	Charge B	Charge C
Puissance active (MW)	125.0	90.0	100.0
Puissance réactive (MVAR)	50.0	30.0	35.0

Tableau 2.3 Caractéristiques des charges.

2.4 Moyens conventionnels de stabilisation du réseau

On qualifie de conventionnels ou classiques les régulateurs de tension ou de vitesse couramment utilisés dans les réseaux et ce pour les différencier des nouveaux systèmes de régulation faisant partie des FACTS [STA68], [ARR83], [AND77],[MOU96]. Le SMES qui en fait partie sera étudié à partir du chapitre suivant et son effet sur le réseau examiné.

2.4.1 Régulateur de tension

La régulation de tension consiste à détecter l'écart entre la valeur réelle de la tension V_t aux bornes de la machine et une valeur de consigne ou de référence V_{ref} et construire une chaîne d'action sur la tension d'excitation E_{fd} .

Le schéma de la figure 2.8 représente un régulateur de tension type IEEE1 et indique la configuration de chaînes tenant compte des systèmes de stabilisation et de saturation. La fonction saturation est de la forme [STA68]:

$$S_e = A_{ex} e^{B_{ex} E_{fd}} \quad (2.27)$$

A_{ex} et B_{ex} sont des constantes.

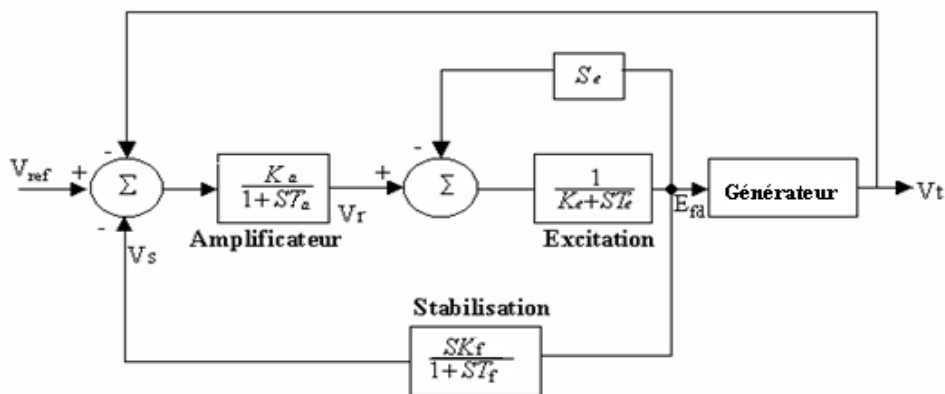


Figure 2.8 Schéma fonctionnel de la régulation de tension type IEEE1

Les équations différentielles liées à ce type de régulation s'écrivent :

$$\frac{dV_r}{dt} = -\frac{1}{T_a} (V_r + K_a (V_s + V_t - V_{ref})) \quad (2.28)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{K_f}{T_f T_e} V_r - \frac{K_f (S_e + K_e)}{T_f T_e} E_{fd} - \frac{1}{T_f} V_s \quad (2.29)$$

$$\frac{dE'_{fd}}{dt} = \frac{1}{T_e} V_r - \frac{S_e + K_e}{T_e} E_{fd} \quad (2.30)$$

2.4.2 Régulateur de vitesse

A la suite d'une perturbation, le régulateur de vitesse des machines agit sur les organes d'admission du fluide moteur afin de rétablir l'équilibre entre les puissances. La réserve de puissance permet d'assurer la correction de l'écart entre la fréquence de référence liée à la pulsation synchrone ω_s et la fréquence réelle liée à la pulsation rotorique ω . La puissance mécanique développée par la turbine est essentiellement fonction de la position des soupapes d'admission du fluide, elle même sous le contrôle du régulateur de vitesse dont le schéma fonctionnel est celui de la figure 2.9 ci-dessous :

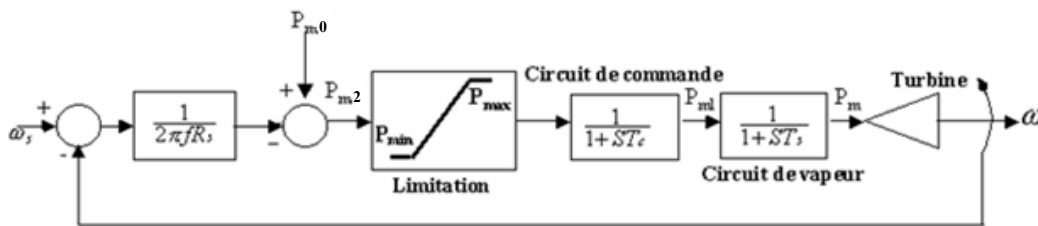


Figure 2.9 Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse.

Où : R_s désigne le statisme.

P_{m0} désigne la puissance mécanique d'entraînement à l'équilibre.

T_c est le temps de réponse du circuit de commande.

T_s est le temps de réponse du circuit vapeur.

Le schéma fonctionnel de la figure 2.9 inclut une fonction de transfert décrivant le circuit de vapeur avec une constante du temps de réponse T_s et une fonction de transfert décrivant le circuit de commande avec une constante de temps T_c . Les équations différentielles reliant les variables d'entrée et de sortie de ces fonctions de transfert sont:

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{T_s} (P_{m1} - P_m) \quad (2.31)$$

$$\frac{dP_{m1}}{dt} = \frac{1}{T_c} (P_{m2} - P_{m1}) \quad (2.32)$$

P_{m2} est telle que :

$$P_{m2} = P_{m0} - \frac{\omega_s - \omega}{2\pi f R_s} \quad (2.33)$$

et doit respecter les seuils du régulateur admis

$$P_{m2} = 0 \quad P_{m2} \leq 0$$

$$P_{m2} = P_{\max} \quad P_{m2} \geq P_{\max}$$

P_{\min} et P_{\max} sont les capacités minimale et maximale de la turbine

2.4.3 Étude de la stabilité transitoire du réseau test

L'étude en grands mouvements du système est faite pour examiner le comportement du réseau test soumis à un court circuit triphasé. La modélisation de la machine se fait suivant le modèle E'_q . Ce modèle dérive de celui à deux axes. Les expressions (2.10), (2.11) et (2.15) constitue les équations du modèle de la machine. Pour l'étude du système sans régulation on utilise les équations (2.10), (2.11) et (2.15), (2.24) et (2.25) relatives à chaque machine.

On simule un court circuit triphasé relié à la terre sur la ligne 7-5. Le défaut est proche du noeud 7. Il est éliminé au bout de 80 ms par ouverture des disjoncteurs d'extrémités de la ligne 7-5. Le tableau 2.4 ci-dessous donne les valeurs des paramètres utilisés pour les régulateurs de tension et de vitesse pour les trois machines :

	Machine G1	Machine G2	Machine G3
Ka	1400.0	50.0	25.0
Ta (s)	0.40	0.30	0.30
Ke	-0.17	-0.17	-0.17
Te(s)	0.6	0.50	0.65
Kf	0.05	0.05	0.05
Tf	1.0	1.0	1.0
Exmin	0.0	-4.02	-3.438
Exmax	3.48	4.02	3.438
Aex	0.0	0.0013	0.0015
bex	3.7884	1.3547	1.5833
Rs	-0.04	-0.04	-0.04
Pmmax	2.5	20.0	2.0
Pmin	0.0	0.0	0.0
Tc(s)	0.5	0.5	0.5
Ts(s)	0.6	0.6	0.6

Tableau 2.4 Données du régulateur de tension et de vitesse.

2.4.4 Résultats de simulation

La performance des systèmes de régulation conventionnelle est étudiée en examinant le comportement du réseau test soumis à une perturbation en l'absence de régulation et quand il en est équipé.

Les équations (2.28), (2.29), (2.30), (2.31), (2.32), (2.33) rendent compte de la régulation. On examine le comportement du système dans les trois situations suivantes :

- * Système non régulé,
- * Système régulé en tension,
- * Système régulé en tension et vitesse.

L'étude du comportement des machines est faite sur la base des variations de l'angle rotorique, la tension et de la vitesse de la machine.

La figure 2.10 montre les variations des caractéristiques de la machine 1 dans les trois situations citées ci-dessus.

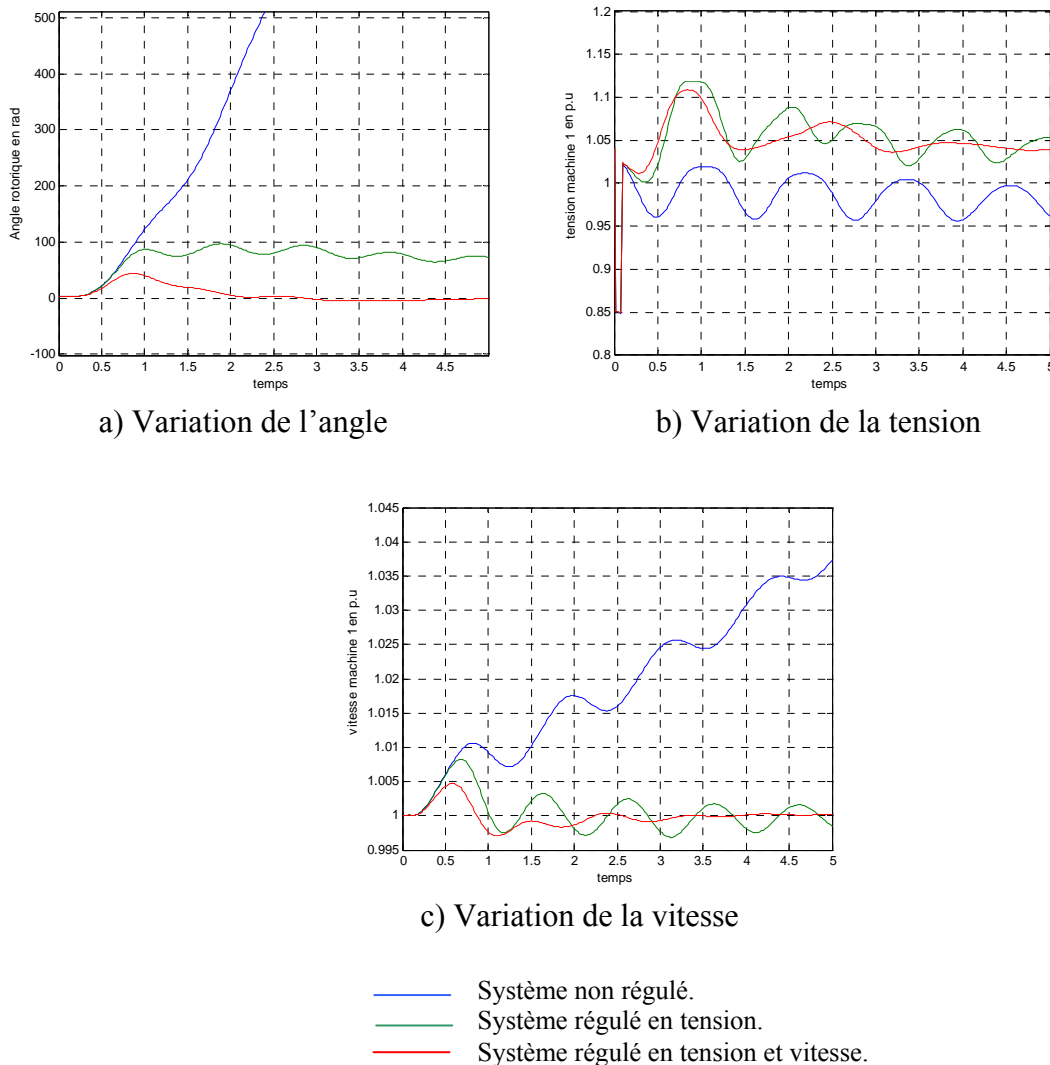


Figure 2.10 Variation des caractéristiques de la machine 1

On constate que la régulation de tension et de vitesse présente une meilleure performance et ce par rapport à la régulation de tension seule. Néanmoins les résultats obtenus par la régulation de tension seule sont appréciables puisque les fluctuations restent toujours dans un intervalle acceptable.

Cela montre que les relations puissance active –angle rotorique (P/δ), puissance réactive – tension (Q/V) ne sont pas totalement découplées puisque la régulation de tension n'est pas sans effet sur les caractéristiques vitesse et angle de la machine.

La figure 2.11 ci-dessous montre le comportement de la machine 2 dans les trois situations : système non régulé, système régulé en tension et système régulé en tension et vitesse. On observe que les phases transitoires des paramètres de la machine 2 sont plus importantes que pour la machine 1. Cela est dû au fait que le court circuit est plus proche de la machine 2 qui est la plus affectée.

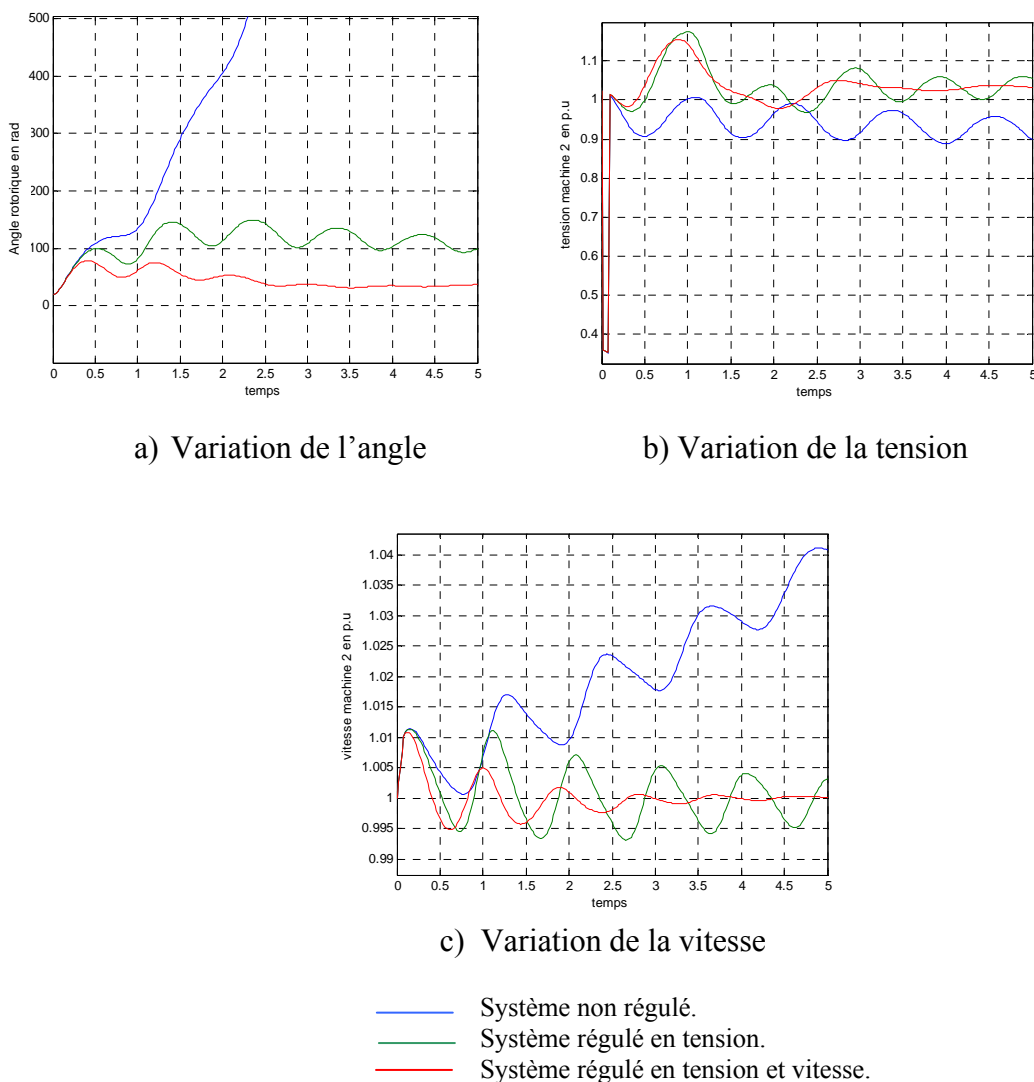


Figure 2.11 Variation des caractéristiques de la machine 2

La figure 2.12 ci-dessous montre les variations des caractéristiques de la machine 3. On observe également que les phases transitoires sont plus importantes que pour la machine 1. Cela est dû au fait que la machine 3 est le point faible du réseau du point de vue dimensionnement.

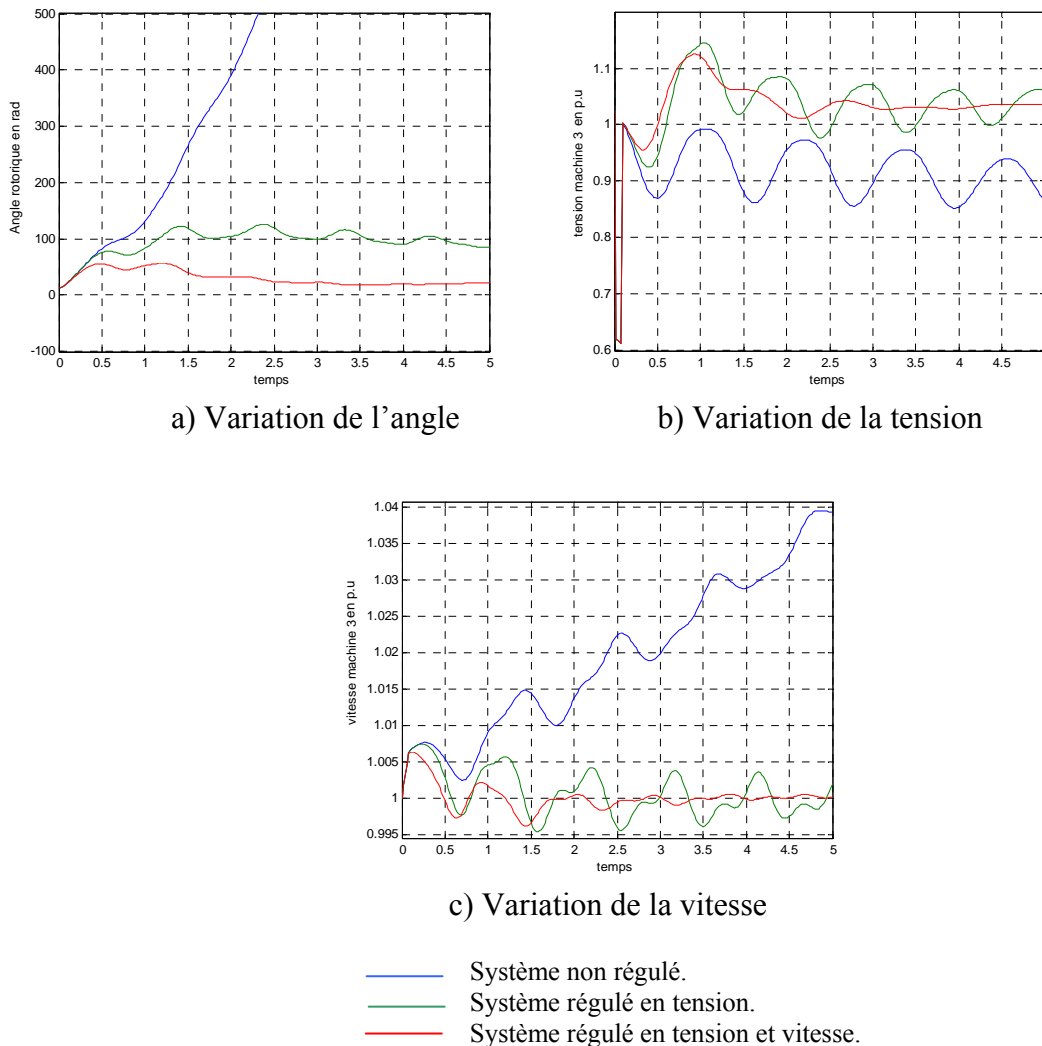


Figure 2.12 Variation des caractéristiques de la machine 3

2.4.5 Influence de la durée du défaut sur le comportement du réseau

Pour l'étude de l'influence de la durée du défaut sur le réseau, on se limite à l'examen du comportement de la machine la plus proche du défaut c'est-à-dire la machine 2.

Le court circuit est simulé sur le réseau test équipé de la régulation de tension et de vitesse avec un temps de défaut égal à 80ms puis à 120ms.

Les résultats de la figure 2.13 montrent que la durée du défaut influe sur la qualité de l'amortissement. Les oscillations sont d'autant plus importantes que la durée de défaut est grande : résultat prévisible. Cela est plus visible sur les courbes de variation de l'angle et de la

vitesse de la machine 2 et ce à cause de sa proximité du défaut.

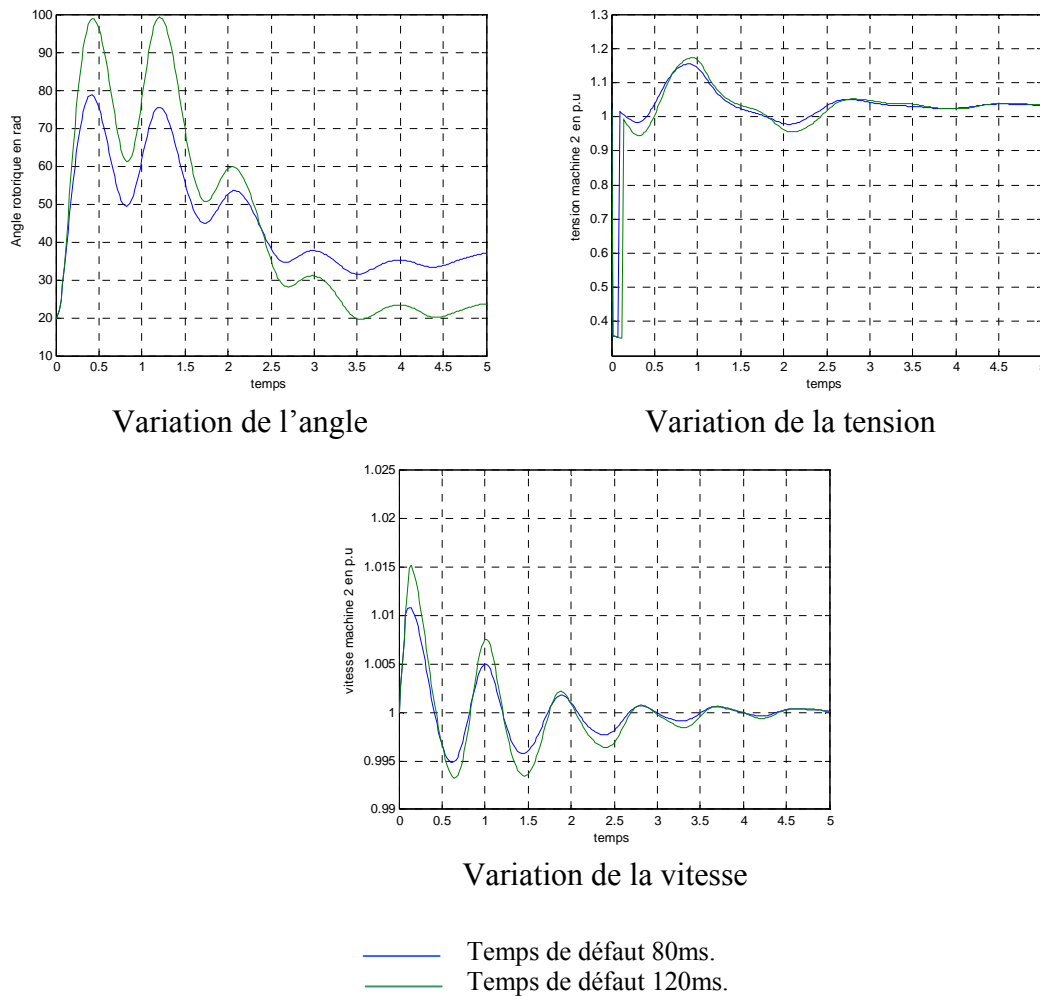


Figure 2.13 Variation des caractéristiques de la machine 2

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les différentes parties du réseau. Un défaut triphasé a été simulé sur une ligne du réseau pour examiner les performances de la régulation classique de tension et de vitesse dans la perspective de les comparer aux performances de la régulation par bobine supraconductrice. Les différentes simulations ont montré l'effet prédominant de la régulation de vitesse. En ajoutant la régulation de tension, les performances sont améliorées. Les résultats obtenus montrent aussi que les relations (P/δ) et (Q/V) ne sont pas totalement découplées et que le temps d'élimination du défaut a une influence sur le comportement du réseau perturbé.

CHAPITRE III

Configuration et Principe de Fonctionnement du SMES

3.1 Introduction

Les stockages de type électrique, batteries, condensateurs et bobines, n'ont pas une capacité suffisante. Cette situation a quelque peu évolué avec les supraconducteurs. L'absence de résistance permet d'augmenter le courant continu dans une bobine de manière très importante. L'énergie magnétique emmagasinée peut alors devenir intéressante et du même ordre de grandeur que l'énergie cinétique des groupes tournants.

Une bobine de stockage supraconductrice associée à un convertisseur permet donc un échange de puissance entre la bobine et le réseau, le temps de réponse n'étant limité que par le type de convertisseur associé à la bobine. L'ensemble constitue le SMES.

Dans ce chapitre, nous donnons la configuration et le principe de fonctionnement d'un tel dispositif, avant de nous intéresser à l'interface d'échange d'énergie entre le SMES et le réseau en examinant sa commande et son mode de couplage.

Nous finirons ce chapitre par le calcul du dimensionnement du SMES en fonction du réseau test utilisé.

3.2 Modulation de la charge

Dans le domaine de la gestion et le dimensionnement des réseaux électrique, on est confronté à un problème très épineux qui est la disparité de la consommation d'électricité au cours d'une journée. La consommation minimum en période creuse peut représenter la moitié de la puissance maximale de consommation en période de pointe. La figure 3.1 ci-dessous indique l'allure d'une courbe de charge journalière quand cette dernière est modulée et quand elle ne l'est pas [DAL 04].

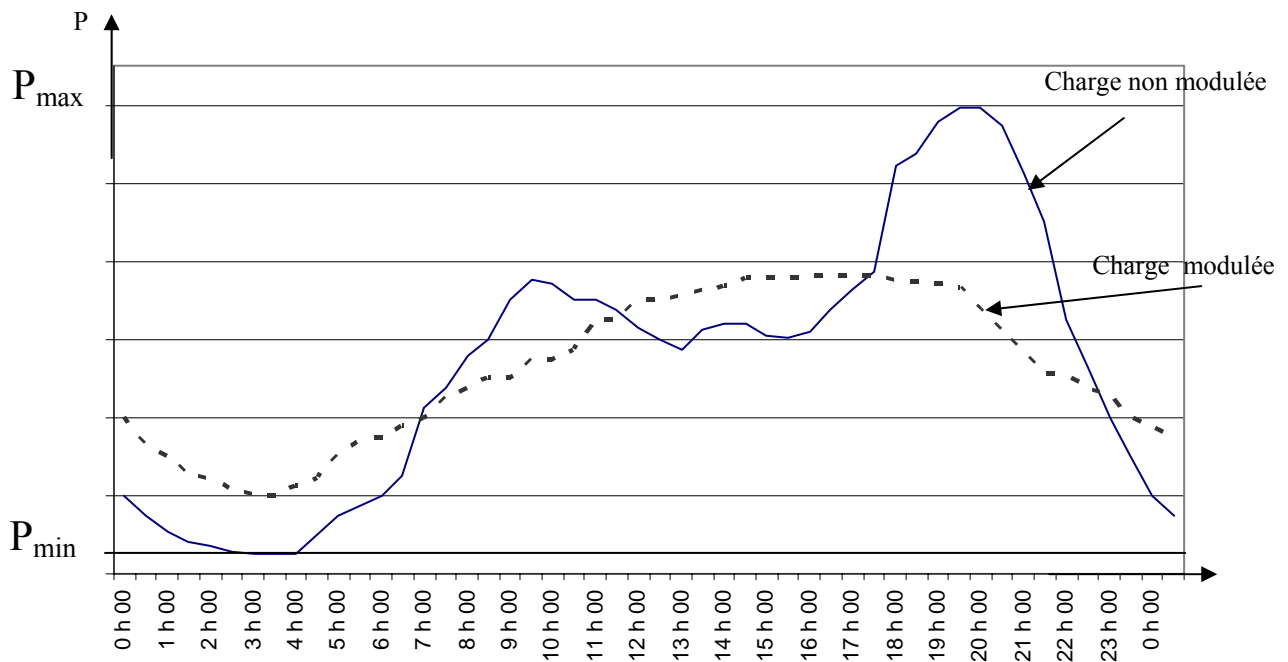


Figure 3.1 Courbe de charge journalière.

Sans modulation de la charge, nous serions amenés à dimensionner les installations électriques en fonction de la charge demandée en période de pointe : P_{\max} (Fig.3.1), or ces installations dans la durée ne sont pas sollicitées pour cette puissance, d'où l'idée de moduler la charge afin d'optimiser l'investissement des installations et faire donc appel en période de pointe à des réserves qui compléteront l'appoint non disponible dans les équipements installés.

Ces réserves sont constituées à partir de l'équipement installé en période creuse c'est-à-dire quand la puissance appelée par le réseau est minimal : P_{\min} (Fig.3.1).

Pour moduler la courbe de consommation, on doit disposer d'un système de stockage de l'énergie électrique capable d'injecter ou d'absorber de la puissance électrique. Il absorbe cette énergie à partir des installations électriques durant la période creuse et la restitue si le besoin est en période de pointe.

Pour le stockage de l'énergie électrique, il existe actuellement plusieurs dispositifs :

- Les barrages hydroélectriques.
- Le stockage sous forme d'air comprimé.
- Les batteries électrochimiques.

- Les supercondensateurs.
- Les bobines magnétiques supraconductrices.

3.3 Historique du SMES

Une bobine supraconductrice représente une réserve d'énergie sous forme électromagnétique pour fournir la puissance aux heures de pointe et réduire les capacités de production dans les grands réseaux ou pour constituer des sources impulsives d'énergie à usages spécifiques (champs pulsés) souvent militaires (arme à énergie dirigée, lanceur d'engins).

Malgré un rendement élevé, une densité d'énergie importante et un temps de réponse extrêmement rapide comparé aux autres systèmes de stockage, une expérimentation à échelle significative (10GWh) se heurte au gigantisme des bobines (diamètre 2 km) dont seules des parois rocheuses en sous-sol peuvent supporter leurs contraintes mécaniques. Un dimensionnement réduit de la bobine rendant le système faisable, permet cependant des applications autres que le stockage comme réserve tournante, telle que les alimentations sans interruptions (UPS) et le réglage de la stabilité des réseaux électriques [FEA97].

L'intérêt porté au SMES a commencé dans les années 1970 à l'université du Wisconsin aux Etats Unis d'Amérique (USA). Le premier SMES était étudié comme réserve d'énergie dans le but de moduler la charge. Il avait une capacité de stockage de plus de 5000MWh avec un diamètre de 1km.

En 1972 à Los Alamos National Laboratory (LANL), on a commencé des travaux d'expérimentation pour étudier la faisabilité de l'application des SMES dans les réseaux électriques. Ce n'est qu'en 1983 que le premier SMES a vu le jour avec la réalisation d'une installation de 30MJ (Tacoma, Washington) par la compagnie d'électricité Bonneville Power Administration (BPA). Le dispositif a été testé sur un réseau 500kV durant une année où plus d'un million de cycles charge/décharge ont été effectués avec succès. Cela a montré l'efficacité des dispositifs SMES et leurs applications pour la stabilisation des réseaux électriques et a ouvert la voie de la recherche dans ce sens [HAS04], [MOH73], [ROG79].

3.5 Constitution du dispositif SMES

Un dispositif SMES est constitué de trois principales parties :

- 1-La bobine supraconductrice.

2- Les systèmes de protection et de refroidissement.

3- L'interface d'échange de puissances constitué par un convertisseur et des transformateurs de puissances.

La figure 3.2 schématise les différentes parties du système.

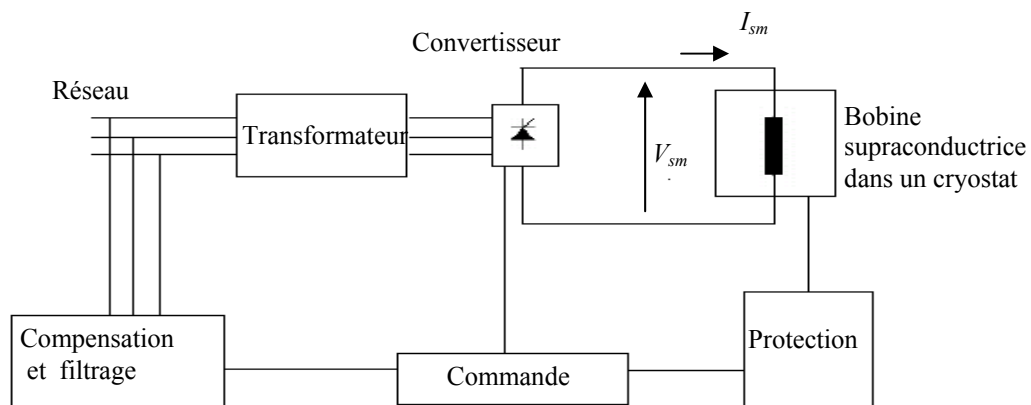


Figure 3.2 Eléments constitutifs du SMES

3.4.1 Bobine supraconductrice

La bobine supraconductrice est composée de filaments de quelques microns de diamètre en Niobium Titane (Nb-Ti). Ces derniers sont enfermés dans une matrice en cuivre (Cu) qui constitue le support mécanique des conducteurs et sert à séparer les filaments Nb-Ti. Elle isole électriquement les filaments en constituant une barrière de résistance qui réduit les pertes pendant la charge et la décharge. Enfin elle participe à la conduction pendant les périodes transitoires où le supraconducteur ne conduit pas et s'achemine vers l'état normal de supraconductivité, elle assure également la stabilité thermique. La bobine est enfermée dans un cryostat rempli d'hélium liquide qui la maintient à une température voisine de 4 K.

Le domaine de la supraconductivité a connu ces dernières années une grande avancée avec les supraconducteurs à haute température critique (HTC) permettant d'augmenter les températures de fonctionnement et simplifiant ainsi beaucoup la cryogénie et améliorant la stabilité de la bobine. La première génération de supraconducteur HTC est en cours d'industrialisation à travers le monde. Ce sont les rubans PIT (Powder In Tube) basés sur le composé supraconducteur BiSrCaCuO sous forme de nombreux filaments dans une matrice en argent ou argent-magnésium pour une meilleure résistance mécanique.

Les contraintes mécaniques sont importantes compte tenu des fortes densités de courant associées à des inductions élevées. Sous des inductions de plusieurs Teslas, les rubans PIT doivent être maintenus à des températures inférieures à 35 K. Des températures de 20 à 30 K sont facilement accessibles et à un coût raisonnable grâce aux développements récents des cryo-réfrigérateurs performants et fiables.

En plus de l'importance du matériau supraconducteur, il est nécessaire de se préoccuper de la compatibilité électromagnétique de telles installations. En adoptant une géométrie adéquate, on peut diminuer les forces magnétiques externes. Pour cette raison, on adopte la forme en tore pour les bobines supraconductrices. La figure 3.3 représente la forme en tore d'une bobine permettant la minimisation des champs parasites. En outre, et en raison du bas champ magnétique externe, des SMES toroïdaux peuvent être situés près d'une installation ou d'une charge d'abonné. Pour les petits SMES, les bobines en formes de solénoïde sont habituellement utilisées parce qu'il est facile de les bobiner. Les bobines en forme de tore nécessitent un compactage par des cercles externes et deux disques, dont un est au dessus et l'autre en dessous pour éviter la rupture de la bobine.

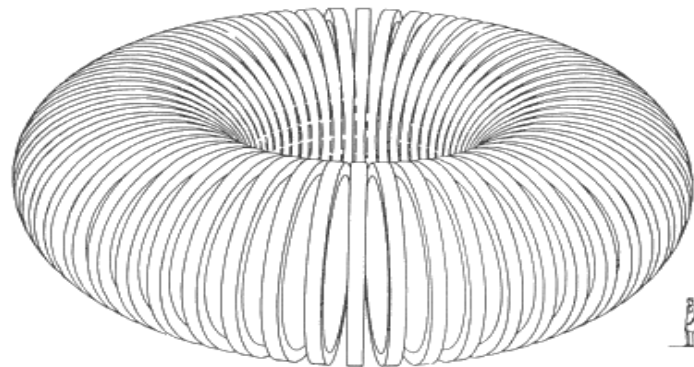


Figure 3.3 Géométrie en tore pour un SMES minimisant les champs parasites.

3.4.2 Systèmes de protection et de refroidissement

Afin de maintenir la bobine supraconductrice à une basse température, on l'enferme dans un cryostat d'hélium liquide. En cas de défaut de la réfrigération ou du convertisseur, un système de protection permet de décharger la bobine supraconductrice dans une résistance.

Les convertisseurs étant polluant, il est nécessaire de disposer d'un système de filtrage des harmoniques que le SMES sera amené à injecter dans le réseau. La bobine constituant une charge réactive, on doit donc ajouter un système de compensation de l'énergie réactive.

3.4.3 Configuration et commande du convertisseur

Les échanges de puissance entre la bobine supraconductrice et le réseau se font à travers un convertisseur triphasé à base de thyristors et d'un transformateur de puissance [TIX91] [ABU02], [PAI96], [ZHE00], [RAB99].

3.4.3.1 Montage en pont simple

Considérons le montage de la figure 3.4, où la bobine supraconductrice est reliée au réseau via un pont simple à thyristors connecté à un transformateur. La tension redressée V_{sm} aux bornes de la bobine supraconductrice est donnée par la relation suivante :

$$V_{sm} = E_{d0} - X_c I_{sm} \quad (3.1)$$

Où X_c est la réactance de commutation des thyristors.

E_{d0} est la tension redressée à vide.

I_{sm} est le courant parcourant la bobine supraconductrice.

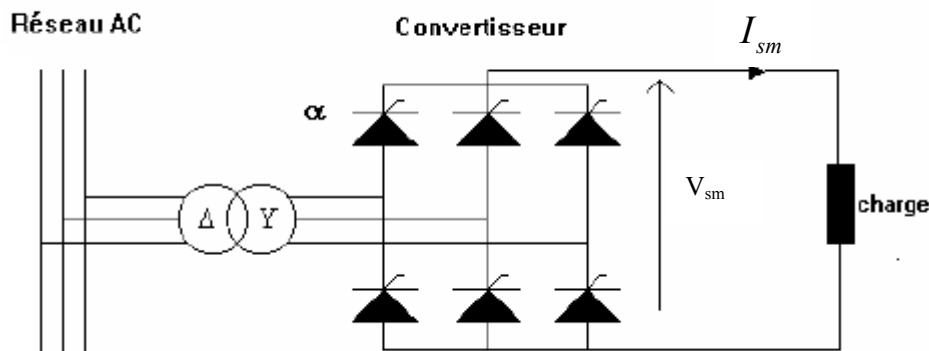


Figure 3.4 Montage en pont simple pour un SMES

Si on considère que V_{max} est l'amplitude de la tension triphasée d'alimentation du pont et α l'angle d'amorçage des thyristors, on aura alors :

* pour un couplage étoile du secondaire du transformateur.

$$E_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{max} \cos \alpha \quad (3.2)$$

* pour un couplage triangle du secondaire du transformateur.

$$E_{d0} = \frac{3}{\pi} V_{\max} \cos \alpha \quad (3.3)$$

Si on suppose que les chutes de tensions dues à la réactance de commutation sont négligeables, l'échange de puissance active avec le réseau s'écrit sous la forme:

$$P_{sm} = V_{sm} I_{sm} = E_{d0} I_{sm} \quad (3.4)$$

En posant :

$$E_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{\max} \quad \text{dans le cas du couplage étoile.}$$

$$E_d = \frac{3}{\pi} V_{\max} \quad \text{dans le cas du couplage triangle.}$$

La puissance active s'écrit alors sous la forme :

$$P_{sm} = E_d I_{sm} \cos \alpha \quad (3.5)$$

De la même manière on obtient la puissance réactive échangée avec le réseau :

$$Q_{sm} = E_d I_{sm} \sin \alpha \quad (3.6)$$

Les échanges d'énergie entre la bobine et le réseau sont commandées par la variation de l'angle d'amorçage α .

Pour un pont simple à thyristors l'angle d'amorçage ne peut pas dépasser π , alors sa plage de fonctionnement est un demi plan du domaine (P,Q). La figure 3.5 représente le domaine de variation des puissances (P,Q) d'un pont simple à thyristors où la puissance réactive est toujours positive (circulant du réseau vers la charge coté continue). Les puissances actives et réactives sont couplées puisque liées par le même angle d'amorçage.

Pour des raisons de commutation la variation de l'angle d'amorçage α se fera sur un arc de cercle limité entre 5° et 140°

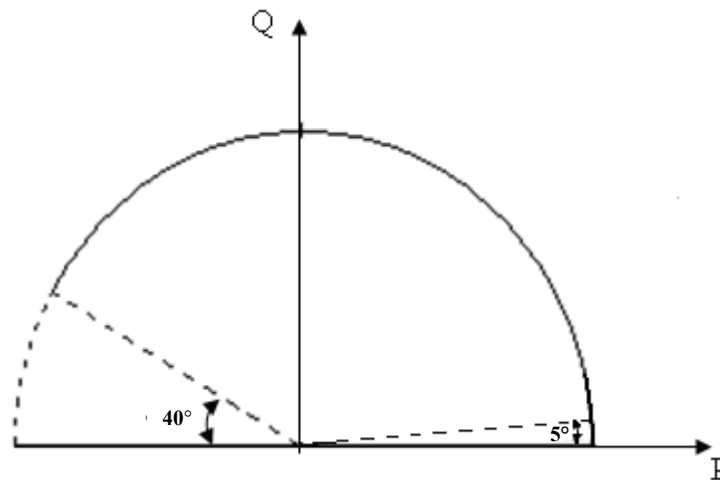


Figure 3.5 Domaine (P,Q) d'un pont simple à thyristors

Pour un pont simple à thyristors GTO l'angle d'amorçage α peut varier entre 0 et 2π . L'échange de puissance active et réactive entre le réseau et la bobine peut donc se faire dans les deux sens. L'extension du domaine d'échange d'énergie est obtenue avec un montage plus complexe (commutation forcée). Le balayage dans les quatre quadrants du domaine (P,Q) se fait également sur un arc de cercle comme le montre la figure 3.6 et ce à cause du couplage des puissances active et réactive .

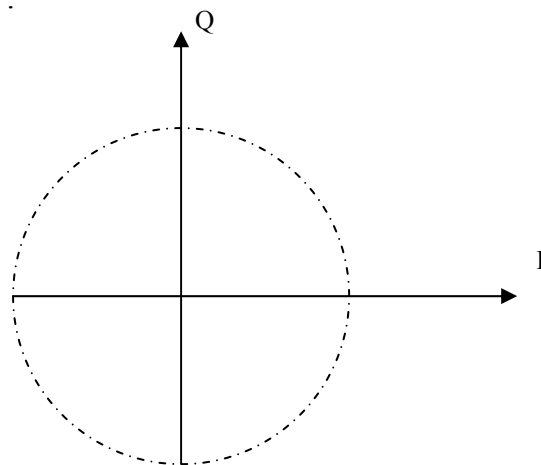


Figure 3.6 Domaine (P,Q) d'un pont simple à thyristors GTO.

3.4.3.2 Montage en pont double

Pour avoir des puissances actives et réactives découplées, on rajoute un deuxième pont commandé indépendamment du premier, et en série avec ce dernier comme le montre la figure 3.7 [CHE05], [LIU06], [XUE05].

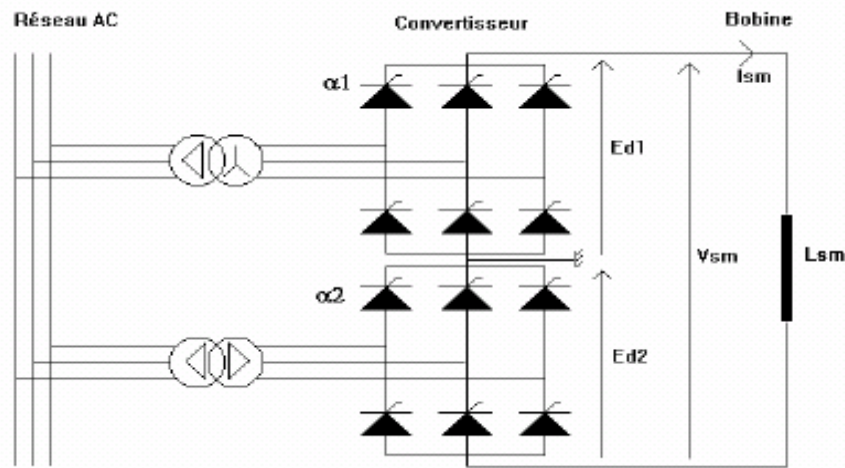


Figure 3.7 Montage en pont double à thyristors GTO

La tension V_{sm} aux bornes de la bobine supraconductrice est telle que :

$$V_{sm} = L_{sm} \frac{dI_{sm}}{dt} \quad (3.7)$$

où L_{sm} et I_{sm} sont respectivement l'inductance de la bobine et le courant de charge. En considérant le schéma de la figure 3.7, l'expression de la tension V_{sm} est telle que :

$$V_{sm} = E_{d1} + E_{d2} \quad (3.8)$$

où E_{d1} et E_{d2} sont les tensions coté continu des deux convertisseurs 1 et 2. Ces tensions sont exprimées en fonction des angles d'amorçage α_1 et α_2 . Leurs expressions sont telles que

$$E_{d1} = V_{sm0} \cos \alpha_1 \quad (3.9)$$

$$E_{d2} = V_{sm0} \cos \alpha_2 \quad (3.10)$$

Tenant compte de (3.8), on obtient :

$$V_{sm} = V_{sm0} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (3.11)$$

Les puissances active et réactive absorbées ou fournies par le SMES sont données par les relations ci-dessous :

$$P_{sm} = V_{sm0} I_{sm0} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (3.12)$$

$$Q_{sm} = V_{sm0} I_{sm0} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) \quad (3.13)$$

Les équations précédentes peuvent être transformées sous la forme suivante :

$$P_{sm} = 2V_{sm0} I_{sm0} \cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right) \quad (3.14)$$

$$Q_{sm} = 2V_{sm0} I_{sm0} \sin\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right) \quad (3.15)$$

En divisant l'équation (3.15) par l'équation (3.14)

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) = \frac{Q_{sm}}{P_{sm}} \quad (3.16)$$

De l'équation (3.16), on peut tracer le triangle des puissances de la figure 3.8

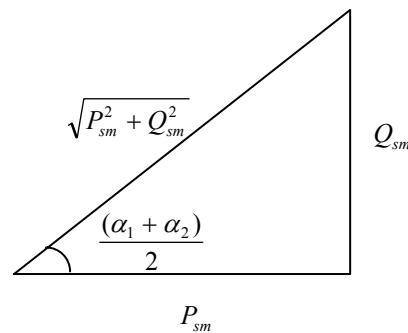


Figure 3.8 Triangle des puissances

A partir de la figure 3.8, on peut déduire les expressions suivantes :

$$\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} = \operatorname{Arc} \cos\left(\frac{P_{sm}}{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}\right) \quad (3.17)$$

En substituant l'équation (3.17) dans l'équation (3.14), on déduit la relation ci-dessous

$$\frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} = \operatorname{Arc} \cos\left(\frac{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}{2V_{sm0} I_{sm0}}\right) \quad (3.18)$$

Des équations (3.17) et (3.18), on peut déterminer les expressions des angles d'amorçage des convertisseurs 1 et 2 qui sont respectivement :

$$\alpha_1 = \text{Arc cos}\left(\frac{P_{sm}}{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}\right) + \text{Arc cos}\left(\frac{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}{2V_{sm0}I_{sm0}}\right) \quad (3.19)$$

$$\alpha_2 = \text{Arc cos}\left(\frac{P_{sm}}{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}\right) - \text{Arc cos}\left(\frac{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}{2V_{sm0}I_{sm0}}\right) \quad (3.20)$$

Pour un montage en pont double à thyristors GTO, la commande se fera dans les quatre quadrants du domaine (P,Q) représenté par la figure 3.9 en balayant toute la surface à l'intérieur d'un cercle de rayon $2E_d I_{sm}$. Cela est obtenu en agissant sur les angles d'amorçage α_1 et α_2 des deux ponts 1 et 2.

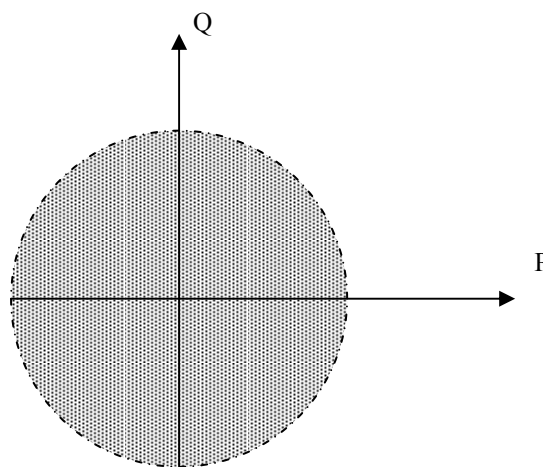


Figure 3.9 Domaine (P,Q) d'un pont double à thyristors GTO

3.4.3.3 Couplage des transformateurs

L'un des phénomènes liés à l'utilisation des convertisseurs dans les réseaux électriques est celui des harmoniques qui peuvent être très néfastes pour les réseaux électriques. Pour cela, on est amené à choisir la façon la plus commode pour le branchement de nos équipements afin de réduire ces risques.

Une méthode pour réduire ces harmoniques consiste à utiliser plusieurs ponts à convertisseurs (multipulse method) afin d'obtenir des convertisseurs à 12 pulsations, 18 pulsations, 24 pulsations...

En utilisant un convertisseur triphasé alimenté par un transformateur couplé en triangle-étoile, la tension et le courant triphasé à son secondaire seront déphasés de 30° par rapport à ceux de son primaire. La figure 3.10 montre l'allure de la tension et du courant dans ce cas.

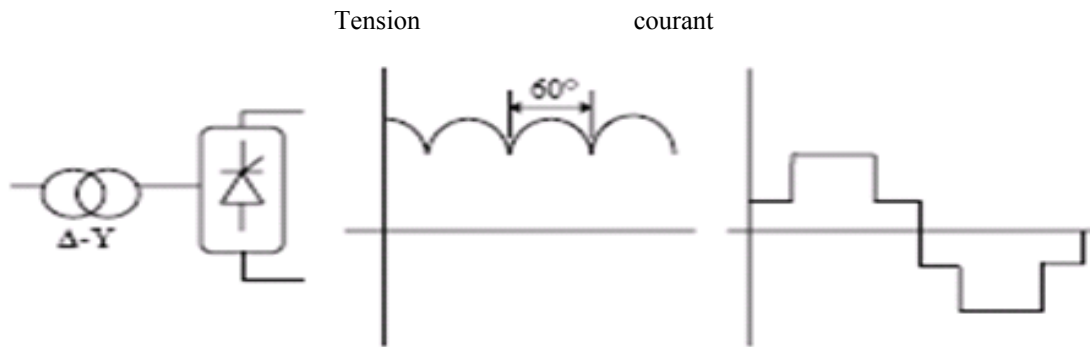


Figure 3.10 Forme d'onde de la tension continue et du courant alternatif (Δ/Y)

Si on choisit d'utiliser un convertisseur triphasé alimenté par un transformateur couplé en triangle-triangle, le déphasage entre la tension et le courant du primaire et ceux du secondaire est nul tel que le montre la figure 3.11 ci-dessous

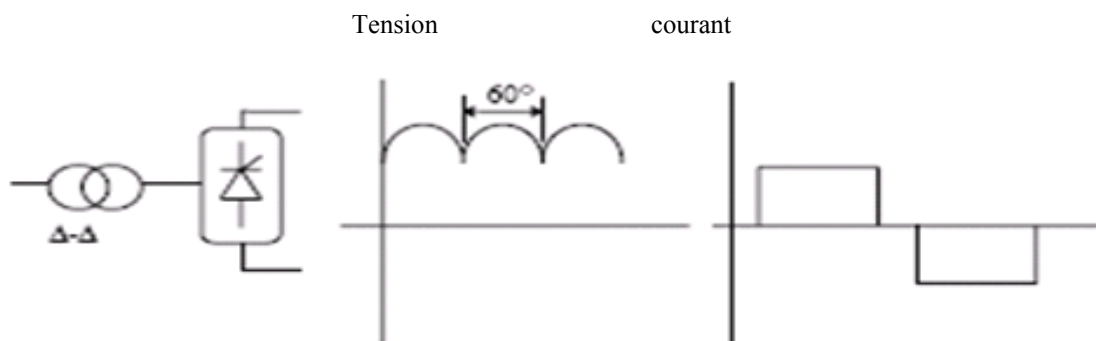


Figure 3.11 Forme d'onde de la tension continue et du courant alternatif (Δ/Δ)

Si on branche les enroulements primaires de deux transformateurs en parallèle sur la ligne triphasée coté alternatif, et on branche leurs secondaires en série coté continu, on obtient une tension V_{sm} telle que

$$V_{sm} = E_{d1} + E_{d2} \quad (3.21)$$

Les enroulements du transformateur T1 sont raccordés en triangle-étoile tandis que ceux du transformateur T2 sont connectés en triangle-triangle. Ces connexions produisent un déphasage de 30° entre les tensions au secondaires de T1 et T2. Par conséquent, les thyristors des deux convertisseurs ne s'amorcent pas en même temps mais avec un décalage de 30° , ce qui produit un total de 12 pulsations de courant déphasées de 30° . Un tel groupement de deux

convertisseurs est appelé convertisseur à 12 pulsations. Ce déphasage de 30° a pour effet d'éliminer les 5^e et 7^e harmoniques des courants produits par les deux convertisseurs. Ces dernières ne seront donc pas injectées au réseau alternatif.

La figure 3.12 donne l'allure de la tension et du courant où on observe l'intérêt de ce montage à réduire les ondulations de ces signaux.

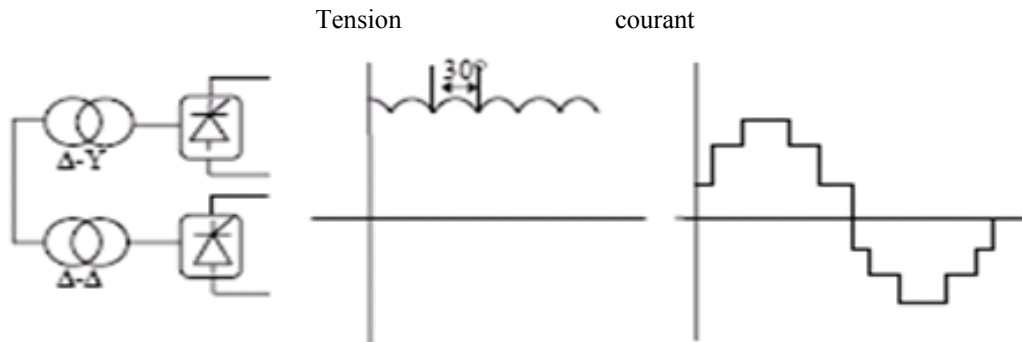


Figure 3.12 Forme d'onde de la tension continue et du courant alternatif
(convertisseur à 12 pulsations)

De la même façon, ce déphasage élimine la 6^e harmonique du côté c.c ce qui nous permet une grande réduction dans l'investissement et l'espace pour les dispositifs de filtrage.

3.4.3.4 Choix des angles d'amorçage du convertisseur

Si on adopte le choix d'utiliser une interface en pont double à thyristors GTO, les puissances transitées entre le SMES et le réseau sont déterminées par le choix des angles d'amorçages α_1 et α_2 des deux ponts. Ces puissances doivent être nulles en fonctionnement normal ($P_{sm}=0, Q_{sm}=0$).

Si on a une variation soudaine de la charge ; alors la puissance réactive Q_{sm} doit varier comme suit :

$$Q_{sm}^* = \Delta Q_{sm} + Q_{sm0} \quad (3.22)$$

La variation correspondante de la puissance active est donnée par

$$P_{sm}^* = \Delta P_{sm} + P_{sm0} \quad (3.23)$$

Où P_{sm}^* et Q_{sm}^* sont les valeurs nécessaires pour rétablir la stabilité du système.

Les angles d'amorçage sont calculés par :

$$\alpha_1^* = \alpha_2^* = \alpha = \text{tg}^{-1}\left(\frac{Q_{sm}^*}{P_{sm}^*}\right) \quad (3.24)$$

Les puissances active et réactive échangées entre le réseau et le SMES sont données par les relations :

$$P_{sm} = 2V_{sm0}I_{sm0} \cos \alpha \quad (3.25)$$

$$Q_{sm} = 2V_{sm0}I_{sm0} \sin \alpha \quad (3.26)$$

La figure 3.13 représente les valeurs des puissances active et réactive en fonction de l'angle d'amorçage α . Les valeurs de P_{sm} et Q_{sm} peuvent ou ne peuvent pas être égales aux valeurs désirées P_{sm}^* et Q_{sm}^* . Pour n'importe quelle valeur du courant de charge, les valeurs de la variation de P-Q décrivent le contour d'un cercle de rayon $2V_{sm0}I_{sm0}$ (la réactance de commutation étant négligée).

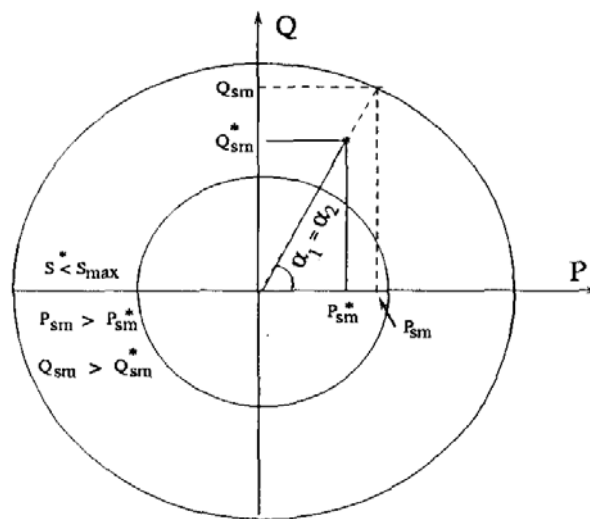


Figure 3.13 Variation des puissances active et réactive du SMES ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$)

Pour une variation du courant de charge I_{sm} , on peut écrire :

$$2V_{sm}I_{sm} = 2V_{sm0}I_{sm0} = S_{max} \quad (3.27)$$

Où S_{max} est le maximum de puissance stockable dans la bobine.

Par ailleurs on a

$$P_{sm} = S_{\max} \cos \alpha \quad (3.28)$$

$$Q_{sm} = S_{\max} \sin \alpha \quad (3.29)$$

On pose

$$S^* = \sqrt{(P_{sm}^{*2} + Q_{sm}^{*2})} \quad (3.30)$$

Si $S^* < S_{\max}$ alors $P_{sm} > P_{sm}^*$ et $Q_{sm} > Q_{sm}^*$

Si $S^* > S_{\max}$ alors $P_{sm} < P_{sm}^*$ et $Q_{sm} < Q_{sm}^*$

Ce qui signifie que la consommation en énergie active et réactive ne peut pas améliorer la stabilité du réseau électrique. Pour corriger la valeur de l'angle d'amorçage d'autres travaux ont proposés l'ajout d'un régulateur PID [LEE93].

La configuration utilisée par Chi-jui wu, Yuang-Shung Lee donnée par la figure 3.14 ci-dessous est une des configurations possibles quand on veut utiliser la commande à angles d'amorçage $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$ [WANG94] .

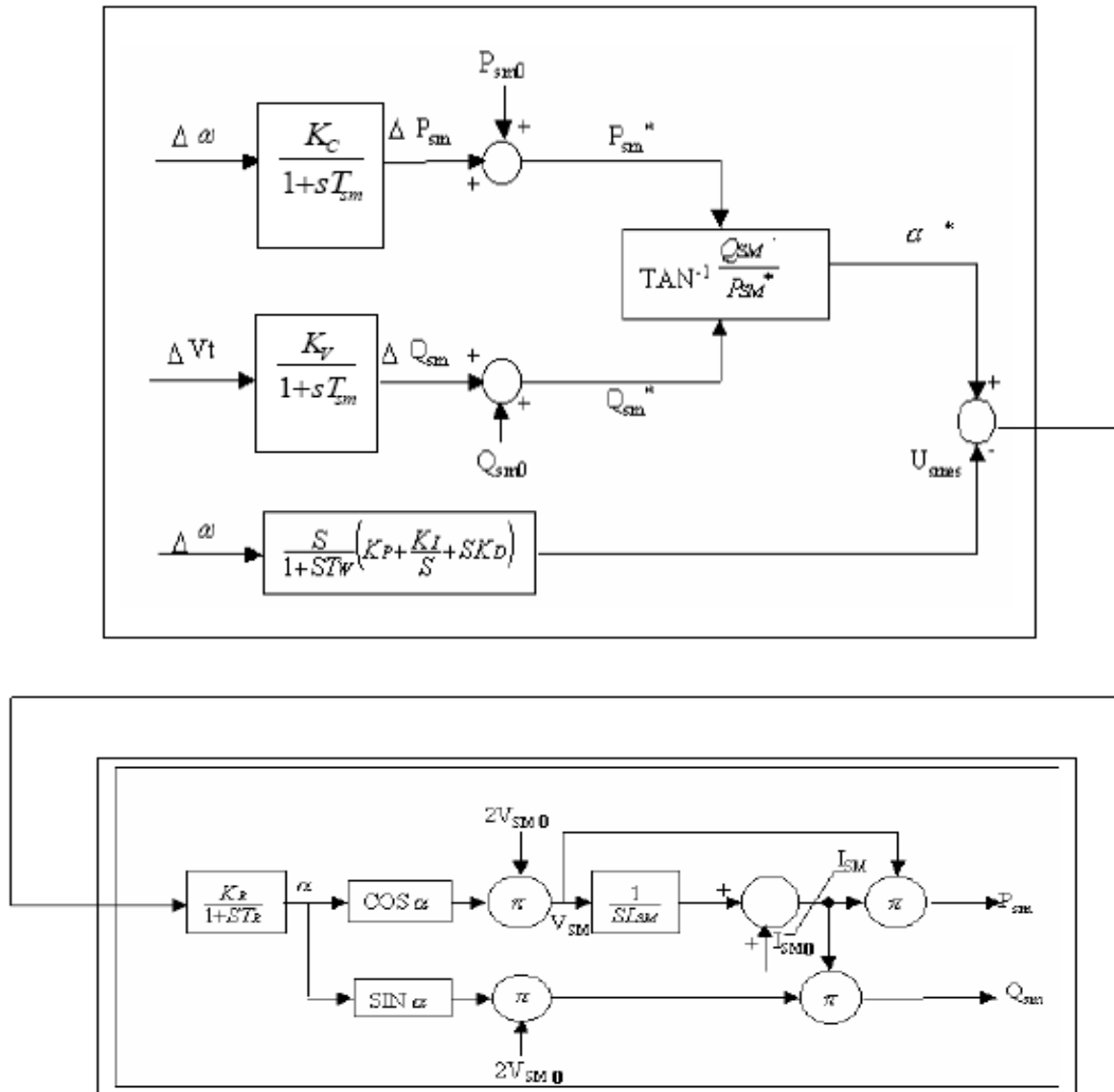


Figure 3.14 Configuration de commande à angles d'amorçage égaux

Si on prend le même montage de la figure 3.7, tout en considérant que les angles d'amorçage α_1 et α_2 sont différents. On peut écrire les expressions (3.25) et (3.26) sous la forme :

$$P_{sm} = V_{sm0} I_{sm0} \cos \alpha_1 + V_{sm0} I_{sm0} \cos \alpha_2 \quad (3.31)$$

$$Q_{sm} = V_{sm0} I_{sm0} \sin \alpha_1 + V_{sm0} I_{sm0} \sin \alpha_2 \quad (3.32)$$

Les valeurs des angles d'amorçage sont toujours choisies de façon à ce que le SMES génère ou

absorbe la valeur désirée de la puissance active ou réactive.

La figure 3.15 représente les angles d'amorçage correspondant aux valeurs désirées de P_{sm}^* et Q_{sm}^* . Dans ce cas :

- Si $S^* < S_{max}$ alors $P_{sm} = P_{sm}^*$ et $Q_{sm} = Q_{sm}^*$
- Si $S^* > S_{max}$ alors $P_{sm} = P_{sm}^*$ et $Q_{sm} = \sqrt{(S^{*2} - P_{sm}^{*2})}$

La valeur de Q_{sm} est toujours inférieure à Q_{sm}^* . Cependant elle a le même signe

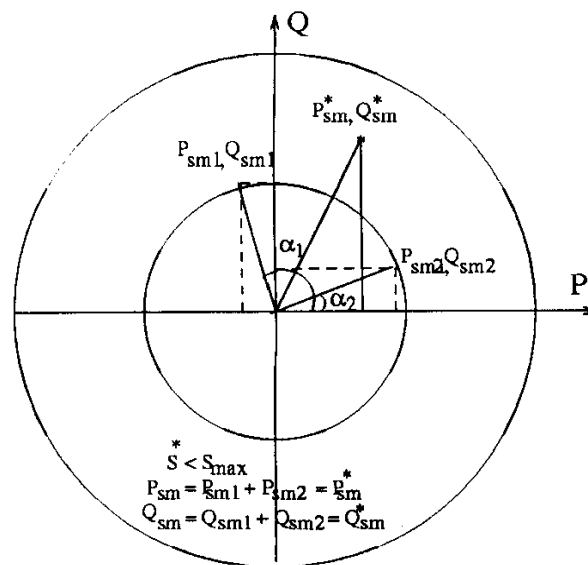


Figure 3.15 Variation des puissances active et réactive du SMES ($\alpha_1 \neq \alpha_2$)

Les expressions des angles d'amorçage du convertisseur à double pont ($\alpha_1 \neq \alpha_2$) sont :

$$\alpha_1 = \text{Arc cos} \left(\frac{P_{sm}}{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}} \right) + \text{Arc cos} \left(\frac{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}{2V_{sm0}I_{sm0}} \right)$$

$$\alpha_2 = \text{Arc cos} \left(\frac{P_{sm}}{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}} \right) - \text{Arc cos} \left(\frac{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}{2V_{sm0}I_{sm0}} \right)$$

3.5 Dimensionnement du SMES

Le SMES doit être dimensionné en fonction du réseau à stabiliser [BEK05]. Dans le cas d'un réseau multimachine, le dimensionnement se fait en fonction des résultats obtenus par l'application du SMES. Les puissances active et réactive échangées entre la bobine et le réseau

sont soumises à des contraintes matérielles telles que les limites de fonctionnement des transformateurs et des convertisseurs.

Pour des considérations liées au convertisseur, on prend le courant maximal I_{smax} dans la bobine égal à 5kA. En prenant comme puissance et tension de base celles du réseau étudié (100MVA, 230 kV), on aura un courant de base I_B égal à 251A. En valeur réduite, le courant maximal dans la bobine est I_{smax} égal à 20 p.u.

En supposant que la commande est faite à angles d'amorçage égaux ($\alpha_1=\alpha_2=\alpha$), la tension aux bornes de la bobine est donnée par :

$$V_{sm}=2E_d \cos\alpha$$

Pour un pont à thyristors, l'angle d'amorçage α est compris entre 5° et 140° . En considérant l'équation (3.4) on peut calculer les limites de la tension V_{sm} qui sont telles que :

$$-2.53 \text{ p.u.} < V_{sm} < 3.30 \text{ p.u.}$$

Le dimensionnement du SMES est fait pour le point de fonctionnement correspondant aux charges du réseau : 315 MW et 115 MVAR. Pour que le SMES puisse répondre à une défaillance totale des groupes de production, il doit être en mesure d'échanger une puissance voisine de la puissance demandée soit 300MW. Pour pouvoir échanger cette puissance durant une seconde le SMES doit avoir une énergie maximale égale à :

$$W_{smax}=300MJ$$

Pour cela la bobine doit avoir une inductance L_{sm} telle que :

$$L_{sm} = \frac{2W_{smax}}{I_{smax}^2} = 24H$$

Les échanges d'énergie entre la bobine et le réseau sont limités par des contraintes liées au fonctionnement de la bobine. En limitant cet échange au tiers de la capacité maximale de la bobine, l'énergie de référence stockée dans la bobine est définie par :

$$W_{ref}=W_{smax} -100=200MJ$$

L'énergie minimale à maintenir dans la bobine est :

$$W_{min}=W_{ref} -100=100MJ$$

En grandeurs réduites, ces énergie valent respectivement

$$W_{\max} = 3 \text{ p.u.}, W_{\text{ref}} = 2 \text{ p.u.}, W_{\min} = 1 \text{ p.u.}$$

Le courant de référence I_{ref} est égal à :

$$I_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{2W_{\text{ref}}}{L_{\text{sm}}}} = 4082 \text{ A}$$

Le courant minimal I_{\min} est

$$I_{\min} = \sqrt{\frac{2W_{\min}}{L_{\text{sm}}}} = 2887 \text{ A}$$

En valeurs réduites les courants ont pour valeurs :

$$I_{\text{ref}} = 16.3 \text{ p.u.}$$

$$I_{\min} = 11.5 \text{ p.u.}$$

L'inductance de référence a pour valeur réduite

$$L_{\text{ref}} = \frac{2W_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}^2} = 0.015 \text{ p.u.}$$

Le tableau suivant résume les données du SMES qui serviront dans les études de stabilité du réseau

L_{sm}	0.015
$I_{\text{sm}0}$	16.3
I_{smin}	11.5
I_{smax}	20
V_{smin}	-2.53
V_{smax}	3.30
P_{smin}	-3.0
P_{smax}	3.0
Q_{smin}	-3.0
Q_{smax}	3.0

Tableau 2.1 Caractéristiques du SMES

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur l'historique du développement du SMES, et examiné les contraintes liées à la réalisation d'un tel dispositif. Nous avons décrit sa configuration, donné son principe de fonctionnement et justifié le couplage des transformateurs entre le réseau et les convertisseurs en fonction de l'échange de puissance réseau-bobine. La commande des angles d'amorçage a été établie. Enfin, le dimensionnement du SMES stabilisant le réseau utilisé a été calculé.

CHAPITRE IV

Dimensionnement et performances du régulateur SMES

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'étudier le comportement du réseau dans le cas de grandes perturbations et d'évaluer l'effet bénéfique du SMES. Nous considérons, comme dans le deuxième chapitre, que le réseau est soumis à un court circuit triphasé sur la ligne 7-5 près du nœud 7 et éliminé au bout de 80 ms par ouverture de la ligne.

Nous étudierons successivement les différentes configurations envisageables avec le SMES seul agissant par la puissance active d'abord et par la puissance active et réactive ensuite. Nous apprécions l'influence de sa localisation dans le réseau et son dimensionnement en fonction de la perturbation.

Nous comparons ensuite le SMES aux régulations classiques de tension et de vitesse afin de ressortir ses performances. En fin de chapitre, l'utilisation de plusieurs SMES sera envisagée et étudiée.

4.2 Fonction de transfert du SMES

Le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse par le SMES est donné par la figure 4.1 où P_{sm} est la puissance active échangée entre le SMES et le réseau.

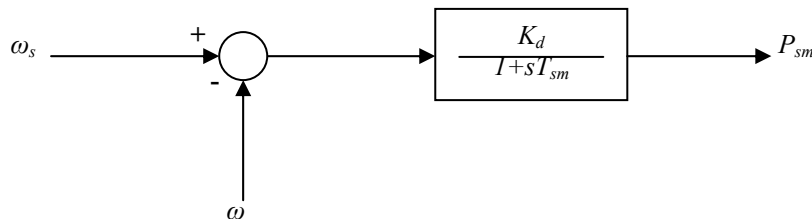


Figure 4.1 Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse du SMES.

La fonction de transfert relative à cette régulation est donnée par la relation suivante :

$$P_{sm} = \frac{K_d}{1 + sT_{sm}} (\omega_s - \omega) \quad (4.1)$$

ω et ω_s sont respectivement la pulsation au point considéré et la pulsation synchrone.

K_d est le gain relatif à la chaîne de puissance.

T_{sm} est le temps de réponse du SMES.

La figure 4.2 donne le schéma fonctionnel du SMES agissant comme régulateur de tension.

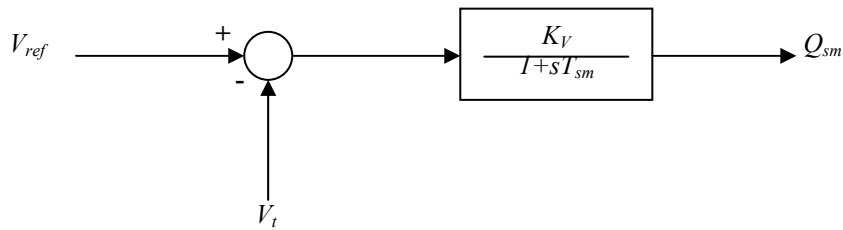


Figure 4.2 Schéma fonctionnel de la régulation de tension du SMES.

La fonction de transfert correspondant au schéma de la figure 4.2 est

$$Q_{sm} = \frac{K_V}{1 + sT_{sm}} (V_{ref} - V_t) \tag{4.2}$$

Où K_V , V_t et V_{ref} sont respectivement le gain lié à la régulation de tension, la tension mesurée au nœud à réguler et la tension de référence.

Tenant compte des schémas fonctionnels de régulation de vitesse (Fig.4.1) et de tension (Fig.4.2) et des relations (3.19) et (3.20), on obtient le schéma de la figure 4.3

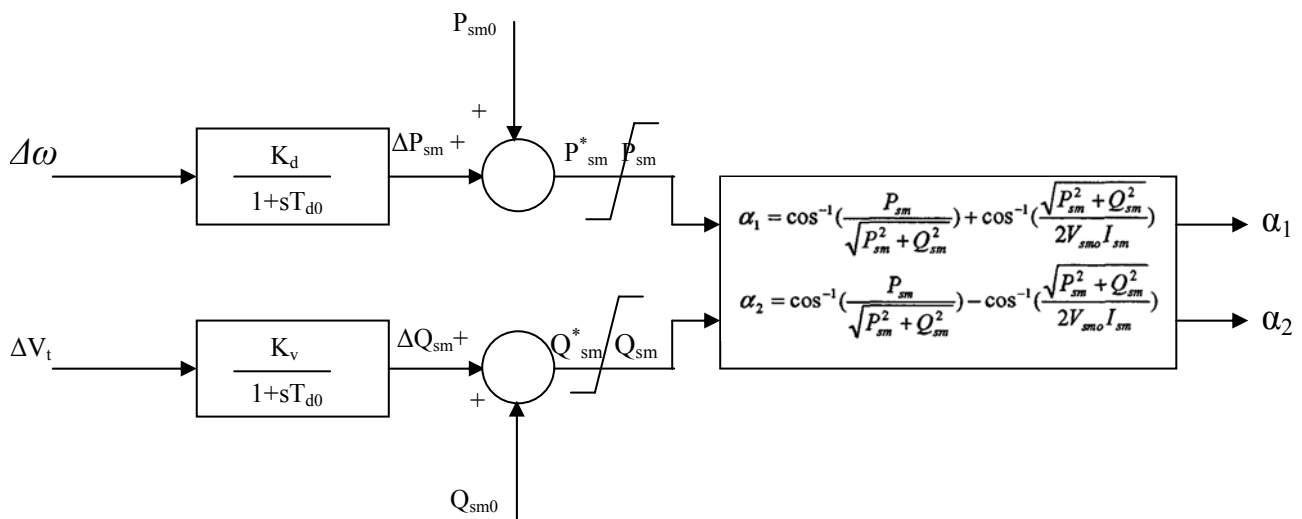


Figure 4.3 schéma de commande (α_1, α_2)

4.3 Détermination des gains du régulateur SMES

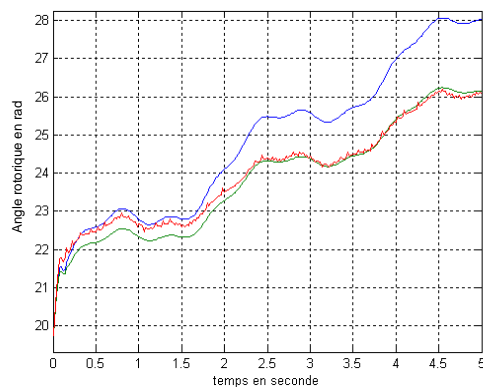
La détermination des gains est effectuée sur un réseau électrique régulé uniquement par le SMES. Ce réseau est soumis à un court circuit triphasé sur la ligne 7-5 (Fig.2.7). Le SMES est connecté à la machine 2 qui est la machine la plus proche du défaut.

4.3.1 Détermination du gain K_d

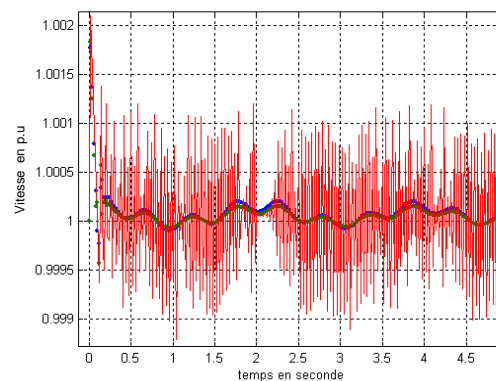
La détermination de la valeur du gain optimal K_d est faite en considérant le SMES agissant seulement par sa puissance active P_{sm} . Le temps de réponse T_{sm} est pris égal à 40ms.

Pour déterminer la valeur optimale du gain K_d , on prend comme indicateurs les variations de la tension, de la vitesse, de l'angle rotorique et la puissance échangée entre le SMES et le réseau.

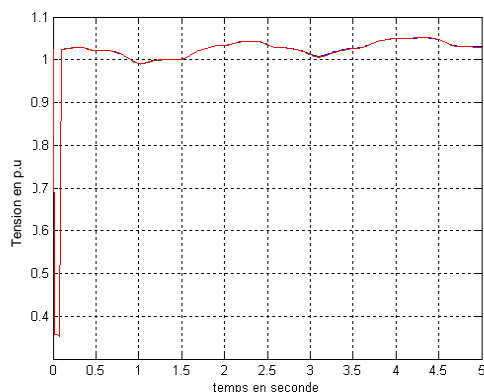
La figure 4.4 donne les variations de la vitesse de la machine 2 pour des valeurs de K_d égales à 8, 11 et 14.



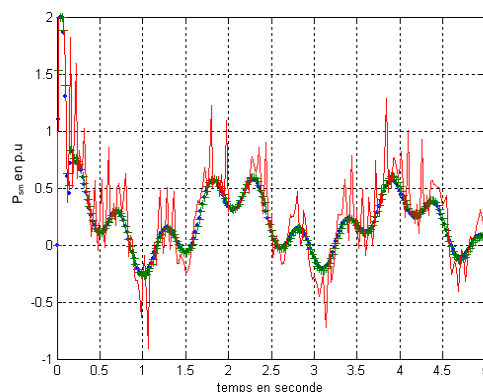
a) Variation de l'angle



b) Variation de la vitesse



c) Variation de la tension



d) Variation de la puissance échangée

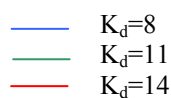


Figure 4.4 Variation des caractéristiques de la machine 2

La variation de l'angle rotorique (Fig.4.4 a) nous montre que les meilleurs résultats sont obtenus avec les valeurs de K_d égales à 11 et 14, cependant les variations de vitesse (Fig.4.4 b) et de la puissance échangée (Fig.4.4 d) montrent qu'avec $K_d = 14$ on obtient de fortes oscillations. Le changement des valeurs du gain K_d n'influe pas sur la variation de la tension : cela est dû au fait que dans notre cas le SMES agit uniquement avec sa composante active Psm. De ces résultats, on peut déduire que la valeur optimale du gain K_d est égale à 11.

Les figures 4.5 et 4.6 ci-dessous montrent les résultats observés sur le comportement des machines 1 et 3 avec le SMES connecté au nœud 2. Le gain optimal K_d déterminé dans les conditions de défaut indiqué n'a aucun effet ou très peu (fig.4.5 a et fig.4.6 a) sur le comportement des machines 1 et 3. Ceci montre l'importance de la position du SMES dans le réseau .

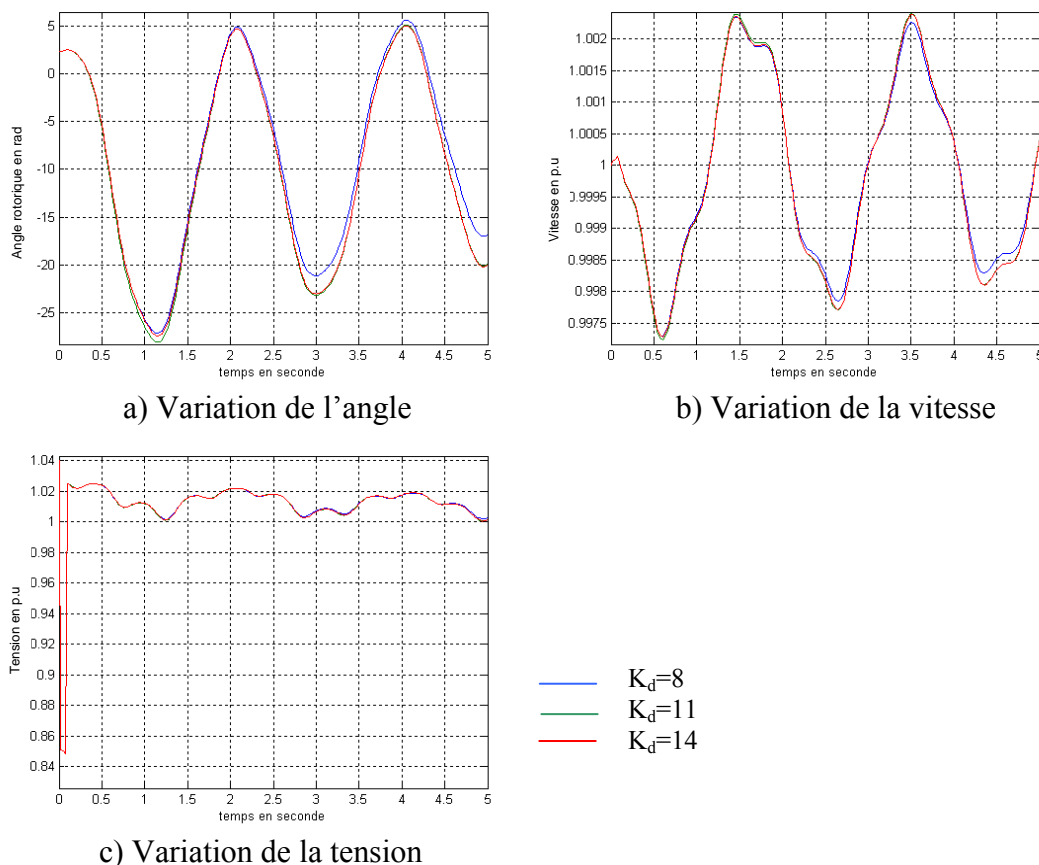


Figure 4.5 Variation des caractéristiques de la machine 1

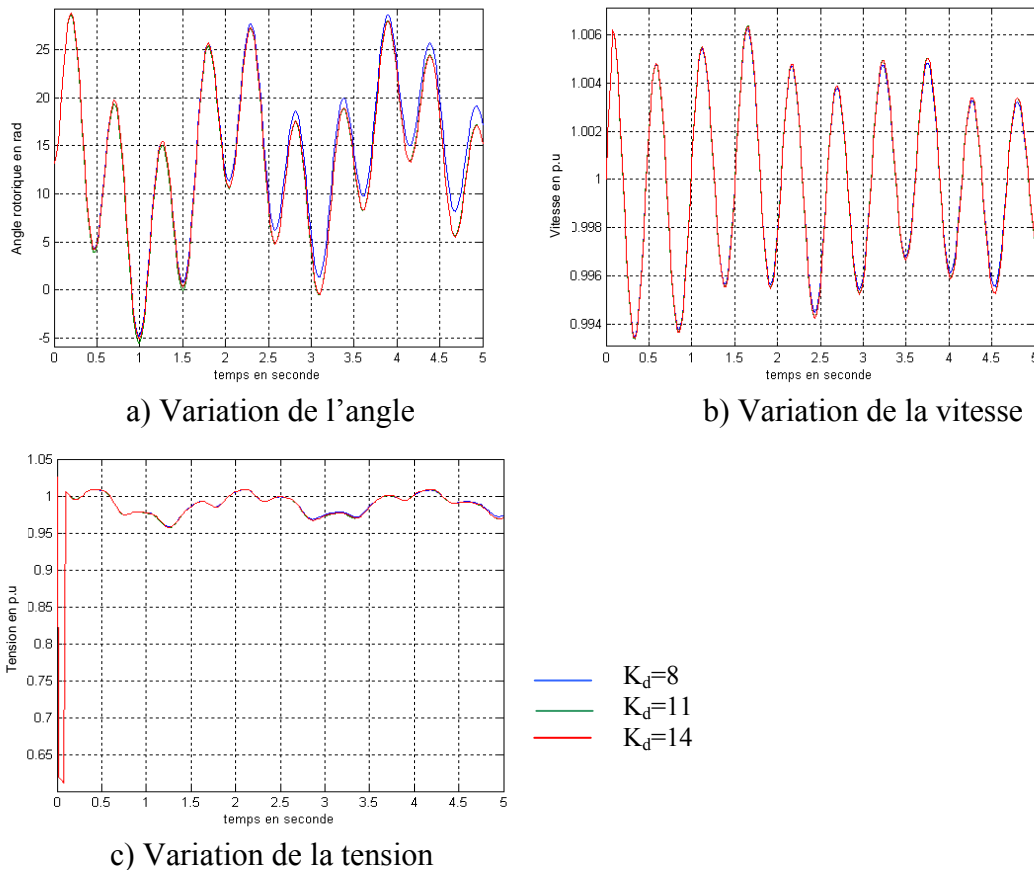


Figure 4.6 Variation des caractéristiques de la machine 3

4.3.2 Détermination du gain K_V

L'étude de la régulation de tension par le SMES nécessite la détermination de la valeur optimale du gain K_V . Pour cela, on introduit un régulateur SMES agissant par sa puissance réactive et ce dans les mêmes conditions utilisées pour la détermination du gain K_d . Pour la détermination de la valeur optimale du gain K_V , on prend la tension aux bornes de la machine 2 comme indicateur. La figure 4.7 montre les résultats obtenus avec des valeurs du gain K_V égales à 1.5, 2.5, 2.8 et 3. Cet intervalle de valeurs est choisi en raison d'un amortissement acceptable après étude et test d'un plus large intervalle.

L'examen de l'allure de la tension aux bornes de la machine 2 nous montre que la valeur optimale du gain K_V est égale à 2.5.

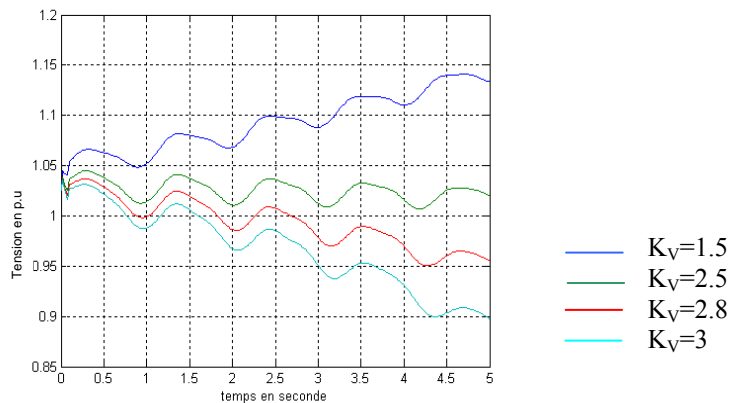


Figure 4.7 Variation de la tension de la machine 2

Les différents essais ont montré que quand le SMES agit par ses deux régulations, la valeur optimale de K_V varie. La figure 4.8 représente les résultats obtenus pour $K_V = 2.8$ quand $K_d = 11$. Cette variation de la valeur du gain K_V est dû au fait que les régulateurs agissent sur les différents paramètres de la machine ce qui montre une fois encore que les relations puissance active - angle rotorique (P/δ), puissance réactive- tension (Q/V) ne sont pas totalement découplées

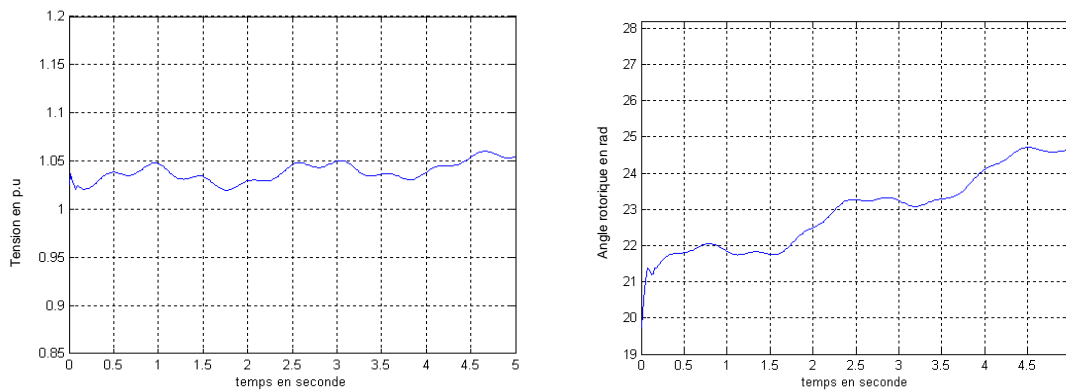


Figure 4.8 Variation des caractéristiques de la machine 2

4.4 Détermination de la position optimale du SMES

Pour la détermination de la position optimale du SMES dans le réseau, nous comparons les résultats obtenus avec le SMES connecté à chacune des machines du réseau successivement ; le SMES agissant en l'absence de toute autre régulation.

La figure 4.9 montre les résultats des comportements des angles rotoriques des trois machines du réseau perturbé et régulé par le SMES connecté successivement aux nœuds 1, 2 et 3. Cette figure montre aussi les résultats obtenus quand le réseau n'est équipé d'aucun moyen de régulation.

La figure 4.9 a montre que l'angle de la machine 1 est maintenu dans une plage de variation limitée et ce quelle que soit la position du SMES. Ce qui n'est pas le cas pour les deux autres machines dont l'angle n'est maintenu au delà de 3s que si le SMES y est connecté (Fig.4.9 b et 4.9 c).

La variation de l'angle rotorique de la machine 1 maintenue dans une plage limitée est dûe au fait que le nœud de cette machine ait été choisi comme nœud bilan du réseau. Les connexions du SMES au nœud 2 et 3 font que toutes les machines aient la variation de leurs angles dans une plage limitée comme on peut le voir sur la figure 4.9.

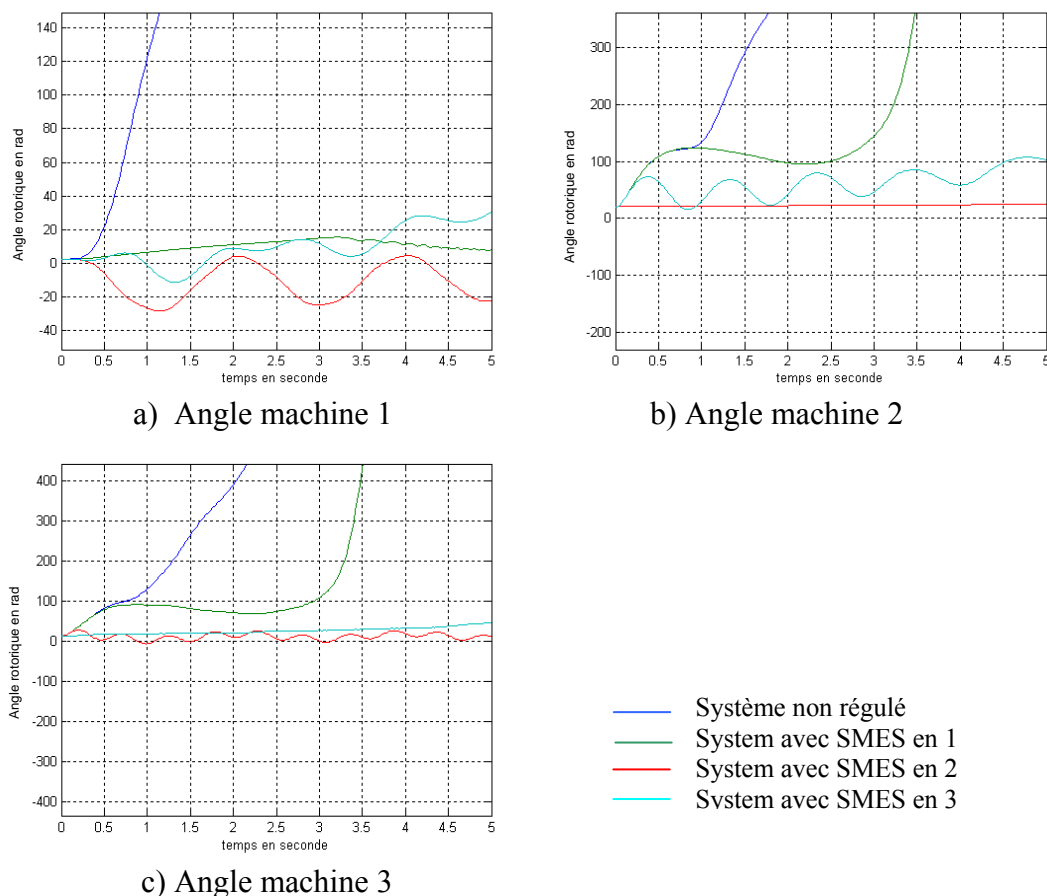


Figure 4.9 Variation de l'angle rotorique

La connexion du SMES au nœud 2 est celle qui donne le meilleur résultat. C'est donc la position optimale du SMES. Ceci s'explique par le fait que la machine 2 est la plus proche du défaut et la tenue de cette machine permet de contrôler le reste du réseau.

Les figures 4.10 et 4.11 montrent le comportement des tensions et des vitesses des trois machines dans les mêmes conditions de connexion du SMES que pour l'étude du comportement des angles rotoriques et confirment que la position optimale du SMES est celle de connexion au nœud 2.

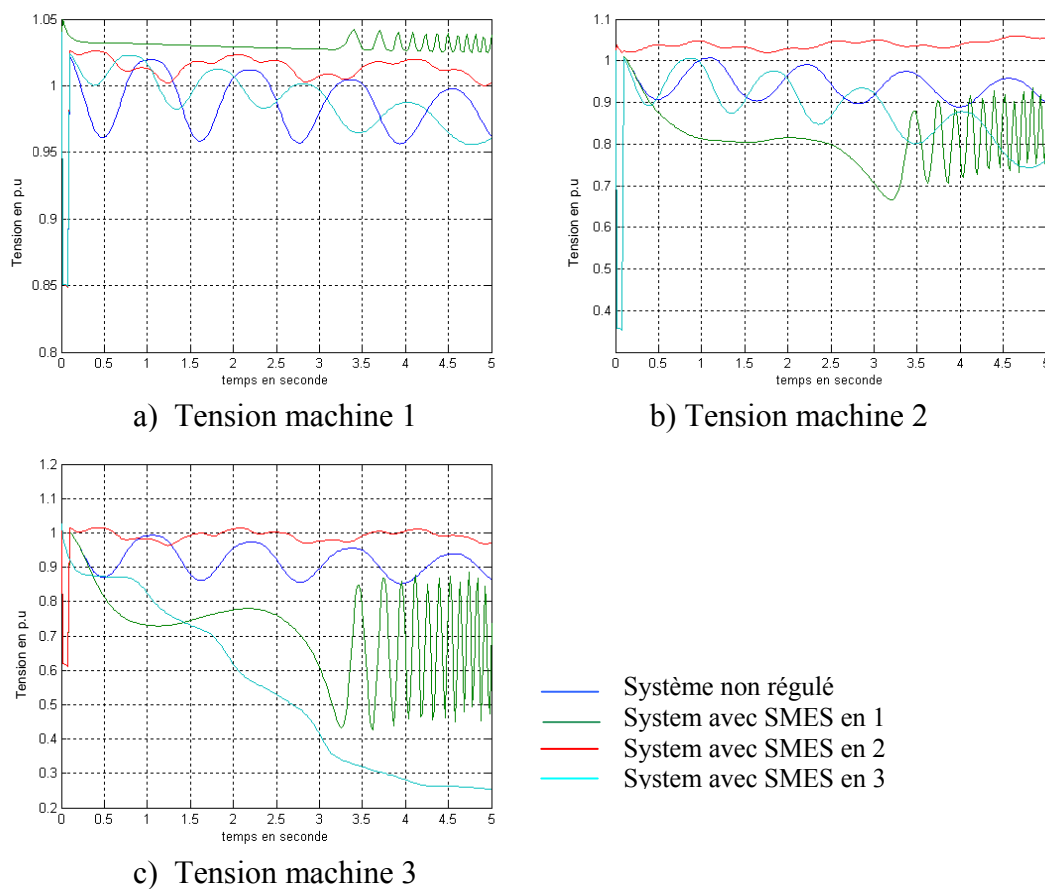


Figure 4.10 Variation de la tension des machines

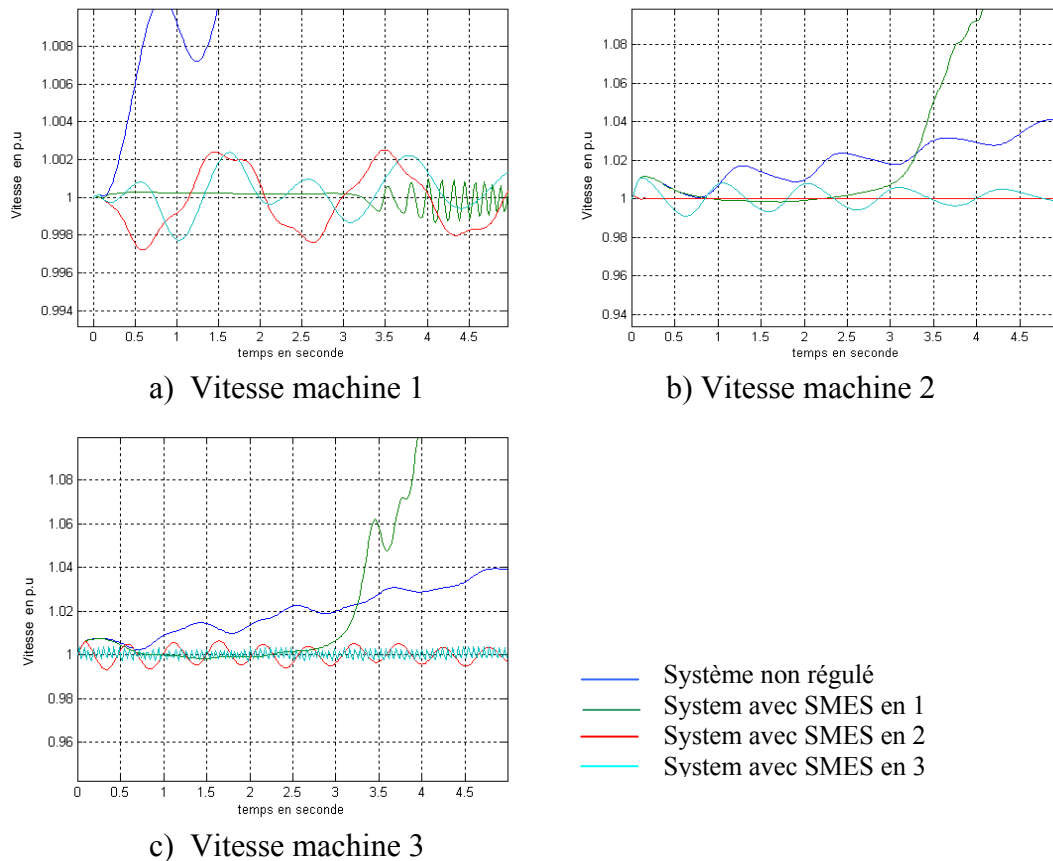


Figure 4.11 Variation de la vitesse des machines

Les résultats obtenus pour les variations de l'angle rotorique et de la vitesse montrent que le SMES a un effet bénéfique sur la machine qui lui est connectée.

Avec un seul SMES comme régulateur dans un réseau multimachine, une position doit être fixée pour avoir un effet bénéfique sur l'ensemble du réseau : la position de la machine la plus perturbée s'avère être la position où le SMES doit être connecté. Ceci confirme les travaux effectués par ailleurs [MOU96] [MOU04] [MAR00].

4.5 Influence de la durée du défaut

La figure 4.12 montre les variations de l'angle et de la tension de la machine 2 pour des durées de défaut égales à 80 ms puis à 120ms, le SMES étant connecté au nœud 2. La figure 4.13 montre la contribution du SMES à la stabilisation de réseau en fonction de la durée de défaut. L'influence de celle-ci est manifeste sur le comportement du réseau (Fig.4.12).

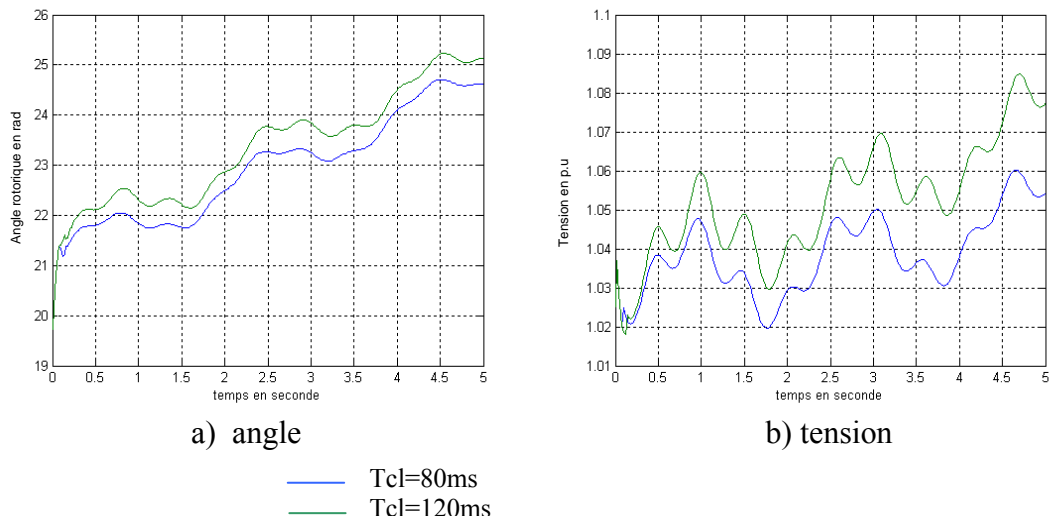


Figure 4.12 Variation des caractéristiques de la machine 2.

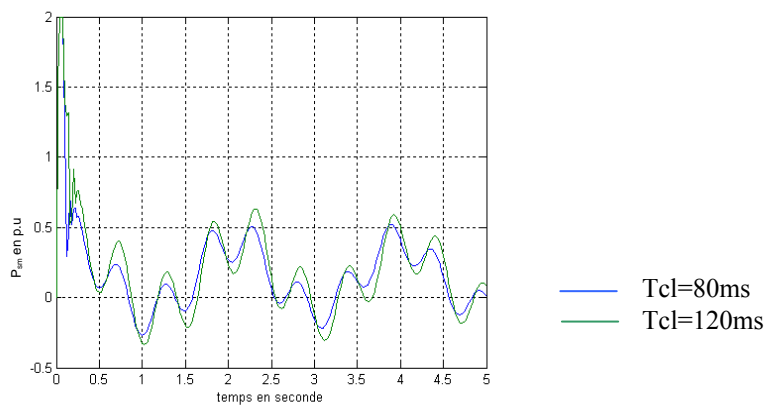


Figure 4.13 Variation de la puissance échangée

L'échange de puissance entre le SMES et le réseau varie en fonction de la durée du défaut notée T_{cl}. La figure 4.13 montre l'évolution de la puissance P_{sm} échangée entre le SMES et le réseau. Sur cette base, le calcul de l'énergie échangée est effectué et indiqué dans le tableau 4.1 ci-dessous dans chaque cas de figure. Par conséquent le dimensionnement du dispositif SMES est aussi fonction de cette durée.

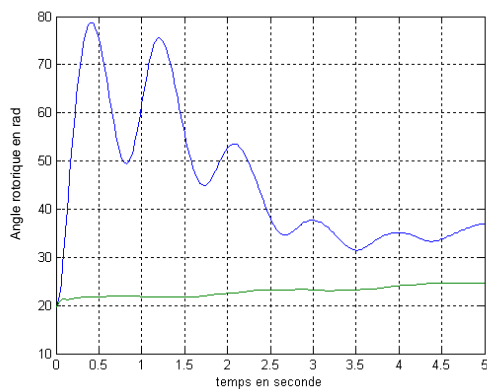
T _{cl} (s)	0.08	0.12
W(MJ)	44.87	58.89

Tableau 4.1 Energie échangée entre le SMES et le réseau.

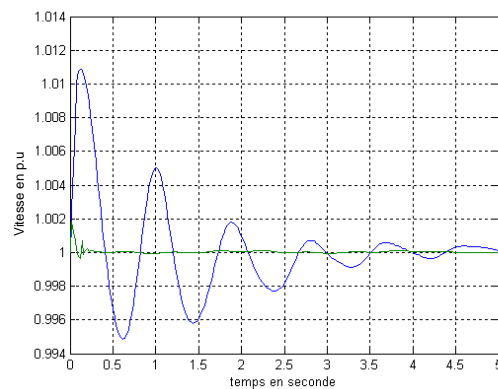
4.6 Comparaison de la régulation par SMES et de la régulation classique

Le SMES est connecté au nœud 2 sa position optimale dans le réseau. Nous considérons son action sur celui-ci et la comparons avec l'action de la régulation classique, et ce dans le but d'évaluer ses performances.

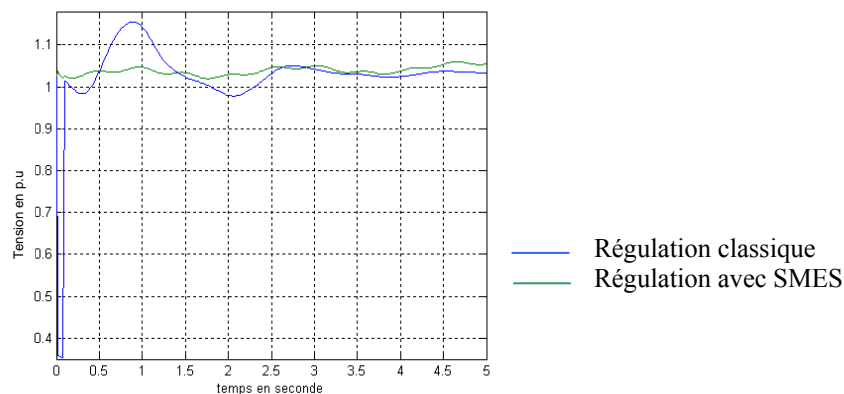
La figure 4.14 décrit les variations de la vitesse, de la tension et de l'angle de la machine 2 où est connecté le SMES. Ces résultats montrent l'efficacité du dispositif SMES : les oscillations observées dans le cas de la régulation classique sont pratiquement éliminées et la stabilité est rapidement établie.



a) Angle



b) Vitesse



c) Tension

Figure 4.14 Caractéristiques de la machine 2

Les figures 4.15 et 4.16 montrent le comportement des caractéristiques des machines 1 et 3 dans le cas d'une régulation par le SMES connecté au nœud 2 comparé aux résultats obtenus pour le réseau non régulé.

Elles montrent que le SMES connecté au nœud 2 a un effet bénéfique sur les deux autres machines mais reste insuffisant. Ce qui nous amène à considérer la possibilité d'installer d'autres SMES.

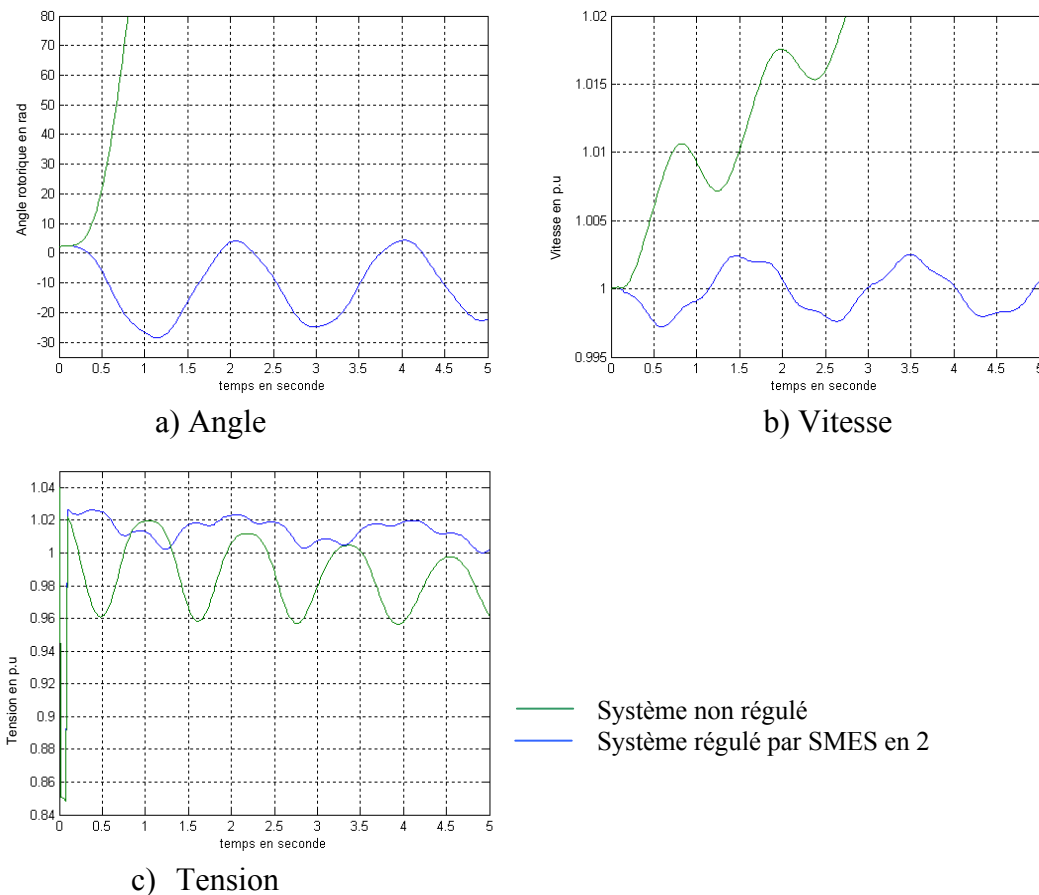


Figure 4.15 Caractéristiques de la machine 1

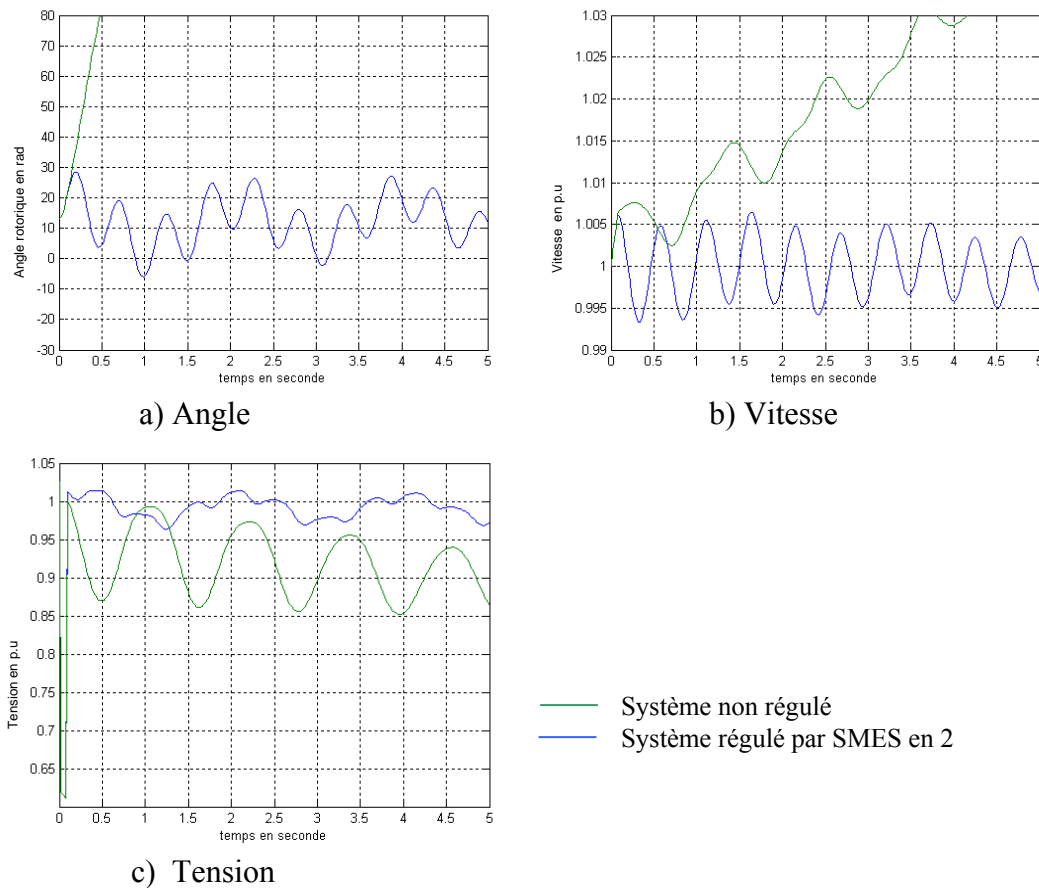


Figure 4.16 Caractéristiques de la machine 3

4.7 Installation de plusieurs SMES

Nous avons vu dans le chapitre 3 que l'implantation et l'utilisation des SMES est limitée par plusieurs facteurs, à savoir :

- La taille de la bobine.
- La compatibilité électromagnétique.
- Les efforts électrodynamiques.

La réduction de la taille du SMES peut en effet régler ou limiter quelques problèmes liés à ces facteurs. Mais en réduisant la taille du SMES, ce dernier ne pourra plus effectuer ses tâches convenablement. Nous avons aussi remarqué dans la partie précédente que l'utilisation d'un seul SMES permet le maintien des paramètres de la machine à laquelle il est connecté dans des plages voisines des valeurs de référence mais qu'il a un effet moindre sur les autres machines du réseau. Ceci conduit à l'idée d'introduire d'autres SMES régulateurs. Nous étudions ci-

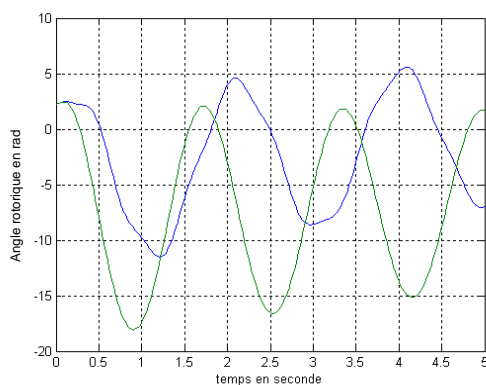
dessous l'effet de cette introduction, d'abord un 2^{ème} SMES au nœud 3, nœud constituant le point faible du réseau, puis un autre SMES au nœud 1.

4.7.1 Installation d'un deuxième SMES

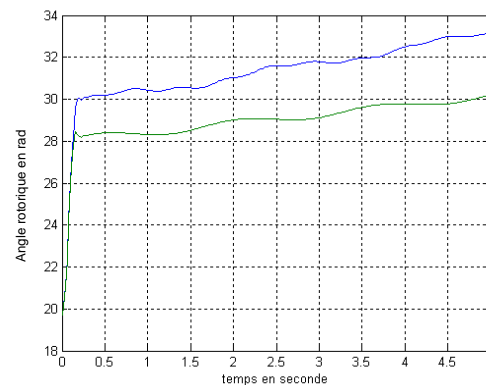
La conduite des simulations est effectuée sur le réseau test soumis aux mêmes conditions de défaut : court circuit triphasé sur la ligne 5-7 éliminé au bout de 80ms.

Le choix d'introduire le second SMES au nœud 3 est justifié par le fait que c'est le point faible du réseau. Les résultats montrés par les figures 4.17, 4.18 et 4.19 comparent les comportements du réseau quand il est équipé d'un SMES au nœud 2 puis de deux SMES aux nœuds 2 et 3.

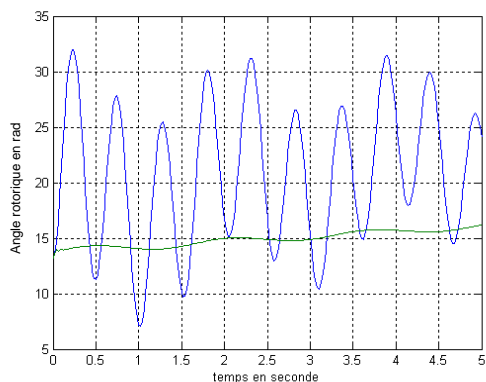
La figure 4.17 ci-dessous représente les variations de l'angle rotorique des trois machines, où on observe que l'effet de l'introduction du second SMES est nettement appréciable pour la machine 2 et 3 (Fig.4.17b et 4.17c).



a) Machine 1



b) Machine 2



c) Machine 3

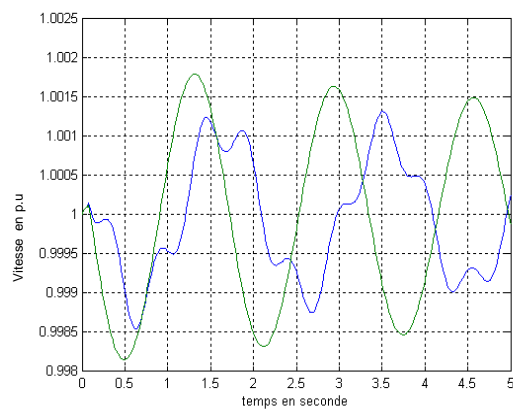
— Régulation par SMES en 2
— Régulation par SMES en 2 et 3

Figure 4.17 Variation des angles des machines du réseau

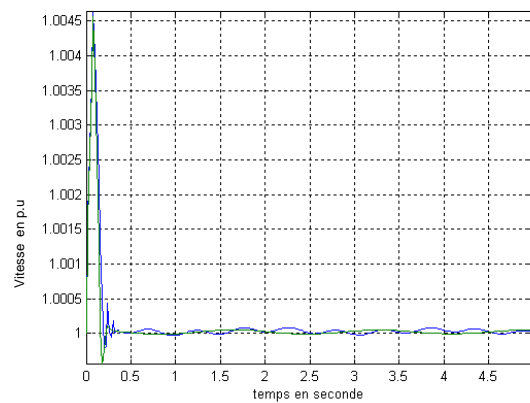
Cependant pour la machine 1 (Fig. 4.17a), on observe une augmentation des amplitudes des oscillations au début de la perturbation mais qui vont s'atténuer dans le temps et restent dans une plage de variation limitée.

La figure 4.18a montre que L'amplitude de variation de la vitesse de la machine 1 augmente avec l'introduction d'un deuxième SMES (courbe en vert) mais reste dans un intervalle acceptable et s'atténue dans le temps

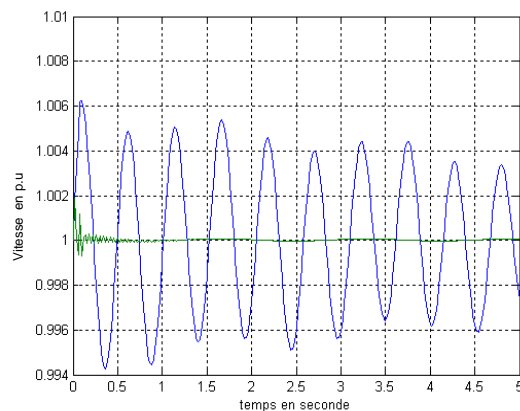
L'introduction d'un deuxième SMES dans le réseau a un effet bénéfique sur le comportement des vitesses des machines 2 et 3 qui redeviennent synchrones en moins de 0.5s (courbe en vert) (Fig 4.18b et Fig 4.18c)



a) Machine 1



b) Machine 2

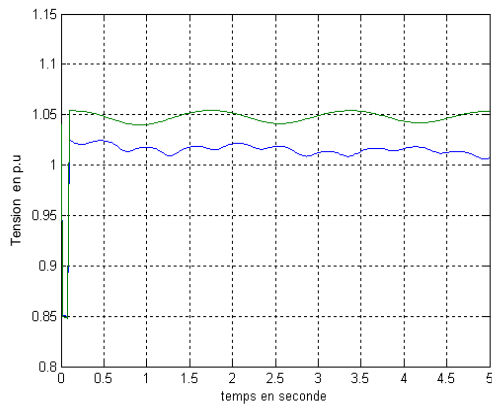


c) Machine 3

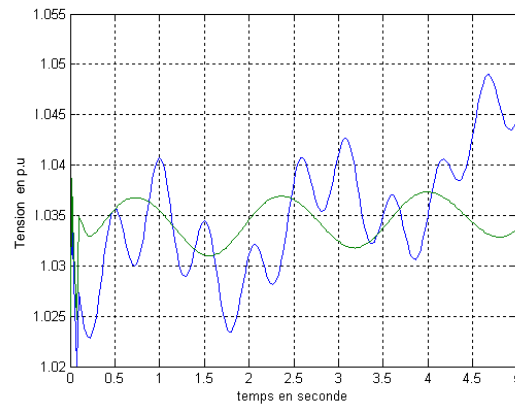
— Régulation par SMES en 2
— Régulation par SMES en 2 et 3

Figure 4.18 Variation des vitesses des machines du réseau

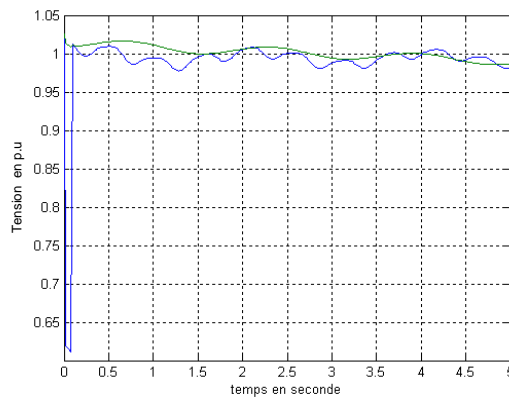
La figure 4.19 montre que l'introduction d'un deuxième SMES a un effet bénéfique sur le comportement des tensions des machines du réseau. L'effet est beaucoup plus net sur la machine 2 (courbe en vert de la figure.4.19b).



a) Machine 1



b) Machine 2



c) Machine 3

— Régulation par SMES en 2
— Régulation par SMES en 2 et 3

Figure 4.19 Variation des tensions des machines du réseau

Les résultats obtenus montrent que l'introduction d'un second dispositif SMES améliore nettement le comportement des caractéristiques des machines comparés à celui obtenu avec un seul SMES.

4.7.2 Installation d'un troisième SMES

Les figures 4.20, 4.21 et 4.22 montrent les résultats obtenus quand on introduit un troisième SMES dans le réseau. La seule amélioration observée est sur le comportement de la vitesse des trois machines qui reprennent leur synchronisme en moins de 1.5s (Fig 4.21). Par contre les angles des machines 2 et 3 (Fig 20 b et c) et la tension de la machine 2 (fig 4.22.b) sont moins maîtrisés qu'avec deux SMES. Cette situation est en relation avec les paramètres des 3 SMES qui doivent être réglés les uns en fonction des autres.

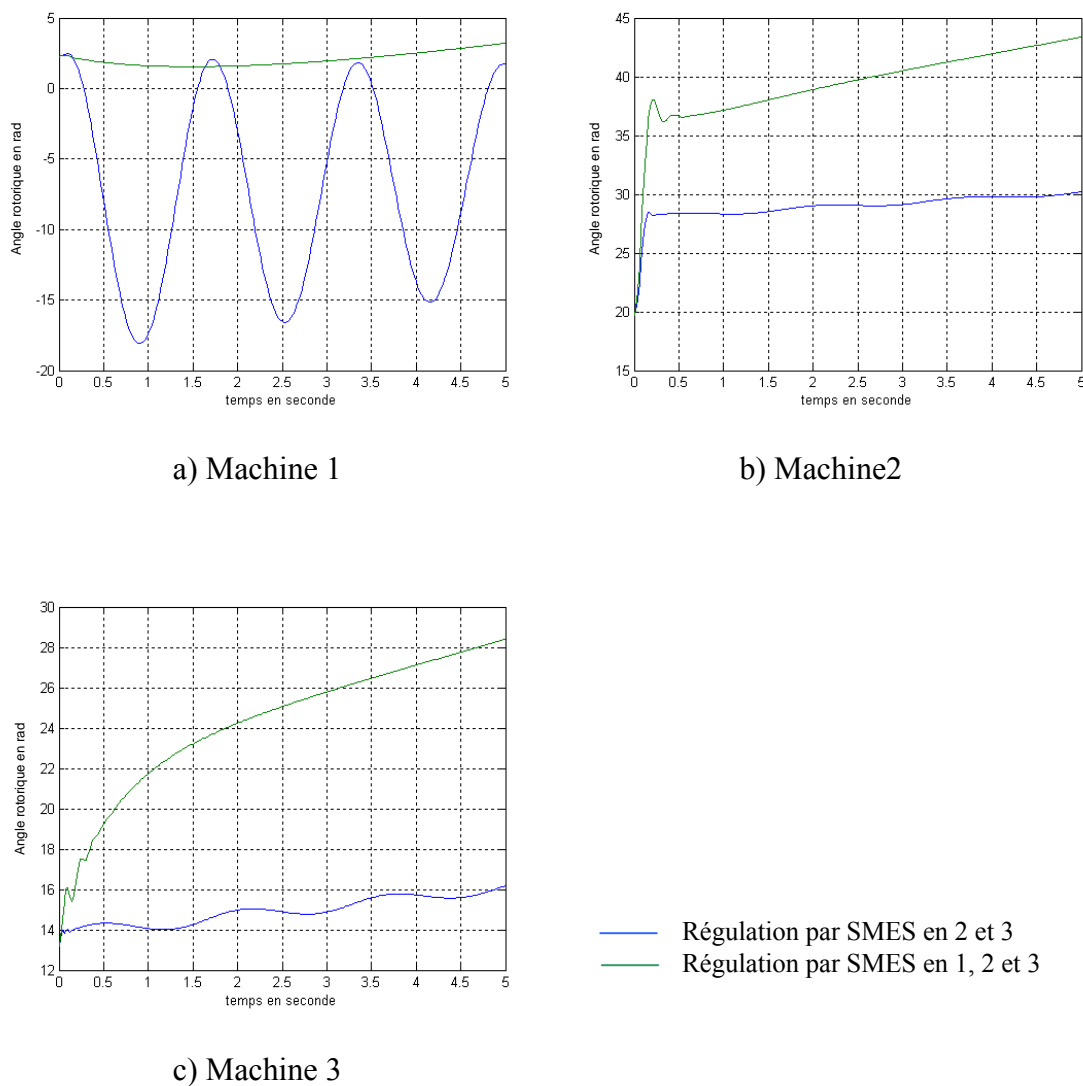
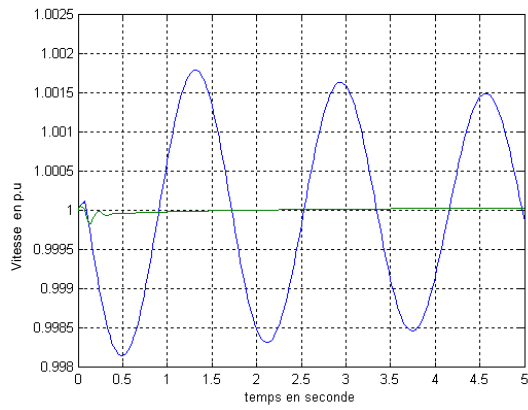
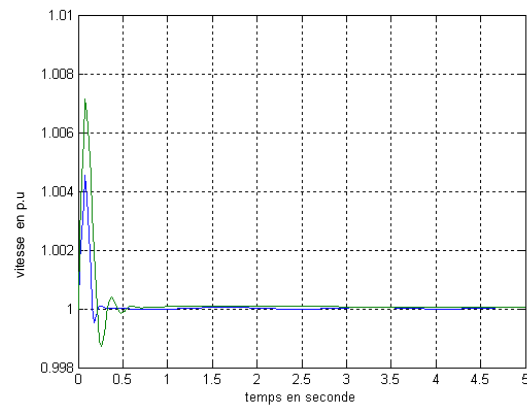


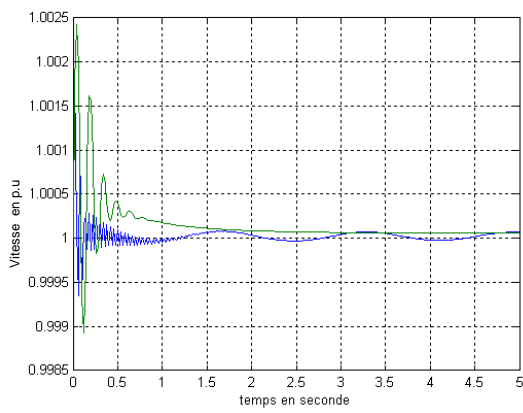
Figure 4.20 Variation des angles des machines du réseau



a) Machine 1



b) Machine 2



c) Machine 3

— Régulation par SMES en 2 et 3
 — Régulation par SMES en 1, 2 et 3

Figure 4.21 Variation des vitesses des machines du réseau

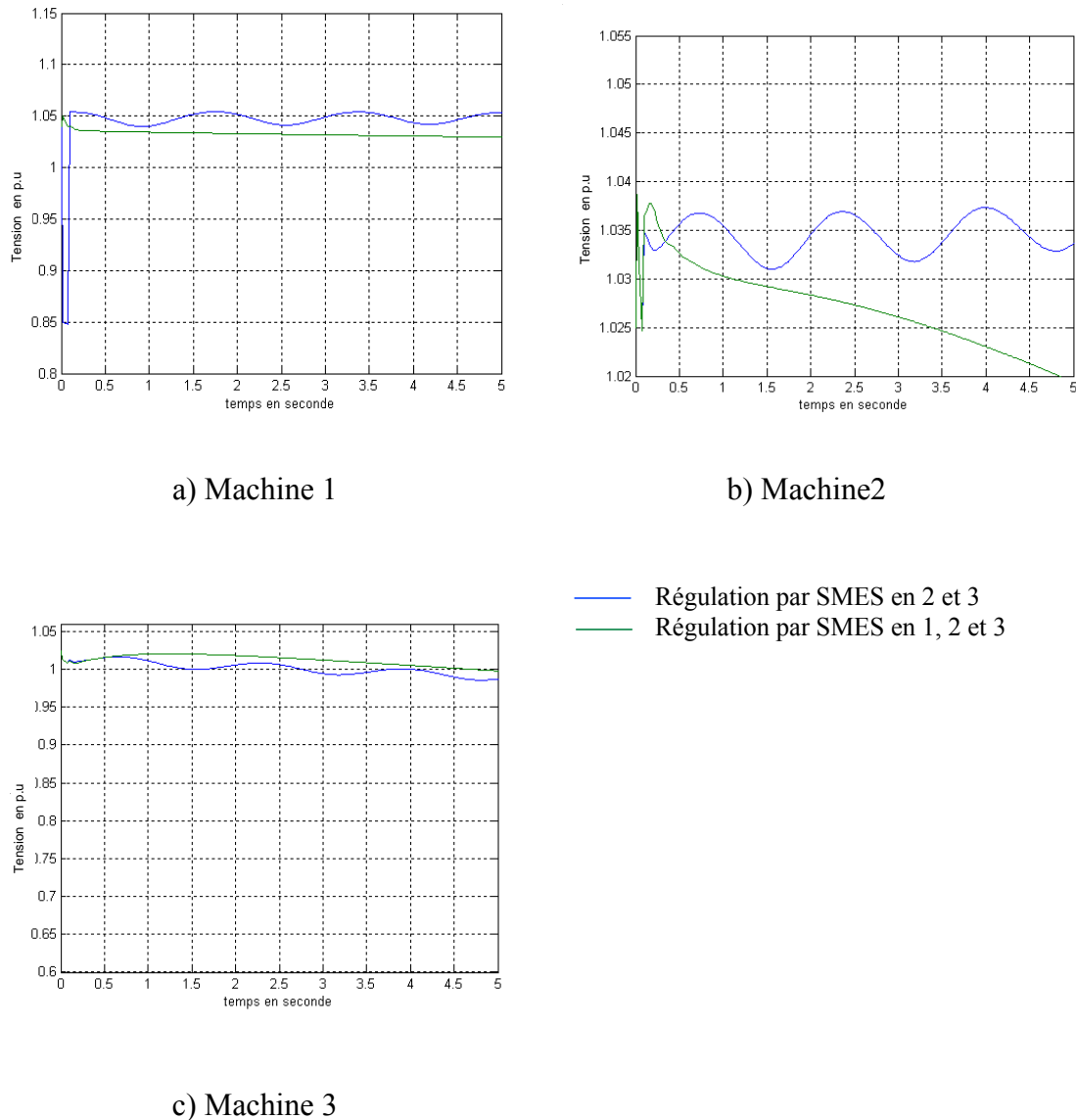


Figure 4.22 Variation des tensions des machines du réseau

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi les performances du dispositif SMES en l'appliquant sur un réseau test et en comparant les résultats obtenus avec ceux de la régulation classique.

Pour cela nous avons déterminé les valeurs optimales des gains du SMES dans toutes les conditions de fonctionnement et montré que la localisation optimale du SMES est le nœud 2 c'est-à-dire que le SMES doit être installé dans la zone la plus perturbée du réseau.

L'échange d'énergie entre le SMES et le réseau est fonction de la durée du défaut et par conséquent le dimensionnement est aussi fonction de cette durée.

L'introduction de plusieurs SMES n'entraîne pas automatiquement une amélioration de la stabilité de l'ensemble du réseau. La recherche d'une combinaison des paramètres de ces dispositifs devrait certainement apporter de meilleurs résultats.

Conclusion Générale

L'étude de la stabilité des réseaux de transport d'énergie électrique constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux. La nécessité de la bonne gestion des transits de puissance et le besoin d'une conduite optimale des réseaux ont amené les chercheurs à développer de nouveaux moyens de réglage tels que les FACTS.

Dans ce travail, nous nous sommes attachés à montrer l'intérêt à utiliser l'un de ces dispositifs, à savoir le SMES, en étudiant son impact sur un réseau multimachine perturbé. Ses performances comparées à celles obtenues avec la régulation conventionnelle s'avèrent nettement supérieures.

L'étude de l'action du SMES sur la stabilité transitoire des réseaux électriques a montré que l'efficacité de ce dispositif est fonction de plusieurs paramètres tels que sa position dans le réseau, le choix des paramètres de régulation et la configuration de l'interface d'échange d'énergie entre la bobine et le réseau.

En effet, une position optimale du SMES favorise un échange de puissance réduit avec le réseau, ceci se répercute sur le dimensionnement de la bobine qui se trouve réduit également. La position optimale du SMES est le nœud de la machine la plus proche du défaut soit la zone la plus sujette à perturbation.

Nous avons étudié la commande du convertisseur permettant l'échange d'énergie en considérant les deux configurations possibles et ce dans les quatre quadrants. La première configuration prend en compte la variation de l'angle d'amorçage sur un arc de cercle, c'est la configuration dite à angles d'amorçage égaux ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$). La deuxième configuration n'impose aucune contrainte aux angles d'amorçage α_1 et α_2 qui sont fonction uniquement des échanges de puissance entre le réseau et la bobine : cette configuration est dite à angles d'amorçage différents ($\alpha_1 \neq \alpha_2$).

Nous avons étudié la commande des échanges d'énergie en utilisant les différentes configurations pour l'angle d'amorçage (angles d'amorçage différents, angles d'amorçage égaux) et cela pour examiner les possibilités des variantes offertes par la commande et décrites au chapitre 3.

L'introduction de plusieurs dispositifs SMES pour la stabilisation du réseau a été examinée et ce en introduisant d'abord un second SMES puis un troisième dans le réseau. Les résultats obtenus ont montré que l'installation de plus de deux SMES n'améliorait pas systématiquement la stabilité si les valeurs des paramètres des SMES n'étaient pas choisis d'une manière adéquate.

Nous constatons que le SMES est un outil performant alors que nous n'avons pas examiné toutes ses possibilités. Celles-ci pourraient être explorées dans d'autres travaux concernant les réseaux multimachines. Nous évoquons d'une manière non exhaustive les travaux qui seraient intéressants à entreprendre.

Nous avons supposé dans notre étude que le courant dans la bobine, au cours des échanges de puissances avec le réseau, ne varie pas. Il serait peut être judicieux d'étudier dans quelle mesure cette hypothèse peut être maintenue.

Dans notre étude les machines de notre réseau test sont régulées uniquement par les dispositifs SMES. En réalité les alternateurs comportent leurs propres dispositifs de régulation, il serait donc intéressant d'examiner la combinaison des deux types de régulation sur la même machine.

Nous avons envisagé le cas où le réseau est équipé de plusieurs SMES, mais les résultats obtenus n'étaient pas complètement satisfaisants. La recherche d'une combinaison des différents paramètres de ces dispositifs devrait certainement apporter de meilleurs résultats

Toutes ces études apporteraient probablement des réponses aux questions posées mais ne manqueraient pas d'en soulever. En tous les cas, les perspectives d'utilisation du SMES font l'objet de nombreuses recherches qui n'ont pas toutes épuisé les potentialités que peut offrir un tel outil.

Bibliographie

- [ABU02] A.Abu-Siada, W. W. L. Keerthipala, W.B. Lawrance
“Application of a SMES Unit to Improve the Stability Performance of Power systems”
Proc of IEEE CCOECE, 2002
- [ALL02] T.ALLAOUI
“Réglage Robuste de l’UPFC pour Optimiser l’Ecoulement des Puissances dans un Réseau
Electrique” Thèse de Magister, USTO – Oran, Avril 2002.
- [AND77] P.M Anderson, A. A. Fouad
“Power System Control and Stability”
Iowa state University Press, Ames , Iowa, USA-1977.
- [ARR83] J Arrillaga, C. P. Arnolet, B. J. Harker
“Computer Modeling Of Electrical Power Systems”
John Wiley and Sons, New York, 1983
- [BAR87] P. Barret
“ Régimes Transitoires des Machines Tournantes Electriques”
Editions EYROLLES, 1987.
- [BEK05] , B. Bekki, M. Moudjahed, M.Naceur, M. Boudhif
“Impact de la Charge du Réseau Electrique sur la Taille du SMES Stabilisateur ”.
Conférence Internationale sur le Transport de l’Electricité en Algérie, Alger, Septembre 2005
- [BER86] A. R. Bergen
“Power system analysis”
Prentice Hall, inc., New Jersey, 1986
- [CHE05] H. C. Chen, P. C. Li
“Fast Transient Stability Control of Power System in Deregulated Environment”
IEEE/PES TDCEAP, China, 2005.
- [DAL 04] DCCG SONELGAZ
“ Dalil 2004” SONELGAZ , Algerie, Décembre 2004
- [DET 05] D. Krischel
“2MJ Supraconducting Magnetic Energy Storage System - SMES”
ACCEL Instruments GMBH, Allemagne,2005
- [EDR00] A. Edris
“FACTS Technology Development : An Update ”
IEEE Power Engineering Review ,March 2000

- [FEA 97] S.D. Feak
“SMES Utility Application Studies”.
IEEE Trans on Power Systems, Vol. 12, N°. 3, August 1997.
- [GJI01] O.Gjini, T.Nitta.
“Evaluation of Power System Stability By Use of SMES”
T.IEE Japan, Vol. 121.-B.N°10, 2001.
- [HAM03] W. K. Ham, B. S. E. E,M.S.E.E
“Active and Reactive Power Control Model of SMES for the Improvement of Power System Stability”
Thèse de Doctorat, University of Texas, USA, 2003.
- [HAS04] W. Hassanzahl, D.W. Hazelton, B. K. Johnson, P. Komarek, M. Noe, C.T. Reis
“Electric Power Applications of Superconductivity”.
IEEE Proc, Vol. 92, N°. 10, October 2004
- [HIN93] N. G. Hingorani
“Flexible AC Transmission”
IEEE SPECTRUM, April 1993.
- [IEE73] IEEE Commitee
“Excitation System Dynamic Characteristics”
IEEE Transactions. On PAS, jan/feb. 1973, pp. 64-75
- [KAU96] M. Moudjahed, J .M. Kauffmann
“Simulation of Power System Stability By Using Superconducting Magnet Energy Storage”
International Journal of power and Energy System vol. 16, N°3, 1996, pp145-150
- [LAC96] J.Lacoste,P.Choley,M.Trotignon,D.Daniel,G.Nativel
“Les FACTS et le comportement dynamique des réseaux ”
Notes internes DER – EDF- 1996
- [LEE93] C.J. Wu, Y.S. Lee
“Application of Simultaneous Active And Reactive Power Modulation Of Superconducting Magnetique Energy Storage Unit To Damp Turbine Generator Subsynchronous Oscillations”
IEEE Transactions on Energy conversion, Vol.8, N°1, march 1993,pp.63-70
- [LIU06] C and Y. Liu, A.B. Arsoy, P. F. Ribeiro, M. R.Iravani
“Detailed Modeling of SMES System”.
IEEE Trans on power delivery. 2006
- [MAR00] Y.Ousawa, Y.Maruoka, H. Takeno, H. Sugihara
“Determination of Installation of SMES for Power Systems Stabilisation”.
IEEE trans, ISCAS, May 2000, Geneva, Switzerland.
- [MEN02] D.Menniti,A.Pinnarelli,N.Sorrentino
“Interconnected model of n-machine power systems with facts devices installed”
IEEE press 2002

- [MIT87] Y. Mitani, Y. Murakami , K. Tsuji,
“Experimental Study on Stabilization of Model Power Transmission System By Using Four
Quadrant Active And Reactive Power Control by SMES”
IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-23, N 2, march 1987,pp. 541-544
- [MOH73] N. Mohan
“Superconducting Energy Storage Inductors for Power Systems”
Thesis of PhD, University of Wisconsin, USA, 1973
- [MOU04] M. Moudjahed, A. Benzitouni, M. Naceur
“ Détermination de la Position Optimale d’un SMES Stabilisant un Réseau Multimachine”
Proc CNGE 2004, Tiaret ,2004.
- [MOU94] M. Moudjahed, J .M. Kauffmann
“Application of Superconducting Magnetic Energy Storage Unit to Improve the Damping of
the Synchronous Generator in a Multimachine System”
Proceeding of the thirteenth IASTED International Conference
Grindelwald, Switzerland, february 21-23, 1994, pp. 412-415
- [MOU96] M.Moudjahed
“Amélioration de la stabilité d’un réseau électrique au moyen d’une bobine supraconductrice”
Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, France, octobre 1996.
- [NAC04] M. Naceur, A. Benzitouni
“ L’effet du SMES sur un réseau perturbé ”
Mémoire PFE , Université Ibn Khaldoun –Tiaret ,2004.
- [PAI96] D.A.Paice
“Power Electronique Converter Harmonics”
IEEE Press, New York,1996.
- [RAB99] M.G.Rabbani, J.B.X.Devotta,S.Elangovan
“Application of Simultanous Active And reactive Power Modulation of SMES Unit Under
Unequal α -Mode For Power System Stabilization” .
IEEE Trans on Power System, vol. 14, N° 2, May 1999,pp 547-552.
- [ROG79] J.D. Rogers, H.J. Boeing, J.C. Bronson, D.B. Colyer, W.V. Hassenzahl,
R.D. Tuner, R.I. Schermer
“30MJ Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Unit for Stabilizing an Electric
Transmission System”
IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-15, N°1, January 1979, pp.820-823
- [SHA03] E.G.Shahraki
“Apport de l’UPFC à l’Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques ” .
Thèse de doctorat Université Henri Poincaré, France, 2003.
- [STA68] G. W. Stagg, A. H. El Abiad
“Computer Methods In Power System Analysis” .
Mc Graw Hill Book Company, New York, 1968.

- [SUP00] M. J. Superzynski
“Analysis of the Power Conditioning System for a SMES Unit”
Thèse de Master, VPISU, USA, 2000
- [TIX91] P.Tixadore, Y. Loumond
“ Projets et développement en cryoélectrotechnique”
J.Phys. III Fevrier 1991.
- [VIJ04] Vijay k. sood
“HVDC and FACTS controllers applications of static converters in power systems”
Kluwer Academic Publishers,2004
- [WANG94] L.WANG, S.MUH LEE, C. HUANG
“Damping Subsynchronous Resonance Using SMES Unit”.
IEEE Trans on energy conversion , Vol9,N° 4, December 1994.
- [Wil00] Theodore .Wildi
“Electrotechnique ”
De Boeck Université, 3eme Edition 2000
- [WOO03] D.Woodford
“How FACTS controllers function in an ac transmission system”
IEEE Press 2003
- [XUE05] X. D. Xue, K.W.E. cheng, D.Sutanto
“Power System Applications of SMES Systems”.
IEEE Paper, IAS2005
- [YON97] Yong Tae Yoon
“Enhancement of electric power systems operation using FACTS devices”
Thèse de doctorat, M.I.T , BOSTON -USA- février 1997
- [ZHE 00] Z. Li, M.Weixin
“Application Of SMES With A Comprehensive Control For Enhancing Transient Stability”
Proc of the 5th APSCOM, Hong Kong, Oct 2000
- [ZIF04] L. Zifeng, M. Yong
“Selecting the Location and the Capacity of SMES for On-Line steady State Security
assessment of Power Systems”
IEEE ICEUD,RPT, April 2004,Hong Kong

Résumé

L'utilisation d'un réseau électrique au plus près de ses limites peut entraîner son instabilité en cas de perturbation. L'amortissement du système peut être obtenu par des moyens classiques de régulation de tension et de la vitesse mais aussi par un SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). Celui-ci fait partie des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) de plus en plus utilisés dans les réseaux électriques. Il est constitué d'une bobine supraconductrice associée à un convertisseur GTO de grande puissance. Il amortit les oscillations du réseau en échangeant avec ce dernier, par absorption ou fourniture, selon les besoins du réseau, de la puissance active et/ou de la puissance réactive. Dans ce travail, le réseau test retenu est un réseau 3 machines - 9 nœuds. La configuration du SMES et son principe de fonctionnement sont décrits en détail pour examiner l'influence de la régulation classique et celle du SMES sur le comportement du réseau soumis aux contraintes les plus sévères. L'action prépondérante du SMES sur celle-ci de la régulation classique a été établie. La position optimale du SMES doit être proche des machines à risque. La possibilité d'installation de plusieurs SMES, un connecté à chaque machine, a été examinée.

Mots clés: FACTS, SMES, Stabilité transitoire, Convertisseur de puissance.

ملخص

إن الاستعمال الأقصى للشبكة الكهربائية يمكن أن يحدث سوء استقرار في حالة حدوث اضطراب و يمكن الحصول على استقرار النظام بالمنظمات التقليدية لتنظيم الضغط و السرعة، إضافة إلى طريقة اللفائف فائقة التوصيل المخزنة للطاقة والتي تنتمي إلى مجموعة أنظمة نقل التيار المتناوب المتغيرة والتي أصبحت تستعمل بشكل أكبر في الشبكات الكهربائية. تتكون هذه الأخيرة من لفائف فائقة التوصيل مرتبطة بمحول للطاقة، يعمل على التخفيف من دذببات الشبكة بالتبادل معها، عن طريق الامتصاص أو التموين وذلك حسب حاجة الشبكة. تتكون الشبكة المدروسة في هذا العمل من 3 مولدات و 9 عقد، تم التطرق بالتفصيل لللفائف فائقة التوصيل المخزنة للطاقة و أسس عملها لمعاينة أثر المنظم الكلاسيكي مقارنة بنظام اللفائف فائقة التوصيل المخزنة للطاقة على سير شبكة معرضة لضغوط شديدة جدا. لللفائف فائقة التوصيل المخزنة للطاقة تأثير قوي مقارنة بالمنظم الكلاسيكي، بعد تحديد الوضعية المناسبة لللفائف فائقة التوصيل المخزنة للطاقة و التي يجب أن تكون بالقرب من المولدات كما أننا قمنا بدراسة إمكانية وضع جهاز اللفائف فائقة التوصيل المخزنة للطاقة على مستوى كل آلة.

كلمات مفاتيح: أنظمة نقل التيار المتناوب المتغيرة، اللفائف فائقة التوصيل المخزنة للطاقة، الاستقرار الانتقالي، محول للطاقة.

Abstract

The use of a power network near its operating limits can provoke its instability when a disturbance occurs. The damping of the system's oscillations can be obtained by the classical means such as automatic voltage regulator and governor action but also by a SMES (superconducting magnetic Energy Storage) which is one of the FACTS (Flexible AC Transmission Systems) devices. These are used more and more in the power systems. The SMES is composed of a superconducting coil and a GTO power converter. It damps the system's oscillations by exchanging the power with the system. Active power and/or reactive power can be consumed or supplied by the SMES according to the system requirement. In this work, a 3 machines- 9 nodes network is simulated. The configuration of the SMES and its principle of operating are described in detail to study the influence The impacts of the classical regulation. and the SMES on the network's behaviour when the system is sujet to strong constraints are studied. The impact of the SMES on the system stability is better than the action of the classical regulation. The optimal position of the SMES is generally close to the machines at the risk. The stabilization of the system by using one, tow and three SMES is examined.

Key words: FACTS, SMES, Transient stability, Power converter