

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Centre Universitaire D'El-oued
Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme
D'ingénieur d'Etat en Electrotechnique
Option réseaux électriques

Thème

*Les Effets du FACTS sur le transit de la puissance active et la
stabilité transitoire dans le réseau électrique*

Proposé et dirigé par :

Dr : Djilani Ben Attous

Etudié par :

Belkhir Yacine

Zegueb Abdelkader

Doudi Ahmed

Promotion :2007

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes parents qui me sont les plus chers dans
tout l'univers.*

A mon frère : Rachid.

A mes sœurs : Fatima, Safia.

*A enfants de mes sœurs : Arafat, Mohammed, Ali, Salim, Nafaa,
Ibtihage, Abd-El-Majid, Maroia, Yahia, yazid.*

A mon enseignant le plus chers : Chemsali Ali.

A mes très chers amis : Hafnaoui, Hamza, Adlan, Abd-El-Kérim.

*A toute la promotion d'électrotechnique 2007 Option : réseaux
électriques.*

A tout ceux que je connais et j'aime et que je n'ai pas citer.

Zegueb Abd-El-Kader

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes parents qui me sont les plus chers dans
tout l'univers.*

A mes frères : Mohammed, Abd-El-Djalil

*A mes sœurs : Fatma, Khadidja, Aicha, Kheira, Khaoula,
Nour-El-Houda, Chaima.*

A mon enseignant le plus chers : Chemsia Ali

*A mes très chers amis : Khaled, Issam, Brahim, Yousri, Imad,
Ahmed*

*A toute la promotion d'électrotechnique 2007 Option : réseaux
électriques*

A tout ceux que je connais et j'aime et que je n'ai pas citer.

Ahmed Douadi

Dédicace

Je dédie ce travail :

*A mes très chers parents Qui me sont les plus chers dans
tout l'univers pour les sacrifices et les
Encouragements.*

*Et je demande de Dieu les gardés heureux.
A toute la famille "Soit les grands ou les petits".
A toute ma grande famille "Dif , Rokh , Belkhir
et Salouba".*

*A mon enseignant le plus chers "Chemsa Ali".
A l'homme qui me dirige "Bachir Ben Bordi" pour faire
ce travail.*

*A tous ceux qui me sont chers.
A tous mes amis.*

Yacine

Remerciements

Je tiens à remercier notre dieu pour la patience et l'effort qu'il m'a donné pour élaborer ce travail jusqu'au dernier moment.

*Aussi, je tiens à remercier profondément mon promoteur
Dr : Ben Attous Djilani, à l'homme qui me dirige
monsieur : Ben Bordi Bachir pour son encouragement pendant
toute la période du projet malgré toutes les difficultés.*

*Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont
accepté de juger ce travail et d'y apporter leur soutien.*

*Je tiens aussi à remercier tous les membres de Scout
Islamique Algérien pour leurs aides.*

*Je tiens aussi à remercier toute ma famille pour leur soutien
morale.*

Zegueb Abd-El-Kader

Belkhir Yacine

Doudi Ahmed

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
------------------------------------	----------

1^{er} Chapitre :

Notions sur la Stabilité

-1.1. Introduction et définition de la stabilité.....	4
-1.2. Analogie mécanique.....	4
-1.3. Stabilité statique et dynamique.....	5
-1.4. La stabilité statique.....	6
-1.4.1. Définition.....	6
-1.4.2. Analyse technique de la stabilité statique.....	7
-1.4.3. Moyen d'amélioration de la stabilité statique.....	10
-1.5. La stabilité dynamique.....	10
-1.5.1. Définition.....	10
-1.5.2. Principaux concepts de la stabilité dynamique.....	11
-1.5.3. Principales causes des pertes de la stabilité dynamique.....	16
-1.5.4. Lois de surfaces.....	17
-1.5.4.1. Débranchement brusque des deux lignes en parallèles.....	17
-1.6. Conclusion.....	19

2^{ème} Chapitre :

Les systèmes FACTS

-2.1. Introduction.....	21
-2.2. FACTS- Termes et définitions.....	21
-2.2.1. Définition de base.....	21
-2.2.1.1. Flexibilité de transmission d'énergie électrique.....	21

-2.2.1.2. Systèmes de transmission flexible à C.A(FACTS).....	22
-2.2.1.3. Convertisseur FACTS.....	22
-2.2.2. Définitions des convertisseurs de FACTS.....	22
-2.2.2.1. Convertisseurs reliés en shunt.....	22
-2.2.2.1.1. Système des batteries du stockage d'énergie(BESS).....	22
-2.2.2.1.2. Compensateur statique synchrone (SSC ou STATCOM).....	22
-2.2.2.1.3. Condensateur statique(STATCON).....	23
-2.2.2.1.4. Générateur statique synchrone(SSG).....	23
-2.2.2.1.5. Compensateur statique de tension(SVC).....	23
-2.2.2.1.6. Générateur de tension statique(SVG).....	24
-2.2.2.1.7. Système de tension statique(SVS).....	24
-2.2.2.1.8.Stockage d'énergie magnétique superconductée(SMES).....	24
-2.2.2.1.9. Résistance freinant commandée par Thyristor(TCBR).....	24
-2.2.2.1.10. Réactance commandée par Thyristor(TCR).....	25
-2.2.2.1.11. Condensateur commuté par Thyristor(TSC).....	25
-2.2.2.1.12. Réacteur commuté par Thyristor(TSR).....	25
-2.2.2.1.13. Système compensateur De Variété(VCS).....	25
-2.2.2.2. Convertisseurs reliés en séries.....	26
-2.2.2.2.1. Compensateur statique synchrone série (SSSC ou S^3C).....	26
-2.2.2.2.2. Compensateur série commandé par Thyristor(TCSC).....	26
-2.2.2.2.3. Compensation série commandé par Thyristor.....	27
-2.2.2.2.4. Réactance série commandée par Thyristor(TCSR).....	27
-2.2.2.2.5. Condensateur série commuté par Thyristor(TSSC).....	27
-2.2.2.2.6. Compensation série commuté par Thyristor.....	28

-2.2.2.2.7. Réactance série commutée par Thyristor(TSSR).....	28
-2.2.2.3. Convertisseurs combinés reliés en série et en shunt.....	28
-2.2.2.3.1. Convertisseur interphase de puissance(IPC).....	28
-2.2.2.3.2. Transformateur à déphasage commandé par Thyristor(TCPST).....	28
-2.2.2.3.3. Contrôleur unifié d'écoulement de puissance(UPFC).....	28
-2.2.2.4. D'autres convertisseurs.....	29
-2.2.2.4.1. Limiteur de tension commandé par Thyristor(TCVL).....	29
-2.3. Statut actuel d'application des convertisseurs de FACTS.....	29
-2.3.1. Convertisseurs FACTS disponibles dans le commerce.....	29
-2.3.1.1. Compensateur statique de tension(SVC).....	30
-2.3.1.2. Condensateur série commuté /commandé par Thyristor (TSSC/TCSC).....	30
-2.3.1.3. Compensateur statique synchrone (STATCOM).....	31
-2.3.2. Convertisseurs de FACTS actuellement en cours de développement.....	31
-2.3.2.1. Contrôleur unifié d'écoulement de puissance(UPFC).....	31
-2.3.3. Futur convertisseurs de FACTS.....	31
-2.4. Conclusion.....	32

3^{ème} Chapitre

Modélisation de l'UPFC

-3.1. Introduction.....	34
-3.2. Arrangement du circuit.....	34
-3.3. Opération de l'UPFC.....	34
-3.4. Fonction de base de l'UPFC.....	35
-3.4.1. Régulation de tension.....	36
-3.4.2. Compensation série.....	36

-3.4.3. Régulation de l'angle de charge.....	36
-3.4.4. Multifonctions de contrôle	36
-3.5. Principe de contrôle	37
-3.6. Modélisation de l'UPFC.....	38
-3.6.1. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux.....	39
-3.6.1.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux.....	39
-3.6.1.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	40
-3.6.1.2.1. Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	40
-3.6.1.2.2. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux.....	42
-3.6.1.2.3. Fonctions de connexion des interrupteurs.....	42
-3.6.1.2.4. Fonctions de connexion des demi-bras.....	43
-3.6.1.2.5. Fonction de conversion.....	43
-3.6.1.2.6. Stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux.....	47
-3.6.1.2.6.1. Commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses.....	47
-3.6.1.2.6.2. Principes de la commande.....	47
-3.6.1.2.6.3. Caractéristique de la tension de référence.....	47
-3.6.2. Modélisation de redresseur à trois niveaux.....	48
-3.6.2.1. Modélisation du redresseur.....	48
-3.6.2.2. Commande par hystérésis en courant appliquée au redresseur.....	49
-3.6.2.3. Commandabilité du redresseur.....	50
-3.7. Cascade de redresseur NPC à trois niveaux-onduleur NPC à trois niveaux.....	51
-3.7.1. Structure de la cascade.....	51
-3.7.2. Modélisation du filtre intermédiaire de la cascade.....	51
-3.8. Simulation et interprétation.....	53

-3.9. Conclusion.....	54
Conclusion Générale.....	56
Bibliographie	

INTRODUCTION GENERALE

Les réseaux électriques de transport sont constitués en circuits interconnectés pour des raisons économique et de sécurité. Le maillage permet d'améliorer la fiabilité de fourniture de l'énergie électrique par la mise en commun de toutes les ressources et réserves disponibles, et de réduire le coût par l'optimisation de la production .

La stabilité du réseau est un facteur essentiel pour assurer la continuité du service. Le régime de fonctionnement doit rester stable en marche normale ainsi que pendant les perturbations causées par les modifications aléatoires dans l'architecture du réseau.

Des systèmes de contrôle rapide du réseau utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la micro-électronique de commande ont été récemment étudiées et réalisés, et sont actuellement pour certains en application normale. Ces systèmes sont désignés par l'acronyme général FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems)

Ces dispositifs sont en application ou en essai essentiellement aux Etats Units et Japon, et n'existent encore qu'en nombre limité.

Le système UPFC (Unified power flow controller) combine à la fois la compensation série et la compensation parallèle. C'est le système FACTS le plus puissant, dans la mesure où il permet de régler trois grandeurs du réseau (tension, impédance, angle de transmission).

L'objectif de ce projet est de développer une stratégie de contrôle pour l'UPFC, modélisation de l'UPFC en utilisant MATLAB / SIMULINK et d'analyser la stratégie de contrôle utilisant l'injection de tension et de courant.

-1.1 Introduction et définition de la stabilité [1] :

Nous considérons le cas simple d'une machine raccordée à un réseau de grande puissance dont la fréquence et la tension sont constantes (figure1) .Ce cas est bien représentatif d'un groupe générateur connecté à un réseau puissant qui raccorde toutes les machines génératrices d'un pays comme c'est le cas pour le réseau algérien.

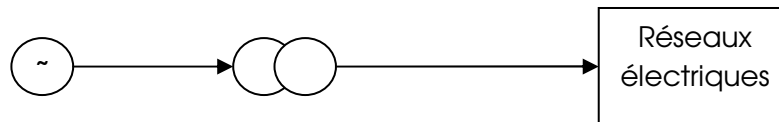


Figure 1: Schéma simple du réseau électrique

Nous dirons que cette machine synchrone fonctionne en état d'équilibre si toutes les grandeurs mécaniques et électriques qui caractérisant son fonctionnement sont constantes.

Mais ces grandeurs qui définissent le fonctionnement sont constamment l'objet de perturbation qui risque de charge.

Aussi, l'étude de la stabilité de ce groupe consistera à recherche ses états d'équilibre possibles et à déterminer si, après avoir été écarté de son équilibre par une perturbation, il pourra retrouver son équilibre antérieur ou le quittera définitivement.

Nous examinerons les réponses qu'on peut apporter à cette question, selon la nature et l'importance de la perturbation qui affecte l'état du réseau ou la machine auquel est connecté.

Si le réseau retrouve son état d'équilibre après la perturbation, nous dirons que son fonctionnement est stable, et instable dans le cas contraire.

-1.2. Analogie mécanique [1] :

Avant d'aller plus loin dans la question de la stabilité du réseau, il parait utile d'indiquer la nature des problèmes, en ayant recours à une analogie mécanique très simple qui traduit assez fidèlement l'allure des phénomènes.

Considérant le système mécanique schématisé sur la (figure 2.a), constitue d'une bille placée dans une structure en forme de col. La position d'équilibre de cette bille est évidemment située au fond du col, où il y a égalité entre la force de pesanteur qui s'exerce sur la bille et la réaction de la structure normale à sa surface.



(a) position d'équilibre stable

(b) position d'équilibre instable

Figure 2 : Analogie mécanique

Si l'on écarte légèrement la bille de cette position d'équilibre en la laissant en contact avec la surface, elle aura tendance, dès que cette action sera interrompue, à retourner vers le fond de la structure. Le mouvement oscillatoire autour de la position d'équilibre s'amortira dans la pratique par suite des frottements.

Pour savoir si une position d'équilibre est stable, il suffit d'examiner les conséquences d'un déplacement autour de cette position, déplacement qui peut être d'amplitude très faible.

La position basse du col est une position d'équilibre stable parce que tout déplacement à partir de cette position, dans n'importe quelle direction provoque l'apparition d'une force résultante appliquée à la bille qui tend à s'opposer au déplacement.

Si la structure avait la forme indiquée sur la (figure 2.b), le point haut de la colline serait encore une position d'équilibre, mais cette fois elle serait instable, tout déplacement de la bille engendrant une force résultante qui tend à l'écarter de la position d'équilibre.

-1.3. Stabilité statique et dynamique [1]:

On notera que l'étude des possibilités de stabilisation peut, alors être effectuée en considérant, à un instant et une position arbitrairement choisie, la vitesse de la bille, autrement dit énergie cinétique.

On remarquera également que la nécessité d'examiner la stabilité sous les deux aspects qui viennent d'être schématisés tient à la nature de la structure considérée.

Les deux aspects de la "stabilité" qui à prendre en considération sont :

Stabilité statique, stabilité dynamique (ou transitoire).

En stabilité statique, les perturbations considérées sont toujours de faible amplitude que se soient des variations de consigne des régulateurs, des variations de régime pour les machines ou des manœuvres réseau sur des lignes éloignées du groupe étudié. Dans ce cas on considère que la vitesse de l'arbre est constante et que les grandeurs électriques varient de manière linéaire autour de leurs valeurs d'équilibre, c'est-à-dire que leurs variations sont toutes proportionnelles entre elles. On voudrait que la machine s'éloigne peu de son état antérieur et que ses oscillations s'amortissent le plus rapidement possible.

En stabilité dynamique, on considère des perturbations importantes : Court-circuit sur le réseau, délestage de charge ou de groupe voisins, ilotage de la tranche étudiée. Dans ce cas le problème est, plus particulièrement, de savoir si la machine gardera ou non le synchronisme. Cette notion est précisée dans l'alinéa concernant la stabilité dynamique.

Nous avons mis en évidence, à l'aide de l'analogie mécanique, le fait qu'un système peut réagir de manière très différente selon les perturbations qu'on lui applique, et peut être trouvé stable pour certaines et instable pour d'autres. Ceci pose à l'expérimentateur le problème parfois délicat de choisir un critère de stabilité qui tient compte de ces différents comportements et permettre si possible une comparaison entre plusieurs machines ou plusieurs configurations.

Il est également difficile parfois de préciser la limite entre les domaines de la stabilité dynamique et de la stabilité statique.

En particulier les phénomènes de stabilité dynamique peuvent être consécutifs à une dégénérescence du comportement en stabilité statique du système.

-1.4. La stabilité statique [1] :

-1.4.1. Définition:

On désigne sous le nom des conditions de stabilité statique d'un réseau, celle qui régit au fonctionnement d'un réseau soumis à des variations lentes de puissance généralement dues à l'apparition d'un défaut, ou à l'exécution des manœuvres automatiques ou involontaire, modifiant la constitution de réseau.

La stabilité statique d'une machine synchrone est la propriété de revenir à son régime de fonctionnement stable c'est-à-dire l'état initial, après avoir subi une perturbation infiniment petite par exemple:

* La tension du réseau pendant le régime stationnaire n'est jamais stable à cause des petites variations dues au branchement, débranchement, ou changement des charges des différents récepteurs.

* La variation de la vitesse provoquée par les variations du couple de la turbine.

* Les variations des courants d'excitations qui sont dues à l'imper-fonctionnement du système balais-collecteur.

Si cette machine peut résister à ces perturbations on dira que son fonctionnement en parallèle avec le réseau est statiquement stable et dans le cas contraire, on dira que son fonctionnement parallèle avec le réseau est impossible d'où la stabilité statique n'existe pas.

-1.4.2. Analyse technique de la stabilité statique:

Pour analyser techniquement la stabilité statique on considère le cas particulier d'un groupe générateur relié à un réseau assez puissant pour qu'on puisse admettre que sa tension reste pratiquement insensible aux fluctuations de puissance (Figure 3.a).

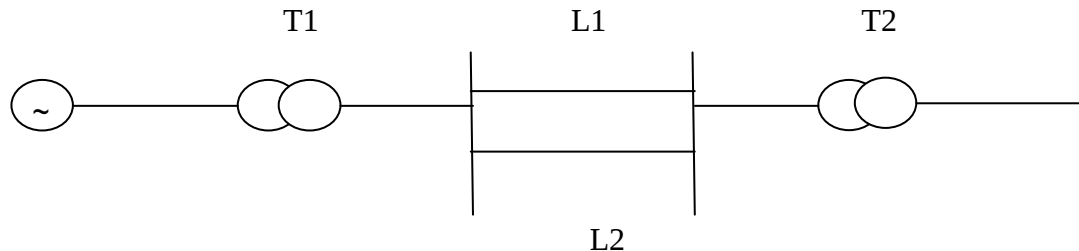


Figure 3.a: schéma d'un réseau avec une station reliée au système de puissance infinie

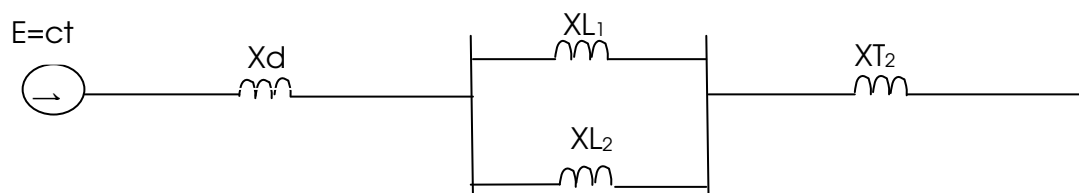


Figure 3.b: Schéma équivalent

D'après le schéma équivalent (Figure 3.b) la réactance sommaire est égale à :

$$X_d = X_G + X_{T1}, X_{L1} // X_{L2}$$

$$\sum X = X_d + \frac{X_L}{2} + X_{T2}$$

$$\text{Où } X_{L1} = X_{L2} = X_L$$

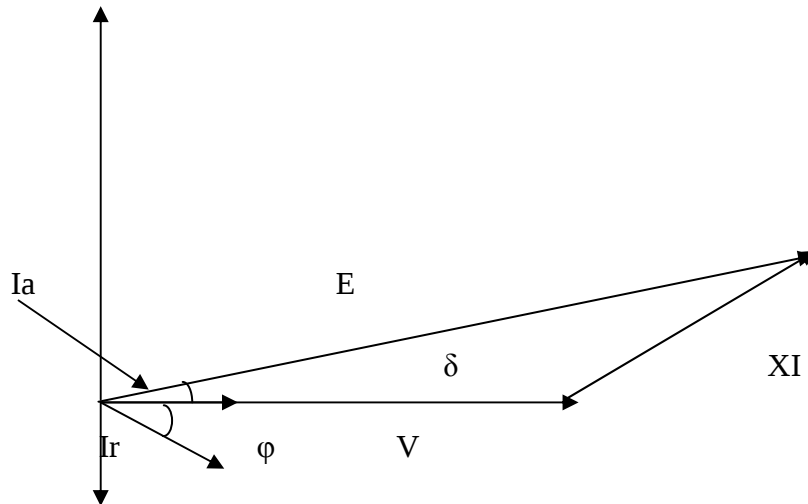


Figure 4: Diagramme Vectoriel de tension

Selon le diagramme vectoriel :

$$\text{On a } E = f_{em} \quad P = 3VI \cos \varphi$$

Où I_a : le courant active.

δ : l'angle entre la source et le récepteur

$$\text{On implique } E \sin \delta = I \cos \varphi X_s$$

on obtient :

$$P = \frac{3 V E \sin \delta}{X}$$

Où

$$P = \frac{3U (E_{\text{entre phase}}) (\sin \delta)}{\sqrt{3} \sqrt{3} X_s} = \frac{U E_{\text{entre phase}} \sin \delta}{X_s}$$

Où P : c'est la puissance active fournie par le générateur, et est une fonction sinusoïdale dans δ , lorsque $\delta = 90^\circ$ la puissance fournie est maximale c'est-à-dire:

$$P_{\text{Max}} = \frac{U E}{X_s}$$

Dans ce cas, dans une centrale reliée à un système de puissance infinie le changement de l'angle δ avec la valeur provoque la variation de la puissance de générateur d'après la loi:

$P = P_{\text{Max}} \sin \delta$ on suppose que la puissance de la turbine reste constante et égale à P_0

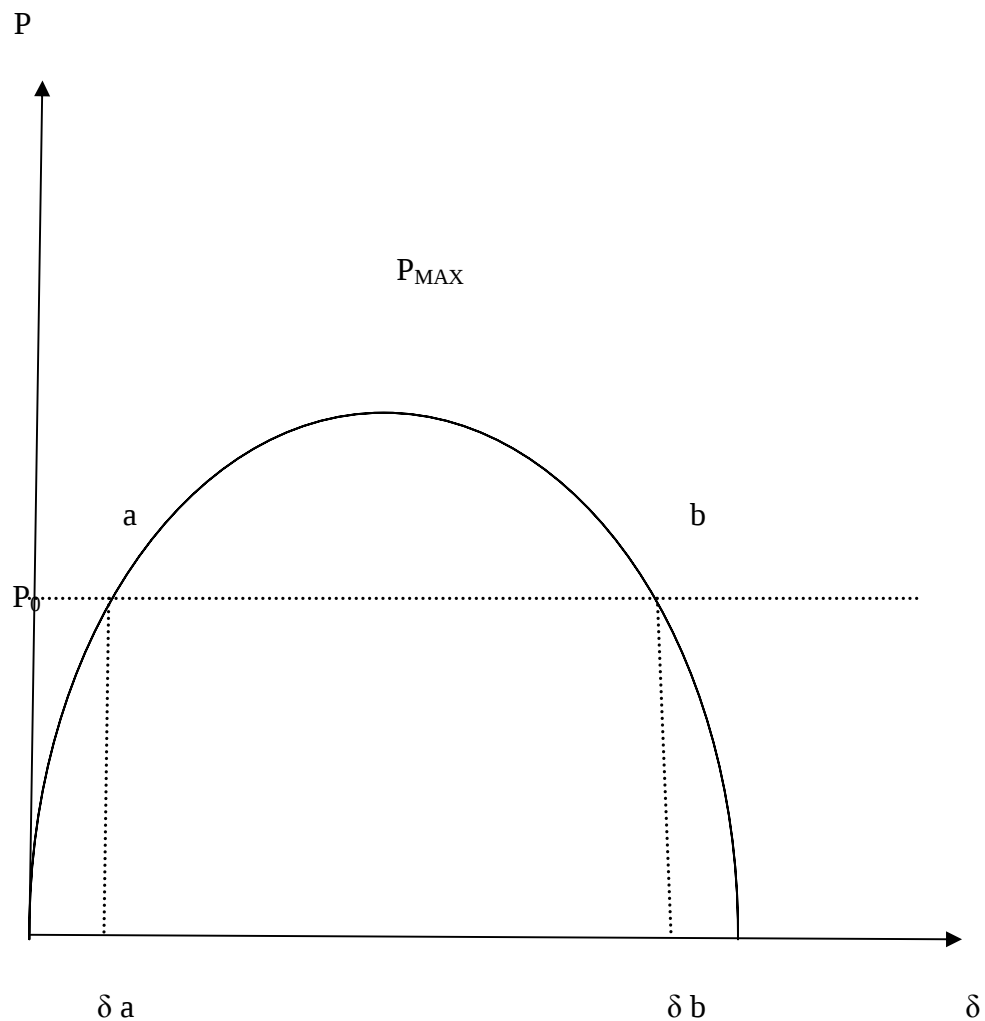


Figure 5: la dépendance de la puissance active avec l'angle δ

-1.4.3. Moyens d'amélioration de la stabilité statique :

On améliore les conditions des stabilités en fonctionnant assez loin des limites de stabilité statique des divers groupes, en régime permanent donc en réduisant le déphasage de chaque groupe par rapport au réseau c'est-à-dire les déphasages relatifs de ces groupes entre eux.

Ceci réduit d'une part les problèmes de la stabilité statique et donne d'autre part de meilleures réactions en cas de défaut c'est-à-dire stabilité dynamique.

Ceci implique qu'on réduit les réactions des lignes en utilisant des lignes parallèles, en limitant les longueurs des antennes sur les quelles débitent les groupes. En maintenant un schéma du réseau suffisamment maillé pour limité la valeur des réactances de liaison.

Un autre procédé, beaucoup plus économique que la multiplication des lignes est obtenu par le réglage de tension, l'utilisation d'un simple régleur proportionnel permet de fonctionner avec des angles internes de 90° correspondant à un fonctionnement sur une ligne de 50% de réactance.

Dans le schéma d'exploitation, on a recourt à un perfectionnement de régulateur de tension classique, appelé stabilisateur à écart de puissance active (S,E,P). Le signal produit par S,E,P s'ajoute à celui du régulateur classique, son effet est d'exciter l'alternateur si la puissance électrique mesurée aux bornes de la machine diminue et de désexciter si cette puissance augmente, il stabilise le groupe jusqu'à des fonctionnements sur réactance de 100% dans certains types de réseaux.

-1.5. La stabilité dynamique [1]:

-1.5.1. Définition:

La stabilité dynamique d'une machine synchrone c'est la capacité, le pouvoir de conserver son régime de fonctionnement en parallèle lors des grandes et brusques perturbations, on peut dire aussi qu'une machine synchrone est stable dynamiquement si lors d'une perturbation (choc) quelconque, elle peut passer d'un régime stationnaire initiale à un autre sans aucun problème.

Cette perturbation peut être soit:

*Un changement brusque de la charge de la machine.

*Une rupture brusque de la charge de la machine.

- * Un débranchement des lignes et des transformateurs.
- * Les courts-circuits.

Ainsi du fait de ces perturbations, l'égalité entre couple moteur et résistant n'existe plus ($C_m \neq C_r$) et la vitesse de rotation commence alors à varier. Par suite la fréquence de la machine synchrone change et devient différente à celle du réseau. La machine donc passe à un régime asynchrone.

Mais on peut avoir le cas où la vitesse de rotation devient une fonction décroissante, et sa valeur finale redeviendra égale à la valeur de la vitesse de rotation synchrone, dans ce cas on dit qu'il y a une stabilité dynamique.

Dans ce cas il faut étudier toutes les conditions possibles de fonctionnement, pour qu'il soit nécessaire d'analyser toutes les perturbations possibles et leurs influences sur le fonctionnement de la machine. D'autre part, il est souvent d'avoir une rupture d'excitation par contre on doit prendre toutes les mesures pour pouvoir éviter la perte de la stabilité dynamique lors des courts-circuits.

-1.5.2. Principaux concepts de la stabilité dynamique :

Nous allons étudier le phénomène qui se produisant lors de la coupure de l'une des deux lignes parallèles de transport de l'énergie électrique relie une lointaine station à un jeu de barre sous tension constante. (Figure 6).

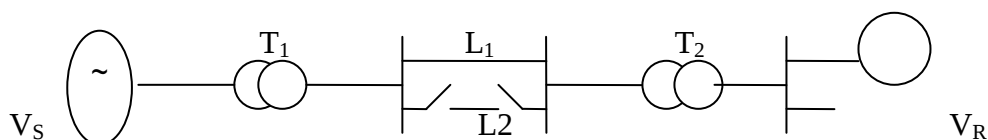


Figure 6: Schéma de principe de transport d'énergie lors de l'ouverture du circuit

L'étude est comme suit:

*Le régime normal : avant le défaut

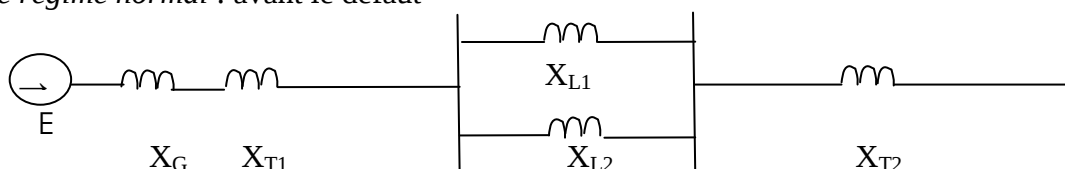


Figure 6.a : Schéma des substitutions de transport d'énergie lors d'un régime normal

La puissance est écrit comme suit:

$$P_{e1} = \frac{|V_S| |V_R|}{X_{eq1}} \sin \delta = P_{max1} \sin \delta$$

$$X_{eq1}$$

$$\text{Où } X_{eq1} = X_G + X_{T1} + X_{T2} + \frac{X_{L1} X_L}{X_{L1} + X_{L2}}$$

* Le régime après le défaut: après l'ouverture d'un disjoncteur.

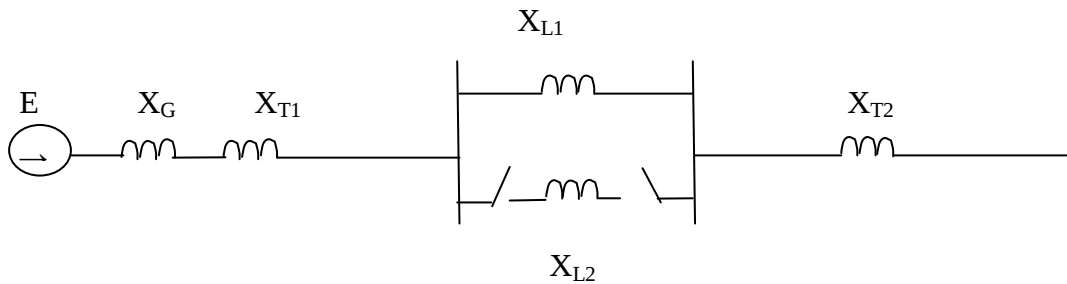


Figure 6.b: Schéma des substitutions de transport d'énergie lors de rupture du circuit

La puissance est écrit comme suit:

$$P_{e3} = \frac{(|V_S| |V_R|)}{X_{eq3}} \sin \delta = P_{max3} \sin \delta.$$

$$X_{eq3}$$

$$\text{Où: } X_{eq3} = X_G + X_{T1} + X_{T2} + X_{L1}$$

* Le régime pendant le défaut :

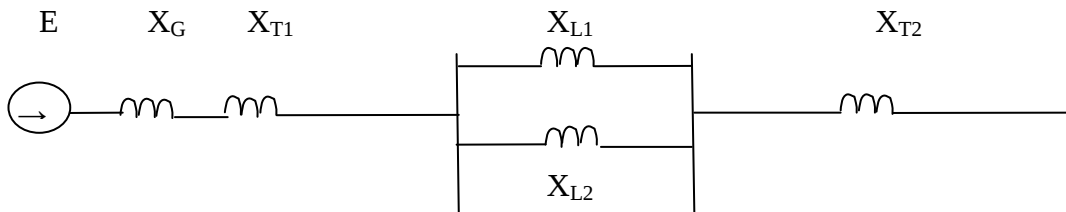


Figure 6.c: Schéma des substitutions de transport d'énergie lors de défaut

La puissance est écrit comme suit:

$$P_{e2} = 0$$

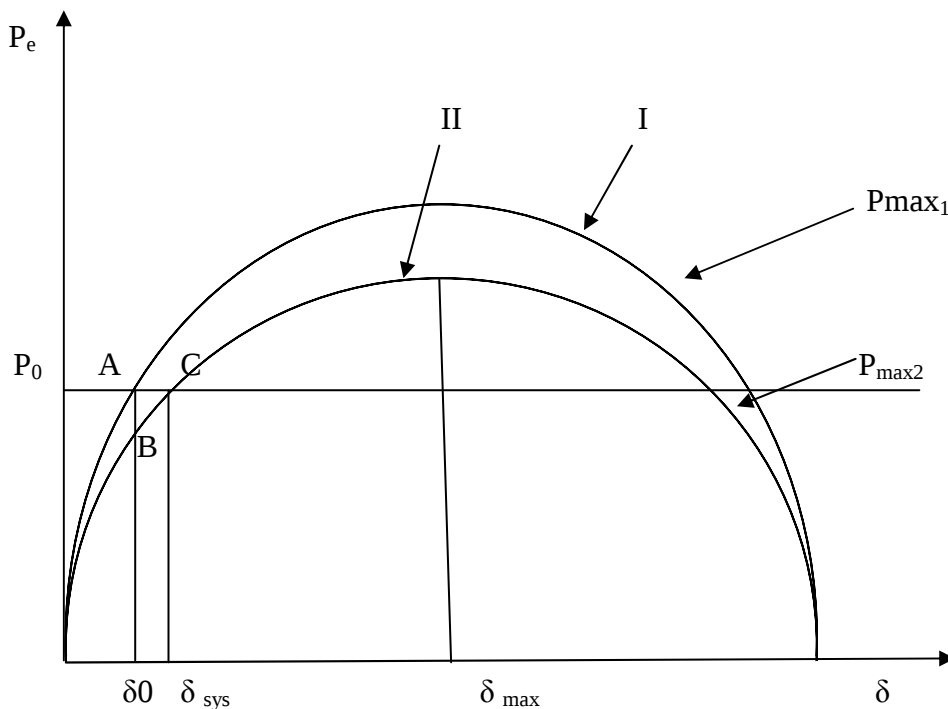


Figure 6.d: Oscillation de la puissance fournie

D'après la courbe on remarque:

La caractéristique I représente le régime normal (initial) du circuit, par contre après la rupture, cette dernière doit correspondre à la nouvelle caractéristique II.

Pour une puissance donnée P_0 et l'angle δ_0 on détermine le point A sur la caractéristique I qui représente la rupture du circuit et à l'instant du rupture du circuit le régime de fonctionnement varie est sera concrétiser par le point B sur la caractéristique II ce qui conditionne la brusque diminution de la puissance de l'alternateur et la puissance de la turbine ne varie pas, dans ce cas reste égale à P_0 par contre l'angle δ garde sa valeur δ_0 nominale, car le vecteur de la f.e.m E de l'alternateur ne peut se déplacer par rapport au vecteur de tension U du système récepteur que lors de la variation de la vitesse de rotation au rotor.

Par suite la vitesse de la machine commence à varie mais la puissance fournie par la turbine reste la même par ce que les régulateurs n'ont pas le temps de réagir sur elle donc l'inégalité des puissances donne naissance à un couple supplémentaire qui permet à l'agrégat-alternateur de s'accélérer.

Ainsi le vecteur **E** commence à tourner plus vite que le vecteur **U** du jeu de barre récepteur, tournant lui à vitesse angulaire ω donc l'apparition du glissement entraîne un accroissement de l'angle δ , et sur la caractéristique de puissance lors de la rupture du circuit, le point **B** se déplacera vers le point **C**, en ce moment la puissance de l'alternateur commence à s'accroître.

Néanmoins, jusqu'au point **C** la puissance de la turbine est encore supérieur à celle de l'alternateur ainsi la vitesse relative de rotation continue à s'accroître. Au point **C** les deux puissances P_m et P_e s'équilibrent de nouveau, cependant le glissement aura atteint sa valeur maximale, par ce que le processus ne s'arrête pas en ce moment, et d'autre part le rotor dépasse le point **C** par inertie.

Lors de l'accroissement ultérieur de l'angle δ la puissance de l'alternateur devienne plus grande que celle de la turbine. La caractéristique II commence à freiner l'agrégat, E tourne à la même vitesse angulaire que le vecteur **U** par conséquent, l'angle δ ne s'accroît plus et aurait atteint sa valeur maximale δ_{max} .

Comme la puissance de l'alternateur est supérieur à celle de la turbine, un couple résistant tend à faire freiner la machine, l'angle δ alors a décroître et le point de fonctionnement situé sur la caractéristique II se déplacera alors dans le sens contraire vers le point **C**, ce dernier point sera de nouveau dépassé par inertie et aux alentours du point **B** l'angle atteindre sa nouvelle valeur minimale, après quoi il commencera à augmenter de nouveau.

Après une série d'oscillations amorties, au point **C** s'obtient un nouveau régime initial ayant pour puissance la puissance nominale P_0 et pour un angle δ_{sys} .

La figure (7) montre le critère pulsatoire de l'angle δ en fonction du temps. Le décroissement par palier de l'amplitude est déterminé par les pertes d'énergie lors d'oscillation de la fréquence de rotation de l'alternateur.

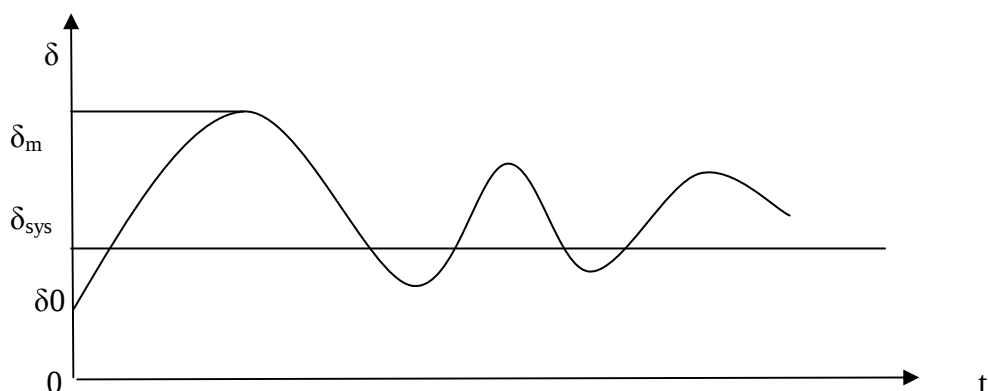


Figure 7: Oscillation de l'angle δ lors de l'ouverture d'une des lignes du circuit de transport d'énergie

Ce passage du nouveau régime stationnaire s'est produit sans aucune complication. En tout cas, il n'y a pas de rupture de la stabilité il faut simplement dire que lors du processus transitoire électromécanique.

L'angle δ aurait atteint une valeur maximale, supérieure à la valeur δ est de nouveau régime stationnaire.

Mais il est possible d'avoir une autre fin pour ce même processus.

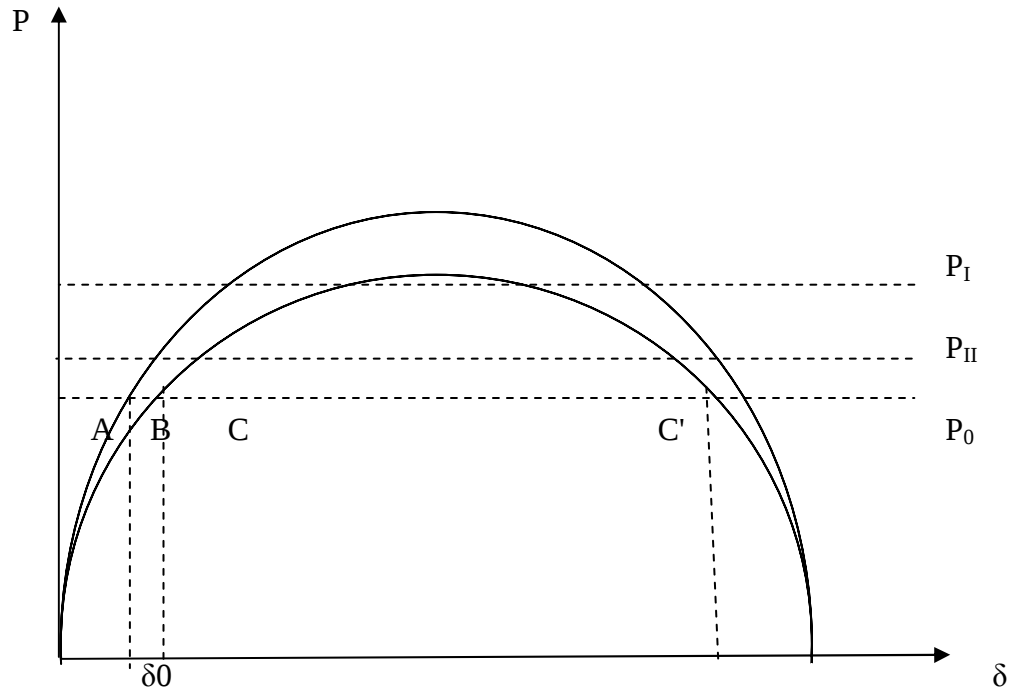


Figure 8: Rupture de la stabilité dynamique lors de la rupture d'une ligne de circuit

Le freinage du rotor à partir du point **C** diminue le glissement, cependant l'angle, en cette phase du processus continue à s'accroître et s'il réussit à atteindre sa valeur critique δ_{crit} au point **C'** sur l'intersection de la branche tombante de la sinusoïde de la puissance de l'alternateur avec la droite représentative de la puissance nominale de la turbine P_0 avant que le glissement commence à augmenter très rapidement et l'alternateur sort du synchronisme

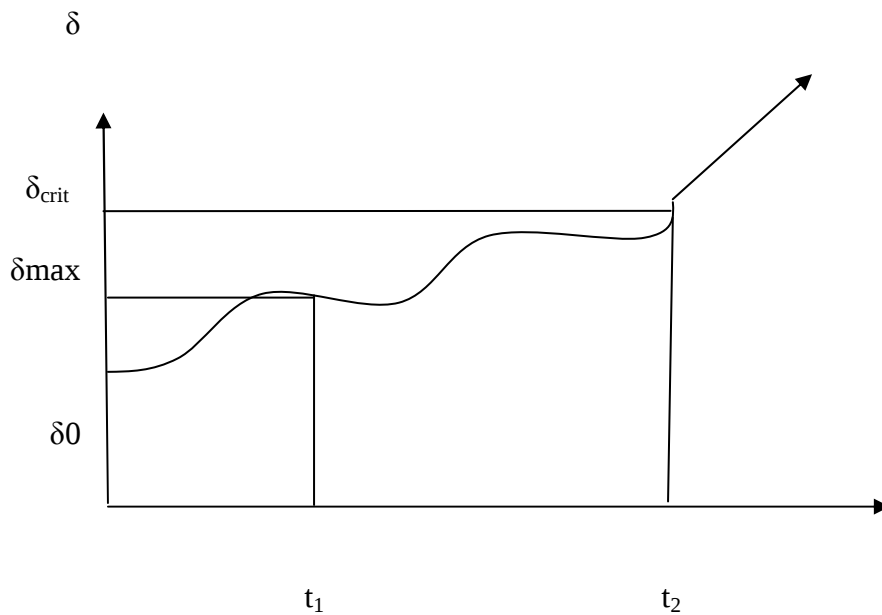


Figure 9: Accroissement de l'angle δ lors de la rupture de la stabilité dynamique

Ainsi si dans le processus de pompage on dépasse le point C, il est alors impossible de retrouver le régime stationnaire. Ainsi, on peut constater qu'en dépit de la possibilité théorique d'existence d'un nouveau régime stationnaire (est une stabilité statique) au point C, le processus de pompage lors du passage vers ce régime peut faire sortir la machine de synchronisme, ce type de rupture est appelé stabilité dynamique.

La principale cause de rupture de la stabilité dynamique des systèmes électriques est en général les courts-circuits, qui entraînent une brusque diminution l'amplitude de la caractéristique de puissance.

-1.5.3. Principales causes des pertes de la stabilité dynamique:

Toutes brusques perturbations du régime de fonctionnement d'un système électrique composé de station, des lignes de transport de l'énergie, et de charge, produit des pompes des machines synchrones (alternateur, moteur, et compensateur).

Lors de mauvaises conditions de fonctionnement l'amplitude des oscillations peut être tellement importante que certaines machines ou une station qui sortent du synchronisme.

La cause de l'apparition des pompes et qu'en général les incidents dans les systèmes de transport s'accompagnent toujours de brusques variations de la puissance fournie au réseau par les stations électriques.

Les régulateurs des moteurs primaires, possèdent une très grande inertie, réagissent avec un certain retard aux variations de puissances, où plus exactement, aux variations de la fréquence de rotation.

Par conséquent, l'égalité entre la puissance fournie par l'alternateur et celle du moteur primaire est rompue et ainsi sur l'arbre des machines apparaissent des moments excédentaires, activant ou freinant les rotors des machines sont déterminées en chaque instant par la valeur absolue et la phase de la f.e.m. De toutes les machines du système les f.e.m varient en fonction du temps, c'est-à-dire à l'inertie des masses tournantes donc des propriétés mécaniques du système, par contre, la variation des valeurs absolues des f.e.m est déterminée par les processus électromagnétiques, automatiques d'excitation et aussi d'autres facteurs.

Les pompages des machines synchrones peuvent apparaître aussi dans les cas suivants: lors de brusque variation de la charge, de la rupture de lignes, de débranchement des transformateurs, de l'alternateur, et lors de courts-circuits. De tous ces incidents, c'est le court-circuit, qui est nécessaire d'être les pires difficultés du point de vue stabilité apparaisse lors du triphasé, celui-ci entraîne une brusque chute de tension, et par conséquent, la liaison entre les alternateurs de la station devient si faible que souvent quand il y a rupture de la stabilité.

Lors de court-circuit monophasé et biphasé, la chute de tension est moindre et les alternateurs se trouvent dans de meilleures conditions de fonctionnement que lors d'un court-circuit triphasé.

Pour des systèmes importants, il est nécessaire d'étudier la sauvegarde de la stabilité lors de court-circuit. Les autres cas de rupture sont de point de vue stabilité dynamique moins dangereux que ces dernières, c'est pour cela notre étude du stabilité dynamique se fera surtout pour le cas de rupture du régime stationnaire ayant pour cause un court-circuit.

-1.5.4. Lois des surfaces:

-1.5.4.1. Débranchement brusque des deux lignes parallèles:

Ces lois sont utilisées pour l'évaluation de la stabilité dynamique.

En considérant le cas simple de fonctionnement quand l'alternateur ou la machine synchrone est équivalent à une station électrique fonctionnent comme récepteur à puissance infinie et tension constante.

L'hypothèse de la tension constante aux bornes du réseau, nous permet de simplifier grandement l'analyse du phénomène.

Pour dire que le réseau est stable, il faut que les deux surfaces hachurées sont égales, c'est-à-dire:

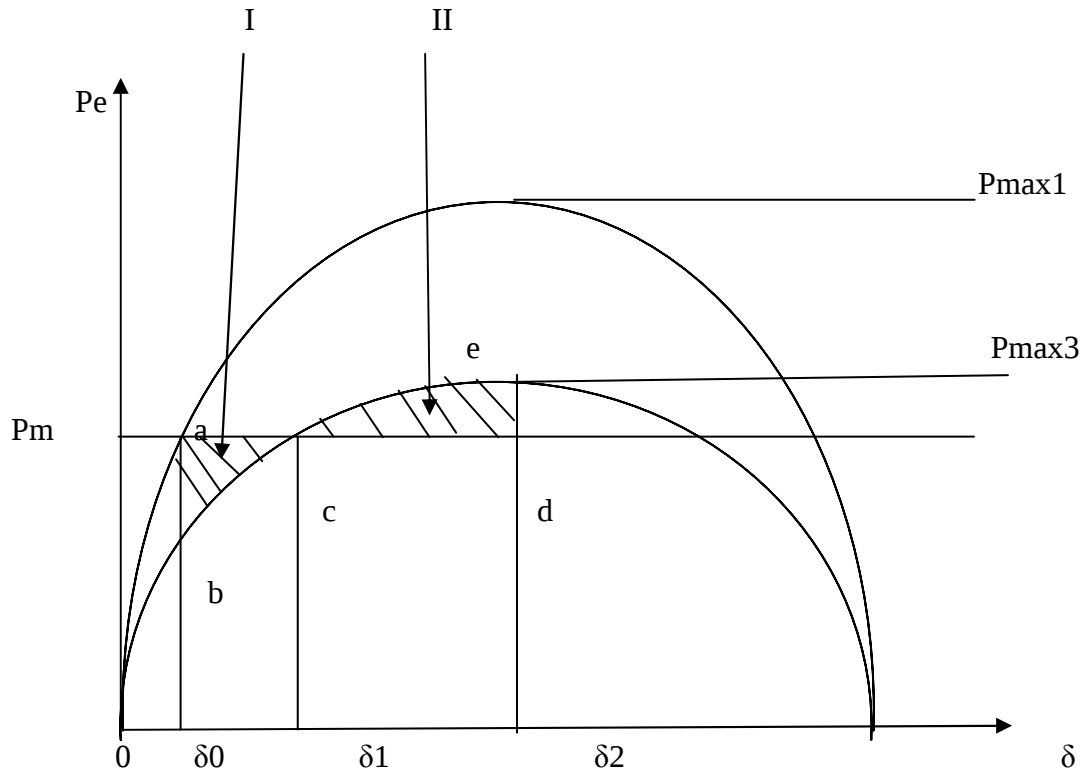


Figure 10: Cas limite de la stabilité dynamique

La surface I, on la note par A_1 sachant que:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_{\max 3} \sin \delta) d\delta$$

$$A_1 = P_m(\delta_1 - \delta_0) - P_{\max 3} (\cos \delta_0 - \cos \delta_1)$$

La surface II, on la note par A_2 sachant que:

$$A_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_e - P_m) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_{\max 1} \sin \delta - P_m) d\delta$$

$$A_2 = P_{\max 1} (\cos \delta_1 - \cos \delta_2) - P_m(\delta_2 - \delta_1)$$

La lois de surfaces égales $A_1 = A_2$

$$\cos \delta_1 = [P_m (\delta_0 - \delta_2) + P_{\max 3} \cos \delta_0 - P_{\max 1} \cos \delta_2] / (P_{\max 3} - P_{\max 1}).$$

Où:

δ_0 : le point de fonctionnement de l'alternateur en régime normal.

δ_1 : l'angle critique.

δ_2 : le point de fonctionnement de l'alternateur en régime après le défaut.

P_m : la puissance mécanique de la turbine.

-1.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les stabilités "statique et dynamique" et leur méthode d'analyse.

Pour tous les réseaux il y a des problèmes qui sont posés à l'exploitant depuis l'apparition des grands réseaux maillés. Beaucoup des méthodes d'évaluations et d'améliorations des marges de la stabilité ont été élaborées pour assurer la continuité de service.

La partie important dans l'analyse de la stabilité est la détermination exacte du temps critique d'élimination du défaut pour laquelle le réseau électrique préserve sa stabilité.

-2.1. Introduction :

Depuis l'introduction du concept de système de transmission flexible à C.A.(FACTS), la technologie s'était déplacée en avant à un rythme croissant à 1990 [2], [3], [4]. Des avantages à long terme très significatifs, la technologie de FACTS, identifiée maintenant sur une base mondiale avec la technologie avancée de la commande et de l'automation globale, représente une nouvelle ère pour des systèmes de transmission .IEEE(Institut of Electrical and Electronic Engineers) et CIGRE a créé un groupe de travail pour des FACTS pour travailler à l'application, aux termes et aux définitions standard de FACTS.

On propose ces définitions qu'ont été inclus dans le dictionnaire d'IEEE. Les définitions et les termes proposés ont été développés selon des objectifs bien étudiés, à savoir :

- * S'adapter avec les termes déjà existents qui traduisent les concepts et les fonctions de ces systèmes.

- * Pour développer un ensemble cohérent des termes, compatibles avec des définitions existantes d'IEEE et de CIGRE [5], [6] et qui ne tombe pas en conflit avec la langue technique utilisée aux Etats-Unis, l'Europe ou ailleurs.

-2.2. FACTS-Terms et Définitions :

Les définitions présentées dans ce qui suit sont divisées en définitions de base et en définitions des convertisseurs qui servent des fonction(s) spécifique(s).

-2.2.1. Définition de base :

-2.2.1.1. Flexibilité de transmission d'énergie électrique :

C'est la capacité de s'adapter à des changements du système de transmission électrique ou à des changements des conditions du travail tout en gardant les régimes permanents et transitoires dans une situation acceptable.

2.2.1.2. Système de transmission flexible à C.A (FACTS) :

Les systèmes de transmission à courant alternatif incorpore l'électronique de puissance et le convertisseur statique pour augmenter la commandabilité et la capacité de transfert de puissance.

2.2.1.3. Convertisseur FACTS :

Est un système basé sur l'électronique de puissance et tout autre équipement statique qui fournissent la commande d'un ou plusieurs paramètres de système de transmission à C.A.

-2.2.2. Définitions des convertisseurs de FACTS :

Les définitions présentées dans ce qui suit sont organisées selon leur ordre de connexion au système de transmission à CA commandé.

-2.2.2.1. Convertisseurs reliés en shunt :**-2.2.2.1.1. Système des Batteries du stockage d'énergie (BESS):**

Est un convertisseur de tension connecté en shunt utilisant système de stockage chimique d'énergie, capable d'ajuster rapidement la quantité d'énergie à la laquelle est fourni ou absorbé d'un système à C.A.

-2.2.2.1.2. Compensateur Statique Synchronique (SSC ou STATCOM) :

Est un alternateur statique synchronique fonctionné comme un compensateur statique de tension connecté en shunt dont le courant de sortie capacitive ou inductive peut être commandé indépendamment de la tension du système à C.A.

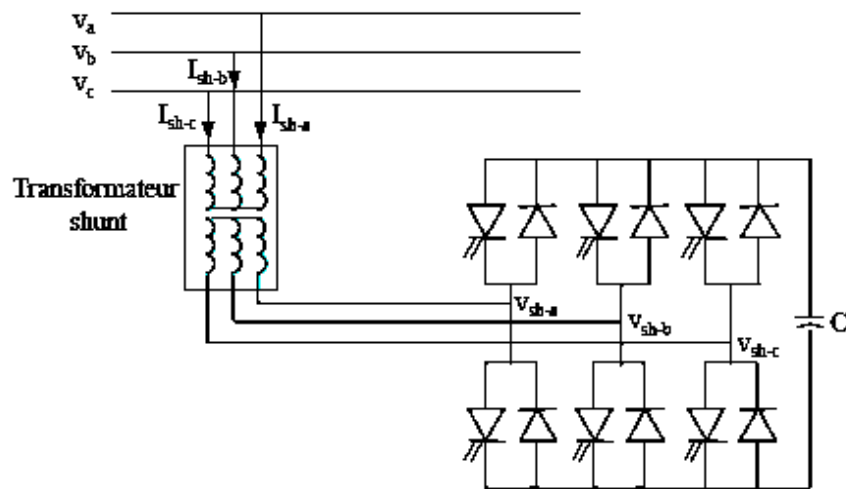


Schéma de base du STATCOM

-2.2.2.1.3. Condensateur Statique (STATCON) :

Ce terme est désapprouvé en faveur du compensateur statique synchrone (SSC ou STATCOM).

-2.2.2.1.4. Générateur Statique Synchrone (SSG) :

Est un convertisseur, de puissance statique commandé, commuté naturellement et alimenté à partir d'une source d'énergie électrique appropriée est fonctionné pour produire un ensemble des tensions multi-phases réglables, qui peuvent être raccordées à un système de C.A afin d'échangée indépendamment la puissance commandable active et réactive.

-2.2.2.1.5. Compensateur Statique de Tension (SVC) :

Est un compensateur statique de tension connecté en shunt, est utilisé pour générer ou absorber la puissance, dont la sortie est connectée pour échanger le courant capacitive ou inductive afin de maintenir ou commander des paramètres spécifiques du système de courant électrique (typiquement tension d'autobus).

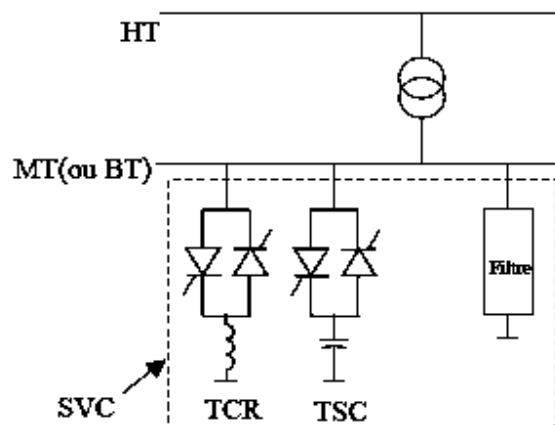


Schéma de SVC

-2.2.2.1.6. Générateur de Tension Statique (SVG) :

Est un dispositif, un équipement, ou un système électrique statique qui est capable de tirer le courant capacitive et/ou inductive commandé à partir d'un réseau électrique et de générer ou d'absorber la puissance réactive, généralement se composé d'un shunt, réactance(s) commandé par thyristor et/ou des condensateurs commutés par thyristor.

-2.2.2.1.7. Système de tension statique (SVS) :

Est une combinaison des différents compensateurs de tension statique ou commandés mécaniquement dont les sorties sont coordonnées.

-2.2.2.1.8. Stockage d'Énergie Magnétique Superconductée (SMES) :

Est un dispositif de stockage électromagnétique d'énergie superconductée contenant les convertisseurs électroniques qui injectent rapidement et/ou absorbent la puissance active et/ou réactive ou commandent dynamiquement l'écoulement de puissance dans un système à C.A.

-2.2.2.1.9. Résistance Freinant Commandée par Thyristor (TCBR) :

Une résistance connecté en shunt et commutée par thyristor, qui est commandée pour faciliter la stabilisation des réseaux électriques ou pour réduire au minimum l'accélération de la puissance produisante d'une centrale pendant une perturbation.

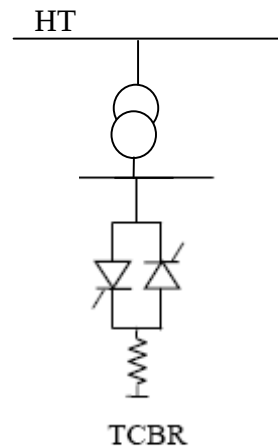


Schéma du TCBR

-2.2.2.1.10. Réactance Commandé par Thyristor (TCR) :

Est un inducteur connecté en shunt, commandé par thyristor dont la réactance efficace est changée d'une façon continue par la commande de conduction partielle de la valve du thyristor.

-2.2.2.1.11. Condensateur Commuté Par Thyristor (TSC) :

Est un condensateur connecté en shunt, commuté par thyristor dont la réactance efficace est changée de la façon TOR (Tout Ou Rien) du fonctionnement de conduction de la valve de thyristor.

-2.2.2.1.12. Réacteur commuté par thyristor (TSR) :

Est un inducteur connecté en shunt, commuté par thyristor dont la réactance efficace est changée de la façon TOR du fonctionnement de conduction de la valve de thyristor.

-2.2.2.1.13. Système Compensateur De Variété (VCS) :

Est une combinaison des différents compensateurs statiques et tournants de variété dont les sorties sont coordonnées.

-2.2.2.2. Convertisseurs Reliés en Série :

-2.2.2.2.1. Compensateur Statique Synchrone Série (SSSC ou S3C) :

Un alternateur statique synchrone a fonctionné sans source électrique d'énergie extérieure comme compensateur série dont la tension de sortie est dans la quadrature, et commandé indépendamment le courant de la ligne, afin d'augmenter ou de diminuer la chute de tension réactive globale à travers la ligne et de commander de l'énergie électrique transmise. Le S3C peut inclure le stockage transitoirement évalué d'énergie ou les dispositifs absorbants d'énergie pour augmenter le comportement dynamique du réseau électrique par compensation provisoire additionnelle de la puissance active, pour augmenter ou diminuer momentanément, la chute active (résistive) de tension globale à travers la ligne.

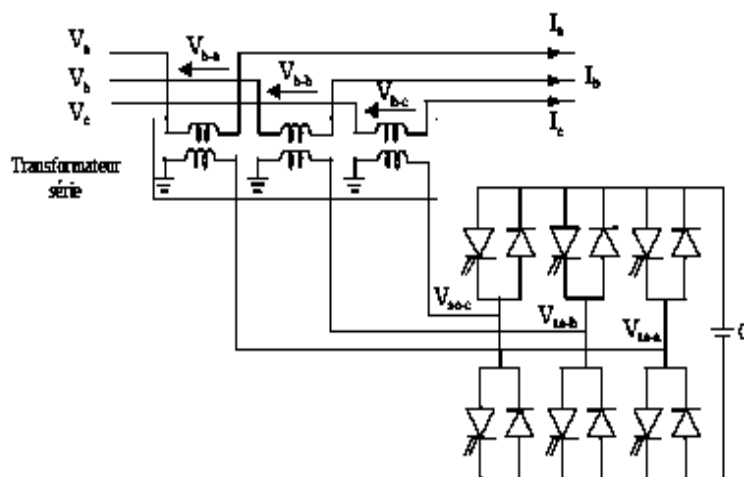
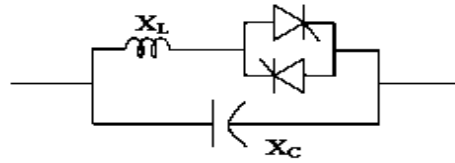


Schéma de base du SSSC

-2.2.2.2.2. Compensateur Série Commandé par Thyristor (TCSC) :

Un compensateur de réactance capacitive qui se compose d'une banque shunt de condensateur en série avec la réactance commandé par thyristor afin de fournir une réactance capacitive série sans coup variable.



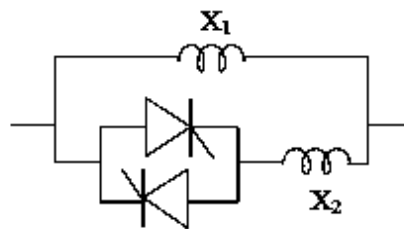
Structure de TCSC

-2.2.2.2.3. Compensation Série Commandé par Thyristor :

Un compensateur d'impédance qui est appliqué en série sur un système de transmission à C.A. pour fournir une commande de la réactance série.

-2.2.2.2.4. Réactance Série Commandée par Thyristor (TCSR) :

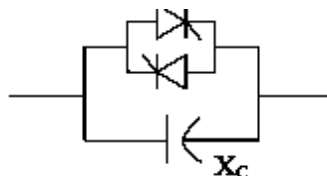
Un compensateur de réactance inductive qui se compose d'une réactance shunt en série avec une réactance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série sans coup variable.



Structure de TCSR

-2.2.2.2.5. Condensateur Série Commuté par Thyristor (TSSC) :

Un compensateur de réactance capacitive qui se compose d'un banc shunt de condensateur en série avec une réactance commutée par thyristor pour fournir une commande par étapes de la réactance capacitive en série.



Structure de TSSC

-2.2.2.2.6. Compensation Série Commutée par Thyristor :

Un compensateur d'impédance qui est appliqué en série sur un système de transmission à C.A. pour fournir une commande par étapes de la réactance série.

-2.2.2.2.7. Réactance Série commutée par Thyristor (TSSR) :

Un compensateur de réactance inductive qui se compose de la réactance shunt en série avec réactance commuté par thyristor afin de fournir une commande par étapes de la réactance inductive série.

-2.2.2.3. Convertisseurs combinés reliés en Série et en Shunt :**-2.2.2.3.1. Convertisseur Interphase De Puissance (IPC) :**

C'est la combinaison de deux ou plus d'SSSC qui sont couplés par une liaison commune DC (dc link), pour faciliter le flux bidirectionnel de la puissance active entre les bornes AC des compensateur SSSC, sont contrôlés pour accomplir une compensation réactive du flux de puissance dans chaque ligne et pour maintenir la distribution de la puissance réactive désirée.

La structure de l'IPC peut aussi contenir un STATCOM couplé à la liaison commune du compensateur pour une compensation shunt.

L'IPC s'accorde au problème de compensation d'un nombre de lignes de transmission dans une sous-station. Les compensateurs capacitatives séries contrôlent la puissance active dans une ligne mais ils sont incapables de contrôler la puissance réactive.

-2.2.2.3.2. Transformateur à Déphasage Commandé par Thyristor (TCPST) :

Un transformateur de déphasage, commute par thyristor ajusté pour fournir un angle de phase rapidement variable.

-2.2.2.3.3. Contrôleur Unifié D'écoulement de Puissance (UPFC) :

Est une combinaison entre STATCOM et SSSC qui sont couplés par l'intermédiaire d'un lien commun de C.C, pour permettre l'écoulement bidirectionnel de la puissance active entre les bornes de sortie série du SSSC et les bornes de sortie shunt du STATCOM

L'UPFC assure à la fois trois compensations (parallèle, série et déphasage). Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et réactive, il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance (tension, impédance, angle de transport).

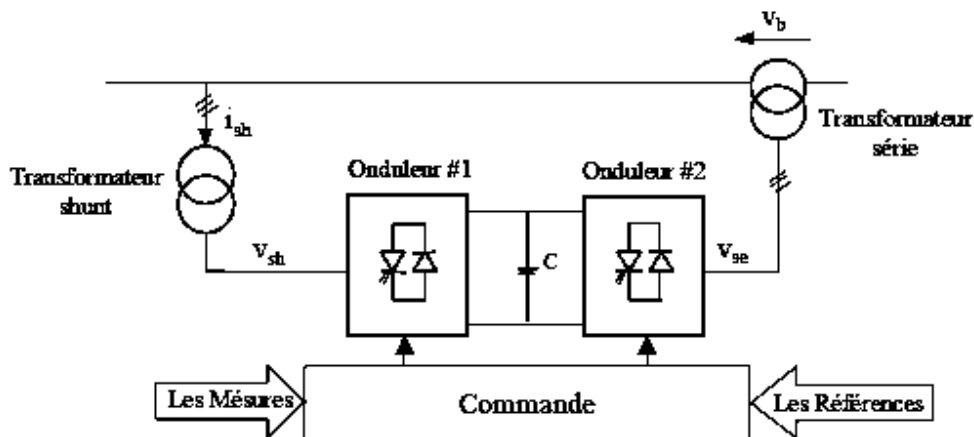


Schéma de base du l'UPFC

-2.2.2.4. D'Autres Convertisseurs :

-2.2.2.4.1. Limiteur de Tension Commandé par Thyristor (TCVL) :

Une varistance d'oxyde métallique commuté par thyristor (MOV) utilisé à limiter la tension à travers ses bornes pendant des états passagers.

-2.3. Statut actuel d'application des convertisseurs de FACTS :

Les convertisseurs de FACTS sont actuellement dans les étapes de maturité. Certains, tels que SVC, STATCOM et TCSC, sont disponibles dans les marchés. Les autres sont dans la phase du développement dans les étapes de démonstration.

-2.3.1. Convertisseurs FACTS Disponibles dans les Commerces :

Les convertisseurs de FACTS pour lesquels commerciaux ou les projets démonstrations existent incluent :

-2.3.1.1. Compensateur Statique de Tension (SVC) :

L'application de SVC pour commander la transmission de tension à commencer vers la fin des années 1970 depuis cette époque, beaucoup de SVCs ont été appliqués dans le monde entier pour la commande de tension et, dans certains cas pour le perfectionnement de stabilité.

-2.3.1.2. Condensateur Série Commuté/Commandé par Thyristor (TSSC/TCSC) :

Depuis 1991 il y a trois installations, aux Etats-Unis d'Amérique (USA), appliqué des commutateurs de thyristor pour obtenir une composition capacitive commandé en série.

La première installation [7] était essentiellement expérimentale en nature, examinant le matériel du condensateur en série commuté par thyristor (TSSC).

Une valve de thyristor a été appliquée à travers une phase d'un module de condensateur en séries compensée capacitive de transmission 345KV sur une ligne de fleuve Kanawa - mate de trouille à la sous-station de fleuve de Kanawa en Virginie Occidentale.

La deuxième installation [8] était un condensateur en série commandé par thyristor (TCSC). Elle se compose du condensateur fixe en shunt avec une réactance commandée par thyristor, fournissant commande sans interruption en série de la compensation capacitive. Elle a été installée en 300 kilomètres, ligne de transmission de 230 kilovolts à la sous-station de Kayenta en Arizona. Les fonctions de cette installation sont d'augmenter la puissance transférée à la limite thermique de la ligne et d'évaluer la capacité de TCSC pour commander l'écoulement de puissance, ligne impédance, oscillations électromécaniques de puissance d'humidité, et atténuent la résonance synchrone (SSR).

La troisième installation, à la sous-station de Slatt en Orégon, est également un TCSC [9]. Le Slatt TCSC est composé de six modules identiques de condensateur commandé par thyristor connecté en série.

-2.3.1.3. Compensateur Statique Synchrone (STATCOM) :

L'installation de STATCOM la plus récente est ± 100 Mvar, le STATCOM [10] qui est installée en novembre 1995 à la sous-station de Sullivan (500 kilovolts/161 kilovolts) en ville de Johnson.

En fonction de la ± 100 Mvar le STATCOM fournira la commande de tension à la tension d'autobus de 161 kilovolts pendant l'habillage quotidien pour réduire au minimum l'activation dessus du commutateur de robinet de charge des 500 kilovolts/161 kilovolts de transformateur.

En outre, le STATCOM fournira à appui proportionné de tension de 161 kilovolts et de 500 kilovolts aux autobus pendant la lumière et les conditions de charge maximale.

-2.3.2. Convertisseurs de FACTS Actuellement En cours de Développement :**-2.3.2.1. Contrôleur Unifié D'écoulement de puissance (UPFC) [11] :**

Le premier UPFC à grande échelle se composera d'une source inverseur shunt de tension (STATCOM) évalué à ± 160 MVA pour fournir ± 150 Mvar appuis de puissance réactive et 50 MW de puissance active à travers par le lien de C.C exigé dans le plein mode de fonctionnement d'UPFC. La source inverseur série de tension est évalué ± 160 MVA pour fournir déphasage et/ou des compensations séries.

Le STATCOM et le sous-ensemble série se composeront d'une source de tension de 160 MVA multi-impulsion, inverseur d'harmonique neutralisé GTO et interface magnétique. L'UPFC sera installé sur la ligne de transmission de 138 kilovolts à la sous-station d'Inez au Kentucky. L'installation est projetée pour être accomplie vers la fin de 1997.

-2.3.3. Futur Convertisseur de FACTS :

. Les convertisseurs de FACTS qui sont attendus être disponibles dans l'avenir prévisible incluent :

* Transformateurs de déphasage commandé par thyristor (TCPST) [12].

* Compensateur statique synchrone série (SSSC ou S3C) [13].

* Convertisseur interphase de puissance (IPC) [14].

-2.4. Conclusion :

Ce chapitre présente des termes et définitions proposées des FACTS. Les définitions proposées de telle sorte qu'en fait un ensemble des termes et définitions compatibles avec ceux qui sont existents dans IEEE et dans CIGRE, et qui ne tombe pas (C'est –à-dire cet ensemble) avec les langages techniques utilisés.

Ce chapitre a également présenté le statut actuel des convertisseurs des FACTS, disponible dans le commerce, actuellement en cours de développement, et de ceux à développer à l'avenir.

-3.1. Introduction :

Le concept "Contrôleur Unifier de l'Ecoulement de Puissance" (UPFC) a été proposé en 1990 par Gyugyi [15], [16], [17]. L'UPFC a été construit pour le contrôle en temps réel et la compensation dynamique des systèmes de transmissions alternatifs; fournissant des multifonctions flexibles pour résoudre sélectivement ou simultanément tous les paramètres effectuant le flux de puissance sur la ligne de transmission (tension, impédance, angle de phase).

-3.2. Arrangement du circuit :

La figure (3-1) représente Contrôleur Unifier de l'Ecoulement de Puissance. Sur la partie gauche on reconnaît l'onduleur parallèle (1) branché sur le réseau à travers le transformateur (2) dont le rôle est de maintenir la tension constante sur le condensateur (3) et sur la partie droite on voit un onduleur, appelé onduleur série (4) branché sur le réseau au moyen d'un transformateur série (5). Cet onduleur est alimenté par la tension U_{dc} et permet d'injecter une tension en série avec la ligne à travers le transformateur série, cette tension additionnelle U_{pq} est variable en module et en phase afin de maintenir la tension V_r constante[17].

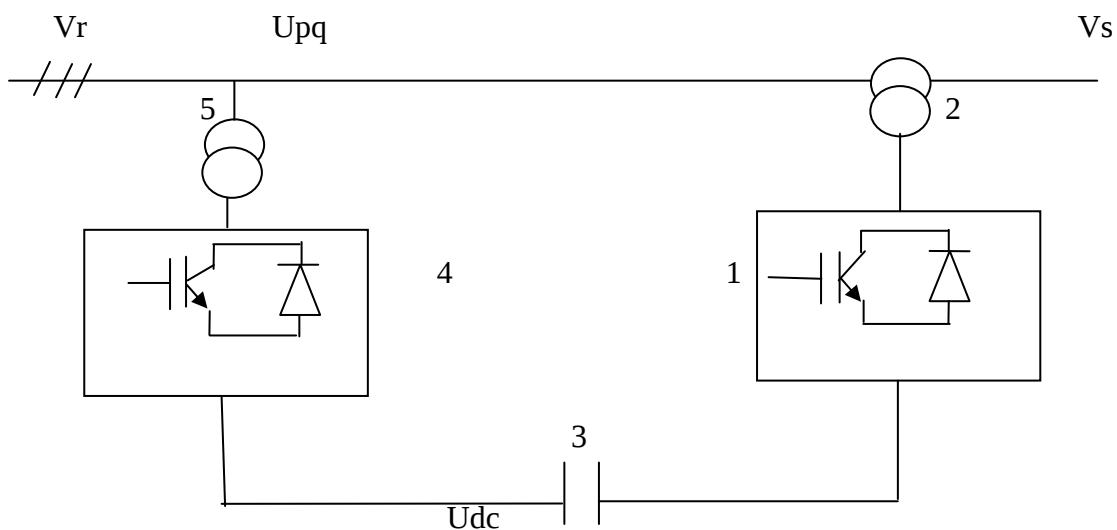


Figure 3.1: Schéma bloc du Contrôleur Unifier de l'Ecoulement de Puissance

-3.3. Opération de l'UPFC :

Le convertisseur (2) dans la figure 3.1, assure la fonction essentielle de l'UPFC en injectant une tension réglable en module U_{pq} ($0 \leq U_{pq} \leq U_{pq_{max}}$) et en phase φ ($0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$) à la fréquence du système en série avec la tension de la ligne par un transformateur. La tension injectée est considérée comme une source synchrone de tension.

Le courant de la ligne de la transmission circule à travers cette source résultant en une puissance active et réactive échangées entre le système alternatif et cette source [17]

La puissance active échangée au point de connexion alternative (point d'insertion du transformateur) est convertit en une puissance continue (DC Link). Cette puissance agit comme une puissance demandée positive ou négative. La puissance réactive échangée au point de connexion alternative est générée par le convertisseur.

La fonction de base du convertisseur (1) est d'absorber la puissance active demandée par le convertisseur (2) à la tension continue (DC Link). Cette puissance de la liaison continue est convertie en suite de puissance alternative et couplée à la ligne de transmission par le transformateur shunt. S'il est désire ; le convertisseur (1) peut généré ou absorbé de la puissance réactive contrôlable et par conséquent il peut fournir une compensation shunt et indépendante de la puissance réactive de la ligne de transmission. Il est important de noter qu'il y a une boucle fermée pour le flux de la puissance active exprimée par l'action d'injection de la tension série à travers le convertisseur (1) et (2) retournant à la ligne. La puissance réactive correspondante échangée est absorbée localement par le convertisseur (2) par conséquent elle ne circule pas à travers la ligne.

Donc le convertisseur (1) peut être contrôlé pour échanger la puissance réactive avec la ligne indépendamment de la puissance réactive échangée par le convertisseur (2) c'est-à-dire qu'il n'y a pas de puissance réactive circulant à travers l'UPFC.

-3.4. Fonction de base de l'UPFC :

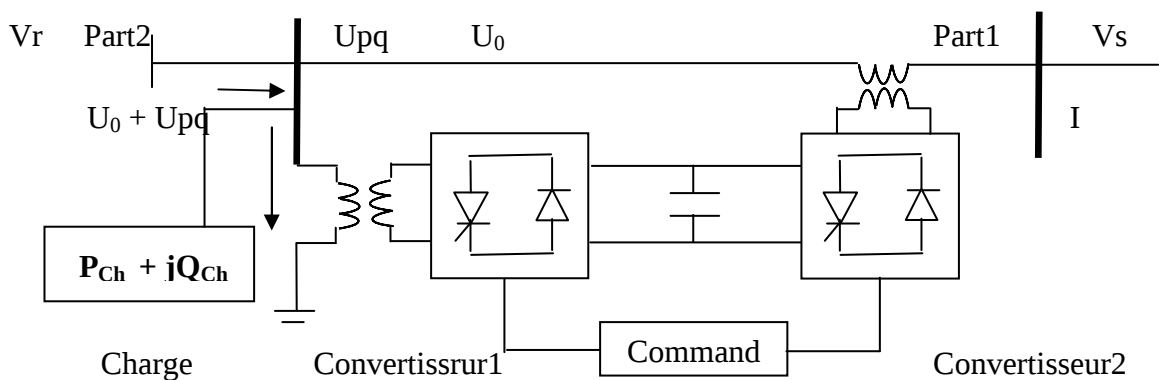


Figure 3.2: Système UPFC à tester

Du point de vu puissance, le fonctionnement de l'UPFC basé sur la compensation shunt et série de la puissance réactive et régulation de l'angle de charge.

L'UPFC peut accomplir plusieurs fonctions de contrôle en ajoutant la tension U_{pq} avec une amplitude et angle de phase appropriée à la tension U_0 [18], [17]. Les fonctions de base de contrôle de l'UPFC sont illustrées à la figure (3-3).

-3.4.1. Régulation de tension :

L'UPFC fonctionnera comme un régulateur de tension pur si la tension insérée est en phase avec la tension U_0 (figure (3.3.a) [18]).

-3.4.2. Compensation série :

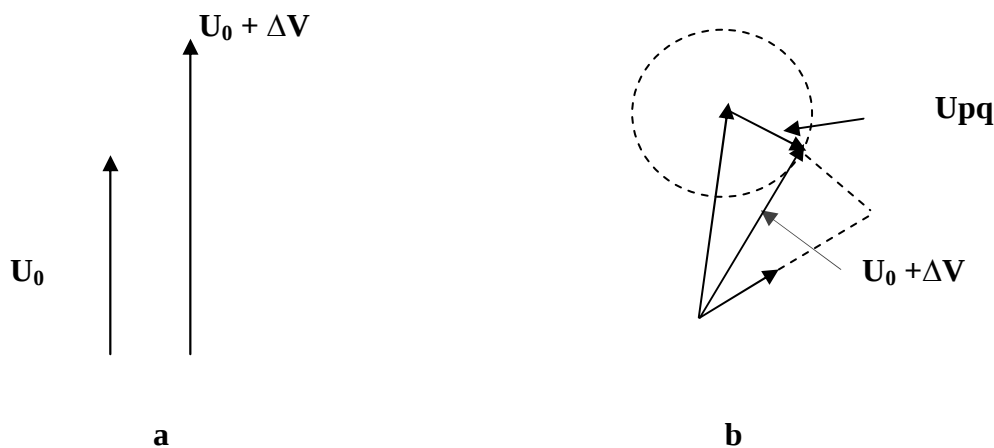
L'UPFC fonctionnera comme un compensateur série (où d'impédance) où ($U_0 = U_{pq}$) si la tension U_{pq} est en quadrature avec le courant de la ligne I (figure (3.3.b) [18]).

-3.4.3. Régulation de l'angle de charge :

L'UPFC fonctionnera comme régulateur de l'angle de phase ou ($U_{pq} = U_0$) si la tension U_{pq} est injectée avec un angle variable (figure (3.3.c) [18]).

-3.4.4. Multifonctions de contrôle :

Il est possible à l'UPFC d'accomplir les trois fonctions de contrôle c'est-à-dire régulation de tension, compensation série, et régulation de l'angle de phase simultanément. (Figure (3.3.d) [18]).



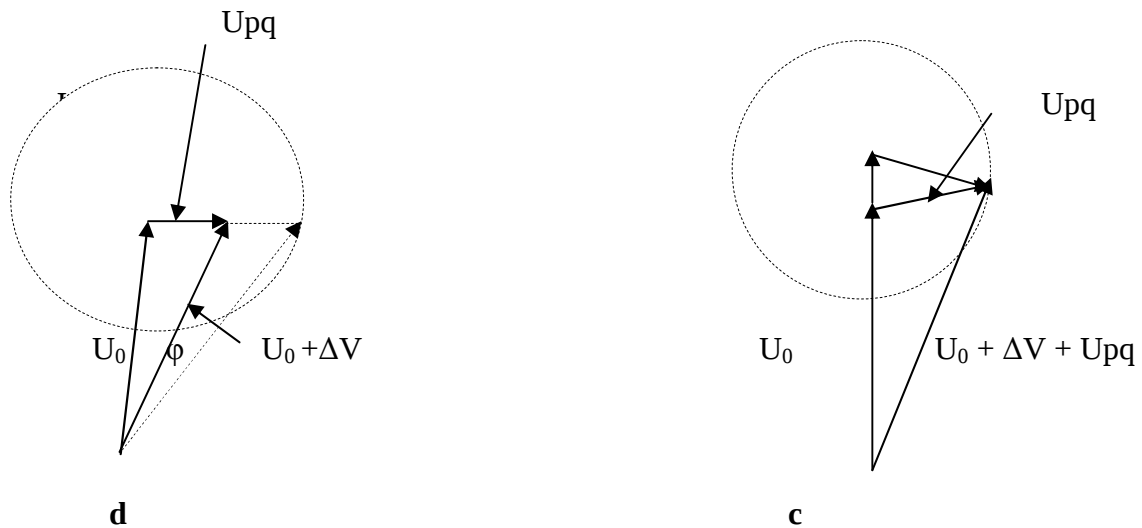


Figure 3.3: Fonction de contrôle de l'UPFC

-3.5. Principe de contrôle :

Considérons le cas simple d'un système de puissance à deux jeux de barre avec une source de tension V_s et tension d'arrivée V_r et une impédance de ligne (figure (3.4.a)).

La figure (3.4.b) représente le diagramme vectoriel des tensions du système avec un angle de transmission δ avec $|V_r| = |V_s| = |V|$.

La puissance transmise par la ligne $P (V^2 \sin \delta / X)$ et la puissance réactive $Q = Q_s = Q_r$.
 $(Q = V^2(1 - \cos \delta) / X)$ sont fournies au point d'arrivée en fonction de δ .

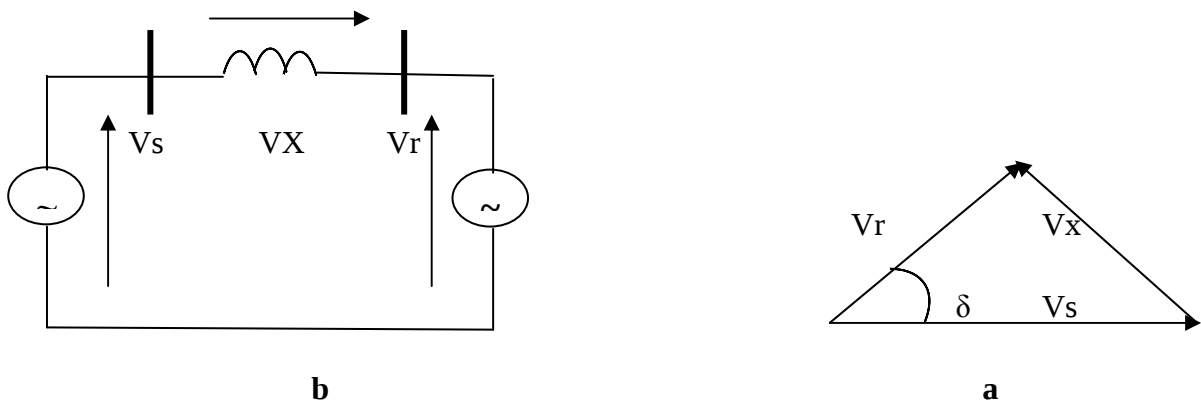


Figure 3.4: Système de puissance à deux jeux de barres

Considérons la figure (3.5), le système UPFC inséré au système de puissance de la figure (3.4). L'UPFC est représenté par une source de tension contrôlable en module et en phase, en série avec la ligne, qui peut générer ou absorber la puissance réactive. Mais la puissance active qu'il échange avec la ligne doit être absorbée ou générée par l'UPFC au point de départ.

L'UPFC est représenté par un vecteur U_{pq} ayant le module U_{pq} ($0 \leq U_{pq} \leq U_{pq_{\max}}$) et l'angle φ ($0 \leq \varphi \leq 360^\circ$).

Comme indique la figure(3.5), le courant de la ligne est représenté par le vecteur I circulant à travers la source U_{pq} , il en résulte l'échange de puissance active et réactive.

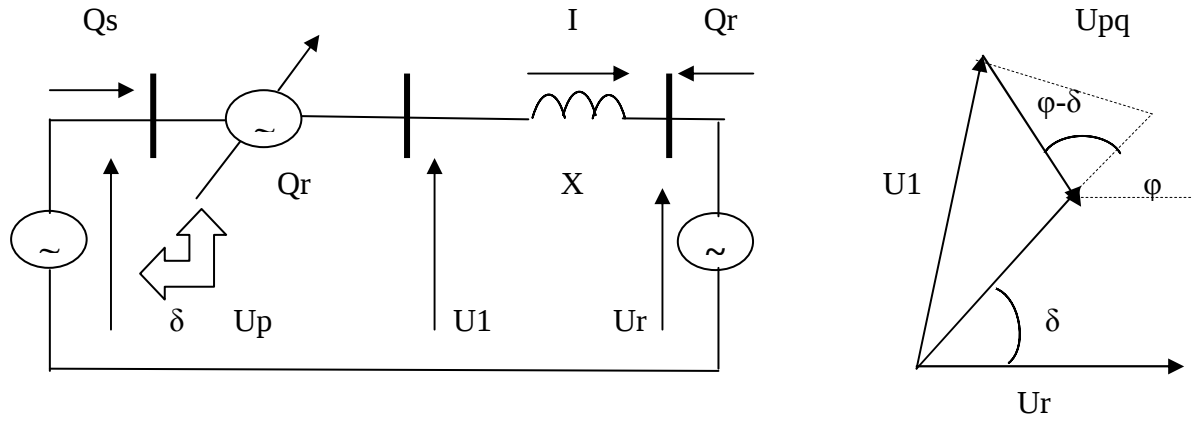


Figure 3.5 :L'UPFC inséré à une système de puissance à deux jeux de barres

La figure (3.5) montre que la ligne de transmission voit la tension $V_s + U_{pq}$ comme source de tension donc il est clair que l'UPFC influe sur la tension à travers la ligne de transmission (en module et en phase), par conséquent on peut dire que l'UPFC est capable de contrôler la puissance active transmise ainsi que la puissance réactive demandée par la ligne pour n'importe quelle angle de transmission entre les tensions de départ et d'arrivée.

-3.6. Modélisation de l'UPFC :

Le circuit simplifié du système de contrôle et de compensation UPFC est représenté par la figure (3.6)

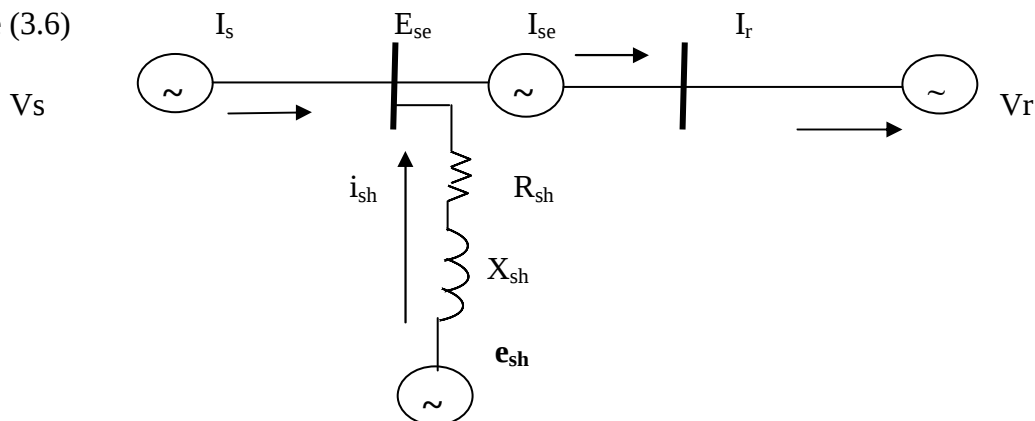


Figure 3.6 : Circuit équivalent simplifié de l'UPFC

La modélisation de ce circuit est basée sur les hypothèses suivantes:

1-Les trois tensions de source alternative sont équilibrées.

2-Tous les interrupteurs sont supposés idéaux.

-3.6.1. Modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveaux :

-3.6.1.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux

L'onduleur triphasé à trois niveaux utilisé, se décompose en trois bras. Chaque bras est composé de quatre interrupteurs en série et deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche. Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue, de force électromotrice $U_{c1}+U_{c2}$. Ces deux générateurs U_{c1} , U_{c2} étant connectés entre eux en un point noté M. Le point M est connecté avec les deux diodes.

La figure 3.7 fournit une représentation schématique de cet onduleur.

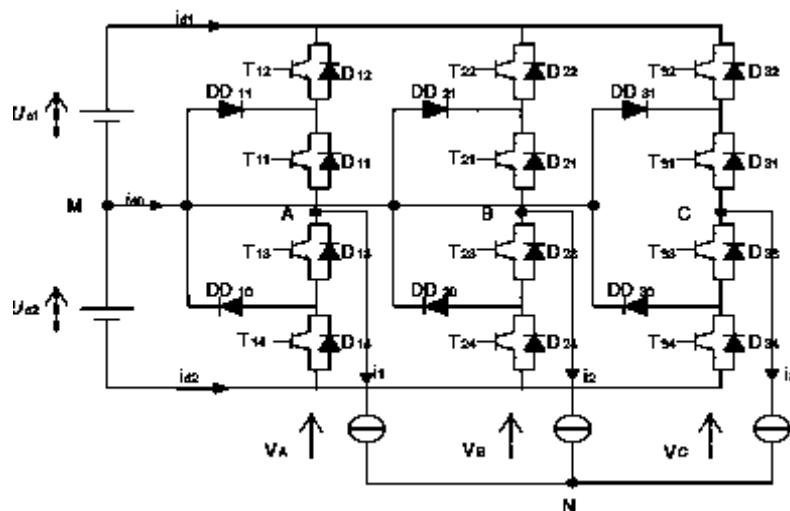


Figure 3.7 : Onduleur triphasé à trois niveaux

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur multi- niveaux, on représente chaque paire transitoire-diode par un seul interrupteur bidirectionnel TDks (figure 3.8), et vu la symétrie de sa structure, on fait le raisonnement sur un seul bras (figure 3.9).

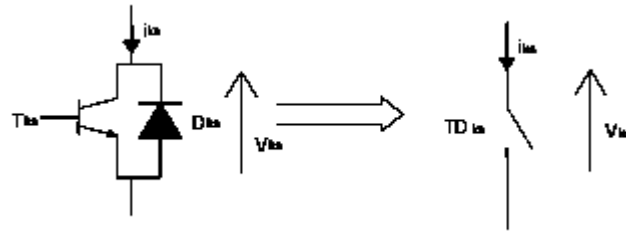


Figure 3.8 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor-diode.

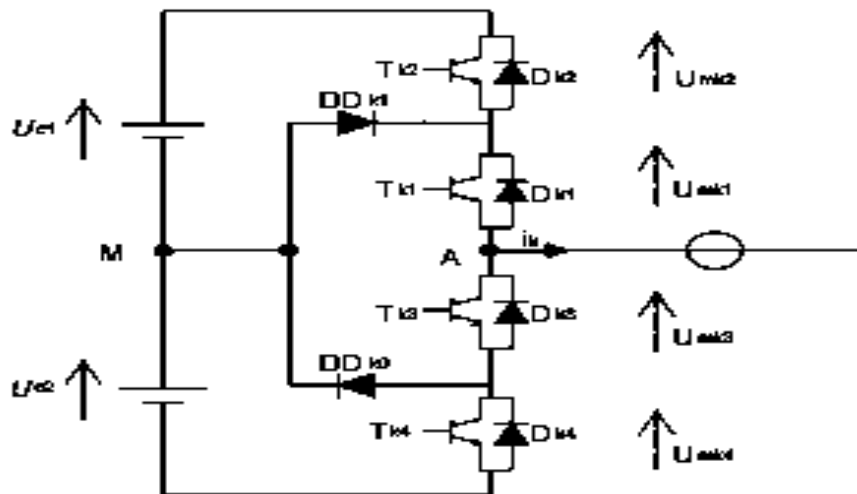


Figure 3.9 : Un bras de l'onduleur à trois niveaux.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de :

- La commande externe Bks (l'ordre d'amorçage ou de blocage des semi-conducteurs bicommandables Tks).
- Une commande interne définie par les signes des courants du bras et des tensions aux bornes des semi-conducteurs.

-3.6.1.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

-3.6.1.2.1. Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux :

Chaque bras est équivalent à un interrupteur à trois positions permettant d'obtenir en sortie trois niveaux de tension U_{c1} , 0 et $-U_{c2}$.

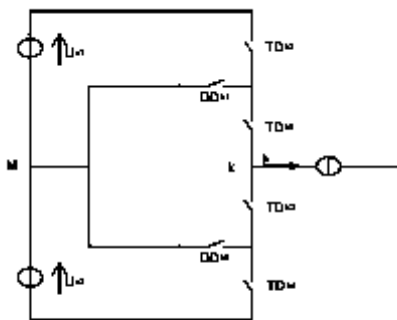
La structure de cet onduleur de tension consiste à créer un point sur l'étage de tension continue tel que $U_{c1} + U_{c2} = E$, permettant de générer des créneaux d'amplitudes $-E/2$, 0 et $E/2$ dont la combinaison de ces niveaux permet d'avoir un fondamental plus proche de la sinusoïde qu'avec la structure classique à deux niveaux.

Le bras d'un onduleur présente cinq configurations possibles, comme le montre la figure 3.10.

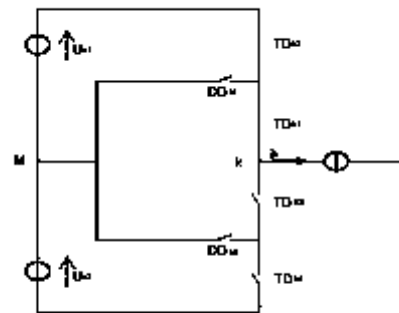
Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau 3.1 (V_k potentiel au noeud k par rapport à l'origine des potentiels M).

La configuration	La grandeur électrique qui la caractérise
E_0	$I_k=0$
E_1	$V_k=U_{c1}$
E_2	$V_k=0$
E_3	$V_k=-U_{c2}$
E_4	$V_k=0$

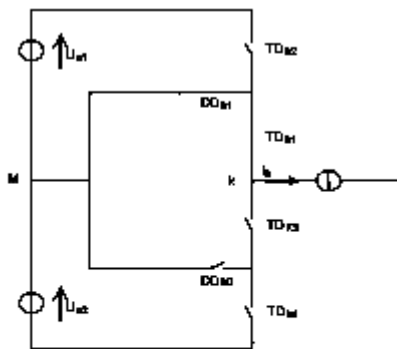
Tableau 3.1 : Grandeurs électriques caractérisant chaque configuration possible d'un bras k de l'onduleur triphasé à trois niveaux.



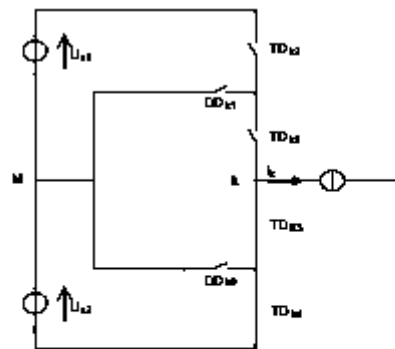
La configuration E_0



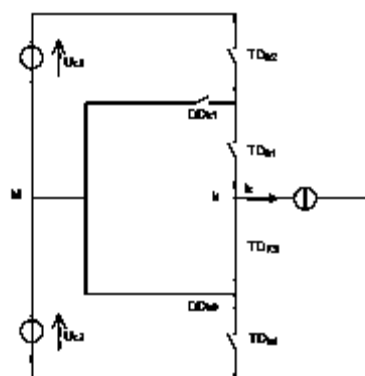
La configuration E_1



La configuration E_2



La configuration E_3



La configuration E3

Figure 3.10 : Les cinq configurations possibles d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux.

-3.6.1.2.2. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux :

Un convertisseur est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur [19].

Pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre les configurations ne dépendent plus des commandes internes (grandeurs électriques), mais uniquement des commandes des transistors (commande externe).

Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée.

Pour un onduleur en mode commandable, on définit la commande complémentaire suivante (voir figure 3.9).

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \dots\dots\dots 3.1$$

Avec B_{ks} la commande du transistor T_{ks} du bras k

-3.6.1.2.3. Fonctions de connexion des interrupteurs :

On définit la fonction de connexion de chaque interrupteur TD_{ks} comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci :

$$\begin{cases} F_{ks}=1 & \text{si l'interrupteur TD}_{ks} \text{ est fermé} \\ F_{ks}=0 & \text{si non} \end{cases} \dots\dots\dots 3.2$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k, on trouve :

$$\begin{cases} F_{k1}=1-F_{k4} \\ F_{k2}=1-F_{k3} \end{cases} \dots\dots\dots 3.3$$

-3.6.1.2.4. Fonctions de connexion des demi-bras :

Pour l'onduleur à trois niveaux, on définit en plus la fonction de connexion d'un demi-bras notée F_{km}^b

Où k est le numéro du bras.

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi-bras du bas constitué de } T_{k3} \text{ et } T_{k4} \\ 1 & \text{pour le demi-bras du haut constitué de } T_{k1} \text{ et } T_{k2} \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \dots\dots\dots 3.4$$

-3.6.1.2.5. Fonction de conversion :

Les potentiels aux nœuds A, B et C de l'onduleur par rapport au point milieu M s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{C1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{C1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{C1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{C2} \end{cases} \dots\dots\dots 3.5$$

En introduisant les fonctions de connexion des demi-bras, on aura :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b \cdot U_{C1} - F_{10}^b \cdot U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21}^b \cdot U_{C1} - F_{20}^b \cdot U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31}^b \cdot U_{C1} - F_{30}^b \cdot U_{C2} \end{cases} \dots\dots\dots 3.6$$

Les tensions composées s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \dots\dots\dots 3.7$$

D'où le système matriciel suivant exprimant ces tensions composées au moyen des fonctions de connexion des demi-bras :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad \dots\dots\dots 3.8$$

Les tensions simples sont déduites comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad \dots\dots\dots 3.9$$

Les courants d'entrée i_{d1} et i_{d2} sont exprimés en fonction des courants de charge i_1 , i_2 et i_3 par les relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{22} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{32} \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{13} \cdot F_{14} \cdot i_1 + F_{23} \cdot F_{24} \cdot i_2 + F_{33} \cdot F_{34} \cdot i_3 \end{cases} \quad \dots\dots\dots 3.10$$

D'où

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad \dots\dots\dots 3.11$$

Cette relation montre, que pour l'onduleur à trois niveaux, tout se passe comme si le courant i_{d1} était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et i_{d2} le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du bas.

Le courant i_{d0} est lié aux courants de charge comme suit :

$$i_{d0} = F_{11} \cdot F_{13} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{23} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{33} \cdot i_3 \quad \dots\dots\dots 3.12$$

Des relations (3.2) et (3.12), on déduit que i_{d0} s'écrit sous la forme :

$$i_{d0} = i_1 + i_2 + i_3 - i_{d1} - i_{d2} \quad \dots\dots\dots 3.13$$

D'où

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) \cdot i_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) \cdot i_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \cdot i_3 \quad \dots\dots\dots 3.14$$

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, le vecteur des grandeurs d'état est $[U_{c1} \ U_{c2} \ i_1 \ i_2 \ i_3]^T$ et ses entrées internes sont $[V_A \ V_B \ V_C \ i_{d1} \ i_{d2} \ i_{d0}]^T$ ou $[U_{AB} \ U_{BC} \ U_{CA} \ i_{d1} \ i_{d2} \ i_{d0}]^T$

On définit la matrice de conversion simple qui nous permet de déduire le vecteur des grandeurs internes en fonction du vecteur d'état :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ id1 \\ id2 \\ id0 \end{bmatrix} = [N(t)] \cdot \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 3.15$$

Avec

$$[N(t)] = \begin{bmatrix} \frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & \frac{2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b + 2F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & \frac{-F_{10}^b + 2F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b - F_{21}^b + 2F_{31}^b}{3} & \frac{-F_{10}^b - F_{20}^b + 2F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad \dots\dots 3.16$$

De même, on définit la matrice de conversion composée comme suit :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ id1 \\ id2 \\ id0 \end{bmatrix} = [M(t)] \cdot \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 3.17$$

Avec

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{21}^b) & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{21}^b - F_{31}^b) & -(F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{31}^b - F_{11}^b) & -(F_{30}^b - F_{10}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1-F_{11}^b-F_{10}^b) & (1-F_{21}^b-F_{20}^b) & (1-F_{31}^b-F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad \dots 3.18$$

Après avoir défini les matrices de conversion simple et composée respectivement $[N(t)]$ et $[M(t)]$, on peut présenter le modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux, en mode totalement commandable comme suit :

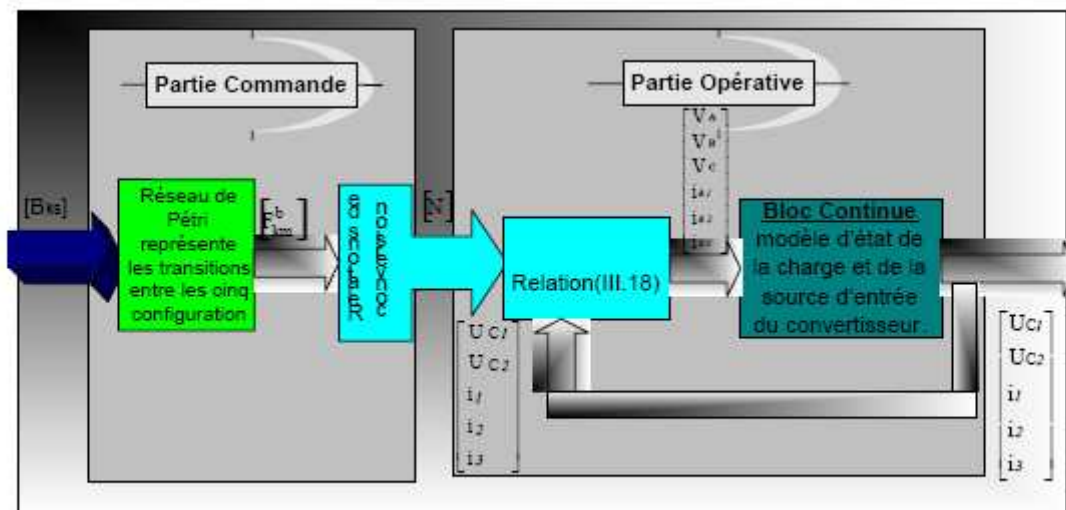


Figure 3.11 : Modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux.

On distingue :

- La partie commandable : représentée par les équations qui définissent le fonctionnement de l'onduleur triphasé en mode commandable. Cette partie génère la matrice de conversion.
- La partie opérative : constituée d'un bloc continu et d'un bloc discontinu :
 - Un bloc discontinu délivrant les entrées internes générées par le convertisseur à partir de ses variables d'état et de la matrice de conversion.
 - Un bloc continue représentant le modèle de la charge de l'onduleur et de la source de tension d'entrée.

-3.6.1.2.6. Stratégie de commande de l'onduleur triphasé à trois niveaux:

-3.6.1.2.7. Commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses :

Pour améliorer le taux d'harmoniques des tensions de sortie d'un onduleur à trois niveaux, on utilise deux porteuses bipolaires identiques déphasées d'une demi période de hachage $1 / (2F_p)$ l'une de l'autre (F_p : fréquence des porteuses). On distingue plusieurs types de porteuses qui sont:

- Triangulaire,
- Porteuse en dents de scie unipolaire ou bipolaire.

La commande triangulo-sinusoïdale avec deux porteuses est caractérisée par les deux paramètres : l'indice de modulation m et le coefficient de réglage r .

-3.6.1.2.8. Principes de la commande :

Le principe de la commande triangulo-sinusoïdale consiste à comparer des tensions des références à deux porteuses triangulaires ou en dent de scie (figure 3.12) [19].

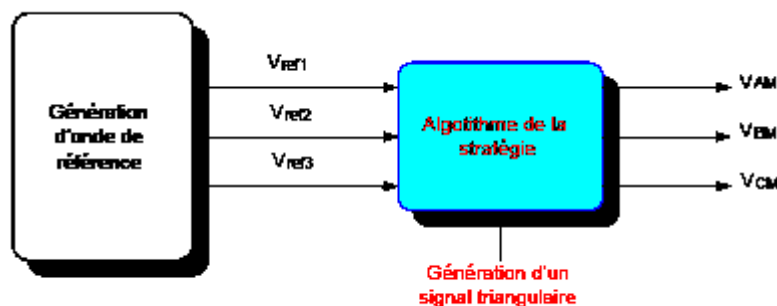


Figure 3.12: Principe de la technique triangulo-sinusoïdale.

-3.6.1.2.9. Caractéristique de la tension de référence :

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé utilisé, qui permettent d'avoir un système triphasé équilibré direct ou inverse sont données par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{ref1}(t) = V_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ V_{ref2}(t) = V_m \cdot \sin(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3} \cdot m \cdot arch e) \\ V_{ref3}(t) = V_m \cdot \sin(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3} \cdot m \cdot arch e) \end{cases} \dots\dots\dots 3.19$$

L'utilité de la variable "marche" permet à onduleur triphasé commandé par cette technique un fonctionnement, dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse.

-3.6.2. Modélisation de redresseur à trois niveaux :

-3.6.2.1. Modélisation du redresseur :

La structure de l'onduleur à trois niveaux est réversible par sa conception. Ceci lui permet de fonctionner aussi en redresseur. On adoptera la convention génératrice pour la source de courant et la convention réceptrice pour la source de tension.

La figure 3.13 représente la structure générale du redresseur de courant triphasé à M.L.I (modélisation large impulsion) à trois niveaux à structure NPC (nature point commun). Son rôle est de générer la tension de sortie continue aux bornes des capacités à partir d'une source alternative triphasée.

Le modèle de connaissance et de commande de ce redresseur est le même que celui élaboré au chapitre 3 pour l'onduleur de tension à trois niveaux, en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources du redresseur.

Ce redresseur va être commandé par la M.L.I, c'est-à-dire les grandeurs de sortie UC1 et UC2 seront modulées pour générer les grandeurs d'entrée VA, VB et VC.

Pratiquement les paramètres du réseau (résistance et inductance) sont difficiles à identifier.

Généralement, on ajoute en série un filtre d'entrée R.L de valeurs plus importantes pour pouvoir négliger les paramètres du réseau. L'inductance dans le filtre permet également de respecter l'alternance des sources et de filtrer les harmoniques des courants du réseau.

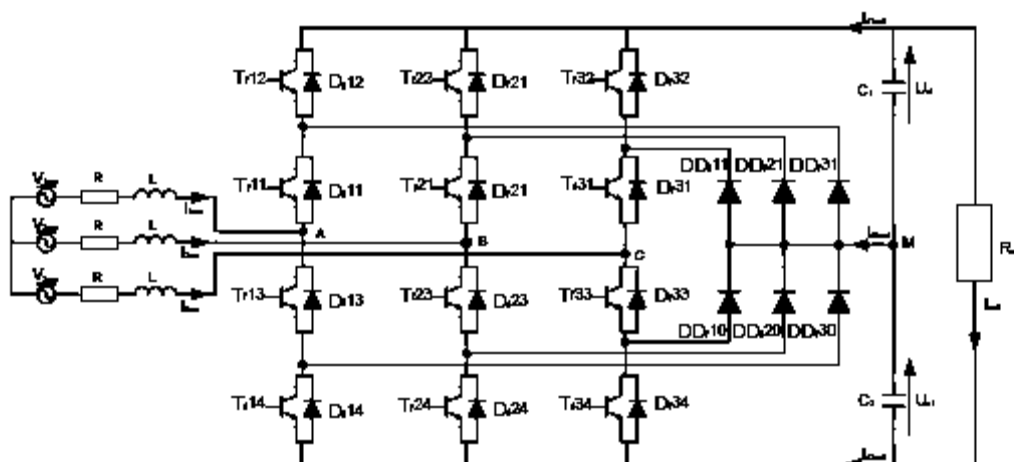


Figure 3.13: Redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure NPC.

-3.6.2.2. Commande par hystérésis en courant appliqué au redresseur :

Toutes les stratégies de commande possibles utilisées avec l'onduleur triphasé à trois niveaux [20], [19], [21] sont aussi utilisables pour la commander du redresseur triphasé à trois niveaux [22].

Dans le cas de notre chapitre, nous avons choisi la stratégie de commande par hystérésis pour commander notre redresseur, afin d'avoir un courant de réseau pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension.

Les courants de référence qui alimentent notre redresseur à trois niveaux sont définis par le système ci-dessous.

$$\begin{cases} i_{1ref} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ i_{2ref} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ i_{3ref} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \dots\dots\dots 3.20$$

Les valeurs efficaces I_{eff} des courants de référence, calculées afin de vérifier la conservation de la puissance à l'entrée et à la sortie du redresseur.

Les redresseurs sont supposés sans pertes (interrupteurs idéals), alors on aura le cas d'une charge résistive (figure 3.13) :

$$v_{1res} \cdot i_{1res} + v_{2res} \cdot i_{2res} + v_{3res} \cdot i_{3res} = \frac{(U_{C1} + U_{C2})^2}{R_{ch}} \dots\dots\dots 3.21$$

$$\Leftrightarrow 3V_e I_e \cos \varphi + 3 \cdot R \cdot I_e^2 = \frac{(U_{C1} + U_{C2})^2}{R_{ch}} \dots\dots\dots 3.22$$

Ve étant la valeur efficace des tensions du réseau. Ie étant la valeur efficace des courants du réseau.

Pour avoir un fonctionnement comme celui déterminé dans l'équation (3.23), on doit avoir un facteur de puissance $\cos \varphi$ unitaire et les pertes Joules dans le réseau seront négligées, donc on aura :

$$I_e = \frac{(U_{C1} + U_{C2})^2}{3V_e R_{ch}} \dots\dots\dots 3.23$$

-3.6.2.3. Commandabilité du redresseur :

Pour s'assurer de la commandabilité du redresseurs, on doit s'assurer d'abords que la valeur initiale U_e que prendre chacune des deux tensions U_{C1} , U_{C2} , doit être supérieure à la valeur maximale V_{max} de la tension du réseau [21]. Cette condition doit être vérifiée à chaque instant. Ce type de condition est nécessaire également pour assurer un facteur de puissance unitaire. On peut voir ça clairement en faisant la représentation de Fresnel pour le circuit du réseau (figure 3.14).

A partir de la figure 3.13, on peut d'écrire les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{1res} = V_A + R.i_{1res} + L.\frac{di_{1res}}{dt} \\ v_{2res} = V_B + R.i_{2res} + L.\frac{di_{2res}}{dt} \\ v_{3res} = V_C + R.i_{3res} + L.\frac{di_{3res}}{dt} \end{cases} \dots\dots\dots 3.24$$

Pour la représentation de Fresnel à partir du système (3.24), en négligeant la résistance R (Figure 3.14), cela nous permet d'écrire l'équation suivant :

$$\bar{V}_A = \bar{V}_{1res} - j.L.\omega \bar{I}_{1res} \Rightarrow |\bar{V}_A|^2 = V_{\max}^2 + (L.\omega I_{\max})^2 \dots\dots\dots 3.25$$

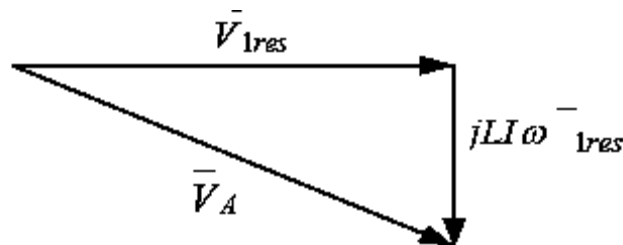


Figure 3.14 : Représentation de Fresnel du circuit du réseau

-3.7. Cascade de redresseur-onduleur à trois niveaux NPC :

-3.7.1. Structure de la cascade :

Dans cette partie de notre chapitre, on étudie l'association de deux redresseurs triphasés à trois niveaux à deux onduleurs triphasés à trois niveaux. Ce changeur de fréquence indirect de la figure 3.15. Permet à partir d'un réseau à fréquence et amplitude fixes d'avoir un système de tensions de sortie à fréquence et amplitude variables

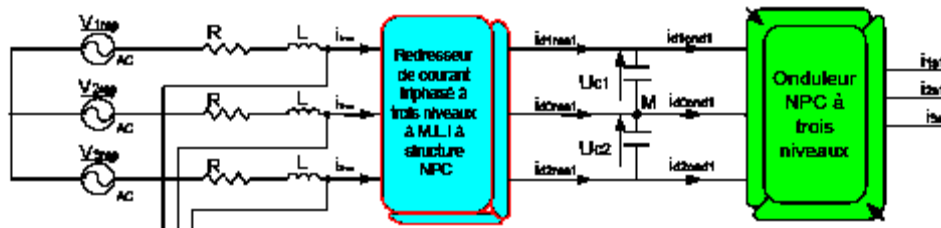


Figure 3.15: Cascade redresseurs de courant triphasé à trois niveaux onduleurs de tension triphasés à trois niveaux

-3.7.2. Modélisation du filtre intermédiaire de la cascade :

La figure 3.16 représente la structure générale du filtre intermédiaire de la cascade. Son modèle est défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = i_{d1red1} - i_{d1ond1} \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = i_{d2red1} - i_{d2ond1} \end{cases} \dots\dots\dots 3.26$$

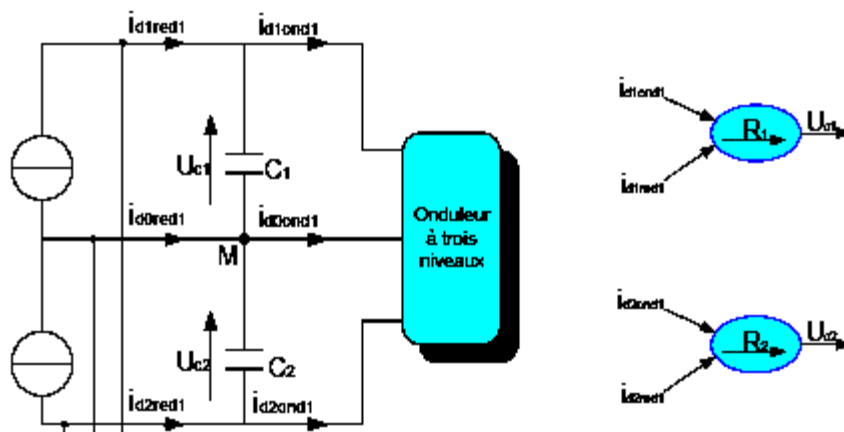


Figure 3.16 : Filtre intermédiaire de la cascade redresseur de courant triphasé à trois niveaux d' onduleur triphasé à trois niveaux .

Le système qui est présenté par l'équation (3.26) peut être interprété par le graphe informationnel de la figure (3.16). Les relations R1, R2, de ce graphe sont respectivement la première et la deuxième équation du système (3.26).

La figure (3.16) nous montre deux blocs apparemment indépendants, qui peut être commandé par i_{d1red1} et i_{d2red1} . Cependant, on doit noter que les deux courants i_{d1red1} et i_{d2red1} sont contrôlé par le même courant du réseau.

La relation qui est d'écrit par l'équation (3.27), montre également qu'on peut réduire la différence entre les quatre tensions U_{c1} et U_{c2} en utilisant des capacités importantes

$$i_{d0ond1} - i_{d0red1} = C \frac{d(U_{c1} - U_{c2})}{dt} = i_{d01} \quad \text{avec} \quad C_1 = C_2 = C \quad \dots\dots\dots 3.27$$

Cette dernière relation montre également afin d'avoir un potentiel du point milieu M plus stable (valeur moyenne nulle de la différence ($U_{c1} - U_{c2}$)), il faut avoir une valeur moyenne du courant i_{d01} , i_{d02} nulle.

-3.8. Simulation et interprétation :

Le modèle utilisé pour la simulation du système à tester est donné par la figure suivante :

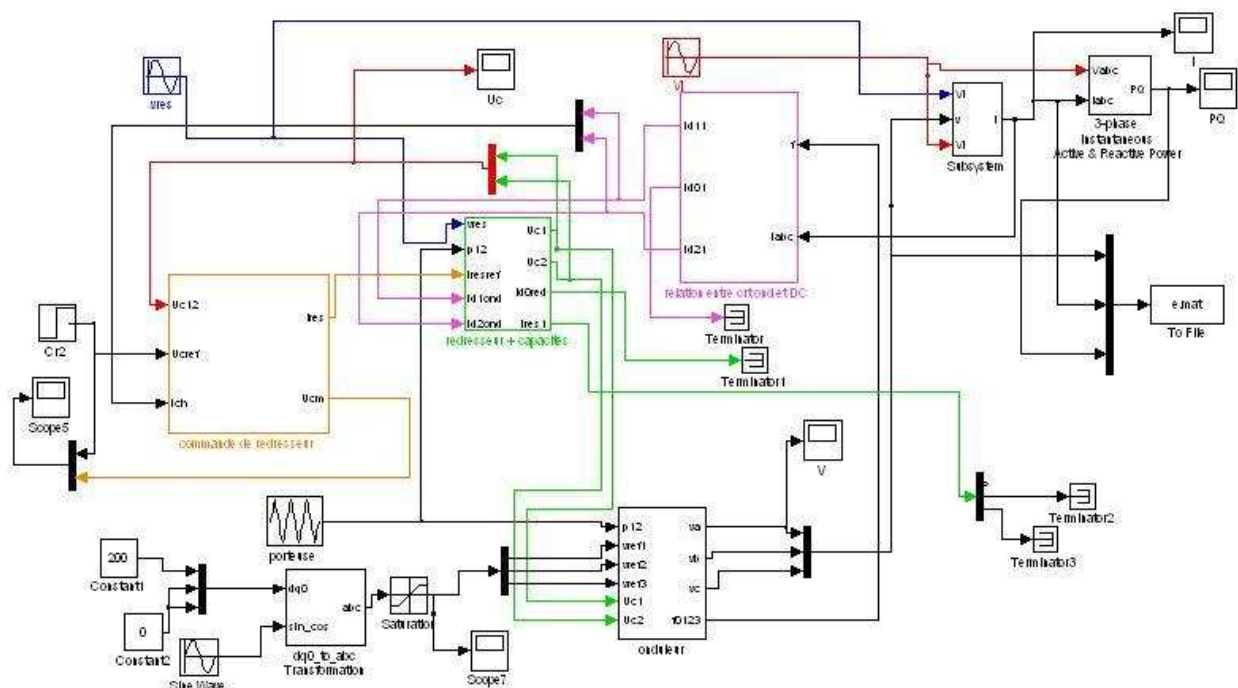


Figure 3.17 : Modèle de simulation pour l'UPFC sans régulation

Les résultats de simulation de l'UPFC sans régulation sont :

- ✓ Ces résultats nous permettent de conclure que ce modèle proposé fonctionne correctement.
- ✓ La stabilité rapide du réseau (voir la puissance et le courant).

- ✓ Les régimes transitoires des puissances (active et réactive) sont brefs, ce qui donne une raison de plus concernant la validité de ce modèle de simulation.

Nous avons représenté sur la figure 3.18, la tension de sortie d'une phase de l'onduleur triphasé, les trois courants de la ligne et la puissance active et réactive.

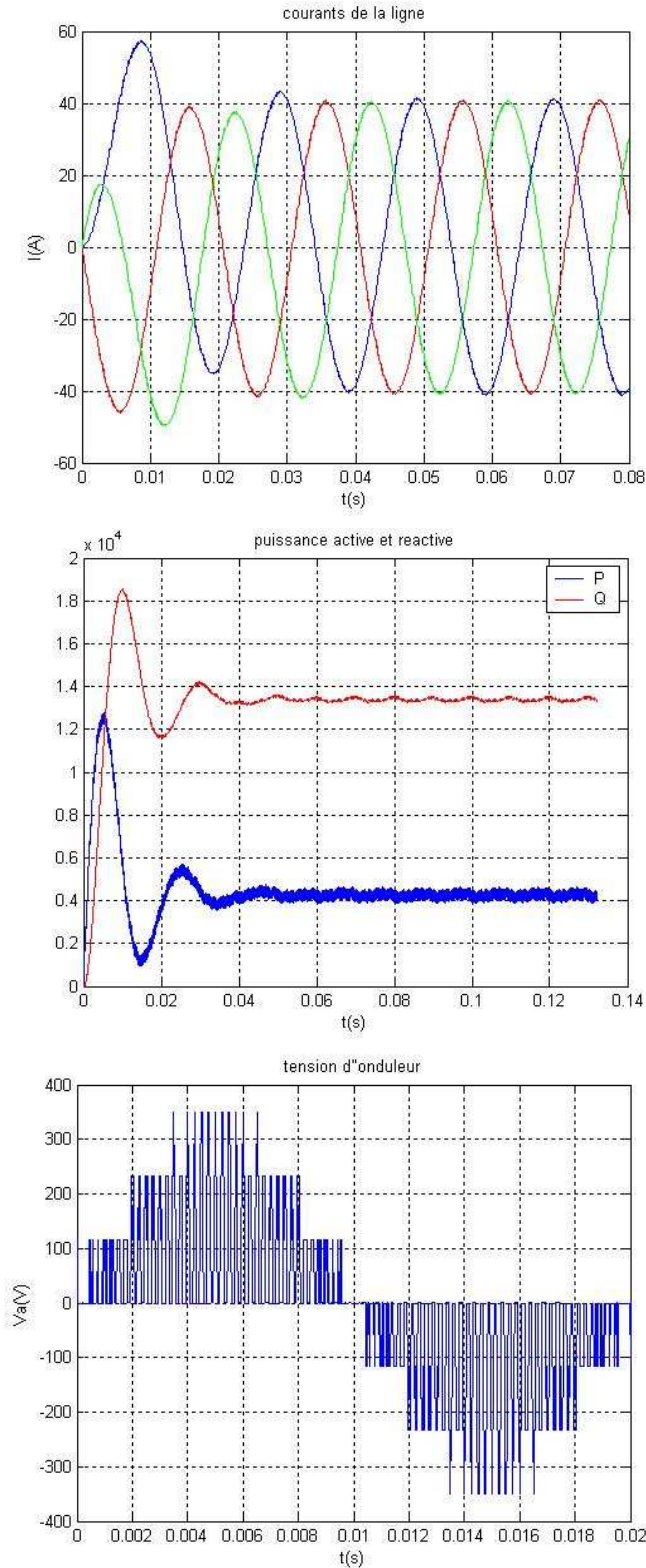


Figure 3.18: résultats de simulation sans régulation

-3.9. Conclusion :

Le contrôleur unifié d'écoulement de puissance (UPFC) est un dispositif FACTS qui combine à la fois les avantages de contrôle de la compensation série et shunt, par son ajustement simultané ou séparé des paramètres clés du réseau électrique, c'est un dispositif efficace et le plus flexible.

Les résultats de simulation montrent que la tension du convertisseur shunt et série sont contrôlées afin de maintenir la tension de la ligne constante et par conséquent augmenter la capacité de transfert d'énergie.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le cadre de mémoire, le travail réalisé concerne les contrôles de transit de puissance sur un réseau électrique par l'UPFC.

Dans une première étape, on a présenté étude sur la stabilité de réseau électrique.

Dans la deuxième étape, nous avons présenté, en bref les systèmes de la compensation et de contrôle FACTS et leur classification avec les différentes applications.

Dans une troisième étape, on a présenté une étude théorique pour le contrôleur unifier de l'écoulement de puissance (UPFC), et on a établi un modèle d'équation décrivant les fonctions de contrôle réalisées par l'UPFC, et nous avons effectué une simulation numérique avec logiciel MATLAB, qui a donné les résultats précédent.

Enfin le sujet de ce mémoire, est un sujet d'actualité qui fait rendre ce travail comme un point de départ sur lequel on peut se baser pour mener des études plus poussées et plus détaillées sur ce modèle de FACTS; études qui peuvent être aussi bien expérimentables que celles abordées dans le présent travail.

Références Bibliographiques :

[1]. Mémoire de fin d'étude, "Etude de la stabilité électrique", Ali Baadi, 2003-2004 Université de Annaba.

Mémoire de fin d'étude "Analyse et commande de la cascade redresseurs trois niveaux-onduleurs trois niveaux machine synchrone à double stator", Babay abdel wahab et sebti hamza ,2004-2005, Ecole Nationale Polytechnique.

[2]. N.G. Hingorani, "High power Electronics and Flexible AC transmission system", joint APC/IEEE luncheon speech, April 1988 at the American power conference 50th Annual Meeting In Chicago, printed IEEE power Engineering, July 1988.

[3]. N.G. Hingorani, "power electronics in electric utilities: Role of power Electronics in future power system", Invited paper, proceeding of the IEEE special Issue, Vol. 76, No. 4, April 1988.

[4]. L.Gyugyi, "Dynamic compensation of AC transmission Lines by solid-state synchronous voltage sources", IEEE transmission on power delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 904-911, April 1994.

[5]. Static Var compensators, CIGRE working group 38-01, Task force No 2 on SVC, Cigre Paris, 1986, Edited y I, A .Erinmez.

[6]. FACTS Overview, published by CIGRE and IEEE PES, 1995, reference IEEE 95 TP 108.

Mémoire de fin d'étude "contrôle du réseau électrique par un système FACTS", Berrahal Khokha, 2004-2005, Université de Batna.

[7]. A. J. F. Kari, R.A. Byron, B.J.WAR, A.S.Mehhraban, M. Chamia, P. Halvarsson, L. Angquist, "Improving transmission system performance using controlled series capacitor, "CIGRE paper 14/37/38-07, Paris, France, 1992.

[8]. N. Christl, R. Hedin, P.E.Kraucs, P.Luetzelberger, S.M. Mckenna, A.H.Montoya, K. Sadek, D.R. Torgerson, "advanced series compensation (ASC) with thyristor controlled Impedance, " CIGRE paper 14/37/38-07, Paris, France, 1992.

[9]. J.Urbanek, R.J.Piwko, E.V. Larsen, B.L. Damsky, B.C.Furumasu, W.Mittelstadt, J.D. Eden, "thyristor controlled series compensation-prototype Installation at Slatt 500 kv Substation", IEEE Transaction on power delivery, pp.1460-1469, July 1993.

[10]. C.D. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacy, T.W. cease, A.Edris, "Development of ± 100 Mvar static condenser for voltage control of transmission system, " IEEE Transactions on power delivery, Vol. 10.No. 3, pp. 1468-1496m July 1995.

[11]. L.Gyugyi, C.D. Schauder, S.L. Williams, T.R. Reitman, D.R. Torgerson, A. Edris, "The unified power flow controller: A New Approach to power transmission control, " IEEE transmissions on power delivery Vol.10, No. 2, pp. 1085-1097, April 1995.

[12]. S. Nyatti, M.E. Eitzmann, J.Kappenman, D. Van House, N.Mohan, A. Edris, "Design Issues for a Single- core transformer thyristor controlled phase Angel Regulator, " IEEE Transactions on power delivery, Vol.10, No. 4, pp. 2013-2019, October 1995.

[13]. L. Gyugyi, C.D Schauder, K.K sen, "static synchronous series compensator : A solid-state Approach to the series compensation of transmission lines," paper to be presented at IEEE/PES winter power Meeting ,Baltimore, MD, January 1996.

[14]. J.Brochu, P. Pelletier, beauregard, G. Morin "Interphase power controller Adapted to the operating conditions of networks,"IEEE transactions on power delivery, Vol .10, No.2, PP. 961-969, April 1995.

[15]. Mitsubishi électrique power product, "www.meppi.com/eng_analysis Htm/".

[16]. Marc Pellerin, "systèmes de transmission à Courant Alternatif Flexible", Ise.evid.ch/projets/FACTS.htm.

[17]. Ch.sudhakara Babu,"control of a unified power flow controller (UPFC) "Master of technology in electrical engineering, University of Calicut, 2002.

[18]. www.ipst.org/techpapers/2001/ipstd1 paper 205.

[19]. [EM. Berkouk] "Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasée et triphasée alimenté par des convertisseurs directs, et indirects. Application aux gradateurs et aux onduleurs multiniveaux. " thèse de doctorat du CNAM. paris 1995.

[20]. [Ben Romdane 94] Y.Ben Romdane, E.M.Berkouk, G.Manesse, " Etude comparative entre un onduleur deux et trois niveaux pour la conduite d'une machine asynchrone triphasée " EPE'94, SUISSE.

[21]. [M.Boussetoua et B.Derkaoui] « Commande vectorielle de la machine asynchrone alimentée par un onduleur multiniveaux » PFE, ENP 1997, Alger.

[22]. [Belazzoug 97] Belazzoug, Sebaa, « Etude des redresseurs multi-niveaux à MLI».PFE, ENP 1997, Alger.