

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté de génie Electrique et d'informatique
Département Automatique

Mémoire

De fin d'étude

En vu de l'obtention du diplôme Master en Automatique

Spécialité : commande des Systèmes

Thème

*Stabilisation d'un système SMIB par
Les modes glissants*

Réalisé par :

M^{elle} : TARAFAT Dihia

Dirigé par :

M^r : HAMACHE

PROMOTION 2016-2017

Remerciements

Nous remercions d'abord le bon dieu qui nous a aidé et qui nous a donnée le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à mon promoteur M^r HAMACHE pour nous avoir fait confiance et pour nous avoir encouragés tout au long de ce projet.

Nos profondes gratitudes et nos plus vifs remerciements à tous ceux qui ont voulu accepter de juger notre modeste travail.

Nous réservons ici une place particulière pour remercier vivement nos familles pour leur soutien continu. Et à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, nous ont aidés et encouragés à la réalisation de ce modeste travail. En bref, merci à tous et à toutes.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

Mes chers parents

Mes frères

À toute la famille

Tous Mes amis

À tous mes camarades de la promotion

2016/2017

*Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche
ou de loïn.*

Dihia

Sommaire

Sommaire

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

Chapitre I : notions élémentaires de réseau électrique et transport d'énergie

1.1. Introduction	2
1.2. Rôle du réseau électrique	2
1.3. Défauts dans les réseaux électriques HT	2
1.4. Caractéristique des défauts	3
1.5. Structure Générale des réseaux électrique	4
1.6. Caractéristique générale du transport et de la distribution	5
1.7. Principe des réseaux électriques	6
1.8. Phénomènes liés au fonctionnement des réseaux électriques	11
1.9. Conclusion	11

Chapitre II : Modélisation du système

2.1. Introduction	12
2.2. Hypothèse simplificatrices	12
2.3. Schéma équivalent	12
2.4. Modèle dynamique	15
2.5. Conclusion	17

Chapitre III : Commande du système SMIB

3.1. Introduction	18
3.2. Cahier des charges	18
3.3. Stratégie de commande	19
3.4. Synthèse de la commande par modes glissants	19
3.5. Simulation et discussion	22
3.6. Conclusion	26
Conclusion générale	27

Liste des figures

Figure 1.1. : Différentes type de défauts.....	3
Figure 1.2. : Constitution d'un réseau électrique simplifié.	5
Figure 1.3. : Transport simplifié de l'énergie électrique.	8
Figure 1.4. : Caractéristique de la puissance maximale transmissible.	9
Figure 1.5. : Alternateur débitant sur une charge.....	10
Figure.2.1. Schéma équivalent du système.....	13
Figure.2.2. Diagramme vectoriel (phaseurs) des tensions et puissance de la machine synchrone.	14
Figure.2.3 Schéma fonctionnel du système.	17
Figure.3.1. Schéma du dispositif de commande.	22
Figure.3.2. Réponse du système pour le test 1.....	24
Figure.3.3. Réponse du système pour le test 2.....	24
Figure.3.4. Réponse du système pour le test 3.....	25

Liste des symboles et abréviations :

SSSC: Static Synchronous Series Compensator.

SMIB : Single Machine Infinite Bus (machine unique reliée à un noeud infini).

FACTS : Flexible AC Transmission System.

E : La force électromotrice induite de la machine.

V_{SSC} : La tension du SSSC.

I : Le courant de ligne.

φ : Le déphasage entre le courant et la tension.

δ : Le déphasage angulaire entre E et V_{SSC} .

P_e : La puissance active

X_s : La réactance équivalente de la machine.

ω_s : Pulsation du stator.

Q : La puissance réactive.

J : Le moment d'inertie de l'arbre de la machine.

T_m : Le couple mécanique.

T_e : Le couple électromagnétique.

$T_f = \alpha \Delta \omega$: Le couple des frottements.

$D = \alpha \omega_s^2$: Le coefficient de dissipation de la machine.

d_δ et d_ω : des perturbations.

P_m : La puissance mécanique.

T_m : Le couple mécanique.

P_e : La puissance électrique.

X_{sssc} : La réactance de SSSC.

λ et k : Gain de conception positif.

X_Σ : La réactance équivalente entre le SSSC et la machine.

Introduction Générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc... Cela implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

La tension et la fréquence sont les deux facteurs principaux déterminant la qualité de l'énergie électrique, ils doivent être maintenus à des limites correspondant aux besoins des consommateurs et au bon fonctionnement du réseau. L'analyse de la stabilité consiste à évaluer la capacité du système à supporter les éventuelles perturbations, et de proposer par la suite les moyens de réglage adéquats et les mesures permettant d'améliorer cette capacité et la maintenir dans des limites admissibles de ces deux grandeurs [1].

Nous proposons dans ce mémoire d'étudier l'une des solutions aux problèmes de stabilité, qui consiste à agir sur la puissance électrique forcée en la modulant selon le besoin grâce au dispositif SSSC de réglage des réseaux électriques, dont la commande est assurée par la technique des modes glissants.

Le réglage par modes glissants fait partie des méthodes de commandes robustes. Il possède des avantages incontestables pour les systèmes mal identifiés ou à paramètres variables. Cependant, la nature commutante (discontinue) de cette technique peut provoquer l'effet désagréable du broutement, appelé en anglais "chattering" [2].

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres ; le premier chapitre donne quelques notions sur la structure du réseau électrique, son rôle ainsi que sur le transport de l'énergie électrique. Le deuxième chapitre porte sur la modélisation du SMIB (single machine infinite bus) et comporte un rappel sur la stabilité des réseaux électriques. Le troisième chapitre est consacré au développement d'une loi de commande en exploitant la technique de commande par les modes glissants, pour la stabilisation du SMIB.

Chapitre I :

*Notions élémentaires de réseau
électrique et transport d'énergie*

1.1. Introduction :

Les réseaux électriques ont été dimensionnés et construits pour transporter l'énergie électrique produite par les centrales de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés.

Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de lignes, des milliers de postes de transformation ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement du réseau et un meilleur service de fourniture d'énergie électrique.

Ainsi des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence par l'intermédiaire d'automates qui ont la charge de garantir la continuité de service du système.

1.2. Rôle du réseau électrique [3] :

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveaux de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution.

Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, celles-ci sont assurées par les postes sources et les transformateurs.

Le réseau électrique est exploité de manière à assurer trois principaux objectifs :

- La distribution d'électricité doit pouvoir être garantie et ce malgré les aléas du réseau. Ainsi l'opérateur du réseau doit être capable de faire face à ces aléas et d'éviter les dégâts potentiels ainsi que leur propagation. Cet enjeu de sûreté de fonctionnement en régime normal et en régime perturbé est un des premiers objectifs.
- L'onde de tension fait l'objet d'engagement contractuel que l'opérateur se doit de tenir en respectant une règle d'égalité c'est à dire une impartialité en conservant une continuité de service maximale.
- Le dernier objectif d'exploitation est un objectif économique, l'exploitation doit être menée de manière optimale dans le but de réduire les pertes ainsi que les coûts de maintenance et d'investissement.

1.3. Défauts dans les réseaux électriques HT :

Le risque d'apparition d'un incident sur les réseaux n'est pas nul car lié à de nombreux paramètres aléatoires, aussi les courts-circuits peuvent avoir diverses origines [4]:

1-3-1-Electrique : c'est l'altération des isolants des matériels de réseau. En effet le matériel électrique que l'on trouve sur le réseau ou dans les postes comporte des isolants (solides, liquides ou gazeux) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre les parties sous tension et la masse, ces isolants subissent des dégradations au cours du temps qui conduisent à des défauts d'isolement et donc des court-circuit.

1-3-2-Atmosphérique : les lignes aériennes sont soumises aux perturbations extérieures telles que la foudre, les tempêtes ou le givre.

1-3-3-Mécanique : c'est la chute d'un corps sur un conducteur ou la dégradation mécanique de conducteur consécutive à des agressions extérieures par des engins de terrassement par exemple.

1-3-4-Humaines : ce sont les fausses manœuvres telles l'ouverture d'un sectionneur en charge par exemple ou des actes de sabotage.

On trouve plusieurs catégories de défaut dans les réseaux HT, ceux-ci sont caractérisés par leur type, leur durée et l'intensité du courant de défaut, on distingue les types et caractéristiques dans la figure suivante :

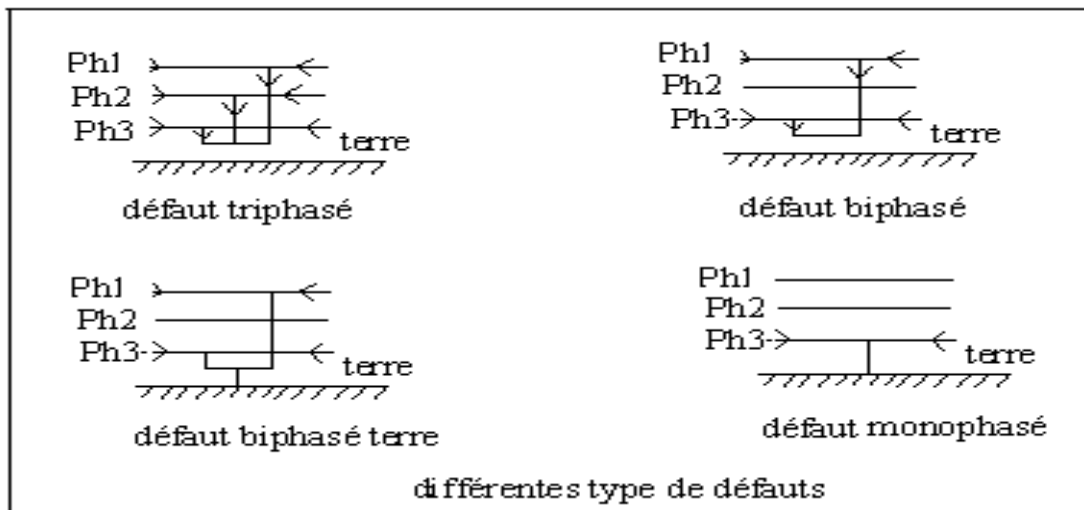


Figure 1.1. Différentes type de défauts.

1.4 . Caractéristique des défauts

1-4-1-Caractéristique des défauts monophasés :

1-4-1-1-Défaut auto-extincteur : un défaut auto-extincteur monophasés est un défaut s'éliminant seul, sans nécessiter la coupure de l'alimentation ou la fermeture du disjoncteur shunt.

1-4-1-2-Défaut réamorçant : un défaut réamorçant est un défaut monophasés auto-extincteur qui réapparaît périodiquement (dans environ 90% des cas le défaut monophasés – auto-extincteur est constitué d'un seul amorçage) le temps entre deux réamorçages peut varier de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes si le temps entre deux réamorçages successifs est inférieur à 200 ms on considère cette succession de défauts comme le même défaut [4].

1-4-1-3-Défaut en régime établi à 50Hz : un défaut en régime établi 50Hz comporte un courant ayant essentiellement un composant à 50Hz après son apparition. [4]

1-4-2-Caractéristique des défauts polyphasés : Les défauts polyphasés sont la plupart du temps des défauts en régime établi à 50Hz. Ils sont dans leur très grande majorité, éliminés par l'ouverture d'un disjoncteur en réseau. Ils entraînent toujours lors de leur apparition, un creux de tension, plus ou moins important en fonction de la puissance de court circuit. Le creux de tension provoqué par un défaut polyphasé est généralement ressenti par la clientèle, les défauts polyphasés peuvent être, dans de très rares cas, des défauts auto-extincteurs. [4]

1.5. Structure Générale des réseaux électrique :

De façon très générique, un réseau électrique est toujours scindé en grandes parties [5]:

1-5-1- Production : elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produits sous forme triphasés par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites primaires.

1-5-2- Transport : Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des lieux de consommation ; les grandes centrales étant en général groupées autour des fleuves, des cours d'eau et des océans. Le grand transport consiste à parcourir de longues distances en direction des extrémités des territoires nationaux. L'ordre

de grandeur de ces distances impose, entre autre, le fait de véhiculer l'énergie électrique sous très haute tension.

1-5-3-La distribution : elle consiste en un maillage fin de territoire permettant à chaque utilisation d'être à proximité d'une liaison au réseau, c'est l'ultime ramification des lignes et des installations qui permet également un passage progressif des très hautes tensions du transport aux basses tensions de la consommation.

1-5-4-La consommation : chaque récepteur électrique connecté à un réseau consomme une puissance active et une puissance réactive. La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est très ramifiée et se fait sous basse tension souvent monophasée (100 à 250 V). Certains clients industriels (grosses usines, ferroviaire ...etc.) sont directement reliés en moyenne MT, haute HT ou très haute tension THT.

La figure 1.2 représente la structure d'un réseau et principales composantes.

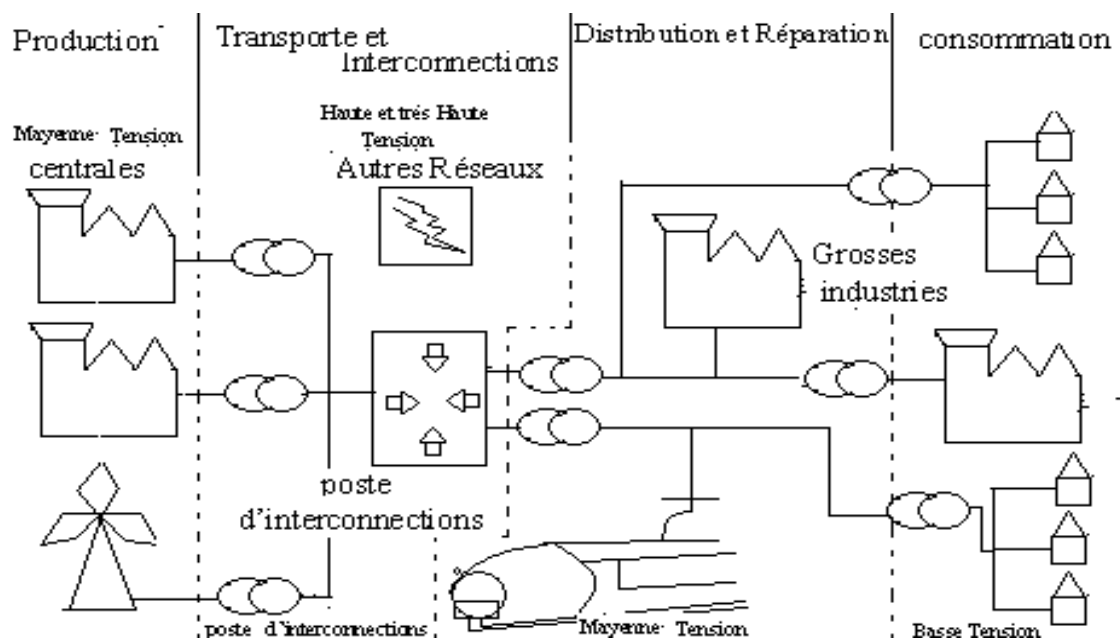


Figure 1.2. : Constitution d'un réseau électrique simplifié.

1.6. Caractéristique générale du transport et de la distribution :

Les réseaux électriques, en très grande majorité, transportent l'énergie électrique sous forme triphasée, les disposition et grandeurs caractéristiques de ces systèmes sont ainsi :

- Leur fréquence.

- Leurs niveaux de tension.
- Leurs différents types de couplage.

1-6-1-Fréquence normalisée [5]:

Les grands réseaux électriques sont des systèmes interconnectés qui fonctionnent à fréquence uniforme afin de garantir un bon fonctionnement de leurs appareillages, ces derniers optimisés pour une valeur précise de la fréquence. Dans le monde, on ne recense que deux valeurs distinctes de fréquence :

- Le 50Hz caractérise les réseaux européens, asiatiques, russes et africains.
- Le 60Hz caractérise les réseaux américains, canadiens et japonais.

1-6-2-Tension normalisée [5] :

Chaque réseau électrique est organisé à partir de quelques niveaux de tension normalisés dont le respect (à quelque %près) est une nécessité pour exploiter les structures de transport en assurant leur sûreté. Les plus hautes valeurs de tension correspondent au domaine du grand transport et les plus petites au domaine de la consommation.

1-6-3-Couplage du système triphasé :

Les réseaux électriques sont organisés à partir de systèmes triphasés, Ces derniers peuvent présenter des couplages triangle ou étoile et plus précisément, présenter un neutre relié ou non. Cette dernière remarque constitue une caractéristique majeure des différents types de tronçons et on retiendra la notion suivant :

- Les domaines du transport et de la répartition (HTB, HTA) sont organisés sur le respect prioritaire des contraintes liées a la minimisation des pertes et des couts des installations. En conséquence, ces tronçons de réseau sont conçus de telle manière à présenter un nombre minimal de conducteurs électriques. Autrement dit, le transport et la répartition représentent quasi exclusivement des systèmes triphasés (sans neutre). Une conséquence majeure est que, pour garantir l'équilibre des tensions produites, ces parties du réseau doivent être équilibrées (en courant). Ce qui constitue une contrainte de répartition de la puissance et des impédances sur les trois phases de l'ensemble de la structure.

- A l'opposé, les installations BT (c'est – à-dire la distribution locale) sont organisées dans le respect prioritaire de l'équilibre des tensions fournies, le plus souvent à des clients monophasés indépendants. En conséquence, ces parties du réseau sont constituées de systèmes triphasés dit « quatre fils » dont le neutre est créé localement, au secondaire des postes de transformation de quartiers (biberons). Le neutre ainsi fourni aux clients entre d'ailleurs dans l'aspect contractuel de l'apport d'énergie et dans la constitution des régimes de protection des installations ou « régime de neutre » .

1.7. Principe des réseaux électriques :

En règle générale, les grands réseaux électriques du monde se ressemblent. Cette similitude s'explique par l'existence de grands principes, de grandes contraintes, qui justifient les structures et la nature des installations propres au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Il est important, pour un électricien, de bien saisir ces différentes notions de base.

1-7-1-Transport en haute tension, facteur de puissance :

De façon générale, il n'est concevable de transporter l'énergie électrique sur de grandes distances qu'à partir d'une tension relativement élevée. Il suffit, pour s'en convaincre, de considérer le schéma simplifié d'un transport d'énergie électrique représenté sur la figure 1.3 et de noter les points suivants :

- Tout conducteur électrique possède une certaine impédance. Transporter l'énergie électrique sur de longues distances revient à utiliser des conducteurs très longs dont l'impédance équivalente n'est pas négligeable.
- Le transport de l'énergie électrique revient à la liaison par une ligne (ou un câble) d'une source vers un récepteur dont l'objectif principal est la fourniture de la puissance.

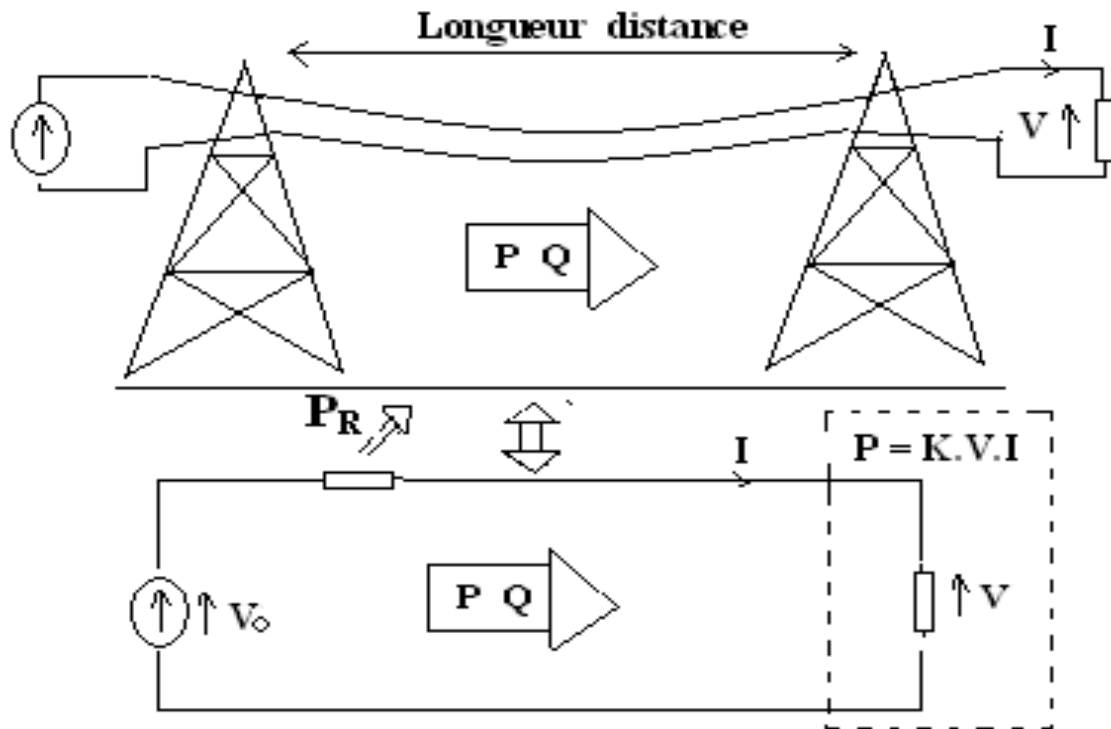


Figure 1.3. : Transport simplifié de l'énergie électrique.

A puissance fournie constante, la minimisation des pertes dans la ligne passe par deux points essentiels.

- La tension V doit être la plus grande possible.
- Le facteur de puissance doit être le plus proche possible de l'unité.

Autrement dit, le transport lointain de l'énergie électrique ne peut se faire à bon rendement que sous haute tension, voire très haute tension. On montre parallèlement que l'usage de hautes tensions permet à la fois de réduire la sensibilité des tensions à la circulation de puissance réactive et d'augmenter les puissances maximales transmissibles [5].

1-7-2-Puissances maximale transmissible :

Toute association « générateur / récepteur » présente une limite de puissance transmissible de l'un vers l'autre. Tout réseau électrique, dès lors qu'il est globalement équilibré, peut être ramené à une telle association et est alors tributaire d'une grandeur importante appelée « puissance maximale transmissible ». La figure 1.4 représente le schéma équivalent monophasé de tout réseau, ou toute partie de réseau, en régime permanent équilibré. Sur ce schéma, la source de tension V_r est la tension à vide des alternateurs,

l'impédance Z_1 est équivalente à l'ensemble des lignes et des transformateurs, la charge est représentée par l'impédance Z_c .

La règle, souvent utilisée en électronique, de « l'adaptation d'impédances » décrit le fait que la puissance P transmise au récepteur est maximale si $Z_c = Z_1^*$ (ce qui implique que $Z_c = Z_1$). En d'autres termes, la modification de la charge ne permet pas de dépasser une certaine puissance $P_{\max} = V_r^2 / 4 \cdot Z_1$. La figure 1.4 représente également l'évolution de P/P_{\max} et du rendement μ du système en fonction de la résistance de la charge.

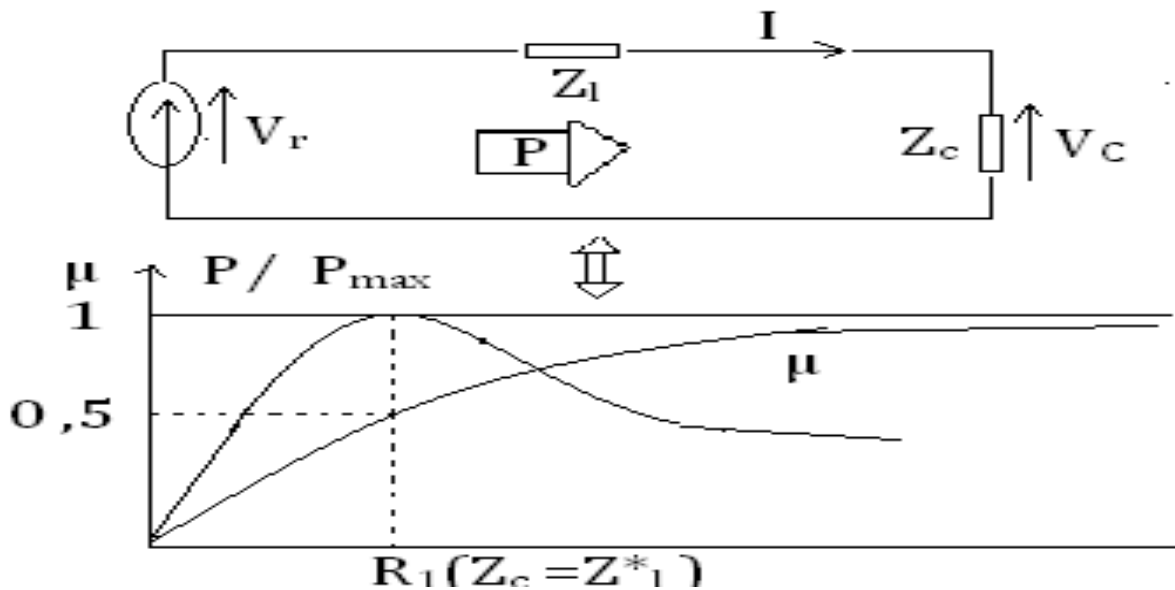


Figure 1.4. : Caractéristique de la puissance maximale transmissible.

Le point de puissance maximale est facile à repérer sur ce graphique et correspond à un rendement de valeur 50%.

1-7-3- Couplage fréquence /puissance :

Tout alternateur, lorsqu'il débite de la puissance dans une charge, est tributaire du principe fondamental de la dynamique de solides en rotation (voir Figure 1.5).

En négligeant les pertes associées à l'alternateur, il est possible de relier alors l'évolution de sa vitesse aux puissances générées et reçues.

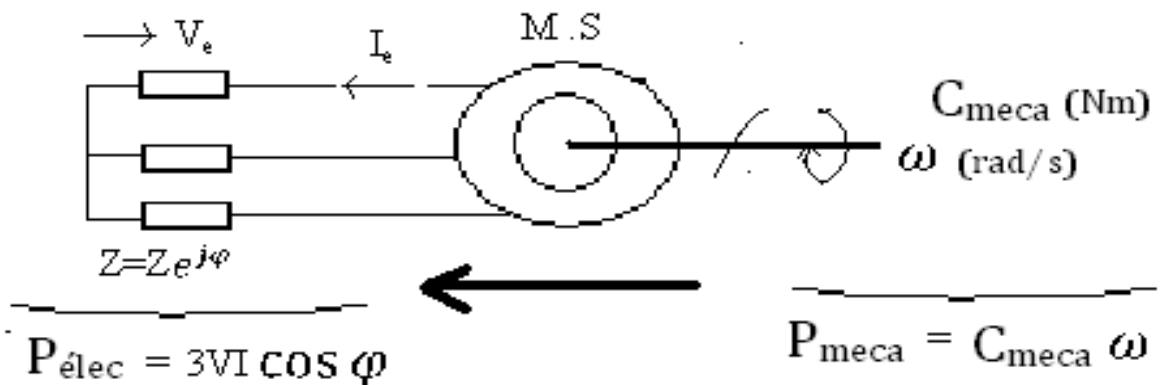


Figure 1.5. : Alternateur débitant sur une charge.

La fréquence des tensions produites par l'alternateur étant proportionnelle à la vitesse de rotation. On peut comprendre l'origine de ses fluctuations à savoir :

- En régime permanent, c'est-à-dire à vitesse et fréquence constantes, il ya égalité entre la puissance produite et la puissance consommée.
- Lors d'une évolution à la hausse de la puissance consommée, il y a freinage de l'alternateur ($\frac{d\omega}{dt} < 0$) et diminution de la fréquence.
- Lors d'une évolution à la baisse de la puissance consommée, il y a accélération de l'alternateur ($\frac{d\omega}{dt} > 0$) et augmentation de la fréquence.

Autrement dit, de par la proportionnalité entre vitesse et fréquence, il existe un fort couplage entre la fréquence d'un réseau (qui n'est autre qu'un regroupement d'alternateurs) et le bilan des puissances. Le fait de garantir la constance de la fréquence consiste ainsi à adapter en permanence le niveau de production à celui de la demande, en permettant aux divers appareillages de fonctionner à leur pulsation optimale. Dans le cas contraire, des oscillations à basse fréquence apparaîtront pour tenter d'équilibrer le bilan des puissances. Si l'amortissement équivalent n'est pas suffisant, ces oscillations hypo-synchrones croîtront en amplitude et mettront le système en danger et ses protections en marche pour isoler la perturbation et dégrader par là le service [5].

1.8. Phénomènes liés au fonctionnement des réseaux électriques :

Pour bien comprendre les principes de fonctionnement des réseaux électriques, il est nécessaire de prendre conscience d'un certain nombre de phénomènes qui limitent leurs possibilités, ou mettent en péril leur sûreté, c'est de la gestion optimisée de ces phénomènes et de leurs conséquences que découlent les grandes stratégies de conduites de réseaux électriques.

1.9. Conclusion :

Le présent chapitre a défini la notion de réseau électrique ainsi que ses principaux constituants et son fonctionnement. Cet ensemble de lignes, aériennes ou souterraines constituant des circuits de transmission des réseaux triphasés et reliant les générateurs aux charges, peut être mis en péril si une contingence survient pour altérer le fonctionnement du réseau. L'équilibre du bilan d'énergie est l'objectif de tout opérateur d'électricité car le moindre déséquilibre engendre des oscillations hypo-synchrones rendant le réseau précaire voire même instable.

Chapitre II :
Modélisation du Système

2.1. Introduction :

La puissance reçue par la turbine est convertie en puissance électrique par la machine synchrone puis elle est injectée dans le réseau d'évacuation via les enroulements du stator. La stabilité du SMIB est étroitement liée à la puissance accélératrice qui quantifie la différence entre la puissance mécanique en provenance de la turbine et la puissance appelée par le réseau [6].

Dans le présent chapitre, un modèle mathématique du système global composé du SMIB et du dispositif FACTS de type SSSC sera établi, en utilisant les équations électriques, mécaniques et de puissance de la machine. Le modèle établi servira d'une part, à la simulation du fonctionnement du système, et d'autre part, à la synthèse d'une loi de commande qui pilotera le système dans la réalisation du cahier des charges, objet du prochain chapitre.

2.2. Hypothèse simplificatrices :

Afin de simplifier la modélisation de du système et ne prendre en considération que les phénomènes dominants, les hypothèses simplificatrices dites de Behn-Eschenburg sont adoptées:

- Les circuits électriques sont inductifs donc les résistances des impédances sont négligées devant les réactances inductives.
- Le SSSC est vue par la machine comme une réactance variable X_{SSC} insérée en série avec sa réactance synchrone X_s .
- Le SSSC est vue par le réseau infini comme un nœud de tension variable V_{SSC} situé juste à coté du transformateur élévateur de réactance X_t .

2.3. Schéma équivalent :

En prenant en considération les hypothèses simplificatrices de la section précédente, les éléments du système peuvent être remplacés par leurs circuits équivalents comme suit :

- La turbine est remplacée par une source de puissance mécanique constante P_m ,
- Le jeu de barres du poste d'évacuation auquel est raccordée la machine est remplacé par un réseau infini à tension stable en amplitude et en phase $V_\infty \angle \delta_\infty$,

- La ligne d'évacuation est remplacée par une ligne double terne purement inductive de réactances $X_{1,2}$ qui varie en fonction de la topologie du réseau, car celle-ci représente l'équivalent de Thévenin vu entre la machine et le réseau infini.
- La machine synchrone à excitation constante est remplacée par un nœud à tension constante en module E et variable en phase δ en série avec sa réactance synchrone,
- Le SSSC est remplacé par un injecteur de tension variable en module $V_{SSC} \angle \delta_{SSC}$ en série avec la ligne d'évacuation. La réactance de fuite de l'injecteur est ramenée au secondaire et est incluse dans X_t .

La figure 2.1 représente le schéma équivalent du système global.

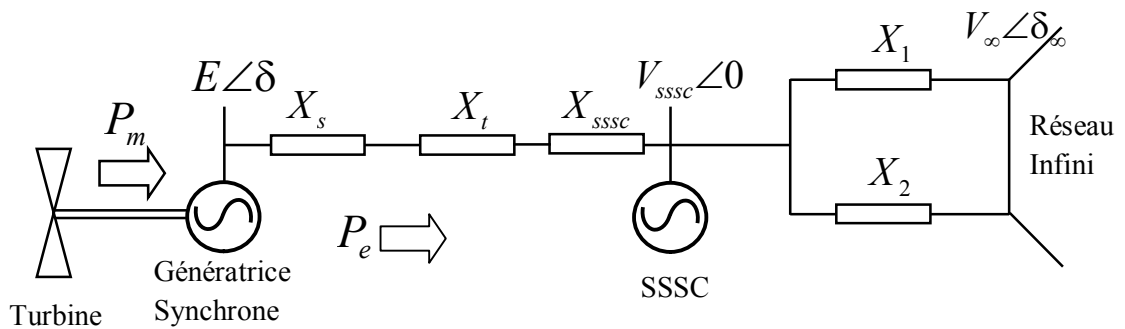


Figure.2.1. Schéma équivalent du système.

Dans le cadre des hypothèses retenues, le fonctionnement de la machine peut être décrit par le diagramme vectoriel en équivalent unifilaire de la figure 2.2. Dans ce cas précis, les grandeurs électriques portées sur le diagramme sont des grandeurs par phase.

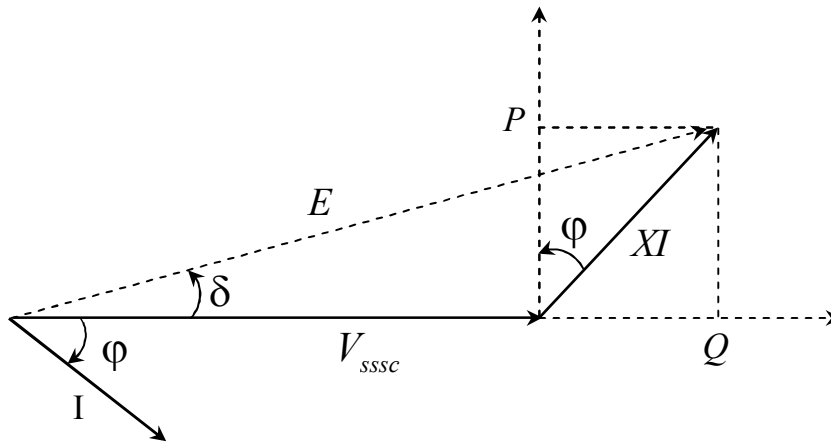


Figure.2.2. Diagramme vectoriel (phaseurs) des tensions et puissance de la machine synchrone.

La puissance électrique active peut être déterminée géométriquement du diagramme de la figure 2.2 en fonction des paramètres intrinsèques de la machine E , X_s et δ . En effet,

$$XI \cos \varphi = E \sin \delta \quad (\text{éq 2.1})$$

D'où :

$$I \cos \varphi = \frac{E \sin \delta}{X} \quad (\text{éq 2.2})$$

Théoriquement, la puissance électrique est donnée par :

$$P_e = V_{sssc} I \cos \varphi \quad (\text{éq 2.3})$$

Enfin, l'expression de la puissance électrique est obtenue en remplaçant (2.2) dans (2.3), ce qui donne :

$$P = \frac{EV_{sssc} \sin \delta}{X} \quad (\text{éq 2.4})$$

Avec :

E est la force électromotrice induite de la machine,

V_{sssc} est la tension simple du côté bus infini,

I est le courant de ligne,

φ est le déphasage entre le courant et la tension,

δ est le déphasage angulaire entre E et V_{sssc} appelé angle interne de la machine,

P_e est la puissance active produite par la machine et injectée dans le réseau infini,

X_s est la réactance synchrone équivalente de la machine $X_s = L_s \omega_s$.

ω_s est pulsation du stator appelée vitesse de synchronisation avec $\omega_s = 2\pi f$ ($f = 50\text{Hz}$ représente la fréquence fondamentale du réseau électrique),

Q est la puissance réactive produite par la machine et injectée dans le réseau infini.

Il y a lieu de noter que la puissance électrique (éq 2.4) est une fonction non linéaire de l'angle interne. Par conséquent, le système est non linéaire.

2.4. Modèle dynamique :

Afin d'établir l'équation dynamique liant l'angle interne de la machine et ses paramètres intrinsèques, le deuxième principe de la dynamique des solides en rotation est appliqué au rotor, il vient que :

$$\sum T = J \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (\text{éq 2.5})$$

Ou encore

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = T_m - T_e - T_f \quad (\text{éq 2.6})$$

2.6)

Où :

$\Delta\omega = \omega - \omega_s = \frac{d\delta}{dt}$ est l'écart de vitesse du rotor par rapport au champ tournant (*speed deviation*) et correspond à la variation de l'angle interne par rapport au temps,

J est le moment d'inertie de l'arbre de la machine.

T_m est le couple mécanique développé par la turbine,

T_e est le couple électromagnétique développé par la machine,

$T_f = \alpha \Delta\omega$ est le couple des frottement visqueux du rotor pour un coefficient des frottements visqueux α . Il est dû aux enroulements amortisseurs logés dans le stator,

Par ailleurs, l'expression du couple en fonction de la puissance pour toute machine tournante, supposée sans pertes, est telle que :

$$T = \frac{P}{\omega_s} \quad (\text{éq 2.7})$$

La substitution de (éq 2.6) dans (éq 2.5) conduit à :

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_s} - \frac{P_e}{\omega_s} - \alpha\Delta\omega \quad (\text{éq 2.8})$$

Or

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{d(\omega - \omega_s)}{dt} = \frac{d\omega}{dt}$$

Finalement le modèle du système de la figure 2.1 s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \\ J \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\omega_s} (P_m - P_e) - \alpha(\omega - \omega_s) \end{cases} \quad (\text{éq 2.9})$$

Pour des raisons de commodité, le modèle du système peut être reformulé autrement dans le système des unités relatives p.u, en introduisant la constante d'inertie H quantifiant l'énergie cinétique emmagasinée dans le rotor en rotation. L'expression de cette dernière en fonction du moment d'inertie et de la vitesse angulaire du rotor est donnée par :

$$H = \frac{1}{2} J \omega_s^2 \quad (\text{éq 2.10})$$

Il en découle que :

$$J = \frac{2H}{\omega_s^2} \quad (\text{éq 2.11})$$

La substitution de cette dernière équation dans (éq 2.9) conduit au modèle donné par l'équation (éq 2.12).

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega + d_\delta \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{D}{2H} \Delta\omega - \frac{\omega_s}{2H} P_e + \frac{\omega_s}{2H} P_m + d_\omega \end{cases} \quad (\text{éq 2.12})$$

où : $D = \alpha\omega_s^2$ est le coefficient de dissipation de la machine.

d_δ et d_ω sont des perturbations supposées être bornées. Elles représentent la résultante des incertitudes de modélisation autour des valeurs paramétriques nominales et des perturbations externes.

Afin de mieux illustrer, cette dernière équation est représentée à la figure 2.3 sous forme de schéma fonctionnel.

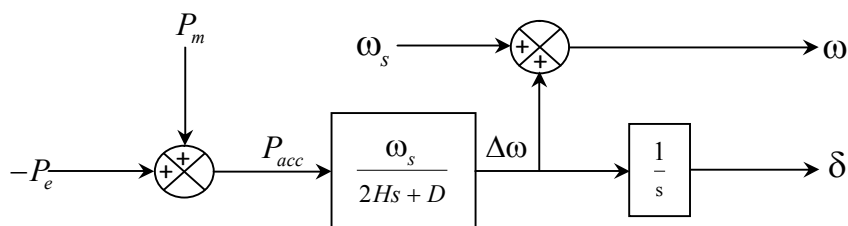


Figure.2.3 Schéma fonctionnel du système.

Les grandeurs d'état du système coïncident avec ses sorties et sont, bien-entendu, l'angle rotorique δ et la déviation de pulsation $\Delta\omega$ image de la déviation de fréquence Δf . La grandeur réglant les sorties est la puissance électrique tirée de la machine par le SSSC et injectée dans le réseau infini à travers la ligne d'évacuation.

Remarque : La dynamique électrique des courants imposés par le SSSC (en boucle fermée) est très rapide par rapport à la dynamique mécanique de la machine. Par conséquent, elle est négligée. Aussi, somme-nous intéressés uniquement à la dynamique de la machine (éq 2.12).

2.5. Conclusion :

Le présent chapitre a été consacré à la modélisation du système SMIB en exploitant certaines hypothèses usuelles, le circuit équivalent et le diagramme vectoriel correspondant. Le modèle obtenu est non linéaire d'ordre 2.

Chapitre III :
Commande du Système
SMIB

3.1. Introduction :

La stabilité transitoire est la capacité du système à maintenir le synchronisme lorsqu'il subit une perturbation transitoire sévère (défaut, perte d'une tranche de production, perte d'une tranche de charge, ... etc.). La réponse du système provoque de larges excursions de l'angle interne et elle est influencée par la loi non linéaire puissance-angle (éq 2.4). La stabilité dépend à la fois de l'état initial du système et de la sévérité de la perturbation survenue. Habituellement, le système est altéré à tel point que son état d'équilibre change de point de fonctionnement.

Il peut se produire dans le système des perturbations dont le degré de sévérité et la probabilité d'occurrence varient largement. Cependant, on doit opérer de sorte que le système soit stable pour un ensemble limité de contingences. Les défauts couramment considérés sont les défauts (courts-circuits) de différents types : monophasé, biphasé ou triphasé, ou bien les variations brusques de charge ou de production. Ils sont supposés se produire sur des ouvrages de transport, mais occasionnellement les défauts transformateur ou barres sont aussi considérés. Les défauts sont supposés éliminés (perturbations rejetées) dès que les protections sont actionnées pour isoler l'élément perturbateur. Cela se fait, dans certains cas, à très grande vitesse [7].

Le système SMIB a été modélisé par un équivalent de Thévenin entre la machine et le réseau infini avec prise en compte du dispositif SSSC ; la raison pour laquelle les paramètres du modèle sont en variation continue d'un point de fonctionnement à l'autre selon le changement de topologie du réseau complet ainsi que les grandeurs électrique de chaque nœud du réseau.

Dans le présent chapitre, il sera question de synthétiser une loi de commande robuste utilisant la technique des modes glissants afin de piloter le système dans le but d'amortir les oscillations hypo-synchrones dues à une contingence sévère qui heurte le système électrique.

3.2. Cahier des charges :

Afin d'avoir un amortissement suffisant et performant, le système de commande devrait forcer l'amplitude des oscillations à s'annuler au bout d'un laps de temps suffisamment petit avant que les protections par variation de fréquence déclenche l'élément affecté (ligne, transformateur, machine ... etc.) ou que la machine décroche par insuffisance de marche angulaire ($\delta \approx 90^\circ$). Pour ce faire, la déviation de vitesse $\Delta\omega$ doit être réglée à sa valeur de référence qui est, bien entendu, nulle. De même, l'angle interne δ doit être réglé à sa valeur de référence δ_0 qui représente sa valeur initiale juste avant la contingence.

3.3. Stratégie de commande :

D'après (éq 2.12), afin d'amortir les oscillations hypo-synchrones en réglant δ et $\Delta\omega$, il faut choisir comme grandeur de commande :

- ✓ la puissance mécanique P_m fournie à l'arbre de la machine par la turbine. Cette puissance est l'image du couple mécanique T_m qui peut être ajusté en faisant varier le débit du fluide actif (vapeur, gaz...etc.) par l'intermédiaire du système de *fast-valving* (mécanisme très rapide d'ouverture/fermeture des valves), ou

- ✓ la puissance électrique P_e produite par la machine et injectée dans le réseau. Cette puissance peut être ajustée par le SSSC en faisant varier sa réactance série X_{SSC} .

Dans ce travail, on adoptera la deuxième stratégie de commande en considérant comme grandeur de commande la réactance X_{SSC} . La puissance mécanique nominale P_m est considérée comme perturbation mesurable.

3.4. Synthèse de la commande par modes glissants :

La commande par mode glissant est une commande robuste passive, le choix adéquat du gain de commande permet d'anticiper sur les effets des erreurs de modélisations et éventuellement les signaux perturbateurs et non connues à priori.

La théorie des systèmes à structure variable fait l'objet de multiples études depuis une cinquantaine d'années. Les premiers travaux sur ce type de systèmes sont ceux d'Anosov, de Tzypkin et d'Emelyanov dans l'ancienne URSS, ou ceux d'Hamel en France, sur la commande à relais. Ces recherches ont connu un nouvel essor à la fin des années soixante-dix lorsque Utkin introduit la théorie des modes glissants [8]. Actuellement, cette technique de commande connaît une large gamme d'applications dans des domaines très variés tels que la robotique, la mécanique et l'électrotechnique.

L'idée de base de la commande par modes de glissants consiste à ramener le vecteur d'état du système dans une région de l'espace d'état convenablement sélectionnée, connue sous le nom de surface de glissement (propriété d'attractivité). Une fois que le vecteur d'état s'y trouve, la commande le force à y rester (propriété d'invariance).

La surface de glissement S qui garantit peut être choisie comme l'erreur filtrée suivante [9]:

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad (\text{éq 3.1})$$

où : λ est un gain de conception positif.

$e = \delta - \delta_0$ est l'erreur de régulation de l'angle interne.

Pour stabiliser l'erreur de poursuite, la loi de commande (éq 3.2) est proposée :

$$X_{sssc} = \frac{\omega_s EV_{sssc}}{P_m + \left(\frac{2H\lambda - D}{\omega_s} \right) \cdot \Delta\omega + \frac{2Hk}{\omega_s} \text{sign}(S)} \sin(\delta) - (X_t + X_s) \quad (\text{éq 3.2})$$

où : k est un gain de conception positif vérifiant la condition de robustesse suivante :

$$k > \bar{d} > |d_\omega + \lambda d_\delta| \quad (\text{éq 3.3})$$

Théorème : la loi de commande (éq 3.2) sous la condition (éq 3.3) stabilise l'erreur filtrée en temps fini.

Preuve : la fonction de Lyapunov définie positive et radialement non bornée V est choisie telle que :

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{éq 3.4})$$

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par :

$$\dot{V} = S\dot{S} \quad (\text{éq 3.5})$$

L'exploitation de (éq 3.3) et (éq 3.1) conduit à :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S(\ddot{e} + \lambda\dot{e}) \\ &= S\left(\frac{d\Delta\omega}{dt} + \lambda \frac{d\delta}{dt} \right) \end{aligned} \quad (\text{éq 3.6})$$

L'utilisation de (éq 2.4) et (éq 2.12) permet d'exprimer $\frac{d\Delta\omega}{dt}$ par :

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{D}{2H} \Delta\omega - \frac{\omega_s EV_{sssc}}{2HX_\Sigma} \sin(\delta) + \frac{\omega_s}{2H} P_m + d_\omega \quad (\text{éq 3.7})$$

où : X_Σ représente la réactance équivalente entre le SSSC et la machine. Celle-ci est donnée par :

$$X_{\Sigma} = X_s + X_t + X_{sssc} \quad (\text{éq 3.8})$$

En remplaçant dans (éq 3.6) $\frac{d\Delta\omega}{dt}$ par son expression déduite de (éq 3.7), il vient :

$$\dot{V} = S \left(-\frac{D}{2H} \Delta\omega - \frac{\omega_s EV_{sssc}}{2H(X_s + X_t + X_{sssc})} \sin(\delta) + \frac{\omega_s}{2H} P_m + d_{\omega} + \lambda\Delta\omega + \lambda d_{\delta} \right) \quad (\text{éq 3.9})$$

L'insertion de la commande X_{sssc} donnée par (éq 3.2) dans (éq 3.9) conduit à :

$$\dot{V} = S(-k \text{sign}(S) + d_{\omega} + \lambda d_{\delta}) \quad (\text{éq 3.10})$$

Il en résulte que \dot{V} peut être majorée comme suit :

$$\dot{V} \leq (|d_{\omega} + \lambda d_{\delta}| - k)|S| \quad (\text{éq 3.11})$$

En prenant en compte la condition (3.3), il vient :

$$\dot{V} \leq -\rho|S| \quad (\text{éq 3.12})$$

avec $\rho = k - \bar{d}$.

Cela prouve que \dot{V} est définie négative. Par conséquent, toutes les grandeurs sont bornées de plus, la surface S converge en temps fini vers zéro [10].

En régime de glissement, $S \equiv 0$ et l'équation différentielle régissant l'erreur de poursuite e est :

$$\dot{e} = -\lambda e \quad (\text{éq 3.13})$$

qui admet pour solution $e(t) = e(0)e^{-\lambda t}$. Il s'en suit que les erreurs de régulation en δ et en $\Delta\omega$ sont asymptotiquement stable. Cela achève la preuve du théorème.

La figure (3.1) représente le schéma de commande par modes glissants du système SMIB.

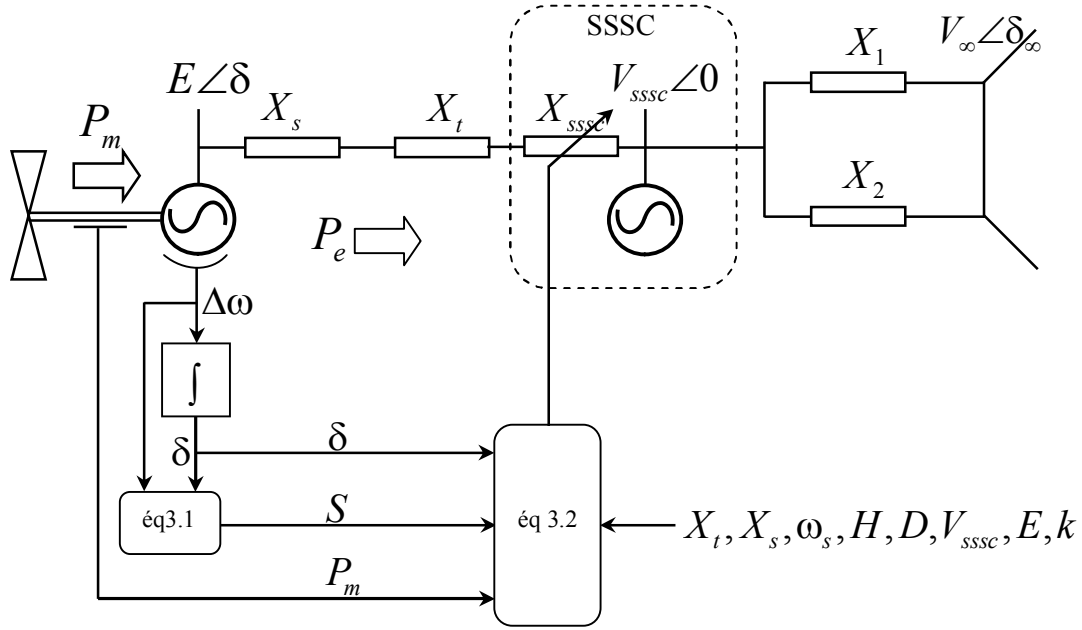


Figure.3.1. Schéma du dispositif de commande.

3.5. Simulation et discussion :

Les valeurs de base sont choisies telles que :

La puissance apparente de base : $S_{base} = 100 \text{MVA}$,

La tension de base : $U_{base} = 220 \text{kV}$,

L'impédance de base : $Z_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} = 484 \Omega$,

La pulsation fondamentale du système : $\omega_s = 2\pi f = 100\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,

Les paramètres du système sont tels que : $H = 4 \text{s}$; $D = 0.04$; $E = 1.04$; $V_\infty = 1.00$; $P_m = 3.00$;

$X_d = 0.10$; $X_t = 0.10$; $X_1 = 0.20$; $X_2 = 0.20$; $\delta_0 = 30^\circ$.

Les paramètres du système de commande : $V_{sssc} = 1.00$; $\delta_{sssc} = 0^\circ$; $\lambda = 10$; $k = 100$.

Pour les simulations, trois tests sont considérés, à savoir :

Test 1 : un défaut au jeu de barres transformateur survient à $t = 5 \text{ s}$ et est éliminé à $t = 5.06 \text{ s}$.

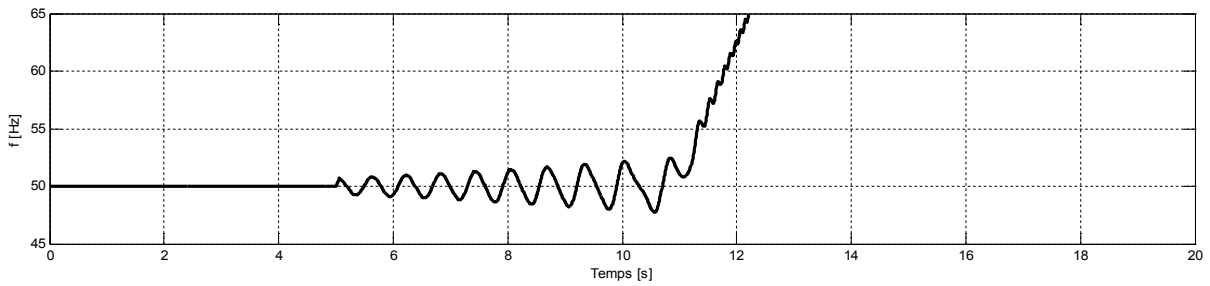
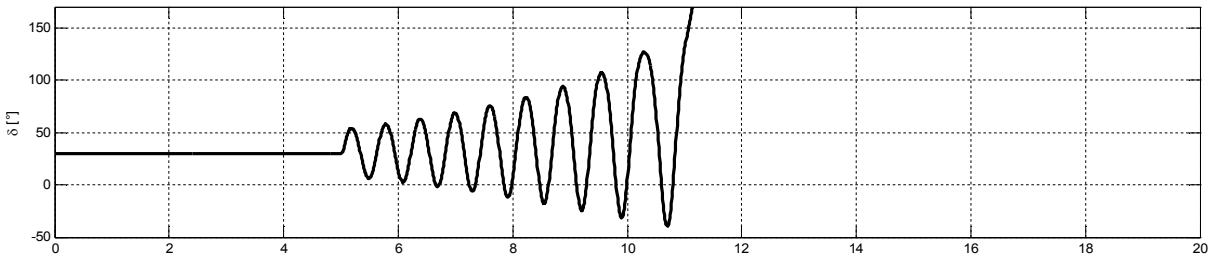
Test 2 : une chute de la puissance mécanique de 50% survient à $t = 5 \text{ s}$ et est éliminée à $t = 6 \text{ s}$.

Test 3 : une chute de la f.e.m de 20% survient à $t = 5 \text{ s}$ et est éliminée à $t = 6 \text{ s}$.

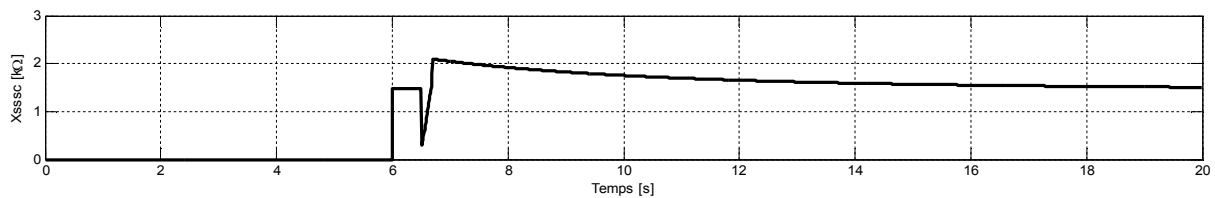
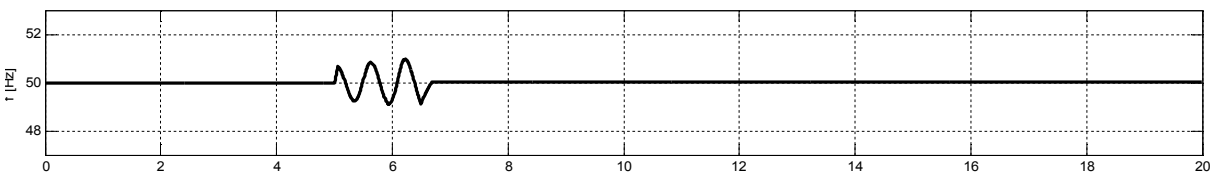
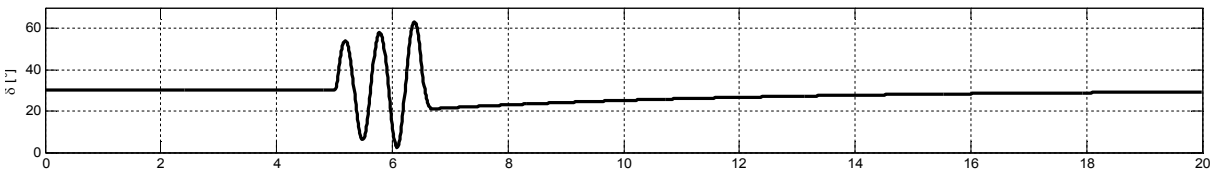
Pour les tests 1, 2 et 3, le système de commande est mis en marche à $t = 6.5 \text{ s}$ après que la contingence ait été détectée.

Remarque : Afin de réduire le phénomène nuisible de chattering dû à la fonction discontinue $x \mapsto \text{sign}(x)$, celle-ci est substituée par la fonction douce $x \mapsto \tanh(x)$.

Les résultats de simulation sont donnés aux figures 3.2 – 3.4.

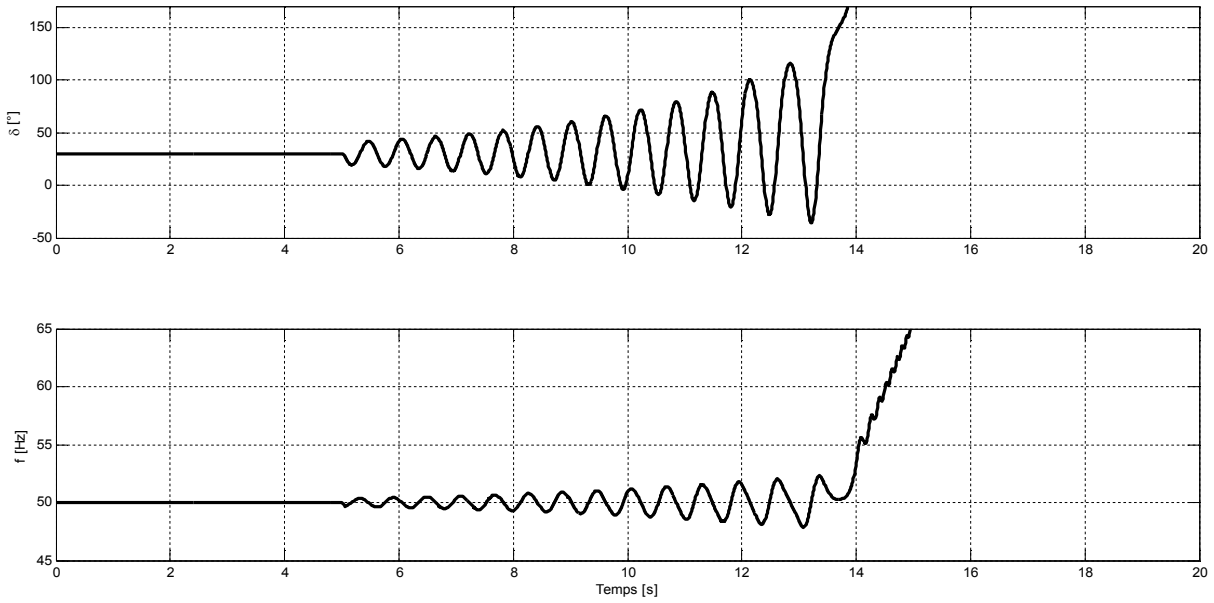


(a) sans SSSC

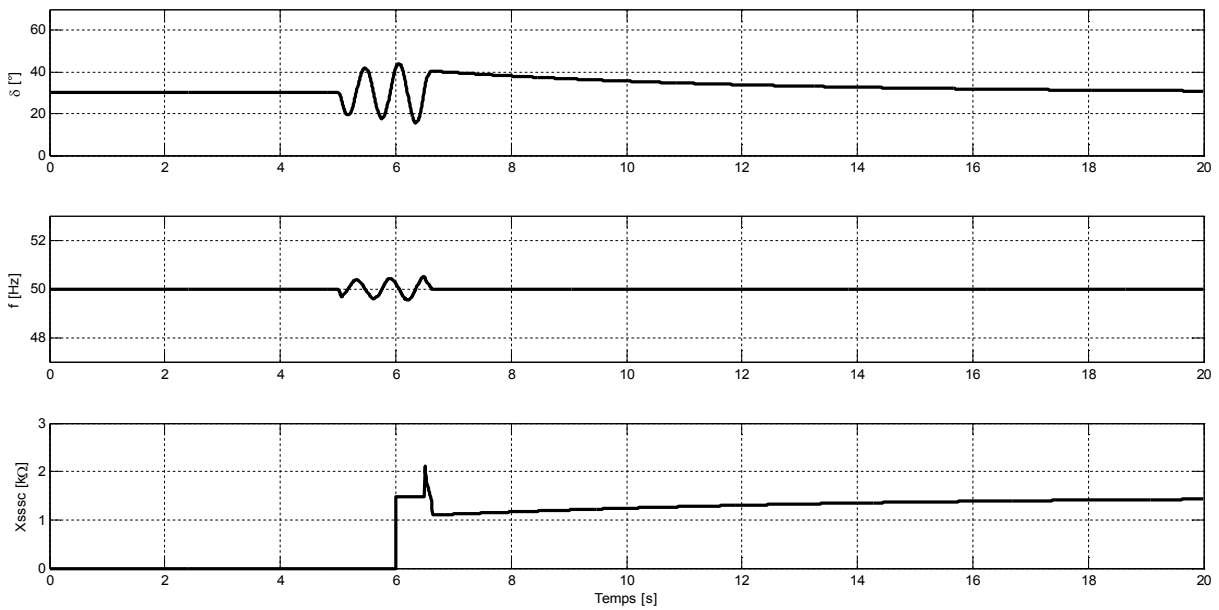


(b) avec SSSC

Figure.3.2. Réponse du système pour le test 1.

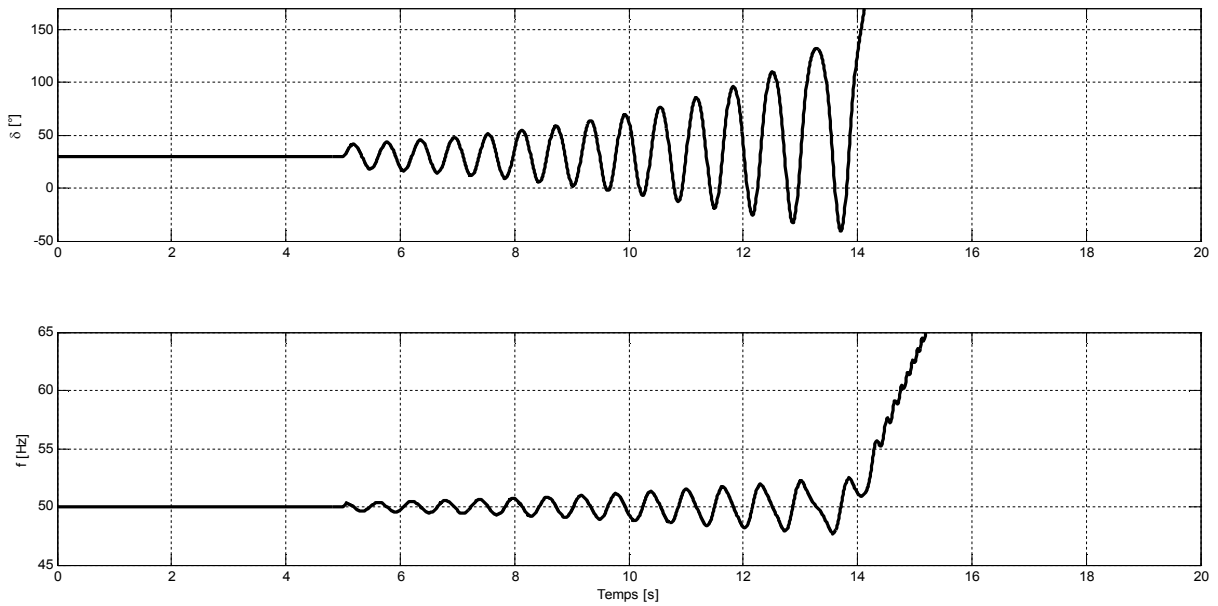


(a) sans SSSC

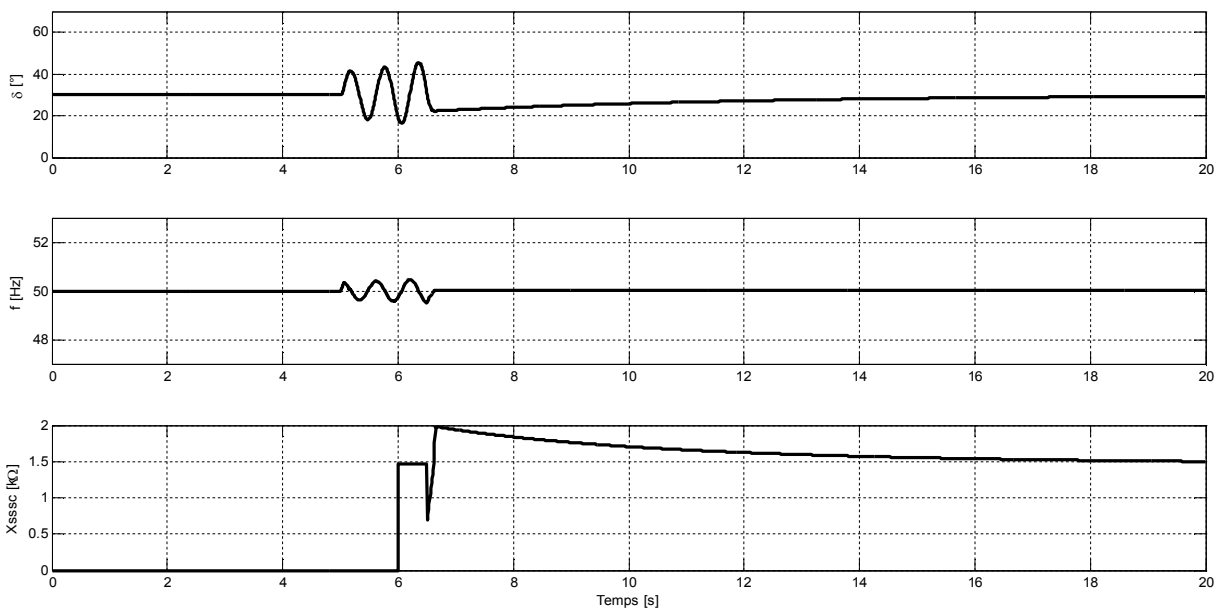


(b) avec SSSC

Figure.3.3. Réponse du système pour le test 2.



(a) sans SSSC



(b) avec SSSC

Figure.3.4. Réponse du système pour le test 3.

D'après les résultats de simulation du système en l'absence du SSSC, la contingence provoque un train d'oscillations d'amplitude croissante, par conséquent, la machine cours le risque de décrochage et le réseau court un black – out en perdant d'une part une tranche importante de production et d'autre part, en atteignant des seuils de fréquence intolérables.

Les résultats de simulation montrent aussi que la commande par modes glissants est robuste aux variations de paramétriques et incertitudes externes.

3.6. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la commande du système SMIB modélisé au chapitre II. Nous avons exposé le problème de fonctionnement du système relatif aux oscillations hypo-synchrones, formulé un cahier des charges puis synthétisé une loi de commande utilisant la technique des modes glissants, pour pallier aux insuffisances des commandes classiques en présence d'incertitudes paramétriques et/ou de perturbations externes.

Cette méthode de commande a été appliquée avec succès au système SMIB dans l'objectif d'amortir les oscillations hypo-synchrones et de stabiliser la fréquence. En effet, les résultats de simulations montrent que, juste après l'apparition de la contingence, le système de commande a permis d'insérer suffisamment de compensation inductive pour amortir efficacement les oscillations et stabiliser par conséquent la fréquence.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'énergie électrique se transporte difficilement ce qui entraîne un réseau électrique à la fois dense et maillé. Il faudrait assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport – consommation afin d'en maîtriser la stabilité. Une défaillance peut potentiellement avoir des conséquences néfastes sur l'ensemble du réseau interconnecté (blackout par exemple).

Le comportement d'un réseau face aux problèmes de stabilité dépend du lieu, de la nature et de l'ampleur de la perturbation. Cette dernière peut être de nature graduelle ou brusque (variations lentes de la charge, du plan de tension, court-circuit sévère, perte d'ouvrages de production ou de transport ...etc.). De ce fait, les études et l'expérience ont réparti la stabilité du système électrique en trois types : stabilité statique, dynamique et transitoire [1].

Dans le chapitre deux, on a considéré les différents composants du réseau électrique à savoir : le générateur d'énergie électrique, la ligne de transport, le transformateur et les charges électriques. En établissant les modèles mathématiques de ces composants, nous avons pu nous adapter à l'étude de la stabilité transitoire.

Pour palier aux défaillances et aux problèmes de stabilité, nous avons choisi d'agir sur la puissance électrique tirée et modulée par un dispositif FACTS de type SSSC. Par conséquent, notre étude a porté sur un système où le réseau est précédé d'un SSSC pour la modulation de la puissance électrique [11].

Le SSSC est un actionneur à faible coût pour la stabilité du réseau électrique qui répond à des perturbations importantes par une modulation très rapide de la puissance électrique par insertion d'une réactance variable. Cette méthode est très sophistiquée doit équiper les centrales modernes en raison de son efficacité et sa puissance en terme d'amortissement des oscillations électromécanique [11].

A la lumière des simulations réalisées dans le dernier chapitre, nous pouvons conclure qu'en boucle ouverte et en régime de défaut, ces oscillations de l'angle interne peuvent entraîner la perte de synchronisme. Pour cela, nous avons exposé dans le chapitre trois une méthode de commande basée sur les modes glissants afin de moduler la puissance électrique générée par la machine et de parvenir à atténuer l'effet néfaste du défaut. Cela permet au

Conclusion Générale

réseau de maintenir le synchronisme en présence du défaut. Bien-entendu, la durée du défaut ne doit pas excéder un seuil bien défini de 60 ms.

Ce travail montre à travers les simulations qu'il est possible d'appliquer la commande robuste par modes glissants pour la stabilisation de l'angle interne d'une machine synchrone équipée d'un SSSC.

Comme perspectives à ce travail, il serait intéressant de considérer un système multi-machines ou d'introduire des injections de puissance à énergie renouvelable connues par les difficultés de synchronisation.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]: P.Kundur, «Power system stability and control», A volume in the EPRI Power System Engineering Serie
- [2]: K. Sebaa, “Commande intelligente pour l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique”, Thèse de Doctorat, USTHB, Algérie, 2008.
- [3] : M. Crappe et al., “Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques”, Hermes Science Publications, 2003
- [4]: J. Raymongue, «*La localisation des défauts sur les réseaux HTA – Pourquoi ?, Comment ?*» EDF R&D, HR 44/02/016/A 20 mars 2002
- [5]: Sonelgaz, Tractebel, CESI, “Feasibility study of the interconnection of the electrical networks of Egypt, Libya, Tunisia, Algeria, Morocco on 400/500 KV”, Arab fund for economic and social development, ELTAM March 2004
- [6]: Kanungo Barada Mohanty, « Sensorless sliding mode control of induction motor drives». Electrical Engineering département, National Institute of Technology, Rourkela 769008, India
- [7] : RTE, “Mémento de la sûreté du système électrique”, Edition 2004, EDF, France.
- [8]: A. HAMACHE «Investigation sur les modèles de commande d'un UPFC en vue de regular le flux de puissance dans une interconnexion THT d'un réseau électrique», Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique, 2015
- [9]: Khalil, H.K. Nonlinear Systems, Third Edition, Prentice Hall, 2002, 750p.
- [10]: Utkin, V.I. Sliding mode in control and optimization. Springer Verlag, 1995, 287 p.
- [11]: N. Hingorani et L. Gyugyi, “Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems”. New York, USA: IEEE Press, 2000.