

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

Réalisé par : Hambli karim et Mansouri rabah

Thème

**Contrôle optimisé des systèmes FACTS pour améliorer la stabilité
transitoire des réseaux électrique**

Soutenu le: 13/06/2024

Devant la commission composée de :

Mr : H.HOUASSINE	M.C.A Univ. Bouira	Président
Dr Touafek M. Yakoub	M.C.A Univ. Bouira	Encadrant
S.MADI	M.C.B Univ. Bouira	Examineur

Remerciement

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers ALLAH, qui nous a accordé la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce modeste mémoire de Master. Nous adressons également nos sincères remerciements à notre famille. Leur amour, leurs encouragements et leur soutien constant ont été des sources inestimables d'inspiration et de motivation, jouant un rôle crucial dans notre réussite.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance à notre encadrant, Dr Touafek M. Yakoub, pour ses précieux conseils, son expertise et son soutien.

Nous remercions également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail :

Dr.....

Mr.....

Dr.....

.....

.....

.....

Bouira, le 13/juin /2024

.....

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes frères et sœurs, à mes enfants Mohamed Baraa, Chaimaa et Abderahmane, à mon épouse, à ma famille, ainsi qu'à mes amis. Je le dédie également à la mémoire de mes chers parents. Que Dieu, le Tout-Puissant, les accueille dans Son vaste paradis.

Hamblī karīm

Je consacre ce travail modeste à mes parents qui n'ont jamais cessé de me soutenir sans cesse tout au long de mes études. Je demande à Dieu le tout-puissant de leur accorder sa miséricorde et de les accueillir dans son immense paradis.

Mansouri Rabah

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	I
1.1. Introduction	3
1.2. Définition de Réseau électrique.....	3
1.3. Définition de Stabilité	3
1.4. Différents types de la stabilité de système de puissance	4
1.4.1. Stabilité angulaire	4
1.5. Relation entre la puissance électrique et l'angle rotorique ($P-\delta$).....	5
1.5.1. Critère d'égalité des aires	6
1.6. Stabilité de tension.....	8
1.6.1. Stabilité de tension à court terme.....	9
1.6.2. La stabilité de tension à long terme	9
1.6.3. Stabilité de tension aux petites perturbations.....	9
1.7. La stabilité de fréquence	9
1.8. Amélioration de la stabilité par les FACTS.....	9
1.8.1. Compensateur statiques parallèle.....	10
1.8.2. Compensateurs séries.....	12
1.8.3. Compensateur statiques hybrides.....	14
1.9. Contributions de la commande des divers régulateurs de FACTS[6].....	15
1.10. Technique de control des Systèmes FACTS	16
1.10.1. Réglage des paramètres des contrôleurs FACTS (état de l'art)	16
1.11. Conclusion.....	21
 <i>Chapitre 02</i>	 22
 LES REGULATEUR PID	 22
2.1. Introduction	23
2.2. Définition	23
2.3. Qualité d'un asservissement et performances d'un système	24
2.3.1. Stabilité.....	24
2.3.2. Rapidité.....	24
2.3.3. Précision	25
2.4. LES ACTIONS ELEMENTAIRES	26
2.4.1. Régulateur à action proportionnelle (P)	25
2.4.2. Régulateur à action intégrale (I)	26
2.4.3. Régulateur à action dérivée (D).....	27

2.4.4. Régulateur à action Proportionnelle-Intégrale (PI)	29
2.4.5. Régulateur à action Proportionnelle-Dérivée (PD)	31
2.4.6. Régulateur à action Proportionnelle-Intégrale-Dérivée (PID)	31
2.5. DOMAINE TECHNIQUE	34
2.6. Dimensionnement des régulateurs	34
2.6.1. Méthodes de synthèse du régulateur PID	34
2.6.2. Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte (première méthode de Ziegler- Nichols)	35
2.6.3. Méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée.....	35
2.7. Principes de base du PID.....	36
2.7.1. Composants de base.....	36
2.7.2. Contrôle proportionnel (P)	36
2.7.3. . Commande différentielle (D).....	36
2.7.4. Contrôle intégral (I)	36
2.8. Classification du contrôle PID.....	36
2.8.1. Contrôle PID prédictif.....	37
2.8.2. Contrôle PID adaptatif	37
2.9. Conclusion.....	38
<i>Chapitre 03</i>	<i>38</i>
3.1. Introduction	40
3.2. Contrôleur PI	40
3.3. Conception d'un régulateur PI.....	41
3.3.1. Résultats Action proportionnelle	41
3.3.2. Action intégrale	41
3.4. Optimisation des paramètres du régulateur par la méthode des moindres carrés.....	42
3.5. Structure de la commande PI pour le contrôle de la tension	42
3.6. Compensateur statique de puissance réactive SVC	42
3.7. Procédure de simulation.....	43
3.8. Résultats de simulation	48
3.8.1. Premier scénario	48
3.8.2. Deuxième scénario.....	51
3.8.3. Troisième scénario.....	51
3.8.4. Quatrième scénario.....	52
3.9. Conclusion.....	53
Conclusions Générales.....	55

Liste des figures

Figure 1-1. Classification de la stabilité des réseaux.....	4
Figure 1-2. Machine synchrone connecte a un jeu de barre infini.....	5
Figure 1.3 Relation puissance- angle de rotor.....	6
Figure 1-4 Evolution de la puissance électrique en fonction des angles rétorques.....	7
Figure 1-5 SVC (Compensateur Statique de Puissance Réactive).....	11
Figure 1-6 Compensateur statique synchrone	11
Figure 1-7 Schéma de principe d'un TCSC.....	12
Figure 1-8 a) Schéma unifilaire de SSSC b)mode fonctionnement de SSSC.....	13
Figure 1-9 Schéma de base de l'UPFC.....	14
Figure 1-10 IPFC Schéma avec deux SSSC	15
Figure 1-11 Emplacement du contrôleur neurone-flou sur la SSSC	18
Figure 2-1 Schéma d'une boucle de régulation.....	23
Figure 2-2 Stabilité du système.....	24
Figure 2-3 Rapidité du système	25
Figure 2-4 Précision d'un système	25
Figure 2-5 Régulateur P	26
Figure 2-6 Exemple de réalisation électronique du régulateur P.....	27
Figure 2-7 Régulateur I.....	27
Figure 2-8 Exemple de réalisation électronique du régulateur I.....	28
Figure 2-9 Régulateur D.....	29
Figure 2-10 Exemple de réalisation électronique du régulateur D.....	30
Figure 2-11 Régulateur PI	30
Figure 2-12 Structure en série du régulateur PI	31
Figure 2-13 Structure en parallèle du régulateur PI	31
Figure 2-14 Exemple de réalisation électronique du régulateur PI	31
Figure 2-15 Régulateur PD.....	32
Figure 2-16 Structure en parallèle du régulateur PID.....	33
Figure 2-17 Structure mixte du régulateur PID.....	33
Figure 2-18 Réponse indicielle en boucle ouverte	35
Figure 2-19 Réponse indicielle en boucle fermée	35
Figure 3-1 Structure d'un contrôleur PID.....	40
Figure 3-2 Système en boucle fermée contrôlé par un régulateur PI.....	41
Figure 3-3.Module avancé de l'SVC.....	42
Figure 3-4.Réseau de test.....	44

Figure 3-5 SVC avec PI controller	45
Figure 3-6 .Schéma de simulink	46
Figure 3-7 .a tension de ligne avec connexion de charge importante .b Tension de charge avec SVC Optimisé et non optimisé.....	47
Figure 3-8 variation de courant avec SVC optimisé et non optimisé b).Variation de la susceptance de l'SVC dans les deux cas optimisé et non optimisé.....	48
Figure 3-9 Variation de l'erreur avec le contrôle optimal et non optimal.....	49
Figure 3-10 .a Variation de substance de SVC avec charge capacitive .b tension avec charge capacitive	50
Figure 3-11.a Variation de la susceptance de l'SVC et b variation susceptance, courant et tension	51
Figure 3-12 Variation B de SVC et courant injecté avec tension réseaux en cas connexion de deux charges.	51
Figure 3-13.a Variation de la susceptance de l'SVC et b variation susceptance, courant et tension.....	52
Figure 3-14 Variation B de SVC et courant injecté avec tension réseaux en cas connexion de deux charge..	53

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

Acronymes

AVR	Automatic Voltage Regulator
BSVC	Susceptance du SVC
DC	direct curen
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
HT / THT	Haute Tension / Très Haute Tension
HVDC	High Voltage Direct Current
IPFC	Interlines Power Flow Controller
MOM	Méthode de la Moyenne des Maximums
NFC	Neuro-flou Contrôle.
PSS	Power System Stabilizers
PSO	Particle Swarm Optimization
RN	Réseaux de Neurones
SSSC	StaticSynchronousSerieCompensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
TCSC	Thyristor Contrôled Serie Capacitor
TCR	ThyristorContrôled Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
TSSC	ThyristorSwitshedSerie Capacitor
UPFC	Unified Power LfowController

Symboles

ϕ_d, ϕ_q	Composante directe et quadrature de flux magnétique
I_q	Courant du STATCOM
X_L	Réactance de la ligne
X_T	Réactance de transformateur
A	L'angle d'amorçage du TCR
R_{fd}	Résistance et flux du circuit d'excitation de la MS
R_s	Résistance statoriques de la machine synchrone (MS)
I_q	Courant du STATCOM
U_T	Tension du STATCOM
u_s / i_s	Tension et courant du TCR

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur de l'énergie revêt une importance cruciale à l'échelle mondiale, étant un moteur essentiel pour le développement économique. Parmi les moyens de production d'électricité les plus vitaux figurent les machines synchrones. Cependant, leur fonctionnement dépend étroitement de la disponibilité continue d'une puissance mécanique adéquate. Cette exigence découle du fait que l'énergie électrique ne peut être stockée efficacement pour une utilisation ultérieure afin d'alimenter les consommateurs. Ainsi, le secteur de l'électricité est intégré dans les stratégies et politiques énergétiques des pays pour répondre à une demande croissante en énergie, résultant des progrès technologiques, industriels, de l'urbanisation et de la croissance démographique.

Afin de satisfaire les consommateurs, les compagnies d'électricité s'efforcent en permanence de construire des centrales et des réseaux. Les constructeurs sont confrontés à des pressions écologiques, des lois administratives strictes et des exigences de fournir une énergie suffisante, continue, de qualité et à un prix raisonnable. Cependant, les critères économiques, notamment les coûts d'investissement élevés, qui rendent la construction de nouveaux projets énergétiques très difficile. Cela oblige les investisseurs à éviter la construction de nouvelles centrales de production et à se tourner vers l'exploitation des réseaux existants. Il devient alors nécessaire d'interconnecter les réseaux électriques entre différents pays, comme par exemple le réseau algérien avec les réseaux voisins du Maghreb, voire même des interconnexions intercontinentales, ainsi que de coordonner les efforts entre les différentes entreprises industrielles et les sociétés de transport et de distribution.

Les compagnies d'énergie cherchent constamment à augmenter la capacité de transfert des lignes existantes, à condition que la tension reste dans les limites autorisées en tout point du réseau, même en présence de perturbations.

Pour maintenir le bon fonctionnement des réseaux en cas de perturbation, il était nécessaire d'utiliser des dispositifs électromécaniques, tels que des disjoncteurs, pour connecter ou déconnecter les condensateurs et les inductances sur la ligne. Ces dispositifs nécessitaient une maintenance systématique et préventive pour éviter les problèmes liés à l'usure et au vieillissement des contacts..

L'intégration des systèmes FACTS, grâce aux avancées de l'électronique de puissance et à une bonne coordination avec le PSS, permet un meilleur contrôle du flux de puissance et une amélioration des paramètres techniques des lignes électriques. Cela inclut la compensation de l'énergie réactive, le contrôle de la tension, et l'amélioration des capacités de transport de puissance active. Ces systèmes contribuent à équilibrer les charges sur les lignes en fonction de la demande d'énergie, ce qui augmente le facteur de puissance. Parmi les systèmes FACTS, Le SVC est essentiellement utilisé pour maintenir la tension du réseau dans des limites acceptables en compensant la puissance réactive et en régulant la tension.

Afin de garantir un réglage robuste des variations de tension dans un système de puissance

Un contrôleur robuste proportionnel-intégral (PI) basé sur la sensibilité absolue a été conçu pour un SVC. Ce contrôleur utilise des gains optimisés par la méthode des moindres carrés, ce qui permet d'ajuster efficacement la tension dans le système malgré les variations et les perturbations. Le mémoire est organisée en trois parties.

Dans le premier chapitre, la définition des réseaux et leurs différents modes de stabilité électrique est abordée. Les différents types de FACTS ainsi que leurs caractéristiques et l'impact de chaque type sur les paramètres du réseau électrique sont analysés et discutés. De plus, l'état de l'art concernant les méthodes de contrôle des FACTS est introduit. Le deuxième chapitre présente une étude détaillée des régulateurs P, PI et PID, incluant leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients.

Le troisième chapitre examine en profondeur l'application de la méthode des moindres carrés pour optimiser les paramètres du régulateur PI intégré dans le SVC, visant à assurer une régulation efficace de la tension.

En conclusion, une synthèse générale du travail réalisé sera présentée, accompagnée de commentaires sur les résultats obtenus.

1.1. Introduction

Il est essentiel que le réseau électrique maintienne en permanence une tension et une fréquence dans des limites acceptables à travers ses différents nœuds. Pour assurer cette stabilité, de nombreuses études sont réalisées afin de limiter les phénomènes indésirables qui pourraient influencer le système, tel que Les générateurs synchrones et leurs systèmes de commande, ainsi que les caractéristiques dynamiques des charges, sont des éléments essentiels qui influencent la stabilité du système électrique. En parallèle, les dispositifs électroniques de puissance, notamment ceux présentant des caractéristiques non linéaires comme l'hystérésis ou la saturation, ainsi que les phénomènes climatiques, jouent également un rôle crucial. Ces composants complexes peuvent introduire des perturbations significatives dans le système électrique, pouvant potentiellement perturber l'équilibre entre la production et la demande d'énergie [1].

Dans ce premier chapitre, nous abordons les concepts fondamentaux des réseaux électriques, les divers types de stabilité ainsi que les différents types de dispositifs FACTS utilisés pour améliorer cette stabilité. Nous explorons également les différents modes de contrôle appliqués aux dispositifs FACTS.

1.2. Définition de Réseau électrique

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés conçu:

- Pour production d'une façon continue de l'énergie électrique.
- transporter l'énergie électrique aux consommateurs.
- Un réseau électrique est composé de lignes aériennes, de câbles souterrains, de transformateurs et de jeux de barres. Il inclut également des dispositifs tels que des disjoncteurs, des sectionneurs et des systèmes de compensation [1].
- Dans les réseaux la chute de tension dépend fortement de puissance réactive consommée puisque les pertes en lignes augmente;
- l'angle de transport(θ) dépend principalement de la puissance active transmise.

1.3. Définition de Stabilité

La stabilité d'un réseau électrique fait référence à sa capacité à maintenir des conditions de fonctionnement sûres et fiables malgré les variations de charge, les perturbations externes et les défauts éventuels. C'est un aspect crucial pour assurer une distribution d'énergie efficace et continue à tous les utilisateurs connectés au réseau. En fonction de la nature et de l'intensité de la perturbation, on peut identifier trois catégories de stabilité [2].

1.4. Différents types de la stabilité de système de puissance

Le souci de stabilité était de garantir le bon fonctionnement des générateurs du système. Afin d'obtenir une production électrique satisfaisante, il est nécessaire que toutes les machines synchrones du système fonctionnent en synchronisme. Les dynamiques de l'angle de rotor du générateur et de la relation entre puissance et angle influencent cet aspect de la stabilité [2].

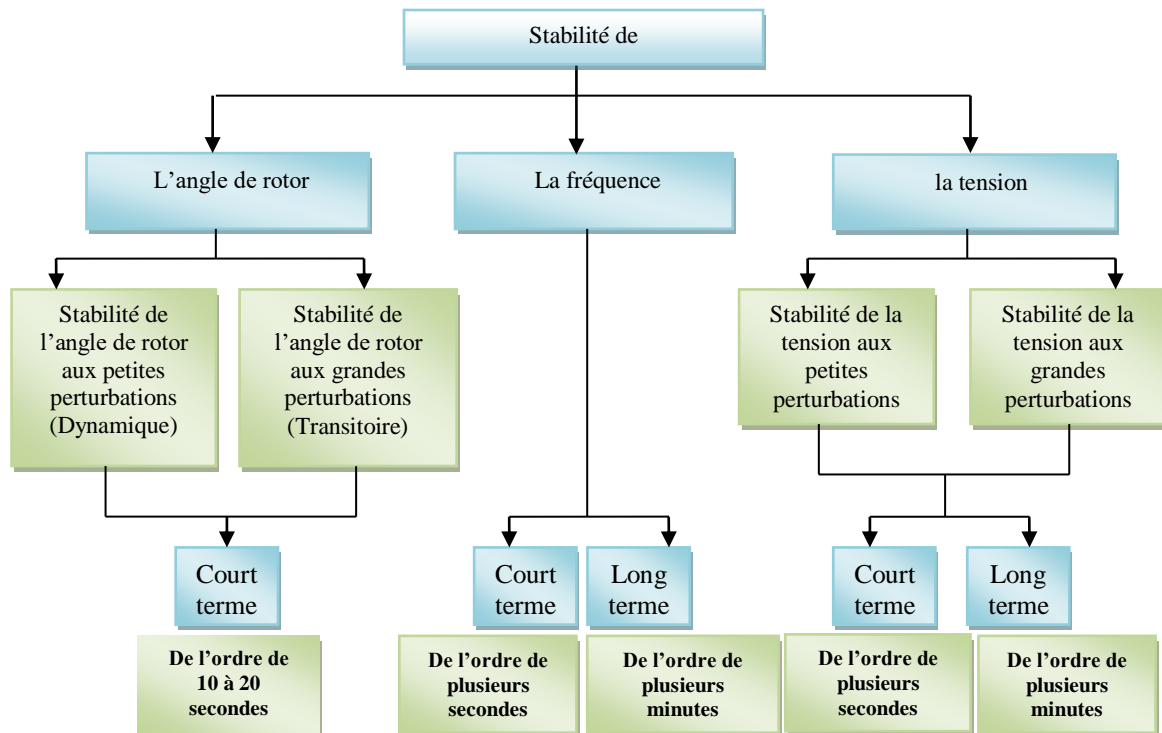


Figure 1-1. Classification de la stabilité de système de puissance [1].

Stabilité angulaire

Le niveau de stabilité de l'angle de rotor est évalué par la capacité des machines synchrones d'un système de puissance interconnecté à maintenir leur synchronisme après une perturbation. C a d La capacité à maintenir/rétablir l'équilibre entre les couples électromagnétiques et mécaniques de rotor de chaque machine synchrone [2].

1.4.1.1. Stabilité dynamique de rotor (pour petite perturbation)

Les petites perturbations qui peuvent apparaître dans les réseaux peuvent être causées par divers facteurs tels que la performance des différents équipements, les conditions de fonctionnement, le système d'excitation des générateurs, les transformateurs et les variations de la consommation. Ces fluctuations peuvent perturber l'équilibre du réseau, notamment l'angle des générateurs [7].

1.4.1.2. Stabilité transitoire (stabilité rotorique de perturbation majeur)

La stabilité de l'angle du rotor est définie comme la capacité du système électrique à maintenir sa synchronisation après une perturbation de forte amplitude, telle qu'un court-circuit, la perte d'un centre de production, ou de grandes variations de charges.

Pour expliquer cette approche, nous prenons un système de puissance simple constitué d'un générateur synchrone connecté à un jeu de barres infini via une ligne de transmission, Figure 1.2. Le générateur est modélisé par une source de tension idéale E_g en série avec une réactance X_g (modèle classique). La ligne et le transformateur sont représentés par la réactance X_E [1, 2, 8].

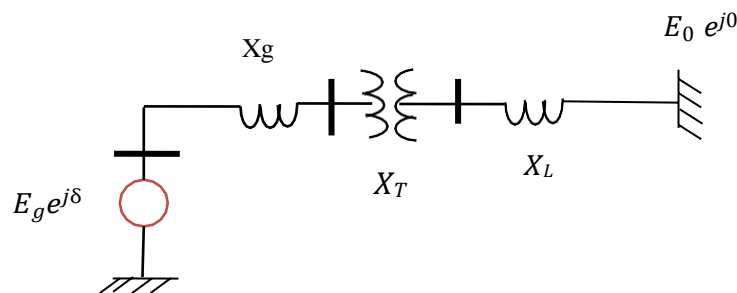


Figure 1-2. Machine synchrone connecte a un jeu de barre infini [2]

1.5. Relation entre la puissance électrique et l'angle rotorique (P- δ)

Dans l'état équilibré, la puissance produite par le générateur P_e est donné par l'équation suivant

$$P_e = \frac{E_g * E_0}{X_g * X_E} \sin \delta \quad \text{avec } X_E = X_T + X_L \quad (1.1)$$

Où, δ est l'angle de rotor, est le déphasage entre la tension interne du générateur (E_g) et la tension du jeu de barres infini (E_0).

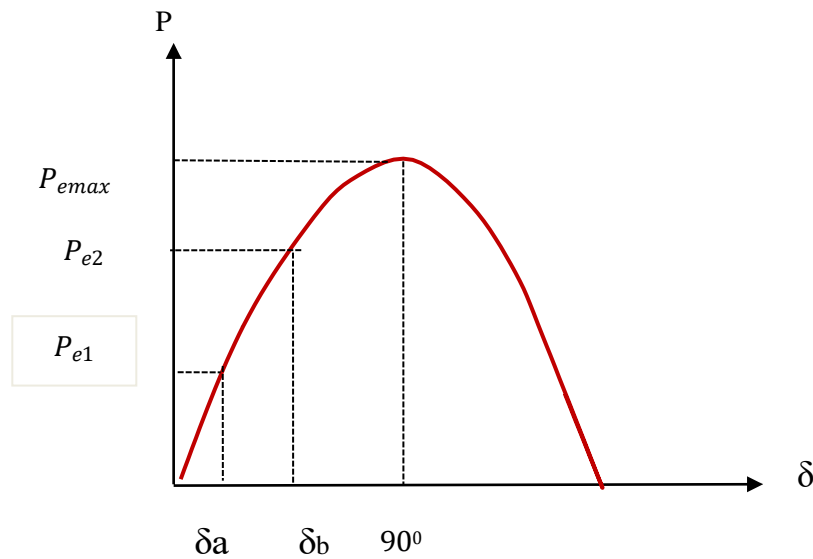


Figure 1.3 Relation puissance- angle de rotor[8]

A l'équilibre, la puissance P_{e1} est égale à la puissance mécanique appliquée sous l'angle δ_a correspondant.

Si la charge sur le générateur change soudainement, alors la puissance mécanique devra changer pour permettre aux génératrices de fournir la puissance P_{e2} nécessaire (Figure 1.3).

Par conséquent, afin de pouvoir fournir une puissance supplémentaire à la charge, le rotor accélère de sorte que l'angle de rotor change de δ_a à δ_b .

La puissance développée sous l'angle δ_b est suffisante pour la charge, mais le rotor continue au-delà de l'angle δ_b jusqu'à ce qu'un contre-couple suffisant soit développé pour arrêter cette accélération. Et ralentit le rotor ce qui réduit l'angle de déphasage. Les vibrations angulaires doivent être amorties pour que la machine restera stable et ne perde pas le synchronisme avec le système [1, 2,8].

1.5.1. Critère d'égalité des aires

- Un défaut appliqué au système pendant quelques périodes crée une augmentation de la puissance transmise, ce qui entraîne l'augmentation de l'angle de rotor δ .
- La première zone (zone A1, zone d'accélération) se situe au-dessous de la droite horizontale correspondant au point de fonctionnement initial (la droite de charge). Elle est limitée par les deux angles de rotor (δ_0 et δ_1) correspondant à l'apparition et à la disparition du défaut. Cette zone est caractérisée par l'énergie cinétique stockée par le rotor du fait de son accélération : $P_m > P_e$
- La deuxième zone (zone A2, zone de décélération), qui commence après l'élimination du défaut, se situe au-dessus de la droite de charge : elle est caractérisée par la décélération du rotor : $P_m < P_e$.

Si le rotor peut rendre dans la zone A2 toute l'énergie cinétique acquise durant la première phase, le générateur retrouvera sa stabilité. Mais si la zone A2 ne permet pas de restituer toute l'énergie cinétique, la décélération du rotor continuera jusqu'à la perte de synchronisme. [2,8].

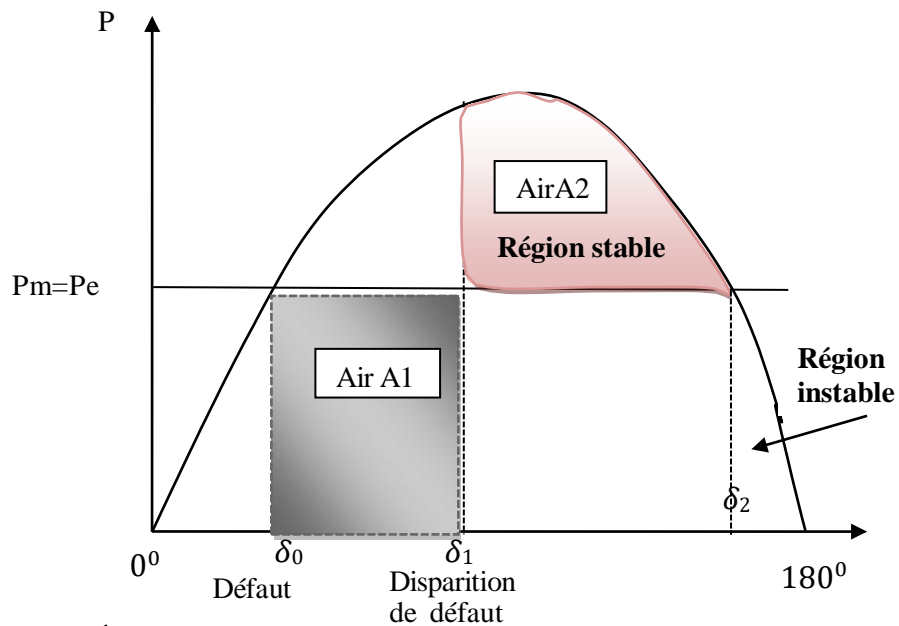


Figure 1-4 Evolution de la puissance électrique en fonction des angles rotoriques [2]

La relation entre les aires des zones (A1 et A2) et la stabilité transitoire peut être mathématiquement expliquée comme suit :

Équation du mouvement de générateur est donnée par la relation suivante

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{w_0}{2H} (Pm - Pe) \quad (1.2)$$

H : la constante d'inertie.

W0 : la vitesse de synchronisme.

P_m : la puissance mécanique fournie au générateur.

P_e : la puissance électrique du générateur.

En multipliant cette équation par $2 \cdot dt/d\delta$, en intégrant par rapport au temps et en faisant un changement de variables, nous obtenons :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + cte = \int_{\delta_0}^{\delta_2} \frac{w_0}{H} (P_m - P_e) d\delta \quad (1.3)$$

δ_0 : L'angle de rotor à l'instant de l'application de défaut.

δ_2 : L'angle à la fin de la période transitoire.

A l'instant $t=0$ $\delta = \delta_0$ alors $cte=0$

L'angle δ devint constant après élimination de défaut et le générateur va retrouver sa vitesse de synchronisme, lorsque $\frac{d\delta}{dt} = 0$ se qui donne

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} \frac{w_0}{H} (P_m - P_e) d\delta = 0 \Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_1} \frac{w_0}{H} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} \frac{w_0}{H} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (1.4)$$

Dou $A_1=A_2$ cette condition est appelée critère d'égalité des aires.

Cela peut être réalisé soit en augmentant la puissance électrique, soit en diminuant la puissance mécanique [8].

1.6. Stabilité de tension

La tension du réseau est dite stable lorsque le système de puissance est capable de maintenir des valeurs de tension acceptables à tous les nœuds après avoir subi une perturbation. L'équilibre entre la consommation et la production est donc essentiel pour assurer cette stabilité des tensions dans les nœuds.

L'instabilité de la tension et celle de l'angle de rotor sont souvent liées, l'une pouvant conduire à l'autre [3].

1.6.1. Stabilité de tension à court terme

La stabilité de tension à court terme inclut les applications à réponse rapide telles que l'arrêt d'un moteur à induction après une perturbation grave, les charges à commande électronique, les liaisons HVDC et les générateurs basés sur un onduleur [3].

1.6.2. La stabilité de tension à long terme

L'instabilité à long terme est généralement due à une perte d'équilibre à long terme, par exemple une prise de transformateur mal positionné, des charges contrôlées par thermostat et mauvais Stabilité de tension à la grande perturbation, Le souci dans ce cas est de maintenir des tensions normales aux nœuds de réseau électrique après une grande perturbation [3].

1.6.3. Stabilité de tension aux petites perturbations.

La stabilité de tension face aux petites perturbations désigne la capacité d'un système à maintenir des tensions stables lorsqu'il est exposé à de légères variations, comme les changements progressifs de charges. Elle est influencée par les caractéristiques des charges, les régulations continues de tension et les contrôles discrets à un moment précis. Ce concept permet de prédire comment les tensions évolueront en réponse aux petites fluctuations du système à tout moment [6].

1.7. La stabilité de fréquence

La stabilité de fréquence dans un système de puissance, c'est-à-dire le maintien de la vitesse nominale des générateurs, est lié à l'équilibre global entre la puissance produite et la puissance demandée par les consommateurs (incluant les pertes) [8].

Il est à noter que deux nouvelles classes de stabilité, à savoir la "Stabilité pilotée par le convertisseur" et la "Stabilité par résonance", ont été introduites en raison de la présence croissante de l'électronique de puissance (CIG) dans les systèmes électriques modernes [3].

1.8. Amélioration de la stabilité par les FACTS

De nombreuses études sur la stabilité des systèmes ont porté sur l'augmentation de la vitesse de contrôle des paramètres de ligne tels que la tension, l'impédance et le déphasage. Ces études ont conduit à l'utilisation des concepts FACTS (Flexible AC Transmission Systems) en parallèle et en série grâce à l'électronique de puissance, rendant ainsi le réseau plus flexible. La compensation parallèle offre un support de tension, tandis que la compensation en série est utilisée pour réduire l'impédance de ligne en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la

tension est trop basse, et en l'absorbant lorsque la tension est trop élevée [4].

1.8.1. Compensateur statiques parallèle

L'injection ou bien l'absorption de courant gras à une impédance variable par ses compensateurs branchés en parallèle avec le réseau permet de modifier la puissance véhiculé par la ligne.

Les compensateurs statiques shunts les plus couramment utilisés sont le SVC et le STATCOM. [9].

1.8.1.1. SVC (Compensateur Statique de Puissance Réactive)

Le FACTS de type SVC est le plus ancien appliqué dans les systèmes [5]. Un SVC est un compensateur placé en parallèle avec la ligne de transport, le SVC a comme rôle d'adsorber de l'énergie réactive. Par l'échange d'un courant inductif ou capacitif. Cela a permis de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, généralement la tension. Le SVC peut aider à atténuer les fluctuations de puissance en ajustant de manière appropriée la boucle de commande et en ajoutant des signaux supplémentaires.

Cad Lorsque la tension du réseau diminue, le SVC génère de la puissance réactive (SVC capacitif).

Lorsque la tension du réseau augmente le SVC absorbe la puissance réactive (inductive SVC).

Les caractéristiques d'un SVC sont les suivantes :

- Il repose sur des composants inductifs et capacitifs passifs.
- Il n'inclut pas de machines tournante.
- Le contrôlé à l'aide d'éléments d'électronique de puissance [1].

a. SVC type TCR(Réactance Contrôlé par Thyristor)

Un TCR est une inductance connectée en dérivation et contrôlée par un thyristor. Sa valeur effective peut être modifiée en ajustant l'amorçage du thyristor électronique. Un schéma d'un élément TCR pour une phase est illustré dans la Figure 1.5. En ajustant l'angle d'amorçage de 90° à 180° [1].

b. SVC type TSC (capacité commutée par thyristor)

Le TSC est un dispositif utilisé dans les réseaux contre les surtensions. Le TSC est en effet une capacité connectée en shunt, le thyristor est utilisé pour contrôler le moment où la capacité est activée ou désactivée

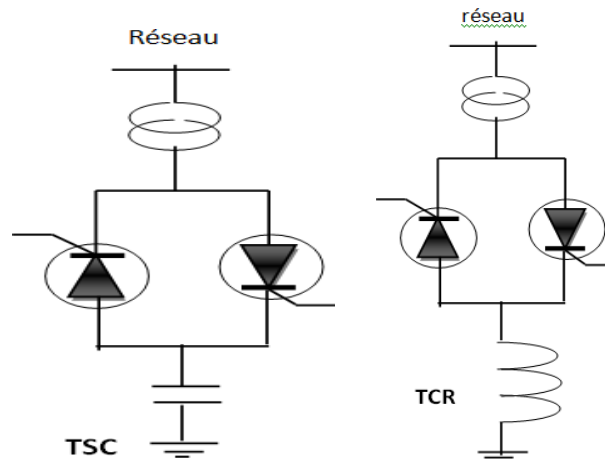


Figure 1-5 SVC (Compensateur Statique de Puissance Réactive) [6].

1.8.1.2. STATCOM (Compensateur Synchrone Statique de Puissance)

Son principe de fonctionnement est similaire à celui d'un compensateur synchrone statique. Des thyristors GTO hautes performances. Sont utilisés dans ces compensateurs pour connecter de manière synchrone des batteries en mode inductives et capacitatives au réseau. a travers d'un transformateur

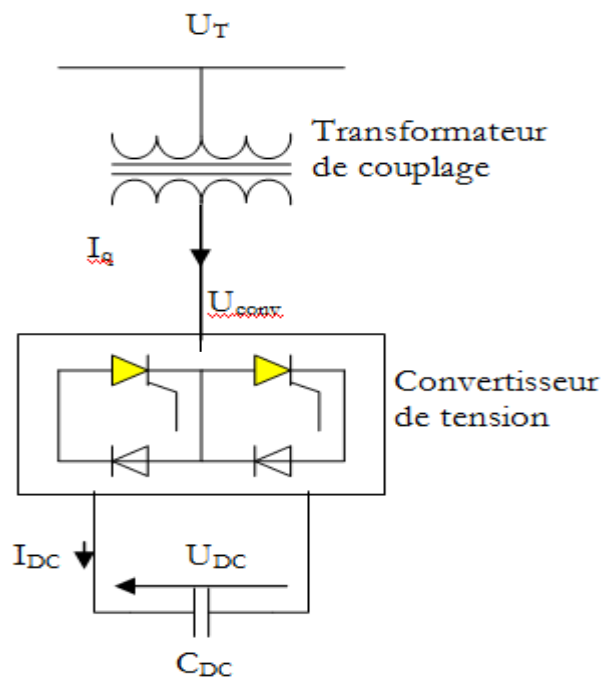


Figure 1-6 Compensateur statique synchrone [1].

Le STATCOM peut fonctionner en deux

- lorsque l'onduleur génère une tension supérieur à la tension de réseau alors un courant est injecté dans le réseau dans ce cas le STATCOM se comporte comme une capacité et va fournir de l'énergie réactive.

- lorsque l'onduleur génère une tension inférieure à la tension de réseau, dans ce cas il se comporte comme une inductance [1].

1.8.2. Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et utilisés comme une impédance variable (inductive ou capacitive) cela permet de modifier la réactance effective de la ligne et compenser la chute de tension inductive.

Ces compensateurs sont efficaces pour contrôler la puissance et améliorer la stabilité dynamique du réseau [6].

1.8.2.1. Le compensateur série commandé par thyristors (TCSC)

Une réactance variable L commandée par thyristors en parallèle avec capacité fixe C , le tout en série sur la ligne de transport, L'impédance équivalente de la ligne sera une impédance variable selon l'angle d'amorçage des thyristors, L'utilisation de TCSC permet.

1 éliminer problèmes de résonance sub synchrone engendrés par les compensateurs série à capacité fixe.

2 d'obtenir une impédance équivalente de la ligne variable avec une commande rapide

3 augmentations puissance active de la ligne [6,7].

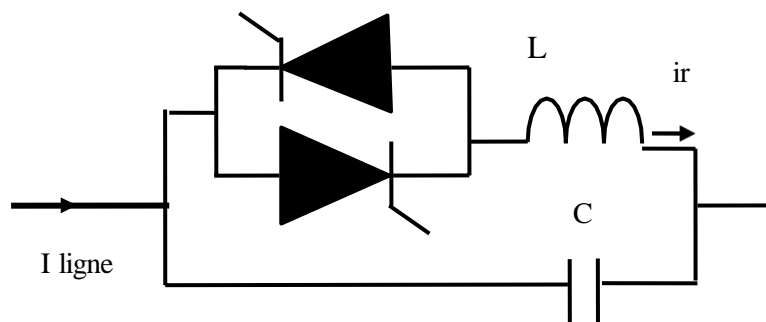


Figure 1-7 Schéma de principe d'un TCSC [8]

1.8.2.2. SSSC.

Le (SSSC) est constitué d'un onduleur triphasé qui délivre une tension triphasé, à la fréquence du réseau cette tension a la sortie de onduleur va être injecté dans la ligne électrique à travers d'un transformateur place en série avec la ligne comme illustrer la figure (1-8) le plus important dispositif de cette famille.

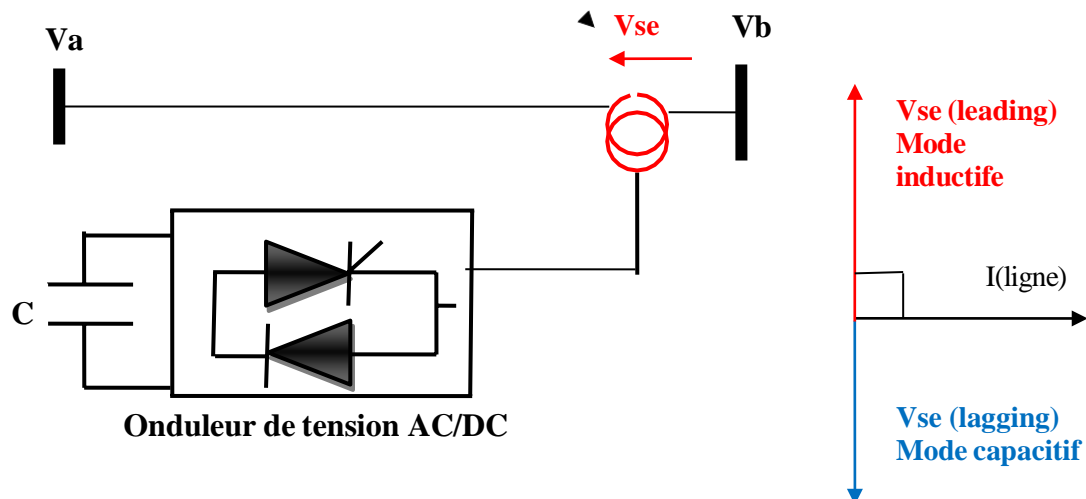


Figure 1-8 a) Schéma unifilaire de SSSC [8]

b) mode fonctionnement de SSSC

Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne, son but est augmenter ou bien diminuer de tension et par conséquent le courant fondamental ainsi que la puissance transmise.

a. **Mode capacitif** : L'injection de tension se fait avec un déphasage de 90° par rapport au courant de ligne, ce qui permet d'obtenir une compensation série équivalente à un condensateur en série à la fréquence fondamentale.

b. **Mode inductif** : La tension injectée dans ce mode est en avance de 90° par rapport au courant, ce qui augmente l'impédance réactive de la ligne. Le SSSC est appliqué pour la commande dynamique du flux de puissance et de la tension, ainsi que pour assurer la stabilité de l'angle de transport [8].

1.8.2.3. TSSC.

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés

Soit de 180 degrés

1.8.3. Compensateur statiques hybrides.

1.8.3.1. UPFC.

Un UPFC est constitué de deux onduleurs couplés par une ligne DC commune et connectés au réseau à travers deux transformateurs. Un transformateur est connecté en série avec la ligne, ce qui forme un SSSC, tandis que l'autre transformateur est connecté en parallèle avec la ligne, formant ainsi un STATCOM. L'UPFC permet de contrôler divers paramètres électriques tels que la tension, l'impédance et l'angle de ligne, tout en permettant le transfert bidirectionnel de puissance active entre la sortie du SSSC et la sortie du STATCOM. De plus, l'UPFC peut compenser l'énergie réactive dans le réseau électrique, améliorant ainsi la stabilité et la qualité de l'énergie électrique distribuée [9].

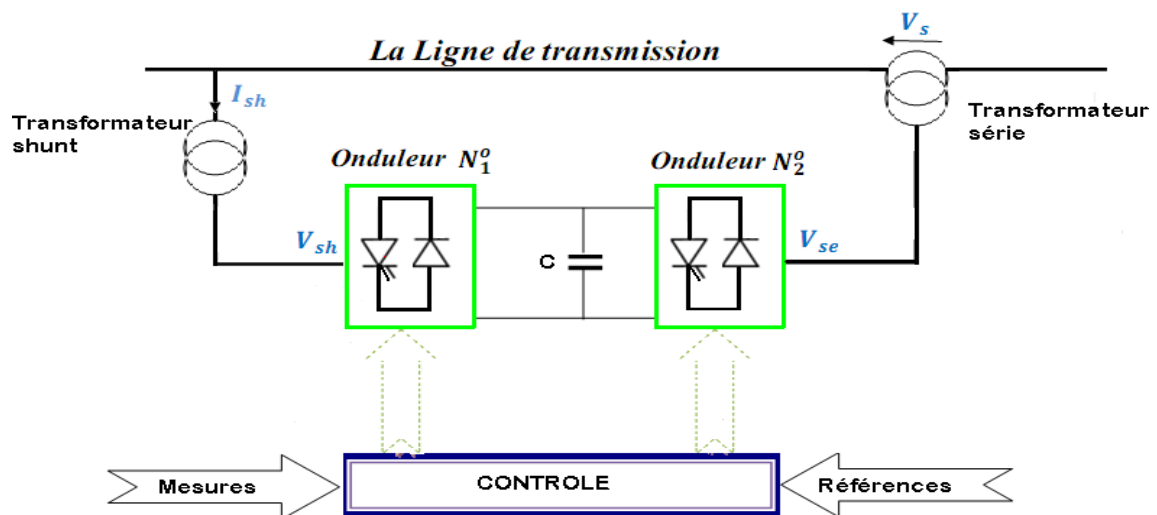


Figure 1-9 Schéma de base de l'UPFC [8].

1.8.3.2. IPFC.

La combinaison de deux ou plusieurs SSSC, couplés via un bus continu commun, utilisée dans les réseaux électriques pour contrôler et optimiser le flux de puissance entre plusieurs lignes. Il peut fournir une compensation de puissance réactive à la ligne afin de réguler le flux de puissance active et la distribution de puissance réactive souhaitée le long des lignes. Dans sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC en série sur la ligne [9].

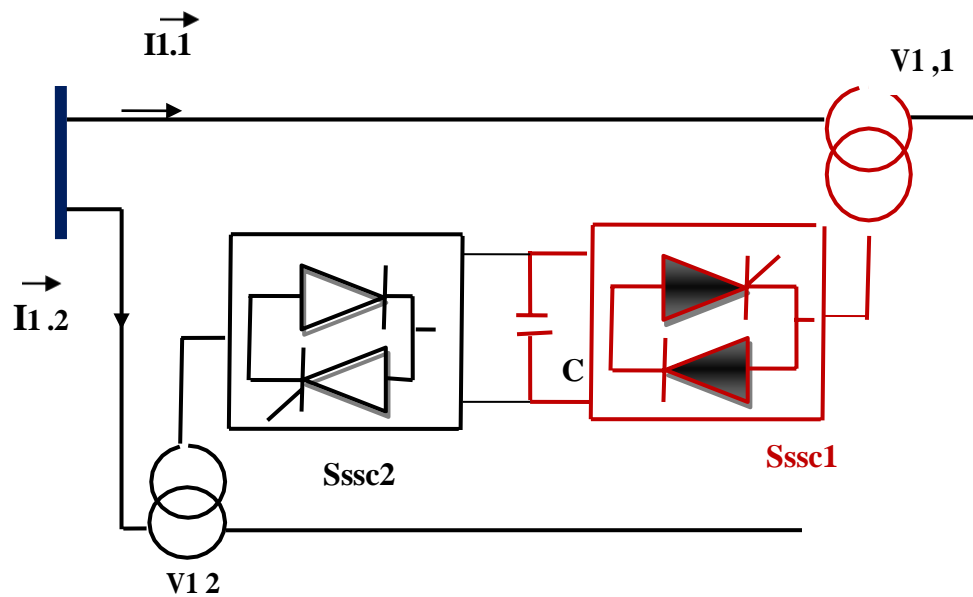


Figure 1-10 IPFC schéma avec deux SSSC [9]

1.9. Contributions de la commande des divers régulateurs de FACTS.

- **STATCOM** : compensation de la puissance réactive, amortissement de l'oscillation, stabilité de la tension, stabilité transitoire et dynamique.
- **SVC** : Commande et stabilité de la tension, compensation, amortir de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique.
- **SSSC** : Commande du courant, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident.
- **TCSC** : Commande du courant, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident.
- **UPFC** : l'appareil le plus puissant et dynamique de la Troisième génération de la famille FACTS. Commande de la puissance active et réactive, et la tension, peut amortir les oscillations, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident.
- **IPFC** : Commande de la puissance réactive, commande de la tension, Amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension. [6].
- La structure mixte réunit à elle seule tous les avantages des deux type de FACTs .

Mais peut présenter des inconvénients en raison du coût et de la nécessité d'une commande très précise [10].

1.10. Technique de control des Systèmes FACTS

Un grand nombre de recherches ont été réalisées afin d'obtenir le réglage optimal des paramètres des contrôleurs FACTS. Ces recherches ont permis de développer plusieurs techniques de commande. On trouve dans la littérature un grand nombre de techniques conventionnelles telles que la programmation mathématique, les procédures de gradient pour l'optimisation ainsi que la théorie moderne du contrôle."

1.10.1. Réglage des paramètres des contrôleurs FACTS (état de l'art)

Les auteurs de [11] ont proposé une méthode d'algorithme génétique avec codes réels (AGCR) pour optimiser les paramètres de SVC et PSS, pour le cas de réseaux mono-machine et multi-machines. L'optimisation a été réalisée séparément pour les paramètres PSS, puis en considérant les deux dispositifs simultanément.

Dans [12], l'analyse des valeurs propres est appliquée. Les auteurs constatent qu'un meilleur réglage des paramètres du PSS et du SVC améliore les performances du réseau.

Dans [13] un contrôleur PI est employé pour le SVC. L'étude a été effectuée sur un réseau mono machine en appliquant les algorithmes génétiques. Les auteurs ont proposé :

- Un système mono machine du 4eme ordre.
- Un SVC de type FC-TCR.
- Une fonction objective donnée par $j = \int_0^{t_{sim}} |\Delta w| t dt$

Le contrôleur PI conçu a été testé pour des variations de la puissance du générateur ainsi que pour un défaut triphasé. Les résultats montrent que cette méthode appliquée a rendu la vitesse du rotor suffisamment stable et a assuré une bonne stabilité.

Les auteurs de [14] présentent une comparaison de l'efficacité entre la méthode d'optimisation PSO et les algorithmes génétiques pour la conception d'un contrôleur basé sur TCSC visant à améliorer la stabilité du système. Les résultats obtenus par les deux méthodes montrent une légère supériorité de la méthode PSO.

Les auteurs ont proposé : Des matrices d'état de l'ordre 4 décrivant le système.

Des contrôleurs de type avance de phase où ils ont considéré la déviation de la vitesse du rotor comme un signal d'entrée du contrôleur.

Les auteurs de [15] ont utilisé un programme AGCR pour l'évaluation de la fonction objectif, avec l'environnement SIMULINK pour la modélisation du réseau mono et multi-machine, basé sur la minimisation de la déviation de la vitesse du rotor. Un FACTS de type SSSC basé sur un contrôleur de type avance de phase est utilisé. Les résultats ont été comparés avec ceux trouvés en appliquant la méthode PSO.

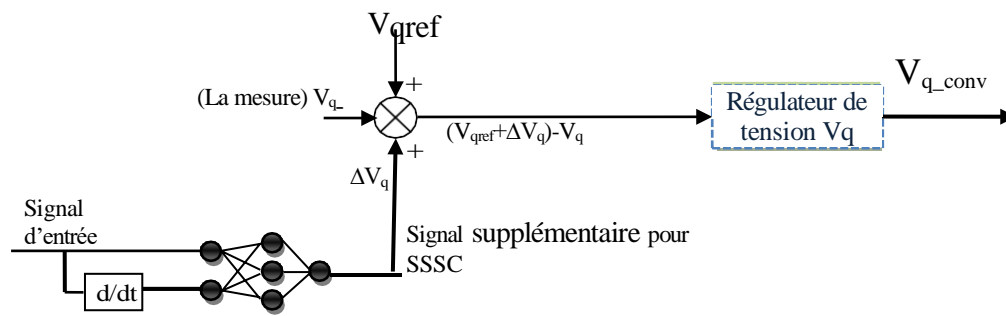
➤ Le développement des dispositifs FACTS a permis la mise en œuvre aisée de contrôleurs auxiliaires appelés Contrôleurs de Modulation Supplémentaires (**SMC**).

La principale caractéristique de ces contrôleurs est qu'ils utilisent des signaux obtenus à partir de mesures locales pour amortir les oscillations du mode interzone caractérisé par les basses fréquences (0,2 à 2 Hz).

Ce type de contrôleur est largement utilisé en raison de sa structure simple, de sa conception simple et de son faible prix.

Dans l'article [16] un schéma de contrôle SVC adaptatif à logique floue est développé. Une unité de contrôle à logique floue supplémentaire est introduite pour ajuster de manière adaptative le facteur de gain de contrôle en temps réel en fonction de l'ampleur des oscillations du système à chaque instant. Les résultats de simulation avec et sans l'unité de contrôle adaptatif sur les systèmes de Nouvelle-Angleterre à 10 générateurs montreraient l'effet des techniques de contrôle adaptatif.

Dans [2] un contrôle neurone-flou (NF) est intégré au niveau de la boucle de compensation pour donner un signal supplémentaire destiné à réguler le SSSC



Contrôleur neuro flou

Figure 1-11 Emplacement du contrôleur neurone-flou sur la SSSC [1]

La puissance (P et Q), l'amplitude de courant (I et V) ainsi que la vitesse du générateur peuvent être utilisées comme signaux d'entrée pour le contrôleur FACTS. La conclusion était que le type de contrôleur appliqué sur les FACTS est efficace pour la stabilité du réseau électrique.

Dans l'article [17] un (UPFC) robuste basé sur PI d'ordre fractionnaire (FOPI) est analysé pour amortir les oscillations sous-synchrones dans l'arbre de la turbine-générateur dues au SSR. Le contrôleur $PI^\lambda D^\mu$ d'ordre fractionnaire est utilisé comme une généralisation du contrôleur PID avec intégrateur et différenciateur d'ordre réel λ et μ . En supposant λ et $\mu=1$, les résultats montrent de FOPI proposé par rapport aux PI conventionnel.

Dans l'article [18] pour un contrôle optimal de TCSC Abd-Elazileet all ont proposé une nouvelle algorithme d'optimisation **BSO** qui couple le BFOA (le mouvement chimiotactique d'une bactérie virtuelle) avec le PSO les auteurs ont constaté que avec BSO l'amortissement des oscillations de système est mieux que avec PSO et BFOA

Dans cet article [19] une conception coordonnée robuste de PSS avec SVC et contrôleur d'amortissement TCSC dans le système d'alimentation multi-machine est proposé

Le contrôle optimal des paramètres du contrôleur coordonné sont obtenus à la fin avec l'algorithme **AAPSO**. Le résultat de simulation avec MATLAB montre que les performances dynamiques du système et l'effet d'amortissement global sont améliorés.

Dans l'article [20] une nouvelle approche visant à améliorer la stabilité du système électrique, en concevant une structure coordonnée composée d'un stabilisateur du système électrique et d'un contrôleur d'amortissement basé sur un compensateur statique synchrone en série (SSSC). Un nouvel algorithme hybride d'optimisation d'essaim de particules et d'algorithme de recherche gravitationnelle (hPSO – GSA) est utilisé afin de trouver les paramètres du contrôleur. D'après les résultats, le contrôleur basé sur hPSO – GSA proposé offre un amortissement supérieur de l'oscillation du système électrique sur une large gamme de perturbations.

Les auteurs de [21] proposent un contrôleur à sortie unique multi-entrées (MISO) comme contrôleur d'amortissement basé sur SSSC. Le contrôleur MISO se compose de deux contrôleurs de retard de plomb de type Pi-Pi, où les contrôleurs reçoivent à la fois un signal distant (signal de déviation de vitesse) et un signal local (signal de déviation de puissance de la ligne). Les performances du contrôleur proposé sont évaluées sur deux systèmes de test soumis à différentes perturbations transitoires. Pour démontrer l'efficacité et la robustesse de l'approche proposée, les résultats de simulation sont présentés et comparés à certains contrôleurs d'amortissement à base de SISO récemment publiés.

Dans [22], les auteurs, après avoir présenté quelques techniques intelligentes pour améliorer le gain des FACTS, telles que l'algorithme génétique (GA), l'algorithme d'évolution différentielle (DE), l'algorithme de luciole (FA) et l'algorithme de recherche d'harmonie quasi oppositionnelle (QOHS), ont proposé l'algorithme QOHS. Le TCSC basé sur l'algorithme QOHS proposé est un meilleur outil d'optimisation pour la conception des gains du contrôleur que le GA. Les modes oscillatoires, les détails transitoires dynamiques et les indices de performance montrent que la réponse obtenue a été considérablement améliorée. Les mêmes observations ont été faites avec l'utilisation de la technique QOHS-SFL.

Dans l'article [23] L'algorithme génétique est employé pour optimiser et ajuster les paramètres du contrôleur PI en vue d'améliorer les performances du compensateur SVC, tant dans sa réponse dynamique que statique. Les résultats comparatifs de cette étude entre le contrôleur PI conventionnel et ceux obtenus grâce à l'algorithme génétique confirment que cette méthode peut efficacement améliorer simultanément les performances statiques et dynamiques du système.

Dans l'article [24] En2017 Dilip P. Ladumor et all ont considéré l'écart de tension comme une fonction objectif principale a minimiser a l'aide de SVC et STATCOM, Dans un système de test de

bus standard IEEE-30 .L'algorithme méta heuristique d'optimisation de Grey Wolf (GWO) a été utilisé pour un réglage optimal des variables de contrôle afin de minimiser la fonction objectif.

Les auteurs ont conclu que l'utilisation de cette algorithme a permet de minimiser l'écart de tension

Les auteurs de [25] présente En 2018 L'algorithme NSGA III qui est une extension de NSGA I et II et qui basée sur la sélection naturelle, aussi que Algorithmes d'optimisation multi-objectifs (MOO) ont été proposé L'algorithme NSGA est comparais avec les autres méthodes. D'optimisations multi-objectives d'essaims de particules (MOPSO) et SPEA

Les résultats après applications aux bus standard montrent que NSGA III peut être utilisé avec succès pour résoudre les problèmes non linéaires du système électrique dans le présence de l'UPFC.

Asim Halder et all dans [26] et pour avoir un système stable ont proposée La méthode de conception dynamique nulle pour contrôler le TCSC Placé dans un système multi machine.

Cette méthode permet d'éviter le problème de linéarisation de système complexe.

Le théorème de stabilité directe de Lyapunov a été utilisé pour prouver la stabilité des états internes du système.

Dans article [27] un SVC utilisé pour améliorer la limite de stabilité en régime permanent et la régulation de tension ; La compensation de puissance réactive, etc., intégrée au contrôleur PID, a été utilisée pour améliorer la stabilité transitoire. L'algorithme de recherche différentielle quasi-oppositionnelle (QODSA) pour contrôleur d'amortissement optimal basé sur SVC-PID est proposé.les résultats de simulation montre que le contrôleur PID basé sur QDSA donne une meilleure stabilité du système électrique et diminue les oscillations basses fréquence par rapport aux autres techniques.

Dans article [28] La mesure locale de puissance active est utilisée pour obtenir le signal d'entrée du contrôleur d'amortissement basé sur SSSC.

Algorithme d'optimisation basé sur **MOL**.est utilisé pour optimiser les paramètres de contrôleur.

Comme conclusion lorsque le signal local modifié est utilisé comme signal d'entrée du contrôleur, il donne un bon amortissement par rapport au signal d'entrée local et distant.

Dans article [29] Un contrôleur en mode glissant basé sur le réseau neuronal adaptatif à fonction de base radiale (RBF) est conçu pour générer la loi de contrôle d'un compensateur statique synchrone (STATCOM), pour le contrôle de la tension et de la puissance réactive dans le réseau. La stabilité du système avec cette loi de contrôle est garantie à l'aide des critères de stabilité de Lyapunov. Une analyse comparative des écarts de tension est présentée pour montrer l'efficacité de ce contrôleur.

1.11. Conclusion

Dans ce chapitre, la définition du réseau électrique et de ses différentes composantes a été présentée. De plus, les différents types de stabilité qui doivent être assurés dans le réseau ont été abordés, ainsi que les différents types de FACTS pour maintenir cette stabilité. Le chapitre se termine par un état de l'art de la technique de contrôle des systèmes FACTS.

Chapitre 02

LES REGULATEUR PID

Chapitre 02

LES REGULATEUR PID

2.1 Introduction

Les régulateurs PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) sont parmi les dispositifs de contrôle les plus couramment utilisés dans divers systèmes industriels et d'ingénierie. Ils sont conçus pour ajuster automatiquement la sortie d'un système en fonction des erreurs entre la valeur désirée (consigne) et la valeur mesurée (retour) [30].

En combinant ces trois termes, un régulateur PID peut fournir un contrôle précis et réactif dans une large gamme de situations. Il est largement utilisé dans des domaines tels que l'automatisation industrielle, le contrôle de processus, la robotique, le contrôle de température, et bien d'autres encore.

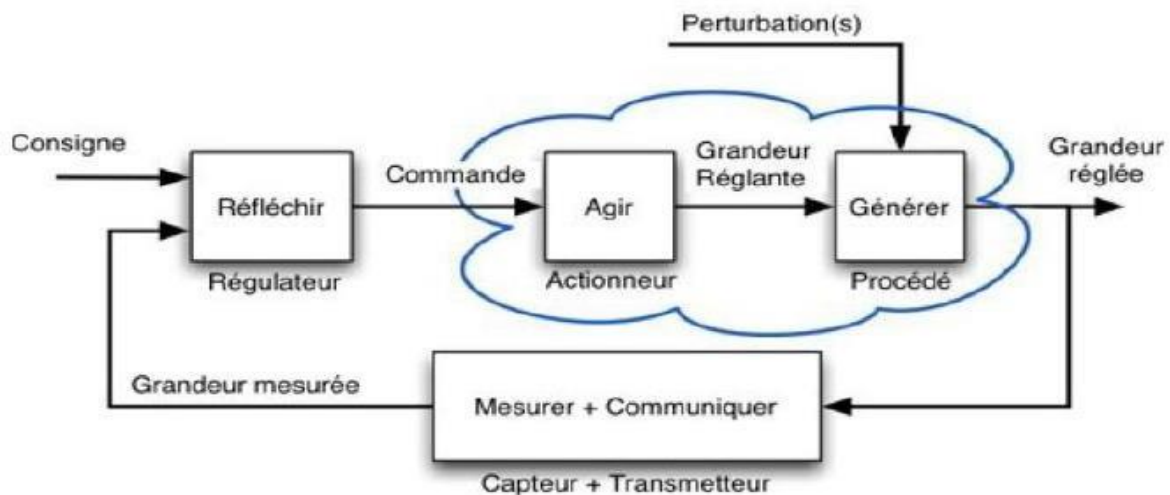


Figure 2-1 Schéma d'une boucle de régulation [30]

2.2 Définition

Le contrôleur PID, ou Proportionnel, Intégral, Dérivé, est un dispositif de régulation utilisé dans les systèmes à boucle fermée pour maintenir une sortie désirée en ajustant une entrée de commande. Son rôle est de minimiser l'écart entre la consigne (la valeur désirée) et la sortie réelle du système [30].

On peut juger le contrôleur selon les critères suivants :

- *Le contrôleur doit être capable de maintenir la variable commandée à sa consigne.
- *Le système en boucle fermée doit être asymptotiquement stable.
- *L'influence des perturbations doit être minimale.
- *Les réponses à des variations de consigne doivent être rapides et douces.
- *Une action de commande excessive doit être évitée.
- *Le système de commande doit être robuste : il doit être insensible aux variations du procédé et aux erreurs du modèle du procédé.

2.3 Qualité d'un asservissement et performances d'un système

Plusieurs paramètres caractérisent les performances d'un asservissement : la rapidité,

La stabilité, le dépassement de la consigne et la précision [32].

2.3.1 Stabilité

Un système est dit stable si et seulement si à une entrée bornée $e(t)$ correspond une sortie bornée $s(t)$. Cette définition permet de qualifier la stabilité des systèmes forcés

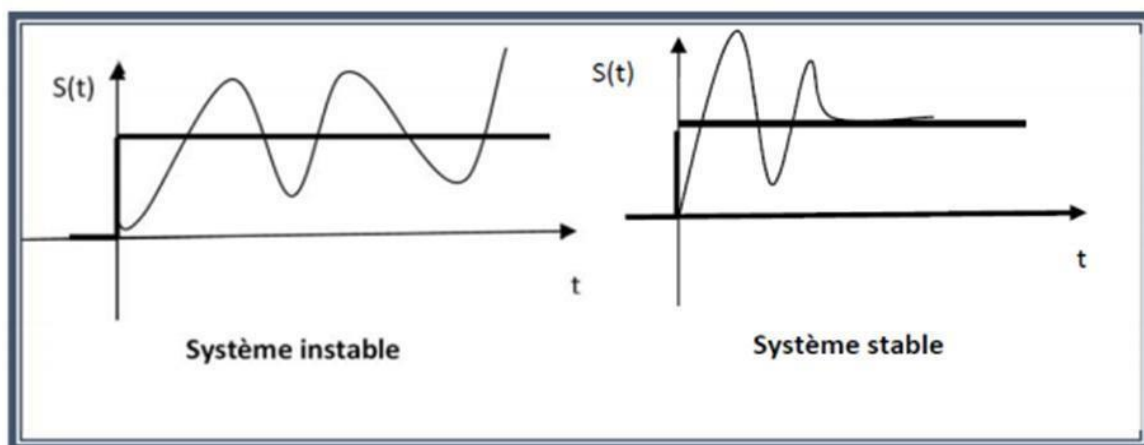


Figure 2-2 Stabilité du système [32]

2.3.2 Rapidité

Elle se définit par la vitesse à laquelle une valeur stable en sortie est atteinte. Cette vitesse

se caractérise par le temps de réponse. C'est le temps mis par la mesure pour atteindre sa

valeur définitive à $\pm 5\%$ de sa variation tout en se maintenant dans cette zone des $\pm 5\%$ [32]

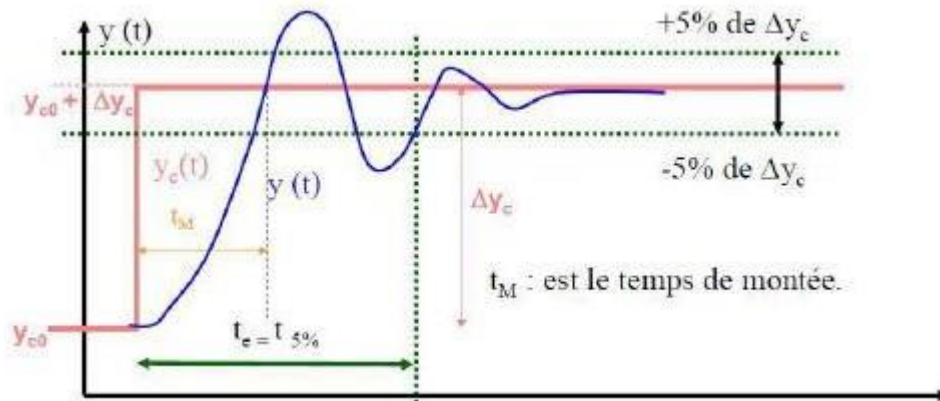


Figure 2-3 Rapidité du système [32]

2.3.3 Précision :

Il est naturel d'évaluer la précision d'un système régulé en comparant l'objectif atteint

par rapport à celui exigé. La précision d'un système régulé se mesure donc par l'écart entre la

consigne demandée et la mesure en régime permanent, on parle alors de précision statique qui s'effectue en réalisant une variation rapide de consigne en amplitude et en mesurant la variation d'amplitude. D'une façon générale, la synthèse d'un asservissement résulte d'un compromis stabilité – précision – rapidité [32].

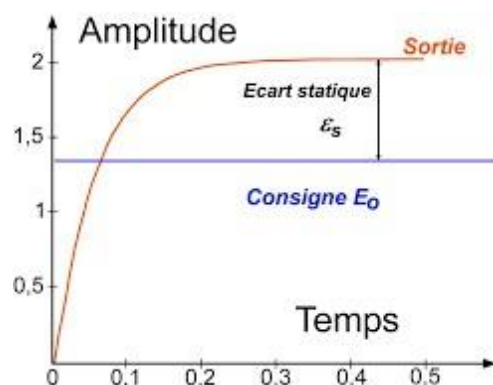


Figure 2-4 Précision d'un système. [32]

2.4 LES ACTIONS ELEMENTAIRES

2.4.1 Régulateur à action proportionnelle (P)

Il permet de générer une commande $u(t)$ proportionnellement à l'écart $\varepsilon(t)$.

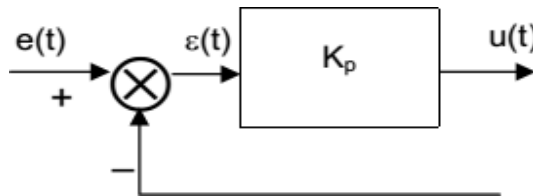


Figure 2-5 Régulateur P [33]

La loi de commande $u(t) = k_p \varepsilon(t)$ (2.1)

avec : k_p est le gain proportionne —

La fonction de transfert $p = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = k_p$ (2.2)

Le régulateur à action proportionnelle, ou régulateur P, a une action simple et naturelle, puisqu'il construit une commande $u(t)$ proportionnelle à l'erreur $\varepsilon(p)$. Sa commande ne dépend pas du passé, ni d'une tendance, mais simplement de ce qui passe à l'instant présent.

- L'action Proportionnelle corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler. Il permet donc d'améliorer notablement la précision
- L'effet d'une augmentation du gain entraîne une diminution de l'erreur statique, rend le système plus rapide mais augmente l'instabilité du système [33]
- Il permet le réglage du gain et de phase
- Augmente la bande passante du système, ce qui Améliore la rapidité du système et augmente l'instabilité du système.

2.4.1.1 La bande proportionnelle BP :

L'action proportionnelle s'exprime soit par le gain proportionnel K_p , soit par la bande proportionnelle BP. Cette dernière est définie comme la variation, en pourcentage, de l'entrée du régulateur $\varepsilon(t)$ nécessaire pour que la sortie $u(t)$ varie de 100 %.

Par exemple, $B_p = 50\%$ signifie qu'une variation de 50% de $\varepsilon(t)$ entraîne une variation de 100% de

$u(t)$.

La bande proportionnelle est la partie où la commande est proportionnelle à l'erreur. Elle définie par : $Bp = 100 Kp$ [33]

- Plus la bande proportionnelle est petite, plus l'erreur en régime permanent est petite.
- Si la bande proportionnelle se rapproche trop de 0, le système devient instable

2.4.1.2 Réalisation électronique du régulateur P :

Le régulateur proportionnel peut être réalisé par des composants électroniques sous la forme suivante :

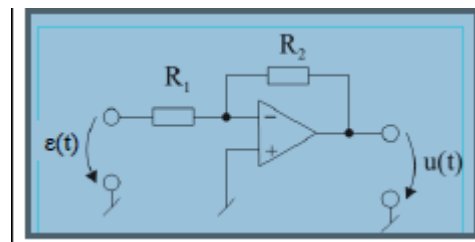


Figure 2-6 réalisation électronique du régulateur P [33]

La fonction de transfert est donnée par :

$$H(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{R2}{R1} = K_p \quad (2.3)$$

2.4.2 Régulateur à action intégrale (I) :

Ce type de régulateur génère une commande à partir de l'intégrale de l'erreur

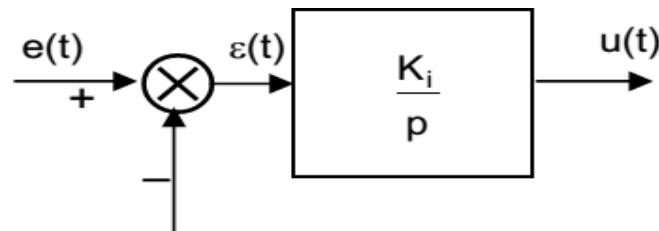


Figure 2-7 Régulateur I[33]

La loi de commande :

$$u(t) = k_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau = \frac{1}{Ti} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

La fonction de transfert:

$$u(t) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{Ti p} = \frac{Ki}{p} \quad (2.5)$$

Ti : constante de temps d'intégration

Ki : le gain intégral

L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent une précision parfaite, il permet :

- d'améliorer la précision en réduisant ou annulant l'erreur statique
- d'accélérer la réponse du système
- En effet, lorsque l'action intégrale (Ti) est petite, cela signifie que le contrôleur réagit plus rapidement aux erreurs du système en ajustant plus rapidement les paramètres de sortie. Cela peut accélérer la réponse du système, mais cela peut également entraîner des oscillations et un fort dépassement [33].

2.4.2.1 Réalisation électronique du régulateur I :

Le régulateur Intégral peut être réalisé par des composants électroniques sous la forme suivante

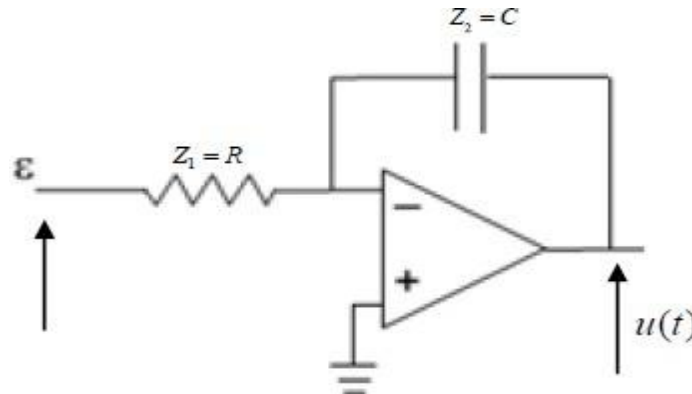


Figure 2-8 réalisation électronique du régulateur I[33]

La fonction de transfert est donnée par

$$H(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{RCp} = -\frac{Ki}{p} \quad (2.6)$$

2.4.3 Régulateur à action dérivée (D)

Ce type de régulateur permet de générer une commande à partir de la dérivée de l'erreur.

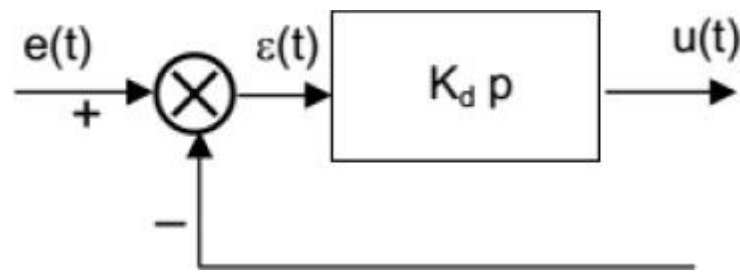


Figure 2-9 Régulateur D[33]

La loi de commande :

$$U(t) \neq \frac{u(p)}{s(p)} = k_d \frac{ds(t)}{dt} \quad (2.7)$$

La fonction de transfert :

$$u(t) = \frac{u(p)}{s(p)} = k_d p = T_d p \quad (2.8)$$

T_d : constante de temps de dérivation

K_d : le gain dérivé

2.4.2.2 L'action dérivée possède les effets suivants :

Tout à fait, l'effet statique du régulateur dérivé (D) est que son action ne réagit qu'à la variation de l'erreur dans le temps et non à l'erreur elle-même. Cela signifie que lorsque l'erreur est constante (en régime statique), le régulateur dérivé n'a aucun effet car il ne détecte pas de variation dans l'erreur. En d'autres termes, le régulateur D ne peut pas corriger une erreur constante,

Effet dynamique : Son principal intérêt est de s'opposer aux grandes variations de l'erreur, ce qui permet de stabiliser le système en réduisant les oscillations et en améliorant le temps de réponse. Il permet :

d'améliorer la stabilité du système d'accélérer la réponse transitoire du système grâce à l'effet d'anticipation (Si l'action dérivée augmente (T_d grand), la réponse s'accélère. Compromis vitesse - stabilité) de compenser les effets du temps mort (retard) du procédé.

mais fait diminuer la précision du système, et amplifie les bruits de hautes fréquences [33].

2.4.2.3 Réalisation électronique du régulateur D :

Le régulateur Dérivé peut être réalisé par des composants électroniques sous la forme suivante :

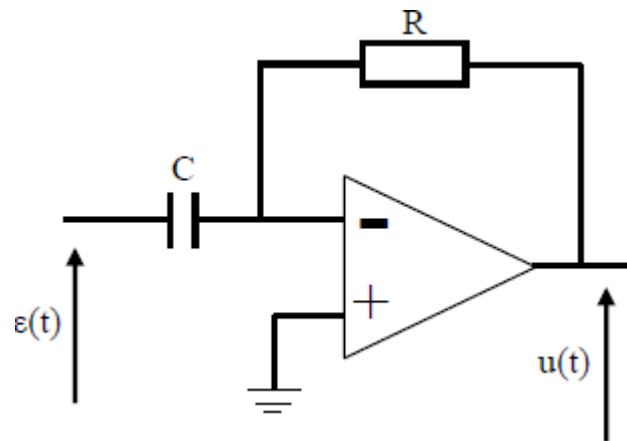


Figure 2-10 réalisation électronique du régulateur D [33]

La fonction de transfert est donnée par

$$H(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = -RCp = -K_d P \quad (2.9)$$

2.4.4 Régulateur à action Proportionnelle-Intégrale (PI)

Le régulateur PI est le régulateur le plus utilisé en pratique où ses contributions à la précision mais aussi à la robustesse du système sont particulièrement appréciées.

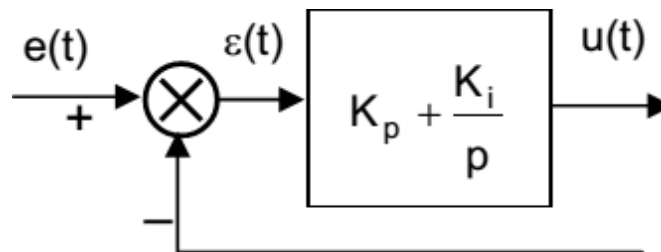


Figure 2-11 Régulateur PI [33]

La loi de commande :

$$u(t) = \varepsilon(t) + k \int^t (\tau) \tau \quad (2.10)$$

La fonction de transfert :

$$u(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = Kp + \frac{1}{T_i p} = K_p \quad (2.11)$$

2.4.2.4 Schéma fonctionnel du régulateur PI :

On distingue deux structures : série et parallèle

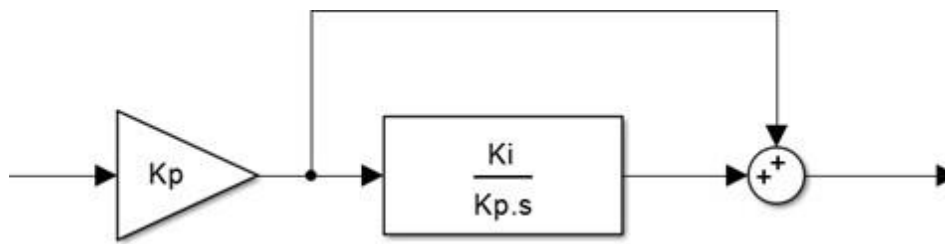


Figure 2-12 Structure en série du régulateur PI[33]

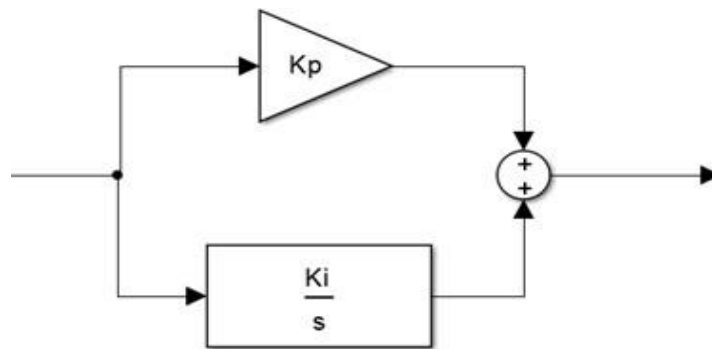


Figure 2-13 Structure en parallèle du régulateur PI [33]

2.4.2.5 Effet du régulateur PI :

Le régulateur PI assure une transmission instantanée du signal d'erreur $\varepsilon(t)$, suivi d'une intégration de ce signal.

Ce correcteur est utilisé chaque fois qu'une erreur permanente doit être annulée ou minimisée, c'est à dire une amélioration de la précision du système.

Il introduit une augmentation du gain global du système à la basse fréquence [34].

2.4.2.6 Réalisation électronique du régulateur PI

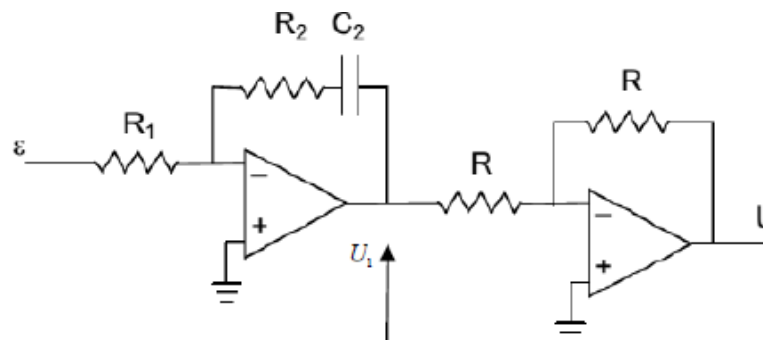


Figure 2-14 Exemple de réalisation électronique du régulateur PI [33]

2.4.3 Régulateur à action Proportionnelle-Dérivée (PD)

Puisque l'action D ne permet pas la transmission d'un signal constant, elle doit donc toujours s'accompagner au moins d'une action P en parallèle (régulateur PD).

- Ce type de régulateur est utilisé pour augmenter la marge de phase. Pour des fréquences élevées.
- La partie dérivée pose un problème majeur de stabilité. Il est donc judicieux d'ajouter un pôle afin de limiter l'effet dérivateur à des fréquences inférieures à la fréquence de pulsation.

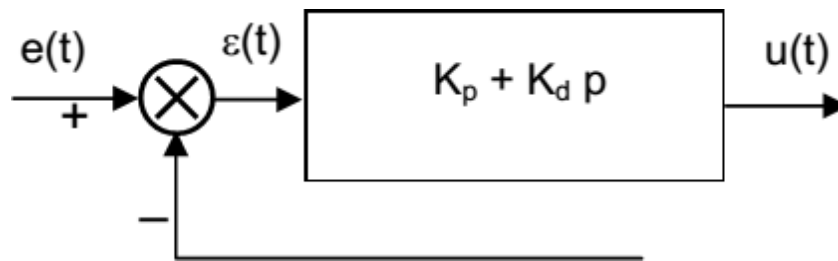


Figure 2-15 Régulateur PD[33]

La loi de commande :

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (2.12)$$

la fonction de transfert :

$$u(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + k_d p \quad (2.13)$$

2.4.3.1 Effet du régulateur PD

- Amélioration de l'amortissement et réduction du dépassement.
- Réduction du temps de montée et du temps d'établissement.
- Augmentation de la bande passante.
- Amélioration de la marge de phase et de la marge de gain.

2.4.4 Régulateur à action Proportionnelle-Intégrale-Dérivée (PID)

Un régulateur PID est un régulateur qui dispose des trois actions P, I et D. Son intérêt est de réunir les effets positifs des trois correcteurs de base. Grâce au terme I, il permet l'annulation d'une erreur statique tout en autorisant grâce à l'action D des performances de rapidité supérieures à celles d'un régulateur PI [33].

La loi de commande :

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + k_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + k_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (2.14)$$

La fonction de transfert :

$$u(t) = \frac{U(p)}{s(p)} = k_p + \frac{K_i}{p} + k_d p \quad (2.15)$$

2.4.4.1 Effet du régulateur PID

Le régulateur PID combine les trois actions de manière que chacune compense la caractéristique indésirable de l'autre. L'action intégrale en régime permanent annule l'erreur, et l'effet oscillant de cette action est supprimé par l'action dérivée, car l'effet anticipé accélère la réponse et augmente la stabilité relative du système. L'action proportionnelle modifie la vitesse pour atteindre la consigne. Ces comportements peuvent être observés en augmentant la valeur de chaque action individuellement dans le processus [32].

2.4.4.2 Schéma fonctionnel du régulateur PD

On distingue trois structures possibles du PID: série, parallèle et mixte

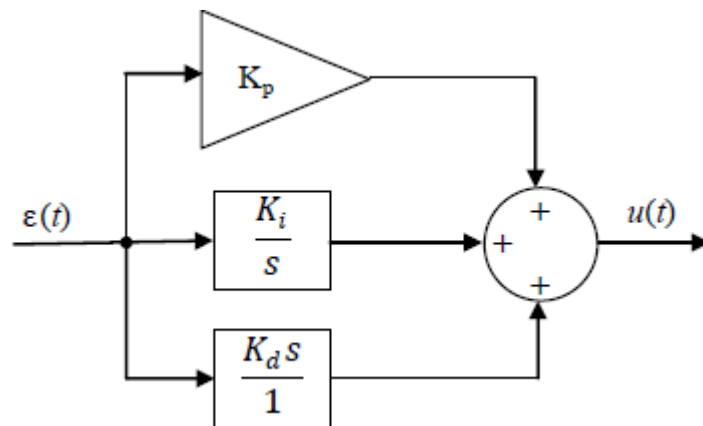


Figure 2-16 Structure en parallèle du régulateur PID [33]

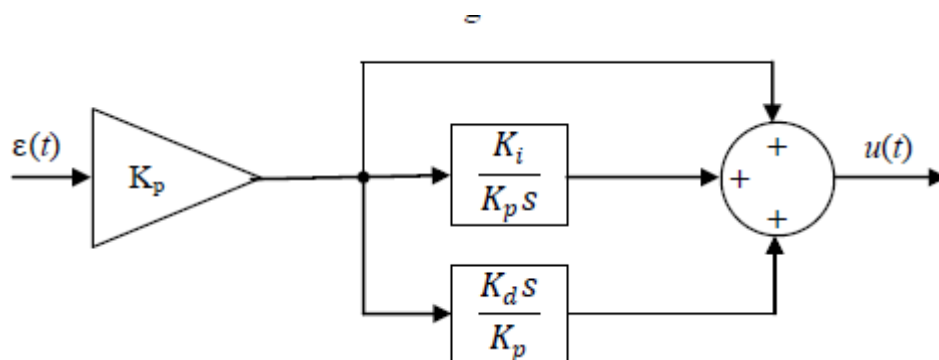


Figure 2-17 Structure mixte du régulateur PID [33]

2.5 Domaine technique

La présente invention concerne le réglage d'un régulateur de type PID pour un processus et plus exactement définit un procédé et un appareil pour amener- en tant que étape dans la méthode de réglage du régulateur - le processus en une auto-oscillation contrôlée pour déterminer les quantités indispensables au réglage du régulateur. L'invention comprend toutes les variantes et combinaisons (P, PI, PD, PID etc.) des fonctions de contrôle d'un PID régulateur [34].

2.6 Dimensionnement des régulateurs

Le but du dimensionnement est de trouver la structure d'un régulateur qui garantisse que le système commandé remplisse les conditions de fonctionnement requise par le cahier des charges [35].

2.6.2 Méthodes de synthèse du régulateur PID

Si on connaît les paramètres du procédé, suite à une modélisation de sa fonction de transfert, et si on est en possession de la structure du régulateur, il est alors possible de calculer les paramètres de réglage d'un régulateur (le PID par exemple) afin d'obtenir la réponse désirée.

Lors de la synthèse d'un régulateur il est important de considérer quelques critères tel que :

- Atténuation des perturbations de charge ;
- Poursuite du signal de référence ;
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes de modélisation ;
- Atténuation du bruit de mesure.

Dans ce qui suit nous prendre comme exemple la synthèse d'un régulateur PID suivant différentes méthodes. En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches heuristiques basées sur leurs expériences et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID.

La première méthode nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième exige d'amener le système bouclé à sa limite de stabilité [35].

2.6.3 Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte (première méthode de Ziegler- Nichols)

On applique à l'entrée du système un échelon, puis à l'aide d'un moyen de mesure (oscilloscope à mémoire ou carte d'acquisition), on enregistre la sortie du système (seul sans le régulateur)[35].

2.6.4 Méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée

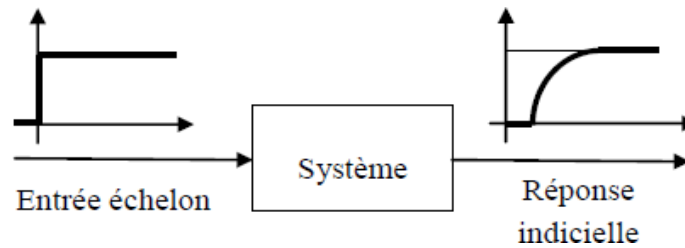


Figure 2-18 Réponse indicielle en boucle ouverte [35]

La méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée consiste à déterminer la limite de pompage du système en boucle fermée. Le pompage est défini par l'apparition qui sont en général indésirables [35].

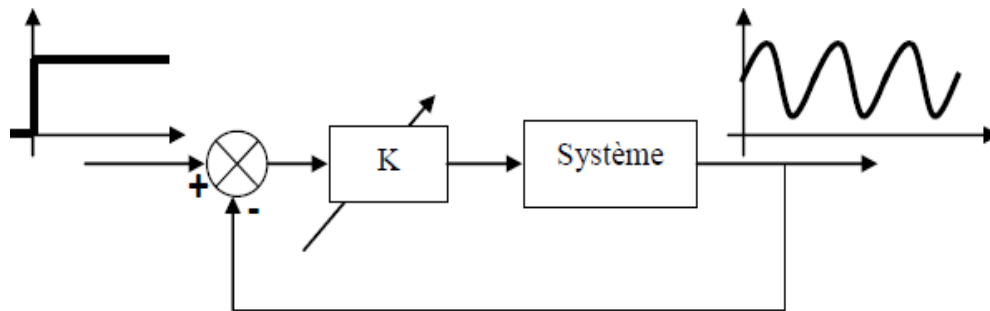


Figure 2-19 Réponse indicielle en boucle fermée [35]

Le régulateur PID est configuré de sorte que seule l'action proportionnelle fonctionne (les actions intégrale et dérivée sont nulles). La grandeur de consigne doit être un échelon. On fixe d'abord la valeur du gain K à une valeur qui permet de garantir la stabilité du système en boucle fermée. On ajuste ensuite, petit à petit, la valeur de K jusqu'à ce que la sortie du système soit une sinusoïde non amortie (limite de stabilité).

Utilisation du critère de Routh-Hurwitz pour le calcul de K_c et T_c

Soit $D(p)$ le dénominateur de la fonction de transfert $H(p)$ en boucle fermée. $D(p)$ peut être écrit sous la forme :

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n$$

(Équation caractéristique de la fonction de transfert en boucle fermée)

La condition nécessaire et suffisante de stabilité est que :

* les termes a_i soient tous de même signe et aucun d'eux ne soit nul. (critère de Hurwitz).

* tous les termes de la 1ère colonne du tableau de Routh soient de même signe [35].

2.7 Principes de base du PID

2.7.1 Composants de base

Le contrôle PID est une combinaison linéaire de la proportion (P), de l'intégrale (I) et du différentiel (D) des écarts dans un système de rétroaction. Ces trois lois de contrôle fondamentales ont leurs caractéristiques respectives [31].

2.7.2 Contrôle proportionnel (P)

Les contrôleurs proportionnels modifient uniquement les amplitudes de leurs signaux sans affecter leurs phases lors du contrôle des modifications du signal d'entrée $e(t)$. Le contrôle proportionnel augmente les gains en boucle ouverte des systèmes. Cette partie du contrôle est dominante [31].

2.7.3. Commande différentielle (D)

Les contrôleurs différentiels déterminent le différentiel pour les signaux d'entrée, et le différentiel reflète le taux de modifications d'un système. Ainsi, le contrôle différentiel, un mode leader de régulation prédictive, prévoit les variations du système, augmente l'amortissement du système et améliore la marge de phase, améliorant ainsi les performances du système [31].

2.7.4 Contrôle intégral (I)

L'intégral, une sorte d'effets additifs, enregistre l'historique des changements du système, de sorte que le contrôle intégral manifeste les effets des historiques sur les systèmes actuels. En général, le contrôle intégral n'est pas adopté séparément mais combiné avec le contrôle PD [31].

2.8 Classification du contrôle PID

Il existe de nombreux algorithmes de contrôle PID et des algorithmes de contrôle PID améliorés. Dans cet article, seuls quelques algorithmes classiques sont résumés et élaborés.

2.8.1 Contrôle PID prédictif

Dans son algorithme, on émet l'hypothèse que les variations d'entrée passées sont les mêmes à chaque étape et égales aux variations d'entrée actuelles. En pratique, ces relations ne sont toujours

pas tenables lors de réponses dynamiques des systèmes. Les impacts d'une telle approximation peuvent être ignorés si les systèmes ne sont soumis à aucun retard ou à un faible retard, mais avec l'augmentation des étapes retardées, il ne fait aucun doute que les effets sur la robustesse du système seront progressivement aggravés. Par conséquent, le prédicteur de Smith est intégré au système pour compenser le décalage temporel, de sorte que les variables régulées retardées soient signalées à l'avance au régulateur. Ensuite, le régulateur agira en avance pour éliminer les impacts du retard du système, réduire les dépassements, améliorer la stabilité du système, accélérer la régulation et améliorer l'efficacité des systèmes à grand retard.

En principe, les sorties d'un contrôleur PID sont renvoyées au terminal d'entrée du PID via une partie de compensation, afin de compenser le décalage des objets contrôlés. Dans les pratiques d'ingénierie, un prédicteur de Smith est renvoyé au régulateur PID pour surmonter le pur retard des objets contrôlés [33,34].

2.8.2 Contrôle PID adaptatif

Dans le processus actuel de contrôle industriel, de nombreux mécanismes contrôlés sont hautement non linéaires et varient dans le temps avec un simple retard. Sous l'influence de certains facteurs, les paramètres du processus peuvent changer, le contrôle PID adaptatif est donc efficace pour résoudre ces problèmes. Les contrôleurs PID adaptatifs possèdent les atouts des contrôleurs adaptatifs et des contrôleurs PID de routine. En plus d'être utiles pour identifier automatiquement les paramètres de processus explorés, régler automatiquement les paramètres du contrôleur et s'adapter aux modifications apportées aux paramètres de processus contrôlés, ils sont également structurellement simples, très robustes et assez fiables comme les contrôleurs PID conventionnels. Le personnel de terrain et les ingénieurs de conception connaissent bien les contrôleurs PID adaptatifs. Grâce à ces atouts, les contrôleurs PID adaptatifs sont devenus des dispositifs automatiques relativement idéaux pour le contrôle des processus [33].

Ils sont classés en deux grandes catégories. Les contrôleurs PID, basés sur l'identification de paramètres de processus contrôlés, sont collectivement appelés contrôleurs PID adaptatifs. La conception de leurs paramètres dépend de l'estimation des paramètres pour les modèles de processus contrôlés. L'autre type de contrôleurs PID adaptatifs est basé sur certains paramètres caractéristiques d'un processus contrôlé tels que les gains d'oscillation critiques et la fréquence d'oscillation critique. Ils sont appelés contrôleurs PID adaptatifs non paramétriques. Les paramètres des contrôleurs PID adaptatifs non paramétriques sont directement ajustés en fonction des paramètres caractéristiques des processus. Le contrôle PID adaptatif paramétrique comprend [31].

- Contrôle adaptatif du placement des pôles PID.
- Contrôle PID adaptatif basé sur des principes d'annulation
- Contrôle PID adaptatif basé sur des indices de performance quadratiques [33].

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, les régulateurs PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) sont des éléments essentiels dans le domaine de l'automatisation et du contrôle des systèmes. Leur conception intuitive, combinée à leur efficacité éprouvée, en fait des outils incontournables pour réguler une grande variété de processus et de systèmes dynamiques.

La force des régulateurs PID réside dans leur capacité à ajuster automatiquement la sortie en fonction des écarts entre la consigne désirée et la valeur mesurée, tout en prenant en compte différents aspects tels que la proportionnalité, l'intégration et la dérivation des erreurs. Cette approche permet d'atteindre un équilibre entre la réactivité du système et sa stabilité, ce qui est crucial dans de nombreuses applications industrielles et d'ingénierie.

Cependant, le réglage des paramètres PID pour obtenir des performances optimales peut parfois être délicat et nécessiter une expertise approfondie. Des méthodes manuelles ou automatiques de réglage des paramètres sont souvent utilisées pour atteindre les objectifs de contrôle spécifiques.

Chapitre 03

Simulation et l'optimisation

3.1. Introduction

Les contrôleurs FACTS et en particulier le SVC est des moyens efficaces pour contrôler la tension. Cependant, les performances de ces contrôleurs dépendent de leurs paramètres et de leur emplacement approprié dans tout réseau électrique. Plusieurs méthodes sont rapportées dans la littérature pour trouver ces paramètres dans un réseau électrique. Ce chapitre utilise des méthodes d'optimisation pour déterminer le réglage des paramètres optimaux des contrôleurs du SVC. Dans ce chapitre, nous avons utilisé la méthode moindre carré pour l'optimisation des paramètres d'un contrôleur SVC dans un système d'alimentation mono machine.

Un contrôleur robuste proportionnel intégrateur (PI) basé sur une sensibilité absolue avec les contraintes de variation de tension dont les gains du contrôleur sont optimisés par la méthode moindre carré qui a été conçu pour un SVC afin d'obtenir un réglage robuste des variations de tension dans un système de puissance. Dans notre travail, tout d'abord, le contexte et le concept général du contrôleur PI. Puis, les performances de ce contrôleur ont été examinées pour différents scénarios d'exploitation d'un système d'alimentation.

3.2. Contrôleur PID

Les régulateurs les plus couramment utilisés dans l'industrie sont les régulateurs de type PID qui offrent la possibilité de régler différentes performances d'un processus de régulation en ajustant ces trois paramètres : le gain proportionnel (P), l'action intégrale (I) et l'action dérivée (D). Ces performances comprennent notamment le temps de réponse, le dépassement en régime transitoire, la précision et la stabilité en régime permanent. La Figure 3.1 illustre le schéma général d'un régulateur PID.

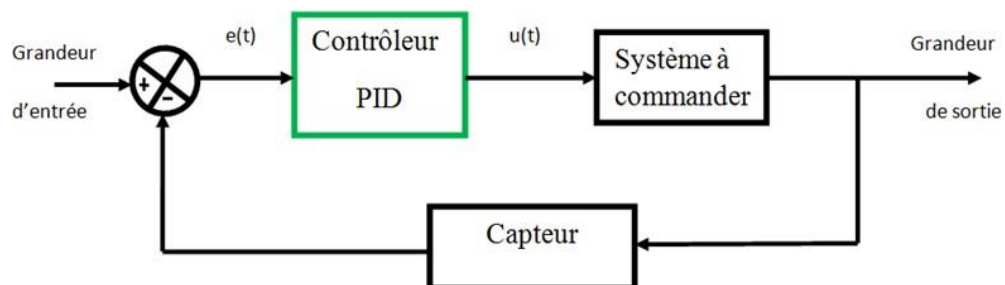


Figure 3-1 schéma d'un contrôleur PID

Dans le cas de notre étude, on se limite à la technique du contrôleur PI classique qui satisfait avec succès la régulation en commande des systèmes du point de vue stabilité, rapidité et précision.

3.3. Conception d'un régulateur PI

Soient V_{ref} le signal à poursuivre et V_{out} le signal de sortie du système à contrôler. La Figure 3.2 représente un système en boucle fermée contrôlé par un régulateur PI.

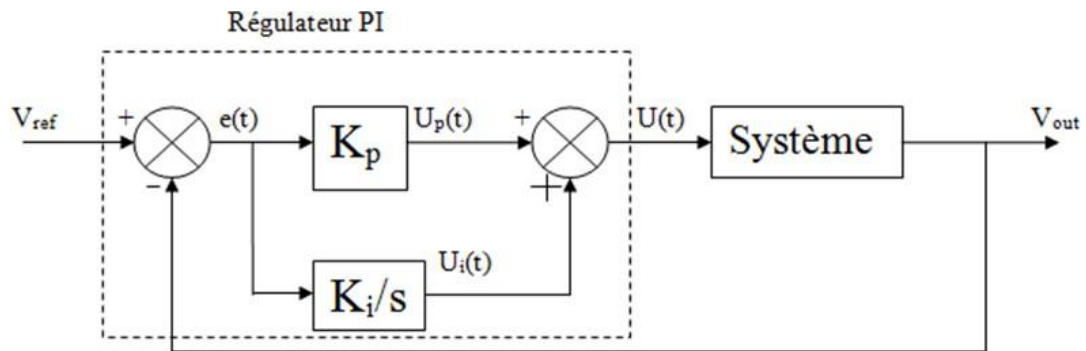


Figure 3-2 Système en boucle fermée contrôlé par un régulateur PI

La loi de commande est :

$$u(t) = Kp * e(t) + Ki \int e(t) dt \quad (3.1)$$

Avec le signal d'erreur :

$$e(t) = V_{ref}(t) - V_{out}(t) \quad (3.2)$$

Kp : Gain de l'action proportionnelle.

Ki : Gain de l'action intégrale.

3.3.1. Résultats Action proportionnelle

Le rôle de l'action proportionnelle Kp est d'accélérer la réponse du signal de sortie V_{out} , ce qui a pour conséquence de réduire l'écart entre les signaux de sortie et d'entrée V_{out} et V_{ref} .

3.3.2. Action intégrale

Le rôle de l'action intégrale Ki est d'annuler l'écart entre V_{out} et V_{ref} . Le signal de sortie du régulateur en intégrateur seul est proportionnel à l'intégrale de l'écart $V_{out} - V_{ref}$.

3.4. Optimisation des paramètres des régulateurs par la méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés, créée par Legendre et Gauss à leur guise au début du XIXe siècle, permet de comparer des données expérimentales, souvent avec des erreurs de mesure, à un modèle mathématique qui devait les décrire. Ce modèle peut adopter différentes configurations. Les quantités mesurées peuvent être soumises à des lois de conservation. Les moindres carrés permettent donc de réduire l'incidence des erreurs expérimentales en intégrant de l'information dans le processus de mesure.

3.5. Structure de la commande PI pour le contrôle de la tension

La boucle de régulation de la tension de sortie avec l'utilisation d'un régulateur de type PI est modélisé sous MATLAB-SIMULINK. Le régulateur proportionnel-intégrateur (PI) est utilisé pour stabiliser la tension à la charge en éliminant l'erreur entre la tension de référence ($V_{réf}$) et la tension mesurée en sortie (V_0). Pour assurer un contrôle efficace du système en boucle fermée, il est crucial de sélectionner soigneusement les coefficients K_p et K_i du régulateur. Après avoir effectué une analyse de stabilité du réseau électrique, les coefficients du régulateur PI sont optimisés à l'aide des deux techniques mentionnées précédemment.

3.6. Compensateur statique de puissance réactive SVC

En anglais statique Var Compensateur (SVC), un type de dispositif FACTS, utilisé pour la compensation shunt pour maintenir la tension de jeu de barre constante.

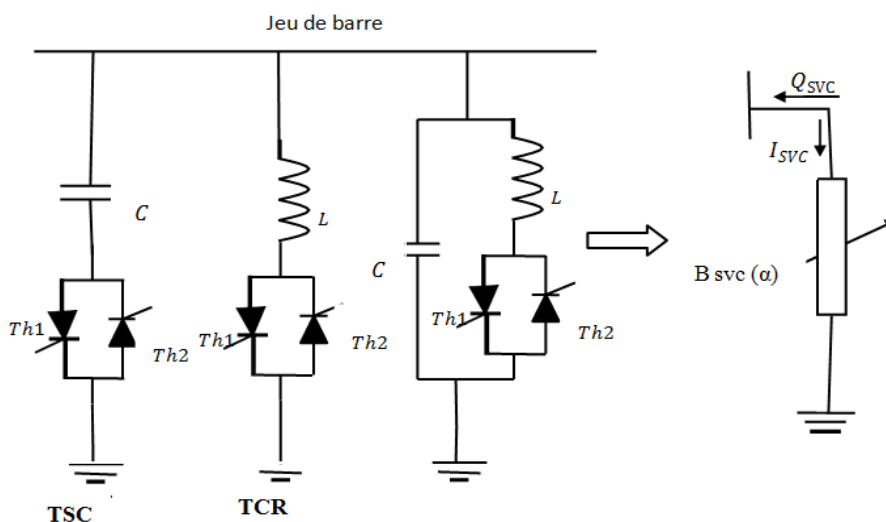


Figure3-3 Modèle avancé de l'SVC [9]

La susceptance (B) est l'inverse de la réactance (X) et est exprimée en Siemens (S). Pour un SVC, la susceptance varie en fonction de la commande des thyristors. La relation peut être exprimée par :

$$B(t) = B_{\max} \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (3.3) \quad \text{où :}$$

B(t) est la susceptance à un instant t.

- B_{max} est la susceptance maximale.
- ω est la fréquence angulaire (2πf, où f est la fréquence du réseau).
- φ est le déphasage introduit par le contrôle du SVC.

Supposons un SVC avec une susceptance maximale B_{max} de 0.1 S et une fréquence réseau de 50 Hz. Si le SVC doit injecter de la puissance réactive, la susceptance varie en fonction de l'angle de conduction des thyristors.

Si l'angle de conduction est réglé pour un maximum d'injection de puissance réactive, alors :

$$B(t) = 0.1 \cdot \sin(2\pi \cdot 50t)$$

Les gâchettes de thyristors sont tirées symétriquement dans un angle α allant de 90 ° à 180°. La susceptance variable équivalent de SVC B_{SVC} à la fréquence fondamentale.

L'entrée de tension du régulateur est mesurée à partir de l'SVC, ce qui permet au régulateur de détecter les variations de tension. L'angle d'amorçage des thyristors, qui détermine la valeur de la susceptance (la composante réactive), est inclus dans le réseau. Cet angle d'amorçage est régulé par un régulateur PI (proportionnel intégral). Le rôle de ce régulateur PI est de maintenir la tension du jeu de barre à la valeur de référence en ajustant l'angle d'amorçage des thyristors en fonction des écarts de tension mesurés par l'SVC. Le régulateur PI prend en compte à la fois l'erreur instantanée (proportionnelle) et l'erreur cumulée dans le temps (intégrale) pour ajuster l'angle d'amorçage de manière appropriée.

3.7. Procédure de simulation

Pour voir l'efficacité des contrôleurs PI optimisés proposés, le système étudié est simulé par le logiciel MATLAB illustré à la figure 3.4.

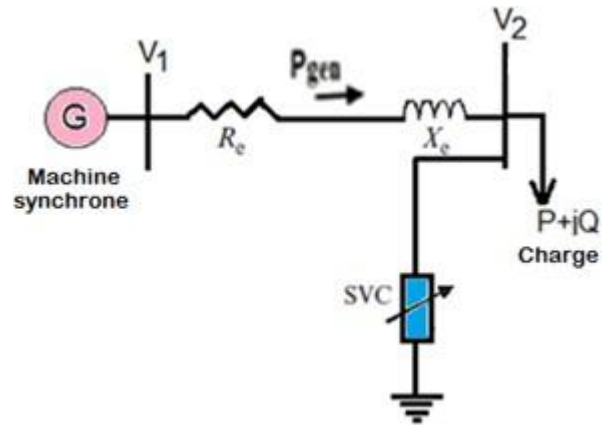


Figure 3-4.Réseau de test

Le modèle de génératrice dans le matlab simulink est représenté dans le repère dq de PARK. Tous les paramètres électriques sont toutes ramenés au référentiel du stator. Ce référentiel facilite l'analyse et la modélisation du système,

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \phi_d - \omega \phi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \phi_q + \omega \phi_d \\ V_{fd}' = R_{fd}' i_{fd}' + \frac{d}{dt} \phi_{fd}' \end{cases} \quad (3.4)$$

Les flux magnétiques sont calculés comme suit

$$\begin{cases} \phi_d = L_d i_d + L_{md} i_{fd}' \\ \phi_q = L_q i_q \\ \phi_{fd}' = L_{fd}' i_{fd}' + L_{md} i_d \end{cases} \quad (3.5)$$

- V_d et V_q sont les tensions dans les axes d et q.
- I_d et i_q sont les courants dans les axes d et q.
- R_s est la résistance statorique.
- L_d et L_q sont les inductances dans les axes d et q.
- ω est la vitesse angulaire du rotor.

On représente la Fonction de transfert de système d'excitation de la machine synchrone :

$$\frac{V_{fd}}{e_f} = \frac{1}{K_e + sT_e} \quad (3.6)$$

Le SVC est connecté au jeu de barre dont le système a été conçu pour étudier l'amélioration de la tension dont le SVC maintiendra la valeur de tension de charge près de la tension désirée.

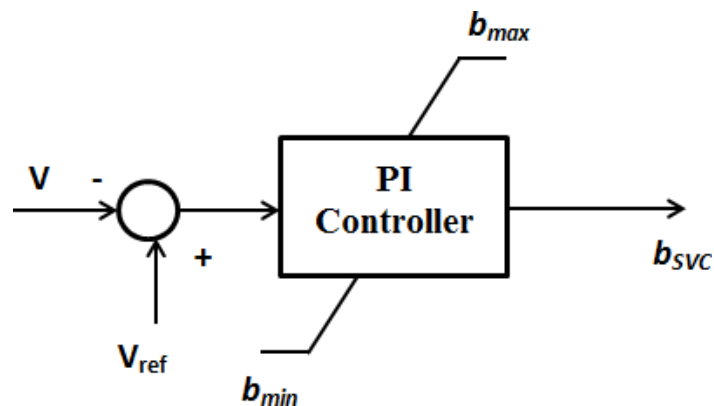


Figure 3-5 SVC avec PI Controller

Pour la régulation de la tension sur le jeu de barre 2, le modèle est complété par l'équation

algébrique exprimant la puissance réactive injectée par le SVC: par l'équation suivante :

$$Q_{SVC} = -b_{SVC} V_{SVC}^2 \quad (3.7)$$

Tel que b_{SVC} la susceptance.

Le régulateur possède un limiteur maximum et minimum comme illustré sur la figure 3.5. La valeur est obtenue par le contrôleur PI.

Dans cette étude, nous utilisons l'algorithme de moindres carrés pour trouver les paramètres optimaux du contrôleur PI, définissant les gains du contrôleur PI ainsi que la loi de contrôle, en utilisant une fonction objective basée sur l'admittance des performances SVC.

Comme fonction objectif, nous utilisons l'erreur absolue intégrée entre la valeur de la tension mesurée et la tension de référence définie par:

$$e = \int (V_{ref} - V_{mes}) dt \quad (3.8)$$

Les variables sont les paramètres du régulateur proportionnel intégral dérivé (Kp et Ki) figure(3.8).

Ouvrez Matlab. Cliquez sur "Help", dans la barre de menu Sélectionnez "Product Help", dans la liste déroulante et Suivez les étapes suivantes:

- Recherchez "SimPowerSystems". Cliquez sur "Demos".
- Recherchez "FACTS Models".
- Cliquez sur "SVC and PSS". Le modèle de la figure 3.6 s'affiche
- Cliquez sur "Open this model".

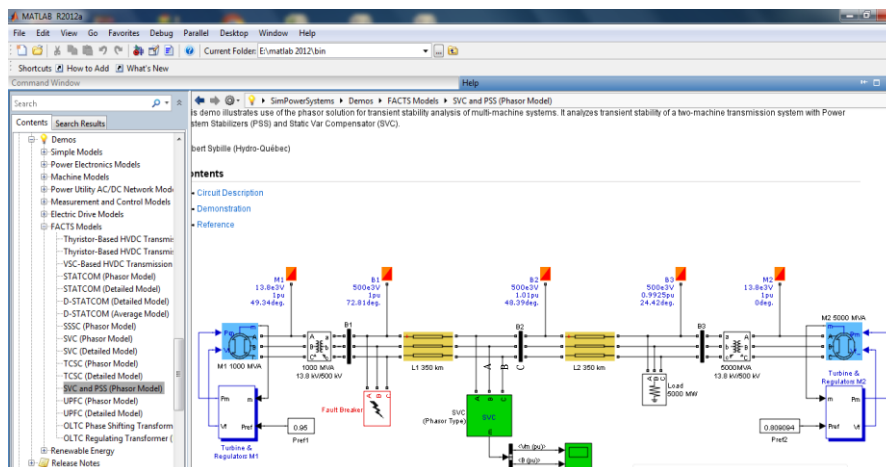


Figure 3-6 .Schéma de simulink

Après avoir modifié le modèle de la figure 3.6, nous avons obtenu le schéma de la figure 3.7 et l'avons enregistré sous le nom : **<<power_svc_tun_machine>>**

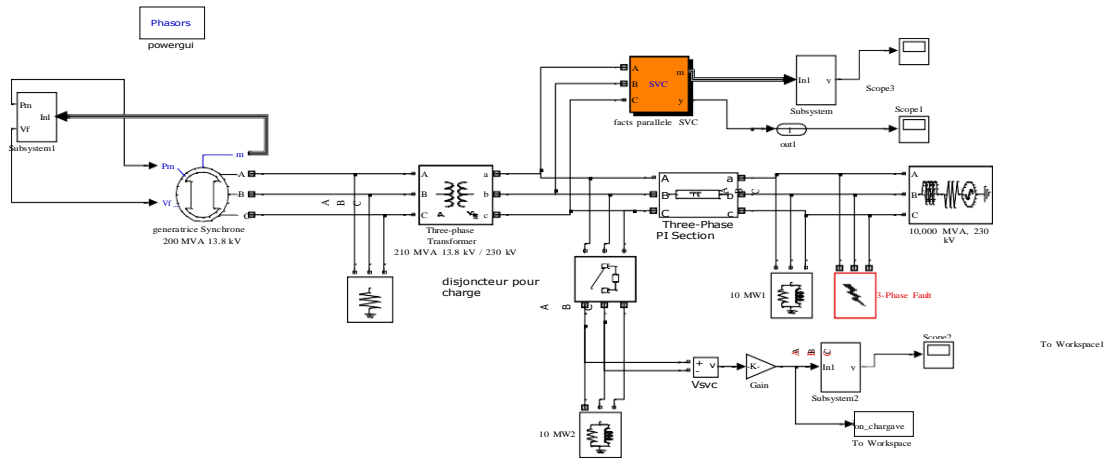


Figure 3-7 schema de simulations

Dans le programme d'optimisation enregistré sous le nom `runtracklsq` La commande `lsqnonlin` est utilisée pour effectuer un ajustement par moindres carrés sur le suivi de la sortie. Le suivi est effectué via la fonction `tracklsq`, qui renvoie le signal d'erreur `yout`, Le code de `tracklsq` est contenu dans le fichier `runtracklsq.m`, présenté ci-dessous.

- **Programme d'optimisation par méthode moindre carrée**

```
function [Kp,Ki] = runtracklsq
clear all;clc;
% RUNTRACKLSQ demonstrates using LSQNONLIN with Simulink.
power_svc_tun_machine      % Load the model
pid0 = [0 0]; % Set initial values
options = optimset('Algorithm',{'levenberg-marquardt',1e-6},...
'Display','on','TolX',1e-6,'TolFun',1e-6);
pid= lsqnonlin(@tracklsq, pid0, [1 200], [10 220], options);
Kp = pid(1); Ki = pid(2);
    %updateIfNeeded(pid)
    % F = yout;
function F = tracklsq(pid)
    % Variable yout is shared with RUNTRACKMM and
    Kp = pid(1)
    Ki = pid(2)
    % Set sim options and compute function value
    %simopt = simset('SrcWorkspace','Current');
[tout,xout,yout] = sim('power_svc_tun_machine');
tensionsvc=yout;
F=yout;
```

end

end

Pour optimiser les paramètres de contrôle (PI) dans ce modèle Simulink nommé power_svc_tun_machine.mdl

Figure 3.7

Lancez la simulation à partir de ce programme. Celui-ci doit appeler le schéma Simulink enregistré sous le nom **power_svc_tun_machine**. Cela permet de trouver les valeurs optimales de K_p et K_i .

- Pour afficher le régulateur PI, faites un clic droit sur le bloc SVC et cliquez sur "Look Under Mask". La fenêtre suivante va s'afficher.

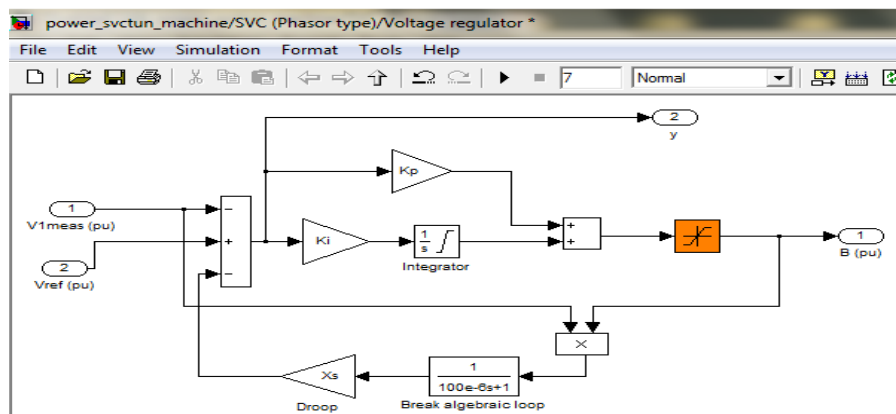


Figure3.8 schema de regulateur PI

3.8. Résultats de simulation

Dans notre étude, on a effectué plusieurs scénarios :

3.8.1. Premier scénario

Le premier scénario consiste à connecté une charge d'une puissance active de 200MWet une puissance réactive de 200MVAR. Les résultats de simulation sont illustrés par la figure 3.9

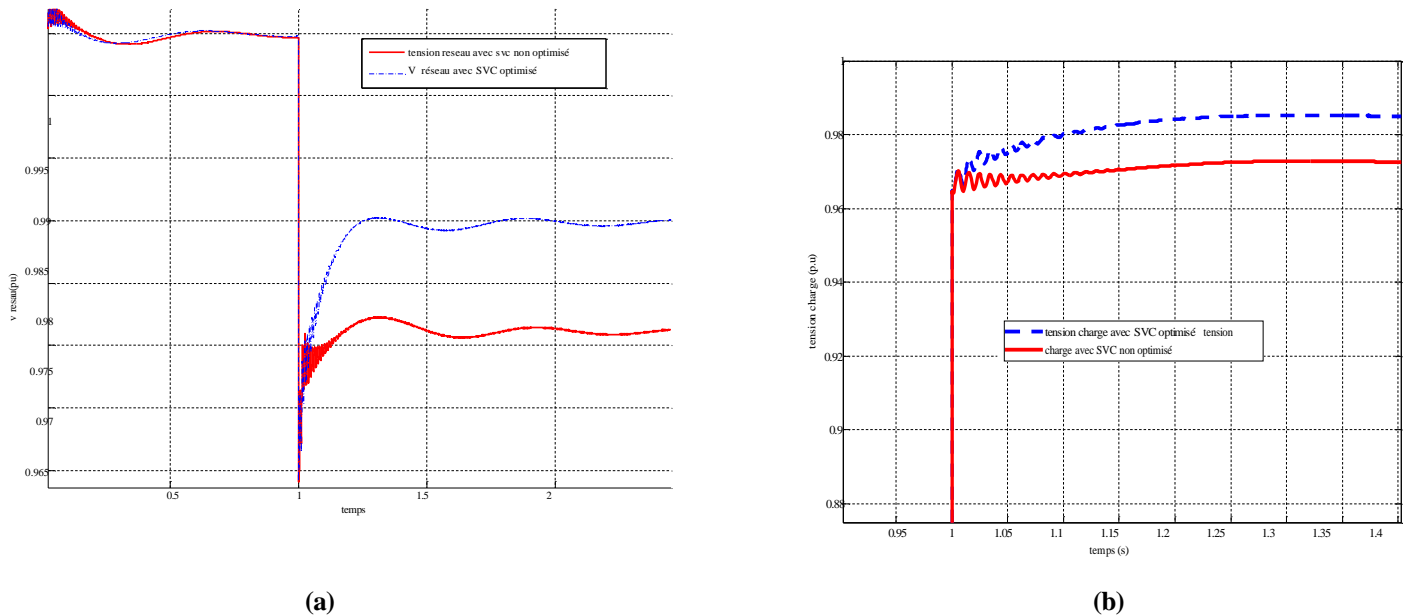


Figure 3-9 .a tension de ligne avec connexion de charge importante .b Tension de charge avec SVC optimisé et non optimisé

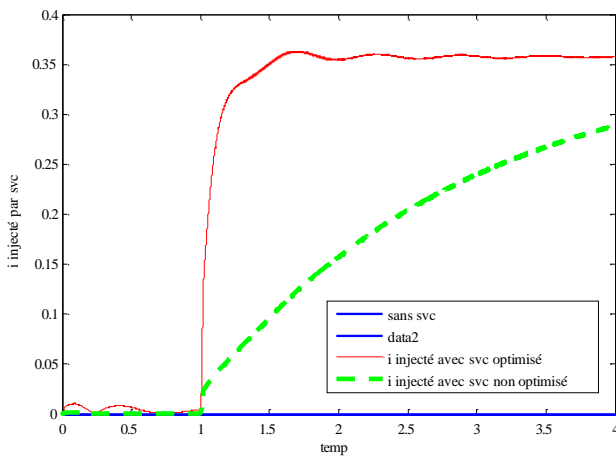
La tension de réseau est stable avant connexion de la charge est égale à 1 pu. A l'instant $t=1\text{s}$ la connexion de charge de 200MW et 200MVAR figure 3.9.a a provoqué une chute de tension important. Le SVC est connecté avec le réseau dans les deux cas.

D'après le graphe de la figure (3.9) la courbe rouge (continue) qui représente le comportement de tension de réseau au point de raccordement de SVC avant et après connexion de charge, avec les paramètres K_p et K_i de régulateur non optimisé. Tandis que la courbe bleu(en pointue) représente le comportement de la tension de réseau en présence de SVC contrôlé avec paramètres de régulateur optimisé. Lorsque la charge augmente la tension du réseau diminue suite au chute de tension, le SVC a fait fonctionner leur condensateur (TSC) pour générer la puissance réactive, cette puissance réactive injecté aux réseaux qui a augmenté la tension, dans notre cas le SVC délivre de la puissance réactive alors (SVC capacitif).

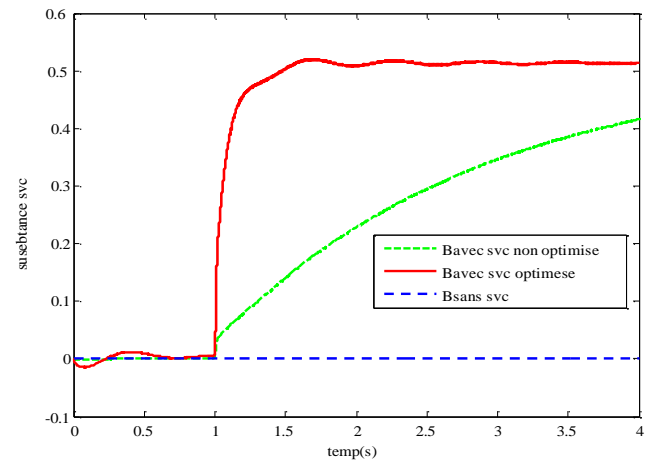
Disant que la puissance réactive du convertisseur est injectée dans le réseau. Il est évidant que la tension est bien régulé avec le SVC optimisé par rapport aux SVC non optimisé, et cela grâce à la bonne injection de l'énergie réactive par le SVC optimisé

La figure 3.9b représente la tension au niveau de charge avec et sans SVC. Initialement le disjoncteur de la charge était ouvert .a listant $t=1$ de fermeture de disjoncteur et connexion de la charge deux résultats sont obtenue, la tension aux borne de la charge est mieux avec la présence de SVC, sa signifie que le SVC a diminué la chute de tension au niveau de la charge par compensation d'énergie réactive.

- Variation de susceptance et courant.



(a)



(b)

Figure 3-10 variations de courant avec SVC optimisé et non optimisé b).Variation de la susceptance de l'SVC dans les deux cas optimisé et non optimisé

La figure 3.10 représente le courant injecté par le SVC vers le réseau et la variation de la susceptance de l'SVC.

Le courant capacitif injecté dans le réseau par le SVC a une valeur plus grande dans le cas de SVC optimisé figure .se qui explique l'augmentation de tension de réseaux mieux qu'en cas de SVC non optimisé. La variation de susceptance (B) de SVC est proportionnelle au courant injecté.

- Variation de l'erreur

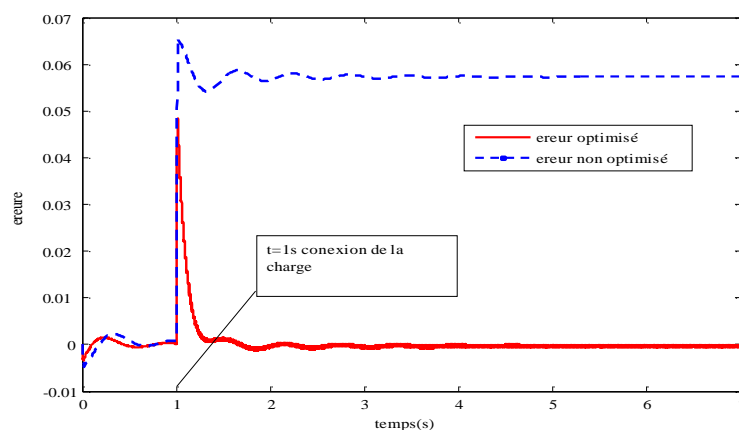


Figure 3-11 Variation de l'erreur avec le contrôle optimisé et non optimisé

La figure 3.11 montre que avant la connexion de la charge l'erreur de régulation est presque nulle puisque la tension de référence est presque égale à la tension mesurée, mais une chute de tension important est provoquée lors de la connexion de la charge important, a entrainé une forte augmentation de l'erreur. Le courbe qui représente l'erreur avec SVC optimisé indique que le régulateur PI donne une bonne réponse, et l'erreur entre la tension de référence et mesuré devient stable à nouveau voire nulle et cela grâce au courant injecté par le SVC dans le réseau.

3.8.2. Deuxième scénario

Le deuxième scénario consiste à connecter une charge capacitive à l'instant $t=1\text{sec}$. La figure (3.10) présente le résultat de simulation qui montre que la tension de la charge est devient supérieur à la tension d'alimentation, dans ce cas le courant va circuler de la charge vers alimentation, le SVC fait fonctionner le TCR et injecte un courant pour compenser l'énergie réactive de la charge (SVC inductive). La susceptance de SVC dans ce cas est negative comme indique la figure(3.10.a).

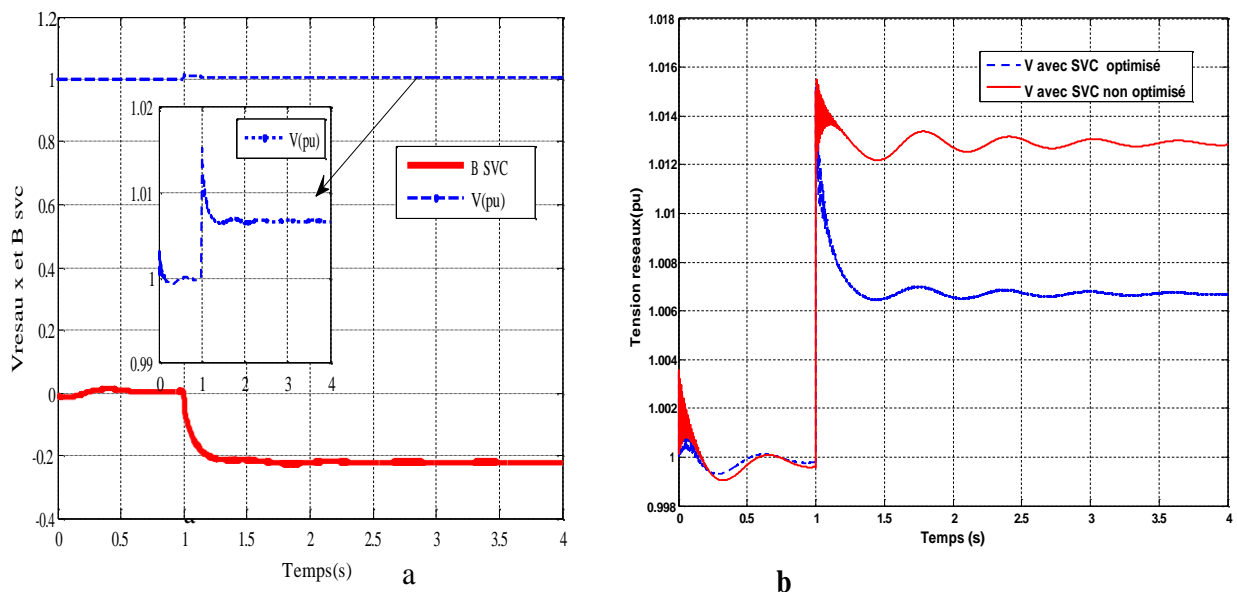


Figure 3-12 .a Variation de susceptance de SVC avec charge capacitive .b tension avec charge capacitive.

3.8.3. Troisième scénario

Le troisième scénario consiste à connecter une charge de 100MVAR ,100MW et appliquer un court-circuit triphasé pour deux cycles au niveau de la ligne.

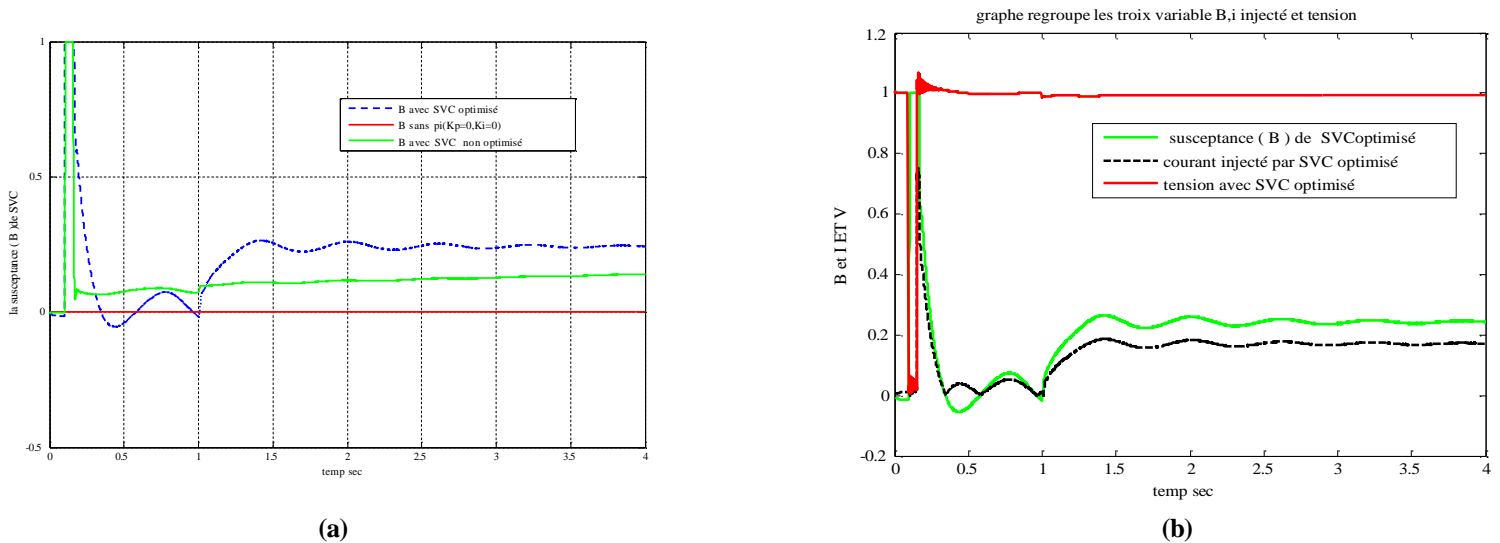


Figure 3-13. a Variation de la susceptance de l'SVC et b variation susceptance, courant et tension

On remarque que la variation de la susceptance est différente dans les trois cas Fig (3.13.a) la meilleure variation est obtenue dans le cas où le SVC est contrôlé par PI optimisé, l'augmentation de la susceptance implique l'augmentation de courant injecté est par conséquent l'augmentation de la tension vers sa valeur initiale (1 pu). La Figure 3.13.b illustre une variation similaire de deux paramètres : la susceptance, et le courant injecté est inversement proportionnel par rapport à la chute de tension, lorsqu'il y a un court-circuit ainsi que lorsqu'une charge est connectée. Cela signifie la souplesse et la rapidité de réponses de SVC optimisé.

3.8.4. Quatrième scénario

Le quatrième et le dernier scénario consiste à connecter deux charges d'une valeur de 100MVAR.

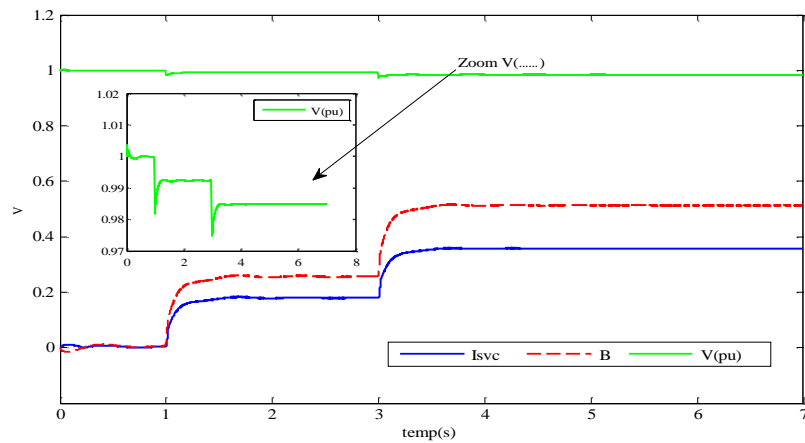


Figure 3-14 Variation B de SVC et courant injecté avec tension réseaux en cas connexion de deux charges

La figure (3.14) illustre que le SVC, conserve son efficacité même lorsque plusieurs charges sont connectées sur une courte période de temps, ce qui est crucial pour assurer la stabilité dynamique du système électrique.

Lorsque plusieurs charges sont connectées simultanément au réseau électrique, cela peut entraîner des fluctuations rapides dans la demande de puissance. Ces fluctuations peuvent provoquer des variations indésirables de la tension et des perturbations de la fréquence, menaçant ainsi la stabilité du réseau électrique.

Le SVC réagit rapidement pour réguler la puissance réactive, en ajustant la tension et en maintenant la stabilité du système même face à ces changements rapides de charge. Il injecte ou absorbe de la puissance réactive selon les besoins, aidant ainsi à stabiliser la tension et à minimiser les variations indésirables, garantissant ainsi une exploitation efficace et sûre du réseau électrique, même en période de fluctuation dynamique de la charge.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'impact d'intégration de FACTS de type SVC sur un réseau électrique. Le SVC utilisées commandé par le contrôleur PI optimisé par la méthode de moindre carré. Quatre scénarios sont appliqués au système d'alimentation SMIB équipé d'un (SVC). Le SVC de type (TSC+TCR) installé sur une ligne de transmission d'énergie au niveau de branchement de la charge, a permis de juger ces performances suite à une grande perturbation due notamment aux connexions des grandes charges électriques ou bien causé par un court-circuit. De plus, Les résultats

de contrôle de tension attestent de l'efficacité du régulateur PI optimisé mis au point, où le profil de tension a été amélioré et suit de manière précise la référence spécifiée.

Conclusions Générales

Conclusions Générales

Le développement des dispositifs FACTS, suite à la progression importante de l'électronique de puissance et à la robustesse ainsi qu'à la commutation rapide de ces composants, a permis une meilleure exploitation des réseaux électriques..

Ce miroir est organisé en trois sections distinctes. Le premier chapitre était consacré à l'étude des différents aspects de la stabilité des réseaux électriques. Ainsi qu'à l'examen des méthodes visant à les améliorer, en mettant particulièrement l'accent sur les systèmes FACTS.

Dans le deuxième chapitre, le fonctionnement du régulateur PID est expliqué ainsi que ses différents paramètres tels que les paramètres de régulation K_p , K_i et K_d . Ce travail est une contribution au problème de choix de synthèse de contrôle des FACTS, afin de choisir une méthode de contrôle optimale des systèmes FACTS et sa pour maintenir les déférant paramètres de réseau tel que la tension de réseaux et de fréquence ainsi que l'angle de rotor entre ces limites acceptable.

Parmi les trois types parallèles, série et hybride de dispositifs FACTS qui ont été présentés dans le premier chapitre, le compensateur statique de puissance réactive(SVC) était choisi. A cause de sa simplicité de contrôle et son coût.

La simulation du SVC est faite dans un réseau contient un générateur de 200MVA avec un réseau infini. Les valeurs optimales des coefficients du régulateur K_p et K_i dans le régulateur SVC sont obtenues par la méthode des moindres carrés exacte pour contrôler les tensions et les puissances réactives du réseau électrique après un court-circuit de deux cycles ou la connexion de charges importantes. Cela permet d'observer le comportement transitoire et dynamique du réseau, ainsi que la variation de la susceptance du SVC et du courant injecté.

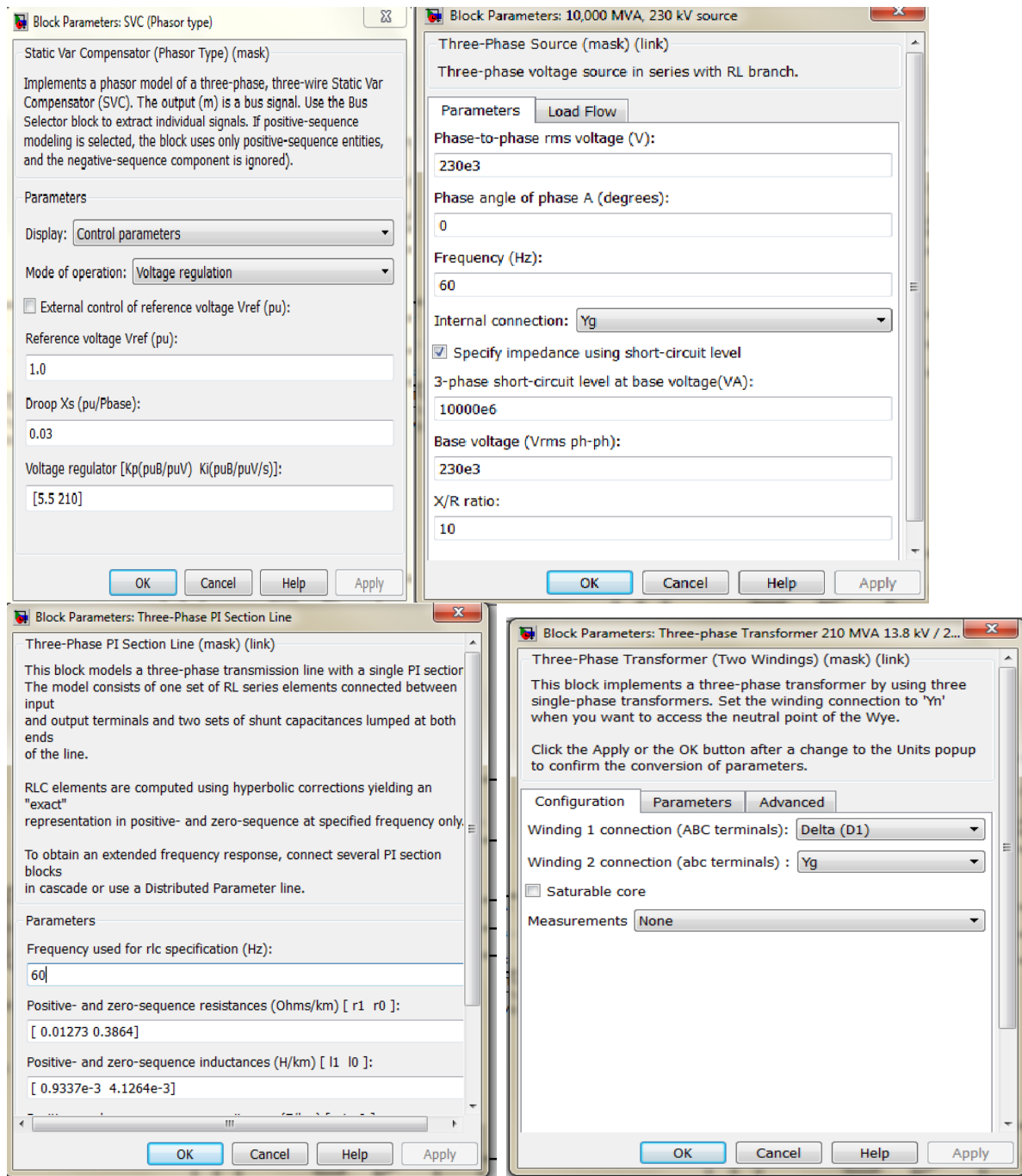
La comparaison des résultats obtenus par simulations sur les performances du compensateur statique SVC optimisé et non optimisé montre que l'optimisation du contrôle du SVC est très importante pour assurer la bonne stabilité de la tension de ligne électrique en compensant l'énergie réactive causée par les variations de consommation.

Conclusions Générales

Les résultats du contrôle de tension attestent aussi que La méthode des moindres carrés s'est avérée extrêmement efficace pour l'optimisation des paramètres K_p et K_i du contrôleur PI du SVC. En utilisant cette approche, nous avons pu ajuster précisément ces coefficients afin de réguler efficacement les tensions et les puissances réactives du réseau électrique, en réponse à des perturbations telles que des courts-circuits ou des variations de charges importantes. Les simulations ont confirmé que cette méthode permet non seulement d'améliorer la stabilité du système mais aussi d'optimiser les performances dynamiques, en minimisant les oscillations et en assurant une réponse rapide et précise du SVC aux variations de conditions du réseau. En conclusion, la méthode des moindres carrés se présente comme une approche robuste et efficace pour l'optimisation des contrôleurs PI dans les systèmes SVC, contribuant ainsi à une gestion plus efficace et fiable des réseaux électriques.

Annexe

Les déferant paramètres de réglage pour déferant composant de reseau de simulation



Référence bibliographique :

- [1] TOUAFEK Mohamed Yaakoub" *Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS*" Soutenu le 11 Janvier 2012
- [2] F. ZITOUNI., " Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques par l'utilisation des Systèmes FACTS " mémoire de magistère, Présenté au département d'Electrotechnique Faculté de Technologie, Université Ferhat Abbas Sétif, le 30/06/2010.
- [3] Nikos Hatziargyriou; Jovica Milanovic; Claudia Rahmann; Venkataramana Ajjarapu
Revues et magazines " Transactions IEEE sur les systèmes d'alimentation." Définition et classification de la stabilité du système électrique , Volume : 36 Numéro : 4
- [4] Sous la direction de René Feuillet et de Nouredine Hadj-Said.en partenariat avec Laboratoire d'électrotechnique (Grenoble1980-2006) (laboratoire) .
- [5] Jean-Christophe Passelergue " Interactions des dispositifs FACTS dans les grands Réseaux électriques" Submitted on 16 May 2013.
- [6] GACEM Abdelmalek " Commande Robuste d'un Dispositif FACTS par les Méthodes Méta heuristiques pour la Stabilité de Tension d'un Réseau Electrique" le 15/04/2019.
- [7] Seyed Mohammad Sadeghzadeh " Amélioration de la stabilité transitoire et de L'amortissement des oscillations d'un réseau électrique à l'aide de SMES et de SSSC" Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1998. Français.
- [8] Ay Abdelouahab" *Modélisation et Analyse d'Un Compensateur Statique : SVC*" Mémoire de Magistère ,le 02 /05/2013.
- [9] Yahiaoui Merzoug " Contrôle optimal des puissances réactives et les tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS " Doctorat en science. le, 10 - 04 - 2014
- [10] Mme GHOMRI née CHIALI LEILA" Contrôle des dispositifs FACTS appliqués au réseau ouest-Algérie " **these** Doctorat en science **2010**.
- [11] A. KHODABAKHSHIAN, R. HOOSMAND, R. SHARIFIAN " Power system stability enhancement by designing PSS and SVC parameters coordinately using RCGA ", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCEC, 2009.
- [12] O H. ABDALLA, W M.REFAEY, M K.SAAD, G.SARHAN " Coordinated design of power system and stabilizers and Static Var Compensator in a multi machine power system using genetic algorithms " Proceeding of the 6th ICEENG conference, Military Technical College Kobry El-Kobbah, Cairo, Egypt, 27-

29 May, 2008

- [13] K.SOMSAI,A.OONSIVILA,et all « Optimal PI controller design and simulation of static var compensator using MATLAB'SIMULINK » Proceedings of the 7thWSEAS International Conference on Power Systems, Beijing, China, September 15-17, 2007
- [14] S. PANDA, N. P. PADHY " Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for FACTS-Based Controller Design ", Applied Soft Computing 8 (2008) 1418-1427
- [15] S. PANDA, S. C. SWAIN, P. K. RAUTRAY, AND R. K. MALIK. P, "Design and analysis of SSSC-based supplementary damping controller," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, no. 9, pp. 1199-1213, Oct. 2010.
- [16] YL Abdel-Magid,MA Abido Recherche sur les systèmes d'alimentation électrique
Volume 69, numéros 2-3, mai 2004, pages 129-141
- [17] Eslami, M., Shareef, H., Mohamed, A. *et al.* " Gravitational search algorithm for coordinated design of PSS and TCSC as damping controller. " *J. Cent. South Univ. Technol.* 19, 923–932 (2012).
<https://doi.org/10.1007/s11771-012-1094-2>
- [18] Abd-Elazim, S. M.a and Ali, E. S.b "Synergy of Particle Swarm Optimization and Bacterial Foraging for TCSC Damping Controller Design " a- Assistant Professor, Electric Power and Machine Department, Faculty of Engineering, Zagazig University, Zagazig, Egypt, E-mail address: sahareldeep@yahoo.com
- [19] World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering Vol:8, No:1, 2014
- [20] Rajendra Jitendriya KuSatapath"Timedelay approach for PSS and SSSC based coordinated controller design using hybrid PSO–GSA algorithm "International Journal of Electrical Power & Energy Systems " Volume 71, October 2015, Pages 262-273
- [21] Sidhartha Panda, Narendra Kumar Yegireddy "ISA Transactions "Multi-Input Single Output SSSC based damping controller design by a hybrid Improved Differential Evolution-Pattern Search approach" Volume 58, September 2015, Pages 173-185
- [22] Mahendra Nandi, C.K. Shiva, V. Mukherjee " Engineering Science and Technology, an International Journal" *TCSC based automatic generation control of deregulated power system using quasi-oppositional harmony search algorithm*Volume 20, Issue 4, August 2017, Pages 1380-1395
- [23] A. Harrag 1, 2 * and S. Messalti " Optimal GA-based PI control of SVC compensator improving voltage stability "CCNS Laboratory, Electronics Department, Faculty of Technology Ferhat Abbas University, Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 °2 (2018) 303 – 314 303
- [24] Dilip P. Ladumor " Optimal Power Flow with shunt Flexible AC Transmission system (FACTS) device using Grey Wolf Optimizer" Third International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information,

- [25] Ahmed Merah and Mohamed Adjabi " Multi-objective Optimization in Power Systems Including UPFC Controller with NSGA III "International Journal of Modeling and Optimization" Vol. 8, No. 6, December 2018 .
- [26] Asim Halder , Nitai Pal, Debasish " Transient Stability Analysis of a Multimachine Power System with TCSC Controller – A Zero Dynamic Design Approach" « International Journal of Electrical Power & Energy Systems''Volume 97, April 2018, Pages 51-71
- [27]Shiba R. Paita, Prakash K. Ray, Asit Mohanty " Stability improvement in solar PV integrated power system using quasi-differential search optimized SVC controller" Volume 170, October 2018, Pages 420-430
- [28] Sanat Kumar Barik, et All "Application of MOL algorithm for SSSC based damping controller design with modified local input signal" Date of Conference: 28-30 March 2018 Date Added to IEEE *Xplore*: 11 June 2018 DOI: 10.1109/ICSESP.2018.8376748'
- [29] Journal international d'automatisation et de contrôle Vol. 17, n° 3 Zahid Afzal Thoker et Honte à Ahmad Lone Publié en ligne: 16 février 2023 pp 306-327.
- [30] J. Silva, « PID controllers for Time-Delay Systems », Springer, 2005.
- [31] Boukhris M. Régulation de vitesse d'une machine asynchrone, Université de Kasdi Merbah OURAGLA, Master en Electrotechnique (2014)
- [32] Vrancic D., Anti-Wind up and conditionnel Transfer for PID contrôler Conférence AntiWind up and conditionnel Transfer for PID contrôler vol. Vol.A. pp 183-6.2010.
- [33] Maurice Rivoire et Louis Ferrier, " Asservissement, Régulation -commande analogique", Edition EYROLLES, juin 2006 .
- [34] W.Boutana, N.Ykhalfoune, Etude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID et un Régulateur flou, mémoire de master en Electronique des systèmes embarqués, Université de Jijel, Algérie, 2019.
- [35] Zoghmar M, Habchi A, Étude comparative entre deux régulateurs PID et FLC Appliqués à la Machine à Courant Continu, master Génie électrique, Université LARBI BEN M'HIDI DE OUM 2010.

Résumé

En raison d'augmentation continue de la demande d'énergie électrique .il est devenue essentiel de trouver les solution pour un meilleur exploitation de l'énergie et minimisé les perte de transport de cette dernier dans les réseaux électriques.et cela Par le bon contrôle de tension, compensation de l'énergie réactive, $\cos \alpha$.. Etc.

L'objectif de ce travaille est le contrôle optimale de système FACTS par Un contrôleur robuste proportionnel intégrateur (PI) dont les gains du contrôleur sont optimisés par la méthode moindre carré a été conçu pour la commande de SVC.

Pour vérifier l'efficacité de cette méthode proposée, elle a été étudiée sur un réseau électrique en utilisant le SVC

Les résultats obtenus du contrôle de tension démontrent l'efficacité du PI optimisé développé dans lequel le profil de tension a été amélioré et suivent parfaitement la référence.

Mots clés:

Stabilité, contrôle optimale des FACTS, Méthode d'optimisation, Dispositifs des FACTS, SVC .compensation .

ملخص

نظرا للزيادة المستمرة في الطلب على الطاقة الكهربائية، أصبح من الضروري إيجاد حلول استغلال الطاقة بشكل أفضل وتقليل فقدان نقل الأخيرة في الشبكات الكهربائية، وذلك من خلال التحكم الجيد في الجهد، وتعويض الطاقة التفاعلية، الخ

تم تحسين مكاسب وحدة (PI) من خلال وحدة تحكم تكامل تناسبية قوية FACTS الهدف من هذا العمل هو التحكم الأمثل في نظام التحكم الخاصة بها بواسطة طريقة المربع الأصغر للتحكم في

SVC

باستخدام SVC وللتحقق من فعالية هذه الطريقة المقترحة تمت دراستها على شبكة كهربائية الأمثل الذي تم تحسين ملف تعريف الجهد فيه ويتبع المرجع PI توضح النتائج التي تم الحصول عليها من التحكم في الجهد فعالية

abstract

Due to the continuos increase in the demand for electrical energy, it has become essential to find solutions for better exploitation of energy and minimize the transport losses of the latter in the electrical networks. and this by the good voltage control, compensation of reactive energy, $\cos \alpha$.. Etc.

The objective of this work is the optimal control of FACTS system by A robust proportional integrator (PI) controller whose controller gains are optimized by the least square method has been designed for the control of SVC.

To verify the effectiveness of this proposed method, it has been studied on an electrical network using the SVC

The results obtained from the voltage control demonstrate the effectiveness of the optimized PI developed in which the voltage profile has been improved and perfectly follows the reference.