

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf/2025



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par: KHALED SARA et KHOUALDIA MERIEM

Thème

**Étude du compensateur statique de puissance réactive utilisé
pour le réglage de la tension nodale dans un réseau électrique**

Soutenu publiquement, le 23/06/2025, devant le jury composé de :

M. LEMZADMI Ahcene	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. BELOUCIF Faissel	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
M. BOUDEFEL Amar	MCA	Univ. Guelma	Examinateur principale
Mme. GUEROUI Assia	MCA	Univ. Guelma	Examinateur

Année Universitaire: 2024/2025

الملخص:

في هذا العمل، قدمنا دراسة حول دور المعوض الساكن للطاقة الردية (SVC) في ضبط الجهد عند العقدة في شبكة كهربائية.

لذلك، تم نمذجة الـ SVC من النوع المركب (TCR+TSC) في نظام غير جيببي، مع مراعاة التفاعلات بين الحمل والمعوض.

تم وضع معادلات تحليلية لتحديد الجهد العقدي، الطاقة الردية المحقونة من طرف الـ SVC، الطاقة الممتصة من طرف الحمل، بالإضافة إلى معدل التشوه التوافقي (THD).

وقد مكّنت المحاكاة المنجزة باستعمال برنامج MATLAB من تقييم أداء الـ SVC وفقاً لمعايير تحكم مختلفة، مثل زاوية الإشعال ونسب القدرة.

وأخيراً، أظهرت النتائج فعالية المعوّض الساكن للقدرة غير الفعالة (SVC) في التنظيم الديناميكي للتوتر وتقليل تأثير التوافقيات، مما يساهم في تحسين أداء الشبكات الكهربائية مع ضمان جودة أفضل للطاقة. كما يُساهم ذلك أيضاً في تقليل التكاليف والوقاية، قدر الإمكان، من الأعطال التي قد تحدث أثناء التشغيل.

Résumé :

Dans ce travail, nous avons présenté une étude sur le rôle du compensateur statique de puissance réactive (SVC) dans le réglage de la tension nodale au sein d'un réseau électrique.

Pour cela, une modélisation du SVC de type combiné (TCR+TSC) a été réalisée en régime non sinusoïdal, en tenant compte des interactions entre la charge et le compensateur.

Des équations analytiques ont été établies pour déterminer la tension nodale, la puissance réactive injectée par le SVC, celle absorbée par la charge, ainsi que le taux de distorsion harmonique (THD).

La simulation, effectuée sous MATLAB, permet d'évaluer les performances du SVC selon différents paramètres de commande, tels que l'angle d'amorçage et les rapports de puissance.

Enfin, les résultats ont démontré l'efficacité du SVC dans la régulation dynamique de la tension et la réduction des effets des harmoniques, ce qui permet une exploitation optimale des réseaux électriques avec une meilleure qualité de l'énergie. Cela contribue également à la réduction des coûts et à la prévention, autant que possible, des anomalies pouvant survenir lors du fonctionnement.

Abstract:

In this work, we presented a study on the role of the Static Var Compensator (SVC) in regulating nodal voltage within an electrical power network.

To achieve this, a modeling of the combined-type SVC (TCR+TSC) was carried out under non-sinusoidal conditions, considering the interactions between the load and the compensator.

Analytical equations were developed to determine the nodal voltage, the reactive power injected by the SVC, the reactive power absorbed by the load, and the Total Harmonic Distortion (THD).

The simulation, performed using MATLAB, allows evaluating the SVC's performance according to different control parameters such as firing angle and power ratios.

Finally, the results demonstrated the effectiveness of the SVC in the dynamic regulation of voltage and the reduction of harmonic effects, allowing for optimal operation of electrical networks with improved power quality. This also contributes to cost reduction and, as much as possible, the prevention of anomalies that may occur during operation.

Remerciements

Louange à Allah, Le Tout-Puissant, pour nous avoir guidés, soutenus et accordé la force et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

*Nous remercions chaleureusement notre encadrant, Dr. **Beloucif Faissel**, pour sa disponibilité, ses conseils pertinents et son accompagnement constant. Son encadrement rigoureux et ses orientations scientifiques nous ont été d'une grande aide tout au long de cette étude.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du département de Génie Électrotechnique et Automatique, pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de notre formation, ainsi qu'au personnel administratif pour son soutien durant notre parcours universitaire.

Enfin, au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté leur aide et leur encouragement.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

À nos mères, nos piliers, nos refuges d'amour et de patience. À celles qui n'ont jamais cessé de croire en nous, qui ont veillé dans le silence et prié dans l'ombre. Que Dieu vous protège et vous récompense pour tout.

À nos pères, sources de vie, d'amour et d'affection, ces rochers de force et d'inspiration. À celui qui continue de nous soutenir chaque jour, et à celui qui nous a quittés trop tôt, laissant derrière lui des souvenirs, des valeurs et un amour éternel. Qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et lui ouvre les portes de Son vaste paradis.

À nos familles, frères, sœurs, grands-parents, oncles, tantes, cousins et cousines, pour leur affection, leur compréhension et leur présence constante à nos côtés.

À nos amis et collègues, pour les échanges, les rires, l'entraide et les moments partagés tout au long de notre parcours universitaire.

À toutes celles et ceux qui nous ont soutenus, encouragés ou inspirés, de près comme de loin, dans la réalisation de ce mémoire.

Khaled Sara

Khoualdia Meriem

Sommaire

Résumé	
Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Liste des symboles	
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Qualité de l'énergie électrique

I.1. Introduction	4
I.2. Qualité de l'énergie électrique	4
I.3. Paramètres de la qualité de l'énergie électrique.....	4
I.3.1. L'amplitude	4
I.3.2. La fréquence.....	5
I.3.3. La forme d'onde.....	5
I.3.4. La symétrie du système triphasé	5
I.4. Notion de charges	5
I.4.1. Charge linéaire	6
I.4.1. Charge non linéaire.....	6
I.5. Dégradation de la qualité de la tension.....	7
I.5.1. Surtensions	7
I.5.2. Fluctuation rapide de tension (Flicker)	8
I.5.3. Déséquilibre de système triphasé de tension	9
I.5.4. Creux de tension et coupures.....	10
I.5.5. Harmoniques et interharmoniques	11
I.5.6. Variation de la fréquence.....	13
I.6. Réglage de la tension	13
I.7. Conclusion.....	15

Chapitre II : La compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques

II.1. Introduction.....	17
II.2. Energies, puissances et facteur de puissance	17
II.3. Circulation de la puissance réactive et ses effets.....	18
II.4. Compensation de l'énergie réactive.....	19
II.5. Intérêt de la compensation de l'énergie réactive.....	20

II.6. Types de compensation	21
II.6.1. Compensation fixe	21
II.6.2. Compensation automatique	21
II.7. Les modes de compensation	22
II.7.1. Compensation globale	22
II.7.2. Compensation partielle ou par secteur	23
II.7.3. Compensation individuelle	24
II.8. Moyens de compensation de l'énergie réactive	25
II.8.1. Les dispositifs conventionnels	25
II.8.1.1. Compensateurs synchrones	25
II.8.1.2. Batteries de condensateurs	25
II.8.2. Les dispositifs FACTS	26
II.8.2.1. Catégories principales	27
II.8.2.1.1. Les compensateurs shunts	28
A. Compensateur Statique (SVC)	28
B. Compensateur synchrone statique (STATCOM)	29
II.8.2.1.2. Les compensateurs séries	31
A. Condensateur Série Contrôlé par Thyristors (TCSC)	31
B. Condensateur Série Commuté par Thyristors (TSSC)	32
C. Compensateur Statique Synchrone Série (SSSC)	32
II.8.2.1.3. Les compensateurs hybrides (série - parallèle)	33
A. Le contrôleur universel d'écoulement de puissance (UPFC)	34
II.8.2.2. Comparaison des différents dispositifs FACTS	35
II.9. Conclusion	36

Chapitre III : Concepts du SVC et le contrôle des paramètres de régime dans un nœud

III.1. Introduction	38
III.2. Définition du SVC	38
III.3. Constitution du SVC	38
III.3.1. Condensateur fixe (FC)	39
III.3.2. Réactance commandée par thyristors (TCR)	39
III.3.3. Réactance commutée par thyristors (TSR)	42
III.3.4. Condensateur commutée par thyristors (TSC)	42
III.4. Principes de fonctionnement du SVC	44
III.5. Système de contrôle du SVC	45
III.6. Les différents types de SVC	45
III.6.1. SVC à condensateurs commutés par thyristor (TSC)	45

III.6.2. SVC à réactance commandée par thyristors avec batteries de condensateurs fixes (TCR + FC).....	46
III.6.3. SVC combiné TCR + TSC ($\alpha_L = \alpha_C$).....	47
III.6.4. SVC combiné TCR + TSC ($\alpha_L \neq \alpha_C$).....	48
III.7. Avantages et inconvénients de la compensation par SVC	48
III.8. Détermination des paramètres du nœud.....	49
III.8.1. Détermination de la tension du nœud.....	51
III.8.2. Détermination de la puissance réactive du SVC et de la charge	54
III.8.2.1. Détermination de la puissance réactive du SVC.....	55
III.8.2.2. Détermination de la puissance réactive de la charge.....	57
III.9. Caractéristiques statiques du nœud	58
III.10. Interprétation et discussion des résultats	62
III.11. Conclusion	63
Conclusion générale	65
Bibliographie	66

Liste des figures

Figure I. 1: Comportement d'une charge linéaire résistive sous tension sinusoïdale	6
Figure I. 2: Exemple de surtension.....	7
Figure I. 3: Fluctuation de tension	9
Figure I. 4: Illustration d'un déséquilibre des amplitudes et des phases.....	9
Figure I. 5: Creux et coupure de tension.....	10
Figure I. 6: Représentation d'un signal déformé et de son spectre harmonique.....	12
Figure I. 7: Variation de fréquence	13
Figure II. 1: Influence de la puissance réactive.....	19
Figure II. 2: Diagramme des puissances.....	20
Figure II. 3: Compensation globale.....	22
Figure II. 4: Compensation partielle	23
Figure II. 5: Compensation individuelle.....	24
Figure II. 6: Principe de la compensation shunt de la puissance réactive.....	28
Figure II. 7: (a) la structure de base d'un SVC, (b) schéma équivalent d'un SVC.....	29
Figure II. 8: (a) la structure de base d'un STATCOM, (b) schéma équivalent d'un STATCOM	30
Figure II. 9: Principe de la compensation série de la puissance réactive.....	31
Figure II. 10: (a) la structure de base d'un TCSC, (b) schéma équivalent d'un TCSC	32
Figure II. 11: (a) la structure de base d'un SSSC, (b) schéma équivalent d'un SSSC.....	33
Figure II. 12: Caractéristique statique du SSSC.....	33
Figure II. 13: Principe de la compensation hybride de la puissance réactive	34
Figure II. 14: (a) la structure de base d'un UPFC, (b) schéma équivalent d'un UPFC	35
Figure III. 1: Schémas des principales structures d'un SVC	39
Figure III. 2: (a) : Réactance commandée par thyristors (TCR), (b) : Représentation des courants et des tensions des différents éléments du TCR.....	40
Figure III. 4: Variation de la susceptance du TCR en fonction de α	41
Figure III. 5: Caractéristique (V-I) du TCR	42
Figure III. 6: (a) : Condensateur commuté par thyristors (TSC), (b) : Représentation des courants et des tensions des différents éléments du TSC.....	43
Figure III. 7: Caractéristique (V-I) du TSC.....	44
Figure III. 8: Caractéristique de réglage du SVC.....	45
Figure III. 9: Configuration d'un SVC composé de plusieurs branches TSC.....	46
Figure III. 10: Schéma de principe d'un SVC combinant TCR et condensateur fixe (FC).....	47
Figure III. 11: Schéma de principe d'un SVC combiné TCR + TSC	48
Figure III. 12: Distribution des courants harmoniques dans un SVC combiné de type TCR+TSC.	50
Figure III. 13: La caractéristique tension - courant du SVC.....	50
Figure III. 14: La caractéristique tension - puissance réactive du SVC	51
Figure III. 15: Caractéristiques de la tension du nœud pour $K_2 = 0,05$	58
Figure III. 16: Caractéristiques de la tension du nœud pour $K_2 = 0,20$	59
Figure III. 17: Variation de la puissance réactive du SVC pour $K_2 = 0,05$	59
Figure III. 18: Variation de la puissance réactive du SVC pour $K_2 = 0,20$	60
Figure III. 19: Variation de la puissance réactive de la charge pour $K_2 = 0,05$	60
Figure III. 20: Variation de la puissance réactive de la charge pour $K_2 = 0,20$	61
Figure III. 21: Caractéristiques du Taux de distorsion harmoniques en fonction de l'angle d'amorçage (α) pour $K_2 = 0,05$	61
Figure III. 22: Caractéristiques du Taux de distorsion harmoniques en fonction de l'angle d'amorçage (α) pour $K_2 = 0,20$	62

Liste des tableaux

Tableau II. 1: Analyse comparative des technologies FACTS	35
--	----

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
FACTS	Systèmes Flexibles de Transmission en Courant Alternatif
FC	Condensateur fixe
GTO	Thyristor à extinction par la grille
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée
SCR	Redresseur commandé au silicium
SSR	Résonance sous-synchrone
SSSC	Compensateur synchrone série statique
STATCOM	Compensateur statique synchrone
SVC	Compensateur statique de puissance réactive
TCR	Réacteur contrôlé par thyristor
TCSC	Condensateur série commandé par thyristor
TSC	Condensateur à commutation par thyristor
TSR	Réacteur à commutation par thyristor
TSSC	Condensateur série à commutation par thyristor
UPFC	Contrôleur unifié de flux de puissance
VSC	Convertisseur à source de tension

Liste des symboles

Symbole	Signification
TDH_v	Taux de distorsion harmonique de la tension
TDH_i	Taux de distorsion harmonique du courant
F_p	Facteur de puissance ($\cos \varphi$)
Q	Puissance réactive
Q_c	Puissance réactive de compensation
P	Puissance active
S	Puissance apparente
I_{sh}	Courant injecté par le STATCOM
P_{sh}	Puissance active injectée par le STATCOM
Q_{sh}	Puissance réactive injectée par le STATCOM
V_{sh}	Tension au niveau du point de connexion du STATCOM

V_k	Tension au nœud k du réseau électrique
X_{TCSC}	Réactance équivalente d'un TCSC
P_{sr}	Puissance active transmise via le TCSC
$V(t)$	Tension instantanée sinusoïdale
I_{LTCR}	Courant dans le réacteur TCR
B_{TCR}	Susceptance équivalente du TCR
I_{TSC}	Courant du TSC
W_m	Énergie magnétique stockée dans l'inductance
W_e	Énergie électrique stockée dans la capacité
ϕ	Flux magnétique
U_n	Tension à l'harmonique n
I_n	Courant à l'harmonique n
φ_n	Angle de phase à l'harmonique n
Q_n	Puissance réactive à l'harmonique n
Q_{L1}	Puissance réactive de l'inductance à la fondamentale
a_{C1}	Coefficient de la composante fondamentale de tension aux bornes de la capacité
a_{L1}	Coefficient de la composante fondamentale de tension aux bornes de l'inductance
Q_{Ln}	Puissance réactive inductive à l'harmonique n
a_{Cn}	Coefficients de la décomposition en série de fourier du $n^{ième}$ harmonique aux bornes de la capacité
a_{Ln}	Coefficients de la décomposition en série de fourier du $n^{ième}$ harmonique aux bornes de l'inductance
Q_{C1}	Puissance réactive capacitive à la fondamentale
Q_{Cn}	Puissance réactive capacitive à l'harmonique n
Q_{SVC1}	Puissance réactive injectée par le SVC à la fondamentale
Q_{ch1}	Puissance réactive de la charge à la fondamentale
Q_{SVC}	Puissance réactive totale injectée par le SVC
Q_{ch}	Puissance réactive totale de la charge

Introduction générale

Introduction générale

L'augmentation continue de la demande en énergie électrique, combinée aux contraintes environnementales et économiques, a profondément transformé la structure et le fonctionnement des réseaux électriques modernes. Ces réseaux sont désormais plus vastes, plus interconnectés, et fonctionnent souvent à proximité de leurs limites de capacité. Le transport d'électricité sur de longues distances, ainsi que la diversité croissante des charges raccordées, rendent la gestion du système électrique de plus en plus complexe, en particulier en ce qui concerne le maintien de la stabilité de la tension.

L'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les exploitants est la préservation d'un profil de tension adéquat, condition essentielle au bon fonctionnement et à la fiabilité du réseau. Le maintien de la tension dans des plages admissibles est indispensable pour garantir la performance des équipements, la continuité de service, et la qualité de l'alimentation. De nombreux événements critiques enregistrés à l'échelle mondiale ont mis en évidence l'importance de ce paramètre dans la sécurité globale du système électrique.

Dans ce contexte, le pilotage de la puissance réactive constitue un levier fondamental pour améliorer la stabilité du réseau et en optimiser le fonctionnement. Une gestion inadéquate de cette grandeur peut entraîner des pertes supplémentaires, une dégradation du facteur de puissance, ainsi que des écarts de tension notables. Dès lors, la compensation de la puissance réactive est devenue une composante incontournable de la planification et de l'exploitation des réseaux.

Pour répondre à ces enjeux, les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) se sont révélés être des solutions à la fois efficaces et dynamiques. Parmi eux, le compensateur statique de puissance réactive (SVC) se distingue par sa capacité à réguler rapidement la tension, en injectant ou en absorbant en continu la puissance réactive requise, ce qui permet d'améliorer significativement la qualité de la tension au niveau nodal.

Le présent mémoire s'inscrit dans ce cadre et a pour objectif d'étudier le rôle du SVC dans le réglage de la tension nodale d'un réseau électrique. Il est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre traite de la qualité de l'énergie électrique, de ses critères d'évaluation, des principales causes de sa dégradation, ainsi que des méthodes de régulation de la tension.

Le deuxième chapitre est consacré à la puissance réactive, à son impact sur le fonctionnement du réseau, et aux différentes techniques de compensation, en distinguant les dispositifs conventionnels et ceux issus de la technologie FACTS.

Le troisième chapitre est consacré aux concepts fondamentaux du SVC et à l'étude du contrôle des paramètres de régime dans un nœud électrique. Il présente la modélisation du SVC et le calcul des principales grandeurs électriques telles que la tension, la puissance réactive injectée par le SVC, celle absorbée par la charge, ainsi que le taux de distorsion harmonique, à l'aide d'un programme développé sous MATLAB.

Chapitre I
Qualité de l'énergie électrique

I.1. Introduction :

La qualité de l'énergie électrique représente un critère fondamental dans le fonctionnement optimal des réseaux électriques, où la continuité de service, la précision des niveaux de tension et la stabilité fréquentielle sont essentielles au bon fonctionnement des équipements, notamment ceux à haute sensibilité. Cependant, cette qualité peut être altérée par différentes perturbations, engendrées notamment par l'évolution des technologies, la prolifération des charges non linéaires (telles que les variateurs de vitesse, redresseurs et convertisseurs), ainsi que par l'expansion et la complexification des réseaux électriques.

Dans cette optique, le présent chapitre vise à identifier les principaux paramètres caractérisant la qualité de l'énergie électrique, à étudier les principales perturbations pouvant compromettre la stabilité de la tension, et à mettre en évidence l'importance du réglage de la tension comme paramètre déterminant pour assurer la robustesse et l'efficacité du réseau électrique.

I.2. Qualité de l'énergie électrique :

La qualité de l'énergie électrique (QEE) concerne la tension, la fréquence et la forme d'onde. Théoriquement, une bonne qualité signifie une tension stable et dans la plage prescrite, une fréquence proche de sa valeur nominale et une forme d'onde ressemblant à une sinusoïde parfaite. En pratique, la qualité de l'énergie électrique peut être définie comme la compatibilité entre l'électricité fournie et les appareils qui y sont connectés. [1]

I.3. Paramètres de la qualité de l'énergie électrique :

La qualité de l'énergie fait principalement référence à la qualité de la tension. L'énergie électrique doit être fournie sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées, caractérisé par quatre paramètres essentiels : l'amplitude, la fréquence, la forme d'onde et la symétrie.

I.3.1. L'amplitude :

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude,

qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions.

I.3.2. La fréquence :

Dans le cas idéal, la fréquence nominale de la tension alternative sinusoïdales fournie par le réseau est constante et de 50 ou 60 Hz selon le pays. Le maintien de la fréquence de la tension en réseau dépend de l'équilibre établi entre la charge et la puissance des centrales. Comme cet équilibre évolue dans le temps, il en résulte de petits écarts de fréquence qui dépendent des particularités de la charge et de la réponse de la production.

Par ailleurs, le réseau peut être soumis à des variations plus importantes dues à des courts-circuits ou des variations importantes de charge ou de production qui causent des variations de fréquence temporaires dont l'amplitude et la durée dépendent de la sévérité de l'événement. [3]

I.3.3. La forme d'onde :

Dans un système triphasé, la forme d'onde des trois tensions doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits. [2]

I.3.4. La symétrie du système triphasé :

Le système est symétrique si les amplitudes des grandeurs sinusoïdales sont égales et si le déphasage entre deux grandeurs consécutives vaut 120° ($2\pi/3$). La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

I.4. Notion de charges :

La compréhension du comportement des charges électriques est essentielle pour l'analyse des réseaux électriques. On distingue principalement deux catégories : les charges linéaires et les charges non linéaires, en fonction de la relation qu'elles entretiennent entre la tension et le courant.

I.4.1. Charge linéaire :

Une charge est dite linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe est proportionnel à la tension appliquée à ses bornes. Autrement dit, la relation entre la tension et le courant suit une loi linéaire, comme la loi d'Ohm dans le cas des résistances, ou les équations différentielles linéaires dans le cas des inductances et des capacités.

Lorsqu'une tension sinusoïdale est appliquée à une charge linéaire, le courant résultant est également sinusoïdal, à la même fréquence que la tension. Ces charges ne modifient pas la forme d'onde du courant et ne génèrent donc aucune distorsion harmonique dans le réseau. Dans ce contexte, la puissance absorbée par la charge se compose d'une puissance active et d'une puissance réactive, selon le décalage de phase entre la tension et le courant.

Les charges linéaires sont généralement constituées d'éléments passifs comme les résistances, les inductances et les condensateurs, ou encore d'équipements fonctionnant dans leur domaine linéaire, tels que les transformateurs ou les moteurs en régime stable.

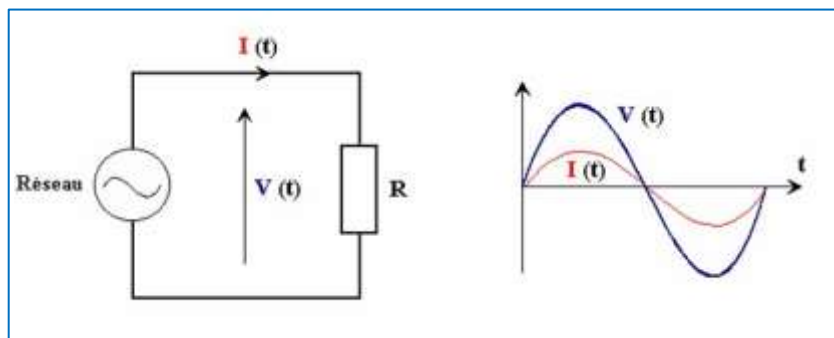


Figure I. 1: Comportement d'une charge linéaire résistive sous tension sinusoïdale.

I.4.1. Charge non linéaire :

Contrairement aux charges linéaires, les charges non linéaires n'obéissent pas à une relation proportionnelle entre tension et courant. Lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale, elles absorbent un courant non sinusoïdal, c'est-à-dire contenant des composantes harmoniques (fréquences multiples de la fréquence fondamentale).

Ce comportement est dû à la présence de composants électroniques à commutation (diodes, thyristors, transistors, etc.) qui modifient brusquement le passage du courant, engendrant des formes d'ondes déformées. Elles sont très répandues dans les installations modernes en raison de l'utilisation massive de l'électronique de puissance, en particulier

dans les équipements informatiques, les alimentations à découpage, les variateurs de vitesse, les convertisseurs statiques et autres dispositifs d'électronique industrielle.

Dans le cas des charges non linéaires, la puissance échangée avec le réseau comprend non seulement la puissance active et réactive, mais aussi une composante déformante liée aux harmoniques. Cette dernière augmente la puissance apparente et dégrade le facteur de puissance. À grande échelle, ces courants déformés perturbent le réseau et peuvent affecter d'autres équipements. Pour y remédier, on utilise des filtres (passifs ou actifs) ou des correcteurs de facteur de puissance (PFC), qui permettent de limiter les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie fournie. [11]

I.5. Dégradation de la qualité de la tension:

Les problèmes liés à la qualité de l'énergie électrique impliquent l'ensemble des partenaires du distributeur d'énergie à l'utilisateur. Ils concernent les imperfections de la tension électrique ayant pour origine les perturbations électriques.

La qualité de l'énergie électrique se mesure donc sur les réseaux et passe par l'observation des perturbations pouvant affecter ces réseaux électriques. Les principaux phénomènes affectant la qualité de la tension sont brièvement décrits ci-après.

I.5.1. Surtensions:

- **Définition**

Les surtensions transitoires sont des phénomènes brefs dans leur durée et aléatoire dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale de 50Hz durant moins d'une seconde.

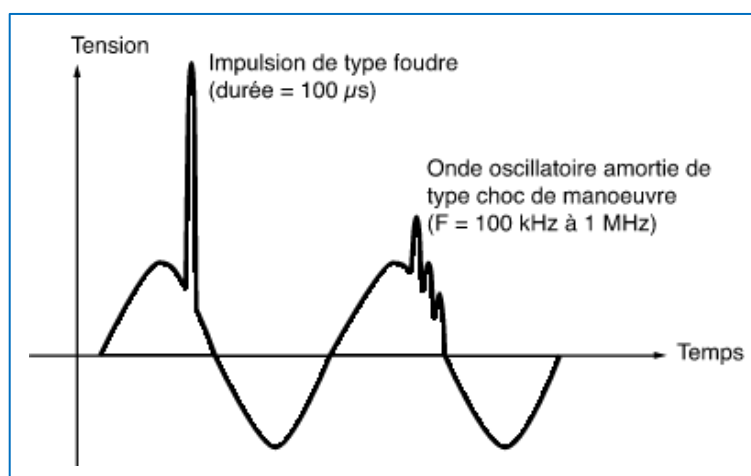


Figure I. 2: Exemple de surtension.

Les surtensions sont de trois natures:

- **Temporaires à fréquence industrielle:** surtensions à la même fréquence que le réseau (50, 60 Hz), Elles ont plusieurs origines: défaut d'isolement, la ferrorésonance, rupture du conducteur de neutre, la surcompensation de l'énergie réactive...).
- **De manœuvre:** surtensions apparaît sur des réseaux électriques subissant des modifications rapides de leur structure (ouverture d'appareils de protection, fermeture et ouverture d'appareils de commande...).
- **D'origine atmosphérique (transitoire):** les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement (sur une ligne ou sur une structure), soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre. [4]

- **Origines (Causes)**

Courts circuits, débranchent des charges importantes, rupture de neutre, manoeuvre d'appareillages et de condensateurs, foudre.

- **Conséquences (Effets)**

Déclenchement intempestifs, danger pour les personnes et pour les matériels, claquage des isolants, verrouillage de variateurs de vitesse, destruction d'appareillage, incendies, pertes d'exploitation. [2]

I.5.2. Fluctuation rapide de tension (Flicker) :

- **Définition**

Les fluctuations de tension sont des variations systémiques de l'enveloppe de tension ou des changements de tension aléatoires, dont l'amplitude ne dépasse pas des plages de tension spécifiées. Elles sont en général causées par la propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareils dont la puissance absorbée varie de façon rapide.

Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. [5] [6]

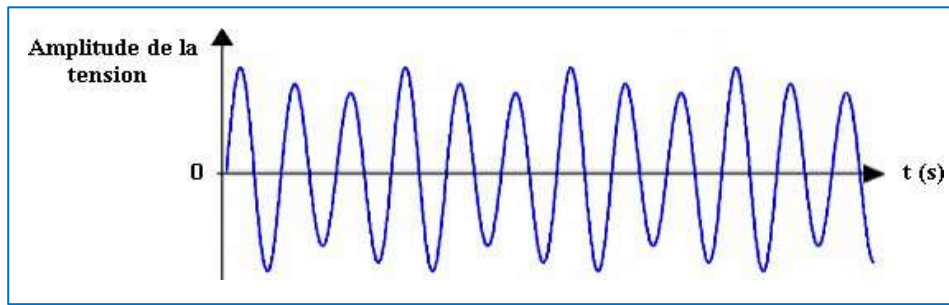


Figure I. 3: Fluctuation de tension.

- **Origines**

Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc, moteurs à démarrages fréquents, éoliennes, compresseurs, générateurs d'air conditionné, etc.).

- **Conséquences**

Papillotements des éclairages à incandescence (flicker), gênant pour les consommateurs, pas de danger pour le matériel. [7]

I.5.3. Déséquilibre de système triphasé de tension :

- **Définition**

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $^{\circ} \pm 120$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré

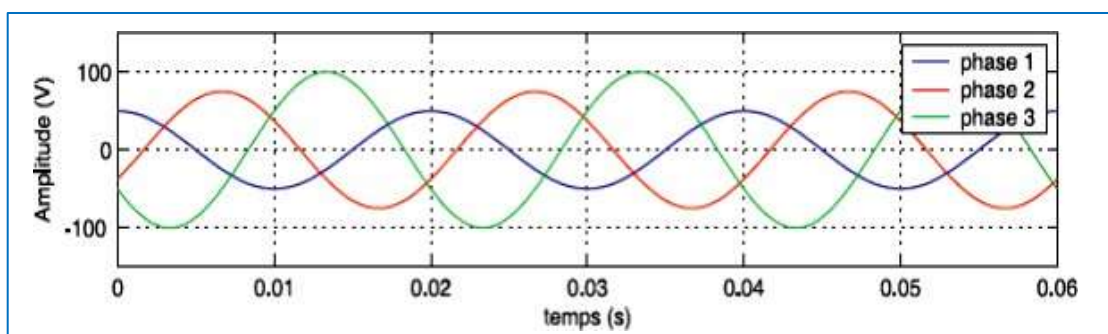


Figure I. 4: Illustration d'un déséquilibre des amplitudes et des phases.

Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions. Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques.

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de 120° . Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices. [8]

- **Origines**

Les charges asymétriques ou monophasées, défaut d'isolement, rupture du conducteur de neutre, mauvaise répartition des branchements monophasés, fusion fusible, mauvais raccordement...

- **Conséquences**

Echauffements des machines tournantes, couples moteurs inverses (vibrations), courant neutre plus élevé dans les systèmes de distribution triphasés à quatre fils... [9] [4]

I.5.4. Creux de tension et coupures :

- **Définition**

Un creux de tension est une brusque réduction de tension en un point du réseau, à une valeur entre 10% et 90% de la tension nominale, suivi de son rétablissement après une courte durée allant d'une demi-période jusqu'à quelques secondes.

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée comprise entre 10 ms et une minute pour les brèves et supérieure à une minute pour les longues. [3]

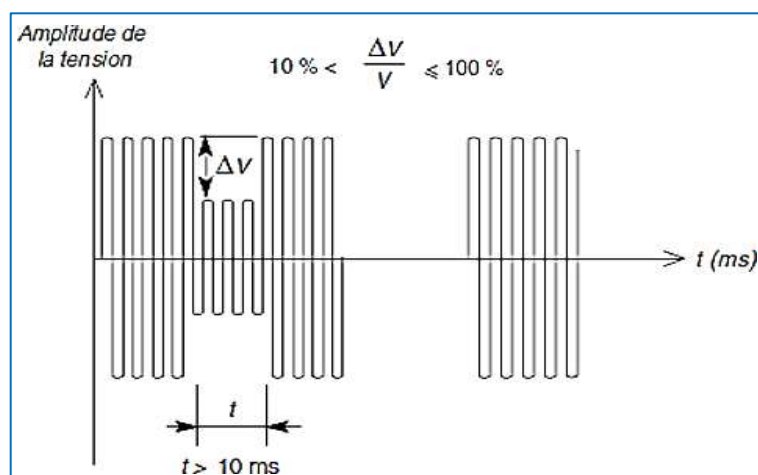


Figure I. 5: Creux et coupure de tension.

- **Origines**

Les modifications volontaires de la géométrie d'un réseau, La mise sous tension de gros transformateurs, court-circuit et défaut d'isolement, l'enclenchement de condensateurs, démarrage de gros moteurs...etc. [10]

- **Conséquences**

Perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage des moteurs et extinction de lampes à décharge, dysfonctionnement gênant...etc. [3]

1.5.5. Harmoniques et interharmoniques:

- **Définition**

Les harmoniques sont des composantes de tension ou de courant dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale du réseau électrique (50 ou 60 Hz). Une forme d'onde périodique déformée peut être représentée comme la somme de la composante fondamentale et de ses harmoniques d'ordre supérieur, selon le principe de la décomposition en série de Fourier. Ces distorsions sont causées par les caractéristiques non linéaires de certains équipements et charges connectés au réseau électrique.

Les niveaux de distorsion harmonique sont décrits par le spectre harmonique complet, qui indique les amplitudes et les angles de phase de chaque composante harmonique, en fonction de son rang harmonique (n), lequel correspond au rapport entre la fréquence de l'harmonique et celle de la fondamentale, défini par la relation suivante :

$$\text{rang} = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{I. 1})$$

Il est également courant d'utiliser une seule grandeur, le taux de distorsion harmonique (TDH), comme mesure de la valeur efficace de la distorsion harmonique. Le TDH est défini comme le rapport entre la valeur efficace des composantes harmoniques et celle de la fondamentale. Il est exprimé en pourcentage. On distingue généralement deux formes principales:

- Taux de distorsion harmonique en tension TDH_v :

$$\text{TDH}_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} U_n^2}}{U_1} \times 100 \quad (\text{I. 2})$$

- Taux de distorsion harmonique en courant TDHi :

$$TDH_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}}{I_1} \times 100 \quad (I.3)$$

Où :

U_1, I_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale de la tension et du courant.

U_n, I_n : La valeur efficace des composantes harmoniques.

Entre les harmoniques de courant et de tension réseau, on peut observer d'autres fréquences (inter harmoniques), qui ne sont pas des multiples entiers de fondamental, Elles peuvent apparaître soit sous la forme de fréquences discrètes, soit sous la forme d'un spectre continu à large bande. [2]

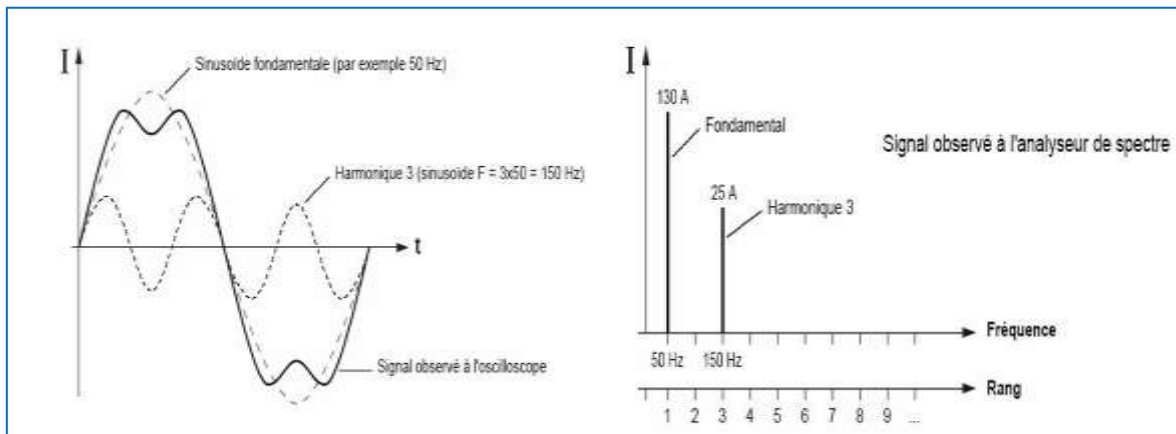


Figure I. 6: Représentation d'un signal déformé et de son spectre harmonique.

- **Origines**

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les charges non linéaire (fours à arc, inductances saturées, transformateurs, machines tournantes...etc.). [8]

- **Conséquences**

On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types:

- **Les effets instantanés** : des troubles fonctionnels de synchronisation ou de commutation, des disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie, la destruction d'équipements (condensateurs, disjoncteur) ...etc.
- **Les effets à terme** : fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements...etc. [6]

I.5.6. Variation de la fréquence:

- **Définition**

L'écart entre la fréquence fondamentale du réseau électrique et sa valeur nominale spécifiée (50 ou 60 Hz) est défini comme la variation de fréquence du réseau. Si l'équilibre entre la production et la demande (charge) n'est pas maintenu, la fréquence du réseau électrique s'écartera en raison des variations de vitesse de rotation des générateurs électromécaniques. L'ampleur et la durée de cet écart dépendent des caractéristiques de la charge et de la réponse du système de contrôle de la production aux variations de charge.

Des défauts du réseau de transport d'électricité peuvent également entraîner des variations de fréquence hors de la plage acceptable pour un fonctionnement normal en régime permanent du réseau électrique. [5]

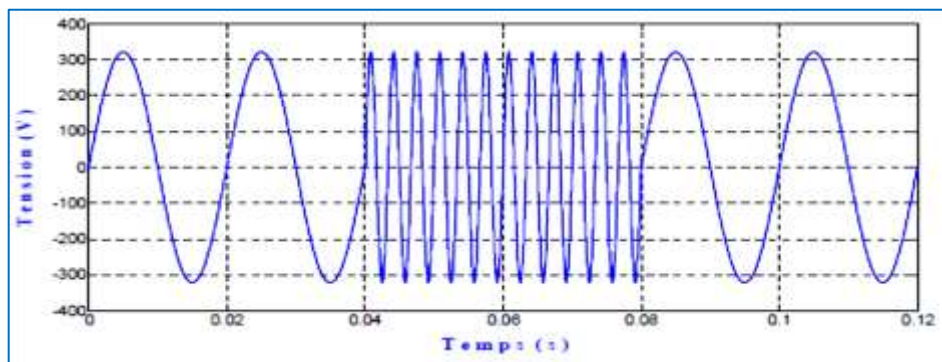


Figure I. 7: Variation de fréquence.

- **Origines**

Le réseau de transport d'électricité, la déconnexion d'un bloc important de charge ou la mise hors service d'une importante source de production.

I.6. Réglage de la tension :

La tension est un paramètre local du réseau électrique dont la valeur fluctue par nature. Elle est d'abord affectée par des variations lentes et générales liées aux cycles d'évolution saisonnière, hebdomadaire et quotidienne de la consommation. Elle subit aussi des variations rapides liées à de multiples aléas : fluctuations aléatoires des charges, changements de topologie du réseau, déclenchements d'ouvrages de transport ou de groupes de production.

Ces variations rendent indispensable un réglage adapté de la tension, à différents niveaux du réseau, pour plusieurs raisons essentielles :

- Assurer la sûreté et la stabilité du réseau : le réglage de la tension permet de prévenir les phénomènes d'écroulement de tension susceptibles de conduire à un black-out.
- Maintenir la qualité de l'alimentation des clients : chaque contrat de fourniture fixe une tension nominale ainsi qu'une plage admissible de variation. Le respect de ces limites est essentiel pour garantir la continuité et la fiabilité du service.
- Préserver les équipements raccordés : les matériels sont conçus pour fonctionner à une tension donnée. Une surtension peut entraîner leur vieillissement prématuré ou leur destruction, tandis qu'une sous-tension peut provoquer des surcharges, perturber les protections et altérer le fonctionnement des transformateurs à réglage sous charge.
- Garantir la stabilité de la production : la tension doit rester compatible avec les exigences des installations auxiliaires des producteurs. Des écarts excessifs peuvent entraîner la déconnexion d'alternateurs, fragilisant ainsi l'ensemble du système électrique. [27]

Pour répondre à ces exigences, plusieurs méthodes de réglage existent :

- **Renforcement du réseau :**

Il s'agit d'augmenter la capacité de transport d'énergie en ajoutant des lignes ou en remplaçant les conducteurs par des câbles plus puissants. Cette approche permet de limiter les pertes et les chutes de tension.

- **Régulation de la production :**

En cas de surtension, notamment dans les réseaux fortement alimentés par des sources renouvelables, une réduction temporaire de la production peut être appliquée.

- **Stockage d'énergie :**

L'utilisation de batteries ou d'autres systèmes de stockage permet de capter l'excédent d'énergie pendant les périodes de faible consommation et de le restituer en cas de besoin.

- **Compensation de l'énergie réactive :**

Parmi les différentes solutions techniques permettant de réguler la tension dans un réseau électrique, la compensation de la puissance réactive constitue une méthode particulièrement efficace. Elle consiste à injecter ou à absorber localement de la puissance réactive afin de stabiliser la tension. Pour cela, on utilise des dispositifs qui peuvent être installés de manière centralisée, dans les postes de transformation, ou de façon décentralisée, directement au niveau des charges ou des unités de production.

Elle peut aider à maintenir les niveaux de tension dans une plage souhaitable, ce qui est crucial pour le fonctionnement fiable des équipements électriques.

I.7. Conclusion:

L'étude de la qualité de l'énergie électrique révèle l'impact croissant des diverses perturbations sur la déformation des signaux de courant et de tension. Ces altérations de la forme d'onde affectent significativement la stabilité du réseau et perturbent le fonctionnement optimal des équipements connectés. Dans ce contexte, le contrôle précis de la tension et le maintien d'un profil de tension adéquat constituent des impératifs techniques essentiels pour assurer la fiabilité et les performances du système électrique dans son ensemble.

Chapitre II

La compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques

II.1. Introduction :

Un réseau de transport d'électricité est principalement constitué de lignes de transmission en courant alternatif (CA) triphasé, fonctionnant à différents niveaux de tension, avec l'augmentation des besoins en capacité de transport et l'allongement des distances de transmission, les niveaux de tension ne cessent de croître. Cette élévation des tensions est directement liée à la réduction des pertes en ligne.

Jusqu'à récemment, le contrôle de la puissance active et réactive dans les réseaux de transmission en courant alternatif était exercé en ajustant soigneusement les impédances des lignes de transmission, ainsi qu'en régulant les tensions aux bornes par le contrôle de l'excitation des générateurs et par les changeurs de prises des transformateurs. Parfois, des impédances en série et en dérivation étaient utilisées pour changer efficacement les tensions dans les jeux de barres du réseau électrique.

II.2. Energies, puissances et facteur de puissance :

Tout récepteur dont l'intensité est déphasée par rapport à la tension, absorbe une énergie totale que l'on appelle énergie apparente (E_{app}). Cette énergie, qui s'exprime généralement en kilovolt-ampère-heure (kVAh), correspond à la puissance apparente S (kVA), laquelle se décompose en deux composantes : la puissance active (kW) et la puissance réactive (kVAR).

a- Énergie active (E_a) :

Exprimée en kilowatt heure (kWh). Elle est utilisable, après transformation par le récepteur, sous forme de travail ou de chaleur. A cette énergie correspond la puissance active P (kW).

b- Énergie réactive (E_r) :

Exprimée en kilovar heure (kVARh). Elle sert en particulier à créer dans les bobinages des machines électriques (transformateurs, moteurs...) le champ magnétique sans lequel le fonctionnement serait impossible. L'énergie réactive est nécessaire pour faire fonctionner l'appareil mais elle n'est pas transformée en travail direct. A cette énergie correspond la puissance réactive Q (kVAR). [12]

c- Facteur de puissance :

Par définition le facteur de puissance est le rapport de la puissance active à la puissance apparente, c'est un nombre abstrait compris entre 0 et 1, on l'appelle également $\cos \varphi$.

$$Fp = \cos \varphi = \frac{P(kW)}{(kVA)} \quad (\text{II. 1})$$

Il permet ainsi d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateurs d'énergie réactive. En effet, un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive. En revanche, un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus grande qu'il se rapproche de 0.

Le $\tan \varphi$ est le quotient entre l'énergie réactive E_r (kVARh) et l'énergie active E_a (kWh) consommées pendant la même période :

$$\tan \varphi = \frac{(kVARh)}{(kWh)} \quad (\text{II. 2})$$

À l'inverse du $\cos \varphi$, on s'aperçoit facilement que la valeur de la $\tan \varphi$ doit être la plus petite possible afin d'avoir le minimum de consommation d'énergie réactive.

Un bon facteur de puissance c'est $\cos \varphi$ élevé proche de 1 ou $\tan \varphi$ faible proche de 0, il permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivants :

- La suppression de la facturation d'énergie réactive.
- La diminution de la puissance souscrite en kVA.
- La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.
- L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire. [12]

II.3. Circulation de la puissance réactive et ses effets :

La circulation de l'énergie réactive a des influences importantes sur la stabilité, l'équilibre et le fonctionnement du réseau électrique. Elle a par conséquent, des incidences économiques.

En effet, pour une même puissance active P , la figure suivante montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente, et donc de courant, que la puissance réactive est importante.

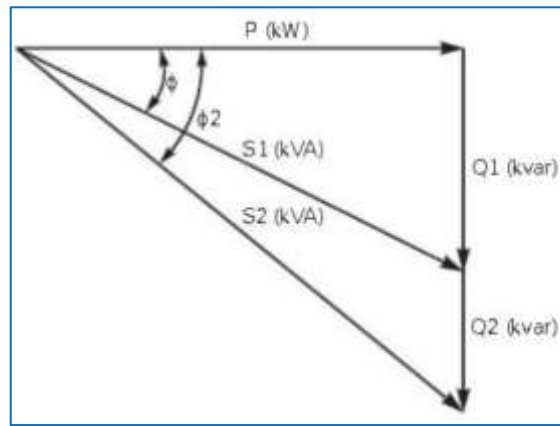


Figure II. 1: Influence de la puissance réactive.

Ainsi, en raison de l'augmentation du courant, la circulation d'énergie réactive provoque :

- des surcharges au niveau des transformateurs.
- Échauffements supplémentaires des câbles d'alimentation.
- Des chutes de tension élevées et des pertes Joules
- La dégradation de la qualité de l'installation électrique.
- Les variations de tension du réseau qui sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production. [13]

II.4. Compensation de l'énergie réactive :

Les réseaux de transport et d'interconnexion en très hautes tension (THT) et haute tension (HT) permettent d'acheminer l'énergie électrique des centres de productions jusqu'au consommateur à tout instant. Toutefois, le transit de la puissance réactive engendre des perturbations (pertes joule, chutes de tension...), or que cette puissance est indispensable pour faire fonctionner les machines et les transformateurs, il est donc nécessaire de produire l'énergie réactive, autant que possible, à l'endroit où elle est consommée. [14]

Pour ce faire, des dispositifs sont installés afin d'injecter une puissance réactive opposée (capacitive) à celle consommée par les charges inductives, dans le but de diminuer la quantité d'énergie réactive fournie par la source et d'améliorer la stabilité du réseau électrique.

La figure ci-dessous présente le bilan des puissances avant et après compensation:

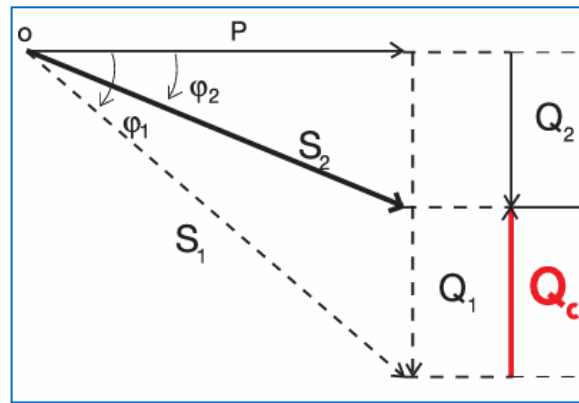


Figure II. 2: Diagramme des puissances.

P : Puissance active.

Q_1 : Puissance réactive sans compensation d'énergie réactive.

S_1 : Puissance apparente avant compensation d'énergie réactive.

φ_1 : Déphasage sans compensation.

Q_2 : Puissance réactive avec compensation d'énergie réactive.

S_2 : Puissance apparente après compensation d'énergie réactive.

φ_2 : Déphasage avec compensation.

Q_c : Puissance réactive de compensation, telle que :

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (\text{II. 3})$$

$$Q_c = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (\text{II. 4})$$

II.5. Intérêt de la compensation de l'énergie réactive :

• Coté technique

- Amélioration du facteur de puissance $\cos \varphi$.
- Stabilité du réseau et amélioration du contrôle de la tension.
- Réduction de la chute de tension.
- limitation des pertes d'énergie dans les câbles par effet Joule.
- Augmentation de la puissance active transportée.
- Bon fonctionnement du poste de transformation.
- Amélioration des oscillations de puissance et de tension susceptibles d'apparaître dans les réseaux à la suite d'un défaut.
- Optimisation de la stabilité électromécanique des groupes de production.

• Coté économique

- Économie sur le dimensionnement des équipements électriques car la puissance appelée diminue.
- réduire la facture d'électricité en maintenant le niveau de la consommation de puissance réactive en dessous d'une valeur définie contractuellement avec le fournisseur d'énergie.
- Amélioration de la durée de vie des équipements.
- Réduction des pertes d'énergie.

II.6. Types de compensation :

La compensation de l'énergie réactive s'effectue au choix avec deux systèmes d'équipements :

II.6.1. Compensation fixe :

La puissance réactive fournie par la batterie de condensateur est constante quelles que soient les variations du facteur de puissance et de la charge des récepteurs, donc de la consommation d'énergie réactive de l'installation.

La mise sous tension de ces batteries est :

- Soit manuelle par disjoncteur ou interrupteur.
- Soit semi-automatique par contacteur commandé à distance.
- Soit directe asservie aux bornes d'un récepteur.

Ce type de batteries est généralement utilisé dans les cas :

- D'installation électrique à charge constante fonctionnant 24/24 h.
- De compensation réactive des transformateurs.
- De compensation individuelle de moteurs.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est inférieure ou égale à 15 % de la puissance du transformateur.
- Où la fluctuation de charge est faible. [12]

II.6.2. Compensation automatique :

La puissance réactive fournie par la batterie est modulable en fonction des variations du facteur de puissance et de la charge des récepteurs, donc de la consommation d'énergie réactive de l'installation.

Une batterie de condensateurs à régulation automatique est divisée en gradins, chaque gradin est commandé par un contacteur. L'enclenchement du contacteur met le gradin en service en parallèle avec les gradins connectés à l'installation, le déclenchement du contacteur, au contraire, le met hors service. Ainsi la capacité totale de la batterie de condensateurs varie par palier en fonction du besoin en énergie réactive.

Un relais var métrique mesure la valeur du facteur de puissance de l'installation et en commandant l'ouverture ou la fermeture des contacteurs des gradins en fonction de la charge, régule la valeur du facteur de puissance de l'installation à la valeur consignée.

Ces batteries sont également utilisées dans le cas :

- D'installation électrique à charge variable.
- De compensation de tableaux généraux (TGBT) ou gros départ.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est supérieure à 15% de la puissance du transformateur. [12] [15]

II.7. Les modes de compensation :

II.7.1. Compensation globale :

- **Principe :**

La batterie est raccordée en tête d'installation BT et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. La batterie reste en service en permanence pendant le fonctionnement normal de l'installation.

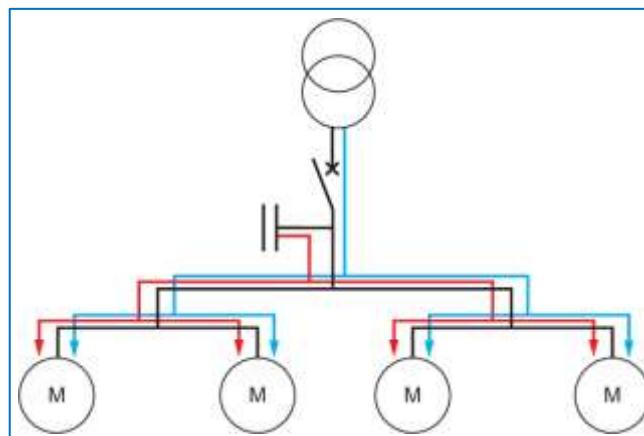


Figure II. 3: Compensation globale.

- **Avantages :**

- Supprime les facturations complémentaires pour consommation excessive d'énergie réactive.
- Représente la solution la plus économique car toute la puissance est concentrée en un point et le coefficient de foisonnement permet des batteries bien optimisées.
- Soulage le transformateur. [12]

- **Remarques :**

- Pas de réduction de pertes en ligne (chutes de tension pour les charges éloignées de la batterie de condensateurs).
- Pas d'économies sur le dimensionnement des équipements électriques. [16]

II.7.2. Compensation partielle ou par secteur :

- **Principe :**

La batterie est connectée sur l'arrivée du tableau de distribution intermédiaire pour lequel la compensation doit être réalisée. Une économie significative sur l'installation est réalisée grâce à cette disposition, notamment au niveau du dimensionnement des câbles d'arrivée du ou des tableaux intermédiaires pour lesquels la compensation est réalisée.

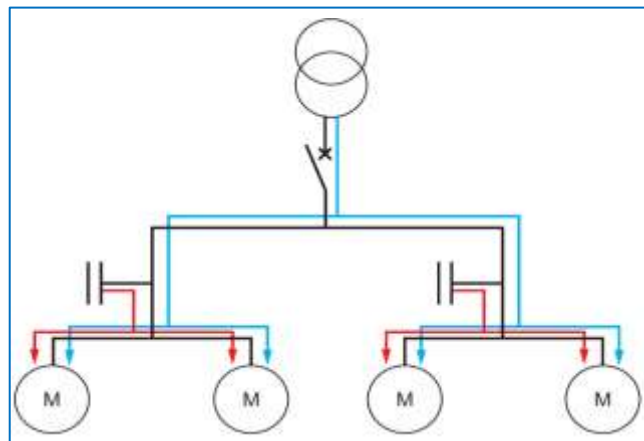


Figure II. 4: Compensation partielle.

- **Avantages :**

La compensation partielle de l'installation :

- Réduit les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive,

- Soulage le transformateur d'alimentation, ce qui permet d'alimenter des charges supplémentaires si nécessaire,
- Permet de réduire la section des câbles d'arrivée du tableau de distribution intermédiaire ou d'ajouter des charges supplémentaires,
- Réduit les pertes en ligne dans ces mêmes câbles. [15]

• **Remarques :**

- Les câbles, en aval de la batterie, alimentant les appareils de l'atelier doivent être dimensionnés pour prendre en considération toute la puissance apparente demandée.
- Une protection des condensateurs de la batterie (fusibles, disjoncteur, etc....) doit être prévue pour question de sécurité, ce qui augmente le coût de la batterie.
- Nécessite une maintenance périodique de la batterie.

II.7.3. Compensation individuelle :

• **Principe :**

La batterie est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur inductif (moteur en particulier). Elle est à envisager lorsque la puissance du moteur est importante par rapport à la puissance souscrite de l'installation. Cette compensation est techniquement idéale puisqu'elle produit l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée, et en quantité ajustée à la demande. [17]

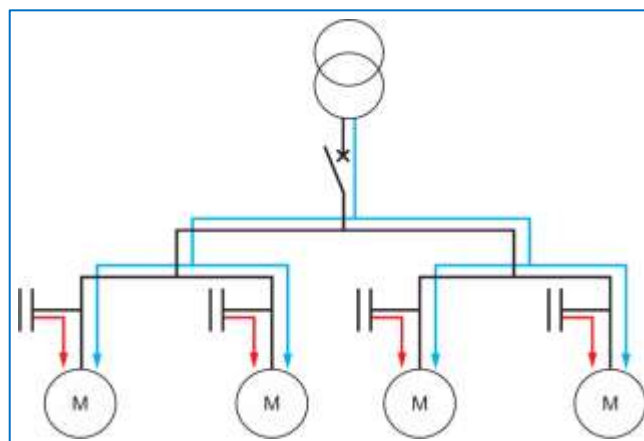


Figure II. 5: Compensation individuelle.

• **Avantages :**

- Compensation d'énergie réactive au plus près des appareils consommant du réactif.
- Suppression de la facturation d'énergie réactive.

- Augmentation de la puissance active disponible au transformateur.
- Réduction des pertes sur toute la ligne entre le transformateur et la charge. [16]
- **Remarques :**
 - Solution la plus onéreuse compte tenu de la multiplicité des installations.
 - Si les charges ne fonctionnent pas en permanence, certains condensateurs restent inactifs.

II.8. Moyens de compensation de l'énergie réactive :

II.8.1. Les dispositifs conventionnels :

II.8.1.1. Compensateurs synchrones :

- **Définition**

Les compensateurs synchrones sont des moteurs synchrones tournant à vide, dont l'excitation est réglée de manière à fournir ou à absorber la puissance réactive nécessaire pour ajuster la tension en un point donné du réseau. [18]

- **Principe de fonctionnement**

Le compensateur synchrone est principalement employé pour l'amélioration du facteur de puissance et le réglage de la tension au sein des réseaux de transport d'énergie. En mode surexcité, il absorbe un courant capacitif destiné à compenser le courant inductif engendré par les charges telles que les moteurs asynchrones et les transformateurs, ce qui contribue à l'optimisation du facteur de puissance.

Son fonctionnement varie en fonction de la charge du réseau : en régime surexcité lorsque la demande est élevée et en régime sous-excité lorsque la charge est faible, assurant ainsi la stabilité de la tension aux extrémités des lignes de distribution. Il est important de noter que les compensateurs synchrones n'injectent pas de puissance active et sont généralement contrôlés par un régulateur automatique de tension.

II.8.1.2. Batteries de condensateurs :

Ils servent à compenser une partie de l'énergie réactive demandée par les charges ou par le réseau électrique. On distingue principalement deux catégories :

- **Batteries de condensateurs HT :**

Installées sur les jeux de barres HT des postes THT/HT, ces unités sont principalement dédiées à la compensation des pertes réactives sur les réseaux de transport.

Certaines contribuent également à la compensation des charges. Leur puissance typique se situe entre 20 et 30 MVAR. [19]

- **Batteries de condensateurs MT :**

Connectées aux jeux de barres moyenne tension (MT) des postes HT/MT ou THT/MT, les batteries de condensateurs assurent la compensation de l'énergie réactive absorbée globalement par les réseaux de distribution auprès des réseaux de transport. Leur emplacement et leur dimensionnement sont définis en fonction des exigences de régulation de la tension en MT.

Techniquement, elles sont subdivisées en gradins de 2 à 4,8 MVAR, selon la puissance des transformateurs HT/MT, chaque gradin étant pilotable de manière indépendante. La taille des gradins est choisie de manière à limiter la variation de tension maximale à 5 % sur le jeu de barres MT lors de l'enclenchement d'un gradin. [19]

II.8.2. Les dispositifs FACTS :

- **Définition**

Le système de transmission CA présente diverses limitations, classées en limitations statiques et limitations dynamiques. Ces limitations inhérentes au système électrique limitent les échanges d'énergie, conduisant à une sous-utilisations des ressources de transmission existantes. Traditionnellement, des condensateurs fixes ou commutés mécaniquement, des réacteurs en série et des générateurs synchrones ont été utilisés pour résoudre une grande partie du problème. Cependant, l'utilisation de ces dispositifs traditionnels est soumise à des limites. Les performances souhaitées n'ont pas été atteintes efficacement.

Le besoin de technologies alternatives, constituées de composants semi-conducteurs à réponse rapide, a augmenté. Ce besoin a été renforcé par la restructuration mondiale des sociétés de distribution d'électricité. Ce besoin, ainsi que l'invention du commutateur à thyristor (un dispositif semi-conducteur), ont ouvert la voie au développement de dispositifs électroniques de puissance appelés contrôleurs FACTS [20], qui signifie Flexible AC Transmission Systems en anglais, est défini par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) comme des technologies de transmission CA utilisant des dispositifs fixes, principalement basés sur l'électronique de puissance. Leur but est d'améliorer la flexibilité du réseau électrique, en facilitant le contrôle du flux de puissance et en augmentant la capacité de transmission.

- **Avantages**

L'un des principaux avantages de la technologie FACTS pour les opérateurs du réseau électrique réside dans l'élargissement des possibilités de contrôle de la puissance, tout en augmentant la capacité exploitable des lignes existantes dans des conditions normales d'exploitation. Cela est rendu possible grâce à la capacité des dispositifs FACTS à agir sur les paramètres clés de l'équation (II-5), qui régit le transport de l'énergie électrique sur une ligne, tels que les impédances série et parallèle, le courant, la tension et l'angle de phase.

$$P = \frac{V_r V_s}{X} \sin(\delta) \quad (\text{II. 5})$$

Grâce à leur action, les contrôleurs FACTS permettent à un système énergétique de bénéficier d'un ou de plusieurs des avantages suivants :

- Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. ce contrôle doit être réalisé selon un chier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.
- Améliorer la stabilité dynamique du système: entre autre des fonctions des FACTS l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- Contrôle de la puissance réactive: Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergies active et par conséquence réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité de l'énergie. [21]

II.8.2.1. Catégories principales :

Selon leur mode de couplage et leur fonction principale, les dispositifs FACTS se classent en plusieurs catégories :

- Les compensateurs shunts.
- Les compensateurs séries.
- Les compensateurs hybrides (série - parallèle).

Chaque catégorie offre des solutions spécifiques adaptées aux besoins du réseau, qu'il s'agisse de régulation de tension, de contrôle de puissance active et réactive ou encore d'amélioration de la stabilité du réseau.

II.8.2.1.1. Les compensateurs shunts :

Selon leur conception, Les compensateurs shunts peuvent être basés sur une impédance variable, sur une source de tension ou de courant contrôlée, ou encore sur une combinaison de ces deux approches. Leur rôle essentiel est d'assurer une régulation rapide et efficace de la tension, contribuant ainsi à la stabilité et à la qualité de l'alimentation électrique.

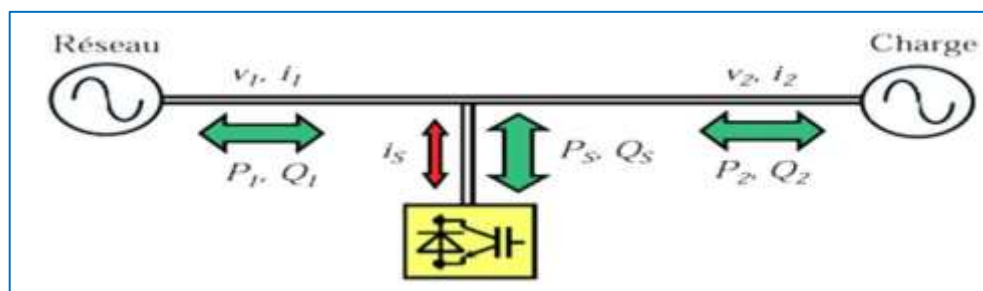


Figure II. 6: Principe de la compensation shunt de la puissance réactive.

Les compensateurs de shunt comprennent :

A. Compensateur Statique (SVC) :

Le SVC (Compensateur Statique de VAR) est un dispositif connecté en parallèle aux lignes de transport, conçu pour ajuster rapidement la tension dans un réseau électrique. Il est constitué généralement de bobines commandées par des thyristors (TCR), de batteries de condensateurs mises en service par des thyristors (TSC), ainsi que de filtres pour atténuer les harmoniques et d'un transformateur de couplage, permettant une régulation flexible et rapide de la puissance réactive injectée ou absorbée par le réseau.

En fonction des besoins du réseau, il agit comme une source ou une charge, injectant ou absorbant du courant réactif pour stabiliser la tension aux points stratégiques, notamment dans les zones faibles du réseau. Le SVC peut être installé aussi bien en milieu d'interconnexion qu'aux extrémités des lignes. Comparable à un condensateur synchrone, mais dépourvu de partie rotative, il offre une réponse rapide et fiable pour la compensation de puissance réactive. [22]

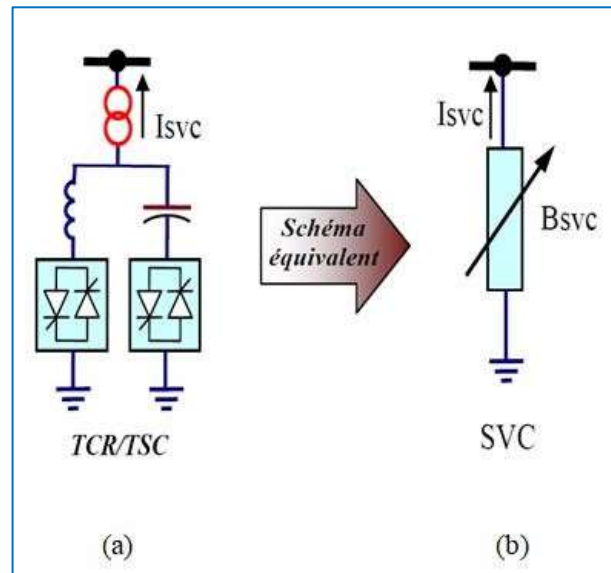


Figure II. 7: (a) la structure de base d'un SVC, (b) schéma équivalent d'un SVC.

B. Compensateur synchrone statique (STATCOM) :

Le STATCOM est un générateur synchrone statique fonctionnant comme un compensateur statique de tension réactive (VAR) connecté en shunt, dont le courant de sortie capacitif ou inductif peut être contrôlé indépendamment de la tension du réseau alternatif. Il assure le maintien de la tension en générant ou en absorbant la puissance réactive au point de couplage commun, sans nécessiter de réacteurs externes de grande taille ni de batteries de condensateurs.

Le STATCOM est composé de SCR (Silicon Controlled Rectifier), d'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), de GTO (Gate Turn-Off Thyristor), etc. En surexcitation, la machine synchrone produit une tension var positive qui agit comme un condensateur en sous-excitation, elle produit une tension var négative qui agit comme une inductance. [22] [23]

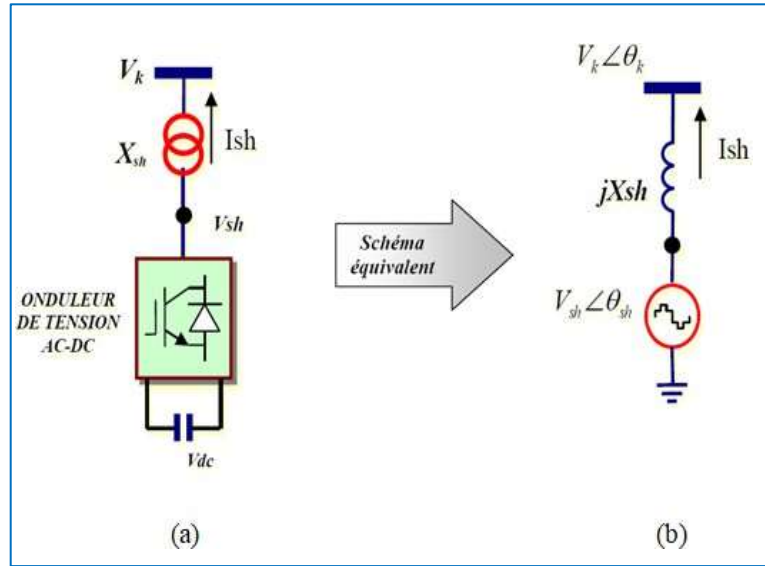


Figure II. 8: (a) la structure de base d'un STATCOM, (b) schéma équivalent d'un STATCOM.

$$I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_k}{jX_k} \quad (\text{II. 6})$$

La puissance injectée au niveau du jeu de barres s'exprime par l'équation suivante :

$$S = V_k + I_{sh} = \frac{(V_{sh} - V_k)}{-jX_k} = \frac{V_k V_{sh} - V_k^2}{-jX_k} \quad (\text{II. 7})$$

Ainsi, les puissances active et réactive injectées par le STATCOM au niveau du jeu de barres t sont exprimées par les expressions suivantes :

$$P_{sh} = \frac{|V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \times (\theta_k - \theta_{sh}) \quad (\text{II. 8})$$

$$Q_{sh} = \frac{|V_k|}{X_{sh}} (|V_k| - |V_{sh}| \cos(\theta_k - \theta_{sh})) \quad (\text{II. 9})$$

À partir des équations (III-8) et (III-9), trois situations peuvent être analysées selon la comparaison entre la tension du STATCOM (V_{sh}) et celle du réseau (V_k) :

- Lorsque V_{sh} est égal à V_k , il n'y a aucun échange de puissance réactive entre le STATCOM et le réseau.
- Si V_{sh} est supérieur à V_k ($Q_{sh} < 0$), le STATCOM fonctionne en mode capacitif et injecte de la puissance réactive dans le réseau.

- Si V_{sh} est inférieur à V_k ($Q_{sh} > 0$), le STATCOM absorbe de la puissance réactive du réseau, ce qui correspond à un fonctionnement en mode inductif.

II.8.2.1.2. Les compensateurs séries :

Les compensateurs série sont utilisés pour compenser l'énergie réactive en modifiant l'impédance de la ligne. Leur principe de fonctionnement repose sur l'injection d'une tension supplémentaire en série, ce qui permet d'améliorer le transfert de puissance active, de stabiliser les flux et de répartir plus efficacement la charge entre les différentes branches du réseau. Cette action contribue à renforcer la stabilité transitoire ainsi qu'à améliorer le profil de tension dans les réseaux de transport. Les principaux types de compensateurs série sont le TCSC, le TSSC et le SSSC.

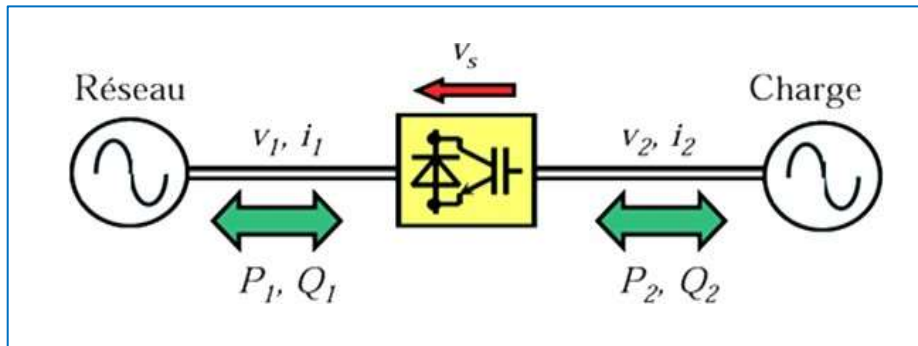


Figure II. 9: Principe de la compensation série de la puissance réactive.

A. Condensateur Série Contrôlé par Thyristors (TCSC) :

L'IEEE décrit le contrôleur de réactance capacitive comme un système constitué d'un ensemble de condensateurs connectés en série, dérivés par un réacteur commandé par thyristor. Cette configuration permet d'obtenir une réactance capacitive série ajustable de manière progressive. Ce type de montage repose sur l'association d'inductances contrôlées par thyristors placées en parallèle avec des sections d'un banc de condensateurs, permettant ainsi une régulation fine et continue de la réactance capacitive à la fréquence fondamentale.

La figure (II.10) illustre la structure de base d'un TCSC et le schéma équivalent, montrant clairement l'agencement entre le condensateur série et le réacteur contrôlé. Chaque banc de condensateurs est installé sur une plate-forme isolée afin d'assurer une séparation complète par rapport à la terre.

Le circuit de commande intègre une chaîne de thyristors de forte puissance montés en série, tandis que la bobine d'inductance utilisée, de type sans noyau magnétique, est

directement reliée au condensateur pour limiter les surtensions. Le comportement global du TCSC dépend essentiellement du rapport entre la réactance du banc de condensateurs et celle de la branche à thyristors. [24]

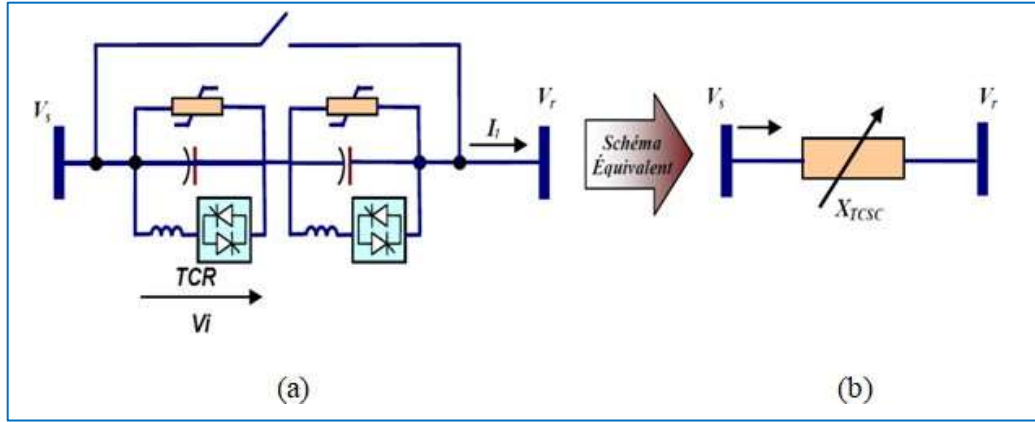


Figure II. 10: (a) la structure de base d'un TCSC, (b) schéma équivalent d'un TCSC.

$$X_{TCSC} = \frac{jLW}{\frac{\pi}{2}(\pi - \alpha + \frac{(2\alpha)}{2}) - LCW^2} \quad (II. 10)$$

$$P_{sr} = \frac{|V_s||V_r|}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\theta_s - \theta_r) \quad (II. 11)$$

B. Condensateur Série Commuté par Thyristors (TSSC) :

Le Condensateur Série Commuté par Thyristors (TSSC) est un dispositif de compensation série constitué de plusieurs condensateurs, chacun shunté par une paire de thyristors montés en antiparallèle. En contrôlant leur conduction, ces thyristors permettent d'insérer ou de court-circuiter les condensateurs, assurant ainsi une compensation par paliers de la réactance série.

Cette technologie permet une réponse dynamique rapide, avec une modulation de l'impédance en fonction des besoins du réseau. De plus, le TSSC présente l'avantage de ne pas générer d'harmoniques, grâce à une commutation à la tension nulle, et peut fonctionner sans limitation du nombre de manœuvres.

C. Compensateur Statique Synchrone Série (SSSC) :

C'est l'un des plus important dispositifs FACTS .Le Compensateur Statique Synchrone Série (SSSC) est un dispositif de type série, basé sur un convertisseur de source de tension (VSC), capable d'injecter une tension alternative en série avec la ligne de

transport afin de compenser les puissances active et réactive. Il est utilisé pour réguler le flux de puissance, améliorer la stabilité dynamique et transitoire, stabiliser la tension et atténuer les phénomènes de résonance sous-synchrone (SSR).

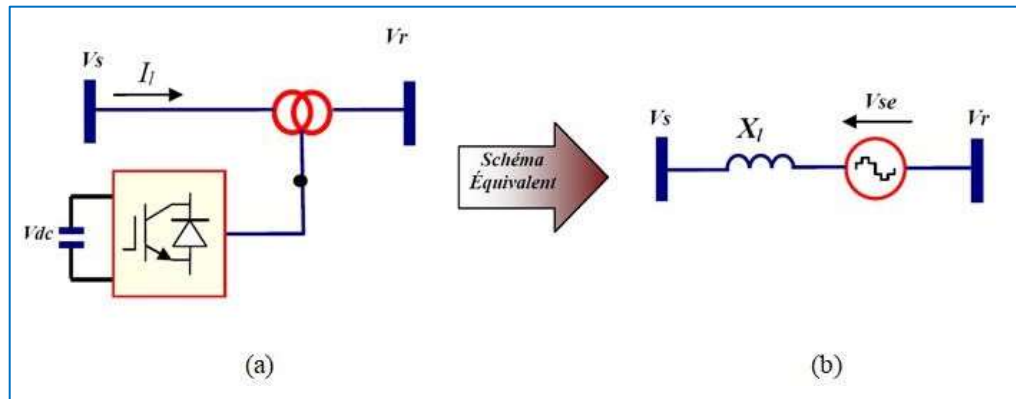


Figure II. 11: (a) la structure de base d'un SSSC, (b) schéma équivalent d'un SSSC.

Le SSSC est constitué d'un VSC, d'un transformateur de couplage connecté en série à la ligne, et éventuellement d'une source d'énergie CC externe. Le niveau de compensation dépend du déphasage entre la tension injectée et le courant de ligne : un déphasage de 90° permet l'échange de puissance réactive (mode capacitif ou inductif selon le sens), tandis qu'un autre angle permet d'échanger de la puissance active, à condition que le SSSC soit alimenté en énergie continue.

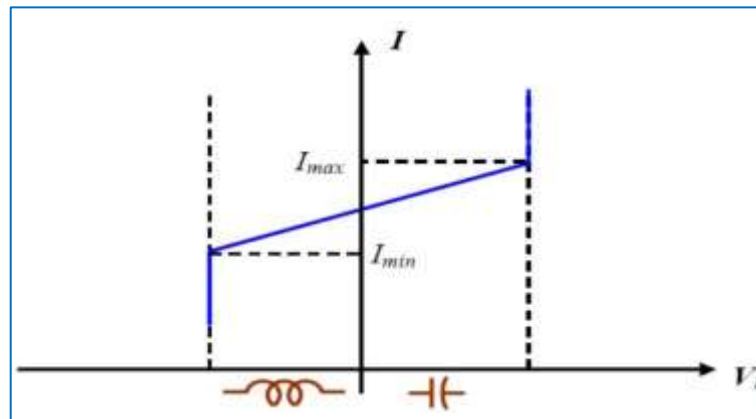


Figure II. 12: Caractéristique statique du SSSC.

II.8.2.1.3. Les compensateurs hybrides (série - parallèle) :

La compensation hybride combine les effets des dispositifs FACTS en série et en parallèle afin d'offrir un contrôle simultané et plus performant des paramètres essentiels du

réseau électrique. Elle permet ainsi d'optimiser le flux de puissance active et réactive, tout en assurant une meilleure stabilité de tension et de phase.

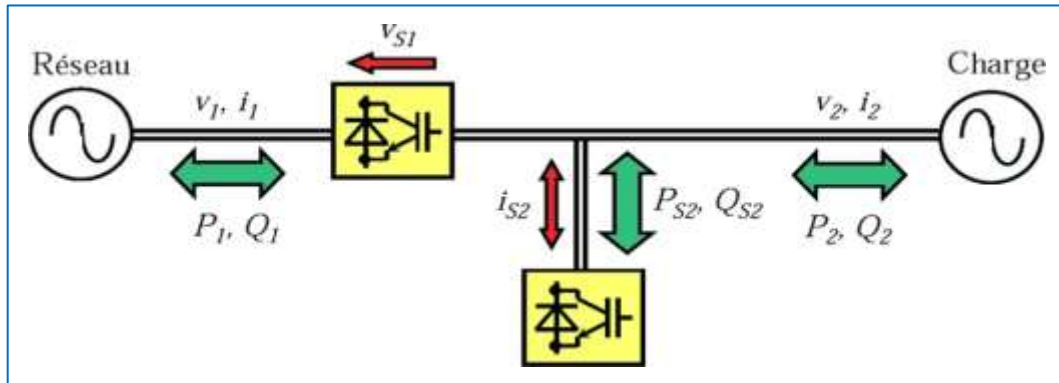


Figure II. 13: Principe de la compensation hybride de la puissance réactive.

A. Le contrôleur universel d'écoulement de puissance (UPFC) :

L'UPFC est constitué de deux onduleurs à source de tension (VSC) qui sont connectés par une liaison continue, l'un est connecté en série et l'autre en parallèle avec la ligne de transmission. Ce contrôleur FACTS avancé permet une régulation simultanée de plusieurs grandeurs électriques du réseau, notamment la tension, la puissance active, la puissance réactive et l'impédance de ligne.

Le convertisseur parallèle (STATCOM) assure principalement la compensation réactive shunt et le maintien de la tension, tandis que le convertisseur série (SSSC) permet l'injection d'une tension contrôlée en amplitude et en phase, influençant ainsi directement le flux de puissance dans la ligne. L'énergie active requise par le convertisseur série est fournie par le convertisseur shunt via la liaison continue, éliminant ainsi le besoin de source d'alimentation externe.

L'amplitude de la tension injectée régule la tension du réseau, tandis que son angle de phase détermine le mode de contrôle du flux de puissance. Par ailleurs, l'ajout d'un dispositif de stockage tel qu'un aimant supraconducteur connecté à la liaison continue pourrait renforcer les capacités dynamiques de l'UPFC, en particulier pour le contrôle du flux de puissance réelle.

Grâce à cette architecture intégrée, l'UPFC constitue l'un des dispositifs les plus complets pour le contrôle flexible et précis des lignes de transmission. [25]

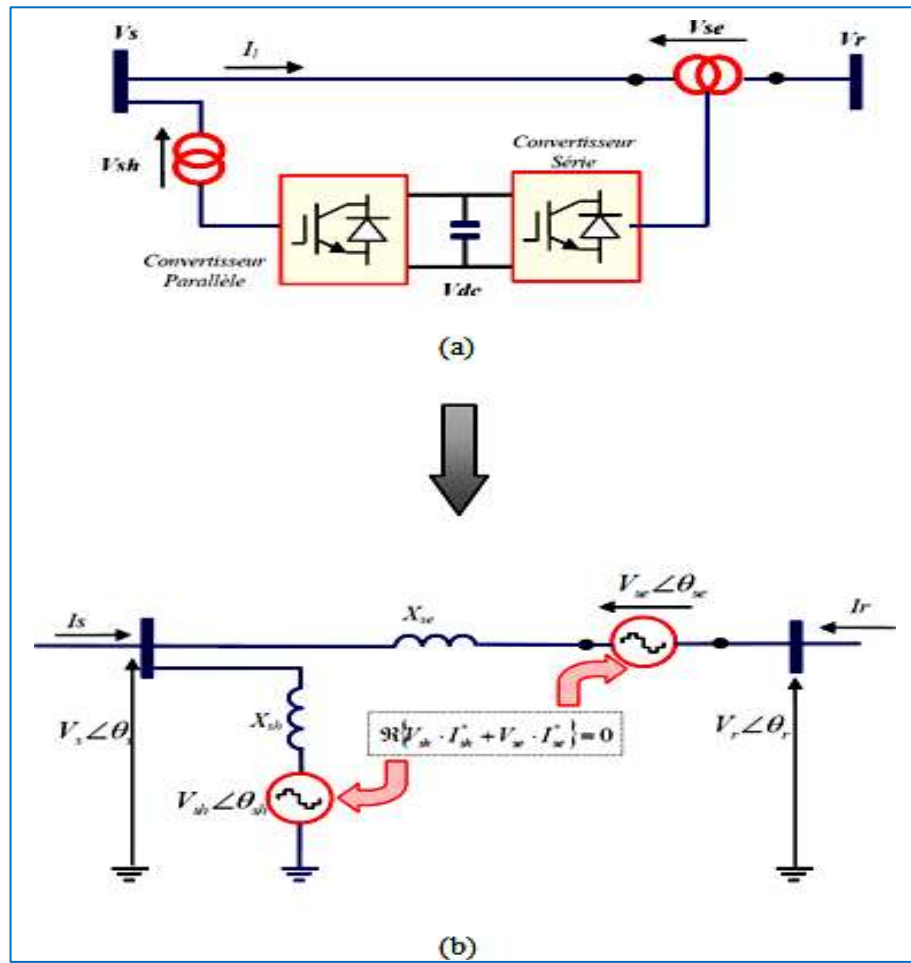


Figure II. 14: (a) la structure de base d'un UPFC, (b) schéma équivalent d'un UPFC.

II.8.2.2. Comparaison des différents dispositifs FACTS :

Le tableau ci-dessous présente une comparaison fonctionnelle des principaux dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) en fonction de plusieurs critères de performance : [26]

Tableau II. 1: Analyse comparative des technologies FACTS.

Paramètres de contrôle	TSCS	TSSC	SSSC	SVC	STATCOM	UPFC
Contrôle du flux de puissance	✓	✓	✓			✓
Amélioration du profil de tension				✓	✓	✓
Commutation en ligne	✓	✓		✓		

Commutation forcée			✓		✓	✓
Onduleur à source de tension			✓		✓	✓
Onduleur à source de courant						
Réponse transitoire et dynamique	✓	✓	✓		✓	✓
Amortissement des oscillations	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Limitation du courant de défaut	✓	✓				
Stabilité de la tension	✓	✓	✓	✓	✓	✓

II.9. Conclusion :

La compensation de la puissance réactive constitue une étape incontournable dans la gestion des réseaux électriques. Elle permet non seulement d'améliorer le facteur de puissance, mais aussi de réguler efficacement la tension au niveau des nœuds, de réduire les pertes et d'optimiser l'exploitation des lignes.

Les solutions conventionnelles de compensation, bien qu'efficaces dans des conditions stables, montrent leurs limites en cas de variations rapides de charge. Cela justifie le recours à des dispositifs plus dynamiques, tels que les compensateurs statiques à base d'électronique de puissance, dont le SVC est un exemple représentatif. Ce dernier fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Concepts du SVC et le contrôle des paramètres de régime dans un nœud

III.1. Introduction :

La stabilité de la tension est un enjeu central dans les réseaux électriques modernes, confrontés à des charges variables et à une forte pénétration des sources renouvelables. Le Compensateur Statique de Puissance Réactive (SVC) s'impose comme une solution performante pour assurer la régulation rapide et continue de la puissance réactive, tout en améliorant la qualité de l'énergie et la tenue de tension dans les réseaux à haute et très haute tension.

Ce chapitre aborde les concepts essentiels liés au compensateur statique de puissance réactive (SVC), en se concentrant sur son rôle dans le contrôle des paramètres électriques d'un nœud.

III.2. Définition du SVC :

Le compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif shunt basé sur l'électronique de puissance (thyristors). Il permet d'injecter ou d'absorber de la puissance réactive au niveau du nœud où il est connecté, afin de satisfaire la demande réactive des charges et de maintenir la tension du réseau à l'intérieur des limites spécifiées, aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire.

Grâce à sa rapidité de réponse (de l'ordre de quelques cycles), le SVC assure une compensation réactive continue, en s'adaptant aux variations de charge et aux fluctuations de tension. Il contribue ainsi à l'amélioration de la stabilité, de la qualité de l'énergie et des performances globales des réseaux de transport et de distribution.

Une représentation schématique de la structure fonctionnelle d'un SVC est montrée sur la figure (III.1).

III.3. Constitution du SVC :

Les dispositifs connus sous l'appellation SVC (Static Var Compensator) sont dérivés de la combinaison des éléments inductifs et capacitifs, lesquels peuvent être commandés de manière indépendante ou coordonnée. Cette combinaison permet d'ajuster la puissance réactive échangée avec le réseau en fonction des besoins de compensation.

Les configurations les plus répandues intègrent généralement une réactance contrôlée par thyristors (TCR) couplée soit à un condensateur fixe (FC), soit à un condensateur commuté par thyristors (TSC). Dans certains cas, on peut également trouver des réactances commutées (TSR) ainsi que des filtres destinés à atténuer les harmoniques, comme illustré sur la figure suivante :

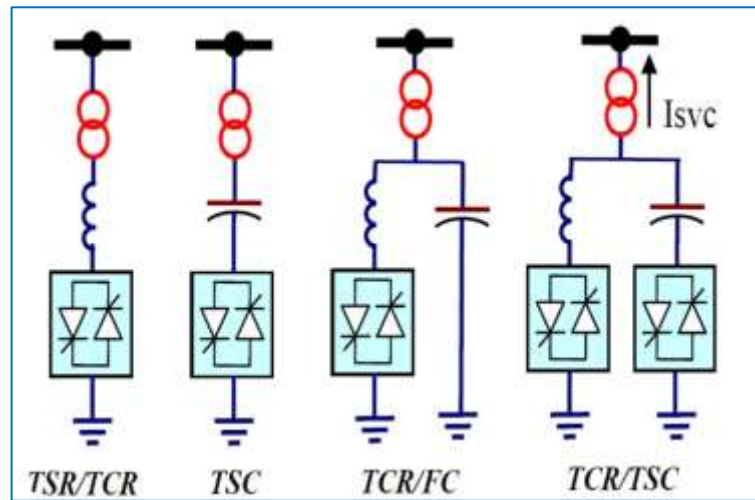


Figure III. 1: Schémas des principales structures d'un SVC.

III.3.1. Condensateur fixe (FC) :

Le condensateur fixe (Fixed Capacitor – FC) est un dispositif connecté de manière permanente au jeu de barres dans le but d'injecter une puissance réactive constante dans le réseau. Son couplage s'effectue par l'intermédiaire d'un disjoncteur, permettant sa mise en ou hors service en fonction des exigences d'exploitation. L'absence de régulation dynamique fait que sa contribution reste fixe, ce qui le rend particulièrement adapté aux charges présentant une demande réactive relativement stable.

III.3.2. Réactance commandée par thyristors (TCR) :

Le circuit TCR (Thyristor Controlled Reactor) est constitué d'une inductance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. En modulant l'angle d'amorçage de ces thyristors, il devient possible de faire varier la quantité de puissance réactive absorbée par le réacteur. Le thyristor devient conducteur lorsqu'il reçoit une impulsion de commande (gâchette) et que la tension à ses bornes est positive. Il cesse naturellement de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule.

Utilisé seul, le TCR ne permet pas de compenser la puissance réactive, car il ne génère pas d'énergie réactive. C'est pourquoi il est généralement associé à des bancs de condensateurs, qui constituent la source principale de puissance réactive, tandis que le TCR en régule le niveau d'injection ou d'absorption selon les besoins du réseau. [28]

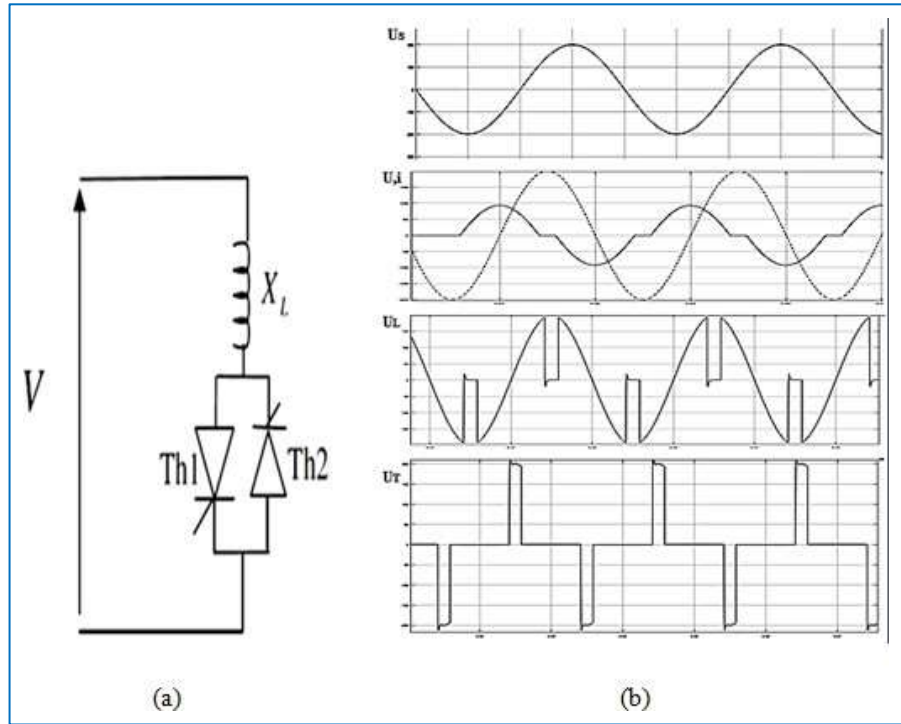


Figure III. 2: (a) : Réactance commandée par thyristors (TCR), (b) : Représentation des courants et des tensions des différents éléments du TCR.

L'équation dynamique qui régit le mode de fonctionnement du TCR est :

$$V(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (\text{III. 1})$$

L'expression du courant instantané dans la réactance contrôlée par thyristors (TCR) est donnée par :

$$L \frac{di}{dt} = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (\text{III. 2})$$

$$I_{\text{TCR}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sqrt{2}V \sin(\omega t) dt = \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos(\alpha) - \cos(\omega t)) & \text{si: } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \text{si: } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

Avec :

V : Tension efficace d'alimentation (V).

$XL = \omega L$: Réactance pour fréquence fondamentale du TCR.

α : Angle d'amorçage.

σ : Angle de conduction.

L'analyse en série de Fourier permet d'extraire l'amplitude de la composante fondamentale du courant compensateur, exprimée comme suit :

$$I_{L_{TCR}}(\alpha) = \frac{V}{\pi\omega L}(2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)) \quad (\text{III. 4})$$

L'équation (III.4) peut s'écrire comme suit :

$$I_{L_{TCR}}(\alpha) = B_{TCR}(\alpha).V \quad (\text{III. 5})$$

Ainsi, l'expression de la susceptance B_{TCR} peut être formulée comme suit :

$$B_{TCR}(\alpha) = \frac{\sigma + \sin(2\alpha)}{\pi.X_L} \quad (\text{III. 6})$$

Ou :

$$B_{TCR}(\sigma) = \frac{\sigma - \sin(\sigma)}{\pi.X_L} \quad (\text{III. 7})$$

Avec : $\sigma = 2(\pi - \alpha)$

La susceptance B_{TCR} correspond à celle du réacteur contrôlé par thyristors, et elle varie de la même manière que la composante fondamentale du courant qui le traverse.

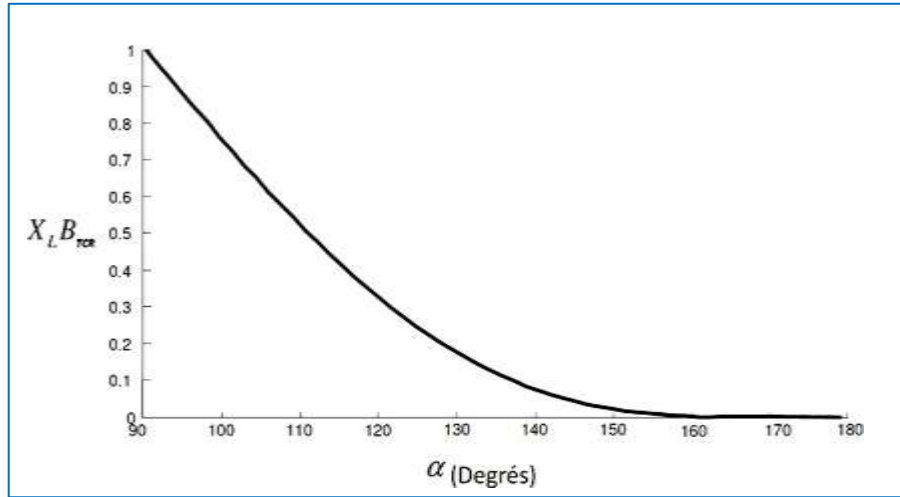


Figure III. 3: Variation de la susceptance du TCR en fonction de α .

La figure (III.4) illustre la caractéristique statique tension-courant (V-I) du TCR, obtenue à partir de l'équation suivante :

$$V = V_{\text{réf}} + X_{\text{SL}} \cdot I \quad (\text{III. 8})$$

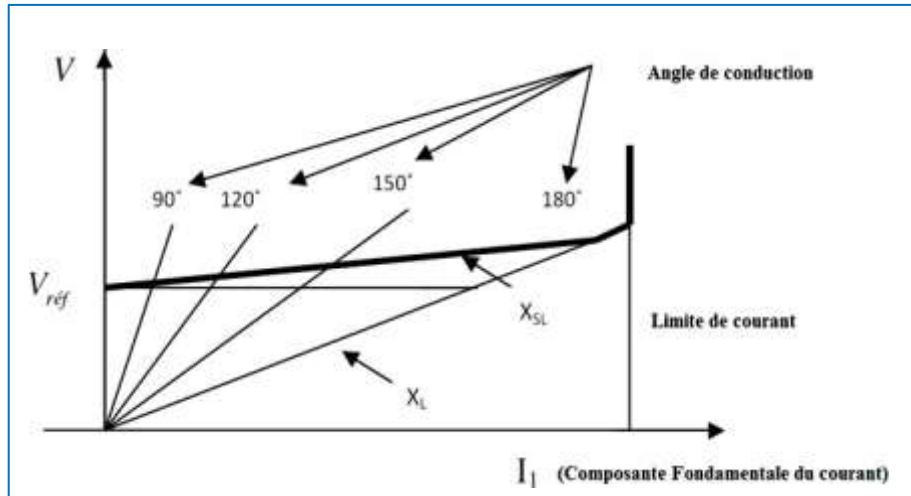


Figure III. 4: Caractéristique (V-I) du TCR.

III.3.3. Réactance commutée par thyristors (TSR):

Le TSR est composé d'une inductance, activée et désactivée par des commutateurs à thyristor sans contrôle de l'angle d'amorçage, afin d'obtenir les variations nécessaires de la puissance réactive consommée par le système. L'utilisation de commutateurs à thyristor sans contrôle de l'angle d'amorçage permet de réduire les coûts et les pertes, mais Contrairement au TCR, le TSR ne permet pas un réglage continu. [32]

III.3.4. Condensateur commuté par thyristors (TSC):

Le TSC (Thyristor-Switched Capacitor) est un dispositif de compensation de puissance réactive constitué d'un condensateur fixe connecté en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle et une inductance d'atténuation. Contrairement aux dispositifs à contrôle de phase, la commande du TSC se fait par la commutation en tout ou rien, pour un nombre entier de demi-cycles de la tension appliquée. Cette stratégie permet d'éviter les variations continues et assure une réponse rapide par paliers.

L'inductance intégrée a pour rôle essentiel de limiter les courants transitoires lors des commutations, de prévenir les surintensités en cas de défaut, et de décourager toute résonance indésirable avec les harmoniques du réseau.

Afin de minimiser les perturbations transitoires, la mise en service du condensateur est réalisée au moment où la tension résiduelle à ses bornes est égale à la tension

instantanée du réseau, ce qui permet de réduire les contraintes sur les composants de commutation.

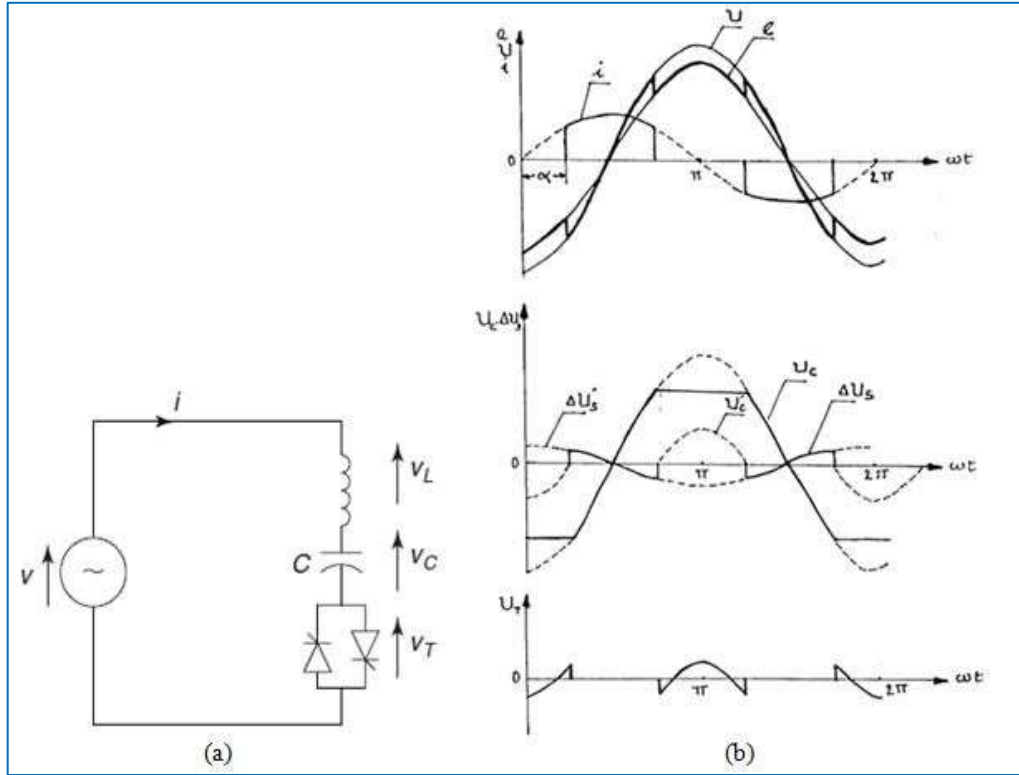


Figure III. 5: (a) : Condensateur commuté par thyristors (TSC), (b) : Représentation des courants et des tensions des différents éléments du TSC. [31]

L'équation de la tension alternative sinusoïdale appliquée au TSC :

$$v(t) = V \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{III. 9})$$

L'équation (III.10) montre le courant dans la branche TSC lorsque le thyristor est fermé, sous régime permanent :

$$I(\omega t) = V \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \cos(\omega t) \quad (\text{III. 10})$$

Où :

$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (\text{III. 11})$$

Avec :

$\omega = 2\pi f$: pulsation du système (rad/s).

L : inductance de la self de limitation (en H).

C : capacité du condensateur (en F).

$X_C = \frac{1}{\omega C}$: réactance capacitive.

$X_L = \omega L$: réactance inductive.

n : Facteur de résonance.

La figure suivante montre la caractéristique statique du TSC :

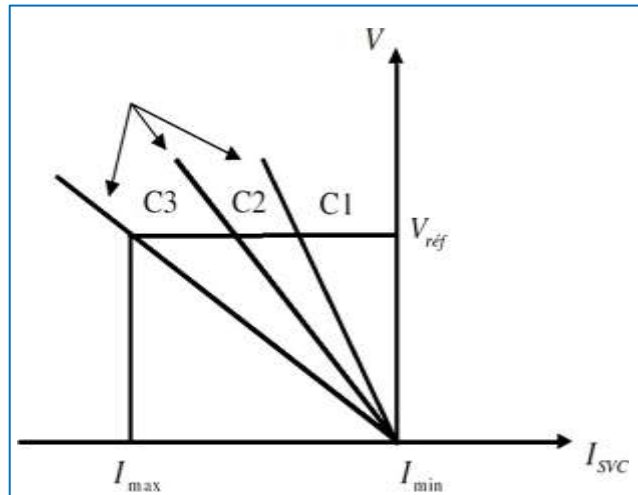


Figure III. 6: Caractéristique (V-I) du TSC.

III.4. Principes de fonctionnement du SVC:

Le principe de fonctionnement de SVC est simple. En faisant varier la grandeur des tensions de sortie produites, l'échange de puissance entre SVC et le réseau peut être réglé.

Autrement dit, si l'amplitude de la tension de sortie est augmentée au-delà de celle du réseau, le courant circule à travers la réactance en provenance du SVC vers le réseau alors le SVC produit de la puissance réactive (capacitif) pour le réseau.

Si l'amplitude de la tension de sortie est réduite à une valeur inférieure par rapport à celle du réseau, alors un courant réactif circule depuis le réseau vers SVC et dans ce cas le compensateur SVC absorbe de la puissance réactive (inductive).

Si la tension de sortie est égale à celle du réseau l'échange de puissance réactive est égal à zéro. [28]

La figure III-7 illustre la caractéristique de fonctionnement d'un SVC conventionnel, laquelle met en évidence trois zones distinctes de fonctionnement : la zone de régulation ($V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$), et les deux extrêmes de fonctionnement correspondants au maximum de génération de puissance réactive ($V < V_{\min}$) et au maximum d'absorption de puissance réactive par le SVC ($V > V_{\max}$).

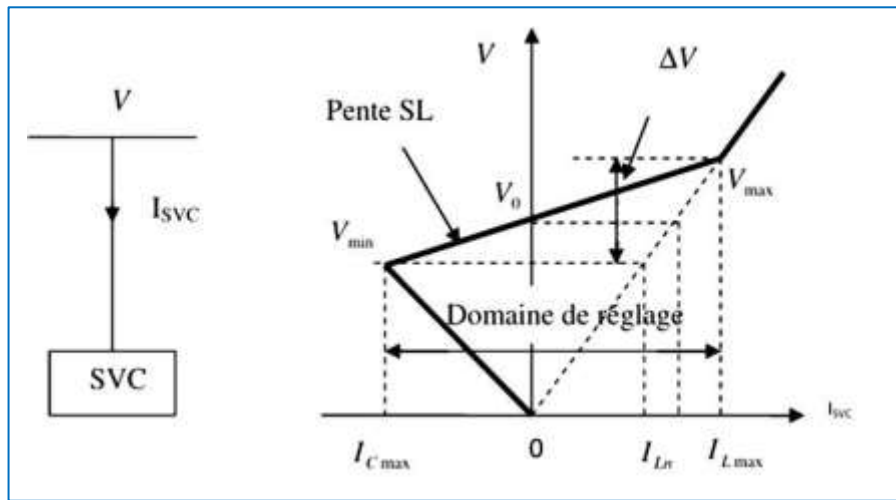


Figure III. 7: Caractéristique de réglage du SVC.

III.5. Système de contrôle du SVC :

Le rôle principal du système de contrôle est de déterminer la susceptance nécessaire du SVC au point de connexion, afin de maintenir la tension du réseau aussi proche que possible de la valeur de consigne. Cette régulation repose sur la mesure continue de la tension du réseau, comparée à une valeur de référence. En cas d'écart détecté, le contrôleur ajuste la susceptance pour rétablir l'équilibre de tension.

L'opération du contrôleur génère un ordre de susceptance à partir du régulateur de tension, qui est ensuite converti en ordres d'amorçage pour chaque thyristor. La susceptance totale délivrée par le SVC résulte de la combinaison des susceptances des différents éléments qui le constituent. Le système de contrôle assure également une surveillance permanente des courants et des tensions dans les différentes branches du compensateur. [29]

III.6. Les différents types de SVC:

Selon leur configuration et leur mode de commande, les SVCs se déclinent en plusieurs types, chacun assurant une régulation spécifique de la puissance réactive. Les principaux sont présentés ci-dessous.

III.6.1. SVC à condensateurs commutés par thyristor (TSC) :

Ce type de SVC repose sur l'association de plusieurs branches TSC, commutées individuellement selon les besoins du réseau. Chaque branche est dimensionnée pour

injecter une quantité déterminée de puissance réactive capacitive, et l'ensemble permet une régulation par paliers fins.

Grâce à cette structure modulaire, le système ajuste dynamiquement la compensation en activant ou désactivant une ou plusieurs branches, en fonction de l'écart de tension détecté. Ce type est particulièrement adapté aux réseaux nécessitant une compensation rapide mais à dynamique modérée, avec une faible complexité de commande.

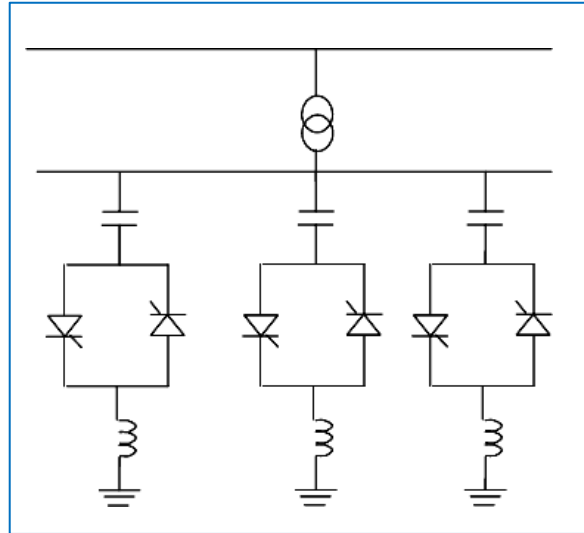


Figure III. 8: Configuration d'un SVC composé de plusieurs branches TSC.

III.6.2. SVC à réactance commandée par thyristors avec batteries de condensateurs fixes (TCR + FC):

Dans cette configuration, les condensateurs fixes (FC) fournissent un niveau de base constant de puissance réactive capacitive, tandis que le TCR (réactance commandée par thyristors) assure la régulation fine. Le TCR absorbe une quantité variable de puissance réactive inductive selon l'angle de conduction α des thyristors. Le courant total dans le SVC est donc la différence entre une injection capacitive fixe et une absorption inductive variable.

Ce régime permet d'adapter la compensation aux besoins réactifs du réseau tout en maintenant un socle capacitif constant. Cependant, en raison du comportement non linéaire du TCR, ce régime génère davantage d'harmoniques et nécessite l'ajout de filtres appropriés pour limiter leur impact.

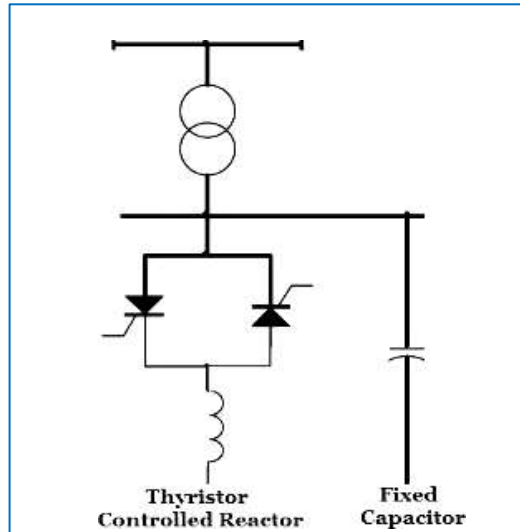


Figure III. 9: Schéma de principe d'un SVC combinant TCR et condensateur fixe (FC).

III.6.3. SVC combiné TCR + TSC ($\alpha_L = \alpha_C$) :

Le SVC, dans cette configuration est constitué d'un TCR et de plusieurs branches TSC, dont le déclenchement est piloté par une consigne d'angle d'amorçage commune. L'amorçage des thyristors de l'inductance et des condensateurs se fait donc de manière simultanée et synchrone, ce qui signifie que le courant dans les deux branches s'établit au même moment, et circule alternativement à travers les deux thyristors (en montage tête-bêche) selon la polarité du signal.

Cette configuration présente l'avantage d'une commande unifiée simplifiée, mais montre ses limites face à des besoins de compensation asymétrique où une régulation indépendante des branches serait nécessaire.

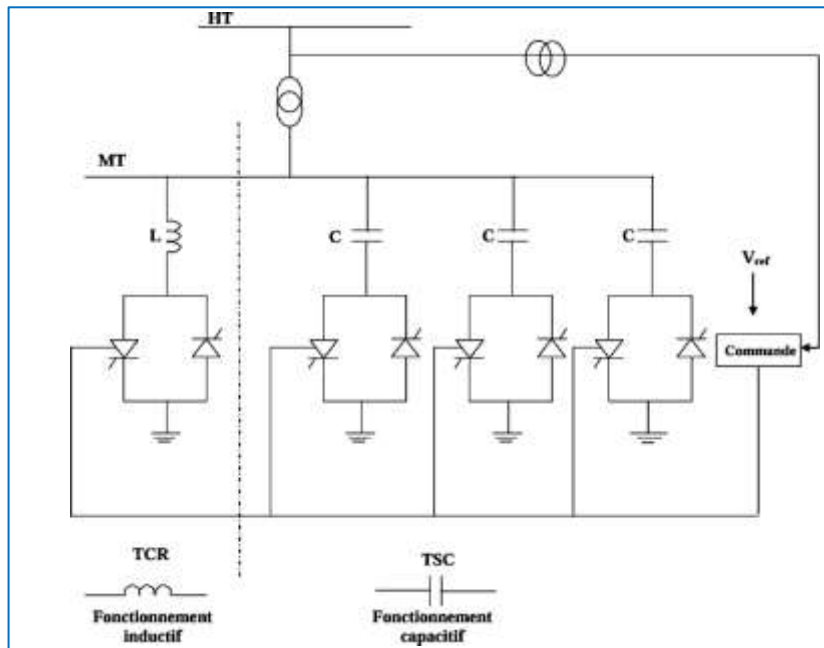


Figure III. 10: Schéma de principe d'un SVC combiné TCR + TSC.

III.6.4. SVC combiné TCR + TSC ($\alpha_L \neq \alpha_C$) :

Dans ce mode de fonctionnement, les branches TCR et TSC sont commandées de manière indépendante, chacune avec son propre angle d'amorçage. Cette dissociation des commandes permet une régulation plus souple et plus précise de la puissance réactive échangée avec le réseau.

Le TSC injecte une puissance capacitive via la commutation discrète de ses gradins, tandis que le TCR absorbe une puissance réactive inductive variable en fonction de l'angle de conduction appliqué. Ce fonctionnement à angles d'amorçage dissociés permet au système de maintenir la tension à un niveau stable, même en présence de variations rapides ou asymétriques de la charge.

Bien que ce mode offre une grande souplesse d'exploitation, il nécessite une stratégie de commande plus élaborée ainsi qu'une coordination précise entre les deux branches pour garantir des performances optimales.

III.7. Avantages et inconvénients de la compensation par SVC :

Le SVC offre plusieurs avantages techniques qui en font une solution efficace pour renforcer les performances des réseaux électriques. Parmi ces bénéfices, on peut citer :

- Amélioration des niveaux de tension dans le réseau.
- Augmentation de la capacité de transit de puissance active du réseau.

- Augmentation de la marge de stabilité transitoire.
- Augmentation de l'amortissement des oscillations électromécaniques.
- Réduction des surtensions temporelles.

Malgré ses nombreux avantages, le SVC présente aussi quelques inconvénients qu'il faut prendre en compte. Parmi ces inconvénients, on trouve :

- Les systèmes qui fonctionnent à leurs limites d'exploitation sont fortement dépendants de la compensation par SVC, donc peuvent souffrir facilement d'un effondrement de la tension.
- La puissance réactive générée est en fonction du carrée de la tension, alors le SVC ne peut maintenir le niveau de tension requis par le réseau.
- Les interactions entre le SVC et les autres éléments de types FACTS ou d'autres éléments d'électronique de puissance utilisés dans les réseaux peuvent être gênantes.
- Le SVC ne peut contrôler qu'un seul paramètre important qui est la tension, pour le contrôle de l'angle et de l'impédance, d'autres dispositifs seront indispensables.
- Enfin le SVC est très cher et demande beaucoup de place au sol pour son installation. [30]

III.8. Détermination des paramètres du nœud :

Cette étude porte sur l'analyse du rôle du compensateur statique (SVC) combiné de type TCR+TSC où les angles d'amorçage sont synchronisés ($\alpha_L = \alpha_C$), dans le réglage de la tension nodale au sein d'un réseau électrique fonctionnant en régime non sinusoïdal. Ce modèle est représenté par la figure :

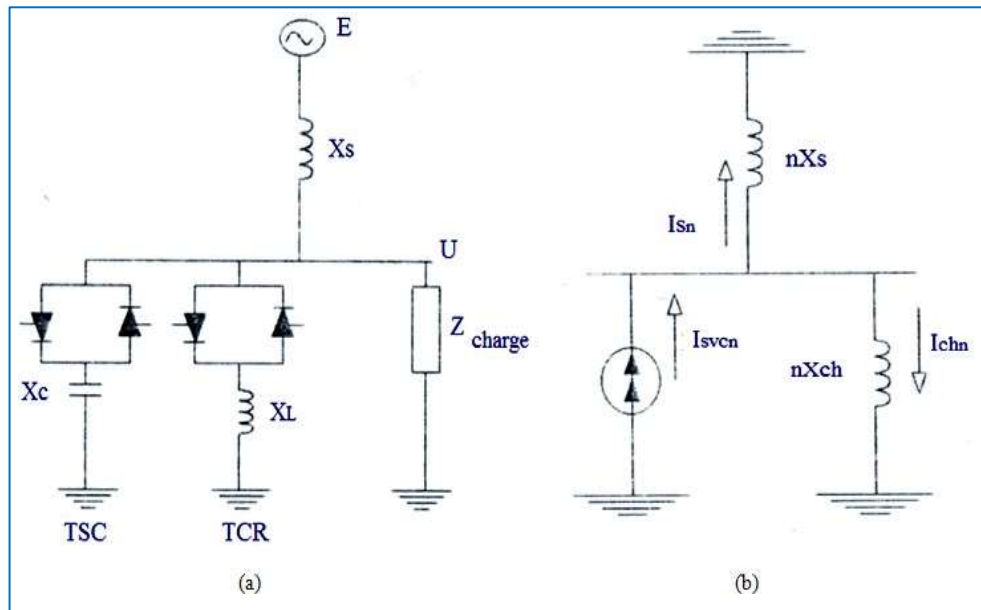


Figure III. 11: Distribution des courants harmoniques dans un SVC combiné de type TCR+TSC.[31]

Le SVC, bien qu'efficace pour la compensation dynamique, constitue également une source d'harmoniques dans le système, ce qui peut influencer la stabilité de la tension.

L'objectif principal est donc de comprendre comment les paramètres du SVC, en particulier l'angle d'amorçage α et les paramètres de configuration (X_{ch} , K_2 , K_{svc}), affectent sur les grandeurs caractéristiques du nœud (U , Q_{svc} , Q_{ch} et le THD).

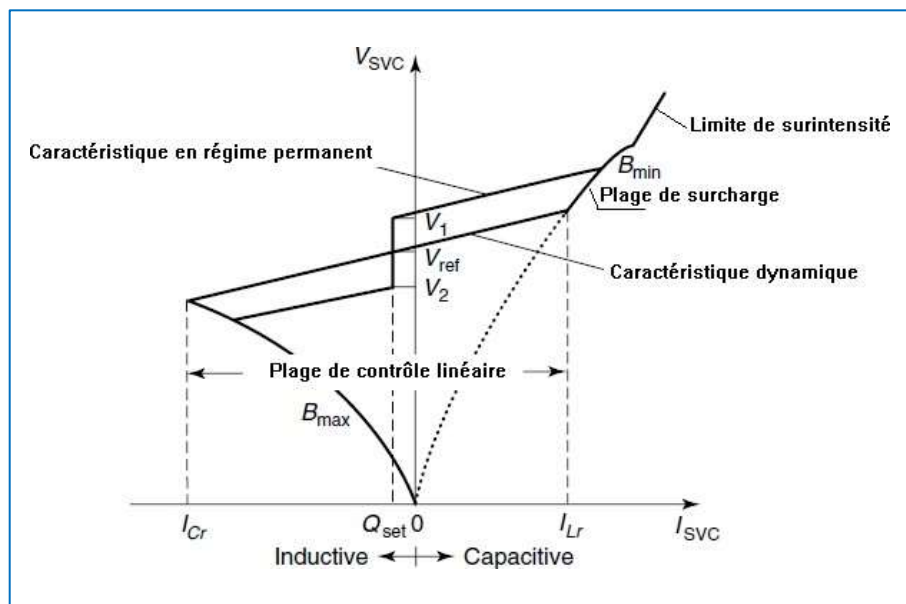


Figure III. 12: La caractéristique tension - courant du SVC.

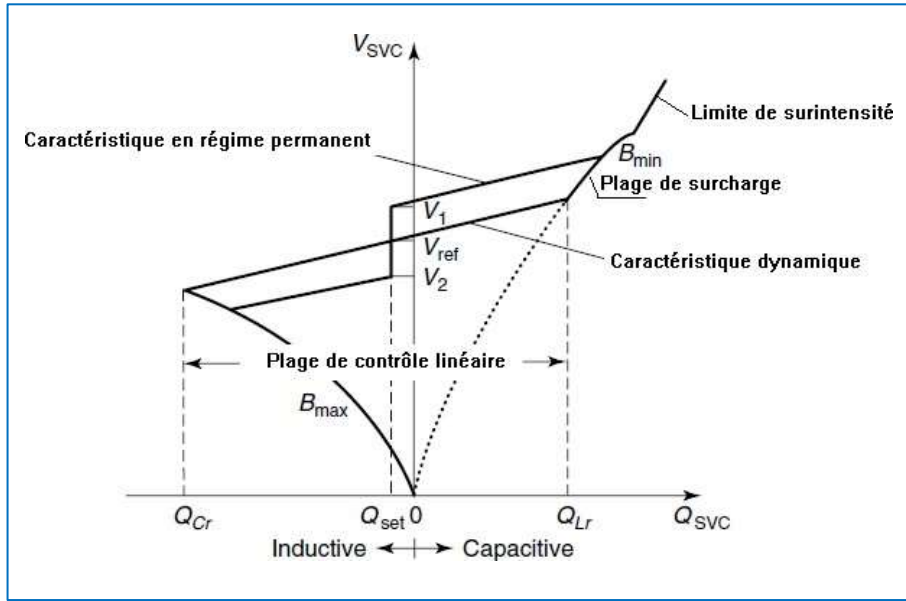


Figure III. 13: La caractéristique tension - puissance réactive du SVC.

Les caractéristiques en régime permanent et dynamique d'un SVC (Compensateur Statique de Var) traduisent l'évolution de la tension au niveau du jeu de barres en fonction du courant injecté I_{SVC} ou de la puissance réactive échangée. Deux représentations alternatives de ces relations sont illustrées dans la Fig. III.12 et la Fig. III.13 : la figure III.12 montre la courbe tension-courant ($V-I$), tandis que la figure III.13 présente la relation entre la tension d'extrémité et la puissance réactive fournie ou absorbée par le SVC.

Cette plage correspond à la zone de régulation dans laquelle la tension dans le jeu de barre ou il est connecté le SVC varie linéairement avec le courant I_{SVC} ou avec la puissance réactive, lorsque cette dernière est modulée de sa limite capacitive maximale à sa limite inductive maximale.

III.8.1. Détermination de la tension du nœud : [31]

Les grandeurs fondamentales du modèle (figure III. 11) se définissent comme suit :

$$U_1 = E_{eq} - jI_{SVC1} \cdot Z_{eq} \quad (III. 12)$$

Où E_{eq} , Z_{eq} : représentent respectivement la force électromotrice (f.é.m) et l'impédance équivalente des branches système-charge, données par les expressions :

$$E_{eq} = E \cdot K_1 \quad (III. 13)$$

$$Z_{eq} = j \cdot K_1 \cdot X_s \quad (\text{III. 14})$$

En remplaçant E_{eq} , Z_{eq} par leurs valeurs, on obtient :

$$U_1 = K_1 (E - jI_{SVC1} \cdot X_s) \quad (\text{III. 15})$$

Le courant fondamental du compensateur s'exprime comme :

$$I_{SVC1} = I_{C1} + I_{L1} = I_{C0} \cdot a_{C1} + I_{L0} \cdot a_{L1} \quad (\text{III. 16})$$

Où :

$$I_{C0} = I_{SVC} \frac{Z_{SVC}}{Z_C} = j \frac{K_1 \cdot K_{2C}}{1 - K_1 K_2} \cdot \frac{E}{X_s} \quad (\text{III. 17})$$

$$I_{L0} = I_{SVC} \frac{Z_{SVC}}{Z_L} = -j \frac{K_1 \cdot K_{2L}}{1 - K_1 K_2} \cdot \frac{E}{X_s} \quad (\text{III. 18})$$

Avec :

$K_{2C} = \frac{X_s}{X_C}$: Exprime la puissance de la branche capacitive du SVC par rapport à la puissance du système.

$K_{2L} = \frac{X_s}{X_L}$: Exprime la puissance de la branche inductive du SVC par rapport à la puissance du système.

$K_2 = \frac{X_s}{X_{SVC}} = K_{2L} (K_{2C} - 1)$: Exprime la puissance du compensateur SVC par rapport à la puissance totale du système.

a_{C1} : Coefficient de la composante fondamentale de tension aux bornes de la capacité, donné par l'expression :

$$a_{C1} = 1 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \quad (\text{III. 19})$$

a_{L1} : Coefficient de la composante fondamentale de tension aux bornes de l'inductance, donné par l'expression :

$$a_{L1} = 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \quad (\text{III. 20})$$

En remplaçant I_{C0} , I_{L0} par leurs valeurs, on obtient :

$$I_{SVC1} = j \frac{K_1}{1 - K_1 K_2} (K_{2C} a_{C1} - K_{2L} a_{L1}) \cdot \frac{E}{X_s} \quad (\text{III. 21})$$

La tension fondamentale du nœud aura donc pour expression :

$$U_1 = K_1 \left(1 + \frac{K_1 (K_{2C} a_{C1} - K_{2L} a_{L1})}{1 - K_1 K_2} \right) \cdot E \quad (\text{III. 22})$$

Par analogie, on peut définir les grandeurs harmoniques représentées dans la figure III.11 comme suit :

$$I_{SVCn} = I_{Cn} + I_{Ln} = I_{C0} \cdot a_{Cn} + I_{L0} \cdot a_{Ln}/n \quad (\text{III. 23})$$

Avec :

a_{Cn} : Coefficient de la décomposition en série de fourier du $n^{ième}$ harmonique, donné par l'expression :

$$a_{Cn} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin(1+n)\alpha}{1+n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right] \quad (\text{III. 24})$$

a_{Ln} : Coefficient de la décomposition en série de fourier du $n^{ième}$ harmonique, donné par l'expression :

$$a_{Ln} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin(1+n)\alpha}{1+n} + \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right] \quad (\text{III. 25})$$

Tenant compte des expressions de I_{C0} et I_{L0} , on détermine :

$$I_{SVCn} = j \frac{K_1}{1 - K_1 K_2} (K_{2C} a_{Cn} - K_{2L} a_{Ln}/n) \cdot \frac{E}{X_s} \quad (\text{III. 26})$$

D'autre part en partant de :

$$U_n = I_{SVCn} \cdot Z_{eqn} \quad (\text{III. 27})$$

Avec :

$$Z_{eqn} = j \cdot n \cdot K_1 \cdot X_s \quad (\text{III. 28})$$

On obtient :

$$U_n = -\frac{K_1^2 \cdot n}{1 - K_1 K_2} (K_{2C} a_{Cn} - K_{2L} a_{Ln} / n) \cdot E \quad (\text{III. 29})$$

Donc la tension efficace relative du nœud s'obtient par :

$$U^* = U_1 \cdot \sqrt{1 + (U)^2} \quad (\text{III. 30})$$

Sachant que le THD(U) représente le taux de distorsion harmonique de la tension, il est obtenu à partir de l'expression suivante :

$$THD_{(U)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^n U_n^2}{U_1^2}} \quad (\text{III. 31})$$

III.8.2. Détermination de la puissance réactive du SVC et de la charge :

La puissance réactive en régime déformant peut avoir deux conceptions différentes, la première est liée à la notion d'énergie moyenne des champs magnétiques et électriques, elle est exprimée par :

$$Q = 2 \cdot U \cdot (W_m - W_e) \quad (\text{III.32})$$

Où : $\left\{ \begin{array}{l} W_m = \frac{1}{2} L \cdot I^2 : \text{énergie des champs magnétiques.} \\ W_e = \frac{1}{2} C \cdot U^2 : \text{énergie des champs électriques.} \end{array} \right.$

Une autre définition de la puissance réactive a été proposée par A.ILIOVICI :

$$Q = -\frac{\omega}{T} \int_0^T \phi \cdot i \cdot dt \quad (\text{III. 14})$$

Avec:

ω : La pulsation (ou fréquence angulaire).

T : La période de l'onde fondamentale du courant alternatif.

ϕ : Le flux magnétique, tel que : $e = -\frac{d\phi}{dt}$

Le développement et l'analyse harmonique de l'expression (III.13) conduit à la formule suivante :

$$Q = \sum_{n=1}^n \frac{1}{n} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n = \sum_{n=1}^n \frac{1}{n} \cdot Q_n \quad (\text{III. 15})$$

n : Rang de l'harmonique.

φ_n : Déphasage entre la tension harmonique U_n et le courant harmonique I_n .

En partant de la proposition définie par l'intégrale :

$$Q = -\frac{1}{\omega T} \int_0^T i \cdot de \quad (\text{III. 16})$$

On obtient une autre formule pour la puissance réactive :

$$Q = \sum_{n=1}^n n \cdot U_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n = \sum_{n=1}^n n \cdot Q_n \quad (\text{III. 17})$$

Aux définitions (III.14) et (III.16), on peut adjoindre l'expression définie par analogie à la définition de la puissance active et bien exposée dans les recueils d'électrotechnique :

$$Q = \sum_{n=1}^n Q_n \quad (\text{III. 18})$$

Où :

$Q_n = U_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n$: Puissance réactive de l'harmonique d'ordre "n".

U_n, I_n : Tension et courant efficaces de l'harmonique d'ordre "n", respectivement.

III.8.2.1. Détermination de la puissance réactive du SVC :

Pour un compensateur statique combiné de type TCR+TSC où les angles d'amorçage sont synchronisés ($\alpha = \alpha_c$), la puissance réactive de la branche inductive s'exprime par :

$$Q_{L1} = U_1 \cdot I_{L1} = U_1 \cdot I_{L0} \cdot a_{L1} \quad (\text{III. 19})$$

En remplaçant U_1, I_{L0} par leurs valeurs, on obtient :

$$Q_{L1}^* = -j \frac{K_1^2 \cdot K_{2L} \cdot a_{L1}}{(1 - K_1 K_2)^2} [1 - K_1 K_2 + K_1 \cdot K_2 (K_{SVC} \cdot a_{C1} - a_{L1})] \quad (\text{III. 39})$$

Pour l'harmonique de rang "n", on peut aussi écrire :

$$Q_{Ln} = U_n \cdot I_{Ln} = \frac{U_n \cdot I_{L0} \cdot a_{Ln}}{n} \quad (\text{III. 40})$$

Ou encore, après avoir remplacé U_n par son expression, on obtient :

$$Q_{Ln}^* = j \frac{K_1^{\prime} \cdot K_{2L}^{\prime}}{(1 - K_1 K_2)^2} (K_{SVC} a_{Cn} - \frac{a_{Ln}}{n}) \cdot a_{Ln} \quad (\text{III. 41})$$

Avec :

$K_{SVC} = \frac{K_{2C}}{K_{2L}}$: Exprime la puissance de la branche inductive par rapport à la puissance de la branche capacitive du SVC.

Ou bien :

$K_{SVC} = \frac{Q_{SVC}}{S_{base}}$: Où Q_{SVC} est la puissance réactive injectée par le compensateur, et S_{base} est la puissance apparente de base du système.

De manière similaire, pour la branche capacitive :

$$Q_{C1} = U_1 \cdot I_{C1} = U_1 \cdot I_{C0} \cdot a_{C1} \quad (\text{III. 42})$$

Par suite :

$$Q_{C1}^* = j \frac{K_1^{\prime} \cdot K_2 \cdot a_{C1}}{(1 - K_1 K_2)^2} [1 - K_1 K_2 + K_1 \cdot K_2 (K_{SVC} \cdot a_{C1} - a_{L1})] \quad (\text{III. 43})$$

Pour l'harmonique "n" :

$$Q_{Cn} = U_n \cdot I_{Cn} = U_n \cdot I_{C0} \cdot a_{Cn} \quad (\text{III. 44})$$

$$Q_{Cn}^* = j \frac{K_1^{\prime} \cdot K_{2C} \cdot K_{2L}}{(1 - K_1 K_2)^2} (K_{SVC} a_{Cn} - \frac{a_{Ln}}{n}) \cdot a_{Cn} \cdot n \quad (\text{III. 45})$$

La composante fondamentale de la puissance réactive injectée par le compensateur peut alors s'exprimer par :

$$Q_{SVC1}^* = Q_{C1}^* + Q_{L1}^* = j \frac{K_1^{\prime} K_{2L}}{(1 - K_1 K_2)^2} [1 - K_1 K_2 + K_1 K_{2L} (K \cdot a_{C1} - a_{L1})] \cdot (K \cdot a_{C1} - a_{L1}) \quad (\text{III.46})$$

Tandis que pour l'harmonique de rang "n", on a :

$$Q_{svcn}^* = Q_{cn}^* + Q_{Ln}^* = -j \frac{K_1^2 \cdot K_{2L}^2}{(1 - K_1 \cdot K_2)^2} \cdot (K_{svc} \cdot a_{cn} - \frac{a_{Ln}}{n})^2 \cdot n \quad (III.47)$$

Conformément à l'équation (III.37), on peut écrire pour le compensateur :

$$Q_{svc} = Q_{svc1} + \sum_3^n Q_{svcn} \quad (III.48)$$

III.8.2.2. Détermination de la puissance réactive de la charge :

On exprime respectivement les puissances réactives de la charge, de la composante fondamentale et de l'harmonique d'ordre "n" par :

$$Q_{ch1} = U_1 \cdot I_{ch1} \quad (III.49)$$

$$Q_{chn} = U_n \cdot I_{chn} \quad (III.50)$$

Où :

$$I_{ch1} = \frac{U_1}{jX_{ch}} = -jK_1K_3 \left[1 + \frac{K_1(K_{2c}a_{c1} - K_{2L}a_{L1})}{1 - K_1K_2} \right] \cdot \frac{E}{X_s} \quad (III.51)$$

$$I_{chn} = \frac{U_n}{j \cdot n \cdot X_{ch}} = j \frac{K_1^2 \cdot K_3}{(1 - K_1 \cdot K_2)^2} (K_{2c} a_{cn} - K_{2L} a_{Ln} / n) \cdot \frac{E}{X_s} \quad (III.52)$$

Avec : $K_3 = \frac{X_s}{X_{ch}}$.

En exprimant les grandeurs en valeurs relatives, on obtient, après remplacement des tensions et courants par leurs valeurs :

$$Q_{ch1}^* = -j \frac{K_1^2 \cdot K_3}{(1 - K_1 \cdot K_2)^2} \cdot [1 - \frac{K_1}{K_2} + K_1 \cdot K_{2L} \cdot (K_{svc} \cdot a_{c1} - a_{L1})]^2 \quad (III.53)$$

$$Q_{chn}^* = -j \frac{K_1^4 \cdot K_{2L}^2}{(1 - K_1 \cdot K_2)^2} \cdot (K_{svc} \cdot a_{cn} - \frac{a_{Ln}}{n})^2 \cdot n \cdot K_3 \quad (III.54)$$

En se référant à l'équation (III.37), on obtient pour la charge :

$$Q_{ch} = Q_{ch1} + \sum_{n=3}^n Q_{ch_n} \quad (\text{III.55})$$

III.9. Caractéristiques statiques du nœud :

Les équations correspondant à la détermination des paramètres du nœud ont été programmées dans MATLAB afin de calculer les grandeurs électriques du nœud, notamment la puissance réactive injectée par le SVC (Q_{svc}^*), celle absorbée par la charge (Q_{ch}^*), la tension relative (U^*), ainsi que le taux de distorsion harmonique (THD).

Les calculs ont été effectués pour différentes combinaisons de paramètres, à savoir :

- $K_2 = 0,05$ et $0,20$.
- $K_{svc} = 1,5$ et $2,5$.
- $X_{ch} = 1$ et 2 .

Avec une variation continue de l'angle d'amorçage α de 0° à 90° .

Les résultats correspondants sont présentés ci-dessous sous forme graphique, permettant d'observer l'évolution de ces grandeurs selon les différentes conditions de fonctionnement.

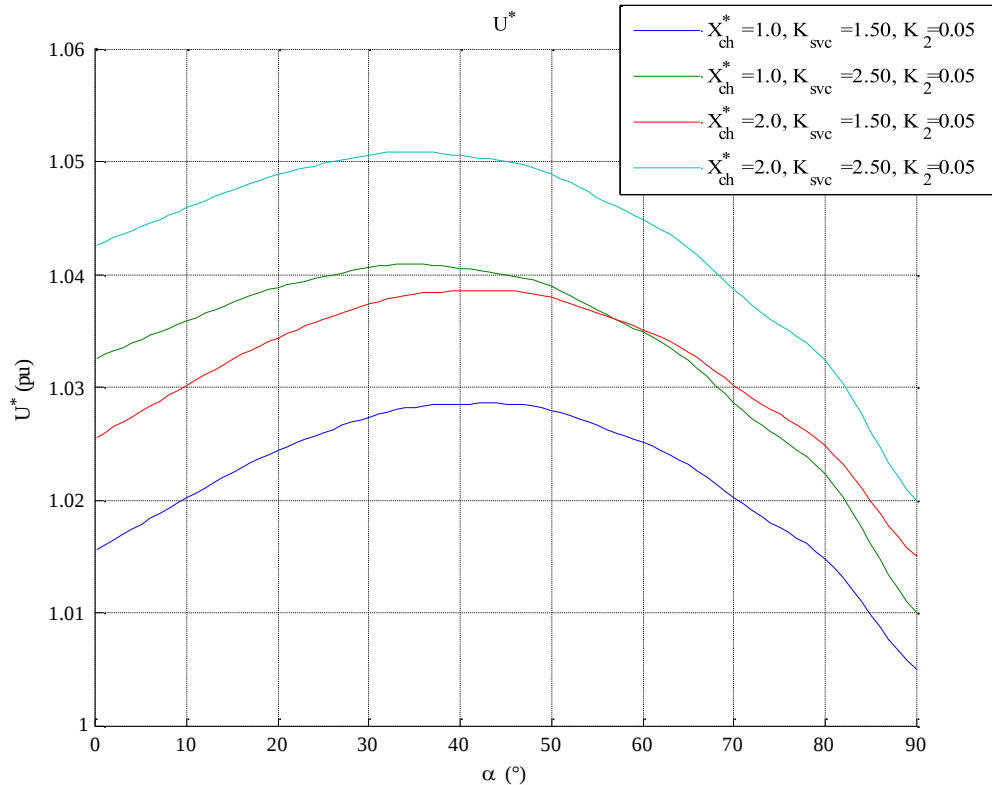


Figure III. 14: Caractéristiques de la tension du nœud pour $K_2 = 0,05$.

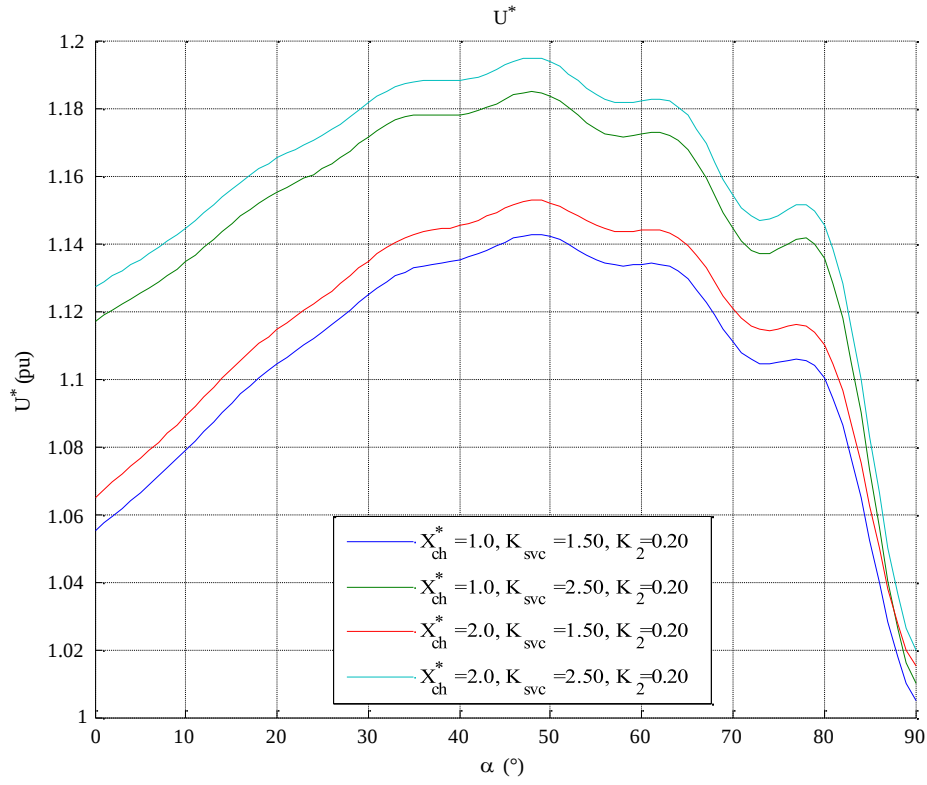


Figure III. 15: Caractéristiques de la tension du nœud pour $K_2 = 0,20$.

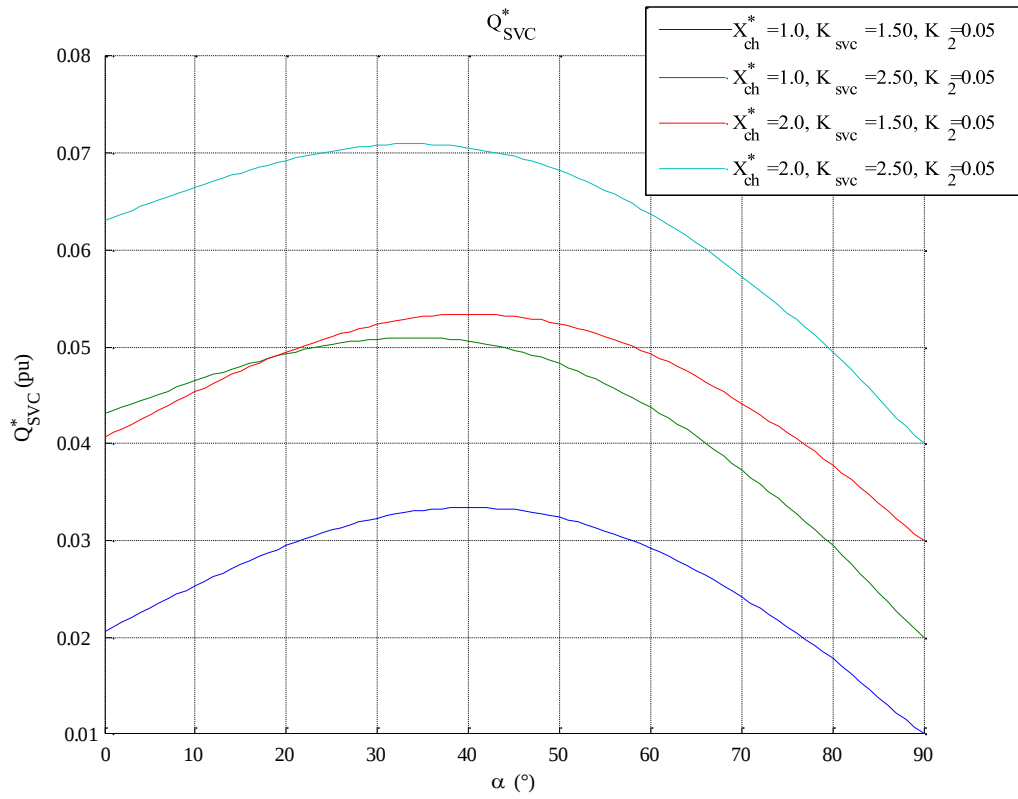


Figure III. 16: Variation de la puissance réactive du SVC pour $K_2 = 0,05$.

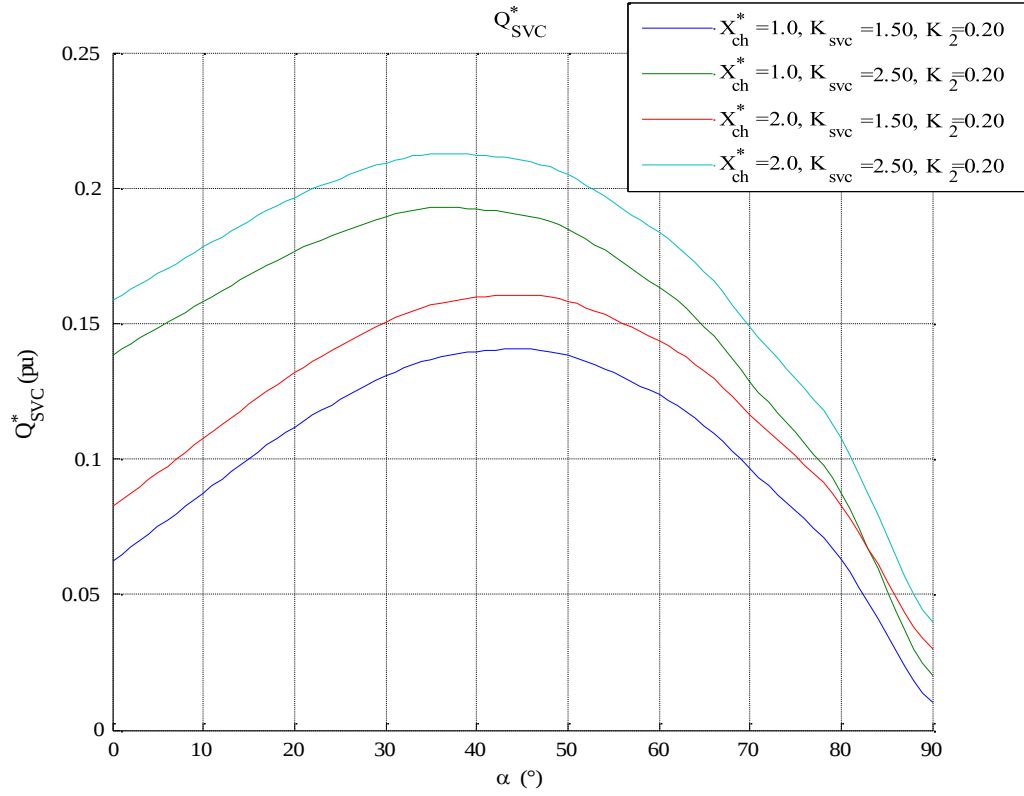


Figure III. 17: Variation de la puissance réactive du SVC pour $K_2 = 0,20$.

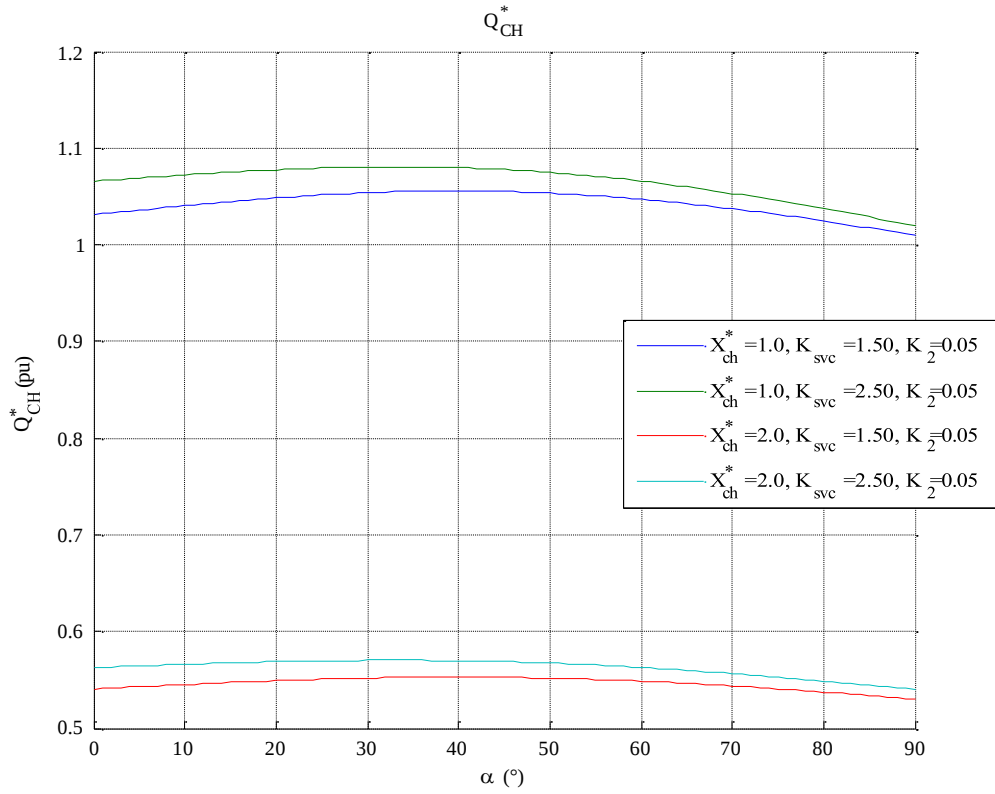


Figure III. 18: Variation de la puissance réactive de la charge pour $K_2 = 0,05$.

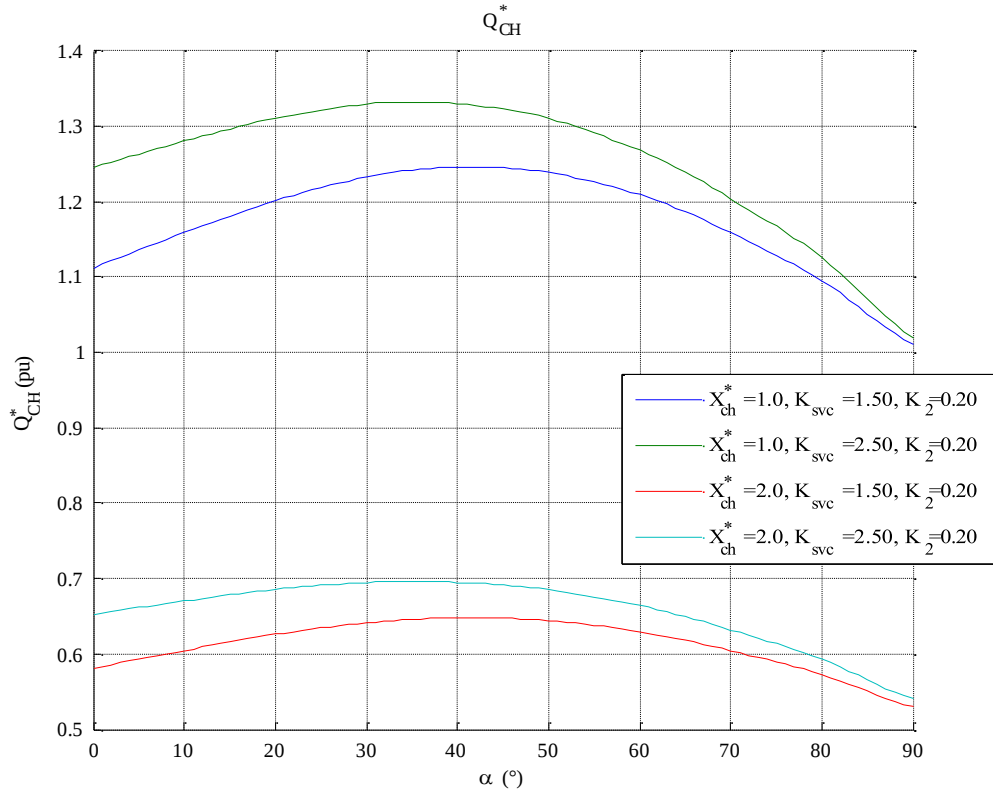


Figure III. 19: Variation de la puissance réactive de la charge pour $K_2 = 0,20$.

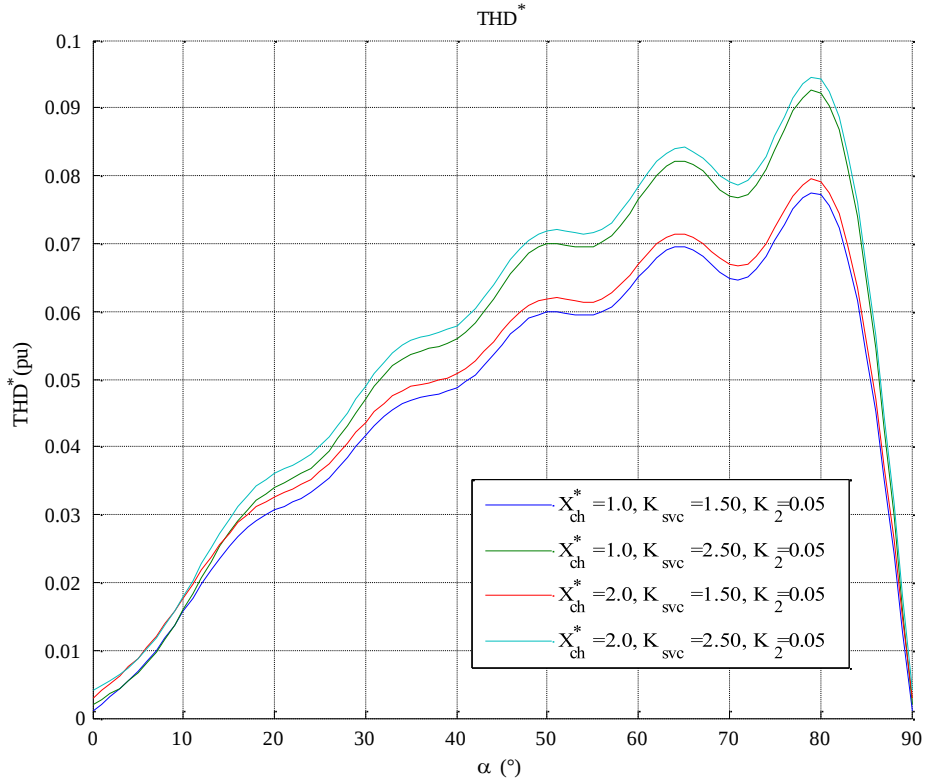


Figure III. 20: Caractéristiques du Taux de distorsion harmoniques en fonction de l'angle d'amorçage (α) pour $K_2 = 0,05$.

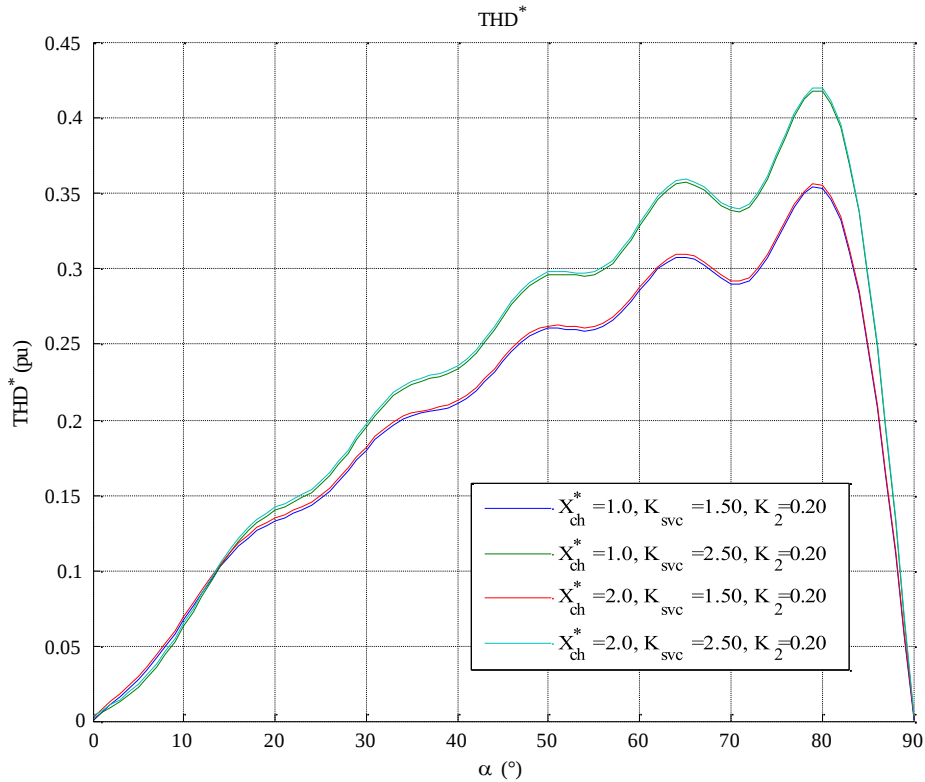


Figure III. 21: Caractéristiques du Taux de distorsion harmoniques en fonction de l'angle d'amorçage (α) pour $K_2 = 0,20$.

III.10. Interprétation et discussion des résultats :

- **Les caractéristiques de U :**

La tension nodale présente un comportement étroitement lié à la quantité de puissance réactive injectée par le SVC. On remarque que plus le rapport K_{svc} augmente (de 1,5 à 2,5), plus la tension U augmente en fonction de l'angle α , dans les deux cas de K_2 .

Pour $K_2 = 0,05$, bien que la tension s'élève légèrement avec α , elle reste proche de la valeur nominale (1 p.u) et donc dans une plage acceptable, avec une forme d'onde peu déformée.

En revanche, pour $K_2 = 0,20$, l'augmentation de U est plus marquée, notamment entre $\alpha = 30^\circ$ et 60° , avec des valeurs dépassant nettement 1 p.u. Cette élévation de tension est accompagnée d'une distorsion de la forme d'onde plus importante.

- **Les caractéristiques de Q_{svc} :**

La puissance injectée par le SVC présente une évolution typique : elle augmente entre $\alpha = 0^\circ$ et 30° , atteint un maximum entre 30° et 50° , puis diminue progressivement jusqu'à 90° .

Les courbes montrent que Q_{svc} est plus élevée pour $K_2 = 0,20$ que pour $K_2 = 0,05$, en raison d'une puissance installée plus importante du SVC. De plus, pour $K_2 = 0,20$, la courbe est légèrement déformée, ce qui traduit l'influence des harmoniques sur le comportement du compensateur.

Lorsque K_{svc} augmente à 2,5, Q_{svc} augmente également dans les deux cas de K_2 , ce qui confirme que la puissance injectée dépend directement du rapport K_{svc} .

- **Les caractéristiques de Q_{ch} :**

Dans les deux cas, la puissance réactive absorbée par la charge reste globalement constante avec la variation de l'angle d'amorçage. Toutefois, pour $K_2 = 0,20$, on observe une légère augmentation de Q_{ch} par rapport au cas $K_2 = 0,05$.

De même, pour un rapport $K_{svc} = 2,5$, la puissance absorbée est plus grande que pour $K_{svc} = 1,5$.

- **Les caractéristiques de THD :**

Le THD augmente avec l'angle α , surtout pour $\alpha > 60^\circ$. Pour $K_2 = 0,05$, le THD reste modéré avec une légère hausse à partir de $\alpha \approx 60^\circ$.

Par contre, pour $K_2 = 0,20$, il est significativement plus élevé sur toute la plage d' α , avec une augmentation rapide des $\alpha > 40^\circ$, et atteint ses valeurs maximales au-delà de 70° , traduisant une forte dégradation de la qualité de la tension.

L'augmentation de K_{svc} , contribue également à une élévation du THD.

III.11. Conclusion :

L'analyse effectuée dans ce chapitre a mis en évidence le rôle essentiel du SVC de type (TCR+TSC) dans le réglage de la tension nodale et l'amélioration de la qualité de l'énergie en régime non sinusoïdal. Grâce à l'injection de puissance réactive variable, le SVC permet de maintenir la tension proche de la valeur nominale, tout en réduisant les déséquilibres. Cette capacité de régulation dépend du rapport de compensation K_{svc} dont l'augmentation améliore la performance du système.

Cependant, les résultats ont également montré qu'une surcompensation peut entraîner des surtensions ($U > 1$ p.u) et une augmentation importante du taux de distorsion harmonique (THD), surtout dans les réseaux déjà affectés par des harmoniques.

Ainsi, l'utilisation d'un SVC doit être soigneusement dimensionnée pour garantir un bon compromis entre la régulation de tension et la préservation de la qualité de l'énergie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail que nous avons réalisé a porté sur l'étude du compensateur statique de puissance réactive (SVC), utilisé pour le réglage de la tension nodale dans un réseau électrique. Cette étude, structurée autour d'une approche théorique et pratique, nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Nous avons identifié que la tension du réseau est fortement affectée par diverses perturbations, ce qui met en évidence la nécessité d'un réglage approprié afin de garantir la stabilité, la sécurité et la performance du système électrique.
- L'analyse approfondie de la puissance réactive a permis de démontrer son impact direct sur le fonctionnement du système électrique. Elle a également souligné l'intérêt croissant des dispositifs FACTS, notamment le SVC, en tant que solutions avancées et performantes pour la compensation dynamique.
- La modélisation et l'étude réalisées sous MATLAB ont démontré que le SVC permet une régulation efficace de la tension en fonction des besoins du réseau. Toutefois, les résultats ont également mis en évidence que la surcompensation peut entraîner une surtension ainsi qu'une augmentation du taux de distorsion harmonique (THD), soulignant ainsi l'importance d'un dimensionnement optimal du SVC.

Nous espérons que ce travail pourra servir de base utile pour les étudiants, ingénieurs et chercheurs souhaitant approfondir les aspects théoriques et pratiques liés à la compensation de la puissance réactive. Il peut également contribuer au développement de solutions plus efficaces pour le contrôle de la tension et l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques modernes.

Bibliographie

- [1] Von Meier, "*Electric Power Systems: A Conceptual Introduction*", John Wiley & Sons, Wiley-Interscience, 2006.
- [2] Dr. Bedaoui Messaouda, "*Qualité de l'énergie électrique (QEE)* ", Support de cours, Département de Génie Electrique, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2022-2023.
- [3] S. Atia, Z. Hamidani, K. E. Hezla, N. E. Lakhoues, "*Compensation d'énergie réactive dans les réseaux électriques*", Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar – El-Oued, 2023.
- [4] Ph. Ferracci, "*Cahier technique n° 199 : la qualité de l'énergie électrique*", Schneider Electric, 2001.
- [5] Ewald F. Fuchs, Mohammad A. S. Masoum, "*Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*", 2^e éd, Elsevier, 2015.
- [6] É. Félice and P. Révilla, "*Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique*", Dunod, 2009.
- [7] Beauvois, Véronique. "*Qualité de la tension - Qualité de l'électricité*" ATT 00254, Université de Liège, Novembre 2008.
- [8] V. Ignatova, "*Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique : Application aux creux de tension et à la pollution harmonique*", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 2006.
- [9] P. Sanjeevikumar, C. Sharmeela , Jens Bo Holm-Nielsen , P. Sivaraman, "*Power Quality in Modern Power Systems*", Academic Press, 2020.
- [10] R. Calvas, "*Cahier technique n° 141 : Les perturbations électriques en BT*", Schneider Electric, 2001.
- [11] Ould Abdeslam Djamel, "*Réseaux électriques : Production, transport, distribution et qualité de l'énergie*". Paris : https://www.editionsellipses.fr/PDF/9782729885281_extrait.pdf
- [12] Catalogue, "*Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques*", Legrand.
- [13] Groupe Schneider Electric, "*Guide de la compensation d'énergie réactive et du filtrage des harmonique*", Guides experts basse tension N°6.
- [14] N. Messad, N. Zinet, "*Etude de la compensation de la puissance réactive dans un réseau de transmission d'énergie électrique*", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri– Tizi-Ouzou, 2014.
- [15] Schneider Electric, "*Guide de l'Installation Électrique – Compensation d'énergie réactive*", Édition en ligne.
- [16] Catalogue, "*Compensation d'énergie réactive et maîtrise de la qualité des infrastructures électriques*", version internationale, Legrand, Alpes Technologies.
- [17] G. Gay, "*La compensation de l'énergie réactive*", Intersections, Le magasin Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel, N°16, 2006.
- [18] Éducol – Ministère de l'Éducation nationale, "*Présentation des moyens de compensation*", Édition en ligne :

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/343/343-4-les-compensateurs.pdf>

- [19] O. Boukada, M. A. D. Bendebbouze, "*Compensation d'énergie réactive par un compensateur statique*", Mémoire de Master, Université de Batna, 2023.
- [20] N. Acharya, A. Sode-Yome, N. Mithulanathan, "*Facts about Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Controllers: Practical Installations and Benefits*".
- [21] A. Talbi, A. Benoudjit, "*Les Systèmes FACTS*", Article, Magister, Université de Batna, 2010.
- [22] M. S. H. Lipu, T. F. Karim, "*Effectiveness of FACTS Controllers and HVDC Transmissions for Improving Power System Stability and Increasing Power Transmission Capability*", *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2013.
- [23] N. M. Agashe, R. D. Kulkarni, A. R. Thorat, "*Power Flow Study and Analysis using STATCOM*", *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2015.
- [24] ABB, "*Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*". ABB Power Technologies AB, 2004.
- [25] N. Mohan, T. A. Lipo, "*Unified Power Flow Controller*". In *Power Electronics Handbook*, 2018.
- [26] Vandana, S. N. Verma, "*Comparative Study of Different FACTS Devices*", *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2014.
- [27] Daniel Souque, Laurent Chatonnet, Étienne Monnot, "*Réglage de tension – Rôles, obligations et organisation du producteur pour les besoins du système électrique en France*", *Techniques de l'Ingénieur*, 2021.
- [28] Ay Abdelouahab, "*Modélisation et Analyse d'Un Compensateur Statique : SVC*", Mémoire de Magistère, Université EL Hadj Lakhdar – Batna, 2013.
- [29] T.U.Okeke, Georgious Zaher. R, "*Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*", University of Oviedo, Spain.
- [30] D.Bouguedad, K.Hadj Said, "*Étude comparative des différents moyens de compensation de l'énergie réactive*", Mémoire d'ingénieur d'État, Université Mouloud Mammeri – TIZI-OUZOU, 2010.
- [31] F. Beloucif, "*Limitation du coefficient de non sinusoidalité du courant et de la tension de la charge dans un nœud comprenant un compensateur statique à thyristors*", Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar – Annaba, 1997.
- [32] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "*Understanding FACTS; Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*", IEEE Press, 2000.