

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Commande Électrique
Domaine : Sciences et de Technologie
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Commande Électrique

Compensation de la puissance réactive dans les charges non-linéaires et aléatoires

Présenté Par :

❖ Melle ABLAOUI Ikram

❖ Melle HAMLET Rym

Devant le jury composé de :

Dr. ZEGAI Mohamed Lamine	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Président
Dr. ADJODJ Redouane	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. BERRACHED Djelloul	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Remerciement

À mon encadrant et aux membres du jury : Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, M.BERRACHED , pour son orientation, sa patience et ses précieux conseils. Mes remerciements s'adressent également aux honorables membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

À mes chers parents: À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leurs prières quotidiennes. Aucun mot ne saurait exprimer ma gratitude pour le soutien moral et financier que vous m'avez apporté. Ce travail est le fruit de votre dévouement.

À mes frères et sœurs : À mes frères et sœurs, Ilyes Wissem Omar romaissa et Imene , pour leur présence constante, leurs encouragements et leur affection. Merci d'avoir toujours été là pour moi.

À mes chers neveux et nièces : À mes adorables neveux et nièces, Djoury djawad Mohamed et chahd, pour la joie, le bonheur et les sourires qu'ils apportent à ma vie. Que ce travail soit pour vous une source d'inspiration.

À mes copines : À mes chères copines, Mouna Merieme Rym et Aida , pour les moments partagés, les fous rires et le soutien mutuel. Merci d'avoir rendu ce parcours si spécial.

À tous mes amis : Enfin, je remercie chaleureusement tous mes, ainsi que toutes les personnes présentes aujourd'hui pour partager avec moi ce moment

ABLAOUI Ikram

Dédicace

الى روح جدتي الغالية (رحمها الله) إلى روح جدتي العزيزة،
التي غادرت دنيانا وبقي أثرها العطر في قلوبنا ينبض. لقد
حزّ في النفس غيابها في هذا اليوم المشهود، وكان الرجاء أن
تكتمل فرحتنا بوجودها، لكنّ قضاء الله نافذ ولا رادّ لأمره.
ومن هذا المقام، أرفع إليكم رجاءً خالصاً بأن تشملوها بدعاءكم
الصديق بالرحمة والمغفرة والثبات

ABLAOUI Ikram

Liste des abréviations et des symboles

Abréviations

Abréviation	Signification
D.C.F.	Dispositif de Compensation et de Filtrage
F.A.A.	Four À Arc (à courant Alternatif)
P.A.A.	Four à arc — abréviation utilisée pour désigner le courant et la tension analysés du four (équivalent de F.A.A.)
HT	Haute Tension
THT	Très Haute Tension
MT	Moyenne Tension
SVC	Static Var Compensator (compensateur statique de puissance réactive)
TM	Transformateur (désignation de type, ex. TM 1600/10)

Symboles et notations

Symbole	Signification	Unité
P	Puissance active	kW
Q	Puissance réactive	kVAR
S	Puissance apparente	kVA
U	Tension instantanée / valeur efficace de la tension	V
U_o	Tension redressée (valeur moyenne)	V
U_m	Tension maximale (valeur de crête)	V
U₁	Tension composée / tension de l'onde fondamentale (primaire)	V
U₂	Tension secondaire du transformateur	V
Ū_{ph}	Valeur de crête de la tension simple (de phase) du réseau	V
I	Courant instantané / valeur efficace du courant	A
I_o	Courant redressé (valeur moyenne)	A
I_m	Courant maximal (valeur de crête)	A
I_{eff}	Courant efficace	A
I_s	Courant secondaire du transformateur	A
I_p	Courant primaire du transformateur	A
I_d	Courant de sortie continu (côté redressé)	A
I_c	Amplitude du courant du secondaire	A
I_L	Courant fondamental traversant l'inductance du compensateur	A
I₁, I₂, ..., I_k	Amplitudes des harmoniques de courant de rang 1, 2, ..., k	A

Symbole	Signification	Unité
φ, φ_1	Déphasage entre le courant et la tension (angle du facteur de puissance)	degré (°)
$\cos \varphi$	Facteur de puissance	—
$\operatorname{tg} \varphi$	Tangente de l'angle de déphasage φ	—
α_{ch}	Angle d'amorçage (de retard à l'allumage) de la charge	degré (°)
α_{comp}	Angle d'amorçage (de retard à l'allumage) du compensateur	degré (°)
θ_{ini}	Borne initiale d'intégration	degré (°)
θ_{lim}	Borne limite d'intégration	degré (°)
A, B (Ak, Bk)	Coefficients harmoniques du développement en série de Fourier	—
K	Facteur (coefficient) d'harmoniques global du courant	—
Kh	Coefficient d'harmoniques avant filtrage	—
K'h	Coefficient d'harmoniques après filtrage	—
Qnom	Puissance réactive nominale (valeur maximale de référence)	kVAR
Qch	Puissance réactive absorbée par la charge	kVAR
Qcomp	Puissance réactive fournie par le compensateur	kVAR
Qmax	Puissance réactive maximale	kVAR
Qc	Puissance réactive fournie par la batterie de condensateurs	kVAR
Qr	Énergie réactive fournie par la batterie pendant un temps donné	kVARh
Qcf	Puissance réactive emmagasinée par le filtre	kVAR
QR	Facteur de résonance du réseau	—
Qk	Facteur de résonance de la k-ième branche de filtre	—
L	Inductance	H
LR	Inductance du réseau	H
Lk	Inductance de la k-ième branche du filtre	H
C	Capacité	F
Ck	Capacité de la k-ième branche du filtre	F
R	Résistance	Ω
RR (Rr)	Résistance du réseau	Ω
Rk	Résistance de la k-ième branche du filtre	Ω
Rtr	Résistance équivalente du transformateur	Ω
Xl	Réactance de fuite du transformateur	Ω
ω	Pulsation (fréquence angulaire) du réseau	rad/s
ω_k	Pulsation de résonance de la k-ième branche du filtre	rad/s
f	Fréquence	Hz

Symbole	Signification	Unité
$f_k (f_n)$	Fréquence relative de réglage du k-ième (n-ième) filtre	—
$\rho_k (\rho_m)$	Résistance caractéristique de la k-ième branche du filtre	Ω
$1/Q_k$	Facteur de résonance (inverse) de la branche de filtre k	—
$\Delta\omega_k$	Bande passante (largeur de bande) de la k-ième branche du filtre	rad/s
Δf_n	Bande passante du spectre du courant à la fréquence de réglage du filtre n	Hz
γ_m	Coefficient d'affaiblissement de l'harmonique m	—
$\sigma_k(\omega)$	Facteur de désaccord relatif de la k-ième branche du filtre	—
$Y_{rc}(j\omega), Y_r(j\omega)$	Conductibilité (admittance) complexe du réseau	S
$Y_{f,cc}(j\omega), Y_{cf}(j\omega)$	Conductibilité (admittance) complexe du D.C.F.	S
S_n	Puissance apparente nominale du transformateur	kVA
$U_{cc}\%$	Tension de court-circuit du transformateur (en pourcentage)	%
$\Delta P_{cc}\%$	Pertes de puissance en court-circuit du transformateur	kW
$\Delta P_0\%$	Pertes à vide du transformateur	kW
I_0	Courant à vide du transformateur	A
m, n, k	Rang (numéro) de l'harmonique considérée	—
t	Temps	s
T	Période du signal	s
T_r	Intervalle (durée) de réalisation de la mesure	s
τ	Constante de temps de l'intégrateur	s
τ_k	Intervalle de corrélation du processus aléatoire	s
α (coefficient)	Coefficient d'amortissement de corrélation	—
δ	Erreur statistique relative de la mesure	—
σ_x	Erreur quadratique moyenne du processus aléatoire	—
ex	Espérance mathématique du processus aléatoire	—
θ (durée normalisée)	Durée d'intégration normalisée par rapport à l'intervalle de corrélation	—
$E^*[x(t)]$	Estimateur de l'espérance mathématique du processus $x(t)$	—
$\bar{U}_n, \bar{I}_n$	Espérance mathématique de la n-ième harmonique de tension / de courant	V, A

Table des matières

REMERCIEMENT	
DEDICACE.....	
LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES	4
ABREVIATIONS.....	5
SYMBOLES ET NOTATIONS.....	5
INTRODUCTION GENERALE :	1
 <i>Chapitre I Compensation de la puissance réactive et moyens de compensation.</i>	
INTRODUCTION :	3
I.1 PROBLEMES GENERAUX DE COMPENSATION DE PUISSANCE REACTIVE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE:	3
I.2 COMPENSATION DANS LES RESEAUX LINEAIRES A CHARGE DETERMINEE :	3
I.2.1 Batteries de condensateurs:.....	4
I.2.2 À l'aide des machines synchrones :	6
I.3 MOYENS DE COMPENSATION DANS LES CHARGES NON LINEAIRES :	6
I.4 MOYENS DE COMPENSATION DANS LES CHARGES ALEATOIRES :	8
CONCLUSION :	9
 <i>Chapitre II Calcul des caracteristiques de reseau electrique avec la charge non-lineaire</i>	
II.1 LES PARTICULARITES DE LA CHARGE NON-LINEAIRE :	11
II.2 CALCUL DES COURANTS, DES TENSIONS ET DES CARACTERISTIQUES ENERGETIQUES DU RESEAU AVEC LA CHARGE :	11
II.3 OBTENTION DU SPECTRE DU COURANT DU RESEAU :	22
II.3.1 Calcul des dépendances suivantes :	22
II.3.2 Facteur de puissance :	23
II.3.3 Calcul des coefficients d'harmoniques :	27
CONCLUSION :	39
 <i>Chapitre III : Calcul du compensateur statique sur la base de thyristors pour la charge non linéaire</i>	
III.1. LES PARTICULARITES DE FONCTIONNEMENT DU COMPENSATEUR STATIQUE :	41
III.1.1. Réalisations des conditions où la puissance est constante. :	41
III.1.2. Choix de couplage de transformateur :	42
III.1.3. Principe de fonctionnement :	43
III.1.4. Application des variateurs de courant alternatif :	45
III.1.5. Calcul des dépendances de puissances réactive du compensateurs de puissance en fonction d'angle d'amorçage de la charge :	45
III.2. CALCUL DES COURANTS ET DES CARACTERISTIQUES REGLEES DU COMPENSATEUR :	47
III.3. OBTENTION DE LA LOI DE REGULATION PAR LE COMPENSATEUR STATIQUE :	50
CONCLUSION :	53
 <i>Chapitre IV : Calcul des paramètres du filtre pour la charge non linéaire</i>	
IV.1. LES QUESTIONS THEORIQUES DU CALCUL DU FILTRE POUR LES RESEAUX ELECTRIQUES :	55
IV.2. CALCUL DES PARAMETRES DU FILTRES :	58
IV.2.1. Utilisation des spectres du courant pour le choix du nombre de filtre :	58
IV.2.2. Détermination du facteur de résonance : [12]	58
IV.2.3. Détermination du facteur d'harmonique :	58
IV.2.4. Le choix des coefficients d'affaiblissement des harmoniques (le niveau d'affaiblissement des harmoniques) :	59
IV.2.5. Calcul de la résistance caractéristique :	59
IV.2.5. Calcul des paramètres des chaines du filtres :- Calcul d'inductance du filtre :	61

IV.3. LE SCHEMA PRINCIPAL D'INSTALLATION :	63
CONCLUSION :	66
 <i>Chapitre V : Calcul d'installation de filtre compensateur pour le réseau avec la charge aléatoire</i>	
V.1. LES PARTICULARITES DE LA CHARGE ALEATOIRE CHOISI :	68
V.2. LES MOYENS D'OBTENTION DES CARACTERISTIQUES DU RESEAU AVEC LA CHARGE :	68
V.2.1 - Les méthodes d'obtention des caractéristiques expérimentales :	68
V.2.2. L'analyse spectrale sur la base d'utilisation de la méthode de filtrage de l'action série :	69
V.4. CALCUL ET CHOIX DES PARAMETRES DU FILTRE :	81
V.4.1. La théorie de calcul des filtres pour la charge aléatoire :	81
CONCLUSION :	84
CONCLUSION GENERALE :	86
REFERENCES	88
RÉSUMÉ :	91

Liste des figures

N°	Intitulé	Chapitre	Page
Fig. I.1	(a) Schéma de branchement b) diagramme vectoriel	I	4
Fig. I.2	Impact du compensateur statique sur la puissance réactive.	I	7
Fig. II.1	Courbes instantanées de la tension redressée pour différents angles d'amorçage	II	13
Fig. II.2	Formes d'onde du courant de sortie continu (I_d) et du courant de phase (I_p)	II	16
Fig. II.3	Variation de la puissance apparente S en fonction de l'angle d'amorçage α_{ch}	II	23
Fig. II.4	Variation de la puissance réactive Q en fonction de l'angle d'amorçage α_{ch}	II	24
Fig. II.5	Variation de la puissance apparente S en fonction de l'angle d'amorçage α	II	24
Fig. II.6	Rendement du facteur de puissance	II	26
Fig. II.7	Variation du facteur de puissance en fonction de l'angle d'amorçage α_{ch} $\cos(\varphi) = f(\alpha_{ch})$	II	28
Fig. II.8	Spectres du courant ($\alpha_{ch} = 0^\circ$) ($\alpha_{ch} = 15^\circ$)	II	31
Fig. II.9	Spectres du courant ($\alpha_{ch} = 30^\circ$) ($\alpha_{ch} = 45^\circ$)	II	32
Fig. II.10	Spectres du courant ($\alpha_{ch} = 60^\circ$) ($\alpha_{ch} = 0^\circ$)	II	33
Fig. II.11	Spectres du courant ($\alpha_{ch} = 135^\circ$)	II	34
Fig. III.1	Montage étoile symétrique avec neutre	III	42
Fig. III.2	Montage étoile symétrique sans neutre	III	42
Fig. III.3	Allures temporelles des courants et des tensions pour une charge inductive ($\alpha = 105^\circ$)	III	44
Fig. III.4	Variation de la puissance réactive de compensation Q_{comp} en fonction de l'angle de commande α_{ch}	III	46
Fig. III.5	Caractéristiques de commande d'un variateur de courant triphasé	III	47
Fig. III.6	Déphasage φ_1 de l'onde fondamentale du courant	III	48
Fig. III.7	$Q_{comp} = f(\alpha_{comp})$	III	50
Fig. III.8	$\alpha_{comp} = f(\alpha_{ch})$	III	52
Fig. IV.1	Schéma d'installation principale	IV	65

N°	Intitulé	Chapitre	Page
Fig. V.1	Schéma-bloc de l'analyse spectrale des signaux du courant et de la tension du P.A.A.	V	70
Fig. V.2	Réistrogramme des harmoniques du courant à côté de 35 KV — Fusion N°1 (harmoniques 1÷4)	V	71
Fig. V.3	Réistrogramme des harmoniques du courant à côté de 35 KV Fusion N°2 (harmoniques 5÷9)	V	72
Fig. V.4	Schéma et principe du filtre D.C.F.	V	75
Fig. V.5	a)Caractéristiques fréquentielles d'après la conductibilité du D.C.F.b) spectre statistique du courant	V	78
Fig. V.6	Zone de filtration	V	79
Fig. V.7	Module de la conductibilité complexe du D.C.F	V	80
Fig V.8	Module de la conductibilité complexe du réseau	V	80
Fig. V.9	Détermination du coefficient de résonance des filtres d'après les tronçons du spectre	V	82

Liste des tableaux

N°	Intitulé	Chapitre	Page
Tab. II.01	Variation du courant moyen redressé I_o en fonction de l'angle d'amorçage α_{ch}	II	15
Tab. II.2	Les bornes d'intégration en fonction de α_{ch}	II	16
Tab. II.3	Amplitudes des harmoniques du courant en fonction de l'angle d'amorçage α	II	17
Tab. II.4	Valeurs des coefficients harmoniques A et B en fonction de l'angle d'amorçage α	II	18
Tab. II.5	Evolution du facteur d'harmoniques K en fonction de l'angle d'amorçage (α_{ch})	II	29
Tab. II.6	Spectre harmonique du courant en fonction de (α_{ch})	II	30
Tab. II.6	Valeurs de la puissance réactive Q en fonction de l'angle de commande α_{ch}	II	42
Tab. II.7	Variation du courant efficace côté primaire $I_{\{eff\}}$ en fonction de l'angle de commande (α_{ch}) après l'insertion de la compensation.	II	36
Tab. II.8	Valeurs de la puissance active P en fonction de l'angle de commande (α_{ch})	II	37
Tab. II.9	Valeurs de la puissance réactive Q en fonction de l'angle de commande (α_{ch}) obtenues après compensation	II	37
Tab. II.10	Calcul des puissances apparentes	II	38

N°	Intitulé	Chapitre	Page
Tab. III.1	Calcul de la puissance réactive de compensation Q_{comp} en fonction de l'angle d'amorçage α_{ch}	III	47
Tab. III.2	Évolution de la valeur efficace du courant en fonction de l'angle de retard à l'allumage α_{comp}	III	49
Tab. III.3	Calcul de la puissance réactive compensée Q_{comp} en fonction de l'angle α	III	50
Tab. III.4	Synthèse des résultats des courants efficaces et des puissances réactives compensées	III	50
Tab. III.5	Synthèse des caractéristiques de commande du compensateur	III	51
Tab. IV.1	Variation du coefficient K_h en fonction de l'angle α (avant le filtrage)	IV	59
Tab. IV.2	Variation du coefficient $K'h$ en fonction de l'angle α (après le filtrage)	IV	59
Tab. IV.3	Calcul des résistances des filtres	IV	62
Tab. V.1	Conception et dimensionnement d'un D.C.F.	V	77
Tab. V.2	Optimisation des paramètres du D.C.F.	V	81
Tab. V.3	Valeurs du facteur de résonance qn en fonction du rang harmonique n	V	83

Introduction Générale

Introduction Générale :

Dans un contexte économique mondial marqué par la hausse constante des coûts de production, l'optimisation de l'efficacité énergétique est devenue un impératif majeur pour les industries, notamment dans le secteur de la métallurgie. Face aux fluctuations complexes de la puissance réactive, les solutions conventionnelles se révèlent souvent insuffisantes, rendant la gestion de la grande variation de puissance un enjeu crucial pour la performance économique industrielle. Le présent travail, intitulé « Compensation de la puissance réactive dans les réseaux électriques avec les charges non-linéaires et aléatoires », s'inscrit dans cette dynamique en se consacrant à l'étude et à la conception de méthodes avancées de compensation des pertes d'énergie. Notre approche repose sur une analyse comparative rigoureuse, incluant la détermination précise des lois de réglage pour une conduite optimale de la puissance du réseau, tout en effectuant une évaluation des erreurs mathématiques, instrumentales et statistiques. Afin de structurer notre démarche, ce mémoire est articulé autour de cinq chapitres :

- **Le Chapitre I :** Compensation de la puissance réactive et les moyens de compensation.
- **Le Chapitre II :** Calcul des caractéristiques du réseau électrique avec la charge non-linéaire.
- **Le Chapitre III :** Calcul du compensateur statique sur la base de thyristors pour la charge non-linéaire.
- **Le Chapitre IV :** Calcul des paramètres du filtre pour la charge non-linéaire.
- **Le Chapitre V :** Calcul de l'installation du filtre-compensateur pour le réseau avec la charge aléatoire.

Cette étude démontre, à travers l'analyse des résultats numériques et des variantes de conception, que l'ajustement rigoureux des caractéristiques techniques permet de réduire significativement la distorsion de la tension, garantissant ainsi une meilleure qualité de l'onde et une stabilité accrue du réseau, tout en minimisant les coûts de réalisation et de disponibilité des éléments.

Chapitre I :

Compensation de la puissance réactive et moyens de compensation.

Introduction :

L'énergie électrique est distribuée aux utilisateurs principalement sous forme de courant alternatif. Dans une installation, cette énergie se divise en deux parties distinctes : la puissance active et la puissance réactive.

La puissance active est celle qui est transformée en travail utile, comme le mouvement d'un moteur ou la production de chaleur.

En revanche, la puissance réactive est nécessaire pour créer les champs magnétiques indispensables au fonctionnement des machines électriques. Même si la puissance réactive ne produit pas de travail direct, elle reste une contrainte technique qu'on ne peut pas ignorer. Une circulation excessive de cette énergie sur le réseau augmente les pertes et surcharge les équipements.

C'est pour cette raison que la compensation de l'énergie réactive est indispensable pour améliorer le rendement et stabiliser la tension du réseau.

Dans ce premier chapitre, nous allons définir les notions de base de l'énergie électrique. Ensuite, nous étudierons les moyens classiques utilisés pour corriger le facteur de puissance, en mettant l'accent sur les batteries de condensateurs et les compensateurs synchrones.

I.1 Problèmes généraux de compensation de puissance réactive dans le réseau électrique:

Les fluctuations de puissance réactive absorbée par certains appareils provoquent des fluctuations de tension qui peuvent être gênantes pour les usagers et pour pallier ces inconvénients, ils existent plusieurs moyens de compenser l'énergie réactive dans les installations industrielles. Pour l'adaptation offre-demande de l'énergie réactive, l'analyse des variations de la demande réactive vue des réseaux de transport, montre que l'adaptation offre-demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi de matériels aux caractéristiques très différentes. Le premier consiste à suivre les fluctuations périodiques. Celles-ci sont tout au moins pour les charges, dans une large mesure prévisible, une grande partie de l'ajustement peut donc être réalisée à l'aide de moyens dont l'action est discontinue et le temps de réponse relativement long (quelques secondes à quelques minutes), cette catégorie de matériels comprend les batteries condensateurs et les inductances installées sur le réseau. Le second consiste à faire face aux variations brusque et aléatoires et à réaliser l'ajustement fin de l'équilibre offre-demande. Cela nécessite la mise en œuvre de moyens dont le temps de réponse est très court (de l'ordre de quelques dixièmes de secondes); entrent dans cette catégorie, les groupes de production ainsi que les compensateurs synchrones et les compensateurs statiques développés récemment . [1]

I.2 Compensation dans les réseaux linéaires à charge déterminée :

Dans le réseau linéaire ou la charge est bien déterminée, la compensation de l'énergie réactive se fait par deux méthodes principales à savoir :

- Batteries de condensateurs
- Machines synchrones [1]

I.2.1 Batteries de condensateurs:

Ce sont actuellement le moyen le plus économique et le plus simple de production de l'énergie réactive, dans les installations industrielles aussi bien dans le réseau public. Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges ou le réseau. On distingue deux types de matériels : Des batteries de condensateurs HT: Raccordées au jeu de barres HT des postes THT/HT; elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur le réseau HT et THT, même si un certain nombre d'entre elles participent également à la compensation des charges; leur puissances est de 20 à 30Mvar; elles représentent environ 20% du parc de condensateurs installés ; Des batteries de condensateurs MT: Raccordés aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT; Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport; elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension de la MT ; Sur le plan technique, les batteries sont fractionnées en gradins de 2,4 ou 3 Mvar selon la puissance des transformateurs HT/MT, chaque gradin pouvant être commandé séparément; la taille des gradins a été déterminé afin de limiter à 50% la variation de tension maximale sur le jeu de barres MT au moment de la manœuvre d'un gradin .

Algorithme de calcul du batterie:

Pour bien comprendre le problème de compensation de l'énergie réactive pour les charges linéaires, on a procédé à un exemple concret qui illustre ce phénomène de compensation [1]

(fig. 1.1).

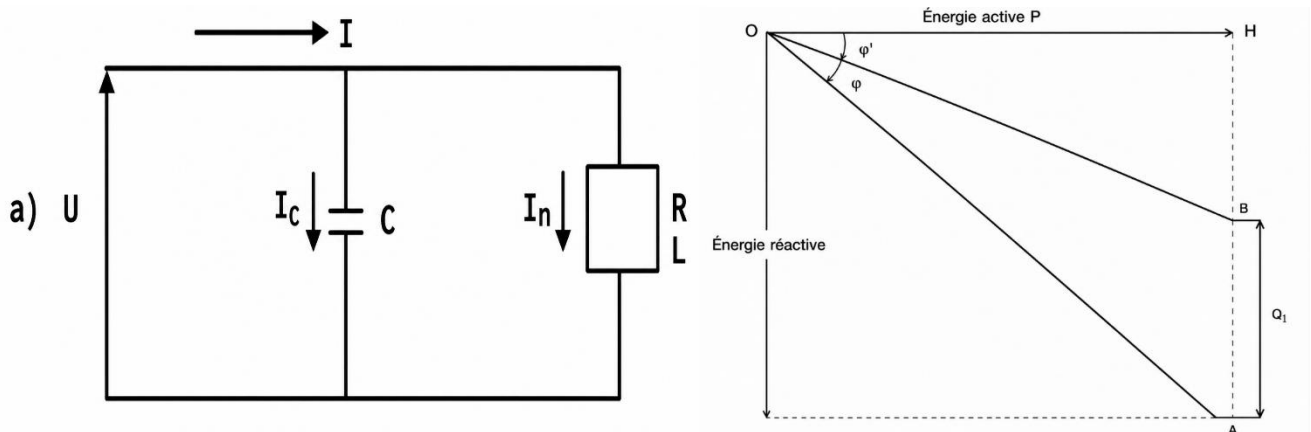


fig. (I.1). (a) Schéma de branchement

b) diagramme vectoriel

Pour compenser l'énergie réactive et améliorer le facteur de puissance de la charge linéaire on a installé une batterie de condensateurs qui doit être bien choisi pour obtenir une diminution de l'angle de déphasage entre la tension et le courant total, les puissances actives et réactives absorbées par les branches comportant l'inductance restant inchangées, ce procédé largement utilisé est appelé compensateur du déphasage ou compensation de facteur de puissance. Pour des raisons économique il n'est pas avantageux de réduire l'angle ϕ jusqu'à zéro, et il convient d'avoir un coefficient = 0,9 à 0,95 pour bien choisir la batterie de condensateur. examinons le schéma de branchement et construction de diagramme vectoriel, (voir Fig .A et .B).

Pour bien utiliser ces batteries de condensateurs, il faut prendre certaines mesures pour le bon fonctionnement de ces batteries.

Du côté tension; Il faut que celle-ci soit bien ajustée à celles du réseau si la tension U_{eff} du réseau est plus faible que celle du fonctionnement normal de la batterie, la puissance réactive $C\omega U_{eff}^2$ quelle fournit est diminuée. Si U_{eff} est très grande la batterie s'échauffe dangereusement.

Du côté de la mise sous tension; Il faut éviter les surintensités à la mise sous tension.

Du côté de l'installation à vide; Il faut éviter que la batterie soit sous tension (machines débranchées) parce que le courant est purement capacitif débité à ce moment là par le transformateur détermine une évaluation de la tension secondaire. Par ailleurs si la batterie est à l'extrémité d'une longue ligne, le circuit oscillant formé peut se mettre en résonance sur une harmonique de la tension alternative.

Les batteries de condensateur présentent les avantages de tous les équipements statiques.

- L'absence d'usure mécanique.
- Un entretien réduit.
- L'absence des parties tournantes.
- Un faible volume et une installation facile.

Par contre les batteries de condensateurs comportent certaines limitation.

- La puissance réactive varie la tension d'alimentation
- La puissance réactive n'est pas réglable simplement.
- La mise sous tension provoque un violent appel du courant.

Il faut diminuer l'angle de déphasage entre la tension U et le courant total jusqu'à φ_1 .

$$OC = I_1 \cos \varphi_1 + OA \cos \varphi_1 \quad (1.1)$$

$$P = UI_1 \cos \varphi_1 \quad (1.2)$$

$$OC = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{P}{U} \quad (1.3)$$

Des triangles OAC et OBC, on tire :

$$AC = OC \operatorname{tg} \varphi_1 \quad (1.4)$$

$$BC = OC \operatorname{tg} \varphi \quad (1.5)$$

En partant du diagramme, on obtient :

$$AB = OD = AC - BC = OC \operatorname{tg} \varphi_1 - OC \operatorname{tg} \varphi = OC (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) \quad (1.6)$$

Puisque :

$$OC = \frac{P}{U} \quad \text{et} \quad AB = I_c \quad \text{on a :} \quad I_c = \frac{P}{U} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) \quad \text{Or a} \quad I_c = UC\omega \quad (1.7)$$

Donc :

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) \quad (1.8)$$

I.2.2 À l'aide des machines synchrones :

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui peuvent fournir ou absorber de la puissance réactive sans mettre en jeu de puissance active (aux pertes internes près) comme pour les groupes thermiques. La fourniture de la puissance réactive est limitée par l'échauffement des enroulements et l'absorption par des problèmes de stabilité statique

Ces appareils ont les possibilités variants entre 20 et 60 Mvar en fournitures, 10 et 30 Mvar en absorption, et sont les plus souvent branchés sur le tertiaire du transformateur THT/HT toutefois, en raison de leur coût élevé tout en investissements qu'en exploitation. On n'installe plus de compensateurs synchrones sur la plupart des réseaux malgré leur mérite. [1]

I.3 Moyens de compensation dans les charges non linéaires :

En qualité d'installation avec la charge non linéaire, on choisi le schéma d'alimentation d'un four de graphite. Ces fours sont utilisés dans la métallurgie non ferreuse et pour produire des différentes matériaux.

Le principe de fonctionnement est basé sur l'échauffement et l'électrolyse. C'est pourquoi il nécessite d'alimenter ces fours à l'aide du courant continu. Selon la technologie il faut changer la tension d'alimentation, en outre le régime du four est irrégulier.

Pendant un cycle de travail la charge non-linéaire varie pendant une période ou plusieurs ce qui nous donne une consommation de puissance réactive variable.

Pour les grandes puissances l'utilisation des batteries de condensateurs est délaissée à cause de leurs emplois les réduit généralement les batteries de condensateurs fournissent une varie pendant une période ou plusieurs ce qui nous donne une consommation de puissance réactive variable.

Pour les grandes puissances l'utilisation des batteries de condensateurs est délaissée à cause de leurs emplois les réduit généralement les batteries de condensateurs fournissent une énergie réactive constante.

C'est pourquoi on est obligé d'utiliser une technologie nouvelle qui prend en considération le type de la charge.

Le distributeur de l'énergie réactive incite l'utilisateur à faire en sorte que sa consommation soit aussi constante que possible et le facteur de puissance soit proche de l'unité en vue de rentabiliser les investissements en matériels de production de transport et de distribution pour cela on utilise les compensateurs statiques fabriqués par des dispositifs semi-conducteurs.

Les compensateurs statiques améliorent la rentabilité de la puissance réactive et de la tension, mais il ne peut pas remplir efficacement son office que lorsque son dimensionnement est correctement calculé selon la fonction attribuée que le choix entre la compensation équilibrée ou phasée par phase a été correctement déterminé et surtout que la vitesse de réponse de la révélation est adoptée au vrai problème. En contrepartie ils existent certaines contraintes (consommation d'énergie réactive, création d'harmoniques liés à leurs principes) ces dispositifs sont connus sous le nom de stato-compensateur ou absorbeur d'énergie réactive. L'ensemble du circuit est connecté en dérivation sur le réseau à compenser. Le gradateur G permet de régler la valeur efficace du courant fondamental I_L , traversant l'inductance L donc la puissance réactive consommée par cette dernière soit Q_L si $(Q_c - Q_L)$ est égale à la sommation de puissance réactive du réseau, la compensation obtenue sera parfaite. L'intérêt d'un tel compensateur est considérable et réside essentiellement dans sa rapidité de réponse. En effet on ne disposait jusqu'ici que des compensateurs synchrones et des batteries de condensateurs. Ces compensateurs statiques sont constitués d'ensemble de condensateurs et d'inductances commandés par thyristors ceux-ci sont montés en tête bêche. Les compensateurs statiques ont de bonnes performances dynamiques (temps de réponse de quelques dixièmes de secondes) ils peuvent donc être utilisés pour le réglage de la tension, en particulier dans les zones éloignées des centres de production. Enfin ils peuvent contribuer à améliorer la stabilité du réseau un compensateur statique d'énergie réactive n'est utilisé que dans deux cas particuliers.

Lorsqu'il est indispensable d'agir très rapidement par exemple, celles produites par les fours à arc dans un réseau d'interconnexion, lorsqu'il est nécessaire d'effectuer une régulation de tension dans ce réseau, on ajustent les transites de puissances réactives n'est pas constant et il peut varier à des instants différentes. Le compensateur synchrone fournit une certaine puissance réactive et réalise donc la compensation. [1]

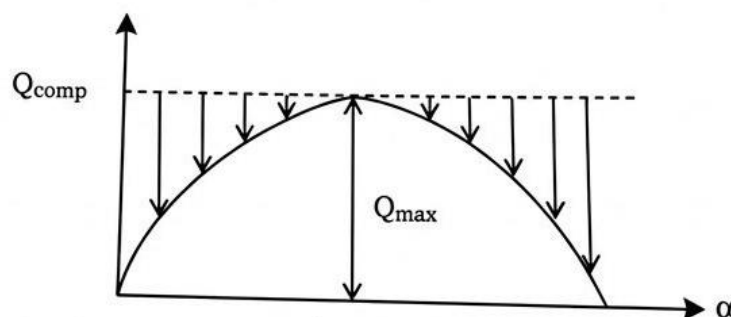


Figure (I.2) Impact du compensateur statique sur la puissance réactive.

Le compensateur statique a pour rôle de soutenir la puissance réactive et la rendre constante (fig. 1.2).

I.4 Moyens de compensation dans les charges aléatoires :

En ce qui concerne le régime de la charge aléatoire, il existe plusieurs types de cette charge; On considère la charge de four de fer, son régime est un régime aléatoire, parce que pendant le cycle de travail, le courant de four change plusieurs fois, dont il est difficile de trouver la loi mathématique pour le four, c'est pourquoi qu'il faut se baser sur des caractéristiques expérimentales. On partage le cycle de travail en plusieurs parties et on suppose que chaque partie le régime n'est pas aléatoire, il est presque constant.

On suppose un schéma pour faire des mesures dans l'installation de four, et à l'aide de ce schéma, on obtient plusieurs oscillogrammes de tension et de courant pour chaque partie choisie; Cela signifie qu'on peut supposer que le four peut être présenté comme la somme des courants et ensuite nous pouvons examiner les oscillogrammes obtenus des courants et des tensions. En ayant ces courbes nous pouvons déterminer le spectre de courant et de tension en utilisant l'analyseur électronique de spectre, et pour chaque oscillogramme on obtient les composantes harmoniques d'ordre supérieur. En ayant ces registrâmes, nous pouvons obtenir le spectre des signaux; Pour détermination de spectre de courants, on peut utiliser un autre schéma qui nous permet d'obtenir le spectre des courants automatiquement, et après cela on construit le spectre de signaux en détail et en ayant cette courbe, on peut calculer les paramètres du filtre.

[1]

Conclusion :

En conclusion, ce premier chapitre nous a permis de comprendre les notions de base sur la qualité de l'énergie électrique et les perturbations dans le réseau. Nous avons vu que les équipements modernes (charges non-linéaires) provoquent des déformations dans le courant et la tension. Les méthodes de compensation classiques ne sont plus suffisantes pour régler ce problème. C'est pourquoi il est nécessaire de chercher des solutions plus modernes et dynamiques, ce que nous allons étudier dans les chapitres suivants.

**CHAPITRE II : CALCUL
DES CARACTERISTIQUES
DE RESEAU
ELECTRIQUE AVEC LA
CHARGE NON-LINEAIRE**

II.1 Les particularités de la charge non-linéaire :

Dans le cas d'une charge linéaire où la charge est bien déterminée, la compensation de l'énergie réactive se fait actuellement par des moyens plus économiques et simples pour la reproduction de l'énergie réactive dans les installations industrielles ainsi bien dans le réseau public avec les condensateurs qui ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges ou le réseau, ou avec des machines synchrones qui sont des machines tournantes qui peuvent fournir ou absorber de l'énergie réactive qui est limitée par l'échauffement des enroulements et par des problèmes de stabilité statique.

Tandis que la charge non-linéaire, son régime de fonctionnement est irrégulier, pendant un cycle de travail la charge non-linéaire varie pendant une période ou plusieurs ce qui nous donne une consommation de puissance réactive variable.

C'est pour cela on est obligé de faire l'étude des courants et des tensions et les caractéristiques énergétiques du réseau avec la charge, et d'après cela on peut expliquer les moyens et les méthodes utilisés pour le calcul de la puissance réactive de compensation. Ensuite il faut trouver la dépendance entre l'angle d'amorçage de la charge et du compensateur pour obtenir la loi de régulation.

II.2 Calcul des courants, des tensions et des caractéristiques énergétiques du réseau avec la charge :

Pendant le fonctionnement du redresseur chargé, les valeurs des courants et tensions changent, c'est-à-dire la puissance active et réactive change aussi; cela signifie que le redresseur influe sur le réseau.

Pour le calcul des valeurs du courant du réseau, il faut prendre en considération les dépendances suivantes : [2]

- $U_o = f(\alpha_{ch})$ (2.1)

- $I_o = f_2(\alpha_{ch})$ (2.2)

- $I_{eff} = f_2(\alpha_{ch})$ (2.3)

Où :

- U_o = tension redressée.
- I_o = courant redressé.
- I_{eff} = courant efficace.
- α_{ch} = angle d'amorçage de la charge.

Examinons la fig. (2.1) :

On a présenté les courbes instantanées pour des angles arbitraires. On détermine U_o : tension continue aux bornes de la charge.

U_o est calculé par cette formule :

$$U_o = \frac{1}{T} \int U(t) dt \quad (2.4)$$

(Calcul de la valeur moyenne)

$$U_o = \frac{1}{T} \int U(t) dt \quad (2.5)$$

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.6)$$

On pose $\varphi = 0$

$$U_o = \frac{3}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} U_m \sin \psi d\psi = \frac{3}{2\pi} \int_{\theta_{lim}}^{2\pi} U_m \sin \psi d\psi \quad (2.7)$$

θ_{ini} = borne initiale

θ_{lim} = borne limite

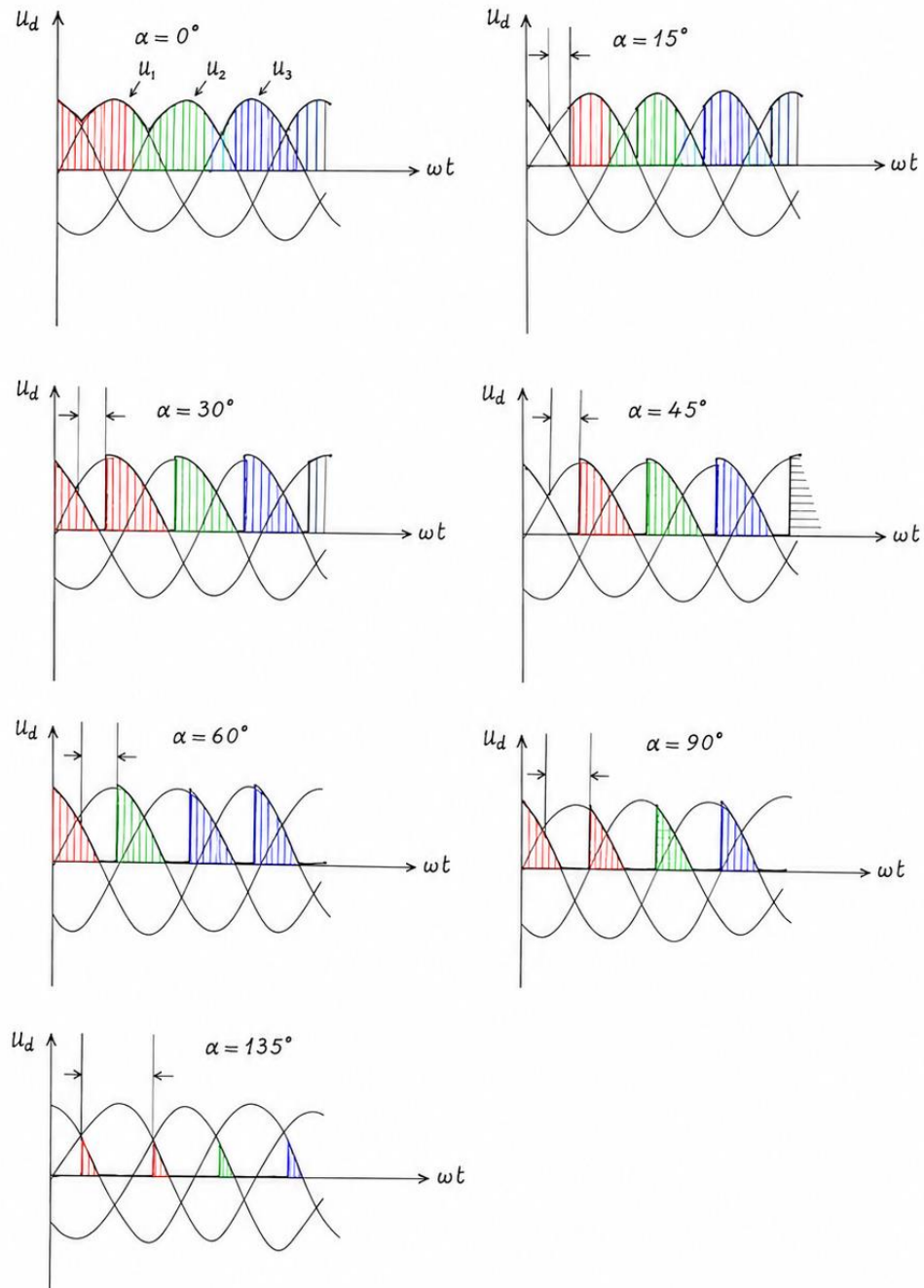


Fig. (II .1) Courbes instantanées de la tension redressée pour différents angles d'amorçage

Pour toutes les gammes des angles d'amorçage on a :

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$

$$\begin{aligned}\theta_{ini} &= 30^\circ \\ \theta_{lim} &= 180^\circ\end{aligned}$$

Pour $\alpha_{ch} = 15^\circ$

$$\begin{aligned}\theta_{ini} &= 45^\circ \\ \theta_{lim} &= 180^\circ\end{aligned}$$

Pour $\alpha_{ch} = 30^\circ$

$$\begin{aligned}\theta_{ini} &= 60^\circ \\ \theta_{lim} &= 180^\circ\end{aligned}$$

Pour $\alpha_{ch} = 45^\circ$

$$\begin{aligned}\theta_{ini} &= 75^\circ \\ \theta_{lim} &= 180^\circ\end{aligned}$$

Pour $\alpha_{ch} = 60^\circ$

$$\begin{aligned}\theta_{ini} &= 90^\circ \\ \theta_{lim} &= 180^\circ\end{aligned}$$

Pour $\alpha_{ch} = 90^\circ$

$$\begin{aligned}\theta_{ini} &= 120^\circ \\ \theta_{lim} &= 180^\circ\end{aligned}$$

Pour $\alpha_{ch} = 135^\circ$

$$\begin{aligned}\theta_{ini} &= 150^\circ \\ \theta_{lim} &= 180^\circ\end{aligned}$$

$$U_o = \frac{3}{2\pi} \int_{30^\circ}^{180^\circ} U_m \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.8)$$

$$U_o = 0,89 U_m \quad \text{avec} \quad U_m \text{ tension max}$$

Pour différents angles d'amorçage :

- $\alpha_{ch} = 15^\circ \Rightarrow U_o = 0,81 U_m$
- $\alpha_{ch} = 30^\circ \Rightarrow U_o = 0,71 U_m$
- $\alpha_{ch} = 45^\circ \Rightarrow U_o = 0,60 U_m$
- $\alpha_{ch} = 60^\circ \Rightarrow U_o = 0,47 U_m$
- $\alpha_{ch} = 90^\circ \Rightarrow U_o = 0,23 U_m$
- $\alpha_{ch} = 135^\circ \Rightarrow U_o = 0,016 U_m$

Et pour $I_o = f(\alpha_{ch})$, le courant redressé qui traverse la charge, le procédé de calcul reste le même que pour la charge ohmique : la courbe du courant répète la courbe de la tension.

Tableau (II.1): Variation du courant moyen redressé I_o en fonction de l'angle d'amorçage α_{ch}

α_{ch}	0°	15°	30°	60°	90°	135°
I_o	$0,89I_m$	$0,81I_m$	$0,71I_m$	$0,60I_m$	$0,47I_m$	$0,016I_m$

Commentaire :

On a obtenu les dépendances relatives en fonction de I_o et U_m ; pour les autres caractéristiques, la procédure est la même.

On remarque qu'avec l'augmentation d'angle d'amorçage, le courant et la tension diminuent progressivement pour atteindre les valeurs négatives.

Pour le calcul $I_{eff} = f(\alpha_{ch})$:

On décompose le courant primaire du transformateur en série de Fourier pour déterminer toutes les harmoniques supérieures : [2]

$$I_s = I_{ao} + I_n \sin \sum (\omega t + \varphi) \quad (2.9)$$

I_s = le courant secondaire du transformateur.

I_{ao} = la valeur continue du courant I_o .

$\sum I_n \sin(\omega t + \varphi)$ = les harmoniques du courant I_s .

$I_{ao} = \frac{1}{3} I_d$ (pour notre couplage considéré)

Le courant primaire :

$$I_p = \frac{I_s - (1/3) I_d}{K} \quad (2.10)$$

K : rapport de transformation supposé égal à 1 (pour simplifier le processus de calcul).

$$I_p = \frac{I_{ao} + A_1 \sin(\omega t) + B_1 \cos(\omega t) + A_2 \sin(\omega t) + B_2 \cos(\omega t) + \dots - (1/3) I_d}{K=1} \quad (2.11)$$

Donc $I_p = I_s$ (voir fig. 2.2).

Pour calculer les coefficients d'harmoniques, faisons des intégrales.

Les limites de ces intégrales :

Tableau (II.2) : Les bornes d'intégration en fonction de α_{ch}

α_{ch}	0°	15°	30°	45°	60°	90°	135°
bornes d'intervalle	30° – 150°	45° – 165°	60° – 180°	75° – 180°	90° – 180°	120° – 180°	150° – 180°

Les résultats seront présentés sur les tableaux suivants :

- **Tableau 1** : représente les coefficients A et B en fonction de α_{ch} .
- **Tableau 2** : représente les amplitudes des courants.

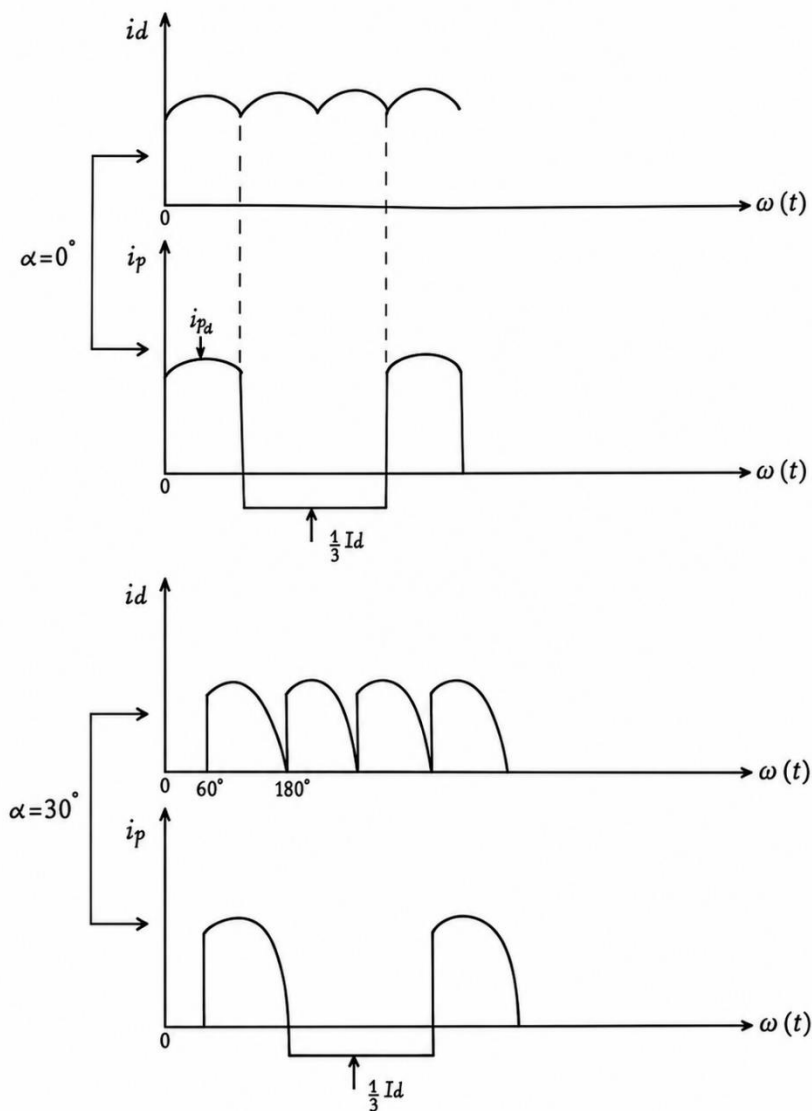


Fig. (II.2) — Formes d'onde du courant de sortie continu (I_d) et du courant de phase (I_p)

TABLEAU (II.3) Amplitudes des harmoniques du courant en fonction de l'angle d'amorçage (α)

$\alpha(t)$	$\sqrt{A_1^2 + B_1^2}$	$\sqrt{A_2^2 + B_2^2}$	$\sqrt{A_3^2 + B_3^2}$	$\sqrt{A_4^2 + B_4^2}$	$\sqrt{A_5^2 + B_5^2}$	$\sqrt{A_6^2 + B_6^2}$	$\sqrt{A_7^2 + B_7^2}$	$\sqrt{A_8^2 + B_8^2}$	$\sqrt{A_9^2 + B_9^2}$	$\sqrt{A_{10}^2 + B_{10}^2}$	$\sqrt{A_{11}^2 + B_{11}^2}$
0°	0,47 I_d	0,26 I_d	0,07 I_d	0,06 I_d	0,07 I_d	0,09 I_d	0,03 I_d	0,04 I_d	0,007 I_d	0,03 I_d	0,03 I_d
15°	0,457 I_d	0,276 I_d	0,065 I_d	0,055 I_d	0,068 I_d	0,028 I_d	0,033 I_d	0,039 I_d	0,016 I_d	0,024 I_d	0,027 I_d
30°	0,417 I_d	0,275 I_d	0,118 I_d	0,054 I_d	0,066 I_d	0,049 I_d	0,033 I_d	0,039 I_d	0,03 I_d	0,025 I_d	0,27 I_d
45°	0,36 I_d	0,26 I_d	0,128 I_d	0,063 I_d	0,061 I_d	0,062 I_d	0,043 I_d	0,034 I_d	0,036 I_d	0,032 I_d	0,025 I_d
60°	0,36 I_d	0,23 I_d	0,16 I_d	0,08 I_d	0,05 I_d	0,05 I_d	0,05 I_d	0,04 I_d	0,03 I_d	0,03 I_d	0,03 I_d
90°	0,154 I_d	0,139 I_d	0,116 I_d	0,093 I_d	0,068 I_d	0,065 I_d	0,034 I_d	0,03 I_d	0,031 I_d	0,03 I_d	0,027 I_d
135°	0,065 I_d	0,065 I_d	0,062 I_d	0,06 I_d	0,059 I_d	0,055 I_d	0,054 I_d	0,051 I_d	0,05 I_d	0,048 I_d	0,045 I_d

TABLEAU (II.4) Valeurs des coefficients harmoniques A et B en fonction de l'angle d'amorçage (α).

α_{ch}	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4	A5	B5	A6	B6	A7	B7	A8	B8	A9	B9	A10	B10	A11	B11
0°	0,45	0	0	0,28	0,07	0	0	0,06	-0,07	0	0	0,09	-0,03	0	0	0,04	0,04	0	0	0,03	0,03	0
15°	0,45	0,07	0,07	0,26	0,08	0,09	0,05	0,01	-0,03	0,06	0,02	0,02	0,017	0,03	0,04	-0,01	-0,01	0,02	0,01	-0,02	-0,02	
30°	0,40	0,12	0,14	0,24	0,10	0,06	0,03	0,05	0,03	0,06	0,05	0,01	0,02	-0,03	0,02	-0,03	-0,03	0,01	-0,01	0,02	0,04	0,02
45°	0,33	0,14	0,19	0,18	0,07	0,13	0,04	0,04	0,06	0,01	0	0,06	-0,04	0,003	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,008	-0,02
60°	0,33	0,16	0,21	0,11	0	0,16	0,08	0,02	0	0,05	0,05	0,01	0	0,05	0,04	0,005	0	0,03	-0,03	0,003	0,03	0,03
90°	0,09	0,12	0,14	0,03	0,10	0,06	0,03	0,09	-0,03	0,06	0,05	0,04	-0,02	-0,03	0,02	0,03	0,006	0,01	-0,03	-0,01	-0,01	0,02
135°	0,05	0,04	0,06	0,02	0,02	0,06	0,03	0,06	0,005	0,04	0,04	0,01	0,05	0,02	0,05	-0,02	-0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03

- Détermination des dépendances énergétiques $P_1 = f_1(\alpha_{ch})$; $Q_1 = f_1(\alpha_{ch})$; $S_1 = f(\alpha_{ch})$.
- Détermination de la puissance active à l'entrée du transformateur. [3]

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (2.12)$$

U_1 : la tension composée dans l'enroulement primaire.

I_1 : le courant de l'onde fondamentale.

$$P = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (2.13)$$

Choisissons la puissance active pour quelques valeurs de α_{ch} .

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$

$$P = \sqrt{3} 10000 \times 0,47 I_m \cos 0 = 8140 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 15^\circ$

$$P = \sqrt{3} 10000 \times 0,451 I_m \cos 8,67 = 7700 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 30^\circ$

$$P = \sqrt{3} 10000 \times 0,417 I_m \cos(-16,56) = 6923 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 45^\circ$

$$P = \sqrt{3} 10000 \times 0,35 I_m \cos 22,98 = 5740 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 60^\circ$

$$P = \sqrt{3} 10000 \times 0,361 I_m \cos 22,86 = 5604 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 90^\circ$

$$P = \sqrt{3} 10000 \times 0,1541 I_m \cos 50,52 = 1695 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 135^\circ$

$$P = \sqrt{3} 10000 \times 0,065 I_m \cos 36,86 = 900 I_m$$

- Détermination de la puissance réactive à l'entrée du transformateur.

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (2.14)$$

I_1 : courant de l'onde fondamentale.

U_1 : la tension de l'onde fondamentale.

$$Q = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (2.15)$$

Choisissons la puissance réactive pour quelques valeurs de α_{ch} :

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$

$$Q = \sqrt{3} 10000 \times 0,47 I_m \sin 0 = 0$$

Pour $\alpha_{ch} = 15^\circ$

$$Q = \sqrt{3} 10000 \times 0,45 I_m \sin 8,018 = 1125 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 30^\circ$

$$Q = \sqrt{3} 10000 \times 0,417 I_m \sin 16,56 = 2058 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 45^\circ$

$$Q = \sqrt{3} 10000 \times 0,35 I_m \sin 22,98 = 2366 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 60^\circ$

$$Q = \sqrt{3} 10000 \times 0,36 I_m \sin 25,8 = 2720 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 90^\circ$

$$Q = \sqrt{3} 10000 \times 0,154 I_m \sin 50,52 = 2058 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 135^\circ$

$$Q = \sqrt{3} 10000 \times 0,065 I_m \sin 35,86 = 675 I_m$$

Détermination de la puissance apparente :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S = I_m \sqrt{P^2 + Q^2} (2.7)$$

Pour quelques valeurs de α_{ch} (angle d'amorçage) :

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$

$$S = I_m \sqrt{8140^2 + 0} = 8140 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 15^\circ$

$$S = I_m \sqrt{7700^2 + 1125^2} = 7781 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 30^\circ$

$$S = I_m \sqrt{6923^2 + 2058^2} = 7222 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 45^\circ$

$$S = I_m \sqrt{5580^2 + 2366^2} = 6060 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 60^\circ$

$$S = I_m \sqrt{5604^2 + 2720^2} = 6229 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 90^\circ$

$$S = I_m \sqrt{1695^2 + 2058^2} = 2666 I_m$$

Pour $\alpha_{ch} = 135^\circ$

$$S = I_m \sqrt{900^2 + 675^2} = 1125 I_m$$

Commentaire des résultats :

La puissance active est calculée d'après la formule :

$$P = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1 \text{ (fig 2.13)}$$

On remarque qu'en variant la valeur d'angle d'amorçage, la puissance active P_{est} proportionnelle à la tension continue.

Pour la puissance réactive est calculée d'après la formule :

$$Q = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (2.16)$$

La puissance réactive augmente rapidement avec l'angle de retard d'amorçage pour atteindre la valeur maximale $\alpha_{ch} = 60^\circ$, et elle diminue jusqu'à ce qu'elle s'annule à $\alpha_{ch} = 180^\circ$ (fig 2.4).

Pour la puissance apparente est donnée d'après la formule :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.17)$$

Cette puissance apparente augmente avec l'augmentation de l'angle d'amorçage (fig 2.5).

II.3 Obtention du spectre du courant du réseau :

II.3.1 Calcul des dépendances suivantes :

$$I_1, I_2, I_3, \dots, I_K = f(\alpha_{ch}) \quad (2.18)$$

Voir les résultats sur le tableau(2.5).

II.3.2 Facteur de puissance :

Pour une installation on ne considère pas le facteur de puissance à un instant t (fonction de la charge essentiellement variable de l'installation) mais le facteur de puissance moyen.

Ce facteur $\cos \varphi$ peut être réduit du rapport donnant la valeur moyenne de la tangente de l'angle φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{Énergie réactive pendant un temps déterminé}}{\text{Énergie active consommée pendant le même temps}} \quad (2.19)$$

Le facteur de puissance moyen $\cos \varphi$ joue un rôle important aussi bien pour la production que pour l'installation de l'énergie électrique. [2]

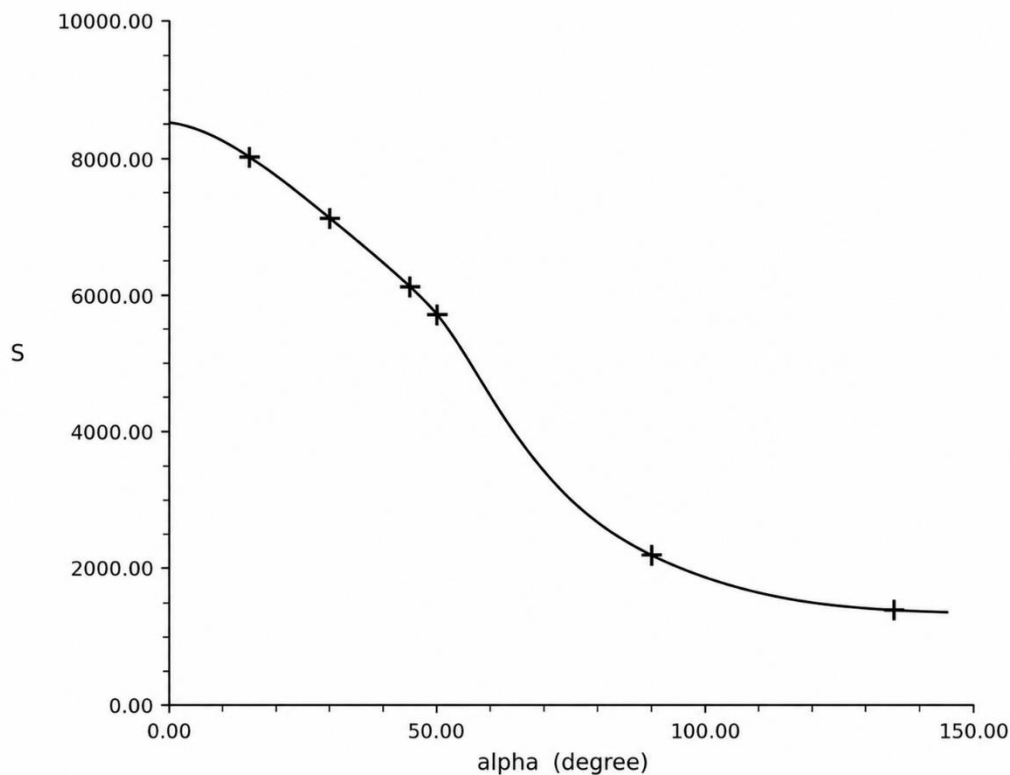


Fig (II.3) Variation de la puissance apparente S en fonction de l'angle d'amorçage (α_{ch})

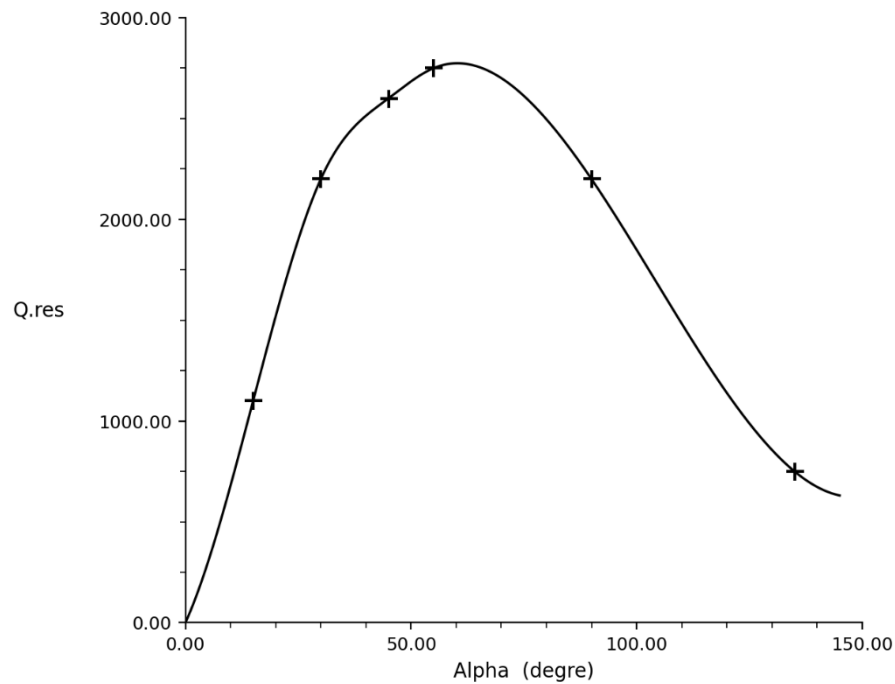


Fig (II.4) Variation de la puissance apparente Q en fonction de l'angle d'amorçage (α_{ch})

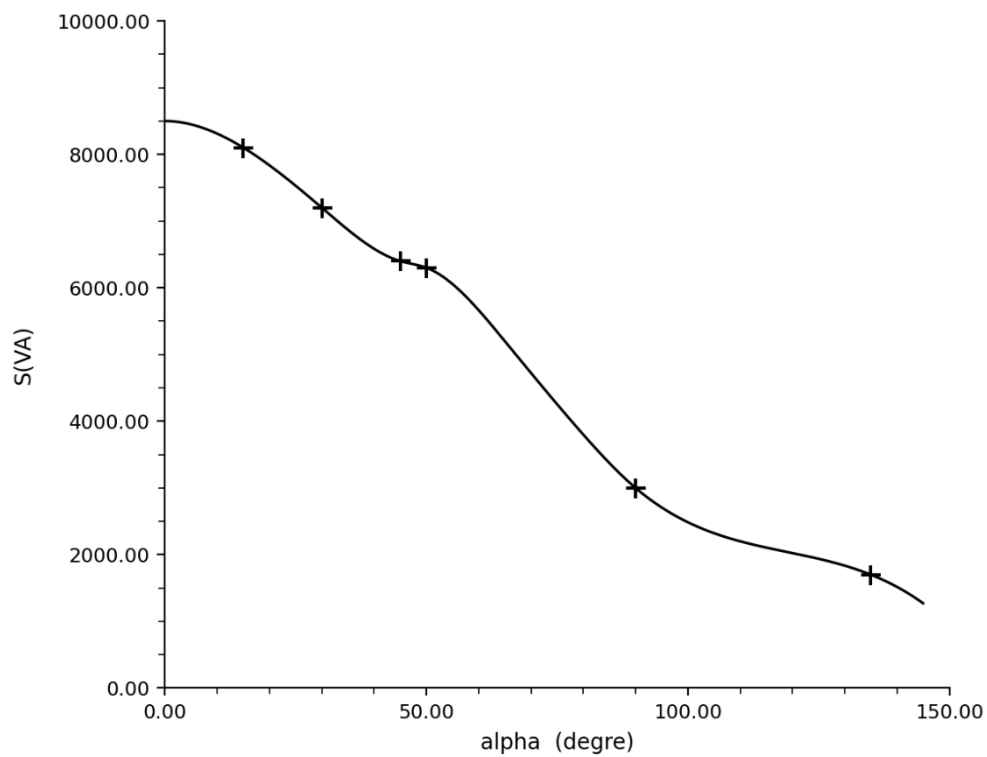


Fig (II.5) Variation de la puissance apparente S en fonction de l'angle (α)

II.3.2.1 Cause d'un faible facteur de puissance :

Le facteur de puissance dépend de type de la charge (résistive, inductive, capacitive et le régime de travail (linéaire, non linéaire)). Dans notre cas la charge est présentée comme la résistance pure. Mais le circuit d'alimentation (redresseur avec transformateur) n'est pas linéaire ; pendant le changement de tension de la charge la composition des harmoniques supérieures changent avec l'angle de déphasage. Ce phénomène influe sur le réseau, c'est pourquoi il faut calculer la puissance pour le redresseur.

En outre, pendant le fonctionnement à vide du transformateur on a un changement de déphasage qu'engendre l'apparition des harmoniques.

II.3.2.2 Apparition du facteur de puissance :

- **Action directe sur l'installation :** Il faut procéder à une révision approfondie de toute installation élue, cette révision doit porter:
- **Sur les transformateurs :** réduction des marches à vide ou à faible charge, remplacement d'un appareil à pertes normales par un transformateur à pertes réduites. À cet égard, pour les marches à faible charge, il y a avantage à installer un petit transformateur pour les services réduits ou bien à effectuer un branchement direct sur le réseau.
- **Action indirecte :** On ne modifie pas l'installation (elle reste défectueuse) mais on fournit sur place l'énergie réactive nécessaire.
- **Emploi d'une batterie de condensateur statique (fig 2.6) :**

L'énergie réactive Q_r que doit fournir la batterie pendant un temps déterminé est donnée par la fonction suivante :

$$Q_r = C (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \quad (2.20)$$

P : désigne l'énergie active indiquée par le compteur pendant le temps considéré.

La puissance apparente ou réactive de la batterie est donnée par la formule : [2]

$$Q = \frac{Q_r}{t} = \frac{P(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')}{t} \quad (2.21)$$

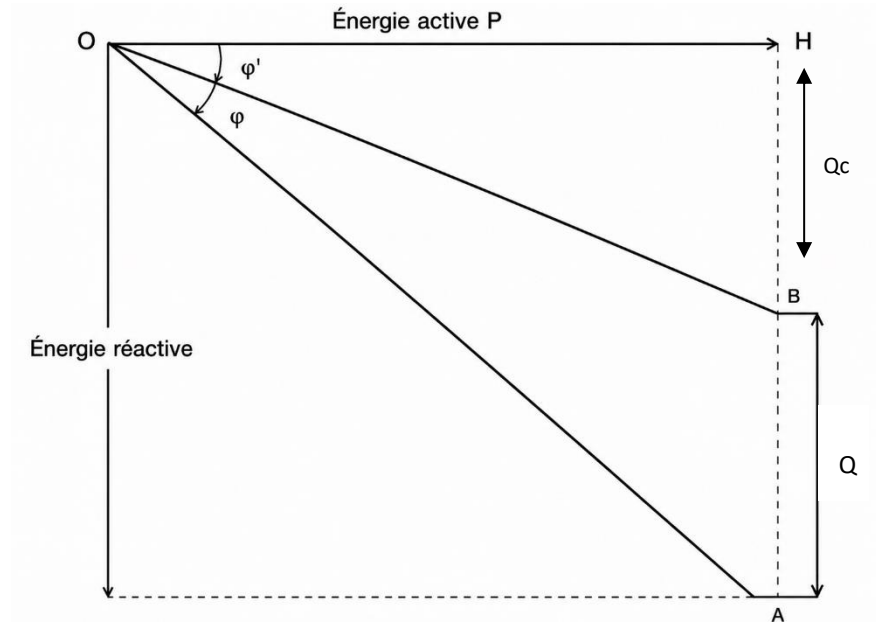


Fig (II.6) Rendement du facteur de puissance

Un condensateur de capacité placé sous la tension U_{eff} fournit une puissance réactive égale à $C\omega U_{eff}^2$. La batterie est donc parfaitement définie par sa puissance apparente S , c'est-à-dire la puissance réactive Q qu'elle peut fournir par sa tension U_{eff} et par sa fréquence f de fonctionnement.

II.3.2.3 Calcul de facteur de puissance $\cos \varphi = f(\alpha_{ch})$.

Calculons $\cos \varphi$ en utilisant la puissance de chaque phase pour quelques valeurs de α_{ch} .

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$:

$$\cos \varphi = \frac{U_1 I_1 \cos \alpha_{ch}}{U_1 I_{eff}} = \frac{I_1 \cos \alpha_{ch}}{I_{eff}} = \frac{I_1 \cos \alpha_{ch}}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}} \quad (2.22)$$

$$\frac{0.47 \cdot \cos 0}{\sqrt{0.47^2 + 0.28^2 + 0.07^2 + 0.08^2 + 0.07^2 + 0.09^2 + 0.03^2 + 0.04^2 + 0.07^2 + 0.07^2 + 0.05^2}}$$

$$\cos\varphi = 0,82$$

$$\text{Pour } \alpha_{ch} = 15^\circ \Rightarrow \cos\varphi = 0,81$$

$$\text{Pour } \alpha_{ch} = 30^\circ \Rightarrow \cos\varphi = 0,75$$

$$\text{Pour } \alpha_{ch} = 45^\circ \Rightarrow \cos\varphi = 0,68$$

$$\text{Pour } \alpha_{ch} = 60^\circ \Rightarrow \cos\varphi = 0,68$$

$$\text{Pour } \alpha_{ch} = 90^\circ \Rightarrow \cos\varphi = 0,36$$

$$\text{Pour } \alpha_{ch} = 135^\circ \Rightarrow \cos\varphi = 0,27$$

Commentaire :

On voit que le facteur de puissance diminue avec l'augmentation de l'angle d'amorçage, cela signifie qu'il faut maintenir le facteur de puissance proche de l'unité (fig 2.7).

II.3.3 Calcul des coefficients d'harmoniques :

Vu le réseau qui alimente un montage redresseur constitue un récepteur non linéaire par des tensions sinusoïdales, il absorbe des courants non sinusoïdaux. On peut le considérer comme un générateur de courant harmonique.

Chaque courant harmonique se propage dans un réseau arrivé à un nœud, il se répartit entre les branches suivant les lois communes à tous les courants alternatifs.

En général, les courants harmoniques créent de nombreux effets nocifs :

- Dans les machines tournantes, ils créent des pertes supplémentaires au stator et au rotor, diminuent le couple résultant, augmentent le niveau sonore.
- Ils augmentent les pertes dans les condensateurs et peuvent provoquer des échauffements anormaux.

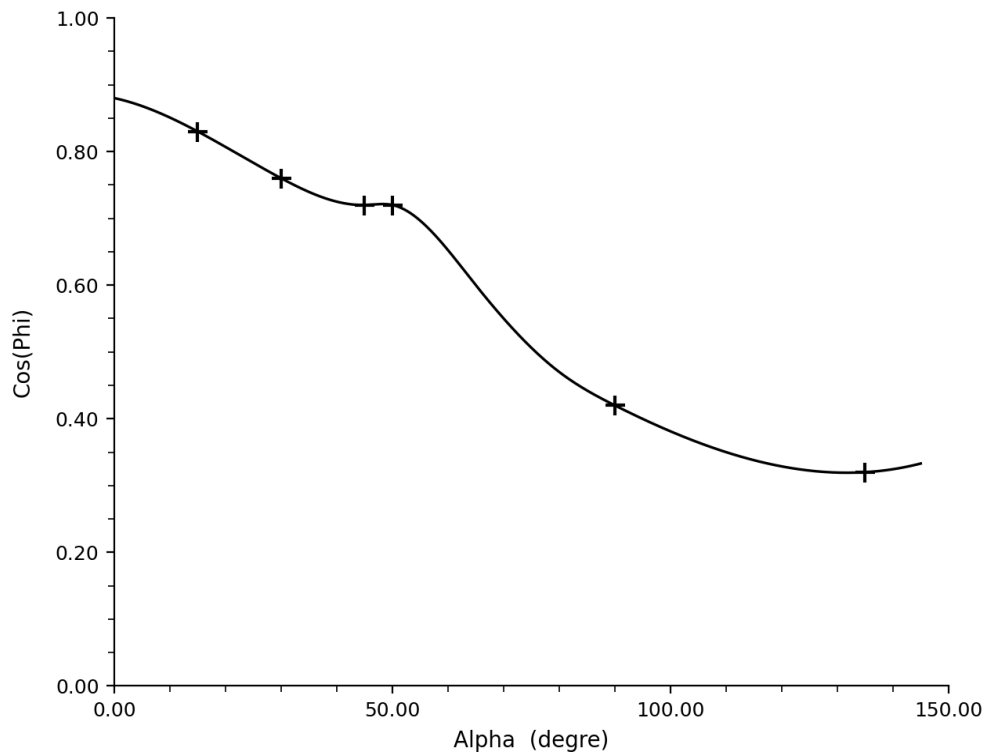


Fig (II.7) Variation du facteur de puissance en fonction de l'angle d'amorçage (α_{ch})

$$\cos(\Phi) = f(\alpha_{ch})$$

- Ils accélèrent le vieillissement des équipements d'éclairage avec lampes fluorescentes.
- Ils peuvent provoquer des erreurs de mesure et de comptage.
- Ils risquent d'exciter des résonances parallèles dans les réseaux où il y a des batteries de condensateurs.

Pour le calcul du facteur d'harmoniques : [3]

$$K = \frac{\sqrt{\sum I_k^2}}{I_1} \quad (2.23)$$

Pour différentes valeurs de α_{ch} :

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$

$$K = \frac{\sqrt{0.028^2 + 0.07^2 + 0.06^2 + 0.07^2 + 0.09^2 + 0.03^2 + 0.04^2 + 0.007^2 + 0.03^2}}{I_1} = 0.63$$

Tableau (II.5) Evolution du facteur d'harmoniques K en fonction de l'angle d'amorçage (α_{ch})

α_{ch}	15°	30°	45°	60°	90°	135°
K	0.67	0.77	0.90	1.12	1.52	2.75

- On a choisi un type de transformateur qui répond bien à un certain mesure d'adaptation à nos puissances calculées et de sécurité.
- On a choisi un transformateur :

TM : 1600 / 10

Puissance nominale : 1600 kVA = 1,6 MVA.

La tension dans l'enroulement primaire = 10 kV.

La tension secondaire = 690 V.

Les valeurs des harmoniques du courant et leur déphasage sont représentées sur le tableau (2.3), ainsi que les spectres des courants sur les figures suivantes.

TABLEAU (II.6) Spectre harmonique du courant en fonction de (α_{ch})

	1 ^{er} Har		2eme Har		3 eme Har		4eme Har		5eme Har		6eme Har		7eme Har		8eme Har		9eme Har		10eme Har		11eme Har	
α (°)	I ₁	φ_1	I ₂	φ_2	I ₃	φ_3	I ₄	φ_4	I ₅	φ_5	I ₆	φ_6	I ₇	φ_7	I ₈	φ_8	I ₉	φ_9	I ₁₀	φ_{10}	I ₁₁	φ_{11}
0°	0.47	0°	0.28	90°	0.07	0°	0.08	90°	0.07	0°	0.09	90°	0.03	0°	0.04	90°	0.007	0°	0.03	90°	0.03	0°
15°	0.457	8.67°	0.276	74.65°	0.085	6.04°	0.055	14.7°	0.068	60.04°	0.02	58°	0.03	59.62°	0.039	14.74°	0.018	60.64°	0.029	75.96°	0.027	30.25°
30°	0.417	-16.58°	0.27	59.89°	0.118	29.8°	0.05	72°	0.06	60.04°	0.05	16.58°	0.03	9.68°	0.04	60.8°	0.03	11.3°	0.025	61.38°	0.03	59.74°
45°	0.36	-22.98°	0.26	43.45°	0.13	59.95°	0.06	46.27°	0.06	6.17°	0.06	87.7°	0.04	3.99°	0.03	9.15°	0.03	47.2°	0.03	36.1°	0.02	71.56°
60°	0.35	25.86°	0.23	27.64°	0.16	90°	0.08	-14.0°	0.05	90°	0.05	10.2°	0.05	90°	0.04	-7.12°	0.03	90°	0.03	5.71°	0.03	90°
90°	0.154	-50.52°	0.14	10.74°	0.115	30.5°	0.09	73.3°	0.06	60.04°	0.06	43.7°	0.03	60.4°	0.03	51.6°	0.03	10.7°	0.03	66.8°	0.027	59.74°
135°	0.065	36.86°	0.06	15.1°	0.06	68.7°	0.06	60.14°	0.06	5.24°	0.06	46.43°	0.05	61.5°	0.05	27.5°	0.05	24.9°	0.048	77.7°	0.04	49.7°

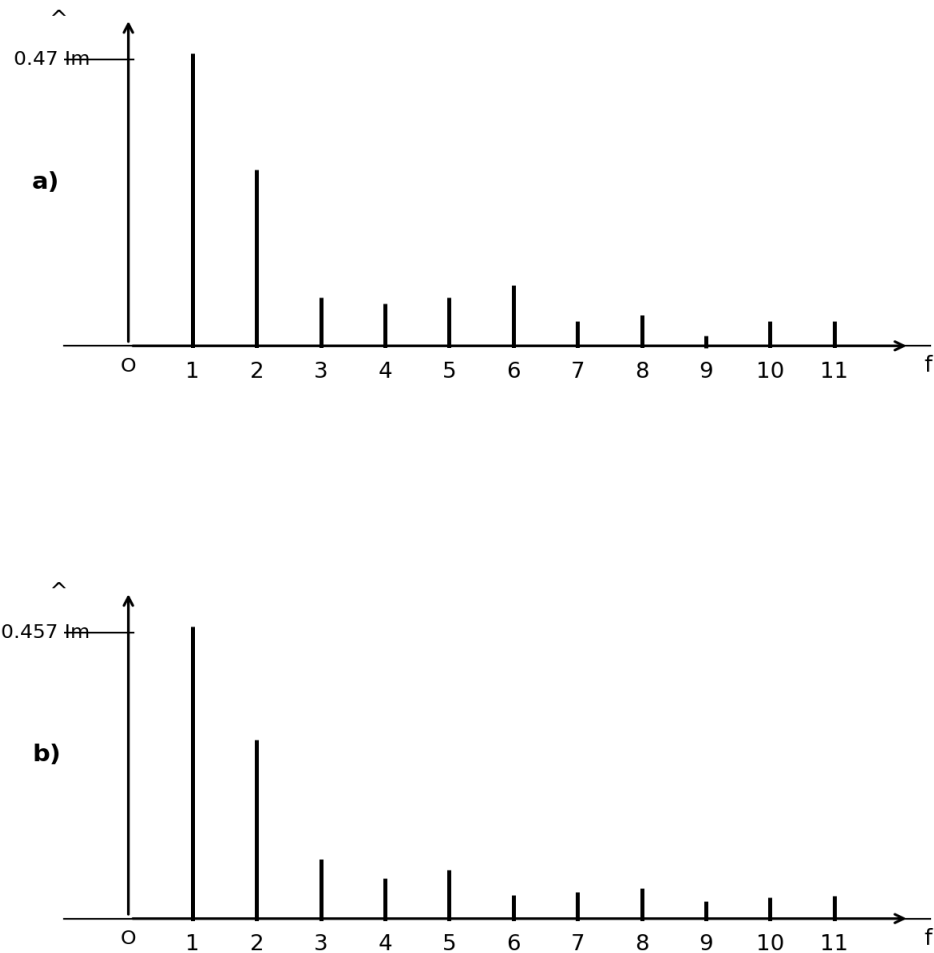


Fig. (II.8) Spectres du courant

a) pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$

b) pour $\alpha_{ch} = 15^\circ$

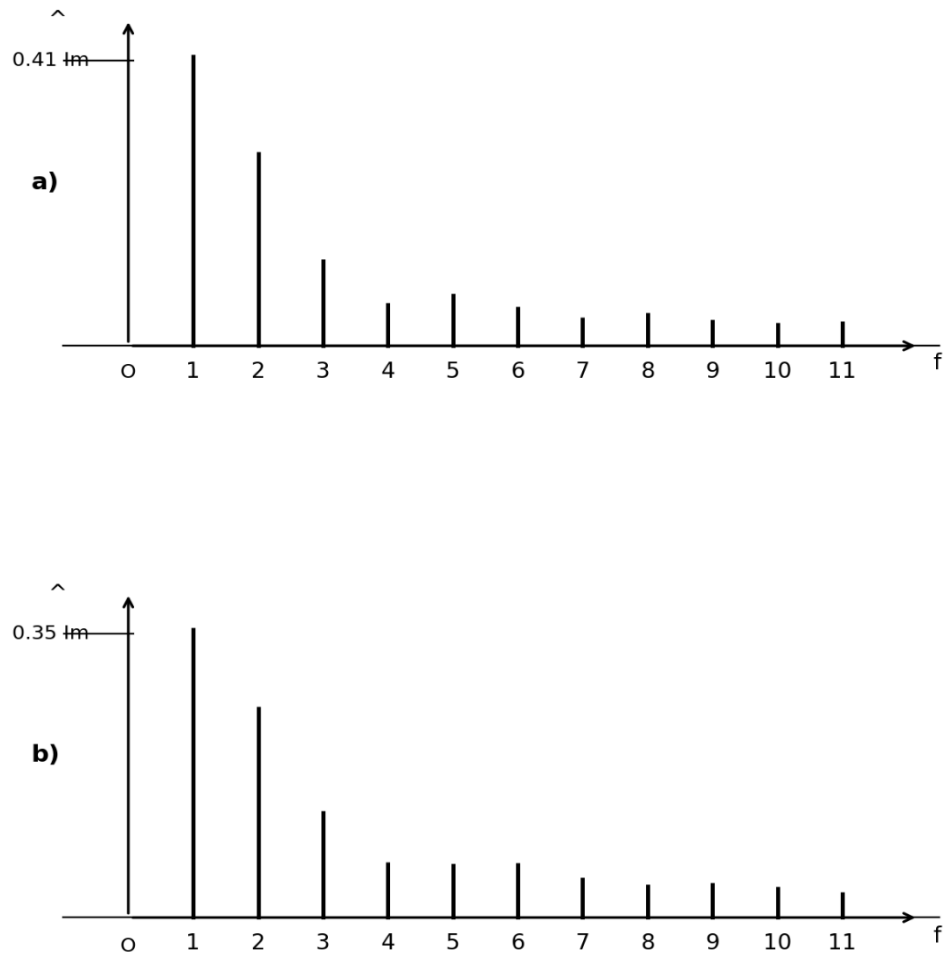


Fig (II.9) Spectres du courant

a) pour $\alpha_{ch} = 30^\circ$

b) pour $\alpha_{ch} = 45^\circ$

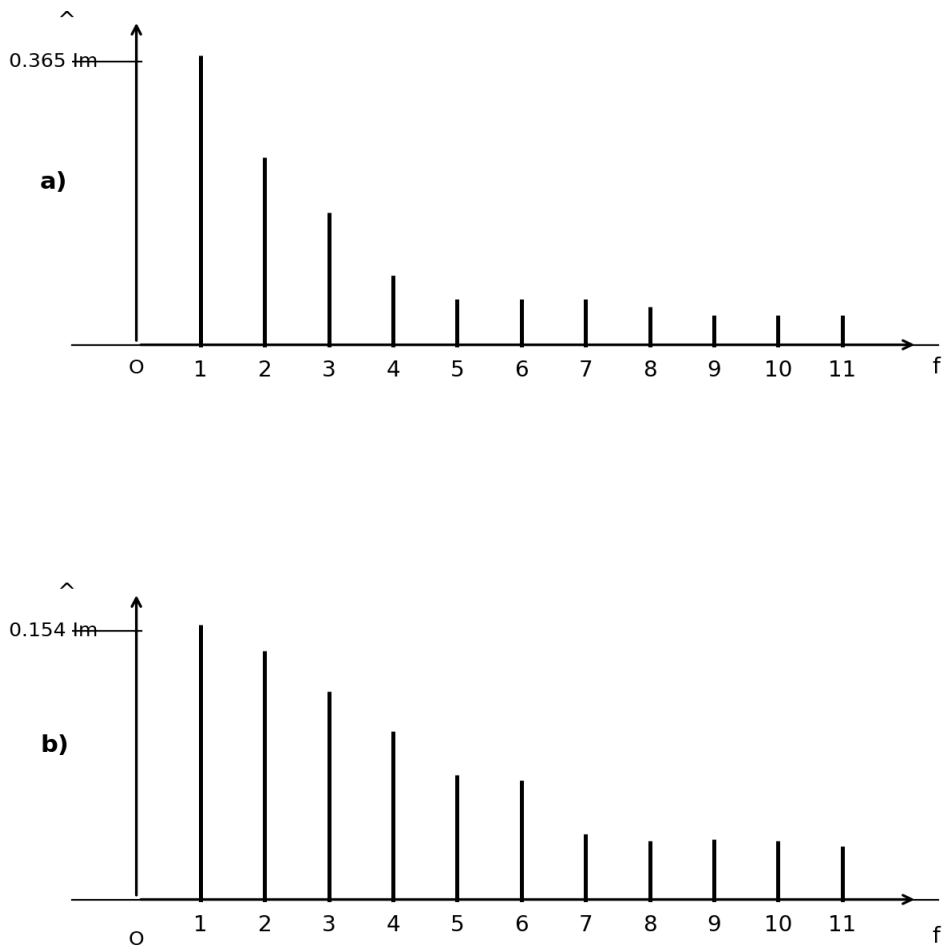


Fig (II.10) Spectres du courant

a) pour $\alpha_{ch} = 60^\circ$

b) pour $\alpha_{ch} = 90^\circ$

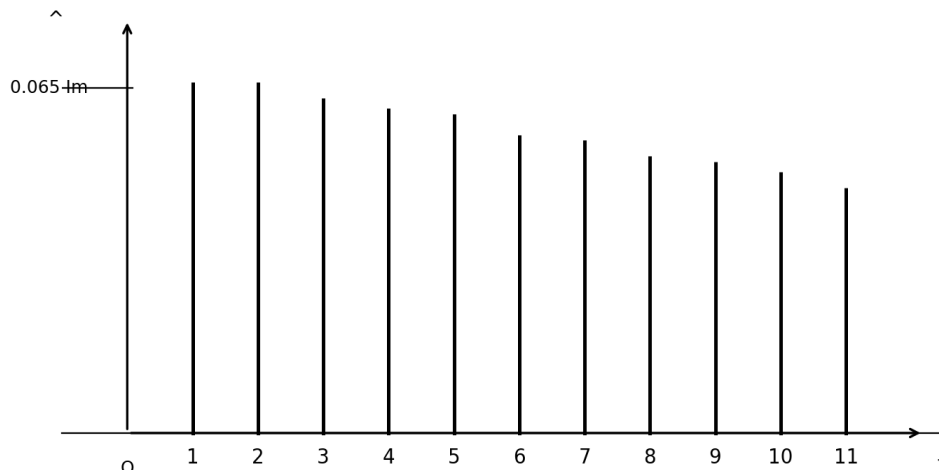


Fig (II.11) Spectres du courant
pour $\alpha_{ch} = 135^\circ$

Caractéristiques de ce transformateur :

- $U_{cc}\% = 5,5$: la tension de court-circuit exprimée en pourcentage.
- $\Delta P_{cc}\% = 18$ kW: les pertes de puissance de court-circuit.
- $\Delta P_0\% = 2,8 + 3,3$: les pertes à vide.
- I_0 : le courant à vide : $1,3 + 2,6$.

On calcule les éléments caractéristiques du transformateur TM600/10.

$$R_{tr} = \frac{\Delta P_{cc} \cdot U_p^2}{S_n^2} \quad (2.24)$$

U_p : la tension primaire du transformateur.

S_n : la puissance apparente nominale.

$$R_{tr} = 0,7$$

$$X_l = \frac{U_{cc}\% \cdot U_p}{100 \cdot S_n}$$

$\Rightarrow$

$$X_l = 3,27 \text{ ohm}$$

$$U_t = 10 \text{ kV}$$

$$U_2 = 0,69 \text{ kV}$$

Calculons U_{2c} : tension secondaire du transformateur pour le choix du transformateur.

$$U_0 = \frac{3}{2\pi} \int_{90^\circ}^{150^\circ} U_m \sin \varphi d\varphi \quad (2.25)$$

$$U_0 = \frac{3U_m}{2\pi} (\cos 90^\circ - \cos 150^\circ)$$

$$U_0 = -\frac{3U_m}{2\pi} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3} U_m}{2\pi}$$

$$2U_m = \frac{U_0 \cdot 2\pi}{3\sqrt{3}}$$

$$= \frac{400 \cdot 2\pi\sqrt{3}}{3\sqrt{3}}$$

$$= \frac{600\pi}{1.5} = 1256 \text{ V}$$

$$U_2 = \frac{1256}{\sqrt{2}} = 889 \text{ V}$$

Pour le calcul de I_c : amplitude du courant du secondaire :

$$I_0 = \frac{3}{2\pi} \int_{90^\circ}^{150^\circ} I_{cm} \sin \varphi d\varphi \quad (2.26)$$

$$I_{cm} = \frac{I_0 \cdot \pi \sqrt{3}}{1.5 \sqrt{3}} = 4188 \text{ A}$$

$$I_c = \frac{4188}{\sqrt{2}} = 2961 \text{ A}$$

Correction des résultats à cause de nouveau rapport du transformateur :

On a les paramètres de transformateur :

$U_1 = 10 \text{ kV}$: tension d'enroulement primaire.

$U_2 = 0,69 \text{ kV}$: tension d'enroulement secondaire.

$$K = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow I_1 = \frac{I_2}{K} = \frac{2961}{14,49} = 204,34 \text{ A}$$

Pour les courants efficaces côté primaire :

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$:

$$I_{eff} = 0,97 I_m$$

$$\text{Avec } I_m = \frac{4188}{14,49}$$

$$I_{eff} = 0,97 \cdot \frac{4188}{14,49} = 280,35 \text{ A}$$

Tableau (II.7) Variation du courant efficace côté primaire I_{eff} en fonction de l'angle de commande (α_{ch}) après l'insertion de la compensation.

α_{ch}	15°	30°	45°	60°	90°	135°
I_{eff}	257,23	231,22	196,53	164,74	86,70	37,57

Il faut donner les puissances actives et réactives et les puissances apparentes pour le nouveau rapport de transformation.

Pour les puissances actives :

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$:

$$P = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \alpha_{ch}$$

$$P = \sqrt{3} 10000 \times 0,47 I_m \cos 0^\circ = 8140 I_m \cdot W$$

$$\text{avec } I_m = \frac{4188}{14,49}$$

$$P = \sqrt{3} 10000 \cdot 0,47 \cdot \frac{4188}{14,49} \cos 0^\circ = 2352,679 \text{ kW}$$

Tableau (II.8) Valeurs de la puissance active P en fonction de l'angle de commande \ α_{ch}

obtenues après compensation. :

$\alpha_{ch}(^\circ)$	15°	30°	45°	60°	90°	135°
P(kW)	2225,507	2000,933	1659,014	1619,707	689,900	260,124

Pour les puissances réactives :

$$Q = U_1 I_1 \sin \alpha_{ch}$$

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ \Rightarrow Q = 0$, et pour $\alpha_{ch} = 15^\circ \Rightarrow Q = 1125 I_m$

$$\text{avec } I_m = \frac{4188}{14,49}$$

$$Q = 1125 \cdot \frac{4188}{14,49} = 325,155 \text{ kVAR}$$

Tableau (II.9) Valeurs de la puissance réactive Q en fonction de l'angle de commande α_{ch} obtenues après compensation :

α_{ch}	30°	45°	60°	90°	135°
Q(kVAR)	594,679	683,837	786,153	594,817	195,093

Tableau (II.10) Calcul des puissances apparentes :

α_{ch}	0°	15°	30°	45°	60°	90°
S(kVA)	2352,679	2248,918	2087,352	1751,503	1800,348	770,545

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Pour $\alpha_{ch} = 135^\circ$, $S = 325,155$ kVA.

Pour les puissances maximales :

- $P_1 = 2352,674$ kW pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$.
- $Q_1 = 786,153$ kVAR pour $\alpha_{ch} = 60^\circ$.
- $S_1 = 2352,679$ kVA pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$.

Conclusion :

Ce deuxième chapitre a été consacré à l'étude quantitative et au calcul des caractéristiques du réseau électrique en présence d'une charge non-linéaire. À travers les différentes étapes de calcul, nous avons d'abord déterminé les amplitudes et les valeurs efficaces des courants et des tensions au niveau du secondaire du transformateur, là où l'impact de la charge est le plus direct. L'introduction du nouveau rapport de transformation nous a ensuite permis de transposer ces grandeurs du côté primaire afin d'évaluer le comportement global du réseau. Les tableaux comparatifs des courants efficaces (I_{eff}), ainsi que des puissances actives (P), réactives (Q) et apparentes (S) obtenus après compensation, mettent clairement en évidence une nette amélioration des performances énergétiques et une réduction du courant absorbé côté réseau.

**CHAPITRE III : CALCUL
DU COMPENSATEUR
STATIQUE SUR LA BASE
DE THYRISTORS POUR
LA CHARGE NON
LINÉAIRE.**

III.1. Les particularités de fonctionnement du compensateur statique :

On a examiné que pendant le fonctionnement de la charge, la puissance réactive change avec l'angle d'amorçage de la charge. Ce changement est très néfaste pour l'installation et il est difficile de compenser à l'aide de batteries de condensateurs ou à l'aide des machines synchrones.

Dans notre cas, on est contraint d'utiliser les compensateurs statiques avec la puissance réactive sur la base des thyristors avec l'inductance.

En variant l'angle d'amorçage du compensateur on peut régler la puissance réactive produit par le compensateur, cela signifie qu'on peut réaliser les conditions dans le schéma d'alimentation quand la puissance active est constante. [4]

III.1.1. Réalisations des conditions où la puissance est constante. :

La recherche de l'efficacité est un souci constant et il se trouve que cet objectif traduit par des tendances contradictoires.

Les industriels tendent à réaliser de plus en plus les variateurs électroniques de vitesse et à éliminer les variateurs rotatifs.

Ces dispositifs sont également connus sous le nom de statocompenseurs ou d'absorbeurs d'énergie réactive.

Les variateurs de courant alternatif doivent conduire un courant circulant dans les deux sens. Il est donc nécessaire de prévoir le montage antiparallèle de deux thyristors, ou l'utilisation d'un triac. Ces deux solutions ont un fonctionnement identique, abstraction faite de la commande de la gâchette. [5]

Dans le montage antiparallèle de deux thyristors, la cathode de l'un des thyristors est connectée avec l'anode de l'autre thyristor.

Cette combinaison est souvent appelée montage "tête-bêche".

On utilisera ce montage que pour des puissances relativement élevées, pour lesquelles les triacs appropriés ne sont pas disponibles.

En effet, la commande des thyristors en antiparallèle est légèrement plus complexe. Car elle exige deux impulsions d'allumage avec un transformateur d'impulsion avec deux enroulements secondaires séparés. Les diodes bloquent les impulsions négatives. [4]

III.1.2. Choix de couplage de transformateur :

On utilise pour les compensateurs statiques différents schémas de couplage : le couplage triangle, le couplage étoile.

Comme nous avons choisi le couplage de transformateur de la charge étoile-étoile et pour le bon fonctionnement utilisons le même couplage c'est-à-dire le couplage étoile.

Il existe deux schémas de couplage étoile . [5]

A : Montage étoile symétrique avec neutre : [4]

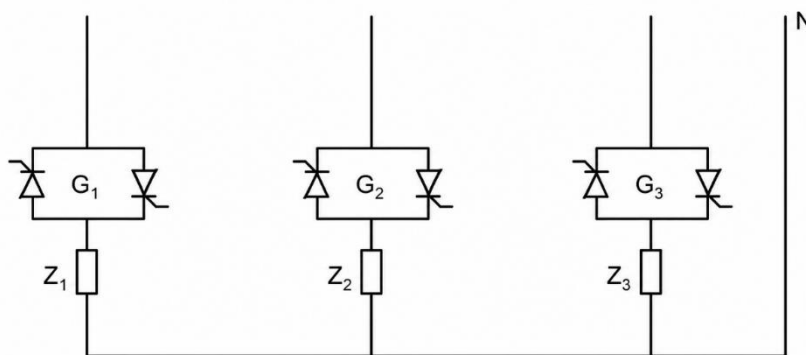


Fig. (III.1) : Montage étoile symétrique avec neutre.

Ce montage est fait par la juxtaposition des trois montages monophasés G1, G2, G3. Les courants et les tensions appliqués à la charge étant identiques entre eux, mais déphasés les uns par rapport aux autres de 120° .

B : Montage étoile symétrique sans neutre : [5] / [2]

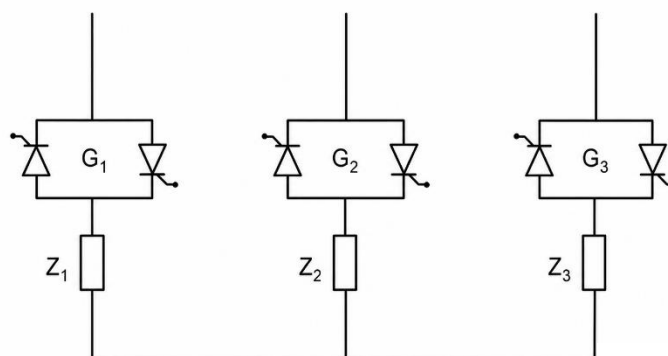


Fig. (III.2) Montage étoile symétrique sans neutre

Le comportement de ce montage est très différent de celui du précédent. Il faut en effet que deux gradateurs (variateurs) soient simultanément en conduction pour obtenir un courant dans la charge.

Dans ces conditions si G1 et G2 sont conducteurs respectivement par l'intermédiaire de T1 et T2 la tension qui apparaît sur Z1 et Z2 en série est la tension de phase U12.

III.1.3. Principe de fonctionnement :

Pour une charge inductive l'allure des courants et des tensions, ainsi que la durée de conduction avec un angle de retard d'allumage égale à 105° est représentée dans la fig 3.3.

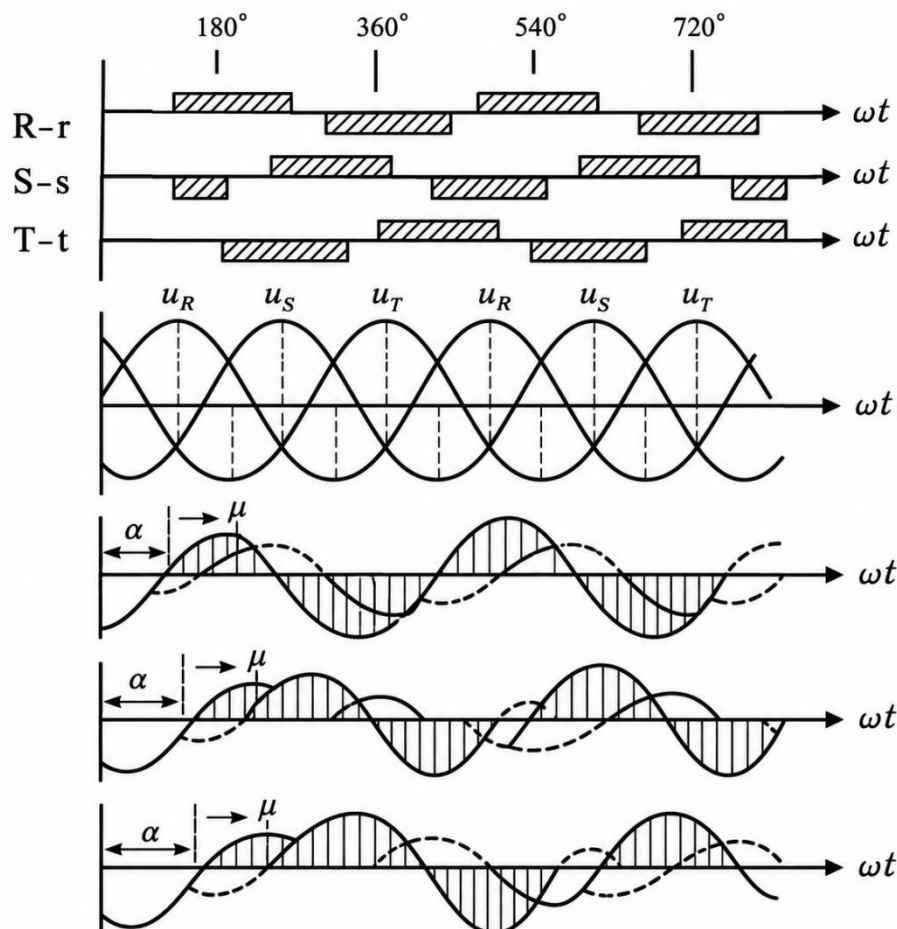


Fig. (III.3) Allures temporelles des courants et des tensions pour une charge inductive

La construction de l'allure du courant est relativement simple : le courant est composé de sections des sinusoïdes décalées verticalement et retardé de 90° par rapport aux sections correspondant de la tension sinusoïdale.

La charge est purement inductive, le courant ne peut pas varier brusquement. La tension simple aux bornes de la charge est égale à la moitié de la tension composée des deux phases du réseau triphasé lorsque deux thyristors sont conducteurs, ou égale à la tension simple du réseau lorsque les thyristors de trois phases sont conducteurs.

Lors du premier enclenchement, l'allure des trois courants ne prend pas toute de suite la forme permanente. Celui-ci s'établit seulement à partir du moment où chacune des trois phases a conduit une fois le courant. Ainsi le courant présente une forme presque trapézoïdale, il est nul pour un certain laps de temps.

Comme dans le cas d'un variateur de courant monophasé, l'angle de retard d'allumage ne peut pas être inférieur à 90° . La limite supérieure est de 150° . Comme pour une charge ohmique, puisque la tension anode des thyristors à enclencher est négative pour $\alpha > 150^\circ$.

Si l'on enclenche le contacteur du courant triphasé avec un angle de retard d'allumage $\alpha = 90^\circ$, le courant sera de nouveau sinusoïdal.

III.1.4. Application des variateurs de courant alternatif :

Une application intéressante, qui couvre le domaine de puissance de quelques 100 kVA à 50 MVA environ, est donnée par le réglage de la puissance réactive dans les réseaux électriques par des dispositifs statiques. Un variateur de courant triphasé alimente une charge inductive triphasée, permettant la variation de la puissance réactive absorbée, qui compense parallèlement celle fournie par une batterie de condensateur fixe, mise en parallèle. Ainsi il est possible de régler continuellement la puissance réactive globale du fonctionnement capacitif au fonctionnement inductif, permettant de maintenir la tension du réseau entre les limites acceptables lors des variations de puissance réactive provoquées. [5]

III.1.5. Calcul des dépendances de puissances réactive du compensateurs de puissance en fonction d'angle d'amorçage de la charge :

Pour le calcul de la puissance réactive du compensateur, il faut tenir compte de la puissance réactive de la charge afin d'aboutir à une relation qui existe entre la puissance réactive à compenser et la puissance réactive de la charge.

Pour bien comprendre le phénomène de compensation, examinons la courbe de la puissance réactive de la charge, on a remarqué qu'il y a fluctuations et que la puissance réactive change pour chaque valeur de l'angle d'amorçage α_{ch} .

Donc pour maintenir la puissance réactive constante il faut compenser le changement de la puissance réactive.

Le procédé de calcul se fait par la méthode suivante : [2]

$$Q_{comp} = Q_{nom} - Q_{ch}(\alpha_{ch}) \quad (3.1)$$

Cette puissance réactive de compensation est égale à la différence de la puissance réactive nominale par la puissance réactive de la charge.

La puissance réactive nominale est choisie comme la valeur maximale.

Pour le calcul du Q_{comp} pour différents angles d'amorçages, trouvons la valeur maximale de l'énergie réactive (fig. 3.4).

$Q_{max} = 2720 \text{ Im}$ qui correspond à la valeur $\alpha_{ch} = 60^\circ$.

Pour $\alpha_{ch} = 0^\circ$

$$Q_{comp} = Q_{nom} - Q_{ch}(\alpha_{ch}) = 2720 - 0 = 2720 \text{ Im VAR}$$

Pour $\alpha_{ch} = 15^\circ$

$$Q_{comp} = Q_{nom} - Q_{ch}(\alpha_{ch}) = 2720 - 1125 = 1595 \text{ Im VAR}$$

Pour $\alpha_{ch} = 30^\circ$

$$Q_{comp} = Q_{nom} - Q_{ch}(\alpha_{ch}) = 2720 - 2058 = 682 \text{ Im VAR}$$

Pour $\alpha_{ch} = 45^\circ$

$$Q_{comp} = Q_{nom} - Q_{ch}(\alpha_{ch}) = 2720 - 2366 = 354 \text{ Im VAR}$$

Pour $\alpha_{ch} = 60^\circ$

$$Q_{comp} = Q_{nom} - Q_{ch}(\alpha_{ch}) = 2720 - 2720 = 0$$

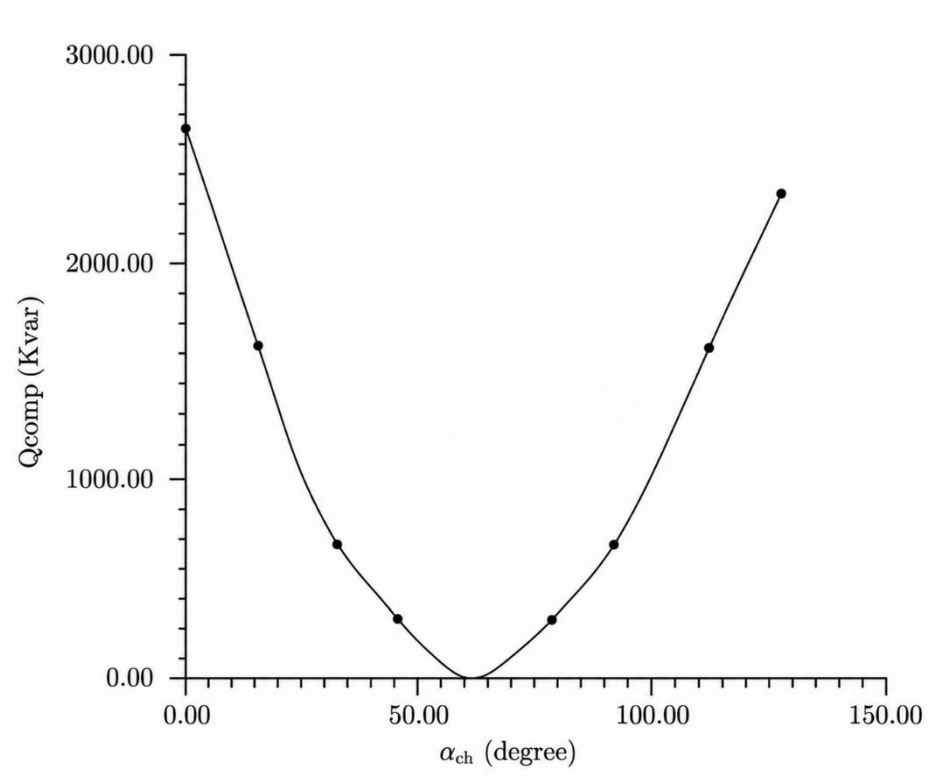


Fig (III.4) Variation de la puissance réactive de compensation Q_{comp} en fonction de l'angle de commande (α_{ch})

Pour $\alpha_{ch} = 90^\circ$

$$Q_{comp} = Q_{nom} - Q_{ch}(\alpha_{ch}) = 2720 - 2058 = 662 \text{ Im VAR}$$

Pour $\alpha_{ch} = 135^\circ$

$$Q_{comp} = Q_{nom} - Q_{ch}(\alpha_{ch}) = 2720 - 675 = 2045 \text{ Im VAR}$$

Tableau (III.1) Calcul de la puissance réactive de compensation Q_{comp} en fonction de l'angle d'amorçage α_{ch}

α°	$Q_{nom(max)}$	Q_{ch}	Q_{comp}
0	2720 lm	0	2720 lm
15	2720 lm	1125 lm	1595 lm
30	2720 lm	2058 lm	662 lm
45	2720 lm	2366 lm	354 lm
60	2720 lm	2720 lm	0
90	2720 lm	2058 lm	662 lm
135	2720 lm	675 lm	2045 lm

III.2. Calcul des courants et des caractéristiques réglées du compensateur :

Etant donné qu'on ne peut pas trouver facilement une relation analytique pour les courants efficaces pour le montage triphasé, on est contraint de faire ces calculs numériquement à l'aide d'un ordinateur.

Les caractéristiques ainsi obtenues sont représentées à la fig(3.5). A savoir la valeur efficace du courant rapporté à sa valeur maximale en fonction de l'angle de retard d'allumage α . La valeur du courant maximale est donnée par : [5] [4]

$$I_{eff} = \frac{\hat{U}_{ph}}{\sqrt{2} \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (3.2)$$

où $\hat{U}_{ph}$: la valeur de crête de la tension simple (tension de phase) du réseau d'alimentation.

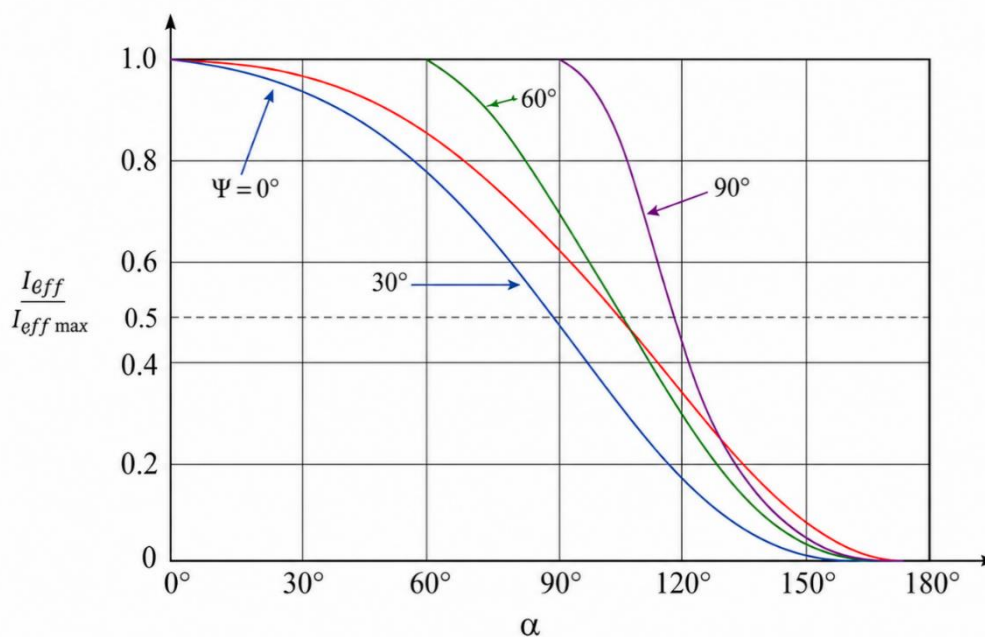


Fig (III.5) Caractéristiques de commande d'un variateur de courant triphasé.

Le déphasage de l'onde fondamentale est représenté à la fig. 3.6. Ce résultat a été obtenu par un calcul numérique du développement en série de FOURRIER.

Même dans le cas d'un variateur de courant triphasé avec une charge purement ohmique ($Q = 0$) on constate qu'il existe un déphasage entre l'onde fondamentale du courant et la tension, se traduisant par une fourniture de puissance réactive de la part du réseau d'alimentation. [2]

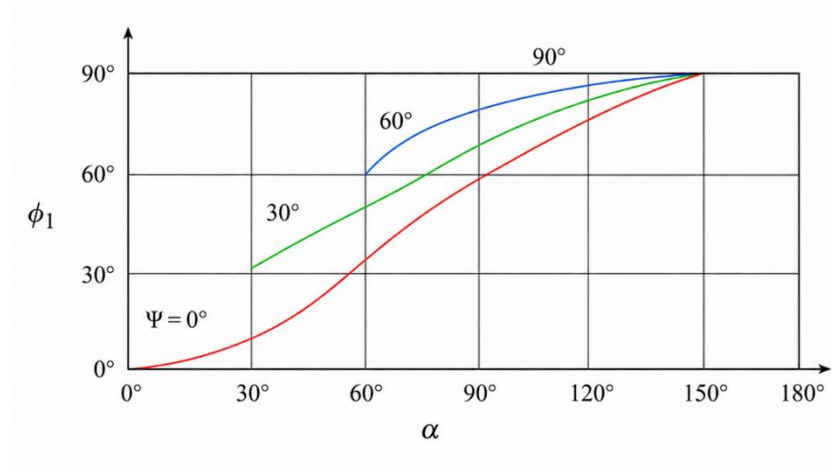


Fig (III .6) Déphasage ϕ_1 de l'onde fondamentale du courant

Pour représenter la caractéristique de commande :

$$Q_{comp} = f(\alpha_{comp}). \quad (3.3)$$

Il faut calculer Q_{comp} en fonction du courant efficace :
(cas d'un variateur de courant triphasé).

$$Q_{comp} = 3L\omega I_{eff\ comp}^2 \quad (3.4)$$

Pour cela il faut calculer l'inductance L :

$$Q = 3L\omega \left(\frac{U}{\omega L}\right)^2 \quad (3.5)$$

Q : la puissance réactive de compensateur maximale pour $\alpha_{ch} = 60^\circ$

avec

$$I_{eff} = \frac{U}{\omega L} \quad (3.6)$$

$$Q_{comp\ max} = 2720\ Im = \frac{2720 \times 4188}{14,49} = 786,153\ Kvar$$

$$Q_{comp} = 3L\omega I_{eff}^2 = 786,153 \text{ KVAR}$$

$$Q_{comp \text{ mono}} = \frac{1}{3} Q_{comp} = U_a I_{eff \text{ max}} \text{ avec } U_a = \omega L I_{eff}$$

$$I_{eff} = \frac{\frac{1}{3} Q_{comp}}{U_a} = \frac{786,153 \times 1000}{\sqrt{3} \times 1000} = 45,43 \text{ A}$$

d'où

$$L = \frac{\frac{1}{3} Q_{comp}}{I_{eff \text{ comp}}^2} = \frac{786,153 \times 1000}{314(45,43)^2} = 0,40 \text{ H}$$

Il faut calculer le courant efficace. Pour cela il faut tenir compte de la caractéristique de commande.

$$\frac{I_{eff}}{I_{eff \text{ max}}} = f(\alpha_{ch}) \quad (3.7)$$

Pour une charge inductive de commande on doit prendre la caractéristique où l'angle d'amorçage α doit être supérieur ou égal à 90° , par exemple :

$$\frac{I_{eff}}{I_{eff \text{ max}}} = 1 \text{ pour } \alpha = 90^\circ$$

$$I_{eff} = I_{eff \text{ max}} = \frac{\hat{U}_{ph}}{\sqrt{2}\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U_{ph}}{2\omega L} = 32,48 \text{ A}$$

Tableau (III.2) Évolution de la valeur efficace du courant en fonction de l'angle de retard à l'allumage (α) (comp).

$\alpha_{comp}(^\circ)$	105°	120°	135°	150°
$I_{eff}(\text{A})$	16,89	4,21	1,29	0

Calculons $Q_{comp} = f(\alpha_{comp})$ (fig 3.7) :

$$Q_{comp} = 3L\omega I_{eff}^2 \quad (3.4)$$

Tableau (III.3) Calcul de la puissance réactive compensée Q_{comp} en fonction de l'angle (α).

$\alpha(^{\circ})$	90°	105°	120°	135°	150°
$Q_{comp}(Kvar)$	397,707	107,545	6,713	0,627	0

Ces résultats seront représentés sur le tableau suivant :

Tableau (III.4) Synthèse des résultats des courants efficaces et des puissances réactives compensées

$\alpha_{comp}(^{\circ})$	$I_{eff}(A)$	$Q_{comp}(KVAR)$
90	32,48	397,707
105	16,89	107,545
120	4,22	6,713
135	1,29	0,627
150	0	0

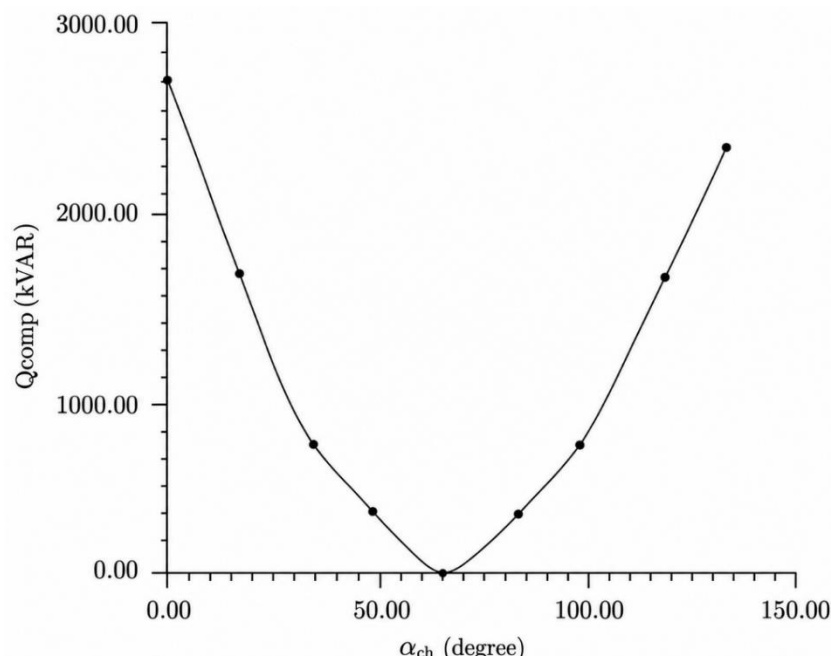


Fig (III.7) $Q_{comp} = f(\alpha_{comp})$

On a représenté la caractéristique $Q_{comp} = f(\alpha_{comp})$ sur la fig. 3.7.

III.3. Obtention de la loi de régulation par le compensateur statique :

Après avoir trouvé les dépendances (dans 3.1)

$$Q_{comp}(\alpha_{ch}) = Q_{nom} - Q_{ch}(\alpha_{ch})$$

et (dans 3.3)

$$Q_{comp} = f(\alpha_{comp})$$

Il faut maintenant trouver la caractéristique

$$\alpha_{comp} = f(\alpha_{ch}) \quad (3.8)$$

On doit voir et examiner les deux dépendances

$$Q_{comp} = f_1(\alpha_{ch}) \text{ et } Q_{comp} = f_2(\alpha_{comp})$$

Pour la dépendance $Q_{comp} = f_1(\alpha_{ch})$, on prend quelques valeurs de Q_{comp} :

- $Q_{comp} = 10\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{ch1} = 48,7^\circ$
- $Q_{comp} = 20\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{ch2} = 33,5^\circ$
- $Q_{comp} = 30\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{ch3} = 25^\circ$
- $Q_{comp} = 40\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{ch4} = 22^\circ$
- $Q_{comp} = 50\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{ch5} = 18^\circ$
- $Q_{comp} = 75\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{ch6} = 7,5^\circ$

On procède au même calcul pour la dépendance $Q_{comp} = f_2(\alpha_{comp})$:

- $Q_{comp} = 10\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{comp1} = 116,25^\circ$
- $Q_{comp} = 20\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{comp2} = 112^\circ$
- $Q_{comp} = 30\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{comp3} = 109^\circ$
- $Q_{comp} = 40\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{comp4} = 107^\circ$
- $Q_{comp} = 50\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{comp5} = 104^\circ$
- $Q_{comp} = 75\% Q_{nom} \Rightarrow \alpha_{comp6} = 97^\circ$

Tableau (III.5) Synthèse des caractéristiques de commande du compensateur.

Q_{comp}	10% Qnom	20% Qnom	30% Qnom	40% Qnom	50% Qnom	75% Qnom
$\alpha_{ch}(^\circ)$	48,7	33,5	25	22	18	7,5
α_{comp}	116,25	112	109	107	104	97

Construisons la caractéristique de commande

$\alpha_{comp} = f(\alpha_{ch})$ voir fig (3.8)

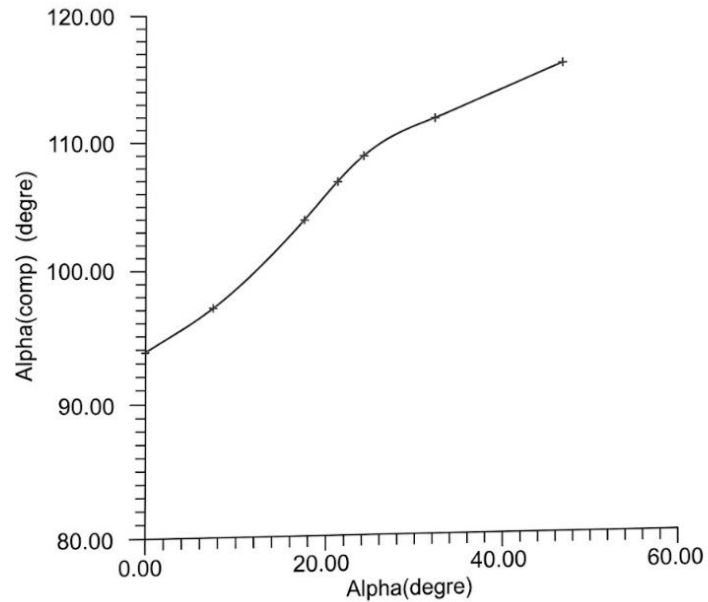


fig. (III.8) α (comp) = f(α)

Conclusion :

Au terme de ce chapitre, les résultats obtenus confirment la validité de la méthode de compensation choisie. L'étude de la loi de régulation, à travers la caractéristique de commande $(\alpha)_{(comp)} = f(\alpha_{ch})$, a permis de démontrer l'efficacité du compensateur statique à ajuster précisément la puissance réactive. Les valeurs calculées valident le dimensionnement du système et assurent sa capacité à maintenir la stabilité du réseau, même en présence de charges non-linéaires. En somme, cette solution technique s'est révélée fiable et parfaitement adaptée aux exigences de notre installation.

CHAPITRE IV : CALCUL DES PARAMETRES DU FILTRE POUR LA CHARGE NON-LINEAIRE

IV.1. Les questions théoriques du calcul du filtre pour les réseaux électriques :

Les circuits redresseurs étudiés produisent une tension non sinusoïdale et un courant alternatif. Ces variations des courants et des tensions peuvent ne pas être acceptables pour certain type de la charge.

Dans ce cas on doit interposer un filtre entre la source et la charge. Le but de filtrer est de régulariser le débit d'énergie fournie à la charge tout comme un volant régularise le débit de l'énergie mécanique. [5]

Les filtres les plus connus utilisant :

- Les bobines de lissage
- Les condensateurs
- Sur la base de résonance

a - Les bobines de lissage :

L'emploi d'une inductance dans le circuit d'un redresseur permet de réduire l'ondulation du courant redressé, et, par conséquent, celle de la tension aux bornes du circuit continu extérieur à l'ondulation.

Or, même pour une fréquence d'alimentation de 50Hz, les harmoniques atteignent rapidement des fréquences voisines de 1000Hz correspondant au maximum de sensibilité de l'oreille. Le fait se vérifie encore mieux dans le redresseur à amorçage retardé, il peut en résulter des perturbations très gênantes, sur les circuit téléphoniques en particulier.

Dans ces conditions, le filtrage par inductance seule est en générale insuffisant quand il convient d'atteindre des taux d'ondulation ne dépassent pas quelques millièmes, on fait alors appel à des montages spéciaux. [6]

b - Les condensateurs :

Peuvent emmagasiner de l'énergie dans leur champs électrique. Ils servent surtout à maintenir une tension constante et on les branche en parallèle avec la charge.

La tension et le courant dans une charge sont d'autant plus constant que l'énergie emmagasinée dans le filtre est plus grande.

c - Sur la base de résonance :

En générale on utilise dans les réseaux électriques les filtres sur la base de circuit de résonance.

Après avoir choisi les paramètres de circuit de résonance on peut obtenir la fréquence de résonance tend vers zéro, cela signifie que les courants de même harmonique peuvent circuler dans ce circuit et ne pas au réseau. [2]

Disposition des filtres d'harmoniques :

Lorsque la distorsion ou la surcharge des condensateurs risquent d'être excessive, on peut envisager un filtre d'harmonique en gradin commutables, chaque gradin est affecté au filtrage d'un des harmoniques.

Cette méthode comporte de nombreuses contraintes :

La compensation à fournir et la nécessité d'un filtrage ne sont en fait que rarement compatibles ; il est difficile de donner des règles générales, mais on peut dire que les filtres d'harmoniques peuvent être enclenchés séparément, à conditions que les filtres sous tension ne produisent une amplification des harmoniques non filtrés.

Il faut aussi vérifier qu'il n'y a pas de surcharge excessive d'une branche de filtre dans chacun des configuration exploitées et faire le calcul détaillé pour déterminer les configurations à prescrire ou à éviter.

En règle générale, les filtres doivent être enclenchés dans l'ordre de leur fréquences d'accord et déclenchés dans l'ordre inverse mais il faut toujours vérifier que le principe est effectivement applicable dans ce cas considéré. [7]

Les expressions principales du calcul du filtre :

Pour calculer les paramètres du filtre on utilise les formules suivantes :

La puissance réactive Qcf emmagasinée par le filtre : [8]

$$Q_{cf} = U_1 \sum_{k=2}^n \frac{1/k-k}{\rho_k [1/Q_k^2 + (1/k-k)^2]} \quad (4.1)$$

Avec :

- U_1 : La tension du réseau.
- $1/Q_k$: Le facteur de résonance.
- k : Le nombre du filtre.
- ρ_k : La résistance caractéristique.

Le facteur de résonance : [8]

$$\frac{1}{Q_k} = \frac{\Delta\omega_k}{\omega_k} \quad (4.2)$$

Pulsation résonante du filtre : [9]

$$\omega_k = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} \quad (4.3)$$

La résistance caractéristique : [9]

$$\rho_m = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}} \quad (4.4)$$

Le coefficient d'affaiblissement d'harmonique : [10]

$$\gamma_m = \frac{m R_r Q_r Q_k}{\rho_k} \quad (4.5)$$

Avec $m = k$:

$$\gamma_m = \frac{m R_r Q_r Q_k}{\rho_k} \quad (4.6)$$

Définitions :

- $k = m$: Le nombre du filtre.
- m : Le nombre d'harmonique.
- ρ_m : La résistance caractéristique.
- R_r : La résistance du réseau.
- Q_r : Le facteur de résonance du réseau.

IV.2. Calcul des paramètres du filtres :

IV.2.1. Utilisation des spectres du courant pour le choix du nombre de filtre :

Après avoir remarqué que les amplitudes d'harmoniques d'ordre 2, 3, 4, 5, 6 peuvent donné lieu à des résonances dans le réseau d'alimentation. C'est pourquoi choisir un nombre de filtre égale à cinq (5). [11]

IV.2.2. Détermination du facteur de résonance : [12]

Le facteur de résonance est déterminé par chaque branche de filtre par l'utilisation de l'expression approximative.

$$Q_k \simeq KQ_R \quad (4.7)$$

où Q_R : facteur de résonance du réseau

$$Q_R = \frac{\omega L_R}{R_R} \quad (4.8)$$

L_R, R_R : Paramètres du réseau

ω : La fréquence industriel

$$Q_R = 10$$

$$Q_2 = 2 \cdot 10 = 20$$

$$Q_3 = 3 \cdot 10 = 30$$

$$Q_4 = 4 \cdot 10 = 40$$

$$Q_5 = 5 \cdot 10 = 50$$

$$Q_6 = 6 \cdot 10 = 60$$

IV.2.3. Détermination du facteur d'harmonique :

Avant le filtrage on avait un coefficient d'harmoniques pour différentes valeurs de α :

$$K_h = \frac{\sqrt{I_{mk}^2}}{I_{m1}} \quad (4.9)$$

I_{1m}, I_{mk} : Ce sont les amplitudes des courants [5]

Tableau (IV.1) Variation du coefficient K_h en fonction de l'angle (α) . (avant le filtrage)

$\alpha(^{\circ})$	0	15	30	45	60	90	135
K_h	0,68	0,57	0,77	0,9	0,86	1,52	2,75

IV.2.4. Le choix des coefficients d'affaiblissement des harmoniques (le niveau d'affaiblissement des harmoniques) :

Pour cela on suppose que :

- L'harmonique 2 est affaiblie à 6 fois que l'amplitude d'ordre 8.
- L'harmonique 3 est affaiblie à 2 fois que l'amplitude d'ordre 8.
- L'harmonique 4 est affaiblie à 1,5 fois que l'amplitude d'ordre 8.
- L'harmonique 5 est affaiblie à 2 fois que l'amplitude d'ordre 8.
- L'harmonique 6 est affaiblie à 2,3 fois que l'amplitude d'ordre 8.

Après avoir installé des filtres dans chaque branche et d'après le choix des coefficients d'affaiblissement des harmoniques, et pour les nouvelles valeurs des courants, on détermine le nouveau coefficient d'harmonique.

$$K'_h = \frac{\sqrt{\left(\frac{I_{2m}}{\gamma_2'''}\right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{\gamma_3'''}\right)^2 + \left(\frac{I_{4m}}{\gamma_4'''}\right)^2 + \left(\frac{I_{5m}}{\gamma_5'''}\right)^2}}{I_{4m}} \quad (4.10)$$

Tableau (IV .2) Variation du coefficient K'_h en fonction de l'angle (α) .(après le filtrage)

$\alpha(^{\circ})$	0	15	30	45	60	90	135
K'_h	0,33	0,18	0,22	0,27	0,3		

Après avoir installé des filtres dans les branches de circuit on remarque que le coefficient d'harmonique diminue.

IV.2.5. Calcul de la résistance caractéristique :

La résistance caractéristique est donnée par la formule suivante : [9]

$$\rho_m = \frac{m R_R Q_R Q_m}{\gamma_m''} \quad (4.11)$$

$$\rho_2 = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10 \cdot 20}{6} = 80 \Omega$$

$$\rho_3 = \frac{3 \cdot 1,2 \cdot 10 \cdot 30}{2} = 540 \Omega$$

$$\rho_4 = \frac{4 \cdot 1,2 \cdot 10 \cdot 40}{1,5} = 1280 \Omega$$

$$\rho_5 = \frac{5 \cdot 1,2 \cdot 10 \cdot 50}{2} = 1500 \Omega$$

D'après (4.1) on a [5]

$$\frac{Q_{cf}}{U_1^2} = \frac{\left(\frac{1}{k} - k\right)}{\rho_k \left[\frac{1}{Q_k^2} + \left(\frac{1}{k} - k\right)^2 \right]} \approx \frac{1}{\rho_k \left(\frac{1}{k} - k\right)}$$

avec $1/Q_k^2 = 0$

Cette expression permet d'obtenir la liaison entre la puissance et les résistances caractéristiques : [2]

$$\frac{Q_{cf}}{U_1^2} = \frac{1}{\rho_2 \left(\frac{1}{2} - 2\right)} + \frac{1}{\rho_3 \left(\frac{1}{3} - 3\right)} + \frac{1}{\rho_4 \left(\frac{1}{4} - 4\right)} + \dots + \frac{1}{\rho_k \left(\frac{1}{k} - k\right)}$$

La résistance caractéristique est déterminée par :

$$\frac{1}{\rho_k \left(\frac{1}{k} - k\right)} = \frac{Q_{cf}}{U_1^2} - \frac{1}{\rho_2 \left(\frac{1}{2} - 2\right)} - \frac{1}{\rho_3 \left(\frac{1}{3} - 3\right)} - \frac{1}{\rho_4 \left(\frac{1}{4} - 4\right)} - \frac{1}{\rho_5 \left(\frac{1}{5} - 5\right)}$$

$$\frac{1}{\rho_6 \left(\frac{1}{6} - 6\right)} = \frac{Q_{cf}}{U_1^2} - \frac{1}{\rho_2 \left(\frac{1}{2} - 2\right)} - \frac{1}{\rho_3 \left(\frac{1}{3} - 3\right)} - \frac{1}{\rho_4 \left(\frac{1}{4} - 4\right)} - \frac{1}{\rho_5 \left(\frac{1}{5} - 5\right)}$$

Avec $Q_{cf} = 0,4 Q_L \text{const}$

Donc $\rho_6 = 4,76 \Omega$

IV.2.5. Calcul des paramètres des chaines du filtres :- Calcul d'inductance du filtre :

$$L_k = \frac{\rho_k}{\omega_k} \quad (4.12)$$

$$L_2 = \frac{\rho_2}{\omega_2} = \frac{80}{628} = 0,127 H$$

$$\text{avec } \omega_2 = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 628 \text{ rad/s}$$

$$L_3 = \frac{\rho_3}{\omega_3} = \frac{540}{942,47} = 513 H$$

$$\text{avec } \omega_3 = 2\pi f = 942,47 \text{ rad/s}$$

$$L_4 = \frac{\rho_4}{\omega_4} = \frac{1280}{1256,63} = 1,018 H$$

$$\text{avec } \omega_4 = 2\pi f = 1256,6347 \text{ rad/s}$$

$$L_5 = \frac{\rho_5}{\omega_5} = \frac{1500}{1570,70} = 0,95 H$$

$$\text{avec } \omega_5 = 2\pi f = 1570,79 \text{ rad/s}$$

$$L_6 = \frac{\rho_6}{\omega_6} = \frac{4,76}{1884} = 0,0025 H$$

$$\text{avec } \omega_6 = 2\pi f = 1884 \text{ rad/s}$$

Calcul des capacités des filtres :

$$C_k = \frac{1}{S_k \omega_k} \quad (4.13)$$

$$C_2 = \frac{1}{80 \cdot 628} = 19,9 \mu F$$

$$C_3 = \frac{1}{540 \cdot 942,47} = 1,96 \mu F$$

$$C_4 = \frac{1}{1280 \cdot 1256,63} = 0,622 \mu F$$

$$C_5 = \frac{1}{1570,70 \cdot 1500} = 0,424 \mu F$$

$$C_6 = \frac{1}{1884 \cdot 4,76} = 1,15 \mu F$$

Calcul des résistances des filtres :

$$R_k = \frac{\rho_k}{Q_k} \tag{4.14}$$

$$R_2 = \frac{\rho_2}{Q_2} = 4 \Omega$$

$$R_3 = \frac{\rho_3}{Q_3} = \frac{540}{30} = 18 \Omega$$

$$R_4 = \frac{\rho_4}{Q_4} = \frac{1280}{40} = 32 \Omega$$

$$R_5 = \frac{\rho_5}{Q_5} = \frac{1500}{50} = 30 \Omega$$

$$R_6 = \frac{\rho_6}{Q_6} = \frac{4,76}{60} = 0,079 \Omega$$

Les résultats précédents sont donnés sur le tableau suivant :

Tableau (IV.3) Calcul des résistances des filtres

m	2	3	4	5	6
$\omega_k(S)$	668	942,47	1256,63	1570,79	1884
Q_k	20	30	40	50	60
$\rho_k(\Omega)$	80	540	1280	1500	4,76
$L_k(H)$	0,127	0,573	1,018	0,95	0,0025
$C_k(\mu F)$	19,9	1,96	0,622	0,424	1,15
$R_k(\Omega)$	4	18	32	30	0,079

IV.3. Le schéma principal d'installation :

Après le calcul considérons le schéma général du réseau d'alimentation. Le schéma comporte la charge dont les régimes sont réglés à l'aide du redresseur commandé.

Puisque la charge du réseau n'est pas linéaire et pendant un cycle de travail la charge produit une puissance réactive qui change pendant plusieurs périodes.

Pour exclure ce phénomène il faut utiliser les compensateurs statiques.

Le compensateur est construit sur la base de variateur triphasé réalisé avec couplage étoile avec neutre.

En changeant l'angle d'amorçage du compensateur on peut produire la puissance réactive complémentaire, cette puissance réactive est ajoutée à la puissance réactive de la charge, c'est pourquoi la puissance réactive du réseau est constante.

Pour compenser cette puissance réactive on utilise soit les batteries de condensateurs soit les branches du filtre.

Ces filtres jouent deux rôles :

1. Pour compenser la réactive.

2. De filtrer les harmoniques supérieurs.

D'après les spectres d'harmoniques du courant primaire de transformateur, on a choisi cinq (05) branches du filtre pour affaiblir les harmoniques supérieurs plus importants.

Chaque branche est ajustée pour sa propre fréquence. Celle-ci laisse passer uniquement les courants correspondant à la fréquence voulue.

Pour la fréquence industrielle (50Hz) le dispositif du filtre fonctionne comme un condensateur branché en parallèle.

Cet dispositif est utilisé pour la compensation de la puissance réactive.

Le schéma présenté doit fonctionner en régime automatique, pour la réalisation il faut prévoir la liaison entre la charge et le compensateur (fig 4.1).

En générale, on utilise le dispositif de formation de la loi de commande réalisé sur la base électronique ou informatique. Ce dispositif (par ordinateur) permet de réaliser la loi des commandes calculée du compensateur.

Pour adapter le dispositif de formation de la loi de commande, il faut utiliser les dispositifs accédés à l'entrée et à la sortie.

Le dispositif de formation de la loi de commande protège le circuit et améliore les propriétés des commande du système.

En qualité du schéma de régulation d'angle d'amorçage de la charge est présenté sur la (fig 4.2).

Ce schéma permet de commander les thyristors branchés en série ou en parallèle. Pour cela on utilise un enroulement propre pour varier les tensions de la charge.

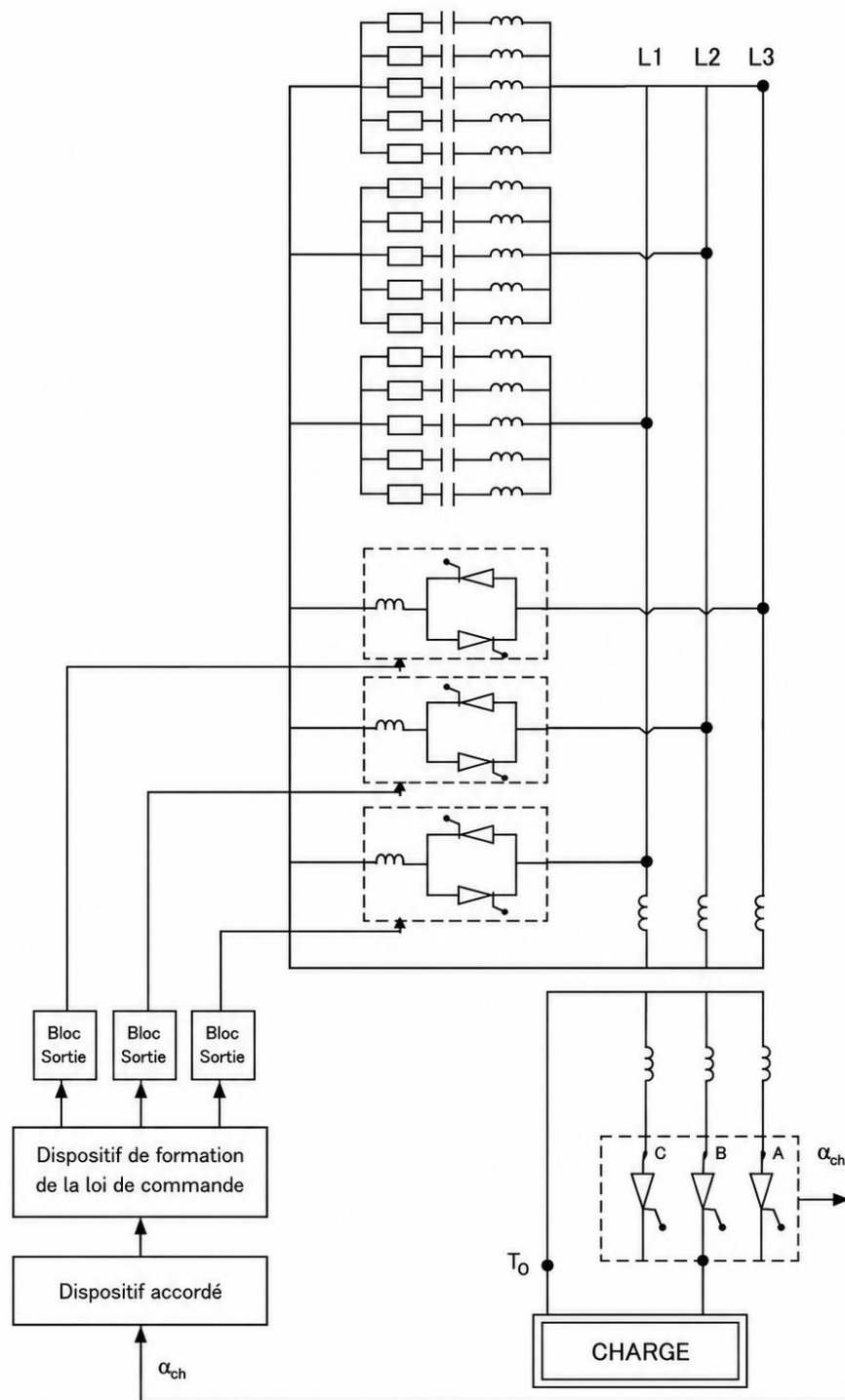


Fig. (IV.1). Schéma d'installation principale

Conclusion :

L'étude menée dans ce chapitre nous a permis de dimensionner les paramètres des filtres passifs, essentiels pour pallier les perturbations harmoniques générées par la charge non linéaire. En optimisant ces paramètres, nous garantissons une amélioration significative de la qualité de l'énergie électrique au sein de l'installation. Cette approche théorique constitue une étape déterminante pour assurer la conformité du système aux normes de dépollution harmonique et garantir la stabilité du régime de fonctionnement

**CHAPITRE V : CALCUL
D'INSTALLATION DE
FILTRE COMPENSATEUR
POUR LE RESEAU AVEC
LA CHARGE ALEATOIRE.**

V.1. Les particularités de la charge aléatoire choisi :

Comme on a vu que la charge non-linéaire son régime de fonctionnement est irrégulier, pendant un cycle de travail la charge non-linéaire varie pendant une période ou plusieurs, ce qui nous donne une consommation de puissance réactive variable, laquelle nous a obligé de faire une étude pour obtenir la loi de régulation qui nous permet de compenser régulièrement la puissance.

En ce qui concerne le régime de la charge aléatoire, il existe plusieurs types de cette charge, nous avons considéré la charge de four de fer. Son régime est un régime aléatoire parce que pendant le cycle de travail, le courant de four change plusieurs fois. Il est difficile de trouver la loi mathématique pour le four, c'est pourquoi nous avons utilisé les caractéristiques expérimentales, dont on a partagé le cycle de travail en plusieurs parties et on suppose que pendant chaque partie le régime n'est pas aléatoire, il est presque constant, et on a choisi les parties les plus importantes de point de vue de la charge. Et pour chaque partie on relève les caractéristiques expérimentales et pour cela on propose un schéma par lequel ont été fait des mesures dans l'installation du four et à l'aide de ces mesures on a fait des recherches pour :

- L'obtention des espérances mathématiques des harmoniques du courant et de tension du F.A.A pour le temps de fusion.
- L'obtention des spectres continus instantanées et statistiques du courant et de la tension de la charge à arc.
- L'obtention de la caractéristique de fréquence du réseau d'alimentation.
- La définition de la quantité des filtres du dispositif de compensation et de filtrage (D.C.F) et les fréquences de leur adaptation selon les résultats de l'analyse spectrale. [13]
- La détermination du facteur de résonance (Q) des filtres selon les spectres continus du courant de charge à arc.

V.2. Les moyens d'obtention des caractéristiques du réseau avec la charge :

V.2.1 - Les méthodes d'obtention des caractéristiques expérimentales :

L'analyse de l'appareillage des spectres des signaux est réalisée par les différentes méthodes. Dans la présente œuvre sont utilisés les méthodes de filtrations et de développement de fourier.

L'obtention de la caractéristique spectrale c'est lié à l'utilisation des analyseurs du spectre, l'élément principale de ces appareils sont les filtres à bande étroite de sélection et qui sert à donner des composants de fréquences, ou bien des intervalles courts du spectre.

Les sorties des filtres sont à l'entrée d'un détecteur et un moyennneur et à sa sortie la composante du signal, attaque l'entrée de l'appareil d'enregistrement.

Les méthodes possible d'analyse sont en parallèle, en serie et combiné.

L'analyse par parallèle se réalise à l'aide d'un ensemble de filtres identiques à bande étroite, chacun de ces filtres est accordé à une fréquence définie. Lorsqu'il y a une action simultanée du signal analysé pour tous les filtres chacun d'eux donne à la sortie la composante du spectre correspondant aux caractéristiques de filtre (adaptation de chaque filtre).

L'analyse en serie se fait à l'aide d'un filtre programmable à bande étroite, réglé dans une bande de fréquence large.

Ce filtre peut adapté sur les différentes fréquences pendant chaque nouveau réglage, on obtient à la sortie différents spectres.

la première méthode possède une grande rapidité d'analyse, cependant la structure du dispositif devient assez compliquée .

La simplicité de l'expérience , la fiabilité dans l'exploitation de la possibilité d'obtention d'un grand pouvoir de différenciation des analyseurs d'une action en série , ces avantages permettent d'utiliser ces analyseurs est la bande passante de son élément selectif Δf . La durée d'analyse en serie est directement proportionnelle à la largeur du spectre analysé et inversement proportionnelle au carré de la bande passante Δf du système selectif

$$t = A \frac{F}{\Delta f^2} \quad (5.1)$$

Actuellement on produit l'analyseur de spectre du type C4-48 dans la gamme de fréquence 10 HZ÷ 20 KHZ avec la dérivation $\Delta f = \pm 0.01$ fn L'erreur principale de mesure de fréquence des composantes spectrales pendant le fonctionnement avec un hétérodyne et pour une bande passante de 5HZ , $\delta f = \pm 0,01$ [fn + 10 HZ] .

L'information sur le niveau de l'harmonique analysé s'enregistre sur l'enregistreur à fonctionnement rapide ou bien est prélevée de l'appareil de mesure à aiguille . [14]

V.2.2. L'analyse spectrale sur la base d'utilisation de la méthode de filtrage de l'action série :

Sur la fig 5.1 est donné de bloc-schéma de l'analyse spectrale sur la base de l'utilisation de la méthode de filtrage de l'action série dans le dispositif de production , les signaux se lisent sur la bande magnétographe, s'amplifient

reproduction du magnétographe circulaire est montée à l'entrée de l'analyseur du spectre à travers l'amplificateur linéaire .

En variant la position du cadran de réglage la d'analyse s'accordera sur l'harmonique analysée la fréquence étant contrôlé par un fréquencemètre électronique . Ensuite la composante du signal attaque l'enregistreur rapide ou bien au traitement ultérieur .

En qualité de l'enregistreur il a été pris un enregistreur analogique du type M327- 5 (bande passante $\delta f=0\pm 100\text{Hz}$) et imprimant .

A la sortie de l'analyseur on obtient la valeur efficace de la composante harmonique du signal au moment que l'harmonique du courant et de la tension se fluctuent fortement alors que leur indication sur l'appareil de mesure de l'analyseur il est necessaire d'augmenter la composante du detecteur des valeurs jusqu'à la valeur maximale 10 secondes. [10] [15]

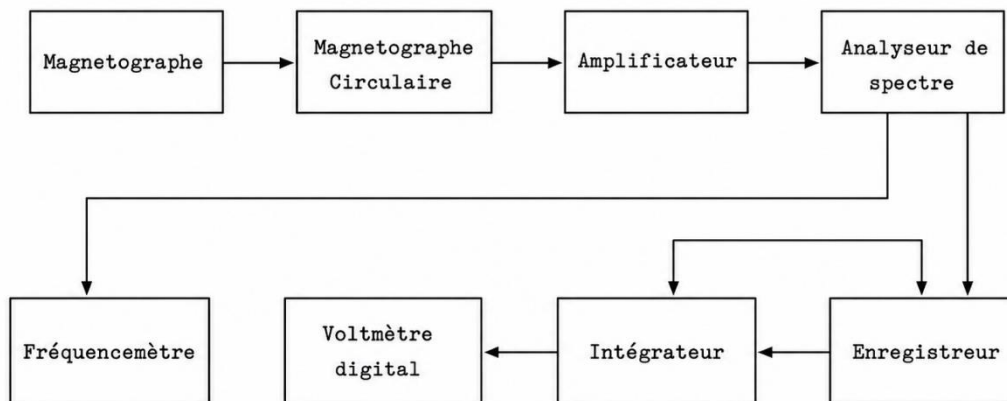


Fig. (V.1). Schéma-bloc de l'analyse spectrale des signaux du courant et de la tension du P.A.A.

L'analyse des paramètres statistique du spectre — l'espérance mathématique, l'erreur quadratique et la variance de l'harmonique, la densité spectrale du courant et de la tension exige l'enregistrement pour un temps fixé minimal de 0,1 sec.

L'espérance mathématique des harmonique supérieures du courant et de la tension de four à arc A.C. peuvent être obtenus par des courbes enregistrés (Fig. 5.2a–5.3a) écrite pour une constante de temps minimale de l'analyseur du spectre selon les formules.

$$\bar{U}_n = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k U_{ni} \quad (5.2)$$

$$\bar{I}_n = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k I_{ni} \quad (5.3)$$

où K — Nombre de valeur maximum de l'harmonique pour une période de réalisation.

U_{ni}, I_{ni} — Tensions et courants respectivement de la $n^{\text{ième}}$ harmonique.

Sur le schéma dans les commentaires des graphes, par exemple 2h, 1/30, 3,2%.

2h — 2ème harmonique.

1/3 — Échelle d'amplificateurs de l'analyseur de spectre.

3,2% — Valeur relative de l'espérance mathématique, ou de niveau maximum de l'harmonique.

Tr — Interval de réalisation.

En variant les graphes selon les formules (5.2) et (5.3) se soulèverait une difficulté de l'espérance...

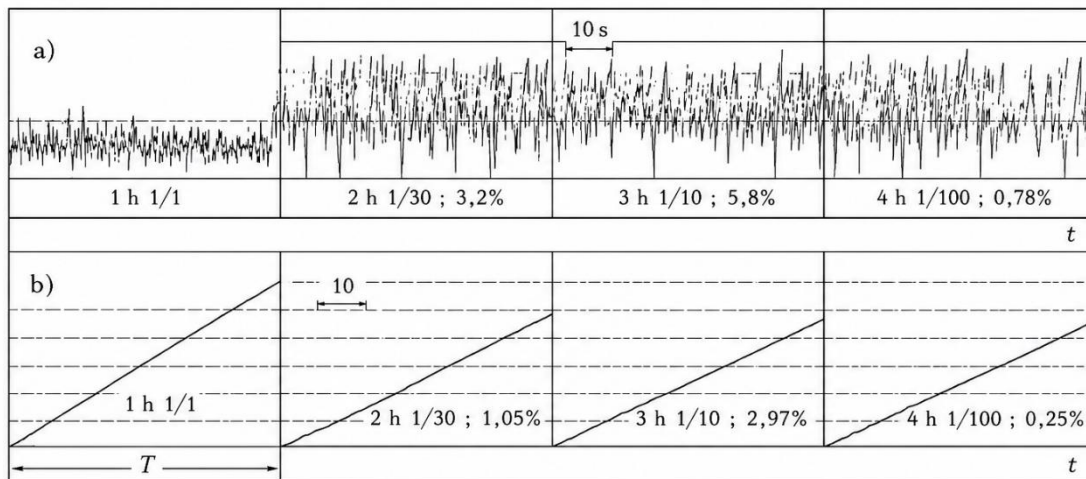


Fig. (V.2)Régistrogramme des harmoniques du courants à côté de 35 KV.

Les harmoniques 1 ÷ 4, le temps du début de la fusion est de 205 mn.

a/Enregistrement à la sortie de l'analyseur de spectre.

b/Enregistrement à la sortie de l'intégrateur.

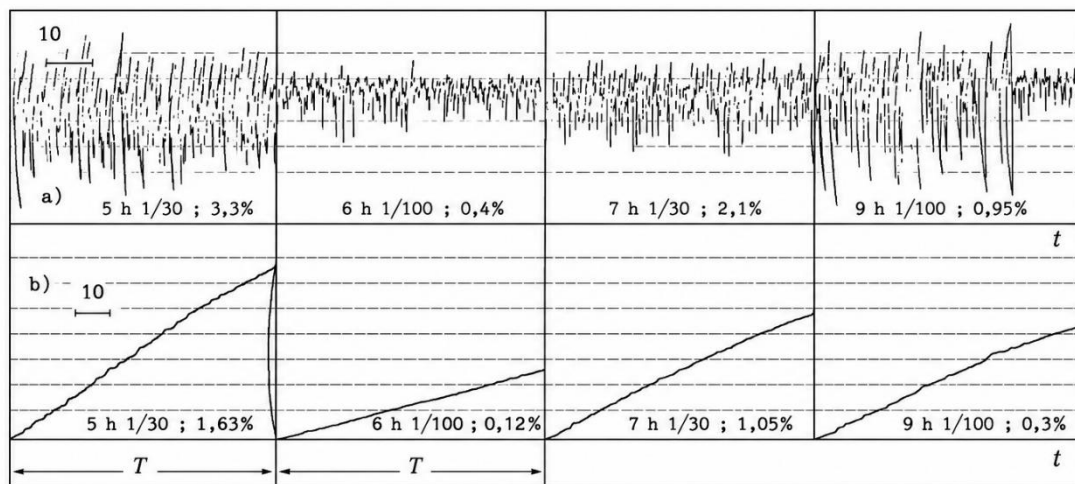


Fig. (V.3) Fusion N° 2. Régistrogramme des harmoniques du courant à côté de 35 KV.

Les harmoniques 5 ÷ 9, le temps du début de la fusion est de 205 mn.

a) Enregistrement à la sortie de l'analyseur de spectre.

mathématique de la n° harmonique d'une minute de réalisation, il faut calculer plus de 200 points. Dans ce cas, pour résoudre à l'aide du calculatrice toutes ces données n'ont pas de sens.

L'autorisation pour déterminer l'espérance mathématique d'une grande quantité de réalisation est possible en se basant sur la méthode discrète.

L'utilisation de la méthode discrète nécessite des opérations d'échantillonnage en temps et quantification des valeurs discrètes en niveaux. D'une part l'application des méthodes discrètes provoquent l'augmentation d'erreur statistique, d'autre part la complication d'analyseur est l'augmentation du temps du calcul qui est très important pour le système en temps réel.

Pour simplifier le processus dont la méthode de calcul est très longue, dont le but de simplifier le processus d'obtention des espérances mathématiques des harmoniques du courant et de la tension du F.A.A., fluctuant fortement, pour assurer une erreur minime de mesure il est possible d'employer une moyenne analogique.

L'espérance mathématique du processus ergodique, comme il apparaît toutes les 3 ÷ 5 min, un processus uniforme du fonctionnement du F.A.A., dont il serait favorable de déterminer par une réalisation. Les mesures statistiques sont basées sur l'emploi de la formule suivante :

$$E^*[x(t)] = \frac{1}{T_r} \int_0^{T_r} x(t) dt \quad (5.4)$$

Qui donne une note de l'espérance mathématique déterminée sur la fin de l'intervall du temps. Moyennement effectuant ses fonctions selon (5.4), s'appelle un intégrateur idéal, c'est aussi que la maille intégrante présente un intérêt, construit sur la base d'un ampli à courant continu.

De ce qui précède il fallait réaliser un intégrateur sur la base d'un ampli opérationnel qui donne la forme d'un circuit intégré du type K284 YD1B. Cette ampli possède une grande impédance d'entrée (500 Ohm).

La constante de temps dans les intervalles de 0,1 s jusqu'à 1,2 s et le temps d'intégration de 30 à 180 s, garantissant ainsi un régime de travail linéaire de l'ampli opérationnel et son erreur minimale en tenant du niveau des signaux venant d'analyseur de spectre. La constante de temps de l'intégrateur $\tau = RC$ est choisi en fonction du niveau du signal et de l'intervall de réalisation, $T_r = 30 \pm 120s$, la constante de temps $\tau = 0,6 \pm 1,2$ s de l'équation de la maille intégrée.

$$U_s = -\frac{1}{RC} \int U_e dt \quad (5.5)$$

Découle qu'à l'intervall de la réalisation T_r et de la constante de temps de l'intégrateur τ , espérance mathématique de la n^e harmonie de l'intensité de courant ou de la tension du F.A.A.

$$\bar{U}_n = \frac{U_{sn}^2 \cdot \tau}{T_r} \quad (5.6)$$

Où U_{sn} — valeur de la tension de la n^e harmonique à la fin de la réalisation.

Les registrogrammes de courant reçu à la sortie de l'intégrateur à la constante de temps $\tau = 0,6$ s, sont montrés sur le graphique 5.4 b et 5.5 b.

D'après l'enregistreur l'espérance mathématique de la valeur absolue de la n^e harmonique est déterminée d'après la formule suivante.

$$\bar{U}_n = \frac{a_m \cdot \tau \cdot V_m}{b} \quad (5.7)$$

Où

a — ordonnée de registrogramme à la fin de la période de réalisation.

m_r Échelle des amplificateurs de l'enregistreur.

m_a Échelle des amplificateurs de l'analyseur des spectre.

B Abcisse de histogramme à la fin de la période de la réalisation.

v Vitesse de l'enregistreur (cm/s).

L'espérance mathématique de la valeur relative de l'harmonique est définie :

$$\bar{U}_n(\%) = \frac{\bar{U}_n}{\bar{U}_1} \cdot 100\% \quad (5.8)$$

L'erreur statistique de la mesure de l'espérance mathématique avec un intégrateur des valeurs moyennes est caractérisée souvent par l'erreur moyenne quadratique. Dans le cas, quand l'intervalle moyen T est plus supérieur par rapport à l'intervalle de corrélation τ_k ,

L'erreur indiquée a pour forme :

$$\delta = \frac{\sigma_x}{e_x} \sqrt{\frac{2}{\theta}} = t \sqrt{\frac{2}{\theta}} \quad (5.9)$$

Où

δ_x — Erreur quadratique moyenne du processus aléatoire à partir de la valeur moyenne.

e_x — Espérance mathématique du processus aléatoire.

θ — La durée d'intégration normalisée par rapport à l'intervalle de corrélation du processus analysé.

t — Coefficient de la variation du processus aléatoire.

Le processus aléatoire du courant du F.A.A. $I(t)$ par la fréquence essentielle a le caractère d'une bande étroite.

Pour le processus à bande étroite l'intervalle de corrélation d'une manière assez précise est déterminé par l'équation :

$$\tau_k = \frac{1}{\alpha} \quad (5.10)$$

Où

α — coefficient de l'amortissement de corrélation.

Pour les fours à arc la valeur α se trouve entre $0,3 \div 4,6$. Par la suite l'intervalle de corrélation compte $\tau_k = 0,2 \div 3$ sec, sur la longueur de réalisation $60 \div 120$ sec l'erreur moyenne quadratique relative (5.9) ne dépasse pas $2 \div 3\%$.

la plus importante ($5 \div 10\%$). L'erreur aléatoire de l'intégrateur est due à la déviation du zéro de l'amplificateur opérationnel.

V.3. CALCUL DU COMPENSATEUR STATIQUE [8]

Le dispositif de compensation et de filtrage dans le circuit à charge aléatoire !

Le dispositif de compensation et de filtrage (D.C.F) est destiné pour la compensation simultanée de la puissance réactive de la charge, et le filtrage des harmoniques supérieures du courant générées par la charge dans le réseau.

Le D.C.F est un filtre à bande limitée composée d'une série de branches résonantes réglées sur les fréquences des harmoniques les plus marquées dans le spectre du courant de la charge (fig. 5.4). [16] [17]

Sur la fig. 5.4 sont désignés : n - numéro de l'harmonique, r - fréquence relative de réglage du filtre R, L, C - Les paramètres du filtre, X_m, R_m - Les paramètres du réseau sur la n ième harmonique : E_1 - source sinusoïdale de la tension ; I_n - L'équivalent de la charge. [16] [17]

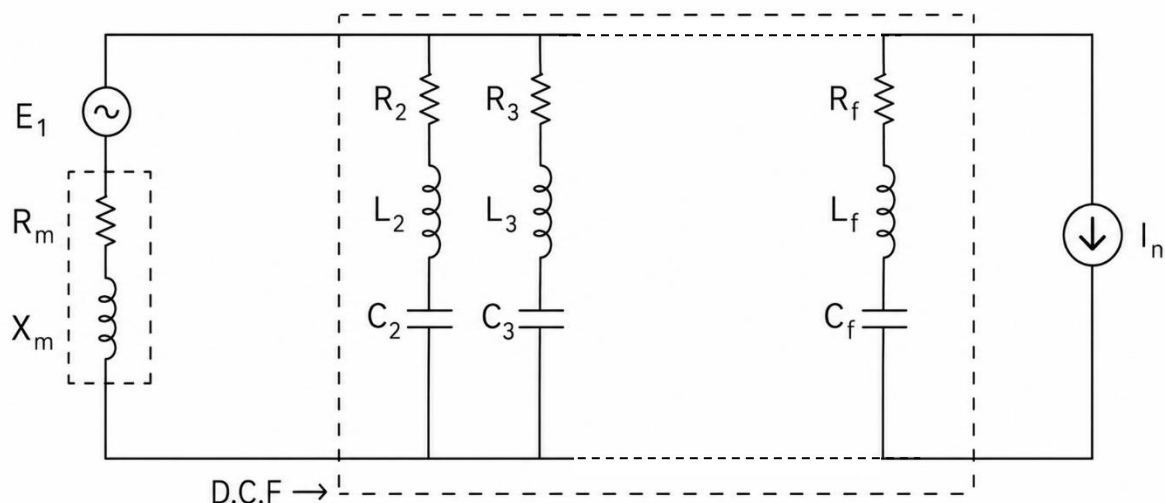


Fig. (V .4) Schéma et principe du filtre D.C.F

La plus part des charges électro-énergétiques non linéaires sont des quasistationnaires et ont spectre du courant linéaire. La méthodologie de calcul D.C.F. pour les charges quasistationnaires est décrite dans le 4ème chapitre.

L'intérêt présente le calcul du D.C.F. dans le circuit à charge aléatoire, ayant un spectre du courant continu.

Les charges du type aléatoire les plus caractérisées sont des fours à arc électriques (F.A.A.). La méthodologie du calcul du D.C.F. pour les circuits du F.A.A. notées dans a trouvé un

caractère des différents résultats pour la résolution du problème de la compensation par filtre.

Pour le rétrécissement du domaine des résolutions admissibles et le choix fondé des paramètres du D.C.F. dans est faite l'optimisation des D.C.F. sur le minimum des dépenses ramenées par les méthodes de programmation non linéaire avec l'analyse spectrale et préalable du circuit du F.A.A.

Dans le diagramme de remplacement, la charge aléatoire à arc est présentée par une source déterminée du courant des harmoniques supérieures avec des amplitudes aléatoires (Fig. 5.4), ce qui permet d'employer la méthode de la théorie des circuits linéaires pendant l'influence des polyharmoniques.

Dans le tableau 5.1 sont présentés les paramètres du D.C.F. optimal d'après les dépenses productives pour les circuits du F.A.A. de 60 MVA de puissance, pour lesquels les conditions de la compensation et de filtrage sont remplies.

Tableau (V.1) Conception et dimensionnement d'un D.C.F :

Numéro du filtre k	1	2	3	4
Fréquence relative de réglage f	3	5	7	11
Facteur de résonance q_k	15	25	35	20
Résistance caractéristique ρ_k	884	84	27	6
Puissance réactive Q_k , MVAR	0.52	3.1	6.45	18.87

La conductibilité d'entrée du D.C.F optimal a la forme:

$$Y_{rc}(j\omega) = \sum_{k=1}^4 \frac{1}{jr_k} \left[\frac{\frac{1}{q_k}}{\frac{1}{q_k^2} + \sigma_k^2(\omega)} - j \frac{\sigma_k(\omega)}{\frac{1}{q_k^2} + \sigma_k^2(\omega)} \right] \quad (5.11)$$

Où K = numéro du filtre; q = facteur de résonance du k^{eme} filtre; ρ_k = résistance caractéristique du k^{eme} filtre; $\sigma_k(\omega) = \omega/\omega_{lk} - \omega_k/\omega$ = facteur de désaccord relatif du k^{eme} filtre; ω_k = fréquence de réglage du k^{eme} filtre; ω = fréquence variable.

Les caractéristiques fréquentielles d'après la conductibilité du D.C.F. avec des paramètres optimal $|Y_{f,cc}(j\omega)|$ et le réseau d'alimentation $|Y_{rc}(j\omega)|$ sont présentées sur la fig (5.6.a).

D'après les caractéristiques fréquentielles, il est clair que la filtration efficace se trouve sur les fréquences supérieures à la 4ème harmonique. D'autre part la plus grande densité spectrale du courant du F.A.A. est concentrée dans la région de la 3ème harmonique. Pour la diminution de la non-sinusoïdalité réelle du courant du F.A.A., il est nécessaire d'augmenter la conductibilité des D.C.F dans la région de la 3ème harmonique.

À l'absence des exigences standardisées à l'appréciation de la non-sinusoïdalité de la tension pour les charges aléatoires se présente l'intérêt à une possibilité d'augmentation fondée de la conductibilité du D.C.F. dans la région du 3ème harmonique sans l'élévation considérable des pertes ramenées. [18]

Le moyen pour l'augmentation de la conductibilité du D.C.F. dans la région du 3ème harmonique est lié avec l'augmentation de la puissance réactive du filtre de la 3ème harmonique en réalisant obligatoirement les conditions de limitation sur la compensation de la puissance réactive.

La limitation sur la compensation peut être réalisée par la répartition de la puissance réactive entre les filtres de la 3ème et 11ème harmoniques, c'est à dire en augmentant de ΔQ la puissance réactive du filtre de la 3ème harmonique, il est nécessaire de diminuer de la même valeur ΔQ la puissance totale des D.C.F. $Q_{c,a}$ reste constante (fig. 5.6 a)

Avec cela se passe la répartition des résistances caractéristiques ρ_3 et ρ_{11} [15] / [8]

$$\rho'_3 = \frac{U_1^2}{\sigma_{3,1}(Q_{3opt} + \Delta Q)} = \frac{U_1^2}{\sigma_{3,1}Q'_3} \quad (5.12)$$

$$\rho'_{11} = \frac{U_1^2}{\sigma_{11,1}(Q_{11opt} - \Delta Q)} = \frac{U_1^2}{\sigma_{11,1}Q'_{11}} \quad (5.13)$$

Où

$\sigma_{3,1}$, $\sigma_{11,1}$ — Les désaccords relatifs des filtres de la 3^{ème} et de 11^{ème} harmoniques sur la fréquence principale .

U_1 — Valeur efficace de la tension de la 1^{ère} harmonique au point du branchement du D.C.F.

A la diminution de la résistance caractéristique du filtre de la 3^{ème} harmonique les dépenses ramenées augmentent .

Pour l'augmentation fondée de la conductibilité du D.C.F. dans la région de la 3^{ème} harmonique , en traduisant la notion de la zone de filtration sure-gamme de fréquences , dans laquelle la condition suivante est réalisée . [18]

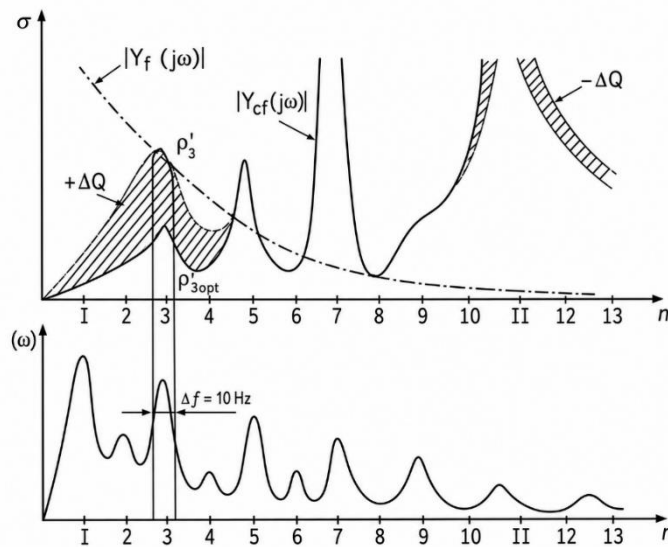
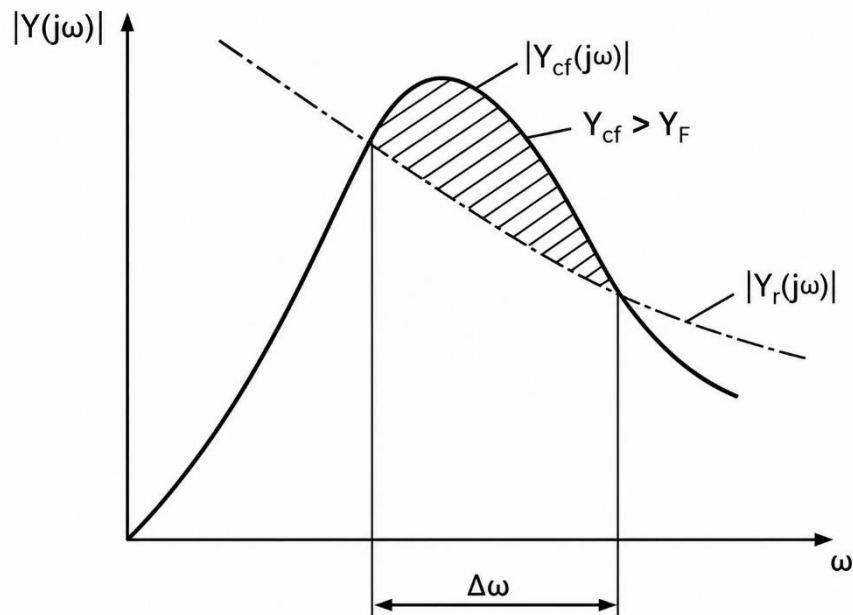


Fig.: (V.5 a) les caractéristiques fréquentielles d'après la conductibilité du D.C.F.

b) Spectre statistique du courant



fig(V.6.c) Zone de filtration

$$|Y_{C.F}(j\omega)| > |Y_r(j\omega)| \quad (5.14)$$

où $|Y_{c.c}(j\omega)|$ — Module de la conductibilité complexe du D.C.F. fig(5.7)

$|Y(j\omega)|$ — Module de la conductibilité complexe du réseau fig(5.8) .

La zone de filtration sûre pour le filtre de la 3^{ème} harmonique doit correspondre à la bande de fréquence Δf_3 de la caractéristique spectrale du courant du F.A.A. dans laquelle est concentrée la densité spectrale maximale aux environs de la 3^{ème} harmonique .

Pour les spectres statistiques du courant du F.A.A. fig(5.6 b) $\Delta f_3 = 10$ HZ .

Par conséquent pour la filtration efficace nécessaire l'accomplissement de la condition fig(5.6c)

$$|Y_{C.F}(j\omega)| > |Y_r(j\omega)| \quad (5.15)$$

avec $145 < f < 155$ HZ

d'après (5.11) et (5.14) déterminons les valeurs limitées $|Y_{c.F}(j\omega)|$ aux points 145 et 155 HZ et après — la valeur ρ'_3 satisfaisante la condition (5.22) .

La puissance réactive des filtres des 3^{ème} et 11^{ème} harmoniques

$$Q'_3 = Q_{3opt} \cdot \rho_{3opt} / \rho'_3 ; Q'_{11} = Q_{11opt} \cdot \rho_{11opt} / \rho'_{11}$$

En résultat de la nouvelle répartition de la puissance réactive des filtres des 3^{eme} et 11^{eme} harmoniques on a obtenu les paramètres principales du D.C.F qui sont cités dans le tableau 5.4 [18] [17]

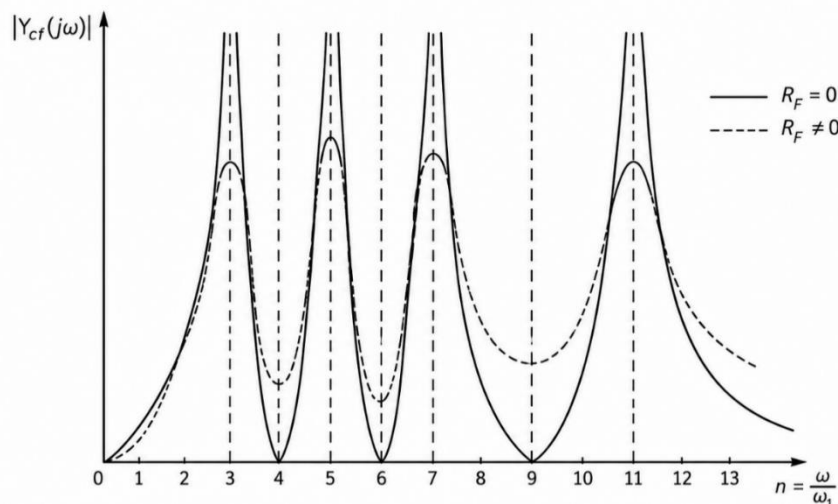


fig.(V.7) Module de la conductibilité complexe du D.C.F¹

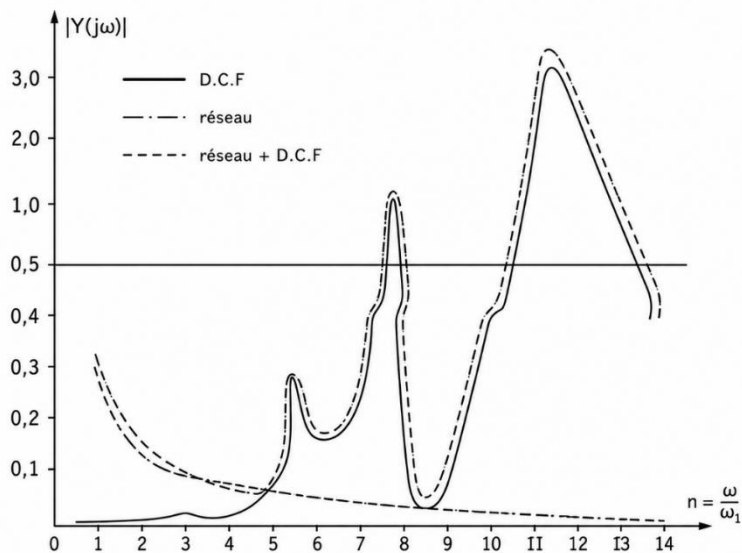


Fig (V.8) Module de la conductibilité complexe du réseau

Tableau (V.2) optimisation des paramètres du D.C.F

Numéro de filtre k	1	2	3	4
La fréquence relative du réglage f_k	3	5	7	11
Facteur de résonance q_k	15	25	35	20
Résistance caractéristique $\rho_k (\Omega)$	90	84	27	7,9
Puissance réactive Q_k , MVAR	5,1	3,1	6,45	14,29

Les dépenses ramenées sur le D.C.F. par rapport à la variante optimale (tableau 5.3) sont augmentées de 6,2% .

De cette façon à l'utilisation de la notion de la zone de filtration sûre , on peut changer d'une manière fondée , d'après les dépenses ramenées les paramètres du D.C.F. optimal pour l'augmentation de la conductibilité dans la région de la plus grande densité spectrale du courant du F.A.A. dans le but de diminuer la non-sinusoïdalité réelle de la tension dans le réseau à charge aléatoire à spectre de courant continu .

V.4. CALCUL ET CHOIX DES PARAMETRES DU FILTRE :

V.4.1. La théorie de calcul des filtres pour la charge aléatoire :

En cours de la fusion , la puissance de la charge à arc diminue ainsi que le contenu des harmoniques paires .

Si on fait le projet de filtres pour la charge nominale pour un travail durant tout le processus de fusion il y aura un danger de surcompensation dans la station de raffinage .

Afin d'éviter la surcompensation , une partie du dispositif de compensation et de filtrage (D.C.F) au stade final de la fusion doit être débranché .

Vu que pendant le processus de fusion , les harmoniques paires diminuent en ordre , on peut régler l'un des filtres sur un harmonique paire et le débrancher pendant la diminution de la puissance consommée par le four , pendant les stades sur "Métal fondu"

le but de l'analyse spectrale réside dans le choix de la quantité des filtres résonnants , fréquence de réglage , le coefficient d'affaiblissement des harmoniques le facteur de résonnance des filtres et l'impédance complexe de la source sur les harmoniques supérieures .

Grâce aux tableaux 5.1., 5.2, On choisit le filtre sur l'harmonique qui a la plus grande influence sur le coefficient .. de la sinusoïdalité de la tension $n = 3,5,7$, ces filtres doivent avoir un facteur de résonnance assez important .

A part cela , il faut un filtre capable d'occuper un intervalle large dans le domaine des fréquences d'un grand rang .

ce filtre est du 11^{ème} harmonique . Cette combinaison de quatre (4) filtres est la base de projection du D.C.F.

Le facteur de résonance des filtres est défini par la bande passante des filtres , le D.C.F. doit garantir la dissipation d'une quantité donnée d'énergie du spectre dans le domaine de la fréquence de réglage et les fréquences externes (non admissibles) .

C'est à dire la bande du filtre doit être plus grande par rapport à la bande passante du spectre du courant du F.A.A. dans la fréquence de réglage .

En liaison avec ceci , par la conduite du spectre du courant se définit la bande passante dans le domaine d'harmoniques filtrées , comme il est montré sur la fig. (5.9) d'où on aura la condition de choix du facteur de résonance du n^{ieme} filtre .

$$\text{Ou } q_n \leq \frac{f_n}{\Delta f_n} \quad (5.16)$$

f_n — fréquence de réglage du n^{ieme} filtre .

Δf_n = bande passante de l'intervalle du spectre du courant du F.A.A. dans la fréquence de réglage du n^{ieme} filtre.

La moyenne du spectre continu nous a donné ce qui suit : [7]

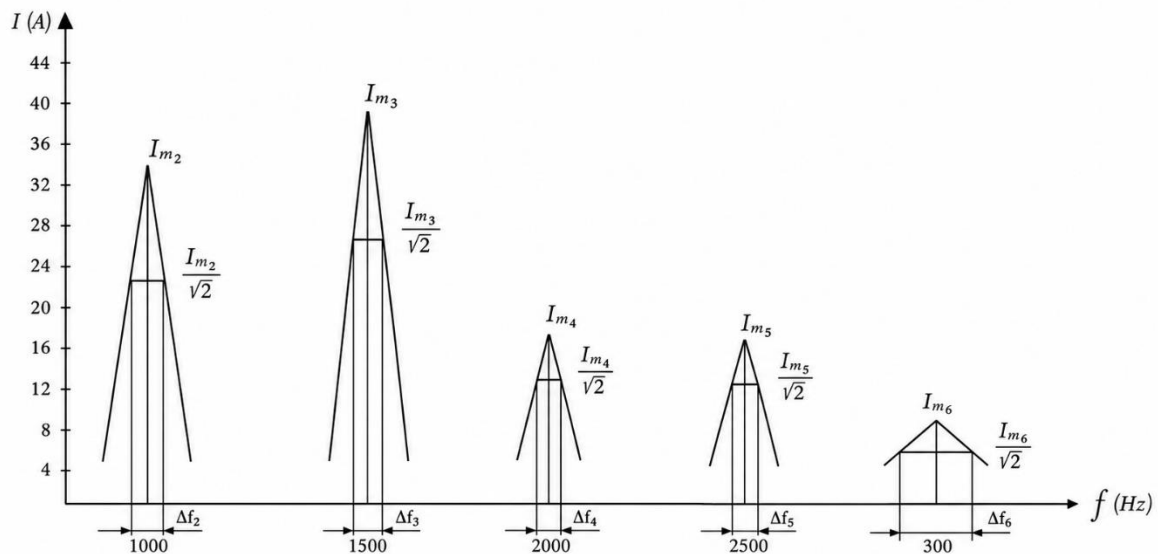


Fig. (V.9) Détermination du coefficient de résonance des filtres d'après les tronçons du spectres

Le changement dans la mesure de la bande passante du spectre dans la 3ème, 5ème, et 7ème harmonique n'est pas grand. Le changement dans la 9ème harmonique est assez important. Au-delà de la 9ème harmonique, avoir une bande passante est impossible, puisqu'au-delà de $450 \div 500$ Hz, le spectre est confondu avec les parasites dus aux appareils. En faisant la moyenne de la bande passante des spectres, nous aurons les valeurs du facteur de résonance des filtres, auxquelles sera définie la condition (5.16).

$$q_3 = 10 \quad q_5 = 25 \quad q_7 = 35 \quad q_{11} = 10 \quad q_5 = 25 \quad q_7 = 35 \quad q_{11} = 55$$

On peut suivre la dépendance du facteur de résonance des filtres en fonction du numéro d'harmoniques.

$$q_n = 5 \cdot n \quad (5.17)$$

En se basant sur la formule (5.17), une suite de facteurs de résonance de filtre proposée est dans le tableau suivant :

Tableau (V.3) Valeurs du facteur de résonance q_n en fonction du rang harmonique n

n	2	3	4	5	6	7	9	11	13
q_n	10	15	20	25	30	35	45	55	65

Conclusion :

Ce chapitre a permis d'établir une approche méthodologique rigoureuse pour le dimensionnement des dispositifs de compensation de filtrage (D.C.F) dans les réseaux électriques soumis à des charges aléatoires. À travers l'analyse comparative des différentes variantes et l'étude de leurs résultats numériques, nous avons démontré l'importance cruciale de l'ajustement des paramètres techniques pour optimiser la réponse du système face aux fluctuations du courant. En finalité, cette démarche de conception, qui concilie performance technique et impératifs économiques, permet de réduire significativement la distorsion de la tension, garantissant ainsi une meilleure qualité de l'onde et une stabilité accrue du réseau

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Ce travail a permis d'établir une approche méthodologique complète pour la compensation de la puissance réactive dans les réseaux électriques alimentant des charges non linéaires et aléatoires. À travers une analyse comparative rigoureuse, nous avons mis en évidence les avantages significatifs de l'utilisation des compensateurs statiques.

Nos travaux ont permis d'analyser les dépendances entre les courants, les tensions et l'angle d'amorçage, démontrant que la puissance réactive du compensateur atteint un comportement optimal pour une valeur particulière de l'angle de commande, ce qui a conduit à l'élaboration d'une loi de régulation optimale du processus de compensation.

Par ailleurs, l'étude s'est étendue au filtrage des harmoniques supérieures, pour lequel nous avons développé des méthodes de calcul spécifiques. En ce qui concerne les charges aléatoires, nous avons mis en évidence l'importance de recourir à des approches probabilistes et statistiques avancées afin de caractériser le courant et la tension de la charge, notamment durant les cycles de fusion.

Cette démarche nous a permis de déterminer les grandeurs statistiques associées aux harmoniques ainsi que les modules des impédances complexes, offrant ainsi une vision précise des paramètres spectraux nécessaires à l'amélioration du filtrage.

Sur le plan scientifique et pratique, cette thèse a abouti au développement de méthodes d'ingénierie robustes pour la conception de compensateurs statiques et de filtres adaptés à divers types de charges. Les solutions proposées se distinguent par leur simplicité de mise en œuvre, l'optimisation des coûts et la disponibilité des composants.

En somme, les résultats obtenus constituent un apport concret pour les secteurs de la métallurgie et de l'énergie, en offrant des outils efficaces pour une gestion durable et performante de la puissance électrique.

Perspectives

Comme prolongement de ce travail, il serait intéressant d'étudier la compensation de la puissance réactive dans des conditions plus proches de la réalité industrielle, en intégrant des charges plus complexes, des perturbations variables et des stratégies de commande adaptatives. Il serait également pertinent de valider les résultats obtenus par simulation avancée ou expérimentation, afin de mieux évaluer les performances du compensateur statique et du filtre dans un réseau réel.

Références bibliographiques

Références

[1]	Schneider Electric, "Compensation de l'énergie réactive et filtrage des harmoniques," dans Guide de l'installation électrique, Chapitre L, 2018.
[2]	P. A. DOBROUSYN LA, Comparaison des variantes de la distribution de la puissance réactive entre les circuits parallèles du D.C.F. Électricité, N° 4, 1977.
[3]	A. BENKHORIS, Dimensionnement et commande d'un compensateur statique de puissance réactive (SVC). Mémoire de Master,, 2021: Université Frères Mentouri, Constantine 1.
[4]	Thyristor, controlled shunt compensation in power networks - ASEA ABB revue technique, Suède, 1991.
[5]	H. BUHLER, Electronique de puissance, 1981.
[6]	V. VENIKOV, Régime transitoire électromagnétique dans un système électrique. Edition de l'école supérieure, Moscou, 1978.
[7]	V. TCHOUKANOV, L'étude du régime dynamique dans les circuits du F.A.A et leurs influences sur la qualité d'énergie électrique, 1979: Institut énergétique, Moscou.
[8]	«Optimisation des réseaux à D.C.F avec utilisation de la source de réglage. Rapport de projet de recherche N° 80070962,» 1981..
[9]	P. TONKINA, Analyse de base et synthèse des circuits électroniques, Moscou: "Ecole Supérieure, 1972.
[10]	M. MAZAROV, Théorie de la transmission des signaux. Moscou, Communication, 1970.
[11]	A. A, Mathématique pour l'ingénieur en radio électronique., Moscou: "NAOUKA", 1965.
[12]	V. VENIKOV, Régime transitoire électromagnétique dans un système électrique. Edition de l'école supérieure, Moscou, 1978.
[13]	A. Iovinski, L'analyse expressa de processus aléatoire, Moscou: "Energia", 1979.
[14]	R. S.G, Les erreurs de mesure. Leningrad, (Energia), 1978.
[15]	F. S. A. JARKOV, Projection optimale des D.C.F. pour les schémas d'alimentation en énergie électrique des F.A.A. Colloque scientifique de l'U.R.S.S. sur la diminution des pertes dans le système électroénergétique, DAKOU, 1981..

Références bibliographiques

[16]	FILTER SYSTEMS. REVUE TECHNIQUE, ABB POWER SYSTEMS, Suède, 1990.
[17]	REACTIVE POWER COMPENSATION. Revue technique: An introduction to ABB SVC; For industries traction, 27-10-91; An introduction to ABB Series Capacitors, SVC System; Design static systems, Suède.
[18]	G. Glachonov, Processus électrique dynamique dans les circuits du F.A.A, Moscou: Institut énergétique, 1975.
[19]	B. V.I, Analyse instrumentelle des caractéristiques des processus., Moscou: Edition Moscou "Energia, 1976.
[20]	B. N. P. A, Mesure et analyse du processus aléatoires, Moscou: Edition "Mir, 1974.

RÉSUMÉ

RÉSUMÉ :

Ce mémoire porte sur l'optimisation de la compensation de la puissance réactive dans les réseaux électriques industriels, notamment ceux soumis à des charges non-linéaires et aléatoires. Après une étude théorique des dispositifs de compensation statique, nous avons développé des méthodes de calcul robustes pour les filtres-compensateurs. Nos travaux, basés sur une analyse comparative et statistique, permettent d'ajuster les paramètres techniques pour réduire la distorsion de tension, améliorer la qualité de l'onde et minimiser les coûts d'installation. Ces solutions offrent ainsi des outils performants et économiquement viables pour les secteurs de la métallurgie et de l'énergie.

Abstract:

This thesis focuses on the optimization of reactive power compensation in industrial electrical networks, particularly those subjected to non-linear and random loads. Following a theoretical study of static compensation devices, we have developed robust calculation methods for filter-compensators (D.C.F). Our work, based on comparative and statistical analysis, allows for the adjustment of technical parameters to reduce voltage distortion, improve wave quality, and minimize installation costs. These solutions provide efficient and economically viable tools for the metallurgy and energy sectors.

ملخص :

تتناول هذه المذكرة تحسين تعويض القدرة الرادئة في الشبكات الكهربائية الصناعية، لا سيما تلك التي تتعرض لأحمال غير خطية وعشوائية. بعد إجراء دراسة نظرية لأجهزة التعويض الساكنة، قمنا بتطوير طرق حسابية قوية لمرشحات التعويض (D.C.F). تعتمد أعمالنا على تحليل مقارن وإحصائي يسمح بضبط الخصائص التقنية لتقليل تشوه التوتر، تحسين جودة الموجة، وتقليل تكاليف التركيب. توفر هذه الحلول أدوات فعالة ومجدية اقتصادياً لقطاعات الصناعات المعدنية والطاقة