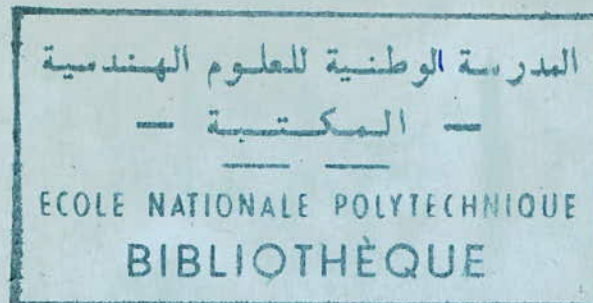


13/78

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Electricité

2ex



**COMPENSATION DES FLUCTUATIONS D'ENERGIE REACTIVE
CAUSEES PAR LES FOURS A ARC ET LES LAMINOIRS**



PROJET DE FIN D'ETUDES

proposé par Mr. H. BOUKARI
Professeur à l'E.N.P.A.

réalisé à la „SONELGAZ” par Salah MAUCHE et
Rachid IKNI

Promotion Juin 1978

I

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Electricité

**COMPENSATION DES FLUCTUATIONS D'ENERGIE REACTIVE
CAUSEES PAR LES FOURS A ARC ET LES LAMINOIRS**

PROJET DE FIN D'ETUDES

proposé par Mr. H. BOUKARI

Professeur à l'E.N.P.A.

réalisé à la „SONELGAZ” par Salah MAUCHE et
Rachid IKNI

Promotion Juin 1978

REMERCIEMENTS

Nos remerciements et notre profonde gratitude vont à :

Monsieur H. BOUKARI, professeur à l' Ecole Nationale Polytechnique d' Alger et directeur technico-commercial à la SONELGAZ, pour avoir mis à notre disposition des moyens matériels considérables

Monsieur B. ZAIDI, ingénieur à la SONELGAZ, pour ses judicieuses suggestions et ses précieux conseils

et à tous ceux qui ont collaboré, de près ou de loin, à l'élaboration de cette étude, en particulier, et à notre formation, en général.

TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u> -----	1
 <u>CHAPITRE I : PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF ET VARIATIONS DE TENSION DANS LES RESEAUX</u> -----	3
I-1- <i>Puissance en courant alternatif</i> -----	3
-1- <i>Puissance instantanée</i> -----	3
-2- <i>Puissance active, réactive et fluctuante</i> -----	4
-3- <i>Nature de l'énergie réactive</i> -----	4
I-2- <i>Puissance de court-circuit.</i> -----	7
-1- <i>Définition</i> -----	7
-2- <i>Impédance amont, admittance de court-circuit.</i> -----	7
I-3- <i>Variations de tension</i> -----	83
 <u>CHAPITRE II : LE FLICKER</u> -----	11
II-1- <i>Définition</i> -----	11
-2- <i>Effets</i> -----	11
-3- <i>Origine</i> -----	12
-4- <i>Critères d'appréciation</i> -----	12
-5- <i>Principe de mesure</i> -----	15
-1- <i>Reaction de l'œil à la variation du flux lumineux</i> -----	15
-2- <i>Etude de l'ensemble lampe - système visuel</i> -----	16
-3- <i>Conclusion</i> -----	17
-4- <i>Cas des à-coups brusques de tension à très basse fréquence.</i> -----	17
-6- <i>Appareil de mesure : le flickermètre</i> -----	183
-1- <i>Principe de l'appareil</i> -----	183
-2- <i>Dispositif de depouillement</i> -----	19

<u>CHAPITRE III</u> : FOUR A ARC ELECTRIQUE	21
III-1- Généralités	21
-2- Arc électrique	22
-1- Définition	22
-2- Principe	22
-3- Propriétés	22
-3- Régulation des électrodes	23
-4- Classification des fours à arc	24
-1- Four à arc libre	24
-2- Four à arc résistance	24
-3- Four à arc surcharge	25
-5- Appareillage électrique	25
-6- Caractéristiques électriques	26
-1- Schéma équivalent	26
-2- Equations électriques	27
-7- Diagrammes caractéristiques	27
-8- Cycle de fonctionnement	30
-1- A l'amorçage	30
-2- Au début et en court de fusion	30
-3- En fin de fusion	30
-4- Sur bain de métal fondu	31
-9- Conduite du four	31
-10- Perturbations causées par le four à arc	32
-11- Problème de raccordement du four	34
-12- Énergie réactive appelée par le four	38
 <u>CHAPITRE IV</u> : LAMINOIRS	 41
IV-1- Introduction	41
-1- But du laminage	41
-2- Description et principe de fonctionnement	41
-3- Alimentation et commande des moteurs d'entraînement	42
-1- Considérations générales	42

V

-2- Choix du mode de couplage	43
-3- choix du mode de réglage	43
-2- Reactions des groupes redresseurs sur le réseau	44
-1- Introduction	44
-2- Origine des pointes de charges de puissance réactive	45
-3- Valeur moyenne de la tension redressée et consommation d'énergie réactive	46
-4- Estimation du facteur de puissance	50
-5- Estimation des chutes de tension provoquées par les pointes de charge réactive	51
-1- Influence des pointes de charge sur la tension	51
-2- Courant de court-circuit et pointe de charge réactive	53
-6- Harmoniques de courants injectés dans le réseau	53
-3- Méthodes générales de réduction de consommation d'énergie réactive par les redresseurs	55
-1- Diagramme des puissances	55
-2- Réduction au minimum de tension	56
-3- Régulateurs à maximum de flux	57
-4- Emploi des redresseurs à commande échelonnée	57
-4- Problème de la compensation d'énergie réactive dans les réseaux	59

CHAPITRE V : INTRODUCTION A LA COMPENSATION

V-1- Fonctions de la compensation	61
-2- Les compensateurs	62
-1- le compensateur synchrone	62
-2- les compensateurs statiques	63
-3- Quelques considérations sur les courants asymétriques	63
-4- Quelques considérations sur les harmoniques de courant	64

CHAPITRE VI : COMPENSATEUR SYNCHRONE

VI-1- Rappel sur la machine synchrone	66
---	----

VI

-1- Equations et diagrammes	66
-1- Expression des flux	67
-2- Expression des tensions	67
-3- Diagrammes	68
-2- Stabilité	70
-1- Puissance et couple	70
-2- Stabilité dynamique	71
-3- Fonctionnement à puissance constante et excitation	
Variable	72
-2- Fonctionnement en compensateur	74
-1- Principe	74
-2- Régulation	75
-3- Temps de réponse	76
-4- Conclusion	77

CHAPITRE VII : COMPENSATION PAR CONDENSATEURS COMMUTES

PAR THYRISTORS	79
-1- Condensateurs commutés par thyristors	79
-1- Schéma de principe	79
-2- Technique de couplage et principe de fonctionnement	79
-1- Condensateurs	80
-2- Inductance L	81
-3- Résistance R	81
-2- Principe de la compensation	82
-1- Idée de base	82
-2- Régulation	83
-3- Mesure de la puissance réactive	84
-1- charge symétrique	84
-2- charge asymétrique	85
-4- Temps de réponse	86
-5- Remarques	87
-6- Dimensionnement	87

VII

-7- Conclusion	87
----------------	----

CHAPITRE VIII : COMPENSATION PAR REACTANCE COMMANDEE

PAR THYRISTORS	89
VIII-1- Reactances commandees par thyristors	89
-1- schema de principe	89
-2- principe de fonctionnement	89
-2- Principe de la compensation	90
-1- idees de base	90
-2- principe de fonctionnement	92
-3- Mesure et regulation	93
-4- temps de reaction	94
-5- Remarque	95
-6- Conclusion	96

CHAPITRE IX : COMPENSATION PAR STABILISATEUR A REACTANCE

SATUREE	97
IX-1- Generalites	97
-2- Reactance autosaturable	97
-3- Stabilisateur de tension alternative	98
-4- Stabilisateur de barre omnibus	99
-1- Schema	99
-2- Principe de stabilisation	100
-3- Mecanisme de stabilisation	100
-5- Stabilisateur a Reactance a prise	101
-1- Schema	101
-2- Principe de stabilisation	101
-3- Mecanisme de stabilisation	102
-6- Compensateur a reactance saturee	103
-1- Compensateur de barre omnibus	104
-1- schema	104
-2- temps de reponse	105

VIII

-3- Conclusion	106
-2- Compensateur à reactance a prise	106
-1- Schema	106
-2- Temps de réponse	108
-3- Conclusion	108
-7- Transducteur magnetique	108
-1- Definition	108
-2- Constitution et montage	109
-3- Equations de fonctionnement	109
-8- Compensateur à transducteur	110
-1- Schema et constitution	110
-2- Principe de compensation	111
-3- Temps de réponse	112
-4- Conclusion	113
<u>CONCLUSION</u>	114
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	115

INTRODUCTION

La tâche principale d'un distributeur de l'énergie électrique est d'assurer l'alimentation de tous les usagers, en permanence, en tout point du réseau, dans les meilleures conditions possibles et avec le niveau de qualité de service garanti.

La production et le transit de l'énergie doit se faire en maintenant un plan de tension correct, et une bonne stabilité du réseau.

Dans le cas de variations lentes et peu fréquentes de la tension, l'action correctrice des transformateurs à réglage en charge est assez efficace. Le facteur de puissance moyen peut être amélioré à l'aide de batteries de condensateurs fixes fournissant une puissance réactive constante.

Le problème est nettement plus complexe dans le cas de fluctuations rapides de la tension engendrant des phénomènes de FLICKER, d'où des effets gênants sur certaines installations techniques et sur l'ensemble des usagers de l'éclairage à incandescence.

En effet, les réseaux d'alimentation sont de plus en plus "pollués" par des utilisateurs dont l'absorption de puissance présente les caractéristiques suivantes :

- L'utilisateur fait varier l'absorption en puissance réactive rapidement et dans un large éventail de puissance.

- L'utilisateur charge le réseau de courant comportant des harmoniques.

- L'utilisateur charge le réseau de courants asymétriques.

Les remèdes possibles à cette "pollution" ressortissent essentiellement à deux (2) catégories dont l'étude objective requiert une grande collaboration entre l'utilisateur et le.

fournisseur de l'énergie électrique.

D'une part, il peut être envisagé, étant donné l'incidence de la PUISSANCE DE COURT CIRCUIT sur l'importance de l'amplitude des variations de tensions, d'étudier la structure du réseau d'alimentation en vue du raccordement du récepteur perturbateur à une tension plus élevée, c'est-à-dire à une puissance de court-circuit accrue. Cette solution dépend entièrement du stade de développement atteint par le réseau à l'époque de l'implantation du récepteur.

D'autre part, il est possible d'agir au niveau même de l'utilisateur et ce en ayant recours à des installations de COMPENSATEUR DE L'ENERGIE REACTIVE.

C'est ce dernier aspect qui constitue l'objet essentiel de la présente étude y compris une approche des problèmes relatif au fonctionnement des principales installations perturbatrices : LES FOURS A ARC ET LES LAMINOIRS.

CHAPITRE - I | PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF ET VARIATIONS DE TENSION DANS LES RESEAUX

I-1- PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF

I-1-1 PUISSANCE INSTANTANEE

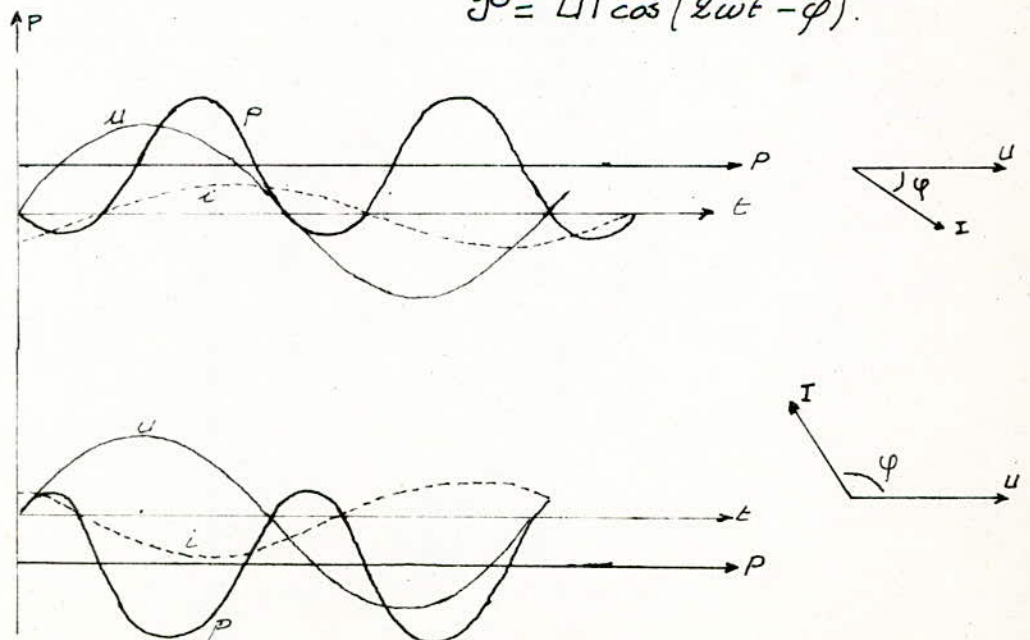
Un récepteur monophasé alimenté par une tension sinusoïdale, $u = U\sqrt{2} \cos \omega t$, prise comme origine, et parcouru par un courant $i = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi)$, où φ est le déphasage du courant par rapport à la tension, absorbe, pendant la durée de temps $[t, t + dt]$, la quantité d'énergie définie par la relation : $dW = u i dt$,

et met en jeu la puissance

$$p = \frac{dW}{dt} = u i = 2 U I \cos \omega t \cos(\omega t - \varphi) \\ = U I \cos \varphi + U I \cos(2\omega t - \varphi)$$

Cette puissance est composée de la grandeur fixe $U I \cos \varphi$ qui représente la puissance moyenne et de la puissance sinusoïdale de pulsation 2ω :

$$P = U I \cos \varphi$$



I-1-2 - PUISSANCES ACTIVE, FLUCTUANTE ET REACTIVE

La puissance active en courant alternatif est la puissance constante qui, en courant continu, développe au cours d'une période T la même quantité d'énergie. C'est donc la puissance moyenne

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u i dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} U I \cos \varphi dt + \frac{1}{T} \int_t^{t+T} U I \cos(2\omega t - \varphi) dt$$

$$P = UI \cos \varphi$$

Le second terme de la puissance instantanée $\mathcal{P} = UI \cos(2\omega t - \varphi)$ dont la moyenne est nulle est la puissance fluctuante qui peut être décomposée, par développement, en deux termes :

$$\mathcal{P} = UI \cos \varphi \cos 2\omega t + UI \sin \varphi \sin 2\omega t$$

L'expression de la puissance instantanée devient alors :

$$p = UI \cos \varphi [1 + \cos 2\omega t] + UI \sin \varphi \sin 2\omega t$$

Le premier terme de valeur moyenne égale à la puissance active P et dont l'amplitude varie entre 0 et $2P$ avec la pulsation 2ω est par définition la puissance active instantanée.

Le second terme de valeur moyenne nulle, et dont l'amplitude oscille entre $-UI \sin \varphi = -Q$ et $UI \sin \varphi = Q$ avec la même pulsation 2ω , est, par analogie, définie comme la puissance réactive instantanée, et son amplitude $Q = UI \sin \varphi$ comme la puissance réactive.

I-1-3 - NATURE DE L'ENERGIE REACTIVE

Un conducteur porté au potentiel V et parcouru par le courant I est entouré par un champ électromagnétique composé des deux vecteurs :

$$\vec{E} = \text{champ électrique}$$

$$\vec{B} = \text{champ d'induction magnétique}$$

Un élément de volume dv de l'espace environnant le conducteur contient l'énergie électromagnétique définie par l'expression

$$dW = \frac{1}{2} \left(\epsilon \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu \mu_0} B^2 \right) dv$$

En effet pour porter un conducteur de capacité C à un potentiel V il a fallu fournir l'énergie :

$$W_e = \frac{1}{2} CV^2$$

emmagasinée dans l'élément de volume dv de l'espace environnant de sorte que :

$$W_e = \frac{\epsilon_0}{2} \iiint \epsilon E^2 dv$$

avec ϵ_0, ϵ , respectivement les constantes diélectriques du vide et relative du milieu considéré.

De même pour faire circuler un courant dans un conducteur d'inductance L il faut fournir l'énergie

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2$$

elle aussi emmagasinée dans l'espace environnant telle que :

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} \iiint \frac{B^2}{\mu} dv$$

avec μ_0 et μ , respectivement les perméabilités magnétiques du vide et relative du milieu ambiant.

Dans un réseau à courant continu, l'énergie électrique W_e fournie à la mise sous tension reste constante tant que la tension reste constante. Elle est récupérée à la mise hors tension. Quant à l'énergie magnétique W_m , elle varie avec la charge. Elle est aussi récupérée, aux pertes près, à l'arrêt de consommation.

En courant alternatif le potentiel V et le courant I étant variable, il y a échange continu entre les champs \vec{E} et \vec{B} d'une part et la source d'autre part. Ce qui met en jeu les puissances.

$$q_e = \frac{dW_e}{dt} = CV \frac{dV}{dt}$$

et

$$q_m = \frac{dW_m}{dt} = LI \frac{dI}{dt}$$

Pour mieux mettre en valeur les différentes puissances, on représente un appareil d'utilisation quelconque, par une résistance R , une inductance L et une capacité C montées en parallèle et soumises à la même tension $V = U\sqrt{2} \cos \omega t$.

Le récepteur reçoit de la source la puissance active qui subira la transformation pour laquelle est conçu l'appareil de sorte que :

$$P_a = \frac{U^2}{R} \cos \omega t$$

Il reçoit aussi la puissance capacitive

$$q_e = -U^2 C \omega \sin \omega t$$

nécessaire à la mise sous tension et la puissance magnétique ou magnétisante

$$q_m = \frac{U^2}{L\omega} \sin \omega t$$

Lorsque les puissances q_m et q_e sont égales, en module il y a échange uniquement entre les deux champs.

$LC\omega^2 = 1$, on dit qu'il y a résonance.

Dans le cas où les modules des puissances q_e et q_m sont différents, la source participe alors à l'échange et le réseau doit transiter une puissance supplémentaire qui est la puissance réactive définie par la différence:

$$\mathcal{P} = q_m - q_e$$

Le récepteur est dit consommateur d'énergie réactive lorsque \mathcal{P} est positive et producteur pour $q_m < q_e$

En définitive l'énergie réactive est liée à l'existence des champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} . Elle passe intégralement et alternativement de la forme électrocinétique à la forme électromagnétique dans les champs magnétiques, et à la forme électrostatique dans les champs électriques.

I-2- PUISSANCE DE COURT-CIRCUIT

I-2-1 DEFINITION

La puissance de court-circuit est une grandeur fictive homogène à une puissance définie à partir du courant de court-circuit triphasé I_{cc} par la relation :

$$S_{cc} = U_n I_{cc} \sqrt{3}$$

U_n étant la tension entre-phase nominale du réseau.

La puissance de court-circuit est un paramètre essentiel d'un réseau intervenant à tous les stades de son évolution aussi bien au niveau conception (choix du niveau de tension, structure du réseau, etc...) qu'au niveau exploitation. Il permet de caractériser le comportement d'un réseau face aux perturbations rapides : La chute de tension relative en pourcent est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit, alors une augmentation suffisante de cette dernière permet d'atténuer, voire même négliger, la quasi-totalité des perturbations.

Le calcul de la puissance de court-circuit, donc du courant de court-circuit, est généralement effectué en utilisant les réactances transitoires des alternateurs dans plusieurs hypothèses de productions et de consommation.

I-2-2 IMPEDANCE AMONT ADMITTANCE DE COURT-CIRCUIT

En appliquant le principe de superposition au

point du défaut, le réseau rendu passif vu de ce point est équivalent à une impédance Z_0 telle que

$$\frac{U}{\sqrt{3}} = Z_0 I_{cc}$$

avec U la tension composée au point du défaut avant son apparition.

Z_0 est dite impédance amont du réseau.

De même on définit l'admittance de court-circuit Y_{cc} de sorte que

$$Y_{cc} = \frac{1}{Z_0}$$

Dans la mesure où l'on peut confondre la tension U avec la tension nominale U_n du réseau, l'expression de la puissance de court-circuit devient alors.

$$S_{cc} = 3Z_0 I_{cc}^2 = Y_{cc} U_n^2$$

I-3-VARIATIONS DE TENSION

Quelle que soit sa nature, maillé ou radiale, un réseau peut être le siège de phénomènes susceptible d'altérer la qualité de la tension. Dans le cas de notre étude, ces phénomènes consistent en des variations plus ou moins brusques de la charge dues au fonctionnement caractéristique de certains récepteurs de grande puissance.

Dans le calcul des variations de tension, on assimilera un élément de réseau à son impédance complexe :

$$Z = R + jX \quad (\text{schéma I-2})$$

La puissance apparente transitée par cet élément de réseau est :

$$S = P + jQ = U_2 I^* \sqrt{3}$$

U_2 = tension composée prise comme origine

I^* = grandeur conjuguée du courant dont l'expression est

$$I = \frac{P - jQ}{U_2 \sqrt{3}}$$

la variation de la tension aux extrémités de l'impédance est alors:

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_1 - U_2 = (R + jX) \sqrt{3} \frac{P - jQ}{U_2 \sqrt{3}} \\ &= \frac{(R + jX)(P - jQ)}{U_2} \end{aligned}$$

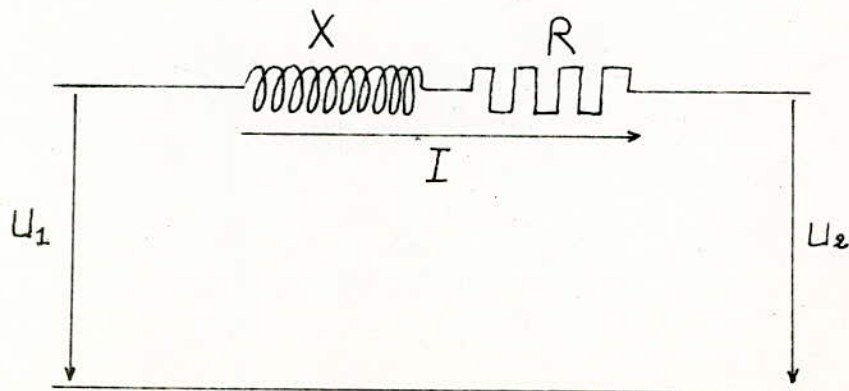
avec pour module

$$|\Delta U| = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)(R^2 + X^2)}}{U_2}$$

et pour argument de sorte que :

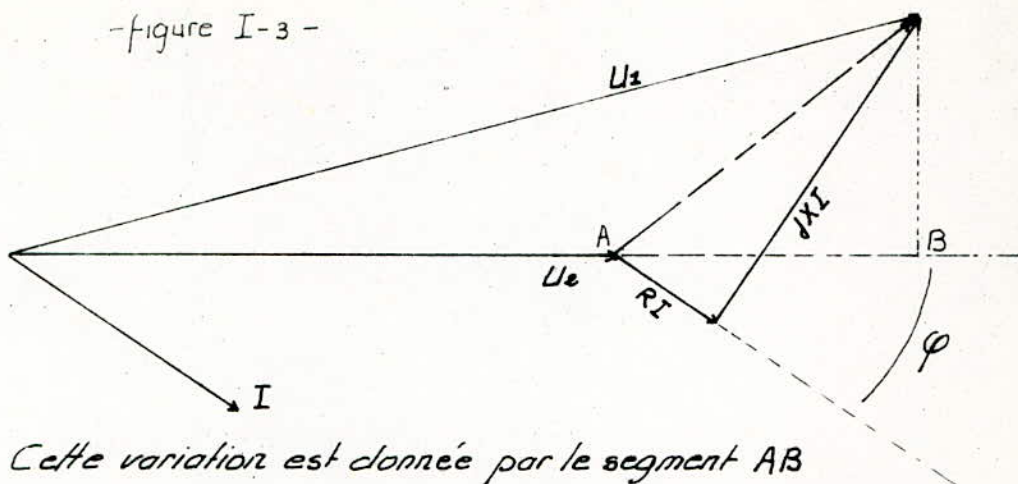
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{XQ + RP}{XP - RQ}$$

Pour le consommateur seule l'intérêt la variation du module $|U_1| - |U_2|$. L'intérêt est alors de chercher, moyennant certaines hypothèses simplificatrices, une expression simple donnant cette variation. (voir figure I-3)



-figure I-2-

-figure I-3-



Cette variation est donnée par le segment AB
telle que

$$AB \simeq |U_1| - |U_2| = \sqrt{3} [R I \cos \varphi + X I \sin \varphi]$$

et enfin :

$$|\Delta U| = \frac{RP + XQ}{U_2}$$

Comme (~~la puissance~~) les puissances active et réactive sont, dans la plus part des cas, du même ordre de grandeur et, à l'exception des réseaux à basse tension, la résistance est négligeable devant l'inductance. L'expression de la variation de tension devient alors :

$$|\Delta U| = \frac{XQ}{U_2}$$

Par ailleurs l'impédance de court-circuit a sa partie réelle très faible, alors en assimilant la reactance X du réseau à l'impédance amont Z_0

$$Z_0 \simeq X = \frac{U_2}{\sqrt{3} I_{cc}}$$

alors

$$|\Delta U| = \frac{U_2 Q}{U_2 I_{cc} \sqrt{3}}$$

ou

$$\frac{|\Delta U|}{U_2} = \frac{U_2 Q}{U_2^2 I_{cc} \sqrt{3}} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

II.1. DEFINITION

Le flicker, ou papillotement du flux lumineux, est la matérialisation sur le réseau électrique des variations très rapides de la tension de ce réseau.

Ces variations de tension apparaissent comme une superposition de modifications relativement lentes et de fluctuations rapides de la valeur efficace de la tension. On répartit ces fluctuations en deux catégories principales:

- Les variations périodiques de tension (dans la bande de fréquence comprise entre 0,5 et 25 Hz)

- Des à-coups brusques de tension se succédant à des intervalles de temps de l'ordre de quelques secondes. Les variations ont une durée plus petite ou au maximum égale à un cycle.

II-2. EFFETS

Le flicker affecte particulièrement l'éclairage à incandescence d'utilisation très générale. Ces effets sont donc susceptibles d'être ressentis sous forme de "sensation de gêne" par les usagers de l'énergie électrique.

Le flicker peut-être aussi à l'origine de perturbations dans le fonctionnement de certains appareils comme les récepteurs de télévision, les calculatrices électroniques, les installations radiographiques, certains automatismes, etc... ou d'une manière générale toute installation exigeant une parfaite stabilité de la tension d'alimentation.

II-3-ORIGINE

Les variations périodiques ou erratiques sont dues à deux types de machines :

- Les machines appelant des puissances à variations rapides comme les fours à arc, machines à souder, laminaires....
- Les machines créant des tensions à des fréquences non harmoniques qui se superposent à la tension à 50 Hz du réseau, comme les machines à souder à haute fréquence, les moteurs à rotor dissymétrique, les émetteurs de télécommande, etc....

Les variations sous forme d'à-coup brusque de tension sont dues :

- A certains des appareils déjà cités au cours d'une phase particulière de leur fonctionnement, comme le début de fusion dans les fours à arc.
- A des appareils à charge non fluctuante mais dont le fonctionnement est intermittent comme c'est le cas de certains moteurs à démarrage fréquent.

II-4- CRITERES D'APPRECIATION

La gêne provoquée par le flicker du flux lumineux émis par des lampes alimentées sous une tension modulée sinusoidalement obéit à cinq (5) lois :

1^{ère} Loi

La sensation de gêne ressentie par un observateur moyen est proportionnelle au carré de l'amplitude de fluctuation et de la durée de cette perturbation.

2^{ème} Loi

La gêne dépend de la fréquence de la fluctuation. A amplitude constante, le maximum de gêne correspond

d'une fréquence de fluctuation pratiquement égale à 10 Hz. Une relation unique permet de déterminer l'amplitude de la fluctuation à la fréquence 10 Hz conduisant à une sensation de gêne identique à celle provoquée par une fluctuation sinusoïdale à fréquence f et à amplitude a_f :

$$a_{10} = g(f) a_f$$

Le terme $g(f)$ est une fonction de la fréquence telle que:

$$g = 1 \text{ pour } f = 10 \text{ Hz}$$

$$g < 1 \text{ pour } f \neq 10 \text{ Hz}$$

et dont la courbe représentative est la suivante:

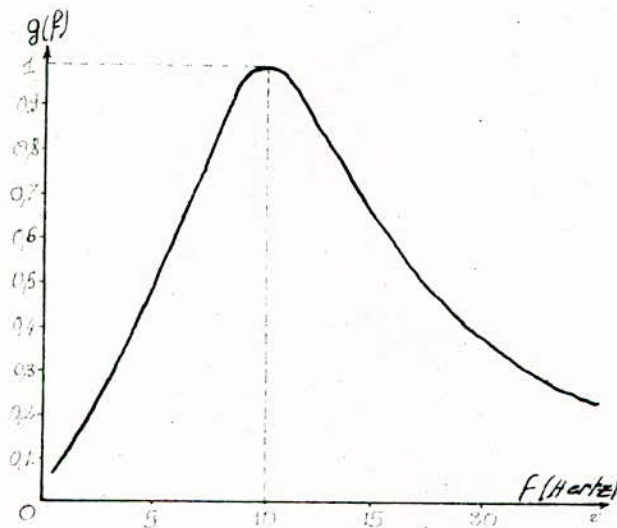


Figure II-1

3^{ème} Loi

Si une fluctuation de tension est la résultante d'une superposition de fluctuations sinusoïdales d'amplitudes a_1, a_2, \dots, a_n de durée T , de fréquences f_1, f_2, \dots, f_n on a constaté que la gêne provoquée est équivalente à celle correspondante à une fluctuation sinusoïdale de tension à 10 Hz dont l'amplitude est égale à la racine carrée de la somme des amplitudes des fluctuations à 10 Hz

équivalentes à chacune de ces composantes

$$a_{10} = \sqrt{\sum_i a_i^2 g_{fi}^2}$$

4^{ème} Loi

Une fluctuation de tension de fréquence, d'amplitude et de durée déterminées produit la même sensation de gêne qu'une fluctuation de tension de même fréquence, d'amplitude double mais de durée quatre (4) fois plus faible que la précédente. On considère donc qu'il y a égalité de gêne à égalité de l'intégrale

$$\int_0^T a_{10}^2 dt$$

a_{10} = amplitude de la fluctuation
équivalente à 10 Hz

T = durée de la fluctuation.

5^{ème} Loi

Le flicker du flux lumineux ne commence à être perceptible que pour une amplitude de seuil a_s de la fluctuation sinusoïdale. Pour une fluctuation sinusoïdale à fréquence 10 Hz, ce seuil est évalué à 0,3% environ.

Remarques

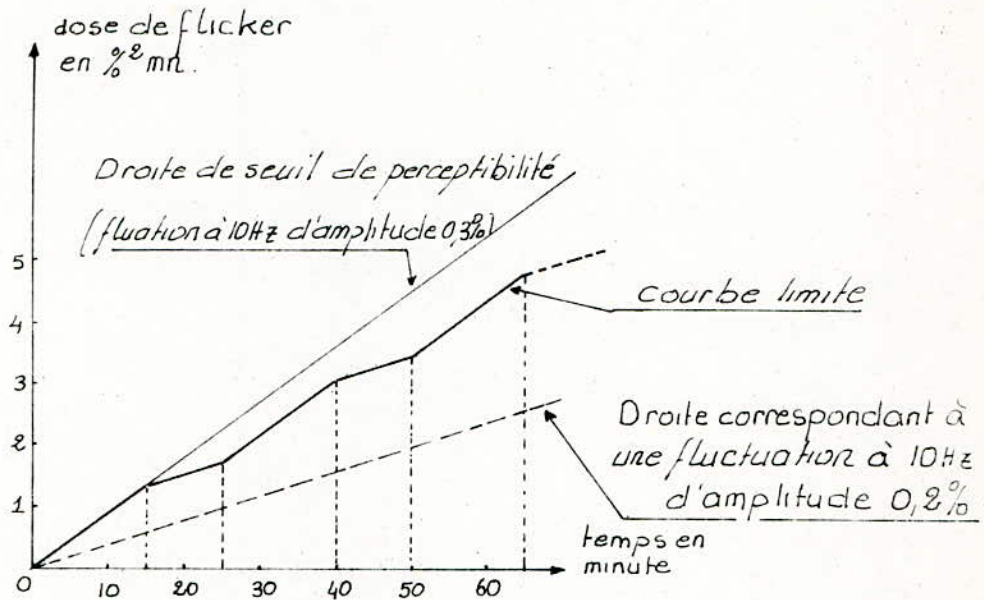
- L'usager peut accepter une certaine dose de flicker pendant une courte période de temps.

- La dose de flicker s'évalue en %² minute de flicker sinusoïdale équivalent à 10 Hz

- A partir de ces éléments de base, on peut aboutir à l'esquisse d'une réglementation relative au flicker par la détermination des doses de flicker admissibles en fonction des périodes de temps de réception.

On peut envisager de tracer la courbe limite correspondant au flicker non perceptible, la pente de la

La courbe de dose cumulée de flicker est constamment inférieure ou en plus égale à celle d'une droite correspondant à une fluctuation de tension à 10Hz d'amplitude constante égale à 0,2%



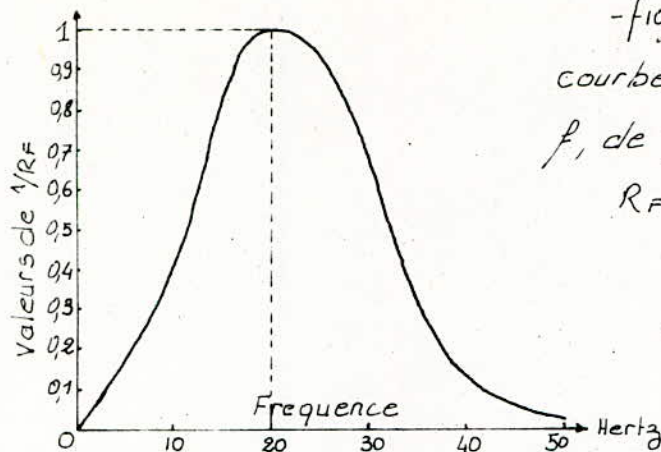
-figure II-2.-

II-5-PRINCIPE DE MESURE DU FLICKER

II-5-1 REACTION DE L'OEIL A LA VARIATION DU FLUX LUMINEUX

Des lois physiologiques du flicker, on déduit que l'œil réagit à un flux lumineux, comme un filtre linéaire passe-bande dont la courbe est représentée à la figure II-3.

Si à l'entrée de ce filtre, on introduit une tension proportionnelle aux variations relatives du flux lumineux, on recueille à sa sortie une tension proportionnelle à la gêne instantanée qui, intégrée dans un compteur quadratique, donne une mesure de la gêne totale.



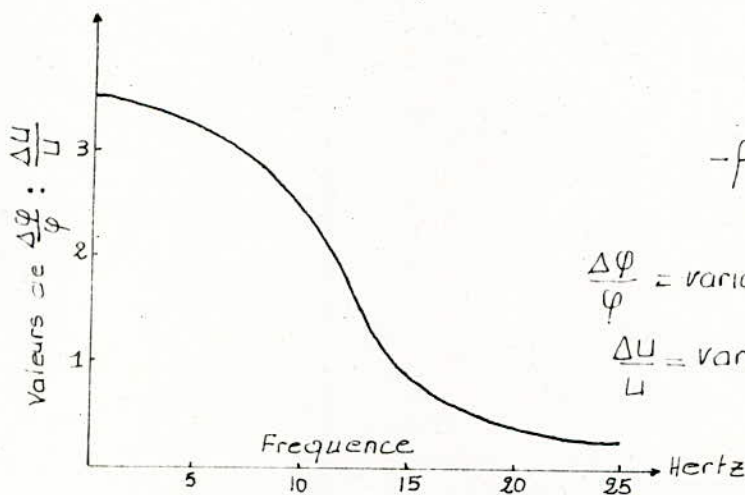
-figure II-3 -
 courbe, en fonction de la fréquence f , de $1/R_F$.

R_F = rapport du flux lumineux à la fréquence à 20 Hz, produisant la même gêne

II-5-2 ETUDE DE L'ENSEMBLE LAMPE-SYSTEME VISUEL

Nous avons examiné les réactions de l'œil aux variations du flux lumineux, mais ce qui intéresse les exploitants, c'est la réaction de l'œil aux variations de tension du réseau.

Dans la limite des très faibles variations relatives de tension (correspondant au cas du flicker), la lampe se comporte comme un filtre linéaire passe-bas dont la courbe de gain serait la suivante.



-figure II-4 -

$\frac{\Delta\phi}{\phi}$ = variation relative du flux

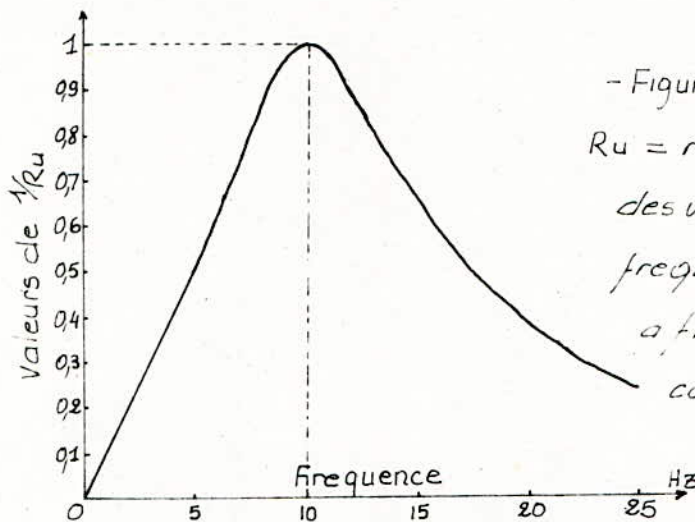
$\frac{\Delta U}{U}$ = variation relative de la tension

- On peut facilement combiner les deux courbes précédentes traduisant, l'une la réponse de l'œil, l'autre celle de la lampe. Par multiplication des ordonnées des

figures, on obtient la courbe de gain de l'ensemble Lampe - système visuel en fonction de la fréquence.

On pose $g(f) = \frac{1}{R_u}$, cette courbe correspond donc à

celle définie au chapitre II-4.



- Figure II-5 -

R_u = rapport des amplitudes des variations à la fréquence f à la variation à fréquence 10 Hz conduisant à la même gêne

II-5-3 CONCLUSIONS

A partir de ces courbes de réponse, il est possible de construire un filtre linéaire équivalent. En appliquant à l'entrée la tension d'alimentation de l'éclairage, on en sort une tension qui, appliquée à un voltmètre quadratique, donne une mesure de la gêne par unité de temps.

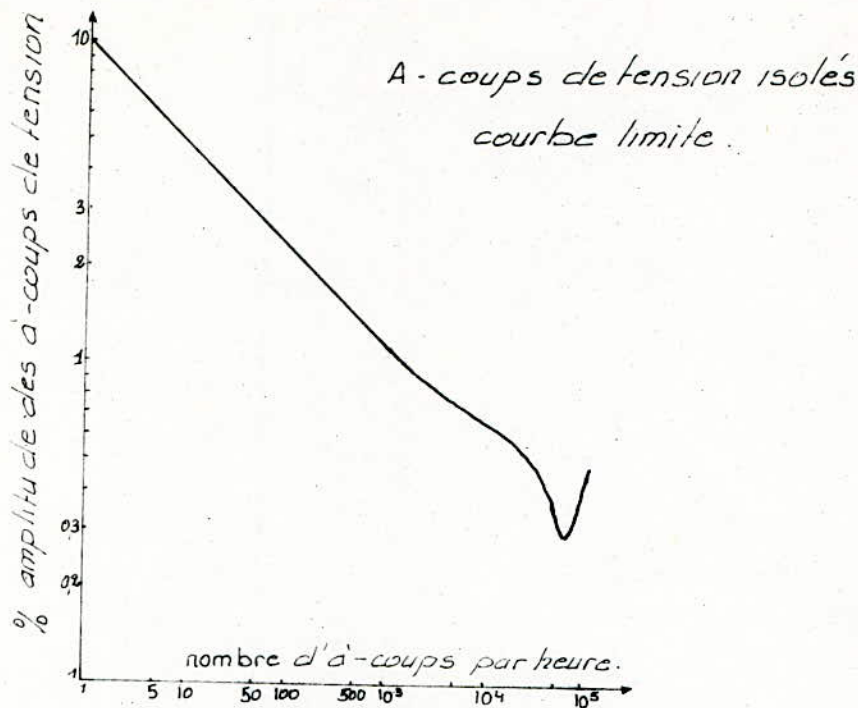
II-5-4-CAS DES A-COUPS BRUSQUES DE TENSION

A TRES BASSES FREQUENCES

On détermine alors une courbe expérimentale qui donne l'amplitude maximale acceptable, pour des à-coups de tension isolés, en fonction de leurs fréquences de répétition.

L'allure de cette courbe est donnée par la figure II-6.

- Figure II - 6 -



II.6. APPAREIL DE MESURE : LE FLICKERMETRE

Nous présenterons le flickermètre conçu par EDF "Electricité de France" et dont la sonelgaz a fait une récente acquisition.

II.6.1. PRINCIPE DE L'APPAREIL

Il se compose essentiellement :

- d'un transformateur-adaptateur qui permet d'assurer l'isolement entre le réseau et l'appareil ainsi que l'adaptation à la tension du réseau étudié.

- d'un pont redresseur bi-alternance pour faciliter le filtrage ultérieur

- d'un filtre passe-bande

- d'un dispositif éleveur au carré

- d'un intégrateur

- d'un convertisseur analogique digital.

- D'un interface qui sert à l'adaptation des signaux à la tête d'enregistrement
 - D'un enregistreur magnétique
- Le schéma synoptique de l'appareil est représentée à la figure II-7.

II.6.2 DISPOSITIF DE DEPOUILLEMENT

Il s'effectue à l'aide d'un ordinateur (CAE 9040) le système permet d'obtenir une bande magnétique compatible pour le ordinateur qui effectue l'exploitation de ces bandes.

Un programme d'exploitation de ces bandes magnétiques permet de tracer les courbes de doses cumulées de flicker puis de conclure sur la gêne éventuelle du phénomène de flicker étudiée par comparaison avec la droite seuil de perceptibilité.

Remarques.

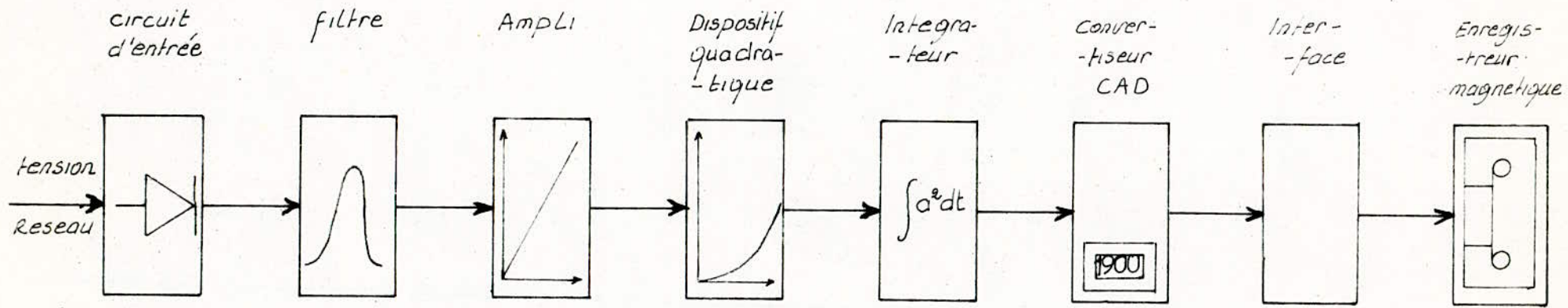
Il existe d'autres types de flickermètres dont le principe de mesure diffère. On citera à titre d'exemple

- le flickermètre ERA qui enregistre chaque minute la quantité

$$\int_0^{1mn} \sqrt{\sum a_f^2} dt$$

- le flickermètre FGH qui fournit instantanément et continuellement la valeur

$$(a_f, g_f)_{Max}.$$



-figure II - 7.-

flickermetre
schema
synoptique.

III-1- GENERALITES

L'élaboration d'acier à partir des fours électriques a connu une évolution sensible ces dernières années. Et la nouvelle conception du four - le four ultra haute puissance dont le but consiste à convertir des ferrailles ou d'autres charges métalliques en acier liquide dans un temps minimal, avec le plus haut taux d'apport d'énergie possible et une réduction au minimum des périodes de mise hors tension - a donné un nouvel élan au procédé électrique, qui devient de plus en plus compétitif aux autres procédés tel le procédé à oxygène.

L'adoption de l'alimentation continue et les progrès effectués dans la réduction du minerai (utilisations des produits pré-réduits) ont donné au four électrique des avantages certains. Les investissements initiaux et le coût opérationnel sont plus bas que pour le procédé haut-fourneau - méthode à oxygène.

Cependant, le raccordement des fours à arc au réseau électrique ne cesse de poser des problèmes aux électriciens. Le fonctionnement, surtout intermittent, du four provoque des perturbations sur le réseau, perturbations qui varient suivant le genre, la taille du four, la nature et les dimensions du produit enfourné, la conduite du four et aussi suivant le réseau électrique d'alimentation.

Dans la conduite du four on cherchera d'avoir des arcs courts pour éviter les rayonnements sur le réfractaire. Pour cela, en plus du système de régulation des électrodes

le transformateur du four, de conception spéciale, comportera toute une échelle de games de tensions secondaires.

Le four électrique peut-être représenté schématiquement par une grande cuve en tôle d'acier, garnie intérieurement d'un revêtement réfractaire, et renforcée par des nervures. Dans cette cuve plongent, à travers sa partie supérieure, la voûte, des électrodes dont le nombre dépend de la nature de la tension d'alimentation.

Le chauffage est basé sur les propriétés calorifiques de l'arc électrique, partie essentiellement active du four.

III-2- ARC ELECTRIQUE

III-2-1- DEFINITION

L'arc électrique est la manifestation du passage de courant, donc une décharge électrique, entre deux électrodes dans un milieu. (air ou gaz particulier)

Il est caractérisé par une tension basse et un fort courant.

III-2-2- PRINCIPE

En écartant l'une de l'autre deux électrodes, portées à des potentiels différents, préalablement en contact apparaît un arc. La cathode émet alors des électrons, qui, en se déplaçant vers l'anode, ionisent les molécules de gaz. Ces particules rendues conductrices, accélérées par le champ électrique existant entre les électrodes, viennent frapper la cathode et libérer d'autres électrons maintenant ainsi le passage du courant.

III-2-3 - PROPRIETES

L'arc électrique, dont la forme caractéristique est due

au mouvement de l'air ascendant est dit arc voltaïque

Il est lumineux, instable et dégage de la chaleur.

On peut, en première approximation, assimiler un arc électrique à une résistance variable. Alors, si I est le courant de l'arc, la tension s'exprimera par la relation usuelle

$$U_0 = R_0 I$$

La courbe caractéristique de l'arc. $U_0 = f(I)$ est donnée par la figure suivante, pour des valeurs croissantes de sa longueur $l_1 < l_2 < l_3$

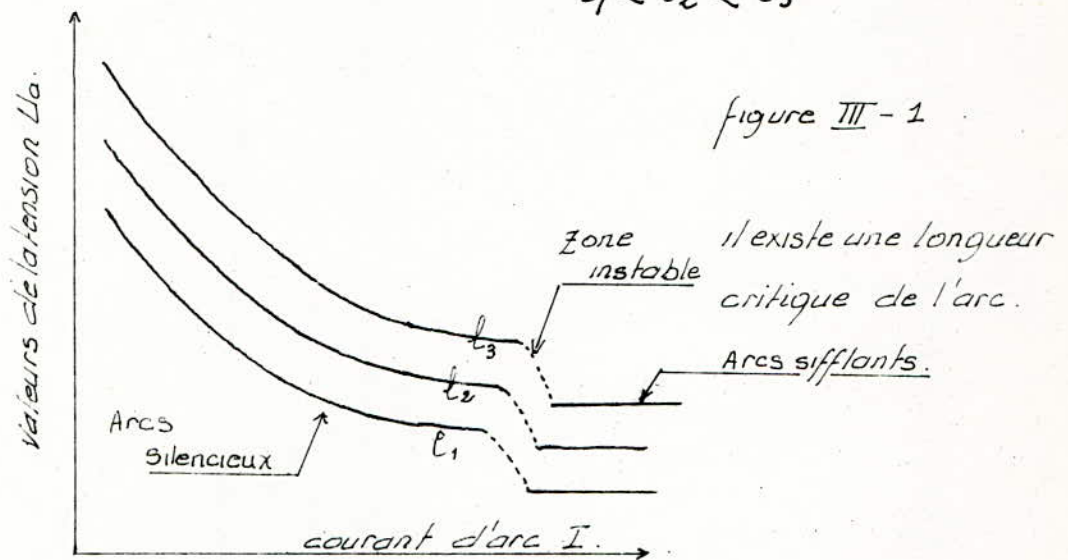


figure III - 1

Dans la zone des arcs silencieux, il y a tendance à autoregulation de la puissance, regulation qui est toutefois insuffisante.

III-3- REGULATION DES ELECTRODES

Le but de cette regulation est de maintenir la puissance absorbée par le four constante. Pour cela, on agit sur la longueur de l'arc de manière à avoir pour chaque électrode le rapport entre la tension U d'électrode et le courant I constant, c'est à dire une impédance constante.

Le régime de l'arc est alors représenté par l'équation

$$\frac{U}{I} = A = \text{constante} \quad \text{où} \quad U - AI = 0.$$

par conséquent

- si $U - AI = 0$ l'électrode reste immobile

- si $U - AI > 0$, I augmente, et l'électrode descend jusqu'à avoir:

$$U - AI = 0$$

- si $U - AI < 0$, I diminue et l'électrode remonte jusqu'à avoir

$$U - AI = 0.$$

La régulation peut être manuelle, mais le plus souvent automatique. Ainsi pendant la fusion, les électrodes sont en continuel mouvement pour compenser les mouvements de la charge tendant à créer des dissymétries.

III-4- CLASSIFICATION DES FOURS

des applications du four différent suivant le type de four

III-4-1 FOUR A ARC LIBRE

Dans le four à arc libre, ou à arc indirect, l'arc est maintenu entre les électrodes disposées horizontalement au-dessus de la charge. Il est généralement utilisé pour la fusion en petite quantité de fonte ou d'acier.

III-4-2 FOUR A ARC RESISTANCE

le four à arc résistance, ou à arc submergé est utilisé à la fabrication des ferroalliage, ou à la réduction de certains minerais. Dans ce genre de four les électrodes sont plongées dans la charge.

III-4-3 FOUR A ARC SUR CHARGE

L'arc est maintenu entre les électrodes et la charge. Ce type de four est presque exclusivement utilisé à la fabrication d'acier à partir de ferrailles ou d'autres charges métalliques.

L'alimentation de tous ces types de fours peut être continue ou alternative monophasée, biphasée, ou triphasée. Généralement les fours de grande puissance sont triphasés. Alors les électrodes, au nombre de trois, sont alternativement anode et cathode à raison de $2f$ changements par second, soit 100 pour $f = 50\text{Hz}$.

III-5-APPAREILLAGE ELECTRIQUE

Le raccordement des fours se fait généralement d'un réseau haute tension, par l'intermédiaire d'un transformateur abaisseur HT/MT

L'appareillage électrique du four est installé, par rapport à ce dernier, à une distance bien déterminée et comprend :

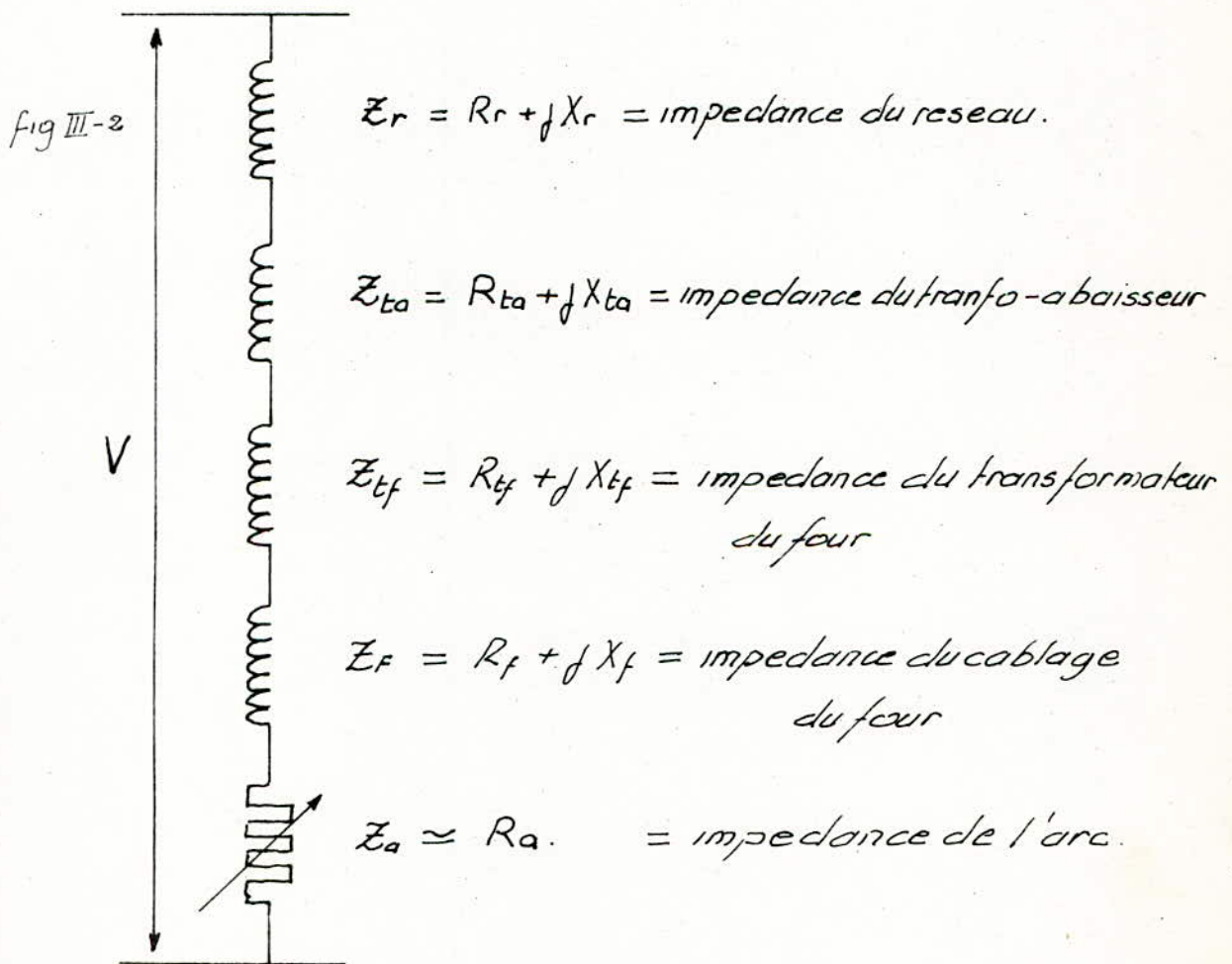
- l'arrivée moyenne tension avec un sectionneur
- les transformateurs de potentiel et d'intensité
- le disjoncteur du four qui doit assurer un très grand nombre de coupures.
- le transformateur du four, de conception spéciale, possédant une échelle étendue de tension secondaire, équipé d'un commutateur de prises en charge. Son secondaire est généralement couplé en triangle
- Un ensemble de tubes et de câbles souples à circulation d'eau, disposé en triangle équilatéral pour

pour réduire la réactance reliant la basse tension aux
 pièces d'électrodes.

III.6. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES

III.6.1. SCHEMA EQUIVALENT

En partant d'une source idéale, à tension constante,
 donc à puissance infinie, les éléments du circuit caractérisés
 par leur impédance, et l'arc électrique par sa résistance
 variable, on peut représenter le circuit d'alimentation
 d'un four par le schéma équivalent suivant.



pour une tension secondaire V déterminée, le
 courant de court-circuit n'est plus limité que par
 l'impédance $Z_t = \frac{V}{I_{cc}} = R_t + jX_t.$

III-6-2-EQUATIONS ELECTRIQUES

En supposant que chaque phase obéit à l'équation de base

$$V = Z I_F = (R_a + R_t) I_F + j X_t I_F$$

le facteur de puissance, est alors

$$\cos \varphi = \frac{R_a + R_t}{\sqrt{(R_a + R_t)^2 + X_t^2}}$$

$$\text{et } \sin \varphi = \frac{X_t}{\sqrt{(R_a + R_t)^2 + X_t^2}}$$

la puissance apparente dans un système triphasé étant

$$S = 3 V \cdot I_F = \frac{3 V^2}{\sqrt{(R_a + R_t)^2 + X_t^2}} = \frac{U^2}{\sqrt{(R_a + R_t)^2 + X_t^2}}$$

la puissance active consommée est alors donnée par l'expression:

$$P = S \cos \varphi = (R_a + R_t) I_F^2 = \frac{U^2 (R_a + R_t)}{(R_a + R_t)^2 + X_t^2}$$

et la puissance réactive consommée par l'expression:

$$Q = S \sin \varphi = X_t I_F^2 = \frac{U^2 X_t}{(R_a + R_t)^2 + X_t^2}$$

La puissance wattée est maximale pour

$$(R_a + R_t) = X_t \quad \text{en effet}$$

$$\frac{dP}{d(R_a + R_t)} = 0 \quad \text{alors } (R_a + R_t) = X_t$$

L'expression de la puissance active devient alors:

$$P = \frac{U^2}{2 X_t}$$

$$\text{et } \cos \varphi = \sin \varphi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$$

C'est donc en fonctionnant sous $\cos \varphi = 0,707$ que le four peut donner son maximum de puissance. C'est le régime de marche des grands fours modernes, les fours ultra haute puissance (UHP).

La puissance de l'arc s'exprime par l'équation

$$P_a = R_a I_f^2 = \frac{R_a U^2}{(R_a + R_t)^2 + X_t^2}$$

III-7 - DIAGRAMMES CARACTERISTIQUES

Grâce aux possibilités des ordinateurs, l'impédance de court-circuit $Z_t = R_t + j X_t$ peut être déterminée avec une bonne précision. Pour les fours en fonctionnement, Z_t est calculée à partir d'un essai en court-circuit:

la tension par phase obéissant à l'équation

$$V = (R_t + j X_t) I_{cc}$$

Dès que les électrodes quittent le court-circuit apparaît la tension d'arc $V_a = R_a I_f$

alors la tension secondaire devient

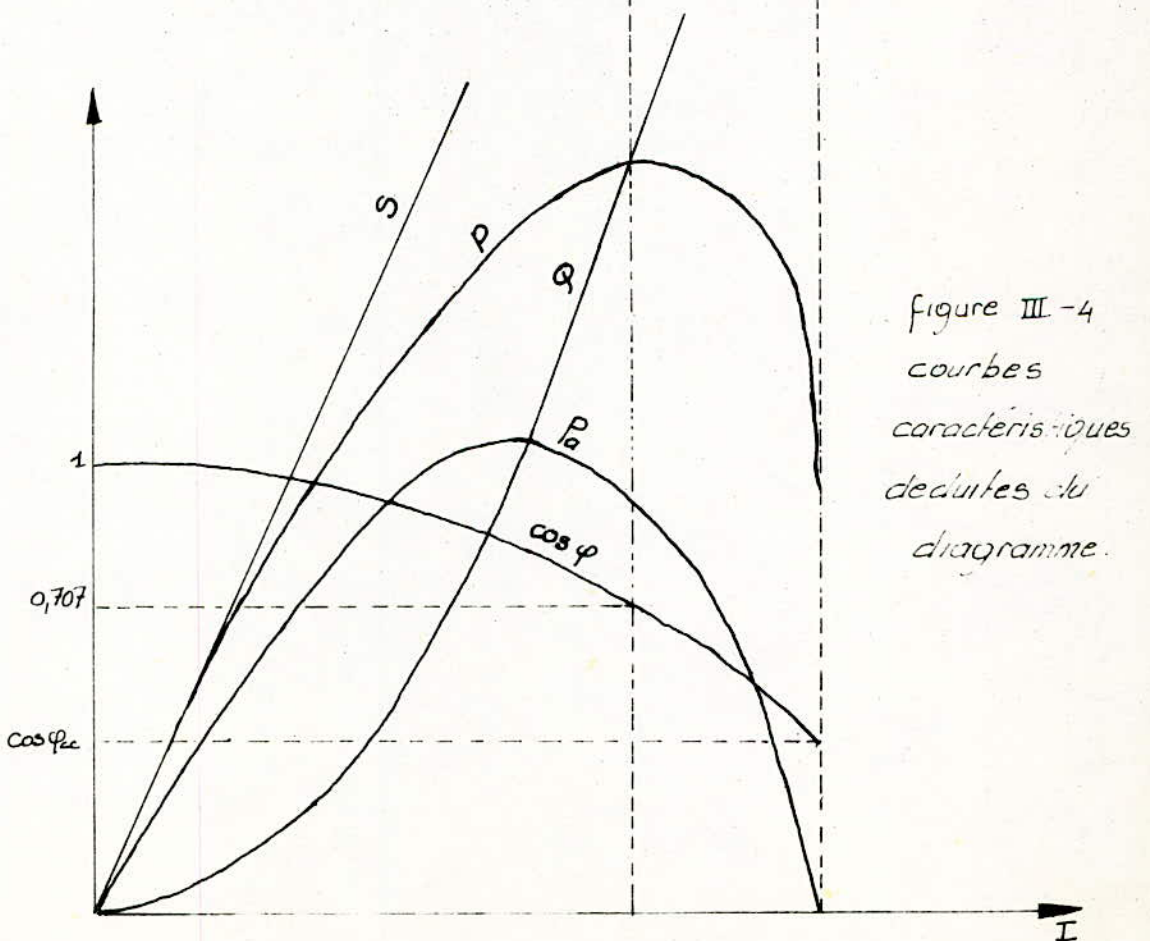
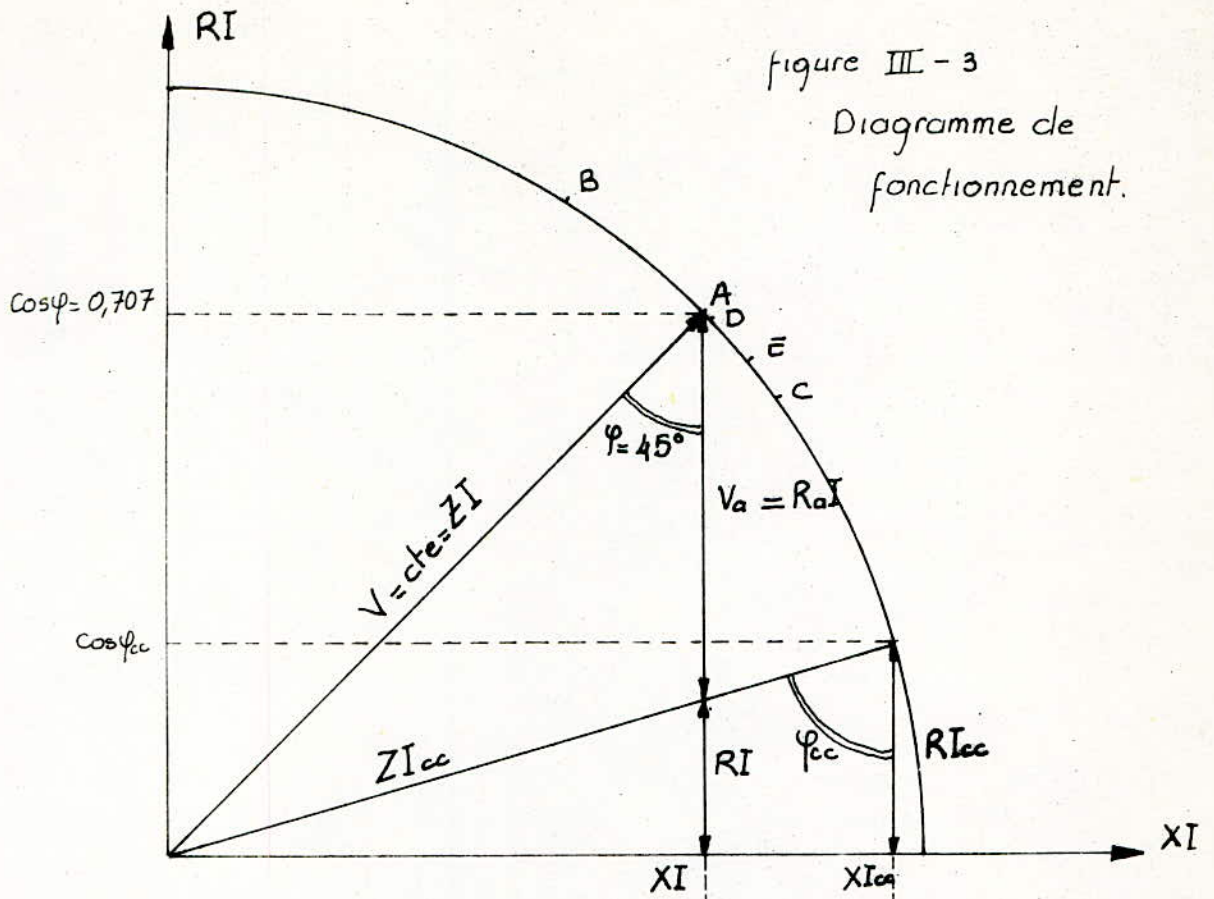
$$V = [(R_t + R_a) + j X_t] I_f$$

Dans le plan complexe, où nous portons en ordonnée RI et en abscisse XI , la tension secondaire constante décrit un cercle. On obtient alors le diagramme de fonctionnement de la figure III-3 duquel on déduit les courbes caractéristiques du four (figure III-4):

En fonction du courant et pour une tension secondaire déterminée nous avons tracé les variations des paramètres suivants

- la puissance apparente $S = \sqrt{3} UI$ qui est une droite
- la puissance wattée $P = 3(R_t + R_a) I_f^2$ qui passe par un maximum pour $\cos \varphi = 0,707$ et égale à $R_t I_{cc}^2$ en court-circuit
- la puissance de l'arc $P_a = 3 R_a I_f^2$ qui s'annule en c-c.
- la puissance réactive $Q = 3 X_t I_f^2$
- le facteur de puissance $\cos \varphi$.

Pour chaque tension secondaire on pourra fixer, grâce



à la régulation des électrodes, un point de fonctionnement qui sera caractérisé par son intensité de courant à laquelle correspond une puissance P , un facteur de puissance $\cos\varphi$ et une longueur d'arc donc aussi une puissance réactive.

III-3. CYCLE DE FONCTIONNEMENT

La conduite en fusion du métal du four passe par différentes étapes constituant le cycle de fonctionnement. Le cycle généralement choisi pour les grands fours modernes est le suivant :

III-3.1. A L'AMORÇAGE

Le four est chargé jusqu'à la voute, pour éviter de surchauffer celle-ci, on utilise une tension moyenne et un arc court ($\cos\varphi \approx 0,707$) mais assez puissant pour permettre une pénétration rapide des électrodes dans la ferraille.

L'amorçage est représenté par le point A du diagramme de fonctionnement où $\varphi = 45^\circ$. Le four absorbe alors :

les puissances
$$P = Q = \frac{S}{\sqrt{2}} = \frac{U^2}{2X_t}$$

III-3.2. AU DEBUT ET EN COURS DE FUSION

Les électrodes plongent dans des puits. Les murs étant protégés, on peut utiliser un arc long ($\cos\varphi \approx 0,85$) et une puissance maximale pour concerner le maximum de ferraille.

Le point B donne pour $\cos\varphi = 0,85$ alors $\sin\varphi = 0,53$

les puissances
$$P = 0,85 S$$
$$Q = 0,53 S.$$

III-3.3. EN FIN DE FUSION

Pour éviter l'usure du réfractaire par le rayonnement des arcs, on diminue progressivement la longueur des arcs

tout en conservant une puissance suffisante (tension moyenne $\cos \varphi$ entre 0,7 et 0,6, fort courant).

Le diagramme de fonctionnement donne la zone comprise entre les points C et D où φ varie entre 45° et 53°

Les puissances consommées varient comme suit

$$P = 0,70 \text{ S à } 0,60 \text{ S}$$

$$\varphi = 0,71 \text{ S à } 0,80 \text{ S.}$$

III-E3-4 SUR BAIN DE METAL FONDU

Il faut éviter le rayonnement des arcs sur les murs, et introduire le maximum d'énergie dans le bain. On utilise des tensions basses, donc des arcs courts, avec un $\cos \varphi$ faible de l'ordre de 0,60 à 0,65 et un fort courant, ce qui est représenté dans le diagramme par la zone comprise entre les points C et E.

Les puissances consommées sont :

$$P = 0,65 \text{ S à } 0,60 \text{ S}$$

$$\varphi = 0,76 \text{ S à } 0,80 \text{ S.}$$

III-9-CONDUITE DU FOUR

La conduite du four est conditionnée par, en plus de la qualité et la quantité de la charge enfournée, l'usure et l'échauffement du matériel. La charge peut être de la ferraille, des produits préreduits ou, un mélange des deux. Et l'arc peut être amorcé avec ou sans charge de métal liquide.

Pour réaliser une fusion dans un temps minimal, on place dans la charge la puissance optimale faisant un compromis entre les critères de limitation suivant.

- usure du garnissage par le rayonnement des arcs
- surcharge du transformateur du four
- échauffement des connexions et en particulier des

electrodes.

- surveillance de l'énergie consommée en fonction de l'énergie allouée par le distributeur.

III-10-PERTURBATIONS CAUSEES PAR LE FOUR A ARC

Pendant le fonctionnement du four, surtout en période de fusion, l'arc est instable. Sa tension, sensiblement proportionnelle à sa longueur, est donc variable.

Ce phénomène, surtout dû à la régulation des électrodes au mouvement de la charge enfournée, et aussi aux forces magnétiques engendrées par les courants d'électrodes, donne naissance à des perturbations du courant, perturbations qui sont caractérisées par la forme non sinusoïdale du courant, et les variations importantes de la valeur efficace de son intensité.

Ces variations de la valeur efficace entraînent des fluctuations de la puissance consommée. Les courbes en charge du four montrent que les variations de la puissance active sont très faibles devant celles de la puissance réactive. L'importance des variations de puissances active et réactive dépend du point de fonctionnement du four. En effet, pour le régime UHP caractérisé par un $\cos\varphi = 0,707$ et un maximum de la puissance wattée les variations de cette dernière sont négligeables, même pour des variations très importantes du courant, devant les variations de la puissance réactive, comme l'illustre bien les courbes en charge du four, où le point de fonctionnement est représenté par le point A, de la figure III-5

Le réseau sera donc appelé à véhiculer toute la puissance réactive appelée par le four, ce qui constitue une charge onéreuse et supplémentaire pour le distributeur.

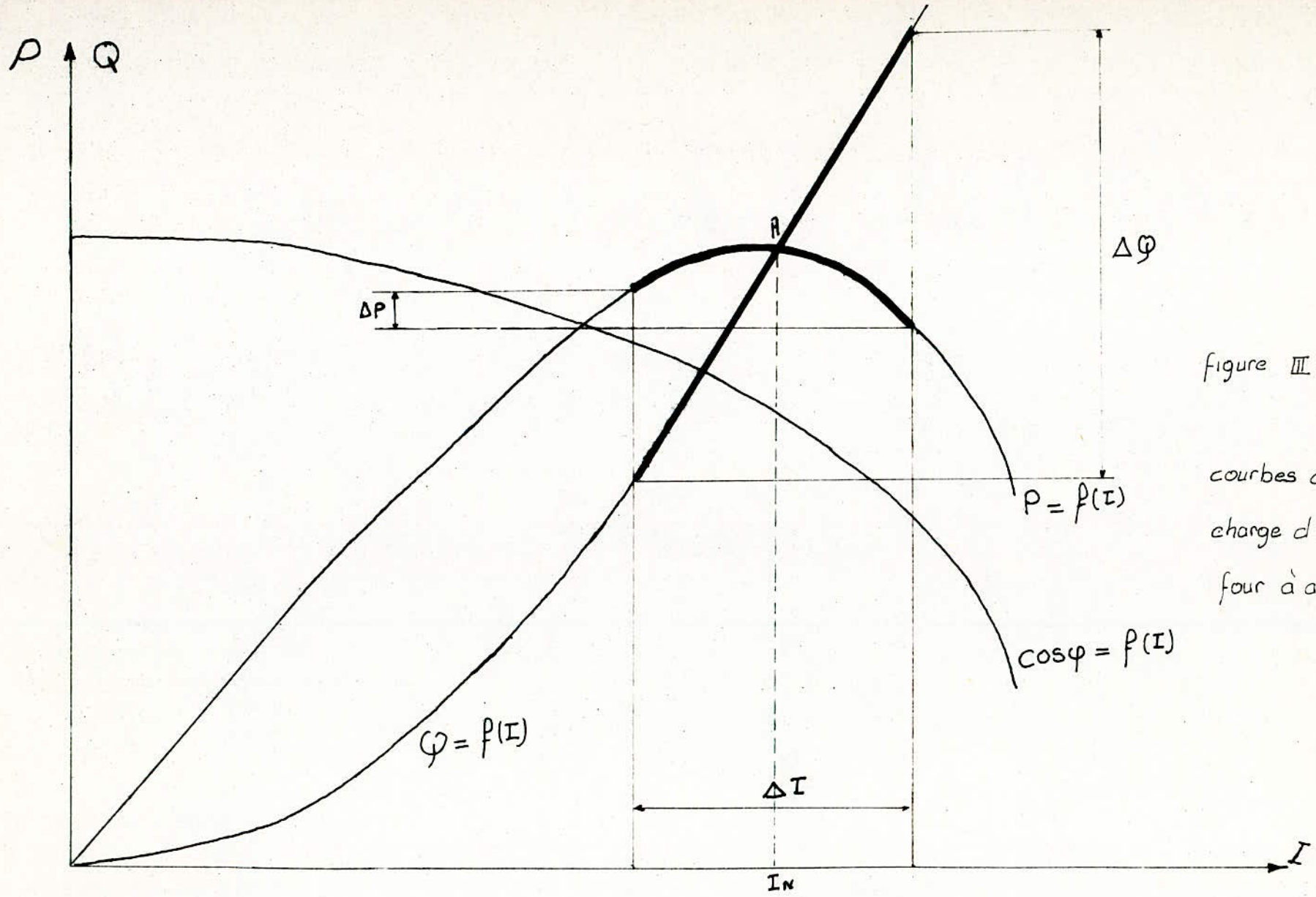


figure III-5

courbes de charge d'un four à arc.

En effet, pour une même puissance active transmise, le courant, en valeur efficace, est d'autant plus grand que le facteur de puissance est faible

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

les pertes par échauffement augmentent, ce qui diminue le rendement, et la chute de tension étant proportionnelle à la valeur efficace du courant, donc, à la puissance transmise augmente aussi. la formule approchée

$$|\Delta U| = \frac{RP + XQ}{U} \text{ donne cette chute.}$$

Outre ces variations aléatoires de tension, dont l'effet, surtout sur les lampes incandescentes est très contraignant, le four engendre, pendant son fonctionnement d'autres phénomènes nuisibles au matériel électrique.

L'analyse de la forme du courant d'arc montre l'existence d'un grand nombre de fréquences différentes, harmoniques ou non. Cependant il est très difficile de déterminer la teneur en harmonique du courant du four. On a constaté que l'amplitude décroît rapidement lorsque la puissance augmente et que l'harmonique d'ordre 3 domine.

De plus, le fonctionnement à certains instants, ou même pendant certaines périodes, en phases déséquilibrées donne naissance à des composantes inverses de nature à provoquer des échauffements sur les machines électriquement voisines du point de raccordement.

III-11- PROBLEME DE RACCORDEMENT DU FOUR

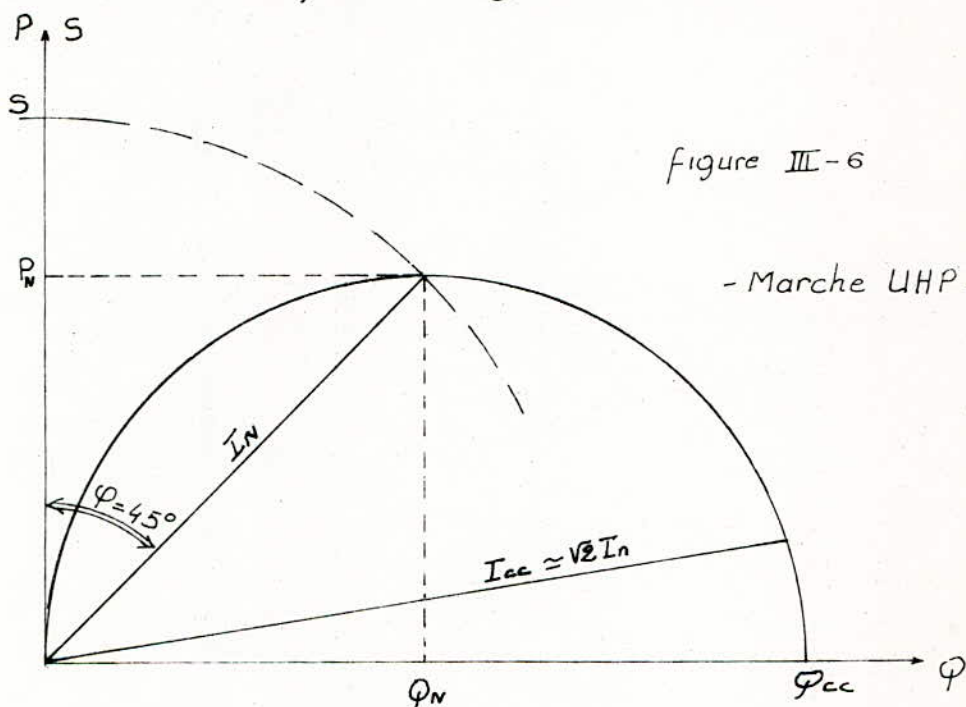
Dans la marche des grands fours à arcs modernes, la recherche systématique d'une faible longueur des arcs caractérisée par une puissance wattée maximale, donc un facteur de puissance de 0,707, la consommation en

énergie réactive équivaut à celle en énergie active, ce qui, du point de vue contract d'énergie, pénaliserait son utilisateur. Il faudra donc redresser le facteur de puissance, c'est-à-dire produire l'énergie réactive nécessaire à proximité de l'installation industrielle, éviter ainsi le transport de cette énergie par le réseau.

En régime UHP le four absorbe les puissances

$$P = \frac{S}{\sqrt{2}} \text{ et } \varphi = \frac{S}{\sqrt{2}}$$

Ce régime est illustré par le diagramme suivant.



En court circuit, la puissance wattée devient négligeable et la puissance réactive double, puisque le courant de court-circuit atteint la valeur $I_N \sqrt{2}$, I_N étant le courant de fonctionnement du four.

Donc la puissance réactive varie de zéro (0), four à l'arrêt à $S/\sqrt{2}$, four en marche normale, puis à $2S/\sqrt{2}$ en court circuit. La variation totale de la tension entre le four à l'arrêt et le four en court-circuit est donc égale à :

$$\frac{2S}{\sqrt{2}} \frac{1}{P_{cc}} \text{ et son amplitude moyenne correspond à } \Delta U\%$$

telle que

$$\Delta U\% = \frac{S}{\sqrt{2}} \frac{1}{P_{cc}}$$

Quant au four de moyenne puissance, dont le fonctionnement est caractérisé par un facteur de puissance voisin de 0,9, des études ont montré que le courant de court-circuit est approximativement égal à $2,5 I_N$. Ceci amènera des variations de puissance réactive allant de zéro (0), four à l'arrêt à 0,445, four en marche normale, puis à 2,55 en court-circuit. le diagramme de la marche normale est le suivant.

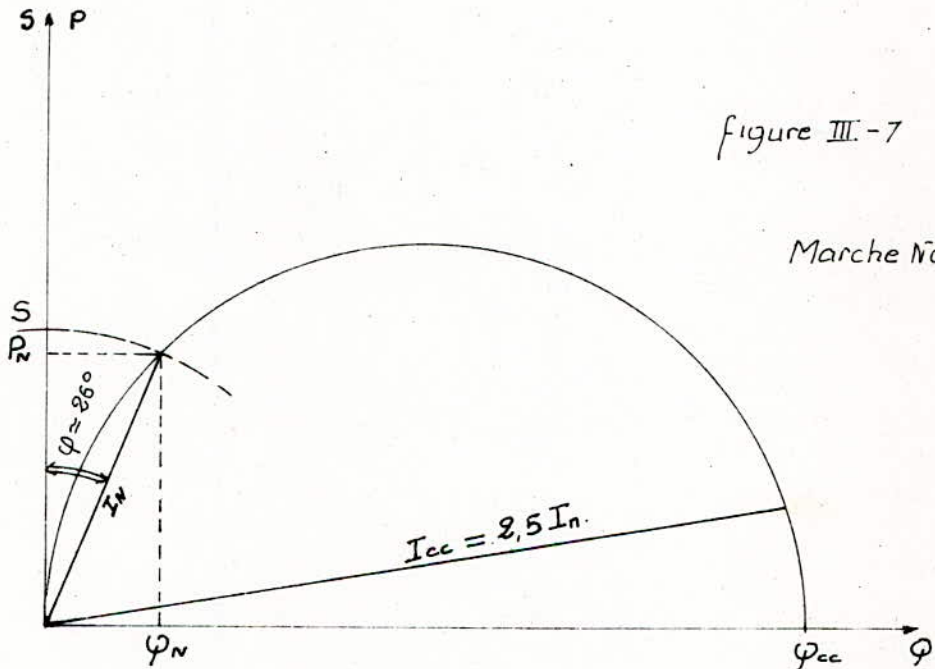


figure III.-7

Marche Normale

la variation totale de la tension est égale $\frac{2,55}{P_{cc}}$ et

son amplitude moyenne correspond à l'expression

$$\Delta U\% = \frac{1,255}{P_{cc}}$$

$\Delta U\%$ est considéré comme le taux de flicker statique. Elle représente l'enveloppe maximale du phénomène. En pratique, les variations de puissance sont bien plus faibles et l'on admet généralement que le flicker comprend deux termes.

- Un flicker lent à 0,5 Hz dont le taux d'amplitude représente 30% de $\Delta U\%$.

- Un flicker rapide à 8 Hz dont le taux d'amplitude représente 15% de $\Delta U\%$.

Des études statistiques ont montré que pour ne pas créer de gêne, il ne faut pas admettre en moyenne dans la tension plus de :

0,7 à 1,3% de flicker lent

0,25 à 0,6% de flicker rapide

Ce qui revient à fixer un minimum de sécurité pour $\Delta U\%$ de 1,4 à 1,7%.

Compte tenu de cette limite, la puissance de court-circuit minimale du réseau d'alimentation du four doit être pour

$$\text{- four UHP} \quad \frac{S}{1,4\% \sqrt{2}} = 50 S$$

$$\text{- four normal} \quad \frac{1,25 S}{1,4\%} = 90 S.$$

S est la puissance apparente du four.

A retenir que toutes ces valeurs, en majorité déduites d'enquêtes effectuées dans différents pays, ne sont que d'un caractère indicatif. Elles ne tiennent pas compte de la susceptibilité particulière; dues soit à la configuration des réseaux, soit à certains consommateurs particulière-ment exigent.

Lorsque la puissance de court-circuit du réseau n'est pas assez élevée, c'est-à-dire que la puissance du four est assez grande, au point de créer des gênes de flicker non-admissibles, il faudra, soit implanter plusieurs fours de puissance plus faible, la puissance dont il faudra tenir compte est alors donnée par la formule empirique

$$S = S_f \sqrt{n + 0,25n_1}$$

où S_f est la puissance d'un four

n le nombre de fours en fusion

n_1 le nombre de fours en affinage

soit installer un système de compensation d'énergie réactive pour combattre le flicker.

III-12- ENERGIE REACTIVE APPELEE PAR LE FOUR

L'énergie réactive appelée par un four peut être décomposée en deux termes distincts :

- Une énergie réactive moyenne, lentement variable, équivalente à l'énergie active consommée par un four UHP. C'est cette énergie qui est à l'origine des variations lentes du plan de tension.

- Une énergie réactive rapidement variable, due spécialement à l'agitation du bain, aux court-circuits indépendants ou non entre électrodes, ou entre électrodes et charge, au mouvement de l'arc etc.....

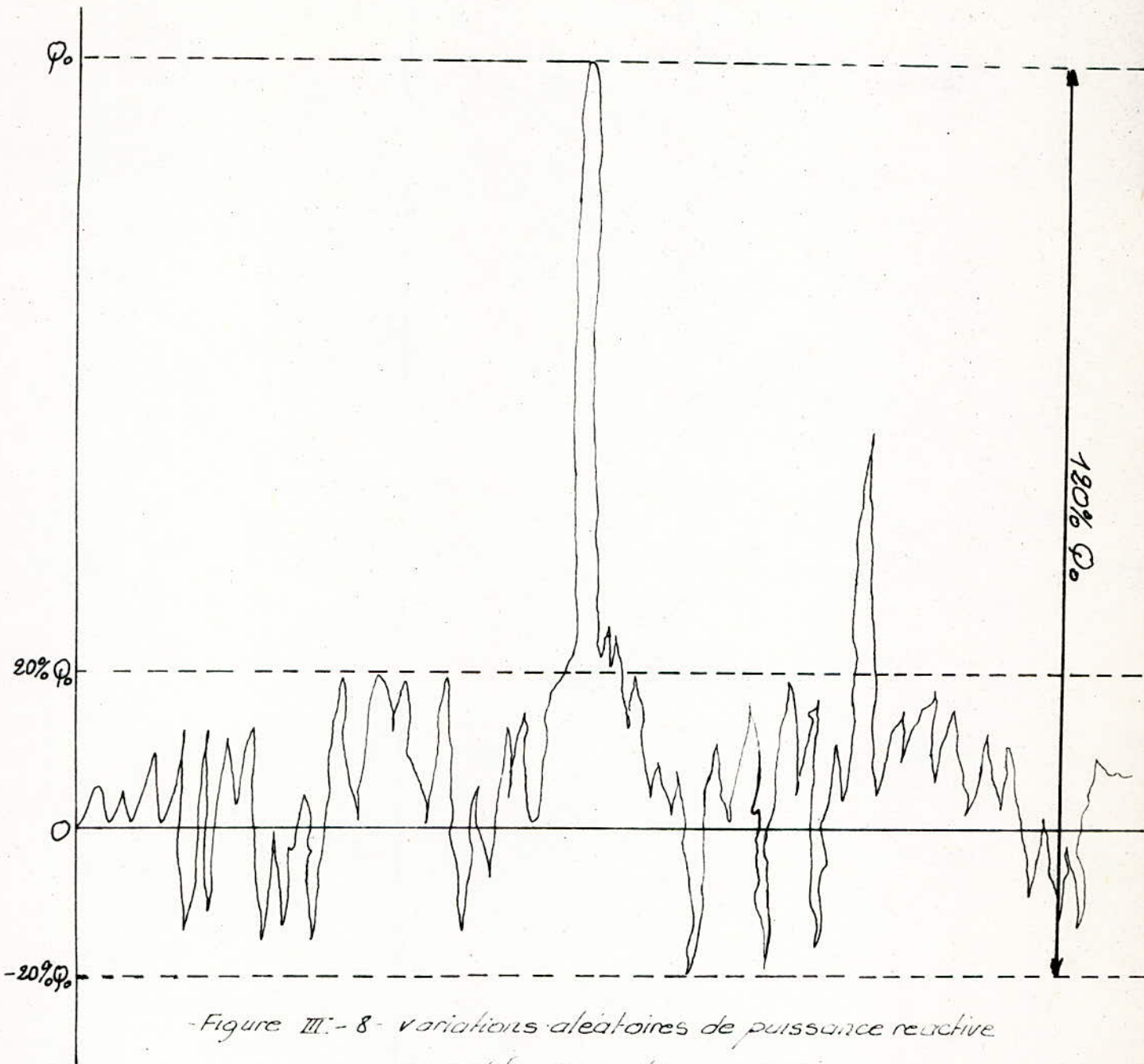
Ces fluctuations tant positives que négatives, et nulles en moyenne sont aléatoires et dépendent fortement de la nature de la charge. Elles sont plus importantes pour les ferrailles que pour les produits préreduits.

Pour un ensemble de n fours en fonctionnement, ces variations, de par leur caractère aléatoire, se compensent mutuellement dans une certaine mesure. La résultante globale est donc inférieure à celle obtenue par simple multiplication par n des variations d'un four unique.

Ces variations rapides de réactif ne peuvent être prédéterminer qu'en fonction des expériences veues en la matière. Une synthèse permet cependant d'avancer les hypothèses suivantes :

- Pour un four unique, les fluctuations aléatoires

presentent l'allure indiquée par la figure suivante.



-Figure III.- 8 - variations aléatoires de puissance réactive
appelée par un four unique

Ces fluctuations se composent d'un bruit de fond couvrant 40% de la puissance réactive moyenne φ_0 et des pointes positives sporadiques liées spécialement aux court-circuits et pouvant atteindre la valeur φ_0 dans le cas du court-circuit franc triphasé. Les variations rapides représentent donc 180% de φ_0 .

- Pour n fours égaux, l'allure des fluctuations est

la même que pour un four unique mais les amplitudes sont multipliées par \sqrt{n} .

- Pour n fours de capacité différente, l'allure reste semblable, mais l'amplitude résultante est égale à \sqrt{n} fois la moyenne quadratique des amplitudes individuelles.

La détermination du reactif à compenser s'effectuera à partir d'une limite de la variation de tension pour éviter des phénomènes de flicker gênants, tenant compte de la puissance de court-circuit du réseau, pour les fluctuations rapides

Quant au redressement du facteur de puissance, son calcul s'effectue à partir de la puissance réactive moyenne consommée φ_0 .

Si φ est la puissance réactive consommée à un facteur de puissance, la quantité d'énergie réactive à retrancher pour obtenir un facteur de puissance $\cos\varphi_1$ est donnée par la formule

$$\varphi_1 = \varphi (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_1)$$

IV.1. INTRODUCTION

IV.1.1. BUT DU LAMINAGE

Le laminage consiste à déformer et allonger un lingot ou un demi-produit - porté à une certaine température (1200°C environ) - entre deux cylindres tournant en sens inverse, de façon à aboutir à une forme géométrique utilisable.

Le plus souvent, le produit de base est le lingot provenant de l'aciérie.

IV.1.2. DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le laminage à chaud comprend deux étapes :

- le degrossissage : Il consiste en une réduction de section. Commun à tous les produits laminés, il s'effectue sur des laminours degrossisseurs. Cette étape s'achève par l'obtention de demi-produits dont les principaux sont :

- les blooms
- les brames
- les billettes

- Le finissage : Il consiste à faire subir au demi-produit une nouvelle réduction au cours de laquelle le profilage désiré est obtenu. Il s'effectue sur des laminours finisseurs. Cette étape s'achève par l'obtention de produits finis tels que :

- les profilés
- les fers marchands
- les tôles

Si nous suivons dans l'ordre les différents stades de la déformation du métal, nous avons d'abord un cycle de.

transformations primaires comprenant les slabbing - transformation du lingot en brame - et les bloomings réversibles - transformation du lingot ou brame en tôles fortes -. Ce cycle est caractérisé par les très fortes valeurs du couple nécessaire, par des durées de fonctionnement très courtes et par des vitesses variant continuellement entre zéro (0) et une valeur maximale, dans les deux sens de rotation. Après un passage dans un four de réchauffage les demi-produits obtenus subissent un cycle de transformation secondaire par les équipements suivants :

- train continu à bandes (brames → larges bandes)
- train à poutrelles ou à rails (brames → profils lourds)
- train à petits fers (billettes → profils légers)
- train à fil (billettes → fil machine)

Ce cycle est caractérisé par un fonctionnement continu. Un train est constitué de plusieurs cages associées les unes aux autres. En fonctionnement normal, les cylindres de ces cages tournent dans un seul sens et on ne modifie leur vitesse que lors d'un changement de programme.

A la sortie du train continu à bandes se trouvent des trains tandems à froid, et les différents types de laminaires à froid. Le but du laminage à froid est d'obtenir à partir des tôles, des bandes laminées présentant certains critères mécaniques et technologiques tels que les qualités de surface et les tolérances d'épaisseur. Ces bandes sont alternativement enroulées puis déroulées sur des bobineuses disposées de chaque côté des cages.

IV.1.3 ALIMENTATION ET COMMANDE DES MOTEURS D'ENTRAÎNEMENT

IV.1.3.1. Considérations générales:

Tous les moteurs d'entraînement (cylindres des cages, bloomings, bobineuses, etc...) sont à courant continu.

L'alimentation se fait par groupes redresseurs à thyristors ou convertisseurs électroniques vu :

- leur bon rendement
- leur sûreté de fonctionnement.
- leur bon comportement dynamique
- leur coût d'entretien et de montage réduit

Les moteurs de bloomings et de slabbing sont souvent alimentés par l'intermédiaire de « convertisseurs doubles » permettant, par commande de la tension d'inclut, des inversions de marche rapides ou des freinages contrôlés.

IV.1.3.2. choix du mode de couplage :

Les couplages des thyristors sont choisis en tenant compte des considérations suivantes :

- le sens du couple du moteur de lacage doit pouvoir être inversé car le signe du couple d'entraînement des machines différent selon les périodes de travail : accélération - vitesse constante - freinage.
- Dans le cas du laminair réversible, il faut de plus, pouvoir inverser le sens de la marche.

IV.1.3.3. choix du mode de réglage :

Avec un convertisseur électronique, nous disposons de deux moyens de réglage de la vitesse, soit par variation de la tension aux bornes, soit par variation de l'excitation. Celui qui convient le mieux, dépend de la machine que le moteur entraîne.

- Réglage par le flux : D'après la relation $C = K\Phi I$, on a intérêt à appliquer le flux maximal Φ_N lors du démarrage. Ensuite, dès que la vitesse nominale est atteinte, on réduit le flux.

Avantages : - bon réglage du point de vue technico-économique et bon rendement.

Inconvénient : si le couple résistant est constant, l'intensité du courant augmente quand on diminue le flux, d'où risque d'échauffement du moteur

Ce type de réglage est donc utilisé si l'entraînement est à puissance constante.

$$P = UI = \text{constante et } U = \text{cte} \Rightarrow I = \text{cte.}$$

- Réglage par la tension d'induit : Le flux est fixé à sa valeur nominale, on agit sur la tension d'induit.

- Avantages :
- Grande souplesse de fonctionnement
 - Grande gamme de réglage de la vitesse
 - Pas de gaspillage d'énergie

- Remarque.

Certains entraînements à vitesse comportent à la fois un réglage par la tension d'induit et par le flux, le système est tel que l'action sur le flux ne commence que lorsque la tension nominale d'induit est atteinte.

IV.2. REACTIONS DES GROUPES REDRESSEURS SUR LE RESEAU

IV.2.1. INTRODUCTION

Lorsqu'on parle, de manière générale de l'effet sur le réseau du fonctionnement des équipements d'entraînement de moteurs à courant continu alimentés par des groupes redresseurs à thyristors, il s'agit des harmoniques de courant créés, mais surtout des charges réactives plus ou moins grandes selon le type d'équipements et le type de commandes. Ces charges réactives sont maximales pour les moteurs réversibles (bloomings) où leur fréquence de répétition est de l'ordre de quelques secondes. Elles rendent difficile la stabilité de la tension du réseau, même dans les régions à forte densité électrique. Des perturbations apparaissent surtout sous forme d'à-coups de tension.

IV.2.2. ORIGINES DES POINTES DE CHARGES DE PUISSANCE REACTIVE

L'alimentation de l'induit d'un moteur à courant continu à partir du réseau triphasé, par l'intermédiaire de redresseurs, implique, pendant la durée de l'accélération, une fourniture par le réseau d'un courant dont l'intensité a une valeur absolue bien déterminée. Au début, la vitesse et la puissance active absorbée sont nulles, ce courant ne peut être que réactif pur. Au fur et à mesure que la puissance active augmente en même temps que la vitesse, le déphasage courant-tension varie : la composante réactive du courant diminue tandis que la composante active augmente. Donc dans le cas d'un réglage de la vitesse par la tension d'induit, il est nécessaire pour obtenir cette variation de vitesse, de faire varier la tension continue dans de larges limites, par action sur la commande des thyristors. d'où une consommation plus au moins grande d'énergie réactive et de commande.

Pour les équipements d'entraînements réversibles de grande puissance, comme ceux des laminoirs, les courants de démarrage des moteurs à courant continu atteignent plusieurs milliers d'ampères et la durée des accélérations entre la vitesse nulle et la vitesse maximale, dépasse rarement la seconde. De plus, des opérations de démarrage et d'inversion se répètent à des intervalles très courts. Mais pour obtenir des temps de démarrage aussi courts que possible, il faut que le courant d'induit augmente très rapidement. C'est pour cela que dans la plus part des cas on travaille avec la vitesse d'accroissement maximale admissible du courant d'induit $\left[\frac{dI}{dt} \right]_{\max}$ qui,

pour les grosses machines à courant continu est de l'ordre de $30I_n$ par seconde, d'où l'origine des à-coups de

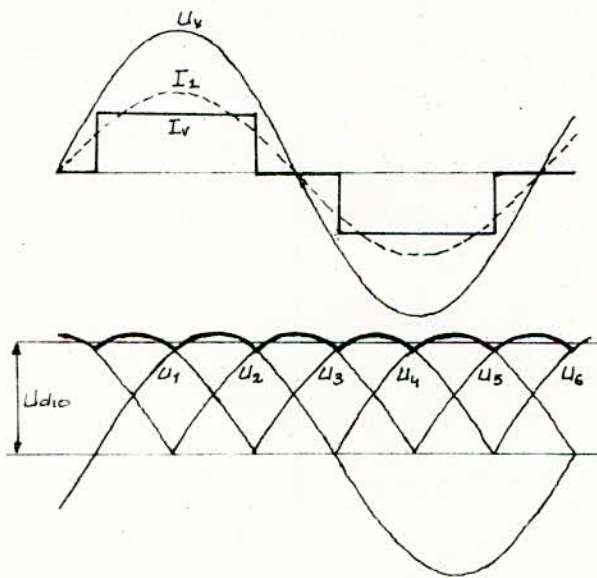
puissance réactive sur le réseau.

IV.2.3. VALEUR MOYENNE DE LA TENSION REDRESSEE ET

CONSOMMATION D'ENERGIE REACTIVE

Quelque soit le type de couplage d'un redresseur à thyristors, les phénomènes observés sont relativement semblables. C'est pourquoi que notre étude portera uniquement sur un montage hexaphasés simple avec point neutre, couplé au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur. Ce montage, bien que ne présentant aucun intérêt pratique, permet une explication très claire de ces phénomènes.

Dans les schémas qui suivent, nous représentons l'allure des courbes des courants et des tensions pour $p=6$ et fonctionnant sans réglage de phase.



Côté réseau

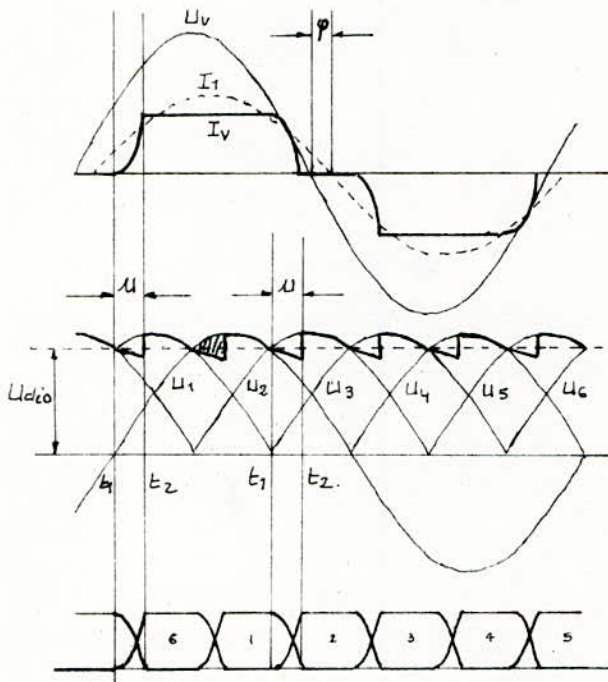
- U_v = tension de réseau
- I_v = courant de réseau
- I_1 = Onde fondamentale de I_v

Côté continu

- U_1 à U_6 = tension des enroulements secondaires
- U_{d10} = Valeur moyenne de la tension redressée idéale
- Courant continu formé par les successions des courants d'anodes

En raison des différentes reactances X_b qui existent du côté alternatif, en particulier celle du transformateur, les courants d'anodes ne s'établissent pas instantanément mais après un temps bien déterminé. Ce temps est d'autant plus grand

que la tension de court-circuit du transformateur et les réactances du réseau sont plus grande, et que le courant I_d débité par le transformateur est plus fort. Les diagrammes suivants représentent les formes d'ondes de la tension continue redressée et des courants anodiques dans le cas d'une commutation simple. L'intervalle de temps $(t_2 - t_1)$ dû à la commutation binaire du courant anodique correspond au processus dit d'"empiètement". On exprime sa durée en degré électrique et on obtient ainsi l'angle d'empie-
-tement u_α



φ = déphasage entre la tension et l'onde fondamentale du courant du réseau.

t_1 = début de l'empieusement

t_2 = fin de l'empieusement

u = angle d'empieusement

A pleine tension, l'angle de retard α est nul et $u_\alpha = u$. La commutation dans le redresseur non commandé ($\alpha = 0$) entraîne une chute supplémentaire de la tension redressée - correspondant à la surface hachurée sur la figure ci-dessus - qui est provoquée justement par la réactance X_b , on appelle la chute de tension inductive D_x . Il se produit un aplatissement du courant anodique et cette déformation se transmet au courant de réseau.

La chute inductive D_x réduit la valeur idéale à vide de la tension redressée U_{dio} à la valeur moyenne de la tension redressée U_d . On peut évaluer la chute relative de tension continu d_x :

$$d_x = \frac{D_x}{D_{dio}} 100 = \left(1 - \frac{U_d}{U_{dio}}\right) 100 = \frac{1}{2} (1 - \cos u) 100$$

d'où

$$\frac{1}{2} (1 - \cos u) = K X_b I_d \quad (1)$$

avec
$$K = cte = \frac{1}{2\sqrt{2} U_{vo} \sin \frac{\pi}{\rho}}$$

U_{vo} étant la valeur efficace de l'onde fondamentale de la tension d'anode.

Par suite du phénomène d'empêchement, il se produit un déphasage φ entre les ondes fondamentales du courant et de la tension du réseau. Il en résulte une composante supplémentaire de la charge réactive, que l'on appelle "la puissance réactive de commutation".

Considérons maintenant les effets de la commande d'un redresseur. La valeur moyenne de la tension redressée est liée à l'angle de retard à l'amorçage par la relation suivante.

$$U_{do} = U_{dio} \cos \alpha$$

Dans les diagrammes qui suivent, nous représentons les courbes des courants et des tensions en fonction de l'angle α de la commande de gâchette des thyristors.

Pendant la durée de commutation

$$\frac{u_1 - u_2}{2} = \frac{X_b}{\omega} \frac{di}{dt}$$

pour $\omega t = u - \frac{\pi}{\rho}$, on peut écrire :

$$\cos \alpha - \cos (\alpha + u) = K I_d X_b \quad (2)$$

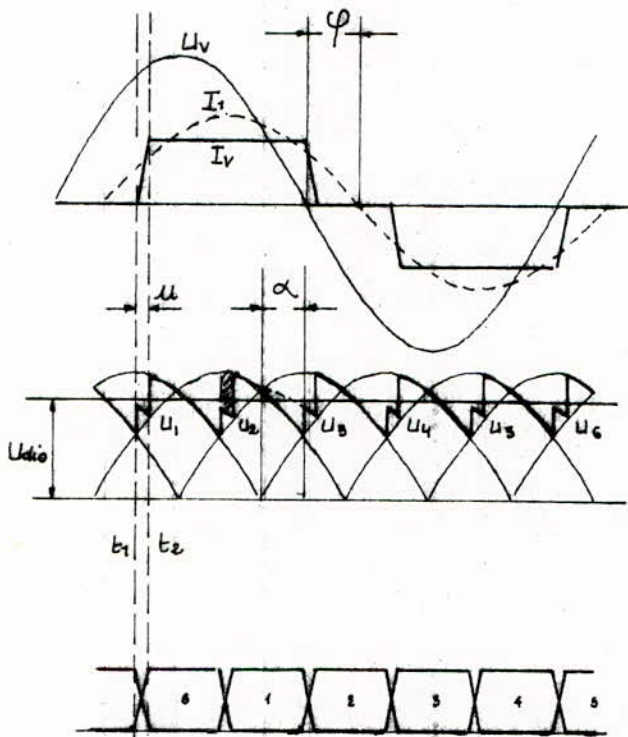
Des relations (1) et (2) nous pouvons tirer

$$\cos \alpha - \cos (\alpha + u) = 1 - \cos u$$

d'où l'on tire :
$$u = \arccos [\cos \alpha + \cos u_0 - 1] - \alpha$$

On constate que l'empiètement u diminue lorsque α augmente.
La chute inductive de tension redressée est donnée par la relation:

$$d_{x\alpha} = \frac{\cos \alpha - \cos (\alpha + u)}{2}$$



φ = angle de déphasage
 α = angle de retard

Par suite de l'action de commande, il en résulte une composante supplémentaire de la charge réactive : "la puissance réactive de commande"

Remarque

Les surfaces hachurées dans les deux diagrammes précédents, avec et sans réglage de phase, sont égales. La valeur absolue de la chute inductive est indépendante de l'angle de retard α .

CONCLUSION

Dans un redresseur à soupapes commandées, quelque soit le mode de couplage, le retard à l'amorçage α et l'empêchement u , déterminent un déphasage φ du courant par rapport à la tension. Il en résulte au primaire, côté alternatif, un retard de l'onde fondamentale du courant par rapport à l'onde fondamentale de la tension et par conséquent l'absorption d'une puissance réactive au réseau.

IV.2.4. ESTIMATION DU FACTEUR DE PUISSANCE

La forme du courant primaire étant non sinusoïdale, le facteur de puissance d'une installation de redresseurs diffère du cosinus de l'angle de déphasage φ . Il est utile de rappeler les définitions des deux expressions pré-citées.

$$\text{-facteur de puissance} = \lambda = \frac{\text{Puissance active}}{\text{Puissance apparente}}$$

$$\text{-facteur de déphasage} = \cos\varphi.$$

$$\cos\varphi = \frac{\text{Puissance active de l'onde fondamentale}}{\text{Puissance apparente de l'onde fondamentale}}$$

On définit aussi le facteur de déformation v comme suit:

$$v = \frac{\lambda}{\cos\varphi}$$

Ce facteur constitue une mesure de l'appel de puissance réactive provoquée par la déformation du courant de ligne.

C'est le facteur de déphasage $\cos\varphi$ qui présente le plus d'importance, ce facteur est fonction :

- de l'angle de commutation u
- de l'angle de retard α
- du facteur de déformation v
- du courant magnétisant du transformateur x

$$\cos \varphi = f(u, \alpha, v, x) \quad (3)$$

α , x et v sont bien définis pour un couplage donné mais u est fonction :

- de l'angle de retard α
- de la chute inductive d_x
- de la valeur relative du courant de charge $\frac{I_d}{I_{dn}}$

$$u = g\left(\alpha, d_x, \frac{I_d}{I_{dn}}\right) \quad (4)$$

Le tracé des courbes représentatives des fonctions (3) et (4) permet une estimation du facteur de déphasage.

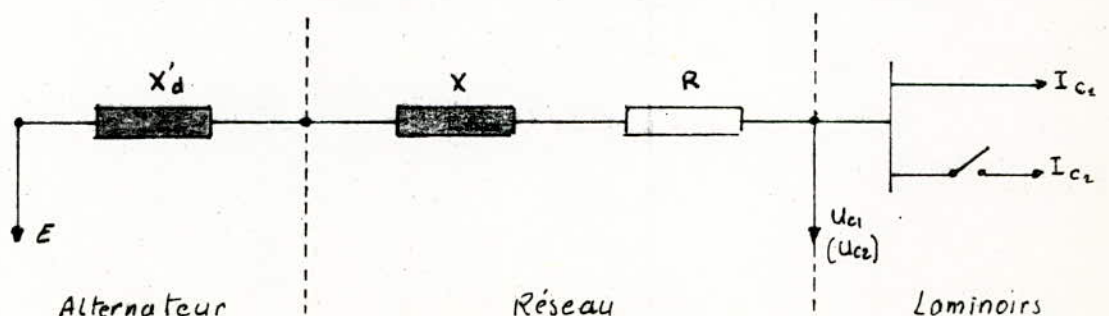
IV.2.5. ESTIMATION DES CHUTES DE TENSION PROVOQUEE PAR

LES POINTES DE CHARGES REACTIVES

Les fortes pointes de charge reactive n'ont qu'une courte durée, mais elles se succèdent à des intervalles très rapprochés et leur vitesse d'accroissement est très élevée. Dans le cas des bloomings, par exemple, où les exigences concernant les temps d'inversion sont sévères, les pointes de puissance reactive peuvent atteindre des vitesses d'accroissement de l'ordre de 100 MVAR par seconde.

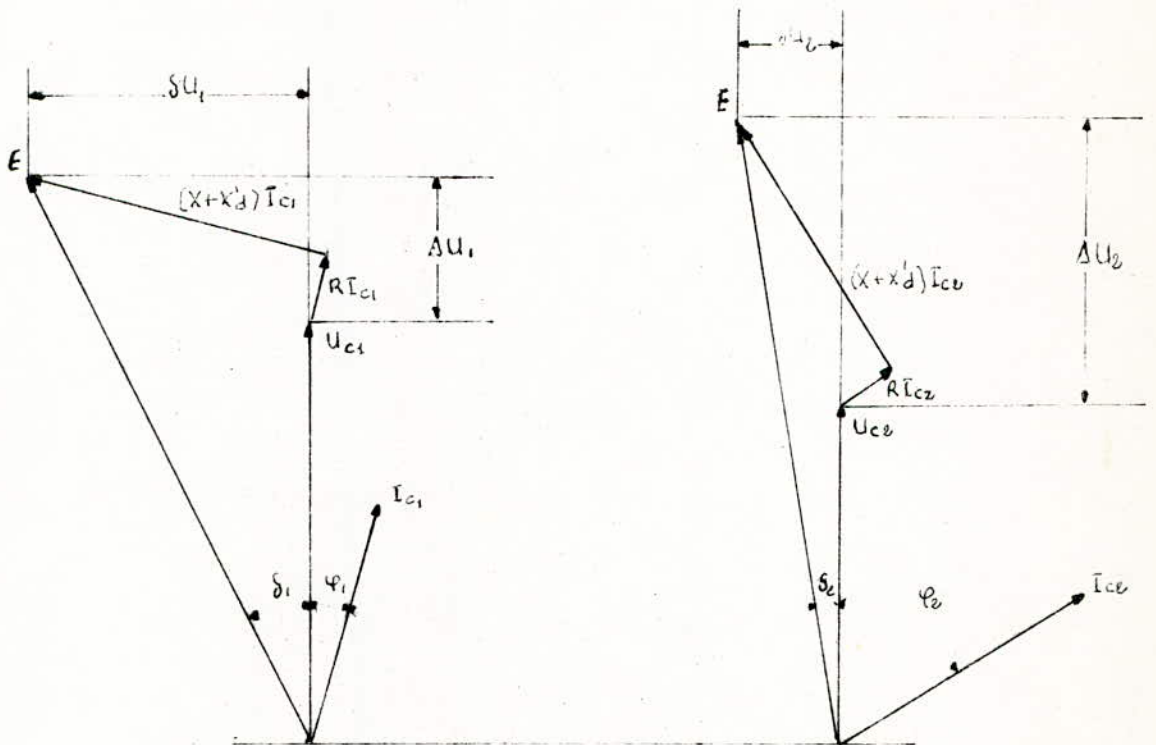
IV.2.5.1. Influence des pointes de charge sur la tension du réseau

Soit un système comprenant un laminoir et son réseau d'alimentation représenté schématiquement ci-dessous.



Nous avons remplacé toutes les sources du réseau par un générateur unique équivalent, dont la tension d'entrefer (f-e-m - chute de tension due à la réactance transitoire) est constante. Ce générateur alimente le jeu de barre d'une installation de laminiers par l'intermédiaire d'une résistance R et d'une réactance X correspondant à l'impédance totale de la ligne et des transformateurs.

Pour une charge (I_{c1}, U_{c1}) nous pouvons trouver la tension E que doit fournir le générateur, à l'aide d'une simple construction vectorielle. Lorsqu'une pointe de charge survient, avec une composante réactive considérable, la tension des barres chute à une valeur $U_{c2} < U_{c1}$. Essayons de représenter les deux diagrammes : d'avant la pointe de charge réactive et pendant la pointe de charge réactive.



la chute de tension comprend une composante longitudinale ΔU et une composante transversale δU (qui détermine la rotation de E). Lors d'une pointe de charge réactive $\delta U \ll \Delta U$,

donc seule la composante ΔU présente une importance.

$$\Delta U = I_c [R \cos \varphi + (X + X'_d) \sin \varphi]$$

quand $\varphi \neq 90^\circ$, $\cos \varphi \approx 0$ et $\sin \varphi \approx 1$

$$\Delta U = I_c (X + X'_d)$$

Donc la chute de tension dépend essentiellement du courant de pointe I_c et de la réaction totale du réseau $X + X'_d$

IV.2.5.2 Courant de court-circuit et pointe de charge réactive

Par définition, le courant de court-circuit est celui qui détermine une chute de tension de 100 pour 100. La pointe de courant de charge et le courant de court-circuit ayant à peu près la même phase, les chutes de tension provoquées sont elles aussi, pratiquement en phase.

On peut donc dire que la valeur en % de la chute de tension due à une pointe de courant réactif correspond à la valeur de cette pointe de courant exprimée en % du courant de court-circuit, c'est-à-dire

$$\Delta U = 100 \frac{I_c}{I_{cc}}$$

Conclusion

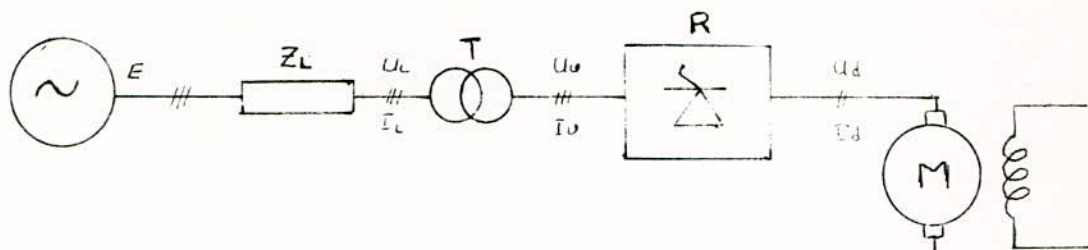
L'estimation des chutes de tension dues aux pointes de charge réactive se ramène donc à la détermination, au point considéré du réseau, du courant de court-circuit

IV.2.6. HARMONIQUES DE COURANTS INJECTES DANS LE RESEAU

Bien que ce problème déborde du cadre de notre étude, nous estimons nécessaire de donner un bref aperçu sur les phénomènes d'harmonique engendrés par un redresseur sur le réseau.

Une installation industrielle de redresseurs à thyristors peut être globalement représentée par le schéma de principe

suivant :



U_L, I_L = tension, et courant de réseau

E = tension interne du générateur

Z_L = impédance du réseau

U_v, I_v = tension, et courant côté alternatif

U_d, I_d = " " " " courant continu.

T = transformateur

R = groupe redresseur.

Le spectre du courant de réseau I_v comporte, en plus du terme fondamental, des harmoniques de rang

$$n = pk \pm 1 \quad (k \in \mathbb{N})$$

Dans le cas, théorique, d'une commutation instantanée (impédance de réseau nulle) on démontre que :

- le déphasage de l'onde fondamentale du courant de réseau par rapport à la tension est égale à l'angle de retard α

- les harmoniques supérieures ont une amplitudes

telle que :

$$\frac{I_n}{I} = \frac{1}{n}$$

On sait qu'en pratique $Z_L \neq 0$, donc $\mu \neq 0$, on constate les faits suivants :

- la composante fondamentale du courant, dont l'amplitude reste constante est ultérieurement déphasé en retard d'un angle $\varphi \approx \frac{1}{2}\mu$

- l'atténuation des harmoniques croît avec l'augmentation de l'inductance de commutation X_c et du rang n

de l'harmonique

- Cette atténuation est d'autant plus faible que l'angle α est voisin de $\frac{\pi}{2}$.

- Dans toutes les applications pratiques, l'ondulation du courant redressé n'est pas négligeable et une correction s'impose surtout pour les valeurs de l'angle α voisines de 90°

De plus, dans le courant de réseau peuvent apparaître d'autres harmoniques, de moindre importance, dues à des causes multiples telles que :

- les dissymétries dans les tensions et dans les impedances de réseau

- les irrégularités dans le déclenchement des impulsions d'amorçage des thyristors.

Le courant s'écoulant dans l'impédance Z_L n'étant pas sinusoïdale, il en résulte un certain taux de distorsion de la tension du réseau U_L . Cette distorsion affecte la valeur efficace de U_L et peut nuire au fonctionnement de certains appareils

IV.3. METHODES GENERALES DE REDUCTION DE CONSOMMATION D'ENERGIE REACTIVE PAR LES REDRESSEURS

IV.3.1. DIAGRAMME DES PUISSANCES

La puissance apparente du réseau S est proportionnelle au courant débité I_d , mais elle est pratiquement indépendante de la tension redressée U_d car le courant alternatif consommé par un redresseur est constant, quelle que soit la tension continue U_d fournie, si l'intensité du courant continu I_d est constante.

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

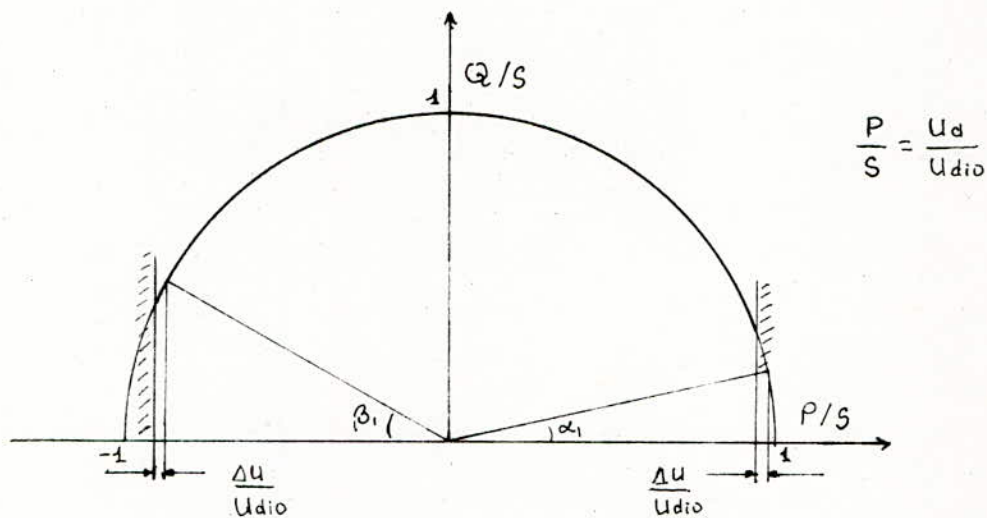
$$U_d = U_{dio} \cos \alpha - U_x - U_o - U_r$$

$$U_x = \text{chute due à la commutation}$$

U_a = chute de tension dans les thyristors.

U_r = chute de tension due aux resistances du circuit

Si la puissance active $P = U_d I_d$ consommée est faible, la puissance reactive Q est élevée. Lorsque la puissance P augmente, c'est à-dire quand U_d augmente, la puissance Q absorbée diminue. Ceci justifie l'allure du diagramme des puissances suivant (pour un redresseur à 6 alternance).



Remarque

La tension relative continue $\frac{U_d}{U_{dio}}$ est inférieure à l'unité du fait de la chute de tension à travers Z_L et de la limite pratique de l'angle α qui est toujours positif. Par conséquent Q n'est jamais nulle, ce qui justifie les zones hachurées sur la figure.

IV.3.2. REDUCTION AU MINIMUM DE TENSION

Une réduction de la tension à vide composée côté transformateur peut aboutir à une diminution de l'appel de puissance réactive, cette réduction est obtenue par:

- Réduction de l'angle de retard α
- minimisation de la réactance de court-circuit du transformateur
- Utilisation, dans le cas de convertisseurs réversibles, de convertisseurs doubles sans arclature de courant.

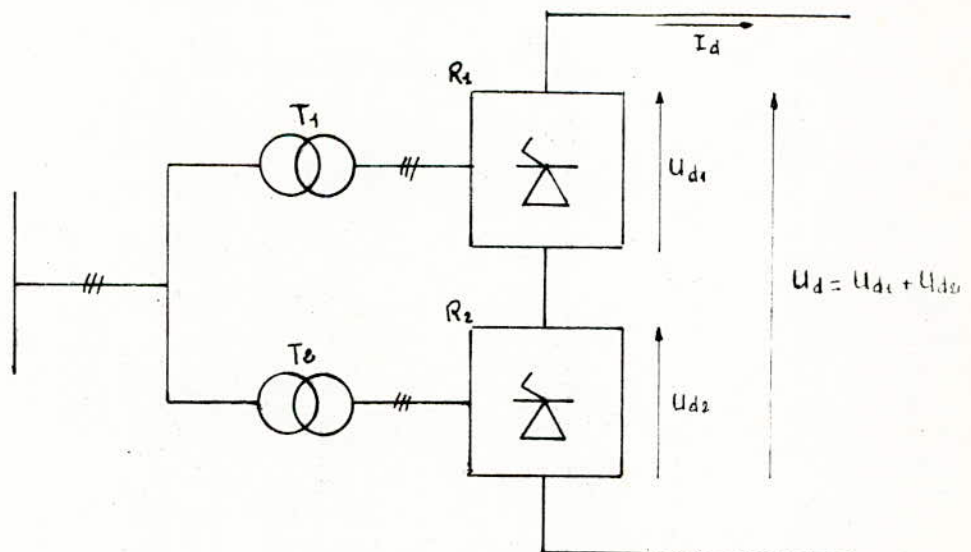
IV.3.3. REGULATEURS A MAXIMUM DE FLUX

Dans le cas des machines à courant continu à puissance constante, l'utilisation d'un système de régulation de vitesse à maximum de flux permet le maintien des machines à pleine flux au démarrage et pendant l'accélération, d'où une réduction, pour un même couple fourni, du courant demandé au convertisseur à de basses tensions et de la puissance réactive appelée.

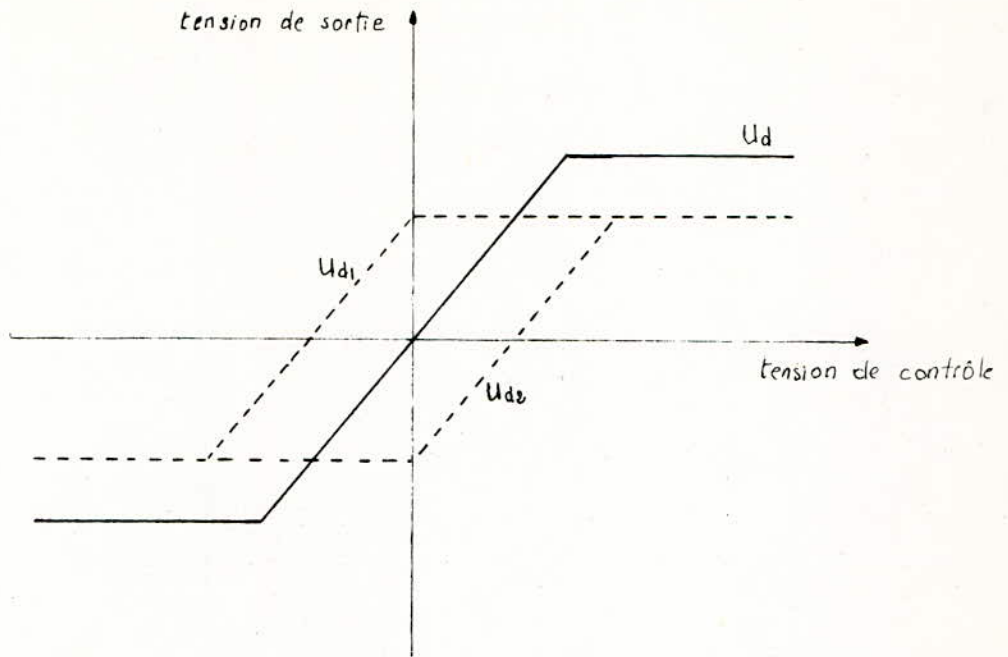
IV.3.4. EMPLOI DE REDRESSEURS A COMMANDE ECHELONNEE

C'est la méthode la plus importante car la plus efficace. Ce type de convertisseur est constitué de plusieurs sections en cascade avec commande échelonnée des générateurs d'impulsions d'amorçage des thyristors. Cette méthode se justifie par le fait que plus la tension de sortie U_d est élevée, plus la consommation d'énergie réactive φ est faible.

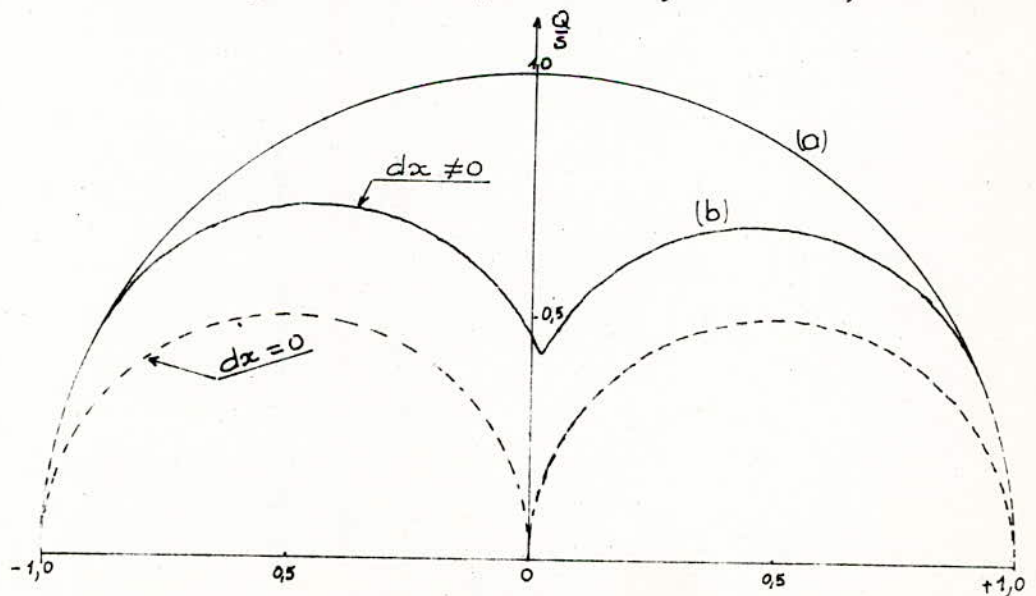
Deux "convertisseurs" R_1 et R_2 sont connectés en cascade suivant le schéma de principe suivant :



et sont commandés suivant les caractéristiques suivantes.



Par un tel montage, seulement une seule des deux sections à la fois peut absorber une puissance réactive élevée, mais chaque section débite la moitié de la puissance du groupe redresseur. L'économie d'énergie réactive est donc réalisée par le fait qu'à chaque instant, la commande n'agit que sur une seule des sections, l'autre étant à ouverture maximale (soit en redresseur, soit en onduleur). Le résultat est que la puissance réactive n'est théoriquement que la moitié de celle résultant d'une commande simple. Cet avantage se traduit par le diagramme de puissance suivant.



- (a) commande simple
- (b) commande échelonnée

Remarque

Dans le cas où l'inversion de tension n'est pas nécessaire, un des deux convertisseurs peut être non commandé. L'avantage d'un tel montage réside en la possibilité de régler la tension de sortie de 0 à sa valeur maximale, mais il présente aussi un inconvénient majeur : taux d'harmoniques de courant alternatif trop élevé ($n = 3K \pm 1$).

IV-4-PROBLEME DE LA COMPENSATION D'ENERGIE REACTIVE DANS LES LAMINOIRS

Les conséquences mentionnées de la réaction du redresseur sur le réseau amènent les producteurs d'énergie électrique, avec le nombre et la puissance croissants des redresseurs, à poser des conditions de plus en plus sévères en vue de réduire les réactions de ces installations sur le réseau. Pour remplir ces conditions on dispose en plus des moyens internes (voir paragraphe VI-3) concernant la technique de montage et de commande, des moyens extérieurs aux redresseurs : les compensateurs d'énergie réactive.

Nous rappelons que vu du réseau alternatif, le laminoir apparaît comme une charge "turbulente" caractérisée par

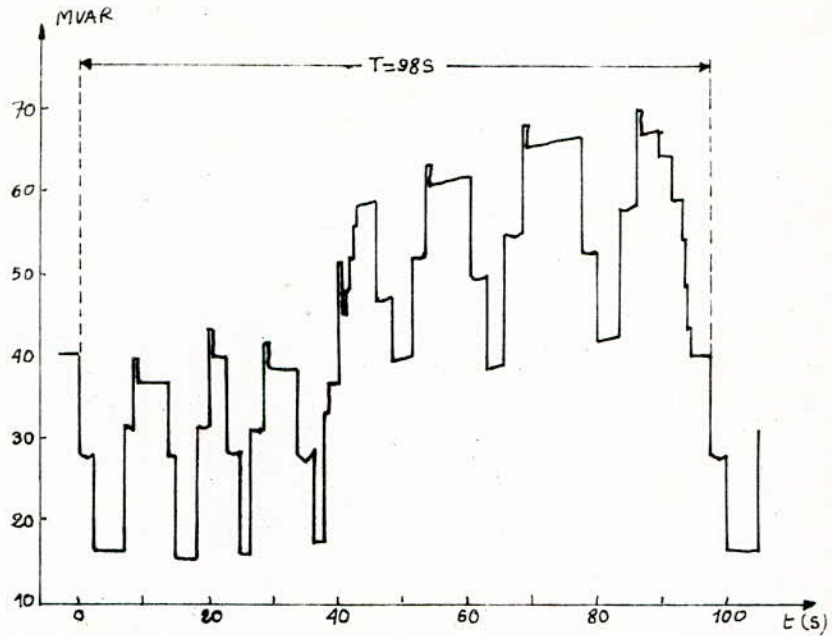
- Un faible facteur de puissance
- Des variations importantes et rapides de la puissance réactive sans provoquer de déséquilibre de phases, comme indiqué par la figure IV-

- la production de courants harmoniques dont l'importance dépend du couplage des redresseurs.

Certaines installations de compensation de l'énergie réactive sont en mesure :

- de relever le facteur de puissance.
- d'adapter la puissance réactive variable demandée par la charge dans les limites de son temps de réaction.

figure IV.-
variations des puissances réactives d'un laminoir à chaud.



Pour déterminer les dimensions de l'équipement de compensation, il faut connaître l'évolution dans le temps des puissances active et réactive appelées par le laminoir. On doit donc établir des programmes de laminage combinant les différents trains et leurs auxiliaires raccordés au même jeu de barres. Le programme de laminage doit indiquer l'importance des passes et la vitesse de laminage. Le dépouillement des résultats d'expériences sur les laminoirs existants, ainsi que les études théoriques, ont conduit à l'établissement d'abaques permettant de calculer les couples de laminage. La connaissance de ces couples et des vitesses permet de déterminer les puissances nécessaires.

On a montré, au cours des chapitres précédents que le fonctionnement des fours à arc et des laminoirs ne se faisait pas sans provoquer, dans des réseaux de puissance relativement faible, de grandes variations de tensions se traduisant par des effets de flicker

On peut réduire, ces perturbations de tension, ainsi que les réactions dues aux charges asymétriques et aux harmoniques par l'installation de compensateurs de l'énergie réactive

V-1- FONCTIONS DE LA COMPENSATION

La compensation de la puissance réactive a pour tâches

- de réduire les fluctuations de tension et les phénomènes de flicker
- d'améliorer le facteur de puissance
- de diminuer les harmoniques
- d'équilibrer les charges asymétriques

Les caractéristiques idéales pour un système quelconque de compensation sont donc les suivantes

- Réponse instantanée à des variations brusques de la charge. Ce qui garantit que les changements rapides et lents de la charge seront atténués dans des proportions semblables
- Réponse indépendante pour chaque phase de manière à ce que les variations de charges, équilibrées et déséquilibrées sur les phases soient atténuées dans des proportions semblables.
- Absences d'effets parasites tels que les oscillations de fréquence naturelles dues à des effets de résonance électrique

Du fait des temps morts et des constantes de temps des circuits de contrôle et de mesure, les installations de compensateurs ne peuvent suivre les fortes variations de charge qu'avec un certain temps de retard égal au temps de réaction du compensateur. On aura donc toujours un écart entre les "exigences" et "l'action de l'équipement de compensation"

Il est évident que l'efficacité d'un système de compensation est surtout fonction de sa capacité de réduction du flicker, de ce fait, les exigences quant au temps de réponse sont extrêmement élevées et se situent physiquement à la limite du possible. Mais lors du dimensionnement d'une installation de compensation on ne doit pas tenir compte uniquement du flicker mais aussi du maintien du facteur de puissance au-dessus d'une valeur déterminée.

V-2- LES COMPENSATEURS

Les effets de brusques phénomènes transitoires peuvent être compensés par le comportement naturel des machines électriques. C'est pourquoi le premier mode de compensation utilisé fut le compensateur synchrone.

Actuellement, avec le progrès de l'électronique de puissance, des compensateurs entièrement statiques ont fait leur apparition.

V-2-1- LE COMPENSATEUR SYNCHRONE

Le principe du compensateur synchrone repose essentiellement sur les propriétés d'une machine synchrone munie d'un système d'excitation à thyristors, capable de fournir à ses bornes une tension nettement supérieure à celle qui est nécessaire en régime nominal et contrôlée par un régulateur électronique agissant sous l'effet de la composante réactive

du courant fourni par le réseau, permet de réaliser une compensation continuellement variable.

V-2-2- LES COMPENSATEURS STATIQUES

Le principe de la compensation statique repose sur les propriétés fondamentales des condensateurs, des réactances et des thyristors. On peut les répartir, en deux catégories distinctes

- Les compensateurs qui fournissent à l'installation de la puissance réactive variable nécessaire à chaque instant à son bon fonctionnement. Ces compensateurs sont constitués à partir de condensateurs statiques insérables à bancs à l'aide de contacteurs à thyristors

- Les compensateurs qui stabilisent la puissance réactive appelée par l'installation. Ces compensateurs comprennent

- Un fournisseur de puissance constitué de condensateurs fixes fournissant à chaque instant une puissance réactive fixe.

- Un absorbeur de puissance ou stabilisateur qui absorbe à chaque instant la différence, entre la différence entre la valeur constante d'énergie réactive du fournisseur, et celle variable appelée par l'installation. Ce stabilisateur est constitué de selfs réglables au moyen de.

. gradateurs à thyristors

. auto-saturation avec le niveau de tension

. contrôle du niveau de saturation

Nous reviendrons en détails sur tous ces compensateurs au cours des chapitres qui suivent.

V-3- QUELQUES CONSIDERATIONS SUR LES COURANTS ASYMETRIQUES

On sait aussi que le fonctionnement spécial des fours

d'arc produit des charges fortement asymétriques. Dans les cas extrêmes, par exemple le desamorçage de l'arc dans une phase ou le court-circuit entre deux phases, la composante inverse atteint 50 à 70% de la composante directe nominale. Un équilibrage est rendu nécessaire car une asymétrie accentuée de la charge active provoque des variations de tension de l'importance de celles produites par la partie réactive.

De plus, ces courants asymétriques entraînent des asymétries de tension au point de raccordement. Il en résulte des charges et pertes accrues non seulement pour les consommateurs, mais aussi pour les installations de production et de distribution de l'énergie électrique.

Le champ tournant inverse provoque dans les alternateurs et moteurs des pertes supplémentaires dans les circuits d'induit. Pour éviter le surcharge thermique des machines, le courant admissible en permanence du système inverse ne doit pas dépasser 5 à 10% du courant nominal, et le degré d'asymétrie de tension ne doit pas dépasser 0,5% au point de raccordement.

En raison des fluctuations de tension, provoquées par une charge asymétrique, et compte tenu du degré d'asymétrie sur les machines tournantes, il faut prendre des mesures appropriées pour réduire la composante inverse, surtout lorsqu'il s'agit de réseau de faible puissance.

V-4- QUELQUES CONSIDERATIONS SUR LES

HARMONIQUES DE COURANT

On sait que les installations de fours à arc, et de laminoirs ont la propriété d'injecter des courants à fréquences d'harmoniques dans l'impédance des réseaux impliquant l'apparition de tensions harmoniques superposées à la tension fondamentale. Sur le plan technico-économique, la pollution

l'harmonique dégrade la qualité de service du réseau distributeur d'énergie électrique

Pour évaluer l'importance de la distorsion de tension due aux harmoniques on se réfère à la valeur efficace des harmoniques comme dans la définition du facteur de distorsion DF

$$DF = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}$$

V_h = valeur efficace de l'harmonique de rang h .

V_1 = valeur efficace de la composante fondamentale.

Étant donné que les réseaux industriels accusent un caractère fortement inductif, des circuits résonants susceptibles d'avoir une répercussion fâcheuse relativement aux surtensions, peuvent se manifester en relation avec des batteries de condensateurs d'amélioration du facteur de puissance.

L'installation de filtres d'harmoniques permet de décharger le réseau de certains harmoniques et de réduire le taux de distorsion de la tension ainsi que les pertes supplémentaires.

Les filtres sont, en général, des circuits [L, C] à résonance série qui présentent aux fréquences harmoniques auxquels ils sont accordés une très faible résistance d'où dérivation de l'harmonique en travers du filtre.

Lors de la conception d'une installation de filtrage, il convient spécialement d'étudier l'effet des différents filtres sur le réseau d'alimentation. On procède à une analyse par ordinateur afin de vérifier, en fonction de la fréquence, la valeur de l'impédance totale constituée par les filtres et le réseau d'alimentation telle qu'elle est vue par les générateurs d'harmoniques de courant, c'est à dire la charge et parfois même, le compensateur.

Dans la plus part des installations de compensation, les filtres sont réalisés à partir de la batterie de condensateurs fournissant la puissance réactive de compensation, ce qui permet un faible investissement supplémentaire relatif aux harmoniques.

VI-1- RAPPEL SUR LA MACHINE SYNCHRONE

La machine synchrone triphasée est une machine à symétrie tournante composée d'un stator à $2p$ pôles comportant l'enroulement triphasé, à l'intérieur duquel tourne le rotor à $2p$ pôles portant le circuit d'excitation à courant continu.

Le champ inducteur, stationnaire par rapport au rotor, est un champ tournant à la vitesse du rotor Ω par rapport au stator fixe. Le champ d'induit produit par l'enroulement triphasé, est un champ tournant à la vitesse ω/p , où ω est la pulsation du courant statorique.

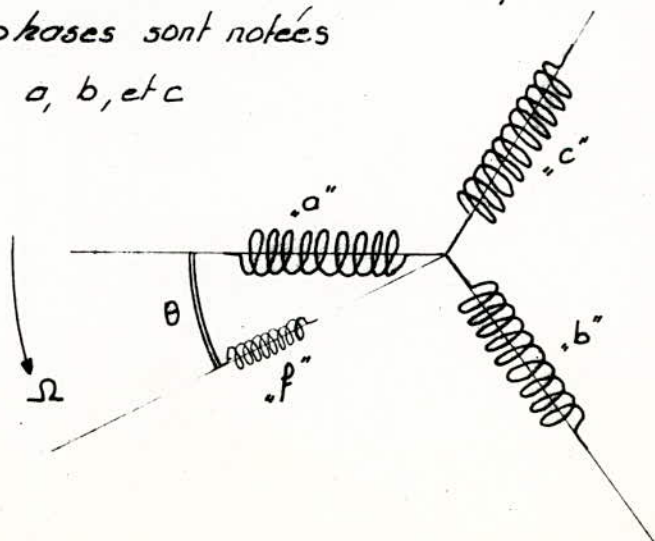
Le fonctionnement synchrone est caractérisé par l'égalité des vitesses $\Omega = \omega/p$.

VI-1-1- EQUATIONS ET DIAGRAMMES

Nous établissons les équations de fonctionnement d'une machine synchrone à p paires de pôles, à entrefer constant, en régime linéaire stationnaire.

L'enroulement triphasé, étant uniformément distribué, les mutuelles inductances entre les phases sont égales. Les trois phases sont notées

a, b, etc



On suppose que l'enroulement inducteur, noté f , fait un angle θ avec l'axe de la phase "a" pris comme origine

VI-1-1-1 Expression des flux.

En appelant M , la mutuelle inductance entre deux phases et M_{if} , la mutuelle entre la phase i et l'enroulement inducteur telle que $M_{af} = M_{af} \cos \theta$, $M_{bf} = M_{af} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})$

$$M_{cf} = M_{af} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})$$

les flux s'expriment par les relations suivantes

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + M_{af} I_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos \theta - \frac{2\pi}{3} \\ \cos \theta - \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix}$$

et $\phi_f = L_f I_f + M_{af} [I_a \cos \theta + I_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + I_c \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})]$

VI-1-1-2 Expression des tensions

Nous considérons tous les enroulements en régime moteur, alors la matrice suivante donne l'expression des tensions aux bornes de l'induit.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} [R_a, R_b, R_c]$$

$R_a = R_b = R_c.$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - M_{af} I_f \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin \theta - \frac{2\pi}{3} \\ \sin \theta - \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix} + R_a \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

et en grandeur complexe

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \end{bmatrix} + R_a \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

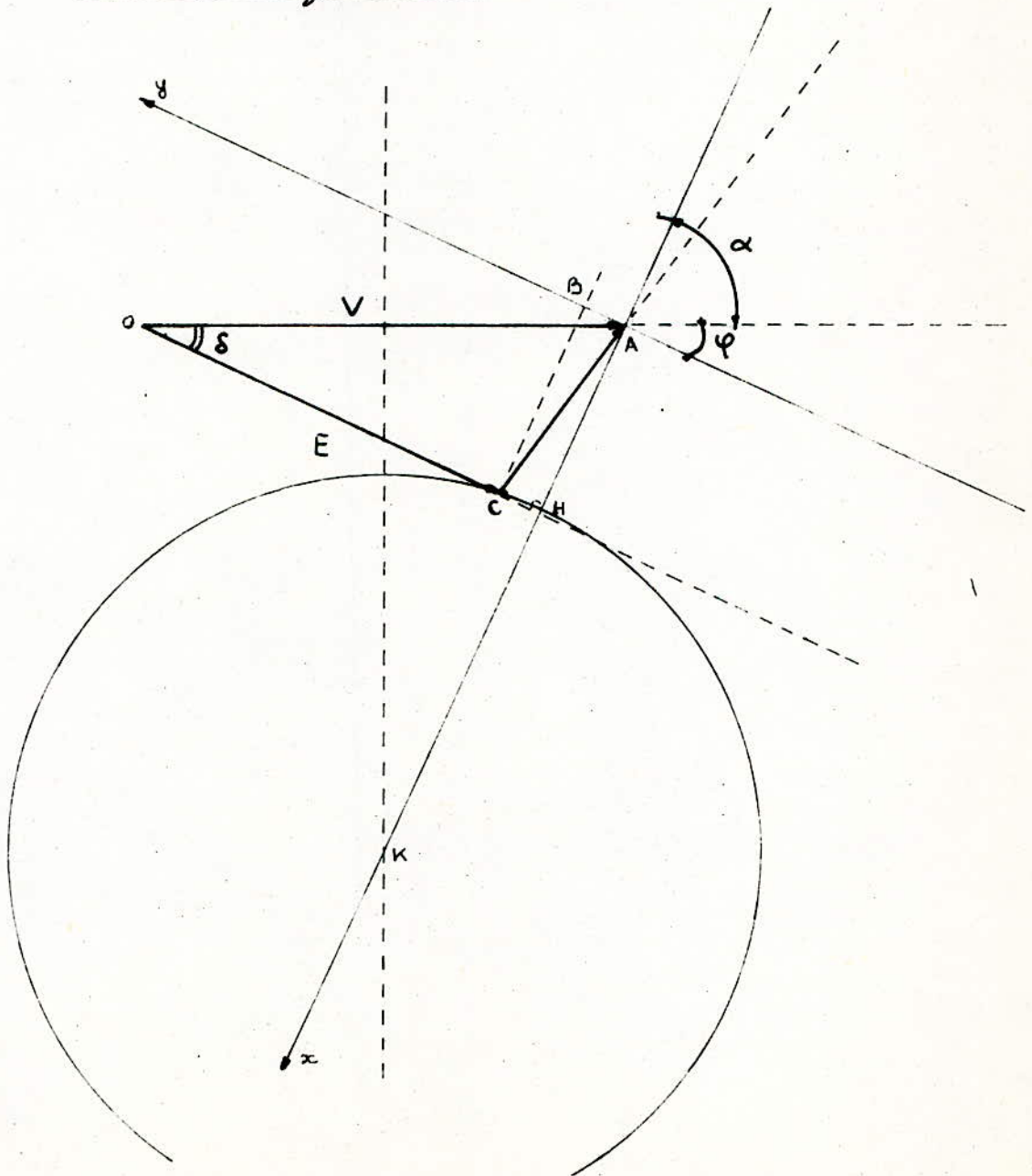
d'où

$$\begin{aligned}\bar{V}_a &= jL\omega\bar{I}_a + jM\omega(\bar{I}_b + \bar{I}_c) + \bar{E}_a + R_a\bar{I}_a \\ &= j\omega(L-M)\bar{I}_a + \bar{E}_a + R_a\bar{I}_a \\ &= (R_a + jX)\bar{I}_a + \bar{E}_a\end{aligned}$$

Donc la tension d'une phase quelconque s'exprimera par la relation

$$\bar{V} = \bar{E} + (R + jX)\bar{I} = \bar{E} + Z\bar{I}$$

VI-1-1-3 Diagrammes.



Axes des puissances.

La grandeur conjuge de la puissance monophasée aux bornes du moteur s'exprime par la relation

$$\bar{S}^* = \bar{V}\bar{I} = \bar{V} \left[\frac{\bar{V} - \bar{E}}{\bar{Z}} \right] = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} \bar{CA}$$

Cette grandeur est réelle pure, c'est à dire égale à la puissance active, si l'argument du vecteur \bar{CA} est égal à l'argument de l'impédance complexe $\bar{Z} : \alpha$.

Puissance utile - cercle d'équipuissance

La puissance wattée fournie, par phase, au moteur est :

$$P_0 = VI \cos \varphi$$

et la puissance utile correspondante :

$$P_u = VI \cos \varphi - R_0 I^2 - p$$

p étant les autres pertes, constantes, indépendantes du courant d'induit

Considérons la puissance

$$\begin{aligned} P &= VI \cos \varphi - RI^2 = P_u + p \\ &= VI \frac{AH}{AC} - \frac{R}{Z^2} AC^2 \end{aligned}$$

en posant $AH = x$ et $AB = y$ l'expression de P devient

$$P = \frac{V}{Z} x - \frac{R}{Z^2} (x^2 + y^2)$$

$$\text{ou } PZ = Vx - \cos \alpha (x^2 + y^2)$$

$$\text{d'où } \left[x - \frac{V}{2 \cos \alpha} \right]^2 + y^2 = \frac{V^2}{4 \cos^2 \alpha} - \frac{PZ}{\cos \alpha}$$

Si P est constante, cette équation correspond à un cercle de centre K , point d'intersection de l'axe des puissances wattées Ax avec la médiatrice à OA et de rayon.

$$R = \frac{1}{2 \cos \alpha} \sqrt{V^2 - 4PZ \cos \alpha}$$

En définitive, à puissance utile constante, le point C

caractérisant la f.c.e.m du moteur sur le diagramme, décrit un cercle. Ce cercle passe par A, dans le cas où P est nulle et il est réduit à une droite parallèle à OA, lorsque l'on néglige la résistance R_a . ($R_a=0 \Rightarrow \cos \alpha = 0 \Rightarrow \text{Rayon} = \infty$) alors, V étant constante, $E \sin \delta = \text{cte}$.

VI-1-2- STABILITE

VI-1-2-1 Puissances et couple.

La puissance apparente monophasée est donnée par la relation

$$\bar{S} = \bar{V} \bar{I}^* = V \left(\frac{\bar{V} - \bar{E}^*}{Z^*} \right) = \frac{V^2}{Z^*} - \frac{\bar{V} \bar{E}^*}{Z^*}$$

d'où la puissance active

$$P_a = \frac{V^2}{Z} \cos \alpha - \frac{VE}{Z} \cos(\alpha + \delta)$$

Quant à la puissance interne, elle s'exprime par :

$$\bar{S}_i = \bar{E} \bar{I}^* = \bar{E} \left(\frac{\bar{V} - \bar{E}^*}{Z^*} \right) = \frac{\bar{E} \bar{V}}{Z^*} - \frac{E^2}{Z^*}$$

d'où la puissance électromagnétique

$$P_e = \frac{EV}{Z} \cos(\alpha - \delta) - \frac{E^2}{Z} \cos \alpha$$

Si l'on néglige la résistance de l'induit, $\alpha = \frac{\pi}{2}$ et

$$P_e = P_a = \frac{EV \sin \delta}{X}$$

d'où le couple électromagnétique

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{EV}{\Omega X} \sin \delta$$

Pour E et V constantes, le couple C_e est représenté par une sinusoïde. (voir figure suivante)

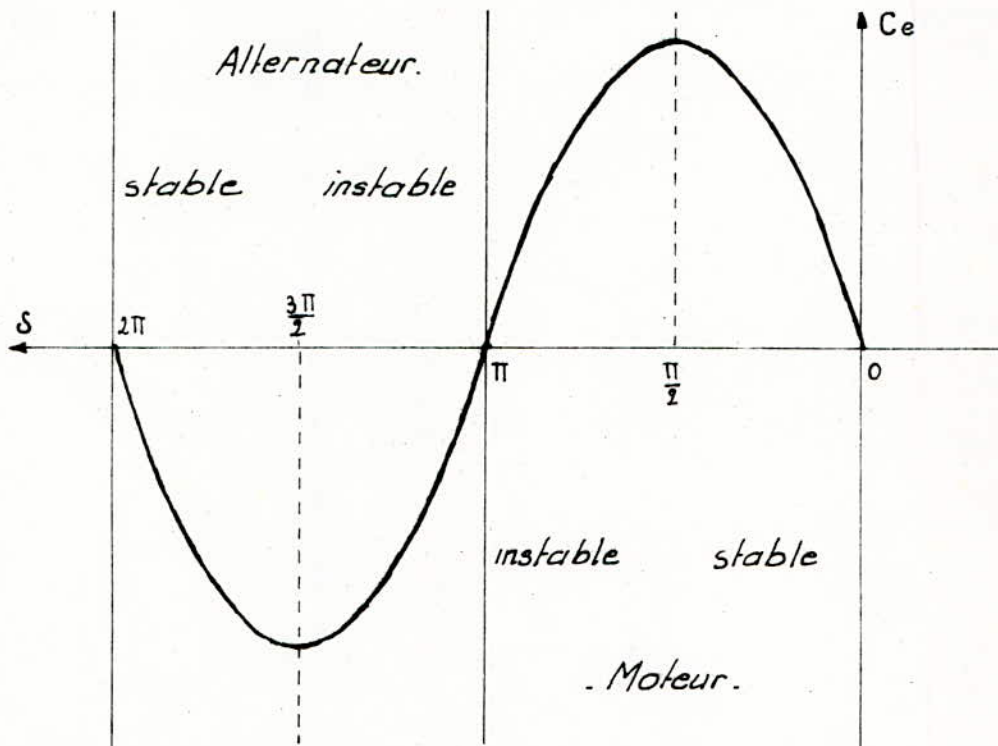
Un ralentissement du rotor, donc une augmentation de δ , doit provoquer un accroissement du couple moteur pour avoir l'équilibre $C_e = C_r$

Cette condition est vérifiée pour $0 < \delta < \frac{\pi}{2}$, car alors

$\frac{dC_e}{d\delta} > 0$ et la marche est stable.

pour $\frac{\pi}{2} < \delta < \pi$ $\frac{dC_e}{d\delta} < 0$ la marche est instable.

Donc si l'on charge progressivement le moteur, celui-ci ne se décroche pas tant que le couple résistant n'aura pas dépassé le couple maximal $C_{em} = \frac{EV}{R_X}$.
Telle est la condition de stabilité statique.



VI-1-2-2 Stabilité dynamique.

La condition de stabilité est différente si le moteur subit une surcharge brusque.

Considérons le tracé du couple, de la figure suivante.

le moteur est en marche de régime caractérisé par l'égalité $C_{e1} = C_{r1}$ et le point P_1 .

Appliquons brusquement au rotor le couple résistant C_{r2} . Le point de fonctionnement est alors amené, en P , où $C_{r2} = C_{e2}$. Pour aller de P_1 à P , la roue pôle ralentit, et perd une énergie cinétique

$$W_1 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (C_e - C_{r2}) d\delta$$

Durant cette phase C_e reste inférieur à C_{r2} .

Au delà du décalage δ_2 .

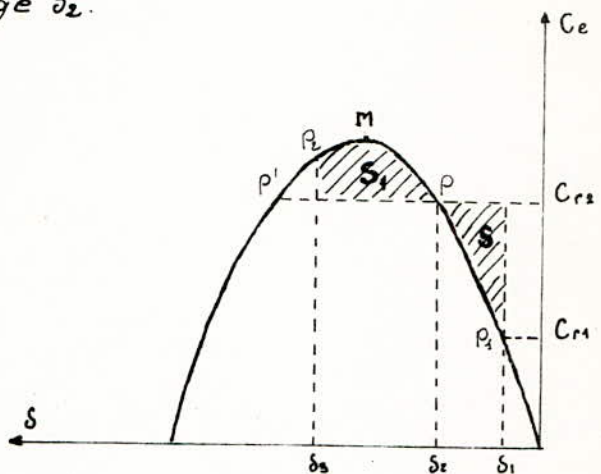
le couple moteur devient supérieur au couple C_{r2} .

la roue polaire reprend alors de la vitesse et celle-ci ne devient

supérieure à la vitesse de synchronisme que

lorsque la roue polaire

a repris l'énergie cinétique positive



$$W_2 = \int_{\delta_e}^{\delta_s} (C_e - C_{r2}) d\delta$$

Les deux énergies W_1 et W_2 sont représentées sur la figure par les surfaces S et S_1 et c'est leur égalité qui définit le décalage δ_s en surcharge brusque.

Donc en surcharge brusque, l'angle électrique peut dépasser la valeur $\frac{\pi}{2}$ sans qu'il y ait décrochage du moteur.

La limite de stabilité dynamique est atteinte lorsque le ralentissement du rotor amène le point figuratif en P' symétrique de P par rapport à la verticale passant par le point M , car à partir de là, il est impossible d'avoir $C_e > C_r$, donc de retrouver la vitesse de synchronisme.

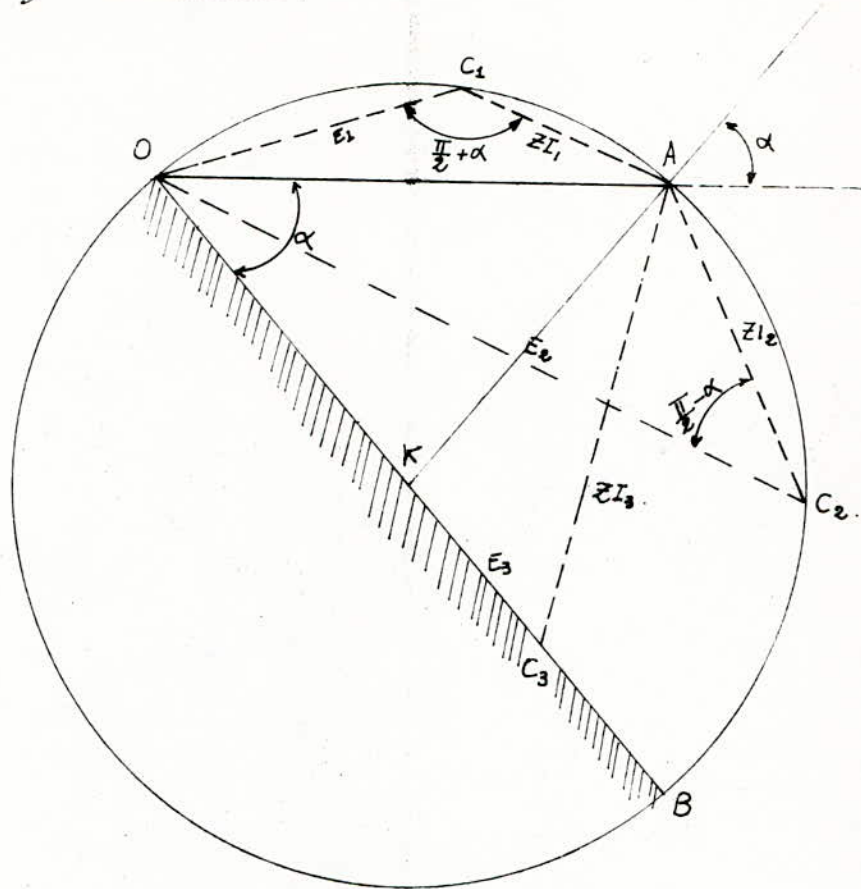
VI-1-3 - FONCTIONNEMENT A PUISSANCE CONSTANTE ET

A EXCITATION VARIABLE

Le fonctionnement d'un moteur à puissance absorbée constante est caractérisé par un réseau de courbes en V de Mordey donnant les variations du courant d'induit en fonction du courant d'excitation.

Considérons, pour simplifier, le cas où $P = UI \cos \varphi - RI^2$

est nulle. le fonctionnement stable de la machine est illustré par la figure suivante.



Le point C_1 décrivant l'arc de cercle OC_1A obéit à l'équation $V^2 = E_1^2 + Z^2 I_1^2 - 2 E_1 Z I_1 \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha)$ la machine est sous-excité, et absorbe de l'énergie réactive du réseau. Lorsque C_1 est en O , $E = 0$ et $V = Z I$. le moteur se comporte comme une impédance Z .

Lorsque C_1 est en A , $E = V$ et $I = 0$

le point C_2 décrit l'arc de cercle AC_2B tel que.

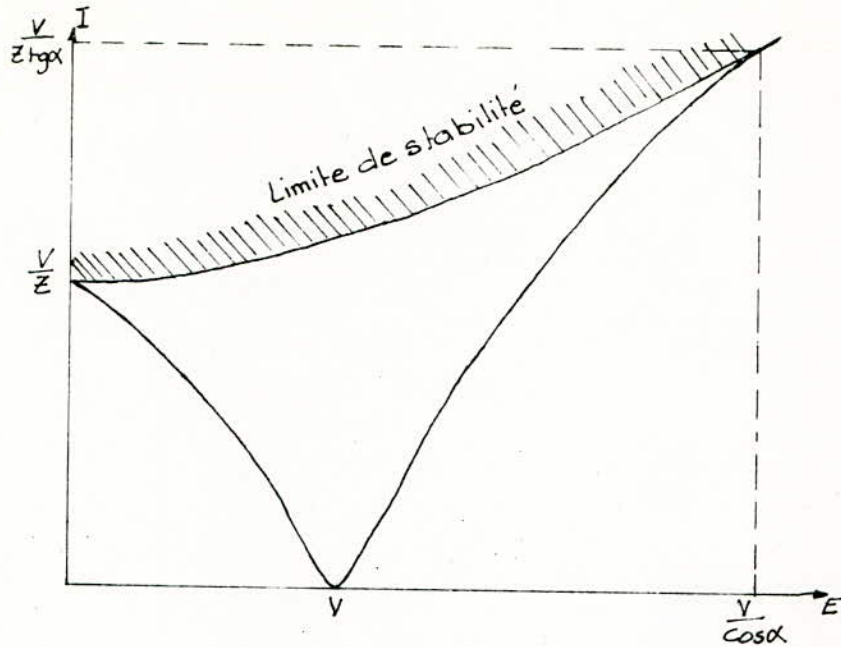
$$V^2 = E_2^2 + Z^2 I_2^2 - 2 E_2 Z I_2 \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha)$$

la machine est surexcitée et fournit de l'énergie réactive au réseau. lorsque C_2 est en B $E = V \cos \alpha$ et $I = \frac{V}{Z} \operatorname{tg} \alpha$

le point C_3 , sur la limite de stabilité

est tel que $Z I_3 = V^2 + E_3^2 - 2 E_3 V \cos \alpha$.

Cette équation représente une hyperbole passant par les points $O (E=0, I = \frac{V}{Z})$ et $B (V \cos \alpha, \frac{V}{Z} \operatorname{tg} \alpha)$



En réalité, pour l'excitation optimale le courant I n'est pas nul.

VI-2- FONCTIONNEMENT EN COMPENSATEUR

VI-2-1- PRINCIPE

Un moteur synchrone à vide, et absorbant un courant réactif, en avance ou en retard par rapport à la tension du réseau est un compensateur. Le réseau lui fournit une énergie active nécessaire à son fonctionnement, cette énergie constitue les pertes du moteur, et reçoit une énergie réactive, capacitive ou inductive, réglable par l'excitation.

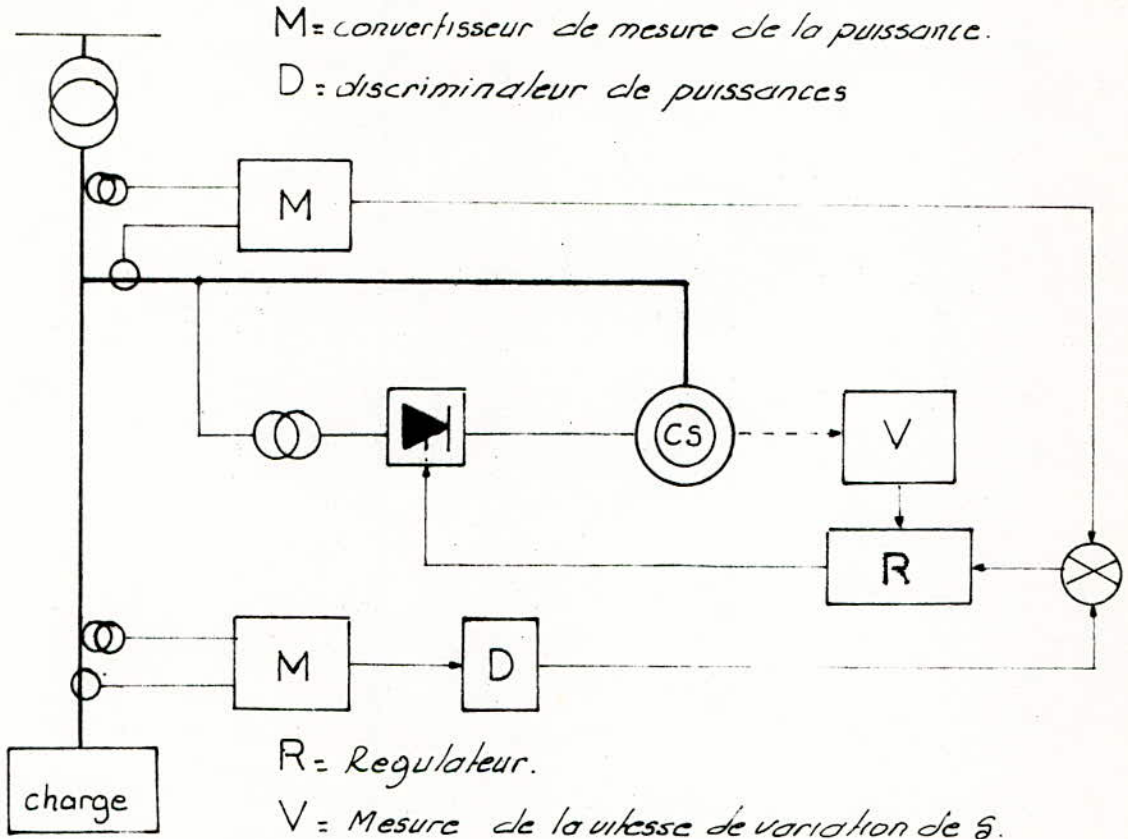
Pour une excitation nulle, la puissance magnétisante est prise en totalité du réseau.

Quand le courant d'excitation augmente jusqu'à la valeur J_n , à laquelle correspond la valeur nominale de la tension à vide, $E = V$, la puissance réactive prise du réseau diminue et s'annule pour cette valeur du courant d'excitation. Dans ce cas le flux d'induit renforce le flux inducteur.

Quand le courant inducteur augmente au-delà de cette valeur, la machine surexcitée fournit de l'énergie réactive au réseau. Le flux d'induit est démagnétisant, en régime surexcité.

VI-2-2- REGULATION

Un système d'excitation rapide utilise un pont redresseur à thyristors commandés par un régulateur de puissance réactive, suivant le schéma principe suivant:



La grandeur de référence est élaborée à partir des valeurs de la tension et du courant absorbé par la charge. la composante variable est comparée directement avec la valeur effective de la puissance déterminée par la mesure de la tension et du courant au point de raccordement du compensateur. Par l'intermédiaire du régulateur de puissance de réactive, tout écart entre cette valeur effective et la grandeur de référence agit sur le régulateur.

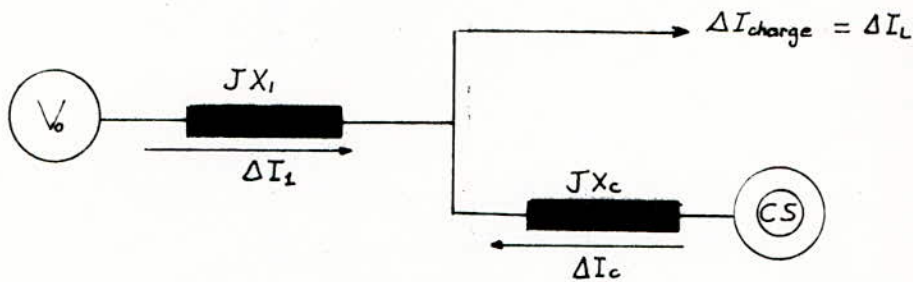
Pour éviter des oscillations du rotor pouvant intervenir lors d'une brusque variation du courant d'excitation, on introduit dans le réglage une grandeur proportionnelle à la vitesse de variation de l'angle δ .

VI-2-3 - TEMPS DE REPONSE

le temps de l'installation de compensation, vue l'importance de la constante de temps du système d'excitation d'une machine synchrone, est de l'ordre de 5 à 6 périodes.

La capacité du compensateur synchrone à atténuer les variations rapides de la tension provient de sa capacité à augmenter la puissance de court-circuit au point de raccordement.

Lors d'une variation brusque du courant réactif, le compensateur synchrone se comporte comme une seconde source, la première étant le réseau d'alimentation. Cette variation va se partager entre ces deux sources inversement proportionnelle à leurs impédances, c'est à dire puisqu'on peut négliger leurs résistances, inversement proportionnelle à leurs réactances.



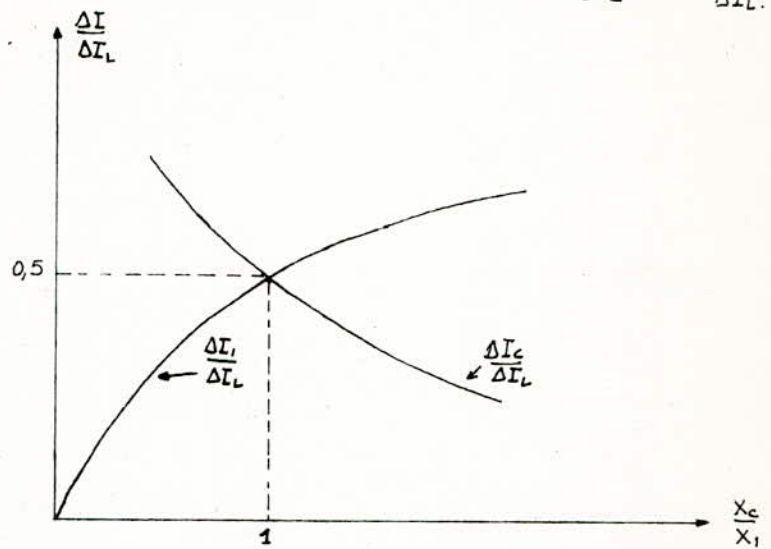
$$\frac{\Delta I_1}{X_c} = \frac{\Delta I_c}{X_1} = \frac{\Delta I_L}{X_c + X_1}$$

$$\text{d'où } \frac{\Delta I_1}{\Delta I_L} = \frac{X_c/X_1}{1 + X_c/X_1} \quad (1)$$

le problème est alors de savoir ce qu'il faut considérer comme valeur de \$X_c\$. Généralement pour des pointes de charges de durée inférieure à 5 périodes, on peut prendre la réactance subtransitoire. Si les excursions de puissance réactive sont de plus longue durée, on considère la réactance transitoire ou la moyenne des deux.

Quant aux variations lentes, elles sont normalement prises en charge par le régulateur qui agira sur l'excitation pour fournir l'énergie réactive compensatrice nécessaire

La figure suivante donne les variations de $\frac{\Delta I_1}{\Delta I_L}$ et $\frac{\Delta I_c}{\Delta I_L}$ en fonction de $\frac{X_c}{X_1}$.



L'examen de cette figure montre qu'il faut réduire le rapport $\frac{X_c}{X_1}$. Diminuer X_c revient à augmenter la taille du compensateur. Par conséquent on cherchera à augmenter la réactance X_1 , si X_R est la réactance du réseau, celle-ci étant fixée, on ajoute une réactance tampon X_b telle que $X_1 = X_b + X_R$. Cependant il existe une limite supérieure, pour X_c donnée, de X_1 qui correspond à la limite de stabilité du compensateur.

Cette limite peut conduire à un X_c grand, don un compensateur de taille importante. Alors pour réduire sa taille, pour des considérations économiques, on ajoute une capacité série avec la réactance de la machine, il faudra alors prévoir un système d'amortissement pour éviter les oscillations du circuit ainsi formé.

Dans ce cas, la machine sera plus chargée. Pour lui permettre d'assumer les écarts de réactif sans échauffement excessif, une partie de la puissance réactive est fournie par une batterie de condensateurs fixe qui servira à former des filtres d'harmoniques.

VI 2 4 CONCLUSION

La constante de temps du système d'excitation d'une

d'une machine synchrone est trop grande pour permettre d'obtenir une contribution importante à la réduction des fluctuations rapides de la charge réactive, par la régulation de tension d'excitation. L'action compensatrice de la machine provient de sa capacité d'élever la puissance de court-circuit au point de raccordement, d'où la nécessité d'augmenter la taille du compensateur afin d'avoir une réactance subtransitoire faible. Pour des considérations économiques la diminution de cette réactance est obtenue par insertion de condensateur série dans le circuit du compensateur.

Le compensateur synchrone permet une réduction des fluctuations à environ 50%.

S'il présente l'avantage de ne point créer d'harmoniques de courants, il ne contribue pas à la réduction de la distorsion de la tension due aux harmoniques.

De plus il a un effet symétrique sur les phases, cependant certaines machines consomment des courants inverses de valeur pouvant atteindre 30% de la valeur nominale du courant direct.

L'installation d'un compensateur synchrone nécessite certains travaux de génie civil et son fonctionnement un entretien continu. Il faudrait aussi faire une étude très poussée de sa stabilité, vu les risques de perte de synchronisme lors de variations brutales de la charge.

Les pertes de la machine sont relativement importantes.

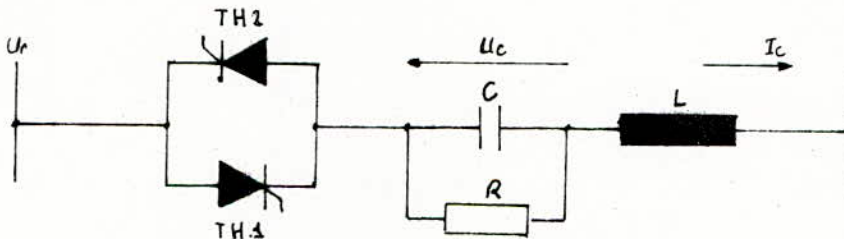
CHAPITRE VII | COMPENSATION PAR CONDENSATEURS COMMUTES PAR THYRISTORS

VII-1-CONDENSATEURS COMMUTES PAR THYRISTORS

VII-1-1 SCHEMA DE PRINCIPE

En version monophasé, on distingue trois ensembles principaux

- Un condensateur ou groupe de condensateurs muni d'une décharge R
- Un contacteur statique constitué par deux thyristors couplés en antiparallèle et constituant donc un montage tête-bêche permettant au courant de circuler dans une branche tantôt dans l'autre, selon le signe de l'alternance, ou aucune circulation (Thyristors bloqués)
- Une inductance L



VII-1-2- TECHNIQUE DE COUPLAGE ET PRINCIPE

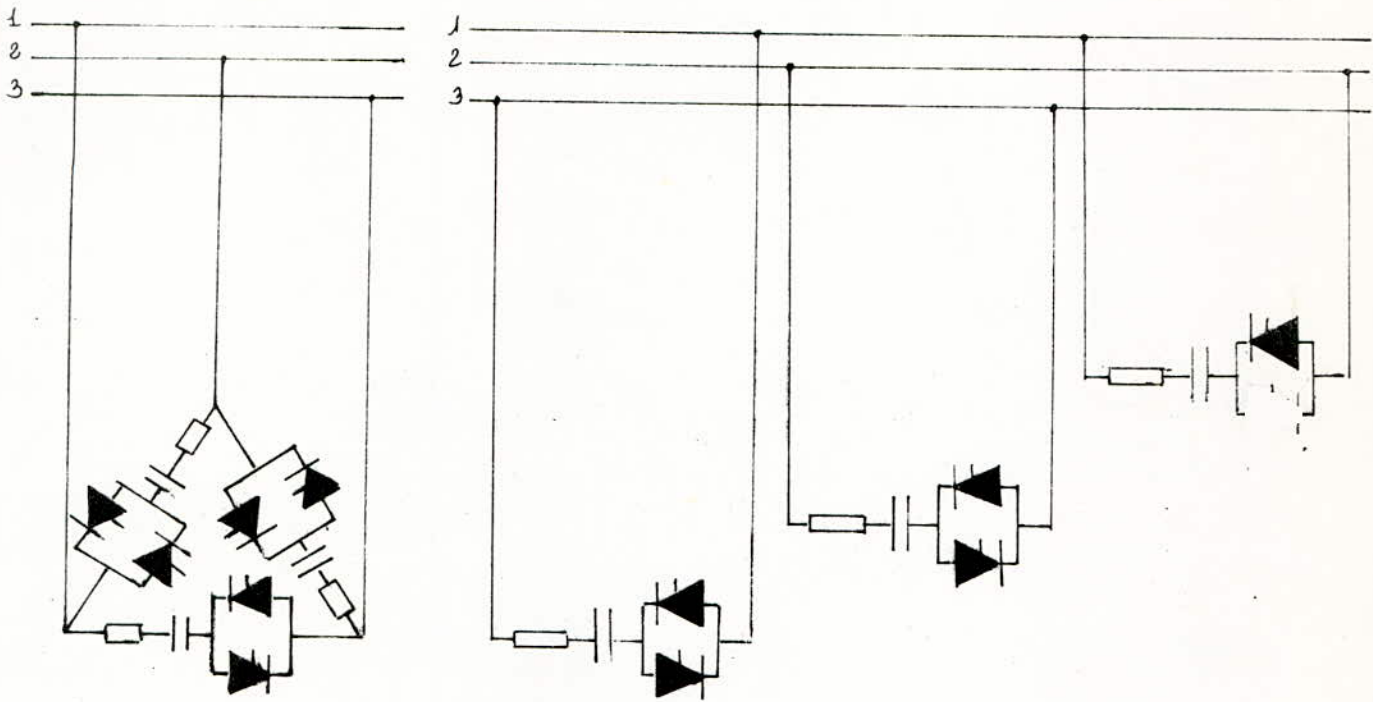
DE FONCTIONEMENT

En version triphasé, selon que l'on considère le réseau équilibré ou non, deux modes de couplages sont possibles.

- Couplage en triangle
- Couplage par unité monophasée indépendante pour chaque phase.

L'installation, dont le schéma de principe est représenté par la figure suivante, doit permettre la mise en ou hors circuit

du groupe de condensateur dans les meilleures conditions possibles



Après sa mise en circuit, le groupe de condensateurs fournit une quantité constante d'énergie réactive

VII-1-2-1 Condensateurs:

les condensateurs utilisés sont du type alternatif du fait de leurs avantages technico-économiques. Lorsqu'ils ne sont pas branchés sur leur réseau, ils restent chargés à l'amplitude positive ou négative de la tension du réseau U_r , prêts ainsi pour une mise en circuit rapide.

Par synchronisation de l'instant d'amorçage des thyristors avec l'instant où la tension du réseau U_r est égale à la tension aux bornes des condensateurs U_c , on réduit considérablement les phénomènes transitoires nuisibles et les risques de surintensité, car de cette façon la mise en ou hors circuit des condensateurs a lieu au moment où le courant I_c dans le groupe de condensateurs s'annule.

La précharge des condensateurs non utilisés est entretenue

grâce à de courtes impulsions de courant. Si le liquide d'imprégnation des condensateurs est susceptible de se dissocier, un changement de polarisation à intervalles réguliers de la tension aux bornes du groupe de condensateurs, U_c , s'avère indispensable. Ce changement de polarisation s'effectue en mettant en circuit les condensateurs pendant $1/2$ période du courant alternatif.

VII-1-2-2 Inductance L

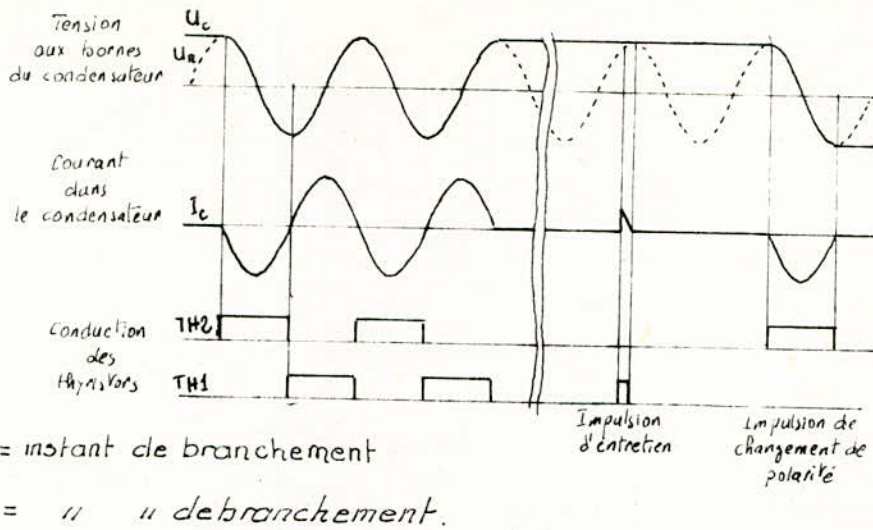
Une inductance est connectée en série avec chaque groupe de condensateurs, son rôle consiste à :

- assurer une limitation du courant à l'enclenchement
- assurer une limitation du courant d'allumage defectueux aux bornes des thyristors.
- constituer un filtre pour réduire les risques de résonance aux harmoniques qui se présentent dans l'installation.

VII-1-2-3 Resistance R.

Une résistance de décharge R est connectée en parallèle aux bornes de chaque groupe de condensateurs. Leur dimensionnement est tel qu'il puisse permettre une décharge du groupe de condensateurs jusqu'à une certaine tension (50V en général) en moins de deux minutes. Pour maintenir la tension du condensateur, on donne une courte impulsion d'allumage du thyristor qui était conducteur en dernier lieu, lorsque la tension est telle que $U_r = U_c$.

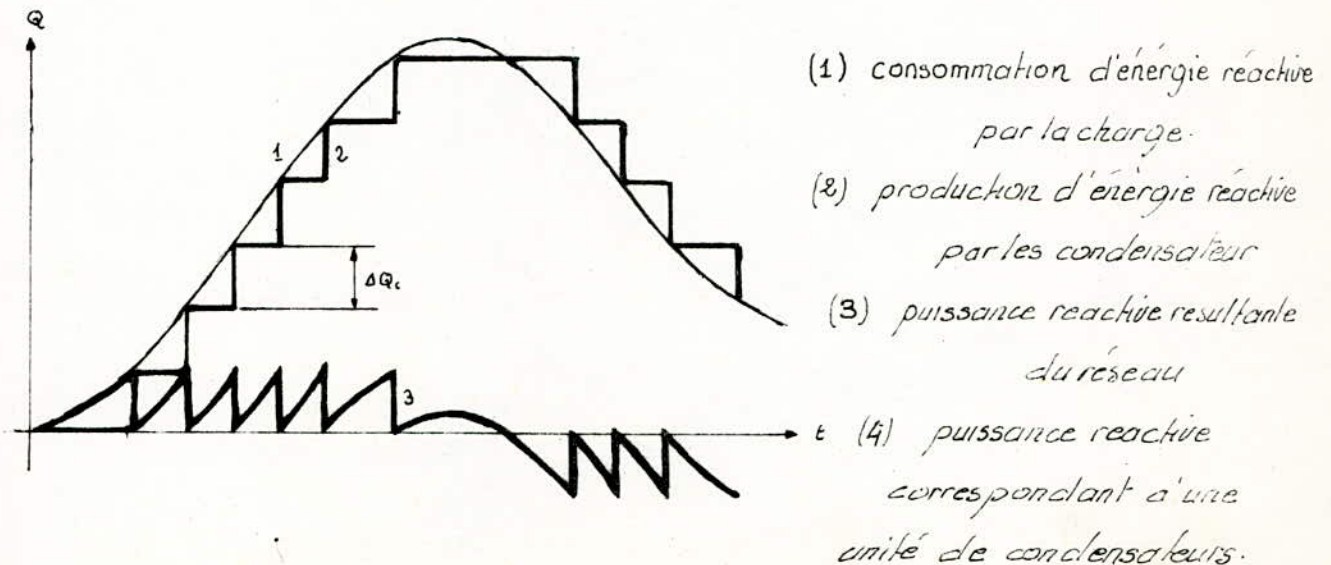
Les diagrammes de la page suivante résument le principe de fonctionnement des condensateurs couplés par thyristors.



VII-2- PRINCIPLE DE LA COMPENSATION

VII-2-1- IDEE DE BASE

Disposant d'une batterie de condensateurs subdivisée en unités de faible puissance, le principe de la compensation par condensateurs commutés par thyristors consiste en un ajustement de la puissance réactive par la mise sous tension ou hors tension d'un nombre variable de bancs de condensateurs. On peut ainsi obtenir une compensation qui s'adapte par échelons à la consommation d'énergie réactive comme l'illustre les diagrammes suivants.

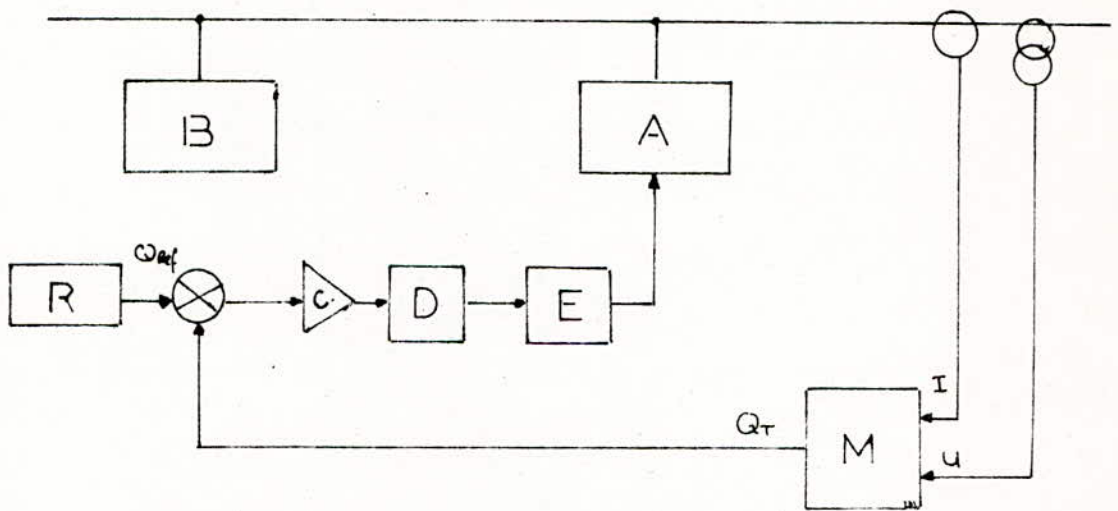


VII-2-2- RECULATION

la détermination de la puissance compensatrice requise à chaque instant peut se faire en mesurant la consommation d'énergie réactive à chaque instant, ce qui permet de déduire le nombre d'unités de condensateurs en circuit.

Si la consommation d'énergie réactive varie rapidement, comme c'est le cas pour les fours à arcs et les laminoirs, les dispositifs de mesure et de commande doivent être conçus de manière à ce que le couplage et le découplage des condensateurs puissent se faire avec le plus faible retard possible et au rythme de la consommation d'énergie réactive.

Dans le cas d'une compensation par condensateurs commutés par thyristors, la régulation se fait à puissance réactive constante et son schéma de principe est le suivant.



- R : référence
- A : condensateurs commutés par thyristors
- B : charge
- M : dispositif de mesure de la puissance réactive du réseau
- C : amplificateur
- D : circuits indicateurs de niveau
- E : commande des thyristors.

le dispositif de mesure [M] indique à chaque instant la puissance réactive Q absorbée au réseau. le signal de sortie du dispositif de mesure est amplifié puis transmis à des circuits indicateurs de niveau [D] qui déterminent le nombre d'unités de condensateurs à mettre en circuit. les signaux de [D] sont alors transmis à un bloc de commande des impulsions d'allumage des thyristors [E] qui fait en sorte que la mise en ou hors circuit des unités de condensateurs se fassent à l'instant adéquat.

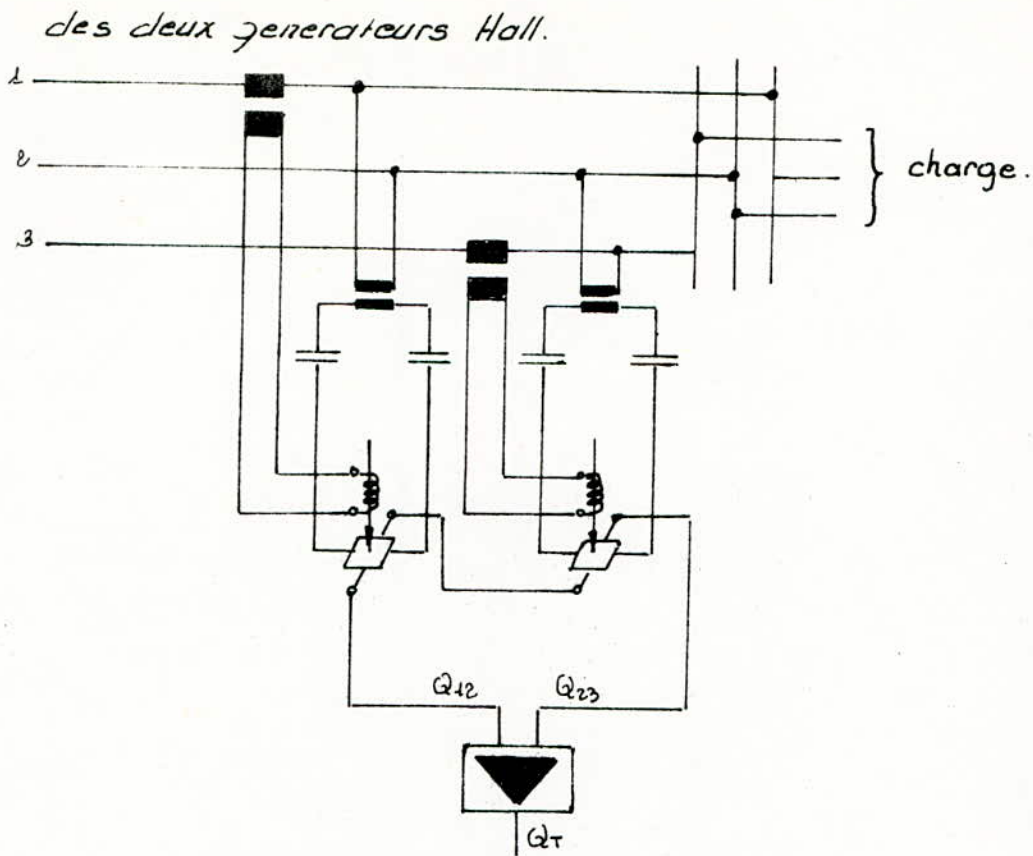
VII-2-3-MESURE DE LA PUISSANCE REACTIVE

Comme on a pu le constater dans les chapitres III et IV la consommation d'énergie réactive peut-être symétrique, comme c'est le cas pour les laminaires, ou asymétrique, comme c'est le cas pour les fours à arc.

Une consommation asymétrique d'énergie réactive entraîne un déséquilibre du système triphasé et l'apparition de courants inverses provoquent des pertes supplémentaires dans le réseau de transport et dans les machines. Le compensateur doit être en mesure de corriger ce défaut. En raison des fluctuations très rapides de la puissance réactive l'instrument de mesure doit fonctionner avec des temporisations des plus réduites, d'où l'intérêt d'utilisation de générateurs Hall.

VII-2-3-1 Charge symétrique.

La mesure de la puissance réactive totale absorbée au réseau se fait à l'aide de deux générateurs hall couplés suivant la méthode des deux varemètres et avec addition des signaux de sortie. le signal de sortie d'un tel dispositif ne contient aucune composante alternative, il consiste en un signal continu dont l'amplitude et la polarité donne la puissance réactive Q_T . le schéma de la figure suivante donne le couplage.



VII-2-3-2 Charge asymétrique

les variations de puissances réactives différent d'une phase à l'autre.

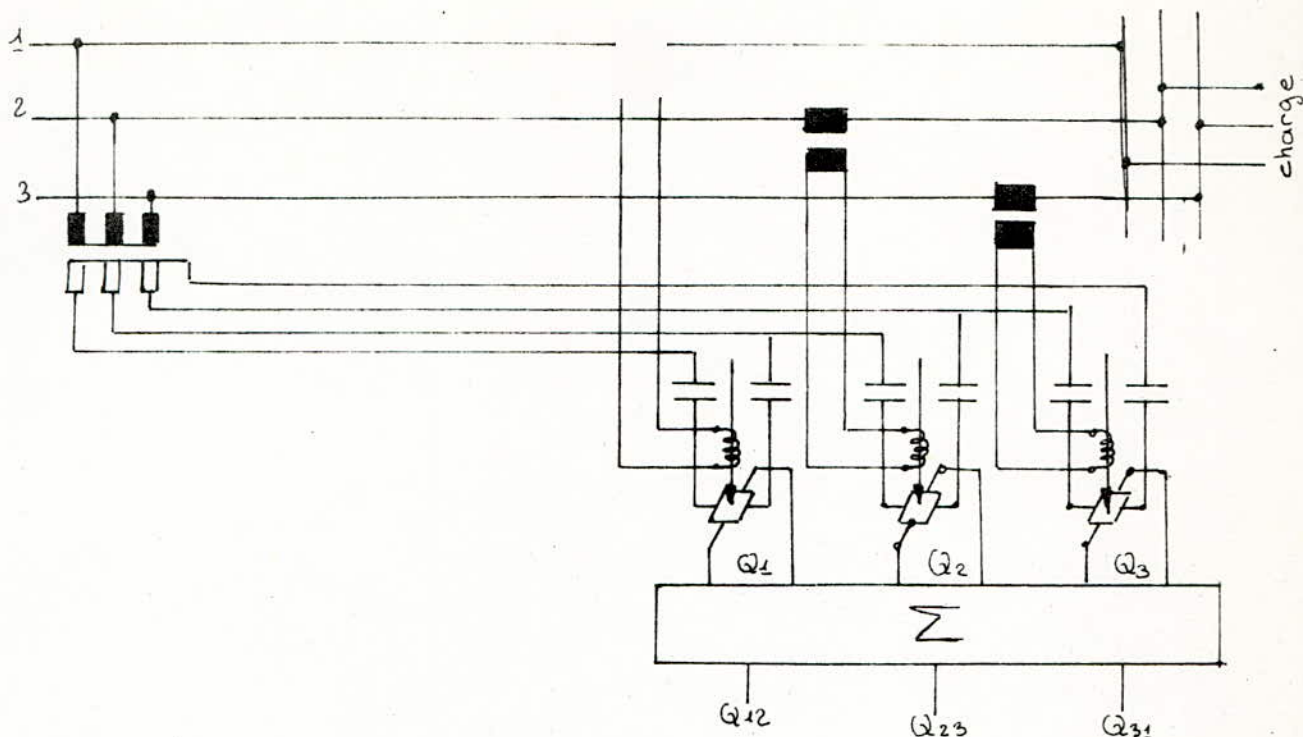
La méthode de "steinmetz" constitue la base théorique pour la compensation et l'équilibrage des charges triphasées. Pour les puissances réactives à commander, le système d'équations de mesure suivant doit être satisfait pour $\cos\varphi = 1$.

$$Q_{12} = Q_1 + Q_2 - Q_3$$

$$Q_{23} = Q_2 + Q_3 - Q_1$$

$$Q_{31} = Q_3 + Q_1 - Q_2$$

Trois instruments de mesure sont nécessaires pour déterminer la charge de chacune des trois phases Q_{12} , Q_{23} , Q_{31} . On utilise trois générateurs Hall chacun branché comme un varmètre monophasé, comme indiqué par la figure suivante



VII-2-4- TEMPS DE REACTION

le temps de réaction de la batterie de condensateurs pour des ajustements de puissance réactive, est la somme du temps de mesure, du temps de fonctionnement, et de réglage.

le temps de mesure requis pour observer une puissance réactive, est théoriquement d'un cycle de la tension du réseau, temps nécessaire pour effectuer une analyse de fourier. En pratique, on peut réduire ce temps à $\frac{1}{2}$ cycle. la méthode (mise au point par la firme suédoise ASEA) consiste à intégrer l'énergie réactive de sommet à sommet de la caractéristique alternative et à diviser cette valeur par la moitié de la durée de la période. Une nouvelle valeur est ainsi obtenue pour chaque crête de tension positive ou négative. Si la puissance de la batterie de condensateurs doit être augmentée, la mise en circuit a lieu pour la crête de tension où apparaît la valeur mesurée, pourvu que des groupes d'attente préchargés à la polarité correcte soient disponibles. Si ce n'est pas le cas, la mise en circuit a lieu $\frac{1}{2}$ cycle plus tard. C'est pour cette raison que certaines des unités d'attente sont maintenues préchargées à la polarité positive et d'autres à la polarité négative.

1 La coupure par contre peut toujours avoir lieu à l'instant où la valeur mesurée apparaît

Le temps de réaction est de l'ordre d'une période au maximum et d'une demi-période au minimum

VII-2-5- REMARQUES

Ce mode de compensation est du type discontinu, car la régulation de la puissance réactive se fait par échelons. Il existe donc, toujours, une différence entre la puissance réactive fournie Q_c et celle consommée Q_v . Cette différence $Q_v - Q_c = Q_R$ constitue une charge pour le réseau d'alimentation et implique une certaine variation de tension ΔU . On doit s'assurer que cette variation corresponde à une cbose de flicker tolérable.

VII-2-6 DIMENSIONNEMENT

Pour réduire au maximum ces perturbations, il faut que la variation relative de tension du réseau soit $\leq 0,3\%$ au point de branchement commun, c'est à dire $\frac{\Delta U}{U} \leq 0,3\%$. A partir de cette contrainte et sachant que

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta Q_c}{S_{cc}}$$

S_{cc} : puissance de court-circuit au point de couplage commun.

ΔQ_c : puissance réactive d'une unité de condensateur on peut dimensionner approximativement chaque unité de condensateurs.

$$\Delta Q_c = \frac{\Delta U}{U} S_{cc}$$

VII-2-7- CONCLUSION

Ce système offre des possibilités certaines de réduction de la chute de tension par l'amélioration du facteur de puissance et de compensation des charges asymétriques. Il présente, en outre, l'avantage de ne pas engendrer d'harmoniques

Les pertes sont relativement faibles car lorsque l'appareil perturbateur est déconnecté, le système de compensation l'est aussi.

De plus n'importe quel défaut a un effet très limité car la partie defectueuse peut être déconnectée sans perturber le fonctionnement du reste du système.

Aucune fondation spéciale n'est nécessaire et le système, entièrement statique nécessite très peu d'entretien, beaucoup moins que pour un compensateur synchrone.

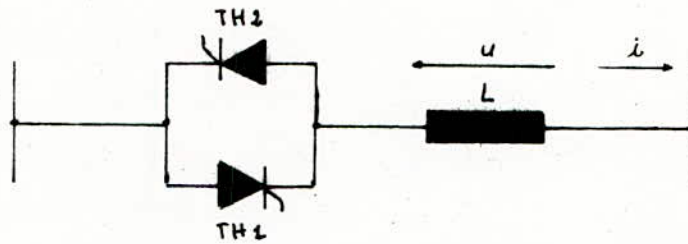
Par contre, ce compensateur présente les inconvénients d'un temps de réponse encore insuffisamment court d'où une réduction limitée du flicker, et d'une mise en œuvre plutôt complexe.

VIII-1- REACTANCES COMMANDEES PAR THYRISTORS

VIII-1-1-SCHEMA DE PRINCIPE

En version monophasé, on distingue deux parties principales

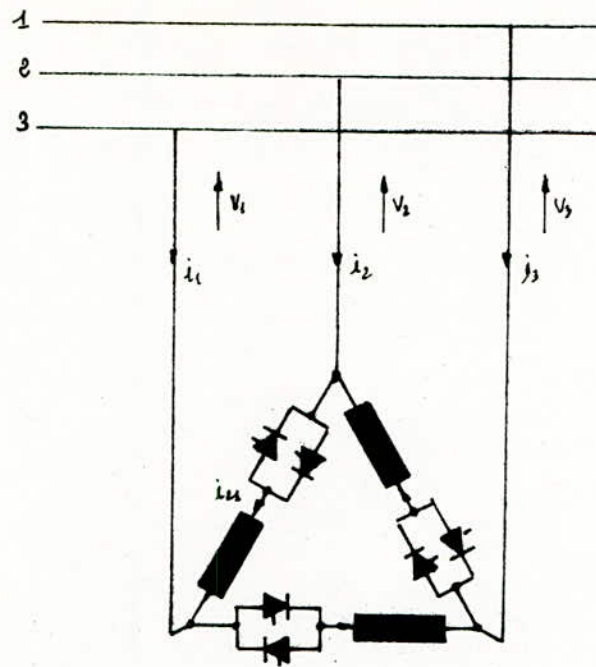
- Une réactance L
- Un montage à deux thyristors en antiparallèle et commandés avec le même angle de retard à l'amorçage α (gradateur à thyristors).



VIII-1-2-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

On sait que l'action sur l'angle de retard à l'amorçage α du convertisseur statique permet une régulation du courant i le traversant.

Le montage ci-dessus de gradateurs tri-monophasés autorise un contrôle triphasé complet. En effet les courants inductifs du stabilisateur peuvent être ajustés dans les trois phases, indépendamment l'une de l'autre, et de façon continue.



VIII-2. PRINCIPE DE LA COMPENSATION

VIII-2-1- IDEES DE BASE

Chaque compensateur comprend trois ensembles raccordés au réseau :

- Des batteries de condensateurs qui peuvent fournir une puissance réactive Q_c égale à la puissance réactive maximale utilisée et dérivant les harmoniques de courant par association avec des inductances convenablement choisies.

- L'organe de réglage constitué par le stabilisateur à gradateurs.

- les capteurs de mesure et le régulateur électronique qui pilote les gradateurs

la circulation d'un courant i à travers une réactance L implique une fourniture, par cette dernière, d'une puissance réactive inductive.

Donc si l'on dispose en série un gradateur à thyristor (convertisseur statique) et une réactance, une telle disposition peut permettre un réglage continu de la puissance réactive

inductive fournie par la réactance, grâce au déphasage progressif des impulsions de commande envoyées sur les thyristors.

Supposons $v = V \sin \omega t$ = tension aux bornes du gradateur (voir figure précédente).

Soit α l'angle d'allumage des thyristors.

A l'instant $t = \frac{\alpha}{\omega}$ le thyristor TH1 commence à conduire.

L'équation différentielle $v = L \frac{di}{dt}$ a pour solution générale

$$i = -\frac{V}{L\omega} \cos \omega t + A \quad (1)$$

pour $\omega t = \alpha$, on doit avoir $i = 0 \Rightarrow A = \frac{V}{L\omega} \cos \alpha$

donc (1) $\Rightarrow i = -\frac{V}{L\omega} \cos \omega t + \frac{V}{L\omega} \cos \alpha = \frac{V}{L\omega} (\cos \alpha - \cos \omega t)$ (2)

Le courant i décrit donc une courbe correspondant à l'équation (2) jusqu'à ce qu'il s'annule.

$$i = 0 \Rightarrow \cos \alpha = \cos \omega t \Rightarrow \omega t = 2\pi - \alpha$$

le courant doit décroître jusqu'à zéro au plus tard lorsque $\omega t = \pi + \alpha$. On doit donc avoir $2\pi - \alpha \leq \pi + \alpha$

$$\text{d'où } \alpha \geq \frac{\pi}{2}$$

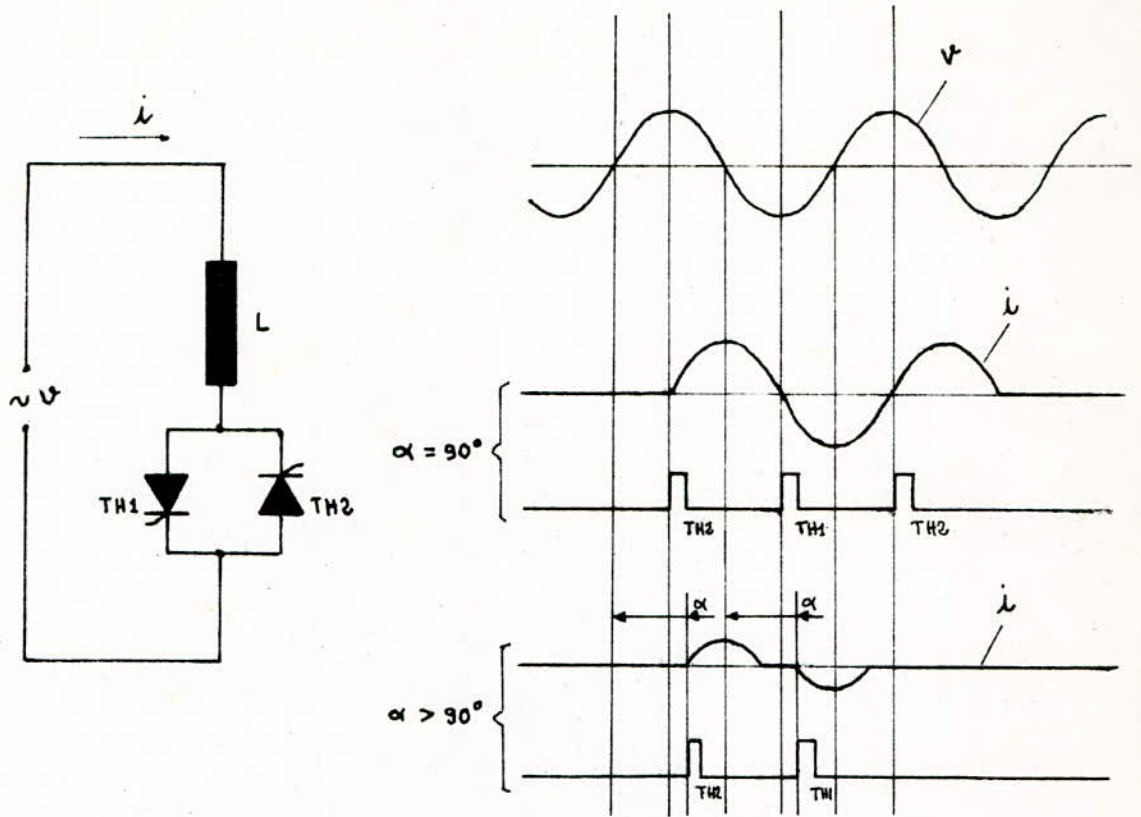
On peut donc faire varier l'angle α de $\frac{\pi}{2}$ à π : $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$

le courant i n'est plus sinusoïdale, une analyse fréquentielle permet de déterminer à partir de l'expression (2), la valeur efficace de la composante fondamentale: I_1

La puissance réactive inductive fournie Q , est telle que:

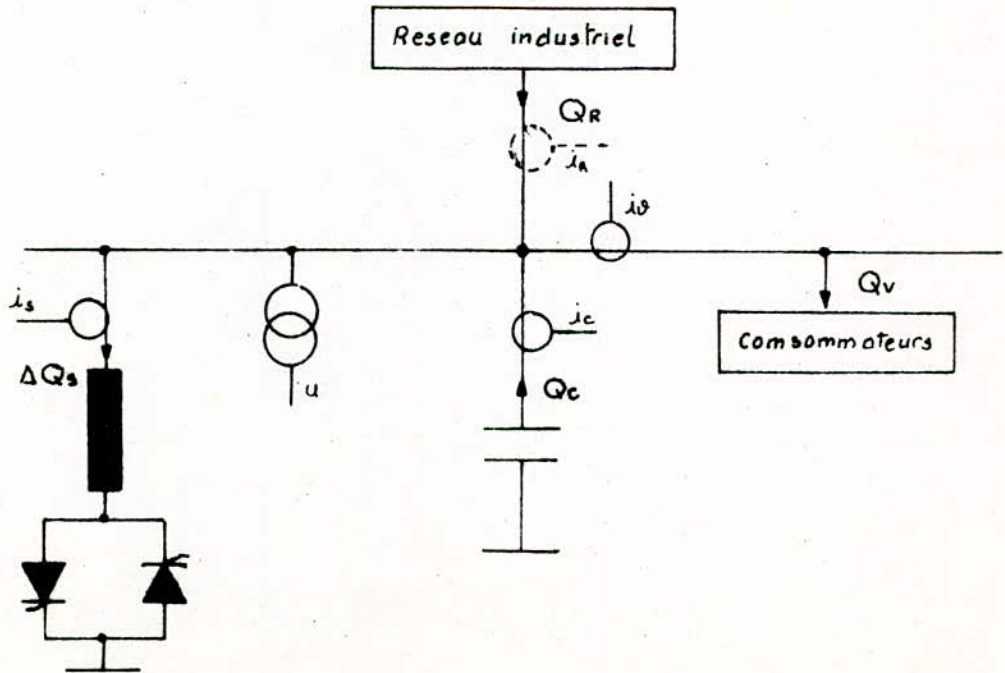
$$Q = V I_1 = \frac{2}{\pi} \frac{V^2}{\omega L} \left[\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]$$

On constate donc que lorsque l'angle α varie de $\frac{\pi}{2}$ à π , la puissance réactive Q varie de zéro à sa valeur max: $\frac{V^2}{\omega L}$.



VIII-2-3-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

On peut représenter approximativement une installation de compensation par réactance commutée par thyristors, par le schéma unifilaire suivant



la puissance réactive inductive ΔQ_s fournie à chaque instant est réglée de telle façon que :

$$(3) \begin{cases} \Delta Q_s + Q_v = Q_s \\ Q_s - Q_c = Q_R \end{cases}$$

On obtient ainsi un lissage de la puissance réactive absorbée à un niveau moyen Q_s .

Pour un facteur de puissance moyen $\cos \varphi$ imposé, la puissance des batteries de condensateurs doit être telle que.

$$Q_c > Q_s - \bar{P} \operatorname{tg} \varphi$$

\bar{P} étant la puissance wattée moyenne de l'installation

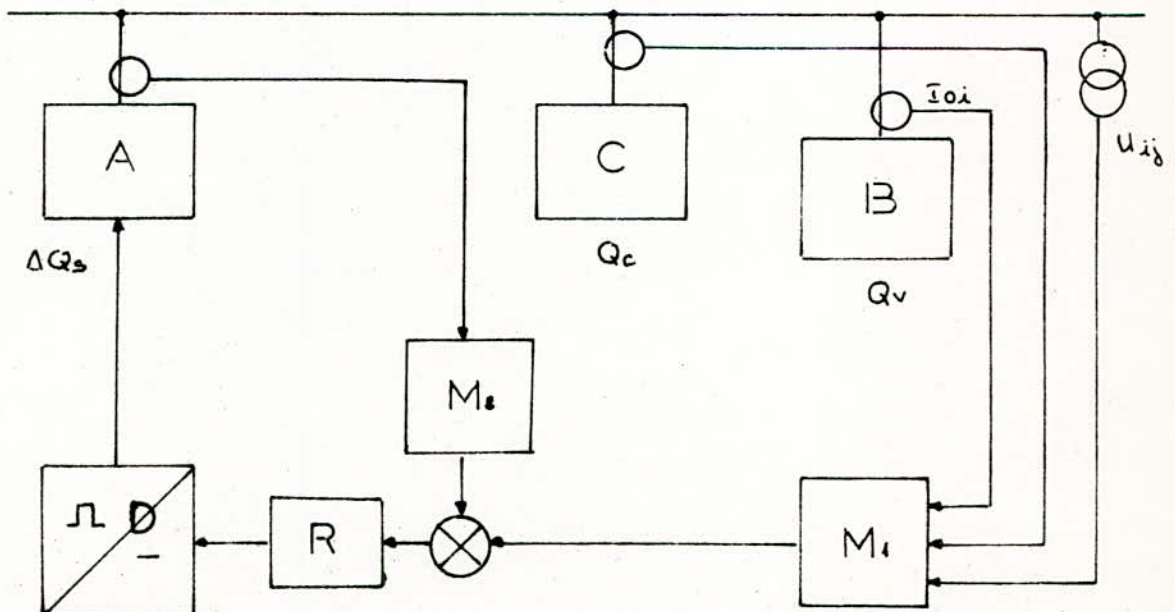
Remarque.

On peut, si le réseau le permet, compenser à $Q_R = 0$, c'est-à-dire de façon à ce que le réseau ne fournisse aucune puissance réactive, alors $\cos \varphi = 1$. Dans ce cas le système (3) devient :

$$(3') \begin{cases} \Delta Q_s = Q_c - Q_v \\ Q_s = Q_c \end{cases}$$

VIII-2-3 MESURE ET REGULATION

On considère une régulation à $Q_R = 0$ ($\cos \varphi = 1$)



- A = Réactance commandée par thyristors
- B = charge
- C = Batterie de condensateurs (filtres)
- D = Dispositif de commande des thyristors.
- M_{1,2} = Dispositifs de mesure.
- R = Régulateur.

On compare :

- Une information élaborée par un dispositif de mesure [M₁] à partir des courants de la charge [B], de la batterie de condensateur [C] et des tensions entre-phase du réseau d'alimentation et constituant la valeur de consigne pour le régulateur : image de $Q_c - Q_v$

- Une information élaborée par un dispositif de mesure [M₂] à partir des courants du stabilisateur et correspondant à la puissance réactive inductive fournie par le stabilisateur ΔQ_s .

Les valeurs assignée et réelle sont traitées dans le régulateur et le signal est au dispositif de commande à destination des soupapes à thyristors

VIII-2-4 TEMPS DE REACTION

le temps de réaction du système se compose :

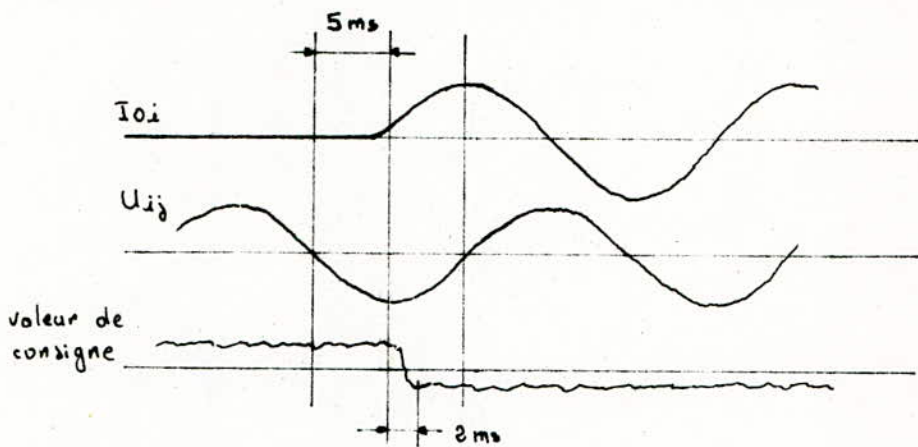
- du temps de mesure et d'élaboration des signaux de consigne.

- du temps de réglage.

La réponse dynamique du système de compensation est surtout affectée par le retard d'acquisition de l'information et le retard statique moyen nécessaire à obtenir une réaction conforme du régulateur et qui dépend de l'état de la charge (charge symétrique ou asymétrique)

Une mesure précise de la puissance réactive présente un

grand inconvénient du fait qu'elle nécessite au moins un temps d'une période (temps d'intégration) et que les valeurs instantanées des courants et des tensions sont altérées par les harmoniques. Une méthode, mise au point par la firme suisse BBC, consistant à travailler avec une rotation de phase des signaux de mesure, d'un angle défini, permet de réduire considérablement ce temps. Le principe de mesure consiste en un signal continu, à la sortie du dispositif de mesure, et lors d'une variation brusque de la grandeur d'entrée, le résultat de mesure est obtenu après 2 ms.



Grâce à cette méthode on ramène le temps global de régulation à l'ordre d'un demi cycle, c'est à dire 10 ms.

VIII-2-5- REMARQUE

le moment le plus retardé dans un demi cycle de courant alternatif où la puissance peut être librement sélectionnée entre zéro et le maximum se trouve au sommet de la caractéristique tension. Si la valeur mesurée est reçue plus tard, seule peut être connectée une puissance plus basse que celle qui correspond à la valeur de l'angle de retard α à l'instant où la valeur mesurée est reçue. Si l'installation de contrôle exige une puissance plus élevée, la connexion est exécutée à l'angle de retard correspondant pendant le demi-cycle suivant.

VIII-2-6- CONCLUSION

Correctement dimensionné, ce système permet d'améliorer le facteur de puissance au point de raccordement au réseau d'équilibrer les charges actives, et reactives asymétriques

La reactance peut-être conçue comme un transformateur ayant une grande impédance de court-circuit (Transformateur à dispersion), on peut donc se passer d'enroulements supplémentaires pour le raccordement au réseau Haute tension

Les éléments utilisés, étant statiques, ne sont pas soumis à l'usure, et l'entretien, est très limité.

Cependant, bien que son temps de réaction soit relativement court, ce système n'est pas en mesure de réduire complètement le flicker.

Ce mode de compensation présente, en plus, malgré une grande facilité à réaliser des filtres, l'inconvénient de produire beaucoup d'harmoniques.

Les pertes sont plus importantes que pour le système à condensateurs couplés par thyristors. Ces pertes sont maximales lorsque la charge compensée est nulle.

CHAPITRE IX | COMPENSATION PAR STABILISATEUR A REACTANCE SATUREE

IX-1-GENERALITES

le principe fondamentale de cette methode consiste à maintenir une consommation constante d'énergie réactive absorbée au réseau, la charge et la reactance saturée consommant ensemble une puissance réactive constante sous un facteur de puissance très faible

L'amélioration du facteur de puissance est réalisée par l'installation d'une batterie de condensateurs shunt capable de fournir l'énergie réactive constante et nécessaire pour maintenir un facteur de puissance désiré.

Nous distinguerons la reactance autosaturable, c'est-à-dire qui, sous l'effet de la tension nominale du réseau, est complètement saturée et la réactance saturée par un courant continu circulant dans un circuit de commande, fonctionnant à la manière des amplificateurs magnétiques

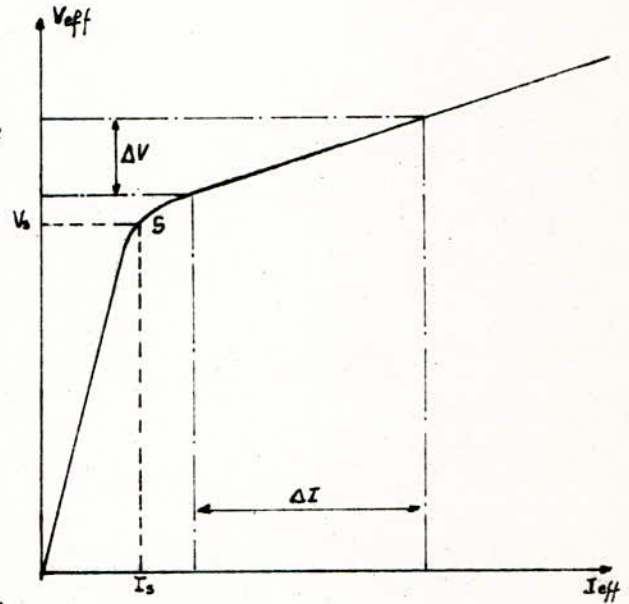
XI-2- REACTANCE AUTOSATURABLE

La reactance autosaturable est une bobine à noyau de fer travaillant à forte induction magnétique, donc consommant un très grand courant réactif sous une tension sensiblement constante à ses bornes.

La perméabilité magnétique étant définie comme étant le rapport B/H , en régime saturé l'impédance totale présentée par la bobine est fonction du courant

qui la traverse. Si bien que si l'on alimente la bobine par une tension sinusoïdale dont la valeur efficace est augmentée progressivement et que l'on mesure la valeur efficace qui en résulte, les résultats seront traduits par une courbe comme représentée figure suivante

A partir du point S, début de saturation, la réactance saturée profite de la caractéristique naturelle du fer pour produire des variations importantes de courant pour de petites variations de la tension aux bornes. Ceci prouve du fait que les ampères-tours, en régime saturé, agissent comme si le bobinage se trouvait dans l'air.



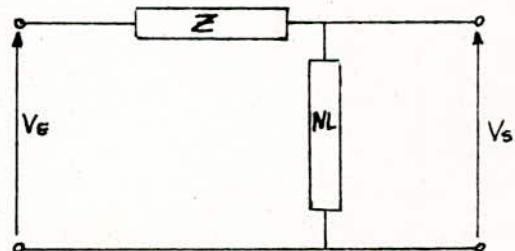
C'est sur cette propriété de non-linéarité de la caractéristique tension-courant d'une réactance saturée que sont basés les stabilisateurs magnétiques de tension alternative.

IX -3- STABILISATEUR DE TENSION ALTERNATIVE

Un stabilisateur de tension alternative dont le schéma de base est le suivant

V_E = tension d'entrée

V_S = tension de sortie



comprend :

- Une impédance linéaire, donc constante, généralement

caractérisé par une inductance non saturable, travaillant à faible induction.

- Une impédance non-linéaire NL constituée par une réactance saturée, telle que la tension V_s à ses bornes soit indépendante du courant qui la traverse.

Toutes les variations de tension d'entrée V_e apparaissent aux bornes de l'impédance Z qui constitue un élément ballast.

A partir du schéma de base, on peut obtenir différents types de montages de stabilisateurs. Nous étudierons deux stabilisateurs importants qui sont:

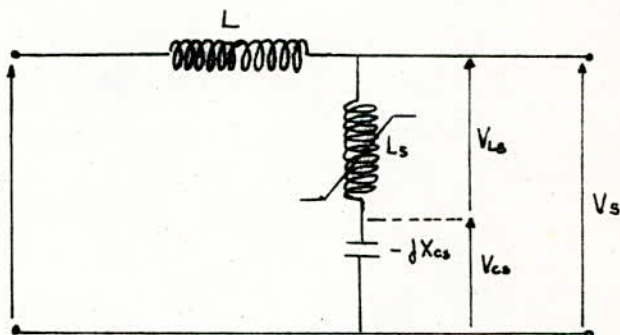
- le stabilisateur de barre omnibus
- le stabilisateur à bobine de réactance à prise.

IX-4. STABILISATEUR DE BARRE

IX-4-1- SCHEMA

En version monophasée, le schéma de principe est directement dérivé du schéma de base d'un stabilisateur. La pente naturelle de la caractéristique de la réactance saturée est compensée par un condensateur série se comportant comme une réactance négative. Cette compensation est utilisée lorsque la pente de la réactance naturelle ne permet pas une stabilisation de tension adéquate.

L représente la réactance du réseau X_R
 V_e la tension monophasée amont du réseau.



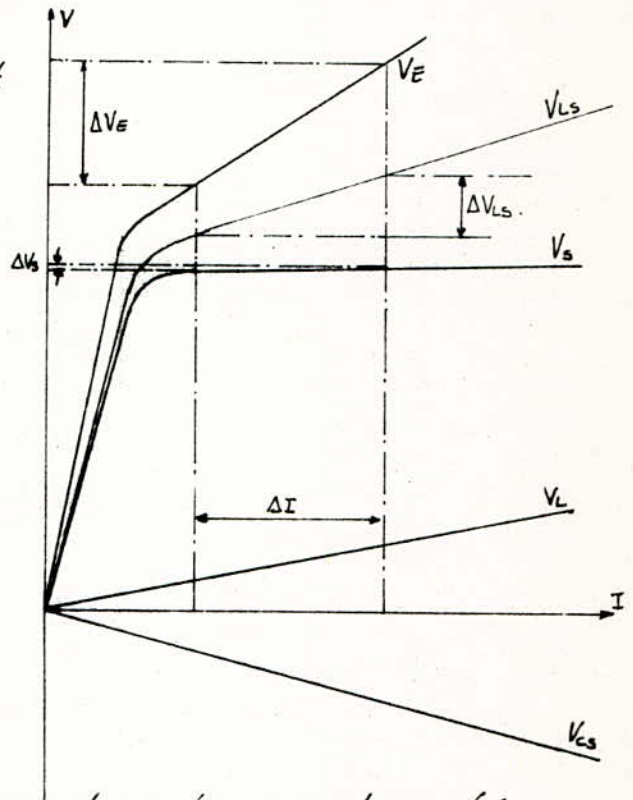
L_s est la réactance saturée
 V_s , tension de sortie du stabilisateur, est la tension à stabiliser au niveau des barres omnibus.

IX.4.2. PRINCIPE

le principe de stabilisation est basé sur les caractéristiques du stabilisateur, qui sont données par la figure suivante.

Une variation de courant, ΔI telle que la variation correspondante de la tension amont est $\Delta V_E = X_R \Delta I$ entraîne une variation ΔV_{Ls} de la tension V_{Ls} aux bornes de la réactance saturée et une variation ΔV_s de la tension de sortie V_s .

On constate que la variation de tension de sortie est négligeable même pour une grande variation du courant réactif.

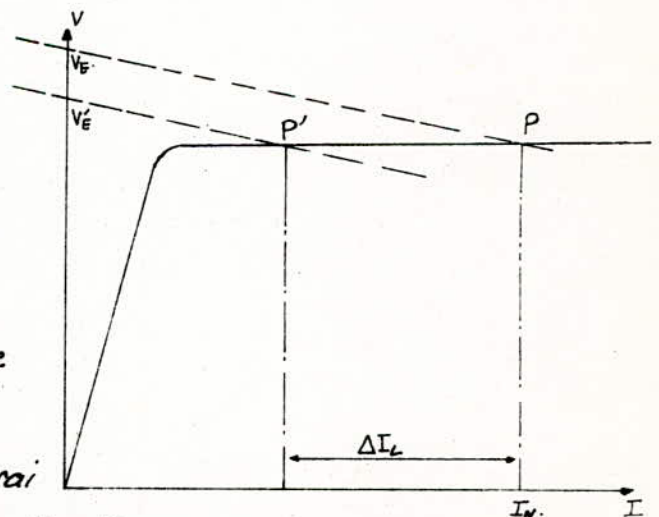


IX.4.3. MECANISME

la caractéristique de sortie du stabilisateur est présentée par la figure ci-dessus.

En régime nominale le point de fonctionnement est en P, et la réactance absorbe un courant réactif I_w (aux pertes près). lorsque la charge appelle un courant ΔI_L , la chute de tension qui, en résulterai

dans le réseau est $V_E - V_E' = X_R \Delta I_L$ si le réseau fournissait ce courant réactif. En réalité le point de fonctionnement vient en P', et le stabilisateur cède le courant appelé ΔI_L .

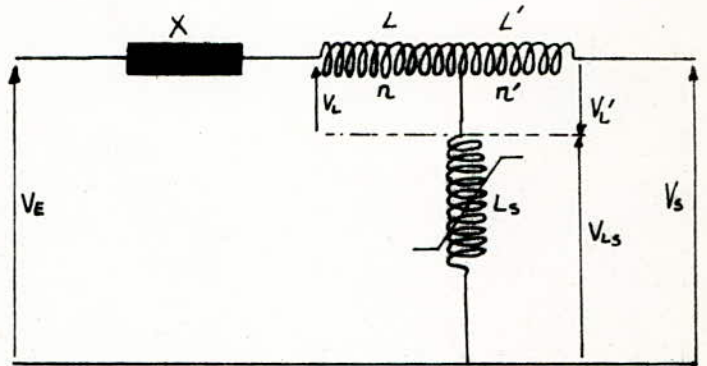


IX-5- STABILISATEUR A REACTANCE A PRISE

IX-5-1 SCHEMA

Une bobine de reactance non saturée, est inserée dans le circuit du réseau.

la pente de la caractéristique V_s est compensée par l'enroulement secondaire L' dont la tension aux bornes, est connectée en opposition de phase avec la tension V_s aux bornes de la réactance saturée.



L représente l'enroulement primaire de la bobine de reactance à prise.

IX-5-2 PRINCIPE

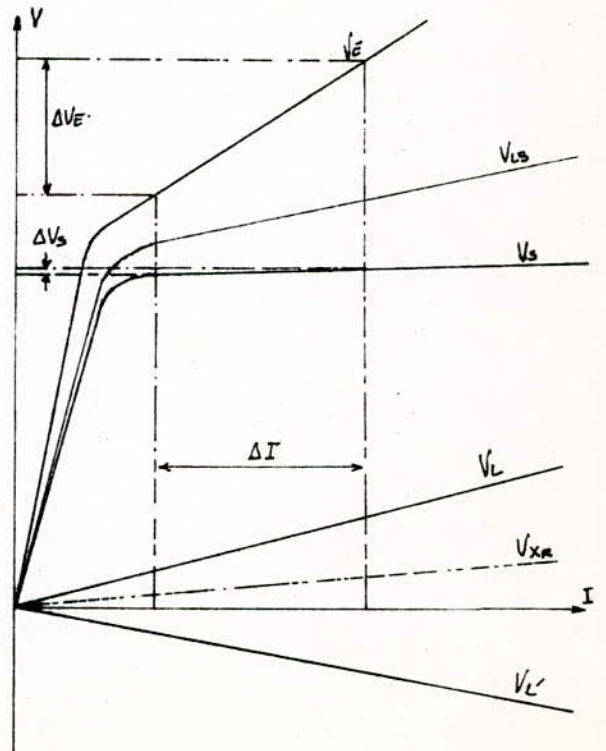
Comme pour le stabilisateur de barre, le principe de stabilisation est basé sur les courbes caractéristiques du stabilisateur.

$$V_E = V_{Ls} + V_L + V_{XR}$$

V_L : tension aux bornes de l'enroulement L .

V_{XR} : tension aux bornes de la reactance du réseau

La variation ΔV_s de la tension de sortie est très faible devant ΔV_E à laquelle correspond une large variation du courant.



IX-5-3 MECANISME

A l'aide d'un choix convenable du rapport $\frac{n'}{n}$, c'est-à-dire de $\frac{V_1}{V_2}$, on peut arriver à obtenir une tension de sortie V_3 constante.

En première approximation, la tension V_3 aux bornes de la reactance saturée peut s'écrire :

$$V_3 = V_s + jX_s I_s$$

I_s étant le courant qui la traverse.

Si I_1 est le courant fourni par le réseau, en considérant la charge et le stabilisateur comme une seule entité, c'est-à-dire que le courant du stabilisateur est complémentaire du courant de la charge I_L , il est donné par la relation

$$I_1 = I_L + I_s$$

le passage du courant I_L à travers l'enroulement L' induit une f.e.m. e , dans l'enroulement L de reactance X_1 telle que

$$e = \frac{n'}{n} jX_1 I_L = \frac{n'}{n} jX_1 (I_1 - I_s)$$

alors
$$V_E = jX_R I_1 + jX_1 (I_1 - I_s) + jX_1 I_1 + V_s + jX_s I_s$$

d'où
$$V_E - V_s = jI_1 (X_R + X_1 + X_s) + jI_s \left(\frac{n'}{n} X_1 - X_s \right)$$

En réglant la réactance à prise de manière à avoir

$$\frac{n'}{n} X_1 - X_s = 0$$

l'expression précédente devient

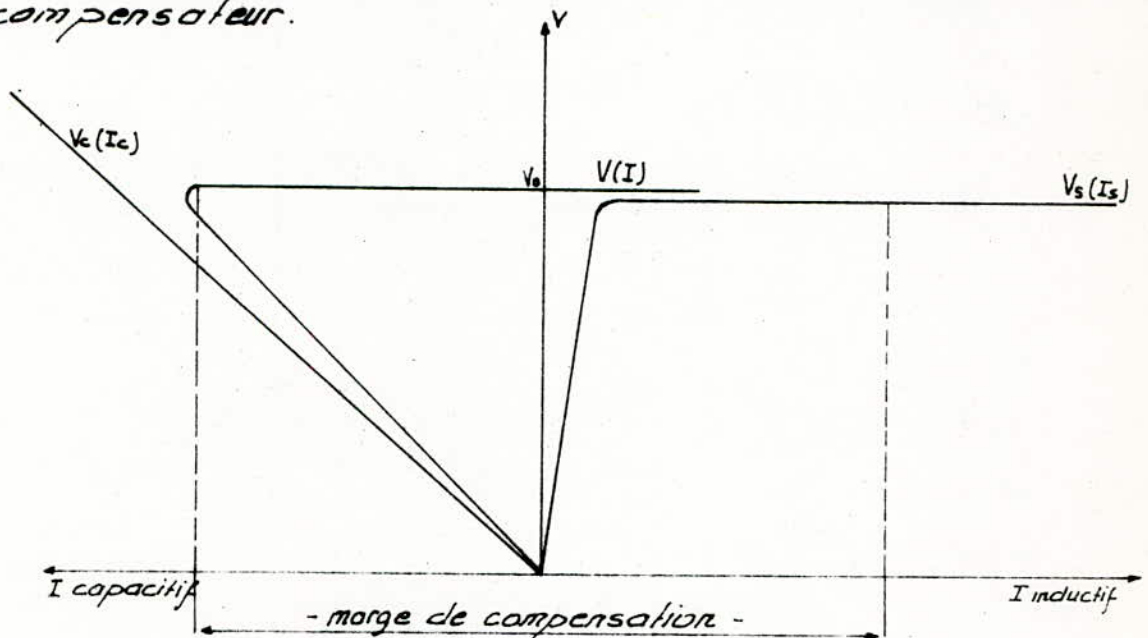
$$V_E - V_s = jI_1 \left(X_R + X_s \frac{n+n'}{n'} \right)$$

Cette équation traduit que l'effet perturbateur du courant fluctuant I_L de la charge sur le courant du réseau I_1 est éliminé tant que la quantité $V_E - V_s$ reste constante. ceci constitue la condition requise pour éliminer les fluctuations de tension. V_E et V_s sont constantes en valeur absolue, alors I_1 ne reste constant que si le déphasage entre V_E et V_s reste lui-même constant. Dans notre cas le facteur de puissance est très faible, donc le courant I_1 a sa composante réactive

très élevée devant la composante active, les variations du déphasage entre V_e et V_s sont très faibles, et la condition de stabilité est remplie

IX 6 COMPENSATEUR

Le compensateur à reactance autosaturable d'énergie réactive est constitué d'un des stabilisateurs précédemment étudiés, qui lui donne son nom, auquel on ajoute une batterie de condensateurs sturt fournissant l'énergie réactive, constante, nécessaire à élever le facteur de puissance à une valeur désirée, de sorte que le compensateur peut être prévu pour fonctionner aussi bien dans le mode absorbeur que dans le mode generateur comme indiqué par le diagramme suivant qui représente les caractéristiques du compensateur.



- V_0 tension de sortie du stabilisateur
- V_e " aux bornes des condensateurs.
- V " du compensateur.
- I_s courant de la reactance saturée
- I_c " de la batterie de condensateur
- I " du compensateur.

Si Q_c est la puissance réactive constante de la batterie de condensateur, et Q_s l'énergie absorbée par la réactance saturée, la puissance compensatrice est donnée à chaque instant par l'expression $Q = Q_c - Q_s$.

En appelant Q_R la puissance réactive transitée par le réseau (pour $\cos\phi \neq 1$) et Q_L la puissance réactive consommée, effectivement par le récepteur perturbateur, on a :

$$Q_R + Q_c = Q_s + Q_L$$

Le but du compensateur est de maintenir constant $Q_s + Q_L$ pour atténuer les fluctuations du courant réactif

Remarque.

Lorsque la tension en amont du réseau devient inférieure à la tension de saturation du fer, V_0 , la réactance n'est plus saturée, d'où la nécessité d'accorder la réactance à la tension minimale que peut avoir le réseau ou d'installer un transformateur avec réglage en charge.

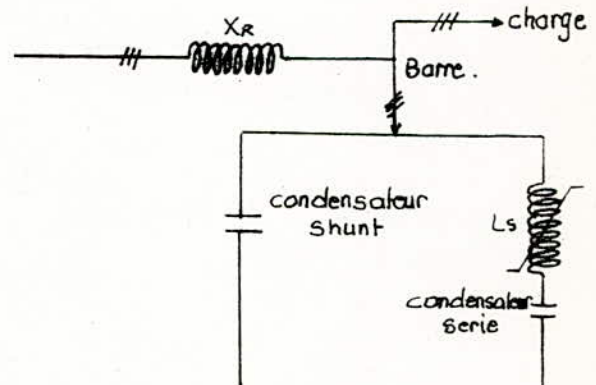
IX-6-1 COMPENSATEUR DE BARRE OMNIBUS

Ce type de compensateur permet une compensation des fluctuations de toute l'installation raccordée aux barres.

IX.6-1-1 Schéma

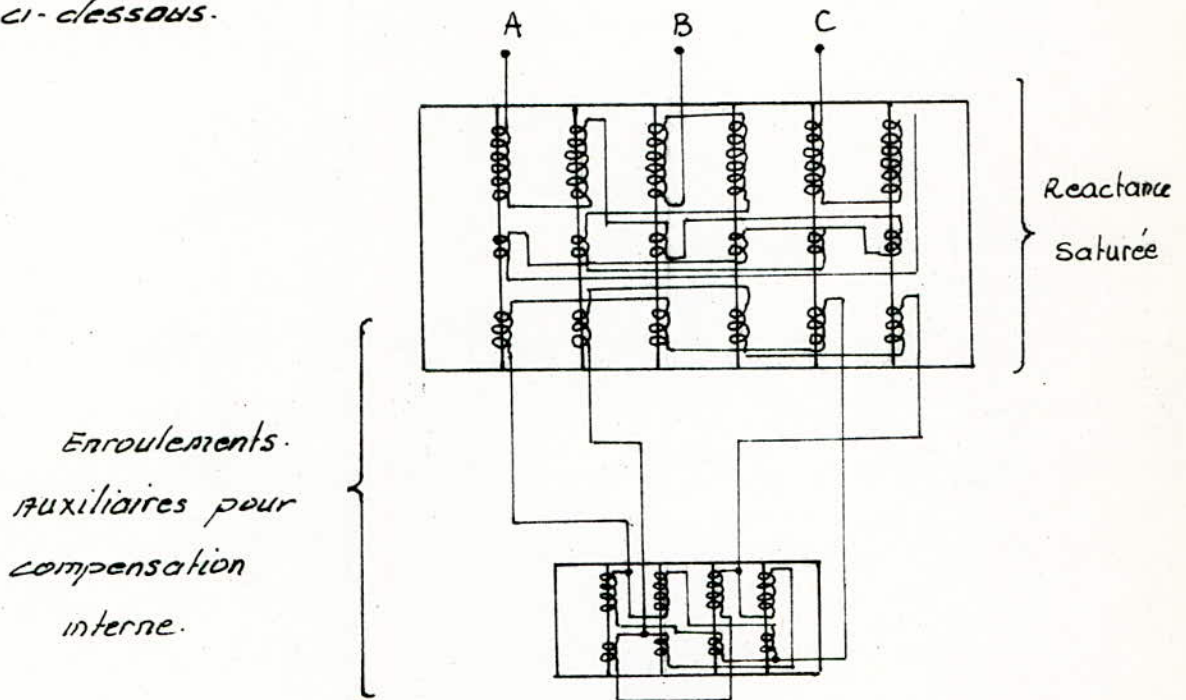
le schéma de principe est le suivant.

La batterie de condensateurs shunt peut être subdivisée en groupes pour former par accordement à des selfs sans fer les filtres d'harmoniques.



L'utilisation du fer hautement saturé produit beaucoup d'harmoniques du courant magnétisant qui sont susceptibles d'altérer les qualités de la caractéristique de la réactance

saturée d'où la nécessité d'éliminer cet effet, par une compensation interne. Un montage du stabilisateur utilisé par la compagnie anglaise "General Electric company", nommé le "twix tripler reactor" permet l'élimination de l'harmonique 5 et 7 dans le courant magnétisant, par l'installation d'enroulements auxiliaires comme l'indique le schéma ci-dessous.



L'adjonction de batterie de condensateurs série dans chaque phase permet la compensation de la pente de la caractéristique de la reactance saturée.

IX 6-1-2 temps de réponse

L'absence de regulation et de mesure confère au compensateur de barre un temps de réponse faible, ne dépendant que de la constante de temps de la reactance saturée. Cependant ce temps est augmenté du fait de la présence des condensateurs séries corrigéant la pente de reactance naturelle de la bobine lorsque celle-ci ne donne pas une bonne stabilisation de la tension

Le temps de réponse est de l'ordre de 1 à 2 périodes

IX-6-1-3 conclusion

Si le compensateur de barre arrive à bien stabiliser la tension du jeu barre à une valeur donnée, la longueur de son temps de réponse conduit à une faible réduction des fluctuations de la puissance réactive. Son rapport d'amélioration est de 3 à 1. le rapport d'amélioration est défini comme étant le rapport entre l'affaiblissement de la tension non compensée et l'affaiblissement de la tension correspondante compensée. Grâce aux condensateurs shunts le facteur de puissance est maintenu à une valeur désirée.

En plus d'une grande production de courants harmoniques, le compensateur de barre n'est pas prévu pour compenser les déséquilibres, c'est-à-dire absorber les courants asymétriques

les pertes d'énergie active sont relativement faible et le compensateur ne nécessite pas de travaux spéciaux de génie civil, lors de son installation, ni d'entretien continu pendant son fonctionnement.

sa technologie des transformateurs statiques est très éprouvée.

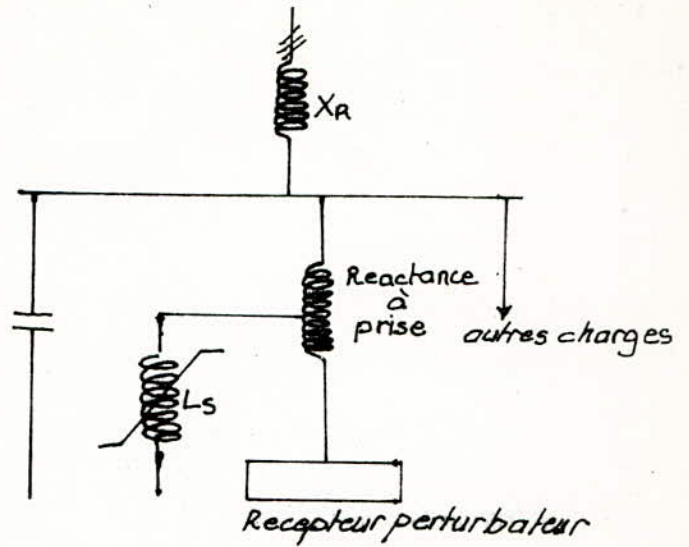
IX-6-2 COMPENSATEUR A REACTANCE A PRISE

Du fait de l'insertion de la bobine de réactance à prise dans le circuit perturbé, ce type de compensateur est utilisé pour la compensation d'un récepteur unique tel le four à arc. Il ne permet pas une compensation au niveau du jeu de Barres.

IX-6-2-1 schéma.

le schéma de principe est donné à la page suivante. la batterie de condensateur est aussi divisée en groupes pour former des filtres d'harmoniques.

Schema à ligne
simple du compensateur
à bobine de reactance
à prise

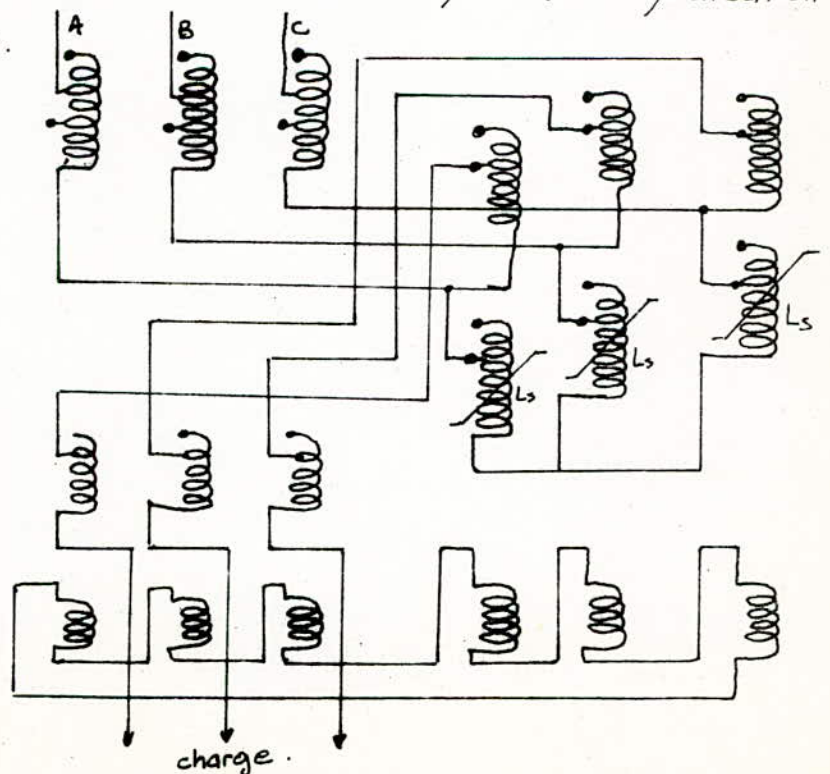


le compensateur établit une barre apparemment infinie entre le réseau d'alimentation et la charge fluctuante. Dans ce cas de compensation, les vacillements dues aux autres charges ne sont pas pris en consideration.

Dans le montage du stabilisateur, on cherchera à éliminer par compensation interne, les harmoniques dans le courant de magnétisation de la réactance saturée.

Differents types de montages peuvent être utiliser, Le "twin tripler reactor" associé à une bobine de reactance à prise peut constituer ce type de stabilisateur

le montage suivant a été utilisé pour la compensation d'un four à arc.



IX-6-2-2 Temps de réponse

Le temps de réponse du compensateur à bobine de réactance à prise, est relativement court, comparé surtout à celui d'un compensateur synchrone. Il peut atteindre la valeur minimale d'une demi période de la tension d'alimentation.

IX-6-2-3 Conclusion

L'insertion d'une réactance à prise dans chaque phase du circuit d'alimentation du récepteur perturbateur et la vitesse de réaction assez grande conduisent à une nette amélioration de la réduction des sautements rapides de la tension. Le rapport d'amélioration est de l'ordre de 7 à 1. De plus le déséquilibre entre les phases peut être réduit.

Cependant la réactance saturée, est source de courant harmonique et ne permet pas d'atténuation de la distorsion de la tension d'où la nécessité de l'installation d'un dispositif de filtrage.

Tout comme le compensateur de barre omnibus ce type de compensateur ne nécessite pas de travaux de génie civils spéciaux ni un important entretien. Il est d'une technologie éprouvée.

IX-7-TRANSDUCTEUR MAGNETIQUE

IX-7-1-DEFINITION

Le transducteur magnétique est un appareil utilisant la saturation des matériaux magnétiques, pour faire varier la puissance dissipée dans une charge, fournie à partir d'une source alternative de puissance, en fonction d'une tension continue appliquée dans un circuit de commande.

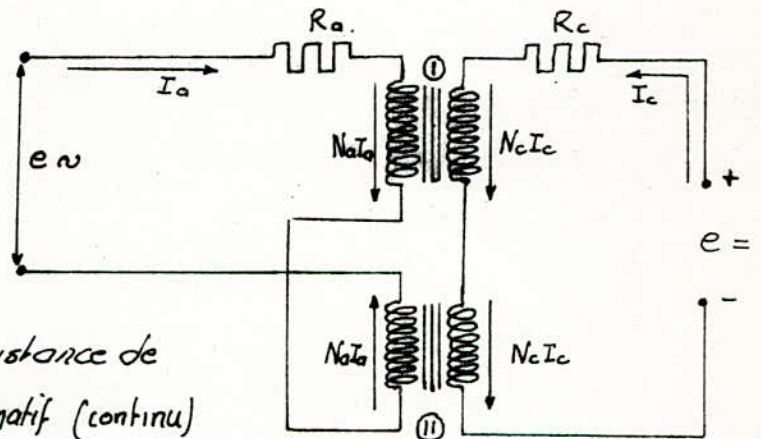
Cet effet est obtenu en faisant passer le circuit magnétique du transducteur d'un état de non saturation à un état

de saturation.

IX-7-2 CONSTITUTION ET MONTAGE

En version monophasée le transducteur est constitué de deux noyaux, chacun d'eux portant deux enroulements: l'un alimenté par la tension alternative fait partie du circuit de charge et l'autre alimenté par une tension continue fait partie du circuit de commande.

Dans le schéma de montage ci-dessous les enroulements à courant alternatifs sont connectés en opposition de phase. On peut aussi connecter les deux enroulements à courant continu, en opposition sans changer le principe de fonctionnement.



$R_{a(c)}$ représente la résistance de l'enroulement alternatif (continu)

IX-7-3-EQUATIONS DE FONCTIONNEMENT

le fonctionnement du transducteur est illustré par les équations suivantes:

circuit de travail
$$e_a - N_a \frac{d\phi_1}{dt} + N_a \frac{d\phi_2}{dt} - R_a I_a = 0$$

circuit de commande
$$e_c - N_c \frac{d\phi_1}{dt} - N_c \frac{d\phi_2}{dt} - R_c I_c = 0$$

noyaux ①
$$F_1 = N_a I_a + N_c I_c$$

②
$$F_2 = -N_a I_a + N_c I_c$$

Au début d'une alternance, avant la saturation les

courants sont faibles. On peut donc négliger les chutes ohmiques. Alors on aura.

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{e_a}{N_a} + \frac{e_c}{N_c} \right)$$

et

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{e_c}{N_c} - \frac{e_a}{N_a} \right)$$

Au début d'une alternance positive $\frac{d\phi_1}{dt} > \frac{d\phi_2}{dt}$ et à mesure

que la tension augmente, la vitesse de variation du flux dans le noyau ① croît et celle du flux dans le noyau ② décroît. Le noyau ① va donc se saturer pendant que le noyau ② se dessature.

Au début de l'alternance négative de la tension $\frac{d\phi_2}{dt} > \frac{d\phi_1}{dt}$, donc le noyau ② va se saturer pendant

que le noyau ① se dessature.

Pour un intervalle de saturation, les expressions suivantes peuvent être établies

$$I_a = \frac{e_a}{R_a} \quad : \text{ le courant, pendant la saturation}$$

tion n'est limité que par la résistance R_a .

$$\text{et} \quad N_a I_a = N_c I_c$$

$$\text{d'où} \quad I_a = \frac{N_c I_c}{N_a}$$

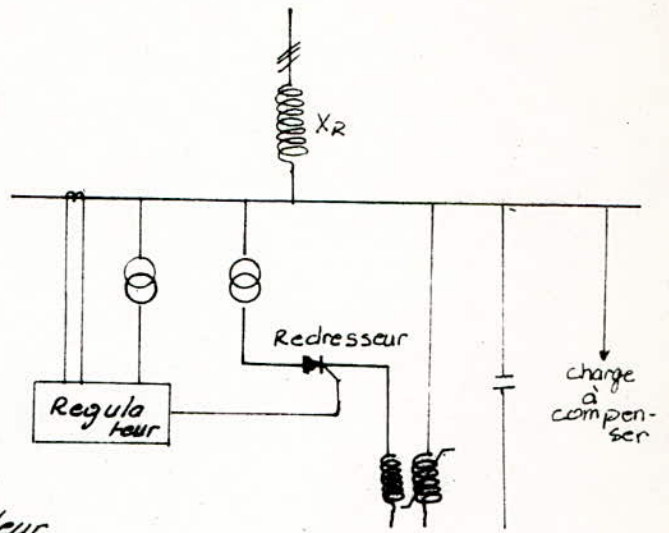
On constate donc que le courant de sortie du transducteur, I_a , est directement proportionnel à un courant continu de contrôle.

IX-3 COMPENSATEUR A TRANSDUCTEUR

IX-3-1 SCHEMA ET CONSTITUTION

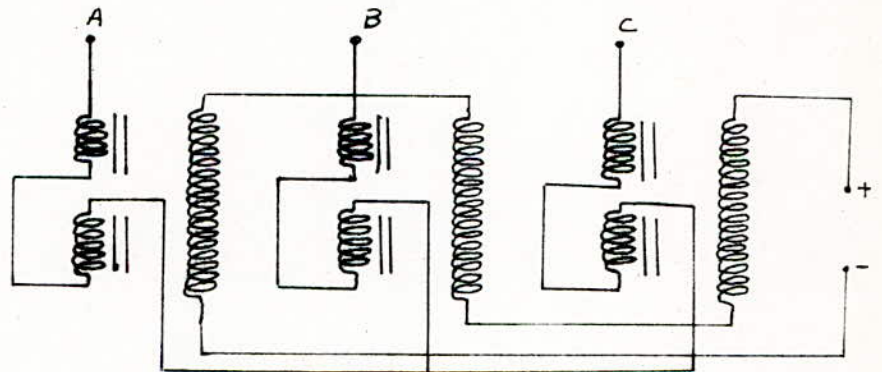
le schéma de principe du compensateur est donné à la page suivante.

Ce type de compensateur se présente comme le compensateur de barre omnibus.



Un transducteur dont le courant de contrôle est commandé par un régulateur de puissance réactive constitue l'élément stabilisateur de tension alternative.

Un montage utilisé par ACEC, Ateliers de constructions électriques de Charleroi, est une étoile formée par simple assemblage de trois transducteurs monophasés.



Dans ce montage, aucune compensation interne d'harmoniques n'est prévue. la batterie de condensateurs shunt est divisée en groupes pour former un système de filtrage d'harmoniques.

le circuit de commande est alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur à thyristors commandés par le régulateur électronique.

3-2 PRINCIPE DE COMPENSATION

la batterie de condensateur fournit une puissance réactive constante Q_c . la consommation de la charge en puissance réactive, Q_L , est réglée par le transducteur.

dont la saturation dépend du courant continu qui a son tour, est commandé par le régulateur qui reçoit du réseau un signal "puissance réactive" formé à partir de la mesure du courant et de la tension. Tant que ce signal traduit un retard de phase du courant sur la tension (composante inductive dans le courant du réseau, celui fournissant donc une puissance réactive φ_r) ou reste nul le régulateur agit sur le système de contrôle des thyristors pour réduire la tension continue du redresseur à son minimum. Dès qu'une composante capacitive apparaît dans le courant du réseau. (le réseau absorbant une puissance réactive) par action sur le système d'allumage des thyristors le régulateur détermine une tension continue suffisante de sorte que le transducteur absorbe un courant inductif d'intensité telle qu'il supprime ou ramène à un minimum prédéterminé par le réglage de l'appareil la composante capacitive dans le courant du réseau.

En définitif si φ_T est la puissance réactive que consomme le transducteur. L'énergie compensatrice correspond à l'équation.

$$\varphi_s = \varphi_c - \varphi_T$$

et la charge consomme la puissance.

$$\varphi_L = \varphi_r + \varphi_c.$$

lorsque $\varphi_L \gg \varphi_c$ la tension de commande est minimale.
et φ_T est nulle.

lorsque $\varphi_L < \varphi_c$ alors $\varphi_L + \varphi_T = \varphi_c$.

13-3 TEMPS DE REPONSE

les temps morts dus au système de mesure et à la régulation diminuent la vitesse de réaction du compensateur. Le temps de réponse est de l'ordre de 3 périodes de la tension d'alimentation.

IX.3.4. CONCLUSION

Le temps de réaction relativement long conduit à une faible réduction des fluctuations rapides de la tension. Le principal avantage, comparé au compensateur de barre, est que le transducteur permet le réglage de la tension stabilisée.

Les pertes sont faibles et le compensateur ne nécessite aucune fondation spéciale pour son installation ni un important entretien pendant son fonctionnement.

La technologie générale dérivant de celle des transformateurs contribue à la fiabilité de l'équipement.

En plus de sa production propre d'harmoniques de courant, ce type de compensateur n'est pas prévu pour atténuer la distorsion de la tension due aux courants harmoniques de la charge, et ne permet pas de compensation des déséquilibres de phase.

CONCLUSION

Vu le caractère perturbateur des fours à arc et des laminaires l'utilisateur industriel de ce genre d'appareil est forcé, s'il ne veut pas se voir imposer des prescriptions sévères au niveau par exemple des conditions d'exploitation par le distributeur d'énergie électrique de plus en plus confronté avec les impératifs de qualité de tension, de recourir à des installations locales de compensateurs.

Pour parvenir à décider quel système de compensation choisir, il faut non seulement considérer les performances techniques du compensateur, comme sa vitesse de réponse globale dont dépend entièrement la réduction du flicker, mais aussi certains aspects économiques, en particulier le prix de revient de l'installation de compensation, les coûts de travaux de génie civil, les coûts d'entretien, etc....

Ce choix doit tenir compte aussi du type de charge à compenser. En effet, bien que les perturbations soient presque de même nature, les exigences en matière de compensation, pour un four à arc ou un laminaire, diffèrent au moins en proportion. Il ressort de notre étude, que tout système de compensation convenant à un four à arc convient à plus forte raison à un laminaire et que les seuls facteurs à considérer, de ce point de vue là sont le dimensionnement et le coût de l'installation.

Ce recours aux installations de compensation, malgré leur fâcheuse incidence sur le prix de revient des produits sidérurgiques, continuera à s'imposer, surtout pour des pays comme l'Algérie, où le grand étalement soit la faible densité de réseau d'alimentation, ne permet pas de compter, lors du raccordement d'un appareil perturbateur sur une P.C.C. suffisamment élevée pour réduire, à des tolérances admissibles les perturbations de tension.

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

R. Langlois Berthelot : " les machines électriques des réseaux "
A Fouille : " Machines électriques à courant alternatif "
Techniques de l'ingénieur.

REVUES

Revue Générale d'Électricité : Tome 71 numéro 9
Tome 80 " 11
" 81 " 5
" 84 " 7/8 et 9
" 85 " 4.
" 86 " 2.
Brown Boveri Company : Tome 48 numéro 11/12
" 58 " 2/3
" 64 " 2
" 65 " 2
ASEA : Edition 1 Août 1971
" " février 1972.
" " " 1974
Année 48 numéro 5 (1976)
" 49 " 2
GEC journal of science and technology : volume 32 numéro 1.
CEM : Décembre 1977 numéro 100-101

AUTRES

" Régime transitoire des machines électrique " cours de Mr Gresillon
" Compensateurs de puissance réactive asservis par thyristors
pour réseaux industriels " B. B. C
" Installation de compensateur statique de la puissance

réactive pour four à arc" B.B.C

"Compensation du facteur de puissance dans les installations de fours à arc à l'aide de condensateurs commandés par thyristors" ASEA.

"Specification technique pour la fourniture, le montage, les essais et la mise en service d'un ensemble statique de compensation d'énergie réactive de four à arc" GEC

"The control of system voltage using A.C. saturated Reactors" English Electric power transmission limited.

"Supply to arc furnaces: measurement and prediction of supply voltage fluctuation" IEE 119 (1972).

"Journées internationales d'étude sur les fours à arc" AIM. CBEE (liege 1973).

"Static compensators VAR-control Using thyristors" 30th annual power distribution conference. Siemens.

"Compensateur statique d'énergie réactive pour laminoire" ACEC.