

11/79

Université d'Alger

Ecole Nationale Polytechnique

lex

Département Electricité

المكتبة
.....
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

DIMENSIONNEMENT
DE L'INSTALLATION DE COMPENSATION
DE L'ACIERIE DE JIJEL

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
— المكتبة —
.....
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

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

réalisé a la SONELGAZ par Kouloughli Abdesslem et
Yahi Mohamed Kamel

Promotion Janvier 1979

Université d'Alger
Ecole Nationale Polytechnique
Département Electricité

DIMENSIONNEMENT
DE L'INSTALLATION DE COMPENSATION
DE L'ACIERIE DE JIJEL

PROJET DE FIN D'ETUDES

proposé par Mr H. BOUKARI
professeur à l'EN.P.A.

réalisé à la SONELGAZ par Kouloughli Abdesslem et
Yahi Mohamed Kamel

Promotion Janvier 1979

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à Messieurs H. BOUKARI et B. ZAIDI respectivement professeur à l'École Nationale Polytechnique d'Alger, Directeur technico-commercial à la Sonelgaz et Ingénieur - chef du service conseil à la clientèle pour leurs suggestions et leurs bons conseils.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui ont participé, de près ou de loin, à l'élaboration de cette étude en particulier, notamment le personnel de la SNS (projet de JIJEL), et à notre formation en général.

<u>CHAP. V</u> - Compensation	44
Introduction	44
1. Role de la compensation	44
2. Moyens de compensation	46
3. Types d'équipement de compensation	48
-1. condensateurs couplés par thyristors	48
-2. réactances couplées par thyristors	56
-3. réactance commandée par thyristors	57
-4. réactance saturée	60
4. Problèmes des harmoniques	66

<u>CHAP. VI</u> - Dimensionnement de la compensation	67
1. Généralités	67
2. Puissance des transformateurs	68
3. Compensation d'énergie réactive à réaliser	69
4. Dimensionnement de l'équipement de compensation rapide	86
5. Dimensionnement de l'équipement de compensation lente	92
6. Etude comparative	99

Conclusion	104
------------	-----

Bibliographie	105
---------------	-----

INTRODUCTION

Comme tous les gros équipements électriques qu'utilise l'industrie métallurgique, les fours à arc posent des problèmes de raccordement au réseau d'alimentation. En effet, en raison de son mode spécial de fonctionnement, un four à arc en service peut exercer des réactions perturbatrices, se traduisant sur le réseau qui l'alimente par :

- des chutes de tension inadmissibles provoquant le phénomène "flicker".

- des courants asymétriques.

- des distorsions harmoniques.

La gravité des inconvénients résultant de ces perturbations est directement liée à l'importance relative du réseau d'alimentation vis-à-vis de l'installation perturbatrice.

Il est reconnu qu'un réseau caractérisé par une forte puissance de court-circuit à l'endroit du raccordement de l'installation, subira une moindre gêne qu'un réseau relativement peu puissant.

Le raccordement des fours à arc à un réseau insuffisamment puissant est néanmoins possible, même lorsqu'il s'agit de puissance élevée (Fours U.H.P.), à condition de prévoir des moyens de compensation de la puissance réactive, cause principale des fluctuations rapides de la tension du réseau.

Le recours à ces palliatifs, s'ils sont correctement dimensionnés, c'est-à-dire adaptés au réseau en question, est aussi bénéfique pour le distributeur d'énergie que pour l'utilisateur. En effet, pour le distributeur, ne pas avoir à transporter de grande quantité d'énergie réactive sur le réseau lui évite des inconvénients se situant au niveau :

- du dimensionnement des réseaux.

- du coût d'exploitation (pertes plus élevées).

- de la qualité de service (chutes de tension élevées).

Pour l'utilisateur, les besoins en puissance réactive des fours étant

compensés, la tension primaire des transformateurs d'alimentation maintenue, il est possible de faire fonctionner les fours à une puissance active plus élevée, ce qui se traduit par une augmentation de la production de l'installation.

En tenant compte des spécificités de l'aciérie de Tijel, la présente étude réunit, un travail théorique introductif concernant les fours et leur fonctionnement, une analyse très sommaire du phénomène flicker, ainsi que la description de quelques systèmes de compensation, sélectionné parmi les plus en vue actuellement. Pour terminer, l'étude donne une méthode pratique de dimensionnement d'une installation de compensation, illustré par l'exemple de l'aciérie de Tijel.

CHAPITRE I

FLICKER

I-1- Définition

Les variations de tension des réseaux de distribution d'énergie électrique dues à un grand nombre de causes aléatoires, se présentent comme la superposition de modifications relativement lentes (quelques dizaines de minutes) et, de fluctuations rapides de la valeur efficace de la tension.

Les fluctuations sont classées en deux catégories principales :

- les variations périodiques ou erratiques de tension dont la distribution de fréquence est située dans la bande de $(0,5 \div 25) \text{ Hz}$.
- les à-coups brusques de tension apparaissant à des périodes de temps supérieures à quelques secondes, de façon systématique ou erratique.

L'ensemble de ces fluctuations constitue le phénomène dénommé FLICKER ou papillotement de la tension.

I-2- Origine

Mis à part les fluctuations provenant des générateurs ou des regulateurs en charge de transformateurs, dont l'amplitude reste toujours limitée. Le flicker provient du transit, dans les impédances du réseau d'alimentation, du courant appelé par des récepteurs puisants :

On attribue les variations périodiques ou erratiques permanentes à deux types de machines :

- d'une part, les machines appelant des puissances à variations rapides : fours à arc, laminaires, moteurs à démarrages fréquents et toute machine à couple pulsatoire...

- d'autre part, les machines créant des tensions à des fréquences non harmoniques qui se superposent à la tension à 50 Hz du réseau : moteurs à rotor dissymétrique, émetteur de télécommande.

Les à-coups brusques non permanents de tension sont dûs principalement à :

- certaines machines déjà cités, au cours d'une phase particulière de leur fonctionnement : Par exemple le début de fusion des haurs à arc.

- la mise en ou hors service de charges non fluctuantes comme c'est le cas de certains appareils électroménagers : cuisinières, radiateurs.

I-3-Mesure du flicker

Parmi les effets les plus néfastes dont le flicker est directement responsable, on trouve le papillotement de l'éclairage. En effet ce phénomène est perceptible par la totalité des usagers de l'énergie électrique et il est ressenti sous forme de sensation de gêne.

C'est donc par ce biais que les chercheurs ont essayé de quantifier le flicker et la gêne qu'il provoque. Ils ont choisi comme appareil de mesure la chaîne composée par un dispositif d'éclairage (lampe à incandescence) et par un système visuel d'un observateur moyen.

En ce qui concerne la mesure et l'appareil de mesure du flicker, il y a lieu de distinguer trois cas :

1^{er} Cas : Flicker causé par une fluctuation sinusoïdale

Les principes de base qui ont permis de réaliser l'appareil de mesure sont :

- si une fluctuation de tension a une amplitude A et une durée t la gêne répond alors à l'expression :

$$G_{\text{ênc}} = K \cdot A^2 \cdot t \quad -5-$$

où K est une constante

- la gêne est fonction de la fréquence de la fluctuation et elle est maximale pour la fréquence 10 Hz à amplitude constante. Il existe donc un seuil de perceptibilité en dessous duquel le flicker n'est pas visible. L'amplitude de la fluctuation à 10 Hz correspondante est égale à 0,3%.

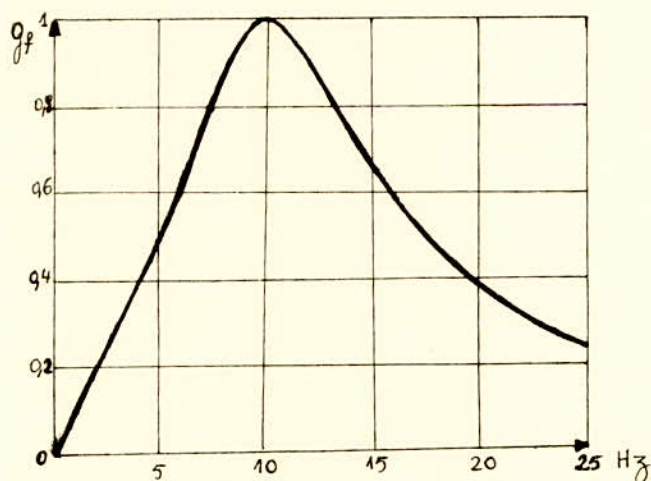
- Il est possible d'obtenir de façon unique l'amplitude de la fluctuation à fréquence 10 Hz qui provoque la même gêne qu'une fluctuation de fréquence f et d'amplitude A_f .

Cette amplitude est : $A_{10} = g_f \cdot A_f$

où g_f est une fonction de la fréquence :

$$g_f = \begin{cases} 1 & \text{pour } f = 10 \text{ Hz} \\ < 1 & \text{pour } f \neq 10 \text{ Hz} \end{cases}$$

Graphique de la fonction g_f :



- La superposition de fluctuations sinusoïdales de fréquences f_1, f_2, \dots, f_n et d'amplitudes A_1, A_2, \dots, A_n de

durée T engendre la même gêne qu'une fluctuation sinusoïdale à 10 Hz de même durée d'amplitude :

$$A_{10} = \sqrt{\sum_i g_{fi}^2 \cdot A_i^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

- la gêne est évaluée par la variation de sa dose en fonction du temps. cette dose est définie par l'expression :

$$\text{dose} = \int_0^T A_{10}^2 \cdot dt \quad \text{en } [\%^2 \cdot \text{minute}]$$

A_{10} étant l'amplitude de la fluctuation à 10 Hz équivalente à la fluctuation réelle de tension.

la chute de tension en pour cent répond à la formule :

$$\frac{\Delta U_n}{U_n} = X \cdot \frac{\Delta Q}{U_n^2} \cdot 100$$

par conséquent la dose de flicker cumulée s'écrit :

$$\text{dose} = \int_0^T K \cdot \left(\frac{\Delta U_n}{U_n}\right)^2 \cdot dt$$

$$\text{dose} = \int_0^T K \cdot X^2 \cdot \frac{\Delta Q^2}{U_n^2} \cdot dt$$

ΔQ - variations de puissance réactive.

X - réactance de court-circuit du réseau d'alimentation.

U_n - tension composée.

U_n - tension simple.

T - temps d'intégration (durée de fusion dans le cas des fours à arc).

K - coefficient permettant de ramener les amplitudes de la fluctuation de tension réelle à celle d'une fluctuation sinusoïdale à 10 Hz.

FLICKERMETRE

La mise en application de tous les résultats précédents

a donné l'appareil de mesure de la dose de flicker : le flickermètre.
Il est constitué :

- d'un circuit d'entrée comprenant un transformateur et un redresseur.
- un filtre qui a pour courbe de réponse la fonction g_f .
- un amplificateur
- d'un système quadratique dont la tension de sortie est appliquée à un système intégrateur.

La tension perturbée est appliquée au transformateur d'entrée et l'appareil donne, par minute, une grandeur proportionnelle à l'intégrale : $\int A_{10}^2 \cdot dt$.

La figure 3.1 montre le schéma synoptique de l'appareil.

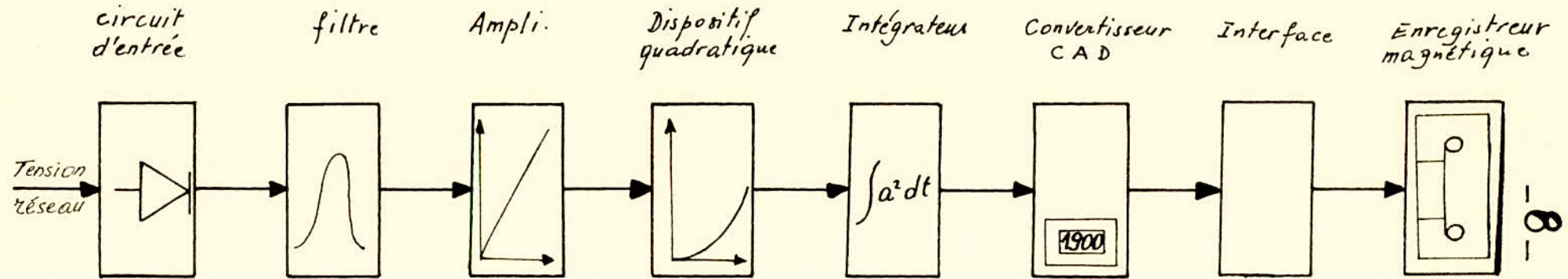
2^e Cas : Flicker provoqué par une fluctuation périodique ou erratique (non sinusoïdale).

Le flickermètre peut être également utilisé pour la mesure du flicker dû à de telles fluctuations et ceci avec une bonne précision. Puisque le flicker non intermittent peut être ramené à un flicker équivalent, engendré par une fluctuation à 10 Hz qui donnerait la même sensation de gêne.

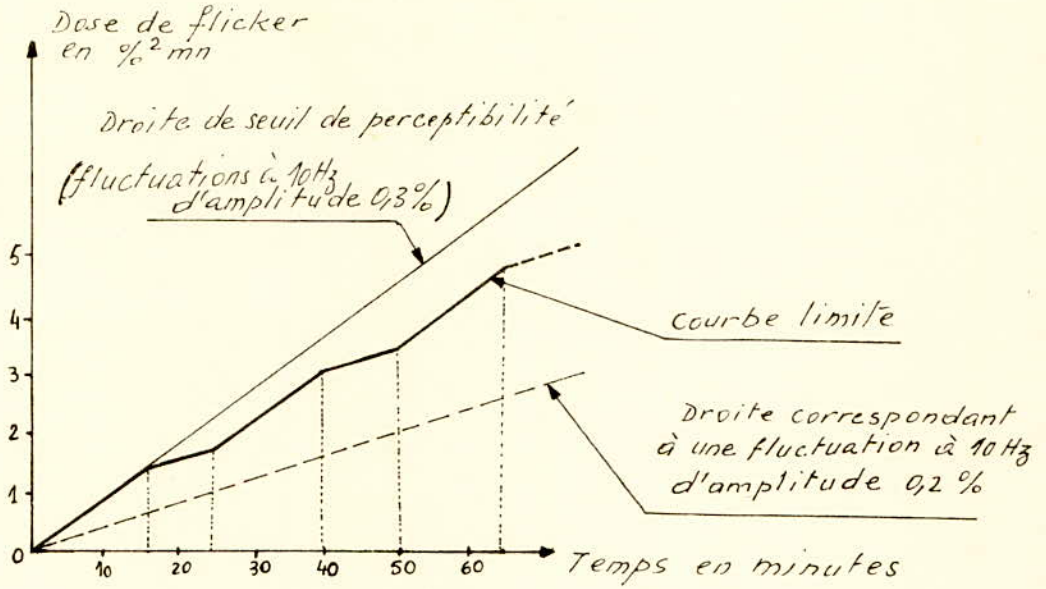
Pour ces deux cas, cette méthode de mesure a permis de tracer une courbe limite, qu'il ne faut pas dépasser. En effet la dose de flicker est tolérable dans la mesure, ou elle reste inférieure à celle créée par un flicker dont l'amplitude à 10 Hz atteint 0,3% de la tension moyenne pendant des intervalles de temps de 15 minutes, eux-mêmes séparés par des périodes de temps de 10 minutes durant lesquels le flicker n'est pas perceptible.

Fig 3.I

FLICKERMETRE



courbe limite de dose de flicker tolerable.



3^e Cas : Flicker dû à des à-coups brusques de tension à fréquence de répétition faible.

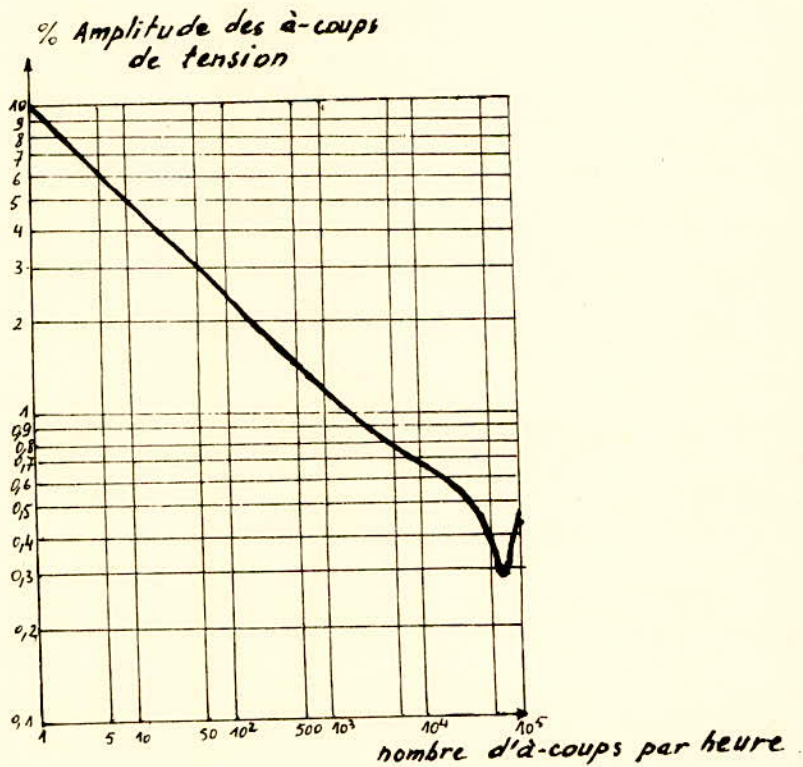
Lorsque les fluctuations de tension prennent l'aspect d'à-coups brusques se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. L'assimilation de l'ensemble lampe-observateur à un filtre de courbe de réponse g_f n'est plus valable. Ceci est dû au fait, que l'observateur a une mémoire dont la constante de temps est différente de celle du filtre pour des régimes transitoires se suivant à très basse fréquence. Ceci fait qu'on ne peut pas utiliser le Flickermètre.

La méthode de mesure la plus valable, consiste à déterminer l'amplitude et la fréquence de répétition des à-coups de tension. Ce qu'on peut faire en réalisant successivement un enregistrement des puissances actives et réactives absorbées par l'appareil perturbateur, à faible vitesse. On obtient ainsi la fréquence.

L'amplitude des à-coups peut être calculée, connaissant l'impédance de court-circuit du réseau au point de raccordement du récepteur.

De même que pour le flicker non intermittent, on a déterminé expérimentalement une courbe limite. Elle donne l'amplitude maximale acceptable pour des à-coups de tension isolés en fonction de leur fréquence de répétition

- courbe limite



Remarque :

Les courbes limites admissibles citées plus haut sont d'une grande importance. Elles permettent en effet de résoudre les problèmes de raccordement d'appareils perturbateurs au réseau.

CHAPITRE II

FOUR A ARC ELECTRIQUE

II-1 - Généralités

Les installations de four à arc sont généralement destinées à la fabrication d'aciers ordinaires, d'aciers alliés ou d'aciers spéciaux à partir de ferrailles ou de minerais pré-réduits.

Ces installations comprennent les éléments principaux suivants :

- le four
- les dispositifs de commande et de régulation.
- l'installation à haute tension.
- un équipement de compensation de la puissance réactive si la nécessité s'en fait sentir.

Pour l'élaboration des différents aciers, la marche du four se présente comme suit :

- une période de fusion des ferrailles (espaceé par de brefs arrêts qui sont fonction du nombre des chargements) pendant laquelle le four fonctionne au maximum de courant et de tension.
- une période appelée affinage, pendant laquelle on effectue les opérations permettant d'obtenir la qualité désirée pour l'acier à produire. Cette période est plus ou moins longue suivant qu'il s'agit d'aciers ordinaires, alliés ou spéciaux.

Les fours à arc représentent souvent pour le réseau une source importante de dérangements, surtout au début et durant (avec un degré moindre) la période de fusion. En effet, l'arc formé entre les électrodes et la charge est instable, et, engendre des variations importantes et rapides du courant; ce qui provoque des fluctuations de la puissance réactive appelée par le four, et par conséquent des variations

intolérables de la tension du réseau.

Tout cela pose des problèmes concrets de raccordement des fours à arc en général et des fours à arc U.H.P (ultra haute puissance) en particulier, qui ont acquis actuellement l'accord unanime de tous les spécialistes, et cela pour leur nombreux avantages (en particulier économique).

II-2-Arc électrique

II.2.1 Naissance de l'arc

La séparation de deux conducteurs d'un circuit fermé sous tension provoque généralement l'apparition d'arc électrique. En effet si l'on écarte l'un de l'autre deux conducteurs (électrodes) préalablement en contact, juste avant la séparation des contacts, la dernière zone en contact est portée à une température élevée, donnée par la formule approximative :

$$\theta = 1,7 \cdot 10^4 \cdot \Delta U^2$$

où ΔU - représente la chute de tension au contact en volts,
 θ - température en degrés Celsius.

Cette température entraîne la vaporisation des métaux du contact et une émission d'électrons par effet thermoélectronique. Les électrons sont accélérés par le champ électrique qui règne dans l'intervalle entre contacts, et acquièrent suffisamment d'énergie pour ioniser par choc les atomes de gaz présents dans cet intervalle.

Les ions positifs se dirigent alors vers l'électrode négative qu'ils bombardent.

Les électrons sont attirés par l'anode sur laquelle leur énergie cinétique se transforme en chaleur. La colonne de gaz ionisés constitue alors l'arc électrique.

II.2.2 Propriétés de l'arc

- L'arc électrique est lumineux
- L'arc produit de la chaleur
- L'arc est instable
- La section est proportionnelle à l'intensité.
- La longueur de l'arc dépend de la tension, la formule de

Miss Ayrton donne :

$$U = A + BL + \frac{C + DL}{I}$$

avec

U - tension aux bornes de l'arc en [V]

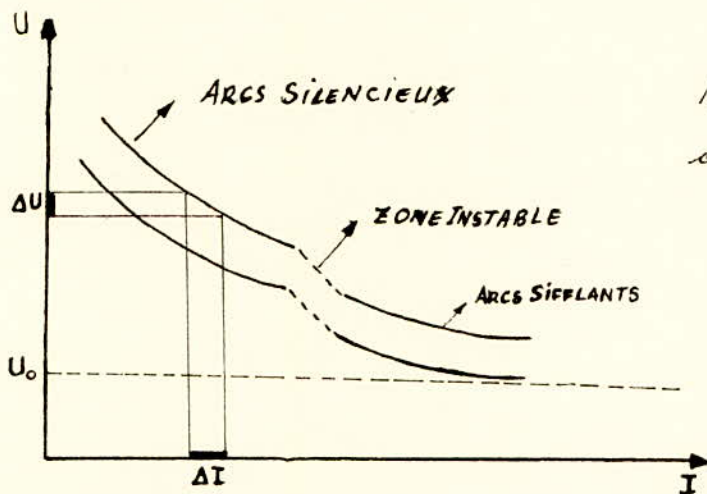
L - longueur de l'arc en [cm]

I - intensité en [A]

A, B, C, D. constantes dépendant des électrodes du four et de la charge

- courbe caractéristique : $U = F(I)$

Il est très difficile d'étudier les caractéristiques d'arc à très haute intensité, du type de ceux qui sont utilisés dans les fours. La figure suivante représente pour différents arcs les tensions en fonction du courant.



le rapport $\frac{\Delta U}{\Delta I}$ est analogue à une résistance

On remarque que l'arc ne peut pas exister en dessous d'une tension minimum, dont la valeur est égale à la chute de tension dans les extrémités de l'arc.

Le produit $U \cdot I$, c'est-à-dire la puissance dans l'arc proprement dit est toujours constante aussi longtemps que la longueur de l'arc ne varie pas. Plus la longueur d'un arc est petite, plus sa puissance et sa tension aux bornes sont petites pour un courant donné. Par suite, la seule façon de changer la puissance dans un arc consiste à modifier sa longueur.

Pour une utilisation efficace de l'arc électrique dans la métallurgie, il est nécessaire de stabiliser l'arc pour éviter les incidents de la marche et des perturbations inacceptables sur le réseau.

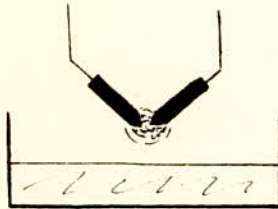
II-3-Classification des fours

On peut faire cette classification suivant l'alimentation des fours; celle-ci peut être continue ou alternative monophasée, biphasée ou triphasée (l'alimentation triphasée est préférée pour les fours de grande puissance).

II.3.1. FOURS MONOPHASÉS

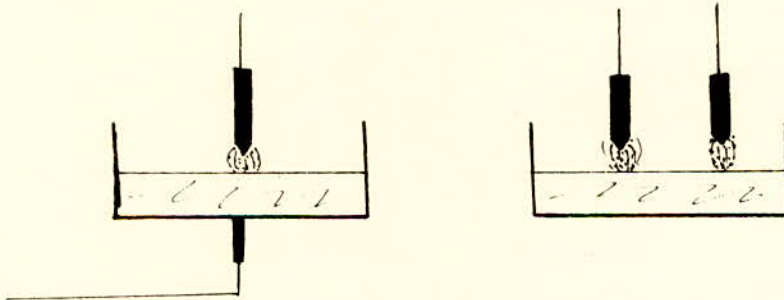
- à arc libre

La naissance de l'arc se fait entre les électrodes en dehors de la charge.



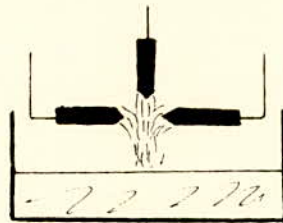
- à arc sur métal

L'arc se produit au contact de la charge et se ferme, soit par la sole du four, soit par le métal.



II.3.2. FOURS biphasés

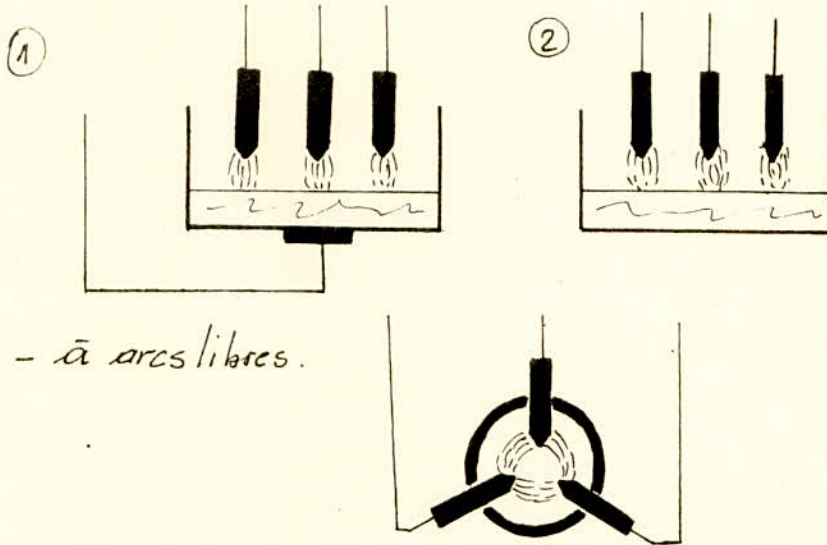
L'arc est en "fleur de lis" sur métal.



II.3.3. FOURS triphasés

- à arcs sur métal

- avec neutre de retour ①
- sans neutre de retour ② : pont essentiellement utilisés dans les aciéries pour la fusion et l'affinage des aciers.



II-4- Caractéristiques en charge du four à arc

Pour tirer les meilleurs résultats économiques du fonctionnement du four à arc, il est très important de pouvoir régler tant la tension que le courant, ceci indépendamment l'un de l'autre. Pour obtenir la puissance maximale, il faut en général utiliser la valeur maximale de réglage de tension et le courant maximal du transformateur du four.

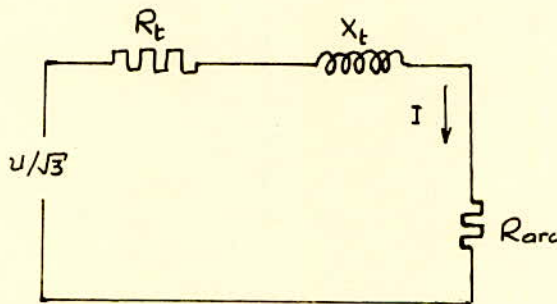
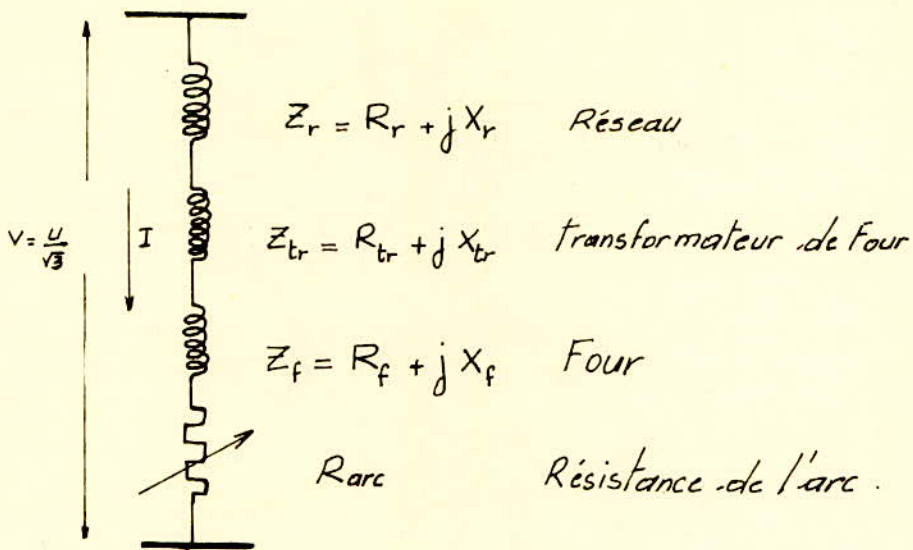
On peut réduire la puissance, en diminuant la tension ou le courant ou les deux simultanément.

Les caractéristiques en charge permettent justement de faire un choix correct des différents paramètres.

II-4-1 Circuit de four symétrique.

La symétrie du circuit du four étant réalisée, on peut simplifier le problème en n'étudiant qu'une seule des trois phases.

II-4-1-1. Schéma de principe.



$$Z_t = Z_r + Z_{tr} + Z_f$$

$$= R_t + jX_t$$

$$R_t = R_r + R_{tr} + R_f$$

$$X_t = X_r + X_{tr} + X_f$$

la Résistance totale s'écrit :

$$R = R_t + R_{arc}$$

U - tension secondaire entre phases.

I - courant d'électrode.

II-4-1-2 - Equations électriques

chaque phase obéit à l'équation de base :

$$V = (R + jX_t) I = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

le courant d'électrode :

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{R^2 + X_t^2}}$$

①

La puissance apparente fournie dans les trois phases est :

$$S = \sqrt{3} U \cdot I = \frac{U^2}{\sqrt{R^2 + X_t^2}} \quad (2)$$

La puissance réactive :

$$Q = 3 X_t \cdot I^2 = U^2 \cdot \frac{X_t}{R^2 + X_t^2} \quad (3)$$

La puissance active fournie est :

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} = U^2 \cdot \frac{R}{R^2 + X_t^2} \quad (4)$$

Les pertes par effet joule : P_j

$$P_j = 3 R_t \cdot I^2 = U^2 \cdot \frac{R_t}{R^2 + X_t^2} \quad (5)$$

La puissance des arcs :

$$P_{arc} = P - P_j = U^2 \cdot \frac{R_{arc}}{R^2 + X_t^2} \quad (6)$$

La tension pour chacun des arcs :

$$U_{arc} = R_{arc} \cdot I = \frac{P_{arc}}{3I} \quad (7)$$

Le Facteur de Puissance :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_t^2}} \quad (8)$$

Le rendement :

$$\eta = \frac{P_{arc}}{P} = \frac{R_a}{R} \quad (9)$$

Les équations (2) - (9) permettent de tracer les caractéristiques en charge en fonction du courant d'électrode de la figure 4.I.

Remarques:

1. on remarque, figure 4.I, que la puissance active P passe par un maximum. pour $R = X_t$.

En effet $\frac{dP}{dR} = 0$ pour $R = X_t$

d'où (4) $\Rightarrow P_{max} = \frac{U^2}{2 X_t}$

Le facteur de puissance et la puissance Réactive deviennent :

$$\textcircled{2} \Rightarrow \cos \varphi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$$

$$\textcircled{3} \Rightarrow Q = \frac{U^2}{2X_t} = P_{max}$$

II-4-1.3 - Diagramme de fonctionnement

Le Fonctionnement du four sera représenté d'une part par un diagramme circulaire. Le vecteur OA sera figuratif de l'intensité, sa projection sur les axes pourra être graduée pour donner sur l'axe des Y la puissance active et sur l'axe des X la puissance réactive. D'autre part, à partir d'un essai en court-circuit du four qui donnera les caractéristiques X et R de l'alimentation, on trace un quart de cercle de rayon

$V = (R_t + jX_t)I$ (le vecteur OA avec une autre graduation). La projection de ce vecteur sur les axes donne RI sur l'axe des ordonnées et XI sur celui des abscisses. Enfin l'origine représente le point $R_{arc} = \infty$ et ce le point $R_{arc} = 0$

Ce diagramme donné par la figure 4.I permet également de tracer les caractéristiques en charge dont il est question en II.4.1.2. En effet pour chaque tension secondaire, on peut fixer par l'intermédiaire de la régulation des électrodes, un point de fonctionnement qui sera caractérisé par son intensité de courant d'arc à laquelle correspond :

- une puissance active : P
- une puissance réactive : Q
- un facteur de puissance : $\cos \varphi$
- une tension d'arc : U_{arc}

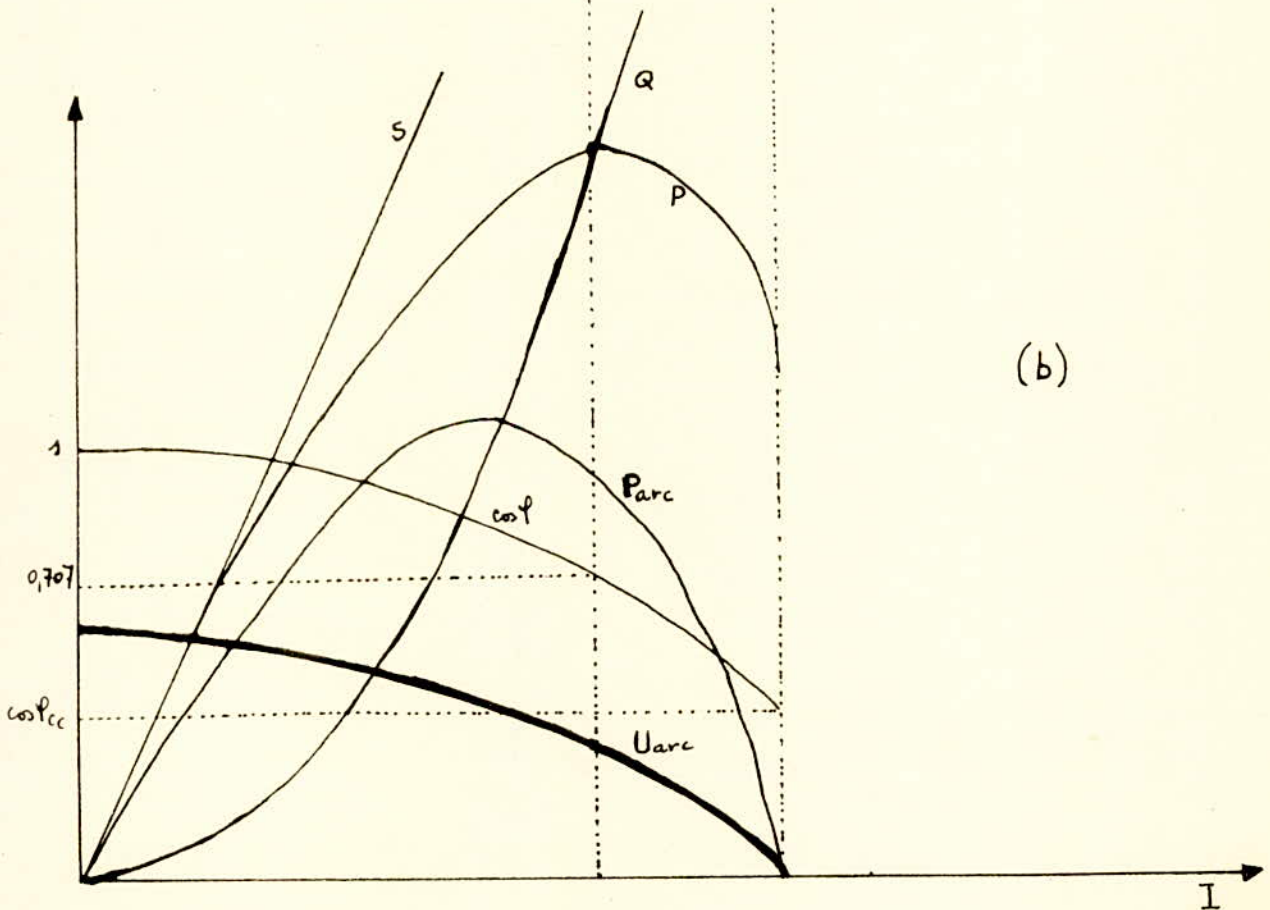
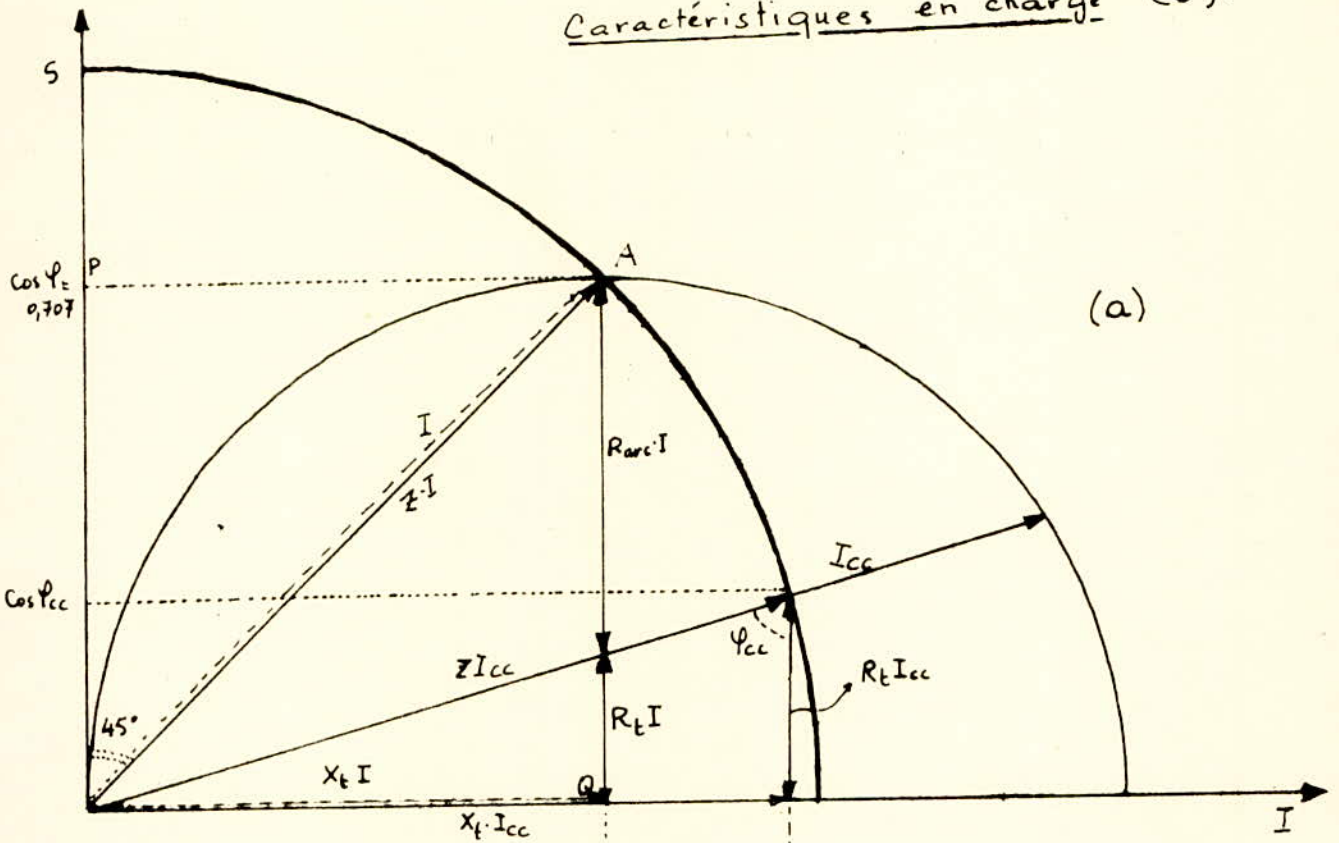
II-4-1-4 - Influence de la réactance de phase du circuit sur le fonctionnement du four

On a vu au paragraphe II.4.1.2 deuxième remarque que la puissance est inversement proportionnelle à la réactance de phase et par conséquent, il y a intérêt à réduire cette dernière. Il est clair que la réactance dépendante de la géométrie de l'installation est plus petite pour les

Fig 4.I -

-20-

Diagramme de fonctionnement (a)
et
Caractéristiques en charge (b)



four de faible capacité et plus importante pour les grands fours. Mais tandis qu'il est difficile d'agir sur la géométrie des câbles, barres, etc., il est assez facile, entre certaines limites d'agir sur la réactance du circuit. Il ressort des équations électriques du four, qu'à une réactance plus faible correspond une tension d'arc plus faible et des courants de fonctionnement et de court-circuit plus élevés.

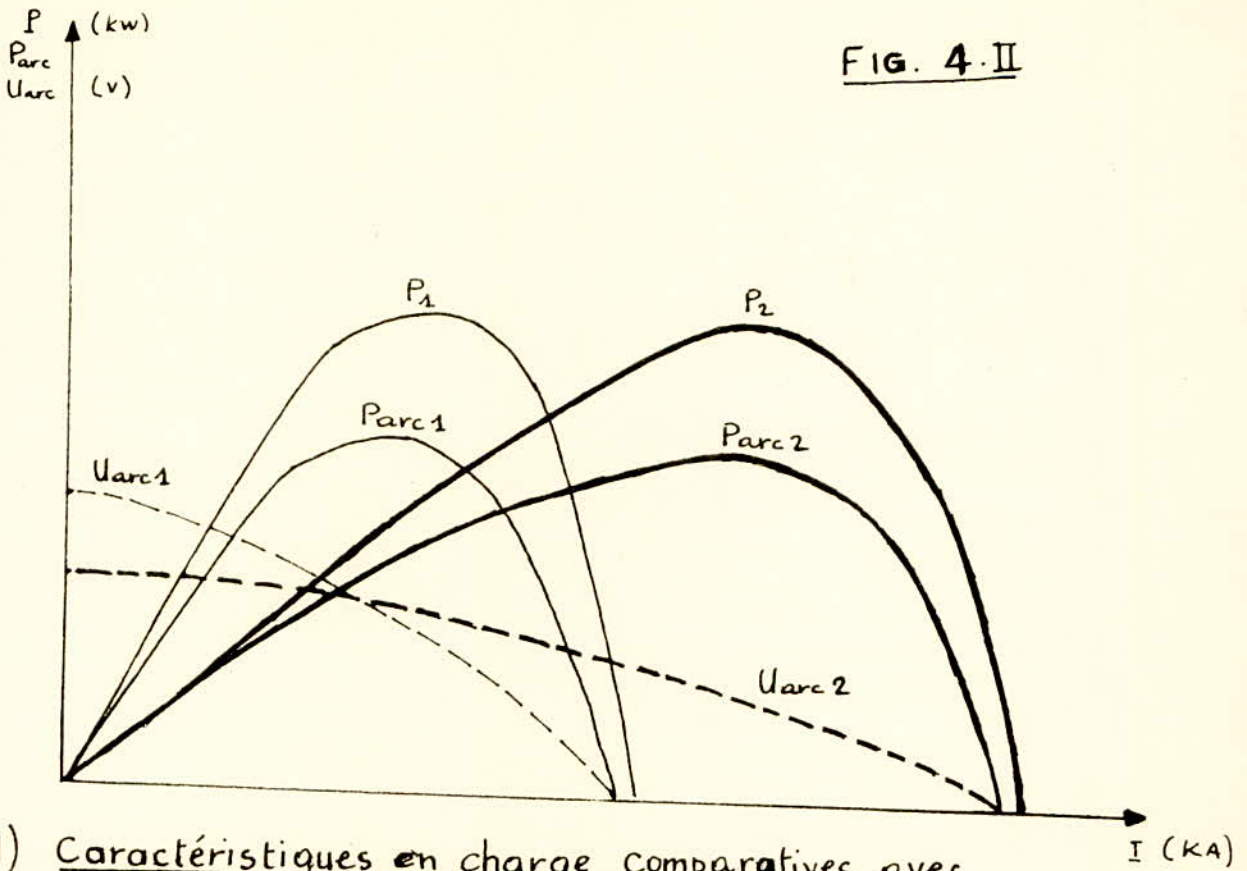
C'est ce que montre la figure 4.II(a) où la puissance d'arc et la tension d'arc d'électrode sont tracés en fonction du courant d'électrode pour les réactances x_1 et x_2 avec $x_1 > x_2$.

Le four de réactance plus faible présente un diagramme circulaire de rayon plus faible donc $I_2 > I_1$ et $I_{cc2} > I_{cc1}$ (voir figure 4.II(b)).

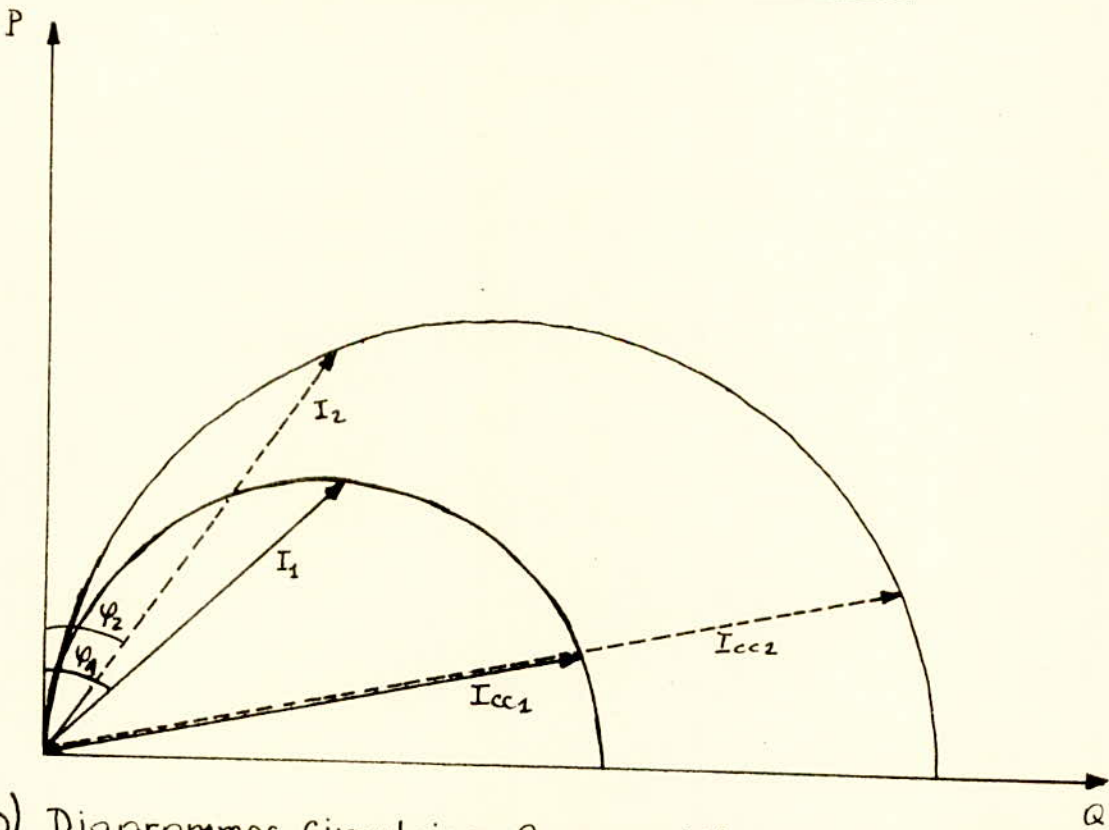
Commentaire :

La tendance est donc d'avoir une réactance de dispersion aussi faible que possible pour les transformateurs de four de grande puissance. Ce qui donne des arcs plus courts par conséquent l'usure de la voûte et des barres est plus modérée. Mais ceci n'engendre pas rien que des avantages ; à ce propos un problème très important se pose. Il s'agit d'une part de la variation de la réactance de dispersion en fonction de la position du commutateur sur les différentes prises. D'autre part il est très nécessaire de prévoir les électrodes et les conducteurs d'alimentation plus forts parce que le courant d'électrode est plus élevé.

FIG. 4.II



(a) Caractéristiques en charge comparatives avec deux réactances différentes ($x_1 > x_2$)



(b) Diagrammes Circulaires Comparatifs avec $x_1 > x_2$.

II.4-2 Circuit de four dissymétrique

La théorie du calcul des caractéristiques électriques d'un circuit de four dissymétrique est très longue et inutile dans la présente étude. En effet de telles caractéristiques de fonctionnement ne sont pas souhaitables comparativement à l'installation symétrique.

On donne, figure 4.iii, uniquement à titre indicatif, les courbes de puissance d'arc et de tension d'arc dans les différentes phases en fonction du courant d'électrode.

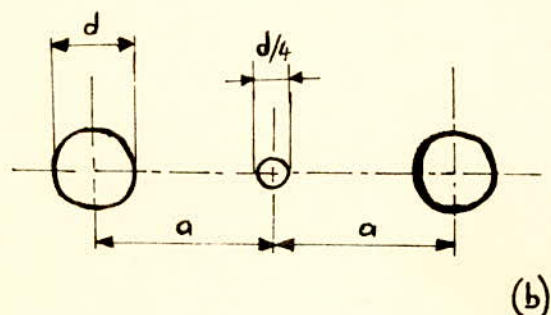
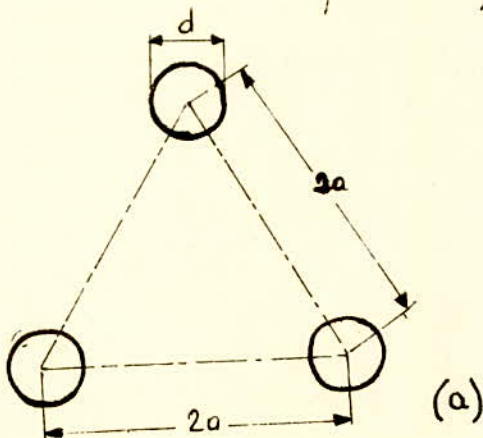
on remarque en particulier que la tension d'arc est maximale pour la phase "deux", par conséquent l'arc devient plus long que dans les deux autres phases et le rayonnement vers les parois et la voûte est maximal. Par contre dans la phase "une", le courant et la puissance sont minimaux.

Comparativement à une installation symétrique, la puissance obtenue est plus faible (car on ne peut pas charger pleinement le transformateur lorsque les courants sont dissymétriques) ce qui réduit la production en plus d'une usure rapide du revêtement.

Remarque:

La dissymétrie du circuit du four peut être évitée en disposant les conducteurs de phase de la façon suivante :

- disposition en triangle (a)
- disposition coplanaire modifiée (b)



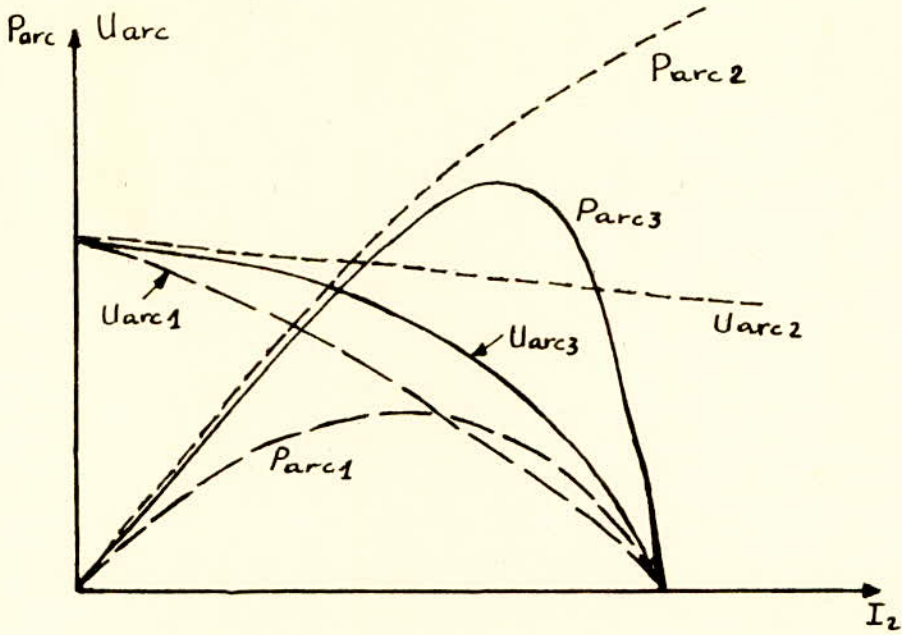
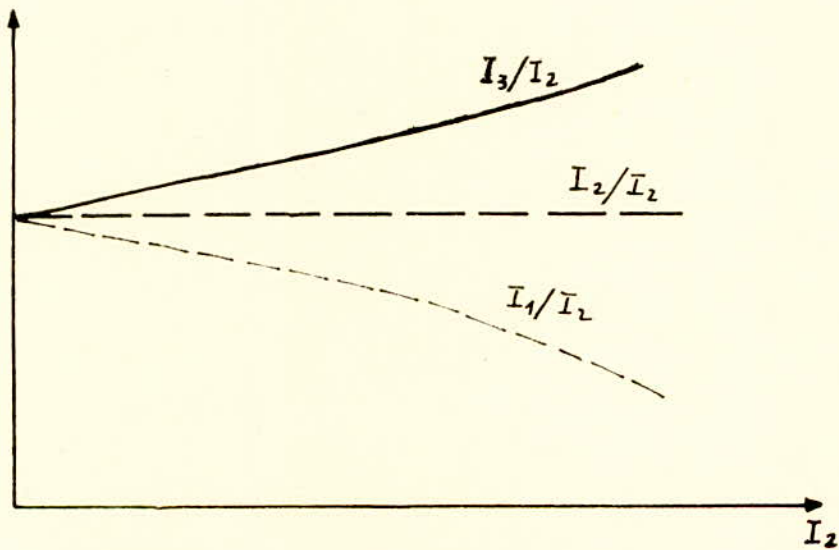
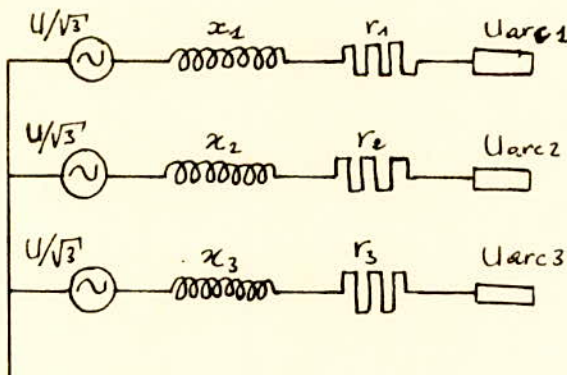


Fig 4 III



Caractéristiques en charge d'un four à arc
à circuit dissymétrique



x - réactance
 r - résistance
 U - tension du transformateur
 U_{arc} - tension d'arc
 $Parc$ - puissance d'arc
 I - courant d'arc.

Schéma de principe

II-5- Effets d'un four à arc sur le réseau

Le fonctionnement du four durant la période de fusion s'accompagne de variations importantes du courant prélevé sur le réseau dues essentiellement à :

- l'instabilité des arcs (changement de longueur) en fonction du réglage des électrodes .
- aux extinctions et réallumages de ces mêmes arcs .
- l'effondrement de la ferraille à l'intérieur du four .

Le fonctionnement du four en période d'affinage s'avère par contre nettement moins perturbateur en raison de la stabilité assurée de l'arc . Les perturbations à prendre en compte seront donc celles liées à la période de fusion .

Le réseau d'alimentation peut être affecté de plusieurs façon à savoir :

II-5-1 - Une chute de tension.

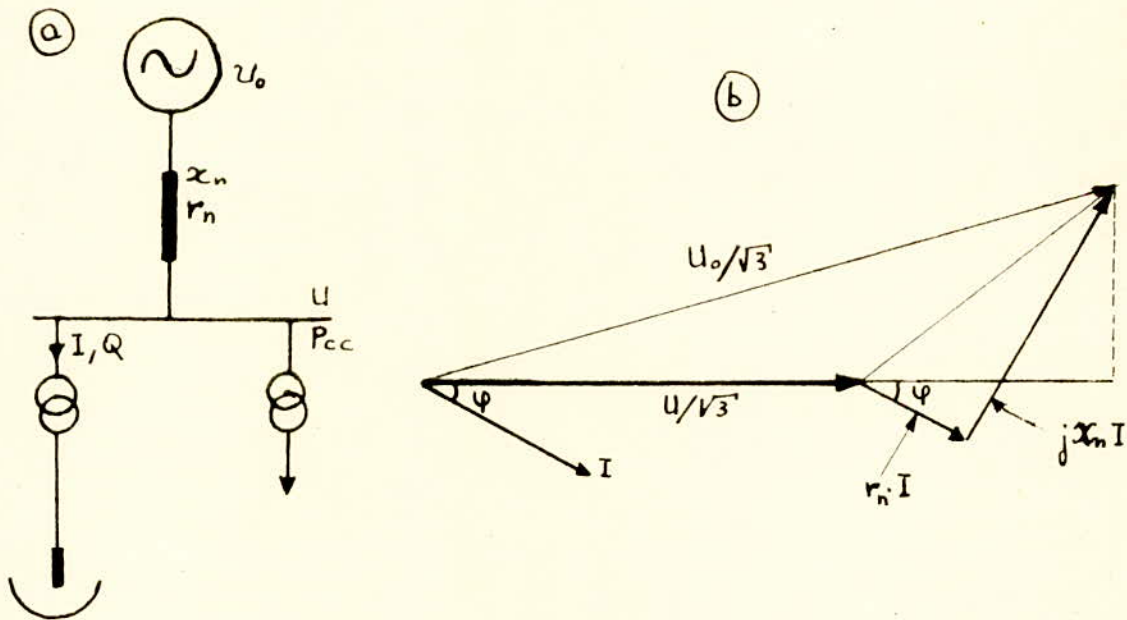


FIG 5-I - Schéma de circuit (a) et diagramme vectoriel (b) d'un réseau triphasé sous charge d'un four à arc .

u_0 - tension à vide du réseau - I courant d'électrode

Q - puissance réactive du four .

les variations de courant provoquent des fluctuations de la puissance réactive fournie par le réseau, ce qui entraîne des variations de tension. La figure 5.I.(b) permet d'écrire :

$$U_0 - U = \sqrt{3} [r_n I \cos \varphi + x_n I \sin \varphi]$$

les expressions des puissances actives et réactives

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi$$

Permettent d'écrire :

$$\Delta U = U_0 - U = \frac{r_n P + x_n Q}{U}$$

Comme un réseau normal a une impédance fortement inductive donc $r_n \ll x_n$ et la puissance active fournie est généralement du même ordre de grandeur que la puissance réactive.

La variation de tension répond donc à l'expression :

$$\Delta U = x_n \cdot \frac{Q}{U}$$

en divisant les deux membres par U on obtient

$$\frac{\Delta U}{U} = x_n \cdot \frac{Q}{U^2}$$

On remarque que cette chute de tension est proportionnelle à la valeur de la puissance réactive, et, par conséquent peut atteindre des valeurs inacceptables ; surtout lorsqu'on sait que les variations de la puissance réactive autour d'un point de fonctionnement peuvent être assez grandes en comparaison avec les variations de la puissance active.

La figure 5.II permet de voir cette différence.

II-5-2. Une dose de flicker.

Les chutes de tension erratiques et nombreuses provoquent

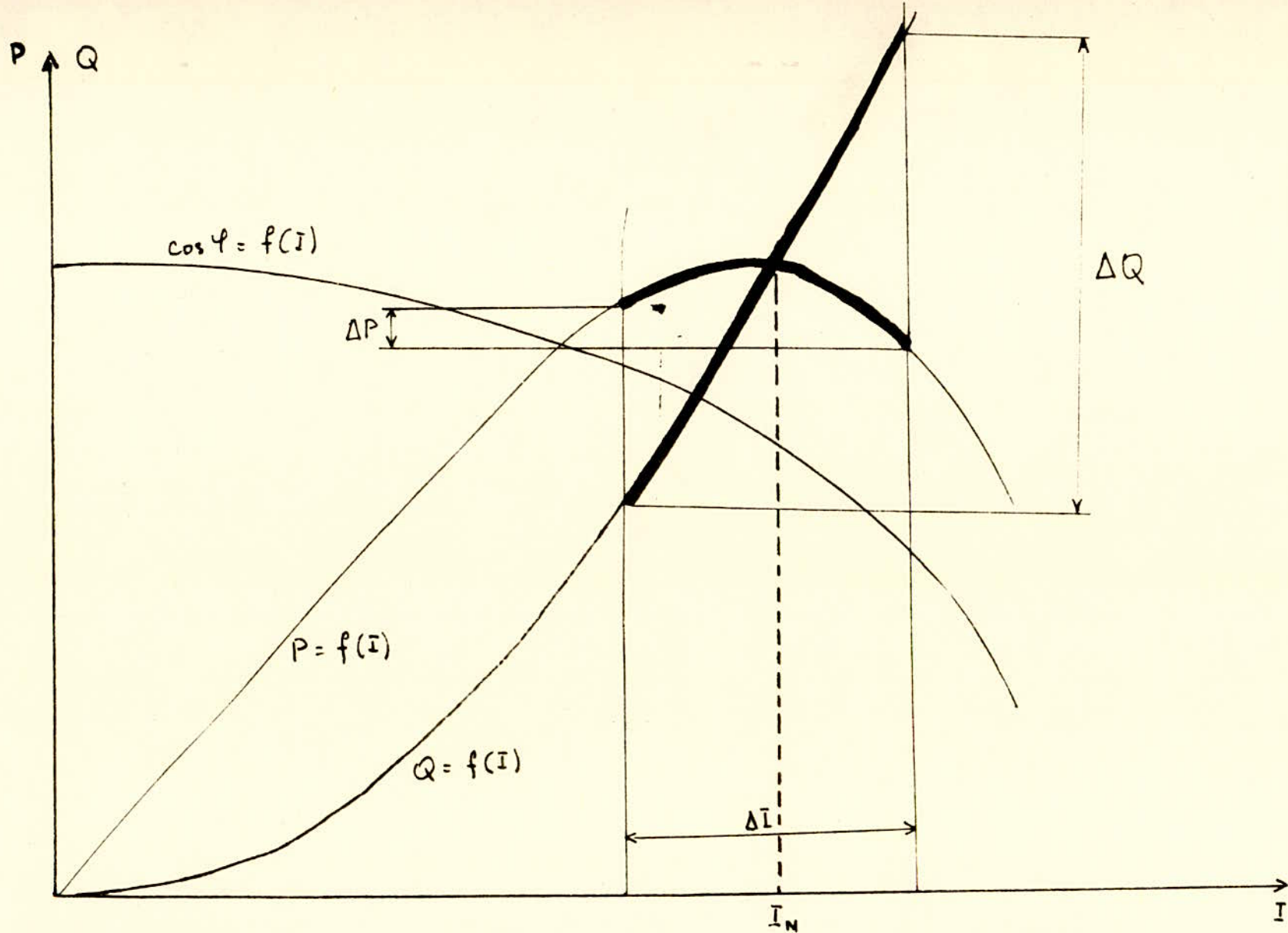


Fig 5.II - variations des puissances actives et réactives résultant d'une variation ΔI du courant autour d'un point de fonctionnement.

à leur tour le flicker ou papillotement du flux lumineux dispensé par les lampes à incandescence. Ce flicker peut entraîner une gêne aux utilisateurs. Cette gêne répond à la formule :

$$\text{Gêne} = \int_0^T K x_n^2 \frac{Q^2}{U^4} dt$$

II-5-3- Des taux d'harmoniques

Ces harmoniques sont généralement faibles dans les courants d'alimentation du four à arc (sauf peut-être à l'amorçage de l'arc entre électrodes et bain). Quoiqu'il en soit leur présence peut engendrer des inconvénients au niveau des autres équipements alimentés par le réseau.

Le four se comporte comme un générateur de courants harmoniques. Ces courants se répartissent entre les différentes branches du réseau en fonction de leurs impédances "harmoniques", et, y créent des distorsions dans l'onde de tension.

II-5-4- Des composantes inverses dans les courants absorbés.

Les composantes inverses de courant dépendent essentiellement de la charge relative en courant des trois électrodes. Elles peuvent exister même pendant la période d'affinage. Cependant, elles peuvent être évitées par une recherche soignée de la symétrie du circuit du four.

II-6- Transformateur de fours à arc

Le transformateur de four est l'un des principaux éléments de l'installation. Les conditions de fonctionnement d'un tel transformateur étant beaucoup plus dures que celles d'un transformateur de réseau.

Le rapport de transformation des transformateurs de four est énormément

élevé. Par conséquent les difficultés de construction et par là même le coût augmentent rapidement avec le rapport.

Les principales exigences que doit remplir un tel transformateur sont :

- une plage de régulation de tension étendue.
- des courants secondaires élevés (du côté du four).
- tension secondaire basse pour une tension primaire relativement élevée.
- fréquence de manœuvre élevée du commutateur à gradins.
- réactance de dispersion réduite.
- haute résistance aux courts-circuits pour maîtriser les courts-circuits qui font partie du fonctionnement du four.

Suivant le mode de régulation adopté, on distingue deux sortes de transformateurs de four :

- transformateur de four avec régulation directe.
- transformateur de four avec régulation indirecte.

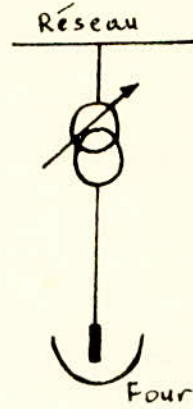
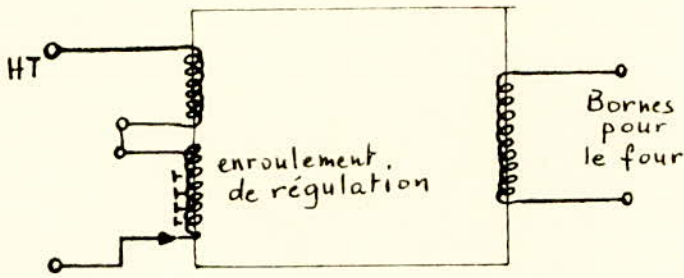
II-6-1. Transformateur avec régulation directe.

Ce type de transformateur est employé pour les fours de moyenne puissance. Le réglage se fait par variation du nombre de spires de l'enroulement haute tension (-primaire). Il en résulte une variation du flux magnétique dans le noyau et par conséquent de la tension induite dans l'enroulement basse tension (secondaire).

Sur ces transformateurs, le réglage se fait indifféremment à vide ou en charge. Quoique le réglage à vide est préférable dans ce cas en raison de sa simplicité, de la rapidité de passage de gradins de tension.

Le réglage en charge permet de faire les variations de tension sans couper la charge, mais il impose l'emploi d'un (régulateur) régleur beaucoup plus complexe et nécessite de sortir beaucoup plus de prises sur l'enroulement de réglage.

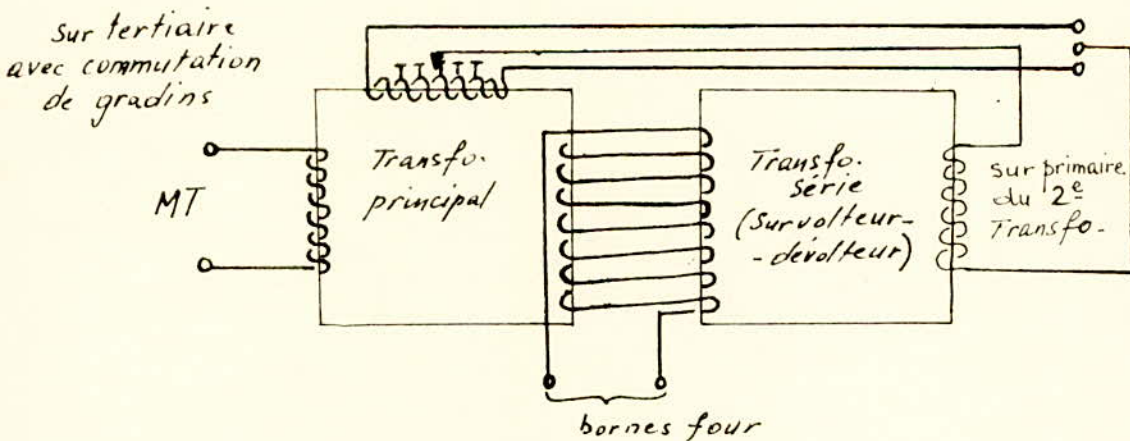
schéma de principe unifilaire



II-6-4 Transformateur avec régulation indirecte.

Ce transformateur convient surtout aux grands fours alimentés à partir de réseau haute tension. Il se compose de deux transformateurs; un transformateur principal avec un enroulement primaire en haute tension, un secondaire qui constitue partiellement l'alimentation du four et un tertiaire de réglage alimentant le second transformateur (survolteur-dévolteur) dont le secondaire est commun avec celui du transformateur principal. La commutation pour ce type de transformateur se fait exclusivement en charge par conséquent pas d'interruption de fonctionnement, le disjoncteur de four est alors ménagé.

schéma de principe unifilaire



Remarque:

les deux types de transformateurs peuvent être surchargés de 20% et cela durant environ 90 minutes dans un cycle de fonctionnement de 120 minutes (d'une coulée à la suivante).

la tension de raccordement pour le premier cas de transformateur va

normalement jusqu'à 36 KV. Pour les transformateurs à régulation indirecte cette tension peut atteindre 150KV.

II-7-Régulation

Il y a intérêt à avoir la température dans le four aussi élevée que possible, tout en étant au dessous de la température dangereuse pour le réfractaire ou pour le métal à produire lui même. Pour maintenir la température à une valeur donnée, la puissance nécessaire doit varier au fur et à mesure que la charge et les murs du four prennent leur température.

La régulation agit de façon à ce que la puissance utilisée ne dépasse pas certaines valeurs limites, compatibles avec la construction du four et la nature de sa charge. Cette régulation est faite en général en fonction de la puissance. Cette dernière étant choisie par un opérateur qui essaie de l'adapter au mieux aux nécessités de l'opération en cours.

Les variations de puissance peuvent être réalisées suivant deux méthodes, qui peuvent être appliquées séparément ou simultanément :

- changement de tension (en agissant sur les prises du transformateur).
- changement de l'intensité.

II-8-Contrôle du mouvement des électrodes

Tout élément qui varie linéairement avec la longueur de l'arc convient pour établir une régulation : résistance, longueur, facteur de puissance, puissance, intensité, tension d'électrode.

Pour des raisons pratiques, la plupart de ces facteurs ne sont pas utilisables. L'impossibilité de faire une régulation basée sur une mesure de la résistance, de la longueur ou de la tension dans l'arc est évidente. Le facteur de puissance est facilement mesurable, mais ses variations pendant une marche convenable du four sont faibles de sorte que la mesure

de ce paramètre demande un appareillage sensible. Il reste les deux dernières possibilités à savoir la régulation de la puissance et la régulation d'intensité. La première, au voisinage de la puissance maximum dans l'arc ne varie pas rapidement dans les limites de fonctionnement du four et n'est donc pas utilisée elle aussi.

Il ne reste que la régulation à l'aide de l'intensité. Il est évident que l'action sur l'intensité seule ne permet pas de déterminer la puissance, la régulation d'intensité maintient celle-ci constante et au fur et à mesure de l'avancement de l'opération de fusion, on agit sur les prises du transformateur.

En agissant sur les paramètres de l'équation représentive de l'arc à savoir :

$$U - AI = 0$$

$$A = \text{constante}$$

On peut contrôler le mouvement des électrodes comme suit :

si $U - AI = 0$ électrode 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 $U - AI = 0$

il faut bien sûr trois circuits identiques pour faire la régulation d'un four triphasé. Cette régulation peut se faire manuellement ou automatiquement (dans ce cas on utilise en général des procédés électriques, parfois des dispositifs hydrauliques).

CHAPITRE III

PRESENTATION DE L'ACIERIE DE JIJEL

III-1-Introduction

L'acierie de Jijel est destinée à alimenter quatre laminaires à produits longs dispersés géographiquement, dont un ou deux seraient installés à proximité de l'acierie.

La production annuelle d'aciers atteindra environ deux millions de tonnes quand tous les fours seront installés. Plus précisément, elle sera de 2105 Ktonnes, en 1988 dans le cas d'une réalisation en une seule phase, ou en 1991 dans le cas d'une réalisation en deux phases.

III-2-Nombre de fours et leurs caractéristiques

L'installation des fours se fera en une seule phase ou bien en deux phases. Leur nombre, ventilé dans le temps, est illustré par les tableaux suivants; qui donnent la production d'acier par année, la puissance maximale des fours ainsi que celle des auxiliaires et enfin la consommation totale.

- cas de Réalisation en une phase.

Année	83	84	85	86	87	88
Production (Kt/anz)	485	1060	1345	1790	1995	2105
nombre de fours	2	3	4	5	6	6
P _{max} fours (MVA)	121	178	230	275	320	320
P _{max} auxiliaire (MVA)	15	33	42	55	62	65
consommation totale (GWh)	340	742	942	1253	1357	1474

- cas de la réalisation en deux phases:

Année	83	84	85	86	87	88	89	90	91
Production (kt/an)	485	1060	1195	1335	1425	1595	1880	1995	2105
nombre de fours	2	3	4	4	4	5	6	6	6
P _{max} fours (MVA)	121	178	230	230	230	275	320	320	320
P _{max} auxiliaire (MVA)	15	33	37	41	44	49	58	62	65
consommation totale (GWh)	340	742	837	935	998	1117	1316	1397	1474

Les fours au nombre de 6, de type U.H.P (ultra haute puissance), ont une capacité unitaire de 150 tonnes et une puissance unitaire de 80 MVA.

La charge de ces fours est constitué par 80% de boulettes préréduites et de 20% de ferrailles, cependant ils fonctionneront occasionnellement avec 100% de mitrilles.

Le courant maximum d'électrode de four est de l'ordre de 80 KA (électrode de diamètre 600 mm). La consommation spécifique d'énergie pour un four d'environ 140 tonnes se situe dans la plage (510 ÷ 540) KWH/Tonne. Dans notre cas (four 150 tonnes), on a opté pour la valeur : $Q = 530$ KWH/Tonne par four.

La quantité de ferrailles et boulettes enfournées par coulée pour attendre la production prévue sera: T

$T_1 = 150 \cdot 0,95 = 142,5$ Tonnes de boulettes correspondant à 80% du chargement.

$T_2 = 150 \cdot 0,235 = 35,25$ Tonnes de ferrailles correspondant à 20% du chargement.

La quantité totale enfournée est

$$T = T_1 + T_2 = 142,5 + 35,25 = 177,75 \text{ Tonnes.}$$

le Facteur de correction : F

Il dépend du degré d'utilisation de la pleine puissance pendant la période de fusion. Il tient compte du fait que la mise en train se fait avec une puissance réduite, des diminutions de la puissance et des interruptions de service dues aux courts-circuits qui se produisent entre 2 ou 3 électrodes.

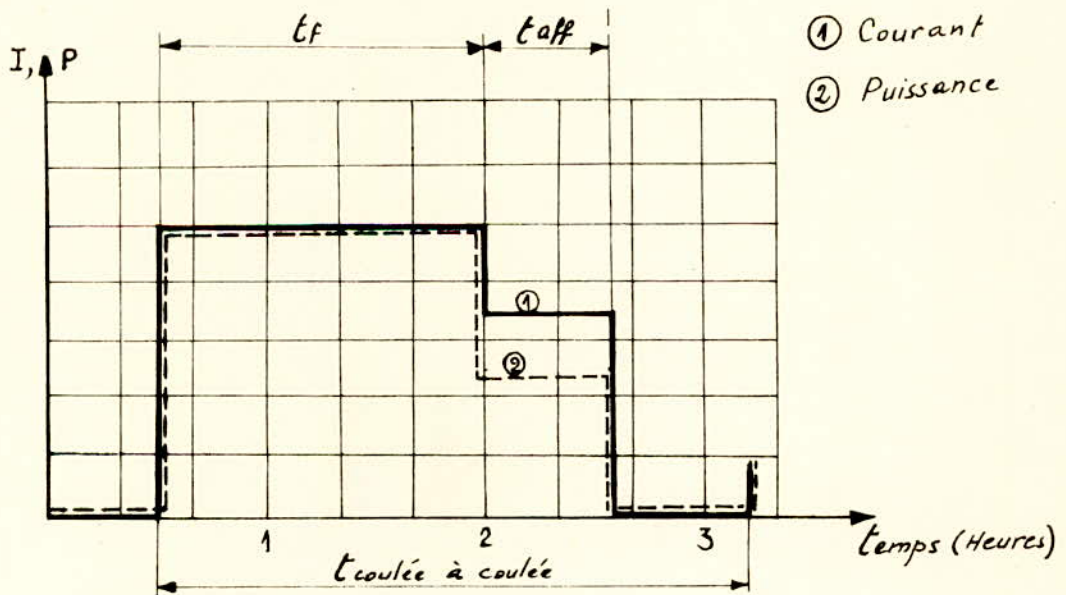
Selon les propriétés du chargement, ce facteur est compris dans l'intervalle (0,92 ÷ 0,94). Dans notre étude, on prend le cas le plus défavorable c'est-à-dire :

$$F = 0,92.$$

Facteur de puissance : $\cos\varphi$

Les fours U.H.P. travaillent sous un $\cos\varphi$ égal à 0,707 en cours de fusion (correspondant à une utilisation optimale de la puissance), et, un $\cos\varphi$ égal à 0,6 en période d'affinage.

diagramme donnant les durées de fusion, d'affinage et de coulée des fours à arc (pour aciers ordinaires).



le temps de fusion : $t_f = 90$ minutes

le temps d'affinage : $t_a = 30$ minutes

le temps de coulée à coulée : t_c

$$t_c = 2^h 30\text{ mn}$$

III-3- Alimentation électrique des fours

Les fours de l'acierie de Jijel sont alimentés directement depuis le 220 kV du poste de distribution SNS qui sera mis en service vers 1983.

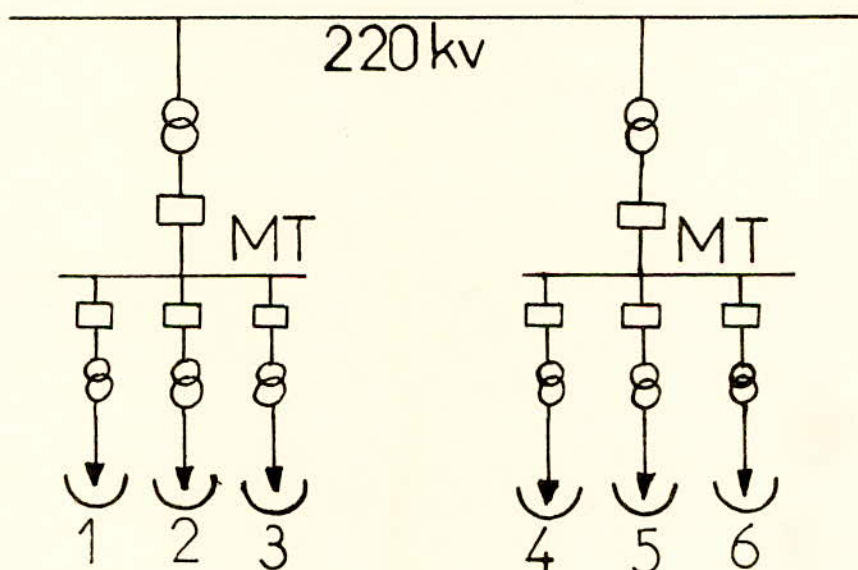
Un niveau MT éventuellement différent de 30 kV (63 kV par exemple) est envisagé pour l'alimentation des fours électriques (tension primaire des transformateurs de four).

L'installation des transformateurs entre 220 kV et MT est envisagée en tenant compte de trois hypothèses.

1^{ère} hypothèse :

- deux jeux de barres MT
- trois fours par jeu de barres.
- deux transformateurs alimentant chacun un jeu de barres.

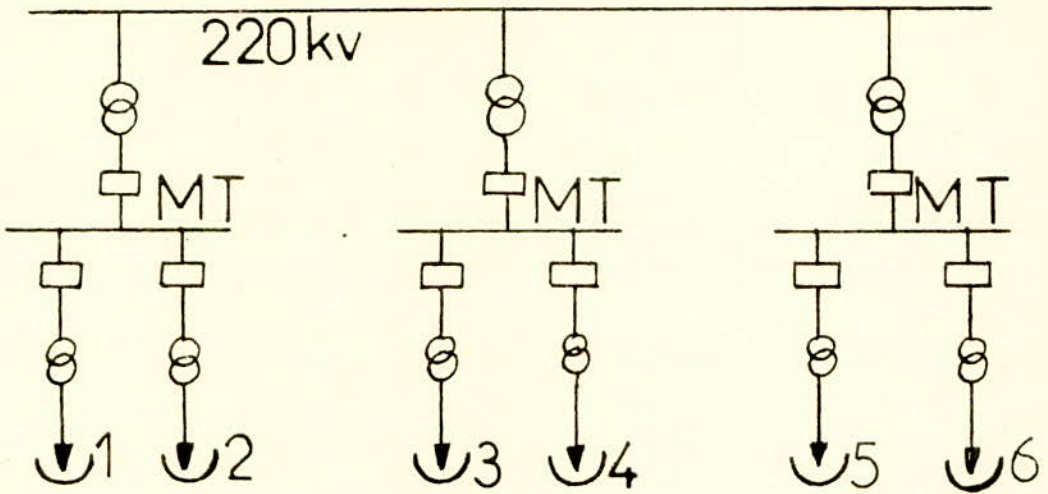
schéma unifilaire de principe



2^{ème} hypothèse :

- trois jeux de barres MT
- deux fours par jeu de barres
- trois transformateurs alimentant chacun un jeu de barre.

schéma unifilaire de principe :

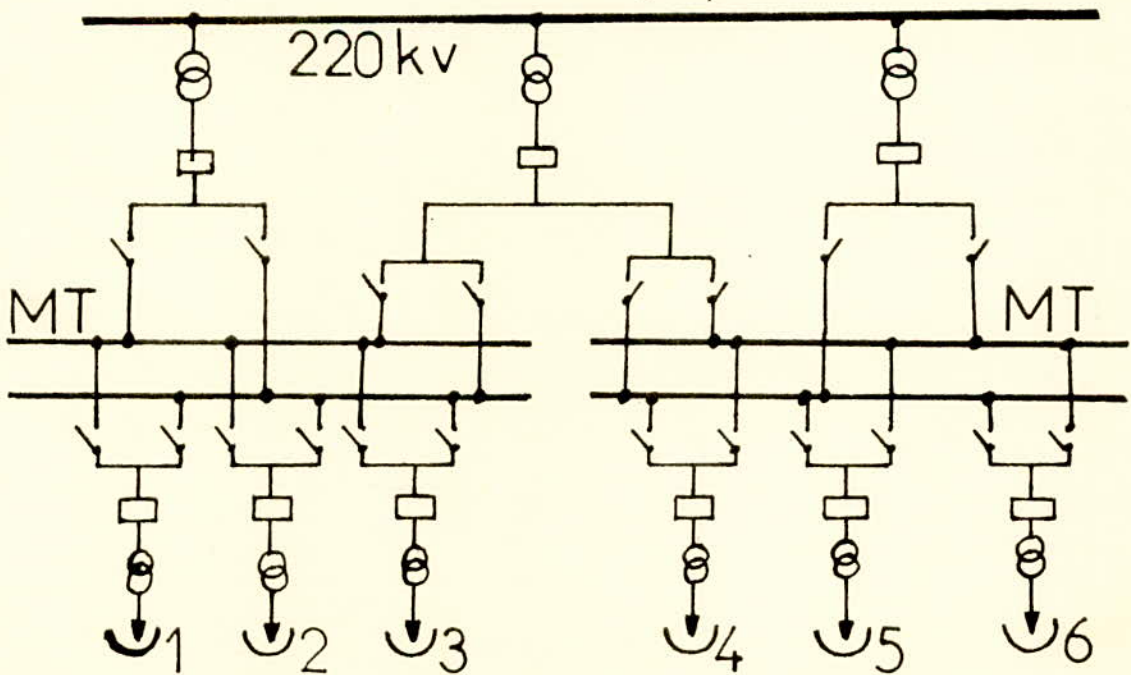


3^{eme} hypothèse :

- deux doubles jeux de barres MT, couplage possible entre eux.
- trois fours par doubles jeux de barres en fonctionnement normal.
- trois transformateurs, dont un de réserve pour avoir être connecté sur l'un ou l'autre jeu de barre.

Pour ce type de montage, il y a possibilité de verrouillage empêchant la mise en parallèle des transformateurs

schéma unifilaire de principe :



Commentaire :

Le premier montage se caractérise par une simplicité d'exploitation et un investissement limité. Mais un manque de réserve de puissance risque de se faire sentir, en effet, en cas de défaut au niveau d'un jeu de barres il y a perte de la moitié de l'aciérie.

Les mêmes avantages peuvent être cités pour le deuxième schéma sauf qu'ici, l'investissement est beaucoup plus élevé que celui du premier cas. Un défaut au niveau du jeu de barres entraîne la perte du tiers seulement de l'aciérie.

La troisième hypothèse qui apparaît attractive du point de vue réserve de puissance (50% de réserve en puissance et équipements) n'est pas intéressante du fait qu'elle entraîne un investissement trop élevé et un mode d'exploitation complexe.

III 4 - Impositions liées au réseau

Pour éviter que les variations de tension ne soient pas trop importantes et intolérables pour le réseau d'alimentation ; on décidera, par la suite, de l'éventualité de l'installation ou non d'un équipement de compensation en vue de limiter les perturbations aux valeurs prescrites suivantes :

- une dose de flicker en concordance avec le critère E.D.F ou similaire de $(0,3\%)^2$ mn.
- une composante inverse de courant inférieure à 3%, pour ne pas surchauffer les alternateurs d'alimentation.
- un taux d'harmoniques de tension inférieur à 2%
- le facteur de puissance pour l'aciérie de jijel est fixé, en commun accord entre SNS et Sonelgaz à 0,85.

CHAPITRE IV

PUISSANCE DE COURT-CIRCUIT

IV-1- Notion de P_{cc}

La puissance de court-circuit est une grandeur fictive. Elle est définie par la relation :

$$P_{cc} = U_N \cdot I_{cc} \cdot \sqrt{3}$$

où U_N - représente la valeur nominale de la tension du réseau considéré.

Dans cette relation, seul le courant de court-circuit I_{cc} a une signification physique. En effet, c'est le courant maximal qui peut être coupé par un disjoncteur lors d'un défaut triphasé franc.

cette grandeur quoique fictive est d'une grande importance pour l'exploitant d'un réseau. En effet, elle permet de caractériser le comportement d'un réseau face à toute perturbation rapide causée par un récepteur plus ou moins puissant (comme c'est le cas des fours à arc).

La chute de tension en pour cent de la tension du réseau engendrée par le raccordement, en un nœud du réseau de puissance de court-circuit P_{cc} , d'un consommateur appelant une puissance S_f est proportionnelle au rapport : $\frac{S_f}{P_{cc}}$

IV-2- Origine de la P_{cc}

Lors d'un court-circuit et d'une manière générale lors de toute perturbation rapide dans un réseau. Les alternateurs, les lignes, les transformateurs ainsi que les charges passives subissent un changement brusque de régime. Malgré que ce régime ne dépasse pas quelques secondes. Il importe d'étudier le comportement des équipements durant ce régime transitoire, en particulier le courant de court-circuit.

Le calcul des courants de court-circuit donc de la puissance de court-circuit d'un réseau de transport est généralement fait en négligeant les charges et en utilisant les réactances transitoires des alternateurs et des lignes dans plusieurs hypothèses de production et de consommation.

IV-3-Influence de la Pcc sur les perturbations

D'une façon générale raccorder un récepteur à un niveau de tension élevé (donc une puissance de court-circuit élevée) contribue à la réduction de la chute de tension, mais n'élimine pas complètement toutes les perturbations.

Ces perturbations étant dues, pour une grande partie, au mode de fonctionnement spécial de certains types de récepteurs. Il y a lieu de distinguer deux cas :

— les appareils appelant un courant fluctuant fortement de manière plus ou moins périodique, de plus, ces appels de courant sont susceptibles de ne pas être identiques dans les trois phases du réseau. Il en résulte des variations de tension plus ou moins répétitives et parfois des déséquilibres entre les 3 tensions.

Dans ce cas, il est certain que si l'on raccorde l'appareil perturbateur en un point de Pcc suffisamment élevée, les variations et les déséquilibres de tension seront assez faibles et n'entraîneront aucun inconvénient pour les autres usagers.

— les appareils appelant un courant déformé qui comporte donc des composantes harmoniques d'amplitude non négligeables. Les courants engendrent à leur tour des chutes de tension harmoniques qui déforment la tension alimentant les autres récepteurs.

Ceci peut entraîner, en présence de condensateurs, des phénomènes de résonances tel qu'à une augmentation de la puissance de court-circuit corresponde une augmentation d'amplitude de certains harmoniques qui deviennent gênants.

IV-4-Limite inférieure de la Pcc

Comme on l'a vu précédemment, le four provoque des variations de tension proportionnelles au rapport de sa puissance à la puissance de court-circuit du réseau qui l'alimente. En effet la variation de tension en pourcent s'exprime par : $\Delta U = \frac{Q}{P_{cc}}$.

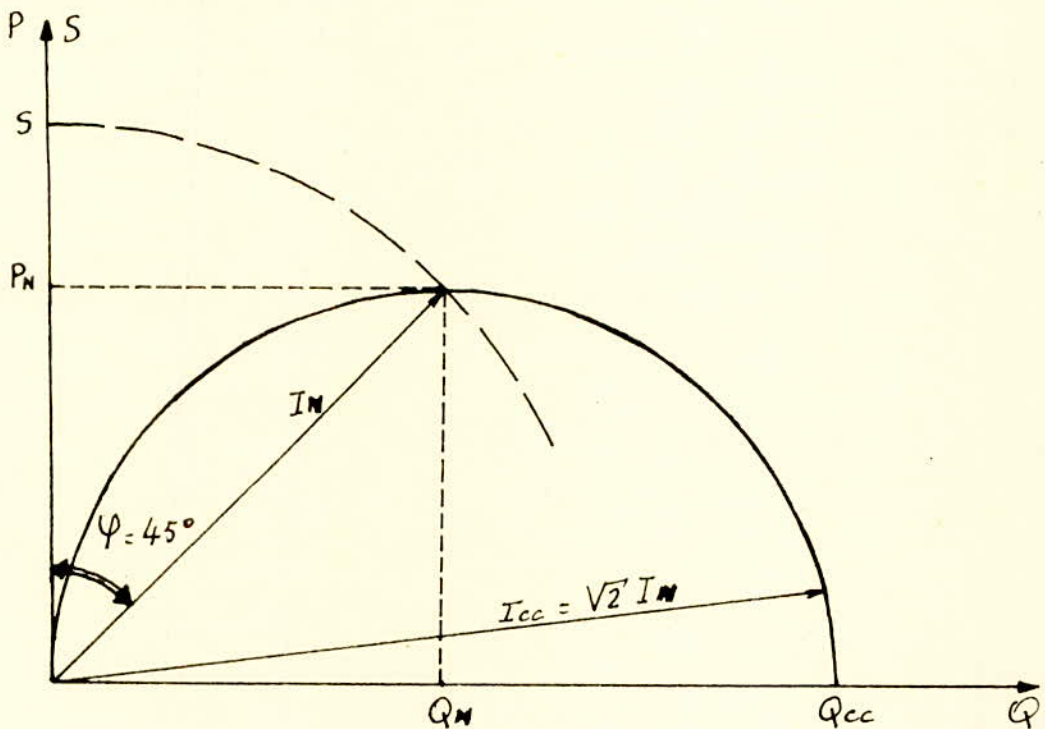
or on sait que les fours U.H.P, en régime de pleine charge sous $\cos \varphi = 0,707$ appellent une puissance active maximale égale à la puissance réactive Q tel que :

$$P_{\max} = Q = \frac{S_f}{\sqrt{2}}$$

par conséquent : $\Delta U\% = \frac{S_f}{\sqrt{2} P_c}$

en régime de court-circuit, le courant atteint $\sqrt{2} I_N$ (I_N courant de fonctionnement du four), la puissance active absorbée devient négligeable et la puissance réactive devient sensiblement le double : $Q_{cc} = 2 \cdot \frac{S_f}{\sqrt{2}}$.

Donc la puissance réactive oscille entre la valeur nulle, four à l'arrêt et $\frac{2S_f}{\sqrt{2}}$ en régime de court-circuit, en passant par la valeur $\frac{S_f}{\sqrt{2}}$, en régime de pleine charge, (voir diagramme suivant).



Comme ce sont sensiblement les fluctuations de puissance réactive qui provoquent la plus grande part des variations de tension. On en déduit que la variation totale de la tension entre four à l'arrêt et four en court-circuit est égale à : $\frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{S_f}{P_c}$ et son amplitude moyenne vaut :

$$\Delta U\% = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{S_f}{P_c}$$

$\Delta U\%$ représente le taux de flicker statique. En pratique les variations de puissance réactive sont plus faibles et on admet généralement que le flicker dont on doit tenir compte est la superposition de deux flickers de fréquences différentes:

- 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 vaut 15% de $\Delta U\%$

Il est reconnu 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%.

Il ressort de cette étude que la limite inférieure de la puissance de court-circuit du réseau d'alimentation est P_{ccmin} telle que:

$$P_{ccmin} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{S_f}{\Delta U\%} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{S_f}{1,4\%} = 50 S_f$$

cette valeur ne constitue qu'une indication générale, en effet la théorie adoptée ne tient pas compte de beaucoup de facteurs entre autres on cite la configuration du réseau. Mais malgré cela, elle donne une idée sur l'importance des variations de tension qui en résulteraient, si jamais un four de puissance apparente S_f est raccordé à un réseau de puissance de court-circuit: $P_{cc} < 50 S_f$

En appliquant cette théorie à l'acierie de Jijel et en tenant compte de la combinaison des périodes respectives de fusion et d'affinage des 6 fours qui permet de limiter l'analyse du problème, à la prise en considération d'un four équivalent aux 6 fours, dont la puissance est égale à:

$$S_{fe} = \sqrt{2} \cdot \sqrt[4]{12} \cdot S_f \quad n = \text{nombre de fours}$$

$$S_{fe} = \sqrt{2} \cdot \sqrt[4]{6} \cdot 80$$

$$S_{fe} = 177 \text{ [MVA]}$$

on trouve comme limite inférieure de la puissance de court-circuit la valeur suivante:

$$P_{ccmin} = 50 \cdot S_{fe} = 50 \cdot 177 = 8850 \text{ [MVA]}$$

Puissance de court-circuit à JIJEL (1983-1987)

Les puissances de court-circuit qui seront disponibles à JIJEL de 1983 à 1987 sont consignées dans le tableau ci-dessous. Ces valeurs ont été déterminées par ordinateur, en tenant compte des méthodes d'entretien, des indisponibilités courantes des groupes de production, ainsi que de l'évolution du réseau national.

On note que pour les années 1984 et 1986, le réseau est supposé ne pas évoluer. Il garde respectivement la structure des années 83 et 85.

Année	1983	1984	1985	1986	1987
P_{cc} [MVA]	2350	2350	2845	2845	3550

En conclusion, il ressort de ce qui a été dit précédemment que l'installation d'équipement de compensation s'impose, puisque au stade final, c'est-à-dire quand les 6 fours seront en place. On ne disposera que d'une valeur de P_{cc} de 3550 [MVA], alors qu'il faut au minimum 8850 [MVA] pour pouvoir raccorder les fours au réseau sans risque de gêne.

CHAPITRE V

COMPENSATION

- Introduction

L'exploitation d'un four à arc alimenté par un réseau relativement faible, provoque, par son mode spécial de fonctionnement, des perturbations gênantes au point de couplage commun avec les autres abonnés.

Ces perturbations ainsi que celles dues aux charges asymétriques et aux harmoniques peuvent être atténuées par l'installation de systèmes de compensation de la puissance réactive.

V-1- Rôle de la compensation

Le rôle de l'installation de compensation consiste à diminuer les effets du four à arc sur le réseau d'alimentation, et ceci en réalisant :

- une amélioration du facteur de puissance.
- une réduction des fluctuations de tension et par conséquent le flicker.
- une diminution des harmoniques
- un équilibrage des charges asymétriques.

V.1.1. Amélioration du facteur de puissance.

On sait tout l'intérêt que présente un facteur de puissance voisin de "un", aussi bien pour le producteur, lors du transport et de la production, que pour l'utilisateur.

En effet si ce facteur est faible, le réseau doit fournir une puissance réactive supplémentaire qui exige, pour la même puissance active utile, un réseau de transport plus important, ou pour un système donné une réduction de sa capacité de transport. D'autre part, les pertes seront plus

élevées et la tension sera altérée chez l'utilisateur.

L'utilisateur d'énergie a donc intérêt à produire sur place l'énergie réactive nécessaire à son installation.

V-1-2 - Réduction des fluctuations de tension.

Pendant la phase de fusion, le courant d'arc change brusquement selon un régime aperiodique et aléatoire. Ces fluctuations sont généralement asymétriques et provoquent des variations rapides de puissance réactive au point de couplage commun.

Les variations de puissance réactive et en partie de puissance active altèrent de manière gênante la tension du réseau. Les exigences posées au système de compensation sont très sévères et ~~un~~ seul un système de mesure et d'intervention rapide permet de réduire le flicker.

V-1-3 - Diminution des harmoniques.

Ces harmoniques de courant, provoqués par la caractéristique non linéaire de la charge, causent sur l'impédance du réseau des chutes de tension. La distorsion de tension perturbe certains appareils sensibles. Il est donc indispensable d'absorber les principaux harmoniques par des filtres.

V-1-4 - Equilibrage des charges asymétriques.

Le fonctionnement des fours à arc est caractérisé par un régime fortement asymétrique. Le cas extrême de désamorçage d'un arc et du court-circuit des deux autres produit une composante inverse de (50 - 70)% rapportée au système direct. La phase de fusion atteste un système inverse de 20% en moyenne.

Un équilibrage est rendu nécessaire, car une asymétrie prononcée de la charge active provoque des variations de tension de l'importance de celles produites par la partie réactive.

Le système inverse provoque également des pertes dans le réseau de transport et un champ tournant inverse qui est la cause de pertes supplémentaires dans les machines.

V-2-Moyens de compensation

On a vu au paragraphe II.5.1 que la chute de tension répondait à la formule :

$$\frac{\Delta U}{U} = x_n \cdot \frac{Q}{U^2}$$

$$\text{or } x_n = \frac{U^2}{P_{cc}} \text{ d'où } \frac{\Delta U}{U} = \frac{Q}{P_{cc}}$$

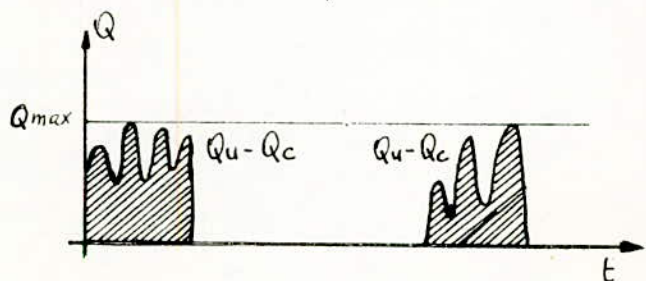
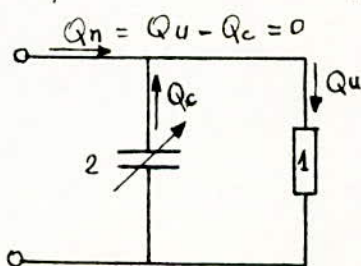
on remarque que cette chute de tension est proportionnelle à la puissance réactive et inversement proportionnelle à la puissance de court circuit au point de couplage commun.

Les moyens de compensation ont donc pour principe d'agir sur les paramètres de cette expression.

- augmenter la P_{cc} , ce qui signifie un renforcement du réseau d'alimentation (nouvelles génératrices, nouvelles lignes de tension, tension plus élevée). Cette solution est onéreuse surtout dans le cas du réseau national.
- Réduire les variations de la puissance réactive, en créant en parallèle avec la charge perturbatrice des fluctuations de puissance réactive qui s'oppose à celles de la charge, ce qui peut se faire par :

une compensation directe :

L'accroissement de la puissance réactive par la charge est directement compensé par une production correspondante (compensateur synchrone, condensateurs commandés par thyristors). cette solution permet de compenser totalement ou partiellement le facteur de puissance.

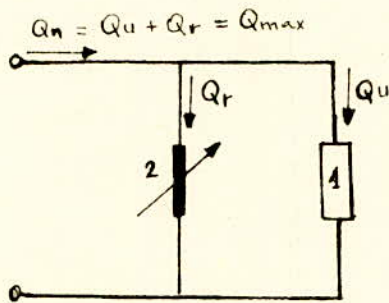


- 1 - charge
- 2 - condensateur variable
- Q_a - puissance réactive absorbée
- Q_u - puissance réactive de la charge
- Q_c - puissance réactive produite par le condensateur
- Q_{max} - consommation maximale de puissance réactive

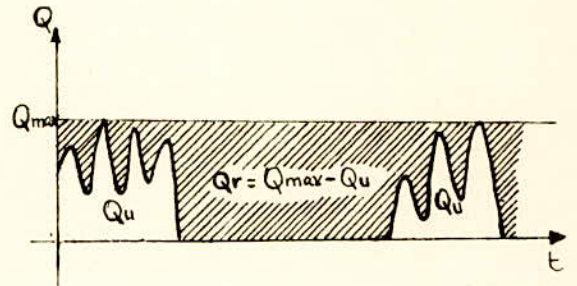
une compensation indirecte :

Une réduction de la consommation de la puissance réactive par la charge est compensée par une consommation correspondante de la puissance réactive par le système de compensation.

Cette méthode compense totalement la puissance réactive, mais aux dépens d'un facteur de puissance faible. C'est pourquoi on doit lui adjoindre une batterie fixe de condensateurs.



- 1 - charge
- 2 - Réactance variable



Q_r - consommation d'énergie réactive par la réactance.

Comme système de compensation indirecte, on parlera des réactances couplées et commandées par thyristors, ainsi que des réactances saturées. Pour ce qui est des systèmes de compensation directe, on étudiera plus en détails le système le plus en vue actuellement, en l'occurrence le système utilisant les condensateurs couplés par thyristors.

V-3-Types d'équipements de compensation

V-3-1-Condensateurs couples par thyristors

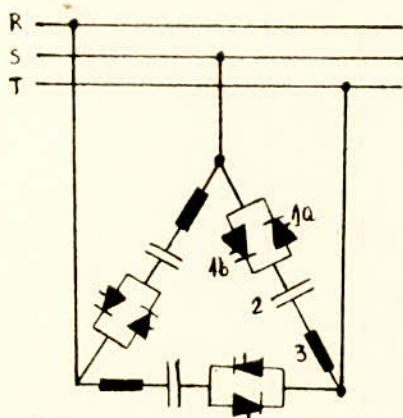
V-3-1-1. Structure

Ce type de compensateur est constitué essentiellement des éléments suivants :

- un groupe de condensateurs.
- un ensemble de thyristors de puissance montés tête-bêche, en série avec les condensateurs.
- une réactance montée en série avec chaque groupe de condensateurs, destinée à limiter tout courant d'allumage défectueux aux bornes des thyristors. Elle permet aussi d'éviter la résonance et l'amplification des harmoniques du four.
- une résistance de décharge connectée en parallèle aux bornes de chaque groupe de condensateurs. Elle permet une décharge du groupe de condensateur jusqu'à une valeur de tension inférieure à 50[V] en général, dans la minute qui suit le déclenchement de l'installation.

V-3-1-2. Technique de couplage.

Pour compenser le facteur de puissance des réseaux triphasés, on dispose généralement les condensateurs couplés par thyristors en gradins triphasés couplés en triangle (figure 3.1).



- 1 - thyristors
- 2 - condensateur
- 3 - réactance

Fig 3-I

Lorsque les condensateurs ne sont pas branchés sur le réseau, ils restent chargés à l'amplitude positive ou négative de la tension du réseau. On fixe l'instant de mise en circuit, comme le montre la figure 3.II, au moment où la tension du réseau aux bornes des branches respectives correspond à l'amplitude et à la polarité de la tension des condensateurs, donc au passage naturel par zéro du courant du condensateur.

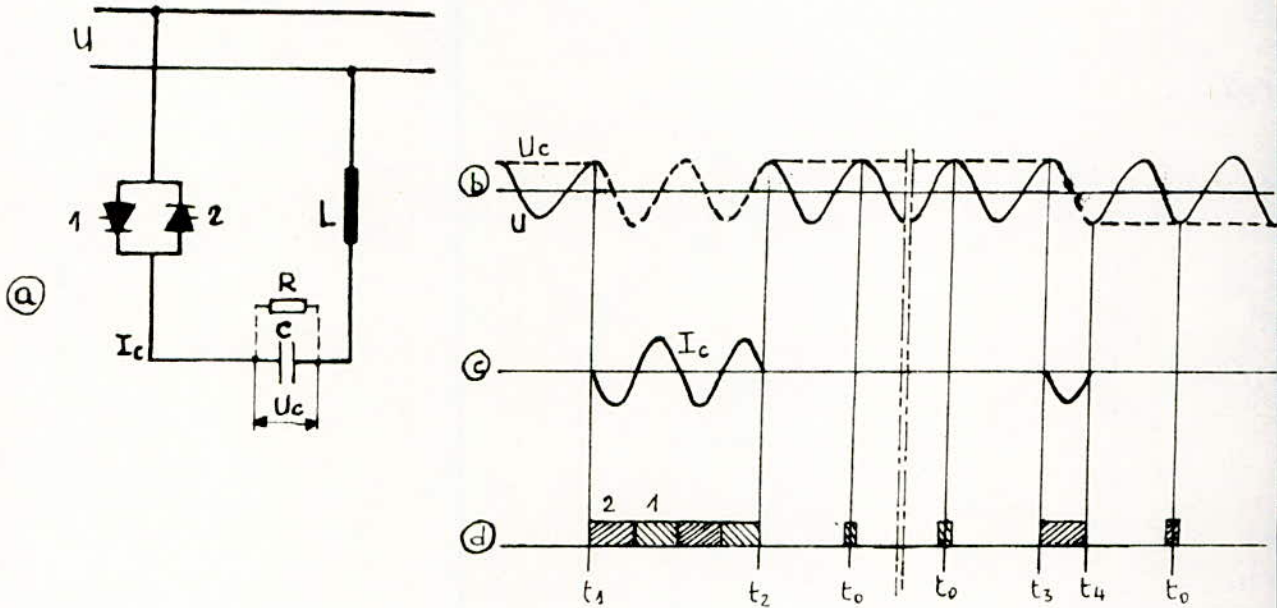


Fig 3.II

(a) condensateur couplé par thyristors .

(b) tension du réseau et du condensateur .

(c) courant du condensateur .

(d) intervalles de déclenchement et de conduction des thyristors 1 et 2 .

C - condensateur

L - Réactance

R - Résistance de décharge .

U - tension entre phase .

U_c - tension aux bornes de C .

I_c - courant de C .

t_0 - impulsion d'entretien de C .

t_1 - branchement d'un condensateur au réseau .

t_2 - coupure du réseau .

t_3-t_4 intervalle de changement de polarisation .

La coupure à l'aide des thyristors se en fait toujours lieu au courant zéro naturel et c'est la raison pour laquelle aucun effet transitoire n'apparaît .

La méthode d'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 obtenue pour chaque crête de tension positive et négative. Si la puissance de la batterie de condensateurs doit être accrue, 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 un demi-cycle plus tard.

Pour obtenir le temps de réaction le plus court possible, quelques-unes des unités d'attente sont maintenues préchargées à la polarité positive et quelques autres, à la polarité négative.

La mise hors circuit du condensateur s'effectue par suppression des impulsions d'allumage des thyristors de sorte que le thyristor qui conduit se bloque dès que le courant est nul. Le condensateur reste alors chargé à l'amplitude de la tension et est prêt pour une nouvelle mise en circuit sans phénomène transitoire.

Comme les condensateurs sont munis de résistances de décharge, le condensateur en position d'attente perdrait lentement sa tension. Pour maintenir la tension du condensateur, on donne une courte impulsion d'allumage au thyristor qui était conducteur en dernier lieu, lorsque la tension du réseau est égal à celle du condensateur.

V. 3.1-3- Changement de polarisation.

Les condensateurs utilisés sont du type à courant alternatif, du fait de leurs avantages techniques et économiques. Or les condensateurs couplés par thyristors sont soumis à une tension continue en position d'attente. En changeant la polarisation du condensateur à intervalles réguliers de façon qu'il reste chargé alternativement à une tension positive et à une tension négative, la tension aux bornes du condensateur devient en fait une tension alternative à faible fréquence.

Le changement de polarisation s'effectue en mettant en circuit le condensateur pendant une demi-période du courant alternatif de sorte

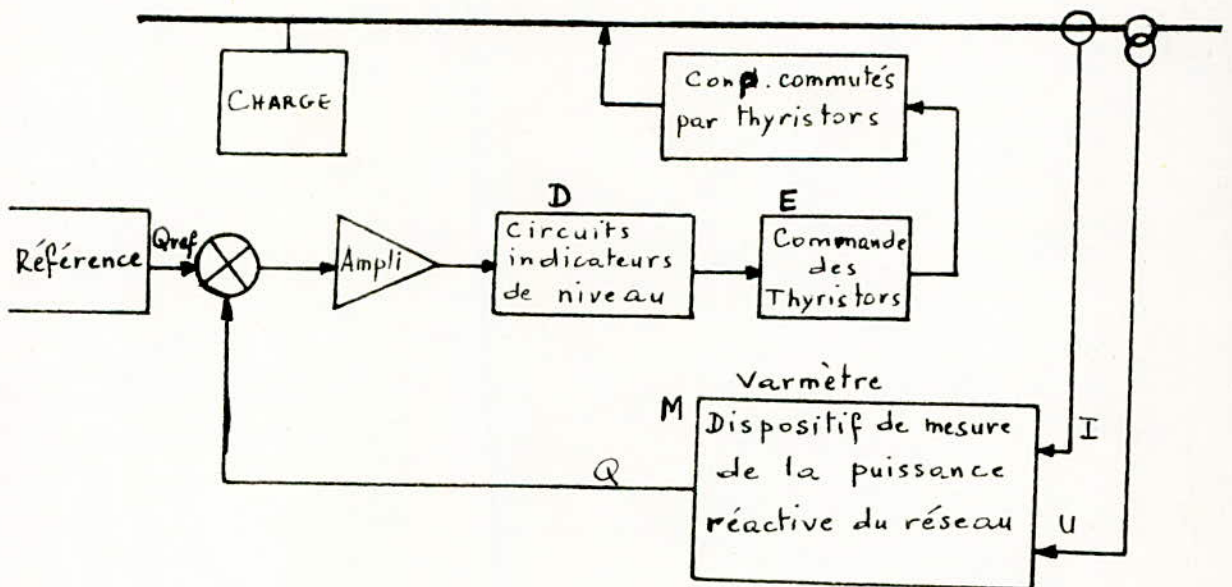
que la tension du condensateur change de polarité (figure 3.II).
Cette opération s'effectue avec un gradin de condensateur à la fois.

V-3.1-4- Principe de Compensation

On dispose d'une batterie de condensateurs subdivisée en unités de faible puissance. La compensation consiste en l'ajustement de puissance réactive par la mise sous tension ou hors tension d'un nombre variable de bancs de condensateurs.

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.

Dans le cas de fours à arc, la consommation d'énergie Réactive varie rapidement, par conséquent les dispositifs de mesure et de commande doivent être choisis de telle sorte à ce que le couplage et le découplage des condensateurs puissent se faire avec le minimum de temporisation. La figure suivante donne le schéma de principe de la régulation nécessaire pour une bonne compensation de la puissance réactive.



Le dispositif de mesure M indique à chaque instant la puissance Réactive absorbée au réseau. Le signal de sortie de M est transmis au comparateur d'énergie Réactive. La différence est amplifiée et transmise

à un circuit indicateur de niveau **D** qui détermine le nombre d'unités de condensateurs à mettre en circuit.

Les signaux de **D** sont alors envoyés à un bloc de commande des impulsions d'allumage des thyristors **E** qui à son tour met rapidement en ou hors circuit les condensateurs.

V.3.1-5. Mesure et indication de la puissance réactive.

Les fours à arc constituent pour le réseau une charge dissymétrique. Le couplage par thyristors permet la mise en circuit ou hors circuit phase par phase des condensateurs de façon à compenser et à rendre symétrique le réseau triphasé.

Les puissances de compensation nécessaires pour les différentes phases sont :

$$Q_{RS} = Q_R + Q_S - Q_T$$

$$Q_{ST} = Q_S + Q_T - Q_R$$

$$Q_{TR} = Q_T + Q_R - Q_S$$

où Q_R , Q_S et Q_T : sont les puissances réactives dans les phases respectives.

Q_{RS} , Q_{ST} et Q_{TR} : sont les puissances réactives de compensation nécessaires entre phases respectives.

Etant donné que la charge est dissymétrique, le système de mesure comprend trois dispositifs identiques pour déterminer la charge de chacune des trois phases Q_{RS} , Q_{ST} et Q_{TR} .

Par l'intermédiaire de circuits indicateurs de niveau et de bloc de commande, le signal Q_{RS} provoque la mise en circuit ou hors circuit des condensateurs entre les phases R et S. La même chose se passe pour Q_{ST} et Q_{TR} .

La détermination de Q_{RS} , Q_{ST} et Q_{TR} se fait par des générateurs Hall montés comme des varimètres monophasés.

La figure 3.III montre le schéma fonctionnel des gradins de

condensateurs monophasés couplés par thyristors avec dispositif de mesure et d'indication de charge dissymétrique.

Legende du schéma.

- ① - Transformateur de réseau.
 - ② - charge.
 - ③ - Générateurs Hall
 - ④ - Amplificateur.
 - ⑤ - circuits détecteurs de niveau.
 - ⑥ - Blocs de commande.
 - ⑦ - Thyristors.
 - ⑧ - condensateur
 - ⑨ - Réactance
- Q - puissance Réactive

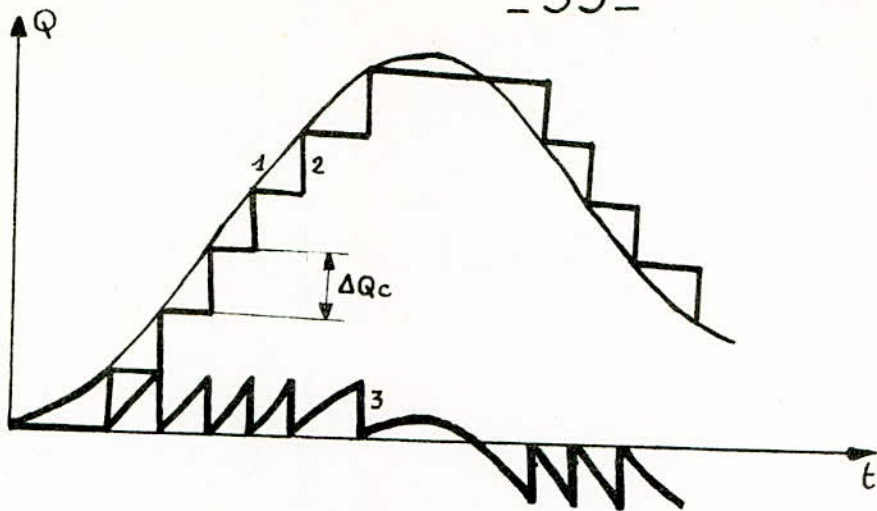
V. 3. 1-6. Calcul des gradins de condensateurs.

La production d'énergie réactive est réglée de façon à équilibrer la consommation, de sorte que la tension de réseau d'alimentation reste sensiblement constante.

Comme il n'est pas possible de faire varier d'une façon continue la puissance réactive d'un équipement de compensation de facteur de puissance avec condensateurs couplés par thyristors, mais bien par gradins, la différence réactive produite et celle consommée constitue une charge pour le réseau d'alimentation.

La figure suivante montre comment se fait la commutation des gradins de condensateurs couplés par thyristors, ainsi que l'énergie réactive prélevée au réseau.

- ① - consommation d'énergie réactive par la charge.
 - ② - production d'énergie réactive par les condensateurs.
 - ③ - puissance réactive résultante du réseau.
- ΔQ_c - grandeur du gradin de condensateur.



Pour éviter toutes perturbations, il faut que la variation relative de tension du réseau soit $\leq 0,3\%$ au point de branchement de la consommation civile.

Si l'on connaît la variation relative maximale permise de tension $\frac{\Delta U}{U}$, on peut déterminer approximativement la puissance réactive de chaque gradin de condensateur triphasé suivant l'équation :

$$\Delta Q_c \approx S_{sc} \cdot \frac{\Delta U}{U}$$

ou S_{sc} est la puissance de court-circuit au point critique (qui n'est pas nécessairement le point de branchement du gradin de condensateur). Dans les réseaux normaux, cette exigence ne constitue nullement une difficulté directe d'obtenir un dimensionnement économique avantageux.

Le condensateur est souvent conçu de manière que pendant la fusion, il reste une certaine quantité de puissance réactive non compensée, qui est empruntée au réseau et qui est d'une grandeur telle qu'elle puisse être permise sans coût supplémentaire.

Sachant la grandeur des gradins de condensateurs, on calcule le nombre de gradins pour obtenir la puissance réactive totale nécessaire à la compensation.

$$Q = n \cdot \Delta Q_c$$

n - nombre de gradins.

Q - puissance réactive totale.

En général, une installation de compensation du $\cos \varphi$ pour

four à arc, comporte une batterie fixe de condensateurs produisant la puissance réactive minimale nécessaire et un banc de condensateurs divisé en gradins compensant les variations de puissance réactive.

V.3.1.7. Emplacement des condensateurs.

La connexion des condensateurs au secondaire du transformateur d'alimentation du four pose un problème, car la tension, donc la puissance réactive fournie par les condensateurs varient dans de trop larges limites en fonction de la position du changeur de prise en charge du transformateur.

D'autre part il faudrait monter les condensateurs à proximité du four où la place disponible est réduite, ce qui exigerait de prévoir un équipement par four.

La meilleure disposition consiste à connecter les condensateurs au primaire du transformateur d'alimentation des fours. Cet emplacement est particulièrement avantageux lorsque plusieurs fours sont raccorlés à un même jeu de barres.

V.3.2. Réactance couplée par thyristors

V.3.2.1. Structure.

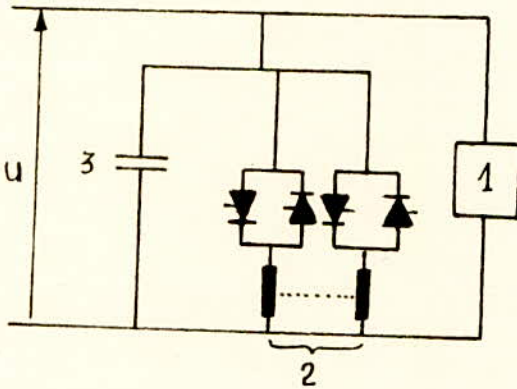
Le système de compensation d'énergie réactive est composé principalement des éléments suivants :

- un banc de réactances triphasés.
- un ensemble de thyristors de puissance montés en série avec les réactances de la même manière que pour les condensateurs, et permettent de régler la puissance réactive absorbée. Cet ensemble de thyristors étant monté en anti-parallèle, le courant circule tantôt dans un thyristor tantôt dans l'autre, suivant que l'alternance est positive ou négative.
- en cas de besoin, un banc triphasé de condensateurs.

V. 3.2.2 - Principe de fonctionnement.

Le principe fondamental de cette méthode consiste à maintenir une consommation constante de la puissance réactive absorbée au réseau. La puissance réactive du four est mesurée et la puissance de la réactance contrôlée à l'aide de thyristors reliés en tête-bêche. De cette façon la somme des deux puissances reste constante. un condensateur fixe fournit la compensation nécessaire pour que la puissance réactive du réseau soit aussi petite que possible (amélioration du facteur de puissance du réseau).

La figure suivante donne le schéma de principe :



- 1 - charge .
- 2 - Réactances couplées par thyristors .
- 3 - batterie fixe de condensateurs .

La commutation a lieu sur l'extrémité positive ou négative de la caractéristique de tension, où apparaît le zéro de courant naturel, ce qui permet d'éviter les effets transitoires et comme les réactances sont mises en circuit par échelons aucune harmonique n'est produite.

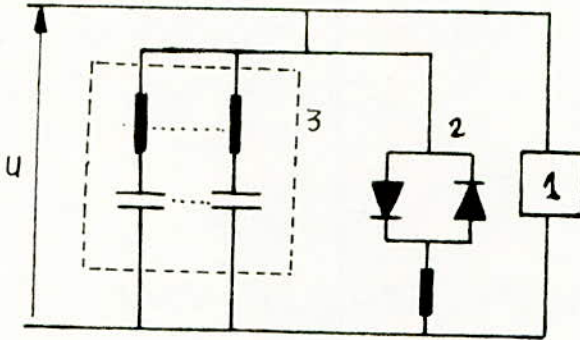
Les réactances d'attente ne doivent pas être préchargées, comme c'est le cas pour les condensateurs. cette méthode de compensation se caractérise donc par une durée de réponse d'une demi-période.

V. 3.3 - Réactance commandée par thyristors

Le principe reste le même que pour le cas précédent, sauf qu'ici on utilise une seule grande réactance par phase. Pour obtenir des temps de réaction courts, il est possible de réaliser la commutation à des temps autres que ceux qui ne font pas apparaître des courants transitoires et d'accepter l'apparition de ces derniers. Par

conséquent, on sera obligé de monter un condensateur shunt fixe qui devra servir de filtre d'harmoniques qui sont produits par la méthode.

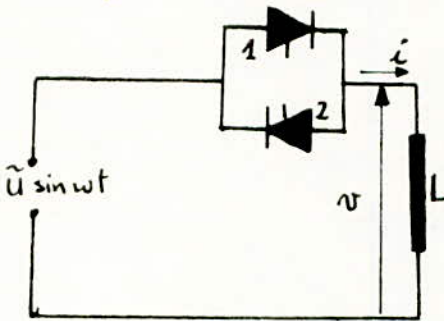
schéma de principe :



- 1 - charge
- 2 - Réactance commandée par thyristors.
- 3 - banc de condensateurs de filtrage.

L'ensemble des deux thyristors montés en opposition permet de contrôler l'amplitude du courant fondamental traversant la Réactance en agissant sur l'instant de leur déclenchement.

Supposons que l'angle d'allumage des thyristors soit α



à $\omega t = \alpha$ un courant commence à circuler par le thyristor 1 (voir figure ci-contre) d'après le circuit, on peut écrire l'équation différentielle:

$$u = L \frac{di}{dt} = U \sin \omega t$$

La solution générale de cette équation est:

$$di = \frac{U}{L} \sin \omega t dt \Rightarrow i = -\frac{U}{\omega L} \cos \omega t + A$$

le courant est nul pour $\omega t = \alpha$, ce qui détermine la constante A en effet: $i = 0 = -\frac{U}{\omega L} \cos \alpha + A \Rightarrow A = \frac{U}{\omega L} \cos \alpha$

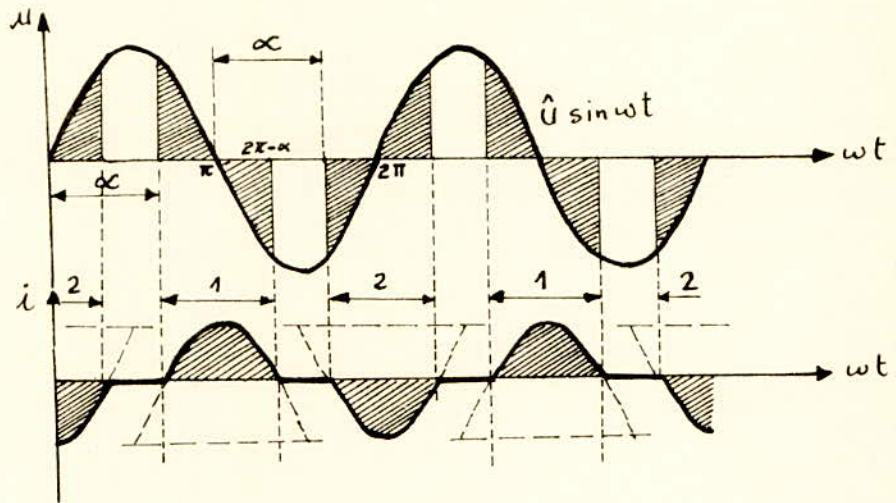
la solution générale s'écrit donc.

$$i = \frac{U}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

Le courant i suit la courbe représentative de cette équation, (la figure 3.IV donne les courbes u et i), jusqu'à ce qu'il devienne égal à zéro, ce qui arrive lorsque:

$$i = 0 = \frac{U}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \Rightarrow \cos \alpha = \cos \omega t$$

$$\Rightarrow \omega t = 2\pi - \alpha$$



Le courant doit décroître et atteindre la valeur zéro au plus tard lorsque $\omega t = \pi + \alpha$, car à ce moment le thyristor 2 se déclenche, ce qui conduit à la condition, sur l'angle d'amorçage, suivante:

$$2\pi - \alpha \leq \pi + \alpha \Rightarrow \alpha \geq \frac{\pi}{2}$$

comme on le voit sur la figure, le courant i n'est pas sinusoïdale. Une analyse d'harmorique donne une fondamentale de valeur efficace I_1 . ce qui donne la puissance réactive Q :

$$Q = UI_1 = 2 \frac{U^2}{\pi L \omega} \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)$$

Q atteint son maximum pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$, en effet:

$$\frac{dQ}{d\alpha} = 0 \Rightarrow \cos 2\alpha = -1 \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow Q_{\max} = \frac{U^2}{L\omega}$$

elle est nulle pour $\alpha = \pi$.

donc la puissance réactive décroît de façon continue de sa valeur maximale $\frac{U^2}{L\omega}$ à zéro lorsque α croît de $\frac{\pi}{2}$ à π .

chaque fois qu'une valeur mesurée est reçue, un équipement de contrôle choisit l'angle d'allumage α adéquat et la réactance est commutée à l'instant d'après. Le moment le plus retardé dans chaque demi-période où la puissance peut être librement choisie entre zéro et le maximum se trouve au sommet de la caractéristique de tension. Le temps de réponse est donc de un demi-cycle.

V-3.4 - Réactance saturée

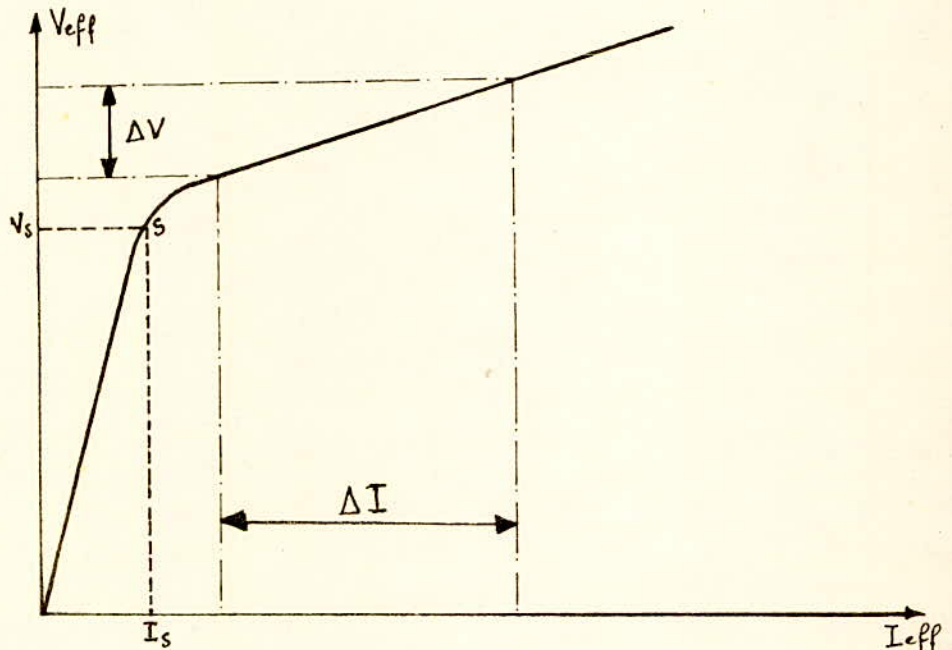
Il y a deux systèmes à réactance saturée.

- bobine de réactance saturable raccordée directement au jeu de barres.

- Réactance saturée raccordée à une bobine de réactance à prise en série dans le circuit du four

V 3.4.1. Réactance saturée raccordée au jeu de barres

Le principe fondamental de cette méthode est basé sur la caractéristique non linéaire de la perméabilité magnétique $\mu = \frac{B}{H}$ du noyau de fer ou, en écrivant $B = f(H)$, aux échelles d'axes près sur la courbe $V = f(I)$.

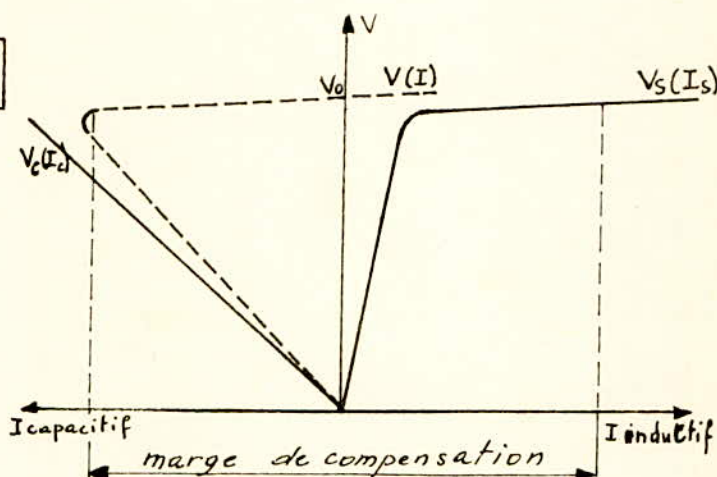
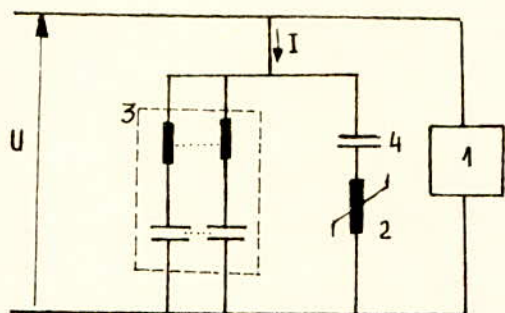


Une consommation de la puissance réactive absorbée au réseau doit être maintenue constante de manière que la charge et la réactance saturée consomment ensemble une puissance réactive constante pour un facteur de puissance très faible.

La réactance est branchée au point où la tension doit être maintenue constante. Sous charge totale, seul un courant faible passe par la réactance, tandis que sans charge, le courant total passe par la réactance.

outre un faible facteur de puissance, cette méthode produit des harmoniques. Des condensateurs fixes de filtrage doivent être reliés en parallèle avec la réactance. Un condensateur en série avec la réactance permet de redresser la caractéristique de saturation.

La figure suivante montre la disposition des différents éléments :



V, I - Compensateur
 V_s, I_s - stabilisateur
 V_c, I_c - Condensateur

Dans la plupart des cas, ce système nécessite un changeur de prises en charge afin que les niveaux de tension puissent correspondre (réactance - alimentation). Le temps de réponse, dépendant uniquement de la constante de temps de la réactance saturée, est en général faible. Il est de l'ordre de 1 à 2 périodes.

Les pertes provoqués par un système de compensation par condensateur shunt en parallèle avec une réactance saturée sont maximales lorsque le facteur compensé est déconnecté ou est compensé à charge nulle. Lorsque la charge prend en charge la plus grande partie de la puissance réactive (haute saturation) les pertes sont de l'ordre de 1,7%. Par contre lorsque la réactance n'est pas saturée, elles sont de l'ordre de 0,5%.

V. 3. 4. 2 Réactance saturée avec réactance à prise

cette méthode de compensation utilise le stabilisateur à réactance à prise, dont le principe de stabilisation est basé sur les courbes caractéristiques $V = f(I)$. Ces courbes sont données par la figure 3.V avec le schéma de principe du stabilisateur.

V_L - tension aux bornes de l'enroulement L
 V_{Ls} - tension aux bornes de la réactance saturée.
 V_{XR} - tension aux bornes de la réactance du réseau
 V_E - tension d'entrée du stabilisateur
 V_S - tension de sortie.
 L - enroulement primaire de la bobine de la réactance à prise.
 L' - enroulement secondaire compensant la pente de la caractéristique $V_S = f(I)$. Il est connecté en opposition de phase avec l'enroulement de la réactance L_s dont la tension aux bornes est V_{Ls}

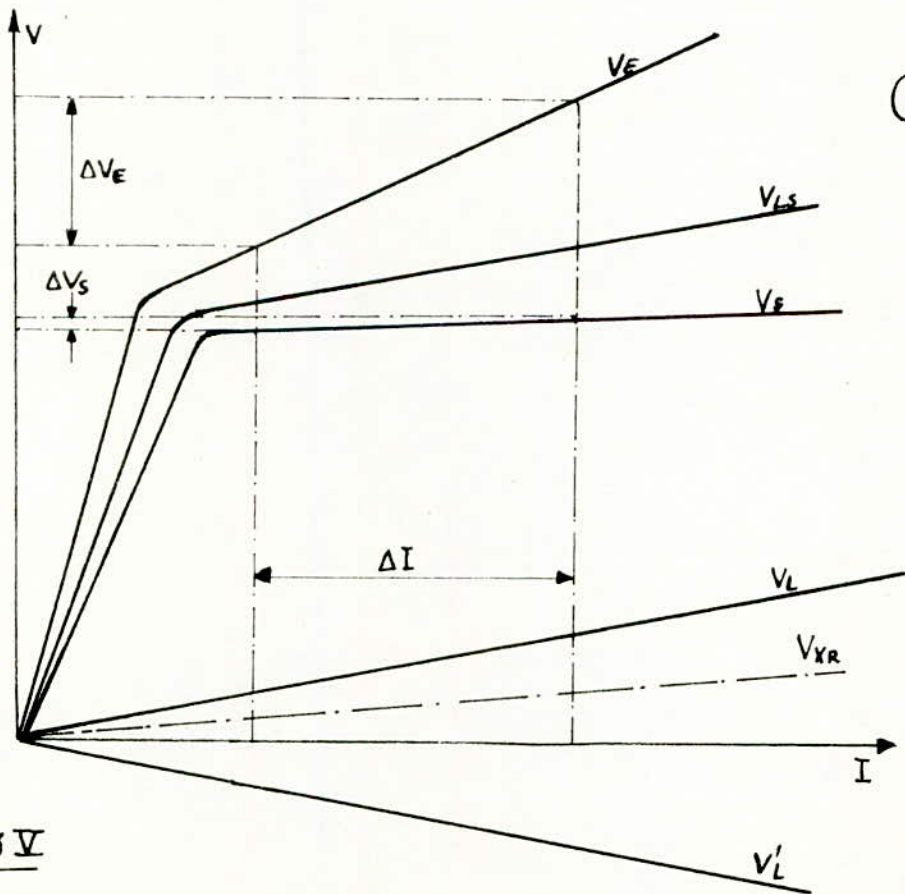
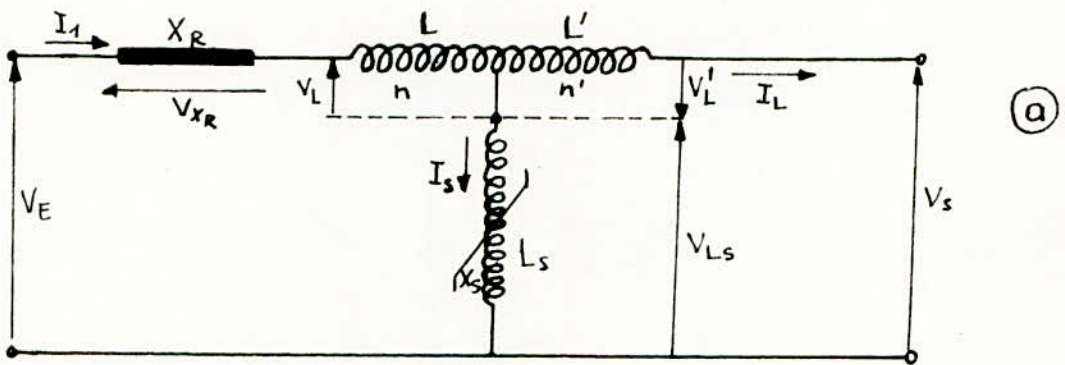


Fig 3V

Le circuit de la figure 3.V⑩ permet d'écrire l'équation des tensions suivante :

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

Les courbes de la figure 3.V⑩ montrent que la variation de tension $\Delta V_S \ll \Delta V_E$ à laquelle correspond une large variation de courant ΔI

on choisit le rapport $\frac{n'}{n}$ de telle sorte qu'en première approximation la tension aux bornes de la réactance saturée soit égale à :

$$V_{LS} = V_S + j X_S I_S$$

où I_S est le courant qui la traverse.

En considérant que le courant du stabilisateur I_S est complémentaire du courant de la charge I_L . Le courant fourni par le réseau s'écrit :

$$I_1 = I_L + I_S$$

Le passage du courant I_L à travers l'enroulement L' induit une f.e.m. e , dans l'enroulement L telle que :

$$e = j \frac{n'}{n} X_1 I_L = j \frac{n'}{n} X_1 (I_1 - I_S)$$

La tension d'entrée V_E s'écrit alors :

$$\begin{aligned} V_E &= j X_R I_1 + j X_1 (I_1 - I_S) + j X_1 I_1 + V_S + j X_S I_S \\ \Rightarrow V_E - V_S &= j I_1 (X_R + X_1 + X_S) + j I_L \left(\frac{n'}{n} X_1 - X_S \right) \end{aligned}$$

en réglant la réactance à prise de manière à avoir $\frac{n'}{n} X_1 - X_S = 0$ on arrive à :

$$V_E - V_S = j (X_R + X_S \frac{n+n'}{n'})$$

cette équation constitue la condition à remplir pour éliminer les variations de tension. En effet les perturbations, causées par le courant fluctuant de la charge I_L sur le courant du réseau I_1 , sont supprimées tant que $(V_E - V_S)$ reste constante.

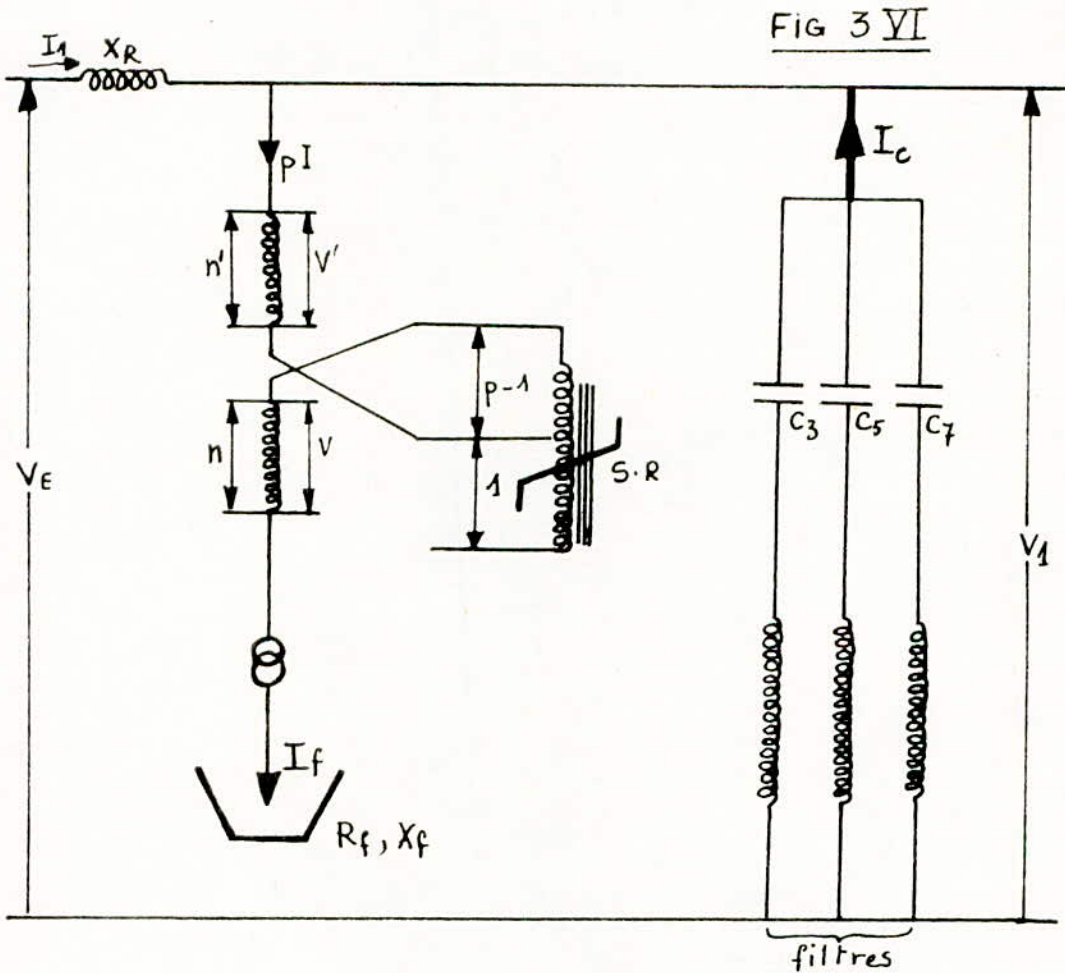
Des dispositifs "filtres d'harmoniques" sont nécessaires pour absorber les différents ^{harmoniques} produits par la réactance. La présence de ces filtres

est mise à profit pour :

- relever le facteur de puissance de l'ensemble four-compensateur.
- filtrer les harmoniques d'ordre au four.

ependant, étant donné que le système de compensation à l'aide de réactance à prise est incorporé dans le circuit du four (voir figure 3.VI), on serait amené à prévoir dans le cas de plusieurs fours :

- soit une compensation unitaire.
- soit une compensation commutable d'un four à l'autre, excluant ainsi un fonctionnement simultané.
- soit une compensation globale pour deux fours (ou plus) permettant le fonctionnement simultané des fours.



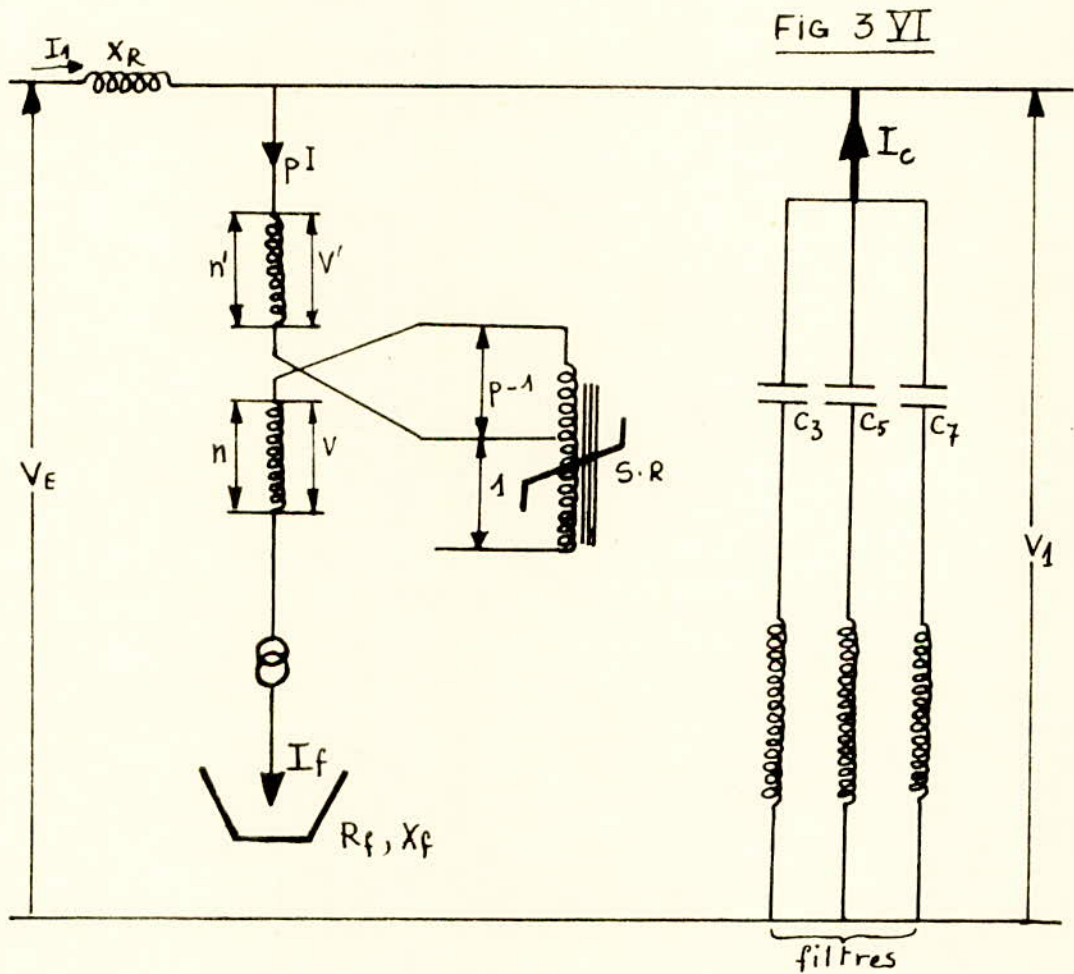
En conclusion on donne le tableau comparatif suivant des différents équipements de compensation décrits précédemment.

est mise à profit pour :

- relever le facteur de puissance de l'ensemble four-compensateur.
- filtrer les harmoniques du réseau four.

ependant, étant donné que le système de compensation à l'aide de réactance à prise est incorporé dans le circuit du four (voir figure 3.VI), on serait amené à prévoir dans le cas de plusieurs fours :

- soit une compensation unitaire.
- soit une compensation commutable d'un four à l'autre, excluant ainsi un fonctionnement simultané.
- soit une compensation globale pour deux fours (ou plus) permettant le fonctionnement simultané des fours.



En conclusion on donne le tableau comparatif suivant des différents équipements de compensation décrits précédemment.

équipement	avantages	inconvenients
condensateurs couplés par thyristors	<ul style="list-style-type: none"> - pertes faibles - aucune fondation n'est nécessaire - - la compensation peut se faire phase par phase - - la batterie de condensateurs ne produit pas d'harmoniques - possibilité d'agrandissement - n'importe quel défaut a un effet limité - 	<ul style="list-style-type: none"> - comprend des pièces de commande délicates - montage et mise en service complexe
Réactances couplées par thyristors	<ul style="list-style-type: none"> - la compensation peut être effectuée phase par phase - temps de réponse est de $1/2$ cycle - - les réactances ne produisent pas d'harmoniques - 	<ul style="list-style-type: none"> - les pertes sont plus importantes que celles des condensateurs couplés par thyristors. (1*) - comprend également des pièces de commande délicates - montage et mise en service complexe
Réactance commandée par thyristors	<ul style="list-style-type: none"> - la compensation peut se faire phase par phase - - la réactance peut être conçue comme un transformateur de grande impédance de court-circuit. on peut donc supprimer le transformateur intermédiaire utilisé dans les autres cas - temps de réponse $1/2$ cycle. 	<ul style="list-style-type: none"> - pertes plus élevées que pour les condensateurs - production des harmoniques de courant. - comprend des pièces de commande délicates.
Réactance Saturée	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de réaction de 1 à 2 cycles. - aucun système de mesure n'est nécessaire - ne nécessite pas de travaux de génie civil 	<ul style="list-style-type: none"> - la réactance produit des harmoniques - la réactance possède un haut niveau sonore. - ne compense pas le déséquilibre entre phases - même pertes que (1*)
1 - Raccordée au j.b	<ul style="list-style-type: none"> - compense le déséquilibre entre phases 	<ul style="list-style-type: none"> - production des harmoniques de courant.
2 - avec Réactance à prise	<ul style="list-style-type: none"> - ne nécessite pas de travaux de génie civil - entretien simple. 	<ul style="list-style-type: none"> - même pertes que (1*)

V-4- Problèmes des harmoniques

Les fours à arc injectent des courants à fréquences d'harmoniques dans l'impédance du réseau d'alimentation, surtout pendant la période de fusion. Par conséquent il y a apparition de tensions harmoniques qui se superposent à la tension fondamentale. Les distorsions de tension qui en résultent détériorent la qualité de service du réseau de distribution.

L'importance de ces distorsions de tension sont évaluées à l'aide du facteur de distorsion qui répond à l'expression:

$$D_F = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} U_n^2}}{U_1}$$

avec U_1 - valeur efficace de la tension fondamentale

U_n - valeur efficace de l'harmonique de rang n

Le pouvoir polluant des fours à arc pendant la fusion et celui des compensateurs statiques se résument ainsi :

en fonction du rang n , le taux des courants harmoniques rapportés au courant à pleine puissance à 50 Hz est:

- Pour les fours à arc pendant la fusion :

- harmoniques de rangs pairs et impairs
- Amplitude de l'ordre de 5% pour le rang 2
- décroissance lente lorsque n augmente

- Pour les compensateurs statiques :

- harmoniques de rangs 5, 7, 11, 13, etc ...
- Amplitude de l'ordre de 20% pour le rang 5
- décroissance très rapide lorsque n augmente.

Les tensions harmoniques créées en un point d'un réseau THT peuvent se propager sans atténuations ni amplifications excessives dans un rayon de 150 km environ autour du point d'injection.

En absence de résonance, l'impédance harmonique de rang n du réseau ramené à 50 Hz est : $Z_n = n \cdot \frac{U_1^2}{P_{cc}}$. Par contre, en cas de résonance Z_n est 2 à 4 plus grande. En général, on la prend égale à : $Z_n = 3 \cdot \frac{n \cdot U_1^2}{P_{cc}}$.

CHAPITRE VI

DIMENSIONNEMENT DE LA COMPENSATION

VI-1 - Généralités

Le dimensionnement de l'installation de compensation de la puissance réactive est fait en tenant compte des paramètres suivants :

- le facteur de puissance moyen de l'alimentation ne doit pas tomber en dessous d'une valeur convenue entre S.N.S et Sonelgaz. Elle est prise égale à 0,85 dans le cadre de cette étude.

- le flicker ne doit pas excéder une valeur définie, déterminée par le seuil de gêne. D'après le critère E.D.F, elle est fixée à $(0,3\%)^2$ minute.

- le système inverse qui impose une charge supplémentaire au réseau et aux machines électriques doit être réduit à un degré d'asymétrie admissible.

- la réaction des harmoniques sur le réseau doit être réduite à un niveau acceptable.

La puissance nominale de l'installation de compensation est déterminée par la grandeur, le mode de fonctionnement, la puissance de court-circuit du four ainsi que la puissance de court-circuit du réseau au point de raccordement.

Il faut aussi tenir compte de la valeur de court-circuit triphasé du four, lorsque les variations de tension ne doivent en aucun moment dépasser une valeur limite. La puissance réactive non compensée restante, qui provoque juste la chute de tension tolérée, peut être empruntée au réseau.

Connaissant par expérience le domaine de variation de la puissance réactive, pour faire le dimensionnement de la compensation, il faut fixer les limites inférieures et supérieures des variations de puissance réactive apparaissant le plus souvent.

L'investissement consenti pour l'installation de compensation doit

en partie, être amorti par la rentabilité (augmentation de la production) de l'aciérie. Pour cela différentes solutions doivent être envisagées et comparées sur les plans techniques et économiques, en vue d'optimiser cette installation.

VI-2- Puissance des transformateurs

VI-2-1- Puissance des transformateurs de fours

La puissance maximale d'un four durant la période de fusion répond à l'expression :

$$P_{\max} = \frac{Q \cdot T}{\cos \varphi \cdot F \cdot h}$$

avec :

- Q = consommation spécifique d'énergie en [kwh/tonne] = 530
- T = nombre de tonnes enfournées (voir chapitre III) = 177,75 tonnes.
- $\cos \varphi$ = Facteur de puissance moyen pendant la fusion = 0,707
- F = Facteur de correction = 0,92
- h = durée nette de fusion en heures = 1,5 heures

la puissance nominale :

Les transformateurs de fours sont surchargeables de 20%, leur puissance nominale vaut donc :

$$P_N = \frac{P_{\max}}{1,2}$$

application numérique :

$$P_{\max} = \frac{530 \cdot 177,75}{0,707 \cdot 0,92 \cdot 1,5} = 96,6 \text{ MVA}$$

$$P_N = \frac{96,6}{1,2} \neq 80 \text{ MVA}$$

VI-2-2- Puissance des transformateurs d'Alimentation

En général un transformateur est commun à plusieurs fours (2, 3, ...), mais la puissance est inférieure à celle obtenue par simple addition, du fait qu'il travaille à un facteur de puissance amélioré par la compensation au niveau MT.

Le facteur de puissance étant ramené de $\cos\varphi_1$ à $\cos\varphi_2$, ($\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$). La puissance apparente du transformateur d'alimentation est donnée par :

$$P_a = n \cdot P_{max} \cdot \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2}$$

avec : n = nombre de fours communs à un transformateur.

P_{max} = puissance maximale du transformateur de four.

$\cos\varphi_1 = 0,707$ (pendant la fusion)

$\cos\varphi_2 = 0,85$ (imposé par le réseau)

1^{ère} Variante : un transformateur abaisseur HT/MT commun à 2 fours.

sa puissance apparente est :

$$P_a = 2 \cdot 96,66 \cdot \frac{0,707}{0,85} \approx 160 \text{ MVA}$$

2^{ème} Variante : un transformateur HT/MT commun à 3 fours.

$$P_a = 3 \cdot 96,66 \cdot \frac{0,707}{0,85} = 241,6 \approx 240 \text{ MVA}$$

VI-3-Compensation d'énergie réactive à réaliser

La puissance réactive consommée par les fours est répartie en deux catégories distinctes, de sorte qu'on est amené à considérer deux types de compensation :

VI.3.1. Variations Rapides

les variations rapides correspondent :

- aux appels de réactifs dus aux fluctuations aléatoires autour d'un point de fonctionnement du four. En général, ils sont plus importants en période de fusion qu'en période d'affinage. Dans les calculs, on ne tient compte que du réactif appelé en période de fusion.

- aux appels de réactifs résultant du court-circuit se produisant pendant la période de fusion.

Lorsque n fours sont en service, ces variations, de par leur

caractère aléatoire, se compensent mutuellement dans une certaine mesure. Ce qui fait que le réactif global appelé est inférieur à celui obtenu par simple multiplication par n le réactif d'un four unique.

La compensation des variations rapides est effectuée à l'aide ~~de~~ d'équipements à réponse rapide, commandés automatiquement et qui doivent couvrir la plage de variation de la puissance réactive.

VI.3.2. Variations lentes

Le fonctionnement optimal des fours est obtenu pour des valeurs du facteur de puissance, de l'ordre de 0,707 en période de fusion et qui correspond à une consommation d'énergie réactive moyenne égale à la puissance active. En période d'affinage ce facteur est de l'ordre de 0,6.

En outre, il est de l'intérêt du consommateur d'énergie d'améliorer ce facteur de puissance au-delà d'une valeur limite prise égale à 0,85. Cette compensation peut se faire par condensateurs mis en service par gradins sans coupleurs à thyristors.

VI.3.3. Solutions envisagées

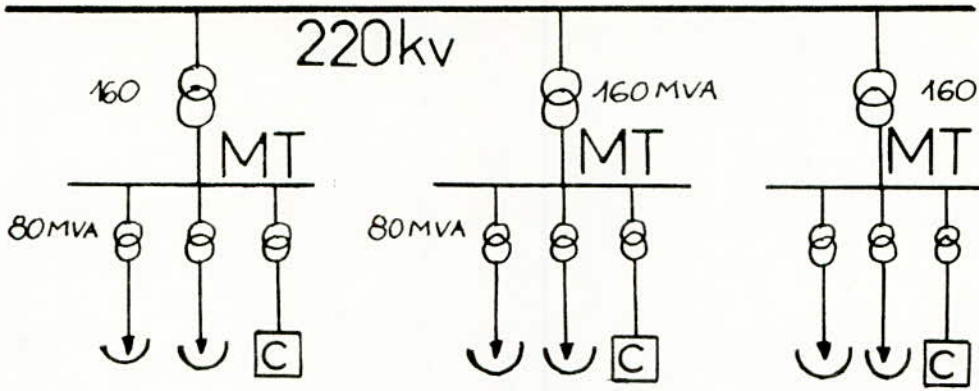
Les diverses solutions envisagées diffèrent entre elles par le fait que l'on soustrait une partie de l'équipement individuel des fours pour le reporter à un niveau commun à plusieurs fours.

VI.3.3.1 Solution N°1 : compensation par deux fours :

La compensation est effectuée au niveau du jeu de barres MT et comporte des équipements de compensation propres à chaque deux fours.

Le schéma unifilaire de principe suivant montre que dans ce cas l'aigrie est divisée en trois petites aigries comprenant chacune deux fours et fonctionnant indépendamment l'une de l'autre.

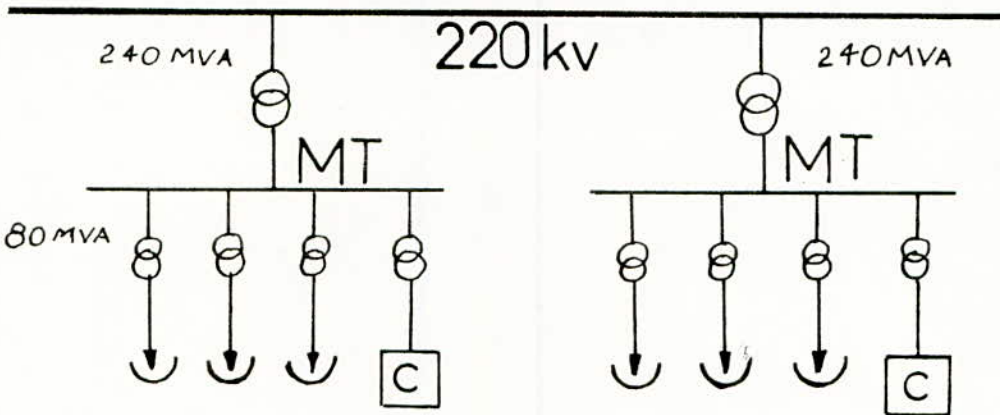
schéma unifilaire de principe



VI-3.3.2 Solution N°2 : compensation par trois fours :

Elle est réalisée au niveau du jeu de barres MT et comporte des équipements propres à chaque trois fours.

schéma unifilaire de principe



V-3.3.3 Solution N°3 : compensation des six fours

La compensation rapide est faite au niveau du jeu de barres HT pour les 6 fours. Deux variantes sont à considérer suivant que les fours sont raccordés au jeu de barres MT deux par deux ou trois par trois.

schéma de principe (variante 3a)

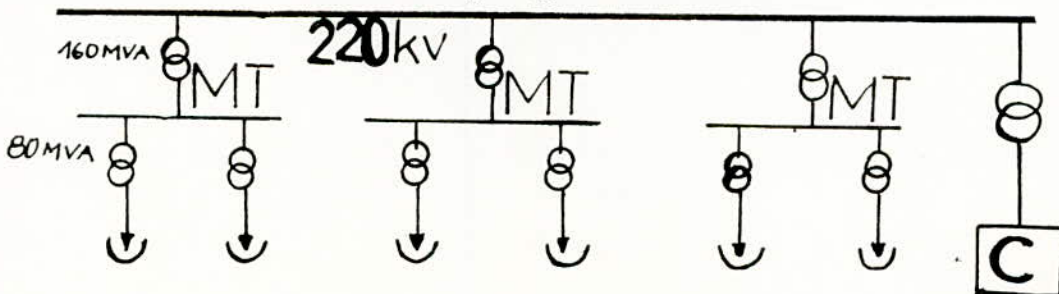
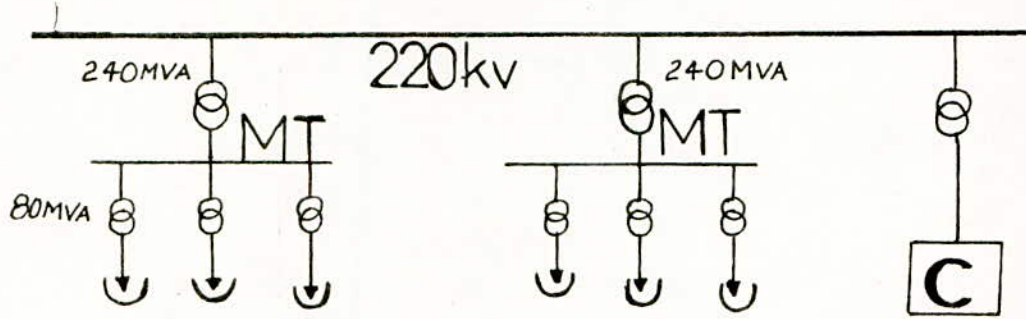


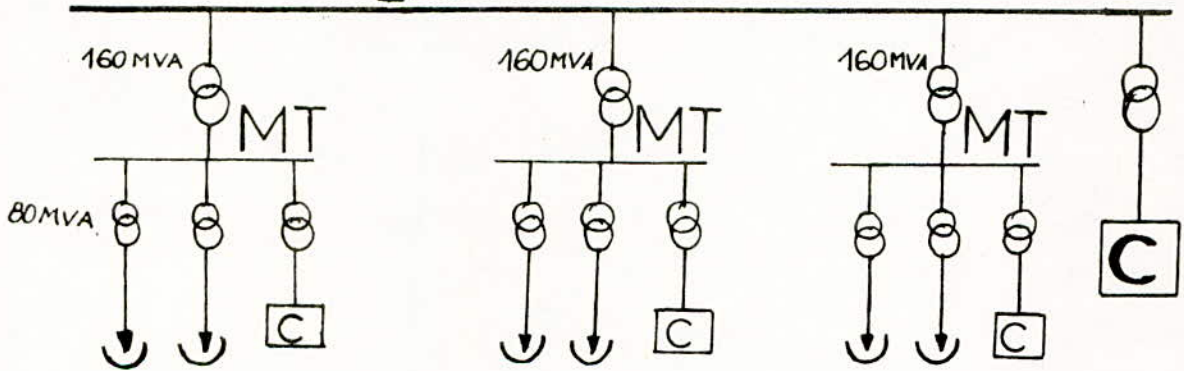
schéma de principe (variante 3.b)



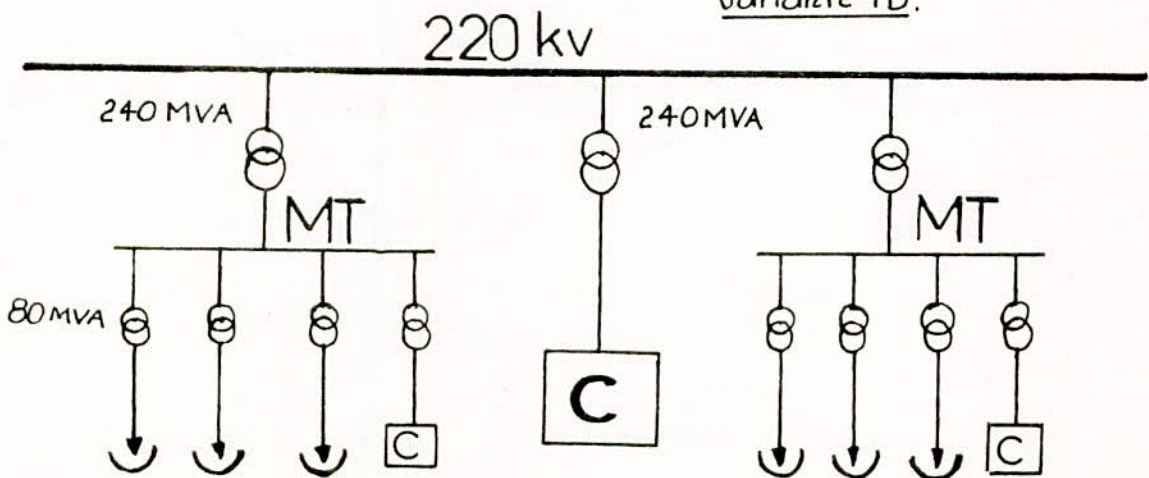
VI 3.3.4 solution N° 4 : compensation intermédiaire.

Cette solution consiste à prévoir une compensation réduite au niveau du jeu de barres MT et un complément au niveau du jeu de barres HT. De même que pour la solution N° 3, on peut distinguer deux cas :

variante 4a.



variante 4b.



VI.3.4. Appel de puissances réactives

VI.3.4.1 variations Rapides

Le diagramme de fonctionnement des fours, donnant p, q, ρ, μ et $\cos\varphi$ en fonction du courant, que nous donnons figure 3.4.I permet de déterminer les limites inférieures et supérieures des variations de la puissance réactive. Ce diagramme est tracé à partir des équations ci-dessous. Soit la base

$$S_B = \sqrt{3} \cdot U_B \cdot I_B$$

$$Z_B = \frac{U_B}{I_B}$$

Prenez :

$$\text{tension de base : } U_B = U$$

$$\text{puissance de base : } S_B = \frac{U^2}{X_t}$$

$$\text{on déduit : } I_B = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot X_t}$$

$$Z_B = \sqrt{3} \cdot X_t$$

$$\text{Posons : } \mu = \frac{U}{U_B} = 1 \quad \text{et} \quad i = \frac{I}{I_B}$$

$$x_t = \frac{X_t}{Z_B} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad ; \quad r_t = \frac{R_t}{Z_B} = \frac{R_t}{\sqrt{3} \cdot X_t}$$

Les équations électriques du chapitre II deviennent alors :

$$\rho = \frac{S}{S_B} = i$$

$$p = \frac{P}{S_B} = i \sqrt{1 - i^2}$$

$$q = \frac{Q}{S_B} = \frac{I^2}{I_B^2} = i^2 \quad , \quad \cos\varphi = \frac{p}{\rho} = \frac{i \sqrt{1 - i^2}}{i} = \sqrt{1 - i^2}$$

$$\mu = \frac{P_u}{S_B} = i \left[\sqrt{1 - i^2} - i \sqrt{3} \cdot r_t \right] ; \quad (P_u \text{ étant la puissance}$$

des arcs). La courbe $\mu = f(i)$ est tracée pour $r_t = 10\%$

$$\eta = \frac{\mu}{p} = 1 - \frac{\sqrt{3} \cdot r_t \cdot i}{\sqrt{1 - i^2}} \quad (\text{tracé pour } r_t = 10\%)$$

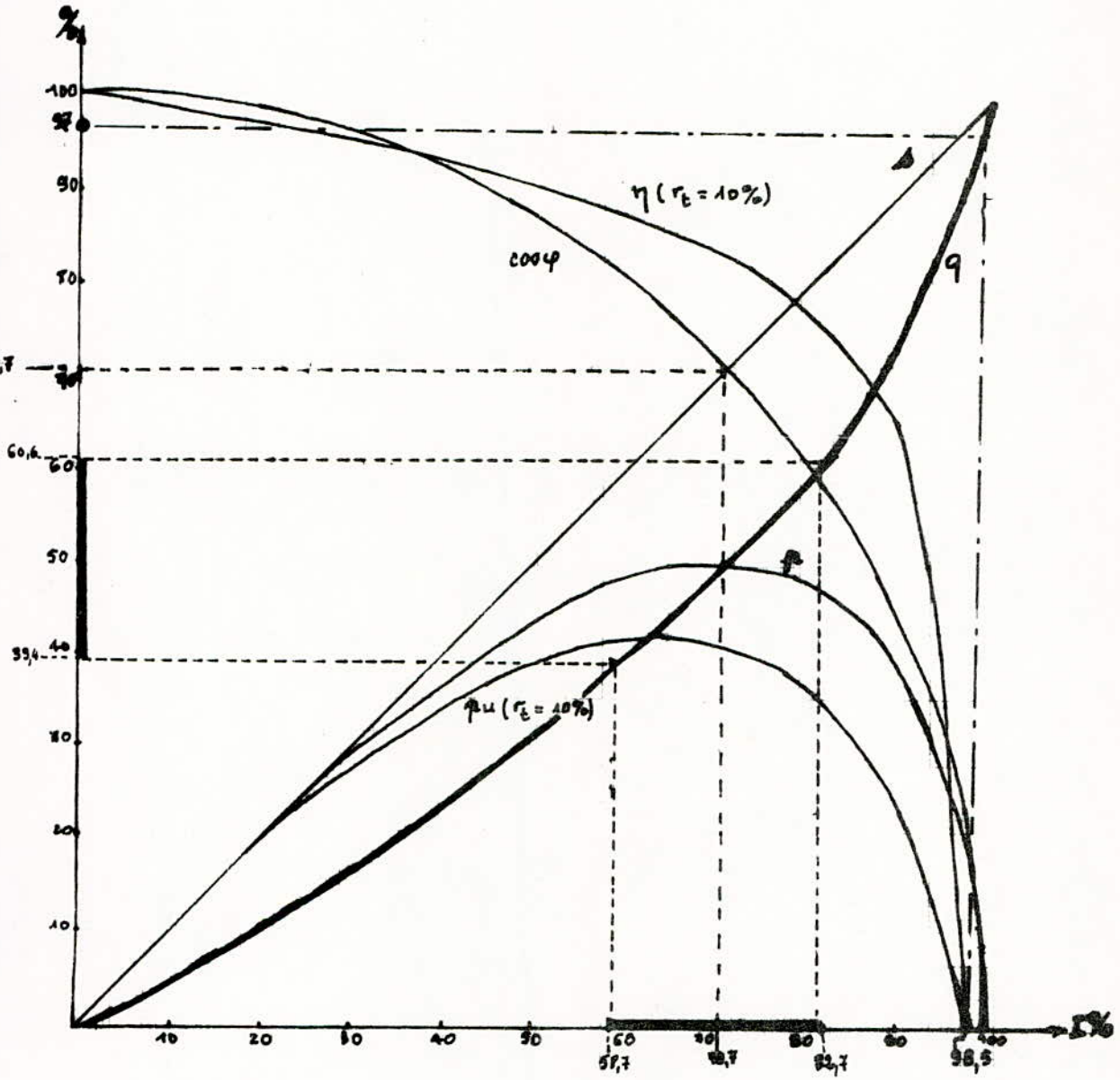


Fig 3.4.I. Diagramme de fonctionnement
d'un four à arc

le maximum de p et p_u .

$\frac{dp}{di} = \frac{di\sqrt{1-i^2}}{di} = 0$ on trouve, en explicitant le calcul que la p_u atteint son maximum pour $i_{max} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow p_{max} = 0,5 = \eta$
 $\Rightarrow \cos\varphi = 0,707$

$\frac{dp_u}{di} = 0$ en développant le calcul, on obtient :

$$i_{max} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{3r_e^2}{1+3r_e^2}} \right)}$$

$$\Rightarrow p_{u,max} = \frac{i}{2\sqrt{1-i^2}}, \text{ le point à } p_u = 0 \text{ (court-circuit)}$$

$$\text{tombe en : } i = \frac{1}{\sqrt{1+3r_e^2}}$$

Le diagramme donne pour :

- un point de fonctionnement nominal : $i_N = 70,7\%$, ce qui correspond à une puissance réactive $\eta = 50\%$
- un court circuit triphasé : $i_c = 98,5\%$ à qui correspond une puissance réactive $\eta = 97\%$.

Les fluctuations normales de courant (en l'absence de court-circuit) sont estimées expérimentalement à $\pm 12\%$ autour du point de fonctionnement nominal ; ce qui correspond d'après le diagramme de charge à une variation de la puissance réactive de $\pm 10,6\%$.

Les fluctuations maximales de réactif sont obtenues lors d'un court-circuit triphasé franc et donnent à peu près : $\eta = 57,6\%$

V.3.4.1.1. Un four en service :

La puissance réactive maximale appelée par un four est :

$$Q_{4f} = 2 \cdot P_{max} \cdot Q \cdot \cos\varphi \quad (1)$$

avec :

$$P_{max} = \text{puissance maximale du transformateur de four} = 96,6 \text{ MVA}$$

$$Q = \eta : 100 = 0,576$$

$$\cos\varphi = \text{facteur de puissance moyen pendant la fusion} = 0,707$$

d'où :

$$Q_{4f} = 2 \cdot 96,6 \cdot 0,576 \cdot 0,707 = 78,67 \quad \# \quad 79 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.1.2 deux fours en service :

hypothèse H1 : simultanéité de court-circuit triphasé sur deux fours à la fois.

on peut voir, figure 3.4.II qui donne le diagramme de marche de deux fours en parallèle ayant chacun un cycle de marche de 2^h30 mn décalé d'un demi-cycle par rapport à l'autre, que l'on a dans tous les cas les deux fours en fusion simultanément pendant au moins un quart d'heure.

L'appel de réactif pour les deux fours sera donc le double de celui appelé par un seul four.

$$Q_{2f} = 2 \cdot 78,67 = 157,34 \text{ MVAR.}$$

hypothèse H2 : pas de court-circuit triphasé franc sur deux fours à la fois.

On considère deux fours en fusion simultanément dont un en court-circuit franc et l'autre à son point de fonctionnement nominal. Ce qui donne, comme on l'a vu au début du paragraphe VI.3.4, pour :

- un four en court-circuit franc : $q = 57,6\%$
- un four en fonctionnement nominal : $q = 2 \cdot 10,6\% = 21,2\%$

La somme de ces deux valeurs représente les fluctuations de puissance réactive pour les deux fours : $q = 57,6 + 21,2 = 78,8\%$

Par conséquent, l'appel de réactif est donné par l'expression (1)

$$Q_{2f} = 2 \cdot 96,6 \cdot 0,788 \cdot 0,707 = 107,63 \neq 108 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.1.3 Trois fours en service

hypothèse H1 : simultanéité de court-circuit triphasé franc sur deux fours à la fois.

La figure 3.4.III, donnant le diagramme de marche de trois fours en parallèle ayant chacun un cycle de 2^h30 mn décalé d'un tiers (50mn) par rapport aux deux autres, montre que l'on a 2 fours au plus en fusion simultanément.

L'appel de réactif des 3 fours sera donc identique à celui de deux fours en fusion (H1; 2 fours en service) :

Marche cyclique de 3 fours en parallèle Fig 3.4.III

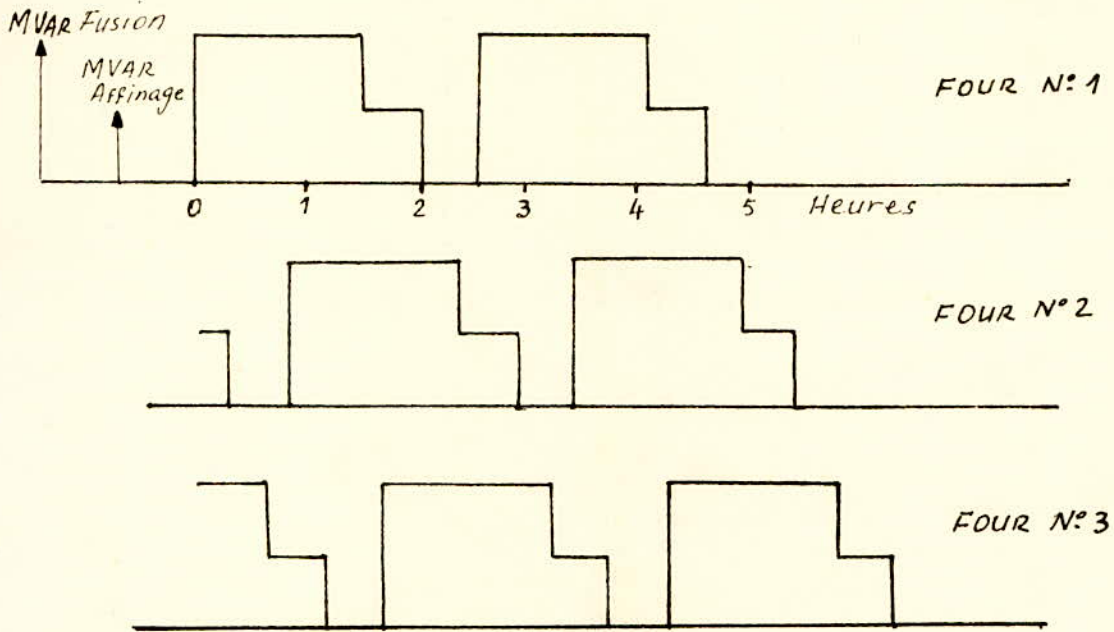
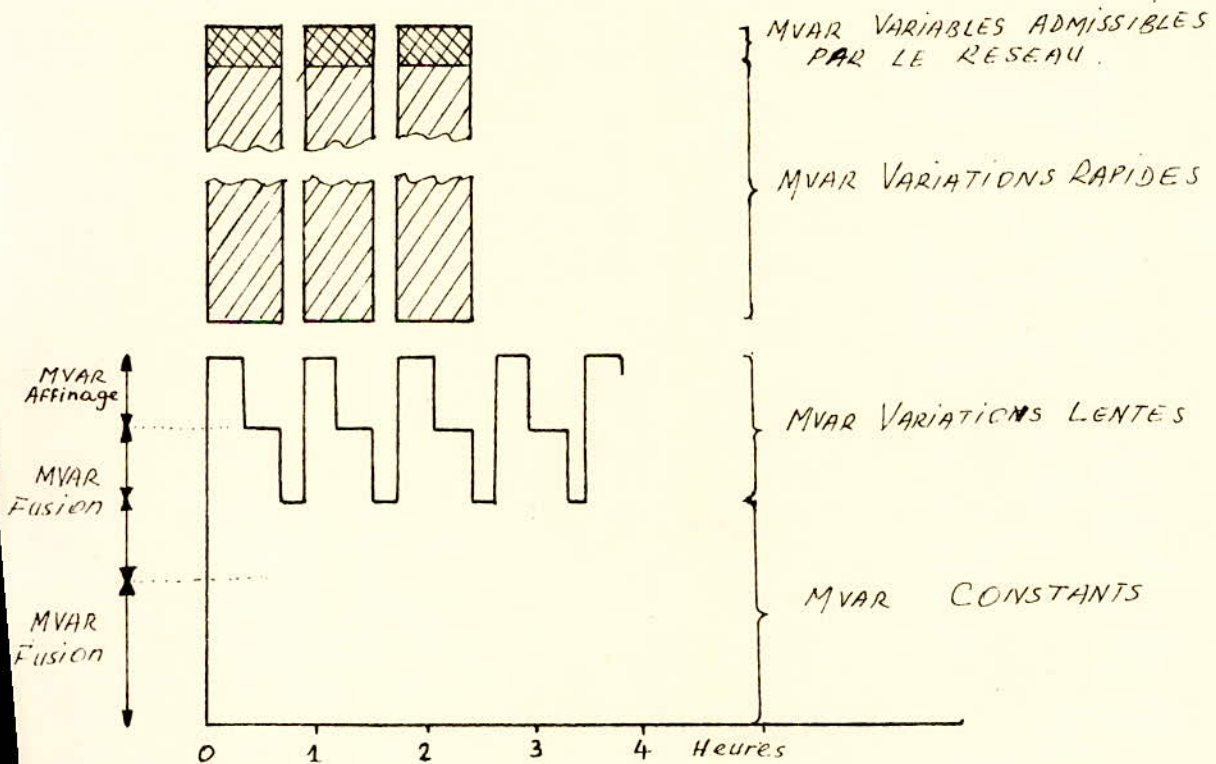


Diagramme Superposé.



Marche cyclique de 2 fours en parallèle Fig 3.4.II

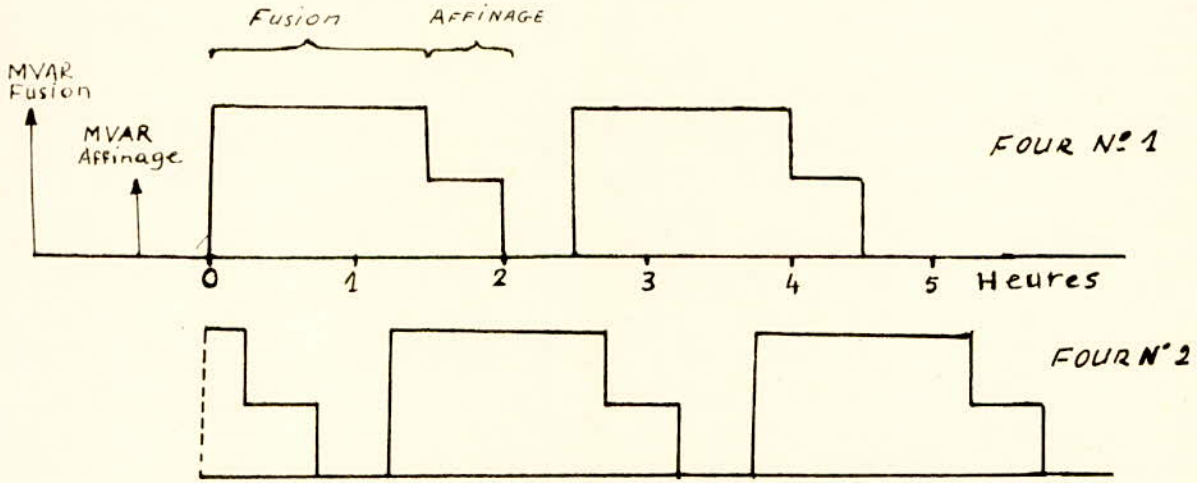
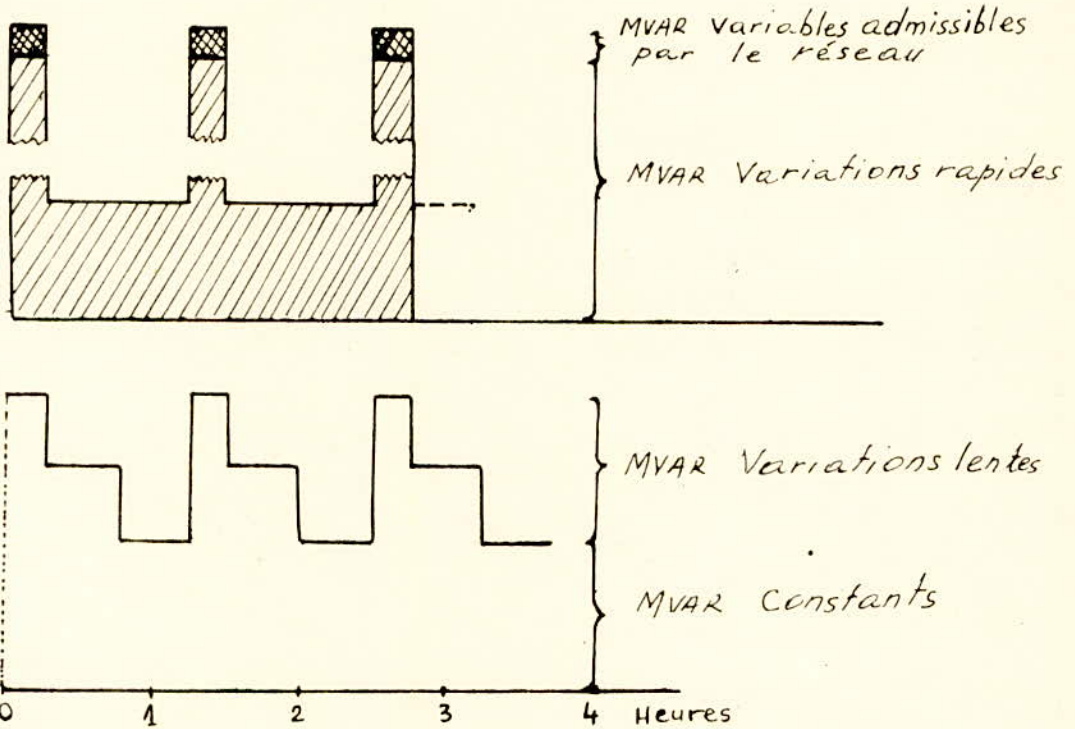


DIAGRAMME SUPERPOSE



donc : $Q_{3f} = Q_{2f} = 157,34 \text{ MVAR}$.

hypothèse H2 : court-circuit triphasé franc sur un seul four à la fois

on envisage la marche suivante des 3 fours :

• 2 fours à leur point de fonctionnement nominal avec les fluctuations de réactif autour du point nominal :

$$q = 2 \cdot 10,6 + 2 \cdot 10,6 = 42,4\%$$

• un four en court-circuit franc avec les fluctuations de réactif :

$$q = 57,6\%$$

Les fluctuations totales pour les 3 fours seront donc :

$$q = 42,4 + 57,6 = 100\%$$

L'expression (1) donne la puissance réactive dans ce cas :

$$Q_{3f} = 2 \cdot 96,6 \cdot 1 \cdot 0,707 = 136,6 \neq 137 \text{ MVAR}$$

hypothèse H2* :

en respectant le diagramme de marche, c'est-à-dire en ne considérant que deux fours en fusion simultanée (le 3^e en affinage ou à l'arrêt). On aboutit au réactif calculé en VI.3.4.1.2, H2 c'est-à-dire :

$$Q_{3f}^* \neq 108 \text{ MVAR}$$

Remarque :

Choisir l'hypothèse H1 entraîne un surdimensionnement de l'installation de compensation. En effet cette hypothèse ne tient pas compte du fait que la probabilité d'avoir plusieurs fours en court-circuit triphasé franc diminue au fur et à mesure que le nombre de fours en service augmente. Par conséquent, on ne retiendra pas cette hypothèse qui n'est pas économique comparée à l'hypothèse H2, beaucoup plus réaliste.

VI.3.4.1.4: 6 fours en service :

Tenant compte de la remarque ci-dessus, on admet dans ce cas que les 6 fours ne seront jamais simultanément en période de fusion.

On considère qu'il y a au maximum 4 fours en fusion simultanée, dont deux en court-circuit triphasé franc et les deux autres en

leur point de fonctionnement nominal, le reste des fours en affinage

• 2 fours en court-circuit triphasé franc :

$$q = 2 \cdot 57,6 = 115,2\%$$

• 2 fours en fonctionnement nominal :

$$q = 2 \cdot 10,6 + 2 \cdot 10,6 = 42,4\%$$

La somme donne le réactif global en % des 6 fours.

$$q = 115,2 + 42,4 = 157,6\%$$

l'expression (1) donne le réactif global en MVAR

$$Q_{gf} = 2 \cdot 96,6 \cdot 0,707 \cdot 1,576 = 215,27 \neq 216 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.2 Puissance Réactive Moyenne

Un four unique en fusion consomme une puissance réactive moyenne Q_0 à peu près égale à la puissance active lorsque le facteur de puissance est maintenu à 0,707.

$$Q_0 = P_{max} \cdot \sin\varphi$$

avec :

P_{max} = puissance maximale du transformateur de four

$$\sin\varphi = \cos\varphi = 0,707$$

En période d'affinage, le facteur de puissance est de l'ordre de 0,6 et la puissance réactive moyenne appelé par un four unique est :

$$Q_a = 1/2 \cdot Q_0$$

Pour un ensemble de n fours ($n_1 + n_2 = n$), dont n_1 fours sont en fusion et n_2 fours en affinage, la puissance réactive moyenne est égale à :

$$Q_{tm} = Q_{0(n_1f)} + Q_{a(n_2f)} \quad (2)$$

avec : $Q_{0(n_1f)} = n_1 \cdot Q_0$ (n_1 fours en fusion) (3)

$$Q_{a(n_2f)} = \frac{1}{2} \cdot n_2 \cdot Q_0$$
 (n_2 fours en affinage) (4)

VI.3.4.2.1 un four en service

la puissance réactive moyenne du four en période de fusion :

$$Q_{0(1f)} = 96,6 \cdot 0,707 = 68,29 \text{ MVAR}$$

La puissance réactive moyenne du four en période d'affinage.

$$Q_{a(1f)} = \frac{1}{2} \cdot 68,29 = 34,1 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.2.2 deux fours en service

En vertu de l'hypothèse H2 (deux fours en fusion), la puissance réactive moyenne sera donc d'après (3)

$$Q_{o(2f)} = 2 \cdot Q_o = 2 \cdot 68,29 = 136,6 \neq 137 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.2.3 Trois fours en service

dans le cas où on a les 3 fours en fusion (hypothèse H2), la puissance réactive moyenne est égale à :

$$(3) \rightarrow Q_{o(3f)} = 3 \cdot Q_o = 3 \cdot 68,29 = 204,87 \neq 205 \text{ MVAR}$$

dans l'hypothèse H2* (2 fours en fusion et un four en affinage)

- 2 fours en fusion : $Q_{o(2f)} = 136,6 \text{ MVAR}$

- 1 four en affinage : $Q_{a(1f)} = 34,1 \text{ MVAR}$

La puissance réactive moyenne totale est d'après (2)

$$Q_{tm} = Q_{o(2f)} + Q_{a(1f)} = 136,6 + 34,1 = 170,7 \neq 171 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.2.4 6 fours en service

dans ce cas, on a 4 fours en fusion dont la puissance réactive moyenne sera d'après (3) :

$$Q_{o(4f)} = 4 \cdot Q_o = 4 \cdot 68,29 = 273,16 \text{ MVAR}$$

Les deux fours restant sont en affinage et leur puissance réactive moyenne est d'après (4).

$$Q_{a(2f)} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot Q_o = Q_o = 68,29 \text{ MVAR}$$

La puissance réactive moyenne totale est :

$$(2) \quad Q_{tm} = Q_{o(4f)} + Q_{a(2f)} = 273,16 + 68,29 = 341,45 \neq 342 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.3 variations lentes

Les variations lentes de puissance réactives sont celles qui correspondent à un fonctionnement déterminé, soit la fusion soit l'affinage en faisant abstraction des fluctuations rapides de la puissance

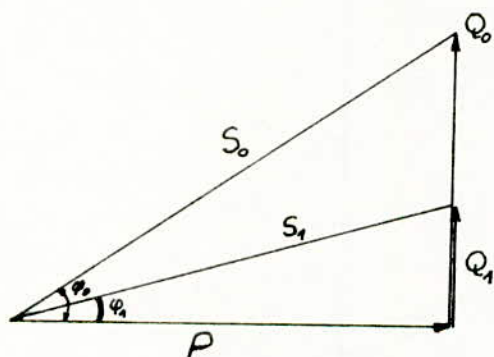
réactive calculées en VI.3.4.1

Les diagrammes superposés des figures 3.4.II et 3.4.III donnent l'appel de réactif lentement variable en fonction du temps, dans le cas de la réarcte en parallèle de deux ou trois fours.

La puissance réactive moyennée calculée en VI.3.4.2 permet de déterminer le réactif nécessaire pour l'amélioration du facteur de puissance à la valeur imposée : 0,85

Principe du calcul de la puissance réactive nécessaire pour redresser le $\cos\varphi$

Soit à ramener de $\cos\varphi_0$ à $\cos\varphi_1$ ($\varphi_0 > \varphi_1$) le facteur de puissance d'une installation consommant une puissance active P . Initialement la puissance réactive appelée était $Q_0 = S_0 \cdot \sin\varphi_0 = P \cdot \text{tg}\varphi_0$, qu'il faut ramener à la valeur $Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = P \cdot \text{tg}\varphi_1$ (à puissance active égale).



la puissance réactive fournie par les batteries de condensateurs est donc :

$$Q = Q_0 - Q_1 = P(\text{tg}\varphi_0 - \text{tg}\varphi_1)$$

$$Q_0 = P \text{tg}\varphi_0 \Rightarrow P = \frac{Q_0}{\text{tg}\varphi_0}$$

d'où $Q = Q_0 \left(1 - \frac{\text{tg}\varphi_1}{\text{tg}\varphi_0}\right)$

dans notre cas :

Pour un four en fusion : $\cos\varphi_0 = 0,707 \Rightarrow \text{tg}\varphi_0 = 1$

$\cos\varphi_1 = 0,85 \Rightarrow \text{tg}\varphi_1 = 0,62$

ce qui donne $Q = Q_0 (1 - 0,62) = Q_0 \cdot 0,38$

Pour un four en affinage : $\cos\varphi'_0 = 0,6 \Rightarrow \text{tg}\varphi'_0 = 1,33$

$\cos\varphi_1 = 0,85 \Rightarrow \text{tg}\varphi_1 = 0,62$

d'où $Q = Q'_0 \left(1 - \frac{\text{tg}\varphi_1}{\text{tg}\varphi'_0}\right) = Q'_0 \left(1 - \frac{0,62}{1,33}\right) = Q'_0 \cdot 0,55$

VI.3.4.3.1 Un four en service

si le four est en période de fusion, le réactif à compenser est:

$$Q = Q_{(1f)} \cdot 0,38$$

$$Q = 68,29 \cdot 0,38 = 25,95 \text{ MVAR}$$

si le four est en affinage, le réactif à compenser diminue et

devient : $Q = Q_{a(1f)} \cdot 0,55$

$$Q = 34,1 \cdot 0,55 = 18,78 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.3.2 deux fours en service

la puissance réactive maximale à compenser est calculée pour l'hypothèse H2 c'est-à-dire que les deux fours sont en fusion.

$$Q = Q_{o(2f)} \cdot 0,38 = 136,6 \cdot 0,38 = 51,9 \neq 52 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.3.3 Trois fours en service

si les 3 fours sont en fusion (hypothèse H2), le réactif est égal à:

$$Q = Q_{o(3f)} \cdot 0,38 = 204,87 \cdot 0,38 = 77,85 \neq 78 \text{ MVAR}$$

dans l'hypothèse H2*, on a 2 fours en fusion et un four en affinage la puissance réactive à compenser sera donc composée de deux termes.

MVAR à compenser pour les deux fours en fusion

$$Q = Q_{o(2f)} \cdot 0,38 = 51,9 \text{ MVAR}$$

MVAR à compenser pour le four en affinage

$$Q = Q_{a(1f)} \cdot 0,55 = 18,78 \text{ MVAR}$$

les MVAR à compenser pour les 3 fours seront donc :

$$Q = 51,9 + 18,78 = 70,68 \neq 71 \text{ MVAR}$$

VI.3.4.3.4 6 fours en service

• 4 fours en fusion

• 2 fours en affinage

MVAR à compenser pour les 4 fours en fusion

$$Q = Q_{o(4f)} \cdot 0,38 = 103,8 \text{ MVAR}$$

MVAR à compenser pour les 2 fours en affinage.

$$Q = Q_{a(2f)} \cdot 0,55 = 68,29 \cdot 0,55 = 37,56 \text{ MVAR}$$

Tableau Récapitulatif

Description		Appel de réactif rapide (MVAR)	Puissance Réactive Moyenne (MVAR)	MVAR à compenser pour améliorer cosφ	observations
deux fours en service	2 fours	108	137	52	Réactif calculé dans l'hypothèse H2 et chaque 2 fours sont considérés comme indépendants.
	4 fours	216	274	104	
	6 fours	324	411	156	
Trois fours en service	3 fours	137	205	78	Réactif calculé dans l'hypothèse H2 et chaque 3 fours sont considérés comme indépendants.
	6 fours	274	410	156	
	3 fours	108	171	71	Réactif calculé dans l'hypothèse H2* et avec (**).
	6 fours	216	342	142	
Six fours en service		216	342	142	Réactif calculé pour 4 fours en fusion simultanément et 2 en affinage.

la somme de ces deux valeurs donne le réactif à compenser pour les 6 jours :

$$Q = 103,8 + 37,56 = 141,36 \quad \# \quad 142 \text{ MVAR}$$

Le tableau récapitulatif montre que dans le cas de 2 groupes, indépendants, de 3 jours chacun H2* on aboutit aux mêmes résultats obtenus dans le cas de 6 jours en service.

Par conséquent, on ne retiendra pas cette hypothèse pour la suite de nos calculs.

VI - 3.5. Puissance réactive empruntée au réseau

Les fluctuations de réactif admissibles sont déduites des variations de tension tolérées sur le réseau. On admet qu'elles restent limitées à $\frac{\Delta U}{U} = 0,3\%$ pour éviter des phénomènes de flicker gênants.

L'énergie réactive empruntée au réseau dépend de la puissance de court-circuit du réseau :

$$Q = \frac{\Delta U}{U} \cdot P_{cc} = 0,3\% \cdot P_{cc}$$

d'où le tableau :

Année	P_{cc} en [MVA]	Q tolérée en [MVAR]	Nombre de jours
1983	2350	7,05 # 7	2
1984	2350	7,05 # 7	3
1985	2845	8,535 # 9	4
1986	2845	8,535 # 9	5
1987	3550	10,65 # 11	6

VI-4 - Dimensionnement de l'équipement de compensation rapide

Le calcul est fait à partir du réactif des fours déterminé précédemment et tient compte de la puissance réactive tolérée par le réseau. On considère dans ce calcul que l'installation des fours se fait en une seule phase.

VI.4.1. Solution N°1

On sait qu'au stade final, la puissance réactive tolérée par le réseau est de 11 MVAR. Ce qui nous donne une puissance réactive empruntée au réseau par chaque groupe de 2 fours de : $11 - 3 \# 4$ MVAR. Or au début, lors de l'installation des 2 premiers fours, on peut emprunter au réseau une puissance réactive de 7 MVAR. Ceci nous oblige à surdimensionner la compensation au départ pour éviter le problème de rajouter des MVAR au stade final.

en 1983 : 2 Fours installés

puissance réactive appelée par 2 fours : 108 MVAR

puissance réactive tolérée en 1983 : 7 MVAR

puissance réactive tolérée au stade final : 4 MVAR (pour 2 fours)

puissance réactive à compenser : $108 - 4 = 104$ MVAR

Pour ce stade on a un surplus de 3 MVAR.

en 1984 : 3^e four installé

puissance réactive demandée par un four : 79 MVAR

puissance réactive tolérée est : 7 MVAR

puissance réactive tolérée au stade final : 4 MVAR (pour 2 fours)

puissance réactive à compenser : $79 - 4 = 75$ MVAR

en 1985 : 4^e four installé

puissance réactive demandée par 2 fours : 108 MVAR

puissance réactive tolérée : 9 MVAR

puissance réactive au stade final : 4 MVAR (pour 2 fours)

puissance réactive à compenser : $108 - 4 = 104$ MVAR

-87-

puissance réactive à ajouter : $104 - 75 = 29$ MVAR

En ce stade, on a un surdimensionnement de 1 MVAR.

en 1986 : 5^e four installé

réactif appelé par un four : 79 MVAR

réactif toléré par le réseau : 9 MVAR

réactif toléré au stade final : 4 MVAR (pour 2 fours)

puissance réactive à compenser : $79 - 4 = 75$ MVAR

en 1987 : 6^e four installé

réactif appelé par 2 fours : 108 MVAR

réactif toléré par le réseau : 11 MVAR

réactif toléré au stade final : 4 MVAR (pour 2 fours)

puissance réactive à compenser : $108 - 4 = 104$ MVAR

compensation à ajouter : $104 - 75 = 29$ MVAR.

VI-4.2 Solution N°2

Pour cette solution, on a 2 groupes de 3 fours chacun, par conséquent au stade final, l'énergie réactive tolérée pour chaque groupe est de : $11 : 2 = 6$ MVAR.

en 1983 : 2 fours installés

réactif appelé par 2 fours : 108 MVAR

réactif toléré par le réseau : 7 MVAR

réactif toléré au stade final : 6 MVAR (pour 3 fours)

puissance réactive à compenser : $108 - 6 = 102$ MVAR

En ce stade on a un surplus de 1 MVAR

en 1984 : 3^e four installé

réactif appelé par 3 fours : 137 MVAR

réactif toléré par le réseau : 7 MVAR

réactif toléré au stade final : 6 MVAR (pour 3 fours)

puissance réactive à compenser : $137 - 6 = 131$ MVAR

compensation à ajouter : $131 - 102 = 29$ MVAR

en 1985 : 4^e four installé

réactif appelé par un four : 79 MVAR

réactif toléré par le réseau : 9 MVAR

réactif toléré au stade final : 6 MVAR (pour 3 fours)

puissance réactive à compenser : $79 - 6 = 73$ MVAR

en 1986 : 5^e four installé

réactif appelé par 2 fours : 108 MVAR

réactif toléré par le réseau : 9 MVAR

réactif toléré au stade final : 6 MVAR (pour 3 fours)

puissance réactive à compenser : $108 - 6 = 102$ MVAR

compensation à ajouter : $102 - 73 = 29$ MVAR

Pour 85 et 86, il peut paraître qu'il y a un sous-dimensionnement parce qu'on a 9 MVAR seulement de réactif toléré, alors qu'on a tenu compte de 12 MVAR.

Mais ce n'est pas le cas, car en 1985 et 86 on a seulement un ou deux fours qui fonctionnent au lieu de 3.

en 1987 : 6^e four installé

réactif appelé par 3 fours : 137 MVAR

réactif toléré par le réseau : 11 MVAR

réactif toléré au stade final : 6 MVAR (pour 3 fours)

puissance réactive à compenser : $137 - 6 = 131$ MVAR

compensation à ajouter : $131 - 102 = 29$ MVAR.

VI - 4.3 Solution N° 3

La compensation rapide se faisant au niveau HT, il n'y a pas de différence entre les deux variantes relatives à cette solution.

en 1983 : 2 fours installés

réactif appelé par 2 fours : 108 MVAR

réactif toléré par le réseau : 7 MVAR

puissance réactive à compenser : 101 MVAR

en 1984 : 3^e four installé

réactif appelé par 3 fours : 137 MVAR

réactif toléré par le réseau : 7 MVAR

puissance réactive à compenser : $137 - 7 = 130$ MVAR

compensation à ajouter : $130 - 101 = 29$ MVAR

en 1985 : 4^e four installé

Pour le cas de 4 fours installés, on considère l'hypothèse la plus défavorable - c'est-à-dire 2 fours en court-circuit triphasé franc, un four en fusion nominale et un four en affinage ou à l'arrêt. Ce qui nous donne :

$$q = 2 \cdot 57,6 + 2 \cdot 10,6 = 136,4\%$$

$$\text{d'où } Q_{(4f)} = 2 \cdot 96,6 \cdot 1,364 \cdot 0,707 = 186,3 \approx 186 \text{ MVAR}$$

donc on aura :

réactif appelé par 4 fours : 186 MVAR

réactif toléré par le réseau : 9 MVAR

puissance réactive à compenser : $186 - 9 = 177$ MVAR

compensation à ajouter : $177 - 130 = 47$ MVAR

en 1986 : 5^e four installé

on admet que lors de l'installation du 5^e four, le diagramme de marche sera presque identique à celui de 4 fours (du moins pour la compensation rapide). Par conséquent la compensation restera la même qu'en 1985.

en 1987 : 6^e four installé

réactif appelé par 6 fours : 216 MVAR

réactif toléré par le réseau : 11 MVAR

puissance réactive à compenser : $216 - 11 = 205$ MVAR

compensation à ajouter : $205 - 177 = 28$ MVAR

VI.4.4 solution N°4

- variante 4a

La compensation rapide comporte :

- des équipements propres à chaque groupe de 2 fours et fournissant 60% de la puissance réactive nécessaire.
- un équipement commun installé au niveau HT et fournissant 40% de puissance réactive nécessaire.

la puissance réactive appelée par les 6 fours est de : 324 MVAR.

Le réactif toléré par le réseau au stade final est de : 11 MVAR.

La puissance réactive à compenser sera donc : $324 - 11 = 313$ MVAR,

ce qui donnera pour chaque groupe de 2 fours : $313 : 3 \approx 104$ MVAR

l'équipement de compensation commun aura à fournir la puissance : $104 \cdot 0,4 = 41,6 \approx 42$ MVAR

en 1983 : 2 fours installés

la puissance réactive à compenser par l'équipement individuel.

$$104 \cdot 60\% = 62,4 \neq 62 \text{ MVAR}$$

en 1984 : 3^e four installé

réactif appelé par un four : 79 MVAR

réactif toléré par le réseau : 7 MVAR

réactif toléré au stade final : 4 MVAR

puissance réactive à compenser : $79 - 4 = 75 \text{ MVAR}$

puissance réactive à compenser par l'équipement individuel.

$$75 - 42 = 33 \text{ MVAR}$$

en 1985 : 4^e four installé

puissance réactive à compenser : $104 \cdot 60\% = 62 \text{ MVAR}$

compensation à ajouter : $62 - 33 = 29 \text{ MVAR}$

en 1986 : 5^e four installé

réactif appelé par un four : 79 MVAR

réactif toléré par le réseau : 9 MVAR

réactif toléré au stade final : 4 MVAR

la puissance réactive à compenser : $79 - 4 = 75 \text{ MVAR}$

la puissance réactive à compenser par l'équipement individuel

$$75 - 42 = 33 \text{ MVAR}$$

en 1987 : 6^e four installé

même raisonnement qu'en 1985, on ajoute : 29 MVAR.

- variante 4b :

La compensation comporte :

• des équipements propres à chaque groupe de 3 fours et couvrant 60% des fluctuations de réactif.

• un équipement commun installé au niveau HT et couvrant 40% des fluctuations de réactif.

Les fluctuations de réactif appelés par les 6 fours sont dans ce cas égales à : 274 MVAR

Le réactif toléré par le réseau au stade final est de : 11 MVAR

La puissance réactive à compenser effectivement est :

$$274 - 11 = 263 \text{ MVAR}$$

ou pour chaque groupe de 3 fours : $263 : 2 = 131,5 \# 132 \text{ MVAR}$.

l'équipement commun doit fournir la puissance réactive :

$$132 \cdot 40\% = 52,8 \# 53 \text{ MVAR}$$

en 1983 : 2 fours installés

réactif appelé par 2 fours : 108 MVAR

réactif toléré par le réseau : 7 MVAR

réactif toléré au stade final : 4 MVAR

puissance réactive à compenser : $108 - 4 = 104 \text{ MVAR}$

puissance réactive à compenser au niveau MT :

$$104 - 53 = 51 \text{ MVAR}$$

en 1984 : 3^e four installé

la puissance réactive fournie par l'équipement individuel (MT)
est égale à : $132 \cdot 60\% = 79,2 \# 79 \text{ MVAR}$

la puissance réactive à ajouter : $79 - 51 = 28 \text{ MVAR}$

en 1985 : 4^e four installé :

réactif appelé par un four : 79 MVAR

réactif toléré par le réseau : 9 MVAR

réactif toléré au stade final : 4 MVAR

puissance réactive à compenser : $79 - 4 = 75 \text{ MVAR}$

puissance réactive à compenser au niveau MT : $75 - 53 = 22 \text{ MVAR}$

en 1986 : 5^e four installé

réactif appelé par 2 fours : 108 MVAR

puissance réactive à compenser : $108 - 4 = 104 \text{ MVAR}$

puissance réactive à compenser au niveau MT : $104 - 53 = 51 \text{ MVAR}$

puissance réactive à ajouter : $51 - 22 = 29 \text{ MVAR}$.

en 1987 : 6^e four installé

la puissance réactive à compenser par l'équipement individuel est :

$$132 \cdot 60\% \# 79 \text{ MVAR}$$

la compensation à ajouter en 1987 sera donc :

$$79 - 51 = 28 \text{ MVAR}$$

VI-5-Dimensionnement de l'équipement de compensation lente

Comme le montrent les diagrammes superposés des figures 3.4.II et 3.4.III, une partie des équipements de compensation rapide est en fonctionnement permanent et compense donc partiellement le réactif lent. Cette partie est estimée à 25% de la capacité totale.

Le réactif à compenser est calculé par différence entre le réactif initial et celui inhérent à la compensation rapide.

Notons que les équipements de compensation lente sont installés au niveau MT, sans partie commune.

VI-5.1 Solution N°1

en 1983 : 2 fours installés

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $104 \cdot \frac{25}{100} = 26$ MVAR

compensation lente à installer : $52 - 26 = 26$ MVAR

en 1984 : 3^e four installé

puissance réactive lente appelée par un four : 26 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $75 \cdot \frac{25}{100} = 18,75 \approx 19$ MVAR

compensation lente à installer : $26 - 19 = 7$ MVAR

en 1985 : 4^e four installé

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $104 \cdot \frac{25}{100} = 26$ MVAR

compensation lente à installer : $52 - 26 = 26$ MVAR

compensation lente à ajouter : $26 - 7 = 19$ MVAR

en 1986 : 5^e four installé

même raisonnement qu'en 1984, la compensation lente à

installer sera donc : 7 MVAR

en 1987 : 6^e four installé

même raisonnement qu'en 1985 \Rightarrow 19 MVAR

VI-5.2 Solution N°2

en 1983 : 2 fours installés

puissance réactive appelée par 2 fours : 52 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $102 \cdot \frac{25}{100} = 25,5$ MVAR

compensation lente à installer : $52 - 25,5 = 26,5$ MVAR

en 1984 : 3^e four installé

puissance réactive lente appelée par 3 fours : 78 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $131 \cdot \frac{25}{100} = 32,75$ MVAR

compensation lente à installer : $78 - 32,75 = 45,25$ MVAR

compensation lente à ajouter : $45,25 - 26,5 = 18,75$ MVAR

en 1985 : 4^e four installé

puissance réactive lente appelée par un four : 26 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $73 \cdot \frac{25}{100} = 18,25$ MVAR

compensation lente à installer : $26 - 18,25 = 7,75$ MVAR

en 1986 : 5^e four installé

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $102 \cdot \frac{25}{100} = 25,5$ MVAR

compensation lente à installer : $52 - 25,5 = 26,5$ MVAR

compensation lente à ajouter : $26,5 - 7,75 = 18,75$ MVAR

en 1987 : 6^e four installé

puissance réactive lente appelée par 3 fours : 78 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $131 \cdot \frac{25}{100} = 32,75$ MVAR

compensation lente à installer : $78 - 32,75 = 45,25$ MVAR

compensation lente à ajouter : $45,25 - 26,5 = 18,75$ MVAR

VI.5.3 Solution N°3

variante 3a

en 1983 : 2 fours installés

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide des 2 fours : $101 \cdot \frac{25}{100} = 25,25$ MVAR

compensation lente à installer : $52 - 25,25 = 26,75$ MVAR

en 1984 : 3^e four installé

compensation lente appelée par un four : 26 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide des 3 fours : $130 \cdot \frac{25}{100} = 32,5$ MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide du 3^e four : $32,5 - 25,25 = 7,25$ MVAR

compensation lente à installer : $26 - 7,25 = 18,75$ MVAR
en 1985 : 4^e four installé

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR
réactif inhérent à la compensation rapide des 4 fours

$$177 \cdot \frac{25}{100} = 44,25 \text{ MVAR}$$

d'où le réactif inhérent à la compensation rapide du 3^e et 4^e four

$$44,25 - 25,25 = 19 \text{ MVAR}$$

compensation lente à installer : $52 - 19 = 33$ MVAR

compensation lente à ajouter : $33 - 18,75 = 14,25$ MVAR

en 1986 : 5^e four installé

puissance réactive lente appelée par un four : 26 MVAR

le réactif inhérent à la compensation rapide étant identique à celui de 1985 (des 4 fours). on est obligé d'installer une compensation lente de : 26 MVAR, car on a supposé que, le réactif rapide appelé par 5 fours reste sensiblement égal à celui appelé en 1985 soit 177 MVAR.

en 1987 : 6^e four installé

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide des 6 fours

$$205 \cdot \frac{25}{100} = 51,25 \text{ MVAR}$$

d'où le réactif inhérent à la compensation rapide du 5^e et 6^e four

$$51,25 - 44,25 = 7 \text{ MVAR}$$

compensation lente à installer : $52 - 7 = 45$ MVAR

compensation lente à ajouter : $45 - 26 = 19$ MVAR

Pour la variante 3b, en suivant le même raisonnement, on aboutit aux mêmes résultats. Ce qui est normal étant donné que toute la compensation rapide se fait au niveau MT.

VI - 5.4 Solution N°4

- variante 4a

en 1983 : 2 fours installés

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR
réactif inhérent à la compensation rapide

$$(62 + 42) \cdot \frac{25}{100} = 26 \text{ MVAR}$$

compensation lente à installer : $52 - 26 = 26 \text{ MVAR}$

en 1984 : 3^e four installé

puissance réactive lente appelée par un four : 26 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $33 \cdot \frac{25}{100} = 8,25 \text{ MVAR}$

compensation lente à installer : $26 - 8,25 = 17,75 \text{ MVAR}$

en 1985 : 4^e four installé

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR.

réactif inhérent à la compensation rapide : $62 \cdot \frac{25}{100} = 15,5 \text{ MVAR}$

compensation lente à installer : $52 - 15,5 = 36,5 \text{ MVAR}$

compensation lente à ajouter : $36,5 - 17,75 = 18,75 \text{ MVAR}$

en 1986 : 5^e four installé

même raisonnement qu'en 1984 $\Rightarrow 17,75 \text{ MVAR}$

en 1987 : 6^e four installé

même calcul qu'en 1985 $\Rightarrow 18,75 \text{ MVAR}$

- Variante 4b

en 1983 : 2 fours installés

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide :

$$(51 + 53) \cdot \frac{25}{100} = 26 \text{ MVAR}$$

compensation lente à installer : $52 - 26 = 26 \text{ MVAR}$

en 1984 : 3^e four installé

puissance réactive lente appelée par 3 fours : 78 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide :

$$(51 + 28 + 53) \cdot \frac{25}{100} = 33 \text{ MVAR}$$

compensation lente à installer : $78 - 33 = 45 \text{ MVAR}$

compensation lente à ajouter : $45 - 26 = 19 \text{ MVAR}$

en 1985 : 4^e four installé

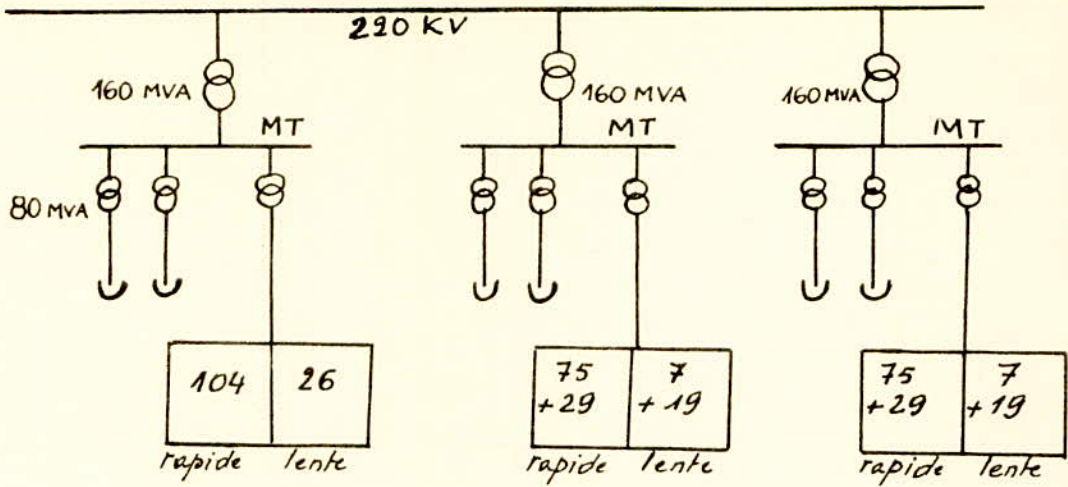
puissance réactive lente appelée par un four : 26 MVAR

réactif inhérent à la compensation rapide : $22 \cdot \frac{25}{100} = 5,5 \text{ MVAR}$.

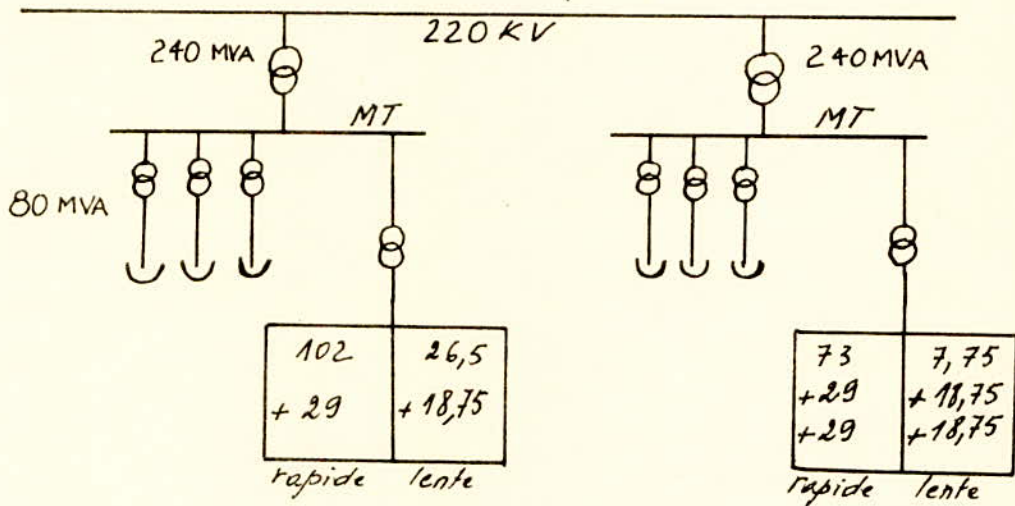
Tableau Récapitulatif

		Equipement de compensation rapide [MVAR]					Equipement de compensation lente [MVAR]				
		1983	1984	1985	1986	1987	1983	1984	1985	1986	1987
Solution N°1		104	75	29	75	29	26	7	19	7	19
Solution N°2		102	29	73	29	29	26,5	18,75	7,75	18,75	18,75
Solution N°3	V3a	101	29	47	—	28	26,75	18,75	14,25	26	19
	V3b	101	29	47	—	28	26,75	18,75	14,25	26	19
Solution N°4	V4a	104	33	29	33	29	26	17,75	18,75	17,75	18,75
	V4b	104	28	22	29	28	26	19	20,5	18,75	19

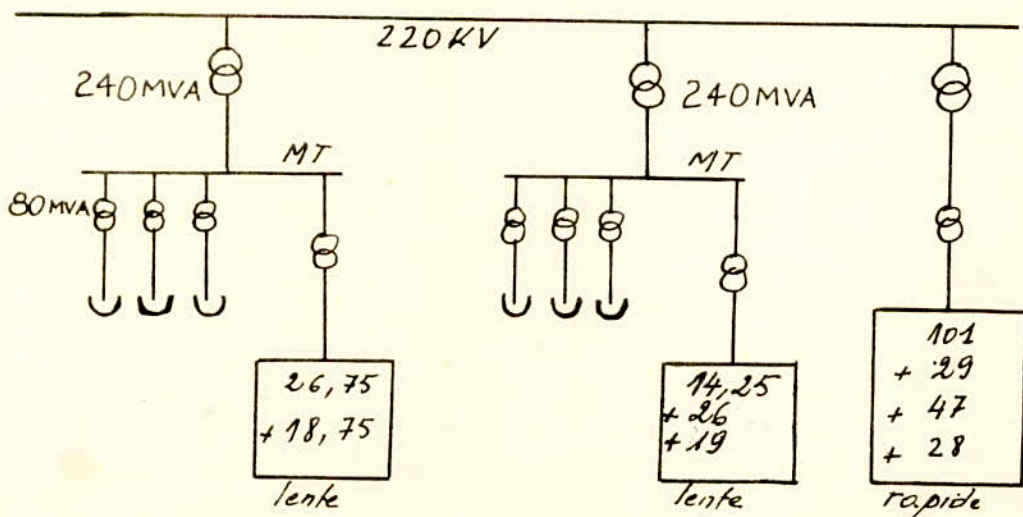
Solution N°1



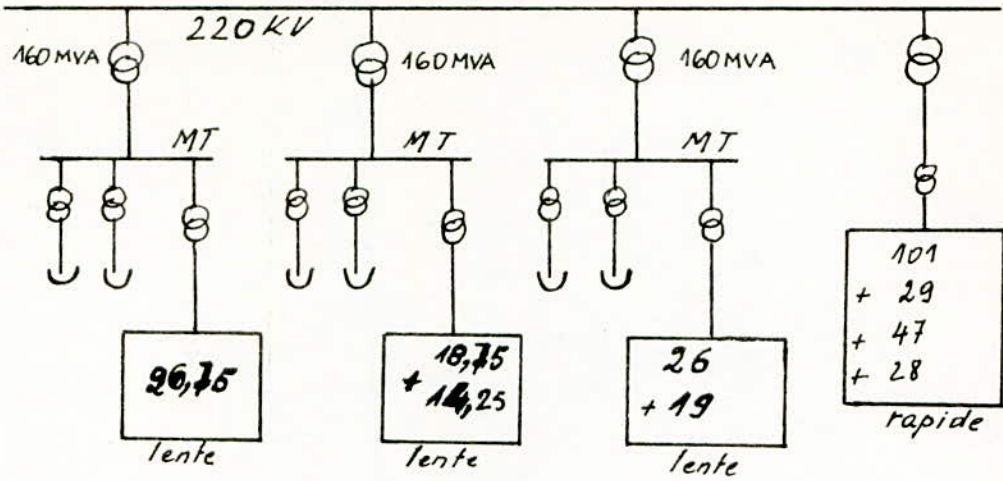
Solution N°2



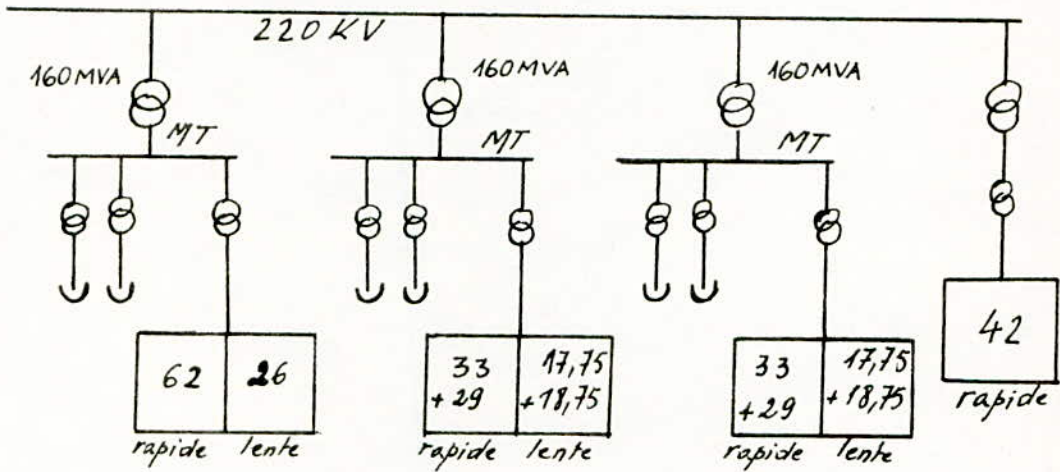
Solution N°3 - V3b



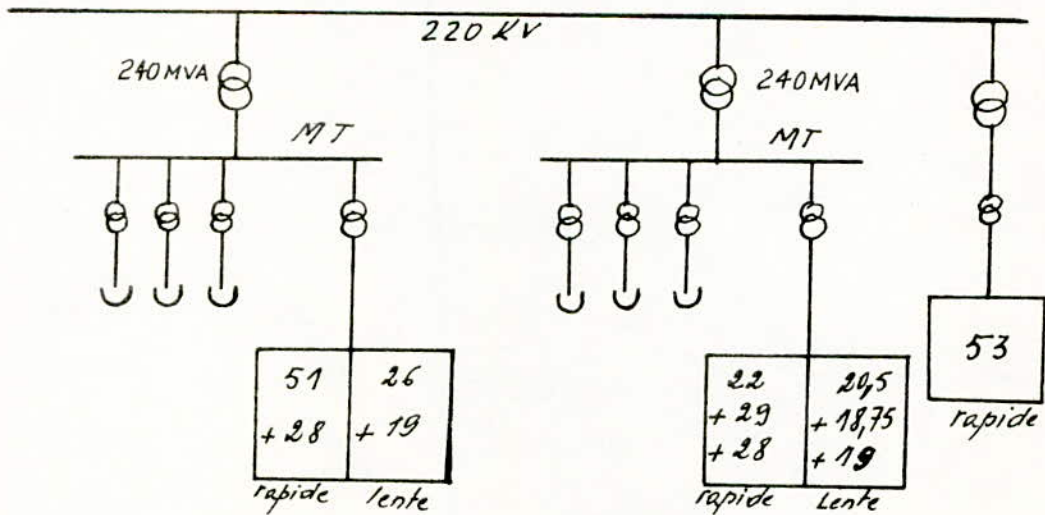
Solution N°3 - V3a



Solution N°4 - V4a



Solution N°4 - V4b



compensation lente à installer : $26 - 5,5 = 20,5$ MVAR
en 1986 : 5^e four installé

puissance réactive lente appelée par 2 fours : 52 MVAR
réactif inhérent à la compensation rapide :

$$(22 + 29) \cdot \frac{25}{100} = 12,75 \text{ MVAR}$$

compensation lente à installer : $52 - 12,75 = 39,25$ MVAR

compensation lente à ajouter : $39,25 - 20,5 = 18,75$ MVAR

en 1987 : 6^e four installé

puissance réactive lente appelée par 3 fours : 78 MVAR
réactif inhérent à la compensation rapide :

$$(22 + 29 + 28) \cdot \frac{25}{100} = 19,75 \text{ MVAR}$$

compensation lente à installer : $78 - 19,75 = 58,25$ MVAR

compensation lente à ajouter : $58,25 - 39,25 = 19$ MVAR

VI-6- Etude comparative

Pour faire une comparaison entre les différentes solutions étudiées, on établit le coût de chacune d'elles. Celui-ci étant déterminant pour le choix de la solution à adopter. Pour cela, on se pris comme référence, les prix de la firme "Tractionel", à savoir :

- équipement de compensation rapide : 1500 F/KVAR

- équipement de compensation lente : 350 F/KVAR

Ces coûts ayant évolué depuis l'année de leur estimation et n'ayant pas d'informations qui permettent de les actualiser, on suppose que 100 u/MVAR soit le prix de la compensation rapide pour l'année 1983. Ce qui donne pour le coût de la compensation lente : $\frac{350}{1500} \cdot 100 = 23,33$ [u/MVAR].

On signale que ces prix couvrent les transformateurs, les condensateurs (ou réactances), les thyristors et les autres accessoires.

L'installation des fours se faisant par échelon et étant donné l'inflation sur le marché de l'équipement, les prix en début de réalisation ne seront plus les mêmes au stade d'après. Par conséquent, il est indispensable de ramener tous les coûts à un même niveau (ici l'année 83).

En considérant un taux d'inflation de 8% par année (ce qui se rapproche

de la réalité). on aura donc :

en 1983 : on prend la base : 1 comme rapport d'actualisation

en 1984 : $1 \cdot (1 + 8\%) = 1,08$, ce qui représente 8% d'inflation par rapport à 83

en 1985 : $1,08 \cdot (1 + 8\%) = 1,1664$

en 1986 : $1,1664 \cdot (1 + 8\%) = 1,2597$

en 1987 : $1,2597 \cdot (1 + 8\%) = 1,3605$

Par conséquent, on sera amené à multiplier les prix par 1; 1,08; 1,1664; 1,2597; 1,3605 respectivement pour les années 83; 84; 85; 86; 87.

- Solution N°1

1983 : compensation rapide : 104 MVAR

 compensation lente : 26 MVAR

 prix compensation rapide : $100 \cdot 104 \cdot 1 = 10400$

 prix compensation lente : $23,33 \cdot 26 \cdot 1 = 606,58$

1984 : compensation rapide : 75 MVAR

 compensation lente : 7 MVAR

 prix compensation rapide : $100 \cdot 75 \cdot 1,08 = 8100$

 prix compensation lente : $23,33 \cdot 7 \cdot 1,08 = 176,37$

1985 : compensation rapide : 29 MVAR

 compensation lente : 19 MVAR

 prix compensation rapide : $100 \cdot 29 \cdot 1,1664 = 3382,56$

 prix compensation lente : $23,33 \cdot 19 \cdot 1,1664 = 517,03$

1986 : compensation rapide : 75 MVAR

 compensation lente : 7 MVAR

 prix compensation rapide : $100 \cdot 75 \cdot 1,2597 = 9447,75$

 prix compensation lente : $23,33 \cdot 7 \cdot 1,2597 = 205,72$

1987 : compensation rapide : 29 MVAR

 compensation lente : 19 MVAR

 prix compensation rapide : $100 \cdot 29 \cdot 1,3605 = 3945,45$

 prix compensation lente : $23,33 \cdot 19 \cdot 1,3605 = 603,068$

 Total compensation rapide = 35275,76

 Total compensation lente = 2108,768

 Total = 37384,53 [4]

- Solution N°2

Année	Rapport d'actualisation	MVAR Rapide	Prix	MVAR lent	Prix
83	1	102	10200	26,5	618,245
84	1,08	29	3132	18,75	472,43
85	1,1664	73	8514,72	7,75	210,893
86	1,2597	29	3653,13	18,75	551,04
87	1,3605	29	3945,45	18,75	595,133
		Total = 29445,3		Total = 2447,74	
Total = 31893,04					

- Solution N°3 (v3a et v3b)

Année	Rapport d'actualisation	MVAR Rapide	Prix	MVAR lent	Prix
83	1	101	10100	26,75	624,077
84	1,08	29	3132	18,75	472,43
85	1,1664	47	5482,08	14,25	387,77
86	1,2597	-	-	26	764,108
87	1,3605	28	3809,4	19	603,068
		Total = 22523,48		Total = 2851,45	
Total = 25374,93					

- Solution N°4 - V4a

Année	Rapport d'actualisation	MVAR Rapide	Prix	MVAR lent	Prix
83	1	104	10400	26	606,58
84	1,08	33	3564	17,75	447,236
85	1,1664	29	3382,56	18,75	510,227
86	1,2597	33	4157,01	17,75	521,651
87	1,3605	29	3945,45	18,75	595,133
		Total = 25449,02		Total = 2680,827	
TOTAL = 28129,847					

- solution N°4 - V4b

Année	Rapport d'actualisation	MVAR Rapide	Prix	MVAR lent	Prix
83	1	104	10400	26	606,58
84	1,08	28	3024	19	478,73
85	1,1664	22	2566,08	20,5	557,848
86	1,2597	29	3653,13	18,75	551,04
87	1,3605	28	3809,4	19	603,068
		Total = 23452,61		Total = 2797,26	
TOTAL = 26249,876					

Il est à noter, qu'il faudrait consacrer pour les solutions N°3 et N°4, un investissement supplémentaire pour la création de traveés supplémentaires 220kv et de leurs transformateurs associés. Le coût de ces auxiliaires est estimé toujours d'après "tractionel" à :

$$\frac{34\,000\,000}{1500\,000} \cdot 100 = 2\,266,7 [U]$$

En tenant compte de cette dépense, les coûts des solutions N°3 et N°4 deviennent :

$$N^{\circ}3 : 25\,374,93 + 2\,266,7 = 27\,641,63 [U]$$

$$N^{\circ}4a : 28\,129,847 + 2\,266,7 = 30\,396,547 [U]$$

$$N^{\circ}4b : 26\,249,876 + 2\,266,7 = 28\,516,576 [U].$$

Commentaires :

En regard des coûts établis, on voit que les deux premières solutions sont plus coûteuses que les autres. La solution N°3 qui semble attrayante du point de vue coût, n'est pas intéressante sur le plan technique. En effet en cas de défaut, du fait que toute la compensation se fait au niveau 220kv, il se répercute sur toute l'aciérie. De plus, des frais supplémentaires peuvent intervenir pour pallier à la diminution du cosφ qui quoique valant 0,85 pour l'ensemble des 6 fours, devient moins bon au niveau de chaque groupe de 2 fours (solution N°3a) ou de 3 fours (solution N°3b) pris séparément - puisque une partie du réactif de compensation (supérieure à celle de la solution N°4) est produite en dehors. On note que la solution N°4a, malgré qu'elle comporte 3 équipements de compensation au lieu de 2 et un prix plus élevé comparativement à la solution N°4b, nous semble la plus indiquée. D'une part parcequ'elle présente une plus grande sécurité de travail. En effet, la non disponibilité d'un équipement ne jouant que sur 2 fours. D'autre part, elle permet de tirer profit, lors de l'installation des 2 autres groupes de 2 fours, de l'expérience acquise sur le premier.

CONCLUSION

Vu la puissance et le nombre de fours à installer, l'aciérie de Djel a besoin d'un haut niveau de puissance de court-circuit qui contribuera sans aucun doute à réduire les variations de la tension du réseau. L'implantation d'une centrale électrique à proximité de l'aciérie jouerait un grand rôle dans le renforcement de la puissance de court-circuit.

Cependant, même avec une centrale locale, l'installation d'équipements de compensation reste indispensable, car celle-ci, installée par SNS, évitera partiellement mais efficacement le problème de la sous-utilisation d'un réseau ayant une puissance de court-circuit de 8850 [MVA] au niveau de DJEL qui serait onéreux.

On a fait un dimensionnement qui s'échelonne sur 5 années consécutives, sans tenir compte d'éventuels retards dans la réalisation de l'aciérie. Les puissances de court-circuit, dont on a tenu compte pour le faire, quoique se rapprochant de la réalité, pourront subir des changements et restent donc à confirmer.

Il est à noter que notre étude n'a porté que sur la compensation de la puissance réactive. L'examen des problèmes tels que les courants asymétriques et les distorsions harmoniques nécessite une connaissance plus précise des équipements. Néanmoins, une compensation phase par phase résoud le problème des courants asymétriques.

Enfin, le choix entre les différents types d'équipements de compensation étudiés ne peut pas être fait a priori, étant donné le nombre important de paramètres à prendre en considération.

Pour l'adoption de tel ou tel système de compensation, la SNS doit s'inspirer de l'expérience déjà vécue (particulièrement celle d'EL-HADJAR). Toutefois, sachant que l'installation de l'équipement doit se faire progressivement, les condensateurs couplés par thyristors offrent des avantages certains, en plus d'une possibilité d'agrandissement au fur et à mesure des batteries de condensateurs, le système est conçu pour une commande phase par phase.

BIBLIOGRAPHIE

ouvrages

P. Henry et R. Naudy : *Technologie d'électricité*.

René Pélissier : *les réseaux d'énergie électrique* :

Tome 1 : *les aspects techniques du service*

Tome 2 : *calcul et réglage des réseaux*.

Paschkis : *les fours électriques industriels*.

Techniques de l'ingénieur.

revues

ASEA :

1976 - année 48 - Numéro 5

1969 - année 41 - Numéro 6

1972 - année 44 - Numéro 4

1977 - année 49 - Numéro 2

édition 1 - Août 1974

édition 1 - Février 1972

Brown Boveri :

Février 1978 - Tome 65

N° de publication CH-E 3.018.0F

N° de publication CH-1W 541 790 F

RGE :

Février 1977 - Tome 86 - Numéro 2

Février 1972 - Tome 81 - Numéro 2

autres

Documents SNS-JIJEL

«Le flicker et les moyens de le compenser» par J. Toulemonde et D. BIRFET

«Expérience en service des filtres d'harmoniques et compensateurs statiques d'Énergie réactive» par G. MABBETTO, ..., L. MEURANT (A.C.E.C).

«Méthode d'approche des problèmes électrotechniques de raccordement des Fours à arc» par M. COUVREUR, ..., P. NICHAISE (A.I.M. - C.B.E.E)