

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

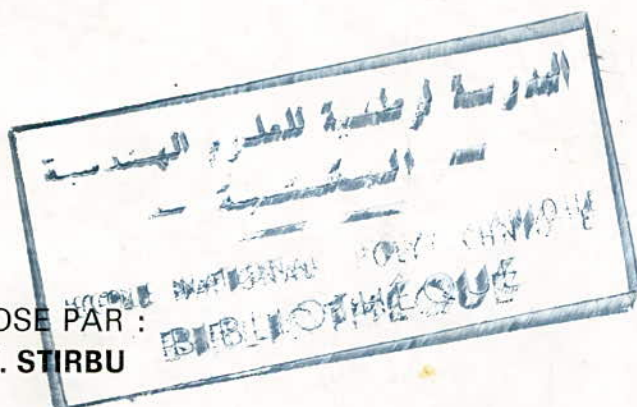
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

1ed



Projet de Fin d'Etudes

**Sujet ; Alimentation en Courant Continu
du Laboratoire d'Electrotechnique**



PROPOSE PAR :
V. STIRBU

ETUDIE PAR :
BARKAT Med

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

Projet de Fin d'Etudes

**Sujet ; Alimentation en Courant Continu
du Laboratoire d'Electrotechnique**

PROPOSE PAR :
V. STIRBU



ETUDIE PAR :
BARKAT Med

X

- Dédicaces -

- A la mémoire de mon père Si Larafi, tombé au champ d'honneur
- A la mémoire de mon frère Ahmed
- A mes frères Belhadj et Saïd
- A toute ma famille
- A mes amis.

Remerciements

Je tiens à remercier M^E STIRBU, promoteur de ce sujet, des efforts qu'il a déployés pour venir en mon aide.

Je remercie particulièrement M^E BOUTENKO des conseils qu'il m'a prodigués

Je remercie également tous les professeurs qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Sommaire

Introduction

Chapitre I

Rappel théorique sur les thyristors.

I.1 principe physique - - - - -	1
I.2 étude des caractéristiques - - - - -	5

Chapitre II

Etude du groupe convertisseur

II.1 généralités sur les thyristors - - - - -	10
II.2 définition concernant un montage redresseur - - - - -	11
II.3 étude du système monophasé - - - - -	11
II.4 choix du pont et fonctionnement - - - - -	13
II.5 étude de grandeurs électriques fournis par le bloc redresseur - - - - -	15
II.6 le transformateur du redresseur - - - - -	21
II.7 chutes de tension du groupe transformateur redresseur	23
II.8 facteur de déphasage - - - - -	27
II.9 courant de court-circuit - - - - -	29
II.10 pertes et rendement - - - - -	31
II.11 protection du bloc redresseur - - - - -	36
II.12 commande du bloc redresseur - - - - -	39

o/oo

Chapitre III

Accumulateur

III-1 principe	44
III-2 phénomène à la charge et à la décharge	44
III-3 caractéristiques de la batterie	46
III-4 exploitation des batteries d'accumulateur	47
III-5 fonctionnement du chargeur de batterie	49
III-6 détermination des caractéristiques du groupe convertisseur	52

Chapitre IV

Changement des thyristions - câblage des redresseurs.

IV-1 changement des thyristions	56
IV-2 câblage des redresseurs	58
Conclusion	61
Bibliographie	62

- Introduction -

À l'heure actuelle, la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique se font généralement en courant alternatif. Les raisons de ce choix sont la relative simplicité de production de ce courant et surtout la facilité avec laquelle on peut passer d'une tension alternative à une autre à l'aide de transformateurs.

Le courant continu est irremplaçable pour l'électrolyse, la charge des accumulateurs, l'alimentation de nombreux dispositifs électroniques, pour l'alimentation des moteurs...

Pour obtenir le courant continu on est obligé de le produire sur place. La conversion du courant alternatif en continu a été réalisée à l'origine par des ensembles moteurs-dynamos, des commutatrices et plus récemment par l'utilisation de l'arc électrique dans les redresseurs à gaz...

Le développement des semi-conducteurs de puissances tels que diodes et thyristors a apporté dans la technique une importance très considérable dans le domaine de l'électricité industrielle. Ces nouveaux dispositifs simples, sûrs, de meilleurs rendements, trouvent leur place où le courant continu est indispensable.

L'alimentation du laboratoire en courant continu s'effectuait par des accumulateurs en plomb et Cd-Ni. Vu le manque

d'entretien, un personnel qualifié, la disponibilité en courant continu se retrouve très réduite. La gamme très étendue de possibilités offertes par ces installations s'en est trouvée considérablement limitée. Actuellement il existe une génératrice de 6KW qui supporte toute la demande. Vu le matériel et l'étape à venir le laboratoire est appelé à travailler en demandant une puissance de l'ordre de 30KW d'où la nécessité d'installer un pont redresseur à thyristors. L'éclairage de secours est indispensable d'où l'implantation de batteries d'accumulateurs. Une batterie d'accumulateurs stationnaire représente par son coût et la sécurité qu'elle assure un bien d'équipement précieux. On alimente la batterie par l'intermédiaire d'un pont redresseur ($\approx 3,5$ KW). Il existe au laboratoire un pont redresseur à thyristors qui a servi comme régulateur de tension. Actuellement ce pont ne délivre aucune tension redressée et est hors service. On doit doter ce pont par des thyristors.

I. Rappel théorique sur les thyatron

1. Principe physique :

1. a Construction :

Un thyatron se compose d'une ampoule en verre, remplie de gaz rarefié (argon, xénon, vapeur de mercure...) dans laquelle sont montées trois ou quatre électrodes. Ces électrodes sont isolées l'une de l'autre, reliées à des fils de sortie traversant l'ampoule et permettant leur connexion au circuit électrique externe. Ces électrodes sont anode, cathode, une ou deux grilles. (voir fig a)

1. b fonctionnement :

Le conducteur entre l'anode et la cathode est le gaz à l'intérieur du tube, qui doit tout d'abord être ionisé pour remplir ce but.

Les ions gazeux se déplacent lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Il en résulte une charge positive qui est ainsi transférée. A condition qu'un gaz soit ionisé, c'est à dire divisé partiellement ou totalement en électrons et ions, deux types de porteurs de charge sont présents et contribuent tous deux au passage du courant électrique à travers le gaz. Pour que le thyatron puisse fonctionner, la cathode doit être chauffée à environ 700 à 900°C. A la croissance de température, la vitesse des électrons dans la cathode devient si élevée qu'ils peuvent surmonter la force d'attraction qui retient normalement les électrons à l'intérieur de la matière qui forme la cathode. Pour faciliter cette émission électronique la surface de la cathode est revêtue d'un mélange d'oxyde métallique poli qui constitue une enveloppe calorifuge...

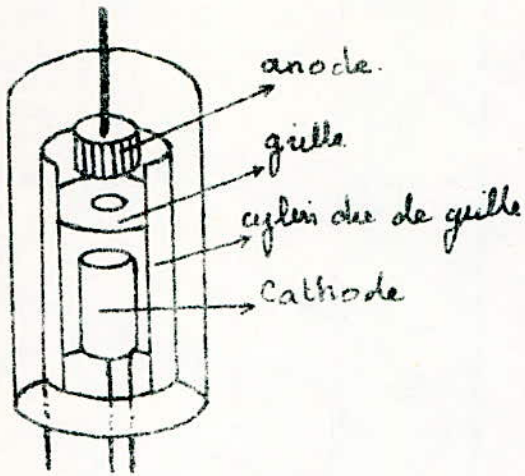


fig. a: schéma de réalisation pratique d'un thyatron.

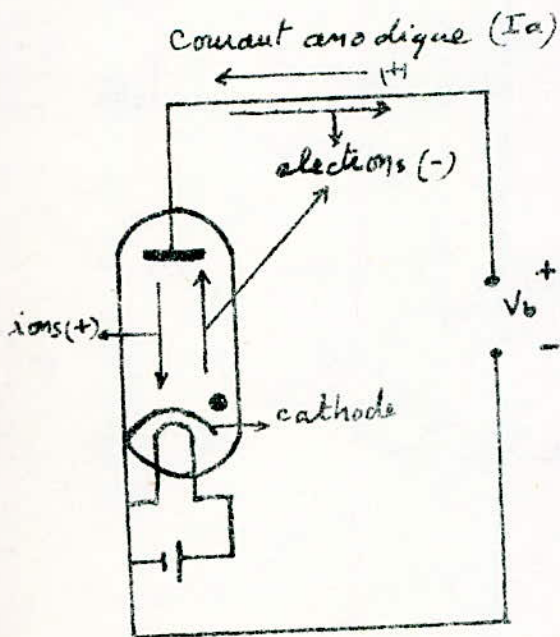
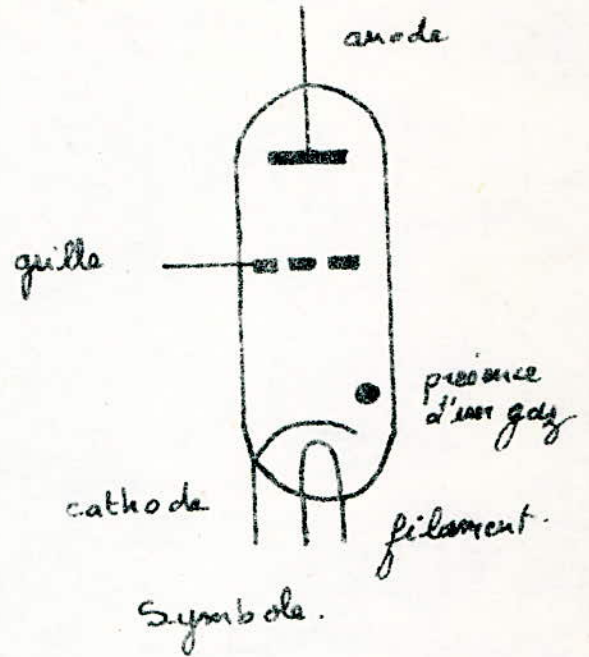


fig b

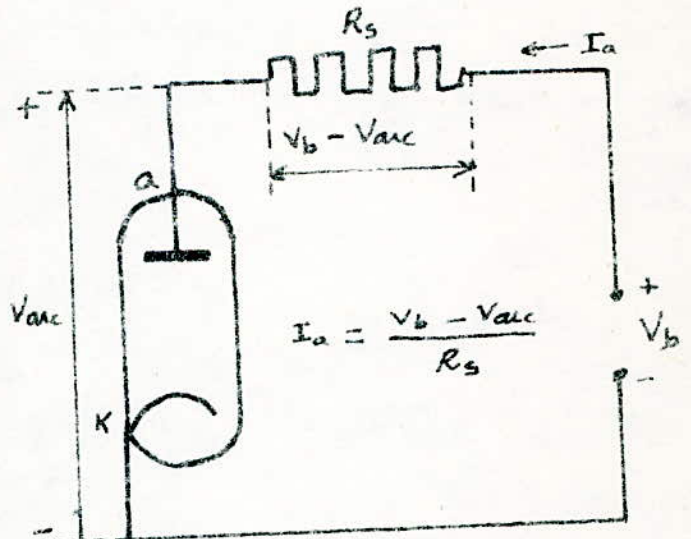


fig c.

Le chauffage s'effectue toujours en basse tension, notamment inférieur au potentiel d'ionisation du gaz de manière à éviter qu'une décharge prenne naissance entre les conducteurs.

1. c. Rôle de la grille :

a. Ehyatron sans grille : fig 6

On applique une faible tension positive V_b entre l'anode et la cathode. Les électrons émis se déplacent vers l'anode. Sur leur chemin ils se heurtent aux atomes gazeux perdant ainsi leur vitesse. Pour une vitesse donnée des électrons correspondant à une tension anodique donnée, les atomes de gaz sont ionisés, c'est à dire la force exercée sur l'atome par l'électron entrant en collision, est si élevée que l'atome en perd un électron. De cette façon l'atome de gaz est divisé en un électron et un ion positif. Les nouveaux électrons et ions de l'atome neutre du gaz sont soumis au champ électrique entre la cathode et l'anode. Les ions se déplacent de l'anode vers la cathode, les électrons vers l'anode comme les électrons émis. De cette façon, identique leur vitesse devient si élevée que lorsqu'ils frappent un atome de gaz ils provoquent l'ionisation de ces atomes et ainsi de suite. Ce phénomène d'accumulation est appelé décharge dans les gaz. Lorsqu'il se produit une décharge dans le gaz, seule une basse tension anodique est nécessaire pour maintenir la décharge (10 à 20V). Cette tension est indépendante de l'intensité anodique qui traverse le tube, on la nomme tension d'arc. Il n'existe aucun moyen pour limiter l'intensité traversant le tube et le circuit externe. Un dispositif limiteur de courant comme une résistance doit...

donc être inséré dans le circuit anodique fig c. La différence entre la tension appliquée et la tension d'arc est chutée dans la résistance série.

b. Thyatron muni d'une grille : fig d

On applique une tension négative suffisamment élevée $-V_g$ à la grille par rapport à la cathode, le tube ne s'amorcera pas même si la tension anodique est élevée, le tube restera non conducteur. Cela est dû à la force de répulsion de la charge négative sur la grille exercée sur les électrons émis par la cathode. Si la tension négative diminue progressivement, son influence sur les électrons émis devient plus faible de sorte qu'à un instant donné le tube s'amorce et un courant anodique commence à passer. Une fois amorcé, le thyatron ne peut être éteint que lorsque la tension d'alimentation tombe en dessous de la tension d'arc. Dans un thyatron allumé, la tension de grille n'exerce plus de commande parce qu'une gaine d'ions positifs entoure la grille. L'épaisseur de la gaine est d'autant plus faible que la pression du gaz est basse et pour une pression de gaz donnée, d'autant plus faible que le courant d'arc est élevé et d'autant plus grande que la polarisation croît en valeur négative. La grille se pour rôle de faire varier l'intensité du courant anodique et de régler le temps d'amorçage.

1. d. Effet des différents types de remplissage gazeux :

Dans les thyatrons à vapeur de mercure on trouve à la fois de la vapeur et du mercure liquide. Lorsque la température est élevée, due à l'échauffement de la cathode. Une partie du mercure liquide s'évapore ce qui entraîne l'augmentation de la pression du gaz. La durée de vie du tube...

est proportionnelle à la pression du gaz mais la tension inverse maximale de crête admissible entre l'anode et la cathode du tube décroît à mesure qu'augmente la pression du gaz. Dans un thyatron à remplissage de gaz inerte, il n'existe absolument aucun liquide, il ne peut se produire aucune évaporation. La pression du gaz inerte ne dépend donc que peu de la température. fig e. La pression du gaz inerte diminue car les atomes du gaz sont absorbés par les électrodes et par les parois du verre, cette diminution est plus forte que les courants sont importants. Dans le cas d'un tube à vapeur de mercure la chute de pression est compensée par une évaporation de mercure liquide. Cependant la vie d'un tube à gaz inerte dépend de l'intensité périodique. Les avantages des thyatrons à vapeur de mercure, gaz inerte sont combinés dans les tubes remplis d'un mélange de deux sortes. Dans ces conditions la pression du gaz dépend moins de la température que celle des tubes à vapeur de mercure, leur durée de vie n'est pas raccourcie par les effets de perte des atomes.

2. Etude des caractéristiques :

2.2. caractéristique de commande: fig 2a

La caractéristique de commande est la courbe de la tension d'anode en fonction de la tension de grille limite, juste au dessus de laquelle la décharge s'amorce. Cette caractéristique a l'allure des courbes C_1 ou C_2 , elle n'est pas précise car elle dépend de la pression du gaz, de la vapeur remplissant le tube et de l'ionisation résiduelle. En pratique on indique une zone de fonctionnement (partie hachurée)

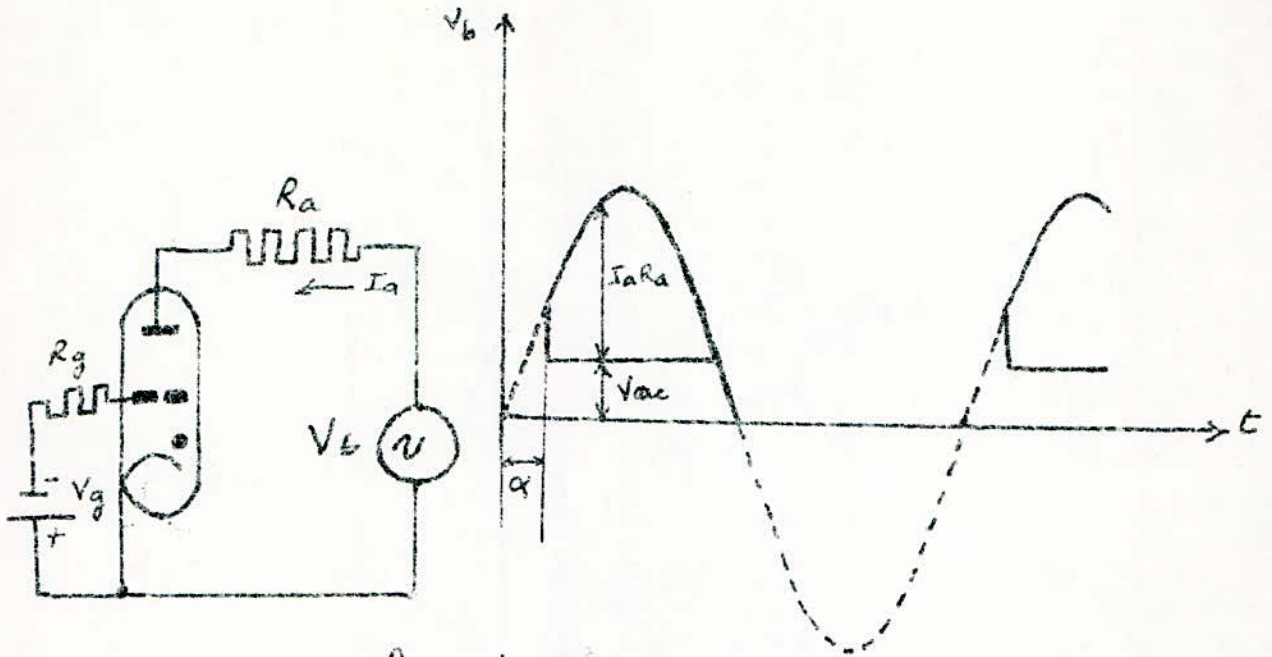
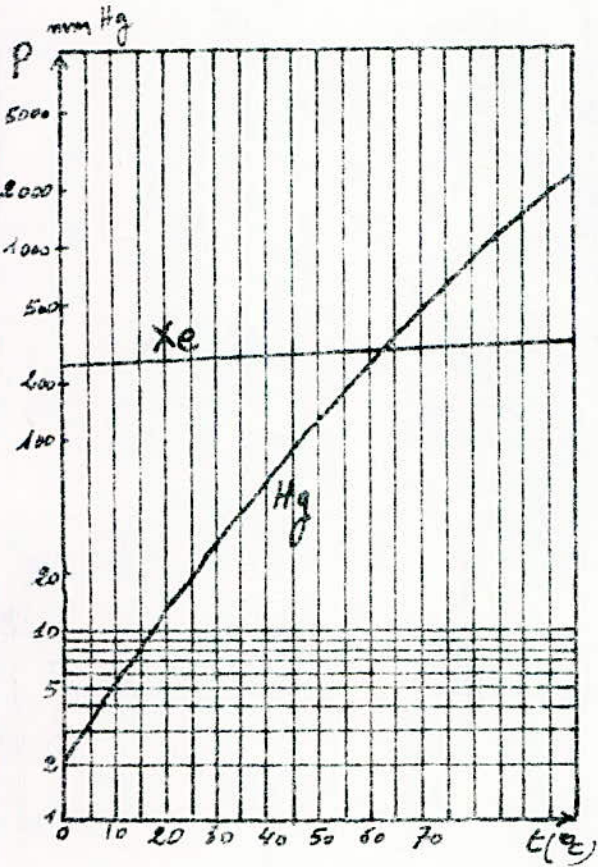


fig: d



fige

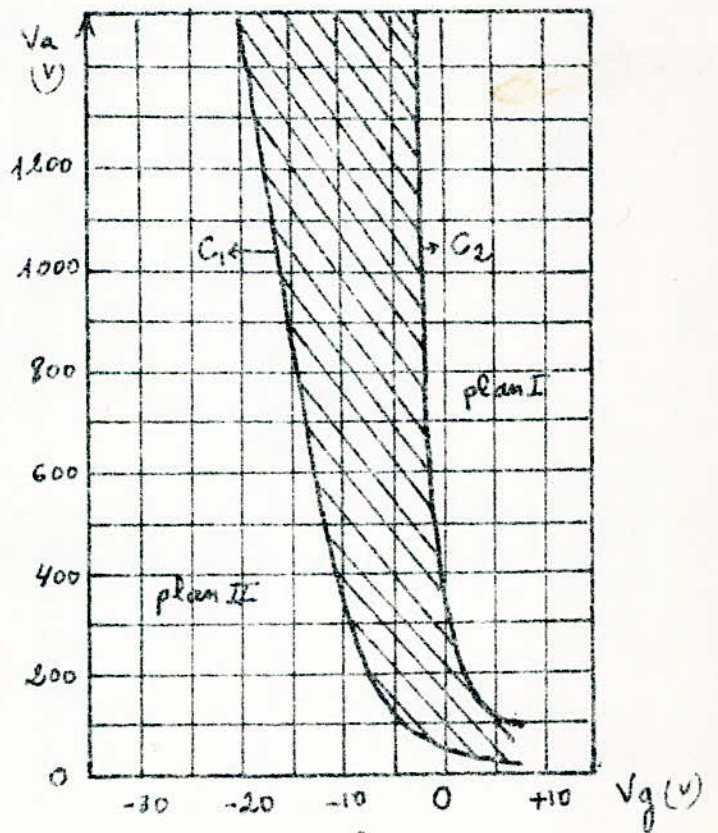


fig 2a

* La commande négative est située dans le plan II

Les tubes sont plus sensibles car ils n'exigent qu'une faible énergie pour leur commande.

* La commande positive est située dans le plan I.

Dans cette position, la grille fonctionne comme une anode auxiliaire, ionisant l'espace grille cathode; Ces tubes exigent pour leur commande une énergie bien supérieure à celle de la commande négative.

2.b. Rapport de commande:

On caractérise un thyatron, dans la région la plus utilisée de sa caractéristique par un coefficient, le rapport de commande $\frac{U_{anode}}{U_{grille}}$.

2.c. Dispersion de l'instant d'amorçage. (Jitter)

Le temps nécessaire pour que l'amorçage se produise, à partir de l'époque d'application du signal de commande sur la grille, subit des variations erratiques, ce phénomène est négligeable aux fréquences industrielles.

2.d. durée d'établissement de la conduction

Dans un thyatron où la commande est du type négatif, l'établissement de l'avalanche n'est pas instantané, il dépend: de la géométrie du tube, de la tension anodique, de l'énergie de commande et de la rapidité de montée de la tension de grille.

2.e. Recouvrement, temps de désionisation:

C'est le temps nécessaire après une période de débit, pour que l'ionisation soit suffisamment réduite afin que la grille ait retrouvé ses caractéristiques de commande normale.

$$5 \mu s < T_{des} < 1000 \mu s$$

(H₂) (H_g)

2. f. Arc inverse, facteur de commutation :

Lorsque le tube cesse de débiter, les ions positifs résiduels sont attirés par l'anode, sur laquelle ils se heurtent. Ce bombardement détermine l'apparition d'un arc inverse.

Le produit des taux de diminution du courant direct à l'extinction par le taux de décroissance de la tension inverse, juste après extinction, détermine le facteur de commutation.

2. g. Pertes internes - Commutation :

Aux basses fréquences, les pertes internes sont dues uniquement aux pertes directes, la chute de tension dans le tube prend instantanément la valeur de régime.

* Pertes à l'établissement du courant :

Le régime permanent n'est obtenu qu'au bout du temps de fermeture.

Pendant la commutation d'établissement, la tension aux bornes du tube décroît et le courant croît, il s'en suit une perte d'énergie

* Pertes de régime :

C'est l'énergie perdue pendant le passage de l'impulsion de courant.

* Pertes de recombinaison :

Après le débit direct on applique une tension inverse, le tube est traversé par le courant de recombinaison. Ce courant présente d'abord une pointe importante puis il décroît exponentiellement.

La somme des pertes à l'établissement du courant et les pertes de recombinaison représente les pertes de commutation.

Conclusion :

Actuellement l'utilisation des thyatrones a disparu pour laisser la place aux thyristors.

On date maintenant les nouvelles installations de thyristors et leurs dérivés. Un tableau comparatif, entre thyatrones et thyristors s'établit :

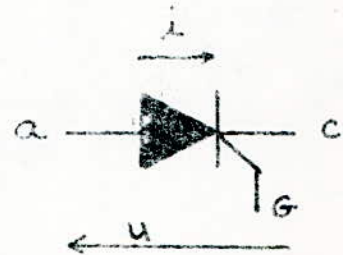
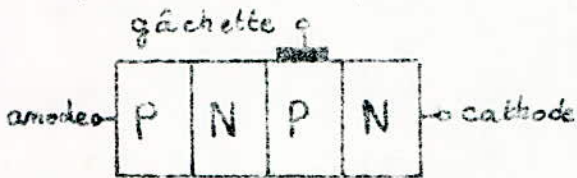
thyatrones à gaz	thyristors
dispositif sous tension élevée, faible I	I fort, tension dépasse 1000V
chute directe 10 à 20V, I inverse faible	chute directe 1,5V, I inverse non négligé
tension de commande élevée, I faible	tension de commande faible, I fort.
doit être chauffé, ne démarre pas immédiatement.	pas de chauffage, démarre immédiatement.
caractéristiques se détériorent dans le temps, durée de vie limitée	reste identique à lui même, durée de vie illimitée
sensibles aux variations de la température ambiante	fonctionnent sans modifications sensibles des paramètres dans un grand intervalle de température.
possibilité de surcharge	faible possibilité de surcharge
supportent une tension inverse assez élevée (1500V)	tension inverse dépasse 2000V pour certains types.

II Étude du groupe convertisseur.

V.1. Généralités sur les thyristors :

Le thyristor est un semi-conducteur composé de quatre couches dopées à des degrés différents de l'anode à la cathode (P-N-P-N)

La couche médiane P forme l'électrode de commande, l'autre couche médiane N est la couche de blocage. Le thyristor est un semi-conducteur unidirectionnel, la circulation du courant dépend de l'impulsion de la gâchette.

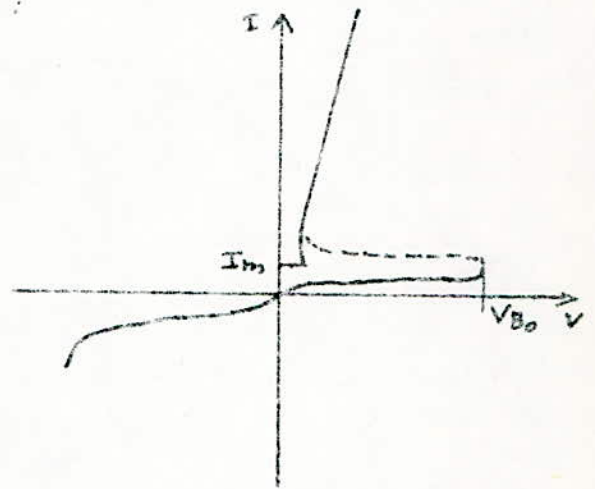


Caractéristiques statiques d'un thyristor :

a. Sans amorçage :

Dans le sens de conduction si on dépasse V_{α} , le thyristor passe de l'état bloqué à l'état passant. Dans le sens inverse, le thyristor se comporte comme une diode, si on dépasse la tension

inverse limite, apparition d'avalanche entraînant la destruction du thyristor.



b. Avec amorçage :

La tension d'anode dans ce cas est inférieure à celle de l'état naturel. Le courant I_m est nommé courant de maintien : courant minimal nécessaire pour maintenir le thyristor à l'état passant. Pour bloquer un thyristor il faut que le courant de conduction soit inférieur à I_m .

II.2 Définitions concernant un montage redresseur

- bloc redresseur:

C'est un circuit composé de thyristors formant un ou plusieurs groupes commutants, placés de manière à délivrer un courant continu à sa sortie lorsque son entrée est alimentée par une tension alternative.

- Groupe commutant:

C'est un ensemble de bras du bloc redresseur qui commutent cycliquement indépendamment.

- Commutation:

C'est le transfert de courant, entre deux trajets de redressement consécutifs.

- bras d'un montage redresseur:

C'est une partie du circuit qui contient un thyristor et qui constitue un trajet de redressement destiné à former, avec d'autres bras semblables, un groupe commutant.

- montage à une ou deux voies:

Le montage à une voie est parcouru par un courant unidirectionnel.

Le montage à deux voies est parcouru par un courant bidirectionnel.

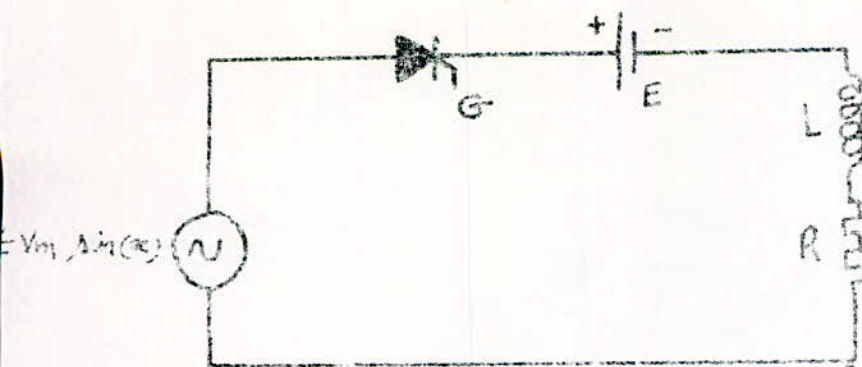
II.3. Etude du système monophasé:

On envisage le cas où le thyristor fonctionne comme redresseur.

On considère le circuit II.3

Si on a $E > 0$, $E > V$, l'amorçage du thyristor est impossible

Si $E > 0$, $E < V$, la tension aux bornes du thyristor devient positive pour $V_m \sin \alpha_0 = E$.



- Une source de tension v
- un thyristor
- charge R-L
- Une tension continue E

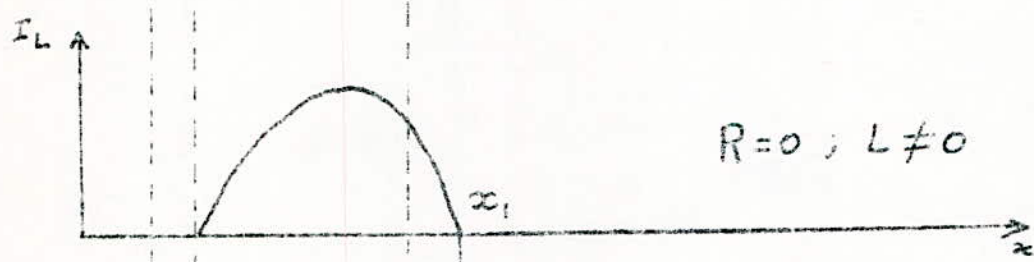
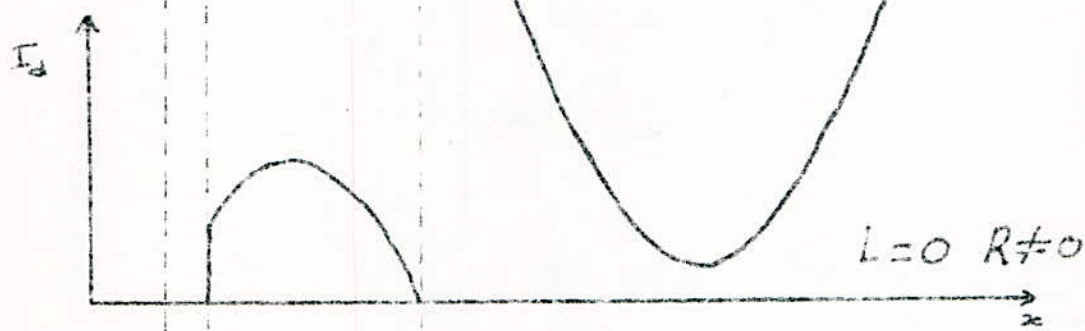
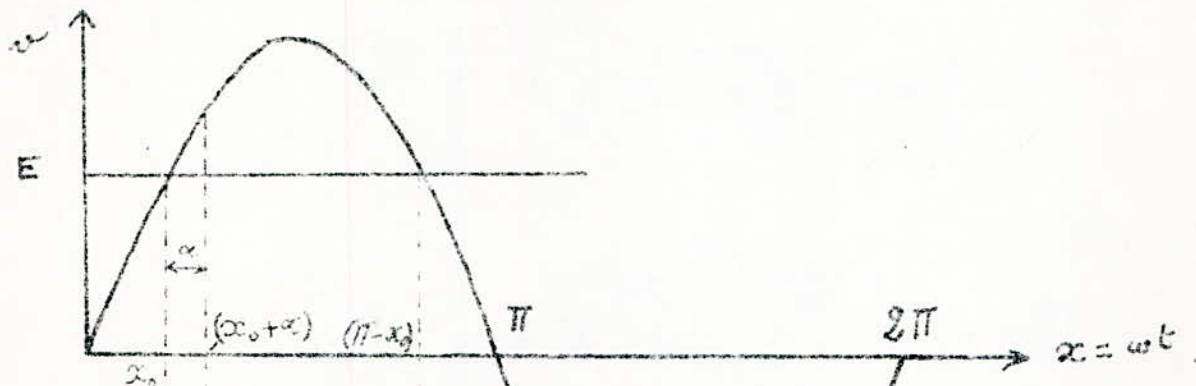


Fig II-3

Soit α l'angle d'amorçage, le thyristor débute à l'instant $\alpha = \alpha_0 + \alpha$ d'où l'équation des tensions $Ri_d + L\omega \frac{di_d}{dt} = V_m \sin(\alpha_0 + \alpha) - E$

Interprétation de l'équation:

1^{er} cas: $L=0 \Rightarrow i_d = \frac{V_m \sin(\alpha_0 + \alpha)}{R}$. Le courant s'arrête à l'instant $\pi - \alpha_0$ car à partir de cet instant la force électromotrice E devient supérieure à la tension d'alimentation: $E > V \Rightarrow$ thyristor bloqué

2^{ème} cas: $R=0$ (circuit purement inductif)

$$\Rightarrow \frac{di_d}{dt} = \frac{V_m \sin(\alpha_0 + \alpha) - E}{L\omega}$$

L'inductance augmente le temps de conduction, le thyristor débute au delà de $\pi - \alpha_0$. En négligeant les chutes internes, la tension aux bornes du thyristor est nulle durant $\alpha_0 + \alpha$ à α_1 .

II.4. Choix du pont et fonctionnement:

Le laboratoire exige une puissance de 30 kW, elle est relativement faible par rapport à celle du réseau. On alimente directement à partir du 220V qui est fourni par le transformateur de puissance 100 kVA. On choisit le pont de GREATZ avec couplage du transformateur étoile-étoile (Y-Y), car il possède des avantages: utilisation du secondaire, tension inverse moyenne... fig II.4

Fonctionnement du pont de GREATZ:

Le système du pont permet de redresser les alternances négatives. Dans ce montage, la tension redressée est à chaque instant, égale à la différence entre la plus élevée et la plus faible et ceci quel que soit le sens des tensions (positives, négatives). A chaque instant deux phases et deux thyristors en série débitent le courant.

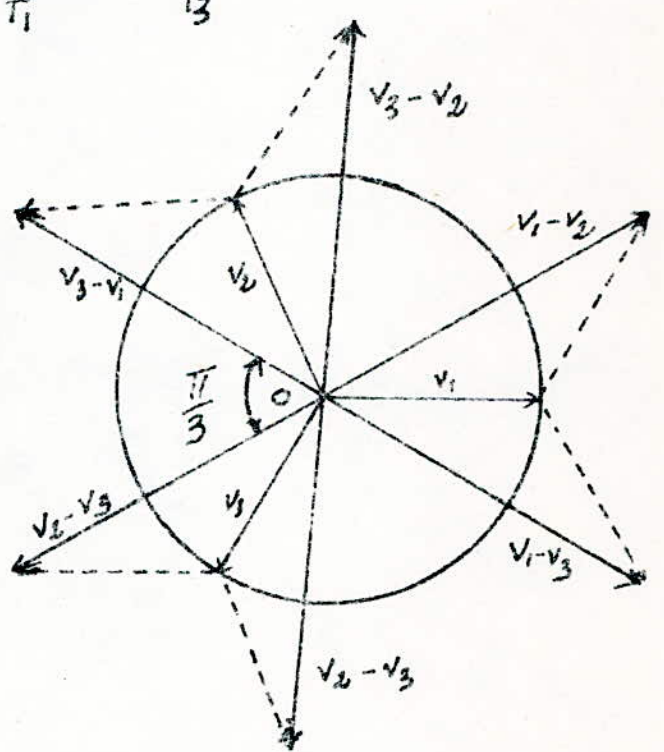
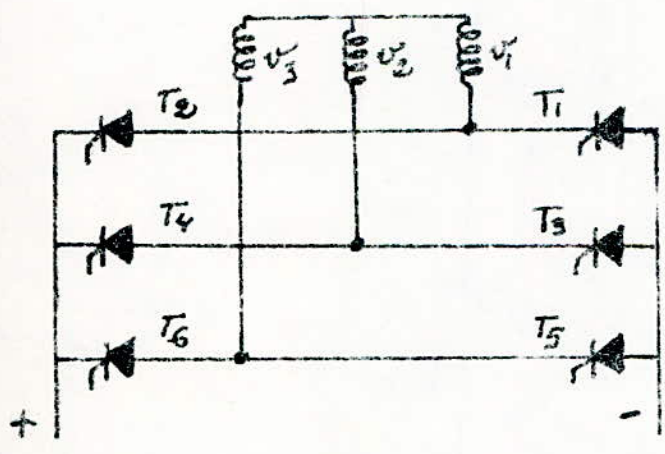
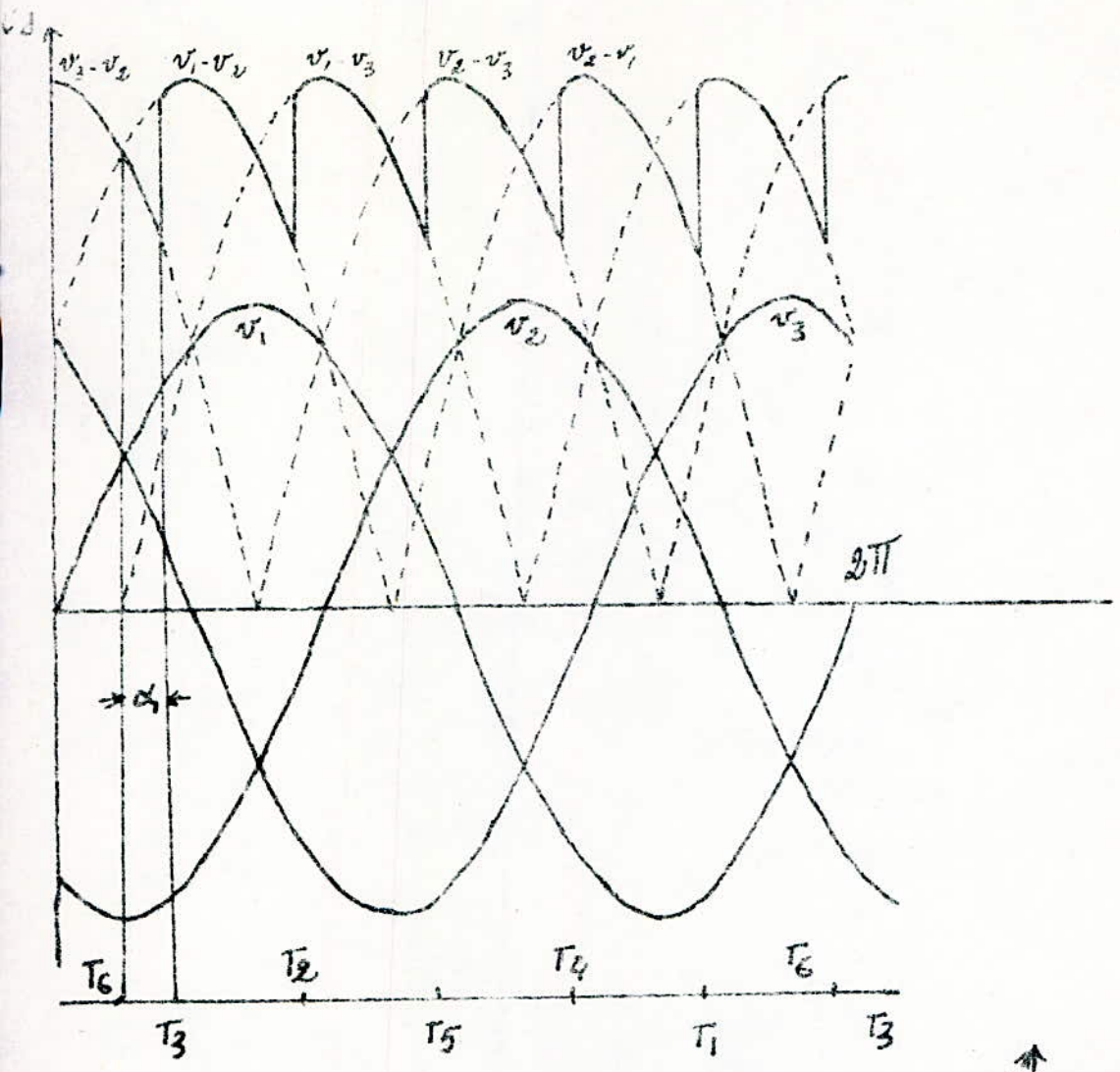


Fig II-4

soit U_c la tension aux bornes du bloc :

Si $v_1 > v_3 > v_2 \Rightarrow U_c = v_1 - v_2 \Rightarrow T_2$ et T_3 débitent

Si $v_1 > v_2 > v_3 \Rightarrow U_c = v_1 - v_3 \Rightarrow T_2$ et T_5 débitent

Si $v_2 > v_1 > v_3 \Rightarrow U_c = v_2 - v_3 \Rightarrow T_4$ et T_5 débitent

Si $v_2 > v_3 > v_1 \Rightarrow U_c = v_2 - v_1 \Rightarrow T_4$ et T_1 débitent

Si $v_3 > v_2 > v_1 \Rightarrow U_c = v_3 - v_1 \Rightarrow T_6$ et T_1 débitent

Remarque: On n'a pas tenu compte (fig II.4) du phénomène d'empiètement pour cela voir II-6.3

II.5 Etude des grandeurs électriques fournies par le bloc redresseur :

II.5.1 tension fictive à vide $U_{dio\alpha}$

Soit $v = V_{pm} \cos y$. La valeur moyenne dans l'intervalle $[y_1, y_2]$ est :

$$V_{moy} = \frac{1}{2\pi} \int_{y_1}^{y_2} V_{pm} \cos y dy = \left[\frac{V_{pm}}{2\pi} \sin y \right]_{y_1}^{y_2} = \frac{V_{pm}}{2\pi} (\sin y_2 - \sin y_1) \quad \textcircled{a}$$

Suivant la variation de l'angle d'amorçage α , plusieurs cas sont envisagés

1^{er} cas: charge inductive ou résistive: fig II-5-1

$$\text{ou} \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{p}$$

L'instant d'amorçage: $y_1 = \alpha - \frac{\pi}{p}$

L'instant d'extinction: $y_2 = \alpha + \frac{\pi}{p}$

On remplace dans la formule \textcircled{a} y_1 et y_2 par leurs valeurs, après réduction on aboutit: $V_{moy} = p \frac{V_{pm}}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \cos \alpha$

pour $\alpha = 0$ c'est à dire amorçage naturel: $U_{dio} = V_{pm} \cdot \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p}$

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

2^{ème} cas: charge inductive fig II-5-2

Dans ce cas le courant peut circuler pendant une durée où la tension...

aux bornes du thyristor est négative.

tand que $\alpha \leq \frac{\pi}{2}$ on a $U_{dio\alpha} = U_{dio} \cdot \cos \alpha$

pour $\alpha > \frac{\pi}{2}$ ce cas est à exclure puisqu'on veut utiliser le bloc comme redresseur uniquement.

3^e Cas: charge résistive Fig II-5-3

Dans ce cas le courant est nul quand la tension ^{est} négative puisque une résistance n'emmagasine pas d'énergie.

Le débit est possible entre $y_1 = \alpha - \frac{\pi}{p}$ et $y_2 = \frac{\pi}{2}$

$$V_{moy} = \frac{V_{pm}}{2\pi} [\sin y_2 - \sin y_1] = \frac{V_{pm}}{2\pi} \left[\sin \frac{\pi}{2} - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right) \right]$$

pour une calotte: $V_{moy} = \frac{V_{pm}}{2\pi} \left[1 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right) \right]$

pour p calottes: $U_{dio\alpha} = \frac{p}{2\pi} V_{pm} \left[1 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right) \right]$.

On a exprimé auparavant U_{dio} :

$$U_{dio} = \frac{p}{\pi} V_{pm} \sin \frac{\pi}{p} \Rightarrow \frac{U_{dio}}{\sin \frac{\pi}{p}} = \frac{p}{\pi} V_{pm}$$

$$\Rightarrow U_{dio\alpha} = \frac{U_{dio}}{2} \left[\frac{1 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right)}{\sin \frac{\pi}{p}} \right]$$

La tension moyenne $U_{dio\alpha}$ est nulle pour $\alpha - \frac{\pi}{p} = \frac{\pi}{2}$, c'est à dire

pour $\alpha = \frac{\pi}{p} + \frac{\pi}{2}$

II.5.2 valeurs efficaces de la tension redressée:

La valeur efficace d'une fonction périodique s'exprime:

$$U_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v^2 dy \quad \text{où} \quad v = V_m \cos y$$

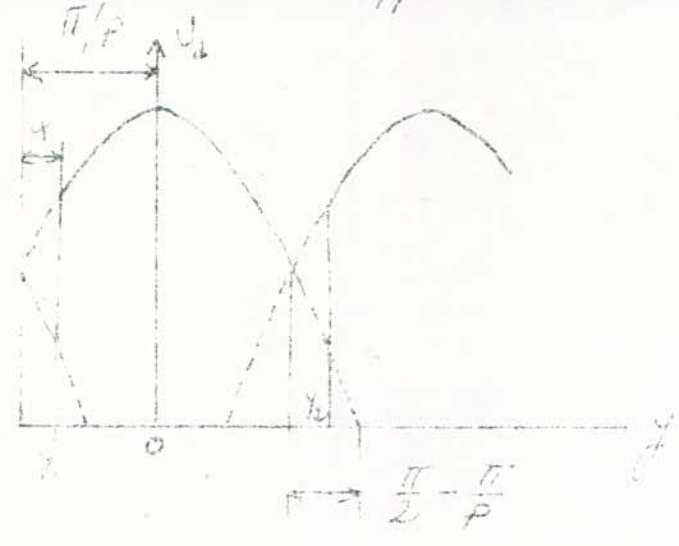
entre l'intervalle $[y_1, y_2]$

$$U_{eff}^2 = \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} V_m^2 \cos^2 y dy = \frac{V_m^2}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} \left(\frac{1 + \cos 2y}{2} \right) dy$$

$$U_{eff}^2 = \frac{V_m^2}{y_2 - y_1} \left[\frac{y_2 - y_1}{2} + \frac{\sin 2y_2 - \sin 2y_1}{4} \right] \quad (b)$$

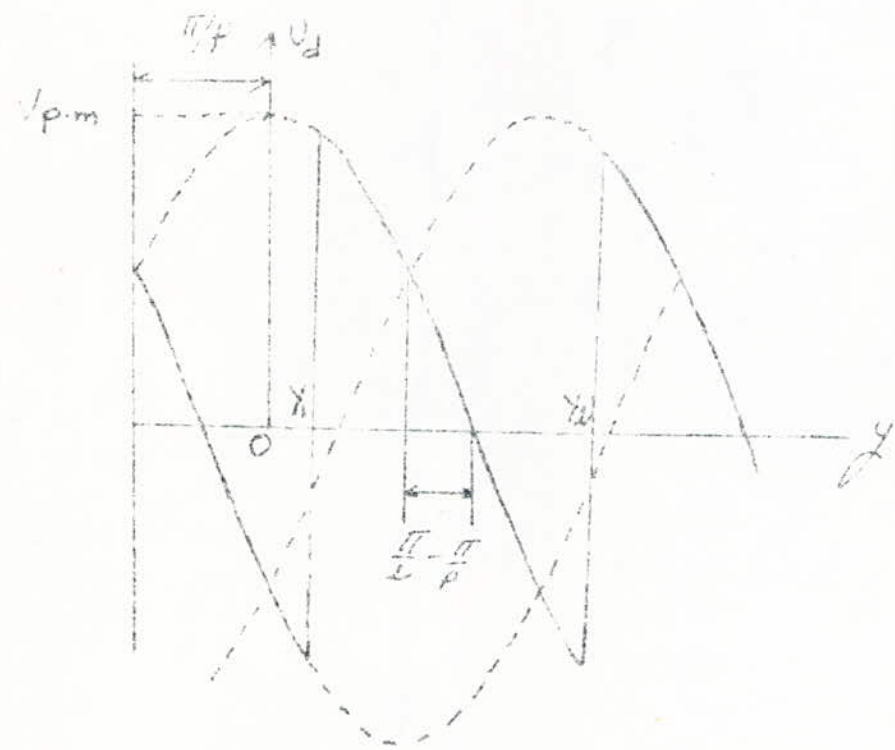
La tension efficace dépend de l'angle d'amorçage.

1



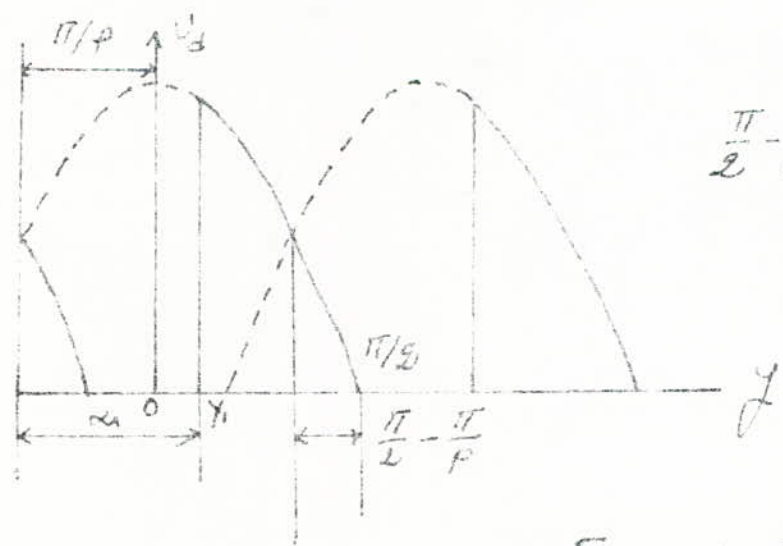
$$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{P}$$

2



$$\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{P} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{P}$$

3



$$\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{P} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{P}$$

Fig II-5

$$- 0 < \alpha < \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{p} ; y_1 = \alpha - \frac{\pi}{p} \text{ et } y_2 = \alpha + \frac{\pi}{p}$$

On remplace dans (b), on obtient après simplification

$$U_{\text{eff}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\sin 2\pi/p \cdot \cos 2\alpha}{2\pi/p}}$$

- charge fortement inductive et pour $\alpha = 0$

$$U_{\text{eff}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\sin 2\pi/p}{2\pi/p}}$$

II.5.3 Tension d'alimentation du bloc redresseur: U_{v0}

U_{v0} : tension entre deux phases commutantes successives elle s'établit comme suit:

$$U_{v0} = \sqrt{2} \cdot \frac{\pi}{q \cdot S} U_{\text{dio}}$$

dans notre cas: $S=2$; $q=3 \Rightarrow U_{v0} = 0,74 \cdot U_{\text{dio}}$

II.5.4 tension inverse supportée par un bras:

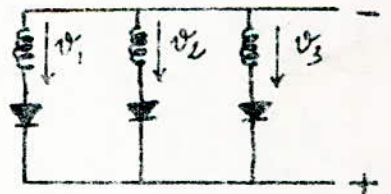
Le courant est très faible en sens inverse. On doit se préoccuper de la tension inverse, si elle dépasse des limites très précises, provoque une destruction complète de l'élément.

On illustre par un exemple d'un redresseur triphasé simple avec amorçage naturel ($\alpha = 0$).

La tension inverse sur le bras 1 est $v_2 - v_1$ lorsque le bras 2 débite.



La tension inverse sur le bras 1 est $v_3 - v_1$ lorsque le bras 3 débite.



$$v_1 = V_m \cos y ; v_2 = V_m \cos(y - 2\pi/3) ; v_3 = V_m \cos(y - 4\pi/3)$$

$$v_2 - v_1 = V_m [\cos(y - 2\pi/3) - \cos y] = -2V_m \sin(y - \pi/3) \cdot \sin 2\pi/3$$

$$v_2 - v_1 = -V_m \sqrt{3} \sin(y - \pi/3)$$

$$v_2 - v_1 \text{ est maximale pour } y - \pi/3 = \pi/2 \Rightarrow y = \frac{5\pi}{6} = \pi - \frac{\pi}{6}$$

à l'instant $y = \frac{5\pi}{6}$ on a $v_3 = 0$

$$\begin{aligned} v_3 - v_1 &= V_m \cdot \cos(y - 4\pi/3) - V_m \cos y \\ &= V_m [\cos(y - 4\pi/3) - \cos y] = 2V_m \sin(y - 2\pi/3) \cdot \sin(-\pi/3) \\ &= -\sqrt{3} V_m \sin(y - 2\pi/3) \end{aligned}$$

$v_3 - v_1$ est maximale pour $y - 2\pi/3 = \pi/2 \Rightarrow y = 7\pi/6 = \pi + \pi/6$

dans le cas de notre montage $p=6$; $q=3$; $s=2$; $g=1$.

$$U_{im} = U_{i0m} = U_{v0m} = \sqrt{2} \cdot U_{v0} = \sqrt{2} \cdot 0,74 \cdot U_{dio}$$

$$U_{im} = 1,05 U_{dio}$$

$$U_i = 0,9 U_{v0} = 0,3 \cdot 0,74 \cdot U_{dio} = 0,665 U_{dio}$$

II.5.5. Facteur de forme : F

Le facteur de forme d'une grandeur ondulée est le rapport de la valeur efficace à la valeur moyenne pendant une période

$$U_{eff} = \frac{V_{pm}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\sin 2\pi/P}{2\pi/P}} \quad ; \quad U_{dio} = V_{pm} \cdot \frac{P}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{P}$$

$$F = \frac{U_{eff}}{U_{dio}} = \sqrt{1 + \frac{\sin 2\pi/P}{2\pi/P}} / \sqrt{2} \cdot \frac{\sin \pi/P}{\pi/P}$$

$$\text{pour } p=6 \Rightarrow F = 1,001$$

II.5.6 harmonique de la tension redressée :

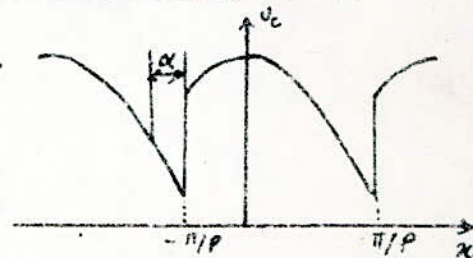
La tension redressée U_c est une fonction périodique qui renferme outre la composante continue U_{dio} , une composante alternative qui peut être développée en série de Fourier.

la tension redressée sur l'intervalle

$$\left[-\frac{\pi}{P} + \alpha, \frac{\pi}{P} + \alpha\right] \text{ est } U_c = V_m \cos x.$$

on passe à un changement de variable on pose $x = y + \alpha$

$$U_c = V_m \cos(y + \alpha) \text{ ici la période est de } 2\pi/P$$



$$U_c = U_{dio} + A_1 \sin p y + B_1 \cos p y + \dots + A_k \sin k p y + B_k \cos k p y \dots$$

— Calcul du coefficient A_k :

$$A_k = \frac{P}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{P}}^{\frac{\pi}{P}} U_c \sin k p y \, dy = \frac{P}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{P}}^{\frac{\pi}{P}} V_m \cos(y + \alpha) \sin(k p y) \, dy$$

$$\text{mais } \cos a \cdot \cos b = \frac{1}{2} [\sin(a+b) + \sin(b-a)]$$

$$A_k = \frac{P}{2\pi} V_m \int_{-\frac{\pi}{P}}^{\frac{\pi}{P}} [\sin(y(1+kp) + \alpha) + \sin(y(kp-1) - \alpha)] \, dy$$

on obtient après calcul

$$A_k = (-1)^k U_{dio} \frac{2kp}{(kp)^2 - 1} \cdot \sin \alpha$$

— Calcul du coefficient B_k :

$$B_k = \frac{P}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{P}}^{\frac{\pi}{P}} U_c \cos k p y \, dy = \frac{P \cdot V_m}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{P}}^{\frac{\pi}{P}} \cos(y + \alpha) \cos(k p y) \, dy$$

$$= \frac{P \cdot V_m}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{P}}^{\frac{\pi}{P}} [\sin((kp+1)y + \alpha) + \sin((kp-1)y - \alpha)] \, dy$$

on obtient après calcul :

$$B_k = (-1)^k U_{dio} \frac{2}{(kp)^2 - 1} \cdot \cos \alpha$$

L'amplitude de $U_{k\alpha} = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$

$$U_{k\alpha} = U_{dio} \cdot \frac{2 \cos \alpha}{(kp)^2 - 1} \sqrt{(kp)^2 \tan^2 \alpha + 1}$$

$$\text{pour } \alpha = 0 \quad U_{k0} = U_{dio} \cdot \frac{2}{(kp)^2 - 1}$$

$$\text{pour } k=1 \text{ et } p=6 \quad U_{10} = \frac{2}{35} U_{dio} = 5,75 \% \text{ de } U_{dio}$$

On constate que l'amplitude des harmoniques diminue à mesure qu'augmente kp .

II.5.7 Courant dans le bloc redresseur et dans son alimentation.

— la valeur moyenne du courant dans un bras est exprimée par :

$$I_a = \frac{I_d}{g \cdot q}$$

— Valeur efficace : $I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{I_d}{g}\right)^2 dt = \frac{I_d^2}{g^2 \cdot q}$

$$I = \frac{I_d}{g \sqrt{q}}$$

— Courant alimentant le bloc :

Le pont de Grätz est à double voie. La valeur moyenne est nulle.

$$\text{valeur efficace : } I_v = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{q}} \cdot I_d$$

Le courant représente aussi le courant secondaire du transformateur.

$$\text{pour } g=1 ; q=3 : I_a = \frac{I_d}{3} ; I = \frac{I_d}{\sqrt{3}} ; I_v = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d$$

II.6. Le transformateur du redresseur

Le transformateur joue plusieurs rôles dans l'alimentation d'un bloc redresseur dont les principales :

- il adopte la tension d'alimentation du réseau à celle nécessaire pour le redresseur.
- il sépare le réseau du circuit à courant continu (aucune composante continue ne parcourt le réseau)
- il permet la mise à la terre de la cathode des redresseurs d'où la sécurité du personnel.

II.6.1 Enroulement secondaire :

— Tension secondaires : la tension d'alimentation du montage redresseur est la même que celle de la tension secondaire du transformateur (Y-Y)

$$\text{tension entre phase } U_{v0} = \sqrt{2} \cdot \frac{\pi}{3 \cdot 2} U_{dio} = \sqrt{2} \cdot \frac{\pi}{3 \cdot 2} U_{dio} = 0,74 \cdot U_{dio}$$

tension simple: $V = \frac{1}{2 \sin(\pi/9)} U_{V0} = 0,427 \cdot U_{V0}$

— Courants secondaires:

Ces courants sont les mêmes que ceux qui alimentent le bloc redresseur.

le courant efficace: $I_V = \frac{\sqrt{2}}{9\sqrt{3}} I_d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d = 0,816 I_d$

Comme le secondaire est en étoile: $I_{Sj} = I_V = 0,816 I_d$

— facteur de puissance du secondaire:

par définition le facteur de puissance est le rapport de la puissance active à la puissance apparente.

$$P_{active} = U_d \cdot I_d$$

$$P_{app} = \frac{95,9}{2} \cdot V \cdot I_V = \frac{95,9}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{95} \cdot 420 \right) \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d \right) = \frac{\pi}{3} U_d I_d$$

$$\lambda_s = \frac{P_{ac}}{P_{app}} = \frac{U_d \cdot I_d}{(\pi/3) \cdot U_d \cdot I_d} = \frac{3}{\pi} = 0,955$$

II-6-2 Enroulement primaire:

— tension primaire du transformateur c'est la tension délivrée par le réseau $U_L = 220 \text{ V}$

— Courant dans les enroulements primaires: il est donné par la relation:

$$I_L = \frac{U_d}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_d}{\cos \varphi} \cdot \frac{1}{v_L} \cdot \frac{1}{4_L} \quad \text{avec } v_L = \frac{3}{\pi} = 0,955, \cos \varphi: \text{facteur de déphasage}$$

$$I_L = 0,605 \cdot \frac{I_d}{\cos \varphi} \cdot \frac{U_d}{4_L}$$

— Courant de ligne: c'est le même puisque le primaire est en étoile.

II-6-3 réactances de fuite et résistances d'enroulement.

Les réactances de fuite sont liées au flux de fuite. Elles dépendent de la fréquence, du flux de fuite et celle-ci dépend de la force magnétomotrice, elle est souvent d'ordre 3. si la force magnétomotrice est constante, elle est nulle.

On insère les réactances $X_{1f} = X_n$ dans les conducteurs d'alimentation de chaque système primaire. On insère les réactances $X_{2f} = X_n$ dans les conducteurs de sortie du système secondaire.

Par convention : les tensions entre phases et entre phases commutantes sont égales dans ce cas $X_V = X_L$. En dehors $X_V = X_L \left(\frac{U_{V0}}{U_L} \right)^2$.

e_z = tension totale en court-circuit, $e_z = \sqrt{e_r^2 + e_x^2}$

où e_r = tension résistive en court-circuit, $e_r = \frac{W_R}{\sqrt{3} U_L I_L}$

où W_R = pertes joules données par le constructeur.

$$e_x = \sqrt{3} \cdot \frac{X_L \cdot I_L}{U_L}$$

dans le cas général $e_z \approx e_x$

II.7 Chutes de tension du groupe transformateur-redresseur :

La chute de tension totale est constituée :

- chute inductive due aux inductances du circuit U_x
- chute résistive due aux résistances du circuit U_R
- chute de tension due au thyristor U_T

La tension continue obtenue à la sortie du bloc :

$U_d = U_{di0} \cos \alpha - \Delta U = U_{di0} \cos \alpha - (U_x + U_R + U_T)$ où ΔU dépend du courant débité.

II.7.1 chute résistive de tension continue :

Les pertes résistives sont dues aux : liaisons, résistances, inductances, enroulements du transformateur.

Soit U_R la tension résistive. $U_R = \frac{P_R}{I_d}$

la chute résistive relative : $d_r = \frac{P_R}{I_d \cdot U_{di0}} = \frac{U_R}{U_{di0}}$

II.7.2. chute de tension due au thyristor :

la chute de tension aux bornes d'un semi-conducteur est généralement très faible par rapport à la puissance traitée. Ces pertes s'expriment par la formule suivante :

$$P_c = n (U_s \cdot I_f + R_d I_{eff}^2)$$

U_s : tension de seuil

n : nombre total de thyristors

R_d : résistance différentielle

I_{eff} : courant efficace

I_f : courant moyen

$$U_T = \frac{P_c}{I_d} \Rightarrow d_T = \frac{U_T}{U_{dio}} \text{ valeur relative}$$

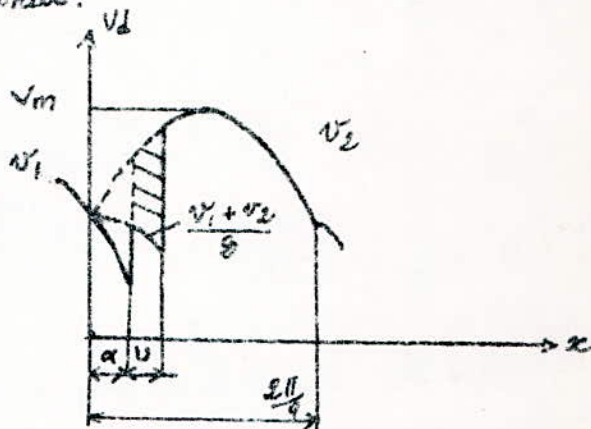
II.7.3 chutes inductives de tension continue :

a. phénomène d'empiètement :

On localise les inductances dans les bras du groupe commutant.

Le transfert du courant d'un bras à un autre ne s'effectuera pas simultanément. Cette transition dure un certain temps, pendant ce temps les phases commutantes sont en court-circuit. Durant la période de transition la moyenne des tensions des phases est : $\frac{V_1 + V_2}{2}$.

On appelle empiètement (angle μ) la durée, en mesure angulaire pendant laquelle deux éléments du circuit sont traversés par le courant.



b. Relation entre la chute inductive et l'angle d'empîtement :

Soient deux anodes d'un même groupe, mises simultanément en court-circuit. Le phénomène se produit sous un angle inférieur à $\frac{2\pi}{q}$ ($u < \frac{2\pi}{q}$) où q est l'indice de commutation.

$$U_x = \frac{q}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+u} \left(v_2 - \frac{v_1+v_2}{2} \right) dx = \frac{q}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+u} \left(\frac{v_2-v_1}{2} \right) dx$$

$$\text{ou } v_1 = V_m \cos\left(x + \frac{\pi}{q}\right)$$

$$v_2 = V_m \cos\left(x - \frac{\pi}{q}\right)$$

$$U_x = \frac{q}{4\pi} V_m \int_{\alpha}^{\alpha+u} \left[\cos\left(x - \frac{\pi}{q}\right) - \cos\left(x + \frac{\pi}{q}\right) \right] dx$$

On sait que : $\cos a - \cos b = -2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{a-b}{2}\right)$

donc $\cos\left(x - \frac{\pi}{q}\right) - \cos\left(x + \frac{\pi}{q}\right) = 2 \sin x \sin \frac{\pi}{q}$

$$U_x = \frac{q}{2\pi} V_m \int_{\alpha}^{\alpha+u} \sin x \cdot \sin \frac{\pi}{q} dx$$

tout calcul fait on trouve :

$$U_x = \frac{q}{2\pi} V_m \sin \frac{\pi}{q} \left[\cos \alpha - \cos(\alpha+u) \right] = U_{dio} \left[\frac{\cos \alpha - \cos(\alpha+u)}{2} \right]$$

on pose : $dx = \frac{U_x}{U_{dio}} \Rightarrow d\alpha = \frac{1}{2} \left[\cos \alpha - \cos(\alpha+u) \right]$

pour $\alpha=0$ commutation naturelle $\Rightarrow d\alpha = \frac{1}{2} [1 - \cos u]$

c. Relation entre la chute inductive et la réactance du circuit de commutation par bras :

$$U_x = \frac{I_d \cdot X_L}{2} \cdot \frac{q}{\pi}$$

En valeur relative : $dx = \frac{U_x}{U_{dio}} = \frac{q X_L}{2\pi} \cdot \frac{I_d}{U_{dio}}$

d. chute inductive de tension due au transformateur :

Elle est définie à partir de la réactance du transformateur

$$U_{xL} = \frac{\delta \cdot S \cdot X_L}{g} \cdot \frac{q}{2\pi} \cdot I_d$$

δ : nombre de groupes commutants simultanément, $\delta = 1$

S : nombre de groupes commutants en série, $S = 2$

g : nombre d'ensemble de groupes commutant, $g = 1$.

I_d : courant moyen continu

q : indice de commutation, $q=3$

$$U_{xt} = \frac{3}{\pi} \cdot X_L \cdot I_d$$

En valeur relative $d_{xt} = \frac{U_{xt}}{U_{dio}} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{X_L \cdot I_d}{U_{dio}}$

Mais la tension de court-circuit réactive: $e_x = \frac{\sqrt{2} \cdot X_L \cdot I_d}{U_{vo}}$

où $U_{vo} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \cdot U_{dio}$

$$X_L I_d = \frac{e_x \cdot U_{vo}}{\sqrt{2}} = \frac{e_x}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \cdot U_{dio}$$

$$d_{xt} = \frac{3}{\pi U_{dio}} \cdot \frac{e_x \cdot \pi}{2 \cdot 3} \cdot U_{dio} = \frac{e_x}{2} \Rightarrow d_{xt} = \frac{e_x}{2}$$

la chute inductive de tension est égale à la moitié de la tension de réactance en court-circuit.

2. chute inductive de tension due à la réactance du réseau:

L'influence de la réactance du réseau à courant alternatif sur la forme d'onde de la tension alternative entraîne l'apparition d'une chute de tension supplémentaire aux bornes côté continu du convertisseur. Elle est égale en valeur relative:

$$d_L = \frac{5 \cdot q \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot q} \left(\frac{U_{vo}}{U_L} \right)^2 \cdot X_L \cdot \frac{I_d}{U_{dio}}$$

La chute de tension selon l'équation précédente s'entend lorsqu'il y a seulement deux anodes déphasées en commutation ($u \leq \frac{2\pi}{3}$)

$$d_x < \frac{1}{2} (\cos \alpha - \cos(\alpha + u))$$

pour $\alpha = 0$, $u \leq \frac{\pi}{3} \Rightarrow d_x < 0,25$

Rappelons que d_x est la chute de tension inductive totale relative.

F. chute de tension totale :

$$\sum U = U_{xt} + U_L + U_R + U_T$$

$U_{xt} + U_T + U_R$: constitue la chute de tension propre du groupe redresseur

U_L : dépend du réseau

En valeur relative $d = d_{xt} + d_R + d_T + d_L$

- expression de U_{dio} :

$$U_{dio} = U_d + \sum U + d \cdot U_{dio} \Rightarrow U_{dio} = \frac{U_d + \sum U}{1 - \sum d}$$

II.8 Facteur de déphasage :

Ce facteur de déphasage est déterminé par le calcul à partir des valeurs mesurées des réactances et du courant magnétisant dans les éléments constituant le groupe. Quand un convertisseur fonctionne comme redresseur il absorbe de la puissance active et réactive du système.

$$\cos \varphi = \frac{\text{Puissance active}}{\text{Puissance apparente}}$$

- détermination du $\cos \varphi'$:

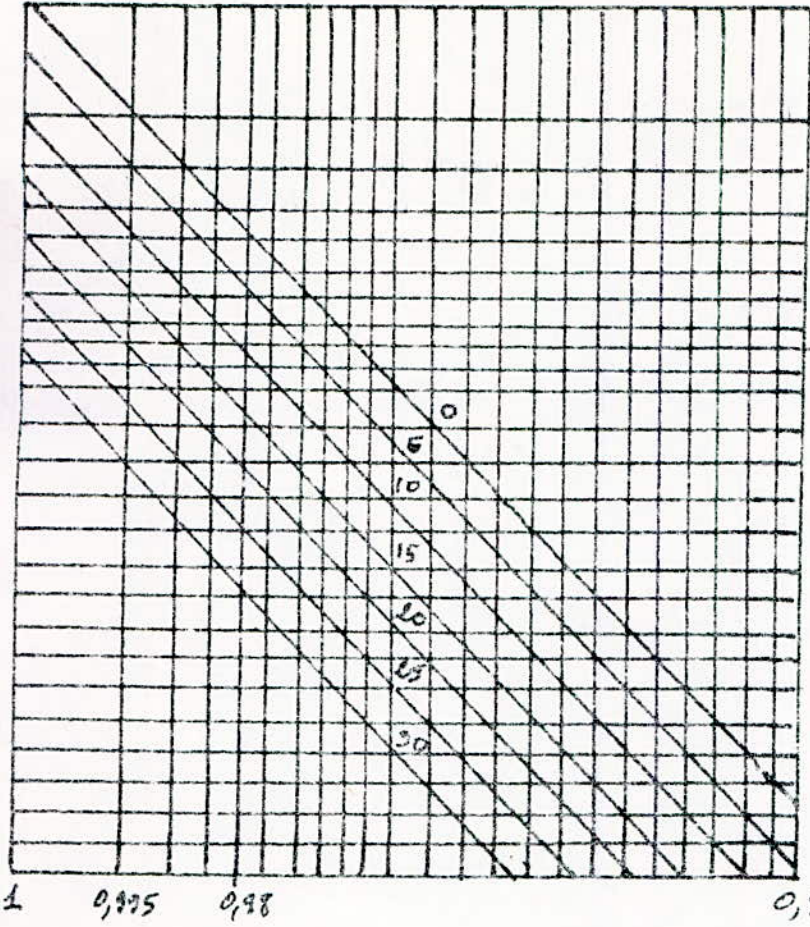
Dans ce cas on néglige le courant magnétisant. Ce facteur $\cos \varphi'$ est obtenu par les selfs inductances du transformateur.

On a la relation :

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{1}{2} \frac{2U + \sin 2\alpha - \sin 2(U+\alpha)}{\cos^2 \alpha - \cos^2 (U+\alpha)} ; \text{ pour } \alpha = 0 \Rightarrow \operatorname{tg} \varphi' = \frac{1}{2} \frac{2U - \sin 2U}{\sin^2 U}$$

de même on peut obtenir $\cos \varphi'$ en fonction de la chute relative dx due aux réactances et ceci pour $\frac{U_d \cdot I_d}{Q} \approx 0$ où Q puissance de court-circuit du réseau. on a la relation: $\cos \varphi' = 1 - 0,9 dx$

Suivant la courbe U. T. E C. 5320 $\cos \varphi = f(\cos \varphi')$ on peut tirer $\cos \varphi$ de la fig II. 7.



0 - 5 - 10 - 15 - 20 - 25 - 30
 Courant magnétisant exprimé
 en % de la composante active
 du courant côté réseau du
 transformateur à la charge
 nominale.

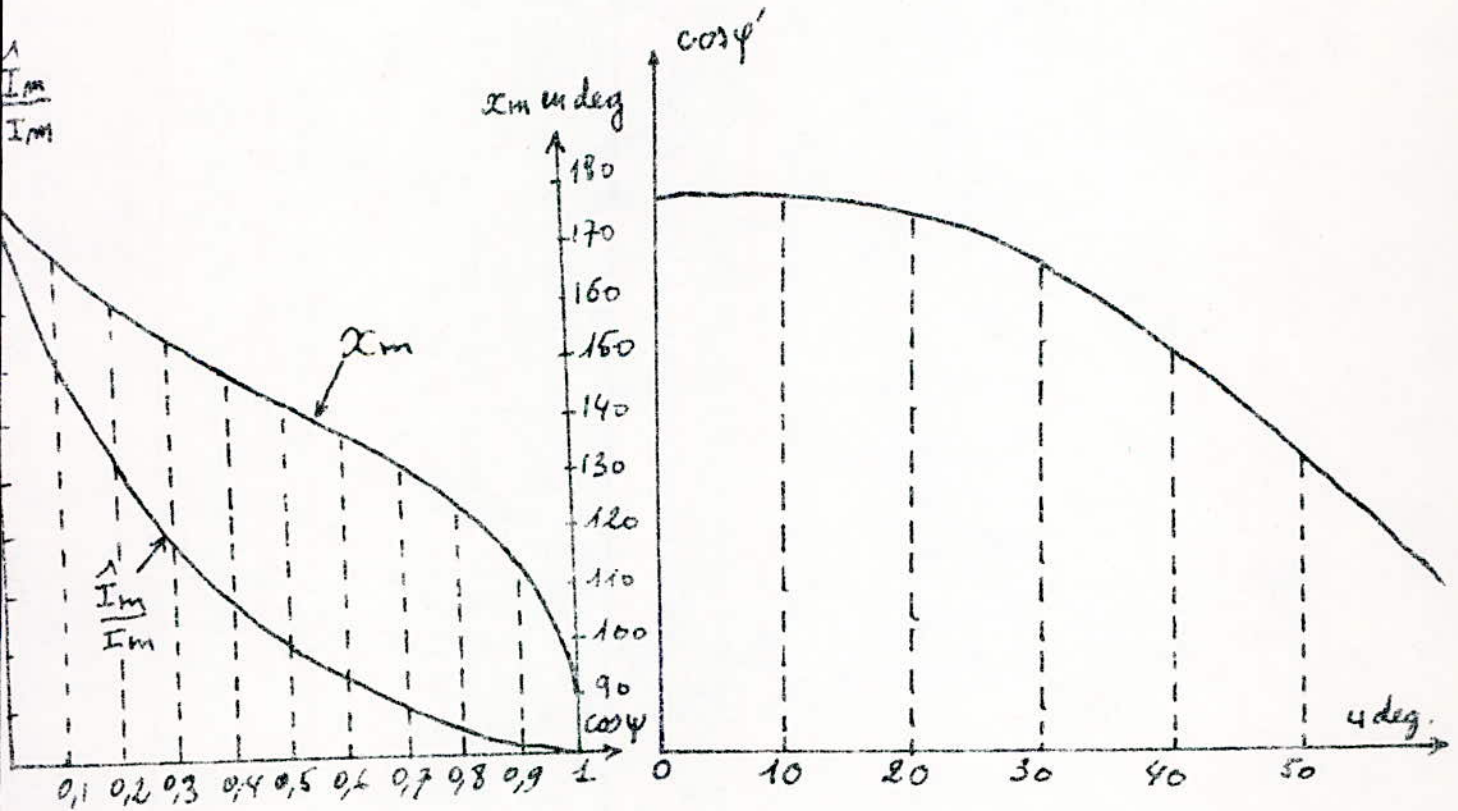


Fig II-7

II.9 Courant de court-circuit:

Les différents éléments du bloc redresseur sont parcourus par des courants intenses en cas d'un court-circuit. Ces courants sont forts par rapport au régime nominal. Les thyristors sont sensibles, aux variations du courant, d'où l'intérêt d'évaluer les caractéristiques de rapportant à ces courants de court-circuit.

a. Courant à l'entrée du transformateur:

Soit e_z la tension de court-circuit. On sait que:

$$I_{LK} = \frac{I_L}{e_z} \leftarrow \text{courant de court-circuit efficace.}$$

$$I_{LKm} = \frac{I_{Lm}}{e_z} \leftarrow \text{courant de court-circuit maximal.}$$

$$\text{ou } I_{Lm} = \sqrt{2} \cdot I_L$$

b. Courant à la sortie du transformateur:

S'il y a n systèmes en parallèles ou en série, ils seront par la loi de conservation de puissance n fois moindre.

$$I_{VKm} = \frac{\sqrt{2}}{n} \cdot \frac{I_L}{e_z} \text{ ou } I_{VKm} = \frac{\sqrt{2}}{n} \cdot \frac{I_d}{e_z} \left(\frac{I_L}{I_d} \right)$$

la valeur efficace sera $\sqrt{2}$ fois moindre pour le cas du montage

à double voie et pour $n=1 \Rightarrow I_{VK} = \frac{I_d}{e_z} \cdot \left(\frac{I_L}{I_d} \right)$.

$$\frac{I_L}{I_d} = \frac{1}{\sqrt{L}} \cdot \frac{U_{dio}}{\sqrt{3} \cdot U_{v_0}} \text{ ou } V_L = \frac{3}{\pi}; U_{v_0} = 0,74 U_{dio}$$

$$\frac{I_L}{I_d} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{3} \cdot 0,74} = 0,82$$

$$I_{VK} = 0,82 \frac{I_d}{e_z}$$

c. Courant dans un bras du bloc redresseur.

- Courant de court-circuit efficace: $I_k = \frac{I_d}{n\sqrt{2}e_z} \cdot \left(\frac{I_L}{I_d}\right)$

dans notre cas $I_k = 0,58 \left(\frac{I_d}{e_z}\right)$

- Courant de court-circuit maximal: est à considérer, en vue de la contrainte des thyristors. $I_{km} = \frac{I_d \cdot \sqrt{2}}{n \cdot e_z} \cdot \left(\frac{I_L}{I_d}\right)$

dans notre cas $I_{km} = 1,15 \left(\frac{I_d}{e_z}\right)$

- Courant de court-circuit moyen:

$$I_{ak} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{n \cdot e_z} \cdot \left(\frac{I_L}{e_z}\right)$$

dans notre cas $I_{ak} = 0,37 \cdot \frac{I_d}{e_z}$

d. Courant continu dans le court-circuit: unidirectionnel

Ce courant est égal au courant moyen dans un bras multiplié par le nombre total de bras débitant en parallèle sur le circuit continu

$$I_{dk} = b_p \cdot I_{ak} \quad \text{où } b_p: \text{ nombre de bras ; } b_p = 3$$

$$I_{dk} = 3 \cdot 0,37 \frac{I_d}{e_z} = 1,1 \left(\frac{I_d}{e_z}\right)$$

e. Régime asymétrique:

Recherche de la valeur de crête du courant dans un bras de montage:

L'un des bras est parcouru par un courant ayant une valeur de crête maximale. C'est cette valeur qui servira à déterminer les contraintes des thyristors en cas de court-circuit entre les pôles plus (+) et moins (-).

Soit un circuit constitué d'une impédance $Z = f(R, L)$, soumis brutalement à une tension $v = V_m \sin(x + x_0)$.

$$\text{On a } Ri + L \frac{di}{dt} = V_m \sin(x + x_0)$$

la solution générale est:

$$i = I_m \left[\sin(\psi - x_0) e^{-x \cot \psi} + \sin(x + x_0 - \psi) \right] \quad (\beta) \quad \text{où } \tan \psi = \frac{L\omega}{R}$$

cas où $R=0 \Rightarrow \psi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \cotg \psi = 0$

$$\Rightarrow i = I_m [\cos x_0 - \cos(x+x_0)]$$

le maximum est atteint pour $x_0=0$ et $x=\pi \Rightarrow \hat{I}_m = 2I_m$

cas où $R \neq 0$: Pour chercher la valeur de crête on doit utiliser les différentielles $i = f(x, x_0)$ de l'équation (β). on aboutit à la relation suivante:

$$\frac{\hat{I}_m}{I_m} = \frac{\sin \alpha_m}{\cos \psi} \quad \text{ou} \quad \cos \psi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

on doit majorer I_{km} par le facteur $\left(\frac{\hat{I}_m}{I_m}\right)$ pour obtenir le courant maximal en valeur de crête.

$$\left(\frac{\hat{I}_m}{I_m}\right) = f(\cos \psi) \quad \text{et} \quad \alpha_m = f(\cos \psi) \quad \text{voir fig II.7}$$

II. 10. pertes et rendement:

Un bloc redresseur présente des pertes dont les principales sont:

- les pertes à vide du transformateur
- les pertes dans les enroulements et liaisons
- les pertes dues à la tension de seuil du thyristor
- les pertes supplémentaires.

a. Pertes dans le transformateur principal:

Les pertes fer sont données par le constructeur.

Les pertes joules dans les enroulements primaires et secondaires s'expriment.

$$\left. \begin{array}{l} P_{rp} = n_1 r_1 I_p^2 \\ P_{rs} = n_2 r_2 I_s^2 \end{array} \right\} \Rightarrow P_{rt} = P_{rp} + P_{rs}$$

Remarque: $P_{rt} = P_A$ où P_A puissance mesurée en court-circuit.

Il existe des pertes supplémentaires qui sont dues au courant parasite ces pertes sont très faibles.

b. pertes dans le bloc redresseur:

La tension instantanée pendant la conduction d'un thyristor

s'exprime: $U_T = U_{T0} + R_T I_m$

$$P_T = \frac{1}{\pi} \int_0^{2/\pi} (U_{T0} + R_T I_m) I_m dt = U_{T0} I_m + R_T I_{eff}^2$$

Pour un bloc constitué de n thyristors:

$$P_T = n [U_{T0} I_m + R_T I_{eff}^2]$$

- Pertes dans les liaisons:

Ce sont des pertes par effet joule, qui dépendent de la résistance du circuit et des courants qui la parcourent

- Pertes dans les fusibles:

Elles sont produites par effet joule

$$P_{fN} = r_f \cdot I_{fN}^2 \quad \text{où } r_f: \text{résistance du fusible}$$

I_{fN} : courant efficace du fusible.

c. détermination du rendement du bloc redresseur:

$$\Sigma p = P_0 + P_r + P_T + P'$$

P_0 : pertes constantes

P_r : $f(I_d^2)$

P_T : $f(I_d)$

P' : $f(I_d)$

le rendement s'obtient donc:

$$\eta = \frac{U_d I_d}{U_d I_d + \Sigma p}$$

II.11. Protection du bloc redresseur:

En regard des nombreux avantages, les convertisseurs statiques ont tout de même quelques inconvénients bien connus: surintensités, court-circuit surtension, harmoniques

- surintensités:

origine externe: Proviennent généralement d'une surcharge ou d'un court-circuit dans le réseau d'utilisation.

origine interne: éléments utilisés au delà de la puissance normale par exemple claquage d'un thyristor. Les soupapes peuvent présenter des perturbations de la commande d'amorçage. Ces perturbations ne pourront donner qu'une baisse fugitive de courant continu

Protection contre les surintensités:

La protection contre les surintensités provenant du réseau continu est assurée au moyen de disjoncteur inséré dans le circuit.

Protection individuelle des soupapes: fusibles ou disjoncteurs à déclenchement électromagnétique. Dans le cas d'un court-circuit externe on place du côté alternatif un disjoncteur qui peut supprimer l'alimentation en un temps compris entre 60 et 100 ms.

Dans le cas d'un court-circuit interne on utilise un court-circuiteur qui a pour effet;

- de supprimer l'alimentation du défaut dans le bloc
- de faire déclencher le disjoncteur côté réseau.

- surtension:

Les thyristors se détériorent si on dépasse leur tension d'avalanche.

Les causes sont multiples:

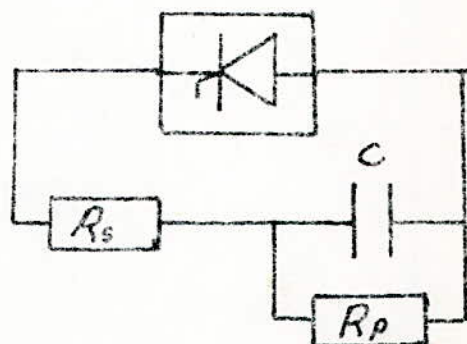
- * coupure et mise sous tension à vide du primaire du transformateur.
- * coupure de charge inductive en parallèle avec l'alimentation du redresseur.
- * surtension apparaissant lors de l'interruption d'un courant de défaut.
- * coup de foudre.

Les dispositifs de réduction de surtension sont constitués par des réseaux R, L, C. La mise sous tension à vide du transformateur provoque une surtension, celle-ci peut atteindre deux fois la tension nominale. À vide, le disjoncteur coupe mal le courant magnétisant, l'énergie magnétisante libérée par le transformateur est dérivée vers les condensateurs. La valeur de la capacité dans le cas de GREATZ est:

$$C = \frac{1,3\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_{0L}}{\omega (k_r \cdot U_{0m}^2 - 2 U_{0a}^2)}$$

I_{0L} : courant magnétisant du transformateur (efficace)

On connecte en parallèle avec le condensateur une résistance de décharge R_p de manière à avoir une constante de temps $\tau = R_p \cdot C$ où $\tau = 1 \text{ s}$. On place en série avec $(R_p \cdot C)$ une résistance série R_s pour limiter le courant.



- Harmoniques.

Tout redresseur engendré, dans le réseau alternatif, des harmoniques de courant dont le rang et l'amplitude sont fonction de la puissance à fournir côté continu, de l'indice de pulsation du convertisseur et de la réactance du réseau. Ces harmoniques créent des perturbations indésirables, on connecte des filtres et harmoniques aux bornes de l'alimentation. Ces filtres sont constitués par des circuits accordés sur la fréquence des harmoniques à éliminer du réseau. La condition de résonance du filtre, et pour l'harmonique de rang n :

$$LCn^2\omega^2 = 1$$

Pour les diodes externes, les dijoncteurs et la protection électronique doivent fonctionner les fusibles ne doivent pas fondre. Le choix des fusibles associés à chaque thyristor est le plus important dans l'étude des protections.

- Refroidissement :

Vue le local et le lieu d'implantation de l'armoire redresseuse, on choisit le refroidissement par ventilation forcée. On appelle résistance thermique la possibilité plus ou moins grande d'évacuation calorifique d'un des points elle s'exprime en $[^{\circ}C/W]$. Si les calories s'évacuent rapidement, la résistance est faible, si au contraire la conduction de chaleur est mauvaise la résistance thermique est élevée. Les radiateurs des thyristors ont des résistances thermiques faibles par rapport à la convection naturelle. On a des abaques qui déterminent les vitesses de l'air avec différents thyristors en fonction des puissances dissipées et les résistances thermiques. A partir de la vitesse de l'air on détermine le ventilateur.

II.12 Détermination des caractéristiques du groupe convertisseur :

— Réseau :

$$U_L = 220 \text{ V} \pm 10\%$$

$$Q \approx 2000 \text{ kW}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

— Charge :

$$\text{tension nominale : } U_d = 125 \text{ V}$$

$$\text{courant nominal : } I_d = 240 \text{ A}$$

$$\text{puissance nominale : } 30 \text{ kW}$$

$$\left. \begin{array}{l} U_d = 125 \text{ V} \\ I_d = 240 \text{ A} \\ \text{puissance nominale : } 30 \text{ kW} \end{array} \right\} \alpha_\eta = 95^\circ$$

— Bloc redresseur : $p = 6$; $q = 3$, $s = 8$; $g = 1$

— tension à vide : on prend une chute de tension de 6%

$$U_{d0} = \frac{U_d}{1-d} = \frac{125}{1-0,06} = 133 \text{ V}$$

— tension d'alimentation du bloc :

$$U_{v0} = 0,74 U_{d0} = 0,74 \cdot 133 = 98 \text{ V}$$

— tension inverse par bras :

$$U_{i0m} = 1,05 \cdot U_{d0} = 1,05 \cdot 133 = 139 \text{ V}$$

— Valeur moyenne du courant dans un bras :

$$I_a = \frac{I_d}{g \cdot q} = \frac{240}{1 \cdot 3} = 80 \text{ A}$$

— Valeur efficace du courant dans un bras :

$$I = \frac{I_d}{g \sqrt{q}} = \frac{240}{1 \cdot \sqrt{3}} = 138 \text{ A}$$

— Courant d'alimentation du bloc :

$$I_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot I_d}{g \cdot \sqrt{q}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 240}{1 \cdot \sqrt{3}} = 196 \text{ A}$$

— Caractéristiques du transformateur :

— Courant de ligne : $I_L = 0,605 \cdot \frac{I_d}{\cos \varphi} \cdot \frac{U_d}{U_L}$

On prend une chute inductive $\alpha = 4\%$: $\cos \varphi' = 1 - 0,9\alpha = 0,964$

pour un courant magnétisant de 3% on a $\cos \varphi \approx 0,955$

$$I_L = 0,605 \frac{240}{0,955} \cdot \frac{138}{220} \approx 964$$

— côté thyristors :

tension entre bornes : $U_{V_0} = 109V$

Courant de sortie : $196A$

On utilise un transformateur de puissance : $31,5KVA$.

La tension de court-circuit d'un transformateur pour rehausser est de 4 à 5%.

tension de court-circuit : $e_{cc} = 4,5\% = 0,042$

— Courant de court-circuit externe : on prend $e_2 = 12\% = 0,12$

— Valeur efficace en régime symétrique : $I_R = 0,58 \cdot \frac{I_d}{e_2} = 0,58 \cdot \frac{240}{0,12} = 1160A$

— Valeur maximale en régime symétrique : $I_{Rm} = 1,15 \cdot \frac{I_d}{e_2} = 1,15 \cdot \frac{240}{0,12} = 2300A$

— Courant moyen dans le court-circuit : $I_{dR} = 1,1 \cdot \frac{I_d}{e_2} = 1,1 \cdot \frac{240}{0,12} = 2200A$

— Valeur maximale en régime asymétrique (R, L) : $\hat{I}_{Rm} = K \cdot I_{Rm} = 1,5 \cdot 2300 = 3450A$

— Courant de court-circuit dans un bras

* dans un bras en défaut : $I_1 = 0,58 \cdot I_{Rm} = 0,58 \cdot 2300 = 1334A$

* dans un bras sain : $I = 0,38 \cdot I_{Rm} = 0,38 \cdot 2300 = 874A$ (efficace)

$$I = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{Rm} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2300 = 1992 \text{ (maximale)}$$

— Choix des thyristors : les thyristors doivent être déterminés pour supporter outre le courant de service avec peu de charge, la contrainte maximale provenant du court-circuit externe jusqu'à fusion totale des fusibles.

— Choix des fusibles :

$I_{fn} > I_{eff} = 138A$; on prend I_{fn} normalisé au dessus de $138A$

on peut prendre $I_{fn} = 150A$

$U_{fn} > U_{V_0} = 109V$

on peut prendre $U_{fn} = 250V$ (normalisé)

Le thyristor doit supporter un I_{T2}

le courant limite de surcharge : $I_{FSM}^2 > \frac{I_K^2 T \cdot I_a}{0,9}$

on prend $T = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}$, $I_K = 1160 \text{ A}$; $I_a = 80 \text{ A}$

on obtient $I_{FSM} = 1400 \text{ A}$

Vérification de la chute de tension :

— chute inductive

* due au transformateur : $v_{xt} \approx e_{zt} \Rightarrow d_{xt} = \frac{0,042}{2} = 0,021$

* due à l'impédance du réseau

$$X_L = \frac{U_L^2}{P} = \frac{(220)^2}{200000} = 0,242 \Omega$$

$$d_L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{U_{V0}}{U_L} \right)^2 \cdot X_L \cdot \frac{I_d}{U_{d10}} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{109}{220} \right)^2 \cdot 0,242 \cdot \frac{240}{147} = 3 \cdot 10^{-3} \approx 0$$

$\Rightarrow d_x = 0,021$

— chute résistive :

$$P_2 = 700 \text{ W} \quad d_z = \frac{P_2}{I_d \cdot U_{d10}} = \frac{700}{240 \cdot 147} = 1,98 \cdot 10^{-2}$$

chute totale : $d = d_x + d_z = 0,021 + 0,0198 = 4,08 \cdot 10^{-2}$

la différence de chute : $d_{imposée} - d_{calculée} = 6\% - 4,08\% = -1,92\%$, sert à compenser les chutes de tension supplémentaires.

Pertes et rendement :

P_0 (transformateur) = 250 W ; P_T (seuil de thyristor) = 480 W

perdes cuivres du transformateur : 540 W ; pertes dynamiques : 35 W

perdes fuyibles : 20 W ; pertes supplémentaires : 10 W

on a $\Sigma p = 1035 \text{ W}$

$$\eta = \frac{U_d \cdot I_d}{U_d I_d + \Sigma p} = \frac{30000}{30000 + 1035} = 0,96$$

II.13. Commande du bloc redresseur:

La régulation automatique consiste à maintenir à une valeur déterminée une quantité ou une variable d'état en mesurant sa valeur existante, en la comparant à la valeur prescrite (référence) et en utilisant la différence entre ces deux valeurs pour actionner un dispositif qui tend à réduire cette différence.

a. Choix de la commande des gachettes:

On choisit le mode d'amorçage par impulsion. L'amorçage par impulsion permet une puissance de crête supérieure à la puissance moyenne des gachettes admissibles. Avec ce processus on peut réduire à une valeur minimale le retard entre le signal de gachette et la montée du courant anodique ce qui rend possible une synchronisation bien précise. La dissipation d'énergie due à l'accroissement du courant au niveau d'amorçage est réduite.

On utilise comme commande d'impulsion la commande par unijonction.

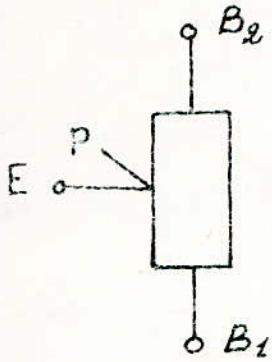
b. Fonctionnement du transistor unijonction: U.J.T

Le transistor unijonction se compose d'un bâtonnet semi-conducteur de type N, portant une inclusion de type P. Les extrémités du bâtonnet N sont reliées aux électrodes appelées bases B_1 et B_2 . L'inclusion P est reliée à une électrode appelée émetteur voir fig II.13.

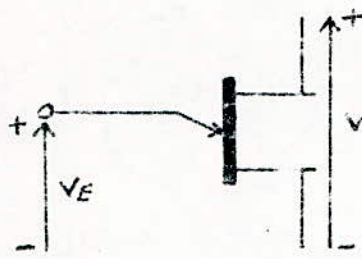
Si on applique une tension continue V entre les bases, il apparaît entre E et B une tension $V_E = \eta \cdot V$ où η est compris dans: $0,5 < \eta < 0,65$

η : est appelé rapport caractéristique du transistor.

Si on applique une tension positive croissante entre E et B_1 et si $V_E < \eta V$ la jonction est polarisée en inverse et il ne circule qu'un très faible courant de fuite.



Structure



polarisation

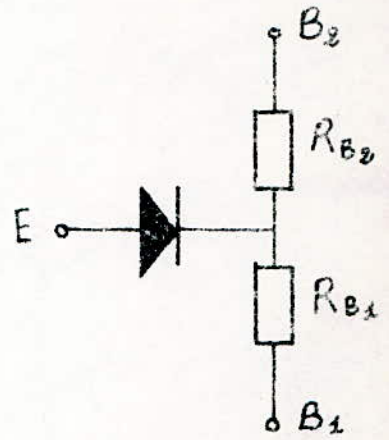
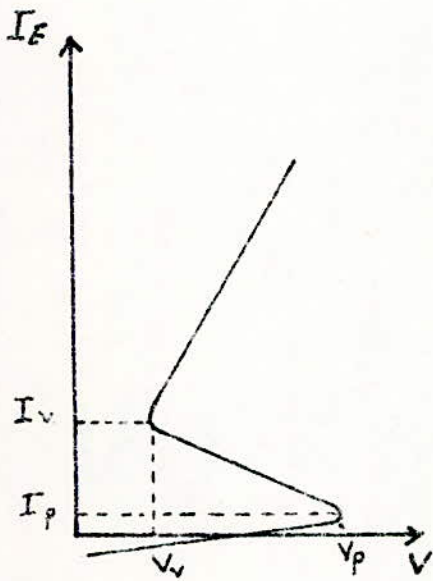
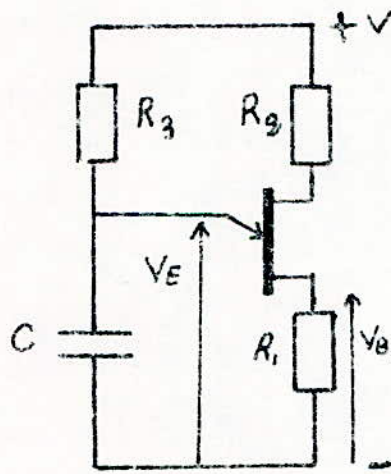


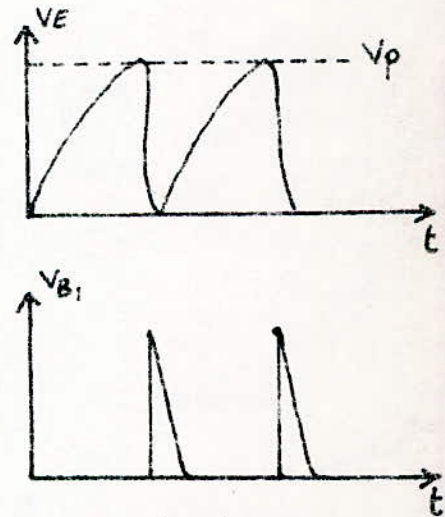
schéma équivalent



caractéristique de l'U.J.T



générateur d'impulsions



formes des tensions V_E; V_{B1}

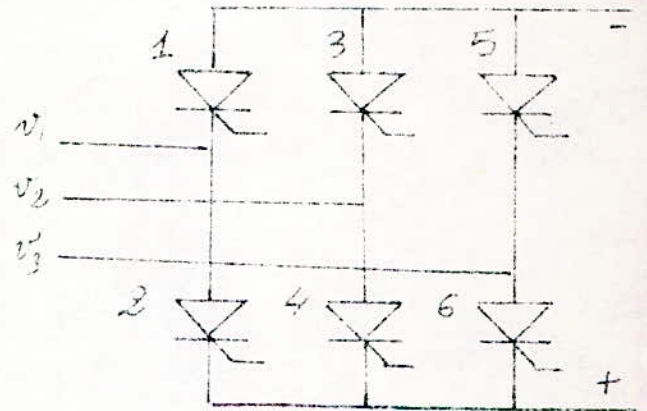
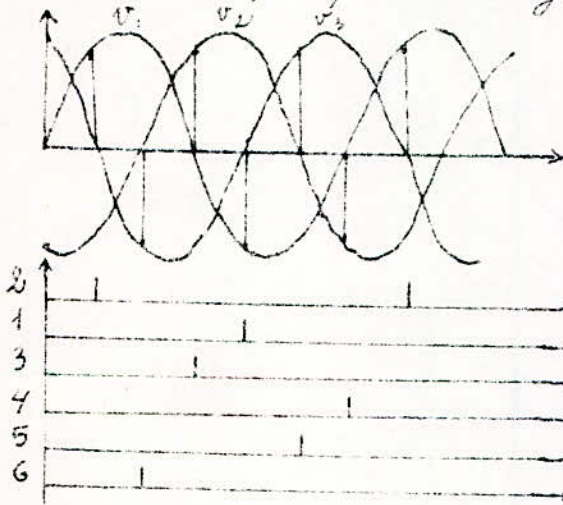
Si $V_E > 0,7V$, la diode est polarisée en direct et il circule un courant I_E .

Si V_E est constante, I_E croît. Le phénomène est cumulatif et se produit dès que I_E est plus grand que le courant de fuit I_p . Quand le courant I_E diminue et passe par une valeur sû la tension V_E augmente c'est le point de vallée (I_v, V_v). voir fig II.13.

c. Fonctionnement du générateur d'impulsion:

La capacité est chargée à travers R_3 jusqu'à ce que la tension d'émetteur atteigne V_p (tension de pic). A ce moment le transistor unijonction bascule et décharge C à travers R_1 . Lorsque la tension d'émetteur chute à une valeur limite, l'émetteur cesse de conduire, le transistor se bloque, puis le cycle recommence de nouveau. voir fig II.13.

d. Commande du pont de thyristors:



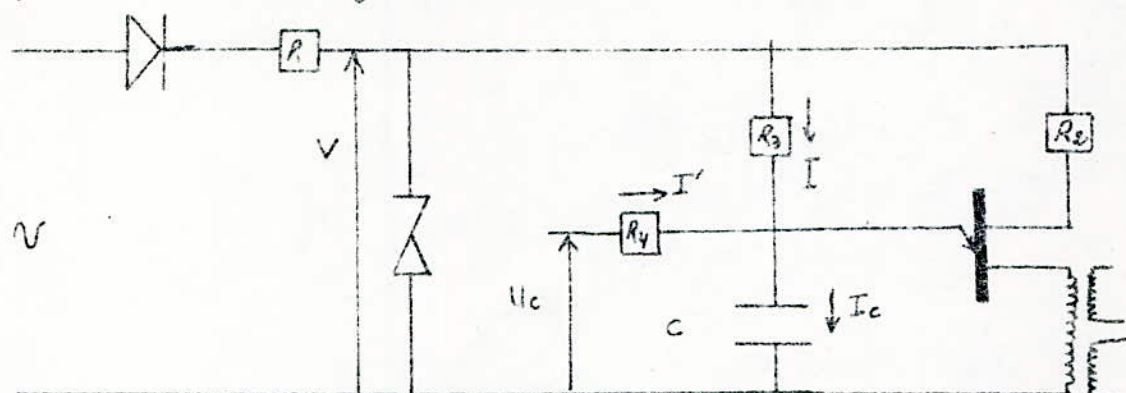
Les 6 thyristors fonctionnent dans

l'ordre de succession suivant: 2 - 5 - 4 - 1 - 6 - 3 - 2 - 5..

On remarque que deux thyristors d'un même bras sont commandés par des impulsions de 180° et que deux impulsions successives sont déphasées de 60° . On utilise trois générateurs d'impulsion identiques commandés par la même tension provenant du détecteur d'écart et chaque générateur commandera deux thyristors d'un même bras à travers un trans-

formateur d'impulsions à deux sorties dont l'une possède des enroulements inversés, permettant ainsi un déphasage de 180° entre les impulsions de sortie. La synchronisation de chaque générateur est assurée par la tension alimentant les thyristors commandés par celui-ci.

2. Synchronisation du générateur de commande :



La tension d'alimentation est redressée par la diode D, stabilisée et reculée par la diode zener.

Le fonctionnement du générateur d'impulsions est régi par le système d'équations :

$$V = R_3 I + \frac{1}{C} \int I_c dt$$

$$U_c = R_4 I' + \frac{1}{C} \int I_c dt$$

$$I_c = I' + I$$

Tout calcul fait on obtient :

$$V_c(t) = \frac{R_3 U_c + R_4 V}{R_3 + R_4} \left[1 - e^{-\frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4 C} t} \right]$$

Le premier amorçage $t = \tau$ pour $V_c = V_p$ on tire la valeur de τ .

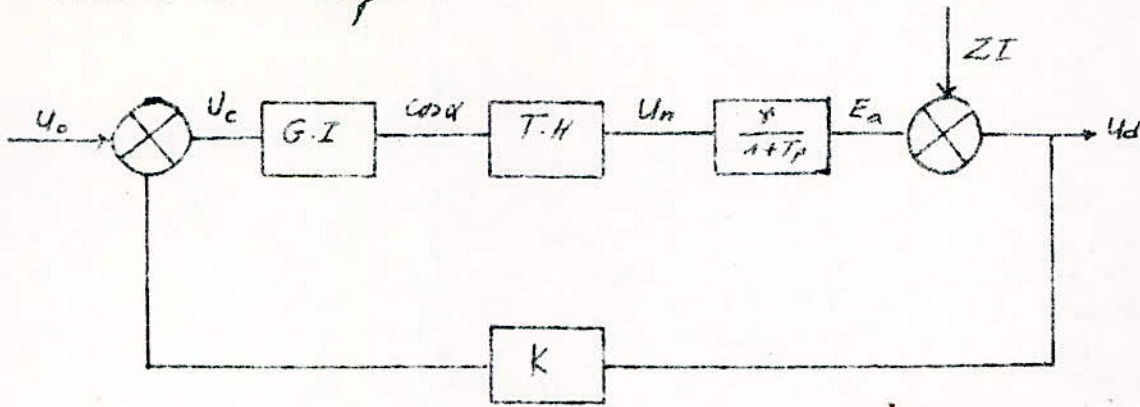
$$\tau = \frac{R_3 R_4 C}{R_3 + R_4} \ln \left[\frac{R_3 U_c + R_4 V}{R_3 U_c + R_4 V - (R_3 + R_4) V_p} \right]$$

On dimensionne le circuit pour le régime nominal si on impose V et V_p :

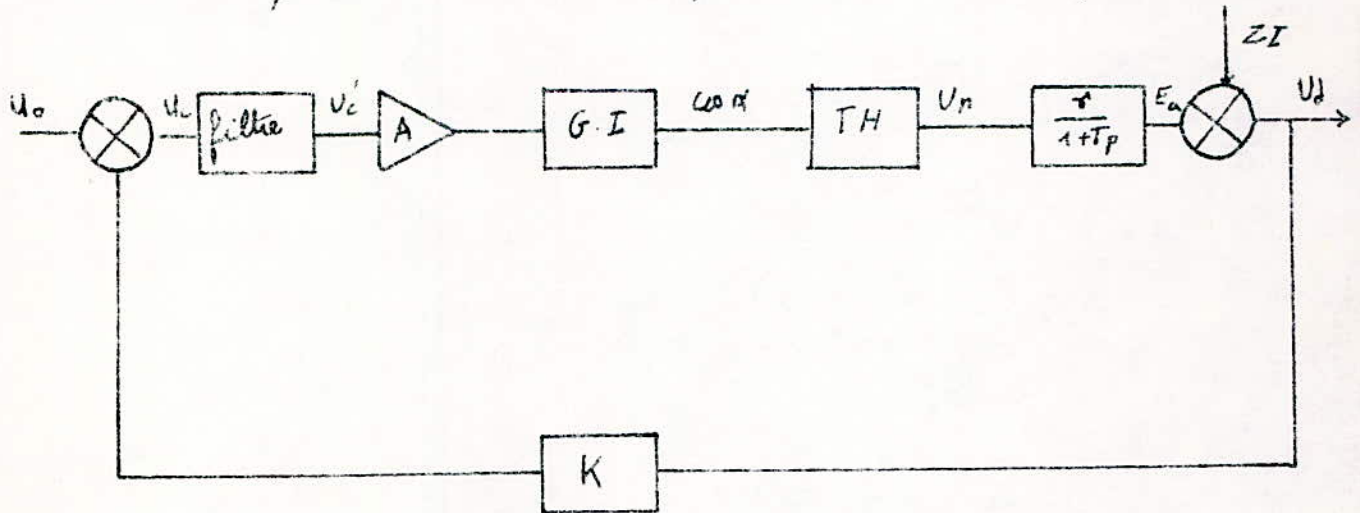
$$U_c = -12,5 \text{ V pour } \alpha = 0 (\tau = 0); \quad U_c = 0 \text{ V pour } \alpha = 25^\circ (\tau = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ s})$$

$$U_c = 12,5 \text{ V pour } \alpha = 36^\circ (\tau = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s})$$

f. Fonction de transfert:



On a à faire à un système non linéaire dans lequel la stabilité dépend non seulement de ses paramètres, mais aussi du signal perturbateur appliqué au système. Il faut linéariser le système pour pouvoir étudier la stabilité et pour cela il existe plusieurs méthodes. Pour améliorer la précision et le temps de réponse on doit introduire un filtre à avance de phase et un amplificateur.

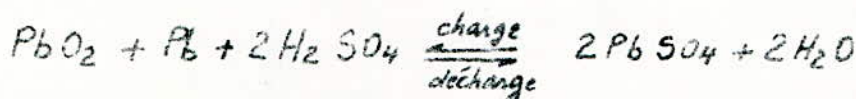


III. Accumulateurs:

III.1. Principe:

Ces réactions chimiques qui se produisent entre les électrodes et l'électrolyte sont réversibles, après décharge il est possible de ramener le système à son état chimique primitif. L'appareil constitue un accumulateur.

L'accumulateur au plomb comporte une électrode positive en peroxyde de plomb et une électrode négative en plomb. L'électrolyte est une solution aqueuse de H_2SO_4 .



Au cours de la décharge, la surface des deux électrodes se transforme en $PbSO_4$ et l'eau qui se transforme augmente la dilution d'électrolyte.

III.2 Phénomène à la charge et à la décharge:

On considère qu'un accumulateur est déchargé quand sa tension tombe à 1,85 V. Si on charge, rapidement la tension s'élève à 2,1 V.

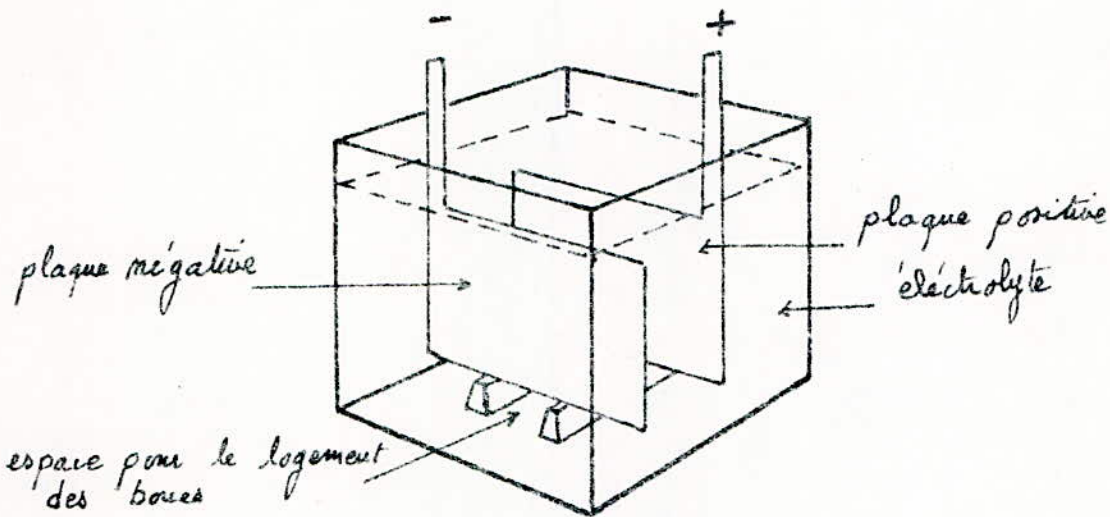
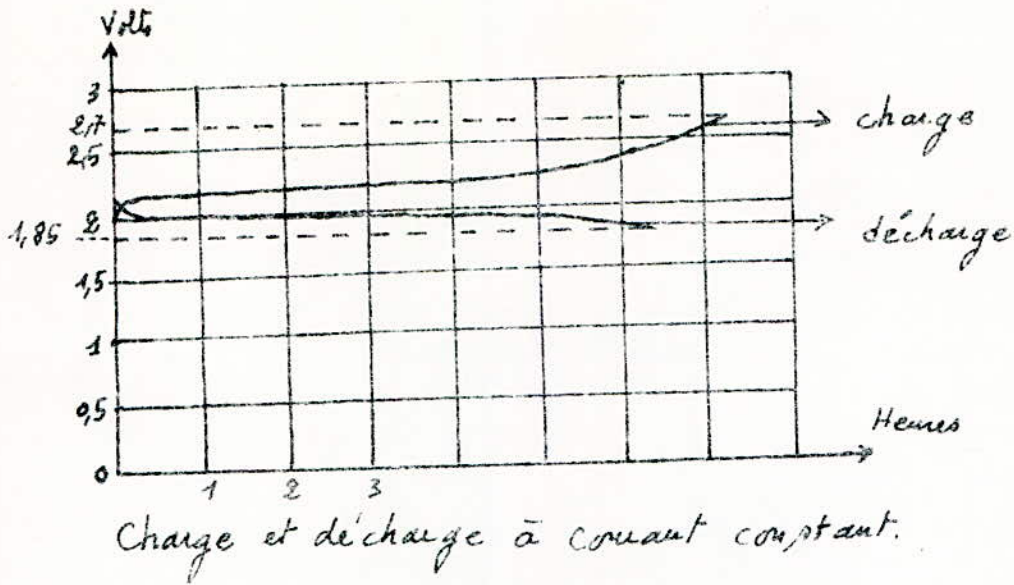
Cette différence est causée par le changement de signe de la chute de tension interne due à la résistance interne. La résistance interne d'un élément est d'autant plus faible que sa capacité est plus grande.

en décharge: $U_d = E - rI$

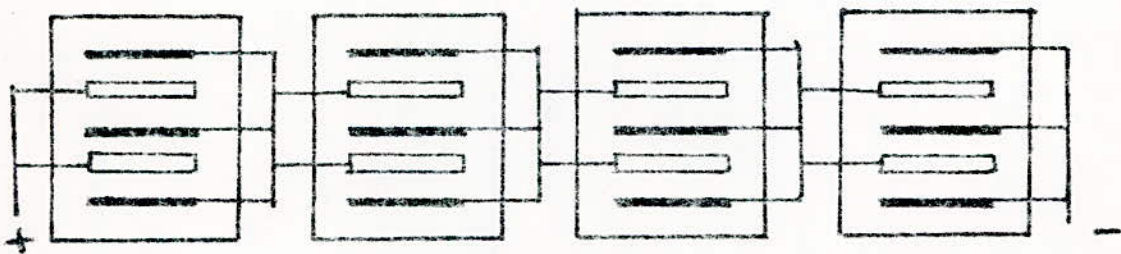
en charge: $U_c = E + rI$

Au cours de la charge, la tension par élément passe de 2,1 à 2,6 V.

Vers la fin de la charge, l'électrolyte se met à bouillonner: Ceci provient du fait qu'il n'existe plus sur les électrodes de sulfate de plomb pour réagir avec l'hydrogène et l'oxygène qui y sont libérés et qui dès lors s'échappent de l'élément sous forme gazeuse. Si on décharge l'élément,



Élément d'accumulateur sous sa forme la plus simple.



Montage des éléments d'accumulateur en série.

Fig III-2

La tension chute de 2,6 à 2 V, elle se maintient environ à cette valeur pendant la moitié de la décharge, puis décroît jusqu'à 1,85 V.

voir fig III.2

Si on prolonge la décharge, la tension chute encore et les plaques se sulfatent, il y aura un dépôt de $PbSO_4$ en si grande quantité que la charge suivante ne parviendra plus à le transformer PbO_2 et Pb . Il faut éviter d'utiliser l'élément sous tension de 1,85 V car un élément ainsi avarié doit subir un traitement spécial pour être remis en état. Le court-circuit d'un élément provoque un courant intense qui tend à courber les plaques, ce qui peut même les mettre en contact, un autre effet de court-circuit est de sulfater les plaques les pannes proviennent neuf fois sur dix d'un mauvais entretien.

3 Caractéristiques de la batterie:

On admet généralement comme courant nominal d'un élément le $\frac{1}{10}$ de sa capacité. Un accumulateur au plomb sera endommagé pour des charges ou décharges trop rapides. Pour la bonne conservation de la batterie de pouvoir lui donner de temps à autre une charge au régime nominal de 10h. La force électromotrice d'un élément n'étant que de 2V, on est obligé pour obtenir la tension de 127V de connecter un grand nombre d'éléments en série.

$$x = \frac{127}{2} = 64 \text{ éléments}$$

pour éviter les conséquences de bouillonnement on prend U_c par élément égal à 2,3V

$$U_c = 64 \cdot 2,3 = 147,2V$$

Dimensions de la batterie :

$$C = 160 \text{ A.h}$$

$$I_c = 16 \text{ A}$$

$$U_c = 150 \text{ V}$$

III. 4. Exploitation des batteries d'accumulateurs :

Les principaux régimes d'utilisation des batteries sont :

- régime cyclique
- régime batteries équilibrées appelé tampon
- régime batteries flottantes ou floating

Le principe de chaque régime est le suivant :

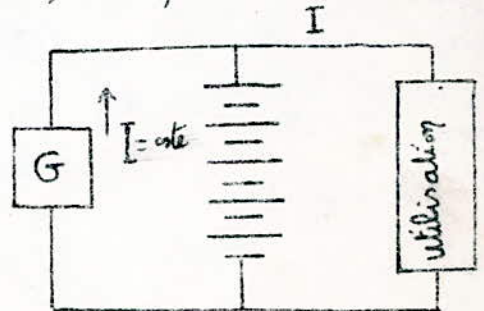
* régime cyclique :

La batterie est mise alternativement en charge et en décharge. Ce régime est à déconseiller pour des batteries stationnaires qui travaillent dans un endroit où l'utilité du courant doit être assuré en permanence.

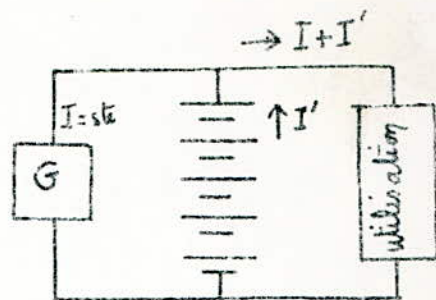
* régime batteries équilibrées :

La batterie est connectée d'une part à un circuit de décharge qu'elle alimente et d'autre part à un circuit de charge réglé de telle manière que le courant moyen de charge compense à la fois les quantités d'électricité déchargées et celles correspondant aux pertes internes de la batterie.

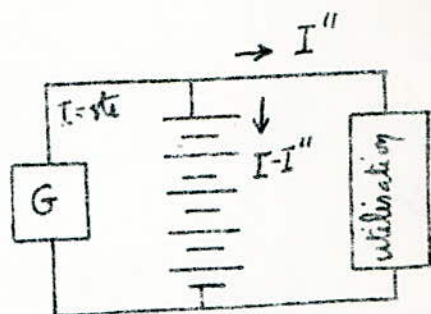
Le courant I est égal à l'intensité moyenne absorbée par le circuit d'utilisation.



Pendant les heures chargées, l'intensité nécessaire au circuit d'utilisation est supérieure à I . La batterie vient en aide au générateur G et se décharge en fournissant une intensité I'



Pendant les heures creuses, l'intensité nécessaire à l'utilisation est plus petite que I . Le surplus d'intensité $I - I''$ sert à charger la batterie

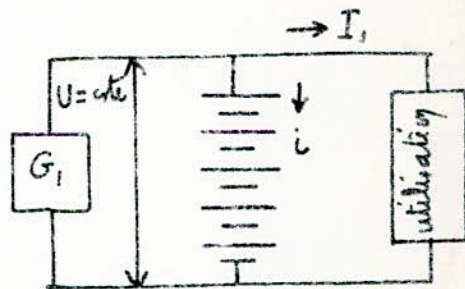


Remarque: Si le courant I est convenablement choisi, la batterie sera à la fin de la journée, aussi chargée que le matin mais ceci n'est valable qu'en présence du secteur.

* régime batterie flottante ou floating:

C'est une batterie aux bornes de laquelle une tension constante suffisante est appliquée en permanence pour maintenir son état de charge approximative. La batterie est connectée aux bornes d'un dispositif de charge régulée, qui maintient à des bornes une tension constante.

C'intensité i est nécessaire pour maintenir la batterie dans un état voisin de la pleine charge. C'est donc le générateur



G_1 qui fournit à chaque instant le courant nécessaire au fonctionnement des installations. La batterie ne débite que lors des pannes du secteur pendant lesquelles le générateur n'alimente plus l'installation. Lorsque la panne cesse, la batterie est rechargée, puis mise en floating.

* Charge d'entretien des éléments au plomb:

C'est une opération au cours de laquelle on fait passer dans une batterie complètement chargée un faible courant pour compenser les pertes qui se produisent en circuit ouvert. La batterie n'est jamais déchargée, sauf dans le cas d'une panne du réseau et elle peut être continuellement maintenue à l'état complètement chargé pendant des années (v. 20 ans).

Si la tension de charge est de $2,3\text{V}$ /élément, le courant d'entretien se règle automatiquement et la batterie se trouve maintenue dans un état convenable de décharge.

Comparativement aux régimes cycliques et batteries équilibrées, le régime batterie flottante ou floating s'adapte le mieux pour notre étude.

III.5. Fonctionnement du chargeur de batteries: VOIR schéma III.5.

a. Fonctionnement normal:

Il assure deux fonctions:

- alimente l'utilisation (différentes tensions $0,6\text{V}$, 12V ...).
- fournit le courant de maintien sous tension de floating

b. Fonctionnement secteur absent:

La batterie en décharge alimente l'utilisation en particulier l'éclairage de secours. Puisque l'éclairage secours est alimenté sous 127V alternatif et commuté automatiquement sur 127V continu.

c. Fonctionnement au retour du secteur:

- L'éclairage de secours est commuté sur l'alternatif
- La coupure du secteur a été inférieure d'un certain temps ou les ampères-heures perdus sont peu nombreux, dans ce cas la tension de

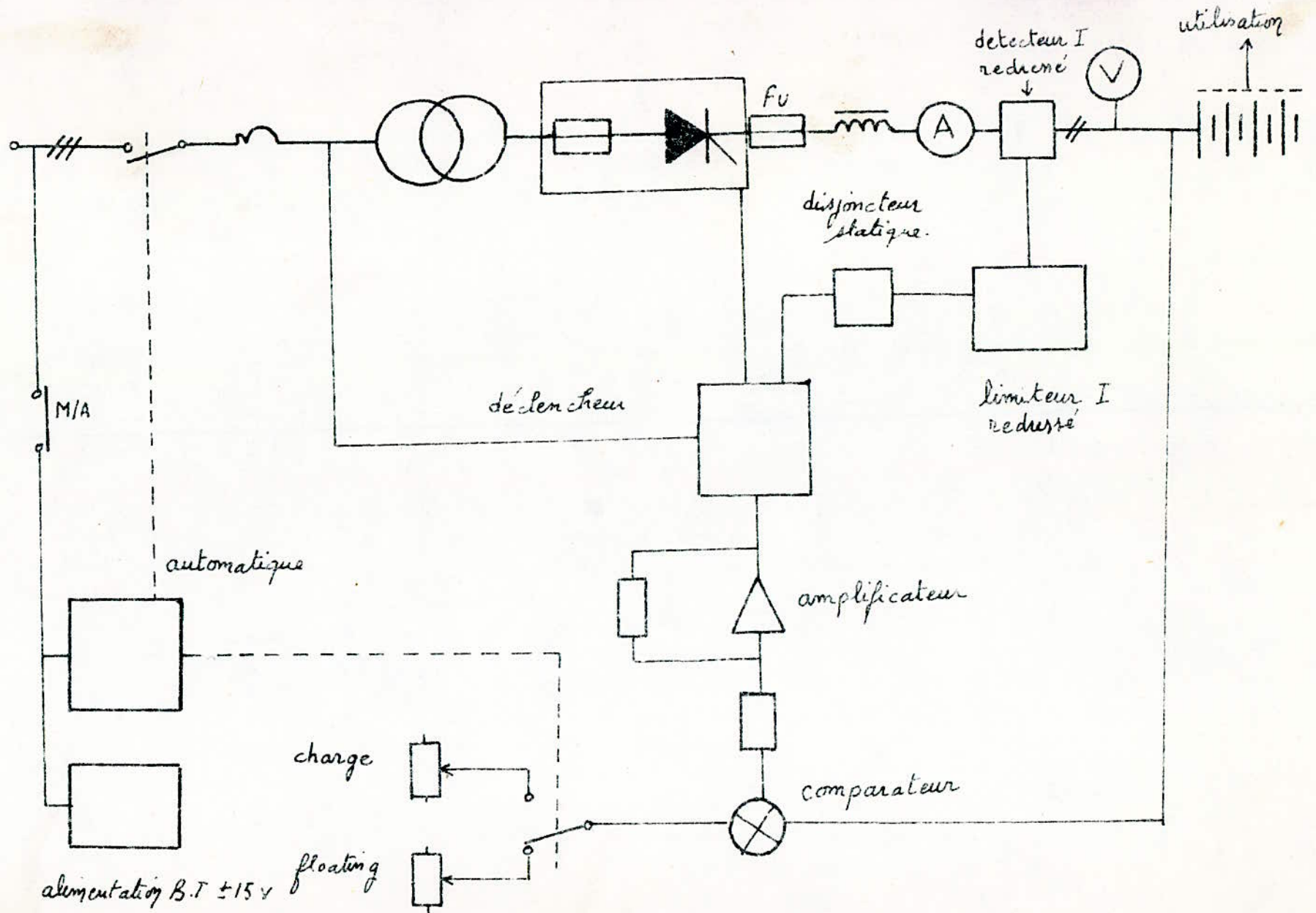


schéma III.5

sortie du chargeur est maintenue à la valeur de la tension de floating ce qui permet de compléter la charge de la batterie.

- Dans le cas contraire, où les ampères-heures perdus sont nombreux et ceci lorsque la décharge limite est atteinte, on débranche automatiquement l'éclairage de secours. La tension de sortie passe automatiquement à la tension de charge. La tension de charge est maintenue à la valeur de charge pendant 10h. Elle revient ensuite automatiquement à la tension de floating.

d. régulation :

Quel que soit son niveau (tension floating-charge) la tension de sortie est régulée. On choisit le système de commande du chapitre II.

La régulation est obtenue pour les variations :

- de la charge 0 à $I_N = 16A$

- tension secteur $\pm 10\%$

e. Dans le cas d'un court-circuit dans la charge, le courant de surcharge est limité pour éviter ses conséquences sur les éléments de la batterie. Pour cela on a prévu un disjoncteur de départ qui sera actionné si $I_{cc} > I_N$.

Les redresseurs à thyristors sont protégés contre l'inversion de polarité de la batterie par un fusible.

III.6 Détermination des caractéristiques du groupe convertisseur.

Le pont est alimenté par le transformateur de puissance 100 KVA (triphase)

La puissance est faible des batteries. On choisit le pont triphasé simple en thyristors.

- Réseau :

$$U_L = 230 \pm 10\%$$

$$Q \approx 2000 \text{ Kw}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

- charge :

tension nominale : $U_d = 150 \text{ V}$	} $d_n = 24^\circ$
courant nominal : $I_d = 16 \text{ A}$	
puissance nominale : $2,4 \text{ Kw}$	

- bloc redresseur : $p = q = 3$ $g = s = 1$

- tension à vide : on prend une chute : 8%

$$U_{dio} = \frac{U_{dio=0}}{1-d} = \frac{165}{1-0,08} = 179 \text{ V}$$

- tension d'alimentation du bloc :

$$U_{v0} = \sqrt{2} \cdot \frac{\pi}{9 \cdot s} U_{dio} = \sqrt{2} \cdot \frac{\pi}{3 \cdot 1} \cdot 179 = 965 \text{ V}$$

- tension inverse par bras :

$$\left. \begin{array}{l} U_{im} = \sqrt{2} \cdot U_{v0} \\ U_{v0} = \sqrt{2} \cdot \frac{\pi}{9 \cdot s} U_{dio} \end{array} \right\} U_{im} = \frac{2 \cdot \pi}{9 \cdot s} U_{dio} = \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot 1} \cdot 179 = 375 \text{ V}$$

- valeur moyenne du courant dans un bras :

$$I_a = \frac{I_d}{j \cdot q} = \frac{16}{1 \cdot 3} = 5,4 \text{ A}$$

- valeur efficace du courant dans un bras :

$$I = \frac{I_d}{g \sqrt{q}} = \frac{16}{1 \cdot \sqrt{3}} = 9,3 \text{ A}$$

c'est aussi le courant I_o alimentant le bloc redresseur : $I_o = 9,3 \text{ A}$

- Caractéristiques du transformateur.

- Pour ce pont simple, le couplage étroit au secondaire laisse une f.m.m résiduelle constante sur le circuit magnétique de valeur $\frac{15}{3} I_d$ où n_s représente le nombre de spires du secondaire par phase. Si la perméance du circuit est grande, une magnétisation permanente des noyaux entraînant à une augmentation inacceptable du courant à vide primaire. Pour palier à ce phénomène on doit utiliser le couplage (Y-Z) puisque le couplage Z évite cet inconvénient.

- Courant de ligne :

$$I_L = 0,7 \cdot \frac{I_d}{\cos \varphi} \cdot \frac{U_d}{U_L}$$

Comme la charge est (E, 2) on considère une chute $dx = 3\%$

$$\cos \varphi' = 1 - 0,9 dx = 1 - 0,9 \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 0,97$$

pour un courant magnétisant $I_\mu = 5\%$ on a $\cos \varphi = 0,957$

$$I_L = 0,7 \cdot \frac{16 \cdot 165}{0,957 \cdot 220} \approx 9,3 A$$

- côtés thyristors :

$$\text{tension entre bornes : } U_{V_0} = 265 V$$

$$\text{courant de partie } I_v = 9,3 A$$

on utilise un transformateur de puissance : $P = 1,345 \cdot P_0 = 1,345 \cdot 2,4 \approx 3,3 \text{ kVA}$

on prend la tension du court-circuit du transformateur : $4\% = \text{ext}$

- Courant de court-circuit :

Les différentes formules sont extraites de la publication N° 223 de la :

« British - electrical and allied - manufacturers - association » qui ont été établies pour un secondaire zig-zag :

on prend $e_2 = 0,2$.

- partie du transformateur :

$$I_{V_k} = \frac{I_d}{e_2} \cdot 0,74 = 0,74 \cdot \frac{16}{0,2} \approx 60 \text{ A}$$

- bras de montage

valeur efficace : $I_k = 0,74 \cdot \frac{I_d}{e_2} \approx 60 \text{ A}$

valeur moyenne : $I_{ok} = 0,55 \cdot \frac{I_d}{e_2} = 0,55 \cdot \frac{16}{0,2} = 44 \text{ A}$

valeur maximale : $I_{km} = 1,15 \cdot \frac{I_d}{e_2} = 92 \text{ A}$

- circuit continu

valeur moyenne : $I_{d2} = 1,65 \cdot \frac{I_d}{e_2} = 1,65 \cdot \frac{16}{0,2} = 132 \text{ A}$

- choix des fusibles :

$I_{fn} > I_{eff} = 9,3 \text{ A}$ on prend $I_{fn} = 15 \text{ A}$

$U_{fn} > U_{V_0} = 259 \text{ V}$ on prend $U_{fn} = 300 \text{ V}$

- choix des thyristors :

le courant limite de surcharge : $I_{FSM} > \frac{I_k^2 \cdot T \cdot I_a}{0,9}$

pour $I_a = 5,4 \text{ A}$; $T = 2 \cdot 10^{-2} \text{ s}$, $I_k = 60 \text{ A}$

$I_{FSM} > 21 \text{ A}$ on prend par exemple $I_{FSM} = 25 \text{ A}$

la tension inverse doit être majorée d'au moins 50% : $U_{TI} = 600 \text{ V}$

- Vérification de la chute de tension.

- Calcul du bobine de lissage :

elle est exprimée par la relation suivante :

$$L_d = k \cdot \frac{U_{dio}}{\frac{\Delta I_c}{I_d} \cdot \omega \cdot I_d}$$

ΔI_c : amplitude de la composante alternatoire du courant continu

I_d : composante moyenne du courant continu.

K : coefficient donnée pour l'indice de pulsation et l'angle de retard.

L_d : Valeur globale de l'inductance du circuit continu. Dans notre cas comme la charge (E, r) $L_d = L_s$.

Données : $\alpha = 90^\circ$, $K = 0,395$, $\frac{OI_c}{I_d} = 0,1$; $I_d = 16A$; $\omega = 314,3$

$$U_{dio} = 179 \text{ V}$$

$$L_d = L_s = 0,395 \cdot \frac{179}{0,1 \cdot 3 \cdot 314 \cdot 16} = 0,47 \text{ mH}$$

- Vérification de la chute de tension.

- due au transformateur.

d'après le tableau extrait de la norme U.T.E - Montage à simple voie

$$\frac{d_{xt}}{e_x} = 0,87 \quad ; \quad \text{pour } e_x = 0,04 \Rightarrow d_{xt} = 3,48 \cdot 10^{-2}$$

- due à l'impédance du réseau :

$$X_L = 0,024 \Omega$$

$$d_L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{U_{vo}}{U_L} \right)^2 \cdot X_L \cdot \frac{I_d}{U_{dio}} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{255}{220} \right)^2 \cdot 0,024 \cdot \frac{16}{179} \approx 0$$

$$\Rightarrow d_x = d_{xt} + d_L = d_{xt} = 3,48 \cdot 10^{-2}$$

- Chute résistive

les pertes dynamiques totales du bloc sont estimées : $P_2 = 100 \text{ W}$

$$d_2 = \frac{P_2}{U_{dio} \cdot I_d} = \frac{100}{179 \cdot 16} = 3,49 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{chute totale : } d_x + d_2 = 3,48 \cdot 10^{-2} + 3,49 \cdot 10^{-2} = 6,97 \cdot 10^{-2}$$

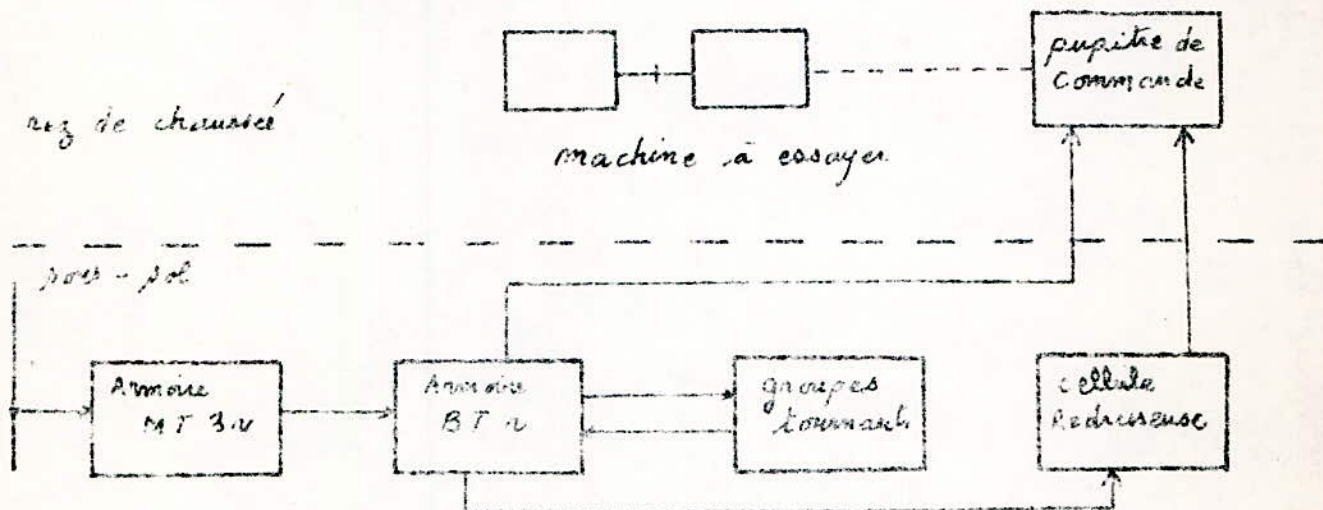
$$\text{la différence de chutes : } d(\text{estimée}) - d(\text{calculée}) = 8\% - 6,97\% = 1,03\%$$

1,03% peut à compenser les chutes dues à la bobine de lissage et connexion....

IV Changement des thyristors - câblage des redresseurs:

IV 1 changement des thyristors:

L'alimentation de chaque pupitre de commande de la salle des machines se fait par un ensemble: "armoire MT alternatif - armoire B.T alternatif - groupes tournants". Certains ensembles individuels comprennent en outre des cellules redresseuses (sélénium, thyristors, silicium, vapeur de mercure) schéma synoptique d'un pupitre:



La tension fixe, continue 125 est délivrée, pour chaque pupitre par les batteries d'accumulateurs au Cd-Ni. La tension continue variable s'obtient, soit par des génératrices entraînées par des moteurs asynchrones, soit par des génératrices et des redresseurs...

Vue que chaque ensemble individuel a ses propres caractéristiques, on s'intéresse au pupitre des thyristors. Les thyristors du pupitre D, sont défectueux, D, est disposé de tensions variable ou réglées qui sont fournies par les thyristors.

Caractéristiques de la cellule redresseuse des thyristors :

- puissance nominale : 5 Kw
- tension nominale : $125 \pm 0,5\%$
- courant nominal : 40 A
- transformateur (Δ -Y) : 14,7 KVA
- tension d'alimentation : 220 V - 50Hz
- tension secondaire : 110 - 160 V

Les thyristors sont une photo-copie des thyristors. Actuellement si un bloc redresseur muni des thyristors tombe en panne, on change les thyristors et leur commande car celle-ci pour un thyristor exige une tension élevée et un faible courant et pour les thyristors elle exige une tension faible et un fort courant.

- bloc redresseur : $p = q = 3$ $g = s = 1$
- tension d'alimentation du bloc : 160V
- tension inverse par bras : $U_{im} = \sqrt{2} \cdot U_{s0} = \sqrt{2} \cdot 160 = 226 \text{ V}$
- valeur moyenne du courant dans un bras :

$$I_a = \frac{I_d}{g \cdot q} = \frac{40}{1 \cdot 3} = 13,4 \text{ A}$$

- valeur efficace du courant dans un bras :

$$I = \frac{I_d}{g \sqrt{q}} = \frac{40}{1 \cdot \sqrt{3}} = 23 \text{ A}$$

- courant de court-circuit :

$$I_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_d}{\sqrt{2}} \left(\frac{I_L}{I_d} \right) = 0,74 \frac{I_d}{\sqrt{2}} = 0,74 \frac{40}{0,7} = 148 \text{ A}$$

choix des thyristors :

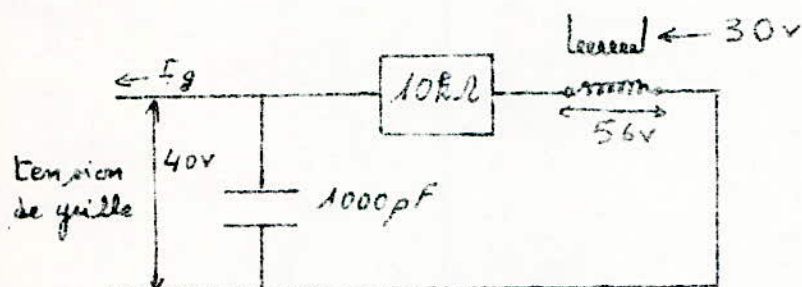
le courant limite de surcharge : $I_{FSM} > \frac{I_K T_{ca}}{0,9}$

pour $I_a = 13,4 A$; $I_K = 148 A$; $T = 116^\circ C$

$I_{FSM} > 57 A$ on prend par exemple $I_{FSM} = 70 A$

On majore la tension inverse : $V_{Ti} = 400 V$

— Commande de la grille d'un thyristor du pupitre :

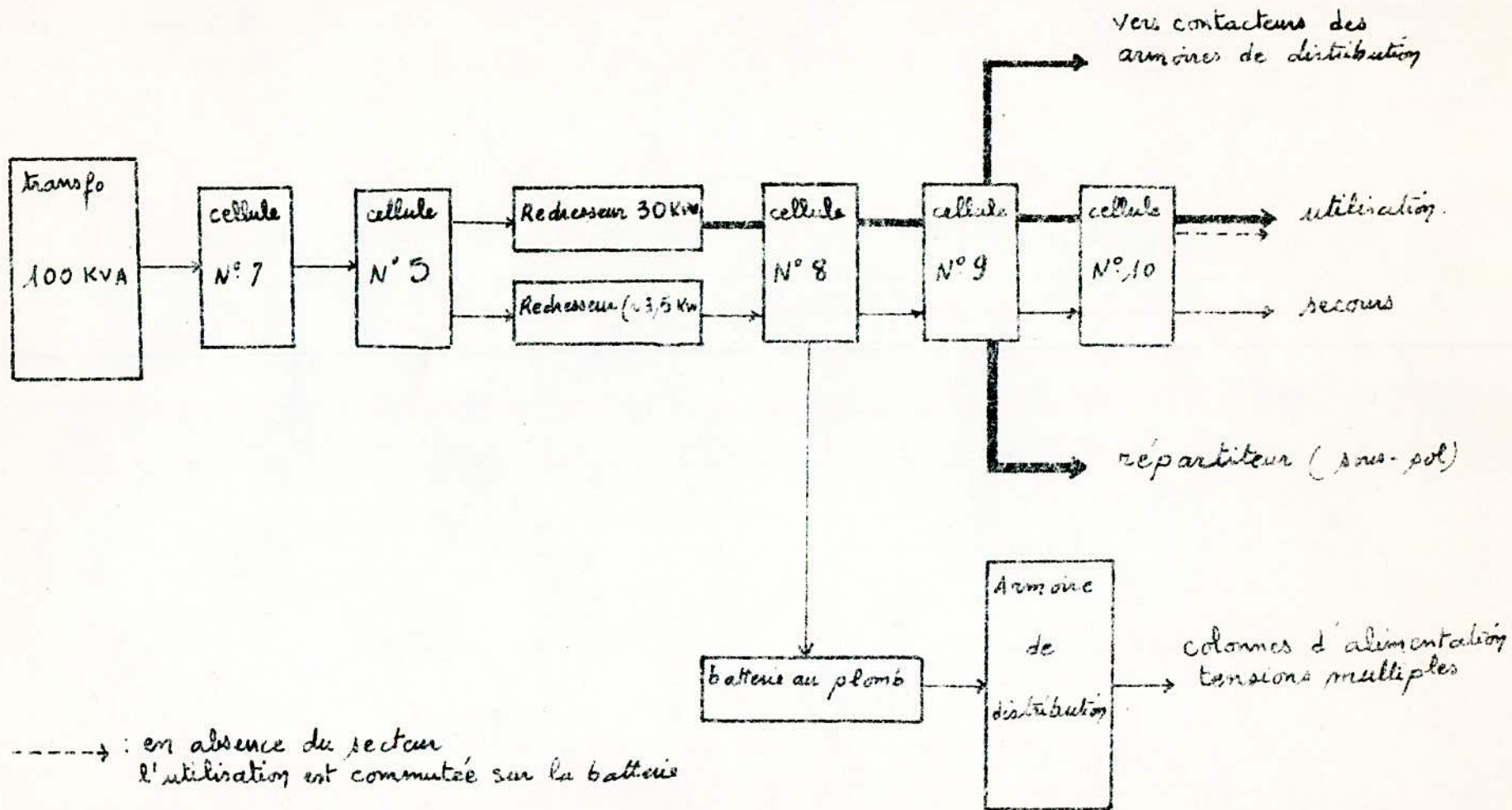


Pour le thyristor choisi on peut aisément déterminer le circuit R-C et en plus on a le transformateur d'alimentation du circuit de commande variable. On doit placer des protections contre les surtensions et un ventilateur pour évacuer la chaleur excédentaire car l'armoire redresseuse se trouve au pôle-pôle.

IV.2 : Câblage des redresseurs : (Voir schéma synoptique)

— Le redresseur de 30 Kw à implanté devra assurer :

- * une ligne de distribution à tension unique 125 V pour armoire de distribution les pannes de mesures
- * les pupitres d'essai des machines du rez-de-chaussée ainsi que les excitations des machines des groupes des ensembles individuels.
- * certains moteurs et circuits d'excitation des machines auxiliaires.
- * tous les circuits de signalisation et d'éclairage des cellules du tableau général de distribution.



Synoptique de distribution de l'alimentation
en courant continu

— la batterie au plomb chargée par le redresseur ($\approx 3,5$ Kw) devra assurer :

* elle alimentera toutes les salles de mesures en tensions multiples :

(0 - 6 - 12 - 18 - 24 - 30 - 36 v)

* elle alimentera en secours l'éclairage du bâtiment.

* elle débitera sur l'utilisation pendant l'interruption du secteur.

Conclusion

J'ai voulu, par cette modeste étude, contribuer à la rénovation du laboratoire d'électrotechnique. Pour cela il m'a été difficile d'entreprendre une réalisation pratique et ce à cause du manque de matériels, je me suis donc limité à l'étude théorique.

Les semi-conducteurs ont largement remplacé les groupes tournants les tubes à gaz, ...

Les redresseurs ont des avantages non négligeables :

- prix moins élevé
- entretien réduit
- rendement meilleur
- grande souplesse d'asservissement

Avec l'acquisition des armoires de (30 et 3,5) kW. Le courant continu sera disponible en permanence et même en surplus. En plaçant ces armoires cela n'insigne pas que le laboratoire est rétabli. Il lui reste une révision totale de ses différentes parties (cellules, armoires, pupitres de commande, états de câbles ...)

Il est donc nécessaire et de façon urgente de procéder à la remise en état de certains circuits de commande, de protections ...

Bibliographie :

C.M. SWENNE : les thyristors ; édition : bibliothèque technique
phadips.

J. LECORGUILLIER : les vannes électroniques à électrodes de
déclenchement ; édition : demod

E. GILLON : cours d'électrotechnique, théories générales, première partie
édition Demod.

M. MOUNIC : redressement, tomes I-III ; édition : fouchee

R. MASCARIN : redresseurs industriels à semi-conducteurs
édition eyrolles.

R.A. HARVEY : emploi et charge des accumulateurs électriques.
édition demod

M. GAUDRY : redresseurs et thyristors ; édition demod.

G. LAEDERICH - R. ESCUDIER : alimentations en énergie électrique
appareils et installation ; "eyrolles"

* projet de fin d'études : "régulation de tension d'un alternateur - exemple
de la centrale thermique d'Algues-pot"

dirigé par : L. Zebrowski ; étudié par : Benhadad-Talouine

* projet de fin d'études : "alimentation et distribution en énergie électrique
du bâtiment électrique de l'E.N.P.A"

dirigé par : A. P. GALLO ; étudié par : S.N.P. SADOR