

19/75

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

200

THESE DE FIN D'ETUDES

SIMULATION MATHÉMATIQUE ET ÉTUDE  
DE FONCTIONNEMENT D'UN REDRESSEUR  
TRIPHASE EN PONT EN RÉGIME

PARTICULIER

(cas d'une force contre électromotrice alternative)

المدرسة الوطنية للعلوم  
المكنة  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكنة  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

Proposé par :

Mr. V. STRIAPAN

Etudié par :

A. NAIT SAADA

Promotion JUIN 1975

UNIVERSITE D'ALGER

---

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

---

DEPARTEMENT ELECTRICITE

---

THESE DE FIN D'ETUDES

---

SIMULATION MATHEMATIQUE ET ETUDE  
DE FONCTIONNEMENT D'UN REDRESSEUR  
TRIPHASE EN PONT EN REGIME  
PARTICULIER

(cas d'une force contre électromotrice alternative)


Proposé par :

**Mr. V. STRIAPAN**

Etudié par :

**A. NAIT SAADA**

Promotion JUIN 1975

 REMERCIEMENTS

J'exprime tout particulièrement ma vive gratitude à Monsieur le Professeur V. STRIAPAN dont le soutien constant et les conseils éclairés m'ont permis d'élaborer cette étude.

Je remercie sincèrement tous les enseignants qui, par leur dévouement et leur patiente bienveillance, ont contribué à ma formation et auxquels j'associe également tous ceux qui, par leur concours moral et leur sympathie, m'ont aidé à réaliser ce travail.

# S O M M A I R E

<u>Paragrap</u> hes	<u>Pages</u>	
1.1	Introduction	5
1/2	Régimes particuliers	6
1.2.1.	Influence de la non symétrie sur le régime du redresseur	6
1.2.2.	Influence de la forme contre électromotrice alternative sur le fonctionnement du redresseur.	6
1.2.2.1.	Excitation des machines synchrones	7
1.2.2.2.	Augmentation de la puissance transportée par une ligne à courant alternatif.	7
1.2.2.3.	Moyen de lutte contre le givre.	8
2.	Redresseur en pont triphasé	10
2.1	Principes généraux	10
2.2.	Notations.	
2.3.	Fonctionnement du redresseur en pont triphasé	10
2.3.1.	Montage de graetz	10
2.3.2.	Fonctionnement - Rappel	11
2.3.3.	Amorçage	11
2.3.4.	Influence des inductances et des résistances présentes dans les circuits.	12
2.4.	Redresseur commandé	13
2.5.	Régime de fonctionnement	14
2.5.1.	Fonctionnement en régime 2.3.	14
2.5.2.	Fonctionnement en régime 3.3.	18
2.5.3.	Fonctionnement en régime 3.4.	21
2.5.4.	Caractéristique externe du redresseur en pont triphasé	24
2.6.	Fonctionnement du redresseur triphasé en régime particulier.	25
2.6.1.	Circuit continu renfermant inductances, résistances et force électromotrice continue.	25
2.6.2.	Cas où le circuit continu renferme une force électromotrice formée d'une composante continue et d'une composante alternative.	25
3.	Méthode de simulation du pont redresseur.	27
3.1.	Choix de la méthode et du schéma général du pont (tableau de fonctionnement).	27
3.2.	Equations différentielles pour les différents régimes de fonctionnement.	27
3.2.1.	Etude du régime à 4 soupapes	30
3.2.2.	Etude du régime à 3 soupapes	34
3.2.3.	Etude du régime à 2 soupapes	37

3.3.	Méthode de résolution des équations différentielles	40
4.	Organigramme général	43
4.1.	Description de l'organigramme général	43
4.2.	Choix d'état de redresseur	433
4.3.	Résolution des équations	44
4.4.	Contrôle de fin d'intervalle	44
4.5.	Organisation des sorties	44
4.6.	Changement des paramètres et fin de calcul	45
	Figure 1	46
	Figure 2	47
	Figure 3	48
5.	Etude de fonctionnement du redresseur aux régimes envisagés.	49
5.1.	Régime permanent $EM = 0$	49
5.2.	Régime permanent $EM = 45 \text{ kV}$	50
5.3.	Régime permanent $EM = 110 \text{ kV}$	50
5.4.	Régime transitoire $EM = 100 \text{ kV}$	50
5.5.	Régime de blocage $EM = 160 \text{ kV}$	50
6.	Analyse des résultats - Conclusion	52
7.	Annexe - Programme en FORTRAN	

## 1.1. - Introduction

IL est actuellement constaté que la consommation en énergie électrique croît sensiblement et atteint approximativement le double à chaque décennie.

Dans les pays industrialisés, la part d'énergie utilisée sous forme de courant continu représente environ 25 % de leur consommation totale.

• L'énergie électrique est produite et distribuée sous forme de courant alternatif, la conversion alternatif-continu s'effectue de nos jours à l'aide des convertisseurs statiques appelés redresseurs.

L'emploi de ces derniers s'est rapidement généralisé depuis l'apparition des soupapes à semi-conducteur non commandées et commandées (diodes de puissance et thyristors).

En ce qui concerne les redresseurs puissants, le montage le plus en usage est le Pont de GRAETZ dont les caractéristiques sont incomparables du point de vue technique et très avantageux économiquement.

Aussi leur application dans l'industrie électro-énergétique est vairée et notamment en ce qui concerne :

- Electrochimie
- Electrométallurgie
- Fraction électrique
- Transport d'énergie à courant continu à haute et très haute tension.

La théorie de redressement par Pont de GRAETZ bien que répandue suscite aussi certaines hypothèses simplificatrices telles que :

- Lissage parfait du courant redressé ou présence d'une inductance de lissage dans le circuit de charge  $X_d = \infty$
- Absence de résistance dans le système d'alimentation  $R_a = 0$
- Le circuit de charge se restreignant à une force électromotrice continue.

Le cas où la théorie la plus développée ne couvre que le domaine des charges normales ; le fonctionnement du pont redresseur se traduirait par le régime 2.3. soupapes conductantes.

De l'importance des redresseurs et de l'augmentation de leur puissance unitaire, résulte la nécessité d'étendre la théorie aux régimes des surcharges, d'avaries et des régimes particuliers.

Le travail présenté est consacré à l'étude de certains régimes particuliers de fonctionnement des redresseurs triphasés en pont de GRAETZ

## 1.2. - REGIMES PARTICULIERS

Des régimes particuliers permanents, les plus fréquents à retenir et à étudier sont

- Non symétrie dans le système d'alimentation
- Force contre électromotrice du circuit Extérieur variable dans le temps.

### 1.2.1. - Influence de la non symétrie sur le régime du redresseur

Le système de production et de transport d'énergie dont est issu le réseau d'alimentation du pont redresseur est ainsi que tout autre système soumis à de nombreux impondérables au cours de son exploitation.

Les avaries se produisant tout au niveau de la source que du réseau peuvent être de toutes natures et avoir lieu à n'importe quel point du trajet séparant la source d'alimentation du transformateur placé en amont du pont.

L'état de fonctionnement de ce dernier et de toute l'installation situé en aval de celui-ci sera dépendant de la fiabilité du réseau d'alimentation ; lequel réseau est défini par la source fournissant les tensions composées appliquées aux deux ensembles de thyristors, les réactances entre phases, les réactances de phases et par le bloc de transformation.

C'est ainsi que toute variation affectant l'un des éléments cités ci-dessus peut être considérée comme anomalie perturbant le fonctionnement normal du convertisseur.

Le pont n'accomplissant pas la fonction requise dans des conditions appropriées, il s'en suit des perturbations au niveau de la tension et du courant redressé.

L'étude assez complète des particularités des fonctionnements du pont en cas de non symétrie du système d'alimentation a été faite par MM. OUERDANE et KHELIL, en thèse de fin d'études promotion 1969-1974 "SIMULATION ET ETUDE D'UN REDRESSEUR PUISSANT TRIPHASE EN REGIMES NON SYMETRIQUES".

Le modèle mathématique général proposé dans cette étude a permis d'évaluer les conséquences de n'importe quelle non symétrie sur le fonctionnement du pont et les mesures à prendre pour limiter l'influence néfaste de cette non symétrie.

### 1.2.2. - Influence de la force contre-électromotrice alternative sur le fonctionnement du redresseur.

Ce cas est assez général pour renfermer beaucoup d'applications des redresseurs ; parmi elles, on peut citer :

- Utilisation du pont redresseur pour l'excitation des générateurs synchrones de grande puissance.

- Redresseurs puissants utilisés pour augmenter la puissance transportée par une ligne à courant alternatif.

- Utilisation du pont redresseur pour la fonte de givre sur les lignes de transport HT et THT à courant alternatif.

Dans ce qui suit, nous ferons une étude détaillée des trois cas cités:

1.2.2.1. - Excitation des machines synchrones

Le faible encombrement, la résistance mécanique et les pertes minimes des soupapes à semi-conducteurs ont permis récemment d'apporter des solutions nouvelles au problème de l'excitation des machines synchrones en supprimant à la fois l'excitatrice à collecteur et même dans certains cas les bagues rotoriques amenant le courant d'excitation à l'inducteur.

La figure 1.2.1. montre un schéma possible.

En régime permanent, on peut négliger la force contre-électromotrice alternative devant la force contre-électromotrice continue. Cependant, pour des fonctionnements de l'alternateur en régimes transitoires, cette force contre-électromotrice alternative peut atteindre des proportions considérables.

L'apparition de cette force contre-électromotrice alternative provoquera des changements dans les processus électromagnétiques du redresseur.

1.2.2.2. - Augmentation de la puissance transportée par une ligne à courant alternatif.

On sait que chacun des deux modes de transport d'énergie électrique (à courant alternatif ou continu) a ses propres avantages et aussi ses inconvénients.

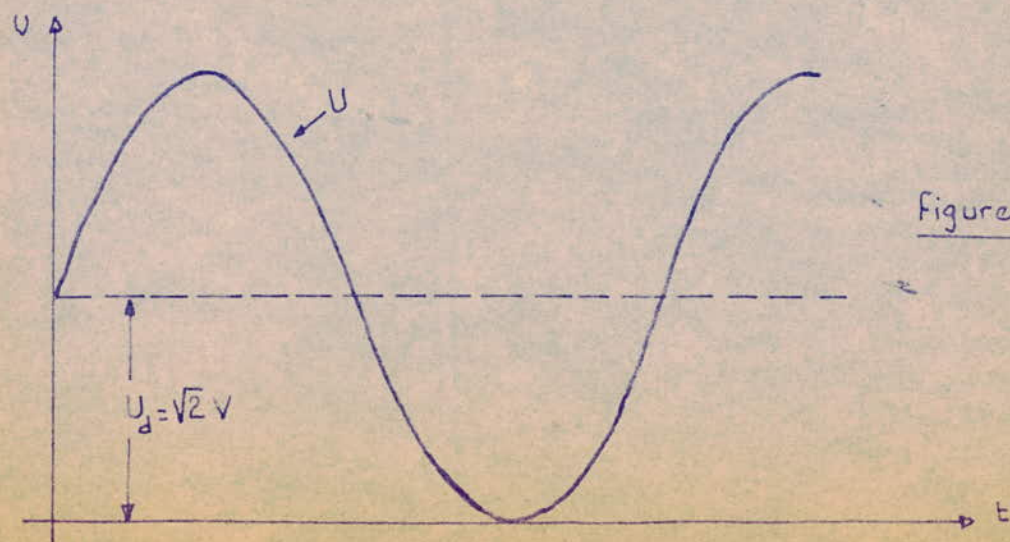
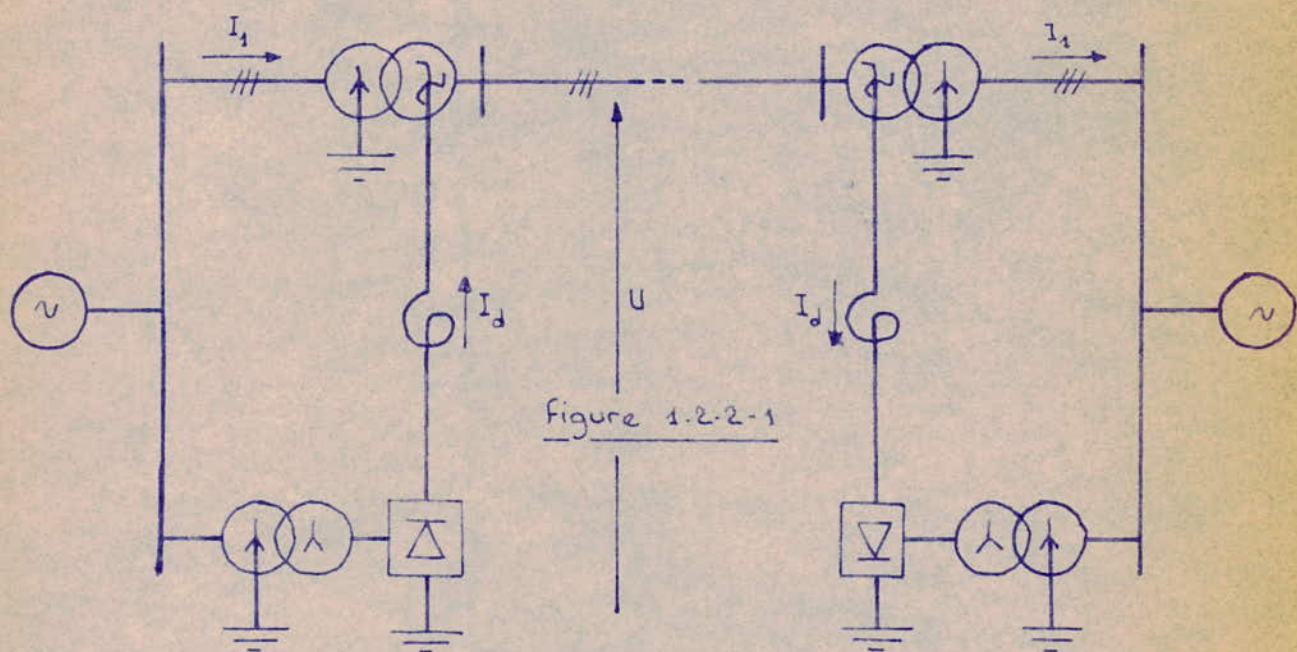
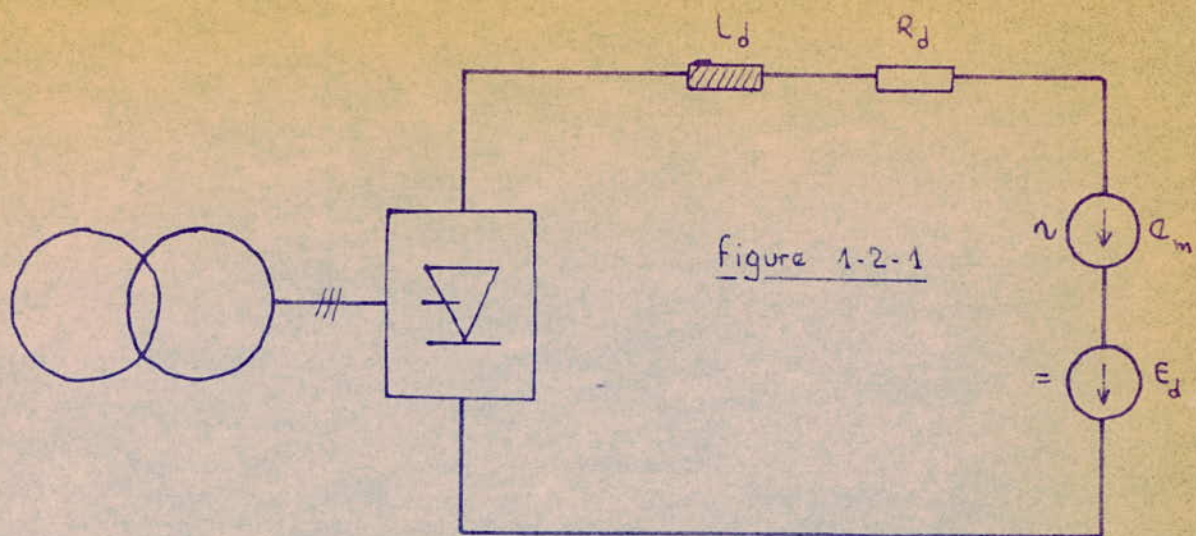
L'idée de réunir les avantages des deux systèmes et de compenser mutuellement les inconvénients a amené au système de transport "mixte" par courant alternatif et continu.

Ce mode prévoit la superposition sur les trois phases d'une ligne à courant alternatif avec une certaine tension continue.

Cette dernière tension est fournie par des convertisseurs qui peuvent être branchés aux extrémités d'une ligne neutre ; le neutre de l'enroulement HT du transformateur et la terre.

Le schéma d'un tel système est indiqué par la fig. 1.2.2.1.





Valeur efficace du courant de phase

$$I_{\underline{c}} = \sqrt{I_1^2 + (I_d/3)^2} = \sqrt{I_1^2 + I_0^2}$$

Chaque conducteur a un potentiel par rapport à la terre ayant deux composantes, pulsatoire et continue. Si nous avons choisi la valeur de la tension continue égale  $U_d = \sqrt{2} V$ , où

$V$  = tension simple du système alternatif.

La différence de potentiel conducteur-terre aura l'allure de la figure 1.2.2.2. et sa valeur efficace égale à :

$$U_{\underline{c}} = \sqrt{V^2 + U_d^2} = \sqrt{3} V$$

La puissance active transmise par cette ligne sera :

$$P = 3 \sqrt{3} V I_{ph} \cos \varphi = 3 U_{\underline{c}} I_{\underline{c}} \cos \varphi$$

On s'aperçoit qu'avec le même courant de phase  $I_{\underline{c}}$ , nous arrivons à faire transiter une puissance  $\sqrt{3}$  fois plus grande.

En URSS { 2 lignes de 10 KV exploitées depuis bien longtemps.  
1 ligne de 110 KV au stade de l'expérimentation

Cette étude n'a pas pour but de discuter des avantages et des inconvénients de ce mode de transport d'énergie. Mais, en cas de court-circuit sur une des lignes de la fig. 1.2.2.3. apparaît une f.c.e.m. alternative égale à la tension simple de la ligne à la sortie du pont redresseur.

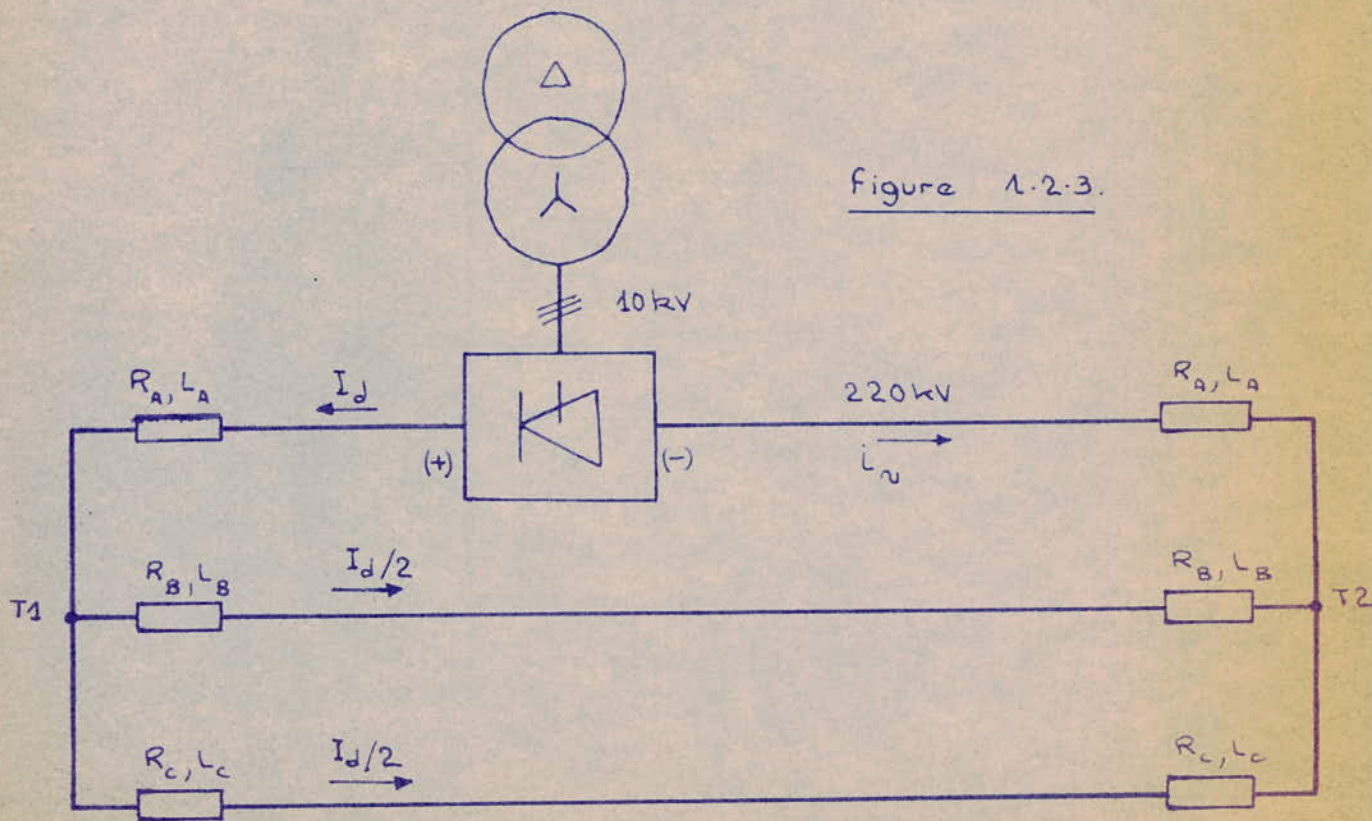
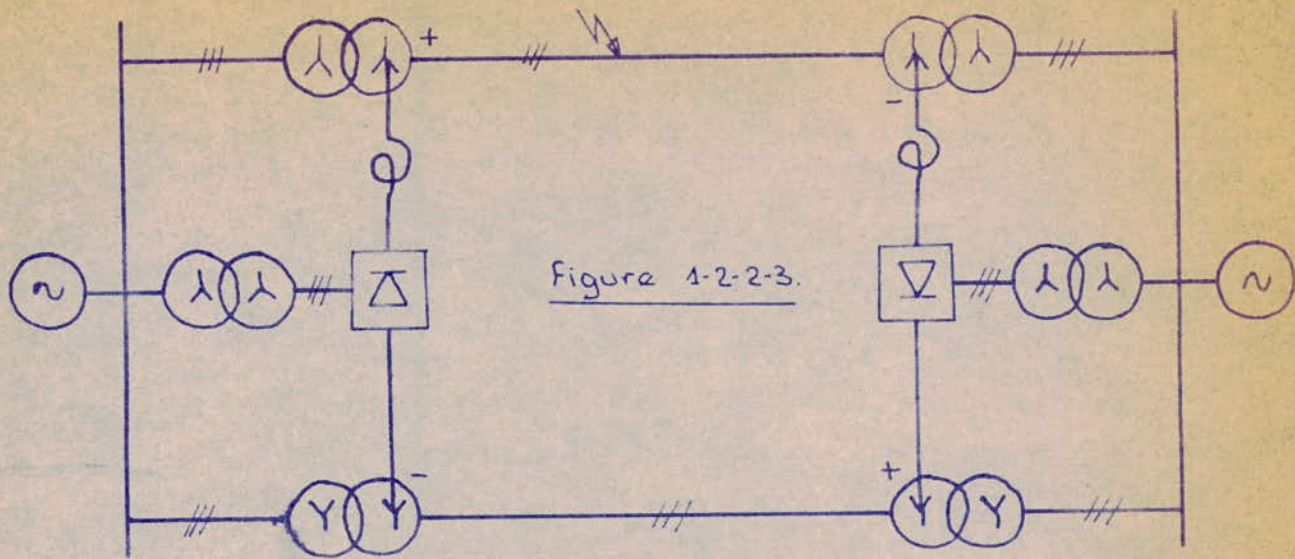
Dans un tel montage, le redresseur fonctionne en régimes particuliers pendant la période d'avarie d'une ligne.

1.2.2.3. - Moyen de lutte contre le givre

Les charges de givre sont de première importance pour le choix des principales dimensions constructives des lignes et tout d'abord de la portée de la hauteur du pylone. Elles exercent une influence importante sur les dépenses en acier, isolateurs et armement. L'augmentation des charges de givre affecte notablement le coût des lignes. Leur sous estimation peut mener à des accidents très graves dus à la rupture des conducteurs et à la destruction des pylones.

Les charges de givre peuvent avoir donc un effet important sur les indices économiques des lignes et la sécurité de leur fonctionnement.

Pour cela, l'élaboration et la mise en service des moyens efficaces de lutte contre le givre visant à diminuer le coût et à augmenter la fiabilité de son fonctionnement s'avère très importante.



Ces dernières années, de nouvelles méthodes consistant à faire fondre le givre sur les conducteurs des lignes de transport à haute et très haute tension ont été proposées.

Celles-ci consistent à superposer en cas de nécessité sur le courant alternatif de la ligne quantitativement insuffisant pour chauffer les conducteurs jusqu'à la fonte du givre, une valeur de courant continu nécessaire fournie par des redresseurs puissants.

La fig. 1.2.3. montre un schéma possible.

La valeur efficace du courant alternatif est de l'ordre d'une centaine d'ampères.

La valeur moyenne du courant redressé est de l'ordre de 1000 ÷ 2000 A. Le courant continu fourni par le redresseur alimente les trois phases de la ligne.

Du pôle (+) du pont - phase A du transformateur T1 - neutre de T1 - phases B et C de T1 - phases B et C de la ligne - phases B et C de T2 - neutre de T2 - phase A de T2 - phase A de la ligne et pôle (-) du pont redresseur.

Là aussi, nous n'envisageons que le fonctionnement du pont qui, en régime normal, a la tension alternative à ses bornes.

On voit que le régime de fonctionnement du pont redresseur sur une f.c.e.m. alternative ou pulsatoire se trouve dans certaines applications des redresseurs.

Nous n'avons pas pu retrouver dans la bibliographie mise à notre disposition des indications mêmes sommaires sur le fonctionnement du pont de GRAETZ dans ce régime. Cependant, l'étude des particularités de fonctionnement dans pareilles conditions est indispensable pour le choix du matériel électrique tel que : transformateur, thyristors, appareillage de protection, etc...

La théorie classique de fonctionnement du pont de GRAETZ ne permet pas de calculer les paramètres du régime : courant et tensions redressés, angle de conduction, courants et tensions des soupapes dans les conditions de fonctionnement indiquées.

Le but de notre travail consiste à élaborer un modèle mathématique assez général permettant d'analyser ce cas de fonctionnement et de déterminer tous les paramètres du régime.

## 2.1 - Principes généraux des redresseurs

Les redresseurs ont aujourd'hui presque complètement supplanté les autres modes de conversions d'énergie électrique alternatif-continu, en particulier, les groupes moteurs génératrices et les commutatrices.

Les raisons en sont les suivantes :

- Prix moins élevé,
- Robustesse plus grande,
- Rendement meilleur dépassant 99 % (pour les installations de grande puissance),
- Installation plus facile (pas de fondations),
- Fonctionnement silencieux,
- Possibilité de réglage ultra-rapide et sans pertes de la tension continue,
- Souplesse d'asservissement incomparable.

Dans cette étude, nous nous limiterons au montage PONT DE GRAETZ qui trouve actuellement l'application la plus large parmi les différents montages redresseurs.

## 2.3 - Fonctionnement du redresseur en pont triphasé

Pour mieux comprendre le fonctionnement du pont redresseur triphasé, rappelons d'abord le redressement du courant par des soupapes non commandées dans l'hypothèse  $X_a = 0$  et  $X_d = \infty$ . Lorsque la commutation est instantanée (régime idéalisé) et ensuite nous tiendrons compte des variations apportées dans le régime de commutation des courants par la valeur finie de  $X_a$  et le régime de redressement par des soupapes commandées.

### 2.3.1. - Montage de GRAETZ (Voir fig. n°2.3.1)

La figure 2.3.1 montre l'association de deux couplages triphasés. Les enroulements secondaires du transformateur comme les enroulements primaires sont couplés en étoile ou en triangle et n'ayant nul besoin de point neutre.

Ce montage est l'équivalent d'un montage hexasphasé série : tout se passe en effet, comme si le montage polyanodique et le montage polycathodique étaient alimentés par des tensions triphasées en opposition de phase c'est à dire formant un système hexasphasé.

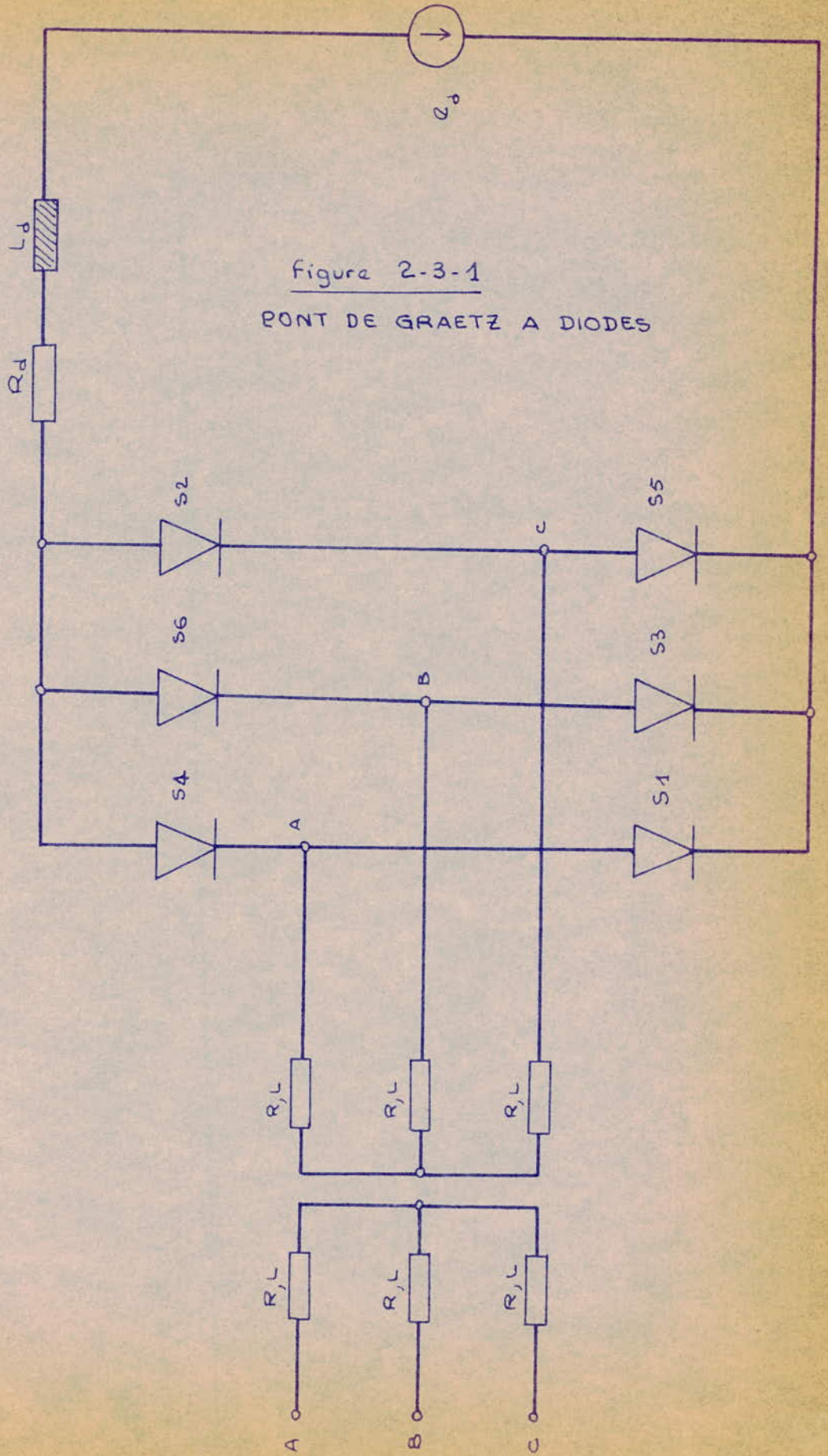


Figure 2-3-1  
 PONT DE GRAETZ A DIODES

Le montage de GRAETZ a l'avantage d'utiliser des transformateurs de construction normale. On peut même, quand la tension le permet, ne pas employer de transformateur, l'alimentation se faisant directement par le réseau.

2.3.2. - Fonctionnement : rappel

Dans le groupe pair ou cathodique, fonctionne pendant chaque tiers de période, la soupape ayant le potentiel d'anode le plus positif.

Dans le groupe impair ou anodique, fonctionne, pendant la portion de période considérée, la soupape dont le potentiel de cathode est le plus négatif.

2.3.3 - Amorçage

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, l'amorçage d'une soupape du groupe cathodique a lieu à l'instant correspondant à l'intersection des portions de sinusoïdes positives de la tension appliquée. Celui d'une soupape du groupe anodique a lieu à l'instant correspondant à l'intersection des portions de sinusoïdes négatives.

A chaque instant quelconque, en supposant en premier lieu que la commutation est instantanée ( $X_a = 0$ ) deux soupapes conduisent, une du groupe anodique et l'autre du groupe cathodique.

L'alternance de fonctionnement des différentes soupapes durant une période de la tension alternative appliquée peut-être suivie sur le diagramme de la tension de phase (fig. 2-3-2).

Ainsi sur l'intervalle (a, b), le courant passe par la soupape 2 ayant le potentiel d'anode le plus élevé du groupe cathodique et par la soupape 1 dont le potentiel est le plus négatif du groupe anodique.

A l'instant correspondant au point b, la soupape 3 devient conductante à la place de la soupape 1, tandis que la soupape 2 continuera à conduire jusqu'au point c. Ensuite S2 sera remplacée par S4.

Par un raisonnement analogue, on constate que chaque soupape conduit pendant un tiers de période.

Le tableau ci-dessous illustre l'ordre de conduction des soupapes.

6	2	4	6	2	4	6
1	3	5	1	3	5	

→  $\theta$

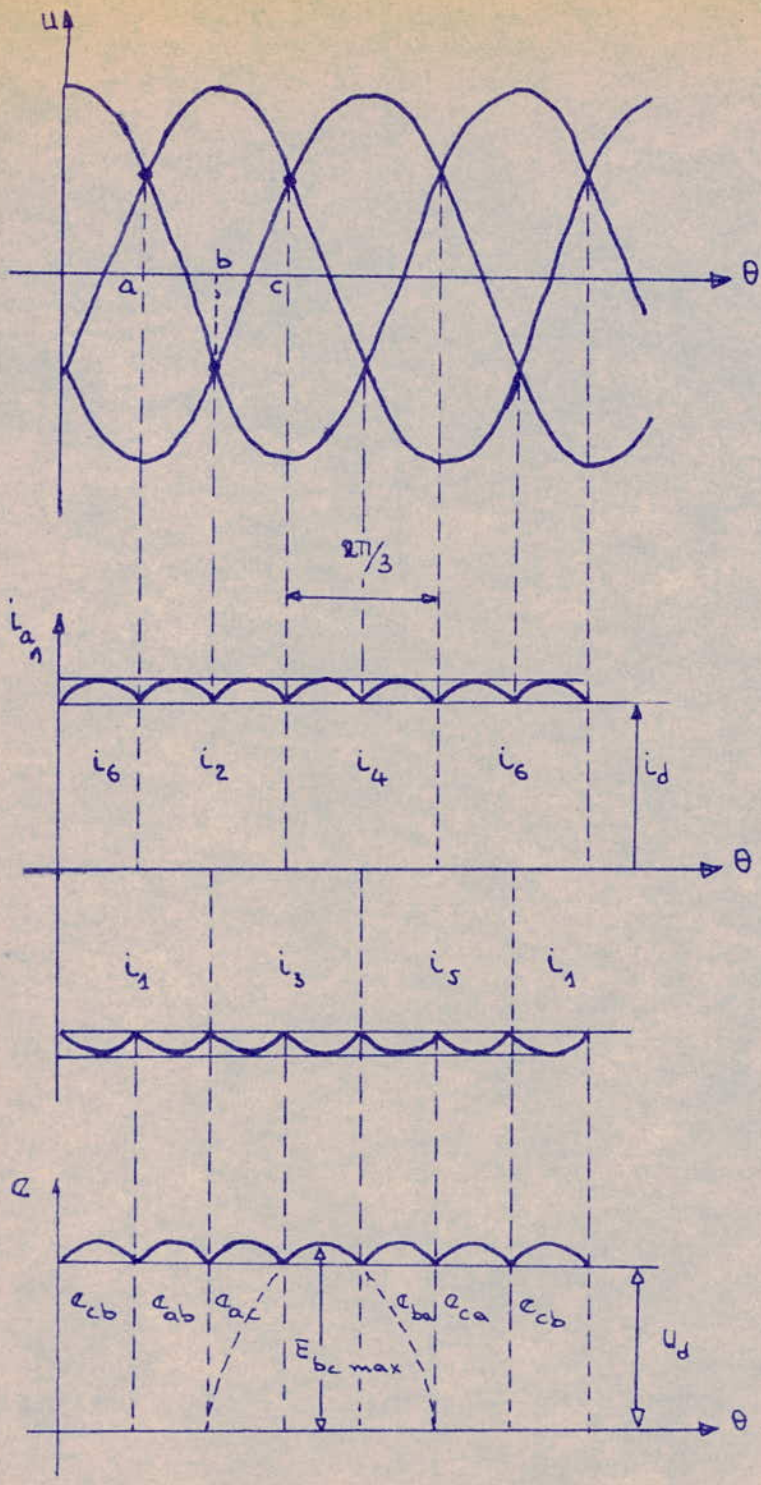


Figure 2.3-2



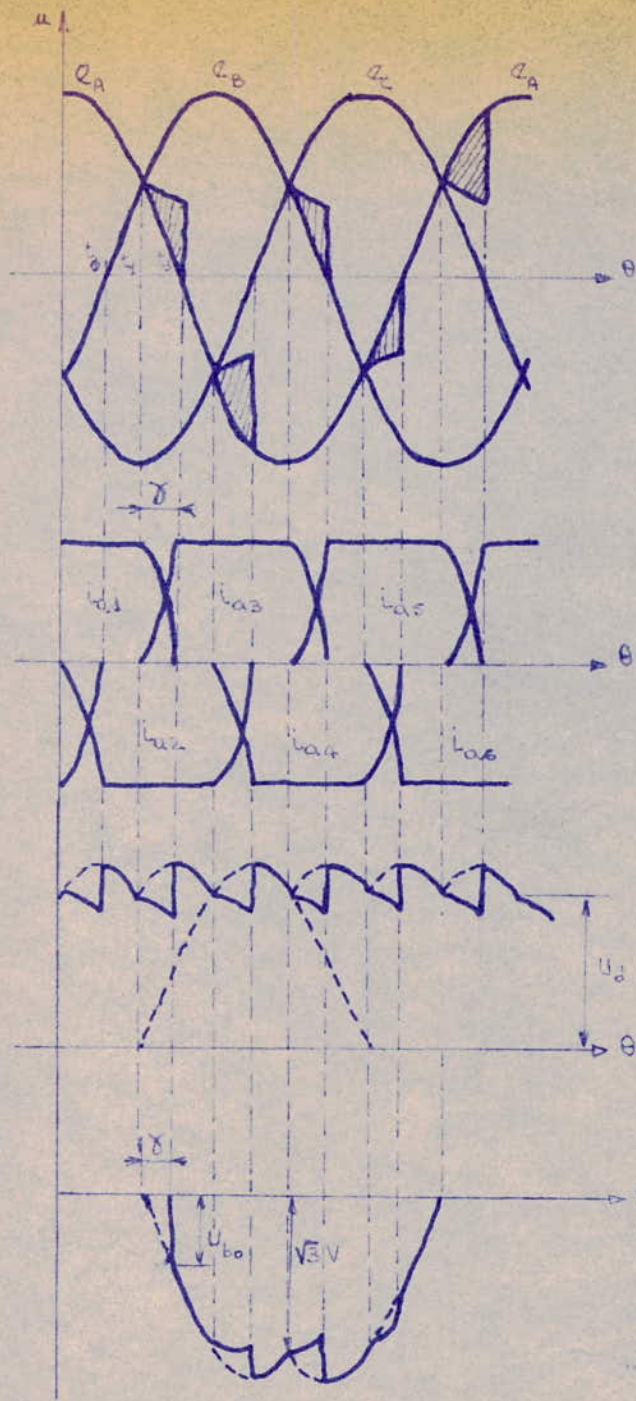


figure 2-3-3

La tension redressée est déterminée dans le montage considéré par la différence des tensions de phase des enroulements fonctionnant pendant la partie donnée de la période. La courbe de la tension redressée est caractérisée par une fréquence sextuple de répétition des ondulations, (par rapport à la fréquence de la tension alimentant le redresseur). C'est la caractéristique du régime hémiphase équivalent de redressement du courant ( $m = 6$ ).

La valeur de la tension redressée en marche à vide ( $U_{d0}$ ) et sans tenir compte de l'influence des étapes de commutation du courant dans un redresseur à  $m$  phases peut être trouvée d'après la valeur moyenne de l'intégrale pour une période de répétition  $\frac{2\pi}{m}$  avec  $m=6$ .

$$U_{d0} = \frac{1}{2\pi/6} \int_{-\pi/6}^{+\pi/6} U_{\max} \cos \theta d\theta = \frac{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot V_{\max}}{2\pi} \cdot \int_{-\pi/6}^{+\pi/6} \cos \theta d\theta$$

$$U_{d0} = \frac{6\sqrt{5}}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \cdot V \Rightarrow U_{d0} \approx 2,34V \quad \text{et} \quad U_{d0} \approx 1,35 U.$$

Nous avons négligé jusqu'ici les impédances présentes dans les divers circuits entre soupapes et réseau alternatif, Les commutations sont alors instantanées, et la tension continue moyenne reste constante. Nous allons examiner maintenant l'effet de l'introduction de résistances et d'inductances dans les circuits.

### 2.3.4 - Inductances et résistances présentes dans les circuits (influence).

Précisons tout d'abord la nature des inductances et résistances mises en jeu. Nous admettons que la puissance du système d'alimentation est infiniment grande donc  $R_s = X_s = 0$ .

En ce qui concerne les inductances, elles proviennent du transformateur.

En ce qui concerne la résistance du circuit relié à une soupape elle comprend évidemment celle de la phase secondaire correspondante du transformateur, et également une certaine contribution du primaire du transformateur. Nous admettons donc qu'il existe par phase secondaire une résistance résultante  $r$  que nous négligerons.

Le régime de fonctionnement de ce montage (réel mais non commandé) pour des valeurs finies de  $X_a$  est illustré par les courbes de tensions et des courants de la figure 2.3.3.

La présence de  $X_a$  fait que la commutation ne peut plus être considérée instantanée mais prend un temps déterminé par l'angle appelé temps de commutation spécifique.

Cette commutation a lieu entre les thyristors appartenant au même groupe. Ainsi, par exemple durant l'intervalle de temps limité par les instants  $t_1$  et  $t_2$ , le courant passe de  $S_1$  à  $S_3$  appartenant toutes les deux au groupe cathodique. Durant l'étape suivante de la commutation, qui a lieu au bout de  $60^\circ$  électrique, le courant passe de  $S_2$  à  $S_4$  et ainsi de suite.

On peut trouver la durée  $\gamma$  de l'étape de commutation d'après la relation :

$$1 - \cos \gamma = \frac{2I_d X_a}{\sqrt{6} V}$$

Quand le courant de commutation augmente et tend à devenir  $I_d$  il indique que la commutation prend fin ce qui se traduit par  $i_d = i$  et  $\frac{d}{dt} i_d = \frac{d}{dt} i$

2.4 - REDRESSEUR COMMANDE

Dans les cas précédents, nous avons envisagé le fonctionnement du pont triphasé en négligeant dans le 1er cas l'inductance du transformateur et en supposant dans le 2 cas les soupapes non commandées.

La figure 2.4.1. montre le schéma d'un redresseur triphasé équipé de soupapes commandées. Les diagrammes de la figure 2.4.2. illustrent les particularités de son fonctionnement. On y trouve un fait nouveau : la valeur finie de l'angle de commande  $\alpha$  pour les différentes soupapes (nous prendrons  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_6 = \alpha$ ). La valeur de cet angle est comptée dès l'instant de la mise en jeu d'une soupape quelconque (allumage naturel) dans un redresseur non commandé.

A cet instant correspondent les points d'intersection des portions positives et négatives des sinusoides des tensions secondaires alimentant les groupes cathodique et anodique de soupapes.

N.B. - Pour une grande inductance cathodique (et d'autant plus pour  $X_d = \infty$ ) la durée du courant anodique reste égale à  $\frac{2\pi}{6} + \gamma$ , Ce qui assure la continuité de la courbe du courant redressé. Durant la période entre commutations, le courant de soupape reste invariable pour  $X_d = \infty$ .

Durant la 1ère étape de commutation, le courant dans la soupape varie suivant la formule :

$$i = \frac{\sqrt{6} V \sin \pi/6}{X_a} (\cos \alpha - \cos \theta) = \frac{\sqrt{6} V}{2 X_a} (\cos \alpha - \cos \theta)$$

A la fin de la commutation lorsque  $\theta = \alpha + \gamma$ , la valeur instantanée du courant atteint la valeur  $I_d$ .

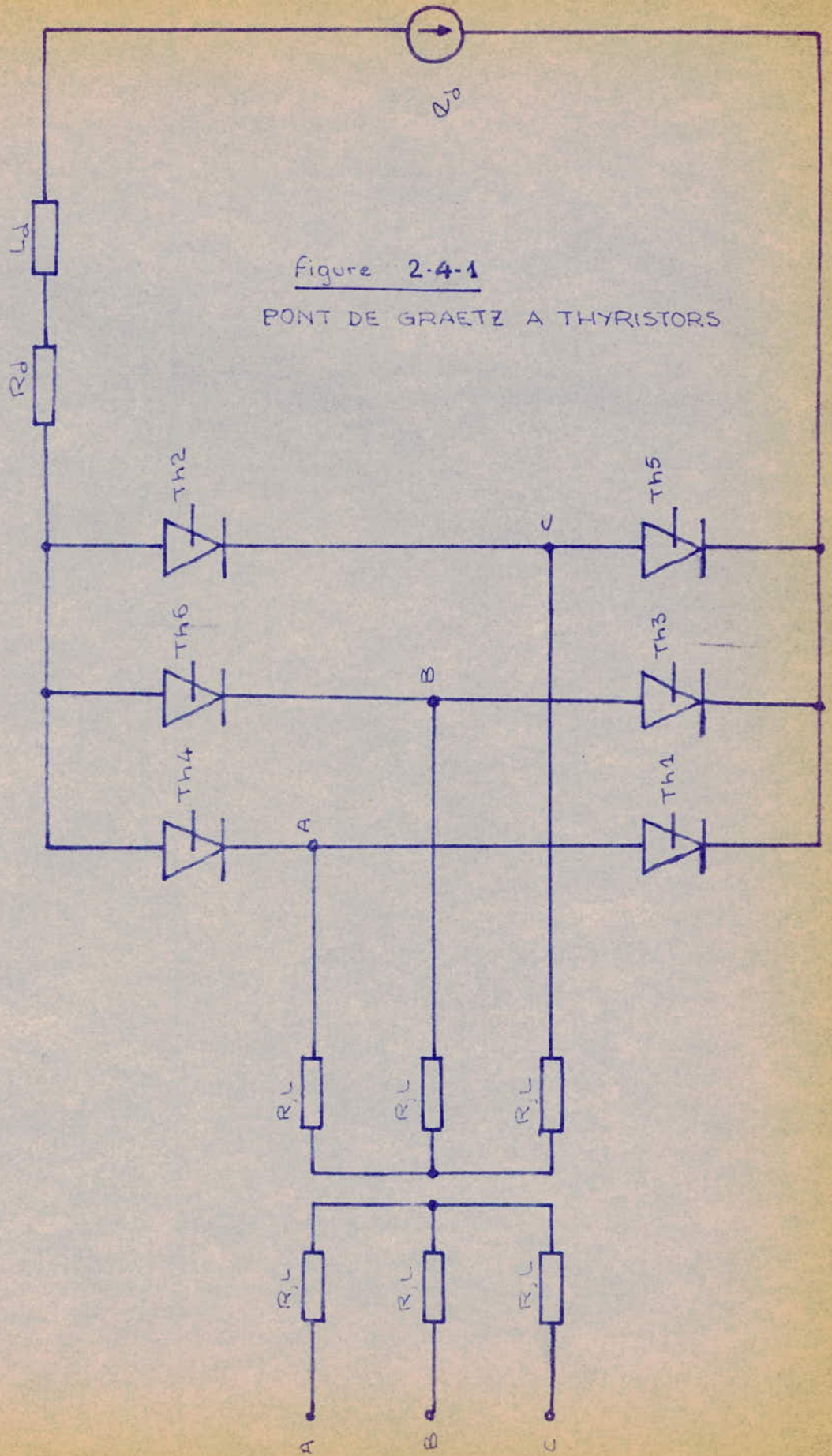


Figure 2-4-1  
PONT DE GRAETZ A THYRISTORS

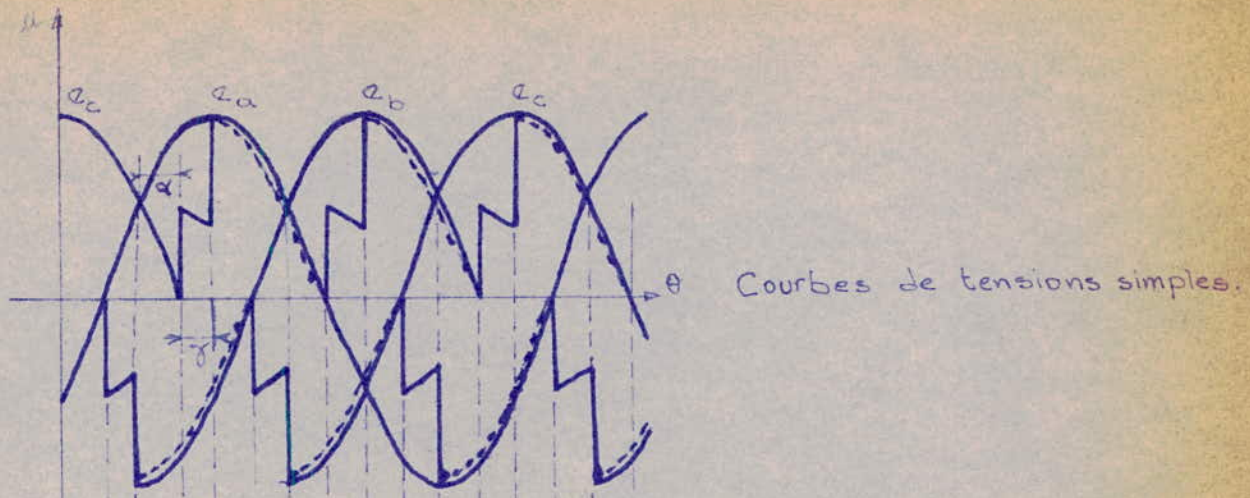
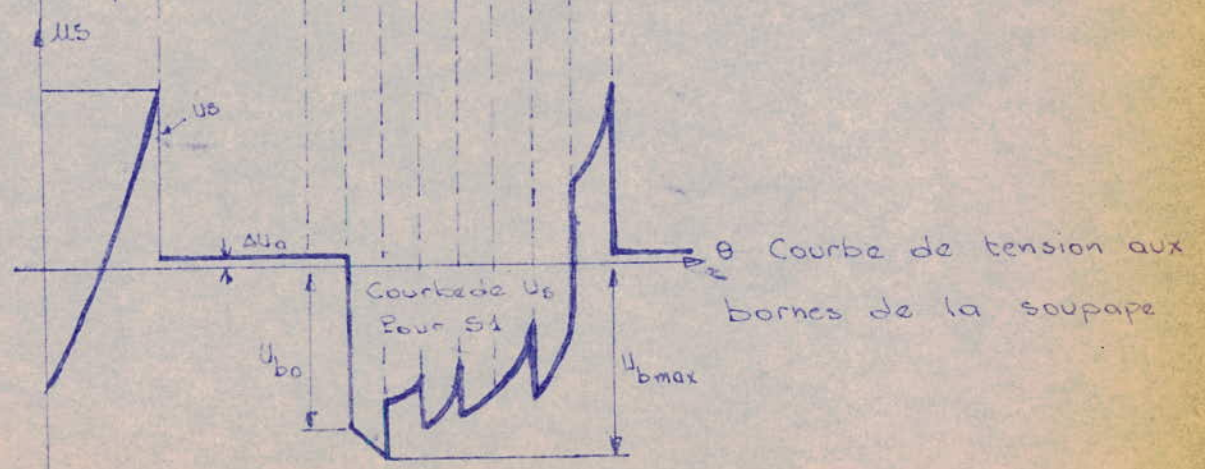
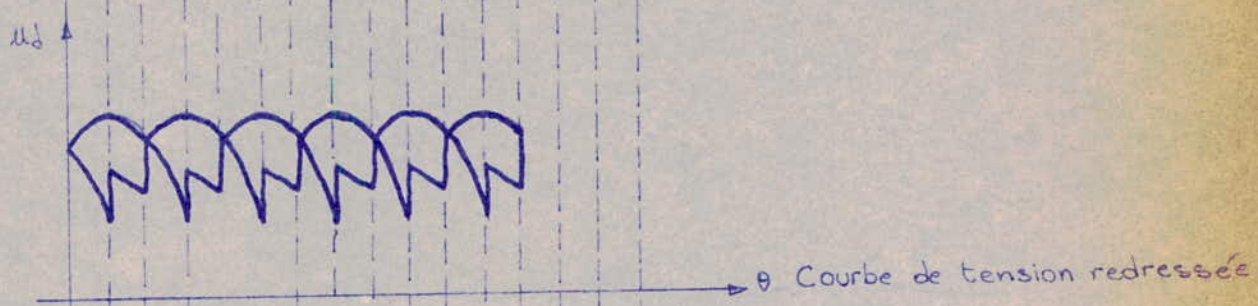
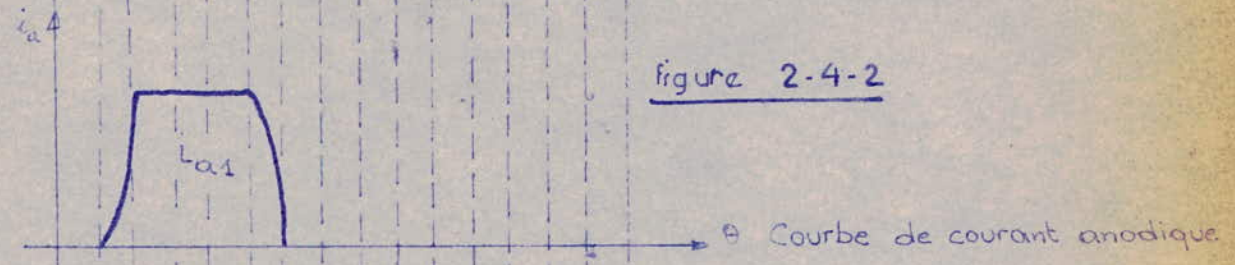


Figure 2-4-2



d'où

$$I_d = \frac{\sqrt{6} V}{2 X_a} \left[ \cos \alpha - \cos (\alpha + \delta) \right]$$

- 14

Dans pareil régime, les valeurs instantanées de la tension redressée entre les limites d'une étape de répétition  $\frac{\pi}{3}$  en marche

à vide est :

$$U_{do} = \frac{1}{2\pi/6} \int_{-\frac{\pi}{6} + \alpha}^{+\frac{\pi}{6} + \alpha} \sqrt{6} V \cos \theta d\theta = \sqrt{6} V \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \cos \alpha$$

d'où

$$U_{do} \approx 1,35 U \cos \alpha \quad \text{et} \quad U_{do} \approx 2,34 V \cos \alpha.$$

Comparativement à la valeur trouvée dans le cas d'un pont redresseur non commandé, celle-ci peut varier de 0 à  $U_{do}$ .

Nous pouvons donc nous permettre de dire que la tension fournie par un redresseur entièrement commandé (pont à thyristors) peut varier entre deux limites, l'une positive, l'autre négative sensiblement égales en valeur absolue, le courant délivré demeurant évidemment de même sens.

Maintenant, nous allons analyser le régime de fonctionnement du pont triphasé quand le débit est fait alternativement à travers 2 et 3 valves car jusque là, seul le régime à 2 valves a été envisagé.

Ce régime correspond aux charges normales du redresseur. Nous verrons plus loin que le débit peut être fait à travers 3 valves voire même à travers 4 valves. Par la même occasion, nous essayerons de montrer que le régime dépend de la valeur de la charge. Lors de cette étude nous tiendrons compte de l'inductance du transformateur ( $X_a \neq 0$ ) et on supposera que  $X_d = \infty$  et que  $\Delta U = 0$

## 2.5 - Régimes de fonctionnement

### 2.5.1. - Fonctionnement en régime 2.3

Dans ce cas, le débit est fait alternativement sur 2 ou 3 soupapes. Durant un intervalle de répétition des processus électromagnétiques (cet intervalle est égale à  $60^\circ$  comme nous allons le voir plus loin). On peut distinguer deux étapes de fonctionnement :

- L'étape sans commutation où 2 soupapes conduisent le courant.
- L'étape de commutation où 3 soupapes participent à la conduction.

Durant cette étape, a lieu une commutation du courant d'une soupape sur une autre ( de S1 sur S3) et en même temps, d'une phase du transformateur sur une autre (de la phase B sur la phase C). Sur la figure 2.5.1. sont représentées les courbes des tensions et des courants de ce régime.

L'axe de référence est choisi de telle façon que les tensions aux bornes du transformateur seront :

$$\begin{aligned} \phi_a &= V_{\max} \cos \theta \\ \phi_b &= V_{\max} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \phi_c &= V_{\max} \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

Si les soupapes 1 et 2 conduisent, la tension sur la soupape 3 sera égale à :

$$U_{S3} = \phi_b - \phi_c = \phi_{bc} = \sqrt{3} V_{\max} \sin \theta$$

Donc à partir de  $\theta = 0$ , la tension aux bornes de S3 sera positive et cette soupape peut se débloquent au moment d'arrivée de l'impulsion de commande.

L'impulsion arrive sur la gachette de S3 à l'instant  $\theta = \alpha$  et S3 commence à conduire le courant.

A partir de cet instant, dans le groupe anodique, deux soupapes (S1 et S3) sont débloquentées et deux phases du transformateur (B et C) sont court-circuitées.

Le circuit parcouru par le courant de court-circuit est indiqué par la figure 2.52.

Rappelons que malgré le changement de configuration du schéma, (la soupape 3 fonctionne). Le courant  $I_d$  ne varie pas à cause de la valeur suffisamment grande de l'inductance  $X_d$ .

Pour un tel circuit, les équations seront les suivantes :

$$X_a \frac{d(i_c - i_d)}{d\theta} + X_a \frac{d i_c}{d\theta} = \phi_{bc} = \sqrt{3} V_{\max} \sin \theta$$

Comme  $I_d = \text{constante}$ , alors :

$$2X_a \frac{d i_c}{d\theta} + \sqrt{3} V_{\max} \sin \theta \Rightarrow i_c = - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{\max}}{X_a} \cos \theta + C$$

Détermination de la constante d'intégration C

$$\text{Pour } \theta = \alpha \quad i_c = 0 \Rightarrow C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{\max}}{X_a} \cos \alpha$$

Alors le courant de court-circuit  $i_c$  ou courant de commutation

est :

$$i_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{\max}}{X_a} (\cos \alpha - \cos \theta)$$

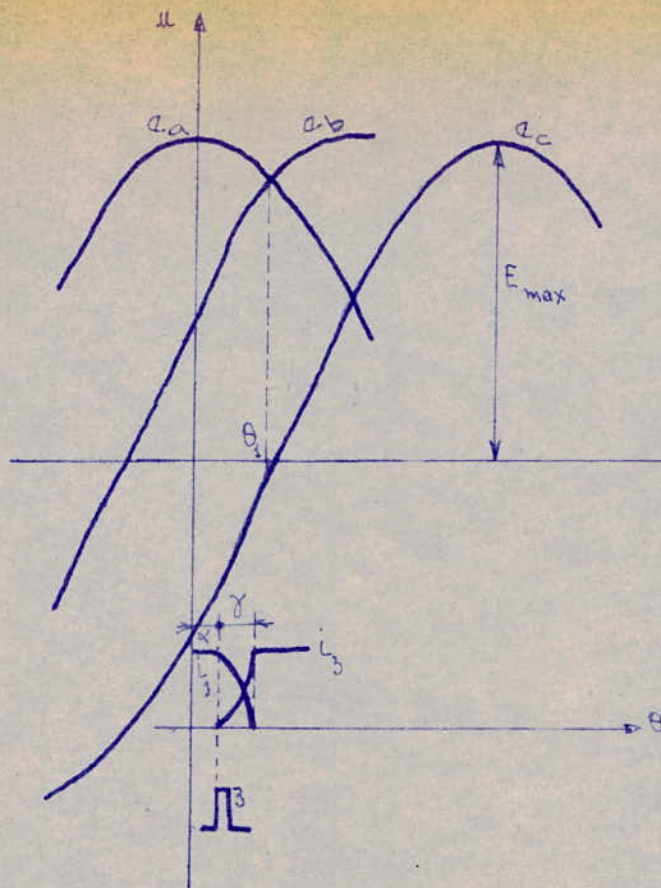


figure 2-5-1

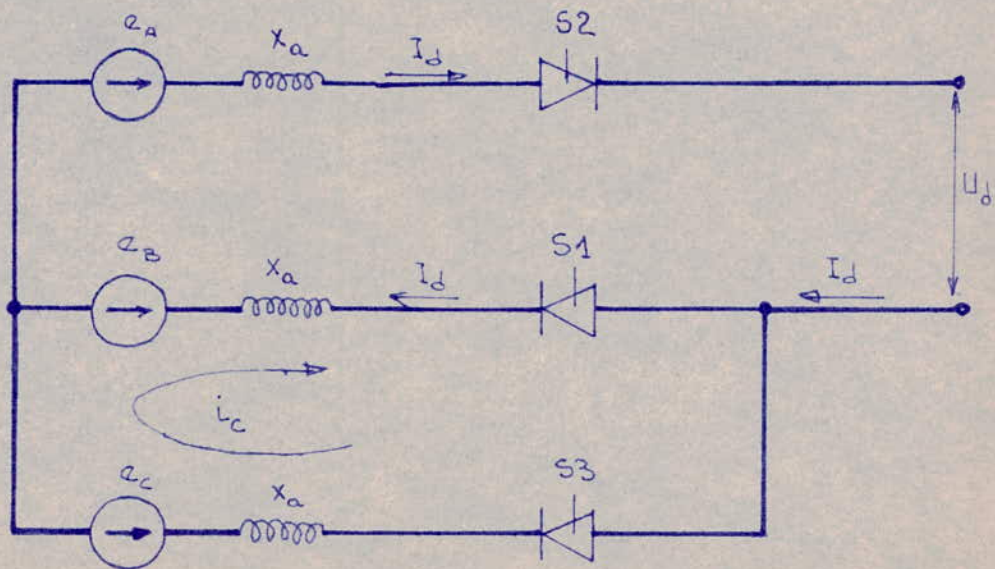


figure 2-5-2



Comme courant de soupapes, nous avons :

- 16

$$i_1 = I_d - i_c$$

$$i_2 = I_d$$

$$i_3 = i_c$$

$$i_4 = i_5 = i_6 = 0$$

La commutation se termine à l'instant.

Quand le courant dans S1 tombe à zéro, c'est à dire quand  $i_c = I_d$

en posant  $\theta = \alpha + \gamma$  nous aurons :

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos\alpha - \frac{2X_d I_d}{\sqrt{3} V_{max}}$$

D'après cette expression, il est possible de déterminer la valeur de  $\gamma$  pour une charge donnée  $I_d$ .

Après la fin de cette commutation (S1-S3) aura lieu une étape sans commutation durant laquelle une autre combinaison de soupapes participera à la conduction du courant. Cette fois, ce seront les soupapes 2 et 3.

A l'instant de l'intersection des portions positives des sinusoides  $\phi_A$  et  $\phi_B$  pour ( $\theta = \theta_1$ ), la tension sur S4 devient positive et après un angle  $\alpha$ , cette soupape commence à conduire ce qui signifie le début de commutation suivante. On voit que les instants de déblocage des soupapes se succèdent chaque  $\frac{\pi}{3}$ , donc la durée de l'intervalle de répétition est égale à :  $\frac{\pi}{3}$

Les courants dans les enroulements secondaires du transformateur sont égaux à la différence des courants de soupapes correspondantes.

$$i_A = i_2 - i_5$$

$$i_B = i_4 - i_1$$

$$i_C = i_6 - i_3$$

Les courbes des courants des soupapes et de phases ainsi que les impulsions de commande pour une période de  $2\pi$  sont représentées par la figure 2.5.3.

La courbe de tension redressée par un pont triphasé est formée de portions de sinusoides.

Pour un fonctionnement à vide ( $I_d = 0, \gamma = 0$ ), la courbe  $\overset{U_d}{V}$  est formée par les sinusoides des tensions composées et la valeur moyenne de  $U_d$  est :

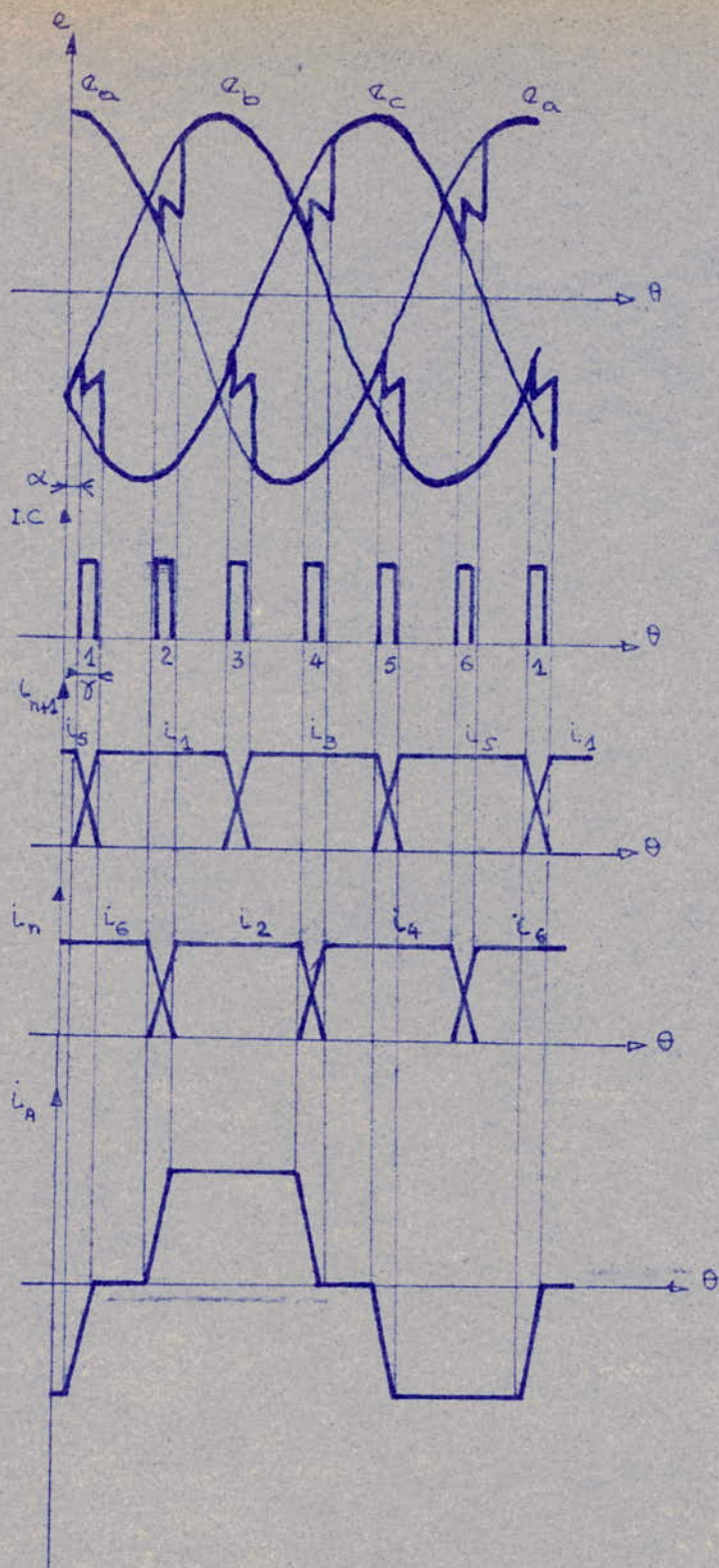


Figure 2-5-3

Impulsions de Commande

$$U_{do} = \frac{1}{2\pi/6} \int_{-\pi/6 + \alpha}^{+\pi/6 + \alpha} \sqrt{3} V_{max} \cos \theta \, d\theta \text{ calculée dans le § 2.3.}$$

Pour  $\gamma \neq 0$ , la valeur moyenne de la tension redressée diminue à cause de la chute de tension due à la commutation.

Les courbes de tension redressée dans les 2 cas ( $\gamma = 0$  et  $\gamma \neq 0$ ) sont représentées par les Fig. 2.5.4. et 2.5.5.

Durant l'étape sans commutation, la tension redressée est une portion de sinusoides de la tension composée correspondante.

ex. : conduction de S1 et S2

$$U_d \equiv \phi_{ab}$$

Conduction de S2 et S3

$$U_d \equiv \phi_{ac}$$

Lors d'une étape de commutation, par exemple de S1 sur S3, deux phases du transformateur sont court-circuitées à travers les soupapes conductantes et la tension redressée (voir fig. 2.5.2.) est égale à :

$$U_d = \phi_A - \frac{\phi_B + \phi_C}{2} = 1/2 (\phi_{AB} + \phi_{BC})$$

A cette expression correspond une portion de sinusoides en pointillés sur la fig. 2.5.5.

Selon l'axe de référence :

$$U_d = \sqrt{3} V_{max} \cos \frac{\pi}{6} \cos \theta = 3/2 V_{max} \cos \theta$$

D'où finalement, l'expression de la valeur moyenne de la tension redressée en régime 2.3.

$$U_d = \frac{1}{2\pi/6} \left[ \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \frac{3}{2} V_{max} \cos \theta \, d\theta + \int_{\alpha+\gamma}^{\pi/3 + \alpha} \sqrt{3} V_{max} \cos (\theta - \frac{\pi}{6}) \, d\theta \right]$$

$$(4) \quad U_d = 3/\pi \cdot \sqrt{3} V_{max} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)}{2} = U_{do} \frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)}{2}$$

où  $U_{do} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{max}$  = tension moyenne redressée en marche à vide ( $\alpha=0$ )

Si on introduit  $\cos (\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{2X_a I_d}{\sqrt{3} V_{max}}$  dans l'expres. (1)

$$U_d = U_{do} \frac{\cos \alpha + \cos \alpha - \frac{2X_a I_d}{\sqrt{3} V_{max}}}{2}$$

On aboutit à la relation :

$$U_d = U_{do} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_a I_d$$

représentent l'expression de la caractéristique externe.

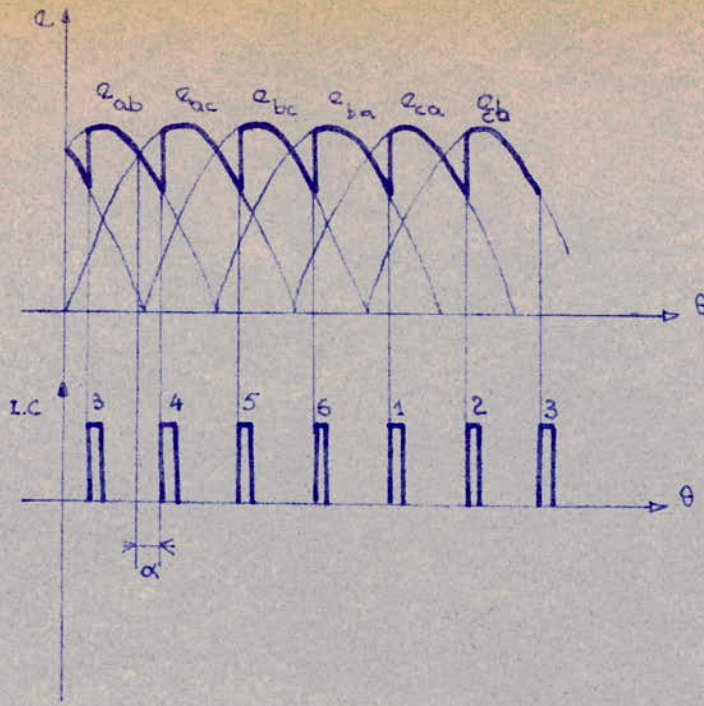


Figure 2-5-4

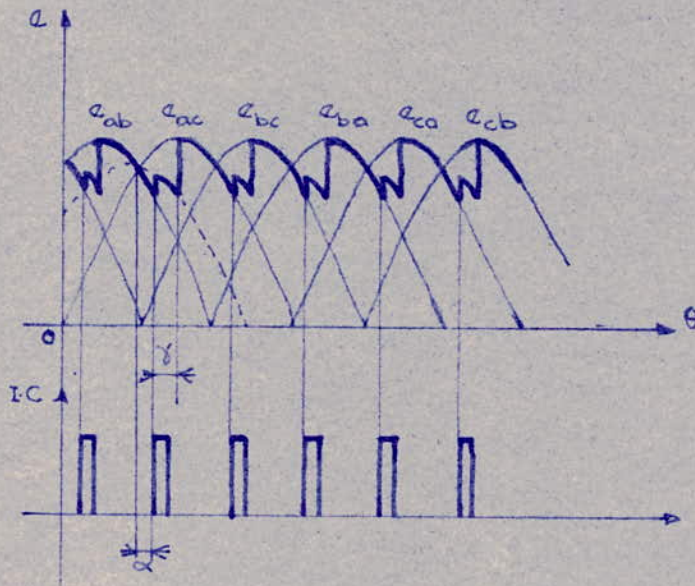


Figure 2-5-5

On remarque que celle-ci est fonction de l'angle de commande  $\alpha$ .

La caractéristique externe  $U_d = f(I_d)$  représente une série de droites correspondantes aux différentes valeurs de l'angle de commande  $\alpha$  et ayant la même pente.

La fig. 2.5.6. montre l'allure de la courbe de tension aux bornes d'une soupape durant une période de  $2\pi$ .

On remarque que la valeur de tension inverse sur une soupape est égale à :  $U_{Bmax} = \sqrt{3} V_{max}$ .

Nous essayerons de réunir dans un tableau les formules régissant le fonctionnement du redresseur en régime 2.3.

Analysons la courbe de tension aux bornes d'une soupape S1 par exemple, sur une période de  $2\pi$ .

Cette analyse est faite à l'aide de la courbe de tension indiquée par la fig. 2.5.4. ou 2.5.5.

Intervalle	Courant des soupapes	Tension redressée	Soupape en conduction	Courant dans les phases
$\alpha \leq \theta \leq \alpha + \gamma$	$i_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{max}}{X_a} [\cos \theta - \cos(\alpha + \gamma)]$ $i_2 = i_d$ $i_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{max}}{X_a} (\cos \alpha - \cos \theta)$ $i_4 = i_5 = i_6 = 0$	$U_d = \frac{3}{2} V_{max} \cos \theta$	1-2-3	$i_A = i_d$ $i_B = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{max}}{X_a} [\cos \theta - \cos(\alpha + \gamma)]$ $i_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{max}}{X_a} (\cos \alpha - \cos \theta)$
$\alpha + \gamma \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} + \alpha$	$i_1 = 0$ $i_2 = i_d$ $i_3 = i_d$ $i_4 = i_5 = i_6 = 0$	$U_d = \sqrt{3} V_{max} \sin(\theta + \frac{\pi}{3})$	2-3	$i_A = i_d$ $i_B = 0$ $i_C = -i_d$

### 2.5.2. - Fonctionnement en régime 3.3.

L'accroissement du courant de charge  $I_d$  est accompagné d'une augmentation de l'angle de commutation  $\gamma$  et par une diminution respective de l'étape sans commutation.

Le domaine du régime 2.3. est limité par la valeur de la charge correspondante à l'angle  $\gamma = 60^\circ$ , quand durant toute l'intervalle de répétition des processus a lieu une commutation. Selon le courant  $I_d$  correspondant à  $\gamma = 60^\circ$  est :

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_{max}}{X_a} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_{max}}{X_a} \sin(\alpha + \frac{\pi}{6}) \quad (a)$$

figure - 2-5-6

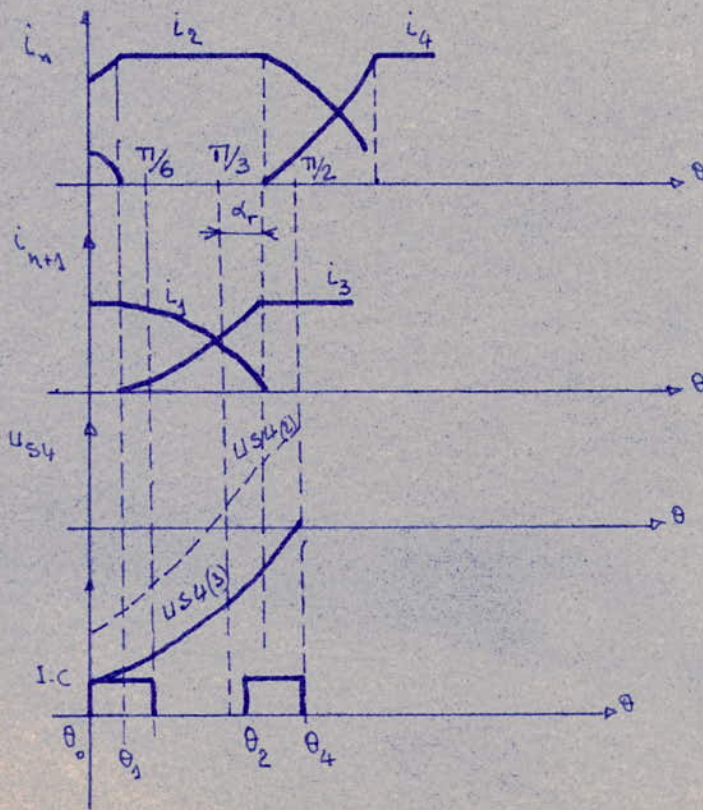
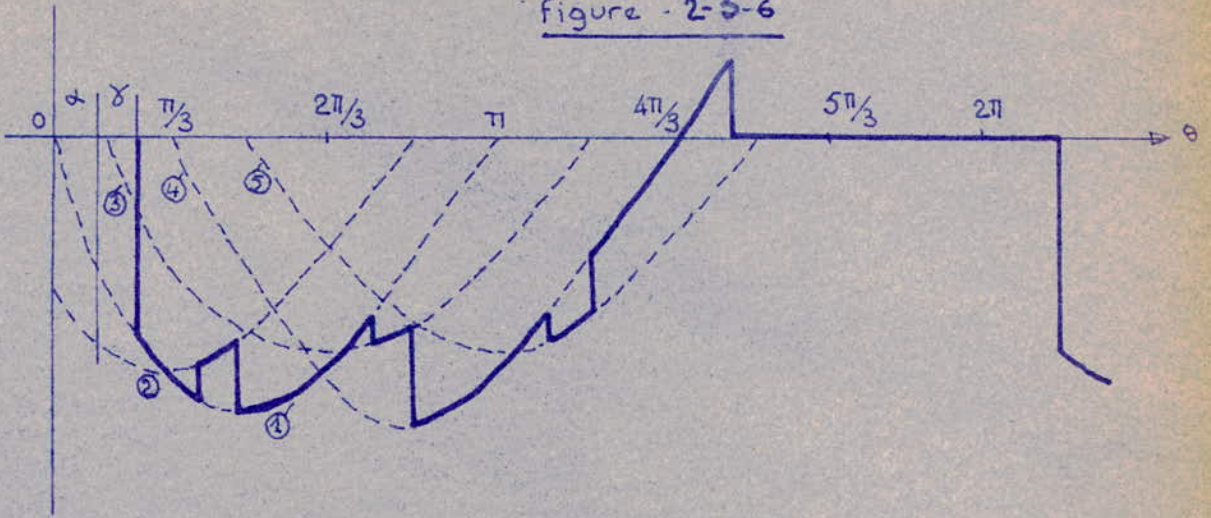


figure 2-5-7

En particulier pour  $\alpha = 0$ , le régime 2.3. prend fin si

$$Id = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{V_{\max}}{X_a}$$

L'accroissement du courant au dessus de la valeur limite (a) provoque un changement de régime du redresseur (voir fig.2.5.7.)

A la place du régime de conduction 2.3. arrive un régime à 3 ou un régime à 3.4. Le passage en régime 3 ou en régime 4 s'effectue en fonction de la valeur de l'angle de commande  $\alpha$ .

Si  $\alpha \leq \frac{\pi}{6}$  on aura un régime à 3 (avec 3 soupapes en conduction) qui commence après le régime 2.3.

Lors de ce régime, la durée de commutation reste toujours égale à  $\frac{\pi}{3}$  et l'accroissement du courant Id est accompagné par une augmentation forcée de l'angle d'allumage  $\alpha$  de toutes les soupapes.

On peut expliquer ce phénomène d'apparition et d'augmentation avec une charge de l'angle de retard  $\alpha_r$  par le fait que la 4ème soupape ne peut être amorcée durant la commutation précédente non achevée.

Par ex. Si S1, S2, et S3 conduisent (il y a une commutation entre S1 et S3) la soupape suivante S4 ne peut s'amorcer, si  $\alpha < \frac{\pi}{6}$  durant cette étape de commutation.

Pour montrer cela, envisageons la tension sur S4 durant la commutation entre S1 et S3. Selon la fig.2.3.4., cette tension est égale à

$$US4(3) = \frac{1}{2} (\phi_B + \phi_C) - \phi_A = -\frac{3}{2} \phi_A = -\frac{3}{2} V_{\max} \cos \theta \quad (b)$$

$$US4(3) = -\frac{3}{2} V_{\max} \cos \left( \alpha + \frac{\pi}{3} \right) \leq 0 \quad \text{si } \alpha \leq \frac{\pi}{6}$$

Rappelons par ailleurs que durant l'étape sans commutation, les soupapes 1 et 3 en (conduction) qui précède l'instant d'amorçage de S4 en régime 2.3. la tension sur S4 était égale à :

$$US4(2) = \phi_B - \phi_A = -\sqrt{3} V_{\max} \cos \left( \theta + \frac{\pi}{6} \right) \quad (c)$$

donc à l'instant d'impulsion sur S4  $\theta = \alpha + \frac{\pi}{2}$

$$US4(2) = -\sqrt{3} V_{\max} \cos \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) > 0$$

Les courbes de tensions sur S4 sont représentées sur la Fig.2.5.7.

On remarque selon les expressions (b) et (c) que la courbe de tension  $US4(3)$  au moment de l'impulsion d'amorçage sur S4, commutation S1-S3 n'étant pas terminée, retardée de  $\frac{\pi}{6}$  par rapport à la courbe de  $US4(2)$  du régime 2.3. quand il ne reste que 2 soupapes en conduction.

Donc à l'instant ( $\theta_2 = \frac{\pi}{2} + \alpha$ ) d'arrivée de l'impulsion de commande

sur S4, la tension  $US4(3)$  est négative.

$$US4_{\theta_2} = \frac{3}{2} V_{\max} \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{6} \right) \text{ avec } \alpha < \frac{\pi}{6}$$

celle-ci ne s'amorcera donc pas si la commutation S1-S3 dure.

C'est à l'instant  $\theta_3$  correspondant à la fin de commutation S1-S3 que la tension  $US4$  deviendra positive (parce qu'il ne reste que 2 soupapes en conduction  $US4(2) = \sqrt{3} V_{\max} \sin \alpha$ ) et entrainera l'amorçage. Cela signifie qu'après l'étape de commutation S1-S3, une nouvelle commutation S2-S4 commencera instantanément. Il y aura toujours 3 soupapes en conduction.

Il est évident qu'en régime 3, l'angle  $\gamma$  reste constant et égal à  $\frac{\pi}{3}$  quelle que soit la valeur de la charge  $I_d$ .

L'intervalle de temps  $\theta_3 - \theta$  représentant un retard d'amorçage  $\alpha_r$  de la soupape suivante provoqué par la commutation prolongée peut être déterminé à partir de :

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{2X_a I_d}{\sqrt{3} V_{\max}} \quad \text{avec } \gamma = \frac{\pi}{3}$$

$$\sin\left(\alpha_r + \frac{\pi}{6}\right) = \frac{2X_a}{\sqrt{3} V_{\max}} I_d \quad (d)$$

Selon l'expression (d) l'augmentation du courant  $I_d$  est liée à l'accroissement  $\alpha_r$ ; la valeur limite de  $\alpha_r$  restant égale à  $\frac{\pi}{6}$  parce qu'à partir de cette valeur (voir fig. 2.5.7.) la tension sur S4 devient positive même si la commutation en cours est inachevée et S4 s'amorce à son tour. En faisant le bilan, 4 soupapes en conduction donc début du régime 3.4.

La valeur du courant correspondant à la fin du régime à 3 peut être déterminée à l'aide de la relation (a)

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_{\max}}{X_a} \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) \quad \text{avec } \alpha_r = \frac{\pi}{6}$$

$$I_d = \frac{3}{4} \cdot \frac{V_{\max}}{X_a}$$

Les expressions des courants et tensions du régime 2.3. restent valables si on remplace  $\alpha$  par  $\alpha_r$  et  $\gamma = \frac{\pi}{3}$

$$\text{ex : } U_d = U_{d0} \frac{\cos \alpha_r + \cos\left(\alpha_r + \frac{\pi}{3}\right)}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{d0} \cos\left(\alpha_r + \frac{\pi}{6}\right) \quad (e)$$

Pour trouver l'expression de la caractéristique externe, on prendra les équations (d) et (e)

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_{\max}}{X_a} \sin\left(\alpha_r + \frac{\pi}{6}\right) \quad ; \quad U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} V_{\max} \cos\left(\alpha_r + \frac{\pi}{6}\right)$$



$$\left( \frac{I_d}{\sqrt{3} V_{max}} \right)^2 + \left( \frac{U_d}{9V_{max}} \right)^2 = 1 \quad (f) \text{ Equation d'un cercle.}$$

La fig. 2.5.8 illustre les courbes des tensions alternatives ; les courants de soupapes ; courant de phase en régime à 3.

La fig. 2.5.9. montre la courbe de la tension redressée pour  $\alpha_r = \frac{\pi}{6}$

Tableau réunissant les formules des tensions et courants du régime à 3 soupapes.

intervalle	Courants de Soupapes	Tension redressée	Souff. conduct.	Courant de phase
$\alpha_r \leq \theta \leq \alpha_r + \frac{\pi}{3}$	$i_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{max}}{X_a} \left[ \cos \theta - \cos \left( \alpha_r + \frac{\pi}{3} \right) \right]$ $i_2 = i_d$ $i_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{max}}{X_a} (\cos \alpha_r - \cos \theta)$ $i_4 = i_5 = i_6 = 0$	$\frac{\sqrt{3}}{2} V_{max} \cos \theta$	1-2-3	$i_A = i_d$ $i_B = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_m}{X_a} \left[ \cos \theta - \cos \left( \alpha_r + \frac{\pi}{3} \right) \right]$ $i_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_m}{X_a} (\cos \alpha_r - \cos \theta)$

Soulignons que le régime à 3 soupapes appelé "Régime à angle de retard à l'amorçage" n'existe que si  $\alpha < \frac{\pi}{6}$ .

Si  $\alpha > \frac{\pi}{6}$ , le régime à 4 soupapes prend naissance après le régime à 2,3.

2.5.3. - Fonctionnement en régime 3.4.

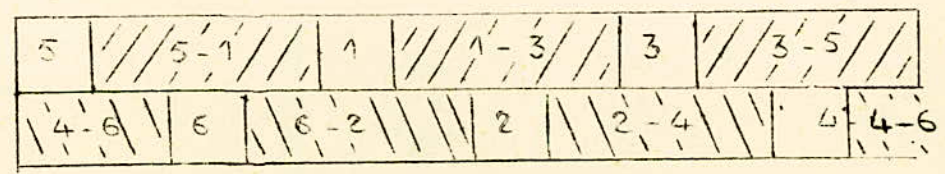
Celui ci se produit à la place du régime 2.3. quand :  $\alpha > \frac{\pi}{6}$  et  $\gamma = \frac{\pi}{3}$ .

Le régime 3.4. est une suite naturelle du régime 3.3. Si  $\alpha_r = \alpha_{reth} = \frac{\pi}{6}$

Durant l'intervalle de répétition, ici égal à :  $\frac{\pi}{3}$  nous avons deux étapes :

- Etape de commutation simple - trois soupapes en conduction
- Etape de commutation double - quatre soupapes en conduction.

Le diagramme de conduction durant une période de  $2\pi$  peut être représenté de la façon suivante :



Les différentes combinaisons sont :

- 1,2,3 - 1,2,3,4 - 2,3,4 - 2,3,4,5 - 3,4,5 - 3,4,5,6 - 4,5,6, - 4,5,6,1
- 5,6,1, - 5,6,1,2 - 6,1,2 - 6,1,2,3 -

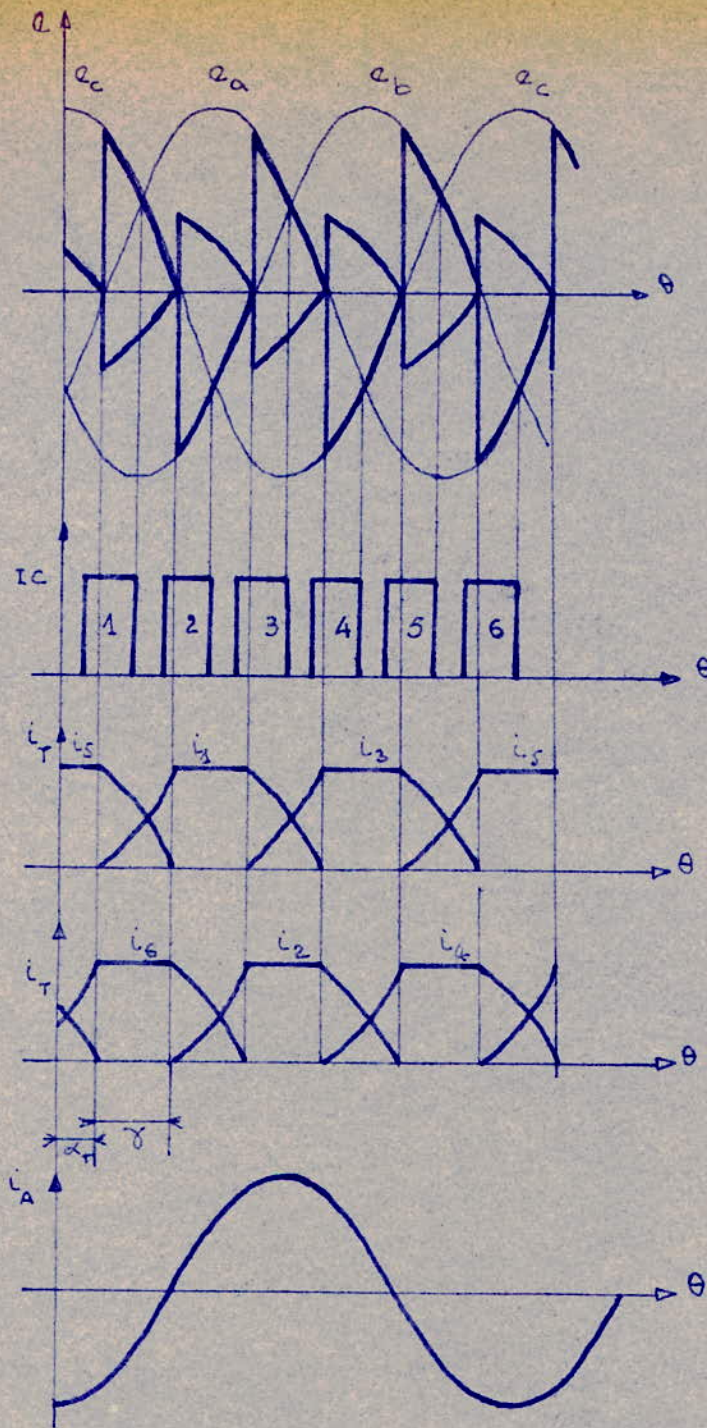


figure 2-5-8

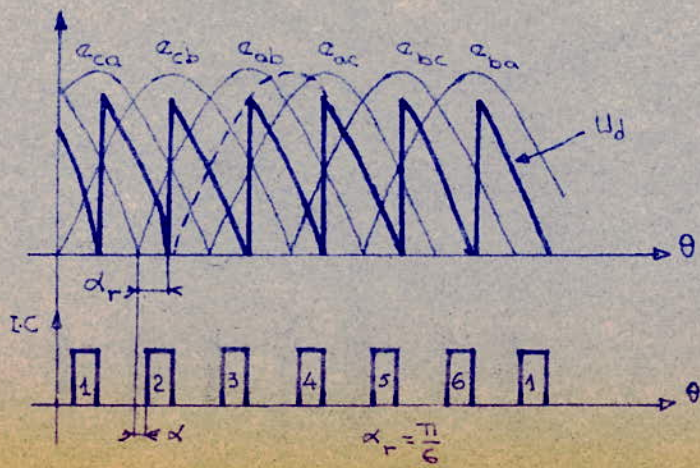


figure 2-5-9

Les courbes de courant des soupapes en régime 3.4. sont données par la fig. 2.5.10

A l'instant  $\theta = \alpha$  l'impulsion de commande engendre l'amorçage de S3. Rappelons que le régime 3.4. implique :

$$\alpha \gg 30^\circ \text{ ou } \alpha < 30^\circ \text{ mais } \alpha_r = 30^\circ$$

A l'arrivée de l'impulsion, la tension sur la soupape est positive.

Dans ce cas précis, avant l'arrivée de l'impulsion sur S3, les soupapes suivantes sont en conduction S6, S1 et S2 (la commutation S6-S2 n'est pas terminée) La tension sera :

$$U_{S4} = -U_d = \phi_B - \frac{\phi_A + \phi_C}{2} = \frac{1}{2} (\phi_{BA} + \phi_{BC})$$

$$U_{S4} = \frac{3}{2} V_{\max} \sin \left( \theta - \frac{\pi}{6} \right)$$

Pour  $\theta = \alpha$

$$U_{S4} \Big|_{\theta = \alpha} = \frac{3}{2} V_{\max} \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{6} \right)$$

Donc si  $\alpha > \frac{\pi}{6}$  ou si  $\alpha = \alpha_r - \frac{\pi}{6}$ , cette tension sera positive et la soupape S3 s'amorce à  $\theta = \alpha$

L'amorçage de S3 signifie le début de l'étape à 4 soupapes - S6 S1, S2 et S3. Durant l'intervalle  $\theta = \alpha$  à  $\theta_1 = \alpha + \gamma - \frac{\pi}{3}$ ; deux commutations s'effectuent simultanément dans le groupe pair, la commutation S6-S2 continue et dans le groupe impair dure la commutation S1-S3

A l'instant  $\theta_1 = \alpha + \gamma - \frac{\pi}{3}$ , la commutation S6 - S2 prend fin. Donc nouvelle étape à 3 soupapes en conduction S1, S2, S3 jusqu'à  $\theta = \alpha + \frac{\pi}{3}$  quand S4 s'amorce qui fera une nouvelle étape à 4 soupapes.

Fonctionnement du redresseur aux  $\neq$  étapes :

$$1 - \text{Etape à 3 soupapes, } \alpha + \gamma - \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \alpha + \frac{\pi}{3}$$

Les expressions régissant le régime 2.3. sont valables en régime 3.

$$i_3 = - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{\max}}{X_a} \cos \gamma + C_1 \quad (g)$$

$$i_1 = I_d - i_3$$

$$2 - \text{Etape à 4 soupapes - } \alpha + \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \alpha + \gamma$$

L'étape à 4 soupapes est équivalente à un court-circuit triphasé du transformateur.

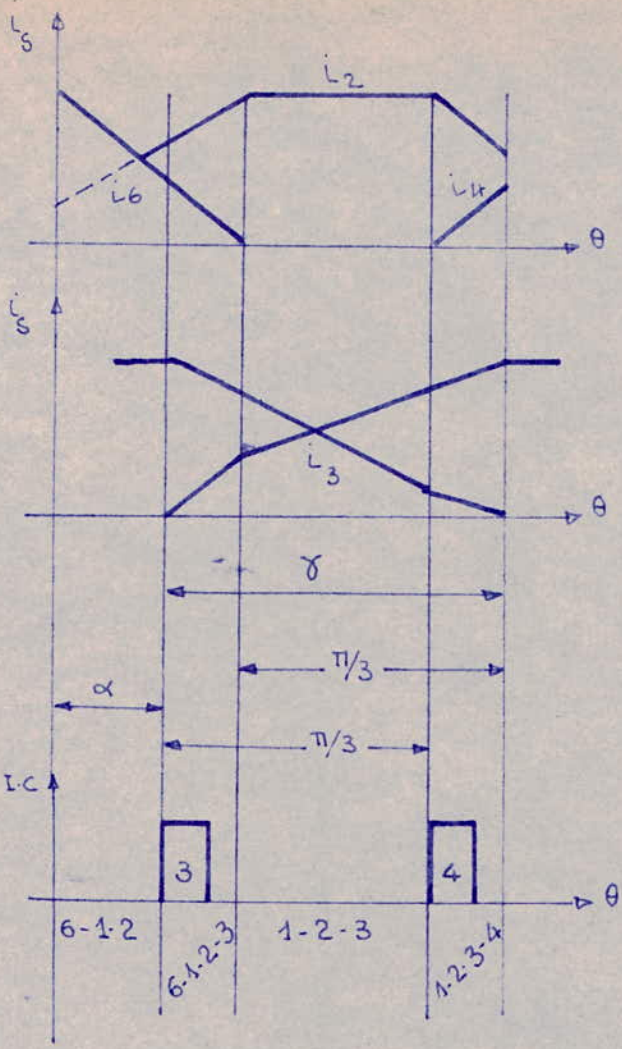


figure 2-5-10

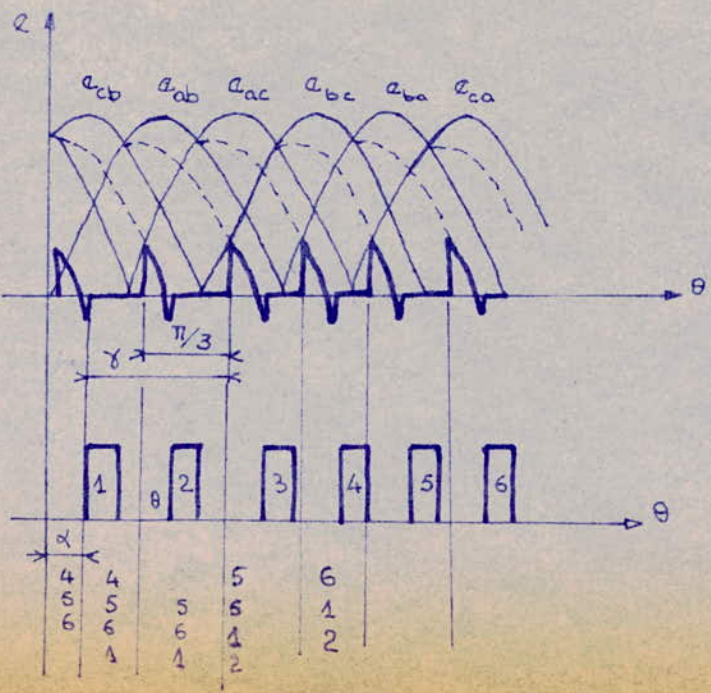


figure 2-5-11

$$i_3 = -i_C$$

$$i_2 = i_A$$

Dans les soupapes :

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= \frac{V_{\text{Max}}}{X_a} \sin \theta + C_2 ; i_4 = i_d - i_2 \\ i_3 &= \frac{V_{\text{max}}}{X_a} \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) + C_3 ; i_1 = i_d - i_3 \end{aligned} \right\} (h)$$

Détermination des constantes d'intégration :

$$\text{Pour } \theta = \alpha + \frac{\pi}{3} \quad \left\{ \begin{aligned} i_4 &= 0 \\ i_2 &= i_d \end{aligned} \right.$$

Dans les expressions (h) et (g)

$$i_3(h) = i_3(g)$$

$$C_2 = i_d - \frac{V_{\text{max}}}{X_a} \sin \left( \alpha + \frac{\pi}{3} \right)$$

$$C_1 = C_3 + \frac{V_{\text{max}}}{X_a} \sin \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_{\text{Max}}}{X_a} \cos \left( \alpha + \frac{\pi}{3} \right)$$

$$\text{Pour } \theta = \alpha + \gamma \quad \left\{ \begin{aligned} i_1 &= 0 \\ i_3 &= i_d \end{aligned} \right.$$

$$C_3 = i_d + \frac{V_{\text{max}}}{X_a} \sin \left( \alpha + \gamma + \frac{2\pi}{3} \right)$$

D'autre part, sachant que la durée de l'intervalle de répétition du processus,  $i_4$  à l'instant  $\theta = \alpha + \gamma$  est égal à  $i_3$  à l'instant

$$\theta = \alpha + \gamma - \frac{\pi}{3}$$

$$\text{Alors : } \cos \left( \alpha + \frac{\pi}{6} + \gamma \right) = \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{6} \right) - \frac{2i_d \cdot X_a}{V_{\text{max}}} \quad (i)$$

La courbe de la tension redressée est représentée sur la fig.

2.5.11

Pour l'étape à 3 soupapes, la tension redressée est une sinusoïde d'amplitude:  $3/2 V_{\text{max}}$  comme pour le régime 2.3. considéré dans le même intervalle.

Pour l'étape à 4 soupapes en conduction, la tension redressée est nulle car le transformateur est court-circuité à travers 4 soupapes amorcées.

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\alpha + \gamma - \frac{\pi}{3}}^{\alpha + \gamma} u_d d\theta = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha + \gamma - \frac{\pi}{3}}^{\alpha + \frac{\pi}{3}} \frac{3}{2} V_{\text{max}} \cos \theta d\theta = \frac{9 V_{\text{max}}}{\pi} \frac{\cos \left( \alpha - \frac{\pi}{6} \right) - \cos \left( \alpha + \frac{\pi}{6} + \gamma \right)}{2}$$

$$U_d = \frac{9 V_{max}}{\pi} \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2}\right) \quad (j)$$

La résolution des équations (i) et (j) donne l'équation de la caractéristique externe :

$$U_d = \frac{9}{\pi} V_{max} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) - \frac{9 Id \cdot X_a}{\pi} \quad (k)$$

Equation d'une droite

Pour  $U_d = 0 \implies Id = \frac{V_{max}}{X_a} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \quad (l)$

Tableau récapitulatif du régime 3.4.

intervalle	courants de Soupapes	Tension redressée	group. conduct. -antes	Tensions inverses
$\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3} + \theta$ $\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3} + \theta$	$i_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{V_m}{X_a} \left[ \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \cos\theta \right]$ $\frac{V_m}{X_a} \left[ \sin\alpha + \sin\left(\alpha + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$ $i_2 = Id$ $i_3 = \frac{\sqrt{3} V_m}{2 X_a} \left[ \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \cos\theta \right]$ $+ \frac{V_m}{X_a} \left[ \sin\alpha + \sin\left(\alpha + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] + Id$	$\theta \cos \frac{\pi}{2}$ $u_d = \frac{3}{2} V_{max}$	$1-2-3$	$U_1 = U_2 = U_3 = 0$ $U_4 = U_5 = U_6 = -\frac{3}{2} V_{m1} \cos\theta$
$\theta \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3} + \theta$ $\theta \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3} + \theta$	$i_1 = \frac{V_m}{X_a} \left[ \sin\left(\alpha + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$ $i_2 = \frac{V_m}{X_a} \left[ \sin\theta - \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right] + Id$ $i_3 = -\frac{V_m}{X_a} \left[ \sin\left(\alpha + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$ $i_4 = -\frac{V_m}{X_a} \left[ \sin\theta - \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right]$ $i_5 = i_6 = 0$	$u_d = 0$	$1-2-3-4$	$U_1 = U_2 = U_3 = 0$ $U_4 = U_5 = U_6 = 0$

2.5.4. - Caractéristique externe d'un redresseur en pont triphasé

Nous avons déjà obtenu pour chaque régime de fonctionnement, la relation de la caractéristique externe.

Récrivons ces relations en valeurs réduites et en prenant comme valeur de base:

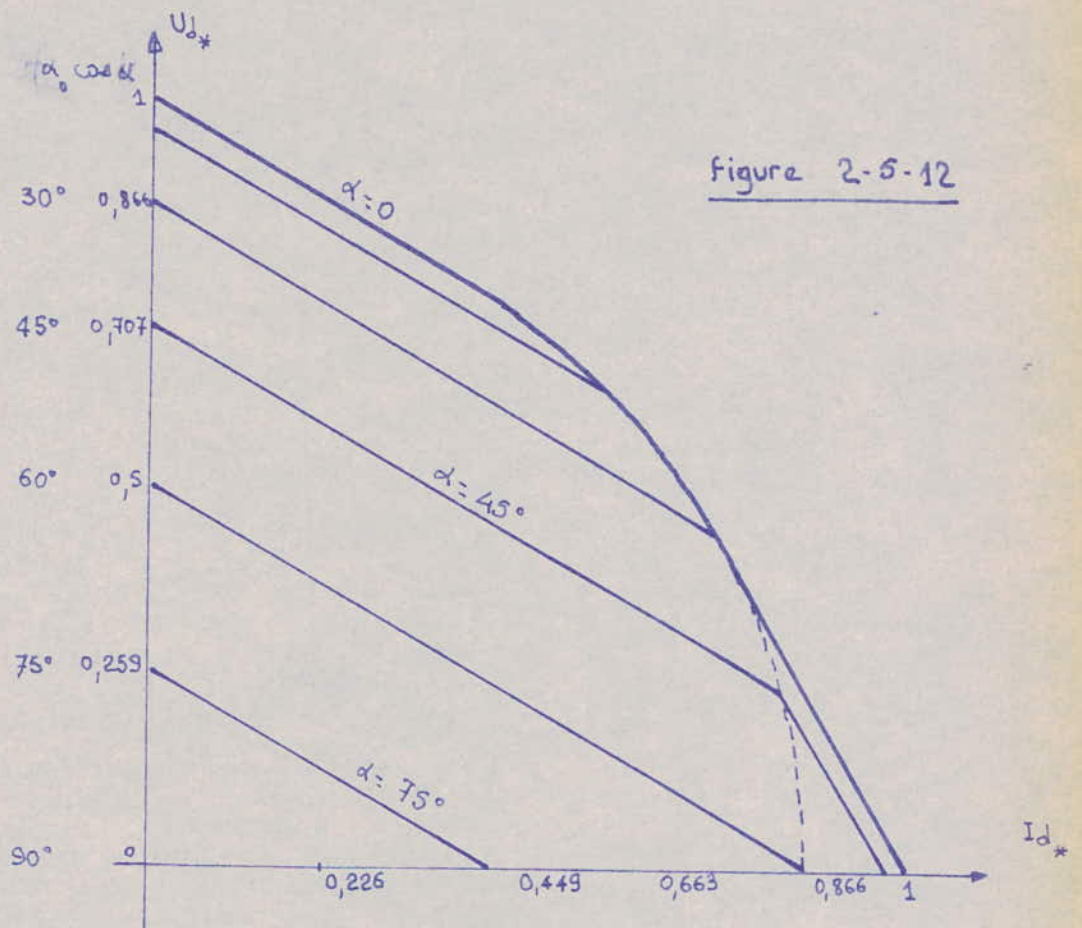
$$Id_b = \frac{V_{max}}{X_a}$$

$$U_{d_b} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{max}$$

1 - Régime 2.3.  $U_{d*} = \cos\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} Id_* \quad (m)$

2 - Régime 3  $U_{d*}^2 + Id_*^2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 \quad (n)$

3 - Régime 3.4.  $U_{d*} = \sqrt{3} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) - \sqrt{3} Id_* \quad (o)$



Caractéristique externe

La caractéristique correspondante à tous les régimes de  $I_d = 0$  au court-circuit est représentée sur la fig. 2.5.12.

2.6 - Fonctionnement du redresseur triphasé en régime particulier.

Jusque là, nous nous sommes efforcés d'étudier le fonctionnement du redresseur triphasé sans tenir compte de la nature de la charge.

Cette partie constitue une étude assez complète, connue, sur le fonctionnement du pont en régime normal.

2.6.1. - Circuit continu renfermant inductance, résistance et force électromotrice.

Nous distinguerons deux cas.

2.6.1.1. - Cas où le circuit continu renferme une force-électromotrice ou contre-électromotrice E continue où  $X_d = \infty$  en série avec une résistance.

Ce cas est assez général pour renfermer beaucoup d'applications des redresseurs.

En effet, la f.c.e.m. E peut être celle d'une batterie ou des cuves à électrolyse fig. 2.5.1. C'est le cas pour un redresseur de charge d'accumulateurs, ou d'alimentation de circuits électrochimiques (fabrication d'aluminium par exemple).

La tension aux bornes d'un collecteur de machine dont le flux inducteur est maintenu constant et assimilable à une force électromotrice ou f.c.e.m. (fig. 2.5.2.). C'est le cas des moteurs à courant continu utilisé en traction électrique par exemple.

Valeur moyenne du courant continu

$$I_d = \frac{U_d - E_d}{R}$$

Dans tous les cas,  $I_d$  doit être positif donc  $U_d > E_d$ .

2.6.1.2. - Cas où le circuit continu renferme une force électromotrice ou contre-électromotrice  $E_3$  formée d'une composante alternative et d'une composante continue.

Sur le fonctionnement du pont sur une f.c.e.m. alternative ou pulsatoire, on peut faire quelques remarques préalables avant de nous lancer dans l'étude détaillée.

Selon le rapport entre  $E_d$  et  $E_m$ , on peut noter deux cas :

2.6.2.1. -  $E_d > E_m$

Dans ce cas, le redresseur se trouve assez proche du régime normal

L'ordre d'allumage des thyristors reste le même. Mais il faut noter l'apparition d'une non symétrie interne c'est à dire la période



de répétition des processus électromagnétiques n'est plus égale à  $\frac{\pi}{3}$  mais à  $2\pi$ .

Ce fait est dû à la composante alternative du courant de période  $2\pi$ .

A cause de cette non symétrie interne, toutes les six commutations ayant lieu durant l'intervalle de  $2\pi$  ont une durée différente. Les courbes de tension et de courant redressés seront modulées par une sinusoïde ayant même fréquence que la f.c.e.m.

2.6.2.2. -  $E_d \ll E_m$

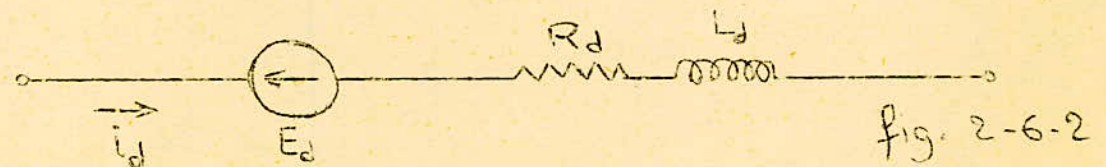
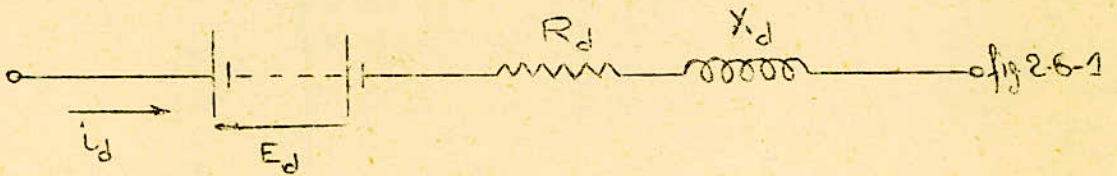
Dans ce cas, outre les particularités citées plus haut, un changement essentiel est à noter.

Durant l'intervalle de temps où  $\beta_m > E_d$ , le redresseur sera complètement bloqué et le courant redressé sera nul. Nous aurons une discontinuité de la courbe du courant redressé.

Durant une période de  $2\pi$ , dans le redresseur, peuvent avoir lieu différentes combinaisons des thyristors conductants. Par exemple la séquence 2.3. peut être suivie d'une séquence 3.4. ou 3.3. pendant la même période. Ce qui ne se produit jamais dans le cas d'une f.c.m. continue et fixée.

On peut noter aussi que le fonctionnement du pont redresseur commandé sera complètement différent du pont non commandé. La présence de la f.c.e.m. alternative provoquera la déformation de la tension aux bornes de la soupape. Par conséquent, dans le redresseur non commandé peut avoir lieu une avance ou un retard des instants d'amorçage par rapport aux instants d'amorçage dans un pont classique.

Par contre, dans le pont commandé, il ne peut y avoir que le retard par rapport à l'instant d'amorçage des soupapes en régime normal.



$V$  = tension simple efficace.

$V_{\max}$  = tension simple maximale.

$\left. \begin{array}{l} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{array} \right\}$  = valeurs instantanées des tensions simples à l'entrée du redresseur.

$U$  = tension composée efficace.

$U_{\max}$  = tension composée maximale.

$U_{d0}$  = tension redressée à vide.

$U_d$  = tension redressée en charge.

$u_d$  = valeur instantanée de la tension redressée.

$E_d$  = valeur moyenne de la f.c.e.m. continue.

$E_m$  = valeur efficace de la f.c.e.m. alternative.

$e_m$  = valeur instantanée de la f.c.e.m. alternative.

$I_d$  = valeur moyenne du courant redressé.

$I_a$  = valeur efficace du courant de soupape.

$i_1, i_2, \dots, i_6$  = valeurs instantanées des courants des soupapes.

$\alpha$  = angle d'amorçage.

$\gamma$  = angle de commutation.

$X_a$  = Réactance d'une phase du système alternatif alimentant le redresseur (système + transformateur).

$X_d$  = Réactance du circuit continu.

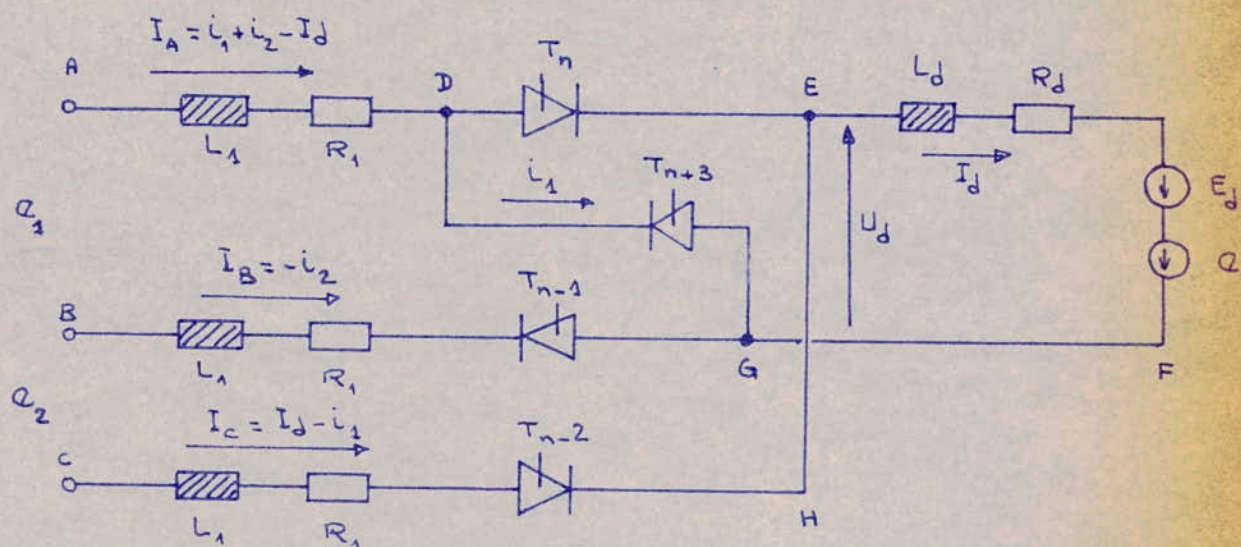
$R_d$  = Résistance du circuit continu.

### 3 METHODE DE SIMULATION DU PONT REDRESSEUR

La simulation du pont redresseur nécessite une méthode convenable programmée sur ordinateur.

#### 3.1 Choix de la méthode et du schéma général du pont.

A partir du pont, et sachant que la période de répétition des processus électromagnétiques est  $\frac{\pi}{3}$ ; on définit une topologie générale permettant de diminuer l'ordre du système dont la résolution se fera pour chaque intervalle de temps; et on remplace au fur et à mesure pour chaque opération les tensions d'alimentation par phase (voir tableau). Pour un processus donné, il suffit de choisir convenablement les tensions et le sens des courants correspondants.



#### 3-2 EQUATIONS DIFFERENTIELLES REGISSANT LES DIFFERENT REGIMES DE FONCTIONNEMENT.

TABEAU DES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME

	1+6m	2+6m	3+6m	4+6m	5+6m	6+6m
$Q_1$	$Q_{AB}$	$-Q_{CA} = Q_{AC}$	$Q_{BC}$	$-Q_{AB} = Q_{BA}$	$Q_{CA}$	$-Q_{BC} = Q_{CB}$
$Q_2$	$Q_{BC}$	$-Q_{AB} = Q_{BA}$	$Q_{CB}$	$-Q_{BC} = Q_{CB}$	$Q_{BA}$	$-Q_{CA} = Q_{AC}$
$I_A$	$i_1 + i_2 - I_d$	$i_2$	$I_d - i_1$	$-i_1 - i_2 + I_d$	$-i_2$	$-I_d - i_1$
$I_B$	$-i_2$	$-I_d + i_1$	$i_1 + i_2 - I_d$	$i_2$	$I_d - i_1$	$I_d - i_2 - i_1$
$I_C$	$I_d - i_1$	$I_d - i_1 - i_2$	$-i_2$	$i_1 - I_d$	$i_1 + i_2 - I_d$	$i_2$
$Q_{AB} = Q_1$	$\sqrt{2} E_{AB} \sin G_1$	$\sqrt{2} E_{AC} \sin G_1$	$\sqrt{2} E_{BC} \sin G_1$	$\sqrt{2} E_{BA} \sin G_1$	$\sqrt{2} E_{CA} \sin G_1$	$\sqrt{2} E_{AC} \sin G_1$
$Q_{BC} = Q_2$	$\sqrt{2} E_{BC} \sin G_2$	$\sqrt{2} E_{BA} \sin G_2$	$\sqrt{2} E_{CA} \sin G_2$	$\sqrt{2} E_{CB} \sin G_2$	$\sqrt{2} E_{AB} \sin G_2$	$\sqrt{2} E_{AC} \sin G_2$
$I_{S1}$	$i_1$	$i_2$	$I_d - i_1$	$I_d - i_2$	0	0
$I_{S2}$	0	$i_1$	$i_2$	$I_d - i_1$	$I_d - i_1$	0
$I_{S3}$	0	0	$i_1$	$i_2$	$I_d - i_1$	$I_d - i_2$
$I_{S4}$	$I_d - i_2$	0	0	$i_1$	$i_2$	$I_d - i_1$
$I_{S5}$	$I_d - i_1$	$I_d - i_2$	0	0	$i_1$	$i_2$
$I_{S6}$	$i_2$	$I_d - i_1$	$I_d - i_2$	0	0	$i_1$

$$E_3 = Q_m + E_d = E_m \sin \omega t + E_d$$

A partir du schéma équivalent, nous définissons les 5 équations relatives aux mailles du système.

Equation (1) Maille ADEFGB

$$Q_1 = R_1 I_A + L_1 \frac{d}{dt} I_A + L_d \frac{d}{dt} I_d + e_d + e_m - R_1 I_B - L_1 \frac{d}{dt} I_B + R_d I_d$$

$$Q_1 = R_1 (i_1 + i_2 - i_d) + L_1 \frac{d}{dt} (i_1 + i_2 - i_d) + L_d \frac{d}{dt} i_d + R_d i_d + R_1 i_2 + L_1 \frac{d}{dt} i_2 + E_d + e_m$$

Posons  $i_1 = y_1$   $\frac{d}{dt} i_1 = f_1$

$i_2 = y_2$   $\frac{d}{dt} i_2 = f_2$

$i_d = y_3$   $\frac{d}{dt} i_d = f_3$

$E_d + e_m = E_3$

$Q_1 = E_1$  ;  $Q_2 = E_2$

$$E_1 = R_1 y_1 + R_1 y_2 - R_1 y_3 + L_1 f_1 + L_1 f_2 - L_1 f_3 + L_d f_3 + R_d y_3 + R_1 y_2 + L_1 f_2 + E_3$$

$$L_1 f_1 + 2L_1 f_2 + (L_d - L_1) f_3 = -R_1 y_1 - 2R_1 y_2 + (R_1 - R_d) y_3 + E_1 - E_3 \quad (1)$$

Equation (2) courant  $i_1 = i_d \Rightarrow f_1 = f_3$  d'où

$$f_1 - f_3 = 0 \quad (2)$$

Equation (3) courant  $i_2 = i_d \Rightarrow f_2 = f_3$  d'où

$$f_2 - f_3 = 0 \quad (3)$$

Equation (4) maille : AEHC

$$Q_1 + Q_2 = R_1 I_A + L_1 \frac{d}{dt} I_A - R_1 I_C - L_1 \frac{d}{dt} I_C$$

$$Q_1 + Q_2 = R_1 (i_1 + i_2 - i_d) + L_1 \frac{d}{dt} (i_1 + i_2 - i_d) - R_1 (i_d - i_1) - L_1 \frac{d}{dt} (i_d - i_1)$$

$$E_1 + E_2 = R_1 y_1 + R_1 y_2 - R_1 y_3 + L_1 f_1 + L_1 f_2 - L_1 f_3 - R_1 y_3 + R_1 y_1 - L_1 f_3 + L_1 f_1$$

$$2L_1 f_1 + L_1 f_2 - 2L_1 f_3 = -2R_1 y_1 - R_1 y_2 + 2R_1 y_3 + E_1 + E_2 \quad (4)$$

Equation (5) maille ADGB

$$Q_1 = R_1 I_A + L_1 \frac{d}{dt} I_A - R_1 I_B - L_1 \frac{d}{dt} I_B$$

$$Q_1 = R_1(i_1 + i_2 - i_d) + L_1 \frac{d}{dt}(i_1 + i_2 - i_d) - R_1(-i_2) - L_1 \frac{d}{dt}(-i_2)$$

$$E_1 = R_1 Y_1 + R_1 Y_2 - R_1 Y_3 + L_1 f_1 + L_1 f_2 - L_1 f_3 + R_1 Y_2 + L_1 f_2$$

$$L_1 f_1 + 2L_1 f_2 - L_1 f_3 = -R_1 Y_1 - 2R_1 Y_2 + R_1 Y_3 + E_1 \quad (5)$$

Les équations régissant le fonctionnement du pont et les conditions d'amorçage (courant et tension) peuvent être résumées sous forme de tableau.

Courants	$i_1 < i_d$ $i_2 < i_d$	$i_2 = i_d$ $i_1 < i_d$	$i_1 = i_d$ $i_2 = i_d$
Soupapes Conductantes	4	3	2
Equations relatives	(1)	(1)	(1)
	(4)	(3)	(2)
	(5)	(4)	(3)

### 3-2-1 Etude du régime à 4 soupapes.

Les 3 équations régissant ce cas de fonctionnement

(1), (4) et (5) peuvent être écrites sous forme matriciel.

$$(1) \quad L_1 f_1 + 2L_1 f_2 + (L_d - L_1) f_3 = -R_1 Y_1 - 2R_1 Y_2 + (R_1 - R_d) Y_3 + E_1 - E_3$$

$$(4) \quad 2L_1 f_1 + L_1 f_2 - 2L_1 f_3 = -2R_1 Y_1 - R_1 Y_2 + 2R_1 Y_3 + E_1 + E_2$$

$$(5) \quad L_1 f_1 + 2L_1 f_2 - L_1 f_3 = -R_1 Y_1 - 2R_1 Y_2 + R_1 Y_3 + E_1$$

avec la condition  $i_1 < i_d$  et  $i_2 < i_d$

$$[A] * [f] = [B].$$

Les inconnues sont évidemment les valeurs de  $[f]$ .

Afin de déterminer ces dernières, nécessité d'inverser

la matrice  $[A]$ .

$$[A] * [F] = [B] \quad \text{en} \quad [F] = [A]^{-1} * [B]$$

Afin de réduire le temps de calcul sur ordinateur, nous ferons l'inversion matricielle manuellement.

Inversion matricielle et calcul des coefficients.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_1 & 2L_1 & L_d - L_1 \\ 2L_1 & L_1 & -2L_1 \\ L_1 & 2L_1 & -L_1 \end{bmatrix}}_{[A]} * \underbrace{\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}}_{[F]} = \underbrace{\begin{bmatrix} -R_1 Y_1 & -2R_1 Y_2 & (R_1 - R_d) Y_3 & E_1 & -E_3 \\ -2R_1 Y_1 & -R_1 Y_2 & 2R_1 Y_3 & E_1 & E_2 \\ -R_1 Y_1 & -2R_1 Y_2 & R_1 Y_3 & E_1 & 0 \end{bmatrix}}_{[B]}$$

Calcul du déterminant de la matrice [A].

$$\begin{aligned} \Delta_A &= -L_1^3 - 4L_1^3 + 4L_1^2(L_d - L_1) - L_1^2(L_d - L_1) + 4L_1^3 + L_1^3 \\ &= 3L_1^3 + 4L_1^2 L_d - 4L_1^3 - L_1^2 L_d + L_1^3 \\ &= 3L_1^2 L_d \end{aligned}$$

$$\boxed{\Delta_A = 3L_1^2 L_d}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} L_1 & 2L_1 & L_d - L_1 \\ 2L_1 & L_1 & -2L_1 \\ L_1 & 2L_1 & -L_1 \end{bmatrix} \Rightarrow [A]_t = \begin{bmatrix} L_1 & 2L_1 & L_1 \\ 2L_1 & L_1 & 2L_1 \\ L_d - L_1 & -2L_1 & -L_1 \end{bmatrix}$$

$$[A]^{-1} = \frac{1}{\Delta_A} \begin{bmatrix} 3L_1^2 & -2L_1 L_d & -3L_1^2 - L_1 L_d \\ 0 & -L_1 L_d & -2L_1 L_d \\ 3L_1^2 & 0 & -3L_1^2 \end{bmatrix} \Rightarrow [A]^{-1} = \frac{1}{\Delta_A} \begin{bmatrix} 3L_1^2 & 2L_1 L_d & -3L_1^2 - L_1 L_d \\ 0 & -L_1 L_d & 2L_1 L_d \\ 3L_1^2 & 0 & -3L_1^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3L_1^2 L_d} * \begin{bmatrix} 3L_1^2 & 2L_1 L_d & -3L_1^2 - L_1 L_d \\ 0 & -L_1 L_d & 2L_1 L_d \\ 3L_1^2 & 0 & -3L_1^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -R_1 Y_1 & -2R_1 Y_2 & (R_1 - R_d) Y_3 & E_1 & 0 & -E_3 \\ -2R_1 Y_1 & -R_1 Y_2 & 2R_1 Y_3 & E_1 & E_2 & 0 \\ -R_1 Y_1 & -2R_1 Y_2 & R_1 Y_3 & E_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = \frac{1}{3L_1^2 L_d} \cdot \left[ \begin{aligned} &(-3L_1^2 R_1 - 2R_1 L_1 L_d + 3L_1^2 R_1 + L_1 L_d R_1) Y_1 + (-6L_1^2 R_1 - 2L_1 L_d R_1 + 6L_1^2 R_1 + \\ &2L_1 L_d R_1) Y_2 + (3L_1^2 R_1 - 3L_1^2 R_d + 4L_1 L_d R_1 - 3L_1^2 R_1 - L_1 L_d R_1) Y_3 + \\ &(3L_1^2 + 2L_1 L_d - 3L_1^2 - L_1 L_d) E_1 + (2L_1 L_d) E_2 - 3L_1^2 E_3 \end{aligned} \right]$$

$$f_1 = \frac{1}{3L_1^2 L_d} \cdot \left[ \begin{aligned} &(-3L_1 L_d R_1) Y_1 + (3L_1 L_d R_1 - 3L_1 R_d) Y_3 + L_1 L_d E_1 + 2L_1 L_d E_2 - 3L_1^2 E_3 \end{aligned} \right]$$

$$f_1 = -\frac{3L_1 L_d R_1}{3L_1^2 L_d} \cdot Y_1 + \frac{3L_1 L_d R_1 - 3L_1^2 R_d}{3L_1^2 L_d} \cdot Y_3 + \frac{L_1 L_d}{3L_1^2 L_d} \cdot E_1 + \frac{2L_1 L_d}{3L_1^2 L_d} \cdot E_2 - \frac{3L_1^2}{3L_1^2 L_d} E_3$$

$$f_1 = -\frac{R_1}{L_1} \cdot Y_1 + \left( \frac{R_1}{L_1} - \frac{R_d}{L_d} \right) \cdot Y_3 + \frac{1}{3L_1} E_1 + \frac{2}{3L_1} E_2 - \frac{1}{L_d} E_3$$

Expression des coefficients  $A_{mn}$  de  $f_1$ .

$$A_{11} = -\frac{R_1}{L_1}$$

$$A_{12} = 0$$

$$A_{13} = \frac{R_1}{L_1} - \frac{R_d}{L_d}$$

$$A_{14} = \frac{1}{3L_1}$$

$$A_{15} = \frac{2}{3L_1}$$

$$A_{16} = -\frac{1}{L_d}$$

$$f_2 = \frac{1}{\Delta_a} \cdot \left[ \begin{aligned} &(2L_1 L_d R_1 - 2L_1 L_d R_1) Y_1 + (L_1 L_d R_1 - 4L_1 L_d R_1) Y_2 + (2L_1 L_d R_1 - 2L_1 L_d R_1) Y_3 + \\ &(2L_1 L_d - L_1 L_d) E_1 - L_1 L_d E_2 \end{aligned} \right]$$

$$f_2 = \frac{1}{\Delta_a} \cdot \left[ \begin{aligned} &(-3L_1 R_1 L_d) Y_2 + L_1 L_d E_1 - L_1 L_d E_2 \end{aligned} \right].$$



Expression des coefficients  $A_{mn}$  de  $f_2$

$$A_{21} = 0$$

$$A_{22} = -\frac{R_1}{L_1}$$

$$A_{23} = 0$$

$$A_{24} = \frac{1}{3L_1}$$

$$A_{25} = -\frac{1}{3L_1}$$

$$A_{26} = 0$$

$$F_3 = \frac{1}{\Delta_a} \left[ \left( -3L_1^2 R_1 + 3L_1^2 R_1 \right) Y_1 + \left( -6R_1 L_1^2 + 6L_1^2 R_1 \right) Y_2 + \left( 3L_1^2 R_1 - 3L_1^2 R_d - 3L_1^2 R_1 \right) Y_3 - 3L_1^2 E_3 \right]$$

$$F_3 = \frac{1}{\Delta_a} \left( -3L_1^2 R_d Y_3 - 3L_1^2 E_3 \right)$$

Expression des coefficients  $A_{mn}$  de  $f_3$ .

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = 0$$

$$A_{33} = -\frac{R_d}{L_d}$$

$$A_{34} = 0$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = -\frac{1}{L_d}$$

3-2-2 Etude du régime à 3 soupapes.

Condition d'amorçage des thyristors:

$$i_2 = i_d \quad i_1 < i_d$$

Ce cas de fonctionnement est régi par les équations (1), (3) et (4)

$$(1) \quad L_1 f_1 + 2L_1 f_2 + (L_d - L_1) f_3 = -R_1 \gamma_1 - 2R_1 \gamma_2 + (R_1 - R_d) \gamma_3 + E_1 - E_3$$

$$(3) \quad f_2 - f_3 = 0$$

$$(4) \quad 2L_1 f_1 + L_1 f_2 - 2L_1 f_3 = -2R_1 \gamma_1 - R_1 \gamma_2 + 2R_1 \gamma_3 + E_1 + E_2$$

Le système matriciel correspondant à ces 3 équations régissant le fonctionnement du pont en régime 3 soupapes est:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_1 & 2L_1 & L_d - L_1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 2L_1 & L_1 & -2L_1 \end{bmatrix}}_{[A]} * \underbrace{\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}}_{[F]} = \underbrace{\begin{bmatrix} -R_1 \gamma_1 & -2R_1 \gamma_2 & (R_1 - R_d) \gamma_3 & E_1 & 0 & -E_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2R_1 \gamma_1 & -R_1 \gamma_2 & 2R_1 \gamma_3 & E_1 & E_2 & 0 \end{bmatrix}}_{[B]}$$

Déterminant de la matrice [A].

$$\Delta_3 = -2L_1^2 - 4L_1^2 - 2L_1(L_d - L_1) + L_1^2$$

$$\Delta_3 = -3L_1^2 - 2L_1 L_d$$

$$\Delta_3 = -L_1 (3L_1 + 2L_d)$$

Inversion matricielle et calcul des coefficients

$$[A] = \begin{bmatrix} L_1 & 2L_1 & L_d - L_1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 2L_1 & L_1 & -2L_1 \end{bmatrix} \Rightarrow [A]_t = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 2L_1 \\ 2L_1 & 1 & L_1 \\ L_d - L_1 & -1 & -2L_1 \end{bmatrix}$$

$$[A]^{-1} = \frac{1}{\Delta_3} \begin{bmatrix} -L_1 & 3L_1^2 + L_1 L_d & -L_1 L_d \\ -2L_1 & -2L_1 L_d & L_1 \\ -2L_1 & 3L_1^2 & L_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{-L_1(3L_1+2L_d)} * \begin{bmatrix} -L_1 & L_1(3L_1+L_d) & -L_1-L_d \\ -2L_1 & -2L_1L_d & L_1 \\ -2L_1 & 3L_1^2 & L_1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -R_1Y_1 & -2R_1Y_2 & (R_1-R_d)Y_3 & E_1 & 0 & E_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2R_1Y_1 & -R_1Y_2 & 2R_1Y_3 & E_1 & E_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = \frac{1}{\Delta_3} \left[ \left( L_1R_1 + 2L_1R_1 + 2R_1L_d \right) Y_1 + \left( 2L_1R_1 + L_1R_1 + R_1L_d \right) Y_2 + \left( L_1R_d - L_1R_1 - 2L_1R_1 - 2L_dR_1 \right) Y_3 - \left( 2L_1 + L_d \right) E_1 - \left( L_1 + L_d \right) E_2 + L_1E_3 \right]$$

$$f_1 = \frac{1}{\Delta_3} \left[ \left( 3L_1R_1 + 2R_1L_d \right) Y_1 + \left( 3L_1R_1 + R_1L_d \right) Y_2 + \left( L_1R_d - 2R_1L_d - 3L_1R_1 \right) Y_3 - \left( 2L_1 + L_d \right) E_1 - \left( L_1 + L_d \right) E_2 + L_1E_3 \right]$$

Posons :  $L'_d = \frac{L_d}{L_1}$

$$A_{11} = \frac{3L_1R_1 + 2R_1L_d}{-L_1(3L_1+2L_d)} = - \frac{R_1}{L_1}$$

$$A_{12} = \frac{3L_1R_1 + R_1L_d}{-L_1(3L_1+2L_d)} = - \frac{3R_1 + R_1L'_d}{3L_1 + 2L_d}$$

$$A_{13} = \frac{L_1R_d - 2R_1L_d - 3R_1L_1}{-L_1(3L_1+2L_d)} = - \frac{R_d}{3L_1+2L_d} + \frac{R_1}{L_1}$$

$$A_{14} = \frac{2L_1+L_d}{L_1(3L_1+2L_d)} = \frac{2+L'_d}{3L_1+2L_d}$$

$$A_{15} = \frac{L_1+L_d}{L_1(3L_1+2L_d)} = \frac{1+L'_d}{3L_1+2L_d}$$

$$A_{16} = - \frac{1}{3L_1+2L_d}$$

$$f_2 = \frac{1}{\Delta_3} \left[ \left( 2L_1R_1 - 2L_1R_1 \right) Y_1 + \left( 4L_1R_1 - R_1L_1 \right) Y_2 + \left( 2L_1R_d - 2L_1R_1 + 2L_1R_1 \right) Y_3 + \left( L_1 - 2L_1 \right) E_1 + L_1E_2 + 2L_1E_3 \right]$$

$$f_2 = \frac{1}{\Delta_3} \left[ (3L_1 R_1) Y_2 + (2L_1 R_d) Y_3 - L_1 E_1 + L_1 E_2 + 2L_1 E_3 \right]$$

Expression des coefficients  $A_{mn}$  de  $f_2$ .

$$A_{21} = 0$$

$$A_{22} = \frac{3L_1 R_1}{-L_1 (3L_1 + 2L_d)} = -\frac{3R_1}{3L_1 + 2L_d}$$

$$A_{23} = \frac{2L_1 R_d}{-L_1 (3L_1 + 2L_d)} = -\frac{2R_d}{3L_1 + 2L_d}$$

$$A_{24} = \frac{-L_1}{-L_1 (3L_1 + 2L_d)} = \frac{1}{3L_1 + 2L_d}$$

$$A_{25} = \frac{L_1}{-L_1 (3L_1 + 2L_d)} = -\frac{1}{3L_1 + 2L_d}$$

$$A_{26} = \frac{2L_1}{-L_1 (3L_1 + 2L_d)} = -\frac{2}{3L_1 + 2L_d}$$

$$f_3 = \frac{1}{\Delta_3} \left[ (2L_1 R_1 - 2L_1 R_1) Y_1 + (4L_1 R_1 - L_1 R_1) Y_2 + (2L_1 R_d - 2L_1 R_1 + 2L_1 R_1) Y_3 + (L_1 - 2L_1) E_1 + L_1 E_2 + 2L_1 E_3 \right]$$

$$f_3 = \frac{1}{\Delta_3} \left[ 3L_1 R_1 Y_2 + 2L_1 R_d Y_3 - L_1 E_1 + L_1 E_2 + 2L_1 E_3 \right]$$

Expression des coefficients  $A_{mn}$  de  $f_3$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = \frac{3L_1 R_1}{-L_1 (3L_1 + 2L_d)} = -\frac{3R_1}{3L_1 + 2L_d}$$

$$A_{33} = \frac{2L_1 R_d}{-L_1(3L_1 + 2L_d)} = -\frac{2R_d}{3L_1 + 2L_d}$$

$$A_{34} = \frac{-L_1}{-L_1(3L_1 + 2L_d)} = \frac{1}{3L_1 + 2L_d}$$

$$A_{35} = \frac{L_1}{-L_1(3L_1 + 2L_d)} = -\frac{1}{3L_1 + 2L_d}$$

$$A_{36} = \frac{2L_1}{-L_1(3L_1 + 2L_d)} = -\frac{2}{3L_1 + 2L_d}$$

3-2-3 Etude du régime à 2 soupapes

Condition d'amorçage des thyristors.

$$L_1 = L_2 = L_d$$

Equations valables en régime de fonctionnement à 2

soupapes.

$$(1) L_1 f_1 + 2L_1 f_2 + (L_d - L_1) f_3 = -R_1 Y_1 - 2R_1 Y_2 + (R_1 - R_d) Y_3 + E_1 - E_3$$

$$(2) f_1 - f_3 = 0$$

$$(3) f_2 - f_3 = 0$$

Ecriture matricielle correspondante à ce cas de fonctionnement.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_1 & 2L_1 & L_d - L_1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}}_{[A]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}}_{[f]} = \underbrace{\begin{bmatrix} -R_1 Y_1 & -2R_1 Y_2 & (R_1 - R_d) Y_3 & E_1 & 0 & -E_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{[B]}$$

Déterminant de la matrice [A]

$$\Delta_2 = L_d - L_1 + L_1 + 2L_1$$

⇒

$$\Delta_2 = L_d + 2L_1$$

Inversion matricielle et calcul des coefficients.

$$[A] = \begin{bmatrix} L_1 & 2L_1 & L_d - L_1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \Rightarrow [A]_t = \begin{bmatrix} L_1 & 1 & 0 \\ 2L_1 & 0 & 1 \\ L_d - L_1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -L_1 - L_d & -2L_1 \\ -1 & -L_1 & -L_d \\ 1 & L_1 & -2L_1 \end{bmatrix} * \frac{1}{\Delta_2} \Rightarrow [A]^{-1} = \frac{1}{\Delta_2} \begin{bmatrix} 1 & L_1 + L_d & 2L_1 \\ 1 & -L_1 & L_d \\ 1 & -L_1 & -2L_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{L_d + 2L_1} * \begin{bmatrix} 1 & L_1 + L_d & -2L_1 \\ 1 & -L_1 & L_d \\ 1 & -L_1 & -2L_1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -R_1 Y_1 & -2R_1 Y_2 & (R_1 - R_d) Y_3 & E_1 & 0 & -E_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = \frac{1}{\Delta_2} \cdot \left[ -R_1 Y_1 - 2R_1 Y_2 + (R_1 - R_d) Y_3 + E_1 - E_3 \right]$$

Expression des coefficients  $A_{mn}$  de  $f_1$

$$A_{11} = -\frac{R_1}{2L_1 + L_d}$$

$$A_{12} = -\frac{2R_1}{2L_1 + L_d}$$

$$A_{13} = \frac{R_1 - R_d}{2L_1 + L_d}$$

$$A_{14} = \frac{1}{2L_1 + L_d}$$

$$A_{15} = 0 \quad \text{et} \quad A_{16} = -\frac{1}{2L_1 + L_d}$$

$$f_2 = \frac{1}{\Delta_2} \cdot [-R_1 Y_1 - 2R_1 Y_2 + (R_1 - R_d) Y_3 + E_1 - E_3]$$

Expression des coefficients  $A_{mn}$  de  $f_2$

$$A_{21} = -\frac{R_1}{2L_1 + L_d} = A_{11}$$

$$A_{22} = -\frac{2R_1}{2L_1 + L_d} = A_{12}$$

$$A_{23} = \frac{R_1 - R_d}{2L_1 + L_d} = A_{13}$$

$$A_{24} = \frac{1}{2L_1 + L_d} = A_{14}$$

$$A_{25} = 0 = A_{15}$$

$$A_{26} = -\frac{1}{2L_1 + L_d} = A_{16}$$

$$f_3 = \frac{1}{\Delta_2} \cdot [-R_1 Y_1 - 2R_1 Y_2 + (R_1 - R_d) Y_3 + E_1 - E_3]$$

finalement :

$$A_{11} = A_{21} = A_{31}$$

$$A_{12} = A_{22} = A_{32}$$

$$A_{13} = A_{23} = A_{33}$$

$$A_{14} = A_{24} = A_{34}$$

$$A_{15} = A_{25} = A_{35}$$

$$A_{16} = A_{26} = A_{36}$$

### 3.3. - Méthode de résolution des équations différentielles.

Les équations régissant le fonctionnement du pont redresseur dans les régimes envisagés sont des équations différentielles du 1er ordre.

3 d'entre elles, sont valables à chaque instant. Ces 3 équations doivent être choisies parmi les 5 en fonction de l'état du convertisseur (existe-t'il une commutation, deux commutations simultanées, ou absence de commutation à l'instant considéré)? La variation dans le temps des équations à résoudre ne permet pas les moyens les plus simples, résolution par transformation de Laplace Carson par exemple.

Dans ce cas, il nous reste que des méthodes numériques utilisant les capacités des calculateurs exécutant rapidement la multitude d'opérations élémentaires.

Parmi les différentes méthodes, la plus appropriée à la résolution des équations obtenues, s'avère celle de RUNGE-KUTTA, plus intéressante au point de vue précision et simplicité. Cette déclaration est faite à partir de la figure 3.3.1. tirée de [N° 9], qui donne l'erreur relative en fonction du pas de calcul choisi. On remarque aussi que pour une précision donnée, la méthode de R.K. permet d'avoir le pas de calcul plus grand, donc temps de calcul réduit, solution plus économique.

#### Méthode de RUNGE-KUTTA

Soit l'équation différentielle :  $dy/dx = f(x,y)$  et soient  $X_0$  et  $y_0$  les conditions initiales.

Le problème est de rechercher les valeurs que prend la fonction Y pour des valeurs de X en progression arithmétique de raison h

$$X_0 + h ; X_0 + 2h ; \dots$$

On constate tout de suite que la difficulté de cette méthode réside dans le choix du pas d'intégration h. Si on ne le prend pas assez faible, les formules d'approximation ci-dessus ne sont plus valables et si on le prend trop faible, le temps de calcul devient prohibitif.

Pour des circuits élémentaires, le pas d'intégration peut être déterminé à partir des constantes de temps ou des périodes.

- Pour un circuit RC, on choisit un pas d'intégration négligeable devant la constante de temps R.C.

- Pour un circuit LC, on choisit un pas d'intégration négligeable devant la période  $2\pi\sqrt{L.C.}$

- Pour un circuit RLC, suivant que l'amortissement est faible ou important, on peut prendre respectivement le pas d'intégration correspondant au circuit LC ou au circuit RC.



- Pour un circuit complexe, on le décompose en circuits élémentaires du type ci-dessus et on calcule le pas d'intégration de chacun d'eux pour retenir en définitive le plus petit.

En ce qui nous concerne, le pas de calcul est de 1,8° électrique soit 0,00011112 seconde, ce qui donne une précision acceptable.

Par ailleurs, il existe un certain nombre de formules d'approximation dites de RUNGE-KUTTA. Nous en établirons une seule qui est la formule simple et très suffisante pour les besoins de la pratique du calcul numérique.

Cette formule peut être obtenue par le procédé suivant :

La valeur de y(x) au point x<sub>0</sub> + h est :

$$y(x_0 + h) = y_0 + \int_{x_0}^{x_0+h} f(x,y) dx$$

Désignons par y(1/2) la valeur de y au point x(1/2) = x<sub>0</sub> + h/2

et y<sub>1</sub> la valeur de y au point x<sub>1</sub> = x<sub>0</sub> + h.

L'intégrale se calculera par la formule de Simpson

$$y_1 = y_0 + h/6 \left[ f(x_0, y_0) + 4f(x(1/2), y(1/2)) + f(x_1, y_1) \right]$$

Calculons les valeurs approchées de y<sub>1</sub> et de y(1/2) qui figurent dans le second membre de l'expression précédente.

$$y_{1/2} = y_0 + \int_{x_0}^{x(1/2)} f(x,y) dx.$$

ou en appliquant le théorème de la moyenne :

$$y_{1/2} = y_0 + \frac{1}{2} hf(\xi, \eta)$$

η est la valeur de y correspondant à un point x = ξ compris entre x<sub>0</sub> + h/2

On aura une valeur approchée en prenant x<sub>0</sub> pour ξ et y<sub>0</sub> pour η soit (y<sub>1/2</sub>)' cette valeur approchée

$$(y_{1/2})' = y_0 + k_1/2 \text{ avec } k_1 = hf(x_0, y_0)$$

Nous obtiendrons encore une valeur approchée (y(1/2))'' en prenant dans la formule de la moyenne ξ = x<sub>0</sub> + h/2 et η = (y(1/2))'. Nous aurons :

$$(y_{1/2})'' = y_0 + k_2/2 \text{ avec } k_2 = hf(x_0 + h/2, y_0 + k_1/2)$$

Pour y<sub>1</sub> nous allons opérer de la même façon :

$$y_1 = y(x_0 + h) = y_0 + \int_{x_0}^{x_0+h} f(x,y) dx = y_0 + h(\xi_1, \eta_1)$$

Prenons pour  $x = x_1$  compris entre  $x_0$  et  $x_0 + h$ , la valeur  $x_0 + h/2$  et pour valeur correspondante de  $y$  la valeur :

$$(y_2)^n = y_0 + k_2/2$$

Nous avons :

$$(y_1)' = y_0 + hf(x_0 + h/2, y_0 + k_2/2) = y_0 + k_3$$

avec  $k_3 = hf(x_0 + h/2, y_0 + k_2/2)$

La formule de Simpson écrite plus haut donne pour valeur de  $y(x_0 + h)$  que nous adoptons.

$$y_1 = y_0 + h/6 \left\{ f(x_0, y_0) + 2f(x_0 + h/2, y_0 + k_1/2) + 2f(x_0 + h/2, y_0 + k_2/2) + f(x_0 + h, y_0 + k_3) \right\}$$

c'est à dire la formule :

$$y_1 = y_0 + 1/3 \left[ k_2 + k_3 + (k_1 + k_4) / 2 \right]$$

REMARQUE : Une étude plus approfondie de la méthode qui vient d'être exposée montre que l'erreur commise en remplaçant la valeur exacte de  $y$  pour  $x_0 + h = x_1$  par  $y_0 + k$  est infiniment petite de l'ordre de  $h^5$ .

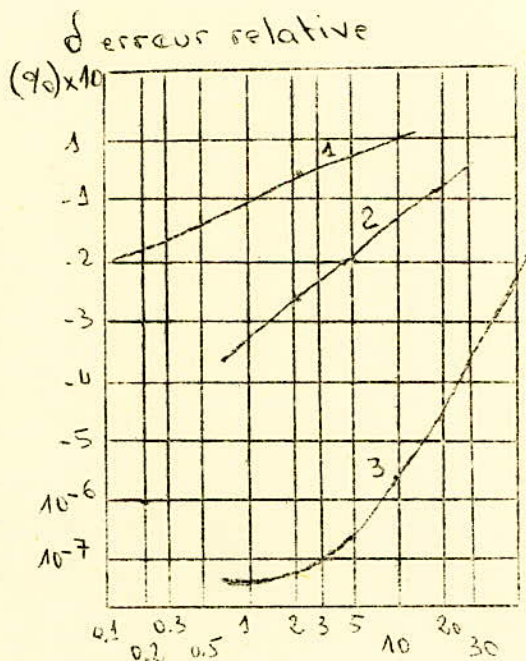


fig. 3.3.4

h pas de calcul en (degré électrique)

- 1 - Euler
- 2 - méthode d'Euler-Cauchy
- 3 - méthode de Runge-kutta

ORGANIGRAMME GENERAL

Le schéma synoptique de l'organigramme est représenté par la fig.

4.1. Il est composé de 6 blocs principaux :

- L'entrée
- Détermination de l'état du convertisseur
- Résolution des équations sélectionnées
- Fin d'intervalle de calcul
- Sortie
- Changement de régime et fin de calcul.

4.1. - Bloc d'entrée

Dans ce bloc, tous les paramètres sont introduits en vue d'être mémorisés et initialisés de la façon suivante :

Valeur égale à l'unité pour : les indicateurs L11, L21, ... L51  
les compteurs N et M

D'une façon analogue, on attribue à k, la valeur 1 si le redresseur est commandé, la valeur 2 si le redresseur n'est pas commandé.

Afin de donner un sens physique à cette étude, on fixe les courants et le temps au démarrage  $y_1 = y_2 = y_3 = t = 0$

$Y_1, y_2, y_3$  auront pour la suite du programme des valeurs positives ou nulles en fonction du régime à étudier.

4.2. - Bloc servant à la détermination de l'état du convertisseur.

Comme nous l'avions montré dans le chapitre précédent, il existe 5 équations différentielles du premier ordre régissant le fonctionnement du redresseur parmi lesquelles 3 sont valables à chaque instant. La combinaison de ces équations traduit le nombre de soupapes conductantes (2, 3 ou 4).

Le schéma de ce bloc est représenté par la fig. 4.2.

L'état de conduction du convertisseur est déterminé par le rapport entre les courants de commutation  $Y_1, Y_2$  et le courant redressé.

Pour déterminer l'instant correspondant à la fin de la commutation en cours, on teste les valeurs des courants  $Y_2$  et  $Y_3$ .

Si  $Y_2 - Y_3$  est négative, le redresseur fonctionne en régime à 4 soupapes en conduction et les coefficients des équations correspondantes à ce régime sont mémorisés:

Si  $Y_2 - Y_3 = 0$ , le régime à 4 soupapes est exclu mais un test supplémentaire s'impose ( $Y_1 - Y_3$ ) pour désigner un des 2 régimes possibles.

$Y1 \rightarrow Y3$  négatif , Régime à 3 soupapes

$Y1 - Y3 = 0$  Régime à 2 Soupapes

Les coefficients correspondants sont à nouveau respectivement mémorisés.

Les indicateurs L11, L21, L31 permettent d'éviter les répétitions des étiquettes commentaires et la mémorisation des coefficients à chaque pas mais exécuter cette opération seulement au passage d'un régime à un autre.

#### 4.3. - Résolution des équations

La méthode de résolution a été exposée au chapitre 3. Ajoutons que les précautions sont prises pour que les courants  $Y1$ ,  $Y2$  et  $Y3$  soient toujours positifs ou nuls. Ces précautions servent à traduire la présence des soupapes dans le circuit laissant passer le courant dans un seul sens.

#### 4.4. - Fin d'intervalle de calcul

L'intervalle de calcul envisagé s'achève à l'instant d'amorçage de la soupape suivante. Cet instant dépend à priori de la nature des soupapes.

Pour le redresseur commandé, l'amorçage de la soupape suivante se produit si deux (2) conditions sont remplies :

- Tension  $U_T$  aux bornes de la soupape positive.
- Présence de l'impulsion de commande sur la gachette.

Pour un redresseur non commandé, la première condition suffit. On voit donc qu'un test, pour savoir si on est en présence d'un redresseur commandé ou non commandé, est nécessaire.  $K = 1$  contrôle de l'arrivée de l'impulsion de commande sur la gachette à l'aide du test  $TRAD - \pi/3$  puis contrôle  $K \neq 1$  de  $U_T$  on contrôle  $U_T$  directement.

Si  $U_T$  est négative de même que si  $TRAD - \pi/3$  est négatif, la soupape suivante ne s'amorce pas. Le calcul se poursuit dans l'intervalle en cours.

S'il y a amorçage de la soupape suivante, le test  $Y1 - Y3$  détermine le régime du convertisseur à l'instant d'amorçage  $\tau$  à savoir :

$Y1 - Y3$  négatif amorçage de la 4ème soupape

$Y1 - Y3 = 0$  amorçage de la 3ème soupape

A cet instant la réinitialisation et l'incrémentation se produisent: ( $Y1 = 0$  ;  $N = N + 1$  ;  $TRAD = TRAD - 1,047$ ) pour entamer le pas suivant.

#### 4.5 - SORTIE

Tous les 5 pas, on imprime les valeurs :

- Courants et tensions redressés
- Force contre électromotrice
- Courants des soupapes
- Le temps en seconde et en degrés électriques.

La sélection des équations donnant les courants des soupapes s'effectue en fonction du numéro N d'intervalles.

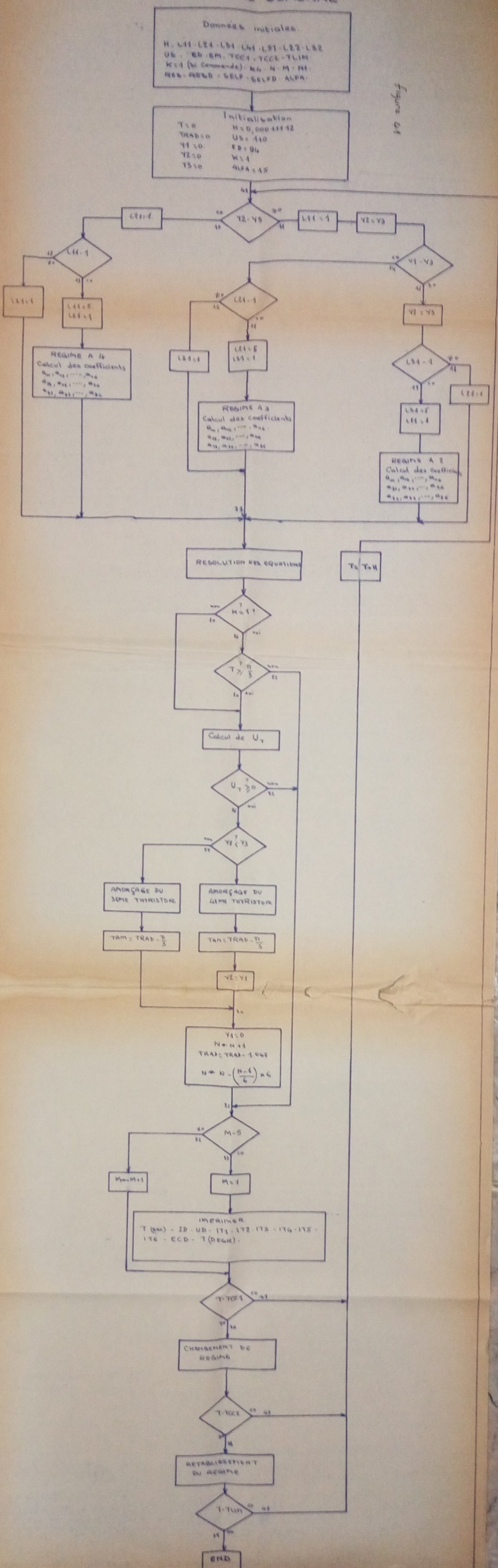
#### 4.6. - Changement de régime et fin de calcul

Les tests T - T CC1 et T TCC2 permettent de changer n'importe quels paramètres du régime et de les rétablir à l'instant voulu.

Le test final T - TLIM donne la fin des calculs.

# ORGANIGRAMME GENERAL

figure 01



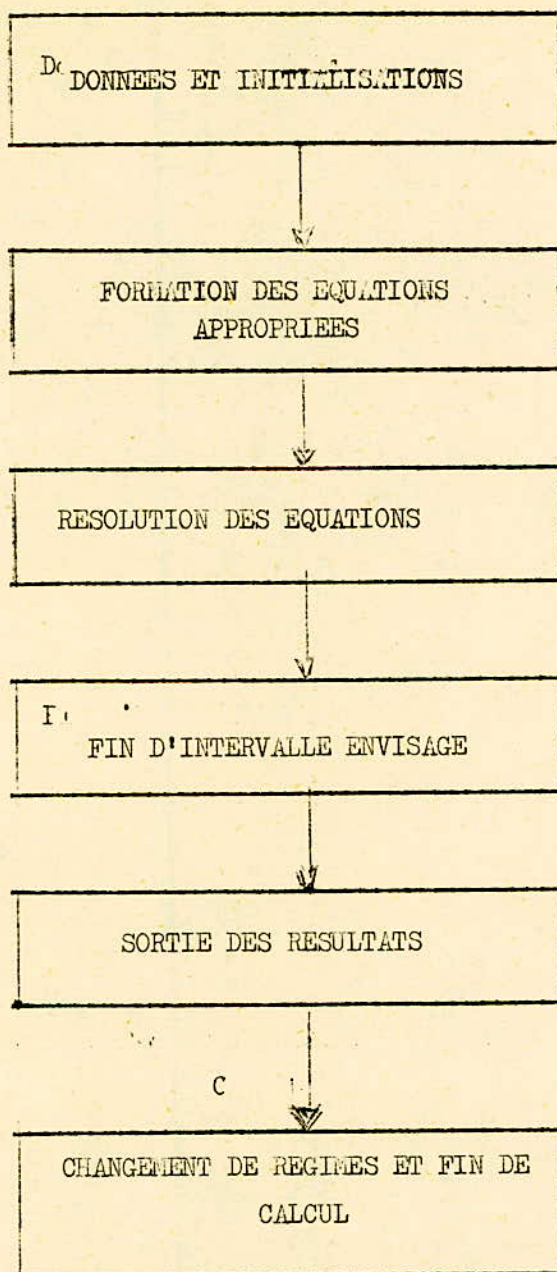
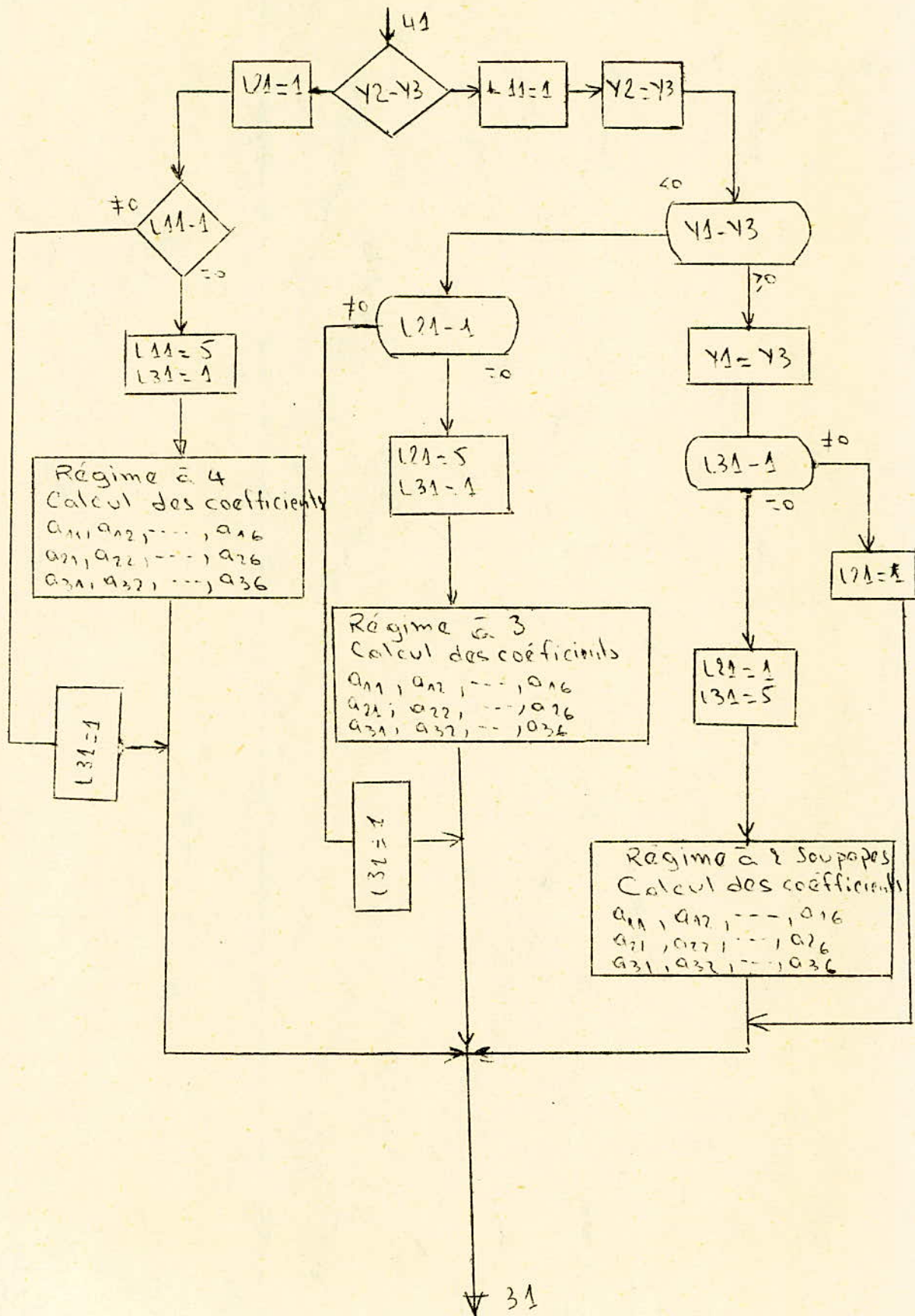
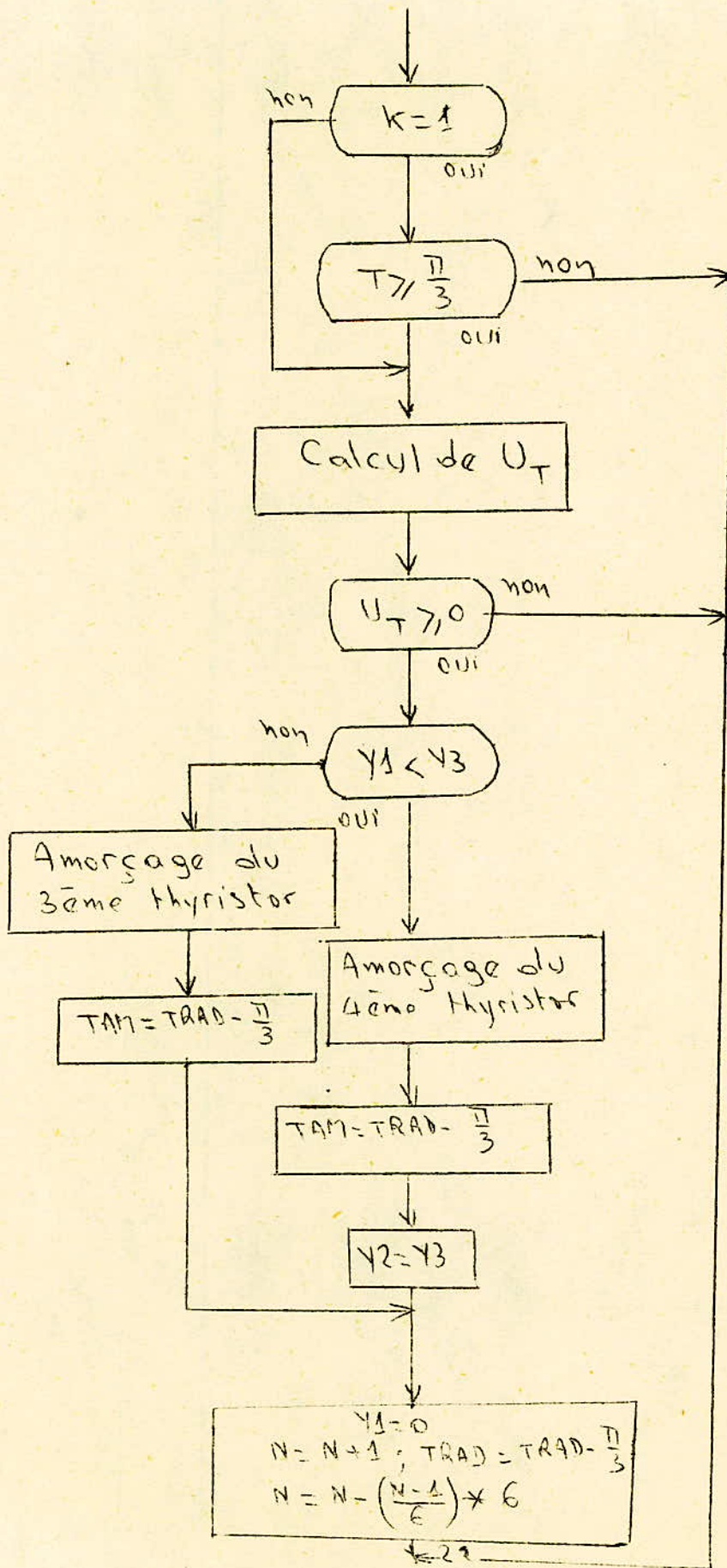


Figure 2.







## 5. - Etude du Fonctionnement du redresseur

La méthode et le programme élaborés nous ont permis d'étudier certains cas de fonctionnement du redresseur alimentant un circuit renfermant une force contre électromotrice sinusoïdale. Parmi les différents régimes étudiés (soit différentes valeurs de f.c.e.m., ECD ainsi que différentes valeurs du courant ID et différents défauts). Nous avons retenu quelques exemples assez caractéristiques :

- Etude du régime permanent avec  $E_d = 94 \text{ kV}$  ;  $E_m = 0$  (régime normal)
- Etude du régime permanent avec  $E_d = 94 \text{ kV}$  ;  $E_m = 45 \text{ kV}$  (régime avec fcem sinusoïdale de valeur modérée  $E_d > E_m$ )
- Etude du régime permanent avec  $E_d = 94 \text{ kV}$  ;  $E_m = 100 \text{ kV}$  (régime avec fcem sinusoïdale de forte valeur  $E_d < E_m$ )
- Etude du régime transitoire dû à l'apparition brusque d'une fcem  $E_m = 100 \text{ kV}$  et retour au régime normal.
- Etude du régime transitoire dû à l'apparition de la fcem suffisamment grande pour provoquer le blocage du redresseur ( $E_m = 160 \text{ kV}$ )

Les paramètres du redresseur étudié sont les suivants :

- Tension d'alimentation (valeur maximale entre phases)
- $U = 110 \text{ kV}$
- Résistance équivalente du système d'alimentation
- $R = 0.02 \Omega$  par phase
- Inductance équivalente du système d'alimentation
- $L = 0.022 \text{ H}$  par phase
- L'angle de commande  $\alpha = 15^\circ$
- Résistance de charge  $R_d = 1 \Omega$
- Inductance de charge  $L_d = 1 \text{ H}$

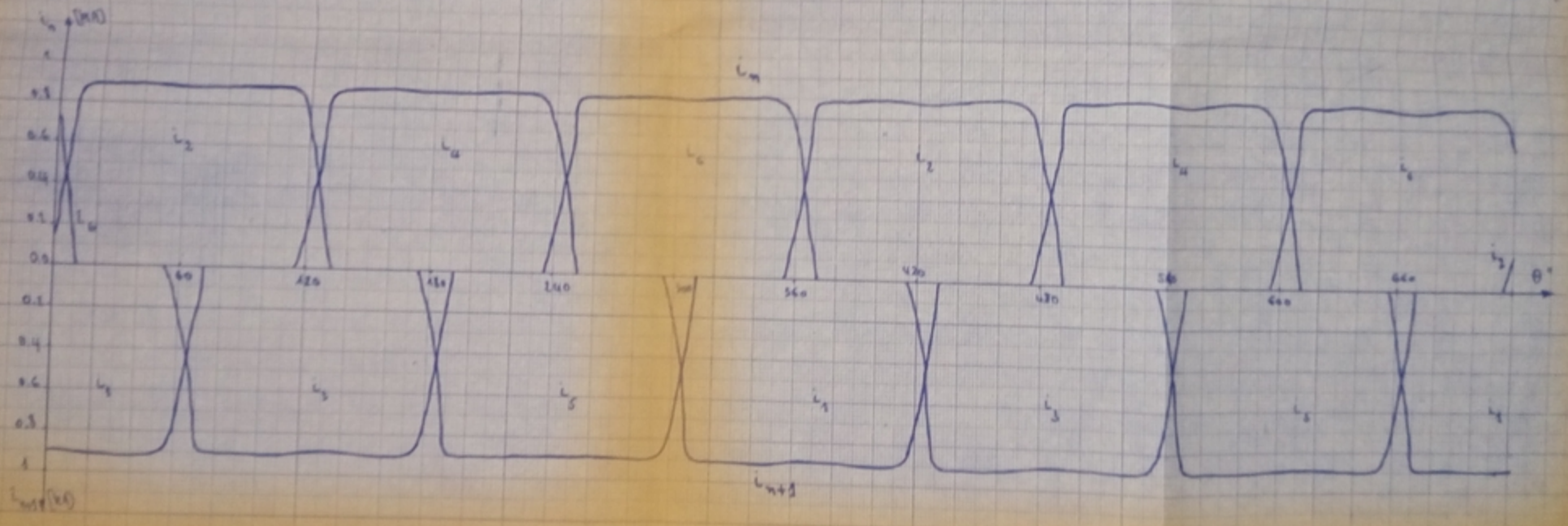
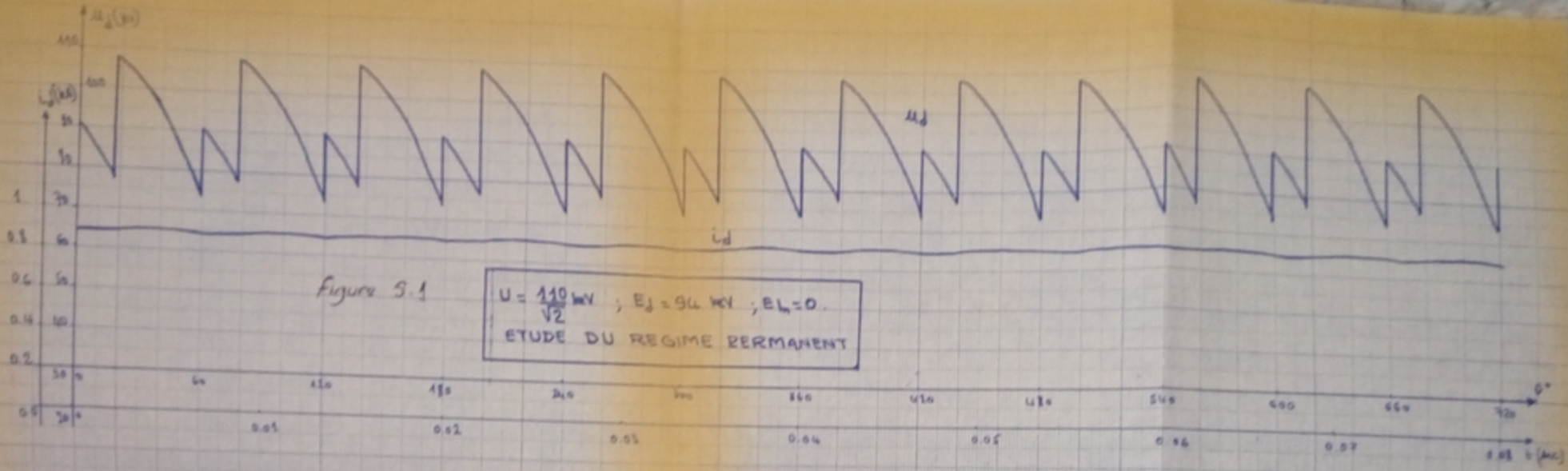
Dans ce chapitre, nous exploiterons les résultats obtenus.

### 5.1. - Régime permanent $E_m = 0$

Le but essentiel de cette étude est de vérifier le fonctionnement du programme vu que ce régime est normal et ne diffère en rien du cas bien connu. Les courbes de tension et courant redressés ainsi que les courants des soupapes sont représentées sur la figure 5.1.

La valeur moyenne de la tension redressée est de  $90 \text{ kV}$  ; le courant redressé de  $900 \text{ A}$  est pratiquement lisse.

L'angle de commutation  $\gamma = 15^\circ$  ; le redresseur fonctionne en régime 2.3. soupapes.



### 5.2. - Régime permanent $E_m = 45$ kV

L'existence de la f.c.e.m. sinusoïdale provoque des changements dans le fonctionnement du redresseur. Les courbes de tension et du courant redressés sont modulées par une sinusoïde de fréquence égale à celle de la f.c.e.m. soit 50 Hz.

Nous apercevons une certaine non symétrie interne dans le fonctionnement du pont.

Les courants des soupapes sont inégaux de même que les angles de commutation entre les différentes soupapes ( $\gamma_{6-2} = 20^\circ$  ;  $\gamma_{1-3} = 14^\circ$  ;  $\gamma_{2-4} = 19^\circ$  ;  $\gamma_{3-5} = 18^\circ$  etc...)

On peut conclure que l'apparition de la f.c.e.m.  $E_m < E_d$  ne provoque pas de changements radicaux dans le fonctionnement du redresseur.

Les courbes représentatives de ce cas de fonctionnement sont illustrées par la figure 5.2.

### 5.3. - Régime permanent $E_m = 110$ kV

Dans ce régime la non symétrie interne est plus accentuée.

Le courant redressé varie de 460 à 1080 ampères. La modulation de la courbe de la tension redressée est aussi plus accentuée.

Les courants des soupapes diffèrent considérablement la valeur moyenne du courant de la soupape S3 est égale à 160 A environ tandis que celle de la soupape S6 est de 345 A. Malgré l'existence de la f.c.e.m. de 100 kV, le redresseur reste en régime 2.3.

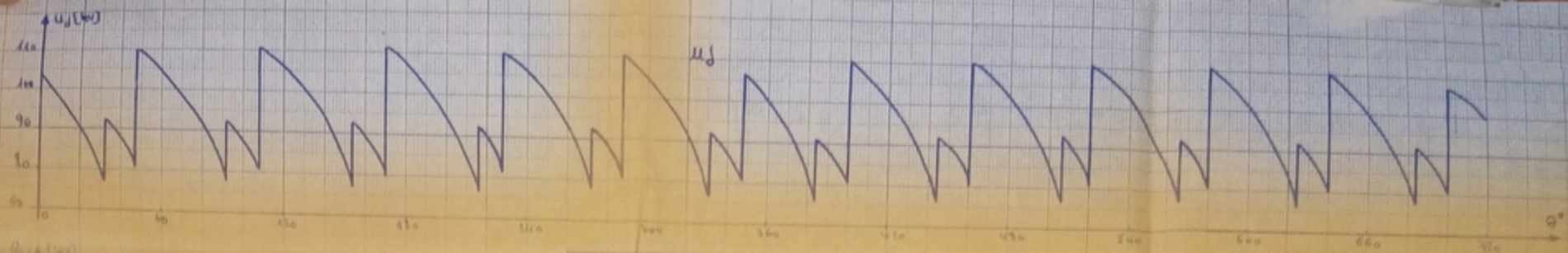
Les courbes de tension, courants redressés, f.c.e.m. et courants des soupapes sont représentées par la figure 5.3.

### 5.4. - Régime transitoire Apparition de $E_m = 100$ kV

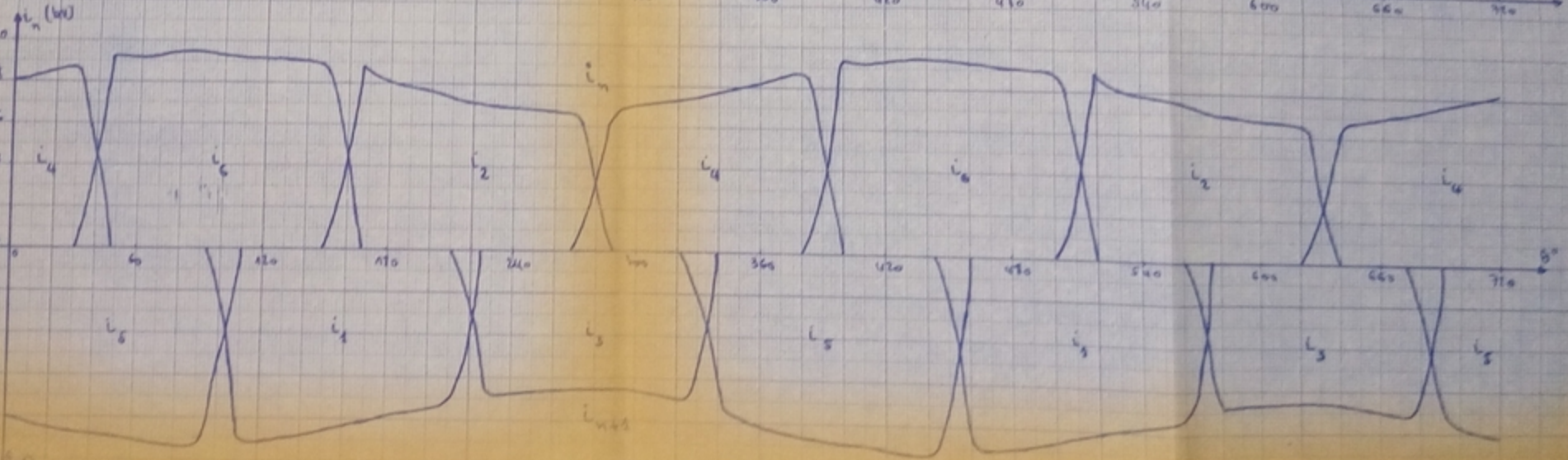
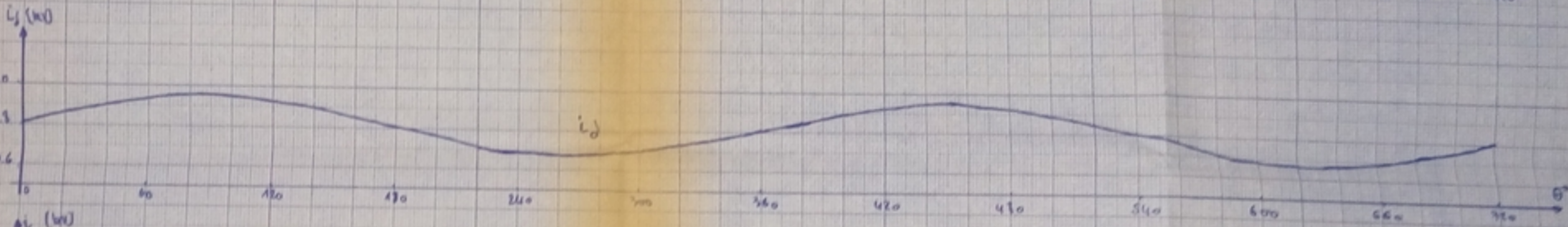
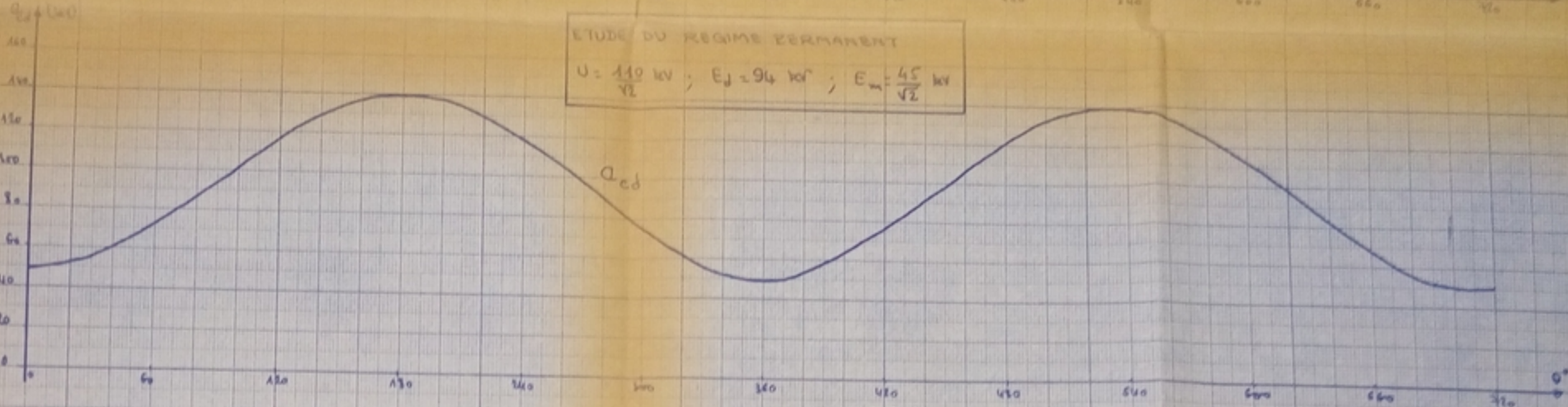
Dans cette étude, le redresseur fonctionnait en régime normal jusqu'à  $T = 0,01$  seconde. A cet instant, la f.c.e.m.  $E_m = 100$  kV apparaît ce qui provoque un régime transitoire.

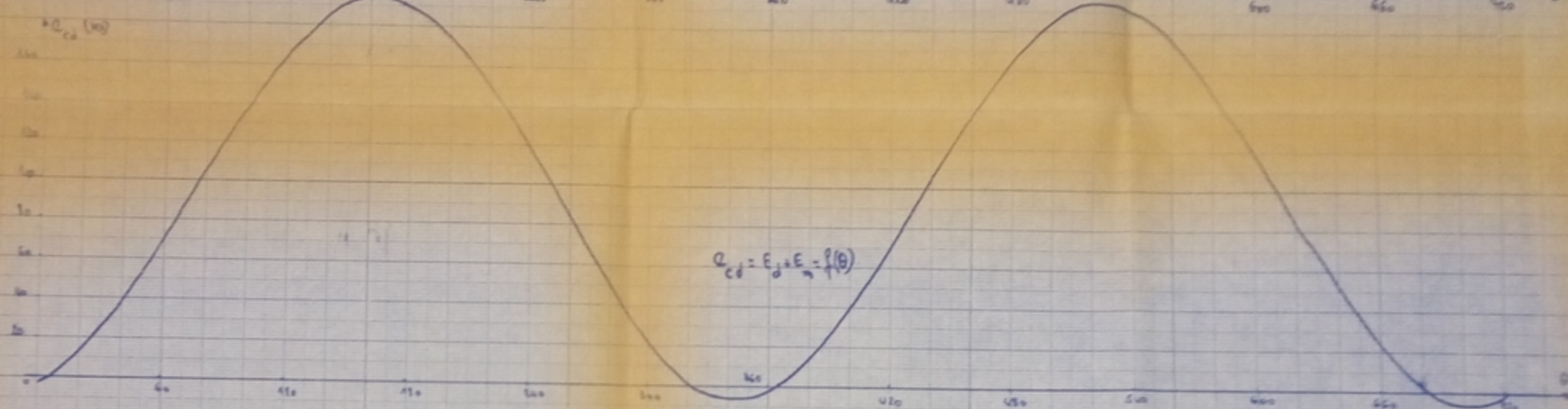
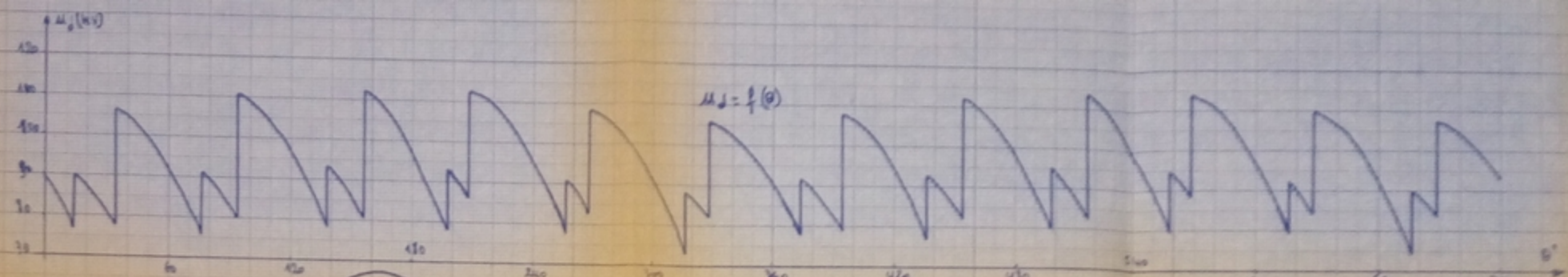
Vu que la phase initiale de  $E_m$  est égale à  $\pi$  le courant redressé et les courants des soupapes augmentent assez rapidement (il passe au bout d'une période de 0,9 à 1,5 kA) On remarque aussi la variation du courant  $i_d$  de 0,6 à 1,5 kA. Le nouveau régime permanent s'établit au bout de 0,2 secondes. Après disparition de la f.c.e.m.  $E_m$ , le retour au régime initial s'effectue avec la même constante de temps. Durant tout l'intervalle de temps étudié, le redresseur reste en régime 2.3. soupapes.

Les courbes sont représentées sur la fig. 5.4.

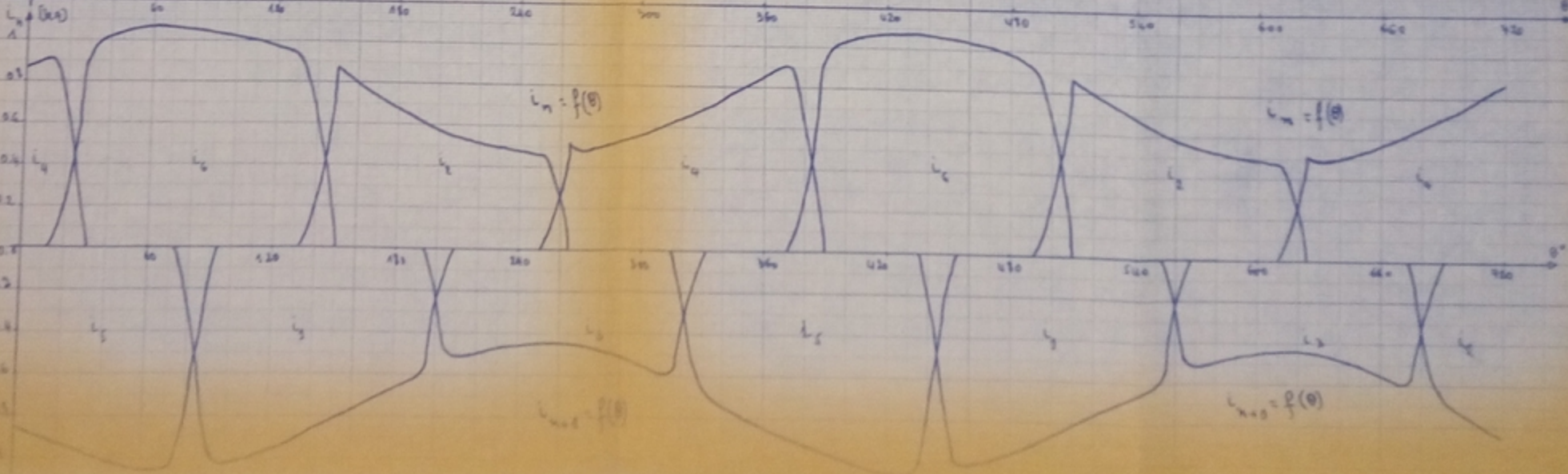
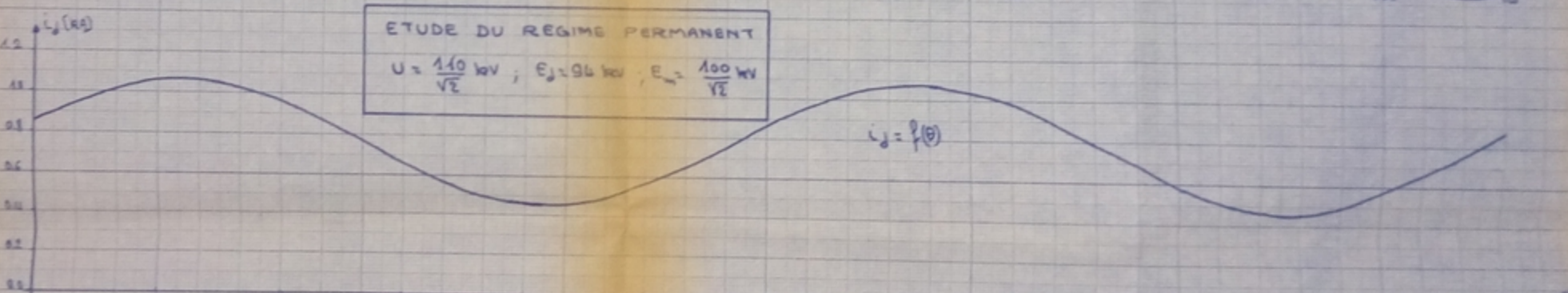


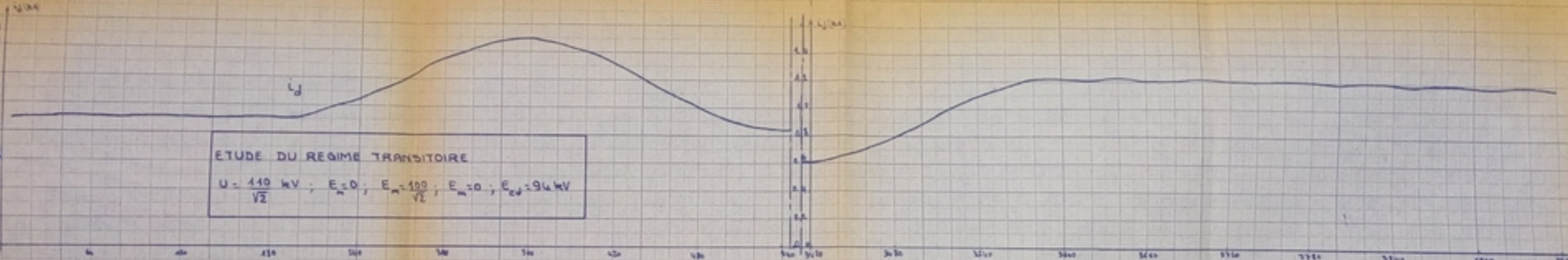
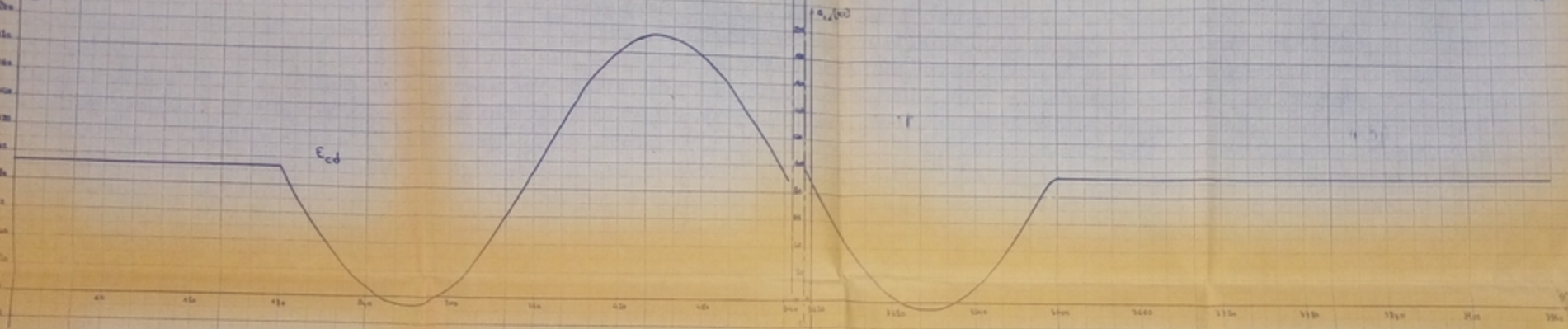
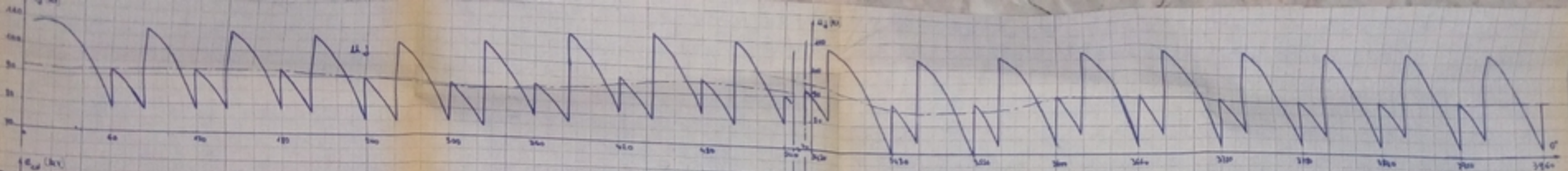
ETUDE DU REGIME PERMANENT  
 $U = \frac{110}{\sqrt{2}}$  kV ;  $E_d = 94$  kV ;  $E_m = \frac{45}{\sqrt{2}}$  kV



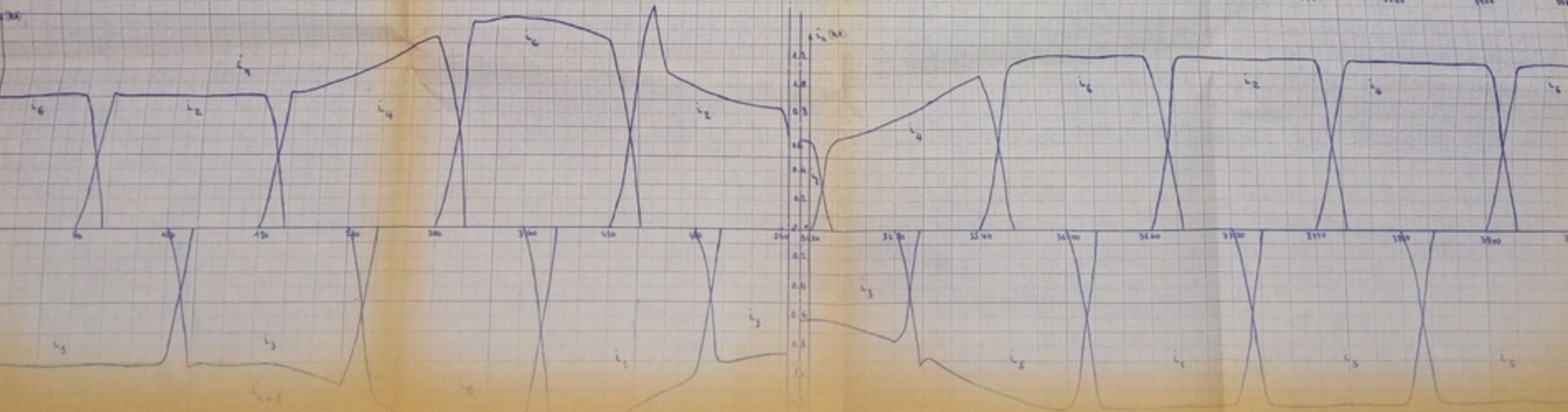


ETUDE DU REGIME PERMANENT  
 $U = \frac{110}{\sqrt{2}}$  kV ;  $E_d = 96$  kV ;  $E_m = \frac{100}{\sqrt{2}}$  kV





ETUDE DU REGIME TRANSITOIRE  
 $U = \frac{110}{\sqrt{2}} \text{ kV}$ ;  $E_m = 0$ ;  $E_m = \frac{100}{\sqrt{2}}$ ;  $E_m = 0$ ;  $E_{cd} = 94 \text{ kV}$



constaté que la demi onde négative de  $E_m$  engendre une diminution sensible du courant redressé.

Il fallait attendre que l'apparition de la f.c.e.m. plus importante peut provoquer le blocage complet du pont. Pour vérifier cette hypothèse nous avons effectué l'étude faisant intervenir brusquement une f.c.e.m.  $E_m = 160$  kV.

Les résultats de cette étude sont représentées sur la fig. 5.5.

On remarque que l'application d'une demi onde positive de  $E_m$  provoque une diminution rapide du courant redressé. Au bout d'un tiers de période, le courant redressé s'annule et le redresseur reste entièrement bloqué pendant  $30^\circ$ .

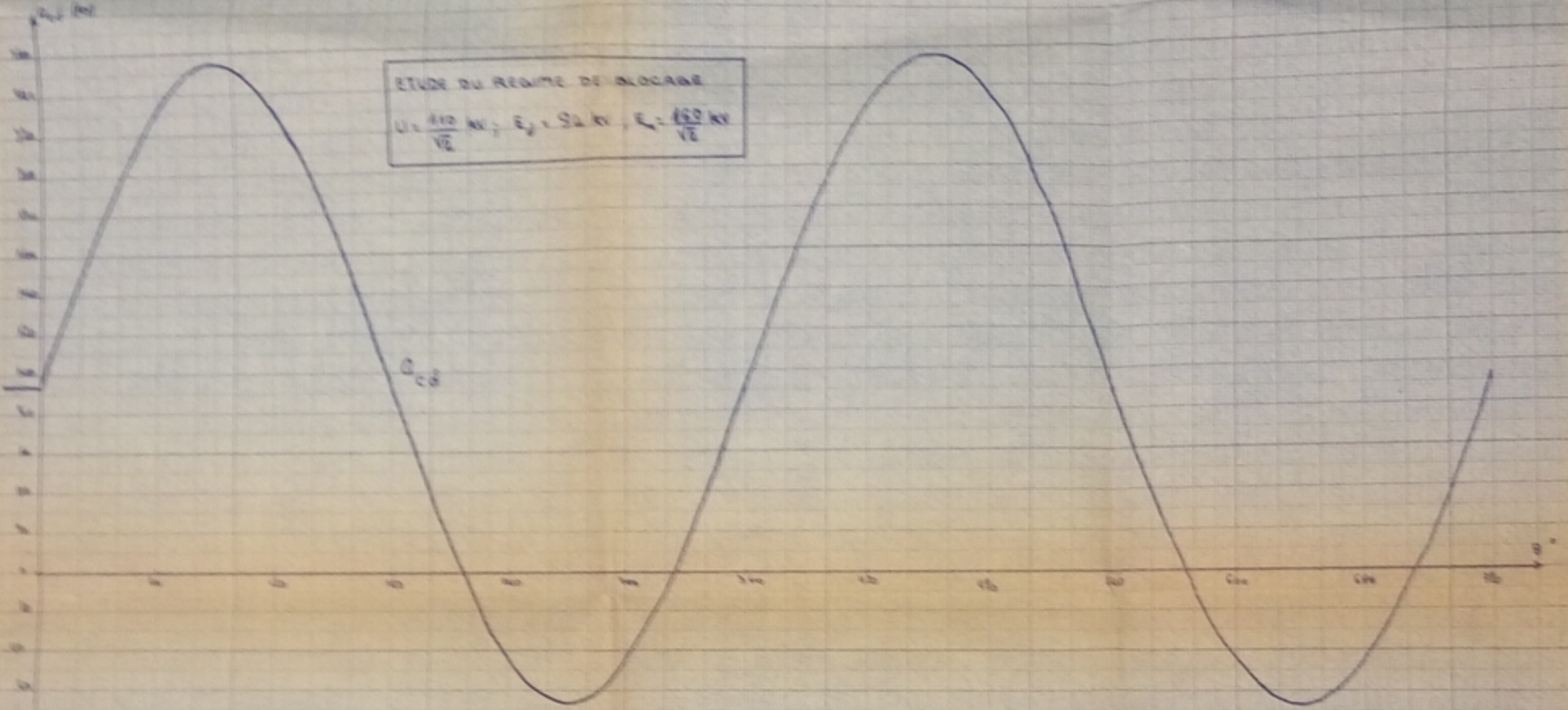
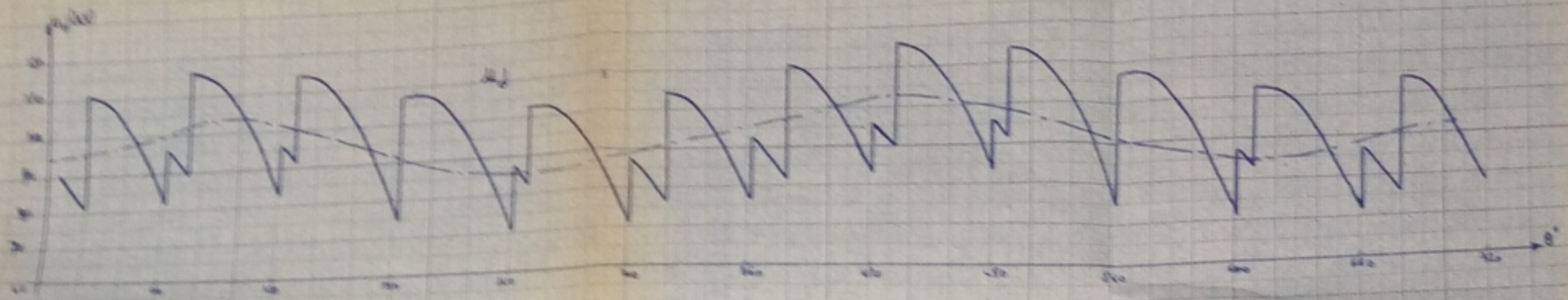
La diminution de la valeur instantanée de la f.c.e.m. permet au redresseur de s'allumer de nouveau et de reprendre le courant id assez grand ( $i_d = 1$  kA.)

A la demi onde positive suivante, le redresseur ne se bloque pas, ce qui peut être expliqué par la valeur importante de l'inductance de lissage  $X_d$  et par la valeur considérable du courant redressé pré-existant. Ce régime est caractérisé par une non symétrie interne très accentuée. Les courants des soupapes sont totalement différents.

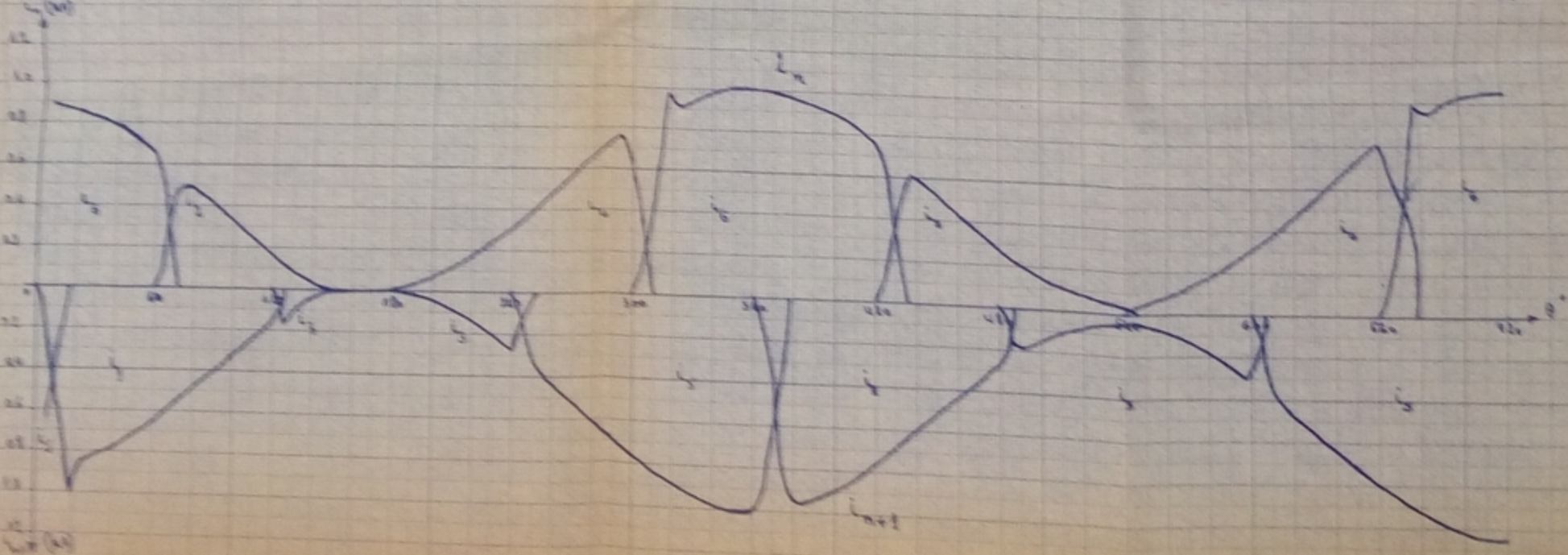
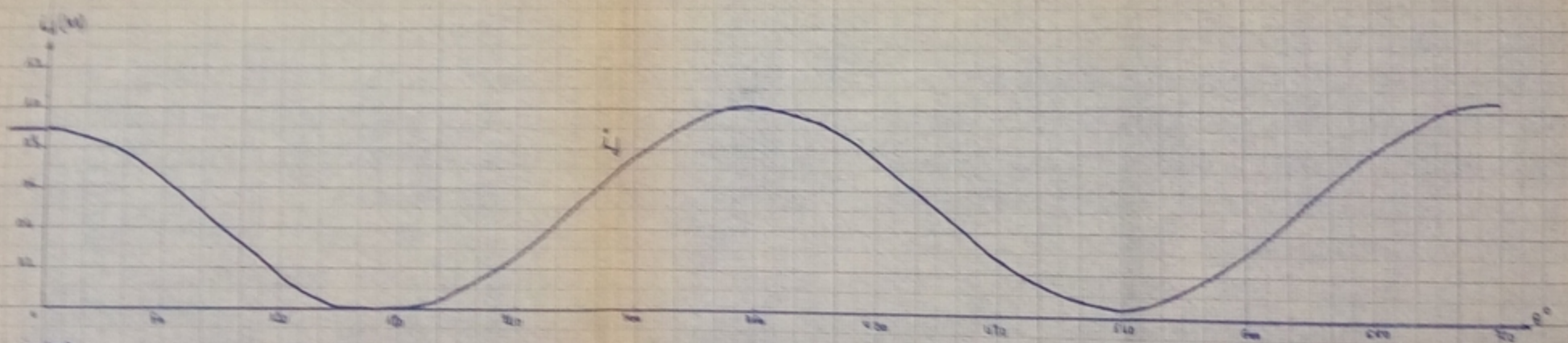
L'angle  $\gamma$  varie durant une période de  $4$  à  $18^\circ$

On peut s'attendre à ce que l'augmentation de  $E_m$  jusqu'aux environs de  $200$  kV provoquera l'existence de l'intervalle de blocage même en régime permanent.





ETUDE DU REGIME DE BLOCAGE  
 $U_c = \frac{410 \text{ KV}}{\sqrt{2}}$ ;  $E_c = 52 \text{ KV}$ ;  $E_c = \frac{450 \text{ KV}}{\sqrt{2}}$



## CONCLUSION

Dans l'industrie électroénergétique actuelle, la place des convertisseurs statiques devient de plus en plus large. Cela nécessite d'approfondir les études théoriques et appliquées du fonctionnement du convertisseur surtout en régimes particuliers que la théorie classique ne couvre pas. Notre étude consiste à élaborer un modèle mathématique permettant l'étude du fonctionnement du redresseur triphasé en pont dans le cas où le circuit extérieur renferme une force contre électromotrice alternative.

Le modèle proposé est assez général étant donné qu'il permet d'étudier tous les régimes permanents et transitoires en cas de :

- N'importe quelle valeur de la charge (du fonctionnement à vide ou fonctionnement en court circuit).
- Différentes formes de la Force contre électromotrice alternative ;
- Différents types de redresseurs (commandé ou non commandé).

Le programme prévoit la sortie des paramètres suivants :

- Tension et courant redressés
- Courants des soupapes
- L'angle de retard d'amorçage éventuel des différentes soupapes.

Pour faciliter l'analyse des résultats, on imprime le temps en secondes et en degrés électriques.

Le passage d'un régime à un autre est accompagné de l'étiquette correspondante.

Le programme de calcul établi en langue FORTRAN IV est facilement applicable par simples versions (assignations) à n'importe quel ordinateur digital de moyenne puissance supérieure ou égale à 65 Cores.

```

1. * IOCS.(CARD,1132PRINTER)
2. * ONE WORD INTEGERS
3. * LIST ALL
4. C PROMOTEUR STRIAPAN VALENTINE
5. C NAIT SAADA A'THESE DE FIN D'ETUDES'
6. C SIMULATION MATHETIQUE ET ETUDE DE FONCTIONNEMENT
7. C D'UN REDRESSEUR TRIPHASE EN REGIME PARTICULIER
8. C (CAS D'UNE FORCE CONTRE-ELECTROMETRIQUE ALTERNATIVE).
9. READ(105,100) SELF, SELFD, RES, RESD, W
10. 100 FORMAT (F8.5,F4.1,F5.2,F4.1,F5.0)
11. C CONDITIONS INITIALES
12. Y1=0.
13. Y2=1.
14. Y3=1.
15. L11=1
16. L21=1
17. L31=1
18. L41=1
19. L51=1
20. K=1
21. N=1
22. M=1
23. TEMPO=0
24. TLIM=0.3
25. H=0.00011112
26. ALFA=15'
27. US=110
28. ED=94
29. EM=0
30. TCC1=0.2
31. TCC2=0.2
32. SELF=0.022
33. TRAD=W*TEMPO
34. HRAD=H*W
35. SELF1=SELFD/SELF
36. WRITE (108,101)SELF, SELFD, RES, RESD, ALFA
37. WRITE (108,101)US, ED, EM
38. 101 FORMAT (2X, 'L=', F8.5, 1X, 'LD=', F4.1, 1X, 'R=', F5.2, 1X, 'ED=',
39. SF4.1, 1X, 'ALFA=', F5.1)

```

```

40.   I02  FORMAT(15X,'US=',F6.1,F5.0,2X,'ED=',F5.0,2X,'EM=',F5.0)
41.      PRINT 900
42.   900  FORMAT(5X,6HT(SEC),5X,2HID,6X,2HUD,7X,3HIT1,5X,3HIT2,5X,
43.      S3HIT3,5X,3HIT4,5X,3HIT5,5X,3HIT6,6X,3HECD,3X,7HT(DEGR))
44.   C    CHOIX DE L'ETAT DU CONVERTISSEUR
45.   C    COMMUTATION PRECEDENTE EST-ELLE TERMINEE
46.      41  IF(Y2-Y3)10,11,11
47.      10  L21=1
48.          IF(L11=1) 12,13,12
49.      13  L11=5
50.          L31=1
51.          TD=TEMPO*180./0.01
52.          PRINT 200
53.   200  FORMAT (2X,20H REGIME A 4 SOUPAPES)
54.          WRITE (108,104) TEMPO,TD
55.   104  FORMAT (20X,'T=',F9.6,10X,'TDE=',F7.1)
56.          A11=-H*RES/SELF
57.          A12=0
58.          A13=-H*RES/SELF-H*RESD/SELD
59.          A14=H/(3.*SELF)
60.          A15=H*2./(3.*SELF)
61.          A16=-H/SELD
62.          A21=0
63.          A22=A11
64.          A23=0
65.          A24=A14
66.          A25=A14
67.          A26=0
68.          A31=0
69.          A32=0
70.          A33=-H*(RESD/SELD)
71.          A34=0
72.          A35=0
73.          A36=A16
74.          GOTO 31
75.   12  L31=1
76.          GOTO 31
77.   11  L11=1.
78.          Y2=Y3

```

```

79.      C   COMMUTATION DERNIERE EST-ELLE TERMINEE
80.      IF(Y1-Y3) I4,15,15
81.      I4  K4= 4.
82.      IF(L21-1.)16,17,16
83.      17  L21=5.
84.      L31=1.
85.      TD= TEMPO*180./0.01
86.      PRINT 300
87.      300  FORMAT(2X,20H REGIME A 3 SOUPAPES
88.      WRITE (108,99) TEMPO,TD
89.      99   FORMAT (20X,'T=',F9.6,10X,'TDE=',F7.1)
90.      D=3.*SELF + 2.*SELFD
91.      A11 = -H* (RES/SELF)
92.      A12 = -H*RES*(3.+SELF1)/D
93.      A13 = H*RES/SELF-H*RES/D
94.      A14 = H* (2.+ SELF1)/D
95.      A15 = H* (1.+ SELF1)/D
96.      A16 = -H/D
97.      A21 = 0.
98.      A22= -H*3.*RES/D
99.      A23 =-H*2.*RES/D
100.     A24 = H/D
101.     A25 = -H/D
102.     A26 = -H*2./D
103.     A31 = 0.
104.     A32 = A22
105.     A33 = A23
106.     A34 = A24
107.     A35 = A25
108.     A36 = A26
109.     GOTO 31
110.     16  L 31 = 1.
111.     GOTO 31
112.     15  Y1 = Y3
113.     IF (L31 - 1.)18,19,18
114.     19  L21 = 1.
115.     L31 = 5.
116.     TD = TEMPO *180./0.01

```

```

117.          PRINT 400
118.    400    FORMAT (2X,20H REGIME A 2 SOUPAPES)
119.          WRITE (108,106) TEMPO, TD
120.    106    FORMAT (20X, 'T=',F9.6,10X, 'TDE = ',F7.1)
121.          A11 = -H*RES/(2.*SELF + SELFD)
122.          A12 = -H*2.*RES/ (2.*SELF + SELFD)
123.          A13 = H" (RES - RESD)/(2.*SELF + SELFD)
124.          A14 = H/(2.*SELF + SELFD)
125.          A15.= 0.
126.          A16 = -H/(2.*SELF + SELFD)
127.          A21 = A11
128.          A22 = A12
129.          A23 = A13
130.          A24 = A14
131.          A25 = A15
132.          A26 = A16
133.          A31 = A11
134.          A32 = A12
135.          A33 = A13
136.          A34 = A14
137.          A35 = A15
138.          A36 = A16
139.          GOTO 31
140.    18    L21 = 1
141.          GOTO 31
142.    C     RESOLUTION DU SYSTEME
143.    C     CALCUL DES COEFFICIENTS DE RUNGE KUTTA
144.    C     CALCUL DES PREMIERS COEFFICIENTS
145.    31    G1 = TRAD + ALFA * 3.14/180. + 1.047
146.          G2 = TRAD + ALFA * 3.14/180. - 1.047
147.          AK11 = A11 * Y1+A12* Y2+A13 *Y3 + A14 * US* SIN (G1)
148.          S+A15*US*SIN(G2)+A16*(ED+EM*SIN (W*TEMPO))
149.          AK21 = A21 * Y1+A22* Y2+A23 *Y3 + A24 * US* SIN (G1)
150.          S+A25*US*SIN(G2)+A26*(ED+EM*SIN (W*TEMPO))
151.          AK31 = A31 * Y1+A32* Y2+A33 *Y3 + A34 * US* SIN (G1)
152.          S+A35*US*SIN(G2)+A36*(ED+EM*SIN (W*TEMPO))
153.          CALCUL DES 2EMES COEFFICIENTS

```

154.  $AK12 = A11*(Y1*AK11/2.)+A12*(Y2+AK21/2.) + A13 *(Y3+AK31/2.)$   
 155.  $S+A14*US*SIN (G1+HRAD/2.)+A15*US*SIN(G2+HRAD/2.) +A16*(ED+$   
 156.  $SEM*SIN(W*TEMPO+HRAD/2.))$   
 157.  $AK22 = A21*(Y1+AK11/2.)+A22*(Y2+AK21/2.) + A23*(Y3+AK31/2.)$   
 158.  $S+A24*US*SIN (G1+HRAD/2.)+A25*US*SIN(G2+HRAD/2.) +A26*(ED+$   
 159.  $SEM*SIN(W*TEMPO+HRAD/2.))$   
 160.  $AK32 = A31*(Y1+AK11/2.)+A32*(Y2+AK21/2.) + A33*(Y3+AK31/2.)$   
 161.  $S+A34*US*SIN (G1+HRAD/2.)+A35*US*SIN(G2+HRAD/2.)+A36*(ED+$   
 162.  $SEM*SIN(W*TEMPO + HRAD/2.))$   
 163. C CALCUL DES 3EMES COEFFICIENTS  
 164.  $AK13 = A11*(Y1 + AK12/2.)+A12*(Y2+AK22/2.)+A13*(Y3+AK32/2.)$   
 165.  $S+A14*US*SIN(G1+HRAD/2.)+A15*US*SIN(G2+HRAD/2.)+A16*(ED+EM*$   
 166.  $SSIN(W*TEMPO+HRAD/2.))$   
 167.  $AK23 = A21*(Y1 + AK12/2.)+A22*(Y2+AK22/2.)+A23*(Y3+AK32/2.)$   
 168.  $S+A24*US*SIN(G1+HRAD/2.)+A25*US*SIN(G2+HRAD/2.)+A26*(ED+EM*$   
 169.  $SSIN(W*TEMPO+HRAD/2.))$   
 170.  $AK33 = A31*(Y1 + AK12/2.)+A32*(Y2+AK22/2.)+A33*(Y3+AK32/2.)$   
 171.  $S+A34*US*SIN(G1+HRAD/2.)+A35*US*SIN(G2+HRAD/2.)+A36*(ED+EM*$   
 172.  $SSIN(W*TEMPO+HRAD/2.))$   
 173. C CALCUL DES 4EMES COEFFICIENTS  
 174.  $AK14 = A11*(Y1+AK13)+A12*(Y2+AK23)+A13*(Y3+AK33)+A14*US*$   
 175.  $SSIN (G1+HRAD)+A15*US*SIN(G2+HRAD)+A16*(ED+EM*SIN(W*TEMPO+$   
 176.  $SHRAD))$   
 177.  $AK24 = A21*(Y1+AK13)+A22*(Y2+AK23)+A23*(Y3+AK33)+A24*US*$   
 178.  $SSIN (G1+HRAD)+A25*US*SIN(G2+HRAD)+A26*(ED+EM*SIN(W*TEMPO+$   
 179.  $SHRAD))$   
 180.  $AK34 = A31*(Y1+AK13)+A32*(Y2+AK23)+A33*(Y3+AK33)+A34*US*$   
 181.  $SSIN (G1+HRAD)+A35*US*SIN(G2+HRAD)+A36*(ED+EM*SIN(W*TEMPO+$   
 182.  $SHRAD))$   
 183.  $DY1 = (AK11+2.*AK12+2.*AK13+AK14)/(16.*H)$   
 184.  $DY2 = (AK21+2.*AK22+2.*AK23+AK24)/(16.*H)$   
 185.  $DY3 = (AK31+2.*AK32+2.*AK33+AK34)/(16.*H)$   
 186.  $Y1 = Y1+DY1*H$   
 187.  $M2 = Y2+DY2*H$   
 188.  $Y3 = Y3+DY3*H$   
 189.  $IF(Y1)80,81,81$   
 190. 80  $Y1 = 0$   
 191. 81  $IF(Y2)82,83,83$   
 192. 82  $Y2 = 0$

```

190. 83 IF(Y3)84,85,85
191. 84 Y3 = 0
192. 85 K4 = 6.
193.      TEMPO = TEMPO + H
194.      TRAD = TRAD + HRAD
195.      IF(K-1)20,21,20
196. 21 IF(TRAD-1.047)22,20,20
197. 20 UT=US*SIN(TRAD-1.047+ALFA*3.14/180.)+SELF*(DY2+DY3-DY1)+RES
198.      S*(Y2+Y3-Y1)
199.      IF(UT)22,26,26
200. 26 IF(Y1-Y3)28,29,29
201. 28 TAM = (TRAD-1.047)*180./3.14
202.      Y2= Y1
203.      PRINT 500
204. 500 FORMAT (2X,26H,AMOR AGE DU 4EME THYRISTOR)
205.      WRITE(108,107)TEMPO,TEM
206. 107 FORMAT(20X,'T=',F9.6,10X,'TAM=',F5.1)
207.      GOTO 30
208. 29 TAM = (TRAD -1.047)*180./3.14
209.      PRINT 600
210. 600 FORMAT(2X,26H,AMOR AGE DU 3EME THYRISTOR)
211.      WRITE (108,109) TEMPO, TAM
212. 109 FORMAT(20X,'T=',F9.6,10X,'TAM=',F5.1)
213. 30 Y1 = 0
214.      N = N+1
215.      TRAD = TRAD - 1.047
216.      N = N-((N-1)/6)*6
217. 22 IF(M-3)32,33,32
218. 33 M = 1
219.      UD=US*SIN(TRAD+1.047+ALFA*3.14/180.)-SELF*(DY1+(2.*DY2)-DY3)
220.      S-RES*(Y1+(2.*Y2)-Y3)
221.      TDE = TEMPO * 180./0.01
222.      ECD = ED+EM*SIN(W*TEMPO)
223.      GOTO (90,91,92,93,94,95),N
224. 90 CT1 = Y1
225.      CT2 = 0.
226.      CT3 = 0.
227.      CT4 = Y3 - Y2
228.      CT5 = Y3 - Y1

```



229		CT6 = Y2
230.		GETO 96
231.	91	CT1 = Y2
232.		CT2 = Y1
233.		CT3 = 0.
234.		CT4 = 0.
235.		CT5 = Y3 - Y2
236.		CT6 = Y3 - Y1
237		GETO 96
238.	92	CT1 = Y3 - Y1
239.		CT2 = Y2
240.		CT3 = Y1
241.		CT4 = 0.
242.		CT5 = 0.
243.		CT6 = Y3 - Y2
243.		GETO 96
245.	93	CT1 = Y3 - Y2
246.		CT2 = Y3 - Y1
247.		CT3 = Y2
248.		CT4 = Y1
248.		CT5 = 0.
250.		CT6 = 0.
250.		GETO 96
251.	94	CT1 = 0.
252.		CT2 = Y3 - Y2
253.		CT3 = Y3 - Y1
254.		CT4 = Y2
256.		CT5 = Y1
257.		CT6 = 0.
258.		GETO 96
259.	95	CT1 = 0.
260.		CT2 = 0.
260.		CT3 = Y3 - Y2
261.		CT4 = Y3 - Y1
263.		CT5 = Y2
264.		CT6 = Y1
265.	96	WRITE (108,110)TEMP0,Y3,UD,CT1,CT2,CT3,CT4,CT5,CT6,ECD,TDE
266.	110	FORMAT (XX,F8.5,2X,F6.1,3X,F6.3,2X,F6.3,2X,F6.3,2X,F6.3,2X
267.		SF6.3,2X,F6.3,3X,F6.1,2X,F7.1)
268.		GETO 34

```

269. 32 M = M+1
270. 34 IF(TEMPO-TCC1) 41,36,36
271. 36 Y1 = 0.
272.      Y2 = 0.89
273.      Y3 = 0.89
274.      ED = 20.
275.      EM = 30.
276.      IF(L41 - 1) 61,62,61

277. 62 PRINT (700)

278. 700 FORMAT (20X, 20H, CHANGEMENT DE REGIME)

279.      L41 = 5.

280. 61 K4 = 5.

281.      IF(TEMPO - TCC2) 41,38,38

282. 38 Y1 = 0.
283.      Y2 = 0.89
284.      Y3 = 0.89
285.      ED = 20.
286.      EM = 100.
287.      K = 2.
288.      ALFA = 0.
289.      IF(L51-1) 63,64,63

290. 64 PRINT 800

291. 800 FORMAT (20X,24H,RETABLISSEMENT DU REGIME)

292.      L51 = 5.

293. 63 K4 = 3.

294.      IF(TEMPO -TLIM)41,40,40

295. 40 STOP

296.      END

297.      L = 0.2200      LD=1.0      R = 0.02      RD= 1.0      ALFA=15.0

```

B BIBLIOGRAPHIE

- 1 - M. DEMONVIGNIER - SOUPAPES ELECTRIQUES, REDRESSEURS, ONDULEURS  
Fasc. 1, 2, et 3.  
ECOLE SUPERIEURE D'ELECTRICITE /PARIS (1970/71)
- 2 - REGIMES DE TRANSPORT DE H.V.D.C. par A.V. POSSE  
Ed. Energia MOSCOU 1973 (en russe)
- 3 - CONFERENCE INTERNATIONALE DES GRANDS RESEAUX ELECTRIQUES A HAUTE  
TENSION - 22° Session 1968 - Tome III - PARIS
- 4 - I. KAGANOV - ELETRONIQUE INDUSTRIELLE Ed. MIR MOSCOU 1972
- 5 - V. STRIAPAN - THESE DE DOCTORAT 3ème CYCLES
- 6 - V. STRIAPAN - COURS DE CONVERTISSEURS STATIQUES  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER 1975
- 7 - OUERDANE S. et KHELIL M.S. -SIMULATION ET ETUDE D'UN REDRESSEUR  
PUISSANT EN REGIMES NON SYMETRIQUES - THESE DE FIN  
D'ETUDES ENPA 1974.
- 8 - A. MOULFI et S. RILI - MODELE MATHEMATIQUE D'UN SYSTEME DE TRANS-  
PORT D'ENERGIE EN COURANT CONTINU A HAUTE TENSION.  
THESE DE FIN D'ETUDES ENPA - JUIN 1974
- 9 - TRANSPORT D'ENERGIE A COURANT CONTINU ET ALTERNATIF N° 16  
Ed. Energia MOSCOU 1970 (en russe)
- 10 - A. ANGOT - COMPLEMENTS DE MATHEMATIQUES A L'USAGE DES INGENIEURS  
DE L'ELECTROTECHNIQUE ET DES TELECOMMUNICATIONS COLLECTION  
TECHNIQUE & SCIENTIFIQUE DU CNET - Ed. de la revue d'Optique  
PARIS 1965
- 11 - N.G.HINGORANI - "DYNAMIC SIMULATION OF H.V.D.C. TRANSMISSION SYS-  
TEME ON DIGITAL COMPUTERS I.E.E. - LONDON Tome 113 N°5 1966.