

وزارة التعليم والبحث العلمي

200

Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

الدراسة الوطنية للعدد الهندسي

المكتملة

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

Sujet

# Etude et Réalisation d'un Gradateur Triphasé

Proposé par :  
Mr B. HEMICI

Etudié par :  
TCHIER Nacer-Eddine  
REKKAB Azze-Eddine

Dirigé par :  
Mr B. HEMICI

Promotion : Juin 85

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

»O«

وزارة التعليم والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

»O«

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

**Sujet**

**Etude et Réalisation  
d'un Gradateur Triphasé**

Proposé par :  
Mr B. HEMICI

Etudié par :  
TCHIER Nacer-Eddine  
REKKAB Azze-Eddine

Dirigé par :  
Mr B. HEMICI

Promotion : Juin 85

ENP - 10, avenue Hacén Badi - EL HARRACH - ALGER



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

من أضر عن ذكر سيكر فإرب

معيث ضيقك وخشيم  
لغيا مأمور

## - الملخص -

مشروعنا هذا يهدف إلى دراسة وتحقيق غراداتور ثلاثي الطور . الذي يسمح لنا بعد ذلك رؤية الظواهر التي تظهر عند تغذيته لعمولة مختلفة ، وعند انطلاق محرك لامتواقت ثلاثي الطور .

## - Résumé -

Notre projet consiste à réaliser et étudier le comportement d'un gradateur triphasé alimentant différentes charges . Ensuite de démarrer un moteur asynchrone triphasé à cage à l'aide de ce gradateur.

## - Summary -

Our subject consists to realise and study behaviour of a three-phase SWITCHING-FED , feeding different loads . Then, to start a three-phase squirrel-cage induction motor by means of this SWITCHING-FED.

## D E D I C A C E S

*Je dédie ce humble travail*

*-A mes chers parents à qui je dois tout le respect, le dévouement, la reconnaissance pour leurs sacrifices consentis à mon égard, pour leurs conseils, leurs aide et encouragements qu'ils ont su m'apporter sur le plan moral que financier, leur compréhension qui m'a permis de franchir des grands obstacles .*

*-A mes frères et sœurs en leur souhaitant une vie harmonieuse pleine de bonheur, d'épanouissement et de réussite , je cite leurs symboles RACHIDA et mes deux nièces SABRINA et OUMMA .*

*-A toute ma famille et particulièrement mon cousin LARBI pour son soutien durant ma formation .*

*-A tous mes amis et en particulier AMMAR et FARID pour leur aide .*

*-A tous ceux qui me sont chers et qui ont souhaité un jour que je sois ainsi*

NACIR

*-A ma mère ;*

*-A mon père .*

*-A mes frères et sœurs .*

*-A tous mes amis et tous ceux qui me sont chers .*

*Je dédie ce modeste travail .*

AZZE-EDDINE

# remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre promoteur B. HEMICI pour la confiance qu'il nous a témoigné, son dévouement et son aide précieuse qu'il nous a apporté durant tout notre travail.

Nos vifs remerciements vont aussi à Mrs MAAZI, MAHMOUDI, TAHMI et MEKHALDI pour nous avoir prodigués d'utiles conseils qui nous ont permis de mener à terme notre réalisation pratique et également d'avoir accepté d'être dans notre Jury.

Que tous les professeurs qui ont contribué à notre formation trouvent ici le témoignage de toute notre sincère gratitude.

# Sommaire

introduction .....	1
1 <sup>ère</sup> PARTIE : Etude théorique du gradateur	
CHAPITRE I - Le gradateur monophasé	
1.1 Fonctionnement sur charge résistive .....	5
1.2 Calcul des courants moyen et efficace .....	6
1.3 Fonctionnement sur charge purement inductive .....	11
1.4 calcul des courants moyen et efficace .....	13
1.5 Fonctionnement sur charge inductive et résistive .....	15
1.5.1 Cas où l'angle d'amorçage $\alpha = \varphi$ .....	17
1.5.2 Cas où l'angle d'amorçage $\varphi < \alpha < \pi$ .....	17
1.5.3 Cas où l'angle d'amorçage $\alpha < \varphi$ .....	18
CHAPITRE II - Le gradateur triphasé	
2.1 Fonctionnement sur charge résistive .....	26
2.1.1 Récepteur monté en étoile symétrique sans neutre .....	26
2.1.2 Récepteur monté en triangle .....	37
2.2 Fonctionnement sur charge inductive et résistive .....	45
2.2.1 Récepteur monté en étoile symétrique sans neutre .....	45
2.2.2 Récepteur monté en triangle .....	49
2 <sup>ème</sup> PARTIE : La réalisation pratique	
CHAPITRE III Commande électronique	
Introduction .....	50
3.1 synchronisation .....	51



3.2	Génération de la dent de scie	52
3.3	Comparateur	53
3.4	Le multivibrateur astable	53
3.5	La mise en forme	55
3.6	Amplificateur de courant	56
3.7	Alimentation stabilisée	62
CHAPITRE IV Démarrage d'un moteur asynchrone à cage à l'aide d'un gradateur triphasé		
4.1	Introduction	63
4.2	Différents types de démarrage	63
4.2.1	Démarrage rotorique sur résistance	64
4.2.2	Démarrage direct	65
4.2.3	Démarrage par insertion de résistances dans le circuit statorique	65
4.2.4	Démarrage étoile-triangle	66
4.2.5	Démarrage par auto-transformateur sans coupure	66
	Conclusion	69
	Annexe	71

# INTRODUCTION

L'industrie en général a de plus en plus besoin de système à vitesse variable. La satisfaction de ce besoin pressant est actuellement réalisée grâce à l'électronique de puissance, qui a permis le remplacement des convertisseurs dynamiques volumineux, coûteux et bruyants (machines de l'électrotechnique classique) par des convertisseurs statiques.

Ces derniers sont constitués d'éléments simples de volume réduit et consommant un minimum d'énergie et qui peuvent assurer la conversion d'énergie.

Les principaux montages qui utilisent cette technique sont les suivants :

- les redresseurs à diodes
- les redresseurs à thyristors
- les gradateurs
- les hacheurs
- les onduleurs autonomes

L'objet de notre travail porte sur l'un de ces convertisseurs : Le gradateur triphasé, qui permet la variation de l'intensité du courant débité par une source d'alimentation alternative.

Les gradateurs sont utilisés depuis les débuts de l'électronique de puissance. Ils ont fait appel aux tubes à gaz du type thyatron et ignitrons dont les propriétés étaient identiques

à celles des thyristors.

Les applications concernaient alors seulement la commande de puissance des soudeuses à résistance par points et celle de l'éclairage des scènes de spectacle, dispositif connu sous le nom de jeux d'orgue. Actuellement on peut citer :

- La commande de puissance des soudeuses par résistance
- Les jeux d'orgues électriques
- La commande de vitesse des petits moteurs électriques
- Les régulateurs de tension statiques
- Les compensateurs statiques de puissance réactive
- Les dispositifs de chauffage par induction
- Le démarrage des moteurs asynchrones à cage.

Le travail qui nous a été confié, consiste à étudier et réaliser un gradateur triphasé qui sera destiné à usage didactique.

Tout au long de notre étude nous avons adopté un plan constitué de quatre chapitres

CHAPITRE I Etude du gradateur monophasé

CHAPITRE II Etude du gradateur triphasé

CHAPITRE III Commande électronique du gradateur

CHAPITRE IV Démarrage d'un moteur asynchrone à cage

à l'aide du gradateur triphasé

Pour la commande de ce gradateur nous lui avons conçu une alimentation stabilisée incorporée pour la commodité du travail.

1<sup>ere</sup> PARTIE

ETUDE THEORIQUE  
DU  
GRADATEUR

# LE GRADATEUR

Un gradateur est un interrupteur statique constitué de deux thyristors montés en tête-bêche, ou par un triac.

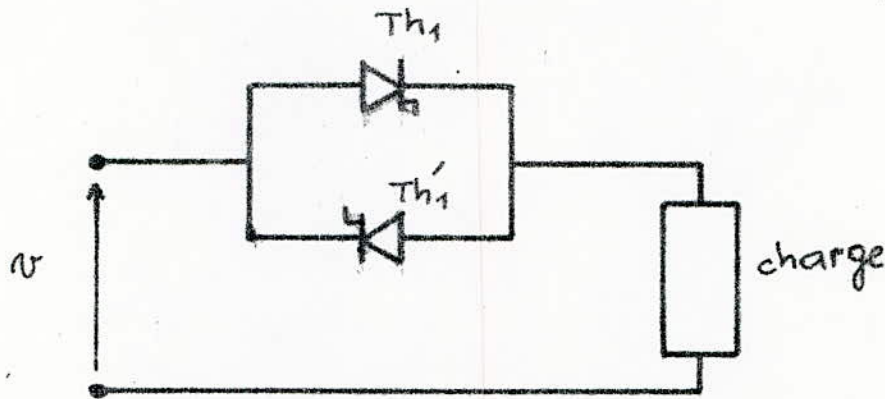
La conduction est bidirectionnelle. On n'utilisera toutefois le montage anti-parallèle que pour des puissances élevées, pour lesquelles des triacs appropriés ne sont pas disponibles.

Le gradateur est caractérisé par un fonctionnement avec phénomène de commutation naturelle, le courant dans la charge est identique à celui de l'élément redresseur contrôlable s'annulant périodiquement.

# CHAPITRE I

## le gradateur monophasé

Il est formé de deux thyristors  $Th_1, Th_1'$  montés en anti-parallèles alimentant une charge.



Quand on envoie une impulsion sur la gâchette d'un des thyristors, celui-ci se met à conduire si la tension appliquée entre son anode et sa cathode est positive puis il se bloque lorsque le courant qui le traverse s'annule.

Le fonctionnement du gradateur monophasé doit être envisagé suivant la nature de la charge.

On distingue trois cas possibles :

- 1° charge purement résistive
- 2° charge purement inductive
- 3° charge résistive et inductive

### Remarque

Les gradateurs ne sont pratiquement pas utilisés pour des charges capacitives à cause des fortes pointes de courant résultant à l'instant d'enclenchement des thyristors.

#### 1.1 Fonctionnement sur charge résistive

Quand l'un des thyristors conduit, une partie de la demi-période positive ou négative de la tension alternative d'alimentation  $v$  apparaît aux bornes de la charge  $R_{ch}$ , si les deux thyristors sont bloqués la tension aux bornes de la charge sera nulle alors l'autre partie de la tension alternative apparaît aux bornes du thyristor  $v_{Th}$ .

L'instant d'allumage des thyristors est donné par l'angle de retard  $\alpha$ , qui est repéré à partir du passage par zéro de la tension d'alimentation  $v$ .

Après l'allumage d'un des thyristors le courant  $i$  est donné par :

$$i = \frac{V_m}{R} \sin \omega t \quad 0 \leq \omega t \leq \pi$$

$$\pi + \alpha \leq \omega t \leq 2\pi$$

$V_m$  : Valeur de crête de la tension d'alimentation

$\omega$  : Pulsation de la tension d'alimentation

avec  $\omega = 2\pi f$

$f$  : Fréquence du réseau d'alimentation

Le courant  $i$  est composé de portions de sinusoïdes. Il est fourni alternativement par l'un ou l'autre des deux thyristors  $Th_1$  et  $Th_1'$ .

Pour  $\omega t = \pi$ , le courant  $i_1$  s'annule et le thyristor  $Th_1$  passe à l'état bloqué, tandis que le thyristor  $Th_2$  allumé en  $\omega t = \pi + \alpha$ , se bloque à l'instant  $\omega t = 2\pi$ .

Pendant l'intervalle  $\frac{\alpha}{\omega}$  la tension aux bornes du thyristor qui vient de se bloquer est négative, et assure ainsi un blocage sûr après l'extinction du courant.

L'inconvénient dans le cas d'une charge purement résistive est qu'il subsiste des fronts de courant, conduisant à  $\frac{di}{dt}$  théoriquement infinis; d'où la nécessité de prévoir en série avec la charge des inductances limitant la vitesse de variation du courant.

## 1.2 Calcul des courants moyen et efficace:

On suppose que la tension du réseau d'alimentation est sinusoïdale et non affectée par les commutations (impédance de source nulle).

Les chutes de tension dans les semi-conducteurs sont négligées et les commutations supposées instantanées.

$$V_m \sin \omega t = R i$$

Il est alors facile de calculer la valeur efficace  $I$  du courant, soit :



$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i^2 dt \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{V_m^2}{R^2} \sin^2 \omega t dt \\ &= \frac{V_m^2}{2\pi R^2} \left( \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi} \right) \end{aligned}$$

finalement

$$I_{\text{eff}} = \frac{V_m}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

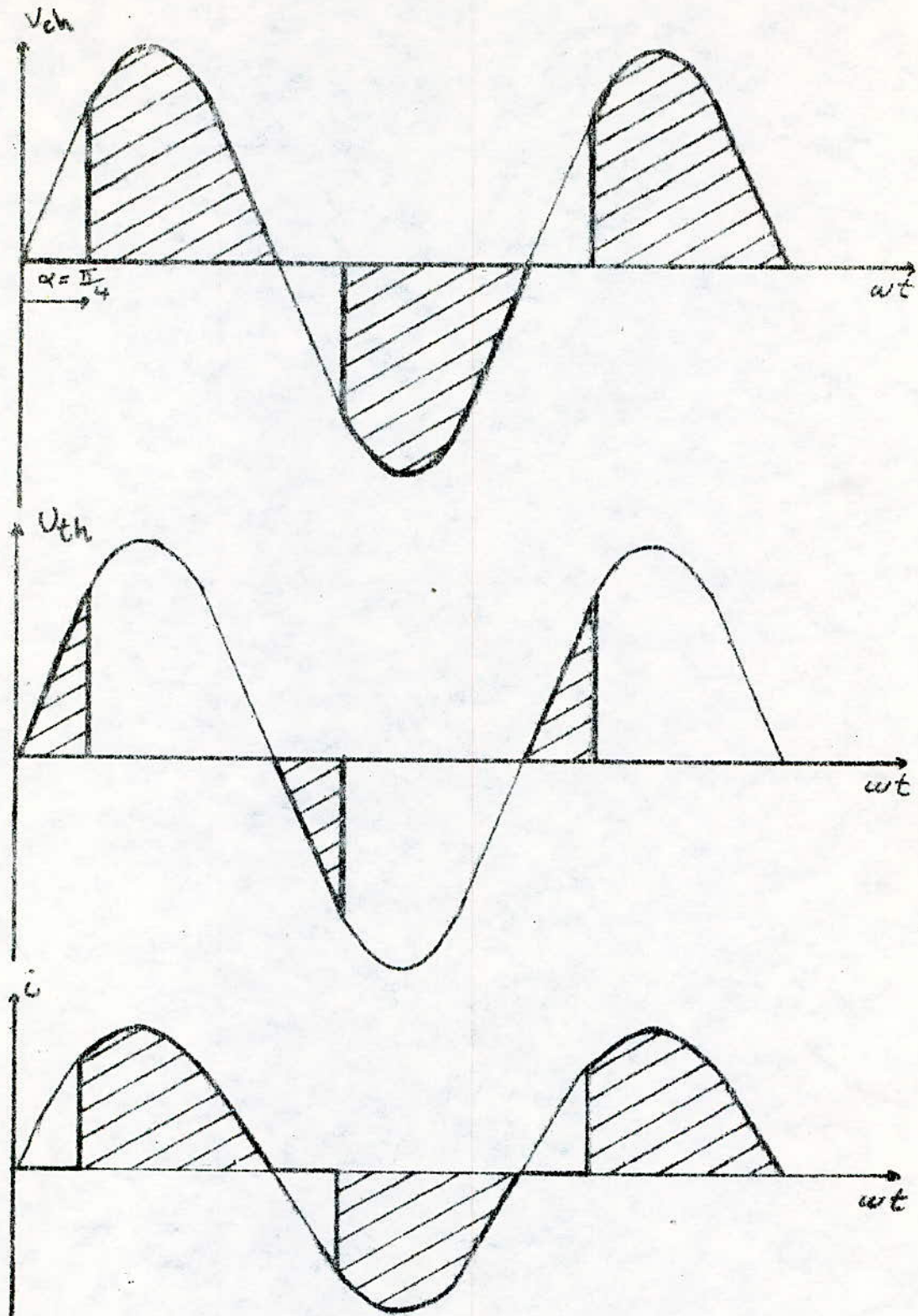
En faisant varier l'angle  $\alpha$  de zéro à  $\pi$ , on fait varier  $I$  de son maximum  $\frac{V}{R}$  à zéro.

En négligeant les inductances de limitation de  $\frac{di}{dt}$  et avec le gradateur fonctionnant avec un angle d'amorçage  $\alpha$  :

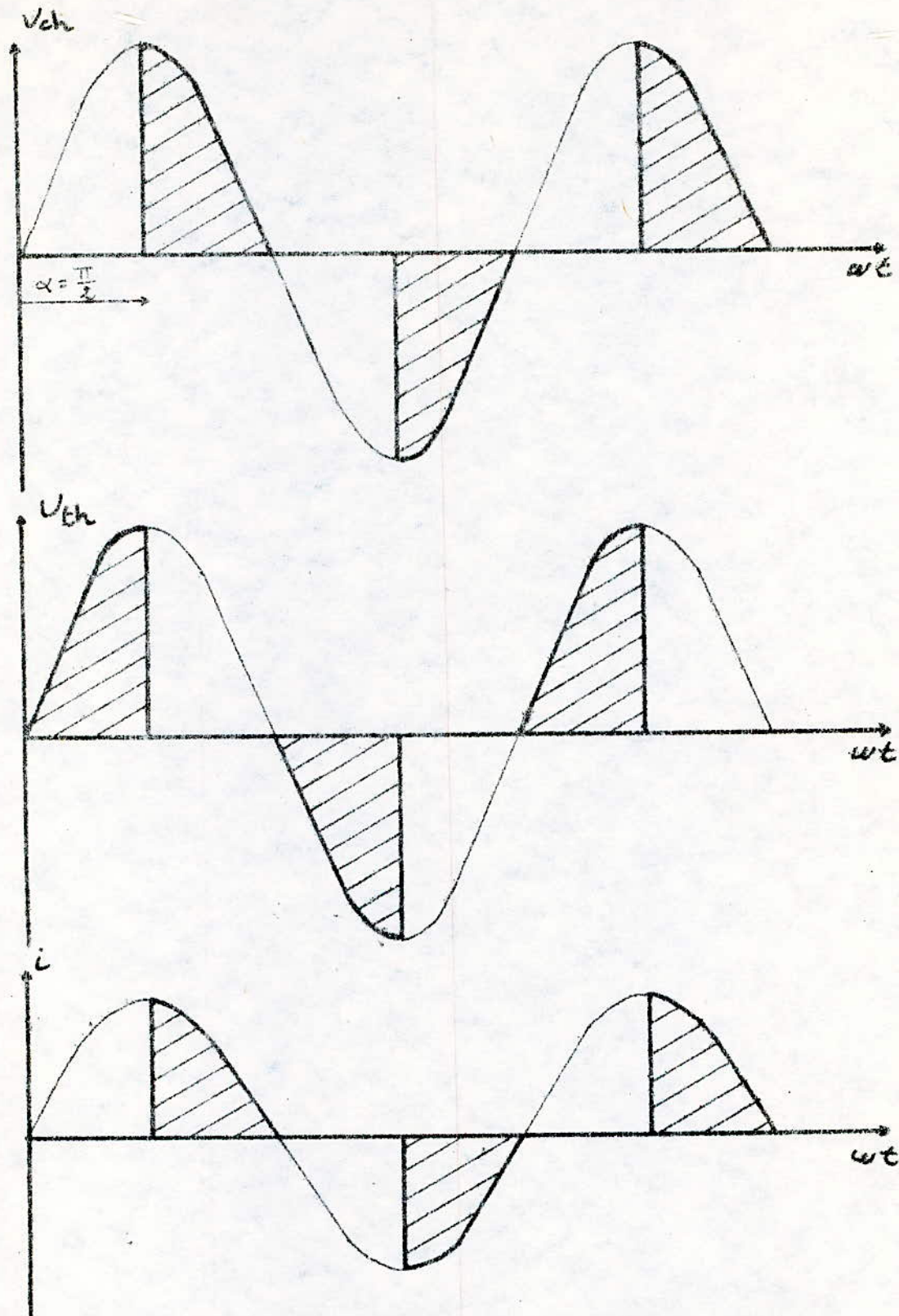
$$\begin{aligned} I_{\text{moy } \alpha} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_m \sin \omega t dt \\ &= \frac{1}{\pi} \left( -I_m \cos \omega t \right)_{\alpha}^{\pi} \end{aligned}$$

finalement

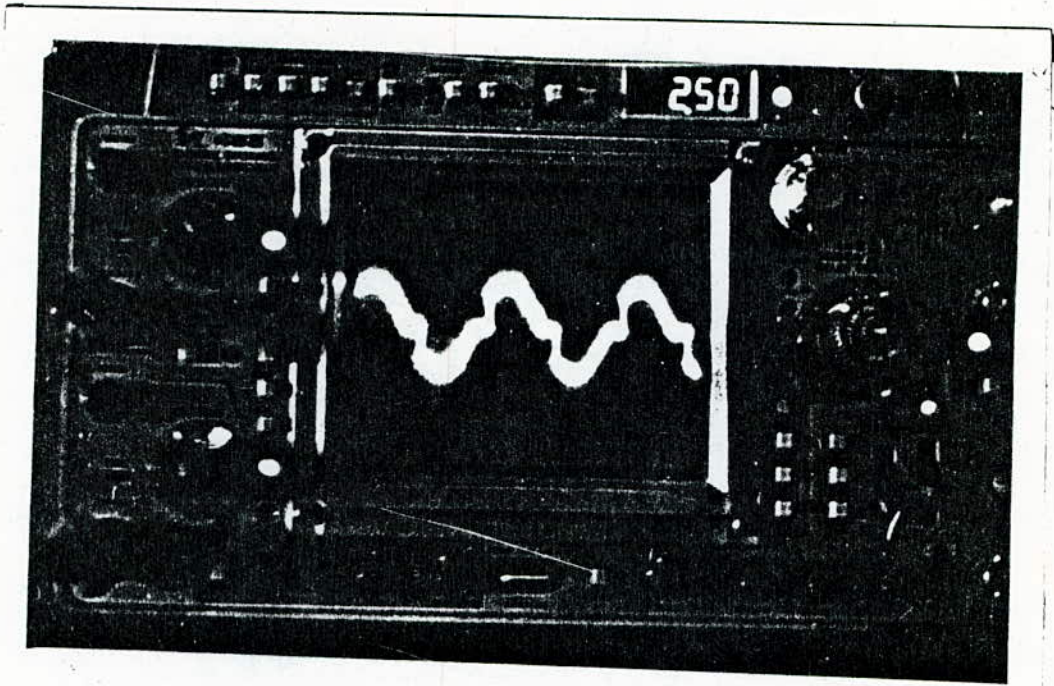
$$I_{\text{moy } \alpha} = \frac{I_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$



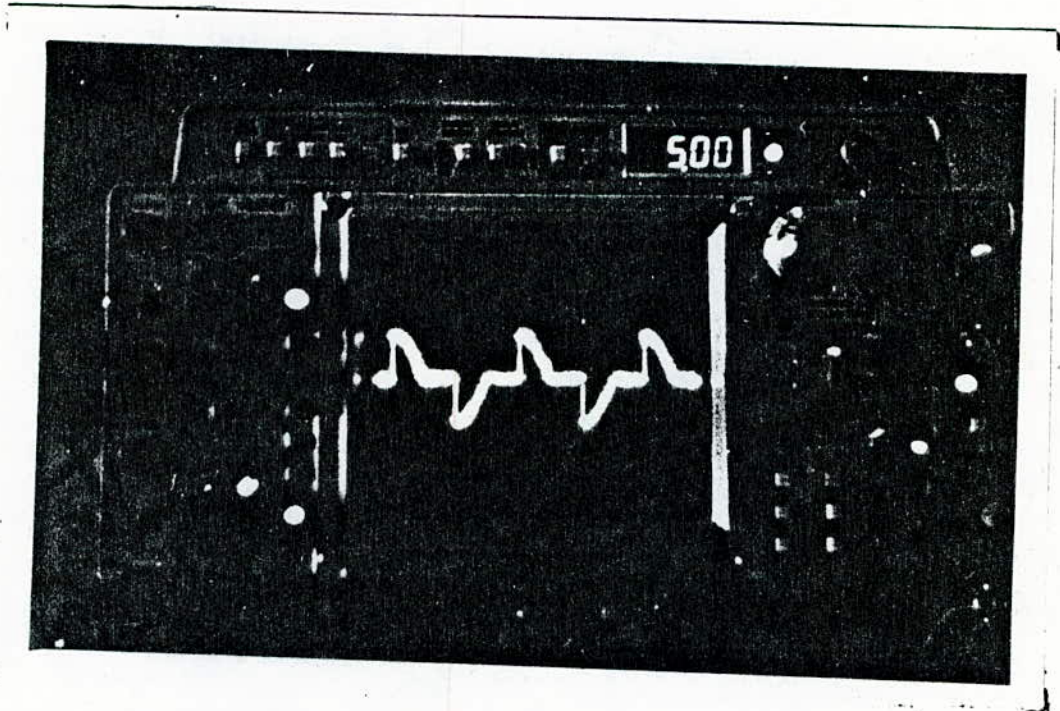
Allures de la tension et du courant aux bornes  
d'une charge purement résistive pour  $\alpha = \frac{\pi}{4}$



Allures de la tension et du courant aux bornes d'un récepteur purement résistif pour  $\alpha = \frac{\pi}{2}$



Allure de la tension aux bornes d'une charge purement résistive pour  $\alpha = \frac{\pi}{4}$



Allure de la tension aux bornes d'une charge purement résistive pour  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ .

### 1.3 Fonctionnement sur charge purement inductive

Après l'allumage d'un thyristor, le courant  $i$  suit l'allure de la solution de l'équation différentielle suivante

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

d'où en intégrant, on obtient :

$$i = - \frac{V_m}{L\omega} \cos \omega t + I_0$$

On détermine la constante d'intégration  $I_0$ , à partir des conditions à l'origine, à l'instant où  $Th_1$  s'allume en  $\omega t = \alpha$ , le courant  $i$  est alors nul.

On en tire 
$$I_0 = \frac{V_m}{L\omega} \cos \alpha$$

d'où l'expression finale du courant

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

Le courant s'annule à  $\omega t = \beta$  et le thyristor  $Th_1$  se bloque.

On calcule l'angle d'extinction en posant  $i=0$  et  $\omega t = \beta$  d'où  $\cos \alpha = \cos \beta$

On obtient, mise à part la solution triviale  $\beta = \alpha$ ,  $\beta = 2\pi - \alpha$  pendant la deuxième période on allume le thyristor  $Th_1'$  à l'instant  $\omega t = \pi + \alpha$ , celui-ci s'éteint alors à  $\omega t = 3\pi - \alpha$ .

Pour que le montage puisse fonctionner correctement avec une charge purement inductive, il faut que  $\beta \leq \pi + \alpha$ , ce qui implique que l'angle d'amorçage doit être compris dans le domaine  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$ .

Dans le cas où  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$  le deuxième thyristor rate l'allumage, on se trouvera dans un régime à courant continu et le gradateur fonctionne comme un montage redresseur simple alternance, ce qui aura pour conséquence un court circuit.

Le courant augmente rapidement en un laps de temps réduit, ce qui provoquera une sur-intensité.

Pour éviter ce régime, on applique aux gâchettes des thyristors des impulsions de longues durées, dans notre cas on a utilisé un train d'impulsions de durée  $> \varphi$ .

### Remarque

Pour avoir un courant purement sinusoïdal, il suffit d'allumer les thyristors à chaque demi-période avec un angle d'amorçage  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ .

#### 1.4 Calcul des courants moyen et efficace

$$\begin{aligned}
 I_{\text{eff}}^2 &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} i^2 dt = \frac{V_m^2}{L^2 \omega^2} \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos \alpha - \cos \omega t)^2 dt \\
 &= \frac{V_m^2}{L^2 \omega^2} \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos^2 \alpha + \cos^2 \omega t - 2 \cos \alpha \cos \omega t) dt \\
 &= \frac{V_m^2}{L^2 \omega^2} \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \left( \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t) - 2 \cos \alpha \cos \omega t \right) dt
 \end{aligned}$$

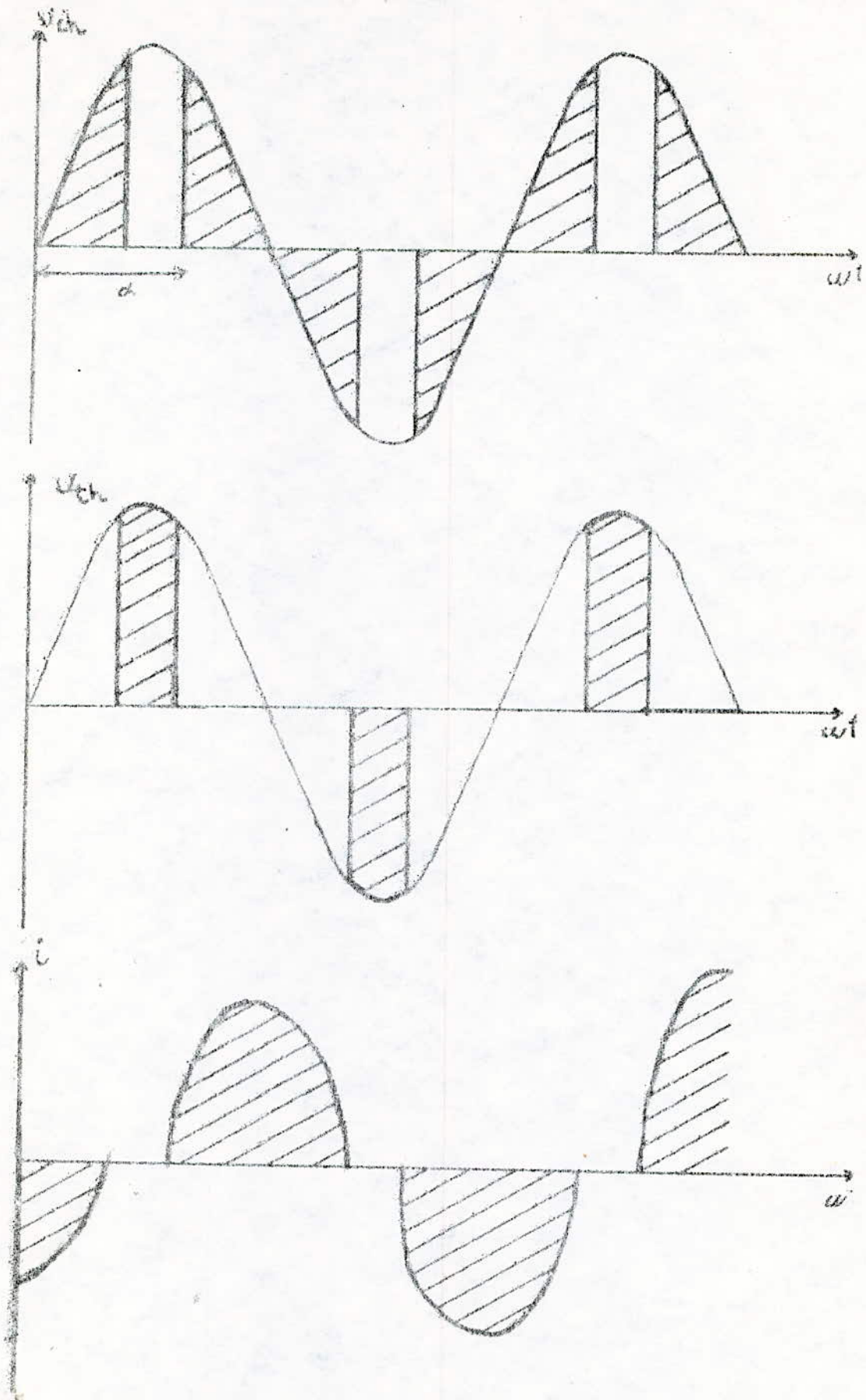
d'où l'expression finale du courant efficace

$$I_{\text{eff}} = \frac{V_m}{\sqrt{2} L \omega} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha)(2 + \cos 2\alpha) + 3 \sin 2\alpha}{\pi}}$$

$$I_{\text{moy}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} i dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos \alpha - \cos \omega t) dt$$

finalement

$$I_{\text{moy}} = \frac{2}{\pi} \frac{V_m}{L \omega} (\sin \alpha + (\pi - \alpha) \cos \alpha)$$



Allures de la tension et du courant aux bornes d'une charge purement inductive pour un angle d'amorçage



### 1.5 Fonctionnement sur charge inductive et résistive

Dans ce cas l'étude théorique devient plus complexe que dans les deux cas étudiés préalablement, car on doit tenir compte de la valeur relative du retard à l'amorçage  $\alpha$  et du déphasage propre du circuit, pour un circuit R,L en série, on a:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

avec R,L respectivement résistance et inductance du récepteur.

Lors de l'allumage d'un thyristor l'équation différentielle suivante reste toujours valable et on a:

$$Ri + L \frac{di}{dt} = V_m \sin \omega t$$

Le courant  $i$  a pour expression :

$$i = i_p + i_t$$

$i_t$  : solution générale de l'équation sans second membre

$i_p$  : Solution particulière de l'équation avec second membre et qui représente le régime définitif que l'on obtient théoriquement au bout d'un certain temps infini, où le régime transitoire ayant totalement disparu.

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0$$

d'où 
$$i_t = C \exp\left(-\frac{R}{L} t\right)$$

$$i_p = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\text{avec } Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \quad \text{et } \operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

$$i = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + C \exp\left(-\frac{R}{L} t\right)$$

$$\text{à l'instant } \omega t_0 = \alpha \quad i = 0$$

$$\text{d'où } \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) + C \exp\left(-\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega}\right) = 0$$

En raison de l'inductance, l'intensité ne peut pas croître brusquement.

$$\text{On tire } C = -\frac{V_m}{Z} \exp\left(\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega}\right) \sin(\alpha - \varphi)$$

En définitive, l'expression du courant s'écrit comme suit :

$$i = \frac{V_m}{Z} \left[ \sin(\omega t - \varphi) - \exp\left(-\frac{R}{L} \left(t - \frac{\alpha}{\omega}\right)\right) \sin(\alpha - \varphi) \right]$$

On peut représenter séparément ces deux intensités, puis on déduit l'intensité globale.

Pour ce fonctionnement, on distingue trois cas possibles et ce, suivant le déphasage propre du circuit et l'angle de retard à l'amorçage  $\alpha$ .

### 1.5.1 Cas où l'angle d'amorçage $\alpha = \varphi$

Il n'y a pas de régime transitoire car l'amorçage s'effectue au passage par zéro du courant, mais la conduction ne cessant également qu'au passage par zéro de ce dernier.

La durée de conduction est totale. Il se reproduit également aux demi-alternances suivantes.

sachant que

$$i = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) - \frac{V_m}{Z} \exp\left[-\frac{R}{L}\left(t - \frac{\alpha}{\omega}\right)\right] \sin(\alpha - \varphi)$$

Et pour  $\alpha = \varphi$ , l'expression du courant devient:

$$i = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$$

terme qui correspond à la composante permanente.

### 1.5.2 Cas où l'angle d'amorçage $\varphi < \alpha < \pi$

Le premier thyristor entre en conduction à l'instant  $t_0$  correspondant à un angle  $\omega t_0 = \alpha$ , le terme  $i_t$  est négatif puisque  $\alpha$  est supérieur à  $\varphi$  donc le courant s'annule et le thyristor se bloque.

Pour  $t = t_1$  tel que :

$$\omega t_1 < \omega t < \pi + \alpha$$

A l'instant  $t = \frac{T}{2} + t_0$  le thyristor  $Th_1$  ayant à ses bornes une tension  $-v$  positive, reçoit

Un courant de gâchette il devient alors conducteur et écoule une alternance négative de  $i$  identique, au signe près, à son alternance positive.

Il résulte que le débit est symétrique mais discontinu.

### Remarque

Il découle qu'à chaque extinction le thyristor présente une valeur de tension  $u_{Th}$  à ses bornes  $(\frac{du}{dt})_{Th}$  très élevée, donc il faut les munir de circuit R,C d'amortissement de façon à réduire la vitesse de variation de la tension, sous peine de le voir se réamorcer.

### 1.5.3 Cas où l'angle d'amorçage $\alpha < \varphi$

Lorsque l'angle  $\alpha$  est inférieur à  $\varphi$ , le fonctionnement dépend de la nature des signaux appliqués aux gâchettes.

Supposons que nous ayons utilisé, dans ce mode de fonctionnement des impulsions brèves.

Lorsque  $\omega t = \alpha$ , le thyristor  $Th_1$  s'allume et le courant  $i_1$  circule dans la charge, la conduction ne pouvant cesser qu'au moment du passage par zéro du courant.

Le thyristor  $Th_1$  sera encore conducteur lors de l'arrivée de l'impulsion sur  $Th_1$  et ceci pour  $\omega t = \pi + \alpha$  lors de l'alternance inverse cependant, ce dernier ne peut s'allumer car sa tension anode-cathode est légèrement négative en raison de la petite tension sur le thyristor  $Th_1$  qui est encore conducteur.

Le courant  $i_1$  s'annule seulement à l'instant  $\beta = \omega t > \pi + \alpha$ .

A cet instant, le thyristor  $Th_1$ , n'ayant plus l'impulsion d'allumage à ses bornes, ne peut plus s'amorcer, et il en sera ainsi à toutes les périodes.

Ainsi, seul un thyristor conduit et ce montage fonctionne en un redresseur simple alternance et la charge sera parcourue par un courant pulsé unidirectionnel, qui charge le réseau d'alimentation avec une composante continu néfaste pour un réseau alternatif.

Il faut donc utiliser dans le cas de l'amorçage avec un retard  $\alpha < \varphi$  des impulsions de longues durées afin qu'elles existent après l'extinction du thyristor précédemment conducteur.

Finalement, il apparaît que la conduction sera continue, puisqu'un thyristor s'amorçera au moment de l'extinction de l'autre.

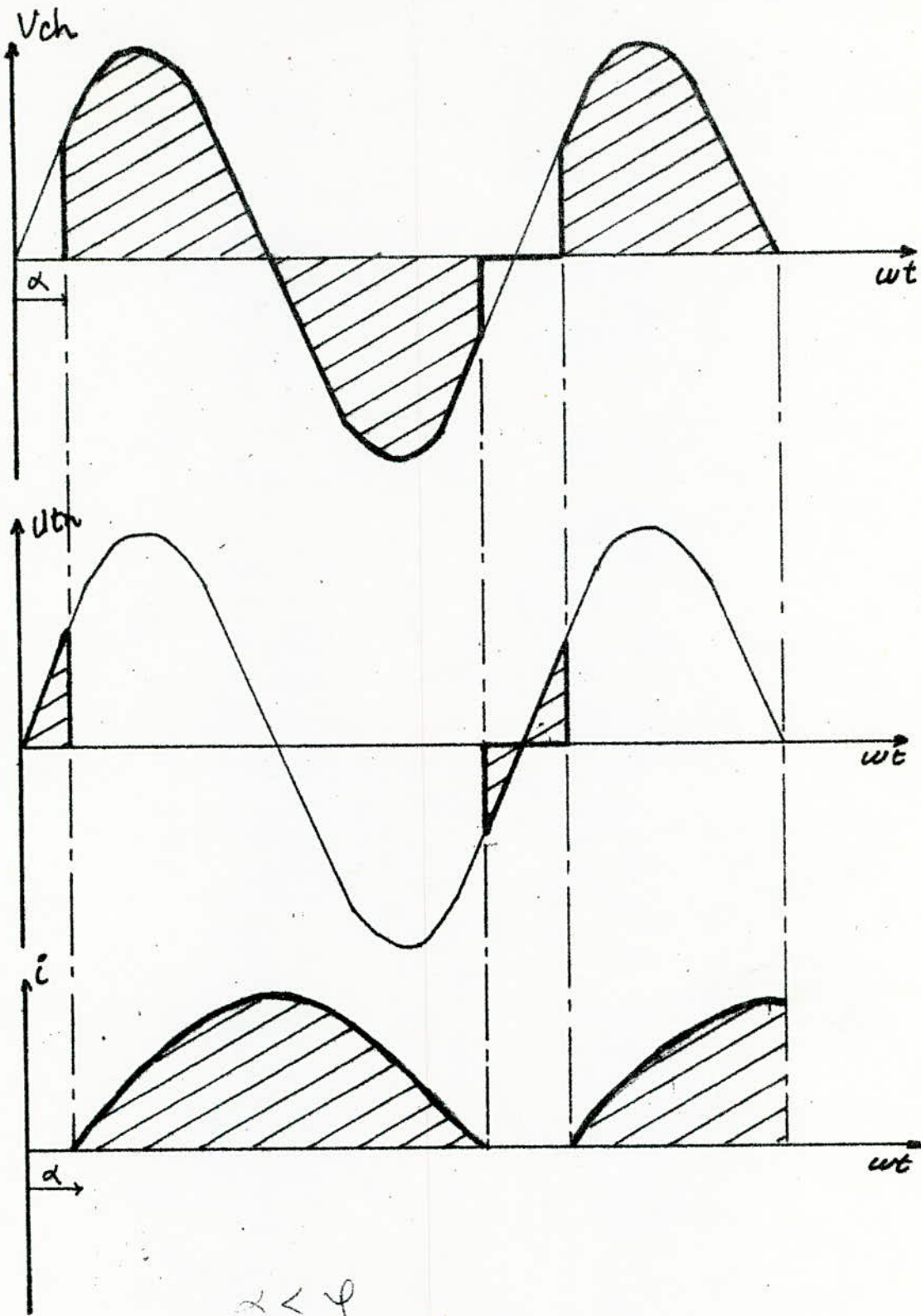
Pour être assuré de ne pas passer brutalement au fonctionnement redresseur, il faut donner aux signaux de gâchettes des thyristors une largeur suffisante.

En résumé, on voit que les seules possibilités de réglage dans un circuit inductif de déphasage propre égal à  $\varphi$  correspondent aux angles de retard  $\alpha \geq \varphi$ .

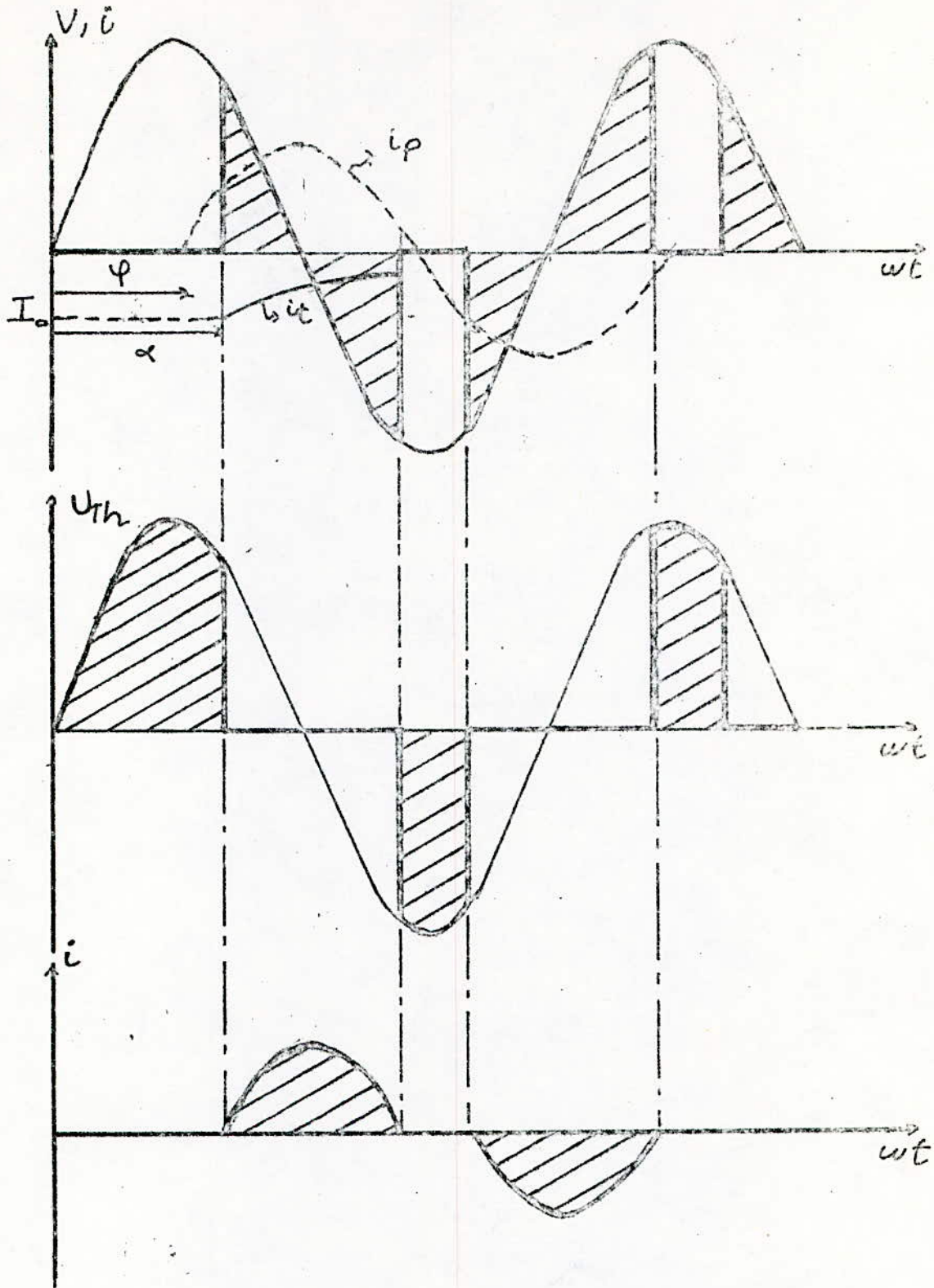
Remarque:

Pour notre réalisation nous avons utilisé un train d'impulsions pour éviter le fonctionnement en redresseur monoalternance (voir partie commande électronique).

- 21 -

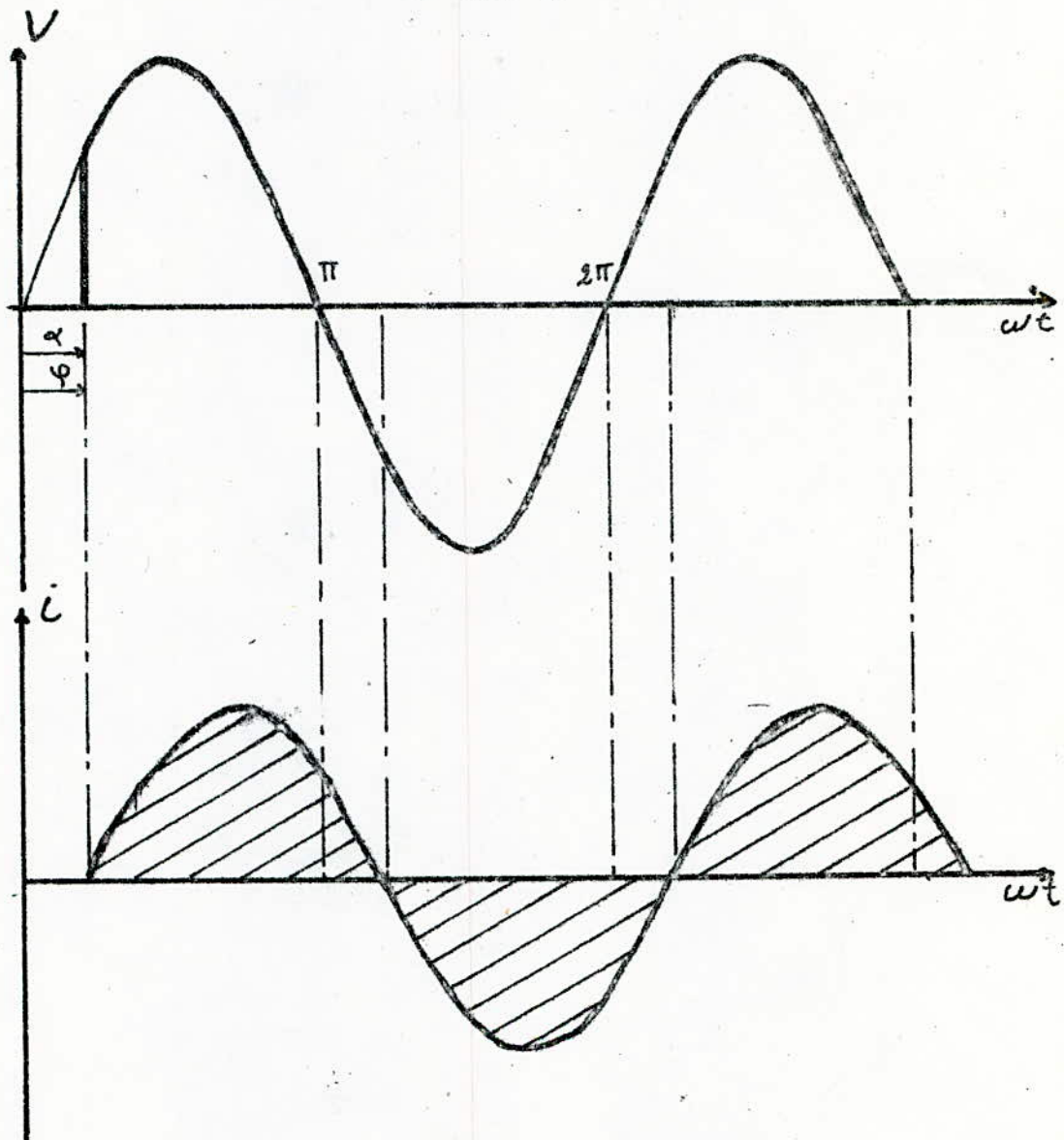


Allures de la tension et du courant aux bornes  
d'une charge (R,L) avec un angle d'amorçage  $\alpha < \varphi$

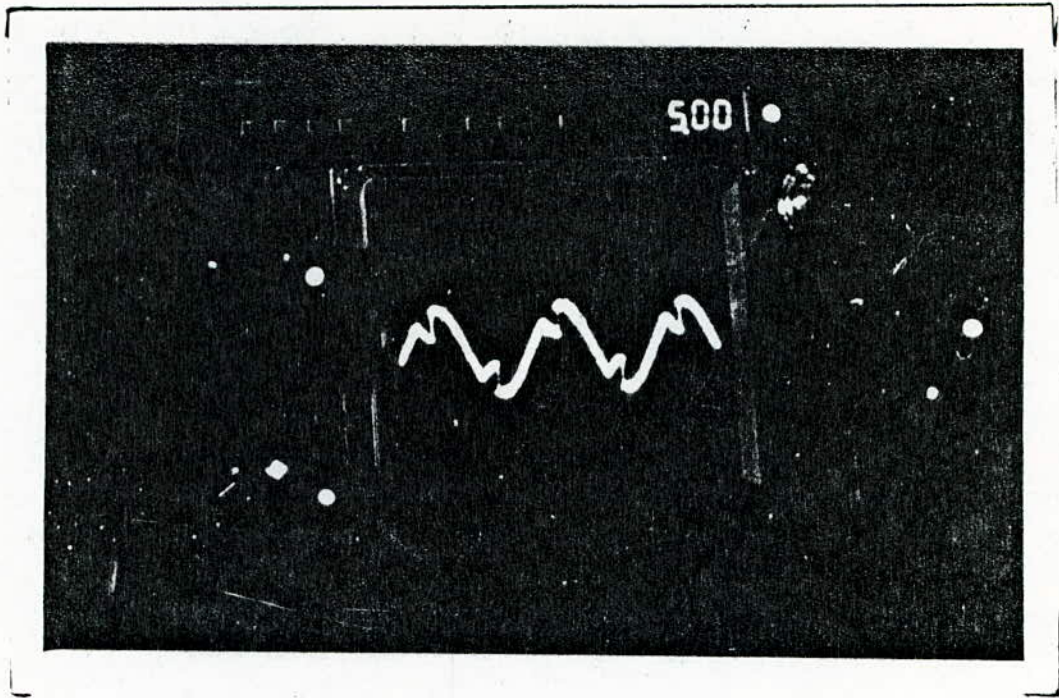


Allures de la tension et du courant aux bornes d'une charge (R,L) avec  $\alpha > \varphi$

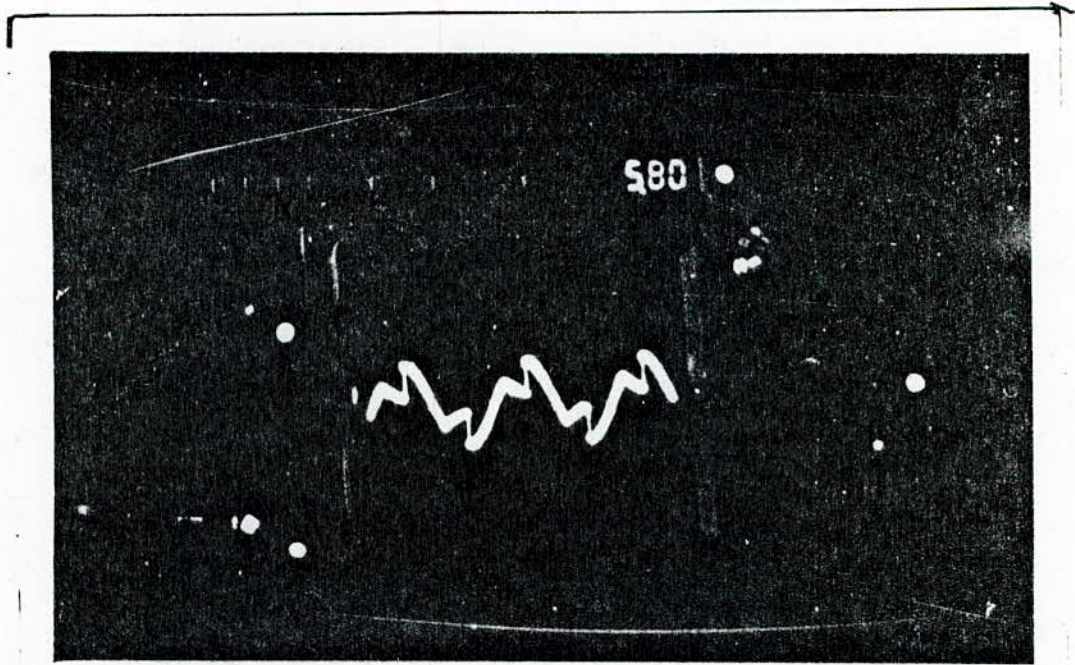




Allures de la tension et du courant aux bornes  
d'une charge (R,L) avec  $\alpha = \varphi$



Allure de la tension aux bornes d'une charge (R,L)  
pour un angle d'amorçage  $\alpha = \frac{\pi}{2}$



Allure de la tension aux bornes d'une charge (R,L)  
pour un angle d'amorçage  $\alpha = 105^\circ$

# CHAPITRE II

## le gradateur triphase

Le gradateur triphasé est formé de trois paires de thyristors montés en anti-parallèle. Ils sont placés entre la source et le récepteur.

On désigne par  $v_1, v_2$  et  $v_3$  les tensions simples d'alimentation sinusoïdales de pulsation  $\omega$ , comptées par rapport au point neutre N de la source.

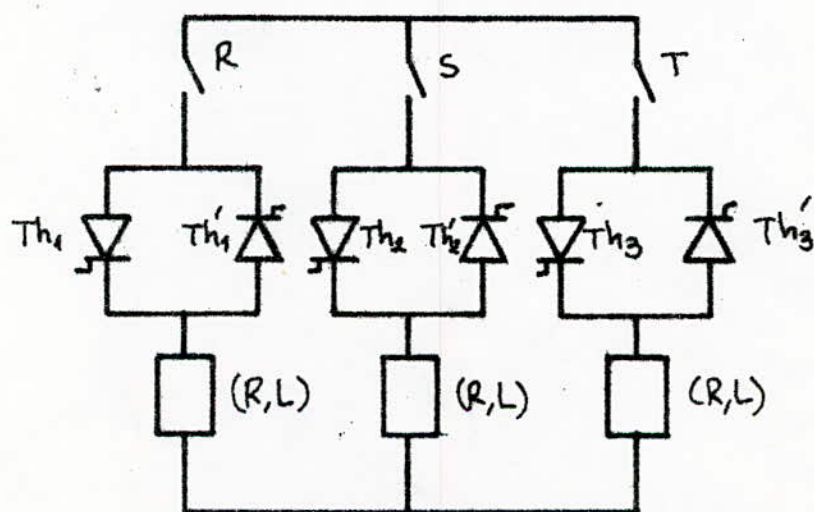
$$v_1 = V_m \sin \omega t$$

$$v_2 = V_m \sin (\omega t - 2\pi/3)$$

$$v_3 = V_m \sin (\omega t - 4\pi/3)$$

Les phases du récepteur sont parcourues par les courants  $i_1, i_2$  et  $i_3$  ;  $v'_1, v'_2$  et  $v'_3$  désignent les tensions aux bornes de ces phases.

$v_{Th_1}, v_{Th_2}$  et  $v_{Th_3}$  sont les tensions aux bornes des groupes de redresseurs.





que tous les gradateurs doivent être prévus pour supporter la tension composée  $U$  dans le cas où un seul d'entre eux se trouve en conduction pour une raison fortuite.

Le nombre de thyristors qui conduisent varie suivant les valeurs prises par l'angle de retard à l'amorçage  $\alpha$ .

On distingue trois intervalles caractérisés par le nombre de thyristors qui rentrent en conduction.

Ces modes de conduction se résument comme suit :

1<sup>er</sup> intervalle  $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$

2<sup>eme</sup> intervalle  $\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$

3<sup>eme</sup> intervalle  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}$

1<sup>er</sup> mode  $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$

Il y a conduction de 2 ou 3 thyristors.

Lorsque  $\alpha$  est inférieur à  $\frac{\pi}{3}$ , l'angle  $\theta_1$  de fin de conduction de  $Th_3$  est supérieur à  $\alpha$ .

pour  $\alpha < \omega t < \frac{\pi}{3}$   $Th_1, Th_2$  et  $Th_3$  conduisent

pour  $\frac{\pi}{3} < \omega t < \frac{\pi}{3} + \alpha$   $Th_1$  et  $Th_2$  conduisent

2<sup>eme</sup> mode  $\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$

Il y a toujours deux thyristors passants. L'intervalle de débit des thyristors reste constant et égal à  $\frac{1}{3}$  de période mais il se décale progressivement.

3<sup>ème</sup> mode       $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}$

Il y a conduction tantôt de deux thyristors, tantôt de 0 thyristors.

L'existence d'intervalles de conduction après des laps de temps où tous les courants sont nuls nécessite le déblocage de deux thyristors à la fois.

Pour cela, il faut qu'on commande les thyristors avec des signaux d'une largeur supérieure à  $\frac{\pi}{3}$ .

pour  $\alpha < \omega t < \frac{5\pi}{6}$   $Th_1$  et  $Th_2$  sont passants  
 $\frac{5\pi}{6} < \omega t < \frac{\pi}{3} + \alpha$  aucun thyristor ne conduit.

Quand  $\alpha$  devient supérieur à  $\frac{\pi}{3}$ , les thyristors ne peuvent plus entrer en conduction.

### Détermination des tensions aux bornes du récepteur

$G_1$  et  $G_2$  conduisent

d'où  $v_3' = 0$

Ecrivons les équations électriques aux bornes des trois charges :

$$Ri_1 = v_1' \quad (1)$$

$$Ri_2 = v_2' \quad (2)$$

$$Ri_3 = v_3' \quad (3)$$

Etant donné que le récepteur est monté en étoile symétrique sans neutre

$$\text{d'où } i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (4)$$

En sommant (1), (2) et (3) on obtient :

$$R(i_1 + i_2 + i_3) = v_1' + v_2' + v_3' = 0$$

$$\text{Donc } v_1' + v_2' = 0$$

$$\Rightarrow v_1' = -v_2'$$

L'équation de maille s'écrit comme suit :

$$v_1 - v_1' + v_2' - v_2 = 0$$

finalement

$$v_1' = \frac{v_1 - v_2}{2}, \quad v_2' = \frac{v_2 - v_1}{2} \quad \text{et } v_3' = 0$$

Dans le cas où  $G_1$  et  $G_3$  conduisent

Par un calcul analogue on tire :

$$v_1' = \frac{v_1 - v_3}{2}, \quad v_3' = -\frac{v_1 - v_3}{2} \quad \text{et } v_2' = 0$$

### Remarque

On ne s'intéresse pas au cas où  $G_2$  et  $G_3$  conduisent, puisque notre raisonnement a été fait sur une seule phase (1) et les deux autres se déduisent par un décalage de  $\frac{2\pi}{3}$  de l'une par rapport à l'autre.

$G_1, G_2$  et  $G_3$  sont en état de conduction.

L'équation  $v_1' + v_2' + v_3' = 0$   
reste toujours valable.

Les équations de mailles s'écrivent sous la forme:

$$v_1 - v_1' - v_2 + v_2' = 0 \quad (1)$$

$$v_1 - v_1' - v_3 + v_3' = 0 \quad (2)$$

En sommant les équations (1) et (2) on aura:

$$2v_1 - 2v_1' - (v_2 + v_3) + v_2' + v_3' = 0$$

$$2v_1 - 2v_1' - (v_2 + v_3) = -(v_2' + v_3')$$

Sachant que :

$$v_1 + v_2 + v_3 = 0$$

Finalement, on aboutit à :

$$v_1' = v_1$$

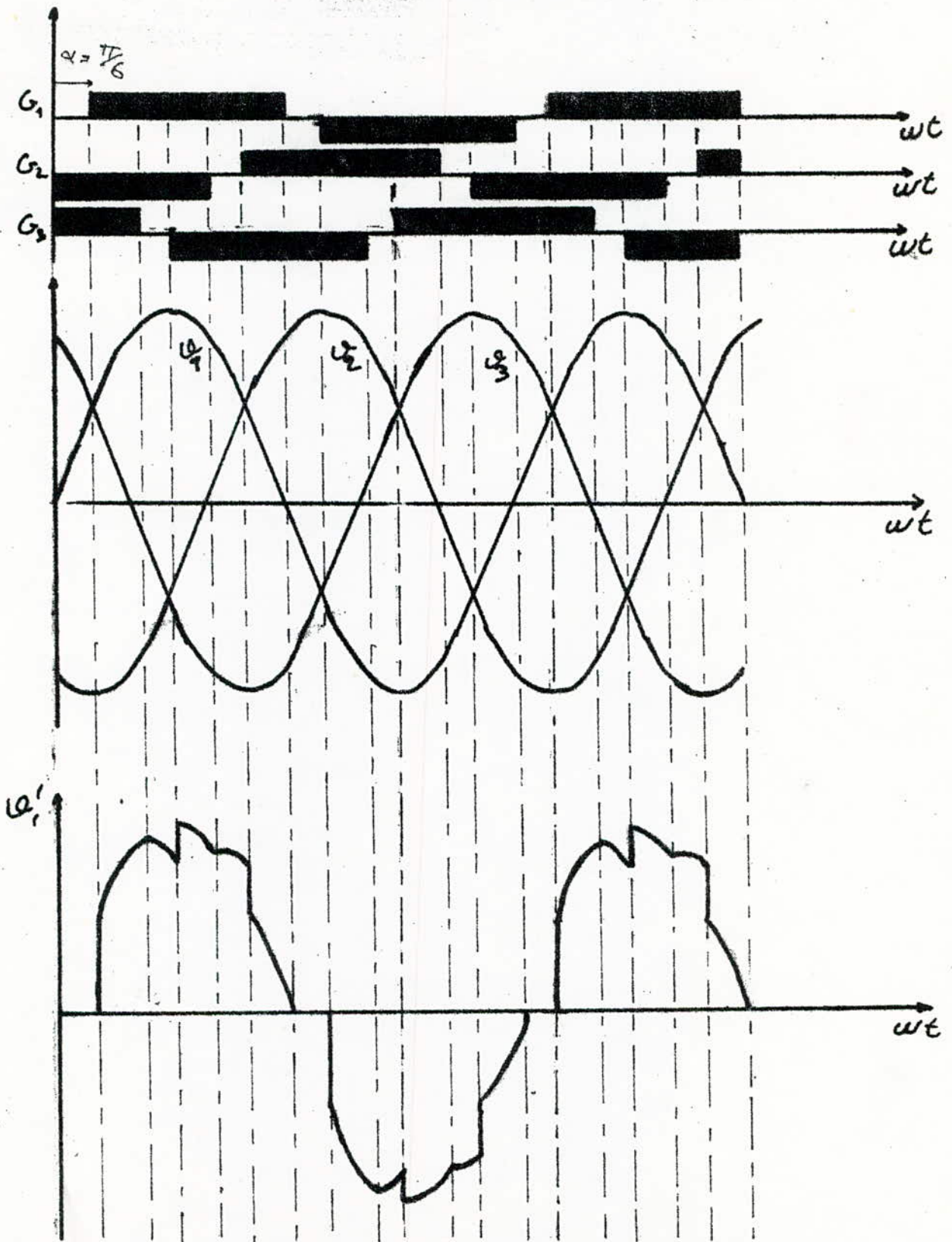
Et par un calcul similaire, on trouve  $v_2' = v_2$  et  $v_3' = v_3$ .

On constate que lorsque deux thyristors conduisent, la tension simple aux bornes de la charge est égale à la moitié de la tension composée du réseau triphasé.

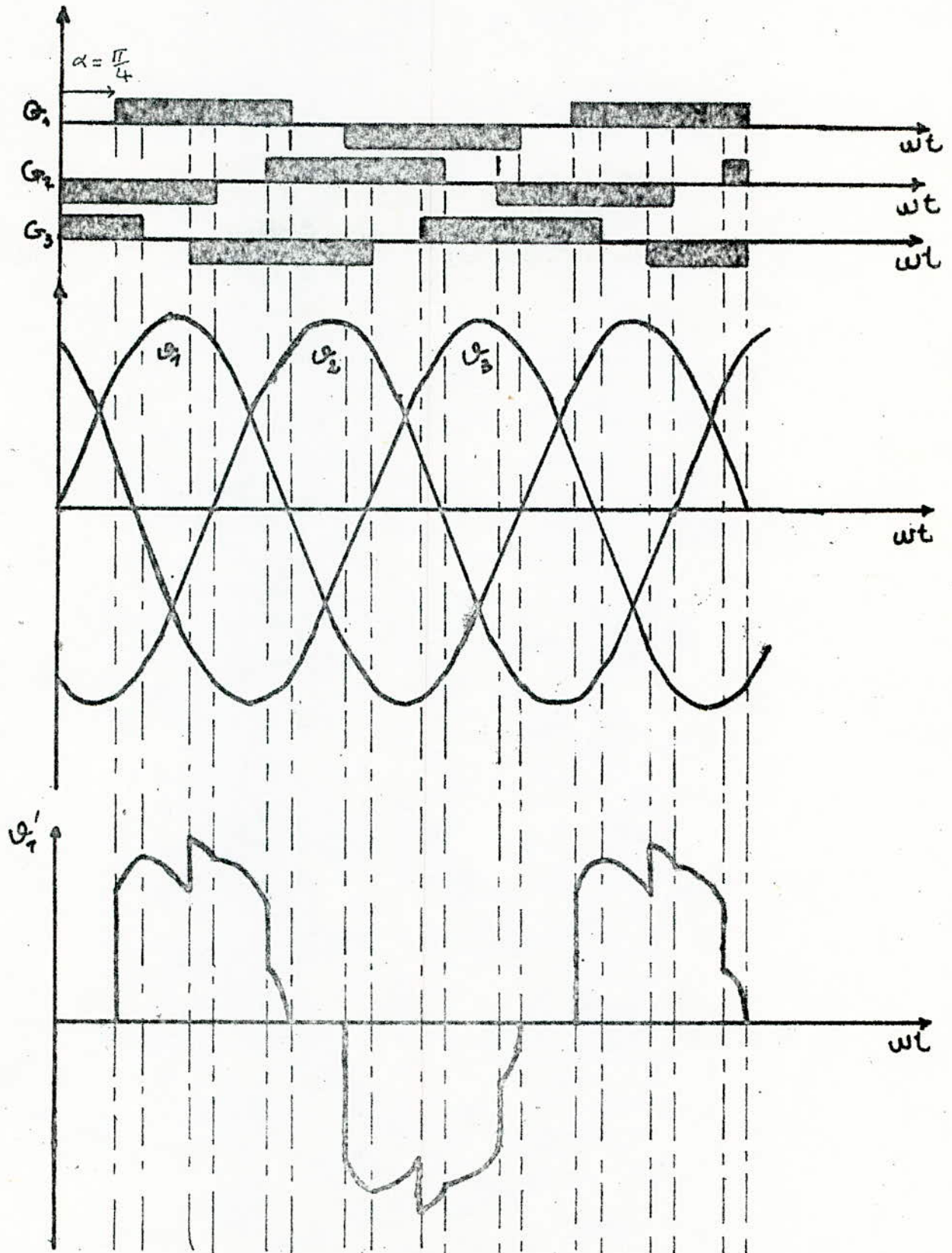
Elle est égale à la tension simple du réseau triphasé dans le cas où tous les gradateurs conduisent en même temps.

Le courant avec un facteur de proportionnalité  $\frac{1}{R}$  a la même allure que la tension simple aux bornes de la charge.

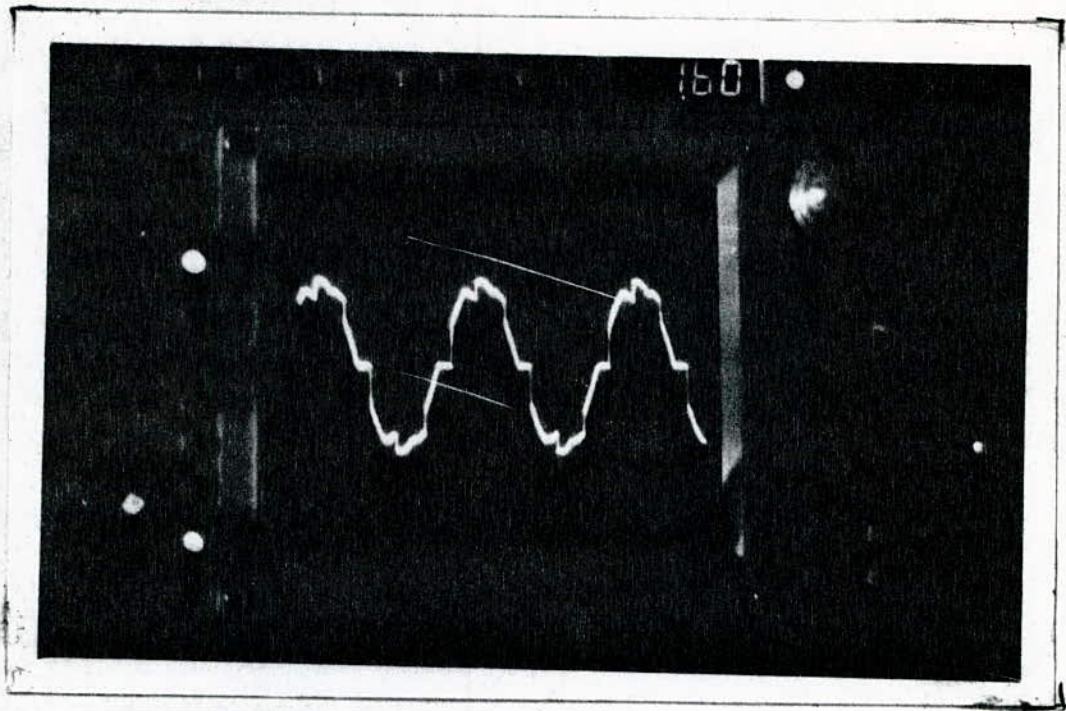




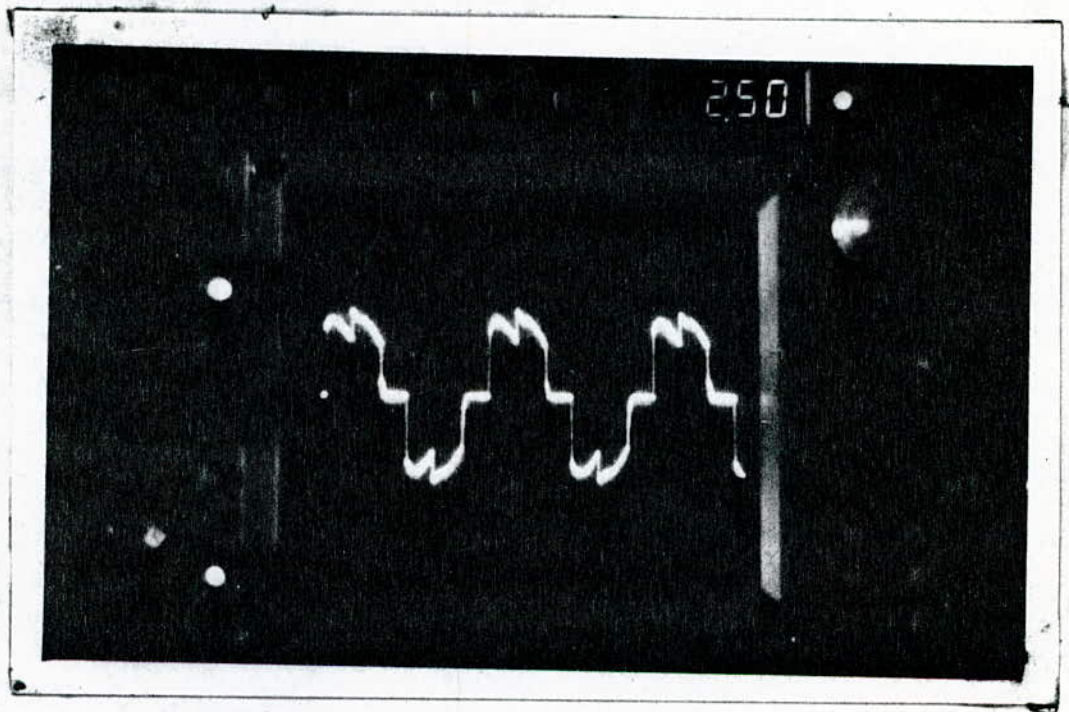
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en étoile pour  $\alpha = \frac{\pi}{6}$



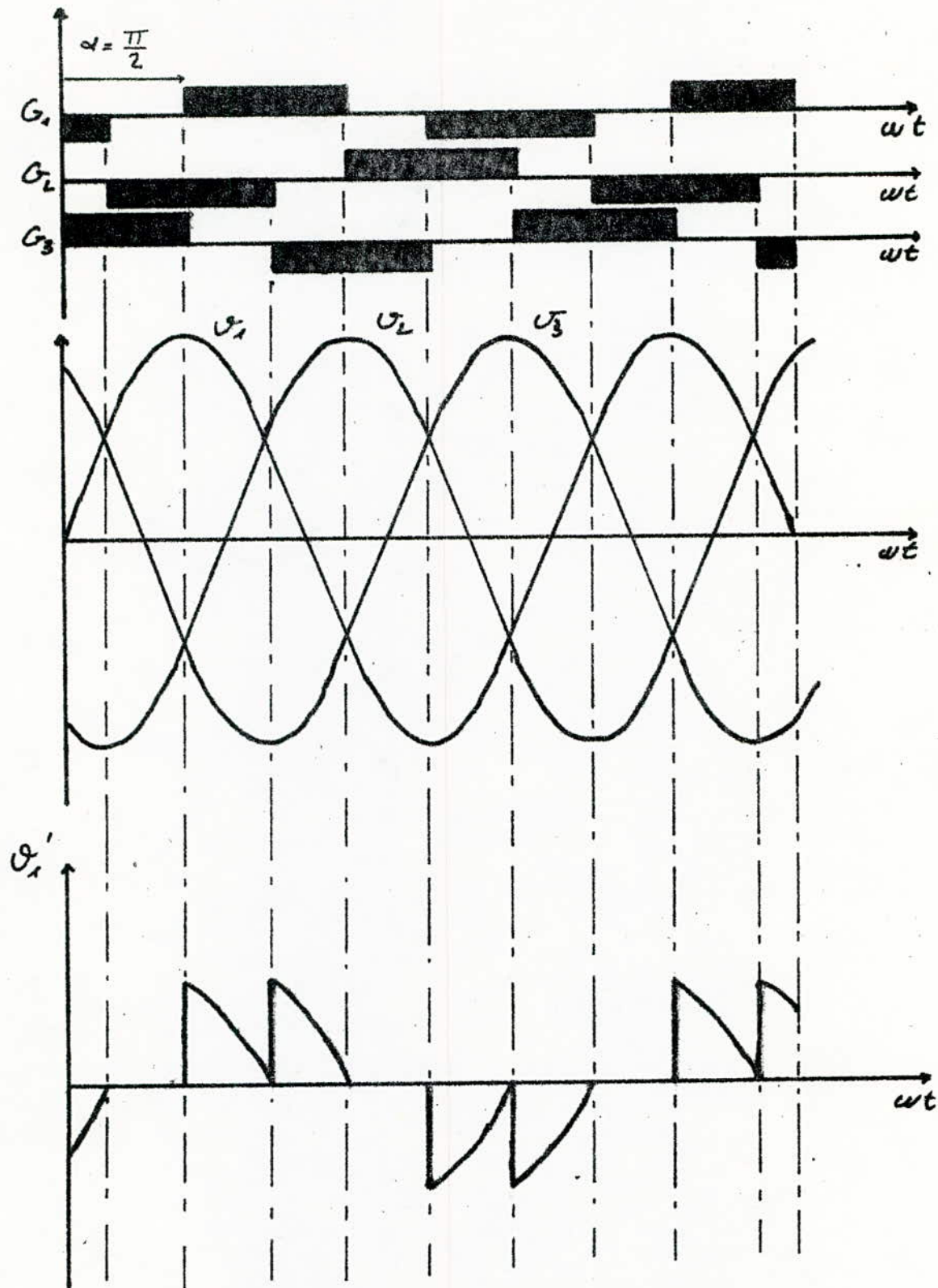
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en étoile pour  $\alpha = \frac{\pi}{4}$



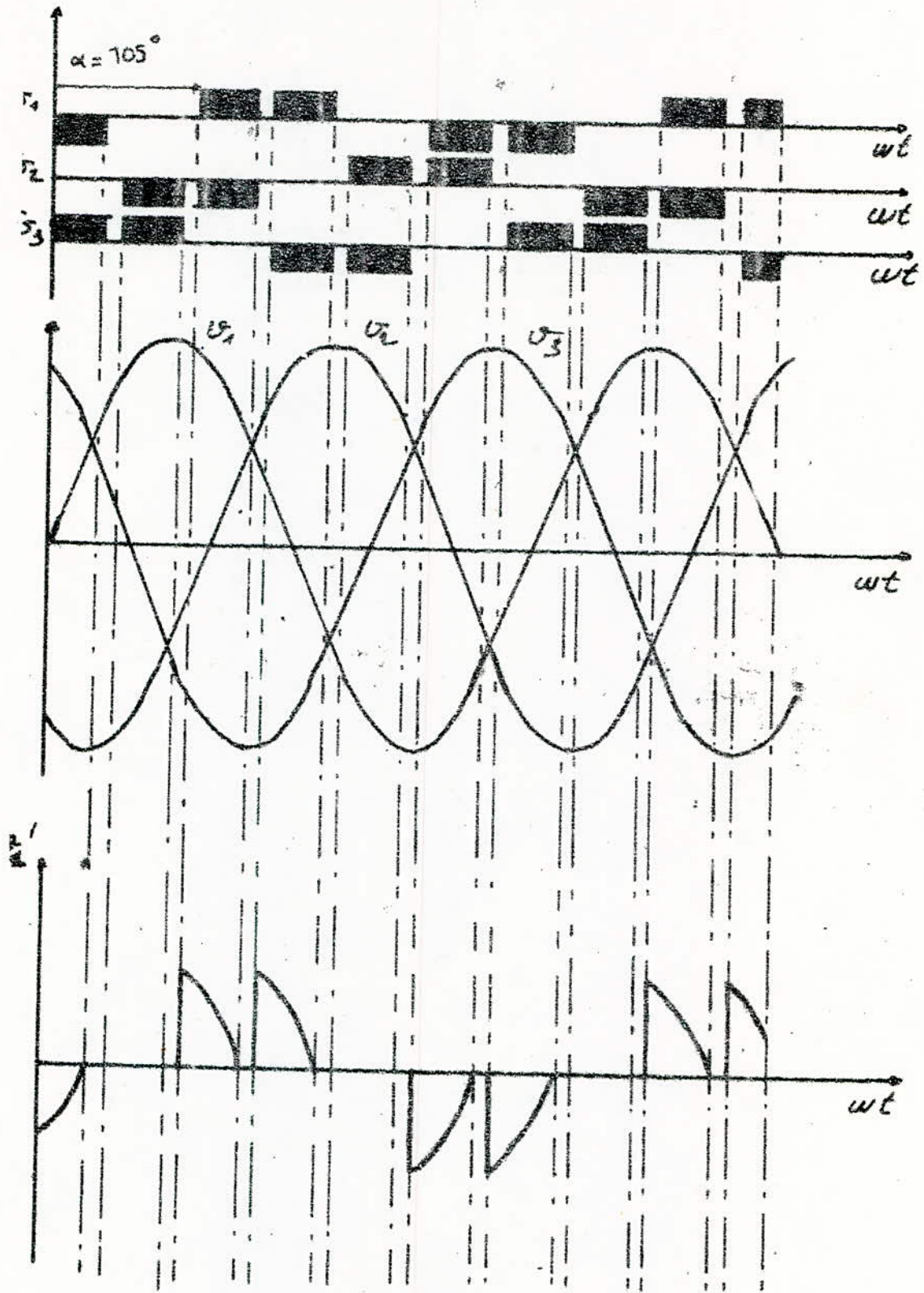
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en étoile pour  $\alpha = \frac{\pi}{6}$



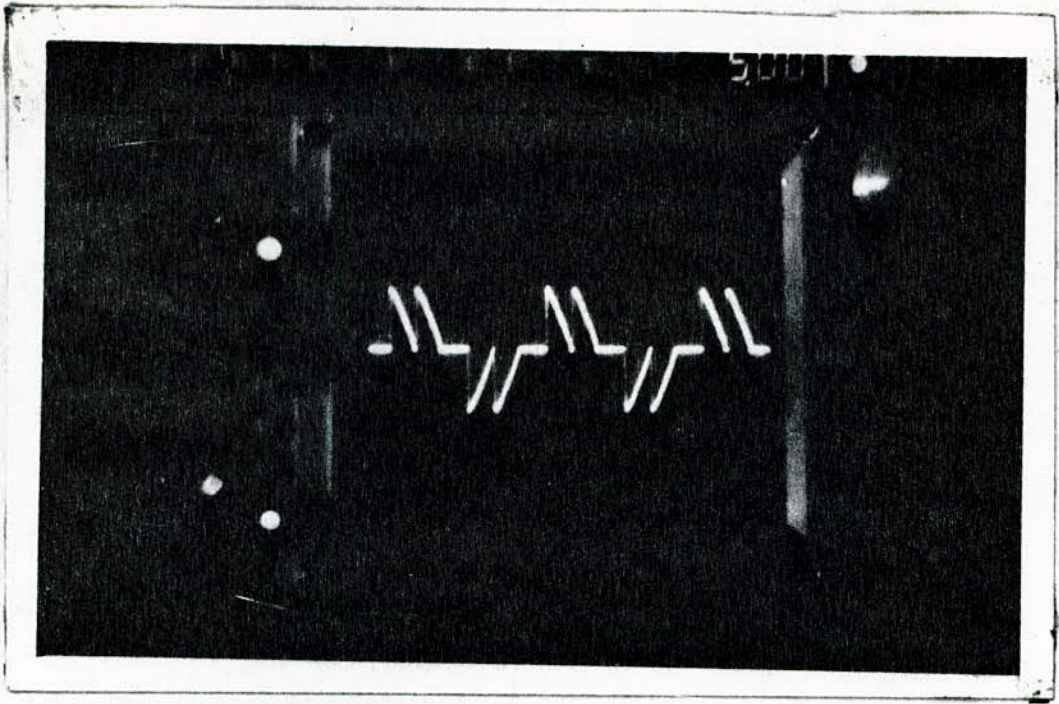
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en étoile pour  $\alpha = \frac{\pi}{4}$



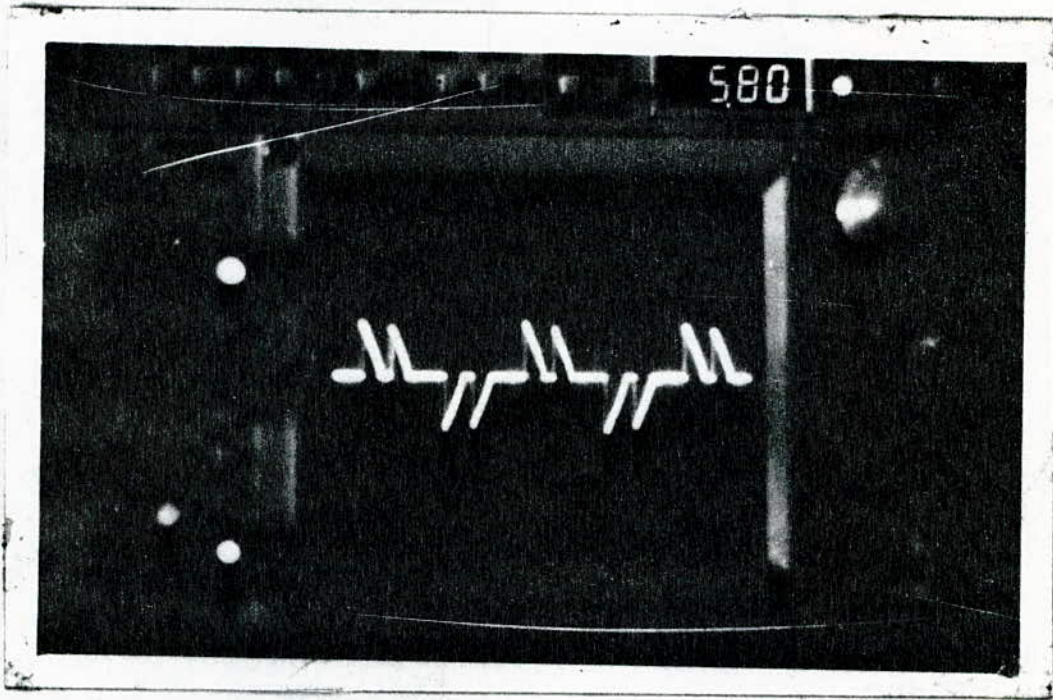
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en étoile pour  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ .



Allure de la tension aux bornes d'un bras  
d'une charge résistive triphasée montée  
en étoile pour  $\alpha = 105^\circ$ .

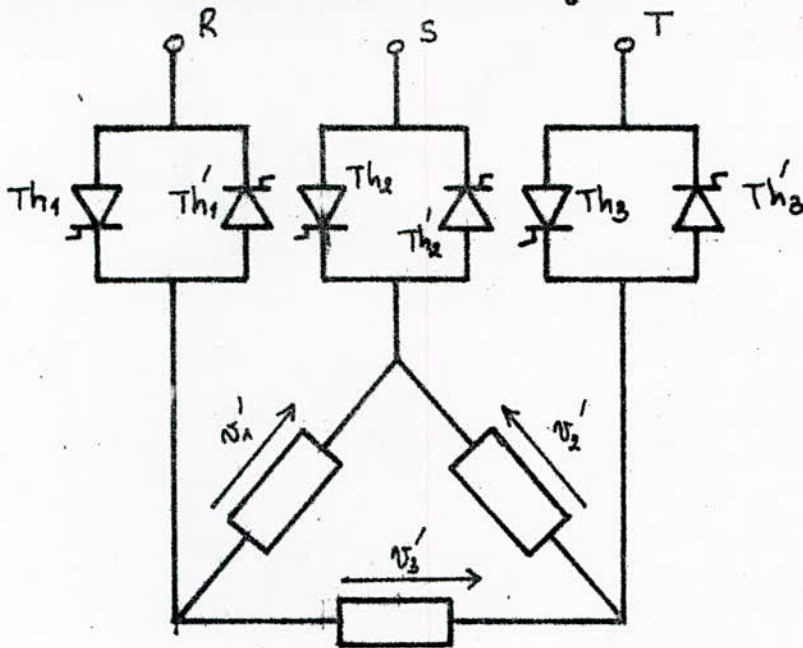


Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en étoile pour  $\alpha = \frac{\pi}{2}$



Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en étoile pour  $\alpha = 105^\circ$

2.1.2 Récepteur monté en triangle



Remarquons que lorsque deux gradateurs conduisent, une charge voit toute la tension composée à ses bornes tandis que la tension aux bornes des autres charges est égale à la moitié de la tension composée.

L'équation de maille est la suivante :

$$v_1' + v_2' + v_3' = 0 \quad (1)$$

On suppose que  $G_1$  et  $G_2$  qui conduisent

$$v_1' = v_1 - v_2 \quad (2)$$

La charge  $R_2$  est parcourue par le même courant que la charge  $R_3$  donc :

$$v_2' = v_3' \quad (3)$$

D'après les équations (1) et (3)

$$v_1' = -2v_2' = -2v_3'$$

Finalement,  $v_1' = v_1 - v_2$  et  $v_2' = v_3' = -\frac{1}{2}(v_1 - v_2)$

$G_1$  et  $G_3$  conduisent

De la même manière on trouve:

$$v_1' = v_2' = \frac{1}{2}(v_1 - v_3) \quad \text{et} \quad v_3' = v_1 - v_3$$

Remarque:

Quand  $G_1$  n'est pas conducteur, la charge  $R_1$  est traversée par un courant résultant de la conduction des deux autres gradateurs.

Alors, la tension  $v_1'$  durant cet état de conduction vaut:

$$v_1' = -\frac{1}{2}(v_2 - v_3) = v_3'$$

de même  $v_2' = v_2 - v_3$

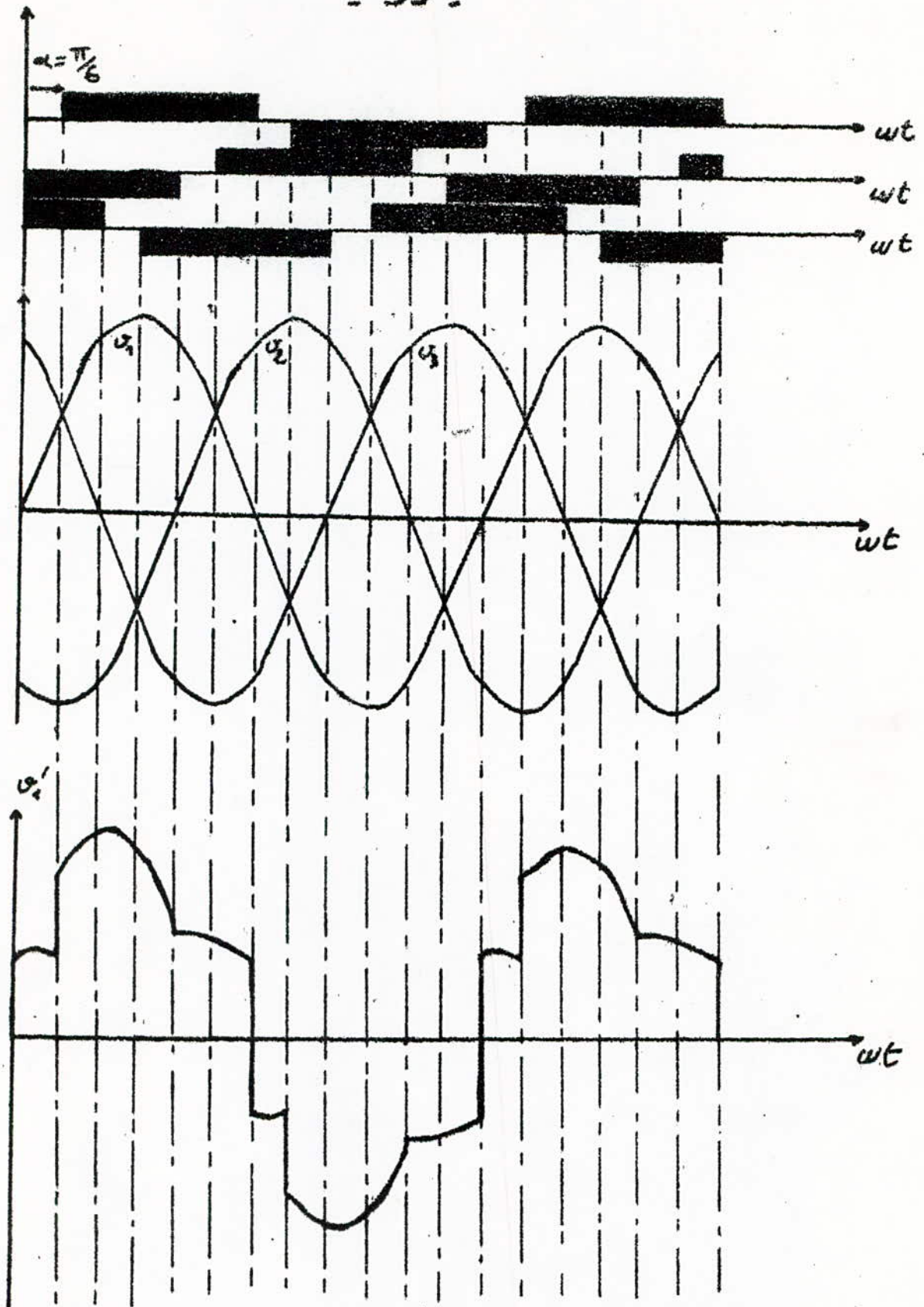
Dans le cas où  $G_1, G_2$  et  $G_3$  conduisent chaque charge voit une tension composée à ses bornes.

$$v_1' = v_1 - v_2$$

$$v_2' = v_2 - v_3$$

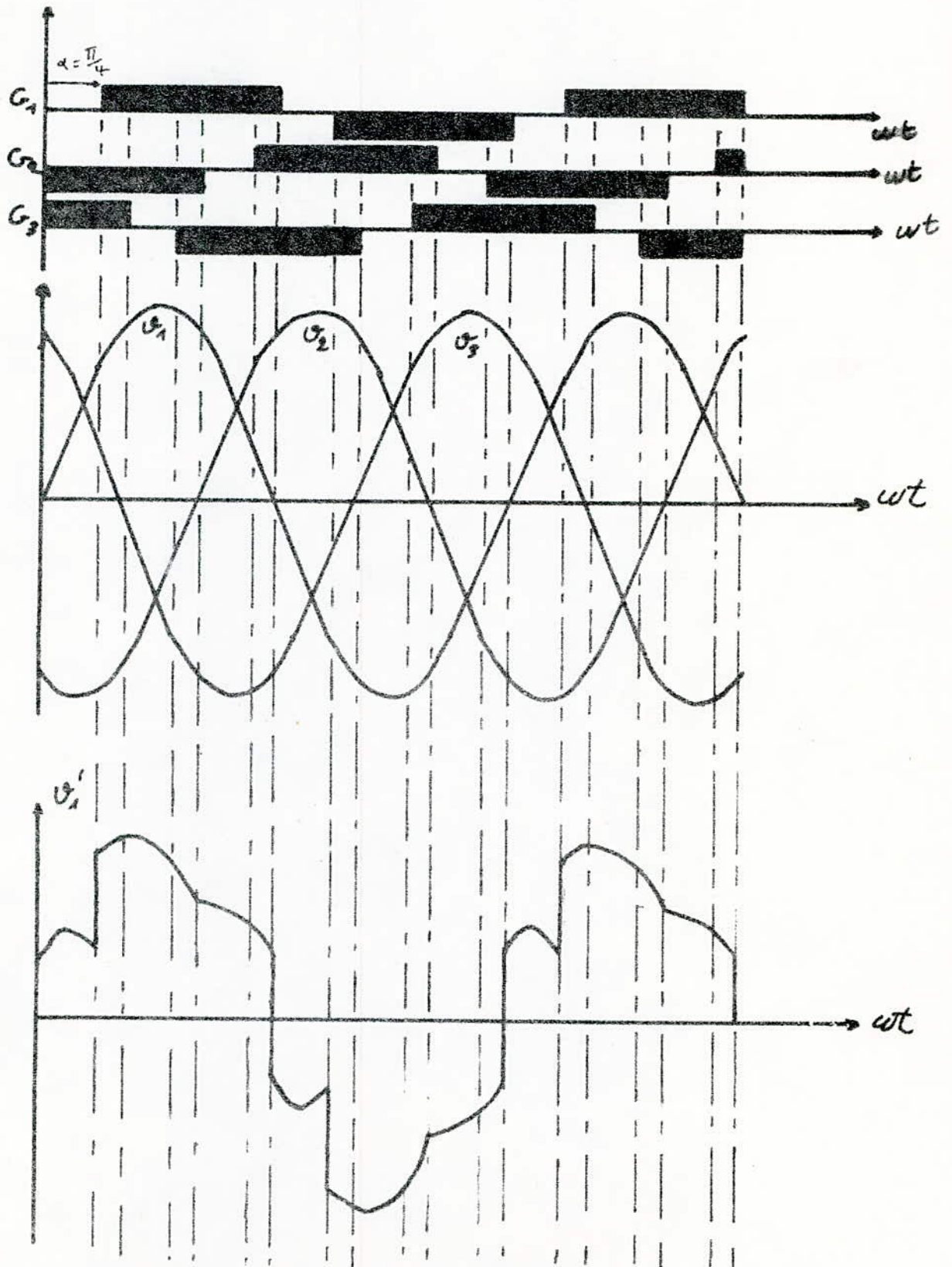
$$v_3' = v_3 - v_1$$



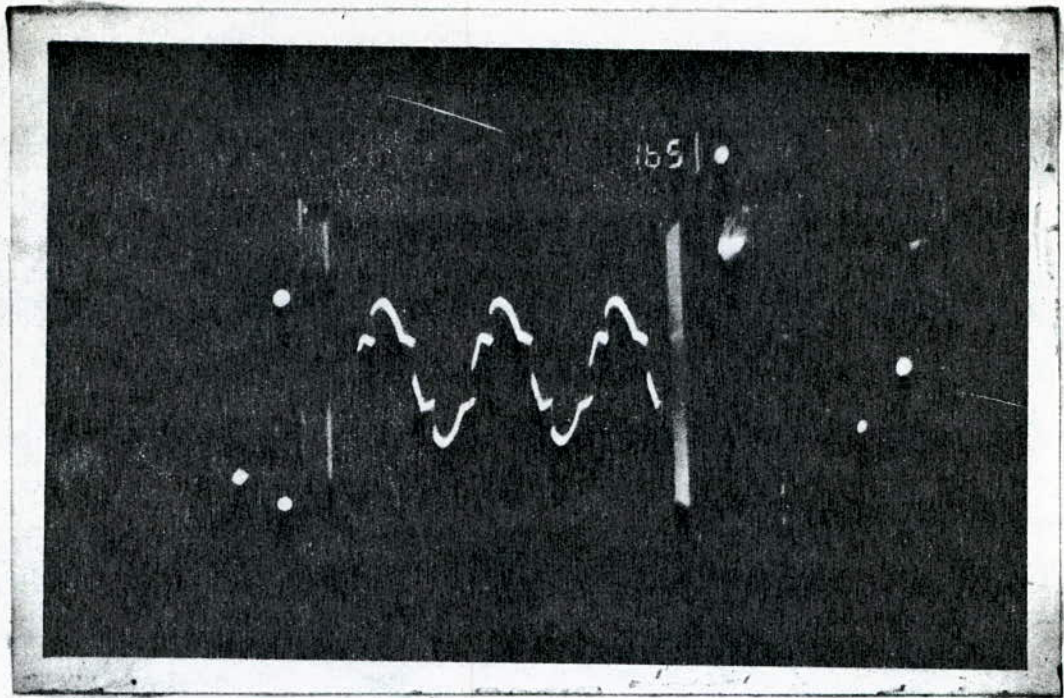


Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en triangle

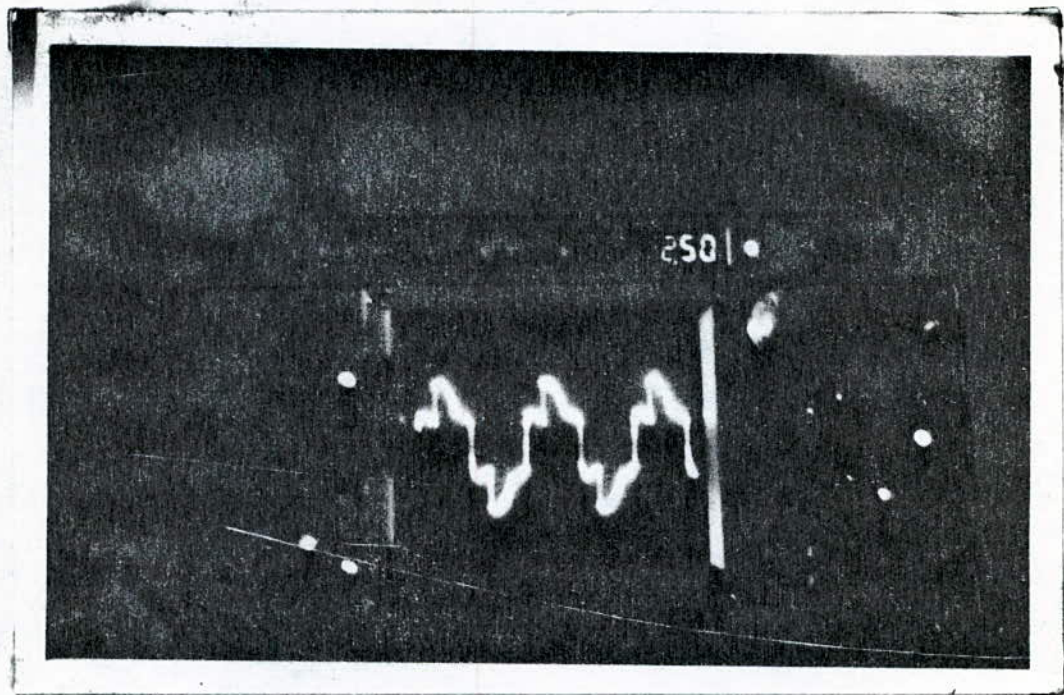
pour  $\alpha = \frac{\pi}{6}$



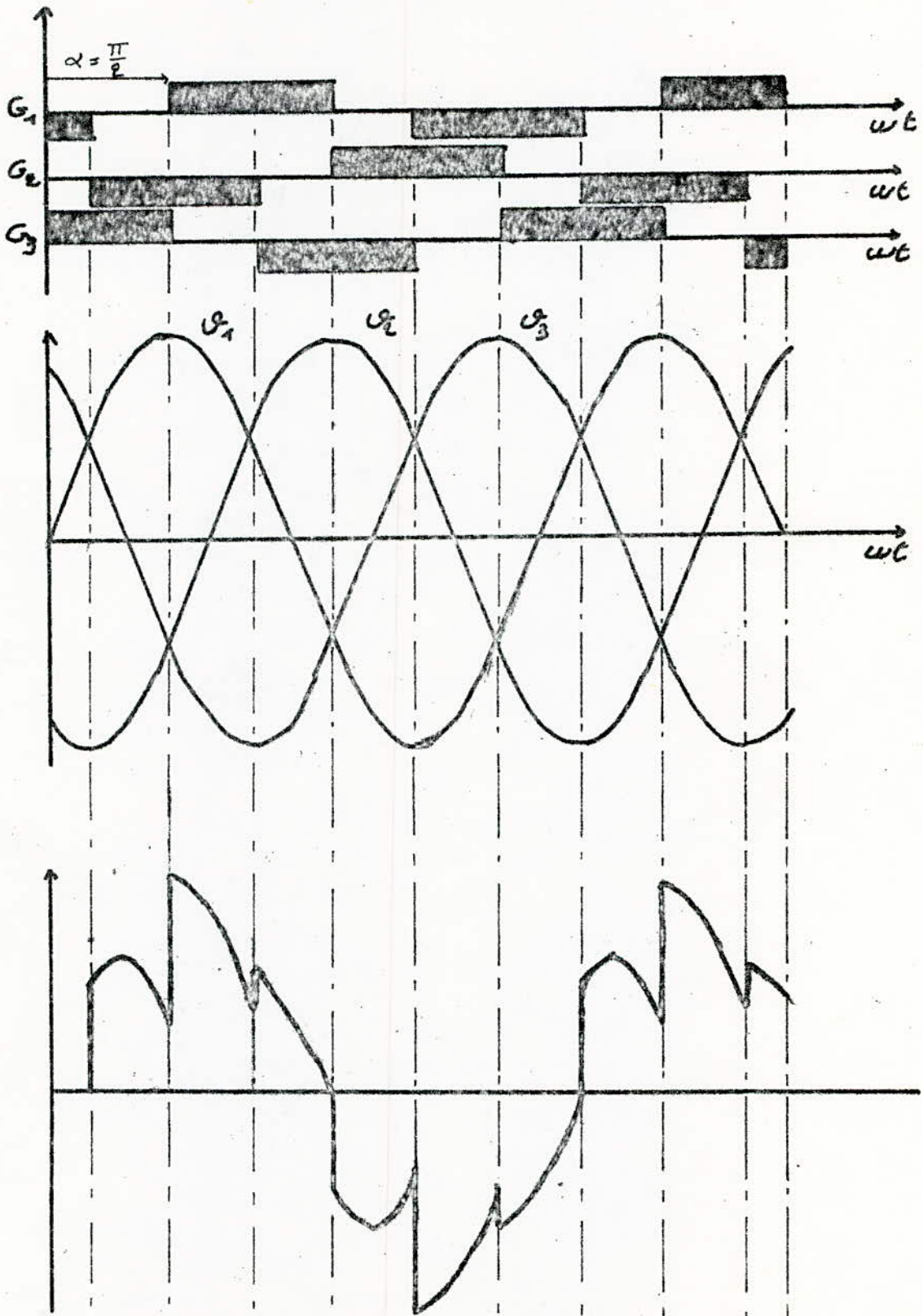
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive monté en triangle pour  $\alpha = \frac{\pi}{4}$



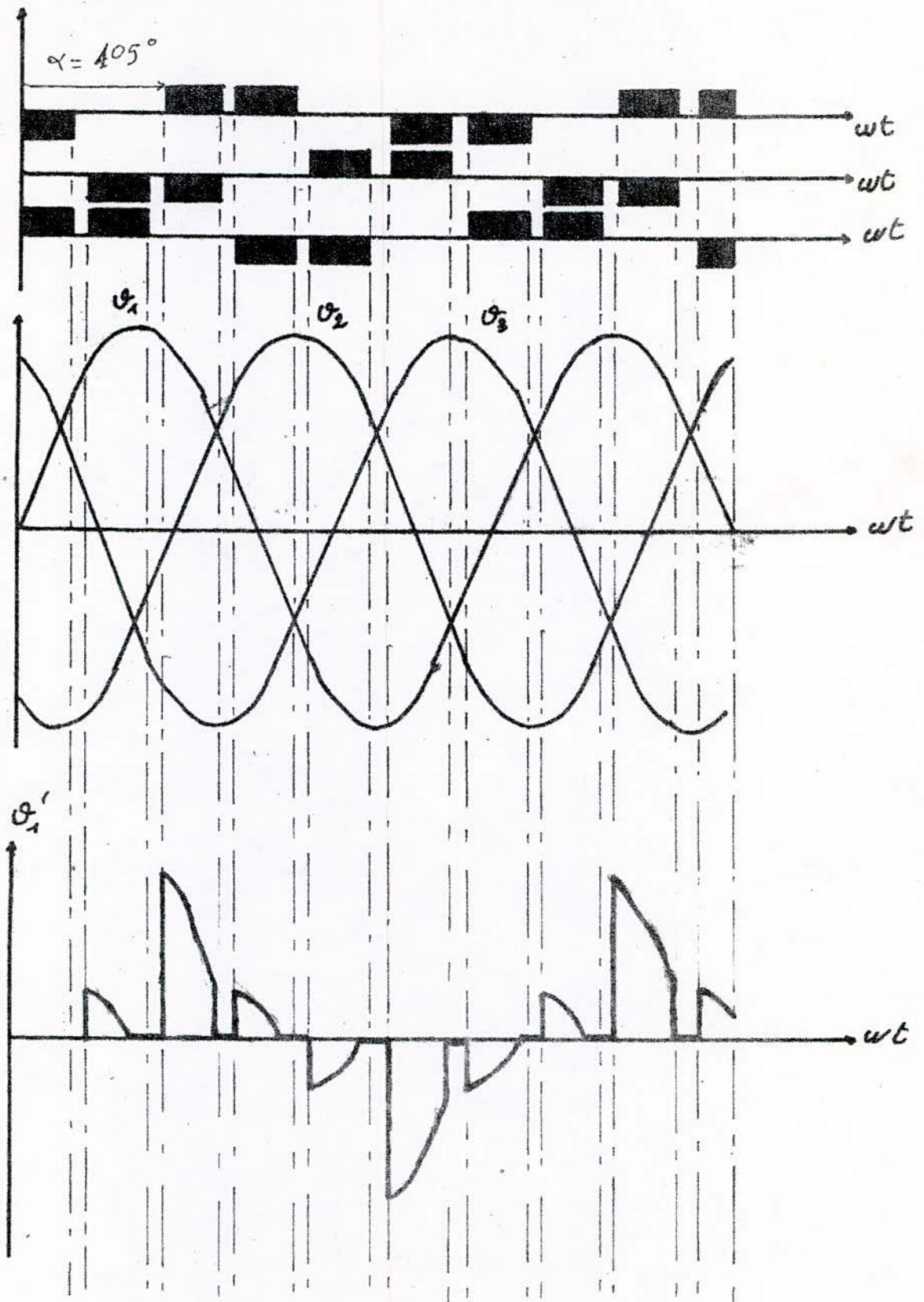
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en triangle pour  $\alpha = \frac{\pi}{6}$



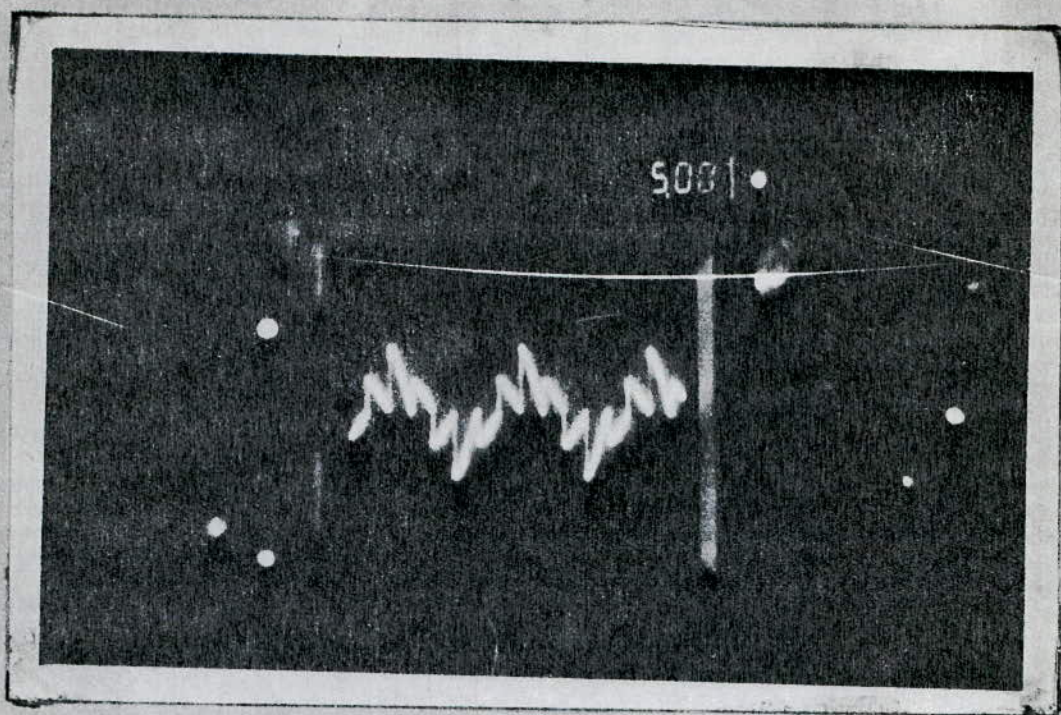
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en triangle pour  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ .



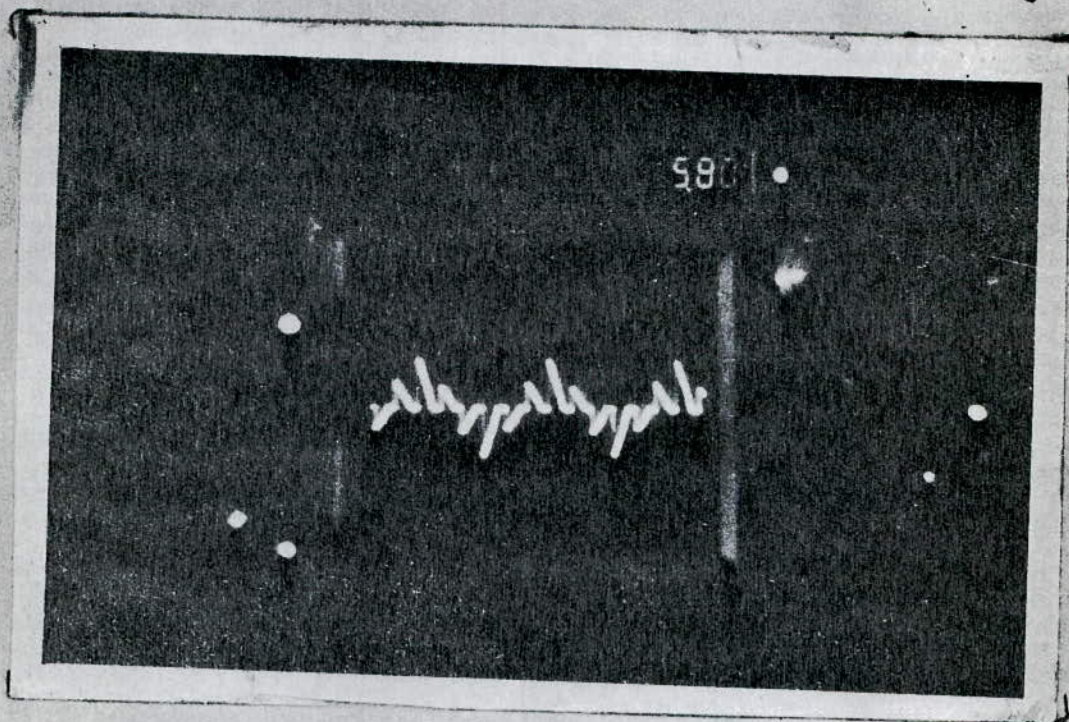
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en triangle pour  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ .



Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en triangle pour  $\alpha = 105^\circ$



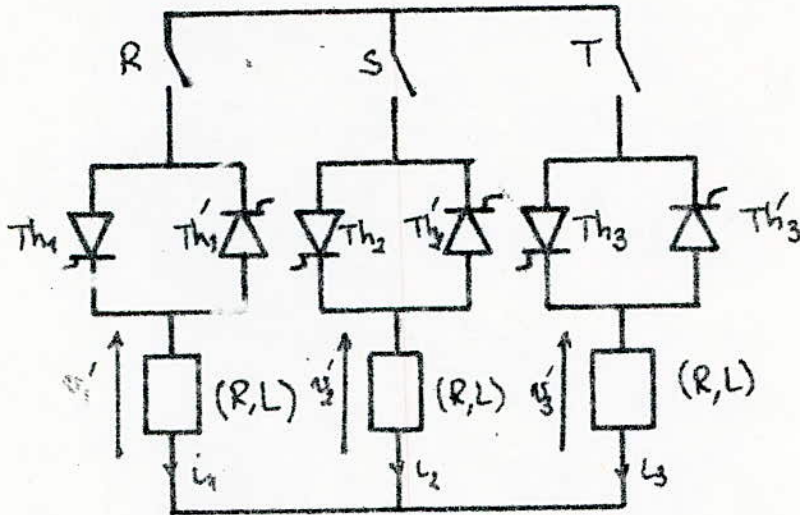
Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive triphasée montée en triangle, pour  $\alpha = \frac{\pi}{2}$



Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge résistive montée en triangle, pour  $\alpha = 105^\circ$

## 2.2 Fonctionnement sur charge inductive et résistive

### 2.2.1 Montage étoile symétrique sans neutre



Dans le cas d'une charge inductive et résistive, la détermination de l'allure du courant est plus laborieuse, pour chaque tronçon du courant, il faut résoudre une équation du type  $Ri + L \frac{di}{dt} = v_m \sin \omega t$  dont la solution présente une composante permanente et une composante transitoire; en outre, pour chaque tronçon, il faut déterminer les conditions initiales de sorte que le courant ne présente pas de discontinuités.

Pour trouver la solution à cette équation différentielle, on doit connaître l'allure de la tension aux bornes de la charge pour chaque phase.

Le calcul, assez difficile doit être fait à l'aide d'un ordinateur.

En sommant les équations, on tire

$$-2v_1 + 2v_1' - v_2' - v_3' + v_2 + v_3 = 0 \quad (7)$$

De (6) découle que  $-v_2' - v_3' = v_1'$

Et du fait que les tensions d'alimentation forment un système triphasé symétrique, on a :

$$v_1 + v_2 + v_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad v_2 + v_3 = -v_1$$

En introduisant la valeur de  $v_2 + v_3$  dans (7) on tire

$$-3v_1 + 3v_1' = 0 \quad \Rightarrow \quad v_1 = v_1'$$

La même déduction peut être faite pour les tensions  $v_2'$  et  $v_3'$  des autres branches de la charge.

Finalement

$$v_1' = v_1, \quad v_2' = v_2 \quad \text{et} \quad v_3' = v_3$$

Ainsi, on a démontré que les tensions aux bornes des trois branches de la charge sont égales à la tension simple du réseau d'alimentation, à condition que les trois phases conduisent le courant et que les trois charges soient identiques.

si  $G_1$  et  $G_2$  conduisent  $v_1' = \frac{v_1 - v_2}{2} = -v_2'$  et  $v_3' = 0$

si  $G_1$  et  $G_3$  conduisent  $v_1' = \frac{v_1 - v_3}{2} = -v_3'$  et  $v_2' = 0$



Détermination des tensions aux bornes de la charge:

$$v_1' = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} \quad (1)$$

$$v_2' = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$v_3' = Ri_3 + L \frac{di_3}{dt} \quad (3)$$

Étant donné, que le point neutre de la charge est flottant, la somme des trois courants doit être nulle

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (4)$$

On déduit de cette relation que

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} = 0 \quad (5)$$

En tenant compte des relations (4) et (5) et en sommant (1), (2) et (3) on obtient :

$$v_1' + v_2' + v_3' = 0 \quad (6)$$

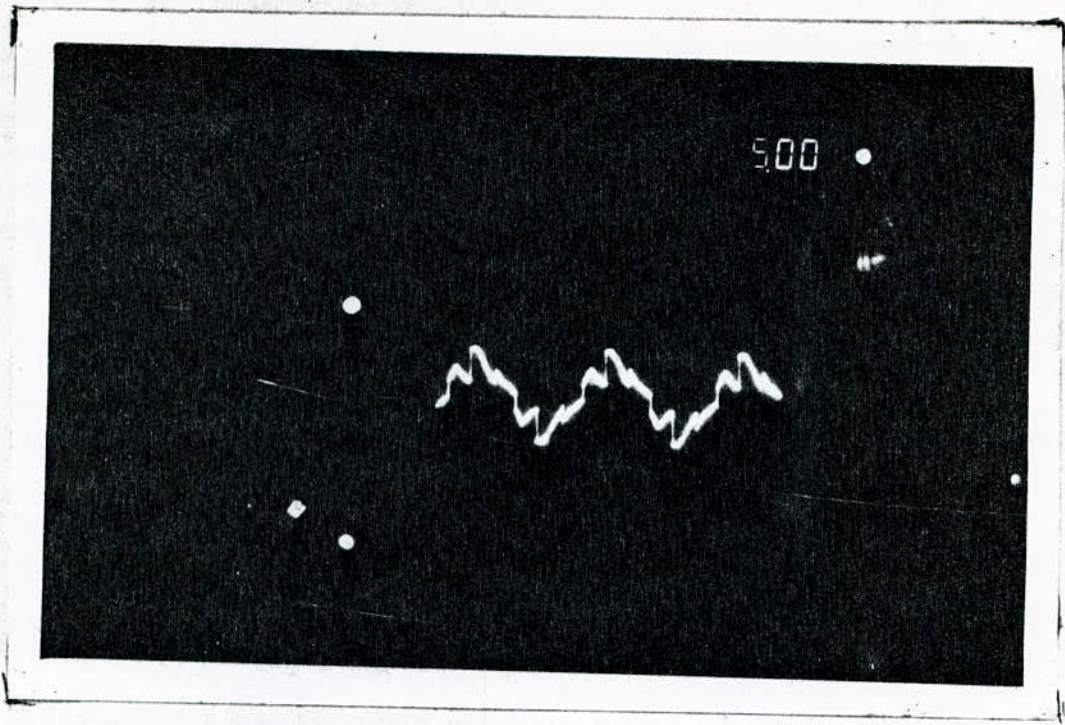
$G_1, G_2$  et  $G_3$  conduisent

Les tensions de charge sont en relation avec les tensions d'alimentation.

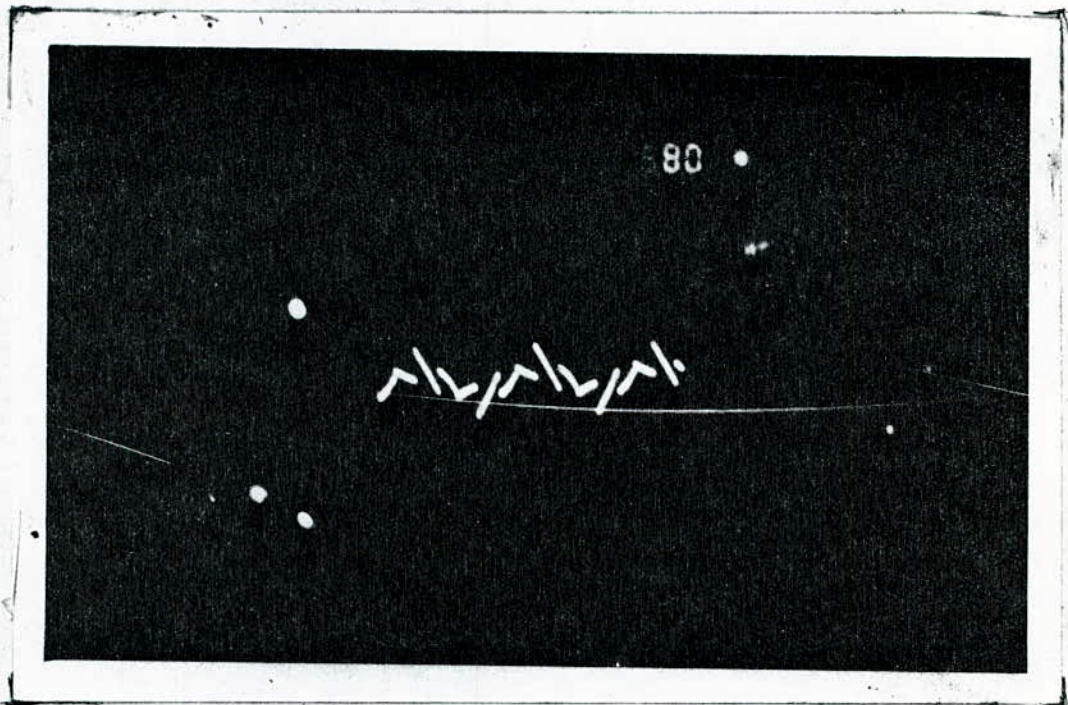
Si les trois phases conduisent, on a les relations

$$-v_1 + v_1' - v_2' + v_2 = 0$$

$$-v_2 + v_2' - v_3' + v_3 = 0$$

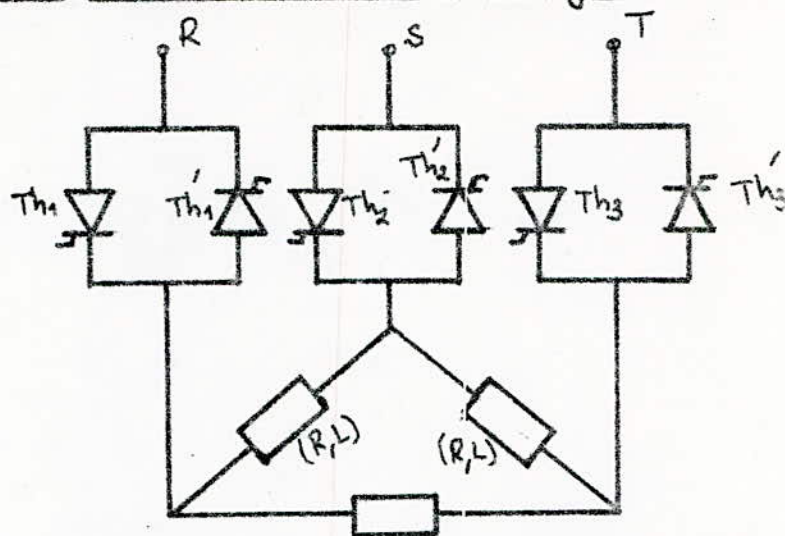


Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge  
(R,L) triphasé montée en étoile pour  $\alpha = \frac{\pi}{2}$



Allure de la tension aux bornes d'un bras d'une charge  
(R,L) triphasé montée en étoile pour  $\alpha = 105^\circ$

### 2.2.2 Récepteur monté en triangle



Par un calcul similaire aux précédents, on trouve  
 si  $G_2$  et  $G_3$  conduisent

$$v_1' = v_1 - v_2 \quad \text{et} \quad v_2' = v_3' = -\frac{1}{2}(v_1 - v_2)$$

si  $G_1$  et  $G_3$  conduisent

$$v_3' = v_1 - v_3 \quad \text{et} \quad v_1' = v_2' = -\frac{1}{2}(v_1 - v_3)$$

si  $G_1$  et  $G_2$  conduisent

$$v_1' = v_3' = -\frac{1}{2}(v_2 - v_3) \quad \text{et} \quad v_2' = v_2 - v_3$$

Dans le cas où  $G_1$ ,  $G_2$  et  $G_3$  conduisent, chaque charge voit une tension composée à ses bornes.

$$v_1' = v_1 - v_2, \quad v_2' = v_2 - v_3 \quad \text{et} \quad v_3' = v_3 - v_1$$

#### Remarque

Dans le cas où le neutre d'un récepteur triphasé monté en étoile est relié au neutre du réseau, l'ensemble se comporte comme la juxtaposition de trois gradateurs monophasés.

# 2<sup>eme</sup> PARTIE

REALISATION PRATIQUE

# CHAPITRE III

## commande électronique

### Introduction

La commande électronique consiste à générer des impulsions capables d'amorcer les gâchettes des thyristors.

L'amorçage par impulsion permet une puissance de crête supérieure à la puissance moyenne admissible de gâchette.

En rappelant que la puissance de crête est la puissance maximale dissipée dans la jonction gâchette - cathode.

Dans ce cas des tolérances plus grandes peuvent être appliquées au circuit d'amorçage.

En fin la dissipation due à l'accroissement du courant résiduel près du niveau d'amorçage est réduite.

Les trois raisons expliquent la préférence accordée à ce mode d'amorçage, le circuit de gâchette doit être attaqué de préférence par un générateur d'impulsions de courant. L'impulsion doit être par rapport à la cathode.

Dans notre étude, le fonctionnement du gradateur sur charge (R,L) a nécessité l'utilisation d'un train d'impulsions pour éviter le passage au fonctionnement redresseur monoalternance.

Cette méthode présente l'avantage de prélever peu d'énergie

moyenne sur le circuit de Commande, elle facilite encore l'attaque des thyristors par le biais d'un transformateur d'impulsions, ce qui isole galvaniquement le circuit de puissance du circuit de commande.

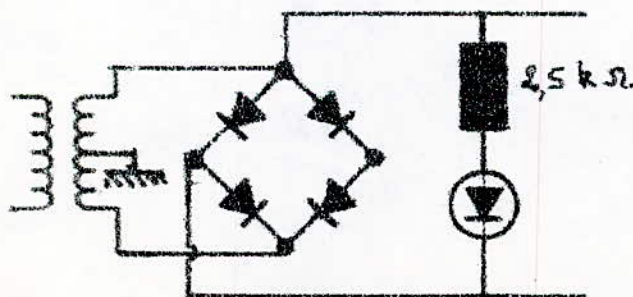
Le circuit de Commande du gradateur est constitué essentiellement de six étages

- 1° Synchronisation
- 2° Génération de la dent de scie.
- 3° La comparaison
- 4° Le multivibrateur astable
- 5° La mise en forme
- 6° L'amplification en courant

### 3.1 Synchronisation

Elle se fait à l'aide d'un transformateur à point milieu  $220/\pm 45V$  qui alimente un pont redresseur.

On obtient à la sortie un redressement monophasé double alternance.



### 3.2 Generation de la dent de scie

Le signal de sortie du pont redresseur attaque un transistor  $T_1$  du type 2N1711 a travers une résistance  $R_3$  qui sert a limiter le courant.

Le collecteur de  $T_1$  attaque la base d'un autre transistor du même type, quand  $T_1$  est bloqué  $T_2$  sera saturé et vice-versa. De ce fait, le signal obtenu sera rectangulaire.

A l'aide d'un amplificateur opérationnel monté en intégrateur, le signal continu d'entrée est intégré. On obtient un signal sous forme de dents de scie.

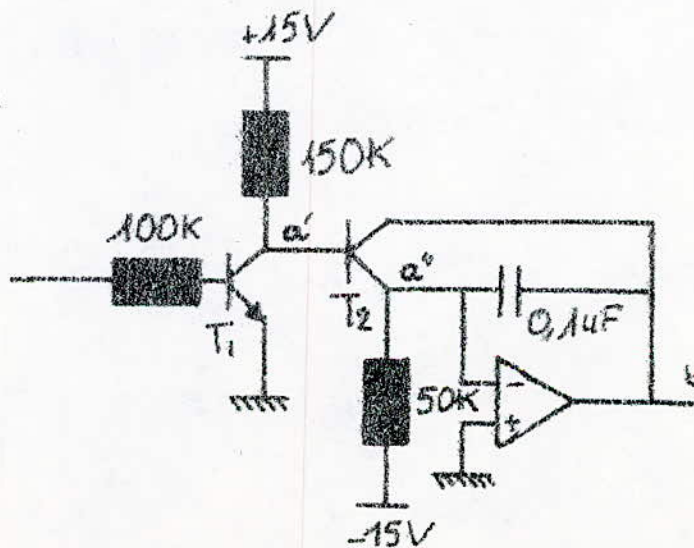
#### Calcul de l'amplitude de la dent de scie

$$V_a = -\frac{1}{C} \int i dt$$

avec  $i = \frac{V}{R_3}$  d'où  $V_a = -\frac{V}{R_3 C} t$

$V = -15V$     $R_3 = 150 k\Omega$     $C = 0,1 \mu F$     $t = 10ms$

$V_a = 10V$

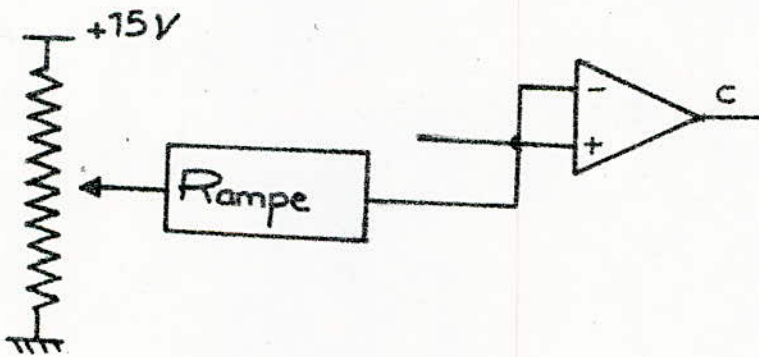


### 3.3 Le comparateur

Le dispositif est constitué d'un  $\mu A 741$  dont l'entrée positive est reliée à la sortie du générateur de la dent de scie dont l'amplitude varie entre 0 et 10V et qui utilise une tension fixe  $e_1$  (tension de référence), l'entrée négative à un potentiomètre à travers une rampe.

Dès que la tension de comparaison  $u_c$  dépasse la tension de référence  $e_1$ , la sortie atteint la saturation dans le sens négatif, tandis que si la tension  $u_c$  est inférieure à  $e_1$ , la sortie atteint la saturation positive.

Remarquons que la largeur des créneaux à la sortie du comparateur dépend de la valeur de la tension de comparaison  $u_c$ .



### 3.4 Le multivibrateur astable

Un multivibrateur astable est un oscillateur de relaxation produisant des signaux rectangulaires et qui passe spontanément d'un équilibre "quasi-stable" à un autre équilibre "quasi-stable" et revient tout aussi spontanément à l'état initial.



### Calcul de la période du multivibrateur astable

Dans le cas où R est relié à la masse, le signal de sortie est alternatif.

La demie période correspond au temps mis par l'entrée (-) pour passer du potentiel  $e_{+1}$  à  $e_{+2}$  ou réciproquement ( $t_2 = t_1$ ).

c'est à dire de  $+\frac{R_3}{R_2+R_3} V_{sat}$  à  $-\frac{R_3}{R_2+R_3} V_{sat}$ .

La charge de C est décrite par l'équation :

$$e_- = A \exp\left(-\frac{t}{R_1 C}\right) + B$$

$$\text{avec } e_-(t=0) = e_{+1} = \frac{R_3}{R_2+R_3} V_{sat} = A + B$$

$$e_-(t=\infty) = -V_{sat} = B$$

$$\text{d'où } A = \frac{R_2 + 2R_3}{R_2 + R_3} V_{sat}$$

$$e_-(t) = (e_{+1} + V_{sat}) \exp\left(-\frac{t}{R_1 C}\right) - V_{sat}$$

$$e_-(t) = V_{sat} \left[ \frac{2R_3 + R_2}{R_2 + R_3} \exp\left(-\frac{t}{R_1 C}\right) - 1 \right]$$

La tension  $e_{+2}$  est atteinte au bout du temps  $t_1$  défini par :

$$e_{+2} = (e_{+1} + V_{sat}) \exp\left(-\frac{t_1}{R_1 C}\right) - V_{sat}$$

$$-\frac{R_3}{R_3 + R_2} = \frac{R_2 + 2R_3}{R_2 + R_3} \exp\left(-\frac{t_1}{R_1 C}\right) - 1$$

$$\text{soit } t_1 = R_1 C \log\left(1 + 2 \frac{R_3}{R_2}\right)$$

La période s'écrit donc :

$$T = 2t_1 = 2R_1C \log \left( 1 + 2 \frac{R_3}{R_2} \right)$$

valeurs expérimentales :

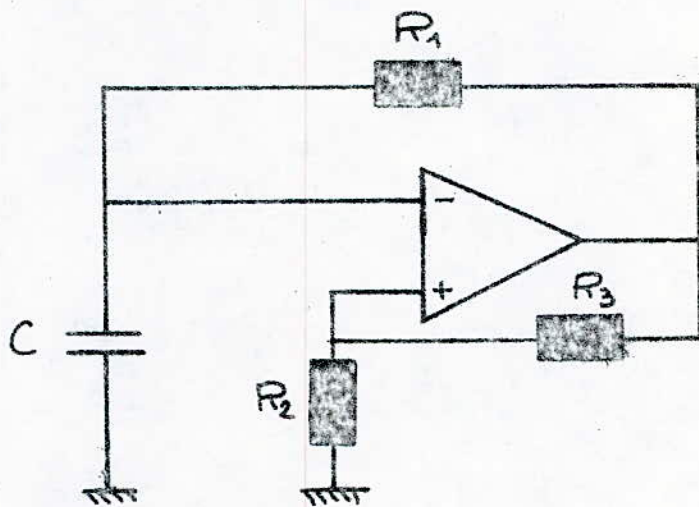
$$R_1 = 1k\Omega$$

$$C = 0,1 \mu F$$

$$R_2 = R_3 = 22k\Omega$$

$$T = 2 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \log 3 = 2,2 \cdot 10^{-4} s$$

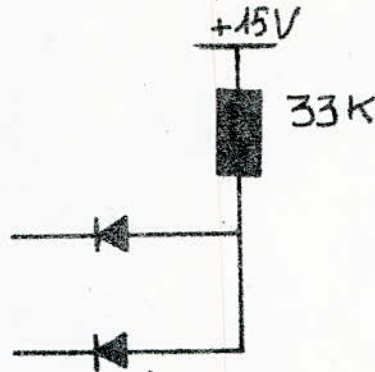
$$T = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad f = 4,6 \text{ kHz}$$



### 3.5 La mise en forme

C'est le produit du créneau obtenu à la sortie du comparateur par le signal délivré par le multivibrateur à l'aide d'une fonction AND réalisée par des diodes montées en parallèle et une résistance, la sortie est à la masse quand l'une des diodes conduit elle est au potentiel +15 quand les deux diodes sont bloquées par des signaux d'entrée d'amplitude

de +15V. On obtient à la sortie le signal de l'astable modulé par le créneau.



### 3.6 Amplificateur de courant

L'impulsion délivrée par le comparateur a une amplitude en tension suffisante mais sa puissance est faible car l'amplificateur opérationnel ( $\mu A 741$ ) ne peut délivrer un grand courant suffisant pour amorcer le thyristor d'où la nécessité d'amplifier ce courant.

Les éléments de base de notre étage amplificateur sont 2 transistors du type 2N 2219

#### Calcul des composants

Le courant de gâchette est  $I_g = 170 \text{ mA}$  pour une tension de 3V. Le transformateur d'impulsions est de rapport unitaire.

Les deux transistors fonctionnent en régime de commutation

L'équation des tensions au niveau du collecteur de  $T_2$  est:

$$15V = V_{ce \text{ sat}} + R_{c2} I_{c2} + 3V$$

avec  $3V = V_{gk}$

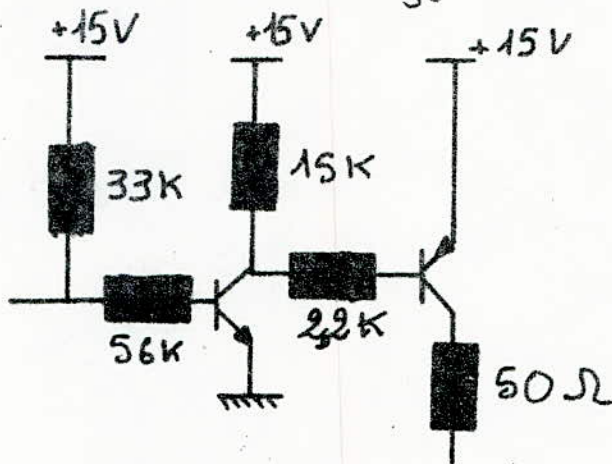
$$V_{ce \text{ sat}} = 0,8V$$

$$I_{c2} = 170 \text{ mA}$$

$$R_{C_2} = \frac{15 - 3 - 0,8}{0,17} = 65,8 \Omega$$

Nous avons pris une résistance de  $50 \Omega$

Dans ce cas  $I_{C_2} = \frac{15 - 3,8}{50} = 224 \text{ mA}$



La puissance que doit supporter cette résistance pendant la demi-séquence correspondante est :

$$P = \frac{1}{2} R_{C_2} I_{C_2}^2 = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot (0,224)^2$$

$$P =$$

Les résistances prises sont de  $50 \Omega$  (2W)

Pour le fonctionnement en régime de saturation du transistor le courant de base  $I_{B_2} > I_{B_2 \text{ min}} = \frac{I_{C_2}}{\beta_{\text{min}}} = \frac{224}{100} = 2,24 \text{ mA}$

$$\text{Donc } R_{B_2} < \frac{15 - V_{ce, \text{sat}} - V_{ce, \text{sat}}}{I_{B_2 \text{ min}}}$$

$$R_{B_2} < \frac{15 - 2 \cdot 0,8}{2,24} = 6 \text{ k}\Omega$$

La valeur prise de  $R_{B_2}$  est de  $2,2 \text{ k}\Omega$  ( $\frac{1}{4} \text{ W}$ )

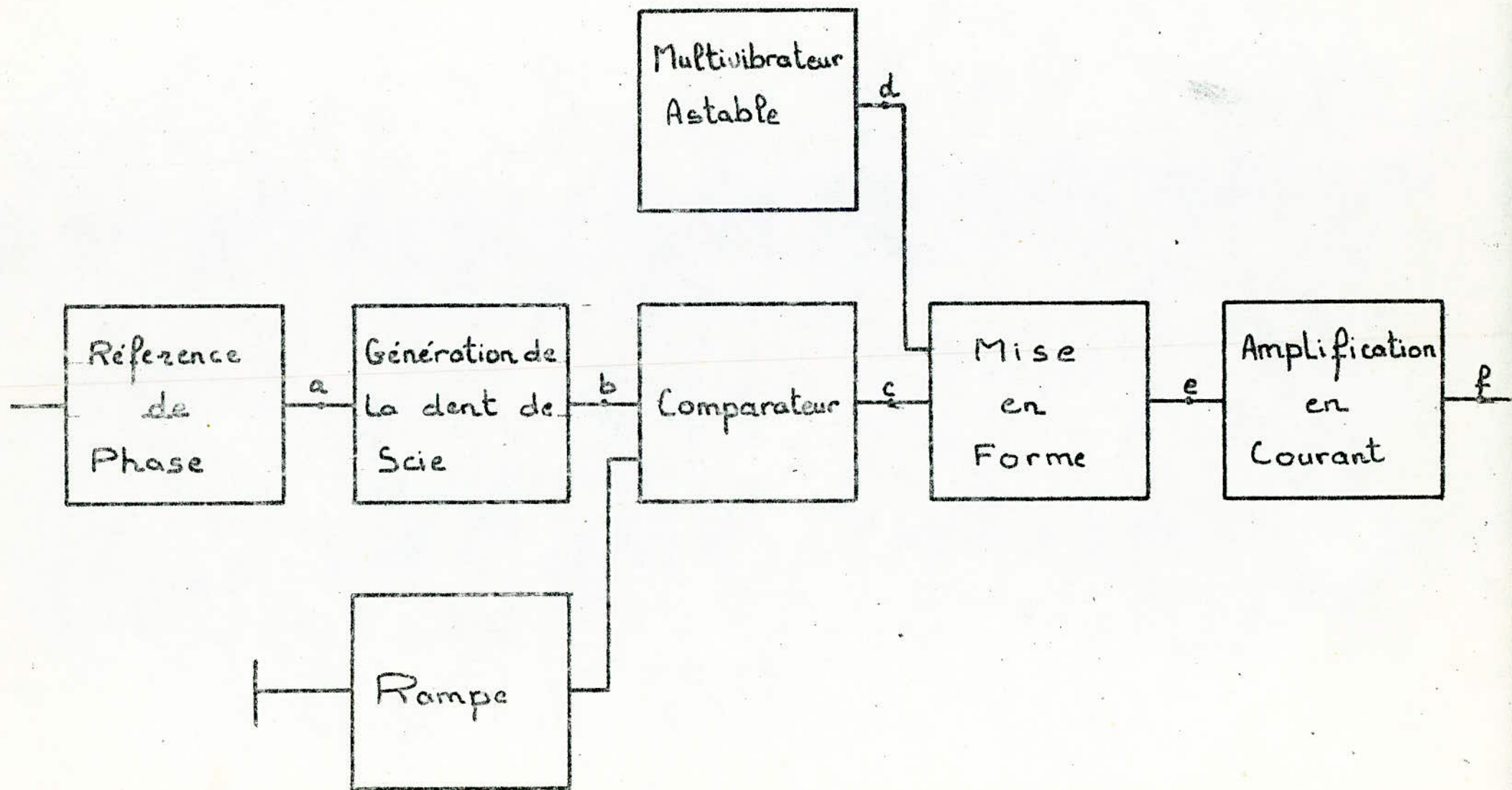
$$I_{c_1} = \frac{15 - 0,8}{15} \approx 1 \text{ mA}$$

$$I_c = I_{c_1} + I_{c_2} = 2,24 + 1 = 3,24 \text{ mA}$$

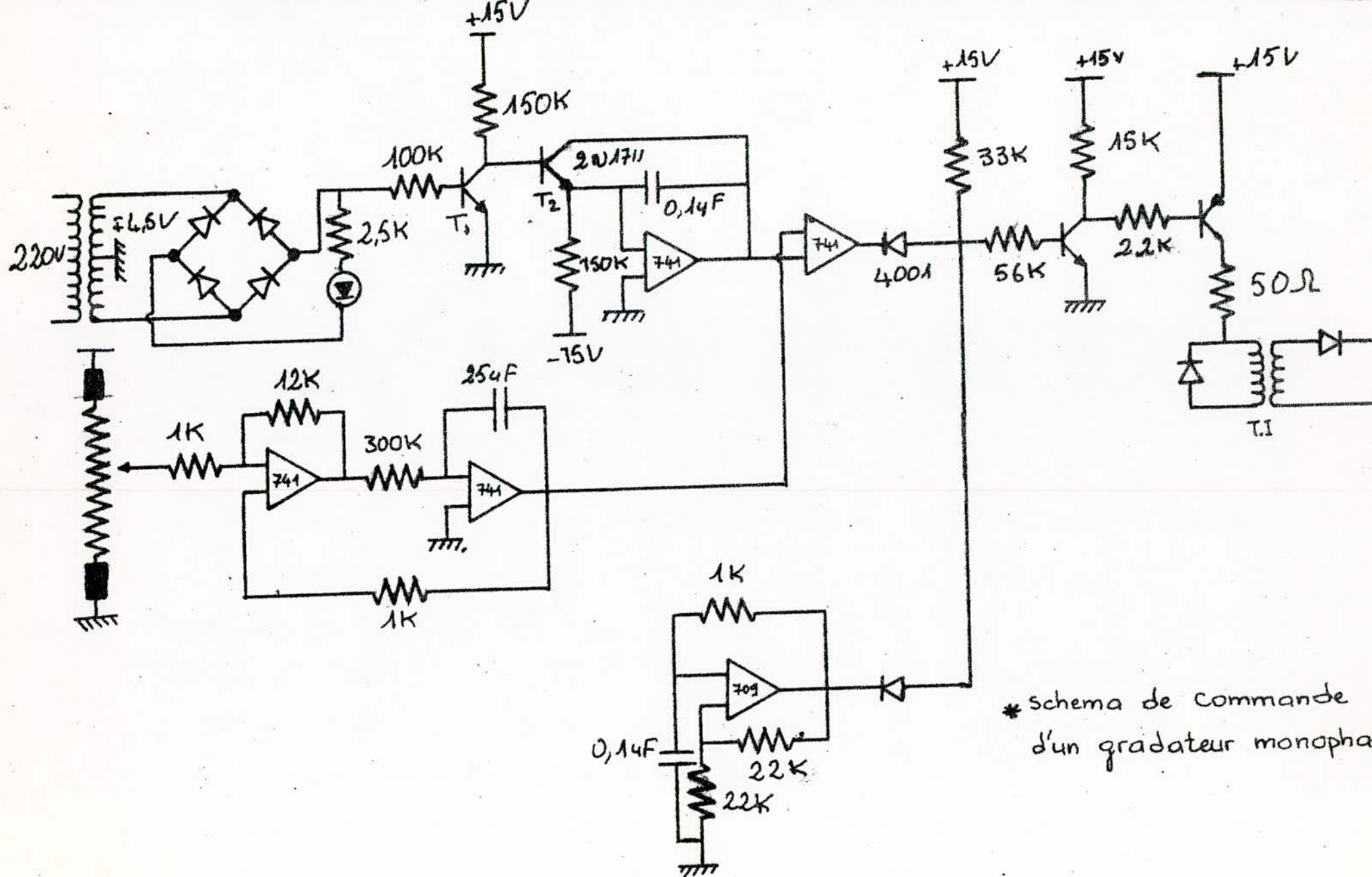
$$I_{B_1} > I_{B_{\min}} = \frac{3,24}{100} = 3,24 \cdot 10^{-2} \text{ mA}$$

$$R_{B_1} < \frac{15}{3,24 \cdot 10^{-2}} = 460 \text{ k}\Omega$$

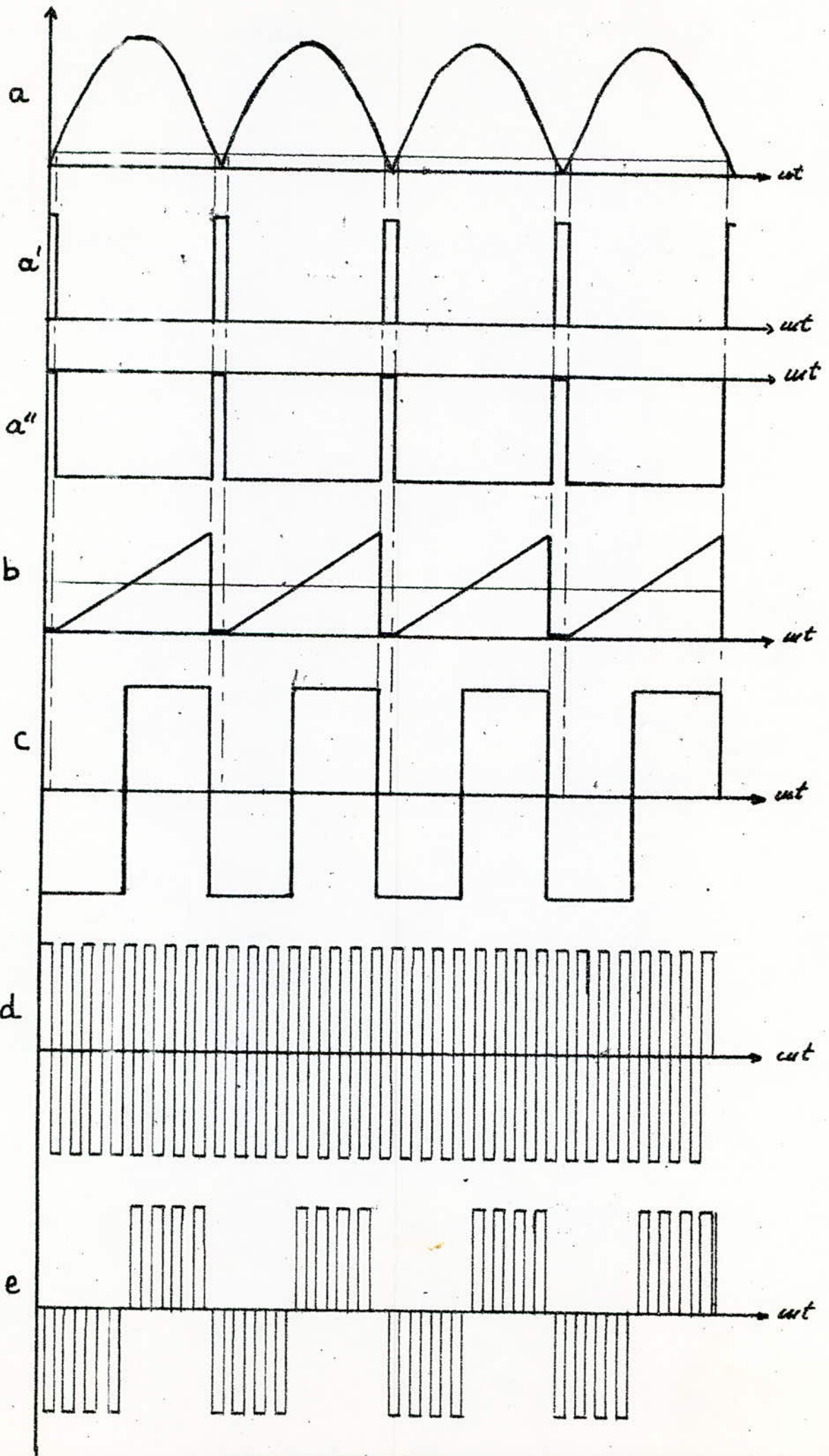
Nous avons pris une résistance de  $56 \text{ k}\Omega$ .



\* Schema synoptique de la commande électronique d'un gradateur



\* Schema de commande d'un gradateur monophasé





### 3.7 Alimentation stabilisée

Les caractéristiques et les performances d'un module électronique (Amplificateur, oscillateur, ...) dépendent de la polarisation des éléments actifs (généralement des transistors) dont il est constitué.

Il est donc nécessaire d'alimenter ces circuits avec des sources de courant ou de tension aussi stables que possible.

Malheureusement tout générateur est soumis à des fluctuations. Les méthodes utilisées pour résorber ou corriger ces perturbations consistent à utiliser, soit un élément stabilisateur (diode zener) qui absorbe partiellement certaines fluctuations grâce à ses propriétés non linéaires, soit un régulateur.

Pour notre commande nous avons réalisé une alimentation stabilisée (+15V, 0, -15V) qui assure l'alimentation des amplificateurs opérationnels ( $\mu A741$ ,  $\mu A709$ ).

#### calcul des composants

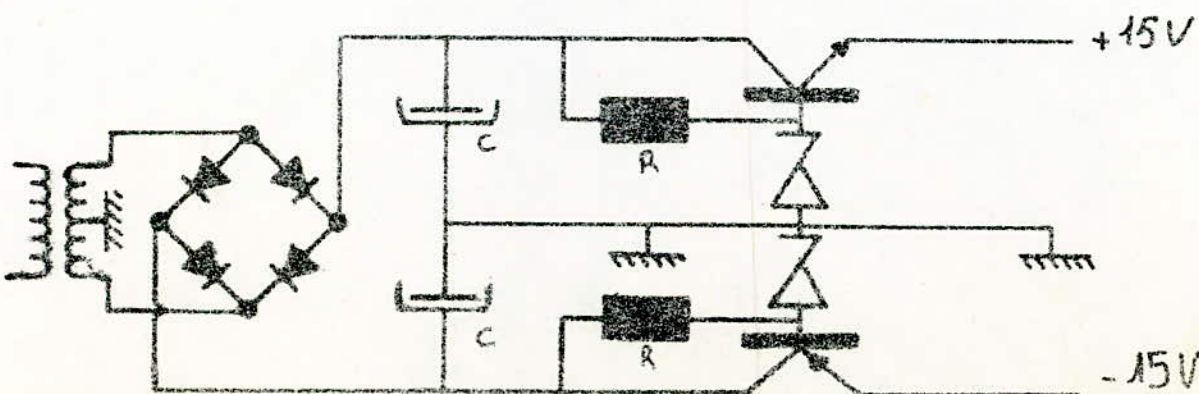
La tension délivrée par le transformateur = 32V       $V_Z = 15V$        $P_Z = 0,4W$

$$I_Z \leq \frac{P_Z}{V_Z} = \frac{0,4}{15} = 0,027 A$$

$$R = \frac{32 - 15}{25 \cdot 10^{-3}} = 680 \Omega$$

Nous avons pris  $I_Z = 25mA$

$$C = 2200\mu F$$



# CHAPITRE IV

## demarrage d'un moteur asynchrone à l'aide d'un gradateur triphasé

### 4.1 Introduction

Le moteur asynchrone reste le convertisseur électromécanique le plus simple, le moins cher et le plus robuste.

Les inconvénients qu'il présente sont sa vitesse liée aux paramètres  $\omega, g, u$  et ses caractéristiques de démarrage caractérisées par des valeurs importantes des courants statoriques (par rapport à son courant nominal) et les valeurs de son couple.

Dans ce type de fonctionnement il est parfois nécessaire de limiter les courants d'appel pour ne pas surcharger la source d'alimentation, ainsi que pour le couple développé par le moteur asynchrone ce qui permet une protection des parties mécaniques de ce dernier.

En effet, au démarrage le couple d'un moteur asynchrone varie d'une manière sensible comme le carré de la tension et la réduction du couple se traduit par un allongement du temps de démarrage et des échauffements excessifs qui peuvent entraîner la détérioration de la machine. Pour un moteur asynchrone à cage, les appels sont de l'ordre de 4,5 à 7 fois le courant nominal. Ceci semblerait condamner dans certains cas les moteurs

asynchrones à cage s'il n'y avait pas des possibilités de réduire les appels de courant lorsque le couple de démarrage est faible.

#### 4.2 Différents types de démarrage :

Pour que le démarrage d'une machine asynchrone soit possible en fonctionnement moteur, deux conditions doivent être remplies :

- Le couple doit être suffisant pour entraîner la charge.
- Le courant doit être relativement faible pour ne pas entraîner la détérioration de la machine.

#### Moteur à rotor bobiné

##### 4.2.1 Démarrage rotorique sur résistances

Ce mode de démarrage peut être appliqué à n'importe quelle machine, mais il est plus particulièrement réservé aux démarrages difficiles, longs et fréquents et aux machines nécessitant une mise en vitesse progressive ou un réglage de vitesse.

L'insertion de résistances en série dans l'enroulement rotorique permet à la fois d'avoir un grand couple de démarrage et un faible courant à cet instant.

Comme autre avantage on citera la possibilité de démarrage progressif et le prix intéressant en haute tension et pour des puissances importantes ( $P > 100 \text{ ch}$ ).

## Moteur à rotor en court-circuit

### 4.2.2 Démarrage direct:

ce mode de démarrage est utilisé dans des moteurs à grand nombre de pôles (faible vitesse) pour lesquels le rapport  $I_d/I_n$  est faible ( $I_d$ : courant de démarrage,  $I_n$ : courant nominal)

Il est utilisé sur des moteurs de petite puissance ou de puissance faible par rapport à la puissance installée, ou sur des machines qui ne nécessitent pas une mise en vitesse progressive.

Avantages: Simplicité extrême de l'appareillage, couple énergétique.

Inconvénients: Appel de courant important, couple de décollage énergétique provoquant un démarrage rapide, ce qui peut être dangereux pour la transmission mécanique.

### 4.2.3 Démarrage par insertion de résistances dans le circuit statorique

A la fin du démarrage, lorsque le moteur aura atteint la vitesse nominale, on court-circuite les résistances insérées.

Avantages: possibilités de choisir le couple de décollage.

Inconvénients: l'appel de courant ne diminue que proportionnellement à la racine carrée du couple, consommation d'énergie active au démarrage.

Utilisation: pour les machines démarrant sous faible couple même si celui-ci augmente au cours de la mise en vitesse.

#### 4.2.4 Démarrage étoile-triangle

En démarrant en étoile, le courant d'appel est réduit au tiers de sa valeur en direct, une fois que le moteur a vaincu son inertie, on le branche en triangle afin d'augmenter le couple.

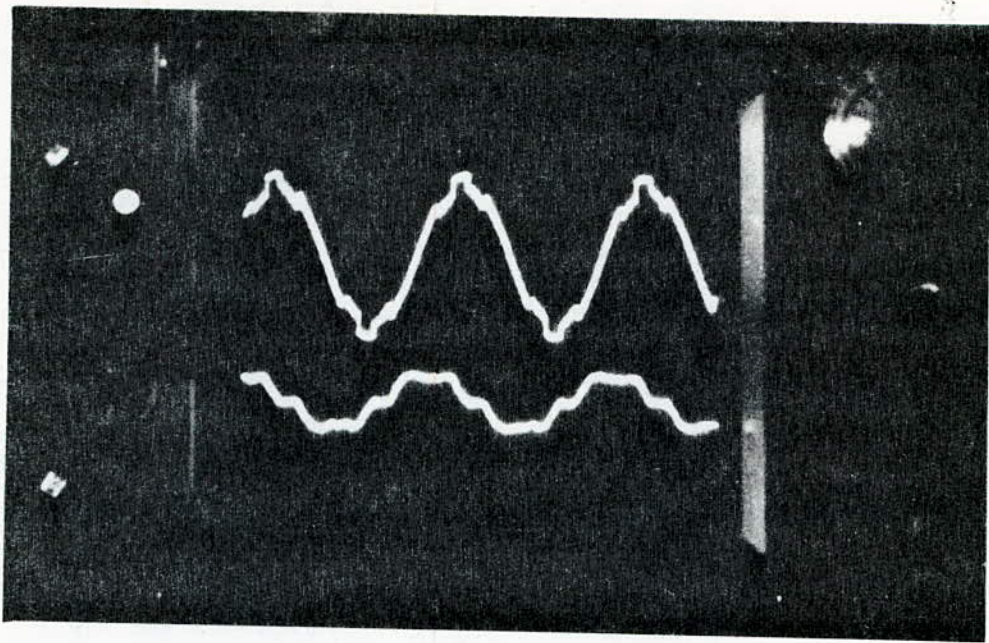
Inconvénients : Couple réduit au tiers de sa valeur en direct, ne permettant pas souvent d'atteindre une vitesse suffisante, le passage en triangle permet d'avoir une pointe de courant acceptable donc un couple suffisant pour entraîner la machine à son régime normal, coupure inévitable dans l'alimentation du moteur qui fait apparaître sur le réseau des phénomènes transitoires pouvant être gênants.

#### 4.2.5 Démarrage par autotransformateur sans coupure

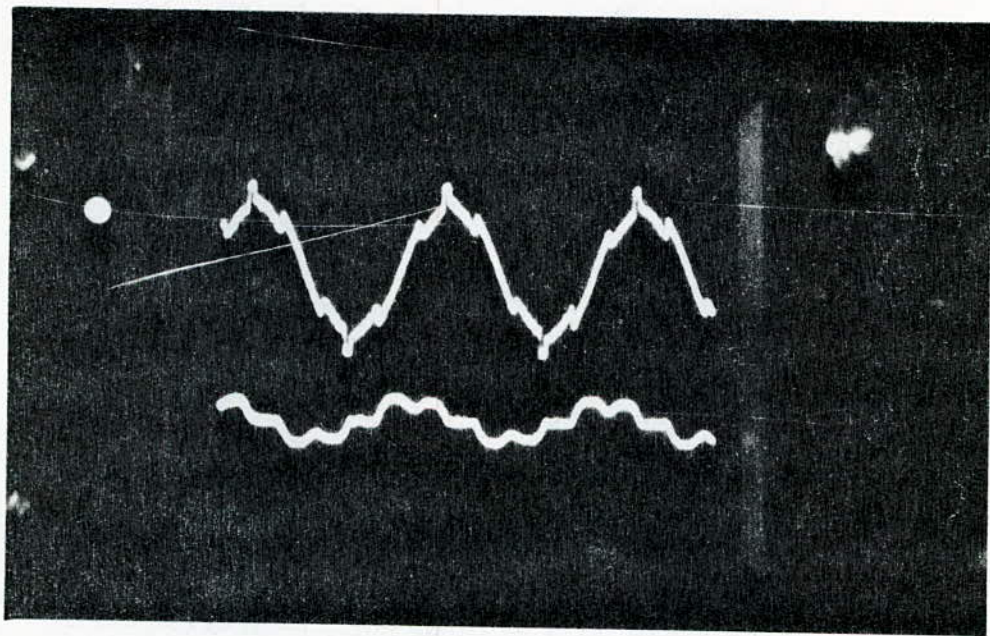
Dans ce type de démarrage on a la possibilité de choisir le couple de démarrage, l'abaissement de l'appel de courant est proportionnel à celui du couple.

Ce procédé est utilisé dans tous les cas où l'on doit limiter l'appel de courant tout en conservant un couple acceptable.

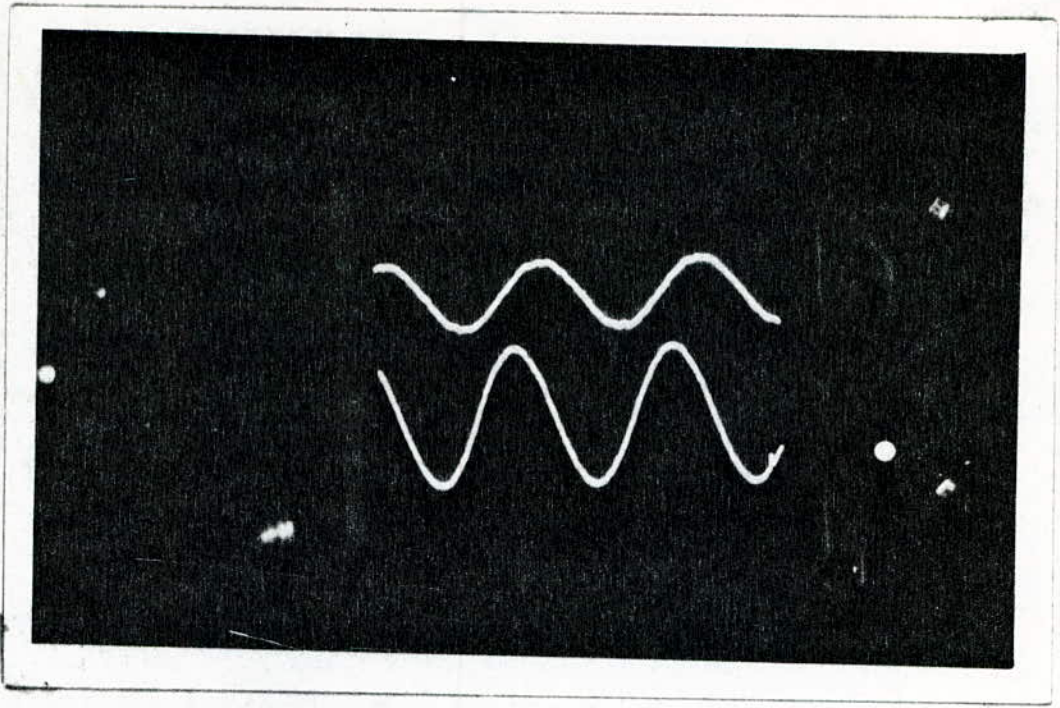
Pour améliorer les caractéristiques électromécaniques du moteur asynchrone triphasé à cage nous lui avons conçu un convertisseur statique "Gradateur triphasé" muni d'une rampe dont le rôle est de démarrer le moteur progressivement en lui donnant une tension suffisante et limitant le courant d'appel pour éviter les conséquences citées précédemment.



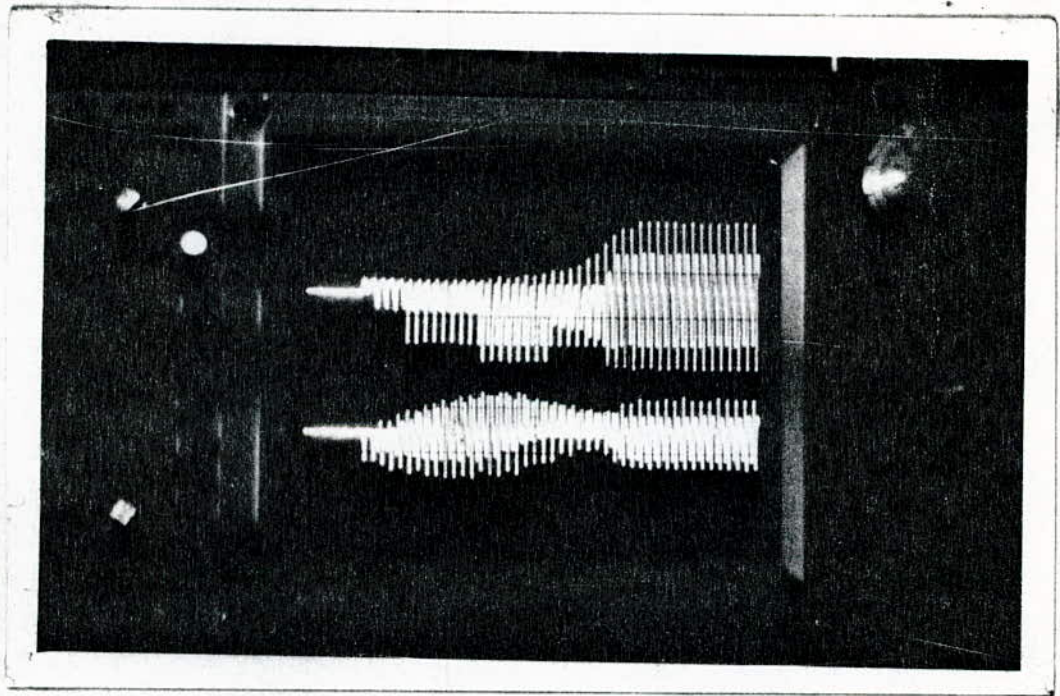
Allures de la tension et du courant aux bornes d'une charge triphasée active (moteur asynchrone) pour un angle  $\alpha_1$ .



Allures de la tension et du courant aux bornes d'une charge triphasée active (moteur asynchrone) pour un angle  $\alpha_2$ .



Allures de la tension et du courant aux bornes d'une charge triphasée active (moteur asynchrone) en régime permanent



Allures de la tension et du courant aux bornes d'une charge triphasée active (moteur asynchrone) en régime dynamique (démarrage du moteur)

## CONCLUSION

Le travail que nous avons entrepris consiste à étudier et réaliser un convertisseur statique type "Gradateur triphasé tout thyristors" permettant de démarrer un moteur asynchrone triphasé à cage d'écurueil par variation de la tension.

Néanmoins, nous pouvons dire que notre travail nous a permis de nous familiariser avec un domaine très utilisé en industrie et dont l'utilité s'est faite sentir ces dernières décennies, qui est en l'occurrence l'électronique de puissance. Par conséquent, nous avons relativement approfondi nos connaissances acquises durant notre cycle universitaire. Au cours de notre réalisation nous avons pu constater la différence qui existe entre la théorie et la pratique et les problèmes liés à cette dernière.

Bien entendu, on a accordé une grande importance au calcul des composants formant les divers étages de notre commande électronique.

Et ce n'est qu'après avoir passé en revue le fonctionnement de notre convertisseur statique sur différentes charges, qu'on a opté pour ce type de commande vu sa



sa cohérence et sa logique.

Cependant, il convient de préciser qu'il existe d'autres types de commande.

Nous remarquons que le convertisseur donne des résultats appréciables et qui concordent bien avec ceux de la pratique.

On aurait bien aimé faire l'étude complète du gradateur triphasé, en se penchant sur les contraintes engendrées par les harmoniques et l'asservissement de notre convertisseur en courant et en tension. Mais, vu l'étroitesse du temps on s'est contenté de l'étude et de la réalisation du gradateur.

Nous espérons que notre maquette sera utile à usage didactique et nous souhaitons que notre travail puisse approfondi davantage et qui pourra faire objet d'un autre projet de fin d'études.

# Annexe

Les thyristors que nous avons utilisé pour la réalisation de la partie puissance de notre gradateur triphasé sont des SKT 100, leurs caractéristiques sont les suivantes:

Tension crête inverse

$$V_{MR} = 1,2 \text{ kV}$$

Courant nominal continu

$$I_d = 100 \text{ A à } 85^\circ \text{C}$$

Courant de maintien

$$I_H = 170 \text{ mA à } 25^\circ \text{C}$$

Variation de tension

$$\frac{dV}{dt} = 1,5 \text{ kV}/\mu\text{s à } 25^\circ \text{C}$$

Surintensité à  $25^\circ \text{C}$

$$I_m = 2,5 \text{ kA}$$

Température maximale de la jonction

$$\theta = 130^\circ \text{C}$$

chute de tension

$$V_f = 1,6 \text{ V à } I_d = 70 \text{ A}$$

temps d'extinction

$$t_{\text{off}} = 150 \mu\text{s}$$

Circuit de gâchette

$$P_{\text{max}} = 1 \text{ W}$$

$$V_G = 3 \text{ à } 5 \text{ V}$$

$$I_G = 170 \text{ mA}$$

Les transistors de l'amplificateur de courant sont des 2N 2219 ayant pour caractéristiques:

Tension maximale base - collecteur

$$V_{BCm} = 60 \text{ V}$$

Tension maximale collecteur - émetteur

$$V_{CEm} = 30 \text{ V}$$

Tension maximale base - émetteur

$$V_{BEm} = 5 \text{ V}$$

courant maximal du collecteur

$$I_{cm} = 800 \text{ mA}$$

Gain minimal

$$\beta_{\text{min}} = 100$$

# BIBLIOGRAPHIE

- 1° Guy SEQUIER L'électronique de puissance  
Ed. DUNOD 1979
- 2° H. BÜHLER Electronique de puissance  
Ed DUNOD 1982
- 3° H. BÜHLER Electronique de réglage et de commande  
Ed DUNOD 1982
- 4° HELLAL ABDELHAFID - HEMICI BOUALEM - MOUMEN K.  
Association onduleur autonome Machines asynchrones,  
réalisation d'un onduleur de type sans thyristors auxi-  
liaires.  
Projet de fin d'études JUIN 1983
- 5° STIHI OMAR - TAHMI REDOUANE - MAAZI HAMID  
Etude et réalisation d'une maquette à thyristors pour  
les redressements mono et triphasé simple et double voie.  
Projet de fin d'études JUIN 1984
- 6° "Encyclopédies des sciences industrielles"  
Electricité - Electronique - Généralités  
Ed. QUILLET 1983
- 7° Robert chauprade et FRANCIS MILSANT  
Commande électronique des moteurs à courant alternatif  
Ed Eyrolles 1980

- 8/ J. MORNAND  
Schemas d'électronique  
DUNOD 1979
- 9/ FRANCIS MILSANT  
Cours d'électronique  
TOME II Composants électroniques  
Eyrolles 1978
- 10/ FRANCIS MILSANT  
Cours d'électronique  
TOME 5 DIODES - THYRISTORS - COMMANDE DES MOTEURS  
EYROLLES 1981
- 11/ CH. MASSELOT  
M. GIRARD  
Electronique non linéaire  
Ed. MASSON 1978
- 12/ A. PEREZ - MAS  
J.-M. FOUCHET  
Electronique pratique  
Ed. Technique - Vulgarisation **TV** 1983

