

4/73

UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

202

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

PROJET DE FIN D'ETUDES

CONTRIBUTION A L'ETUDE
 ET A LA SIMULATION
 DES CONVERTISSEURS STATIQUES

LIGNES ELECTRIQUES HAUTE TENSION A COURANT CONTINU

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية
 — المكتبة —
 —————
 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

propose par :
A. RAJAGOPALAN

Etudie par :
A. DEHOUCHE

Membres du jury

- M.M. STRYAPANE Président
- DE FORNEE
- MALEVAL
- RAJAGOPALAN

PROMOTION 1969-73

-o-o-o-o-o- REMERCIEMENTS -o-o-o-o-o-

Qu'il me soit permis de remercier, tous
les Professeurs qui ont contribué à ma formation.

Que Messieurs : RAJAGOPALAN et STRIAPAN
trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance,
pour tous les conseils qu'ils m'ont prodigués tout le
long de cette étude, sans oublier Monsieur DE FORNEL
qui a bien voulu venir nous honorer de sa présence ,
malgré ses occupations .

Je ne termine pas sans remercier tous ceux
qui de près ou de loin m'ont apporté leur aide.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	...	5
TRANSPORT D'ENERGIE A COURANT CONTINU en HAUTE TENSION	...	8
ETUDE DU PONT DE GRAETZ : METHODE CLASSIQUE	...	13
ETUDE DU PONT DE GRAETZ : METHODE DU PROCESSUS CENTRAL	...	17
MISE EN EQUATIONS DU SYSTEME	...	22
ORGANIGRAMME DE CALCUL	...	25
<u>ANNEXE</u> : PROGRAMME EN LANGAGE FORTRAN IV (IBM 1130)	...	29
CONCLUSION	...	36

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES

I_{d1}, I_{d2} I_d : courants de charge continus; A

V_d, V_{d1}, V_{d2} : tensions continues

V_{AKn} : tensions entre anode et cathode thyristor n , ($n=1,2,3,4,5,6$)V



3ϕ : réseau.

P: puissance W

R,S,T: phases

I_R, I_S, I_T : courants de phases; A

URS, URT, USR, UST, UTR, UTS, : tensions entre phases; V

T1, T2...T6: thyristors

I_{Tn} : courant dans le thyristor n , ($n=1,2,3,4,5,6$) ; A

e_a, e_b, e_c : tensions simples instantanées appliquées aux processus central, V

e_{ab}, e_{bc}, e_{ca} : tensions entre phases appliquées aux processus central; V

f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 : dérivées par rapport au temps de: $i_1, I_{d1}, i_2, I_{d2}, V_c$

L_1 : inductance de fuite par phase du transformateur ramenée au secondaire ; H

r: résistance par phase du transformateur ramenée au secondaire ,

i: courant de court circuit lors de la commutation; A

R_{d1}, R_{d2}, R_d : résistance de la ligne à courant continu ; A

C: capacité ; F

t: temps ; s

θ : angle d'amorçage; rad

γ : angle de commutation ; rad

$\delta = (\bar{I}L - I)$ marge de sécurité ; rad

n: entier ≥ 0

t_0 : temps de commencement du processus : s

U_{Rn}, U_{Sn}, U_{Tn} : tensions simples entre phase et neutre

TR1, TR2: transformateurs

Introduction

Importance du transport d'énergie à courant continu haute tension.

De nombreuses installations importantes de transport d'énergie à courant continu haute tension sont en service et fonctionnent d'une manière satisfaisante. La confiance qu'on accorde au courant continu est mise en évidence par les autres projets importants qui sont actuellement en cours de construction ou d'étude.

une caractéristique essentielle de ces projets est que le courant continu est en compétition directe avec la méthode de transport d'énergie en courant alternatif. En même temps ceci a pour résultat: la mise en utilisation de ressources potentielles d'énergie éloignées des zones de consommation, ainsi que pour la traversée de certaines agglomérations très peuplées.

Des exemples de pays à ressources énergétiques éloignées des centres de consommations, citons: URSS, U S A, SUEDE, NOUVELLE-ZELANDE, CANADA; L'ALGERIE, avec les ressources énergétiques concentrées au SAHARA aura peut-être recours à ce moyen de transport pour l'alimentation des zones industrielles du Nord.

Inconvénients du transport d'énergie par courant alternatif

L'isolation des installations ne doit pas correspondre la tension U mais à la tension $U\sqrt{2}$; soit 41% supérieure, il en résulte une augmentation des frais d'installation.

Pour utiliser la pleine capacité du réseau de transport, il est nécessaire d'améliorer le facteur de puissance. Cette amélioration nécessite des installations coûteuses, ce qui augmente dans une large mesure le prix du KW/h installé.

Les conducteurs sont mal employés du fait de l'effet pelliculaire.

- L'interconnexion des différents réseaux alternatifs pose de sérieux problèmes de synchronisation et de réglage.
- Le phénomène de résonance peut introduire des problèmes de surtensions locales.
- Dans les réseaux téléphoniques voisinant la ligne de transport introduction de parasites ce qui oblige à faire des installations éloignées les uns des autres le plus possible et imposent des intersections rigoureuses là où elles sont inévitables.

Inconvénients du transport par courant continu haute tension :

Le transport d'énergie à courant continu évite les inconvénients précédents mais l'énergie doit être produite sous forme de courants alternatifs. En effet :

- La production d'énergie sous forme de courants alternatifs est moins coûteuse que sous forme continu.
- Les tensions produites par les alternateurs sont plus élevées que celles produites par les dynamos.
- Le courant alternatif se prête nettement mieux que le courant continu aux élévations et abaissements de tensions nécessaires au transport et à l'utilisation.
- L'énergie doit être distribuée, sauf exceptions (électrolyse électrochimie, traction) sous forme de courants alternatifs.

Donc le redressement n'aura d'utilisation que pour le transport ; d'où la nécessité d'employer des unités très puissantes de redresseurs et d'onduleurs placés respectivement à la sortie des centrales et avant la livraison de cette énergie à l'utilisation.

EVOLUTION DES REDRESSEURS

I.1 Inconvénients des ponts à valves à cathode de mercure

Les premières installations de convertisseurs montées dans le monde ont été des installations à valves à cathode de mercure. Bien que ces installations aient ^{fait} leurs preuves il subsiste encore certains problèmes tels que :

- nécessité d'avoir des auxiliaires (entretien du vide, régulateur de température des anodes, des filtres etc..) très coûteux.
- existence de retours d'arcs très fréquents, contrôle difficile de la température.

C'est pour cette raison que la dernière génération des convertisseurs montés se fait de plus en plus à ponts à thyristors. Actuellement ^{les} recherches et les expérimentations se font avec ces composants.

I.2 Les ponts à thyristors

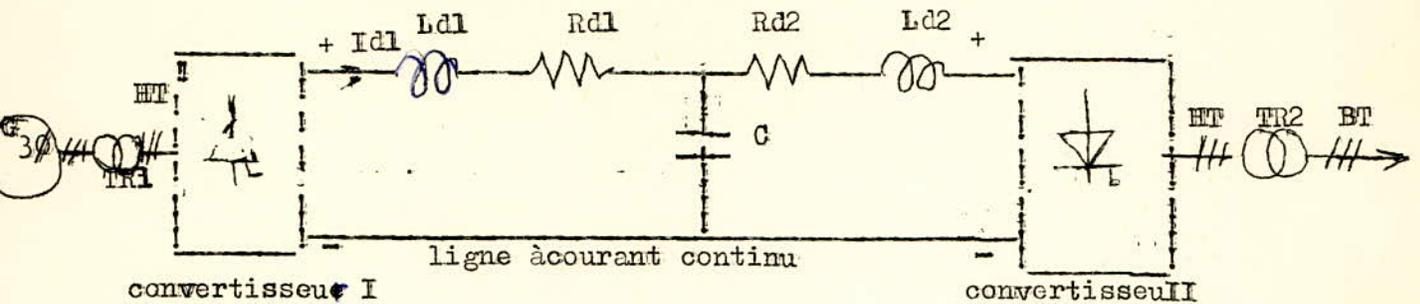
La remarquable avance des semi conducteurs de ces dernières années, permet une production de masse de thyristors. Ceci offre la possibilité de les utiliser pour la construction de convertisseurs à haute tension.

Une fois réalisés, les convertisseurs à thyristors, ont, comparés aux convertisseurs à valves à vapeur de mercure, des avantages techniques et économiques tels que le non retour d'arcs, l'inutilité de la pompe à vide, un contrôle aisé de la température et de la capacité.

D'un autre côté, on porte actuellement beaucoup d'attention à l'emploi de moyens de calcul pour le réglage d'un réseau d'énergie sous l'aspect de la répartition économique des charges. A cet effet, il faut mettre l'accent sur le fait que le calculateur digital est le moyen le plus efficace actuellement connu. En outre le calculateur digital permet de faire une stimulation rapide et par conséquent de déterminer les meilleures conditions de fonctionnement en un temps très bref.

I Transport d'énergie à courant continu haute tension

I 1 Schéma de principe



A la sortie du générateur le courant passe par le transformateur TR1 où sa tension est élevée. De là il passe par le redresseur I avant d'être conduit par la ligne à courant continu. A l'autre extrémité de la ligne, le courant est ondulé par le groupe onduleur II, puis passe par un transformateur avant d'être livré à l'utilisation.

Remarque

La ligne bifilaire peut être réduite à une ligne unifilaire dans le cas où le retour par terre ou par mer selon le cas ne perturbe pas les lignes téléphoniques et les instruments de navigations.

I. 2 Interconnexions en courant continu H.T de deux réseaux

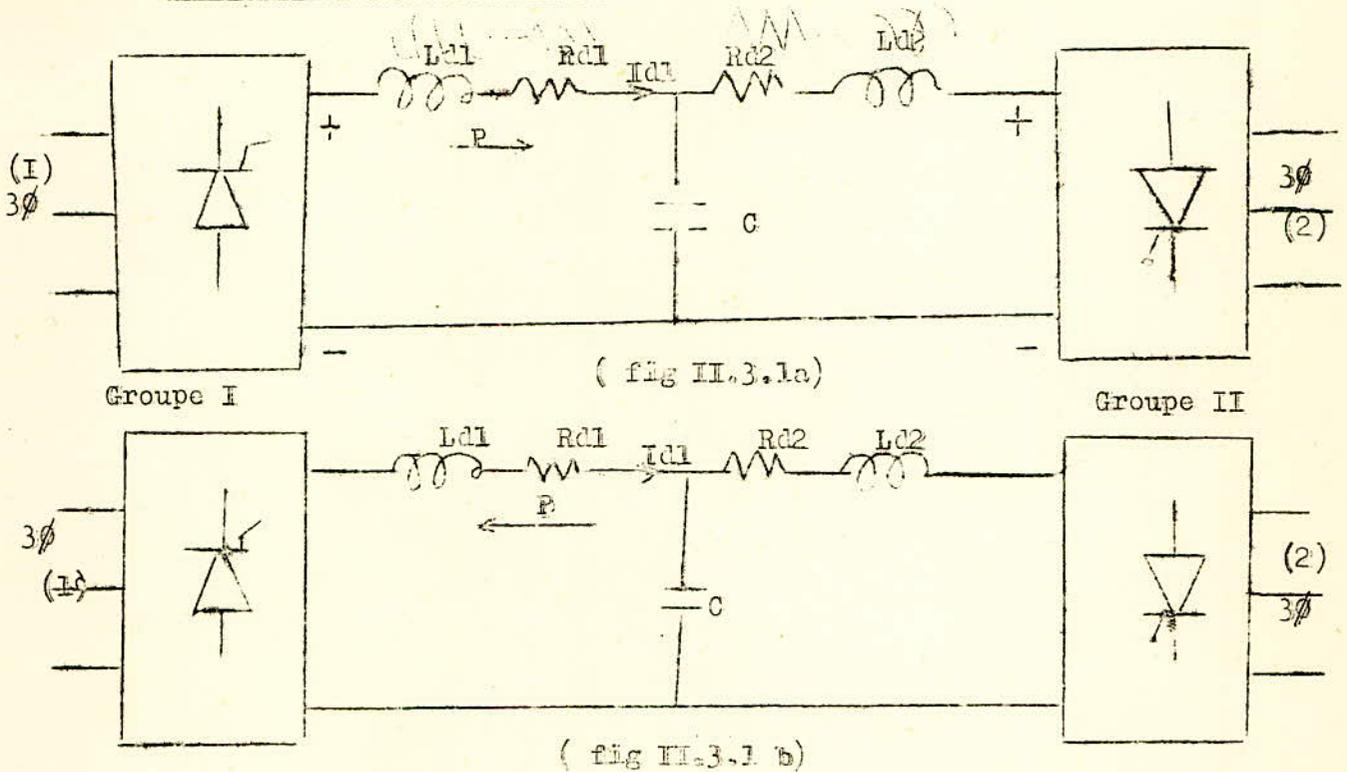
à courants alternatifs

Les redresseurs onduleurs non autonomes servent aussi à interconnecter des réseaux de distributions à courants alternatifs par courant continu H.T, ceci grâce à leur réversibilité par l'inversion de leur polarité de tension. C'est d'ailleurs dans ce genre d'application que l'on trouve actuellement les plus grandes puissances installées (record actuel: 720MW sous 800KV); d'autres projets prévoient des milliers de mégawatts sous tension dépassant le million de volts.

Généralement ces interconnexions sont faites dans le but d'échanges réversibles d'énergie de puissance très élevée, séparées par de grandes distances ou par des zones de construction de lignes ordinaires

triphasées à H.T malaisées (mer, régions surpeuplées . L'avantage tiré de ce mode de raccordement est, qu'il élimine tous les inconvénients dus au transport d'énergie par courants alternatifs. En plus les réseaux interconnectés peuvent fonctionner à des fréquences différentes pour de très grandes distances et la stabilité du réseau est assurée.

II. 3 Principe d'interconnection



Les deux réseaux 3 ϕ (1) et (2) alimentent respectivement les redresseurs-onduleurs I et II reliés par la ligne à courant continu (3). Il y a échange de puissance dans les 2 sens.

1^o Cas (fig. II. 3.1 a)

Le groupe I fonctionne en redresseur avec la polarité indiquée, le groupe II fonctionne en onduleur avec la polarité correspondante.

Le transfert de puissance se fait de (1) à (2)

Le sens du courant dirigé de (1) vers (2)

2° Cas. Dans le cas de la (fig. 1. 3. 1b)

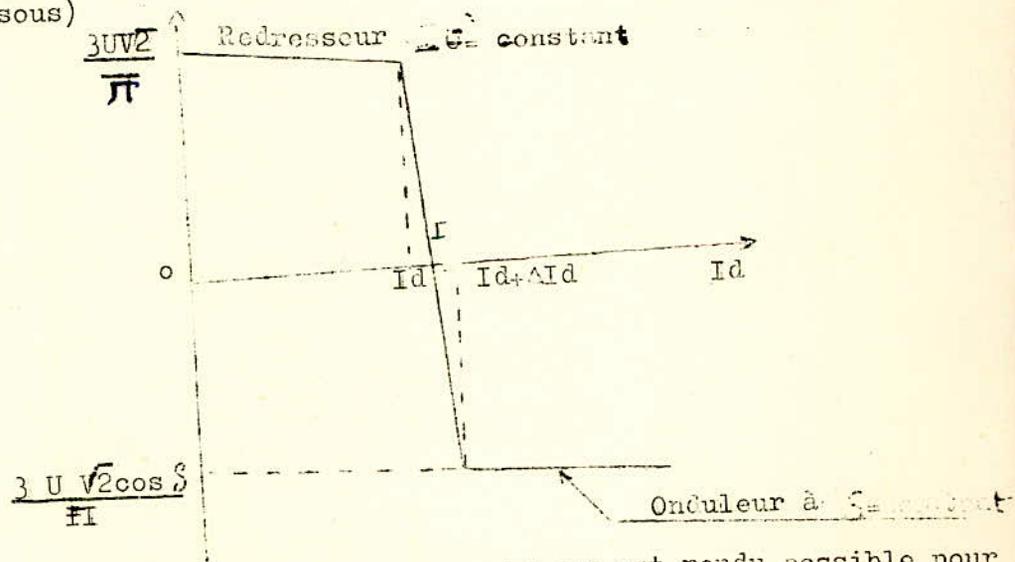
Le groupe I fonctionne en onduleur, sans que le sens du courant i_c change. Le groupe II fonctionne en redresseur ; les polarités étant celle indiquées sur le schéma.

Le transfert de puissance se faisant de (2) vers (1). Le système permet donc un échange réversible de puissance réelle entre les réseaux (1) et (2). Il n'y a évidemment pas d'échange de puissance réactive.

En effet le montage du redresseur est fait selon le critère θ (angle d'amorçage) plus petit possible de l'ordre de 10° . Tandis que dans l'onduleur l'angle de sécurité $\delta = (\pi - \theta - \gamma)$ est aussi choisi le plus petit possible.

II. 4 Etude de la Reversibilité

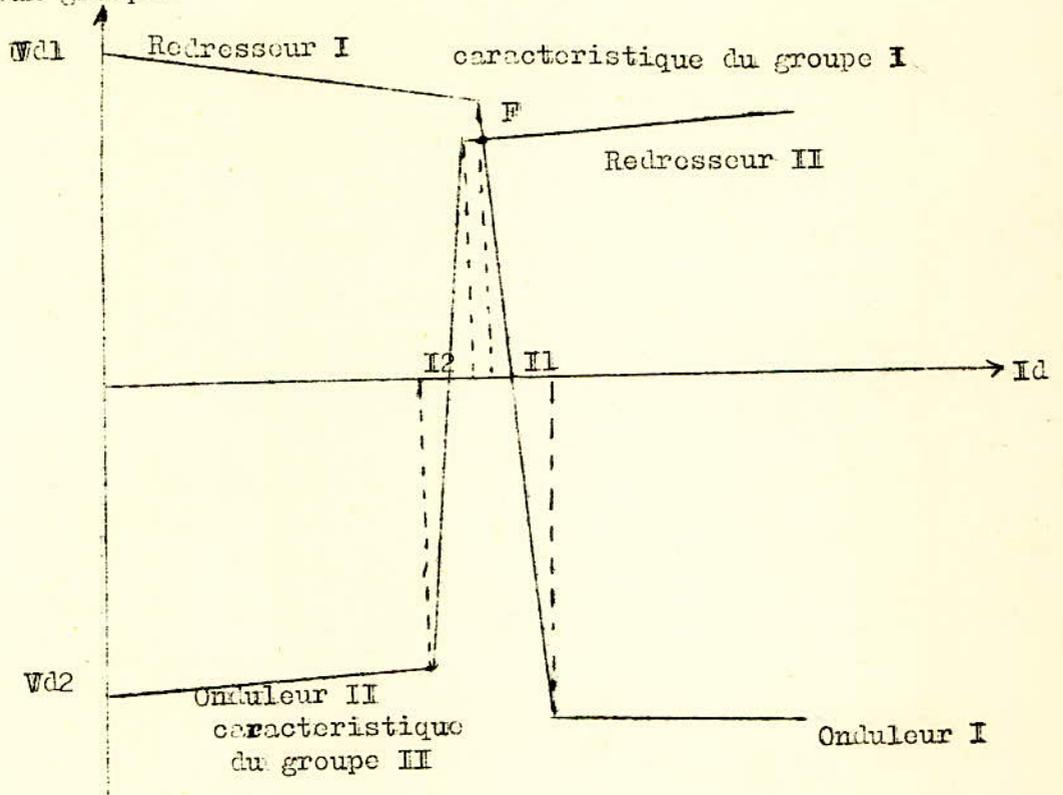
Pour mieux comprendre cet échange réversible, il nous faut étudier la caractéristique $V_d = f(I_d)$ du groupe convertisseur. (fig. ci-dessous)



Le passage de redresseur en onduleur est rendu possible pour chaque groupe convertisseur, si on lui donne la caractéristique que nous venons de voir $V_d = f(I_d)$, l'appareil fonctionne en redresseur (commutation naturelle, $\theta = \theta^{tc}$) pour I_d inférieur à I

Dans le cas $I_d + \Delta I_d$ supérieur à I le groupe fonctionne en onduleur avec un angle δ (marge de sécurité) constant.

ci-dessous est représenté le principe de réversibilité des deux groupes

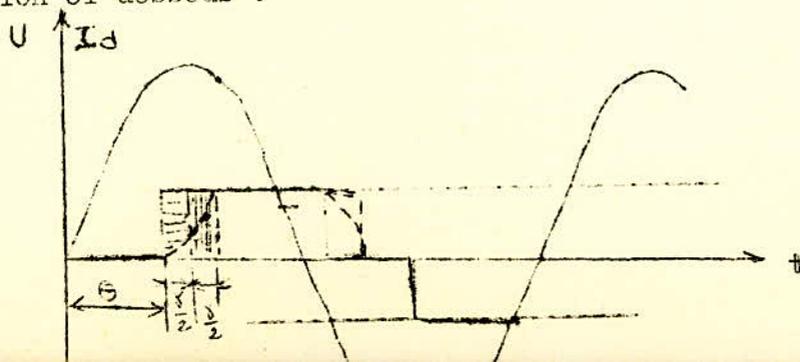


Les deux caractéristiques ont des branches d'intensité presque constantes situées respectivement aux abscisses I_I et I_2 pour les groupes I et II

L'intensité de la ligne est imposée par le montage d'asservissement.

La tension à vide déterminée par la f.c.é.m de l'onduleur. On s'arrange de telle sorte à ce que cette tension soit aussi élevée que possible de façon que le facteur de puissance du côté redresseur soit assez bon. Du côté onduleur ce facteur étant forcément réduit de l'ordre $\cos(\delta + \frac{\alpha}{2})$

En effet nous aurons pour tension et courant la configuration ci dessous :



Le calcul de la puissance coté onduleur donne:

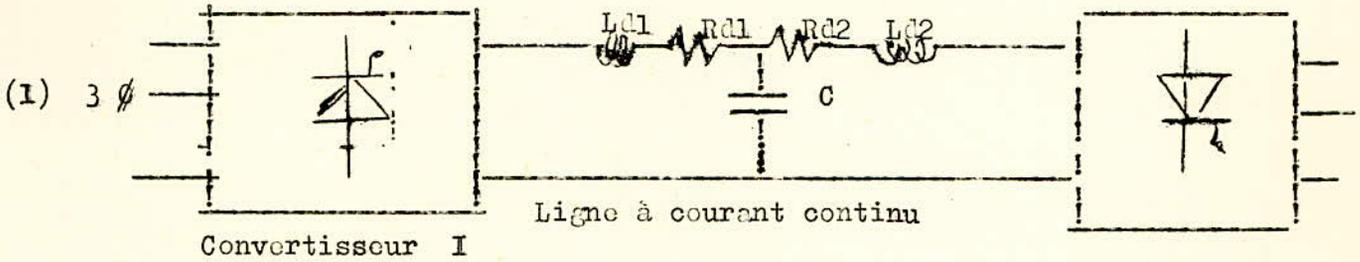
$$P = UR \cdot IR \cos\left(\theta + \frac{\delta}{2}\right)$$

avec : $\delta = (\pi - \theta - \alpha)$ ===== $\theta = (\pi - \alpha - \delta)$

nous obtenons comme facteur de puissance coté onduleur;

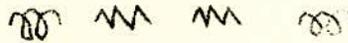
$$\cos\left(\delta + \frac{\alpha}{2}\right)$$

I.5 Montage des 2 convertisseurs



Remarque

Ce mode d'interconnection ne peut se faire qu'entre deux points, sans aucune dérivation intermédiaire ; elle nécessite l'emploi d'un disjoncteur à courant continu haute tension dont l'étude est encore peu avancée. Les disjoncteurs fabriqués actuellement ne dépassent rarement la tension de 5kV.



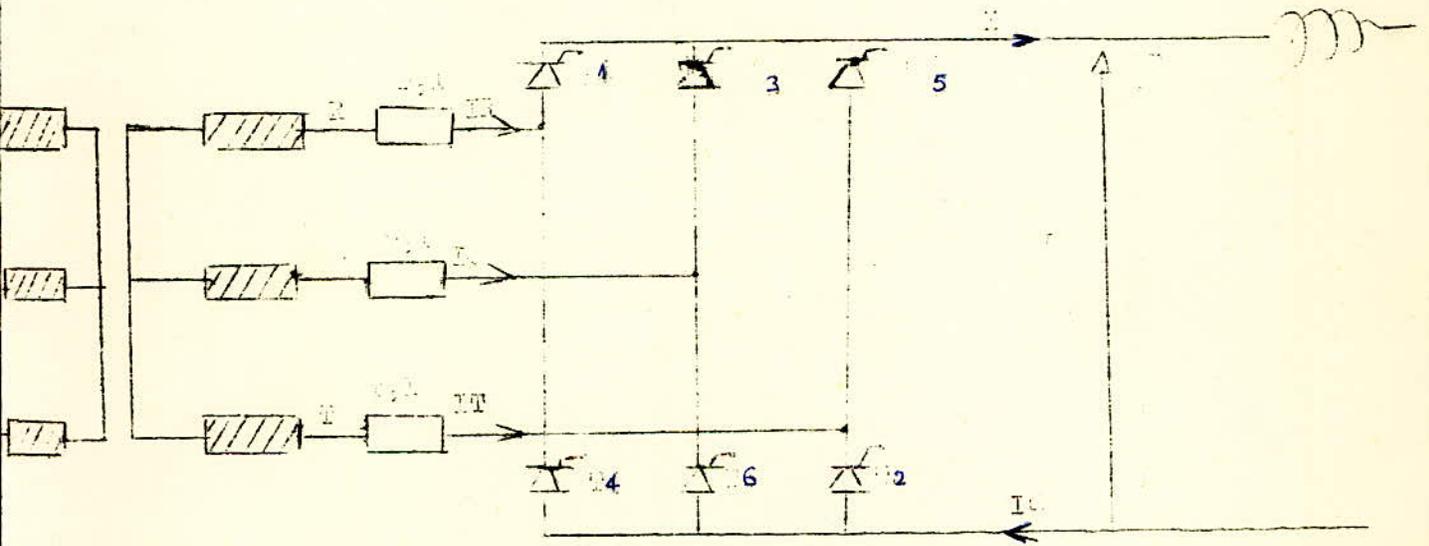
III - ETUDE DU PONT DE GRAETZ

III.1 - Généralités

Depuis l'apparition des diodes au silicium le montage de Graëtz (pont de Graëtz) s'est généralisé dans l'industrie. On le retrouve dans les industries d'électrolyse, les stations de redressement : pour la traction électrique, l'alimentation des moteurs, dans divers montage de laboratoire et actuellement dans les groupes redresseurs pour le transport d'énergie à courant continu haute tension.

III.2 - Etude classique du pont de Graëtz

III. 2. 1. Schéma



III. 2. 2. Caractéristiques externes

$$V_{d1} = \frac{6}{\pi} U_{Rn} \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{6} \cdot \cos \theta, \text{ à vide}$$

$$V_x = \frac{6}{2\pi} l_w I_d : \text{ chute de tension due à la commutation}$$

$$V_r = r I_d : \text{ chute de tension résistive}$$

$$V_d = V_{d1} - V_x - V_r$$

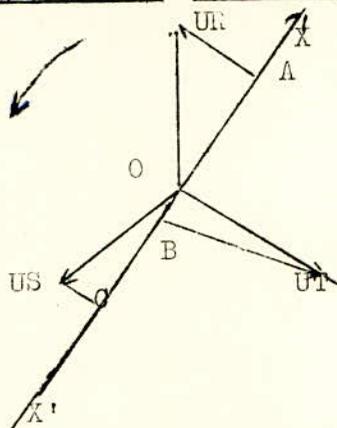
$$I_{R \text{ eff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$$

$$\text{fréquence d'oscillation } F = 6f$$

II.3 Fonctionnement

Les thyristors T1, T3, T5 ont leur cathode au même potentiel et T2, T4, T6 ont leur anode au même potentiel.

III.3.1 Représentation de UR, US, UT par un système de vecteurs tournants



X'X axe de référence fixe. les trois vecteurs UR, US, UT tournent dans le sens indiqué sur le schéma. OA, OB, OC représentent les projections des trois tensions simples UR, US, UT. le thyristor ayant la projection de la tension appliquée

anode sur X'X la plus grande sera passant dans le sens "aller", celui dont la tension appliquée à sa cathode est la plus négative sera passant dans le sens "retour"

Chaque changement de thyristor se fait avec une commutation, au cours de laquelle deux thyristors conduisent dans le même sens (aller) ou (retour).

Le tableau cidessous montre le déroulement complet d'un cycle

Tableau

T1	!	commuta	!	T3	!	commuta	!	T5	!	commuta	!	T1
	!		!		!		!		!		!	!!
T6	!	commuta	!	T2	!	commuta	!	T4	!	commuta	!	
	!		!		!		!		!		!	

Remarque

Le nombre de commutations est égal au nombre de thyristors

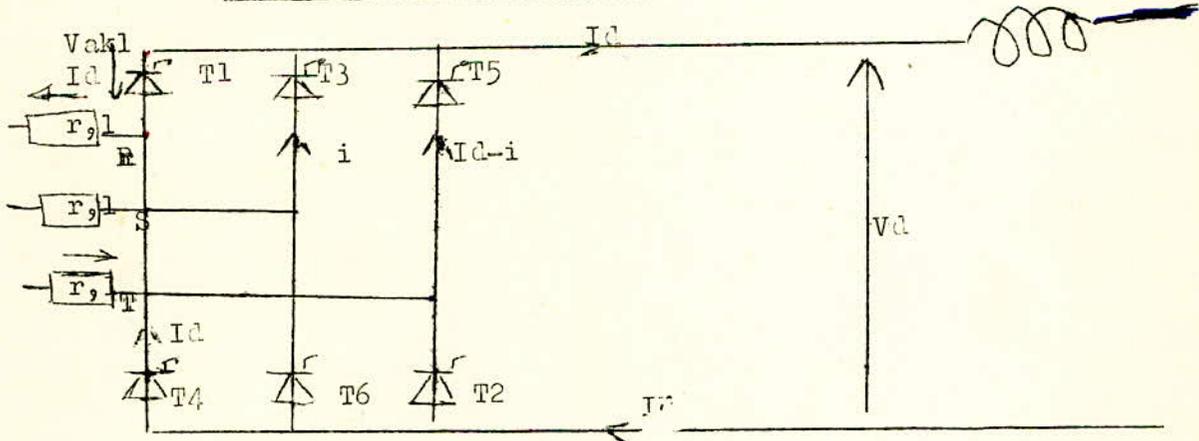
Etat	Thyristor conducteur	thyristors commutants
1+6m	T6	T1 et T5
2+6m	T1	T2 et T6
3+6m	T2	T3 et T1
4+6m	T3	T4 et T2
5+6m	T4	T5 et T3
6+6m	T5	T6 et T4

II.4. Calcul de la tension aux bornes du thyristor ne commutant pas pendant la commutation

Hypotheses

- Resistance du circuit negligible
- Courant de charge I_d constant
- Commutation entre T3 et T5, T4 conducteur

Representation schematique



Calcul de la tension aux bornes de T1

potentiel au point M

$$U_{Sn} = L \frac{di}{dt} + U_{fn} \dots \quad (II.1)$$

$$U_{Tn} = L \cdot \frac{d(I_d - i)}{dt} + U_{fn} \dots \quad (II.2)$$

soit en additionnant:

$$U_{Sr} + U_{Tn} = 2 \cdot U_{Mn} \implies U_{Mn} = \frac{U_{Sn} + U_{Tn}}{2} \dots (II.3)$$

$$d'o\grave{u} (U_{A1} - U_{K1}) = U_{Rn} - \frac{U_{Sn} + U_{Tn}}{2} \dots (II.4)$$

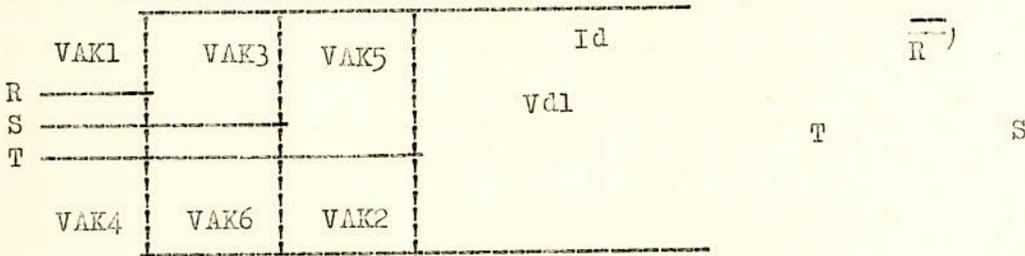
comme $(U_{A1} - U_{K1}) = U_{Rn} - U_{Mn} = U_{K1}$

$$U_{A1} = \frac{U_{Rr} - U_{Sn}}{2} + \frac{U_{Rn} - U_{Tn}}{2} \dots (II.5)$$

Ce calcul peut être étendu pour tous les thyristors

Le tableau ci dessous donne toutes les caracteristiques du pont .

	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
Vd1	URS	$\frac{URS+URT}{2}$	URT	$\frac{URT+UST}{2}$	UST	$\frac{UST+USR}{2}$	USR	$\frac{USR+UTR}{2}$	UTR	$\frac{UTR+UTS}{2}$	UTS	$\frac{UTS+URS}{2}$
VAK1	0	0	0	0	URS	URS	URS	$\frac{URS+URT}{2}$	URT	URT	URT	0
IT1	Id	Id	Id	Id-i	0	0	0	0	0	0	0	i
VAK3	USR	USR	USR	0	0	0	0	0	UST	UST	UST	$\frac{UST+USR}{2}$
IT3	0	0	0	i	Id	Id	Id	Id-i	0	0	0	0
VAK5	UTR	UTR	UTR	$\frac{UTR+UTS}{2}$	UTS	UTS	UTS	0	0	0	0	0
IT5	0	0	0	0	0	0	0	i	Id	Id	Id	Id-i
VAK2	UST	0	0	0	0	0	URT	URT	URT	$\frac{URT+UST}{2}$	UST	UST
IT2	0	i	Id	Id	Id	Id-i	0	0	0	0	0	0
VAK4	USR	$\frac{USR+UTR}{2}$	UTR	UTR	UTR	0	0	0	0	0	USR	USR
IT4	0	0	0	0	0	i	Id	Id	Id	Id-i	0	0
VAK6	0	0	UTS	UTS	UTS	$\frac{UTS+URS}{2}$	URS	URS	URS	0	0	0
IT6	Id	Id-i	0	0	0	0	0	0	0	i	Id	Id
IR	Id	Id	Id	Id-i	0	-i	-Id	-Id	-Id	-Id+i	0	i
IS	-Id	-Id+i	0	i	Id	Id	Id	Id-i	0	-i	-Id	-Id
IT	0	-i	-Id	-Id	-Id	-Id+i	0	i	Id	Id	Id	Id-i



III. Etude du pont de Graetz - Methode du processus central

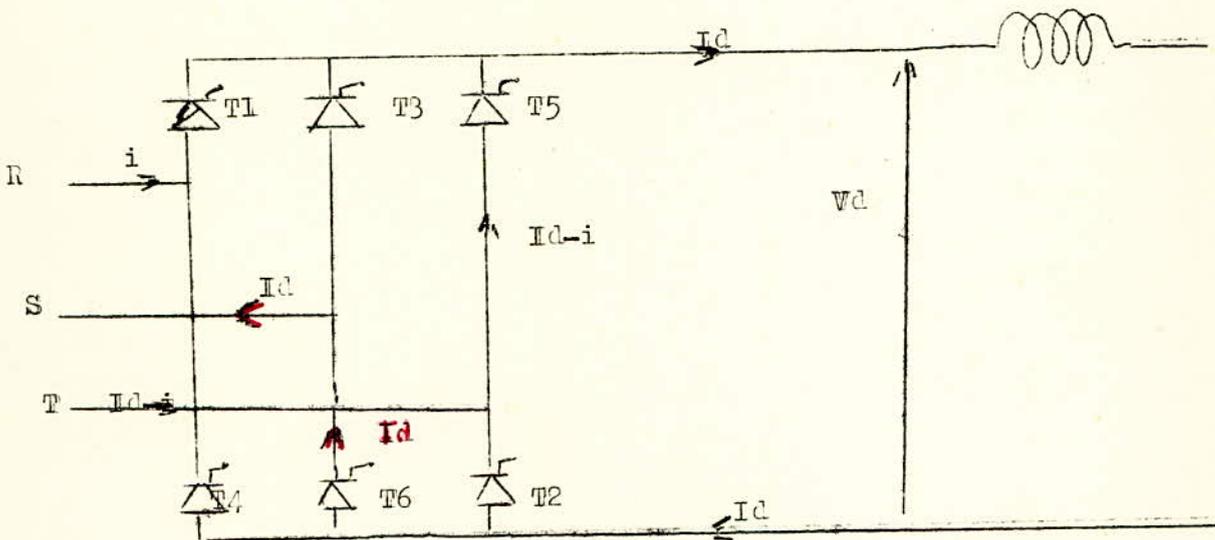
le processus central est defini de la façon suivante:
il commence à l'ouverture du thyristor; il se poursuit par la commutation et le temps pendant lequel deux thyristors de la serie assurent la conduction du courant de charge I_d ; le processus se termine par l'ouverture du thyristor suivant.

pour reconnaitre facilement le thyristor conducteur on definie un systeme de nombre qui caracterise à chaque instant le thyristor conducteur

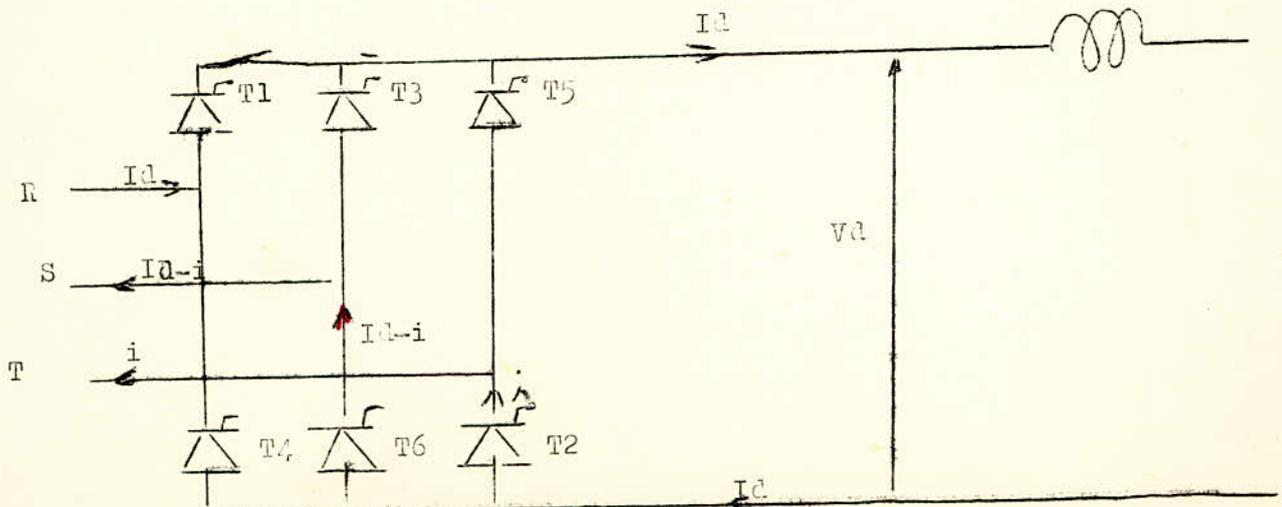
Par exemple T1 est conducteur dans les phases 1,7,13,19...etc; de même T2 sera conducteur dans les phases 2,8,14,20...etc.

D'une façon générale T1 sera conducteur dans $1+6n$, T2 dans $2+6n$, T3 dans $3+6n$, ce systeme sera étendu aux autres thyristors

III. 1. Représentation de deux processus successifs



Cas (III.1. a)



Cas(III.1.b)

Cas (3.1a) commutation entre T5 et T1; retour du courant par T6.

Le courant de court circuit de commutation i augmente de 0 à I_d , lorsqu'il atteint la valeur I_d , $i = I_d$; le courant dans T5 s'annule et T1 assure la conduction du courant I_d .

cas (III.1b)

T1 conducteur .

Le courant i prend naissance dans T2, il augmente jusqu'à atteindre la valeur I_d ; à ce moment, puisqu'il est de sens opposé à I_d : le courant s'annule dans T6. T2 assurera le retour du courant I_d .

III.2 Processus central

Le cycle complet du pont se compose de 6 états successifs. Chaque état sera représenté par un schéma équivalent. Pour alléger ces schémas, les thyristors non conducteurs ne seront pas représentés.

La synthèse de ces schémas donne une topologie commune.

Les états du pont sont indiqués par:

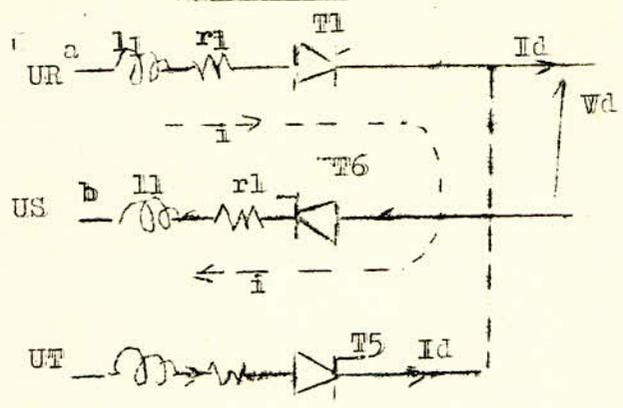
(1+6m), (3+6m), (5+6m)

(2+6m), (4+6m), (6+6m)

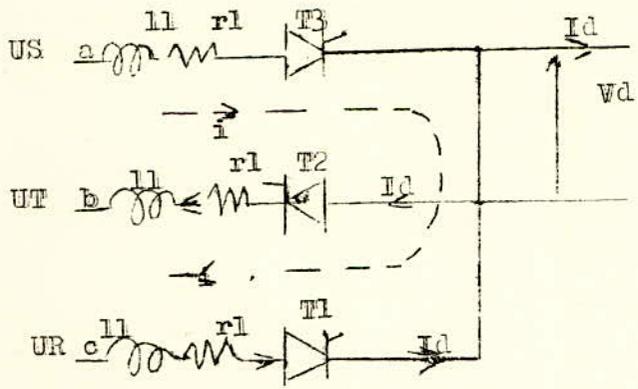
Pour faciliter l'étude et déduire les analogies entre les topologies des états du système les états pairs et les états impairs sont représentés séparément.

III.3 Représentation du processus

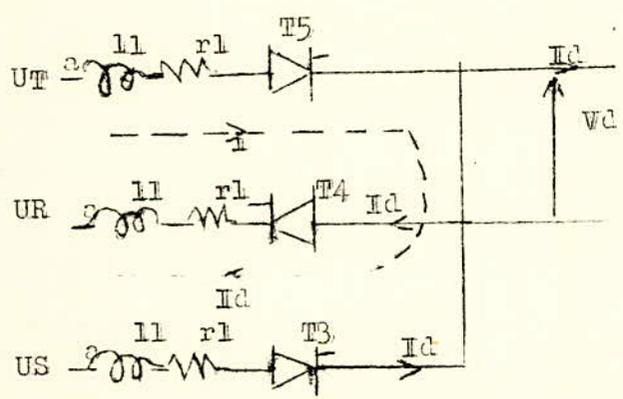
Etat 1 + 6m



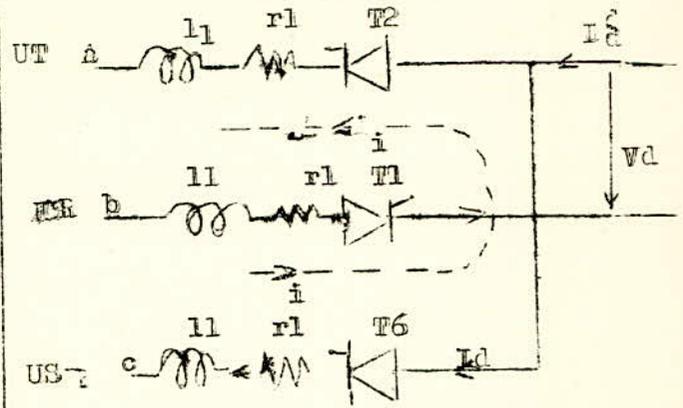
Etat 3+ 6m



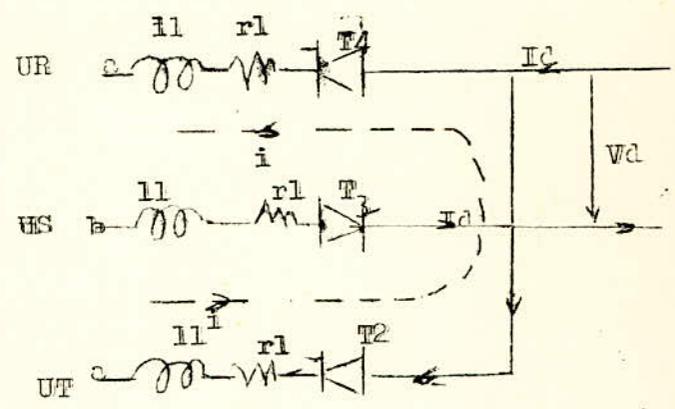
Etat 5 + 6m



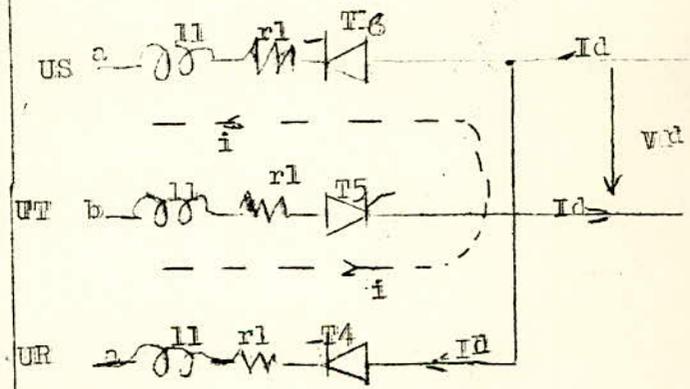
Etat 2+ 6m



Etat 4+ 6m



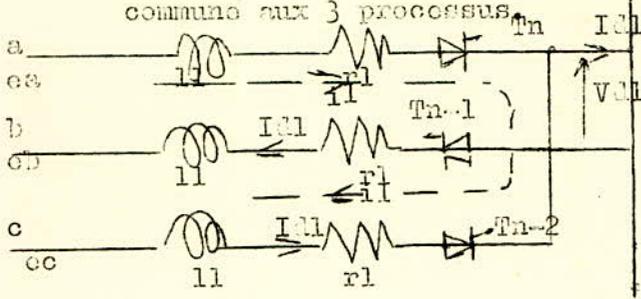
Etat 6 + 6m



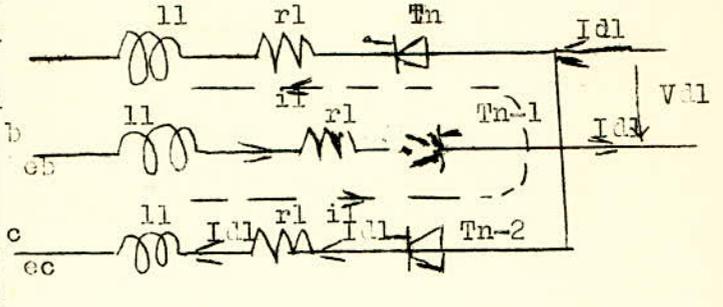
Les configurations (1+6m), (3+6m), (5+6m) : sont les mêmes.
 Pour retrouver l'une d'entre elles à partir d'une autre il suffit de permuter les tensions simples UR,US,UT qui

De même les configurations (2+6m), (4+6m), (6+6m) le sont aussi

qui lui sont appliquées
La topologie ci-dessous est
commune aux 3 processus



Le choix des tensions se de la même
manière que dans le cas ci-contre



Choix d'une topologie générale

Pour un processus donné, il suffit de choisir convenablement les tensions et le sens des courants correspondants.

De ces dernières topologies du système, on déduit une topologie générale valable pour tous les processus. Il est à remarquer que l'on passe de l'une à l'autre en changeant le sens de montage des thyristors, ce qui revient à changer les signes des tensions en conservant une même topologie. Prenons la topologie ci-dessus et dressons le tableau des caractéristiques (voir tableau I)

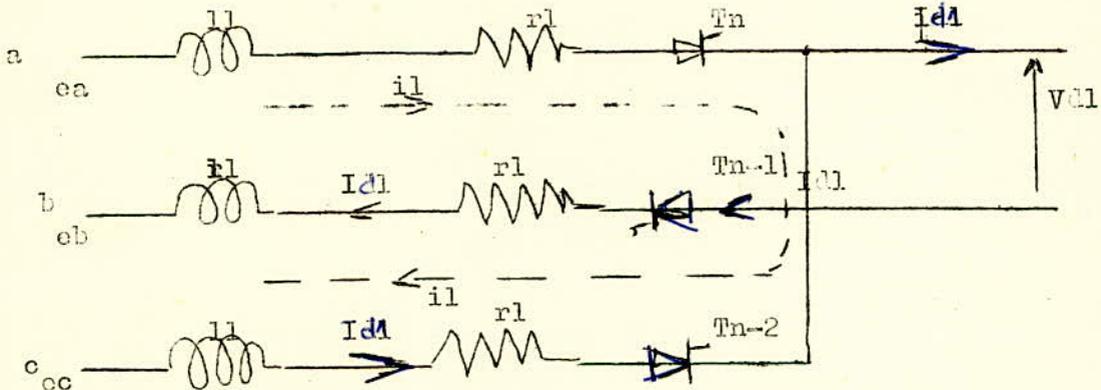


TABLEAU I

	1+6m	2+6m	3+6m	4+6m	5+6m	6+6m
ea	URn	-UTn	USn	-URn	UTn	-USn
eb	USn	-URn	UTn	-USn	URn	-UTn
ec	UTn	-USn	URn	-UTn	USn	-URn
eab	$\frac{URS}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n + \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{URT}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n + \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{UST}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n + \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{USR}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n + \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{UTR}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n + \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{UTS}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n + \frac{\pi}{3}}{3}\right)$
ebc	$\frac{UST}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n - \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{USR}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n - \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{UTR}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n - \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{UTS}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n - \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{URS}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n - \frac{\pi}{3}}{3}\right)$	$\frac{URT}{2} \sin\left(\frac{\omega T + \theta_n - \frac{\pi}{3}}{3}\right)$
IR	i	Id	Id-i	-i	-Id	-(Id-i)
IS	-Id	-(Id-i)	i	Id	Id-i	-i
IT	Id-i	-i	-Id	-(Id-i)	i	Id

T=t-to

IV Mise en equation

IV .1 Schema des deux ponts interconnectés

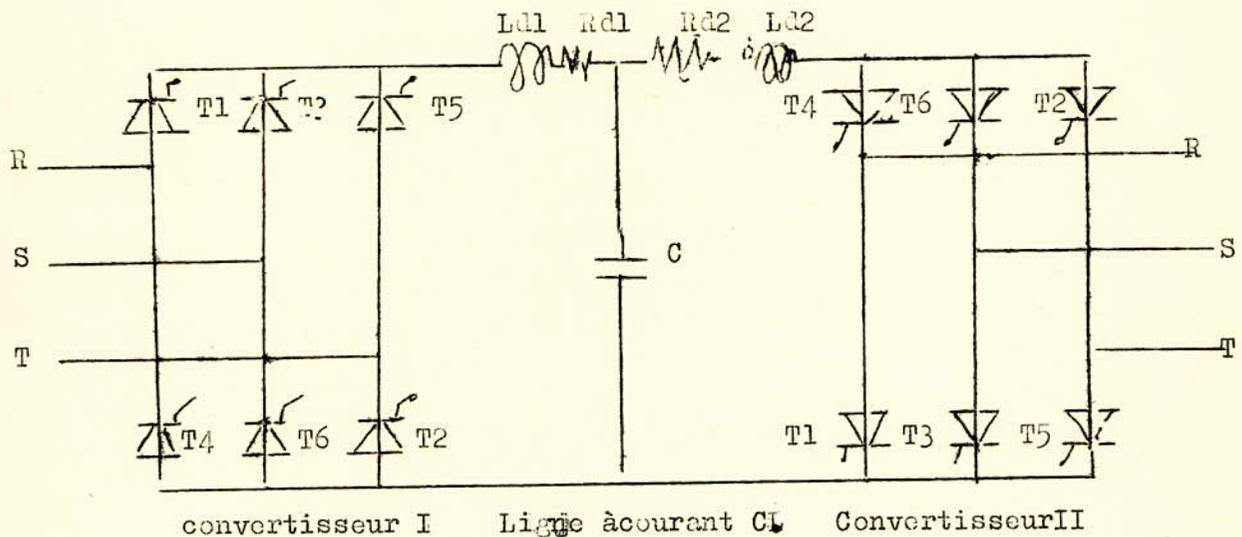
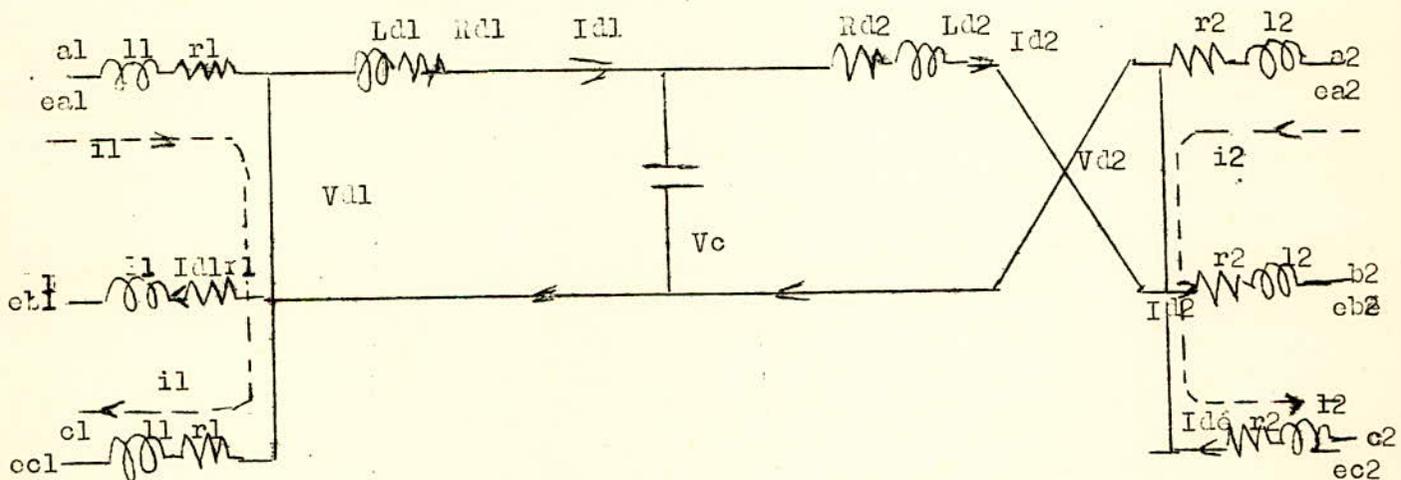


Schéma équivalent



IV.2 Equations des deux ponts

pour chaque pont nous aurons 3 équations différentielles du 1^o ordre
 La ligne à courant continu nous donne une 7^o équation.

IV. 2. 1 Equations du pont I

$$e_{abl} = r_1 \cdot i_1 + l_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + r_1 \cdot I_{d1} + l_1 \cdot \frac{dI_{d1}}{dt} + V_{d1}$$

avec $V_{d1} = R_{d1} \cdot I_{d1} + L_{d1} \cdot \frac{dI_{d1}}{dt} + V_c$

$$e_{abl} = r_1 \cdot i_1 + l_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + (r_1 + R_{d1}) \cdot I_{d1} + (l_1 + L_{d1}) \cdot \frac{dI_{d1}}{dt} + V_c \quad ; \dots \quad (IV.1)$$

$$e_{abl} + e_{bcl} = 2 \cdot r_1 \cdot i_1 + 2 \cdot l_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - r_1 \cdot I_{d1} - l_1 \cdot \frac{dI_{d1}}{dt}$$

$$Id1 = i1 \text{ et } \frac{dId1}{dt} = \frac{di1}{dt} \dots \quad (\text{IV. 3})$$

Ces trois equations representent le processus central du convertisseur I mais , à chaque instant deux d'entre elles seulement sont valables . Leur validité depend de de l'état du convertisseur .

IV. 2.2 Equations du pont II

$$aeb2 = r2.i2 + l2.\frac{di2}{dt} + r2.Id2 + l2.\frac{dId2}{dt} + Vd2$$

avec $Vd2 = Rd2 . Id2 + Ld2 . \frac{dId2}{dt} - Vc$

$$cab2 = r2.i2 + l2.\frac{di2}{dt} + (r2 + Rd2) . Id2 + (l2 + Ld2) . \frac{dId2}{dt} - Vc \dots \quad (\text{IV.4})$$

$$cab2 + cbc2 = r2.i2 + l2.\frac{di2}{dt} - r2.Id2 - l2.\frac{dId2}{dt} \dots \quad (\text{IV.5})$$

$$Id2 = i2 \text{ et } \frac{dId2}{dt} = \frac{di2}{dt} \dots \quad (\text{IV. 6})$$

Comme dans le cas du pont I , de ces 3 equations, 2 seulement sont valables à chaque instant pour le processus central du convertisseur II

IV. 2. 3 Equation de la ligne

$$\frac{(Id1 - Id2)}{C} = \frac{dVc}{dt} \dots \quad (\text{IV.7})$$

IV .3 Choix des equations selon l'état du systeme

Posons $\frac{d}{dt} = p$

<u>Pont I</u>	<u>Pont II</u>
Commutation (IV.1)	Commutation (IV. 2)
$l1pi1 + (l1 + Ld1)pId1 = eab1 - rl1i1$ $(r1 + Rd1)Id1 - Vc$ $2l1pi1 - l1pId1 = eac1 - 2rl1i1 + r1Id1$	$l2pi2 + (l2 + Ld2)pId2 = cab2 - r2i2 - (r2 + Rd2)Id2 + Vc$ $2l2pi2 - l2pId2 = eac2 - 2r2i2 + r2Id2$
Equation de la ligne	
$\frac{Id1 - Id2}{C} = pVc \quad (\text{IV.5})$	
Non commutation (IV.3)	Non commutation (IV .4)
$l1pi1 + (l1 + Ld1)pId1 = eab1 - rl1i1 - (r1 + Rd1)Id1 - Vc$ $i1 = Id1 ; pi1 = pId1$	$l2pi2 + (l2 + Ld2)pId2 = cab2 - r2i2 - (r2 + Rd2)Id2 + Vc$ $i2 = Id2 ; pi2 = pId2$

On peut avoir les quatre possibilités suivantes:

- Les deux ponts en commutation : (IV.1), (IV.2) et (IV.5)
- Le pont I en commutation le pont II en non commutation: (IV.1), (IV.4) et (IV.5)
- le pont I en non commutation le pont II en commutation: (IV.3), (IV.2) et (IV.5)
- Les deux ponts en non commutation: (IV.3), (IV.4) et (IV.5)

IV.4 Resolution des equations differentielles

La resolution a été faite sur ordinateur par la methode de NEWTON - CAUCHY (tangente améliorée)

On peut aussi mettre chaque état sous la forme de matrices selon :

$$\begin{aligned} \text{d'où} \quad [B] \cdot [P] &= [A] \\ [P] &= [B^{-1}] \cdot [A] \end{aligned}$$

IV.5 Expressions des tensions côté redresseur et onduleur

$$V_{d1} = e_{ab1} - (i_{l1} + I_{d1}) \cdot r_{l1} - \left(\frac{di_{l1}}{dt} + \frac{dI_{d1}}{dt} \right) \cdot l_{l1}$$

$$V_{d2} = e_{ab2} - (i_{l2} + I_{d2}) \cdot r_{l2} - (di_{l2} + dI_{d2}) \cdot l_{l2}$$

IV.6 Notations utilisées dans le programme de calcul sur ordinateur

Resistances

$$r_{l1} = R_{l1}; R_{d1} = R_{D1}; r_{l2} = R_{l2}; R_{d2} = R_{D2}$$

Inductances

$$l_{l1} = S_{l1}; L_{d1} = S_{D1}; l_{l2} = S_{l2}; L_{d2} = S_{D2}$$

Courants

$$i_{l1} = C_{R11}; C_{R12}; C_{R13} = C_{R11}$$

$$I_{d1} = C_{D11}; C_{D12}; C_{D13} = C_{D11}$$

$$i_{l2} = C_{R21}; C_{R22}; C_{R23} = C_{R21}$$

$$I_{d2} = C_{D21}; C_{D22}; C_{D23} = C_{D21}$$

$$I_{R1} = C_{RR1}$$

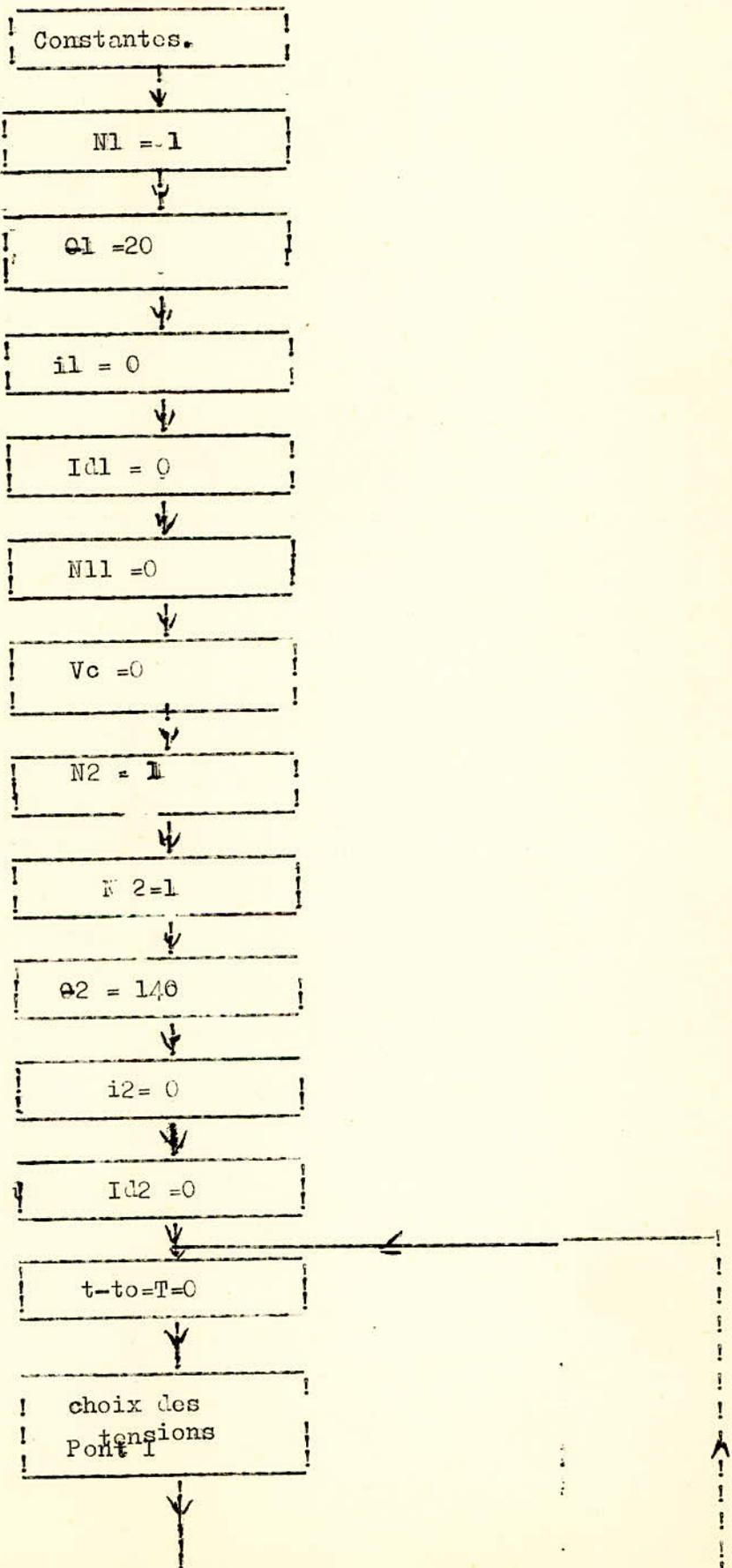
$$I_{E1} = C_{RY1}$$

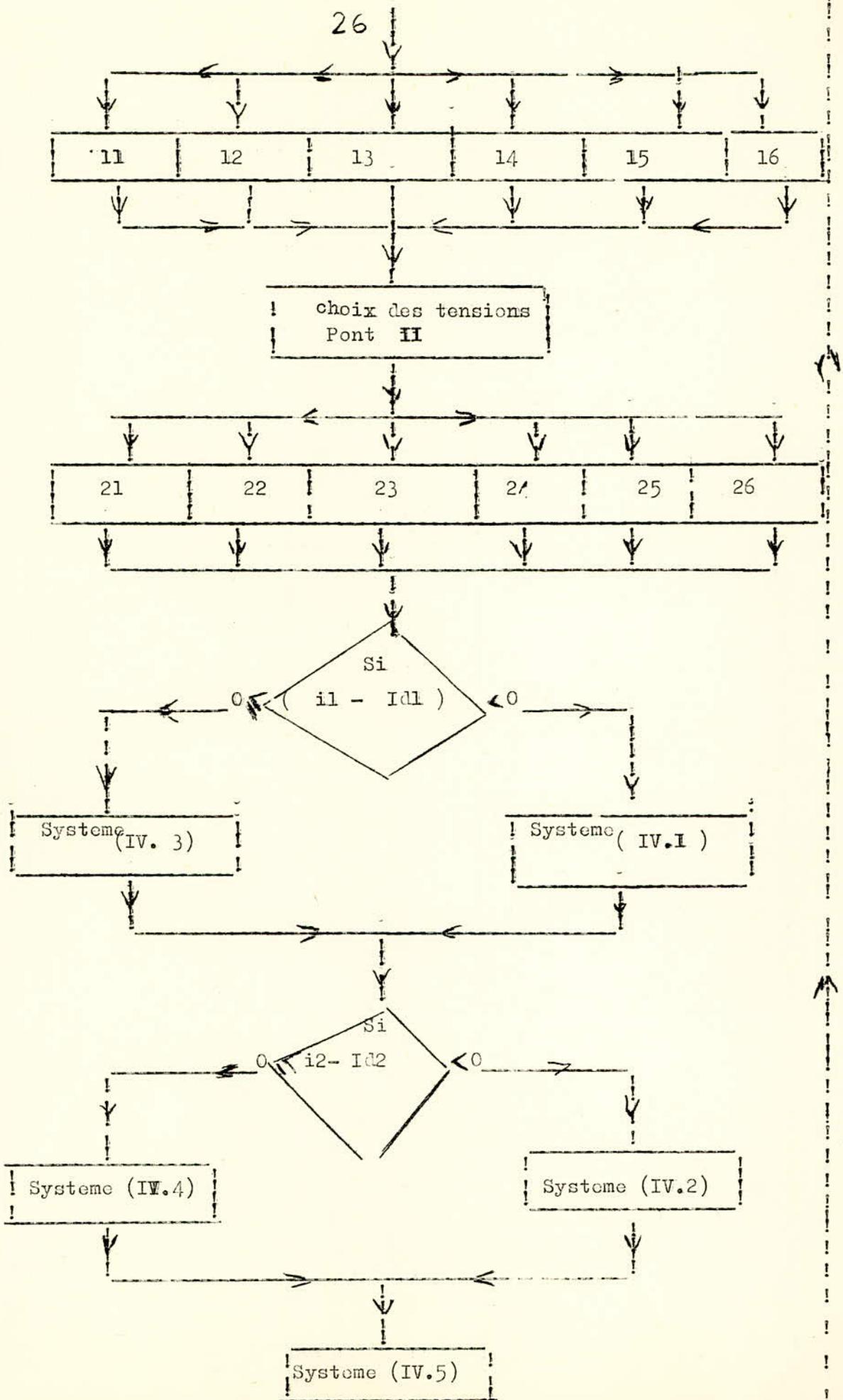
$$I_{T1} = C_{RB1}$$

$$I_{R2} = C_{RR2}$$

$$I_{S2} = C_{RY2}$$

$$I_{T2} = C_{RB2}$$

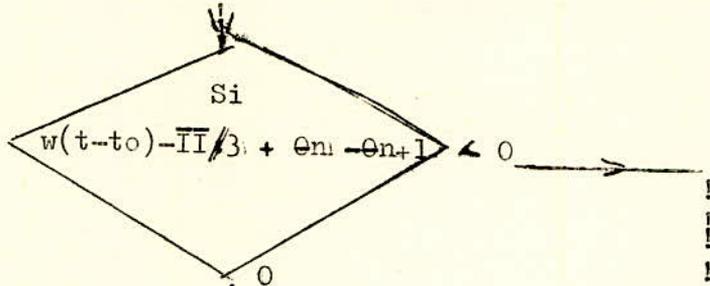




Résolution numérique des équations correspondant à l'état du système (IV.1), (IV.2), (IV.3) (IV.4), (IV.5)

Prochain angle d'amorçage $\theta_{n+1} = 20$

E. t que la prochain commutation aura lieu dans le pont I



$N1 = N1 + 1$

$i1 = 0$

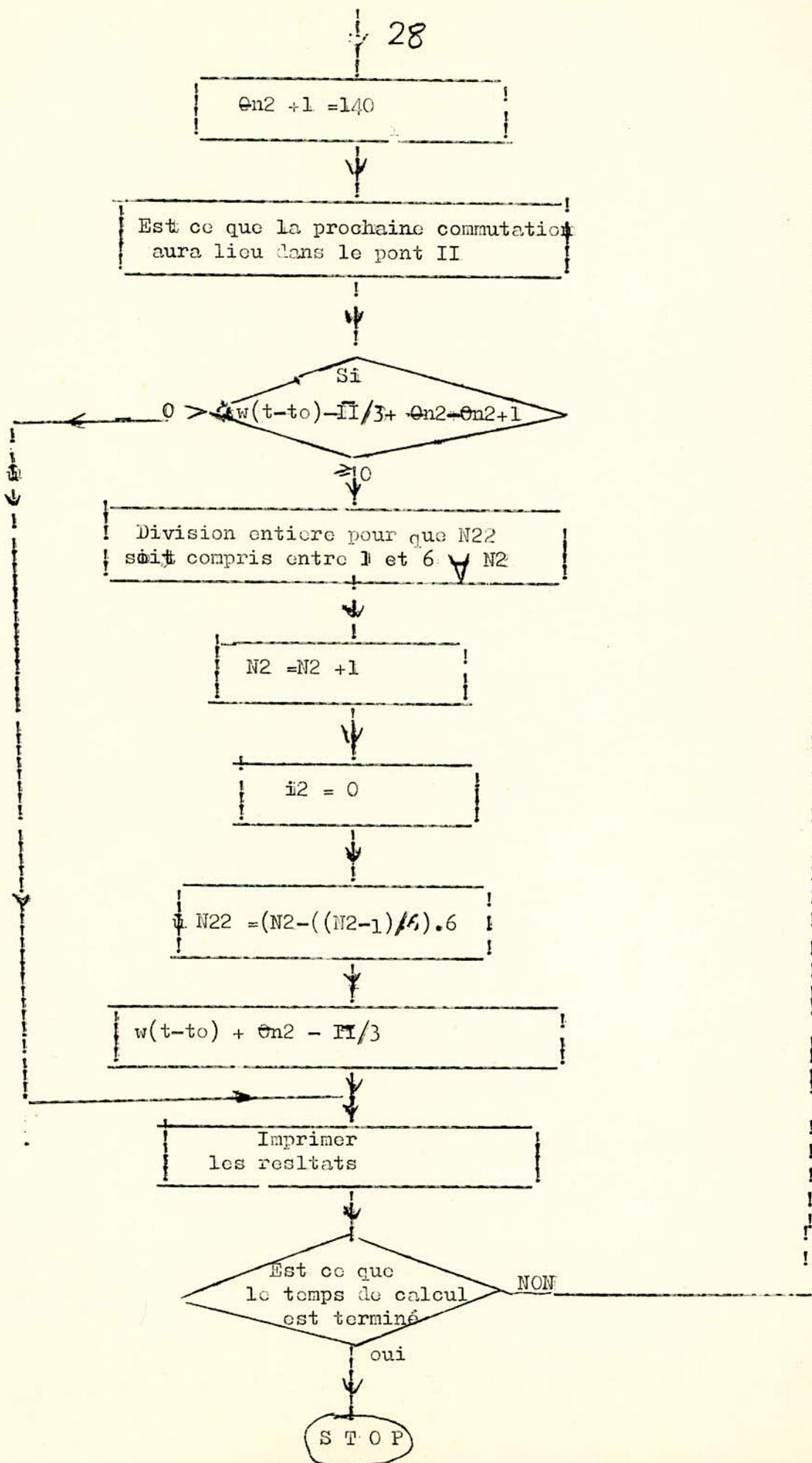
Division entière pour que $N11$ soit compris entre 1 et 6

$N11 = (N1 - ((N1-1)/6)) \cdot 6$

$\theta_{n1} = w(t-t_0) + \theta_n - \frac{6}{3}$

Prochain angle d'amorçage pont II





```

// FOR
* IOCS (CARD,1132 PRINTER)
* ONE WORD INTEGERS
* LIST ALL
  REAL IDI, ID2
C DEHOUCHE,PROJET, THESE DE FIN D4ANNEE
C LIGNE A COURANT CONTINU A HAUTE TENSION
C SIMULATION DE DEUX PONTS DE GRAETZ TRIPHASES
C ET DE LA LIGNE DE TRANSMISSION
C LECTURES DES CARTES
  READ (2,1) R1, RD1, S1, SD1, ERY1, ERB1, EYR1, EYB1, EBR1, W1
  READ (2,1) R2, RD2, S2, SD2, ERY2, ERB2, EYR2, EYB2, EBR2, W2
1  FORMAT (4F4.2, 7F8.1)
  READ (2,2)CAPA
2  FORMAT(F10.7)
C IMPRIMER LES DONNEES
  WRITE(3,3)R1, RD1, S1, SD1, W1, ERY1
  WRITE(3,3)R2, RD2, S1, SD2, W2, ERY2
3  FORMAT(1H , 6(F10.2, 2X),/)
  WRITE(3,4)CAPA
4  FORMAT(1H , F13.8,/)
  HRAD=0.0001111
  INDXR=0
C PAS DE CALCUL EN SECONDE HRAD
C CENTRALE 1 LES COURANTS SONT I1=CR11, CR12, CR13, I2=CD11, CD12, CD13=CD11
C LES ANGLES D'AMORCAGE EN RADIANS SONT APONT 1 ALP11 ALP12
C LES ANGLES D'AMORCAGE EN RADIANS SONT APONT 2 ALP21, ALP22
C N11 EST COMPRIS ENTRE 1ET6 QUELQUES SOIT N1
  CR11=0.

```

CD11=0.
 ALP11=10.*3.14/180.
 N1=1
 N11=N1
 C CENTRAL2
 CR21=0.
 CD21=0.
 N2=1
 C N22 EST COMPRIS ENTRE 1 ET 6 QUELQUE SOIT N22
 N22 N2
 IMP=0
 ALP21=140.*3.14/180.
 VC1=0.
 TFIN=0.10
 C REFERENCE DE L'AXE A PARTIR DUQUEL ON REPERE L'ANGLE ' D'AMORCAGE
 C CALCUL DU TEMPS EN SECONDE TRAD
 TRAD=0.
 TRD10=0.
 TRD20=0.
 10 TRAD1=W1* (TRAD-TR10)
 TRAD2=W2* (TRAD-TRD20)+20.*3.14/180.
 C CHOIX DES TENSIONS SELON L'ETAT DE FONCTIONNEMENT PONT1 VALEURS EFFICACES
 GO TO (11,12,13,14,15,16),N11
 11 EAB1=ERY1
 EBC1=EYB1
 GO TO 30
 12 EAB1=ERB1
 EBC1=EYR1
 GO TO 30
 13 EAB1=EYB1
 EBC1=EBR1
 GO TO 30
 14 EAB1=EYR1
 EBC1=EBY1
 GO TO 30
 15 EAB1=EBR1
 EBC1=ERY1
 GO TO 30
 16 EAB1=EBY1
 EBC1=ERB1
 C CHOIX DES TENSIONS SELON L'ETAT DE FONCTIONNEMENT PONT 2 VALEURS EFFICACES
 30 GO TO (21,22,23,24,25,26,),N22
 21 EAB2=ERY2
 EBC2=EYB2
 GO TO 50
 22 EAB2=ERB2
 EBC2=EYR2
 GO TO 50

3 EAB2=EYB2

EBC2=EBR2

GO TO 50

4 EAB2=EYR2

EBC2=EBY2

GO TO 50

5 EAB2=EBR2

EBC2=ERY2

GO TO 50

6 EAB2=EBY2

EBC2=ERB2

TESTER SI LA COMMUTATION EST TERMINEE PONT 1

IF(CR11-CD11)41,42,42

IF(CR11)42,41,41

OUI IL Y'A COMMUTATION DANS LE PONT 1 EQUATIONS 5 ET 4

CALCUL DU DETERMINANT DET1

DET1=2.*S1*(S1+SD1)+S1*S1

VI11=EAB1*(SIN(TRAD1+ALP11+3.14/3.)))*1.414+EBC1*(SIN(TRAD1+ALP11-13.14/3.)))*1.414-CR11*2.*R1+CD11*R1

VD11=EAB1*(SIN(TRAD1+ALP11+3.14/3.)))*1.414-CR11*R1*R1-CD11*(R1+RD1)-V1C1

DI11=(VI11*(S1+SD1)+VD11*S1)/DET1

DID11=(-VI11*S1+VD11*2.*S1)/DET1

I1=1

GO TO 53

NON IL N'Y A PAS DE COMMUTATION DANS LE PONT 1 EQUATIONS 5 ET 6

DET1=2.*S1+SD1

CR11=CD11

VI11=0

VD11=EAB1*(SIN(TRAD1+ALP11+3.14/3.)))*1.414-CR11*R1-CD11*(R1+RD1)-V1C1

DI11=VD11/DET1

DID11=DI11

I1=0

TESTER SI LA COMMUTATION EST TERMINEE PONT2

IF(CR21-CD21)51,52,52

IF(CR21)52,54,54

OUI IL Y'A COMMUTATION EQUATIONS 8 ET 7

DET2=2.*S2*(S2+SD2)+S2*S2

VI21=EAB2*(SIN(TRAD2+ALP21+3.14/3.)))*1.414+3BC2*(SIN(TRAD2+ALP21-13.14/3.)))*1.414-2.*CR21*R2+CD21*R2

V121=0.
 VD21=EAB2*(S1N(TRAD2+ALP21+3.14/3.))*1.414-CR21/R2-CD21*(R2+RD2)+

1VC1

D121=VD21/DET2
 I2=0

RESOLUTION DES EQUATIONS DIFFERENTIELLES

DVC1=(CD11-CD21)/CAPA

VC2=VC1+DVC1*HRAD/2.

CR12=CR11+D111*HRAD/2

CD12=CD11+D1D11*HRAD/2.

CR22=CR21+D121*HRAD/2.

CD22=CD21+D1D21*HRAD/2.

TRAD=TRAD+HRAD/2.

TRAD1=TRAD1*(TRAD-TRD10)

TRAD2=TRAD2*(TRAD-TRD20)+20.*3.14/180.

IF(11-1)61,62,62

CALCUL DU DETERMINANT DET1

DET1=2.*S1*(S1+SD1)+S1*S1

V112=EAB1*(S1N(TRAD1+ALP11+3.14/3.))*1.414+EBC1*(S1N(TRAD1+ALP11-

13.14/3.))*1.414-CR12*R1+CD12*R1

VD12=EAB1*(S1N(TRAD1+ALP11+3.14/3.))*1.414-CR12*R1-CD12*(R1+RD1)-

1VC2

D112=(V112*(S1+SD1)+VD12*S1)/DET1

D1D12=(-V112*S1+S1+VD12*2.*S1)/DET1

I1=1

GO TO 63

61 DET1=2.*S1+SD1

CR12=CD12

V112=0.

VD12=EAB1*(S1N(TRAD1+ALP11+3.14/3.))*1.414-CR12*R1-CD12*(R1+RD1)-

1C2

D112=VD12/DET1

D1D12=D112

I1=0

IF(12-1)71,72,73

DET1=2.*S2*(S2+SD2)+S2*S2

V122=EAB2*(S1N(TRAD2+ALP21+3.14/3.))*1.414+EBC2*(S1N(TRAD2+ALP21-

13.14/3.))*1.414-CR22*R2+CD22*R2

VD22=EAB2*(S1N(TRAD2+ALP21+3.14/3.))*1.414-CR22*R2-CD22*(R2+RD2)+

1VC2

D122=(-V122*S2+VD22*2.*S2)/DET2

I3=1

GO TO 74

71 DET2=2.*S2+SD2

CR22=CD22

V122=0

VD22=EAB2*(SIN(TRAD2+ALP21+3.14/3.)))*1.414-CR22*R2-CD22*(R2+RD2)+
1VC2

DI22=VD22/DET2

DID22=DI22

I2=0

C CALCUL DES COURANTS 2 IEME ETAPE

74 DVC2=(CD12-CD22)/CAPA

VC3=VC1+DVC2*HRAD

CR13= CR11+D112*HRAD

CD13=CD11+DID12*HRAD

CR23=CR21=DI22*HRAD

CD23=CD21+DID22*HRAD

CR11=CR13

CD11=CD13

CR21=CR23

CD21=CD23

VC1=VC3

TRAD=TRAD+HRAD/2.

TRAD1=TRAD1+W1*HRAD/2.

TRAD2=TRAD2+W2*HRAD/2.

IMP=IMP+1

IF (IMP-5) 81,82,81

82 IDI=CD13

ID2=CD23

VDI=EAB1*(SIN(TRAD1+ALP11+3.14/3.)))*1.414-R1*(CR13+CD13)-S1*(D112+
1DID12)

VD2=EAB2*(SIN(TRAD2+ALP21+3.14/3.)))*1.414-R2*(CD23+CR23)-S2*(DI22+
1DID22)

VD3=RD1*IDI+SD1*DID12-V3

VD4=RD2>ID2+SD2*DID22-VC3

GO TO(200,201,202,203,204,205),N11

200 CRR1=CR11

CRY1=-CD11

CRB1=CD11-CR11

GO TO207

201 CRR1=CD11

CRY1=-(CD11-CR11)

CRB1=-CR11

GO TO207

202 CRR1=(CD11-CR11)

CRY1=CR11

CRB1=CD11

GO TO207

203 CRR1=-CRY1

CRY1=CD11

CRB1=-(CD11-CR11)

GO TO207

204 CRR1=-CD11

```

CRY1=(CD11-CR11)
CRB1=CR11
GO TO207
205 CRR1=-(CD11-CR11)
CRY1=-CR11
CRB1=CD11
207 GO TO(300,301,302,303,304,305),N22
300 CRR2=CR21
CRY2=-CD21
CRB2=CD21-CR21
GO TO307
301 CRR2=CD21
CRY2=-(CD21-CR21)
CRB2=-CR21
GO TO307
302 CRR2=(CD21-CR21)
CRY2=CR21
CRB2=-CR21
GO TO307
303 CRR2=-CR21
CRY2=CD21
CRB2=-(CD21-CR21)
GO TO307
304 CRR2=-CD21
CRY2=(CD21-CR21)
CRB2=CR21
GO TO307
305 CRR2=-(CD21-CR21)
CRY2=-CR21
CRB2=CD21
307 WRITE(3,84)TRAD,11,CRR1,CRY1,CRB1,ID1,VD1,VC3,CR13
WRITE(3,86)N2,N22,12,CRR2,CRY2,CRB2,ID2,VD2,CR23
34 FORMAT(1H ,1X,5HTRAD=,F9.7,2X,3HI1=,I1,2X,5HCRR1=,F7.4,2X,5HCRY1=,
1F7.4,2X,5HCRB1=,F7.4,2X,4HID1=,F7.4,2X,4HVD1=,F7.2,2X,4HVC3=,F7.2,
12X,F7.4,/)
36 FORMAT(1H ,10X,3HN2=,12,2X,4HN22=,11,2X,3HI2=,I1,2X,5HCRR2=,F7.4,2
1X,5HCRY2=?F7.4,2X,5HCRB2=,F7.4,2X,4HID2=,F7.4,2X,4HVD2=,F7.2,2X,F7
1.4,/)
IMP=0
C TESTER SI LA NOUVELLE COMMUTATION AURA LIEU DANS LE PONT 1
31 ALP12=ALP11
IF(TRAD1+ALP11-ALP12-3.14/3.)91,92,92
C OUI LA NOUVELLE COMMUTATION AURA LIEU DANS LE PONT 1
92 INDX1=0
N1=N1+1
CR11=0
ALP11=TRAD1+ALP11-3.14/3.
TRD10=TRAD

```

```

N11=N1-((N1-1)/6)*6
GO T093
C NON LA NOUVELLE COMMUTATION N4AURA PAS LIEU DANS LE PONT 1
91 INDX1=1
GO TO 93
C TESTER SI LA NOUVELLE COMMUTATION AURA LIEU DANS LE PONT 2
93 ALP22=ALP21
IF(TRAD2-ALP22+ALP21-3.14/3.)101,102,102
102 INDX2=3
N2=N2+1
CR21=0.
ALP21=TRAD2+ALP21-3.14/3.
TRD20=TRAD2+20.*0.01/180.
N22=N2-((N2-1)/6)*6
GO T0103
C LA NOUVELLE COMMUTATION N'AURA PAS LIEU DANS LE PONT 2
101 INDX2=5
GO T0103
103 INDXR=INDX1+INDX2
C SI INDXR=3 COMMUTATION DANS LES DEUX PONTS
C SI INDXR=4 PAS DE COMMUTATION DANS 1 ET COMMUTATION DANS 2
C SI INDXR=5 COMMUTATION DANS 1 ET PAS DE COMMUTATION DANS 2
C SI INDXR=6 PAS DE COMMUTATION DANS LES DEUX PONTS
IF(TRAD-TFIN)10,10,1000
1000 CALL EXIT
END

```

DONNEES

```

R1=R2=0,5 Ω
RD1=RD2= 5 Ω
L1=L2=20mH
LD1=LD2=1H
C=20, F
EAB1=74100 v
EAB2=66700 v

W=314

```

--- C O N C L U S I O N ---

Ce travail a été entrepris dans le but de contribuer à l'étude de la simulation des convertisseurs statiques dans les applications pour le transport d'énergie à courant continu en haute tension.

L'élément principal dans les installations à courant continu étant les convertisseurs statiques ; c'est pour cette raison qu'il occupe une place importante dans cette étude.

L'étude des convertisseurs statiques est menée sous deux aspects différents :

- une étude classique du pont de GRAETZ avec toutes les caractéristiques de fonctionnement en tenant compte du phénomène de commutation.
- une étude basée sur la méthode du processus central, permettant une simulation dynamique des deux convertisseurs sur l'ordinateur.

L'étude des convertisseurs statiques par la méthode du processus central permet la mise en équation du fonctionnement de ceux-ci quelque soit leur régime de fonctionnement :

- régime de commutation ou de non commutation
- fonctionnement en redresseur ou en onduleur.

Ce travail a été programmé en langage FORTRAN IV pour exécution sur l'ordinateur IBM 1130 : en raison de la courte durée de ce projet il ne nous a pas été possible de calculer les caractéristiques du fonctionnement en régime transitoire.

Il serait nécessaire de poursuivre cette étude pour calculer les caractéristiques de fonctionnement du système lors des régimes suivants :

- transfert d'énergie d'un réseau à l'autre,
- court-circuit sur la ligne.

*_*_*_*_*_*_*_*_*_*_*_*_*_*_*_*_*_*

BIBLIOGRAPHIE

- (1) M. DEMONTVIGNIER, "Soupapes électriques : Redresseurs , Onduleurs Fascicule I,II,III",ESE,Paris 1968
- (2) N.G.HINGORANI, "Dynamic simulation of HVdc transmission systems on digital computers"PROC.IEE London,t.113,N°5,1966
- (3) Cours de Redresseurs et Machines statiques,Ecole Nationale Polytechnique,El Harrach,Alger 1972-73.