

7/75

UNIVERSITÉ D'ALGER ELECTRONIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

2ex
avec
plancha

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
 PROJET DE FIN D'ÉTUDES
 ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

SIMULATION MATHÉMATIQUE SUR
 ORDINATEUR DIGITAL D'UN
 CONVERTISSEUR DE TRANSPORT H.V.D.C
 Montage de deux ponts en cascade

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
 المكنية
 ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

Proposé par :
Mr. V. STRIAPAN

Étudié par :
A. MOUGHARI

promotion 1975

TABLE DES MATIERES

	Pages
1. INTRODUCTION	
2. Etude théorique du pont dodécaphasé	1
-régime 4-5	
-régime 5	
-régime 5-6	
3. Simulation du système de deux ponts hémaphasés montés en série .	10
3.1 hypothèses	
3.2 topologie	
3.3 mise en equation	
3.3.1 notations	
3.3.2 schéma équivalent	
3.3.3 équations régissant le système	
3.3.4 choix des équations	
3.3.5 équations matricielles - inversions	
3.4 établissement de l'organigramme	39
3.4.1 bloc diagramme	
3.4.2 notations employées dans le programme	
3.5 exemple d'application de la méthode élaborée	44
-CONCLUSION	
-programme fortran IV	(annexe I)
-organigramme général	(annexe II)

INTRODUCTION

Groupement des unités de conversion

Il est commode de grouper par deux les unités hexasphasées de conversion; en les connectant en série sur le circuit à courant continu. Et en les associant du côté alternatif à des enroulements de transformateurs dont l'un est couplé en triangle et l'autre en étoile, ceci pour produire un déphasage de 30° entre les deux ponts hexasphasés.

Avec les deux unités en série, les commutations dans les deux ponts alternent tous les 30° électriques.

On obtient des tensions et des courants qui sont identiques aux tensions et aux courants du côté alternatif aussi bien que du côté continu d'un pont dodécaphasé.

Les deux ponts hexaphasés peuvent être alimentés par deux transformateurs distincts ou par deux secondaires, l'un en étoile et l'autre en triangle d'un même transformateur. Du côté alternatif les deux groupes se comportent comme deux ponts triphasés distincts branchés en parallèle sur le réseau.

Du côté continu les tensions redressées apparaissent comme mises en série entre le pôle positif et le pôle négatif de la tension redressée totale.

On peut dire que un groupe fonctionne sur les alternances positives et l'autre sur les alternances négatives.

-Groupement de plusieurs unités de conversion.

Pour les puissances très grandes, on est obligé de coupler en série plus de deux unités de conversion.

Si on veut un groupement de 4 unités, on doit réaliser des formes d'ondes équivalentes à 24 phases, pour cela il

faudra créer un déphasage de + ou - 15° au moyen d'un transformateur déphaseur ; Entre les tensions alternatives fournies à deux des groupes hexaphasés .

Cette solution est employée couramment pour les grosses installations d'électrolyse dont les puissances unitaires et les tensions d'alimentation sont relativement faibles .

Cette solution serait coûteuse dans le cas des transformateurs à très haute tension , en outre la multiplication du nombre de phases risque de rendre plus délicat le fonctionnement des valves par suite d'interférences possibles entre les commutations dans les groupes hexaphasés voisins .

En définitive , la tendance générale est de limiter à 12 le nombre de phases , même pour des puissances très élevées .

2- Etude théorique du pont dodécaphasé .

Le schéma équivalent d'un convertisseur étudié est représenté en figure 2.1 ;

On admet , outre les suppositions habituelles , que le rapport de transformation d'un transformateur Y/Y est égale à 1 (W2=W1) et le meme rapport d'un transformateur Y/D est égale à 1,732 (W2 = 1,732W1) ce qui donne l'égalité des tensions secondaires des transformateurs . Les thyristors sont numérotés de façon que le numéro indique l'ordre d'amorçage des thyristors .

L'inductance de commutation pour une phase est égale à $X_{\gamma} = X_t + X_s$.

X_t : inductance de fuite du transformateur .

X_s : inductance du système d'alimentation .

On verra plus loin que le régime de fonctionnement d'un redresseur dépend du coefficient d'influence mutuelle (A) entre les ponts .

$$A = X_s / (X_t + X_s)$$

Selon le schéma équivalent on a pour les courants dans différentes parties du montage .

$$(I'_A - I'_B) / 1,732 = I_{a3} - I_{a9}$$

$$(I'_B - I'_C) / 1,732 = I_{a7} - I_{a1}$$

$$\text{et } I'_A + I'_B + I'_C = 0$$

en résolvant ce système avec

$$I_{a9} + I_{a1} + I_{a5} = I_{a3} + I_{a7} + I_{a11} \quad \text{on trouve :}$$

Les courants dans les enroulements :
du premier transfo

$$I'_A = (I_{a3} - I_{a9} - I_{a11} - I_{a5}) / 1,732$$

$$I'_B = (I_{a7} - I_{a1} - I_{a3} + I_{a9}) / 1,732$$

$$I'_C = (I_{a11} - I_{a5} - I_{a7} + I_{a1}) / 1,732$$

du second transfo

$$I''_A = I_{a4} - I_{a10}$$

$$I''_B = I_{a8} - I_{a2}$$

$$I''_C = I_{a12} - I_{a6}$$

Les courants dans les phases du système

$$(\sqrt{3} = 1,732)$$

$$I_A = (I_{a3} - I_{a9} - I_{a11} + I_{a5}) / 1,732 + I_{a4} - I_{a10}$$

$$I_B = (I_{a7} - I_{a1} - I_{a3} + I_{a9}) / 1.732 + I_{a8} - I_{a2}$$

$$I_C = (I_{a11} - I_{a5} - I_{a7} + I_{a1}) / 1.732 + I_{a12} - I_{a6}$$

les formules donnant I'_A , I''_A , I_A sont valables pour tous les régimes de fonctionnement du redresseur

parmi les différents régimes possibles les plus intéressants sont les régimes de charge normale et de surcharge modérée.

ces régimes correspondent au fonctionnement du redresseur avec 4-5 et 5-6 soupapes conductantes comme régimes intermédiaires peuvent avoir lieu aussi les régimes à 5 ou à 6 soupapes

1/ régime à 4-5 soupapes

dans ce régime l'angle de commutation γ est inférieure à 30° sur un intervalle de répétition des processus électromagnétiques égale à 30° , il y a une étape sans commutation (4 soupapes laissent passer le courant) qui dure 30° moins γ et une autre étape qui est l'étape de commutation elle a une durée de γ et le courant passe par 5 soupapes.

l'ordre de fonctionnement des soupapes est le suivant :

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

Il faut souligner que dans ce régime une commutation dans un pont ne coïncide pas avec celle dans l'autre pont

le régime envisagé commence à partir de la marche à vide ($\gamma=0$) et dure jusqu'au courant de charge correspondant à ($\gamma=30^\circ$)

nous allons étudier les processus dans le convertisseur en régime à 4-5

supposons que la commutation s'effectue entre les soupapes 2 et 6 les soupapes conductantes sont 2, 3, 4, 5, 6.

et nous pouvons écrire :

$$I_{a3} = I_{a4} = I_{a5} = I_d \quad ; \quad I_{a6} = i \quad ; \quad I_{a2} = I_d - i$$

i : courant de commutation dans le circuit formé par les soupapes 2 et 6

en utilisant les équations (2) et (3) on obtient :

$$I''_A = I_d$$

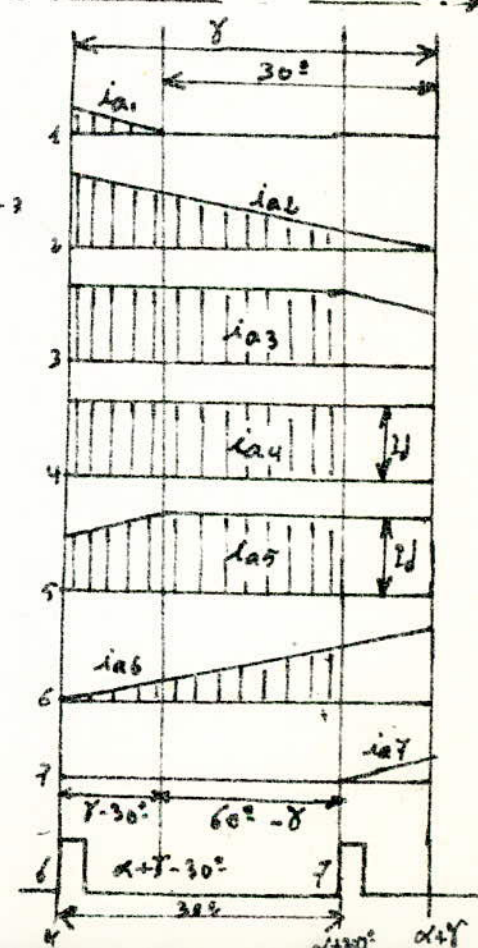
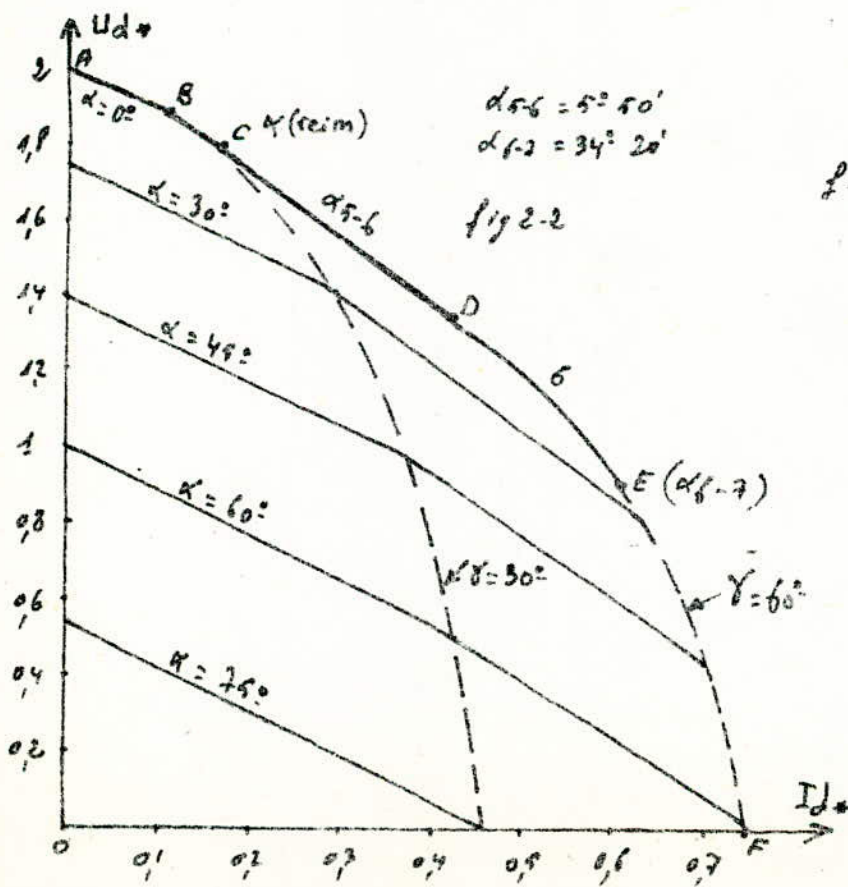
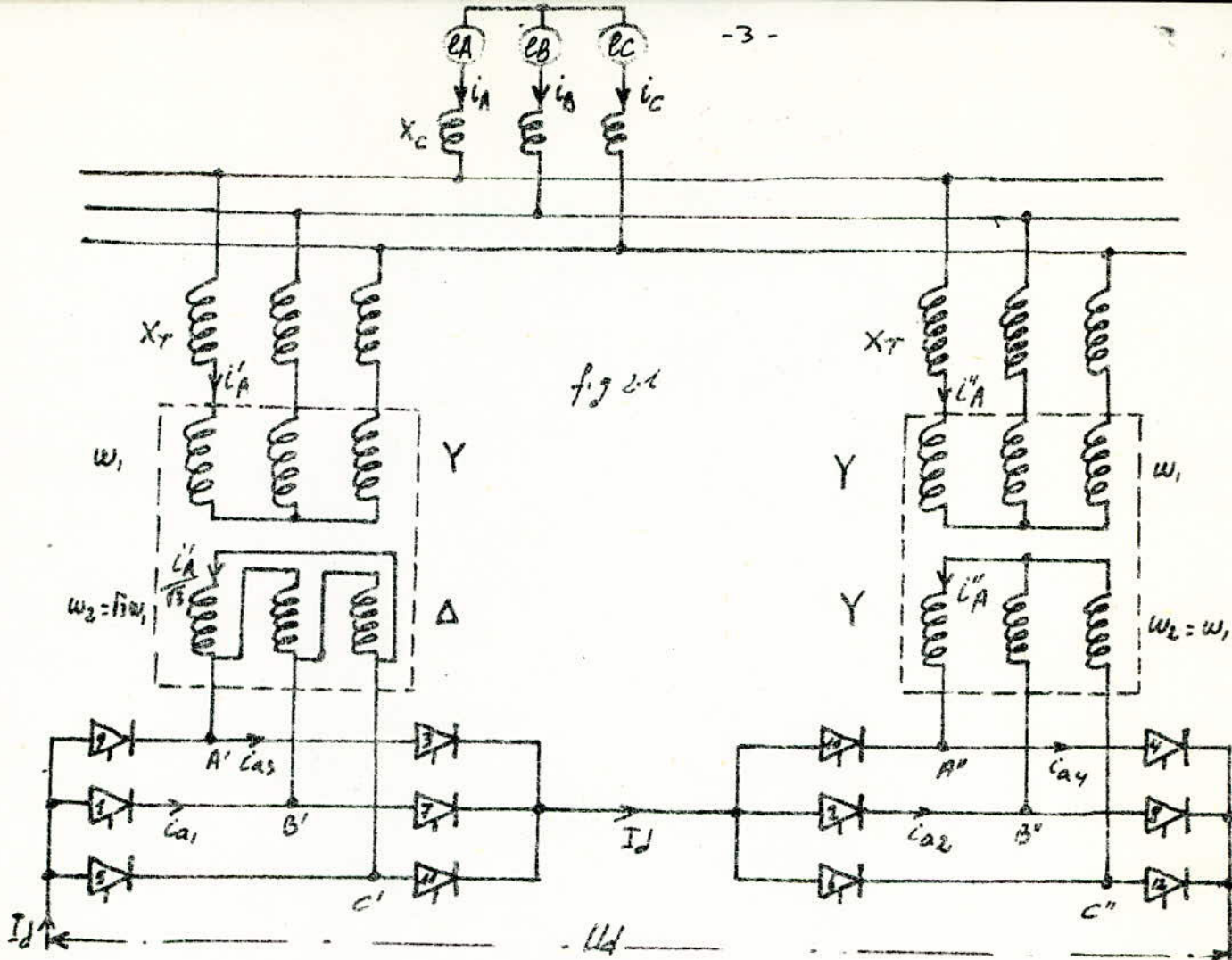
$$I''_B = -(I_d - i)$$

$$I''_C = -i$$

et $I_A = (I_d + I_d) / 1.732 + I_d$

$$I_B = -I_d / 1.732 - (I_d - i)$$

$$I_C = -I_d / 1.732 - i$$



l'equation pour le circuit de commutation :

$$X_s dI_B/d\theta + X_t dI_B''/d\theta - X_t dI_C''/d\theta - X_s dI_C/d\theta = E_B - E_C$$

en tenant compte des expressions (4) on obtient

$$2(X_t + X_s) dI/d\theta = E_B - E_C \quad (5)$$

on voit que la dernière equation est analogue à une equation pour l'etape de commutation dans un redresseur à un pont de Graetz .

A partir de (5) on trouve une formule pour l'angle de commutation

$$U_b = 3(1,732)E_m/3,14$$

$$I_b = E_m/X_c$$

E_m : valeur maximale de tension simple coté secondaire du transfo

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos \alpha' - 2I_d^*/1.732 \quad (6)$$

— valeur moyenne de tension redressée d'un redresseur peut être déterminée selon la formule :

$$U_d^* = 2(\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)) = 2\cos(\alpha + \gamma/2)\cos \gamma/2$$

equation de la caractéristique externe :

$$U_d^* = 2(\cos \alpha - I_d^*/1.732)$$

cette caractéristique est représentée sur la fig (2-2)

les caractéristiques sont représentées pour ALFA=0 ; 30° ; 45° ; 60° ; 75° .

pour ALFA =0° le regime à 4-5 se termine au point B ($I_d=C,116$ et $U_d = 1,866$) l'angle de commutation atteint 30° .

pour les valeurs de ALFA différentes de 0° la frontière du regime à 4-5 correspond à l'arc BCE avec ALFA = constante = 30° .

2/ Regime à 5 soupapes

ce regime est analogue au regime à 3 du convertisseur triphasé en pont de Graetz

toutes les equations pour le regime à 4-5 sont valables pour le

regime à 5 si on prend Gamma ±30° .

l'angle de retard peut etre determiné à partir de (6)

$$\sin(\alpha_r + 15^\circ) = I_d^* / 1,732 \cdot \sin 15^\circ \quad (7)$$

la valeur moyenne de la tension redressé est egale à :

$$U_d^* = 2 \cos 15^\circ \cos(\alpha_r + 15^\circ) \quad (8)$$

les expressions (7) et (8) permettent de trouver une equation de la caracteristique externe :

$$(U_d^{2*} / 4 \cos^2 15^\circ) + (I_d^{2*} / 3 \sin^2 15^\circ) = 1 \quad (9)$$

selon l'expression (9) sur la fig 2-2 on à l'intervalle BC qui correspond au regime à 5 soupapes .

une limite du regime à 5 correspond à une charge I_d pour laquelle $\alpha_r = \alpha_{r \text{ lim}}$, pour trouver cet angle on peut utiliser une formule :

$$\tan \alpha_{r \text{ lim}} = 1.732A / (4 - 3A)$$

d'apres la formule (7) on obtient un courant limite

$$I_d^* \text{ lim} = 1.732 \sin 15^\circ \sin(\alpha_{r \text{ lim}} + 15^\circ)$$

3/ Regime à 5-6 soupapes

le regime existe dans l'intervalle des charges quand l'angle de commutation compris entre 30° et 60°

sur la fig 2-3 les courbes des courants des soupapes ($I_{a1}; I_{a7}$) sont representés .

l'intervalle de repetition des processus est egale à 30° ,il contient deux etapes :

___ etape de dureé $\gamma - 30^\circ$ quand 6 soupapes (1;2;3;4;5;6) conduisent .

___ etape de dureé $60^\circ - \gamma$ quand 5 soupapes (2;3;4;5;6) conduisent .

durant la premiere etape une commutation entre les soupapes 1 et 5 se termine; et l'autre entre 2 et 6 commence .

durant la seconde etape (5 soupapes en conduction) une commutation a lieu dans un pont seulement .

avec une augmentation de charge l'angle de commutation croit .
respectivement cet angle augmente pour la première étape et elle
diminue durant la seconde étape .

du a la limite du régime à 5-6 l'angle de commutation égale à 60°
et pendant tout l'intervalle de répétition des processus a lieu
l'étape de 6 soupapes conductantes .

Analisons le fonctionnement du convertisseur sur les deux étapes
envisagés .

—Étape à 6 soupapes en conduction (1;2;3;4;5;6)

nous avons :

$$i_{a1} = Id - i_{a5}$$

$$i_{a2} = Id - i_{a6}$$

$$i_{a3} = Id = i_{a4}$$

Courants dans les transformateurs et dans les phases du

système :

$$i'_A = (Id + i_{a5}) / 1.732$$

$$i'_B = (i_{a5} - 2Id) / 1.732 \quad (10)$$

$$i'_C = (Id - 2i_{a5}) / 1.732$$

$$i''_A = Id$$

$$i''_B = i_{a6} - Id \quad (11)$$

$$i''_C = -i_{a6}$$

$$i_A = (1 + 1/1.732)Id + i_{a5}/1.732$$

$$i_P = -(1 + 2/1.732)Id + i_{a5}/1.732 + i_{a6} \quad (12)$$

$$i_C = Id / 1.732 - 2i_{a5} / 1.732 + i_{a6}$$

les équations pour les circuits en commutation (soupapes
1 et 5 en pont 1 et soupapes 2 et 6 en pont 2)

selon la fig 2-1

circuit formé par les soupapes 1 et 5

$$1,732(E_c - X_c di_c/d\theta - X_t di'_c/d\theta) = 0$$

en utilisant (10) et (12) on peut écrire :

$$2(X_t + X_c) di_{a5}/d\theta + 1,732 X_c di_{a6}/d\theta = -1,732 E_c$$

$$\text{ou } 2X\gamma di_{a5}/d\theta + 1,732 A X\gamma di_{a6}/d\theta = -1,732 E_c \quad (13)$$

pour le circuit formé par les soupapes 2 et 6 on a :

$$X_c di_B/d\theta + X_t di''_B/d\theta - X_t di''_c/d\theta - X_c di_c/d\theta = E_B - E_C$$

en tenant compte des formules (11) et (12) on écrit :

$$2X\gamma di_{a6}/d\theta + 1,732 A X\gamma di_{a5}/d\theta = E_B - E_C \quad (14)$$

en résolvant les équations (13) et (14) on trouve :

$$\frac{di_{a5}}{d\theta} \equiv -1,732 \frac{E_C + A/2 (E_B - E_C)}{(2 - 3/2 A^2) X\gamma}$$

$$\frac{di_{a6}}{d\theta} = \frac{(E_B - E_C) + 3/2 A E_C}{(2 - 3/2 A^2) X\gamma}$$

si les fem d'alimentation sont représentées comme :

$$E_A = E_m \cos \theta ; E_B = E_m \cos(\theta - 120^\circ) ; E_C = E_m \cos(\theta + 120^\circ)$$

on en déduit :

$$\frac{di_{a5}}{d\theta} = \frac{(4 - 6A + 3A^2)^{0,5}}{(4 - 3A^2) X\gamma} 1,732 E_m \sin(\theta + 30^\circ + \alpha \text{rerun})$$

$$\frac{di_{a6}}{d\theta} = \frac{(4 - 6A + 3A^2)^{0,5}}{(4 - 3A^2) X\gamma} 1,732 E_m \sin(\theta - \alpha \text{rerun})$$

donc les courants de soupapes 5 et 6 sont égaux à :

$$i_{a5} = \frac{(4-6A+3A^2)^{0,5}}{(4-3A^2) X\gamma} 1,732 \operatorname{Im}(C_1 - \cos(\theta + 30^\circ + \alpha_{\text{reim}})) \quad (15)$$

$$i_{a6} = \frac{(4-6A+3A^2)^{0,5}}{(4-3A^2) X\gamma} 1,732 \operatorname{Im}(C_2 - \cos(\theta - \alpha_{\text{reim}})) \quad (16)$$

ces expressions sont valables pour l'etape

$$\alpha < \theta < \alpha + \gamma - 30^\circ$$

pour la deuxieme etape $\alpha + \gamma - 30^\circ < \theta < \alpha + 30^\circ$ quand 5 soupapes

(2-3-4-5-6) conduisent le courant, l'expression (5) est valable avec $i = i_{a6}$; donc nous pouvons ecrire :

$$i_{a6} = \frac{1,732 \operatorname{Em}}{2X\gamma} (C_3 - \cos\theta) \quad (17)$$

les constantes d'integration C_1 , C_2 , C_3 et l'angle de commutation se trouvent en tenant compte des conditions suivantes (fig 2-3)

1- $i_{a6} = 0$ pour $\theta = \alpha$

2- $i_{a5} = I_d$ pour $\theta = \alpha + \gamma - 30^\circ$

3- pour $\theta = \alpha + \gamma - 30^\circ$ ~~i_{a5}~~ i_{a6} determiné par (16) est egale à i_{a6} determiné à partir de (17) .

4- i_{a6} pour $\theta = \alpha + 30^\circ$ est egale à i_{a5} pour $\theta = \alpha$.

la condition 4 permet d'etablir une formule pour γ en regime à 5-6

$$\cos(\alpha + \alpha_{\text{reim}} + \gamma) = \cos(\alpha - \alpha_{\text{reim}}) - \frac{2(2+1,732A)}{1,732(4-6A+3A^2)^{0,5}} I_d^* \quad (18)$$

valeur moyenne de la tension redresseé :

$$U_d^* = \frac{(4-6A+3A^2)^{0,5}}{2-1,732A} (\cos(\alpha - \alpha_{s.6}) + \cos(\alpha + \alpha_{s.6} + \gamma)) \quad (19)$$

a partir de (18) et (19) on determine l'expression de la caracteristique externe :

$$U_d^* = \frac{2}{2-1,732\Lambda} ((4-6\Lambda+3\Lambda^2)^{0,5} \cos(\alpha' - \alpha'_{\text{crit}}) - \frac{2+1,732\Lambda}{1,732} I_d^*)$$

les caractéristiques construites selon cet expression sont représentées sur la figure (2-2) ; elles se situent entre l'arc CE ($\gamma=30^\circ$) et l'arc DEF ($\gamma=60^\circ$) .

3. SIMULATION MATHÉMATIQUE

Notre étude consiste en la mise en équations du fonctionnement du pont dodecaphasé; et l'établissement d'un programme pour la résolution de ces équations sur ordinateur .

On suppose connu l'étude d'un pont triphasé ainsi que les résultats. (voir projet de RILLI et MOULFI année 74)

L'idée principale de étude est la suivante :

on travaille en régime linéaire, on prend deux ponts triphasés et on applique le principe de superposition .

3.1 Hypothèses :

- le système de tensions triphasées est symétrique.
- le déphasage entre les deux ponts est de $30^\circ = \text{Cste}$.
- les circuits magnétiques ne sont pas saturés .
- les courants magnétisants du transformateurs sont négligeables .
- les thyristors sont idéaux: impédance nulle dans le sens direct et infinie dans le sens inverse .
- le système de commande est idéal .
- les angles α_1 et α_2 sont constants .

3.2 Système de numérotation :

on numérote les 12 thyristors de 1 à 12 ; dans une période on a 12 intervalles . dans chaque intervalle on a un thyristor qui conduit . (voir figure 3-1)

on prend le système de numérotation des opérations suivant :

$1+12m$, $2+12m$, $3+12m$ $\dots 12+12m$.

exemple :

le thyristor T1 est conducteur dans les opérations 1,13,25....

le thyristor T2 est conducteur dans les opérations 2,14,26 ...

m : entier positif ou nul .

le pont 2 sera alimenté par un transformateur Y/Y et le pont 1 sera alimenté par un transformateur Y/D ceci pour avoir un déphasage de 30° entre les deux ponts .
le système de tensions alternatives dans le pont 2 est en avance de 30° sur le pont 1 . (voir fig 3-2)

-différents cycles de fonctionnement :

pour un pont triphasé on a les régimes suivants :

- régime à 4 thyristors qui commutent en même temps .
- régime à 3 thyristors qui commutent en même temps .
- régime à 2 thyristors .

le pont dodécaphasé étant équivalent à deux ponts triphasés par conséquent un régime du pont dodécaphasé est équivalent à la somme de deux régimes du pont triphasé .

on en déduit les régimes suivants :

pont: (P)		regime: (R)	
P-1, R-4	+	P-2, R-4	= R-8
P-1, R-4	+	P-2, R-3	= R-7
P-1, R-4	+	P-2, R-2	= R-6
P-1, R-3	+	P-2, R-4	= R-7
P-1, R-3	+	P-2, R-3	= R-6
P-1, R-3	+	P-2, R-2	= R-5
P-1, R-2	+	P-2, R-4	= R-6
P-1, R-2	+	P-2, R-3	= R-5
P-1, R-2	+	P-2, R-2	= R-4

du point de vue pont dodécaphasé on a 5 régimes différents .

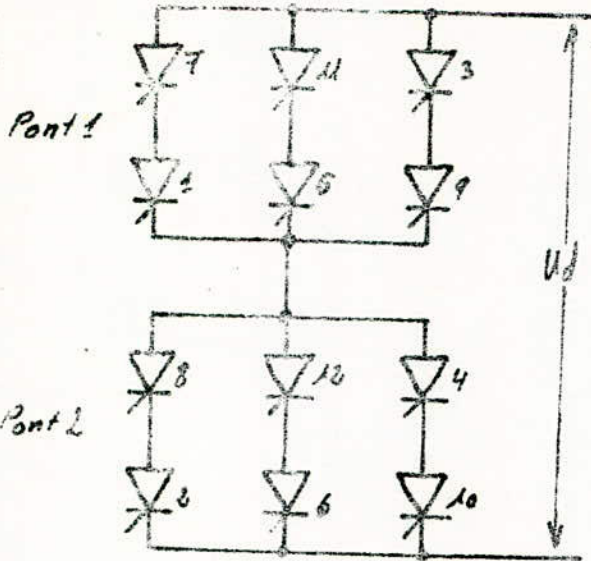


fig 3-1

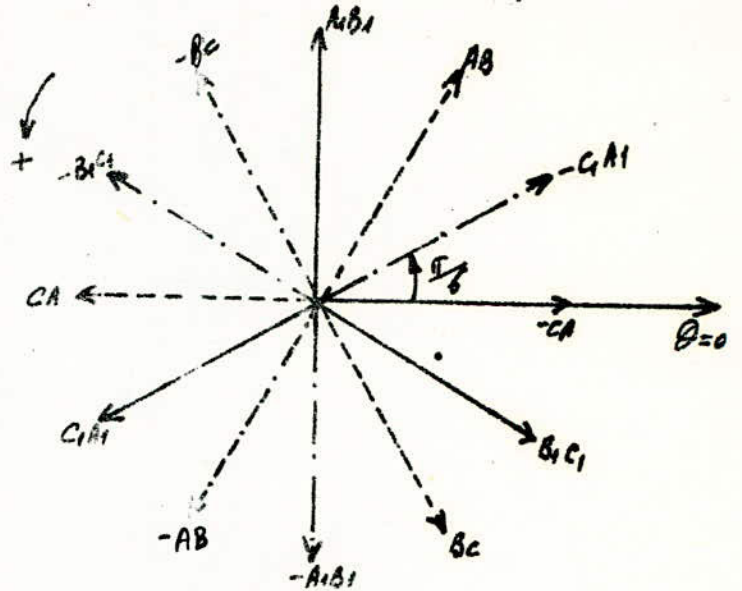


Fig 3-2

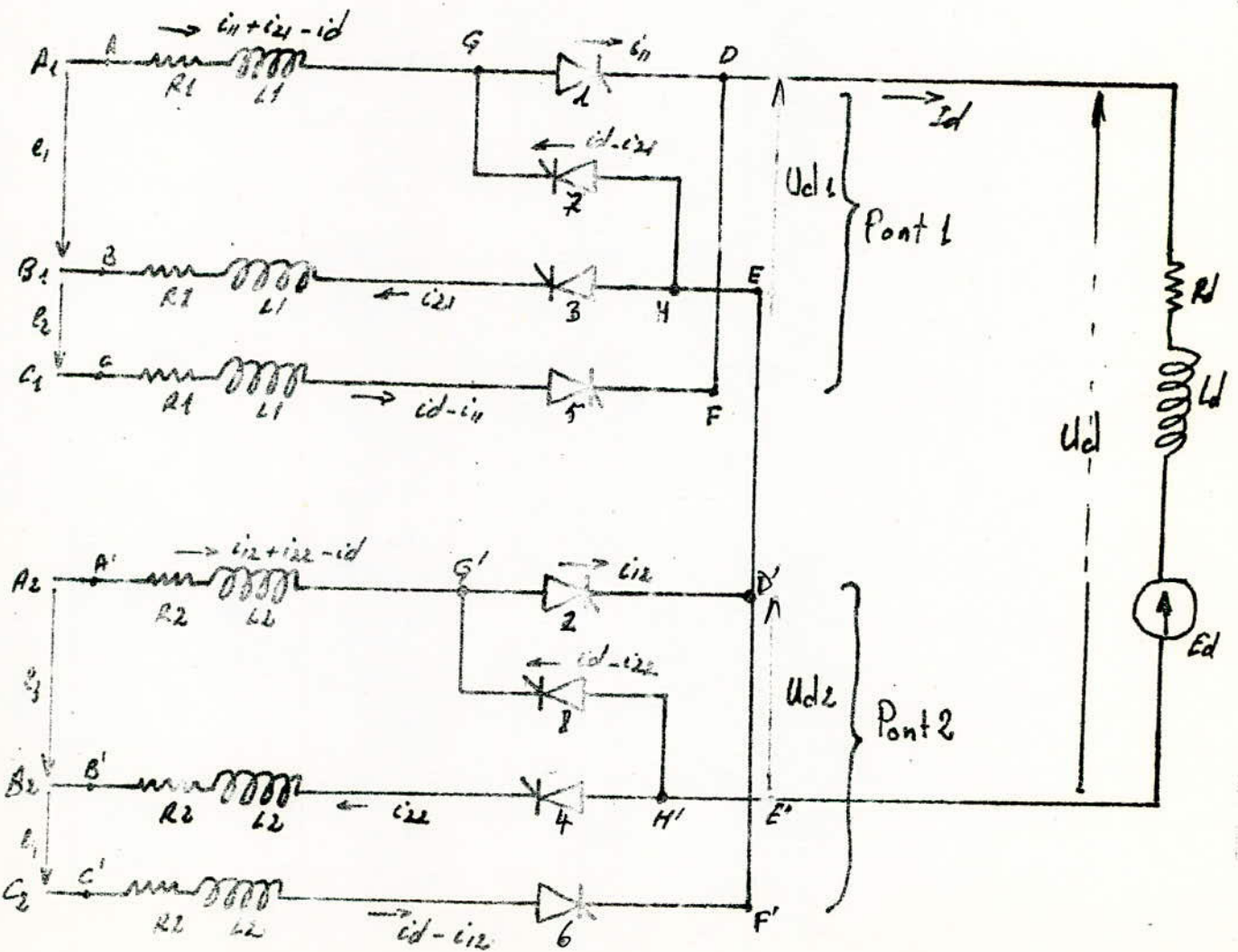


fig 3-3

Schemas topologiques

Pour chaque pont on prend le schema topologique quaternaire qui considere le cas general .(voir fig 3-3)
les tensions A,B,C et A',B',C' sont dephaseés de 30° .
on considere que R1,R2,X1,X2 sont les resistances et les reactances de phase rameneés aux secondaires des transformateurs .

i_{11} et i_{21} sont respectivement les courants 1 et 2 de commutation dans le pont 1 .

i_{12} et i_{22} sont respectivement les courants 1 et 2 de commutation dans le pont 2

le schema de la fig 3-3 corespond au regime à 8 thyristors.
le regime à 7 thyristors correspond : pont 1 regime 3 et pont 2 regime 4 ou inversement .

UD1 et UD2 sont respectivement les valeurs des tensions moyennes redresseés dans le pont 1 et 2 .

ID etant la valeur moyenne du courant redressé .

dans chaque pont ,pour une dureé de 60° on a un fonctionnement bien defini .

durant l'intervalle $1+12m$ et $2+12m$ on a pas de changement dans le pont 1 .

on a un changement dans le pont 2 :

en regime 4 on a les valves 5,6,1,2 au lieu de 4,5,6,1 .

le systeme de tension a tourné de 60° par rapport à l'axe fixe $\theta = 0$

on obtient :

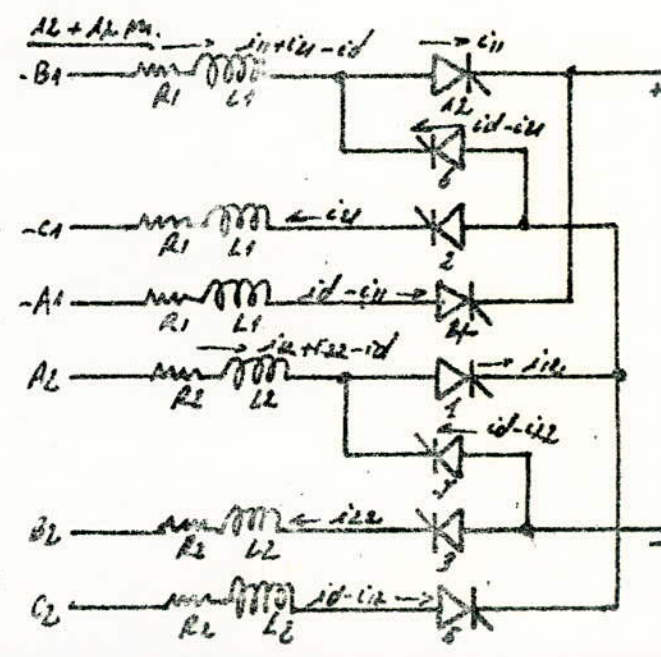
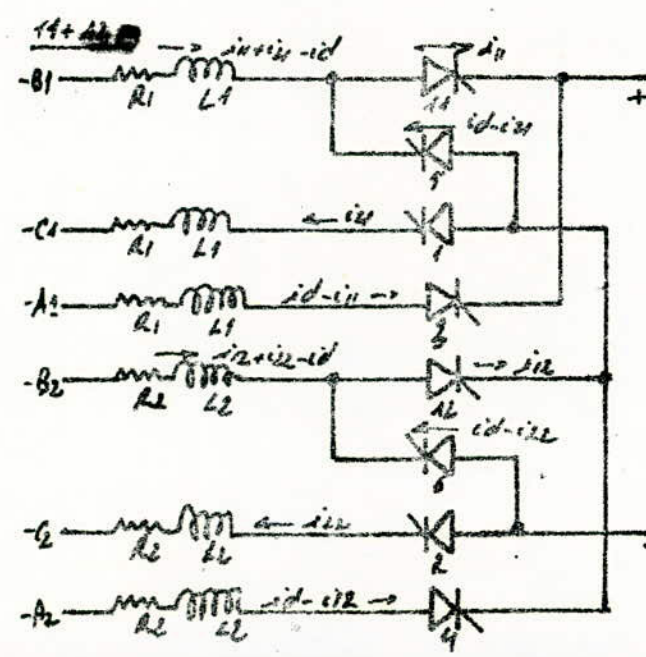
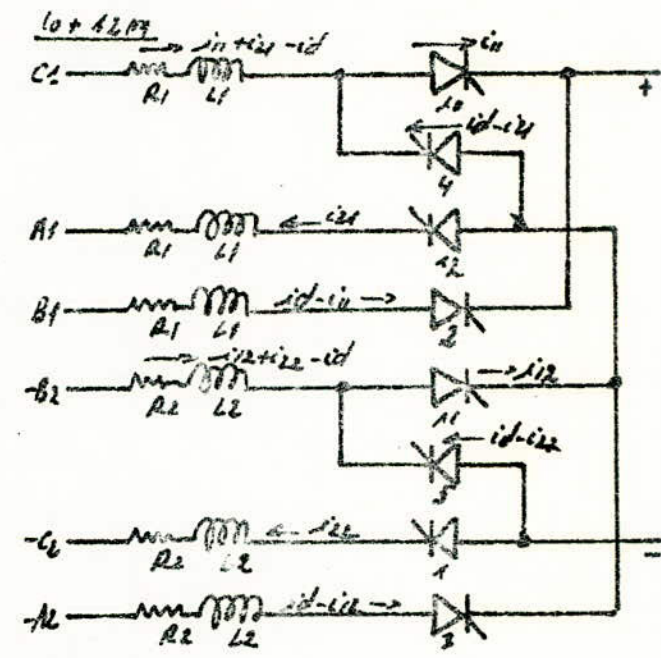
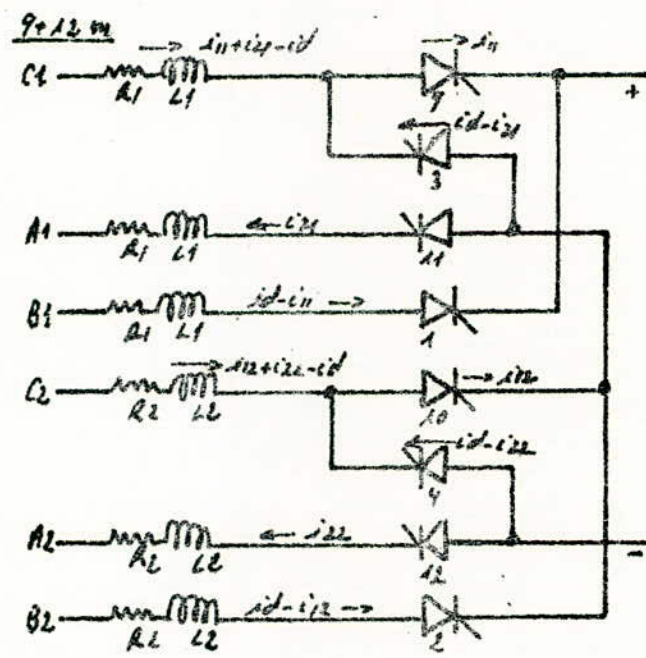
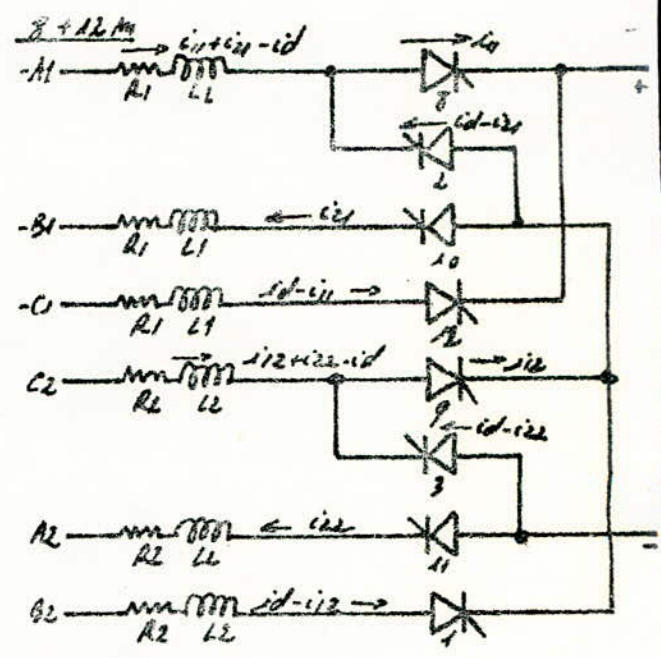
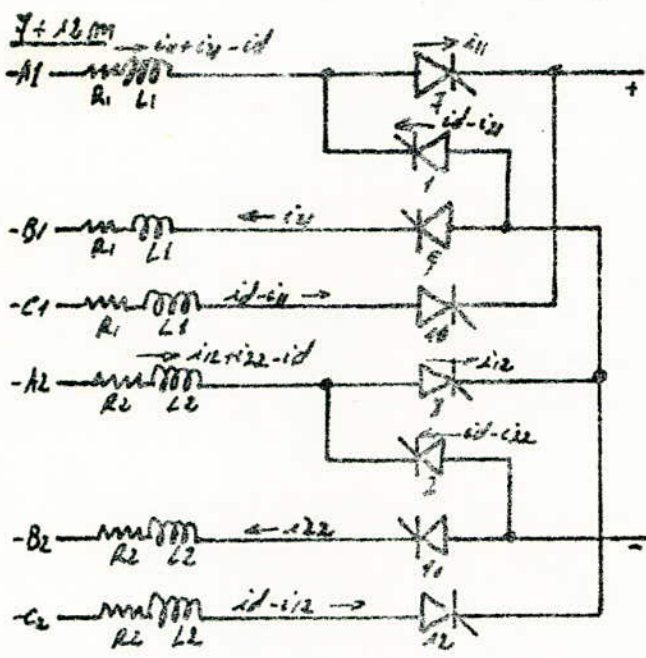
-CA au lieu de AB

-AB au lieu de BC

-BC au lieu de CA

et comme cela on obtient tous les schemas dans les 12 intervalles .

tableau N° 1	1 + 12m	2 + 12m	3 + 12m	4 + 12m	5 + 12m	6 + 12m	7 + 12m	8 + 12m	9 + 12m	10 + 12m	11 + 12m	12 + 12m
e ₁	U _{A1B1}	U _{A1B1}	U _{A1C1}	U _{A1C1}	U _{B1C1}	U _{B1C1}	U _{B1A1}	U _{B1A1}	U _{C1A1}	U _{C1A1}	U _{C1B1}	U _{C1B1}
e ₂	U _{B1C1}	U _{B1C1}	U _{B1A1}	U _{B1A1}	U _{C1A1}	U _{C1A1}	U _{C1B1}	U _{C1B1}	U _{A1B1}	U _{A1B1}	U _{A1C1}	U _{A1C1}
e ₃	U _{A2B2}	U _{A2C2}	U _{A2C2}	U _{B2C2}	U _{B2C2}	U _{B2A2}	U _{B2A2}	U _{C2A2}	U _{C2A2}	U _{C2B2}	U _{C2B2}	U _{A2B2}
e ₄	U _{B2C2}	U _{B2A2}	U _{B2A2}	U _{C2A2}	U _{C2A2}	U _{C2B2}	U _{C2B2}	U _{A2B2}	U _{A2B2}	U _{A2C2}	U _{A2C2}	U _{B2C2}
i _{A1}	$x_{11} + i_{21} - id$	$x_{11} + i_{21} - id$	i_{21}	i_{21}	$id - i_{11}$	$id - i_{11}$	$id - i_{11} - i_{21}$	$id - i_{11} - i_{21}$	$-i_{21}$	$-i_{21}$	$i_{11} - id$	$i_{11} - id$
i _{B1}	$-i_{21}$	$-i_{21}$	$i_{11} - id$	$i_{11} - id$	$i_{11} + i_{21} - id$	$i_{11} + i_{21} - id$	i_{21}	i_{21}	$id - i_{11}$	$id - i_{11}$	$id - i_{11} - i_{21}$	$id - i_{11} - i_{21}$
i _{C1}	$id - i_{11}$	$id - i_{11}$	$id - i_{11} - i_{21}$	$id - i_{11} - i_{21}$	$-i_{21}$	$-i_{21}$	$i_{11} - id$	$i_{11} - id$	$i_{11} + i_{21} - id$	$i_{11} + i_{21} - id$	i_{21}	i_{21}
i _{A2}	$i_{12} + i_{22} - id$	i_{22}	i_{22}	$id - i_{12}$	$id - i_{12}$	$id - i_{12} - i_{22}$	$id - i_{12} - i_{22}$	$-i_{22}$	$-i_{22}$	$-i_{22}$	$i_{12} - id$	$i_{12} + i_{22} - id$
i _{B2}	$-i_{22}$	$i_{12} - id$	$i_{12} - id$	$i_{12} + i_{22} - id$	$i_{12} + i_{22} - id$	i_{22}	i_{12}	$id - i_{12}$	$id - i_{12}$	$id - i_{12} - i_{22}$	$id - i_{12} - i_{22}$	$-i_{22}$
i _{C2}	$id - i_{12}$	$id - i_{12} - i_{22}$	$id - i_{12} - i_{22}$	$-i_{22}$	$-i_{22}$	$i_{12} - id$	$i_{12} - id$	$i_{12} + i_{22} - id$	$i_{12} + i_{22} - id$	i_{22}	i_{22}	$id - i_{12}$
i _A	$i_{11} + i_{21} + i_{12} + i_{22} - 2id$	$i_{11} + i_{21} + i_{22} - id$	$i_{11} + i_{22}$	$i_{21} + id - i_{12}$	$2id - i_{11} - i_{12} - i_{22}$	$2id - i_{11} - i_{12} - i_{22}$	$2id - i_{11} - i_{21} - i_{12} - i_{22}$	$id - i_{11} - i_{21} - i_{22}$	$-i_{21} - i_{22}$	$i_{12} - i_{21} - id$	$i_{11} + i_{12} - 2id$	$i_{11} + i_{12} + i_{22} - 2id$
i _B	$-i_{21} - i_{22}$	$i_{12} - i_{21} - id$	$i_{11} + i_{12} - 2id$	$i_{11} + i_{12} + i_{22} - 2id$	$i_{11} + i_{21} + i_{12} + i_{22} - 2id$	$i_{11} + i_{21} + i_{12} - id$	$i_{11} + i_{22}$	$id + i_{21} - i_{12}$	$2id - i_{11} - i_{12} - i_{22}$	$2id - i_{11} - i_{12} - i_{22}$	$2id - i_{11} - i_{21} - i_{12} - i_{22}$	$id - i_{11} - i_{21} - i_{22}$
i _C	$2id - i_{11} - i_{12}$	$2id - i_{11} - i_{12} - i_{22}$	$2id - i_{11} - i_{21} - i_{12} - i_{22}$	$id - i_{11} - i_{21} - i_{22}$	$-i_{21} - i_{22}$	$i_{12} - id - i_{21}$	$i_{11} + i_{12} - 2id$	$i_{11} + i_{12} + i_{22} - 2id$	$i_{11} + i_{21} + i_{12} + i_{22} - 2id$	$i_{11} + i_{21} + i_{12} + i_{22} - id$	$i_{21} + i_{22}$	$id + i_{21} - i_{12}$



3-3 Mise en equations

3.3.1 Notations:

- i_{kj} : courant k dans le pont j .
- E_m : tension simple maximum d'alimentation .
- R_s : resistance de phase du système energitique .
- L_s : inductance de phase du système energitique .
- R_t : resistance de phase du primaire du transformateur .
- L_t : inductance " " "
- R_1 : resistance " secondaire " (pont 1)
- R_2 : " " " " (pont 2)
- L_1 : inductance " " " (pont 1)
- L_2 : " " " " (pont 2)
- R_d : resistance de la charge .
- L_d : inductance "
- E_d : f.c.e.m de la charge .
- e_1, e_2, e_3, e_4 tensions composeés (instantaneés)
- ω : pulsation des tensions .
- T ; temps
- H : pas de calcul .
- Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 : ; representent respectivement $i_{11}, i_{21}, i_d, i_{12}, i_{22}$.
- f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 : deriveés des courants $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4; Y_5$.
- I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} courants de phase d'alimentation triphasée dans le pont 1 .
- I_{A2}, I_{B2}, I_{C2} courants de phase d'alimentation triphaseé dans le pont 2 .
- I_A, I_B, I_C courants de phase d'alimentation triphaseé du pont dodecaphase .

3.3.2 schema equivalent .

dans chaque intervalle on calcule le courant dans chaque phase pour les deux ponts .

et en faisant la somme des courants des phases correspondantes, on obtient IA, IB, IC , ces courants sont utilises pour le calcul de la chute de tension dans le systeme energetique .

$$I_A = I_{A1} + I_{A2}$$

$$I_B = I_{B1} + I_{B2}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2}$$

3.3.3 Equations regissant le systeme :

on considere que les deux ponts sont alimentés par deux sources independantes , dont les tensions sont decaleés de 30° .

(voir fig 3-3)

nombre d'inconnues : 5 (i_{11} , i_{21} , i_d , i_{12} , i_{22})

on considere C_d comme connu ; car on peut determiner U_d a partir de la determination de i_d .

on a :

$$i_{d1} = i_{d2} = i_d \quad \text{les deux ponts etant en serie .}$$
$$U_{d1} + U_{d2} = U_d = E_d + R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt}$$

pont 1 :

-fonctionnement en regime 2 valves .

$$i_{11} = i_d \quad ; \quad i_{21} = i_d$$

on en deduit 2 equations .

1) $\frac{di_{11}}{dt} = \frac{di_d}{dt}$

2) $\frac{di_{21}}{dt} = \frac{di_d}{dt}$

Maille (A D E B)

$$3) e_1 = U_{d1} + R_1(-i_d + i_{11} + 2i_{21}) + L_1 \frac{d}{dt}(i_{11} + 2i_{21} - i_d)$$

fonctionnement en regime 3 valves .

$$i_{21} = i_d$$

Maille (A D F C)

$$4) e_1 + e_2 = R_1(2i_{11} - 2i_d + i_{21}) + L_1 \frac{d}{dt}(i_{11} + i_{11} - 2i_d + i_{21})$$

fonctionnement en regime 4 valves .

Maille (A G H B)

$$5) e_1 = R_1(i_{11} + 2i_{21} - i_d) + L_1 \frac{d}{dt}(i_{11} + 2i_{21} - i_d)$$

Pont 2 : fonctionnement en regime 2 valves

$$6) \frac{di_{12}}{dt} = \frac{di_d}{dt}$$

$$7) \frac{di_{22}}{dt} = \frac{di_d}{dt}$$

$$8) e_3 = U_{d2} + R_2(i_{12} + 2i_{22} - i_d) + L_2 \frac{d}{dt}(i_{12} + 2i_{22} - i_d)$$

fonctionnement en regime 3 valves .

$$i_{22} = i_d$$

Maille (A' D' F' C')

$$9) e_3 + e_4 = R_2(i_{22} + 2i_{12} - 2i_d) + L_2 \frac{d}{dt}(i_{22} + 2i_{12} - 2i_d)$$

fonctionnement en regime 4 valves .

Maille (A' G' H' B')

$$10) e_3 = R_2(i_{12} + 2i_{22} - i_d) + L_2 \frac{d}{dt}(i_{12} + 2i_{22} - i_d)$$

Les equations 3 et 8 sont valables quelque soit les regimes dans le pont dodecaphase car elles representent le regime a 4 qui est inclu dans les autres regimes . En prenant la somme des equations des deux ponts on obtient 6 equations a 6 inconnues; la 6^{eme} inconnue est la tension U_d . Comme les equations 3 et 8 sont valables dans tous les regimes ; on constate qu'en faisant la somme de 3 et 8 on obtient une equation 11 dans laquelle on elimine l'inconnue U_d .

Ceci nous donne un systeme de 5 equations a 5 inconnues .

Il en resulte 9 equations qui definissent le systeme :

$$1) \frac{di_{11}}{dt} = \frac{di_d}{dt}$$

$$2) \frac{di_{21}}{dt} = \frac{di_d}{dt}$$

$$11) e_1 + e_3 = Ed + Rdi_d + R_1(i_{11} + 2i_{21} - i_d) + R_2(i_{12} + 2i_{22} - i_d) + L_d \frac{di_d}{dt} \\ + L_1 \left(\frac{di_{11}}{dt} + \frac{di_{21}}{dt} - \frac{di_d}{dt} \right) + L_2 \left(\frac{di_{12}}{dt} + 2 \frac{di_{22}}{dt} - \frac{di_d}{dt} \right)$$

$$4) e_1 + e_2 = R_1(i_{21} + 2i_{11} - 2i_d) + L_1 \left(2 \frac{di_{11}}{dt} - 2 \frac{di_d}{dt} + \frac{di_{21}}{dt} \right)$$

$$5) \quad e_1 = R_1(i_{11} + 2i_{21} - i_d) + L_1 \left(2 \frac{di_{21}}{dt} + \frac{di_{11}}{dt} - \frac{di_d}{dt} \right)$$

$$6) \quad \frac{di_{12}}{dt} = \frac{di_d}{dt}$$

$$7) \quad \frac{di_{22}}{dt} = \frac{di_d}{dt}$$

$$9) \quad e_3 + e_4 = R_2(i_{22} + 2i_{12} - i_d) + L_2 \left(\frac{di_{22}}{dt} + 2 \frac{di_{12}}{dt} - 2 \frac{di_d}{dt} \right)$$

$$10) \quad e_3 = R_2(i_{12} + 2i_{22} - i_d) + L_2 \left(2 \frac{di_{22}}{dt} + \frac{di_{12}}{dt} - \frac{di_d}{dt} \right)$$

3.3.4 Choix des equations .

Il existe 9 combinaisons possibles d'etats de fonctionnement du pont dodecphasé . on a 5 equations sur 9 qui sont valables a chaque instant .

P1-R2 ; P2-R2 Equations (1 , 2 , 11 , 6 , 7)

P1-R2 ; P2-R3 Equations (1 , 2 , 11 , 6 , 9)

P1-R2 ; P2-R4 Equations (1 , 2 , 11 , 9 , 10)

.-.

P1-R3 ; P2-R2 Equations (2 , 4 , 11 , 6 , 7)

P1-R3 ; P2-R3 Equations (2 , 4 , 11 , 6 , 9)

P1-R3 ; P2-R4 Equations (2 , 4 , 11 , 9 , 10)

.-.

P1-R4 ; P2-R2 Equations (4 , 5 , 11 , 6 , 7)

P1-R4 ; P2-R3 Equations (4 , 5 , 11 , 6 , 9)

P1-R4 ; P2-R4 Equations (4 , 5 , 11 , 9 , 10)

L'etat du pont dodecaphasé depend de l'etat du pont 1 et de l'etat du pont 2 .

Pour chaque regime du pont 1 on a 3 regimes possibles du pont 2 .. ce qui donne 9 regimes possibles pour le pont dodecaphasé ?

3.3.5 Calcul des valeurs muettes : (e₁;e₂;e₃;e₄)

on considere le schema : (voir fig 3-4)

le systeme de tension e₃ et e₄ correspondant au pont 2 est en avance de 30° par rapport au systeme de tension e₁ ; e₂ correspondant au pont 1 .

Notre domaine de travail est lineaire ; on applique le theoreme de superposition, on obtient le schema equivalent (voir fig 3-5) .

Dans chaque intervalle la chute de tension dans le systeme d'alimentation est fonction de i_A , i_B , i_C

$$e_1 = e_{AB} + L_g \left(\frac{d}{dt} (i_B - i_A) \right) + R_g (i_B - i_A)$$

$$e_2 = e_{BC} + L_g \left(\frac{d}{dt} (i_C - i_B) \right) + R_g (i_C - i_B)$$

$$e_3 = e_{AB'} + L_g \frac{d}{dt} (i_B - i_A) + R_g (i_B - i_A)$$

$$e_4 = e_{BC'} + L_g \frac{d}{dt} (i_C - i_B) + R_g (i_C - i_B)$$

$$R_g = R_s + R_T$$

$$L_g = L_s + L_T$$

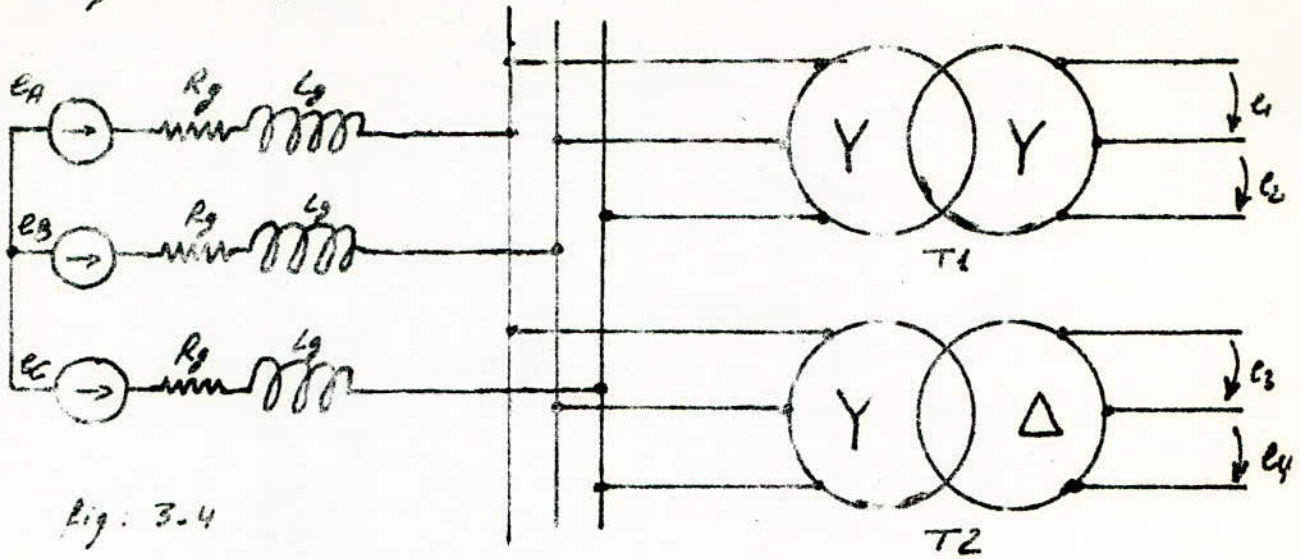


Fig. 3-4

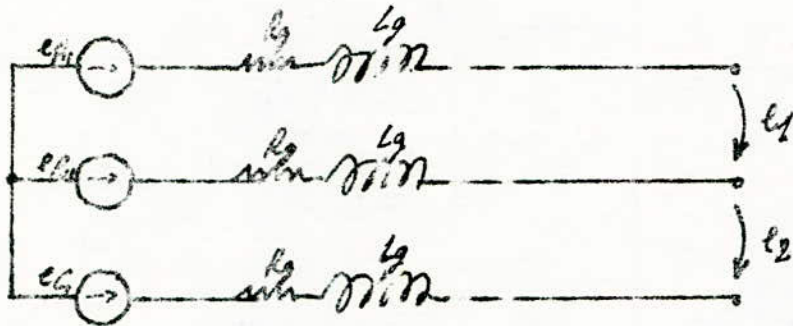


Fig. 3-5

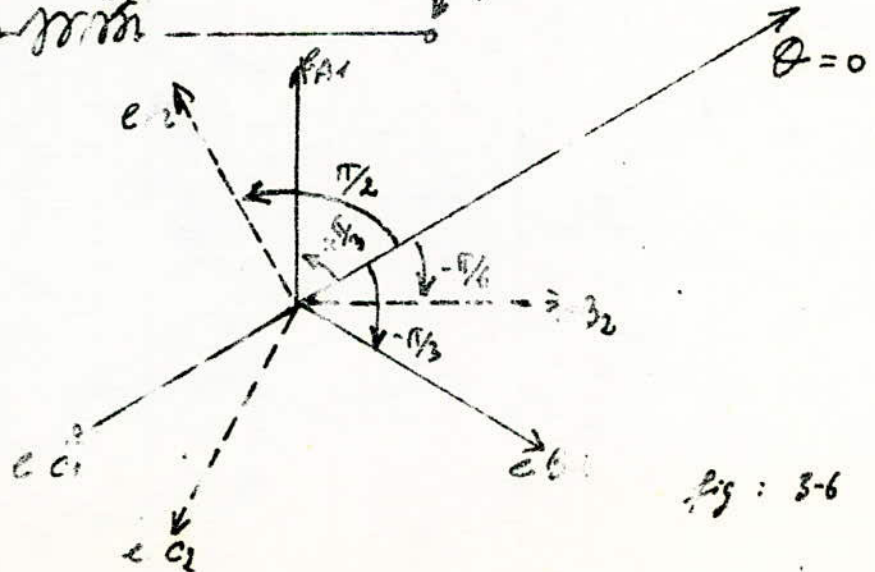
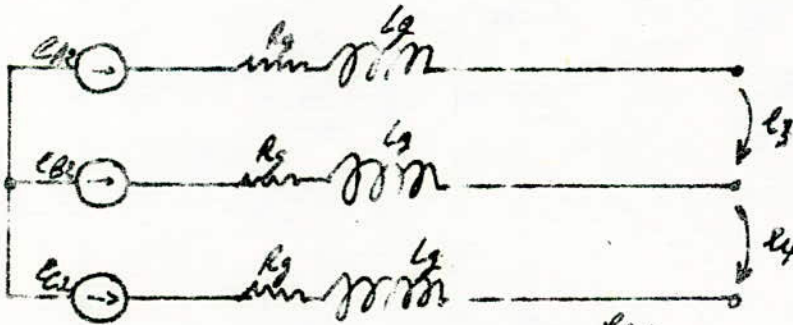


Fig. 3-6

Dans le tableau 1 on a toutes les tensions correspondantes a $e_1 ; e_2 ; e_3 ; e_4$ pour chaque intervalle .

Le diagramme des tensions est representé en fig 3-6

On choisit un dephasage initial de 60° c'est pour avoir les memes f.e.m apres une rotation de 60° .

$$e_{A2} = E_m \sin(\theta + 3,14/3 + \alpha_1)$$

$$e_{BC} = E_m \sin(\theta - 3,14/3 + \alpha_1)$$

$$e_{AB'} = E_m \sin(\theta + 3,14/2 + \alpha_2)$$

$$e_{BC'} = E_m \sin(\theta - 3,14/6 + \alpha_2)$$

Si on prend ces 4 equations pour l'interval 1+12m apres 60° on sera dans l'interval 3+12m ; pour 3+12m on a :

$e_1 = u_{AC} = -u_{CA}$ apres 60° a partir de l'etat initial u_{AC} tournera de 60° et prendra la place de u_{AB} par rapport a l'axe fixe . donc on aura la meme equation que celle de e_{AB} .

on fait le meme raisonnement pour les f.e.m $e_2 ; e_3 ; e_4$.

Lorsqu'on commence par l'interval 1+12m ; tous les 60° on a les memes formules . les formules precedentes de f.e.m sont

valables pour les intervalles impairs : 1+12m, 3+12m, 13+12m

On en deduit de meme des equations valables pour l'interval

pair . a partir des equations precedentes on fait une rotation

de 30° des vecteurs e_1 , e_2 , e_3 , e_4 on obtient :

Intervalle pair :

$$e_1 = E_m \sin(\theta + 3,14/2 + \alpha_1)$$

$$e_2 = E_m \sin(\theta - 3,14/6 + \alpha_1)$$

$$e_3 = E_m \sin(\theta + 3,14/3 + \alpha_2)$$

$$e_4 = E_m \sin(\theta - 3,14/3 + \alpha_2)$$

On constate que les grandeurs $(i_B - i_A)$ et $(i_C - i_B)$ sont identiques respectivement pour les intervalles pairs et impairs (voir tableau 1).

tenant compte de toutes ces constatations on peut écrire :

-intervalle impair :

$$e_1 = E_m \sin(\theta + \frac{\pi}{3} + \alpha_1) + L_{\mathbb{S}}(-f_1 - 2f_2 + 2f_3 - f_4 - 2f_5) + R_{\mathbb{S}}(-y_1 - 2y_2 + 2y_3 - y_4 - y_5 - y_5)$$

$$e_2 = E_m \sin(\theta + \frac{\pi}{3} + \alpha_1) + L_{\mathbb{S}}(-f_1 + f_2 + 2f_3 - f_4 + f_5) + R_{\mathbb{S}}(-y_1 + y_2 + 2y_3 - y_4 + y_5)$$

$$e_3 = E_m \sin(\theta + \frac{\pi}{2} + \alpha_2) + L_{\mathbb{S}}(-f_1 - 2f_2 + 2f_3 - f_4 - 2f_5) + R_{\mathbb{S}}(-y_1 - 2y_2 + 2y_3 - y_4 - 2y_5)$$

$$e_4 = E_m \sin(\theta - \frac{\pi}{6} + \alpha_2) + L_{\mathbb{S}}(-f_1 + f_2 + 2f_3 - f_4 + f_5) + R_{\mathbb{S}}(-y_1 + y_2 + 2y_3 - y_4 + y_5)$$

-intervalle paire :

$$e_1 = E_m \sin(\theta + \frac{\pi}{2} + \alpha_1) + L_{\mathbb{S}}(-2f_2 - f_1 + f_4 - f_5) + (-2y_2 - y_1 + y_4 - y_5) R_{\mathbb{S}}$$

$$e_2 = E_m \sin(\theta - \frac{\pi}{8} + \alpha_2) + L_{\mathbb{S}}(-f_1 + f_2 + 3f_3 - 2f_4 - f_5) + R_{\mathbb{S}}(-y_1 + y_2 + 3y_3 - 2y_4 - y_5)$$

$$e_3 = E_m \sin(\theta + \frac{\pi}{3} + \alpha_1) + L_{\mathbb{S}}(-2f_1 - f_2 + 3f_3 - f_4 - 2f_5) + R_{\mathbb{S}}(-2y_1 - y_2 + 3y_3 - y_4 - 2y_5)$$

$$e_4 = E_m \sin(\theta - \frac{\pi}{3} + \alpha_2) + L_{\mathbb{S}}(f_1 + 2f_2 - f_4 + f_5) + R_{\mathbb{S}}(y_1 + 2y_2 - y_4 + y_5)$$

On peut écrire les valeurs de e_1, e_2, e_3, e_4 sous la forme suivante .

$$e_j = E_m \sin(G_j) + DE_j \quad j \text{ varie de } 1 \text{ à } 4 .$$

$$DU_1 = L_g(-f_1 - 2f_2 + 2f_3 - f_4 - 2f_5) + R_g(-y_1 - 2y_2 + 2y_3 - y_4 - 2y_5)$$

$$DU_2 = L_g(-f_1 + f_2 + 2f_3 - f_4 + f_5) + R_g(-y_1 + y_2 + 2y_3 - y_4 + y_5)$$

$$DU_3 = L_g(-2f_2 - f_1 + f_4 - f_5) + R_g(-2y_2 - y_1 + y_4 - y_5)$$

$$DU_4 = L_g(-f_1 + f_2 - 2f_4 - f_5 + 3f_3) + R_g(-y_1 + y_2 - 2y_4 - y_5 + 3y_3)$$

$$ARG1 = (\theta + 1,047 + \alpha_1 \cdot 3,14/180)$$

$$ARG2 = (\theta + 1,047 + \alpha_1 \cdot 3,14/180)$$

$$ARG3 = (\theta + 1,57 + \alpha_2 \cdot 3,14/180)$$

$$ARG4 = (\theta - 0,523 + \alpha_2 \cdot 3,14/180)$$

Après en faisant un test sur la parité du système avec la formule suivante :

$$A = N - 2(IN) \quad IN \text{ étant la partie entière de } N + 1/2$$

N : numero de l'intervalle .

si A est nul l'intervalle est pair .

si A est positif ou négatif l'intervalle est impair .

-Intervalle impair :

$$G1 = ARG1$$

$$G2 = ARG2$$

$$G3 = ARG3$$

$$G4 = ARG4$$

$$DE1 = DU1$$

$$DE2 = DU2$$

$$DE3 = DU1$$

$$DE4 = DU2$$

-Intervalle pair :

$$G1 = ARG3$$

$$G2 = ARG4$$

$$G3 = ARG1$$

$$G4 = ARG2$$

$$DE1 = DU3$$

$$DE2 = DU4$$

$$DE3 = DU3 + DU4$$

$$DE4 = -DU3$$

On écrit le système d'équations sous forme matricielle .
toutes les valeurs de e_1 , e_2 , e_3 , e_4 seront remplacés
par leurs expressions :
$$e_j = E_m \sin(G_j) + DE_j$$

- L'inversion des matrices sera faite à la main afin de
diminuer la longueur du programme et le temps de calcul .

Equations matricielles

Pont 1 - Regime - 4 - Pont 2 - Regime - 4 :

$$(i_{11}, i_{21}, i_{12}, i_{22}) < Id.$$

$$\begin{bmatrix} 2L_1 & L_1 & -2L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & 2L_1 & -L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & 2L_1 & (-L_1 - L_2 + L_2) & L_2 & 2L_2 \\ 0 & 0 & -2L_2 & 2L_2 & L_2 \\ 0 & 0 & -L_2 & L_2 & 2L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1 (2y_1 + y_2 - 2y_3) \\ e_1 - R_1 (2y_2 + y_1 - y_3) \\ e_1 + e_3 - Ed - R_2 y_3 - R_1 (y_1 + 2y_2 - y_3) - R_2 (y_4 + 2y_5 - y_3) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 + y_5 - 2y_3) \\ e_3 - R_2 (2y_5 + y_4 - y_3) \end{bmatrix}$$

Pont 1 - Regime - 4 - Pont 2 - Regime - 3 :

$$(i_{11}, i_{21}, i_{12}) < Id ; i_{22} = Id.$$

$$\begin{bmatrix} 2L_1 & L_1 & -2L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & 2L_1 & -L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & 2L_1 & (-L_1 + L_1 + L_2) & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & -L_2 & 2L_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1 (2y_1 + y_2 - 2y_3) \\ e_1 - R_1 (2y_2 + y_1 - y_3) \\ e_1 + e_3 - Ed - R_2 y_3 - R_1 (y_1 + 2y_2 - y_3) - R_2 (y_4 + y_3) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 - y_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pont 1 - Regime - 4 - Pont 2 - Regime - 2

$$(i_{11}, i_{21}) < Id ; i_{22} = i_{12} = Id.$$

$$\begin{bmatrix} 2L_1 & L_1 & -2L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & 2L_1 & -L_1 & 0 & 0 \\ L_1 & 2L_1 & (-L_1 + L_1 + L_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1 (2y_1 + y_2 - 2y_3) \\ e_1 - R_1 (2y_2 + y_1 - y_3) \\ e_1 + e_3 - Ed - R_2 y_3 - R_1 (y_1 + 2y_2 - y_3) - 2R_2 y_3 \\ (e_3 + e_4 - R_2 y_3) = 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pont 1 - Regime - 3 ; Pont 2 - Regime - 4

$$i_{21} = Id ; (i_{11}, i_{22}, i_{12}) < Id$$

$$\begin{bmatrix} 2L_1 & 0 & -L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ L_1 & 0 & (L_1 + L_2) & L_2 & 2L_2 \\ 0 & 0 & -2L_2 & 2L_2 & L_2 \\ 0 & 0 & -L_2 & L_2 & 2L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1 (2y_1 - y_3) \\ 0 \\ e_1 + e_3 - E_d - R_d y_3 - R_1 (y_1 + y_3) - R_2 (y_4 + 2y_5 - y_3) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 + y_5 - 2y_3) \\ e_3 - R_2 (2y_5 + y_4 - y_3) \end{bmatrix}$$

Pont 1 - Regime - 3 ; Pont 2 - Regime - 3

$$i_{21} = i_{22} = Id ; (i_{11}, i_{12}) < Id$$

$$\begin{bmatrix} 2L_1 & 0 & -L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ L_1 & 0 & (L_1 + L_2) & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & -L_2 & 2L_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1 (2y_1 - y_3) \\ 0 \\ e_1 + e_3 - E_d - R_d y_3 - R_1 (y_1 + y_3) - R_2 (y_4 + y_5) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 - y_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pont 1 - Regime - 3 ; Pont 2 - Regime - 2

$$i_{21} = i_{22} = i_{12} = Id ; i_{11} < Id$$

$$\begin{bmatrix} 2L_1 & 0 & -L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ L_1 & 0 & (L_1 + L_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1 (2y_1 - y_3) \\ 0 \\ e_1 + e_3 - E_d - R_d y_3 - R_1 (y_1 + y_3) - 2R_2 y_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pont 1 - Regime - 2 ; Pont 2 - Regime 4
 $i_{11} = i_{21} = Id$; $(i_{22}, i_{12}) < Id$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (2l_1 - l_2 + l_3) l_2 & 2l_2 & 0 \\ 0 & 0 & -2l_2 & 2l_2 & l_2 \\ 0 & 0 & -l_2 & l_2 & 2l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_1 + e_3 - Ed - R_1 y_3 - 2l_1 y_3 - R_2 (y_4 + y_5 - y_3) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 + y_5 - 2y_3) \\ e_3 - R_2 (2y_5 + y_4 - y_3) \end{bmatrix}$$

Pont 1 - Regime 2 ; Pont 2 - Regime 3
 $i_{11} = i_{21} = i_{22} = Id$; $i_{12} < Id$.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (2l_1 + l_2 + l_3) l_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_2 & 2l_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_1 + e_3 - Ed - R_1 y_3 - 2l_1 y_3 - R_2 (y_4 + y_5) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 - y_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pont 1 - Regime 2 ; Pont 2 - Regime 2
 $i_{11} = i_{21} = i_{12} = i_{22} = Id$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (2l_1 + l_2 + l_3) l_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_1 + e_3 - Ed - R_1 y_3 - 2y_3 (R_1 + R_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Inversion des matrices precedentes.
pour chaque regime de fonctionnement.

Pont 1 - Regime 4 ; Pont 2 - Regime 4

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{6}{9L_1} & \frac{1}{L_1} \frac{1}{3L_1} & \frac{1}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ -\frac{1}{3L_1} & \frac{6}{9L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_1} & \frac{1}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{1}{L_1} & \frac{1}{L_1} & \frac{6}{9L_2} & -\frac{1}{L_1} \frac{1}{3L_2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{3L_2} & \frac{6}{9L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1 (2y_1 + y_2 - 2y_3) \\ e_1 - R_1 (2y_2 + y_1 - y_3) \\ e_3 + e_5 - E_d - R_d y_3 - R_1 (y_1 + y_2 - y_3) - R_2 (y_4 + y_5 - y_3) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 + y_5 - 2y_3) \\ e_3 - R_2 (2y_5 + y_4 - y_3) \end{bmatrix}$$

$$f_1 = -\frac{R_1}{L_1} y_1 + \left(\frac{R_1}{L_1} - \frac{R_d}{L_1} \right) y_3 + \frac{e_1}{3L_1} + 2 \frac{e_2}{3L_1} - \frac{E_d}{L_1}$$

$$f_2 = -\frac{R_1}{L_1} y_2 + \frac{e_1}{3L_1} - \frac{e_2}{3L_1}$$

$$f_3 = -\frac{R_d}{L_1} y_3 - \frac{E_d}{L_1}$$

$$f_4 = -\frac{R_2}{L_2} y_3 - \frac{R_2}{L_2} y_4 + \frac{e_3}{3L_2} + 2 \frac{e_4}{3L_2} - \frac{E_d}{L_2}$$

$$f_5 = -\frac{R_2}{L_2} y_5 + \frac{e_3}{3L_2} - \frac{e_4}{3L_2}$$

Pont 1 - Regime 4 ; Pont 2 - Regime 3

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e}{3L_1} & \left(-\frac{1}{3L_1} - \frac{2}{3L_2+2Ld}\right) & \frac{2}{3L_2+2Ld} & \frac{-1}{3L_2+2Ld} & 0 \\ \frac{-1}{3L_1} & \frac{2}{3L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-2}{3L_2+2Ld} & \frac{2}{3L_2+2Ld} & \frac{-1}{3L_2+2Ld} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{3L_2+2Ld} & \frac{1}{3L_2+2Ld} & \frac{L_2+Ld}{3L_2^2+2L_2Ld} & 0 \\ 0 & \frac{-2}{3L_2+2Ld} & \frac{2}{3L_2+2Ld} & \frac{-1}{3L_2+2Ld} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1+e_2 - R_1 (2y_1 + y_2 - 2y_3) \\ e_1 - R_1 (2y_2 + y_1 - y_3) \\ e_1+e_3 - Ed - R_d y_3 - R_1 (y_1 + y_2 - y_3) - R_2 (y_4 + y_3) \\ e_3+e_4 - R_2 (2y_4 - y_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = -\frac{R_1}{L_1} y_1 + \left(\frac{R_1}{L_1} - \frac{3R_2+2R_d}{3L_2+2Ld}\right) y_3 + \frac{e_1}{3L_1} + 2\frac{e_2}{3L_1} + \frac{e_3}{3L_2+2Ld} - \frac{e_4}{3L_2+2Ld} - \frac{2Ed}{3L_2+2Ld}$$

$$f_2 = -\frac{R_1}{L_1} y_2 + \frac{e_1}{3L_1} - \frac{e_2}{3L_1}$$

$$f_3 = f_5 = -\frac{3R_2-2R_d}{3L_2+2Ld} y_3 + \frac{e_3}{3L_2+2Ld} - \frac{e_4}{3L_2+2Ld} - 2\frac{Ed}{3L_2+2Ld}$$

$$f_4 = \frac{(R_2Ld - R_dL_2)}{3L_2^2 + 2L_2Ld} y_3 - \frac{R_2}{L_2} y_4 + \frac{2L_2+Ld}{3L_2^2 + 2L_2Ld} e_3 + \frac{L_2+Ld}{3L_2^2 + 2L_2Ld} e_4 - \frac{Ed}{3L_2+2Ld}$$

Pont 1 - Regime 4 ; Pont 2 - Regime 2

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{34} \left(-\frac{1}{34} - \frac{1}{2L_2 + L_d} \right) & \frac{1}{2L_2 + L_d} & 0 & 0 \\ \frac{1}{34} & \frac{2}{3L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{2L_2 + L_d} & \frac{1}{2L_2 + L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{2L_2 + L_d} & \frac{1}{2L_2 + L_d} & -1 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{2L_2 + L_d} & \frac{1}{2L_2 + L_d} & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1 (y_1 + y_2 - 2y_3) \\ e_1 - R_1 (2y_2 + y_1 - y_3) \\ e_1 + e_3 - E_d - R_d y_3 - R_1 (y_1 + 2y_2 - y_3) - R_2 (2y_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = -\frac{R_1}{L_1} y_1 + \left(\frac{R_1}{L_1} - \frac{R_d + 2R_2}{2L_2 + L_d} \right) y_3 + \frac{e_1}{34} + \frac{2e_2}{34} + \frac{e_3}{2L_2 + L_d} - \frac{E_d}{2L_2 + L_d}$$

$$f_2 = -\frac{R_1}{L_1} y_2 + \frac{e_1}{34} - \frac{e_2}{3L_1}$$

$$f_3 = f_4 = f_5 = -\frac{(R_d + 2R_2)}{2L_2 + L_d} y_3 + \frac{e_3}{2L_2 + L_d}$$

Pont 1 - Regime 3 ; Pont 2 - Regime 4

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1 + l_d}{3l_1^2 + 2l_1 l_d} & 0 & \frac{1}{3l_1 + 2l_d} & 0 & \frac{-1}{3l_1 + 2l_d} \\ \frac{-1}{3l_1 + 2l_d} & 1 & \frac{2}{3l_1 + 2l_d} & 0 & \frac{-2}{3l_1 + 2l_d} \\ \frac{-1}{3l_1 + 2l_d} & 0 & \frac{2}{3l_1 + 2l_d} & 0 & \frac{-2}{3l_1 + 2l_d} \\ \frac{-1}{3l_1 + 2l_d} & 0 & \frac{2}{3l_1 + 2l_d} & \frac{2}{3l_2} \left(\frac{-1}{3l_2} - \frac{2}{3l_2 + 2l_d} \right) & \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{3l_2} & \frac{2}{3l_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1 (2y_1 - y_3) \\ 0 \\ e_1 + e_3 - E_d - R_d y_3 - R_1 (y_1 + y_3) - R_2 (y_4 + 2y_5 - y_3) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 + y_5 - 2y_3) \\ e_3 - R_2 (2y_5 + y_4 - y_3) \end{bmatrix}$$

$$p_1 = -\frac{R_1}{l_1} y_1 + \frac{(R_1 l_d - R_d l_1)}{3l_1^2 + 2l_1 l_d} y_3 + \frac{2l_1 + l_d}{3l_1^2 + 2l_1 l_d} e_1 + \frac{l_1 + l_d}{3l_1^2 + 2l_1 l_d} e_2 - \frac{E_d}{3l_1 + 2l_d}$$

$$p_2 = p_3 = -\frac{3R_1 + 2R_d}{3l_1 + 2l_d} y_3 + \frac{e_1}{3l_1 + 2l_d} - \frac{e_2}{3l_1 + 2l_d} - \frac{2E_d}{3l_1 + 2l_d}$$

$$\begin{aligned} p_4 = & \left(\frac{R_1}{l_1} - \frac{3R_1 + 2R_d}{3l_1 + 2l_d} \right) y_3 - \frac{R_2}{l_2} y_4 + \frac{e_1}{3l_1 + 2l_d} - \frac{e_2}{3l_1 + 2l_d} + \frac{e_3}{3l_2} \\ & + \frac{2e_4}{3l_2} - \frac{2E_d}{3l_1 + 2l_d}
 \end{aligned}$$

$$p_5 = -\frac{R_1}{l_2} y_5 + \frac{e_3}{3l_2} - \frac{e_4}{3l_2}$$

Pont 1 - Regime 3 ; Pont 2 - Regime 3

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3L_2 + 2L_1 + 2Ld}{L_1(6L_2 + 6L_1 + 4Ld)} & 0 & \frac{2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & \frac{-1}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & 0 \\ \frac{-2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & 1 & \frac{4}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & \frac{-2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & 0 \\ \frac{-2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & 0 & \frac{4}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & \frac{-2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & 0 \\ \frac{-1}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & 0 & \frac{2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & \frac{3L_2 + 2Ld + 2L_1}{L_2(6L_2 + 6L_1 + 4Ld)} & 0 \\ \frac{-2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & 0 & \frac{4}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & \frac{-2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1(y_4 - y_3) \\ 0 \\ e_1 + e_3 - E_d - R_d y_3 - R_1(y_1 - y_2) - R_2(y_4 + y_3) \\ e_3 + e_4 - R_2(y_4 - y_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 f_1 = & -\frac{R_1}{L_1} y_1 + \frac{\left(\frac{3L_2}{L_1} R_1 + \frac{2Ld}{L_1} R_2 + 3R_2 - 2Rd\right)}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} y_3 + \frac{3L_2 + 2L_1 + 2Ld}{L_1(6L_2 + 6L_1 + 4Ld)} e_1 \\
 & + \frac{3L_2 + 2L_1 + 2Ld}{L_1(6L_2 + 6L_1 + 4Ld)} e_2 + \frac{R_3}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} - \frac{e_4}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} - \frac{2E_d}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_2 = f_3 = f_5 = & -\frac{6R_1 + 6R_2 + 4Rd}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} y_3 + \frac{2e_1}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} - \frac{2e_2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} \\
 & + \frac{2e_3}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} - \frac{2e_4}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} - \frac{4E_d}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_4 = & \frac{3R_1 L_1 + 2R_2 Ld - 3R_1 L_2 - 2L_1 Rd}{L_2(6L_2 + 6L_1 + 4Ld)} y_3 - \frac{R_2}{L_2} y_4 + \frac{e_1}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} \\
 & - \frac{e_2}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld} + \frac{4L_2 + 3L_1 + 2Ld}{L_2(6L_2 + 6L_1 + 4Ld)} e_3 + \frac{3L_1 + 2Ld + 2L_2}{L_2(6L_2 + 6L_1 + 4Ld)} e_4 \\
 & - \frac{2E_d}{6L_2 + 6L_1 + 4Ld}
 \end{aligned}$$

Point 1 - Regime 3 ; Point 2 - Regime 2

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2L_2 + L_1 + Ld}{4L_1L_2 + 2L_1Ld + 3L_1^2} & 0 & \frac{1}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} & 1 & \frac{2}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} & 0 & \frac{2}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} & 0 & \frac{2}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} & -1 & 0 \\ \frac{-1}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} & 0 & \frac{2}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 + e_2 - R_1(2y_1 - y_3) \\ 0 \\ 2e_1 + e_3 - Ed - R_1 y_3 - R_1(y_1 + y_3) - 2R_2 y_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 f_1 = & -\frac{R_1}{L_1} y_1 + \frac{(2L_2 R_1 + Ld R_1 - 2L_1 R_1 - R_1 L_1)}{4L_1 L_2 + 2L_1 Ld + 3L_1^2} y_3 + \frac{(2L_2 + 2L_1 + Ld)}{4L_1 L_2 + 2L_1 Ld + 3L_1^2} e_1 \\
 & + \frac{(2L_2 + L_1 + Ld)}{4L_1 L_2 + 2L_1 Ld + 3L_1^2} e_2 + \frac{e_3}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} - \frac{Ed}{4L_2 + 2Ld + 3L_1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = & -\frac{3R_1 + 4R_2 + 2Rd}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} y_3 + \frac{e_1}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} \\
 & - \frac{e_2}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} + \frac{2e_3}{4L_2 + 2Ld + 3L_1} - \frac{2Ed}{4L_2 + 2Ld + 3L_1}
 \end{aligned}$$

Pont 1 - Regime 2 ; Pont 2 - Regime 4

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2L_1+L_d} & 0 & \frac{-1}{2L_1+L_d} \\ 0 & 1 & \frac{1}{2L_1+L_d} & 0 & \frac{-1}{2L_1+L_d} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2L_1+L_d} & 0 & \frac{-1}{2L_1+L_d} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2L_1+L_d} & \frac{2}{3L_2} \left(\frac{-1}{3L_2} - \frac{1}{2L_1+L_d} \right) & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{3L_2} & \frac{2}{3L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_1+e_3 - E_d - R_d y_3 - 2R_1 y_3 \\ -R_2 (y_4 + 2y_5 - y_3) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 + y_5 - 2y_3) \\ e_3 - R_2 (2y_5 + y_4 - y_3) \end{bmatrix}$$

$$f_1 = f_2 = f_3 = - \frac{(R_d + 2R_1)}{2L_1 + L_d} y_3 + \frac{e_1}{2L_1 + L_d}$$

$$f_4 = \left(\frac{R_2}{L_2} - \frac{R_d + 2R_1}{2L_1 + L_d} \right) y_3 - \frac{R_2}{L_2} y_4 + \frac{e_1}{2L_1 + L_d} + \frac{e_3}{3L_2} + \frac{2e_4}{3L_2} - \frac{E_d}{2L_1 + L_d}$$

$$f_5 = - \frac{R_2}{L_2} y_5 + \frac{e_3}{3L_2} - \frac{e_4}{3L_2}$$

Part 1 - Regime 2 ; Part 2 - Regime 3

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{2}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & \frac{-1}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & 0 \\ 0 & 1 & \frac{2}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & \frac{-1}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & \frac{-1}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & \frac{2L_1 + L_2 + L_d}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & \frac{-1}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_1 + e_3 - E_d - R_d y_3 - 2R_1 y_3 - R_2 (y_4 + y_3) \\ e_3 + e_4 - R_2 (2y_4 - y_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_5 = -\frac{4R_1 + 3R_2 + 2R_d}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} y_3 + \frac{2E_1}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} + \frac{E_3}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} - \frac{e_4}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} - \frac{2E_d}{4L_1 + 2L_d + 3L_2}$$

$$f_4 = -\frac{2R_1 L_2 + R_d L_2 - 2L_1 R_1 - L_d R_1}{4L_1 L_2 + 2L_2 L_d + 3L_2^2} y_3 - \frac{R_2}{L_2} y_4 + \frac{e_1}{4L_1 + 2L_d + 3L_2} + \frac{2L_1 + 2L_2 + L_d}{4L_1 L_2 + 2L_d L_2 + 3L_2^2} e_3 + \frac{(2L_1 + L_2 + L_d)}{4L_1 L_2 + 2L_d L_2 + 3L_2^2} e_4 - \frac{E_d}{4L_1 + 2L_d + 3L_2}$$

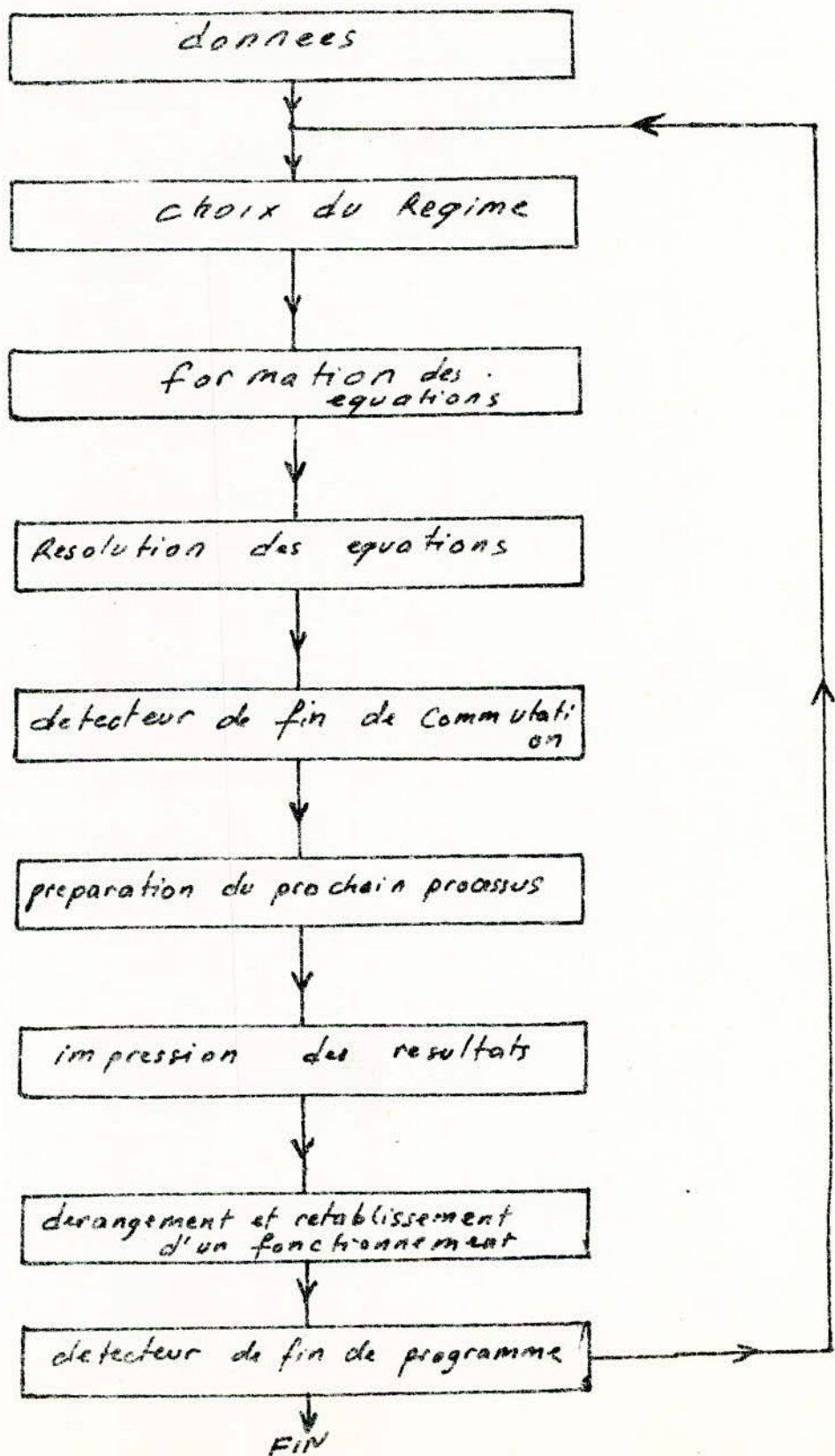
Pont 1 - Regime 2 ; Pont 2 - Regime 2

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2L_1 + 2L_2 + L_d} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{2L_1 + 2L_2 + L_d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2L_1 + 2L_2 + L_d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2L_1 + 2L_2 + L_d} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2L_1 + 2L_2 + L_d} & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_1 + e_2 - E_d - R_d y_3 - 2R_1 y_3 - 2R_2 y_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 &= - \frac{(R_d + 2R_1 + 2R_2)}{2L_1 + 2L_2 + L_d} y_3 + \frac{e_1}{2L_1 + 2L_2 + L_d} \\
 &+ \frac{e_2}{2L_1 + 2L_2 + L_d} - \frac{E_d}{2L_1 + 2L_2 + L_d}
 \end{aligned}$$

4 établissement de l'organigramme

- bloc du diagramme :



3.4.4 Explication de l'organigramme :

-données : dans les données on regroupe toutes les valeurs des resistances et des inductances qui entrent dans le calcul. les valeurs des deux alimentations .

les angles de retard ALFA1 et ALFA2 dans les ponts 1 et 2 .

-choix du regime : on doit detecter le regime du pont 1 et le regime du pont 2 .Ceci sera determiner en faisant les tests suivants .

Pont 1 $i_{21} - i_d < 0 \longrightarrow$ regime 4

$i_{21} - i_d = 0$ on a deux possibiliteés :

a) $i_{11} - i_d < 0 \longrightarrow$ regime 3

b) $i_{11} - i_d = 0 \longrightarrow$ regime 2

Pont 2 $i_{22} - i_d < 0 \longrightarrow$ regime 4

$i_{22} - i_d = 0$ on a deux possibiliteés :

a) $i_{12} - i_d < 0 \longrightarrow$ regime 3

b) $i_{12} - i_d = 0 \longrightarrow$ regime 2

on determine premierement le regime dans le pont 1 ensuite dans le pont 2 . car les deux regimes sont dependants . les tests sur L_i ($i=1,2,3.. ..,9$) nous evitent de refaire le calcul des coefficients A_{ij} lorsqu'on fait des calculs conssecutifs pour le meme regime .

-Resolution des equations .

les equations sont des equations differentielles du premier ordre à coefficients constants de la forme :

$$f_i = (A_{ij}y_j) + A_{i6}e_1 + A_{i7}e_2 + A_{i8}e_3 + A_{i9}e_4 + A_{i10}E_d$$

i et j varient de 1 à 5 .

pour chaque etat de fonctionnement on à des coefficients bien determinés .

avant de resoudre les equations on doit calculer les differentes chutes de tension dans le systeme et dans le primaire des transformateurs .

La resolution des equations est faite par la methode de Range - Kutta (methode itérative d'integration) .

formule de resolution à 4 pas .

$$T_1 = h.f(x_0, y(x_0))$$

$$T_2 = h.f(x_0+h/2, y(x_0)+T_1/2)$$

$$T_3 = h.f(x_0+h/2, y(x_0)+T_2/2)$$

$$T_4 = h.f(x_0+h, y(x_0)+T_3)$$

$$y(x_0+h) = y(x_0) + (T_1 + 2T_2 + 2T_3 + T_4) / 6$$

-Detection de fin de commutation . On determine la fin de commutation en faisant le test (wt - 3,1416/6)

wt - 3,14/6 \geq 0 \longrightarrow commutation terminée .

wt - 3,14/6 < 0 \longrightarrow commutation non terminée .

Pour ceci on doit faire le test sur la parité de l'intervalle
exp: si N impair on a amorçage 3^{eme} valve dans le pont 2 .

si N pair on a amorçage 3^{eme} valve dans le pont 1 .

-Preparation du processus suivant / .

suisant la parité de l'intervalle on prepare le prochain
processus dans le pont 1 ou dans le pont 2 .

Exp: N pair : si $(y_1 - y_3) = 0$ ceci veut dire qu'on est en
regime 2 ; donc on doit preparer l'amorçage de la 3^{eme} valve .

Si $(y_1 - y_3) < 0$ on a deux possibiliteés suisant la valeur de U_{d1} .

Si $U_{d1} > 0$ on est en regime 3 et on garde le meme regime .

Si $U_{d1} < 0$ on est en regime 3 on prepare l'amorçage de la 4^{eme}
valve .

-Changement des conditions de fonctionnement .

On peut introduire dans le fonctionnement du pont dodecaphasé
des dérangements et des retablissemments de regimes bien
definis à des temps bien determinés .

Pour ceci on fait les tests suivants : $(t-t_{c1})$ et $(t-t_{c2})$

t_{c1} et t_{c2} sont respectivement les temps de debut de
derangement et le debut de retablissemment du regime .

Si $t-t_{c1} < 0$ le dérangement n'est pas introduit .

Si $t-t_{c2} \geq 0$ on a retablissemment du regime .

Si $t-t_{c1} \geq 0$ le derangement a commencé .

-Fin de programme : pour la détection de la fin de progr-
amme ; on fait un test sur le temps limite qu'on s'est
fixé à l'avance .

3.4.2 Notations employées dans le programme .

$$R_s = RS1$$

$$L_s = SS1$$

$$R_t = RT$$

$$L_t = ST$$

$$R_1 = RT1$$

$$L_1 = ST1$$

$$R_2 = RT2$$

$$L_2 = ST2$$

$$R_d = RD$$

$$L_d = SD$$

$$E_d = ED$$

$$\alpha_1 = ALFA1$$

$$\alpha_2 = ALFA2$$

$$e_{ab1} = E1$$

$$e_{bc1} = E2$$

$$e_{ab2} = E3$$

$$e_{bc2} = E4$$

L1 , L2 L9 , K1, K2 K4 :indexation des compteurs

N : nombre de processus (entier positif)

Donnés :

$$EM = 105KV$$

$$ED = 190KV$$

$$ST1 = ST2 = 0,024H$$

$$RT1 = RT2 = 0,01$$

$$SS1 = 0,003 H$$

$$RS1 = 0,001 \Omega$$

$$ST = 0,006 H$$

$$RT = 0,005 \Omega$$

$$SD = 1 H$$

$$RD = 1 \Omega$$

$$W = 314 \text{ rd/s}$$

3-5 Exemples d'application de la méthode élaborée .

D'après l'organigramme donné, ~~on peut~~ étudier tous les régimes permanents et transitoires .

On fera chaque essai de la manière suivante : au début on fonctionne en régime normal , au temps t_{c1} on introduit le changement de régime après au temps t_{c2} on rétablit le régime normal jusqu'au temps limite .

Pour vérifier le fonctionnement du programme proposé nous avons fait plusieurs passages , pour différents régimes de fonctionnement du convertisseur .

Quelques exemples sont présentés sur les figures (1,2,3,4):

La fig 2 représente les formes des tensions redressées des deux ponts en cas de régime permanent pour les paramètres suivants : (α_1 et α_2 nuls , $E_d = 180\text{kv}$, $R_d = 1$, $L_d = 1$)

La fig 1 représente les formes du courant dans les phases du transformateur T1 et T2 ; et les phases du système .

On voit que pour les paramètres indiqués le convertisseur fonctionne en régime normal (4,5 soupapes conduisantes) .

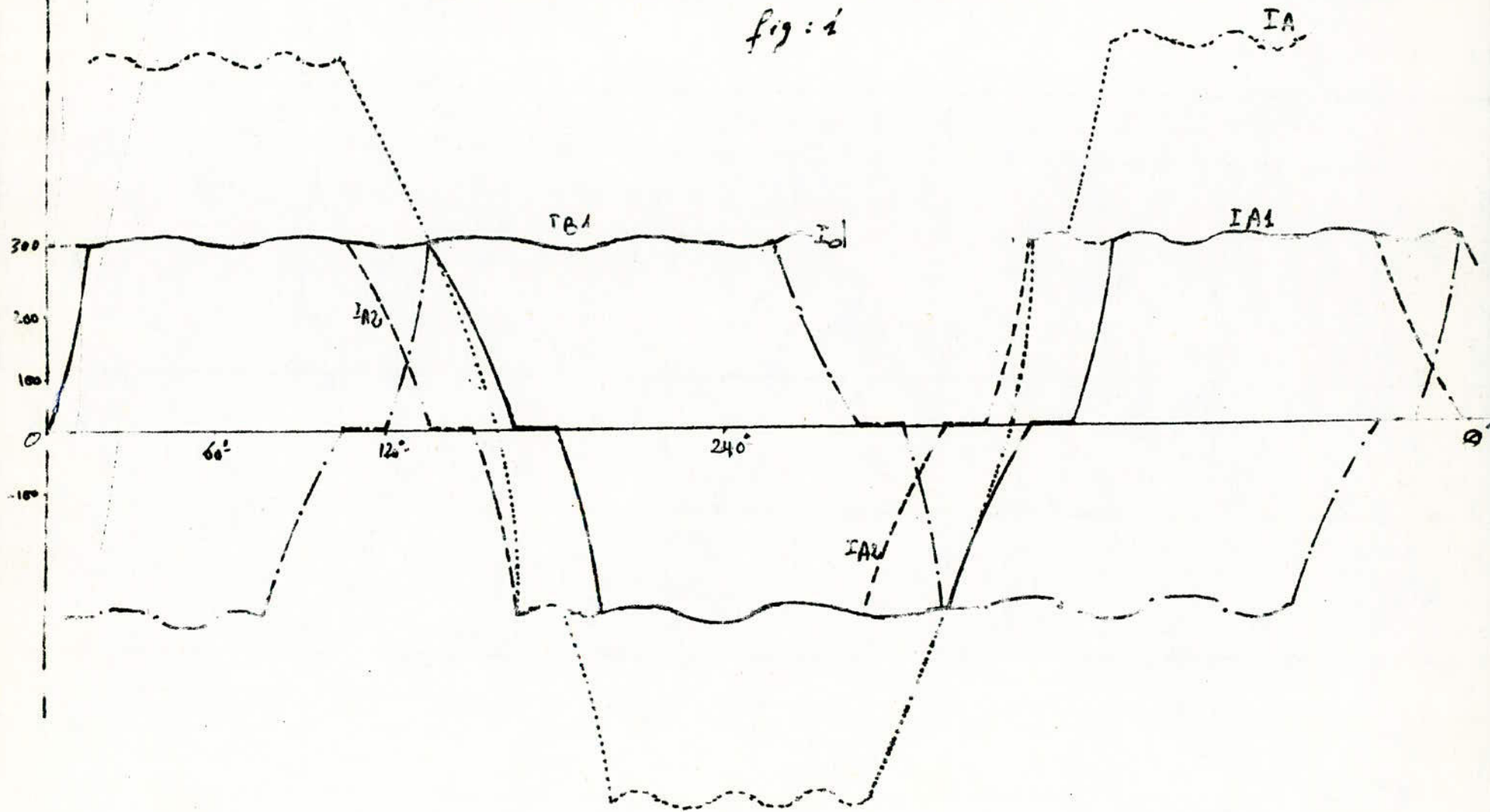
L'angle de commutation est le même pour les deux ponts ($\gamma = 15^\circ$) /

Les deux ponts étant identiques , il n'y a pas d'influence mutuelle entre les commutations qui ont eu lieu à un instant différent .

Caracteristiques des courants en regime permanent.

$R_d = 1 \Omega$ $L_d = 1H$ $E_D = 180 kV.$

fig: 2



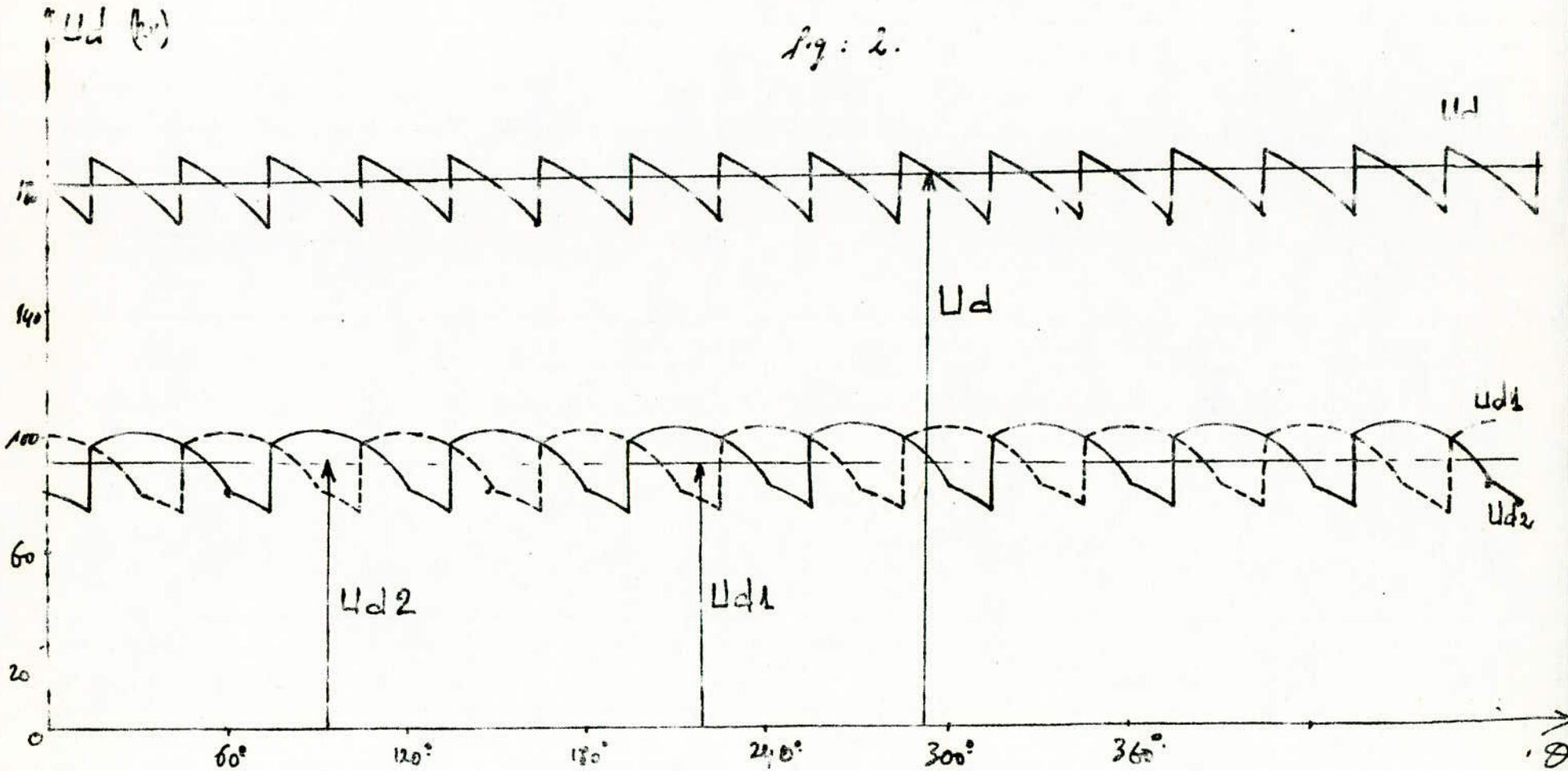
Courbes de tensions en Regime Permanent.

$R_d = 1 \Omega$

$L_d = 1 H$

$E_d = 180 \text{ V}$

fig: 2.



La courbe des courants primaires des transformateurs est obtenu en supposant même couplage des transformateurs (couplage étoile , étoile) .

Signalons que vu l'inductance importante de lissage ($L_d=1$ Henry) , le courant redressé est pratiquement constant .

La fig 3 représente l'exemple d'application du programme proposé pour l'étude de régime transitoire du convertisseur .

A l'instant $t=0$ le convertisseur qui fonctionné en régime permanent ($I_d=1,3KA$) a été soumis a un dérangement provoqué par une diminution brusque de E_d ($E_d=10KV$) .

Le courant redressé commence à augmenter et au bout d'une période il augmente de sa valeur initiale jusqu'a 4KA .

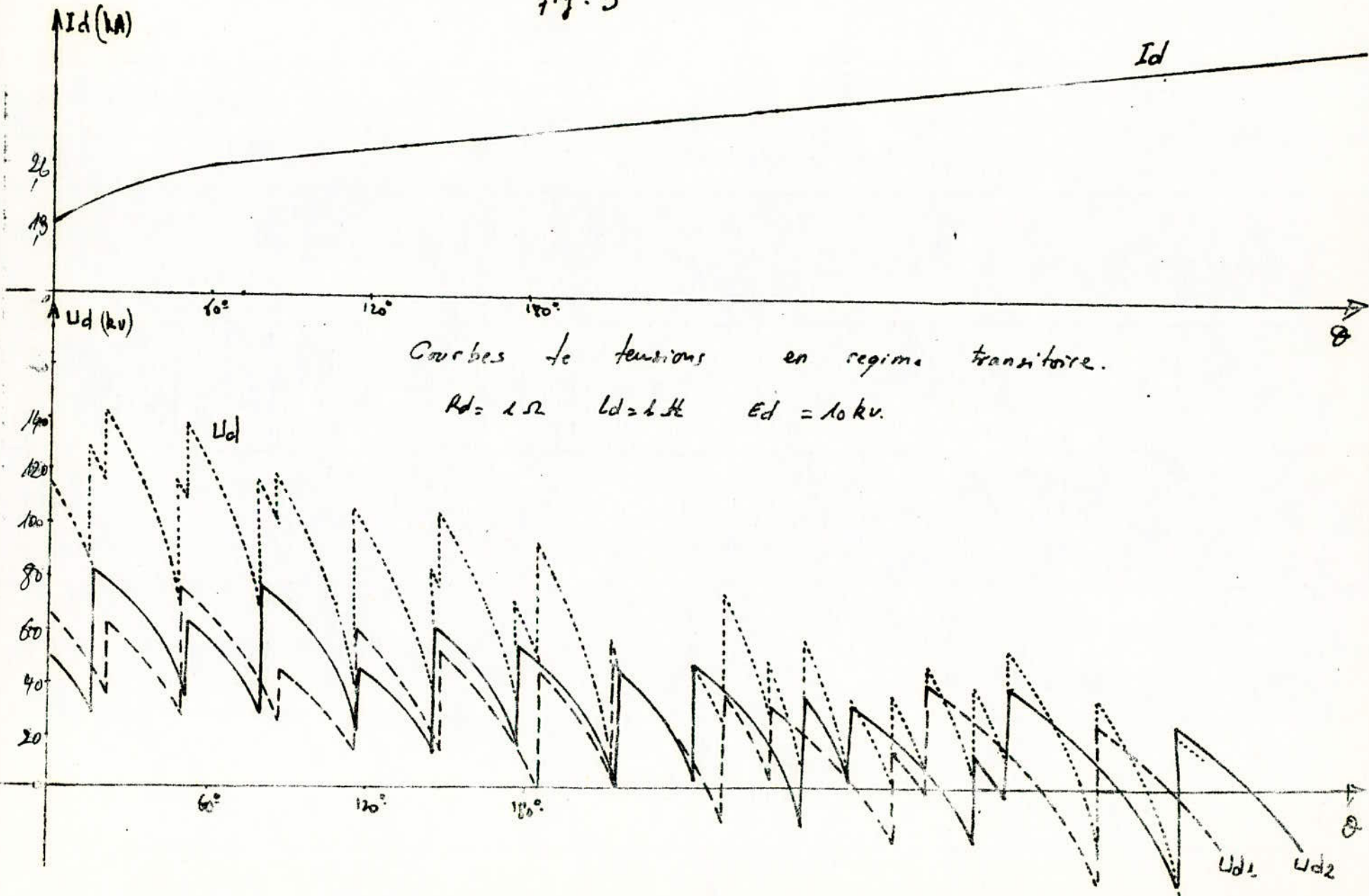
En même temps les tensions redressées diminuent . Les tensions redressées de chaque pont passent par zéro .

La fig 4 représente le fonctionnement non symétrique des deux ponts .

Les autres passages exécutés ont démontrés le fonctionnement normal et sûre des différents blocs du programme .

Régime transitoire

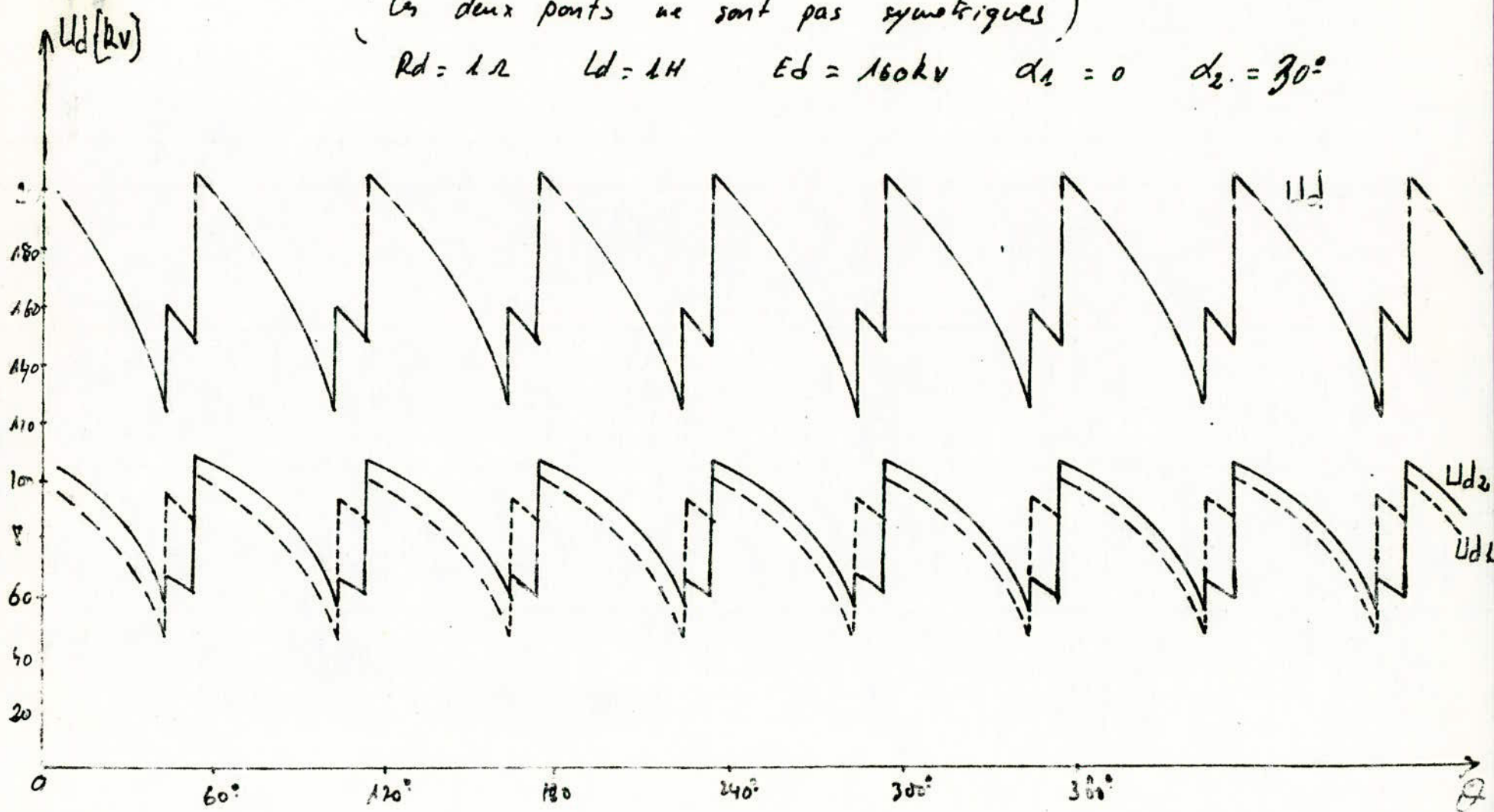
fig: 3



Courbes de tensions. Regime permanent.

(Les deux ponts ne sont pas symétriques)

$R_d = 1 \Omega$ $L_d = 1 H$ $E_b = 160 kV$ $\alpha_1 = 0$ $\alpha_2 = 30^\circ$



CONCLUSION

Le domaine d'utilisation des transports par courant continu haute tension s'élargit de plus en plus . Ceci implique le développement des méthodes de calcul et d'analyses du fonctionnement des convertisseurs statiques d'énergie . Notre étude concerne en la simulation mathématique et l'élaboration d'un programme sur ordinateur digital d'un redresseur à deux ponts en série qui représente l'élément essentiel d'une station de conversion d'énergie moderne . La méthode mathématique proposée permet de simuler les régimes permanents et transitoires avec n'importe quel nombre de soupapes conduisant simultanément (4,5,.....,8) . Le programme prévoit la possibilité d'étudier le convertisseur à deux ponts différents (différence des paramètres des transformateurs , différence d'angles de commande , ...ect) Les régimes avec l'angle de retard d'amorçage sont prévus , dans ce cas là on a prévu le contrôle de l'angle de retard . Le programme prévoit le calcul et la sortie des paramètres suivants :

- tensions et courants redressés .
- tensions redressées aux bornes de chaque pont .
- courants de tous les thyristors .
- courants de phases de chaque transformateur .
- courants de phases du système d'alimentation .

Le programme est écrit en langage fortran IV et exécuté sur ordinateur IBM 1070 au centre d'étude et recherche en informatique .

Le temps de calcul pour 0,6 seconde avec sortie de tous les paramètres tous les 6° électrique est de 4 mn environ . .

Ce programme peut être complété par la simulation du système de commande plus complet .

ANNEXE I

PROGRAMME - FORTRAN IV

```
!JOB,T POLYTECH,:POL,MOUGHARI,15
```

```
!LIMIT (CORE,50),(TIME,10),(PAGE,100)
```

```
!FORTRAN SI,LS,GO
```

```
C    PROJET DE FIN D'ETUDES
```

```
C    PROMOTEUR MONSIEUR STRIAPAN
```

```
C    PROJET ETUDIE PAR MOUGHARI
```

```
C    SIMULATION D'UN PONT DODECAPHASE EN REDRESSEURS
```

```
READ(2,201) RS1,SS1,RT,ST,RT1,ST1,RT2,ST2,RD,SD
```

```
READ(2,202) EM,ED,W
```

```
201  FORMAT(8(F5.3),2(F3.1))
```

```
202  FORMAT(3(F5.1))
```

```
C    CONDITIONS INITIALES
```

```
L1=1.
```

```
L2=1.
```

```
L3=1.
```

```
L4=1.
```

```
L5=1.
```

```
L6=1.
```

```
L7=1.
```

```
L8=1.
```

```
L9=1.
```

```
N=1.
```

```
K1=1.
```

```
K2=1.
```

```
K3=1.
```

```
K4=1.
```

```
M=1.
```

```
Y1=0.
```

```
Y2=0.
```

```
Y3=0.
```

```
Y4=0.
```

```
Y5=0.
```

```
T=0.
```

```
H=0.000112
```

```

ALFA1=0.
ALFA2=0.
TC1=0.1
TC2=0.1
TLIM=0.1
DY1=0.
DY2=0.
DY3=0.
DY4=0.
DY5=0.
A=1.
HR=W*H
TR=W*T
SG=SS1+ST
RG=RT+RS1
WRITE(3,204) RS1,SS1,RT,ST,RT1,ST1,RT2
204 FORMAT(2X,'RS1=',F6.3,1X,'SS1=',F6.3,1X,'RT=',F6.3,1X,'ST=',
F6.3,1X,'RT1=',F6.3,1X,'ST1=',F6.3,1X,'RD=','SD='/'RT2=',F6.3)
WRITE(3,199) ST2,RD,SD,ALFA1,ALFA2
199 FORMAT(2X,'ST2=',F6.3,1X,'RD=',F4.1,1X,'SD=',F4.1,1X,'ALFA1='
,F4.1,1X,'ALFA2=',F4.1)
WRITE(3,205) EM,ED
WRITE(3,510)
205 FORMAT(10X,'EM=',F6.1,4X,'ED=',F6.1)
510 FORMAT(14X,'T',7X,'I11',5X,'I21',5X,'ID',6X,'I12',5X,'I22',
5X,'EM',6X,'ED',5X,'TEL')
C TEST DONNANT LE REGIME DU PONT1 ET DU PONT2
75 TEL=T*180./0.01
IF(Y2-Y3) 10,11,11
10 A=1.
L4=1.
L5=1.
L6=1.
L7=1.
L8=1.
L9=1.
IF(L1-1.) 14,15,14
IF(Y5-Y3) 12,13,13
12 A=1.
IF(L1-1.) 14,15,14
14 L2=1.
L3=1.
GOTO 600
15 L1=5.
L2=1.
L3=1.
C PONT1 REGIME4 PONT2 REGIME4
A11=-H*RT1/ST1
A12=0.
A13=H*(RT1/ST1-RD/SD)
A14=0.
A15=0.
A16=H/(3.*ST1)
A17=2;. *A16
A18=0.
A19=0.

```

```

A110=-H/SD
A21=0.
A22=A11
A23=0.
A24=0.
A25=0.
A26=A16
A27=-A16
A28=0.
A29=0.
A210=0.
A31=0.
A32=0.
A33=-H*RD/SD
A34=0.
A35=0.
A36=0.
A37=0.
A38=0.
A39=0.
A310=A110
A41=0.
A42=0.
A43=-H*RT2/ST2
A44=A43
A45=0.
A46=0.
A47=0.
A48=H/(3.*ST2)
A49=2.*A48
A410=A310
A51=0.
A52=0.
A53=0.
A54=0.
A55=A44
A56=0.
A57=0.
A58=A48
A59=-A48
A510=0.
WRITE(3,90) T,TEL
90 FORMAT(10X,'T=',F8.5,3X,'REGIME 8 THYRISTORS,P1-4,P2-4',
3X,'TEL=',F7.1)
GOTO 600
13 Y5=Y3
L1=1.
IF IF(Y4-Y3) 16,17,17
16 A=1.
IF(L2-1.) 18,19,18
18 L3=1.
GOTO 600
19 L2=5.
L1=1.
L3=1.
C PONT1 REGIME4 PONT2 REGIME3

```

```

DEN=(3.*ST2+2.*SD)
A11=-H*RT1/ST1
A12=0.
A13=H*(RT1/ST1-(3.*RT2+RD)/DEN)
A14=0.
A15=0.
A16=H/(3.*ST1)
A17=2.*A16
A18=H/DEN
A19=-A18
A110=2.*A19
A21=0.
A22=A11
A23=0.
A24=0.
A25=0.
A26=A16
A27=-A16
A28=0.
A29=0.
A210=0.
A31=0.
A32=0.
A33=-H*(3.*RT2+2.*RD)/DEN
A34=0.
A35=0.
A36=0.
A37=0.
A38=A18
A39=A19
A310=A110
A41=0.
A42=0.
A43=H*(RT2*SD-RD*ST2)/(ST2*DEN)
A44=-H*RT2/ST2
A45=0.
A46=0.
A47=0.
A48=H*(2.*ST2+SD)/(ST2*DEN)
A49=H*(ST2+SD)/(ST2*DEN)
A410=A310/2.
A51=0.
A52=0.
A53=A33
A54=0.
A55=0.
A56=0.
A57=0.
A58=A38
A59=A39
A510=A310
WRITE(3,91) T; TEL
91 FORMAT(10X,'T=',F8.5,3X,'REGIME 7 THYRISTORS,P1-4,P2-3',3X,
'TEL=',F7.1)
GOTO 600
17 Y4=Y3

```

```

IF(L3-1.) 20,21,20
20 L2=1.
   GOTO 600
21 L3=5.
   L2=1.
   L1=1.
C  PONT 1 REGIME 4 , PONT 2 REGIME2
   DEN=(2.*ST2+SD)
   A11=-H*RT1/ST1
   A12=0.
   A13=H*(RT1/ST1-(RD+2.*RT2)/DEN)
   A14=0.
   A15=0.
   A16=H/3.*ST1      ST+
   A17=2.*A16
   A18=H/DEN
   A19=0.
   A110=-A18
   A21=0.
   A22=A11
   A23=0.
   A24=0.
   A25=0.
   A26=A16
   A27=-A16
   A28=0.
   A29=0.
   A210=0.
   A31=0.
   A32=0.
   A33=-H*(RD+2.*RT2)/DEN
   A34=0.
   A35=0.
   A36=0.
   A37=0.
   A38=H/DEN
   A39=0.
   A310=0.
   A41=0.
   A42=0.
   A43=A33
   A44=0.
   A45=0.
   A46=0.
   A47=0.
   A48=A38
   A49=0.
   A410=0.
   A51=0.
   A52=0.
   A53=A33
   A54=0.
   A55=0.
   A56=0.
   A57=0.
   A58=A38
   A59=0.
   A510=0.
WRITE (3,92) T , TEL

```

```

92 FORMAT(10X,'T=',F8.5,3X,'REGIME 6 THYRISTORS, P 1-4 , P 2-2 '
,3X,'TEL=',F7.1)
GOTO 600
11 Y2=Y3
L1=1.
L2=1.
L3=1.
IF(Y1-Y3) 22,23,23
22 Δ=1.
L7=1.
L8=1.
L9=1.
IF(Y5-Y3) 24,25,25
24 Δ=1.
IF(L4-1.) 26,27,26
26 L5=1.
L6=1.
GOTO 600
27 L4=5.
L5=1.
L6=1.
C PONT 1 REGIME 3 , PONT 2 REGIME 4
DEN=(3.*ST1+2.*SD)
Δ11=-H*RT1/ST1
Δ12=0.
Δ13=H*(RT1*SD-RD*ST1)/(ST1*DEN)
Δ14=0.
Δ15=0.
Δ16=H*(2.*ST1+SD)/(ST1*DEN)
Δ17=H*(ST1+SD)/(ST1*DEN)
Δ18=0?
Δ19=0.
Δ110=-H/DEN
Δ21=0.
Δ22=0.
Δ23=-H*(3.*RT1+2.*RD)/DEN
Δ24=0.
Δ25=0.
Δ26=H/DEN
Δ27=-Δ26
Δ28=0.
Δ29=0.
Δ210=2.*Δ27
Δ31=0.
Δ32=0.
Δ33=Δ23
Δ34=0.
Δ35=0.
Δ36=Δ26
Δ37=Δ27
Δ38=0.
Δ39=0.
Δ310=Δ210
Δ41=0.
Δ42=0.
Δ43=H*(RT2/ST2-(3.*RT1+2.*RD)/DEN)
Δ44=-H*RT2/ST2
Δ45=0.

```

```

A46=A36
A47=A37
A48=H/(3.*ST2)
A49=2.*A48
A410=A310
A51=0.
A52=0.
A53=0.
A54=0.
A55=A44
A56=0.
A57=C.
A58=A48
A59=-A58
A510=C.
WRITE (3,93) T, TEL
93 FORMAT(10X,'T=',F8.5,3X,'REGIME 7 THYRISTORS , P 1-3 , P2-4',
3X,'TEL=',F7.1)
GOTO 600
25 Y5=Y3
L4=1.
IF(Y4-Y3) 28,29,29
28 A=1.
IF(L5-1.) 30,31,30
30 L6=1.
GOTO 600
31 L5=5.
L4=1.
L6=1.
C PONT 1 REGIME 3 , PONT 2 REGIME3
DEN=(6.*ST2+6.*ST1+4.*SD)
A11=-H*RT1/ST1
A12=0.
A13=-H*(-3.*ST2*RT1/ST1-2.*SD*RT1/ST1+3.*RT2+2.*RD)/DEN
A14=C.
A15=0.
A16=H*(3.*ST2+4.*ST1+2.*SD)/(ST1*DEN)
A17=H*(3.*ST2+2.*ST1+2.*SD)/(ST1*DEN)
A18=H/DEN
A19=-A18
A110=2.*A19
A21=0.
A22=0.
A23=-H*(6.*RT1+6.*RT2+4.*RD)/DEN
A24=0.
A25=0.
A26=2.*H/DEN
A27=-A26
A28=A26
A29=A27
A210=2.*A27
A31=0.
A32=0.
A33=A23
A34=0.
A35=0.
A36=A26
A37=A27
A38=A28

```



```

A39=A29
A310=A210
A41=0.
A42=0.
A43=H*(3.*RT2*ST1+2.*RT2*SD-3.*RT1*ST2-2.*RD*ST2)/(ST2*DEN)
A44=-H*RT2/ST2
A45=0.
A46=H/DEN
A47=-A46
A48=H*(4.*ST2+3.*ST1+2.*SD)/(ST2*DEN)
A49=H*(3.*ST1+2.*SD+2.*ST2)/(ST2*DEN)
A410=-2.*H/DEN
A51=0.
A52=0.
A53=A33
A54=0.
A55=0.
A56=A36
A57=A37
A58=A38
A59=A39
A510=A310
WRITE(3,94) T, TEL
94 FORMAT(10X,'T=',F8.5,'REGIME 6 THYRISTORS,P 1-3,P 2-3',3X,
'TEL=',F7.1)
GOTO 600
29 Y4=Y3
IF(L6-1.) 32,33,32
32 L5=1.
GOTO 600
33 L6=5.
L5=1.
L4=1.
C PONT 1 REGIME 3, PONT 2 REGIME 2
DEN=(4.*ST2+2.*SD+3.*ST1)
A11=-H*RT1/ST1
A12=0.
A13=H*(2.*ST2*RT1+SD*RT1-2.*RT2*ST1-RD*ST1)/(ST1*DEN)
A14=0.
A15=0.
A16=H*(2.*ST2+2.*ST1+SD)/(ST1*DEN)
A17=H*(2.*ST2+ST1+SD)/(ST1*DEN)
A18=H/DEN
A19=0.
A110=-A18
A21=0.
A22=0.
A23=-H*(3.*RT1+4.*RT2+2.*RD)/DEN
A24=0.
A25=0.
A26=H/DEN
A27=-A26
A28=2.*A26
A29=0.
A210=2.*A27
A31=0.
A32=0.
A33=A23
A34=0.

```

```

A35=0.
A36=A26
A37=A27
A38=A28
A39=0.
A310=A210
A41=0.
A42=0.
A43=A33
A44=0.
A45=0.
A46=A36
A47=A37
A48=A38
A49=0.
A410=A310
A51=0.
A52=0.
A53=A43
A54=0.
A55=0.
A56=A46
A57=A47
A58=A48
A59=0.
A510=0/ A410
WRITE(3,95) T , TEL
95 FORMAT(10X,'T=',F8.5,3X,'REGIME 5 THYRISTORS,P 1-3,P 2-2';
3X,'TEL=',F7.1)
GOTO 600
23 Y1=Y3
IF(Y5-Y3) 34,35,35
34 A=1.
IF(L7-1.) 36,37,36
36 L8=1.
L9=1.
GOTO 600
37 L7=5.
L8=1.
L9=1.
C PONT 1 REGIME 2 , PONT 2 REGIME 4
A11=0.
A12=0.
A13=-H*(RD+2.*RT1)/DEN
A14=0.
A15=0.
A16=H/DEN
A17=0.
A18=0.
A19=0.
A110=0.
A21=0.
A22=0.
A23=A13
A24=0.
A25=0.
A26=A16
A27=0?
A28=0.

```

```

A29=0.
A210=0.
A31=0.
A32=0.
A33=A23
A34=0.
A35=0.
A36=A26
A37=0.
A38=0.
A39=0.
A310=0.
A41=0.
A42=0.
A43=H*(RT2/ST2)+A33
A44=-H*RT2/ST2
A45=0.
A46=H/DEN
A47=0.
A48=H/(3.*ST2)
A49=-2.*A48
A410=-H/DEN
A51=0.
A52=0.
A53=0.
A54=0.
A55=A44
A56=0.
A57=0.
A58=-A48
A59=A48
A510=0.
WRITE (3, 96) T, TEL
96 FORMAT(10X, 'T=', F8.5, 3X, 'REGIME 6 THYRISTORS, P +-2 ,
P 2-4', 3X, 'TEL=', F7.1)
GOTO 600
35 Y5=Y3
L7=1.
IF(Y4-Y3) 38, 39, 39
38 A=1.
IF(L8-1.) 40, 41, 40
40 L9=1.
GOTO 600
41 L8=5.
L7=1.
L9=1.
C PONT 1 REGIME 2, PONT 2 REGIME 3
DEN=(4.*ST1+3.*BT2+2.*SD)
A11=0.
A12=0.
A13=-H*(4.*RT1+3.*RT2+2.*RD)/DEN
A14=0.
A15=0.
A16=2.*H/DEN
A17=0.
A18=A16/2.
A19=-A18
A110=-A16

```

```

A21=0.
A22=C.
A23=A13
A24=0.
A25=0.
A26=A16
A27=0.
A28=A18
A29=A19
A210=A110
A31=0.
A32=0.
A33=A23
A34=0.
A35=0.
A36=A26
A37=0.
A38=A28
A39=A29
A310=A210
A41=0.
A42=0.
A43=H*(2.*RT2*ST1+SD*RT2-2.*RT1*ST2-RD*ST2)/(ST2*DEN)
A44=-H*RT2/ST2
A45=0.
A46=H/DEN
A47=0.
A48=H*(2.*ST1+2.*ST2+SD)/(ST2*DEN)
A49=H*(2.*ST1+ST2+SD)/(ST2*DEN)
A410=-A46
A51=0.
A52=0.
A53=A33
A54=0.
A55=0.
A56=A36
A57=0.
A58=A38
A59=A39
A510=A310
WRITE (3,97) T , TEL
97 FORMAT(10X,'T=',F8.5,3X,'REGIME 5 THYRISTORS,P 1-2,P 2-3',
3X,'TEL=',F7.1)
GOTO 600
39 Y4=Y3
IF(L9-1.) 42,43,42
42 L8=1.
GOTO 600
43 L9=5.
L8=1.
L7=1.
C PONT 1 REGIME 2 , PONT 2 REGIME 2
DEN=(2.*ST1+2.*ST2+SD)
A11=0.
A12=0.
A13=-H*(RD+2.*RT1+2.*RT2)/DEN
A14=0.
A15=0.
A16=H/DEN

```

A17=0.
 A18=A16
 A19=0.
 A110=-A18
 A21=0.
 A22=0.
 A23=A13
 A24=0.
 A25=0.
 A26=A16
 A27=0.
 A28=A26
 A29=0.
 A210=-A28
 A31=0.
 A32=0.
 A33=A23
 A34=0.
 A35=0.
 A36=A26
 A37=0.
 A38=A36
 A39=0.
 A310=-A38
 A41=0.
 A42=0.
 A43=A33
 A44=0.
 A45=0.
 A46=A36
 A47=0.
 A48=A38
 A49=0.
 A410=-A48
 A51=0.
 A52=0.
 A53=A43
 A54=0.
 A55=0.
 A56=A46
 A57=0.
 A58=A56
 A59=0.
 A510=-A58

WRITE(3,98) T, TEL
 98 FORMAT(10X,'T=',F8.5,3X,'REGIME 4 THYRISTORS,P1-2 , P2-2',
~~3X~~ 3X,'TEL=',F7.2)
 GOTO 600
 C CALCUL DE DU1, DU2, DU3, DU4
 600 DU2=SG#(-DY1+DY2+2.*DY3-DY4+DY5)+RG#(-Y1+Y2+2.*Y3-Y4+Y5)
 DU1=SG#(-DY1 -2.*DY2+2.*DY3-DY4-2.*DY5)+RG#(-Y1-2.*Y2
 1+2.*Y3-Y4-2.*Y5)
 /DU3=SG#(-DY1-2.*DY2+DY4-DY5)+RG#(-Y1-2.*Y2+Y4-Y5)
 DY4= SG#(-DY1+DY2+3.*DY3-2.*DY4-DY5)+rg#(-Y1+Y2+3.*Y3-
 12.*Y4-Y5)

$ARG1 = TR + 1,047 + \Delta LFA1 \times 3,14/180.$
 $ARG2 = TR - 1,047 + \Delta LFA1 \times 3,14/180.$
 $ARG3 = TR + 1,57 + \Delta LFA2 \times 3,14/180.$
 $ARG4 = TR - 0,523 + \Delta LFA2 \times 3,14/180.$
 $JL = (N+1)/2$

IF(N-(2**JL)) 44,45,44

44 G1=ARG1
 G2=ARG2
 G3=ARG3
 G4=ARG4
 DE1=DU1
 DE2=DU2
 DE3=DU1
 DE4=DU2
 GOTO 700

45 G1=ARG3
 G2=ARG4
 G3=ARG1
 G4=ARG2
 DE1=DU3
 DE2=DU4
 DE3=DU3+DU4
 DE4=-DU3

700 A=1.

C RESOLUTION DES EQUATIONS

C PREMIERS COEFFICIENTS DE R. KUTTA

$S11 = A11 \times Y1 + A12 \times Y2 + A13 \times Y3 + A14 \times Y4 + A15 \times Y5 + A16 \times (EM \times \sin(G1) + DE1)$
 $+ A17 \times (EM \times \sin(G2) + DE2) + A18 \times (EM \times \sin(G3) + DE3) + A19 \times (EM \times \sin(G4) + DE4)$
 $+ A110 \times ED$

$S12 = A21 \times Y1 + A22 \times Y2 + A23 \times Y3 + A24 \times Y4 + A25 \times Y5 + A26 \times (EM \times \sin(G2) + DE1)$
 $+ A27 \times (EM \times \sin(G2) + DE2) + A28 \times (EM \times \sin(G3) + DE3) + A29 \times (EM \times \sin(G4) + DE4)$
 $+ A210 \times ED$

$S13 = A31 \times Y1 + A32 \times Y2 + A33 \times Y3 + A34 \times Y4 + A35 \times Y5 + A36 \times (EM \times \sin(G1) + DE1)$
 $+ A37 \times (EM \times \sin(G2) + DE2) + A38 \times (EM \times \sin(G3) + DE3) + A39 \times (EM \times \sin(G4) + DE4)$
 $+ A310 \times ED$

$S14 = A41 \times Y1 + A42 \times Y2 + A43 \times Y3 + A44 \times Y4 + A45 \times Y5 + A46 \times (EM \times \sin(G1) + DE1)$
 $+ A47 \times (EM \times \sin(G2) + DE2) + A48 \times (EM \times \sin(G3) + DE3) + A49 \times (EM \times \sin(G4) + DE4)$
 $+ A410 \times ED$

$S15 = A51 \times Y1 + A52 \times Y2 + A53 \times Y3 + A54 \times Y4 + A55 \times Y5 + A56 \times (EM \times \sin(G1) + DE1)$
 $+ A57 \times (EM \times \sin(G2) + DE2) + A58 \times (EM \times \sin(G3) + DE3) + A59 \times (EM \times \sin(G4) + DE4)$
 $+ A510 \times ED$

C DEUXIEMES COEFFICIENTS DE R. KUTTA

$S21 = A11 \times (Y1 + S11/2.) + A12 \times (Y2 + S12/2.) + A13 \times (Y3 + S13/2.) + A14 \times (Y4 + S14/1/2.)$
 $+ A15 \times (Y5 + S15/2.) + A16 \times (EM \times \sin(G1 + HR/2.) + DE1) + A17 \times (EM \times \sin(G2 + 2HR/2.)$
 $+ DE2) + A18 \times (EM \times \sin(G3 + HR/2.) + DE3) + A19 \times (EM \times \sin(G4 + HR/2.) + DE4)$
 $+ A110 \times ED$

$S22 = A21 \times (Y1 + S11/2.) + A22 \times (Y2 + S12/2.) + A23 \times (Y3 + S13/2.) + A24 \times (Y4 + S14/12.)$
 $+ A25 \times (Y5 + S15/2.) + A26 \times (EM \times \sin(G1 + HR/2.) + DE1) + A27 \times (EM \times \sin(G2 + 2HR/2.)$
 $+ DE2) + A28 \times (EM \times \sin(G3 + HR/2.) + DE3) + A29 \times (EM \times \sin(G4 + HR/2.) + DE4)$
 $+ A210 \times ED$

$S23 = A31 \times (Y1 + S11/2.) + A32 \times (Y2 + S12/2.) + A33 \times (Y3 + S13/2.) + A34 \times (Y4 + S14/12.)$
 $+ A35 \times (Y5 + S15/2.) + A36 \times (EM \times \sin(G1 + HR/2.) + DE1) + A37 \times (EM \times \sin(G2 + 2HR/2.)$
 $+ DE2) + A38 \times (EM \times \sin(G3 + HR/2.) + DE3) + A39 \times (EM \times \sin(G4 + HR/2.) + DE4)$
 $+ A310 \times ED$

$S24 = A41 \times (Y1 + S11/2.) + A42 \times (Y2 + S12/2.) + A43 \times (Y3 + S13/2.) + A44 \times (Y4 + S14/22.)$
 $+ A45 \times (Y5 + S15/2.) + A46 \times (EM \times \sin(G1 + HR/2.) + DE1) + A47 \times (EM \times \sin(G2 + 2HR/2.)$
 $+ DE2) + A48 \times (EM \times \sin(G3 + HR/2.) + DE3) + A49 \times (EM \times \sin(G4 + HR/2.) + DE4)$
 $+ A410 \times ED$

$$S25 = \Lambda 51 \# (Y1 + S11 / 2.) + \Lambda 52 \# (Y2 + S12 / 2.) + \Lambda 53 \# (Y3 + S13 / 2.) + \Lambda 54 \# (Y4 + S14 / 2.) + \Lambda 55 \# (Y5 + S15 / 2.) + \Lambda 56 \# (EM \# SIN(G1 + HR / 2.) + DE1) + \Lambda 57 \# (EM \# SIN(G2 + 2HR / 2.) + DE2) + \Lambda 58 \# (EM \# SIN(G3 + HR / 2.) + DE3) + \Lambda 59 \# (EM \# SIN(G4 + HR / 2.) + DE34) + \Lambda 510 \# ED$$

C TROISIEMES COEFFICIENTS DE RANGE KUTTA

$$S31 = \Lambda 11 \# (Y1 + S21 / 2.) + \Lambda 12 \# (Y2 + S22 / 2.) + \Lambda 13 \# (Y3 + S23 / 2.) + \Lambda 14 \# (Y4 + S24 / 2.) + \Lambda 15 \# (Y5 + S25 / 2.) + \Lambda 16 \# (EM \# SIN(G1 + HR / 2.) + DE1) + \Lambda 17 \# (EM \# SIN(G2 + 2HR / 2.) + DE2) + \Lambda 18 \# (EM \# SIN(G3 + HR / 2.) + DE3) + \Lambda 19 \# (EM \# SIN(G4 + HR / 2.) + DE34) + \Lambda 110 \# ED$$

$$S32 = \Lambda 21 \# (Y1 + S21 / 2.) + \Lambda 22 \# (Y2 + S22 / 2.) + \Lambda 23 \# (Y3 + S23 / 2.) + \Lambda 24 \# (Y4 + S24 / 2.) + \Lambda 25 \# (Y5 + S25 / 2.) + \Lambda 26 \# (EM \# SIN(G1 + HR / 2.) + DE1) + \Lambda 27 \# (EM \# SIN(G2 + 2HR / 2.) + DE2) + \Lambda 28 \# (EM \# SIN(G3 + HR / 2.) + DE3) + \Lambda 29 \# (EM \# SIN(G4 + HR / 2.) + DE34) + \Lambda 210 \# ED$$

$$S33 = \Lambda 31 \# (Y1 + S21 / 2.) + \Lambda 32 \# (Y2 + S22 / 2.) + \Lambda 33 \# (Y3 + S23 / 2.) + \Lambda 34 \# (Y4 + S24 / 2.) + \Lambda 35 \# (Y5 + S25 / 2.) + \Lambda 36 \# (EM \# SIN(G1 + HR / 2.) + DE1) + \Lambda 37 \# (EM \# SIN(G2 + 2HR / 2.) + DE2) + \Lambda 38 \# (EM \# SIN(G3 + HR / 2.) + DE3) + \Lambda 39 \# (EM \# SIN(G4 + HR / 2.) + DE34) + \Lambda 310 \# ED$$

$$S34 = \Lambda 41 \# (Y1 + S21 / 2.) + \Lambda 42 \# (Y2 + S22 / 2.) + \Lambda 43 \# (Y3 + S23 / 2.) + \Lambda 44 \# (Y4 + S24 / 2.) + \Lambda 45 \# (Y5 + S25 / 2.) + \Lambda 46 \# (EM \# SIN(G1 + HR / 2.) + DE1) + \Lambda 47 \# (EM \# SIN(G2 + 2HR / 2.) + DE2) + \Lambda 48 \# (EM \# SIN(G3 + HR / 2.) + DE3) + \Lambda 49 \# (EM \# SIN(G4 + HR / 2.) + DE43) + \Lambda 410 \# ED$$

$$S35 = \Lambda 51 \# (Y1 + S21 / 2.) + \Lambda 52 \# (Y2 + S22 / 2.) + \Lambda 53 \# (Y3 + S23 / 2.) + \Lambda 54 \# (Y4 + S24 / 2.) + \Lambda 55 \# (Y5 + S25 / 2.) + \Lambda 56 \# (EM \# SIN(G1 + HR / 2.) + DE1) + \Lambda 57 \# (EM \# SIN(G2 + 2HR / 2.) + DE2) + \Lambda 58 \# (EM \# SIN(G3 + HR / 2.) + DE3) + \Lambda 59 \# (EM \# SIN(G4 + HR / 2.) + 3DE4) + \Lambda 510 \# ED$$

C QUATRIEMES COEFFICIENTS DE RANGE KUTTA

$$S41 = \Lambda 11 \# (Y1 + S31) + \Lambda 12 \# (Y2 + S32) + \Lambda 13 \# (Y3 + S33) + \Lambda 14 \# (Y4 + S34) + \Lambda 15 \# (Y5 + S35) + \Lambda 16 \# (EM \# SIN(G1 + HR) + DE1) + \Lambda 17 \# (EM \# SIN(G2 + HR) + DE2) + \Lambda 18 \# (EM \# 2SIN(G3 + HR) + DE3) + \Lambda 19 \# (EM \# SIN(G4 + HR) + DE4) + \Lambda 110 \# ED$$

$$S42 = \Lambda 21 \# (Y1 + S31) + \Lambda 22 \# (Y2 + S32) + \Lambda 23 \# (Y3 + S33) + \Lambda 24 \# (Y4 + S34) + \Lambda 25 \# (Y5 + S35) + \Lambda 26 \# (EM \# SIN(G1 + HR) + DE1) + \Lambda 27 \# (EM \# SIN(G2 + HR) + DE2) + \Lambda 28 \# (EM \# 2SIN(G3 + HR) + DE3) + \Lambda 29 \# (EM \# SIN(G4 + HR) + DE4) + \Lambda 210 \# ED$$

$$S43 = \Lambda 31 \# (Y1 + S31) + \Lambda 32 \# (Y2 + S32) + \Lambda 33 \# (Y3 + S33) + \Lambda 34 \# (Y4 + S34) + \Lambda 35 \# (Y5 + S35) + \Lambda 36 \# (EM \# SIN(G1 + HR) + DE1) + \Lambda 37 \# (EM \# SIN(G2 + HR) + DE2) + \Lambda 38 \# (EM \# 2SIN(G3 + HR) + DE3) + \Lambda 39 \# (EM \# SIN(G4 + HR) + DE4) + \Lambda 310 \# ED$$

$$S44 = \Lambda 41 \# (Y1 + S31) + \Lambda 42 \# (Y2 + S32) + \Lambda 43 \# (Y3 + S33) + \Lambda 44 \# (Y4 + S34) + \Lambda 45 \# (Y5 + S35) + \Lambda 46 \# (EM \# SIN(G1 + HR) + DE1) + \Lambda 47 \# (EM \# SIN(G2 + HR) + DE2) + \Lambda 48 \# (EM \# 2SIN(G3 + HR) + DE3) + \Lambda 49 \# (EM \# SIN(G4 + HR) + DE4) + \Lambda 410 \# ED$$

$$S45 = \Lambda 51 \# (Y1 + S31) + \Lambda 52 \# (Y2 + S32) + \Lambda 53 \# (Y3 + S33) + \Lambda 54 \# (Y4 + S34) + \Lambda 55 \# (Y5 + S35) + \Lambda 56 \# (EM \# SIN(G1 + HR) + DE1) + \Lambda 57 \# (EM \# SIN(G2 + HR) + DE2) + \Lambda 58 \# (EM \# 2SIN(G3 + HR) + DE3) + \Lambda 59 \# (EM \# SIN(G4 + HR) + DE4) + \Lambda 510 \# ED$$

C SOLUTION DU SYSTEME

$$Y1 = Y1 + (S11 + 2. \# S21 + 2. \# S31 + S41) / 6.$$

$$Y2 = Y2 + (S12 + 2. \# S22 + 2. \# S32 + S42) / 6.$$

$$Y3 = Y3 + (S13 + 2. \# S23 + 2. \# S33 + S43) / 6.$$

$$Y4 = Y4 + (S14 + 2. \# S24 + 2. \# S34 + S44) / 6.$$

$$Y5 = Y5 + (S15 + 2. \# S25 + 2. \# S35 + S45) / 6.$$

$$IF(Y1) \quad 1, 2, 2$$

1 $Y1 = 0.$

2 $IF(Y2) \quad 3, 4, 4$

3 $Y3 = 0.$

4 $IF(Y3) \quad 5, 6, 6$

5 $Y3 = 0.$

6 $IF(Y4) \quad 7, 8, 8$

7 $Y4 = 0.$

8 $IF(Y5) \quad 9, 80, 80$

9 $Y5 = 0.$

```

80 DY1=(S11+2.*S21+2.*S31+S41)/(6.*H)
DY2=(S12+2.*S22+2.*S32+S42)/(6.*H)
DY3=(S13+2.*S23+2.*S33+S43)/(6.*H)
DY4=(S14+2.*S24+2.*S34+S44)/(6.*H)
DY5=(S15+2.*S25+2.*S35+S45)/(6.*H)
C  CALCUL DE DU1, DU2, DU3, DU4, UD1, UD2
DU1=SG*(-DY1-2.*DY2+2.*DY3-DY4-2.*DY5)+RG*(-Y1-2.*Y2+2.*Y3-Y4
17-2.*Y5)
DU2=SG*(-DY1+DY2+2.*DY3-DY4+DY5)+RG*(-Y1+Y2+2.*Y3-Y4+Y5)
DU3=SG*(-DY1-2.*DY2+DY4-DY5)+RG*(-Y1-2.*Y2+Y4-Y5)
DU4=SG*(-DY1+DY2+3.*DY3-2.*DY4-DY5)+RG*(-Y1+Y2+3.*Y3-2.*Y4-Y5)
UD1=EM*SIN(G1)+DU1+RT1*(Y3-Y1-2.*Y2)+ST1*(DY3-DY1-2.*DY2)
UD2=EM*SIN(G3)+DU1+RT2*(Y3-Y4-2.*Y5)+ST2*(DY3-DY4-2.*DY5)
T=T+H
TR=TR+HR
TEL=T*180./0.01
C  TEST DE FIN DE COMMUTATION
IF(TR-3,1416/6.) 46;47,47
46 GOTO 64
47 A=1.
JL=(N+1)/2
IF(N-(2*JL)) 49,48,49
48 A=1.
IF(Y4-Y3) 50,51,51
51 WRITE(3,500) TR,T,TEL
500 FORMAT(4X,'AMORCAGE 3 VALVE,PONT2','TR=',F6.3,2X,'T=',F8.5,2X,
1'TEL=',F7.1)
IF(K2-1.) 52,53,52
52 ANGR=(TR-TANGR)*180./3,14
WRITE(3,501) ANGR
501 FORMAT(4X,'ANGR=',F5.1)
GOTO 53
50 A=1.
IF(UD2) 54,55,55
54 WRITE(3,502) TR,T,TEL
502 FORMAT(4X,'AMORCAGE 4 VALVE,PONT2','TR=',F6.3,2X,'T=',F8.5,2X;
1'TEL=',F7.1)
Y4=Y5
53 Y4=0.
N=N+1
TR=TR-3,1416/6.
IN=(N-1)/12
N=N-IN*12
GOTO 64
55 A=1.
IF(K2-1.) 64,56,64
56 TANGR=TR
K2=5.
GOTO 64
49 A=1.
IF(Y1-Y3) 58,59,59
59 WRITE(3,503) TR,T,TEL
503 FORMAT(4X,'AMORCAGE 3 VALVE,PONT1','TR=',F6.3,2X,'T=',F8.5,2X,
1'TEL=',F7.1)
IF(K1-1.) 60,61,60
60 WRITE(3,504) ANGR ANGR=(TR-TANGR)*180./3,14
WRITE(3,504) ANGR
504 FORMAT(24X,'ANGR=',F5.1)

```



```

GOTO 61
58 A=1.
   IF(UD1) 62,63,63
62 WRITE(3,505) TR,T,TEL
505 FORMAT(4X,'AMORCAGE 4 VALVE,PONT1','TR=',F6.3,2X,'T=',F8.5,
12X,'TEL=',F7.1)
   Y2=Y1
61 Y1=0.
   N=N+1
   TR=TR-3,1416/6.
   IN=(N-1)/12
   N=N-IN#12
   GOTO 64
63 A=1.
   IF(K1-1.) 64,65,64
65 TANGR=TR
   K1=5.
   GOTO 64
64 IF(M-3) 66,67,67
66 M=M+1
   GOTO 800
67 M=1.
   WRITE(3,508) T,Y1,Y2,Y3,Y4,Y5,TEL
508 FORMAT(10X,F8.5,4X;F6.3,4X,F6.3,4X,F6.3,4X,F6.3,4X,F6.3,4X,F7.1)
   WRITE(3,509) DY1,DY2,DY3,DY4,DY5
509 FORMAT(10X,F10.4,2X,F10.4,2X,F10.4,2X,F10.4,2X,F10.4)
800 IF(T-TC1) 68,69,69
69 A=1.
   IF(K3-1.) 70,71,70
71 EM=105.
   ED=95.
   RD=1.
   WRITE(3,506) T,EM,ED,RD,TEL
506 FORMAT(2X,'CHANGEMENT DU REGIME 'T=',F8.5,2X,'EM=',F6.1,2X,
1'ED=',F6.1,2X,'RD=',F4.1,2X,'TEL=',F7.1)
   K3=5.
70 A=1.
   IF(T-TC2) 68,73,73
73 A=1.
   IF(K4-1.) 68,74,68
74 EM=105.
   ED=150.
   RD=1.
   WRITE(3,507) T,EM,ED,RD,TEL
507 FORMAT(2X,'RETABLISSEMENT DU REGIME','T=',F8.5,2X,'EM=',F6.1,
12X,'ED=',F6.1,2X,'RD=',F4.1,2X,'TEL=';F7.1)
   K4=5.
68 A=1.
   IF(T-TLIM) 75,76,76
76 STOP
   END
!LINK
!RUN

```

BIBLIOGRAPHIE

1- M . DEMONTVIGNER

Soupapes electriques redresseurs onduleurs .

fascicule 1,2,3 , Paris 1970 - 1971 .

2- A . POSSE

Les regimes de transport d'energie à courant continu .

en russe . Moscou 1973 .

3- A. MOULFI et S. RILI

Modèle mathématique d'un système de transport d'energie
en courant continu à haute tension .

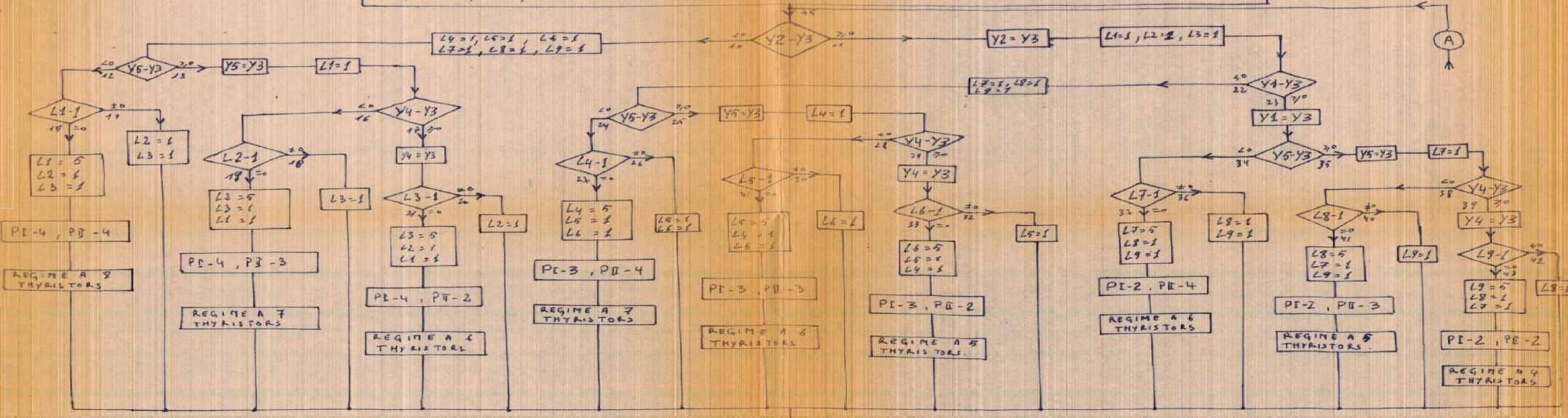
Thèse de fin d'etudes ENPA 1974 .

4- M. DREYFUS

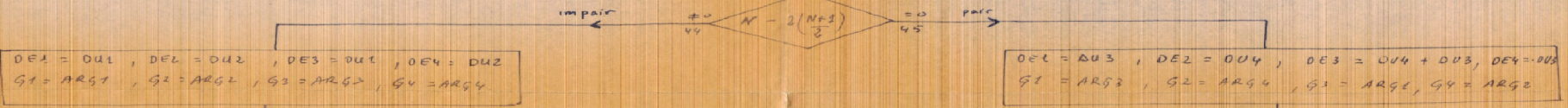
Fortran IV Dunod, Paris .

ORGANIGRAMME GENERAL

domaines variables RT1, ST1, RT2, ST2, RD, SD, RT, ST, FT1, ED, ALFA1, ALFA2, W
Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, OY1, OY2, OY3, OY4, OY5, L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, N, NI, NI2, NI3, NI4
H, TL17, TC1, TC2



CALCUL DE D01, D02, D03, D04
ARG1, ARG2, ARG3, ARG4



RESOLUTION DES EQUATIONS
T = T + H ; TR = TR + HR

