

1/74

lex

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE



THESE DE FIN D'ETUDES



ETUDE DE STABILITE D'ONDULEUR
TRIPHASE EN REGIME DE COURT CIRCUIT
DANS LE SYSTEME ALTERNATIF

Proposé par
M. V. STRIAPAN

Étudié par
A. BELOUI

JUIN 1974

U N I V E R S I T E D ' A L G E R

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Etude de stabilité d'onduleur triphasé
en régime de court circuit

ALGER-1974

Nous avons le plaisir d'adresser nos très vifs remerciements à Monsieur TRIAPAN V. qui nous a guidés tout au long de notre étude et qui nous a apporté toute son aide et son dévouement.

Nous tenons aussi à exprimer toute notre reconnaissance à Messieurs DEFORNEL et COULON pour la documentation qu'ils ont bien voulu nous procurer.

Notre gratitude s'adresse également à Messieurs BELAUS, Président du Jury et RUIZ, examinateur.

Nous n'oublierons pas Monsieur RAJAGOPALAN à qui nous devons les principes généraux sur les convertisseurs statiques. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Pour leur concours efficace, nous adressons nos sincères remerciements à l'équipe du Centre de Calcul de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à la réalisation du programme de calcul et à celle du présent mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
<u>I - FONCTIONNEMENT D'UN CONVERTISSEUR TRIPLASE EN ONDULEUR :</u>	
1.1. Généralité sur le fonctionnement d'onduleur non autonome	4
1.2. Phénomène de commutation	6
1.3. Caractéristiques externes d'un onduleur	8
1.4. Stabilité d'onduleur non autonome	9
<u>II - INFLUENCE DES DEFAUTS NON SYMETRIQUES SUR LE FONCTIONNEMENT D'ONDULEURS NON AUTONOMES :</u>	
2.1. Paramètres de commutation	12
2.2. Causes de non symétrie dans le système alternatif	13
2.3. Détermination des paramètres de commutation en cas de non symétrie dans le système d'alimentation	13
<u>III - SIMULATION MATHÉMATIQUE D'ONDULEUR :</u>	
3.1. Schéma de calcul général	17
3.2. Mise en équation du système	18
3.3. Choix des équations correspondants à chaque état de conduction de l'onduleur	20
3.4. Adaptation des systèmes en vue d'une résolution sur ordinateur	21
<u>IV - EXECUTION DU PROGRAMME DE CALCUL :</u>	
4.1. Organigramme général	24
4.2. Organisation des différents blocs de l'organigramme de calcul	25
<u>V - APPLICATION :</u>	
5.1. Exemple d'étude	31
5.2. Détermination des paramètres de commutation	32
5.3. Calcul préliminaire du régime permanent	33
5.4. Analyse des résultats obtenus	35
CONCLUSION	
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXE 1	
ANNEXE 2	

I N T R O D U C T I O N

De nombreuses études sont, depuis longtemps, poursuivies qui traitent des problèmes très divers posés par le transport de l'énergie en courant continu à très haute tension et notamment par les stations de conversion de la forme continue de l'énergie électrique à la forme alternative et inversement.

L'intérêt qu'apporte ces études est basé sur certains avantages indiscutables de ce mode de transport d'énergie électrique tant sur les plans économique que technique.

Du point de vue économique, les spécialistes s'accordent pour dire que, dans les transports massifs d'énergie par lignes aériennes, le courant continu peut prendre un avantage sérieux sur le courant alternatif pour des distances dépassant 1 000 km.

Par contre, le problème est tout à fait différent dès qu'il s'agit d'une traversée de mer. Le courant alternatif est très rapidement limité par la distance (en raison de l'énergie réactive produite par les câbles eux-mêmes). Dès que cette distance dépasse quelque 60 ou 70 km le transport devient impossible, ce qui explique la vogue actuelle du courant continu dans tous les projets d'interconnexion sous-marine.

Le transport par courant continu présente certaines différences fondamentales par rapport au transport traditionnel par courant alternatif.

En courant alternatif, l'énergie active transitée par une ligne d'interconnexion reliant deux grands réseaux est essentiellement déterminée par la différence de phase des deux vecteurs tensions aux deux extrémités de l'interconnexion.

Le problème de réglage de la puissance échangée entre les deux réseaux consiste essentiellement à asservir cette différence de phases à une loi d'échange donnée. Si l'on accélère les machines du réseau exportateur, en ouvrant les vannes d'admission, cet angle a tendance à croître et le transit d'énergie augmente. Au contraire, si l'on ferme ces vannes, les machines du réseau exportateur ont tendance à ralentir, la différence de phases entre les deux extrémités de la ligne a diminuer ainsi que l'échange d'énergie entre les deux réseaux. Il s'ensuit que toute modification de la puissance transitée est intimement liée au mouvement mécanique des machines, ce qui se traduit pratiquement par une certaine constante de temps d'ordre mécanique dans le réglage de la puissance.

Toute interconnexion à courant alternatif réalise un couplage élastique électromécanique entre les deux réseaux, qui peut être rompu par suite d'une défaillance du réglage ou d'un défaut électrique dans la transmission; il en résulte, la plupart du temps, un déclenchement brutal de l'interconnexion impose nécessairement des systèmes de réglage sévère de fréquence dans chacun des deux réseaux interconnectés, qui doivent tenir compte du programme d'échange entre les deux réseaux.

Au contraire, en courant continu, l'indépendance des réseaux interconnectés (en tension et en fréquence) est totale et la puissance qui circule sur l'interconnexion ne dépend que de la différence des tensions continues aux deux extrémités, tensions qui peuvent être ajustées avec une très grande rapidité, quelles que soient les valeurs actuelles des tensions par actions sur les grilles des valves; les stations de conversion courant alternatif-courant continu et courant continu-courant alternatif peuvent être considérées comme des commutatrices dont le rapport de transformation peut varier très rapidement, sans inertie notable.

Promptitude de réglage et indépendance totale des réseaux à courant alternatif interconnectés sont donc les caractéristiques essentielles des liaisons en courant continu.

Il est évident que les éléments les plus importants des systèmes de transport en courant continu sont les sous-stations de conversions (Redresseurs, onduleurs).

N°

Les convertisseurs statiques de courant continu en courant alternatif, c'est à dire les onduleurs, trouvent leurs utilisations non seulement dans les systèmes de transport d'énergie mais aussi dans d'autres applications en particulier dans les nouveaux procédés de production de l'énergie sous forme continu ~~comme~~ sous le nom de système-magnéto-hydro dynamique.

Le fonctionnement d'onduleur non autonome est déterminé par les paramètres et caractéristiques du réseau alternatif, récepteur d'énergie.

Un fait évident est que les régimes anormaux ou différents défauts dans ces réseaux influencent le déroulement du processus électro magnétique dans l'onduleur.

Parmi les défauts les plus fréquents dans la partie alternative on citera les courts circuits non symétriques :

- monophasés
- biphasés sans terre
- biphasés avec terre

L'étude ainsi proposée, consiste à étudier le fonctionnement de l'onduleur non autonome triphasé en cas de défauts cités ci-dessus.

On se penchera plus spécialement sur le problème de la stabilité de cet onduleur pendant de tels régimes.

Pour résoudre ce problème, on peut proposer la réalisation d'un modèle physique réduit. Mais cette solution est à rejeter du fait que d'une part l'Ecole ne dispose pas suffisamment de matériel indispensable à la réalisation d'un modèle assez précis et d'autre part ceci souffre des difficultés que le prix augmente avec le modèle pour devenir suffisamment universel.

Ceux-ci et plusieurs autres aspects font qu'il est souhaitable d'avoir quelques moyens par lesquels un système (Réseau + onduleur) donné peut être simulé.

Un programme sur un ordinateur digital dans lequel tous les paramètres sont représentés numériquement fournit pour tous les problèmes de stabilité une alternative universelle et exacte pour un modèle physique.

Entre autre la réalisation de modèle mathématiques permet une résolution rapide du problème posé avec possibilité de généralisation la plus complète.

FONCTIONNEMENT D'UN CONVERTISSEUR TRI PHASE
EN ONDULEUR

1.1. - Généralités sur le fonctionnement d'onduleur non autonome.

Considérons le cas simple d'un pont triphasé étoilé.
La tension continue y a pour valeur :

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

Faisons varier l'angle α en maintenant constant le courant débité I_d .
On peut obtenir ce résultat en faisant débiter le pont sur une force électromotrice que, pour chaque valeur de l'angle α , on réglera de façon à retrouver toujours la même valeur du courant débité; lorsque α croît, il faut évidemment diminuer la valeur de la f.c.e.m.; la puissance absorbée par celle-ci diminue donc. Lorsque α devient supérieur à 90° , la U_{di} change de signe, la f.c.e.m. réglable doit, elle aussi, changer de signe pour

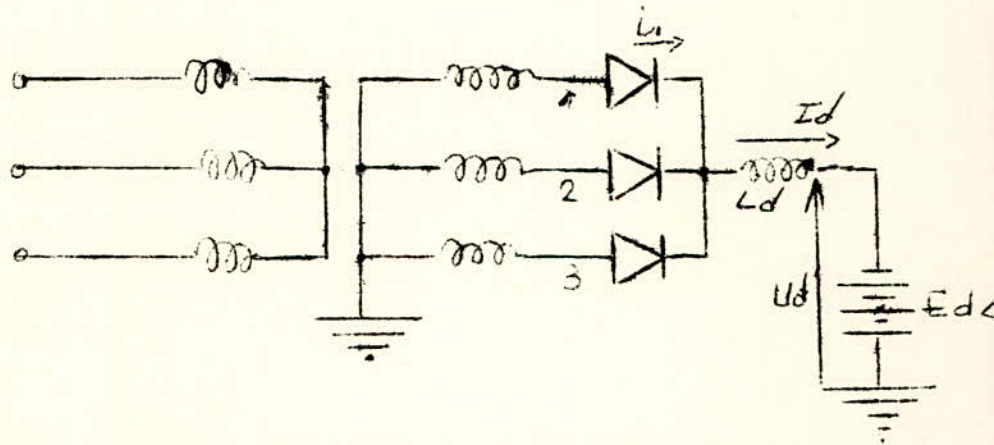


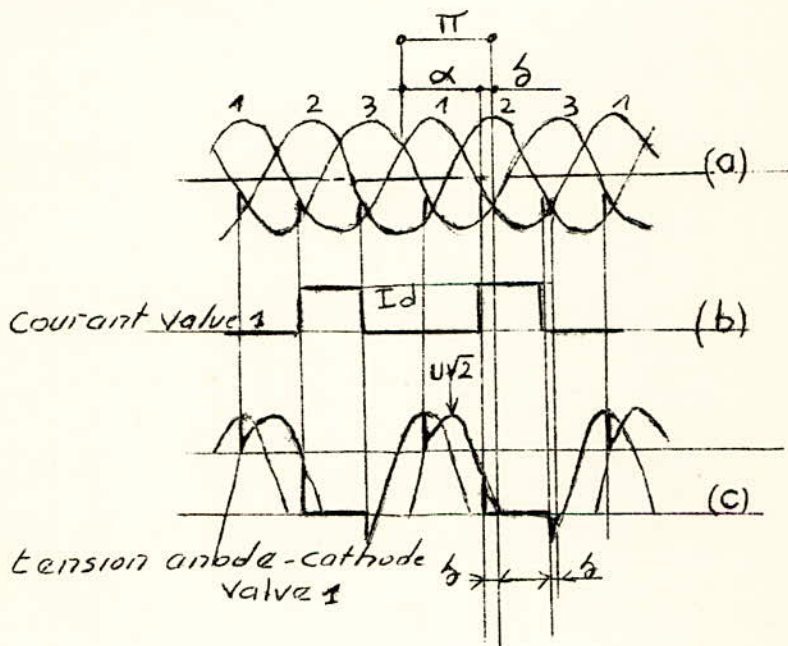
Fig. 1 - schéma de principe du fonctionnement d'un onduleur triphasé étoilé.

maintenir constant en grandeur et signe le courant I_d ; elle devient donc une force électromotrice tendant à faire circuler ce courant à travers les valves; la puissance est alors fournie par le réseau à courant continu au réseau à courant alternatif.

Sur la fig. 2 on a porté les valeurs des courants et des tensions relatif au schéma envisagé. On y voit bien que c'est lorsque sa tension est négative que le thyristor 1 est parcourue par un courant positif suivant les conventions faites : La puissance du coté alternatif est bien dirigée du pont vers le réseaux.

La tension entre anode et cathode (fig. 2.C) dans le fonctionnement en onduleur est presque toujours positive. C'est précisément le role de la gachette de retarder, malgré la valeur élevée de cette tension, l'allumage de l'anode. Dans le fonctionnement en onduleur, l'angle α est supérieur à 90° , mais il doit rester inférieur à 180° , sinon, comme on le voit sur la fig. 2a, le Thyristor allumé demeure allumé et ne peut pas passer le courant à son voisin : c'est un raté de commutation.

(fig. 2) Courbes des tensions et des courants dans un onduleur triphasé étoilé.



Il n'existe pas de différence fondamentale entre les fonctionnements en onduleur et en redresseur d'un pont de valves. Dans un cas comme dans l'autre, le pont joue le role d'un commutateur à directions multiples qui établit des contacts périodiques entre deux réseaux; suivant les instants où sont établis ces contacts, la puissance passe du réseau à courant alternatif au réseau à courant continu, ou inversement.

On peut, bien entendu, étendre sans difficulté au montage un pont de Graetz. La théorie de l'onduleur faite dans le cas d'un pont triphasé étoilé (fig. 3).

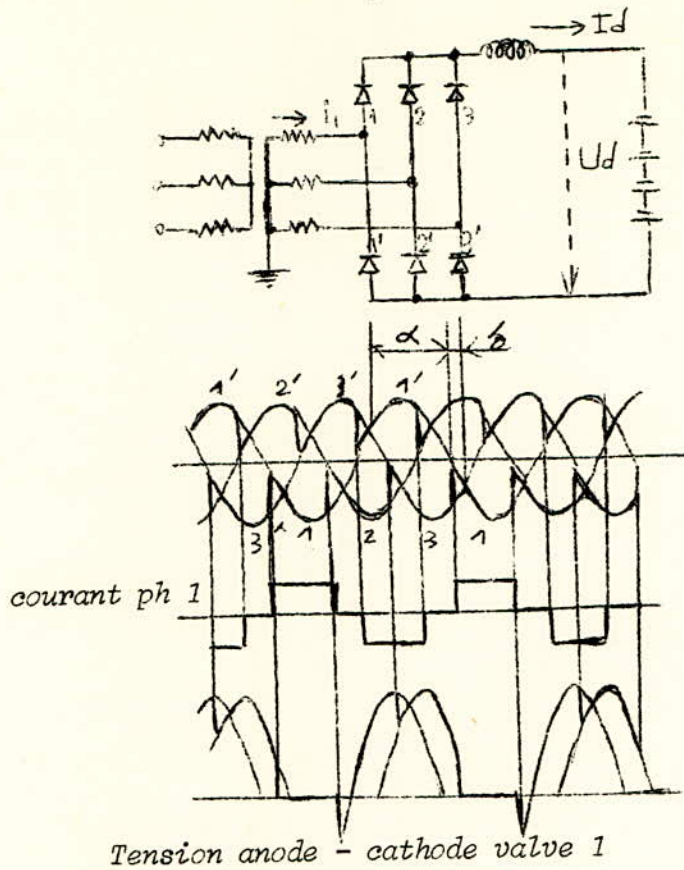


Fig.3 - sché^{ma} de principe d'un onduleur en pont de Graetz et courbes des tensions et des courants de l'onduleur

1.2. - Phénomène de commutation.

Dans la théorie du convertisseur faite ci-dessus, on a supposé que le passage du courant d'une phase à l'autre s'effectue instantanément. En réalité la source triphasé d'alimentation d'un pont comporte toujours une réactance interne qui rend impossible les variations brusques de courant dans chaque phase. Le phénomène de transfert du courant d'une phase à l'autre s'appelle la commutation.

Considérons un pont triphasé alimenté à travers trois inductances L , par trois tensions alternatives triphasées e_1, e_2, e_3 (fig.4) et étudions le passage de la phase 1 à la phase 2.

A l'instant où la valve 2 est débloquée, les phases 1 et 2 sont mises en court-circuit, et la f.e.m. $e_1 - e_2$ est appliquée au circuit 1-2. Le courant dans ce court-circuit diphasé résulte de la superposition :

a) du courant alternatif forcé que fait circuler la force électromotrice $e_1 - e_2$. A l'instant du début de commutation,

Ce courant circule de la phase 2 vers la phase 1 ;

schéma d'un pont 3 ph Y alimenté par une source d'inductance L

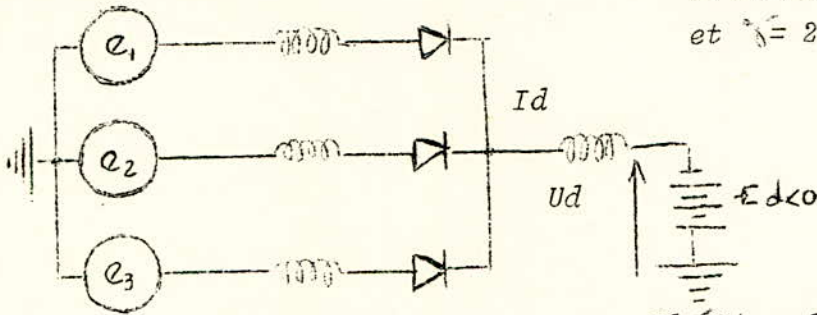


fig. 4

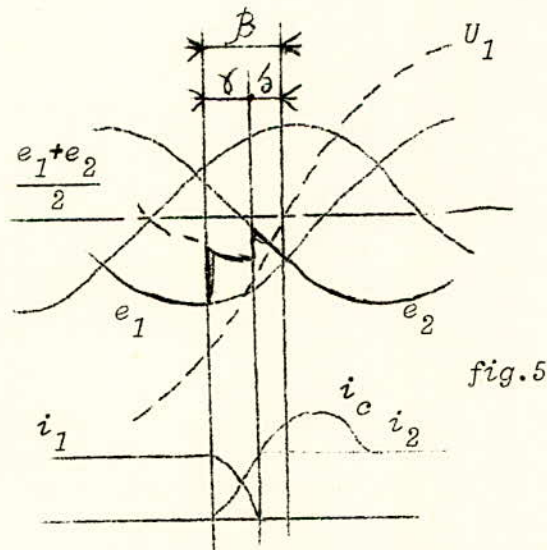
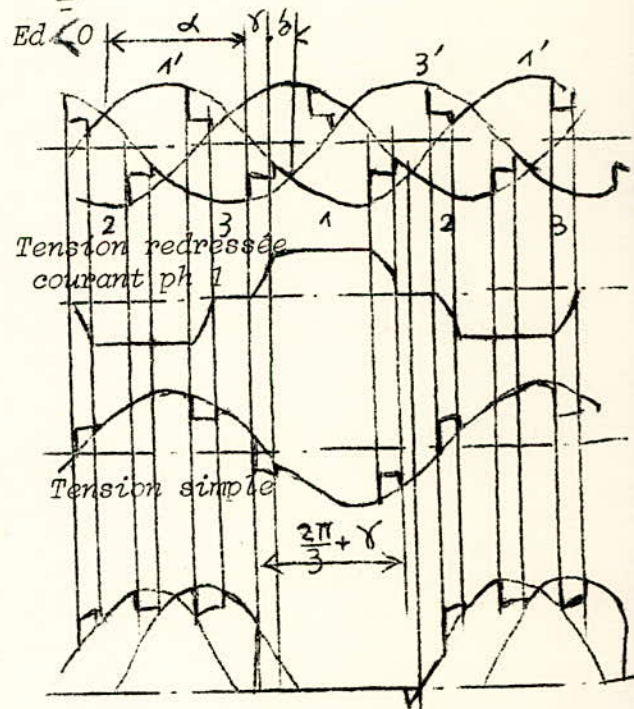


fig. 5

courbes courant et tensions fig. 6

fig. 7 - courbes des tensions et des courants d'un onduleur en pont de Graetz dans le cas $\alpha = 15^\circ$ et $\gamma = 22^\circ 30'$



Tension anode - cathode Valve 1

b) d'une composante continue telle que la valeur des courants dans ces deux phases ne subissent pas, au début de la commutation, de discontinuité.

Le courant total des phases 1 et 2 est représenté en figure 6. La valve 1 s'éteint lorsque son courant i_1 s'est spontanément annulé; le courant continu passe alors en totalité par la valve 2.

La circulation du courant alternatif forcé provoque une chute de tension dans les inductances L. Si l'on néglige la chute de tension non inductive due à la composante continue du courant, la tension de la cathode s'établit, pendant la durée de la commutation, à la valeur moyenne de e_1 et e_2 , soit $\frac{e_1 + e_2}{2}$ la tension cathodique est représentée en fig. 5.

L'extension de la théorie précédente au cas du montage en pont de Grätz, s'effectue sans difficulté. On a représenté en fig. 7, les tensions et les courants caractérisant le fonctionnement du convertisseur en onduleur.

1.3.- Caractéristiques externes d'un onduleur.

L'allumage des anodes d'un onduleur peut avoir lieu suivant deux lois différentes (fig. 8).

L'angle d'allumage $\alpha = 180^\circ - \beta$ est constant (aucune action sur la commande de grille en fonction du courant). Dans ce cas, β doit être assez grand pour que l'angle δ de repos de la soupape soit supérieur à toute charge à l'angle de sécurité minimal δ_0 .

L'angle de repos δ est maintenu constant par un calculateur qui détermine en conséquence, pour chaque valeur du courant I_d , l'angle satisfaisant à cette condition.

1°/ Caractéristique à $\beta =$ constante.

On voit facilement que plus u augmente, plus la tension continue moyenne augmente. Quand donc, à tension alternative fixée, le courant ondulé augmente, la tension continue appliquée doit augmenter pour compenser les chutes de tension constantes (fig. 9).

2°/ Caractéristique à $\delta =$ constante.

Dans ce cas, toute augmentation du courant, en augmentant δ , augmente la surface couverte de hachures, la fig. 8, et par conséquent diminue la tension continue.

Les caractéristiques externes sont des droites légèrement tombantes (fig.10).

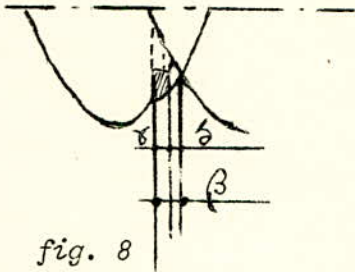


fig. 8

Courbes des variations de la tension de la cathode d'un onduleur pendant la commutation.

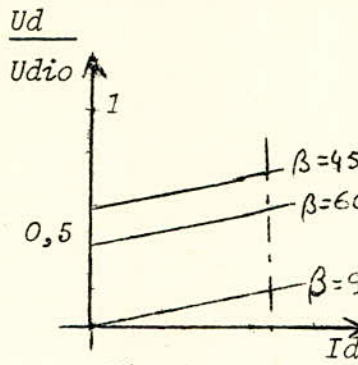


Fig. 9

Caractéristiques externes d'un onduleur à $\beta = cte$

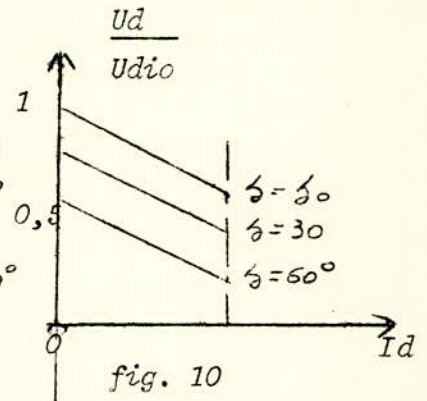
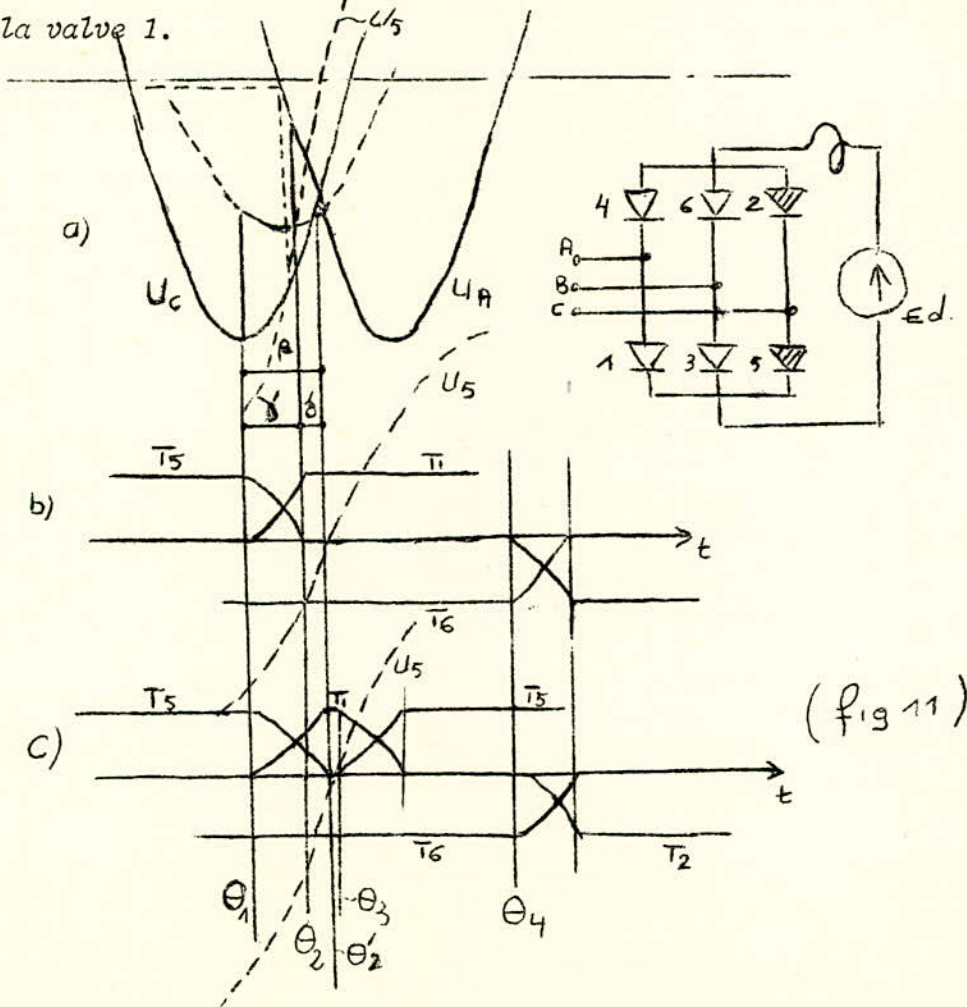


fig. 10

Caractéristiques externes d'un onduleur à $\delta = cte$.

1.4.- Stabilité d'onduleur non autonome.

Sur la figure 11 sont représentées les courbes de tensions de phases et de courant des Thyristors pendant la commutation de la valve 5 sur la valve 1.



(fig 11)

Au moment Θ_1 la valve 1 s'allume et commence à reprendre le courant Id.

La tension sur le thyristor sortant Th5 est représentée en pointillés sur la fig. 11a. On voit que cette tension devient positive au moment Θ_3 ; étant données les propriétés intrinsèques des thyristors actuelles, pour que ceux-ci retrouvent leurs propriétés de bloquer le courant, il faut que ce courant qui les traverse s'annule au moins 15° électriques avant Θ_3 , ce qui veut dire que l'angle δ (angle de marge ou retablisement, ou de repos) soit au moins égal à cette valeur.

Sur la figure 11b sont représentées les courbes de courant de thyristors en cas de commutation normale c'est à dire quand la valeur minimale de δ est assuré,

Le Th5 s'étend à Θ_2 , pendant le laps de temps $(\Theta_3 - \Theta_2) \geq 15^\circ$ il reprend ses propriétés sans réallumage à Θ_3 , moment à partir duquel la tension sur Th 5 devient positive.

Finalement, ne restent, en conduction que Th 6 et Th 1 jusqu'à l'instant Θ_4 - début de la commutation suivante Th 6 sur Th 2 etc...

Si pour une cause quelconque, la durée de commutation (δ) augmente de telle façon que δ devient inférieur à 15° nous avons un raté de commutation ce qui provoque la perte de stabilité d'onduleur; ce cas est illustré sur la (fig. 11c).

La commutation Th 5 sur Th 1 se termine à Θ'_2 et nous avons $\delta = \Theta_3 - \Theta'_2 < 15^\circ$. Pendant cet intervalle de temps le Th 5 ne retrouve pas ces propriétés de bloquer le courant, et se réallume à Θ_3 .

Etant donné qu'à partir de ce moment la tension d'anode de Th 5 est supérieure à la tension d'anode de Th 1; le thyristor, Th 5 reprend le courant tandis que Th 1 s'éteint. Dans la conduction ne reste de nouveau que Th 5 et Th 6. Pendant cette période l'onduleur n'exerce plus qu'1 f.c.e.m alternative; tout se passe donc du côté courant continu comme s'il était en court circuit.

Au moment Θ_4 la commutation suivante Th 6 sur Th 2 commence et se retrouve dans le situation de 2 valves de même phase. Th 5 et Th 2 se retrouve en état de conduction ce qui provoque un court circuit franc aux bornes à courant continu de l'onduleur.

Cela peut nous amener à la surintensité de Id importante étant donné que dans le circuit, il ne reste que la f.e.m. du redresseur et l'impédance d'une ligne alors que la f.c.e.m. de l'onduleur devient nulle.

Il va de soi qu'aucune puissance ne peut être transmise sur la ligne à courant continu pendant ce phénomène de perte de stabilité.

Le raté de commutation qui conduit à la perte de stabilité peut être provoqué le plus souvent par une augmentation de l'angle γ de commutation. Etant donné la relation $\beta = \gamma + \delta$; à une augmentation de δ correspondra inévitablement une diminution de δ .

Les raisons pour lesquelles l'angle γ augmente peuvent se traduire soit par :

- une augmentation du courant continu
- soit par une diminution des tensions alternatives alimentant l'onduleur.

Les courts circuits dans les réseaux de réception entraînent inévitablement une diminution de la tension qui peuvent provoquer la perte de stabilité d'onduleur.

Ces phénomènes se compliquent en cas de court circuit non symétrique car les conditions de commutations deviennent différentes pour chaque combinaison de paires de phases.

Par exemple nous pourrions avoir durant une période deux commutations normales (entre les phases A et B et les phases B et C) tandis que la 3ième commutation (entre les phases C et A) ne sera pas réussite.

En résumé l'étude de la "stabilité" consiste à vérifier pour chaque commutation (surtout pour les régimes non symétriques) la valeur réelle de δ .

++++++
+ CHAPITRE II +
++++++

INFLUENCE DES DEFAUTS NON SYMETRIQUES SUR LE
FONCTIONNEMENT D'ONDULEURS NON AUTONOMES

2.1.- Paramètres de commutation :

Le fonctionnement d'un convertisseur statique dans n'importe quel régime, peut être déterminé si on connaît les tensions composées appliquées à l'entrée du convertisseur et l'impédance équivalente du système d'alimentation.

Etant donné qu'en régime symétrique, les processus électromagnétique dans le convertisseur triphasé, "montage Graetz" se répètent chaque 60° électrique, et pour déterminer tous les courants et tensions dans le schéma du convertisseur, il est suffisant de connaître une tension composée entre n'importe quelle paire de phases, et une impédance de phase du système d'alimentation.

Si nous supposons que le système d'alimentation présente une dissymétrie quelconque, les processus changent leurs périodes de répétition. Au lieu de 60° cette période devient égale à 180° , pendant cette période-ci, ont lieu 3 intervalles de commutation (3 thyristors en conduction simultanée) et 3 intervalles dit entre commutations (2 thyristors en conduction simultanée).

Dans le cas de non symétrie générale, la durée de ces 6 intervalles sont différentes. Il en découle de ceci, que pour déterminer tous les courants et tensions dans le schéma, il n'est pas suffisant de connaître une seule tension composée et une impédance par phase.

Une connaissance des 3 tensions composées ($U_{AB,BC,CA}$) ainsi que les impédances des paires de phases ($Z_{AB,BC,CA}$) seront indispensables. Ces tensions et impédances seront appelées paramètres de commutation, et caractériseront les 6 commutations sur toute la période des 360° .

2.2.- Causes de non symétrie dans le système alternatif

En général, le système triphasé alimentant l'onduleur est symétrique en régime normal. Toutefois la non symétrie peut avoir lieu dans ce système, tant en régime transitoire qu'en régime permanent.

Les causes les plus fréquentes de non symétrie, sont sans doute les courts circuits non symétriques dans le réseau alternatif. Parmi tous les courts-circuits dans les réseaux, 95 % des cas sont les courts circuits dissymétriques qui se répartissent statistiquement de la façon suivante : (voir OULIANOV S., *Processus transitoirs electro magnétiques dans les systèmes électriques*, ed. Moscou 1964).

# monophasés	65 %
# biphasés avec terre	20 %
# biphasés sans terre	10 %

Outre les courts circuits, d'autres causes peuvent créer cette non symétrie. Nous pouvons citer par exemple les coupures de phases, non ouverture de l'une des phases du disjoncteur etc...

D'autres causes de non symétrie peuvent exister en régime permanent. C'est le cas des non équilibrage des paramètres longitudinaux des équipements d'un système (transformateurs, lignes).

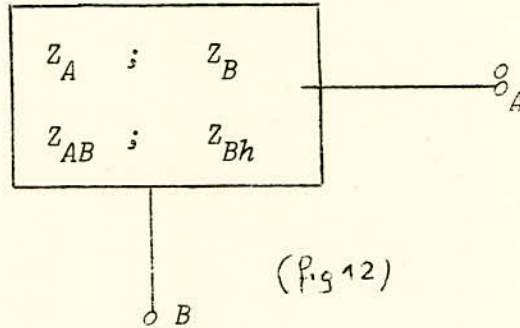
2.3.- Détermination des paramètres de commutation en cas de non symétrie dans le système d'alimentation.

La connaissance des paramètres de commutations, c'est-à-dire les tensions et impédances entre les 3 paires de phases, est indispensable pour l'étude du fonctionnement d'onduleur en régime non symétrique. En vue d'une généralisation plus complète de cette étude, il serait souhaitable d'avoir un moyen par lequel, les paramètres de commutations peuvent être déterminés quelque que soient le schéma du système, le couplage du transformateur d'alimentation, le mode et le lieu de court circuit dans le système.

Pour cela, je me suis servie des résultats établis par : (S. TRIAPAN V., *les conditions de commutation dans le convertisseur en cas de court circuit non symétrique dans le système d'alimentation*. Revue énergétique n° 4 1970 (en russe).

La méthode ainsi utilisée consiste en l'idée suivante :

n'importe quel système d'alimentation triphasé, en cas de court circuit, peut être représenté par le schéma général de la fig. 12.



où A est le lieu de branchement du convertisseur dans le système et B le lieu du court circuit. La structure interne de ce schéma est caractérisée par les paramètres suivants.

Z_A = impédance du système vue du point A

Z_B = impédance du système vue du point B

Z_{Bh} = impédance homopolaire du système vue du point B

Z_{AB} = impédance commune pour A et B

Ces paramètres peuvent être déterminés facilement si nous connaissons le schéma réel du système envisagé. Le problème consiste à déterminer les paramètres au point A (tensions composées $U_{AB,BC,CA}$) et les impédances entre phases $Z_{AB,BC,CA}$.

En admettant l'hypothèse classique pour les réseaux haute tension $r \ll X$ on se contentera de déterminer les réactances de commutation $X_{AB,BC,CA}$ à la place de $Z_{AB,BC,CA}$.

Dans le cas de non symétrie générale les paramètres de commutation peuvent être présentés sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}U_{AB} &= K_{AB} U_s \sin (\omega t + \Upsilon_{AB}) \\U_{BC} &= K_{BC} U_s \sin (\omega t - \frac{2\pi}{3} + \Upsilon_{BC}) \\U_{CA} &= K_{CA} U_s \sin (\omega t + \frac{2\pi}{3} + \Upsilon_{CA})\end{aligned}\tag{1}$$

$$X_{AB} = N_{AB} \cdot X$$

$$X_{BC} = N_{BC} \cdot X$$

$$X_{CA} = N_{CA} \cdot X$$

où U_s : valeur maximum de la tension de commutation en régime symétrique (avant court circuit).

X : impédance de commutation entre paire de phases en régime symétrique.

$K_{AB,BC,CA}$: Coefficient de changement d'amplitudes des tensions correspondantes due au court circuit.

$\Upsilon_{AB,BC,CA}$: Déphasage supplémentaire des tensions correspondantes due au court circuit.

$N_{AB,BC,CA}$: Coefficients de changement des impédances correspondantes.

Les formules permettant de déterminer tous ces coefficients pour tous les modes de courts circuits dans les réseaux et couplages des transformateurs d'alimentation sont portées sur la planche PL 1.

Toutes les formules contiennent les paramètres r, n, e représentant les rapports entre les paramètres du système X_A, X_B, X_{AB}, X_{Bh} de façon suivante :

$$r = \frac{X_{AB}}{X_B} \quad ; \quad n = \frac{X_{AB}}{X_A} \quad ; \quad e = \frac{X_{Bh}}{X_B}$$

FORMULES POUR CALCUL DES COEFFICIENTS

$K_{mn}, N_{mn}, \psi_{mn}$

PL. N°1

Mode de C.C.	Type de couplage Y/Y	Type de couplage Y/Δ
C.C. monophasé.	$K_{AB}=K_{CA} = \left(1 - 3 \frac{r}{2+e} + 3 \frac{r^2}{(2+e)^2}\right)^{1/2}; K_{BC} = 1$ $\psi_{AB} = -\psi_{CA} = \text{arctg} \frac{3r}{2(2+e)-3r}; \psi_{BC} = 0$ $N_{AB}=N_{CA} = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{r}{2+e} n; N_{BC} = 1$	$K_{AB} = K_{BC} = \left(1 - \frac{r}{2+e} + \frac{r^2}{(2+e)^2}\right)^{1/2}; K_{CA} = 1 - 2 \frac{r}{2+e}$ $\psi_{AB} = -\psi_{BC} = \text{arctg} \frac{3r}{2(2+e)-e}; \psi_{CA} = 0$ $N_{AB} = N_{BC} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{r}{2+e} n; N_{CA} = 1 - 2 \frac{r}{2+e} n$
C.C. biphasé sans Terre.	$K_{AB} = K_{CA} = \left(1 - \frac{r}{2} + \frac{r^2}{4}\right)^{1/2}; K_{BC} = 1 - r;$ $\psi_{AB} = -\psi_{CA} = -\text{arctg} \frac{3r}{4-r}; \psi_{BC} = 0$ $N_{AB} = N_{CA} = 1 - \frac{1}{4} r.n.; N_{BC} = 1 - r.n.$	$K_{AB} = K_{BC} = \left(1 - \frac{1}{2} r + \frac{3}{4} r^2\right)^{1/2}; K_{CA} = 1$ $\psi_{AB} = -\psi_{BC} = -\text{arctg} \frac{3r}{4-3r}; \psi_{CA} = 0$ $N_{AB} = N_{BC} = 1 - \frac{3}{4} r.n.; N_{CA} = 1$
C.C. biphasé + Terre.	$K_{AB} = K_{CA} = \left(1 - \frac{(2+e)r}{1+2e} + \frac{(1+e)^2 r}{(1+2e)^2}\right)^{1/2}; K_{BC} = 1 - r$ $\psi_{AB} = -\psi_{CA} = -\text{arctg} \frac{3r}{2 \frac{1+2e}{e} - \frac{2+e}{e} r}; \psi_{BC} = 0$ $N_{AB} = N_{CA} = 1 - \frac{2+e}{2(1+2e)} r.n.; N_{BC} = 1 - rn$	$K_{AB} = K_{BC} = \left(1 - \frac{2+3e}{1+2e} r + \frac{(1+3e+3e^2)}{(1+2e)^2} r^2\right)^{1/2}; K_{CA} = 1 - \frac{r}{1-2e}$ $\psi_{AB} = -\psi_{BC} = -\text{arctg} \frac{3r}{2 \frac{1+2e}{e} - \frac{2+3e}{e}}; \psi_{CA} = 0$ $N_{AB} = N_{BC} = 1 - \frac{2+3}{2(1+2)} r.n.; N_{CA} = 1 - \frac{r}{1+2e} n.$

finalement pour déterminer les paramètres de commutation d'onduleur qui est alimenté par un système de structure donnée il faut :

a) calculer les paramètres de ce système vue des points A et B - X_A, X_B, X_{AB}, X_{Bh} .

b) calculer les paramètres r, n, e .

c) selon les formules de la PL 1. pour le court circuit donné et en tenant compte du type de couplage ~~du~~ ~~type de couplage~~ du transformateur calculer les coefficients de changement des paramètres de commutations.

d) selon les formules (1) retrouver les paramètres de commutation pour le régime envisagé.

C H A P I T R E III

SIMULATION MATHÉMATIQUE D'ONDULEUR

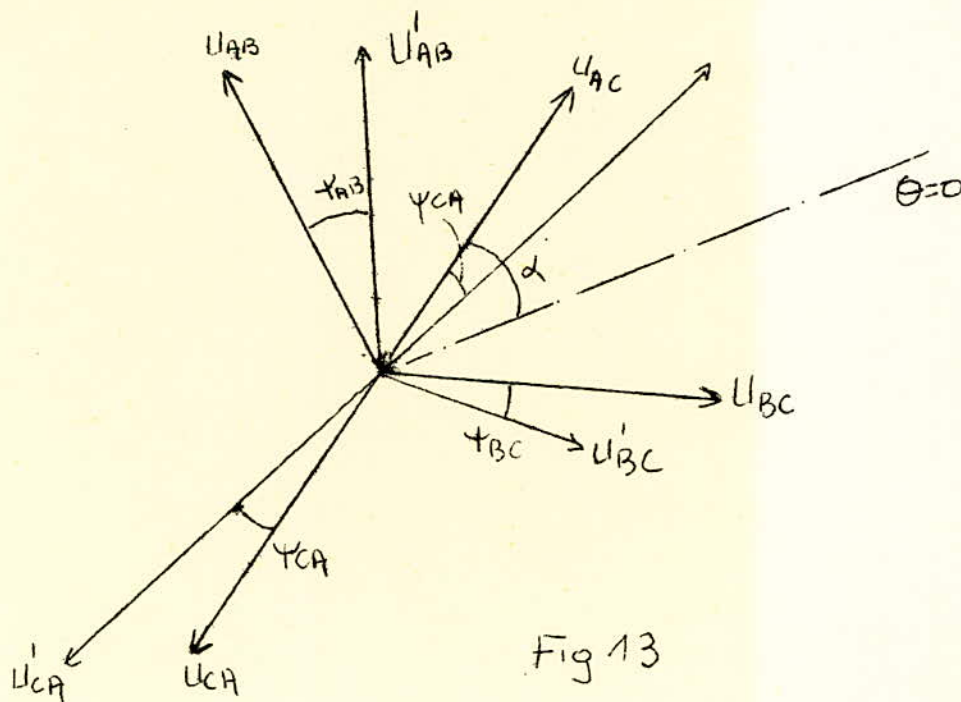
3.1.- Schéma de calcul général.

Pour la simulation d'onduleur nous avons utilisé la méthode du "processus central" exposé dans l'article de MINGORANI. (simulation d'un système de transmission HVDC sur ordinateur digital (TRANSACTION 1965).

La méthode proposée dans cet article a été modifiée et complétée pour répondre au problème qui m'a été posé.

Cette modification consiste essentiellement à tenir compte du déséquilibre complet du système d'alimentation.

Sur la planche 2 sont portées les valeurs des tensions, courant et impédance entrant dans les calculs pour chacun des 6 intervalles pendant la période des 360° .



SEQUENCES	1+6 m	2+6 m	3+6 m	4+6 m	5+6 m	6+6 m
CARACTERISTIQUES						
E1	U _A	- U _C	U _B	- U _A	U _C	- U _B
E2	U _B	- U _A	U _C	- U _B	U _A	- U _C
E3	U _C	- U _B	U _A	- U _C	U _B	- U _A
EM1	$K_{AB} U_s \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{CA}}{Y_{CA}}$	$K_{CA} U_s \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{CB}}{Y_{CB}}$	$K_{BC} U_s \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{AB}}{Y_{AB}}$	$K_{AB} U_s \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{CA}}{Y_{CA}}$	$K_{CA} U_s \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{CB}}{Y_{CB}}$	$K_{BC} U_s \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{AB}}{Y_{AB}}$
EM2	$K_{BC} U_s \sin(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{CA}}{Y_{CA}}$	$K_{AB} U_s \sin(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{CB}}{Y_{CB}}$	$K_{CA} U_s \sin(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{AB}}{Y_{AB}}$	$K_{BC} U_s \sin(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{CA}}{Y_{CA}}$	$K_{AB} U_s \sin(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{CB}}{Y_{CB}}$	$K_{CA} U_s \sin(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha + \frac{\pi}{6}) - \frac{V_{AB}}{Y_{AB}}$
EM3	-(EM1 + EM2)	-(EM1 + EM2)	-(EM1 + EM2)	-(EM1 + EM2)	-(EM1 + EM2)	-(EM1 + EM2)
i _A	i	i _D	i _D - i	-i	-i _D	-(i _D - i)
i _B	-i _D	-(i _D - i)	i	i _D	i _D - i	-i
i _C	i _D - i	-i	-i _D	-(i _D - i)	i	i _D
Z _{AB}	2R _{NAB} , 2X _{NAB}	2R _{NCA} , 2X _{NCA}	2R _{NBC} , 2X _{NBC}	2R _{NAB} , 2X _{NAB}	2R _{NCA} , 2X _{NCA}	2R _{NBC} , 2X _{NBC}
Z _{BC}	2R _{NBC} , 2X _{NBC}	2R _{NAB} , 2X _{NAB}	2R _{NCA} , 2X _{NCA}	2R _{NBC} , 2X _{NBC}	2R _{NAB} , 2X _{NAB}	2R _{NCA} , 2X _{NCA}
Z _{CA}	2R _{NCA} , 2X _{NCA}	2R _{NBC} , 2X _{NBC}	2R _{NAB} , 2X _{NAB}	2R _{NCA} , 2X _{NCA}	2R _{NBC} , 2X _{NBC}	2R _{NAB} , 2X _{NAB}

L'écriture des expressions des tensions de commutations, portées sur cette planche peuvent être expliquées à l'aide de la fig. 13 ou les systèmes de tension symétrique, $U'_{AB,BC,CA}$ et les tensions correspondantes au régime non symétrique, ainsi que l'axe de référence choisit, d'après cette fig. 13, on a comme tension par exemple pour l'intervalle 1 + 6 m :

$$em_1 = U_{AB} = K_{AB} \cdot U_s \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma_{AB} - \gamma_{CA} \right)$$

$$em_2 = U_{BC} = K_{BC} \cdot U_s \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma_{BC} - \gamma_{CA} \right)$$

Le schéma de topologie générale valable pour n'importe quel intervalle de calcul est représenté sur la fig. 14.

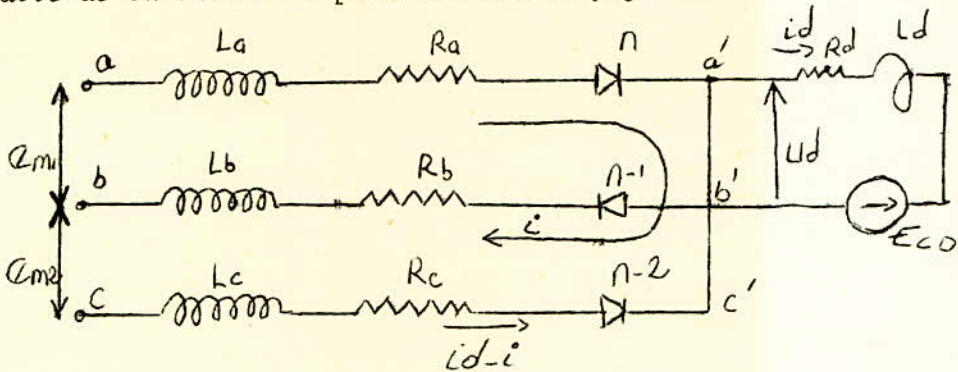


fig 14

3.2.- Mise en équation du système :

Le schéma de la fig. 14, peut être décrit par le système d'équations suivantes, de la maille aa' c'c :

$$(1) \quad e_{ac} = e_{m1} + em_2 = (Ra+Rc) i + (La + Lc) \frac{di}{dt} - RcId - Lcd \frac{d(id)}{dt}$$

de la maille aa'b'b on a :

$$em_1 = Rai + Ld \frac{di}{dt} + Rb id + Lbd \frac{d(id)}{dt} - Ud$$

en tenant compte de l'équation

$$Ud = E_{CD} - Rdid - Ldd \frac{(id)}{dt}$$

On obtient

$$(2) \quad e_{m1} = Rai + La \frac{di}{dt} + Rbid + Lbd \frac{(id)}{dt} - E_{CD} + Rdid + Ldd \frac{(id)}{dt}$$

Les équations (1) et (2) sont valables si la commutation entre les thyristors $n-2$ et n n'est pas encore terminée; c'est-à-dire $i < id$. Une fois cette commutation terminée ce courant (i) devient égale à (id) ce qui indique que le convertisseur change d'Etat.

Ce changement d'état peut être traduit par l'équation :

$$(3) \quad Id = i \text{ et } d(id) = \frac{di}{dt}$$

En introduisant dans les équations (1), (2), et (3) les coefficients de changement des paramètres de commutation dus au court circuit, nous avons :

$$Ra = Na \cdot R$$

$$Rb = Nb \cdot R$$

$$Ra + Rc = 2R \cdot Nac \text{ etc...}$$

En tenant compte de ces notations, le système d'équations s'écrira :

$$(1) \quad 2Nac \cdot L \frac{di}{dt} - Nc \cdot Ld \frac{(id)}{dt} = - 2Nac \cdot R \cdot i + NcRid + em1 + em2$$

$$(2) \quad Na \cdot L \frac{(di)}{dt} + (Nb \cdot L + Ld) \frac{d(id)}{dt} = - NaR \cdot i - (Nb \cdot R + Rd) id + em1 + e_{CD}$$

$$(3) \quad \frac{di}{dt} = \frac{did}{dt} \quad \text{et} \quad i = id$$

3.3.- Choix des équations correspondant à chaque état de conduction de l'onduleur.

Le système d'équations ci-dessus décrit le processus Electromagnétique durant l'un des 6 intervalles de temps. Pendant cet intervalle, l'onduleur peut se trouver dans ^{l'un} ou l'autre des états de conduction possibles suivants :

- a) commutation
- b) non commutation.

Pour l'état de commutation (a) ne sont valables que les équations (1) et (2) du système.

Pour l'état de non commutation des équations correspondantes sont (2) et (3).

Alors pour chaque état de conduction on forme les systèmes correspondant.

- a) état commutation

$$S_1 \Rightarrow \begin{cases} (1) \quad 2Nac.L \frac{di}{dt} - NcL \frac{did}{dt} = - 2 Nac.R.i + Nc.Rid + em1 + em2 \\ (2) \quad Na.L \frac{di}{dt} + (Nb.L+Ld) \frac{d(id)}{dt} = - Na.R.i - (Nb.R+Rd)id + em1 + e_{CD} \end{cases}$$

- b) état de non commutation

$$S_2 \Rightarrow \begin{cases} (2) \quad Na.L \frac{di}{dt} + (Nb.L+Ld) \frac{d(id)}{dt} = - Na.R.i - (Nb.R+Rd)id + em1 + e_{CD} \\ (3) \quad \frac{di}{dt} = \frac{did}{dt} \end{cases}$$

3.4.- Adaptation des systèmes en vue d'une résolution sur ordinateur.

Pour la résolution des équations différentielles, nous avons utilisés la forme matricielle de représentation de ce système.

Dans ce qui suivra nous utiliserons les notations supplémentaires suivantes :

Variables :	Courants :	Tensions :
$\frac{di}{dt} = g1$	$i = y1$	$em1 = e1$
$\frac{did}{dt} = g2$	$id = y2$	$em2 = e2$
		$eCD = e3$

Alors le système S_1 peut être représenté comme :

$$S_1 \begin{bmatrix} 2Nac.L & -Nc.L. \\ Na.L. & (Nb.L+Ld) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g1 \\ g2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2Nac.R.y1+Nc.R.y2+e_1+e_2 \\ -Na.R.y1. -(Nb.R+Rd)y2 + e_1 + e_3 \end{bmatrix}$$

et pour le système S_2

$$S_2 \Rightarrow \begin{bmatrix} Na.L & (Nb.L+Ld) \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g1 \\ g2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Na.R.y1 -(Nb.R+Rd) y2 + e_1 + e_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

A ce niveau nous avons deux possibilités :

a) soit utiliser l'ordinateur pour résoudre chaque système sous la forme actuelle c'est-à-dire :

$$[A] [g] = [B] \text{ et trouver } [g] \text{ matrice des inconnus.}$$

Soit :

b) faire une transformation au préalable de façon à ramener le système à la forme :

$$[g] = [A]^{-1} [B]$$

Cette 2ème possibilité nécessite une inversion à la main de la matrice $[A]$, qui est une matrice carrée du 2ème ordre, mais permet un raccourcissement sensible du temps de calcul. Nous avons choisi* cette 2ème possibilité.

La matrice $[A]$ du système S_1 est égale :

$$[A] = L \cdot \begin{bmatrix} 2Nac. & -Nc. \\ Na & Nb+L'd \end{bmatrix} \quad \text{ou } L'd = \frac{Ld}{L}$$

La matrice inverse :

$$[A]^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} Nb+L'd & Nc \\ -Na & 2Nac \end{bmatrix}$$

ou représente :

$$\Delta = L [2Nac (Nb+L'd) + Na.Nc]$$

Pour le système S_2

$$[A] = L \begin{bmatrix} Na & Nb+L'd \\ 1 & -1 \end{bmatrix};$$

$$[A]^{-1} = \frac{1}{\Delta'} \begin{bmatrix} 1 & Nb + L'd \\ 1 & -Na \end{bmatrix}$$

$$\Delta' = -L (2Nab + L'd)$$

Alors nous avons :

$$S_1 \Rightarrow \begin{bmatrix} g1 \\ g2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} Nb+L'd & Nc \\ -Na & 2Nac \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2Nac.R.y1+Nc.R.y2+e_1 + e_2 \\ -Na.R.y1 -(Nb-R+Rd)y2+ e_1 + e_2 \end{bmatrix}$$

$$S_2 \Rightarrow \begin{bmatrix} g1 \\ g2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} 1 & Nb+L'd \\ 1 & -Na \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Na.R.y1 - (Nb.R+Rd)y2 + e_1 + e_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Et finalement nous obtenons :

$$S_1 \Rightarrow \begin{bmatrix} g1 \\ g2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} y1 + \frac{RNc}{\Delta} (L'd-R'd) y2 + \left(\frac{2Nbc + L'd}{\Delta}\right)e_1 + \left(\frac{Nb+L'd}{\Delta}\right)e_2 + \frac{Nc}{\Delta} e_3 \\ -\frac{R}{\Delta} \left(2Nac (Nb+R'd)+Na.Nc\right) \cdot y2 + \frac{Nc}{\Delta} e_1 - \frac{Na}{\Delta} e_2 + \frac{2Nac}{\Delta} e_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{ou } R'd = \frac{Rd}{R}$$

$$S_2 \Rightarrow g1 = g2 = -\frac{RNa}{LNab} y1 - \frac{R.Nb}{LNab} y2 + \frac{1}{LNab} e_1 + \frac{1}{LNab} e_3$$

C H A P I T R E I V

EXECUTION DU PROGRAMME DE CALCUL

4.1.- Organigramme général :

L'organigramme général du calcul sur IBM 1130 est donné sur les planches (voir annexe).

La méthode consiste à résoudre à chaque intervalle de temps, le système d'équation correspondant (ξ_1 ou ξ_2) avec un choix selon l'état de conduction de l'onduleur.

Les paramètres d'entrée (em_1 , em_2 , les impédances des phases) sont choisis selon le numéro d'intervalle.

On exécute le contrôle d'amorçage du thyristor suivant en vue de capter la fin de validité des paramètres de l'intervalle en question.

A chaque pas, le test de stabilité interviendra pour vérifier si l'onduleur reste ou non en stabilité.

A un instant donné, le court circuit intervient puis cesse.

Le test fin de calcul nous arrêtera le programme; cependant un arrêt anticipé peut avoir lieu si l'onduleur perd la stabilité malgré l'intervention de la protection.

4.2.- Organisation des différents blocs de l'organigramme de calcul.

4.2.1.- Bloc "choix des tensions et impédances"

L'organisation de ce bloc figure dans l'annexe 1.

Selon le tableau de la page 17 bis, à chaque intervalle de temps (1+6 m à 6 + 6 m) durant la période des 360°, Les tensions appliquées (em1, em2) au schéma général, fig. 14 - p. 18, ainsi que les impédances de phases ($Z_{AB, BC, CA}$) doivent être en principe différentes.

Cependant, on remarquera que les paramètres cités ci-dessus se répètent tout les 3 intervalles.

Par exemple : pour l'intervalle 1 + 6 m ces paramètres sont :

$$EM1 = U_{AB}$$

$$EM2 = U_{BC}$$

Les mêmes grandeurs seront valables pour l'intervalle 1+ 6 m ceci nous permet de faire le choix des tensions et impédances de la façon suivante.

A la première séquence de calcul nous attribuons au compteur d'intervalles (N) la valeur entière $N = 1$; à chaque nouvel intervalle nous incrémentons le compteur par l'opération suivante $N = N + 1$ en gardant toujours N dans les limites $1 \leq N \leq 6$ en faisant l'opération en valeur entière de N.

$$N = N - \left(\frac{N - 1}{6} \right) \neq 6$$

Le choix des tensions et impédances s'opère par l'ordre "GO TO" selon la valeur de N.

4.2.2.- Bloc "choix des équations d'état de l'onduleur (annexe 1)

A chaque instant, l'onduleur peut se trouver dans l'un ou l'autre des états de conduction :

a) soit deux thyristors conduisent (pas de commutation)

b) soit trois thyristors conduisent (commutation a lieu)

Le critère sur lequel nous nous sommes basé pour faire un tel choix consiste en une comparaison entre les courants de commutation i_1 et redressé i_d .

Si le courant i_1 est inférieur à i_d , nous nous retrouvons dans le cas (b)

Si nous avons égalité des courants $i_1 = i_d$, c'est-à-dire que la commutation est terminée, nous nous retrouvons dans l'état (a).

L'organigramme de ce bloc est présente (annexe 1).

Le test d'entrée de ce bloc ($i_1 - i_d$) fait la sélection des états (a) et (b) décrits plus haut.

Une fois l'état choisi et les équations correspondantes formées, les tests L_1 ou L_2 interviendront afin d'éviter une répétition inutile de la formation de ces mêmes équations pendant la durée de l'état de conduction donné. Ceci se faisant par un saut vers la suite du programme (3.1) sans passer par les sous bloc "coefficients des équations".

Les coefficients BF11 à BF25 représentent les facteurs multiplicatifs des variables (y_1, y_2, e_1, e_2, e_3) dans les systèmes finaux à résoudre S_1, S_2 (p. 23).

1

4.2.3.- Bloc "Test de stabilité"

L'organisation du détail de ce bloc figure en (annexe 1)

Selon l'explication du phénomène de "perte de stabilité" voir (pages 9 et 10), le contrôle de la stabilité d'onduleur consiste à vérifier une fois chaque commutation terminée; la valeur réelle de l'angle de rétablissement (δ).

Rappelons que la valeur critique de δ (permettant de garder l'onduleur dans les limites de la stabilité est égale à 15° GROIS.E., POESSE.A., Développement historique du transport HVDC, Revue : Transport d'énergie par courant continu et alternatif n° 16. 1970 (en Russe).

Pour faire ce test, une mesure d'angle δ [intervalle de temps entre la fin de commutation et le passage de la tension par zéro sur le Thyristor sortant; selon la fig. 11 $\delta = (\Theta_3 - \Theta_2)$] s'impose de même; sur cette fig, il apparait que le début de chaque intervalle de calcul, coïncide avec Θ_1 . début de la commutation.

Le moment de passage de U_5 (tension sur le thyristor sortant de travail) coïncide avec Θ_3 distant de Θ_1 d'un angle $\beta = 180^\circ - \alpha$

Le contrôle de la tension sur le thyristor sortant se fait par le test $\Theta_T \geq 0$ qui exécute l'opération $(\omega t - \pi + \alpha \frac{3,14}{180}) \geq 0$ le résultat de ce test sera affirmatif une fois que la tension devient positive, et négatif si la tension demeure inférieure à zéro. Dans ce dernier cas le test de stabilité n'est pas exécuté et on aboutit vers la suite du programme (121) par une déviation.

A l'instant Θ_3 (réponse affirmative du test précédent) on exécute le test $(i_1 - id) < 0$ afin de vérifier si le commutation est ~~vérifiée~~ terminée, ou pas.

Si elle n'est pas terminée (oui 122) il est évident qu'il y a un raté de commutation car le thyristor sortant restera en conduction. Dans ce cas là, il y a arrêt immédiat d'exécution du programme. L'impression de l'étiquette "perte de stabilité" nous situera ce cas.

Si le test $(i_1 - id)$ est positif (réponse négative (128) la commutation précédente est terminée avant Θ_3 . Il ne reste qu'à vérifier la valeur réelle de ζ en comparaison avec $\zeta_0 = 15^\circ$.

Cette opération est faite par le test $\zeta \leq 15^\circ$. Si cette valeur est suffisante ($\zeta = 15^\circ$ au moins) l'onduleur reste en stabilité et selon l'organigramme la suite du programme à lieu (121) par voie (129)

Si ζ se rapproche de la valeur critique (réponse ^{oui du} ~~onduleur~~ Test) le programme simule l'intervention de protection de l'onduleur par une incrémentation échelonnée d'angle $\alpha = 5^\circ$. Cette protection permet l'augmentation si nécessaire de l'angle ζ afin de garder l'onduleur en fonctionnement.

On notera cependant que le test $L_y = 1$ assure l'exécution de ce bloc une fois pour chaque commutation.

4.2.4.- Bloc "Amorçage du thyristor suivant (annexe 1)

Chacune des 6 séquences de calcul pendant la période des 360° dure en régime symétrique 60° . Etant donné que chaque séquence commence avec l'allumage du thyristor suivant il suffit de faire le test $\omega t = \pi/3$ pour avoir le début de la séquence suivante.

Dans le cas de non symétrie générale, que nous avons à étudier le phénomène est différent selon le (fig. 13 - p. 17) entre les passages par zéro des tensions, par exemple, U_{AC} et U_{BC} (et respectivement, entre les débuts de commutation correspondantes) nous avons l'intervalle de temps

$$\omega t = \frac{\pi}{3} + \tau_{BC} + \tau_{CA} = \frac{\pi}{3} - 2\tau_{BC} - \tau_{AB}$$

pour le schéma de topologie générale on a donc le test de fin d'intervalle de calcul sous forme $\omega t - \pi/3 + 2 \rho_2 + \rho_1 \geq 0$ ou ρ_1 et ρ_2 représentent les angles de déphasage supplémentaires des tensions d'entrée e_{m_1} , e_{m_2} dans le cas de la non symétrie; si ce test est > 0 on fait l'incréméntation de N et rétablissement des conditions initiales ($i_1=0$)

4.2.5.- Bloc "Sortie des résultats"

Le choix des courants de phase à imprimer est exécuté par un GO TO, en fonction du rang de l'intervalle N d'après les formules de I_A , I_B , I_C présentée dans le tableau des séquences.

La valeur de la tension aux bornes de l'onduleur Ud est donnée par la relation :

$$U_d = E_{m_1} \sin(\omega t + \pi/3 + 2 \rho_1 + \rho_2 + \alpha) - L N_A \frac{di}{dt} - L N_b \frac{did}{dt} -$$

- R N a . i - R N b i d valable pour tout les intervalles.

Le test M = IMP fait le choix du pas d'impression.

4.2.6.- Bloc "Introduction du court circuit" (annexe 1)

Le programme commence par la simulation du régime normal (symétrique). A l'instant donné (TCC1) le court circuit intervient par le simple test (" - TCC1) le sous bloc "changement de paramètres" contient les coefficients de changement des paramètres de commutation (K, N, Y) correspondant au court circuit envisagé.

Le test $L_3 = 1$ permet l'exécution de ces paramètres une seule fois pendant le déroulement du programme.

4.2.7.- Bloc "Retablissement du régime normal: (annexe 1)

Le rétablissement du régime normal est exécuté par la réintroduction des paramètres de commutation correspondant au régime symétrique ($K = 1$; $N = 1$; $\Psi = 0$) ceci étant fait à l'aide du test $T = TCC_2$ à l'instant choisi TCC_2 .

Le test L_5 permet un raccourcissement du temps de calcul total en évitant des répétitions inutiles de cette opération après le temps TCC_2 .

4.2.8.- Le programme en FORTRAN :

Selon l'organigramme décrit plus haut nous avons établi le programme de calcul sur ordinateur IBM 1130.

Ce programme ^{est} traduit en FORTRAN IV. Ainsi que les notations utilisées sont présentées en Annexe 1.

CHAPITRE V

APPLICATION

5.1.- Exemple d'étude :

A l'aide du programme de calcul établi, nous avons étudié les processus électromagnétiques et le problème de stabilité d'onduleur non autonome en cas de court circuit non symétrique dans le réseau alternatif.

Le schéma d'installation étudié figure sur la planche N°2.

L'onduleur triphasé monté en pont est alimenté par le système alternatif à travers le transformateur d'onduleur. Le jeu de barres primaires alimente aussi une ligne de 110 kv sur laquelle le court circuit peut se produire.

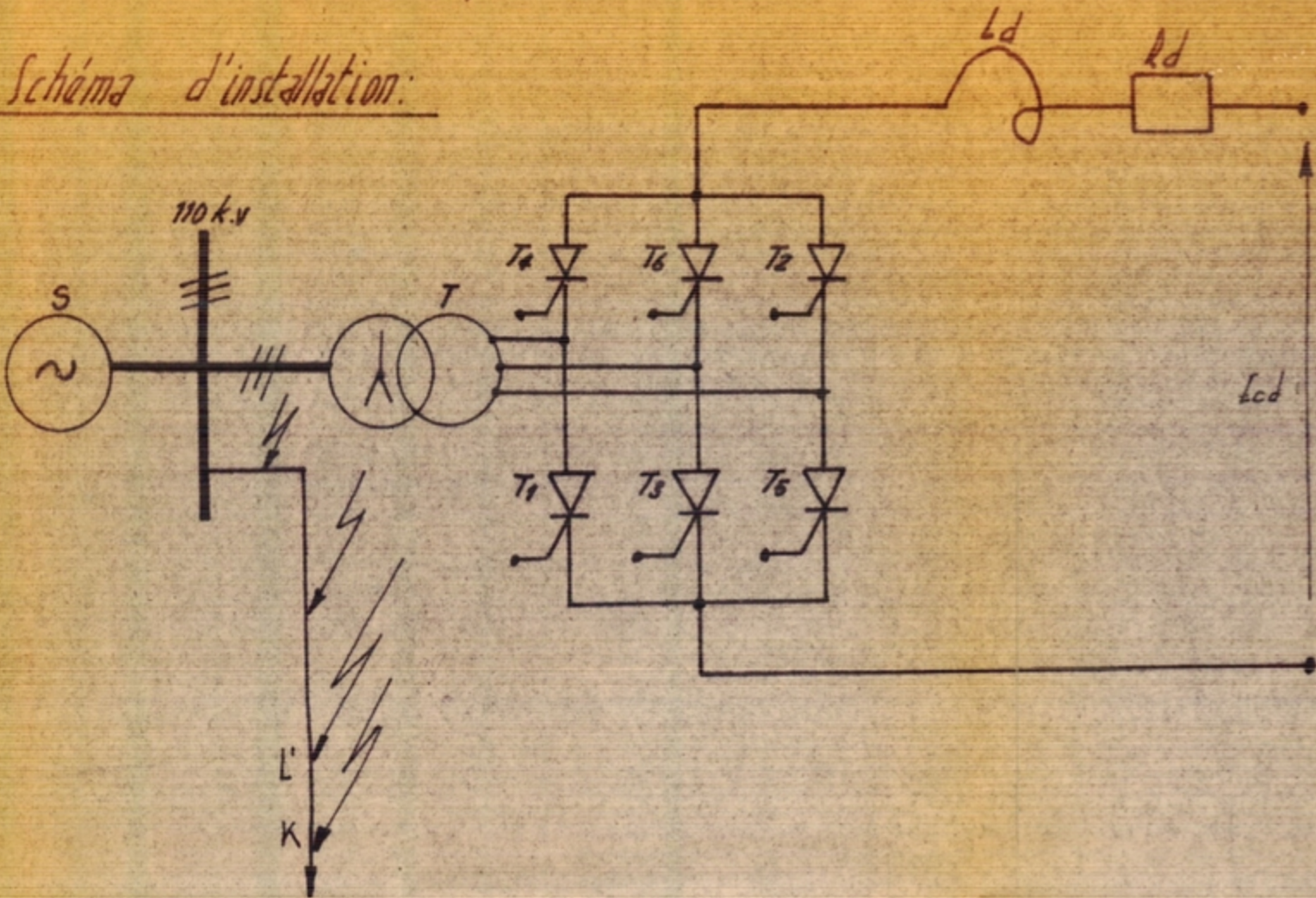
Les caractéristiques des équipements de l'installation sont données sur le tableau de la même planche.

~~étude de~~ déroulement du processus électromagnétique de l'onduleur en cas de court circuit ^{est} influencé par les facteurs suivants :

- 1°/ Mode ^{de} court circuit (monophasé, biphasé, triphasé avec terre).
- 2°/ Couplage du transformateur d'onduleur (Y/Y; Y/ Δ).
- 3°/ lieu du court circuit (0 1; 3; 7; 10 km des jeux de barres).

Exemple d'étude

Schéma d'installation:



CARACTERISTIQUES

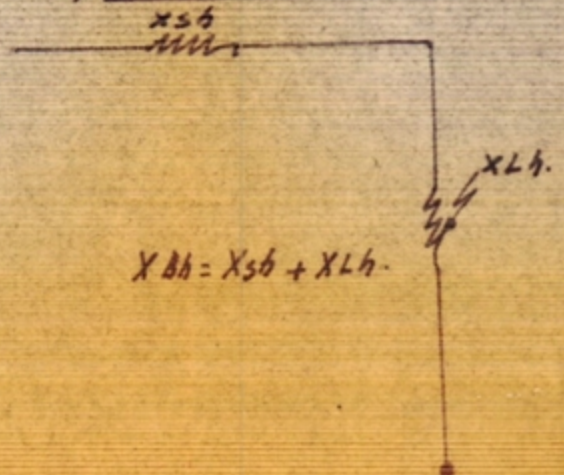
LIGNE ~ (L)	TRANSFORMATEUR (T)	SYSTEME (S)	CONVERTISSEUR.
110 Kv avec fil de garde $X_h = 3,5 X_d$ $X_0 = 0,45 \Omega / km.$	$S = 120 MVA$ $U_2 = 110 / 94 Kv.$ $U_{cc} = 15 \%$	$S_{cc} = 5000 MVA$ $X_h = 3 X_d$	$I_d = 100 MW$ $U_d = 100 Kv.$

SCHEMA DE CALCUL:

a) COMPOSANTES DIRECTES



B) COMPOSANTES HOMOPOLAIRES



Notre but sera donc d'étudier l'influence de chacun de ces facteurs. Pour cela il est indispensable de connaître les tensions et impédances d'entrée d'onduleur en régime symétrique ainsi que les coefficients de changement des paramètres de commutation pour chaque cas envisagé.

Nous noterons que les paramètres choisis pour l'exemple d'étude se rapproche de ceux de la transmission HVDC ITALIE-SARDAIGNE.

5.2.- Détermination des paramètres de commutations :

Pour déterminer ces paramètres nous avons établi les schémas de calcul des composantes directe et homopolaire pour le schéma initial.

Ces schémas sont présentés au bas de la planche 2

Les valeurs n , r , e représentant les rapports entre les différentes impédances du schéma de calcul sont données sur le tableau de la PL. 4. Ces valeurs sont données pour quatres distances de court circuit (0,1 - 3 - 7 - 10 km) du jeu de Barres primaires.

Selon les formules (planche n° 1) Les paramètres de changements de commutation K , N , γ ont été calculés pour tous les 3 modes de court circuits et deux différents types de couplage du transformateur d'onduleur.

Ces valeurs numériques sont données sur le tableau ci-joint et ont servi de données d'introduction du court circuit dans le programme.

VALEURS NUMERIQUES DES PARAMETRES

n, r, e, pour le cas étudié

PL. N° 4

Lieu de court circuit	$n = \frac{X_{AB}}{X_A}$	$r = \frac{X_{AB}}{X_B}$	$e = \frac{X_{Bh}}{X_B}$	$X_{Bh} = X_{1h} + X_{3h}$
10 km	3,137	0,376	3,5	22,47
7 km	0,137	0,463	3,5	18,27
3 km	0,137	0,668	3,5	12,67
0,1km	0,137	0,983	3,5	8,67

Légende :

X_A = impédance vue de A.

X_B = impédance vue de B.

X_{AB} = " commune

X_{Bh} = " homopolaire vue de B.

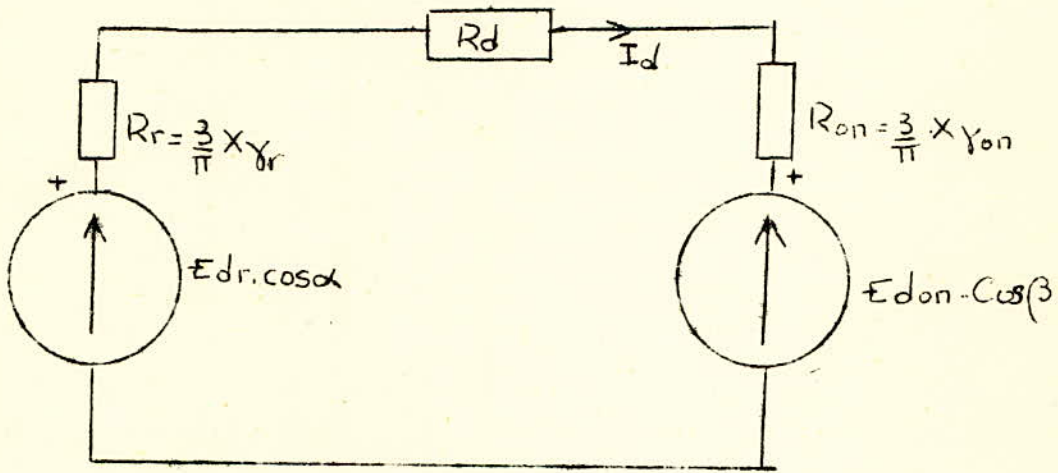
VALEURS NUMERIQUES DES COEFFICIENTS K, N, Ψ
POUR LE CAS ETUDIE

MODE DE C.C	LIEU DU C.C	TYPE DE COUPLAGE Y/Y									TYPE DE COUPLAGE Y/Δ								
		K			N			Ψ			K			N			Ψ		
		DEAB	DEBC	DECA	ANAB	ANBC	ANCA	DFAB	DFBC	DFCA	DEAB	DEBC	DECA	ANAB	ANBC	ANCA	DFAB	DFBC	DFCA
COURT. CIRCUIT MONO.	10	0,889	1,0	0,889	0,986	1	0,986	3°46'	0	3°46'	0,967	0,967	0,864	0,996	0,996	0,981	3°30'	3°30'	0
	7	0,876	1,0	0,876	0,982	1	0,982	4°45'	0	4°46'	0,960	0,960	0,832	0,995	0,995	0,976	4°25'	4°25'	0
	3	0,824	1,0	0,824	0,975	1	0,975	7°20'	0	7°20'	0,945	0,945	0,750	0,992	0,992	0,966	6°20'	6°20'	0
	0,1	0,748	1,0	0,748	0,963	1	0,963	11°56'	0	11°56'	0,923	0,923	0,644	0,989	0,989	0,951	9°36'	9°36'	0
COURT. CIRCUIT BY PHA. S.T	10	0,920	0,624	0,920	0,988	0,949	0,988	10°10'	0	10°10'	0,736	0,736	1,0	0,961	0,961	1	12°36'	12°36'	0
	7	0,906	0,537	0,906	0,985	0,937	0,985	12°46'	0	12°46'	0,682	0,682	1,0	0,952	0,952	1	17°9'	17°9'	0
	3	0,881	0,332	0,881	0,978	0,909	0,978	19°6'	0	19°6'	0,576	0,576	1,0	0,931	0,931	1	35°51'	35°51'	0
	0,1	0,869	0,017	0,869	0,967	0,866	0,967	29°32'	0	29°32'	0,500	0,500	1,0	0,898	0,898	1	58°4'	58°4'	0
COURT. CIRCUIT BY PHA. + T	10	0,882	0,624	0,882	0,983	0,949	0,983	9°16'	0	9°16'	0,720	0,720	0,953	0,959	0,959	0,993	11°33'	11°33'	0
	7	0,858	0,537	0,858	0,979	0,937	0,979	11°46'	0	11°46'	0,662	0,662	0,942	0,950	0,950	0,992	15°20'	15°20'	0
	3	0,811	0,332	0,811	0,970	0,909	0,970	18°10'	0	18°10'	0,540	0,540	0,916	0,928	0,928	0,988	27°54'	27°54'	0
	0,1	0,759	0,017	0,759	0,955	0,866	0,955	29°23'	0	29°23'	0,438	0,438	0,877	0,894	0,894	0,983	58°6'	58°6'	0

5.3.- Calcul préliminaire du régime permanent :

Ce calcul permet une approche de la valeur du courant redressé en régime établi symétrique afin de l'utiliser comme donnée d'entrée du programme. Le même but pouvait être atteint par des passages de programme sur ordinateur à partir de la valeur de démarrage $I_d = 0$ jusqu'au régime permanent, ce qui exige un temps de calcul relativement long.

Cette valeur approchée du courant redressé I_d relatif au régime permanent a été calculé à partir du schéma suivant :



Dans ce schéma nous avons :

$$E_{dr} = \frac{3}{\pi} U_{sr}$$

$$E_{don} = \frac{3}{\pi} U_{son}$$

U_{sr} = Valeur maximale de la tension composée appliquée au redresseur.

U_{son} = Valeur maximale de la tension composée appliquée à l'onduleur.

R_r, R_{on} = résistances équivalentes respectivement du redresseur et d'onduleur.

α, β = angle d'amorçage des convertisseurs

$X_{\gamma r}$ et $X_{\gamma on}$ = réactance d'une phase du système d'alimentation respectivement pour redresseur et onduleur.

De ce schéma en découle la formule approximative suivante :

$$a) \quad I_d = \frac{E_{dr} \cdot \cos \alpha - E_{don} \cdot \cos \beta}{R_d + \frac{3}{\pi} X_{\gamma r} + \frac{3}{\pi} X_{\gamma on}}$$

Dans le cas de notre étude nous avons remplacé le redresseur par une f.e.m. constante E_{CD} , donc le terme $R_r = \frac{3}{\pi} X_{\gamma r}$ disparaît et l'équation (a) peut s'écrire de la façon suivante :

$$I_d = \frac{E_{cd} - E_{don} \cos \beta}{R_d + \frac{3}{\pi} X_{\gamma on}}$$

En choisissant $E_{cd} = 115 \text{ kv}$ avec $\beta = 35^\circ$

$$\text{On obtient } I_d = \frac{115 - \frac{3}{\pi} \cdot 133 \cos 35}{5 + 17,6}$$

$$I_d \approx 0,5 \text{ kA}$$

Nous avons retenue cette valeur, comme courant permanent du régime symétrique.

5.4.- Analyse des résultats obtenus :

Sur les planches de l'annexe 2 sont présentées les courbes illustrant le déroulement du processus électromagnétique dans l'onduleur pour les différents cas de court-circuits dans le réseau de réception. Ces courbes représentent partiellement les résultats d'étude effectuée.

Tous les cas de défauts pour les 4 distances choisies et les différents modes de couplages ont été étudiés à l'aide du programme élaboré dans ce travail. Néanmoins nous n'avons gardé que certaines courbes ayant les allures les plus intéressantes. Dans l'annexe 2 sont présentées les courbes pour les cas suivants :

1/ C.C. monophasé;	distance $l = 10$ km;	couplage	Y/Y
2/ C.C. "	" $l = 7$ km;	"	Y/Y
3/ C.C. "	" $l = 3$ km;	"	Y/Y
4/ C.C. "	" $l = 0,1$ km;	"	Y/Y
5/ C.C. "	" $l = 7$ km;	"	Y/ Δ
6/ C.C. biphasé ;	" $l = 7$ km;	"	Y/Y
7/ C.C. biphasé avec terre "	$l = 7$ km;	"	Y/Y
8/ C.C. biphasé sans terre "	$l = 7$ km;	"	Y/ Δ
9/ C.C. biphasé avec terre "	$l = 7$ km;	"	Y/ Δ

Alors nous pourrions étudier l'influence des distances de court circuit pour le même mode de court circuit et couplage du transformateur d'onduleur (courbes 1 à 4) ainsi que l'influence du mode de court circuit et du type de couplage pour une même distance de défaut (courbes 5 à 9).

Sur chaque planche nous avons représenté les courbes de la tension aux bornes de l'onduleur et du courant redressé d'une part, et d'autre part les courbes des courants de phases du transformateur d'alimentation.

Chaque planche contient aussi les diagrammes vectoriels des tensions de commutation du régime symétrique (étoile régulière en traits fins) et du régime de court-circuit (étoile déséquilibrée en traits gras).

Aussi nous avons porté les grandeurs relatives (échelle) des impédances de commutation pour les régimes symétriques et non symétriques, pour la construction de ces 2 derniers diagrammes, nous avons utilisé les valeurs des coefficients de changement des paramètres de commutation présentés sur la PL1 .

Pour des commodités d'exploitation de ces courbes nous avons choisi les mêmes instants d'intervention du court circuit, à $(T = 0,0081 \text{ s})$ et du rétablissement du régime symétrique à $(T = 0,0530 \text{ s})$.


L'analyse des courbes (1 à 4) montre que, pour le cas des défauts monophasés couplage Y/Y les conséquences s'aggravent au fur et à mesure que le court circuit est plus proche du jeu de barres primaires. Le défaut le moins dangereux est celui distant de 10 km du convertisseur.

Dans ce cas le court circuit provoque une augmentation assez lente du courant redressé I_d .

L'augmentation du courant I_d nécessite une augmentation de l'angle de commutation (γ) et évidemment une diminution de l'angle de rétablissement (δ). La protection ainsi simulée contrôle cette variation de (δ) et une fois l'angle de rétablissement s'approche de sa valeur critique (15°) cette protection augmente automatiquement l'angle d'avance (β) (ou diminue l'angle α ($\alpha = 180 - \beta$)) au fur et à mesure que le courant redressé augmente la protection peut intervenir plusieurs fois et cela jusqu'à $(T = 0,0530 \text{ s})$ quand le court-circuit disparaît et le régime symétrique se rétablit.

On constate que plus le défaut approche le convertisseur, le nombre d'interventions de la protection (exécuté par échelon $\Delta\beta = 5^\circ$), nécessaire pour garder l'onduleur en fonctionnement, augmente aussi.

Ainsi pour $L = 10$ km nous avons 2 interventions de la protection ($T \approx 0,02$; $\alpha = 135^\circ$ et $T \approx 0,05$ s; $\alpha = 130^\circ$) pour $L = 7$ km nous en avons 3 (l'angle d'allumage final est $\alpha = 125^\circ$), pour $L = 3$ km il y a 4 interventions (l'allumage final $\alpha = 120^\circ$).

On s'aperçoit que pour les court circuits très proches ($L=0,1$ km; courbe 4)  l'intervention de la protection ne permet pas de garder l'onduleur en marche. Et cela à cause de la pente très grande du courant (I_d). Dans ce cas là, nous avons perte de stabilité de l'onduleur à $T = 0,0139$ s.

L'analyse des courbes 6 à 9 montre que les court circuits biphasés sont beaucoup plus dangereux que les défauts monophasés et cela quelque soit le type de couplage du transformateur d'onduleur.

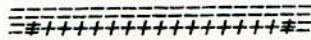
Ainsi pour le court circuit monophasé quelque soit le type de couplage pour la même distance $L = 7$ km l'onduleur peut rester en stabilité.

Au contraire pour cette même distance $L = 7$ km les courts circuits biphasés avec ou sans terre mènent toujours à la perte de stabilité.

Toutefois, on notera la différence suivante entre les déroulements des processus pour les différents modes de couplages en cas de défaut biphasé.

Pour le couplage Y/Δ les courts circuits biphasés avec terre ~~est~~ ^{sont} beaucoup plus dangereux que le biphasé sans terre tandis que pour le couplage Y/Y ces deux modes de court circuit sont presque identiques.

C O N C L U S I O N



Les besoins actuels en énergie électrique nécessitent le perfectionnement des moyens de production et de transport. L'étude des convertisseurs statiques occupent une place importante dans l'industrie électro énergétique.

Nous avons contribué à ces études en proposant un modèle mathématique d'onduleur triphasé non autonome et le programme de calcul des processus électromagnétiques dans cet onduleur sur ordinateur digital.

La méthode proposée est assez générale, vue qu'elle permet d'étudier le fonctionnement d'onduleur tant en cas de symétrie qu'en cas de n'importe quelle non symétrie dans le réseau alternatif.

La méthode est aussi valable pour l'étude des régimes transitoires dues à l'apparence de court circuit dans le système complexe d'alimentation.

Cette méthode présente selon nous de nombreux intérêts parmi lesquels :

- # facilité d'adaptation au problème posé;
- # précision suffisante pour un temps de calcul réduit.
(5 mn environ pour une période de fréquence 50 Hz).
- # le programme élaboré peut être réalisé sur ordinateur relativement modeste.

L'application de ce programme a été fait pour l'étude de stabilité d'onduleur pour les différents cas de court circuit dans le réseau.

.../...

Cela nous a permis de classer des modes de court circuits selon la gravité des conséquences qu'ils peuvent engendrer, d'analyser l'influence des distances de court circuit et du mode de couplage du transformateur d'onduleur et aussi de faire certaines remarques sur les exigences auxquelles doivent répondre les systèmes de contrôle et de protection du convertisseur.

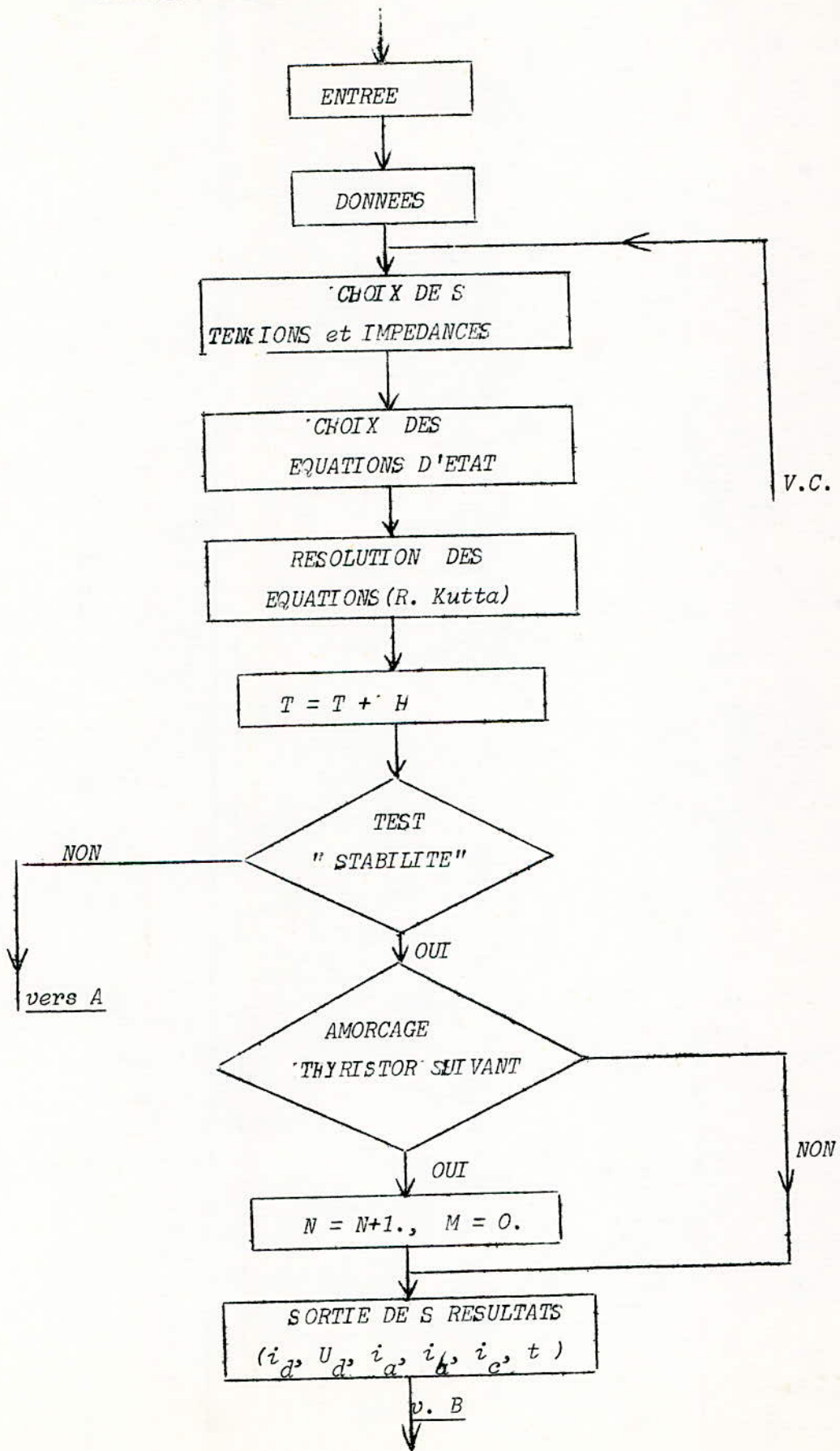
L'utilisation plus large du même programme permettra d'éclaircir beaucoup de phénomènes assez complexe et donner des recommandations nécessaires pour assurer un fonctionnement stable d'onduleur en cas de perturbation quelconque.

--- BIBLIOGRAPHIE ---

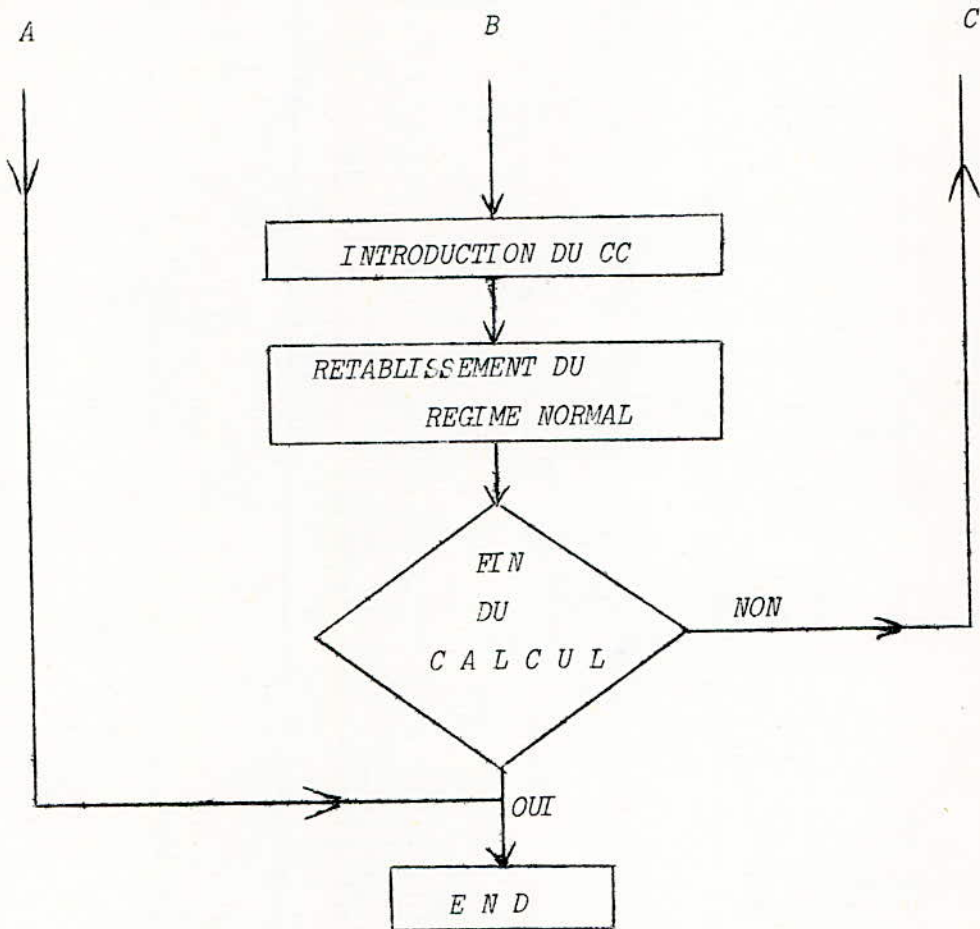
- 1- *ETRIAPAN.V.* - Conditions de commutation dans le convertisseur en cas de cc non symétrique dans le système d'alimentation .
Revue énergétique n°4 1970 (en Russe)
- 2- *ETRIAPAN.V.* - Etude des processus électromagnétiques dans le convertisseur 3 Ph en cas de non symétrie générale.
(Thèse de 3^{ème} Cycle 1970)
- 3-*OULIANOV.S.* - Processus Transitoirs électromagnétique dans le système électriques (Ed.Moscou 1964)
- 4-*PRIGENT. Et LADE.J.* : Les principes de fonctionnement des transports d'énergie en courant continu à haute tension
RGE. N°5 - 11960.
- 5-*GROIS. et POËËE.* Développement historique du transport' E.V.DC Revue Transport d'énergie par courant continu et alternatif N°16 , 1970 (Russe)
- 6- *IINGORANI -* Simulation du transport' E.V.DC sur calculateur digital transaction 1965.
- 7 - *POËËE A.* Le transport d'énergie' E.VDC ("Le schéma et les régimes de fonctionnement" ed. Moscou 1972(en Russe)
- 8- *RAJAGOPALAN V.* (Cours machines statiques et redresseur ENPA 1972).
- 9- *KAGANON I.* Electronique industrielle éd. Moscou 1962
- 10- Rapport de session de travail 1972
- 11- *DREFUS* FORTRAN IV

A N N E X E I

ORGANIGRAMME DE CALCUL

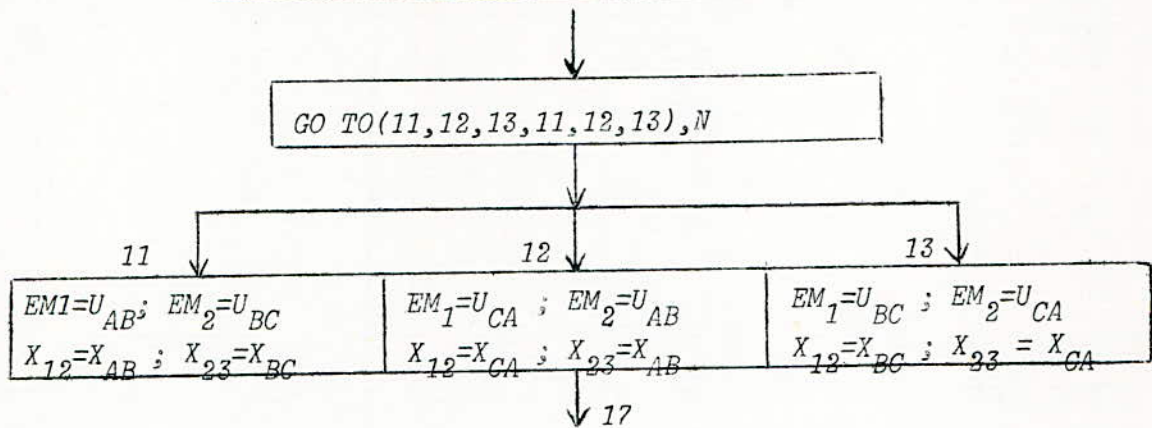


(SUITE)

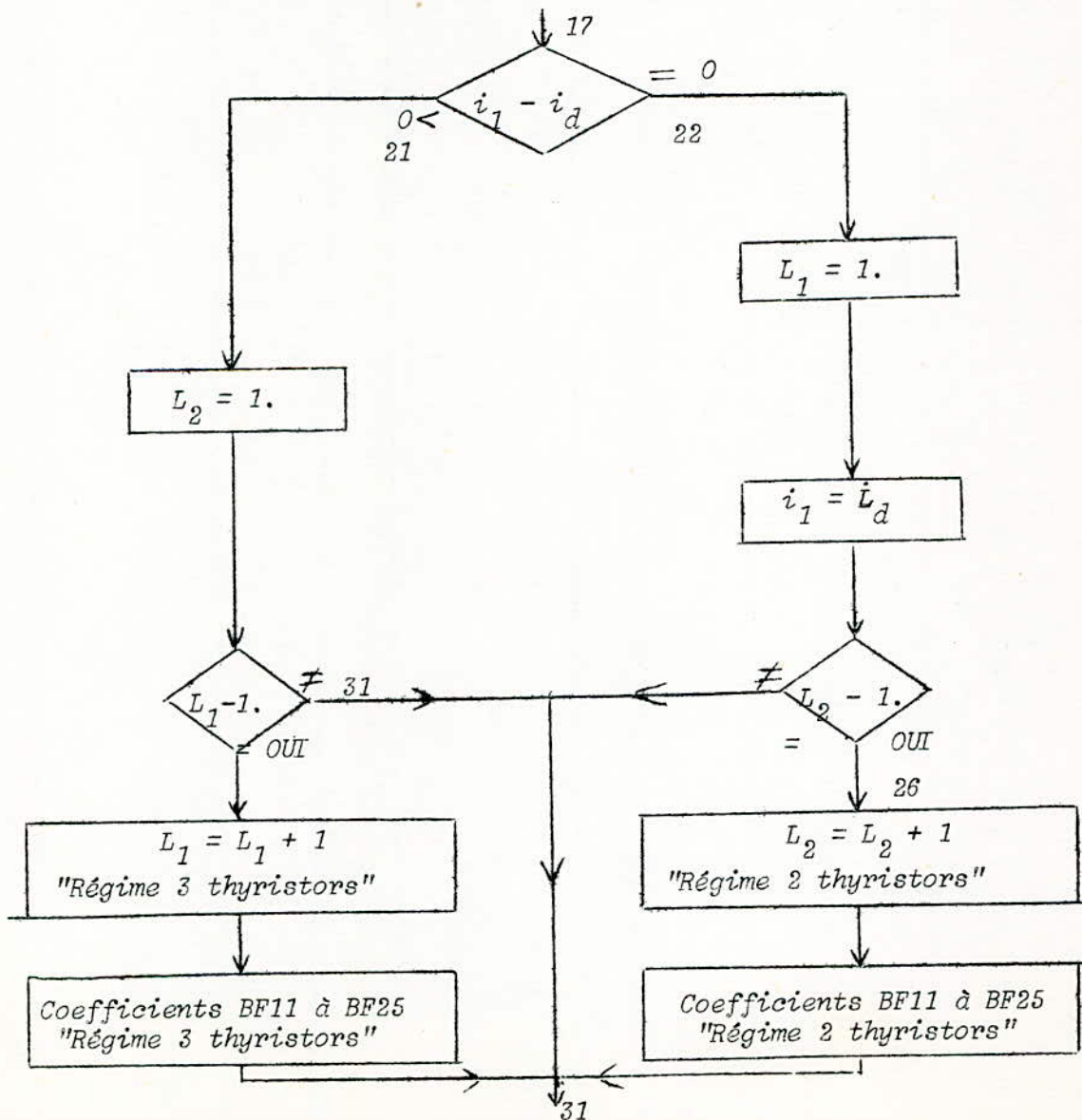


DETAI LS DES DIFFERENTS BLOCS
DE L'ORGANIGRAMME

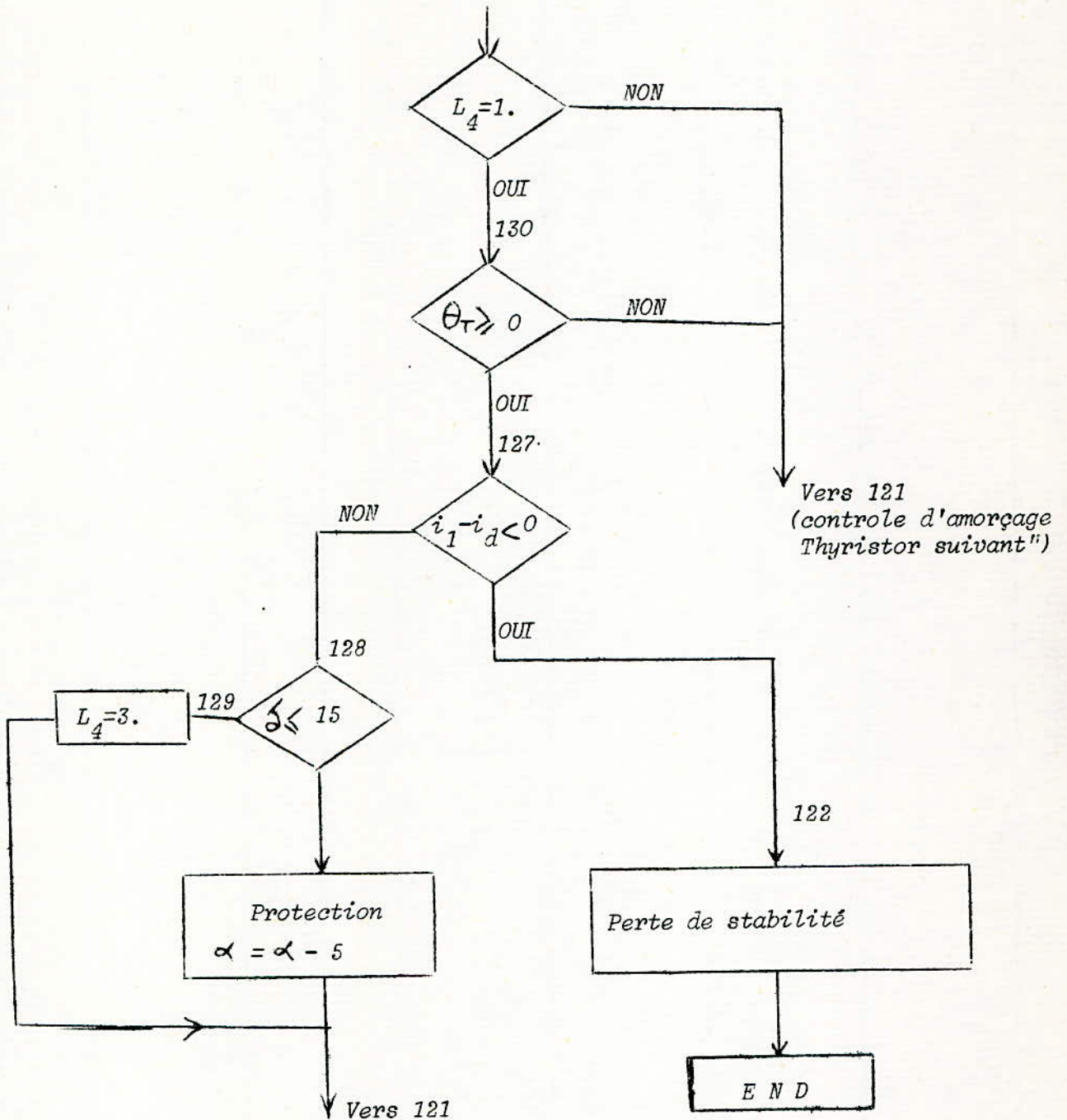
1) BLOC. "CHOIX DES TENSIONS ET IMPEDANCES"



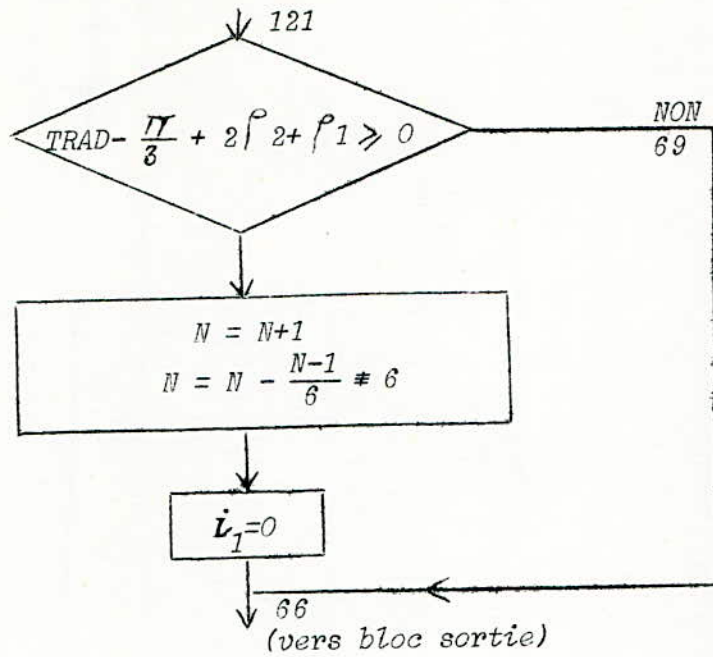
2) BLOC "CHOIX DE S EQUATIONS D'ETAT DE L'ONDULEUR"



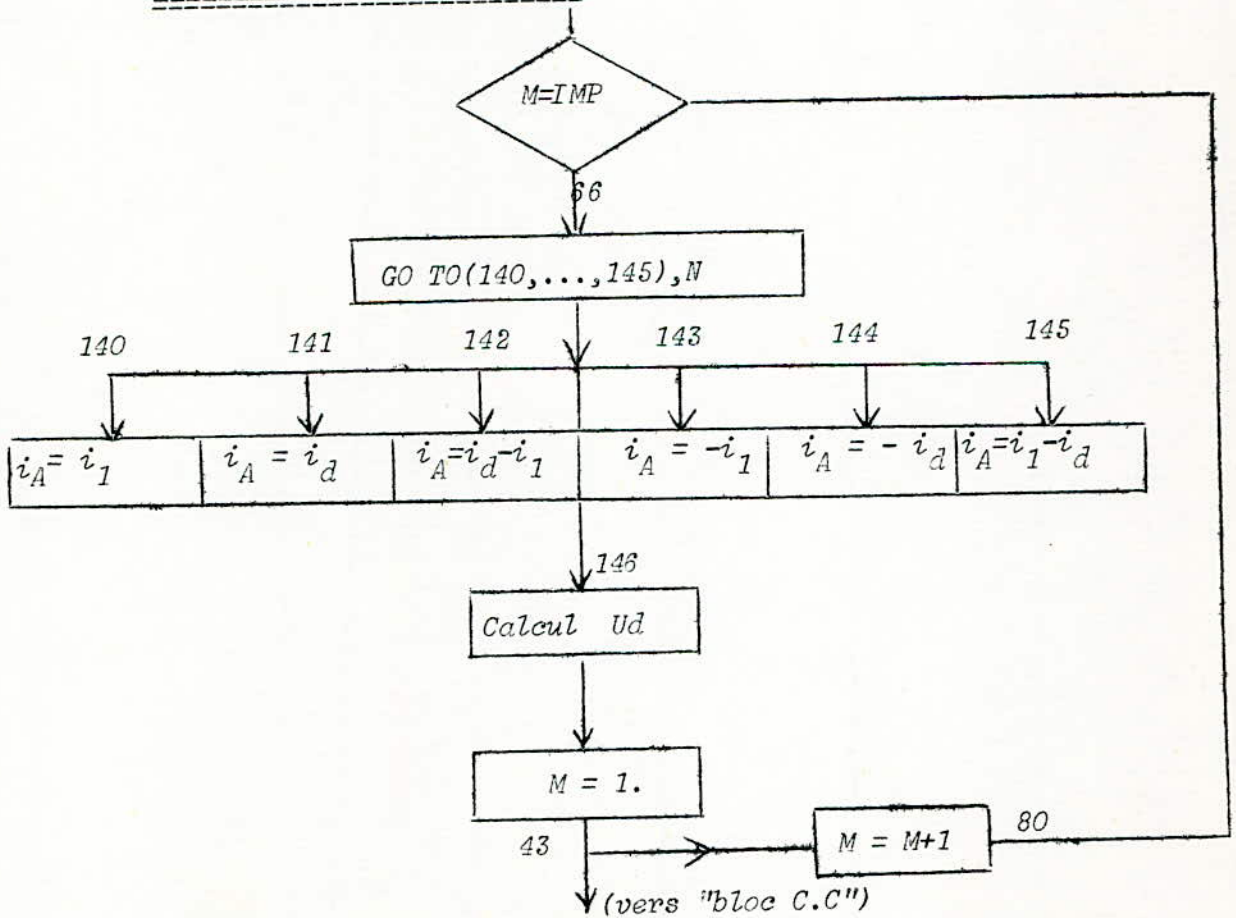
3) BLOC "TEST STABILITE"



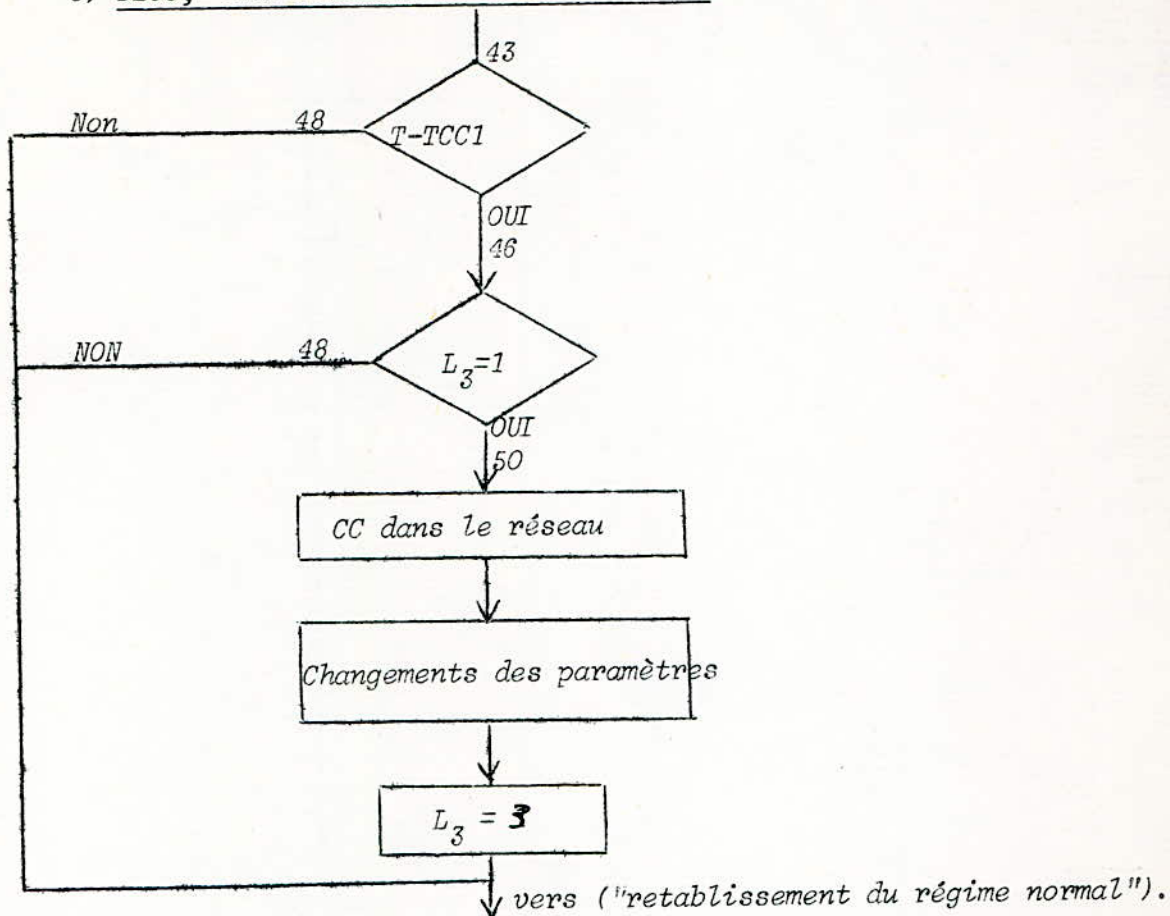
4) BLOC "Amorçage du Thyristor suivant"



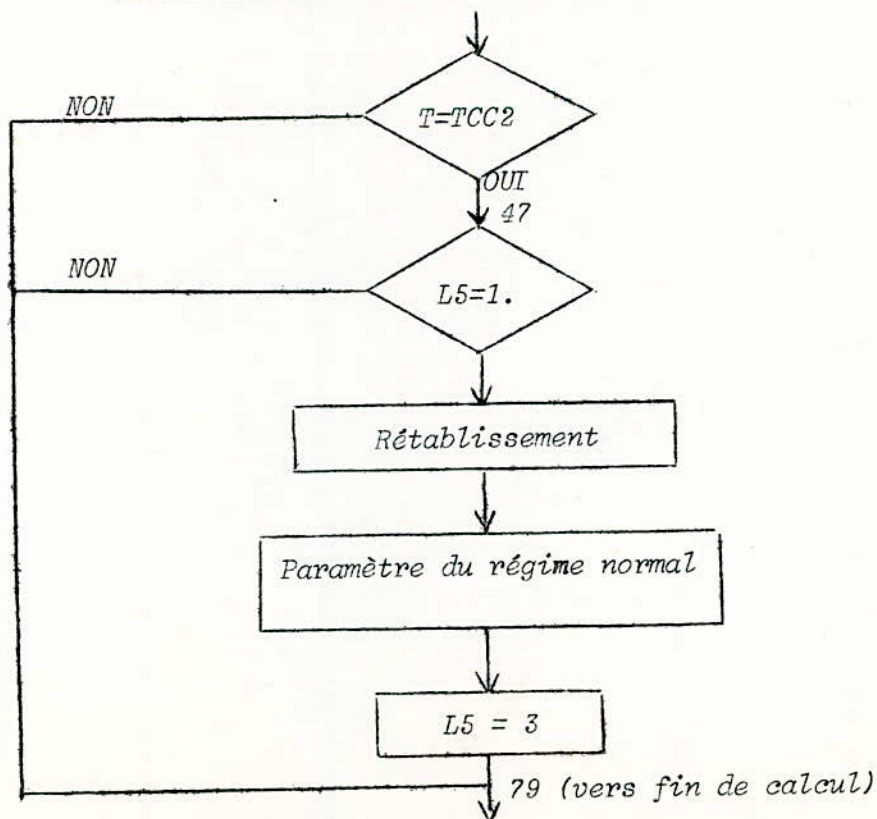
BLOC "sortie des résultats"



5) BLOC, 'Introduction du court circuit'.



BLOC "RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL"



PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES

- REX = résistance équivalente par phase du système d'alimentation en régime symétrique.
- $REXD$: Résistance de la ligne en courant continu
- $LEXL$: Inductance équivalente par phase du système d'alimentation en régime symétrique.
- $SELFD$: Inductance de lissage de la ligne en courant continu
- $TEMPO$ = Temps de calcul en secondes
- TCC_1 = Temps de court circuit coté Alternatif.
- H : pas de calcul en secondes
- TCC_2 : Temps de rétablissement du régime symétrique
- $ALFA$: angle de commande en degrés
- $TLIM$ = temps limite de fin de calcul
- U_s : Valeur maximale de la tension entre phase en régime symétrique
- E_{CD} : tension continue appliquée à l'onduleur
- W : pulsation
- $DEAB, DEBC, DECA$: respectivement, coefficients de changement d'amplitude de tensions (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}) dues au court circuit.
- $ANAB, ANBC, ANCA$: coefficients de changement d'impédance de commutation entre phases AB, BC, CA pendant le court circuit.
- $DFAB, DFBC, DFCA$: coefficients de changement de phase des tensions U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} dues au court circuit.
- $cour_1 = i_1$ = courant de commutation
- $cour_3 = id$: courant continu
- $TRAD$: Temps en radians.
- L_1 à L_5 : indicateurs logiques
- H_{RAD} : pas en radians
- EM, DX, FCC : valeurs muettes utilisées dans le bloc "Résolutions des équations".

.../...

BF11 à BF25 : coefficients des systèmes d'équations.

C.C. : court-circuit

$\ominus 1$: moment de passage par zéro de la tension sur le thyristor sortant

N : entier positif - numéro d'interval de calcul

IMP : pas d'impression

M : Compteur d'impression

IP : intervention de la protection

RN : Rétablissement du régime normal

P S : perte de stabilité

Paramètres d'entrée :

$$U_s = 133 \text{ kv}$$

$$REQ = 5$$

$$RES = 0,2$$

$$SELF = 0,0560 \text{ I.}$$

$$SELFD = 0,75$$

$$E = 0.000111 \text{ sec.}$$

$$W = 314$$

$$ECD = 110 \text{ KV}$$

```

// FOR
#IOCS (CARD,1132 PRINTER)
#ONE WORD INTEGERS
#LIST SOURCE PROGRAM
C BELOUI A HMED. THESE DE FIN D'ETUDE
C STABILITE DES ONDULEURS NON AUTONOMES
      READ(2,100)RES,SELF,RESD,SELD,TEMPO,TCC1,H,ALFA,TCC2,TLIM
      READ(2,101)US,ECD,W,DEAB,DEBC,DECA,DFAB,DFBC,DFCA,ANAB,ANBC,ANCA
100  FORMAT(F4.1,F7.4,F4.1,F5.2,F4.1,F7.4,F9.6,F5.0,F7.4,F7.4)
101  FORMAT(F6.1,F6.1,F5.0,3F5.2,3F5.1,3F5.2)
C    CONDITIONS INITIALES
      COUR1=0
      COUR3=0.25
      ALFA=140
      TEMPO=0.
      TCC1=0.018
      TCC2=0.063
      TLIM=0.1
      L3=1.
      L5=1.
      TRAD=W#TEMPO
      N=1.
      IMP=1.
      M=1.
      L1=1.
      L2=1.
      L4=1.
      HRAD=H#W
      RESD1=RESD/RES
      SELF1=SELD/SELF
      WRITE(3,100)RES?SELF,RESD,SELD,TEMPO,TCC1,H,ALFA,TCC2,TLIM
      WRITE(3,101)US,ECD,W,DEAB,DEBC,DECA,DFAB,DFBC,DFCA,ANAB,ANBC,ANCA
C    CHOIX DES TENSIONS ET IMPEDANCES

```

44 GO TO(11,12,13,11,12,13),N
 11 DX12=ANAB
 DX13=ANCA
 DX23=ANBC
 EM1=US#DEAB
 EM2=US#DEBC
 FCC1=DFAB#3.14/180.
 FCC2=DFBC#3.14/180.
 GO TO 17
 12 DX12=ANCA
 DX13=ANBC
 DX23=ANAB
 EM1=U #DEAB
 EM2=U #DEAB
 FCC1=DFCA#3.14/180.
 FCC2=DFAB#3.14/180.
 GO TO 17
 13 DX12=ANBC
 DX13=ANAB
 DX23=ANCA
 EM1=US#DEBC
 EM2=US#DECA
 FCC1=DFBC#3.14/180.
 FCC2=DFCA#3.14/180.
 17 DX1=(DX12+DX13-DX23)
 DX2=(DX12+DX23-DX13)
 DX3=(DX13+DX23-DX12)
 C CHOIX D'ETAT CONVERTISSEUR
 IF(COUR1-COUR3)21,22,22
 21 L2=1.
 IF(L1-1.)31,25,31
 25 L1=L1+1.
 TEL=TEMPO#360./0.02
 WRITE(3,102)TEMPO,TEL

102 FORMAT(1,5X,18,'REGIME 3 VALVES','T=',F10.7,'TEL=',F7.1)

C

EQUATIONS POUR REGIME 3

DET3=ξ ELF*(2.*DX3+DX2+DX1+DX3)+2.*DX13+ξ ELFD

BF12= -H*(REξ *DX3+REξ D1 - ξ ELF1)/DET3

BF13= -H*(REξ /ξ ELF)

BF13 = H*(2.*DX23+ξ ELF1)/LKT3

BF14= H*(DX2+ ELF1)/DET3

BF15= H*DX3/DET3

BF21 = 0.

BF22=-H*RE ξ*((2.*DX13+DX2+DX1+DX3)+2.*DX13+RE ξ D1)/DET3

BF23= H*DX3/DET3

BF24=-H*DX1/DET3

BF25= H*2.*DX13/DET3

GO TO 31

22 L1 = 1.

COUR1 = COUR3

IF(L2-1.)31,26,31

26 L2 = L2 + 1.

TEL=TEMPO*360./0.02

WRITE(3,103)TEMPO,TEL

103 FORMAT(1,5X,18,'REGIME 2 VALVES','T=',F10.7,'TEL=',F7.1)

TP = TRAD

C

EQUATIONS POUR REGIMES 2

DET2= -ξ ELF*(ξ ELF1+2.*DX12)

BF11 = H*RES *DX1/DET2

BF12 = *RE *(DX2+RE D1)/DET2

BF13=-H/DET2

BF14=0.

BF15=-H/DET2

BF21=BF11

BF22=BF12

BF23=BF13

BF24=BF14

BF25=BF15

C

RESOLUTION DES EQUATIONS

```

31  ARG1=TRAD+1.047+2.*FCC1+FCC2+ALFA#3.14/180.
    ARG2=TRAD-1.047+2.*FCC2+FCC1+ALFA#3.14/180.
    AK11=BF11#COUR1+BF12#COUR3+BF13#EM1# SIN(ARG1)+BF14#EM2# SIN(ARG2)+
1BF15#ECD
    AK12=BF21#COUR1+BF22#COUR3+BF23#EM1# SIN(ARG1)+BF24#EM2# SIN(ARG2)+
1BF25#ECD
    AK21=BF11#(COUR1+AK11/2.)+BF12#(COUR3+AK12/2.)+BF13#EM1# SIN(ARG1+
1 1/2*TRAD/2.)+BF24#EM2# SIN(ARG2+1/2*TRAD/2.)+BF25#ECD
    AK31=BF11#(COUR1+AK21/2.)+BF12#(COUR3+AK22/2.)+BF13#EM1# SIN(ARG1+1/2*
1TRAD/2.)+BF14#EM2# SIN(ARG2+1/2*TRAD/2.)+BF15#ECD
    AK32=BF21#(COUR1+AK21/2.)+BF22#(COUR3+AK22/2.)+BF23#EM1# SIN(ARG1+1/2*
1TRAD/2.)+BF24#EM2# SIN(ARG2+1/2*TRAD/2.)+BF25#ECD
    AK41=BF11#(COUR1+AK31)+BF12#(COUR3+AK32)+BF13#EM1# SIN(ARG1+1/2*TRAD)
1+BF24#EM2# SIN(ARG2+1/2*TRAD)+BF15#ECD
    AK42=BF21#(COUR1+AK31+BF22#(COUR3+AK32)+BF23#EM1# SIN(ARG1+1/2*TRAD)+
1BF24#EM2# SIN(ARG2+1/2*TRAD)+BF25#ECD
    COUR1=COUR1+(AK11+2*AK21+2.*AK31+AK41)/6.
    COUR3=COUR3+(AK12+2.*AK22+2.*AK32+AK42)/6.
    TEMPO=TEMPO+H
    TRAD=TRAD+H/RAD
    IF(L4-1.)121,130,121
130  IF(TRAD-3.14+ALFA#3.14/180.)121,127,127
127  IF(COUR1-COUR3)122,128,128
128  IF(TRAD-TP-3.14/11.)123,129,129
123  ALFA=ALFA-5.
    WRITE(3,190)TEMPO,ALFA
190  FORMAT(15X,'T=',F9.6,2X,'INTERVENTION DE PROTECTION CONTRE INSTABILITE',
15X,'ALFA=',F5.0)
129  L4=3.
    CONTROLE D'AMORÇAGE VALVE SUIVANTE

```

```

121 IF(TRAD-1.047+2.*FCC2+FCC1)69,60,60
60 N=N+1.
    N=N-(N-1)/6#6
    COUR1=0
    L4=1.
    TRAD=TRAD-1.0#2.*FCC2+FCC1
69 IF(COUR1-COUR3)70,70,71
71 COUR1=COUR3
    GO TO 17
70 IF(M-IMP)80,66,80
66 TD=TRAD*(180./3.14)
C   CHOIX DES COURANTS
    GO TO(140,141,142,143,144,145),N
140 CFA=COUR1
    CFB=COUR1-COUR3
    GO TO 146
142 Ci =COUR3-COUR1
    CFB=COUR1
    GO TO 146
143 CFA=-COUR1
    CFB=COUR3
    GO TO 146
144 CFA=-COUR3
    CFB=COUR3-COUR1
    GO TO 146
145 CFA=COUR1-COUR3
    CFB=-COUR1
146 CFC=-CFA-CFB
    DC1=(AK11+2.*AK21+2.*AK31+AK14)/(6.*H)
    DC3=(AK12+2.*AK22+2.*AK32+AK42)/(6.*H)
    UD=EM1# SIN(ARG1+ HRAD)- SELF#DX1#DC1- SELF#DX2#DC3-RES #DX1#COUR1-
    IRES #DX2#COUR3
    WRITE(3,108)TEMPO,TD,COUR3,CFA,CFB,CFC,UD,COUR1,N
108 FORMAT(1 , 'T=',F9.6,1X, 'TD='F4.1,1X, 'ID=',F5.2,1X, 'IFA='F5.2,1X,
1 'IFB=',F5.2,1X, 'IFC=',F5.2,1X, 'ECD='nF7.2,1X, 'IL=',F5.2,1X,I1)

```

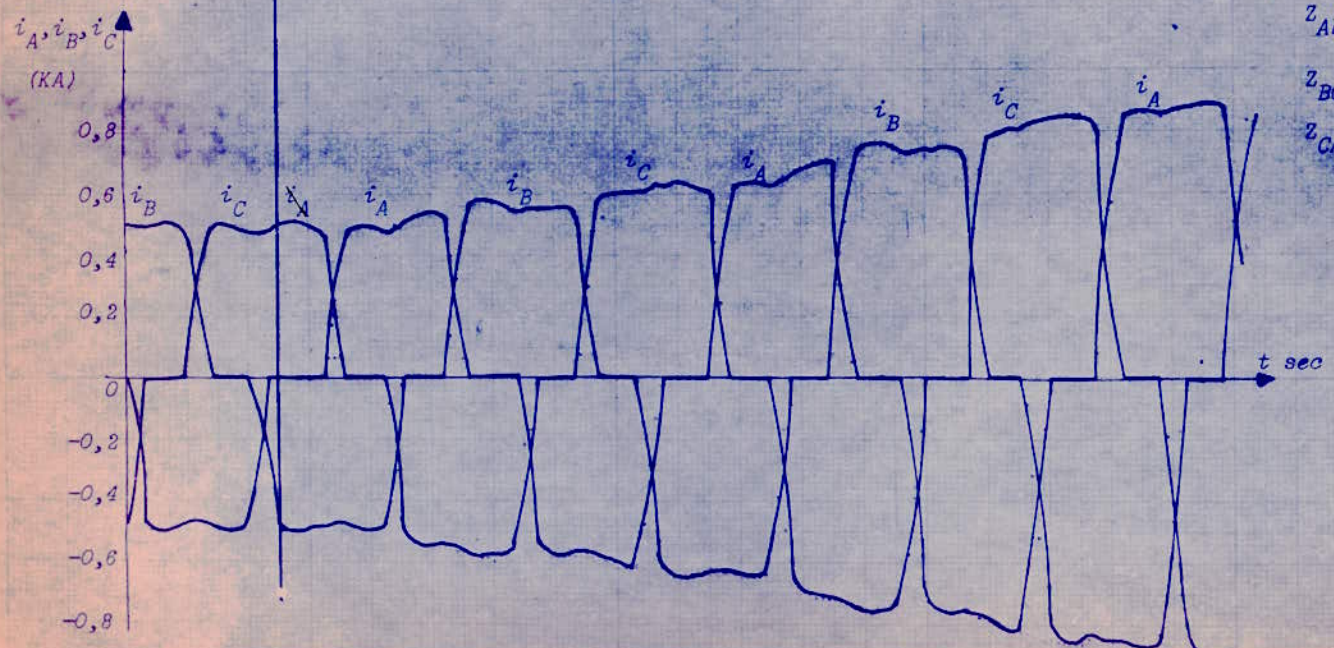
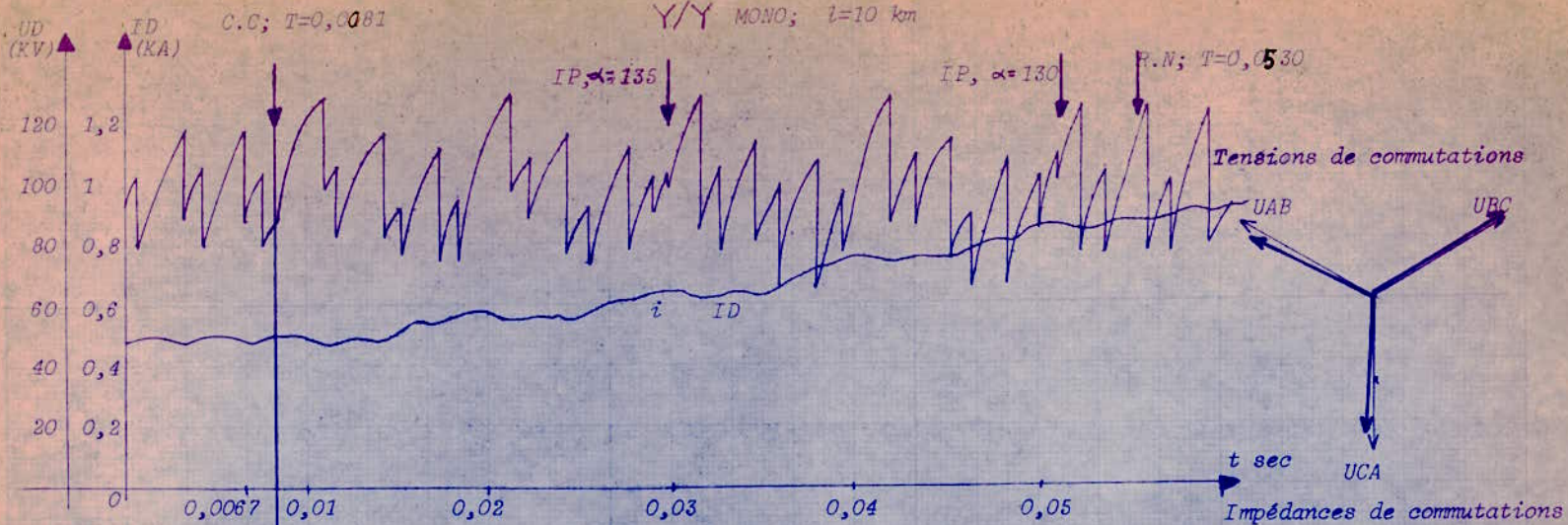
141 { CFA=COUR3
 CFB=COUR1-COUR3
 GO TO 146

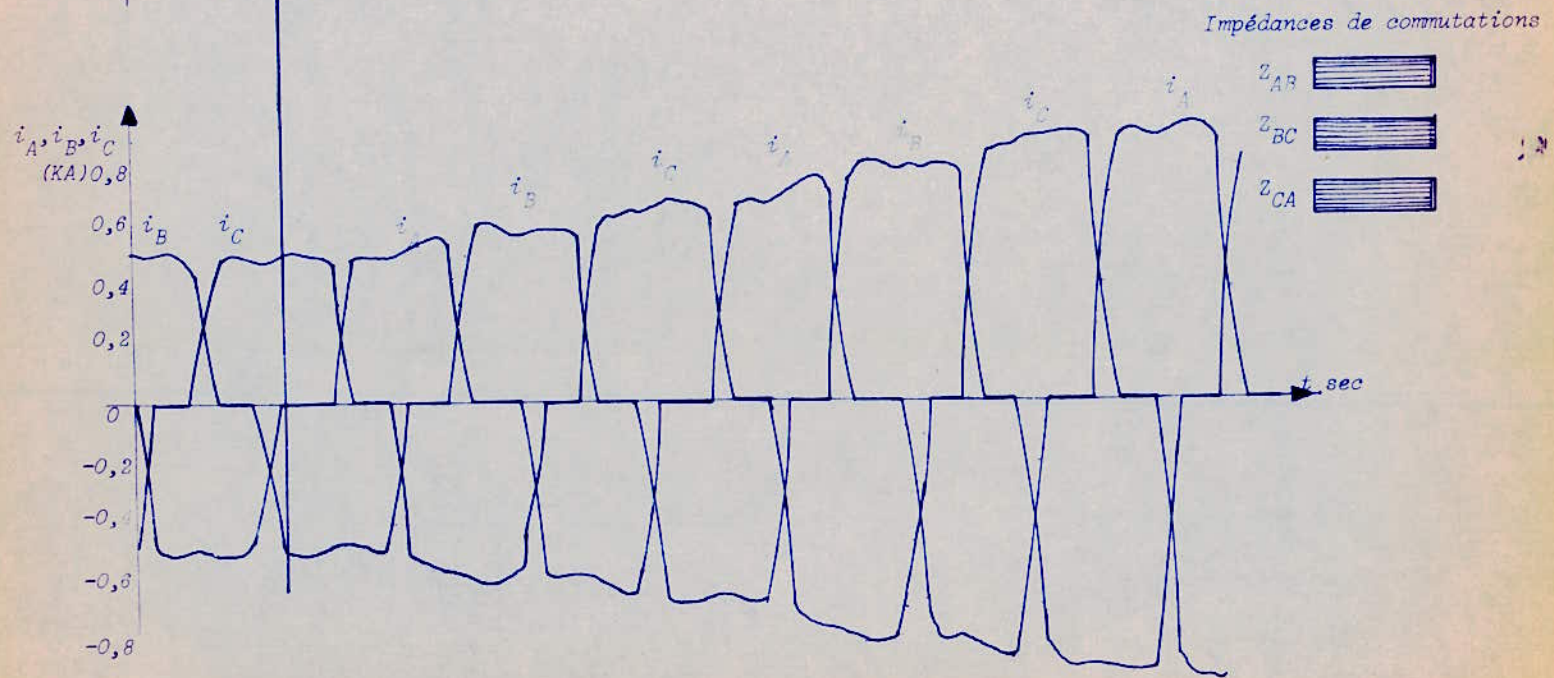
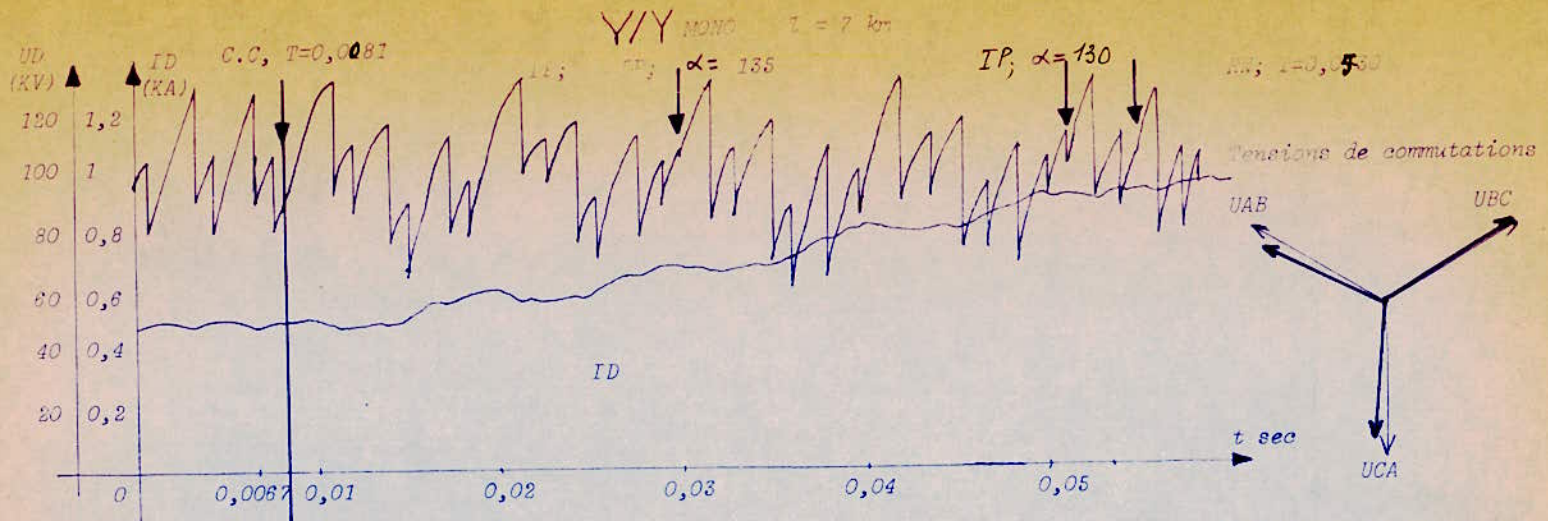
```

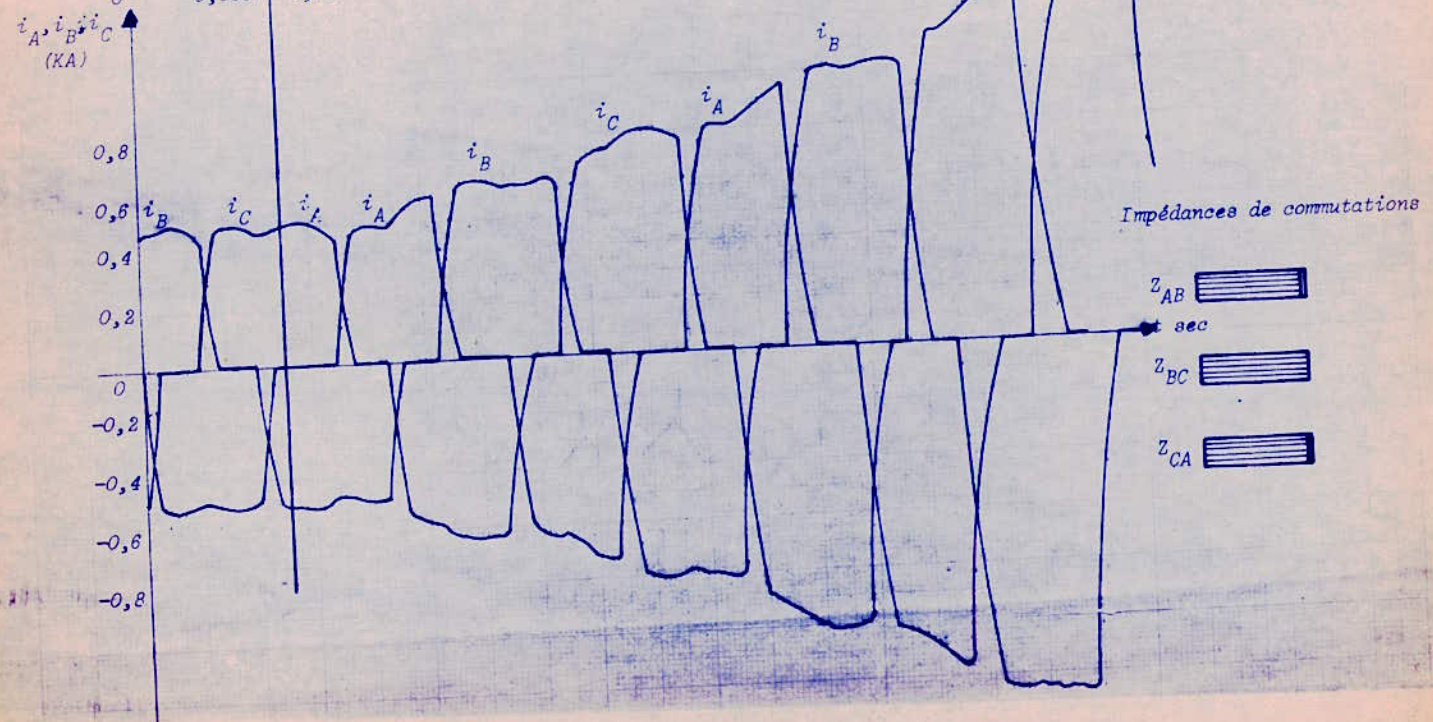
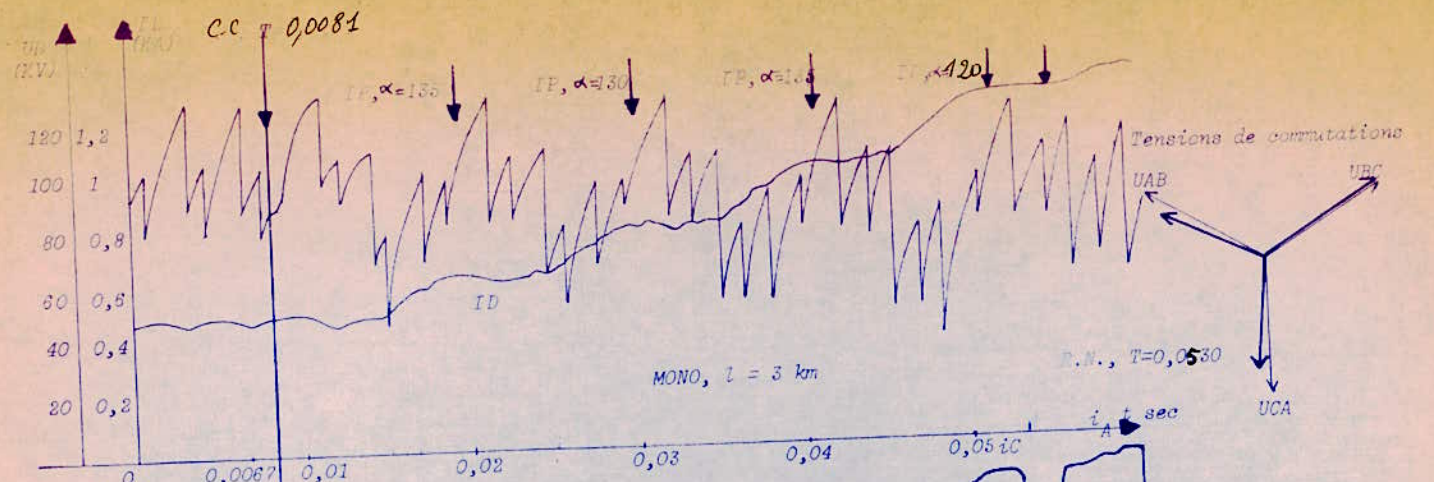
GO TO 43
80 M=M+1.
43 IF (TEMPO-TCC1) 48, 46, 46
46 IF (L3-1.) 48, 50, 48
50 WRITE (3, 180) TEMPO
180 FORMAT (20X, 'T=', F9.6, 2X, 'COURT CIRCUIT DANS LE RESEAU D'ALIMENTATION'
DEAB=0.889
DEBC=1.
DECA=0.889
ANAB=0.986
ANBC=1.
ANCA=0.986
DFAB=3.76
DFBC=0.
DFCA=3.76
BLOC VARIABLE
WRITE (3, 182) DEAB, DEBC, DECA, ANAB, ANBC, ANCA, DFAB, DFBC, DFCA
182 FORMAT (1X, 3F6.3, 2X, 3F6.3, 2X, 3F7.2)
L3=3.
48 IF (TEMPO-TCC2) 79, 47, 47
47 IF (L5-1.) 79, 52, 79
52 WRITE (3, 181) TEMPO
181 FORMAT (20X, 'T=', F9.6, 2X, 'RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL')
DEAB=1.0
DEBC=1.0
DECA=1.0
ANAB=1.0
ANBC=1.0
ANCA=1.0
DFAB=0.0
DFBC=0.0
DFCA=0.0
L5=3.
79 IF (TEMPO-TLIM) 44, 45, 45
122 WRITE (3, 124) TEMPO, COUR3, ALFA
124 FORMAT (10X, 'T=', F10.7, 'PERTE DE STABILITE', 2X, 'ID=', F7.3, 2X,
1'ALFA=', F5.0)
45 CALL EXIT
END

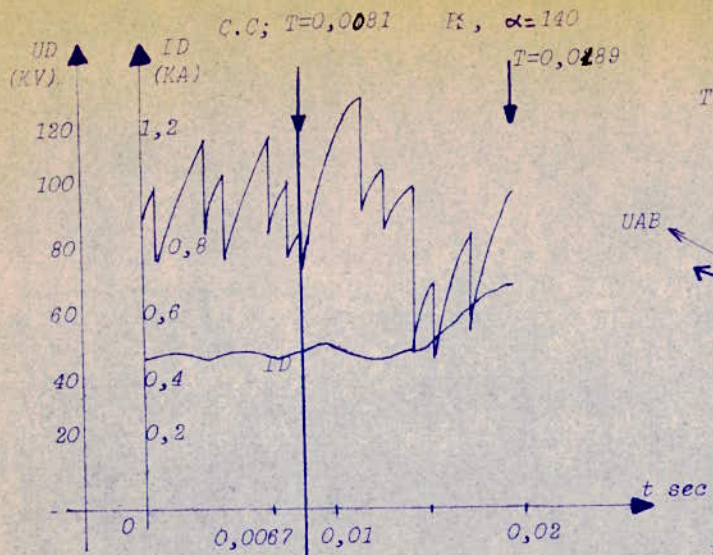
```


ANNEXE II

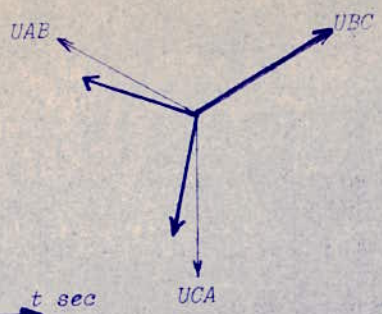




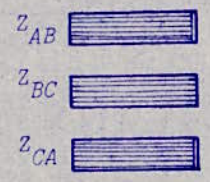
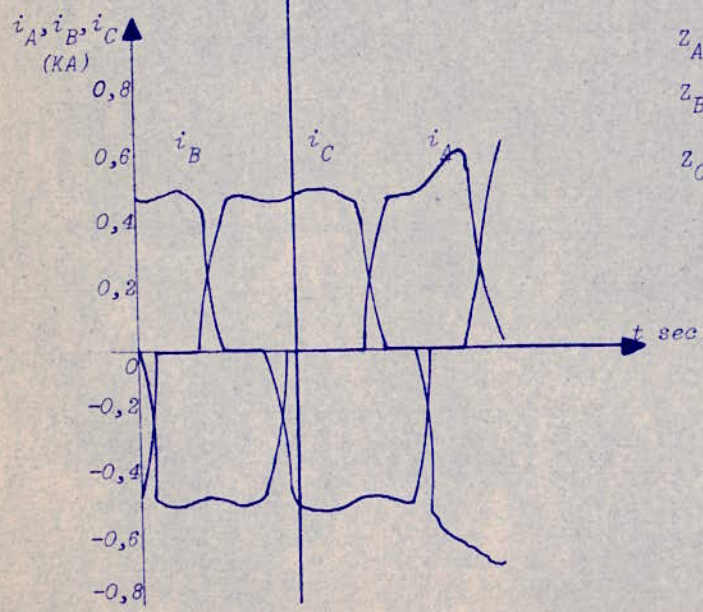


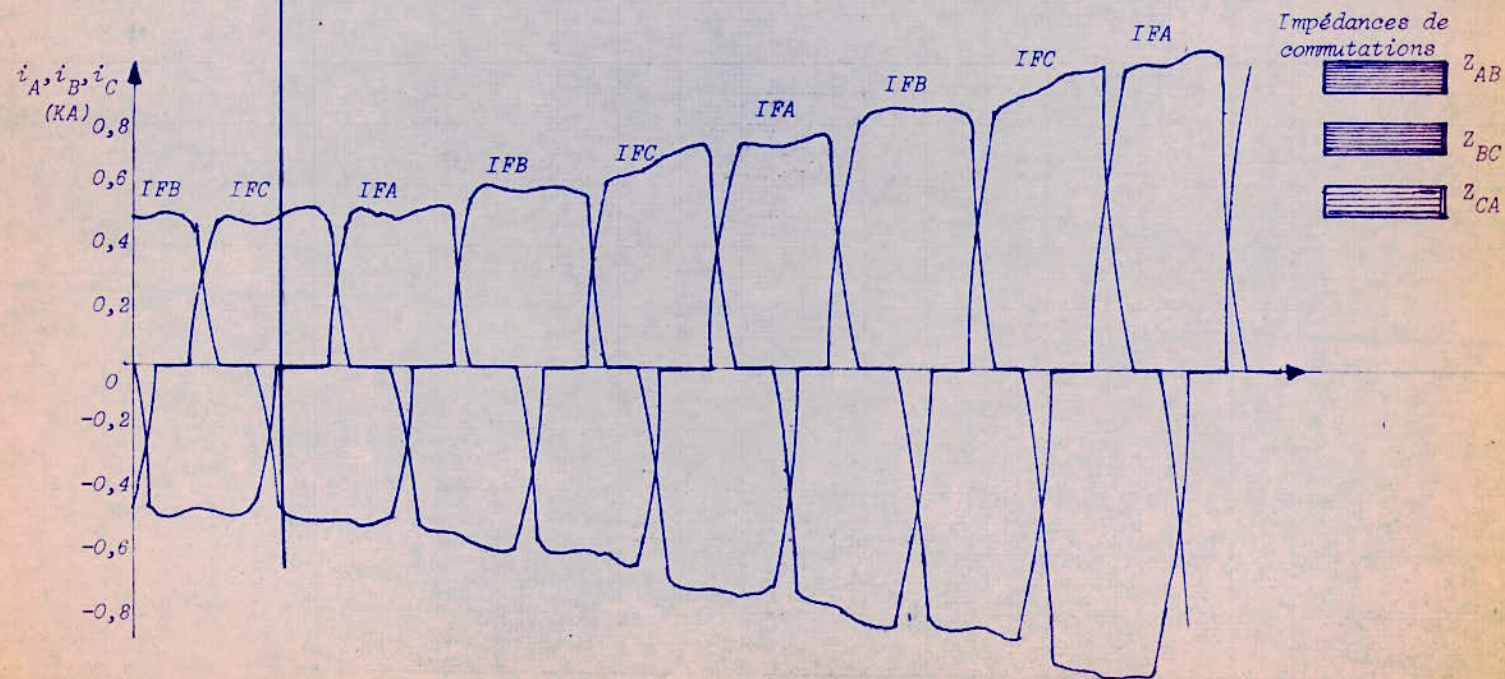
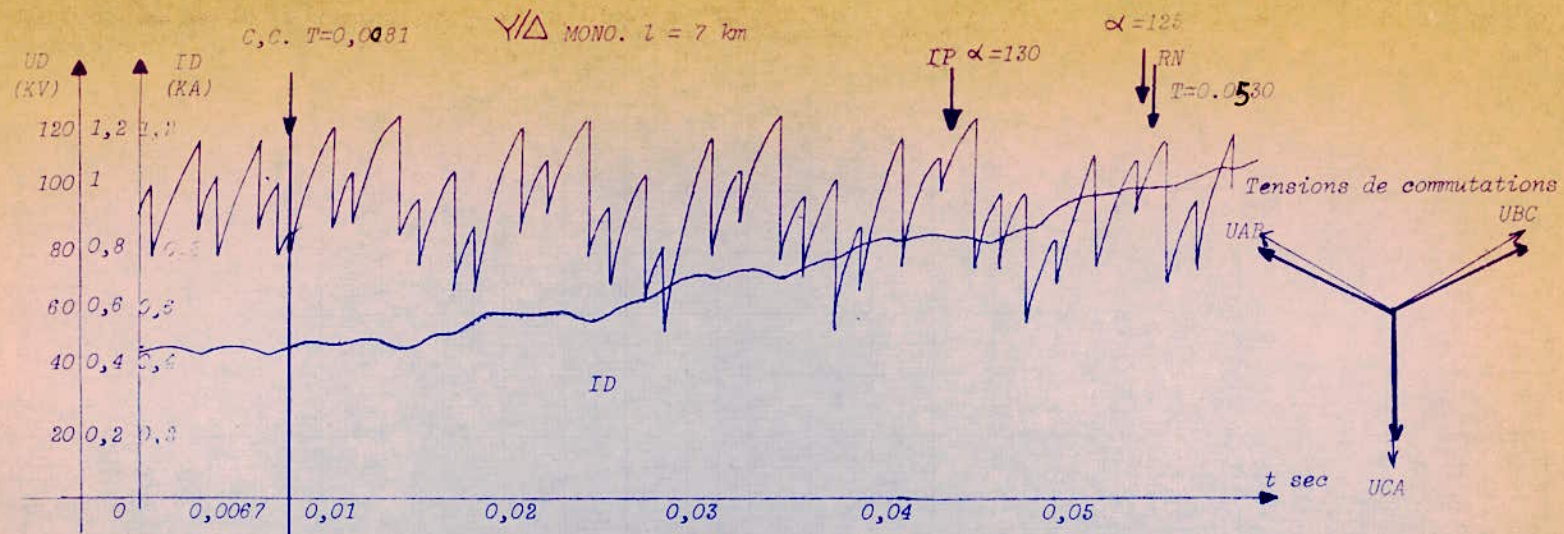


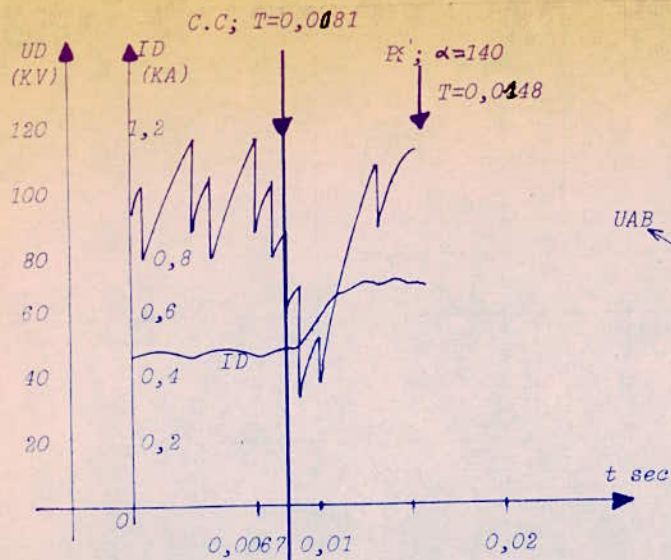
$\text{Y/Y MONO, } l=0,1 \text{ km}$
 Tensions de commutations



Impédances de commutations

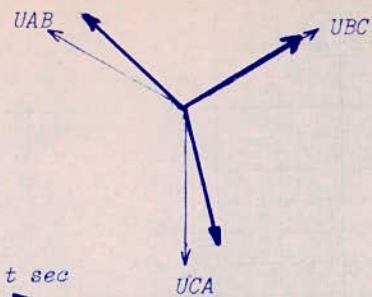




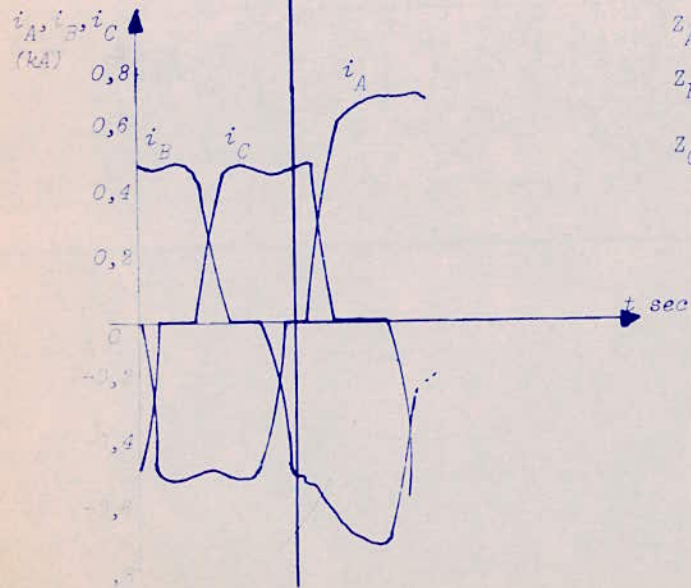
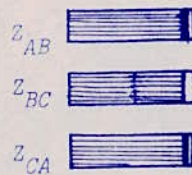


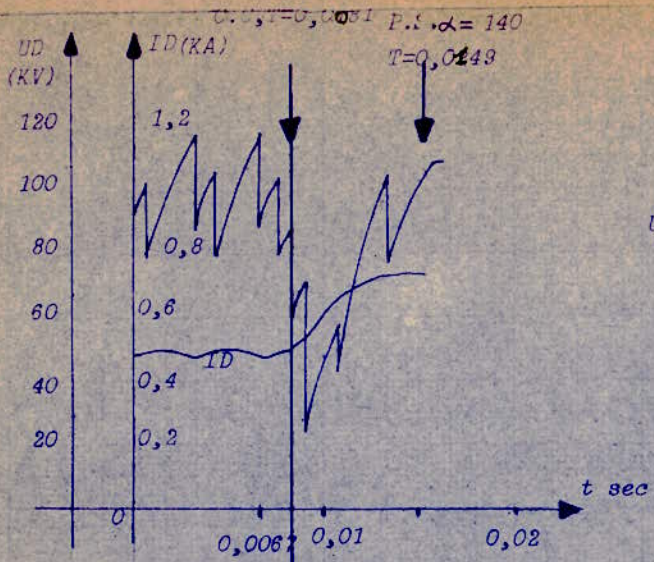
$Y/Y_{BLPFAE} \quad l = 7 \text{ km}$

Tensions de commutations



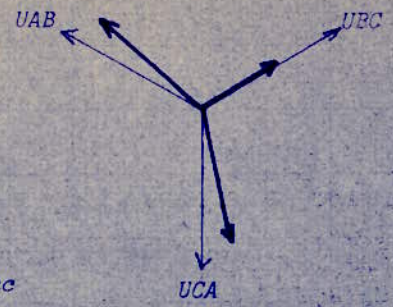
Impédances de commutations



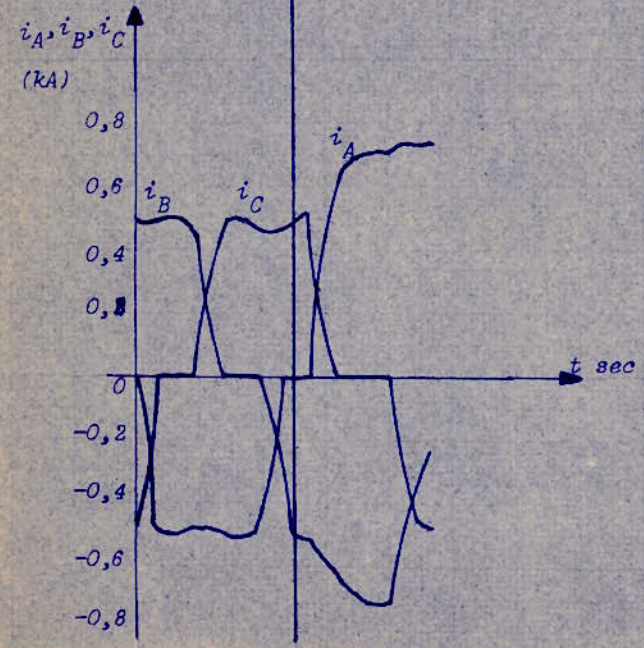
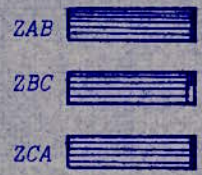


Y/Y BIPLAS E + TERRE $l = 7$ km

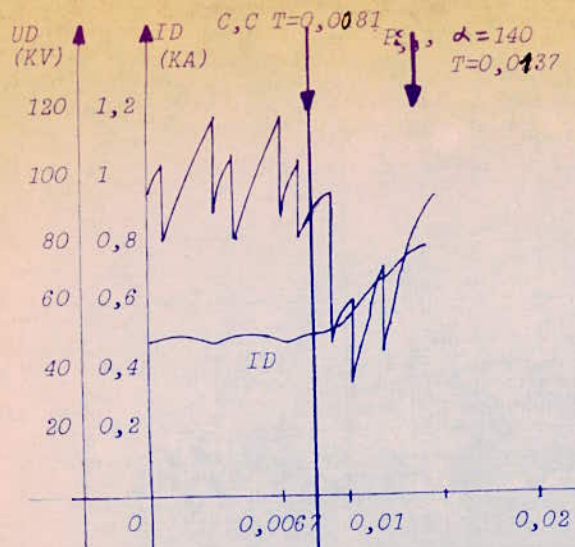
Tensions de commutations



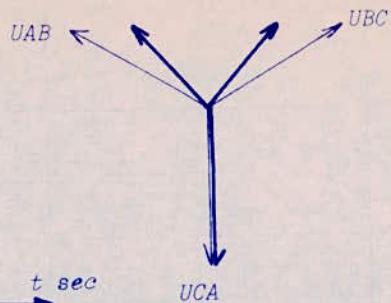
Impédances de commutations



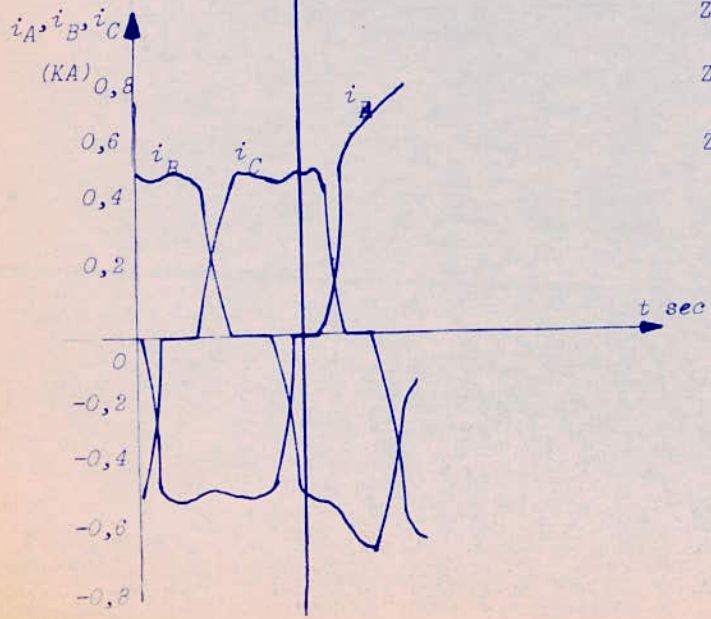
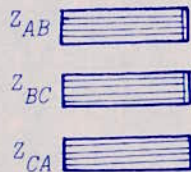
∇/Δ Biphasé $l = 7 \text{ km}$

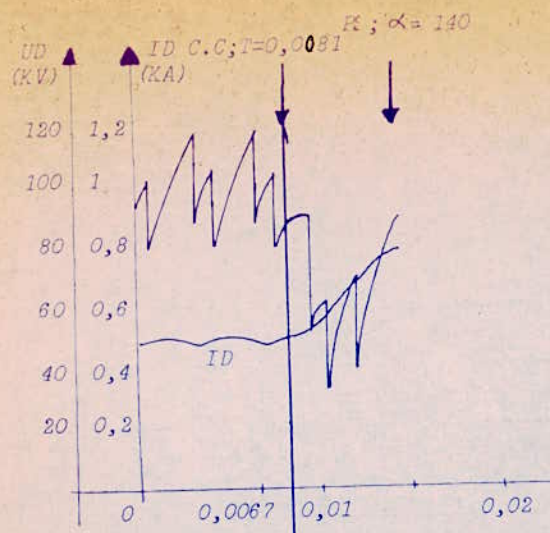


Tensions de commutations



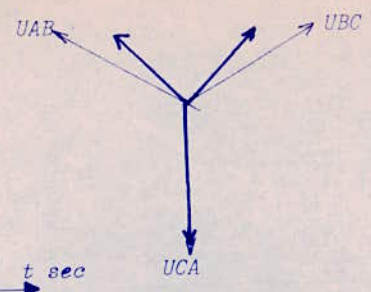
Impédances de commutations





Y/Δ BCFASE + TERRE; $L = 7 \text{ Km}$

Tensions de commutations



Impédances de commutations

