

1/83

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

20x

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
« HOUARI BOUMEDIENNE »

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكثنية
PROJET DE FIN D'ETUDES
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

INGENIORAT D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE

SUJET :

Analyse de la stabilité statique
et dynamique d'une centrale électrique

Proposé par :

W. MICHALAK
Professeur à l'ENPA

Etudié par :

ABDESSEMED Yassine
AMOUR Mebarek

PROMOTION JUIN 1983

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
« HOUARI BOUMEDIENNE »

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGENIORAT D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE

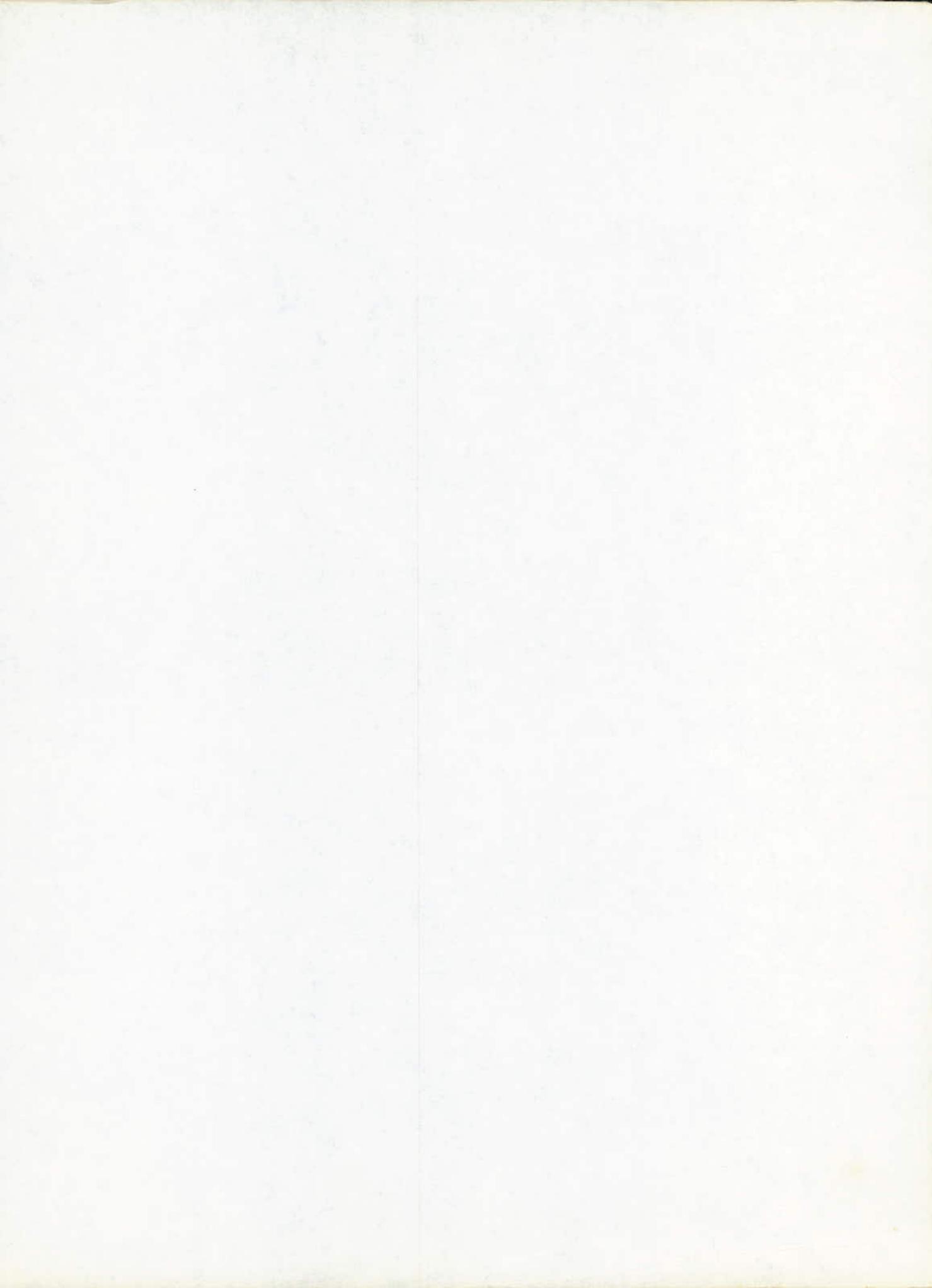
SUJET :

**Analyse de la stabilité statique
et dynamique d'une centrale électrique**

Proposé par :
W. MICHALAK
Professeur à l'ENPA

Etudié par :
ABDESSEMED Yassine
AMOUR Mebarek

PROMOTION JUIN 1983



SOMMAIRE

<u>CHAPITRE/</u> :	1	INTRODUCTION	
	1.1	Présentation du ^{sojet} réseau.....	.....
	1.2	Description du réseau.....	.....
<u>CHAPITRE/</u> :	2	RAPPELS THEORIQUES	
	2.1	Diagramme circulaire des puissances.....	.....
	2.2	Rappels sur les quadripôles.....	.....
	2.3	Application de la théorie des quadripôles à une machine synchronè.....	.....
	2.4	Etude d'un court-circuit biphasé à la terre par la méthode des composantes symétriques dans un réseau triphasé.....	.....
<u>CHAPITRE/</u> :	3	STABILITE STATIQUE	
	3.1	Définition.....	.....
	3.2	Généralités.....	.....
	3.3	Analyse de la stabilité statique.....	.....
<u>CHAPITRE/</u> :	4	STABILITE DYNAMIQUE	
	4.1	Définition.....	.....
	4.2	Généralités.....	.....
	4.3	Analyse de la stabilité dynamique.....	.....
<u>CHAPITRE/</u> :	5	AMELIORATION DE LA STABILITE DE LA CENTRALE	
	5.1	Conception des groupes tournants.....	.....
	5.2	Conception du système de transmission.....	.....
<u>CHAPITRE/</u> :	6	ETUDE PRATIQUE	
	6.1	Calcul des limites de la stabilité statique.....	.....
	6.2	Calcul des limites de la stabilité dynamique.....	.....
<u>CHAPITRE/</u> :	7	CONCLUSION.....	.....
<u>ANNEXE /</u> :		Calcul des paramètres du réseau.....	.....
<u>BIBLIOGRAPHIE/</u>:		.....	.....

EXPOSE DU PROBLEME

La stabilité d'une centrale électrique est un facteur essentiel conditionnant le maintien du service assuré par cette centrale . Le régime de fonctionnement doit demeurer stable non seulement en marche normale , mais encore en période troublée . L'instabilité conduit très rapidement en effet à la rupture de synchronisme des machines synchrones couplées sur le réseau , d'où résulte un arrêt du service , qui , pour sa reprise , nécessite des manoeuvres d'assez longue durée . Lors des perturbations du réseau , la stabilité d'un turbo-groupe n'est pas toujours assurée si l'on ne prend pas des mesures supplémentaires . Outre les régulateurs de tension et de turbines modernes qui , par leur rapidité améliorent notablement la stabilité d'une centrale électrique , les dispositifs de protection et les disjoncteurs rapides améliorent , eux aussi , la stabilité par réduction de la durée du défaut . Ces moyens devraient être utilisés en priorité , car ils permettent en même temps de diminuer les contraintes mécaniques .

Dans la pratique moderne , pour assurer la stabilité , on a recours surtout à ce dernier procédé par protection sélective des éléments défectueux du réseau .

Dans cette étude , on montrera ce rôle important dans le maintien de la stabilité du système considéré .

On complètera notre étude par montrer un autre intérêt du réenclenchement rapide dans l'amélioration de la stabilité autre que celui d'assurer la continuité de service de la centrale , dans le cas de défauts fugitifs .

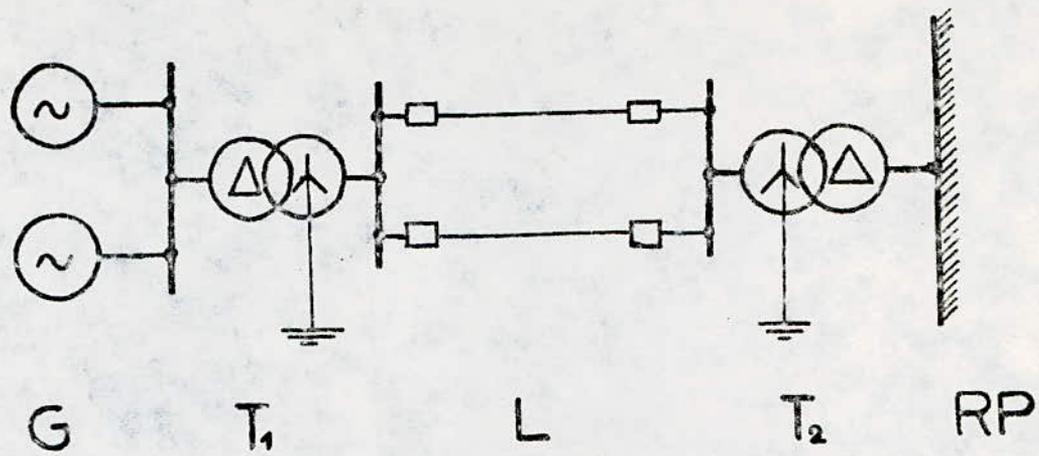


FIG.11

Profil du pylône

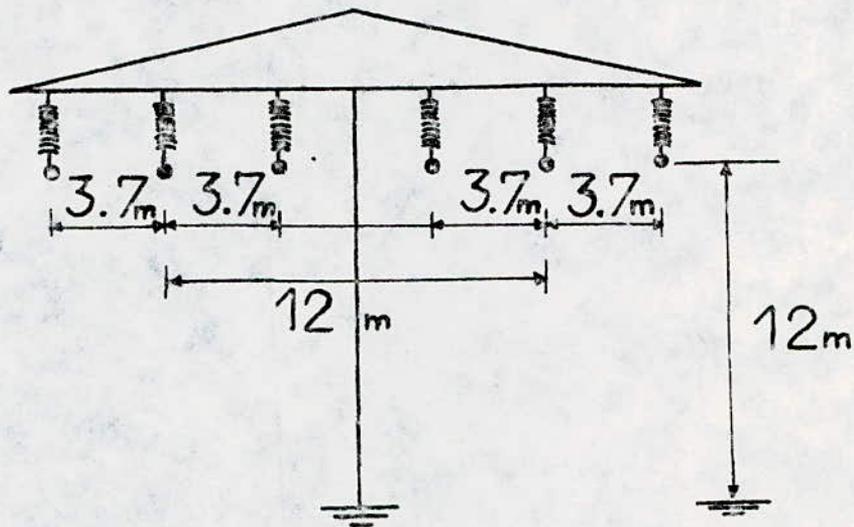


FIG.12

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Présentation du sujet

L'objet de la présente étude consiste à analyser la stabilité de la centrale - G - débitant par l'intermédiaire d'un système de transmission (T₁ - L - T₂) sur un réseau infiniment puissant. On montrera particulièrement l'importance du rôle joué par les disjoncteurs dans le maintien de la stabilité lors d'une perturbation qui se limite à un court - circuit biphasé à la terre en début d'une voie.

Pour effectuer cette analyse on donnera un aperçu théorique sur les chapitres suivants qui faciliteront notre étude :

- 1) Diagramme circulaire des puissances et théorie des quadripôles.
- 2) Composantes symétriques.
- 3) Principe de la théorie de la stabilité.

1.2 Description du système (voir fig 1-1)

a) La centrale - G - est constituée de deux groupes hydro-électriques.

Les caractéristiques des alternateurs :

- Puissance nominale apparente : $S_n = 2 \times 30 \text{ MVA}$
- Réactance synchrone directe : $X_d = 75 \%$
- Réactance synchrone directe adaptée : $X_d (\text{ad}) = 52 \%$
- Réactance transitoire directe : $X'_d = 26 \%$
- Réactance inverse : $X_2 = 32 \%$

- Réactance homopolaire : $X_0 = 15 \%$
- Tension nominale : $U_n = 15,5 \text{ KV}$
- Moment d'inertie x 4 : $FD^2 = 16.10^6 \text{ (kg.m}^2 \text{)}$
- Vitesse nominale : $n = 75 \text{ tr/mn}$

b) Transformateurs T_1 et T_2 (identiques)

- Puissance apparente nominale : $S_n = 60 \text{ MVA}$

- Rapport de tension :

$$T_1 : U_{n1}/U_{n2} = 15/110 \text{ KV (élévateur)}$$

$$T_2 : U_{n1}/U_{n2} = 110/15 \text{ KV (abaisseur)}$$

- Pertes dans le cuivre : $\Delta P_{cu} = 0,7 \%$
- Pertes dans le fer : $\Delta P_{fer} = 160 \text{ KW}$
- Tension de C-C : $\Delta U_{c.c} = 10 \%$
- Montage des enroulements : Δ / Y (fig 1-1)

Le point neutre de l'enroulement en étoile est mis à la terre directement .

c) Ligne L

- La ligne 110 kV utilisée pour la transmission de l'énergie électrique est à deux voies , à conducteurs disposés en nappe et transposés (fig 1-2) , de longueur $l = 100 \text{ km}$.

Paramètres d'un conducteur :

- Section nominale : $s = 150 \text{ mm}^2$
- Matériau : cuivre
- Résistance (à la température de service 20°c) : $R_L = 0,128 \text{ ohms / km}$
- Inductance : $X_L = 0,36 \text{ ohms / km}$
- Capacité : $C_L = 8,5 \text{ nF / km}$

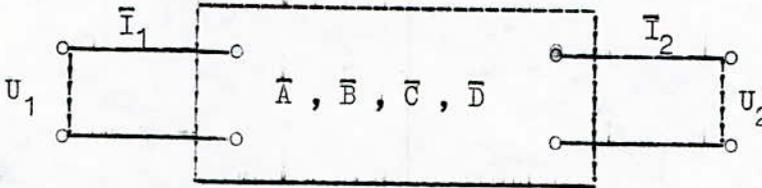
d) Réseau puissant : RP

- Puissance apparente : $S = \infty$

2-1 Diagramme circulaire des puissances

Le diagramme circulaire des puissances constitue une image graphique des variations de la puissance à une extrémité du système analysé en fonction des changements de la charge, les tensions aux deux extrémités étant fixes.

Les équations déterminant l'état de transmission sont d'habitude établies en faisant sortir des relations liant les courants et les tensions du système, dont le schéma équivalent est présenté en forme d'un quadripôle de constantes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , \bar{D} (paramètres caractéristiques du quadripôle).



Les équations d'un quadripôle sont :

$$\left(\begin{array}{l} \bar{U}_1 = \bar{A}\bar{U}_2 + \bar{B}\bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{C}\bar{U}_2 + \bar{D}\bar{I}_2 \end{array} \right. \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \bar{U}_2 = \bar{D}\bar{U}_1 - \bar{B}\bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 = \bar{C}\bar{U}_1 + \bar{A}\bar{I}_1 \end{array} \right.$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C}\bar{U}_2 + \bar{D}\bar{I}_2 \Rightarrow \bar{I}_2 = \bar{C}\bar{U}_1 + \bar{A}\bar{I}_1$$

La tension en commencement : $\bar{U}_1 = U_1 e^{j\theta_1}$

La tension à la fin : $\bar{U}_2 = U_2 e^{j\theta_2}$

Le courant à la fin est : \bar{I}_2

D'habitude on exprime la puissance comme $\bar{S} = \bar{I}\bar{U}^*$ (\bar{U}^* vecteur conjugué de tension), c'est à dire sous la convention que la puissance réactive inductive est négative.

Les courants sont donnés par :

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{D}}{\bar{B}} \bar{U}_1 - \frac{1}{\bar{B}} \bar{U}_2$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{\bar{B}} \bar{U}_1 - \frac{\bar{A}}{\bar{B}} \bar{U}_2$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_1 &= \frac{\bar{D}}{B} \bar{U}_1 - \frac{1}{B} \bar{U}_2 \bar{U}_1^* = \frac{\bar{U}_1 \bar{U}_1^* \bar{D}}{B} - \frac{\bar{U}_1 \bar{U}_2}{B} \\ \bar{S}_1 &= \frac{U_1 U_1 e^{j(\theta_1 - \theta_1)}}{B} \bar{D} - \frac{U_1 U_2 e^{j(\theta_2 - \theta_1)}}{B} \\ \bar{S}_1 &= U_1^2 \frac{\bar{D}}{B} - \frac{U_1 U_2}{B} e^{j(\theta_2 - \theta_1)} \\ \bar{S}_2 &= -U_2^2 \frac{\bar{A}}{B} + \frac{U_1 U_2}{B} e^{j(\theta_1 - \theta_2)} \end{aligned}$$

En prenant le vecteur U_2 comme vecteur de référence, dans ce cas on pose : $\theta_2 - \theta_1 = 0$

$$\begin{aligned} \bar{S}_1 &= U_1^2 \frac{\bar{D}}{B} - \frac{U_1 U_2}{B} (\cos \theta + j \sin \theta) \\ \bar{S}_2 &= -U_2^2 \frac{\bar{A}}{B} + \frac{U_1 U_2}{B} (\cos \theta - j \sin \theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{On pose aussi : } \bar{r}_1 &= \frac{U_1 U_2}{B} (\cos \theta + j \sin \theta) \\ \bar{r}_2 &= \frac{U_1 U_2}{B} (\cos \theta - j \sin \theta) \end{aligned}$$

Ce sont des rayons de cercle, leurs modules sont égaux, mais les phases varient en fonction de l'angle θ (angle entre les tensions).

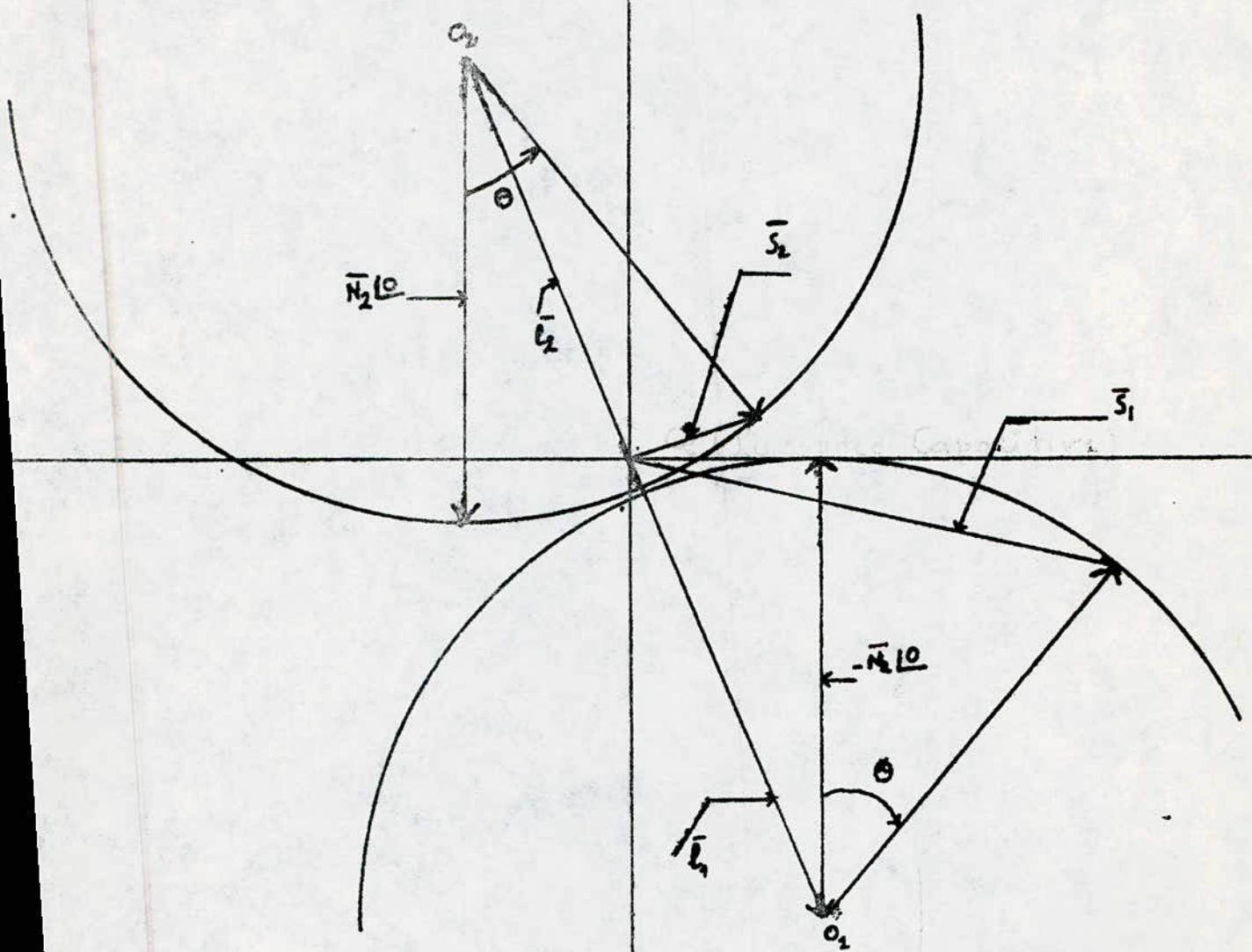
Cet angle varie en fonction de la charge à la fin du système.

Les coordonnées des centres des cercles sont déterminées par les premiers termes des équations :

$$\bar{l}_1 = \frac{\bar{D}}{B} U_1^2, \quad \bar{l}_2 = -\frac{\bar{A}}{B} U_2^2$$

Donc il suffit de connaître \bar{r} et \bar{l} pour tracer le diagramme.

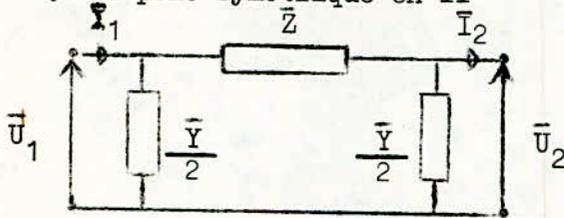
Q (Puissance Capacitive)



$-Q$ (Puissance Inductive)

2-2 Rappels sur les quadripôles

2-2-2 Quadripôle symétrique en Π

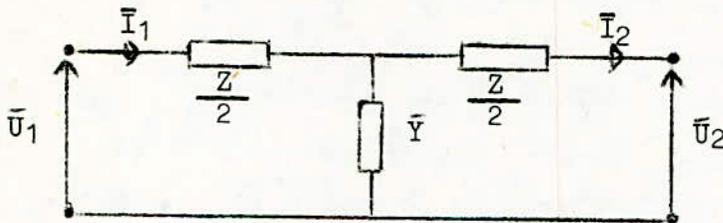


$$\bar{A} = \bar{D} = 1 + \frac{Z \bar{Y}}{2}$$

$$\bar{B} = Z$$

$$\bar{C} = \bar{Y} \left(1 + \frac{Z \bar{Y}}{4} \right)$$

2-2-2 Quadripôle symétrique en T

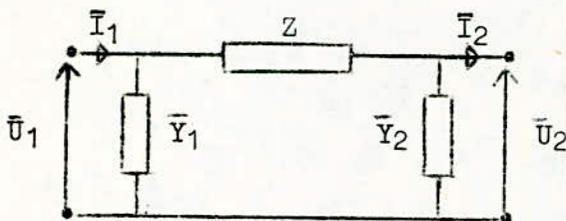


$$\bar{A} = \bar{D} = 1 + \frac{Z \bar{Y}}{2}$$

$$\bar{B} = Z \left(1 + \frac{Z \bar{Y}}{4} \right)$$

$$\bar{C} = \bar{Y}$$

2-2-3 Quadripôle assymétrique en Π



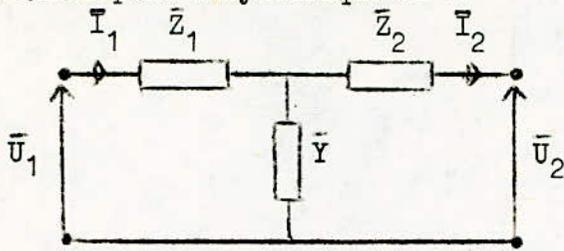
$$\bar{A} = 1 + Z \bar{Y}_2$$

$$\bar{B} = Z$$

$$\bar{C} = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + Z \bar{Y}_1 \bar{Y}_2$$

$$\bar{D} = 1 + Z \bar{Y}_1$$

2-2-4 Quadripôle assymétrique en T



$$\bar{A} = 1 + \bar{Z}_1 \bar{Y}$$

$$\bar{B} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_2 \bar{Y}$$

$$\bar{C} = \bar{Y}$$

$$\bar{D} = 1 + \bar{Z}_2 \bar{Y}$$

2-2-5 Equations

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \bar{A} \bar{U}_2 + \bar{B} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{C} \bar{U}_2 + \bar{D} \bar{I}_2 \end{cases}$$

2-2-6 Marche à vide d'un quadripôle

$$\bar{I}_2 = 0$$

$$\bar{U}_1(o) = \bar{A} \bar{U}_2$$

$$\bar{I}_1(o) = \bar{C} \bar{U}_2$$

2-2-7 Marche en court-circuit d'un quadripôle

$$\bar{U}_2 = 0$$

$$\bar{U}_1(cc) = \bar{B} \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1(cc) = \bar{D} \bar{I}_2$$

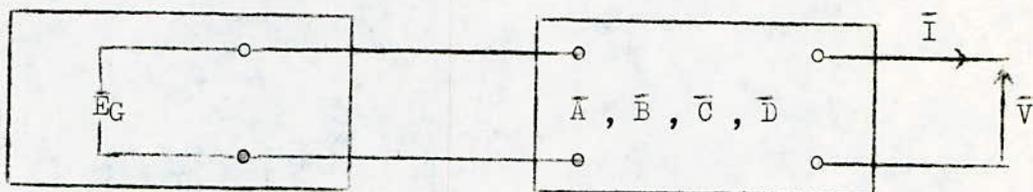
Chaque état de travail d'un quadripôle peut être exprimé par les superpositions de l'état de marche à vide et de court-circuit.

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \bar{U}_1(o) + \bar{U}_1(cc) \\ \bar{I}_1 = \bar{I}_1(o) + \bar{I}_1(cc) \end{cases}$$

2-3 Application de la théorie des quadripôles à une machine synchrone

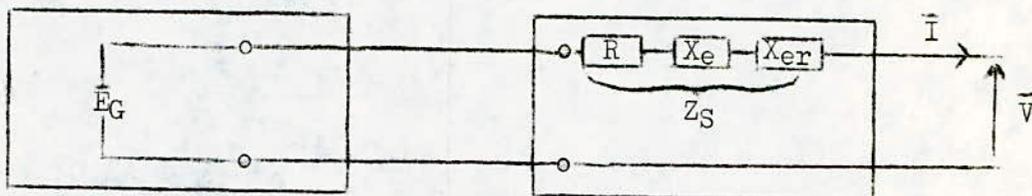
2-3-1 Machine à rotor lisse

Dans le cas d'une machine à rotor lisse, c'est à dire à entrefer constant, on peut considérer que le circuit équivalent est composé d'une source de tension parfaite et d'un quadripôle comme c'est indiqué sur la figure suivante :



Ce quadripôle est constitué d'une impédance Z_S qui regroupe la résistance des enroulements R , la réactance de fuites X_l , la réactance fictive X_{ar} (ou réactance de réaction d'induit).

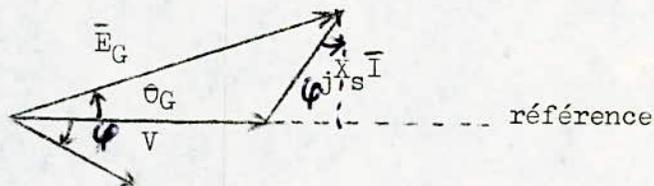
D'où :



Z_S est appelée impédance synchrone. En général, on a : $R + X_l + X_{ar} = X_S$
C'est une approximation courante, souvent justifiée, de considérer Z_S comme réactance pure.

Diagramme de fonctionnement :

Fig. 231



Ce diagramme est identique à celui d'une ligne simple, l'angle θ_g est appelé angle de charge.

A partir de ce diagramme vectoriel, on obtient facilement le lieu de l'extrémité du vecteur courant, si l'on fixe en grandeur les tensions V et E , puis si l'on fait varier le déphasage θ_g entre ces tensions.

Si l'on gradue convenablement les axes de ce dernier diagramme le point de fonctionnement donne directement les puissances active et réactive.

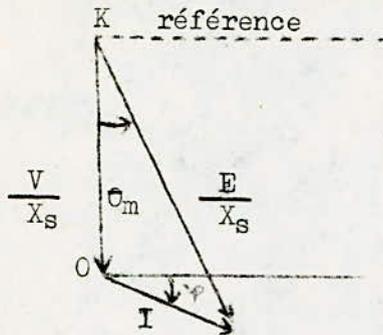


Fig. 232

Ce diagramme est obtenu, en divisant par X_s les vecteurs du diagramme - 231 en multipliant par $3V$, dans la figure 232 .

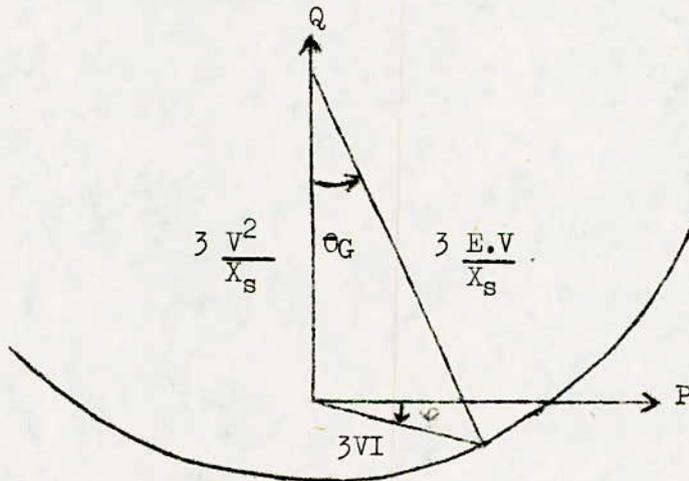


Fig. 233

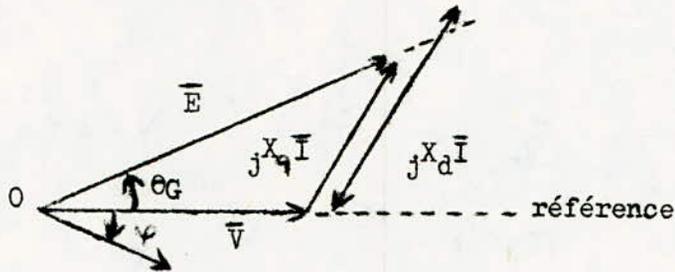
En définitive, on obtient le diagramme circulaire côté récepteur (avec R négligée), la convention de la tension conjuguée étant utilisée à la place de l'intensité conjuguée.

2-3-2 Machine synchrone à pôles saillants :

Dans cette machine, l'entrefer varie dans des proportions importantes, il est minimal sous les pôles et maximal entre ceux-ci.

La valeur de la réactance fictive X_{ar} (qui traduit l'influence du courant d'alimentation) et dans une moindre mesure celle de la réactance de fuites X_l varient avec l'angle de charge θ_g . Le paramètre B est ici fonction de θ_g .

Diagramme vectoriel de fonctionnement :



X_d : valeur maximale de X_s (réactance synchrone directe)
 X_q : valeur minimale de X_s (" " en quadrature)

Dans notre étude nous nous placerons dans le cas d'une machine synchrone à pôles lisses en posant $X_s = X_d$ pour des raisons que nous évoquerons ultérieurement dans l'étude de la stabilité dynamique.

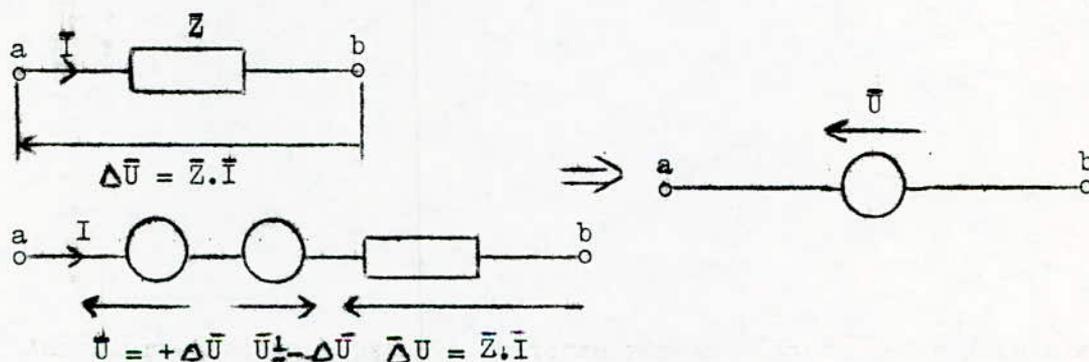
2-4 Étude d'un court-circuit biphasé à la terre par la méthode des composantes symétriques dans un réseau triphasé

2-4-1 Composantes symétriques :

Elles sont utilisées pour l'étude des systèmes dyssymétrique triphasés : soit pour l'analyse des courts-circuits, soit pour l'étude du fonctionnement des machines triphasés.

Afin de pouvoir appliquer cette méthode pour l'étude des courts-circuits assymétriques, il faut recourir au principe de la compensation qui dit :

↳ Dans un circuit électrique, une impédance \bar{Z} parcourue par un courant \bar{I} peut être remplacée par une source idéale de tension dont la valeur est égale à la chute de tension sur cette impédance ↗



Soit un système dont la source est symétrique :

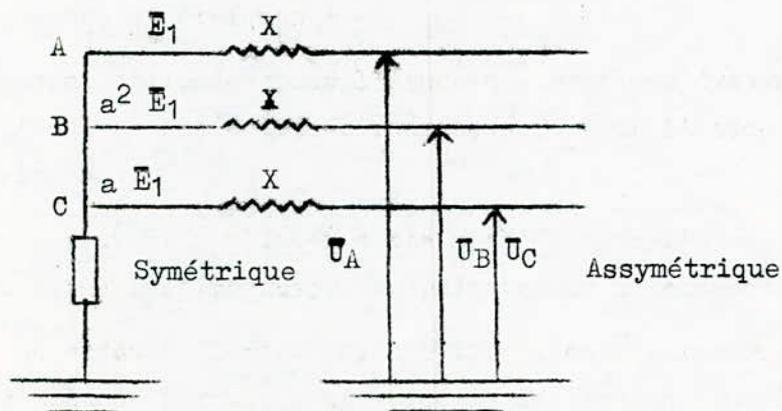


Fig. 241

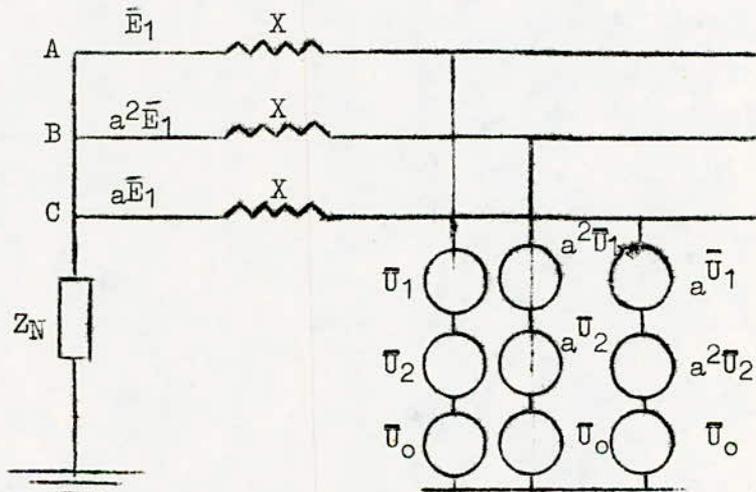
a est un opérateur vectoriel représentant une rotation de $2\pi/3$ en avance, soit en notation complexe :

$$a = e^{j2\pi/3}$$

Un système quelconque de trois vecteurs $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ peut être considéré comme la résultante de trois systèmes composants, appelés composants symétriques.

- Un système symétrique direct
- Un système symétrique inverse
- Un système asymétrique homopolaire

On peut décomposer les tensions $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ de la figure 241, en composantes symétriques.



Composantes directes : $\bar{U}_1; a^2 \bar{U}_1; a \bar{U}_1$

Composantes inverses : $\bar{U}_2; a \bar{U}_2; a^2 \bar{U}_2$

Composantes homopolaire : $\bar{U}_0; \bar{U}_0; \bar{U}_0$

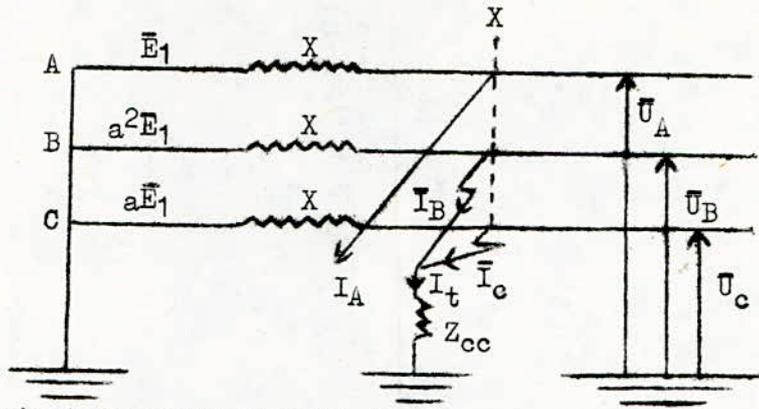
Relation liant le système de vecteurs $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ à leurs composantes symétriques :

$$\bar{U}_A = \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2$$

$$\bar{U}_B = \bar{U}_0 + a^2 \bar{U}_1 + a \bar{U}_2 \quad (24.1)$$

$$\bar{U}_C = \bar{U}_0 + a \bar{U}_1 + a^2 \bar{U}_2$$

2-4-2 Etude d'un court-circuit biphasé à la terre dans un réseau à neutre mis à la terre directement



Au point de court-circuit X, on a :

$$\begin{aligned} \bar{U}_B &= \bar{U}_C = \bar{0} \\ I_t &= \bar{I}_B + \bar{I}_C \\ \bar{I}_A &= \bar{0} \end{aligned}$$

Z_0, Z_1, Z_2 étant respectivement les impédances homopolaires, directe et inverse vues du point de court-circuit X, on a :

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \frac{1}{3} (\bar{U}_A + a \cdot \bar{U}_B + a^2 \cdot \bar{U}_C) = \frac{1}{3} \bar{U}_A \\ \bar{U}_2 = \frac{1}{3} (\bar{U}_A + a^2 \bar{U}_B + a \cdot \bar{U}_C) = \frac{1}{3} \bar{U}_A \\ \bar{U}_0 = \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) = \frac{1}{3} \bar{U}_A \end{cases}$$

Donc : $\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0$ (242)

On a aussi :

$$\bar{I}_A = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = \bar{0} \quad (243)$$

Les composantes de tension exprimant la loi d'ohm :

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= E - Z_1 \cdot \bar{I}_1 & (E = E_1) \\ \bar{U}_2 &= -Z_2 \cdot \bar{I}_2 \\ \bar{U}_0 &= -Z_0 \cdot \bar{I}_0 \end{aligned}$$

La relation 242 entraine :

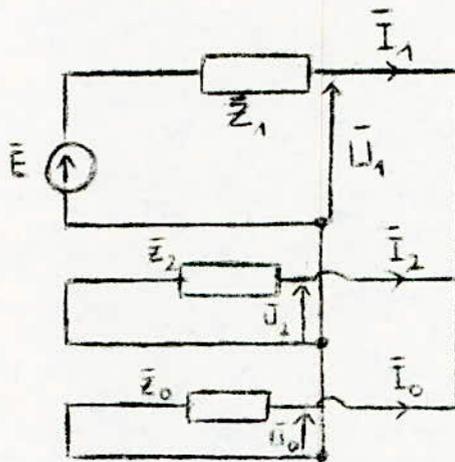
$$\begin{cases} E - Z_1 \cdot \bar{I}_1 = -Z_0 \bar{I}_0 ; & E - Z_1 \cdot \bar{I}_1 = -Z_2 \cdot \bar{I}_2 \\ E - Z_1 \cdot \bar{I}_1 + Z_2 \cdot \bar{I}_2 = 0 \\ E - Z_1 \cdot \bar{I}_1 + Z_0 \cdot \bar{I}_0 = 0 \end{cases}$$

En combinant avec la relation (243), il vient .

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}}$$

(244)

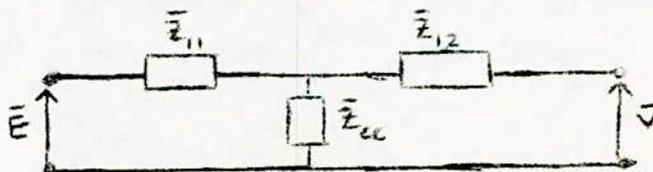
Le schéma équivalent conjugué : La relation (244) donne :



Dans l'analyse de la stabilité, le schéma direct se déduit du schéma équilibré en branchant sur celui-ci au point X où se produit le court-circuit entre chaque phase et la terre, une impédance

$$Z_{cc} = \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0} .$$

Le schéma équivalent sera alors, puisqu'on a deux sources de tension :



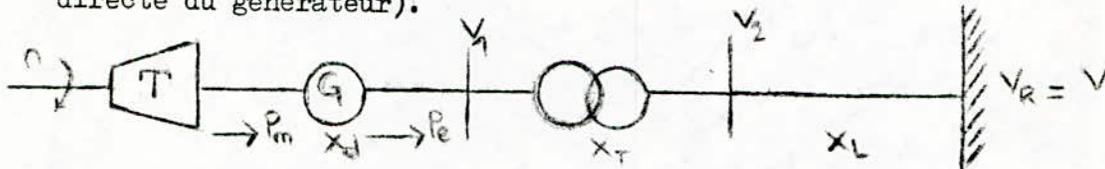
3-1. Définition:

On désigne sous le nom de conditions de stabilité statique, celles qui régissent le fonctionnement de la centrale, lorsqu'on charge lentement mais fortement les alternateurs jusqu'à ce que l'écart angulaire entre les f. é.m et la tension du réseau puisse dépasser une valeur limite, pour laquelle il ya perte de synchronisme.

3-2. Généralités:

Pour décrire la définition du concept « stabilité statique », prenons l'exemple suivant, qui décrit convenablement le système.

Supposons qu'un alternateur synchrone - G - entraîné par une turbine - T - est relié au réseau d'interconnexion par une réactance - X - (somme des réactances du transformateur, de la ligne et de la réactance synchrone directe du générateur).



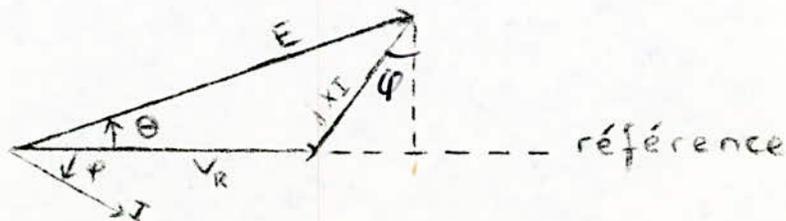
$$X = X_d + X_t + X_l$$

En fonctionnement normal la puissance - P_e - active fournie par l'alternateur est égale à la puissance mécanique - P_m - fournie par la turbine

Le groupe tourne à une vitesse correspondant à la fréquence du réseau en synchronisme avec celui-ci ().

La puissance active fournie au réseau est déterminée par le décalage angulaire θ , angle compris entre le vecteur tension - E - induit dans l'enroulement statorique et le vecteur tension de réseau - V_R-. (les pertes actives sont supposées nulles).

Diagramme vectoriel des tensions pour une phase:



La puissance débitée au réseau est donné par :

$P = 3VI \cos \varphi$, d'après le diagramme on a :

$$XI \cos \varphi = E \sin \theta, \text{ d'où } I \cos \varphi = \frac{E \sin \theta}{X}$$

$$\text{donc } P = \frac{3EV}{X} \sin \theta$$

La puissance maximale est obtenue pour $\theta = 90^\circ$

3-3. Analyse de la stabilité statique

Les variations de l'écart angulaire entraînent une variation de la puissance électrique débitée par la centrale. L'aptitude du groupe à garder le synchronisme pour une charge donnée de l'angle θ , est caractérisée par la vitesse de croissance de la puissance mécanique, cette puissance désignée sous le nom de puissance synchronisante spécifique ou encore élastique et intervient pour rétablir le synchronisme compromis.

$$P_{sp} = \frac{dP}{d\theta} = \frac{3EV}{X} \cos \theta$$

A cette puissance correspond le couple synchronisant spécifique

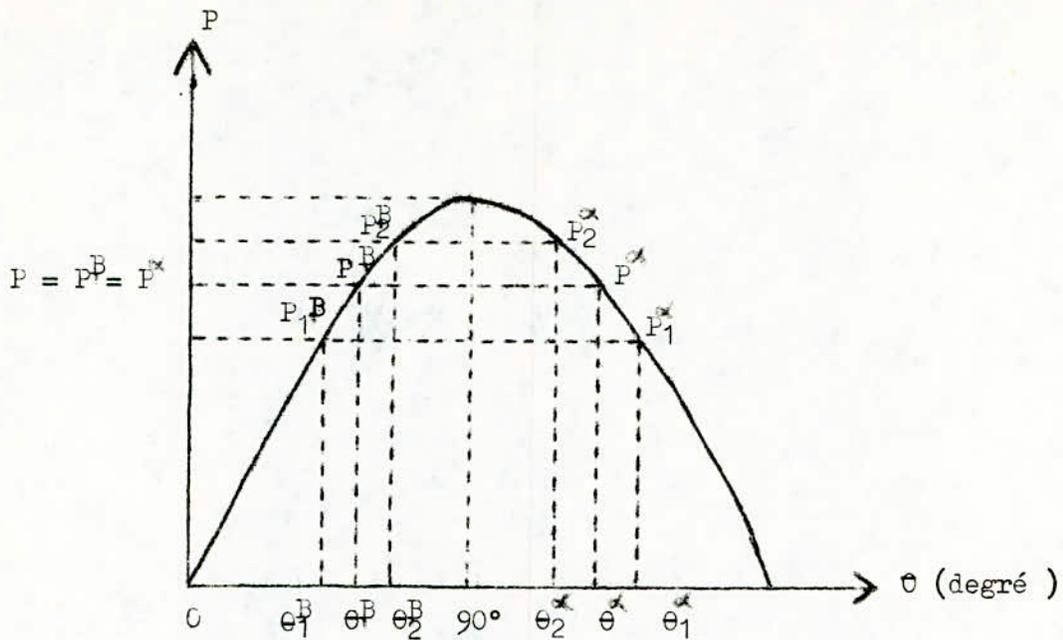
$C_{sp} = \frac{P_{sp}}{\omega_0} = \frac{3EV}{\omega_0 X} \cos \theta$, ce couple pour un faible écart θ fait apparaître un couple synchronisant :

qui tend à rétablir la valeur initiale de l'angle.

Cette puissance et ce couple synchronisants spécifiques diminuent lorsque θ croît. Pour $\theta = \frac{\pi}{2}$ ces grandeurs s'annulent, aussi, le fonctionnement n'est il possible que si $\theta < \frac{\pi}{2}$.

Fonctionnement normal

Examinons maintenant la caractéristique de puissance - angle donné par la figure suivante :



Cette caractéristique est tracée sous l'hypothèse que les pertes sont nulles, autrement dit la puissance au commencement est la même qu'à la fin.

En fonctionnement normal, la puissance débitée est $-P^B$ correspondant au décalage θ^B , si la charge augmente, la puissance débitée par la centrale P_2^B (correspondant à θ_2^B) est plus grande que celle fournie par la turbine, le rotor ralentit tandis que les régulateurs de la turbine actionnent les vannes d'admission pour augmenter le débit, la puissance fournie par la turbine augmente, ainsi le système revient à la position initiale θ^B et tourne toujours à la vitesse de synchronisme (ω_0). si la puissance débitée par la centrale diminue à P_1^B (correspondant à θ_1^B), le phénomène inverse se produit : la turbine fournit toujours la même puissance, le rotor accélère, l'angle θ va augmenter et le système revient à la position initiale θ^B cela signifie que le système travaillant au point $P(\theta^B)$ est stable.

Analysons maintenant le cas où la puissance $-P$ transportée est la même ($P = P$) mais l'angle entre la f.é.m E et la tension $-V$ est plus grand. ($\theta = \theta$)

supposons que le système fut déséquilibré (c'est à dire qu'il survient une modification temporaire quelconque du régime de fonctionnement, modification que l'on supposera s'effectuer progressivement), l'angle θ a augmenté $\theta = \theta_1$, ce qui correspond à la puissance débitée par le générateur P_1 , la puissance fournie par la turbine est plus grande, l'angle θ va augmenter

Les vecteurs \vec{E} et \vec{V} vont s'écarter. Par suite, il ya perte de synchronisme et les alternateurs décrochent.

Le système ne reviendra pas à son état de départ.

Dans ce cas, il ya stabilité instable

Supposons le cas où l'angle θ fut diminué. La puissance fournie par la centrale est P_2 et l'angle est θ_2 . La turbine fournit moins de puissance, le rotor va ralentir et l'angle θ va diminuer. Après un certain moment, la puissance mécanique devient égale à la puissance électrique et le rotor tourne à nouveau au synchronisme. Dans ce cas il ya stabilité.

En conclusion, tant que $\theta \leq \theta < \theta$ le système aura toujours tendance à revenir à son état initial.

- θ sera alors l'angle critique des oscillations lentes de puissance (pour E , X et P déterminés). Si cet angle est franchi, le système perdra le synchronisme.

Si $\theta^x = \theta^p = \frac{\pi}{2}$ la puissance correspondante est - P - maximale qui est donc la puissance limite de la stabilité statique.

Notons qu'il existe deux limites de la stabilité statique :

- Limite statique naturelle qui suppose un fonctionnement à courant

constant ($E = \text{constante}$): $P_{1s} = \frac{3EV}{X}$.

- Limite statique artificielle qui suppose l'intervention d'un régulateur

de tension (tension V_1 aux bornes de l'alternateur constante): $P_{1s} = \frac{3V_1 \cdot V}{X}$

Dans notre étude on se limitera à la limite statique naturelle.

En pratique il est impossible de transporter une puissance qui soit égale ou supérieure à la puissance limite de la stabilité statique, car le système perdrait le synchronisme dès l'apparition d'un défaut sur le système de transmission.

4-1. Définition :

Par opposition aux conditions de stabilité statique qui régissent le fonctionnement de la centrale électrique soumise à des variations lentes de puissance, les conditions de stabilité dynamique correspondent aux variations brusques de puissance généralement dues à la coupure brutale d'une charge importante ou coupure de la liaison mécanique entre turbine - alternateur, soit plus fréquemment à un défaut sur une ligne et au déclenchement de cette ligne, se traduisant par une variation brutale de l'impédance de liaison avec le réseau puissant.

4-2. Généralités :

On appelle limite de la stabilité dynamique relative à une perturbation bien caractérisée, la puissance maximum qu'il est possible de transporter sans que cette perturbation provoque la perte de synchronisme.

Dans ces conditions, les oscillations se répètent après une période de temps suffisante pour que le système revienne à l'état stable.

Dans cette étude, on se limitera à la détermination de la limite de la stabilité dynamique naturelle du système, lors d'une perturbation brusque qui se limite à un court-circuit biphasé à la terre dans une des deux voies de la ligne de transmission, sans intervention d'un réglage manuel ou automatique sur les circuits d'excitation des alternateurs de la centrale.

Cette limite dépend de cette perturbation, de sa grandeur et de sa durée.

On se place donc dans l'étude dans des conditions plus sévères qu'elles ne le sont en réalité.

N.B:

Même si l'on tient compte de l'intervention des régulateurs de tension les plus communs ne parviennent pas à réagir durant le petit intervalle de temps où ont lieu les oscillations de puissances (de l'ordre de 0,1 à 0,7 sec)

La détermination des limites de la stabilité dynamique exige dans le cas général des calculs longs et complexes.

Cette complication provient du fait qu'il intervient des grandeurs mécaniques : moment d'inertie, vitesse et accélération relatives.

Pour simplifier nos calculs, on a tenu compte de quelques hypothèses simplificatrices :

- 1- On admet que le couple moteur reste constant pendant un certain temps après la naissance de la perturbation; les régulateurs de vitesse, à la suite de la variation de vitesse qui en résulte; n'ont pas encore intervenu pour modifier l'admission du fluide moteur et par suite varier ce couple moteur dans le même sens que le couple résistant provenant du générateur.
- 2- Les machines synchrones ne sont pas munis d'amortisseurs et lors de la variation brusque de la puissance, le flux dans l'inducteur ne peut varier instantanément. La chute de tension qui se produit dans un alternateur est due seulement à la réactance transitoire, ne varie pas au moment de la perturbation.

En général dans les calculs de stabilité dynamique,

On admet généralement que cette f.e.m reste constante pendant un court intervalle de temps, de l'ordre de 0,2 sec, et il n'ya pas de diminution progressive du flux dans l'inducteur d'après les constantes de temps subtransitoire et transitoire et avec lui la f.e.m correspondante.

Etablissons la représentation de la machine synchrone pour montrer l'importance de cette dernière hypothèse dans notre étude.

4-2-1 Représentation de la machine synchrone

L'état d'une machine synchrone quelconque peut être défini par un diagramme vectoriel semblable au diagramme de Blondel.

soit Φ_i , le flux que produit l'inducteur seul; Φ , le flux de l'induit, Φ , le flux résultant qui peut être décomposé en flux en quadrature Φ_q (longitudinal) et le flux direct Φ_d (transversal). A ces flux correspondent respectivement la f.é.m en quadrature E_q , la f.é.m directe E_d et la f.é.m résultante E_r .

On a porté sur ce diagramme:

- Les axes directs O_d et en quadrature O_q .
- Les tensions aux bornes de l'alternateur et sa composante V_q .
- Le courant débité et ses composantes I_d et I_q .
- La "chute de tension" $jX'_d \cdot I$ dans la réactance transitoire.
- La "chute de tension" $jX_q \cdot I$ dans le stator, représentée par sa réactance en quadrature (la résistance équivalente est négligée)

La f.é.m. correspondante e_q' garde donc elle aussi une amplitude constante au début du régime troublé. On admettra aussi que l'amplitude du flux direct Φ_d et par suite celle de E_d , ne peuvent pas non plus varier très rapidement à cause des courants induits dans la masse polaire.

Par suite le flux résultant Φ_r et la f.e.m E_r varient lentement et d'une manière continue en conservant des positions fixes par rapport au début de la perturbation. On pourra définir la position du rotor par rapport à un axe origine tournant au synchronisme pris comme référence au moyen de l'angle θ .

Pendant les premiers instants du régime perturbé, on admet à titre de simplification approchée que la réactance à considérer est la réactance transitoire directe X_d' , ou réactance de fuites totales entre l'inducteur et l'induit, rapportée à l'induit.

Dans notre étude, nous disposons d'alternateurs hydrauliques tournant à vitesse réduite ($n = 75$ tr/mm) et de ce fait ont des rotors à pôles saillants ($P = 40$ paires de pôles). Le flux varie très vite et en toute rigueur on ne devrait considérer comme constante et liée au rotor que la f.e.m e_q' . Toutefois l'erreur commise en introduisant dans les calculs E_r au lieu de e_q' et l'angle θ au lieu de θ , n'est pas très importante.

Au cours du régime perturbé, les grandeurs électriques (courants, tensions, et puissances) passent très vite de leurs valeurs initiales à celles qui correspondent au nouvel état du système.

La f.e.m E_r , prise comme référence, conserve pendant les premiers instants de la perturbation la valeur $\vec{E}_r = \vec{V}_0 + jX_d' \vec{I}_0$ qu'elle avait tout juste avant.

Nous traiterons le générateur à pôles saillants comme s'il était à rotor lisse en négligeant la puissance provenant de la différence des dans la direction de l'axe directe et dans celle de l'axe en quadrature, puisqu'il s'agit de fonctionnement à excitation constante. Cette puissance est d'ailleurs fonction de $\sin 2\theta$.

4-2-2. Constante d'inertie et accélération

Lorsque la machine synchrone fonctionne en régime permanent le couple moteur est égale au couple résistant, si l'un des couples subit une variation, il en résulte une variation de la vitesse, égale à la vitesse de synchronisme en régime permanent, telle que l'on ait

$$I \frac{d\dot{\xi}}{dt} = C_m - C_r = C_a$$

C_a : couple net qui produit l'accélération

I : étant le moment d'inertie du groupe tournant, si on pose que θ l'écart angulaire électrique entre la f.e.m E_r et la tension V à l'arrivée de la ligne, entre cet angle θ et la vitesse relative $\dot{\xi}$ existe la relation $\dot{\xi} = \frac{d\theta}{dt}$ de telle sorte que l'équation précédente puisse s'écrire :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = C_m - C_r$$

Si on multiplie cette équation par la vitesse angulaire $\dot{\xi}$, on obtient $I \omega \frac{d^2\theta}{dt^2} = P_a = P_m - P_r = \Delta P$ qui peut s'écrire aussi :

$$M \frac{d^2\theta}{dt^2} = P_a = P_m - P_r = P_m - (P_{e1} + P_p) = \Delta P \text{ où :}$$

$M = I \omega$ est le moment angulaire

$\Delta P = P_a$ la puissance cause d'accélération

P_m : Puissance mécanique fournie par la turbine entraînant le générateur

P_e : puissance électrique fournie par le générateur au réseau

P_p : pertes de puissance dans le système de transmission.

Notons que ΔP dépend des conditions de départ, les pertes électriques sont prises en considération. En pratique dans l'étude de la stabilité on introduit une autre grandeur.

La constante d'inertie H à la place du moment angulaire - M - qui varie avec la vitesse.

L'inertie des machines synchrones dépend de la puissance nominale, de la vitesse de rotation et (éventuellement) de PD^2 - la constante d'inertie - H - qui détermine l'énergie cinétique par 1KVA, peut être calculée selon la formule

$$H = \frac{I \omega^2}{1000 P^2 S_n} \quad (\text{KWS/KVA})$$

$$(4-1) \quad H = 5,483 \frac{PD^2 \cdot n^2 \cdot 10^{-6}}{S_n} \quad (\text{KWS/KVA}) \text{ où}$$

$$\frac{PD^2}{4} = I \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

$$P = S_n \quad (\text{KVA})$$

$$n \quad - \quad (\text{tr/mn})$$

N.B : Dans certains ouvrages, on utilise une autre grandeur appelée constantes d'accélération (ou temps de lancer) qui s'exprime en secondes. Elle représente le temps fictif nécessaire pour qu'un groupe initialement au repos atteigne la vitesse de synchronisme n sous l'action du couple constant correspondant à la puissance active nominale P_n .

« C'est le quotient du double de l'énergie cinétique emmagasinée par les parties tournantes à la vitesse normale - n -, par la puissance active nominale du groupe. »

En pratique, les constantes d'accélération admises dans les groupes hydroélectriques varient entre 4 et 10 secondes d'après la puissance et la vitesse angulaire.

Finalement, l'équation de la perturbation deviendra :

$$a = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{180 \cdot f}{H \cdot S_n} \cdot \Delta P \quad (4 - 2)$$

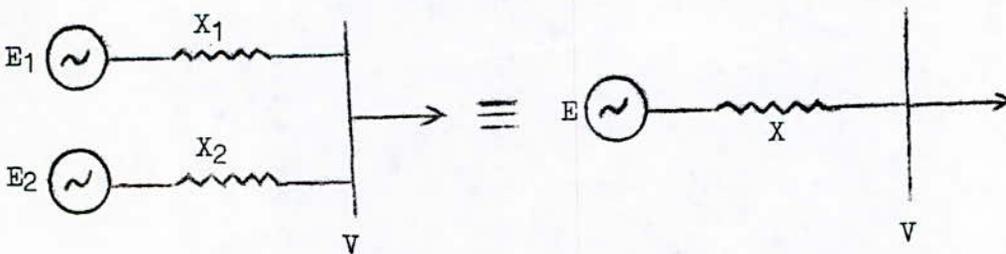
a : accélération - deg/s²

f : fréquence du réseau - HZ

4-2-3 Machine synchrone équivalente :

Les deux machines synchrones sont séparées les unes des autres par des impédances faibles et débiteront sur un même jeu de barre.

La perturbation n'affecte pas directement l'une d'elles, on peut admettre qu'elles ne présenteront pas de moment important l'une par rapport à l'autre et dans ces conditions on peut les remplacer par une machine unique et on aura :



- La réactance équivalente, des deux réactances associées en parallèle

$$X = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2}$$

- La f.e.m équivalente : $E = \frac{X_1 E_2 + X_2 E_1}{X_1 + X_2}$

- La constante d'inertie équivalente : $H = \frac{H_1 S_{n1} + H_2 S_{n2}}{S_{n1} + S_{n2}}$

Si on considère qu'on a affaire à des machines rigoureusement identique, on aura

$$X = \frac{X_1}{2} = \frac{X_2}{2}$$

(4 - 3)

$$E = E_1 = E_2$$

$$H = H_1 = H_2$$

N.B : La puissance (apparente) nominale de la machine équivalente est la somme des puissances apparentes nominales donc

$$S_n = S_{n1} + S_{n2}$$

4-3. Analyse de la stabilité dynamique

Les principales perturbations susceptibles d'entraîner la perte de synchronisme de la centrale avec le réseau sont :

- a - Brusques augmentations de la charge
- b - Exécution de manœuvres automatiques ou volontaires, modifiant la constitution du réseau.
- c - Court-circuit suivis d'une déconnection d'une partie de liaison.
- d - Une succession de ces différents phénomènes.

La recherche des limites de la stabilité dynamique, est un problème de mouvement relatif. Il s'agit de reconnaître, lorsque la centrale débite des puissances données et est le siège d'une perturbation déterminée, si les alternateurs reviennent au synchronisme avec le réseau puissant ou perdent définitivement le synchronisme après un certain moment.

La perte de synchronisme se traduit par un glissement important des pôles, suivi d'un décrochage.

4-3-1. Etude sommaire sur les principaux à coups

- a) Brusques augmentations de puissance

Ces perturbations sont importantes si:

- 1 - La charge totale dépasse la puissance limite de la stabilité statique pour X et E déterminées.
- 2 - L'augmentation de la charge cause des oscillations électromécaniques durant lesquelles l'angle θ sera plus grand que l'angle critique. Le système sera alors instable.

Pour cela, on introduit le critère de l'égalité des aires qui est tout à fait applicable pour le cas d'une machine oscillante, couplée à un réseau de puissance infinie.

L'équation des oscillations est :

$$M \frac{d^2\theta}{dt^2} = \Delta P(\theta) = (C_m - C_r) \cdot \frac{\omega}{p}$$

C_m : Couple mécanique

C_r : Couple résistat électrique

θ étant l'écart angulaire entre la f.é.m de la machine et la tension du réseau puissant.

Multiplions les deux membres de cette équation par $2 \frac{d\theta}{dt}$:

$$2 \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = 2 \cdot \frac{\Delta P(\theta)}{M} \cdot \frac{d\theta}{dt} = 2 \cdot \frac{180 \cdot f}{H \cdot S_n} \cdot \Delta P(\theta) \frac{d\theta}{dt}$$

θ est à dire:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = 2 \cdot \frac{180 \cdot f}{H \cdot S_n} \cdot \Delta P(\theta) \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

D'où, en intégrant entre le temp t_0 et t_1 :

$$\left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \frac{360 \cdot f}{H \cdot S_n} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \Delta P(\theta) d\theta$$

Et :

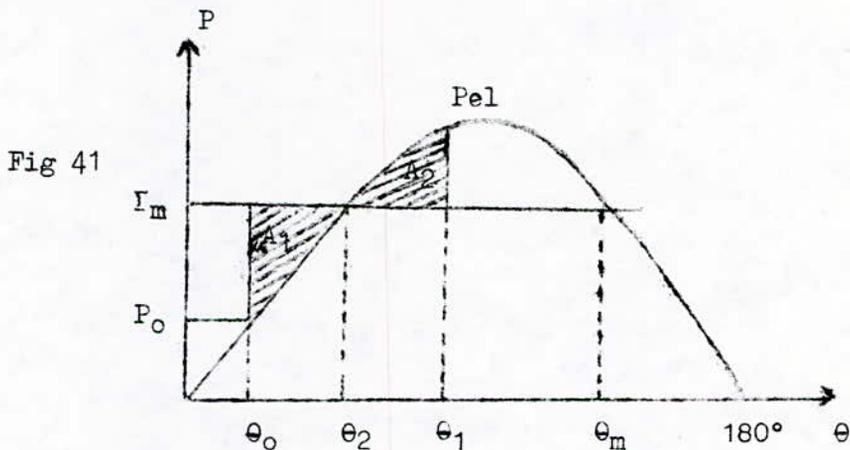
$$\frac{d\theta}{dt} = \sqrt{\frac{360 \cdot f}{H \cdot S_n} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \Delta P(\theta) \cdot d\theta} \quad (4-4)$$

Pour que le fonctionnement soit stable, il faut que la vitesse relative $\frac{d\theta}{dt}$ s'annule pour une certaine valeur θ_1 de θ et qu'au moment

l'accélération proportionnelle à $P(\theta_1)$ soit négative ou nulle, cette condition peut s'exprimer par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \Delta P(\theta) d\theta = 0 \quad [4-5] \\ \Delta P(\theta_1) = 0 \end{array} \right.$$

Cette intégrale peut être interprétée graphiquement comme l'aire entre la courbe de la puissance (la caractéristique puissance - angle) et la ligne horizontale désignant la puissance mécanique supposée constante avant et pendant l'à - coup, la caractéristique de la puissance est une sinusoïde. Ceci est fait sans réserve que les pertes actives sont négligées. Cette approximation est admissible car les pertes actives n'ont pas d'influence sur les phénomènes de grandes oscillations, elles influent seulement l'amortissement des oscillations.



L'air A_1 pour laquelle $P_m < P_{e1}$ est positive, l'air A_2 pour laquelle $P_m > P_{e1}$ est négative, les aires A_1 et A_2 peuvent s'interpréter en termes d'énergie cinétique.

Le travail résultant de la rotation provoqué par un couple

$$C = C_m - C_r, \text{ travaillant entre les angles } \theta \text{ et } \theta_0 : W = \int_{\theta_0}^{\theta} C \cdot d\theta;$$

c'est proportionnel à $P(\theta)$.

Ce travail W , qui entraîne une variation de l'énergie cinétique, est proportionnel à l'air A_1 .

Lorsque la puissance accélérante ΔP est positive, ce travail est reçu par le rotor sous forme d'énergie cinétique. Il accélère, θ croît

θ croît lorsque ΔP devient négative, le rotor freine sous l'action du couple $C = C_m - C_r$, le décalage angulaire continue à croître. Jusqu'à ce que l'énergie cinétique reçue précédemment par le rotor est restituée au réseau sous forme d'énergie électrique. Lorsque cette énergie cinétique s'annule, donc $\frac{d\theta}{dt}$ s'annule pour $\theta = \theta_1$. On a:

$$A_1 = A_2.$$

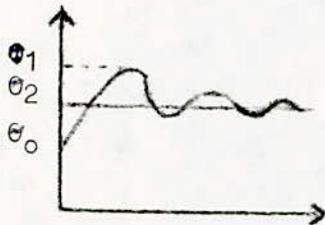
L'écart angulaire passe par un maximum correspondant à θ_1 . et après quelques oscillations amorties par les pertes actives dans le système de transmission et "le couple développé dans la masse des pôles", le décalage interne - θ - revient à la valeur stationnaire - θ_2 - et le régime est stable. Le mouvement est oscillatoire amorti.

Si au moment où $\frac{d\theta}{dt}$ s'annule, l'accélération est nulle donc $\theta = \theta_m$, on est au limite de la stabilité et le régime est stable.

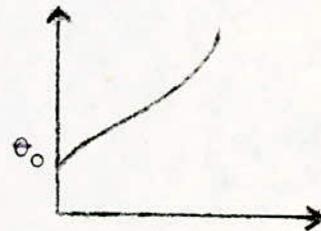
Si la vitesse $\frac{d\theta}{dt}$ ne s'annule pas, θ augmente indéfiniment.

Il en est de même si, au moment où $\frac{d\theta}{dt}$ s'annule, l'accélération étant positive, θ continue croître et la machine décroche.

Le mouvement est alors révolatif.

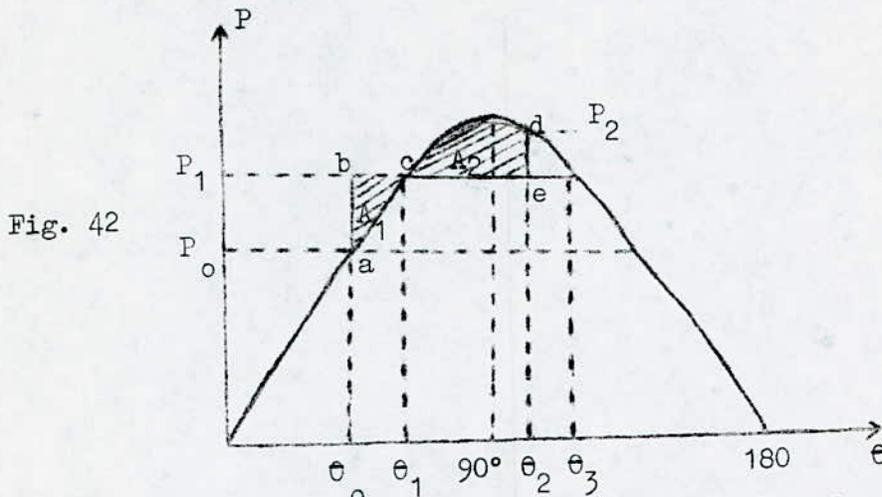


Mouvement oscillatoire amorti.



Mouvement révolatif.

Analysons les conditions de travail du système analysé , dont la caractéristique de puissance est la suivante (les pertes sont négligées) :



A la puissance $P_0(\theta_0)$, le système est en état de stabilité .

Supposons que pour une raison quelconque , la puissance mécanique fournie par la turbine à l'alternateur équivalent augmente brusquement à la valeur P_1 . Ceci peut être dû à une ouverture brusque du vannage d'admission de la turbine .

A cause de l'inertie du groupe équivalent , l'écart angulaire ne peut se déplacer d'emblée pour atteindre la valeur θ_1 . La différence entre les puissances débitée et consommée produit l'accélération du rotor et la vitesse de rotation n'est plus synchrone .

Au moment où le système atteint l'angle θ_1 , la vitesse est hypersynchrone . Le système continue à évoluer grâce à l'énergie cinétique accumulée , jusqu'au point auquel correspond la puissance P_2 et θ_2 .

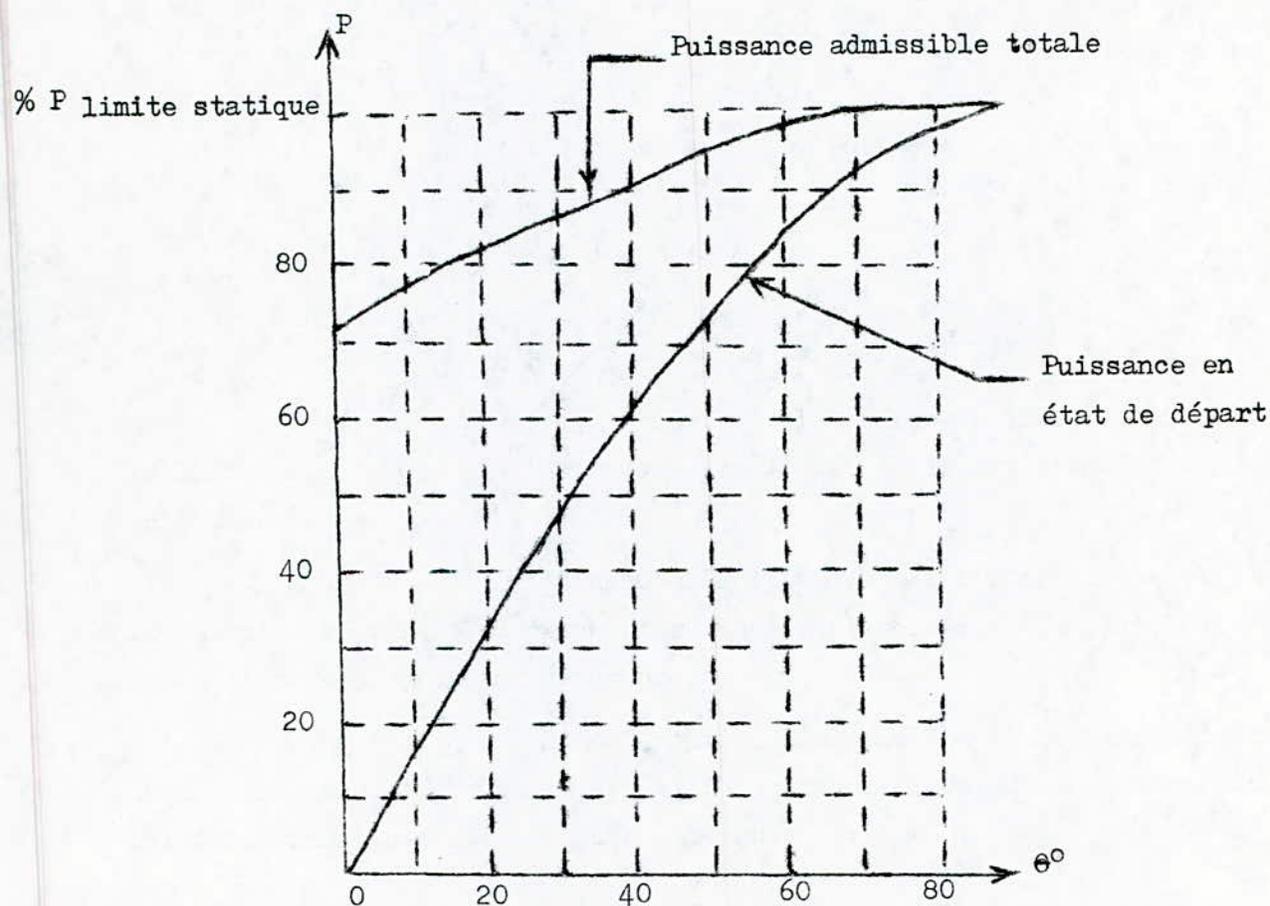
En négligeant les pertes , il faut que l'aire (abc) et l'aire (cde) soient égales pour que l'augmentation de l'écart angulaire θ cesse; c'est-à-dire : $A_1 = A_2$.

Dans ce cas le mouvement inverse aura lieu : le rotor va oxiller autour du point θ_1 et, grâce aux pertes amortissantes, l'écart se stabilisera au point θ_1 .

Le système reviendra à l'état stable seulement si lors des oscillations, l'angle θ_3 n'est pas dépassé, cet angle est l'angle critique.

Plus proche de la puissance limite de stabilité statique est le point de travail plus proche sera de l'angle critique et plus les conditions de départ sont sévères.

Il en résulte que l'augmentation admissible de la charge dépend de la puissance limite de la stabilité statique et du décalage angulaire initial, comme le montre le diagramme suivant:

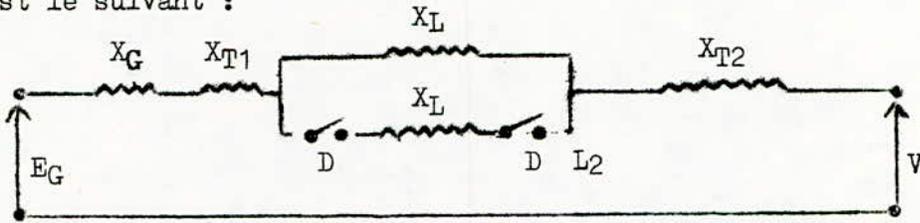


Cette puissance admissible est calculée sans considération des pertes.

La puissance limite de stabilité dynamique dans ce cas, est donc la puissance admissible totale.

b) Commutations (manœuvres) dans le réseau :

Soit le système analogue à celui de l'étude dont le schéma équivalent est le suivant :



Cette analyse doit prendre en considération deux cas :

- a-) L'état initial avant la commutation: réactance équivalente de liaison X_1 .
- b-) L'état après la commutation: réactance équivalente de liaison X_2 .

La caractéristique de puissance lorsque la réactance de liaison passe de X_1 à X_2

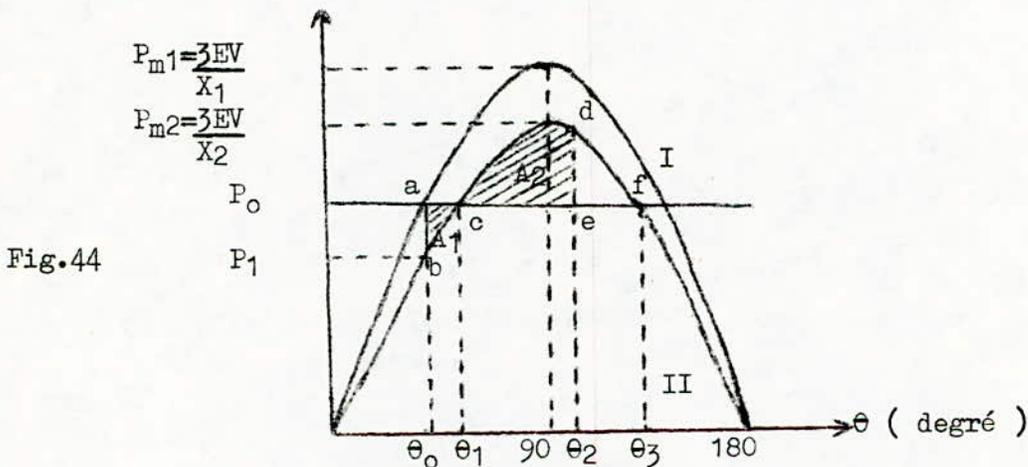


Fig.44

Le point (P_0, θ_0) sur la caractéristique I correspond à l'état de départ qui était stable. Lorsque la ligne 2 est coupée il y a changement de la configuration du circuit de transmission. A cette nouvelle configuration correspond la caractéristique II. Au moment de la coupure de la ligne 2, la puissance transmise diminue à la valeur P_1 , mais le déphasage électrique angulaire ne peut passer brutalement de θ_0 à θ_1 à cause de l'inertie du groupe générateur.

L'équilibre des couples n'est rétabli que par apparition d'un couple d'inertie.

L'équation du mouvement relatif du rotor par rapport à un axe gardant un déphasage constant et tournant à la vitesse de synchronisme ω_0 (frottement et pertes actives sont négligées).

$$C_m = \frac{3EVP}{\omega X_2} \sin\theta + I \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Ce couple mécanique équilibre à ce moment le couple électrique

$$C_e = \frac{3EVP}{\omega X_1} \sin\theta_0 \quad \text{on a donc}$$

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{3EVP}{\omega} \left(\frac{\sin\theta}{X_2} - \frac{\sin\theta_0}{X_1} \right) = 0 \quad (4-6)$$

Le surplus de puissance $P_0 - P_1$ produit l'accélération du rotor du générateur et le point de travail passe au point C, et à cause de l'inertie du groupe, il continue à se déplacer jusqu'au point d.

Pour que l'augmentation de θ cesse, il faut que l'aire (abc) = A_1 soit égale à l'aire (cde) = A_2 .

Si l'angle θ_3 n'est pas dépassé, il ya le déplacement dans le sens inverse. Après des oscillations autour du point C, l'état stable de la stabilité s'établira grâce aux pertes dans le système.

D'après l'équation (4) on constate qu'on ne pourra retrouver un état stable que si :

$$X_2 < \frac{X_1}{\sin\theta_0} \quad \text{dans ce cas : } X_1 < X_2 < \frac{X_1}{\sin\theta_0}$$

Tant que θ est inférieur à l'angle θ_2 ; il ya accélération.

Dans la mesure où on a négligé les frottements (et tous les facteurs d'amortissement du mouvement), cette accélération ne cesse

que lorsque $\theta = \theta_1$. Mais la machine a emmagasiné une énergie cinétique qui lui fait passer cette position.

Le dernier terme de l'équation (4-6) devient positif et l'accélération devient négative: la machine ralentit. Il en est ainsi tant que θ ne dépasse pas la valeur ($\pi - \theta_1$) à partir de laquelle le dernier terme de l'équation (4-6) redevient négatif. Donc :

- Si la vitesse s'annule pour un déphasage $\theta_2 < \pi - \theta_1$, elle change alors de signe et des oscillations s'amorcent autour de la valeur θ_1 du déphasage.

- Si la vitesse est encore positive pour $\theta_2 = \pi - \theta_1$ il ya de nouveau accélération et il s'ensuit une perte de synchronisme.

La vitesse relative se calcule d'après l'équation (4-6).

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot dt = \frac{3EV}{\omega} \cdot P \left(\frac{\sin\theta_0}{X_1} - \frac{\sin\theta}{X_2} \right) d\theta$$

En intégrant de l'instant initial ($\theta = \theta_0$) à l'instant t où le déphasage a la valeur θ , on obtient:

$$I \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \frac{3EVP}{\omega} \left[(\theta - \theta_0) \frac{\sin\theta_0}{X_1} + \frac{\cos\theta - \cos\theta_0}{X_2} \right]$$

La limite de la stabilité dynamique est atteinte si le second terme de cette égalité s'annule pour $\theta_2 = \pi - \theta_1$; soit en y remplaçant $\frac{\sin\theta_0}{X_1}$ par $\frac{\sin\theta_1}{X_2}$:

$$\pi - (\theta_1 + \theta_0) = \frac{\cos\theta_1 + \cos\theta_0}{\sin\theta_1} \quad (4-7)$$

Cette formule malgré sa simplicité, n'est pas maniable car les déphasages θ ne sont pas directement connus; on l'exprime en fonction des rapports de puissance $\frac{P}{P_{m1}}$ et le rapport des réactances $\frac{X_2}{X_1}$

où P_{M1} est la puissance limite de la stabilité statique correspondant à l'écart avant la commutation et P la puissance limite de la stabilité relative à la commutation et on a :

$$\sin \alpha_0 = \frac{P}{P_{M1}} \quad \text{et} \quad \sin \alpha_1 = \frac{P}{P_{M1}} \cdot \frac{X_2}{X_1}$$

La relation [4-7] devient :

$$\alpha = \arcsin \frac{P}{P_{M1}} + \arcsin \left(\frac{P}{P_{M1}} \cdot \frac{X_2}{X_1} \right) = \sqrt{\frac{P_{M1}^2}{P^2} \cdot \frac{X_1^2}{X_2^2} - 1} + \sqrt{\frac{P_{M1}^2}{P^2} - 1} \quad [4-7]$$

qui se traduit par le diagramme suivant :

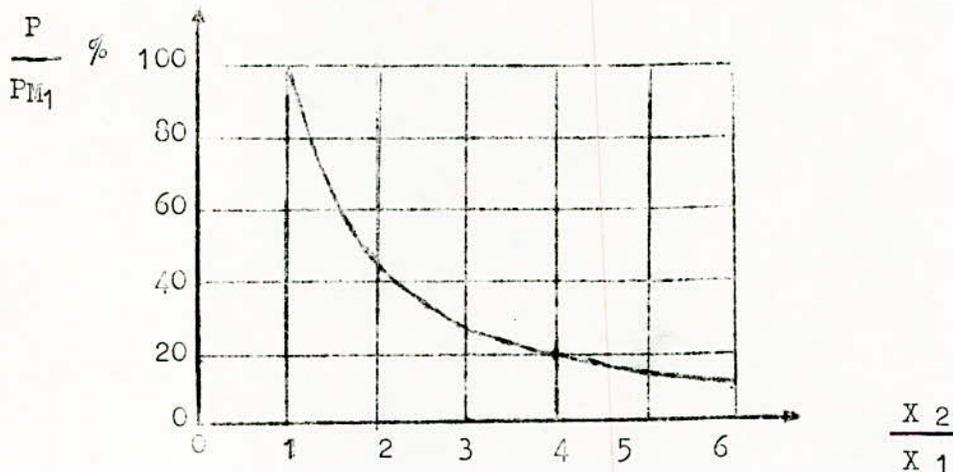


Fig. 4-5

Cette puissance limite est d'autant plus faible que la réactance de liaison en état final est plus grande.

C - COURT - CIRCUIT DANS LE RESEAU. :

C'est la plus importante perturbation susceptible de se produire dans le réseau. On doit prendre en considération non seulement les conditions de départ, mais aussi des autres conditions telles que :

- a) - L'élimination du défaut qui exige plusieurs commutations après un certain temps t_d .
- b) - Le réenclenchement des disjoncteurs qui éliminent l'élément déféctueux et ensuite rétablissent l'état de départ dans le cas où le défaut est passager.

- c) Dans le cas où le défaut persiste, il y a coupure définitive du tronçon défectueux.

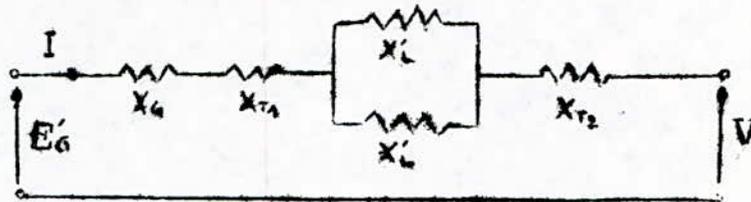
Analysons les deux premiers cas :

- Soit un court circuit biphasé à la terre en début de la première voie de la ligne de transmission du système étudié. Ce court - circuit se traduit par une modification des impédances d'entrée et de liaison qui déterminent les puissances échangées entre la centrale électrique et le réseau.

a) Analysons les différents stades de la perturbations, lorsque le défaut est supprimé par disjonction uniquement.

1/- L'état de départ est déterminé du diagramme circulaire.

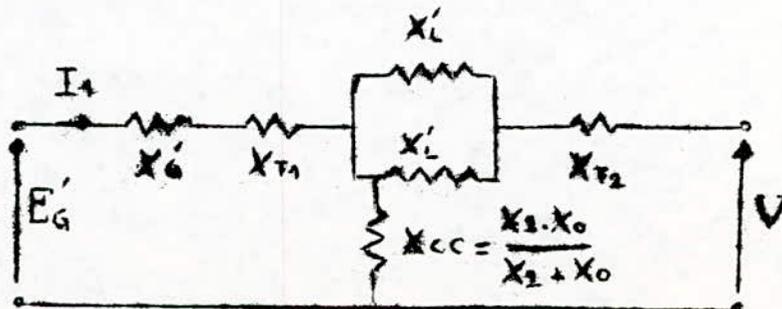
Les puissances actives, la tension à l'arrivée de la ligne, la F.E.M. du générateur équivalent et les réactances sont connues.



Ce stade correspond à la caractéristique I (voir figure 4.6).

2/- L'état du système durant le défaut :

Le schéma pour la composante directe équivalent à cet état se déduit du schéma équilibré sans court-circuit en branchant sur celui-ci, au point où se produit l'avarie entre chaque phase et la terre, la réactance de c - c X_{cc} .



La puissance de ce cas a pour expression :

$$P = 3.(\overline{V}_1.\overline{I}_1 + \overline{V}_2.\overline{I}_2 + \overline{V}_0.\overline{I}_0)$$

Les f.e.m. correspondant au courant d'excitation sont toujours équilibrées et leurs composantes inverses et homopolaires sont nulles, donc :

$$P = 3E.\overline{I}_1$$

Pour calculer les puissances fournies par le générateur en régime déséquilibré, il suffira de connaître le courant débité.

Ce court-circuit se traduit par ^{une} augmentation de l'impédance de liaison. Il permet, par opposition au cas d'un c-c triphasé à la terre, de transmettre une puissance. Il correspond à la caractéristique II (figure 46)

3/- L'état final qui correspond à la caractéristique III, (fig.46) pour laquelle la voie défectueuse a été deconnectée.

La caractéristique angulaire dans ce cas:

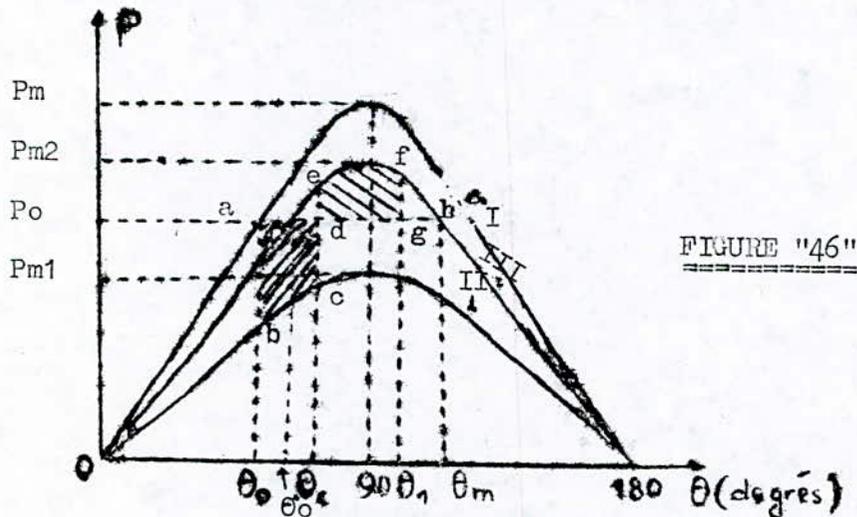


FIGURE "46"

Introduisons deux termes qui nous aideront dans cette étude : r_1 et r_2 qui sont les rapports des amplitudes des puissances électriques maximales échangées avec le réseau durant et après le défaut, respectivement, sur celle avant le défaut.

Avant le défaut	: $P_{el} = P_m \sin \theta$
Durant le défaut	: $P_{el} = P_{m1} \sin \theta = r_1 P_m \sin \theta$
Après le défaut	: $P_{el} = P_{m2} \sin \theta = r_2 P_m \sin \theta$

où P_m est la puissance limite de la stabilité statique :

$$P_m = 3 \frac{E_G \cdot V}{X}$$

Il est évident que r_1 et r_2 peuvent s'exprimer en fonction des réactances de transfert entre le générateur et le réseau puissant.

$$r_1 = \frac{X_1 \text{ avant défaut}}{X_1 \text{ durant défaut}} \quad ; \quad r_2 = \frac{X \text{ avant le défaut}}{X_1 \text{ après le défaut}} \quad (49)$$

où X_1 est la réactance de liaison.

En général X_1 après le défaut est un peu plus grande que la valeur normal :

On a donc ici :

$$1 \rangle r_2 \rangle r_1$$

On considèrera que la protection sélective est établie de manière que le déclenchement des disjoncteurs aux extrémités de la ligne se fait instantanément.

Au moment de la naissance du défaut, le générateur qui fournissait une puissance $P_0 = P_m \cdot \sin \theta_0$, ne débite plus que la puissance $r_1 \cdot P_m \cdot \sin \theta_0$ (point p sur la fig.46), la différence entre la puissance mécanique fournie par la turbine et la puissance électrique produit l'accélération de l'inducteur du générateur et l'écart angulaire croît jusqu'au point C. A l'instant t_d après naissance du défaut, l'angle θ atteint la valeur θ_c , le défaut est éliminé et la réactance de liaison prend la valeur $\frac{X}{r_2}$, à ce moment la puissance débitée par l'alternateur devient $r_2 \cdot P_m \cdot \sin \theta_c$, le point de fonctionnement saute de d en d sur la caractéristique III, mais θ croît jusqu'au moment où la vitesse relative $\frac{d\theta}{dt}$ s'annule, et les oscillations autour du point θ_c s'amorcent. Autrement dit les aires (defg) et (abcd) deviennent égales. La vitesse relative $\frac{d\theta}{dt}$ étant proportionnelle à l'aire hachurée, telle que l'aire négative compense l'aire positive. Si l'on aurait aire (abcd) = (dchg), l'annulation de la vitesse relative se ferait au point (h) et le fonctionnement serait encore stable, mais on est à la limite de la stabilité, l'angle θ atteignant la valeur critique θ_m . Si on aurait au contraire l'aire (dehd) < aire (abcd), à partir du point (h), les aires redeviennent positives; c-à-d de même sens que l'aire (abcd), la vitesse relative

ne pourrait s'annuler et il y a rupture de synchronisme, le générateur décrocherait

La condition de stabilité est que :

$$\text{aire (defh)} \gg \text{aire (abcd)}$$

Inégalité équivalente à la suivante :

$$\text{aire}(\theta_0 \text{bcdfh} \theta_m) \gg \text{aire}(\theta_0 \text{ah} \theta_m)$$

L'angle θ_m correspond au point intersection de l'horizontale P_0 avec la branche descendante de la caractéristique III .

θ_m est l'angle supplémentaire de θ'_0 on a d'ailleurs :

$$\theta'_0 = \arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{r_2} \right)$$

L'inégalité précédente peut se mettre sous la forme :

$$\int_{\theta_0}^{\theta_c} r_1 \cdot P_m \cdot \sin \theta \cdot d\theta + \int_{\theta_c}^{\theta_m} r_2 \cdot P_m \cdot \sin \theta \cdot d\theta \gg P_m \cdot (\theta_m - \theta_0) \cdot \sin \theta_0$$

On aura donc :

$$r_1 \cdot (\cos \theta_0 - \cos \theta_c) + r_2 \cdot (\cos \theta_c - \cos \theta_m) \gg (\theta_m - \theta_0) \cdot \sin \theta_0 \sqrt{4 - 11}$$

L'étude de la stabilité dynamique consiste le plus souvent à déterminer la durée critique de coupure t_{cc} , c'est-à-dire la valeur maximum du temps t_c qui peut s'écouler entre la naissance du défaut et son élimination pour que la stabilité soit assurée.

Pour déterminer la durée critique de coupure t_{cc} , il faut résoudre l'égalité (4-10) (qui signifie d'ailleurs l'égalité des aires).

ce qui donne :

$$\cos \theta_{cc} = \frac{(\theta_m - \theta_0) \cdot \sin \theta_0 - r_1 \cdot \cos \theta_0 + r_2 \cdot \cos \theta_m}{r_2 - r_1} \sqrt{4 - 11}$$

avec :

$$\theta_m = \pi - \sin^{-1} \frac{P_0}{r_2 P_m} = \pi - \sin^{-1} \frac{\sin \theta_0}{r_2}$$

La durée critique t_{cc} correspond à l'angle de phase θ_{cc} peut être déterminée, soit par des calculs, soit elle se lit sur des abaques que nous verrons dans les paragraphes suivants .

Notons que la puissance P_1 , pour laquelle l'angle θ atteint la valeur θ_m tel que $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{\theta = \theta_m} = 0$ et $\Delta P(\theta_m) = 0$ est la puissance limite de la stabilité relative à cette perturbation.

R E M A R Q U E /

Le déclenchement en une durée inférieure à la durée limite t_{cc} , constitue le procédé le plus efficace pour assurer la stabilité de la centrale. Cette durée qui de l'ordre de 0,1 S se compose :

1/- De la durée de fonctionnement du relai commandant le dispositif de déclenchement du disjoncteur (par exemple 0,025).

2/- De la durée de déclenchement du disjoncteur proprement dit, y compris celle de l'extinction de l'arc (de l'ordre de 0,1 S).

Les disjoncteurs rapides modernes permettent la coupure aisément en 0,1 S et même un peu moins, 0,07 à 0,08S, les disjoncteurs lents en 0,2 S.

b) EMPLOI DU REENCLANCHEMENT RAPIDE /

Lorsqu'on réenclenche rapidement si le défaut n'a été que passager, on se retrouve dans la position normale avant le défaut et le point de fonctionnement parcourt la sinusoïde de départ.

Soit, la puissance débitée P_0 en marche normale, tombant à la valeur P_i correspondant au point b, lors de la naissance du défaut, comme le montre la figure suivante :

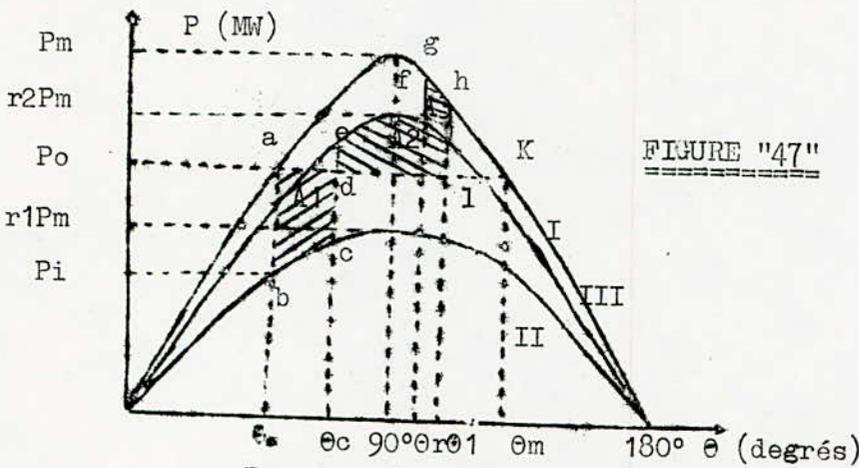


FIGURE "47"

Par un raisonnement analogue au précédent, le point de fonctionnement parcourt la caractéristique II, jusqu'au moment de déclenchement t_d (point c) où il passe à la caractéristique III.

Au moment du ^{ré}enclenchement t_r , lorsque l'angle de déphasage est θ_r , il passe à la caractéristique de fonctionnement normale I. A cause de l'énergie acquise précédemment, l'angle θ continue à croître jusqu'à la valeur θ_1 où la vitesse relative s'annule, tel que $A_1 = (abcd)$ soit égale à l'aire $A_2 + A_3 = (defghl)$. Si l'angle θ_1 atteint la valeur θ_m , l'accélération s'annule et le mouvement inverse aura lieu : le système est alors à la limite de la stabilité. Si l'angle θ_1 dépasse la valeur θ_m , l'accélération devenant positive, l'angle θ continue à croître et le système perd le synchronisme.

La puissance P_1 pour laquelle θ atteint la valeur θ_m , est la puissance limite de la stabilité dynamique pour le temps de coupure t_c et le temps de réenclenchement t_r . La condition de stabilité étant que l'aire $A_2 + A_3 = (defghkl)$ soit égale ou supérieure à l'aire $(abcd) = A_1$. Cette inégalité, peut se mettre sous la forme : aire $(\theta_0 b c d e f g h k) \gg$ aire $(\theta_0 a k \theta_m)$

$$\int_{\theta_0}^{\theta_c} r_1 \cdot \sin \theta \cdot d\theta + \int_{\theta_c}^{\theta_r} r_2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta + \int_{\theta_r}^{\theta_m} \sin \theta \cdot d\theta \gg (\theta_m - \theta_0) \cdot \sin \theta_0$$

Avec : $\theta_m = \pi - \theta_0$

d'où :

$$r_1 \cdot (\cos \theta_0 - \cos \theta_c) + r_2 \cdot (\cos \theta_c - \cos \theta_r) + \cos \theta_r + \cos \theta_0$$

$$\gg (\pi - 2 \theta_0) \cdot \sin \theta_0 \quad [4-12]$$

La détermination de la durée critique de coupure t_{cc} dans ce cas ne peut être faite analytiquement, ce qui rend la vérification de l'inégalité $\sqrt{4 - 12}$ difficile. Elle ne peut se faire que par tâtonnement par une méthode appelée " pas à pas " .

Notons que t_{cc} pour ce cas est supérieur à celui du cas de déclenchement simple à cause du ralentissement produit lors du passage de la caractéristique III à la caractéristique I.

Rappelons que pour que la stabilité soit assurée, il faut d'abord que la coupure du tronçon défectueux se produise en un temps t_c , inférieure à t_{cc} . Mais il faut ensuite que le réenclenchement soit réalisé en un temps t_r , tel que la centrale soit restée stable pendant l'intervalle de temps $t_r - t_c$ où elle fonctionne avec le tronçon éliminé. Cet intervalle $t_r - t_c$ ne doit pas être inférieur à la durée de déionisation de l'arc qui est de l'ordre de 0,15 à 0,2 secondes pour le réenclenchement triphasé (un peu plus grand pour le réenclenchement monophasé $\sim 0,5$ seconde). Sa limite inférieure doit tenir compte aussi de la durée de la cause du défaut. Ces deux conditions combinées amènent à la conclusion que la valeur à conseiller pour t_r est environ 0,25S avec une durée de coupure t_c d'environ 0,1 seconde.

c) Si le défaut persiste, on peut être amené à alimenter le réseau par une seule voie, soit à couper définitivement l'alimentation.

4.3.2. METHODE CALCUL DES LIMITES DE LA STABILITE DYNAMIQUE / 1/ Notons, à titre indicatif, qu'il existe des modèles réduits dynamiques au micro-réseau qui permettent d'étudier expérimentalement les problèmes les plus variés de stabilité.

- Pour des calculs "à la main", on a 2 méthodes :

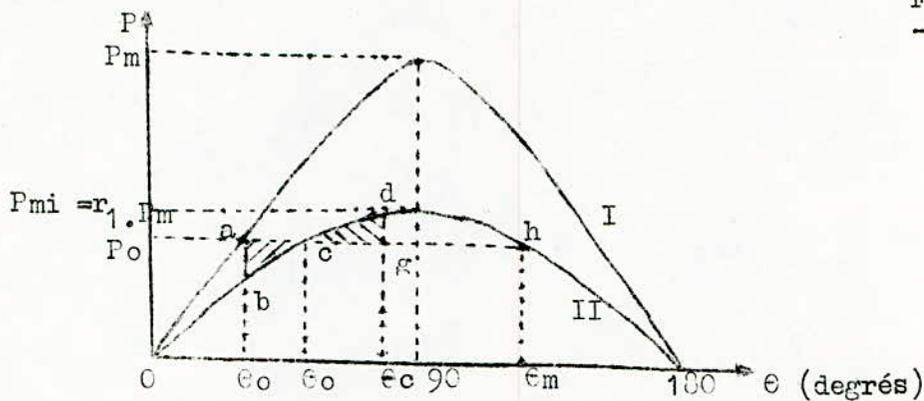
la méthode des abaques et la méthode de calcul itératif "pas à pas".

a) Méthodes des courbes prédéterminées /

((Voir KIMBARK , volume I , pages 152 à 156 et pages 170 à 175)

- Pour donner une idée sur la construction de ces abaques, étudions le cas d'un défaut non-déconnecté ; on a les caractéristiques de puissance durant les deux stades de la perturbation sur la figure suivante :

Fig. 4-8



Avant l'apparition du défaut, le fonctionnement est sur la caractéristique I. près l'apparition du défaut, on passe à la caractéristique II. A cause de l'inertie du groupe, le point de fonctionnement en a, passe en b pour un angle θ_0 . L'augmentation de la réactance de liaison a pour conséquence que la puissance maximum devient $P_{mi} = r_1 \cdot P_m$.

La puissance motrice, égale à la puissance électrique débitée par le défaut n'ayant pas changé reste : $P_o = P_m \cdot \sin \theta_0$

La puissance débitée tombe à la valeur $r_1 P_m \cdot \sin \theta_0$ et varie ensuite suivant la loi $r_1 \cdot P_m \cdot \sin \theta$.
L'équation de l'équilibre devient alors :

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{180 \cdot f}{H \cdot S_n} (P_m \cdot \sin \theta_0 - r_1 \cdot P_m \sin \theta) \quad [4 - 13]$$

La signification physique est obtenue par le même raisonnement que dans le cas de déclenchement, le passage à la caractéristique III n'ayant pas lieu.

La condition de stabilité dans ce cas :

$$\text{aire } (c d h g) \gg \text{aire } (a b c).$$

Pour étudier analytiquement l'équation [4 - 13], nous allons la mettre sous la forme :

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{1}{M'} \cdot \left(\frac{\sin \theta_0}{r_1} - \sin \theta \right)$$

où :

$$M' = \frac{H \cdot S_n}{180 \cdot f \cdot r_1 \cdot P_m}$$

Intégrons comme précédemment, en multipliant les deux membres par $2 \cdot \frac{d\theta}{dt}$, nous obtenons :

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 = \frac{2}{M'} \int_{\theta_0}^{\theta} \left(\frac{\sin \theta_0}{r_1} - \sin \theta \right) d\theta$$

d'où :

$$\frac{d\theta}{dt} = \sqrt{\frac{2}{M'}} \cdot \sqrt{(\theta - \theta_0) \frac{\sin \theta_0}{r_1} + (\cos \theta - \cos \theta_0)}$$

On peut alors calculer le temps t_c nécessaire pour que l'angle atteigne la valeur θ_c par l'intégrale :

$$[4-14] \quad t_c = \sqrt{\frac{M'}{2}} \int_{\theta_0}^{\theta_c} \frac{d\theta}{\sqrt{\frac{\sin \theta_0}{r_1} (\theta - \theta_0) + (\cos \theta - \cos \theta_0)}}$$

Intégrale elliptique qui est difficile à résoudre.

En faisant un changement de variable du temps :

$$T_c = t_c \cdot \sqrt{\frac{2 \pi f r_1 P_m}{H S_n}} \quad [4-15]$$

et pour différentes valeurs de :

$$\sin \theta_0 = \frac{P_0}{P_m} \quad \text{et} \quad P = \frac{P_0}{r_1 P_m} = \frac{\sin \theta_0}{r_1}$$

Summers et Mac clure, ont calculé et construit des familles de courbes donnant les écarts angulaires en fonction du temps t , pour différentes valeurs de $\sin \theta_0$, entre 0 et 0.9 par échelons de 0.1. Connaissant l'angle critique de déclenchement θ_{cc} d'après la relation [4-11], $\sin \theta_0$ et p , on détermine la durée critique de coupure.

BYRD et PRITCHARD ont calculé aussi des abaques qui facilitent considérablement l'étude de la stabilité en présence d'un défaut supprimé par disjonction de l'élément défectueux. Pour différentes valeurs de $\sin \theta_0$, par échelons de 0.05, de 0.1 à 0.9 connaissant r_1 et r_2 et $\sin \theta_0$. La durée critique de coupure est donnée directement, sous forme d'une grandeur T_c , la même que celle déduite de la relation [4-15] .

$$t_{cc} = \tau_c \cdot \sqrt{\frac{H \cdot S_n}{2 \cdot \Pi \cdot f \cdot r_1 \cdot P_m}} \quad [4-16]$$

b) Méthode " pas à pas "

Cette méthode appliquée au calcul des oscillations électromécaniques a d'autres avantages que la précédente bien qu'elle soit plus difficile. Elle donne en même temps que la variation de l'écart angulaire θ en fonction du temps, d'autres caractéristiques utiles servant par exemple pour déterminer les valeurs de démarrage des protections : la vitesse et l'accélération. Elle peut faire intervenir d'autres facteurs tels que les effets des pôles saillants, l'amortissement, les actions des régulateurs de tension, etc ...

Entre les caractéristiques obtenues par cette méthode existe la relation qui résulte de l'équation des oscillations. La difficulté unique se présente quand on passe d'un stade de fonctionnement à l'autre. Elle consiste en un calcul itératif en décomposant les mouvements en mouvements élémentaires exécutés dans des intervalles de temps Δt suffisamment courts (généralement compris entre 0.02 et 0.1 s), pour que l'on puisse négliger les variations de certaines grandeurs physiques. On détermine d'abord, pour l'instant qui précède immédiatement la perturbation, les puissances fournies et absorbées par le générateur et l'angle θ_0 qui fixe la position de l'induit au commencement de la perturbation ($t=0$) par rapport au vecteur tension V tournant à la vitesse de synchronisme ω . On suppose que l'accélération est constante durant la première moitié de l'intervalle de temps, cela permet de calculer la variation linéaire de vitesse à la fin de cet intervalle :

$$\Delta W_1 = a_0 \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

où :

$$a_0^{(1)} = K \Delta P_0 = K \cdot (P_m - P_{e0} - F_p) \quad \text{où : } K = \text{constante} = \frac{100 \cdot f}{H \cdot S_n}$$

La puissance mécanique P_m est supposée constante durant le défaut.

Le changement $\Delta \theta$ à la fin de cet intervalle est considéré comme linéaire :

$$\Delta \theta_1 = W_1 \cdot \Delta t$$

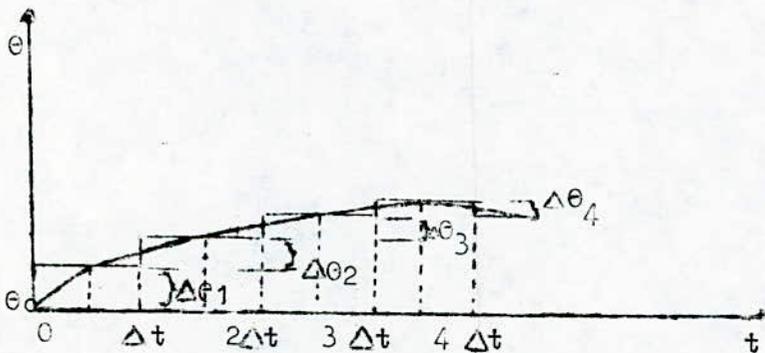
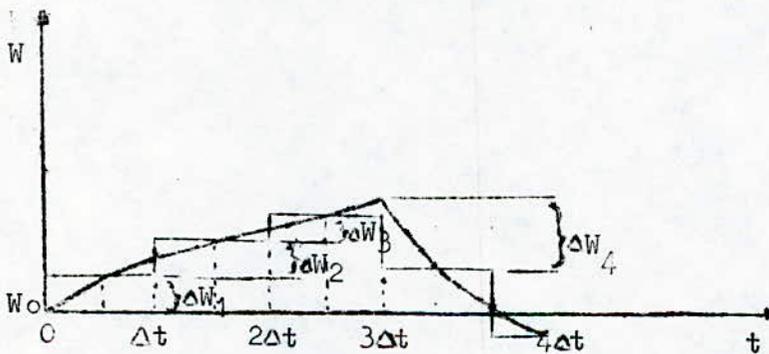
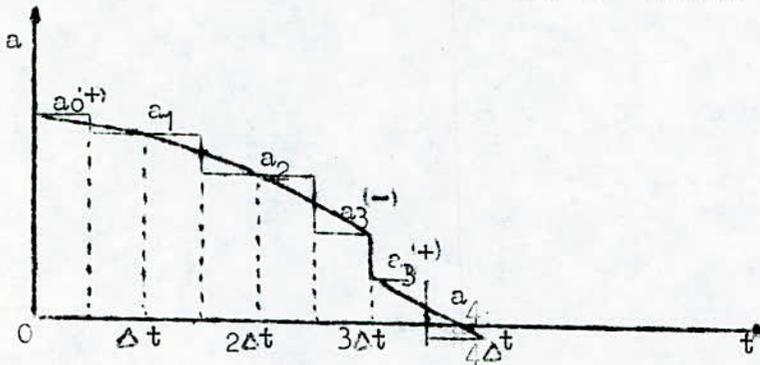
l'écart angulaire à la fin de cet intervalle de temps :

$$\theta_1 = \theta_0 + \Delta \theta_1 = \theta_0 + K \cdot \Delta P_0 \cdot \Delta t^2 / 2$$

Passant au deuxième intervalle de temps, on calcul a_1 s'appuyant sur la valeur de θ_1 pour déterminer les puissances échangées (tirées de la caractéristique angulaire), d'où le changement de vitesse : $\Delta W_1 = a_1 \cdot \Delta t$ et l'angle θ_2 à la fin du 2nd intervalle :

$$\theta_2 = \theta_1 + a_1 \cdot \Delta t^2$$

On répète les mêmes opérations et si l'on arrive au moment où a la lieu un changement de conditions (par exemple élimination de défaut), on prend en considération la correction pour ΔW . Ce changement est supposé se produire au début d'un intervalle. Sur les figures ci-dessous sont représentées les courbes $a = f(t)$, $W = f(t)$ et $\theta = f(t)$. On y a représenté 4 intervalles de temps avec changement de conditions au temps $t = 3 \cdot \Delta t$.



Ces courbes de variation des paramètres θ , W et a sont déterminées en fonction du temps en les assimilant à une suite de petits segments de droites.

L'ordre des calculs se présente ainsi :

Vitesse^B relatives:

$$\begin{aligned} \Delta W_1 &= a_0^{(1)} \cdot \Delta t / 2 & W_1 &= W_0 + \Delta W_1 \\ \Delta W_2 &= a_1 \cdot \Delta t & W_2 &= W_1 + \Delta W_2 \\ \Delta W_3 &= a_2 \cdot \Delta t & W_3 &= W_2 + \Delta W_3 \\ \Delta W_4 &= a_3^{(1)} \cdot \Delta t / 2 + a_3^{(2)} \cdot \Delta t / 2 \\ W_4 &= W_3 + \Delta W_4 \end{aligned}$$

Ecart^s angulaires :

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_0 + W_1 \cdot \Delta t = \theta_0 + a_0^{(1)} \cdot \Delta t^2 / 2 \\ \theta_2 &= \theta_1 + W_2 \cdot \Delta t = \theta_1 + a_1 \cdot \Delta t^2 \\ \theta_3 &= \theta_2 + W_3 \cdot \Delta t = \theta_2 + a_2 \cdot \Delta t^2 \\ \theta_4 &= \theta_3 + W_4 \cdot \Delta t = \theta_3 + \frac{a_3^{(1)} + a_3^{(2)}}{2} \cdot \Delta t^2 \end{aligned}$$

Dans le calcul des accélérations, on tient compte des pertes actives, désignées par le symbole Pp.

Le nombre de calculs augmente jusqu'à la constatation de l'augmentation indéfinie, ou du passage de θ par un maximum, c'est à dire mise en évidence du caractère oscillatoire ou révolutif. Il est assez important : on systématisera les calculs et on les rassemblera dans un même tableau.

4.3.3. DETERMINATION DE LA LIMITE DE LA STABILITE DYNAMIQUE /

Le maximum de puissance que peut fournir la centrale au réseau puissant sans qu'il y ait perte de synchronisme quand le système est sujet à un court-circuit dépend de la durée de ce défaut. La puissance limite, lorsque la tension E et V sont considérées comme constantes, peut être déterminée comme fonction de l'angle de coupure et de la durée du défaut. L'angle critique de coupure étant déterminé par le critère de l'égalité des aires d'après la relation [4 - 11], le temps de coupure peut être déterminé par les courbes de Summers et Mac Clure.

La courbe donnant la variation de la puissance limite en fonction du temps de disjonction du défaut, est obtenue en suivant la procédure suivante :

- Premièrement, le critère de l'égalité des aires est utilisé pour déterminer la limite de la stabilité avec une disjonction instantanée.

Pratiquement, la disjonction instantanée n'est pas obtenue, mais peut être assimilée comme une limite approchée du temps de coupure réduit. La limite de la stabilité peut être utilisée par une coupure instantanée, comme si on a déconnection de la voie défectueuse, lorsqu'il n'y a pas de défaut sur cette voie.

- A partir du critère de l'égalité des aires, on détermine la limite de la stabilité pour un défaut non-éliminé. La valeur minimum de la puissance limite trouvée est tracée comme l'asymptote qui représente pratiquement la courbe pour un temps de coupure très grand.

- On prend les valeurs intermédiaires de $\sin \theta_0$ correspondantes aux deux puissances limites calculées précédemment, et qui sont multiples de 0.10.

On détermine les angles critiques d'après la relation [4 - 11], correspondant à la puissance limite et au $\sin \theta_0$. Il ne reste alors qu'à déterminer θ_c , d'où on a θ_c d'après la relation [4 - 15].

Amélioration de la stabilité de la centrale.

Lorsque la centrale fonctionne près de la limite de la stabilité statique elle risque plus facilement la perte de synchronisme.

Les moyens apportant une amélioration de la stabilité peuvent être classés suivant qu'ils s'appliquent :

- aux groupes tournants
- au système de transmission.

5 - 1 ; Groupe tournants :5 -1- 1. Dispositions constructives :

a) Une machine est d'autant plus stable qu'elle changera plus lentement de vitesse. Pour une vitesse donnée d'élimination des courts - circuits, elle s'écartera d'autant moins de sa position d'équilibre relatif et sera par conséquent d'autant plus stable que son moment d'inertie sera plus élevé. Mais ce moyen est généralement assez onéreux , sans obtenir en contrepartie une efficacité suffisante.

b) Les groupes de grande impédance interne sont plus stables car une variation brusque de l'impédance de transfert a sur eux un effet relatif moins grand. Mais une augmentation systématique des impédances des groupes (et éventuellement des transformateur qui leur est associé) est en pratique un moyen trop onéreux et de faible efficacité.

c) Emploi d'amortisseurs puissants sur les alternateurs :

L'effet des amortisseurs est surtout notable dans le cas des petites oscillations qui peuvent survenir lors de la marche en synchronisme.

5 -1- 2 Modes d'exploitation :

a) La durée d'accroissement de l'écart angulaire étant proportionnelle à la racine carrée du moment d'inertie, on peut remédier à une trop faible inertie des groupes hydrauliques en limitant leur accélération par un freinage à action rapide, c'est ainsi que sur les turbines Pelton, on peut agir sur le déflecteur du jet pour obtenir très rapidement la réduction du couple moteur. Pour les autres types de turbines, on a recouru au freinage par accroissement de la charge : soit en enclenchant brutalement des résistances aux bornes des groupes (pour la plupart des résistances liquides dans les centrales hydrauliques), soit en découplant un groupe restant, mais cette méthode présente l'inconvénient d'obliger au recouplage, une fois la perturbation terminée.

b) La stabilité statique d'un groupe est accrue par le réglage de sa tension aux bornes. Pour la stabilité dynamique, il faut tout d'abord combattre la diminution des flux et les accroître ensuite. On est donc conduit à surexciter fortement la machine au moment d'une perturbation. La surexcitation doit se manifester très promptement pour être efficace. Ceci ne peut être obtenu qu'au prix de dispositions spéciales et l'emploi d'excitatrices dont les constantes de temps peuvent être réduites par divers procédés :

- L'excitatrice pilote est munie d'un appareillage électronique de commande, qui par envoi d'impulsions de courant à la fréquence du courant alternatif est capable d'augmenter rapidement la tension délivrée par l'excitatrice principale.

- On emploie des systèmes d'excitation séparés alimentés par des redresseurs munis d'un dispositif de régulation.

Lorsque les réseaux sont munis de protections et de disjoncteurs rapides fonctionnant par exemple en 0,15 sec. Les défauts peuvent être éliminés avant que la surexcitation rapide ait eu le temps d'arrêter la décroissance des flux. Celle-ci n'a donc aucune influence sur le choc causé au réseau par l'apparition du C-C, sauf si les protections rapides sont défectueuses. Par contre elle exerce un effet favorable sur la période troublée qui suit l'élimination du défaut. La surexcitation rapide ne se classe, dans les moyens d'améliorer la stabilité, qu'après l'élimination rapide des courts-circuits. Lorsqu'il s'agit d'un court-circuit que les protections n'ont pas éliminé, il est nécessaire de supprimer la surexcitation au bout de quelques secondes d'application. En effet, à cette époque, son rôle favorable a cessé et il convient de ne pas accroître par son maintien, les courants de C-C et les surintensités dans les différents circuits de l'alternateur et des excitatrices.

5 - 2 - Améliorations dans la conception du système de transmission.

a) Action sur les impédances de transfert :

- Mises en parallèle de plusieurs lignes : moyen efficace mais qui serait onéreux s'il n'était pas compensé par des économies (réduction de section et surtout réduction de tension), ou justifié par d'autres avantages (sécurité d'alimentation).

- Utilisation de conducteurs en faisceaux qui réduit l'inductance linéique des lignes aériennes.

b) Action sur les systèmes de protection.

- Élimination sélective rapide de la liaison en défaut et même, si possible, du seul conducteur de phase si le défaut est monophasé à la terre (réclenchement monophasé).

- Pratique du réclenchement automatique rapide du fait que dans les réseaux de transport, plus de 90 % des défauts sont fugitifs.

- Élimination sélective définitive des liaisons affectées de défaut, si les défauts sont permanents.

c) Emploi de compensateurs synchrones :

Ce moyen est trop coûteux, on ne l'utilise que lorsqu'ils participent au réglage de la tension dans les lignes longues.

CHAPITRE -6- ETUDE PRATIQUE /

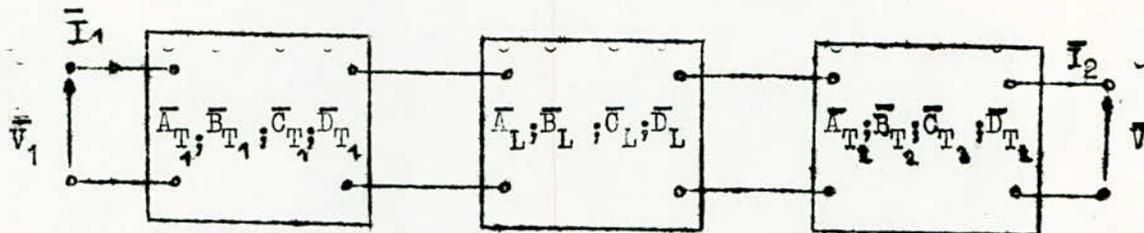
La puissance maximum transmissible n'est pas uniquement limitée par la puissance des groupes, l'échauffement des ~~convertisseurs~~ et par les chutes de tension mais aussi par le facteur de la stabilité.

6.1. Calcul des limites de la stabilité statique /

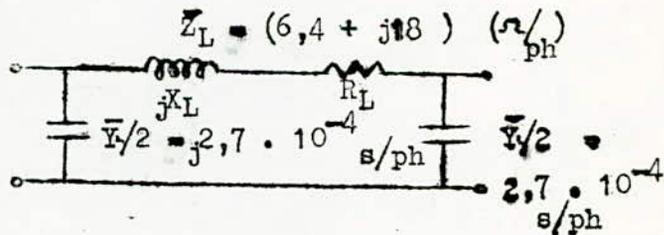
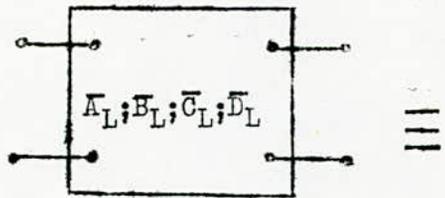
6.1.1. Fonctionnement à tension aux bornes des alternateurs constantes /

Les tensions à l'arrivée et à l'entrée du système de transmission d'énergie T1 - L - T2 sont maintenues constantes.

Ce système peut être représenté par 3 quadripôles groupés en chaîne, d'où le schéma équivalent :



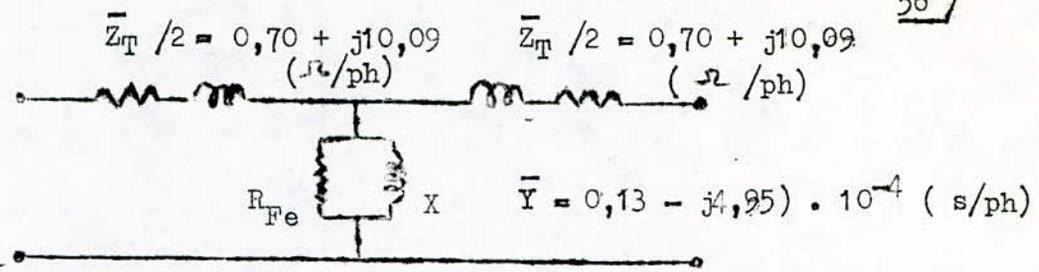
- Paramètres caractéristiques pour le quadripôle symétrique en ~~de~~ de la ligne :



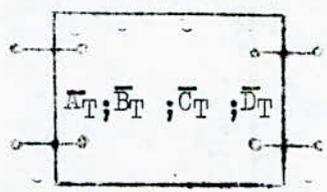
$$\begin{aligned} \bar{A}_L &= \bar{D}_L = 1 \\ \bar{B}_L &= \bar{Z}_L = 6,4 + j18 \quad (\Omega / \text{ph}) \\ \bar{C}_L &= j5,4 \cdot 10^{-4} \quad (\text{s/ph}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\bar{Z}_L &= R_L + jX_L) \\ (\bar{C} &= \bar{Y}_L = jC \cdot W) \end{aligned}$$

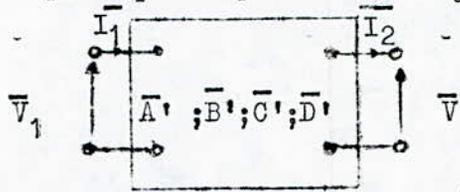
- Paramètres caractéristiques pour le quadripôle symétrique en T, d'un transformateur (T1 ou T2):



\bar{Y} peut être négligée ; ce schéma est équivalent au quadripôle :



Ce quadripôle équivalent au système de transmission total :



Les paramètres caractéristiques de ce quadripôle :

$$\begin{aligned} \bar{A}' &= \bar{D}' = 1 \\ \bar{B}' &= 2 \cdot \bar{Z}_T + \bar{Z}_L = 9,22 + j58,34 \quad (\Omega / \text{ph}) \\ \bar{C}' &\approx \bar{Y}_L = j C \cdot W \approx 0 \quad (\text{s} / \text{ph}) \end{aligned}$$

Considérons le réseau comme une charge constante demandant uniquement de la puissance active de la centrale .

Soit la puissance nominale demandée par le réseau puissant en régime permanent :

$$\begin{aligned} P_2 &= 50 \text{ (MW)} & \text{avec :} & \quad \cos \varphi_2 = 1 \\ & & & \quad Q_2 = 0 \text{ (MVAR)} \end{aligned}$$

Le courant demandé par le réseau est alors :

$$I_2 = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 262,5 \text{ (A)}$$

Etablissement du diagramme circulaire :

Les équations du quadripôle équivalent au système de transmission :

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C}' \cdot \bar{V} + \bar{D}' \cdot \bar{I}_2 \\ \bar{V}_1 &= \bar{A}' \cdot \bar{V} + \bar{B}' \cdot \bar{I}_2 \end{aligned}$$

Dans notre cas, on a :

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V} + \bar{B}' \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U} + \sqrt{3} \cdot \bar{B}' \cdot \bar{I}_2 \quad (\text{tension entre phases au bornes de l'alternateur})$$

A.N : $\bar{U}_1 = 110 + \sqrt{3} \cdot (9,22 + j58,34) \cdot 262,5 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kV})$

$$\bar{U}_1 = 117,24 \quad (13^\circ) \quad (\text{kV})$$

Le centre O_1' du cercle d'alimentation est déterminé par le vecteur :

$$\bar{l}_1' = \frac{U_1^2 \cdot \bar{D}'}{\bar{B}}$$

A.N : $\bar{l}_1' = \frac{(117,24)^2}{(9,22)^2 + (58,34)^2} (9,22 - j58,34) = 36,33 - j229,87 \quad (\text{MVA})$

Le centre O_2' du cercle récepteur est déterminé par le vecteur :

$$\bar{l}_2' = \frac{-U_2^2 \cdot \bar{A}'}{\bar{B}'}$$

A.N : $\bar{l}_2' = \frac{(110)^2}{(9,22)^2 + (58,34)^2} (9,22 - j58,34) = -31,98 + j202,35 \quad (\text{MVA})$

Le vecteur de référence \bar{N}_2' :

$$\bar{N}_2' = \frac{U_1 \cdot U_2}{\bar{B}'}$$

A.N : $\bar{N}_2' = \frac{117,24 \cdot 110}{(9,22)^2 + (58,34)^2} (9,22 - j58,34) = 34,1 - j215,67 \quad (\text{MVA})$

Du diagramme circulaire (Fig. 6.1.1), on tire les

résultats suivants :

- La puissance limite de la stabilité statique : $P_1 = 186 \quad (\text{MW})$

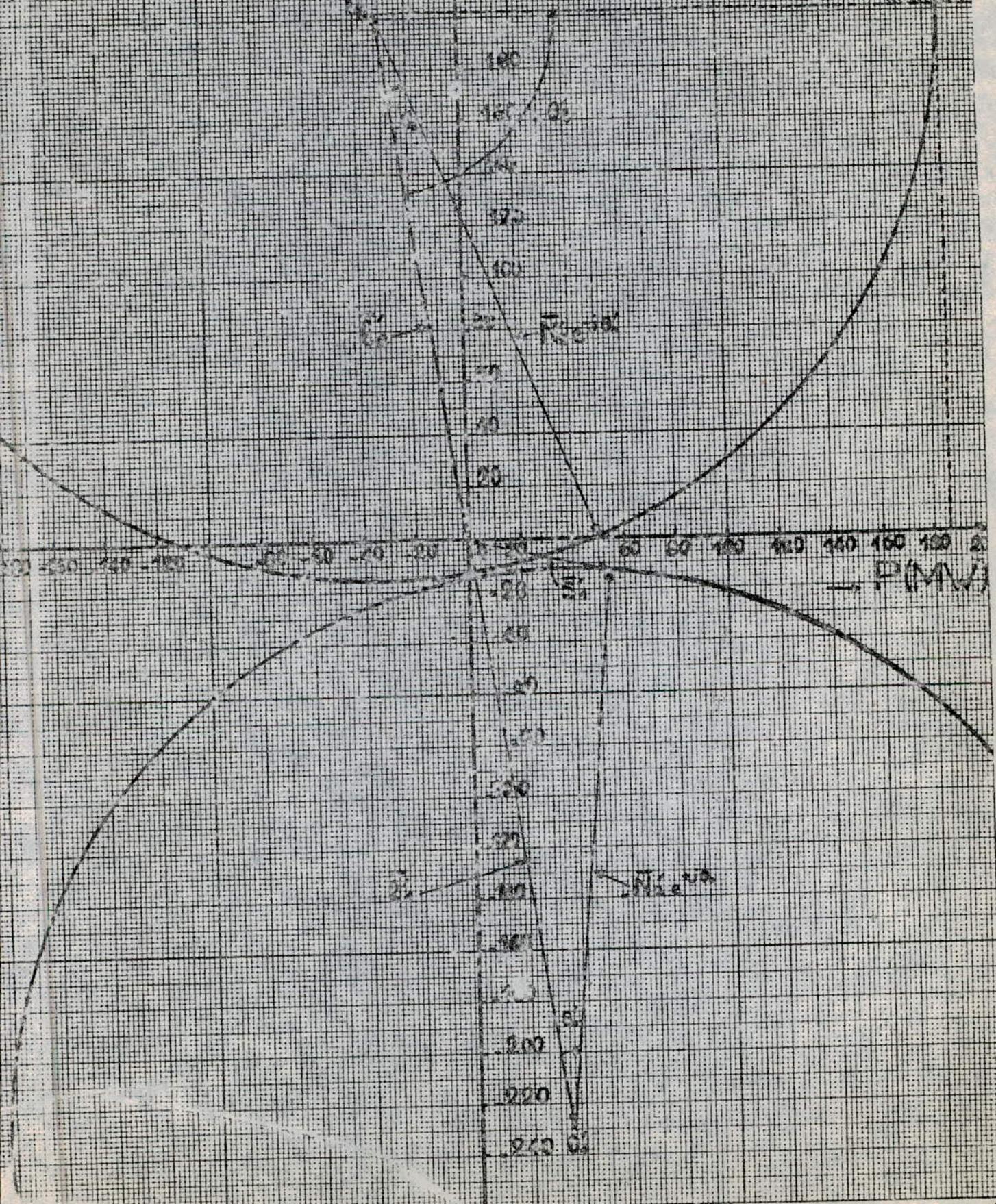
- Déphasage limite : $\theta_1 = 81,5 \quad (\text{Degrés})$

- La f.é.m Du générateur : $E = 138,63 \quad (36,5^\circ) \quad (\text{kV})$

Cette valeur de la f.é.m, ramenée du côté H.T, est mesurée sur le diagramme circulaire comme l'indique la Fig. 2.3.3.

FIG 571

Q (MVAR) limite de la stabilité d'essai

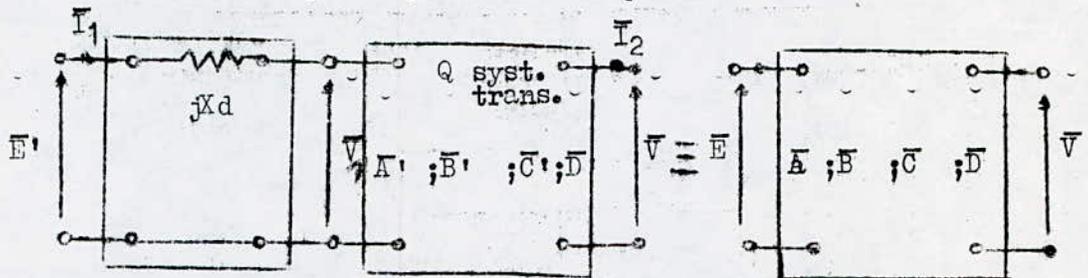


Ce cas, introduit à titre indicatif, où U est maintenue constante est envisagé si le transformateur T_1 est muni de prises d'enroulement du côté primaire pour le réglage automatique de la tension. La puissance limite de la stabilité statique est bien plus grande lorsqu'on travaille à tension constante aux bornes du générateur, qu'en maintenant la f.é.m constante (c-à-d à excitation constante) comme le montrent les Fig. 611 ET Fig. 612. Dans la suite de l'étude, on travaillera uniquement à f.é.m constante.

6.1.2 Fonctionnement à f.é.m E constante :

L'alternateur pouvant être considéré comme un quadripôle (voir paragraphe 2,3).

Le quadripôle équivalent au système total :



E' : f.é.m entre phase et neutre.

Le courant demandé par le réseau puissant étant toujours :

$$I_2 = 262,5 \text{ (A)}$$

$$\text{et : } \cos \varphi_2 = 1 \text{ (} Q = 0 \text{ (MVAR))}$$

Les équations de ce quadripôle :

$$\begin{aligned} \bar{E}' &= \bar{V}_1 + j X_d \cdot \bar{I}_1 = \bar{A}' \cdot \bar{V} + (\bar{B}' + j X_d) \cdot \bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{V} + \bar{D} \cdot \bar{I}_2 \end{aligned}$$

Les paramètres caractéristiques de ce quadripôle :

$$\bar{E}' = \bar{A} \cdot \bar{V} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{V} + \bar{D} \cdot \bar{I}_2$$

Où :

$$\bar{A} = \bar{A}' = 1$$

$$\bar{D} = \bar{D}' = 1$$

$$\bar{B} = \bar{B}' + j X_d (\text{adap}) = 9,22 + j (112 + 58,34) = 9,22 + j 170,34 \text{ (} \Omega / \text{ph)}$$

$$\bar{C} \approx -\bar{Y}_L \approx 0 \text{ (s / ph)}$$

- Calcul de la f.é.m-E entre phases ramenée du côté H.T (110 kV) :

$$\bar{E} = \sqrt{3} \cdot \bar{E}' = \bar{U}_1 + j \cdot \sqrt{3} \cdot X_d \cdot \bar{I}_1$$

A.N : $\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = 262,5 \text{ (} \underline{\quad} \text{ } ^{\circ} \text{) (A)}$

$$\bar{U}_1 = 114,20 + j 26,53 \text{ (K)}$$

$$\bar{E} = 114,20 + j 77,45 \text{ (kV)}$$

$$\bar{E} = 138,00 \text{ (} \underline{34,14} \text{ } ^{\circ} \text{) (kV)}$$

Le centre O₁ du cercle d'alimentation est déterminé par le vecteur :

$$\bar{L}_1 = \frac{\bar{E}^2 \cdot \bar{D}}{\bar{B}}$$

A.N :
$$\bar{L}_1 = \frac{(138)^2 \cdot 1}{(9,22)^2 + (170,34)^2} \cdot (9,22 - j170,34)$$

$$\bar{L}_1 = 6,04 - j111,47 \text{ (MVA)}$$

Le centre O₂ du cercle récepteur est déterminé par le vecteur :

$$\bar{L}_2 = \frac{-U^2 \cdot \bar{A}_u}{\bar{B}}$$

A.N :
$$\bar{L}_2 = \frac{-(110)^2 \cdot 1}{(9,22)^2 + (170,34)^2} \cdot (9,22 - j170,34) \text{ (MVA)}$$

$$\bar{L}_2 = -3,83 + j50,83 \text{ (MVA)}$$

Le vecteur référence :

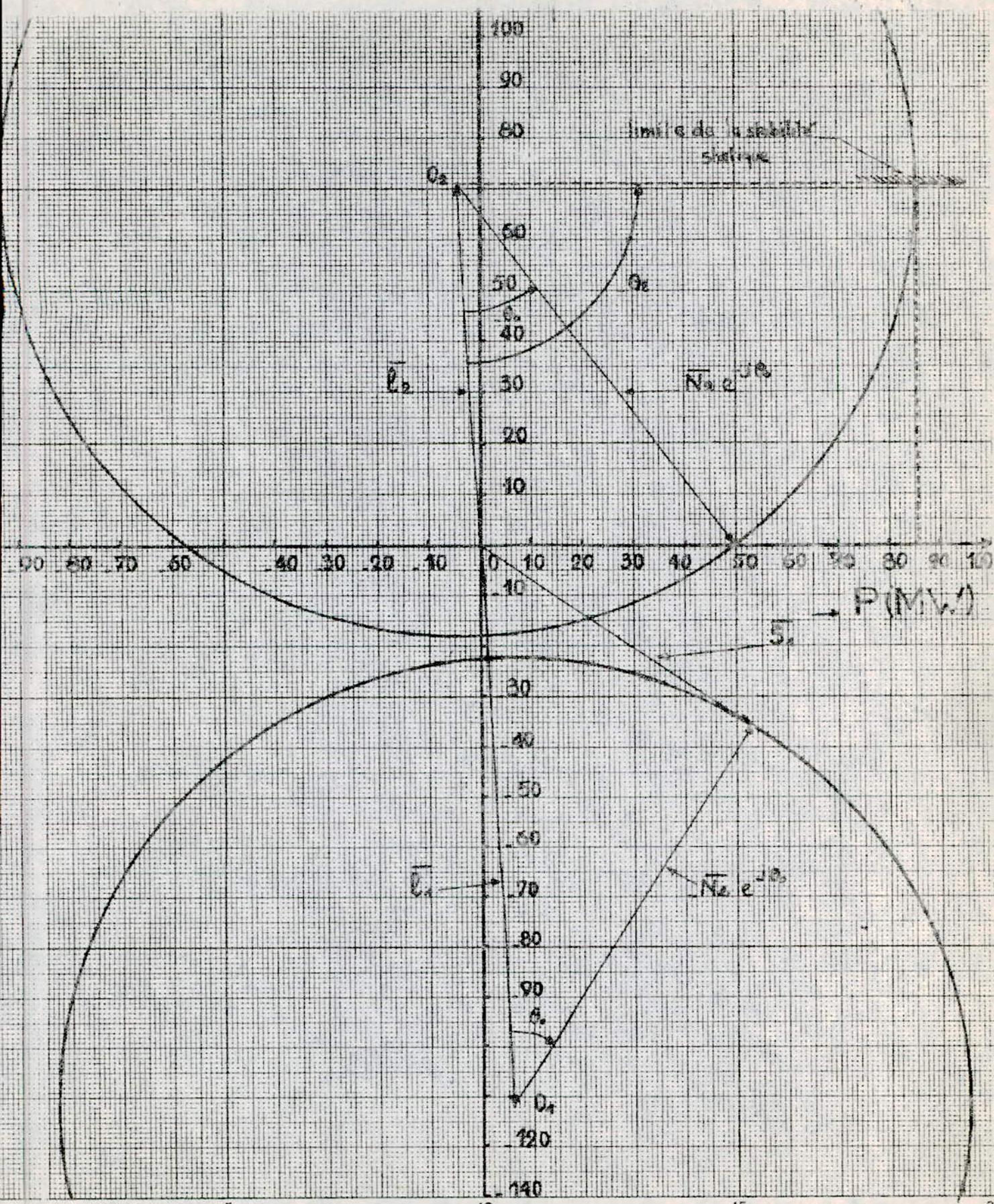
$$\bar{N}_2 = \frac{E \cdot U}{\bar{B}}$$

$$\bar{N}_2 = \frac{138 \cdot 110}{(9,22)^2 + (170,34)^2} \cdot (9,22 - j170,34) \text{ (MVA)}$$

$$\bar{N}_2 = 4,81 - j88,86 \text{ (MVA)}$$

Du diagramme circulaire (Fig. 612), on tire les résultats suivants :

.../...



- LA puissance limite de la stabilité statique : $P_1 = 85,5$ (MW)
- L'écart angulaire limite : $\theta_1 = 87,5$ (degrés)
- Les pertes actives pour une puissance reçue par le réseau puissant de 50 (MW) (donc pour un courant $I_2 = 262,5$ (A)) : $P_p = 2$ (MW) .
- Calculons maintenant la puissance limite de la stabilité statique en négligeant les pertes :

La tension aux bornes d'un alternateur :

$$\bar{U}_1 = \bar{U} + j\sqrt{3} \cdot (X_{T1} + X_L + X_{T2}) \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{E} = \bar{U}_1 + j\sqrt{3} \cdot X_{d(\text{adap.})} \cdot \bar{I}_1$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2$$

La puissance limite :

$$P_1 = \frac{E \cdot U}{X_{d(\text{adap.})} + X_{T1} + X_L + X_{T2}}$$

A.N :

$$\bar{U} = 110 \text{ (} \underline{0^\circ} \text{ (kV))}$$

$$\bar{U}_1 = 110 + j 26,53 \text{ (kV)}$$

$$\bar{U}_1 = 113,15 \text{ (} \underline{13,56^\circ} \text{ (kV))}$$

$$\bar{E} = 110 + j 77,45 \text{ (kV)}$$

$$\bar{E} = 134,53 \text{ (} \underline{35,15^\circ} \text{ (kV))}$$

RESULTS /:

$$- E = 134,53 \text{ (} \underline{35,15^\circ} \text{ (kV))}$$

$$- P_1 = 86,87 \text{ (MW)}$$

$$- \theta_1 = 90,00 \text{ (degrés)}$$

CONCLUSION /

En négligeant les pertes actives dans le système de transmission (donc les résistances), on ne commet pas d'erreur notable en utilisant la puissance limite de la stabilité statique calculée à la place de celle mesurée sur le diagramme circulaire. Ce qui sera utile pour l'étude de la stabilité dynamique.

6.2. Calcul des limites de la stabilité dynamique /

Analysons les différents états correspondant à la perturbation (court-circuit biphasé à la terre).

a) Conditions de départ /

- La puissance maximum transmissible correspond à la puissance limite de la stabilité statique : $P_m = 86,87 \text{ [MW]}$.
- On considère un transfert d'énergie de 50 MW entre la centrale et le réseau.

- La f.e.m. constante : $E = 138 \angle 35,15^\circ \text{ [kV]}$ (ramenée).

- La réactance de liaison : $X_1 = X_d (\text{adap}) + X_e + 2 \cdot X_T$

$$X_1 = 170,34 \text{ [}\Omega\text{]}$$

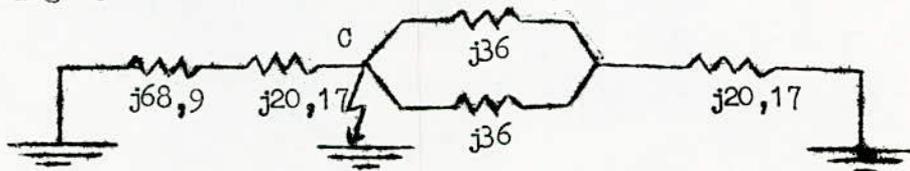
Caractéristique correspondante I sur la figure 6 2 1

b) Etat durant le court-circuit /

Déterminons d'abord les réactances inverse, homopolaire et directe vue du point de court-circuit :

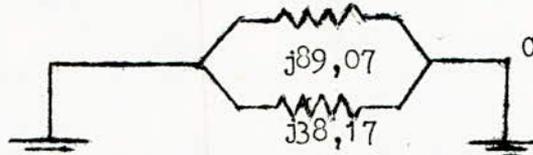
- Schéma équivalent pour la composante inverse :

On ne tiendra pas compte des admittances transversales et des résistances vu leur influence négligeable. Le réseau puissant est considéré comme une charge constante de réactance nulle.



.../...

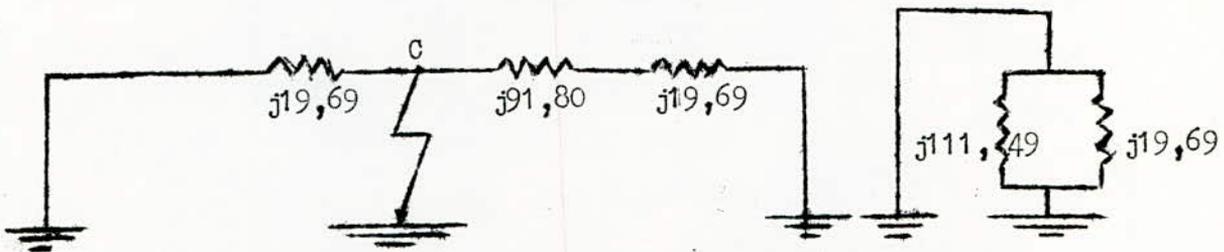
La réactance inverses vue du point de Court-Circuit :



$$X_2 = 26,72 \quad (\Omega / \text{ph})$$

Schéma équivalent pour la Composante homopolaire /

Les transformateurs T1 et T2 sont Complés en étoile avec neutre mise à la terre côté haute tension (110 kV), en triangle de l'autre côté. Le réseau homopolaire considéré est donc limité par ces transformateurs.



d'où :

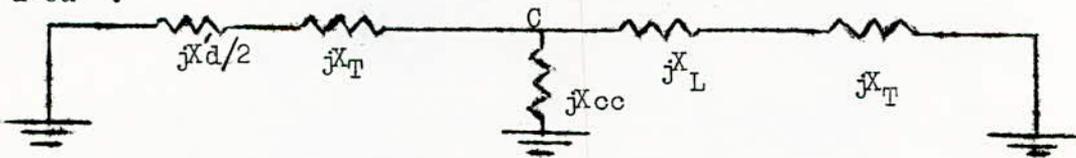
$$X_0 = 16,74 \quad (\Omega / \text{ph})$$

Schéma équivalent pour la composante directe /

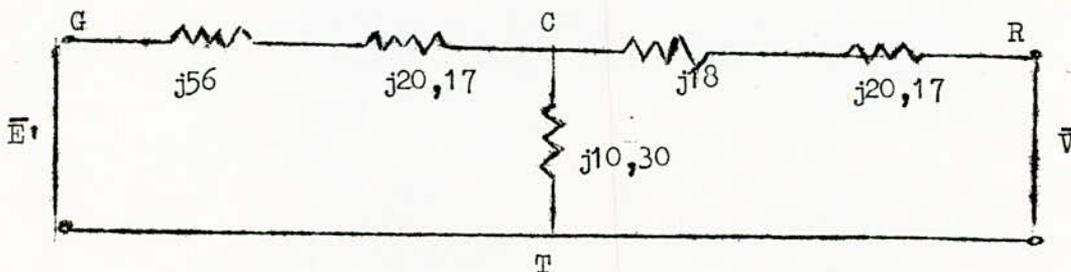
Pour obtenir ce schéma, on branche une réactance X_{cc} de court-circuit entre chaque phase du point de c-c et la terre:

$$X_{cc} = \frac{X_0 \cdot X_2}{X_0 + X_2} = 10,30 \quad (\Omega / \text{ph})$$

d'où :



qui est équivalent à :



.../...

Transfigurons l'étoile GCRT en triangle GTR :

$$X_{GR} = X_{GC} + X_{CR} + \frac{X_{GC} \cdot X_{CR}}{X_{CT}}$$

$$X_{GT} = X_{GC} + X_{CT} + \frac{X_{GC} \cdot X_{CT}}{X_{CR}}$$

$$X_{RT} = X_{RC} + X_{TC} + \frac{X_{RC} \cdot X_{TC}}{X_{GT}}$$

$$X_{GC} = 76,17 \text{ (}\Omega/\text{ph)}$$

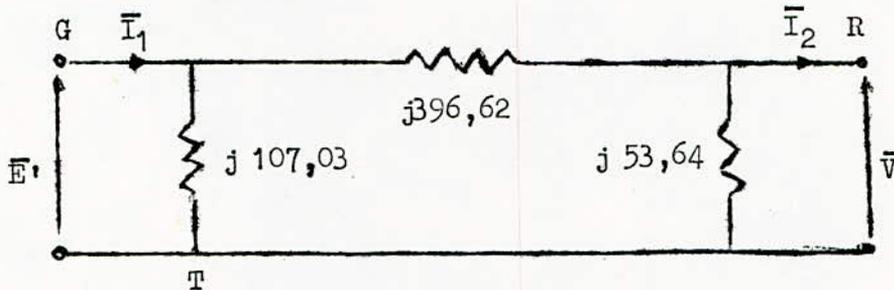
$$X_{GR} = 396,62 \text{ (}\Omega/\text{ph)}$$

$$X_{RC} = 38,17 \text{ (}\Omega/\text{ph)}$$

$$X_{GT} = 107,03 \text{ (}\Omega/\text{ph)}$$

$$X_{TC} = 10,30 \text{ (}\Omega/\text{ph)}$$

$$X_{RT} = 53,64 \text{ (}\Omega/\text{ph)}$$



La réactance de liaison est :

$$X_1 = 396,62 \text{ [}\Omega\text{]}$$

La puissance transmissible maximum dans ce stade de la perturbation :

$$P_{\max} = 3 \cdot \frac{E' \cdot V}{X_1} = \frac{E \cdot U}{X_1}$$

$$P_{\max} = r_1 \cdot P_m$$

A.N : $P_{\max} = 37,31 \text{ [MW]}$ (Voir caractéristique II sur la Fig. 621)

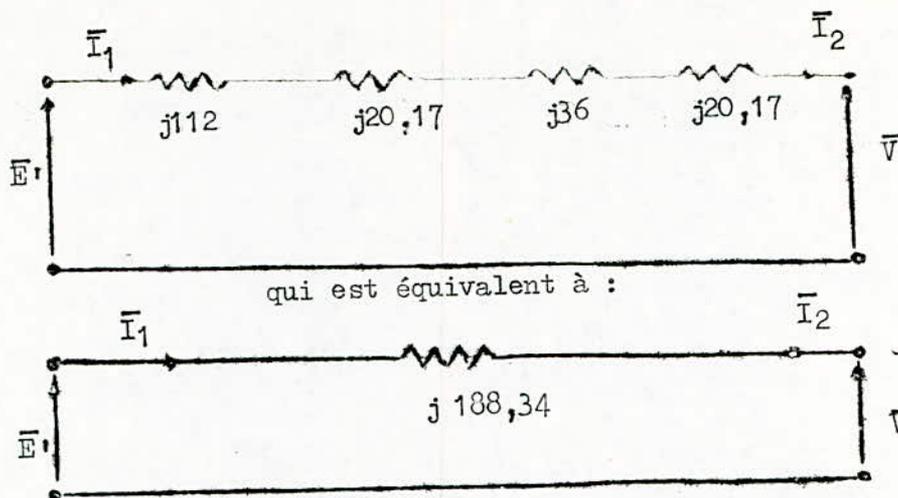
Le terme r_1 :

$$r_1 = \frac{170,34}{396,62} = 0,4295 \text{ (Voir relation 4-9)}$$

c) Etat d'élimination du défaut /

Schéma équivalent dans le cas du déclenchement d'une voie de la ligne de transmission :

.../...



La réactance de liaison : $X_1 = 188,34$ [Ω]

La puissance maximum transmissible : $P_{max} = \frac{E \cdot U}{X}$

$P_{max} = 78,57$ [MW] (voir caractéristique III figure 621)

- Le terme r_2 [relation 4-9] : $r_2 = \frac{170,34}{188,34}$

$$r_2 = 0,9045$$

6.2.1. Application de la méthode / "pas à pas"

On applique cette méthode pour calculer la durée critique de coupure du défaut. Cette durée est obtenue par tâtonnement.

Elle correspond à une puissance débitée par la centrale de 52 MW en fonctionnement normal (dans cette méthode, on tient compte indirectement des pertes dans le calcul de l'accélération, en tant que facteur de correction. Ces pertes ont été déterminées du diagramme circulaire $P_0 = 2$ [MW]. La puissance reçue par le réseau est alors 50 [MW].

La puissance mécanique est considérée constante dans tous les calculs : $P_m = 52$ [MW].

L'accélération est donnée par la formule [4-2]

$$\text{ici : } a = K \cdot (P_m - P_{el} - P_p)$$

où : P_{el} : puissance électrique débitée par la centrale au réseau, cette puissance est mesurée sur les caractéristiques de la Fig. 621.

P_p : pertes électrique dans le système de transmission

(les résistances sont considérées constantes et égales aux résistances directes).

$$P_p = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad \text{où : } I = \frac{P_{el}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (I = I_2)$$

$$K = \frac{180 \cdot f}{H \cdot S_n}$$

H : Ste d'inertie (voir formule 4-1)

$$H = 8,23 \left(\frac{\text{kW s}}{\text{kVA}} \right)$$

$$K = 0,01824 \left[\frac{\text{degré}}{\text{s}^2 \cdot \text{kW}} \right]$$

a) Cas d'une disjonction simple de la ligne avariée /

Pour différentes valeurs du temps de coupure t_d (0,10 s ; 0,15 s ; 0,20 s ; 0,45 s ; 0,50 s ; ∞), on a dressé les tableaux de I à VI.

Le premier tableau correspond à un court-circuit non-déconnecté, le temps de déclenchement 0,10 s et 0,20 s correspondent respectivement aux disjoncteurs rapides et lents.

Les résultats sont reportés sur les figures 622 ; 623 et 624. La figure 622 montre que la durée critique de déclenchement est comprise entre 0,45 s et 0,50 s.

Pour $t_d = 0,45$ s, lorsque la vitesse (figure 623) s'annule, l'accélération (figure 624) est négative : il y a conservation de la stabilité.

Pour $t_d = 0,50$ s, il y a perte évidente de synchronisme vu que θ dépasse l'angle maximum θ_m après 1,0 s.

A cause de l'imprécision de la détermination du temps critique de coupure exact et par mesure de sécurité, on choisit une durée critique :

$$t_{d0} = 0,45 \text{ s}$$

Qui correspond à l'angle critique de déclenchement

$$\theta_d = 83,27^\circ$$

La période des oscillations est réduite à mesure que le temps de coupure est réduit. Les ^{des} oscillations de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme, connues sous le nom de "pompages", les protections de distance se trouvent sollicitées, et peuvent fonctionner en l'absence de tout défaut, ce qui nécessite

L'emploi de relais de verrouillage anti-pompage qui doivent distinguer un défaut véritable d'une oscillation. Du fait de ces pompages, un phénomène de battement des tensions et des courants apparaît, d'où variation de l'impédance apparente en chaque point du système de transmission. Si la fréquence des battements est faible, soit au début d'un pompage, soit à la fin, s'il se produit une reprise de synchronisme, les relais wattmétriques directionnels de débouclage, peuvent suivre les oscillations. Si la puissance oscillatoire est importante par rapport à la puissance moyenne, il peut fermer son contact de déclenchement, même si la puissance moyenne est inférieure à sa valeur de réglage ou n'est pas dans le sens convenable. Ces déclenchements désordonnés sont évidemment très gênants.

Il est donc nécessaire de choisir le temps de déclenchement le plus réduit, car le système revient plus vite à un autre état stable, après quelques faibles oscillations amorties par les pertes, état déterminé par l'angle $\theta' = 39,5^\circ$ sur la caractéristique III (figure 221).

b) Déclenchement disjonction suivie d'un réenclenchement rapide automatique /

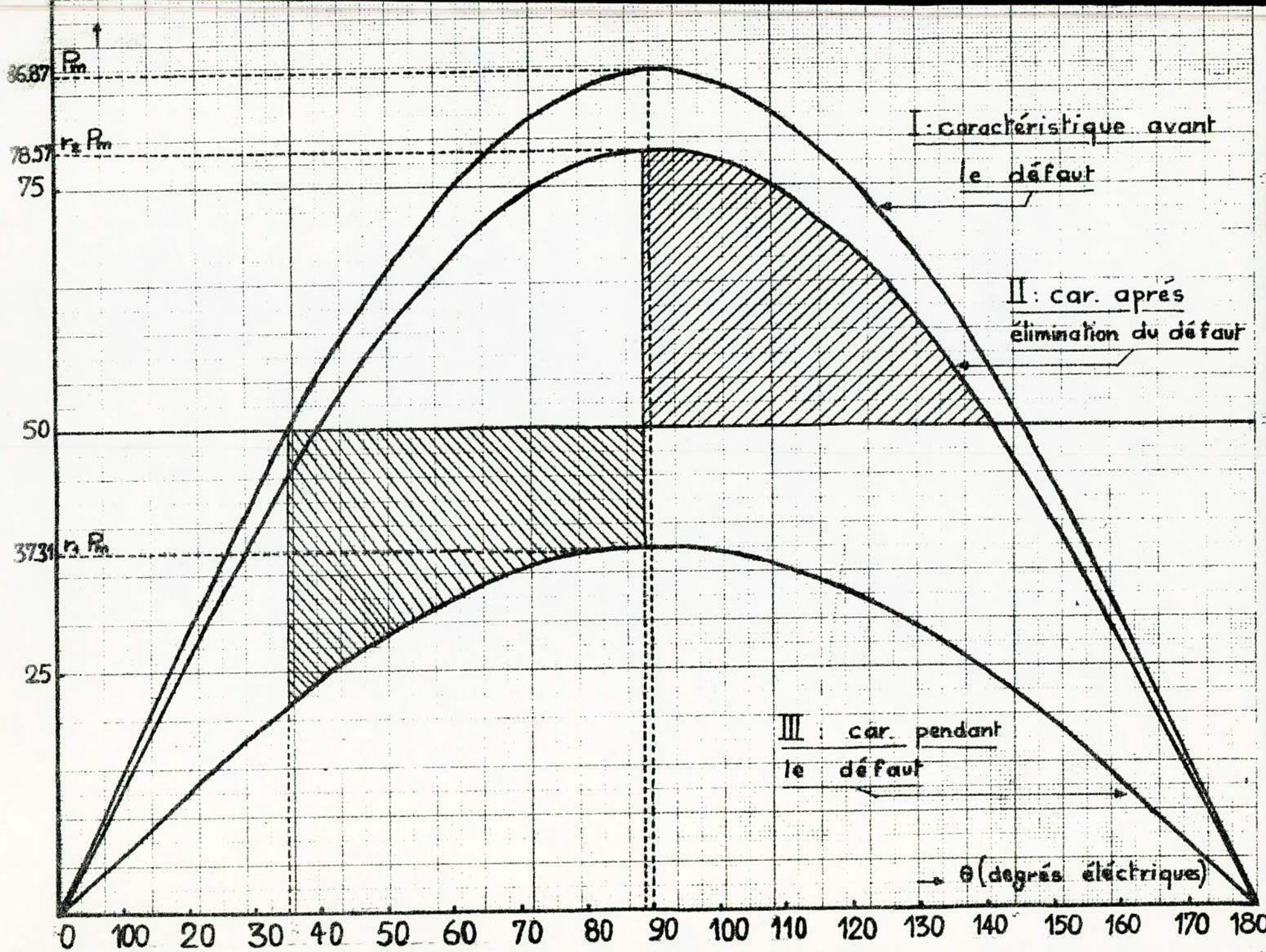
Pour différentes valeurs du temps de coupure t_d (0.10 S ; 0.15 S ; 0.20 S ; 0.45 S ; 0.50 S ; ∞) et des temps de réenclenchement tripolaires respectifs (0,35 S ; 0,40 S ; 0,45 S ; 0,70 S ; 0,75 S ; ∞), nous avons établi les tableaux de VII à XI.

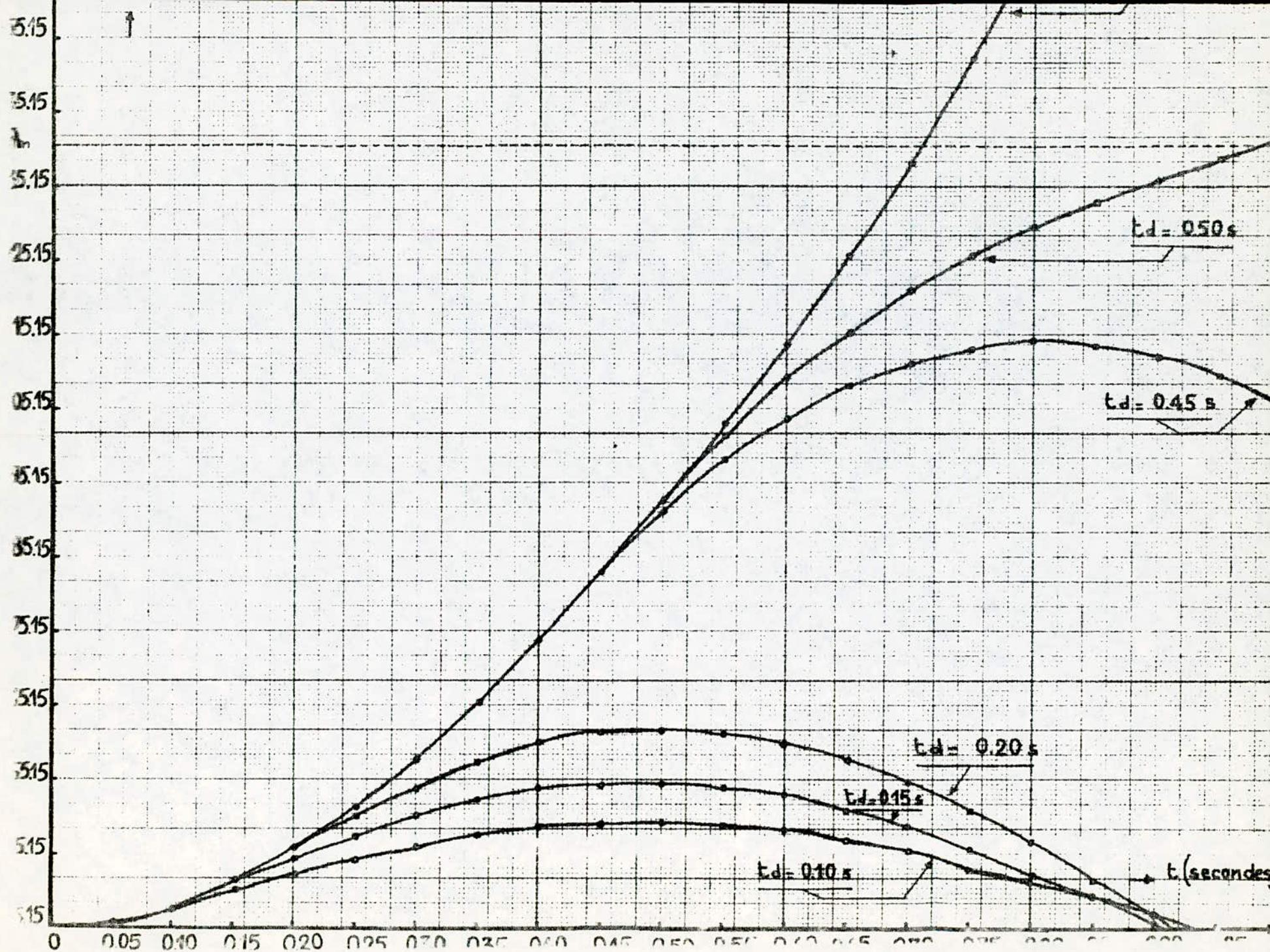
Nous avons pris un temps de déionisation de l'arc constante :

$$t_r = t_r - t_d = 0.25 \text{ S.}$$

Les courbes déduites sont reportées sur les figures 625 ; 626 et 627.

La figure 625 montre que la durée critique de déclenchement n'a pas changé : t_d est comprise entre 0,45 S et 0.50 S. Pour $t_d = 0,45 \text{ S}$, il y a conservation de la stabilité. Pour $t_d = 0.50 \text{ S}$, il y a perte de la stabilité.





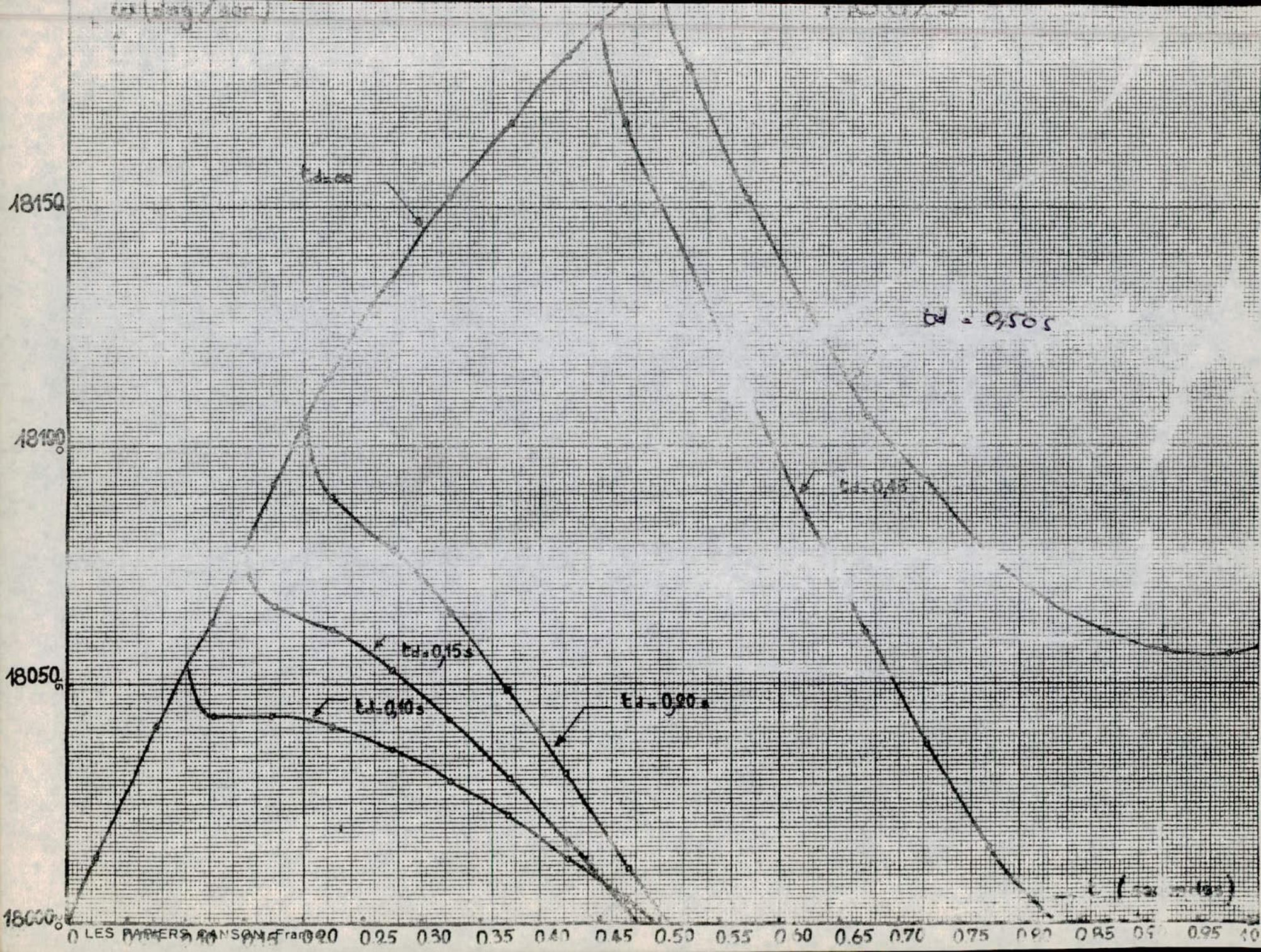
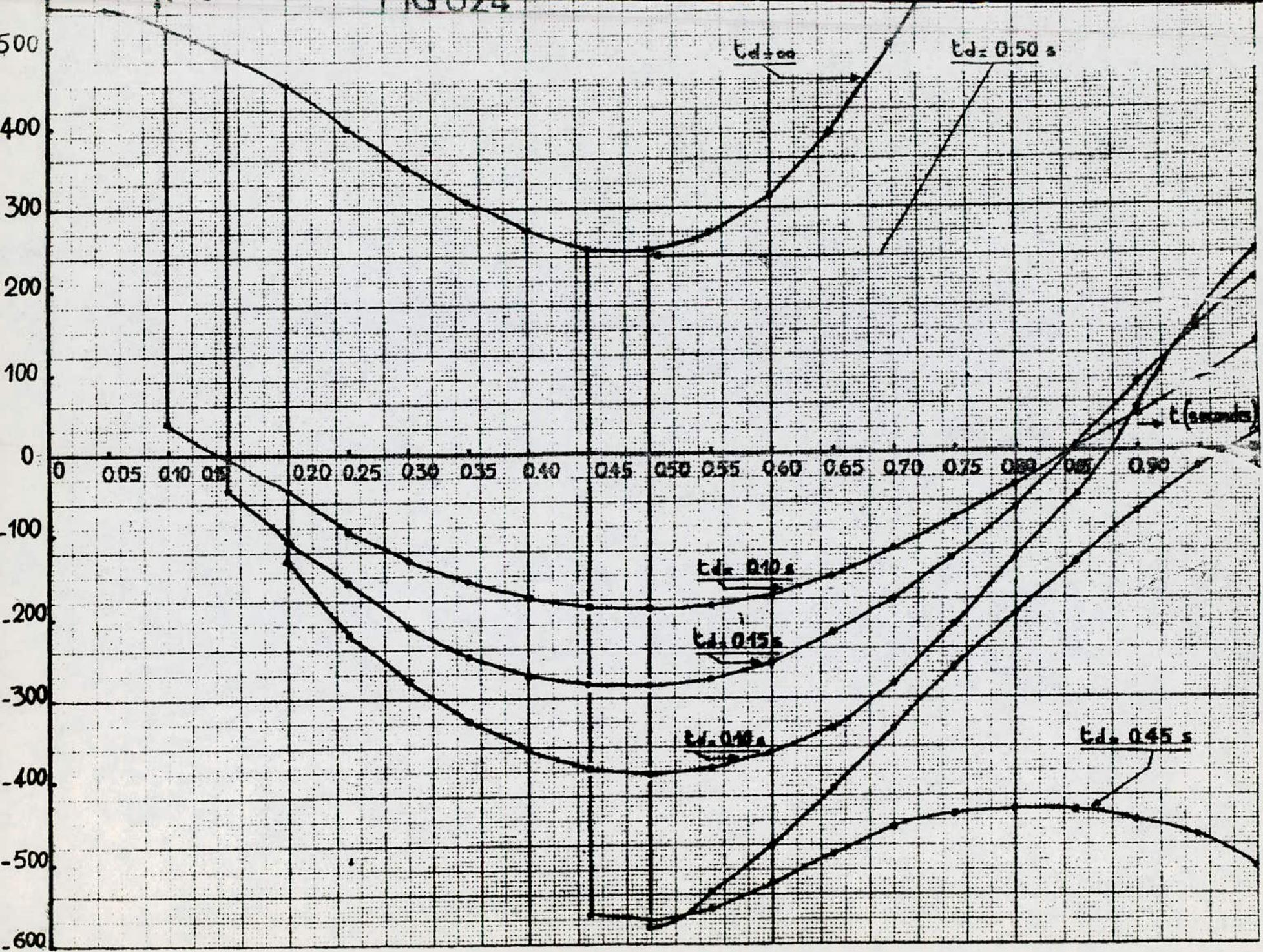
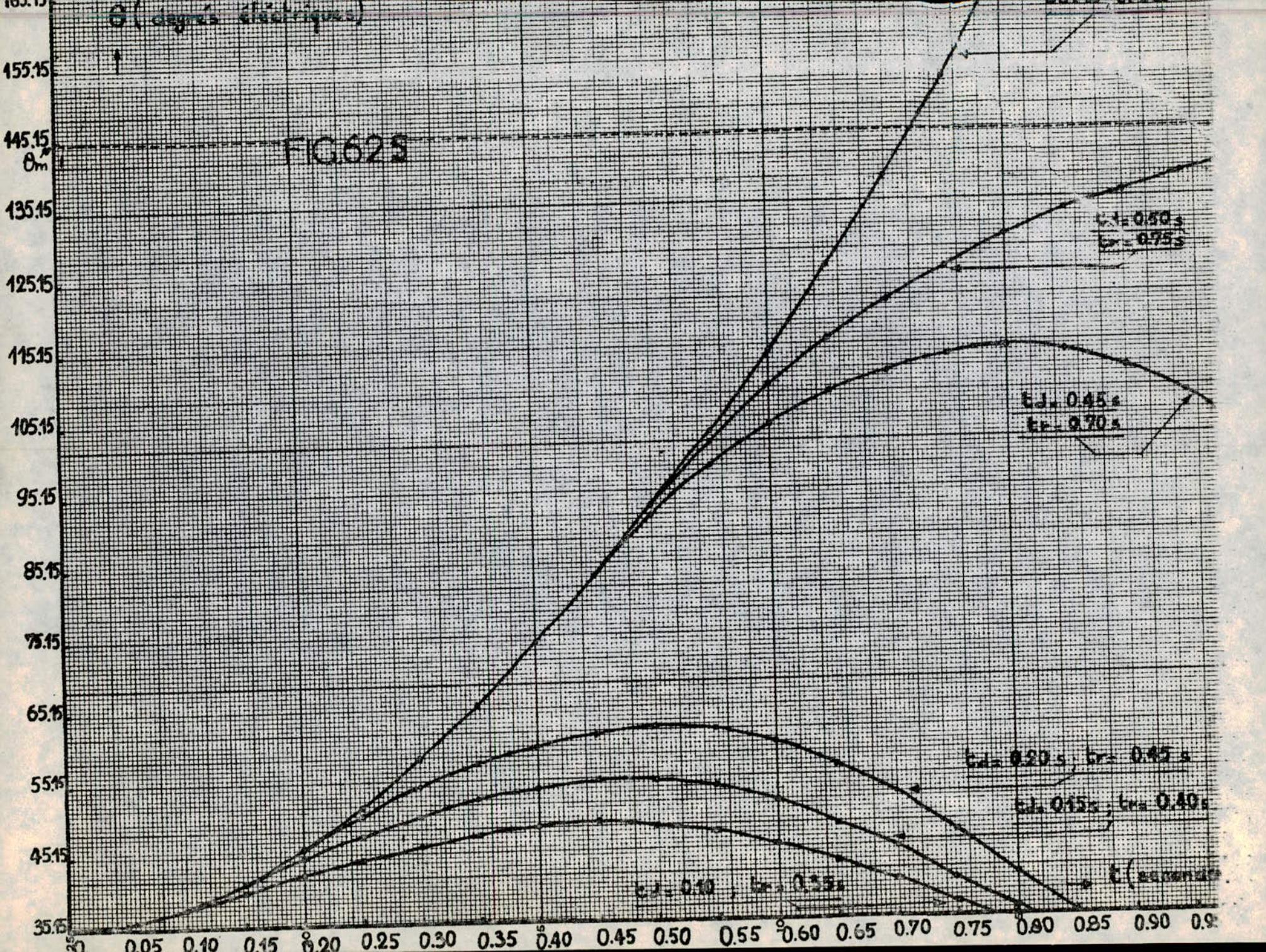


FIG 074





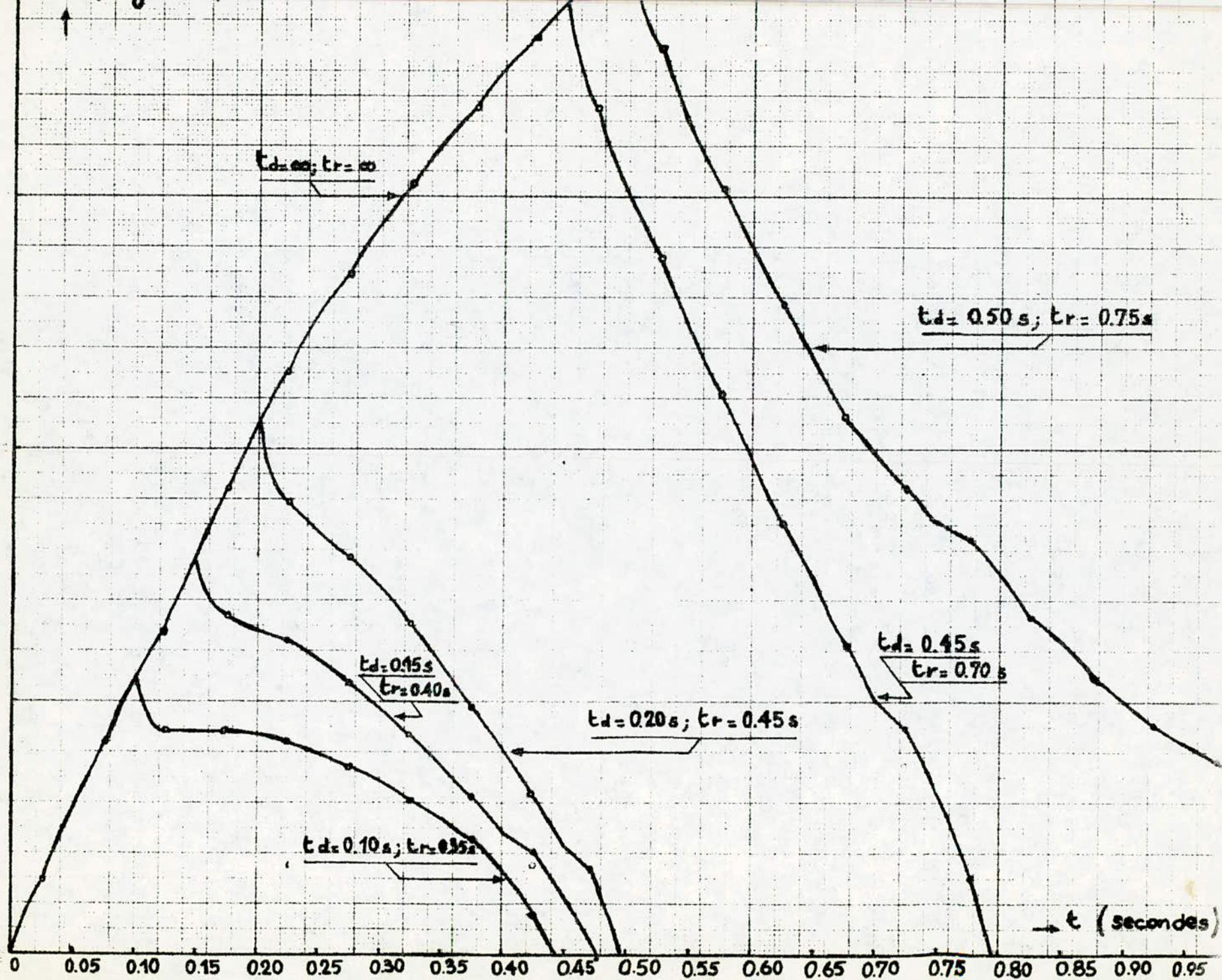
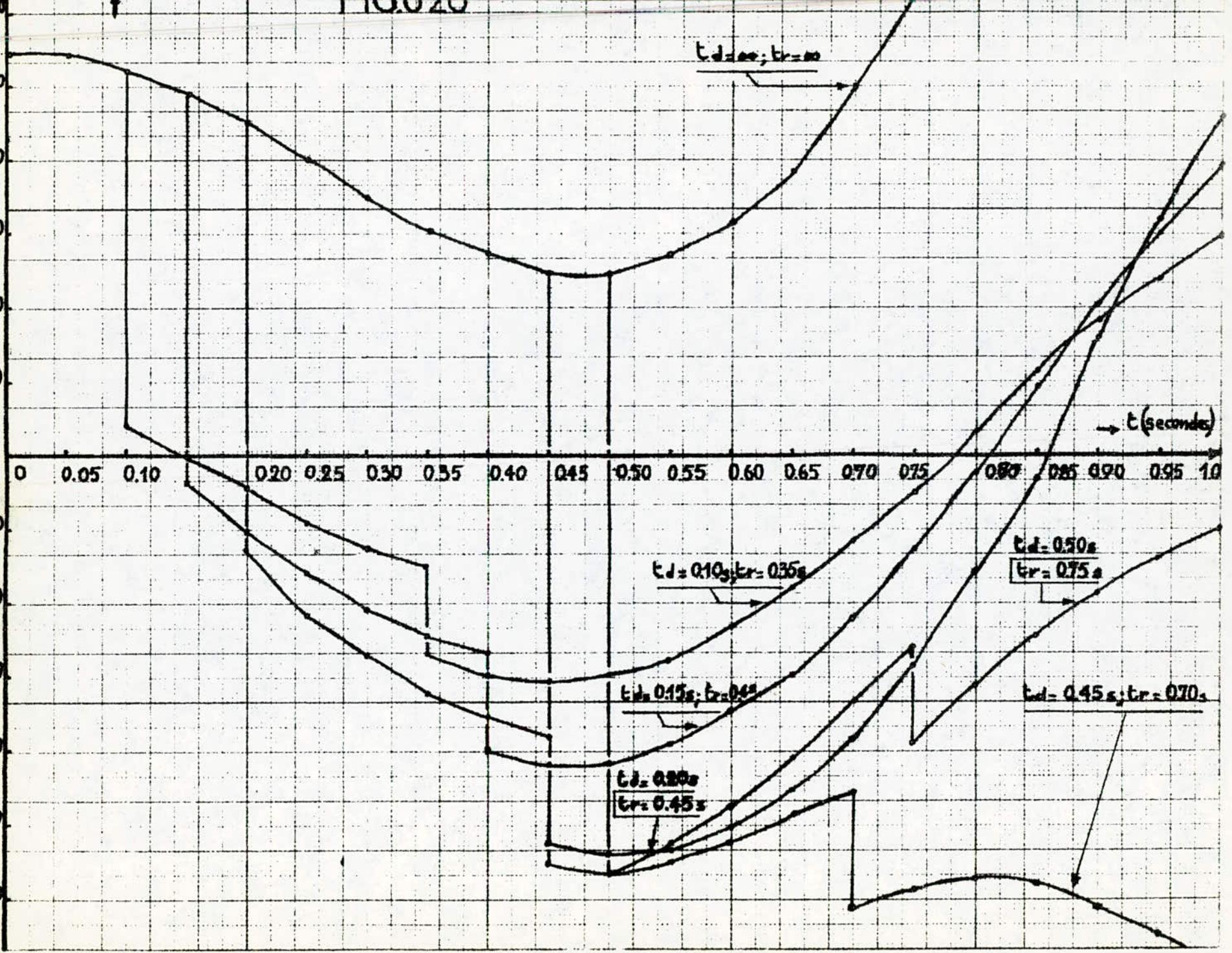


FIG. 20



D'autre part, ces courbes montrent une diminution de la période et de l'amplitude des oscillations.

Ceci est surtout visible dans le cas des durées réduites de déclenchement.

La durée critique de coupure peut être prise :

$$t_{dc} = 0,45 \text{ S}$$

Ces résultats font apparaître l'importance du réenclenchement dans l'amélioration de la stabilité par comparaison avec les résultats obtenus pour une disjonction sans autre artifice : les oscillations de vitesse de l'écart angulaire et de l'accélération sont plus amorties.

6.2.2. Application de la méthode des courbes prédéterminées /

- Utilisation des abaques de Summers et Mac Clure

Cette méthode, ne doit pas tenir compte des pertes actives dans le réseau.

Soit, P_0 : puissance électrique débitée au réseau juste avant la perturbation.

$$P_0 = 50 \text{ MW}$$

Le déphasage angulaire initial : $\theta_0 = 35,15^\circ$

$$\sin \theta_0 = 0,576$$

Le facteur p de détermination du temps modifié t_c .

$$p = \frac{P_0}{r_1 P_m} = \frac{\sin \theta_0}{r_1}$$

$$p = 1,34$$

L'angle critique de déclenchement est déterminé de la relation [4 - 11] qui résulte du critère de l'égalité des aires [figure 621]

$$\theta_{dc} = 88,86^\circ$$

Par approximation, on prend la figure 629 qui correspond à
 $\sin \theta_0 = 0,60$

On tire : $\tau_c = 1,7 \text{ S}$

La relation [4 - 15] lie t_c à τ_c :

$$t_c = \sqrt{\frac{H \cdot S_n}{2 \cdot \Pi \cdot f \cdot r_1 \cdot P_m}} \cdot \tau_c$$

La durée critique de déclenchement est finalement :

$$t_{dc} = 0.35 \text{ S}$$

Cette valeur est inférieure à celle déduite par la méthode "pas à pas" car cette méthode est basée sur la considération que le couple d'amortissement dû au pertes actives est nul.

- Utilisation des abaques de Byrd et Pritchard

En utilisant les termes r_1 , r_2 et la relation [4 - 16]. Pour les l'abaque $\sin \theta_0 = 0.60$ (voir figure 628), et par interpolation, on tire : $\tau_c = 1,7$

$$t_{dc} = \sqrt{\frac{H \cdot S_n}{2 \cdot \Pi \cdot f \cdot r_1 \cdot P_m}} \cdot \tau_c$$

La durée critique de déclenchement :

$$t_{dc} = 0.35 \text{ S}$$

Même remarque que précédemment.

6 - 2-3. DETERMINATION DE LA LIMITE DE LA STABILITE EN FONCTION DU TEMPS DE COUPE

En utilisant les abaques de Summers et Mac Clure ; la relation

[4 - 15] donne :

$$t_c = \tau_c \cdot \sqrt{\frac{H \cdot S_n}{2 \cdot \Pi \cdot f \cdot r_1 \cdot P_m}}$$

où :

$$H = 8,23 \left[\frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{\text{kVA}} \right]$$

$$S_n = 60000 \left[\text{kVA} \right]$$

$$r_1 = 0,4295$$

Abaque de Byrd et Pritchard

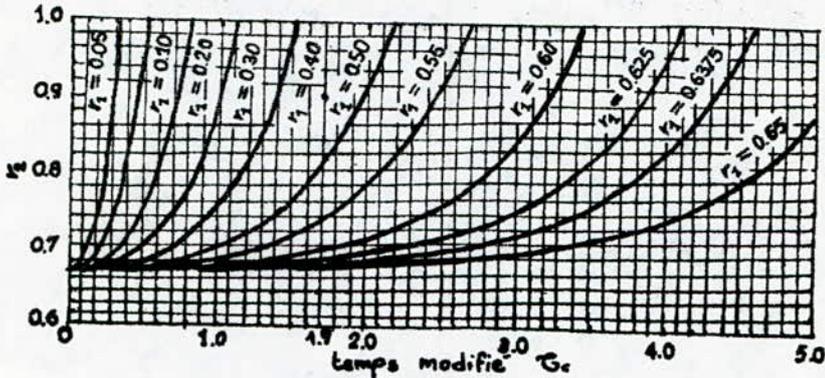


Fig. 628 $\sin \theta_0 = 0.60$

Abaque de Summers et MacClure

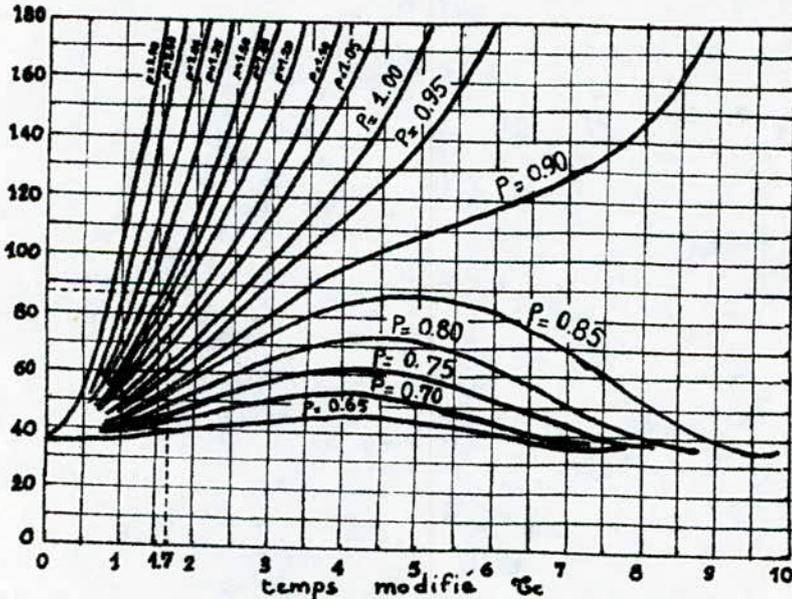


Fig. 629 $\sin \theta_0 = 0.80$

$$r_2 = 0,9045$$

$$P_m = 86870 \text{ [kW]}$$

Les valeurs extrêmes de la limite de la stabilité sont déterminées par le critère de l'égalité des aires (voir figure 631).

On en tire :

$$0,356 < \sin \theta_0 < 0,88.$$

$$\text{le facteur } p : \quad p = \frac{\sin \theta_0}{r_1}$$

$$t_c = T_c \cdot 0,2052.$$

l'angle critique de déclenchement θ_{dc} est déterminée par la relation [4 - 11].

D'où le tableau suivant :

$\sin \theta_0$	$P_{el} = P_m \sin^2 \theta_0$ (MW)	θ_0 (deg)	$p = \frac{\sin \theta_0}{r_1}$	θ_m (deg)	θ_{dc} (deg)	T_c (s)	t_0 (s)
0,40	34,748	23,5	0,931	153,70	128,56	3,8	0,78
0,50	43,435	30,00	1,164	146,44	103,34	2,3	0,472
0,60	52,122	36,87	1,397	138,45	84,78	1,6	0,33
0,70	60,809	44,43	1,63	129,30	70,66	0,9	0,185
0,80	69,496	53,13	1,87	117,82	61,95	0,5	0,103

Sur la fig. 632, on a tracé la courbe de variation de la puissance limite en fonction de la durée d'élimination du défaut.

Le gain de puissance transmissible sans perte de synchronisme, est assez important si la durée d'élimination du défaut est réduite à moins de 0,20 s.

Afin d'accroître le gain, on peut être conduit à pratiquer le réenclenchement rapide, qui conduit à des puissances limites supérieures à celles qui correspondent à l'absence de réenclenchement.

En réalité, le gain en puissance transmissible sans perte de synchronisme est supérieur à celui calculé par cette méthode des abaques, à cause de l'amortissement produit par les pertes électriques dans le système de transmission, et que ces abaques ne prennent pas en considération.

FIG.631

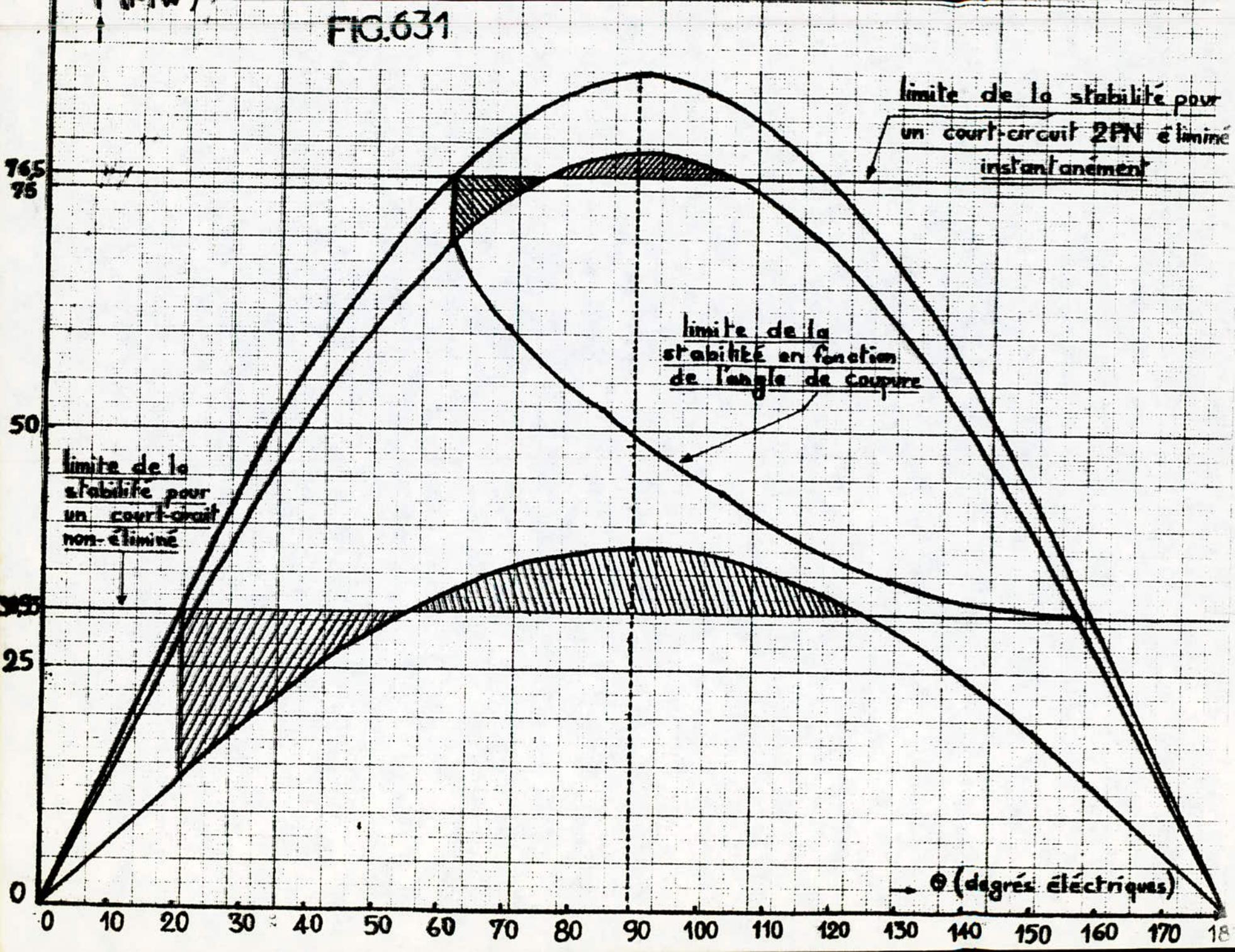
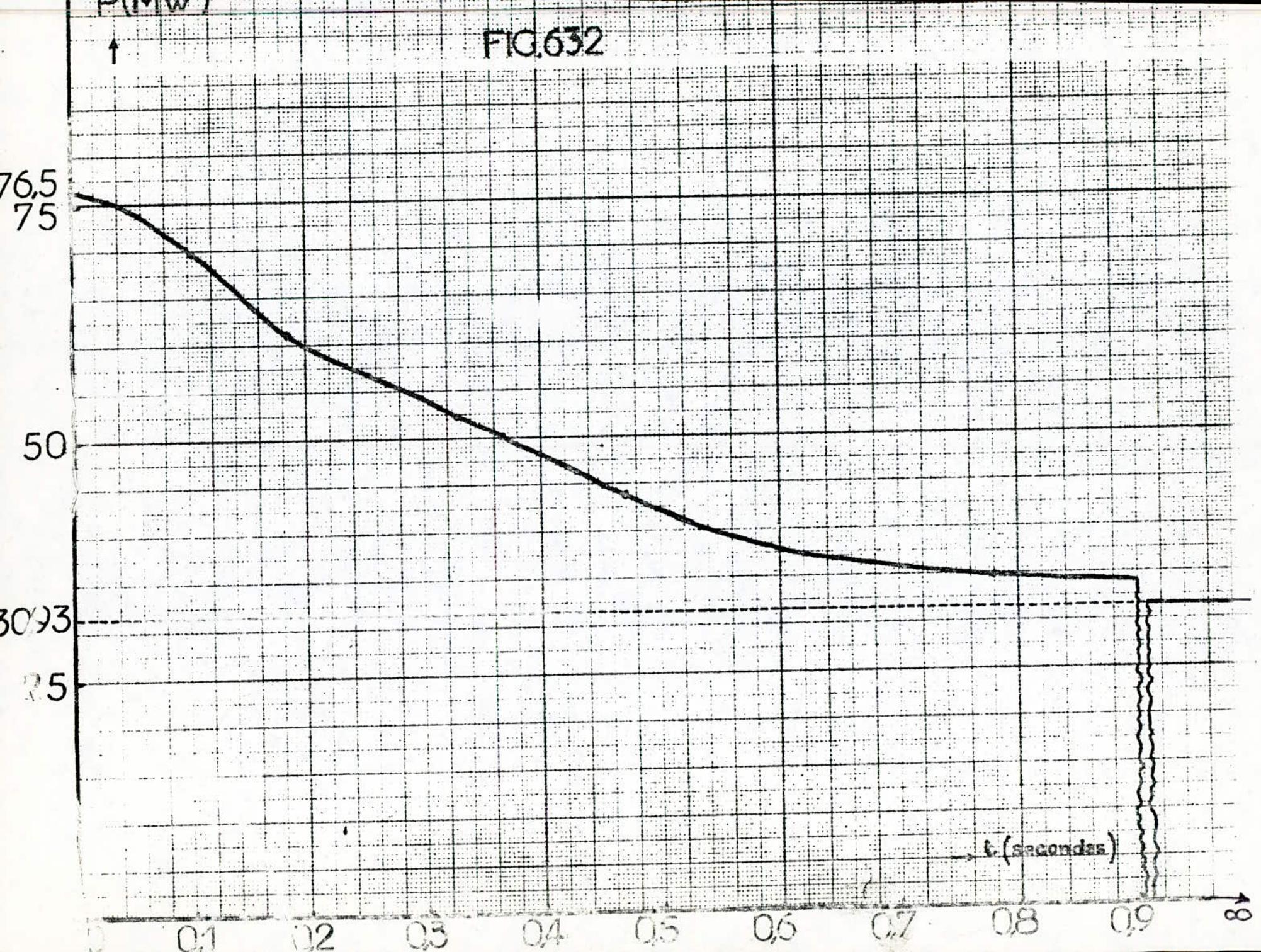


FIG. 632



T A B L E A U I / : td = ∞

t	θ	Pd = Pp + Pel	ΔP = Pm - Pd	a = K · ΔP	Δt	Δ W	W	Δ t	Δ θ	e	Pp	Pel
s	degrés	kW	k W	deg./s ²	s	Deg./s	deg./s	s	degrés	degrés	kW	kW
0.00	35.15	21921	30079	548.64	0.025	13.72	18013.72	0.05	0.69	35.84	355	21566
0.05	35.84	22077	29923	545.79	0.05	27.23	18041.00	0.05	2.05	37.89	359	21718
0.10	37.89	23302	28699	523.46	0.05	26.17	18067.17	0.05	3.36	41.25	400	22902
0.15	41.25	25143	26057	489.87	0.05	24.50	18091.67	0.05	4.58	45.83	464	24679
0.20	45.83	27195	24805	452.45	0.05	22.62	18114.29	0.05	5.72	51.55	541	26654
0.25	51.55	30078	21922	399.86	0.05	19.99	18134.28	0.05	6.72	58.26	660	29418
0.30	58.26	32764	19236	350.87	0.05	17.55	18151.83	0.05	7.59	65.86	780	31984
0.35	65.86	35045	16955	309.26	0.05	15.46	18167.29	0.05	8.37	74.22	890	34156
0.40	74.22	36917	15083	275.12	0.05	13.76	18181.05	0.05	9.05	83.28	984	35933
0.45	83.28	38376	13624	248.50	0.05	12.43	18193.48	0.05	9.67	92.95	1061	37315
0.50	92.95	38376	13624	248.50	0.05	12.43	18205.90	0.05	10.30	103.24	1061	37315
0.55	103.24	37125	14875	271.33	0.05	13.57	18219.45	0.05	10.97	114.22	995	36130
0.60	114.22	34837	17163	313.06	0.05	15.65	18235.10	0.05	11.76	125.97	879	33958
0.65	125.97	30695	21305	388.60	0.05	19.43	18254.53	0.05	12.73	138.69	686	30009
0.70	138.69	24734	27267	497.35	0.05	24.87	18279.40	0.05	13.97	152.66	450	24284
0.75	152.66	17401	34599	631.09	0.05	31.56	18310.96	0.05	15.55	168.21	225	17176
0.80	168.21	15783	36218	660.60	0.05	33.03	18343.99	0.05	17.20	185.40	185	15597

T A B L E A U II / : $t_d = 0.10_s$

t	θ	$P_d = P_p + P_{el}$	$\Delta P = P_{in} - P_d$	$\alpha = K \cdot \Delta P$	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ	P_p	P_{el}
s	logrés	k W	k W	deg./s ²	s	Deg./s	deg./s	s	degrés	logrés	k W	k W
0.00	35.16	21921	30079	548.64	0.025	13.72	18013.72	0.05	0.69	35.84	355	21566
0.05	35.84	22078	29922	545.79	0.05	27.23	18041.00	0.05	2.05	37.89	360	21778
0.10	37.89	49730	2270	41.41	0.025	2.07	18043.07	0.05	2.15	40.04	1754	47976
0.15	40.04	52170	- 170	- 3.10	0.05	- 0.16	18042.91	0.05	2.15	42.19	1924	50247
0.20	42.19	54512	- 2512	-45.82	0.05	- 2.29	18040.62	0.05	2.03	44.22	2094	52418
0.25	44.22	57075	- 5075	- 92.56	0.05	- 4.63	18035.99	0.05	1.80	46.02	2287	54787
0.30	46.02	59002	- 7002	- 127.72	0.05	- 6.39	18029.60	0.05	1.48	47.50	2438	56564
0.35	47.50	60505	- 8505	- 155.13	0.05	- 7.76	18021.85	0.05	1.09	48.59	2559	57946
0.40	48.59	61500	- 9580	- 174.74	0.05	- 8.74	18013.11	0.05	0.66	49.25	2646	58933
0.45	49.25	62226	- 10226	- 186.52	0.05	- 9.33	18003.79	0.05	0.19	49.44	2700	59526
0.50	49.44	62441	- 10441	- 190.45	0.05	- 9.52	17994.27	0.05	- 0.29	49.15	2710	59723
0.55	49.15	62226	- 10226	- 186.52	0.05	- 9.33	17984.95	0.05	- 0.75	48.40	2700	59526
0.60	48.40	61473	- 9473	- 172.78	0.05	- 8.64	17976.31	0.05	- 1.19	47.21	2638	58835
0.65	47.21	60290	- 8290	- 151.21	0.05	- 7.56	17968.75	0.05	- 1.56	45.65	2541	57749
0.70	45.65	58359	- 6359	- 115.9	0.05	- 5.80	17962.95	0.05	- 1.85	43.80	2387	55972
0.75	43.80	56433	- 4433	- 80.86	0.05	- 4.04	17958.91	0.05	- 2.06	41.74	2238	54195

Suite TABLEAU II/ : $t_d = 0.10$ s

t	θ	$P_d =$ $P_p + P_{el}$	$\Delta P =$ $P_m - P_d$	$a =$ $K \cdot \Delta P$	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ	P_p	P_{el}
s	degrés	kW	kW	deg./s ²	s	deg./s	deg./s	s	degrés	degrés	kW	kW
0.80	41.74	54086	- 2086	- 38.04	0.05	-1.90	17957.01	0.05	- 2.15	39.59	2062	52023
0.85	39.59	51745	255	4.65	0.05	0.23	17957.24	0.05	- 2.14	37.45	1894	49851
0.90	37.45	49518	2482	45.27	0.05	2.26	17959.5	0.05	- 2.03	35.42	1739	47779
0.95	35.42	47086	4914	86.63	0.05	4.33	17963.83	0.05	- 1.81	33.61	1578	45508
1.00	33.61	44767	7233	131.93	0.05	6.60	17970.43	0.05	- 1.48	32.13	1431	43336

T A B L E A U III/ : $t_d = 0.15 \text{ s}$

t	e	$P_1 = P_p + P_{cl}$	$\Delta P = P_m - P_d$	$K \cdot \Delta P$	Δt	ΔW	W	Δt	Δe	e		P_p	P_{cl}
s	degrés	k W	k W	deg./s ²	s	deg./s	deg./S	s	degrés	degrés		kW	kW
0.00	35.15 2	21921	30079	548.64	0.025	13.72	180 13.72	0.05	0.69	35.84		355	21566
0.05	35.84	22070	29923	545.79	0.05	27.23	180 41.00	0.05	2.05	37.89		360	21718
0.10	37.09	23302	28699	523.46	0.05	26.17	180 67.17	0.05	3.36	41.25		400	22902
0.15	41.25	54192	- 2192	- 39.98	0.025	- 1.00	180 66.17	0.05	3.31	44.55		2070	52122
0.20	44.55	57824	- 5824	- 106.22	0.05	- 5.31	180 60.86	0.05	3.05	47.60		2345	55478
0.25	47.60	60827	- 8827	- 161.00	0.05	- 8.05	180 52.81	0.05	2.64	50.24		2585	58242
0.30	50.24	63519	- 11519	- 210.10	0.05	- 10.50	180 42.30	0.05	2.12	52.36		2809	60710
0.35	52.36	65463	- 13463	- 245.56	0.05	- 12.28	180 30.02	0.05	1.50	53.86		2975	62487
0.40	53.86	66761	- 14761	- 269.24	0.05	- 13.46	180 16.56	0.05	0.83	54.69		3089	63672
0.45	54.69	67411	- 15411	- 281.10	0.05	- 14.06	180 02.5	0.05	0.13	54.82		3147	64264
0.50	54.82	67519	- 15519	- 283.07	0.05	- 14.15	179 88.35	0.05	- 0.50	54.24		3157	64363
0.55	54.24	66869	- 14869	- 271.21	0.05	- 13.56	179 74.79	0.05	- 1.26	52.98		3099	63770
0.60	52.98	66003	- 14003	- 255.42	0.05	- 12.77	179 62.02	0.05	- 1.90	51.08		3023	62980
0.65	51.08	64058	- 12058	- 219.94	0.05	- 11.00	179 51.02	0.05	- 2.45	48.63		2854	61204
0.70	48.63	61903	- 9903	- 180.64	0.05	- 9.03	179 41.99	0.05	- 2.90	45.73		2673	59230
0.75	45.73	59002	- 7002	- 127.72	0.05	- 6.39	179 35.60	0.05	- 3.22	42.51		2438	56564

Suite TABLEAU III:

t	θ	$P_d =$ $P_p + P_{el}$	$\Delta P =$ $P_m - P_d$	$K^a =$ ΔP	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	ϵ	P_p	P_{el}
s	degrés	kW	kW	deg./s ²	s	deg./s S	deg./s	s	degrés	degres	kW	kW
0.80	42.51	55685	- 3685	- 67.22	0.05	- 3.36	17932.24	0.05	- 3.39	39.12	2181	53504
0.85	39.12	51639	861	6.59	0.05	0.33	17932.57	0.05	- 3.37	35.75	1806	49753
0.90	35.75	47192	4808	87.70	0.05	4.39	17937.00	0.05	-3. 15	32.60	1585	45607
0.95	32.60	43610	8389	153.03	0.05	7.65	17944.65	0.05	- 2.77	29.83	1360	42250
1.00	29.83	40465	11535	210.40	0.05	10.52	17955.17	0.05	-2.24	27.59	1176	39289

TABLEAU IV

td = 0.20 s

t	θ	$P_d = P_p + P_{el}$	ΔP $P_m - P_d$	$a = K \cdot \Delta P$	Δt	ΔW	W	Δt	θ	θ	P_p	P_{el}
s	degrés	kW	kW	deg./s ²	s	deg./s	deg./s	s	degrés	degrés	kW	kW
0.00	35.15	21921	30079	548.64	0.025	13.72	18013.72	0.05	0.69	35.84	355	21566
0.05	35.84	22077	29923	545.79	0.05	27.23	18041.00	0.05	2.05	37.89	360	21718
0.10	37.89	23302	28699	523.46	0.05	26.17	18067.17	0.05	3.36	41.25	400	22902
0.15	41.25	25143	25857	489.87	0.05	24.50	18091.67	0.05	4.58	45.83	464	24679
0.20	45.83	59109	-7109	-129.67	0.025	- 3.24	18089.42	0.05	4.47	50.30	2446	56663
0.25	50.30	64058	-12058	-219.90	0.05	- 10.99	18078.40	0.05	3.92	54.22	2854	61204
0.30	54.22	67086	-15086	-275.16	0.05	- 13.75	18064.64	0.05	3.23	57.45	3118	63968
0.35	57.45	69908	-17908	-326.64	0.05	- 16.33	18048.30	0.05	2.41	59.86	3373	66535
0.40	59.86	71649	-19649	-358.40	0.05	-17.92	18030.38	0.05	1.52	61.38	3535	68114
0.45	61.38	72958	-20958	-382.27	0.05	-19.11	18011.26	0.05	0.56	61.94	3659	69299
0.50	61.94	73395	-21395	-390.23	0.05	-19.51	17991.75	0.05	- 0.41	61.53	3701	69694
0.55	62.53	72958	-20958	-382.27	0.05	-19.11	17972.63	0.05	- 1.37	60.16	3659	69299
0.60	60.16	72085	-20085	-366.30	0.05	-18.31	17954.30	0.05	- 2.28	57.87	3576	68509
0.65	57.87	70343	-18343	-334.57	0.05	-16.73	17937.57	0.05	-3.12	54.75	3414	66929
0.70	54.75	67519	-15519	-283.07	0.05	-14.15	17923.42	0.05	-3.83	50.92	3156	64363
0.75	50.92	63375	-11735	-214.00	0.05	-10.70	17912.70	0.05	-4.71	46.55	2827	60908

Suite : TABLEAU IV/

td = 0.20 s

t	θ	$P_d =$ $P_p + P_{el}$	$\Delta P =$ $P_m - P_d$	$a =$ $K \cdot \Delta P$	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ	P_p	P_{el}
s	degrés	kW	kW	deg./s ²	s	deg./s	deg./s	s	degrés	degrés	kW	kW
0.80	46.55	58895	- 6895	- 125.76	0.05	- 6.29	17906.41	0.05	- 4.68	41.87	2429	56465
0.85	41.87	55045	- 3045	- 55.54	0.05	- 2.77	17903.63	0.05	- 4.81	37.05	2133	52912
0.90	37.05	49094	+ 2906	+ 52.99	0.05	2.65	17906.28	0.05	- 4.69	32.37	1711	47383
0.95	32.37	43400	8599	156.85	0.05	7.84	17914.12	0.05	- 4.30	28.07	1348	42053
1.00	28.07	38584	13416	244.70	0.05	12.24	17926.36	0.05	- 3.70	24.37	1072	37512

t	θ	$P_d =$ $P_p + P_{e1}$	$\Delta P =$ $P_m - P_d$	$a =$ $K \cdot \Delta P$	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ		P_p	P_{e1}
s	DEgrés	kW	kW	deg./s ²	s	deg./s	deg./s	s	degrés	degrés		kW	kW
0.00	35.15	21921	30079	548.64	0.025	13.72	18013.72	0.05	0.69	35.84		355	21566
0.05	35.84	22077	29923	545.79	0.05	27.23	18041.00	0.05	2.05	37.89		360	21718
0.10	37.89	28699	523	523.46	0.05	26.17	18067.17	0.05	3.36	41.25		400	22902
0.15	41.25	25143	26857	489.87	0.05	24.50	18091.67	0.05	4.58	45.83		464	24679
0.20	45.83	27195	24805	452.45	0.05	22.62	18114.29	0.05	5.72	51.55		541	26654
0.25	51.55	30078	21922	399.86	0.05	19.99	18134.28	0.05	6.72	58.26		660	29418
0.30	58.26	32764	19236	350.87	0.05	17.55	18151.83	0.05	7.59	65.86		780	31984
0.35	65.86	35045	16955	309.26	0.05	15.46	18167.29	0.05	8.37	74.22		890	34156
0.40	74.22	36917	15083	275.12	0.05	13.76	18181.05	0.05	9.05	83.27		984	35933
0.45	83.27	82620	-30620	-558.50	0.025	-13.96	18167.09	0.05	8.35	91.63		4634	77986
0.50	91.63	83277	-31277	-570.50	0.05	-28.53	18138.57	0.05	6.93	98.56		4704	78573
0.55	98.56	82399	-30399	-554.48	0.05	-27.73	18110.85	0.05	5.54	104.10		4611	77788
0.60	104.10	80855	-28855	-526.31	0.05	-26.32	18084.54	0.05	4.23	108.33		4448	76406
0.65	108.33	78873	-26873	-490.17	0.05	-24.51	18060.03	0.05	3.00	111.33		4244	74629
0.70	111.33	77116	-25116	-458.11	0.05	-22.91	18037.12	0.05	1.86	113.19		4066	73050
0.75	113.19	76239	-24239	-442.12	0.05	-22.11	18015.01	0.05	0.75	113.94		3979	72260

Suite TABLEAU V/

 $t_d = 0.45 \text{ s}$

t	θ	$P_d =$ $P_p + P_{el}$	$\Delta P =$ $P_m - P_d$	$a =$ $K \cdot \Delta P$	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ		P_p	P_{el}
s	degrés	kW	kW	deg./s ²	s	deg./s	deg./s	s	degrés	degrés		kW	kW
0.80	113.94	75801	- 301	-434.12	0.05	- 21.17	17993.30	0.05	- 0.33	113.61		3935	71865
0.85	113.61	76020	- 24020	- 438.12	0.05	- 21.91	17971.40	0.05	- 1.43	112.18		3957	72063
0.90	112.18	76677	- 24677	- 450.11	0.05	- 22.51	17948.89	0.05	- .	109.63		4022	72655
0.95	109.63	78214	- 26214	- 478.14	0.05	- 23.91	17924.98	0.05	- 2.56	105.88		4177	74037
1.00	105.88	79973	- 27973	- 510.23	0.05	- 25.51	17899.47	0.05	- 5.03	100.85		4357	75616

T A B L E A U VI/

 $t_d = 0.50 \text{ s}$

t	θ	$P_d =$ $P_p + P_{el}$	$\Delta P =$ $P_m - P_d$	$a =$ $K \cdot \Delta P$	Δt	ΔW	W	Δt	θ	θ	P_p	P_{el}
s	degrés	kW	kW	deg./s ²	s	deg./s	deg./s	s	degrés	degrés	kW	kW
0.00	35.15	21921	30079	548.64	0.025	13.72	18013.72	0.05	0.69	35.84	355	21566
0.05	35.84	22077	29923	545.79	0.05	27.23	18041.00	0.05	2.05	37.89	360	21718
0.10	37.89	23302	28699	523.46	0.05	26.17	18067.17	0.05	3.36	41.25	400	22902
0.15	41.25	25143	26857	489.87	0.05	24.50	18091.67	0.05	4.58	45.83	464	24679
0.20	45.83	27195	24805	452.45	0.05	22.62	18114.29	0.05	5.72	51.55	541	26654
0.25	51.55	30078	21922	399.86	0.05	19.99	18134.28	0.05	6.72	58.26	660	29418
0.30	58.26	32764	19236	350.87	0.05	17.55	18151.83	0.05	7.59	65.86	780	31984
0.35	65.86	35045	16955	309.26	0.05	15.46	18167.29	0.05	8.37	74.22	890	34156
0.40	74.22	36917	15083	275.12	0.05	13.76	18181.05	0.05	9.05	83.27	984	35933
0.45	83.27	38376	13624	248.50	0.05	12.43	18193.48	0.05	9.67	92.95	1061	37315
0.50	92.95	83504	- 31504	- 574.62	0.025	- 14.37	18179.11	0.05	8.96	101.90	4729	78775
0.55	101.90	81296	- 29295	- 534.35	0.05	- 26.72	18152.39	0.05	7.62	109.52	4495	76801
0.60	109.52	78324	- 26324	- 480.14	0.05	- 24.00	18128.38	0.05	6.42	115.94	4188	74136
0.65	115.94	74597	- 22597	- 412.16	0.05	- 20.61	18108.77	0.05	5.44	121.38	3817	70779
0.70	121.38	70343	- 18343	- 334.57	0.05	- 16.73	18092.04	0.05	4.60	125.98	3413	66929
0.75	125.98	66436	- 14436	- 263.31	0.05	- 13.17	18076.98	0.05	3.84	129.82	3060	63376

Suite

TABLEAU VI/

t $t_d = 0.50$ s

t	θ	$P_d =$ $P_p + P_{el}$	$\Delta P =$ $P_m - P_d$	$a =$ $K \cdot \Delta P$	Δt	ΔW	W	Δt	e	θ	P_p	P_{el}
s	degrés	kW	kW	deg./s ²	s	deg./s	deg./s	s	degrés	degrés	kW	kW
0.80	129.82	62764	- 10764	- 196.34	0.05	- 9.82	18067.06	0.05	3.35	133.17	2745	600019
0.85	133.17	59324	- 8324	- 133.59	0.05	- 6.68	18060.38	0.05	3.02	136.19	2464	56860
0.90	136.19	56113	- 4113	- 75.01	0.05	- 3.75	18056.89	0.05	2.83	139.02	2214	53899
0.95	139.02	52914	- 914	- 16.68	0.05	- 0.84	18055.79	0.05	2.79	141.81	1977	50337
1.00	141.81	50790	1210	22.07	0.05	1.10	18056.89	0.05	2.85	144.65	1827	48963

t	θ	$P_{el} + P_P$	$\frac{\Delta P}{P_m - (P_{el} + P_P)}$	$a = \frac{\Delta P}{K}$	Δt	$\Delta \omega$	ω	Δt	$\Delta \theta$	θ	P_P	Pel
S	deg	kW	kW	deg / S ²	S	deg / S	deg / S	S	deg	deg	kW	kW
0,00	35,15	21921	30079	548,64	0,025	13,71	18013,72	0,05	0,69	35,84	355	21566
0,05	35,84	22078	29922	545,79	0,05	27,023	18041,00	0,05	2,05	37,89	360	21778
0,10	37,89	49730	2270	41,41	0,025	2,07	18043,07	0,05	2,15	40,04	1754	47976
0,15	40,04	52170	- 170	- 3,10	0,05	- 0,16	18042,91	0,05	2,15	42,19	1924	50247
0,20	42,19	54512	- 2512	- 45,82	0,05	- 2,29	18040,62	0,05	2,03	44,22	2094	52418
0,25	44,22	57075	- 5075	- 92,56	0,05	- 4,63	18035,99	0,05	1,80	46,02	2287	54787
0,30	46,02	59002	- 7002	- 127,72	0,05	- 6,39	18029,60	0,05	1,48	47,50	2438	56564
0,35	47,50	67303	- 15303	- 279,12	0,025	- 6,98	18022,62	0,05	1,13	48,63	3137	64165
0,40	48,63	68387	- 16387	- 298,90	0,05	- 14,95	18007,68	0,05	0,38	49,02	3235	65152
0,45	49,02	68821	- 16821	- 306,82	0,05	- 15,34	17992,34	0,05	- 0,38	48,63	3274	65547
0,50	48,63	68387	- 16387	- 298,90	0,05	- 14,95	17977,39	0,05	- 1,13	47,50	3137	64165
0,55	47,50	67303	- 15303	- 279,12	0,05	- 13,96	17963,43	0,05	- 1,83	45,67	3137	64165
0,60	45,67	64706	- 12706	- 231,76	0,05	- 11,59	17951,84	0,05	- 2,41	43,26	2910	61796
0,65	43,26	61903	- 9903	- 180,63	0,05	- 9,03	17942,81	0,05	- 2,86	40,40	2673	59230
0,70	40,40	58466	- 6466	- 117,95	0,05	- 5,90	17936,91	0,05	- 3,15	37,25	2396	56070
0,75	37,25	54832	- 2832	- 51,65	0,05	- 2,58	17934,33	0,05	- 3,28	33,97	2117	52714
0,80	33,97	50154	1846	33,68	0,05	1,68	17936,01	0,05	- 3,20	30,77	1783	48371
0,85	30,77	45715	6285	114,64	0,05	5,73	17941,74	0,05	- 2,91	27,86	1490	44225
0,90	27,86	41722	10278	187,48	0,05	9,37	17951,11	0,05	- 2,45	25,42	1248	40474
0,95	25,42	38584	13416	244,70	0,05	12,24	17963,50	0,05	- 1,83	23,59	1072	37512
1,00	23,59	35460	16540	301,69	0,05	15,08	17978,44	0,05	- 1,08	22,51	910	34551

$t_d = 0.10 \text{ S} ; t_r = 0.35 \text{ S}$

Tableau VII

t	θ	$P_{el} + P_P$	$\Delta P = P_m - (P_{el} + P_P)$	$a = K \cdot \Delta P$	Δt	$\Delta \omega$	ω	Δt	$\Delta \theta$	θ	P_P	P_{el}
S	deg	kW	kW	deg / S ²	S	deg / S	deg / S	S	deg	deg	kW	kW
0,00	35,15	21921	30079	548,64	0,025	13,72	18013,72	0,05	0,69	35,84	355	21566
0,05	35,84	22078	29923	545,79	0,05	27,23	18041,00	0,05	2,05	37,89	360	21718
0,10	37,89	23302	28699	523,46	0,05	26,17	18067,17	0,05	3,36	41,25	400	22902
0,15	41,25	54192	-2192	-39,98	0,025	1,00	18066,17	0,05	3,31	44,55	2070	52122
0,20	44,55	57824	-5824	-106,22	0,05	5,31	18060,86	0,05	3,05	47,60	2345	55478
0,25	47,60	60827	-8827	-161,00	0,05	8,05	18052,81	0,05	2,64	50,24	2585	58242
0,30	50,24	63519	-11519	-210,10	0,05	10,50	18042,30	0,05	2,12	52,36	2809	60710
0,35	52,36	65463	-13463	-245,56	0,05	12,28	18030,02	0,05	1,50	53,86	2975	62487
0,40	53,86	73831	-21831	-398,20	0,025	9,96	18020,06	0,05	1,00	54,86	3743	70088
0,45	54,86	74925	-22925	-418,15	0,05	20,90	17999,15	0,05	-0,04	54,81	3849	71075
0,50	54,81	74925	-22925	-418,15	0,05	20,90	17978,24	0,05	-1,09	53,72	3849	71075
0,55	53,72	73613	-21613	-394,22	0,05	19,71	17958,53	0,05	-2,07	51,65	3722	69891
0,60	51,65	71213	-19213	-350,45	0,05	17,52	17941,00	0,05	-2,95	48,70	3494	67719
0,65	48,70	68495	-16495	-300,88	0,05	15,05	17925,96	0,05	-3,70	45,00	3244	65251
0,70	45,00	64058	-12058	-219,94	0,05	11,00	17914,96	0,05	-4,25	40,75	2854	61204
0,75	40,75	58895	-6895	-125,76	0,05	6,29	17908,67	0,05	-4,57	36,18	2430	56466
0,80	36,18	53340	-1340	-24,44	0,05	1,22	17907,45	0,05	-4,63	31,55	2008	51332
0,85	31,55	46770	5230	95,39	0,05	4,77	17912,22	0,05	-4,39	27,16	1558	45212
0,90	27,16	40674	11326	206,58	0,05	10,33	17922,55	0,05	-3,87	23,29	1188	39486
0,95	23,29	35259	16748	305,48	0,05	15,27	17937,82	0,05	-3,11	20,18	899	34354
1,00	20,18	30283	21717	396,12	0,05	19,80	17957,63	0,05	-2,12	18,06	668	29615

$$t_d = 0.15 \text{ S} ; t_r = 0.40 \text{ S}$$

Tableau VIII.

t	θ	$P_{el}+P_p$	$\frac{\Delta P}{P_m-(P_{el}+P_p)}$	$a = \frac{\Delta P}{K}$	Δt	$\Delta \omega$	ω	Δt	$\Delta \theta$	θ	P_p	P_{el}
S	deg	kW	kW	deg / S ²	S	deg / S	deg / S	S	deg	deg	kW	kW
0,00	35,15	21921	30079	548,64	0,025	13,71	18013,71	0,05	0,686	35,83	355	21566
0,05	35,836	22077,4	29923	545,79	0,05	27,23	18041,00	0,05	2,05	37,886	359	21718
0,10	37,886	23302	28699	523,46	0,05	26,173	18067,17	0,05	3,36	41,245	400	22902
0,15	41,245	25143	26857	489,87	0,05	24,494	18091,66	0,05	4,58	45,829	464	24679
0,20	45,829	59109,4	-7109,4	-129,67	0,025	-3,24	18089,42	0,05	4,47	50,3	2446,5	56662,9
0,25	50,3	64058	-12058	-219,9	0,05	-10,99	18078,4	0,05	3,92	54,22	2854,3	61203,8
0,30	54,22	67085,8	-15085,8	-275,16	0,05	-13,75	18064,64	0,05	3,23	57,45	3117,9	63967,9
0,35	57,45	69907	-17907,68	-326,64	0,05	-16,33	18048,3	0,05	2,415	59,86	3373,1	66534,5
0,40	59,86	71649,2	-19649,4	-358,4	0,05	-17,92	18030,38	0,05	1,52	61,38	3535,2	68113,9
0,45	61,38	81075	-29075	-530,32	0,025	-13,258	18017,12	0,05	0,856	62,23	4471,4	76603,5
0,50	62,236	81847	-29847	-544,4	0,05	-27,22	17989,9	0,05	-0,504	61,73	4552,4	77294,5
0,55	61,73	81406	-29406	-536,36	0,05	-26,81	17963,08	0,05	-1,9	59,9	4506	76899,7
0,60	59,9	79863,2	-27836,2	-508,22	0,05	-25,41	17937,66	0,05	-3,11	56,78	4345,5	75517,67
0,65	56,78	77006,2	-25006,2	-456	0,05	-22,8	17914,86	0,05	-4,256	52,52	4055	72951
0,70	52,52	73176,1	-21176,1	-386,25	0,05	-19,3	17895,55	0,05	-5,222	47,29	3680	69496
0,75	47,29	67519,3	-15519,3	-283	0,05	-14,15	17881,39	0,05	-5,93	41,359	3156,5	64362,7
0,80	41,36	60612	-8612	-157	0,05	-7,85	17873,54	0,05	-6,33	35	2567,3	58045
0,85	35	52701,7	-701,73	-35	0,05	-1,75	17871,78	0,05	-6,41	28,59	1961,7	50740
0,90	28,59	42980,5	9019,5	164,5	0,05	8,225	17880	0,05	-5,999	22,59	1322,3	41658
0,95	22,59	34422	17578	320,62	0,05	16	17896,03	0,05	-5,198	17,39	858,3	33563,4
1,00	17,39	25578,5	25421	463,68	0,05	23,18	17919,2	0,05	-4	13,35	517,5	26061

$$t_d = 0.20 \text{ S} ; t_r = 0.45 \text{ S}$$

Tableau IX

$$t_d = 0.45 \text{ S} ; t_r = 0.70 \text{ S}$$

Tableau X

t	θ	$P_{el} + P_P$	$\frac{\Delta P}{P_m - (P_{el} + P_P)} \cdot a = \frac{\Delta P}{K \cdot \Delta P}$	Δt	$\Delta \omega$	ω	Δt	$\Delta \theta$	θ	P_P	P_{el}	
S	deg	kW	kW	deg / S ²	S	deg / S	deg / S	S	deg	deg	kW	kW
0,00	35,15	21921	30079	548,64	0,025	13,72	18013,72	0,05	0,69	35,84	355	21566
0,05	35,84	22077	29923	545,79	0,05	27,23	18041,00	0,05	2,05	37,89	359	21718
0,10	37,89	23302	28699	523,46	0,05	26,17	18067,17	0,05	3,36	41,25	400	22902
0,15	41,25	25143	26857	489,87	0,05	24,50	18091,67	0,05	4,58	45,83	464	24679
0,20	45,83	27195	24805	452,45	0,05	22,62	18114,29	0,05	5,72	51,55	541	26654
0,25	51,55	30078	21922	399,86	0,05	19,99	18134,28	0,05	6,72	58,26	660	29418
0,30	58,26	32764	19236	350,87	0,05	17,55	18151,83	0,05	7,59	65,86	780	31984
0,35	65,86	35045	16955	309,26	0,05	15,46	18167,29	0,05	8,37	74,22	890	34156
0,40	74,22	36917	15083	275,12	0,05	13,76	18181,05	0,05	9,05	83,27	984	35933
0,45	83,27	82620	-30620	-558,50	0,025	-13,96	18167,09	0,05	8,35	91,63	4634	77986
0,50	91,63	83277	-31277	-570,50	0,05	-28,53	18138,57	0,05	6,93	98,56	4704	78573
0,55	98,56	82399	-30399	-554,48	0,05	-27,73	18110,85	0,05	5,54	104,10	4611	77788
0,60	104,10	80855	-28855	-526,31	0,05	-26,32	18084,54	0,05	4,23	108,33	4448	76406
0,65	108,33	78873	-26873	-490,17	0,05	-24,51	18060,03	0,05	3,00	111,33	4244	74629
0,70	111,33	85718	-33718	-615,02	0,025	-15,38	18044,66	0,05	2,23	113,56	4969	80750
0,75	113,56	84389	-32389	-590,77	0,05	-29,54	18015,12	0,05	0,76	114,32	4824	79565
0,80	114,32	83614	-31614	-576,65	0,05	-28,83	17986,29	0,05	-0,69	113,63	4740	78874
0,85	113,63	83946	-31946	-582,70	0,05	-29,13	17957,16	0,05	-2,14	111,49	4776	79170
0,90	111,49	85718	-33719	-615,02	0,05	-30,75	17926,41	0,05	-3,68	107,81	4969	80750
0,95	107,81	87716	-35716	-651,46	0,05	-32,57	17893,84	0,05	-5,31	102,50	5190	82527
1,00	102,50	90276	-38276	-698,15	0,05	-34,91	17858,93	0,05	-7,05	95,45	5479	84797
1,05	95,45	92173	-40173	-732,76	0,05	-36,64	17822,29	0,05	-8,89	86,56	5698	86475
1,10	86,56	92508	-40508	-738,87	0,05	-36,94	17785,35	0,05	-10,73	75,83	5737	86771

t	θ	$P_d = P_e + P_P$	$\Delta P = P_m - P_d$	$a = K \cdot \Delta P$	Δt	$\Delta \omega$	ω	Δt	$\Delta \theta$	θ	P_P	P_e
S	deg	kW	kW	deg / S ²	S	deg / S	deg / S	S	deg	deg	kW	kW
0,00	35,15	21921	30079	548,64	0,025	13,72	18013,72	0,05	0,69	35,84	355	21566
0,05	35,84	22077	29923	545,79	0,05	27,23	18041,00	0,05	2,05	37,89	359	21718
0,10	37,89	23302	28699	523,46	0,05	26,17	18067,17	0,05	3,36	41,25	400	22902
0,15	41,25	25143	26857	489,87	0,05	24,50	18091,67	0,05	4,58	45,83	464	24679
0,20	45,83	27195	24805	452,45	0,05	22,62	18114,29	0,05	5,72	51,55	541	26654
0,25	51,55	30078	21922	399,86	0,05	19,99	18134,28	0,05	6,72	58,26	660	29418
0,30	58,26	32764	19236	350,87	0,05	17,55	18151,83	0,05	7,59	65,86	780	31984
0,35	65,86	35045	16955	309,26	0,05	15,46	18167,29	0,05	8,37	74,22	890	34156
0,40	74,22	36917	15083	275,12	0,05	13,76	18181,05	0,05	9,05	83,27	984	35933
0,45	83,27	38376	13624	248,50	0,05	12,43	18193,48	0,05	9,67	92,95	1061	37315
0,50	92,95	83504	- 31504	- 574,62	0,025	- 14,37	18179,11	0,05	8,96	101,90	4729	78775
0,55	101,90	81296	- 29296	- 534,35	0,05	- 26,72	18152,39	0,05	7,62	109,52	4485	76801
0,60	109,52	78324	- 26324	- 480,14	0,05	- 24	18128,38	0,05	6,42	115,94	4188	74136
0,65	115,94	74597	- 22597	- 412,16	0,05	- 20,61	18108,77	0,05	5,44	121,38	3817	70779
0,70	121,38	70343	- 18343	- 334,57	0,05	- 16,73	18092,04	0,05	4,60	125,98	3413	66929
0,75	125,98	73613	- 21613	- 394,22	0,025	- 9,86	18082,18	0,05	4,11	130,09	3722	69891
0,80	130,09	69256	- 17256	- 314,74	0,05	- 15,74	18066,45	0,05	3,32	133,41	3313	65942
0,85	133,41	65354	- 13354	- 243,58	0,05	- 12,18	18054,27	0,05	2,71	136,12	2966	62388
0,90	136,12	62334	- 10334	- 188,48	0,05	- 9,42	18044,85	0,05	2,24	138,36	2709	59625
0,95	138,36	59753	- 7753	- 141,42	0,05	- 7,07	18037,78	0,05	1,89	140,25	2498	57255
1,00	140,25	57610	- 5610	- 102,32	0,05	- 5,12	18032,65	0,05	1,63	141,88	2329	55281

... / ...

t	θ	$P_d = P_{el} + P_p$	$\Delta P = P_m - l \dot{\theta}$	$a = K \cdot \Delta P$	Δt	$\Delta \omega$	ω	Δt	$\Delta \theta$	θ	P_I	P_{el}
S	deg	kW	kW	deg / S ²	S	deg / S	deg / S	S	deg	deg	kW	kW
1,05	141,88	55899	- 3899	- 71,12	0,05	- 3,56	18029,11	0,05	1,46	143,34	2197	53702
1,10	143,34	53766	- 1766	- 32,21	0,05	- 1,61	18027,50	0,05	1,37	144,71	2039	51727
1,15	144,71	52276	- 276	- 5,04	0,05	- 0,25	18027,25	0,05	1,36	146,07	1931	50345
1,20	146,07	50366	1634	29,81	0,05	1,49	18028,74	0,05	1,44	147,50	1794	48268
1,25	147,50	48248	3752	68,43	0,05	3,42	18032,16	0,05	1,61	149,11	1654	46594

$$t_d = 0.50 \text{ S} ; t_r = 0.55 \text{ S}$$

Tableau XI

CONCLUSION

Cette étude nous a permis d'élargir nos connaissances sur le domaine de la stabilité des réseaux, qui est un domaine d'étude assez vaste.

Elle nous a permis de confirmer le rôle de l'élimination rapide et sélective des défauts, grâce aux dispositifs de protection et disjoncteurs rapides et redondants, dans le maintien de la stabilité d'un réseau de distribution. La durée d'élimination des courts-circuits doit être aussi réduite que possible (moins de 0.15 secondes) pour améliorer la stabilité d'une part, et pour augmenter le gain en puissance maximum transmissible en fonctionnement normal sans risque de perte de synchronisme relativement à un C-C biphasé à la terre (jusqu'à 80 % de la puissance limite statique). La participation du réenclenchement rapide automatique dans l'amélioration de la stabilité a été mise en évidence.

Dans cette étude nous nous sommes limités au cas particulier d'un groupe générateur relié à réseau puissant par l'intermédiaire d'une réactance, et au cas d'un court-circuit biphasé à la terre, c'est un cas que l'on rencontre que rarement en pratique. On peut généraliser cette étude surtout aux réseaux longs et peu étoffés, destinés à l'évacuation de sources d'énergie éloignées des centres consommateurs. On aurait pu étudier tous les genres de C-C et à distances différentes de la centrale. Les calculs seraient longs et fastidieux.

L'étude aura été plus intéressante si l'on disposait d'un analyseur à courant continu ou d'un calculateur arithmétique.

Nous souhaitons qu'à l'avenir l'E. N. P disposera de moyens pédagogiques permettant l'étude de la stabilité d'un réseau réel en Algérie. D'autant plus que la Sonelgaz envisage d'augmenter la capacité de transit à 400 kV, d'où les problèmes de stabilité qui peuvent inévitablement survenir.



AUTOTRANSFORMATEUR

CALCUL DES PARAMETRES DU RESEAU

I - LIGNE AERIENNE

1-1 Résistance directe :

La valeur de la résistance kilométrique des lignes aériennes est donnée par les catalogues, en fonction de la nature du conducteur et de son diamètre :

$$R'_L = 0,128 \ \Omega / \text{km}$$

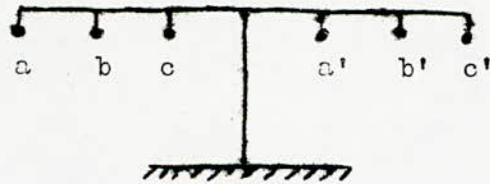
1-2 Réactance inductive directe.

L'Inductance par phase en Henry/km d'une ligne triphasée à double voie à conducteurs transposés est donnée par :

$$L = 2 \cdot \left(\ln \frac{D_{eq}}{r_{eq}} \right) \cdot 10^{-4} \text{ Henry/km}$$

où :

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} \quad \text{et} \quad r_{eq} = \sqrt[3]{r_{eqa} \cdot r_{eqb} \cdot r_{eqc}}$$



avec :

$$\begin{cases} D_{ab} = \sqrt[4]{ab \cdot ab' \cdot a'b \cdot a'b'} \\ D_{bc} = \sqrt[4]{bc \cdot bc' \cdot b'c \cdot b'c'} \\ D_{ca} = \sqrt[4]{ca \cdot ca' \cdot c'a \cdot c'a'} \end{cases}$$

et :

$$\begin{cases} r_{eqa} = \sqrt{ra \cdot da \cdot aa'} \\ r_{eqb} = \sqrt{rb \cdot db \cdot bb'} \\ r_{eqc} = \sqrt{rc \cdot dc \cdot cc'} \end{cases}$$

A.N : avec $r_a = r_b = r_c = r$

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 6,91 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_{ab} = \sqrt[4]{3,7 \cdot 15,7 \cdot 8,3 \cdot 3,7} = 6,49 \text{ m}$$

$$D_{bc} = \sqrt[4]{3,7 \cdot 15,7 \cdot 8,3 \cdot 3,7} = 6,49 \text{ m}$$

$$D_{ca} = \sqrt[4]{7,4 \cdot 4,6 \cdot 19,4 \cdot 7,4} = 8,36 \text{ m}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{8,36 \cdot 2 \cdot 6,49} = 4,92 \text{ m}$$

$$r_{eqa} = r_{eqb} = r_{eqc} = r_{eq}$$

$$r_{eq} = \sqrt{6,9 \cdot 10^{-3} \cdot 12}$$

$$r_{eq} = 0,287 \text{ } \Omega$$

$$L = 2 \cdot \ln \frac{D_{eq}}{r_{eq}} \cdot 10^{-4} \text{ H / km}$$

$$L = 2 \cdot \ln \frac{4,92}{0,287} \cdot 10^{-4} \text{ H / km}$$

$$L = 5,68 \cdot 10^{-4} \text{ H / km}$$

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 5,68 \cdot 10^{-2}$$

$X_L = 17,84 \approx 18 \text{ } \Omega / \text{ph}$
--

Pour une voie, on a :

$X'_L = 36,0 \text{ } \Omega / \text{ph}$

1-3 Réactance inductive homopolaire

Le rapport de la réactance homopolaire à la réactance directe en fonction de la tension du réseau pour une ligne simple voie sans câble de garde est donnée par les tableaux :

$$\frac{X_0}{X_1} = 3,4 \quad (\text{Pour une tension de 110 kv})$$

Pour une ligne à double voies la réactance homopolaire est donnée par : $X_{0-2 \text{ voies}} = 1,5 \cdot X_{0-1 \text{ voie}}$

Donc pour une tension de 110 kv et une ligne à 2 voies on a :

$X_{0-2 \text{ voies}} = 5,1 X_1$

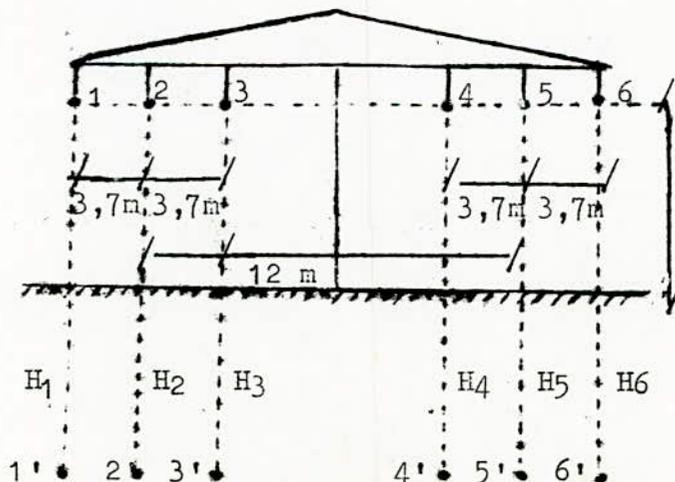
1 - 4 Réactance inductive Inverse.

La réactance inductive inverse est égale à la réactance inductive directe. De même pour les résistances, la résistance directe d'une ligne est égale à sa résistance inverse.

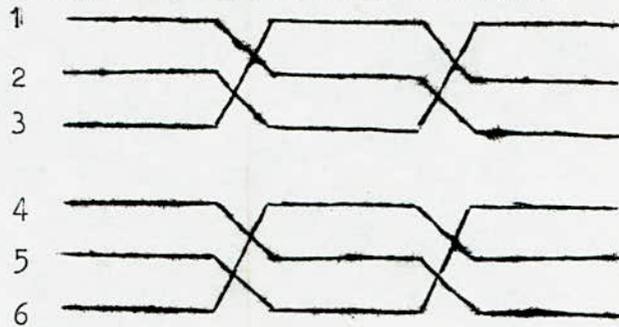
Nous avons en définitive :

$X_{11} = X_{12} = 36,0$	Ω / ph
$R_1 = R_2 = 12,8$	Ω / ph
$X_{01} = 183,6$	Ω / ph

III - CALCUL DE LA CAPACITE D'UN CONDUCTEUR.



Pour le calcul de la capacité, on tient compte de l'influence du sol, les conducteurs sont transposés, comme le montre le schéma :



La capacité propre d'un conducteur est donnée :

$$C = \frac{1}{18 \left(\ln \frac{D_{eq}}{r} - \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12} \cdot H_{13} \cdot H_{23}}}{H_1} \right)}$$

avec : $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}$

$$H_{eq} = \sqrt[3]{H_{12} \cdot H_{13} \cdot H_{23}}$$

A.N :

$$D_{12} = D_{23} = 3,7 \text{ m}, D_{13} = 7,4 \text{ m}$$

$$H_1 = H_2 = \text{---} = H_6 = 24 \text{ m}$$

$$H_{12} = 24,28 \text{ m}$$

$$H_{13} = 25,11 \text{ m}$$

$$H_{23} = 24,28$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}} = 4,66 \text{ m}$$

$$H_{eq} = \sqrt[3]{H_{12} \cdot H_{13} \cdot H_{23}} = 24,56 \text{ m}$$

$$C = 8,56 \text{ nF / km}$$

III - TRANSFORMATEURS

3-1 Résistance directe :

La valeur de la résistance d'un transformateur est donnée par l'expression :

$$R_T = \frac{P_{cu}}{1000} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2}$$

avec

P_{cu} : pertes en cuivre en kw

U_n : tension nominale en kv

S_n : puissance apparente en MVA

P_{cu} est donnée par les catalogues en pour-cent de la puissance totale du transformateur.

3-2 Réactance inductive directe

la valeur de la réactance est donnée par la formule :

$$X_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

avec

$U_{cc}\%$ = la tension du court-circuit en %

U_n = tension nominale en kv

S_n = puissance apparente nominale en MVA

A noter que la réactance inductive directe est égale à la réactance inductive inverse.

3- 3 IMPEDANCE HOMOPOLAIRE.

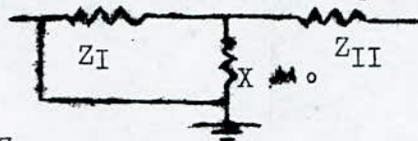
L'Impédance homopolaire d'un transformateur dépend de la nature du couplage de ses enroulements, et du circuit magnétique qui peut être à flux libre ou à flux forcé.

Les transformateurs utilisés dans notre réseau sont à flux forcé. Ce sont des transformateurs de construction identiques à trois colonnes munis d'une cuve d'huile.

Le couplage des enroulements est Δ / Y , l'étoile étant mise à la terre, leur impédance homopolaire est donnée en fonction de leur impédance directe :

$$Z_0 = (0,8 \div 0,9) \cdot Z_d$$

Voici par ailleurs le schéma équivalent pour un transformateur :



avec $Z_I = Z_{II} = \frac{Z_1}{2}$

Resultats :

$$Z_2 = Z_1 \approx X_1 = X_2$$

$X_{\mu 0}$ = réactance du circuit magnétique

$X_{\mu 0} \neq \infty$ (transformateur équivalent à trois transformateurs monophasés).

$$Z_0 = \frac{Z_1}{2} + \frac{\left(\frac{Z_1}{2}\right) \cdot (j X_{\mu 0})}{\frac{Z_1}{2} + j X_{\mu 0}}$$

mais comme on l'avait signalé précédemment on pratique :

$$Z_0 = (0,8 \div 0,9) Z_1$$

$$Z_0 \approx X_0$$

$$\Delta U_x = 10 \% ; S_n = 60 \text{ MVA}$$

$$\Delta P_{cu} = 0,7 \%$$

$$\Delta P_{fer} = 160 \text{ kw}$$

$$X_T = X_1 = X_2 = \frac{10}{100} \cdot \frac{110^2}{60} = 20,17 \ \Omega / \text{ph}$$

$$R_T = \frac{0,7}{100} \cdot \frac{110^2}{60} = 1,41 \ \Omega / \text{ph}$$

$$X_{\mu} = \frac{1}{I_{\mu}} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1}{1} \cdot \frac{110^2}{60} = 202 \ \Omega / \text{ph}$$

$$R_{fer} = \frac{110^2}{160} \cdot 10^3 = 75625 \ \Omega / \text{ph}$$

$$Z_0 \approx X_0 = 19,69 \ \Omega / \text{ph}$$

N. B : Toutes ces grandeurs sont ramenées du côté H.T (110 kv)

IV ALTERNATEURS

La résistance est généralement négligée, l'expression des différentes réactances synchrones directe, transitoire directe est donnée par :

$$X = \frac{x \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

$x \%$: taux de réactance.

- le taux de réactance synchrone directe est 75 %, il lui correspond la réactance :

$$X_d = \frac{75}{100} \cdot \frac{(15,5)^2}{30} \cdot \left(\frac{110}{15}\right)^2 = 323 \ \Omega/\text{ph}$$

- En fonctionnement normal de l'alternateur on prend un taux de réactance synchrone directe adapté de 52 %, d'où :

$$X_d (\text{adap}) = \frac{52}{100} \cdot \frac{(15,5)^2}{30} \cdot \left(\frac{110}{15}\right)^2 = 223,94 \ \Omega/\text{ph}$$

- Le taux de réactance transitoire directe est de 26 % d'où :

$$X_d = \frac{26}{100} \cdot \frac{(15,5)^2}{30} \cdot \left(\frac{110}{15}\right)^2 = 112 \ \Omega/\text{ph}$$

- Le taux de réactance homopolaire est évalué à partir des tableaux à 15 %, d'où :

$$X_0 = \frac{15}{100} \cdot \frac{(15,5)^2}{30} \cdot \left(\frac{110}{15}\right)^2 = 64,6 \ \Omega/\text{ph}$$

- Le taux de réactance inverse est 32 %, d'où :

$$X_2 = \frac{32}{100} \cdot \frac{(15,5)^2}{30} \cdot \left(\frac{110}{15}\right)^2 = 137,8 \ \Omega/\text{ph}$$

N . B :

Toutes ces grandeurs sont ramenées du côté H.T (110 kv).

-°- BIBLIOGRAPHIE -°-

- (1) - Edward Wilson Kimbark. Power System stability
volume I - Elements of stability calculations.
New York - 1948 -
-
- (2) - A. MAUDUIT. Installations électriques à haute et basse tension
tome II et III.
DUNOD - Paris 1959.
-
- (3) René Pélissier. Les réseaux d'énergie électrique.
tome II . DUNOD - Paris 1971.
-
- (4) A. Curchol et L. Vellard. Memento d'électrotechnique
tome III
-
- (5) - Pierre Henriot : Fonctionnement et Protection des réseaux
de transport d'électricité .
Gauthier - Villars - Paris 1963.
-
- (6) - "Fast Valving " un moyen pour améliorer la stabilité
du réseau . Revue Brown Boveri
N° 6 1979.
-
-
-
-

