

UNIVERSITÉ D'ALGER

18/75

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

20x



PROJET DE FIN D'ÉTUDES

ÉTUDE DE LA STABILITÉ DYNAMIQUE
DES RÉSEAUX DE TRANSPORT
D'ÉNERGIE H.T.

Proposé par :
Monsieur G. CIRTINA

Étudié par :
Monsieur N. MEHALHAL
et Monsieur B. CHOUAKI

PROMOTION 1970 - 1975

REMERCIEMENTS

M. GEORGES CIRTINA DOCTEUR ENGENIEUR

PROFESSEUR

À L'ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

NOS REMERCIEMENTS S'ADRESSENT TOUT PARTICULIÈREMENT A
Mr. GEORGES CIRTINA DOCTEUR INGENIEUR, PROFESSEUR A
L'ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, QUI, MALGRE LES CIRCON-
STANCES FACHEUSES DANS LESQUELLES IL S'ÉTAIT TROUVE, NOUS
A GUIDES ET SUIVIS DANS LE PRESENT TRAVAIL.

MESSIEURS LES MEMBRES DU JURY :

QUI ONT BIEN VOULU NOUS HONORER DE LEUR PRESENCE A LA
PRESENTATION DE CE TRAVAIL.

TOUS LES ENSEIGNANTS DE L'E.N.P.A :

NOUS REMERCIONS ÉGALEMENT TOUS LES PROFESSEURS ET ASSIS-
TANTS QUI ONT CONTRIBUÉ A NOTRE FORMATION.

—A— T — — — — —

CEUX QUI DE PRES OU DE LOIN ONT CONTRIBUE A L'ELABORA-
TION DE CETTE ETUDE PAR LEUR SOUTIEN MATERIEL OU MORAL

— — — — — o o — — — — —

O M M A I R E

Page

Introduction	1
 <u>Chapitre I - Stabilité dynamique</u>	
I-1	2
I-1.2	3
I-1.3	4
I-1.3.1	4
I-1.3.1.1	5
I-1.3.1.2	5
I-1.3.2	5
 <u>Chapitre II -</u>	
II-1	6
II-1.1	6
II-1.2	6
II-1.2.1	6
II-1.2.2	6
II-1.2.3	7
II-1.2.4	8
II-1.3	8
II-1.3.1	16
II-1.3.1.2	16
II-1.3.1.3	17
II-1.3.2	18
 <u>Chapitre III - Influence de la structure des réseaux et des paramètres</u>	
III-1	23
III-1.1	23
III-1.2	23
III-2	27
III-3	27
III-3.1	29
III-3.2	31
III-4	31
III-4.1	33
III-5	36
III-6	38
III-7	41
 <u>Chapitre IV - Méthode d'amélioration de la stabilité</u>	
IV-1	44
IV-2	44
IV-3	46
IV-4	46
IV-5	49

Chapitre V - Application numérique

V-1	Calcul de l'accroissement de puissance DP par mise en série de condensateur	59
V-2	Amélioration de la stabilité d'une ligne 2 x 220 KV par compensation série pour un réseau de puissance infinie	66
	- Conclusion	90
	- Bibliographie	91

INTRODUCTION

La rentabilité de la production d' énergie croit avec la grandeur et la puissance des alternateurs, l'interconnexion des réseaux permet d' utiliser des tranches de centrales de grandes puissances sans mettre en question la sécurité de fourniture d' énergie.

Toutefois lorsqu' il s' agit d' alternateurs de grande puissance avec un facteur d' utilisation élevé, les problèmes de stabilité deviennent plus importants aussi bien lors de l' établissement du projet qu' en service.

L' étude du comportement dynamique d' un réseau électrique présente en général de nombreux aspects en effet le comportement du système dont on a la configuration et suivant sa complexité dépend de la contribution de toutes les parties qui le composent et chaque composante peut à son tour être caractérisé même par plusieurs paramètres.

A cet égard, il est concevable de faire une étude critique sur l' effet de chaque composante et de chaque paramètre du réseau si les problèmes de stabilité se posent pour un réseau c' est qu' en général plusieurs facteurs défavorables sont réunis. Les uns concernant la structure du réseau et son mode d' exploitation d' autres concernant les caractéristiques des machines et leur système de régulation d' autres enfin concernant les performances des systèmes de protection. Le progrès technique et économique implique souvent une demande de plus en plus grande en puissance électrique et l' acuité du problème de stabilité se fera sentir comme on le verra .

En ce qui concerne l' Algérie de nos Jours les problèmes de stabilité ne sont pas connus.

D' après les perspectives du deuxième plan quadriennal, au environ des années 1980, le nombre de postes sera doublé, ce qui par conséquent conduira au doublement du nombre des lignes existantes. C' est à partir de ce moment que les problèmes de stabilité se poseront à l' Algérie.

Actuellement certains modes d' amélioration de la stabilité dynamique sont appliqués de par le monde. Dans notre étude nous essayerons de les définir et d' en faire une analyse au moyen d' applications pratiques sur des réseaux radiaux et d' en tirer quelques règles afin de les justifier.

CHAPITRE I

Stabilité dynamique

I- 1 Définition de la stabilité dynamique et de la stabilité statique :

Généralement nous avons tendance à donner à ce mot un sens plus large qu'il n' avait à l' origine et à parler plutôt de comportement dynamique que de stabilité dynamique. Traditionnellement un transport de puissance est considéré au-delà de sa limite de stabilité dynamique si une ou plusieurs machines risquent de perdre le synchronisme à la suite d' un défaut. Le synchronisme d' un alternateur est considéré comme perdu à partir d' un glissement assez important de pôles. Si cette définition reste valable elle ne répond que partiellement aux problèmes qui se posent dans un réseau. Il est nécessaire de délimiter ce qu' on entend par stabilité statique. La limite de stabilité statique correspond, généralement, à une perte de synchronisme à la suite d' une faible variation d' une grandeur dans le réseau. C' est un phénomène très lent si bien que son approche est caractérisée par des oscillations entretenues de puissances sur le réseau. Ceci rend impossible un transport au-delà de la limite de stabilité statique. Un régime dynamique des réseaux est obtenu à la suite d' incidents (défaut sur ce réseau. Par conséquent il constitue un risque ayant une probabilité d' occurrence et dont la probabilité combinée avec celle du régime étudié est généralement faible. En élargissant la définition de la stabilité dynamique à celle du comportement dynamique, on se fixe un objectif arbitraire pour ce genre d' étude. D' où la définition de certains auteurs, afin de restreindre l' étude.

"On dit qu' un réseau est stable si toutes les machines synchrones qui y sont raccordées restent synchrones entre elles."

I.- 1. 1. Interprétations : afin de mieux saisir ces définitions nous pouvons donner un aperçu formel.

Soit le schéma suivant

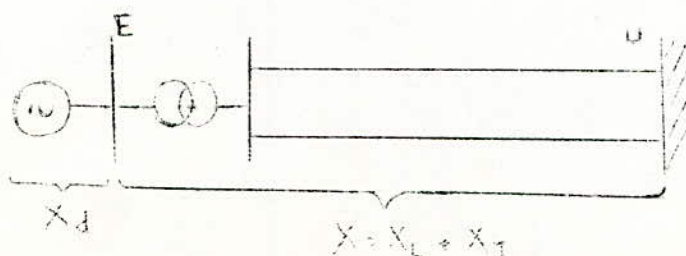


Fig. 1

Le fonctionnement de la machine synchrone de la figure 1 exige que la force électromotrice E dans l'enroulement induit soit et reste en synchronisme avec la tension aux bornes de la machine, et soit connectée directement au réseau de grande puissance. Dans le cas où la machine est reliée à un tel système par une ligne de transmission, la force électromotrice devra être et rester synchrone avec la tension V aux points de connection de la ligne au système considéré.

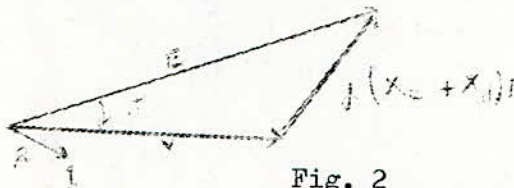
En négligeant les résistances R, l'expression de la puissance par phase, est :

$$P = \frac{EV \cdot \sin \delta}{X_d + X_c} \quad (I. 1)$$

X_d = réactance synchrone de la machine.

X_c = réactance de la ligne + celle du transformateur

δ = angle de déphasage entre E et V (ou bien angle de transport).



Les puissances de 1^{er} ordre du maximum

$$P_{\max} = \frac{EV}{X_d + X_c} \quad (I. 2)$$

correspondant à un angle de transport de 90°, transmissibles en régime établi, ne peuvent pas être admises en pratique car le système perdrait le synchronisme à la suite de l'apparition d'un défaut sur la ligne de transmission.

La puissance limite admissible, en pratique, sur un grand réseau de transport et celle pour laquelle un défaut, généralement entre une phase et la terre, survenant sur le jeu de barres en tête de ligne avec un cycle de temps de déclenchement et de réenclenchement donné (le plus court possible) peut encore ne pas causer une perte de synchronisme et compromettre la stabilité de la transmission.

I. 1. 2. Les perturbations :

Les principales perturbations susceptibles d'entraîner des pertes de synchronisme sont les suivantes :

- Les brusques augmentations d'impédance d'un réseau.
- Les courts circuits .
- Les surcharges brusques .

- Une succession de ces différents phénomènes.
- Les pertes d'ouvrage (mise hors service involontaire d'un groupe).

Bien que ces perturbations sont aléatoires, nous devons faire un classement par ordre de probabilité de fréquence de ces phénomènes.

Dans les brusques augmentations d'impédance d'un réseau la cause principale est toujours un court circuit. La probabilité d'apparition des courts circuits est donné dans le tableau suivant:

Nature du court-circuit	Symbole	Probabilité
Triphasé	3p	50%
Biphasé la terre	2pn	20%
Biphasé	2p	10%
Phase-terre	pn	65%

I- 1. 1. 3. Conséquences dans les réseaux maillés et les réseaux radiaux :

La stabilité dynamique des grands réseaux de production et de transfert d'énergie électrique, à fait depuis de nombreuses années l'objet de grandes études. Elle est souvent d'impédance moyenne dans les réseaux fortement maillés.

I- 1. 3. 4. Réseaux maillés :

Dans un réseau maillé les mouvements des machines se transmettent de proche en proche engendrant des variations de courant sur la ligne. Les répercussions des incidents peuvent être graves et peuvent même entraîner un effondrement complet du réseau si les réactions, tant des protections que des organes de réglage sont désordonnés.

Il est donc très important de pouvoir connaître l'évolution des grandeurs U et J en différents points du réseau pour des durées dépassant la première oscillation des machines et ceci même en cas de rupture de synchronisme. Le fonctionnement hors synchronisme du réseau maillé est dû généralement au fait qu'à la suite d'une perturbation grave, soit de liaison entre les génératrices et les charges, soit au niveau de plusieurs générateurs, ces derniers pouvant à un instant donné présenter des vitesses différentes, que l'équilibre entre les couples moteurs et les couples résistants est rompu par les perturbations. Les forces électromotrices des machines constituent des sources de tension à différentes fréquences dans le réseau que présentent ces perturbations.

En chacun de ces points toutes les grandeurs sont affectées (à divers degrés) par l'existence de ces différentes fréquences et toutes les dispositions doivent être prises afin de limiter en durée l'influence des perturbations provoquées par ces phénomènes. Parmi les dispositifs de protection certains agissent sur le réseau d'autres sur les machines génératrices.

I- 1. 3. 1. 1. Action sur le réseau : Elle consiste en des débouclages des zones atteintes afin de sauvegarder la continuité de service dans les zones isolées. Ce débouclage permet une reprise facile du synchronisme.

I- 1. 3. 1. 2. Action sur les consommateurs : le débouclage s'accompagne souvent d'un délestage des gros consommateurs dans certaines zones isolées. Ce type d'intervention nécessaire afin d'éviter une généralisation du fonctionnement hors synchronisme anarchique d'un réseau maillé, ne réduit pas forcément la durée de fonctionnement hors synchronisme dans la zone qui a été le liège de l'incident grave.

Cette procédure représente cependant un des seuls moyens dont disposent actuellement les exploitants de réseaux pour se prémunir contre des incidents catastrophiques.

I- 1. 3. 2. Réseaux radiaux :

Il fait l'objet de notre étude et nous verrons en dernier chapitre une application numérique qui dégagera les conséquences essentielles sur ce genre de réseaux.

II CHAPITRE II

II- 1. Etude de la stabilité:

II- 1. 1. Mise en équation du mouvement relatif de l' inducteur d' une machine synchrone:

Base de mise en équation: soit une machine synchrone fonctionnant en parallèle avec d' autres machines synchrones, que l' on supposera de puissance beaucoup plus grande que celle de la première, de sorte que la fréquence et la tension de ces dernières puissent être considérées comme constantes.

L' inducteur de la première machine, s' il se trouve écarté de sa position d' équilibre a un mouvement non uniforme au cours duquel il est soumis aux couples suivants :

1/ Un couple C_m transmis par l' arbre de la machine motrice .

2/ Un couple d' origine électrique $C_r = C_e$ correspondant à la puissance fournie au réseau.

3/ Un couple d' inertie de l' inducteur.

4/ Un couple d' amortissement dû aux courants induits que le mouvement non uniforme engendre dans la partie tournante de la machine.

A tout instant la somme algébrique de ces quatre (4) couples doit faire équilibre.

Donc : $C_e + C_i + C_a = C_m$

II- 1. 2. Etude des différents couples :

On étudiera successivement les trois (3) premiers couples, en supposant que la pulsation du réseau $\omega = 2\pi f$ est constante, et à cet effet on rapporte le mouvement de la machine à un système d' axes de référence tournant à une vitesse constante Ω_0 , lié à la pulsation ω du réseau par :

$$\Omega_0 = \frac{\omega}{p}$$

p = nombre de paires de pôles
= vitesse de synchronisme

La puissance électrique en négligeant la résistance de l' alternateur est d' après la théorie du quadripôle :

$$P = \frac{3EV}{X_d} \sin \delta \quad \text{et} \quad (II.1)$$

$$P_{\max} = \frac{3EV}{X_d} \quad (II.2)$$

X_d = réactance synchrone de l' alternateur

E = force électromotrice de l' alternateur

E = tension en bout de ligne ou aux bornes de l' alternateur. Ainsi on peut écrire :

$$P = P_m \sin \delta \quad (\text{II.3})$$

Le couple correspondant pour une vitesse absolue Ω est le couple électrique :

$$C_e = \frac{P}{\Omega} = \frac{P_m}{\Omega} \sin \delta \quad (\text{II.4})$$

Pour une machine à pôles saillants :

$$C_e = \frac{3EV}{\Omega X_d} \sin \delta + \frac{3V^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (\text{II.5})$$

II- 1. 2. 1. Couple d' inertie:

Si on désigne par I le moment d' inertie de la partie tournante de la machine, le couple d' inertie est :

$$C_i = \frac{I}{p} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (\text{II.6})$$

II- 1. 2. 2. Couple d' amortissement :

Le mouvement relatif du champ de l' induit par rapport à la roue pôlaire peut induire des courants dans l' amortisseur, dans l' enroulement inducteur et dans la masse des pôles.

La vitesse relative du champ de l' induit par rapport à la roue pôlaire est :

$$\Omega - \Omega_o = \frac{1}{p} \times \frac{d\delta}{dt} \quad (\text{II.7})$$

Le couple d' amortissement est résistant si $\Omega > \Omega_o$, ce qui est toujours vrai dans le cadre de notre étude.

$$C_a = \lambda_a \frac{d}{dt} \quad \lambda_a = \text{constante} \quad (\text{II.8})$$

II- 1. 2. 3. Equation générale du mouvement :

L' équation générale du mouvement est de la forme suivante :

$$C_m = \frac{I}{p} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{d\delta}{dt} + \frac{P_m}{\Omega} \sin \delta \quad (\text{II.9})$$

Nous ne garderons pas cette équation sous cette forme en vue de sa transformation ultérieure mais nous définirons une constante fort utile dans la suite de l'étude

II- 1. 2. 4. Constante d' accélération :

On appelle constante d' accélération ou temps de lancer d' une machine tournante le temps nécessaire aux parties tournantes initialement à l' arrêt pour atteindre la vitesse normale lorsqu' on applique sur l' arbre un couple accélérateur égal au couple nominal.

Si on néglige les pertes de la machine et si l' on désigne sa puissance actuelle nominale par P_n le couple nominal correspondant est $\frac{P_n}{\Omega_0}$ et on trouve facilement

que la constante d' accélération a pour expression :

$$T = \frac{I \Omega_0^2}{P_n} \quad \text{et} \quad I = \frac{TP_n}{\Omega_0^2} = \frac{TP_n p^2}{\omega^2} \quad (\text{II. 10})$$

On remarque que la constante d' accélération est égale au quotient du double de l' énergie cinétique des parties mobiles tournant à la vitesse nominale par la puissance nominale.

Il est fort utile de remarquer que le moment d' inertie change pour deux (2) machines du même type qui ne tournent pas à la même vitesse, alors on le remplace par leur temps de lancer qui lui varie peu.

L' équation devient :

$$M \ddot{\delta} = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega}{TP_n} \left(P_m - \frac{EV}{X_d} \sin \delta \right) \quad (\text{II. 11})$$

$$M = \frac{I \Omega_0}{p} \quad (\text{II. 12})$$

Où P_m = puissance mécanique

P_e = puissance électrique

II- 1. 3. Equations d' un réseau comportant n machines :

Nous avons vu l' équation du mouvement du rotor d' une machine isolée, maintenant nous essayerons de généraliser ce résultat en cherchant l' équation du mouvement d' une machine faisant partie d' un système multimachine constitué de n génératrices reliées entre elles par un réseau électrique linéaire et passif. Classiquement, en tenant compte des amortisseurs, cette équation s' écrit :

$$M \quad M_i \delta_i'' = P_{mi} - P_{ei} \quad (II.13)$$

Où $M_i = \Omega_0 I_i$ coefficient d' inertie de la machine i de moment d' inertie I_i éventuellement réduit à la vitesse de rotation synchrone en ($Mws^2 \text{ rad}^{-1}$)

P_{mi} = Puissance mécanique fournie à la machine en Mw

P_{ei} = Puissance électrique fournie au réseau en Mw

δ_i = angle rotirique par rapport à une origine synchrone arbitraire

Admettons le modèle simple d' une machine synchrone constituée par une force elec - tromotrice de module constant en série avec une réactance transitoire.

Nous supposerons que P_{mi} est constante pendant le phénomène si bien que la partie passive du réseau, réactance transitoire des machines comprise, est complètement décrite par une matrice d' admittance aux noeuds complexes. Cette matrice est symétrique et invariante, ce qui exclut des branches contenant éventuellement des transformateurs réglables (Y_{ij} = admittance de transfert entre les machines, Y_{ii} = admittances des noeuds des centrales).

Dans ce cas la puissance électrique apparante S_i peut s' écrire en fonction de I_i de cette machine et de sa force électromotrice derrière une réactance transitoire.

$$S_i = E_i \times I_i^* \quad (II.14)$$

$$I = \bar{Y} \times \bar{E} \quad \text{avec} \quad (II.15)$$

$$E = \begin{bmatrix} E_1 / \delta_1 \\ E_2 / \delta_2 \\ \vdots \\ E_n / \delta_n \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} / \alpha_{11} + \dots + Y_{1n} / \alpha_{1n} \\ Y_{12} / \alpha_{12} + \dots + Y_{2n} / \alpha_{2n} \\ \vdots \\ Y_{1n} / \alpha_{1n} + \dots + Y_{nn} / \alpha_{nn} \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

Soit pour la puissance apparante :

$$S_i = E_i \times \left(Y_t^* \right) \left(E^* \right)_t$$

$$S_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ E_i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{11} / \underline{-n_{11}} & \dots & Y_{1n} / \underline{n_{1n}} \\ \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} / \underline{n_{n1}} & \dots & Y_{nn} / \underline{n_{nn}} \end{bmatrix} \times \left[E_1 \dots E_i \dots E_n \right]$$

En effectuant tout en tenant compte que $Y_{ij} = Y_{ji}$, on trouve :

$$S_i = E_i^2 \times Y_{ii} / \underline{-n_{ii}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j E_i Y_{ij} / \underline{\delta_j - \delta_i - n_{ij}} \quad (\text{II.18})$$

Soit :

$$S_i = E_i^2 Y_{ii} (\cos n_{ii} - j \sin n_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} (\cos (\delta_j - \delta_i - n_{ij}) + j \sin (\delta_j - \delta_i - n_{ij}))$$

En identifiant les parties réelles de cette expression, nous pouvons écrire celle de P_{ei} .

$$P_{ei} = E_i^2 Y_{ii} \cos n_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_i E_j \cos (\delta_j - \delta_i - n_{ij}) \quad (\text{II.19})$$

Nous pouvons de proche en proche et en faisant varier $i = 1 \dots n$, trouver l'équation des n machines.

Hypothèses simplificatrices :

Si nous négligeons la résistance R de la ligne ainsi que celle des réacteurs synchrones, on admet en général :

$$Y_{ij}^* = \frac{1}{Z_{ij}^*} \quad \text{et} \quad \arg Y_{ij}^* = - \arg Z_{ij}^* \quad (\text{II.20})$$

$$- \arg Z^* = \frac{\pi}{2}$$

$$P_{ei} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{E_i E_j}{X_{ij}} \sin (\delta_j - \delta_i) \quad (\text{II.21})$$

Si par ailleurs nous introduisons la constante d'accélération T

$$\frac{I_i \omega}{p^2} = T \frac{P_{ni}}{\omega} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

P_{ni} = puissance nominale de la machine i

p = nombre de paire de pôles

$$I_i \omega_i = P_{ni} - P_{ei} = P_{ni} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{E_i E_j}{X_{ij}} \sin(\delta_j - \delta_i)$$

En définitive on aura

$$I_i \omega_i = T \frac{P_{ni} p^2}{\omega_i} \quad (\text{II.23})$$

$$\delta_1 = \frac{\omega}{TP_{n1} p^2} \left(P_{n1} - \sum_{\substack{j=2 \\ j \neq 1}}^n \frac{E_1 E_j}{X_{1j}} \sin(\delta_j - \delta_1) \right)$$

:

:

:

:

:

:

:

:

:

:

:

:

:

:

:

:

:

:

$$\delta_i = \frac{\omega}{TP_{ni} p^2} \left(P_{ni} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{E_i E_j}{X_{ij}} \sin(\delta_j - \delta_i) \right)$$

$$\delta_{n-1} = \frac{\omega}{TP_{n(n-1)} p^2} \left(P_{n(n-1)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n-1}}^{n-1} \frac{E_{n-1} E_j}{X_{n-1,j}} \sin(\delta_{n-1} - \delta_j) \right) \quad (\text{II.24})$$

Bien que cela ne paraisse pas avoir frappé certains auteurs, l'étude de la stabilité du système doit être faite dans le mouvement relatif de chacun des rotors par rapport à l'un d'eux pris comme référence et non dans le mouvement absolu sans quoi tout réseau dérivant de la fréquence nominale devrait être déclaré instable. Cela revient à dire que la stabilité du système n'est régie que par $(n-1)$ équations dérivant des n précédentes et ayant comme variable les quantités :

$$\delta_{1n} = (\delta_1 - \delta_n) \quad \text{1ère machine}$$

$$\delta_{2n} = (\delta_2 - \delta_n) \quad \text{2ème machine}$$

$$\delta_{in} = (\delta_i - \delta_n) \quad \text{3ème machine}$$

$$\delta_{n-1, n} = (\delta_{n-1} - \delta_n) \quad \text{nième machine} \quad (\text{II.25})$$

On choisit éventuellement comme machine de référence la nième machine correspondant au grand coefficient d'inertie.

$$\ddot{\delta}_{1n} = \frac{M_n P_1 - M_1 P_n}{M_1 M_n} - \frac{1}{M_1} \sum_{j=1}^n A_{1j} \sum_{j=1}^n \cos(\delta_{1n} - \delta_{jn} - \eta_{1j}) + \frac{1}{M_1} \sum_{j=1}^{n-1} A_{nj} \cos(\delta_{nj} - \eta_{nj})$$

$$\ddot{\delta}_{2n} = \frac{M_n P_2 - M_2 P_n}{M_2 M_n} - \frac{1}{M_2} \sum_{j=1}^n A_{2j} \cos(\delta_{2n} - \delta_{jn} - \eta_{2j}) + \frac{1}{M_2} \sum_{j=1}^{n-1} A_{nj} \cos(\delta_{nj} - \eta_{nj})$$

$$\ddot{\delta}_{in} = \frac{M_n P_i - M_i P_n}{M_i M_n} - \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^n A_{ij} \cos(\delta_{in} - \delta_{jn} - \eta_{ij}) + \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{n-1} A_{nj} \cos(\delta_{nj} - \eta_{nj})$$

$$\ddot{\delta}_{n-1, n} = \frac{M_n P_{n-1} - M_{n-1} P_n}{M_{n-1} M_n} - \frac{1}{M_{n-1}} \sum_{j=1}^n A_{n-1, j} \cos(\delta_{n-1; n} - \delta_{jn} - \eta_{n-1, j}) + \frac{1}{M_{n-1}} \sum_{j=1}^{n-1} A_{nj} \cos(\delta_{nj} - \eta_{nj})$$

et on pose :

$$\ddot{\delta}_{in} = F_{in}(i, n, \dots, n-1, n) \quad (\text{II.26})$$

Les méthodes de résolution des problèmes de stabilité:

Méthode de LIAPOUNOV :

L'adaptation de la méthode de LIAPOUNOV aux problèmes de la stabilité dynamique des réseaux multimachines est l'une des méthodes la plus récente. Nous analyserons la stabilité dynamique d'un réseau multimachine dans l'hypothèse de machines synchrones assimilables à une force électromotrice de module constant en série avec une réactance transitoire, elle aussi constante.

Définition relative à la stabilité dynamique :

Nous nous placerons dans un cas tout à fait général et en particulier dans le cas d' étude de la stabilité des grands réseaux électriques .

L' état d' un système quelconque (mécanique ou électromécanique) peut être caractérisé par les valeurs prises à un instant quelconque par n variables appelées variables d' état formant le vecteur :

$$(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)_T$$

Dans les réseaux, ces variables pourraient être les angles rotoriques et les flux des machines.

Les systèmes auxquels nous nous intéresserons sont descriptibles par un système normal de n équations différentielles du premier ordre, c' est - à dire dont les premiers membres sont : $(\ddot{X} = -\frac{d^2}{dt^2})$ les dérivées par rapport au temps des n

variables d' état et les seconds membres des fonctions de ces mêmes variables

$$\dot{x}_1 = X_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$\dot{x}_2 = X_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$\vdots$$

$$:$$

$$:$$

$$\vdots$$

$$\dot{x}_n = X_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

(II.27)

En particulier le système est dit autonome si les fonctions X_1, X_2, \dots, X_n ne contiennent pas explicitement la variable temporelle t. La suite de cette méthode suppose que les systèmes sont autonomes. Un point d' équilibre est défini par :

$$\dot{x}_1 = 0$$

$$\dot{x}_2 = 0$$

$$\dot{x}_3 = 0$$

$$\vdots$$

$$:$$

$$:$$

$$\dot{x}_n = 0$$

Par conséquent ce point est fourni par les racines du système :

$$X_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

$$X_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

:

:

:

$$X_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

(II.28)

Il existe en général plusieurs solutions de la forme suivante:

$$(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$$

qui satisfont au système d'équation

Toutefois rien ne prouve que le système se trouvant dans l'état défini par $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, y revient si une cause extérieure vient à perturber momentanément une des variables d'état. On considère la perturbation finie dans le cas de la stabilité dynamique. La perturbation peut porter sur la ligne (ouverture) ou défaut quelconque. Dans ce cas on considère l'état d'équilibre initiale du système comme un état perturbé du nouveau système. La stabilité peut être de divers types ou de diverses qualités. Pour en donner l'image géométrique classique - que représentons-nous l'espace euclidien à n dimensions des n variables d'état par un plan et par une simple translation.

Faisons coïncider l'origine avec un des points d'équilibre défini par :

$$(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$$

Si à un instant donné le système se trouve amené en un point $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ plusieurs évolutions sont possibles. Elles sont données par les figures (a, b, c, d).

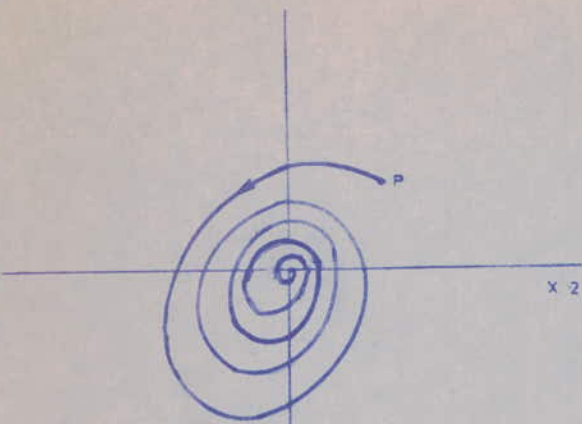
Fig 3a - 3b

Le système tend d'une manière oscillatoire ou non à revenir à l'origine; on dit que l'origine est dans ce cas asymptotiquement stable.

Fig 3c Le système, tout en ne revenant pas à l'origine, reste à l'intérieur d'une hypersphère de rayon α . On dit que l'origine est stable.

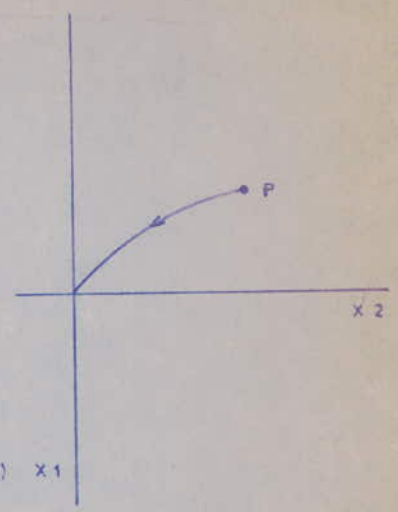
En fait le système pourrait tendre vers un autre état d'équilibre, ce qui oblige à préciser que pour que la stabilité soit assurée autour du premier point d'équilibre (l'origine), il faut qu'à tout nombre $\delta(\alpha)$ tel que $\rho < \delta(\alpha)$ l'inégalité (t) est toujours satisfaite. C'est le cas de la figure

$$\rho = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}$$



a) x_1

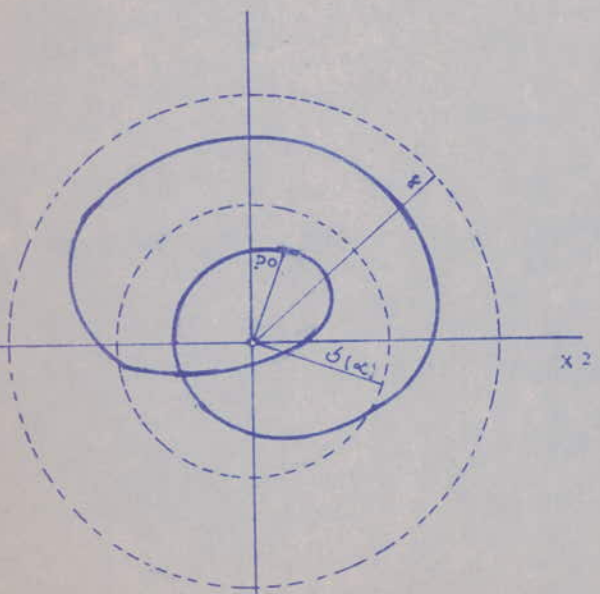
Mouvement asymptotiquement stable
allure oscillatoire.



b) x_1

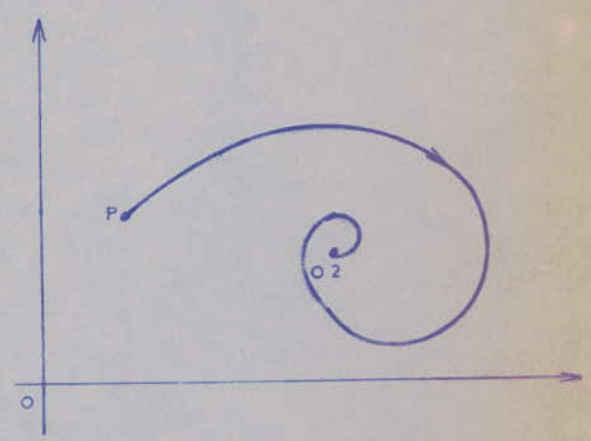
Mouvement asymptotiquement stable.

Fig 3



c), x_1

Mouvement stable.



d)

Passage vers un point d'équilibre O_2
distinct du point d'équilibre initial O .

Dans les autres cas le système est instable, soit qu' il tende vers un nouvel état distinct de l' origine 0 ($0 \implies 0_2$) soit qu' il ne tende vers aucun état d' équilibre. (F 3.1)

Dans les réseaux électriques la figure serait le cas d' une machine retrouvant le synchronisme après un décalage d' un ou plusieurs pas pôlaires.

Un système est dit localement stable si la stabilité n' est assurée que pour des petites valeurs de $\delta(\infty)$, c' est le cas de la stabilité statique des réseaux.

Il est stable en "grand" si la stabilité est assurée pour des valeurs de $\delta(\infty)$ non infinitésimales. C' est le problème de stabilité transitoire.

II. 1. 3. 1. Définitions relatives à la méthode directe de LIAPOUNOV :

II- 1. 3. 1. 1. La méthode mathématique exposée permet l'étude dans un domaine Ω de l' espace de (x_1, x_2, \dots, x_n) , de la stabilité d' un système dont le mouvement perturbé est mathématiquement décrit par :

$$\begin{aligned} X_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= \dot{x}_1 \\ X_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= \dot{x}_2 \\ &: \\ &: \\ &: \\ X_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= \dot{x}_n \end{aligned} \tag{II.29}$$

En effectuant une translation d' axes telle que l' origine soit un point d' équilibre, on aura :

$$\begin{aligned} X_1(0, 0, \dots, 0) &= 0 \\ X_2(0, 0, \dots, 0) &= 0 \\ &: \\ &: \\ X_n(0, 0, \dots, 0) &= 0 \end{aligned} \tag{II.30}$$

On suppose que les fonctions X_1, X_2, \dots, X_n sont définies et continues dans le domaine Ω entourant l' origine.

L' énoncé des théorèmes fondamentaux nécessitent l' introduction d' une fonction

$V(x)$ associée au système (1'), elle-même faisant appel à la notion de fonction semi-définie ou définie positive ou négative .

On dit qu'une fonction $V(x)$ est semi-définie positive dans un domaine Ω entourant l'origine si elle y est dérivable positive ou nulle et si elle s'annule à l'origine .

Soit $V(x) \geq 0 \quad V(0) = 0$

On dit aussi qu'une fonction $V(x)$ est définie positive dans le domaine Ω si elle y est différentiable et ne s'annule qu'à l'origine .

Soit $V(x) > 0 \quad V(0) = 0$

II- 1.3.1.2. Théorème n° 1 de stabilité :

Si pour le système

$$\dot{x}_1 = X_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\dot{x}_2 = X_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

⋮

⋮

⋮

⋮

$$\dot{x}_n = X_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

(II-1)

du mouvement perturbé il existe dans un certain domaine Ω une fonction $V(x)$ définie positive dont la dérivée $\dot{V}(x)$ est définie négative alors l'origine est asymptotiquement stable .

II- 1. 3. 1.3. Théorème n° 2 de stabilité :

Si pour le système (3), il existe dans un certain domaine Ω une fonction $V(x)$ définie positive dont la dérivée $\dot{V}(x)$ est semi-définie négative alors l'origine est asymptotiquement stable.

II- 1. 3. 1. 4. Conclusions :

L'étude de la stabilité du mouvement par la méthode directe de LIAPOUNOV se ramène dès lors à l'élaboration d'une fonction $V(x)$ associée au système d'équations (1) du mouvement perturbé du système physique considéré .

Il n'existe de méthode absolument générale de construction de fonction de LIAPOUNOV. Des méthodes particulières telles que : KRASOVSKI, ZIBOV, couvrent toutefois un domaine important.

Citons que dans les cas des systèmes conservatifs, le hamiltonien peut constituer une fonction de LIAPOUNOV .

II. 1. 3. 2. Fonction de LIAPOUNOV pour un système de n machines :

A l'heure actuelle, personne n'est parvenue à définir une vraie fonction de LIAPOUNOV .

Pour un système normal de n machines si les déphasages ($n_{ij} = \frac{\pi}{2}$) des admittances de transfert sont en quadrature alors la construction est possible. Nous avons vu que lors de l'établissement des équations du mouvement des n machines que nous avons :

$$\dot{\delta}_{in} = \frac{M_n P_i - M_i P_n}{M_i M_n} - \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^n A_{ij} \cos(\delta_{in} - \delta_{jn} - \eta_{ij}) + \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{n-1} A_{nj} \cos(\delta_{nj} - \eta_{nj})$$

avec $i = 1, 2, \dots, n$

On pose $\dot{\delta}_{in} = F_{in}(\delta_{1n}, \delta_{2n}, \dots, \delta_{n-1, n})$

Les points d'équilibre (stables ou instables) sont fournis par la relation :

$$w_{in} = 0 \quad F_{in}(\delta_{1n}, \delta_{2n}, \dots, \delta_{n-1, n}) \quad (II.32)$$

La première de ces deux relations signifie que les vitesses des machines sont les mêmes pour tout point d'équilibre.

Dans le cas où $n_{ij} = \frac{\pi}{2}$ l'expression devient :

$$\dot{\delta}_{in} = w_{in}$$

$$w_{in} = \frac{B_{in}}{M_i M_n} - \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^n A_{ij} \sin(\delta_{in} - \delta_{jn}) + \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{n-1} A_{jn} \sin \delta_{nj} \quad (II.33)$$

$$w_{in} = F_{in}(\delta_{1n}, \delta_{2n}, \dots, \delta_{n-1, n})$$

$$\text{Où } B_{in} = M_n P_i - M_i P_n$$

$$\text{et } \frac{1}{M} = \frac{1}{M_i}$$

et l'équation de LIAPOUNOV sera la suivante :

$$V(\delta, w) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \left\{ M_i M_k (w_{in} - w_{kn})^2 - [B_{ik}(\delta_{in} - \delta_{kn}) + A_{ik} M(\delta_{in} - \delta_{kn})] \right\} \quad (\text{II } 34)$$

L' expression de V est de la forme

$$V(\delta, w) = A(w) - \phi(\delta) + K \quad (\text{II } 35)$$

Pour le point d' équilibre $(\delta^s, 0)$ on montre que $V(\delta, w)$ remplit les conditions requises par la fonction de LIAPOUNOV pour assurer la stabilité du système à savoir :

$$a/ V(\delta^s, 0) = 0 \quad \text{Pour le choix convenable de la constante } K \\ K = \phi(\delta^s)$$

$$b/ \dot{V}(\delta, 0) = 0 \quad \text{dans tout l' espace d' état}$$

$V(\delta, w) > 0$ dans un certain domaine Ω entourant l' origine. Au point de vue dimensionnel $V(\delta, w)$ s' exprime en $Mw^2 s^2$ ou en (Mega joules)²

Domaine de stabilité et application :

La fonction étant construite, il reste à déterminer les domaines de stabilité du système des n machines synchrones considérées.

Il faut remarquer d' abord que le système porté par une perturbation à une valeur $V(\delta, w) = C_0$ continue à évoluer sur la même surface dans l' hyperspace (δ, w) lorsqu' il est abandonné à lui-même puisque $\dot{V}(\delta, w) = 0$.

Le mouvement sera donc stable si $V(\delta, w) = C_0$ constitue une surface fermée autour de $(\delta^s, 0)$. Or la surface cesse d' être fermée dès qu' elle possède un point multiple pour lequel on a :

$$(\text{II } 36) \quad \frac{\partial V}{\partial \delta_{in}} = 0 \quad \frac{\partial V}{\partial w_{in}} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

Ainsi le domaine de stabilité est le domaine de l' espace d' état qui entoure l' origine stable $(\delta^s, 0)$ et qui est délimité par la plus grande surface fermée telle que :

$$V_1 = V(\delta^i, 0) = \phi(\delta^s) - \phi(\delta^i) \quad (\text{II } 37)$$

Dans cette expression V_1 désigne la plus petite des valeurs que la fonction $V(\delta, w)$ prend aux différents points entourant $(\delta^i, 0)$ désignant précisément les points singuliers.

Donc nous pouvons énoncer un critère formel très important, :

étant donné un réseau défini dans le cadre des hypothèses ci-dessus par ses machines, ses charges et ses liaisons, si ce réseau possède une répartition de charges stables, il est possible de déterminer une valeur limite V_1 de la fonction de LIAPOUNOV associée à ce réseau telle que si une perturbation l' amène dans un état (δ, w) où $V(\delta, w) < V_1$ alors le réseau abandonné à lui-même est certainement stable.

APPLICATION DU CRITERE DE STABILITE A LA DETERMINATION DES TEMPS CRITIQUES

D' ELIMINATION D' UN DEFAUT.

Cette application peut se résumer de la façon suivante : un réseau acquiert à l' instant t_e sa topologie T_f ; à l' instant $t > t_e$, il se trouve dans un état hors d' équilibre $E(t)$ dû à une perturbation antérieure de durée t_e secondes dans un réseau de topologie $T_p \neq T_f$.

On demande de calculer t_e pour que l' état $E(t_e)$ soit tel que puisse certainement trouver un état d' équilibre. La réponse est évidente :

Il faut que la fonction $V(\sigma^e, w_e^e)$ relative à l' état $E(t_e)$ soit inférieure à la valeur limite V_1 de la fonction de LIAPOUNOV calculée pour la même topologie finale. Dans la pratique il importe de déterminer le temps critique d' élimination du défaut t_e , c' est - à dire le temps maximal que le défaut peut durer sans faire perdre au système l' aptitude de revenir à un état d' équilibre stable.

Cette recherche se fait en cinq (5) étapes :

- 1/ Détermination des paramètres du réseau dans sa topologie finale .
- 2/ Calcul de la valeur V_1 .
- 3/ Calcul de l' évolution du réseau perturbé dans sa topologie T_p (par la méthode de pas à pas).
- 4/ Vérification à tous les pas du calcul de l' inégalité $V(\sigma^e, w_e) < V_1$.
- 5/ Détermination de la durée maximale de l' élimination du défaut t_e telle que $V(\sigma^e, w_e) < V_1$

Vérification numérique dans le cas de deux machines :

Le critère précédent évidemment être vérifié sur des cas réels. Sa première vérification, presque immédiate, se trouve dans le cas de deux (2) machines .

Pour cela nous utiliserons les célèbres courbes de BYRD et de PRITCHARD.

Considérons un réseau de deux (2) machines reliées entre elles par une liaison purement réactive d' impédance X_{12} . On définit immédiatement :

$$\text{- La puissance maximale transmissible : } P_{\max} = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \quad (\text{II.38})$$

- La constante d' inertie d' une machine vis à vis d' un réseau infini

$$M = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \quad (\text{II.39})$$

On montre que le temps critique d' élimination d' un défaut est donnée par :

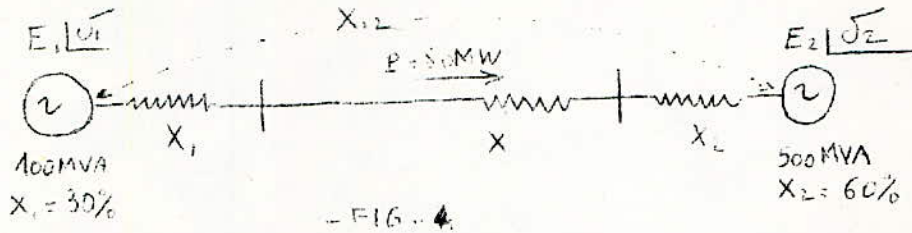
$$t_c = \tau_c \sqrt{\frac{M}{r_1 P_{\max}}} \quad (\text{II.40})$$

Où τ_c est le temps réduit donné par les courbes et $r_1 = \frac{X_{12}}{X_{12}}$ avant défaut
 X_{12} pendant défaut

Les courbes de BYRD et de PRITCHARD font appel à un deuxième paramètre défini de la manière suivante :

$$r_2 = \frac{X_{*2}}{X_{12}} \quad \begin{array}{l} \text{avant défaut} \\ \text{après défaut} \end{array} \quad (\text{II.41})$$

Schéma du réseau :



La valeur limite de V_1 se ramène dans le cas de deux machines à la formulation suivante

$$V_1 = (2\cos \delta_{12} - \pi) \sin \delta_{12} + 2\cos \delta_{12} \quad (\text{II.42})$$

Pour la détermination de t_c dans le cas d'une perturbation, voir les courbes de BYRD et de PRITCHARD. Cela revient à calculer les différentes valeurs de X_{12} pour chaque perturbation et cela afin de pouvoir éliminer le risque de perte de synchronisme. On trace le diagramme $V_1 = f(t_c)$, on constate une dépendance linéaire de la durée d'élimination critique t_c par rapport à V_1 .

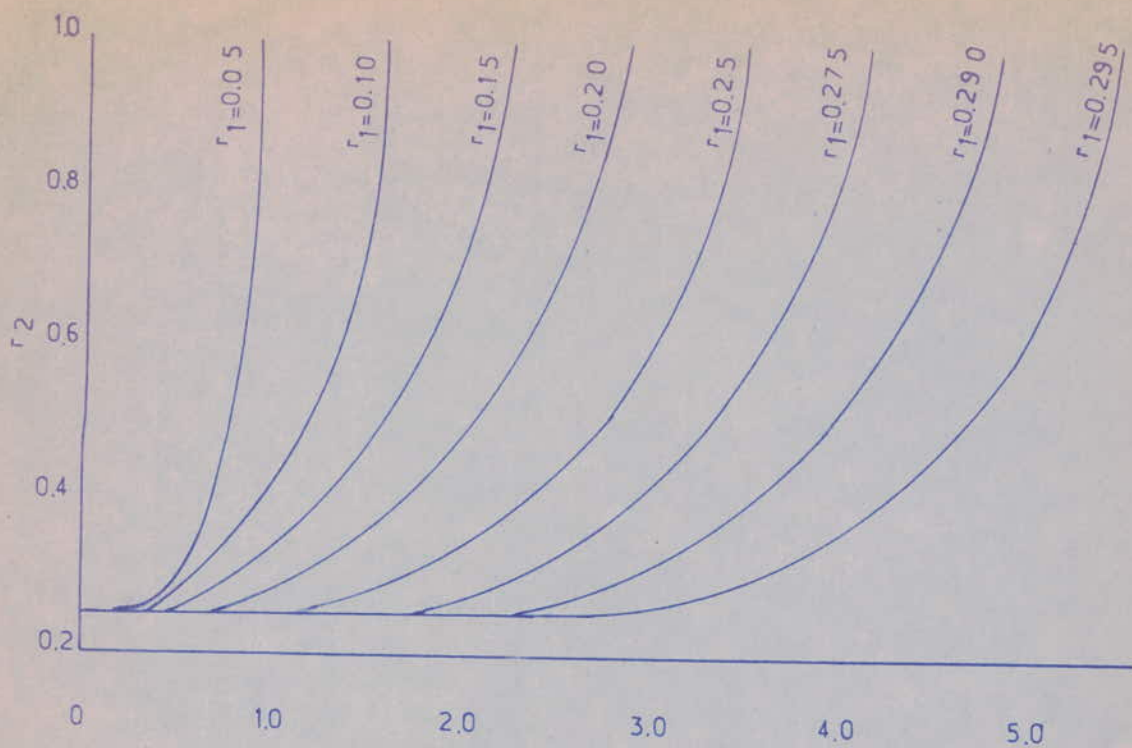


Fig 5

Courbes de Byrd et Pritchard

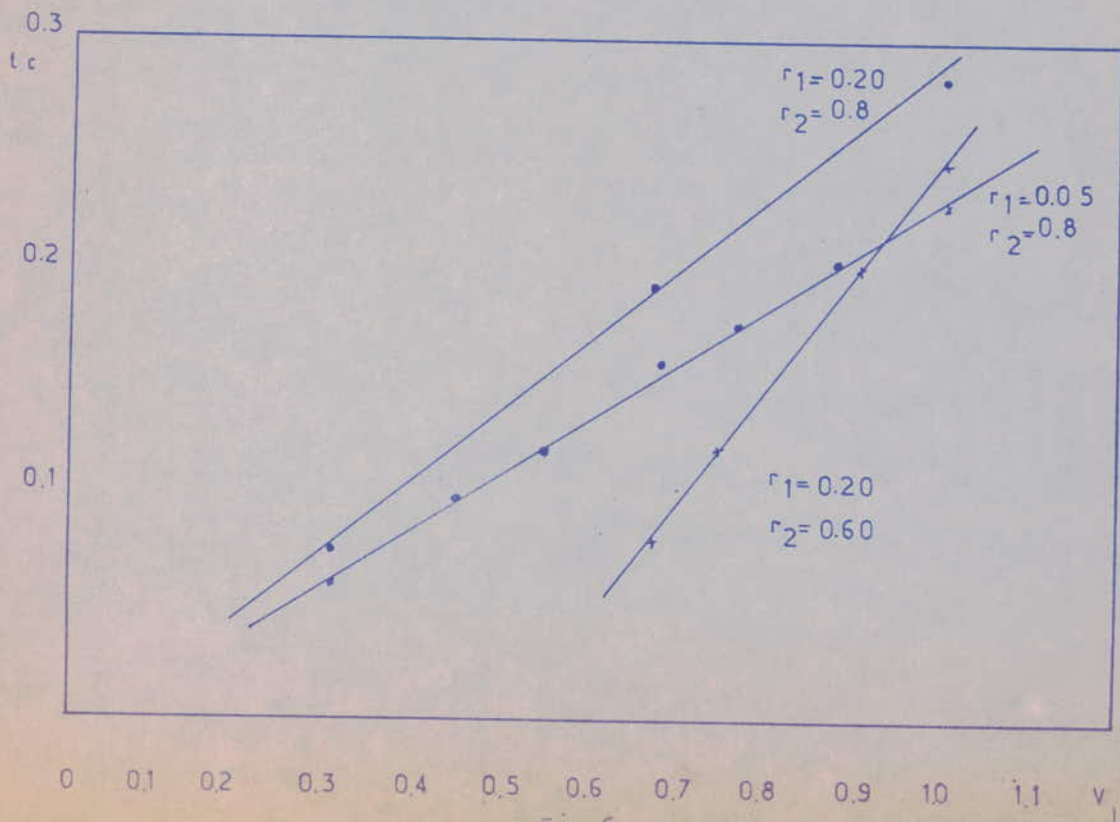


Fig 6

Regressions entre le temps critique d'élimation t_c et la valeur limite v_1

Influence de la structure des réseaux et des paramètres.

III- 1. Influence du paramètre X :

III- 1. 1. Définition de la réactance X :

On définit la réactance X comme étant la réactance de liaison entre les générateurs. Elle englobe les réactances transitoires des alternateurs aussi bien que celles des transformateurs et des lignes de transport de puissance. Lors d'une perturbation, la réactance X augmente et il s'en suit une perte de puissance modifiant ainsi l'équilibre entre les couples moteurs et les couples résistants. D'après la formule du quadripôle on tire l'expression suivante pour la puissance :

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta \quad \text{avec } X = X'_g + X_T + X_L \quad (\text{III. 1})$$

Où X'_g = réactance synchrone transitoire

X_T = réactance des transformateurs

X_L = réactance de la ligne

On remarque que si la réactance X augmente il s'en suit une diminution de la puissance P.

III- 1. 2. Variation de X_L :

Nous allons montrer que lors d'une perturbation (court-circuit) X_L ne peut que croître. En effet tout-à-coup sur le réseau, qu'il soit dû à la coupure d'un générateur d'une charge ou un déclenchement de cette ligne est ressenti par toute génératrice comme une variation brusque des impédances de transfert entre elle et les autres génératrices. Considérons l'élément de liaison sur lequel se produit le défaut; avant lequel le schéma en π , de son quadripôle équivalent comprend une impédance longitudinale z et des admittances transversales y_1 et y_2 . Le défaut apparaissant au point M qui partage z en deux impédances z_1 et z_2 .

$$z_1 = r_1 + jx_1 \quad (\text{III. 2})$$

$$z_2 = r_2 + jx_2$$

Le défaut en M possède lui-même une admittance $y_0 = g_0 - jh_0$ (Fig. 7). On a alors deux (2) quadripôles en série si bien que la multiplication de leurs impédances de transfert, permet d'établir le schéma en π de la liaison avec défaut

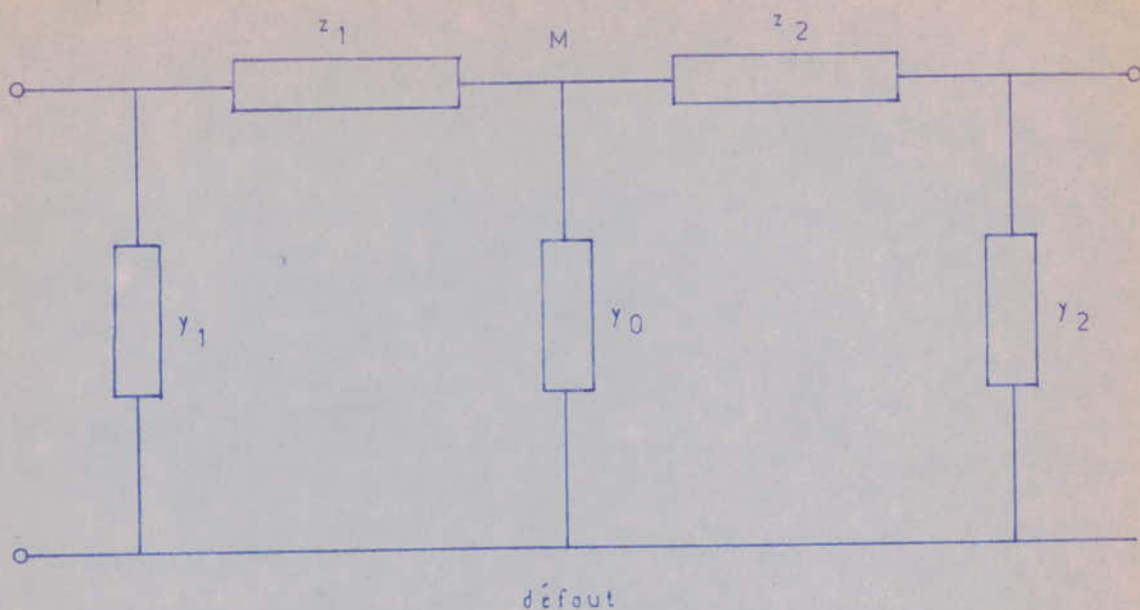


fig 7 Schéma de la liaison

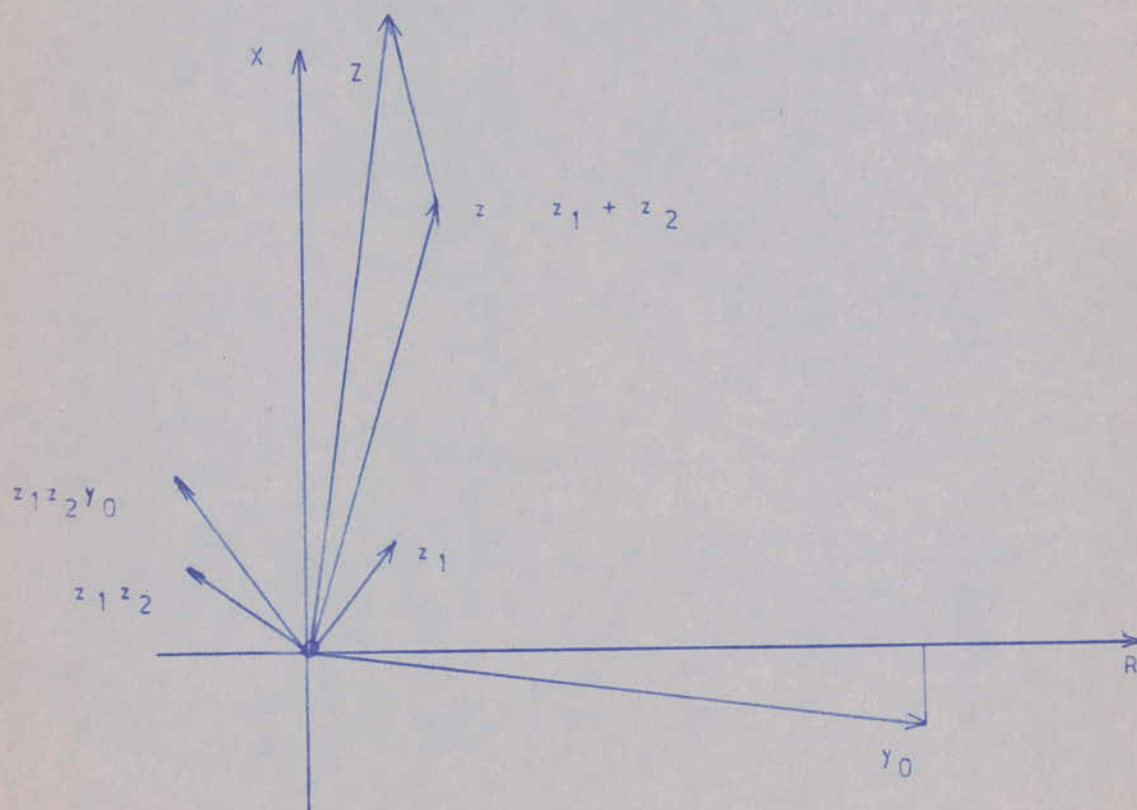


fig 8 Variation de l'impédance longitudinale apparente d'une liaison d'un défaut d'admittance y_0

formé d' une impédance longitudinale Z et de deux (2) admittances transversales Y_1 et Y_2

$$Z = z_1 + z_2 + z_1 z_2 y_0 = z + z_1 z_2 y_0$$

$$Y_1 = y_1 + \frac{z_2 y_0}{z} \quad (\text{III } 3)$$

$$Y_2 = y_2 + \frac{z_1 y_0}{z}$$

En négligeant la résistance R de la ligne on a

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

$$y_0 = \frac{1}{X_{cc}} \quad (\text{III } 4)$$

L' impédance longitudinale Z se trouve augmentée de l' impédance $z_1 z_2 y_0$ ou z_1 et z_2 sont voisines de réactances pures, x_1 et x_2 supérieures à 0. y_0 a par contre, en général, sa composante résistive très grande devant sa composante réactive.

La construction de la figure 8 montre que $z_1 z_2 y_0$ est aussi très voisine d' une réactance pure avec une composante réactive positive et :

$$|E| > |z| \quad (\text{III } 5)$$

Pour qu' il en soit autrement il faudrait que y_0 soit fortement capacitive, ce qui ne peut pas être le cas d' un défaut. Examinons maintenant un cas réel . Soit le réseau de la fig. 9 où X_1 est la réactance de la ligne, X_g celle du générateur et X_{con} la réactance équivalente à la puissance consommée. Afin d' établir une base commune de comparaison des effets des paramètres sur la stabilité dynamique, le système supposé initialement en équilibre, a été soumis a une perturbation conventionnelle qui est un court circuit triphasé sur une ligne près des barres H.T du transformateur, suivi par un déclenchement temporaire de la ligne endommagée et par un réenclenchement réussi. Nous avons observé les régimes transitoires indiqués par la figure 10.

Les valeurs successives de la réactance totale "vue" de l' alternateur pendant la perturbation sont par conséquent celles données par la fig. 10.

Le facteur $K_x \gg 1$ tient compte de l' accroissement de la réactance équivalente

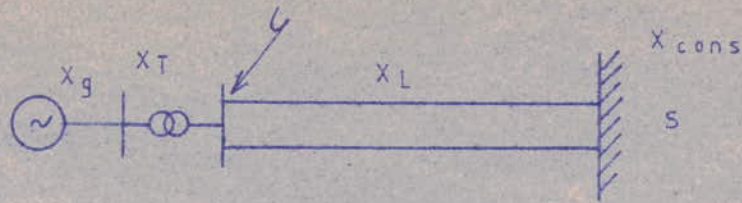


Fig. 9

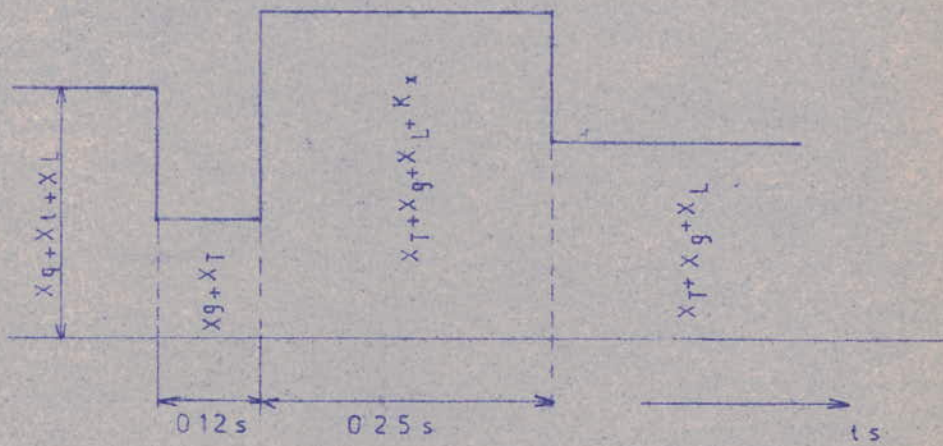


Fig. 10

Réactance totale vue de l'alternateur pendant la perturbation conventionnelle.

des lignes pendant la disjonction de la ligne endommagée. Suivant le cas, on distingue trois (3) valeurs de K_x .

$K_x = \infty$: cas d'une seule ligne

$K_x = 2$: cas de deux (2) lignes égales en parallèle.

$K_x = 1, 5$: cas de trois lignes égales en parallèles.

A travers cette expérience, il apparaît que grâce au système de disjonction supposé parfait, on évite durant 0,26s l'intervention d'une résistance infinie, dans le cas d'une seule ligne, laquelle peut détruire complètement l'équilibre de la machine. C'est de cette étude que l'idée de diminuer la réactance X , par des capacités lors des perturbations pour lesquelles le système de disjonction n'y parvient pas, est venue. (voir ultérieurement).

III- 2. Influence des charges:

La stabilité dépend de la charge car une ligne à vide est parfaitement stable mais il est très difficile à l'heure actuelle de préciser l'influence exacte de la variation dynamique des charges.

Il est certain que la représentation par des impédances passives est suffisante pour déterminer une limite de stabilité au sens classique c'est - à dire une perte de synchronisme à la première oscillation consécutive à un accouplage sur le réseau. Toutefois le maintien du flux qui est assuré par les charges actives, peut modifier d'une façon non négligeable les variations transitoires de fréquence des alternateurs les plus proches.

La fig. 11 montre dans le cas schématique d'un réseau à trois machines les différences de variations de la position angulaire de deux machines suivant que les charges sont représentées par des charges passives pures ou par des charges asynchrones pures. Toutefois cet exemple semble correspondre à un cas extrême.

III- 3. Influence des perturbations :

Lorsque les hypothèses sont satisfaites l'équation du mouvement est :

$$\frac{I}{p} \delta + \frac{P_m \sin \delta}{\Omega_0} = C_m \quad (\text{III. 6})$$

En remplaçant Ω_0 par $\frac{w}{p}$ et I par sa valeur tirée de la formule (II. 11) on a

$$\frac{P}{I} = \frac{w}{TP_n} \cdot \frac{w}{p} \quad (\text{III. 7})$$

L'équation devient :

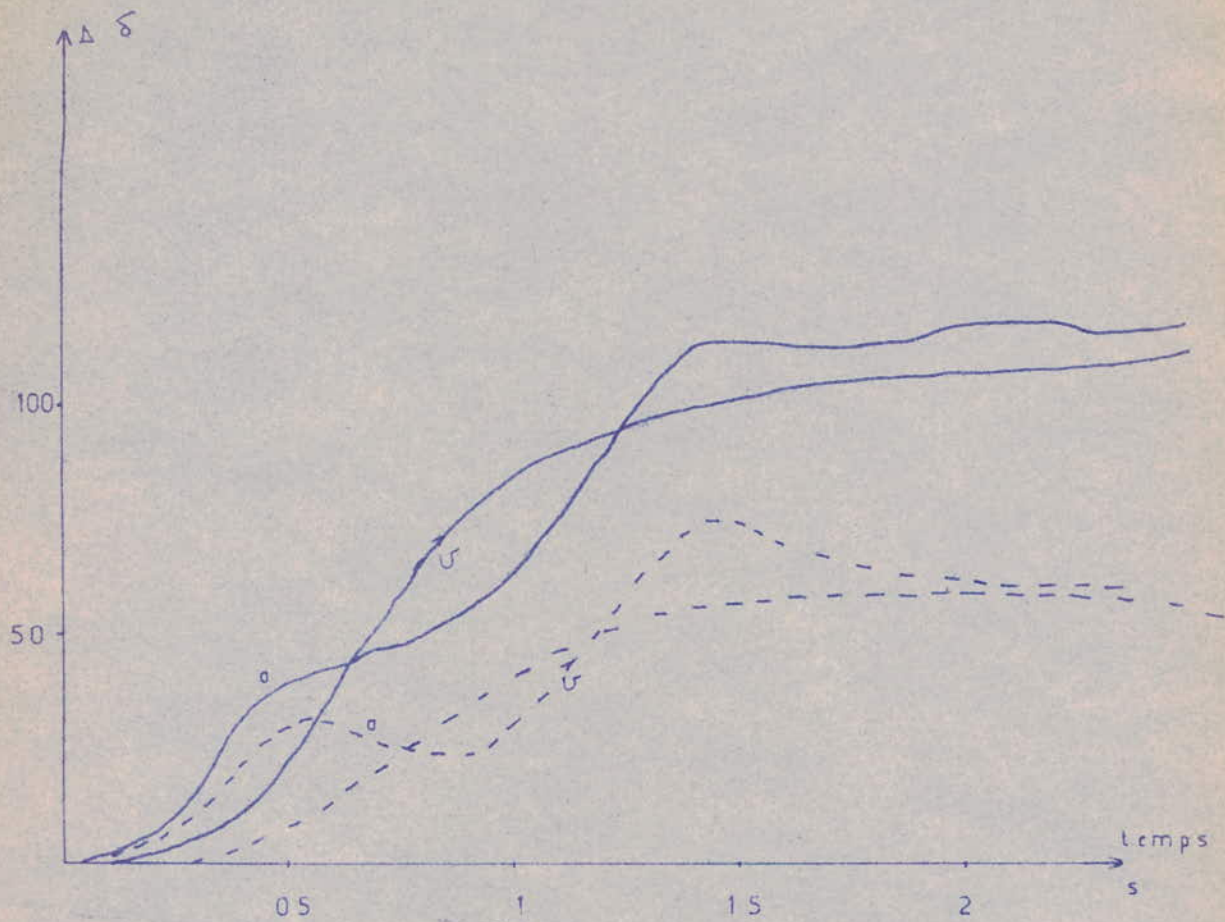


Fig 11

Evolution dans un cas de réseau à 3 machines des variations d'angle de deux machines a et b suivant que les charges sont représentées par des charges passives pures ou par des charges asynchrones.

$$\ddot{\delta} = \frac{w}{TP_n} \left(C_m \frac{w}{p} - P_m \sin \delta \right) \quad (\text{III. 8})$$

III- 3. 1. Premier type de perturbations : surcharge brusque de la machine :

On suppose que pour une raison quelconque, la puissance sur l'arbre de la machine augmente brusquement. Ceci peut-être dû à une ouverture brusque du vannage d'admission de la turbine dans le cas de l'alternateur. La puissance fournie par l'alternateur, aura à tout instant pour expression

$$P = P_m \sin \delta \quad \text{avec } P_m = 3 \frac{EV}{X} \quad (\text{III. 9})$$

P_m = puissance maximale susceptible d'être fournie en régime d'équilibre si E est indéfiniment maintenue constante, la réactance de liaison X étant elle-même invariable. Le régime de la machine, avant la perturbation, tant que la force électromotrice E est constante, peut-être représentée par une sinusoïde. Avant la perturbation la machine fournit une puissance P_0 à laquelle correspond un angle $\delta = \delta_0$ (point A sur la fig. 12). Le couple moteur équilibre (en négligeant les pertes) le couple résistant et on a

$$P_0 = P_m \sin \delta_0 = C_m \frac{w}{p} \quad (\text{III. 10})$$

Si la perturbation a pour effet de faire croître brusquement le couple moteur à la valeur C_m la machine devrait débiter une nouvelle puissance P_1 telle que le couple résistant correspondant équilibre le nouveau couple moteur ($\delta \rightarrow \delta_1$) correspondant à la relation

$$P_1 = P_m \sin \delta_1 = C_m \frac{w}{p} \quad (\text{III. 11})$$

(P_1 correspond au point B de la fig. 12). Ce point ne peut-être atteint instantanément en raison de l'inertie mécanique de la machine. Soit en remplaçant $C_m \frac{w}{p}$ par la valeur précédente :

$$\ddot{\delta} = \frac{w}{T} \frac{P_m}{P_n} (\sin \delta_1 - \sin \delta) \quad (\text{III. 12})$$

L'accélération angulaire à laquelle est soumis le rotor est donné à $\frac{1}{p \text{ iens}}$ près.

On observe les phénomènes suivants : à l'instant de la perturbation (point A)

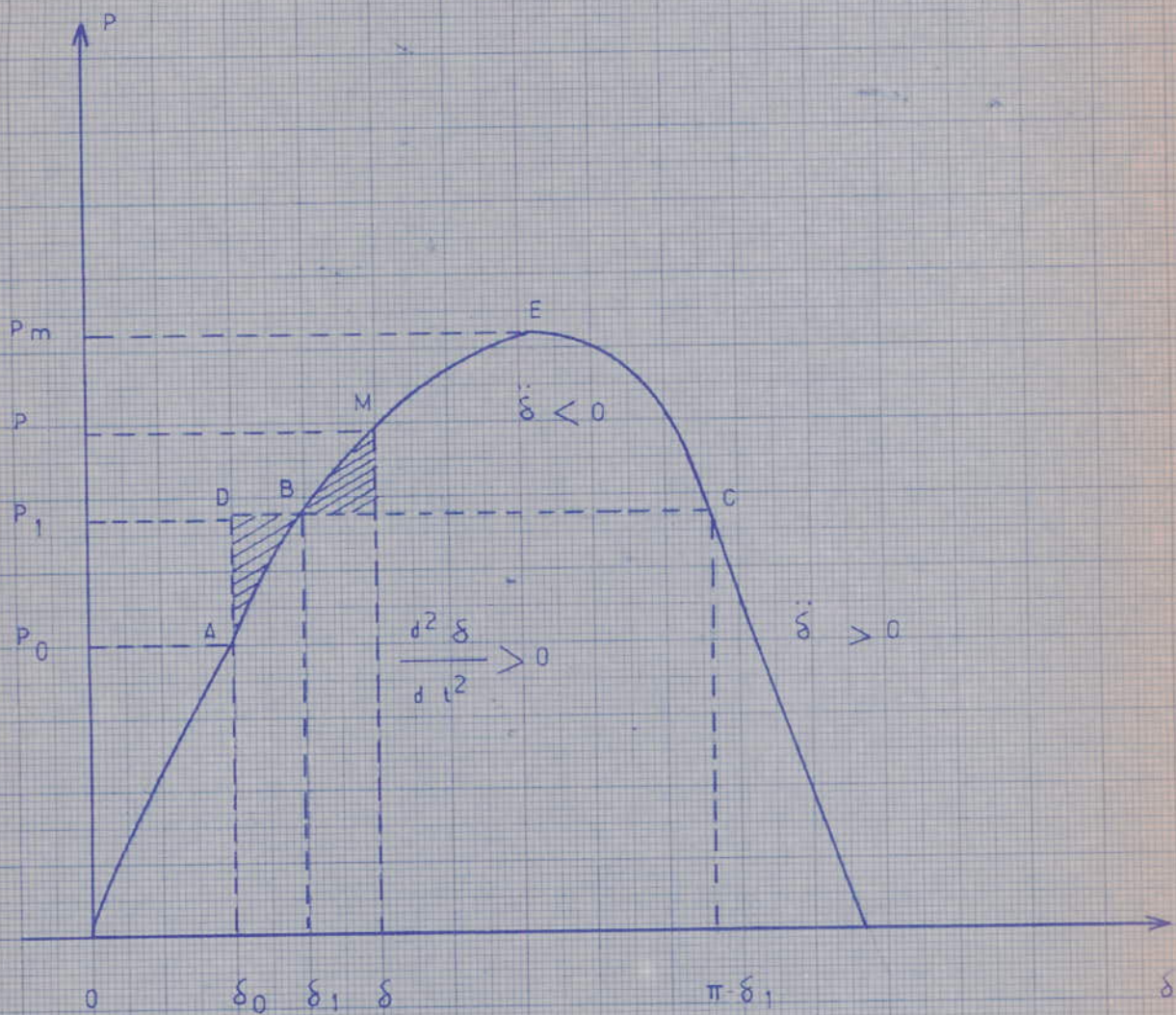


fig. 12

L' équilibre entre C_m et C_r est détruit ; alors le rotor est soumis à une accélération angulaire positive si $\sin \delta_1 > \sin \delta_0$, tendant à accroître l' écart angulaire relatif $\frac{\delta}{p}$. En raison de l' inertie mécanique, cet angle croît progressivement si bien que la vitesse angulaire relative (par rapport à la machine de référence à marche rigoureusement synchrone) est positive. Elle a pour expression $\frac{1}{p} \cdot \frac{d\delta}{dt}$ et elle croît puisque $\frac{1}{p} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} > 0$ lorsque δ atteint la valeur

δ_1 correspondant au nouvelle équilibre des couples (point B). L' accélération $\frac{1}{p} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0$ et $\frac{1}{p} \frac{d\delta}{dt}$ est maximale de sorte qu' entraîné par son inertie, le rotor

dépasse la position d' équilibre si bien que l' angle δ continue à croître mais l' accélération devenant négative ($\sin \delta_1 < \sin \delta_0$), La vitesse relative

$\frac{1}{p} \cdot \frac{d\delta}{dt}$ décroît d'où deux (2) cas peuvent se présenter .

1/ L' accélération angulaire reste négative pendant un temps afin de permettre à δ de passer par un maximum puis de décroître. Ainsi le point figuratif se déplace vers l' arrière de la sinusoïde. Le mouvement du rotor se poursuit sous forme d' oscillations pendulaires autour de $\delta = \delta_1$ et il s' amortit si bien que le synchronisme est maintenu.

2/ L' accélération redevient positive à l' instant même où l' écart angulaire est maximal et la vitesse angulaire relative recommence à croître en même temps que l' écart angulaire. Le fonctionnement étant instable et la machine perd son synchronisme.

III- 3. 2. Deuxième type de perturbations : accroissement de l' impédance liaison:

L' impédance de liaison de la machine $X = X_g + X_t + X_L$ peut subir une brusque augmentation. Cette liaison peut - être constituée par plusieurs lignes dont l' une d' elles vient d' être déclenchée à cause d' un court circuit affectant la liaison. On va montrer que ce cas fréquent en pratique est plus réel que le premier type de perturbation. Le régime de fonctionnement de la machine comme il a été vu précédemment peut - être caractérisé par la puissance électrique débitée. (Fig. 13).

$$P = P_m \sin \delta \quad P'_m = \frac{3EV}{X'} \quad (\text{III. 13})$$

La machine fournit initialement la puissance $P_0 = P_m \sin \delta_0$, lors la perturbation la réactance X prend la valeur $X' > X$ et le nouveau régime de fonctionnement est représenté par la sinusoïde S' d' équation :

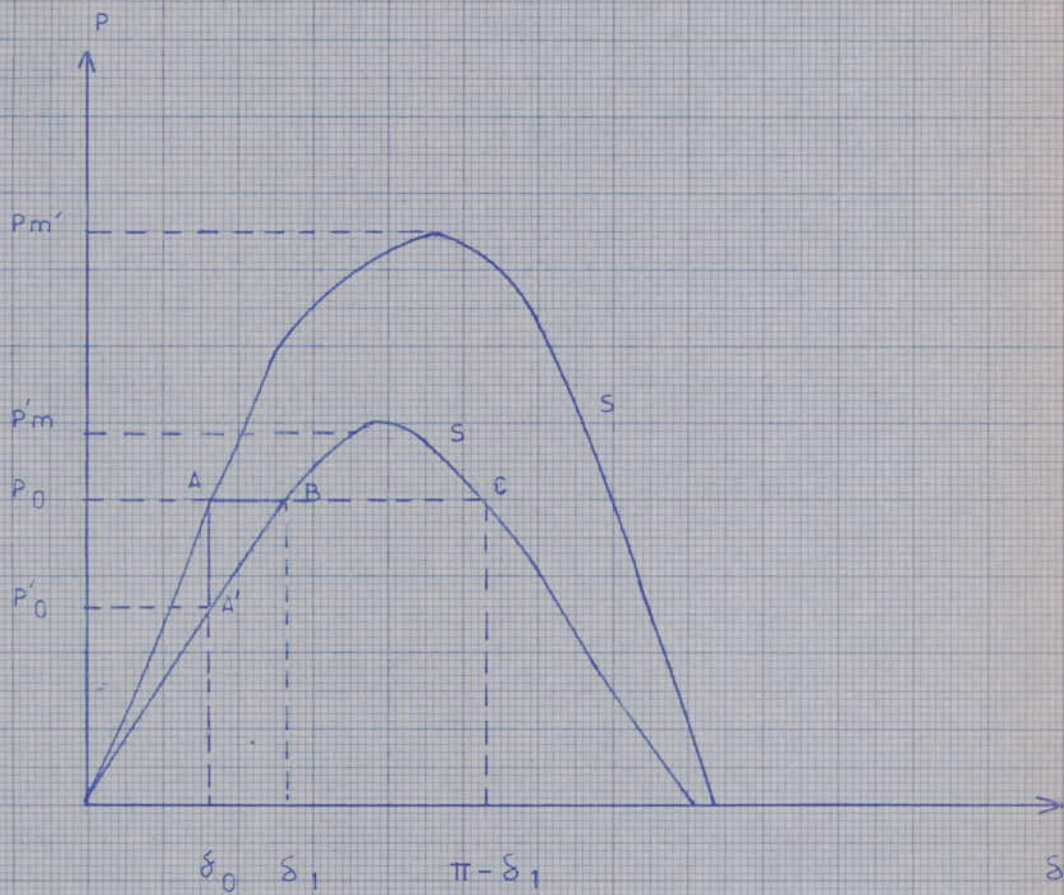


fig 13

$$P = P'_m \sin \delta \quad \text{avec } P'_m = \frac{3EV}{X'} \quad (\text{III } 14)$$

Le point figuratif du régime de la machine passe instantanément de A en A' et la puissance électrique débitée par la machine passe de P_0 à $P'_0 = P'_m \sin \delta_0$. L'équilibre entre les couples moteur et résistant est détruit. Ces phénomènes sont complètement décrits ci-dessous

				ETAT
0			0	
Croit	0		croit	
1	0		max	
décroît	0		décroit	
Max	0		0	stable
- 1	0		0	limite de stabilité
Max	0		0	instable

III- 4. Influence de la structure des réseaux :

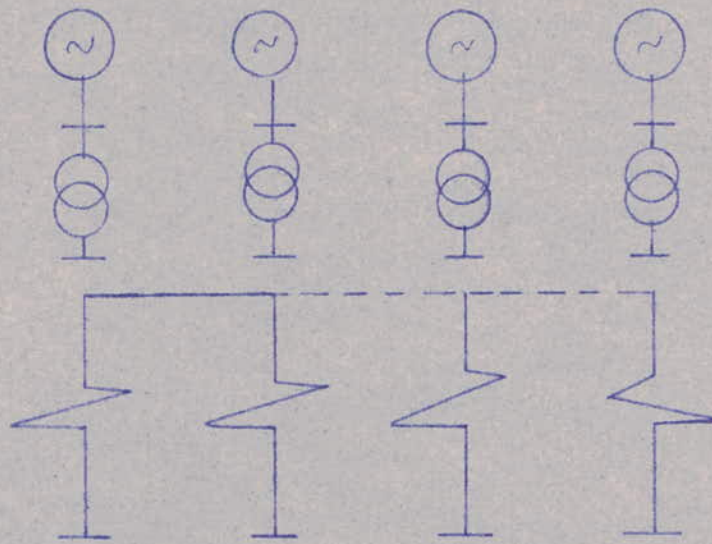
Nous nous proposons d'exposer quelques résultats d'ordre général concernant la stabilité d'un réseau multimachine en essayant d'analyser le comportement des groupes générateurs vis-à-vis d'une perturbation, tout en considérant comme paramètres principaux la structure des réseaux et le nombre de machines en présence.

On examinera en premier lieu, sur des cas simples, le mécanisme de la propagation d'une perturbation dans un réseau ainsi que le rôle des dissymétries et des échanges de puissances, et par la suite les problèmes posés par le regroupement des machines qui seront évoqués dans l'hypothèse où on tient compte des oscillations des machines.

- Comportement des réseaux présentant des structures simples: la structure entraîne est la plus simple tout en pouvant servir de référence à des structures plus compliquées, c'est donc sur elle que portera, en premier lieu l'analyse les autres étant examinés par la suite. Les différentes structures synétriques sont données en figure 14.

III- 4. 1. Structure en train : limite de stabilité dynamique :

On examinera le cas simple d'un réseau synétrique sans échange de puissance, où le terme (sans échange de puissance) caractérise les sché-



Structure en train

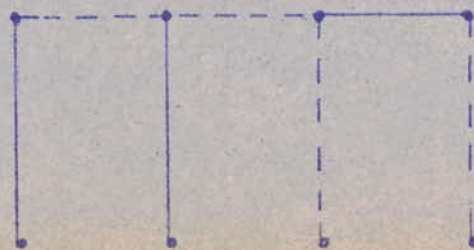
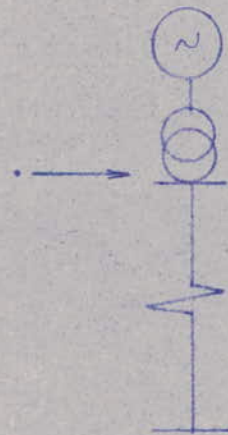


Fig 14

Structure en peigne

- mas types pour lesquels les machines produisent une puissance voisine de leur puissance nominale mais alimentant une charge située aux bornes HT de leurs transformateurs de groupes respectifs. Ces machines étant liées par des lignes d'équilibre dans lesquelles il ne passe pas de puissance en service normal. Ces schémas simples ont l'avantage d'étaler facilement l'influence de la topologie d'une part, et ils peuvent s'appliquer, sans grande erreur, au cas où les transits sont très faibles, vis à vis de la puissance des machines d'autre part. Dans d'autres cas ils donnent toujours des valeurs trop grandes des impédances maximales de liaison ; ils peuvent donc être considérés comme des cas limites. On entend par réseau symétrique les réseaux composés d'un certain nombre de lignes reliant entre elles des machines de tailles identiques suivant un schéma se reproduisant identique à lui-même un certain nombre de fois selon l'importance du réseau. Le comportement d'un tel ensemble sera examiné en supposant qu'un défaut triphasé, éliminé en 0,2s sans ouverture de la ligne, affecte une extrémité du train. Dans ces conditions on recherche comment varie l'impédance, entre deux machines, qui correspond à la limite de stabilité en fonction du nombre de machines du train. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous où l'impédance limite est exprimée en valeurs réduite rapportée à la puissance nominale d'une machine.

nombre de machines	impédance limite
2	7
3	5,4
5	5,25
10	5,25

On déduit de ce tableau qu'à partir de trois (3) machines, que le nombre de celles-ci n'intervient pratiquement plus sur la limite de stabilité. Ces résultats montrent également que les machines éloignées du point de défaut n'ont pas d'influence sur la limite de stabilité.

Evolution du mouvement des machines selon leur position; propagation de la perturbation dans le cas d'un schéma en train.:

Le comportement de ces machines peut être analysé en représentant l'évolution de l'angle du rotor en fonction du temps pour les différentes machines du train.

C' est ce qui a été fait sur le diagramme de la figure 15 dans le cas d' un train de dix machines. Les lignes étant longues au premier instant du court - circuit seule la machine proche subit une croissance de sa tension entraînant une rotation de son rotor. Le décalage du rotor entraîne lui-même une circulation de puissance entre la première et la deuxième machine qui à son tour entraîne un décalage de la deuxième et ainsi de suite de proche en proche. Ce retard dans la transmission du mouvement est donc dû à la constante d' inertie des différentes machines et à la valeur des impédances des lignes séparant ces machines. On constate également que, bien que la première machine ait un décalage angulaire de plus d' un tour électrique par rapport à la dernière, le réseau peut être considéré comme stable. En effet le décalage angulaire d' une machine avec la machine consécutive ne dépasse jamais 100° ; le décalage de 360° est réparti tout au long du train donc il n' y a pas lieu de parler de rupture de synchronisme. Ainsi si on compare la différence des variations de l' angle du rotor de la machine la plus proche du défaut et de celle la plus éloignée pour un train de dix machines avec ou sans "groupe infini" on constate que les courbes se superposent pendant 2,4s environ et que l' amortissement est ensuite plus rapide dans ce cas. Ceci prouve que la machine la plus proche est la plus perturbée et qu'elle a le temps de décélérer suffisamment pour que la dernière machine n' ait plus d' influence sur la perte du synchronisme. A titre indicatif, afin de donner une idée de l' influence de la taille du réseau représentée, signalons que pour le train considéré précédemment, lorsqu' on déplace le groupe infini de la deuxième à la huitième machine, les courbes de variation d' angle sont identiques pour la première machine pendant 4,6s, pour la deuxième pendant 4,1s.

III- 5. Influence des échanges de puissances

On a cherché à apprécier l' influence d' un échange de puissance entre deux machines en fonction du rapport de puissance de celle-ci. Les résultats sont sur la fig. 17.

Le défaut considéré est un défaut triphasé fugitif de 0,2s, on indique la valeur maximale de l' impédance reliant les deux machines entre elles, permettant de conserver le synchronisme de à la suite du défaut d' une part dans le cas où il n' y a pas d' échange de puissance et d' autre part avec échange de puissance de 20% à 30% de la puissance d' une des machines. On peut remarquer que pour un transit donné, le défaut le plus sévère est celui qui a lieu à l' extrémité productrice. Pour un réseau donné, le régime le moins stable correspond à un transit s' effectuant de la plus petite machine vers la grande machine.

- Pour un réseau de deux machines de puissances égales un échange de puissance

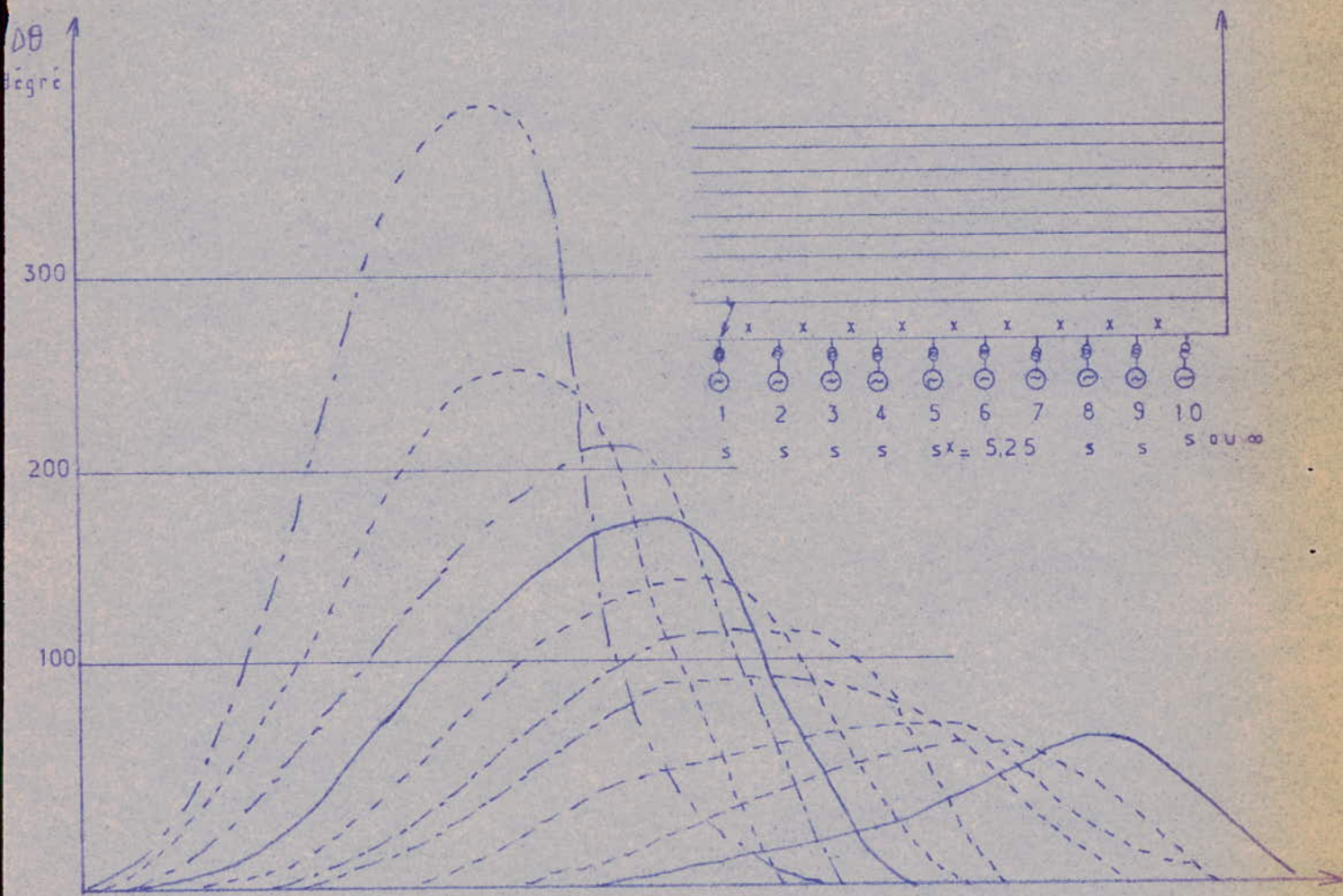


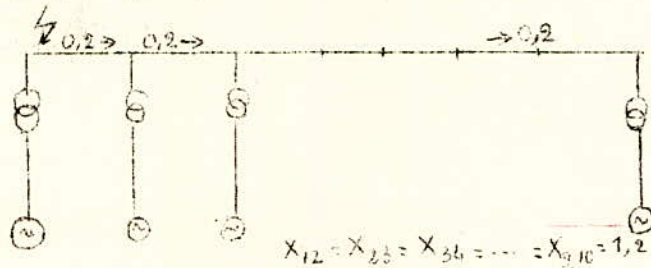
Fig 15

Evolution des écarts angulaires des machines
 pour un train de 10 machines sans échange
 de puissance entre machines

de 20% de la puissance d' une machine fait passer l' impédance limite de 7 à 2,4.
 - Pour un train de 10 machines de puissance égale, un transit de puissance de 20% de la puissance d' une machine entre la première et la deuxième machine fait passer l' impédance limite de 5,25 (sans échange de puissance), à 1,4.

L' ordre de grandeur de la réduction d' impédance limite due au transit dans un tronçon est donc à peu près le même lorsque la machine située à l' extrémité de ce tronçon est seule ou lorsqu' elle est réunie à un train de neuf machines.

Si, avec le train de machine, le transit de 0,2P d' effectue non pas du premier au second noeud, mais du premier au dixième (fig. 16).



Tout au long du train l' impédance limite a pour valeur 1 . L' influence du transit dans les lignes éloignées est donc beaucoup plus faible que celle de ligne la plus proche du défaut lorsque le réseau atteint la limite de stabilité, ce n' est pas la machine la plus proche du défaut qui perd le synchronisme avec la machine suivante du train mais ce sont les machines les plus éloignées qui perdent le synchronisme avec les autres. On a porté en fig. 17 pour un tel train d' impédance de liaison 1,2 les variations de l' angle relatif des rotors des 10 machines en fonction du temps pour un défaut de 0,2s .

III- 6. Influence des dissymétries:

Cette étude concerne toujours un réseau sans échange de puissance.

Il peut y avoir plusieurs types de dissymétries :

- Dissymétrie dans la répartition de la puissance.
- Dissymétrie dans la liaison entre machines
- Dissymétrie dans le coefficient de charge d' une machine.

La première étude consiste à regarder l' influence de la dissymétrie de liaison sur un train de trois machines de même puissance. L' impédance entre deux machines étant fixée, on a cherché quelle pouvait être l' impédance maximale entre

une de ces machines et une troisième aux bornes de laquelle on fait un défaut.

On s' aperçoit que, plus les machines qui ne sont pas voisines du défaut sont proches l' une de l' autre, l' impédance limite est faible c' est à dire la stabilité est mauvaise. Les résultats numériques sont portés en fig. 18. Au-delà

de la valeur X_{23} égal à 5,4 la courbe est tracée en traits interrompus car un défaut au noeud n° 3 entraînerait une perte de synchronisme entre les machines

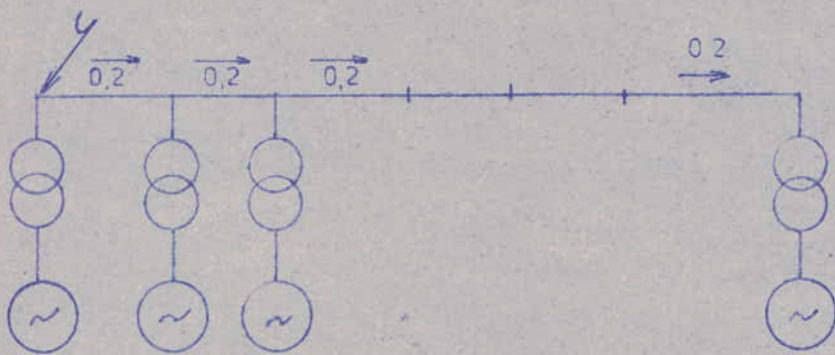


Fig 16

$$X_{12} = X_{23} = X_{34} = \dots = X_{910} = 1,2$$

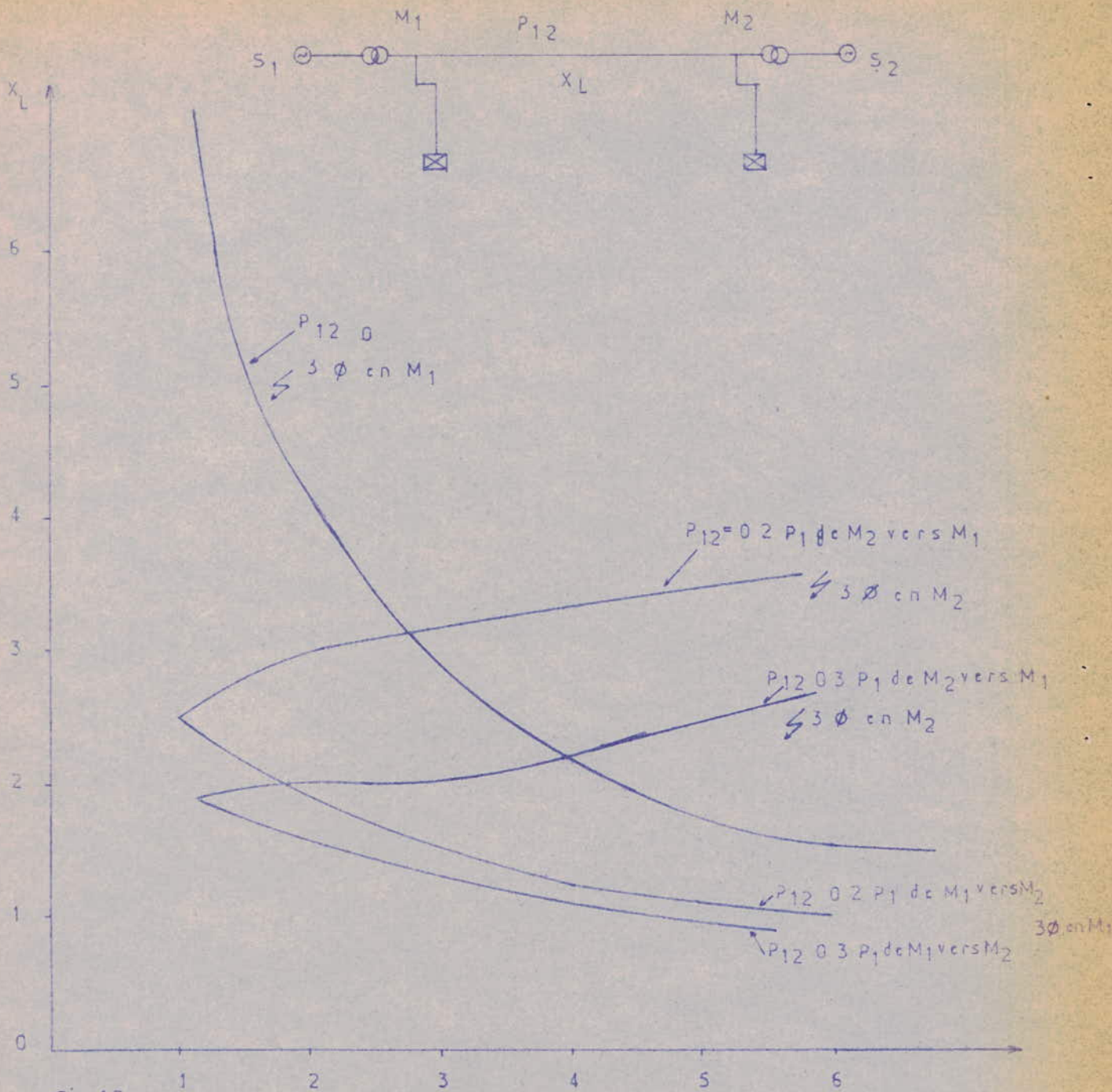


Fig 17

Réseau à deux machines Influence de la puissance échangée

X_L impédance maximale de liaison entre machines exprimée en valeur réduite rapportée à la puissance nominale de la machine 1

S_2/S_1 rapport des puissances nominales des machines 2 et 1

2 et 3.

A la limite inférieure (pour $X_{23} = 0$), on se ramène au cas de deux machines avec dissymétrie de puissance. On montre (fig. 17) que plus la machine éloignée du défaut est puissante, plus l'impédance limite est faible. Rappelons à titre indicatif que pour un réseau à deux machines de même puissance l'impédance limite a pour valeur 7. Il en résulte de ces considérations qu'une dissymétrie d'impédance de liaison entraîne une diminution de stabilité par rapport au réseau symétrique lequel est caractérisé par la faible ou la plus grande des impédances de liaison.

En effet pour un réseau symétrique la stabilité est d'autant meilleure que l'impédance de liaison est plus faible. Le réseau à grande impédance de liaison est donc moins stable que celui à faible impédance de liaison; or un réseau dissymétrique est encore moins stable que le réseau à grande impédance de liaison pour un défaut situé près de la machine reliée à cette impédance.

Ainsi, partant d'un réseau dissymétrique à trois machines, si on réduit une des impédances de liaison, on diminue la stabilité pour un défaut situé près de la machine reliée à l'impédance conservée; si au contraire on augmente une des impédances de liaison, on diminue la stabilité pour un défaut situé près de la machine reliée à cette impédance augmentée. De toute façon la dissymétrie a entraîné une diminution de la stabilité.

III- 7. Influence de la perturbation en général :

En cas de perte de synchronisme on préfère découper le réseau en plusieurs sous-réseaux de sorte qu'à l'intérieur de chacun d'eux un synchronisme local se rétablisse. Cela suppose bien sûr que le découpage satisfasse un certain nombre de conditions telles que :

- Egalité des consommations.
- Egalité des productions.
- Homogénéité des temps de lancer.

C'est une des tâches du dispatching que de prévoir ces découpages, mais lorsque des alternateurs débitant sur un même réseau ne sont plus synchrones, on peut étudier le fonctionnement de ce réseau en appliquant le théorème de superposition. Chaque machine est caractérisée par sa force électromotrice E_i et son courant I_i . Nous pouvons calculer également en chaque point M : la tension e_i et le courant i_i . Pour mieux saisir ce qui se passe dans un réseau hors synchronisme et comprendre comment on peut détecter rapidement une perte de synchronisme on va se placer dans un cas simple de deux machines débitant sur une charge.

Les deux courants qui se superposent sont respectivement :

$$I_{11} / \frac{2\pi(f + \Delta f) \neq \neq 1}{-}$$

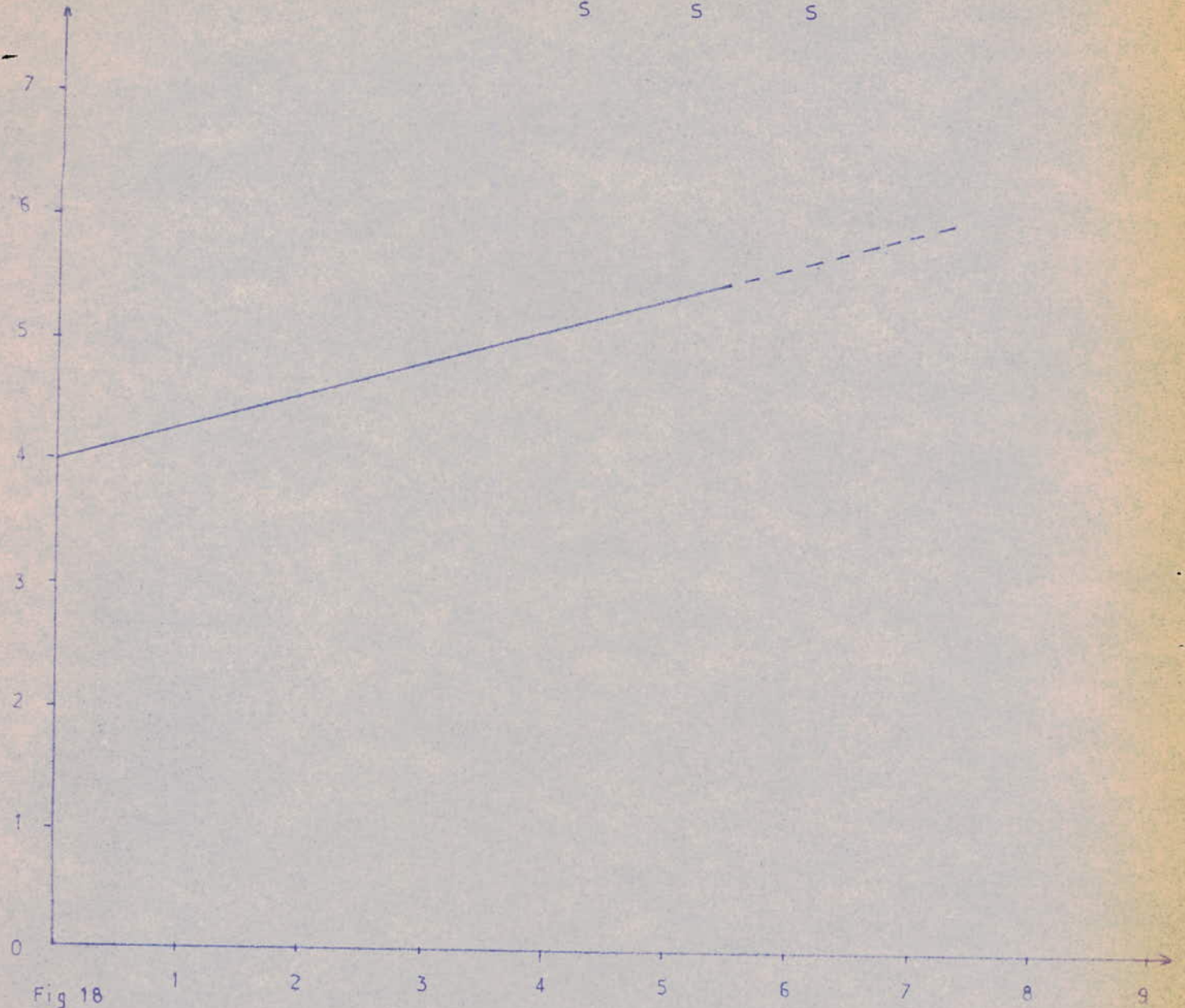
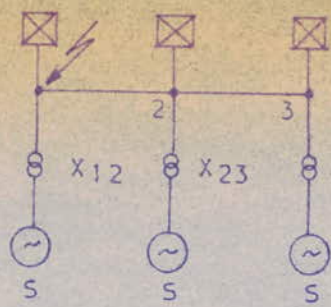


Fig 18

- Train de trois machines impédance limite entre les machines 1 et 2 exprimée en valeur réduite rapportée à une machine en fonction de l'impédance entre les machines 2 et 3

$$V(\mathcal{J}, w) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \left\{ M_{ik} M_{ki} (w_{in} - w_{kn})^2 - [B_{ik}(\mathcal{J}_{in} - \mathcal{J}_{kn}) + A_{ik} M(\mathcal{J}_{in} - \mathcal{J}_{kn})] \right\} \quad (\text{II } 34)$$

L'expression de V est de la forme

$$V(\mathcal{J}, w) = A(w) - \phi(\mathcal{J}) + K \quad (\text{II } 35)$$

Pour le point d'équilibre $(\mathcal{J}^s, 0)$ on montre que $V(\mathcal{J}, w)$ remplit les conditions requises par la fonction de LIAPOUNOV pour assurer la stabilité du système à savoir :

$$a/ V(\mathcal{J}^s, 0) = 0 \quad \text{Pour le choix convenable de la constante } K \\ K = \phi(\mathcal{J}^s)$$

$$b/ \dot{V}(\mathcal{J}, 0) = 0 \quad \text{dans tout l'espace d'état}$$

$V(\mathcal{J}, w) > 0$ dans un certain domaine Ω entourant l'origine. Au point de vue dimensionnel $V(\mathcal{J}, w)$ s'exprime en $Mw^2 s^2$ ou en (Mega joules)²

Domaine de stabilité et application :

La fonction étant construite, il reste à déterminer les domaines de stabilité du système des n machines synchrones considérées.

Il faut remarquer d'abord que le système porté par une perturbation à une valeur $V(\mathcal{J}, w) = C_0$ continue à évoluer sur la même surface dans l'hyperespace (\mathcal{J}, w) lorsqu'il est abandonné à lui-même puisque $\dot{V}(\mathcal{J}, w) = 0$.

Le mouvement sera donc stable si $V(\mathcal{J}, w) = C_0$ constitue une surface fermée autour de $(\mathcal{J}^s, 0)$. Or la surface cesse d'être fermée dès qu'elle possède un point multiple pour lequel on a :

$$(\text{II } 36) \quad \frac{\partial V}{\partial \mathcal{J}_{in}} = 0 \quad \frac{\partial V}{\partial w_{in}} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

Ainsi le domaine de stabilité est le domaine de l'espace d'état qui entoure l'origine stable $(\mathcal{J}^s, 0)$ et qui est délimité par la plus grande surface fermée telle que :

$$V_1 = V(\mathcal{J}^i, 0) = \phi(\mathcal{J}^s) - \phi(\mathcal{J}^i) \quad (\text{II } 37)$$

Dans cette expression V_1 désigne la plus petite des valeurs que la fonction $V(\mathcal{J}, w)$ prend aux différents points entourant $(\mathcal{J}^i, 0)$ désignant précisément les points singuliers.

Donc nous pouvons énoncer un critère formel très important, :

étant donné un réseau défini dans le cadre des hypothèses ci-dessus par ses machines, ses charges et ses liaisons, si ce réseau possède une répartition de charges stables, il est possible de déterminer une valeur limite V_1 de la fonction de LIAPOUNOV associée à ce réseau telle que si une perturbation l'amène dans un état (\mathcal{J}, w) où $V(\mathcal{J}, w) < V_1$ alors le réseau abandonné à lui-même est certainement stable.

$$I_{21} \angle \pi + 2\pi(f - \Delta f) + \varphi_2$$

$$|I_{11}| = \frac{E_1}{X_{c1}}$$

$$|I_{21}| = \frac{X}{X + X_1} E_2$$

Le vecteur courant résultant va varier entre : $\frac{E_1}{X_{c1}} + \frac{E_2}{X_{c2}} \cdot \frac{X}{X + X_1}$ et

$\frac{E_1}{X_{c1}} - \frac{E_2}{X_{c2}} \cdot \frac{X}{X + X_1}$. Sa phase varie d'une manière oscillatoire autour de celle

du plus grand des vecteurs composants, donc il s'en suit une grave conséquence sur la puissance émise. En effet dans ces conditions la puissance émise par chaque machine varie fortement dans le temps. La machine au point A dont la force électromotrice est E_1 est traversée par les courants I_{11} et I_{21} définis ci-dessus.

On peut décomposer cette puissance émise en deux puissances :

1°/ Puissance apparante constante : $E_1 \times I_{11} \angle \varphi_a$

2°/ Puissance apparante variable : $E_1 \cdot I_{21} \angle 2\Delta wt + \varphi_b$

Où φ_b est l'angle entre E_2 et I_{21} .

Il est intéressant de remarquer que, les charges, ayant toujours des réactances X grandes par rapport aux réactances X_1 et X_2 , les courants I_{11} et I_{21} sont dans un rapport voisin des puissances des deux machines.

Il en résulte que la puissance active $E_1 \cdot I_{11} \cdot \cos \varphi_1$ sera faible devant $E_1 \cdot I_{21} \cdot \cos(2\Delta wt + \varphi_2)$.

La puissance active totale émise par la machine A changera de signe ce qui constitue un déséquilibre grave pour ce petit réseau.

CHAPITRE IV

Méthodes d' amélioration de la stabilité

IV- 1. Par action sur la régulation :

Les objectifs de la régulation assurés par le système d' excitation sont dégagés à l' aide de différents régimes de fonctionnement d' une synchrone dans un réseau maillé et radial. Il s'agit de réduire les défauts stationnaires et d' obtenir des marges suffisantes pour la stabilité dynamique, ainsi qu' une bonne régulation de tension de différentes conditions de système, avec l' emploi de très gros turbo-alternateurs dans les réseaux électriques, le système d' excitation pour un rôle de plus en plus grand.

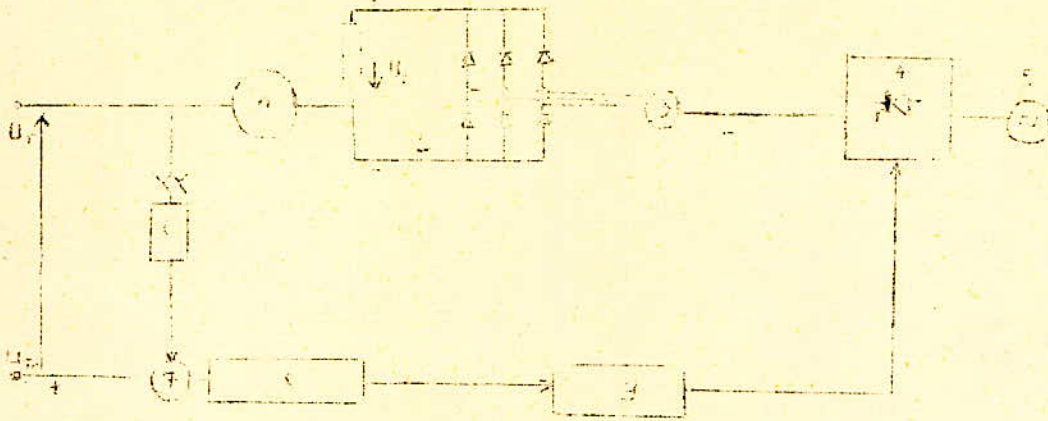
Buts de la régulation de tension dans différentes conditions de fonctionnement:

La tâche fondamentale est de fournir le courant d' excitation et de maintenir un point de fonctionnement stationnaire. La fonction du système d' excitation est, en général d' améliorer la caractéristique d' amortissement et d' élargir les limites de stabilité.

Les conditions de fonctionnement à considérer sont:

- Marche à vide avec disjoncteur d' alternateur ouvert,
- Marche à vide après délestage.
- Fonctionnement en parallèle pour différentes charges et conditions des réseaux.
- Etat perturbé, provoqué par des défauts ou une refermeture réussie ou non.
- L' objectif à atteindre est une stabilité satisfaisante, c'est-à-dire amortissement satisfaisant des phénomènes transitoires, maintenir de la stabilité dynamique pour une série de perturbations définies d' avance.

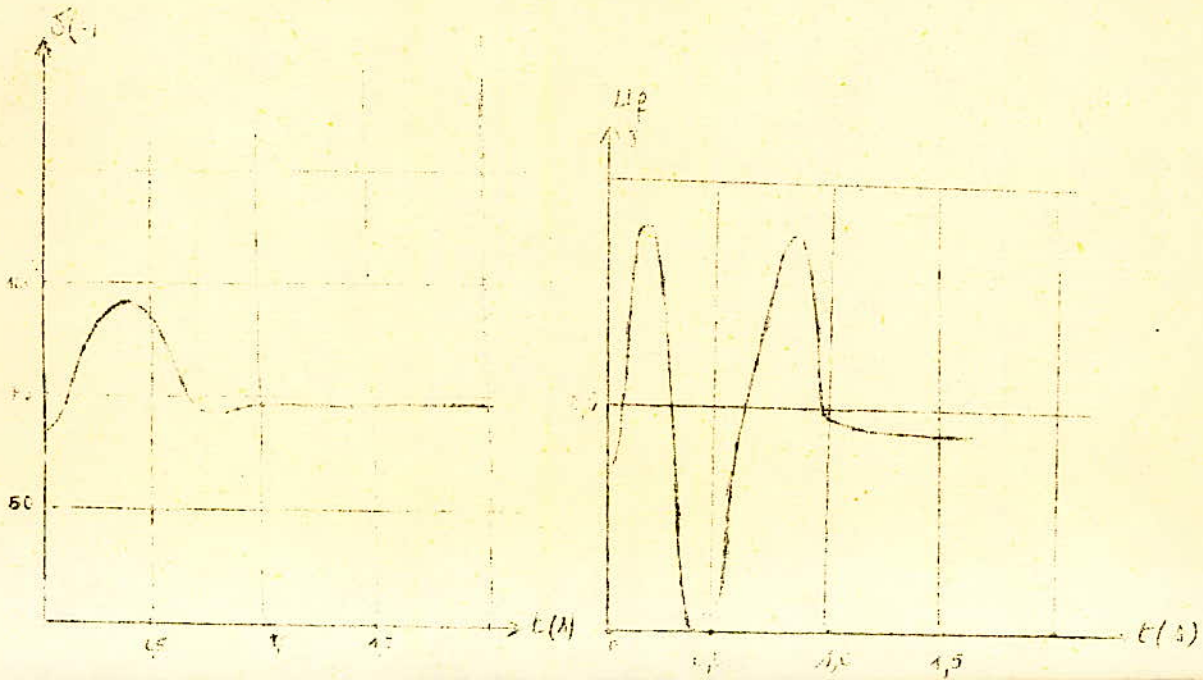
Si l' on sépare l' alternateur du réseau, il peut apparaître des écarts de tension importants; selon la charge du turbo-alternateur avant la manoeuvre de disjoncteur. Dans ces conditions, la fonction du système d' excitation est d' une importance primordiale.



- 1 - Alternateur triphasé
- 2 - Pont de d'écarts
- 3 - Excitatrice a courant alternatif
- 4 - Pont de thyristor
- 5 - Génératrice à aimant permanent
- 6 - Capteur
- 7 - Comparaison des valeurs consignées des valeurs réelles
- 8 - Régulateur
- 9 - Dispositif de commande de gachette

Exemple :

Installation 2 x 750 MVA durée du défaut triphasé = 0,05 s.



IV-2. Par action sur δ et E :

La perte de synchronisme dans la machine est dû à ce que, par suite de l'apparition du défaut et de l'augmentation de l'impédance de transfert qui en résulte entre les bornes de la machines et le point de connexion de la ligne de transmission au réseau de grande puissance, point où la tension est V , δ augmente et s'il dépasse une certaine valeur avant que l'élimination du défaut et le réenclenchement n'ait restauré le système dans sa configuration initiale, le synchronisme sera perdu.

IV-3. Procédé de stabilisation de la machine :

- δ représente l'angle entre V et E (angle de phase)

- V représente $V_m \sin \omega t$ tourne à la vitesse angulaire correspondant à celle du réseau et elle est indépendant de la machine.

La pulsation de E est déterminée par la vitesse angulaire de l'arbre de la machine motrice et sa phase est liée à la position relative de l'arbre de la machine motrice également par rapport à la direction de V .

E est engendré par le champ inducteur produit par l'enroulement d'excitation solidaire du rotor de la machine motrice.

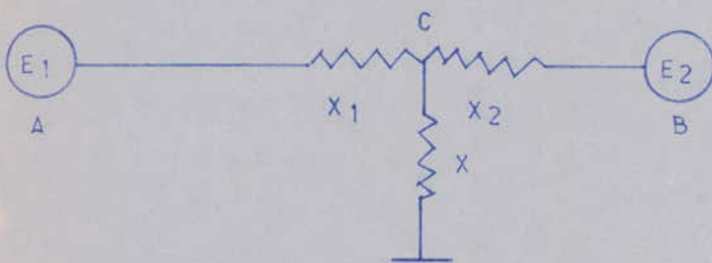
Augment par suite du mouvement relatif d'accélération de l'arbre moteur consécutivement à l'apparition du défaut.

L'angle interne δ est relié au champ inducteur mais pas à l'arbre de la machine motrice. En libérant le champ inducteur de l'arbre de la machine motrice et en faisant glisser par exemple dans le sens inverse du mouvement relatif de l'arbre par rapport à la direction de V , on obtiendrait la possibilité de réduire l'angle interne et de la maintenir à des valeurs permettant le maintien du synchronisme, après l'élimination du défaut tandis que l'arbre de la machine motrice continuerait son mouvement en avant sous l'effet du couple accélérateur.

Ce découplage de l'axe du champ inducteur, par rapport à l'arbre de la machine peut être obtenu par utilisation d'enroulement d'excitation ayant des axes magnétiques décalés autour du rotor ex : disposition de deux enroulements ayant des axes magnétiques décalés de 90° .

1/ L'enroulement d'excitation principale dans lequel circule le courant d'excitation correspondant à E , F.E.M en régime établi que nous appellerons E_m . L'angle de déphasage entre E et \bar{V} est l'angle mécanique δ_m .

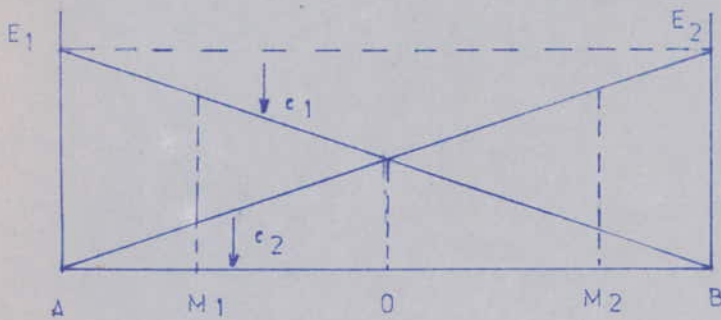
2/ L'enroulement qui est excité aussitôt après l'apparition de la perturbation dans le but de déplacer l'axe magnétique du champ inducteur en sens inver-



X_1 = réactance entre A et C

X_2 = réactance entre B et C

X = réactance équivalente à la charge en C



Tension en marche Synchronisme

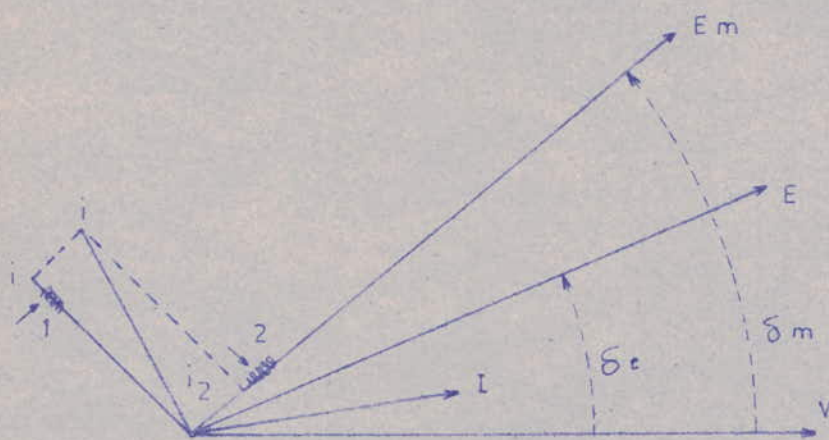


Fig 20

Déplacement de l'axe magnétique du champ inducteur par utilisation de deux enroulements d'excitation à axes décalés de 90° électriques

- se du mouvement du rotor.

E, F.E.M. résultante des courants i_1 et i_2 circulant dans les enroulements 1 et 2
L' angle de déphasage entre E et V devient θ avec e m'

IV- 4. Etude théorique et expérimentale du procédé :

Le principe du procédé étant établi, il reste à voir si le courant dans l' enroulement auxiliaire pourrait effectivement s'établir pendant la courte durée du phénomène transitoire.

Les calculs montrent que les déplacements de l'axe du champ inducteur étant possibles et qu'avec ce procédé la machine pourrait fonctionner sans perte de synchronisme même en régime transitoire avec des angles de décalage interne de 75° à 80° .

La possibilité d'exploiter la machine avec de tels décalages correspond à une possibilité d'augmentation des puissances transmises sur les grands systèmes de transmission d'énergie à courant alternatif de l'ordre de 70 à 80% et dans certains cas de 100% supérieure aux puissances pratiquement transmises sur ces systèmes, en égard au maintien du synchronisme et à la stabilité du transport dans le cas d'apparition et d'élimination d'un défaut sur le système.

L'efficacité et la sûreté du procédé sont démontrés par le maintien du synchronisme même avec le temps de coupure de 0,2s pour le disjoncteur de tête de ligne et de 0,4s pour celui en bout de ligne. Le réenclenchement ayant lieu au temps 0,8s après l'apparition du défaut, temps et durée relativement longs par rapport à ceux généralement admis.

Un alternateur qui, dans de telles conditions reste stable est une machine indécrochable.

IV- 5. Machines stabilisées dans un système de transmission :

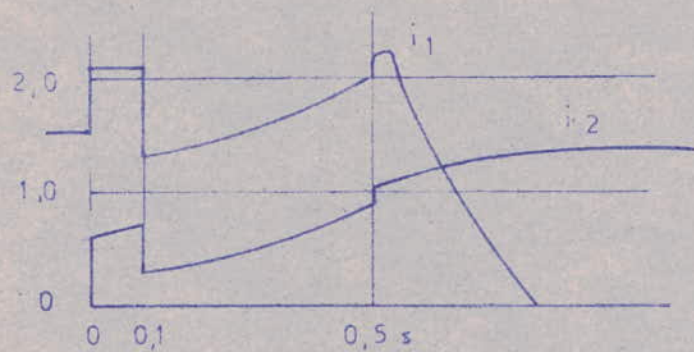
Il est de toute évidence qu'un alternateur qui ne décroche pas ne peut pas poser de problèmes dans un réseau quelconque, en effet le danger que présente la perte de synchronisme d'un alternateur de puissance relativement élevée qui peut conduire jusqu'à des perturbations très graves pour le système en entier, n'existe avec la machine stabilisée suivant le procédé.

Quant aux modifications à apporter aux équipements existants, considérons les différents cas qui peuvent se présenter dans un réseau dans le sens le plus général (Fig. 23) c'est à dire comprenant un certain nombre de nœuds reliés entre eux par des impédances des charges étant connectées à des nœuds, un certain nombre d'entre eux étant alimentés par des alternateurs.

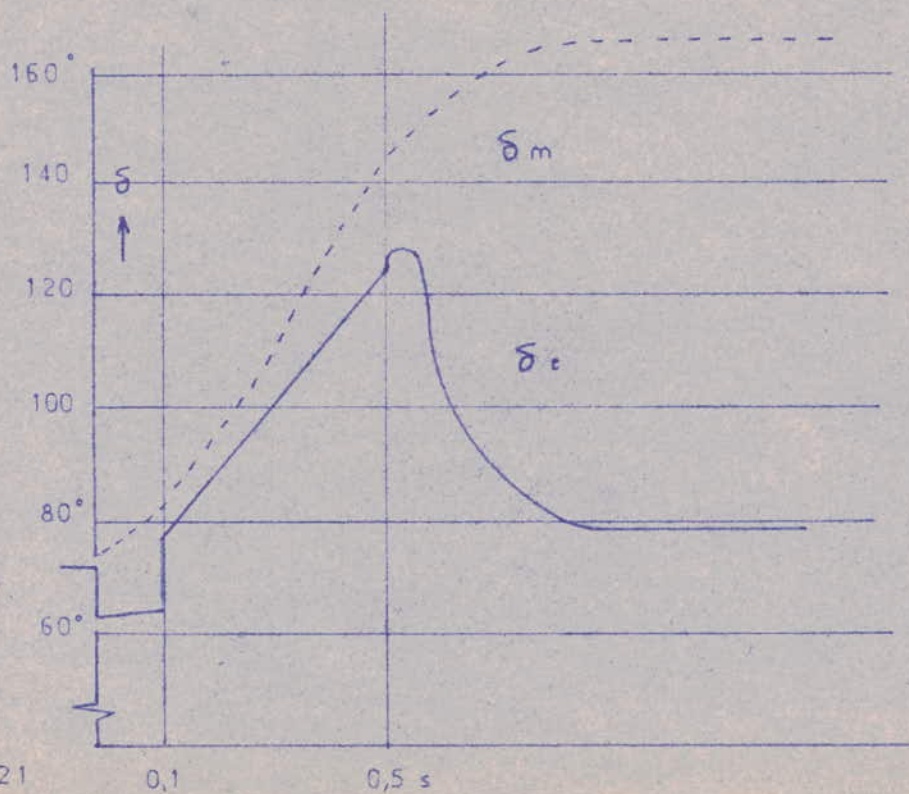
Les machines figurées de 1 à 6 sont des alternateurs ou des machines équivalentes au groupe d'alternateurs alimentant les différents nœuds du système.

Admettons d'abord que tous les alternateurs sauf 1, soient des machines de construction normale et que seule la dernière soit stabilisée suivant le procédé.

Aucune modification dans les machines 2 à 6 n'est nécessaire, en effet la fonction



A



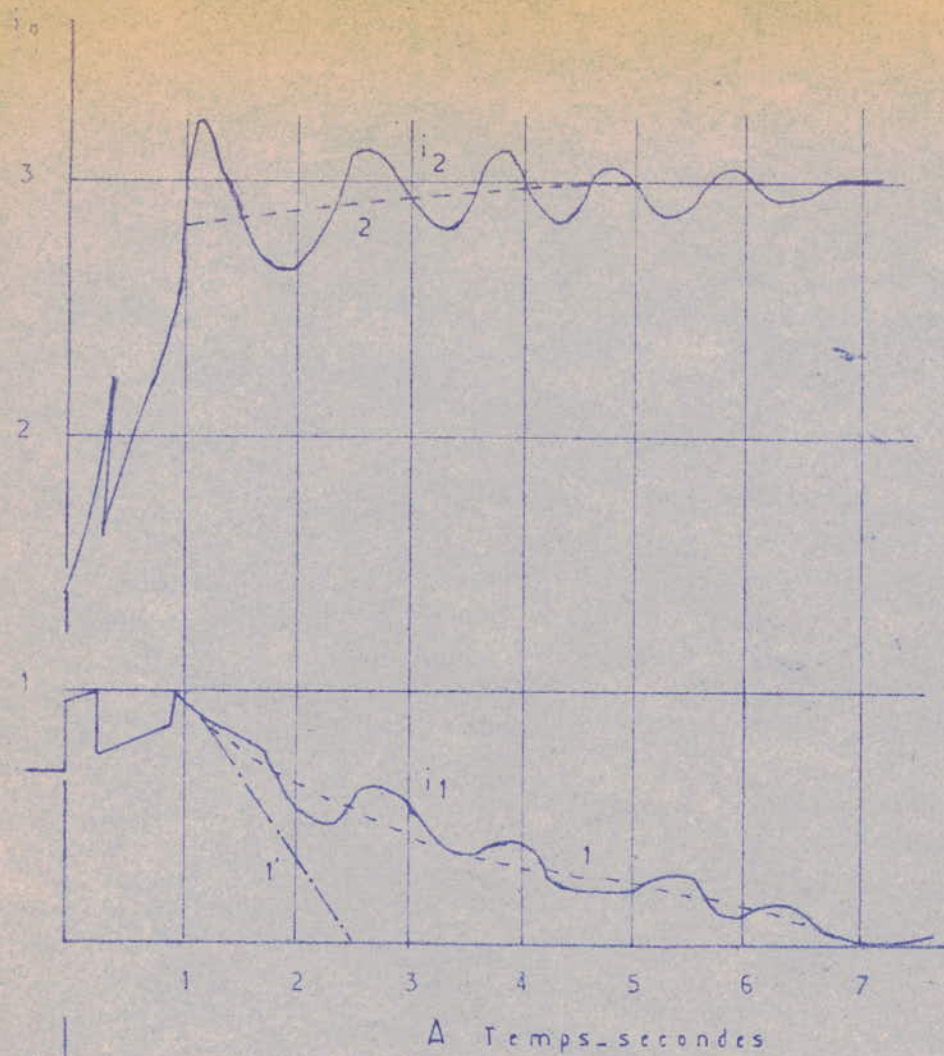
B

Fig 21

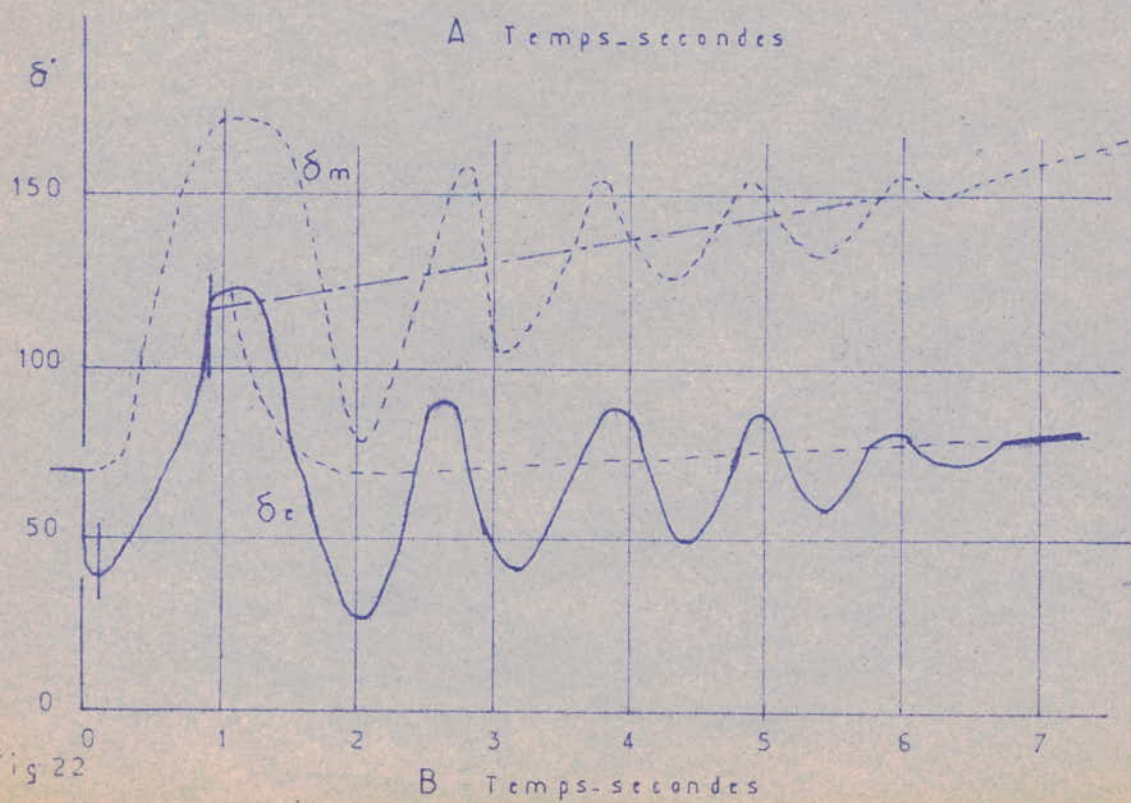
- Courbes calculées :

A) Variation des courants d'excitation dans les enroulements 1 et 2

B) Variation des angles δ_m et δ_e , tels que définitions en figure



A Temps-secondes



B Temps-secondes

Fig 22

- Courbes relevées :

A) Variation des courants d'excitation dans les enroulements 1 et 2 et valeurs moyennes

B) Variation des angles δ_m et δ_e et valeurs moyennes

- nement de l' alternateur 1 avec un grand décalage interne afin de bénéficier des avantages des procédés, n' a aucun rapport avec les conditions de fonction-
- nement des machines 2 à 6 connectées à d' autres noeuds du système. La différen-
- ce de phase entre la force électromotrice de la machine 1 et la tension au point de connexion de la ligne alimentée par cette machine au système S n' est liée qu' à la puissance fournie par cette machine 1. Considérons maintenant les machi-
- nes 3 et 4 reliées en parallèle, connectées au système par une ligne de transmis-
- sion d' une certaine longueur et admettons que 3 soit une machine normale alors 4 est stabilisée suivant le procédé. L' utilisation permet de fonctionner avec des décalages de l' ordre de 75° à 80° entre la F.E.M de ces machines et la tension en bout de ligne du système.

Dans ces conditions la machine normale sera stable en régime établi mais perdra immédiatement le synchronisme à la suite d' un défaut sur la ligne alors que l'al-
- ternateur 4 stabilisé suivant le procédé restera stable pendant et après la per-
- turbation. Si on voulait rendre la machine 3 indécrochable en lui appliquant le procédé il y aurait lieu de la doter d' un enroulement auxiliaire que l' on pou-
- rait réaliser sur les machines existantes dans l' emplacement occupé par l' amor-
- tisseur. Considérons enfin le système formé par les alterbateurs 5 et 6 et les lignes de transmission indiquées par la ligne 23. Il sera démontré plus loin, com-
- ment l' application du procédé aux machines 5 et 6 permet de transmettre une puissance de près de quatre fois supérieure à celle possible avec les machines normales. Dans ce cas, nous pourrions dire que les problèmes de stabilité pour les machines existantes ne se poseront que pour des alternateurs en parallèle avec des machines indécrochables.

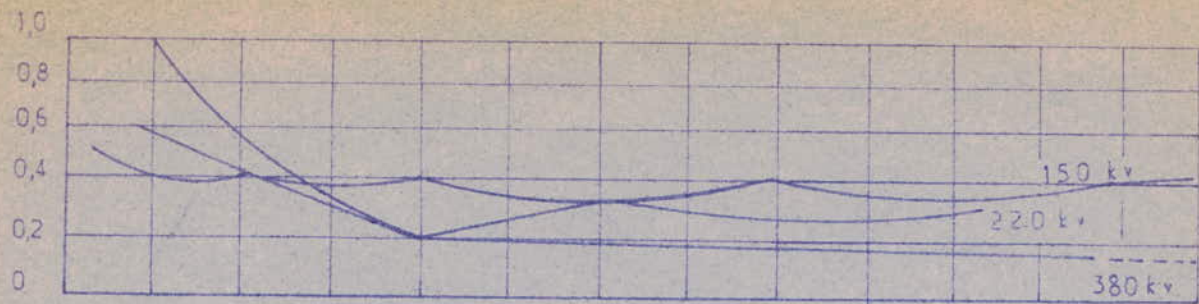
- Considération sur la réalisation pratique de l' enroulement auxiliaire :

Il y a lieu de remarquer que , si l' enroulement auxiliaire n' a fourni l' exci-
- tation totale de la machine que pendant une à deux secondes durant lesquelles le courant dont l' enroulement principal sera nul, le système d' excitation de cet enroulement doit toutefois être capable, pendant cette courte durée de fournir l' excitation entière de la machine. Le dimensionnement de l' enroulement auxili-
- aire est déterminé par la place disponible pour loger cet enroulement. On trou-
- ve que les densités de courant dans les enroulements d' excitation sont dans le rapport inverse des sections droites totales de ces enroulements. Les puissances d' excitation sont aussi dans le rapport inverse des sections droites. Etant don-
- née la courte durée du courant maximal dans cet enroulement, l' échauffement ne pose pas de problèmes.

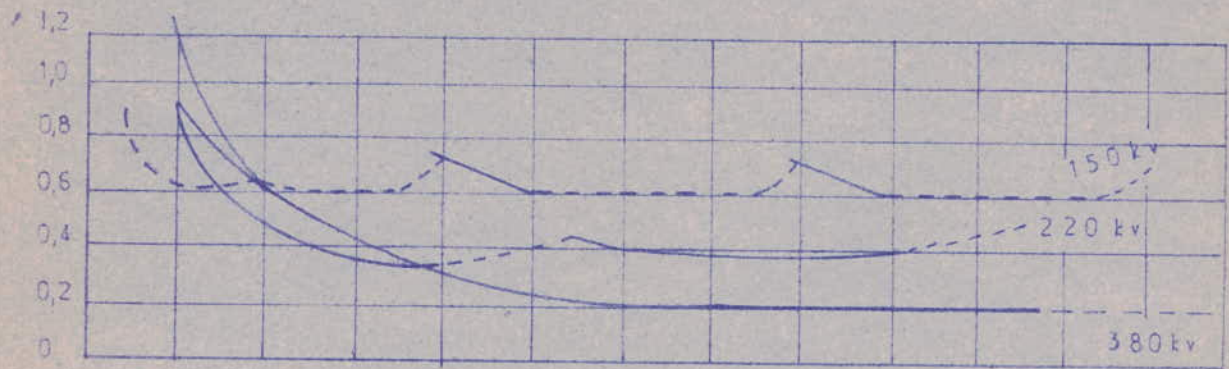
- Possibilités techniques et avantages économiques obtenus par application du procédé :

La possibilité de fonctionner avec des décalages internes grands, correspond à une

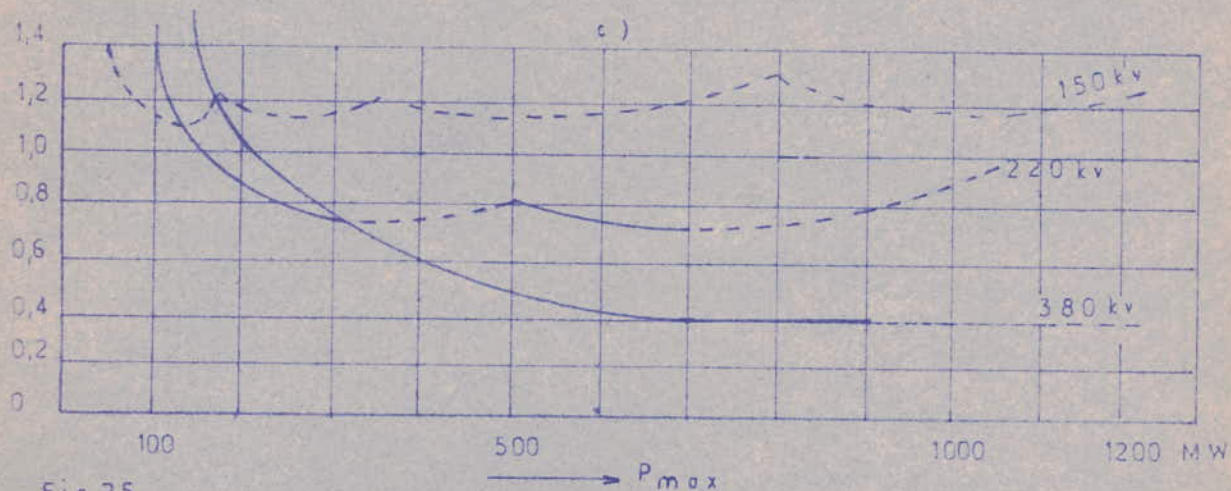
COUTS SPECIFIQUES DE TRANSMISSION



a)



b)



c)

Fig 25

→ P_{max}
PUISSANCE TRANSMISE

Côûts spécifiques de transmission en fonction des puissances transmises pour différentes tensions et distances de transmission (d'après F. Aemmer)

augmentation de la puissance transmise d'une distance donnée, par rapport à la puissance transmise avec la technique habituelle.

Comme exemple de possibilité d'application du procédé, nous prendrons la connexion d'un turbo-alternateur de 660mw à un système de grande puissance par une ligne à deux ternes chacune de $X_e = 0,4$. Avec terne unique le décalage total est de 80° avec ($X_q = 0,85X_d$). Le système ne serait pas stable en régime transitoire.

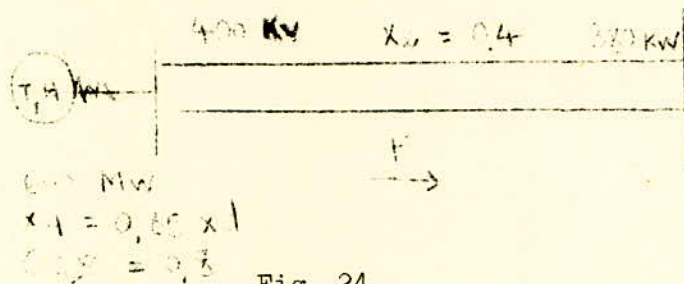


Fig. 24

La stabilisation de la machine par le procédé proposé permettrait, avec une parfaite stabilité, même en régime transitoire, de transmettre 660 mw par terne unique. Nous ne condérons pas le défaut triphasé, l'expérience prouve pour les lignes à 400Kv que le défaut à retenir comme critère de base est le défaut fugitif entre phase et terre.

L'avantage de l'application du procédé dans ce système ne traduit pas l'économie d'une ligne entière. La puissance transmise par terne passant de 300mw à 600mw, la réduction des frais de transmission, selon les courbes de AEMMER seront de 42%. Ainsi les 300mw excédentaires seront transmis au 1/6 de leur coût.

Comme autre exemple, nous prendrons un système de transmission d'énergie à un réseau de grande puissance en P.

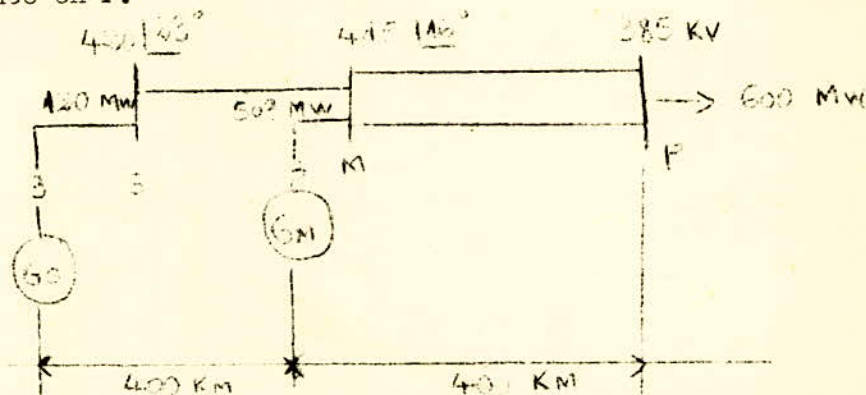


Fig. 26. transmission de puissance à une distance de 800Km avec la technique habituelle.

Du point S situé à 800Km de P est supposé alimenté par un autre groupe de machines situées en M à mi-distance (400Km du point P).

En admettant qu'une puissance de l'ordre de 500mw est fournie par les groupes

situés en M. Le résultat sur modèle réduit prouve que la puissance limite transmissible à partir de S est inférieure à 120mw.

Le procédé est appliqué pour les machines en S le déphasage (U_s, U_M) entre S et P est de 40° . Une puissance de 400MW venant de S peut-être transmise au système en P s'ajoutant au 500MW déjà fournis à ce système par les centrales situées en M, et le décalage de tension correspondant aux conditions initiales de fonctionnement du système. Donc à l'économie d'une ligne, qui serait nécessaire avec les machines de construction normale s'ajoute une réduction de 35 à 40 de frais de transmission.

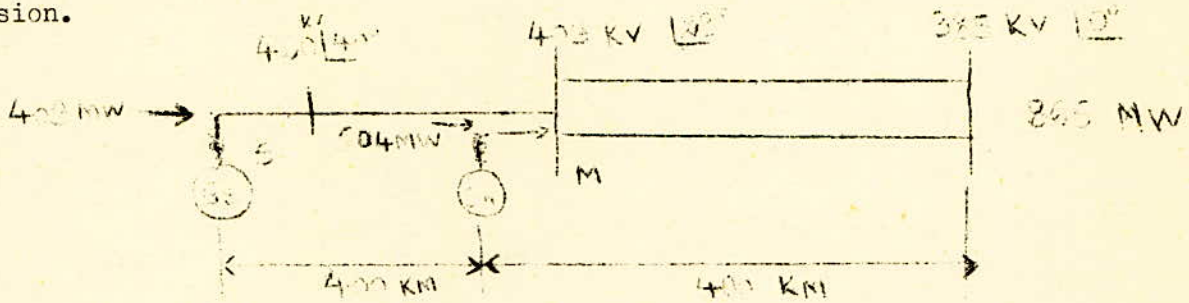


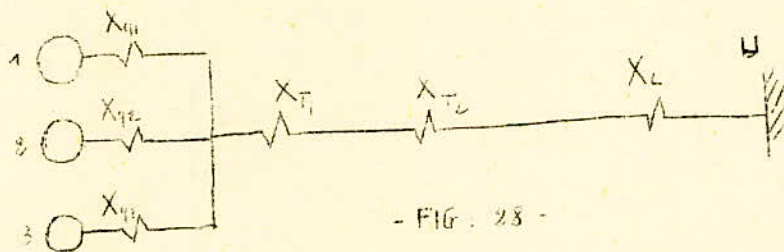
Fig. 27. Transmission de puissance à une distance de 800KM avec application du procédé.

Par action sur la réactance de liaison X_T :

Amélioration de la stabilité des lignes à H.T de 220Kv et de 400Kv.

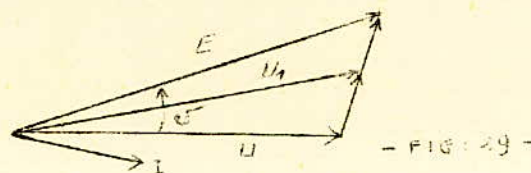
Nous partons d'un principe simple qui est celui de l'expression de la puissance pour le cas d'une ligne à H.T placée en antenne sur un grand réseau.

$$P = \frac{E \cdot U}{X_T} \sin \delta_1$$



- FIG. 28 -

Le diagramme de tension correspondant est le suivant.



- FIG. 29 -

La réactance totale de liaison étant avec $X_{g1} // X_{g2} // X_{g3} = X$

$$X_T = X_g + X_{Ti} + X_{T2} + X_L \quad (2)$$

Nous avons signalé dans le chapitre qu' un cas de défaut sur la ligne il s'en-
- suit toujours une augmentation de X_T en raison de la dissymétrie introduite par
ce défaut et une diminution de la puissance.

Nous pouvons à l' aide de condensateurs compenser cette augmentation de X_T ; en
effet lors de l' insertion de la réactance X_C dans la ligne, 2 diminue $X'_T = X_T - X_C$

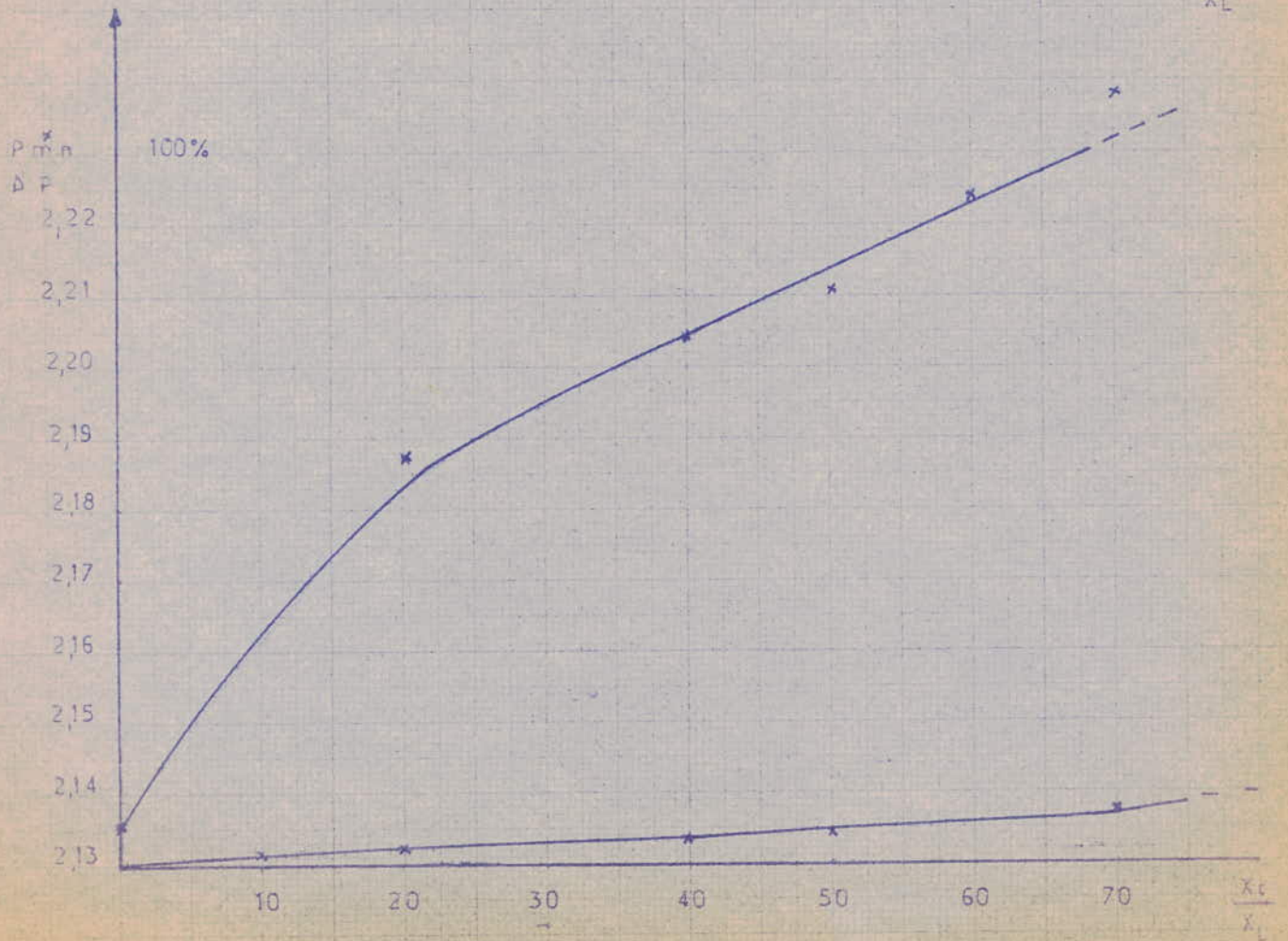
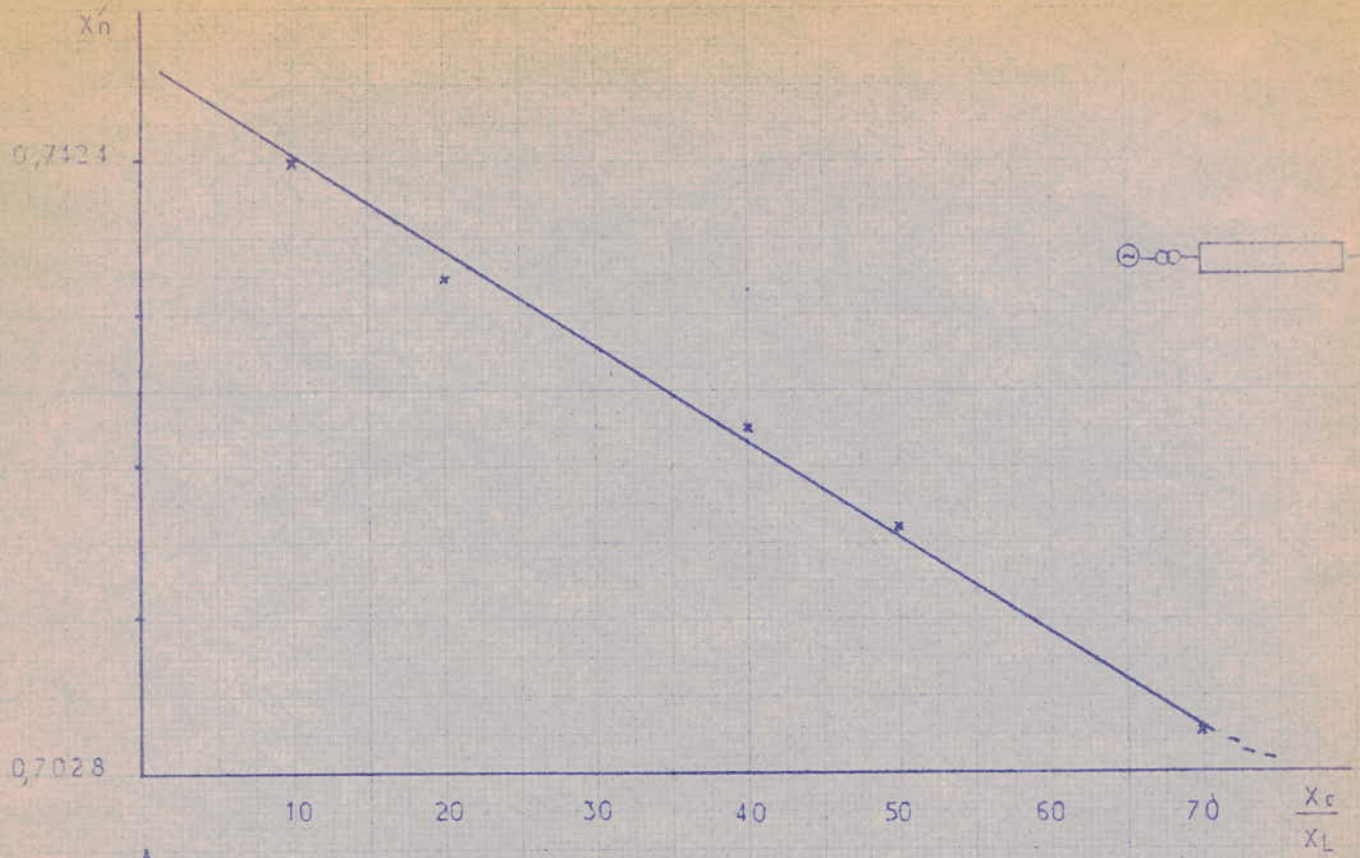
et la nouvelle puissance est $P = \frac{EU}{X'_T} \sin \delta_2 > \frac{EU}{X_T} \sin \delta_1$. Ce qui permet de

maintenir l' égalité entre les couples moteurs et les couples résistants et de mê-
- me que le synchronisme des machines.

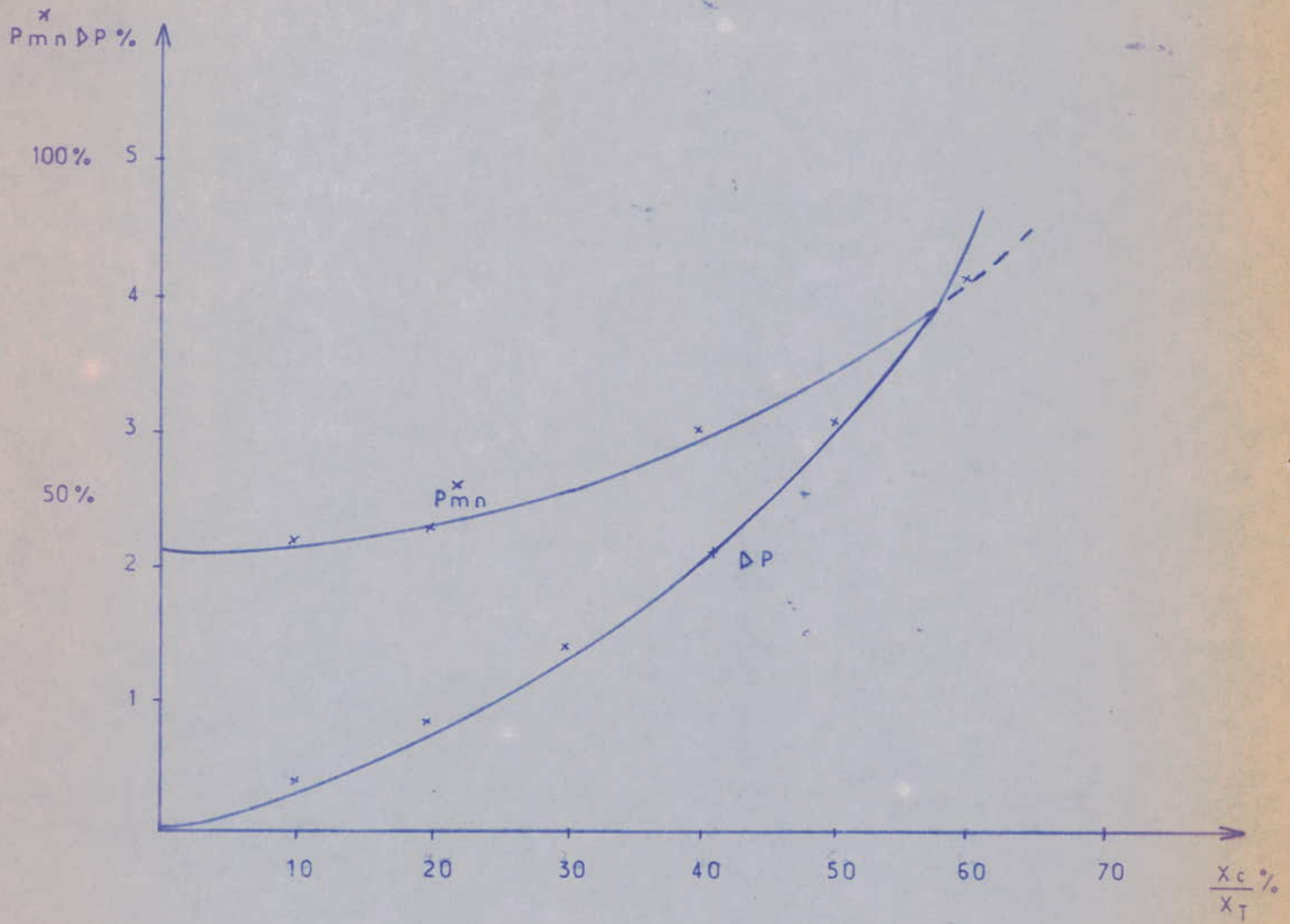
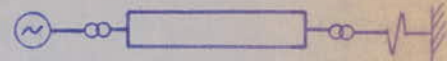
Ce principe est appliqué dans les lignes à H.T de 220Kv et de 400Kv en régime
normal pour améliorer leur stabilité et . augmenter la puissance transportée par
celle - ci. Mais il faut signaler que pour ne pas détruire la stabilité de la mar-
- che en parallèle des alternateurs, on prend le rapport $\frac{X_C}{X_L} < 90\%$; car pour

$\frac{X_C}{X_L} = 1$, le réseau sera en résonance et cela peut entraîner des perturbations

graves. Un calcul numérique pour trois sortes de lignes H. T illustrera cette
méthode et ses limites d' emploi en chapitre V.



$P_{mn}^x \triangleright P_{cn}\%$



Réseau sans charge intermédiaire courbe donnant la puissance sur la ligne et le % par rapport au réseau non compensé

CHAPITRE V

APPLICATION NUMERIQUE.

V- 1. Calcul de l'accroissement de puissance P par mise en série de condensateurs pour une ligne 2 x 220Kv sans charge intermédiaire :

- Schéma :

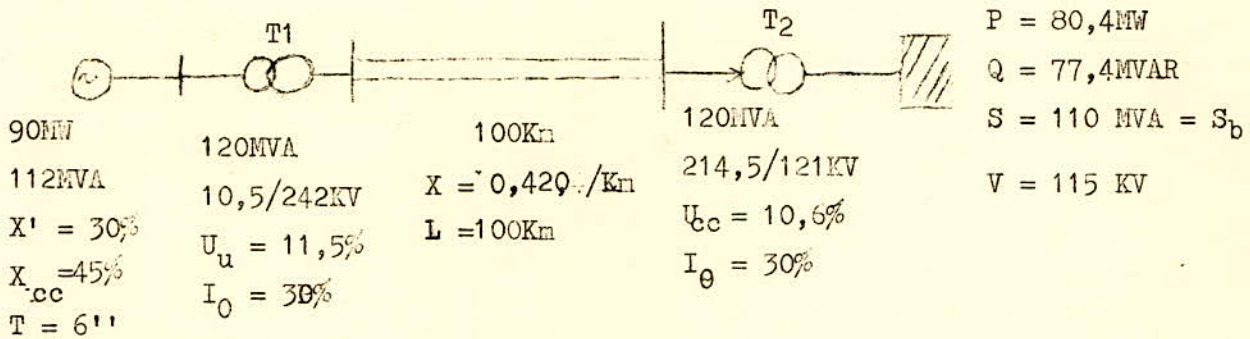


Fig. 30

En premier lieu, on procède au choix de la puissance apparante de base S_b et au calcul des autres valeurs de base. Dans notre cas on choisit $S_b = 110Mva$.

* Tension de base :

$$U_b = U \times k = \frac{115 \times 214,5}{121} = 203Kv.$$

* Calcul de X_{T1}^* :

$$X_{T1}^* = \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{S_b}{U_b^2} = 0,115 \cdot \left(\frac{242}{203}\right)^2 \cdot \frac{110}{120} = 0,152$$

* Calcul de X_{T2}^* :

$$X_{T2}^* = \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{S_b}{U_b^2} = 0,106 \cdot \left(\frac{214,5}{203}\right)^2 \cdot \frac{110}{120} = 0,106$$

* Calcul de X_L^* :

$$X_L^* = \frac{X_L}{X_b} \Rightarrow X_L^* = 0,132$$

* Calcul de X_{c1}^* :

$$X_{c1}^* = \frac{X_d}{100} \cdot \frac{S_b}{U_n^2} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,30 \cdot \left(\frac{242}{10,5}\right)^2 \cdot \frac{110}{203^2} \cdot \frac{10,5^2}{112,5} = 0,415$$

* Calcul de X_{c2}^* :

$$X_{c2}^* = \frac{X_d}{100} \cdot \frac{S_b}{U_b^2} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{45}{100} \cdot \frac{110}{11,2} \cdot \left(\frac{10,5}{203}\right)^2 \cdot \left(\frac{242}{10,5}\right)^2 = 0,622$$

Ainsi nous pouvons calculer la réactance homopolaire de la ligne : $0,132 \times 4 = 0,53$

- Schéma en régime normal :

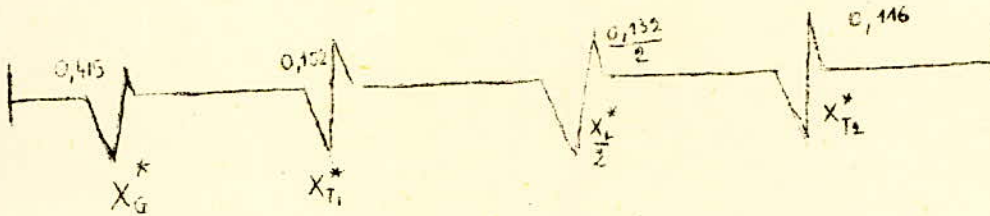


Fig. 31

* Calcul de la consommation en bout de ligne P_0^* :

$$P_0 = \frac{P_0}{S_b} = \frac{80,4}{110} = 0,73$$

$$Q_0^* = P_0^* \cdot \text{tg} \phi = 0,70 \text{ Mvar}$$

$$X_{\text{Tot}} = 0,749$$

$$E^* = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0^* X_n}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_0 X_n}{U} \right)^2} = 1,6$$

$$P_{\text{max}}^* = \frac{E^* \times U}{X_{\text{Tot}}} = \frac{1,6}{0,749} = 2,136$$

Nous allons étudier la compensation de la ligne en vue d'améliorer sa stabilité. Pour cela on considérera quelques situations.

$$\frac{X_c}{X_L} = 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10\%$$

$$1/ \frac{X_c}{X_L} = 10\%$$

$$X_L = 0,066 \quad \text{et} \quad X_c = 0,0066$$

$$X'_{\text{Tot}} = 0,749 - 0,0066 = 0,7424$$

$$E = \sqrt{\left(1 + \frac{0,70}{1} \cdot 0,7424 \right)^2 + \left(\frac{0,73 \cdot 0,7424}{1} \right)^2} = 1,62$$

$$P'_{\text{mn}} = \frac{1,62}{0,7424} = 2,1821$$

$$P'_{\text{mn}} = P_{\text{mn}} = 2,1821 - 2,136 = 0,0461$$

$$2/ \frac{X_c}{X_L} = 20\%$$

$$X_L = 0,066 \quad \text{et} \quad X_c = 0,0132$$

$$X_{Tot}^1 = 0,749 - 0,132 = 0,7358$$

$$E = \sqrt{(1 + 0,70 \cdot 0,7358)^2 + (0,73 \cdot 0,7358)^2} = 1,6074$$

$$P_{mn}^1 = \frac{1,60}{0,7358} = 2,1846$$

$$P_{mn}^1 - P_{mn} = 2,1846 - 2,136 = 0,0486$$

$$3/ \frac{X_c}{X_L} = 30\%$$

$$X_L = 0,066 \quad X_L = 0,0198$$

$$X_{Tot}^1 = 0,749 - 0,0198 = 0,7292$$

$$E = \sqrt{(1 + 0,70 \cdot 0,7292)^2 + (0,73 \cdot 0,7292)^2} = 1,602$$

$$P_{mn}^1 = \frac{1,602}{0,7292} = 2,195$$

$$P_{mn}^1 - P_{mn} = 2,195 - 2,136 = 0,059$$

$$4/ \frac{X_c}{X_L} = 40\%$$

$$X_L = 0,066 \quad \text{et} \quad X_c = 0,0264$$

La nouvelle valeur de la réactance de liaison est :

$$X_{Tot}^1 = 0,749 - 0,0264 = 0,7226$$

$$E = \sqrt{(1 + 0,70 \cdot 0,7226)^2 + (0,73 \cdot 0,7226)^2} = 1,60$$

(E est la tension en début de ligne.)

La puissance dans ce cas limite est donnée par : $P_{mn}^1 = \frac{EU}{X_{Tot}^1}$ soit $P_{mn}^1 = 2,2142$

La différence de puissance par rapport au régime normal initial $P_{mn}^1 - P_{mn} = 0,078$ correspond en pourcentage à la valeur de 3,68%.

On continuera le calcul de la même façon pour 50% et 60%. Les résultats sont rassemblés dans un tableau récapitulatif.

Tableau récapitulatif

$\frac{X_c}{X_T}$ (en %)	X_T	E	P_{mn}	p (90)
10	0,7424	1,615	2,175	1,87
20	0,7358	1,610	2,1881	2,4
40	0,7226	1,6	2,2148	3,6
50	0,7160	1,59	2,2207	3,9
60	0,7094	1,585	2,2343	4,6
70	0,7028	1,58	2,2482	7,4

Analyse des résultats :

Notre analyse sera, en particulier, orientée sur l'accroissement de la puissance et sur ses conséquences sur la tension E.

On constate que :

- L'augmentation de puissance n'est pas une fonction linéaire de la compensation

- La tension E décroît au fur et à mesure que ΔP (%) augmente.

Accroissement de ΔP (%)	%	0,53	1,2	0,3	0,7	2,8
Chute de tension	%	0,005	0,01	0,01	0,005	0,005

- Pour une diminution de la réactance X_T de 0,0462, on a une augmentation de 7,4%, ce qui est nettement appréciable.

- Quand on passe d'une compensation de 20% à 40%, il y correspond une augmentation de puissance de 30% et une chute de tension double.

En d'autres termes, cette chute de tension est non linéaire.

En dernier point, il est important de remarquer que pour un accroissement de ΔP de 2,8 correspondant à une augmentation de 10% de la compensation, correspond une faible chute de tension et ce, relativement aux autres cas.

- Voir fig.

Tableau récapitulatif du résultat pour une ligne
2 x 220Kv reliée à une charge.

$$\frac{X_c}{X_T} = 60, 50, 30, 20\%$$

$$\text{Avec } P_{mn} = 2,136$$

$$X_T = 0,749$$

X_L	X_T	E	ΔP (%)	P'_{mn}
5%	0,7115	1,6	8,28	2,2185
10%	0,6741	1,58	9,7	2,3439
20%	1,5992	1,5	17	2,5033
30%	0,5243	1,44	28,3	2,7413
40%	0,4414	1,35	40,6	3,004
50%	0,3745	1,29	61,2	3,445
60%	0,2996	1,23	92,21	4,1055

Analyse des résultats :

De même que pour le cas précédent, on oriente notre analyse sur l'augmentation de puissance et sur les variations de la tension E .

En ce qui concerne la puissance :

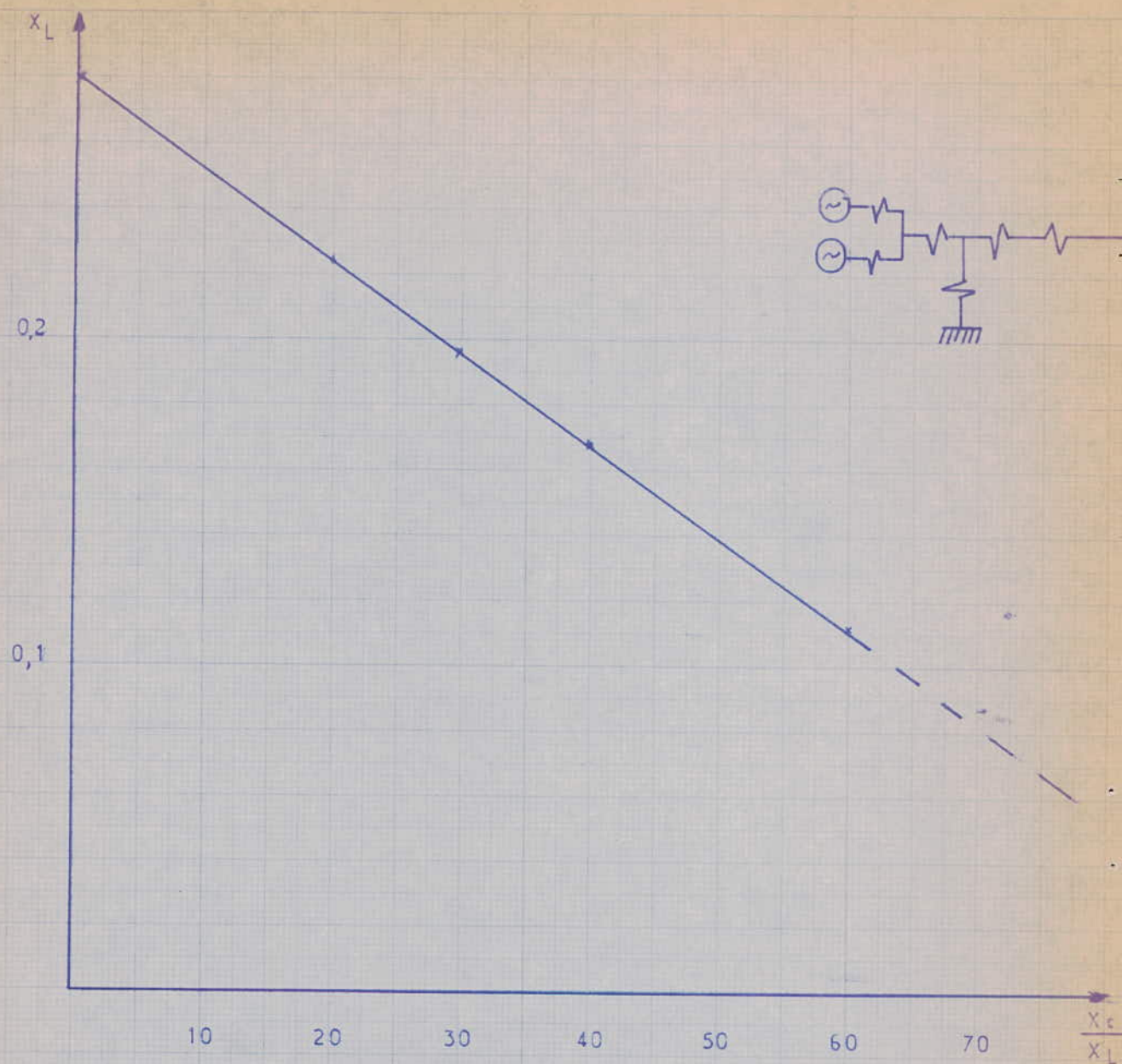
Accroissement de ΔP	1,42	7,3	11,3	24,24	20,6	31,01
Chute de tension	0,02	0,08	0,06	0,09	0,06	0,06

On constate:

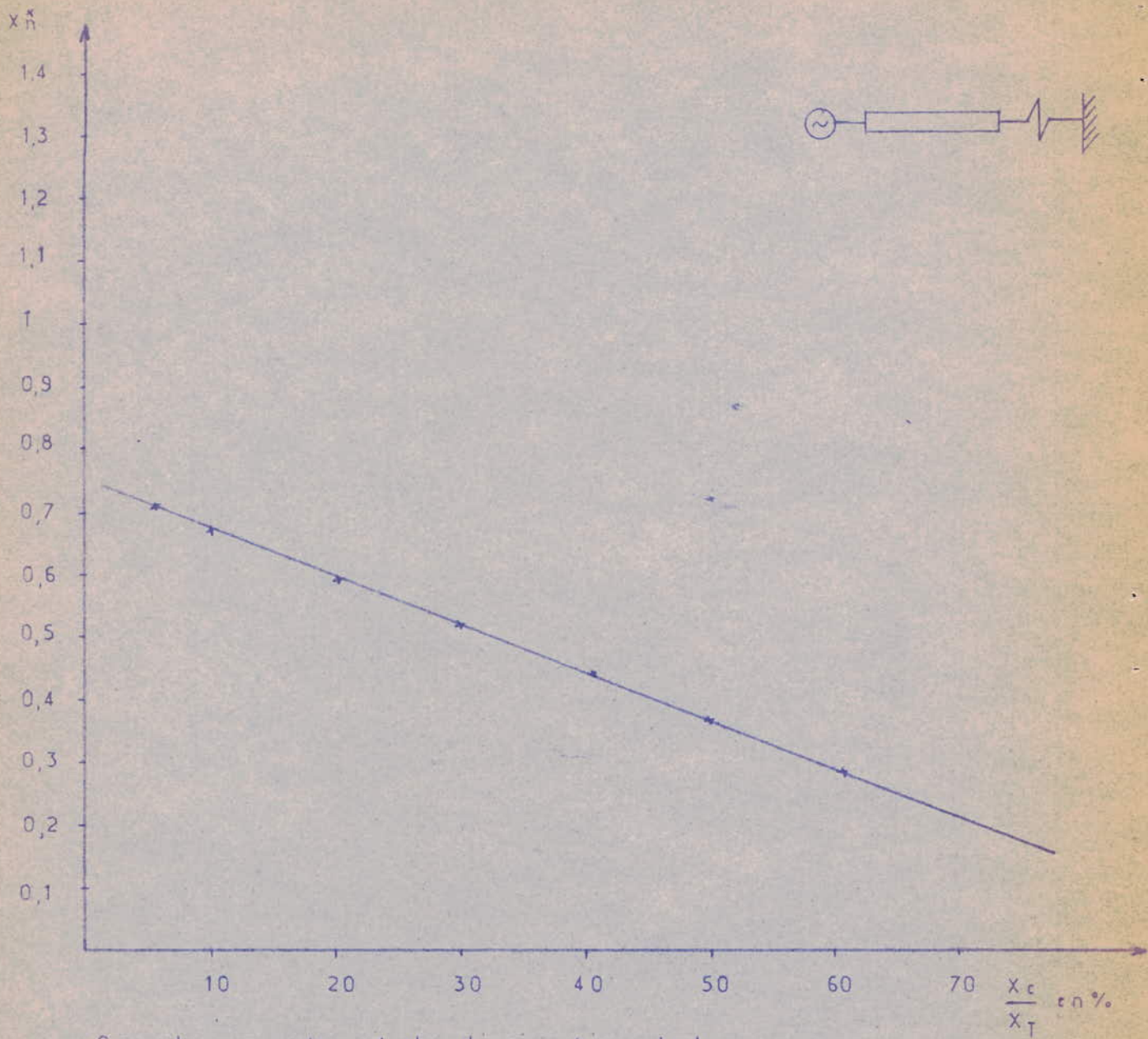
Qu' elle est une fonction linéaire de degré de compensation.

Pour ce qui est de la chute de tension, au début elle est oscillante et finit par se fixer vers la fin.

Autrement dit on peut dire qu' elle est une droite décroissante.



Réseau charge intermédiaire
 diminution de la réactance
 de liaison par insertion de
 capacité



Courbe montrant la diminution de la réactance de liaison par insertion de capacité

V- 2. Améliorations de la stabilité d' une ligne 2 x 220Kv par compensation série
pour un réseau de puissance infini (placée en antenne):

Soit le schéma le suivant :

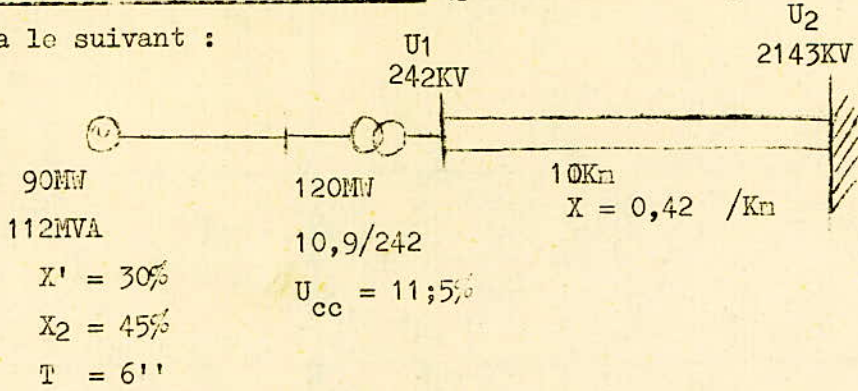


Fig. 32

Le diagramme vectoriel correspondant est :

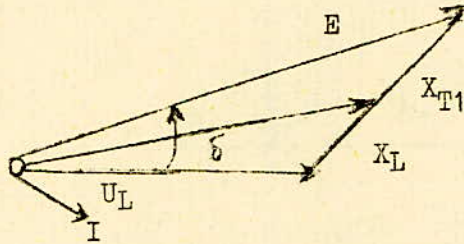


Fig. 33

Valeurs de base :

$S_b = 110\text{Mva}$
 $U_b = 203\text{Kv}$
 $X_{T1}^* = 0,152$ $X_L^* = 0,132$ $X_g^* = 0,415$
 $U_1 = \frac{242}{203} = 1,19$ $U_a = \frac{214,5}{203} = 1,05$
 $P^* = 0,443$ $Q^* = 0,332$

Schéma du réseau en régime normal (à l' aide des réactances).

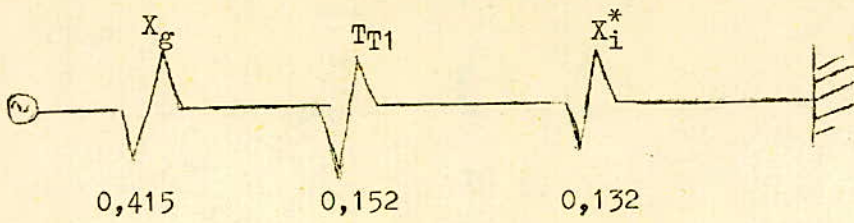


Fig.34

Calcul de la tension résultante E :

$$E = \sqrt{\left(1,19 + \frac{0,33 \cdot 0,567}{1,19}\right)^2 + \left(\frac{0,443 \cdot 0,567}{1,19}\right)^2} = 1,4$$

donc la puissance maximale (limite de stabilité).

$$P_{\max}^* = \frac{E^* \cdot U_2^*}{X_g^* + X_T^* + X_L^*} = \frac{1,4 \cdot 1,05}{0,152 + 0,132 + 0,415} = \frac{1,47}{0,7} = 2,1$$

Soit : $2,1 \times 110 = 231 \text{ Mw.}$

avec $X_T^* = 0,7$

$$1/ \frac{X_c}{X_T} = 50\%$$

$$X_c = 0,35 \quad \text{et} \quad X_T^* = 0,7 - 0,35 = 0,35$$

$$P_{\min}^* = \frac{1,47}{0,35} = 4,2$$

$$P\% = \frac{4,2 - 2,1}{2,1} \times 100 = 100\%$$

$$2/ \frac{X_c}{X_T} = 40\%$$

$$X_c = 0,28 \quad \text{et} \quad X_T^* = 0,7 - 0,28 = 0,42$$

La puissance maximale est dans ce cas $P_{\min}^* = \frac{EU_2}{X_T^*} = \frac{1,4 \times 1,05}{0,42} = 3,5$

$$\text{Donc } P\% = \frac{3,5 - 2,1}{2,1} \times 100 = 66,66\%$$

$$3/ \frac{X_c}{X_T} = 30\%$$

$$X_c = 0,21$$

Dans ce cas la réactance de liaison devient : $X_T^* = 0,7 - 0,21 = 0,49$

L'augmentation de puissance est : $P_{\min}^* = \frac{1,47}{0,49} = 3$. La pourcentage par rapport

au régime initial est : $P\% = \frac{3 - 2,1}{2,1} \times 100 = 42,85\%$

$$4/ \frac{X_c}{X_T} = 40\%$$

$$X_c = 0,14 \quad X_T^* = 0,7 - 0,14 = 0,56$$

Schéma homopolaire du réseau :



Fig. 37

La réactance homopolaire est :

$$X_0 = \frac{X_T^* + X_C^*}{X_T^* + X_C^*} = 0,1182$$

$$X_{\text{avarie}} = X_d + X_b + \frac{X_b \times X_d}{X_{cc}} = 0,567 + 0,132 + \frac{0,567 \cdot 0,132}{0,056} = 2,0347$$

L'analyse des résultats de la compensation de la ligne à l'aide des condensateurs série nous donne pour $X_c = 50\%$ de $X_{T\text{ot}} = 0,35$ un régime optimal en cas d'avarie 2PN aux jeux de barres H.T. En plaçant les condensateurs au départ de la ligne H.T il s'en suit les modifications suivantes pour ce défaut :

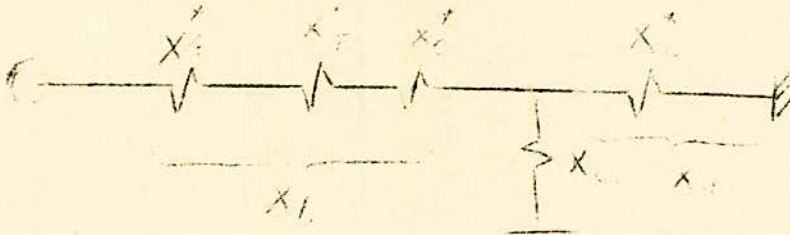


Fig. 38

La réactance avarie avant le déclenchement de la ligne est : $X_a = 0,85$

Cette valeur correspond à une puissance maximale très proche de celle du régime non compensé par des condensateurs; ce qui se traduit dans le régime post-avarie par le transport de la puissance nominale sur un seul terme. En effet pour $\frac{X_c}{X_T} = 50\%$

et $P = 100\%$, la puissance par tene est égal à la puissance nominale. L'ouverture d'une ligne n'indique pas la rupture du synchronisme mais un fonctionnement normal.

Soit :

$$P_{mn} = \frac{1,47}{0,56} = 2,625$$

$$P\% = \frac{2,625 - 2,1}{2,1} \times 100 = 24,8\%$$

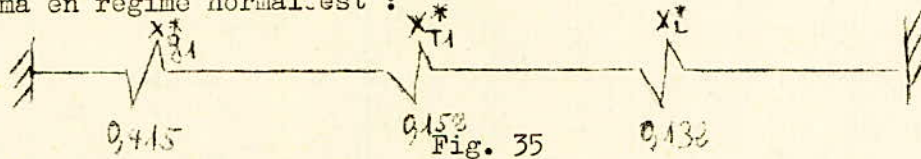
Tableau récapitulatif des résultats.

X_c/X_T	X_c	X_{T1}^*	P_{mn}	P
	0	0,7	2,1	0
20%	0,14	0,56	2,625	24,8%
30%	0,21	0,49	3	42,85%
40%	0,28	0,42	3,5	66,66%
50%	0,35	0,35	4,2	100%

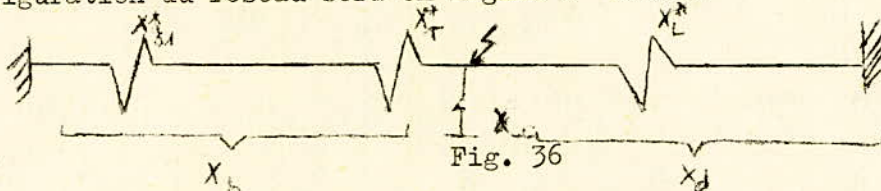
Régime d'avarie pour la ligne 2 x 220KV placé en antenne.

1/ Nous prendrons un court circuit 2PN près du jeu de base H.T ce qui est défaut très sévère.

Le schéma en régime normal est :



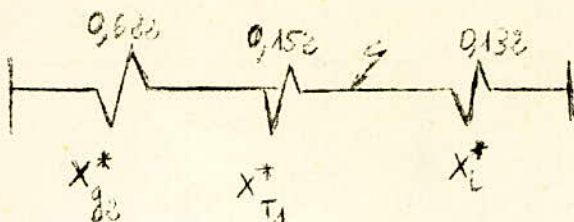
La configuration du réseau sera en régime d'avarie



$$X_{cc} = \frac{-X_0 X_2}{X_0 + X_2}$$

X_0 = réactance homopolaire du réseau
 X_2 = réactance inverse du réseau.

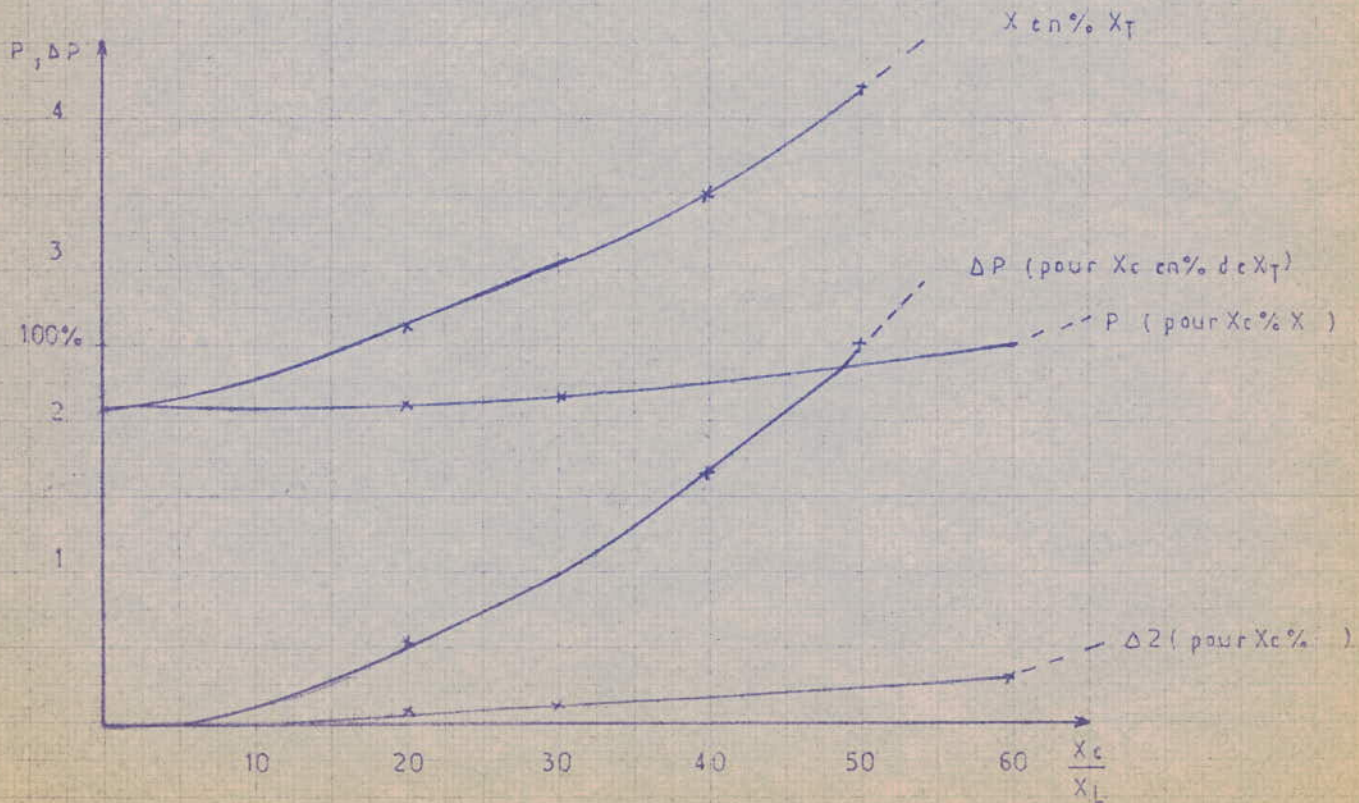
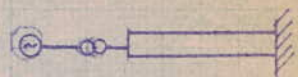
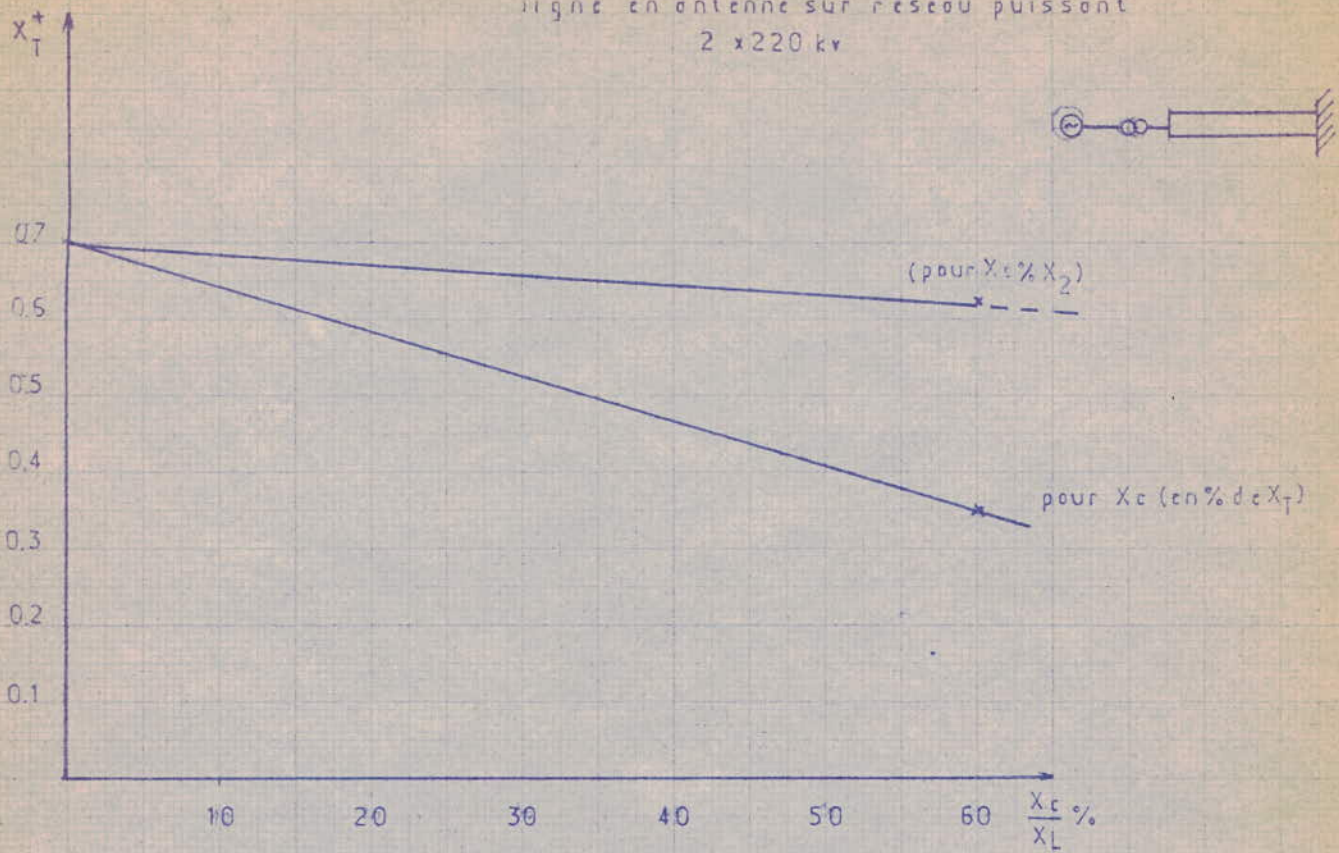
Schéma inverse du réseau



$$X_0^* = \frac{(X_{g2}^* + X_{T1}^*) X_L^*}{X_{g2}^* + X_{T1}^* + X_L^*} = 0,106$$

Fig. 36'

X_T et X_L comme parametre
 ligne en antenne sur reseau puissant
 2 x 220 kv



CALCUL PRATIQUE POUR UNE LIGNE REELLE
AVEC CHARGE INTERMEDIAIRE

Schéma du réseau.

$S = 2.60\text{MVA}$

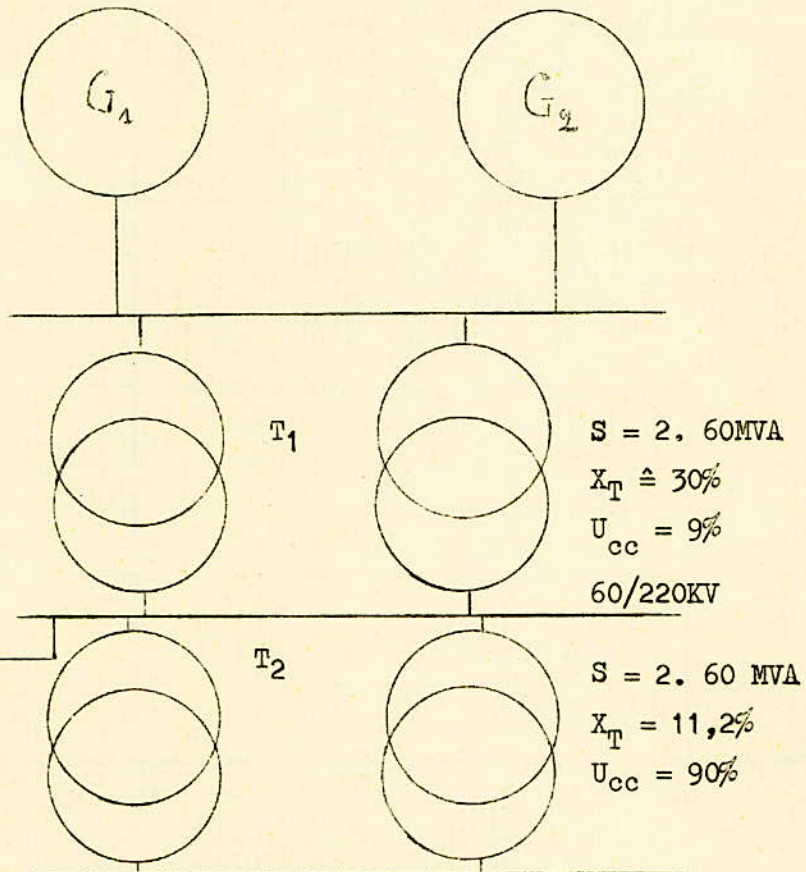
$T = 10\text{s}$

$\text{Cos}\phi = 0,8$

$X'_d = 23,5\%$

$X_2 = 45\%$

$U = 60\text{KV}$
$S = 225\text{MVA}$
$P = 180\text{MW}$
$Q = 135\text{MVAR}$
$\text{Cos}\phi = 0,8$



$S = 2.60\text{MVA}$

$X_T \hat{=} 30\%$

$U_{cc} = 9\%$

$60/220\text{KV}$

$S = 2.60\text{MVA}$

$X_T = 11,2\%$

$U_{cc} = 90\%$

$L = 350\text{Km}$

$r = 0,1045 \Omega/\text{Km}$

$X = 0,45 \Omega/\text{Km}$

104MVA

96MW

$\text{Cos}\phi = 0,8$

- FIG. 33 -

Nous pouvons simplifier le schéma en produisant les différents éléments par leur réactance en régime normal.

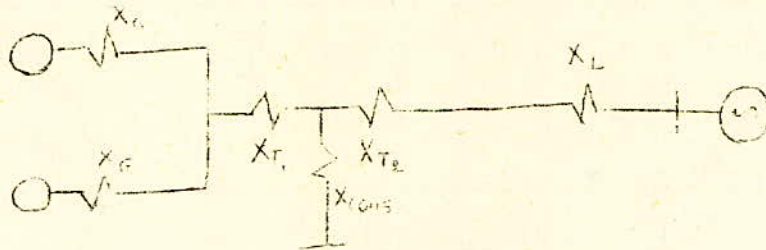


Fig. 40

1/ Calcul des grandeurs réduites et choix des valeurs de base.

Valeurs de base :

$$S_b = 105 \text{ Mva}$$

$$U_b = 234 \text{ Kv}$$

2/ Calcul des réactances des transformateurs :

$$X_{T1N} = \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

On rapporte X_{T1N} a la H.T

$$X'_{T1N} = \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{U_b^2}{U_n^2} = \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n}$$

X'_{T1N} grandeur réduite

$$X'_{t1} = \frac{X'_{c1N}}{K_b} \cdot \frac{U_a}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} \cdot \frac{S_b^2}{U_0^2}$$

$$X_{t1}^* = \frac{9}{100} \cdot \frac{10,5}{120} = 0,078$$

Pour le transformateur T2

$$X_{T2}^* = \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{S_b}{U_b} = \frac{9}{100} \cdot \left(\frac{220}{234}\right)^2 \cdot \frac{105}{120} = 0,07$$

Calcul des réactances directes des générateurs :

$$X_{c1}^* = \frac{X_d}{100} \cdot \frac{S_b}{S_n} \cdot \left(\frac{U_n}{U_n} \right) \cdot X^2$$

K état le rapport de transformation H.T/BT :

$$X_{c1}^* = \frac{33,5}{100} \cdot \frac{105}{120} \cdot \left(\frac{10}{234} \right)^2 \cdot \left(\frac{234}{10} \right)^2$$

$$X_{c1}^* = 0,293$$

Calcul des réactances des générateurs inverses :

$$X_{o2}^* = \frac{X_2}{100} \cdot \frac{S_b}{S_n} \cdot \left(\frac{U_n}{U_b} \right)^2 \cdot 2$$

$$X_{c2}^* = \frac{45}{100} \cdot \frac{105}{120} \cdot \left(\frac{10}{234} \right)^2 \cdot \left(\frac{134}{10} \right)^2$$

Réactance des lignes directes :

$$X_L^* = \frac{X_L}{X_b} = X_{0L} \cdot \frac{S_b}{U_b} = 0,43 \times 350 \cdot \frac{105}{(234)^2} = 0,28$$

$$X_L^* = 0,28$$

Réactance homopolaire de la ligne, on suppose que c' est 4 fois la réactance triphasée:

$$X_{L01}^* = 4 \times 0,093 = 0,37$$

Réactance équivalente des consommateurs :

$$X_{con}^* = \frac{U_b^2}{S_{con}} \cdot \frac{S_{b2}}{b^2} = \frac{S_b}{S_{cons}}$$

$$X_n^* = X_L^* + X_{T2}^* = 0,28 + 0,07 = 0,350$$

$$U = \frac{Q_0^* X_n^*}{U_2} = \frac{0,35 \times 0,104}{1} = 0,036$$

$$U = \frac{P_0^* X_n^*}{U_2} = \frac{0,99 \times 0,35}{1} = 0,346$$

Soit :

$$U_c = \sqrt{1 - (0,346)^2} - 0,036 = 0,9$$

Et pour retrouver E développée aux bornes des générateurs, il faut calculer la consommation P et Q aux bornes des générateurs.

$$P = S_n \cos \phi = 120 \times 0,8 = 96 \text{ KW}$$

$$P^* = \frac{P}{S_b} = \frac{96}{105} = 0,914$$


$$Q^* = P^* \operatorname{tg} \phi = 0,914 \times 0,75 = 0,68$$

$$X_n^* = X_c^* + X_{T1} = 0,393 + 0,078 = 0,471$$

Soit E développé par les générateurs

$$E = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q^* \times X_n^*}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P^* \times X_n^*}{U_c} \right)^2}$$

$$E = \sqrt{\left(0,9 + \frac{0,68 \times 0,471}{0,9} \right)^2 + \left(\frac{0,914 \times 0,471}{0,9} \right)^2} = 1,25$$

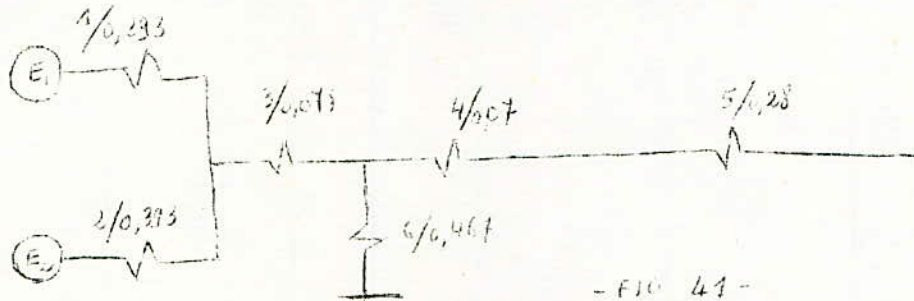
Pour les transformateurs sont couplés en  du côté 220Kv et de l'autre côté et si les points neutres des enroulements à 220Kv sont reliés directement au sol dans ce cas :

$$X_{T1}^* = X_{T01}^*$$

$$X_{T2}^* = X_{T02}^*$$

$$X_{\text{con}}^* = \frac{105}{225} = 0,467$$

Soit le schéma en régime normal par les grandeurs réduites :



Calcul de la valeur de la tension pour le sonsommateur d'Oran en grandeur réduite. En effet nous devons tenir compte de la chute de tension active et réactive et U_c est la tension en bout de ligne des consommateurs.

Schéma des tensions :



U_2 = tension aux bornes de la source et est égale à 1, nous avons la relation des triangles.

$$U_2^2 = (U_c + \Delta U)^2 + (\delta U)^2$$

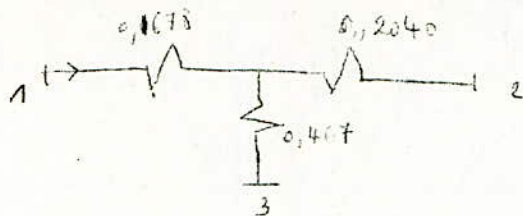
$$U_c = \sqrt{U_2^2 - \delta U^2} - \Delta V$$

Le calcul de ΔV et δU nécessite les valeurs réduites de P_0 et Q_0 des consommateurs et de $X_n^* = X_L^* + X_{T2}^*$.

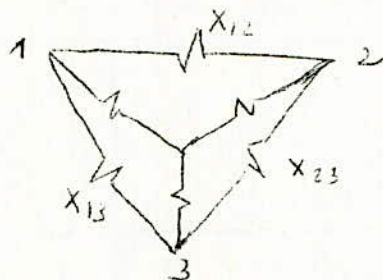
$$P_0^* = \frac{P_0}{S_b} = \frac{104}{105} = 0,99$$

$$Q_0^* = P_0^* \text{tg} \phi = \frac{P_0^* Q_0}{P_0} \text{ Soit } Q_0^* = 0,99 \times \frac{11}{104} = 0,104$$

Calcul des réactances de transfert en régime normal. Donc le schéma simplifié de la ligne est :



La transfiguration de l'étoile en triangle donné.



Avec :

$$X_{12}^* = X_1 + X_2 + \frac{X_1^* X_2^*}{X_3^*} = 0,1678 + 0,2940 + \frac{0,1678 \times 0,2940}{0,4670}$$

$$X_{12}^* = 0,5674$$

$$X_{13}^* = X_1 + X_3 + \frac{X_1^* X_3^*}{X_2^*} = 0,1678 + 0,467 + \frac{0,1678 \times 0,467}{0,2940}$$

$$X_{13}^* = 0,9013$$

$$X_{23}^* = X_2 + X_3 + \frac{X_2^* X_3^*}{X_1^*} = 0,2940 + 0,467 + \frac{0,2940 \times 0,467}{0,1678} =$$

$$X_{23}^* = 1,5792$$

Calcul de la puissance (max) transitoire par les réactances de transfert X_{12}^* et X_{13}^*

$$P_{12 \max} = \frac{1,25 \cdot 1}{X_{12}^*} = 2,2030$$

$$P_{13 \max} = \frac{1,25 \cdot 1}{X_{13}^*} = 1,38$$

En vue de compenser la ligne à l'aide de condensateurs, il faut tenir compte des facteurs suivants :

X_C ajouter algébriquement à la ligne dans un pourcentage donné n' est seulement qu' une diminution de la réactance de liaison entre l'interconnexion Alger ran.

- Le transfert de puissance en vue de charger convenablement la ligne de liaison doit être calculé en tenant compte de la consommation dans le réseau d'Oran.

Choisissons les pourcentages de $\frac{X_c}{X_L} = 20\%, 30\%, 40\%, 50\%, 60\%$, de la ligne

Soit $X_L = 0,28$

$$X_c = 20\%X_L = 0,0560$$

$$X_L^i = 0,2240$$

$$X_c = 30\%X_L = 0,0840$$

$$X_L^i = 0,1960$$

$$X_c = 40\%X_L = 0,1120$$

$$X_L^i = 0,1680$$

$$X_c = 50\%X_L = 0,1400$$

$$X_L^i = 0,1400$$

$$X_c = 60\%X_L = 0,1680$$

$$X^i = 0,1120$$

Nouvelles valeurs de E pour les différentes valeurs de $\frac{X_c}{X_L}$

1°/ Pour $\frac{X_c}{X_L} = 20\%$ dans X_c

Le calcul de la nouvelle valeur de E nécessite la connaissance des tensions aux différents échelons de tension U et U et de $X_n^* = X_{T2}^* + X_L^* = 0,2940$

$$\Delta U = \frac{Q_0 X_c^*}{U} = \frac{0,2940 \times 0,104}{1} = 0,0305$$

$$\delta U = \frac{P_0 \times X_n^*}{U} = \frac{0,99 \times 0,2940}{1} = 0,2910$$

Soit U_c tension à l'échelon du réseau consommateur est :

$$E = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q^* X_n^{i*}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P^* X_n^{i*}}{U_c} \right)^2}$$

Ou $X_n^{i*} = X_{T1} + X_g = 0,393 + 0,78 = 0,471$

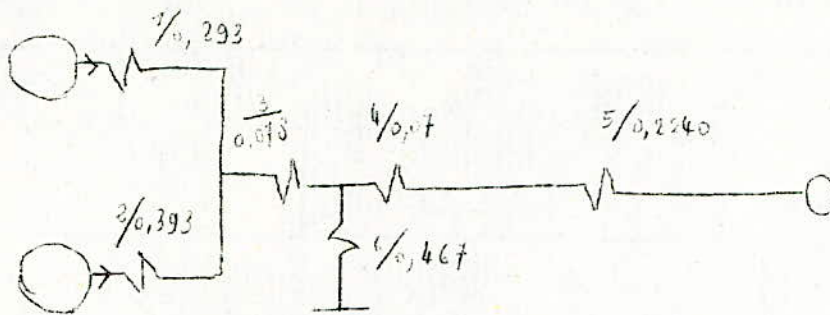
et P et Q des générateurs qui ont été calculés précédemment :

$$E = \sqrt{\left(0,93 + \frac{0,68 \times 0,471}{0,93} \right)^2 + \left(\frac{0,014 \times 0,471}{0,93} \right)^2} = 1,27$$

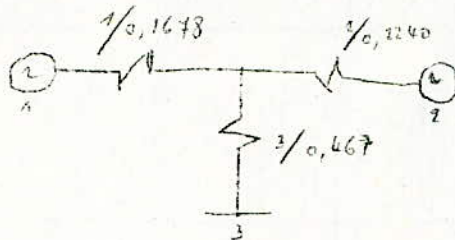
X_{Lf}^* correspond au nouveaux régime est la différence des réactances initiales et finales.

$$X_{Ll}^{i*} = X_{Li} - X_{Lf} = 0,28 - 0,0560 = 0,2240$$

Le schéma finale est modifié et la configuration est la suivante résultant de la mise en série de capacité.



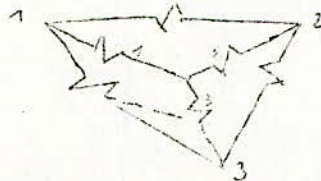
La réduction des éléments en série en une seule réactance donne la configuration finale.



$$X_T^* = X_1^* // X_2^* = \frac{X_1^* X_2^*}{X_1^* + X_2^*} = 0,1677$$

$$X_T^* + X_3^* = X_1^*$$

La transfiguration de l'étoile en triangle nous donne le schéma suivant :



Le nouveau régime aura, pour réactances les valeurs suivantes :

$$X_{12}^* = X_1^* + X_2^* + \frac{X_1^* X_2^*}{X_3^*} = 0,1678 + 0,2940 + \frac{0,1678 \cdot 0,2940}{0,1467}$$

$$X_{12}^* = 0,5673$$

$$X_{13}^* = X_1^* + X_3^* + \frac{X_1^* X_3^*}{X_2^*} = 0,1678 + 0,467 + \frac{0,1678 + 0,467}{0,2940}$$

$$X_{13}^* = 0,9011$$

$$X_{23}^* = X_2^* + X_3^* + \frac{X_2^* X_3^*}{X_1^*} = 0,2940 + 0,467 + \frac{0,2940 \cdot 0,467}{0,1678}$$

$$X_{23}^* = 1,5722$$

Calcul des nouvelles puissances transitoires par X_{12}^* et X_{23}^*

$$P_{\max}^* = \frac{E^*}{X_{12}} = \frac{1,27 \cdot 1}{0,5673} = 2,2386$$

$$P_{13\max}^* = \frac{E \cdot 0}{X_{12}} = \frac{1,27}{0,941} = 1,400$$

$$P_{23}^* = \frac{1,27}{1,5722} = 0,8078$$

Soit la différence entre le régime normal et le nouveau régime compensé pour les points 1 et 2.

$$\% \Delta P_{12} = \frac{2,2346 - 2,203}{2,202} \times 100 = 1,62\%$$

$$\% \Delta P_{13} = \frac{1,36 - 1,2906}{1,38} \times 100 = 6,5\%$$

$$\% \Delta P_{23} = \frac{0,8078 - 0,79}{0,79} \times 100 = 9,52\%$$

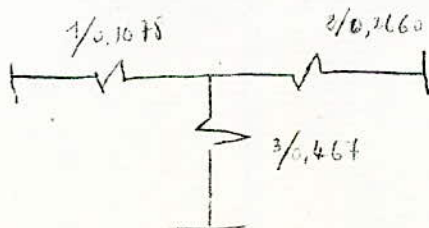
$\% \Delta P_{13}$ c' est le rapport de puissance sur les points de connexion 1,2 donc P sur 1. 3 est négative.

$$X_c = 30\% \text{ de } X_L \quad \text{soit } X_c = 0,0840$$

Les valeurs de la réactance de la ligne sompensée X_L :

$$X_L^* = X_{Li}^* - X_c^* = 0,28 - 0,840 = 0,1960$$

La configuration avec la nouvelle réactance est la suivante :



Calcul de la nouvelle valeur de U échelon consommateur :

$$X_n^* = 0,2660$$

$$\Delta U = \frac{Q_0^* X_n^*}{U_2} = \frac{0,266 \times 0,104}{1} = 0,0276$$

$$\delta U = \frac{P_0^* X_n}{U} = \frac{0,266 \times 0,99}{1} = 0,2237$$

$$U_c = \sqrt{U_2^2 - \delta U^2 - \Delta U}$$

$$U_c = \sqrt{1 - (0,2237)^2 - 0,0276} = 0,947$$

$$\text{Soit : } E = \sqrt{(0,947 + \frac{0,478 \cdot 0,68}{0,947})^2 + (\frac{0,014 \times 0,47}{0,947})^2} = 1,284$$

Transfiguration du schéma en triangle pour avoir les réactances de transfert :

$$X_{12}^* = X_1^* + X_2^* + \frac{X_1^* X_2^*}{X_3} = 0,1678 + 0,2660 + \frac{0,1678 \cdot 0,2660}{0,467}$$

$$X_{12}^* = 0,529$$

$$X_{13}^* = X_1^* + X_3^* + \frac{X_1^* X_3^*}{X_2^*} = 0,1678 + 0,467 + \frac{0,1678 \cdot 0,467}{0,2660}$$

$$X_{13}^* = 0,9291$$

$$X_{23}^* = X_2^* + X_3^* + \frac{X_2^* X_3^*}{X_1^*} = 0,2660 + 0,467 + \frac{0,2660 \cdot 0,467}{0,1678}$$

$$X_{23}^* = 1,4733$$

Calcul de la puissance avec condensateur

$$P_{12\max} = \frac{1,284}{0,529} = 2,4272$$

$$P_{13\max} = \frac{1,284}{0,9291} = 1,400$$

$$P_{23}^* = \frac{1,284}{1,473} = 0,8715$$

Evaluation en % de l'augmentation de puissance :

$$P_{12}^* \% = \frac{2,420 - 2,2030}{2,2030} \times 100 = 10,17\%$$

$$P_{13}^* \% = \frac{1,4 - 1,38}{1,38} \times 100 = 1,45\%$$

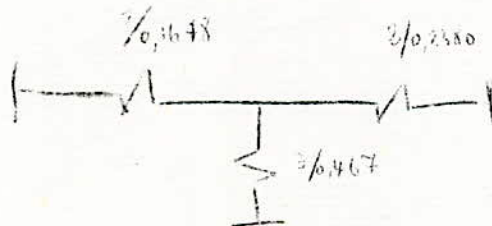
$$P_{23}^* \% = \frac{0,8705 - 0,7915}{0,7915} \times 100 = 10,13\%$$

Compensation à 40% de X_L par des condensateurs série :

Les valeurs de la réactance de la ligne compensé X_L

$$X_L^* = X_{Li}^* - X_i^* = 0,28 - 0,1120 = 0,1680$$

La configuration du réseau avec les nouvelles réactances est comme les autres cas précédemment décrits :



Le calcul de la valeur U correspond au consommateur est la suivante en tenant compte toujours de la variation de $X_n^* = 0,2380$

$$\Delta U = \frac{Q_0^* X_n^*}{U} = \frac{0,2380 \cdot 0,104}{1} = 0,0247$$

$$\delta U = \frac{P_0^* X_n^*}{U} = \frac{0,2380 \cdot 0,99}{1} = 0,2356$$

$$U_c = \sqrt{U^2 - \delta U^2} - \Delta U = \sqrt{1 - (0,2356)^2} - 0,0247 = 0,9650$$

Valeur de E aux bornes des générateurs

$$E = \sqrt{\left(0,9650 + \frac{0,471 \cdot 0,68}{0,9650}\right)^2 + \left(\frac{0,014 \cdot 0,47}{0,965}\right)^2} = 1,284$$

Transfiguration du schéma en triangle pour avoir des réactances de transfert :

$$X_{12}^* = X_1^* + X_2^* + \frac{X_1^* X_2^*}{X_3^*} = 0,1678 + 0,1380 + \frac{0,1678 \cdot 0,2380}{0,467}$$

$$X_{12}^* = 0,49$$

$$X_{13}^* = X_1^* + X_3^* + \frac{X_1^* X_3^*}{X_2^*} = 0,1678 + 0,467 + \frac{0,1678 \cdot 0,467}{0,2380} =$$

$$X_{13}^* = X_2^* + X_3^* + \frac{X_2^* X_3^*}{X_1^*} = 0,1678 + 0,467 + \frac{0,1678 \cdot 0,467}{0,1678} =$$

$$X_{13}^* = 0,9347$$

$$X_{23}^* = X_2^* + X_3^* + \frac{X_2^* X_3^*}{X_1^*} = 0,2380 + 0,467 + \frac{0,2380 \cdot 0,467}{0,1678} =$$

$$X_{23}^* = 1,3671$$

Calcul de la puissance (avec compensation) transitée dans les branches 1. 2 et 1. 3

$$P_{12\max}^* = \frac{1,284}{0,49} = 2,6200$$

$$P_{13\max}^* = \frac{1,3323}{0,9637} = 1,3323$$

$$P_{23\max}^* = \frac{1,284}{1,3671} = 0,9392$$

Evaluation en % de l'augmentation de puissance

$$P_{12\%} = \frac{2,62 - 2,2030}{2,2030} \times 100 = 18,92\%$$

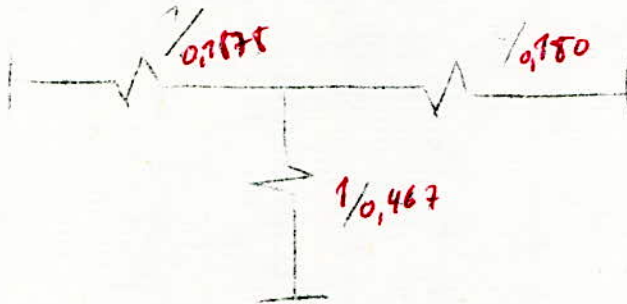
$$P_{13}\% = \frac{1,383 - 0,9392}{1,38} \times 100 = 31,94\%$$

$$P_{23}\% = \frac{0,93 - 0,7915}{0,7915} \times 100 = 17,72\%$$

Compensation à 50% de X_L , $X_C = 0,1400$

$$X_L = 0,28 - 0,1400 = 0,14$$

Schéma :



$$X_n^* = 0,1820$$

$$U = \frac{Q_0 X_n^*}{U} = 0,1820 \cdot 0,104 = 0,0189$$

$$U = \frac{P_0 X_n^*}{U} = 0,1820 \times 0,99 = 0,1802$$

$$U_c = \sqrt{U^2 - \Delta U^2} = \Delta U = \sqrt{1 - (0,1802)^2} = 0,0189 = 0,97$$

$$E = \sqrt{\left(0,9 + \frac{0,47 \times 0,68}{0,97}\right)^2 + \left(\frac{0,014 \times 0,47}{0,97}\right)^2} = 1,29$$

$$X_{21}^* = X_1^* + X_2^* + \frac{X_1^* X_2^*}{X_3^*} = 0,1678 + 0,1820 + \frac{0,1678 \cdot 0,1820}{0,467}$$

$$X_{21}^* = 0,4139$$

$$X_{13}^* = X_1^* + X_3^* + \frac{X_1^* X_3^*}{X_2^*} = 0,1678 + 0,467 + \frac{0,1678 \cdot 0,467}{0,1820}$$

$$X_{13}^* = 1,1367$$

$$X_{23}^* = X_2^* + X_3^* + \frac{X_2 X_3}{X_1^*} = 0,1820 + 0,467 + \frac{0,1820 \cdot 0,467}{0,1678} =$$

$$X_{23}^* = 1,1560$$

$$P_{12\max} = \frac{1,29}{0,4139} = 3,1167$$

$$P_{23\max}^* = \frac{1,29}{1,1160} = 1,156$$

$$P_{31\max}^* = \frac{1,29}{1,1367} = 1,1349$$

$$P_{12\%} = \frac{3,1167 - 2,203}{2,203} \times 100 = 41,48\%$$

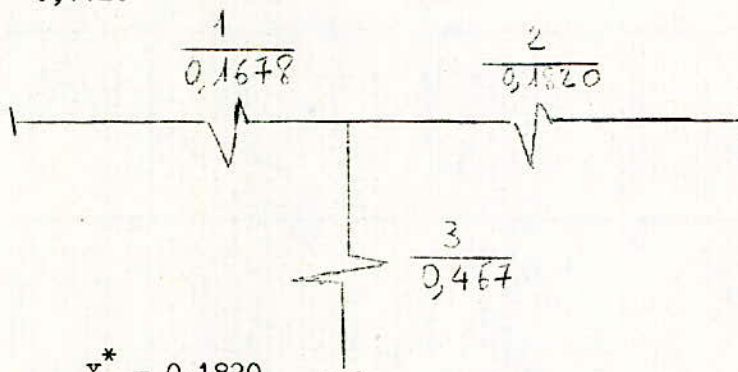
$$P_{31\%} = \frac{1,38 - 1,1349}{1,38} \times 100 = 17,76\%$$

$$P_{23\%} = \frac{1,156 - 0,79}{0,79} \times 100 = 46,28\%$$

Compensation à 60% de X_L $X_C = 0,1680$

La valeur de $X_L = 0,1120$

Schéma



$$X_n^* = 0,1820$$

$$U = \frac{Q_0 X_n^*}{U} = 0,1820 \cdot 0,104 = 0,0189$$

$$U = \frac{P_0^* X_n^*}{U} = 0,1820 \cdot 0,99 = 0,1801$$

$$U_c = \sqrt{U^2 - U^2} \quad U = \sqrt{1 - (0,1801)^2} = \sqrt{0,9676} = 0,975$$

$$E = \sqrt{0,975 + \frac{0,47 \times 0,68}{0,975}} + \left(\frac{0,014 \times 0,47}{0,975} \right)^2 = 1,303$$

$$X_{12}^* = X_1^* + X_2^* + \frac{X_1^* X_2^*}{X_3} = 0,168 + 0,18 + \frac{0,168 \cdot 0,98}{0,98} = 0,4126$$

$$X_{13}^* = X_1^* + X_3^* + \frac{X_1^* X_3^*}{X_2} = 0,168 + 0,467 + \frac{0,168 \cdot 0,467}{0,18} = 1,08$$

$$X_{23}^* = X_2 + X_3 + \frac{X_2 X_3}{X_1} = 0,467 + 0,18 + \frac{0,467 \cdot 0,18}{0,168} = 1,1474$$

donc $P_{12\max}^* = \frac{1,303}{0,4126} = 3,1580$

$$P_{13\max}^* = \frac{1,303}{1,08} = 1,2064$$

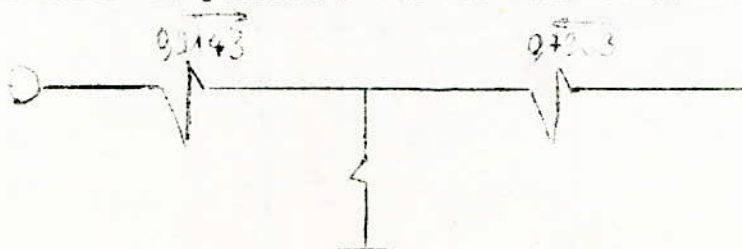
$$P_{23\max}^* = \frac{1,303}{0,1474} = 0,8840$$

Soit $P_{12}^{\%} = \frac{3,1580 - 2,2030}{2,2030} \times 100 = 43,34\%$

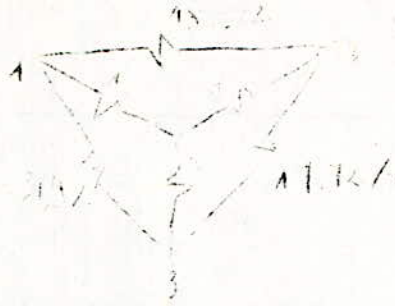
$$P_{13}^{\%} = \frac{1,38 - 1,2064}{1,38} \times 100 = 12,57\%$$

$$P_{23}^{\%} = \frac{0,8840 - 0,7915}{0,7915} \times 100 = 11,69\%$$

Régime normal : Transfert de puissance dans les différentes branches :

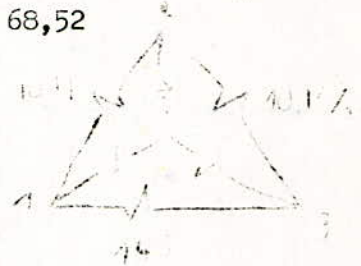


Comportement du transport sur la ligne avec compensation à 40% de X_L

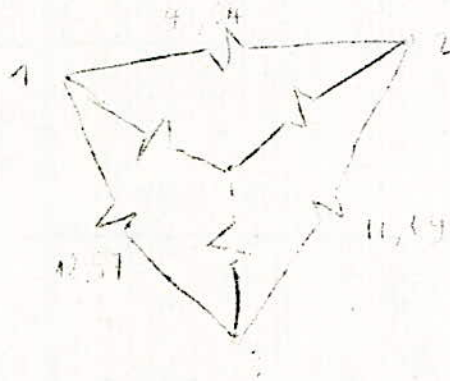


$$\Delta P_L = \frac{18,9 \times 17,72}{18,92 + 17,72 + 2 + 31,9} = \frac{89,2}{68,52} = 5\%$$

- à 30% de X_L



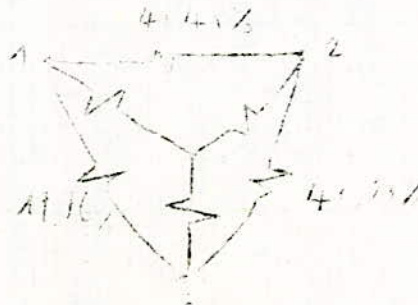
Pour $X_C = 60\%$ de X_L



Compensation de puissance sur la ligne.

$$\Delta P_L = \frac{11,69 \times 43,34}{12,57 + 11,69 + 43,34} = \frac{507,2}{67,60} = 7,2\% \equiv 12\%$$

Pour $X_C = 50\%$ de X_L



$$\Delta P_L = \frac{41,48 \times 46,28}{41,48 + 17,76 + 46,28} = 18,2\% \equiv 27,42\%$$

Nous pouvons dresser un tableau récapitulatif des différents résultats :

X_C/X_L	X_C^*	X_L^*	X_{12}^*	X_{13}^*	X_{23}^*	P_{12}^*	P_{13}^*	P_{32}^*	P_L	P
	0	0,28	0,5674	0,9013	1,5792	2,2030	1,38	0,7916	0	0,7924
20%	0,0560	0,2240	0,5673	0,9011	1,5722	2,2386	1,4	0,8078	2%	0,808
30%	0,840	0,1960	0,529	0,9291	1,4733	2,4272	1,4	0,8715	4,7%	0,829
40%	0,1120	0,1680	0,49	0,9637	1,3671	2,6020	1,3323	0,9392	5%	0,832
50%	0,14	0,14	0,4139	1,1367	1,1560	3,1167	1,1349	1,156	12%	0,887
60%	0,1680	0,1120	0,4126	1,08	1,1474	3,1580	1,3069	43,34	27%	1,006

Analyse des résultats du tableau récapitulatif :

D'après les résultats de ce tableau

on peut faire des remarques suivantes :

- Plus la compensation est grande, mieux la ligne est chargée .
- Pour une compensation de 60%, on remarque que P_L est appréciable relativement à une compensation de 50% et ce pour une très faible diminution de la réactance
- On peut faire la même remarque en ce qui concerne les puissances transitées.

AMELIORATION DE LA STABILITE PAR CONDENSATEURS SERIE

DANS LES RESEAUX A H.T

L'emploi des condensateurs série commence à se développer sur les réseaux d'énergie à H.T. La première installation a été mise en service en Suède, sur une ligne 220Kv. Le but poursuivi est d'effectuer une diminution de la réactance pour mieux charger la ligne, et d'améliorer en même temps sa stabilité. Cette réduction est obtenue par condensateurs série branchés vers le milieu de la ligne

Etude théorique :

On prendra comme exemple une ligne (2ternes) branchée en antenne sur un réseau.

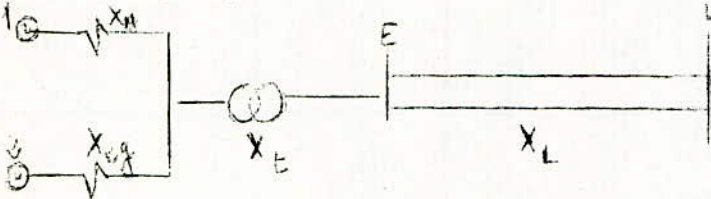


Fig : ligne 2. 220Kv branché en antenne sur un réseau.

Nous définissons l'expression de la puissance à la ligne par

$$P = \frac{EV}{X_T} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta$$

E = la tension au jeu de barres H.T

V = la tension aux bornes du réseau

δ = angle de transport

$$X_T = X_g + X_T + X_L$$

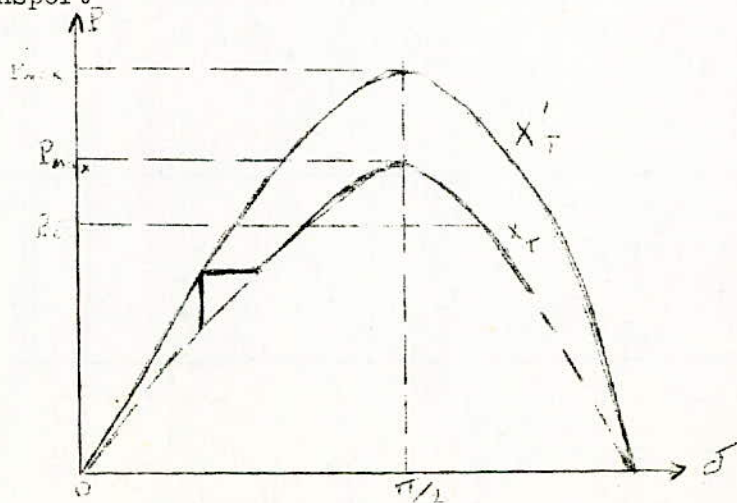


Fig.: Augmentation de la puissance en fonction de l'angle de transport.

En introduisant des capacités branchées en série sur la ligne et si possible vers le milieu, la réactance totale devient:

$$X_T = X_g + X_b + X_L - X_c \quad \text{où } X_c = \text{réactance des condensateurs}$$

de cela, il s'en suit une augmentation de la puissance maximale (voir fig.)
l'expression de la puissance maximale :

$$P'_{\max} = \frac{EV}{X'_T} \quad \frac{EV}{X_T}$$

Ainsi pour un angle de transport fixé, nous pouvons dire que la diminution de X_T favorise le maintien de la stabilité et augmente en même temps la puissance transitée par la ligne.

Cette étude a fait l'objet d'une première application numérique dont on a tiré des renseignements très intéressants.

Parmi les moyens pour améliorer la stabilité, nous avons constaté que le condensateur série occupe une position importante, étant donné qu'il permet de produire une augmentation de la stabilité du transport surtout pour les lignes longues. Ainsi le problème de stabilité peut changer de caractère puisqu'elle n'imposera plus aucune limite en ce qui concerne le pouvoir du transport du réseau. Ceci grâce à l'emploi des machines indérochables et des condensateurs série.

En ce qui concerne le condensateur série, à son faible coût et à son pouvoir très marqué d'augmentation du pouvoir de transport, s'ajoute le fait qu'il peut constituer un moyen de comparaison économique lorsqu'on estime d'autres procédés de compensation.

Pour le réseau suédois, les qualités de condensateurs série ont fait l'objet d'études très poussées lesquelles ont montré que la compensation à 40% sur une ligne à 400KV à double et triple conducteurs augmente respectivement le pouvoir de transport de 400MW à 600MW environ et d'environ 450MW à 700MW environ.

Remarque :

Généralement, quand on cite les diverses méthodes d'amélioration de la stabilité, on ne parle pas des avantages apportés par le maintien du niveau élevé de la tension sur le réseau. Néanmoins ce paramètre a une grande importance tant sur la stabilité que sur l'économie d'exploitation de ce réseau.

Quant aux moyens classiques telle que la régulation de l'excitation de vitesse, ils peuvent toujours contribuer à l'amélioration des régulateurs.

CONCLUSION

On peut, sur des réseaux simples ne demandant pas un grand temps de calcul, isoler et analyser des phénomènes et des influences de certains paramètres qui se retrouvent mélangés dans les réseaux réels, radiaux et maillés. Cependant la multiplicité des paramètres est telle qu'on ne peut pas prétendre arriver rapidement à une étude complète de la stabilité dynamique des réseaux, on a pu déjà dégager de cette étude les idées suivantes :

1°/ A l'avenir les moyens mathématiques vont contribuer pour beaucoup à la connaissance des évolutions des paramètres en stabilité dynamique des réseaux, l'adaptation de la méthode de LIAPOUNOV à des réseaux réels est insuffisante à mettre en lumière les différents aspects du problème, toutefois il se posera le problème de la capacité des ordinateurs existants pour emmagasiner les nombreux détails, c'est pour cela que la structure influe de beaucoup sur la stabilité dynamique. Nous avons constaté qu'un réseau sollicité à un défaut quelconque et selon sa durée voit ses machines les plus éloignées du point de défaut indifférentes tandis que les machines les plus approuvées sont celles qui sont près du point critique. Donc pour le calcul, nous pouvons toujours réduire le nombre de machines et les regrouper de façon à n'étudier que le comportement dynamique de celles approuvées par le défaut avec un grand ensemble de détails.

2°/ La machine indérochable essayera à son tour à ce que des problèmes de stabilité dynamique pour les pays en voie de développement, en effet par son aspect avantageux de se maintenir au synchronisme malgré les perturbations dangereuses, elle permet une économie de construction de la ligne.

Mais pour les réseaux plus élaborés, il est intéressant d'améliorer la stabilité grâce aux condensateurs série dont nous avons montré l'utilité par deux exemples numériques largement commentés qui nous montrent qu'il est préférable d'utiliser des condensateurs série pour des réseaux qui ne sont pas fortement maillés et que l'idéal est d'utiliser cette méthode pour des lignes placées en antenne sur des réseaux.

B I B L I O G R A P H I E

- Polycop de cours 4ème A de Mr. le Professeur Docteur Ingénieur Georges CIRTINA
- Cigé : * 23ème session 1970
Amélioration de la stabilité dans les réseaux d'énergie interconnectés.
- * 24ème session Tome I 1972
Fonctionnement anormaux dans les régimes anormaux des grands alternateurs à vitesse de rotation petite
- * 24ème session Tome II 1972
Application d'un critère général de stabilité transitoire des réseaux.
- * Session de 1966 ; rapport 330
considérations sur les marges de stabilité avec référence particulière à l'effet des caractéristiques de l'alternateur et du système d'excitation et de régulation
- * Session de 1964 ; rapport 330
Influence de certains facteurs sur la stabilité
- Pelissier : Etudes des réseaux électriques TE
- Kahen : Machines tournantes à courant alternatif
- R. B. Boverly : Tomme 61
Méthode de calcul et modèle pour l'étude de la stabilité
- R.G.E. : * Décembre 1969 n° 12
Influence de la structure et de certaines grandeurs caractéristiques d'un réseau sur son comportement dynamique.
- * Janvier 1966 Tome 75 n° 1
Procédé de stabilisation de la machine synchrone en régime transitoire
- * Mai 1971 Tome 80 n° 5
Quelques questions concernant la stabilité dynamique des réseaux.