

5/74

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

red

PROJET DE FIN D'ETUDES

G. Electrique



Etude de la stabilité dynamique

d'une ligne haute-tension: 220 kv



Proposé et dirigé par Monsieur CIRTINA

Etudié et présenté par H. CHOUBANE

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

---

ETUDE DE LA STABILITE DYNAMIQUE

D'UNE LIGNE HAUTE - TENSION : 220 KV

---

PROPOSE ET DIRIGE PAR MONSIEUR CIRTINA  
ETUDIE ET PRESENTE PAR H. CHOUBANE.

ANNEE UNIVERSITAIRE 1973 -1974

QU'IL ME SOIT PERMIS D'EXPRIMER MES REMERCIEMENTS ET  
MA PROFONDE GRATITUDE A MONSIEUR CIRTINA QUI A PROPOSE CE  
SUJET ET M'A AIDE DANS L'ELABORATION DE CE PROJET.

JE PROFITE PAR LA MEME OCCASION POUR EXPRIMER MA  
RECONNAISSANCE A TOUS LES PROFESSEURS QUI ONT CONTRUBUE A  
MA FORMATION.

## 1. Introduction.

### 1. Position du Problème.

La capacité de transport d'une ligne est liée souvent à la stabilité. Pour faire face à la demande sans cesse croissante d'énergie, il est nécessaire d'installer des centrales à grande échelle dans les réseaux modernes.

Les lieux de production sont de plus en plus éloignés des centres de consommation.

D'autre part, de nombreuses centrales sont établies collectivement et leur production est très souvent transportée par les lignes de transport à longue distance.

Dans les réseaux de distribution, il n'existe que peu des génératrices reliées directement au réseau et elles sont de puissance faible. De plus, la perte de synchronisme entre l'une d'elles et les réseaux se traduit sans inconvénients par leur séparation instantanée.

Donc le problème de la stabilité ne se pose que dans le réseau de transport, où la perte de synchronisme entraîne la coupure du réseau en plusieurs sous réseaux et où nécessairement l'équilibre production - consommation n'est plus assuré, ce qui entraîne des arrêts de fourniture. La remise en parallèle de ces sous réseaux, pour la reprise de service est toujours longue, car elle ne peut se faire qu'entre des sous réseaux que l'on est arrivé à resynchroniser, et sur chacun desquels, on a pu au préalable, limiter la consommation aux possibilités de production. La perte de synchronisme peut se produire de deux façons différentes:

- Par augmentation lente de l'angle de phase des machines fortement chargées, jusqu'à ce que cet angle dépasse une certaine valeur limite: c'est le problème de la stabilité statique.

- Par un à-coup dans le réseau dû soit à une coupure brutale d'une charge importante ou d'un groupe générateur puissant, soit plus souvent à un défaut sur une ligne et au déclenchement de cette ligne, se traduisant par une variation brutale d'une impédance de transfert: c'est le problème de la stabilité dynamique.

1. 2. Dans ce projet, après avoir étudié le problème de la stabilité dynamique en général, nous avons appliqué l'étude pour la ligne H.T. 220 KV Alger - Oran.

En ce qui concerne cette ligne, SONEGAS dispose d'un projet de réalisation, de manière à renforcer la liaison de la partie Ouest du pays avec le système Algérien.

De plus, SONEGAS est entraîné de remplacer toutes les lignes de 150 KV, par des lignes de 220 KV, de manière à augmenter la capacité de transport. Comme les premières lignes de 220 KV auront des longueurs assez grandes ( 200 Km) sûrement le problème de stabilité dynamique interviendra dans leur exploitation. Surtout en cette première période de développement du pays où la réserve de production est faible.

D'ailleurs, les conclusions de l'étude pratique montrent que pour les premières lignes de 220 KV, des avaries assez courantes tels que les courts - circuits risquent de provoquer une perte de synchronisme. Les conséquences d'une perte de synchronisme sont assez graves si nous tenons compte du grand nombre de manoeuvres nécessaires pour rétablir le fonctionnement normal, donc pertes économiques dues à la non fourniture d'énergie électrique.

Nous avons considéré comme défauts les courts - circuits entre deux phases (2P), deux phases - terre (2PN), phase - terre (PN) pour se rendre compte de la situation dans laquelle on se trouve dans ces différents cas.

À la fin, nous avons présenté quelques conclusions concernant notre étude et l'amélioration de la stabilité.

## 2. Stabilité Statique.

Pour voir la différence entre la stabilité statique et la stabilité dynamique, et pour mieux comprendre cette dernière, on donnera quelques notions sur la stabilité statique.

### 2. 1. Groupe éloigné raccodé à un réseau puissant.

D'habitude, un réseau puissant est caractérisé par:  
 V: le vecteur tension au point d'arrivée de la tension avec le groupe; par hypothèse  $V = \text{constante}$  (ou  $P = P^*$ ).

En ce qui concerne la liaison entre une centrale (ou Groupe) éloignée et ce réseau, on remplacera l'impédance de la ligne H.T. avec une approximation suffisante par son inductance,

$$Z_1 = X_1.$$

Chaque état du groupe générateur est défini à partir de :

$Z_i = X_i$  : l'impédance interne du groupe supposée égale à son inductance.

$E$  : le vecteur force électromotrice de la machine.

$U$  : vecteur tension aux bornes de la machine.

$\theta_i$  : déphasage interne entre les vecteurs  $E$  et  $U$ .

$\theta_1$  : déphasage entre les vecteurs  $U$  et  $V$ , c'est à dire les tensions aux deux extrémités de la liaison.

$X = X_i + X_1$  : réactance totale (interne + de liaison).

$\theta = \theta_i + \theta_1$  : déphasage entre  $E$  et  $V$ .

La puissance active débitée par la machine est :

$$P_e = \frac{E.V}{X} \sin \theta \quad \text{Si elle fonctionne à excitation constante.}$$

$$P_u = \frac{U.V}{X_1} \sin \theta_1 \quad \text{Si elle fonctionne à tension aux bornes Cte.}$$

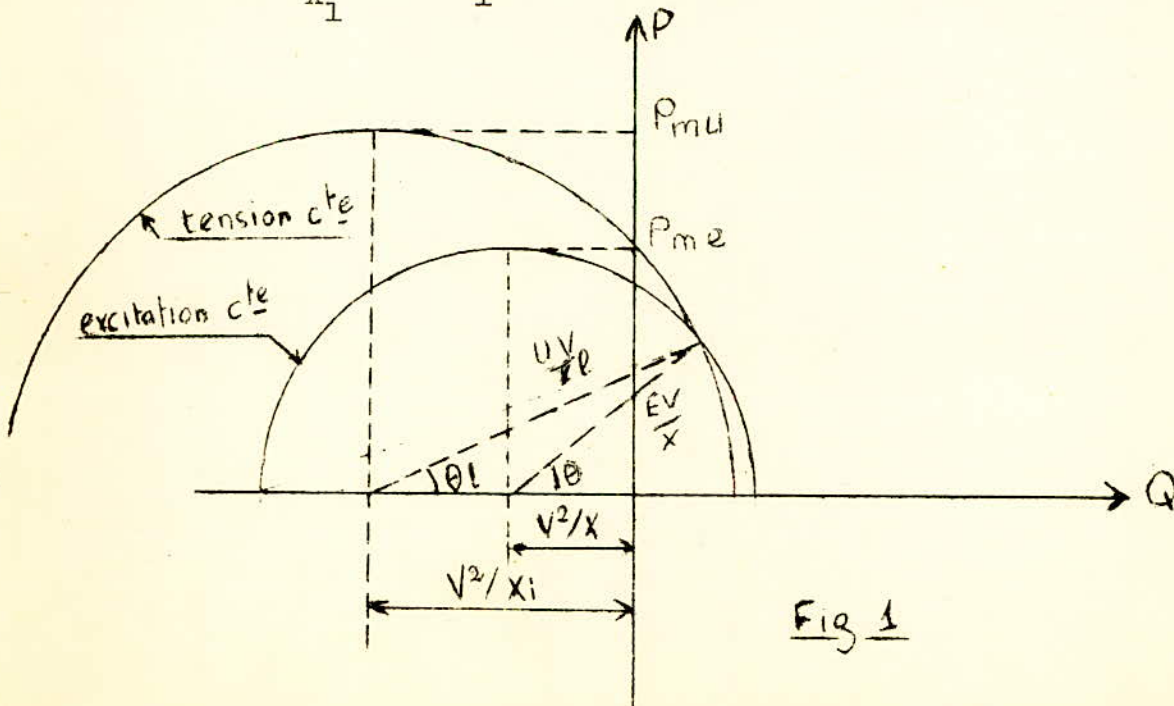


Fig 1

Diagramme de fonctionnement d'une machine synchrone reliée à un réseau puissant (dont la tension  $V = Cte$ ).

$X_l$  = impédance de liaison

$X_i$  = impédance interne de la machine

$$X = X_i + X_l .$$

Si l'on ouvre les vannes du groupe d'une très petite quantité supplémentaire, celui-ci va communiquer à la machine synchrone un couple accru, lequel commence par accélérer la machine. Cette accélération augmente le déphasage interne, ce qui fait varier la puissance électrique fournie au réseau. Deux cas peuvent se produire;

1.er cas: si cette variation de  $\theta$  est une augmentation, elle finira par absorber l'augmentation du couple mécanique et la machine reprendra sa vitesse initiale, lors de l'équilibre couple mécanique - couple électrique.

2ème cas: si cette variation est une diminution, l'écart entre les couples électrique et mécanique se creuse et sous l'effet de cet écart la machine accélère.

Le fonctionnement de la génératrice synchrone n'est donc stable que sur la moitié droite des demi-cercles.

On constate également que la marche à tension aux bornes  $U$  régulée permet d'atteindre une puissance maximale  $P_{mu}$  supérieure à la puissance  $P_{me}$  possible dans la marche à excitation constante.

En cas de légère variation de l'ouverture des vannes du groupe le nouvel équilibre sera trouvé d'autant plus rapidement que les variations de  $\theta$  entraînent des variations de puissance électrique appelée grande.

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{E.V}{X} \cos\theta \quad \text{dans le régime à excitation constante}$$

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{U.V}{X_l} \cos\theta_l \quad \text{dans le régime à tension aux bornes régulée.}$$

Cette quantité est appelée : Puissance synchronisante ( $P_s$ ).

Cette puissance synchronisante ou encore élastique est la puissance qui intervient pour rétablir le synchronisme compfomis. On peut dire que les chances de maintien du synchronisme sont d'autant plus grandes que la puissance

synchronisante,  $P_s$ , est plus grande.

On distingue deux limites de stabilité statique d'une machine synchrone:

- 1) La limite statique naturelle, qui suppose un fonctionnement à courant inducteur constant.
- 2) La limite statique artificielle, un peu plus grande que la précédente, qui suppose l'intervention d'un régulateur de tension ( $U = \text{Cte}$ ).

À la puissance synchronisante mise en jeu pour un déplacement angulaire  $\delta$  correspond un couple synchronisant sur le rotor de la machine motrice;

$$C_s = \frac{E \cdot V}{X} \frac{\cos \theta}{W}$$

$C_s$  est un couple proportionnel à l'écart et qui rappelle le rotor vers sa position d'équilibre relatif.

## 2. 1. 2. Groupes répartis dans un réseau maille

Dans les réseaux, la répartition des groupes se fait toujours par "paquets", certaines régions étant plus propices à l'installation de centrales électriques, thermiques ou hydraulique. Le synchronisme reste très bon à l'intérieur de chacun de ces "paquets", car les déphasages entre les tensions aux bornes sont faibles. Par contre, entre deux régions, le déphasage de la tension entre les extrémités d'une liaison peut devenir important. Les liaisons longues risquent d'être peu stables. Le contrôle des déphasages entre les tensions aux différents noeuds du réseau devient alors très utile pour sa bonne exploitation, car il permet d'intervenir dès qu'ils dépassent des valeurs admises comme des limites de sécurité.



### 3. Stabilité Dynamique

#### 3. 1. Conditions risquant la perte de synchronisme

Bien que nous cherchions à avoir toujours un régime normal, optimal, dans le fonctionnement du système, il arrive souvent des avaries plus ou moins graves, qui mettent en cause le problème de la stabilité. Les principales perturbations susceptibles d'entraîner des pertes de synchronisme sont:

- 1) Les brusques augmentations d'impédance d'un réseau de transport.
- 2) Les courts - circuits entre une phase et la terre ou entre phases.
- 3) Les sur charges brusques, telles que celles qui résultent de reports de puissance sur une partie du réseau en cas d'ouverture d'une maille.
- 4) Une succession de ces différents phénomènes.

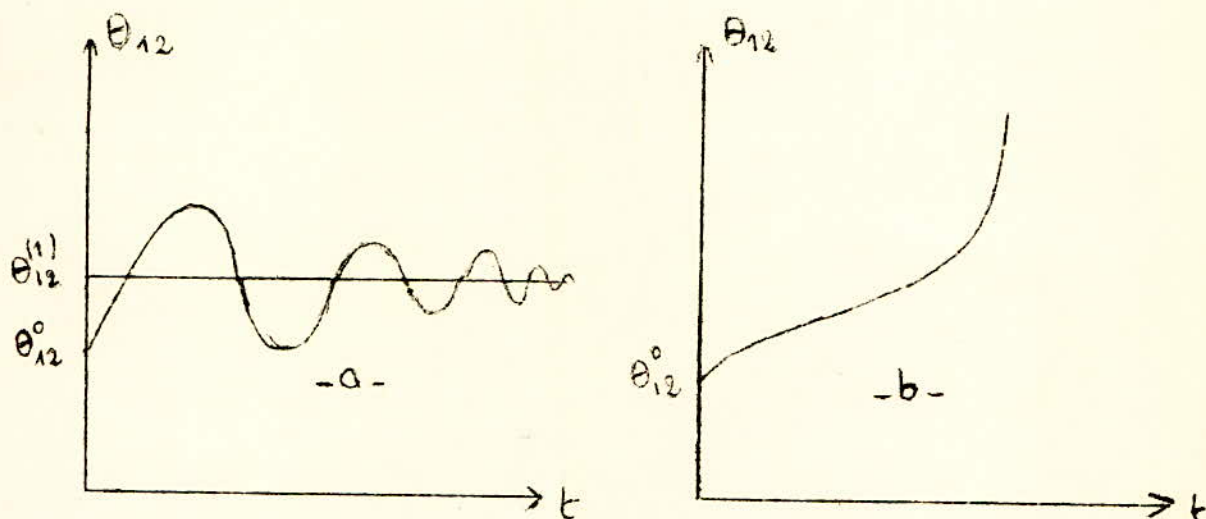
On constate qu'en cas d'un régime troublé, pour une perturbation d'un type et d'une durée déterminée, l'instabilité risque d'autant plus de se produire que le réseau transport une puissance plus élevée.

Concernant la probabilité des différents types de c.c. on on donne ci - dessous un tableau

Nature Court Circuit	Synbole	Probabilité
Triphasé	3p (H)	5%
Biphasé à la Terre	2p n	20%
Biphasé	2p	10%
	pn	65%

### 3. 2. Hypothèses et données générales

La recherche des limites de stabilité dynamique est un problème de mouvement relatif. Il s'agit donc de reconnaître, lorsque le réseau transportant des puissances données est siège d'une perturbation, si les mouvements relatifs des différents alternateurs reliés à ce réseau sont oscillatoires amortis (Fig 2a) ou révolutif (Fig 2b).



Mouvement oscillatoire amort

Mouvement révolutif

Fig 2

Dans le cas où les mouvements sont oscillatoires amortis, les machines reviennent à la vitesse de synchronisme et la stabilité est maintenue (Fig 2a). Par contre lorsque les mouvements sont révolutifs (Fig 2.b), certaines machines s'en écartent, soit qu'elles accélèrent quand elles sont déchargées, soit qu'elles ralentissent si elles sont surchargées, et la rupture du synchronisme se produit.

On suppose que toutes les machines sont bipolaires et nous rapporterons leur mouvement à celui d'un axe OX tournant avec une vitesse angulaire égale à la pulsation normale  $\omega$  du réseau.

L'équation du mouvement relatif introduit la valeur des couples qui s'exercent sur les parties tournantes. Il y a lieu de les exprimer, non en fonction des tensions et des courants qui varient rapidement au moment d'une perturbation, mais en fonction de grandeurs continues à variations relativement lentes, telles que certains flux des machines ou les f.e.m. qui leur correspondent. Les seules quantités à variations brusques sont alors les impédances du réseau, dont on déterminera les valeurs aux différents stades de la perturbation.

### 3. 2. 1 Axe et flux liés au rotor d'un alternateur.

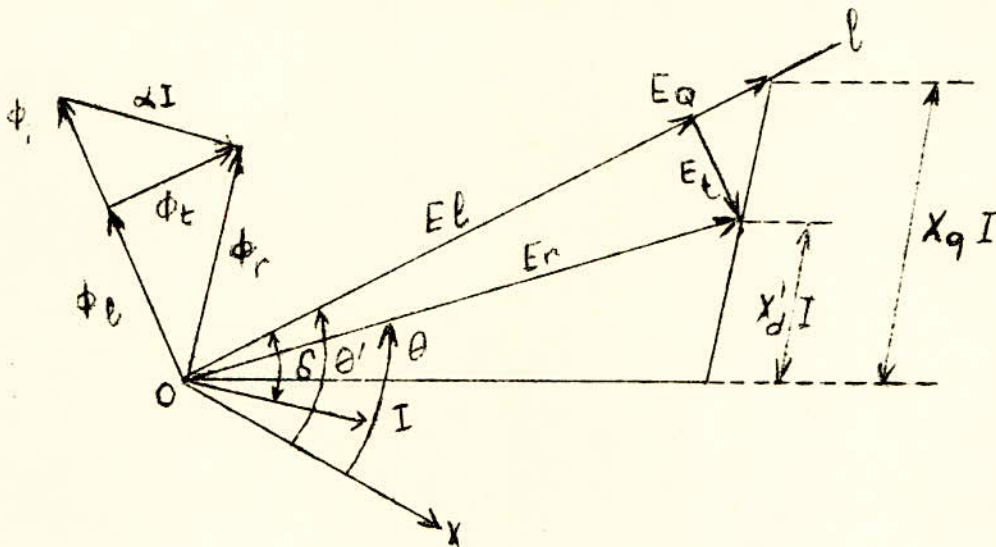


Fig 3

Soit un alternateur non saturé débitant un courant  $I$  sous une tension  $V$ . Soient également  $\phi_1$  le flux que produit l'inducteur seul,  $\alpha I$  le flux de l'induit; le flux résultant  $\phi_r$  se décompose en flux longitudinal  $\phi_l$  et en flux transversal  $\phi_t$ , à ces flux correspondent respectivement la f.e.m. longitudinale  $E_l$  la f.e.m transversal  $E_t$  et la f.e.m résultante  $E_r$ .

Au début, d'une perturbation, le flux  $\phi_l$  embrassant l'induit, l'inducteur et l'amortisseur ne peut subir de variation brusque car, les courants induits dans les deux derniers circuits fermés sur eux mêmes s'y opposeraient. Donc la f.e.m  $E_l$  qui lui correspond garde une amplitude Cte.

Dans le cas d'une machine à entrefer constant (turbo-alternateur)

on peut admettre que l'amplitude du flux transversal  $\phi_t$  donc celle de  $E_t$  ne peuvent pas varier rapidement. Cela est dû aux courants qui seraient induits dans la masse polaire.

Donc on peut considérer que le flux résultant  $\phi_r$  et la f.e.m. résultante  $E_r$  varient lentement et d'une manière continue et conservent des positions fixes par rapport au rotor de l'alternateur.

On définira donc la position de celui-ci soit l'angle  $\theta$  représentant la position de  $E_r$  par rapport à un axe origine OX ou par l'angle  $\theta$  repérant la position de  $E_1$  par rapport à OX. Si l'alternateur est à pôles saillants et dépourvu d'amortisseur, le flux  $\phi_t$  varié très vite et on ne devra considérer comme constante et liée au rotor que la f.e.m. longitudinale  $E_1$ . C'est ainsi que dans la majorité des problèmes de stabilité on considère des machines à entrefer constant bien amorties de sorte que la position du rotor d'une machine synchrone est déterminée par l'angle  $\theta$  que fait la f.e.m.  $E_r$  avec un axe OX tournant à la vitesse du synchronisme. On prend comme référence la f.e.m.  $E_r$  qui conserve pendant les premiers instant de la perturbation la valeur  $\bar{E}_r = \bar{V}_0 + j X_d \bar{I}_0$  qu'elle avait tout juste avant.  $V_0$  et  $I_0$  étant les tensions et les courants en cet instant et  $X_d$  la reactance transitoire suivant l'axe longitudinal de l'alternateur.

### 3. 2. 2. Constante d'Accelération

On utilise assez souvent dans les calculs de stabilité dynamique la constante d'accélération  $M$  qui remplace le moment d'inertie de l'alternateur et du moteur qui entraîne. L'avantage d'utiliser la constante d'accélération est le suivant:

La constante d'accélération varié très peu et a sensiblement la même valeur pour des alternateurs de même type quelle que soit leur puissance. Par contre le moment d'inertie peuvent varier considérablement pour deux inductances de même type, mais de vitesses différents.

$$M = \frac{I \left( \frac{2\pi}{60} \right)^2}{\omega^2} \quad (6)$$

$I$  : Moment d'inertie

$P$  : Nombre de paires de pôles de la machine

$P_n$  : Puissance nominale active de la machine

La constante  $M$  étant le quotient d'une énergie par une puissance s'exprime en seconde. On l'appelle parfois temps de lancer. Le temps  $M$  représente le temps nécessaire au groupe pour passer de l'arrêt à la vitesse normale  $\frac{\omega}{P}$ , lorsqu'on lui applique le couple moteur constant qui correspond à la puissance normale  $P_n$ .

Ce couple est  $C_m = \frac{P_n}{\omega}$  ; soit  $\frac{\omega}{P}$  la vitesse instantanée, l'équation du mouvement est :

$$I \frac{d\frac{\omega}{P}}{dt} = \frac{P_n}{\frac{\omega}{P}} \quad \text{ou} \quad \omega I \frac{d\omega}{P^2} = P_n \cdot dt$$

$$\Rightarrow t = \frac{I \cdot \frac{\omega^2}{P^2}}{P_n} = M$$

### 3.2.3 Machine synchroné équivalente à plusieurs autres.

Il est possible de remplacer plusieurs machines synchrones par une machine unique si :

- 1) Elles sont séparées les unes des autres par des impédances faibles. C'est le cas des alternateurs d'une même usine qui débitent sur un même jeu de barres
- 2) Une avarie telle qu'un court circuit n'affecte pas directement l'une d'elles de manière à admettre qu'elles ne présentent pas de mouvement relatif important les unes par rapport aux autres. Prenons l'exemple de deux machines synchrones fonctionnant en parallèle, sur le même jeu de barres dont la tension est  $V$ . (fig 4).

Soient  $\bar{E}_1, \bar{E}_2, X_1, X_2, P_{n1}, P_{n2}, \bar{I}_1, \bar{I}_2, M_1, M_2$  les f.e.m. resultantes, les reactances transitoires, les courants et les constantes d'acceleration des ces machines

les caracteristiques correspondantes de la machine equivalentes

Pour les machines 1 et 2 on peut écrire:

$$\begin{aligned}\bar{E}_1 &= \bar{V} + j X_1 \bar{I}_1 \\ \bar{E}_2 &= \bar{V} + j X_2 \bar{I}_2 \\ \bar{I} &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2\end{aligned}$$

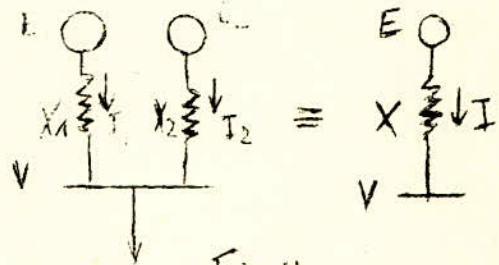


Fig 4

Pour la machine equivalente:

$$\bar{E} = \bar{V} + j X \bar{I}$$

d'où  $\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1 - \bar{V}}{j X_1}$  ;  $\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2 - \bar{V}}{j X_2}$

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_1}{j X_1} + \frac{\bar{E}_2}{j X_2} - \bar{V} \left( \frac{1}{j X_1} + \frac{1}{j X_2} \right)$$

En comparant cette dernière relation à l'équation  $\bar{E} = \bar{V} + j X \bar{I}$ , on en déduit  $X = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2}$  la reactance resultante est obtenue par la mise en parallèle des reactances des deux machines.

D'autre part la puissance active nominale de la machine équivalente est la somme des puissances actives normales.

$$\text{donc : } P_n = P_{n1} + P_{n2}$$

### 3. 2 . 4 Schémas directes équivalents à des déséquilibres.

Lorsque les tensions et les courants sont déséquilibrés, la puissance a pour expression  $3( V_d I_d + V_1 I_1 + V_0 I_0 )$ , les  $V$  étant les tensions étoilées et les  $I$  les courants par phase de chaque système. On les f.e.m correspondant au courant d'excitation sont toujours équilibrées et leurs composantes inverses et homoplaires sont nulles . Donc  $P = 3 E I_d$ . Pour calculer les puissances fournies par les machines en régime déséquilibré, il suffit de connaître les composantes directes des courants débités par ces machines . On considère donc le schéma direct. Ainsi en cas de court - circuit, le schéma

directe se déduit des schéma équilibré sans court - circuit en branchant sur celui - ci, au point M où se produit l'avarié, entre chaque phase et la terre fig 5 une impédance  $Z_e$  égale à:

$\bar{Z}_0 + \bar{Z}_i$  en cas de court - circuit entre une phase et la terre

$\bar{Z}$  " " " " deux phases.

$\frac{Z_0 Z_i}{Z_0 + Z_i}$  " " " " deux phases et la terre.

0 " " " " Triphasé.

$Z_0$  et  $Z_i$  étant les impédances monopolaire et inverse resultantes au point M.

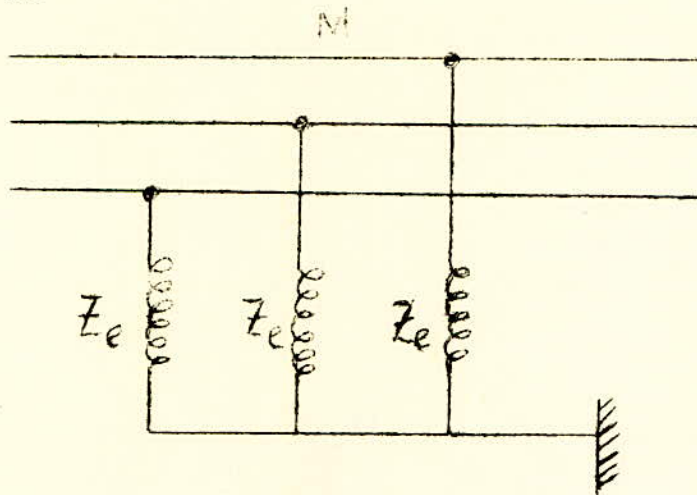


Fig 5

### 3. 2. 5 Puissance interne d'une machine synchrone.

On exprimera cette puissance en fonction

1) du flux ou de la f.e.m liés au rotor de l'alternateur qui conservent des valeurs partiquement constantes au début d'une perturbation.

2) d'un certain nombre d'impédances dont les valeurs changent à chaque stade de cette perturbation.

Nous nous plaçons dans le cas où les machines sont à entrefer constant. Dans chacune des usines A, B, C, (fig 6), on remplace les différents alternateurs en un seul groupe et on assimile les récepteurs a-synchrones et les récepteurs passifs à des impédances.

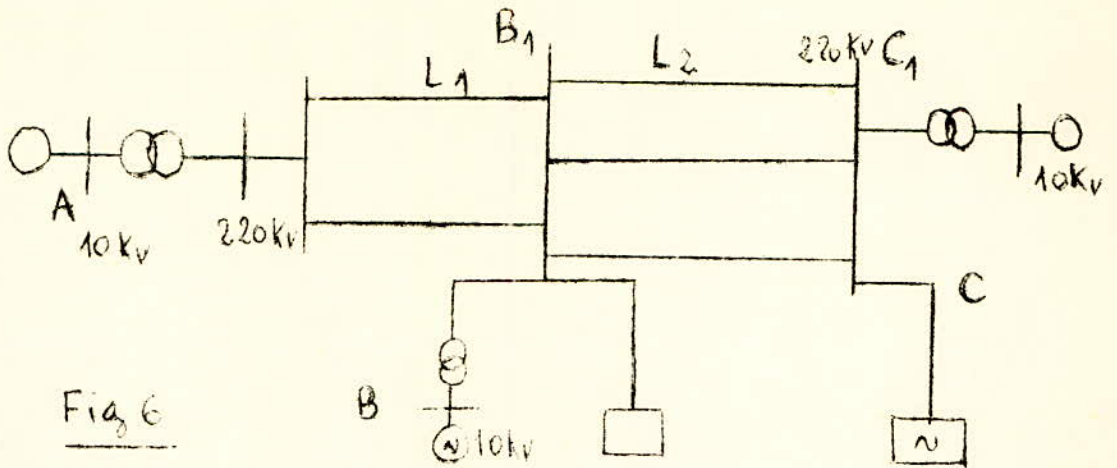


Fig 6

On considère d'abord l'état avant l'avarié. Soient les f.e.m resultantes,  $\bar{E}_1, \bar{E}_2$  et  $\bar{E}_3$ , les courants débités par chaque machine,  $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$  et  $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_3, \bar{Z}_4$  les impédances des liaisons qui comprennent la reactance transtoire des alter-  
-ateurs et l'impédance des lignes et transformateurs.

$Z_B$  et  $Z_C$  representent les charges (fig 7). Pour calculer la puissance interne on appliquera le théoïeme de superposition ce qui suppose que le reseau est linéaire et que les effets de saturation dans les machines sont négligés.

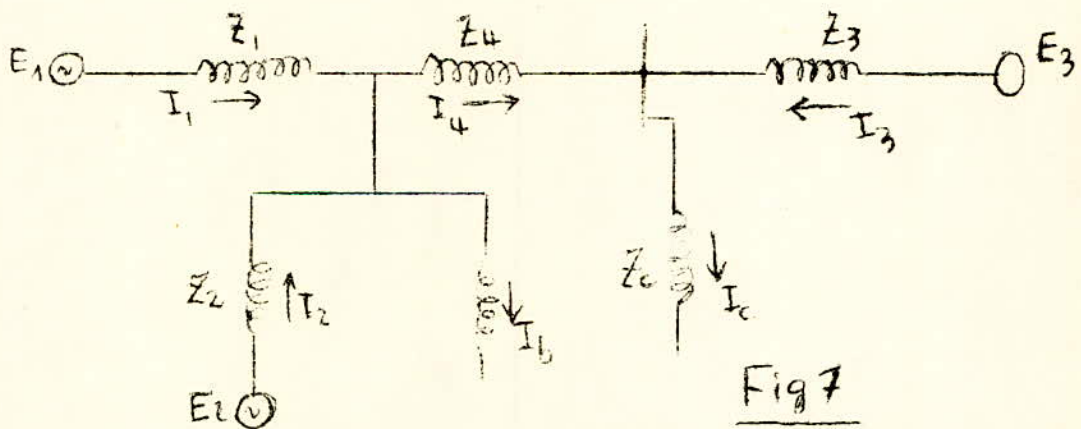
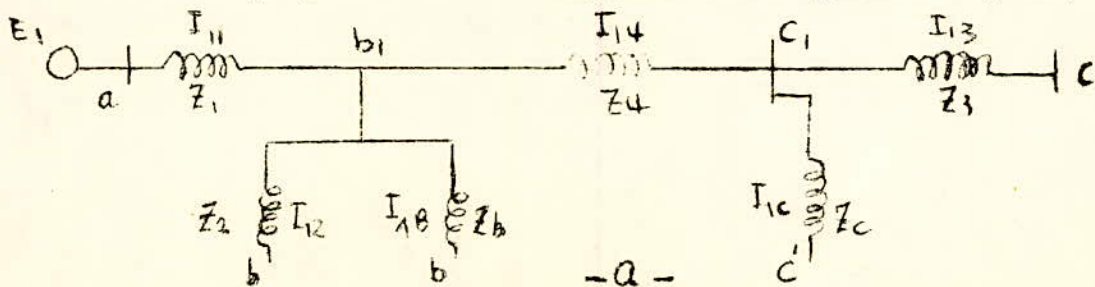


Fig 7

On va établir des régimes dans lesquels n'interviendra qu'une seule f.e.m avec la totalité des impédances. On pourra avoir donc trois régimes. Le régime de fig 7 peut - être considéré comme la superposition des régimes des figures 8a, 8b, 8c.





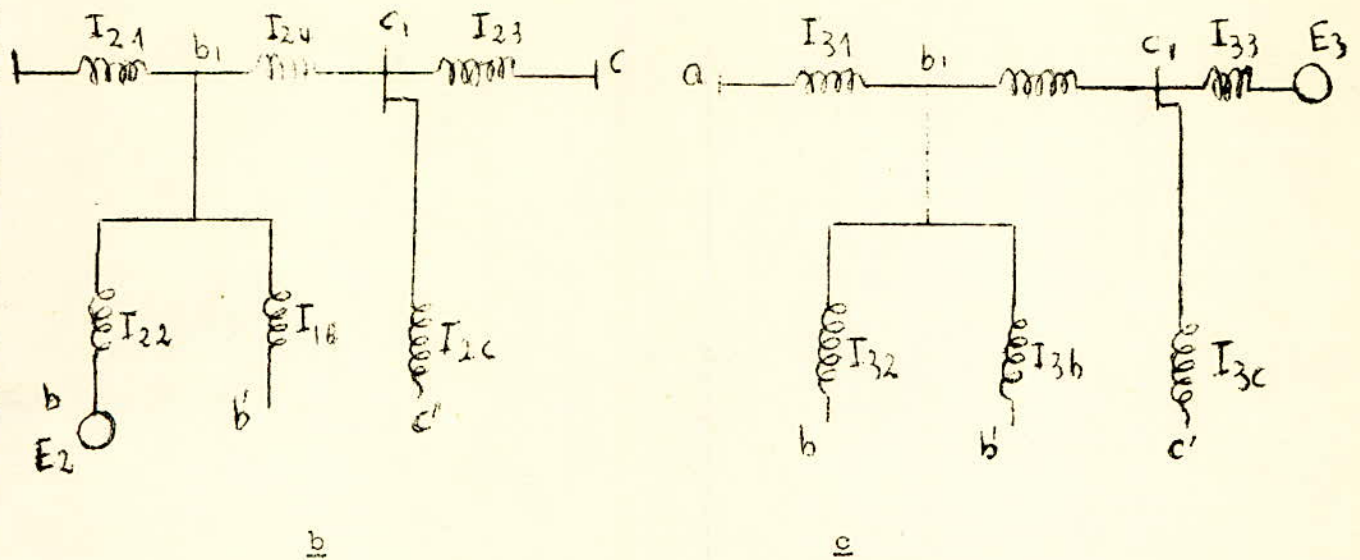


fig 8

Courants débités par chaque machine:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{11} - \bar{I}_{21} - \bar{I}_{31}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{22} - \bar{I}_{12} - \bar{I}_{32}$$

$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{33} - \bar{I}_{13} - \bar{I}_{23}$$

Or, chacun des schémas de cette figure renferme une seule f.e.m donc:

$$\bar{I}_{11} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_{11}} ; \quad \bar{I}_{12} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_{12}} ; \quad \bar{I}_{13} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_{13}}$$

$$\bar{I}_{21} = \frac{\bar{E}_2}{\bar{Z}_{21}} ; \quad \bar{I}_{22} = \frac{\bar{E}_2}{\bar{Z}_{22}} ; \quad \bar{I}_{23} = \frac{\bar{E}_2}{\bar{Z}_{23}}$$

$$\bar{I}_{31} = \frac{\bar{E}_3}{\bar{Z}_{31}} ; \quad \bar{I}_{32} = \frac{\bar{E}_3}{\bar{Z}_{32}} ; \quad \bar{I}_{33} = \frac{\bar{E}_3}{\bar{Z}_{33}}$$

$\bar{Z}_{11}$ ,  $\bar{Z}_{22}$ , et  $\bar{Z}_{33}$  sont les impédances resultantes vues respectivement des points a, b, c. Les autres impédances  $\bar{Z}_{12}$ ,  $\bar{Z}_{13}$ ,  $\bar{Z}_{21}$ ,  $\bar{Z}_{23}$ , et  $\bar{Z}_{32}$  sont les impédances de transfert entre les machines 1 et 2, 1 et 3, 2 et 3

Remarque:

$$\text{R9} \quad \bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{21} ; \quad \bar{Z}_{31} = \bar{Z}_{13} ; \quad \bar{Z}_{23} = \bar{Z}_{32}$$

Soient  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  les arguments des f.e.m  $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_3$  rapportés à une origine quelconque, on a :

$$\bar{E}_1 = E_1 \angle \theta_1, \quad \bar{E}_2 = E_2 \angle \theta_2, \quad \bar{E}_3 = E_3 \angle \theta_3$$

d'autre part:  $\bar{Z}_{ij} = Z_{ij} \angle \psi_{ij} = \bar{Z}_{ji}$

d'où :

$$\bar{I}_1 = \frac{E_1 \angle \theta_1 - \psi_{11}}{Z_{11}} - \frac{E_2 \angle \theta_2 - \psi_{12}}{Z_{12}} - \frac{E_3 \angle \theta_3 - \psi_{13}}{Z_{13}}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{E_2 \angle \theta_2 - \psi_{21}}{Z_{12}} + \frac{E_2 \angle \theta_2 - \psi_{22}}{Z_{22}} - \frac{E_3 \angle \theta_3 - \psi_{23}}{Z_{23}}$$

$$\bar{I}_3 = -\frac{E_1 \angle \theta_1 - \psi_{31}}{Z_{13}} - \frac{E_2 \angle \theta_2 - \psi_{32}}{Z_{23}} + \frac{E_3 \angle \theta_3 - \psi_{33}}{Z_{33}}$$

Posons :  $\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2$  ;  $\theta_{23} = \theta_2 - \theta_3$  ,  $\theta_{13} = \theta_1 - \theta_3$

on obtient donc la puissance active de chaque machine en prenant la partie réelle des produits  $\bar{E}_1 \bar{I}_1, \bar{E}_2 \bar{I}_2, \bar{E}_3 \bar{I}_3$  ;  $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$  représentant les valeurs conjuguées des intensités  $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$ .

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \cos \psi_{11} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos(\theta_{12} + \psi_{12}) - \frac{E_1 E_3}{Z_{13}} \cos(\theta_{13} + \psi_{13})$$

$$P_2 = -\frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos(\theta_{12} - \psi_{12}) + \frac{E_2^2}{Z_{22}} \cos \psi_{22} - \frac{E_2 E_3}{Z_{23}} \cos(\theta_{23} + \psi_{23})$$

$$P_3 = -\frac{E_1 E_3}{Z_{13}} \cos(\theta_{13} - \psi_{13}) - \frac{E_2 E_3}{Z_{23}} \cos(\theta_{23} - \psi_{23}) + \frac{E_3^2}{Z_{33}} \cos \psi_{33}$$

3. 2. 5. 1. Calcul des impédances resultantes  $\bar{Z}_{11}, \bar{Z}_{22}$  et des impédances de transfert  $\bar{Z}_{12}$  :

$$\text{Posons: } \bar{Z}_R = \bar{Z}_4 + \frac{\bar{Z}_3 \cdot \bar{Z}_C}{\bar{Z}_3 + \bar{Z}_C}$$

$$\bar{Z}_T = \frac{\bar{Z}_B \cdot \bar{Z}_R}{\bar{Z}_B + \bar{Z}_R}$$

Le rescau de la figure 8a) eq. ramène à 3 impédances,  $Z_1, Z_2, Z_T$  montées en étoile (fig 9).

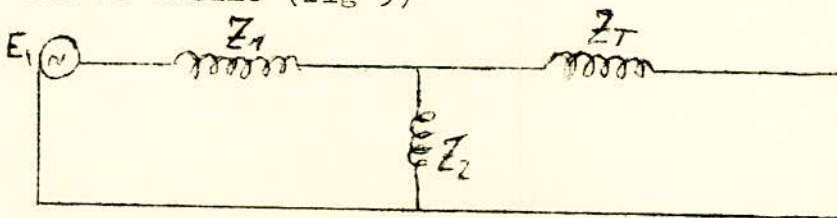
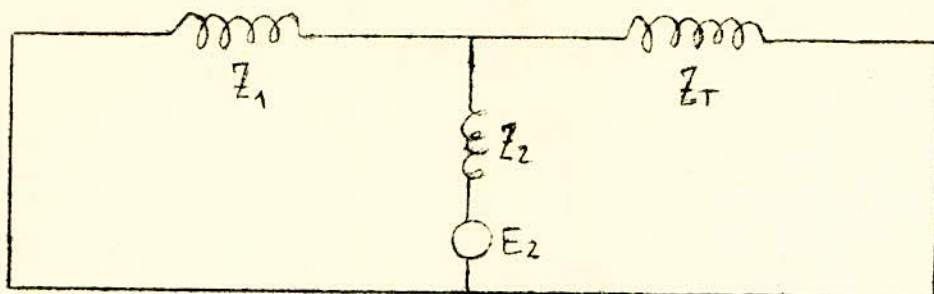


Fig 9



$Z_{11}$  est par définition l'impédance résultante vue au point<sup>a</sup>, elle s'obtient en insérant la f.e.m  $\bar{E}_1$  entre le point a et les points b, b, c, c' (fig 8a) réunis en parallèle.

$$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_T}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_T}$$

De même  $\bar{Z}_{21}$  s'obtient en insérant la f.e.m  $\bar{E}_2$  entre le point b et les points a, b, c, c' réunis en parallèle (fig 10).

$$\bar{Z}_{22} = \bar{Z}_2 + \frac{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_T}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_T}$$

De la figure 8a on tire les relations:

$$\bar{Z}_2 \bar{I}_{12} = \bar{Z}_T (\bar{I}_{11} - \bar{I}_{12})$$

$$\text{d'où } \bar{I}_{12} = \frac{\bar{Z}_T}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_T} \bar{I}_{11} = \frac{\bar{Z}_T}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_T} \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_{11}}$$

$$\text{puisque par définition } \bar{I}_{12} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_{12}}$$

on en déduit:

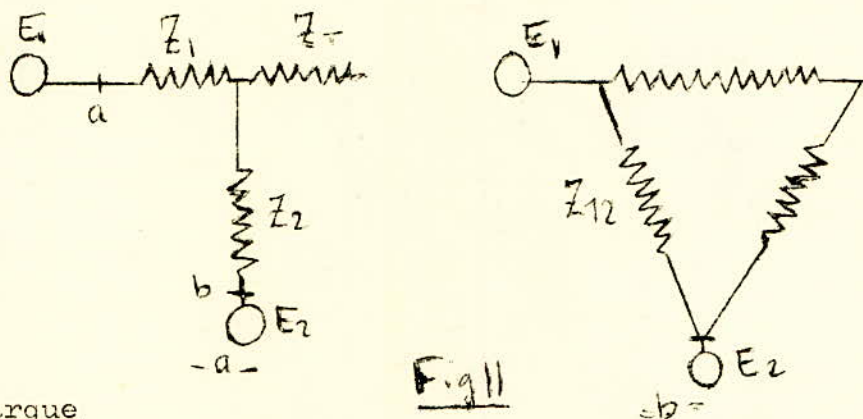
$$\bar{Z}_{12} = \frac{\bar{Z}_T (\bar{Z}_2 + \bar{Z}_T)}{\bar{Z}_T}$$

$$\text{On remplace } \bar{Z}_{11} \text{ par sa valeur } \bar{Z}_{11} = \bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_T}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_T}$$

$$\text{d'où: } \bar{Z}_{12} = \frac{\bar{Z}_1 \bar{Z}_T + \bar{Z}_2 \bar{Z}_T + \bar{Z}_1 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_T} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \frac{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_T}$$

d'où finalement 
$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \frac{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_T}$$

Donc  $\bar{Z}_{12}$  est l'impédance qui reunit les points a et b du réseau, (fig 11b) lorsqu'on transforme en triangle le réseau en étoile de la figure 11a dans laquelle ne figurent que les f.e.m  $E_1$  et  $E_2$ .



#### Remarque

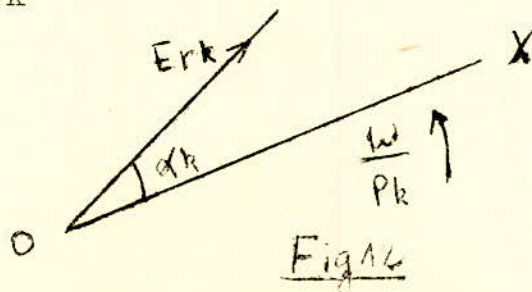
La présence d'un court-circuit sur un réseau quelle que soit la nature de ce genre de défaut augmente la valeur des impédances de transfert. Par conséquent pour une même valeur des angles  $\theta$  et des f.e.m réduit la puissance transportable.

### 3. 3. Mise en Équations du Problème

On a dit auparavant que si le mouvement de l'une des machines est révalutif (fig 26) au cours d'une perturbation cette machine perd le synchronisme par rapport aux autres.

Cherchons donc à déterminer l'équation du mouvement du rotor de chaque alternateur.

La position du rotor dans l'espace à un instant donné sera déterminé par la position du vecteur de la f.e.m  $E_{rk}$  lié au rotor de l'alternateur  $X_k$  étant d'angle dans l'espace entre  $E_{rk}$  et un axe de référence  $OX$  tournant à la vitesse de synchronisme  $\frac{\omega}{P_k}$  (fig 12).

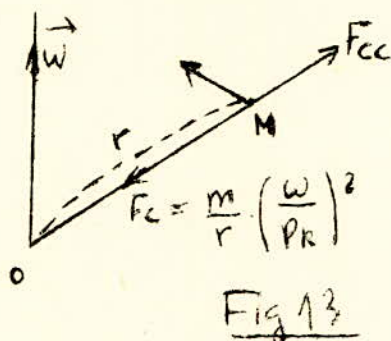


Nota:

Seuls les mouvements relatifs des machines des unes par rapport aux autres, est non par rapport à l'axe de référence  $ox$ , peuvent sur le maintien ou la perte de synchronisme, parce qu'il peut s'agir d'un mouvement d'ensemble des différentes machines (ralentissement ou accélération).

Puisqu'il s'agit d'un mouvement relatif, on doit ajouter aux travaux des forces réellement appliquées le travail des forces centrifuges; En chaque point, la force centrifuge  $-\frac{m}{r} \left( \frac{\omega}{p_k} \right)^2$  rencontre l'axe de rotation du rotor, sur moment résultant est donc nul.

La force centrifuge composée est égale au produit  $-2m \frac{\omega}{p_k} \times v_r$  où  $\frac{\omega}{p_k}$  est le vecteur rotation, et  $v_r$  la vitesse relative située dans un plan perpendiculaire au vecteur rotation (fig 13)



En appelant  $I_k$  le moment d'inertie des parties tournantes de la machine  $k$ ,  $C_{mk}$  et  $C_{rk}$  les couples moteur, et résistants appliqués à l'arbre, l'équation générale du mouvement est:

$$I_k = \frac{d^2 \alpha_k}{dt^2} = C_{mk} - C_{rk}$$

Si la machine considérée est un alternateur,  $C_{rk}$  représente le couple dû à la puissance électrique interne  $P_{ek}$  de la machine à un instant donné de la perturbation.

Au début du phénomène, la vitesse moyenne du rotor varie très peu et on ne commet pas d'erreur en la confondant avec la vitesse de synchronisme  $\Omega_0 = \frac{\omega}{p_k}$ . La différence des couples appliqués est alors  $\frac{P_{mk} - P_{ek}}{\Omega_0}$

Or  $P_{mk}$  équilibre la puissance électrique  $P_{ek}$  juste avant la perturbation on écrira :

$$I_k \frac{d^2 \alpha_k}{dt^2} = \frac{P_{ek}^0 - P_{ek}}{\Omega_0}$$

Entre l'angle dans l'espace  $\alpha_k$  et l'angle électrique  $\theta_k$  il existe la relation:  $P_k \alpha_k = \theta_k$

L'équation précédente devient alors:

$$\frac{I_k}{P} \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} = \frac{P_{ek}^0 - P_{ek}}{\Omega_0}$$

Soit en remplaçant  $\Omega_0$  par  $\Omega_0 = \omega/p$  et en introduisant la constante d'accélération  $M_k$  telle que:  $\frac{I_k \cdot \omega}{P^2} = \frac{M_k \cdot P_{mk}}{\omega}$

$$\Rightarrow \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} = \frac{\omega}{M_k P_{mk}} (P_{ek}^0 - P_{ek})$$

$P_{ek}^0$  est constant tandis que  $P_{ek}$  une fonction des angles  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$  et des impédances résultantes et de transfert  $Z_{01}, Z_{21}, Z_{23}$  suivant le stade considéré de la perturbation.

### 3. 4. Machine Synchrones reliée à un Réseau de Puissance $\infty$

Pour la simplicité de ce exposé, on va supposer que la machine est à excitation constante le raisonnement reste identique pour une machine à tension aux bornes constante.

Cependant il suffirait de remplacer la formule  $P_e = \frac{E \cdot V}{X} \sin \theta$  par la formule  $P_{el} = \frac{U \cdot V}{X_p} \sin \theta_l$

Que se passe-t-il lorsque l'impédance de liaison entre le réseau et la machine passe de  $X_1$  à  $X_2$  la notation  $X$  résulte du fait qu'en pratique on assimile ces impédances à des réactances pures.

Prions comme paramètre la puissance  $P$  l'état de la machine sera défini par l'angle  $\theta$  que font les vecteurs  $V$  et  $E$ . Cet état ne sera stable que si  $\theta < \pi/2$ . Donc tous les  $\theta$  dont nous parlons seront supposés dans le premier quadrant.

L'état initial était stable avec un déphasage  $\theta$  donné par:

$$P = \frac{E \cdot V}{X_1} \sin \theta_1$$

Le couple mécanique équilibre alors le couple électrique:

$$C_m = \frac{EV}{\omega X} \sin \theta_1$$

Si l'état final est stable; le déphasage correspondant sera  $\theta$  tel que:

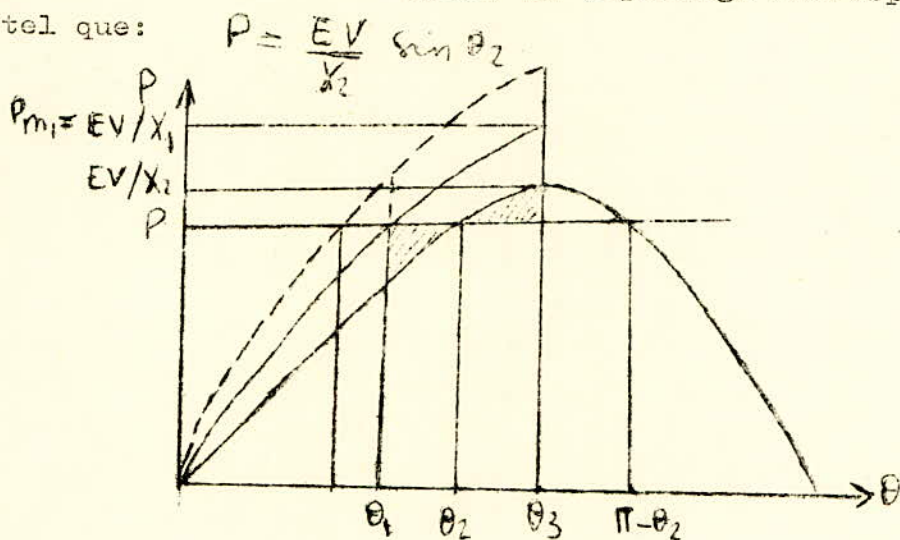


fig 14

Diagramme de fonctionnement d'une machine synchrone reliée à un réseau de puissance infinie ( $P = \infty$ ) lorsque l'impédance de liaison passe de  $X_1$  à  $X_2$  avec  $X_2 > X_1$ .

Lorsque l'impédance passe de  $X_1$  à  $X_2$  de façon instantanée, le déphasage ne peut passer brutalement de  $\theta_1$  à  $\theta_2$  à cause de l'inertie du groupe générateur. L'équilibre des couples n'est rétabli que par apparition du couple d'inertie :  $I \frac{d^2\theta}{dt^2}$ . Sous l'action de ce couple d'inertie, le mouvement sera amorti par les frottements qui correspondent avec une approximation suffisante à un couple  $C_f = K \frac{d\theta}{dt}$ .

L'équation du mouvement relatif du rotor par rapport à un axe gardant un déphasage constant (donc tournant à une vitesse  $\omega_0 = \text{cte}$ ) est donnée par:

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

Soit :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + K \frac{d\theta}{dt} + \frac{EV}{\omega} \left( \frac{\sin \theta}{X_2} - \frac{\sin \theta_1}{X_1} \right) = 0$$

### 3.5.1. Méthode par échelons successifs.

C'est une méthode qui permet de tracer point par point les

courbes donnant les valeurs des différents écarts angulaires électriques  $\theta_{kl}$  entre deux machines  $k$  et  $l$ . Les fonctions  $\theta_{kl}$  étant les solutions d'équations de la forme:  $\frac{d^2 \theta_k}{dt^2} = \frac{\omega}{M_k P_{nk}} (P_{ek}^0 - P_{ek})$

$P_{ek}$ : puissance électrique interne est une fonction des angles  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$  et des impédances résultantes et de transfert.

$P_{ek}^0$ : constante.

On commence par déterminer, pour l'instant qui précède la perturbation les valeurs des puissances fournies ou absorbées par les machines et les angles électriques  $\theta_k$  qui fixent des rotors des machines par rapport à un axe origine tournant à la vitesse de synchronisme  $\omega$ .

On partage le temps en intervalles égaux (de l'ordre de 1/10 de seconde) à partir de l'instant où se produit l'avarie. Pendant ces intervalles de temps on suppose que les couples appliqués à la machine restent <sup>st</sup> les variations ne se produisant qu'à la fin de chaque intervalle.

Soient  $P_{mo}$  et  $C_{mo}$  la puissance et le couple mécaniques relatifs à une machine déterminée, avant l'instant initial et  $C_{ro}$  et  $P_{ro}$  le couple et la puissance électrique fournis par cette machine immédiatement après l'instant initial.

Le couple  $\Delta C_o$  qui est appliqué au rotor de la machine au début du premier intervalle de temps  $\Delta t$  est:

$$\Delta C_o = C_{mo} - C_{ro} = \frac{P_{mo} - P_{ro}}{\Omega_o}$$

On a supposé bien entendu que la vitesse  $\Omega_o$  de chaque groupe n'a pas eu le temps de se modifier. La vitesse est donc égale à  $\Omega_o = \omega / p$  au début de cet intervalle.

Reprenons l'équation générale du mouvement du rotor de l'alternateur :

$$\frac{d^2 \theta_k}{dt^2} = \frac{\omega}{M_k P_{nk}} (P_{ek}^0 - P_{ek})$$

Posons:  $K = \frac{\omega}{M P_n} \implies \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} = K (P_{mo} - P_{ro})$



Or par hypothèse  $\Delta C$  reste constant pendant le premier intervalle  $\Delta t$ , par suite la vitesse angulaire relative  $\frac{d\theta}{dt}$  du rotor de la machine varie linéairement, elle part de zéro  $\frac{d\theta}{dt}$  à l'instant initial et atteint la valeur  $\mu$  au temps  $\Delta t$ . L'accélération moyenne est  $\frac{\Delta \mu}{\Delta t} = \frac{\mu_1}{\Delta t}$  et l'équation précédente devient:

$$\mu_1 / \Delta t = K (P_{m0} - P_{r0}).$$

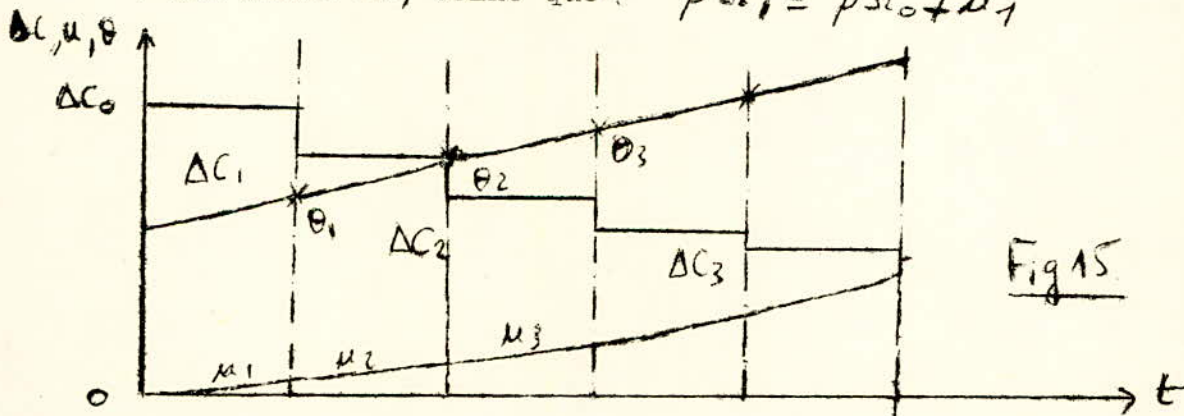
l'où la valeur de la vitesse à la fin du premier intervalle:

$$\mu_1 = K (P_{m0} - P_{r0}) \Delta t$$

L'angle  $\theta_j$  pendant  $\Delta t$  passe de  $\theta_0$  à  $\theta_1$ , le rapport  $\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\theta_1 - \theta_0}{\Delta t}$  est égal à une valeur de  $\mu$  comprise entre 0 et  $\mu_1$ ; on admettra que cette valeur est  $\mu_1 / 2$ . Il en résulte que:

$$\theta_1 - \theta_0 = \frac{\mu_1}{2} \Delta t \text{ soit } \theta_1 = \theta_0 + K (P_{m0} - P_{r0}) \frac{\Delta t^2}{2}$$

on répète ainsi la même opération pour chacune des  $n$  machines, et l'on connaît les valeurs des écarts angulaires et des vitesses relatives à la fin du premier intervalle c'est à dire au début du second. La vitesse absolue du rotor de la machine 1 est alors  $\Omega_1$ , telle que:  $P \Omega_1 = P \Omega_0 + \mu_1$



On reprend le même genre de calculs pour le deuxième intervalle de temps  $\Delta t$ . Les couples moteurs n'ayant pas eu le temps de se modifier, leurs valeurs  $C_{m1}$  au début du deuxième intervalle sont  $C_{m1} = C_{m0} = \frac{P_{m0}}{\Omega_0}$  on part de l'équation  $I/p \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{P_{m0}}{\Omega_0} - \frac{P_{r1}}{\Omega_1}$  du mouvement du rotor de la machine 1.

On pose  $\Omega_0 = w/p$

$$\Rightarrow \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{w \Omega_0}{M \cdot P_n} \left( P_{m0} - \frac{\Omega_0}{\Omega_1} P_{r1} \right) = K \left( P_{m0} - \frac{\Omega_0}{\Omega_1} P_{r1} \right)$$

soit en fin de compte

En passant par les termes finis:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{u_2 - u_1}{\Delta t} = u \left( P_{m0} - \frac{r_0}{r_1} P_{21} \right)$$

$$u_2 = u_1 + K \left( P_{m0} - \frac{r_0}{r_1} P_{21} \right) \Delta t$$

d'autre part, pendant le second intervalle, l'angle  $\theta$  passe de  $\theta_1$  à  $\theta_2$  et le rapport  $\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\Delta t}$  est égal à une valeur de la vitesse relative  $u$  comprise entre  $u_1$  et  $u_2$ ; on prendra cette valeur égale à  $(u_1 + u_2) \frac{1}{2}$

On a donc

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{u_1 + u_2}{2} \Delta t$$

Et en tenant compte de la valeur trouvée pour  $u$ :

$$\theta_2 = \theta_1 + u_1 \Delta t + K \left( P_{m0} - \frac{r_0}{r_1} P_{21} \right) \frac{\Delta t^2}{2}$$

A la fin de chaque intervalle, on forme des différences angulaires  $\theta_{kl} = \theta_k - \theta_l$  entre les rotors des différentes machines prises deux à deux et l'on trace les courbes  $\theta_{kl}$  en fonction du temps. On arrête le calcul dès que le caractère oscillatoire ou sous cesse croissant des courbes  $\theta_{kl}$  en fonction de temps à été mis en évidence.

En résumé pour appliquer la méthode par échelons successifs il faut effectuer les opérations suivantes:

- 1) Déterminer le régime permanent avant la perturbation, c'est à dire calculer les impédances resultantes vues des différentes machines, et les impédances de transfert qui les réunissent, ainsi que les valeurs des puissances fournies par ces machines.
- 2) Calculer la valeur de l'impédance  $Z_c$  correspondant au court-circuit et les nouvelles valeurs des impédances resultantes et de transfert ainsi que les valeurs des puissances fournies par ces machines.
- 3) Calculer les écarts angulaires et les vitesses à la fin du premier intervalle  $\Delta t$  ce qui fournit les valeurs des puissances et des couples au début du deuxième intervalle.
- 4) Répéter la même opération à la fin de chaque intervalle jusqu'à ce que le caractère oscillatoire ou relatif du mouvement ait apparu.

### 3.5.2. Méthode des courbes prédéterminées.

On évite les difficultés de la méthode précédente en utilisant les courbes types tracées pour les différentes

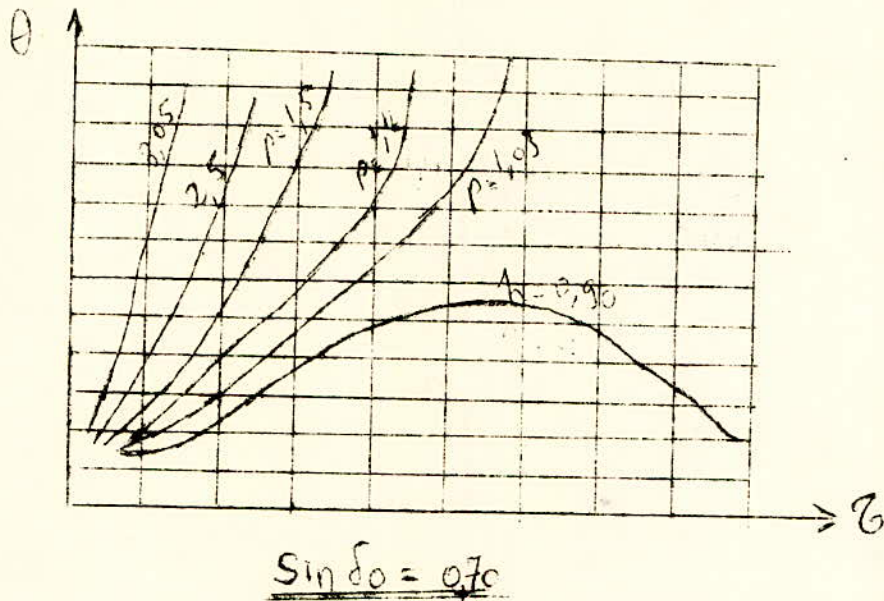


fig 16

Valeurs des paramètres intervenant dans l'équation du rotor. Il est nécessaire de mettre cette équation sous la forme.

$$\frac{d^2\theta}{d\zeta^2} = \mu - \sin\theta_0, \text{ où:}$$

$$\mu = \frac{P_0}{P_{ma}}, \quad \zeta = t \sqrt{\frac{P_{ma} \cdot \omega_0^2}{M}}$$

$P_{ma}$  : la puissance maximum en régime d'avarie.  $P_0$  : la puissance juste avant le début d'avarie. Les solutions de cette équation,  $\theta = \theta(\zeta)$ , sont représentées sous la forme des courbes fig 16 (Kimark (Power system Stability)). Pour déterminer la courbe correspondante, on détermine d'abord:

$$\sin \theta_0 = \frac{P_0}{P_{mn}} \quad \text{et} \quad r = \frac{P_0}{P_{ma}}$$

Pour  $P, \sin \theta_0, \theta_{dec}$ , on trouve  $\theta_{dec}, t_{dec}$ . Si la surface d'accélération est plus grande que celle de freinage, le rotor n'arrive pas à freiner et quand il dépasse l'angle entique il accélère de nouveau. Pour éviter la perte du synchronisme, on doit éliminer le défaut au plus tard à  $t_{dec}$ , ou  $\theta_{dec}$  :

$$\cos \theta_{dec} = \frac{P_0 (\theta_{cr} - \theta_0) + P_{mpa} \cos \theta_{cr} - P_{ma} \cos \theta_{cr}}{(P_{mpa} - P_{ma})}$$

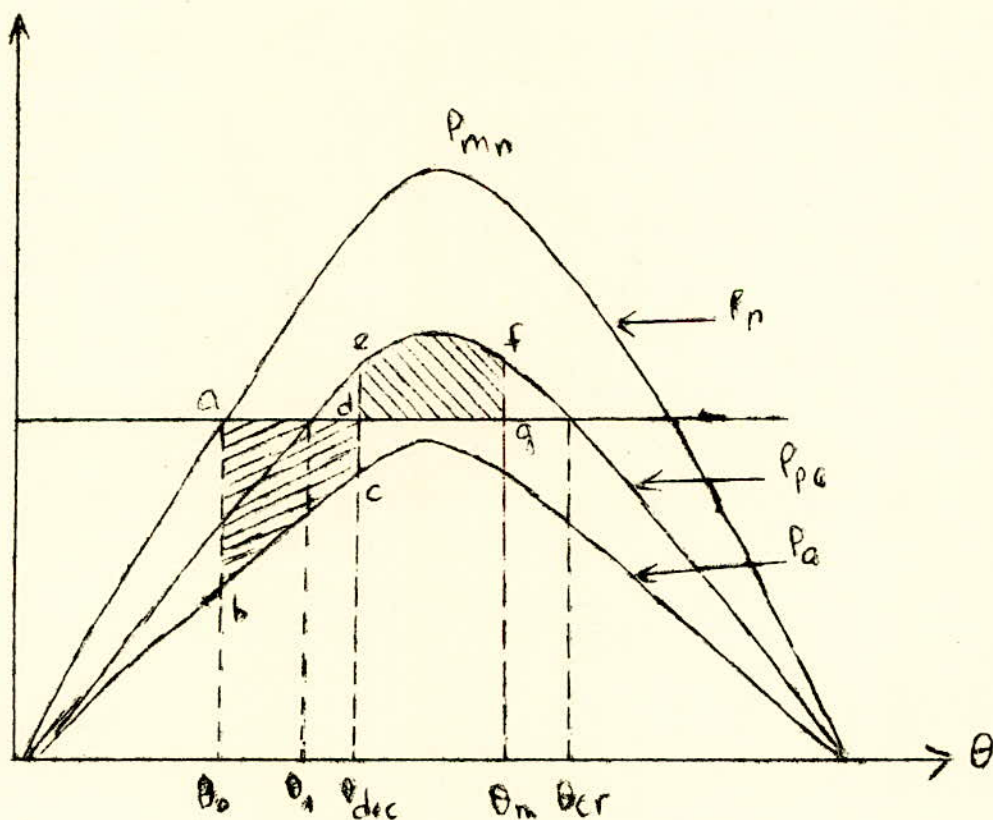


fig 47

#### 4. Amélioration de la stabilité d'un réseau.

Lorsqu'un réseau fonctionne près de sa limite de stabilité statique, il risque plus facilement la perte du synchronisme. Cette limite ne peut - être estimée que pour des réseaux de structure simple, mais pour un réseau maillé on peut dire que l'on se rapproche de la limite de stabilité lorsque les déphasages relatifs entre les différents groupes augmentent. Le risque d'instabilité est d'autant plus grand qu'un incident sur une liaison ou sur un groupe générateur entraîne un à coup plus, grand. D'où l'importance des problèmes d'architecture du réseau.

On peut dire que les moyens apportant une amélioration de la stabilité des réseaux peuvent être classés suivant qu'ils s'appliquent:

- aux groupes tournants
- aux réseaux

#### 4<sup>e</sup>. Groupe Tournants.

##### 4. 1. 2. Dispositions Constructives

1) Une machine sera d'autant plus stable qu'elle changera plus lentement de vitesse. Donc on augmente la stabilité en augmentant l'inertie des groupes, mais on s'écarte rapidement de l'optimum économique pour le dimensionnement de ces groupes, sans obtenir en courte partie une efficacité suffisante.

2) Les groupes de grande impédance interne sont plus stables, car une brusque variation des impédances de transfert du réseau a sur eux un effet relatif moins grand. Mais une augmentation systématique des impédances des groupes et éventuellement des transformateurs qui leur sont associés est en pratique un moyen très onéreux et de faible efficacité.

##### 4. 1. 3 Modes d'Exploitation

4.1.3.1. On peut remédier à une trop faible inertie des groupes hydrauliques en limitant leur accélération par un freinage à action rapide. Par exemple sur les turbines Pelton, on peut agir sur le déflecteur pour réduire instantanément le couple moteur. Pour les autres types de turbines on a recouru au freinage par accroissement de la charge:

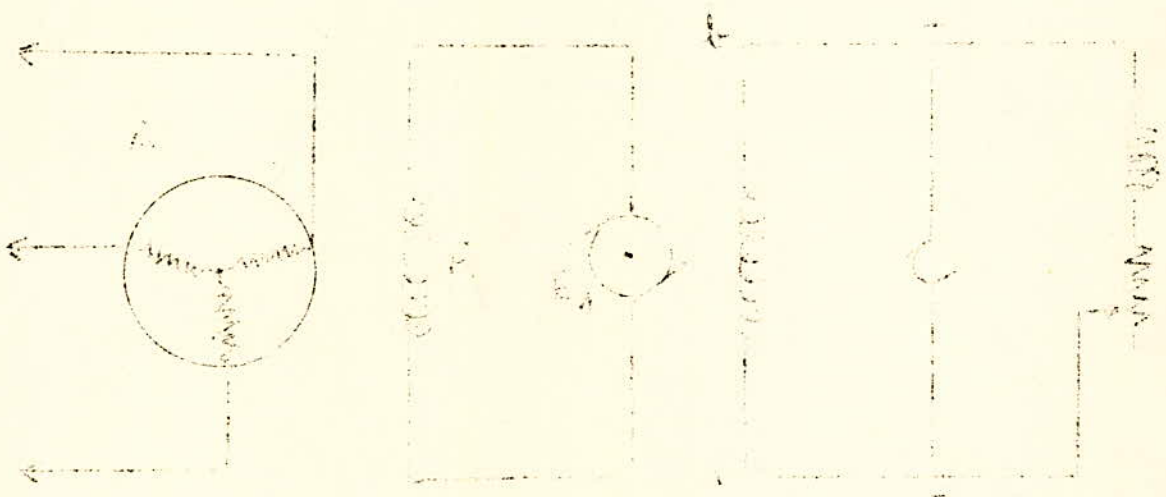
Soit en enclenchant brutalement des résistances aux bornes des groupes.

Soit en découplant certains groupes du réseau, ce qui accroît la charge des autres groupes restants.

4.1.3.2. Pour améliorer la stabilité, il faut tout d'abord combattre la diminution des flux et les accroître ensuite. on est donc conduit à surexciter fortement la machine au moment d'une perturbation susceptible de compromettre le maintien du synchronisme. Comme l'instabilité peut survenir très vite, l'effet de la surexcitation doit se manifester très promptement pour être efficace.

Pour arriver à un accroissement rapide des flux, il faut que l'excitatrice applique en un temps très court une tension importante aux bornes du rotor. D'où les dispositions spéciales et l'emploi d'excitatrices dont les temps de lancer ou les constantes de temps sont aussi réduites que possibles.

Exemple de surexcitation rapide



L'excitation de l'alternateur A se fait au moyen d'une excitatrice principale  $E_1$  qui debite dans l'enroulement R de l'inducteur de l'alternateur A et qui est à son tour excitée par une seconde machine  $E_2$  appelée excitatrice pilote et excitée elle même en dérivation.

#### 4.3. Réseaux

- Mettre plusieurs lignes en parallèle a fin de reduire les impedances de transfert. Mais cette mise en parallèle n'est acceptable que si en cas d'elimination de l'une d'entre elle, les autres ne se trouvent pas sur chargées au point de compromettre la stabilité du reseaux.
- La diversité des temps de lancer des groupes des divers types fait que, soumis à une à - coup, ils prennent des accelerations tres differentes ce qui peut couduire à la perte de synchronisme D'où la nécessité de regrouper "electriquement" que les groupes ayant des temps de lancer voisins.

En definitive le problème de la stabilité est tres important dans les reseaux longs et peu etoffes.

On rencontre de tel reseaux :

- Pour l'evacuation de source d'energie éloignées des centres consommateurs (exemple suede, Canada, U.R.S.S. ...).
- Au debut du developpement d'un réseau, par exemple en France, entre 1920 et 1940, durant les premiers étapes du reseau 220 KV.

ETUDE PRATIQUE

5-I; Nous allons appliquer la méthode des courbes prédéterminées présentée ci-dessous sur un exemple réel Constitué par la ligne HT 220Kv = ORAN - ALGER  
-Le but de cette ligne est de renforcer les réseau Ouest du pays ORAN au réseau d'Alger.

5.I.2. Description de la ligne

La ligne part d'el Arba dans la région D'Alger pour arriver à Zahene (EX St-Lucien) dans la région d'Oran. Cette ligne passe à proximité de :

- Oued-El-Alleug
- Ammeur-El-Ain
- Monts des Zaccar
- Miliana
- El-Khemis
- Oud-Fadda
- El-Asnam
- Ain Kerma
- Relizane

Paramètres

5.I.3. - Tension = 220 kV, 4=220 to.

- Section Nominale =  Cable : 4II  
Acier : 86  
Al : 525

- Resistance Lineique

$$R = R_{20} (1 + L \Delta \theta)$$

R= Valeur de la resistance à la temperature de service=75°C

L= Coefficient de temperature =  $L = 40 \cdot 10^{-4}$

$\Delta \theta$  = Difference de temperature = 55°C

$R = 0,1095 \text{ } \Omega / \text{KM}$

$R = 0,1095 \text{ } \Omega / \text{KM}$



- Inductance lineique

$$L = (0,5 + 2 \log \frac{D}{r}) \cdot 10^{-7} \text{ (H/m) avec } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

$$L = (0,5 + 2 \log \frac{D}{r}) \cdot 10^{-4} \text{ (H/Km)}$$

$$r = 13,2 \text{ mm}$$

$$D = 7 \text{ m}$$

$$D = \sqrt[3]{2 \cdot d \cdot d \cdot d} = d \sqrt[3]{2}$$

$$D = 8,82 \text{ m}$$

d'où

* * * * *	$L = 13,7 \cdot 10^{-4} \text{ H/Km}$	* * * * *
-----------------------	---------------------------------------	-----------------------

- Reactance :

$$X = Lw = 0,43 \text{ /Km}$$

- Capacite

$$C = \frac{\epsilon_0}{4 \log \frac{D}{r}} \text{ or } \epsilon_0 = 1 \text{ pour l'air}$$

$$C = \frac{1}{4 \log \frac{D}{r}} \text{ nF/Km}$$

$$r = 13,2 \text{ mm}$$

$$D_{12} = 7 \text{ m}$$

$$D_{23} = 7 \text{ m}$$

* * * * *	$C = 8,25 \text{ nF/Km}$	* * * * *
-----------------------	--------------------------	-----------------------

$$D_{31} = 14 \text{ m}$$

$$D = 8,82 \text{ m}$$

- Impédance Caractéristique.

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 w^2}$$

$$Y = \sqrt{G^2 + C^2 w^2}$$

$$\bar{Z}_c = \frac{R+jLw}{G+jCw}$$

$$|\bar{Z}_c| = \frac{R^2 + L^2 w^2}{G^2 + C^2 w^2}$$

C = 3,25 nF /Km

G = 10<sup>-10</sup> mho/Km

Zc = 40I

L'argument de  $\bar{Z}_c$  est:

$$Z_c = -\frac{I}{2} \quad \text{Arc tg } \frac{Lw}{R} = \text{Arc tg } \frac{Cw}{G}$$

Zc = - 6° 8'

- Puissance naturelle de la ligne:

$$P_n = \frac{U^2}{Z_c}$$

U = 220 Kv ,    Zc = 40I    P = 12I Mw

- Pertes :

$$P_1 = U_1 I_1 \sqrt{3} \cos \varphi_1 \quad P_2 = U_2 I_2 \sqrt{3} \cos \varphi_2$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sqrt{3} \sin \varphi_1 \quad Q_2 = U_2 I_2 \sqrt{3} \sin \varphi_2$$

Expressions des Pertes :

- Actives :  $p = p_1 - p_2 = \sqrt{3} (U_1 I_1 \cos \varphi_1 - U_2 I_2 \cos \varphi_2)$

- Reactives :  $q = q_1 - q_2 = \sqrt{3} (U_1 I_1 \sin \varphi_1 - U_2 I_2 \sin \varphi_2)$

- Chute de tension :

U<sub>1</sub> : Tension de départ

U<sub>2</sub> : Tension d'arrivée

Δ U : Chute de tension

$$U\% = \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot 100 = 14,5$$

$U_2 = \text{Constante} = 220 \text{ Kv}$

$S_2 = \text{Variable}$

$\cos \varphi = 0,8$

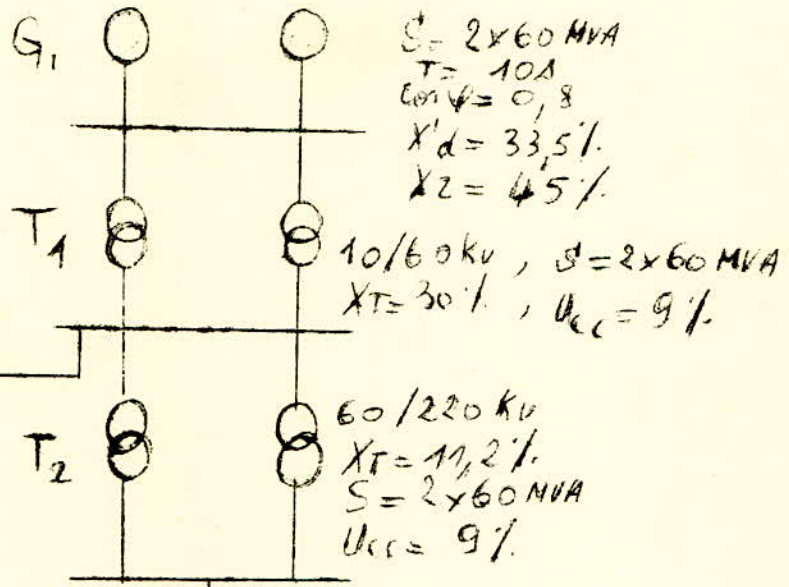
- TABLEAU -

$S_2$ MVA	$P_2$ MW	$Q_2$ MVAR	$U_2$ KV	$I_2$ A	$S_1$ MVA	$P_1$ MW	$Q_1$ MVAR	$U_1$ KV	$I_1$ A	$\mu$ MW	$q$ MVAR	$\Delta U$ %	$\cos \varphi_1$
100	80	60	220	263	105	104	11	234	253	24,5	-49	6,35	0,995
125	96	72	220	315	122	118	31,6	241	290	22	-40	9,55	0,966
140	112	84	220	368	143	132	54,78	247	330	20	-29,2	12,75	0,924
160	128	96	220	420	166	146,5	78	253	370	18,5	-18	15	0,883

# Schéma du réseau

ORAN

Réseau d'Oran
$U_N = 60 \text{ kV}$
$S = 225 \text{ MVA}$
$P = 180 \text{ MW}$
$Q = 135 \text{ MVAR}$
$\cos \varphi = 0,8$



K400 ↙

$L = 350 \text{ Km}$   
 $r = 0,1045 \text{ } \Omega/\text{Km}$   
 $X = 0,43 \text{ } \Omega/\text{Km}$

K200 ↙

K300 ↙

ALGER

Fig 17

- On se propose d'étudier la stabilité du réseau Schematisé par la Figure N° 17.

5.I. Valeurs des réactances en grandeurs réduites :

Sb = 105 MVA

Ub = 234 Kv

Calcul de la reactance du transformateur T1 :

On calcule d'abord la reactance  $X_{T1N}$  en grandeurs normales ( $X_{T1N}$ )

$X_{T1N} = \frac{U_{cc}}{I_{00}} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$

On rapporte cette reactance ( $X_{T1N}$ ) à la haute tension, et on la note  $X'_{T1N}$ .

$X'_{T1N} = \frac{U_{cc}}{I_{00}} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{U_b^2}{U_n^2} = \frac{U_{cc}}{I_{00}} \cdot \frac{U_b^2}{S_n}$

On calcule alors la valeur de la reactance en grandeur reduite

$X_{t1}^* = \frac{X'_{t1n}}{X_b} = \frac{U_{cc}}{I_{00}} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} \cdot \frac{S_b}{U_b^2}$

$X_{t1}^* = \frac{U_{cc}}{I_{00}} \cdot \frac{S_b}{S_n}$

$X_{T1}^* = \frac{9}{100} \cdot \frac{105}{120} = 0,078$

$X_{T1}^* = 0,078$

Calcul de la reactance du transformateur T2 :

$X_{t2}^* = \frac{U_{cc}}{I_{00}} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{U_b^2}{S_b}$

$$X_{t2}^* = \frac{U_{cc}}{I_{00}} \cdot \left( \frac{U_{cc}}{U_b} \right)^2 \cdot \frac{S_b}{S_n}$$

$$X_{t2}^* = \frac{9}{100} \cdot \left( \frac{220}{234} \right)^2 \cdot \frac{105}{120} = 0,07$$

$$\underline{X_{t2}^* = 0,07.}$$

Calcul de la réactance de la ligne:  $X_{l1}^*$ .

$$X_{l1}^* = \frac{X_{l1}}{X_b} = X_{0.L.} \cdot \frac{S_b}{U_b^2}$$

$$X_{l1}^* = 0,43 \times 350 \times \frac{105}{(234)^2} = 0,28$$

$$\underline{X_{l1}^* = 0,28.}$$

Calcul de la réactance des Générateurs:

- Réactance directe.  $X_{G1}^*$

$$X_{G1}^* = \frac{X'd}{100} \cdot \frac{S_b}{S_n} \cdot \left( \frac{U_n}{U_b} \right)^2 \cdot k^2$$

$k$  étant le rapport de transformation.

$$X_{G1}^* = \frac{33,5}{100} \cdot \frac{105}{120} \cdot \left( \frac{10}{234} \right)^2 \cdot \left( \frac{234}{10} \right)^2$$

$$X_{G1}^* = \frac{33,5}{100} \cdot \frac{105}{120} = 0,293$$

$$\underline{X_{G1}^* = 0,293}$$

- REACTANCE INVERSE. :

$$X_{G2}^* = \frac{X^2 d}{100} \cdot \frac{S_b}{S_n} \cdot \left( \frac{U_n}{U_b} \right)^2 \cdot k^2$$

$$X_{G2}^* = \frac{45}{100} \cdot \frac{105}{120} \cdot \left( \frac{10}{234} \right)^2 \cdot \left( \frac{234}{10} \right)^2$$

$$X_{G2}^* = \frac{45}{100} \cdot \frac{105}{120} = 0,393$$

$$\underline{X_{G2}^* = 0,393}$$

Calcul de la réactance équivalente des consommateurs.

$$X_{Cons}^* = \frac{U_b^2}{S_{cons}} = \frac{S_b}{U_b^2} = \frac{S_b}{S_{cons}}$$

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

$$\underline{X_{cons}^* = 0,467}$$

Calcul de la constante d'inertie.

$$M = T \cdot \frac{P_n}{\omega S} = \frac{I}{(S_b)^2}$$

$$M = \frac{10 \cdot 120 \cdot 1}{360 \cdot 50 \cdot 105} = 6,35 \cdot 10^{-4}$$

$$\underline{M = 6,35 \cdot 10^{-4}}$$

5.2. Schéma du réseau équivalent dans le régime normal:

Nous grouperons d'abord les machines synchrones et les transformateurs en une machine unique dont la réactance est égale à la réactance de l'ensemble des machines ~~en parallèle~~.  
~~La~~ ~~réactance~~ des machines synchrones introduites dans les calculs de stabilité est la réactance transitoire  $X'd$  que nous supposons égale à la réactance inverse  $X_i$ .

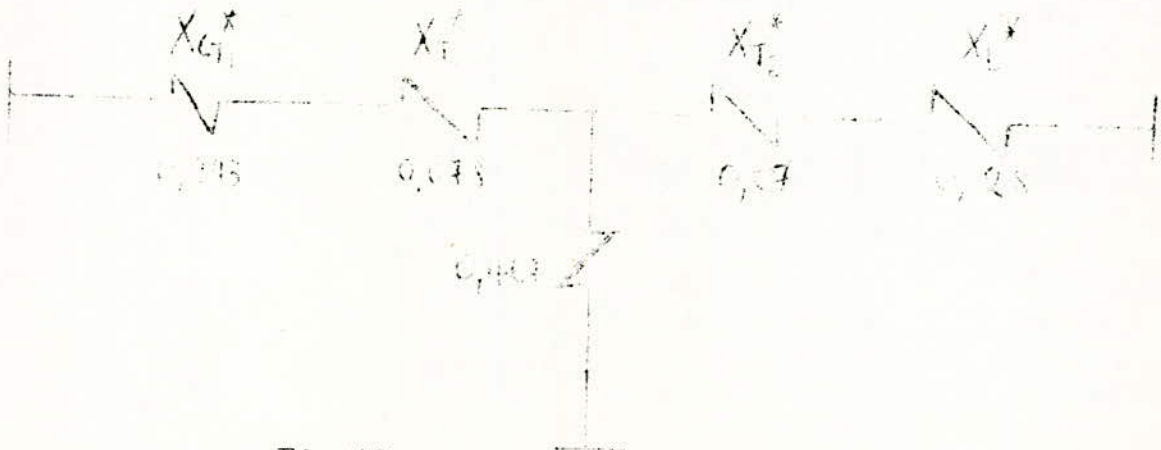


Fig.18

On rassemble les réactances en série et le schéma devient: (Fig 19)

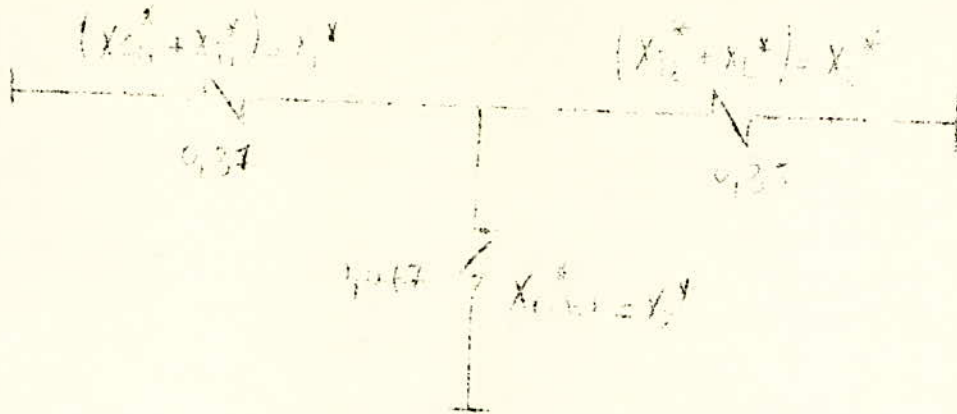


Fig. 19

5.2.1. Calcul des réactances équivalentes et de transfert.

$$X_{11}^* = X_1^* + \frac{X_2^* \cdot X_3^*}{X_2^* + X_3^*}$$

$$X_{11}^* = 0,37 + \frac{0,35 \cdot 0,467}{0,35 + 0,467} = 0,57$$

$$X_{12}^* = X_1^* + X_2^* + \frac{X_1^* \cdot X_2^*}{X_3^*}$$

$$X_{12}^* = 0,37 + 0,35 + \frac{0,37 \cdot 0,35}{0,467} = 0,99$$

5.3. Différents défauts (courts-circuits):

Bien que le court-circuit monophasé est le plus courant, nous allons considérer les autres cas de court-circuit tels que : biphasé, biphasé à la terre, monophasé. Si  $X_0$  et  $X_i$  désignent respectivement les réactances homophasées et inverses équivalentes au réseau et mesurées à l'endroit du défaut entre phase et neutre, on a pour réactance  $X_{cc}$  dont le branchement entre le réseau et le point neutre équivalent à l'apparition du défaut ( ce branchement de la réactance  $X_{cc}$  équivaut à un accroissement des réactances de liaison entre les machines.)

$$X_e = X_0 + X_i \quad \text{pour défaut entre phase et terre}$$

$$X_e = X_i \quad \text{" " " deux phases}$$

$$X_e = \frac{X_0 \cdot X_i}{X_0 + X_i} \quad \text{" " " deux phases et terre.}$$

Pour ce dernier défaut (court-circuit) la réactance de la ligne devient infinie et le lien synchronisant est rompu.



Nous voyons que pour les défauts phase-terre et deux phases-terre, la réactance homopolaire est introduite dans les calculs de la réactance de court-circuit.

5.4. Détermination de la réactance homopolaire.

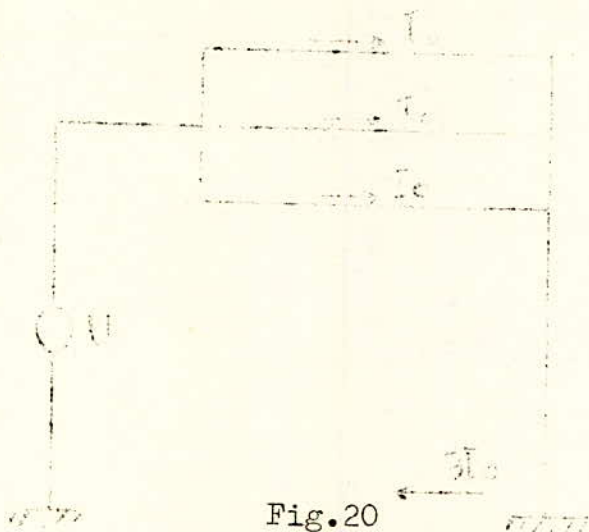


Fig.20

Soient:

- $\lambda$  : l'impédance kilométrique du circuit constitué par un conducteur et la terre.
- $\lambda_0$  : la mutuelle impédance entre deux circuits constitués chacun par une phase et la sol.

Réunissons au sol les phases (3) d'une ligne de 1Km à ses deux extrémités et intercalons dans une de ces liaisons une source de tension U qui débite un courant  $I_0$  dans chaque conducteur (Fig.20); l'impédance par phase est:

$$Z = \frac{U}{I_0} = \lambda + 2\lambda_0 \quad \text{ou} \quad \lambda_0 = r + \frac{j\omega \cdot 10^{-4}}{2} \cdot 10^4 + j\omega \cdot 10^{-4} \cdot 10^4$$

$\lambda_0$  : étant la réactance du circuit phase-terre et  $\frac{j\omega \cdot 10^{-4}}{2} \cdot 10^4$

la résistance kilométrique du sol aux fréquences industrielles exprimée en ohms.

Mais en général on suppose que la réactance homopolaire des lignes est égale à 4 fois la réactance triphasée.

5.4.1. Transfiguration des schémas.

Pour le calcul des réactances résultantes et de transfert vues d'un point de défaut, le schéma est ramené par une série de transfigurations successives à une forme équivalente finale qui permet la détermination de la réactance équivalente totale ( $X_{\Sigma}$ ).

O N détermine cette réactance d'après le calcul dans le processus de transfiguration du schéma, des réactances pour chaque élément du système.

Pour ce, on utilise les relations suivantes :

Pour des réactances en série  $X_1, X_2, \dots, X_n$

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$

Pour des réactances en parallèle  $X_1, X_2, \dots, X_n$

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}$$

Pour des réactances en parallèle

$$1 / X = 1 / X_1 + 1 / X_2 + \dots + 1 / X_n$$

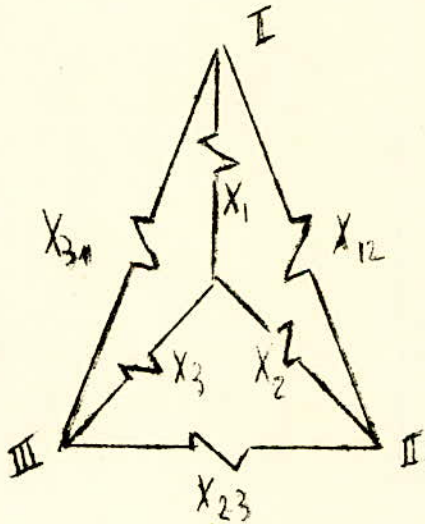
Pour des réactances en parallèle  $X_1$  et  $X_2$  :

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

Pour  $n$  réactances égales en parallèle :

$$X = \frac{X_n}{n}$$

Dans le cas de la transfiguration d'un triangle en étoile équivalente (Fig 21) les réactances  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  se calculent d'après les formules :



$$X_1 = \frac{X_{31} \cdot X_{12}}{X_{12} + X_{23} + X_{31}}$$

$$X_2 = \frac{X_{12} \cdot X_{23}}{X_{12} + X_{23} + X_{31}}$$

$$X_3 = \frac{X_{23} \cdot X_{31}}{X_{12} + X_{23} + X_{31}}$$

Dans le cas de la transfiguration d'une étoile en triangle équivalent, les réactances  $X_{12}$ ,  $X_{23}$ ,  $X_{31}$  se calculent d'après les formules :

$$\bar{X}_2 = \bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \frac{\bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2}{\bar{X}_3}$$

$$\bar{X}_{23} = \bar{X}_2 + \bar{X}_3 + \frac{\bar{X}_2 \cdot \bar{X}_3}{\bar{X}_1}$$

$$\bar{X}_{31} = \bar{X}_1 + \bar{X}_3 + \frac{\bar{X}_1 \cdot \bar{X}_3}{\bar{X}_2}$$

5.5. Courts-circuits au point K100 (à 100 Km d'ORAN)

Calcul des reactances résultants et de transfert

5.5.1. Court-Circuit déphasé

Pour ce genre de défaut, la réaction équivalente de court-circuit ( $X_e^*$ ) égale à la réactance inverse du réseau :

$$X_e^* = X_i$$

D'où le schéma inverse :

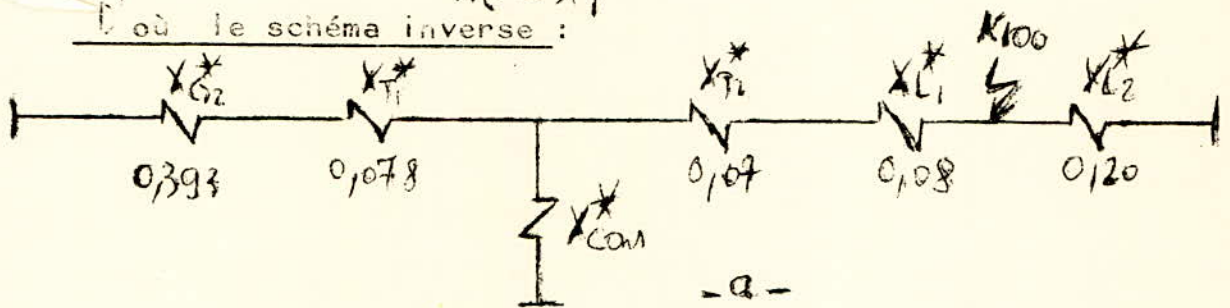


fig 21

Le défaut a lieu à 100 Km d'ORAN au point K100, et la réactance de la ligne ( $X_L^*$ ) est partagée en deux réactances  $X_{L1}^*$  et  $X_{L2}^*$  que nous allons déterminer.

Pour	350 Km----->	$X_{L1}^*$	=	0,28
	100 Km----->	$X_{L2}^*$	=	0,08
	250 Km----->	$X_{L2}^*$	=	0,20

Le schéma du réseau de la figure 21 sera transféré de nouveau et sera représenté par la figure 21. Nous additionnons les réactances en série afin de simplifier le plus possible le schéma du réseau.

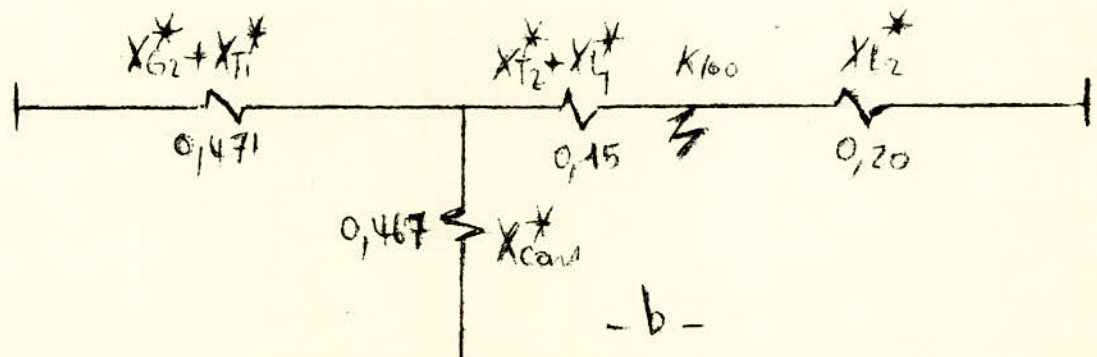


fig. 21

Puisque nous avons à calculer les réactances vues du point de défaut (Kms) et que les réactances ( $X_{G2}^* + X_{T1}^*$ ) et ( $X_{L0}^*$ ) sont en parallèle le schéma devient : (fig. 21.C).

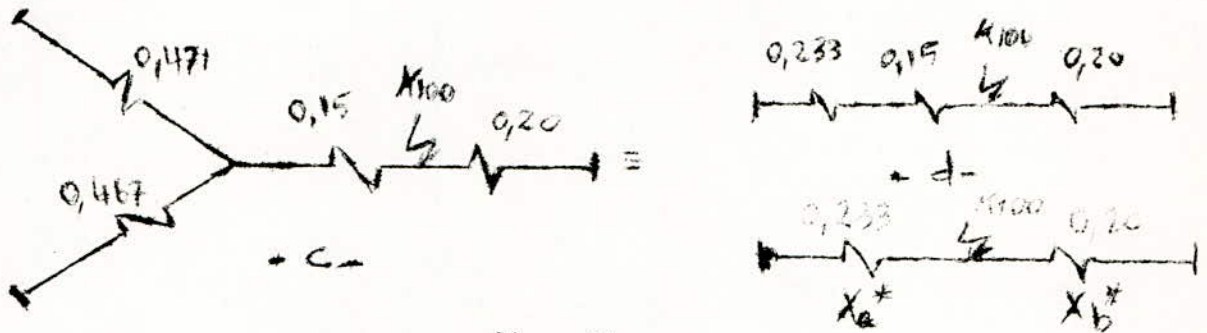


fig. 21.

Les réactances ( $X_{G2}^* + X_{T1}^*$ ) et  $X_{L0}^*$  étant en parallèle, leur réactance équivalente sera :

$$\frac{0,471 \cdot 0,467}{0,471 + 0,467} = 0,233$$

La réactance inverse est donnée par la formule :

$$X_i^* = \frac{X_a^* \cdot X_b^*}{X_a^* + X_b^*} \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} X_a^* &= 0,233 + 0,15 = 0,383 \\ X_b^* &= 0,20 \end{aligned}$$

$$X_i^* = \frac{0,383 \cdot 0,2}{0,383 + 0,2} = 0,132$$

$$X_i^* = 0,132$$

Maintenant nous devons appliquer la réactance  $X_e = X_i$  équivalente au court-circuit, au réseau directe (fig 22) afin de déterminer les réactances résultantes  $X_{11}^*$  et de transport  $X_{12}^*$ .

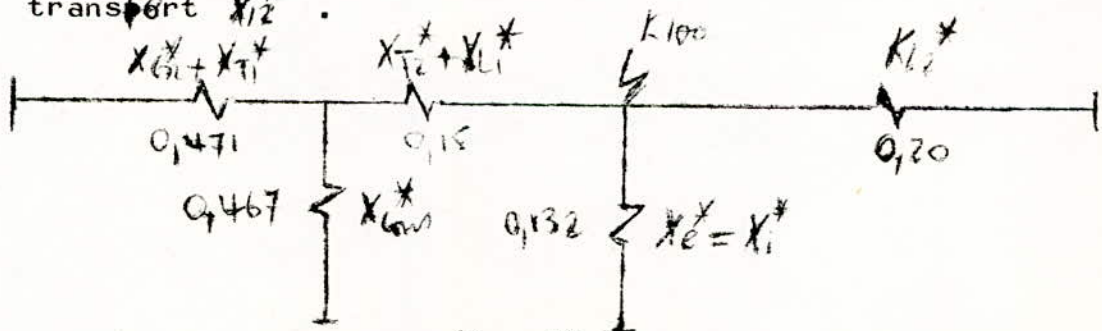
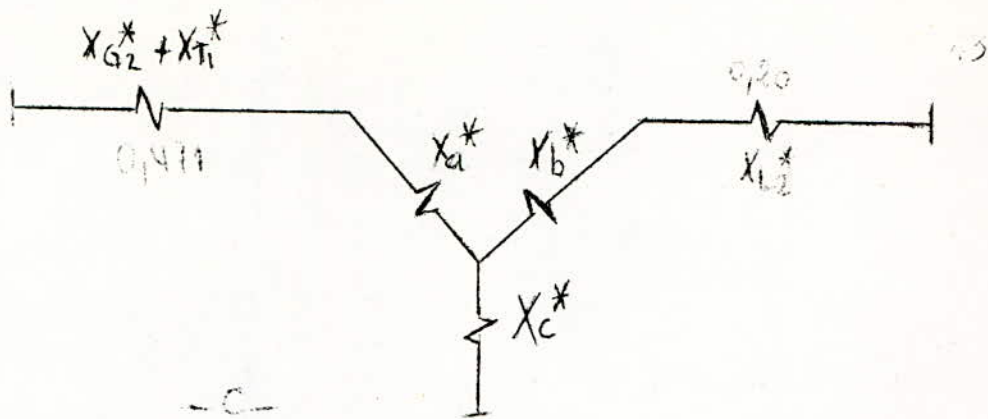


fig. 22



On a transfiguré le triangle a, b, c, de la figure 22 b en une étoile équivalente fig. 22 c, d'où les valeurs des réactances.

$$\begin{aligned} X_{ab}^* &= 0,15 \\ X_{ac}^* &= 0,467 \\ X_{bc}^* &= 0,132 \end{aligned}$$

$$X_a^* = \frac{X_{ab}^* \cdot X_{ac}^*}{X_{\Sigma}^*}$$

$$X_b^* = \frac{X_{ab}^* \cdot X_{bc}^*}{X_{\Sigma}^*}$$

$$X_c^* = \frac{X_{ac}^* \cdot X_{bc}^*}{X_{\Sigma}^*}$$

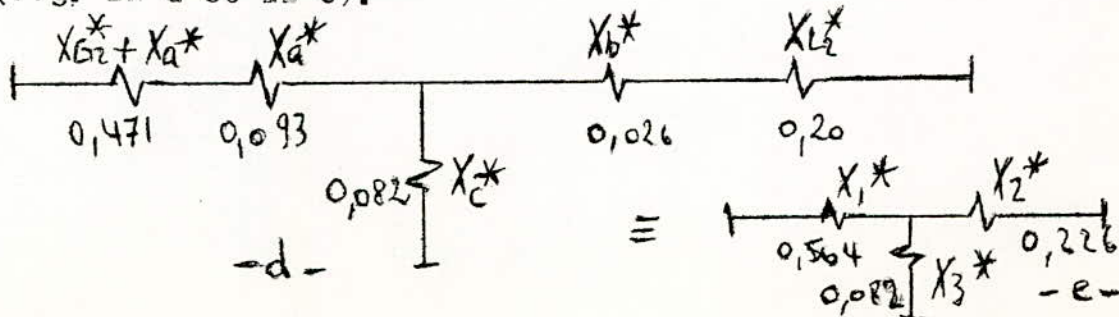
avec  $X_{\Sigma}^* = X_{ab}^* + X_{ac}^* + X_{bc}^*$   
 $X_{\Sigma}^* = 0,15 + 0,467 + 0,132$   
 $X_{\Sigma}^* = 0,749$

$$X_a^* = \frac{0,15 \cdot 0,467}{0,749} = 0,093$$

$$X_b^* = \frac{0,15 \cdot 0,132}{0,749} = 0,026$$

$$X_c^* = \frac{0,467 \cdot 0,132}{0,749} = 0,082$$

Methons en série ( $X_{G2}^* + X_{T1}^*$ ) et  $X_a^*$  puis  $X_{L2}^*$  et  $X_b^*$  (fig. 22 d et 22 e).



Les réactances résultantes  $X_{11}^*$  et de transfert  $X_{12}^*$  sont données par les formules :

$$X_{11}^* = X_1^* + \frac{X_2^* \cdot X_3^*}{X_2^* + X_3^*} = 0,564 + \frac{0,226 \cdot 0,082}{0,226 + 0,082} = 0,624$$

$$X_{12}^* = X_1^* \cdot X_2^* + \frac{X_1^* \cdot X_2^*}{X_3^*} = 0,564 + 0,226 + \frac{0,564 \cdot 0,226}{0,082}$$

$$X_{11}^* = 0,624$$

$$X_{12}^* = 2,338$$

Calcul de la tension ( $U_2$ ) du réseau pour consommateurs :

On pose  $U_2 = 1$

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

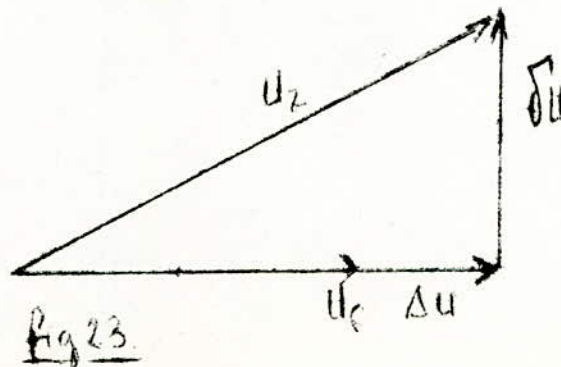
$$Q_0^* = P_0^* \cdot \tan \varphi = P_0^* \cdot \frac{Q_0}{P_0}$$

$$Q_0^* = 0,99 \cdot \frac{11}{104} = 0,104$$

On calcule la réactance  $X_e^*$  de la ligne et des transformateur T2 :

$$X_n^* = X_l^* + X_{T2}^*$$

$$X_n^* = 0,28 + 0,07 = 0,35$$



Sur le diagramme des tensions (fig. 23) on voit que =

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

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

$$\text{d'où } U_c = \sqrt{U_2^2 - (\delta U)^2} - \Delta U$$

$$U_2 = 1$$

$$\Delta U = \frac{Q_0^* \cdot X_n^*}{U_2}$$

$$\Delta U = 0,104 \cdot 0,35 = 0,036$$

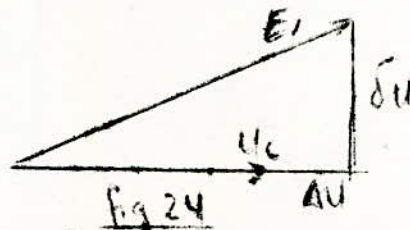
$$\delta U = \frac{P_0^* \cdot X_m^*}{U_2}$$

$$\delta U = 0,99 \cdot 0,35 = 0,346$$

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

$$\underline{U_c = 0,9}$$

Calcul de E1



C'est le même diagramme que celui de la figure 23 mais les chutes de tension sont différentes

$$E_1^2 = (U_c + \Delta U)^2 + (\delta U)^2$$



$$E_1 = \sqrt{(U_c + \Delta U)^2 + (\delta U)^2}$$

Remplaçons  $\Delta U$  et  $\delta U$  par leurs valeurs respectives. :

$$E_1 = \sqrt{\left( U_c + \frac{P_o^* \cdot X_n^*}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{P_o^* \cdot X_n^*}{U_c} \right)^2}$$

$$P_o = S_n \cdot \cos \varphi = 120 \times 0,8 = 96 \text{ Kw}$$

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

$$Q_o^* = P_o^* \cdot \tan \varphi = 0,914 \times 0,75 = 0,68$$

$$X_n^* = X_{G2}^* + X_{T1}^*$$

$$X_n^* = 0,393 + 0,078 = 0,471$$

$$E_1 = \sqrt{\left( 0,9 + \frac{0,68 \cdot 0,471}{0,9} \right)^2 + \left( \frac{0,914 \cdot 0,471}{0,9} \right)^2}$$

$$E_1 = \sqrt{(1,25)^2 + (0,47)^2} = \sqrt{1,78}$$

$$\underline{E_1 \# 1,33}$$

On a vu précédemment que :

La réactance de transfert en régime normal est =  $X_{12n}^* = 0,9$

La réactance de transfert en régime avarié est =  $X_{12a}^* = 2,3$

Calculons les puissances maximales en valeurs réduites dans les régimes normal et avarié :

$$P1 \text{ max normal} = P_{mn}^* = \frac{E_1 \cdot U_b}{X_{12n}^*} = \frac{1,33 \cdot 1}{0,99} = 1,34$$

$$P1 \text{ max avarié} = P_{ma}^* = \frac{E_1 \cdot U_b}{X_{12a}^*} = \frac{1,33 \cdot 1}{2,33} = 0,57$$

$$P_0 = 96 \text{ MW} \quad S_b = 105 \text{ MW} \quad \rightarrow \quad P_0^* = \frac{P_0}{S_b} = \frac{96}{105} = 0,91$$

Ainsi on pourra calculer le  $\sin \delta_0$  et le paramètre  $p$  :

$$\text{Or } P_{mn} \cdot \sin \delta_0 = P_0^*$$

$$\sin \delta_0 = \frac{P_0^*}{P_{mn}} = \frac{0,91}{1,34} = 0,68$$

$$p = \frac{P_0^*}{P_{ma}} = \frac{0,91}{0,57} = 1,59$$

donc

$$\boxed{\begin{array}{l} \sin \delta_0 = 0,68 \\ p = 1,59 \end{array}}$$

Sur les courbes prédéterminées le  $\sin \delta_0 = 0,68$  n'existe pas donc on prendra  $\sin \delta_0 = 0,7$ .

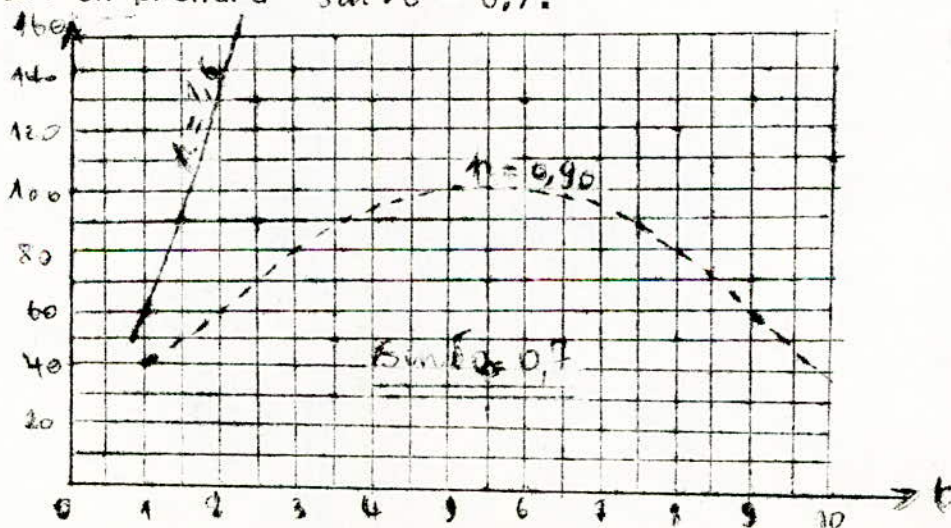


fig. 25

La courbe ( $p = 0,90$  de la figure 25) correspond à la limite de la stabilité dynamique. Au delà de cette limite le synchronisme est perdu. Nous constatons que le court-circuit diphasé au point K100 provoque la perte des synchronisme.

Comment procéder de manière à maintenir le synchronisme

Il faudrait que  $p \leq 0,90$

$$\text{Or } p = \frac{P_{o^*}}{P_{ma}} = \frac{P_{o^*}}{0,57} = 0,90 \implies P_{o^*} = 0,57 \times 0,9 = 0,513$$

$$P_{o^*} = 0,513$$

$$P_{o^*} \text{ est aussi égal à } P_{o^*} = \frac{P_o}{S_b} \implies$$

$$P_o = P_{o^*} \cdot S_b = 0,513 \times 105 = 53,86 \text{ Kw}$$

$$\underline{P_o = 53,86 \text{ Kw.}}$$

En régime normal la contribution de cette centrale est de 96 Kw.

$$\Delta P = 96 - 53,86 = 42,14 \text{ Kw.}$$

En conclusion, pour maintenir le synchronisme il faudrait une réserve d'une puissance de 42Kw,

### 5.5.2. Court-Circuit entre 2 phases et la terre

La réactance équivalente de court-circuit pour ce défaut est :

$$X_e^* = \frac{X_o^* \cdot X_i^*}{X_o^* + X_i^*}$$

La réactance inverse est la même que pour le court-circuit diphasé puisque ce défaut se situe toujours au même point (K100)

### Calcul de la réactance homopolaire

On a supposé la réactance homopolaire de la ligne égale à quatre fois la réactance triphasée.

$$X_{L0}^* = 4 \cdot X_L^*$$

Donc :

$$X_{L01}^* = 4 \times X_{L1}^* = 4 \times 0,08 = 0,32$$

$$X_{L02}^* = 4 \times X_{L2}^* = 4 \times 0,2 = 0,8$$

Nous nous plaçons dans le cas où les transformateurs élévateurs sont couplés en étoile du côté 220 Kv et en triangle de l'autre côté.

Le réseau homopolaire considéré sera donc limité à ces transformateurs.

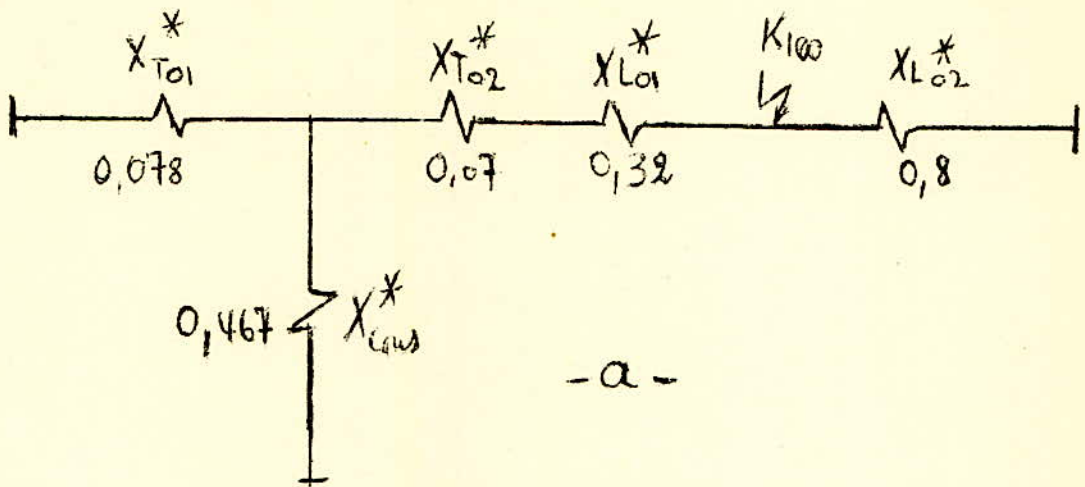
Les points neutres des enroulements à 220 Kv sont reliés directement au sol.

La réactance homopolaire des transformateurs avec neutre à la terre est égale à la réactance triphasée; Donc :

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

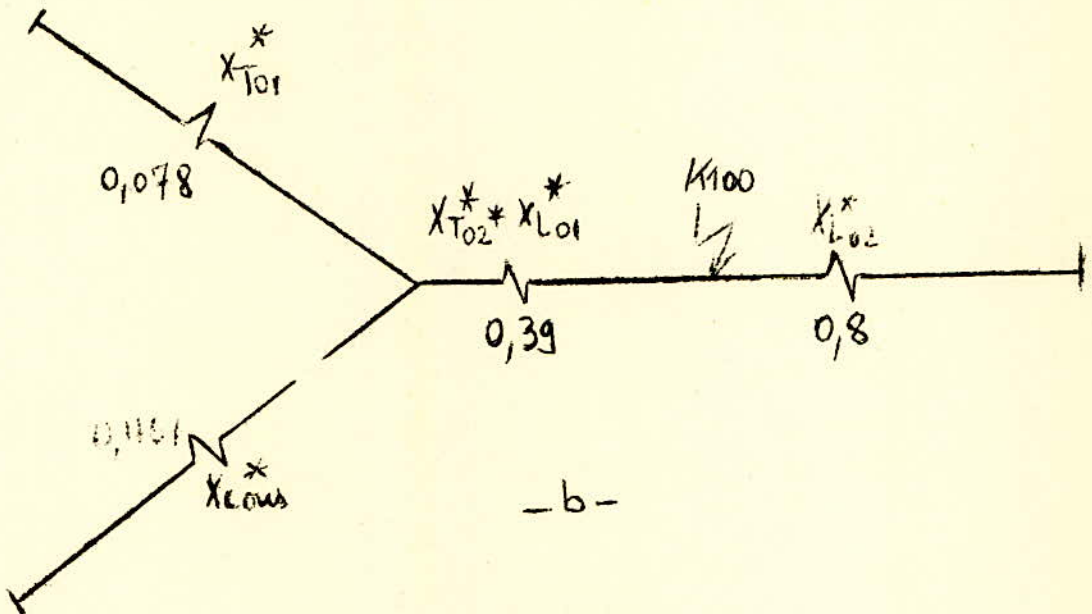
$$X_{T2}^* = X_{T02}^*$$

Schéma homopolaire



- a -

Schema équivalent : (fig 26 b)



- b -

On ramène le schéma (fig 26 b) en un autre plus simplifié, ne comportant que deux reactances  $X_a^*$  et  $X_b^*$  se trouvant de part et d'autre point de défaut K100 (fig 26 c)



$$X_a^* = (X_{T01}^* + X_{L01}^*) + \frac{X_{T01}^* \cdot X_{C010}^*}{X_{T01}^* + X_{C010}^*}$$

$$X_a^* = 0,39 + \frac{0,078 \cdot 0,467}{0,078 + 0,467} = 0,456$$

$$X_b^* = X_{L02}^* = 0,8$$

$$X_e^* = \frac{X_a^* \cdot X_b^*}{X_a^* + X_b^*} = \frac{0,456 \cdot 0,8}{0,456 + 0,8} = 0,28$$

La reactance équivalente de court-circuit au point K100 est:

$$X_e^* = \frac{X_0^* \cdot X_1^*}{X_0^* + X_1^*}$$

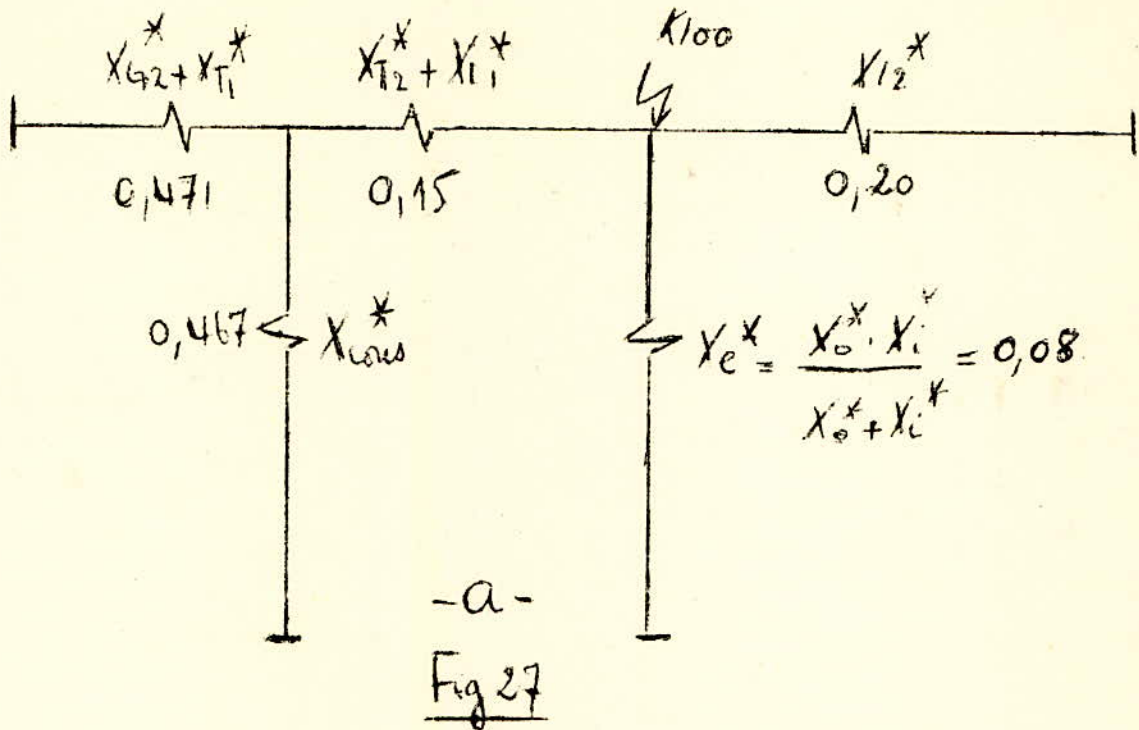
$$X_e^* = \frac{0,28 \cdot 0,132}{0,28 + 0,132} = 0,08$$

$$X_e^* = 0,08$$

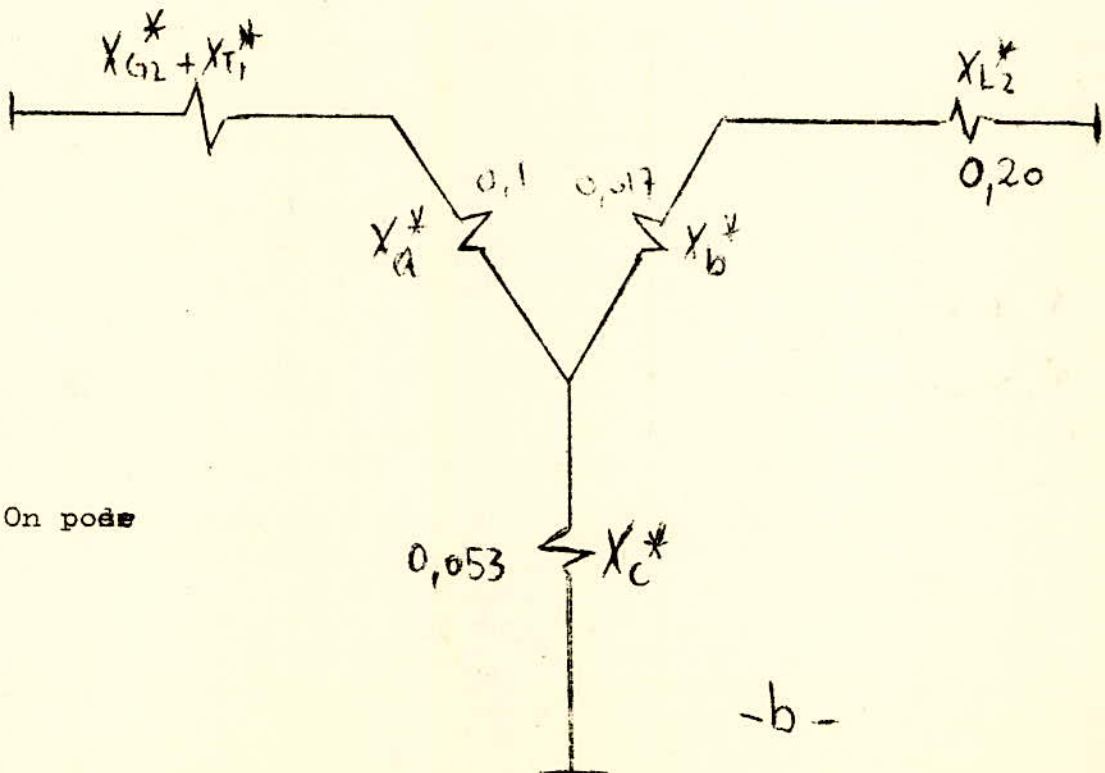
Calcul des reactances resultante  $X_{11}^*$  et de transfert  $X_{12}^*$

C'est la même procédure que pour le court-circuit diphasé sauf que la reactance équivalente est différente donc on sera le même schéma que celui indiqué la figure 22(a) mais avec une reactance équivalente :

$$X_e^* = \frac{X_0^* \cdot X_1^*}{X_0^* + X_1^*}$$



On transfigure le triangle en étoile et on obtient le schéma suivant : (fig. 27 b)



On pose

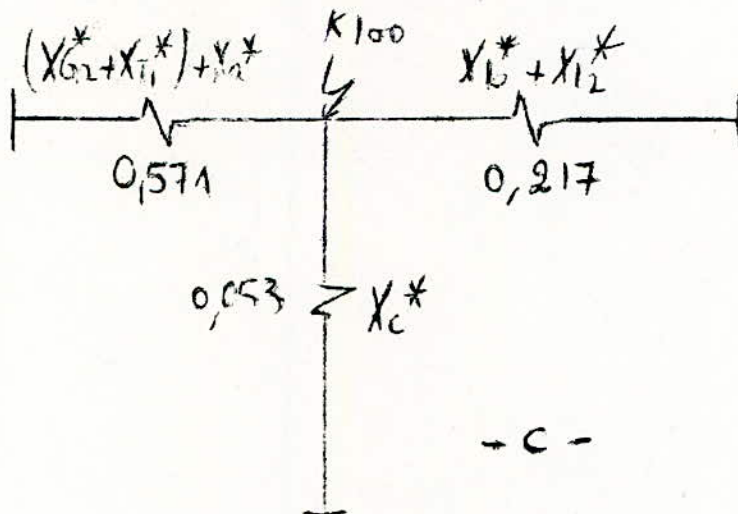
Posons:  $X_{\Sigma}^* = 0,15 + 0,467 + 0,08 = 0,697$

$$X_a^* = \frac{0,15 \cdot 0,467}{0,697} = 0,1$$

$$X_b^* = \frac{0,15 \cdot 0,08}{0,697} = 0,017$$

$$X_c^* = \frac{0,467 \cdot 0,08}{0,697} = 0,053$$

D'où le schéma simplifié (figure 27 c)



On pose:

$$(X_{G2}^* + X_{T1}^*) + X_a^* = X_1^*$$

$$X_b^* + X_{I2}^* = X_2^*$$

$$X_c^* = X_3^*$$



$$X_{11}^* = Y_1^* + \frac{X_2^* \cdot Y_3^*}{X_2^* + Y_3^*} = 0,571 + \frac{0,217 \cdot 0,053}{0,217 + 0,053}$$

$$\underline{X_{11}^* = 0,611.}$$

$$X_{12}^* = X_1^* + Y_2^* + \frac{X_1^* \cdot X_2^*}{X_3^*} = 0,571 + 0,217 + \frac{0,571 \cdot 0,217}{0,053}$$

$$\underline{X_{12}^* = 2,32.}$$

$$\underline{X_{11}^* = 0,611}, \quad \underline{X_{12}^* = 2,32.}$$

Nous savons que :

$$U_b = U_2 = 1$$

$$P_0^* = 0,91$$

$$E_1 = 1,33$$

$$X_{12}^* n = 0,99$$

$$X_{12}^* a = 2,32$$

$$P_{mn} = \frac{E_1 \cdot U_2}{X_{12}^* \cdot n} = \frac{1,33 \cdot 1}{0,99} = 1,34$$

$$P_{ma} = \frac{E_1 \cdot U_2}{X_{12}^* a} = \frac{1,33 \cdot 1}{2,32} = 0,57$$

$$P_{mn} \cdot \sin \delta_0 = P_0^* \Rightarrow \sin \delta_0 = \frac{P_0^*}{P_{mn}}$$

$$\sin \delta_0 = \frac{0,91}{1,34} = 0,68 ; \quad \mu = \frac{P_0^*}{P_{ma}^*} = \frac{0,91}{0,57} = 1,60$$

$$\underline{\underline{\sin \delta_0 = 0,68 ; \quad \mu = 1,60}}$$

Nous nous plaçons sur la même courbe que dans le cas précédent (fig 25).

Donc il faudrait une même réserve de puissance pour maintenir le synchronisme ( soit  $P \approx 42 \text{ MW}$  )

5.5.3. Court - circuit entre une phase et la terre

On sait que la reactance équivalente à ce défaut est  $X_e^* = \frac{V_{ph}^2}{P_{sc}^*}$  on ces reactances homopolaire et inverse on été calculé précédemment puisque le défaut se localise toujours au point K100:

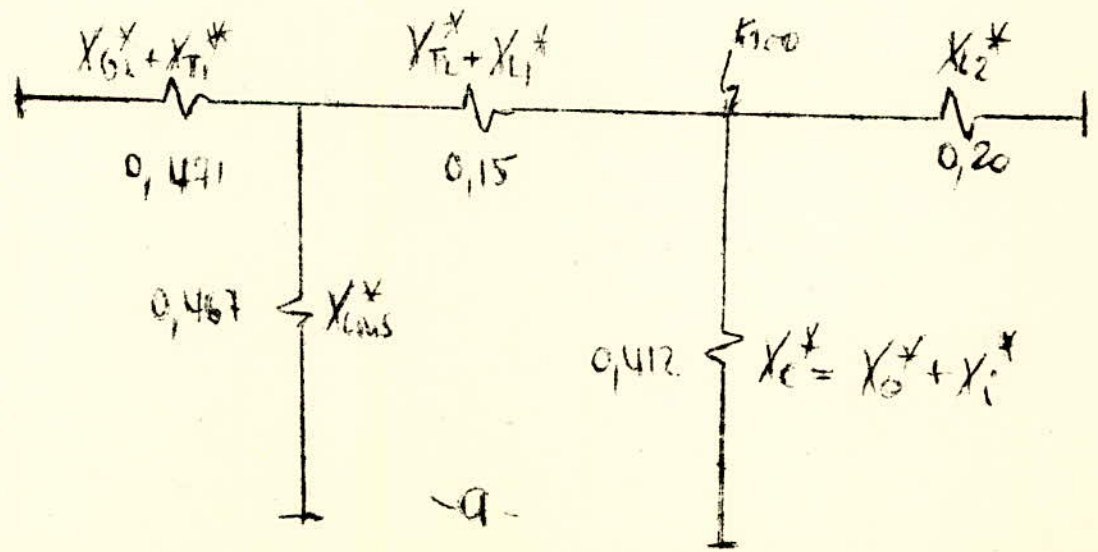
Donc:

$$X_0^* = 0,28$$

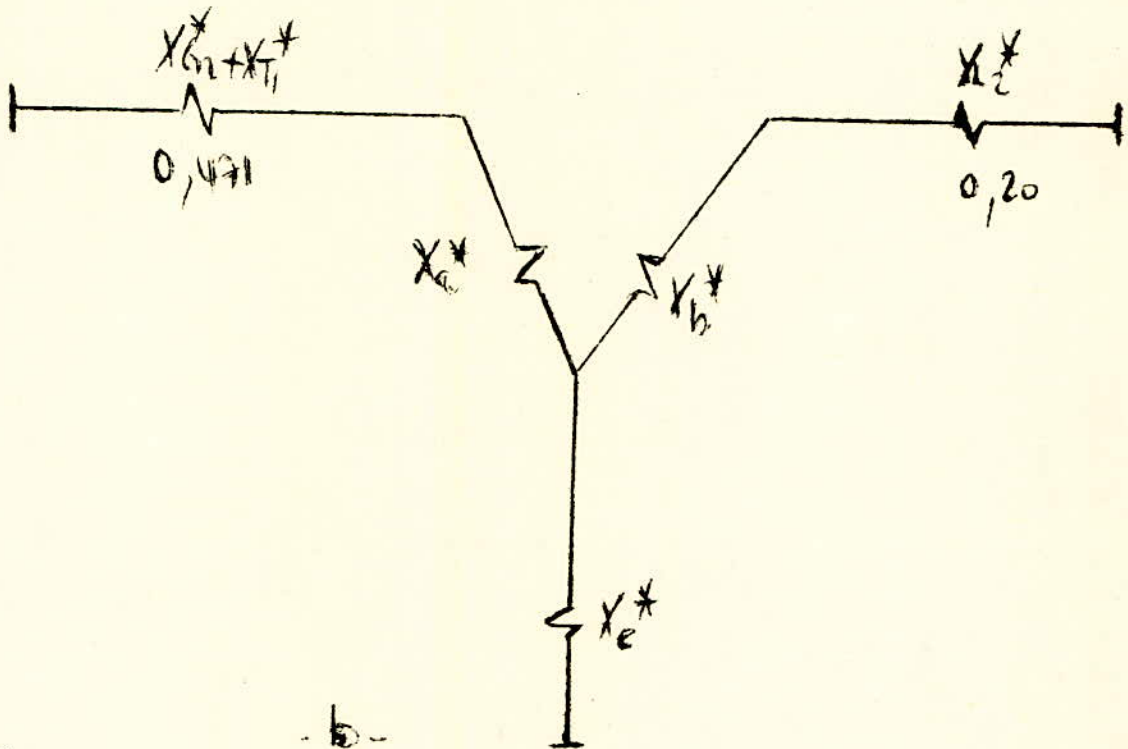
$$X_1^* = 0,132$$

$$X_e^* = 0,412$$

Connaissant  $X_e^*$  on détermine les reactances résultante  $X_{11}^*$  et de transfert  $X_{12}^*$  (fig 28)



Transfiguration du triangle en étoile



Posons

Fig 28

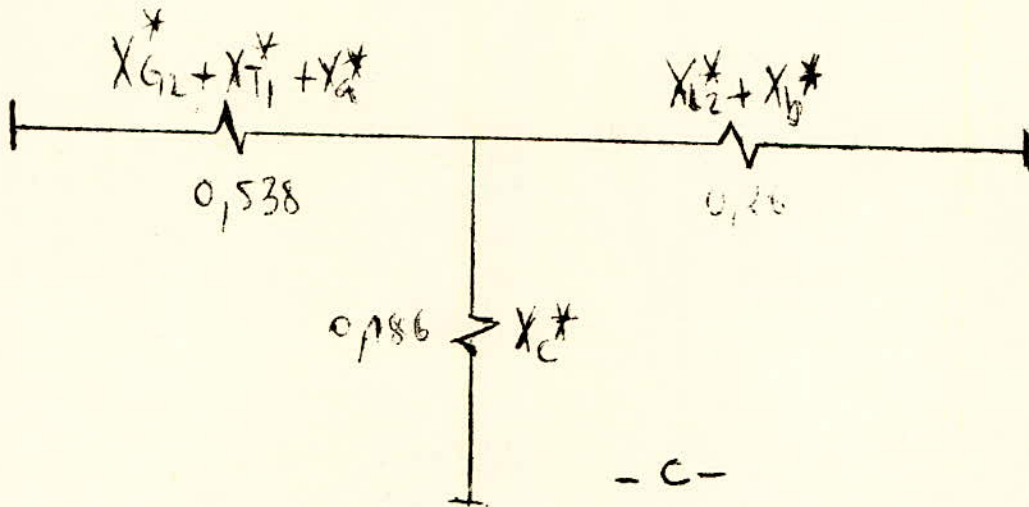
$$X_{\Sigma}^* = 0,45 + 0,467 + 0,412 = 1,029$$

$$X_a^* = \frac{0,15 \cdot 0,467}{1,029} = 0,067$$

$$X_b^* = \frac{0,15 \cdot 0,412}{1,029} = 0,06$$

$$X_c^* = \frac{0,467 \cdot 0,412}{1,029} = 0,186$$

Groupons les reactances en serie:



$$X_{11}^* = 0,538 + \frac{0,186 \cdot 0,26}{0,186 + 0,26} = 0,645$$

$$X_{12}^* = 0,538 + 0,26 + \frac{0,538 \cdot 0,26}{0,186} = 1,538$$

$$\underline{X_{12}^* = 1,538}$$

$$P_{mn}^* = 1,34$$

$$P_{ma}^* = \frac{E_L \cdot U_2}{X_{12}^*} = \frac{1,33 \cdot 1}{1,538} = 0,86$$

$$\sin \varphi_0 = \frac{P_0^*}{P_{mn}} = \frac{0,91}{1,34} = 0,68$$

$$\mu = \frac{P_0^*}{P_{ma}} = \frac{0,91}{0,86} = 1,05$$

$$\sin \delta_0 = 0,68$$

$$p = 1,05$$

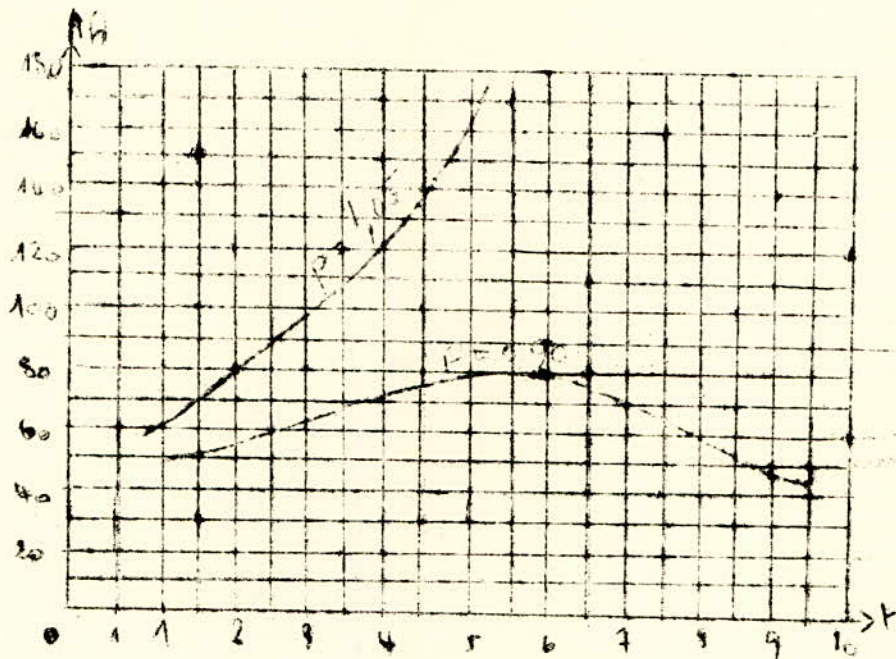


Fig. 29.

Il y a toujours perte de synchronisme mais on constate que dans ce cas la courbe avec  $p = 1,05$  est moins éloignée de la courbe  $p = 0,90$  que dans le cas précédent.

Pour que le synchronisme soit maintenu il faudrait une réserve de puissance de :

$p \leq 0,90$  pour qu'il y ait stabilité

$$p = \frac{P_0^*}{P_{\max}} = \frac{P_0^*}{0,86} = 0,90 \Rightarrow P_0^* = 0,86 \cdot 0,9 = 0,774$$

$$\text{or } P_0^* = \frac{P_0}{S_b} \Rightarrow P_0 = P_0^* \cdot S_b = 0,774 \cdot 105 = 81,27 \text{ MW}$$

$$\text{d'où } \Delta P = 96 - 81,27 = 14,73 \text{ MW}$$

$$\Delta P = 14,73 \text{ kW}$$

On constate que cette avarie demande une reserve de puissance beaucoup importante que celle du court circuit diphasé.

### 5.6. Court-circuits au point K200 (à 200km d'Oran).

#### 5.6.1. Court circuit diphasé

$$X_e^* = X_i^*$$

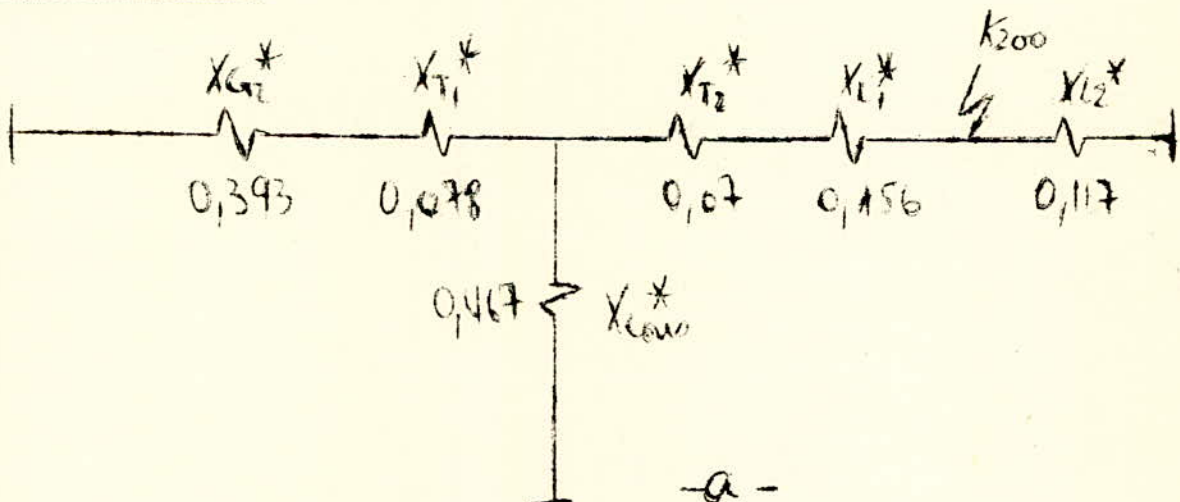
Calculons les reactances de la ligne d'Oran au point de défaut ( $X_{L1}^*$ ) et du point de defaut à Alger ( $X_{L2}^*$ ).

$$350 \text{ Km} \rightarrow X_{L1}^* = 0,273$$

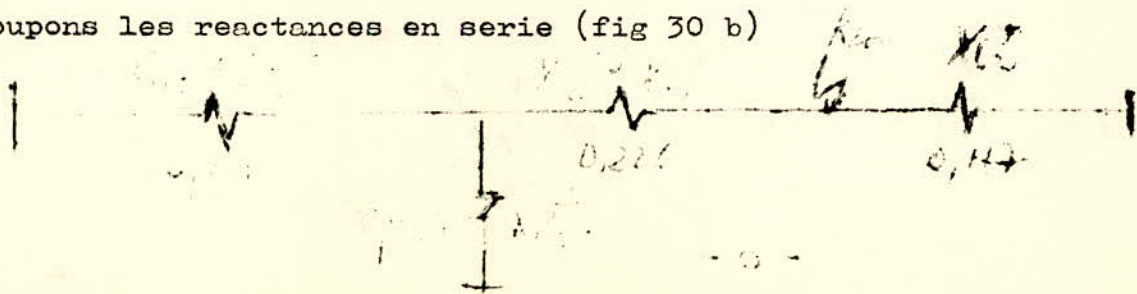
$$200 \text{ Km} \rightarrow X_{L1}^* = 0,156$$

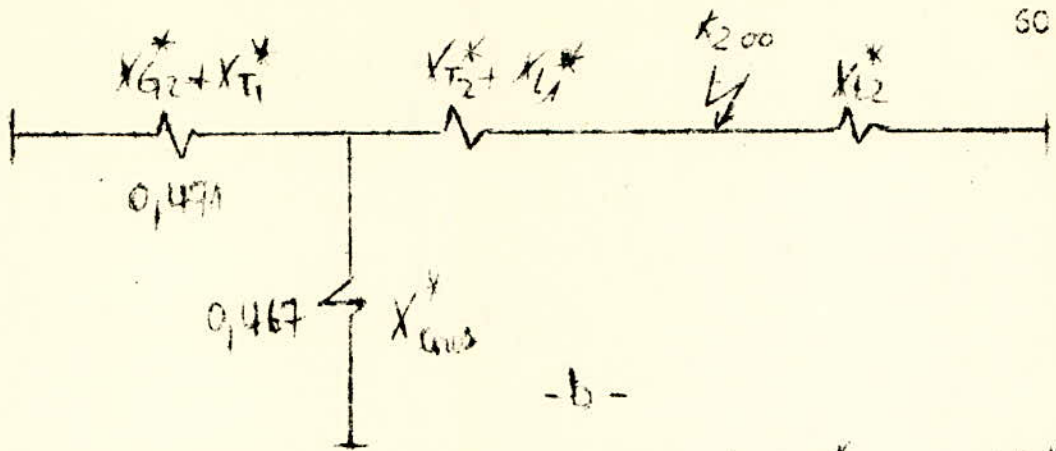
$$150 \text{ Km} \rightarrow X_{L2}^* = 0,117$$

Schema inverse:

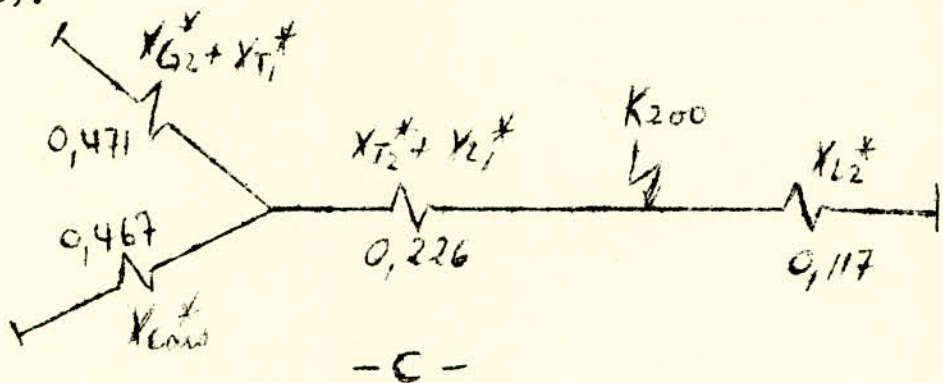


Groupons les reactances en serie (fig 30 b)





Vues du point K200, les reactances ( $X_{G2}^* + X_{T1}^*$ ) et  $X_{Lms}^*$  sont paralleles et sont en serie avec la reactances ( $X_{T2}^* + X_{L1}^*$ ) (fig 30 c).



Les reactances ( $X_{G2}^* + X_{T1}^*$ ) et  $X_{Lms}^*$  étant en parallele leur réactance equivalente sera;

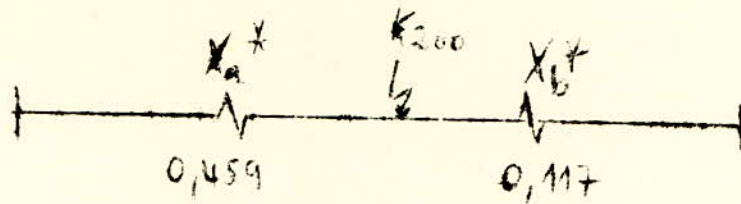
$$\frac{0,471 \cdot 0,467}{0,471 + 0,467} = 0,233$$

Soient

$$X_{e1}^* = 0,233 + 0,226 = 0,459$$

$$X_{L2}^* = X_{L2}^* = 0,117$$

Le schema devient (fig 30 d)



$$X_i^* = \frac{X_a^* \cdot X_b^*}{X_a^* + X_b^*} = \frac{0,459 \cdot 0,117}{0,459 + 0,117} = 0,093$$

$$X_i^* = 0,093$$

Appliquons cette reactance  $X_e^* = X_i^*$  equivalente au court circuit au reseau direct (fig 31)

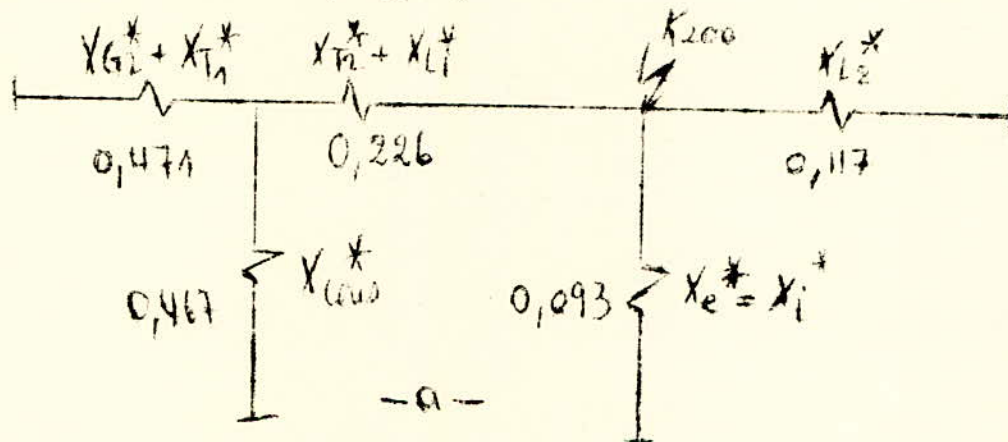
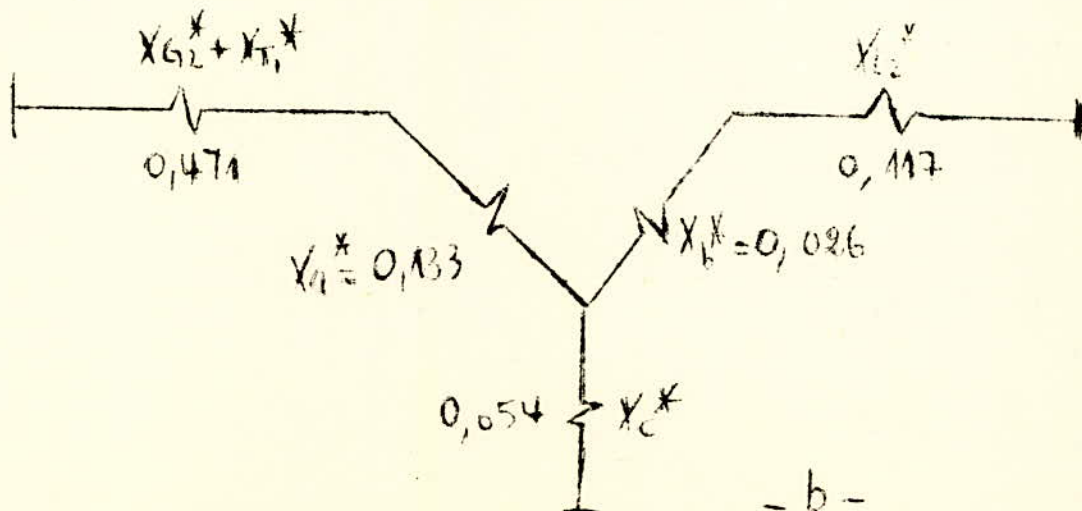


fig 31

Transfiguration du triangle en étoile:





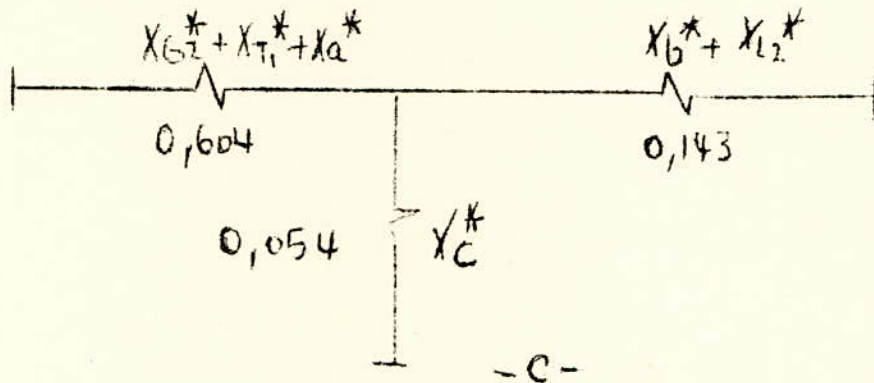
$$X_{\Sigma}^* = 0,226 + 0,467 + 0,093 = 0,786$$

$$X_a^* = \frac{0,226 \cdot 0,467}{0,786} = 0,133$$

$$X_b^* = \frac{0,226 \cdot 0,093}{0,786} = 0,026$$

$$X_c^* = \frac{0,467 \cdot 0,093}{0,756} = 0,054$$

La figure (31 b) devient .



calculons les réactances **resultante**  $X_{11}^*$  et de transfert  $X_{12}^*$  du schéma simplifié du réseau (fig 31).

$$X_{11}^* = 0,604 + \frac{0,143 \cdot 0,054}{0,143 + 0,054} = 0,642$$

$$X_{12}^* = 0,604 + 0,143 + \frac{0,604 \cdot 0,143}{0,054} = 2,33$$

$$\underline{X_{12}^* = 2,33}$$

On a vu que  $P_{mn}^*$  et  $P_0^*$  sont constantes et ont respectivement pour valeur 1,34 et 0,91.  $P_{mn}^*$  dépend de la réactance de transfert qui change suivant  $\delta$  et varie.

$$P_{ma}^* = \frac{E_1 \cdot U_2}{X_{12a}^*} = \frac{1,33 \cdot 1}{2,33} = 0,57$$

On se trouve exactement dans les mêmes conditions qu'au point de défaut K100.

Donc il faudrait la même réserve de puissance (soit  $4 \times 42 \text{ MW}$ ) pour que le synchronisme ne soit pas perdu.

### 5.6.2 Court circuit entre deux phases et la terre

$$X_e^* = \frac{X_o^* X_i^*}{X_o^* + X_i^*}$$

On sait que la reactance inverse  $X_i^* = 0,093$ , il nous reste à calculer la reactance homopolaire  $X_o^*$  afin de déterminer la reactance équivalente de court circuit  $X_e^*$  au point de défaut K200.

#### Calcul de la reactance homopolaire

On a suppose que  $X_{L0}^* = 4 X_L^*$

$$X_{L01}^* = 4 \cdot X_{L1}^* = 4 \times 0,156 = 0,624$$

$$X_{L02}^* = 4 \cdot X_{L2}^* = 4 \times 0,117 = 0,468$$

on a vu que le réseau homopolaire se limitait aux transformateurs qui ont une reactance homopolaire égale à la reactance tréphasée puisque leur point n'entre est à la terre.

#### Schéma homopolaire

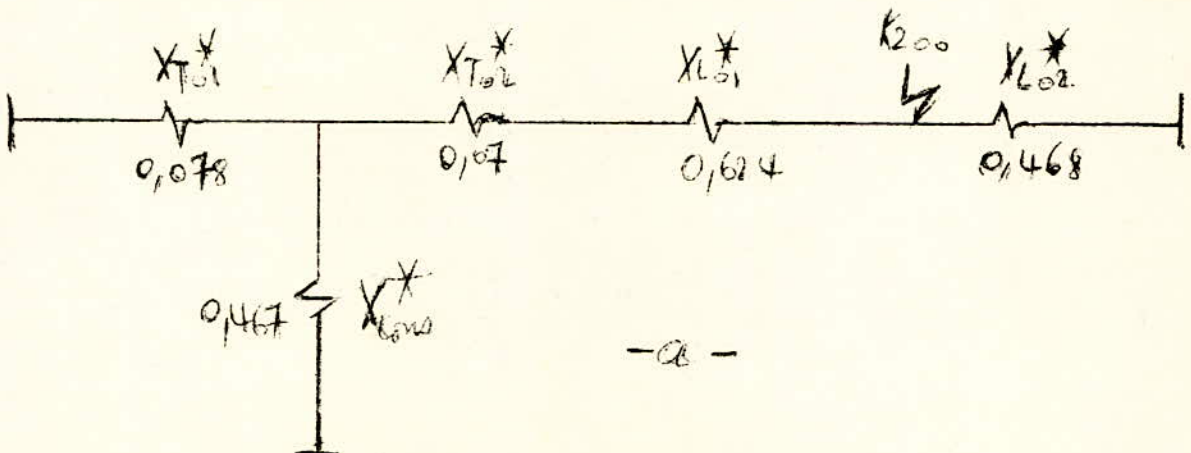
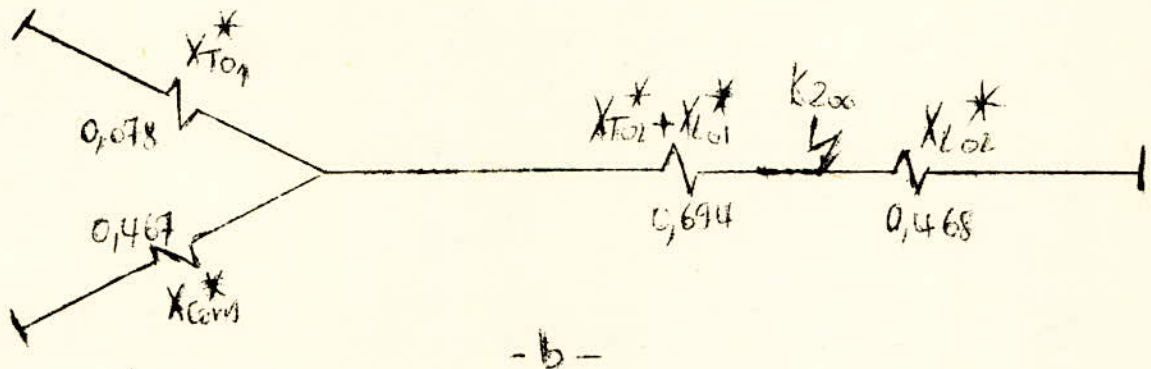


fig 32

transfiguration du schéma de la figure (32a) en 32b)



Posons :

$$X_a^* = (X_{T02}^* + X_{L01}^*) + \frac{X_{T01}^* \cdot X_{L02}^*}{X_{T01}^* + X_{C01}^*}$$

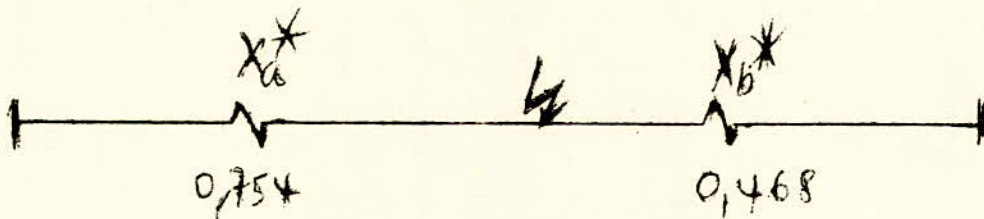
$$\text{et } X_b^* = X_{L02}^*$$

d'où :

$$X_a^* = 0,694 + \frac{0,078 \cdot 0,467}{0,078 + 0,467} = 0,754$$

$$X_b^* = 0,468$$

Le schéma devient : (fig 32 c)



d'où :

$$X_0 = \frac{X_a^* \cdot X_b^*}{X_a^* + X_b^*} = \frac{0,754 \cdot 0,468}{0,754 + 0,468} = 0,21$$

D'où la valeur de la reactance équivalente de court circuit au point K200:

$$X_e^* = \frac{X_o^* \cdot X_i^*}{X_o^* + X_i^*} = \frac{0,21 \cdot 0,093}{0,21 + 0,093} = 0,06$$

$$\underline{X_e^* = 0,06}$$

Calcul des reactances resultante  $X_{11}^*$  et de transfert  $X_{12}^*$

Schema du reseau:

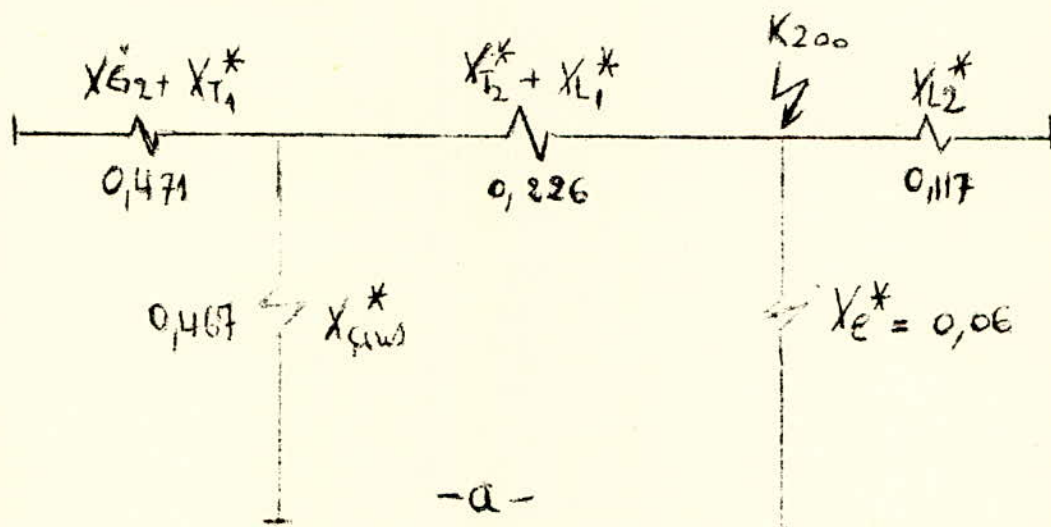
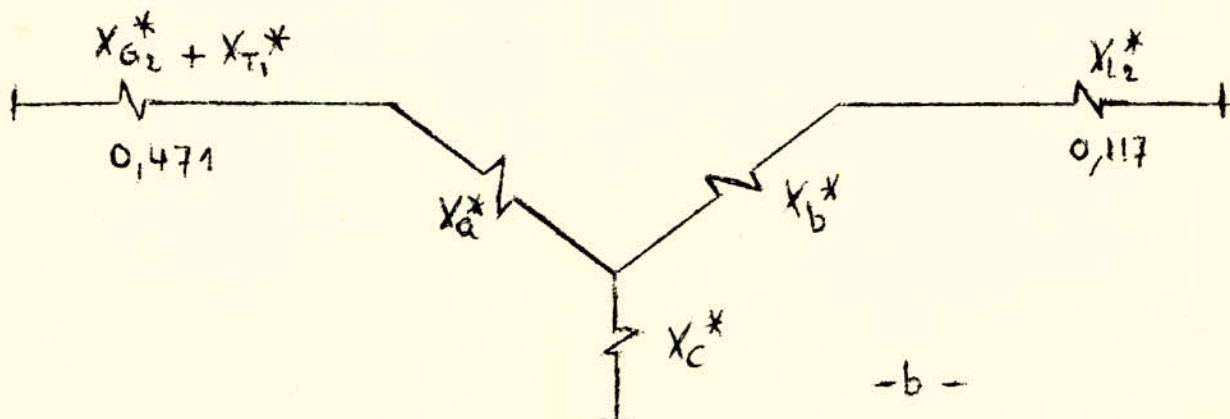


fig 33

On voit que seule la reactance équivalente au court-circuit ( $X_e^*$ ) change suivant le lieu et la nature du défaut.

Transfigurons le schéma du réseau de la figure 33(a) en transformant le triangle en étoile (fig 33 b)



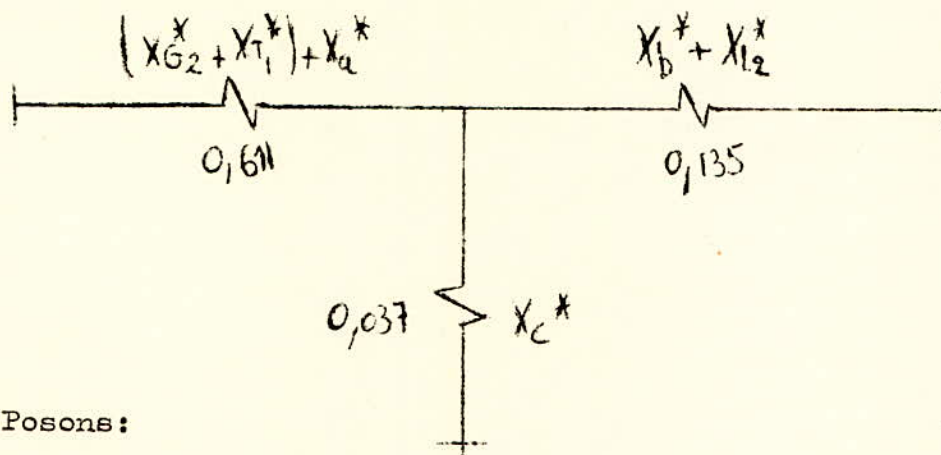
$$\text{Soit } X_{\Sigma}^* = 0,226 + 0,467 + 0,06 = 0,753$$

$$X_a^* = \frac{0,226 \cdot 0,467}{0,753} = 0,14$$

$$X_b^* = \frac{0,226 \cdot 0,06}{0,753} = 0,018$$

$$X_c^* = \frac{0,467 \cdot 0,06}{0,753} = 0,037$$

D'où le schéma final (fig 33 c) où les reactances sont mises en serie.



Posons:

$$(X_{G2}^* + X_{T1}^*) + X_a^* = X_1^* = 0,611$$

$$X_b^* + X_{L2}^* = 0,135$$

$$X_2^* = X_3^* = 0,037$$

Alors:

$$X_{11}^* = X_1^* + \frac{X_2^* \cdot X_3^*}{X_2^* + X_3^*} = 0,611 + \frac{0,135 \cdot 0,037}{0,135 + 0,037} = 0,64$$

Alors:

$$X_{12}^* = X_1^* + X_2^* + \frac{X_1^* \cdot X_2^*}{X_3^*} = 0,611 + 0,135 + \frac{0,611 \cdot 0,135}{0,037}$$

$$\underline{X_{11}^* = 0,64} \quad \underline{X_{12}^* = 2,97}$$

$$X_{12}^* = 0,99$$

$$X_{12}^* a = 2,97$$

$$P_{mn} = \frac{E_1 \cdot U_n}{X_{12}^*} = \frac{1,33 \cdot 1}{0,99} = 1,34$$

$$P_{ma} = \frac{E_1 \cdot U_2}{X_{12}^* a} = \frac{1,33 \cdot 1}{2,97} = 0,444$$

$$\text{Or } P_{mn} \sin \delta_0 = P_0^* \Rightarrow \sin \delta_0 = \frac{P_0^*}{P_{mn}} = \frac{0,91}{1,34} = 0,68$$

$$\mu = \frac{P_0^*}{P_{ma}} = \frac{0,91}{0,444} = 2,04$$

donc :

$$\boxed{\begin{aligned} \sin \delta_0 &= 0,68 \neq 0,70 \\ \mu &= 2,04 \end{aligned}}$$

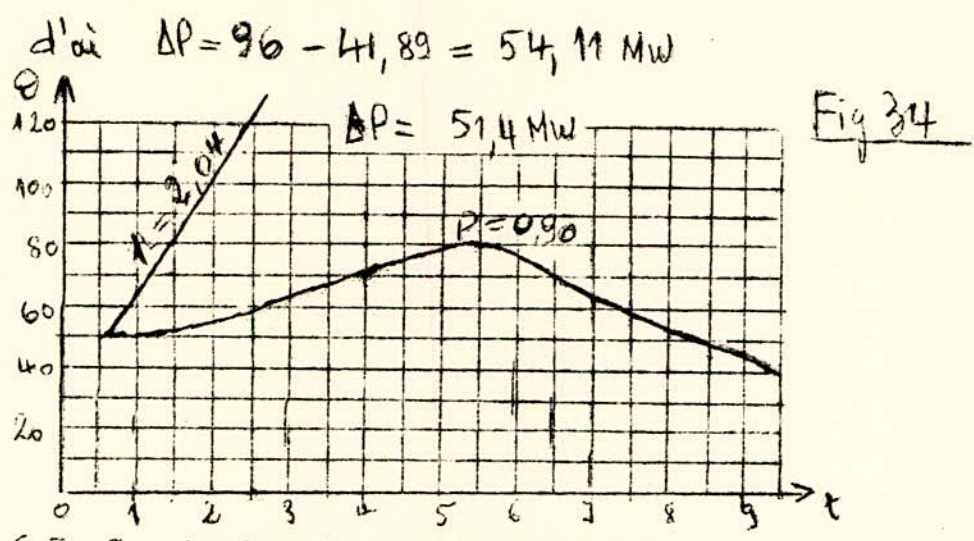
Le synchronisme est toujours perdu et dans ce cas il faudrait une réserve de puissance de  $\Delta P$ .

Calculons  $\Delta P$ :

$$\mu \leq 0,90 \quad (\text{limite de stabilité}).$$

$$\mu = \frac{P_0^*}{P_{ma}} = \frac{P_0^*}{0,444} = 0,90 \Rightarrow P_0^* = 0,444 \cdot 0,9 = 0,399.$$

$$\text{Or } P_0^* = \frac{P_0}{S_b} \Rightarrow P_0 = P_0^* \cdot S_b = 0,399 \cdot 105 = 41,89 \text{ MW}$$



5.6.3. Court circuit entre une phase et la terre

$$X_e^* = X_0^* + X_i^*$$

Avec  $X_0^* = 0,21$   
 $X_i = 0,093$

d'où  $X_e^* = 0,303.$

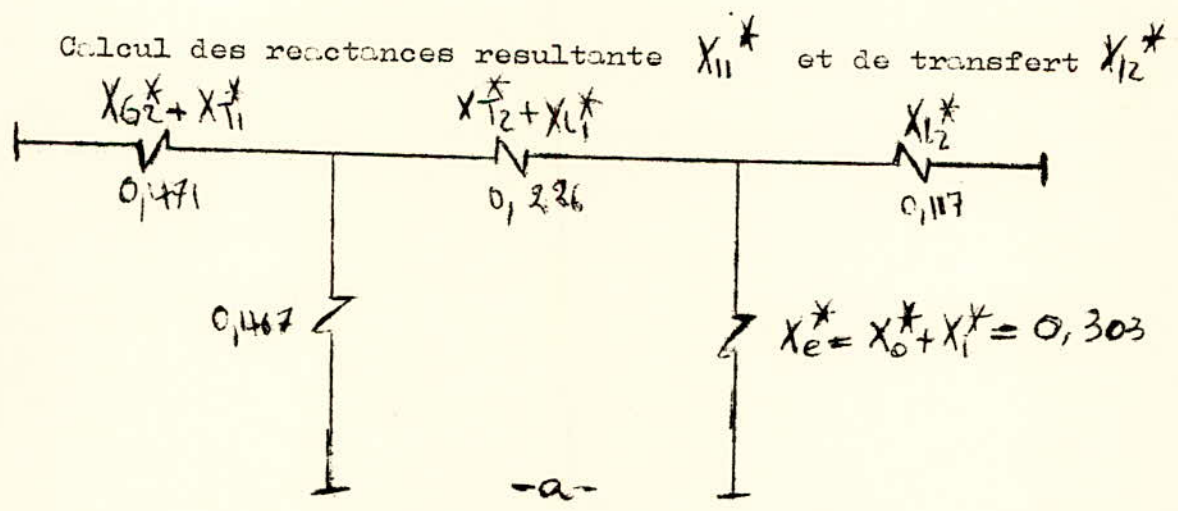
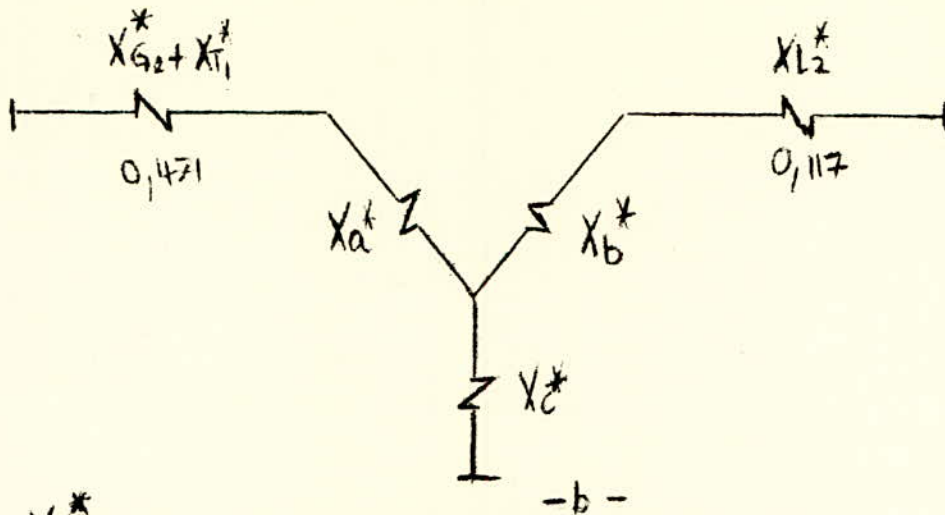


fig 35

Transfiguration du triangle en étoile (fig 35 b)



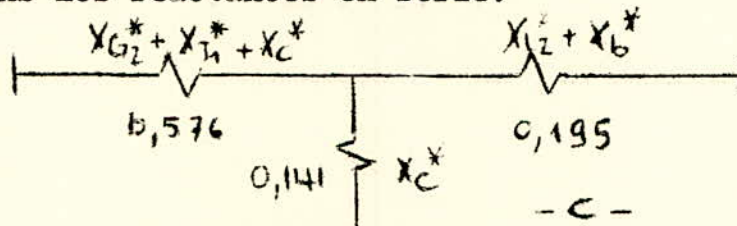
$$X_{\Sigma}^* = 0,226 + 0,467 + 0,303 = 0,996$$

$$X_a^* = \frac{0,226 \cdot 0,467}{0,996} = 0,105$$

$$X_b^* = \frac{0,226 \cdot 0,303}{0,996} = 0,078$$

$$X_c^* = \frac{0,467 \cdot 0,303}{0,996} = 0,141$$

Mettons les réactances en serie:



$$X_{11}^* = 0,576 + \frac{0,141 \cdot 0,195}{0,141 + 0,195} = 0,567$$

$$X_{12}^* = 0,576 + 0,195 + \frac{0,576 \cdot 0,195}{0,141} = 1,565$$

$$P_{mn}^* = 1,34 \quad ; \quad P_{ma}^* = \frac{1,33 \cdot 1}{1,565} = 0,84$$

$$\sin \delta_0 = 0,68 \neq 0,70$$

$$\mu = \frac{P_0^*}{P_{ma}^*} = \frac{0,91}{0,84} = 1,07$$

$$\Delta u_{10} = 0,7 \text{ et } p = 1,07$$



C'est le même cas que la figure 29; le synchronisme est toujours perdu et la réserve de puissance est  $\Delta P = 14,73$  MW.

### 5.7. Court-circuits au point K300 (à 300 Km d'Oran)

#### 5.7.1. Court -circuit diphasé

$$X_e^* = X_i^*$$

Valeurs de  $X_{L1}^*$  et de  $X_{L2}^*$

$$350 \text{ km} \longrightarrow X_{L1}^* = 0,273$$

$$300 \text{ km} \longrightarrow X_{L1}^* = 0,234$$

$$50 \text{ km} \longrightarrow X_{L2}^* = 0,039$$

#### Schéma inverse

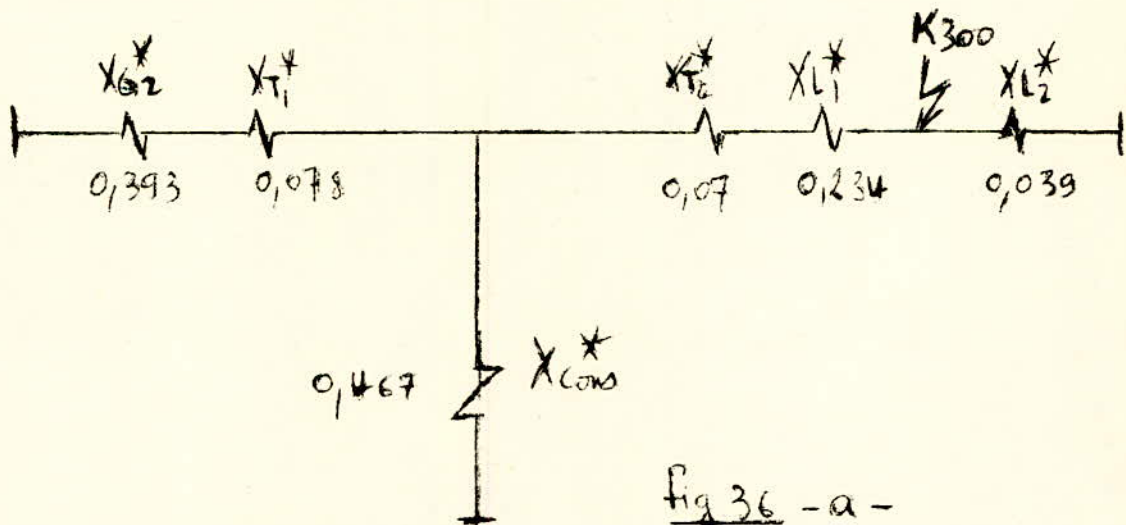
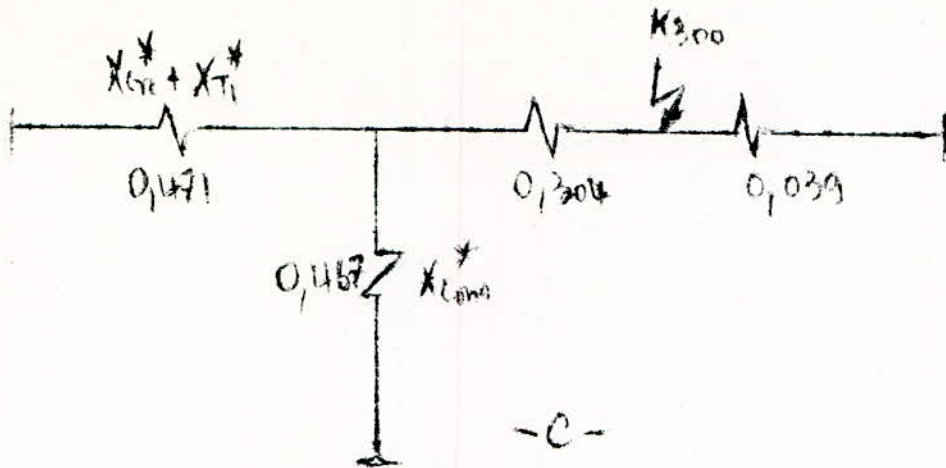
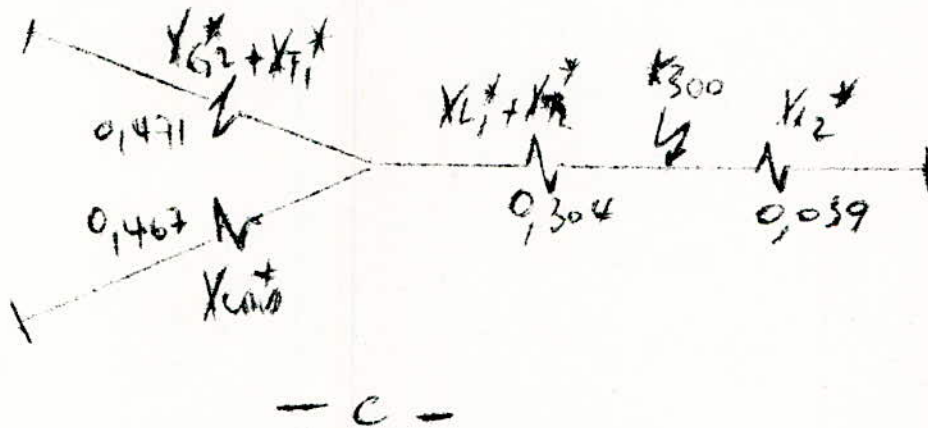


Fig 36 - a -

$X_{G2}^*$  et  $X_{T1}^*$ ,  $X_{T2}^*$  et  $X_{L1}^*$  étant en serie le schéma devient :



Vues du point de défaut K300, les reactances  $(X_{G2}^* + X_{T1}^*)$  et  $X_{Lons}^*$  sont en paralleles et sont en serie avec la reactance  $(X_{L1}^* + X_{L2}^*)$  figure (36 c).



$$\text{Soit } X_a^* = \frac{(X_{G2}^* + X_{T1}^*) \cdot X_{Lons}^*}{(X_{G2}^* + X_{T1}^*) + X_{Lons}^*} + (X_{L1}^* + X_{T2}^*) \quad \text{et } X_b^* = X_{L2}^*$$

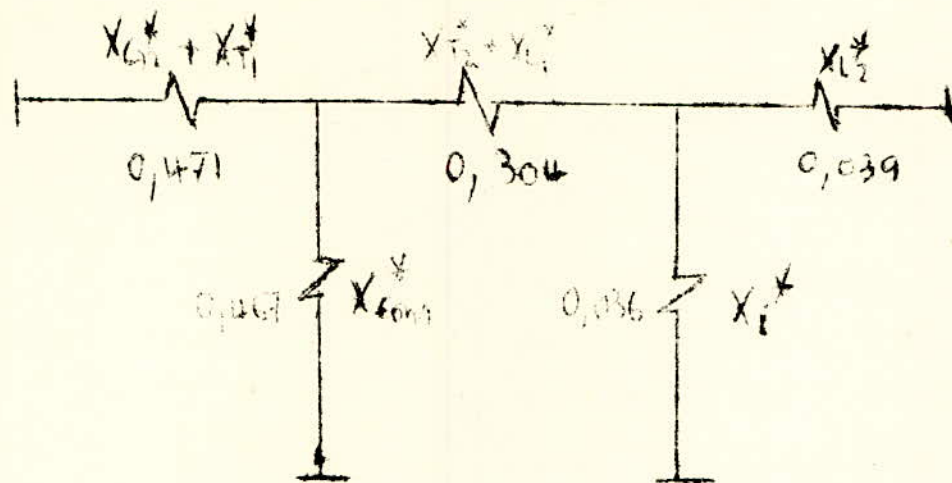
$$X_a^* = 0,538$$

$$X_b^* = 0,039.$$

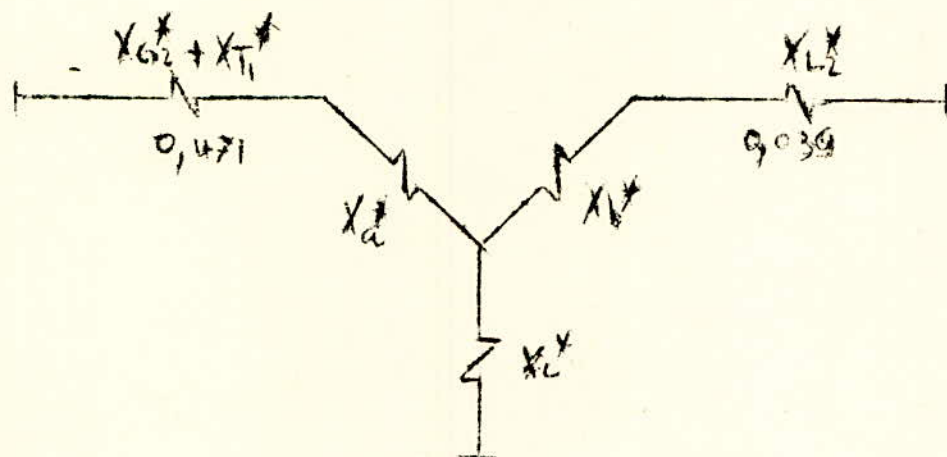
D'où la valeur de la reactance inverse:

$$X_1^* = \frac{0,538 \cdot 0,039}{0,538 + 0,039} = \underline{\underline{0,036}}$$

Calculons les reactances resultante et de transfert :  
le schéma du reseau devient (fig 37 a).



transfiguration de triangle en étoile : (fig 37 b).



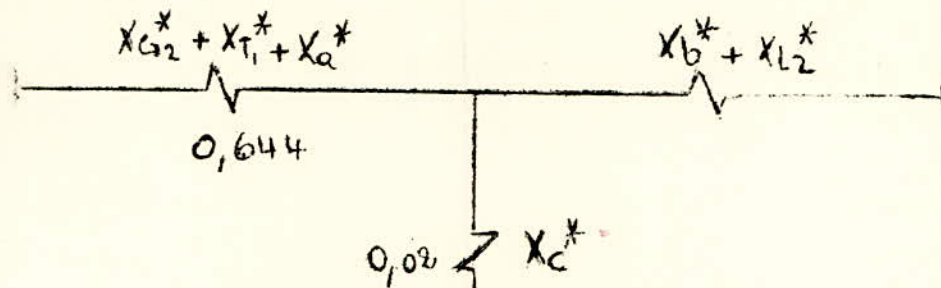
$$X_{\Sigma}^* = 0,304 \Rightarrow 0,467 + 0,036 = 0,807$$

$$X_a^* = \frac{0,304 \cdot 0,467}{0,807} = 0,176$$

$$X_b^* = \frac{0,304 \cdot 0,036}{0,807} = 0,013$$

$$X_c^* = \frac{0,467 \cdot 0,036}{0,807} = 0,02$$

Le schéma devient (fig 37 b) avec la mise en serie des reactances:



$$\text{D'où : } X_{11}^* = 0,644 + \frac{0,02 \cdot 0,052}{0,02 + 0,052} = 0,657$$

$$X_{12}^* = 0,644 + 0,052 + \frac{0,644 \cdot 0,052}{0,02} = 2,346$$

$$\underline{X_{12}^* = 2,346}$$

$$P_{ma}^* = \frac{E_1^* \cdot U_2}{X_{12a}^*} = \frac{1,33 \cdot 1}{2,346} = 0,56$$

On sait que :

$$P_0^* = 0,91 \text{ et } \sin \delta_0 \neq 0,70$$

$$P = \frac{P_0^*}{P_{ma}^*} = \frac{0,91}{0,56} = 1,62$$

donc :

$\sin \delta_0 \neq 0,70$ $P = 1,62$
--------------------------------------

et la réserve d'énergie électrique  $\Delta P$  serait de :

$$\mu = \frac{P_0^*}{P_{ma}} \leq 0,90 \Rightarrow P_0^* = P_{ma} \cdot \mu$$

$$P_0^* = 0,56 \cdot 0,9 = 0,5$$

$$P_0^* \cdot 56 = 0,5 \cdot 105 = 52,5 \text{ MW}$$

$$\Delta P = 96 - 52,5 = 43,5 \text{ MW}$$

### 5.7.2. Court - circuit entre deux phases et la terre

$$X_e^* = \frac{X_0^* \cdot X_i^*}{X_0^* + X_i^*}$$

La réactance inverse étant connue ( $X_i^* = 0,036$ ) on détermine la réactance homopolaire  $X_0^*$  afin de calculer la réactance équivalente de court - circuit au kilomètre 300 (K300).

Calcul de  $X_e^*$  :

$$X_{L01}^* = 4 X_{L1}^* = 4 \times 0,234 = 0,936$$

$$X_{L02}^* = 4 X_{L2}^* = 4 \times 0,039 = 0,156$$

Schema homopolaire:

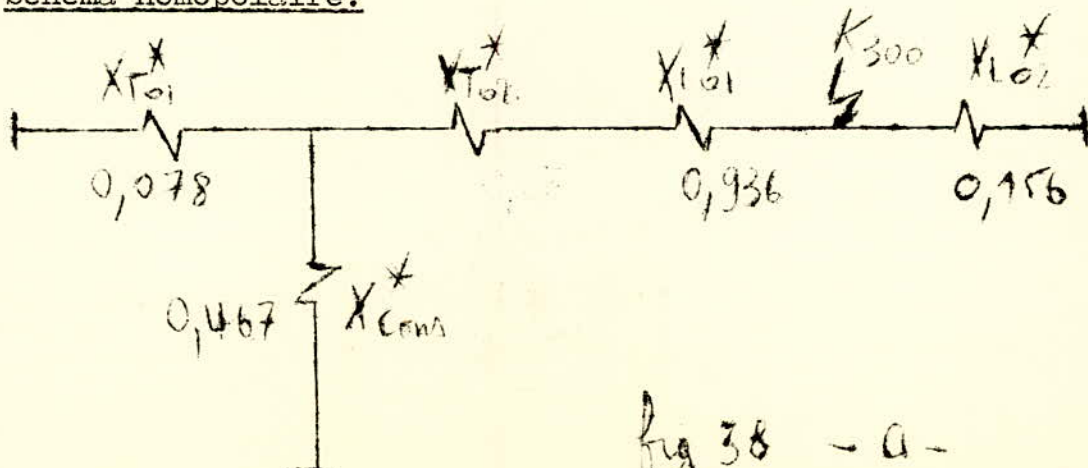
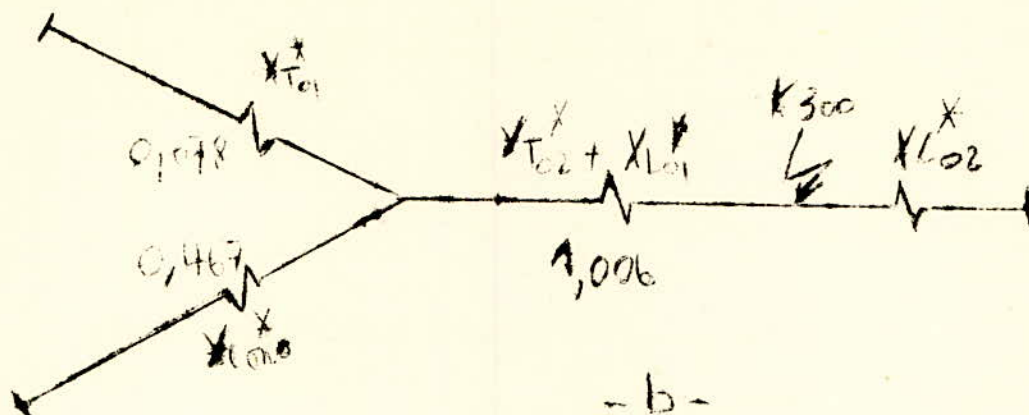


Fig 38 - a -

Les Scéma devient :



Posons :

$$X_a^* = \frac{X_{T01}^* \cdot X_{L01}^*}{X_{T01}^* + X_{L01}^*} + (X_{T02}^* + X_{L01}^*)$$

$$X_b^* = X_{L02}^*$$

D'où

$$X_a^* = \frac{0,078 \cdot 0,467}{0,078 + 0,467} + 1,006 = 1,042$$

$$X_b^* = 0,156$$

D'où le schéma simplifié :



$$X_0^* = \frac{X_a^* \cdot X_b^*}{X_a^* + X_b^*} = \frac{1,042 \cdot 0,156}{1,042 + 0,156} = 0,135$$

La valeur de la reactance équivalente de c'ct

Sera:

$$X_e^* = \frac{X_0^* \cdot X_1^*}{X_0^* + X_1^*} = \frac{0,135 \cdot 0,036}{0,135 + 0,036} = 0,028$$

$$\underline{X_e^* = 0,028}$$

Calcul des reactances resultant et de transfert :

Schéma du réseau

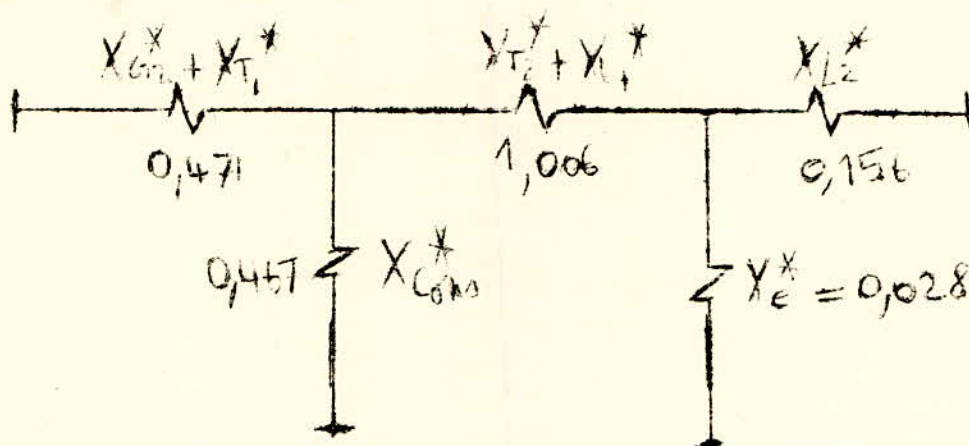
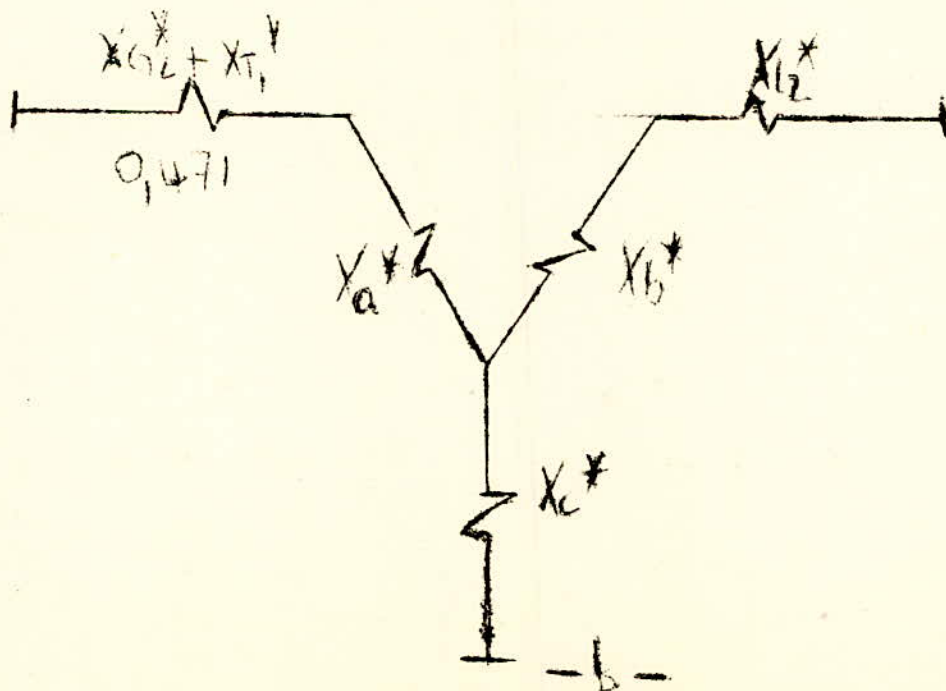


fig 39 a.

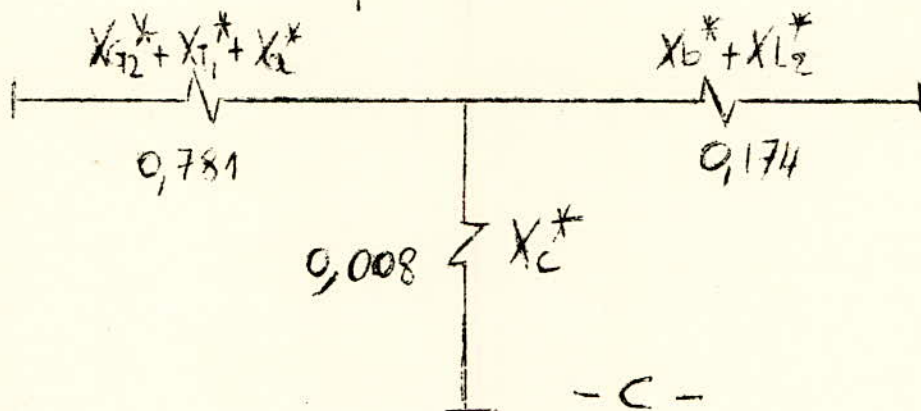


$$X_{\Sigma}^* = 1,006 + 0,467 + 0,028 = 1,5$$

$$X_a^* = \frac{1,006 \cdot 0,467}{1,5} = 0,31$$

$$X_b^* = \frac{1,006 \cdot 0,028}{1,5} = 0,018$$

$$X_c^* = \frac{0,467 \cdot 0,028}{1,5} = 0,01$$



On a transfiguré le triangle du schéma de la fig 39 -a- en étoile (figure 39 -b-) puis on a mis les reactances en serie en une reactance équivalente ainsi on obtient le schéma simplifié (fig 39 -c-) qui nous permet de calculer les reactances resultante et de transfert.

Posons :

$$X_{G2}^* + X_{T1}^* + X_a^* = X_1^* = 0,781$$

$$X_b^* + X_{L2}^* = X_2^* = 0,174$$

$$X_c^* = X_3^* = 0,01$$

et calculons  $X_{11}^*$  et  $X_{12}^*$



de la puissance serait dans ce cas:

$$I_a = \frac{P^*}{V_a} = \frac{100}{1,21} = 82,64 \Rightarrow I_a^2 = 6829,48 = 0,004$$

$$P^* = \frac{P}{\eta} \Rightarrow \frac{1}{\eta} = \frac{P^*}{P} \Rightarrow \eta = \frac{P}{P^*} = \frac{100}{100000} = 0,001$$

Donc :  $100000 - 0,001 \times 100000 = 99,999 \text{ kW}$

$\lambda = 15 - 5 \text{ km}$

5.7.3 Court - circuit entre une phase et la terre

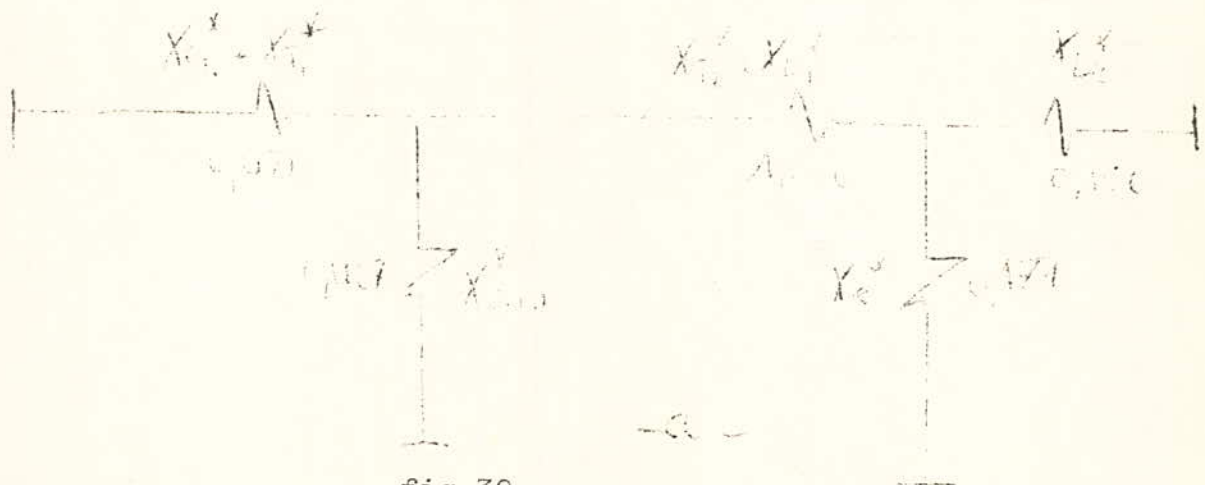
$$X_c^x = X_{L1}^x + X_{L2}^x$$

$$X_{L1}^x = 0,135$$

$$X_{L2}^x = 0,036$$

$$X_c^x = 0,171$$

Calcul des reactances resultante et de transfert :



Transfigurons du triangle en étoile :



$$X_c^y = (X_1^x + X_2^y) + X_{12}^z + X_c^y$$

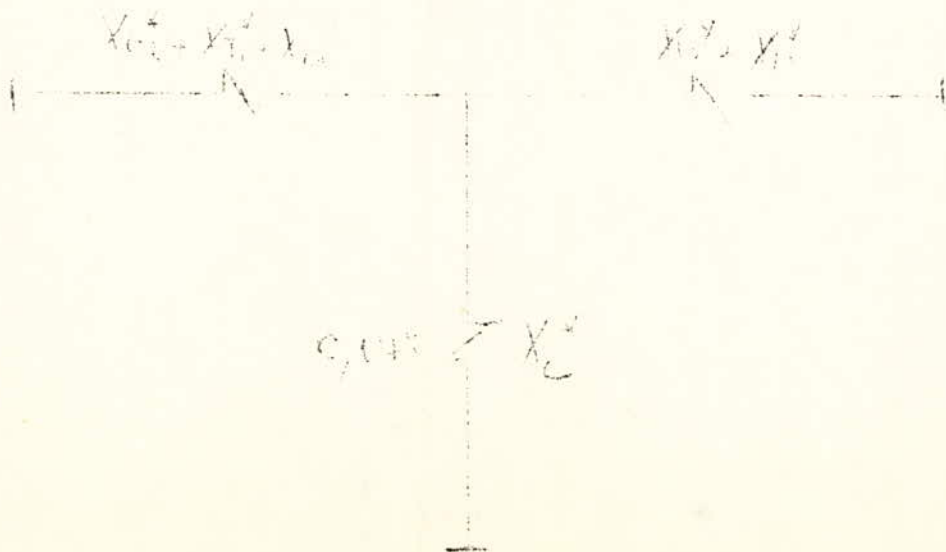
$$X_c^y = 1,200 + 0,200 + 0,100 = 1,500$$

$$X_a^x = \frac{1,200 \cdot 0,100}{1,500} = 0,080$$

$$X_b^y = \frac{0,200 \cdot 0,100}{1,500} = 0,013$$

$$X_c^z = \frac{0,100 \cdot 0,100}{1,500} = 0,007$$

Mettons les reactances en serie :



$$x_1^* = 0,750 + \frac{0,6 \cdot 0,045}{0,6 + 0,045} = 0,777$$

$$x_{10}^* = 0,750 + 0,25 + \frac{0,6 \cdot 0,25}{0,6 + 0,25} = 0,890$$

$$\underline{x_{10}^* = 0,90}$$

$$D_{\text{min}}^* = \frac{F_1 \cdot V_3}{x_{10}^*} = \frac{1,35}{0,90} = 0,26$$

$$\text{Soit } T_0 = 0,21 \neq 0,26$$

$$h = \frac{23}{P_{\text{min}}^*} = \frac{0,90}{0,26} = 3,5$$

D'où la caractéristique correspondante (fig 40).

on voit que le synchronisme est toujours perdu la réserve de d'énergie électrique serait de :

$$h \leq 0,30 \text{ (condition de stabilité de M. d'Alouite)}$$

$$h = \frac{P_0^*}{P_{\text{min}}^*} \leq 0,30$$

$$\Rightarrow P_0^* = P_{\text{min}}^* \cdot h$$

$$P_0^* = 0,26 \cdot 0,30 = 0,078$$

$$\Rightarrow P_0^* \cdot S_b = 0,078 \cdot 300 = \frac{24,57}{1000} \text{ MW}$$

$$\Delta P = 90 - 24,57 = 65,43 \text{ MW}$$

$$\underline{\Delta P = 71,43}$$



#### 5.7.4. Conclusion.

En analysant les résultats du calcul de stabilité pour différents points de court - circuit au long de la ligne, on constate que les risques de pertes de synchronisme augmentent au fur et à mesure que le court - circuit se produise le plus proche du système infini.

On pourra faire l'interprétation suivante:

Dans le régime normal, le consommateur ayant une puissance de 225 MVA, est alimenté de deux côtés (centre de la région d'Oran et le système). Au fur et à mesure que le court - circuit se produise près de système, la contribution de ce dernier à l'alimentation du consommateur diminue, et il reste à la centrale de se charger avec la différence.

La perte de synchronisme existe toujours à cause du fait que la centrale tourne presque à pleine charge et qu'il n'y a pas une autre liaison entre le consommateur et le système.

Le cas le plus défavorable est le court - circuit diphasé à la terre (2FN) au kilomètre 300 où l'augmentation de la reactance de transfert est très importante soit 13,5 fois la reactance de transfert en régime normal. On a vu que pour le maintien du synchronisme dans ce dernier cas de court - circuit, il faudrait que  $P_0$  soit égale à 0,945 MW soit plus de 1/100 de la puissance nominale. La contribution de cette centrale en régime normal est de 96 MW. La réserve de puissance nécessaire au maintien du synchronisme est de:  $=96 - 0,945 = 95,05$  MW.

Les conditions d'amélioration du maintien du synchronisme sont :

Soit de prévoir une réserve de puissance dans la centrale d'Oran.

Soit dans les premiers instants du court - circuit sur la ligne une protection spéciale dans le poste du consommateur .

TABLA DES MATIÈRES

1.	Introduction	1
2.	Stabilité Statique	2
2.1.	Groupe éloigné raccordé à un réseau de P	2
2.1.2.	Groupes répartis dans un réseau maillé	5
3.	Stabilité Dynamique	6
3.1.	Conditions risquent la perte de synchronisme	6
3.2.	Hypothèses et données générales	7
3.2.1.	Axe et flux liés au rotor d'un alternateur	8
3.2.2.	Constante d'accélération	9
3.2.3.	Machine synchrone équivalente à plusieurs autres	10
3.2.4.	Schémas directs équivalents à des déséquilibres	11
3.2.5.	Puissance interne d'une machine synchrone	12
3.2.5.1.	Calcul des impédances résultantes et de transfert	15
3.3.	Mise en équations du problème	17
3.4.	Machine synchrone reliée à un réseau P	19
3.5.1.	Méthode par échelons successifs	20
3.5.2.	Méthode des courbes pré <sup>l</sup> éminées	24
4.	Amélioration de la stabilité d'un réseau	26
4.1.	Groupes tournants	26
4.2.	Réseaux	28
5.	Etude pratique	29
5.1.	Calcul des réactances en grandeurs réduites	34
5.2.	Schéma du réseau équivalent dans le régime normal	36
5.3.	Différents défauts ( courts-circuits )	37
5.4.	Détermination de la réactance monopolaire	38
5.5.	Court-circuit au point K100	