

UNIVERSITE D'ALGER

10/75

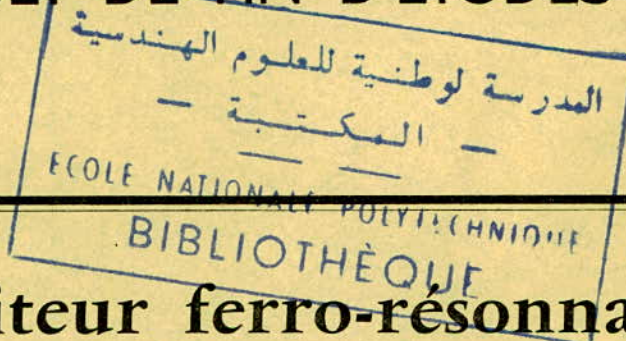
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Electrotechnique

200



PROJET DE FIN D'ETUDES



**Le limiteur ferro-résonnant
de courant de court-circuit**

Proposé par :

M. Gheorghiu CIRTINA
(Docteur - Ingénieur)

Etudié par :

M. Ali BOUGHACHICHE

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Electrotechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

**Le limiteur ferro-résonnant
de courant de court-circuit**

Proposé par :

M. Gheorghiu CIRTINA
(Docteur - Ingénieur)

Etudié par :

M. Ali BOUGHACHICHE

LE LIMITEUR FERRO-RESONNANT DE COURANT

DE COURT-CIRCUIT

(Projet de fin d'études)

par: BOUGHACHICHE Ali

==o-o-o==

Promoteur

M. Gheorghiu CIRTINA (Docteur-Ingénieur)

==o-o-o==

Président du Jury

Membres du Jury

==o-o-o==

Soutenu le:

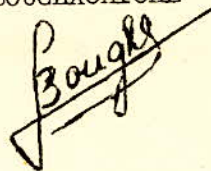
Juin 1975 à heures

==o-o REMERCIEMENTS o-o==

Qu'il me soit permis de remercier :

- * M. CIRTINA pour avoir dirigé ce projet et pour les conseils qu'il m'a donné pour l'élaboration de ce travail.
- * M. SAAL pour la traduction de l'article de l'A.I.M. qui m'a beaucoup servi.
- * Je remercie également et vivement M. STRIAPAN qui a bien voulu prendre la direction du projet durant l'absence de M. CIRTINA, et pour m'avoir suivi et aidé le long de mon travail.
- **Ma gratitude va également à tout le personnel qui a contribué -de loin comme de près- à ma formation.

Ali BOUGHACHICHE

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Boughachiche', written over a horizontal line.

0 TABLE DES MATIERES 0

	Pages
Introduction	1
Chapitre I: Les courts-circuits dans les réseaux électriques	3
I.1. Rappels sur les courts-circuits	3
I.1.1. Définition	3
I.1.2. Causes	3
I.1.3. Formes	4
I.1.4. Durée	5
I.1.5. Méthodes de calcul des courants de c.c.	6
I.2. Conséquences des courts-circuits	7
I.2.1. Surintensité	7
I.2.2. Effets électrodynamiques	8
I.2.3. Chute de tension	10
I.2.4. Conséquences dans les LEC et LEA	10
I.2.5. Autres répercussions	10
Chapitre II: Protection des réseaux électriques contre les courts-circuits. Limitation des courants.	12
II.1. Conditions imposées aux dispositifs de protection	12
II.2. Quelques types de protection	13
II.3. Méthodes utilisées pour limiter les courants de court-circuit.	13
II.3.1. Bobines de réactance	14
II.3.2. Fortes réactances d'alternateurs et de transformateurs	17
II.3.3. Choix d'un schéma rationnel d'interconnexion	17
II.3.4. Renforcement de l'isolation entre phases	18
II.3.5. Les circuits résonnants	18

	Pages
Chapitre III: Le limiteur ferro-résonnant de courant de court-circuit.	
III.1. Schéma et principe de fonctionnement	20
III.1.1. Schéma	20
III.1.2. Principe de fonctionnement	20
III.1.3. Calcul de l'impédance du limiteur	21
III.2. Choix des éléments du limiteur	23
III.2.1. Réactance X_L	23
III.2.2. Bobine à noyau de fer: LS	24
III.2.3. Calcul de C	26
III.2.4. Calcul de R	29
Chapitre IV: Mise en oeuvre du limiteur- Application-	31
IV.1. Régime normal de fonctionnement	31
IV.2. Régime de court-circuit	33
IV.3. Pertes dans le limiteur	34
IV.4. Application	37
Chapitre V: Le régime transitoire	47
V.1. Calcul des courants permanents avant commutation	47
V.1.1. $i(t)$	47
V.1.2. $i_C(t)$ et $u_C(t)$	48
V.2. Expression des courants libres	49
V.3. Application	55
Chapitre VI:	
VI.1. Rapport d'un essai expérimental à grande échelle	59
VI.2. Forme des courants et des tensions	60
VI.3. Autre avantage du limiteur dans le cas de la mise en parallèle	60
VI.4. Amélioration du limiteur	61
VI.5. Discussion sur la projection d'un limiteur	62
Conclusion:	64
	65

"L'AVENIR EST TOUJOURS INCERTAIN, MAIS ON PEUT FAIRE
CONFIANCE A L'HOMME POUR RESOUDRE LES INCONNUES DU
MOMENT. DANS LE PIRE DES CAS, IL POURRAIT TOUJOURS
ADAPTER LE RESEAU AUX POSSIBILITES DONT IL DISPOSE
AVEC CERTITUDE."

Marcel Pétard

INTRODUCTION

L'expansion, ou la modification, des réseaux électriques existants, (pour satisfaire la demande croissante en énergie électrique) l'interconnexion des réseaux de grande puissance, ne procurent pas seulement les avantages de l'exploitation, mais posent également des problèmes très sérieux du côté des courts-circuits.

Lorsqu'il s'agit des grandes puissances, des points d'injection dans les réseaux, la puissance de court-circuit augmente et atteint un tel niveau que, dans le cas d'une perturbation, les conséquences deviennent assez graves.

Les disjoncteurs qui étaient auparavant entièrement suffisants pour les besoins de protection contre les courts-circuits, peuvent devenir surchargés au point de ne pouvoir interrompre le défaut qu'au bout d'un certain temps. Ces problèmes toujours présents étaient résolus en construisant des disjoncteurs plus robustes, à pouvoir convenable de coupure du défaut; en renforçant l'installation, ou en prenant d'autres dispositions. Cependant, étant donné que les puissances augmentent constamment, les courants de courts-circuits sont devenus à nouveau un problème sérieux. Par exemple dans les réseaux à T.H.T. les courants de défauts atteignent des valeurs très supérieures au courant nominal, et à ce niveau là, en plus des effets thermiques, les forces électrodynamiques sont d'une importance particulière.

Cet état de choses oblige à réviser la conception de la protection des réseaux. Il n'est plus suffisant de se borner à utiliser un disjoncteur capable de couper une puissance de court-circuit élevée.

Naturellement les disjoncteurs peuvent être conçus et réalisés pour couper des niveaux d'avarie extrêmement élevés, mais même les plus modernes (à grand pouvoir de coupure) n'interrompent le défaut qu'au bout d'un certain temps. Ils protègent les installations contre les effets thermiques, mais ils ne permettent pas d'éviter complètement les efforts dynamiques.

C'est ainsi qu'en 1966 lors d'une réunion de la C.I.G.R.E.* l'Allemand B. KALKNER a proposé une solution dans le rapport N° 301: "Le limiteur ferro-résonnant de courant de court-circuit".

Les moyens connus pour la limitation des courants de court-circuit résolvent convenablement le problème, cependant ces procédés présentent des inconvénients sous beaucoup de points de vue, comme par exemple leur influence sur le fonctionnement des systèmes. Dans les cas les plus difficiles, ces inconvénients peuvent interdire l'utilisation de ces procédés classiques.

Par contre le dispositif du limiteur est une méthode de réduction qui non seulement a un effet négligeable sur le fonctionnement normal d'un réseau électrique, mais en outre augmente son efficacité et sa sécurité.

Le but de cette thèse est l'étude de ce limiteur. Après des courts rappels théoriques sur les courts-circuits et les différentes méthodes de limitation des niveaux d'avarie (chapitres I et II) nous examinerons le principe du dispositif (chapitre III). Dans le chapitre IV nous traiterons un exemple de calcul où le rapport de réduction du courant est imposé (donné). Enfin nous présenterons l'étude du régime transitoire et rapporterons des preuves expérimentales à grande échelle du limiteur ferro-résonnant de courant de court-circuit.

CHAPITRE I

Les Courts - Circuits dans les Réseaux Electriques

I.1 Rappels sur les courts-circuits

I.1.1 Définition

Les installations électriques sont formées de circuits constitués par des conducteurs séparés entre eux par des isolants. Pour que le courant passe, il faut que le circuit soit fermé. Par exemple, dans les réseaux de distribution à tension constante, tous les circuits sont fermés par une résistance ou une impédance réceptrice qui limite le courant à la valeur prévue par le constructeur. La tension doit être tenue indéfiniment, grâce à la rigidité diélectrique des isolants (s'ils ne sont pas détériorés). Il faut que les phases soient isolées entre elles, et aussi isolées par rapport aux parties conductrices de l'installation reliées à la terre. Ceci nous conduit à dire que :

Un court-circuit est la disparition intempestive de l'isolement relatif de deux conducteurs de tensions différentes, reliés à la même source sans interposition d'une impédance convenable. Le court-circuit peut être réalisé, soit par contact direct (deux conducteurs qui se touchent chute d'un corps conducteur sur une ligne aérienne), soit par détérioration ou claquage de l'isolant (arc). D'une façon plus simple, nous pouvons dire qu'un court-circuit est une liaison imprévue qui est établie entre les phases du réseau ou entre une phase et la terre, dans les conditions normales de fonctionnement.

I.1.2. Causes

Les causes de court-circuit sont multiples. Dans les installations électriques intérieures, les courts-circuits sont dus le plus souvent à la détérioration mécanique d'un isolant (frottement, écrasement, rongeur). Celle-ci est d'autant plus facile que l'isolant est vieux, et souvent soumis à des surtensions. Il en résulte soit un court-circuit franc (contact de conducteurs), soit un phénomène d'électrolyse dans les endroits humides. Parfois, encore, la rupture d'un conducteur dénudé (à un coude ou sur une cosse serrée) entraîne son déplacement et son contact avec un autre conducteur. Dans les lignes souterraines (en câbles), la rupture de l'isolant vient généralement des mouvements de terrain, des fausses manœuvres (ex : coups de pioche...), de l'infiltration d'humidité à travers l'enveloppe de plomb détériorée (corrosion chimique ou électrolytique.).

Sur les lignes aériennes, les courts-circuits sont encore beaucoup plus fréquents. (Par exemple en France, on a noté 10 courts-circuits en moyenne, par 100 Kms de longueur et par an, sur les lignes de T.H.T). Les causes de claquage ou de contournement d'un isolateur sont multiples: coup de foudre; action de l'humidité aggravée par les défauts des porcelaines, de leur scellement, ainsi que par les dépôts formés à la surface des isolateurs dans les régions industrielles; surtensions engendrées lors de certaines manoeuvres (surtout les fauses); jets de pierre etc.... Les courts-circuits sont aussi provoqués par le balancement des conducteurs sous l'action du vent (contact d'un conducteur avec le pylône, ou contact direct de deux conducteurs). Ils le sont encore par la mise en contact accidentelle d'une ligne avec des corps étrangers: branche d'arbre, oiseaux, chute d'un conducteur sur le sol, accident du personnel, etc... Dans les autres installations, l'avarie matérielle d'un appareil, le claquage de l'isolant d'un bobinage, ou bien une fausse manoeuvre (telles que l'ouverture en charge d'un sectionneur, l'enclenchement d'une ligne mise à la terre pour travaux) sont autant de causes de courts-circuits.

A titre d'information, la répartition des défauts dans les réseaux électriques est comme suit :

Courts-circuits sur les LEC et LEA	44,5%
- // - dans les centrales et Postes	55,5%

I-1-3. Forme

La forme des courts-circuits détermine l'importance de leurs effets. On sait qu'ils se manifestent souvent par un amorçage ou un arc. L'absence de l'impédance normale d'utilisation entraîne une surintensité, et la tension sur la ligne au voisinage du point de court-circuit est d'autant plus faible que celui-ci est parfait.

D'après leur origine, leurs caractères on peut distinguer des courts-circuits aléatoires, provoqués. En suivant le nombre de phases affectées, on en a des symétriques et des non symétriques.

Type de Court-Circuit	Symbole	Probabilité
Monophasé à la terre	PN	65 %
Biphasé à la terre	2PN	20 %
Biphasé	2P	10 %
Triphasé (triphasé à la terre)	3P 3PN	5 %

sont

Les courts circuits d'origine atmosphérique, en général, monophasés sauf en ce qui concerne les coups de foudre qui atteignent les trois phases à la fois. Malgré sa faible probabilité le calcul du 3P(N) représente un élément essentiel dans l'étude de n'importe quel réseau, et on le fait toujours.

I.1 -4. Durée

La durée d'un court-circuit prend deux aspects, suivant que l'on considère l'état du circuit ou les caractéristiques de la tension et du courant dans la partie du réseau qu'il atteint. Il est toujours le résultat direct d'un manque d'isolement en un point, qui parfois est durable (avarie de matériel): le court-circuit est dit "permanent". Par contre, souvent il n'y a aucune avarie d'isolant solide, ni aucun conducteur interposé. L'isolant (gazeux ou liquide) se reforme de lui-même autour de la zone atteinte dès la coupure du courant et la disposition de l'arc. Il suffit de remettre l'installation sous tension pour reprendre le service normal. On dit alors que le court-circuit était "fugitif". C'est le cas de nombreux incidents de lignes (à peu près 90 % des cas sur les lignes d'interconnexion). Lorsque le court-circuit est dû au balancement des conducteurs, on a un défaut fugitif qui se répète à intervalles rapprochés : on le qualifie alors d'"intermittent".

I.1-5. Méthodes de calcul des courants de court-circuit

Pour calculer les courants de défauts, on dispose de plusieurs méthodes. Il n'est pas question de les étudier dans notre cas, nous allons simplement donner quelques hypothèses générales de calcul, qui dépendent du but du calcul. Ainsi pour déterminer les efforts qui apparaissent lors d'un défaut, on peut admettre que :

- les circuits magnétiques ne sont pas saturés.
- Les courants de magnétisation des transformateurs sont négligeables.
- On néglige les capacités des lignes (sauf dans le cas de lignes longues et dépassant 220 KV).
- On néglige les résistances des lignes aériennes.
- Les charges sont négligeables (on considère uniquement la contribution des moteurs proches et qui dépassent 1000 KVA)
- En ce qui concerne les alternateurs on utilise les réactances suivantes :

X'' = réactance subtransitoire longitudinale ^{pour} le calcul des efforts dynamiques et thermiques

X' = - - transitoire longitudinale pour le calcul du courant de court circuit au temps $t = 0,1$ s, et l'étude de la stabilité dynamique

X_d = - - synchrone longitudinale pour le calcul des courants non symétriques (de longue durée).

Pour calculer les courants de défauts des régimes assymétriques, on utilise la méthode des composantes symétriques.

Dans les installations électriques (centrales et postes), on remplace les éléments du système avarié par leur réactance et on calcule la réactance équivalente. Il est conseillé de travailler en grandeurs réduites. On détermine les courants de court-circuit à l'aide de "Courbes de calcul" établies dans ce but. (Les réactances de calcul sont calculées en fonction des éléments du schéma en considérant les réactances des générateurs comme constantes et égales aux réactances subtransitoires).

I-2. Conséquences des Courts-Circuits

Les courts circuits dans les systèmes électroénergétiques sont des avaries très graves avec des répercussions négatives sur le fonctionnement des systèmes. En particulier la stabilité du réseau est affectée. Leurs conséquences sont dues aussi bien aux effets de la surintensité qu'à ceux de la chute de tension qu'ils entraînent.

I-2-1: La surintensité.

a) Elle peut être considérable. soit, par exemple, à l'intérieur d'une usine une ligne électrique en câble (LEC) de longueur 300 mètres, d'impédance $Z = 0,3\Omega$, fonctionnant à la tension triphasée de 10 Kv. Elle alimente un transformateur abaisseur 10/6 Kv de 2000 KVA. (Fig 1)

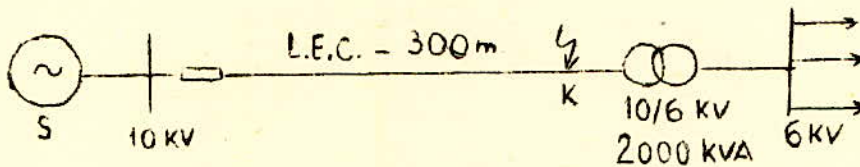


fig-1-

Supposons un court-circuit au point K, à proximité du transformateur. La puissance transmise est $S = \sqrt{3} U_1 I_1$ en régime normal ($L =$ ligne). Si la chute de tension en ligne ΔU_1 est négligeable, le courant correspondant à la pleine charge du transformateur est : $I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 115,6 \text{ A}$. Au court circuit (côté H.T. du transformateur), le courant dans la ligne ne sera plus limité que par l'impédance Z .

$$I_{cc} = \frac{U}{Z} = \frac{10/\sqrt{3}}{3 \cdot 10^{-1}} \cdot 10^3 = 19268 \text{ A}$$

On voit que $I_{cc} = 167 I_n$!

En réalité I_{cc} serait moindre. En effet, nous avons admis que, pendant le court circuit la tension restait 10 KV à l'entrée de la LEC, alors qu'elle baisserait certainement.

Cependant, si le réseau alimentant cette ligne était très puissant, la valeur de I_{cc} pourrait s'approcher de celle que nous venons de calculer.

Il est très important de remarquer que l'intensité du courant de court circuit ne dépend uniquement que des caractéristiques du réseau situé en amont du défaut (du côté de son alimentation) et non des récepteurs alimentés en aval.

b) Les conséquences de la surintensité sont multiples :

- La quantité de chaleur dégagée par l'arc électrique, ou celle dépensée dans le contact imprévu, peuvent fondre les métaux environnants, carboniser les isolants et déclencher un incendie.

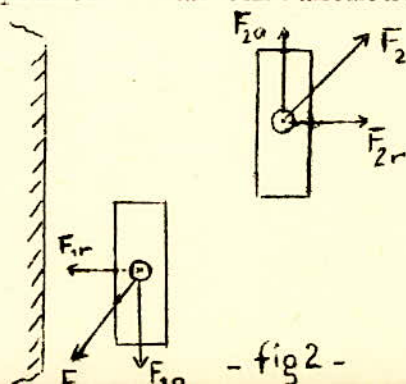
- L'échauffement de tous les conducteurs parcourus par le courant de court - circuit est loin d'être négligeable. Il concentre ses effets sur les points faibles : manchons de linges, mâchoires de sectionneurs ...

- Les efforts électrodynamiques posent des problèmes très sérieux, et ils ne sont pas à négliger.

I-2-2: Les efforts électrodynamiques.

a) Transformateurs : Les enroulements sont véritablement secoués. A l'apparition du court-circuit il y a des forces électrodynamiques qui naissent dans le transformateur, et elles agissent sur les spires. Ces forces peuvent conduire à des sollicitations mécaniques d'une grande valeur, allant jusqu'à la détérioration. Dans un même temps nous avons une augmentation du champ de dispersion magnétique entre les enroulements. Ces forces se décomposent en deux: forces axiales et forces radiales. (fig 2).

Les composantes axiales agissent dans une direction perpendiculaire au plan des spires et tendent à les écarter entre elles; (on prend des mesures pour que ces forces soit faibles, surtout en ce qui concerne la partie de réglage du transformateur); tandis que les composantes radiales tendent à comprimer un enroulement sur le noyau ferromagnétique et à en écarter en outre



- fig 2 -

$$\vec{F}_1 = - \vec{F}_2$$

On démontre que la force maximale radiale est

$$F_{rn} = \mu_0 \cdot 10^4 \left(\frac{k_{cc} I_{cc} \omega_1}{(U_{cc})^2} \right)^2 \frac{\pi D_m}{H_n} K_r (N)$$

U_{cc} = tension de c.c % , $\omega_1 = n^{bre}$ de spires

$K_{cc} = f(S_n)$ $k_{cc} = 1,2 \div 1,9$; H_n = hauteur du noyau

D_n = diamètre moyen des spires ; k_r = coef de Rogowski.

On peut aussi calculer la force de répulsion par m² de surface de bobine. On obtient

$$F_{\text{rép}} = 2\mu_0 \left(\frac{w_1 1,8 I_{cc} \sqrt{2}}{2b} \right)^2 N_m^2$$

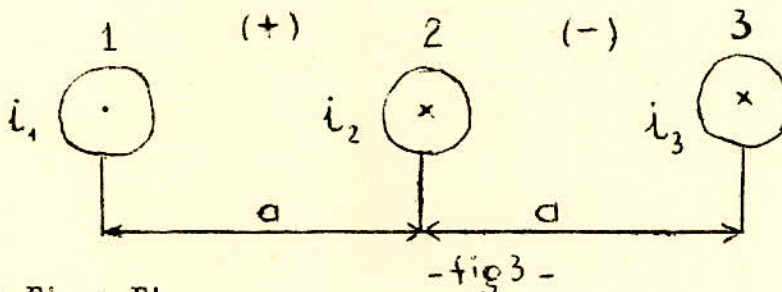
b = épaisseur de la bobine

Toutes ces forces électrodynamiques sont périodiques, leur fréquence étant d'une valeur double par rapport à celle du réseau. Il est à signaler que dans le fonctionnement normal du transformateur, ces forces existent aussi mais leurs valeurs ne représentent aucun danger pour la durée de service de l'appareil. Pendant le court-circuit elles augmentent de quelques centaines de fois, peuvent provoquer l'avarie et même la détérioration du transformateur.

b/ Jeux de barres.

En régime de court-circuit, les forces électrodynamiques sont maximales. Nous pouvons avoir une élongation du matériau et la déformation du conducteur, aussi que de la colonne isolante. Le courant de défaut produit une charge dynamique appliquée presque instantanément de façon que la force maximale sur une colonne isolante approche deux fois la valeur de la force en régime permanent.

Soit, par exemple, un jeu de barres triphasé (fig 3). L'effort maximal est exercé sur la barre du milieu (2).



$$F_2 = F_{23}' + F_{21}'$$

Après un calcul élémentaire on aboutit à l'expression de F_2 , en régime de court-circuit

$$F_{2cc} = \frac{\mu_0}{2\pi a} 2I_{cc}^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\sin(2\omega t + 2\psi - \pi/3) - 2e^{-t/Ta} \sin(\omega t + 2\psi - \pi/3) + e^{-t/Ta/2} \sin(2\psi - \pi/3) \right]$$

La force maximale, qu'on appelle force de choc, est obtenue pour $t = 0,01$ s

$$F_2 \text{ choc} = - 0,87 \frac{M_0}{2\pi a} 2 I_{cc}^2 K_{choc}^2 \quad (N)$$

avec $K_{choc} = \text{coef de choc} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} = 1,$

On voit ainsi que F_2 choc est proportionnelle au carré du courant de court-circuit.

I-2-3 : Chute de tension

Le deuxième aspect par lequel se traduit un court-circuit en général (après la surintensité) est la chute de tension. Les effets s'ils font courir moins de danger au matériel, n'en sont pas moins gênants. La tension devenant quasi-nulle au voisinage d'un court-circuit, les moteurs synchrones décrochent si sa durée dépasse quelques secondes. Dans certains cas, on risque même la rupture du synchronisme entre centrales, ce qui retarde considérablement la reprise du service normal.

I-2-4 : Conséquences dans les LEC et LEA

- Pour les câbles, lors d'un court-circuit, on peut avoir des déplacements et soulèvements des dalles recouvrant les caniveaux dans lesquels étaient placés ces câbles.

- L.E.A : Si une ligne de transport ou de distribution d'énergie reste pendant un certain nombre de kilomètres à faible distance -jusqu'à 1 Km environ) d'une ligne de télécommunications (téléphone, télégraphe), les courants de court-circuit monophasé de la première induisent dans la seconde des tensions (pouvent atteindre 1000 volts et plus) qui risquent d'endommager les installations de transmissions, et de causer des accidents du personnel. Ainsi on est amené à prendre des précautions à ce sujet : à savoir l'éloignement des lignes de télécommunications, renforcement de leur isolement et limitation des courants de court-circuit dans les réseaux de transport et de distribution d'énergie.

I-2-5 : Autres répercussions.

- Tout défaut déséquilibré provoque l'apparition de composantes inverses et homopolaires dans les tensions et les courants. (Au point de court-circuit ces composantes sont maximales).

- Différence de phase ou d'amplitude entre le courant à l'entrée et le courant à la sortie d'un élément du réseau.

- Inversion du sens de la puissance entre l'entrée et la sortie du système avarié.

CHAPITRE II

PROTECTION DES RESEAUX ELECTRIQUES CONTRE LES COURTS CIRCUIT-LIMITATION DES COURANTS.

Les conséquences des courts-circuits nécessitent et justifient des mesures appropriées. On utilise des dispositifs qui agissent lors de l'apparition d'une perturbation. Mais tout système de protection doit répondre à certains critères de base.

II- 1. Conditions imposées aux dispositifs de Protection

Lorsqu'un élément de réseau : machine transformateur, ligne, etc... est le siège d'un court-circuit (ou d'un défaut d'isolement) il est indispensable de le mettre le plus rapidement possible hors tension afin de limiter les dégâts que peuvent causer l'arc ou les courants de défauts et d'éviter les répercussions que le maintien d'un court-circuit aurait sur le fonctionnement général du réseau, en particulier sur sa stabilité. Les systèmes de protection jouent un rôle important dans le fonctionnement des réseaux de transport et de distribution d'énergie, puisque c'est d'eux que dépendent en grande partie la sécurité de tout l'ensemble et la continuité de service. Ainsi un système de protection bien établi doit :

- retrancher à coup sûr, du réseau, l'organe affecté d'un défaut et n'éliminer que celui-ci en laissant en service tous les éléments sains (selectivité.),
- fonctionner dans un temps aussi court que possible pour limiter les dégâts dus aux arcs et aux courants de court-circuits,
- avoir un comportement indépendant, dans une mesure aussi large que possible, de la configuration du réseau. (Il doit laisser toute liberté de manoeuvre : mise en parallèle, bouclage , etc...),
- rester indifférent aux surcharges.
- Le fonctionnement des protections doit avoir lieu, quelles que soient les intensités des courants de court-circuit, la nature et la position des défauts.
- Les systèmes de protection doivent enfin rester insensibles aux oscillations qui se manifestent dans les tensions, les courants et les puissances. A titre d'indication, nous allons donner quelques types de protections utilisés dans les réseaux électriques (sans aucun détail)

II-2 : quelques types de Protections.

- Protection des alternateurs.

Parmi les systèmes utilisés, nous avons des dispositifs de protection thermique qui comportent soit des sondes thermélectriques, soit des sondes bobinées en fil nickel. Ces appareils fonctionnent sur le principe du thermomètre à résistance. Pour les alternateurs avec réglage automatique de tension on utilise - afin de limiter les courants de court-circuit - un système de " desexcitation rapide ".

- Protection des jeux de barres

- par drainage des courants de défauts.
- par deux transformateurs de courant sans fer dans le secondaire et montés en série.

- Protection des lignes

- par relais temporisé à maximum d'intensité
- protection différentielle.
- protection à distance : - relais de réactance
- relais d'admittance.
- Protection par comparaison des courants des phases un moment du court-circuit
etc....

- Protection en Basse Tension.

On utilise des disjoncteurs limiteurs dont les intensités nominales ≥ 800 A et pouvoir de coupure compris entre 50.000 A et 100.000 A; temps d'intervention 10/1000 de seconde.

Nous allons maintenant étudier une protection très efficace. Elle consiste en la limitation des courants de courts-circuits.

II-3 : Méthodes utilisées pour limiter les courants de courts-circuits

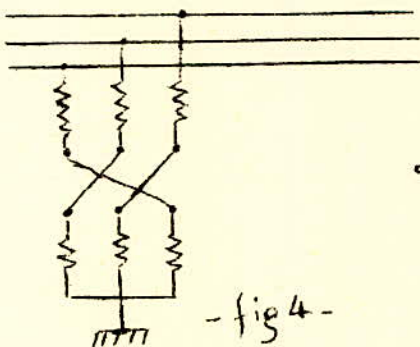
Malgré les dispositions préventives, les défauts se produisent dans les réseaux électriques. Nous avons vu que les effets les plus importants des courts-circuits sont dus à la surintensité qu'ils entraînent. La limitation de cette surintensité est nécessaire dans un grand nombre de cas. Différents systèmes sont utilisés pour réduire les courants de défauts. Examinons les dispositifs souvent utilisés dans les réseaux électriques.

II-3-1 : Les Bobines de réactance.

L'utilisation d'impédances additionnelles sous forme de bobine de réactance, en série, est une méthode de limitation du courant. Mais il y a des cas où ces bobines peuvent conduire à des désavantages qui aggravent les problèmes déjà existants dans un réseau, exemple : problème de réglage de la tension, stabilité des machines. Ainsi ces bobines sont le plus souvent employées dans le cas où le degré exigé de la réduction du niveau d'overie n'est pas élevé. D'habitude une bobine avec une impédance de quelques (%) suffit.

II-3-1-1 : Les impédances de Neutre.

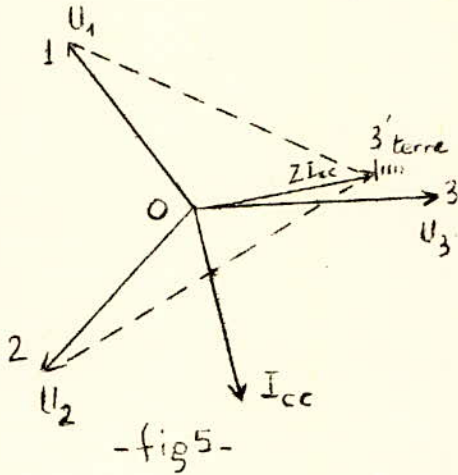
(Méthode appliquée uniquement aux courts-circuits entre une phase et la terre (masse)). Dans les réseaux électriques dont le neutre est relié à la terre, plus de 80 % des courts-circuits sont monophasés, c'est-à-dire que leur courant de retour passe par le sol. Pour en limiter l'intensité, on introduit une impédance dans le circuit de mise à la terre du neutre des transformateurs ou des machines. Cette impédance peut être localisée dans une résistance ou dans une réactance (souvent) mises en série dans la connexion qui relie le point neutre à la terre. Elle peut être aussi la réactance de fuites d'une "bobine de point neutre" : bobine à deux enroulements montés sur chaque colonne magnétique et reliés en zig - zag. (fig-4) (Cette bobine s'utilise sur les réseaux dont les transformateurs couplés en triangle, ne possèdent pas de point neutre à la tension considérée.).



.Bobine de point neutre

- fig 4 -

Soit, par exemple, un réseau triphasé, supposons un court-circuit entre la phase 3 et la terre (fig 5), et Z l'impédance qu'on insère dans le circuit de mise à la terre. Cette impédance Z , parcouru par le courant de court-circuit I_{cc} , porte alors le point neutre du réseau à la tension ZI_{cc} par rapport à la terre.



La tension entre le point neutre(0) du réseau et la terre est $ZI_{cc} = U_{3'}$; sensiblement en phase avec U_3 . I_{cc} est déphasé de près de $\pi/2$ en arrière.

Pour les phases saines 1 et 2 on aura alors les tensions $U_{13'}$ et $U_{23'}$, qui sont des tensions composées au lieu de U_1 et U_2 en régime normal.

Donc cette solution, si elle réduit le courant

de court-circuit, fait apparaître un autre danger: celui de la surtension des conducteurs sains par rapport à la terre. On est cependant obligé de l'adopter soit pour réduire la fatigue des disjoncteurs qui coupent le courant de défaut, soit pour limiter à une valeur acceptable l'induction dans les lignes de télécommunications.

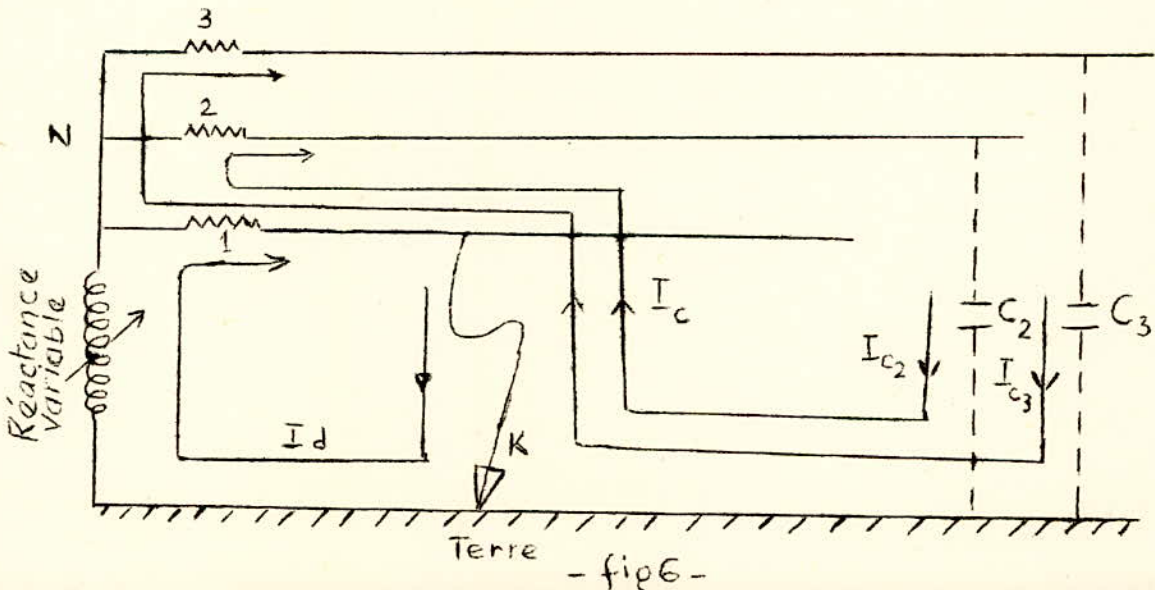
II-3-1-2 : Les réactances variables.

(Méthode appliquée uniquement aux courts-circuits monophasés)

Dans certains réseaux, dont le schéma est simple et la configuration stable (surtout les réseaux à M.T.) on peut relier le neutre à la terre par des réactances variables (fig-6-). Celles-ci sont réglées de façon telle que se compensent dans le défaut:

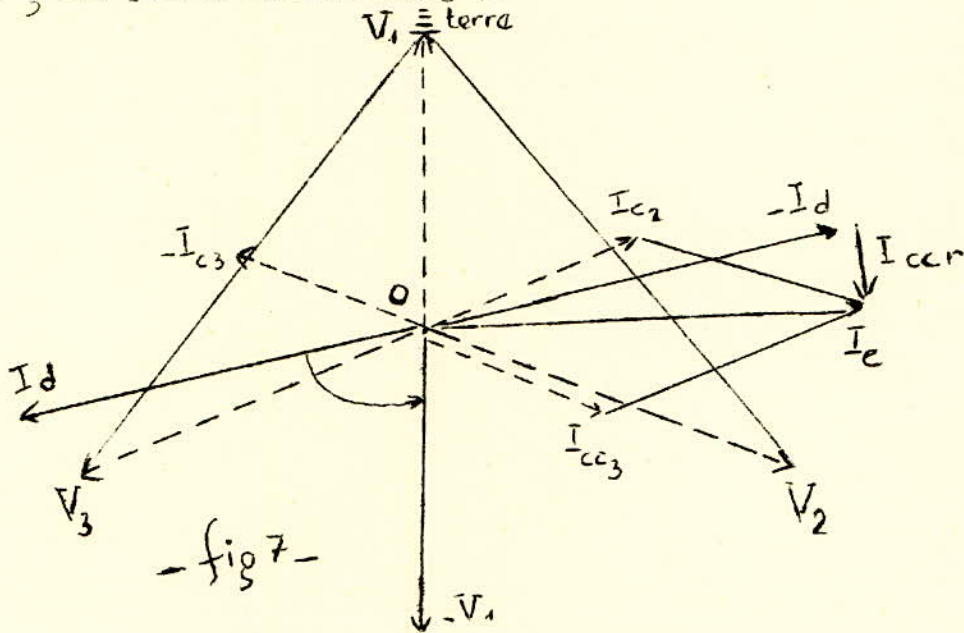
- le courant inductif engendré par le court-circuit,
- le retour des courants de capacité (déséquilibrés) des phases saines.

Ces réactances variables sont appelées: "bobines d'extinction" ou "bobines de Petersen".



I_d = courant de défaut
 I_c = " capacitif résultant

Supposons un court-circuit entre la phase 1 et la terre. D'après la fig 6 on voit que I_d et I_c circulent sensiblement en sens inverse. I_c est produit par l'application des tensions composées V_{12} et V_{13} aux capacités C_{12} et C_{13} des phases saines. (fig 7)

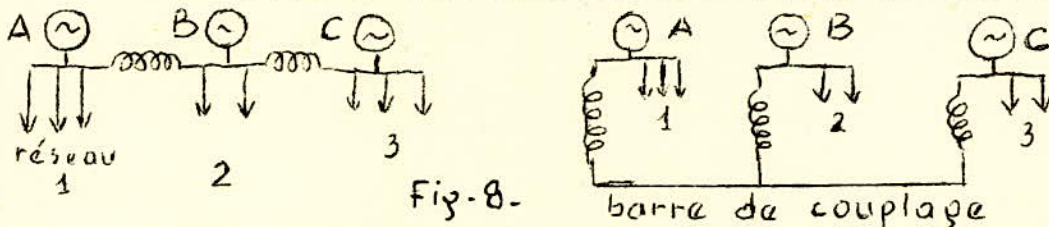


I_{ccr} est la valeur du courant dans le défaut.

(Il est à noter que la valeur de la réactance de la bobine doit être modifiée à chaque variation de schéma du réseau.)

Les méthodes que nous allons examiner par la suite, s'appliquent pour tous les courts-circuits, quelles que soit leur forme : PN, 2P, 2PN, 3P, 3PN.

II-3-1-3. Réactances en série dans les lignes et dans les barres.



L'utilisation de petites bobines de quelques ohms, pour le couplage des barres par exemple (fig 8) a conduit dans beaucoup de cas à une solution satisfaisante en ce qui concerne le problème du niveau d'avarie.

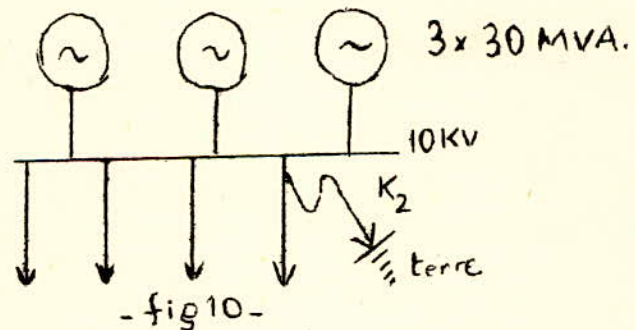
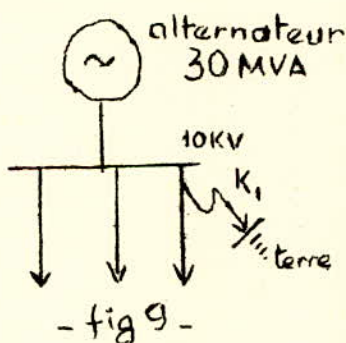
II-3-2 : Forte réactance d'alternateurs et de transformateurs.

Les courts-circuits les plus violents sont évidemment ceux qui se produisent près des alternateurs ou des transformateurs. L'impédance qui les relie aux générateurs est en effet très réduite et leur intensité peut être considérable. Alors pour la limiter, et dans ce cas seulement, on donne systématiquement aux alternateurs et aux transformateurs d'interconnexion une réactance de fuites importante (10 à 14 % pour les transformateurs). Cette réactance, au moins, reste en série entre le court-circuit, la force électromotrice qui l'alimente. ^{et}

II-3-3 : Choix d'un schéma rationnel d'interconnexion

Du fait que l'intensité des courants de court-circuit est d'autant plus grande, à tension égale, que la puissance du réseau qui l'alimente est plus importante; de même, à puissance égale, cette intensité est d'autant plus grande que la tension est plus faible (puisque les impédances des transformateurs diminue comme le carré de la tension), on est amené à choisir convenablement des réseaux d'alimentation.

Exemples :

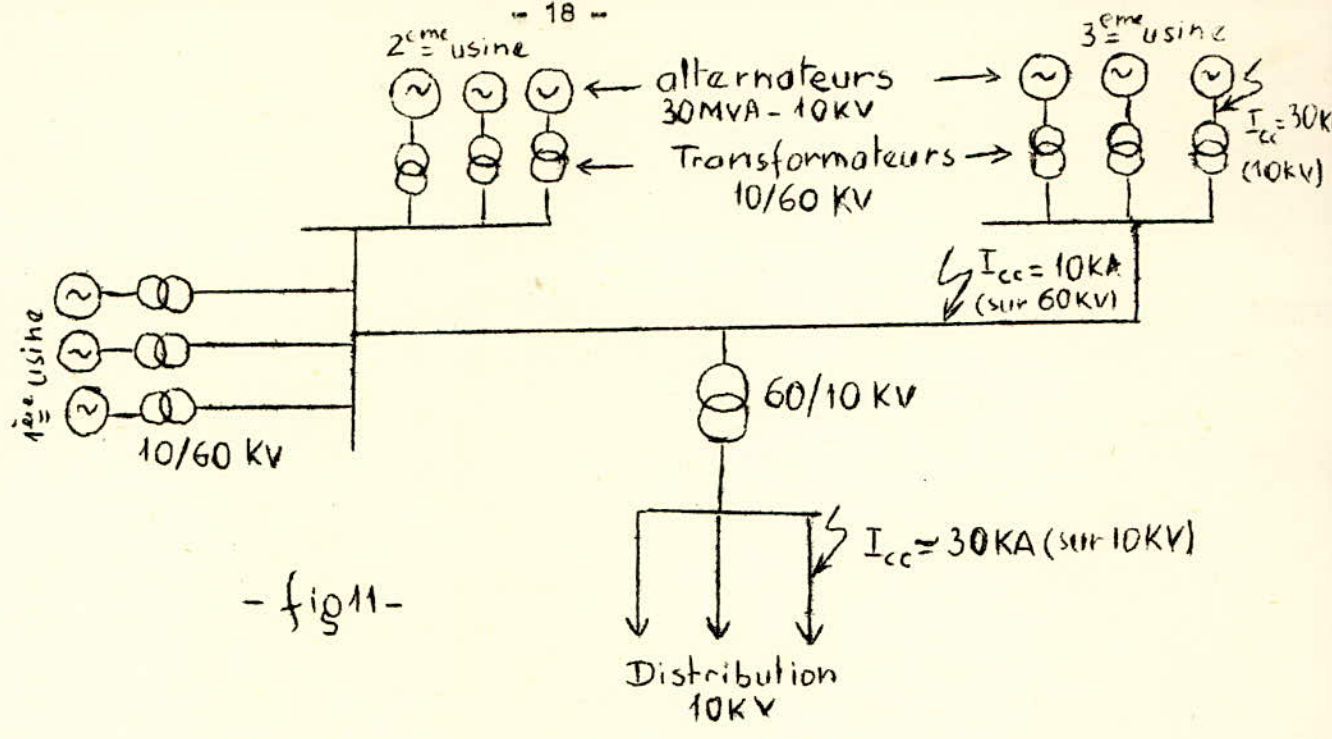


Quand on a le court-circuit K_1 (fig 9) : $I_{cc1} = 8$ KA

————— " ————— K_2 (fig10) : $I_{cc2} = 3 \times 8 = 24$ KA

Donc l'interconnexion directe sur un réseau de distribution de 10 KV de 3 usines ayant chacune 3 alternateurs en service, ferait passer l'intensité du court-circuit à 72 KA, ce qui est considérable.

L'interconnexion de ces mêmes usines par un réseau de 60 KV, suivant la fig 11, permet de limiter à 30 KA sur le réseau à 10 KV et 10 KA sur le réseau à 60 KV la valeur des courants de courts-circuits à craindre. (La notable réduction des courants, obtenue dans le dernier cas, est entièrement due aux réactances de fuites magnétiques des enroulements des transformateurs inclus dans le schéma).

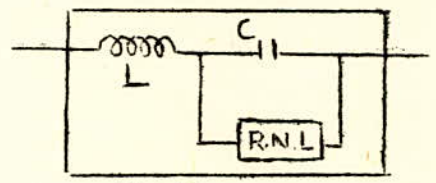


- fig 11 -

II-3-4 : Renforcement de l'isolation entre phases.

Dans les réseaux puissants à moyenne tension, les courts-circuits entre phases sont beaucoup plus violents que ceux à la terre et sont plus difficiles à limiter. Dans les machines tournantes, dans les connexions des tableaux, les conducteurs d'une phase sont séparés des autres par des cloisons conductrices reliées à la terre : écrans dans les machines, galeries séparées pour les câbles, transformateurs monophasés. (Ainsi il ne reste que le cas, peu probable, de la simultanéité de 2 courts-circuits PN qui reste alors à redouter.

II- 3-5 : Les circuits résonnants



- fig 12 -

R.N.L. = réseau non linéaire.

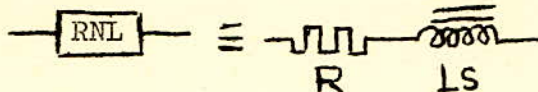
Ce circuit (-fig-12-) présente une impédance négligeable pour le régime normal de fonctionnement.

Un tel circuit peut être applicable aux systèmes ayant un nombre quelconque de phases. Le condensateur série C est shunté par un dispositif ayant une impédance non linéaire qui pour rôle de détruire la résonance série entre L et C quand le courant tend à dépasser un niveau choisi, et par conséquent l'effet obtenu est la limitation des courants et des surintensités d'avaries. Le R.N.L. doit avoir la possibilité de revenir à sa valeur d'impédance grande quand on revient aux conditions normales de fonctionnement du système.

La stabilité du système énergétique et les effets transitoires doivent être pris en considération dans la projection d'un tel dispositif. Les circuits résonnants possèdent l'avantage essentiel d'avoir un effet négligeable sur le fonctionnement normal des réseaux et sont en conséquence très supérieures, du point de vue technique, aux bobines de réactance dans la limitation des courants de court-circuit.

L'efficacité et le fonctionnement du circuit résonnant dépendent beaucoup de la forme prise par le RNL shuntant C.

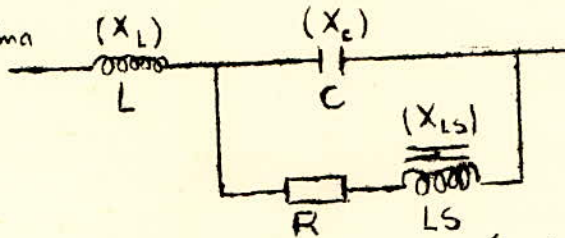
Dans les chapitres qui suivent, nous allons étudier, de plus près, un tel dispositif où le RNL est constitué d'une résistance R en série avec une self à saturation LS:



CHAPITRE III.
LE LIMITEUR FERRO-RESONNANT DE COURANT
DE COURT - CIRCUIT

III.1 Schéma et principe de fonctionnement.

III-1-1 Schéma



L = Inductance
C = Condensateur
R = Résistance
LS = Self à saturation

- fig 13 -

III-1-2 Principe de fonctionnement.

L'inductance L et le condensateur C forment un circuit résonnant série. En parallèle sur C est branché un montage série d'une résistance ohmique R et d'une self à saturation LS.

En régime normal les réactances de L et C (X_L et X_C) ayant pratiquement même valeur mais de signe opposé, se compensent en donnant une impédance résultante nulle de sorte qu'il n'y ait pas de chute de tension sur l'ensemble. LS est conçue de manière à présenter pour des valeurs de courants $\leq I_n$ (courant normal de la self) une forte réactance, ce qui empêche la circulation d'un courant notable dans R.

- Régime de court - circuit.

Lors d'une surintensité, la tension aux bornes du condensateur augmente. Comme LS (en série avec R) est branchée en parallèle sur C, la tension à ses bornes augmente et la self se sature. La réactance inductive, qui était initialement grande, diminue et atteint une faible valeur qui est pratiquement celle de la réactance dans l'air. X_{LS} étant très faible, la résistance R shunte pratiquement le condensateur C, de sorte que l'impédance résultante du circuit n'est plus nulle comme à la résonance, mais prend une valeur très grande. (voir 3-1-3)

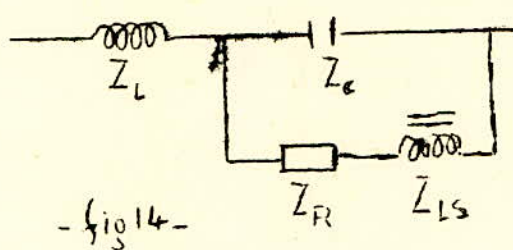
Comme $I_{cc} = \frac{U_{\text{systeme}}}{Z_{\text{systeme}} + Z_{\text{limiteur}}}$ on a une limitation du courant de court-circuit.

Après la perturbation $U_{c_{cc}}$ devient égale à U_{c_n} immédiatement et la self LS n'est plus saturée. De ce fait elle ramène alors le courant i_r (dans R) à une valeur négligeable. L'impédance résultante du limiteur présente de nouveau la valeur pratiquement nulle, atteinte par la compensation.

Il est à noter que le circuit oscillant série composé de l'inductance principale L et du condensateur C avec son shunt ($R + LS$) est accordé à la résonance sur la fréquence du réseau. Cette condition de résonance produit que :

- la chute de tension est nulle pour tous les courants de service normal
- il suffit d'une faible variation d'une ou l'autre impédance, pour qu'il en résulte une variation relative (assez nette) de l'impédance totale résultante.

III.1-3. Calcul de l'impédance du limiteur



$$Z_L = j^X L$$

$$Z_C = \frac{1}{j \omega c} = - \frac{j}{\omega c} = - j^X c$$

$$Z_R = R \quad \text{et} \quad Z_{RLS} = R + j^X LS$$

$$Z_{LS} = j^X LS$$

$$Z_{\text{limiteur}} = Z_L + (Z_C // Z_{RLS})$$

$$= Z_L + Z_{\text{éq}}$$

Calculons $Z_{\text{éq}}$

$$Z_{\text{éq}} = \frac{Z_C Z_{RLS}}{Z_C + Z_{RLS}} = \frac{- j^X c (R + j^X LS)}{- j^X c + R + j^X LS} = \frac{X_c X_{LS} - j^{RX_c}}{R + j(X_{LS} - X_c)}$$

$$Z_{\text{éq}} = \frac{(X_c X_{LS} - j^{RX_c}) (R - j(X_{LS} - X_c))}{R^2 + (X_{LS} - X_c)^2}$$

$$Z_{\text{éq}} = \frac{RX_c X_{LS} - jR^2 X_c - j X_c X_{LS} (X_{LS} - X_c) - RX_c (X_{LS} - X_c)}{R^2 + (X_{LS} - X_c)^2}$$

$$Z_{\text{éq}} = \frac{RX_c^2 + j (X_{LS} X_c^2 - X_{LS}^2 X_c - R^2 X_c)}{R^2 + (X_{LS} - X_c)^2}$$

$$\text{et } Z_{\text{lin}} = jX_1 + \frac{RX_c^2}{R^2 + (X_{1S} - X_c)^2} + j \frac{(X_c^2 X_{1S} - X_{1S}^2 X_c - R^2 X_c)}{R^2 + (X_{1S} - X_c)^2}$$

$$Z_{\text{limi}} = \frac{RX_c^2}{R^2 + (X_{1S} - X_c)^2} + j \left[X_1 + \frac{X_c^2 X_{1S} - X_{1S}^2 X_c - R^2 X_c}{R^2 + (X_{1S} - X_c)^2} \right]$$

La valeur relative de Z_{limi} change alternativement pour les deux états de LS.

- En régime non saturé

On peut considérer que $R \ll X_{1S}$

$$\text{et } Z_{\text{éq}} = \frac{Z_c Z_{1S}}{Z_c + Z_{1S}} = - \frac{jX_c jX_{1S}}{jX_{1S} - jX_c} = \frac{X_c X_{1S}}{j(X_{1S} - X_c)} = - \frac{j X_{1S} X_c}{X_{1S} - X_c}$$

$$Z_{\text{limi}} = j \left(X_1 - \frac{X_{1S} X_c}{X_{1S} - X_c} \right)$$

$$\text{or } Z_{\text{éq}} = Z_1$$

$$\text{d'où } Z_{\text{limi}} = 0$$

- En régime saturé

$$Z_{\text{éq}} \simeq 0 \quad \text{soit} \quad \frac{X_{1S} X_c^2 - X_{1S}^2 X_c - R^2 X_c}{R^2 + (X_{1S} - X_c)^2}$$

et Z_{lin} sera légèrement supérieure à X_1


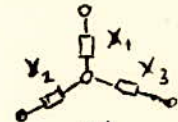
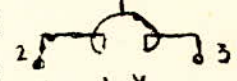
III.2 : Choix des éléments du limiteur

Pour le dimensionnement des éléments du système on dispose d'une gamme extrêmement large, et il est possible de réaliser beaucoup de variantes qui fonctionnent de façon extrêmement sûre et remplissent leur but. Sa limite du courant à laquelle l'intensité de court-circuit est ramenée immédiatement peut être fixée même à une valeur voisine du courant nominal, ou au double à quintuple de celui-ci.

III.2-1. La réactance X_1

La limitation du courant de court-circuit dépend en grande partie, de la valeur de l'inductance principale L (X_1). Pour obtenir des résultats satisfaisants nous prendrons $X_1 > 4\%$. Les réactances du tableau 1 sont utilisées surtout pour les départs en câble à partir des centrales et postes. Ce sont des réactances dans l'air afin que leurs valeurs ne soient pas affectées par les courants de court-circuit.

Tableau 1

Type	Tension nominale U_n (KV)	Courant Nominal I_n (KA)	X_1 %	Coefficient de couplage K_1	Schéma	
RBA	6	0,15 - 0,75	3 - 10	/		
		1,0	4 - 10			
		1,5	5 - 10			
		2,0	6 - 12			
		2,5	12			
RBAS	6	3,0 - 4,0	8 - 12	0,46		
		0,6	5			
		1,0	4 - 10			0,44 - 0,53
		1,5	6 - 10			0,57 - 0,62
		2,0	8 - 12			0,50 - 0,55
RBAS	6	2,5	10 - 15	0,47 - 0,49		
		2,5	10 - 15	0,47 - 0,49		
		3,0	12 - 15	0,41 - 0,44		

RBA = Réacteur en Aluminium et support en béton
 RBAS = " " en " " " double et support en béton

La réactance X_1 est fonction de la réactance X_S du système (où se produit le défaut) et du rapport de réduction (n) du courant de court-circuit.

Nous avons $I_{cc} = \frac{U}{X_S}$ = courant de court-circuit initial
 $I'_{cc} = \frac{U}{X_S + X_1}$ = courant de court-circuit limité par X_1

et $I'_{cc} = \frac{I_{cc}}{n}$

$I'_{cc} = \frac{U}{nX_S} = \frac{U}{X_S + X_1}$

d'où $X_S + X_1 = nX_S$

soit $X_1 = X_S (n - 1)$ (3-1)

III.2.2 : Self à saturation LS

a) Rappel sur les caractéristiques de fonctionnement d'une bobine saturable
(alimentée par une tension sinusoïdale)

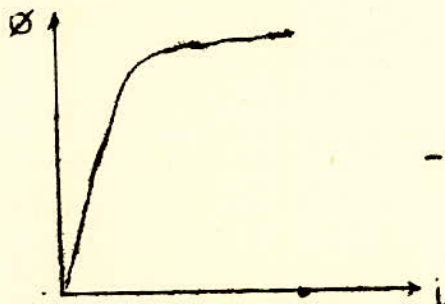
Dans le cas d'une bobine à noyau de fer, ayant une résistance électrique négligeable, entre la tension aux bornes $u(t)$, le flux $\phi(t)$ et le nombre de spires N on a la relation

$$u(t) = - N \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Soit: $u(t) = U_m \sin \omega t$, alors le flux a pour expression.

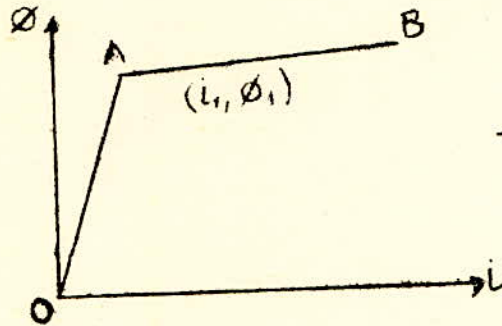
$$\phi(t) = \frac{U_m}{N\omega} \cos \omega t = \phi_m \cos \omega t \quad \text{avec } \phi_m = \frac{U_m}{N\omega}$$

La relation entre le courant $i(t)$ et le flux $\phi(t)$ (ou $u(t)$) est donnée par une courbe de magnétisation de la forme :



- fig 15 -

Cette courbe peut être approximée analytiquement soit par une relation sous forme de polynôme (impair), soit par une expression en sinus hyperbolique (sh) soit par des segments de droite. Le plus commode c'est d'utiliser la dernière représentation soit :



- fig 16 -

OA = segment correspondant au régime normal de fonctionnement.

AB = segment au régime saturé.

$$\phi(t) = n_1 \cdot i(t) + \mu (n_2 - n_1) [i(t) - \sqrt{i_1} i_1(t)]$$

n_1 et n_2 sont des coefficients qui correspondent aux deux segments.

μ et $\sqrt{}$ sont des opérateurs : $\mu = +1; 0$ respectivement pour AB et OA

$\sqrt{} = \pm 1$, suivant le sens de parcours du cycle.

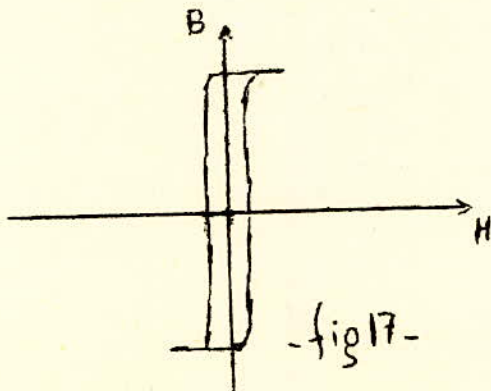
$$(\phi > 0, \sqrt{} > 0)$$

$$(\phi < 0, \sqrt{} < 0)$$

b) Caractéristiques de LS.

Pour justifier la représentation de la courbe de magnétisation par deux segments de droite, nous choisirons pour LS un noyau ferromagnétique ayant un cycle d'hystérésis

rectangulaire et étroit



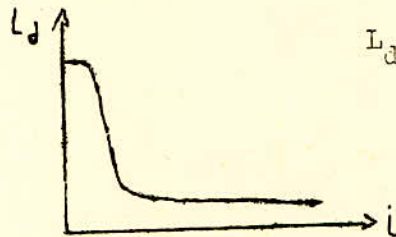
- fig 17 -

On utilise alors soit :

- des alliages de fer - nickel (50% nickel)

- des matériaux à cristaux orientés obtenus par laminage à froid.

A partir de $\phi = f(i)$, on peut déduire une inductance dynamique L_{dyn} telle que :



$$L_{dyn} = \frac{d\phi}{di}$$

fig -18-

Toujours par approximation des courbes, on obtient

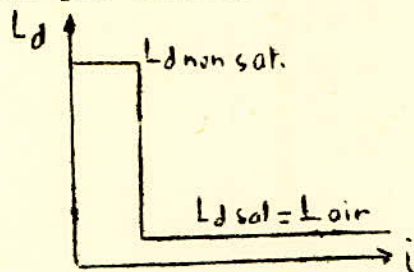


fig-19-

La self à saturation correspond bien aux deux conditions antérieures: une forte inductance en régime normal ($L_{dy. non saturé}$) et une faible inductance en régime de court-circuit ($L_{dyn saturé} = L_{air}$).

De ce fait la tension aux bornes de LS, en régime saturé ne sera pas très grande et restera voisine de la tension de saturation. Ainsi la tension soutenue aux bornes de G restera à peu près constante.

Selon les considérations d'ordre technique, nous choisisons une self à saturation qui conviendrait le plus possible à la résolution du problème envisagé.

III.2-3: Calcul de X_c

En régime normal de fonctionnement, la réactance X_1 produit une chute de tension telle que : $\Delta U_L = X_1 \cdot I_1$ (I_1 = courant dans la bobine)

Pour compenser cette chute de tension, nous ne prendrons pas $X_c = X_1$ mais nous devons avoir $X_{cq} = -X_1$ où X_{cq} est la réactance du condensateur avec son shunt.

$$X'_{eq} = \frac{-jX_c (R + jX_{lsn})}{-jX_c + R + jX_{lsn}}$$

Comme $R \ll X_{lsn}$, on peut écrire

$$X'_{eq} = \frac{-jX_c \cdot jX_{lsn}}{-jX_c + jX_{lsn}} = -jX_1$$

$$X_c \cdot X_{lsn} = j (X_{lsn} - X_1) \cdot jX_1$$

$$X_c \cdot X_{lsn} - X_{lsn} X_1 + X_c X_1 = 0$$

$$X_c (X_{lsn} + X_1) = X_1 \cdot X_{lsn}$$

$$X_c = \frac{X_1 \cdot X_{lsn}}{X_1 + X_{lsn}} \quad (3-2)$$

Connaissant X_c , on peut en déduire la valeur de la capacité C , et sa puissance Q_c .

D'après ces valeurs nous pouvons choisir des batteries de condensateurs normalisées suivant les tableaux 2 et 3 par exemple.

Tableau 2.

Types (VDE 0560)	Tensions max de l'unité (KV)	Unité de puissance max (KVAr)
! au cophène	! 12	! 100
! à l'huile	! 12	! 50
! sous pression	! 10	! 100
! métal-papier	! 10	! 50
! au styroplex	! 3	! 300
! à céramique	! 15	! 50

Tableau 3

Types	U_n (KV)	Q (KVAR)	C (μ F)	Tension d'isolement (KV)
A	2	13,8	11	12
B	2,9	20	7,58	12
C	5,8	20	1,9	12
D	8,9	20	0,84	17,5

Ce sont-là des condensateurs M.T. (Unités monophasées normalisées U.T.E)

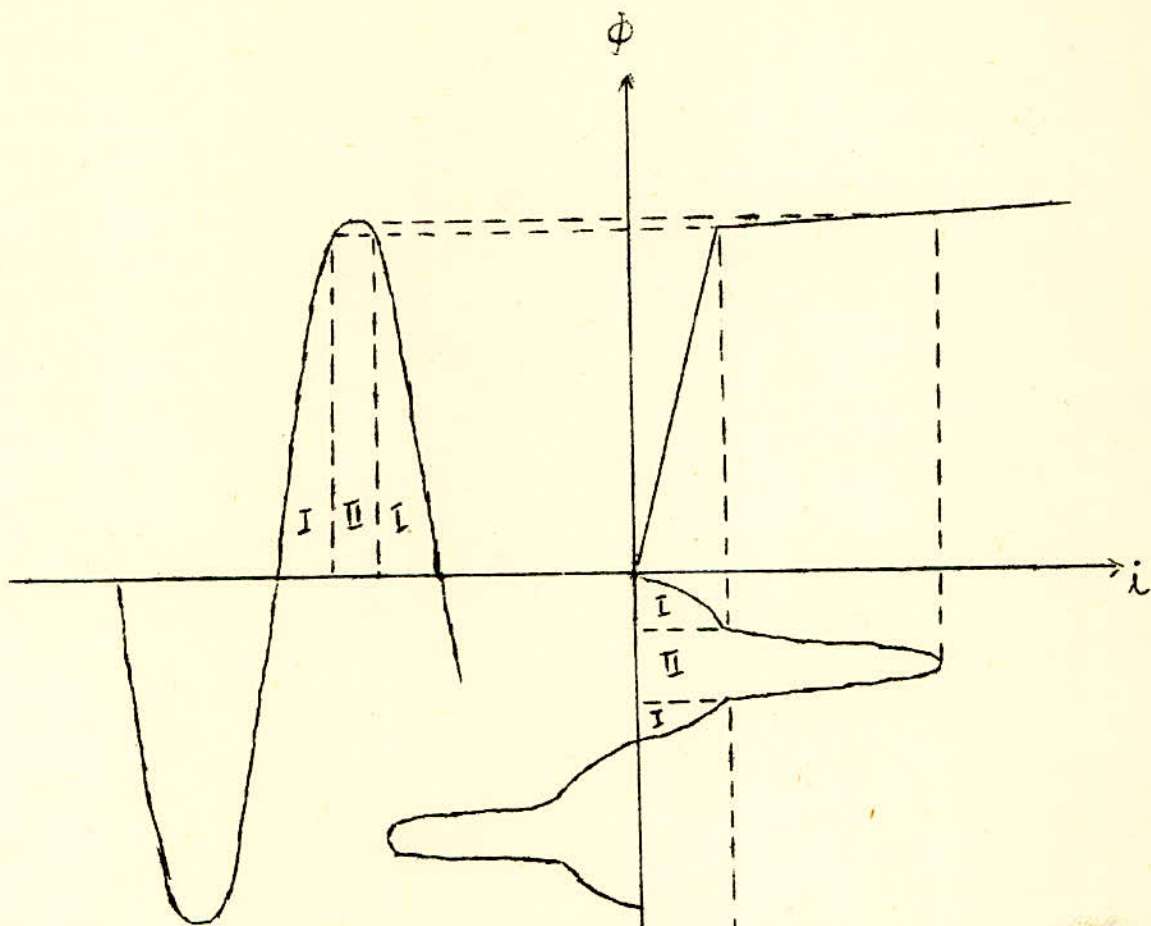
III.2-4 : La résistance R.

La résistance R amortit les oscillations du circuit. Lorsque LS est saturée, le circuit emmagasine de l'énergie sous forme magnétique (en LS) et électrique (en C).

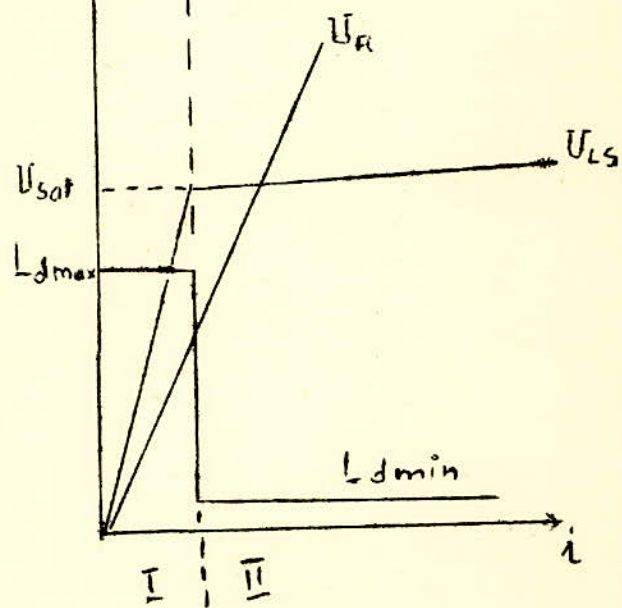
Après la perturbation cette énergie est dissipée en grande partie dans R qu'on appelle aussi résistance atténuante. Dans le cas d'un court-circuit le limiteur fonctionne avec l'alternance continue de ses deux états I et II : non saturé et saturé (fig 20). Comme on l'a vu précédemment à partir de ϕ (i) on peut déterminer facilement une inductance dynamique (pour LS) telle que $L_d = \frac{d\phi}{di}$, qui aura des valeurs :

$$L_{d \text{ max}} \rightarrow X_{lsn}$$

$$L_{d \text{ min}} = L_{air} \rightarrow X_{ls_{ce}}$$



-fig 20-



Pour $L_d \text{ min} = L_{\text{air}}$ correspond une tension aux bornes de LS telle que $U_{LS} = U_{\text{sat}}$

(on a une saturation par courant et non par tension).

U_r étant la tension aux bornes de R, on peut écrire :

$$\bar{U}_{LSR} = \bar{U}_R + \bar{U}_{LS}$$

et pour une limite en courant imposée, on peut calculer

$$\bar{U}_{\text{limite}} = \bar{U}_R + \bar{U}_{\text{sat}}$$

Mais si R est grande et la valeur de \bar{U}_R ^{très grande} tellement, on risque d'avoir $U_{LS} < U_{\text{sat}}$.

Normalement on a toujours une R_{min} déterminée par les conditions imposées au circuit (sa constante de temps τ par exemple).

Théoriquement R aura aussi une limite supérieure (de façon qu'on à la limite obtenir la saturation de LS) mais par le sens pratique, on prend R faible Dans l'état II c'est R qui shunte pratiquement le condensateur C.

Donc dans I : la bobine LS intervient et on a $R \ll X_{LSn}$

et dans II : la résistance R intervient et on a $R \gg X_{LS_{cc}}$

III.2.4 Calcul de R.

L'impédance équivalente du condensateur avec son shunt, sans négliger R est :

$$Z_{\text{éq}} = \frac{-jX_c (R + jX_{LS})}{-jX_c + R + jX_{LS}}$$

En régime de court-circuit, $Z_{\text{éq}}$ est presque nulle, tandis qu'en service normal, $Z_{\text{éq}} = -Z_L = -jX_L$.

Posons $x = \frac{X_{LSn}}{X_{LS_{cc}}} = \frac{\text{réactance de LS en régime normal}}{\text{réactance de LS en régime normal}}$

1^{er} Cas

$$Z_{\text{éq}} \approx 0$$

$$-jX_c \cdot (R + jX_{LS_{cc}}) \approx 0$$

$$R + j(X_{LS_{cc}} - X_c)$$

$$\frac{(X_{LS_{cc}} \cdot X_c - jRX_c)(R - j(X_{LS_{cc}} - X_c))}{R^2 + (X_{LS_{cc}} - X_c)^2} \approx 0$$

ce qui implique numérateur nul, soit:

$$(X_C X_{LSc} - jR X_C)(R - j(X_{LSc} - X_C)) = 0$$

$$R X_C X_{LSc} - jR^2 X_C - jX_C X_{LSc}^2 + jX_C^2 X_{LSc} - R X_C X_{LSc} + R X_C^2 = 0$$

ce qui nous donne:

$$\begin{aligned} R X_C^2 &= 0 \\ X_C^2 X_{LSc} - X_C X_{LSc}^2 - R^2 X_C &= 0 \quad 3-3 \end{aligned}$$

2^{ème} Cas: $Z_{eq} = -jX_L$

$$\frac{-jX_C(R + jX_{LSn})}{-jX_C + R + jX_{LSn}} = \frac{-jX_C(R + jX_{LSc})}{-jX_C + R + jX_{LSc}} = -jX_L$$

En tenant compte des calculs faits dans le premier cas, nous obtenons:

$$R X_C^2 + jX_C^2 X_{LSc} - jX_C X_{LSc}^2 - jR^2 X_C = -jX_L (R^2 + (X_{LSc} - X_C)^2)$$

ou encore; après développement:

$$\begin{aligned} R X_C^2 &= 0 \\ X_C^2 X_{LSc} - X_C X_{LSc}^2 - R^2 X_C + R^2 X_L + X_L X_{LSc}^2 - 2X_L X_{LSc} X_C + X_L X_C^2 &= 0 \quad (3-4) \end{aligned}$$

En faisant (3-3) = (3-4), nous aurons:

$$R^2 X_L = X_C^2 X_{LSc} (1-x) + X_C X_{LSc}^2 (x^2-1) - X_L (X_{LSc} - X_C)^2$$

d'où:

$$R^2 = \frac{X_C^2 X_{LSc}}{X_L} (1-x) + \frac{X_C X_{LSc}^2}{X_L} (x^2-1) - (X_{LSc} - X_C)^2 \quad (3-5)$$

Remarque: comme $x = \frac{1-x}{x^2-1}$, alors $\frac{1-x}{x^2-1} = \frac{-x}{x^2}$

et l'expression (3-5) peut s'écrire:

$$R^2 = -x X_C^2 X_{LSc} / X_L + x^2 X_C X_{LSc}^2 / X_L - (X_{LSc} - X_C)^2$$

$$\text{et } R = \frac{x^2 X_C X_{LSc}^2 / X_L - x X_C^2 X_{LSc} / X_L - (X_{LSc} - X_C)^2}{2} \quad (3-6)$$

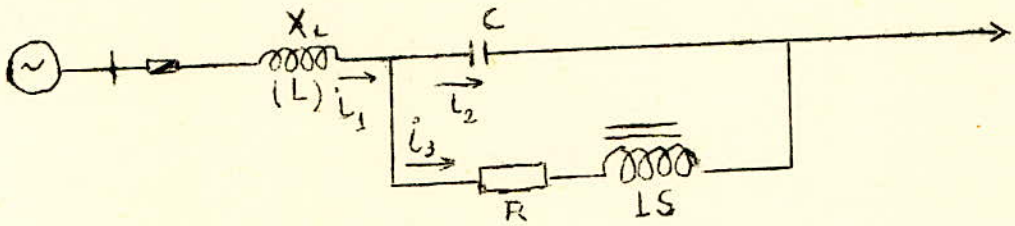
Ainsi d'après (3-6), on voit que la résistance atténuante R est fonction des autres éléments du limiteur, à savoir X_L , X_C , X_{LS} , donc de Xs et du rapport de réduction du niveau d'avarie.

CHAPITRE IV

MISE EN OEUVRE DU LIMITEUR

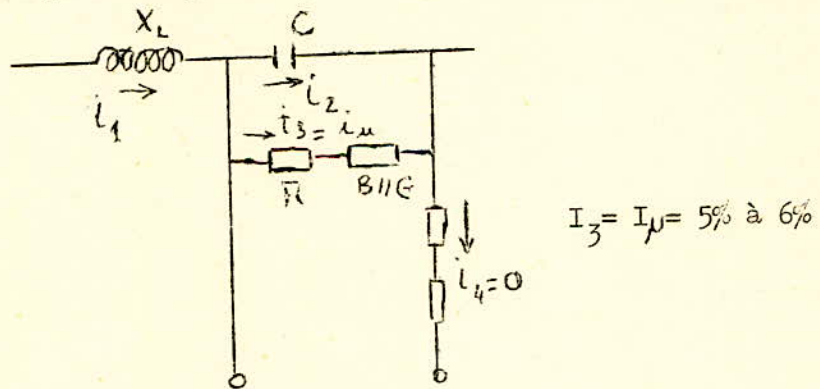
- APPLICATION -

IV-1. Régime normal de fonctionnement.



- fig 21 -

LS étant conçue de manière à présenter une forte inductance pour ce régime, nous aurons un faible courant dans R, soit i_3 . Il sera pratiquement le courant magnétisant de la bobine LS, qu'on peut représenter par le schéma équivalent (suivant) d'un transformateur comme suit:



- fig 22 -

Nous avons

$$U_L = X_L \cdot I_1$$

$$U_C = X_C \cdot I_2$$

Et nous avons démontré au chapitre précédent que pour compenser totalement la chute de tension due à la réactance X_L , le condensateur C avec son shunt composé de R et LS doit avoir une réactance telle que:

$$X_C = \frac{X_L \cdot X_{LSn}}{X_L + X_{LSn}} \quad (\text{en négligeant } R \text{ devant } X_{LSn})$$

Cette hypothèse nous permet d'obtenir une impédance résultante totale nulle en service normal.

Elle conduit aussi à écrire :

$$U_C \approx U_{LSn}$$

soit

$$X_C \cdot I_2 = X_{LSn} \cdot I_3$$

ou encore

$$\frac{X_L \cdot X_{LSn} \cdot I_2}{X_L + X_{LSn}} = X_{LSn} \cdot I_3$$

De même on a

$$U_{LSn} \approx U_L$$

$$X_{LSn} \cdot I_3 = X_L \cdot I_1$$

$$X_{LSn} = X_L \cdot I_1 / I_3 \quad (4-1)$$

Comme $I_3 \ll I_1$, alors I_1 / I_3 sera grand et X_{LSn} grande.

L'impédance résultante du limiteur est:

$$\begin{aligned} Z_{limi} &= jX_L + X_{eq} \\ &= jX_L + \frac{-jX_C \cdot jX_{LSn}}{-jX_C + jX_{LSn}} \\ &= j \left(X_L - \frac{X_C \cdot X_{LSn}}{X_{LSn} - X_C} \right) \end{aligned}$$

Remplaçons X_C par (3-2) du paragraphe III-2-3 ,

$$\begin{aligned} Z_{limi} &= j \left(X_L - \frac{\frac{X_L \cdot X_{LSn}}{X_L + X_{LSn}} \cdot X_{LSn}}{X_{LSn} - \frac{X_L \cdot X_{LSn}}{X_L + X_{LSn}}} \right) \\ &= j \left(X_L - \frac{X_L \cdot X_{LSn}^2}{X_L + X_{LSn}} \cdot \frac{X_L + X_{LSn}}{X_{LSn}^2} \right) \\ &= j (X_L - X_L) \end{aligned}$$

$$Z_{limi} = 0$$

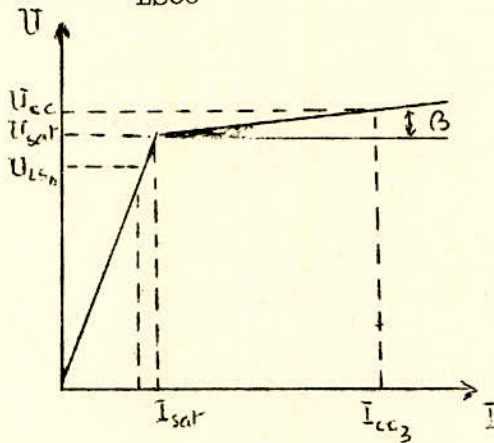
IV-2. Régime de court-circuit.

En cas de défaut, la tension aux bornes du condensateur C augmente et dès que :

$$u_C = R i_{cc3} + u_{sat}.$$

la self LSse sature et C est pratiquement shunté par R qui provoque une surtension soutenue aux bornes de C. Le courant dans R (soit i_3) augmente et devient égal à i_{cc1} (courant limité par X_L), alors X_{LSn} diminue jusqu'à une faible valeur: X_{LScc} .

Calculons X_{LScc} :



En régime saturé, la tension aux bornes de la self est :

$$U = U_{sat} + \text{tg} \beta \cdot (I - I_{sat})$$

avec

U_{sat} = tension de saturation

I_{sat} = courant de saturation

D'après la fig-23- nous avons :

$$U_{cc} = U_{sat} + (I_{cc3} - I_s) \cdot \text{tg} \beta$$

En général on prend $U_{LSn} = 80\% U_{sat}$, donc $\begin{cases} U_{sat} = k U_{LSn} \\ I_{sat} = k I_{LSn} = k I_3 \end{cases} \quad k = 1,25$

Le courant de court-circuit I_{cc3} (= I_{cc1} limité par X_L) est très supérieur au courant de LS en régime normal soit $I_3 = I_{LSn}$.

Posons alors $I_{cc3} = n_1 I_3 = n_1 I_{LSn}$

d'où :

$$\begin{aligned} U_{cc} &= k U_{LSn} + (n_1 I_3 - k I_3) \cdot \text{tg} \beta \\ &= k U_{LSn} + I_3 (n_1 - k) \cdot \text{tg} \beta \end{aligned}$$

et $X_{LScc} = U_{cc} / I_{cc3} = U_{cc} / n_1 I_3$

soit:

$$X_{LScc} = \frac{kU_{LSn} + I_3(n_1 - k) \cdot \text{tg} \beta}{n_1 I_3}$$

$$= \frac{kU_{LSn}}{n_1 I_3} + \frac{n_1 - k}{n_1} \text{tg} \beta$$

Or $U_{LSn} = X_{LSn} \cdot I_3$, ce qui nous donne :

$$X_{LScc} = \frac{kX_{LSn} \cdot I_3}{n_1 I_3} + \left(1 - \frac{k}{n_1}\right) \cdot \text{tg} \beta$$

$$X_{LScc} = \frac{k}{n_1} \cdot X_{LSn} + \left(1 - \frac{k}{n_1}\right) \text{tg} \beta \quad 4-2$$

Comme $n_1 \gg k$, alors $\frac{k}{n_1} \simeq 0$ et $1 - \frac{k}{n_1} \simeq 1$

D'autre part $\text{tg} \beta \simeq 0$, car β voisin de 0° , l'expression 4-2 devient:

$$X_{LScc} \simeq \frac{k}{n_1} \cdot X_{LSn} \quad 4-3$$

$\frac{k}{n_1}$ étant faible, donc X_{LScc} faible ($\ll X_{LSn}$)

Le condensateur avec son shunt présente une impédance équivalente très faible (presque nulle), et le limiteur aura une impédance résultante presque égale à X_L (légèrement supérieure).

Pour calculer les dimensions de LS, il faut considérer le régime normal de fonctionnement. La tension à ses bornes sera $U_{LSn} = U_L$ et le courant nominal sera celui de la ligne. (On fera l'analogie avec le calcul d'un transformateur-un peu spécial-dont le primaire sera alimenté par I_{ligne} et le secondaire à vide).

IV-3. Pertes dans le limiteur.

Les pertes dans le limiteur sont faibles en service normal.

1. Pertes dans la réactance X_L

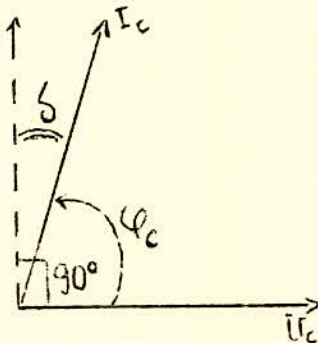
Ce sont des pertes dans le cuivre.

$$P_{cu_L} = RI_L^2$$

$$R = \rho \frac{l_{sp}}{S_{co}} \cdot N_L$$

avec l_{sp} = longueur d'une spire
 S_{co} = section du conducteur
 N_L = nombre de spires
 ρ = résistivité du cuivre
 $\approx 216 \cdot 10^{-10}$ (.m) à 75°C

$$P_{cu_L} = \rho \frac{l_{sp}}{S_{co}} \cdot N_L \cdot I_L^2 \quad (W)$$



2. Pertes dans le condensateur C .

$$P_C = U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi_C$$

$$= U_C \cdot I_C \cdot \cos(\pi/2 - \delta) = U_C \cdot I_C \cdot \sin \delta$$

Si δ est très petit, nous aurons $\sin \delta \approx \text{tg } \delta$ et

$$P_C = U_C \cdot I_C \cdot \text{tg } \delta \quad (W) \quad (\text{tg } \delta = 10^{-2} \text{ à } 10^{-4})$$

Les pertes dans C sont ainsi très faibles et elles ne jouent aucun rôle.

3. Pertes dans la résistance R

$$P_R = R \cdot I_R^2 \quad (W)$$

R étant faible, I_R l'étant aussi (à cause de X_{LSn} grande), les pertes dans R sont négligeables.

4. Pertes dans la bobine à noyau de fer LS

Dans cet élément du limiteur, nous avons des pertes dans le fer et des pertes dans le cuivre.

a/ Pertes fer

-Pertes par Hystérisis: Les pertes spécifiques par hystérisis sont exprimées par la relation suivante:

$$P_H = C_h \cdot f \cdot B_{max}^\alpha \quad (W/Kg)$$

La constante C_h dépend du matériau utilisé.

f = fréquence

B_{max} = induction maximale

$\alpha \approx 2$ = coefficient que l'on détermine expérimentalement

Pour obtenir les pertes totales, on multiplie par la masse de fer totale:

$$P_H = P_H \cdot m_{Fe}$$

$$P_H = C_h \cdot f \cdot B_{\max}^2 \cdot m_{Fe} \quad (W)$$

-Pertes par courants tourbillonnaires: Les pertes spécifiques sont exprimées par la relation:

$$P_{CF} = \sigma_F \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \quad (W/Kg)$$

où σ_F est un coefficient qui dépend: -de la forme de la section du noyau
-du matériau utilisé
-du coefficient de forme K_f

Les pertes totales par courants de Foucault sont obtenues en multipliant P_{CF} par la masse totale de fer:

$$P_{CF} = \sigma_F \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot M_{Fe} \quad (W)$$

Les pertes totales dans le fer sont:

$$\begin{aligned} P_{Fe \text{ tot}} &= P_H + P_{CF} \\ &= C_h \cdot f \cdot B_{\max}^2 \cdot m_{Fe} + \sigma_F \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot m_{Fe} \end{aligned}$$

$$P_{Fe \text{ tot}} = (C_h + \sigma_F \cdot f) \cdot f \cdot B_{\max}^2 \cdot m_{Fe} \quad (W)$$

b/ Pertes dans le cuivre

$$P_{cu_{LS}} = \rho \cdot \frac{l_{sp}}{S_{co}} \cdot N_{LS} \cdot I_{LS}^2 \quad (W)$$

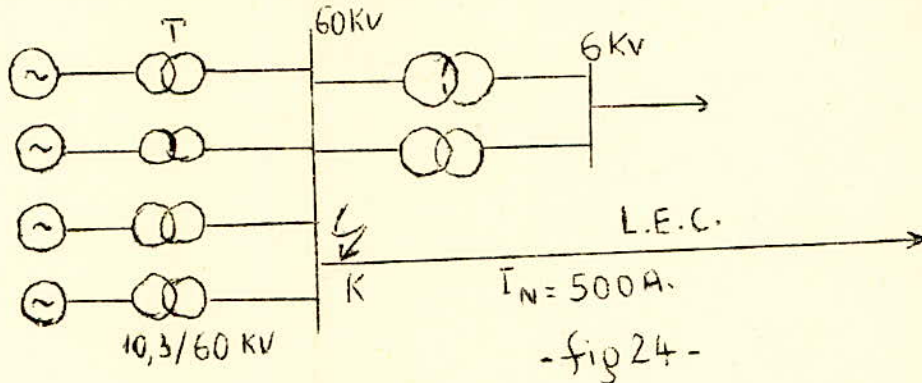
Les pertes totales dans le limiteur sont alors:

$$P_{limi.} = P_{cu_L} + P_C + P_R + P_{Fe_{LS}} + P_{cu_{LS}} \quad (W)$$

En général ces pertes sont faibles et elles n'affectent en rien le fonctionnement normal du système électro-énergétique où est incorporé le limiteur. En particulier les pertes cuivres peuvent être réduites et notamment pour la réactance X_L : il s'agit de mettre à profit les réactances déjà existantes du réseau (telles que celles des centrales, des câbles, etc...), ce qui aide à diminuer les dimensions de la self principale (L), donc ses pertes vont être affectées.

IV - 4 : APPLICATION

Nous allons dimensionner un limiteur dans le cas d'une situation bien définie. Soit l'installation suivante : (fig. 24)



Atemateurs	$S_n = 4.150 \text{ MVA}$ $X'_d = 30 \%$ $U_n = 10,3 \text{ KV}$	Transformateurs T	$S_n = 4.150 \text{ MVA}$ $U_{cc} = 9,65 \%$
------------	--	-------------------	---

A partir du jeu de barres de 60 KV, on a un départ en ligne électrique en câble (L.E.C : section 240 mm^2 , $I_{admissible} = 510 \text{ A}$)

Un court-circuit se produit au point de départ (K) du jeu de barres à 60 KV.

On veut limiter le courant de court-circuit à $5 \cdot I_n$ SOIT $I_{cc} = 5 \cdot 500 = 2,5 \text{ KA}$.

--C--

- Calculons tout d'abord le courant de court-circuit :

$$I_{cc} = \frac{U}{X_s} \quad \text{avec} \quad X_s = X_{t.alt} + X_{t.T}$$

$$X_{alt} = X'_d \cdot \frac{U_n^2 (\text{KV})}{S_n (\text{MVA})} = 0,3 \cdot \frac{60^2}{150} = 7,2 \Omega$$

Comme il y a 4 groupes en parallèles, alors $X_{t.alt} = \frac{X_{alt}}{4} = 1,8 \Omega$

$$X_T = \frac{10 u_{cc}(\%) \cdot U_n^2 (\text{KV})}{S_n (\text{KVA})} = \frac{10 \cdot 9,65 \cdot 60^2}{150 \cdot 10^3} = 2,316 \Omega$$

4 transformateurs en parallèles, d'où $X_{t.T} = \frac{X_T}{4} = 0,579 \Omega$

$$\text{et } X_S = 1,8 + 0,579 = 2,379 \Omega$$

$$I_{cc} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 2,379} = 14,578 \text{ KA} \quad I_{cc} = 14,578 \text{ KA}$$

a/ Calcul de la réactance X_L :

$$I'_{cc} = \frac{U}{X_S + X_L} = \frac{I_{cc}}{n}$$

$$\text{d'où } X_L = X_S (n - 1)$$

$$n = \frac{I_{cc}}{I'_{cc}} = \frac{14,578}{2,5} = 5,83 \approx 6$$

$$X_L = 2,379 (5,83 - 1) \approx 11 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{11}{314} = 35 \text{ mH}$$

$$U_L = X_L \cdot I_n = 11 \cdot 500 = 5500 \text{ V}$$

$$U_L = 5,5 \text{ KV} = \frac{U_L (\%)}{100} \cdot \frac{60}{\sqrt{3}}$$

$$U_L (\%) = 15,85 \%$$

$$\text{et } X_L \approx 16 \%$$

$$X_L \left\{ \begin{array}{l} U_L = 5,5 \text{ KV} \\ I_L = 500 \text{ A} \\ X_L = 11 \Omega \\ L = 35 \text{ mH} \end{array} \right.$$

b/ Bobine LS :

$$\text{Nous avons } U_{LSn} \approx U_c = U_L = 5,5 \text{ KV}$$

$$I_{LSn} = 5 \% = \frac{1}{20} I_L = \frac{500}{20} = 25 \text{ A}$$

$$X_L = 11 \Omega$$

$$L = 35 \text{ mH}$$

$$U = 5,5 \text{ KV}$$

La relation (4.1) (IV.1) donne

$$X_{LSn} = \frac{5500}{25} = 220 \Omega \quad X_{LSn} = 220 \Omega$$

$$X_{LSn} = L_{\max} \cdot \omega$$

$$L_{\max} = \frac{220}{314} = 0,7 \text{ Henry} \quad L_{\max} = 0,7 \text{ H}$$

En régime de court-circuit, on a démontré que (4.3)

$$X_{LScc} = \frac{k}{n_1} X_{LSn} \quad \text{avec } k = 1,25$$

$$n_1 = \frac{2500}{25} = 100$$

$$\begin{aligned} \text{d'où } X_{LScc} &= \frac{1,25}{100} 220 = 2,75 \Omega & X_{LScc} &= 2,75 \Omega \\ L_{\min} &= \frac{X_{LScc}}{\omega} = \frac{2,75}{314} = 8,8 \text{ mH} & L_{\min} &= 8,8 \text{ mH} \end{aligned}$$

On remarque bien que $X_{LScc} \ll X_{LSn}$

$$\text{et } x = \frac{X_{LSn}}{X_{LScc}} = \frac{220}{2,75} = 80$$

$$U_{LScc} \simeq U_{\text{sat}} = k \cdot U_{LSn} = 1,25 \cdot 5,5 = 6,875 \text{ KV}$$

$$I_{LScc} = I'_{cc} = 2,5 \text{ KA}$$

La puissance totale transitée **par** LS en régime de court-circuit est alors:

$$S_{LScc} = \sqrt{3} \cdot 6,875 \cdot 2,5 = 29,73 \text{ MVA}$$

La puissance totale transitée dans le système en c.c. est :

$$S_{\text{tot.cc}} = \sqrt{3} \cdot 60 \cdot 12,65 = 1313 \text{ MVA}$$

et en régime normal :

$$S_{\text{tot.r.n.}} = \sqrt{3} \cdot 60 \cdot 500 = 51,9 \text{ MVA}$$

ce qui nous donne en pourcentage :

$$S_{LScc} = 2,26 \% \text{ de } S_{\text{tot.cc}}$$

$$S_{LScc} = 57,28 \% \text{ de } S_{\text{tot.r.n.}}$$

Avant de dimensionner la bobine à noyau de fer saturable, calculons d'abord le condensateur et la résistance.

c/ Calcul de C :

$$U_c = U_L = 5,5 \text{ KV}$$

$$U_c = 5,5 \text{ KV}$$

La relation 3.2 (III.2.3) permet de calculer X_c :

$$X_c = \frac{11 \cdot 220}{11 + 220} = 10,5 \Omega$$

$$X_c = 10,5 \Omega$$

On remarque que X_c est presque égale à X_L (11Ω)

Valeur de la capacité C :

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

$$\text{d'où } C = \frac{1}{\omega X_c} \quad \text{avec } \omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ rd/s}$$

$$C = \frac{1}{314 \cdot 10,5} = 0,0003 \text{ F}$$

$$C = 300 \mu\text{F}$$

Puissance réactive de C :

$$Q_c = C \omega U^2$$

$$Q_c = 0,0003 \cdot 5500^2 \cdot 314$$

$$Q_c = 2850 \text{ KVAR/phase}$$

$$Q_c = 2850 \text{ KVAR}$$

Le tableau 2, par exemple, nous permet d'utiliser des batteries normalisées

$$C \left| \begin{array}{l} U_c = 5,5 \text{ KV} \\ X_c = 10,5 \Omega \\ C = 300 \mu\text{F} \\ Q_c = 2850 \text{ KVAR} \end{array} \right.$$

Dans le choix des batteries de condensateurs, nous allons tenir compte du fait qu'il y a surtension sur C au début du court-circuit.

D'après le tableau 2 nous prendrons:

100 condensateurs de $c = 0,84 \mu\text{F}$ et $U = 8,9 \text{ KV}$; disposés en parallèle:

$$\left| \begin{array}{l} C_1 = 100 \cdot 0,84 = 84 \mu\text{F} \\ U_1 = 8,9 \text{ KV} \\ Q_1 = 84 \cdot 8,9^2 \cdot 314 = 2089 \text{ KVAR} \end{array} \right.$$

3 condensateurs de $c = 7,58 \mu\text{F}$ et $U = 2,9 \text{ KV}$; disposés en série:

$$\left| \begin{array}{l} C_2 = \frac{7,58}{3} = 2,526 \mu\text{F} \\ U_2 = 2,9 \cdot 3 = 8,7 \text{ KV} \\ Q_2 = 2,526 \cdot 314 \cdot 8,7^2 = 60 \text{ KVAR} \end{array} \right.$$

86 condensateurs de $C_2 = 2,526 \mu\text{F}$ et $U = 8,7 \text{ KV}$; disposés en parallèle:

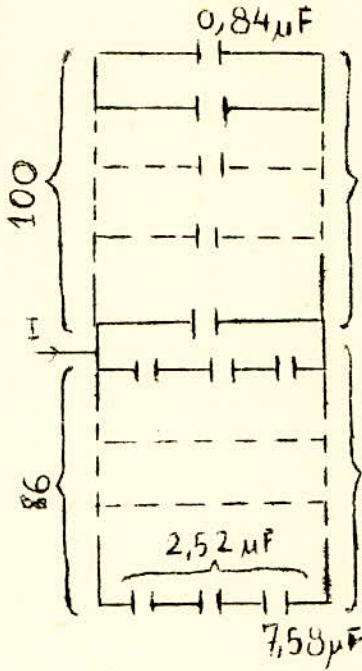
$$\left| \begin{array}{l} C_3 = 86 \cdot 2,526 = 216,7 \mu\text{F} \\ U_3 = 8,7 \text{ KV} \\ Q_3 = 216,7 \cdot 314 \cdot 8,7^2 = 5110 \text{ KVAR} \end{array} \right.$$

Pour obtenir $C = 300 \mu\text{F}$, on mettra C_1 en parallèle avec C_3 ; d'où:

$$\left| \begin{array}{l} C = C_1 + C_3 = 84 + 216,7 = 300,7 \mu\text{F} \\ U = 8,9 \text{ KV} \\ Q = 300,7 \cdot 314 \cdot 8,9^2 = 7435 \text{ KVAR} \end{array} \right.$$

Nous aurons donc pour C la configuration suivante:

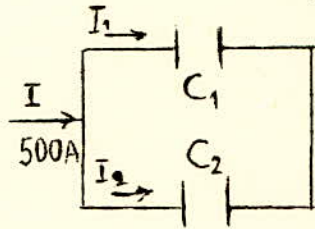
(voir page suivante)



$$C_1 = 84 \mu\text{F} \quad \text{---} \quad X_{C1} = 40 \Omega$$

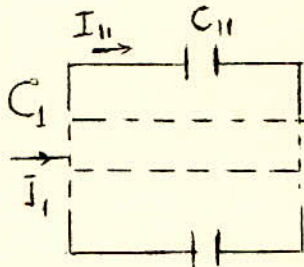
$$X_{C1} = 2,66 X_{C2}$$

$$C_2 = 216,7 \mu\text{F} \quad \text{---} \quad X_{C2} = 15 \Omega$$



$$I_1 = 136 \text{ A.}$$

$$I_2 = 2,66 I_1 = 364 \text{ A.}$$

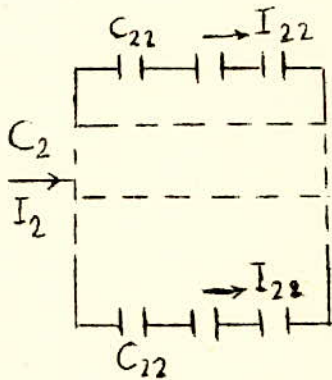


$$I_{11} = \frac{I_1}{100} = 1,36 \text{ A.}$$

$$U_{C11} = 1,36 \cdot 4000 = 5,44 \text{ KV}$$

$$X_{C11} = 4000 \Omega$$

$$Q_{C11} = wCU^2 = 7,8 \text{ KVAR.}$$



$$I_{22} = \frac{I_2}{86} = 4,23 \text{ A.}$$

$$U_{C22} = 4,23 \cdot 420 = 1,8 \text{ KV}$$

$$X_{C22} = \frac{10^8}{314 \cdot 7,58} = 420 \Omega$$

$$Q_{C22} = 314 \cdot 7,58 \cdot 1,8^2 = 7,8 \text{ KVAR}$$

En comparant les tensions et les puissances (U_{Cii} , Q_{Cii}) des différentes unités de condensateurs avec celles du tableau 2, on constate qu'en régime normal on ne risque pas d'avoir des surtensions ni des surcharges.

(Le coefficient de sécurité est suffisamment grand)

d/ Calcul de la résistance R :

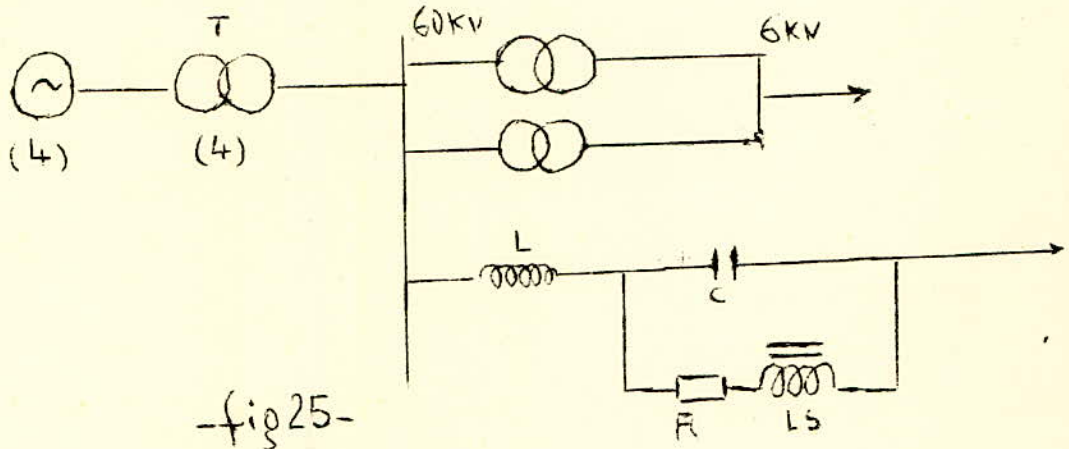
On applique la relation (3.6) du chapitre III avec

$$X_C = 10,5 \Omega ; X_L = 11 \Omega ; x = 80 ; X_{LScc} = 2,75 \Omega$$

Tout calcul fait, on trouve

$$R = 10,235 \Omega$$

Nous aurons le schéma suivant /



e/ Vérifions si l'impédance du limiteur est nulle, en régime

normal de fonctionnement :

$$Z_{limi.} = \frac{RX_C^2}{R^2 + (X_{LSn} - X_C)^2} + j \left(X_L + \frac{X_C^2 X_{LSn} - X_{LSn}^2 X_C - R^2 X_C}{R^2 + (X_{LSn} - X_C)^2} \right)$$

$$= \frac{10,235 \cdot 10,5^2}{(10,235)^2 + (209,5)^2} + j (11 + 10,96)$$

$$= 0,02 + j0,04$$

$$|Z_{limi.}| = \sqrt{0,002} = 0,045 \Omega$$

$$|Z_{limi.}| \simeq 0$$

En court-circuit, on remplace X_{LSn} par X_{LScc} , tout calcul fait, on trouve:

$$Z_{limi.} = 0,2 + j10,86$$

$$|Z_{limi.}| = \sqrt{117,97} = 10,865 \Omega \simeq 11 \Omega = X_L$$

f/ Dimensions de la bobine LS.

On se propose maintenant de dimensionner la self à saturation. Il n'est pas question de faire un calcul très détaillé, d'ailleurs nous utiliserons des caractéristiques graphiques établies dans ce but, tout en donnant des formules et quelques précisions.

Bobine LS	U _{LSn} = 5,5 KV
	I _N = 500 A
	I _{0,μ} = 25 A
	S _{LS} = $\sqrt{3} \cdot 5,5 \cdot 500 = 4757,5$ KVA

Le calcul sera analogue à celui d'un transformateur ayant la même puissance que LS, et dont le courant primaire est égal à 500 A.

1) Calcul des pertes :

D'après les courbes (%) de la puissance nominale = f(S_n) nous avons :

- Pertes dans le cuivre :

$$P_{Cu} = \alpha S_n = 0,85 \cdot \frac{4757,5}{100} \cdot 10^3 = 40,5 \text{ KW} \quad P_{Cu} = 40,5 \text{ KW}$$

- Pertes dans le fer :

$$P_{Fe} = \beta S_n = 0,32 \cdot \frac{4757,5}{100} \cdot 10^3 = 15,2 \text{ KW} \quad P_{Fe} = 15,2 \text{ KW}$$

$$-\alpha_p = \frac{P_{Cu}}{P_{Fe}} = \frac{40,5}{15,2} = 2,66 \quad \alpha_p = 2,66$$

- Pertes spécifiques dans le cuivre p_{cu} :

Soit l_{co} (m) la longueur du conducteur et S_{co} sa section. Nous

pouvons écrire : $RI^2 = I^2 K \rho \frac{l_{co}}{S_{co}}$ (W) (4.4) où .

K : coefficient qui tient compte des pertes supplémentaires provenant de l'effet pelliculaire du courant (K ≤ 1,2) .

La masse de cuivre est :

$$m_{Cu} = \rho_{Cu} \cdot l_{co} \cdot S_{co} \text{ (Kg)} \text{ (4.5)}$$

(4.4) et (4.5) donnent :

$$p_{cu} = I^2 \frac{K \cdot \rho \cdot l_{co.tot}}{S_{co}} \cdot \frac{1}{g_{cu} \cdot l_{co.tot} S_{co}}$$

$$g_{cu} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{cu} = 0,0216 \cdot 10^{-6} (\Omega \cdot m) \text{ à } 75^\circ C$$

$$\text{d'où } p_{cu} = 2,7 \cdot 10^{-2} J^2 \text{ (W/Kg)}$$

$$\text{avec } J^2 = \frac{I^2}{S_{co}^2} = \text{densité de courant} \quad J = 3,15 \cdot 10^6 \text{ A/mm}$$

D'après $J = f(S_n)$ on trouve $J = 3,15 \cdot 10^6 \text{ A/mm}^2$

$$p_{cu} = 2,7 \cdot 10^{-12} \cdot (3,15)^2 \cdot 10^{12} = 26,8 \text{ W/Kg}$$

$$p_{cu} = 26,8 \text{ W/Kg}$$

- Pertes spécifiques dans le fer p_{Fe} :

$$p_{Fe} = K_{us} \cdot p'_{Fe} \cdot B_{max}^2$$

avec p'_{Fe} = chiffre de pertes

K_{us} = coefficient d'usinage = 1,2 pour les moyennes puissances

$$p'_{Fe} = 1,3 \text{ W/Kg pour les tôles d'épaisseur } 0,35 \text{ mm (celles que nous avons choisi)}$$

$$= 1,5 \text{ à } 1,6 \text{ W/Kg " " " " } 0,5 \text{ mm}$$

$$B_{max} = 1,6 \text{ Tesla (d'après } B=f(S_n))$$

$$p_{Fe} = 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1,6^2 = 4 \text{ W/Kg} \quad p_{Fe} = 4 \text{ W/Kg}$$

Toutes ces pertes vont servir pour le calcul de la section du noyau de fer.

2) Section active du noyau: S_{Fe}

S_{Fe} est donnée par la formule suivante:

$$S_{Fe} = C \sqrt{\frac{Sn \cdot \frac{p_{cu}}{p_{Fe}} \cdot 10^{-1}}{f \cdot p \cdot J \cdot B_{max}}}$$

où C est un coefficient qui dépend de la forme des bobines. Nous adopterons des bobines rondes, ce qui donne $C = 45$.
 $f = 50 \text{ Hz}$

$$S_{Fe} = 45 \cdot \sqrt{475 \cdot 10^{-8}}$$

$$S_{Fe} = 981 \text{ cm}^2$$

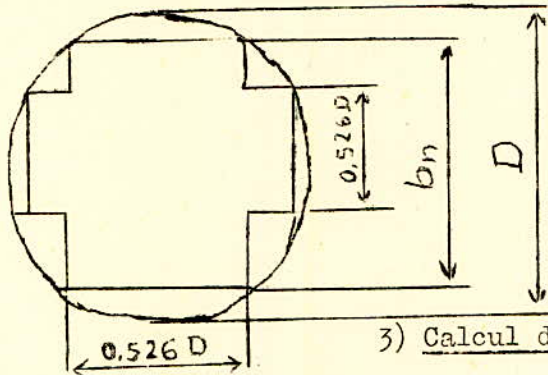
La section totale du noyau est:

$$S'_{Fe} = \frac{S_{Fe}}{K_f}$$

K_f = coefficient de remplissage du fer
= 0,87 pour les tôles de 0,35 mm

$$S'_{Fe} = 1127,5 \text{ cm}^2$$

Pour une meilleure utilisation du fer, nous prendrons une section en croix.



$$b_n = \frac{S_{Fe}}{2 \cdot 0,526 D} + \frac{0,526 D}{2}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 S'_{Fe}}{\pi}}$$

3) Calcul du nombre de spires.

- flux maximum dans l'enroulement:

$$\phi_{\max} = B_{\max} \cdot S_{Fe}$$

$$\phi_{\max} = 15,696 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.}$$

- le nombre de spires N est donné par:

$$N = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot \phi_{\max}}$$

$$N = 158 \text{ spires}$$

4) Section du conducteur.

- le courant nominal est :

$$I = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U} = 500 \text{ A.}$$

- la section du conducteur est:

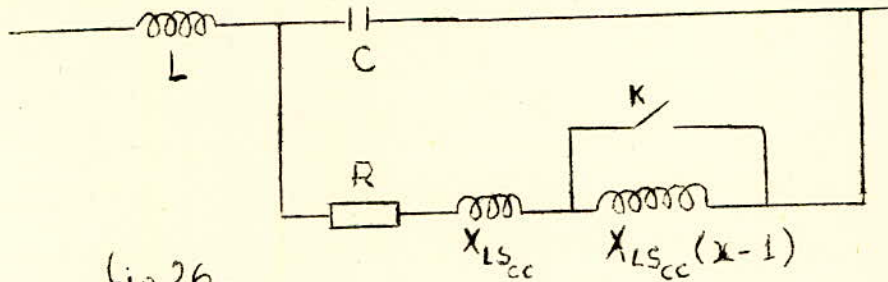
$$S_{co} = \frac{I}{J}$$

$$S_{co} = 159 \text{ mm}^2$$

Ainsi nous avons dimensionné la self à saturation LS.

LE REGIME TRANSITOIRE

Etant donné que l'inductance de la self à saturation varie brusquement en passant du régime non saturé au régime saturé, nous pouvons représenter le circuit par le schéma équivalent suivant:



- fig 26 -

avec $x = \frac{X_{LSn}}{X_{LScc}}$

- en régime normal: K ouvert et $X_{LS} = X_{LScc} + X_{LScc}(x-1) = xX_{LScc} = X_{LSn}$
- en régime de court-circuit: K fermé et $X_{LS} = X_{LScc}$

V-1. Calcul des courants permanents avant la commutation.

Soit le circuit suivant: (fig-27-)

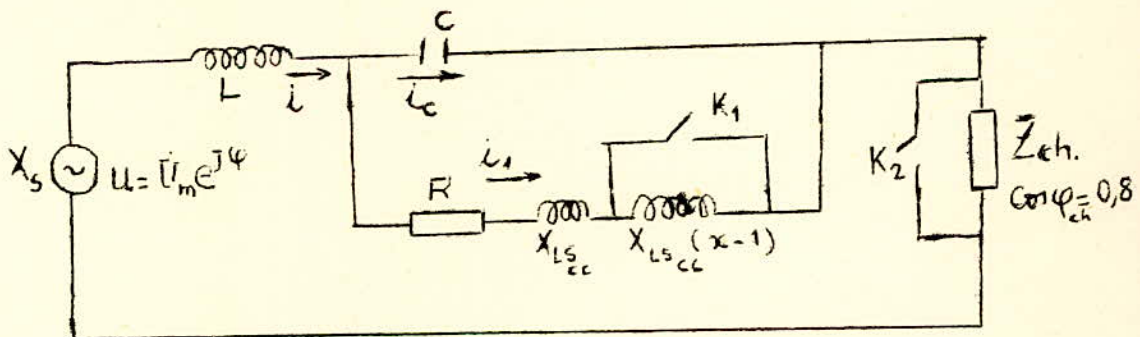


fig-27-

V-1.1: Calcul de i(t)

$$i(t) = \frac{U_m \cdot e^{j\psi}}{Z_{\text{eq}}}$$

avec $Z_{\text{eq}} = Z_{\text{limiteur}} + Z_s + Z_{\text{charge}}$

On a vu au chapitre précédent, qu'en régime normal de fonctionnement, l'impédance résultante du limiteur est presque nulle ($Z_{lim.}=0$)

$$Z_s = jX_s$$

$$Z_{ch.} = R_{ch.} + jX_{ch.}$$

d'où: $Z_{éq} = R_{ch.} + j(X_s + X_{ch.})$

En considérant $u(t)$ comme fonction sinusoïdale, soit $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, nous aurons pour $i(t)$ l'expression suivante:

$$i(t) = \frac{U_m}{|Z_{éq.}|} \sin(\omega t + \varphi - \varphi_1)$$

soit:
$$i(t) = \frac{U_m}{\sqrt{R_{ch.}^2 + (X_s + X_{ch.})^2}} \sin(\omega t + \varphi - \arctg \frac{X_s + X_{ch.}}{R_{ch.}})$$

V-1.2: Calcul de $i_C(t)$ et $u_C(t)$

En régime normal (avant le court-circuit), vu que i_1 est très faible, on peut admettre que:

$$i_C = i = i_{charge}$$

Alors
$$i_C(t) = \frac{U_m}{\sqrt{R_{ch.}^2 + (X_s + X_{ch.})^2}} \sin(\omega t + \varphi - \arctg \frac{X_s + X_{ch.}}{R_{ch.}})$$

soit sous forme complexe:

$$\bar{I}_C = \bar{I}_m \cdot e^{j\alpha}$$

avec
$$\bar{I}_m = \frac{U_m}{\sqrt{R_{ch.}^2 + (X_s + X_{ch.})^2}} e^{j\omega t} \quad \text{et } \alpha = \varphi - \arctg \frac{X_s + X_{ch.}}{R_{ch.}}$$

La tension sur le condensateur est:

$$\bar{U}_C = -j\bar{I}_C X_C = U_m e^{j(\alpha - \pi/2)}$$

où:

$$U_m C = \frac{U_m \cdot X_C}{\sqrt{R_{ch.}^2 + (X_s + X_{ch.})^2}}$$

Nous pouvons aussi écrire:

$$u_C(t) = \frac{U_m \cdot X_C}{\sqrt{R_{ch.}^2 + (X_s + X_{ch.})^2}} \sin(\omega t + \varphi - \arctg \frac{X_s + X_{ch.}}{R_{ch.}} - \pi/2)$$

V-2. Expressions des courants libres.

En première approximation nous pouvons considérer que $X_{LSc} \ll R$, et nous envisagerons le schéma ci-dessous. (fig-28-)

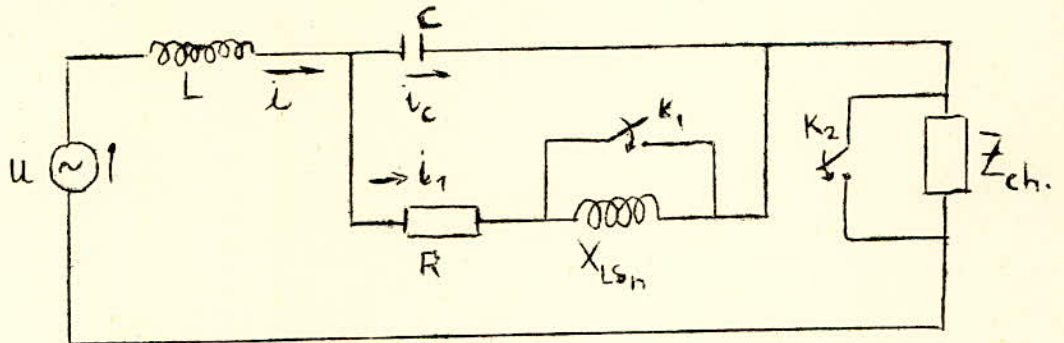


fig-28-

En appliquant la théorie de la transformée de Laplace (Héaviside), les équations opérationnelles de notre système s'écrivent :

$$U(p) = pLI(p) - pLi(0) + U_C(p) \quad (1)$$

$$U(p) = pLI(p) - pLi(0) + RI_1(p) \quad (2)$$

$$I(p) = I_C(p) + I_1(p) \quad (3)$$

$$U_C(p) = 1/pC \cdot I_C(p) + u_C(0) \quad (4)$$

En combinant les équations (1), (2), (3), (4), nous obtenons :

$$\begin{cases} U(p) = pLI(p) - pLi(0) + \frac{I(p)}{pC} - \frac{I_1(p)}{pC} + u_C(0) \\ U(p) = pLI(p) - pLi(0) + R \cdot I_1(p) \end{cases}$$

soit :

$$\begin{aligned} (pL + 1/pC) \cdot I(p) - 1/pC \cdot I_1(p) &= U(p) + pL \cdot i(0) - u_C(0) \\ pL \cdot I(p) + R \cdot I_1(p) &= U(p) + pL \cdot i(0) \end{aligned}$$

ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{vmatrix} (pL + 1/pC) & (-1/pC) \\ (pL) & (R) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I(p) \\ I_1(p) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U(p) + pL \cdot i(0) - u_C(0) \\ U(p) + pL \cdot i(0) \end{vmatrix}$$

de la forme :

$$(A) \cdot (I) = (B)$$

$$\text{d'où : } (I) = (A)^{-1} \cdot (B)$$

$$(A)^{-1} = 1/D \cdot \begin{vmatrix} R & 1/pC \\ -pL & pL+1/pC \end{vmatrix}$$

avec $D = (pL + 1/pC)R - (pL) \cdot (-1/pC)$

$$D = \frac{p^2 RLC + pL + R}{pC}$$

D'où :

$$I(p) = \frac{R}{p^2 RLC + pL + R} \cdot pC (U(p) + pLi(0) - u_C(0))$$

$$+ \frac{1}{pC} \cdot \frac{pC}{p^2 RLC + pL + R} \cdot (U(p) + pL \cdot i(0))$$

$$I(p) = \frac{U(p) \cdot (1+pRC) + pL \cdot i(0) \cdot (1+pRC) - pRC \cdot u_C(0)}{p^2 RLC + pL + R} \quad 5-1$$

et $I_1(p) = \frac{-pL}{p^2 RLC + pL + R} \cdot pC (U(p) + pLi(0) - u_C(0))$

$$+ \frac{pL+1/pC}{p^2 RLC + pL + R} \cdot pC (U(p) + pL \cdot i(0))$$

$$I_1(p) = \frac{U(p) + p^2 LC \cdot u_C(0) + pL \cdot i(0)}{p^2 RLC + pL + R} \quad 5-2$$

Cherchons les racines de l'équation $p^2 RLC + pL + R = 0$

$$p^2 RLC + pL + R = 0$$

soit $p^2 + p \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC} = 0$

Les solutions sont :

$$p_{2,3} = - \frac{1}{2RC} \pm \frac{1}{2RC} \cdot \sqrt{1 - 4R^2 C/L}$$

Comme $4R^2 C > L$, nous pouvons alors écrire les racines sous forme complexe :

$$p_2 = a + j\omega_0$$

$$a = -1/2RC$$

$$p_3 = a - j\omega_0$$

avec

$$\omega_0 = 1/2RC \cdot \sqrt{1 - 4R^2C/L} = -a \cdot \sqrt{1 - 4R^2C/L}$$

Pour trouver les expressions de $i(t)$ et $i_1(t)$, on utilise une méthode classique, à savoir :

si
$$I(p) = \frac{N(p)}{M(p)}$$

on a
$$i(t) = \sum_{p_k} \frac{N(p_k)}{p_k M'(p_k)} \cdot e^{p_k t}$$

Rappelons que si la tension appliquée $u(t)$ est une fonction sinusoïdale du temps, on représente alors $U(p)$ par :

$$U(p) = U_m \cdot e^{j\varphi} \frac{p}{p - j\omega}$$

Les expressions 5-1 et 5-2 s'écrivent alors : (en tenant compte que seule la partie imaginaire nous intéresse, donc il faut ajouter un j devant $i(0)$ et $u_C(0)$)

$$I(p) = \frac{U_m \cdot e^{j\varphi} \cdot p(1+PRC) + jp(p-j\omega)(1+PRC)L \cdot i(0) - jpRC(p-j\omega)u_C(0)}{(p-j\omega)(p^2RLC + pL + R)}$$

$$I_1(p) = \frac{U_m \cdot e^{j\varphi} \cdot p + jp^2(p-j\omega)LC \cdot u_C(0) + j(p-j\omega)pL \cdot i(0)}{(p-j\omega)(p^2RLC + pL + R)}$$

Etant donné que nous ne déterminerons que les composantes libres, nous ne chercherons pas à trouver un membre correspondant à $p_1 = j\omega$ (qui est un courant permanent et qui sera calculé par une méthode ordinaire); on a alors:

$$M'(p) = (p-j\omega)(2pRLC + L)$$

Le courant libre $i'(t)$ est égal à :

$$i'(t) = \text{Imaginaire} \left[\frac{U_m \cdot e^{j\varphi} (1+p_2 RC)}{(p_2 - j\omega)(2p_2 RLC + L)} + j \frac{(1+p_2 RC)Li(0) - RCu_C(0)}{2p_2 RLC + L} \right] e^{p_2 t} \\ + \text{Imaginaire} \left[\frac{U_m \cdot e^{j\varphi} (1+p_3 RC)}{(p_3 - j\omega)(2p_3 RLC + L)} + j \frac{(1+p_3 RC)Li(0) - RCu_C(0)}{2p_3 RLC + L} \right] e^{p_3 t}$$

Introduisons la notation suivante:

$$\begin{aligned}
 1 + p_2 RC &= 1 + (a + jw_0)RC = (1 + aRC) + jw_0RC = Be^{j\beta} \\
 p_2 - jw &= a + jw_0 - jw = a + j(w_0 - w) = C_1 e^{j\delta_1} \\
 2p_2 RLC + L &= 2(a + jw_0)RLC + L = (2aRLC + L) + j2w_0RLC = De^{j\delta} \\
 LCp_2 &= (a + jw_0)LC = aLC + jw_0LC = Ee^{j\epsilon}
 \end{aligned}$$

Il s'ensuit que:

$$\begin{aligned}
 1 + p_3 RC &= 1 + (a - jw_0)RC = (1 + aRC) - jw_0RC = B.e^{-j\beta} \\
 p_3 - jw &= a - jw_0 - jw = a - j(w_0 + w) = C_2.e^{j\delta_2} \\
 2p_3 RLC + L &= 2(a - jw_0)RLC + L = (2aRLC + L) - j2w_0RLC = D.e^{-j\delta} \\
 LCp_3 &= (a - jw_0)LC = aLC - jw_0LC = E.e^{-j\epsilon}
 \end{aligned}$$

Ce qui nous donne:

$$\begin{aligned}
 i'(t) = \text{Ima.} &\left[\frac{Um.e^{j\varphi}.B.e^{j\beta}}{C_1.e^{j\delta_1}.De^{j\delta}} + j \frac{Be^{j\beta}.Li(0) - RCu_C(0)}{De^{j\delta}} \right] e^{(a+jw_0)t} \\
 &+ \text{Ima.} \left[\frac{Um.e^{j\varphi}.B.e^{-j\beta}}{C_2.e^{j\delta_2}.De^{-j\delta}} + j \frac{Be^{-j\beta}.Li(0) - RCu_C(0)}{De^{-j\delta}} \right] e^{(a-jw_0)t}
 \end{aligned}$$

Posons:

$$\begin{aligned}
 \frac{Um.B}{C_1.D} e^{j(\varphi + \beta - \delta_1 - \delta)} &= G_1 e^{j\varphi} ; \quad \frac{Um.B}{C_2.D} e^{j(\varphi - \beta - \delta_2 + \delta)} = G_1 e^{j\varphi} \\
 \frac{Be^{j\beta}.Li(0) - RCu_C(0)}{De^{j\delta}} &= H_1 e^{j\varphi} ; \quad \frac{Be^{-j\beta}.Li(0) - RCu_C(0)}{De^{-j\delta}} = H_1 e^{j\varphi}
 \end{aligned}$$

Donc $i'(t)$ s'écrit:

$$\begin{aligned}
 i'(t) = \text{Ima.} &(G_1 \cos p + jG_1 \sin p + j(H_1 \cos q + jH_1 \sin q)) . e^{(a+jw_0)t} \\
 &+ \text{Ima.} (G_1 \cos m + jG_1 \sin m + j(H_1 \cos n + jH_1 \sin n)) . e^{(a-jw_0)t}
 \end{aligned}$$

soit:

$$\begin{aligned}
 i'(t) &= \text{Ima.} (K_1 + jK_2) . e^{(a+jw_0)t} + (K_3 + jK_4) . e^{(a-jw_0)t} \\
 i'(t) &= e^{at} \left\{ (K_1 - K_3) \sin w_0 t + j(K_2 + K_4) \cos w_0 t \right\}
 \end{aligned}$$

qu'on peut mettre sous la forme :

$$\boxed{i'(t) = K_I e^{at} \sin(\omega_0 t + \psi_I)}$$

avec

$$K_I = \sqrt{(K_1 - K_3)^2 + (K_2 + K_4)^2} ; \quad \text{tg } \psi_I = \frac{K_2 + K_4}{K_1 - K_3}$$

et

$$\begin{aligned} K_1 &= G \cos p - H \sin q & ; & \quad K_2 = G \sin p + H \cos q \\ K_3 &= G_1 \cos m - H_1 \sin n & ; & \quad K_4 = G_1 \sin m + H_1 \cos n \end{aligned}$$

En résolvant de la même façon l'expression pour $I_1(p)$, on trouve :

$$\begin{aligned} i'_1(t) &= \text{Ima.} \left[\frac{U_m \cdot e^{j\varphi}}{C_1 e^{j\delta_1} \cdot D e^{j\delta}} + j \frac{E e^{j\xi} \cdot u_C(0) + Li(0)}{D e^{j\delta}} \right] e^{(a+j\omega_0)t} \\ &+ \text{Ima.} \left[\frac{U_m \cdot e^{j\varphi}}{C_2 e^{j\delta_2} \cdot D e^{-j\delta}} + j \frac{E e^{-j\xi} \cdot u_C(0) + Li(0)}{D e^{-j\delta}} \right] e^{(a-j\omega_0)t} \end{aligned}$$

Posons

$$\frac{U_m}{C_1 \cdot D} e^{j(\varphi - \delta_1 - \delta)} = G' e^{j p'} ; \quad \frac{U_m}{C_2 \cdot D} e^{j(\varphi - \delta_2 + \delta)} = G'_1 e^{j m'}$$

$$\frac{E e^{j\xi} \cdot u_C(0) + Li(0)}{D e^{j\delta}} = H' e^{j q'} ; \quad \frac{E e^{-j\xi} \cdot u_C(0) + Li(0)}{D e^{-j\delta}} = H'_1 e^{j n'}$$

d'où :

$$\begin{aligned} i'_1(t) &= \text{Ima.} (G' \cos p' + j G' \sin p' + j(H' \cos q' + j H' \sin q')) e^{(a+j\omega_0)t} \\ &+ \text{Ima.} (G'_1 \cos m' + j G'_1 \sin m' + j(H'_1 \cos n' + j H'_1 \sin n')) e^{(a-j\omega_0)t} \end{aligned}$$

soit

$$i'_1(t) = e^{at} (K'_1 - K'_3) \sin \omega_0 t + j(K'_2 + K'_4) \cos \omega_0 t$$

qu'on peut aussi mettre sous la forme :

$$\boxed{i'_1(t) = K_{II} e^{at} \sin(\omega_0 t + \psi_{II})}$$

où

$$K_{II} = \sqrt{(K'_1 - K'_3)^2 + (K'_2 + K'_4)^2}$$

$$\text{tg } \psi_{II} = \frac{K'_2 + K'_4}{K'_1 - K'_3}$$

et $K_1' = G_1' \cos \varphi_1' - H_1' \sin \varphi_1' \quad ; \quad K_2' = G_1' \sin \varphi_1' + H_1' \cos \varphi_1'$

$K_3' = G_1' \cos \varphi_2' - H_1' \sin \varphi_2' \quad ; \quad K_4' = G_1' \sin \varphi_2' + H_1' \cos \varphi_2'$

Les expressions analytiques complètes des courants sont :

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_{\text{éq.}}} \sin(\omega t + \varphi - \psi_1) + K_I e^{at} \sin(\omega_0 t + \psi_I)$$

$$i_1(t) = \frac{U_m}{Z_{\text{éq.}}} \sin(\omega t + \varphi - \psi_2) + K_{II} e^{at} \sin(\omega_0 t + \psi_{II})$$

$$i_C(t) = i(t) - i_1(t)$$

V-3. Application

Nous allons utiliser les résultats du chapitre IV, pour faire les calculs du régime transitoire.

$$X_s = 2,379 \Omega$$

$$C = 300 \mu\text{F. et } X_C = 10,5 \Omega$$

$$R = 10,235 \Omega$$

$$U_m = 48990 \text{ Volts}$$

$$X_L = 11 \Omega \text{ et } L = 35 \text{ mH.}$$

$$Z_{ch} = \frac{U}{3 I} = \frac{60000}{1,73 \cdot 500} = 69,36 \Omega$$

or $\cos \varphi_{ch} = 0,8$; donc

$$R_{ch} = 69,36 \cdot 0,8 = 55,5 \Omega$$

$$X_{ch} = 69,36 \cdot 0,6 = 41,5 \Omega$$

Supposons qu'à l'instant $t=0$ et $\varphi = \pi/2$, le court-circuit se produit.

Nous aurons alors :

$$i(0) = \frac{U_m}{R_{ch} + (X_s + X_{ch})^2} \sin(90^\circ - \arctg \frac{X_s + X_{ch}}{R_{ch}})$$

$$i(0) = \frac{48990}{55,5^2 + (2,379 + 41,5)^2} \sin(90^\circ - 38^\circ)$$

$$i(0) = 545 \text{ A.}$$

$$u_C(0) = \frac{U_m \cdot X_C}{R_{ch} + (X_s + X_{ch})^2} \sin(90^\circ - 38^\circ + 90^\circ)$$

$$u_C(0) = - 5729 \text{ V.}$$

*** Calcul de K_I, K_{II}, V_I, V_{II} .

$$P_2 = a + j\omega_0$$

$$P_3 = a - j\omega_0$$

$$a = - \frac{1}{2RC} = - \frac{1}{2 \cdot 10,235 \cdot 0,0003} = - 163$$

$$a = -163$$

$$\omega_0 = - a \sqrt{1 - \frac{4R^2C}{L}} = 262$$

$$\omega_0 = 262$$

$$(1+aRC) + j\omega_0 RC = B e^{j\beta}$$

$$B = \sqrt{(1+aRC)^2 + (\omega_0 RC)^2}$$

$$B = 0,95$$

$$\text{tg } \beta = \frac{\omega_0 RC}{1 + aRC}$$

$$\beta = 58^\circ$$

$$a + j(\omega_0 - \omega) = C_1 e^{j\delta_1}$$

$$C_1 = \sqrt{a^2 + (\omega_0 - \omega)^2}$$

$$C_1 = 171$$

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{\omega_0 - \omega}{a}$$

$$\delta_1 = 18^\circ$$

$$2aRLC + L + j2\omega_0RLC = De^{j\delta}$$

$$D = \sqrt{(2aRLC + L)^2 + (2\omega_0RLC)^2}$$

$$D = 0,0563$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2\omega_0RLC}{a2RLC + L}$$

$$\delta = 90^\circ$$

$$aLC + j\omega_0LC = Ee^{j\xi}$$

$$E = \sqrt{(aLC)^2 + (\omega_0LC)^2}$$

$$E = 0,00323$$

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{\omega_0LC}{aLC}$$

$$\xi = -58^\circ$$

$$a - j(\omega_0 + \omega) = C_2 e^{j\delta_2}$$

$$C_2 = \sqrt{a^2 + (\omega_0 + \omega)^2}$$

$$C_2 = 598,6$$

$$\delta_2 = -74^\circ$$

$$G = 4834$$

$$G = \frac{Um \cdot B}{C_1 \cdot D}$$

$$p = \varphi + \beta - \delta_1 - \delta$$

$$p = 40^\circ$$

$$\frac{Be^{j\beta} \cdot Li(0)}{De^{j\delta}} - \frac{RC \cdot u_C(0)}{De^{j\delta}} = He^{jq}$$

$$\frac{BLi(0)}{D} e^{j(\beta - \delta)} - \frac{RC \cdot u_C(0)}{D} e^{-j\delta} = He^{jq}$$

$$H \cos q = \frac{BLi(0)}{D} \cos(\beta - \delta) - \frac{RC \cdot u_C(0)}{D} \cos(-\delta)$$

$$H \cos q = 272,96$$

$$H \sin q = \frac{BLi(0)}{D} \sin(\beta - \delta) - \frac{RC \cdot u_C(0)}{D} \sin(-\delta)$$

$$H \sin q = -483$$

$$G_1 = \frac{Um \cdot B}{C_2 \cdot D}$$

$$G_1 = 1381$$

$$m = \varphi - \beta - \delta_2 + \delta$$

$$m = 196^\circ$$

$$\frac{BLi(0)}{D} e^{j(-\beta + \delta)} - \frac{RC \cdot u_C(0)}{D} e^{j\delta} = H_1 e^{jn}$$

$$H_1 \cos n = \frac{B Li(0)}{D} \cos(\delta - \beta) - \frac{RC \cdot u(0)}{D} \cos \delta$$

$$H_1 \sin n = \frac{B Li(0)}{D} \sin(\delta - \beta) - \frac{RC \cdot u(0)}{D} \sin \delta$$

$$K_1 = G \cos p - H \sin q$$

$$K_2 = G \sin p + H \cos q$$

$$K_3 = G_1 \cos m - H_1 \sin n$$

$$K_4 = G_1 \sin m + H_1 \cos n$$

$$K_{II} = \sqrt{(K_1 - K_3)^2 + (K_2 + K_4)^2}$$

$$\operatorname{tg} \psi_I = \frac{K_2 + K_4}{K_1 - K_3}$$

$$G' = \frac{U_m}{C_1 \cdot D}$$

$$p' = \varphi - \delta_1 - \delta$$

$$G'_1 = \frac{U_m}{C_2 \cdot D}$$

$$m' = \varphi - \delta_2 + \delta$$

$$\frac{E e^{j\xi} \cdot u(0)}{D e^{j\delta}} + \frac{Li(0)}{D e^{j\delta}} = H' e^{jq'}$$

$$H' \cos q' = \frac{E u(0)}{D} \cos(\xi - \delta) + \frac{Li(0)}{D} \cos(-\delta)$$

$$H' \sin q' = \frac{E u(0)}{D} \sin(\xi - \delta) + \frac{Li(0)}{D} \sin(-\delta)$$

$$\frac{E e^{-j\xi} \cdot u(0)}{D e^{-j\delta}} + \frac{Li(0)}{D e^{-j\delta}} = H'_1 e^{jn'}$$

$$H'_1 \cos n' = \frac{E u(0)}{D} \cos(\delta - \xi) + \frac{Li(0)}{D} \cos \delta$$

$$H'_1 \sin n' = \frac{E u(0)}{D} \sin(\delta - \xi) + \frac{Li(0)}{D} \sin \delta$$

$$K'_1 = G' \cos p' - H' \sin q'$$

$$K'_2 = G' \sin p' + H' \cos q'$$

$$K'_3 = G'_1 \cos m' - H'_1 \sin n'$$

$$K'_4 = G'_1 \sin m' + H'_1 \cos n'$$

$$K_{II} = \sqrt{(K'_1 - K'_3)^2 + (K'_2 + K'_4)^2}$$

$$H_1 \cos n = 272,96$$

$$H_1 \sin n = 483$$

$$K_1 = 4186$$

$$K_2 = 3380$$

$$K_3 = -1810$$

$$K_4 = -107,69$$

$$K_{II} = 6831 \text{ A.}$$

$$\psi_I = 29^\circ$$

$$G' = 5088,65$$

$$p' = -18^\circ$$

$$G'_1 = 1453,65$$

$$m' = 254^\circ$$

$$H' \cos q' = -278,73$$

$$H' \sin q' = -512,98$$

$$H'_1 \cos n' = 278,73$$

$$H'_1 \sin n' = 164,636$$

$$K'_1 = 5353$$

$$K'_2 = 1851$$

$$K'_3 = -565,3$$

$$K'_4 = -1118,6$$

$$K_{II} = 5963 \text{ A.}$$

$$\operatorname{tg} \psi_{II} = \frac{K'_2 + K'_4}{K'_3 - K'_3}$$

$$\psi_{II} = 7^\circ$$

—0—

Forme des courants
(allure approximative)

$$K_I \sin(\omega_0 t + \psi_I) = 3279 \text{ A. pour } t=0 \text{ s.}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad ; \quad f_0 = 262/6,28 = 41,72 \text{ Hz} \quad ; \quad T_0 = 1/f_0 = 0,024 \text{ s}$$

$$\omega = 2\pi f \quad ; \quad f = 50 \text{ Hz} \quad ; \quad T = 1/f = 0,020 \text{ s}$$

a) $i_{cc} = f(t)$ sans limiteur: (voir courbe A_1)

L'échelle adoptée est: 2 mm = 500 A.

$$I_{cc} = 15 \text{ KA. (valeur efficace)} \quad ; \quad T = 0,020 \text{ s}$$

Au début du court-circuit ($t=0, \varphi = \pi/2$), on n'a pas considéré de régime transitoire.

b) $i_{cc \text{ limi.}} = f(t)$ avec limiteur: (voir courbe A_2)

$$I'_{cc} \approx 2,5 \text{ KA.} \quad : \text{ composante périodique de période } T = 0,020 \text{ s}$$

(là aussi on n'a pas considéré de régime transitoire au début du cc)

$$i'_{cc} = f(t) \text{ avec limiteur}$$

$$I'_{cc} \approx 3,3 \text{ KA.} \quad : \text{ composante aperiodique de pseudo-période } T_0 = 0,024 \text{ s}$$

Les calculs ont montré que cette composante s'amortit très vite.

(au bout de 3 demi-périodes -soit $t \approx 0,004 \text{ s}$ - elle devient pratiquement

$$\text{nulle } -I'_{cc} = 0,09 \text{ A.}) \quad (\text{ voir courbe } A_2)$$

c) Courant total $i'_{cctot.} = f(t)$ avec limiteur

Le courant résultant limité par le dispositif est représenté sur la courbe A_1 .

$$i'_{cctot.} = i'_{cc \text{ limi.}} + i'_{cc}$$

Au début du court-circuit ($t=0, \varphi = \pi/2$) ce courant est supérieur à 2,5 KA. (niveau imposé pour la réduction), mais au bout de 3 demi-périodes -soit $t = 0,03 \text{ s}$ - on a pratiquement:

$$I'_{\text{cctot.}} = 2,5 \text{ KA.}$$

car la composante libre i'_{cc} devient nulle comme on l'a souligné précédemment. (voir courbe A_1)

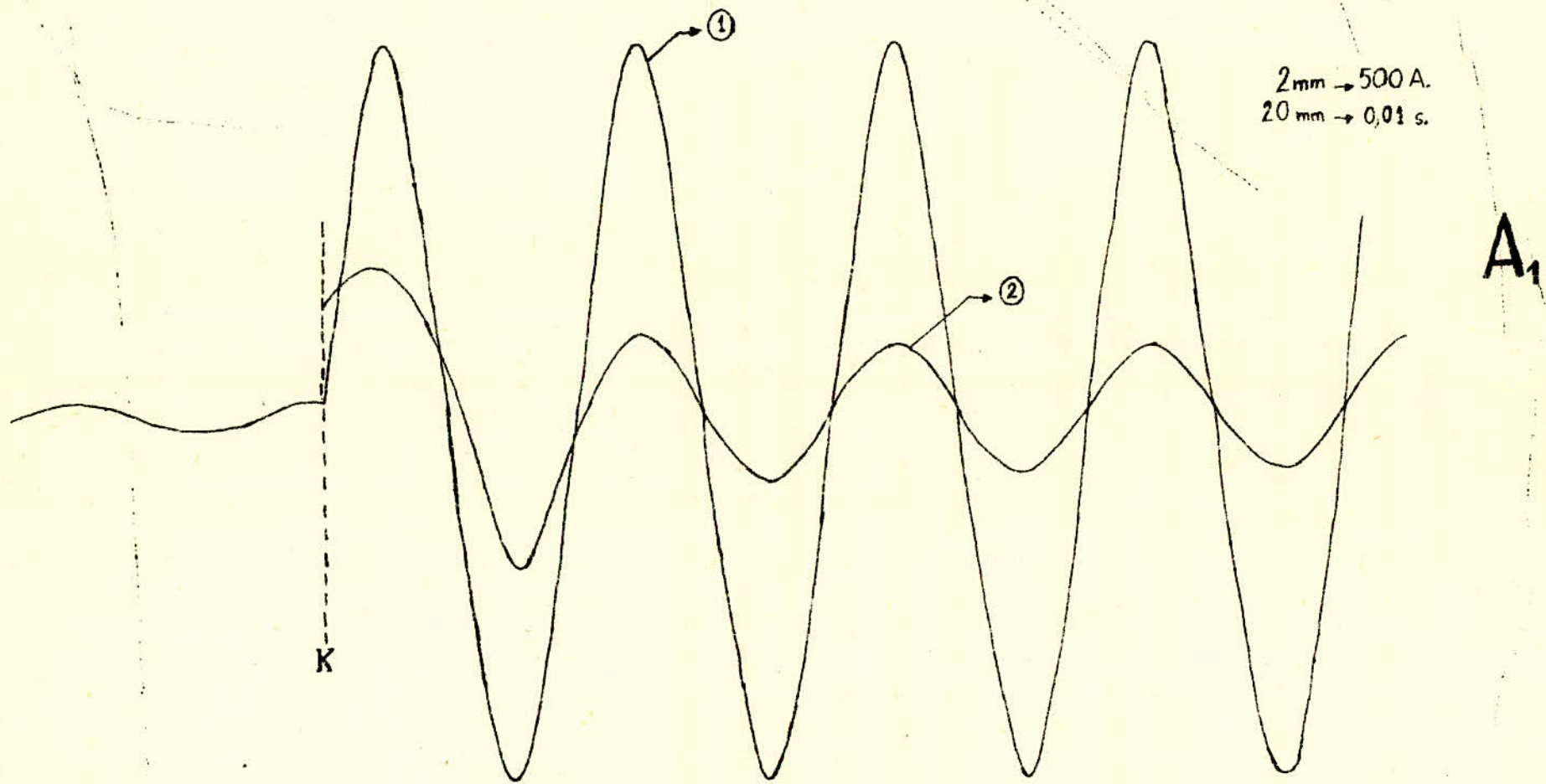
D'après l'allure des courbes obtenues sur A_1 , on retrouve le rapport de réduction n soit $n = \frac{58\text{mm}}{10\text{mm}} = 5,8$.

Remarque:- On peut faire le même travail pour $i_1(t)$, $i_c(t)$ et $u_c(t)$.

- On peut faire varier la phase(φ) de la tension d'alimentation et observer les variations des courants.

Conclusion:

On a tracé l'allure des courbes pour démontrer l'efficacité du dispositif dans ses propres fonctions et pour montrer que les phénomènes dans le circuit du limiteur ne sont pas dangereux pour les installations électriques (appareillages...), vu que la composante apériodique s'amortit très vite (elle disparaît pratiquement au bout de 0,024 s) et l'amplitude d'oscillation n'est pas trop grande.

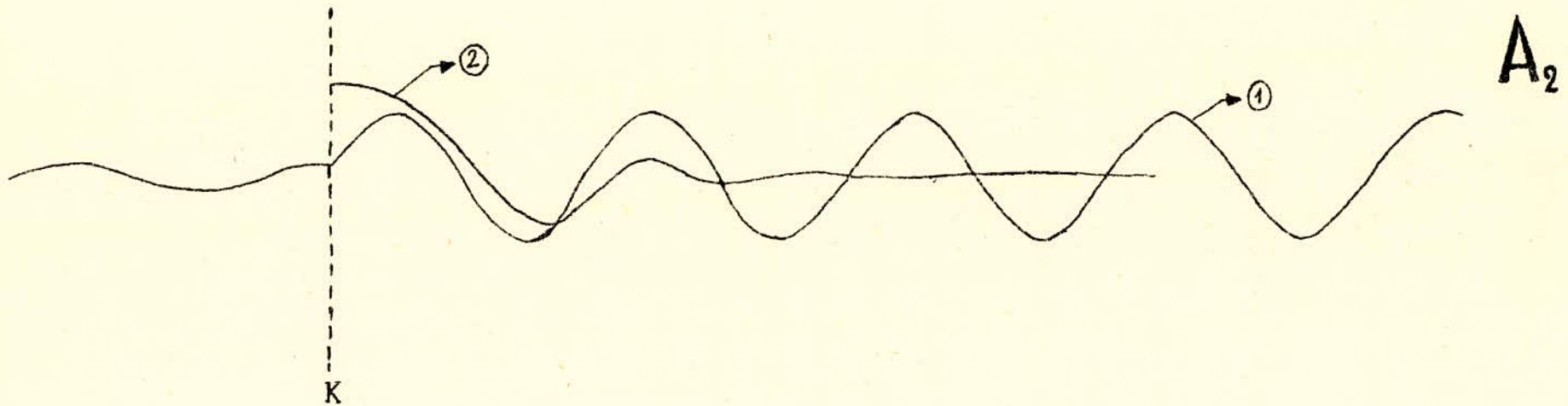


①: $i_{cc} = f(t)$ sans limiteur

②: $i'_{cc\ tot} = f(t)$ avec limiteur

K: début de court-circuit: $t = 0$ s et $\varphi = \frac{\pi}{2}$

2 mm \rightarrow 500 A.
20 mm \rightarrow 0,01 s.



①: $i_{cc\text{limit}} = f(t)$ avec limiteur

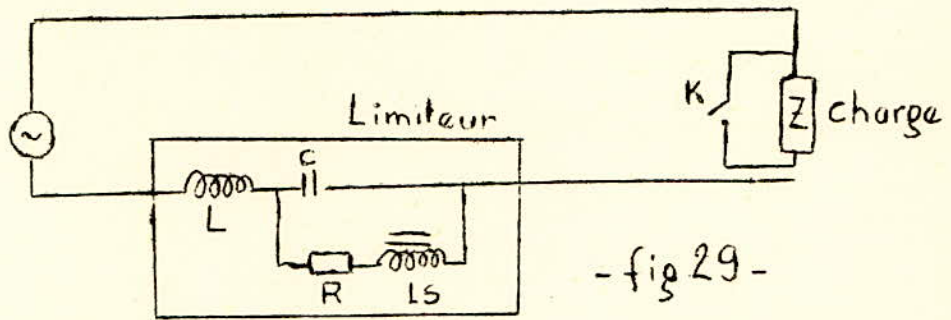
②: $i'_{cc} = f(t)$ (apériodique)

K: début de court-circuit : $t=0$ s. et $\varphi = \pi/2$

CHAPITRE VI.

6-1 : Rapport d'un essai expérimental à grande échelle

Pour confirmer le fonctionnement du limiteur, avec ses conditions spécifiées précédemment, des essais de court-circuit en monophasé ont été effectués en grande puissance à l'Institut H.T. de l'A.E.G. à Kassel (Allemagne).



La puissance de court-circuit triphasée de l'installation utilisée pour cette expérience était : $S_{cc} = 850 \text{ MVA}$.

Le court-circuit était provoqué par un fil fusible que l'on fait tomber sur les barres. Les résultats enregistrés sont les suivants :

	Essai N°1 sans limiteur	Essais N°2 avec limiteur
Tension nominale	10 KV	10 KV
Courant nominal	140 A.	140 A.
Courant de court-circuit	31000 A.	190 A.
Rapport <u>courant de court-circuit</u> courant nominal	221	1,35

Les conditions d'essais ont été exagérées sous beaucoup de point de vue, comme par exemple la valeur du courant qui a été préréglée à un seuil tellement bas qu'il ne se trouvait que légèrement au dessus du courant nominal. Par ailleurs on a constaté que l'interposition du limiteur n'a pas influencé la marche avec le courant normal. En régime de court-circuit le courant de défaut a été seulement de 190 A. au lieu de 31000 A. Dans le premier cas un arc se déplaçait à grande vitesse le long des barres, dans le second cas un faible arc est resté attaché au point de court-circuit.

6-2 : Forme des tensions et des courants.

(voir fig - 0₁ - 9 fig- 0₂ - et fig-0₃-)

On constate que la limitation du courant de court-circuit s'effectue complètement automatiquement déjà dans la première demi-période, la valeur réduite n'étant par exemple que légèrement supérieure au courant nominal. Cette limitation s'opère en n'entraînant aucune pointe particulière.

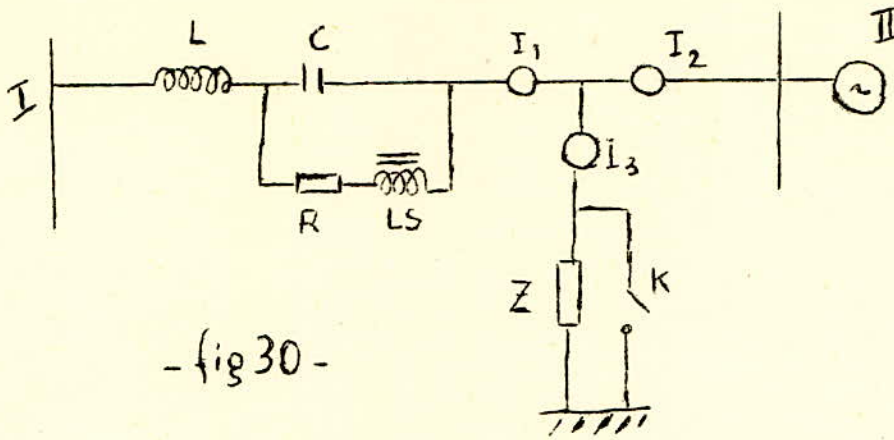
Le retour au régime normal après élimination du défaut s'effectue immédiatement et sans phénomènes secondaires.

6-3 : Autre avantage du limiteur dans le cas de la mise en parallèle (Interconnexion des réseaux)

Quand il s'agit de l'interconnexion de centrales ou réseaux de grande puissance, on attribue au limiteur le nom de coupleur à limitation.

Bien que le coupleur limiteur élimine les surintensités de n'importe quelle origine déjà lors de leur formation (et notamment les courants d'irruption après enclenchement des transformateurs), son but principal est cependant d'éviter les contraintes qui deviennent insupportables et qui risquent de se produire lorsqu'on interconnecte des réseaux de grande puissance.

On peut cependant attribuer au coupleur à limitation d'autres fonctions encore. Puisqu'on dispose d'un moyen de limiter le courant en cas de perturbation à des valeurs sûrement admissibles, on n'a plus besoin d'interrompre l'interconnexion elle-même dans un laps de temps très réduit, lorsque le défaut n'est pas éliminé immédiatement. Les possibilités que représente le coupleur dans un tel cas peuvent être entrevues dans l'exemple qui suit. (fig-30-)



- fig 30 -

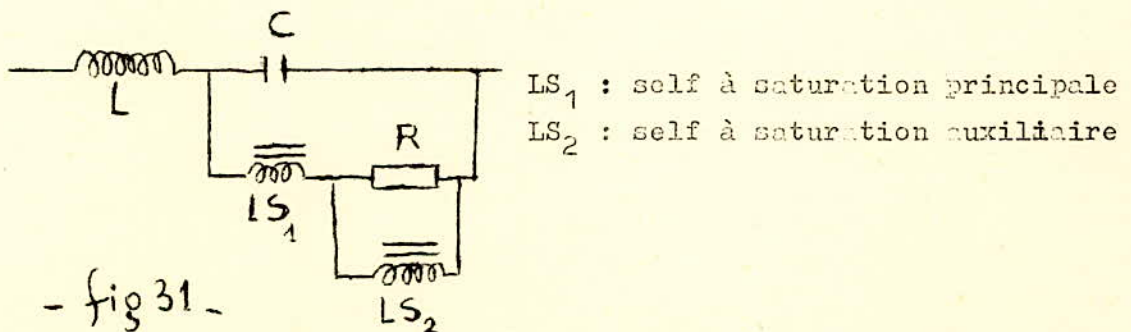
Le réseau I et l'alternateur II sont interconnectés à travers un coupleur à limitation. Ils alimentent une charge Z dans laquelle se produit un court-circuit. Pendant le défaut, le courant i_1 qui est fourni par le réseau I de grande puissance, est limité par le coupleur. La machine II est surchargée et tombe hors du synchronisme. Au moment où le court-circuit est finalement éliminé, le réseau et l'alternateur sont désynchronisés. La perte de synchronisme se manifeste par les battements sur la courbe du courant i_3 au moment 2 (voir fig-0₄-).

Non seulement le coupleur à limitation maintient alors l'interconnexion sans courant le compensation excessif, mais encore il permet et favorise la resynchronisation, en rétablissant entièrement automatiquement la marche en parallèle normale.

(voir fig-0₄-)

6-4 : Amélioration du limiteur.

L'amélioration des performances du limiteur consiste en l'incorporation d'une bobine saturable auxiliaire liée en parallèle avec la résistance atténuante R. Le circuit shuntant le condensateur C sera alors un plus complexe. (fig-31-)



- fig 31 -

Cette bobine additionnelle réduit les effets négatifs de la résistance dans les conditions de fonctionnement du dispositif. Donc on voit que LS_2 joue un rôle de réaction positive.

En régime de court-circuit, la self auxiliaire court-circuite R , donc C . Le choix de niveau de saturation de LS_2 peut être tel que la résistance R est subitement shuntée lorsque le limiteur fonctionne, et au fur et à mesure que le court-circuit diminue, on a de nouveau l'obtention de la fonction de R pour amortir plus vite les oscillations.

Quand le dispositif est en fonction, le circuit combiné de C a une impédance résistive inductive.

En ce qui concerne la limitation de l'avarie, on peut aboutir à des réductions considérables.

Les facteurs primaires qui "plaidoient" pour l'utilisation de ce type de circuit résonnant sont : le fonctionnement presque instantané et automatique, le passage à l'état normal, du circuit à deux bobines saturables dans les conditions d'avarie, et l'effet négligeable que le dispositif a dans le fonctionnement normal d'un système, si on inclut la stabilité du système. Le circuit à deux bobines saturables est connu aussi sous le nom de coupleur limiteur de court-circuit.

6-5 : Discussion sur la projection d'un limiteur.

Le dimensionnement d'un limiteur dépend beaucoup des problèmes auxquels il doit faire face, et de la durée pendant laquelle on doit le laisser fonctionner en cas de perturbation.

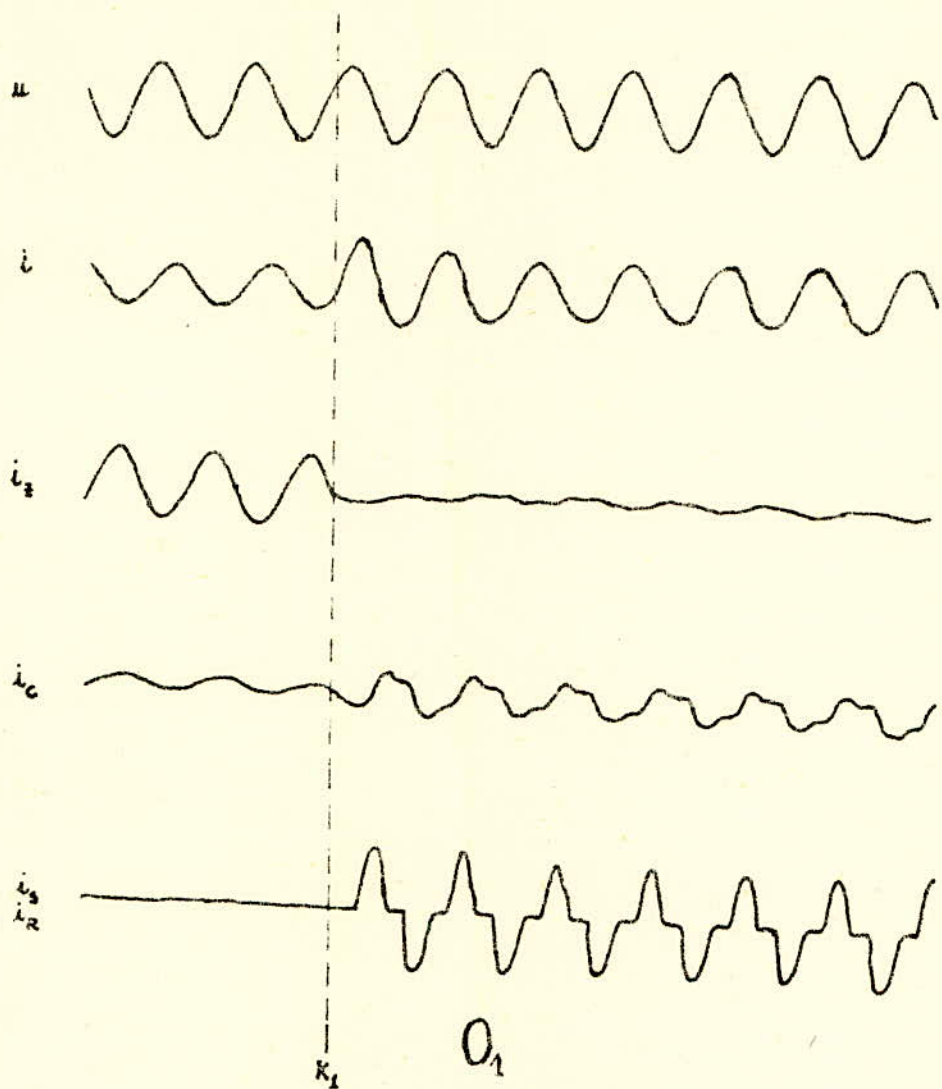
Le niveau de fonctionnement du limiteur (c'est à dire le niveau de puissance à la tension nominale du système correspondant au courant de passage du dispositif pour lequel apparaît la saturation du réseau shuntant C) doit être tel que la maille (C, LS, R) ne doit pas s'interférer avec la charge normale ou avec les surcharges admissibles à courte durée qui peuvent probablement apparaître dans le fonctionnement normal du système.

Il faut aussi tenir compte d'autres facteurs, dans le choix de ce niveau, par exemple : les courants augmentés exigés pour le démarrage des moteurs.

Généralement, si on exige une grande réduction du courant de court-circuit, les impédances du limiteur doivent être plus grandes. (Il est important d'éviter la surréduction afin de ne pas accroître inutilement le coût du dispositif). On doit aussi tenir compte de l'extension future du réseau, pour un nombre quelconque d'années à l'avenir. Dans ce cas on doit prendre un coefficient de sécurité pour la puissance de court-circuit du limiteur). La durée admissible du fonctionnement, avec avarie soutenue, du limiteur dans les applications industrielles varie de 3 à 9 secondes. Pour une application donnée, le choix des caractéristiques de projection du limiteur sera influencée par les conditions du système, le type d'application et l'emplacement du limiteur.

Par exemple le prix de revient du condensateur série, comme aussi sa capacité nominale, varient approximativement avec le carré du rapport entre le niveau de fonctionnement (en courant) et la charge normale. (Ce rapport varie de 1,2 à 3). A titre d'indication, on peut dire que le prix d'un limiteur prévu pour la projection de circuits à tension normale du réseau ne sera pas probablement aussi élevé que le prix de deux transformateurs pour la même puissance transférée. (Donnons les prix de quelques transformateurs : TM-1 10 KV. C=2,35m.r. TM-1,610 KV. C=3,2m.r. / TM-1 35 KV. C=3,4m.r.). Cette dépense peut être confrontée avec les investissements qui deviennent nécessaires lorsqu'il faut reconstruire une très grande station à H.T. et d'autres parties du réseau pour obtenir une tenue augmentée vis à vis des courts-circuits, On peut aussi comparer cette dépense avec le coût des inconvénients économiques qui résultent de l'arrêt de la marche des réseaux en interconnexion (par exemple), ou de la nécessité d'adopter une autre configuration de réseau.

L'efficacité et l'économie de l'utilisation d'un limiteur sont liées "intimement" en ce qui concerne la projection. Par conséquent, par un procédé logique, il est possible d'arriver à l'optimisation de la projection (gabarit, prix de revient, performances, et localisation) d'un limiteur, pour un niveau d'avarie donné dans un réseau.



u = tension de ligne.

i_c = courant dans le condensateur.

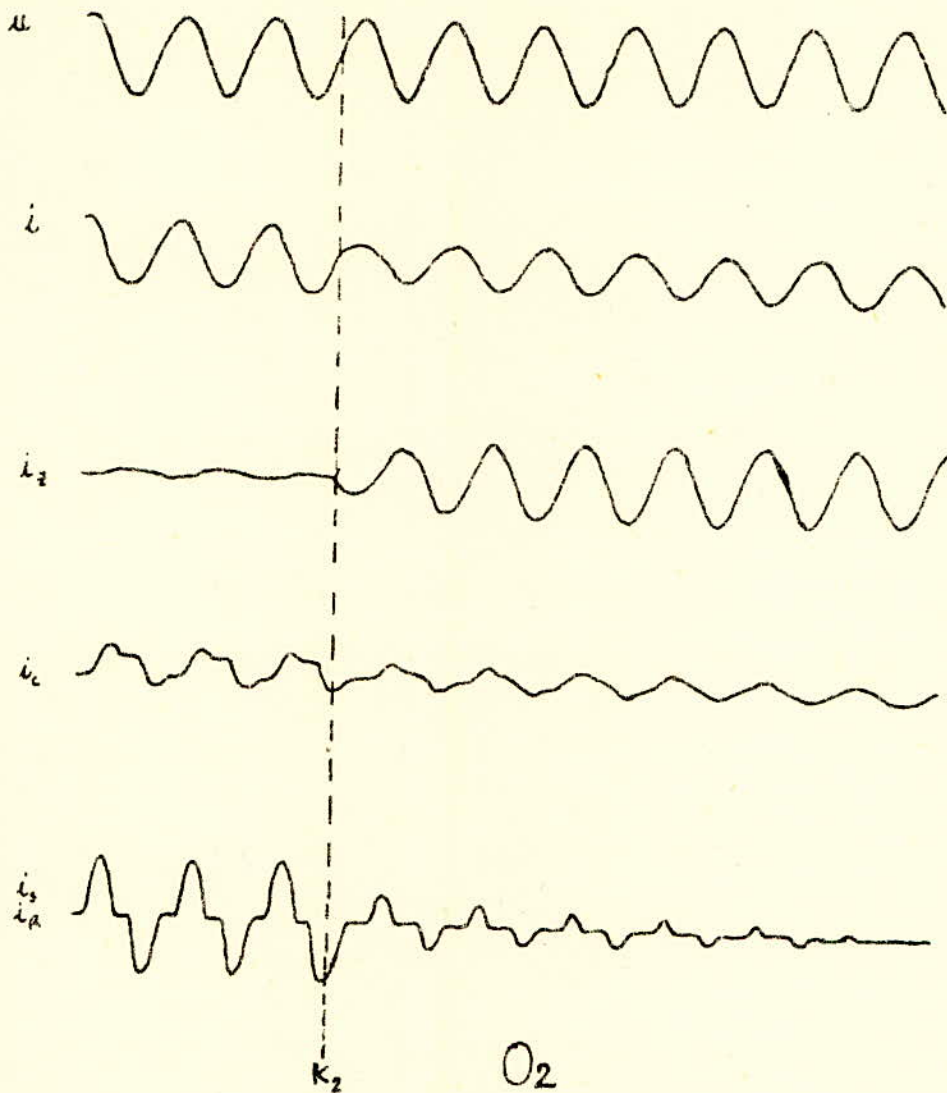
i = courant de ligne.

$i_s = i_R$ = courant dans la self à saturation et la résistance

i_z = courant de charge normal.

K_1 = début de court-circuit.

Avec le début du court-circuit (K_1), le courant de charge normal (i_z) s'affaïsse. Le courant de ligne (i) n'augmente que peu, jusqu'à la limite de courant représentant un facteur multiple très faible du courant nominal. Pendant le court-circuit, le courant limité a une forme sinusoïdale remarquable, et un faible déphasage par rapport à la tension.



u = tension de ligne.

i = courant de ligne.

i_2 = courant de charge normal.

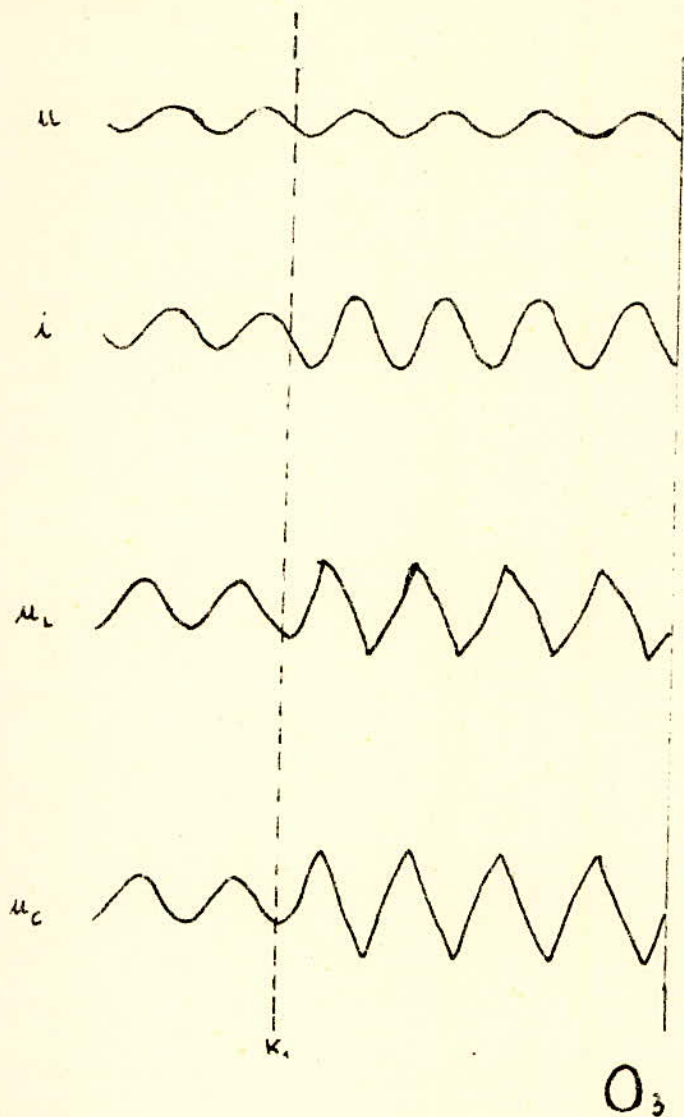
i_c = courant dans le condensateur.

$i_s = i_a$ = courant dans la self à saturation et la résistance.

K_2 = fin de court-circuit

Avec l'élimination définitive du défaut (K_2), le courant de charge (i_2) remonte et atteint sa valeur normale au bout de quelques demi-périodes. Le courant de ligne (i) reprend aussi sa valeur nominale.

La courbe (i_s) de courant dans la self à saturation (et dans la résistance) est caractéristique pour le fonctionnement interne du limiteur (alternance continue de ses deux états : état non saturé et état saturé).



u = tension de ligne .

i = courant de ligne .

u_L = tension sur l'inductance principale (L) .

u_C = tension sur le condensateur .

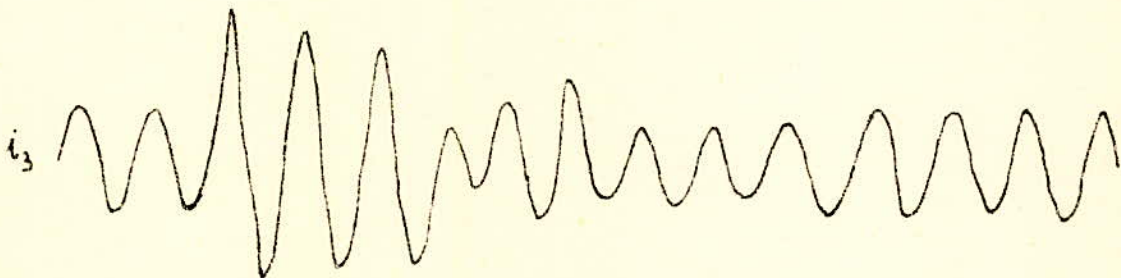
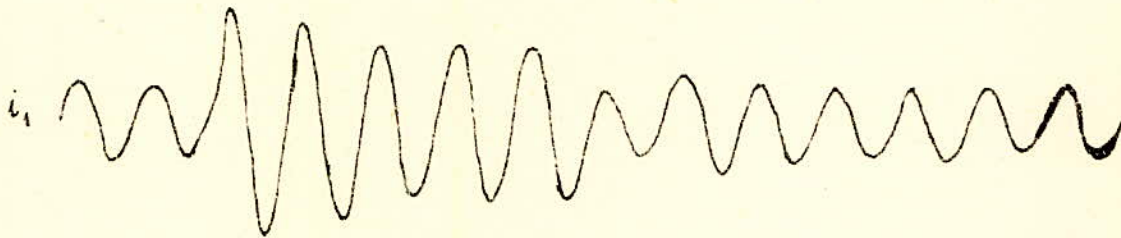
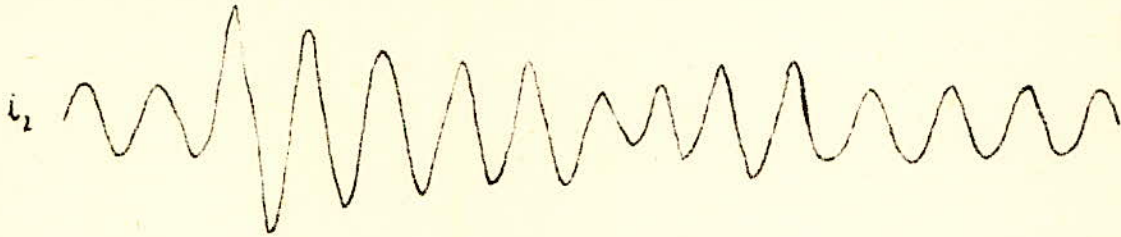
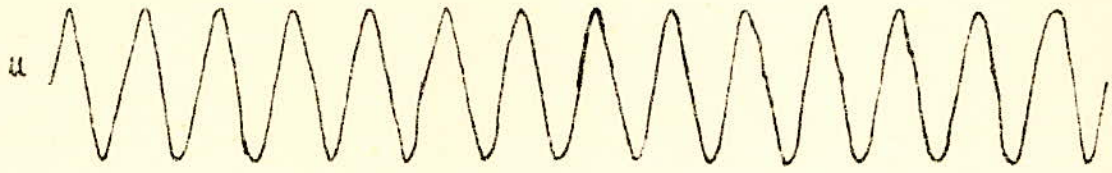
K_1 = début de court-circuit .

K_2 = fin de court-circuit .

Avec l'apparition du défaut (K_1), les tensions u_L et u_C respectivement sur l'inductance L et le condensateur C augmentent immédiatement.

Après l'élimination du court-circuit (K_2) ces mêmes tensions reprennent leurs valeurs normales au bout de quelques périodes.

04



i_1 = courant dans le réseau I.
 i_2 = courant de l'alternateur II.
 i_3 = courant dans la charge Z et l'interrupteur K.

a = marche normale.
b = court-circuit et perte de synchronisme.
c et d = resynchronisation automatique et remise en marche en parallèle.
1 = début de court-circuit
2 = fin de court-circuit
3 = marche normale en synchronisme.

BIBLIOGRAPHIE

- 1°/ C.I.G.R.E. Tome II 1966
- 2°/ Journées Internationales des Réseaux Electriques
A.I.M. 1969
- 3°/ Généralités sur la protection des réseaux d'énergie électrique
par MARCEL PETARD 1961
- 4°/ Lois générales de l'Electrotechnique
par A. BUISSON
- 5°/ Calcul des machines électriques Tome II
par M. LIWSCHITZ et L. MARET
(Bibliothèque de l'Ingénieur)
- 6°/ Réseaux Electriques : Cours de GH. CIRTINA
- 7°/ Centrales et Postes : Cours de PREDA
- 8°/ Transport d'énergie : Cours de STRYAPAN