

# Détermination des causes d'instabilité dans un système triphasé

Autor(en): **Germond, A. / Wolf, J.-P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **94 (1968)**

Heft 25

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-69668>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

621.316.13. 016-35 - 0.7.  
de  
en

# DÉTERMINATION DES CAUSES D'INSTABILITÉ DANS UN SYSTÈME TRIPHASÉ

par A. GERMOND et J.-P. WOLF, Institut d'électrotechnique EPUL

## 1. Introduction

Dans la marche à vide ou sous faible charge de réseaux triphasés sans neutre relié à la terre, les transformateurs de tension peuvent provoquer des oscillations. La littérature en parle le plus souvent de manière purement descriptive à partir de relevés oscillographiques [1]. Le but de cet exposé est de proposer un modèle mathématique permettant de prédéterminer ces phénomènes qui peuvent se résumer d'après la littérature [2, 3, 4] à l'apparition d'une composante de tension homopolaire de fréquence 50 ou 150 Hz, ou voisine de 25 ou 100 Hz.

Ces phénomènes ont leur origine dans l'interaction entre les inductivités saturées des transformateurs et les capacités du réseau ; il en résulte des surtensions et des surintensités pouvant amener le claquage des isolations et la destruction thermique des appareils de mesure et de protection.

### 1.1 Représentation simplifiée du cas des oscillations harmoniques

Admettons provisoirement que tous les courants et toutes les tensions soient assez voisins de sinusoides pour être représentés par des valeurs complexes. Examinons alors le dipôle suivant constitué d'une self-inductance non linéaire et d'une capacité mises en série (fig. 1). En représentant les valeurs efficaces des tensions complexes aux bornes de la self, soit  $U_L$ , et de la capacité, soit  $U_C$ , en fonction de la valeur efficace du courant  $I$  parcourant ces deux éléments, on obtient la courbe (C) et la droite (D) (fig. 2). En reportant la différence prise en valeur absolue entre ces deux tensions, on obtient la courbe représentant la valeur efficace  $U$  de la tension résultante : courbe (R). On voit ainsi qu'en imposant la tension variable  $U$  aux bornes du système, on peut avoir trois points de fonctionnement différents 1, 2, 3 (2 étant instable) et passer par « sauts » de 1' à 3' lorsqu'on élève progressivement la tension [5]. On a subitement une surintensité alors que la tension imposée ne varie pratiquement pas. Ce phénomène peut être facilement reproduit sur un modèle monophasé.

De même, dans un circuit où l'inductance et la capacité seraient en parallèle, on obtiendrait un résultat

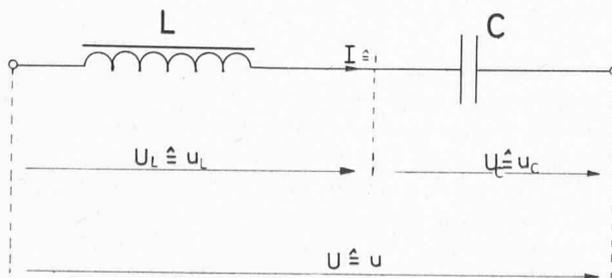


Fig. 1.

identique, mais avec des sauts de tension cette fois, lorsque le courant est imposé.

En fait, ce raisonnement fondé sur le calcul complexe permet simplement de comprendre qu'il doit se passer quelque chose, mais il est incorrect, car courants et tensions sont loin d'être sinusoidaux. Le calcul complexe perd toute sa valeur dès que l'on veut serrer la réalité de près, il est alors nécessaire de recourir aux valeurs instantanées  $i$ ,  $u_L$ ,  $u_C$  et  $u$ .

### 1.2 Observations faites dans les installations triphasées

D'après Bergmann [3, 4] les oscillations qui peuvent avoir une fréquence sensiblement moitié, égale, double ou triple de celle du réseau, se développent dans des cas propices qui sont difficiles à prévoir pour le moment ; un réseau peut avoir deux états stables, un état de fonctionnement normal et un état troublé par ces oscillations. Le basculement d'un état à l'autre peut se produire par exemple lors d'un enclenchement ou lors de courts-circuits à la terre fugitifs.

La présente étude fait un pas vers une méthode qui permettrait de prévoir les conditions nécessaires pour l'apparition de ces oscillations dans les réseaux. Ces conditions sont encore mal connues en théorie, même si dans la pratique le personnel assurant l'exploitation peut, dans certains cas connus, les reproduire à volonté.

## 2. Analyse d'un réseau atteint d'instabilité

L'étude a porté sur une partie du réseau de la Compagnie Vaudoise d'Electricité (CVE), dans la sous-station de Lucens 125/60/17 kV, fonctionnant à vide (voir fig. 3) et dans laquelle apparaissent les oscillations précitées. La méthode d'analyse comprend :

- la recherche d'un schéma équivalent aussi rigoureux que possible de chaque élément de réseau ;
- la représentation par des éléments fictifs des interactions existant entre les différents éléments du réseau ;

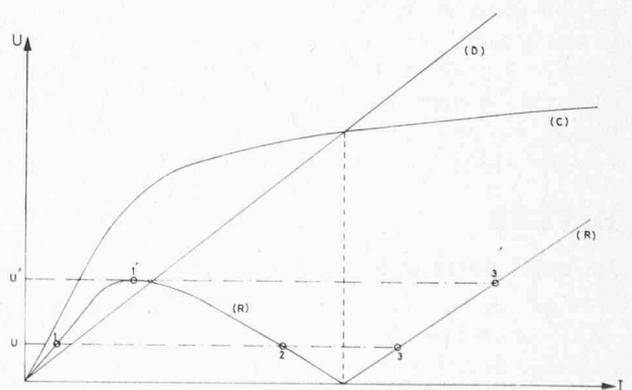


Fig. 2. — Exemple de ferrorésonance dans le cas d'une self non linéaire et d'une capacité mises en série.

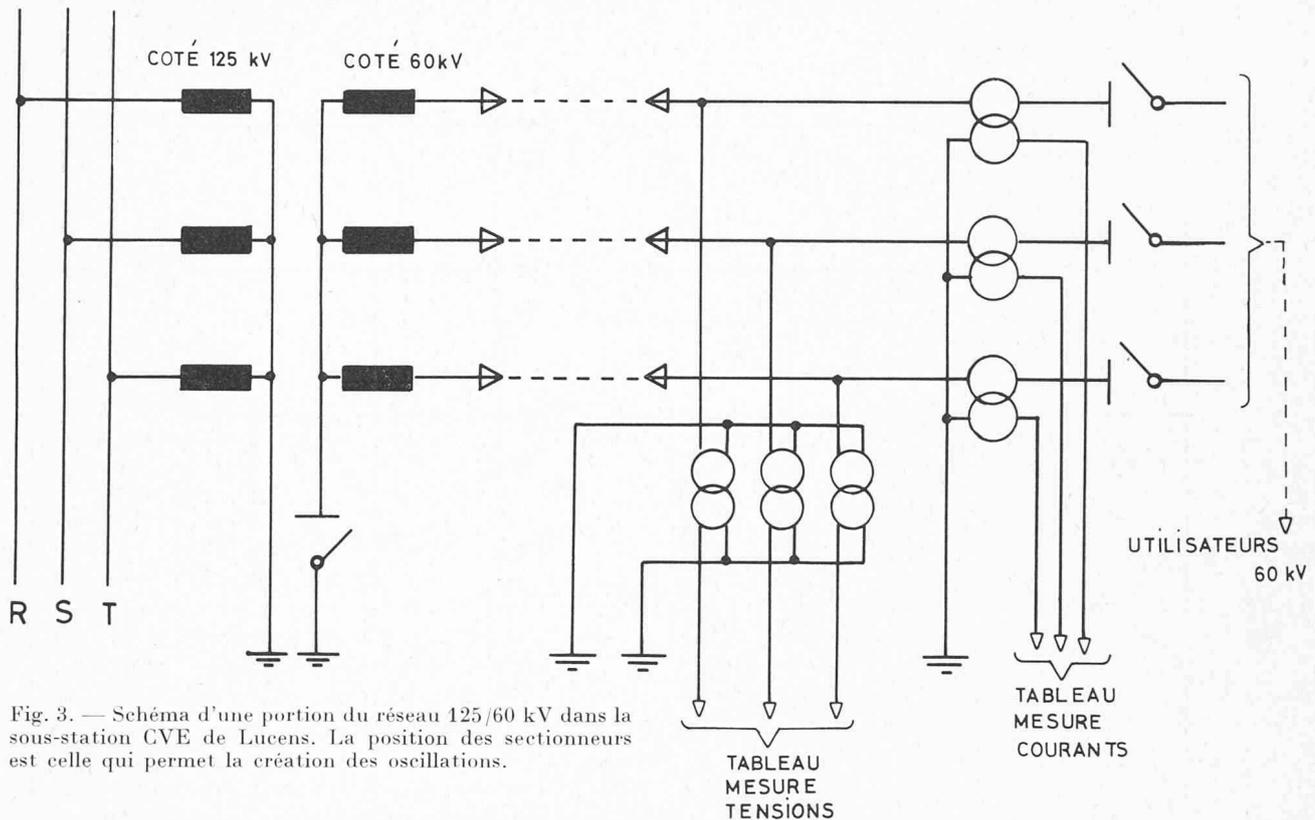


Fig. 3. — Schéma d'une portion du réseau 125/60 kV dans la sous-station CVE de Lucens. La position des sectionneurs est celle qui permet la création des oscillations.

- l'énoncé d'hypothèses simplificatrices permettant d'éliminer certains éléments vis-à-vis d'autres ;
- sur la base de cette analyse, sera établi un plan de calcul pour calculatrice électronique.

### 2.1 Schémas équivalents

La difficulté principale réside dans la représentation des transformateurs de tension  $\frac{62,5}{\sqrt{3}} / \frac{0,11}{\sqrt{3}}$  kV servant à la mesure des tensions entre terre et phases du côté 60 kV. Ces transformateurs sont du type à enroulement de compensation destiné à réduire les flux de dispersion entre les colonnes supportant d'une part l'enroulement secondaire et un demi-enroulement primaire haute tension, d'autre part le second demi-enroulement primaire, lorsque le secondaire de ce transformateur est fermé sur un appareil de mesure ou de sécurité.

Le schéma équivalent représenté à la figure 4 peut se ramener par une transformation triangle-étoile au schéma de la figure 5, compte tenu de quelques approximations.

### 2.2 Représentation des interactions

En plus des capacités des câbles contre terre, il faut tenir compte de l'effet capacitif du transformateur d'intensité sur le transformateur de tension, du fait que ces deux appareils sont montés dans le même fût.

Il faut tenir compte en outre de la capacité entre spires du primaire du transformateur de tension.

### 2.3 Hypothèses simplificatrices

Outre celles permettant de négliger certains éléments vis-à-vis d'autres, la plus importante consiste à considérer le secondaire 60 kV du transformateur 125/60/17 kV comme une source de tension sinusoïdale parfaite, ce qui revient à négliger l'impédance de court-circuit de ce transformateur et l'effet des enroulements 17 kV.

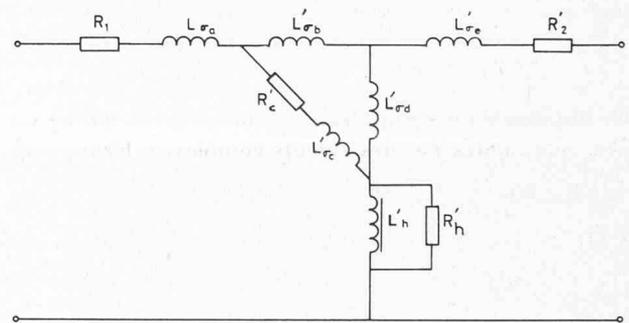


Fig. 4. — Schéma équivalent rapporté au primaire d'un transformateur de tension avec enroulement de compensation.

- $R_1$  = résistance primaire
- $R'_2$  = résistance secondaire rapportée au primaire
- $R'_c$  = résistance de l'enroulement de compensation rapportée au primaire
- $R'_h$  = résistance tenant compte des pertes fer
- $L_{\sigma a}, L'_{\sigma b}, L'_{\sigma c}, L'_{\sigma d}, L'_{\sigma e}$  inductances représentant l'action des flux de fuite entre les différents enroulements
- $L'_h$  = inductance principale représentant le flux commun à tous les enroulements

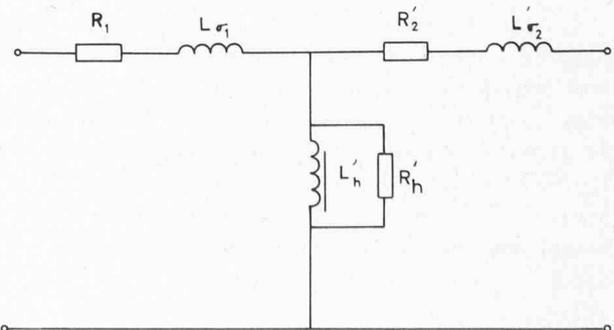


Fig. 5. — Même transformateur qu'à la figure 4, mais schéma transformé par un passage étoile-triangle en un schéma classique de transformateur.

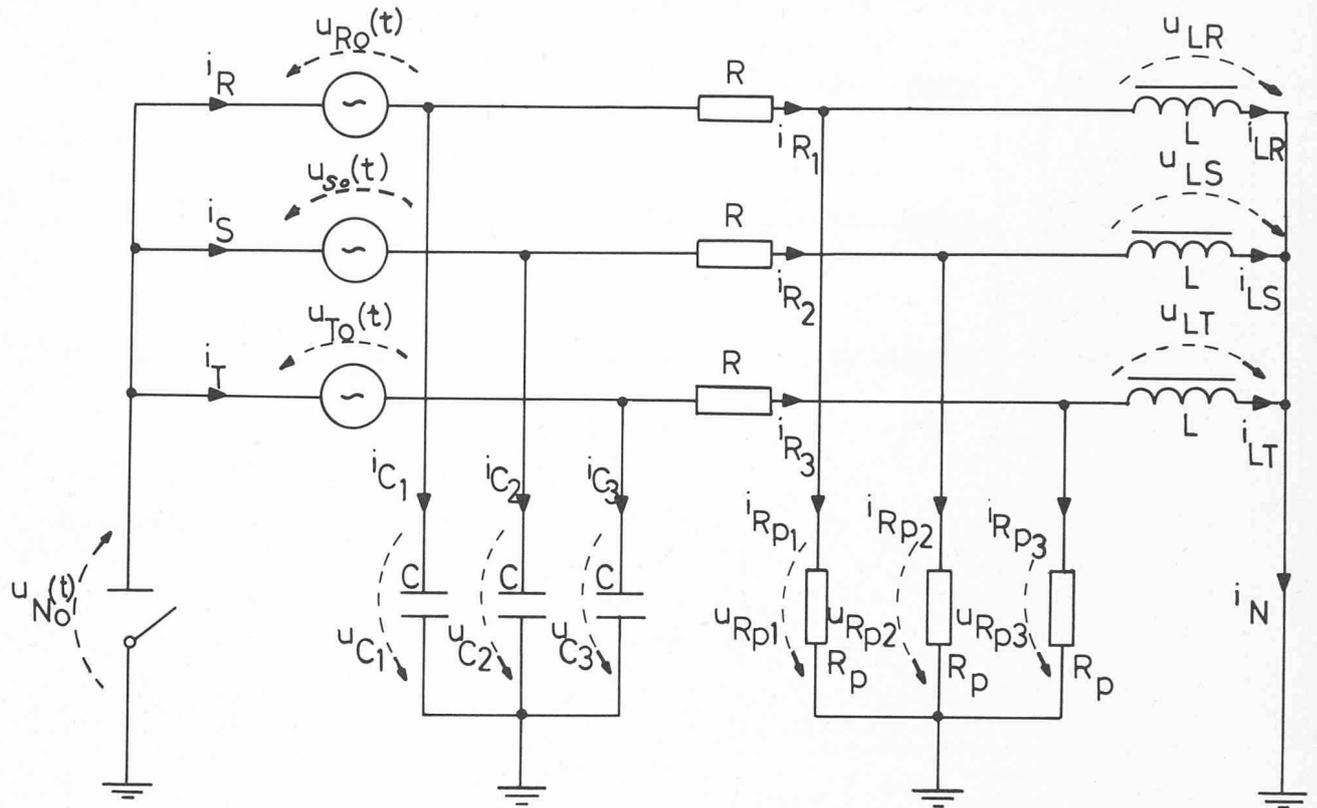


Fig. 6. — Schéma équivalent de la portion du réseau représenté à la figure 3.

### 3. Représentation simplifiée du réseau précédent

Compte tenu de ce qui précède, le réseau de la figure 3 se simplifie en un schéma dans lequel (fig. 6)

$L$  = inductance principale des transformateurs de tension  $\frac{62,5}{\sqrt{3}} / \frac{0,11}{\sqrt{3}}$  kV. Etant donné la présence de fer, cette inductance varie au cours d'un cycle.

$R_p$  = résistance, en parallèle avec  $L$ , tenant compte des résistances « fer » des transformateurs de tension et des résistances de charge de ceux-ci.

$R$  = résistance primaire des transformateurs précités.

$C$  = capacité représentant :  
la capacité des câbles reliant le transformateur principal au primaire des transformateurs de tension ;  
la capacité entre spires au primaire des transformateurs de tensions ;  
l'effet capacitif entre le transformateur de tension et le transformateur d'intensité monté dans le même fût.

$u_{Ro}(t)$ ,  $u_{So}(t)$ ,  $u_{To}(t)$  sont trois sources de tension sinusoïdale représentant le secondaire 60 kV du transformateur principal 125/60/17 kV.

$u_{No}(t)$  représente la tension aux bornes du sectionneur de terre du secondaire du transformateur principal 125/60/17 kV.

$u_{LR}$ ,  $u_{LS}$ ,  $u_{LT}$  sont trois tensions apparaissant aux bornes des inductances non linéaires  $L$ .

En ce qui concerne les trois courants parcourant les selfs  $L$ , soit  $i_{LR}$ ,  $i_{LS}$ ,  $i_{LT}$ , rien n'est changé si on se reporte au schéma de la figure 7. La justification de ce passage est faite en annexe 1. Dès lors le schéma est conditionné pour une exploitation mathématique.

### 4. Modèle mathématique

Les équations découlant du schéma 7 sont :

$$i_{LR} + i_{LS} + i_{LT} = 3C \frac{du_{No}}{dt} + 3 \frac{u_{No}}{R_p} \quad (1)$$

$$u_{No} + R \cdot i_{LR} + u_{LR} = u_{Ro} \quad (2)$$

$$u_{No} + R \cdot i_{LS} + u_{LS} = u_{So} \quad (3)$$

$$u_{No} + R \cdot i_{LT} + u_{LT} = u_{To} \quad (4)$$

$$\text{or } u_{LR} = \frac{d}{dt} (N \cdot \Phi_R) = \frac{d}{dt} (N \cdot S \cdot b_R) = N \cdot S \frac{db_R}{dt}$$

$$= N \cdot S \frac{db_R}{dh_R} \cdot \frac{dh_R}{dt} = N \cdot S \left( \frac{db}{dh} \right)_R \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{N}{l} \cdot i_{LR} \right)$$

$$u_{LR} = \frac{N^2 \cdot S}{l} \cdot \left( \frac{db}{dh} \right)_R \cdot \frac{di_{LR}}{dt} \quad (5)$$

$$u_{LS} = \frac{N^2 \cdot S}{l} \cdot \left( \frac{db}{dh} \right)_S \cdot \frac{di_{LS}}{dt} \quad (6)$$

$$u_{LT} = \frac{N^2 \cdot S}{l} \cdot \left( \frac{db}{dh} \right)_T \cdot \frac{di_{LT}}{dt} \quad (7)$$

$N$  étant le nombre de spires côté primaire du transformateur de tension ;

$S$  la section du circuit magnétique et  $l$  sa longueur moyenne ;

$\Phi$  le flux embrassé par une spire au primaire du transformateur représenté par la self non linéaire.

Des équations (1) à (7) on tire :

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_{No}}{dt} &= \frac{1}{3C} (i_{LR} + i_{LS} + i_{LT}) - \frac{1}{R_p \cdot C} u_{No} \\ \frac{di_{LR}}{dt} &= \frac{(u_{Ro} - u_{No} - R \cdot i_{LR})}{\frac{N^2 \cdot S}{l} \cdot \left(\frac{db}{dh}\right)_R} \\ \frac{di_{LS}}{dt} &= \frac{(u_{So} - u_{No} - R \cdot i_{LS})}{\frac{N \cdot S^2}{l} \cdot \left(\frac{db}{dh}\right)_S} \\ \frac{di_{LT}}{dt} &= \frac{(u_{To} - u_{No} - R \cdot i_{LT})}{\frac{N^2 \cdot S}{l} \cdot \left(\frac{db}{dh}\right)_T} \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

On a exprimé  $\left(\frac{db}{dh}\right)$  en fonction de  $i$ , à partir de la caractéristique magnétique des tôles relevées en continu, sous la forme :

$$\left(\frac{db}{dh}\right)_K = \frac{A_1}{1 + B_1 i_K^2} + \frac{A_2}{1 + B_2 i_K^2} + \mu_o \quad (II)$$

$k$  représentant l'indice  $R, S, T$ .

D'autre part :

$$u_{Ro} = \sqrt{2} U \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \alpha_o)$$

$$u_{So} = \sqrt{2} U \sin\left(2\pi \cdot f \cdot t + \alpha_o - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_{To} = \sqrt{2} U \sin\left(2\pi \cdot f \cdot t + \alpha_o - \frac{4\pi}{3}\right)$$

A partir des valeurs initiales de  $u_{No}$ ,  $i_{LR}$ ,  $i_{LS}$ ,  $i_{LT}$ , nous intégrons pas à pas le système différentiel (I) par la méthode de Runge-Kutta, [6],  $\left(\frac{db}{dh}\right)$  étant évalué à chaque pas et dans chaque phase par l'expression (II). Un programme a été écrit en langage FORTRAN et exploité sur la calculatrice IBM 7040 du Centre de calcul électronique de l'EPUL.

### 5. Résultats numériques. Conclusions

La figure 8 représente le courant  $i_{LR}$ , la tension  $u_{LR}$  dans la phase correspondante et la tension  $u_{No}$  (voir fig. 6) calculés par la méthode exposée ainsi que les oscillogrammes des mêmes grandeurs. On constate une concordance satisfaisante entre valeurs calculées et mesurées dès 200 ms environ après l'enclenchement dans cet exemple.

La méthode proposée est semble-t-il un moyen intéressant pour l'étude des phénomènes de ferorésonance que nous nous proposons de poursuivre à la Chaire d'installations électriques de l'EPUL sur la base d'autres exemples pratiques.

#### Annexe 1

Considérons le schéma de la figure 6 : la somme des trois courants instantanés parcourant les trois inductances non linéaires est :

$$i_N = i_{LR} + i_{LS} + i_{LT}$$

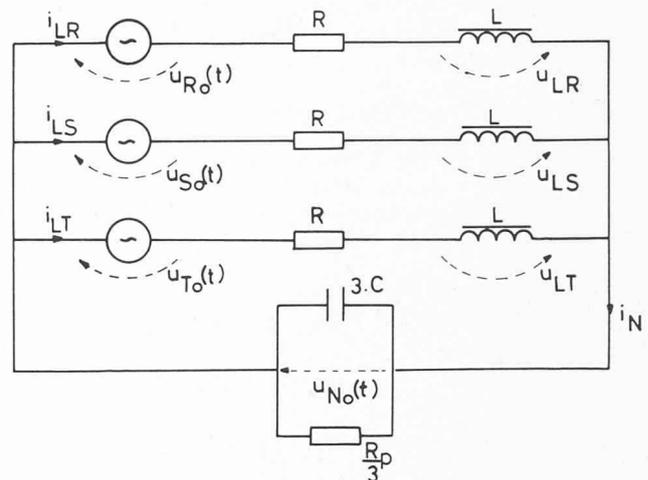


Fig. 7. — Schéma définitif, compte tenu des diverses hypothèses permettant l'exploitation mathématique.

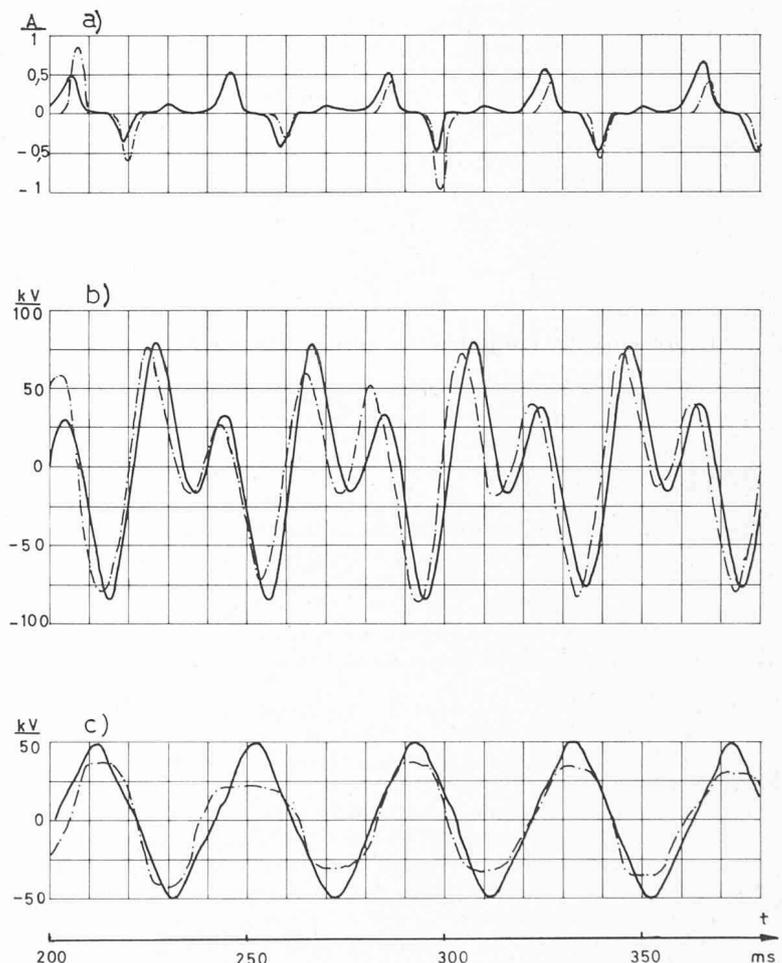


Fig. 8. — Relevés oscillographiques, en trait plein, et résultats de l'intégration numérique, en pointillé.

a) courant  $i_{LR}$     b) tension  $u_{LR}$     c) tension  $u_{No}$

De plus, soient les considérations suivantes :

1. La somme des trois tensions  $u_{Ro}, u_{So}, u_{To}$  est nulle.

$$u_{Ro} + u_{So} + u_{To} = 0$$

En effet, le transformateur principal 125/60 kV comporte trois colonnes, donc est à flux obligé.

2. Lorsque le sectionneur de terre aux bornes duquel apparaît la tension  $u_{No}(t)$  est ouvert, la somme des courants  $i_R + i_S + i_T$  est nulle.

Dès lors, l'expression du courant  $i_N$  est :

$$\begin{aligned} i_N &= -(i_{Rp1} + i_{Rp2} + i_{Rp3}) - (i_{C1} + i_{C2} + i_{C3}) \\ &= -\frac{1}{R_p} (u_{Rp1} + u_{Rp2} + u_{Rp3}) - C \frac{d}{dt} (u_{C1} + u_{C2} + u_{C3}) \\ &= -\frac{1}{R_p} (-R \cdot i_{R1} + u_{R0} - u_{No} - Ri_{R2} + u_{S0} - \\ &\quad - u_{No} - Ri_{R3} + u_{T0} - u_{No}) \\ &\quad - C \frac{d}{dt} (u_{R0} - u_{No} + u_{S0} - u_{No} + u_{T0} - u_{No}) \end{aligned}$$

Or,  $u_{R0} + u_{S0} + u_{T0} = 0$  d'après la considération 1.

D'où :

$$i_N = -\frac{1}{R_p} [-3u_{No} - R(i_{R1} + i_{R2} + i_{R3})] - C \frac{d}{dt} (-3u_{No})$$

$$i_N = \frac{3u_{No}}{R_p} + 3C \frac{du_{No}}{dt} + \frac{R}{R_p} (i_R - i_{C1} + i_S - i_{C2} + i_T - i_{C3})$$

Or  $i_R + i_S + i_T = 0$  d'après la considération 2.

Donc :

$$i_N = \frac{3u_{No}}{R_p} + 3C \frac{du_{No}}{dt} - \frac{R}{R_p} (i_{C1} + i_{C2} + i_{C3})$$

$$i_N = \frac{3u_{No}}{R_p} + 3C \left(1 + \frac{R}{R_p}\right) \frac{du_{No}}{dt}$$

$$\text{car } i_{C1} + i_{C2} + i_{C3} = -3C \frac{du_{No}}{dt}$$

Pour autant que le rapport  $\frac{R}{R_p}$  soit faible vis-à-vis de 1, ce qui est le cas ici, on peut écrire l'expression de  $i_N$  :

$$i_N = 3 \frac{u_{No}}{R_p} + 3C \frac{du_{No}}{dt}$$

ce qui amène au schéma de la figure 7.

## Résumé

Dans cet article, les auteurs analysent le réseau triphasé d'une sous-station électrique, dans lequel se produisent des phénomènes d'instabilité et des surtensions, provenant de l'interaction entre les inductances non linéaires des transformateurs de tension et les capacités contre terre des câbles.

Ils proposent ensuite un modèle mathématique permettant de reproduire ces phénomènes, donc de les prévoir dans d'autres cas.

## BIBLIOGRAPHIE

1. L. N. ROBINSON : *Phenomena accompanying transmission with some types of star transformer connections*. Trans. AIEE, vol. 34, sept. 1915, p. 2183-2195.
2. C. W. LA PIERRE : *Theory of abnormal line-to-neutral transformer voltages*. Trans. AIEE, vol. 50, 1931, p. 328-342.
3. C. BERGMANN : *Kippschwingungen in Drehstromnetzen*. Thèse D83, Technische Universität Berlin, 1966.
4. C. BERGMANN : *Grundlegende Untersuchungen über Kippschwingungen in Drehstromnetzen*. ETZ, vol. 88, 1967, n° 12, p. 292-298.
5. L. I. SIROTINSKI : *Hochspannungstechnik. Innere Überspannungen*, ch. 3. VEB Verlag Technik, Berlin, 1966.
6. L. COLLÄTZ : *Numerische Behandlung von Differentialgleichungen*. Springer, Berlin, 1951.

## BIBLIOGRAPHIE

**Thermodynamique appliquée aux machines**, par R. Vichnievsky, professeur à la Faculté des Sciences de Paris. Paris, Masson, 1967. — Un volume 16 × 25 cm, 412 pages, 177 figures, 21 tableaux. Prix : relié, 60 F.

L'ouvrage du professeur Vichnievsky traite des applications de la thermodynamique macroscopique aux machines.

Son plan comporte trois parties importantes :

- machines thermiques à gaz parfait ;
- machines thermiques à fluide moteur à deux phases ;
- machines frigorifiques et thermo-transformateurs.

Un bref rappel des principes de possibilité de production de travail et de l'utilisation de la chaleur aux différents niveaux de température constitue une introduction. Le comportement des produits de combustion à température élevée, et les conséquences sur la construction des diagrammes thermodynamiques des produits dissociables sont traités en vue de l'évaluation des températures de combustion à pression et à volume constants. Les cycles des machines à gaz parfait sont étudiés en partant des cycles simples des fusées et en terminant par les cycles combinés des turbines et des moteurs alternatifs. Quelques éléments de mécanique des fluides, indispensables, sont abordés à l'occasion de l'étude des moteurs à réaction pourvus ou non de machines tournantes.

Le rappel des propriétés essentielles des fluides réels et la construction des diagrammes thermodynamiques correspondants permet d'aborder l'étude des cycles des moteurs à vapeur.

Sont examinés les cycles simples de Carnot, de Hirn, de Rankine, les cycles à soutirages. Les cycles complexes binaires ou des cycles comportant la production simultanée du travail mécanique et de la chaleur, montrent la multiplicité des solutions que peut fournir la thermodynamique. La production de basses températures comporte deux aspects différents quant au but poursuivi, réalisation des atmosphères à température inférieure à l'ambiante et obtention des produits à l'état liquide ou solide.

Les atmosphères à température supérieure à celle du milieu ambiant peuvent être réalisées grâce à la pompe à chaleur. La production simultanée du froid et de la chaleur suivant des cycles complexes, avec ou sans régénération, conduit à un rendement global très élevé. Le problème de l'air humide est examiné dans son application à la réalisation des atmosphères à température et à état hygrométrique donnés, au séchage et au refroidissement des fluides.

De nombreux exemples numériques servent à illustrer les principes de fonctionnement des différentes installations. Les diagrammes thermodynamiques des différents fluides présentés sont des réductions au quart ou au cinquième des figures spécialement dessinées pour cet ouvrage. Leur présence sous forme réduite dans le texte donne les ordres de grandeur et familiarise le lecteur avec la représentation graphique. La restitution de ces diagrammes en vraie grandeur fournit un document utilisable pour des calculs précis, au même titre que les nombreux tableaux relatifs aux propriétés des fluides.

*Sommaire :*

Système thermodynamique. Chaleur et travail. Notions sur les équations d'état. — Principes de la thermodynamique.