

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 13

Artikel: Méthode d'analyse des perturbations dues aux redresseurs dans un réseau de distribution

Autor: Moussa, G.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915429>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Elektrotechnik – Electrotechnique



Méthode d'analyse des perturbations dues aux redresseurs dans un réseau de distribution

Par G. Moussa

Cet article expose une méthode matricielle pour le calcul des perturbations dues aux redresseurs dans un réseau triphasé de distribution. Le programme numérique de calcul, basé sur cette méthode, est décrit par un organigramme succinct. Les résultats de calcul obtenus par ce programme sont confrontés avec les résultats d'essais sur un modèle de réseau.

Der Artikel beschreibt eine Matrizenmethode für die Berechnung der durch Gleichrichter in einem Drehstrom-Verteilnetz verursachten Störungen. Das auf dieser Methode basierende numerische Rechenprogramm wird durch ein Organigramm erläutert. Die mit diesem Programm erhaltenen Resultate werden mit den Versuchsergebnissen eines Netzmodells verglichen.

621.316.13 : 621.314.6 : 621.391.823

Notations utilisées dans le texte

Tous les termes possédant, en haut et à gauche la lettre ν , se rapportent à l'harmonique de rang ν .

Z_L	impédance propre de l'élément de réseau
Z_M	impédance mutuelle entre phase de l'élément de réseau
U_r	vecteur des tensions à l'entrée de l'élément de réseau
Z_r	matrice d'impédance de l'élément de réseau
I_r	vecteur des courants circulant dans l'élément de réseau
T	matrice de changement de base
T^{-1}	matrice inverse de T
U_h, I_h	tension respectivement courant homopolaires
U_d, I_d	tension respectivement courant directs
U_i, I_i	tension respectivement courant inverses
ω	pulsation de la fondamentale = $2\pi f = 2\pi \times 50$ (Hz)
θ	angle de déphasage entre les fondamentales de deux fonctions périodiques
ν	rang de l'harmonique
X_h	tension ou courant homopolaire
X_d	tension ou courant direct
X_i	tension ou courant inverse
I_{si}	courant injecté par un redresseur au nœud i
I_s	vecteur des courants injectés par les redresseurs aux différents nœuds
U_i	tension simple au nœud i
U	vecteur des tensions simples aux différents nœuds
$Y = Z^{-1}$	matrice d'admittance nodale
$Z = Y^{-1}$	matrice d'impédance nodale
Y_{ij}	terme de la matrice d'admittance correspondant à l'admittance reliant le nœud i au nœud j
Y_{ii}	terme de la matrice d'admittance correspondant à la somme d'admittance convergeant vers le nœud i
I_i	courant absorbé au nœud i
U_k	tension au nœud de jonction du réseau d'alimentation et le modèle de réseau étudié

i_s	courant alternatif ou primaire du transformateur du redresseur
I_d	courant continu du redresseur
NH	nombre d'harmonique
C_{ik}	capacité reliée au nœud i
Z_{cc}	impédance de court-circuit d'un transformateur
Z_M	impédance équivalente d'une machine asynchrone
Z_U	impédance d'un utilisateur passif
$U_{mod.}$	tension nominale du modèle
$U_{rés.}$	tension nominale du réseau réel
λ_u	rapport de réduction des tensions
$P_{mod.}$	puissance nominale du modèle
$P_{rés.}$	puissance nominale du réseau réel
λ_p	rapport de réduction des puissances
λ_Z	rapport de réduction des admittances

1. Introduction

L'emploi grandissant des semi-conducteurs pour le réglage et la conversion de tension, dans les réseaux triphasés de distribution, a fait surgir des problèmes nouveaux :

- déformation de la sinusoïde de tension de certains utilisateurs. Ces déformations sont dues essentiellement à la circulation dans ces réseaux d'harmoniques de courant créées par des redresseurs.
- Influence sur la télécommande centralisée.
- Chute de tension due à la consommation, par les redresseurs, d'énergie réactive.

Dans ce qui suit, le premier problème, qui est à la base des deux autres, sera étudié. Cette étude a été faite sur deux plans parallèles, d'une part, l'établissement d'un programme numérique de calcul et, d'autre part, la vérification en laboratoire sur un modèle de réseau des résultats obtenus par ce programme.

2. Etude théorique du problème

2.1 Hypothèse de calcul

a) Le réseau d'alimentation au niveau de la haute tension est une source de tension idéale sinusoïdale. C'est donc une source de tension nulle ou un court-circuit pour les harmoniques.

b) Tous les utilisateurs peuvent se ramener à des dipôles équivalents «R, L» ou «R, C» série.

c) Les redresseurs sont des sources d'harmoniques de courant (voir 2.4.1).

d) Le réseau est linéaire et symétrique, on calcule seulement le régime permanent.

2.2 Expression matricielle générale d'un élément de réseau triphasé et symétrique

Pour un réseau triphasé, l'équation complexe de chaque élément sera une équation matricielle d'ordre 3.

Soit l'élément de réseau fig. 1.

D'après l'hypothèse d: $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_L$ et $Z_{12} = Z_{23} = Z_{31} = Z_M$ l'équation matricielle de l'élément:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_L & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_L & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix}$$

ou d'une manière plus condensée:

$$\underline{U}_R = Z_R \underline{I}_R \quad (1)$$

Par un changement de base dans l'espace où sont exprimés les courants et les tensions, on peut diagonaliser toutes les matrices exprimant le fonctionnement des éléments. La matrice de changement de base est:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \quad \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

appliquons ce changement de base à la matrice Z_R . Pour cela effectuons le produit matriciel suivant:

$$B = T^{-1} Z_R T \quad (2)$$

Sachant que $1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0$ et $\underline{a}^n = \underline{a}^{n-3}$ et en effectuant le produit ci-dessus 2 on aura:

$$B = \begin{bmatrix} Z_L + 2Z_M & 0 & 0 \\ 0 & Z_L - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & Z_L - Z_M \end{bmatrix}$$

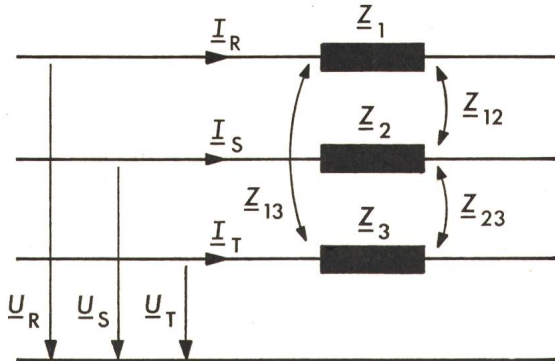


Fig. 1 Elément de réseau triphasé

\underline{U} Tension simple de l'élément du réseau
 \underline{I} Courant de ligne de l'élément du réseau
 \underline{Z} Impédance de ligne de l'élément du réseau

En transformant l'expression (1)

$$\begin{aligned} T^{-1} \underline{U}_R &= T^{-1} Z_R T T^{-1} \underline{I}_R \\ T^{-1} \underline{U}_R &= B T^{-1} \underline{I}_R \end{aligned} \quad (3)$$

$$T^{-1} \underline{U}_R = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T^{-1} \underline{I}_R = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix}$$

l'expression (3) s'écrit:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_L + 2Z_M & 0 & 0 \\ 0 & Z_L - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & Z_L - Z_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

B étant une matrice diagonale, notre réseau est décomposé en trois réseaux: direct, inverse et homopolaire.

Utilisons \underline{X} d'une manière générale pour représenter le courant ou la tension. Pour un réseau triphasé symétrique et direct:

$$\begin{aligned} \underline{X}_R &= \underline{X} & \underline{X}_R &= \underline{X} \\ \underline{X}_S &= \underline{X} e^{j\frac{4\pi}{3}} & \text{ou bien } \underline{X}_S &= \underline{a}^2 \underline{X} \\ \underline{X}_T &= \underline{X} e^{j\frac{2\pi}{3}} & \underline{X}_T &= \underline{a} \underline{X} \end{aligned}$$

Si entre l'onde de base de deux fonctions périodiques identiques (à un retard près) on a un déphasage θ on aura un déphasage $\nu\theta$ entre les harmoniques de rang ν de ces mêmes fonctions. Comme dans notre cas

$$\nu \underline{X}_R = \nu \underline{X} \quad \nu \underline{X}_S = \nu \underline{X} e^{j\frac{\nu 4\pi}{3}} \quad \nu \underline{X}_T = \nu \underline{X} e^{j\frac{\nu 2\pi}{3}}$$

D'après (4):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \nu \underline{X}_h \\ \nu \underline{X}_d \\ \nu \underline{X}_i \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nu \underline{X} \\ \nu \underline{X} e^{j\frac{\nu 4\pi}{3}} \\ \nu \underline{X} e^{j\frac{\nu 2\pi}{3}} \end{bmatrix} \\ \nu \underline{X}_h &= \frac{\underline{X}}{3} \left(1 + e^{j\frac{4\pi\nu}{3}} + e^{j\frac{2\pi\nu}{3}} \right) \\ \nu \underline{X}_d &= \frac{\underline{X}}{3} \left(1 + e^{j\frac{2\pi}{3}(2\nu+1)} + e^{j\frac{2\pi}{3}(\nu+2)} \right) \\ \nu \underline{X}_i &= \frac{\underline{X}}{3} \left(1 + e^{j\frac{2\pi}{3}(2\nu+2)} + e^{j\frac{2\pi}{3}(\nu+1)} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

On voit que pour $K = 0, 1, 2, 3, \dots, n$:

si $\nu = 3K$ alors $\nu \underline{X}_d = 0$ et $\nu \underline{X}_i = 0$

si $\nu = 3K + 1$ alors $\nu \underline{X}_h = 0$ et $\nu \underline{X}_i = 0$

si $\nu = 3K + 2$ alors $\nu \underline{X}_h = 0$ et $\nu \underline{X}_d = 0$

En résumé pour

$\nu = 3K$ on calcule seulement le réseau homopolaire
 $\nu = 3K + 1$ on calcule seulement le réseau direct
 $\nu = 3K + 2$ on calcule seulement le réseau inverse.

2.3 Expression du problème sous forme matricielle

On exprime le fonctionnement du réseau au moyen de la matrice admittance, harmonique par harmonique.

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{s1} \\ \underline{I}_{s2} \\ \vdots \\ \underline{I}_{sn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \dots & \underline{Y}_{1n} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \dots & \underline{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{n1} & \underline{Y}_{n2} & \dots & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \vdots \\ \underline{U}_n \end{bmatrix}$$

ou \underline{U}_i représente la composante des tensions simples d'harmoniques de rang ν au nœud i

\underline{I}_{sj} représente la composante des courants d'harmoniques de rang ν injectée au nœud j .

Les coefficients de la matrice admittance se calculent à partir des éléments du réseau, en exprimant la loi de Kirchhoff en chaque nœud du réseau et ceci pour chaque harmonique considéré.

$$\text{pour } i = j \quad \underline{Y}_{ii} = \sum_{k=1}^{NN} \frac{1}{\underline{Z}_{ik}}$$

$$i \neq j \quad \underline{Y}_{ij} = -\frac{1}{\underline{Z}_{ij}}$$

\underline{Z}_{ij} étant l'impédance reliant le nœud i au nœud j .

Pour illustrer ce qui vient d'être dit, on considère le réseau fig. 2. Pour alléger l'écriture on décide d'appeler

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{s1} \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_1 \quad \underline{Y}_{ij} = \underline{Y}_{ij} \quad \underline{I}_{s1} = \underline{I}_{s1}$$

étant bien entendu que toutes ces grandeurs se rapportent à l'harmonique ν et sont complexes.

On écrit la loi de Kirchhoff aux différents nœuds:

$$\text{nœud 1} \quad \underline{I}_{s1} - \underline{I}_1 - \underline{I}_3 - \underline{I}_4 = 0$$

$$\text{nœud 2} \quad \underline{I}_{s2} + \underline{I}_3 - \underline{I}_5 = 0$$

$$\text{nœud 3} \quad \underline{I}_{s3} + \underline{I}_4 + \underline{I}_5 - \underline{I}_2 = 0$$

(7)

On exprime les courants \underline{I}_i en fonction des tensions \underline{U}_i contre le neutre apparaissant en chaque nœud:

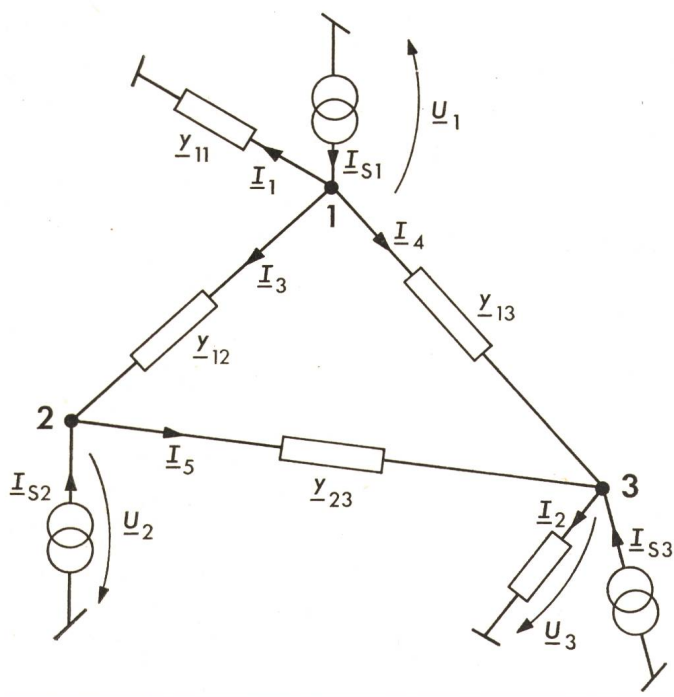


Fig. 2 Schéma monophasé d'un réseau

I Courant de ligne ou d'utilisateur
 U Tension simple d'un nœud
 y Impédance de ligne ou d'utilisateur

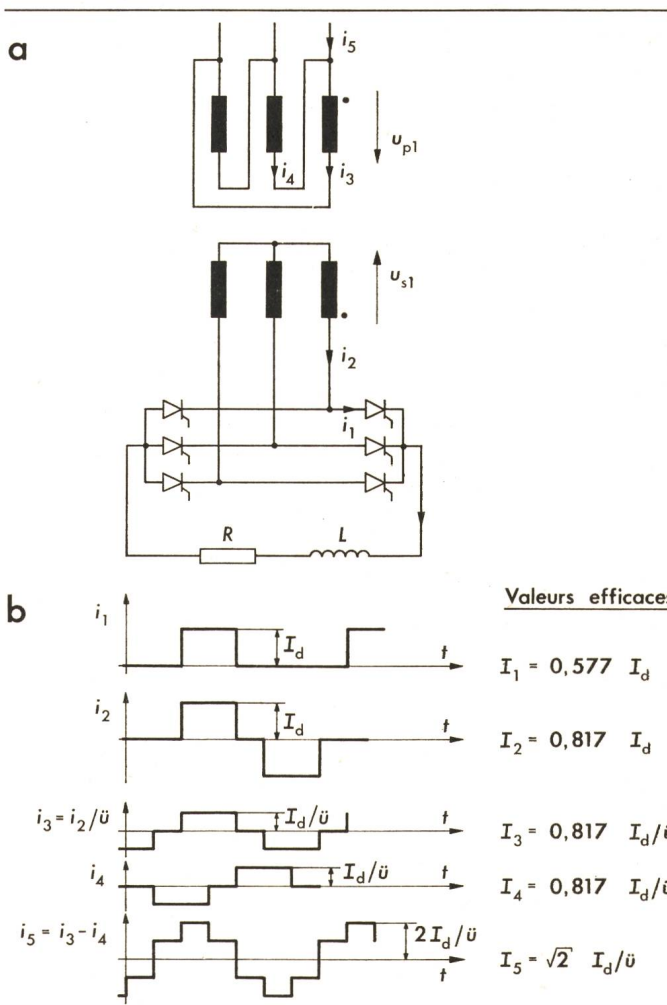


Fig. 3 Pont de Graetz triphasé

- a Schéma de connexion
b Courants aux différents endroits du pont
 i Courant instantané
 u_p Tension primaire du transformateur
 u_s Tension secondaire du transformateur
 R Résistance de charge
 L Inductance de charge
 I_d Courant continu de charge
 \bar{u} Rapport de transformation
 t Temps

$$\underline{I}_1 = \underline{y}_{11} \underline{U}_1$$

$$\underline{I}_2 = \underline{y}_{33} \underline{U}_3$$

$$\underline{I}_3 = \underline{y}_{12} (\underline{U}_1 - \underline{U}_2)$$

$$\underline{I}_4 = \underline{y}_{13} (\underline{U}_1 - \underline{U}_3)$$

$$\underline{I}_5 = \underline{y}_{23} (\underline{U}_2 - \underline{U}_3)$$

(8)

En introduisant (8) dans (7) et en ordonnant par rapport à \underline{U}_1 , \underline{U}_2 et \underline{U}_3 :

$$\underline{I}_{s1} = (\underline{y}_{11} + \underline{y}_{12} + \underline{y}_{13}) \underline{U}_1 - \underline{y}_{12} \cdot \underline{U}_2 - \underline{y}_{13} \cdot \underline{U}_3$$

$$\underline{I}_{s2} = -\underline{y}_{12} \cdot \underline{U}_1 + (\underline{y}_{12} + \underline{y}_{23}) \underline{U}_2 - \underline{y}_{23} \cdot \underline{U}_3$$

$$\underline{I}_{s3} = -\underline{y}_{13} \cdot \underline{U}_1 - \underline{y}_{23} \cdot \underline{U}_2 + (\underline{y}_{13} + \underline{y}_{23} + \underline{y}_{33}) \underline{U}_3$$

et sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{s1} \\ \underline{I}_{s2} \\ \underline{I}_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{11} + \underline{y}_{12} + \underline{y}_{13} & -\underline{y}_{12} & -\underline{y}_{13} \\ -\underline{y}_{12} & \underline{y}_{12} + \underline{y}_{23} & -\underline{y}_{23} \\ -\underline{y}_{13} & -\underline{y}_{23} & \underline{y}_{13} + \underline{y}_{23} + \underline{y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

on arrive bien à ce qui a été dit au début de 2.3.

Pour une démonstration plus rigoureuse, voir bibliographie à la fin de l'article [1]. N'étant intéressé qu'aux perturbations,

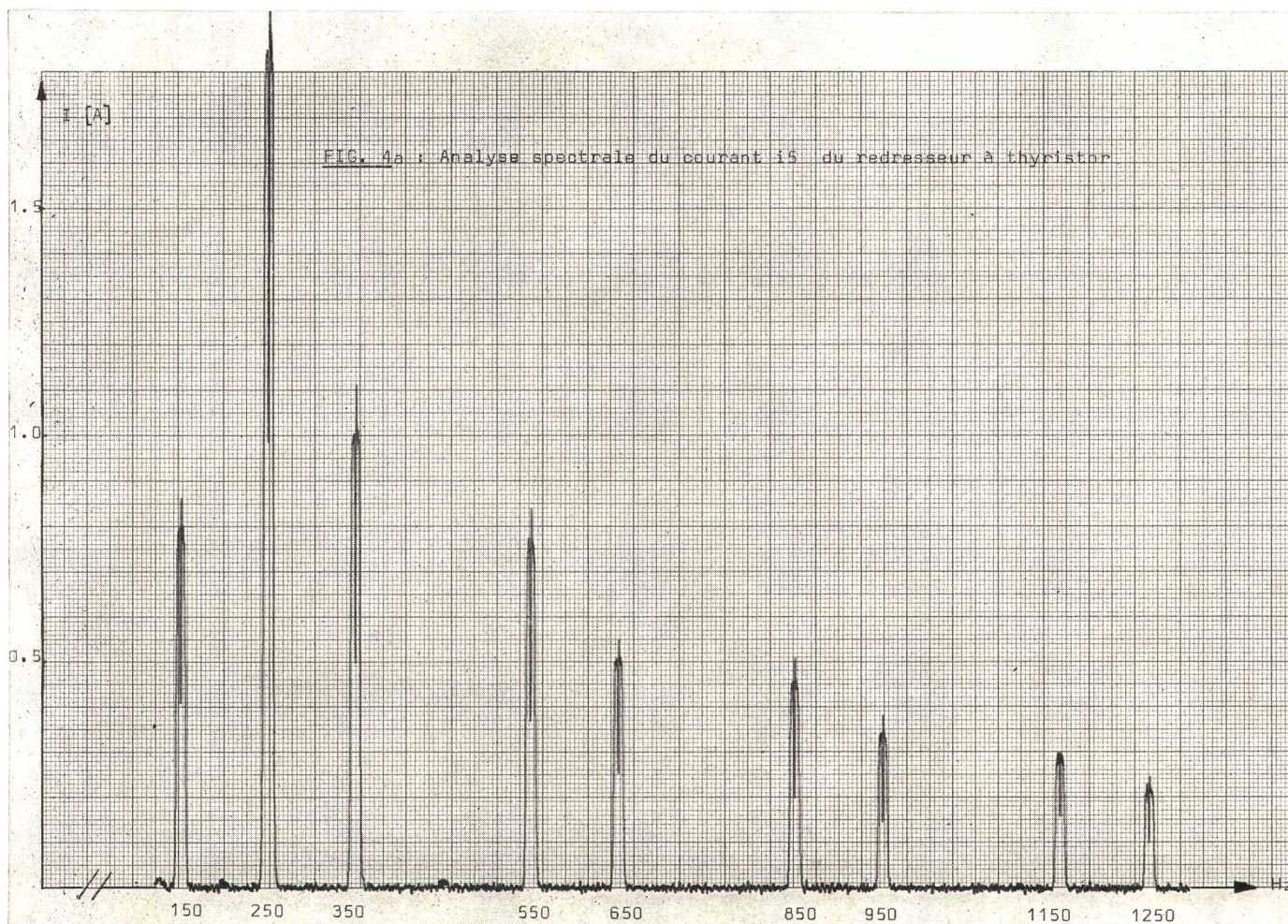


Fig. 4a Analyse spectrale du courant i_5 du redresseur à thyristor

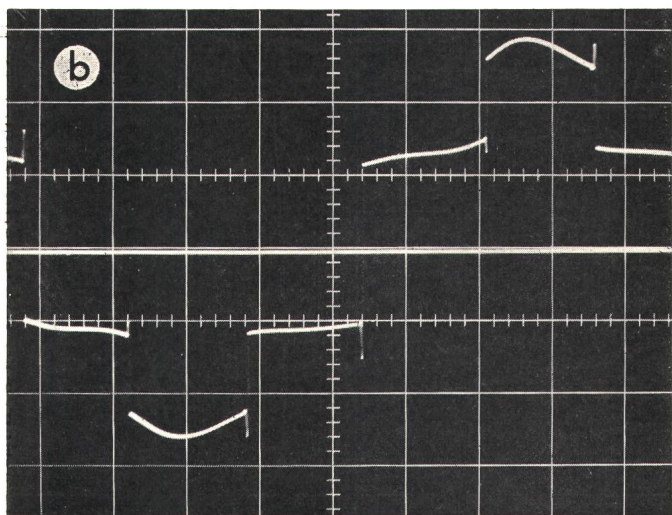


Fig. 4b Courant alternatif i_5 du redresseur en pont de Graetz triphasé

on ne fera pas les calculs relatifs à la fondamentale. Soit k le nœud de jonction entre le réseau d'alimentation (infiniment puissant) et le réseau de distribution étudié. D'après l'hypothèse «a» les tensions vU_k sont nulles et dans la matrice Y on élimine la ligne et la colonne k . Ainsi nous obtenons une matrice Y d'ordre $n-1$.

$$^vI_s = ^vY ^vU \quad (10)$$

On multiplie les deux membres de 10 par Y^{-1} .

$$^vY^{-1} ^vI_s = ^vY^{-1} ^vY ^vU$$

$$^vZ ^vI_s = ^vU \quad (11)$$

Finalement si on connaît tous les harmoniques de courant injectés par les redresseurs en chaque nœud du réseau, on peut calculer tous les harmoniques de tension aux différents nœuds. A partir de ces tensions on peut déduire les harmoniques de courant qui circulent dans chaque élément du réseau pour autant qu'on s'y intéresse.

2.4 Représentation des principaux éléments du réseau

2.4.1 Représentation du redresseur en tant que source de courant harmonique

Ce paragraphe est consacré à une étude sommaire du redresseur à thyristors. On déterminera la forme du courant alternatif du redresseur ainsi que sa dépendance du couplage du transformateur d'alimentation.

En supposant:

- que le redresseur est un pont de Graetz triphasé (Fig. 3a);
 - que le transformateur d'alimentation ($\Delta - \lambda$) de ce pont est idéal (courant magnétisant nul, couplage parfait entre primaire et secondaire, symétrie parfaite des trois phases);
 - que le courant continu est parfaitement lissé (self de charge infinie);
- l'allure du courant aux différents endroits du pont est illustrée par la fig. 3b.

L'expression mathématique du courant alternatif i_5 du redresseur est:

$$i_5 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{I_d}{\tilde{u}} \left(\sin \omega t + \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\sin (6p-1) \omega t}{6p-1} + \frac{\sin (6p+1) \omega t}{6p+1} \right) \quad (12)$$

La forme réelle du courant i_5 du redresseur expérimental utilisé est illustrée par la fig. 4b. L'analyse spectrale de ce courant i_5 est illustrée par la fig. 4a.

Remarques:

– Un léger déséquilibre entre les phases du transformateur suffit pour que, malgré le couplage triangle-étoile, des courants harmoniques «3» circulent dans la ligne (fig. 4a et 4b).

– Plutôt que de décomposer en série de Fourier le courant idéal de ligne pour connaître le taux de chaque harmonique, on peut mesurer avec un analyseur d'ondes la valeur réelle de chaque harmonique de courant et l'introduire ainsi dans le programme de calcul (fig. 4a).

2.4.2 Câbles

– Les câbles reliant différents nœuds sont simulés par des schémas en π (fig. 5) dans lesquels on a négligé les conductances transversales.

2.4.3 Transformateurs

– Les transformateurs sont donnés suivant le schéma de la fig. 6.

2.4.4 Utilisateurs

– Les utilisateurs sont des dipôles «RL», «RC», «LC». La machine asynchrone est représentée par son schéma équivalent habituel et que l'on ramène, par un sous-programme, à un dipôle «RL» équivalent pour chaque harmonique.

2.5 Programme numérique de calcul

2.5.1 Organigramme général du programme

Moyennant les hypothèses mentionnées au § 2.1, ainsi que les considérations du § 2.4, un programme de calcul numérique en langage «FORTRAN» a été établi. On donne, ci-après, un organigramme sommaire de ce programme (fig. 7).

2.5.2 Caractéristiques du programme

Ce programme est exploitable sur l'ordinateur CDC 6500 (CYBER 7326) du centre de calcul de l'EPF de Lausanne. Il a été dimensionné pour des réseaux de distribution de:

- 20 nœuds
- 20 lignes
- 20 transformateurs
- 20 utilisateurs (actifs ou passifs)
- 12 harmoniques.

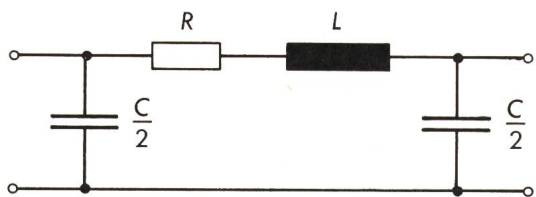


Fig. 5 Schéma équivalent monophasé d'une ligne triphasée

R Résistance de ligne
 L Inductance de ligne
 C Capacité de ligne

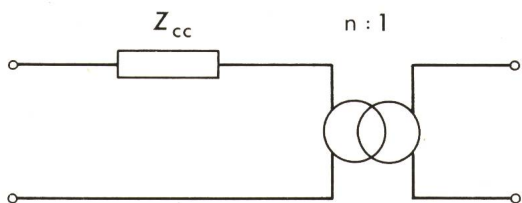


Fig. 6 Schéma équivalent monophasé d'un transformateur triphasé

Z_{cc} Impédance de court-circuit du transformateur
 n Rapport de transformation

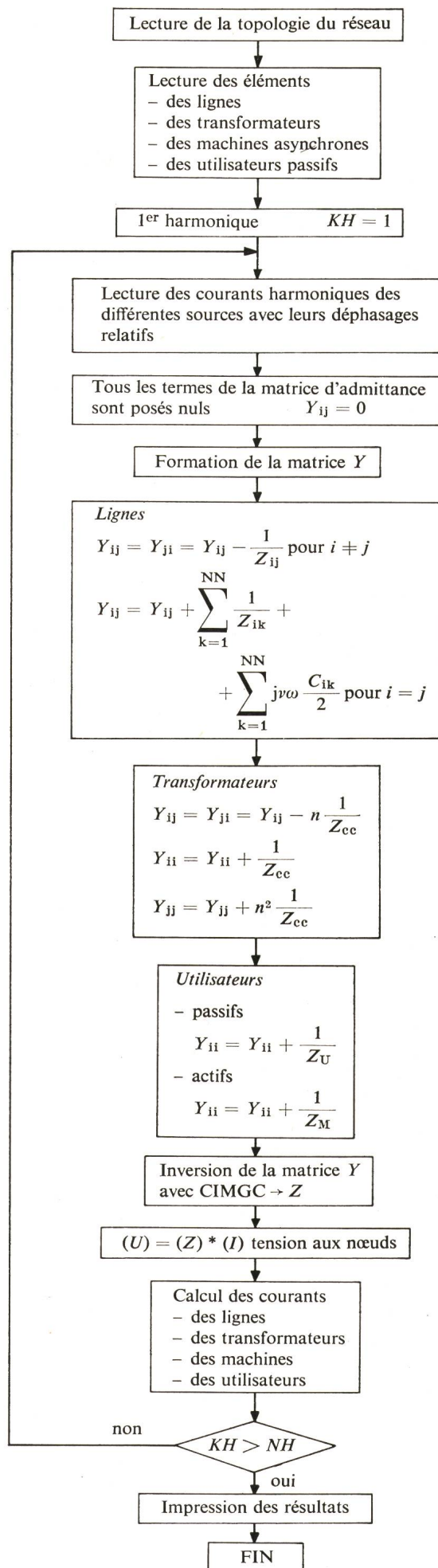


Fig. 7 Organigramme

Tableau I

NUMERO DES NOEUDS

ORIGINE 6

EXTREMITES 1

DONNEES SELON SCHEMA EN PI

R = .165 OHM

L = .00006 HENRY

C = .15 MICROFARAD

I	RANG DE	I	TENSION AU	I	TENSION AU	I	COURANT AU	I
I	L'HARMONIQUE	I	NOEUD ORIGINE	I	NOEUD EXTREMITÉ	I	DANS LA LIGNE	I
I		I	MOD. ARG.	I	MOD. ARG.	I	MOD. ARG.	I
I	3	I	0.00 0.	I	.02 65.	I	.112 -135.	I
I	5	I	0.00 0.	I	.25 28.	I	1.315 176.	I
I	7	I	0.00 0.	I	.20 33.	I	.903 173.	I
I	11	I	0.00 0.	I	.14 65.	I	.521 -168.	I
I	13	I	0.00 0.	I	.11 58.	I	.360 180.	I
I	17	I	0.00 0.	I	.15 63.	I	.406 178.	I
I	19	I	0.00 0.	I	.13 75.	I	.322 -172.	I
I	23	I	0.00 0.	I	.10 60.	I	.199 170.	I
I	25	I	0.00 0.	I	.12 67.	I	.222 175.	I

2.5.3 Performances du programme

Il est rappelé que le programme tient compte:

- du déphasage relatif entre les harmoniques, de même rang,
- des différents redresseurs,
- du courant alternatif réel du redresseur,
- du comportement fréquentiel de la machine asynchrone.

2.5.4 Résultats

Sont imprimés soit:

- sous forme de tableau de valeurs (Tableau I et II)
- sous forme de spectre fourni par un traceur incrémental.

Tableau II

NUMERO DES NOEUDS

ORIGINE 2

EXTREMITES 4

DONNEES SELON SCHEMA EN PI

$$R = .178 \text{ OHM}$$

L = .00028 HENRY

C = .59 MICROFARAD

I	RANG DE	I	TENSION AU	I	TENSION AU	I	COURANT AU	I
I	L'HARMONIQUE	I	NOEUD ORIGINE	I	NOEUD EXTREMITÉ	I	DANS LA LIGNE	I
I		I	MOD. ARG.	I	MOD. ARG.	I	MOD. ARG.	I
I	3	I	.05 34.	I	.07 45.	I	.079 -170.	I
I	5	I	.37 38.	I	.44 47.	I	.197 -165.	I
I	7	I	.25 47.	I	.31 55.	I	.118 -171.	I
I	11	I	.22 59.	I	.31 66.	I	.094 -177.	I
I	13	I	.19 62.	I	.26 68.	I	.060 -178.	I
I	17	I	.20 67.	I	.28 72.	I	.056 180.	I
I	19	I	.16 69.	I	.21 72.	I	.032 179.	I
I	23	I	.16 72.	I	.23 75.	I	.035 178.	I
I	25	I	.15 73.	I	.21 75.	I	.027 177.	I

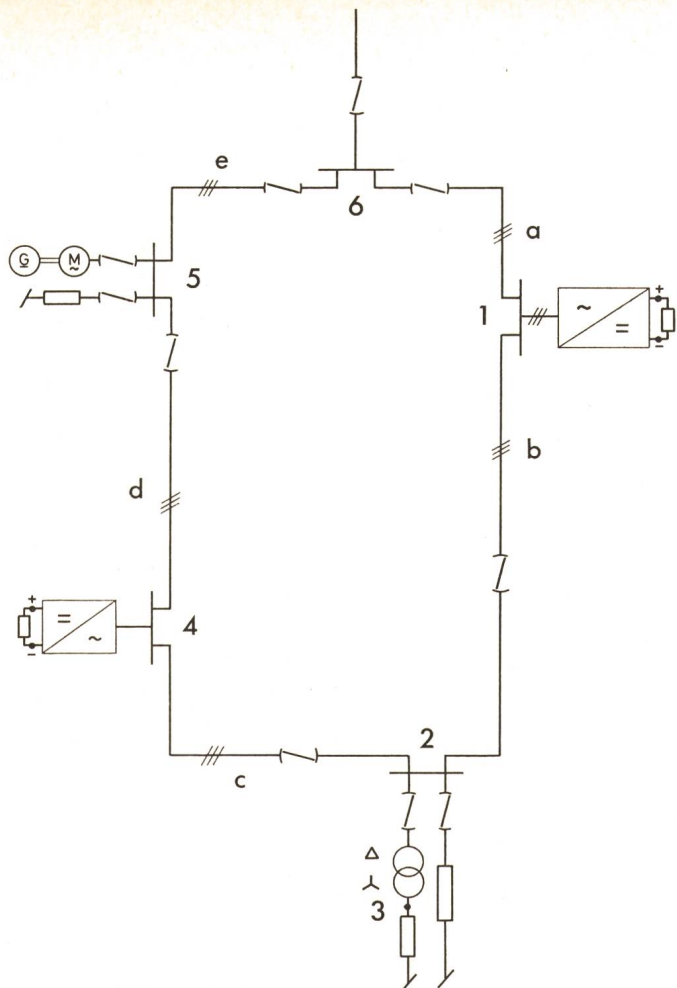


Fig. 8 Schéma unifilaire du modèle de réseau
1...6 nœuds, a...e lignes

2.5.5 Temps de calcul

Pour un réseau (fig. 8) comportant 6 nœuds, 5 lignes, 2 redresseurs, 1 transformateur et 3 utilisateurs, le temps de calcul observé pour 9 harmoniques est de 30 s.

3. Comparaison des résultats obtenus sur calculateur et sur modèle de réseau

Pour vérifier la validité du programme de calcul, des comparaisons ont été effectuées entre les résultats de calcul et le modèle de réseau triphasé. Ce modèle, dont le schéma unifilaire est représenté par la fig. 8, est l'image transposée d'un réseau 6 kV triphasé à câble. Les rapports de réduction sont les suivants:

$$\lambda_u = \frac{U_{\text{mod.}}}{U_{\text{rés.}}} = 60 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda_p = \frac{P_{\text{mod.}}}{P_{\text{rés.}}} = 5 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda_z = \frac{\lambda_u^2}{\lambda_p} = 0,72$$

Tel qu'on l'a conçu, ce modèle est prévu pour le fonctionnement en boucle ouverte ou fermée.

3.1 Essais

De nombreux essais ont été effectués sur le modèle. Il est malheureusement impossible de mentionner, dans le cadre de cet article tous les résultats obtenus; pour cela on donne les deux résultats suivants:

- Analyse spectrale du Courant de la ligne (a) fig. 9
- Analyse spectrale du Courant de la ligne (c) fig. 10

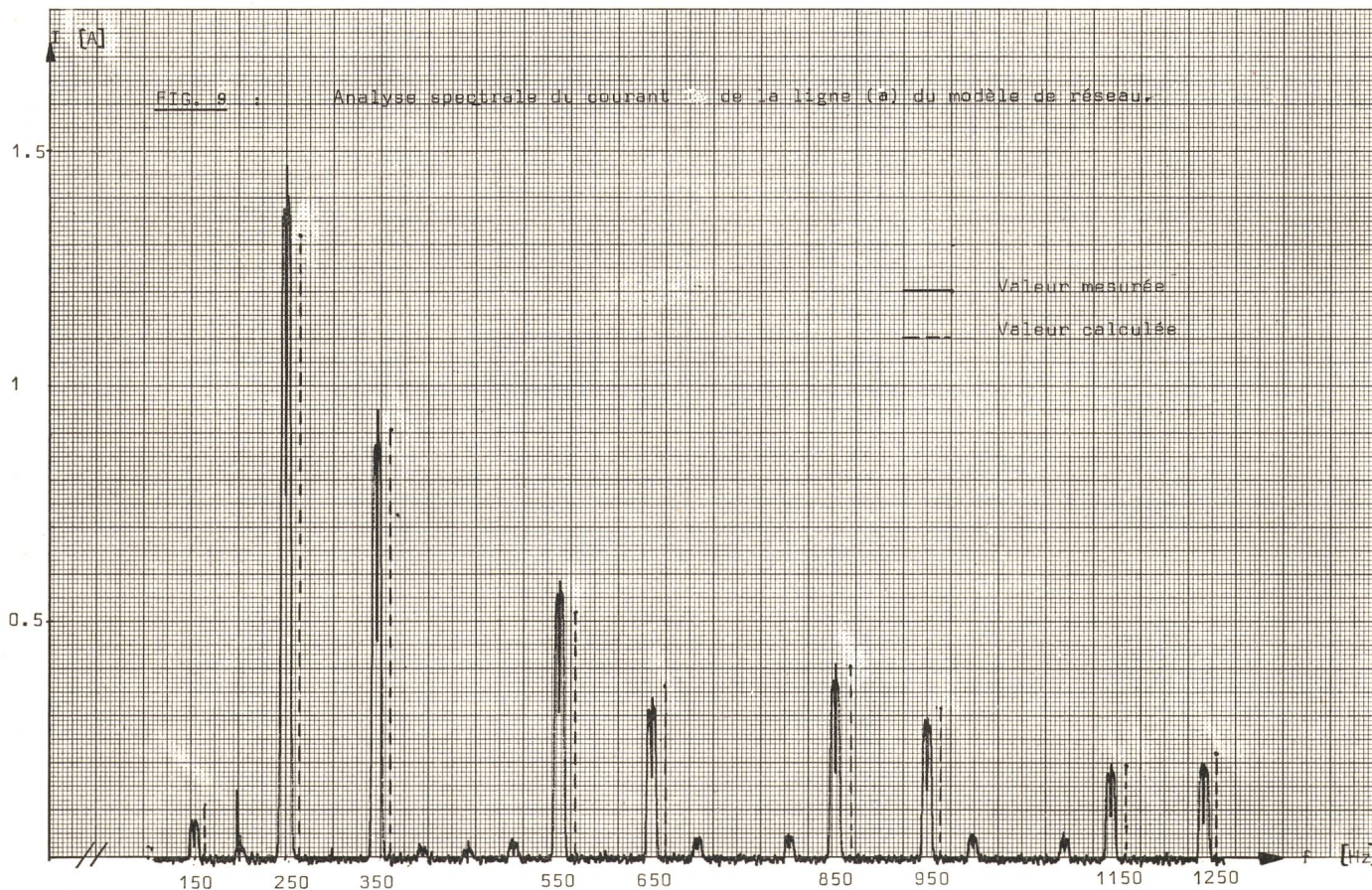


Fig. 9 Analyse spectrale du courant de la ligne a du modèle de réseau

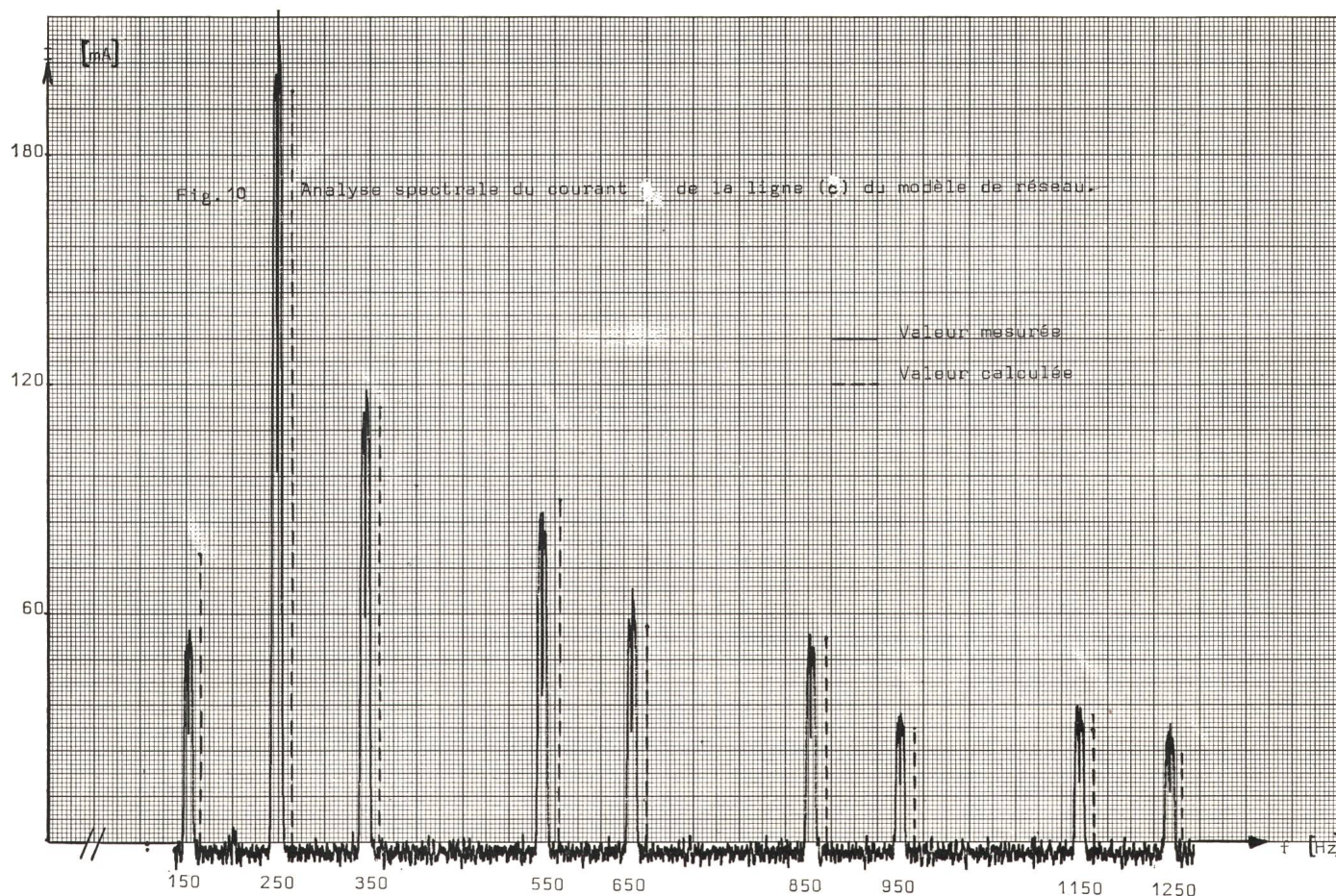


Fig. 10 Analyse spectrale du courant de la ligne *c* du modèle de réseau

Ces deux mesures ont été effectuées sur le modèle (fig. 8) en boucle fermée.

3.2 Discussion des résultats

L'examen des résultats des différents essais sur le modèle et la comparaison avec les résultats du programme de calcul montrent :

- a) Une bonne concordance pour tous les harmoniques à l'exception de l'harmonique 3 (fig. 10); cela est dû :
 - aa) à ce que l'hypothèse 2.1a n'est pas parfaitement vérifiée. L'analyse harmonique de la tension au nœud d'alimentation 6 (fig. 8) a montré effectivement l'existence d'un harmonique 3 de tension.
 - ab) à l'existence d'élément à noyau magnétique saturable (transformateurs, etc.) qui absorbent un courant harmonique 3.
- b) Par suite du changement d'angles d'allumage relatifs des différents redresseurs, certains harmoniques subissent une amplification ou un affaiblissement en un point donné du réseau; cela a été constaté aussi bien par la mesure que par le programme de calcul (harmoniques 13 et 17, fig. 9).

4. Conclusion

Au terme de cette étude, deux objectifs ont été atteints :

- le premier est de montrer que l'analyse matricielle des réseaux est un outil bien adapté à l'étude de ce genre de problème. Les essais sur le modèle ont confirmé les résultats du programme de calcul. Le

temps de calcul n'est pas excessif pour des réseaux de distribution de moyenne importance;

- le deuxième est de prévoir le taux d'harmonique apparaissant en un point quelconque d'un réseau de distribution comportant un certain nombre d'éléments « perturbateurs ».

Les effets perturbateurs des redresseurs à thyristors ne sont pas cumulatifs dans un réseau donné, car on constate qu'en un point donné de ce réseau le taux d'harmonique varie avec le déphasage relatif des angles d'allumage des redresseurs. On peut s'attendre, avec un grand nombre de redresseurs et une certaine répartition statistique des angles d'allumage, à un affaiblissement ou à une amplification de ce taux.

L'évolution future d'un tel programme doit être orientée dans le sens de la recherche de l'emplacement optimum des filtres pour palier à ces perturbations qui peuvent être gênantes pour certains utilisateurs.

Bibliographie

- [1] H. Edelmann: Théorie et calcul des réseaux de transport d'énergie électrique. Paris, Dunod, 1966.
- [2] J. M. Schaefer: Rectifier circuits, theory and design. New York, John Wiley, 1965.
- [3] M. Gaudry: Redresseurs et thyristors, comportement physique et utilisation. Paris, Dunod, 1969.

Adresse de l'auteur:

G. Moussa, Ingénieur dipl., Chaire d'installations électriques de l'EPFL, 16, ch. de Bellerive, 1007 Lausanne.