

**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:** 82 (1991)

**Heft:** 23

**Artikel:** La mesure de l'impédance des réseaux basse tension en fonction de la fréquence

**Autor:** Schreiber, Rolf

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-903043>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 16.03.2025

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

# La mesure de l'impédance des réseaux basse tension en fonction de la fréquence

Rolf Schreiber

**Un système de mesure de l'impédance d'un réseau électrique est décrit. Il est basé sur la génération d'un courant particulier et la mesure digitalisée du courant et de la tension. Appliqué dans un instrument, les résultats ont montré la validité de son principe.**

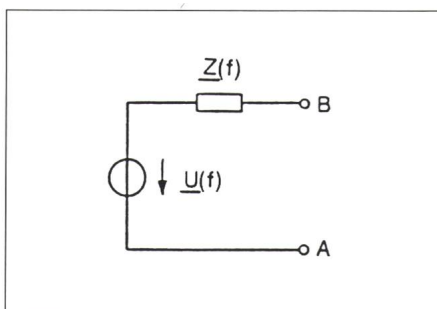
**Ein Verfahren zur Messung der Schleifenimpedanz im elektrischen Netz wird vorgestellt. Es basiert auf der Erzeugung eines Einzelstromes und der digitalen Messung von Strom und Spannung. In einem Messinstrument angewandt, bestätigten die Resultate die Gültigkeit seines Prinzips.**

## But de la mesure

Les exigences de qualité posées à un réseau d'électricité deviennent toujours plus grandes. Un des facteurs de qualité est le niveau des harmoniques qui influence la forme de l'onde fondamentale de tension. L'électronique de puissance, avec ses nombreux composants non linéaires, comme les thyristors de puissance, produit des courants harmoniques importants. Pour déterminer quels seront les harmoniques de tension résultant et donc la distorsion de l'onde fondamentale, il est nécessaire de connaître l'impédance du réseau à toutes les fréquences harmoniques.

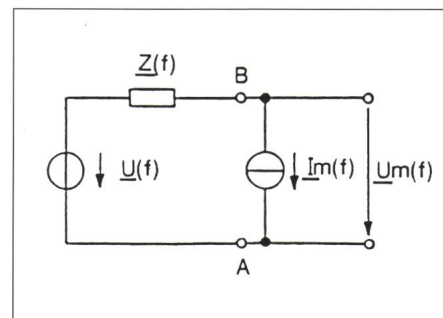
A partir des données de la charge non-linéaire à raccorder et du spectre d'impédance du réseau, il est facile de calculer les tensions harmoniques produites et de choisir les moyens propres à les réduire à un niveau admissible.

L'impédance d'un réseau à la fréquence nominale peut être calculée à partir des caractéristiques du réseau, transformateurs et lignes, ou mesurée directement par un appareil convenable fournissant également la valeur du courant de court-circuit (par exemple le contrôleur de réseaux BT MIC Panensa).



**Figure 1** Schéma de principe du réseau  
 $U(f)$  Tension du réseau à vide  
 $Z(f)$  Impédance du réseau  
 $f$  Fréquence

Par contre le calcul de l'impédance à des fréquences plus élevées est malaisé, sinon impossible, étant donné les capacités et les inductivités installées dans le réseau. Sa connaissance dé-



**Figure 2** Principe de la mesure de l'impédance

$U_m(f)$  Tension à mesurer  
 $I_m(f)$  Courant à mesurer

pend donc de mesures et a conduit au développement d'un appareil dont le principe et le fonctionnement sont décrits plus avant [1,2].

Son emploi par les distributeurs d'énergie électrique permet d'autoriser un raccordement ou d'exiger des mesures de protection pour toute nouvelle installation. Il sera également possible de vérifier l'efficacité de filtres dans les conditions réelles d'utilisation.

## Principe de la mesure

### Principe fondamental

Le réseau, vu des bornes A et B, peut être schématisé selon la figure 1. Le but de la mesure est d'obtenir la valeur  $Z(f)$  pour un large spectre de fréquence.

Le principe de la mesure ressort de la figure 2: un courant  $I_m(f)$  est soutiré des bornes A et B sous une tension

### Adresse de l'auteur

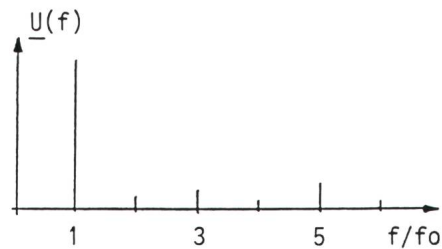
Rolf Schreiber, El. Ing. HTL, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich, Postfach, 8022 Zürich.

$\underline{U}_m(f)$ . L'impédance cherchée  $\underline{Z}(f)$  se calcule selon la formule:

$$\underline{Z}(f) = (\underline{U}(f) - \underline{U}_m(f))/\underline{I}_m(f) \quad (1)$$

Alors qu'il est aisé de mesurer  $\underline{I}_m(f)$  et  $\underline{U}_m(f)$ , la valeur  $\underline{U}(f)$  ne peut être obtenue par ce moyen. L'idée, qui a conduit le développement, est de procéder à la mesure aux fréquences pour lesquelles la tension du réseau  $\underline{U}(f) = 0$ .

La tension est une fonction périodique, donc son spectre se limite à des fréquences discrètes, multiples de la fréquence du réseau, selon la figure 3. Il s'ensuit que pour toutes les fré-



**Figure 3 Exemple du spectre de la tension du réseau**

$\underline{U}(f)$  Tension du réseau en fonction de la fréquence  $f$   
 $f_0$  Fréquence du réseau

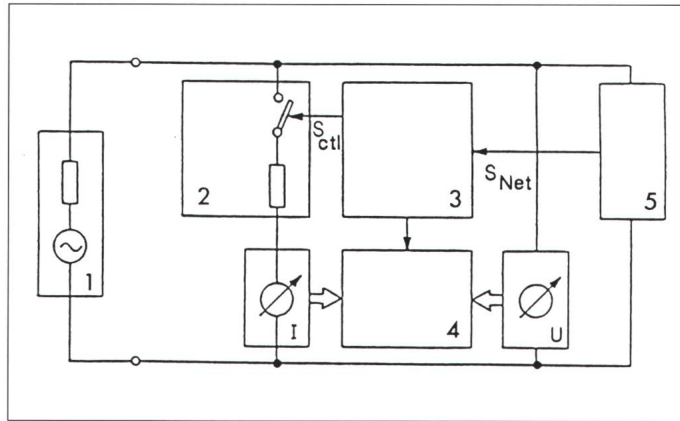
quences, hormis les multiples de la fondamentale,  $\underline{U}(f) = 0$  et la formule (1) devient:

$$\underline{Z}(f) = -\underline{U}_m(f)/\underline{I}_m(f) \quad (2)$$

avec  $f \ll n \cdot f_0$  où  $f_0$  est la fréquence du réseau et  $n$  est un nombre entier. Il est donc possible de mesurer tout le spectre où la tension  $\underline{U}(f)$  est nulle, c'est-à-dire à n'importe quelle fréquence autre que la fondamentale et ses multiples.

Alors que le principe est simple, la réalisation est moins aisée. Le courant  $\underline{I}_m$  doit avoir une fréquence donnée mais variable et une valeur qui produise une tension  $\underline{U}_m$  suffisante.  $\underline{U}_m$  et  $\underline{I}_m$  doivent être mesurés avec précision bien que des valeurs très supérieures soient présentes à une fréquence très proche. La solution choisie est une commande de la fréquence et un traitement digital, avec un étalonnage automatique.

Le schéma-bloc du système fait l'objet de la figure 4. La fréquence de mesure, sous forme de signaux carrés, est utilisée pour la commande du circuit de courant. La tension  $\underline{U}_m$  et le courant  $\underline{I}_m$  sont obtenus par une



**Figure 4 Schéma-bloc du système de mesure**  
 1 Réseau  
 2 Charge commandée  
 3 Génération de la fréquence de commande  
 4 Calcul et affichage  
 5 Mesure de la fréquence du réseau

conversion analogique/digitale après un circuit-bouchon accordé à la fréquence du réseau. Les coefficients de la Transformée de Fourier du courant et de la tension permettent de calculer l'impédance à la fréquence de mesure.

**Circuit de courant**

Le courant pourrait provenir d'un circuit actif, mais la solution choisie est de le tirer du réseau, en appliquant une charge résistive à la fréquence de mesure. D'après les formules (1) et (2), on voit qu'il est important que la composante spectrale du courant  $\underline{I}_m(f)$  soit aussi élevée que possible, pour que la précision soit suffisante.

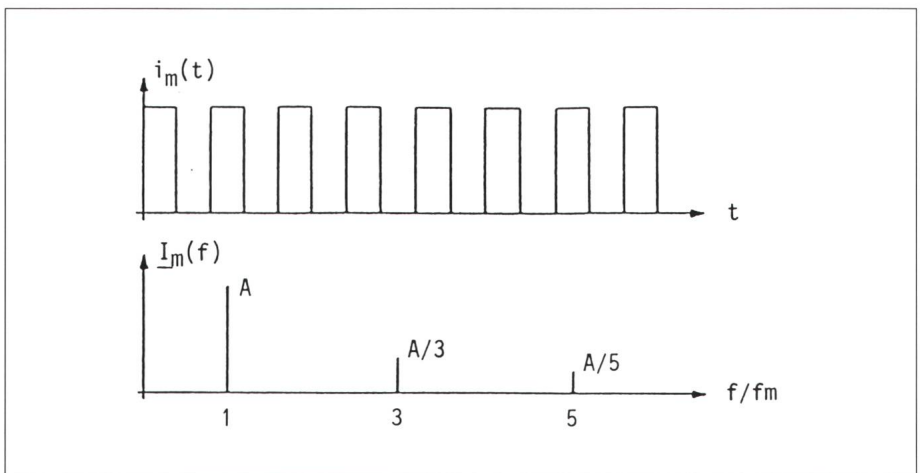
La figure 5 montre le cas d'une source de tension continue raccordée à une résistance à la fréquence  $f_m$ . Avec un rapport fermeture/ouverture de 1/1, seuls les harmoniques impairs sont présents.

Dans le cas de la tension alternative du réseau, le spectre du courant de mesure est celui de la figure 6, c'est-à-dire inapproprié au but recherché. Pour l'atteindre, la solution consiste à moduler la fréquence de mesure avec la fréquence du réseau; on obtient ainsi le spectre de la figure 7: une grande partie de la puissance apparaît à la fréquence de mesure.

**Fréquence de mesure**

Le principe de mesure décrit plus haut a pour conséquence que l'impédance du réseau ne peut être mesurée qu'à des fréquences qui ne sont pas des multiples de la fréquence du réseau, ce qui n'a guère d'importance pratique.

Comme la mesure du spectre se fait pendant un temps limité, le spectre discret devient un spectre continu. Toutefois en choisissant la durée de la

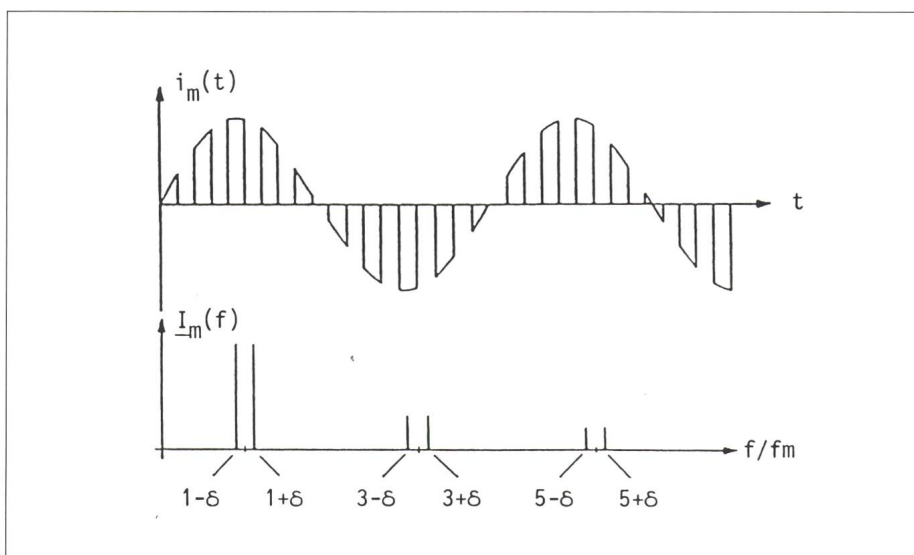


**Figure 5 Génération du courant (source continue)**

Le courant est généré par l'application périodique d'une charge ohmique à une source de tension continue

$i_m(t)$  Courant généré en fonction du temps  
 $\underline{I}_m(f)$  Composantes spectrales du courant généré  
 $f_m$  Fréquence ouverture/fermeture  
 $A$  Amplitude de la composante fondamentale





**Figure 6** Génération du courant (source alternative)

Le courant est généré par l'application périodique d'une charge ohmique à une source de tension alternative de fréquence  $f_o$  (fréquence du réseau)

- $i_m(t)$  Courant généré en fonction du temps
- $I_m(f)$  Composantes spectrales du courant généré
- $f_m$  Fréquence ouverture/fermeture
- $\delta$   $f_o/f_m$

mesure égale à un multiple de la période du signal mesuré on obtient le spectre de la figure 8. Les fréquences  $f$ , pour lesquelles la valeur du spectre est nulle, se calculent selon la formule:

$$f = f_o \pm (k/T_m) \quad (3)$$

sauf pour  $f = n \cdot f_o$  avec  $k$ ,  $n$  et  $p$  entiers et pour autant que la durée de la mesure soit

$$T_m = p/f_o \quad (4)$$

Dans ces conditions, le spectre apparent montre, dans chaque plage comprise entre deux harmoniques,  $p-1$  points où la valeur est nulle. La mesure de l'impédance doit donc se faire aux fréquences correspondant à ces points singuliers. L'écart  $\Delta f_m$  entre ces fréquences est:

$$\Delta f_m = 1/T_m = f_o/p \quad (5)$$

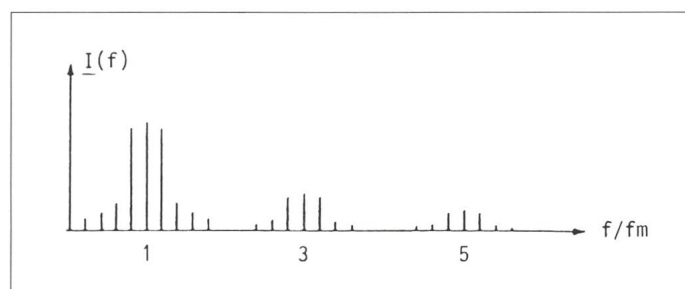
Si par exemple  $f_o = 50$  Hz et  $p = 16$ :  $\Delta f = 3,125$  Hz et  $T_m = 320$  ms. L'ensemble des fréquences de mesure utilisable est alors:  $f_m = k/p \cdot f_o$  avec  $k$ ,  $n$  et  $p$  entiers et  $k \ll n \cdot p$ .

### Mesure du courant et de la tension

Le schéma-bloc de la chaîne d'acquisition de l'appareil est représenté sur la figure 9. Les canaux de tension et de courant présentent une fonction

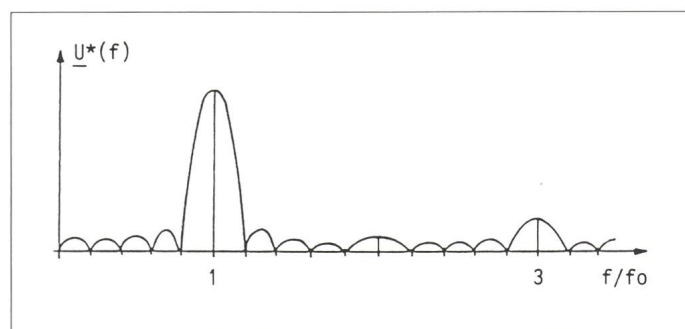
de transfert complexe avec un déphasage et une atténuation variant en fonction de la fréquence. Pour en tenir compte, une calibration est effectuée à chaque fréquence de mesure par commutation des circuits d'entrée sur un signal d'étalonnage interne dont l'amplitude et la phase sont connues très précisément. Le calcul correspond à une transformation de Fourier discrète à la fréquence de mesure (1 coefficient pour la tension et 1 pour le courant).

**Figure 7** Spectre du courant de mesure utilisé



**Figure 8** Spectre de la tension

Le spectre est indiqué dans cet exemple pour un temps de mesure de  $T_m = p/f_o$  avec  $p = 5$



### Choix des paramètres pour la conversion A/D

Lors de la digitalisation d'un signal, il faut vérifier que l'échantillonnage et la quantification soient réalisés correctement:

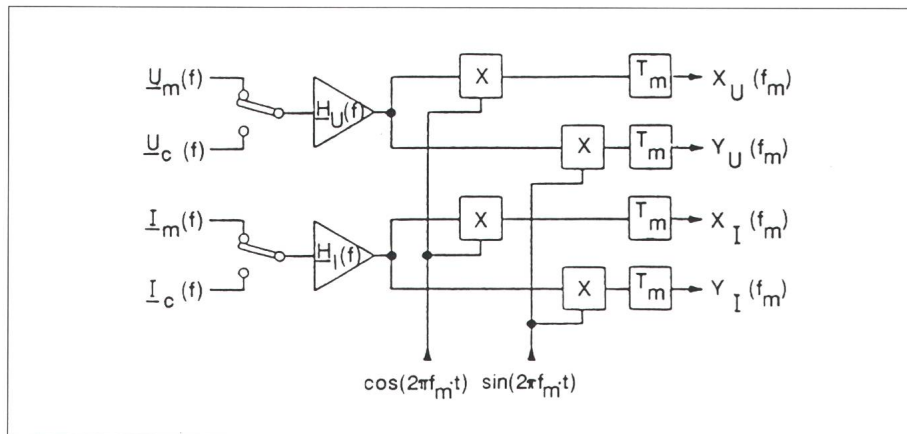
**Bruit de quantification:** pour le réduire à une valeur acceptable sans augmenter exagérément le nombre d'échantillons, la fréquence 50/60 Hz est filtrée avant le système d'acquisition, avec une atténuation d'au moins 40 dB.

**Recouvrement:** un filtre antirecouvrement du troisième ordre est incorporé à l'appareil pour éviter cet effet qui pourrait être du à la digitalisation du signal.

### Réalisation de la mesure

Sur la base des considérations précédentes, Panensa SA a développé un appareil de mesure du spectre d'impédance du réseau portant la désignation MZF. Il est utilisé dans les réseaux basse tension chaque fois que des harmoniques causent ou pourraient poser un problème. Raccordé à un PC par une interface RS 232, il permet non seulement la mesure de l'impédance des réseaux, mais aussi d'autres mesures. On a le choix:

- du type de mesure (impédance du réseau, harmoniques de tension, harmoniques de courant)
- de la gamme des fréquences de mesure (de 100 à 2500 Hz au maximum)
- de l'intervalle des fréquences de mesure (de 3.125 à 200 Hz).



**Figure 9** Schéma des circuits d'entrée

$U_m(f), I_m(f)$  Tension et courant à mesurer

$U_c(f), I_c(f)$  Tension et courant de référence

$H_U(f), H_I(f)$  Fonction de transfert à déterminer

$X_U(f_m), Y_U(f_m), X_I(f_m), Y_I(f_m)$  Signal de la composante spectrale pour le calcul

La mesure des harmoniques s'exécute à partir de 512 échantillons durant 4 périodes, le calcul du coefficient de la transformée de Fourier se faisant pour chaque fréquence désirée.

Pour la mesure de l'impédance, l'appareil fait passer le courant par une résistance incorporée à l'appareil, ceci à une fréquence dépendant de la fréquence de mesure. Les applications sont:

- vérifier que les tensions harmoniques générées par un courant non sinusoïdal restent dans des limites admissibles
- choisir les condensateurs de compensation d'énergie réactive ou leur commande, pour éviter toute résonance
- vérifier l'efficacité réelle de filtres
- trouver la cause de tensions harmoniques trop élevées.

Le MZF commute automatiquement sur la gamme de tension (230 ou 400 V  $\pm$  10%). Il tient compte de la fréquence de 50 ou de 60 Hz ( $\pm$  5%).

## Utilisation et expériences

### Généralités

Des charges de courant non sinusoïdal provoquent sur le réseau des courants harmoniques. Ces courants engendrent des tensions harmoniques proportionnelles à l'impédance du réseau, celles-ci influencent d'autres utilisateurs et peuvent ainsi provoquer des perturbations.

La limite de ces influences, autrement dit les taux d'harmoniques admissibles, sont contenus dans la

«Norme Suisse NS 413600: Limitation des perturbations électriques dans les réseaux publics de distribution.»

Les entreprises électriques ont le devoir de surveiller les réseaux de distribution et sont responsables que les seuils d'harmoniques admissibles ne soient pas dépassés. C'est pourquoi l'installation de charges sur le réseau fait l'objet d'une demande et d'une autorisation de raccordement. Il est ainsi possible de prévoir l'influence qu'auront de nouveaux utilisateurs par exemple quant aux harmoniques induites sur le réseau. La norme NS 413600 contient d'ailleurs une méthode de calcul.

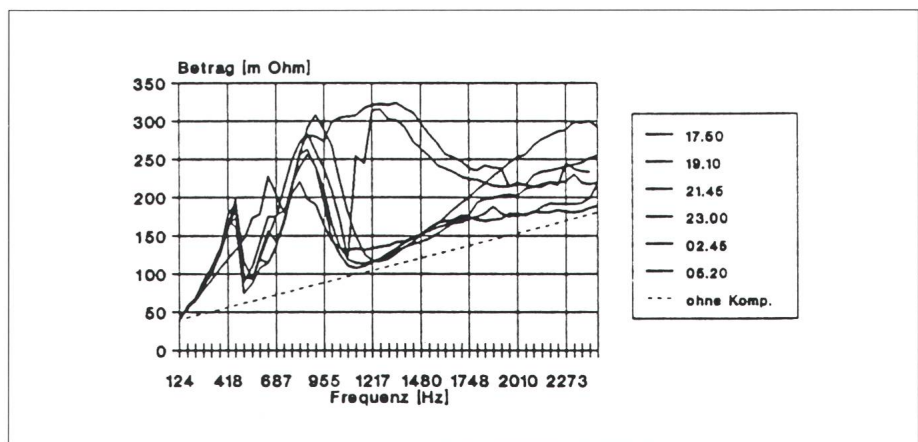
En pratique, ce calcul s'est avéré être une bonne approximation et a fait ses preuves pour les installations jus-

qu'à 100 kVA. Les limites du calcul selon NS 413600 sont atteintes lorsqu'il s'agit d'évaluer des compensations, des circuits bouchon ou des installations de plus de 100 kVA. Dans ces cas, l'extrapolation de l'impédance à 50 Hz aux fréquences harmoniques ne suffit plus. Il s'agit alors de connaître l'impédance du réseau en fonction de la fréquence. Les programmes informatiques de calcul développés à cet effet ont eux aussi leurs limites puisqu'il est très rare de connaître tous les éléments d'un réseau (impédance des charges comprise). C'est pourquoi il devient indispensable de mesurer le spectre d'impédance à l'aide d'un appareil MZF aux points de raccordement.

### Utilisation du MZF par les entreprises électriques

Pour assurer une exploitation sans perturbation, les entreprises électriques sont appelées à attacher une grande importance aux problèmes des «influences». Par ce terme, il faut comprendre les répercussions des harmoniques dans le réseau, les dysfonctionnements ainsi que les effets sur les transmissions des signaux de télécommandes centralisés. Dans ces cas, les influences dépendent des résonances (série et/ou parallèle) du réseau.

Des pointes de courant ou de tension dangereuses peuvent être engendrées si ces résonances coïncident avec les fréquences harmoniques du réseau. Ces impédances peuvent également modifier les caractéristiques de compensation, filtres ou autres circuits bouchon. Si l'on veut donc éviter



**Figure 10** Mesure de l'impédance sur plusieurs heures

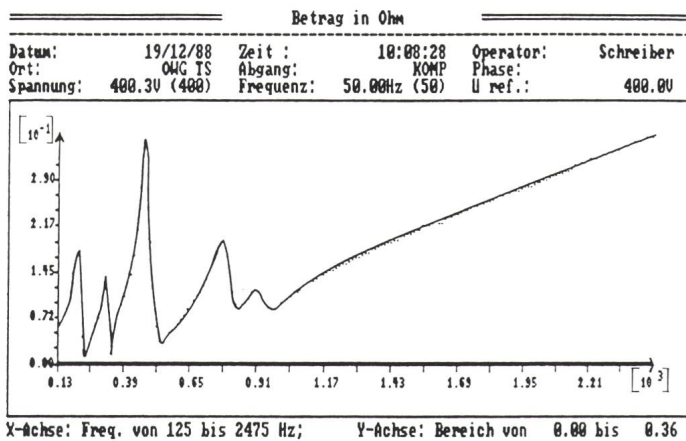
Mesures sur jeu de barres de transformateur 630 kVA. Plusieurs niveaux de compensation avec circuit bouchon à 750 Hz.

Ordonnée: impédance mesurée

Abscisse: fréquence

En encadré: les heures de mesure pour chaque courbe





**Figure 11**  
**Résultats de la**  
**mesure d'un circuit**  
**bouchon**

Ordonnée:  
 impédance mesurée  
 [ohm]  
 Abscisse:  
 fréquence [Hz]

des perturbations, des pannes ou des erreurs de fonctionnement dues aux résonances dans le réseau, il devient indispensable de mesurer l'impédance en fonction de la fréquence (spectre d'impédance). Les cas spécifiques suivants sont à mentionner:

- au vu de la norme NS 413600, mesure de l'impédance afin de statuer sur une demande de raccordement quant aux harmoniques
- détermination des résonances dans le réseau
- mise en service et vérification d'installations de compensation ou de filtrage.

L'avantage de la mesure sur le calcul, est qu'il est ainsi tenu compte de tous les éléments du réseau si faibles soient-ils. La mesure du spectre de courant d'un utilisateur ainsi que du spectre d'impédance au point de raccordement, permet de déterminer les tensions harmoniques engendrées et le cas échéant de prendre des dispositions pour les réduire.

Les pointes de courant ou de tension peuvent provoquer des dégâts importants (par exemple dans les installations de compensation). Finalement il est important de tenir compte de la modification de l'impédance notamment lors de la commutation de compensation ou filtres. En effet, ces changements peuvent perturber le bon fonctionnement de télécommandes par exemple.

L'utilisation de plus en plus fréquente de l'électronique de puissance demande également une multiplication des mesures. Le but étant de fournir au client «une tension la plus sinusoïdale possible.» Ils s'agit également de prendre des dispositions permettant de satisfaire les normes et qui soient économiquement supportables.

### Expériences avec l'appareil de mesure MZF

L'appareil est contrôlé de préférence par un PC Lap-top. Les manipulations sont simples et conduites par

menu. Les résultats peuvent être présentés sous formes graphiques ou numériques. Ceux-ci sont mémorisés et peuvent être rappelés (p. ex. pour des comparaisons).

Ils peuvent également être transposés en fichiers ASCII si bien qu'une autre forme de présentation devient possible (p. ex. Lotus, Harvard Graphics, etc.). Les mesures peuvent également être conduites automatiquement si bien que des comparaisons peuvent être faites sur plusieurs heures voire plusieurs jours. La figure 10 montre une telle mesure sur plusieurs heures tandis que la figure 11 montre le spectre d'impédance d'une installation bouchon.

### Conclusions

Les principes de mesures précités ont été testés et ont donné des résultats exacts. L'impédance de boucle est mesurée plus précisément avec le MZF qu'avec d'autres méthodes, ceci cependant au détriment de la vitesse.

Dans l'ensemble l'appareil peut être considéré comme un outil indispensable pour la détermination précise et sûre de l'impédance en fonction de la fréquence.

### Bibliographie

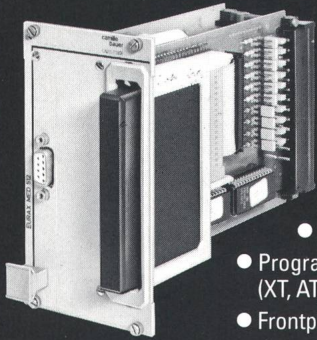
- [1] H. Sauvain, W. Hirschi et M. Aguet: Détermination de l'impédance des réseaux dans la gamme des fréquences industrielles. Bull. ASE/UCS 75(1984)12, p. 665-668.
- [2] M. Meyer: Experimentelle Bestimmung der frequenzabhängigen Quellenimpedanz im Niederspannungsnetz. Ph. D. Thesis. ETH Zürich, 1988.

**Note:** Cet article a été réalisé avec la collaboration de MM. Otar Johnsen, Ecole d'Ingénieurs, Fribourg, Nicolas Peguiron, Système P. Le Locle, et Pierre Schnegg, Panensa SA, Corcelles.



# EURAX

Sofort und **MED 512**  
richtig reagieren können.

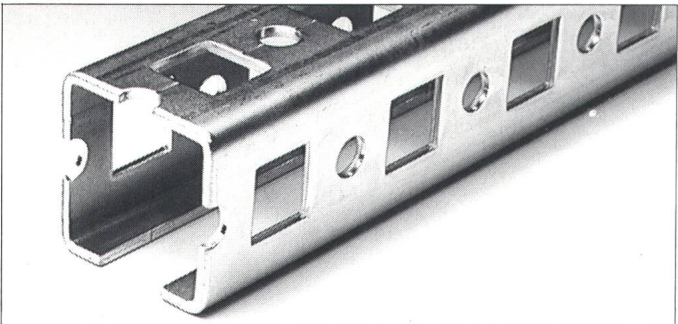


Messdaten-Analysator zur permanenten Überwachung von Netzwerken in allen Industriezweigen.

- Bis 16 Messeingänge
- 5 Standardprogramme, z.B. für Auslastungskurven, Ausfallstatistiken, statistische Verteilungen
- Steckbares Speichermodul
- Programmierung und Auswertung auf PC (XT, AT, 386, DOS 4.0)
- Frontplattenbreite 14 TE (~70 mm)

**camille  
bauer**

Camille Bauer AG  
5610 Wohlen  
Telefon 057 21 21 11  
Telefax 057 22 74 32  
Telex 827 901 cbm ch



## MULTIFIX NOUVEAU

Profils Traverses Supports

Multifix éléments de montage en acier perforé 50x50 mm pour cadres, tables de travail, étagères pour machines et sous-constructures de toute nature.

- effort de construction minima grâce à la systématique élaborée de tous les éléments
- montage propre avec des éléments de raccordement adéquats
- plus robustes et à prix plus avantageux que les systèmes profilés en alu.

Demandez la documentation Multifix, des échantillons et les prix à **lanz oensingen sa**  
Tél. 062/78 21 21 FAX 062/76 31 79

MULTIFIX m'intéresse.  
Prière d'envoyer la documentation.

IND

Pourriez-vous me/nous rendre visite? Avec préavis!

Nom, adresse: \_\_\_\_\_

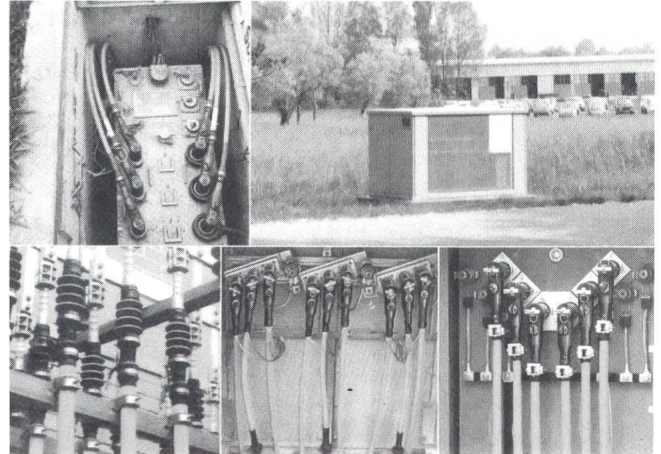


**lanz oensingen sa**  
CH-4702 Oensingen · téléphone 062 78 21 21

**GLASSEY**  
Mit uns

fließt der  
Strom besser

les prises embrochables  
**ELASTIMOLD®**  
un renouveau de l'exploitation M.T.



Communication  
à Martigny  
par TCX 3000

Tél. 026 22 64 51  
Fax 026 22 75 49  
Télex 473 424

**Nous sommes toujours  
disponibles**



**Wir sind immer zu Ihrer Verfügung**



**MARTIGNY**  
Av. du Léman 6  
CH-1920