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: 75 (1984)

Heft: 12

Artikel: Détermination de l'impédance des réseaux dans la gamme des fréquences industrielles

Autor: Sauvian, H. / Hirschi, W. / Aguet, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904422

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: 10.12.2025

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

Détermination de l'impédance des réseaux dans la gamme des fréquences industrielles

H. Sauvain, W. Hirschi, M. Aguet

L'article présente une méthode de calcul et une méthode de mesure de l'impédance, vue d'un point particulier du réseau, en fonction de la fréquence.

Die zunehmende Verbreitung der Leistungselektronik beeinflusst die Versorgungsnetze immer mehr durch Netzrückwirkungen (z. B. Oberwellen). Die auftretenden Störungen sind nicht nur in der Nähe ihrer Quelle wirksam, sondern verteilen sich über das ganze Netz. Dieser Umstand verlangt den Einbau von Filtern sowie Blindleistungs-Kompensationsanlagen, welche die Oberwellen absaugen, ohne jedoch die Rundsteuerung des Elektrizitätswerkes zu beeinflussen. Dabei spielt die Netzimpedanz eine wichtige Rolle. Bezogen auf einen bestimmten Punkt des Netzes, werden in diesem Aufsatz eine Berechnungsmethode und eine Messmethode der Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz vorgestellt.

Adresses des auteurs

H. Sauvain, ingénieur diplômé EPFL, Chef du groupe EMC, et *W. Hirschi*, ingénieur ETS, EMC, Condensateurs Fribourg Holding S.A., 7-13, rue de la Fonderie, 1700 Fribourg,
M. Aguet, ingénieur diplômé EPFL-SIA, chargé de cours EPFL, ingénieur adjoint du Service de l'électricité de la ville de Lausanne, rue de Genève 32, 1004 Lausanne.

1. Introduction

L'utilisation de plus en plus fréquente d'installations d'électronique de puissance pour des raisons de souplesse, de réglage et d'économie d'énergie entraîne fréquemment des distorsions de la tension d'alimentation du réseau électrique. Ces distorsions de tension se traduisent par des tensions harmoniques dont les effets sont des pertes supplémentaires, des contrecouples dans les générateurs et les moteurs, des perturbations des télécommandes centralisées et des systèmes de régulation électronique [1].

Ces perturbations générées par l'électronique de puissance se manifestent non seulement à proximité de leur source mais se propagent le long du réseau. Cette transmission des harmoniques peut être atténuée ou amplifiée suivant l'ordre de grandeur des impédances mises en jeu à la fréquence correspondante, différente de 50 Hz.

Pour atténuer ces perturbations, on fait appel à des filtres dont le but est d'absorber les harmoniques. Ces filtres peuvent cependant en cas de mauvais dimensionnement, constituer des atténuateurs indésirables pour les fréquences de télécommandes centralisées.

2. Impact des convertisseurs statiques dans le réseau

L'impact d'un convertisseur statique implanté dans un réseau est habituellement évalué par l'intermédiaire de mesures des tensions harmoniques (fig. 1) [2].

Lors du projet d'installation d'un convertisseur statique, les mesures précédentes n'étant pas possibles, on ne peut s'appuyer que sur la connaissance des courants harmoniques générés par le convertisseur statique associés à l'impédance équivalente du réseau pour les fréquences considérées.

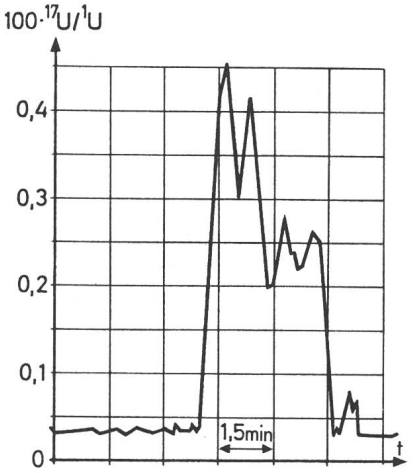

Fig. 1 Accroissement d'une tension harmonique de rang 17 durant le démarrage d'un convertisseur statique de 250 kW

Source de courant harmonique: Les convertisseurs statiques peuvent être considérés comme une source quasi idéale de courant harmonique. A titre d'exemple, le tableau I présente les courants harmoniques générés par un convertisseur statique en pont de Graetz triphasé d'une puissance de 250 kW [3].

Courants harmoniques générés par un convertisseur statique en pont de Graetz triphasé d'une puissance de 250 kW avec compensation par batterie de condensateurs de 250 kvar et filtrage à 250 Hz

Tableau I

ν	f	$^{\nu}I_{max}$ (eff.)	
I	Hz	A	%
1	50	460	100
5	250	105	23
7	350	24	6
11	550	43	10
13	650	21	5
17	850	35	8
19	950	16	4

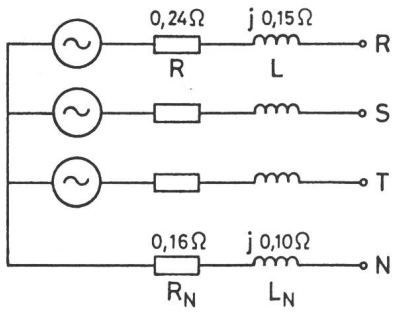

Fig. 2 Réseau équivalent 50 Hz

Impédance du réseau: L'impédance des réseaux est essentiellement fonction du lieu d'observation et de la fréquence considérée.

Afin de fixer un point de référence commun pour les appareils de faible puissance, la publication ASE-EN 50 006. 1976 propose les impédances données à la figure 2 [4]. Ces valeurs d'impédance sont représentatives de la distribution statistique dans les réseaux européens [5]. D'autre part, pour les plus hautes fréquences (10 kHz – 30 MHz), le CISPR propose une impédance équivalente de 150 Ω, respectivement 50 Ω [6].

Pour des questions de puissance ou de fréquence, ces impédances normalisées ne sont absolument pas utilisables pour les convertisseurs de puissance dans le domaine des fréquences industrielles.

Tension harmonique: La tension harmonique résultante attendue au point d'installation du convertisseur statique est donnée par

$$\underline{{}^{\nu}U} = \underline{{}^{\nu}Z} \cdot \underline{{}^{\nu}I} \qquad (1)$$

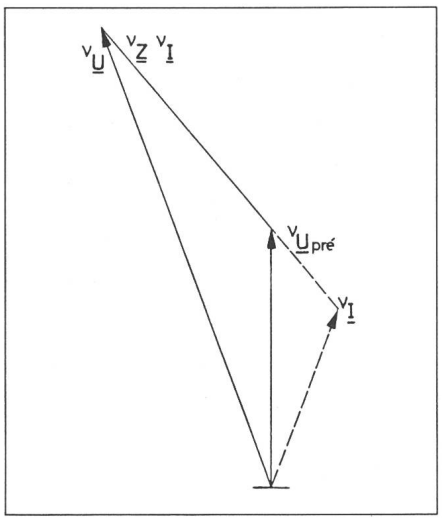

Fig. 3 Diagramme complexe de la tension harmonique ν

Cette tension calculée peut être vérifiée après installation du convertisseur statique. Une discordance entre ces deux valeurs peut être attribuée à une mauvaise appréciation de l'impédance $^{\nu}Z$, à la présence d'une tension harmonique préexistante dans le réseau (fig. 3), ou à une mauvaise connaissance du convertisseur statique et de sa charge.

Dans le cas de la figure 1, la tension harmonique préexistante était négligeable par rapport à la tension d'accroissement. Par conséquent la relation (1) était vérifiée.

3. Calcul de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence

En pratique, on constate que le point d'achoppement est constitué par le manque de connaissance du paramètre $^{\nu}Z$. L'impédance des réseaux à fréquence de 50 Hz est calculable à partir des caractéristiques des appareils et des lignes ou mesurable au moyen de mesureur de courant de court-circuit [7]. L'extension de l'impédance connue à 50 Hz pour d'autres

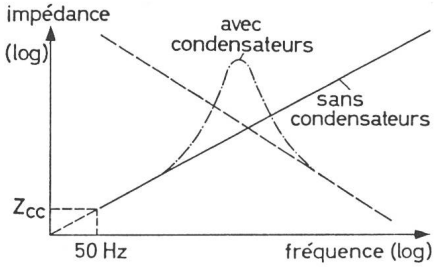

Fig. 4 Résonance d'impédance due à des condensateurs

fréquences est le plus souvent impossible étant donné que les convertisseurs statiques sont en général associés à des batteries de compensation d'énergie réactive. La mise en parallèle de condensateurs C avec le réseau d'alimentation comportant des inductances L et des résistances R crée des résonances (fig. 4) [8].

3.1. Méthode de calcul

La figure 5 présente une installation typique d'un convertisseur statique accompagné d'une compensation d'énergie réactive et d'un éventuel circuit bouchon situé côté basse ou moyenne tension pour le blocage des signaux de télécommande centralisée [9].

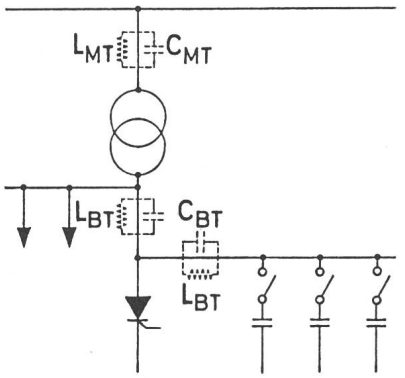

Fig. 5 Schéma simplifié d'un réseau de distribution avec convertisseur statique et compensation d'énergie réactive

L_{MT}, C_{MT}, L_{BT}, C_{BT} Impédance côté moyenne tension, resp. basse tension

Pour maîtriser les impédances au niveau du réseau de la figure 5, il est nécessaire de conduire le calcul à partir de plusieurs points d'observation, en particulier

- vu du convertisseur statique pour la calculation de tensions harmoniques;
- vu de la moyenne tension pour le calcul de l'atténuation des signaux de télécommande centralisée.

Pour y parvenir, on recourt au schéma équivalent de la figure 6.

Chaque élément du schéma équivalent est donné par sa tension, sa puissance, sa fréquence de référence, les tensions de court-circuit, etc.

3.2 Programme de calcul

A partir des éléments du réseau équivalent, le programme de calcul «RESON»:

- calcule les paramètres R, L, C du schéma équivalent,
- recherche les impédances de chaque branche en fonction de la fréquence,
- calcule les impédances équivalentes vues des points d'observation fixés,

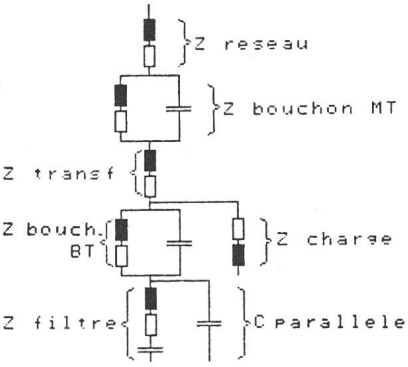

Fig. 6 Schéma équivalent correspondant au réseau de la figure 5

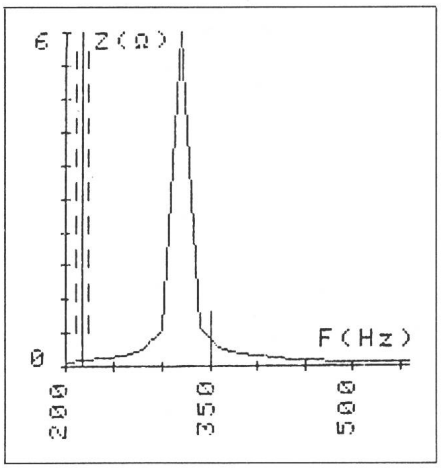

Fig. 7 Impédance du réseau calculée, vue du convertisseur statique

- permet d'affiner la connaissance des zones critiques où résident des résonances.

3.3 Exemple

Un transformateur de puissance de 1 MVA alimente plusieurs groupes de secours statiques redresseurs - onduleurs ainsi qu'une batterie de condensateurs de 300 kvar, réglable par échelons de 50 kvar. La fréquence de télécommande centralisée est de 217 Hz.

Le graphique de la figure 7 met en évidence une résonance de l'impédance vue du convertisseur statique. Cette résonance est particulièrement marquée pour l'harmonique de rang 7, d'autant plus que la puissance des condensateurs peut être réduite de plusieurs échelons et entraîne un décalage de la fréquence de résonance vers la droite. Afin de supprimer cette résonance, on pourrait introduire des selfs de blocage en série avec les condensateurs, accordées à 214 Hz [9]. En effet, ces selfs modifient le comportement de la batterie de condensateurs de capacitif à inductif à partir de 214 Hz.

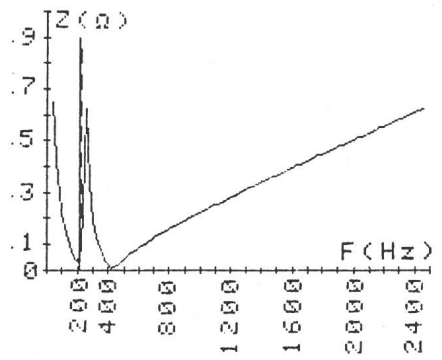

Fig. 8 Impédance du réseau calculée, vue de la moyenne tension

Cependant, on remarque que cette solution de selfs série crée un nouveau problème pour la télécommande centralisée. L'impédance vue de la moyenne tension (fig. 8) comporte une résonance série de fréquence au voisinage de 200 Hz. La mise en série du transformateur avec les selfs et les condensateurs crée un court-circuit pour les signaux de télécommande centralisée. Le calcul de la puissance consommée équivalente à la fréquence 217 Hz passe de 1 MVA (puissance installée) à 2,13 MVA.

Dans le cas présent, la solution du problème par la méthode classique des inductances série était donc inapplicable. La solution proposée consista à régler les enclenchements des échelons de condensateurs en sautant les séquences critiques.

4. Mesure de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence

Le principe de base de la mesure d'impédance en fonction de la fréquence consiste à soutirer du réseau ou injecter dans celui-ci un courant non sinusoïdal (fig. 9) [10]. Le spectre de ce courant et de la tension résultante au lieu d'observation permet d'obtenir les composantes de l'impédance en fonction de la fréquence. Pour des raisons énergétiques, il est plus facile de soutirer le courant du réseau que de l'injecter.

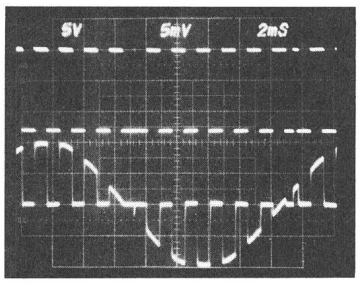

Fig. 9 Courant instantané haché soutiré du réseau par le convertisseur statique (trace inférieure)

Trace supérieure: impulsions de commande

Pour éviter l'effet des tensions harmoniques préexistantes, les composantes de l'impédance à mesurer sont choisies à des fréquences non multiples de 50 Hz. En effet, les nombreuses mesures effectuées jusqu'à ce jour dans les réseaux montrent que les spectres de tension sont principalement du type discret. Seuls les harmoniques de rang multiple de 50 Hz sont présents (fig. 10). Afin de s'affranchir de ces effets parasites, on concentre les spectres du courant soutiré dans le réseau sur une fréquence bien déterminée non multiple de 50 Hz, comme par exemple 1025 Hz dans la figure 11. La figure 12 présente le spectre de tension correspondant à 1025 Hz.

Pour effectuer les mesures d'impédance en fonction de la fréquence in situ, un appareil «ZEDEF» basé sur la méthode décrite a été spécialement développé (fig. 13).

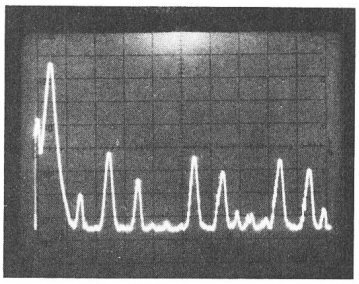

Fig. 10 Spectre de tension d'un réseau monophasé alimentant des convertisseurs statiques

Echelles: 100 Hz/div; 10 dB/div; U_1 = 220 V

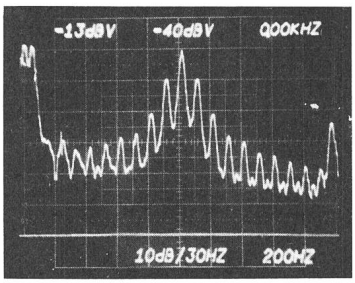

Fig. 11 Spectre d'un courant harmonique soutiré du réseau, centré sur 1025 Hz

Echelles: 200 Hz/div; 10 dB/div; 1025 I_{eff} = 0,16 A

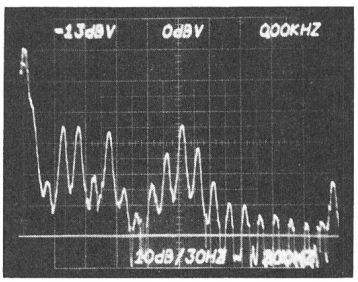

Fig. 12 Spectre de tension résultant du courant soutiré à 1025 Hz

1025 U_{eff} = 20 mV

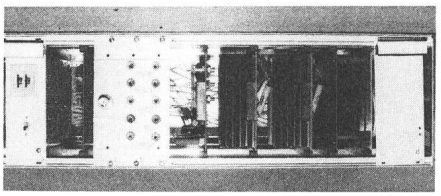

Fig. 13 Prototype de l'appareil de mesure de l'impédance en fonction de la fréquence ZEDEF

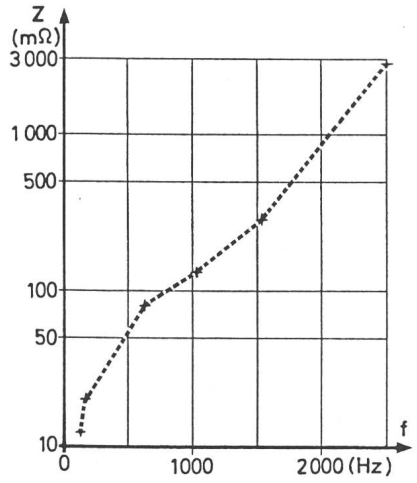

Fig. 14 Impédance équivalente d'un réseau mesurée au moyen de l'appareil ZEDEF

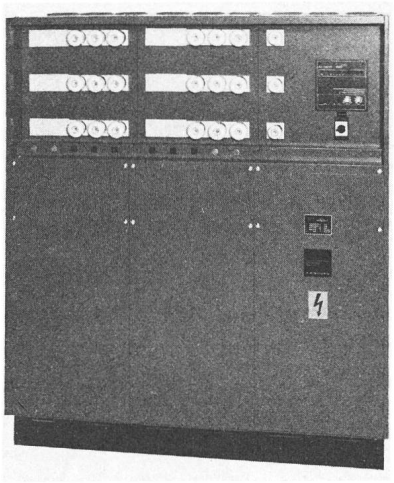

Fig. 15 Batterie de condensateurs de compensation d'énergie réactive à échelons réglables par voie électronique

Un exemple de mesures est donné à la figure 14. Il s'agit du cas particulier d'un réseau de distribution alimenté par un transformateur 630 kVA.

5. Conclusions

La connaissance de l'impédance des réseaux électriques de distribution dans la gamme des fréquences industrielles est indispensable au dimensionnement des convertisseurs statiques et de leur compensation (fig. 15). Pour une installation planifiée, on doit recourir au calcul par voie numérique (p.ex. par le programme «RESON»). Dans le cas d'une installation existante, des mesures sont préférables; on recourt alors à des appareils de mesure spéciaux tels que «ZEDEF», spécialement développé pour la mesure de l'impédance des réseaux électriques en fonction de la fréquence.

Bibliographie

[1] *G. Goldberg:* Niveau admissible des tensions harmoniques dans les réseaux à basse et moyenne tension. Bull. ASE/UCS 73(1982)5, S. 197...202.

[2] *M. Aguet, P.A. Nobs* et *H. Sauvain:* Mesures statistiques des perturbations dans les réseaux électriques. Bull. ASE/UCS 73(1982)21, p. 1145...1152.

[3] *A. Kloss:* Stromrichter-Netzrückwirkungen in Theorie und Praxis. Aarau/Stuttgart, AT-Verlag, 1981.

[4] Limitation des perturbations apportées aux réseaux d'alimentation par les appareils électrodomestiques et analogues comportant des dispositifs électroniques. Publication de l'ASE EN 50 006.1976.

[5] Aktuelle Probleme der niederfrequenten Beeinflussung in elektrischen Netzen. Berichtsband der SEV-Kommission zum Studium niederfrequenter Störeinflüsse. Zürich, SEV, 1978.

[6] Spécification du C.I.S.P.R. pour les appareils et les méthodes de mesure des perturbations radioélectriques. Publication du C.I.S.P.R. 16, 1977.

[7] *P. Rageth:* Appareil de mesure des courants de court-circuit sur réseaux à basse tension. Bull. ASE/UCS 69(1978)10, p. 499...503.

[8] *M. Lemoine:* Résonances en présence des harmoniques créés par les convertisseurs de puissance et les fours à arcs associés à des dispositifs de compensation. Rev. Gén. Electr. 87(1978)12, p. 944...962.

[9] Recommandations pour le blocage à fréquence musicale de condensateurs raccordés à des réseaux de distribution équipés d'installations de télécommande centralisée. (Recommandations pour le blocage de condensateurs.) Publication de l'ASE 4007.1962/SN 414007.

[10] *J. Weiler:* Measurement of the frequency dependency of main's impedance. A review of different methods. In: From Electronics to Microelectronics. Fourth European Conference on Electrotechnics - Eurocon '80. 4(1980), p. 479...483.