Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 106 (2015)
Heft: 6

Artikel: CEM et réseaux intelligents
Autor: Roggo, Dominique
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856661

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: 14.12.2025

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

CEM et réseaux intelligents

Le rôle de l'impédance harmonique

Les compteurs intelligents, composante essentielle des réseaux « smart », nécessitent des systèmes de communication fiables et efficaces. Or, les signaux de communication par courants porteurs en ligne utilisés dans certains cas peuvent être perturbés par les harmoniques générées par les onduleurs d'injection d'énergie renouvelable. Une approche systémique, qui tient compte non seulement des équipements individuels mais aussi des conditions du réseau dans le domaine fréquentiel, est proposée dans le cadre de la normalisation CEM de 2 à 150 kHz. L'impédance harmonique y joue un rôle très particulier.

Dominique Roggo

Selon l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), les systèmes de mesure intelligents (smart meter systems) ne constituent pas une condition préalable mais une composante essentielle des réseaux intelligents (smart grids) [1]. Leur déploiement à grande échelle a d'ailleurs déjà commencé en Europe. Or, celui-ci repose, tout comme celui des autres technologies « smart grids », sur des systèmes de communication fiables et efficaces.

Communication par courants porteurs en ligne et CEM

La technologie de communication par courants porteurs en ligne (CPL) représente un maillon important de la chaîne de communication entre les compteurs individuels situés chez les particuliers et les concentrateurs généralement installés au niveau d'un quartier.

La bande de fréquences de 3 à 95 kHz a été attribuée par le Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique (Cenelec) aux communications CPL destinées aux applications smart grids. Malheureusement, ces fréquences correspondent justement à celles des harmoniques de commutation générées par les onduleurs d'injection mis en œuvre dans le cadre de la production d'énergie provenant de sources renouvelables. Des cas de perturbations sont rencontrés de plus en plus fréquemment, ce qui a motivé le Cenelec à lancer une étude au niveau européen. Un rapport complet a été publié sur le sujet en 2014 [2].

Les cas d'interférences répertoriés sont parfois piquants et ne se limitent pas seulement aux onduleurs d'injection mais à presque tous les types de convertisseurs électroniques connectés au réseau : alimentations, ampoules économiques, UPS (uninterruptible power supply ou alimentation sans interruption), chargeurs rapides pour véhicules électriques, pour ne citer qu'eux. Des cas de perturbations entre onduleurs PV (photovoltaïques) et commandes centralisées sont également rapportés en Suisse, par exemple celui d'un éclairage public qui a pris l'habitude de s'enclencher dès que le soleil brillait ! Il ne s'agit pas de peindre le diable sur la muraille, ces cas sont encore rares, mais ce genre de problèmes devraient être écartés afin de permettre l'extension de la production et du stockage décentralisé dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050.

Conflits d'intérêts

Des projets de normes CEM (compatibilité électromagnétique) sont en cours pour la bande de fréquence se situant entre 2 et 150 kHz, en particulier en ce qui concerne les limites d'émissions générées par les onduleurs d'injection. Cependant, les limites d'émissions non intentionelles (NIE) proposées par les représentants des systèmes de communication sont en des-

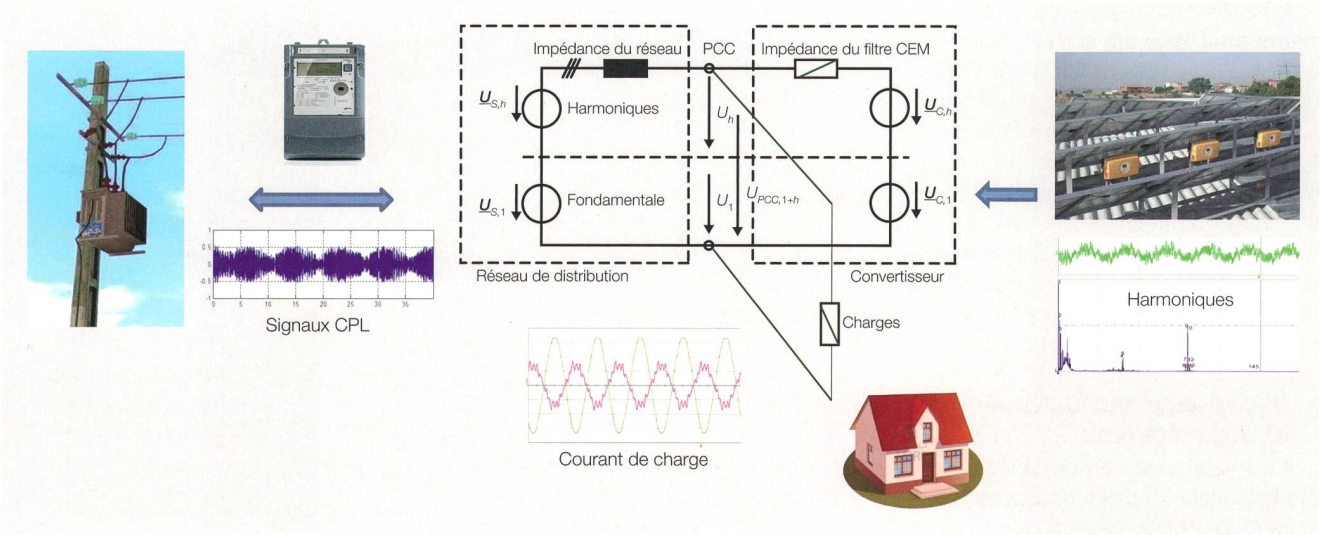

Figure 1 Approche systémique pour les normes CEM dans la plage de fréquence de 2 à 150 kHz.

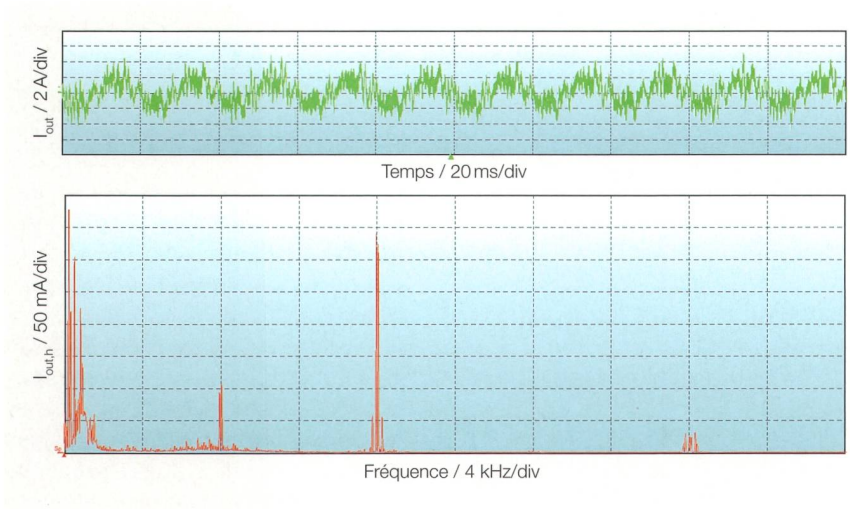

Figure 2 Harmoniques de courant mesurées en sortie d'un onduleur photovoltaïque.

sous des émissions mesurées dans de nombreux cas de production d'énergie décentralisée en Europe [2]. La situation est complexe car les technologies mises sur le marché ont largement devancé les normes.

Des conflits d'intérêts, tout à fait légitimes, viennent pimenter les choses: dans une situation de marché tendue, les fabricants d'onduleurs ne peuvent, d'une part, pas se permettre d'augmenter leurs coûts avec des filtres supplémentaires; d'autre part, les fournisseurs de technologies « smart » ne peuvent pas revenir sur des choix stratégiques et des développements coûteux liés aux systèmes de communication. Il faudra patienter encore quelque temps jusqu'à ce qu'un compromis soit trouvé. Une norme pour le test d'immunité des équipements aux perturbations est bien apparue (IEC 61000-4-19) et une seconde est en bonne voie (IEC 61000-4-16), mais la question des niveaux d'émission pour les équipements individuels reste ouverte.

C'est dans ce contexte qu'intervient la proposition de ne pas considérer uniquement les niveaux de perturbation et d'immunité des équipements de manière individuelle, dans des conditions de laboratoire « stériles », mais d'aborder les problèmes CEM de manière plus systémique. Le comportement des équipements, des lignes et des transformateurs doit en effet être considéré dans le domaine fréquentiel, en tenant compte des conditions de l'application.

Impédance harmonique et interférences

Le rôle joué par l'impédance harmonique dans la propagation des perturbations électromagnétiques conduites entre équipements connectés au réseau est très bien décrit dans un rapport publié par le comité IEC TC22 en 2012 [3]. Le chemin de transmission des perturbations générées par un onduleur vers le réseau est représenté par le schéma simplifié au centre de la **figure 1**.

Les harmoniques dues à la modulation de largeur d'impulsions et mesurées au point de couplage se situent généralement dans la plage comprise entre 5 et 100 kHz. Leur valeur RMS (Root Mean Square) peut s'élever à plus de 120 dBuV. À ces fréquences-là, l'onduleur est considéré comme une source de tensions harmoniques non intentionnelles. L'onduleur n'étant pas une source de courant idéale, des harmoniques sont également mesurées aux fréquences inférieures. Son régulateur de courant de sortie tente de fournir un courant proche du sinus à 50 Hz, mais les harmoniques de tension présentes sur la ligne l'en empêchent. Dans le domaine des fréquences inférieures à 2 kHz, l'onduleur est considéré comme une source d'émissions non intentionnelles en courant. Un exemple de spectre des harmoniques de tension mesurées à la sortie d'un onduleur sur une échelle de fréquence linéaire est représenté à la **figure 2**.

Les harmoniques de commutation mesurées seraient beaucoup plus élevées si les onduleurs n'étaient pas déjà équipés d'une inductance de réglage et d'un filtre CEM, représentés sur le schéma simplifié de la **figure 1** par le composant « impédance du filtre CEM ». Les filtres

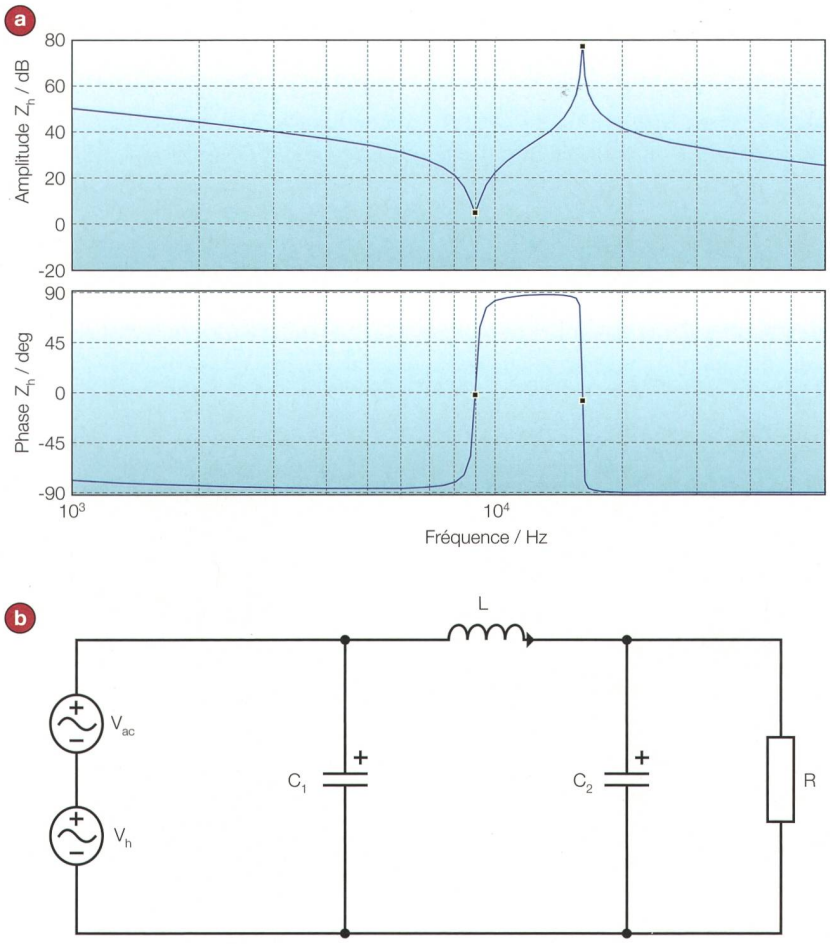

Figure 3 Spectre de l'impédance (a) et circuit (b) d'un filtre CEM pour ballast électronique.

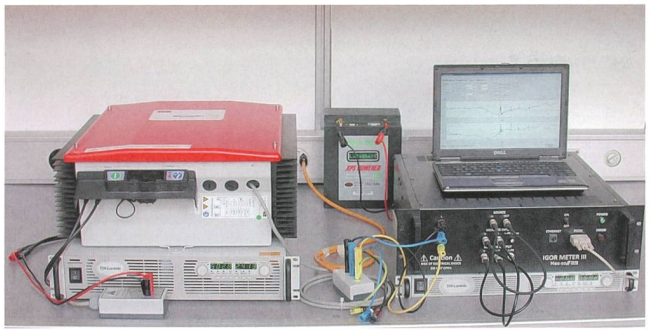

Figure 4 Premier prototype d'analyseur d'impédance harmonique.

CEM sont de manière générale réalisés à l'aide de composants passifs : LCL, CLC, filtre « bouchon », etc.

La partie « impédance du réseau » représente l'impédance complexe totale des lignes, filtres et transformateurs jusqu'à la source idéale de tension que représente le réseau de distribution. L'impédance de source du réseau a généralement un comportement inductif. Le circuit de la **figure 1** peut être traité comme un diviseur de tension. Les impédances harmoniques Z_h définies à la fréquence des harmoniques correspondantes f_h fixent le rapport entre la tension harmonique mesurée au point de couplage commun (PCC) et la tension générée par l'onduleur :

$$U_{h,PCC} = U_{h,onduleur} \cdot \frac{Z_{h,réseau}}{Z_{h,filtre} + Z_{h,réseau}}$$

Selon cette équation et pour un onduleur donné, une impédance de réseau $Z_{h,réseau}$ élevée correspond à une tension harmonique élevée au point de couplage commun. Partant d'un raisonnement similaire, il est possible de montrer que la stabilité du régulateur de courant d'un onduleur est diminuée lorsque l'impédance de ligne $Z_{h,réseau}$ est élevée [4]. En résumé, les perturbations CEM générées par les onduleurs diminuent lorsque l'impédance du réseau est basse. À la fréquence fondamentale, cela correspond à une puissance de court-circuit ou un rapport de court-circuit élevés si l'on se réfère à la norme CEM IEC 61000-3-12 ou IEC TR 60725 par exemple. Les fournisseurs d'onduleurs recommandent du reste une tension de court-circuit réduite pour le transformateur MT/BT. Mais quelle impédance doit-on considérer pour les fréquences d'harmoniques élevées ?

Impact sur les signaux transmis par les lignes

Prenons le cas d'un compteur intelligent installé dans une villa équipée de panneaux photovoltaïques et d'un onduleur. L'un des canaux de fréquence utilisé par la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pour la transmission des signaux par CPL pourrait être perturbé par les harmoniques de commutation d'un onduleur au delà des 36 kHz par exemple, résultant en une diminution du débit des signaux transmis. Selon les explications ci-dessus, la perturbation sera plus importante si l'impédance du réseau à cette fréquence est élevée par rapport à celle du filtre de l'onduleur.

La solution généralement préconisée par la CEM consiste à augmenter l'efficacité du filtre de sortie de l'onduleur en baissant sa fréquence de coupure. Cela a un impact sur le coût et le volume des composants, éventuellement sur l'efficience. Mais ces mesures peuvent également avoir un résultat négatif par rapport à l'effet souhaité. Les filtres CEM réalisés avec des composants passifs sont caractérisés par des fréquences de résonance. Ces résonances influencent l'impédance spectrale vue du réseau. La **figure 3** montre l'impédance spectrale théorique pour le filtre CLC simplifié d'un ballast électronique pour luminaire. On constate une résonance série et une résonance parallèle.

Si un filtre ou la combinaison de ce filtre avec des équipements proches comporte une fréquence de résonance série, l'impédance du réseau sera très faible à cette fréquence. Un signal bande étroite travaillant à une fréquence proche de la résonance sera absorbé par un effet de « filtre bouchon » ou « notching effect ». L'augmentation des capacités de filtrage CEM à outrance pourrait donc nuire à la transmission des signaux modulés, au même titre que les harmoniques elles-mêmes.

L'impédance harmonique du réseau mesurée jusqu'à 20 kHz sur de nombreux sites en Europe a des valeurs en moyenne nettement inférieures aux impédances normalisées recommandées dans les normes (IEC, 61000-4-7, CISPR 16) [3]. L'utilisation de ces impédances lors de tests en laboratoire a pour conséquence une surestimation des perturbations. Cela conduira dans un premier temps à une réduction des niveaux émis par les équipements, mais risque d'aboutir en contrepartie à une plus forte atténuation des signaux CPL.

D'autres équipements destinés à améliorer la qualité de la tension sur le réseau peuvent influencer l'impédance harmonique et les perturbations aux fréquences inférieures à 2 kHz (entre les 5e et 40e harmoniques) : les compensateurs de

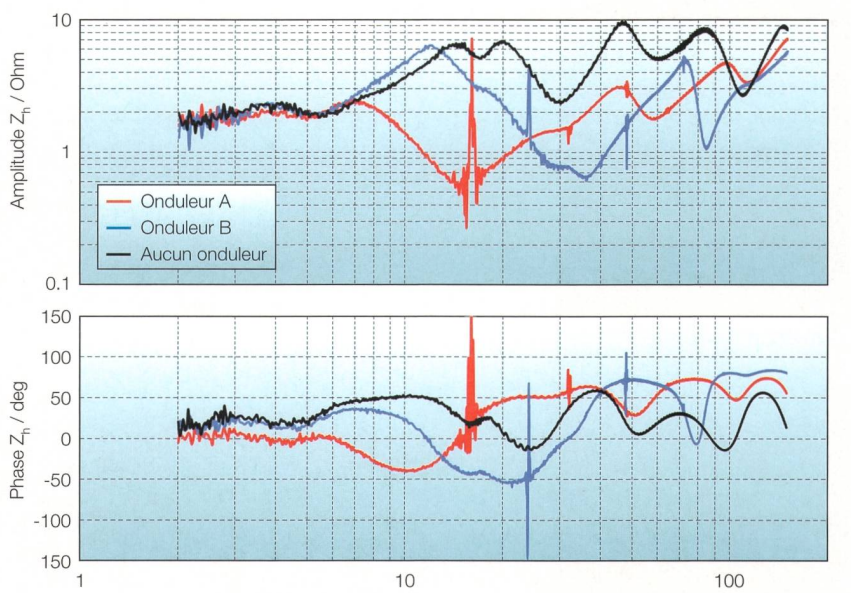

Figure 5 Impédances harmoniques mesurées au point de couplage commun entre plusieurs onduleurs.

Figure 6 Vue panoramique du laboratoire GridLab.

puissance réactive capacitifs, les filtres actifs tels que les compensateurs d'harmoniques ou les régulateurs des onduleurs d'injection [5]. Ces équipements interviennent dans les processus de perturbations entre convertisseurs et commandes centralisées.

Mesure de l'impédance de réseau en ligne

Il est aisé de calculer l'impédance vue du réseau pour le filtre CEM d'un équipement individuel. Les choses se compliquent lorsque plusieurs équipements sont branchés en parallèle.

Dans ce cas, la simulation dans le domaine de fréquence peut apporter un résultat, à condition de connaître les composants de ces équipements et les paramètres des lignes qui les relient. Une variation de l'impédance harmonique dans le temps est cependant provoquée par les changements d'états de conduction des semi-conducteurs dans les convertisseurs, par le vieillissement des capacités des filtres CEM ou par les filtres adaptatifs. En outre, si la connexion en parallèle de plusieurs convertisseurs résulte de manière positive en un amortissement de la résonance principale, en contrepartie le nombre de résonances augmente et leurs fréquences se retrouvent décalées. De plus, les variations de l'impédance harmonique dans le temps deviennent imprévisibles lorsque ces équipements s'enclenchent et se déclenchent en fonction de la météo [6].

Développement d'un analyseur d'impédance harmonique

Seules des mesures sur une certaine durée et sur site permettent de montrer l'évolution de l'impédance harmonique. À notre connaissance, aucun équipement disponible sur le marché ne répond encore aux besoins de la recherche CEM dans le domaine des smart grids : un appareil « portable », rapide, précis, n'ayant pas d'impact sur le réseau lui-même, couvrant une large bande de fréquences et pouvant effectuer des mesures sur plusieurs jours. Comprenant l'importance du rôle joué par l'impédance harmonique en CEM, l'équipe du laboratoire d'électronique industrielle de la HES-SO Valais a suivi les traces de trois entreprises suisses, Panensa avec le MZF ainsi que Michels Datentechnik et EKZ avec le DSA [1], et a décidé de réaliser un tel équipement de mesure (figure 4).

Un premier prototype couvre la bande de fréquence de 1 à 150 kHz [4]. Les résultats des premiers essais ont permis de démontrer l'effet de l'impédance harmonique sur les harmoniques générées par les onduleurs. La figure 5 présente la variation de l'impédance harmonique mesurée en fonction des types d'onduleurs branchés en parallèle. Les premiers essais récemment réalisés sur des sites de production d'énergie photovoltaïque demandent par contre encore à être analysés. À noter qu'une nouvelle version d'analyseur d'impédance, plus rapide et mesurant une plage de fréquence plus large est en cours de développement.

L'intégration des énergies renouvelables au réseau peut être étudiée de manière pratique dans le nouveau laboratoire GridLab à Sion (figure 6). La figure 7 représente une application typique impliquant trois producteurs PV et des compteurs intelligents connectés à un point de couplage commun. Le nouvel analyseur d'impédance devra permettre d'analyser le comportement des CPL en réseau perturbé.

Conclusions et recommandations

Les projets de recherche mettant en pratique l'analyseur d'impédance harmonique n'en sont qu'à leur début. Il est cependant possible d'établir quelques recommandations d'ordre général pour le processus de normalisation en cours :

Figures : HES-SO Valais-Wallis

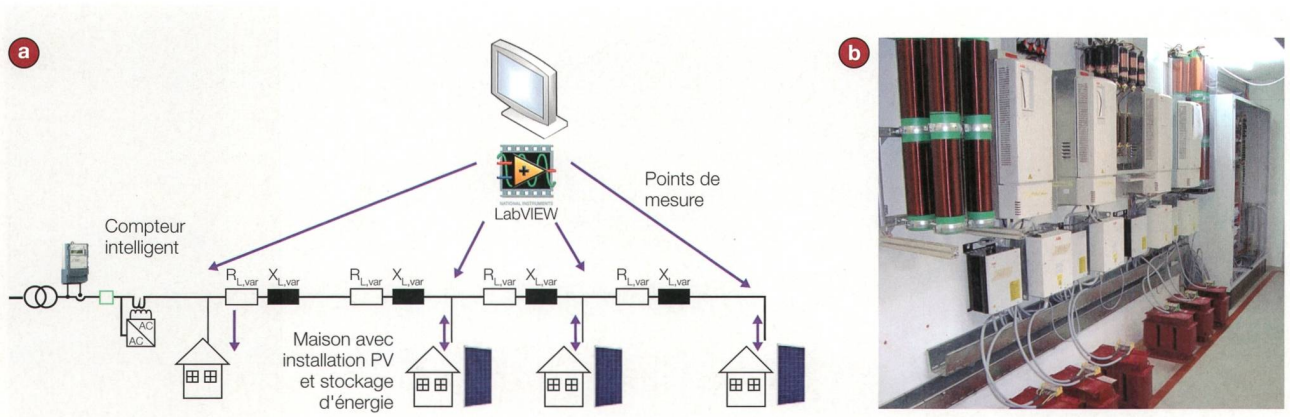

Figure 7 Topologie (a) et réalisation (b) du « GridLab District » pour les essais de perturbation des CPL.

■ Une méthode plus systémique doit venir compléter les tests des niveaux d'émissions et d'immunité pour les équipements individuels en condition de laboratoire. L'impédance harmonique du réseau qui y est utilisée doit mieux correspondre à la réalité de l'application.

■ Une attention particulière doit être portée aux effets de résonances entre convertisseurs statiques, filtres CEM et compensateurs de puissance réactive si ces résonances provoquent une diminution de l'impédance harmonique.

■ Non seulement les régulateurs, mais également les filtres CEM devraient pouvoir être paramétrés en fonction des applications (par exemple en fonction du nombre d'équipements connectés à un même point de couplage).

■ Grâce aux nouveaux types de semiconducteurs apparus sur le marché (SiC, GaN, etc.), la fréquence des harmoniques générées par les onduleurs augmentera dans un futur proche. Il faut en tenir compte.

Des outils plus efficaces pour la mesure et la simulation du réseau dans le domaine des fréquences seront développés au cours de nouveaux projets en collaboration entre la HES-SO et EOS Holding, ainsi que dans le cadre du pôle de compétences interuniversitaires SCCER-FURIES en collaboration avec la HES bernoise, EWZ et les FMB. Il sera ainsi possible de participer activement à l'établissement de nouvelles normes CEM, en particulier en ce qui concerne les interférences entre onduleurs et systèmes de communication par courants porteurs en ligne.

Zusammenfassung **EMV und intelligente Netze**

Die Rolle der Oberschwingungsimpedanz

«Intelligente» Zähler (Smart Meters) sind ein wesentlicher Bestandteil «intelligenter» Netze und erfordern zuverlässige und effiziente Kommunikationssysteme. Die Signale, welche direkt über das Netz übermittelt werden, können allerdings durch Oberschwingungen, welche beispielsweise netzgekoppelte Wechselrichter für die Einspeisung erneuerbarer Energien erzeugen, gestört werden. Entsprechende Störfälle treten immer häufiger auf.

Momentan werden Normierungsprozesse im Bereich EMV (elektromagnetische Verträglichkeit) für den Frequenzbereich von 2 bis 150 kHz ausgearbeitet, insbesondere hinsichtlich der Grenzwerte für Emissionen von netzgekoppelten Wechselrichtern. Allerdings ist die Situation komplex, denn die am Markt verfügbaren Technologien, sowohl bezüglich der Wechselrichter als auch bezüglich der von den «intelligenten» Technologien eingesetzten Kommunikationssysteme, sind natürlich bereits unabhängig von zukünftigen Normen entwickelt worden.

Zudem hängt die von den Wechselrichtern erzeugten Störwirkung von der zeitvarianten Netzimpedanz ab. Und nicht zuletzt weisen die am Ausgang des Wechselrichters eingesetzten und aus passiven Komponenten bestehenden EMV-Filtersysteme Resonanzfrequenzen auf. Diese Resonanzen beeinflussen die Frequenzabhängigkeit der Impedanz des Netzes und sind in der Lage, ein Kommunikationssignal zu absorbieren, wenn dessen Frequenz nahe der Resonanzfrequenz liegt. Eine übermässige Filterung könnte daher, genau wie die Oberschwingungen selbst, die Übertragung von modulierten Signalen negativ beeinträchtigen.

Im vorliegenden Artikel wird ein systemischer Ansatz vorgestellt, der nicht nur die einzelnen Geräte und Anlagen sondern auch die im Frequenzbereich vorherrschenden Netzbedingungen berücksichtigt. Er basiert auf einer Studie, bei der die Entwicklung der Oberschwingungsimpedanzen innerhalb des Netzes anhand von Messungen vor Ort über einen längeren Zeitraum verfolgt wird. Für die Messungen wird ein von der HES-SO Valais-Wallis entwickelter «portabler» Analysator für Oberschwindungsimpedanzen verwendet. Die Forschungsprojekte, bei denen dieser Analysator bislang zum Einsatz kam, befinden sich noch ganz am Anfang. Allerdings konnten einige allgemeine Empfehlungen für den laufenden Normierungsprozess bereits davon abgeleitet werden. CHe

Références

[1] Bases pour l'introduction de systèmes de mesure intelligents auprès du consommateur final en Suisse – Exigences techniques minimales et modalités d'introduction. Office fédéral de l'énergie, novembre 2014. www.bfe.admin.ch/smartgrids/index.html?lang=en&dossier_id=06242.

[2] SC205A of Cenelec: Electromagnetic Interference between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range below 150 kHz. TR50627, Ed. 2, 2014.

[3] TC 22 of IEC: Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active in-feed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz. TS 62578 Ed.2, April 2015.

[4] D. Roggo, L. Merendaz, D. Furrer: On-line 2 to 150 kHz Grid Impedance Meter. 22nd International Conference on Electricity Distribution CIRED, Paper No. 1417, Stockholm, Sweden, 10-13 June 2013. www.cired.net/publications/cired2013/pdfs/CIRED2013_1417_final.pdf.

[5] Jian Sun: Impedance-Based Stability Criterion for Grid-Connected Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 11, pp. 3075-3078, November 2011.

[6] X. Lu, M. Liserre, K Sun, F Blaabjerg, R. Teodorescu and L. Huang: Resonance Propagation of Parallel-Operated DC-AC Converters with LCL Filters. IEEE- Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC, pp. 877-884, Orlando, Florida, USA, 5-9 February, 2012.

Auteur

Dominique Roggo est ingénieur diplômé de l'ETHZ depuis 1990. Il a travaillé en R&D chez ABB Systèmes de transport, chez Lemsys SA (équipements de test pour semi-conducteurs) à Genève, puis en tant qu'ingénieur d'application pour LEM SA en Finlande. Il enseigne l'électronique industrielle à la HES-SO Valais à Sion. Ses activités de recherche au sein du laboratoire GridLab se concentrent sur l'intégration des énergies renouvelables au réseau. Il est membre du comité IEC 77A, Compatibilité électromagnétique, phénomènes basse fréquence.

HES-SO Valais-Wallis, 1950 Sion, dominique.roggo@hevs.ch

[1] Le MZF et le DSA, deux appareils portables disposant d'une bande passante maximale de 2,5 kHz, ont été développés dans les années 90 et ne sont apparemment plus commercialisés.

Anzeige

Kennen Sie www.bulletin-online.ch schon?

Die Beiträge dieser Ausgabe finden Sie auch auf Bulletin-Online. Dort können Sie die Artikel bewerten und Ihren Kommentar abgeben. Damit aus einer Einweg-Kommunikation ein spannender Dialog wird.

Das elektronische Bulletin lädt Sie ein zum Schnuppern, zum «Durchwühlen» des Archivs und zum Lesen der aktuellsten Kurzbeiträge. Wir freuen uns auf Ihren Besuch!

www.bulletin-online.ch

Bulletin
Fachzeitschrift von Electrosuisse und VSE
Revue spécialisée d'Electrosuisse et de l'AES