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: 73 (1982)

Heft: 5

Artikel: Niveau admissible des tensions harmoniques dans les réseaux basse et moyenne tension

Autor: Goldberg, G. / Sauvain, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904940

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: 09.07.2025

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

Niveau admissible des tensions harmoniques dans les réseaux basse et moyenne tension

Proposition de la Commission pour l'étude des perturbations en basse fréquence, de l'ASE

621.3.027.24;

L'onde de tension 50 Hz du réseau subit des perturbations de différentes sortes comme les fluctuations de tension (flicker), les creux de tension, les microcoupures, les harmoniques. La question de la qualité de la tension soulève un intérêt croissant. Les problèmes qui ne sont pas en relation directe avec la fréquence fondamentale sont étudiés en Suisse par la «Commission pour l'étude des perturbations à basse fréquence» de l'ASE qui traite aussi des affaires relatives au Comité 77 de la CEI. Le rapport ci-dessous concerne l'un des problèmes les plus importants dans le domaine des harmoniques: fixer les tensions harmoniques admissibles dans les réseaux de distribution [1]).

1. But et contenu du rapport

Ce rapport présente une proposition dans le but d'établir le niveau admissible des tensions harmoniques dans les réseaux basse et moyenne tension. Cette limitation est nécessaire pour permettre un fonctionnement simultané et sans perturbation des générateurs d'harmoniques et des systèmes qui y sont sensibles dans le cadre commun des réseaux électriques.

Le rapport présente tout d'abord les parties concernées (perturbateurs, perturbés, réseaux électriques), leurs objectifs et les facteurs d'influence. Dans le chapitre 4, trois spectres traduisent la proposition. Les limites admissibles des tensions harmoniques doivent être établies de façon réaliste. Dans ce but, on contrôle l'adaptation de cette proposition aux conditions d'apparition des tensions harmoniques dans les réseaux. On vérifie aussi qu'il existe une réserve suffisante pour les perturbateurs futurs. Enfin, on vérifie que les limites envisagées concordent avec le niveau d'immunité des perturbés.

Cette proposition devrait servir de base à l'élaboration d'une future norme ASE. Entre-temps, elle pourra être utilisée comme guide pour accumuler des expériences. Son opportunité sera ainsi testée.

Seuls sont considérés les régimes stationnaires et quasi-stationnaires. On admet que les origines des harmoniques sont connues. Les problèmes de mesure ne sont pas traités.

2. Objectif

Les appareils connectés aux réseaux électriques et sensibles aux harmoniques sont influencés par les tensions harmoniques apparaissant à leurs bornes; on propose donc de prendre comme critère d'influence un spectre des tensions harmoniques admissibles. Il est légèrement différent pour les réseaux basse tension et les réseaux moyenne et haute tension. Ce spectre représente une base technique pour les 3 parties concernées, les perturbés, les perturbateurs et le réseau électrique:

– cette base doit indiquer aux fabricants d'appareils sensibles aux harmoniques (les *perturbés*) le niveau minimum que ces appareils doivent supporter. L'immunité des appareils devrait comprendre en plus une marge de sécurité.

– elle doit indiquer aux fabricants d'appareils générateurs d'harmoniques (les *perturbateurs*) par quelle tension harmonique globale ils sont limités. En principe, chaque appareil ne doit y contribuer que pour une partie. En ce sens, le spectre global a plutôt un caractère d'information pour élaborer des prescriptions destinées à chaque appareil en particulier.

– elle doit indiquer aux *entreprises électriques* les limites qui résultent des tensions harmoniques générées par les différentes sources. Dans des conditions normales ces limites ne devraient pas être dépassées.

Cette base technique représentera donc pour les perturbés, les perturbateurs et les entreprises électriques une référence de décision commune pour les problèmes – spécialement les dérangements – liés aux influences des harmoniques. Les solutions envisagées viseront un optimum économique pour les trois parties. Les limites seront fixées en considérant la majorité des appareils et des points de raccordements tant du côté des perturbateurs que du côté des perturbés. On ne tiendra pas compte des cas extrêmes pour lesquels on pourra admettre des mesures spéciales.

3. Facteurs d'influence

3.1 D'après leur mode d'apparition, on distingue trois groupes d'harmoniques, auxquels correspondent trois spectres partiels différents:

– *les harmoniques de rangs impairs non multiples de 3.* Ce sont les harmoniques (5., 7., 11., 13., ...) usuellement produits par les générateurs ou consommateurs non linéaires. Ils forment dans le réseau des systèmes triphasés directs ou inverses.

– *les harmoniques de rangs impairs multiples de 3.* Ces harmoniques (3., 9., 15., ...) sont homopolaires et n'apparaissent habituellement que dans les réseaux basse tension avec conducteur neutre. On ne les trouve dans les réseaux moyenne et haute tension que lorsque ceux-ci sont mis à la terre rigidement. Quand les trois tensions de phase harmoniques (ou les trois courants harmoniques) du réseau basse tension sont asymétriques, une partie du déséquilibre peut passer dans le réseau moyenne et haute tension.

– *les harmoniques de rangs pairs* (2., 4., 6., ...). Ces harmoniques sont dus aux consommateurs caractérisés par des demi-ondes de courant asymétriques, tels que les petits redresseurs à monoalternance, les récepteurs de télévision, etc. Ils sont aussi dus aux appareils équipés d'un pont triphasé semi-contrôlé (les recommandations de l'UCS limitent cependant leur puissance).

3.2 La limitation des tensions harmoniques doit tenir compte des problèmes – et de leurs conséquences – qui se présentent aux pertubateurs et aux perturbés:

Dans l'optique des *perturbateurs*, c'est-à-dire des générateurs d'harmoniques, les limites à fixer doivent être en accord avec les lois d'apparition des tensions harmoniques dans le réseau. On risque sinon que ces limites ne puissent être ni respectées ni appliquées. Pour chaque fréquence, on part du niveau d'harmonique qui s'est établi dans le réseau de façon «naturelle» et qui a été déterminé au cours d'une longue période d'observation (enregistrements). Il faut retenir que le niveau d'harmonique varie fortement en fonction du temps et du lieu selon une distribution statistique d'apparition. Dans le sens

[1]) La version allemande de cet article a été publiée dans le Bulletin 1/1982, pages 2...8.

de l'optimum recherché, on ne retiendra pas comme valeur admissible les valeurs maximales apparaissant de façon isolée, mais on fixera des limites plus basses, ayant toutefois une probabilité de dépassement encore acceptable.

De nombreuses mesures de tensions harmoniques ont été effectuées. On ne connaît cependant presque aucune distribution probabilistique d'apparition. De même on n'a pas établi de critères de probabilité pour fixer des limites. Il a fallu, par conséquent, faire des hypothèses raisonnables sur la base des mesures disponibles (chapitre 5).

L'expansion continue de l'électronique de puissance qui entraîne une augmentation générale des harmoniques ou la présence de résonances locales ont incité à prévoir une réserve adéquate en fixant les limites des tensions harmoniques. En les appliquant, il faudra cependant veiller à limiter au mieux le coût d'éventuels moyens de correction (filtres, etc., ...).

Dans l'optique des *perturbés,* les niveaux limites des harmoniques doivent être fixés de telle manière que les appareils sensibles puissent les supporter après des investissements raisonnables. Suivant l'appareil perturbé, on distingue les effets de longue ou de courte durée. Pour les premiers, par exemple les effets thermiques dans les moteurs et les condensateurs, on tient compte des valeurs moyennes (valeurs efficaces) durant une certaine période (de quelques minutes à 1 heure). Pour les seconds, par exemple dans le cas des régulations électroniques et des récepteurs de télécommande, on tient compte des valeurs maximales. Il faut noter qu'en plus du régime stationnaire ou quasi-stationnaire, les tensions harmoniques montrent souvent des pointes de très brèves durées (moins d'une seconde). On distingue aussi les cas où l'ensemble des harmoniques intervient (par exemple pour les condensateurs) de ceux où seul un ou quelques harmoniques seulement interviennent (par exemple pour les condensateurs lors de résonances marquées ou pour les récepteurs de télécommande centralisée et les moteurs).

3.3 Les mêmes limites sont-elles valables pour les réseaux de distribution basse tension et pour les réseaux moyenne tension? Il faut noter à ce propos que les tensions harmoniques dans le réseau basse tension résultent d'une production locale et d'un transfert à partir du réseau moyenne tension. Les tensions harmoniques sont donc, en principe, plus faibles au niveau moyenne tension qu'au niveau basse tension, ce qui est confirmé par l'observation. En Suisse, le niveau des harmoniques dans les réseaux moyenne tension correspond en moyenne à 60–80 % du niveau présent dans les réseaux basse tension.

3.4 Les limites sont valables pour le point de raccordement de l'abonné au réseau, par exemple au point de comptage. A l'intérieur de son installation, par exemple dans un réseau d'usine ou dans une installation de redresseurs, l'utilisateur peut convenir avec le fabricant des appareils d'autres valeurs admissibles.

4. Proposition pour un spectre des tensions harmoniques admissibles

Le tableau I et la figure 1 présentent une proposition relative au niveau admissible des tensions harmoniques dans les réseaux basse tension. Il faut comprendre les valeurs de la manière suivante: *elles représentent les limites des tensions harmoniques admises dans les réseaux basse tension, compte tenu d'une très faible probabilité de dépassement dans le temps et quant au lieu.*

Niveau admissible des tensions harmoniques dans les réseaux basse tension en fonction de la tension nominale Tableau I

Rang de l'harmonique (ν)	Fréquence (Hz)	Harmoniques impairs, non multiples de 3, P–N ou P–P	Harmoniques impairs multiples de 3, P–N	Harmoniques pairs, P–N ou P–P
2	100			1,25
3	150		4,5	
4	200			1,0
5	250	5,0		
6	300			0,65
7	350	4,5		
8	400			0,5
9	450		0,75	
10	500			0,4
11	550	3,0		
12	600			0,35
13	650	2,5		
14	700			0,3
15	750		0,3	
16	800			0,25
17	850	1,25		
18	900			0,25
19	950	1,15		
20	1000			0,25
21	1050		0,3	
22	1100			0,25
23	1150	0,9		
24	1200			0,25
25	1250	0,8		
26	1300			0,25
27	1350		0,3	
28	1400			0,25
29	1450	0,6		
30	1500			0,25
31	1550	0,6		
32	1600			0,25
33	1650		0,3	
34	1700			0,25
35	1750	0,6		
36	1800			0,25
37	1850	0,6		
38	1900			0,25
39	1950		0,3	
40	2000			0,25

P–N Phase–Neutre P–P Phase–Phase
Pour les indications relatives aux réseaux moyenne tension ou aux dépassements occasionnels et de courte durée: voir texte

En prévision des dépassements aléatoires possibles, il est recommandé de dimensionner les appareils à connecter au réseau de telle manière qu'ils supportent sans dommage des augmentations de 20 % durant une période de $^1/_4$ s à quelques secondes. Les phénomènes de plus courte durée et les «spikes» ne sont pas considérés.

Dans les réseaux moyenne tension, on admettra 80 % de la valeur retenue pour les réseaux basse tension, pour chaque rang d'harmonique non multiple de 3 (les harmoniques dont le rang est un multiple de 3 n'apparaissent en général pas dans les réseaux moyenne tension).

Le fonctionnement des appareils sensibles sera garanti par une marge de protection comprise entre leur seuil d'immunité et ces limites et par des mesures de protection supplémentaires (par exemple des mesures de codage). Le type et le degré de

protection tiendront compte des conditions spécifiques à chaque cas et seront fixés par le fabricant.

A notre avis, le calcul classique du taux global de distorsion obtenu par la sommation des carrés de chaque harmonique n'est pas un critère valable pour fixer des valeurs admissibles. En effet, ce paramètre n'est utilisable pour juger de l'effet des harmoniques sur aucun des différents appareils influencés tels que moteurs, condensateurs, etc. Bien au contraire, à chaque appareil correspond un critère de sommation qui lui est propre (voir chapitre 6).

Les tensions perturbatrices dont les fréquences sont situées entre les harmoniques sont à limiter de telle manière qu'elles ne perturbent pas les récepteurs de télécommande. Il faut analyser les conditions de cas en cas: d'une part, il faut tenir compte de la tension de non-fonctionnement de ceux-ci et de leur courbe limite de perturbation; d'autre part il faut tenir compte de la fréquence et de l'amplitude des tensions perturbatrices telles que les tensions issues de télécommandes voisines.

5. Aperçu du réseau actuel

Pour que les spectres des tensions limites puissent être appliqués, ils doivent concorder avec les conditions d'exploitation du réseau. En particulier, les constatations suivantes sont à noter:

– *harmonique de rang 3 (150 Hz)*: l'expérience montre que cet harmonique est élevé (lampes à décharge, récepteurs de télévision). Il est cependant inférieur à l'harmonique de rang 5, ne recevant pas de contribution importante depuis le niveau moyenne tension (environ 0,5 à 1% de moins que l'harmonique de rang 5). Dans les réseaux moyenne tension sans mise à la terre, il ne présente que des valeurs réduites. On a admis une valeur de 4,5%.

– *harmonique de rang 5 (250 Hz)*: l'expérience montre que c'est l'harmonique le plus élevé. Les niveaux maxima mesurés se situent aux environs de 3% (cas de résonance exclus). La tension admissible a été fixée à 5%.

– *harmonique de rang 7 (350 Hz)*: cet harmonique est également élevé, cependant moins que l'harmonique de rang 5. On a admis une valeur de 4,5%.

– *harmoniques de rangs impairs, du rang 11 (550 Hz) au rang 39 (1950 Hz)*: les tensions harmoniques diminuent lorsque le rang augmente: toutes les sources d'harmoniques ont en effet une amplitude décroissante en fonction de la fréquence. De plus, on constate une compensation due à la répartition statistique des phases de chaque source. Au-dessus de 1000 Hz les tensions harmoniques sont en général très faibles en l'absence de résonance. Contrairement à la théorie, on doit s'attendre à d'éventuelles asymétries pour certains couples de fréquences (harmoniques de rangs 11/13, 17/19). Pour les fréquences supérieures à l'harmonique de rang 21, la présente proposition retient un niveau admissible d'au-moins deux fois la limite tolérée par la règle UCS pour chaque installation individuelle, c'est-à-dire deux fois la valeur CENELEC-EN 50006.

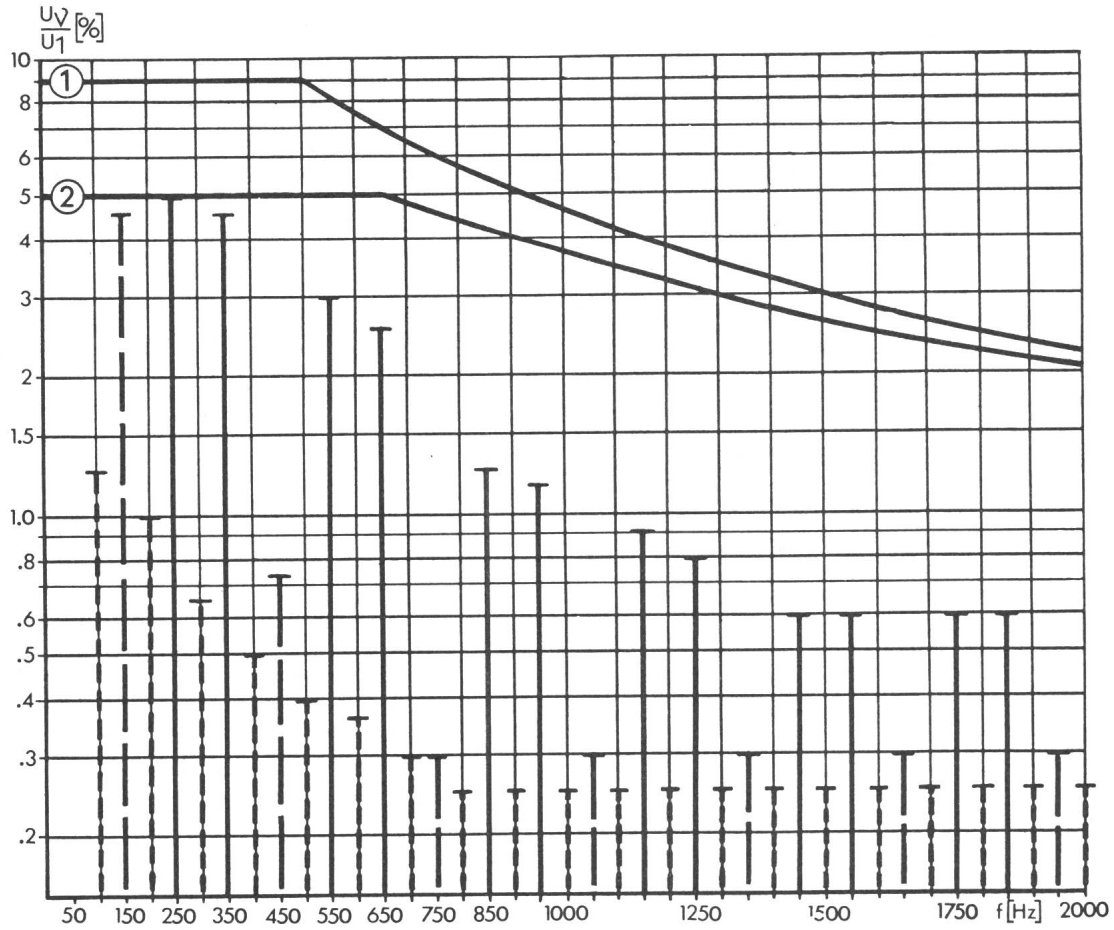

Fig. 1 Proposition pour le niveau admissible des tensions harmoniques dans les réseaux basse tension

① «Courbe de Meister»: tension admissible de télécommande centralisée pour récepteurs de radio et télévision

② CEI-Publication 146–2 (1974), convertisseurs autocommutés à semi-conducteurs

– *harmoniques de rangs impairs ≧41 (2050 Hz):* ce domaine de fréquences n'a pas encore été analysé et l'on a renoncé, pour l'instant, à fixer des limites.

– *harmoniques de rangs impairs et multiples de 3:* mis à part l'harmonique de 150 Hz, ils étaient très faibles jusqu'à l'expansion de l'électronique de puissance. Avec la généralisation dans les ménages des appareils électroniques monophasés d'une certaine puissance, on doit s'attendre à une élévation du niveau des harmoniques de rangs 9 et 15. Il en est tenu compte dans le spectre proposé.

– *harmoniques de rangs pairs:* les mesures effectuées jusqu'à présent dans les réseaux montrent principalement l'effet dû aux récepteurs de télévision avec alimentation à redressement asymétrique. Il a fallu tenir compte de valeurs relativement élevées à 100 et 200 Hz. Aux fréquences plus hautes, grâce à la diminution d'amplitude et à la compensation de phase plus marquée, les tensions résultantes sont faibles. Les récepteurs de télévision futurs vont utiliser des redressements symétriques qui diminueront les harmoniques de rangs pairs. Par contre il faut noter que certains phénomènes transitoires ou les appareils d'électronique de puissance à régulation asymétrique peuvent produire des harmoniques de rangs pairs.

Pour tenir compte encore de futurs appareils producteurs d'harmoniques, il a fallu prévoir en établissant les limites une réserve adéquate par rapport aux harmoniques actuels. Les mesures d'harmoniques dans les réseaux suisses montrent qu'une telle réserve existe en fait pour les rangs impairs. Par contre elle est très petite pour les rangs pairs, elle n'existe presque plus à 100 et 200 Hz.

La question de l'opportunité de cette réserve amène les remarques suivantes:

– dans les réseaux basse tension la production de tensions harmoniques par les appareils électro-domestiques sera limitée par la norme européenne ASE-EN 50006. On pourra continuer à brancher les gradateurs de lumière et les appareils électroménagers usuels à réglage de phase à condition que les harmoniques provenant des récepteurs de télévision n'augmentent plus fortement. Dans les installations du commerce et de la petite industrie, les entreprises électriques suisses appliquent actuellement des recommandations prescrivant que les élévations des tensions harmoniques au point de raccordement au réseau public ne doivent pas dépasser les valeurs dites «limites CENELEC EN 50006». La réserve prévue permettra le raccordement de nouvelles installations de ce genre mais leur nombre et leur puissance dépendront des conditions locales du réseau.

– dans les réseaux moyenne tension, les installations productrices d'harmoniques sont soumises soit aux recommandations UCS, soit à des conventions particulières. La réserve prévue permettra le raccordement de nouvelles installations, mais leur nombre et leur puissance dépendront aussi des conditions locales.

6. Comparaison avec le niveau d'immunité des machines et appareils perturbés

La proposition analyse dans ce chapitre le comportement des machines et des appareils les plus sensibles aux harmoniques, pour vérifier si les limites fixées sont comparables avec leurs niveaux d'immunité et si elles n'entraînent pas des situations difficiles.

Cas des moteurs asynchrones: les tensions harmoniques peuvent influencer les moteurs asynchrones de diverses façons: pertes supplémentaires, moments oscillatoires, bruit. En pratique l'échauffement supplémentaire des enroulements du rotor s'avère être le facteur le plus important, en particulier pour les moteurs à cages à effet pelliculaire où des augmentations de température inacceptables pourraient apparaître. Une prescription fixant les harmoniques admissibles ne doit pas entraîner des conséquences significatives sur la durée de vie des machines. L'échauffement moyen supplémentaire ne devrait pas dépasser une valeur définie dans une période donnée (par exemple 5 %/24 h). Un échauffement supplémentaire de plus courte durée ne devrait pas non plus dépasser une certaine limite (par exemple 8 %).

L'influence des harmoniques dépend très fortement de la construction de la machine et on ne peut donner ici que des critères généraux. Les tensions harmoniques sont acceptables si

– les valeurs individuelles du tableau I ne sont pas dépassées;

– l'effet global évalué par la formule de pondération suivante ne dépasse pas, pour les moteurs triphasés, les valeurs indiquées:

$$\alpha = 5 \cdot 10^4 \sum_{\nu} \left(\frac{U_\nu}{U_{50}}\right)^2 \cdot \frac{1}{\nu^2}, \text{ en } \% \qquad \nu = 5, 7, 11, 13$$

α ne doit pas dépasser 8 % au maximum.
α ne doit pas dépasser 5 % en moyenne sur 24 heures.
Remarque: dans ce cas, on peut négliger les harmoniques supérieurs au rang 13 (> 650 Hz).

La première condition est alors tout juste remplie (7,6 % à la place de 8 %) avec les limites proposées dans le tableau I. La deuxième condition devrait être également remplie dans les réseaux de distribution publique, compte tenu des variations du niveau au cours de la journée. Par exemple, elle est remplie si les harmoniques de rangs 5, 7, 11 et 13 n'atteignent chacun que 80 % des valeurs du tableau I, ou si le seul harmonique présent de rang 5 est en permanence au maximum admissible de 5 %.

Remarque: La publication 34–1 de la CEI «Machines électriques tournantes» (Règle ASE 3009) se borne à dire qu'en l'absence d'accords particuliers on considère la machine branchée à un réseau de tension pratiquement sinusoïdale. «Une courbe de tension est considérée comme pratiquement sinusoïdale, si aucune des valeurs instantanées de l'onde ne diffère de la valeur instantanée de l'onde fondamentale, observée au même moment, de plus de 5 % de la valeur maximale de l'onde fondamentale.» Une révision de cette publication devrait analyser de manière plus détaillée le problème des harmoniques.

Cas des machines synchrones: les machines synchrones sont également soumises aux effets des harmoniques du réseau. L'échauffement de l'enroulement amortisseur est le critère le plus important. Il faut noter que seuls les niveaux présents dans le réseau haute tension, c'est-à-dire des niveaux déjà réduits à 80 %, ont une influence sur ces machines et que ces valeurs sont encore abaissées à environ 60 % par les transformateurs intermédiaires. L'échauffement supplémentaire causé par les tensions harmoniques proposées devrait ainsi rester faible.

Cas des transformateurs: les harmoniques entraînent une légère augmentation des pertes fer, pratiquement négligeables

pour les niveaux proposés. Il n'existe d'ailleurs aucune prescription à ce sujet. Il serait important d'analyser l'influence de ces tensions sur le bruit des transformateurs.

Cas des condensateurs: la publication 70 de la CEI (Règle ASE 3011) prescrit que les condensateurs de puissance en fonctionnement permanent doivent être dimensionnés pour une tension dont la valeur efficace ne dépasse pas 1,1 fois la tension nominale. De même elle prescrit un courant dont la valeur efficace ne dépasse pas 1,3 fois l'intensité qui se présente sous la tension sinusoïdale nominale et à la fréquence nominale. Tous les harmoniques de rangs impairs proposés dans le tableau I et une tension de réseau supérieure de 10% à la tension nominale exercent sur les condensateurs une contrainte de $U_{eff} = 1{,}104\ U_n$ et $I_{eff} = 1{,}4\ I_n$. La valeur efficace de la tension n'est donc que peu influencée par les harmoniques. Par contre la valeur efficace du courant dépasse la valeur prescrite $1{,}3\ I_n$.

Les mesures effectuées dans les réseaux rendant peu vraisemblable l'hypothèse que tous les harmoniques atteignent en même temps et pour une longue durée leur valeur maximale, on peut attendre une charge en courant inférieure aux limites admissibles.

Ce sont les pertes qui déterminent l'échauffement du diélectrique d'un condensateur. En admettant que le facteur de pertes soit constant dans la bande de fréquences considérée, on obtient pour les valeurs de tensions harmoniques proposées dans le cas d'une élévation de tension de réseau d'environ 10%: $Q = 1{,}28\ Q_n$ où $Q_n = U_n \cdot I_n$. Comme l'essai de stabilité thermique est effectué avec une puissance de 1,44 fois la puissance nominale, la surcharge thermique due aux harmoniques n'est pas critique.

On peut admettre que la tension sur les condensateurs disparaît presque entièrement pour les fréquences plus élevées grâce aux inductances du réseau. Il ne faut pas oublier cependant le danger de résonances. On les évitera par des mesures appropriées.

Cas des systèmes électroniques: ce terme englobe aussi bien les systèmes électroniques pour le traitement des informations que les systèmes électroniques de puissance (VDE 0160/77). Les tensions harmoniques peuvent déranger les dispositifs de régulation et d'alimentation électroniques. En électronique de puissance, elles peuvent influencer les conditions de commutation lorsqu'elles déplacent le passage à zéro de la tension. Selon la publication CEI 146–2 «Convertisseurs autocommutés à semi-conducteurs» les installations doivent être dimensionnées de manière à pouvoir fonctionner dans les conditions suivantes: le taux global de distorsion ne doit pas dépasser 10% et le niveau admissible pour chaque harmonique est de 5% maximum jusqu'à 650 Hz, puis il descend jusqu'à 1% à 5000 Hz. Les limites relatives à chaque harmonique au-dessus de 350 Hz sont parfois considérablement plus élevées que les exigences de la présente proposition, qui ne devrait donc rencontrer aucune difficulté d'application.

Cas des compteurs électriques: les harmoniques entraînent des erreurs supplémentaires dans les compteurs, erreurs dues aussi bien à des harmoniques de tension qu'à des harmoniques de courant. Des essais sur divers types de compteurs à induction de classe 2 ont donné les résultats approximatifs suivants:

– avec un harmonique de rang 3 de 5% en tension et en courant (par exemple sur une charge ohmique), on peut obtenir une erreur additionnelle de l'ordre de $\leqq \pm 0{,}6\%$

– avec un harmonique de rang 3 de 10% en tension et en courant l'erreur additionnelle pourrait être de l'ordre de $\leqq \pm 1{,}5\%$

– avec un harmonique de rang 5 de 5% l'erreur additionnelle pourrait être d'environ $\leqq \pm 0{,}3\%$; avec un harmonique de rang 5 de 10% l'erreur additionnelle pourrait être d'environ $\leqq \pm 1\%$

– avec un harmonique de rang 7 de 5% l'erreur additionnelle pourrait être d'environ $\leqq \pm 0{,}2\%$; avec un harmonique de rang 7 de 10% l'erreur additionnelle pourrait être d'environ $\leqq \pm 1\%$

La présente proposition limitant les harmoniques à 5%, les erreurs additionnelles sont acceptables. Par contre, les erreurs additionnelles dues à des tensions harmoniques plus élevées pourraient être trop grandes dans certaines circonstances.

Les compteurs à induction de précision sont moins sensibles aux harmoniques que les compteurs standards: dans ce cas aussi, on peut accepter les valeurs proposées. Les compteurs statiques de précision, qui traitent les valeurs instantanées de U et I, ne sont en principe pas influencés par les harmoniques et mesurent presque sans erreur.

Cas des récepteurs de télécommande centralisée: les tensions harmoniques de grande amplitude peuvent influencer (élever ou abaisser) le niveau de fonctionnement du circuit d'entrée des récepteurs.

Dans le cadre du comité CENELEC TC 102 «Récepteurs de télécommande centralisée», un document d'harmonisation est à l'étude. Il propose un spectre de tensions harmoniques pour les essais de ces appareils. Les valeurs fixées dans ce document sont en partie très élevées; toutefois il est explicitement mentionné qu'on ne doit pas les considérer comme les niveaux d'harmoniques admissibles dans le réseau mais comme valeurs d'essai. Le test des récepteurs en présence d'harmoniques s'effectue de deux manières: on considère soit un seul harmonique voisin de la fréquence de télécommande au niveau élevé donné soit simultanément trois harmoniques voisins de la fréquence de télécommande. Dans ce deuxième cas les niveaux vont être multipliés par le facteur 0,6; ainsi réduits, ces niveaux concordent presque avec la présente proposition.

Ces harmoniques influencent peu le comportement des récepteurs modernes, en particulier la tension de seuil de leur circuit d'entrée. Par contre ils peuvent, selon les circonstances, perturber les premières générations de récepteurs. Dans les réseaux équipés de tels récepteurs, on devra prévoir des prescriptions pour les fréquences perturbatrices.

Cas des ordinateurs et des calculateurs de processus: les constructeurs ont entre autres les exigences suivantes quant aux harmoniques de la tension d'alimentation des calculateurs: le facteur de distorsion en marche à vide doit être inférieur à 3% (DEC), ou à 5% (IBM); ou bien le rapport valeur de crête – valeur efficace doit demeurer dans les limites $1{,}41 \pm 7\%$ (CDC).

Ces exigences sont très sévères: par exemple, la première condition limitant l'ensemble des harmoniques à 5% ne permet qu'un niveau de 3,5% pour les harmoniques de rangs 5 et 7 apparaissant simultanément. La deuxième condition limite à 7% la somme arithmétique de tous les harmoniques en tenant compte de leur phase. La probabilité que cette limite soit dépassée en de nombreux endroits n'est pas négligeable. Un abaissement des niveaux des tensions harmoniques à cause de ces appareils entraînerait, à notre avis, des conséquences économiques inadmissibles pour les producteurs d'harmoniques, plus nombreux. Jusqu'à présent, on ne connaît pas de tels dérangements dus aux harmoniques. S'il devait cependant

s'en produire, il serait plus judicieux que les constructeurs d'ordinateurs et de calculateurs de processus prennent les mesures nécessaires pour élever le seuil d'immunité de leur appareils ou qu'ils prévoient des alimentations indépendantes.

Cas de l'électronique grand public: les récepteurs radio et les amplificateurs sont en général insensibles aux niveaux des tensions harmoniques proposés, ces fréquences n'étant pas transmises jusqu'à l'étage de sortie. Les variations d'amplitude de la tension d'alimentation peuvent provoquer dans les récepteurs de télévision noir-blanc dépourvus de régulateurs de tension des fluctuations de la grandeur de l'image et de sa luminosité. Les harmoniques stables n'ont pas de conséquences perturbatrices. Par contre, des fluctuations permanentes pourraient avoir un effet désagréable. Les fluctuations admissibles restent à déterminer.

Les récepteurs de télévision couleur sont moins sensibles, étant pourvus de stabilisateurs de tension.

La courbe limite (appelée «courbe de Meister»), établie autrefois en rapport avec les perturbations des récepteurs de radio et de télévision par les tensions à fréquences audibles des installations de télécommande centralisée peut servir de référence pour les perturbations dues aux fréquences des harmoniques. La «courbe de Meister» se trouve bien au-dessus des niveaux proposés ici (fig. 1).

Cas de l'exploitation des réseaux: d'après les connaissances actuelles, les niveaux des harmoniques proposés n'ont aucune influence sur l'exploitation normale du réseau. Il faut examiner principalement les effets en relation avec les défauts à la terre.

Dans les réseaux moyenne et haute tension, les harmoniques élèvent le courant de terre résultant. Dans les réseaux avec le point neutre isolé ou mis à la terre de manière rigide, cette influence est négligeable. Même dans les plus grands réseaux câblés, le courant résultant de défaut à la terre n'est augmenté que de 10 à 15 % au maximum.

Il en va autrement dans les réseaux avec mise à la terre par bobine d'extinction. Dans ces réseaux, qui sont principalement des réseaux moyenne tension, le courant capacitif 50 Hz de défaut à la terre est réduit à une faible valeur grâce à la résonance à 50 Hz avec cette bobine. Les courants harmoniques, eux, ne sont pas compensés et s'écoulent au lieu du défaut où ils provoquent une augmentation du courant résiduel. Ils peuvent même devenir une partie prépondérante de ce courant. Des calculs relatifs à un exemple de réseau suisse ont montré que la composante due aux harmoniques peut élever 2 à 3 fois la valeur efficace du courant résiduel au cas où les quatre premiers harmoniques de rangs impairs atteignent le niveau maximal admis pour la moyenne tension. On demeure encore en-dessous de la limite de dimensionnement des installations de mise à la terre (30 A), cependant sans grande réserve. Les niveaux proposés pour les réseaux moyenne tension sont donc aussi acceptables dans le cas de la mise à la terre du point neutre avec bobine d'extinction, particulièrement si l'on pense peu vraisemblable une apparition simultanée de tous les harmoniques avec leur niveau maximal. Toutefois, des valeurs plus élevées ne seraient plus admissibles, car elles entraîneraient des courants résiduels trop importants dans les dispositifs de mise à la terre.

7. Résumé

Face au problème des perturbations engendrées par les harmoniques, il est nécessaire de disposer d'une base d'appréciation commune à tous les intéressés (perturbateurs, perturbés, entreprises électriques). Dans ce but, la Commission propose deux spectres des niveaux des tensions harmoniques admissibles dans les réseaux basse et moyenne tension. Toutefois, le rapport attire l'attention sur la distribution statistique de leur apparition géographiquement et dans le temps. On admet que les valeurs limites peuvent être exceptionnellement dépassées lorsque cette probabilité demeure faible. La proposition tient encore compte des lois relatives à l'apparition de tensions harmoniques dans les réseaux. Elle prévoit aussi une réserve adéquate par rapport aux niveaux maxima actuels en vue des appareils et des installations à venir.

Dans l'optique des perturbés on a vérifié la compatibilité de la proposition avec leur niveau d'immunité actuel. Pour quelques appareils cependant, il serait indiqué de prévoir des améliorations ou même une révision de certains règlements. Si tous les harmoniques n'apparaissent pas en même temps à leur niveau maximal, ce qui est probable, il ne devrait surgir aucun problème dans les cas suivants: systèmes électroniques, compteurs électriques, récepteurs de télécommande centralisée modernes, électronique grand public, condensateurs, exploitation normale des réseaux ou en cas de défaut à la terre. Par contre les limites d'immunité devraient être revues pour certains appareils, par exemple certains moteurs asynchrones (une révision de la publication CEI à ce sujet serait souhaitable car elle ne correspond plus à la réalité) ou les ordinateurs et calculateurs de processus (les données des fournisseurs sont très prudentes).

Tout bien pesé cette proposition semble équilibrée et acceptable pour tous les intéressés. Ainsi elle aurait atteint son but: créer une base d'appréciation commune.

Bibliographie

[1] Beeinflussung in Netzen durch Einrichtungen der Leistungselektronik. Informationstagung, 12. und 13. November 1974, Zürich. Zürich, SEV/VSE, 1974.

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

Adresse des auteurs

Commission pour l'étude des perturbations en basse fréquence, c/o ASE Association Suisse des Electriciens, secrétariat du CES, case postale, 8034 Zürich.

Auteur dans le cadre de la Commission: *G. Goldberg*, ing. dipl., c/o LGZ Landis & Gyr Zug AG, 6301 Zug.

Version française: *G. Goldberg*, auteur, et *H. Sauvain*, ing. dipl., c/o Condensateurs Fribourg Holding, 1700 Fribourg.