

## CONCEPTION OPTIMALE DE FILTRES PASSIFS DESTINES A AMELIORER LA QUALITE DE L'ENERGIE REQUISE PAR UN RESEAU DE TRACTION URBAINE

Lucian MANDACHE, Ioana Gabriela SÎRBU, Mircea Emilian ARDELEANU

*Université de Craiova, Faculté de l'Électrotechnique, Roumanie; lmandache@elth.ucv.ro*

**Résumé** – L'article présente une des dernières contributions des auteurs au domaine de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique requise par une sous-station de distribution pour le réseau urbaine de traction électrique en courant continu (tramway). L'élément non linéaire à l'origine des problèmes graves de qualité est un pont redresseur de puissance triphasé, à diodes. De plus, le transformateur de distribution qui travaille sous charge partielle la plupart du temps est à l'origine d'un facteur de puissance faible. La solution choisie pour cette étude est un réseau de filtres passifs ayant deux fonctions: minimisation du contenu harmonique du courant de ligne et la compensation de la puissance réactive fournie par le réseau. L'article montre les principes d'une méthode pratique, soutenue par simulation numérique au domaine de temps, de conception optimale d'un filtre qui assure le facteur de distorsion harmonique et le facteur de puissance désirés.

**Mots clés:** *filtre passif, qualité de l'énergie électrique, traction électrique urbaine, simulation numérique.*

### 1. INTRODUCTION

La topologie classique d'une sous-station de distribution pour un réseau urbaine de traction électrique en courant continu, bâtie il y a plus de vingt ans, consiste dans un transformateur de puissance moyenne / base tension qui transfère la puissance du réseau vers un pont redresseur à diodes. La sortie du redresseur est liée aux sections du réseau de courant continu, entre la voie ferrée et la ligne aérienne de contact. C'est aussi le cas du réseau de Craiova, ayant trois telles sous-stations.

Il est bien connu que le transformateur de puissance exige toujours une puissance réactive constante par rapport à la charge, nécessaire à la magnétisation. D'autre part, le redresseur, comme charge fortement non linéaire, endommage d'une manière sévère le contenu harmonique du courant de ligne. Par conséquent, la qualité de l'énergie électrique requise du réseau devient assez mauvaise pour conduire aux effets techniques négatifs spécifiques [1-3]. Quant aux effets économiques, le fournisseur de l'énergie applique de pénalités pécuniaires importantes, conformément aux normes européennes, tel que l'énergie utile devient très coûteuse.

La situation devient de plus en plus grave, à la suite des considérations suivantes. Durant les dernières années, la plupart de voitures-tramway a été modernisée, elles ont devenu plus performantes et plus économiques (l'économie d'énergie augmente vers 40% au niveau d'une nouvelle voiture roulant en mêmes conditions que les vieilles [4]). De plus, le besoin de transport urbain dans les villes roumaines a diminué, tel que l'ensemble du réseau, conçu autrefois pour une certaine puissance, travaille maintenant sous charges partielles, souvent inférieures à la moitié de la puissance nominale (conformément aux estimations de la Régie de Transport de Craiova à l'aide de certaines essais expérimentales réalisés par les auteurs). Par conséquent, la puissance de magnétisation du transformateur étant la même (et dominante par rapport à la puissance réactive totale nécessaire dans le système), le facteur de puissance partie réseau moyenne tension diminue. Dans les conditions mentionnées, un calcul facile nous conduit à un facteur de puissance inférieur à la valeur 0.6, même si en pleine charge il touchait la valeur 0.93.

Plusieurs solutions techniques ont été proposées, ayant comme but l'amélioration de la qualité de l'énergie décrite ci-dessus. La solution optimale de point de vue technique est de remplacer tout l'équipement électrique de la sous-station de distribution, en utilisant un transformateur proprement conçu et un redresseur à découpage réversible, non déformant et capable de corriger le facteur de puissance [5,6]. Ceci est très sophistiqué et très coûteuse pour être mise en pratique.

Une autre catégorie de solutions, beaucoup moins chères, préservent l'équipement actuel, en ajoutant d'équipements supplémentaires destinés à améliorer la qualité de l'énergie. Ce sont les filtres passifs, filtres actifs ou les filtres hybrides [7-10].

### 2. FILTRES PASSIFS

Nous allons nous y concentrer sur les filtres passifs avec plusieurs cellules de type LC, en appréciant, en première instance, leur simplicité constructive, robustesse et fiabilité. Telles filtres assurent les deux fonctions nommées ci-dessus. Leur principe de fonctionnement est amplement traité dans la

littérature technique [8,10]. En fait, une cellule LC série est une impédance résonante sur la fréquence d'une composante harmonique. Elle représente un court-circuit pour la composante harmonique du courant générée par la charge non linéaire, qui ne va passer plus vers le réseau de puissance. Si les principales composantes harmoniques du courant sont filtrées de cette façon, alors la distorsion harmonique du courant de ligne peut diminuer jusqu'à un niveau désiré. Parce que la forme d'onde du courant de ligne du redresseur à commutation naturelle possède un spectre harmonique bien défini, incluant les composantes d'ordres  $6k \pm 1$ ;  $k = 2, 3, \dots$ , alors les cellules du filtre peuvent être précisément conçues. D'autre part, les bobines du filtre

représentent d'impédances minces pour la fréquence fondamentale, tel que l'impédance de chaque cellule est, en effet, capacitive pour la fondamentale. Par conséquent, les batteries de condensateurs des cellules assurent la puissance réactive nécessaire sur la composante fondamentale.

La topologie d'une charge non linéaire de type pont redresseur ajouté par un filtre passif à six cellules est présenté dans la figure 1. Le schéma contient aussi l'impédance du réseau incluant l'impédance de court-circuit du transformateur de puissance.

Pour l'application étudiée, le filtre passif reste toujours branché; il ne nécessite aucun circuit de commande ou élément de commutation (contacteur) pour chaque cellule.

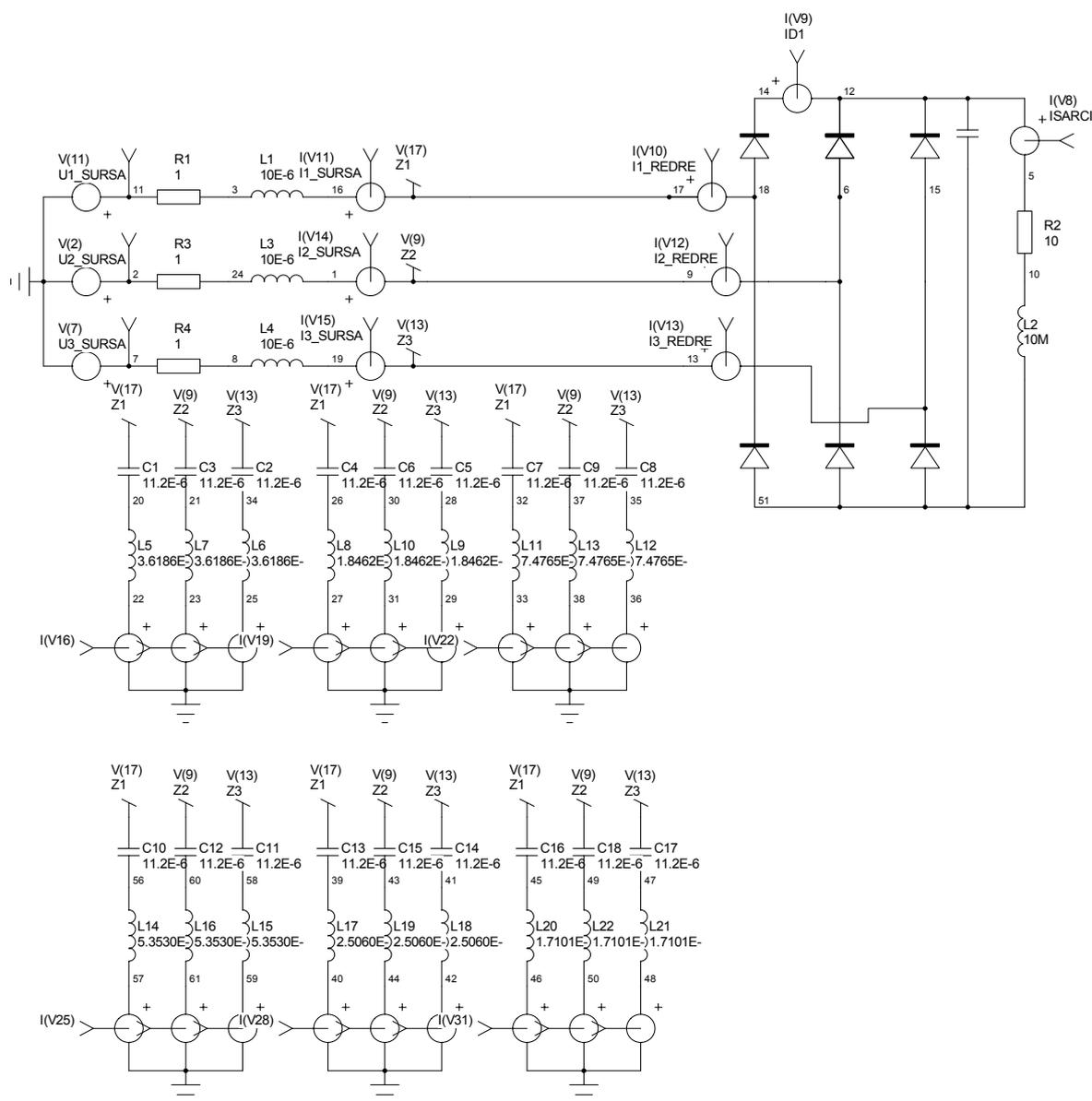


Figure 1: Topologie d'un redresseur avec filtre passif. Schéma de simulation SPICE.

### 3. CONCEPTION ET SIMULATION NUMERIQUE

La conception du filtre, assisté par l'ordinateur, est soutenue par une simulation numérique au domaine de temps, à l'aide du logiciel SPICE, basé sur le schéma de simulation de la figure 1 qui reproduit à l'échelle les paramètres réels.

Le processus commence avec l'analyse harmonique du courant de ligne en absence du filtre, basée sur la transformation de Fourier rapide [11], voir fig. 2 et tableau 1. On y montre le spectre harmonique d'un courant obtenu par simulation numérique à partir du schéma de la figure 1, où les cellules du filtre étaient isolées. Pour les cas réels, on a besoin de la décomposition harmonique des courants mesurés directement dans l'équipement.

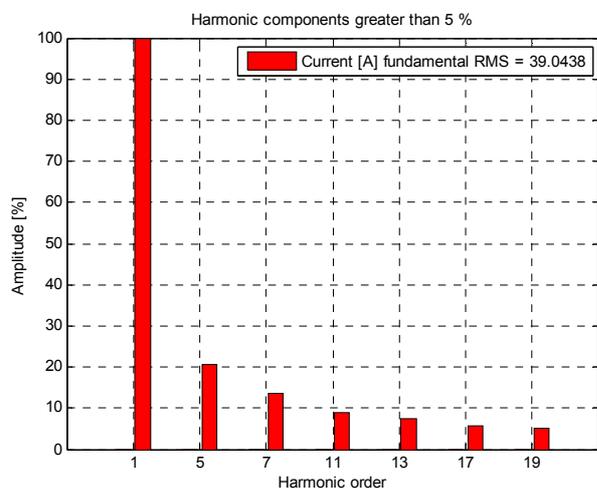


Figure 2: Spectre harmonique du courant de ligne du redresseur.

Ordre	Valeur crête [A]	Phase [deg]	Pourcentage [%]
1.0000e+000	5.5216e+001	-1.2136e+000	1.0000e+002
5.0000e+000	1.1433e+001	1.7157e+002	2.0705e+001
7.0000e+000	7.4656e+000	1.7735e+002	1.3521e+001
1.1000e+001	4.9074e+000	-1.1229e+001	8.8875e+000
1.3000e+001	4.1126e+000	-1.1263e+001	7.4481e+000
1.7000e+001	3.1057e+000	1.6314e+002	5.6247e+000
1.9000e+001	2.7764e+000	1.6144e+002	5.0283e+000

Tableau 1: Spectre harmonique du courant de ligne du redresseur, en valeurs numériques.

La capacité totale de toutes les six batteries de condensateurs doit fournir la puissance réactive nécessaire. On choisit de capacités identiques, conformément aux raisons économiques. L'inductance de chaque bobine résulte de la condition de résonance de tension de la cellule correspondante:

$$L_v = \frac{1}{4\pi^2 f^2 v^2 C},$$

où  $v$  représente l'ordre de la composante harmonique filtré et  $f$  est la fréquence fondamentale. Le calcul thermique des bobines est imposé par les niveaux des composantes harmoniques des courants du tableau 1. Par conséquent, on obtient les paramètres constructifs des éléments du filtre présentés dans le tableau 2.

Ordre	5	7	11	13	17	19
$C$ [ $\mu$ F]	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2
$L$ [mH]	36.2	18.5	7.5	5.3	2.5	1.7

Tableau 2: Paramètres constructifs du filtre passif.

Les effets des cellules du filtre sur le courant de ligne sont montrés, de manière qualitative, dans la figure 3, obtenue par simulation. De haut en bas, on y a le courant non filtré, suivi par les formes d'onde obtenues par l'addition graduelle des filtres d'ordre 5, 7, ..., 19.

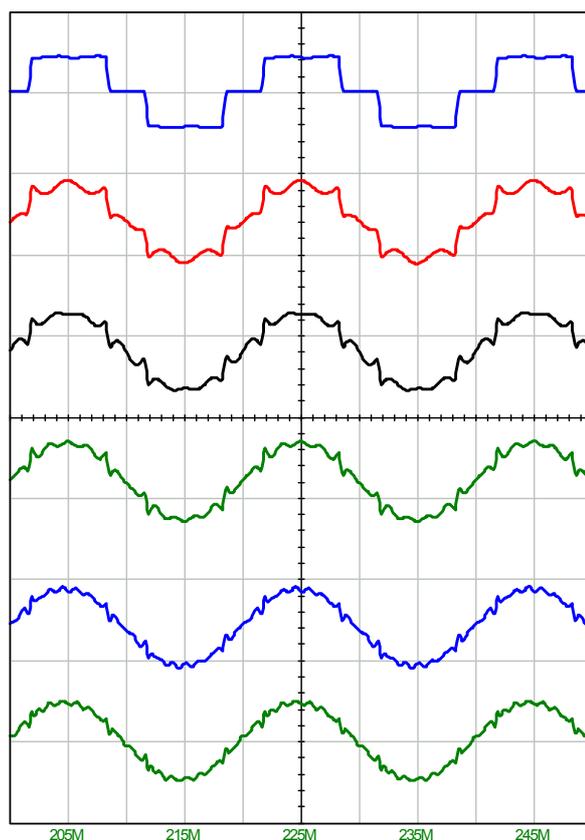


Figure 3: Le courant de ligne filtré graduellement (de haut en bas) par les filtres d'ordres 5, 7, ..., 19.

De cette façon, on a passé d'un facteur de distorsion totale de 28% à moins de 5%.

Évidemment, la méthode présentée nous permet de concevoir le filtre approprié à un facteur de distorsion désiré.

Durant les variations du courant de charge, son spectre harmonique reste le même, ainsi que la puissance de magnétisation du transformateur, tel que le filtre garde ses fonctions pour n'importe quel niveau de la charge. Conformément à la théorie connue des redresseurs, les essais expérimentaux réalisés au niveau d'une sous-station du réseau de transport de Craiova prouvent le niveau d'environ 28% du facteur de distorsion totale pour tout courant de charge (voir tableau 3).

Courant de ligne – valeur efficace [A]	100	150	250	400	600
THD [%]	30.5	28.5	27.5	26.5	26

Tableau 3: Facteur de distorsion harmonique mesurée pour différents valeurs du courant de ligne.

Le contenu harmonique du système triphasé de courants de ligne, mesuré à une certaine charge intermédiaire, est montré dans la figure 4, en prouvant le spectre simulé.

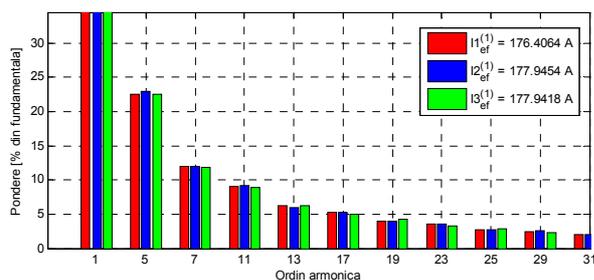


Figure 4: Contenu harmonique des courants de ligne déduit par essais expérimentaux.

#### 4. CONCLUSIONS

L'étude montre que la solution de filtrage passif est efficace, simple, robuste et moins coûteuse. Quant à la conception, elle-même est très facile et moins chère si on dispose d'outils adéquats d'analyse de qualité et de simulation numérique. La méthode exposée nécessite une analyse attentive de la qualité de l'énergie requise par l'équipement visé, y incluant une analyse harmonique performante des courants. La simulation numérique donne d'informations précises sur le contenu harmonique du courant filtré, tel qu'on peut choisir la topologie optimale d'un filtre qui assure le résultat désiré.

La méthode est soutenue par certaines essais expérimentaux réalisés dans une sous-station du réseau de transport urbain de Craiova, ayant comme but l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique fournie par la ligne de puissance.

#### Remerciements

Ce travail a bénéficié du support du Programme National Roumain de Recherche et Développement PN II.

#### Bibliographie

- [1] P. Pinato, D. Zaninelli, *Harmonic disturbances in electric traction system overhead lines*, 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2002, vol.2, pp. 748-753.
- [2] J. Arrillaga, M.H.J. Bollen, N.R. Watson, *Power quality following deregulation*, Proceedings of the IEEE, vol.88, no.2, pp.246-261, Feb 2000.
- [3] V. Leon-Martinez, J. Montanana-Romeu, J. Giner-Garcia, A. Cazorla-Navarro, J. Roger-Folch, M.A. Grana-Lopez, *Power quality effects on the measurement of reactive power in three-phase power systems in the light of the IEEE Standard 1459-2000*, 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU 2007, pp.1-6, 9-11 Oct. 2007.
- [4] P.M. Nicolae, I.D. Nicolae, L. Mandache, I.G. Sirbu, *Improved Technological Solution For Urban Transportation System By Tram*, Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion - SPEEDAM, Taormina, Italy, 23-26 May, 2006.
- [5] H.M. Suryawanshi, A.K. Kulwal, M.A. Chaudhari, V.B. Borghate, *High Power Factor Operation of a Three-Phase Rectifier for an Adjustable-Speed Drive*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 4, April 2008, pp. 1637-1646.
- [6] S. Bhim, G. Bhuvanawari, G. Vipin, *Improved power quality AC-DC converter for electric multiple units in electric traction*, Power India Conference, 2006 IEEE, 10-12 April 2006.
- [7] S.H. Hosseini, F. Shahnian, M. Sarhangzadeh, E. Babaei, *Power quality improvement of DC electrified railway distribution systems using hybrid filters*, Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2005., vol.2, no., pp. 1273-1277.
- [8] H. Fujita, H. Akagi, *A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.27, no.6, pp.1020-1025, Nov/Dec 1991.
- [9] A. Horn, R.H. Wilkinson, T.H.R. Enslin, *Evaluation of converter topologies for improved power quality in DC traction substations*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE '96, vol.2, no., pp.802-807 vol.2, 17-20 Jun 1996.
- [10] M. Peterson, B.N. Singh, P. Rastgoufard, *Active and Passive Filtering for Harmonic Compensation*, 40th Southeastern Symposium on System Theory, SSSST 2008, pp.188-192, New Orleans, 16-18 March 2008.
- [11] P.M. Nicolae, L. Mandache, Ileana-Diana Nicolae, Monica Săvulescu, *The accuracy of the energetic parameters determination for steady-states in distorting regimes*, Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2002, November 29, 2002, Bucharest, pp. 94-97.