



BILAN ENERGETIQUE ET EVALUATION DE L'APPORT D'UN FILTRE ACTIF FAT1 DANS UN SYSTEME INDUSTRIEL AVEC CHARGES NON LINEAIRES

Vunda Ngulumingi Christian¹, Meni Babakidi Narcisse², Kondatata Mbambu Jordan³, Tangenyi Okito Marcien⁴, Lembi Manima Baudri and Kinyoka Kabalumuna God'El⁴

¹Institut Supérieur de Techniques Appliquées de Kinshasa, Section Electricité, Kinshasa, RD Congo

²Institut Supérieur de Techniques Appliquées de Kinshasa, Section Electronique, Kinshasa, RD Congo

³Institut Supérieur de Techniques Appliquées de Kasangulu, Section Electronique, Kongo-Central, RD Congo

⁴Institut Supérieur de Techniques Appliquées de Gombe-Matadi, Section Electricité, Kongo-Central, RD Congo

⁵Institut Supérieur de Techniques Appliquées de Gombe-Matadi, Section Télécommunication, Kongo-Central, RD Congo

⁶Université Pédagogique Nationale, Faculté des Sciences, Département de Physique et Sciences Appliquées, Kinshasa, RD Congo

KeyWords

Active filter, harmonics, energy balance, distorting power, power factor, non-linear loads.

ABSTRACT

This study presents a detailed analysis of the energy balance of an industrial system including an asynchronous motor associated with a variable speed drive, before and after the insertion of an active filter FAT1. The analysis highlights the significant impact of harmonics generated by the non-linear load on the various power components. The results show that harmonics are responsible for 48% of the total losses in the power line and reduce the power factor from 0.995 to 0.830. The distorting energy represents nearly 90% of the total reactive energy, excessively straining the grid. The study demonstrates that harmonic compensation by an active filter would substantially reduce energy losses and improve the overall efficiency of the system.

Mots-clés

Filtre actif, harmoniques, bilan énergétique, puissance déformante, facteur de puissance, charges non linéaires.

RÉSUMÉ

Cette étude présente une analyse détaillée du bilan énergétique d'un système industriel comprenant un moteur asynchrone associé à un variateur de vitesse, avant et après l'insertion d'un filtre actif FAT1. L'analyse met en évidence l'impact significatif des harmoniques générées par la charge non linéaire sur les différentes composantes de puissance.

Les résultats montrent que les harmoniques sont responsables de 48 % des pertes totales dans la ligne d'alimentation et réduisent le facteur de puissance de 0,995 à 0,830. L'énergie déformante représente près de 90 % de l'énergie réactive totale, sollicitant excessivement le réseau. L'étude démontre que la compensation des harmoniques par un filtre actif permettrait de réduire substantiellement les pertes énergétiques et d'améliorer l'efficacité globale du système.

1. Introduction

Les systèmes électriques industriels modernes sont de plus en plus caractérisés par la présence de charges non linéaires, notamment les variateurs de vitesse, les redresseurs et les alimentations à découpage. Ces équipements, bien qu'essentiels pour le contrôle et l'efficacité des processus industriels, génèrent des courants harmoniques qui dégradent la qualité de l'énergie et entraînent des pertes supplémentaires dans les réseaux de distribution.

La BRALIMA, étudiée dans des travaux antérieurs, présente des défis majeurs en termes de qualité d'énergie et d'efficacité énergétique. Dans ce contexte, l'insertion de dispositifs de compensation tels que les filtres actifs devient une solution prometteuse pour atténuer les effets néfastes des harmoniques. Le filtre actif FAT1 représente une technologie avancée capable d'injecter des courants compensatoires pour neutraliser les harmoniques présentes dans le réseau [4].

Cette étude se propose d'évaluer l'apport énergétique du filtre actif FAT1 en comparant les performances du système avant et après compensation. L'objectif est de quantifier précisément les gains en termes de réduction des pertes, d'amélioration du facteur de puissance et d'optimisation de l'utilisation de la capacité du réseau.

2. Méthodologie

La méthodologie adoptée pour cette étude repose sur une approche analytique et comparative [4, 5]:

- **Mesures initiales:** Collecte des données électriques du système industriel (moteur asynchrone + variateur de vitesse) avant l'installation du filtre actif, à l'aide d'un analyseur de réseau EPL 103.
- **Caractérisation des harmoniques:** Analyse des taux de distorsion harmonique individuels (IHD) et calcul des courants harmoniques par rang.
- **Calcul des pertes:** Évaluation des pertes Joule dans la ligne d'alimentation, en considérant séparément les contributions du courant fondamental et des harmoniques, avec prise en compte de l'effet de peau.
- **Bilan de puissance:** Détermination des différentes composantes de puissance (active, réactive, apparente, déformante) et calcul du facteur de puissance réel.
- **Consommation énergétique:** Calcul des énergies consommées sur une heure de fonctionnement pour chaque composante de puissance.
- **Analyse comparative:** Évaluation théorique des bénéfices attendus de l'insertion du filtre actif FAT1, basée sur la réduction des harmoniques [2].

3. Résultats

3.1 Caractéristiques du système avant compensation

Les mesures initiales du système industriel révèlent les paramètres suivants:

- Puissance active : $P_T = 16,25$ kW
- Puissance réactive fondamentale : $Q_T = 1,159$ kVAr
- Tension réseau : $V_r = 230$ V
- Tension composée : $U = 397,7$ V
- Courant fondamental : $I_1 = 26,0$ A
- Facteur de déplacement : $\cos \varphi = 0,995$

3.2 Analyse des harmoniques

La figure 1 représente l'analyse des harmoniques de notre bilan énergétique.



Fig. 1. Analyse des harmoniques de notre bilan énergétique.

Les taux de distorsion harmonique individuels mesurés sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 1 : Taux de distorsion harmonique individuels

Rang	3	5	7	11	13	17	19	25
IHD (%)	3	38	16	8	3	4	3	4

Les courants harmoniques correspondants sont calculés comme suit :

$$I_3 = 0,78 \text{ A} \quad I_5 = 9,88 \text{ A} \quad I_7 = 4,16 \text{ A} \quad I_{11} = 2,08 \text{ A}$$

$$I_{13} = 0,78 \text{ A} \quad I_{17} = 1,04 \text{ A} \quad I_{19} = 0,78 \text{ A} \quad I_{25} = 1,04 \text{ A}$$

Le courant harmonique total efficace est :

$$I_H = \sqrt{\sum I_n^2} \approx 11,43 \text{ A}$$

Soit un taux de distorsion harmonique total :

$$\text{THD}_I = \frac{I_H}{I_1} \approx 0,4395(43,95\%)$$

3.3 Calcul des pertes dans la ligne d'alimentation

La ligne d'alimentation présente les caractéristiques suivantes:

- Résistance : $R_r = 0,16 \Omega$
- Inductance : $L_r = 0,16 \mu\text{H}$

Tableau 2 : Évaluation des pertes dans le réseau électrique

Description	Pertes (W)	Commentaire
Pertes Joule (fondamental)	108,16	Résistance à 50 Hz
Pertes Joule (harmoniques, R constante)	20,89	Sous-estimées
Pertes Joule (harmoniques, avec effet de peau)	≈ 52	Estimation réaliste
Pertes Joule totales (avec effet de peau)	≈ 160	Valeur représentative
Pertes réactives (inductance)	$< 0,1$	Négligeable

Les harmoniques sont responsables d'environ 48 % des pertes totales dans la ligne.

3.4 Bilan de puissance complet

- Courant efficace total : $I_{\text{eff}} = I_1 \sqrt{1 + \text{THD}_I^2} \approx 28,40 \text{ A}$
- Puissance apparente totale : $S_T = \sqrt{3} \times U \times I_{\text{eff}} \approx 19,56 \text{ kVA}$
- Puissance déformante : $D_T = \sqrt{S_T^2 - P_T^2 - Q_T^2} \approx 10,72 \text{ kVAr}$
- Facteur de puissance réel : $\text{PF} = \frac{P_T}{S_T} \approx 0,830$

3.5 Consommation énergétique

a) Énergie active consommée (utile + pertes)

Durée de fonctionnement: $t = 1$ heure (pour exprimer en kWh, kVArh, etc.)

- Puissance active utile : $P_f = 16,25 \text{ kW}$

$$E_p = P_f \times t = 16,25 \times 1 = 16,25 \text{ kWh}$$

- Pertes actives en ligne : $P_{\text{pertes}} = 0,160 \text{ kW}$

$$E_{\text{pertes}} = 0,160 \times 1 = 0,160 \text{ kWh}$$

- Énergie active totale fournie par la source :

$$E_{\text{active,tot}} = E_p + E_{\text{pertes}} = 16,25 + 0,160 = 16,410 \text{ kWh}$$

b) Énergie réactive (stockée/échangée)

- Énergie réactive fondamentale :

$$E_{Q_f} = Q_f \times t = 1,159 \text{ kVArh}$$

- Énergie déformante (liée aux harmoniques) :

$$E_D = D_T \times t = 10,72 \text{ kVArh}$$

- Énergie réactive totale (fondamentale + déformante) :

$$E_{\text{réactive,tot}} = 1,159 + 10,72 = 11,879 \text{ kVArh}$$

c) **Énergie apparente (souvent utilisée pour dimensionner)**

$$S_{\text{tot}} \approx 20,255 \text{ kVA}$$

$$E_{\text{apparente}} = S_{\text{tot}} \times t \approx 20,255 \text{ kVAh}$$

3.6 Consommation énergétique globale (sur 1 heure)

Le tableau 3 ci-dessous synthétise la consommation énergétique associée à chacune des composantes de puissance.

Tableau 3 : Résumé des énergies consommées

Composante énergétique	Valeur (sur 1 heure)	Commentaire
Énergie active utile	16,250 kWh	Facturée par le fournisseur (index kWh)
Pertes actives en ligne	0,160 kWh	Non récupérée, représente un gaspillage
Énergie active totale fournie	16,410 kWh	Consommation totale à la source
Énergie réactive (fondamentale)	1,159 kVArh	Peut être facturée si $\tan \phi$ dépassé
Énergie déformante (harmoniques)	10,720 kVArh	Augmente les pertes et sollicite le réseau
Énergie réactive totale	11,879 kVArh	Impacte le dimensionnement des câbles et transformateurs
Énergie apparente	20,255 kVAh	Représente la puissance totale « vue » par le réseau

4. Discussion

Les résultats obtenus démontrent l'impact significatif des harmoniques sur le bilan énergétique du système industriel. Le tableau 3 montre que l'énergie active utile (16,25 kWh) est la composante principale facturée. Cependant, l'énergie déformante due aux harmoniques (10,72 kVArh) est très élevée, représentant près de 90 % de l'énergie réactive totale. Cela sollicite excessivement le réseau et génère des pertes supplémentaires (0,16 kWh). L'énergie apparente totale (20,255 kVAh) est significativement plus importante que l'énergie active seule, indiquant une sous-utilisation de la capacité du réseau à cause des harmoniques. Une compensation adaptée permettrait de réduire l'énergie déformante, les pertes associées et améliorerait l'efficacité globale du système.

Impact des harmoniques sur les pertes

L'analyse révèle que les harmoniques sont responsables de près de 48 % des pertes totales dans la ligne d'alimentation. Cette contribution importante s'explique par deux facteurs:

- L'effet de peau, qui augmente la résistance effective du conducteur aux fréquences harmoniques.
- La valeur quadratique élevée du courant harmonique total ($I_H \approx 11,43 \text{ A}$).

La prise en compte de l'effet de peau est essentielle pour une évaluation réaliste des pertes, car elle multiplie par environ 2,5 les pertes harmoniques par rapport à un modèle simplifié avec résistance constante.

Dégradation du facteur de puissance

Le facteur de puissance réel (0,830) est significativement inférieur au facteur de déplacement (0,995). Cette différence de 0,165 points est entièrement attribuable à la présence des harmoniques, comme l'indique la relation:

$$PF = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

Cette dégradation a des implications importantes pour la facturation électrique et la capacité du réseau.

Perspectives d'amélioration avec le filtre actif FAT1

L'insertion du filtre actif FAT1 permettrait théoriquement:

- Une réduction significative du THD_I^2 , visant idéalement des valeurs inférieures à 5 % selon les normes IEEE 519.
- Une diminution proportionnelle des pertes harmoniques dans la ligne.
- Une amélioration notable du facteur de puissance, approchant la valeur du facteur de déplacement.
- Une réduction de l'énergie déformante, optimisant l'utilisation de la capacité du réseau.

Les gains économiques attendus incluent la réduction des pénalités pour faible facteur de puissance et la diminution des coûts d'énergie dus aux pertes réduites.

5. Conclusion

Cette étude a présenté une analyse complète du bilan énergétique d'un système industriel avec charges non linéaires, mettant en évidence l'impact significatif des harmoniques sur les différentes composantes de puissance. Les résultats montrent que les harmoniques sont responsables de près de la moitié des pertes dans la ligne d'alimentation et réduisent le facteur de puissance de 0,995 à 0,830.

L'énergie déformante, représentant environ 90 % de l'énergie réactive totale, constitue une sollicitation importante du réseau sans contribuer au transfert d'énergie utile. Ces constatations soulignent l'intérêt potentiel de l'insertion d'un filtre actif FAT1 pour compenser les harmoniques.

Les perspectives de cette recherche incluent la validation expérimentale des bénéfices du filtre actif FAT1 et l'extension de l'analyse à d'autres types de charges non linéaires présentes dans le réseau industriel. Une telle approche contribuerait à l'optimisation énergétique des systèmes électriques industriels et à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans des contextes similaires à celui de la BRALIMA.

Remerciements

Nous avons l'obligation de nous acquitter d'un agréable devoir, celui de remercier toutes les personnes, qui ont contribué de loin ou de près à la rédaction de cet article.

Références

- [1] Akagi, H. (2005). *Active harmonic filters*. Proceedings of the IEEE, 93(12), 2128-2141.
- [2] IEC 61000-3-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions*.
- [3] IEEE Standard 519-2014, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*.
- [4] Marcien, T. O., Narcisse, M. B., & God'El, K. K. (2023). Impact of harmonics on the power factor in an industrial network. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 66(1), 34-41.
- [5] Singh, B., Al-Haddad, K., & Chandra, A. (1999). *A review of active filters for power quality improvement*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 46(5), 960-971.