

Énergies

TP n° 1 : Harmoniques absorbées par un pont redresseur

1 Introduction

1.1 Objet de l'étude

Les redresseurs à diode sont une source importante de perturbation harmoniques sur les réseaux. En effet, ces systèmes sont très répandus (alimentations de ordinateurs, par exemple) et ils consomment beaucoup d'harmoniques.

Dans ce travail, on se propose d'étudier les harmoniques de courant produites par un redresseur et de mettre en évidence leurs variations en fonction des inductances placées en amont et en aval. La simulation sera faite avec le logiciel PSIM. Un objectif de cette séance de TP est de vous initier au fonctionnement de ce logiciel qui est relativement facile à prendre en main. Les données seront ensuite sauvegardées afin d'être utilisées sous Matlab afin d'effectuer les calculs nécessaires à la détermination du taux d'harmoniques.

1.2 Travail demandé

Le travail peut être effectué en binômes. Vous rédigerez un compte-rendu électronique de votre travail intégrant les différents résultats obtenus (calculs, courbes, valeurs numériques et analyses). Il ne doit pas s'agir d'une simple collection de résultats, mais d'un véritable rapport d'expertise où vous donnerez des explications et des commentaires sur les résultats obtenus. La qualité des remarques et de la rédaction est un point important qui sera évalué.

Vous enverrez votre compte-rendu au format pdf ainsi qu'une archive de vos programmes au plus tard une semaine après la séance de TP. L'archive contiendra un fichier Matlab `execute.m` dont l'exécution lancera vos calculs et le tracé des courbes.

Pour profiter pleinement de la séance de TP, il est impératif de bien la préparer, notamment en se mettant à niveau sur les aspects théoriques en rapport avec le sujet. Comme les logiciels PSIM et Matlab sont utilisables en accès libre, vous avez également la possibilité de commencer la partie pratique avant la séance.

2 Analyse harmonique sous Matlab (préparation)

Pour l'analyse des signaux, vous serez amenés à effectuer des calculs sur des signaux périodiques de période T connue. L'étude suivante permet de calculer la décomposition en série de Fourier à partir de la fonction `fft` de Matlab.

2.1 Transformée de Fourier rapide

Soit un signal $x(t)$ dont on a mesuré m échantillons $x_e(l)$ à la fréquence d'échantillonnage f_e . La fonction `fft` de Matlab calcule la transformée de Fourier rapide :

$$X(k) = \sum_{l=1}^m x_e(l) \exp\left(-\frac{j2\pi(l-1)(k-1)}{m}\right) \quad (1)$$

Ce spectre est donné en m points sur la plage de fréquence $[0, f_e]$, soit pour les fréquences $f_k = \frac{k-1}{m} f_e$, $k = 1, \dots, m$. On considérons que le signal est périodique et que sa période est un multiple de la période d'échantillonnage, i.e. $T = \lambda T_e$ avec $\lambda \in \mathbb{N}$.

→ Déterminez les valeurs de k correspondant aux fréquences harmoniques du signal.

2.2 Décomposition en série de Fourier

On considère maintenant la décomposition en série de Fourier sous forme exponentielle de $x(t)$:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp(jk\omega t) \quad (2)$$

où :

$$c_k = \frac{1}{T} \int_T x(t) \exp(-jk\omega t) dt. \quad (3)$$

Considérons que la période du signal est un multiple de la période d'échantillonnage, i.e. $T = \lambda T_e$ avec $\lambda \in \mathbb{N}$. En approchant l'intégrale par une somme finie, on obtient :

$$c_k \simeq \frac{1}{T} \sum_{l=1}^{\lambda} x((l-1)T_e) \exp(-jk\omega(l-1)T_e) dt \quad (4)$$

En notant que $\omega T_e = 2\pi/\lambda$ et que $x_e(l) = x((l-1)T_e)$, on obtient :

$$c_k \simeq \frac{1}{T} \sum_{l=1}^{\lambda} x_e(l) \exp(-jk(l-1)2\pi/\lambda) \quad (5)$$

En considérant que l'on a acquis p période du signal ($m = \lambda p$), on peut aussi écrire :

$$c_k \simeq \frac{1}{pT} \sum_{l=1}^m x_e(l) \exp(-jk(l-1)2\pi p/m) \quad (6)$$

→ Montrez que l'on peut retrouver les coefficients c_k à partir de la transformée de Fourier rapide.

2.3 Série réelle

On considère maintenant la décomposition en série de Fourier sous forme de cosinus et de sinus :

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t) \quad (7)$$

où :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_T x(t) dt \quad (8)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_T x(t) \cos(k\omega t) dt, \quad k \geq 1 \quad (9)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_T x(t) \sin(k\omega t) dt, \quad k \geq 1 \quad (10)$$

→ Déterminez les expressions des coefficients a_k et b_k à partir des coefficients c_k .

3 Simulation sous PSIM

3.1 Implantation du modèle

Implantez un redresseur monophasé à 4 diodes alimenté par une source de tension monophasée de valeur efficace $U = 230$ V et chargé par un filtre LC (inductance L et condensateur C), lui-même chargé par une résistance de charge R_c . En amont du redresseur, vous introduirez une inductance L_r pouvant modéliser l'inductance du réseau mais aussi une inductance additionnelle. Placez la référence de potentiel à la cathode du générateur. Placez des sondes de tension et de courant aux endroits pertinents. Vérifiez que la simulation fonctionne. Observez les formes d'onde.

3.2 Transitoire

On observe une phase transitoire avant d'atteindre un régime permanent harmonique. Commentez ce transitoire. Dans la suite, on s'intéressera au régime permanent. Vous pourrez effectuer les simulations avec une tension initiale aux bornes du condensateur afin de réduire ce transitoire.

3.3 Empiètement

Observez l'empiètement et sa variation en fonction de l'inductance du réseau.

3.4 Commutation d'une diode

En introduisant, dans les paramètres de la diode, la charge de recouvrement, observez le détail de la tension et du courant relatif à une diode lors de l'ouverture et de la fermeture.

3.5 Mode de conduction

Pour des valeurs arbitraires (mais plausibles) de L_r , C , L et R_c , quel type de fonctionnement (conduction continue ou discontinue) obtenez-vous ? Quelle est la valeur R_c^* de R_c qui donne la limite entre les deux modes ?

4 Traitement des données sous Matlab

4.1 Sauvegarde des données issues de PSIM

Sous PSIM, les données numériques de la simulation peuvent être visualisées (clic droit sur les courbes), puis copiés dans un fichier texte. En retirant les noms des axes, on obtient un fichier qui peut être lu sous Matlab avec la commande `load`. Vous préciserez le format `ascii` des données en option. On obtient alors un tableau ayant comme première colonne les instants d'échantillonnage et dans les autres colonnes les différents signaux électriques.

4.2 Calculs

Effectuez un programme sous Matlab permettant de calculer en régime permanent (vous prendrez soin de retirer le régime transitoire) à partir d'une simulation sous PSIM :

- La valeur moyenne de la tension aux bornes de la résistance
- La puissance active absorbée par la résistance
- La valeur efficace du courant absorbé par le redresseur
- Le taux d'harmoniques du courant absorbé par le redresseur
- Le facteur de puissance au niveau de la source de tension.
- Le déphasage ϕ_1 entre le fondamental du courant et la tension.

Auparavant, vous aurez pris soin de placer vos sondes de tension et de courant aux bons endroits et de régler la période d'échantillonnage de manière adéquate.

4.3 Inductance de ligne

On considère que l'inductance destinée à lisser le courant est placée uniquement au niveau du réseau ($L = 0$, $L_r \neq 0$). Simulez le redresseur dans cette situation et effectuez les calculs. Analysez l'évolution des grandeurs en fonction de L_r (deux ou trois valeurs suffisent). Commentez.

4.4 Inductance en aval

On considère que l'inductance destinée à lisser le courant est placée uniquement au niveau du filtre LC ($L \neq 0$, $L_r = 0$) et on considère qu'elle a la même valeur que L_r à la question précédente. Simulez le redresseur dans cette situation et effectuez les calculs. Commentez. Comparez avec la situation précédente.