

Etude de l'effet d'empiètement dans un redresseur triphasé

- Travail expérimental et rédaction du document :
- Jean-Baptiste Desmoulin (P.R.A.G.)
mail : desmouli@physique.ens-cachan.fr

Un redresseur n'est pas une source de tension parfaite. Expérimentalement, on observe une diminution de la tension moyenne délivrée avec le niveau moyen de courant débité par ce système de conversion de puissance. Les principaux éléments responsables de cette chute de tension sont :

- les **résistances du transformateur** (primaire et secondaire pour chaque phase).
- la **résistance dynamique des interrupteurs**.
- les **inductances de la source** (ramenées par le réseau, les inductances de fuite du transformateur) qui empêchent les commutations de courant d'être instantanées.

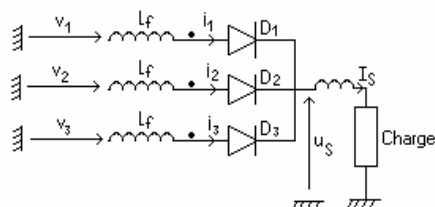
- La chute de tension liée à la résistance du transformateur dépend du couplage de ce dernier. On l'établit en faisant un bilan des pertes Joule dues aux enroulements. La puissance dissipée de cette façon est considérée comme égale à $R_{eq} \cdot I_c^2$ avec R_{eq} résistance apparente modélisant la chute de tension dans le transformateur, vue du côté continu.

- Concernant les interrupteurs, on en a toujours un en conduction. Si ρ est la résistance d'un interrupteur, la chute de tension due à ces derniers sera donc $\rho \cdot I_c$. On peut, par ailleurs, prendre en compte la tension seuil des interrupteurs qui contribue, elle aussi, à faire chuter la tension de sortie

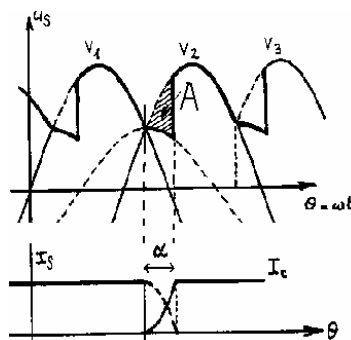
- Le fait que la commutation de courant ne soit pas instantanée entraîne aussi un effet que l'on représente par une chute de tension. C'est le phénomène d'empiètement. Il n'a bien entendu rien à voir avec l'effet Joule. C'est lui que nous allons détailler maintenant.

I. Etude du phénomène d'empiètement sur un redresseur triphasé.

Nous allons raisonner dans le cas particulier d'un redresseur simple triphasé à diodes dans lequel on prend en compte les inductances parasites de la source notées L_f .



Lors de la commutation de la diode D1 à la diode D2, si on considère que le courant ne commute pas instantanément, il y aura un intervalle de temps pendant lequel deux diodes seront en conduction. La durée de cet intervalle de temps sera notée α



On aura alors

$$v_1 - l_f \cdot \frac{di_1}{dt} = u_s$$

$$v_2 - l_f \cdot \frac{di_2}{dt} = u_s$$

en ajoutant les deux équations, et sachant que $i_1 + i_2 = I_s$, on a

$$u_s = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Cela signifie que durant la commutation, la tension de sortie est inférieure à la tension attendue s'il n'y avait pas d'empiètement.

- Nous allons tout d'abord calculer la durée α de l'empiètement.

En remplaçant u_s par sa valeur, on obtient, si on travaille en grandeurs angulaires

$$v_1 - v_2 = V \cdot \sqrt{2} \cdot [\sin(\theta) - \sin(\theta - 2\pi/3)] = V \cdot \sqrt{6} \cdot \sin(\theta + \pi/6) = 2 \cdot l_f \cdot \omega \cdot \frac{di_1}{d\theta}$$

en intégrant, entre $5\pi/6$ et $5\pi/6 + \alpha$, on trouve que

$$1 - \cos \alpha = \frac{2 \cdot l_f \cdot \omega \cdot I_s}{V \cdot \sqrt{6}}$$

La durée de la commutation est d'autant plus longue que l'inductance parasite est importante

- La chute de tension moyenne causée par l'empiètement est donnée par

$$\delta U_s = \frac{1}{2\pi/3} \int_{5\pi/6}^{5\pi/6 + \alpha} (v_2 - u_s) \cdot d\theta = \frac{1}{2\pi/3} \int_{5\pi/6}^{5\pi/6 + \alpha} (l_f \cdot \omega \cdot \frac{di_2}{d\theta}) \cdot d\theta = \frac{1}{2\pi/3} \int_0^{I_s} (l_f \cdot \omega) \cdot di_2 = \frac{3 \cdot l_f \cdot \omega \cdot I_s}{2 \cdot \pi}$$

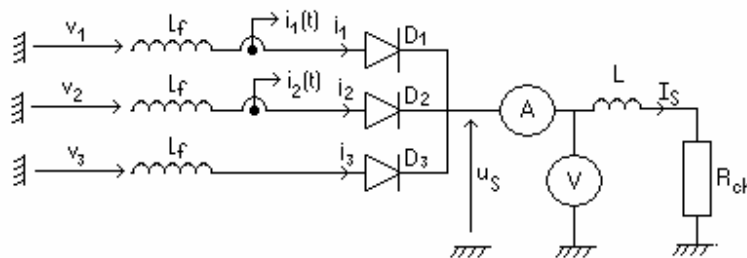
La résistance équivalente modélisant la chute de tension par empiètement est donc, pour ce montage, donnée par

$$R_{emp} = \frac{3 \cdot l_f \cdot \omega}{2 \cdot \pi}$$

II. Approche expérimentale du problème.

Pour mettre en évidence les effets de l'empiètement sur la caractéristique tension/courant d'un redresseur, nous allons commencer par relever cette caractéristique. Par la suite nous essaierons de détailler les différentes causes pour évaluer leurs contributions relatives.

Pour faire les relevés expérimentaux, nous allons réaliser le circuit suivant :

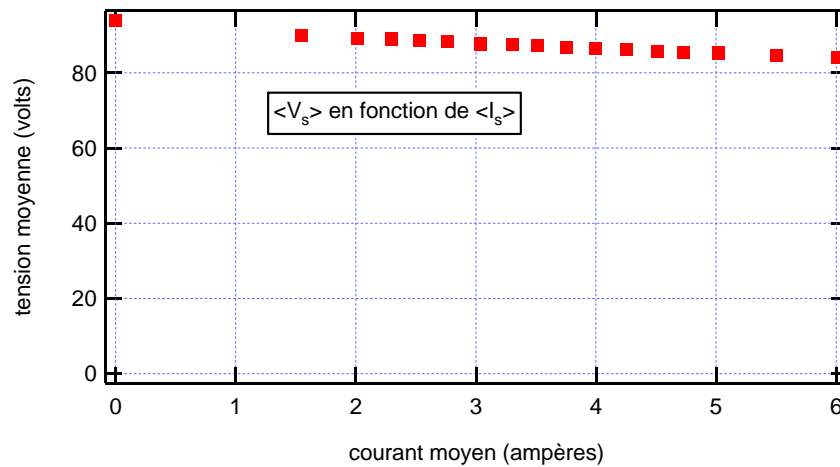


L'ampèremètre et le voltmètre nous donnent la valeur moyenne. Les capteurs de courant donnant $i_1(t)$ et $i_2(t)$ sont donnés par des capteurs de courant à zéro de flux (bande passante du continu à quelques centaines de kHz) tels que la sortie mesure est isolée de la partie du circuit où circule le courant à observer. On peut également observer la tension u_s avec une soude différentielle de tension atténuatrice envoyée sur l'oscilloscope (ne pas envoyer la tension u_s directement sur l'oscilloscope pour des questions de terre, ainsi que pour des raisons de niveaux de tension manipulés).

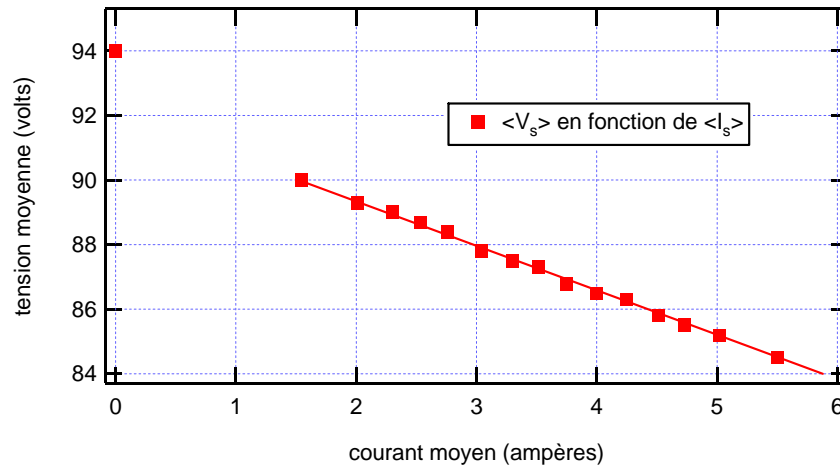
Lors de essais, on travaille à une tension efficace entre neutre et phase fixée, afin de faire tous les essais avec la même position de l'autotransformateur afin d'avoir tout le temps la même inductance « de réseau ». En faisant varier la résistance de charge R_{ch} , on observe l'évolution de la valeur moyenne de u_s en fonction de celle de i_s (on fera en sorte que i_s soit le plus continu possible en prenant une inductance L de la plus forte valeur possible). Au passage, on relèvera l'angle d'empiètement à chaque fois pour faire tous les relevés en même temps.

II.1. Caractérisation de la source de tension

On obtient alors une caractéristique dont l'allure est la suivante :



On constate alors que le redresseur n'est pas une source de tension parfaite puisque la tension chute lorsque le courant débité augmente. On peut zoomer pour dilater la variation de $\langle u_s \rangle$ en fonction de $\langle i_s \rangle$, ce qui donne



On en déduit une évolution de la forme

$$\langle u_s \rangle = 92.1 \pm 0.1 - (1.38 \pm 0.10) \cdot \langle i_s \rangle$$

Sachant que l'on a une tension à vide de 94 V, la caractéristique précédente nous indique un effet de seuil de 1.9V environ et une résistance équivalente de chute de tension $R_{eq} = 1.38 \pm 0.10 \Omega$.

Nous allons maintenant détailler et quantifier les effets des phénomènes permettant d'expliquer la valeur de la résistance équivalente.

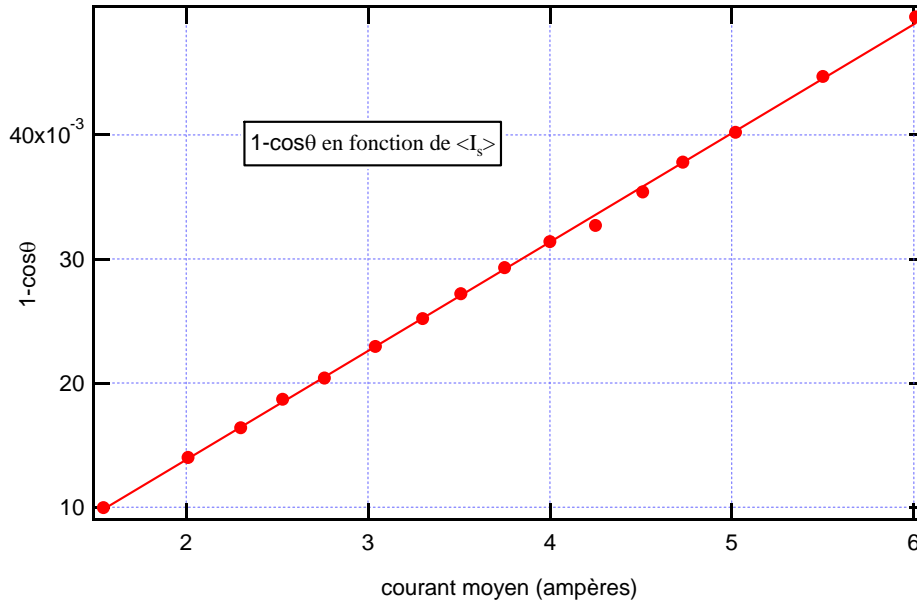
II.2. Analyse de la chute de tension : la résistance de la source.

Concernant l'effet de la résistance du bobinage de sortie de l'autotransformateur, en moyenne, on peut dire que tout se passe comme si une résistance équivalente à cette dernière résistance venait se mettre en série avec la charge.

Expérimentalement, compte tenu de la faible valeur de cette résistance, on choisit d'appliquer la méthode volt-ampèremétrique pour éviter les effets de contact. Ainsi, **alors que l'autotransformateur est hors tension**, mais dans sa position permettant de délivrer la tension voulue, on applique la tension d'une alimentation stabilisée entre phase et neutre et on relève le courant (si possible de l'ordre du courant de travail lors de l'expérience précédente). On recommence cette expérience pour chaque phase. On relève respectivement $0.85 \pm 0.05 \Omega$, $0.90 \pm 0.05 \Omega$ et $1.30 \pm 0.05 \Omega$ dans chacune des phases. Sachant que la valeur moyenne relevées dépendent de la conduction successive de chacune des diodes, nous allons supposer que la résistance équivalente est une moyenne des différentes valeurs précédente soit $R_{Jeq} = 1.02 \pm 0.05 \Omega$ pour les seules chutes de tensions ohmiques.

II.3. Analyse de la chute de tension : l'inductance de la source, empiètement.

Pour ce qui concerne l'empiètement à proprement parler, on trace $1-\cos\alpha$ en fonction de $\langle i_s \rangle$ ce qui nous donne les évolutions suivantes



On obtient une droite de pente $8.8 \cdot 10^{-3} \pm 0.1 \cdot 10^{-3}$ SI. De cette pente, on peut remonter à l'inductance de ligne de la source (tension efficace par phase $V = 80V$, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50$ rad/s)

$$L_f = \frac{8.8 \cdot 10^{-3} \cdot 80 \cdot \sqrt{6}}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 2.74 \pm 0.06 \text{mH}$$

On en déduit la résistance équivalente d'empiètement

$$R_{Eeq} = 0.41 \pm 0.01 \Omega$$

II.4. Bilan.

En sommant les effets des différentes chutes de tension, on a $R_{Jeq} + R_{Eeq} = 1.43 \pm 0.06 \Omega$. C'est comparable au résultat de l'étude globale de la chute de tension qui était $R_{eq} = 1.38 \pm 0.10 \Omega$

rq : il faut noter que la dernière droite obtenue ne passe pas par l'origine, ce qui laisse penser que la modélisation n'est pas satisfaisante pour les faibles valeurs de courant.

Références.

[1] «Electronique de puissance - conversion de l'énergie», M. Lavabre, Edition Casteilla

Liste de matériel.

3 diodes de redressement.

Un rhéostat de charge

Un autotransformateur

Une sonde différentielle de tension atténuatrice (visualisation de la tension de sortie)

Un ampèremètre

Un voltmètre

Un oscilloscope

Un U et un barreau ferromagnétiques

2 bobines de 250 spires montées en flux additif

2 capteurs de courants permettant de visualiser la commutation de courant.