

PROBLÈMES CORRIGÉS D'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

- ▶ Niveaux de difficulté progressifs
- ▶ Corrigés détaillés

Pierre Mayé

Professeur de physique appliquée à Arras

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Illustration de couverture : © *digitalvision*

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements



d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, Paris, 2013

ISBN 978-2-10-058828-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

PARTIE I • CONVERSION ALTERNATIF-CONTINU	1
Chapitre 1 • Redresseur non commandé PD3	3
Chapitre 2 • Redresseur non commandé S9	15
Chapitre 3 • Redresseur commandé PD3	37
Chapitre 4 • Redresseur de courant	49
Chapitre 5 • Redresseur MLI à appel de courant sinusoïdal	63
PARTIE II • CONVERSION CONTINU-CONTINU	77
Chapitre 6 • Hacheur alimentant un moteur à courant continu	79
Chapitre 7 • Hacheur abaisseur	97
Chapitre 8 • Hacheur élévateur en correcteur de facteur de puissance	111
PARTIE III • CONVERSION CONTINU-ALTERNATIF	137
Chapitre 9 • Onduleur de secours	139
Chapitre 10 • Onduleur d'une installation photovoltaïque	153
Chapitre 11 • Onduleur à résonance	177
Chapitre 12 • Convertisseur alternatif-alternatif à deux onduleurs	191
PARTIE IV • CONVERSION ALTERNATIF-ALTERNATIF	203
Chapitre 13 • Gradateur monophasé à trains d'ondes	205
Chapitre 14 • Gradateur à commande de phase	227
Chapitre 15 • Gradateur triphasé à trains d'ondes	243

Partie I

Conversion alternatif-continu

1. Redresseur non commandé PD3	3
2. Redresseur non commandé S9	15
3. Redresseur commandé PD3	37
4. Redresseur de courant	49
5. Redresseur MLI à appel de courant sinusoïdal	63

REDRESSEUR NON COMMANDÉ PD3



Niveau de difficulté : * – Application simple du cours accessible à tous.

Le problème s'intéresse au redresseur le plus courant dans les applications industrielles : le montage PD3. Les questions sont proches du cours et permettent ainsi de revoir les méthodes classiques d'étude des redresseurs. Après trois parties consacrées à l'étude du montage en fonctionnement normal, la dernière partie traite de son comportement en cas de défaut.

ÉNONCÉ

L'étage d'entrée d'une alimentation à découpage destinée à maintenir en parfait état électrique une batterie d'accumulateurs est un pont redresseur non commandé PD3 (figure 1.1).

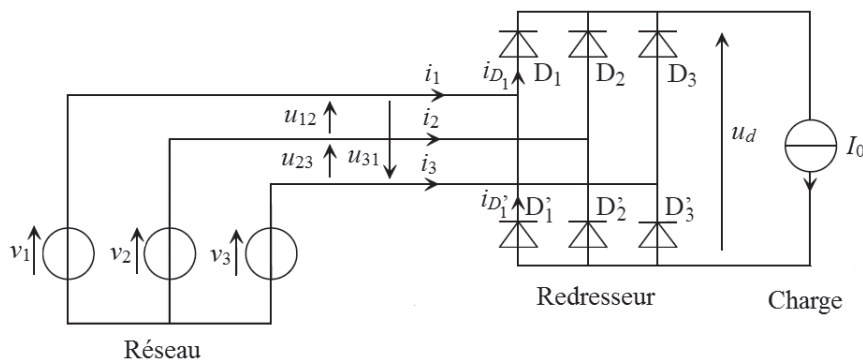


Figure 1.1 - Redresseur non commandé PD3.

Ce montage comporte six diodes supposées idéales. Il est alimenté par un réseau dont les tensions simples v_1 , v_2 et v_3 forment un système triphasé équilibré direct de valeur efficace $V = 230$ V et de fréquence $f = 50,0$ Hz :

$$v_1 = V\sqrt{2} \cos \theta$$

$$v_2 = V\sqrt{2} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$v_3 = V\sqrt{2} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$

avec $\theta = \omega t = 2\pi ft$.

La sortie du pont PD3 est branchée sur un récepteur dont l'inductance est suffisamment élevée pour que la charge puisse être assimilée à une source de courant continu $I_0 = 7,20 \text{ A}$.

A. ÉTUDE DES TENSIONS

A.1 Tracer la courbe de la tension redressée u_d aux bornes du récepteur en fonction de l'angle θ . Indiquer les intervalles de conduction de chacune des diodes.

A.2 Quel est l'indice de pulsation p de la tension redressée ?

A.3 Exprimer la valeur moyenne U_{d0} de la tension redressée u_d en fonction de V puis effectuer l'application numérique.

B. ÉTUDE DES COURANTS

B.1 Tracer la courbe de l'intensité i_{D_1} du courant dans la diode D_1 en fonction de l'angle θ .

B.2 Exprimer l'intensité moyenne I_{D0} du courant dans une diode en fonction de I_0 puis effectuer l'application numérique.

B.3 Établir l'expression de l'intensité efficace I_D du courant dans une diode en fonction de I_0 et calculer sa valeur.

B.4 Tracer la courbe de l'intensité i_1 du courant dans le fil de ligne 1 en fonction de l'angle θ .

B.5 Exprimer l'intensité efficace I des courants en ligne en fonction de I_0 et calculer sa valeur.

C. ÉTUDE DES PUISSANCES

C.1 Déterminer la puissance apparente S à l'entrée du redresseur.

C.2 Calculer la puissance active P appelée par le redresseur.

C.3 Calculer le facteur de puissance f_p à l'entrée du montage.

C.4 Tracer l'allure de la courbe du fondamental i_{1f} du courant en ligne i_1 (sans donner la valeur de son amplitude). En déduire le déphasage ϕ_f du fondamental i_{1f} du courant i_1 par rapport à la tension v_1 .

C.5 Que peut-on dire de la puissance réactive Q appelée par le redresseur ?

C.6 En déduire la puissance déformante D appelée par le redresseur.

D. FONCTIONNEMENT EN CAS DE DÉFAUT

La diode D_1 est détruite et elle se comporte comme un circuit ouvert (figure 1.2).

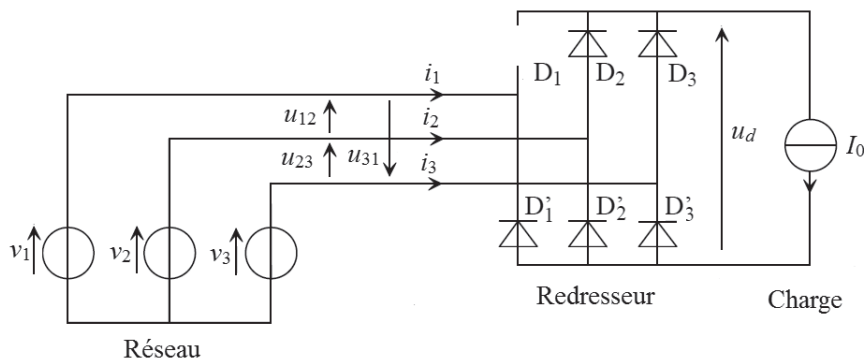


Figure 1.2 - Coupure d'une diode.

D.1 Tracer la courbe de la tension redressée u_d aux bornes du récepteur en fonction de l'angle θ . Indiquer les intervalles de conduction de chacune des diodes.

D.2 Exprimer la valeur moyenne U_{d0} de la tension redressée u_d en fonction de V puis effectuer l'application numérique. Par quel coefficient cette valeur moyenne est-elle réduite par rapport au fonctionnement normal ?

SOLUTION

A. ÉTUDE DES TENSIONS

A.1 Les diodes D_1 , D_2 et D_3 constituent un commutateur à cathodes communes. À chaque instant, la diode passante est celle qui est reliée à la phase du réseau présentant la tension la plus positive. Les diodes D'_1 , D'_2 et D'_3 constituent un commutateur à anodes communes. À chaque instant, la diode passante est celle qui est reliée à la phase du réseau présentant la tension la plus

négative. Pendant une période de l'alimentation, la tension redressée u_d est donc constituée de six calottes de sinusôides qui correspondent aux tensions composées du réseau (figure 1.3).

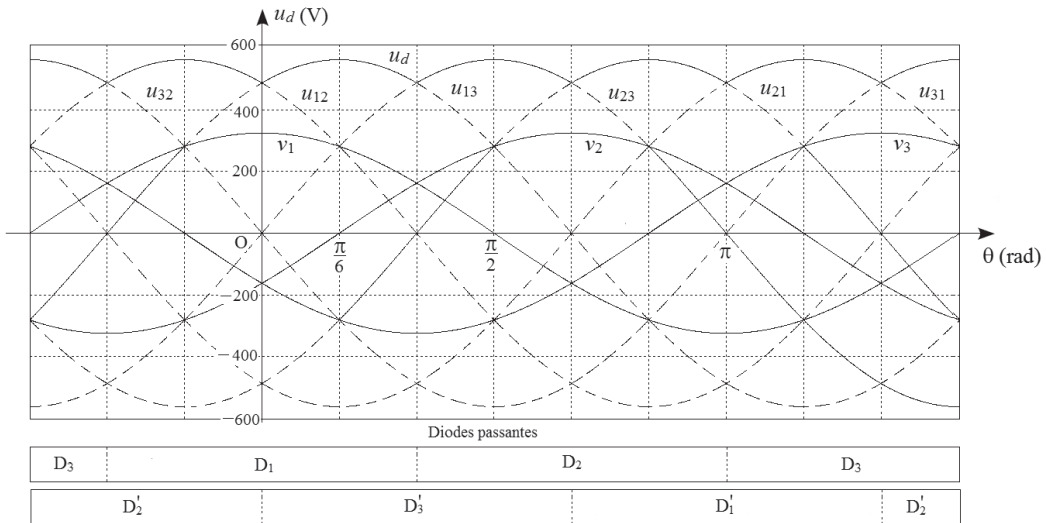


Figure 1.3 - Courbe de la tension redressée.

La valeur efficace des tensions composées est :

$$U = V\sqrt{3}$$

Application numérique :

$$U = 230\sqrt{3} = 400 \text{ V}$$

L'amplitude de ces tensions est alors :

$$U_M = U\sqrt{2}$$

Application numérique :

$$U_M = 400\sqrt{2} = 566 \text{ V}$$

A.2 L'indice de pulsation p de la tension redressée est le nombre de calottes de sinusôide composant cette tension pendant une période 2π :

$$p = 6$$

A.3 La tension redressée u_d possède une période de $\frac{\pi}{3}$. Pour faciliter le calcul de sa valeur moyenne U_{d0} , changeons d'origine des angles pour qu'une des calottes de sinusoïde passe par son maximum à $\theta' = 0$ (figure 1.4) afin que, dans la période $\left[-\frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{6}\right]$, la tension redressée u_d s'exprime par :

$$u_d = U\sqrt{2} \cos \theta'$$

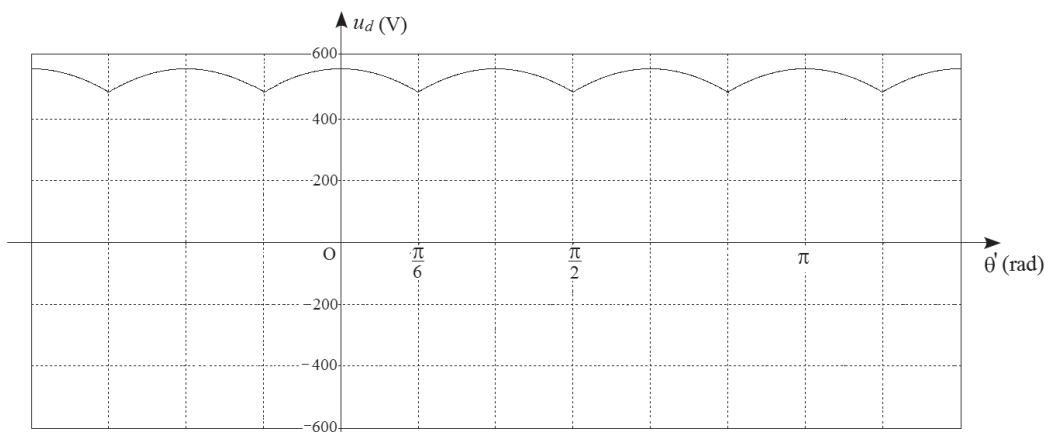


Figure 1.4 - Changement d'origine des angles.

La valeur moyenne U_{d0} de la tension redressée u_d est définie par :

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} u_d d\theta'$$

La fonction u_d étant paire, nous pouvons intégrer sur une demi-période puis doubler le résultat :

$$U_{d0} = \frac{6}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} u_d d\theta'$$

soit :

$$U_{d0} = \frac{6}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} U\sqrt{2} \cos \theta' d\theta'$$

L'intégration s'effectue immédiatement :

$$U_{d0} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U [\sin \theta']_0^{\frac{\pi}{6}}$$

ce qui conduit à:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U$$

La valeur efficace U des tensions composées est liée à la valeur efficace V des tensions simples :

$$U = V\sqrt{3}$$

Nous obtenons finalement :

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V$$

Application numérique :

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \times 230 = 538 \text{ V}$$



Le changement de repère n'est pas indispensable, mais quand il n'est pas utilisé, la fonction à intégrer comporte une phase à l'origine des temps non nulle.

B. ÉTUDE DES COURANTS

B.1 L'intensité du courant dans une diode est égale à I_0 lorsque cette diode est passante et elle est nulle quand cette diode est bloquée (figure 1.5).

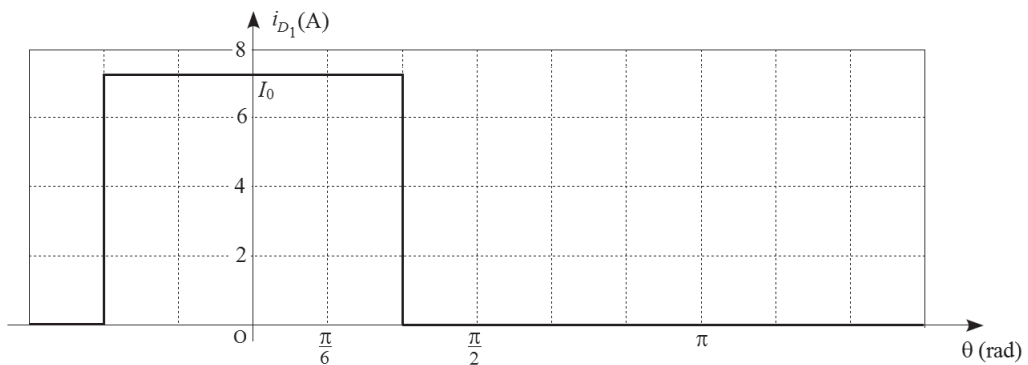


Figure 1.5 - Courbe du courant dans une diode.

B.2 Chaque diode est traversée par un courant d'intensité I_0 pendant un tiers de la période. L'intensité moyenne du courant dans une diode est donc :

$$I_{D0} = \frac{I_0}{3}$$

Application numérique :

$$I_{D0} = \frac{7,20}{3} = 2,40 \text{ A}$$

B.3 L'intensité efficace I_D du courant dans une diode est la racine carrée de la valeur moyenne de i_{D1}^2 :

$$I_D = \sqrt{\langle i_{D1}^2 \rangle}$$

Comme i_{D1}^2 prend la valeur I_0^2 pendant un tiers de la période, nous obtenons :

$$I_D = \frac{I_0}{\sqrt{3}}$$

Application numérique :

$$I_D = \frac{7,20}{\sqrt{3}} = 4,16 \text{ A}$$

B.4 L'intensité instantanée i_1 du courant dans le fil de ligne 1 est la différence des intensités i_{D1} et $i_{D1'}$ des courants dans les diodes D_1 et D_1' :

$$i_1 = i_{D1} - i_{D1'}$$

Chaque diode est passante pendant un tiers de la période et les débloqués de D_1 et D_1' sont décalés d'une demi-période (figure 1.6).

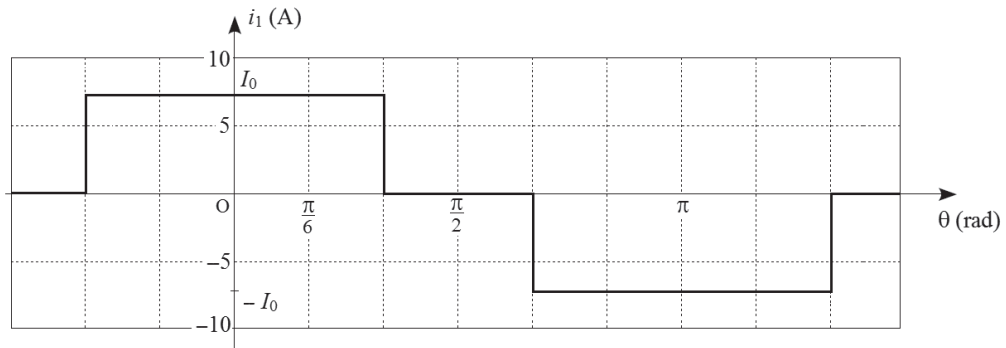


Figure 1.6 - Courbe du courant dans un fil de ligne.

B.5 L'intensité efficace I des courants en ligne est la racine carrée de la valeur moyenne de i_1^2 :

$$I = \sqrt{\langle i_1^2 \rangle}$$

Comme i_1^2 prend la valeur I_0^2 pendant deux tiers de la période, nous obtenons :

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}} I_0$$

Application numérique :

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}} \times 7,20 = 5,88 \text{ A}$$

C. ÉTUDE DES PUISSANCES

C.1 La puissance apparente est définie par :

$$S = 3VI$$

Le résultat de la question précédente permet d'écrire :

$$S = 3V \sqrt{\frac{2}{3}} I_0$$

soit :

$$S = \sqrt{6} VI_0$$

Application numérique :

$$S = \sqrt{6} \times 230 \times 7,20 = 4,06 \text{ kVA}$$

C.2 Comme les diodes sont idéales, le redresseur ne présente pas de pertes. La puissance active appelée à l'entrée est donc égale à la puissance moyenne fournie à la charge :

$$P = U_{d0} I_0$$

soit :

$$P = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V I_0$$

Application numérique :

$$P = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \times 230 \times 7,20 = 3,87 \text{ kW}$$



Il est également possible de calculer la puissance active par la formule $P = 3 V I_f \cos \varphi_f$.

C.3 Le facteur de puissance f_p est défini par :

$$f_p = \frac{P}{S}$$

ce qui donne ici :

$$f_p = \frac{\frac{3\sqrt{6}}{\pi} V I_0}{\sqrt{6} V I_0}$$

soit :

$$f_p = \frac{3}{\pi}$$

Application numérique :

$$f_p = 0,955$$



Un avantage du montage PD3 est de présenter un facteur de puissance assez proche de 1.

C.4 La courbe du fondamental i_{1f} du courant i_1 présente la même symétrie que la courbe du courant i_1 (figure 1.7).

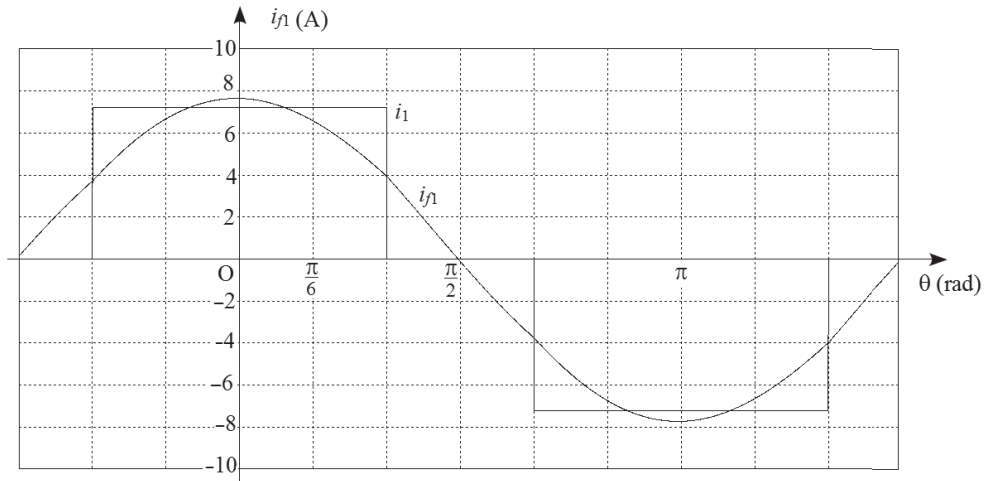


Figure 1.7 - Courbe du fondamental du courant dans un fil de ligne.

Le fondamental i_{1f} du courant i_1 est donc en phase avec la tension simple v_1 :

$$\varphi_f = 0$$

C.5 Comme les tensions sont sinusoïdales, la puissance réactive Q appelée par le redresseur est due uniquement aux composantes fondamentales des courants, ce qui donne, en notant I_f l'intensité efficace de ces dernières :

$$Q = 3VI_f \sin \varphi_f$$

Comme $\varphi_f = 0$, la puissance réactive Q appelée par le redresseur est nulle.



Malgré l'absence de puissance réactive, le facteur de puissance est strictement inférieur à 1 à cause de la puissance déformante.

C.6 La puissance apparente S s'écrit :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} = \sqrt{P^2 + D^2}$$

Nous en déduisons l'expression de la puissance déformante D :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Application numérique :

$$D = \sqrt{4060^2 - 3870^2} = 1,23 \text{ kVAD}$$



L'unité volt-ampère déformant (VAD) n'est pas reconnue officiellement, mais elle est couramment utilisée au même titre que le volt-ampère et le volt-ampère réactif.

D. FONCTIONNEMENT EN CAS DE DÉFAUT

D.1 Les règles de commutation utilisées pour le fonctionnement normal sont toujours applicables, mais seules deux diodes sont présentes dans le commutateur à cathodes communes (figure 1.8).

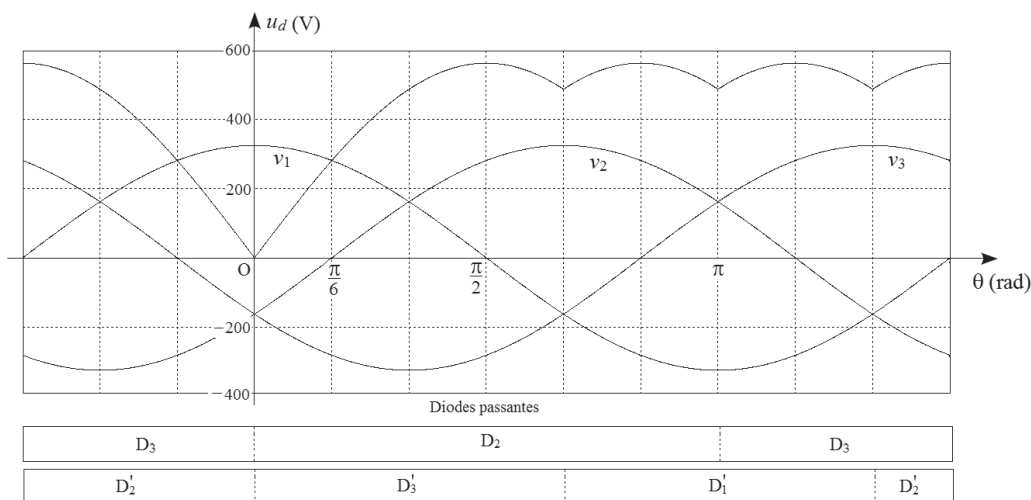


Figure 1.8 - Courbe de la tension redressée.

D.2 La tension redressée u_d présente une période de 2π . La fonction étant paire, nous pouvons intégrer sur une demi-période et doubler le résultat :

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_d d\theta$$

soit, en décomposant l'intervalle d'intégration en deux parties correspondant à deux morceaux de courbes de tensions composées :

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\frac{2\pi}{3}} u_{23} d\theta + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} u_{21} d\theta \right]$$

Chapitre 1 • Redresseur non commandé PD3

Remplaçons ensuite les tensions composées par leurs expressions :

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\frac{2\pi}{3}} U\sqrt{2} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) d\theta + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} -U\sqrt{2} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta \right]$$

L'intégration s'effectue immédiatement :

$$U_{d0} = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} \left\{ \left[\sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_0^{\frac{2\pi}{3}} - \left[\sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \right\}$$
$$U_{d0} = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} \left[\sin\frac{\pi}{6} - \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) - \left(\sin\frac{7\pi}{6} - \sin\frac{5\pi}{6} \right) \right]$$
$$U_{d0} = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} \left[\frac{1}{2} - (-1) - \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) \right]$$

Nous obtenons finalement :

$$U_{d0} = \frac{5\sqrt{2}}{2\pi} U$$

La valeur efficace U des tensions composées est liée à la valeur efficace V des tensions simples :

$$U = V\sqrt{3}$$

La formule devient :

$$U_{d0} = \frac{5\sqrt{6}}{2\pi} V$$

Application numérique :

$$U_{d0} = \frac{5\sqrt{6}}{2\pi} \times 230 = 448 \text{ V}$$

La valeur moyenne est réduite par un coefficient :

$$\frac{\frac{3\sqrt{6}}{\pi} V}{\frac{5\sqrt{6}}{2\pi} V} = \frac{6}{5} = 1,2$$