

CHAPITRE 3

REDRESSEURS

1. Introduction

Les montages redresseurs, souvent appelés simplement redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif-continu. Alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie.

On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin de continu alors que l'énergie électrique est disponible en alternatif. Comme c'est sous cette seconde forme que l'énergie électrique est presque toujours générée et distribuée, les redresseurs ont un très vaste domaine d'applications.

Les redresseurs à diodes, ou redresseurs non contrôlés, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.

Les redresseurs à thyristors, ou redresseurs contrôlés, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus réversibles ; lorsqu'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif, on dit qu'ils fonctionnent en onduleurs non autonomes. On précisera au paragraphe 3.5 le pourquoi de ce qualificatif de "non-autonomes" destiné à différencier ces onduleurs des onduleurs autonomes dont l'étude fera l'objet du chapitre 5.

2. Les trois types de montages redresseurs

Pour obtenir une tension continue, on redresse un ensemble de q tensions alternatives, d'ordinaire supposées sinusoïdales et formant un système polyphasé équilibré (nombre de phases q). Ces tensions peuvent être les tensions aux bornes d'un alternateur. Généralement, elles sont fournies par le réseau monophasé ou, plus souvent, par le réseau triphasé, d'ordinaire par l'intermédiaire d'un transformateur.

On distingue trois types de montages :

1. **P_q** : montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance" ;
2. **PD_q** : montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source étoilée ;
3. **S_q** : montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source polygonale.

La figure 3-1 donne le schéma électrique des montages P3, PD3 et S3. Ces trois montages sont le plus communément utilisés pour le redressement de tensions triphasées.

Remarques:

- L'indication du type (P, PD ou S) suivie de celle du nombre q de phases suffit à caractériser un redresseur.
- Les montages de type S_q ne seront pas étudiés dans ce cours.

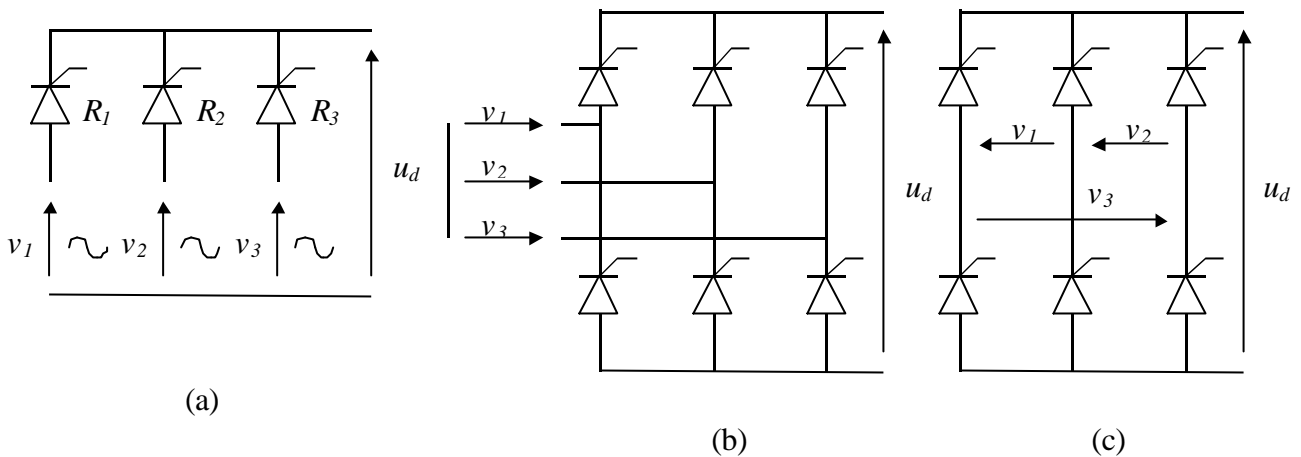


Figure 3-1. Redresseurs triphasés. (a) P3. (b) PD3. (c) S3.

2.1 Commutation des redresseurs

Lorsque plusieurs redresseurs ont une électrode commune, on verra que chacun n'est conducteur que pendant une durée limitée et qu'un seul conduit à chaque instant (lorsque l'on considère les interrupteurs redresseurs comme parfaits).

Si le courant produit par le montage redresseur est ininterrompu, ce qui représente le cas général, cela impose que l'enclenchement d'un redresseur s'accompagne du blocage de celui qui conduisait auparavant. La figure 3-2 montre qu'à l'instant t_1 le redresseur R_2 devient conducteur tandis que R_1 se bloque.

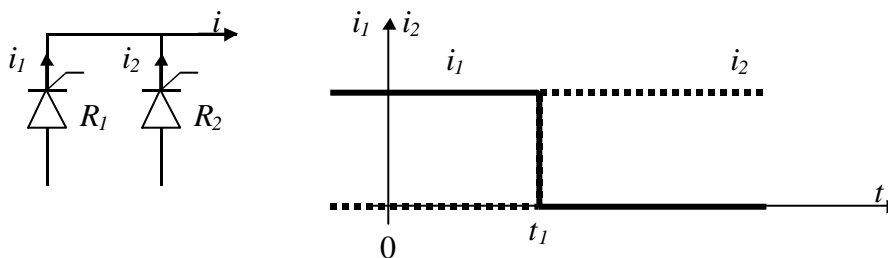


Figure 3-2. Commutation instantanée des interrupteurs redresseurs.

En pratique, le phénomène de commutation n'est jamais instantané comme on l'a vu au chapitre 2. Les conséquences de cette réalité physique seront abordées au § 3.2. Pour l'instant, on considérera toujours une commutation instantanée.

On distinguera plusieurs types de commutation suivant le mode de blocage du redresseur à déclencher :

- *Commutation par la charge ou par la source* (dite également **commutation naturelle**) lorsque ce sont des conditions extérieures (et donc naturelles) au convertisseur (tensions ou f.e.m. de la charge ou de la source) qui contraignent au blocage le redresseur conducteur quand un nouveau redresseur s'enclenche ;
- *Auto-commutation* (ou **commutation forcée**) lorsque le redresseur est commandé quelles que soient les conditions extérieures (charge ou source).

On donne par ailleurs les deux définitions suivantes :

Indice de commutation q du montage.

L'indice de commutation est donné par la durée de conduction de chaque diode et correspond au nombre de phases du réseau de distribution. Par exemple, pour le montage PD3, l'indice de commutation est égal à 3 (chaque diode conduit pendant un tiers de période ou T/q).

Indice de pulsation p de la tension redressée.

L'indice de pulsation p donne le nombre de portions de sinusoïde par période de la tension redressée. Par exemple, pour le montage PD3, nous verrons que l'indice de pulsation est égal à 6 (la tension redressée se compose de six portions par période).

2.2 Facteur de forme

La valeur du facteur de forme caractérise la tension redressée. Plus cette valeur est proche de l'unité, plus la tension obtenue est voisine d'une grandeur continue.

Ce coefficient sert à comparer des montages redresseurs différents entre eux.

Par définition, on nomme facteur de forme le rapport :

$$F = \frac{U_{eff}}{U_0}$$

avec : U_{eff} : valeur efficace de la tension considérée ;

U_0 : valeur moyenne de la tension considérée.

2.3 Principe de l'étude d'un montage

L'étude d'un montage doit servir, pour le concepteur, à déterminer les caractéristiques de chaque élément constitutif (transformateur, diodes, thyristors,...). Elle doit également permettre de calculer et définir les protections contre des échauffements dus à des surtensions ou surcourants (dus à des courts-circuits) éventuels.

On procède en général en quatre étapes :

1. **Etude des tensions** (de l'entrée vers la sortie). En partant des tensions alternatives à l'entrée, on calcule la tension redressée à vide et la tension maximale aux bornes des semi-conducteurs. Pour cette étude on suppose négligeables les impédances de la source et des éléments du montage, ce qui est réaliste compte tenu des faibles chutes de tension qu'elles occasionnent.
2. **Etude des courants** (de la sortie vers l'entrée). A partir du courant débité supposé continu, on calcule la valeur du courant dans les semi-conducteurs ainsi que dans les enroulements secondaires et primaires du transformateur. Les chutes de tension dues aux impédances citées précédemment sont négligées.
3. **Etude des chutes de tension**. A l'aide des courants ainsi déterminés, on peut maintenant calculer les diminutions de la tension redressée dues aux résistances, aux inductances et à la chute de tension interne des semi-conducteurs.
4. **Etude du fonctionnement en court-circuit**. On se reportera à la bibliographie fournie à la fin du cours pour aborder cette étude.

3. Redressement non commandé (diodes)

On n'étudiera dans ce chapitre que l'allure des tensions obtenues au moyen de montages redresseurs triphasés. Puis on déduira les formules générales pour les systèmes de tension polyphasés. Les diodes sont supposées parfaites (interrupteurs parfaits) et le courant à la sortie du montage redresseur continu (charge fortement inductive). On supposera également négligeable l'inductance ramenée au secondaire du transformateur.

3.1 Grandeurs caractéristiques des modes de redressement parallèle et parallèle double

3.1.1 Fonctionnement des redresseurs simple alternance : montage P3

Dans le cas général, les q phases, sièges des q tensions alternatives à redresser, sont couplées en étoile. Grâce à q diodes formant par exemple un commutateur "plus positif", à chaque instant, la borne M est reliée à la plus positive des bornes 1, 2, ..., q . La tension redressée u_d est recueillie entre M et le point neutre N .

Dans ce type de redresseur, les diodes effectuent un seul choix. Nous utilisons l'adjectif "parallèle" (P) pour ce type de montage car entre les deux bornes de sortie, on trouve en parallèle les q voies formées chacune par un enroulement et une diode.

La figure 3-3 représente le montage P3, avec le commutateur à trois diodes. Seul le secondaire en étoile du transformateur est représenté.

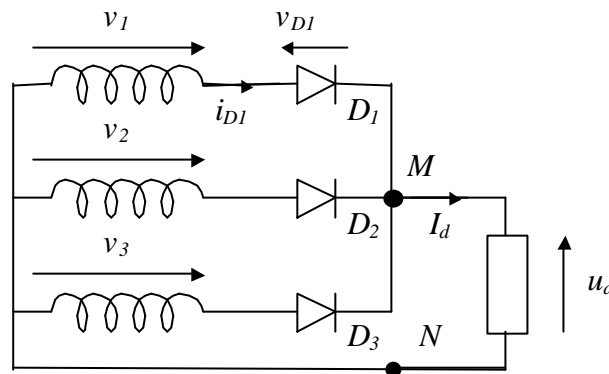


Figure 3-3. Redresseur simple alternance. Montage parallèle P3.

Seule la diode dont l'anode est au plus haut potentiel peut conduire.

Supposons qu'à un instant donné, v_1 est la tension la plus élevée. Si la diode D_2 conduit ($v_{D2} = 0$, $u_d = v_2$), D_1 se trouve sous la tension : $v_{D1} = v_1 - u_d = v_1 - v_2 > 0$ et devient passante.

On a alors : $v_{D1} = 0$ et $v_{D2} = v_2 - v_1 < 0$

donc la diode D_2 se bloque. On a donc :

$$u_d = v_1 \text{ quand } v_1 > v_2 \text{ et } v_3$$

$$u_d = v_2 \text{ quand } v_2 > v_1 \text{ et } v_3$$

$$u_d = v_3 \text{ quand } v_3 > v_1 \text{ et } v_2$$

On obtient en définitive le graphe de la figure 3-4.

La diode D_i conduit lorsque la tension v_i est la plus grande.

Ainsi chaque diode conduit pendant un tiers de la période. On a représenté dans le tableau sous le graphe les intervalles de conduction des diodes (0 : diode bloquée ; 1 : diode passante) ainsi que les expressions des tensions u_d et v_{D1} .

$$v_{D1} = v_1 - u_d$$

Soit : $v_{D1} = 0$ lorsque D_1 conduit,

$v_{D1} = v_1 - v_2$ lorsque D_2 conduit

$v_{D1} = v_1 - v_3$ lorsque D_3 conduit.

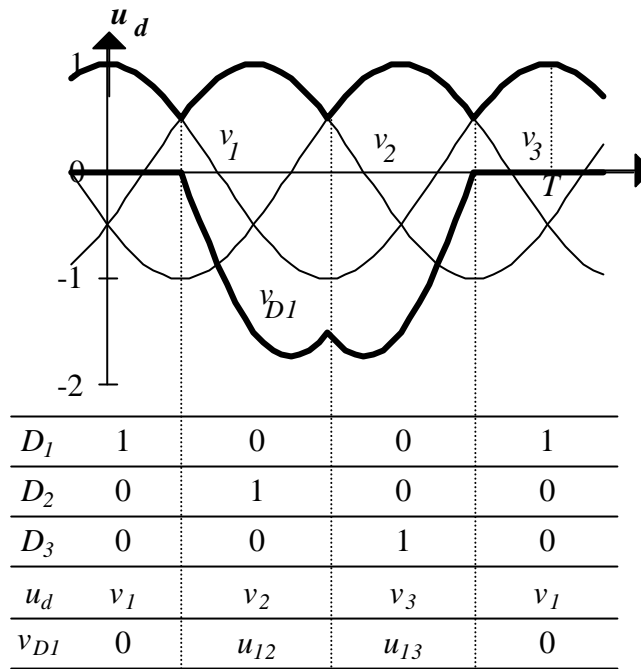


Figure 3-4. Montage P3 : tension redressée.

3.1.1.1 Etude de la tension redressée

La tension redressée u_d est périodique de période $T/3$ (T/p).

Entre $-T/6$ ($-T/2p$) et $+T/6$ ($+T/2p$), cette tension s'exprime :

$$u_d(t) = U_{dM} \cos \omega t$$

avec : $U_{dM} = V\sqrt{2}$, V étant la valeur efficace des tensions simples.

- Valeur moyenne.

On note U_{dio} la valeur moyenne de $u_d(t)$ dans le cas idéal envisagé (indices : i pour idéal ($I_d = Cte$) ; 0 pour moyenne ; d pour disponible).

On calcule :

$$U_{dio} = \frac{1}{T/3} \int_{-T/6}^{+T/6} u_d \cdot dt = U_{dM} \frac{\text{Sin}(\mathbf{p}/3)}{\mathbf{p}/3} = 0,83U_{dM}$$

Dans le cas général :

$$U_{dio} = \frac{1}{T/p} \int_{-T/2p}^{+T/2p} u_d \cdot dt = U_{dM} \frac{\text{Sin}(\mathbf{p}/p)}{\mathbf{p}/p}$$

- Valeur efficace.

On calcule :

$$U_{dieff} = \sqrt{\frac{1}{T/3} \int_{-T/6}^{+T/6} u_d^2 \cdot dt} = \frac{U_{dM}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\text{Sin}(2\mathbf{p}/3)}{2\mathbf{p}/3}} = 0,84U_{dM}$$

Dans le cas général :

$$U_{dieff} = \sqrt{\frac{1}{T/p} \int_{-T/2p}^{+T/2p} u_d^2 \cdot dt} = \frac{U_{dM}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\text{Sin}(2\mathbf{p}/p)}{2\mathbf{p}/p}}$$

- Facteur de forme.

$$F = \frac{U_{dieff}}{U_{dio}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1 + \frac{\text{Sin}(2\mathbf{p}/3)}{2\mathbf{p}/3}}}{\frac{\text{Sin}(\mathbf{p}/3)}{\mathbf{p}/3}} = 1,02$$

Dans le cas général :

$$F = \frac{U_{dieff}}{U_{di0}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin(2p/p)}{2p/p}}}{\frac{\sin(p/p)}{p/p}}$$

Remarque : pour un système monophasé et un redressement simple alternance, le facteur de forme est égal à $p/2 = 1,57$.

3.1.1.2 Etude des courants

• Courant dans la charge.

Ce courant est constant par hypothèse (charge fortement inductive).

Le montage P3 présente à chaque instant une diode susceptible d'être passante. L'hypothèse d'avoir I_d constant est donc réaliste.

• Courant dans une diode.

Le courant dans les diodes est égal à I_d lorsque la diode considérée est passante. Il est égal à 0 si la diode est bloquée. Chaque diode est donc parcourue par un courant d'intensité I_d pendant une fraction $1/q$ de la période T des tensions d'alimentation. L'intensité i_{f1} du courant traversant D_1 évolue donc comme l'indique la figure 3-5.

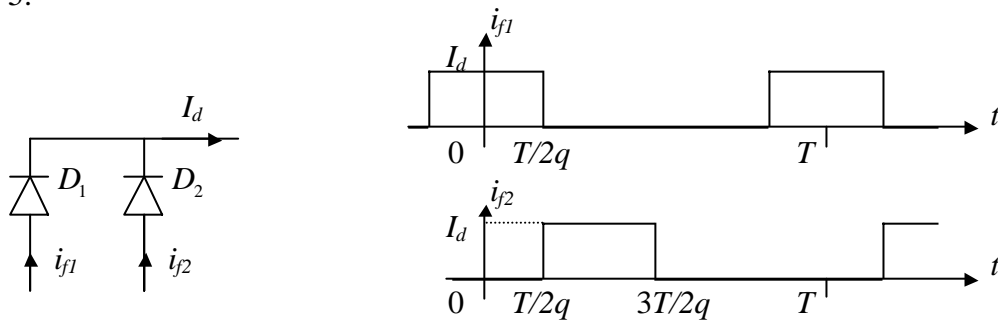


Figure 3-5. Montage Pq. Courant dans une diode.

On en déduit aisément les valeurs moyenne et efficace du courant dans une diode pour $q = 3$:

$$I_{fi0} = \frac{1}{T} \int_{-T/6}^{T/6} I_d dt = \frac{I_d}{3} \quad \text{et} \quad I_{fieff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/6}^{T/6} I_d^2 dt} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$$

Dans le cas général :

$$I_{fi0} = \frac{1}{T} \int_{-T/2q}^{T/2q} I_d dt = \frac{I_d}{q} \quad \text{et} \quad I_{fieff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2q}^{T/2q} I_d^2 dt} = \frac{I_d}{\sqrt{q}}$$

• Courants dans les enroulements secondaires du transformateur.

Le courant dans un enroulement secondaire est identique au courant passant dans la diode qui lui est connectée. D'où les valeurs caractéristiques de son intensité I_s :

$$I_{si0} = I_{fi0} = \frac{I_d}{q} \quad \text{et} \quad I_{sieff} = I_{fieff} = \frac{I_d}{\sqrt{q}}$$

3.1.1.3 Tension inverse maximale aux bornes d'une diode

Le choix des composants d'un montage redresseur nécessite la connaissance de la valeur maximale de la tension inverse appliquée à chaque diode. On a tracé sur la figure 3-4 l'allure de la tension aux bornes de D_1 (v_{D1}).

Si on note V la valeur efficace des tensions secondaires simples, la valeur maximale de la tension inverse supportée par D_1 vaut :

$$U_{iM} = \text{Max}(v_1 - v_3) = \text{Max}(v_1 - v_2) = U\sqrt{2} = \sqrt{3}V\sqrt{2} = V\sqrt{6}$$

U étant la valeur efficace des tensions composées secondaires.

On exprime généralement ces grandeurs en fonction de la valeur moyenne de la tension redressée :

$$U_{di0} = \frac{3}{\mathbf{p}} U_{dM} \text{Sin}(\mathbf{p}/3) = \frac{3\sqrt{2}}{\mathbf{p}} V \text{Sin}(\mathbf{p}/3) = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{2\mathbf{p}} V$$

D'où :

$$U_{iM} = \frac{2\pi}{3} U_{di0} = 2,10U_{di0}$$

Dans le cas général :

- pour q impair :
$$U_{iM} = 2V\sqrt{2} \text{Cos} \frac{\mathbf{p}}{2q}$$
- pour q pair :
$$U_{iM} = 2V\sqrt{2}$$

3.1.2 Redressement parallèle double ou en pont : montage PD3

Dans le cas général, les q enroulements, sièges des q tensions alternatives v_1, v_2, \dots, v_q , sont encore couplés en étoile, mais on utilise $2q$ diodes.

Le premier groupe, D_1, D_2, \dots, D_q , forme un commutateur "plus positif" et réunit M à la plus positive des bornes 1, 2, ..., q . Le second groupe, D'_1, D'_2, \dots, D'_q , forme un commutateur "p plus négatif" et relie N à la plus négative des bornes 1, 2, ..., q . Cet ensemble de $2q$ diodes est couramment appelé pont de diodes.

La tension redressée u_d , recueillie entre M et N , est égale, à chaque instant, à la plus grande différence entre les tensions d'entrée. Le montage effectue donc un double choix, d'où le sigle PD (parallèle double) utilisé.

La figure 3-6 représente le redresseur PD3. Seul le secondaire du transformateur est représenté.

Ce montage est à comparer au pont de Graëtz en monophasé et à ce titre il peut également être appelé triphasé double alternance.

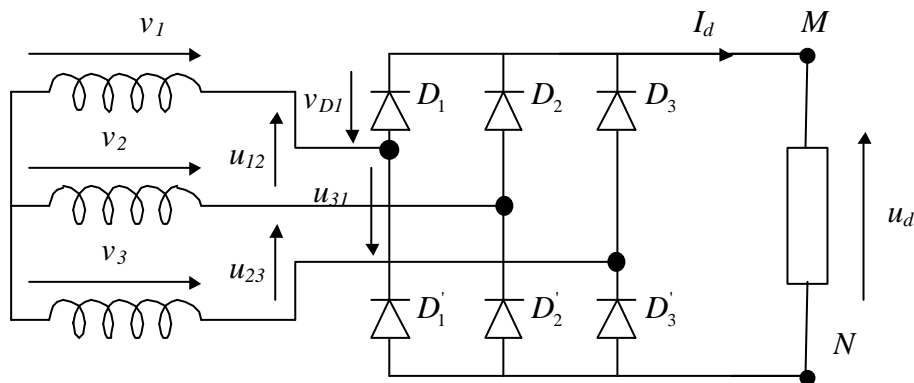


Figure 3-6. Redresseur double alternance. Montage PD3.

Le secondaire du transformateur est couplé en étoile et connecté à deux groupes de diodes : un commutateur à cathode commune (D_1, D_2, D_3) et un commutateur à anode commune (D'_1, D'_2, D'_3). L'existence d'un courant continu dans la charge exige la conduction de deux diodes à tout instant, une de chaque commutateur.

La règle pour déterminer les diodes passantes est la même que pour le montage P3 :

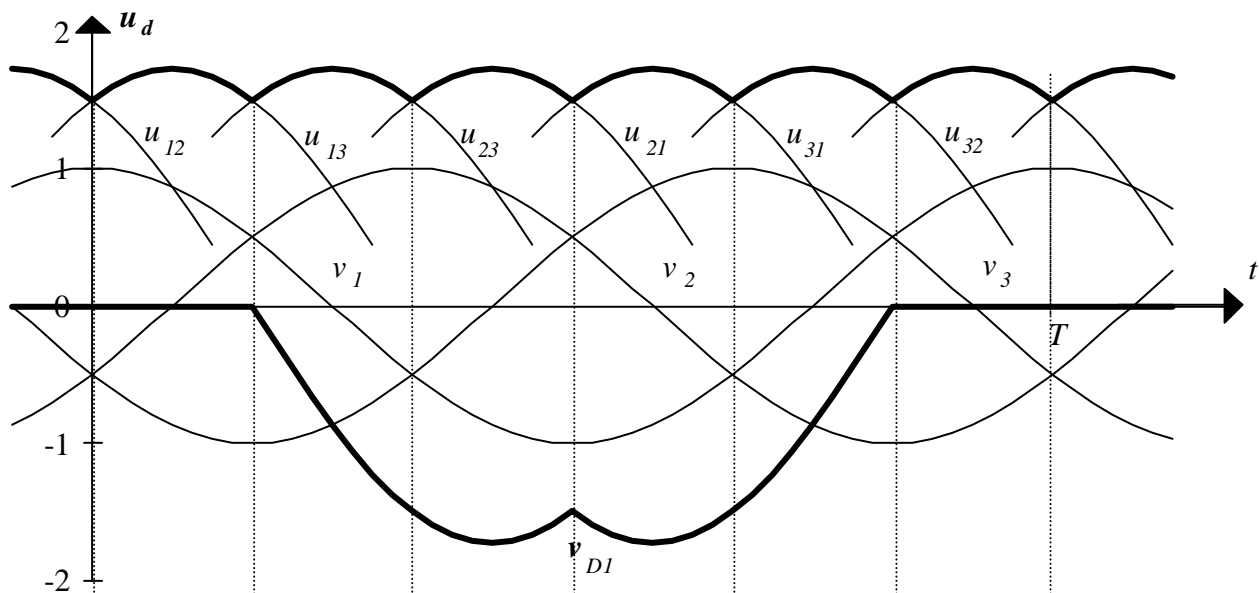
- pour le commutateur à cathode commune, la diode dont l'anode est au potentiel le plus élevé conduit, d'où la dénomination « + positif » ;
- pour le commutateur à anode commune, la diode dont la cathode est au potentiel négatif le plus faible conduit, d'où la dénomination « + négatif ».

Donc :

- lorsque $v_1 > v_3 > v_2$, D_1 et D'_2 conduisent : $u_d = v_1 - v_2$;
- lorsque $v_1 > v_2 > v_3$, D_1 et D'_3 conduisent : $u_d = v_1 - v_3$;
- lorsque $v_2 > v_1 > v_3$, D_2 et D'_3 conduisent : $u_d = v_2 - v_3$;
- etc ...

Chaque diode conduit ainsi pendant un tiers de période (on dira que l'indice de commutation de ce montage est $q = 3$) tandis que la tension redressée se compose de six portions de sinusoi des par période T (on dira que l'indice de pulsation est $p = 6$) ; ces deux indices avaient des valeurs égales dans le cas des montages parallèles simples.

Sur la figure 3-7, on a représenté l'allure de la tension redressée u_d ainsi que la tension aux bornes de la diode D_1 (v_{D1}).



D_1	1	0	0	0	0	1
D_2	0	1	1	0	0	0
D_3	0	0	0	1	1	0
D'_1	0	0	1	1	0	0
D'_2	0	0	0	0	1	1
D'_3	1	1	0	0	0	0
u_{D1}	0	u_{12}	u_{12}	u_{13}	u_{13}	0

Figure 3-7. Montage PD3 - tension redressée.

3.1.2.1 Etude de la tension redressée

La tension redressée u_d est périodique de période T/p ($T/6$).

Entre 0 et T/p ($T/6$), cette tension a pour expression :

$$u_d = U_{dM} \cos \omega t$$

avec : $U_{dM} = U\sqrt{2}$, U étant la valeur efficace des tensions composées.

- Valeur moyenne.

$$U_{di0} = \frac{1}{T/6} \int_{-T/12}^{+T/12} u_d \cdot dt = U_{dM} \frac{\text{Sin}(p/6)}{p/6} = 0,95.U_{dM}$$

- Valeur efficace.

$$U_{dieff} = \sqrt{\frac{1}{T/6} \int_{-T/12}^{+T/12} u_d^2 \cdot dt} = \frac{U_{dM}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1 + \text{Sin}(2p/6)}{2p/6}} = 0,94.U_{dM}$$

- Facteur de forme.

$$F = \frac{U_{dieff}}{U_{di0}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1 + \frac{\text{Sin}(2p/6)}{2p/6}}}{\frac{\text{Sin}(p/6)}{p/6}} = 1,0009$$

Ce résultat montre clairement que la forme de la tension redressée est plus proche du continu que pour le montage P3 ($F = 1,02$).

3.1.2.2 Etude des courants

- Courant dans une diode.

Chaque diode conduit pendant $T/3$.

Par un raisonnement analogue à celui utilisé pour les montages parallèles, on déduit :

$$I_{fi0} = \frac{1}{T} \int_0^{T/3} I_d dt = \frac{I_d}{3} \quad \text{et} \quad I_{fieff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/3} I_d^2 dt} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$$

Dans le cas général :

$$I_{fi0} = \frac{I_d}{q} \quad \text{et} \quad I_{fieff} = \frac{I_d}{\sqrt{q}}$$

- Courant dans les enroulements secondaires du transformateur.

On voit sur la figure 3-8a) que l'intensité i_{s1} du courant de l'enroulement secondaire étudié s'exprime :

$$i_{s1} = i_{f1} - i_{f1'}$$

où i_{f1} et $i_{f1'}$ sont les intensités du courant dans les diodes D_1 et D_1' .

Chacune de ces diodes conduit le courant de la charge durant $T/3$; leur débloccage est décalé dans le temps d'une demi période (voir graphe figure 3-7). Le graphe de l'intensité i_{s1} est donc celle de la figure 3-8b). Les valeurs moyenne et efficace ont respectivement pour expression :

$$I_{si0} = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{T/3} I_d \cdot dt + \int_{T/2}^{T/2+T/3} (-I_d) \cdot dt \right\} = 0 \quad \text{et} \quad I_{sieff} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/3} I_d^2 \cdot dt} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Dans le cas général :

$$I_{sieff} = I_d \sqrt{\frac{2}{q}}$$

La valeur moyenne de l'intensité des courants secondaires est nulle et la valeur efficace est $\sqrt{2}$ fois plus grande qu'en commutation parallèle, à courant égal.

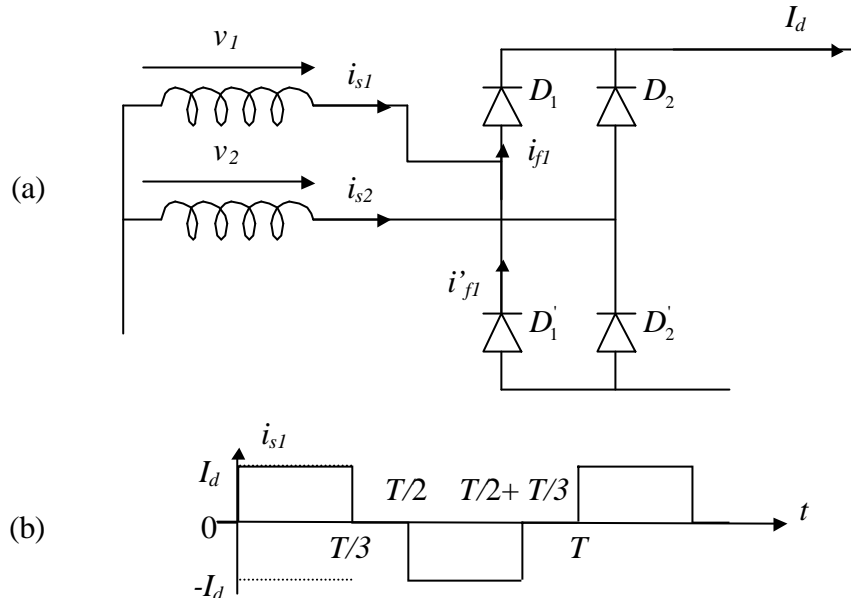


Figure 3-8. Montage PDq. Courant au secondaire du transformateur (enroulement 1).

3.1.2.3 Tension inverse maximale aux bornes d'une diode

On a établi sur la figure 3-7 que les montages parallèles doubles imposent aux diodes de supporter en inverse la valeur maximale de la tension redressée : $U_{iim} = U_{dm}$.

On obtient alors :
$$U_{iim} = U_{dm} = \frac{p/6}{\sin(p/6)} U_{di0} = 1,047 U_{di0}$$

3.2 Facteurs de puissance

3.2.1 Rappel

Considérons une charge alimentée par une tension sinusoïdale $u(t) = U\sqrt{2}\cos(\omega t)$. Le courant traversant la charge est appelé $i(t)$ avec $i(t) = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \mathbf{j})$.

La puissance disponible est donc : $p(t) = u(t) \cdot i(t)$, \mathbf{j} étant le déphasage entre $u(t)$ et $i(t)$ ($i(t)$ étant pris comme référence de phase).

Soit :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = 2UICos(\omega t) \cdot Cos(\omega t + \mathbf{j}) = UI[Cos(2\omega t + \mathbf{j}) + Cos(\mathbf{j})].$$

La puissance disponible peut donc se décomposer en une somme de la puissance moyenne disponible appelée **puissance active** $P_a = UI\cos\mathbf{j}$ et de la puissance fluctuante $P_f = UI\cos(2\omega t + \mathbf{j})$.

$\cos\mathbf{j}$ est appelé **facteur de puissance**.

3.2.2 Facteur de puissance secondaire

Par extension de la définition donnée en régime sinusoïdal, on nommera facteur de puissance du primaire ou du secondaire (du transformateur) le rapport de la puissance active disponible en sortie du montage et de la puissance apparente développée dans les enroulements du transformateur :

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

On abordera dans ce cours uniquement au facteur de puissance secondaire. On pourra se reporter à la bibliographie fournie pour le calcul du facteur de puissance primaire concernant les différents types de montages abordés.

Si on suppose le transformateur et les diodes parfaits, la puissance active se réduit à celle consommée par la charge et a pour expression :

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T u_d \cdot i_d \cdot dt .$$

Le courant de charge étant supposé constant et égal à I_d (charge fortement inductive), on a :

$$P_a = I_d \frac{1}{T} \int_0^T u_d \cdot dt = U_{di0} I_d .$$

3.2.2.1 Montage parallèle

On a $p = q$ enroulements secondaires fournissant des tensions sinusoïdales de valeur efficace V et parcourus par des courants d'intensité efficace I_{sieff} ; d'où la puissance apparente développée par le secondaire :

$$S = p \cdot V \cdot I_{sieff} .$$

On a vu au §3.1.1.2. que :

$$I_{sieff} = \frac{I_d}{\sqrt{q}} .$$

Donc :

$$S = q \cdot V \cdot \frac{I_d}{\sqrt{q}} = \sqrt{q} \cdot V \cdot I_d .$$

En reportant l'expression de U_{di0} établie au §3.1.1.1., on obtient l'expression de P_a :

$$P_a = \frac{p}{\mathbf{p}} \text{Sin}\left(\frac{\mathbf{p}}{p}\right) \sqrt{2} \cdot V \cdot I_d$$

et celle du facteur de puissance :

$$f_p = \frac{P_a}{S} = \frac{\sqrt{2p}}{\mathbf{p}} \text{Sin}\left(\frac{\mathbf{p}}{p}\right) .$$

Le tableau 3-1 donne les valeurs de f_p obtenues pour quelques valeurs de p .

p	2	3	4	5	6
f_p	0,636	0,675	0,636	0,592	0,55

Tableau 3-1. Facteur de puissance.

Le facteur de puissance passe donc par son maximum pour les montages triphasés.

C'est donc en triphasé que le produit $p \cdot I_{sieff}$, qui définit les dimensions du secondaire (nombre d'enroulements multiplié par la valeur efficace du courant dans ces enroulements), passe par sa valeur minimum puisque d'après ce que l'on a écrit précédemment :

$$p \cdot I_{sieff} = \frac{S}{V} = \frac{P_a}{V \cdot f_p} .$$

3.2.2.2 Montage parallèle double

On a q enroulements secondaires fournissant des tensions sinusoïdales de valeur efficace V et parcourus par des courants d'intensité efficace I_{sieff} ; d'où la puissance apparente développée par le secondaire :

$$S = q.V . I_{sieff} .$$

On a vu au §3.1.2.2. que :

$$I_{sieff} = \sqrt{\frac{2}{q}} . I_d .$$

Donc :

$$S = \sqrt{2q} . V . I_d .$$

En reportant l'expression de U_{dio} établie au §3.1.2.1., on obtient l'expression de P_a :

$$P_a = \frac{p}{P} \text{Sin}\left(\frac{p}{p}\right) U_{dM} . I_d$$

et celle du facteur de puissance : $f_p = \frac{P_a}{S} = \frac{p}{P\sqrt{2q}} \text{Sin}\left(\frac{p}{p}\right) \cdot \frac{U_{dM}}{V} .$

Quelque soit la valeur de p , on peut montrer que l'on obtient alors :

$$f_p = \frac{2}{P} \sqrt{q} . \text{Sin}\left(\frac{p}{q}\right) .$$

Le tableau 3-2 donne les valeurs de f_p obtenues pour quelques valeurs de p .

	PD2	PD3	PD4	PD6
p	2	6	4	6
q	2	3	4	6
f_p	0,900	0,955	0,900	0,780

Tableau 3-2. Facteur de puissance.

De même que pour les montages parallèle simple, le facteur de puissance passe donc par son maximum pour les montages triphasés.

3.2.2.3 Conclusion

- Le facteur de puissance est maximum en triphasé. A puissance active disponible pour l'utilisateur P_a et amplitude de la tension redressée U_{dM} données, la masse de cuivre concernant le transformateur est la plus faible en triphasé.
- Le facteur de puissance des montages parallèle double est meilleur que celui des montages parallèle simple.

On peut donc conclure que le montage PD3 est le plus efficace (idem S3) des montages parallèles pour ce qui concerne la rentabilité du transformateur. Il est clair cependant que ce montage nécessite 6 diodes au lieu de 3 pour le montage P3.

3.3 Chutes de tension en charge (fonctionnement normal)

Jusqu'ici nous avons supposé la source et le redresseur parfaits. En fait, les impédances des éléments du redresseur et celle du réseau qu'il alimente entraînent une diminution de la valeur moyenne U_{dio} de la tension redressée au fur et à mesure que le courant continu débité I_d croît. Au début de la caractéristique de tension (U_{do}, I_d), c'est-à-dire entre la marche à vide et la marche en pleine charge, la chute de tension moyenne totale ΔU_{do} est d'ordinaire faible par rapport à la tension à vide.

On peut donc, avec une bonne approximation, calculer la chute de tension totale :

- en ajoutant les chutes de tension dues aux diverses causes,
- en calculant chacune de ces chutes de tension partielles sans tenir compte des phénomènes qui sont à l'origine des autres.

La chute de tension totale est obtenue en ajoutant :

- la chute due aux commutations (empiétements) $\Delta_1 U_{d0}$;
- la chute due aux résistances $\Delta_2 U_{d0}$;
- la chute due aux diodes $\Delta_3 U_{d0}$.

On écrit : $U_{do} = U_{dio} - \mathbf{DU}_{do}$

avec : $\mathbf{DU}_{do} = \Delta_1 U_{d0} + \Delta_2 U_{d0} + \Delta_3 U_{d0}$

Surtout pour les montages de forte puissance, c'est le phénomène d'empiétement lors des commutations qui est à l'origine de la principale chute de tension.

Remarque: pour l'étude des chutes de tension en fonctionnement normal, on a de plus en plus recours à la simulation (SPICE). Il s'avère cependant important de comprendre leur origine et de savoir les répertorier.

3.3.1 Chutes de tension inductives dues à la commutation des diodes : phénomène d'empiétement

Nous avons jusqu'ici supposé tous les éléments du redresseur parfaits, et en particulier le transformateur. En réalité, les enroulements primaire et secondaire du transformateur présentent des inductances de fuite (voir 1ère partie du module M6). En conséquence, l'intensité du courant ne peut varier de façon discontinue dans ces éléments et la commutation ne peut être instantanée : l'intensité du courant dans la diode qui se bloque ne peut passer instantanément de I_d à 0 tandis que celle de la diode qui s'enclenche passe de 0 à I_d . On se propose dans ce paragraphe d'étudier l'influence de ce phénomène sur la tension redressée. Nous allons chercher à évaluer la chute de tension moyenne de la moyenne de la tension redressée liée au phénomène d'empiétement $\Delta_1 U_{d0}$.

Pour simplifier l'étude (nous généraliserons à la fin), nous considérons la commutation entre deux diodes d'un commutateur parallèle. Nous supposons constante l'intensité du courant de la charge (charge fortement inductive) et nommons l l'inductance totale de fuite ramenée au secondaire du Transformateur.

La figure 3-9a) décrit le montage étudié. La figure 3-9b) décrit l'allure des tensions et courants mis en jeu.

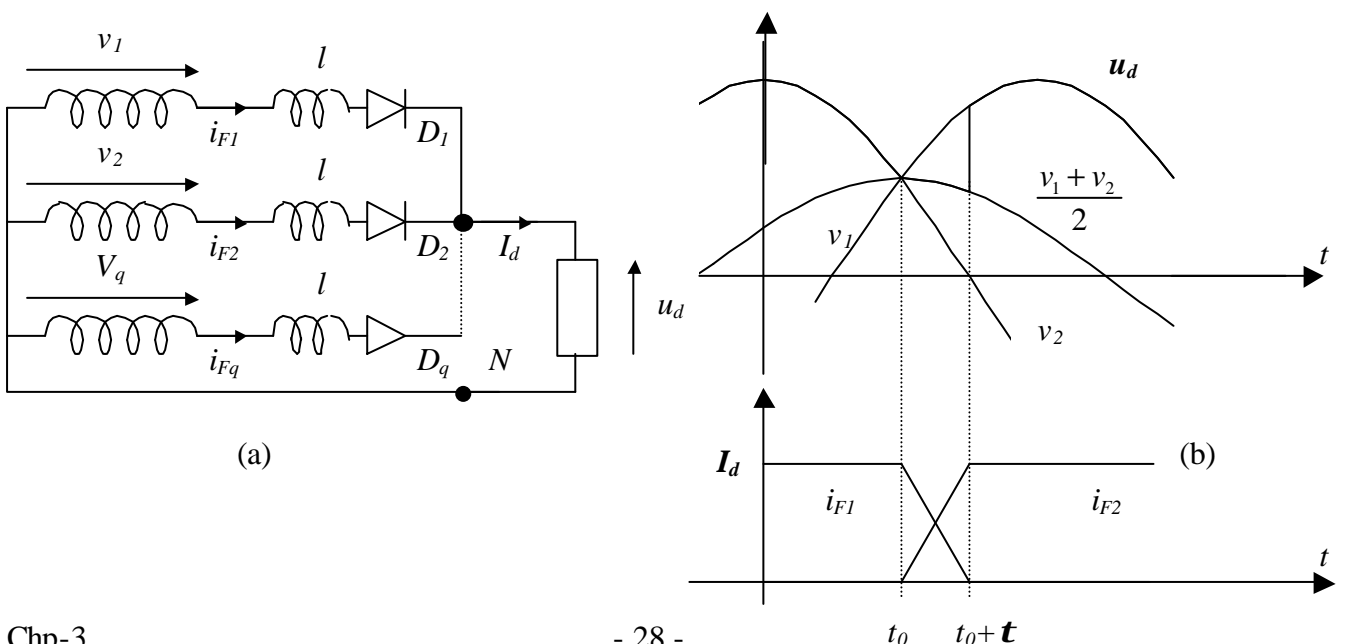


Figure 3-9. a) Montage. b) Phénomène d'empiétement.

• **Calcul de la chute de tension moyenne :**

A l'instant t_0 où $v_1(t) = v_2(t)$, les diodes commutent : l'intensité i_{F2} du courant dans D_2 cesse d'être nulle et commence à augmenter. i_{F2} prend la valeur I_d à l'instant $t_0 + t$ où se termine la commutation. Simultanément l'intensité i_{F1} du courant dans D_1 est passée de I_d à l'instant t_0 à 0 à l'instant $t_0 + t$. Pendant la durée t , les deux diodes sont simultanément conductrices ; c'est le phénomène d'empiètement (la diode D_1 reste enclenchée au-delà de la limite idéale de conduction et empiète sur la région de conduction de D_2). Pendant la durée t de l'empiètement la tension redressée u_d doit satisfaire à (loi des mailles) :

$$u_d = v_1 - l \frac{di_{F1}}{dt} = v_2 - l \frac{di_{F2}}{dt}$$

Le courant de charge est supposé d'intensité constante I_d , ce qui impose :

$$i_{F1} + i_{F2} = I_d = C^{te} \Rightarrow \frac{di_{F1}}{dt} + \frac{di_{F2}}{dt} = 0$$

d'où :

$$u_d = v_1 - l \frac{di_{F1}}{dt} = v_2 + l \frac{di_{F1}}{dt} \Rightarrow u_d = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Pendant la durée t de l'empiètement la tension redressée vaut donc $\frac{1}{2}(v_1 + v_2)$ au lieu de v_2 dans le cas idéal. Au delà de l'instant $t_0 + t$, on a :

$$i_{F1} = 0 \quad i_{F2} = I_d \quad u_d = v_2$$

d'où l'allure de la tension u_d représentée sur la figure 3-9b).

Si la commutation était instantanée, la tension redressée u_d vaudrait v_2 au delà de l'instant t_0 ; l'empiètement se traduit donc par une chute de tension instantanée:

$$\Delta_1 u_d = u_{di} - u_d = v_2 - \frac{1}{2}(v_1 + v_2) = \frac{1}{2}(v_2 - v_1) = l \frac{di_{F2}}{dt}$$

où u_{di} est la forme de la tension redressée dans le cas d'une commutation instantanée.

La valeur moyenne de $\Delta_1 u_d$ vaut donc :

$$\Delta_1 U_{d0} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+t} \frac{1}{2}(v_2 - v_1) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+t} l \frac{di_{F2}}{dt} dt = \frac{1}{T} \int_0^{I_d} l di_{F2} = \frac{1}{T} \cdot l \cdot I_d$$

soit encore :

$$\Delta_1 U_{d0} = \frac{1}{T} l \cdot I_d = \frac{l \mathbf{w}}{2 \mathbf{p}} I_d$$

En conclusion, on voit que la chute de tension moyenne en charge est d'autant plus grande que l'inductance de fuites ramenée au secondaire est plus importante et l'intensité du courant à commuter plus grande.

• **Calcul de la durée t de l'empiètement en fonction de l, \mathbf{w} et U :**

U est la valeur efficace de la tension composée appliquée entre les anodes des deux diodes qui commutent.

Les relations :

$$u_d = v_1 - l \frac{di_{F1}}{dt} = v_2 - l \frac{di_{F2}}{dt} = v_1 + l \frac{di_{F2}}{dt}$$

impliquent :

$$2l \frac{di_{F2}}{dt} = v_2 - v_1 = u_{21} = U \sqrt{2} \text{Sin}(\mathbf{w}(t - t_0)).$$

D'où :

$$i_{F2} = -\frac{U \sqrt{2}}{2l \mathbf{w}} \text{Cos}(\mathbf{w}(t - t_0)) + C^{te}.$$

A l'instant $t = t_0$, début de la commutation, l'intensité i_{F2} est nulle, ce qui permet de déterminer la

constante d'intégration :

$$C^{te} = \frac{U \sqrt{2}}{2l \mathbf{w}}.$$

D'où :
$$i_{F2} = \frac{U\sqrt{2}}{2l\omega} (1 - \cos(\omega(t - t_0)))$$

L'instant $t_0 + t$ définit la fin de l'empiétement à laquelle i_{F2} prend la valeur I_d . Donc :

$$I_d = \frac{U\sqrt{2}}{2l\omega} (1 - \cos(\omega t))$$

D'où :
$$t = \frac{1}{\omega} \text{ArcCos} \left(1 - \frac{2l\omega}{U\sqrt{2}} I_d \right) = \frac{T}{2p} \text{ArcCos} \left(1 - \frac{\sqrt{2}l\omega}{U} I_d \right)$$

La durée de l'empiétement est donc d'autant plus grande que l'intensité du courant à commuter est importante et que l'inductance de fuite est plus élevée. Elle diminue lorsque l'amplitude de la tension composée qui provoque la commutation augmente.

Remarque : sur la figure 3-9b), on a représenté une croissance de i_{F1} de 0 à I_d (avec décroissance simultanée de i_{F2}) linéaire. En réalité cette croissance sera exponentielle du fait de l'impédance ramenée au secondaire du transformateur, mais cela ne change rien au raisonnement ayant permis de calculer $\Delta_1 U_{d0}$ et t . Les résultats restent également inchangés.

• **Cas général : redresseur quelconque**

La chute de tension est proportionnelle au nombre de commutations par période, soit à l'indice de pulsation p :

$$\Delta_1 U_{d0} = \frac{l\omega}{2p} p \cdot I_d$$

La figure 3-11 donne le graphe des tensions pour le montage redresseur en pont de la figure 3-10 (PD3 pour un couplage du secondaire en étoile, S3 pour un couplage en triangle).

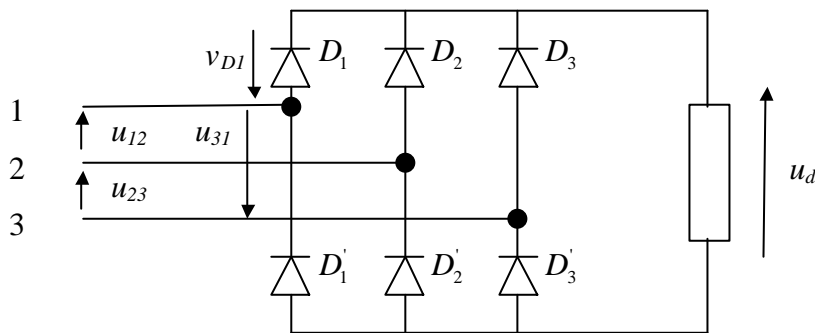


Figure 3-10.

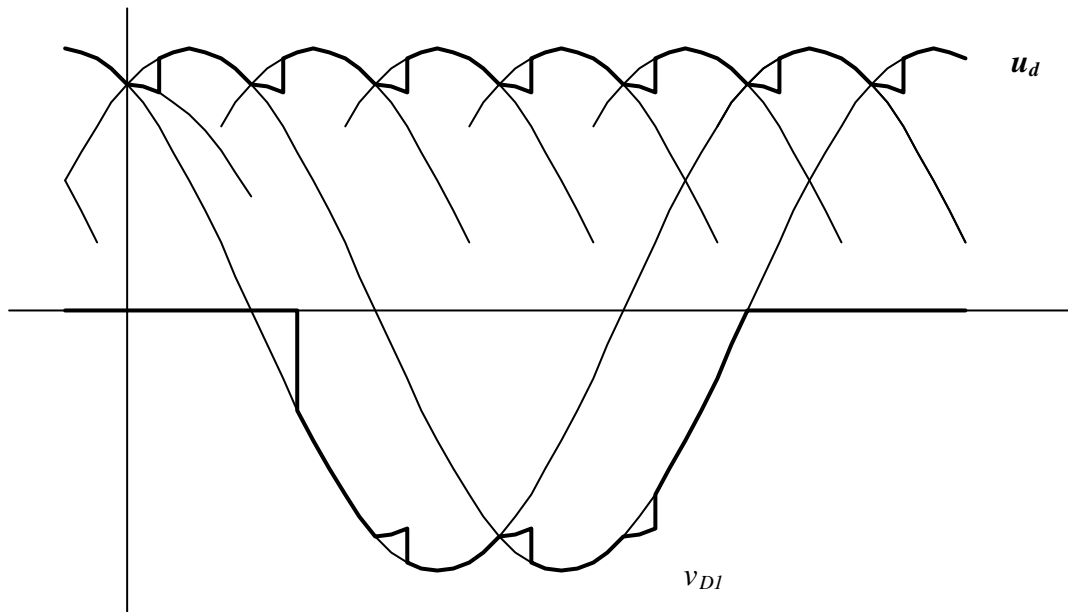


Figure 3-11.

3.3.2 Chute de tension ohmique

Les enroulements du transformateur provoquent une chute de tension continue du fait de leurs résistances propres (que l'on peut ramener au secondaire). Cette chute de tension s'écrit :

$$\Delta_2 u_d = R_s i_s$$

R_s étant la résistance du transformateur ramenée au secondaire et i_s l'intensité du courant dans un enroulement secondaire.

3.3.3 Chute de tension due aux diodes

On sait qu'une diode enclenchée présente une chute de tension :

$$\Delta_3 u_d = V_{seuil} + r_f i_f$$

lorsqu'elle est parcourue par un courant direct d'intensité i_f . Connaissant le nombre de diodes disposées en série et simultanément conductrices et l'intensité du courant de charge, on pourra donc calculer la chute de tension due à ces composants.

3.4 Influence de la nature du récepteur

Pour étudier les divers redresseurs à diodes, nous avons commencé par supposer la source des tensions alternatives parfaite (impédance nulle) et le récepteur de courant fortement inductif conduisant à un courant constant. Puis, pour corriger les résultats obtenus en évaluant la chute de tension en charge, nous avons tenu compte de l'impédance de la source tout en supposant encore le redresseur fortement inductif.

Pour compléter cette étude des redresseurs à diodes, nous allons **examiner l'influence de la nature du récepteur** sur le fonctionnement des montages et la valeur des diverses variables, afin de voir dans quelle mesure il faut corriger les résultats obtenus en supposant le récepteur fortement inductif.

Cette étude corrective supposera la source parfaite.

Les deux cas de charges les plus fréquents sont les suivants :

- récepteur passif, résistant et inductif ;
- récepteur actif comportant en série une résistance, une inductance et une force électromotrice.

Dans le cadre de ce cours, seul le cas du récepteur passif est traité.

Le récepteur est donc constitué d'une charge résistive modélisée par une résistance pure en série avec une inductance pure.

Si, au cours de l'intervalle $-\frac{\pi}{p} < \omega t < \frac{\pi}{p}$ (p étant l'indice de pulsation du montage), on lui applique une

tension $u_d(t) = U_{dM} \cos \omega t$, le courant $i_d(t)$ est toujours positif et la conduction est continue.

Tous les résultats de l'étude des tensions restent utilisables. Par contre le courant $i_d(t)$ n'est plus parfaitement lissé ; l'étude de ses variations au cours d'une de ses périodes montre comment corriger les résultats relatifs aux courants.

Pour $-\frac{\pi}{p} < \omega t < \frac{\pi}{p}$, le courant $i_d(t)$ est solution de :

$$L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = U_{dM} \cos \omega t$$

La solution générale de cette équation (régime transitoire) s'écrit :

$$i_{dG}(t) = K \cdot \exp(-t / \tau)$$

avec : $\tau = \frac{L}{R}$.

La solution particulière (régime permanent) s'écrit sous la forme :

$$i_{dP}(t) = I_M \cdot \cos(\omega t - \mathbf{j})$$

En remplaçant ce résultat dans l'équation différentielle et en prenant par exemple $\omega t - \mathbf{j} = 0$ et

$\omega t - \mathbf{j} = \frac{\pi}{2}$, on obtient facilement I_M et \mathbf{j} :

$$I_M = \frac{U_{dM}}{Z} \quad ; \quad \mathbf{j} = \frac{L\omega}{R} \quad ; \quad Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$$

Z représente l'impédance équivalente à la charge et \mathbf{j} le déphasage entre le courant $i_d(t)$ et la tension $u_d(t)$ prise comme référence (le courant est en retard sur la tension).

On a donc : $i_d(t) = i_{dG}(t) + i_{dP}(t) = K \cdot \exp(-t / \tau) + I_M \cdot \cos(\omega t - \mathbf{j})$

En désignant par I_0 la valeur de $i_d(t)$ pour $\omega t = 0$ (conditions initiales), on obtient :

$$K = I_0 - I_M \cos \mathbf{j}$$

et
$$i_d(t) = \frac{U_{dM}}{Z} \cos(\omega t - \mathbf{j}) + \left[\left(I_0 - \frac{U_{dM}}{Z} \cos \mathbf{j} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

On peut caractériser la charge par son facteur de qualité :

$$Q = \frac{L\omega}{R}$$

De façon qualitative, plus le facteur de qualité Q sera élevé, plus le courant redressé $i_d(t)$ se rapprochera du continu (la charge est de plus en plus inductive).

On exprime Z , \mathbf{j} , $\cos \mathbf{j}$ et $\sin \mathbf{j}$ en fonction de Q :

$$Z = R\sqrt{1+Q^2} \quad ; \quad \mathbf{j} = \arctan Q \quad ; \quad \sin \mathbf{j} = \frac{Q}{\sqrt{1+Q^2}} \quad ; \quad \cos \mathbf{j} = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2}}$$

De même pour $i_d(t)$:

$$i_d(t) = \frac{U_{dM}}{R} \frac{\cos \omega t + Q \sin \omega t}{1+Q^2} + \left[\left(I_0 - \frac{U_{dM}}{R(1+Q^2)} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

Pour trouver la valeur de I_0 , on écrit que :

$$i_d\left(-\frac{\pi}{p}\right) = i_d\left(\frac{\pi}{p}\right)$$

car, en régime permanent, le courant $i_d(t)$ est forcément périodique de même période p/p que la tension redressée $u_d(t)$ du fait que tous les éléments du circuit étudié sont linéaires.

On obtient alors en définitive :

$$I_0 = \frac{U_{dM}}{R(1+Q^2)} \left[\frac{2Q \sin \frac{p}{p}}{p} \frac{1}{\exp\left(\frac{p}{pQ}\right) - \exp\left(-\frac{p}{pQ}\right)} + 1 \right]$$

En reportant dans l'expression de $i_d(t)$, On obtient finalement :

$$i_d(t) = \frac{U_{dM}}{R(1+Q^2)} \left[\cos \omega t + Q \sin \omega t + \frac{Q \sin\left(\frac{p}{p}\right)}{\text{Sh}\left(\frac{p}{pQ}\right)} \exp\left(-\frac{\omega t}{Q}\right) \right]$$

Les figures 3-12 et 3-13 montrent l'allure de $i_d(t)$ pour différentes valeurs de Q pour $R=10\Omega$ et $U_{dM} = 380\sqrt{2}$, respectivement pour $p = 2$ (montage P2) et $p = 3$ (montage P3).

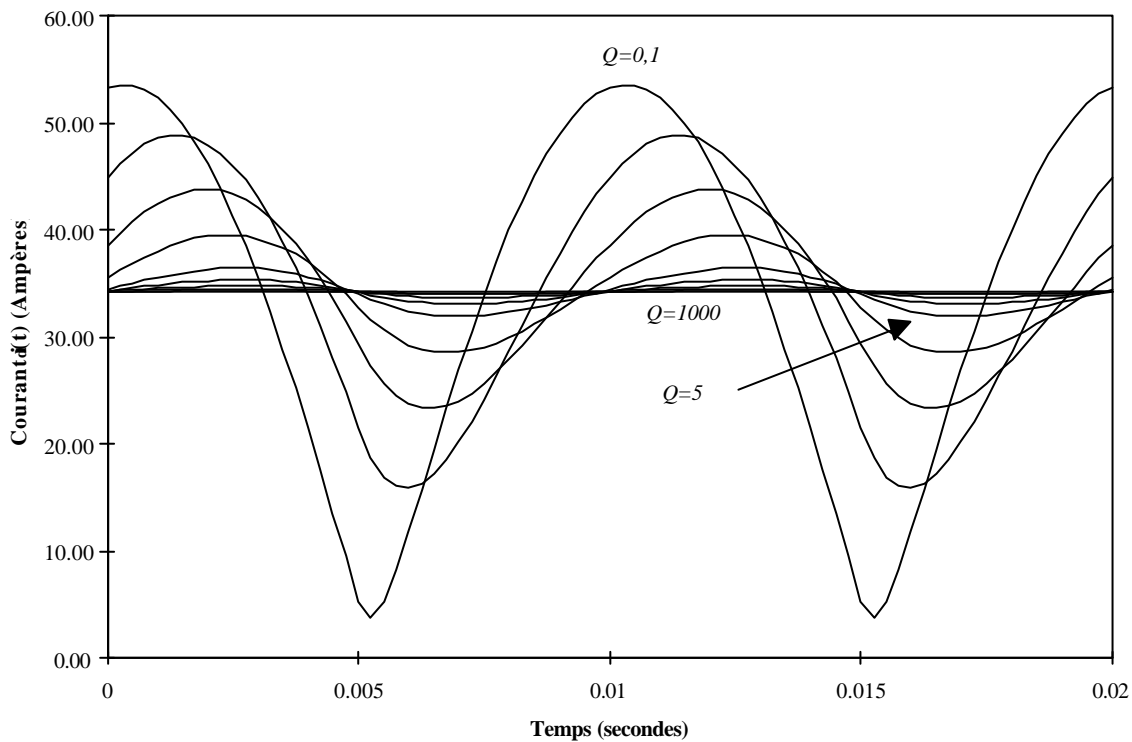


Figure 3-12. Allure du courant redressé $i_d(t)$ pour $p = 2$.

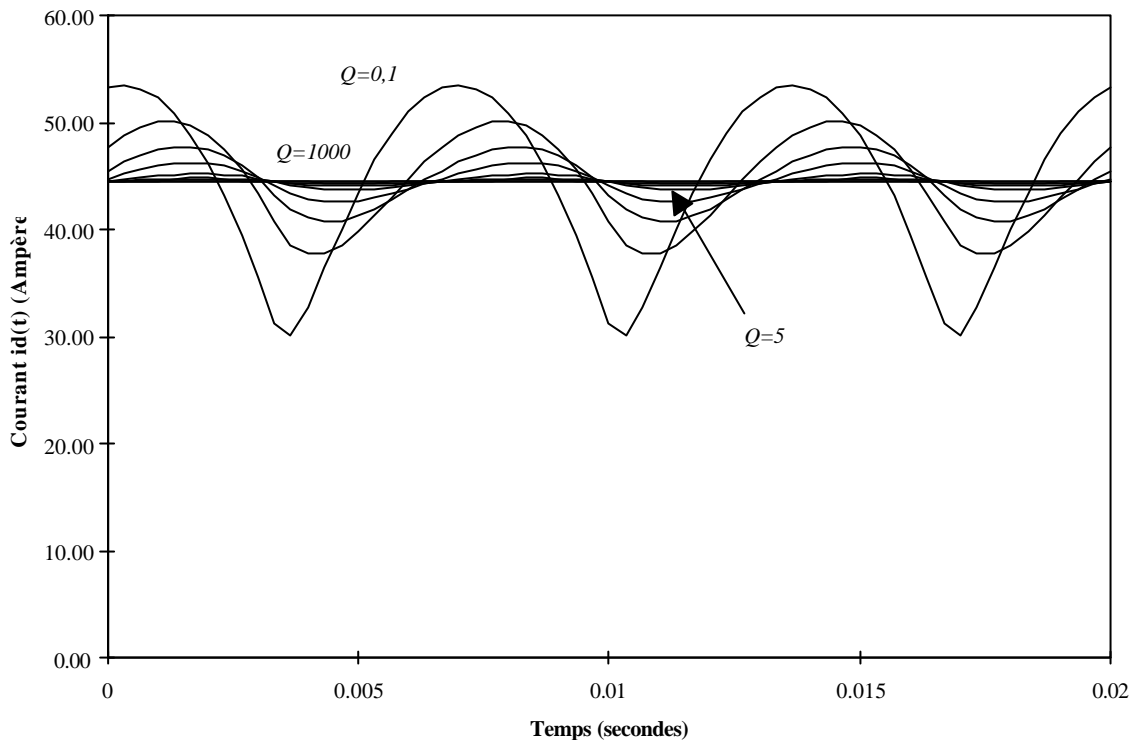


Figure 3-13. Allure du courant redressé $i_d(t)$ pour $p = 3$.

3.4.1 Valeurs caractéristiques du courant redressé

- Valeur moyenne.

La valeur moyenne du courant aux bornes de l'inductance est nulle. Donc la valeur moyenne I_{d0} de $i_d(t)$ est égale à :

$$I_{d0} = \frac{U_{di0}}{R} = \frac{U_{dM}}{R} \frac{p}{p} \text{Sin}\left(\frac{p}{p}\right)$$

- Valeurs minimale et maximale.

Les valeurs minimale et maximale, I_{dM} et I_{dm} , s'obtiennent en recherchant les instants où la dérivée du courant $i_d(t)$ s'annule, soit :

$$\frac{di_d}{d\omega t} = 0$$

Les deux valeurs de ω satisfaisant cette condition correspondent, l'une (ω_m) négative au minimum de $i_d(t)$, l'autre (ω_M) positive à son maximum.

Les valeurs extrêmes du courant, obtenues pour $\frac{di_d}{dt} = 0$ correspondent à $Ri_d = u_d$, soit :

$$I_{dM} = \frac{U_{dM} \text{Cos}(\omega_M)}{R} \text{ et } I_{dm} = \frac{U_{dM} \text{Cos}(\omega_m)}{R}$$

On exprime en général les rapports :

$$\frac{I_{dM}}{I_{d0}} = \frac{I_{dM}}{U_{di0}} \cdot R = \frac{p \text{Cos}(\omega_M)}{p \text{Sin}\frac{p}{p}} \text{ et } \frac{I_{dm}}{I_{d0}} = \frac{I_{dm}}{U_{di0}} \cdot R = \frac{p \text{Cos}(\omega_m)}{p \text{Sin}\frac{p}{p}}$$

- Valeur efficace.

Par définition :

$$I_{deff} = \sqrt{\frac{p}{2p} \int_{-\frac{p}{p}}^{\frac{p}{p}} i_d^2(t) \cdot d\omega} = \sqrt{\frac{p}{T} \int_{-\frac{T}{2p}}^{\frac{T}{2p}} i_d^2(t) \cdot dt}$$

On déduit le facteur de forme :

$$F_{I_d} = \frac{I_{deff}}{I_d}$$

3.4.2 Application aux valeurs usuelles de p

Pour les valeurs les plus usuelles de p , soient 2, 3 et 6, et pour diverses valeurs de Q , les paramètres suivants ont été calculés :

- les valeurs extrêmes de $\frac{i_d}{I_{d0}}$
- le facteur de forme F_{I_d}
- le rapport $\frac{I_0}{I_{d0}}$ (I_0 étant la valeur du courant lors des commutations)

Les résultats sont présentés dans le tableau 3-3.

Ils montrent que le courant redressé s'écarte d'autant moins de sa moyenne que p et Q sont grands.

$Q = \infty$ correspond à l'hypothèse d'une charge infiniment inductive, donnant lieu à un courant constant.

p grand correspond à une tension aux bornes de la charge quasi-constante, et donc à un courant également quasi-constant.

De façon plus fine, on peut remarquer que :

- lorsque l'indice de pulsation est faible, égal à 2 ou 3, on ne peut négliger l'ondulation de $i_d(t)$ que pour les fortes valeurs de Q ;
- pour p égal à 6, l'approximation $i_d(t) = I_d$ est acceptable, même pour $Q=0$ (erreur inférieure à 10%).

	Q	0	0,5	1	2	5	10
$p=2$	I_{dM}	1,57	1,428	1,278	1,156	1,068	1,027
	I_{dm}	0	0,452	0,678	0,834	0,934	0,96
	I_{deff}	1,111	1,055	1,022	1,007	<1,005	
	I_0	0	0,631	0,856	0,958	0,993	>0,995
$p=3$	I_{dM}	1,209	1,127	1,078	1,04	1,017	1,008
	I_{dm}	0,605	0,845	0,927	0,957	0,984	0,992
	I_{deff}	1,017	1,015	1,012	<1,005		
	I_0	0,605	0,916	0,973	0,993	>0,995	
$p=6$	I_{dM}	1,047	1,017	1,009	<1,005		
	I_{dm}	0,907	0,981	0,99	>0,995		
	I_{deff}	<1,005					
	I_0	0,907	0,95	0,974	>0,995		

Tableau 3-3. Valeurs du courant $i_d(t)$ rapportées à I_d .