



## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

#### 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.



#### 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.

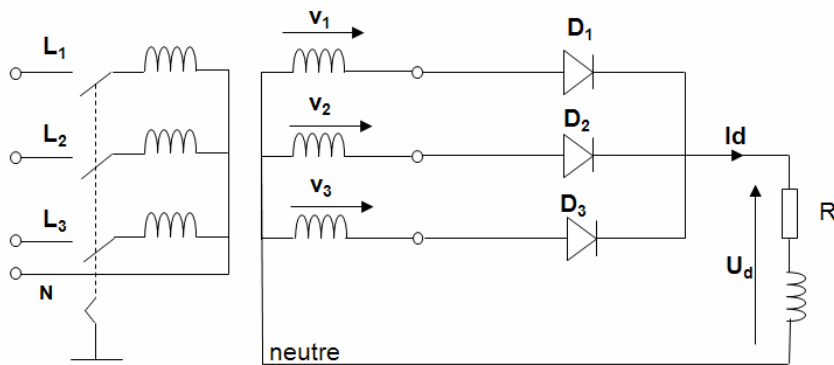
On distingue trois types de montages :

1. **P<sub>q</sub>** : montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance" ;
2. **PD<sub>q</sub>** : montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont";
3. **S<sub>q</sub>** : montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source polygonale (Les montages de type S<sub>q</sub> ne seront pas étudiés dans ce cours).

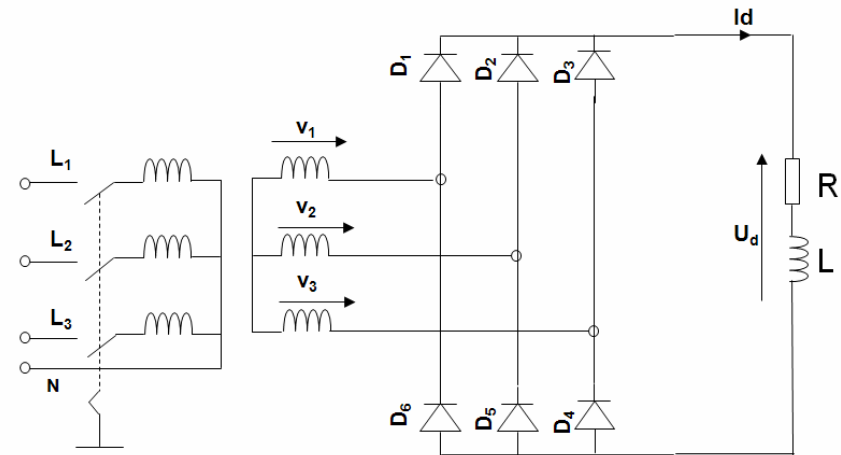
## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

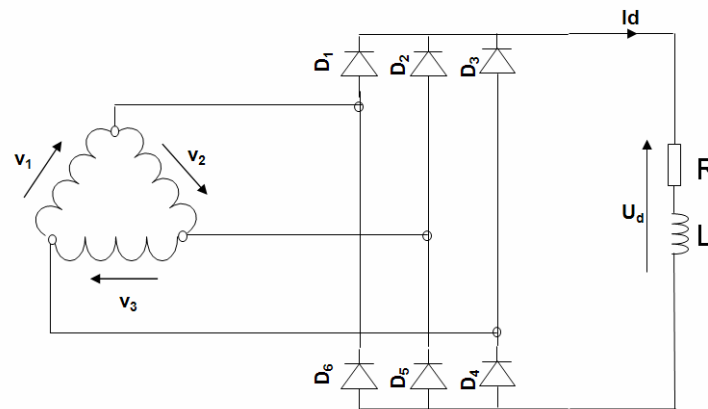
#### Montage P3



#### Montage PD3



#### Montage S3





#### 3. Quelques définitions:

##### *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 les montage P3 et 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).

##### *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 :

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

$U_{eff}$  Valeur efficace de la tension redressée

$U_0$  Valeur moyenne de la tension redressée



#### 4. Principe d'étude d'un montage redresseur:

L'étude d'un montage doit servir, pour le concepteur, à déterminer les caractéristiques de chaque élément constitutif (transformateur, diodes, thyristors,...).

On procède en général en trois 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.



#### 5. Etude des montages redresseurs P3 et PD3:

##### Hypothèses:

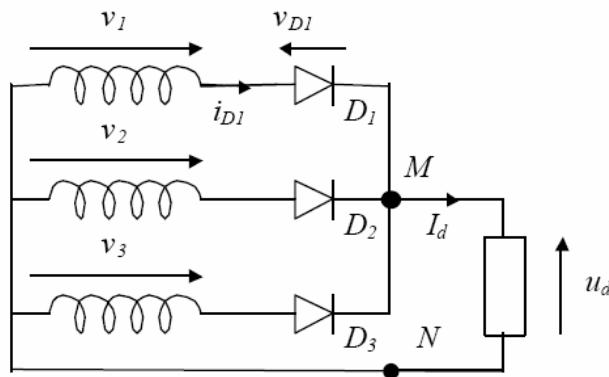
Les diodes sont supposées parfaites (interrupteurs parfaits) et le courant à la sortie du montage redresseur continu (charge fortement inductive). On supposera également négligeable l'inductance ramenée au secondaire du transformateur.

#### 5.1 Etude du montage redresseur parallèle simple P3:

Les enroulements secondaires du transformateur sont couplés en étoile et le redresseur composé de trois diodes montés en cathode commune (nommé commutateur plus positif). La charge est placée entre la cathode et le neutre. Les tensions d'enroulements secondaire de valeur efficace forment un système triphasé direct.

## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés



$$v_1 = v\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

$$v_2 = v\sqrt{2}\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_3 = v\sqrt{2}\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

A un instant donné, la diode qui est reliée au potentiel le plus élevée est passante (Seule la diode dont l'anode est au plus haut potentiel peut conduire), et les autres sont bloquées.

$$u_d = \sup\{v_1, v_2, v_3\}$$

On a donc

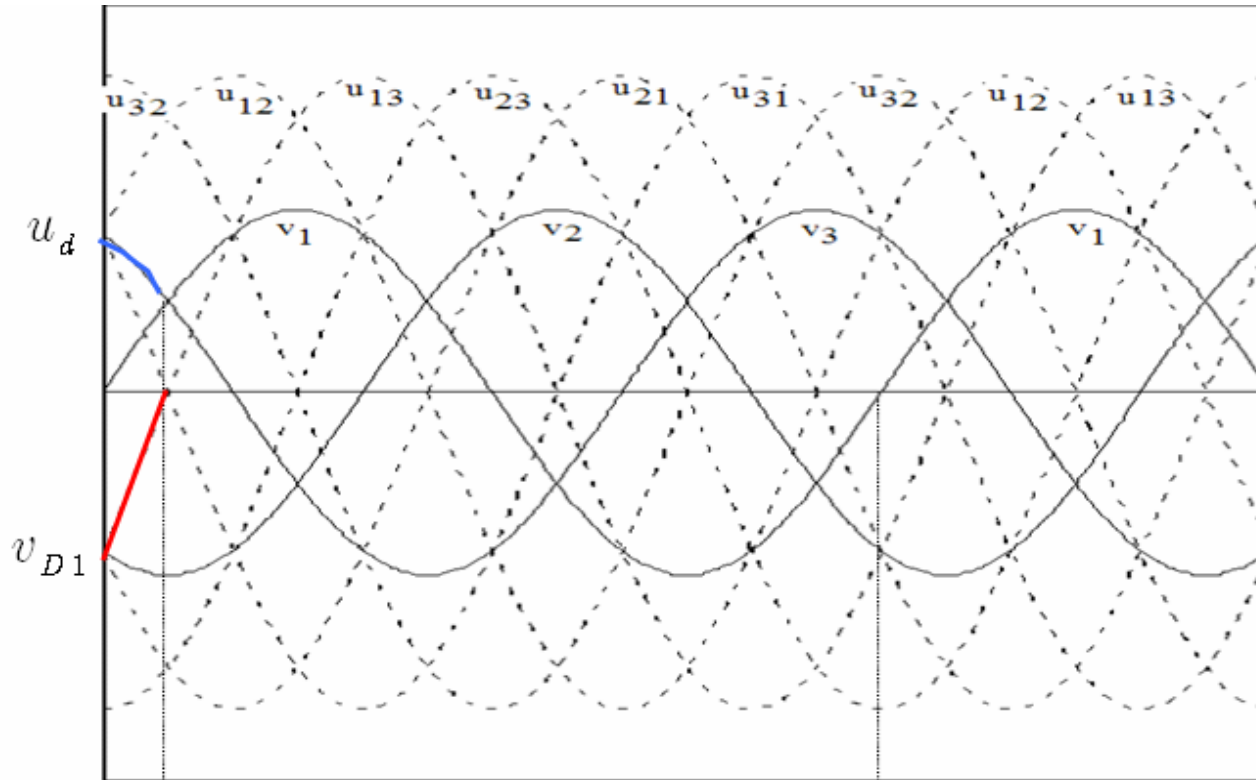
$$u_d = v_1 \text{ si } \{v_1 > v_2 \text{ et } v_3\}$$

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

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

## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés



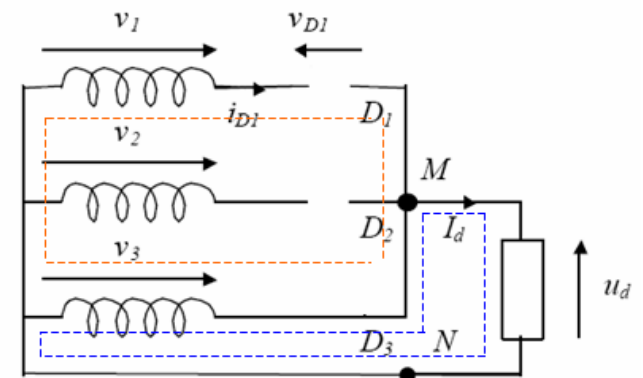
$D1$		
$D2$		
$D3$		
Intervalles de conduction des diodes		

De 0 à  $T/12$   $v_3 > v_1$  et  $v_2$

$D3$  est passante

La tension au borne de la charge est donnée par:

$$u_d = v_3$$



Les tensions inverses au bornes des diode  $D1$   $D2$  et  $D3$  sont données par:

$$v_{D1} = v_1 - v_3 = u_{13}$$

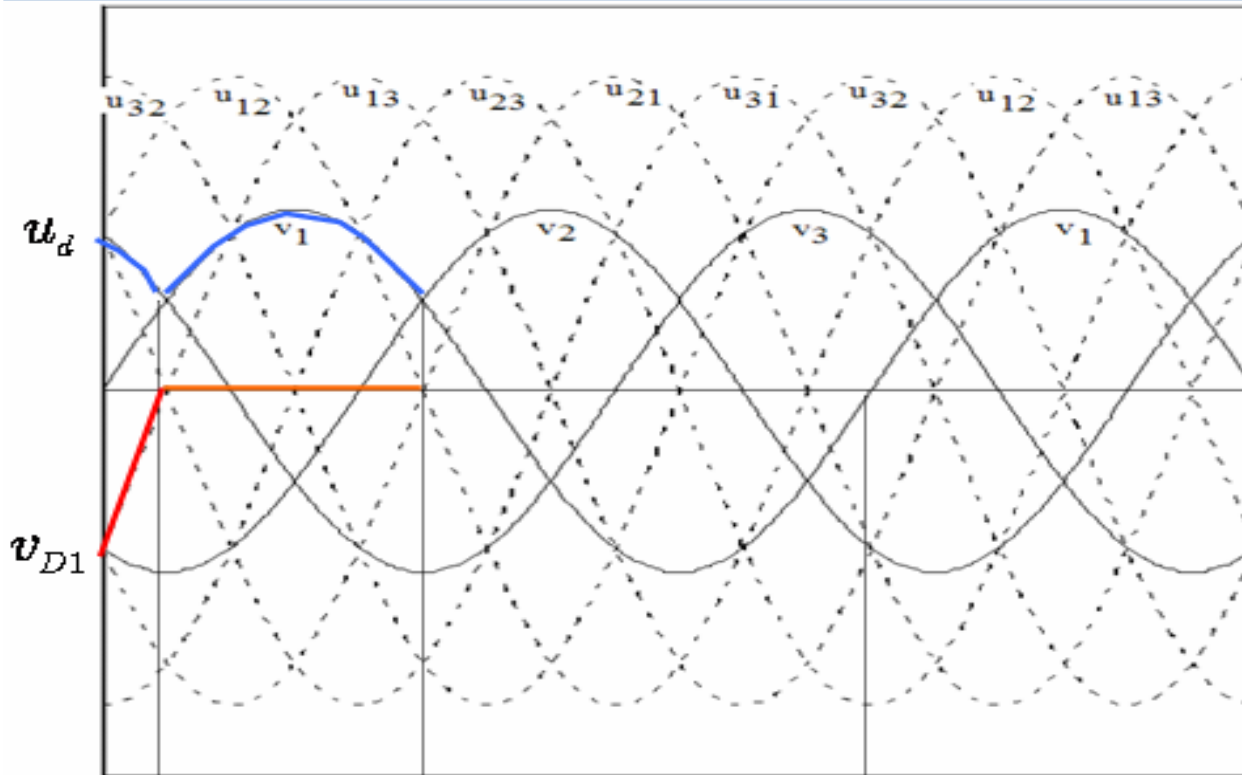
$$v_{D2} = v_2 - v_3 = u_{23}$$

$$v_{D3} = 0$$



## Électronique de puissance

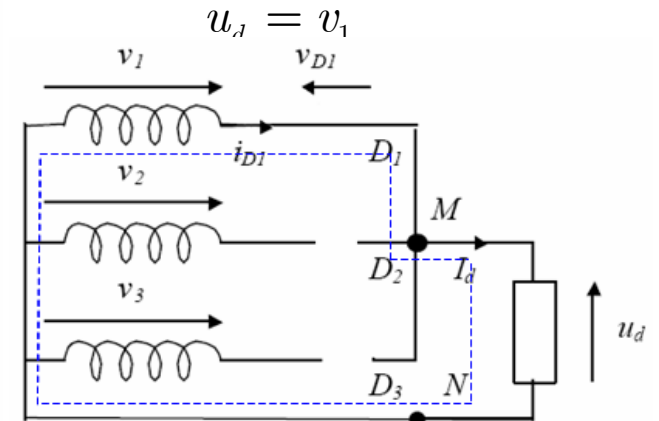
### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés



	$T/12$	$5T/12$	$T$
<b>D1</b>			
<b>D2</b>			
<b>D3</b>			
Intervalles de conduction des diodes			

De  $T/12$  à  $5T/12$   $v_1 > v_2$  et  $v_3$

D1 est passante  
La tension au borne de la charge est donnée par:



Les tensions inverses au bornes des diode D1 D2 et D3 sont données par:

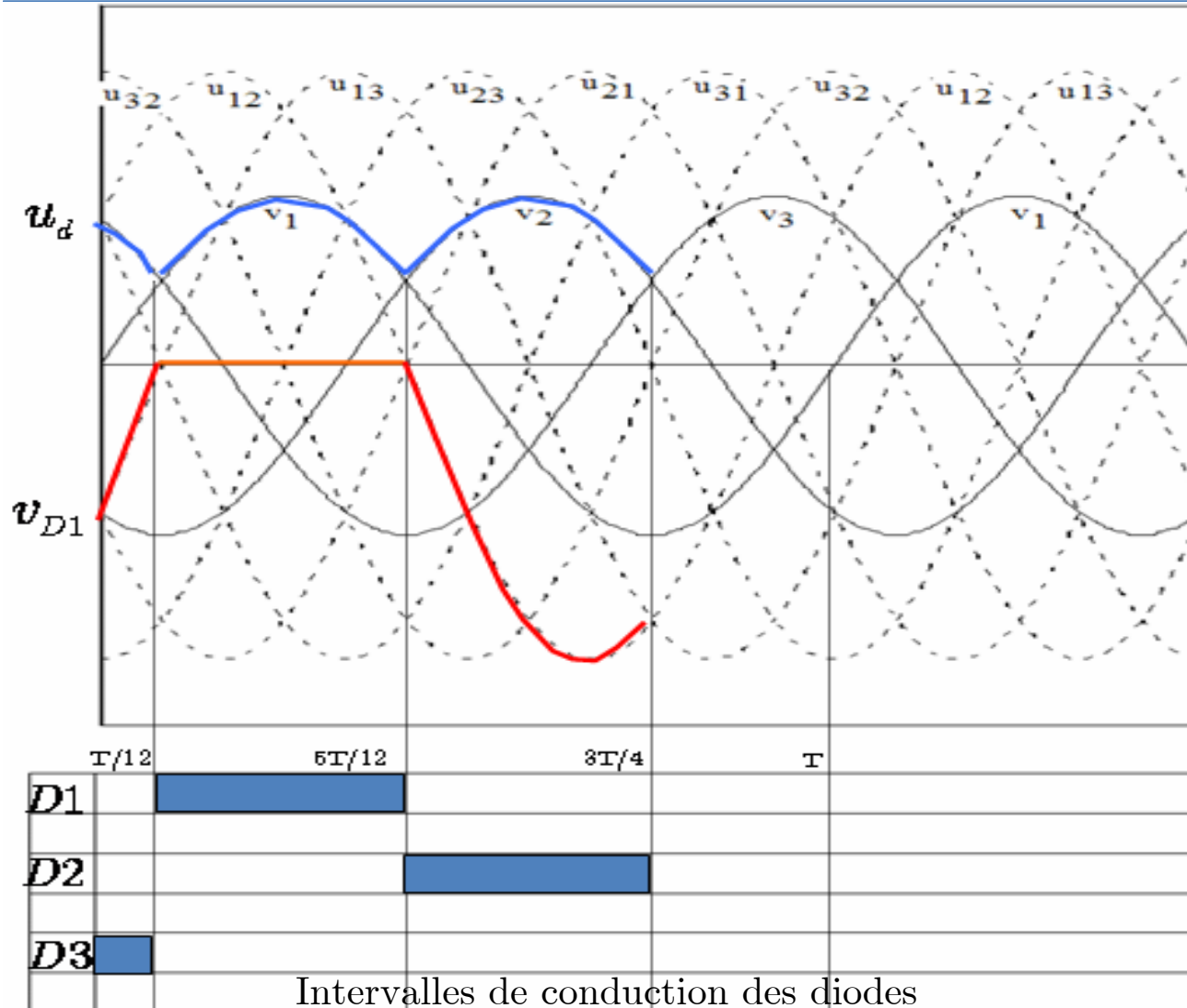
$$v_{D1} = 0$$

$$v_{D2} = v_2 - v_1 = u_{21}$$

$$v_{D3} = v_3 - v_1 = u_{31}$$

## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

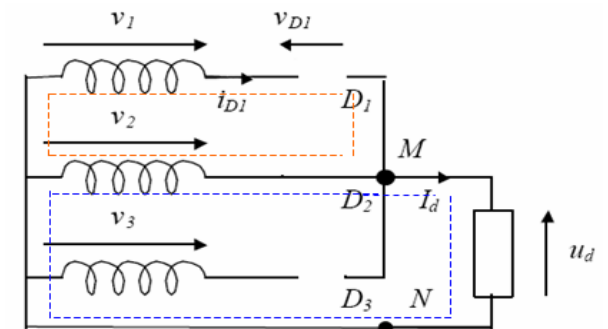


De  $5T/12$  à  $3T/4$   $v_2 > v_1$  et  $v_3$

D2 est passante

La tension au borne de la charge est donnée par:

$$u_d = v_2$$



Les tensions inverses au bornes des diode D1 D2 et D3 sont données par:

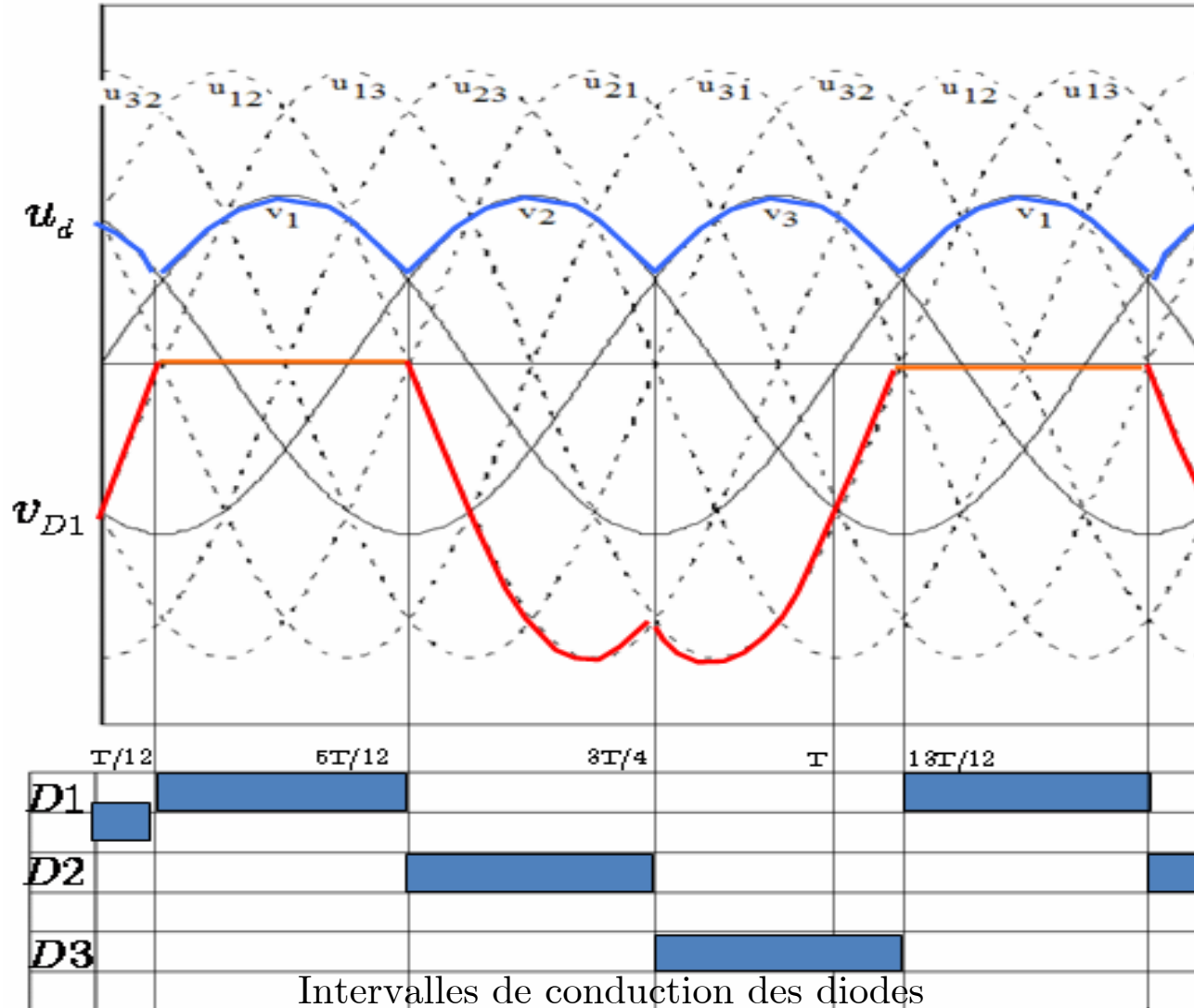
$$v_{D1} = v_1 - v_2 = u_{12}$$

$$v_{D2} = 0$$

$$v_{D3} = v_3 - v_2 = u_{32}$$

## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

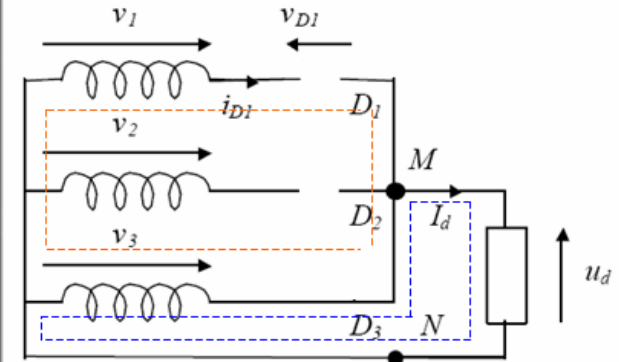


De  $3\pi/4$  à  $13\pi/12$   $v_3 > v_1$  et  $v_2$

D3 est passante

La tension au borne de la charge est donnée par:

$$u_d = v_3$$



Les tensions inverses au bornes des diode D1 D2 et D3 sont données par:

$$v_{D1} = v_1 - v_3 = u_{13}$$

$$v_{D2} = v_2 - v_3 = u_{23}$$

$$v_{D3} = 0$$



#### 5.1.1 Etude de la tension redressée:

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

Entre  $T/12$  et  $5T/12$ , cette tension s'exprime par:

$$u_d = v_1 = v\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

avec :  $v$  est la valeur efficace des tensions simples.

#### Valeur de la tension moyenne:

$$u_{dmoy} = \frac{3}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} v\sqrt{2}\sin(\omega t) dt = \frac{3v\sqrt{2}}{T} \left[ -\frac{1}{\omega} \cos(\omega t) \right]_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} \quad \text{avec } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$u_{dmoy} = \frac{3v\sqrt{2}}{T} \left[ -\frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T} \frac{5T}{12}\right) + \frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{12}\right) \right] = \frac{3v\sqrt{2}}{2\pi} \left[ \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) \right]$$



$$u_{dmoy} = \frac{3v\sqrt{2}}{2\pi} \left[ \text{Cos}\left(\frac{\pi}{6}\right) - \text{Cos}\left(\pi - \frac{\pi}{6}\right) \right] = \frac{3v\sqrt{2}}{2\pi} \left[ 2\text{Cos}\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] = \frac{3v\sqrt{2}}{\pi} \left[ \text{Cos}\left(\frac{\pi}{6}\right) \right]$$

avec  $\text{Cos}(a) - \text{Cos}(b) = -2\text{Sin}\left(\frac{a+b}{2}\right)\text{Sin}\left(\frac{a-b}{2}\right)$

$$u_{dmoy} = \frac{3v\sqrt{2}}{\pi} \text{Sin}\left(\frac{\pi}{3}\right) = 0.83v\sqrt{2} = 0.83V_{\max}$$



#### Valeur de la tension efficace:

$$u_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{3}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} (v\sqrt{2}\text{Sin}(wt))^2 dt} = \frac{V_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\text{Sin}(2\pi/3)}{2\pi/3}} = 0.84V_{\text{max}}$$

$$\text{avec } \text{Sin}(a) - \text{Sin}(b) = 2\text{Sin}\left(\frac{a-b}{2}\right)\text{Cos}\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

#### Facteur de forme:

$$F = \frac{u_{\text{eff}}}{u_{\text{dmoy}}} = \frac{0.84}{0.83} = 1.02$$

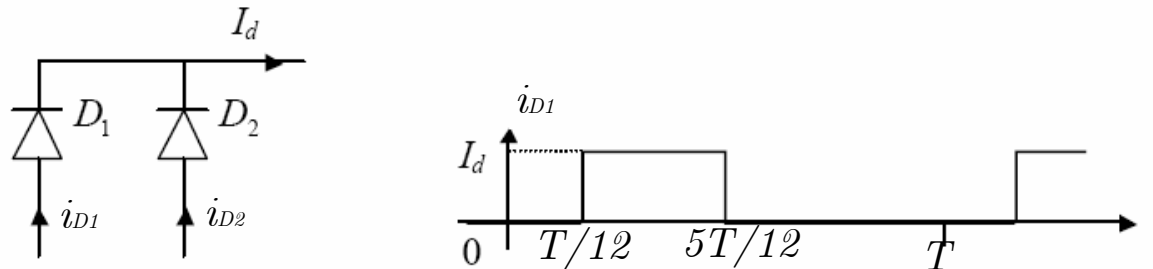
### 5.1.2 Etude du courant:

#### 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 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  $1/3$  de la période  $T$  des tensions d'alimentation. L'intensité  $i_{D1}$  du courant traversant  $D1$  évolue donc comme l'indique la figure suivante.





## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

On en déduit aisément le courant moyen et efficace dans une diode:

$$i_{Dmoy} = i_{D1moy} = i_{D2moy} = i_{D3moy} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} I_d dt = \frac{I_d}{3}$$

$$i_{Deff} = i_{D1eff} = i_{D2eff} = i_{D3eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} (I_d)^2 dt} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$$

#### Courant dans les enroulements secondaires du transformateurs:

Le courant dans un enroulement secondaire est identique au courant passant dans la diode qui lui est connectée:

$$i_{Smoy} = i_{S1moy} = i_{S2moy} = i_{S3moy} = i_{Dmoy} = \frac{I_d}{3}$$

$$i_{Seff} = i_{S1eff} = i_{S2eff} = i_{S3eff} = i_{Deff} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$$





#### 5.1.4 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. La valeur maximale de la tension inverse supportée par  $D1$ ,  $D2$  et  $D3$  vaut respectivement

$$\begin{aligned}v_{D1\max} &= \text{Max}(v_1 - v_2) = \text{Max}(v_1 - v_3) = u_{12}\sqrt{2} = v\sqrt{3}\sqrt{2} = -v\sqrt{6} \\v_{D2\max} &= \text{Max}(v_2 - v_1) = \text{Max}(v_2 - v_3) = u_{23}\sqrt{2} = v\sqrt{3}\sqrt{2} = -v\sqrt{6} \\v_{D3\max} &= \text{Max}(v_3 - v_2) = \text{Max}(v_3 - v_1) = u_{31}\sqrt{2} = v\sqrt{3}\sqrt{2} = -v\sqrt{6}\end{aligned}$$

#### 5.1.5 Puissances et facteurs de puissance:

Par définition en régime sinusoïdal, on nommera le 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 :

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



## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

On abordera dans ce cours uniquement au facteur de puissance secondaire. Si on suppose le transformateur et les diodes parfaits, la puissance active se réduit à celle consommée par la charge et a pour expression :

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

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

$$P_a = I_d \frac{1}{T} \int_0^T u_d dt = I_d u_{d moy}$$

Pour 3 enroulements secondaires fournissant des tensions sinusoïdales de valeur efficace  $v$  et parcourus par des courants d'intensité efficace  $I_{seff}$ ; d'où la puissance apparente développée par le secondaire :

$$S = 3vI_{seff}$$



## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

On a vu que le courant efficace est donné par

$$i_{Seff} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$$

Donc puissance apparente est

$$S = \sqrt{3}vI_d$$

En reprenant l'expression de la tension redressée déduite précédemment on obtient l'expression de la puissance active suivante

$$P_a = \frac{3}{\pi} \text{Sin} \left( \frac{\pi}{3} \right) \sqrt{2}vI_d$$

Et celle du facteur de puissance

$$f_p = \frac{P_a}{S} = 0.675$$

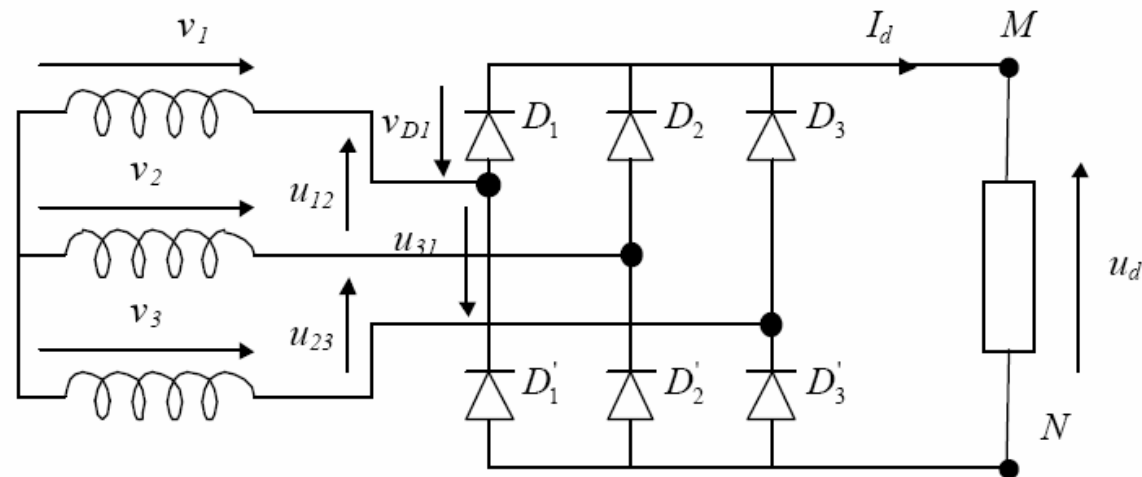
#### 5.2 Etude du montage redresseur Parallèle Double PD3:

Les enroulements secondaires du transformateur sont couplés en étoile et le redresseur composé de  $2q$  diodes

un premier groupe monté en cathode commune (nommé commutateur plus positif M).

Le deuxième groupe monté en anode commune (nommé commutateur plus négatif N).

La charge est placée entre les point M et N. Les tensions d'enroulements secondaire de valeur efficace forment un système triphasé direct.





## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

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 ».

On a donc

$si \{v_1 > v_3 > v_2\} \quad D_1 \text{ et } D_2' \text{ conduisent et } u_d = v_1 - v_2$

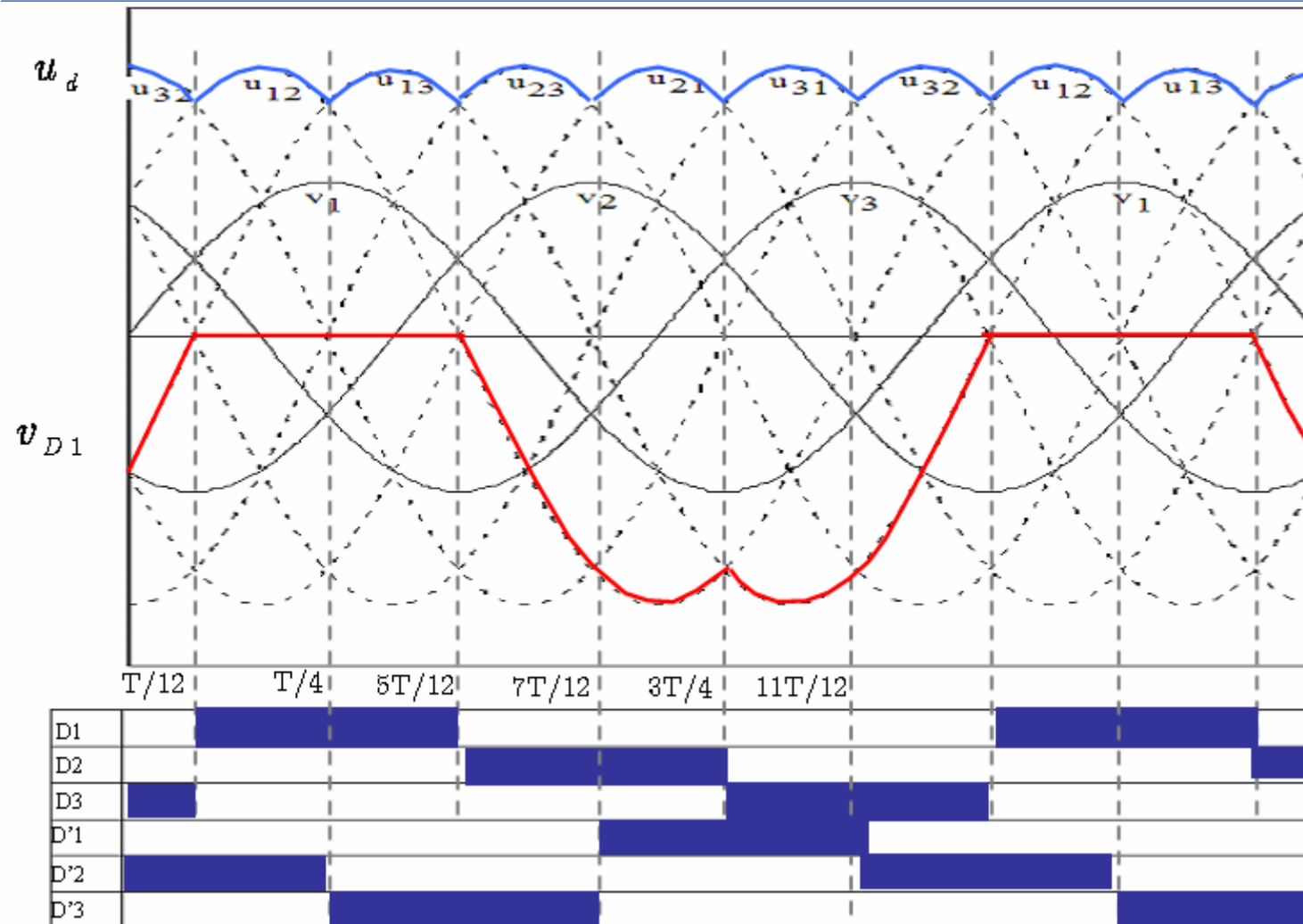
$si \{v_1 > v_2 > v_3\} \quad D_1 \text{ et } D_3' \text{ conduisent et } u_d = v_1 - v_3$

$si \{v_2 > v_1 > v_3\} \quad D_2 \text{ et } D_3' \text{ conduisent et } u_d = v_2 - v_3$

*etc ...*

## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés



Intervalles de conduction des diodes

Chaque diode conduit pendant un tiers de la 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 sinusoïdes 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.



#### 5.2.1 Etude de la tension redressée:

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

Entre  $T/12$  et  $T/4$ , cette tension s'exprime par:

$$u_d = v_1 - v_2 = v\sqrt{2} \left( \sin(\omega t) - \sin(\omega t - 2\pi/3) \right)$$

avec :  $v$  est la valeur efficace des tensions simples.

#### Valeur de la tension moyenne:

$$\begin{aligned} u_{dmoy} &= \frac{6}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} v\sqrt{2} \left( \sin(\omega t) - \sin(\omega t - 2\pi/3) \right) dt \\ &= \frac{6v\sqrt{2}}{T} \frac{1}{\omega} \left[ -\cos(\omega t) + \cos(\omega t - 2\pi/3) \right]_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} \quad \text{avec } \omega = \frac{2\pi}{T} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{dmoy} &= \frac{6v\sqrt{2}}{2\pi} \left[ -\cos\left(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{4}\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{4} - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{12}\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{12} - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ &= \frac{6v\sqrt{2}}{2\pi} \left[ \cos\left(-\frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] = \frac{6v\sqrt{2}}{\pi} \left[ \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] \end{aligned}$$



Valeur de la tension efficace :

$$u_{deff} = \sqrt{\frac{6}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} \left( v\sqrt{2}\text{Sin}(wt) - v\sqrt{2}\text{Sin}(wt - 2\pi / 3) \right)^2 dt}$$
$$u_{deff} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{\max} \sqrt{1 + \frac{\text{Sin}(2\pi / 6)}{2\pi / 6}} = 1.662V_{\max}$$

Facteur de forme:

$$F = \frac{u_{deff}}{u_{dmoy}} = 1.0009$$

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





#### 5.2.2 Etude du courant:

##### Courant dans la charge:

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

##### Courant dans une diode:

Le courant dans les diodes est égal à  $I_d$  lorsque la diode 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  $1/3$  de la période  $T$  des tensions d'alimentation.

Par un raisonnement analogue à celui du montage parallèle simple, le courant moyen et efficace dans une diode:

$$i_{Dmoy} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} I_d dt = \frac{I_d}{3} \qquad i_{Deff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} (I_d)^2 dt} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$$

## Électronique de puissance

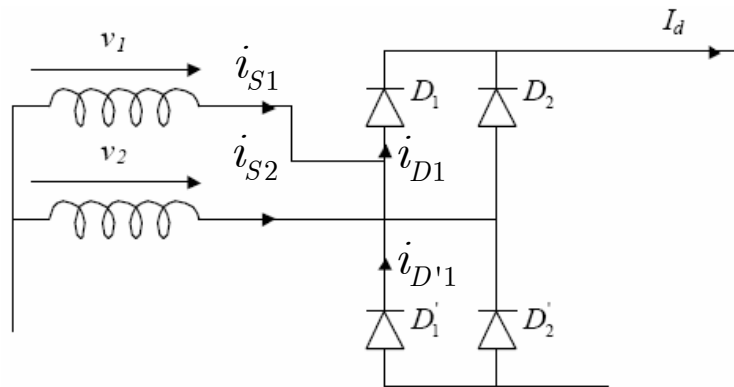
### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

#### Courant dans les enroulements secondaires du transformateurs:

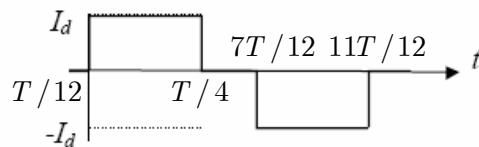
**Si on considère l'enroulement 1:**

De  $T/12$  à  $T/4$  la diode  $D_1$  est passante et le courant dans l'enroulement 1 vaut  $I_d$ .

De  $7T/12$  à  $11T/12$  la diode  $D'_1$  est passante et le courant dans l'enroulement 1 vaut  $-I_d$ .



$$i_{S1\text{moy}} = \frac{1}{T} \left( \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} I_d dt - \int_{\frac{7T}{12}}^{\frac{11T}{12}} I_d dt \right) = 0$$



$$i_{S1\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} (I_d)^2 dt} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}}$$

**La valeur moyenne de l'intensité des courants secondaires est nulle et la valeur efficace est 1.414 fois plus grande qu'en commutation parallèle, à courant de charge égal.**



#### 5.2.4 Tension inverse maximale aux bornes d'une diode:

La valeur maximale de la tension inverse supportée par  $D1$ ,  $D2$  et  $D3$  vaut respectivement:

$$\begin{aligned}v_{D1\max} &= \text{Max}(v_1 - v_2) = \text{Max}(v_1 - v_3) = u_{12}\sqrt{2} = v\sqrt{3}\sqrt{2} = -v\sqrt{6} \\v_{D2\max} &= \text{Max}(v_2 - v_1) = \text{Max}(v_2 - v_3) = u_{23}\sqrt{2} = v\sqrt{3}\sqrt{2} = -v\sqrt{6} \\v_{D3\max} &= \text{Max}(v_3 - v_2) = \text{Max}(v_3 - v_1) = u_{31}\sqrt{2} = v\sqrt{3}\sqrt{2} = -v\sqrt{6}\end{aligned}$$



## Électronique de puissance

### Chapitre 2: Les Redresseurs non commandés

#### 5.2.5 Puissances et facteurs de puissance:

On a vu que le courant efficace est donné par

$$i_{seff} = i_{s1eff} = i_{s2eff} = i_{s3eff} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$$

Donc puissance apparente est  $S = \sqrt{6} v I_d$

En reprenant l'expression de la tension redressée déduite précédemment on obtient l'expression de la puissance active suivante

$$P_a = \frac{6}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \sqrt{2} v I_d$$

Et celle du facteur de puissance

$$f_p = \frac{P_a}{S} = 0.955$$



#### 5.3 Conclusion:

- Le facteur de puissance est maximum en montages triphasé .
- Le facteur de puissance des montages parallèle double est meilleur que celui des montages parallèle simple ainsi que le facteur de forme.

On peut donc conclure que le montage PD3 est le plus efficace des montages parallèles pour ce qui concerne la rentabilité du transformateur.