

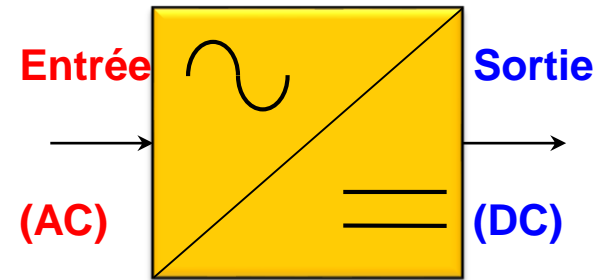
Cours d'Electronique de Puissance 1

A. ABOULOIFA

Chapitre 2: Convertisseurs AC-DC (les redresseurs)

1. Introduction

- On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin du continu alors que l'énergie électrique est disponible en alternatif.
- Les redresseurs à diodes (redresseurs non commandés) 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: la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.



- Les redresseurs à thyristors, ou redresseurs commandés, 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 (Onduleurs assistés par le réseau)**.

2. Généralités

2.1. Facteur de forme, Taux d'ondulation, facteur de forme:

Soit $u_d(t)$ un signal périodique de période T , alors nous avons :

- Valeur moyenne :

$$U_{do} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d(t) dt$$

- Valeur efficace :

$$U_{deff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_d(t)^2 dt}$$

- Facteur d'ondulation:

$$K_0 = (U_{d\max} - U_{d\min}) / 2U_{do}$$

- Facteur de forme :

$$F_F = U_{deff} / U_{do}$$

- Taux d'ondulation résiduelle (Taux d'harmoniques):

$$\tau_{ud} = U_{dr_eff} / U_{do} = \sqrt{F_F^2 - 1}$$

avec $U_{dr_eff} = (u_d(t) - U_{do})_{eff}$: valeur efficace de la tension résiduelle.

- Le rendement en puissance :

$$\eta = \frac{\text{Puissance_continue}}{\text{Puissance_totale}} = \frac{1}{F^2}$$

avec : $\text{Puissance_continue} = \frac{U_{do}^2}{R_{ch}}$; $\text{Puissance_totale} = \frac{U_{deff}^2}{R_{ch}}$

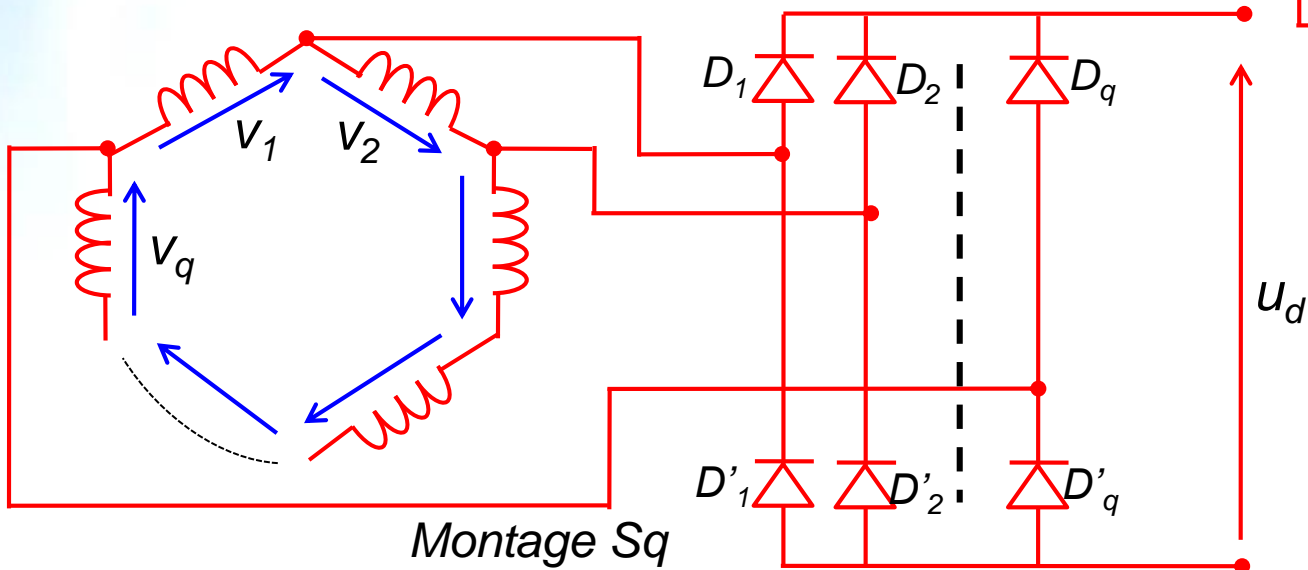
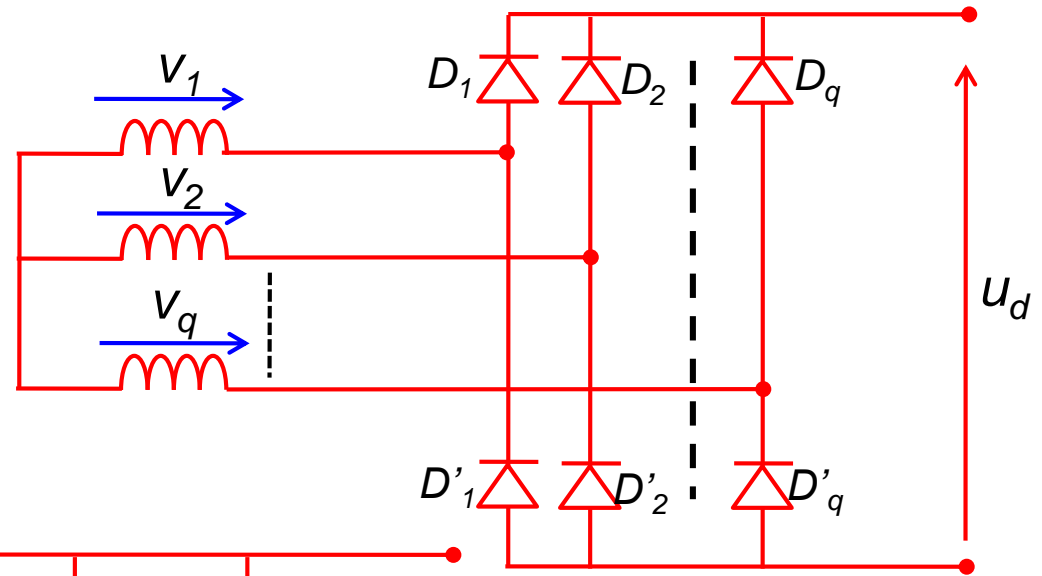
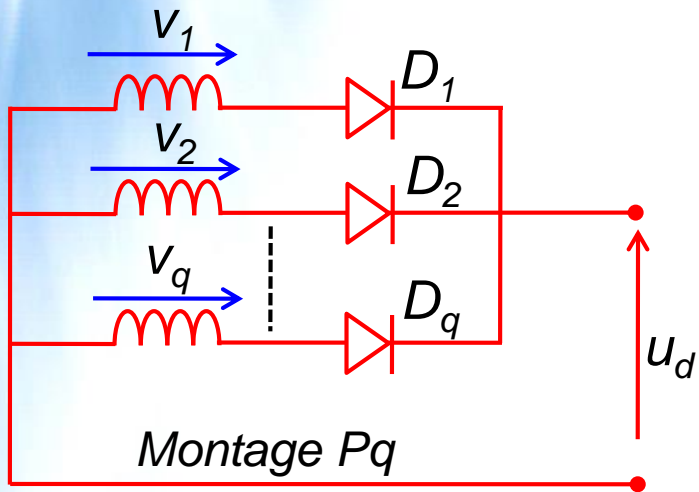
- Facteur de puissance:

$$F = \frac{|P|}{S}$$

2.2. Les trois types de montages:

- Pour obtenir une tension continue, on redresse un ensemble de q tensions alternatives, sinusoïdales et formant un système polyphasé équilibré (nombre de phases q).
- Ces tensions sont généralement, fournies par le réseau monophasé ou, plus souvent, par le réseau triphasé, par l'intermédiaire d'un transformateur.
- On distingue trois types de montages :
 - **Pq** : montages avec source en étoile et un seul commutateur ou *redresseur "simple alternance"* ;
 - **PDq** : montages avec source en étoile et deux commutateurs ou *redresseurs "en pont" avec source étoilée* ;
 - **Sq** : montages avec source en polygone et deux commutateurs ou *redresseurs "en pont" avec source polygonale*.

...Les trois montages



2.3. L'indice de commutation et l'indice pulsation :

- **Indice de commutation q du montage:** Il 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:** Il 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).

2.4. 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 surintensités (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**. L'examen des contraintes maximales que peut supporter le transformateur et les semi-conducteurs permet de déterminer les protections.

3. Redressement non commandé (à diodes)

- Ce type de redresseur permet d'obtenir en sortie une tension redressée dont la valeur moyenne est fixée (non réglable).
- v_1, v_2, \dots, v_q : les q tensions sinusoïdales aux bornes des enroulements secondaires à vide:

$$v_1 = V_m \sin(\omega t) \quad ; \quad v_2 = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{q}\right) \quad ; \quad \dots \quad v_q = V_m \sin\left[\omega t - (q-1)\frac{2\pi}{q}\right]$$

- u_d : la tension redressée et U_{D0} sa valeur moyenne à vide,
- I_d : le courant redressé débité supposé constant,
- i_1, i_2, \dots . Les courants dans les diodes,
- I_{P1}, I_{P2}, \dots . Les courants dans les bobinages primaires,
- i_{S1}, i_{S2}, \dots . Les courants dans les bobinages secondaires.

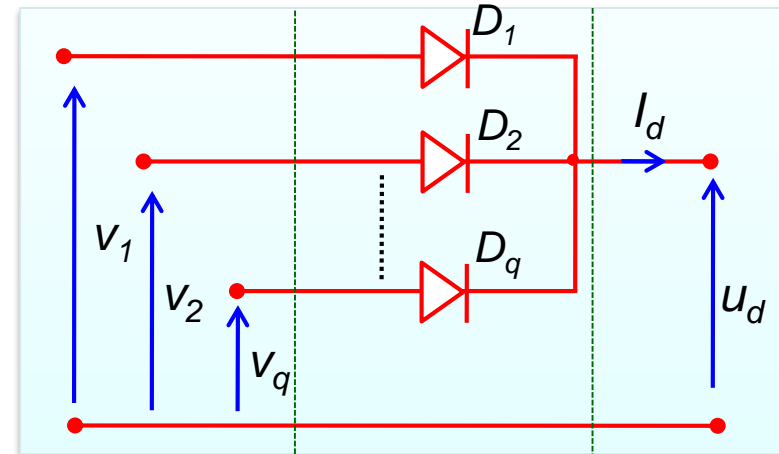
3.1. Les commutateurs

3.1.1. Commutateurs « plus positif »

- Dans un commutateur « plus positif » la tension u_d est égale à la tension la plus positive des tensions d'entrée. En effet, pendant l'intervalle où v_1 est plus grand que v_2, v_3, \dots, v_q , on a:
 - D_1 conduit $\Rightarrow u_d = v_1$.
 - D_2, D_3, \dots, D_q : bloquées ($v_{D_j} = v_j - v_1 < 0$).

3.1.2. Commutateurs « plus négatif »

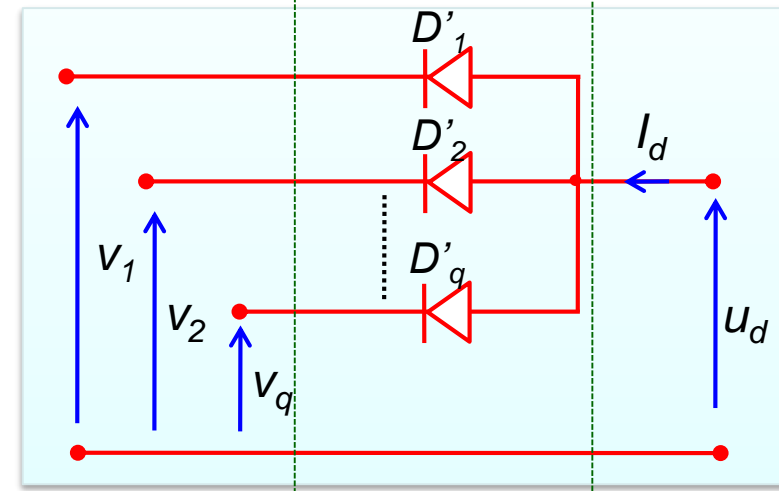
- Dans un commutateur « plus négatif » la tension u_d est égale à la tension la plus négative des tensions d'entrée.



Côté
alternatif

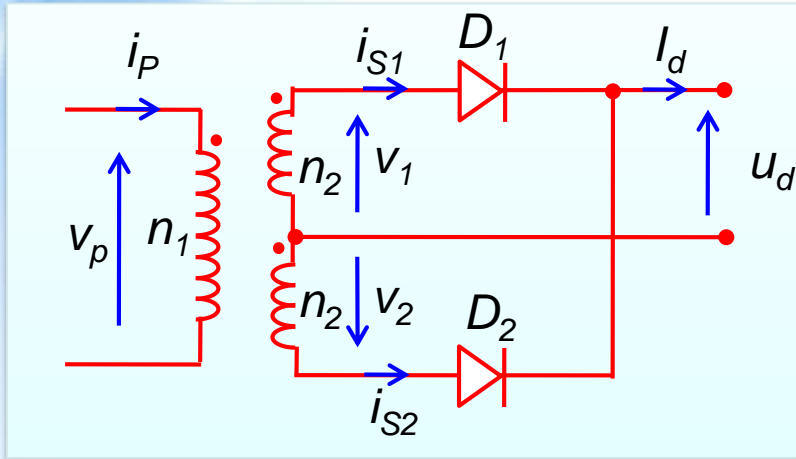
commutateur

Côté
continu



3.2. Redresseurs simple alternance (de type P)

3.2.1. Montage biphasé P2



$$v_1 = V_m \sin(\omega t) = -v_2$$

- Pour $0 < t < T/2$, $v_1 > v_2$, D_1 est ON:

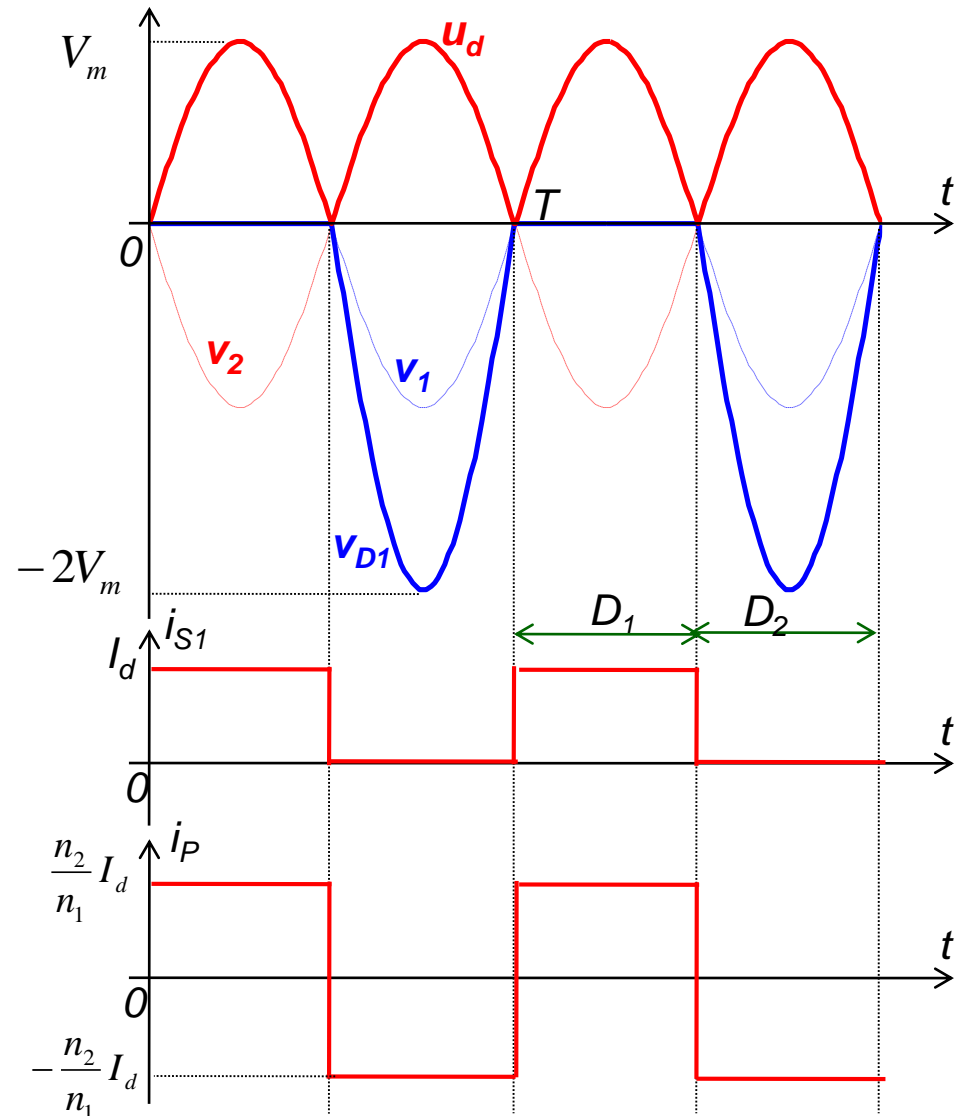
$$u_d = v_1 = V_m \sin(\omega t)$$

$$v_{D2} = v_2 - u_d = -2V_m \sin(\omega t)$$

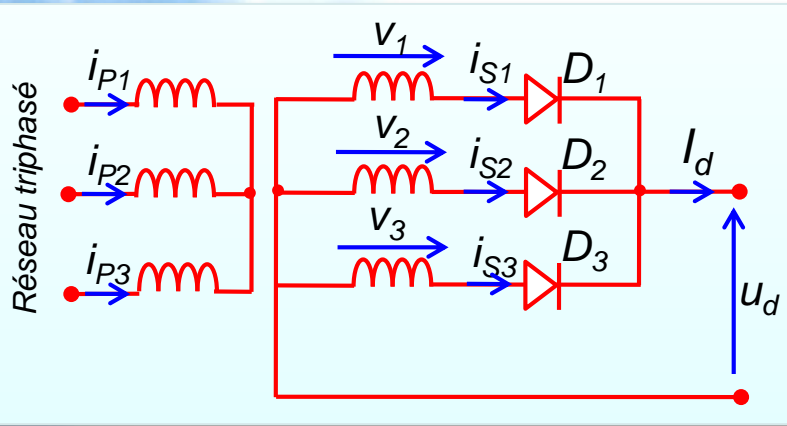
- Pour $T/2 < t < T$, $v_2 > v_1$, D_2 est ON:

$$u_d = v_2 = -V_m \sin(\omega t)$$

$$v_{D1} = v_1 - u_d = 2V_m \sin(\omega t)$$



3.2.2. Montage triphasé P3

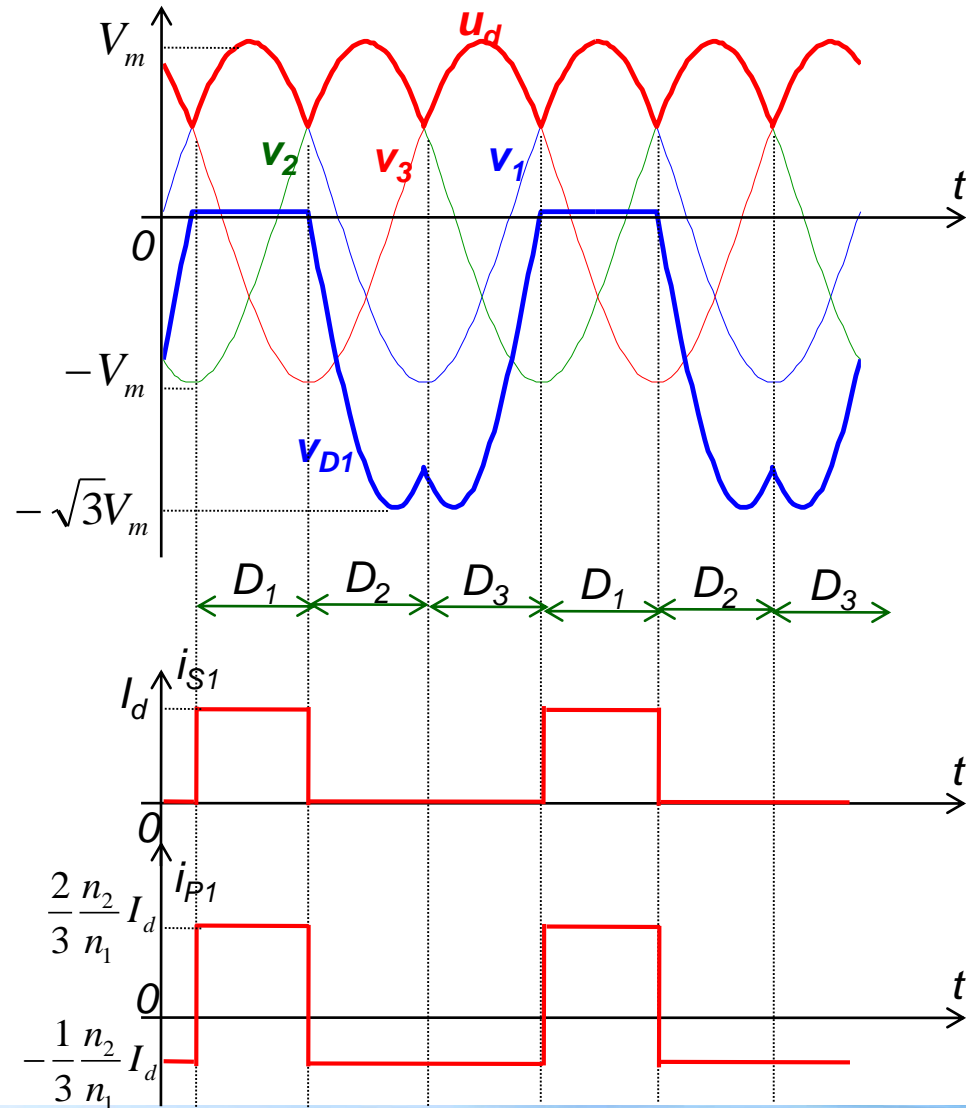


$$v_1 = V_m \sin(\omega t)$$

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

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

- La tension redressé est formé de trois sommets de sinusoïdes par période



● Pour $T/12 < t < 5T/12$: $v_1 > v_2$ et $v_1 > v_3$, donc :

● D_1 conduit

● $u_d = v_1$, $v_{D1} = v_1 - v_1$, $v_{D2} = v_2 - v_1$, $v_{D3} = v_3 - v_1$

● Pour $5T/12 < t < 9T/12$:

● D_2 conduit

● $u_d = v_2$, $v_{D1} = v_1 - v_2$, $v_{D2} = v_2 - v_2$, $v_{D3} = v_3 - v_2$

● Pour $9T/12 < t < 13T/12$:

● D_3 conduit

● $u_d = v_3$, $v_{D1} = v_1 - v_3$, $v_{D2} = v_2 - v_3$, $v_{D3} = v_3 - v_3$

● Pour réduire l'ondulation de u_d on pourrait multiplier le nombre q de tensions à redresser.

3.2.3. Etude des tensions

- Pour les redresseurs en simple alternance l'indice de pulsation $p=q$.

a) Valeur moyenne et valeur efficace:

- La période de u_d est $T/p=T/q$

- $u_d = v_1 = V_m \sin(\omega t)$ pendant l'intervalle: $\frac{T}{4} - \frac{T}{2q} < t < \frac{T}{4} + \frac{T}{2q}$

- La valeur moyenne de u_d est:

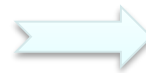
$$U_{d0} = \frac{q}{T} \int_{\frac{T}{4} - \frac{T}{2q}}^{\frac{T}{4} + \frac{T}{2q}} V_m \sin(\omega t) dt$$



$$U_{d0} = \frac{q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)$$

- Sa valeur efficace est:

$$U_{d_eff}^2 = \frac{q}{T} \int_{\frac{T}{4} - \frac{T}{2q}}^{\frac{T}{4} + \frac{T}{2q}} [V_m \sin(\omega t)]^2 dt$$



$$U_{d_eff} = V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{q}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{q}\right)}$$

b) Facteur d'ondulation:

$$u_{d\max} = V_m$$

$$u_{d\min} = V_m \sin\left(\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{q}\right) = V_m \cos\left(\frac{\pi}{q}\right)$$

$$K_0 = \frac{u_{d\max} - u_{d\min}}{2U_{d0}} = \frac{\pi}{2q} \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{q}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{q}\right)}$$

c) Facteur de forme – taux d'harmonique

- On peut aussi caractériser l'ondulation de u_d par le facteur de forme:

$$F_F = \frac{u_{d_eff}}{U_{d0}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{q}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{q}\right)}}{\frac{q}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)}$$

- La taux d'harmonique est:

$$\tau_{ud} = \frac{1}{U_{d0}} \sqrt{U_{d_eff}^2 - U_{d0}^2} = \sqrt{F_F^2 - 1}$$

d) Tension inverse des diodes:

- La tension v_{D_1} aux bornes de la diode D_1 , par exemple, toujours égale à $v_1 - u_d$, a pour expressions successives: $v_1 - v_1 = 0$, puis $v_1 - v_2$ puis $v_1 - v_3$, ..., puis $v_1 - v_q$.
- La tension inverse maximale correspond au maximum de la plus grande de ces différences.

- Si q est pair:

- Il y a une tension directement opposée à v_1 , il s'agit de la tension $v_{\frac{q}{2}+1}$ la différence $v_1 - v_{\frac{q}{2}+1} = 2V_m \sin(\omega t)$ passe par son « maximum » négatif pour $\omega t = 3\pi/2$ et vaut alors $-2V_m$. La tension inverse maximale appliquée à la diode est donc:

$$v_{i\max} = 2V_m$$

- Si q est impair:

- Les 2 tensions « éloignées » de v_1 sont $v_{\frac{q+1}{2}}$ et $v_{\frac{q+3}{2}}$. Les différences entre v_1 et ces deux tensions sont:

$$v_1 - v_{\frac{q+1}{2}} = 2V_m \cos\left(\frac{\pi}{2q}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2q}\right) \quad v_1 - v_{\frac{q+3}{2}} = 2V_m \cos\left(\frac{\pi}{2q}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2q}\right)$$

- La tension inverse passe par 2 maxima par période, pour

$$\omega t = 3\pi/2 - \pi/2q \quad \text{et} \quad \omega t = 3\pi/2 + \pi/2q$$

$$v_{i\max} = 2V_m \cos\left(\frac{\pi}{2q}\right)$$

3.2.4. Etude des courants

a) Courant dans les diodes:

- Si le montage débite un courant continu I_d constant, chaque diode assure le passage de I_d pendant l'intervalle de durée T/q où elle est conductrice.
- D'où les valeurs maximale, moyenne et efficace du courant dans chacune des q diodes:

$$i_{\max} = I_d \quad i_{\text{moy}} = \frac{I_d}{q} \quad I = \frac{I_d}{\sqrt{q}}$$

b) Courant et facteur de puissance secondaire:

- Le courant i_s dans le bobinage secondaire du transformateur est égal au courant dans la diode par laquelle il débite, donc:

$$I_s = \frac{I_d}{\sqrt{q}}$$

- Si on néglige les chutes de tension, la puissance débitée par le secondaire du transformateur est:

$$P_d = U_{d0} I_d$$

- La puissance apparente du secondaire formé de q enroulements est:

$$S = qVI_s$$

avec $V = V_m / \sqrt{2}$: valeur efficace.

D'où le facteur de puissance secondaire:

$$F_S = \frac{P_d}{S} = \frac{U_{d0} I_d}{qVI_s} = \frac{\frac{q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) I_d}{q \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_d}{\sqrt{q}}}$$



$$F_S = \frac{\sqrt{2}q}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)$$

q	2	3	4	6	12
F_S	0,637	0,675	0,637	0,55	0,40

- Le tableau montre que F_S est faible et diminue quand q augmente au-delà de 3.

- La puissance apparent qVI_s détermine le dimensionnement du secondaire du transformateur:
 - q donne le nombre de phase;
 - V le nombre de spires par phase;
 - I_s la section des conducteurs.
- Plus F_s est faible plus, à P_d donnée, la réalisation du secondaire est coûteuse.

C'est la principale raison qui limite l'intérêt des montages de type parallèle et empêche de les employer pour des valeurs élevées de q .

c) Passage de secondaire au primaire:

- Relation d'ampères-tours (AT) utilisables en monophasé:

Pour trouver le courant primaire, on néglige le courant magnétisant et on écrit la compensation des AT alternatifs:

$$n_1 i_p = \sum n_2 i_s$$

Application au redresseur P2:

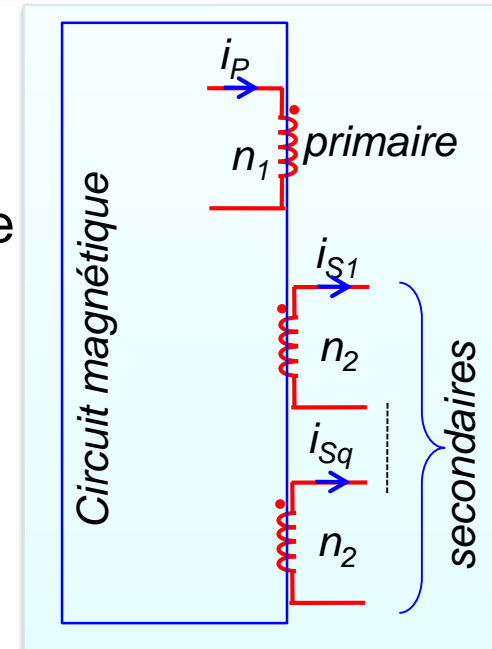
$$n_1 i_p = n_2 i_{s1} - n_2 i_{s2}$$

Le courant primaire i_p égal à $(n_2/n_1)I_d$ pendant une alternance, à $(-n_2/n_1)I_d$ pendant l'autre, a pour valeur efficace :

$$I_p = \frac{n_2}{n_1} I_d$$

La tension primaire vaut:

$$V_p = \frac{n_1}{n_2} V$$



d'où la facteur de puissance primaire:

Le primaire est donc dimensionné pour une puissance apparente inférieure à celle du secondaire ($F_S=0,636$).

- Relation d'ampères-tours (AT)

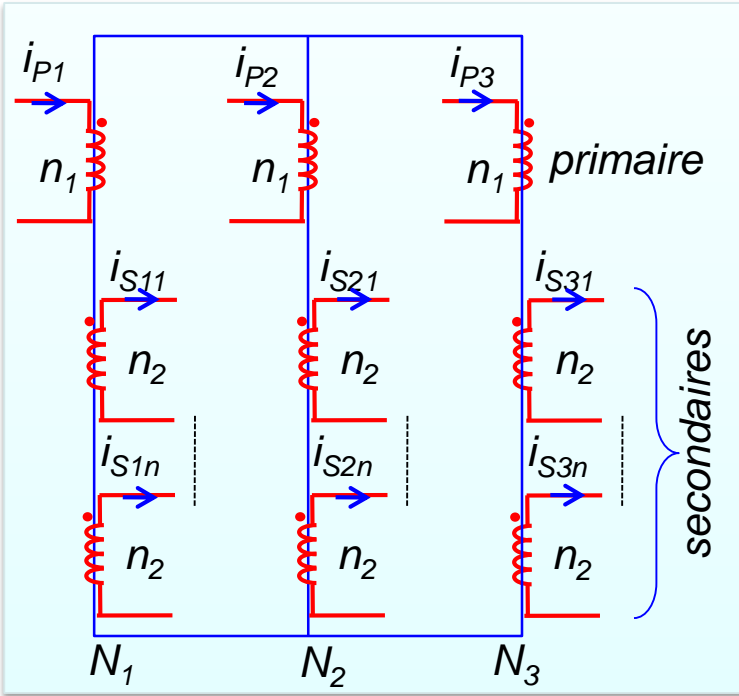
utilisables en triphasé:

N_1, N_2 et N_3 : sont trois noyaux.

En écrivant la compensation des ampères-tours (*Théorème d'Hopkinson*) pour une colonne N de transformateur on a:

$$n_1 i_p - \sum_N n_2 (i_s - \bar{i}_s) = 0$$

$$F_p = \frac{U_{d0} I_d}{V_p I_p} = \frac{\frac{2}{\pi} V_m I_d}{\frac{n_1}{n_2} \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{n_2}{n_1} I_d} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,90$$



Application au redresseur P3:

- Pour une quelconque des 3 colonnes on a:

$$\bar{i}_s = \frac{I_d}{3} \quad \Rightarrow \quad i_p = \frac{n_2}{n_1} \left(i_s - \frac{I_d}{3} \right)$$

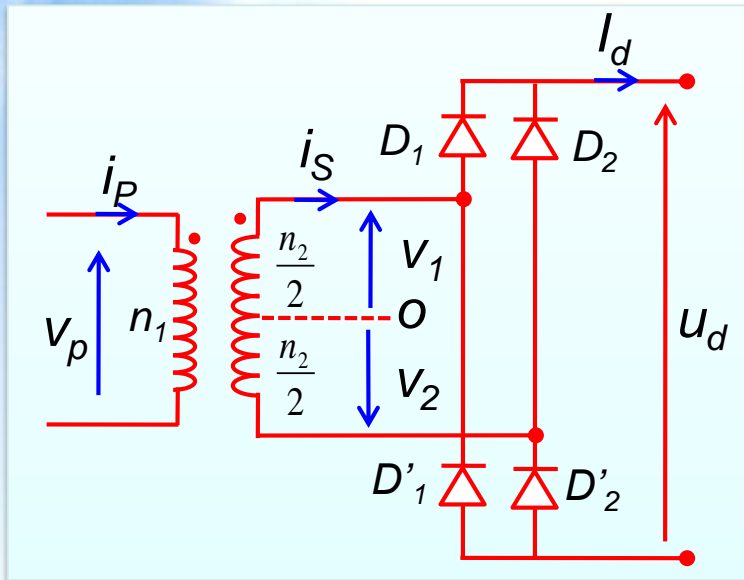
- La valeur efficace du courant i_p est:

$$I_p = \frac{n_2}{n_1} I_d \sqrt{\frac{1}{T} \left(\frac{4T}{9 \cdot 3} + \frac{1 \cdot 2T}{9 \cdot 3} \right)} \quad \Rightarrow \quad I_p = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{n_2}{n_1} I_d$$

$$F_P = \frac{U_{d0} I_d}{3 V_p I_p} = \frac{\frac{3}{\pi} V_m \frac{\sqrt{3}}{2} I_d}{3 \frac{n_1}{n_2} \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{n_2}{n_1} I_d} = 0,827$$

3.3. Redresseurs de type Parallèle Double (PD)

3.3.1. Montage PD2:



● Pour $0 < t < T/2$, $v_1 > v_2$, D_1 et D'_2 ON:

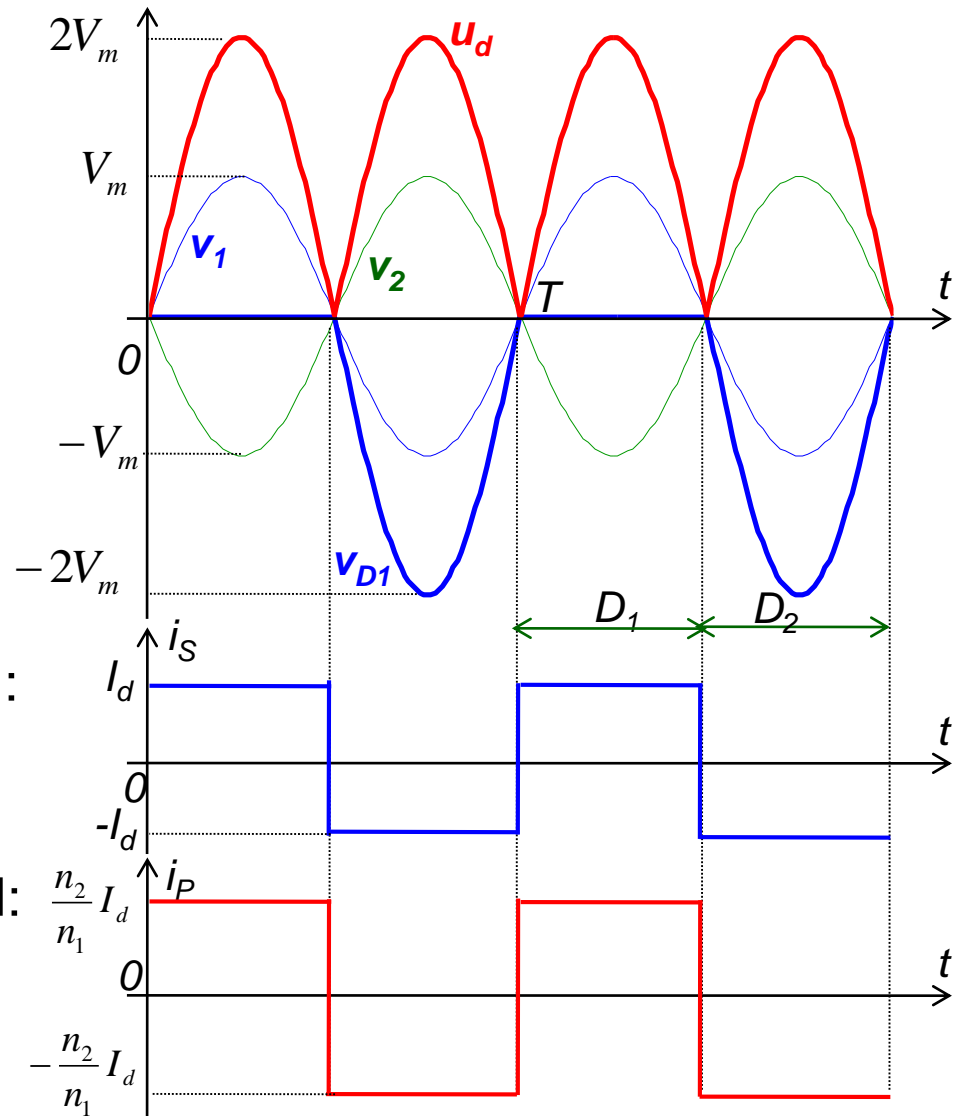
$$u_d = v_1 - v_2 = 2V_m \sin(\omega t)$$

$$v_{D1} = -u_d = -2V_m \sin(\omega t)$$

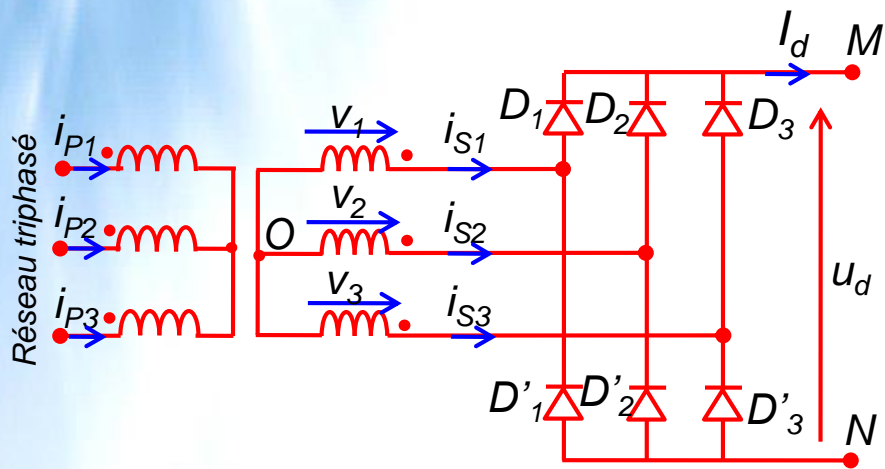
● Pour $T/2 < t < T$, $v_2 > v_1$, D_2 et D'_1 ON:

$$u_d = v_2 - v_1 = -2V_m \sin(\omega t)$$

$$v_{D1} = -u_d = 2V_m \sin(\omega t)$$



3.3.2. Montage PD3 (Pont à 6 diodes):



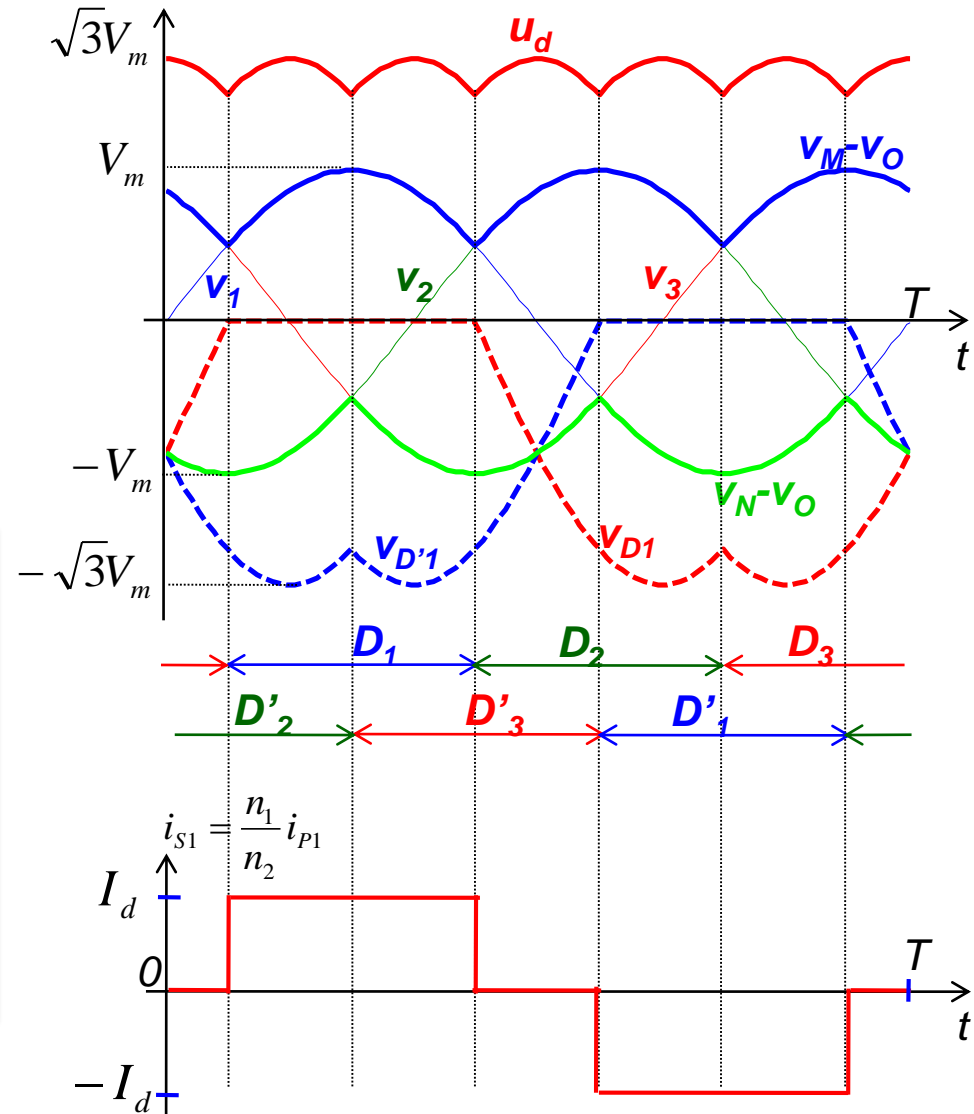
- D_1, D_2 et D_3 forment un commutateur plus positif:

$$v_M - v_O = \sup \{v_1, v_2, v_3\}$$

- D'_1, D'_2 et D'_3 forment un commutateur plus négatif:

$$v_N - v_O = \inf \{v_1, v_2, v_3\}$$

$$u_d = (v_M - v_O) - (v_N - v_O)$$



3.3.3. Etude des tensions

a) Tension redressée:

Valeur moyenne:

$$U_{d0} = (v_M - v_O)_{moy} - (v_N - v_O)_{moy}$$

- Or $(v_M - v_O)$ est la tension redressée que donne le montage P3:

$$(v_M - v_O)_{moy} = \frac{q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right). \text{ De plus, on a : } (v_N - v_O)_{moy} = -(v_M - v_O)_{moy}$$

- Il vient:

$$U_{d0} = \frac{2q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)$$

Indice de pulsation:

- Si q est pair on a:

$$p = q$$

- Si q est impair on a:

$$p = 2q$$

Facteur d'ondulation:

$$K_0 = \frac{u_{d\max} - u_{d\min}}{2U_{d0}} = \frac{\pi}{2p} \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{p}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{p}\right)}$$

p=q, si q est pair

p=2q, si q est impair

b) Tension inverse:

- La tension aux bornes des diodes ont même formes d'ondes et mêmes valeurs maximales que lors du fonctionnement en redresseur parallèle simple:

$$v_{i\max} = 2V_m \quad , \quad \text{si } q \text{ pair}$$

$$v_{i\max} = 2V_m \cos\left(\frac{\pi}{2q}\right) \quad , \quad \text{si } q \text{ impair.}$$

3.3.4. Etude des courants

a) Courant dans les diodes:

- Le courant dans les $2q$ diodes a pour valeurs:

$$i_{\max} = i'_{\max} = I_d \qquad i_{\text{moy}} = i'_{\text{moy}} = \frac{I_d}{q} \qquad I = I' = \frac{I_d}{\sqrt{q}}$$

b) Courant et facteur de puissance secondaire:

- Chaque enroulement secondaire étant relié à 2 diodes, est parcouru par un courant pendant 2 intervalles de durée T/q . Ainsi:

$$i_{S1} = +I_d \quad \text{Quand } D_1 \text{ conduit}$$

$$i_{S1} = -I_d \quad \text{Quand } D'_1 \text{ conduit}$$

- La valeur efficace du courant secondaire est donc:

$$I_S = \sqrt{\frac{1}{T} \left(I_d^2 2 \frac{T}{q} \right)} \quad \longrightarrow \quad I_S = I_d \sqrt{\frac{2}{q}}$$

- Le facteur de puissance secondaire est:

$$F_S = \frac{U_{d0} I_d}{q V I_s} = \left(\frac{2q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) I_d \right) / \left(q \frac{V_m}{\sqrt{2}} I_d \sqrt{\frac{2}{q}} \right) \Rightarrow F_S = \frac{2\sqrt{q}}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)$$

- A q donné, il est $\sqrt{2}$ fois plus fort qu'avec le redresseur parallèle.
- F_S est voisin de l'unité pour q faible (**0,90 pour le PD2; 0,955 pour le PD3**) mais il diminue si on augmente q .

C) Courant et facteur de puissance primaire:

Redresseur PD2	Redresseur PD3
$n_1 i_p = n_2 i_{S1} \quad n_1 I_P = n_2 I_S = n_2 I_d$	$n_2 i_{S1} + n_2 i_{S2} + n_2 i_{S3} = 0$
$F_p = F_S = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,90$	$n_1 i_{P1} = n_2 i_{S1}, n_1 i_{P2} = n_2 i_{S2}, n_1 i_{P3} = n_2 i_{S3}$
	$I_P = \frac{n_2}{n_1} I_S = \frac{n_2}{n_1} I_d \sqrt{\frac{2}{3}}$
	$F_p = F_S = \frac{3}{\pi} = 0,955$

3.4. Chutes de tension d'un montage redresseur

- Nous avons supposé jusqu'ici que les différents composants (diodes, transformateurs) des montages redresseurs étaient parfaits.
- En réalité les imperfections des éléments occasionnent une diminution de la tension de sortie u_d et donc de sa valeur moyenne.

3.4.1. Causes de la chute de tension

a) Les diodes:

- La tension aux bornes d'un diode passante vaut: $V_D = V_0 + R_D I_d$ (≈ 1 à $3V$; avec $V_0 \approx 0,7V$ tension de seuil).
- Si n diodes conduisent simultanément I_d , la chute de tension moyenne est:

$$(\Delta \bar{u}_d)_{diodes} = n(V_0 + R_D I_d)$$

Cette chute reste modeste.

b) Le transformateur:

- Prenons l'exemple de PD3: à chaque instant le courant I_d circule dans deux enroulements secondaires. Si R_S est la résistance ramenée au secondaire, la chute de tension vaut:

$$(\Delta \bar{u}_d)_{\text{résistance}} = 2R_S I_d$$

c) Les commutations:

- L'étude précédente ne tient pas compte des phénomènes qui se produisent pendant les **commutations** et sont généralement la cause principale de chute de tension: il s'agit de ***l'empiétement***.

3.4.2. L'empiètement

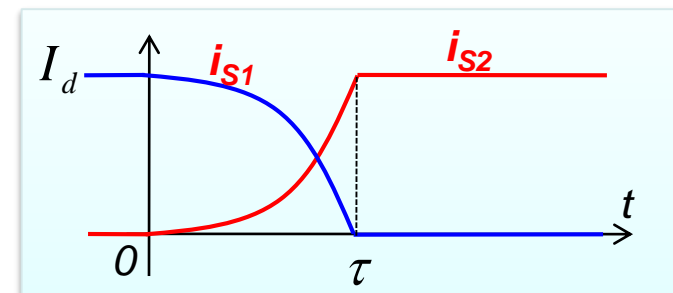
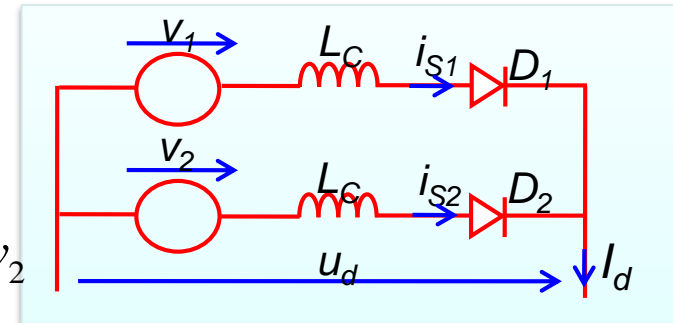
a) Description du phénomène

- Considérons un redresseur P3. les diodes D_1 et D_2 sont en cours de commutation.
- L'origine des temps est choisi lorsque $v_1 = v_2$
A cet instant D_2 devient passante.
- La croissance de i_{S2} et la décroissance de i_{S1} ne sont pas immédiates, elles sont ralenties par l'inductance de fuite L_C . Les deux courants sont liés par la relation:

$$i_{S1} + i_{S2} = I_d$$

1

- Lorsque i_{S1} tombe à zéro, au bout de τ la commutation est terminée, alors D_1 OFF et $i_{S2} = I_d$ (D_2 ON). Entre les instants $t = 0$ et $t = \tau$, les deux diodes sont **passantes simultanément**, c'est **l'empiètement de D_1 sure D_2** .



b) Chute de tension due à l'empiètement

- Pendant la commutation, nous pouvons écrire deux lois de mailles:

$$u_d = v_1 - L_C \frac{di_{s1}}{dt}$$

$$u_d = v_2 - L_C \frac{di_{s2}}{dt}$$

2

- Puisque I_d est constant, la dérivation de (1) donne:

$$\frac{di_{s1}}{dt} + \frac{di_{s2}}{dt} = 0$$

3

- En additionnant membre à membre les équations (2), et compte tenu de (3):

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

4

- Pendant l'intervalle de commutation, la tension u_d au lieu d'être égale à v_2 n'est égale à $(v_1 + v_2)/2$. La chute de tension instantané vaut:

$$\Delta u_d = v_2 - (v_1 + v_2)/2 = (v_2 - v_1)/2 = L_C di_{s2} / dt$$

5

- Puisqu'il y a q commutations par période, la chute de tension moyenne est:

$$\Delta \bar{u}_d = \frac{q}{T} \int_{t=0}^{t=\tau} \Delta u_d dt = \frac{q}{T} \int_{t=0}^{t=\tau} \left(L_C \frac{di_{s2}}{dt} \right) dt = \frac{qL_C}{T} [i_{s2}(t)]_0^\tau = \frac{q}{T} L_C I_d$$

6

c) Durée de l'empiètement

- Equation (5) donne:

$$\frac{di_{S2}}{dt} = \frac{v_2 - v_1}{2L_C} = \frac{-V_m}{L_C} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{q}\right)$$

- Le courant i_{S2} est de la forme:

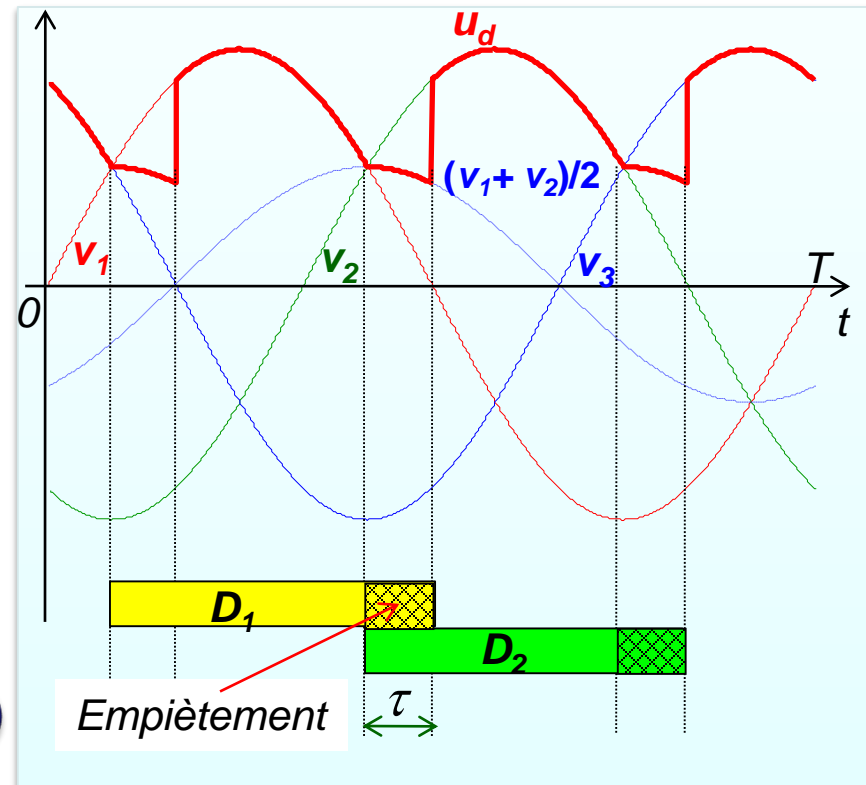
$$i_{S2} = \frac{-V_m}{L_C \omega} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{q}\right) + cte$$

- La cte est obtenue en écrivant

$$i_{S2} = 0 \text{ pour } \omega t = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q}$$

$$i_{S2} = \frac{V_m}{L_C \omega} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \left[1 - \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{q}\right) \right]$$

7



- Pour obtenir la durée de l'empiètement τ , il suffit de noter que pour

$\omega t = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \omega \tau$ le courant i_{S2} atteint la valeur I_d . On obtient donc:

$$\tau = \frac{1}{\omega} \text{Arcos} \left(1 - \frac{2L_C \omega I_d}{V_m \sin(\pi/q)} \right)$$

8

4. Redressement commandé (à thyristors)

- Le redressement à thyristor utilisent les mêmes schémas que les redresseurs à diode. Les diodes sont simplement remplacées par des thyristors. Deux cas se présentent:
 - Toutes les diodes sont remplacées par des thyristors: **pont complet** ou **pont tout thyristors**. On retrouve les trois montages: élémentaires: P, PD et S.
 - Lorsque pour un montage PD ou S un seul des deux « P » est constitué de thyristors (généralement en cathodes communes) et l'autre de diodes, c'est un **pont mixte**.
- En utilisant les thyristors on peut retarder l'entrée en conduction des interrupteurs. On caractérise le retard par l'angle α : les thyristors sont débloqués avec un retard en temps α / ω par rapport à l'instant où la diode correspondante entrait en conduction.

4.1. Redresseur du type P (parallèle)

4.1.1. Fonctionnement. Etude des tensions

a) Formes d'onde et tension redressée:

- Le thyristor Th_1 qui remplace D_1 est passant

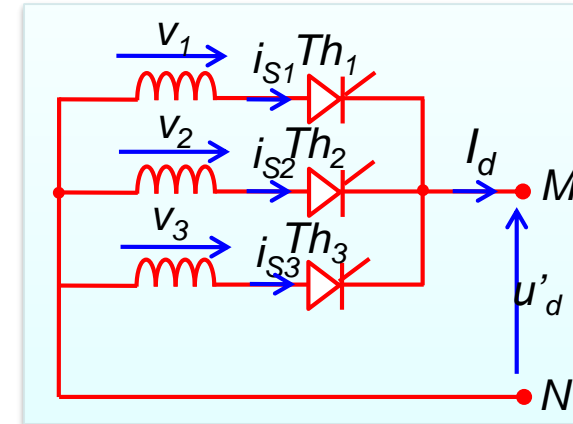
pour:
$$\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega t < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha$$

- De même le thyristor Th_2 conduit durant

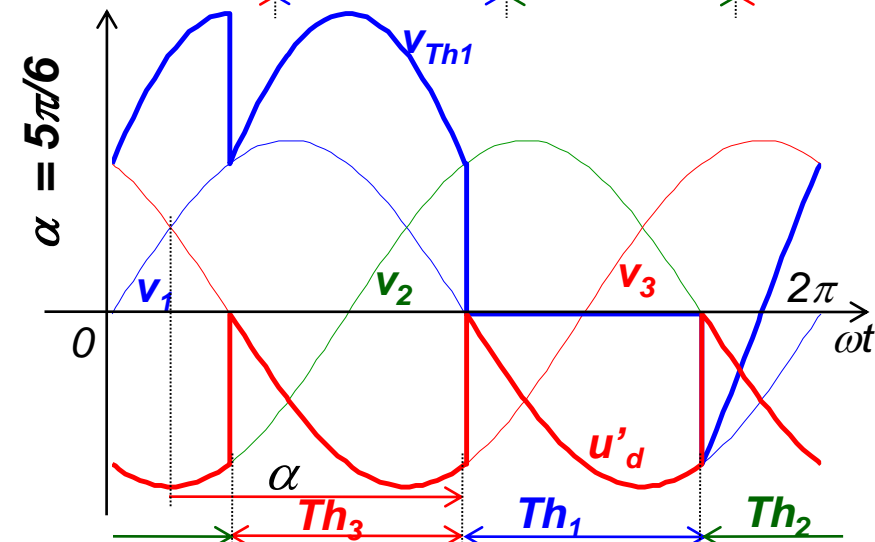
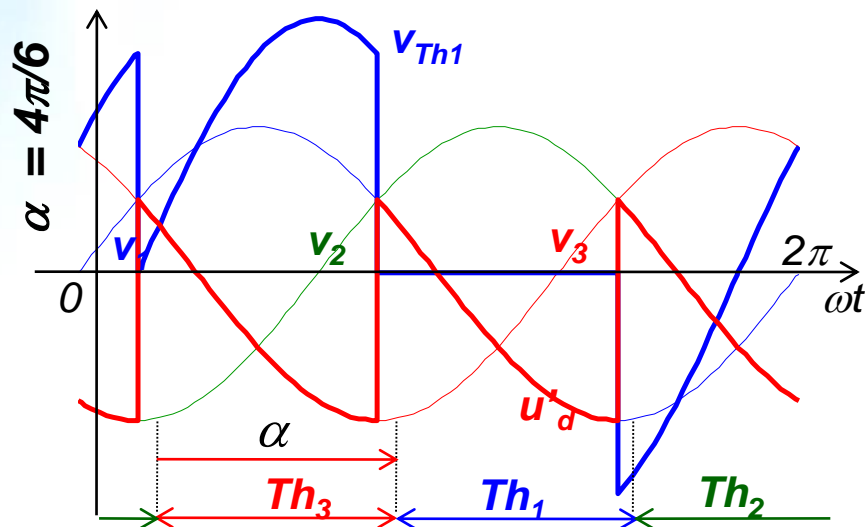
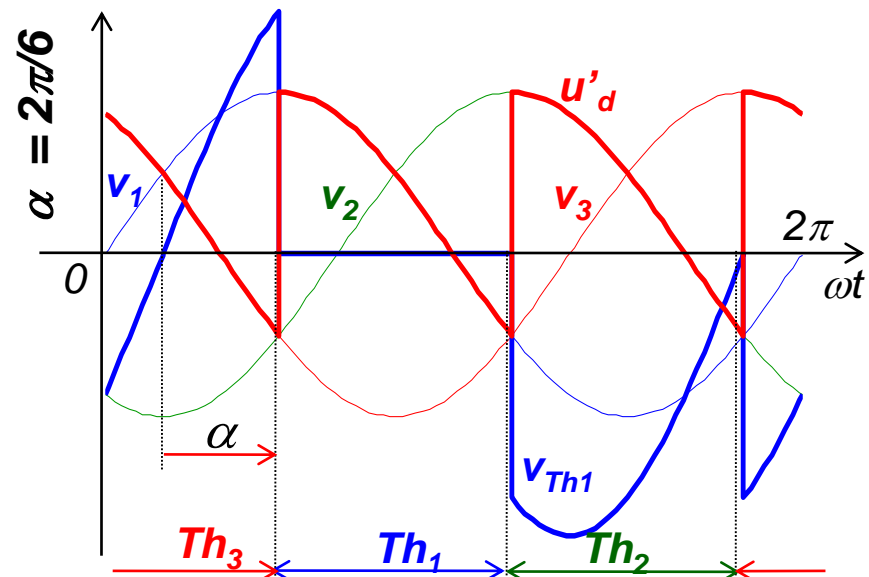
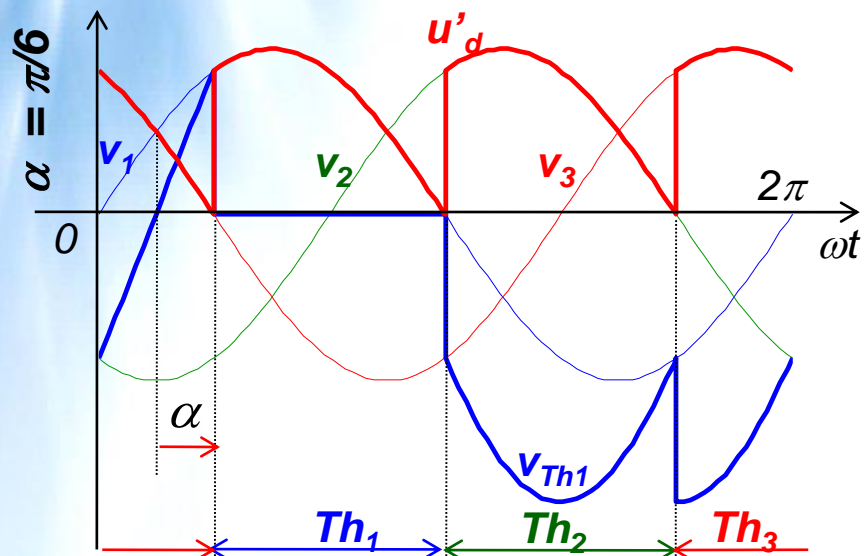
l'intervalle:
$$\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega t < \frac{\pi}{2} + \frac{3\pi}{q} + \alpha$$
 etc.

- Deux cas sont à considérer:

- $\alpha < \frac{\pi}{2}$ *marche en redresseur*: la tension redressée moyenne U'_{d0} est toujours positive.
- $\alpha > \frac{\pi}{2}$ *marche en onduleur non autonome*: la tension redressée moyenne U'_{d0} est toujours négative. Entre M et N il n'y a donc plus un récepteur mais *un générateur*: l'énergie passe du côté continu au côté alternatif.



...Montage P à Thyristors



b) Valeur moyenne de la tension redressée:

- La tension redressée u'_d est formée , par période T , de q portions de sinusoides.

- Ainsi pour $(\pi/2) - (\pi/q) + \alpha < \omega t < (\pi/2) + (\pi/q) + \alpha$ $u'_d = V_m \sin(\omega t)$

D'où sa valeur moyenne:

$$U'_{d0} = \frac{q}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha} V_m \sin(\theta) d\theta = \frac{q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cos \alpha \quad \Rightarrow \quad U'_{d0} = U_{d0} \cos \alpha$$

- La tension redressée moyenne est égale à celle obtenue sans retard à l'amorçage (montage à diode) multipliée par $\cos \alpha$.
- En faisant varier α de 0 à π , on peut, théoriquement, faire varier U'_{d0} de U_{d0} à $-U_{d0}$.

c) Facteur d'ondulation K'_0 :

● Le facteur d'ondulation est toujours donné par: $K'_0 = \frac{u'_{d\max} - u'_{d\min}}{2U'_{d0}}$

● Si l'on adopte l'hypothèse de la conduction continue,

$$\begin{aligned} u'_{d\max} &= V_m && \text{pour} && 0 < \alpha < \frac{\pi}{q} \\ u'_{d\max} &= V_m \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{q}\right) && \text{pour} && \frac{\pi}{q} < \alpha < \frac{\pi}{2} \\ u'_{d\min} &= V_m \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{q}\right) && \text{pour} && 0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

● K'_0 croit de K_0 (redresseur à diodes) à l'infini quand α va de 0 à $\pi/2$.

d) Tension aux bornes des thyristors:

● La tension inverse maximale qui peut apparaître aux bornes des Thyristors est la même que le même montage utilisant des diode.

$$\begin{aligned} v_{i\max} &= 2V_m && , && \text{si } q \text{ pair} \\ v_{i\max} &= 2V_m \cos\left(\frac{\pi}{2q}\right) && , && \text{si } q \text{ impair.} \end{aligned}$$

4.1.2. Etude des courants. Diagramme des puissances

a) Courants:

- À valeur donnée de I_d les courants dans les thyristors ont la même valeur que pour le même redresseur équipé de diodes:

$$i'_{\max} = I_d \quad i'_{\text{moy}} = \frac{I_d}{q} \quad I' = \frac{I_d}{\sqrt{q}}$$

- Chaque phase secondaire étant parcourue par I_d pendant T/q , les courants secondaires ont encore pour valeur efficace: $I'_s = I_d / \sqrt{q}$

- Les courants primaires ont la même forme d'onde et même valeur que dans le cas des redresseurs à diode: $I'_P = I_P \quad J'_P = J_P$

b) Facteurs de puissance:

- Les facteurs de puissance sont multipliés par $|\cos \alpha|$:

$$F'_s = F_s |\cos \alpha| \quad F'_P = F_P |\cos \alpha| \quad F'_L = F_L |\cos \alpha|$$

c) Diagramme de puissance:

- Les redresseurs dégradent le facteur de puissance (présence des harmoniques dans les courants primaires)
- Les redresseurs à thyristors consomment de l'énergie réactive: Le fondamental du courant pris au réseau est déphasé d'un angle $\varphi_1 = \alpha$, en arrière de la tension.
- La puissance apparente est donnée de façon générale par l'expression:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

- Les puissances ont pour valeur (cas du triphasé):

$$S = 3V_p I_p$$

$$P = 3V_p I_{P1} \cos(\varphi_1) = U_{d0} I_d \cos(\alpha)$$

$$Q = 3V_p I_{P1} \sin(\varphi_1) = U_{d0} I_d \sin(\alpha)$$

$$D = 3V_p \sqrt{I_{P2}^2 + I_{P3}^2 + \dots} = 3V_p \sqrt{I_p^2 - I_{P1}^2}$$

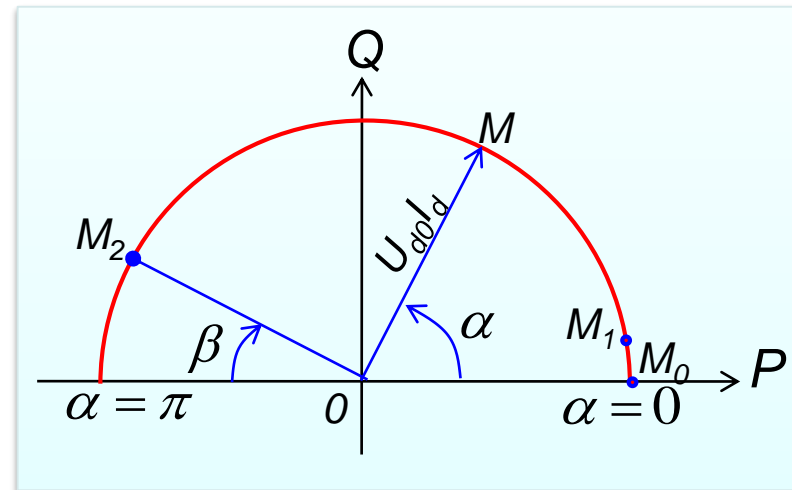
V_p et I_p : valeurs efficaces des tensions simples et courants du réseau.

I_{P1} : fondamental du courant i_p

I_{Pn} : valeur efficace des harmoniques.

φ_1 : déphasage entre le fondamental du courant et la tension.

- Puisque la puissance déformante D d'un redresseur commandé ne dépend pas de l'angle de retard, on caractérise le fonctionnement du montage par le graphe des variations de Q en fonction de P .
- Pour un courant redressé I_d donné, le point de fonctionnement M du redresseur se déplace, lorsque α varie entre 0 et π , sur un demi-cercle de rayon $U_{d0}I_d$.
- Quand α va de α_{min} à $\pi - \beta$, le point M va de M_1 à M_2 .
- Le point M_0 correspond au Fonctionnement du montage à diodes.



4.2. Redresseurs à thyristors du type PD (parallèle double)

4.2.1. Redresseurs tout thyristors du type PD

- Les deux commutateurs de chaque branche sont à thyristors. Les mêmes raisonnements que pour les redresseurs de type P conduisent à des résultats analogues.

a) Tensions:

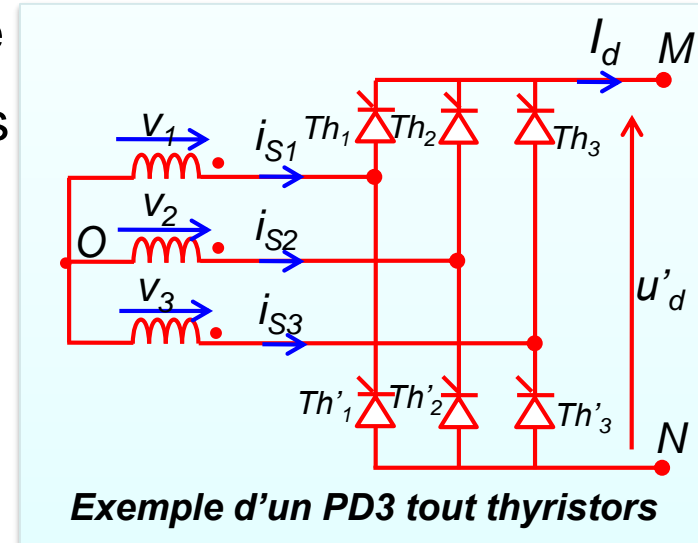
- Le commutateur plus positif délivre, à vide, une tension redressée v_{MO} formée de q portions de sinusoïdes, qui a

pour valeur moyenne:

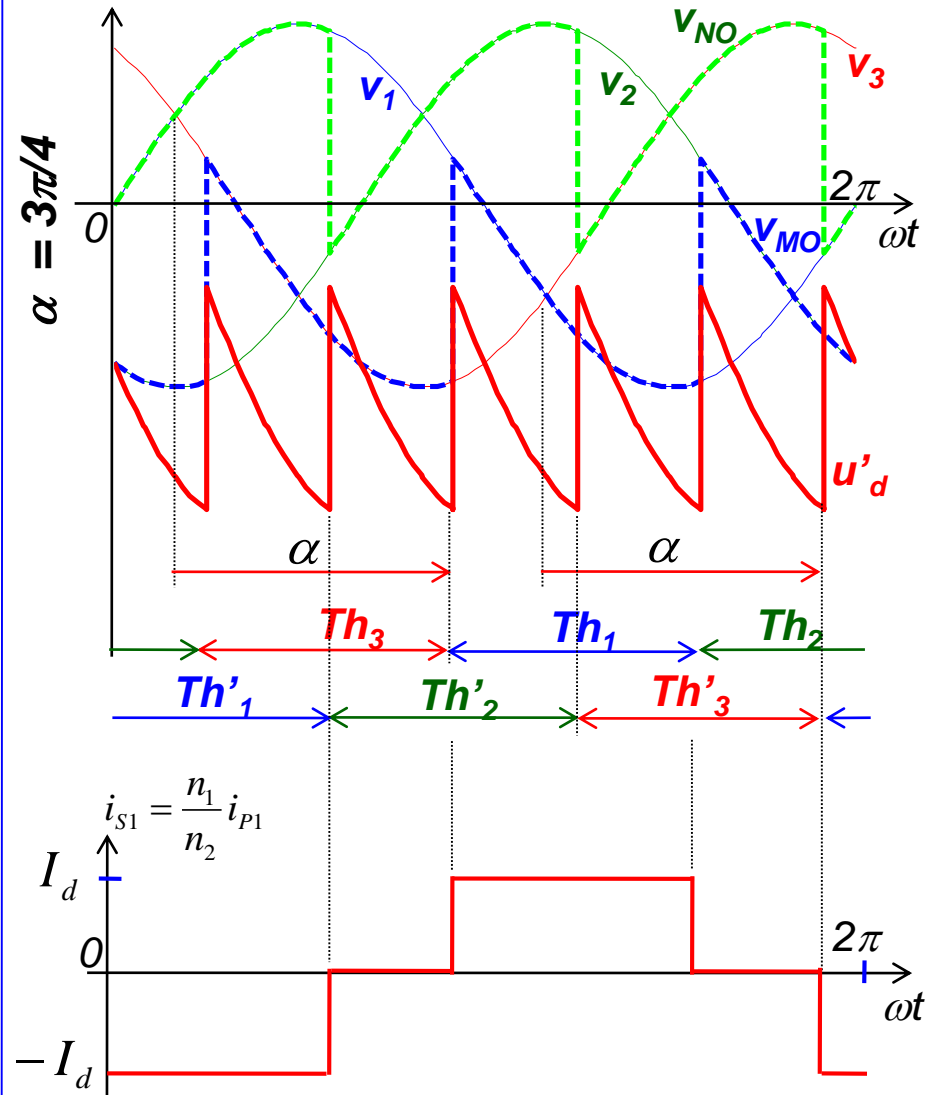
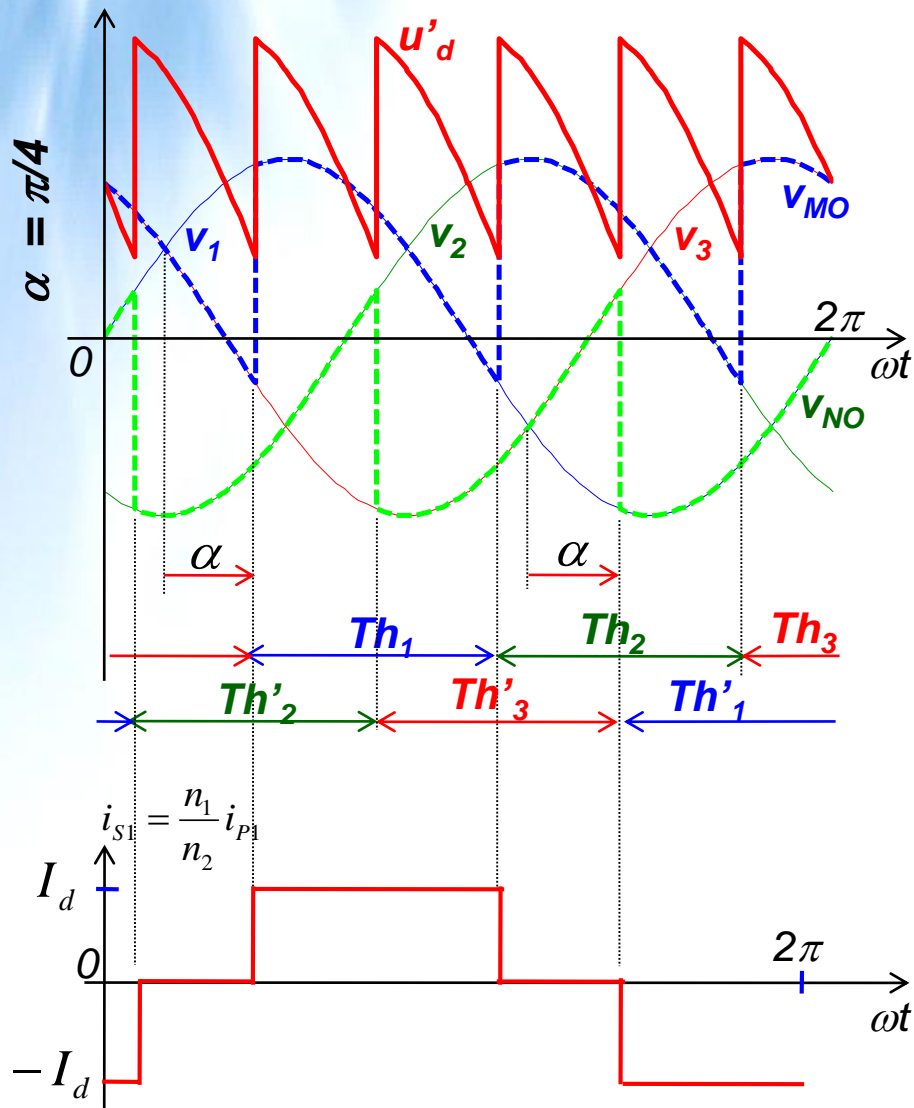
$$\bar{v}_{MO} = \frac{q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cos \alpha$$

- Le commutateur plus négatif délivre, quant à lui une tension v_{NO} formée de q portions de sinusoïdes de valeur moyenne:

$$\bar{v}_{NO} = -\frac{q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cos \alpha$$



...Montage PD à thyristors



- La tension redressée totale $u'_d = v_M - v_N$ est formée de q portions de sinusoides si q est pair, de $2q$ portions si q est impair. Sa valeur moyenne est toujours donnée par:

$$U'_{d0} = \frac{2q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cos \alpha \quad \Rightarrow \quad U'_{d0} = U_{d0} \cos \alpha$$

- La tension aux bornes des thyristors a la même forme d'onde et même valeur inverse maximale qu'en redressement parallèle.

b) courants:

- Les courants dans les thyristors, dans les enroulements secondaires et primaires, sont les mêmes que lorsqu'il n'y avait pas de retard à l'amorçage. Les ondes de tous ces courants sont simplement décalés de α . Les facteurs de puissance s'obtiennent en multipliant par $|\cos \alpha|$ les valeurs trouvées pour les redresseurs à diodes.

4.2.2. Redresseurs mixtes du type PD

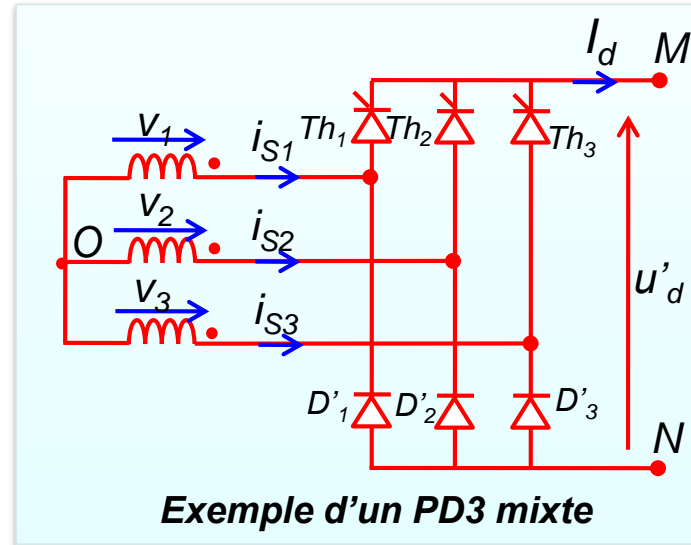
- Le commutateur plus positif est réalisé à base de thyristors, le commutateur plus négatif reste à diode.

a) Tension redressée:

- La tension redressée: $u'_d = v_{MO} - v_{NO}$
- v_{MO} est donnée par le commutateur plus positif à thyristors,
- v_{NO} est donnée par le commutateur plus négatif à diode.
- La valeur moyenne de u'_d s'écrit alors:

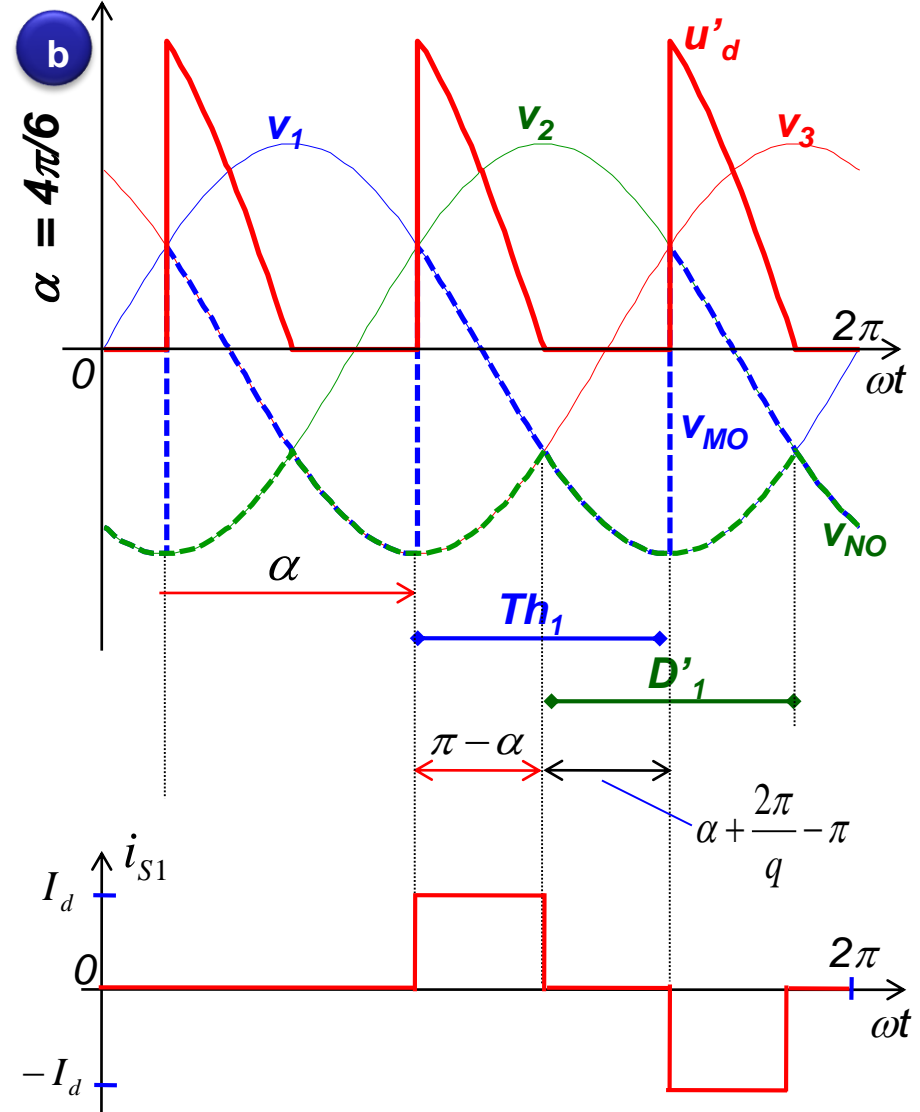
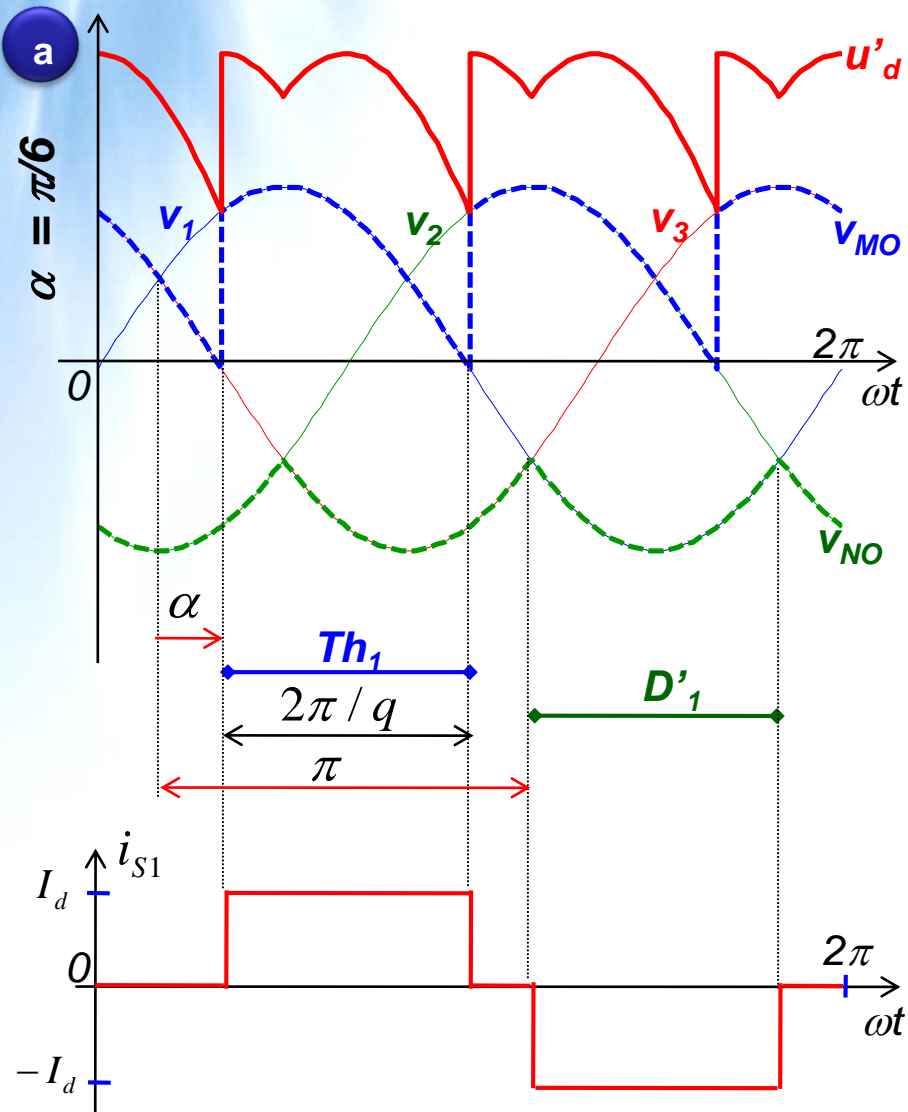
$$U'_{d0} = \frac{q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cos \alpha - \left[-\frac{q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \right] = \frac{2q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

$$U'_{d0} = U_{d0} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$



- En faisant varier α de 0 à π , on peut faire varier U'_{d0} de son maximum U_{d0} à zéro; on ne peut plus l'inverser. Un redresseur mixte ne permet pas la marche en onduleur, **il n'est pas réversible**.
- La forme d'onde de la tension redressée peut présenter deux allures différentes
 - a Tant que les intervalles de conduction du thyristor et de la diode de la même branche ne chevauchent pas ($\alpha < \pi - (2\pi/q)$), u'_d est formée de deux portions de sinusoïdes pour chacune de ses périodes T/q .
 - b Pour $\alpha > \pi - (2\pi/q)$, y a des intervalles où les deux semi-conducteurs (thyristor et diode reliés à la même phase) conduisent simultanément; les bornes M et N sont alors au même potentiel. La tension u'_d présente des segments à valeur nulle.

...Montage PD mixte



- Pour le redresseur PD3 mixte on l'une ou l'autre de ces formes d'ondes suivant que α est inférieur ou supérieur à $\pi/3$.
- Pour le PD2 mixte on a toujours le deuxième mode de fonctionnement.
- Quel que soit q , même s'il est impair, l'indice de pulsation $p=q$.
- La tension aux bornes de thyristors a même forme d'onde et mêmes valeurs extrêmes que pour un redresseur tout thyristors.
- La tension aux bornes de diodes est la même que pour un redresseur du type parallèle (P).

b) Courants. Diagramme des puissances:

- Pour les courants secondaires, il faut distinguer les deux cas précédents:

a) Si $\alpha < \pi - (2\pi/q)$, chaque phase est parcourue par $+I_d$ quand le thyristor correspondant est passant, par $-I_d$ quand c'est la diode qui conduit. On a encore:

$$I'_s = I_d \sqrt{\frac{2}{q}}$$

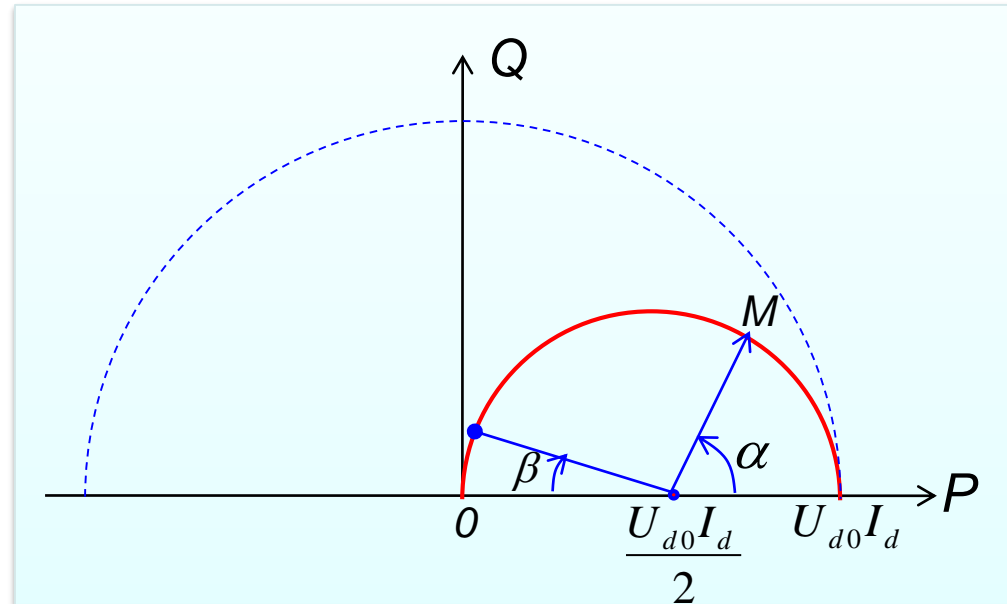
b) Si $\alpha > \pi - (2\pi/q)$, pendant les intervalles de conduction simultanée des deux semi-conducteurs reliés à la même phase secondaire, le courant dans celle-ci est nul (I_d se referme par ces semi-conducteurs et le récepteur). La valeur efficace des courants devient alors:

$$I'_s = I_d \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$$

- Pour le redresseur PD3 mixte, les puissances active et réactive ont pour expressions:

$$P = U_{d0} I_d \frac{1 + \cos(\alpha)}{2}$$

$$Q = U_{d0} I_d \frac{\sin(\alpha)}{2}$$



- La comparaison avec le demi-cercle de rayon $U_{d0} I_d$ (tracé en pointillées) des redresseurs tout thyristors montre que *les pont mixtes consomment moins de puissance réactive mais qu'ils ne sont pas réversibles.*