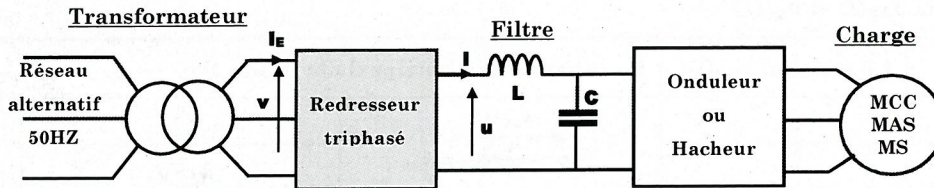


Redresseur triphasé P3 et PD3

I. Introduction

Les redresseurs triphasés convertissent l'énergie électrique alternative triphasée en courant continu. Ils sont utilisés dans l'industrie pour alimenter des moteurs électriques, l'électromobilité pour les véhicules électriques, les stations de conversion d'énergie, les alimentations à découpage, et les gros appareils électroménagers. Ils jouent un rôle essentiel dans l'électronique de puissance en assurant une efficacité et une stabilité accrues des systèmes électriques modernes.



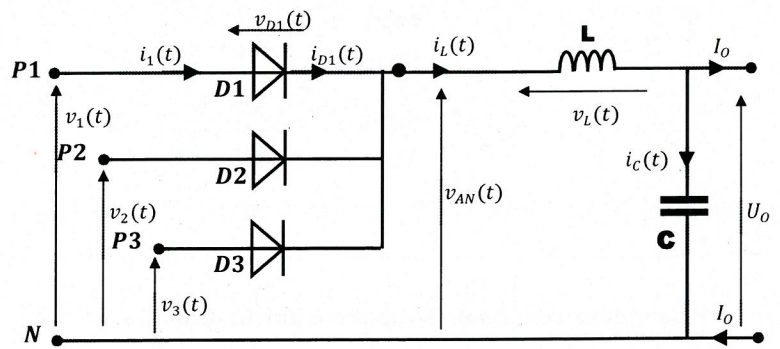
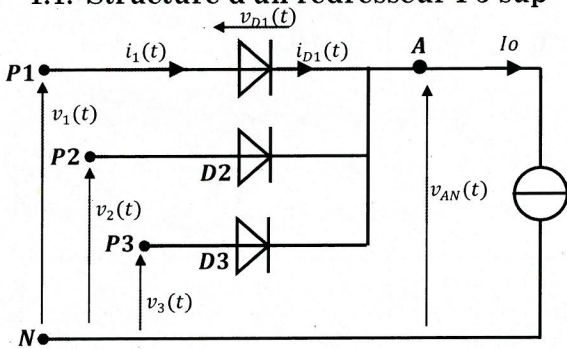
Dans ce cours, notre focus est sur les redresseurs non commandés qui utilisent des diodes pour la conversion du courant alternatif en courant continu. Cependant, il est important de noter qu'il existe une autre catégorie de redresseurs, les redresseurs commandés, qui ne seront pas traités ici. Pour des raisons de structuration du cours, nous aborderons d'abord les redresseurs parallèles P3, puis les redresseurs parallèles doubles PD3.

II. Redresseur parallèle triphasé P3

Le redresseur parallèle triphasé P3 est un convertisseur alternatif-continu utilisé lorsque l'entrée provient d'une source de tension triphasée équilibrée. Il se décline en deux types : le P3 le plus positif et le P3 le plus négatif.

1. Redresseur P3 le plus positif

1.1. Structure d'un redresseur P3 sup



Le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré. Soient v_1, v_2 et v_3 les tensions simples. On note V leur valeur efficace, soient u_{12}, u_{23} et u_{31} les tensions composées. On note U leur valeur efficace : $U = \sqrt{3} V$.

Les tensions simples :

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

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

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

- V_m est la valeur maximale de la tension : $V_m = \sqrt{2} V$
- θ est la phase instantanée : $\theta = \omega t = 2\pi f t$
- f est la fréquence de réseau, égale à 50 Hz



Hypothèses :

- La source d'entrée est un réseau triphasé, qui fournit des tensions alternatives équilibrées.
- La charge est un filtre LC : la source de sortie est de type courant.
- Les diodes D1, D2 et D3 sont supposées parfaites, ce qui signifie qu'elles ne présentent aucune perte de puissance.
- L'inductance L est choisie grande pour réduire l'ondulation de courant : $i_L(t) \cong I_o$
- Le condensateur C est choisi grand pour réduire l'ondulation de tension redressée.

Pour une raison de simplicité et d'éviter toutes erreurs de calculs, il est préférable de résoudre toutes les intégrales par en faisant changer la vraie temps (t) par la variable phases (θ).

1.2. La conduction des diodes de redresseur

La conductivité des diodes est liée à l'état de la tension alternative appliquée en entrée, La diode est conductrice lorsque la tension à laquelle elle est liée est supérieure (pour cela le nom PLUS POSITIF).

$v_1 > v_2$ et $v_1 > v_3$	$v_2 > v_1$ et $v_2 > v_3$	$v_3 > v_2$ et $v_3 > v_1$
D1 passante	D2 passante	D3 passante

1.3. Etudes analytique de redresseur P3 plus positif

❖ Expression des tensions $v_{AN}(t)$ et $v_{D1}(t)$

La tension la plus grande	La tension $v_{AN}(t)$	La tension aux bornes de la diode D1		
v_1	v_1		$v_1 - v_1$	0
v_2	v_2		$v_1 - v_2$	u_{12}
v_3	v_3		$v_1 - v_3$	u_{13}

Pour les allures, voir document de traçage

La tension redressée $v_{AN}(t)$ est formée de trois sommets de sinusoïde par période du réseau :

Période en rad	Fréquence fr	Valeur maximale
$\omega_r = 3 \cdot \omega$	$f_r = 3 \cdot f$	$V_m = \sqrt{3} \cdot V$

❖ Valeur moyenne de la tension redressée $v_{AN}(t)$

La valeur moyenne de la tension $v_{AN}(t)$ correspond à la composante continue de cette tension. Elle est défini par :

$\langle v_{AN}(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_{AN}(t) dt \Rightarrow$ on calcul, l'intégrale de $\pi/6 \text{ à } 5\pi/6 \Rightarrow v_{AN}(t) = v_1(t)$

$\langle v_{AN} \rangle = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} v_m \sin(\theta) d\theta$ $= \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m \sin \theta d\theta$	$\langle v_{AN} \rangle = \frac{3V_m}{2\pi} \left[-\cos \theta \right]_{\pi/6}^{5\pi/6}$ <p>d'où $\langle v_{AN}(t) \rangle = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} = \frac{3\sqrt{6}V}{2\pi}$</p>
---	--

❖ La valeur maximale supportée par la diode

La tension maximale supportée par la diode est importante pour faire le choix des diodes de redresseur

Donc : $V_{Rmax} = U_{max} = \sqrt{3} \cdot V_m \Rightarrow V_{Rmax} = \sqrt{6} \cdot V$

❖ Etude des courants i_1 et i_{D1}

En suivant l'hypothèse initiale, la bobine L est sélectionnée avec une valeur excessive afin de réduire l'ondulation du courant $i_L(t)$ et de le rendre aussi continu que possible $i_L(t) = I_o$.

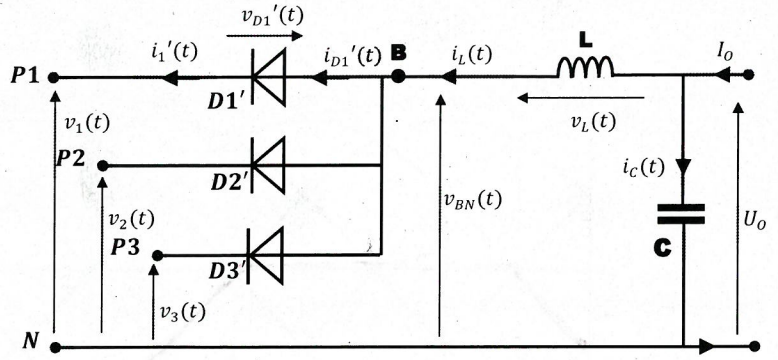
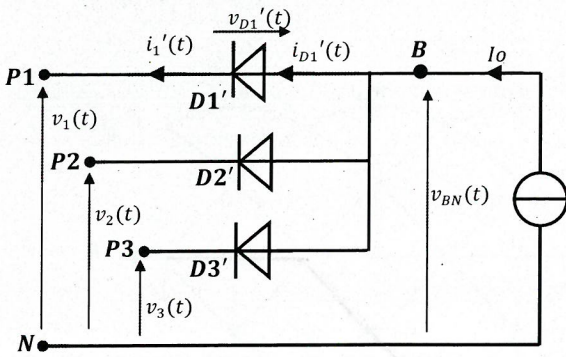
Expression du courant

Toutes les expressions seront formulées en termes de courant de sortie $i_L(t)$, donc en fonction de I_o . (Pour les allures, voir document de traçage)

Etat de la diode D1	$i_1(t)$	$i_{D1}(t)$
Passante	I_o	I_o
Bloquée	0	0

2. Redresseur P3 le plus négatif

2.1. Structure d'un redresseur P3 inf



2.2. La conduction des diodes de redresseur

La conductivité des diodes est liée à l'état de la tension alternative appliquée en entrée, La diode est conductrice lorsque la tension à laquelle elle est liée est la plus inférieure (pour cela le nom PLUS NEGATIF).

$v_1 < v_2$ et $v_1 < v_3$	$v_2 < v_1$ et $v_2 < v_3$	$v_3 < v_2$ et $v_3 < v_1$
D1' passante	Dé passante	D3' passante

2.3. Etudes analytique de redresseur P3 plus positif

❖ Expression des tensions $v_{BN}(t)$ et $v_{D1}(t)$

La tension la plus grande	La tension $v_{BN}(t)$	La tension aux bornes de la diode D1	
v_1	v_1	$v_{D1} = v_1 - v_1 = 0$	0
v_2	v_2	$v_{D1} = v_2 - v_1 = v_{21}$	v_{21}
v_3	v_3	$v_{D1} = v_3 - v_1 = v_{31}$	v_{31}

❖ Valeur moyenne de la tension redressée $v_{BN}(t)$

Par définition : $\langle v_{BN}(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_{BN}(t) dt \Rightarrow$ on calcule l'intégrale de $\pi/6$ à $5\pi/6 \Rightarrow \langle v_{BN} \rangle = v_1(t)$

$$\langle v_{BN} \rangle = \frac{3\pi}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} v_{BN}(\theta) d\theta$$

$$= \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m \cdot \sin \theta d\theta$$

$$\langle v_{BN} \rangle = \frac{3V_m}{2\pi} [\cos \theta]_{\pi/6}^{5\pi/6}$$

comme $v_m = \sqrt{2} V$

$$\langle v_{BN} \rangle = -\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} = -\frac{3\sqrt{6} \cdot V}{2\pi}$$

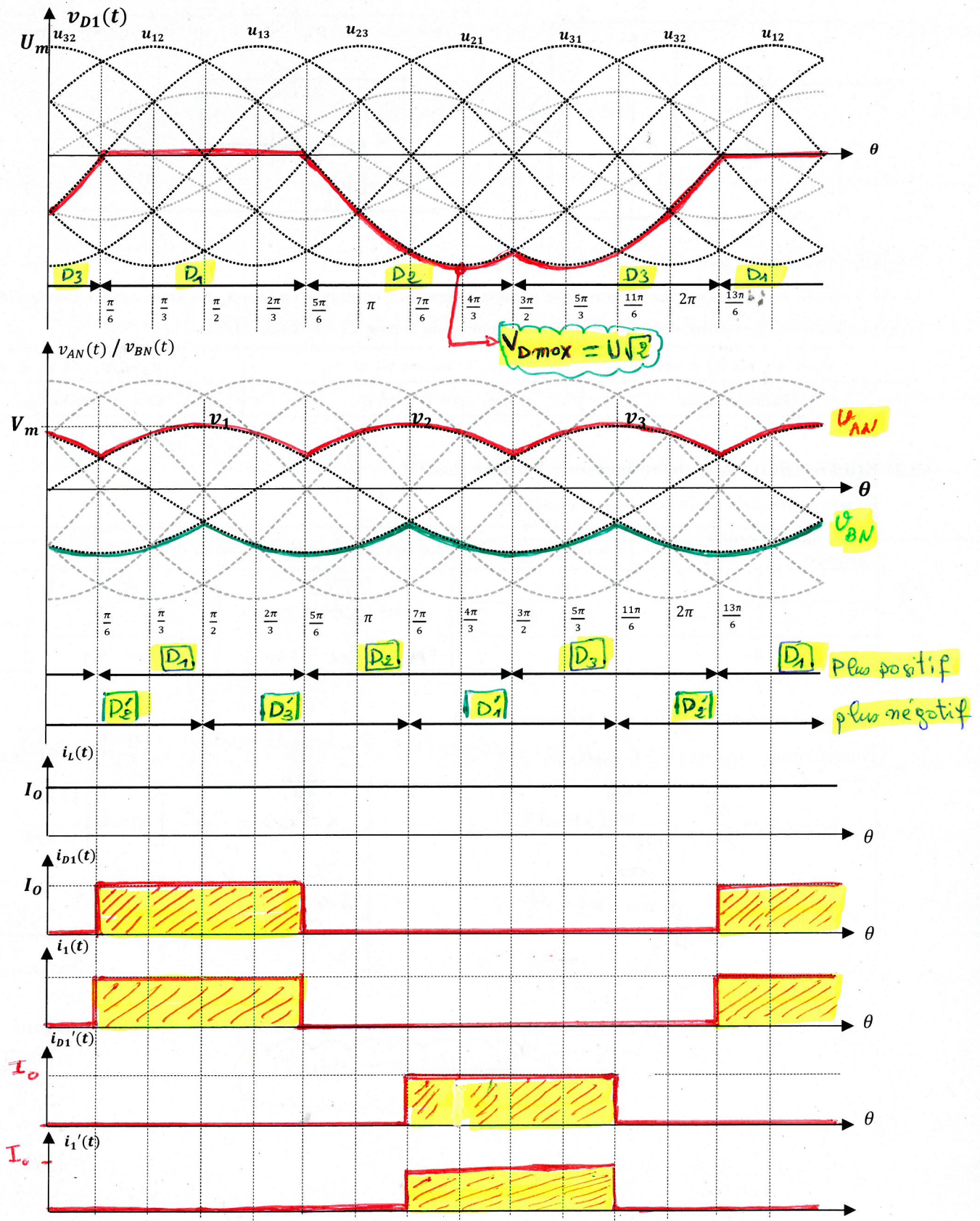
N.B : la valeur moyenne de P3 le plus positif est égal à l'inverse de la valeur moyenne de P3 le plus négatif

$\langle v_{AN}(t) \rangle = - \langle v_{BN}(t) \rangle$

Conclusion

Le redresseur parallèle triphasé est peu apprécié en raison de son faible facteur de puissance, ce qui explique pourquoi il est rarement utilisé dans l'industrie. En effet, le redresseur PD3 est préféré dans les variateurs de vitesse industriels en raison de sa popularité et de son efficacité.

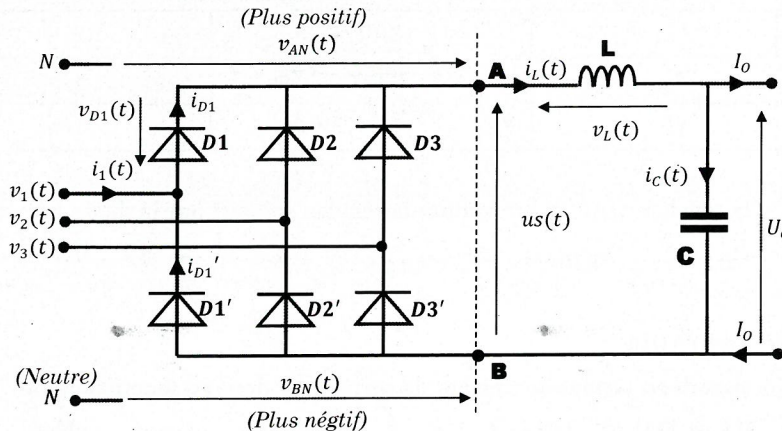
Allures de redresseur triphasé P3



III. Redresseur parallèle triphasé PD3

1. Structure de redresseur PD3

Le Redresseur parallèle double triphasé PD3 est un dispositif de conversion alternatif-continu, composé principalement d'une combinaison d'un redresseur P3 en sortie positive (v_{AN}) et d'un redresseur d'entrée négative (v_{BN})



On note que Le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré. Soient v_1, v_2 et v_3 les tensions simples. On note V leur valeur efficace, soient u_{12}, u_{23} et u_{31} les tensions composées. On note U leur valeur efficace : $U = \sqrt{3} V$.

Les tensions simples :

- | | |
|---|--|
| $v_1(t) = V_m \sin(\theta)$ | • V_m est la valeur maximale de la tension : $V_m = \sqrt{2} V$ |
| $v_2(t) = V_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$ | • θ est la phase instantanée : $\theta = \omega t = 2\pi f t$ |
| $v_3(t) = V_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$ | • f est la fréquence de réseau, égale à 50 Hz |

2. L'allure de la tension de sortie $u_s(t)$

La tension de sortie est obtenue en traçant les tensions $v_{AN}(t)$ et $v_{BN}(t)$. Ensuite, en appliquant la loi des mailles, on établit la relation entre $u_s(t)$, $v_{AN}(t)$ et $v_{BN}(t)$.

Relation de la tension $u_s(t)$: ... Donc : $u_s(t) = v_{AN}(t) - v_{BN}(t)$

Question : Représentez graphiquement les évolutions des tensions $v_{AN}(t)$ et $v_{BN}(t)$ en indiquant les diodes appropriées qui laissent passer le courant pendant les phases de fonctionnement. En déduisant ensuite le tracé de la tension $u_s(t)$.

3. La valeur moyenne de la tension redressée.

Il existe deux méthodes pour calculer la valeur moyenne d'un redresseur PD3. La première consiste à effectuer un calcul intégral de la tension de sortie $u_s(t)$. La deuxième méthode repose sur l'application des propriétés de la valeur moyenne à la relation établie entre $u_s(t)$, $v_{AN}(t)$ et $v_{BN}(t)$. Pour des raisons de simplicité, il est préférable d'utiliser la deuxième méthode.

Etapes de calculs :

- Calcul de la valeur moyenne de $v_{AN}(t)$. on a pour $\theta \in [\pi/6, 5\pi/6] \Rightarrow v_{AN}(\theta) = v_1(\theta)$

$$\langle v_{AN} \rangle = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} v_{AN}(\theta) d\theta$$

$$\langle v_{AN} \rangle = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta$$

$$\langle v_{AN} \rangle = \frac{3V_m}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \sin \theta d\theta = \frac{3V_m}{2\pi} [\cos \theta]_{\pi/6}^{5\pi/6}$$

$$\langle v_{AN} \rangle = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} V$$
- Sachant que : $\langle v_{AN}(t) \rangle = -\langle v_{BN}(t) \rangle$, il faut trouver la relation entre $\langle u_s(t) \rangle$ et $\langle v_{AN}(t) \rangle$, puis en déduire $\langle u_s(t) \rangle$.

on a : $u_s(t) = v_{AN} - v_{BN} \Rightarrow \langle u_s(t) \rangle = \langle v_{AN} \rangle - \langle v_{BN} \rangle$

$$\langle u_s(t) \rangle = \langle v_{AN} \rangle - \langle v_{BN} \rangle = 2 \langle v_{AN} \rangle$$

$$\langle v_{AN} \rangle = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V$$

4. La tension maximale supportée par les diodes : Exemple D1

La tension maximale supportée par la diode est un critère de choix important. Pour la déterminer, il convient tout d'abord de tracer l'allure de $v_{D1}(t)$ en suivant le tableau ci-dessous :

La tension la plus grande	La tension $v_{AN}(t)$	La tension aux bornes de la diode D1		
v_1	U_1		$U_1 - U_1$	0
v_2	U_2		$U_1 - U_2$	U_{12}
v_3	U_3		$U_1 - U_3$	U_{13}

Question : représentez l'allure de la tension $v_{D1}(t)$ et en deduire la tension support par la diode.

d'après l'allure de U_{D1} : $V_{Rmax} = U_{max} = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} V \Rightarrow V_{Rmax} = \sqrt{6} V$

5. Expressions et allures des courants

Toutes les expressions seront formulées en termes de courant de sortie $i_L(t)$, donc en fonction de I_0 .

5.1. Le courant dans la diode D1 et D1' : $i_{D1}(t)$ et $i_{D1}'(t)$

Etat de la diode D1	Passante	Bloquée
$i_{D1}(t)$	I_0	0
$i_{D1}'(t)$	0	I_0

Question : représentez l'allure de $i_{D1}(t)$ et $i_{D1}'(t)$

Voir page 35

5.2. Le courant de phase 1 : $i_1(t)$

En utilisant la loi des nœuds entre les diodes D1 et D1', on parvient à obtenir la relation suivante :

on : $i_1(t) + i_{D1}'(t) = i_{D1}(t) \Rightarrow i_1(t) = i_{D1}(t) - i_{D1}'(t)$

Question : représentez l'allure de $i_1(t)$

6. Valeur moyenne de courant dans la diode D1 et D1' : $\langle i_{D1}(t) \rangle$ et $\langle i_{D1}'(t) \rangle$

On rappelle qu'en vue de choisir les diodes de redresseur PD3, il est essentiel de connaître le courant qu'elles peuvent supporter. Dans cette situation, il s'agit de déterminer la valeur moyenne du courant traversant la diode $i_{D1}(t)$.

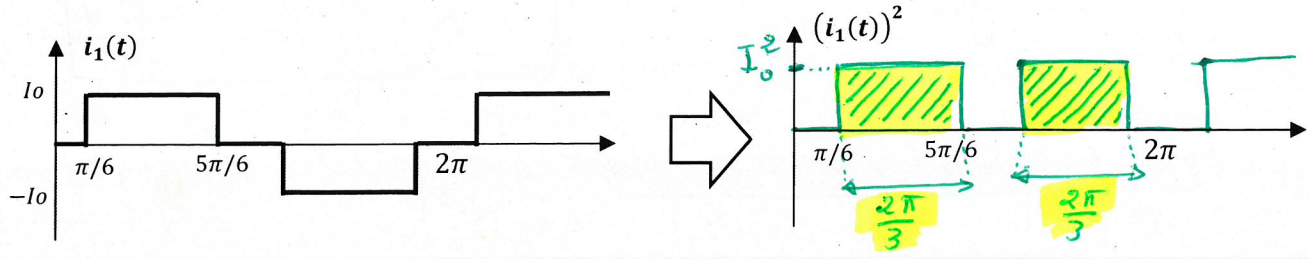
❖ Méthode : il est recommandé d'utiliser la méthode de surface

$\langle i_{D1}(t) \rangle$	$\langle i_{D1}'(t) \rangle$
$\langle i_{D1} \rangle = \frac{2\pi \cdot I_0}{3 \cdot 2\pi} \Rightarrow$ $\langle i_{D1} \rangle = \frac{I_0}{3}$	même valeur $\langle i_{D1}' \rangle = \frac{I_0}{3}$

7. La valeur efficace du courant de phase 1 : $i_1(t)$

Pour évaluer l'efficacité énergétique d'un redresseur, il est essentiel d'avoir un facteur de puissance proche de l'unité. L'un des paramètres importants dans ce contexte est la connaissance du courant de ligne d'une phase du redresseur, notamment le courant de phase 1.

o Méthode : Il est préconisé d'employer la méthode de surface, en particulier lorsque le courant est de forme carrée.



On définit la valeur efficace de courant i_1 : $I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_1(t))^2 dt} \Rightarrow I_1 = \sqrt{\langle (i_1(t))^2 \rangle}$

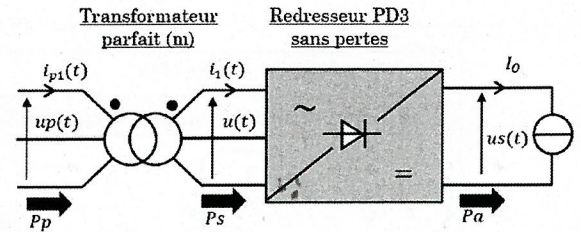
On a : $\langle i_1^2(t) \rangle = 2 \times \frac{2\pi/3 \times I_0^2}{2\pi}$ | d. ou $I_1 = \sqrt{\langle i_1^2(t) \rangle}$

$\langle i_1^2(t) \rangle = \frac{2}{3} \cdot I_0^2$ | $I_1 = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot I_0^2}$

8. Comportement globale en puissance du redresseur

Un facteur de puissance élevé indique que le redresseur utilise efficacement l'énergie fournie par le réseau électrique, réduisant ainsi les pertes d'énergie et améliorant l'efficacité globale du système. Cela permet d'optimiser la consommation d'énergie et de réduire les coûts énergétiques.

Dans cette situation, nous considérons uniquement le transformateur sans pertes, où le facteur de puissance au niveau du secondaire est identique au facteur de puissance au niveau du primaire : $f_p = f_s$.



On définit le facteur de puissance :

$f_p = f_s = \frac{P_p}{S_p} = \frac{P_s}{S_s} = \frac{P_a}{S_s}$ ($P_s = P_a$: pas de pertes de redresseur)

Voici les expressions des différentes puissances mentionnées, respectivement au primaire et au secondaire :

- P_p : Puissance active au primaire
- P_s : Puissance active au secondaire
- S_p : Puissance apparente au primaire
- S_s : Puissance apparente au secondaire
- P_a : Puissance active fournie à la charge

Ces expressions sont fournies dans le tableau ci-dessous :

$P_a = \langle u_s \cdot I_o \rangle$	$S_p = 3 V \cdot I_1$	$f_p = \frac{P_a}{S_s}$
$P_a = \langle u_s \rangle \cdot I_o$ $P_a = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot V \cdot I_o$	$S_p = 3 V \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_o$ $S_p = \sqrt{6} \cdot V \cdot I_o$	$f_p = \frac{\frac{3\sqrt{6}}{\pi} V \cdot I_o}{\sqrt{6} V \cdot I_o} \Rightarrow f_p = \frac{3}{\pi}$ $f_p = 0.95$

Le facteur de puissance cible de 0.95 respecte les recommandations des fournisseurs d'électricité, mais des imperfections dans le transformateur et le redresseur peuvent le réduire. Les technologies, conditions thermiques et vieillissement des composants peuvent influencer sa diminution. Une surveillance régulière et des entretiens préventifs sont importants pour améliorer l'efficacité énergétique.

9. Effet de filtrage à la sortie LC

Le filtre LC joue un rôle crucial dans la stabilisation de la tension et du courant pulsé. Il réduit efficacement l'ondulation du courant et de la tension, les rendant quasi-continus. Cela améliore considérablement la qualité de l'énergie et peut augmenter le facteur de puissance global du système.

Question : Démontrez que la tension de sortie du filtre ainsi que le courant sont rendus continus.

La tension de sortie U_o	Le courant $i_L(t)$
On a : $u_s(t) = u_L(t) + U_o$ $\Rightarrow \langle u_s(t) \rangle = \langle u_L(t) \rangle + \langle U_o \rangle$ Comme : $\langle u_L(t) \rangle = 0 \Rightarrow U_o = \langle u_s(t) \rangle$	On a : $i_L(t) = I_o + i_c(t)$ $\Rightarrow \langle i_L(t) \rangle = \langle I_o \rangle + \langle i_c(t) \rangle$ Comme $\langle i_c(t) \rangle = 0 \Rightarrow I_o = \langle i_L(t) \rangle$

10. Choix des diodes de redresseur PD3

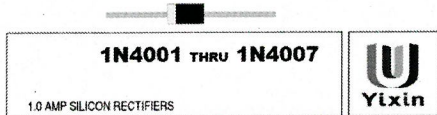
Les diodes du redresseur sont soumises à des courants positifs et des tensions inverses qui doivent rester compatibles avec les valeurs limites définies par le constructeur.

Le choix de la diode doit respecter les conditions suivantes :

- Le courant direct moyen de la diode I_{FAV} doit être supérieur à la valeur moyenne du courant $i_D(t)$.
- La tension inverse maximale V_{RRM} doit être supérieure à la tension maximale de $V_D(t)$.
- Le courant impulsionnel maximum I_{FSM} doit être supérieure au courant maximal de $i_D(t)$.

$I_{FAV} = s \cdot \langle i_{D1}(t) \rangle$	$I_{FSM} = s \cdot i_{D1 \max}$	$V_{RRM} = s \cdot V_{D1 \max}$ ↑ $V_{RRM \max}$
S : le coefficient de sécurité est choisi entre 1.25 à 1.5		
$I_{FAV} = s \cdot \frac{I_0}{3}$	$I_{FSM} = s \cdot I_0$	$V_{RRM} = s \cdot \sqrt{6} \cdot V$

Exemple : diode de puissance IN400X



TYPE NUMBER	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNITS	
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V	
Maximum RMS Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V	
Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V	
Maximum Average Forward Rectified Current									
.375" (9.5mm) Lead Length at Ta=75°C								1.0	A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)								30	A

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/1042228/YIXIN/1N4007.html>

Conclusion

La technologie continue d'évoluer, ce qui permet d'apporter des modifications aux redresseurs PD3 afin d'améliorer leur facteur de puissance. Ces modifications incluent l'utilisation de redresseurs à commutation naturelle, l'application de la modulation de largeur d'impulsion (MLI), la mise en place de la correction active du facteur de puissance (PFC), le filtrage et la suppression des harmoniques, ainsi que l'utilisation de redresseurs à modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale (PWM).

Allures de redresseur triphasé PD3

