

Electronique de Puissance

TD 1 : Triphasé et transformateur

TD 2 : MCC et moteur pas à pas

TD 3 : Le moteur brushless et le moteur asynchrone

TD 4 : Moteur asynchrone

TD 5 : Redressement monophasé et thyristor

TD 6 : Redressement monophasé commandé

TD 7 : Redressement triphasé

TD 8 : Convertisseur continu-continu

1. Triphasé

Soient $\underline{V}_1=230 e^{j0^\circ}$, $\underline{V}_2=230 e^{-j120^\circ}$, $\underline{V}_3=230 e^{+j120^\circ}$ (donc $V_1=V_2=V_3=230V$)

Tracer le diagramme de Fresnel de $\underline{V}_1, \underline{V}_2, \underline{V}_3, \underline{U}_{12}, \underline{U}_{23}, \underline{U}_{31}$ (\underline{V}_1 origine des phases)
Rappeler à quelles conditions 3 tensions forment un système triphasé.

On dispose de 3 impédances identiques que l'on câble en étoile, donner le montage et noter sur celui-ci les grandeurs $i_1, i_2, i_3, v_1, v_2, v_3, u_{12}, u_{23}, u_{31}$.
Estimer la valeur du courant qui circule dans le fil du neutre.

On dispose de 3 impédances identiques que l'on câble en triangle, donner le montage et noter sur celui-ci les grandeurs $i_1, i_2, i_3, j_1, j_2, j_3, u_{12}, u_{23}, u_{31}$.

Application :

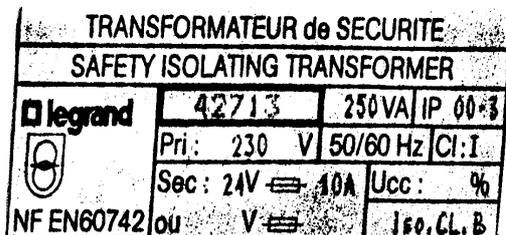
Nous sommes alimentés par EDF via un réseau 230/400V.

Donner la valeur de la tension entre phase et neutre et la valeur de la tension entre phase.

2. Transformateur

Lecture d'une plaque à bornes

On relève sur un transformateur les indications suivantes :



Que signifient :

250 VA

IP 00-3

Pri : 230V

50/60Hz

Cl : I

Sec : 24V \equiv 10A

Isol.CL.B

Transformateur d'isolement

Pour un transformateur d'isolement monophasé expliquer :

- où il faut connecter L1, N et PE coté primaire
- pourquoi on a une chance sur deux de mourir si on touche une des deux bornes du primaire
- pourquoi on ne risque rien si on touche une des deux bornes du secondaire
- la notion d'isolation électrique assurée par le transformateur triphasé utilisé en TP pour assurer le lien entre le triphasé du réseau EDF et le triphasé disponible sur la table

Couplage d'un transformateur triphasé branché sur le réseau EDF 230/400V

Déduire la valeur de la tension entre phase au niveau du secondaire si :

- primaire en étoile, secondaire en étoile (Yy)
- primaire en étoile, secondaire en triangle (Yd)
- primaire en triangle, secondaire en triangle (Dd)
- primaire en triangle, secondaire en étoile (Dy)

3. Puissances et influence du couplage

Un récepteur triphasé est relié au réseau EDF 230/400V et peut être câblé en étoile ou en triangle.

L'impédance de chacune de ses phases vaut $10 + 15j$

Calculer pour chaque couplage :

- Le courant par phase
- Le courant de ligne
- La puissance active par phase puis la puissance active totale par deux méthodes différentes
- La puissance apparente par phase puis la puissance apparente totale.

Comparer les puissances totales entre les deux couplages

4. Protection des transformateurs et de leurs lignes (extrait doc Legrand)

Protection des lignes

Les lignes doivent être protégées contre les surcharges et contre les courts-circuits.

La protection contre les surcharges n'est obligatoire que si la ligne est susceptible d'être parcourue par un courant de surcharge et elle peut être installée en tête ou en bout de ligne.

La protection contre les courts-circuits, est obligatoire dans tous les cas et doit être installée en tête de ligne.

Ordres de grandeur :

Un fil lorsqu'il est déroulé supporte environ $10A/mm^2$ et lorsqu'il est enroulé, il ne supporte plus que de 4 à $6 A/mm^2$.

Un aspirateur de puissance 1400W possède un enrouleur automatique du fil dont la section est de $1,5mm^2$. Pourquoi est-il conseillé de dérouler complètement le fil d'un aspirateur lorsqu'on l'utilise ?

Ligne d'alimentation (primaire du transformateur)

Le transformateur est un appareil qui ne peut, à lui seul, générer des surcharges. Sa ligne d'alimentation ne nécessite donc qu'une protection contre les courts-circuits.

Par ailleurs, à la mise sous tension d'un transformateur, il se produit un courant d'appel très important (de l'ordre de $25 I_n$) pendant 10 ms environ.

La protection de la ligne doit tenir compte de ces deux facteurs. Legrand propose les trois possibilités suivantes :

- cartouches aM,
- disjoncteurs type D (magnétique réglé à $15 I_n$ moyen),
- disjoncteurs type C (magnétique réglé à $6 I_n$ moyen).

Calibre minimal des protections de ligne d'alimentation du primaire du transformateur

Puissance (VA)	230 V Mono			400 V Mono			400 V Tri		
	Cart. aM	Disj. C	Disj. D	Cart. aM	Disj. C	Disj. D	Cart. aM	Disj. C	Disj. D
40	1	1		1	1		1		
63	1	2	1	1	1		1		
100	1	3	1	1	2		1		
160	1	6	2	1	2	1	1		
250	2	6	3	1	3	2	1		
400	4	10	6	2	6	2	2		
630	6	16	6	4	10	3	2	6	

Ces valeurs sont données à titre indicatif pour des transformateurs ayant des courants d'appel d'environ $25 I_n$.

MP2	TD N°1	ELECTRONIQUE DE PUISSANCE	2010/11
Triphasé et Transformateur			

Déduire la protection minimale à placer au primaire d'un transformateur de 230V/250VA.
Donner l'inconvénient d'utiliser un disjoncteur courbe C.

Ligne d'utilisation (secondaire du transformateur)

Cette ligne doit être protégée contre les surcharges et les courts-circuits.
Pour les surcharges vérifier que le calibre de la protection choisie est inférieur ou égal au courant secondaire du transformateur.

Pour les courts-circuits vérifier qu'un court-circuit au point le plus éloigné de la ligne assurera le déclenchement du dispositif de protection en moins de 5 secondes.

Legrand propose les deux possibilités suivantes :

- cartouches gG
 - disjoncteur type C (magnétique réglé à 6 ln moyen)
- Pourquoi un disjoncteur courbe D n'est pas nécessaire dans ce cas ?

Dans le cas où le transformateur n'alimente qu'une seule ligne d'utilisation, la protection du transformateur (si elle est effectuée au secondaire) et la protection de la ligne peuvent être confondues.
Un seul dispositif de protection assure ainsi les deux fonctions

Solution Legrand pour la protection des transformateurs

Les transformateurs doivent être protégés contre les surcharges et les courts-circuits pouvant survenir dans le cadre d'une utilisation normale.

C'est le constructeur qui choisit la position la mieux adaptée, soit au primaire soit au secondaire.
Legrand a choisi la protection au secondaire.

A partir du tableau ci-contre la protection nécessaire au secondaire d'un transformateur de 24V/250VA.

Puissance nominale (VA) IEC et CSA	24 V			48 V		
	Fusible Amp.	Type	Disj. Courbe C	Fusible Amp.	Type	Disj. Courbe C
40	2	T		1	T	
63	3,15	T		1,6	T	
100	4	gG	4	2	gG	2
160	8	gG	8	4	gG	4
250	10	gG	10	6	gG	6
400	16	gG	16	8	gG	8
630	25	gG	25	12	gG	13

Cas de lignes de grande longueur : Estimation du courant maximum au point le plus éloigné :

Pour vérifier que le dispositif choisi est bien adapté, une valeur approchée du court-circuit minimum au point le plus éloigné de l'installation peut être obtenue grâce à la formule ci-dessous :

$$I_{c/c \text{ mini}} = \frac{U_s}{\left(\frac{U_s^2}{P} \times \frac{U_{c/c \%}}{100}\right) + \frac{2pl}{S}}$$

Us = tension secondaire du transformateur
P = puissance du transformateur
U c/c % = tension de court-circuit du transformateur
l = longueur de la ligne en m
S = section de la ligne en mm²
ρ cuivre = 0,027 Ω mm²/m

Le calibre de la protection sera choisi de façon à avoir un temps de coupure de 5" maximum pour le courant I c/c défini précédemment :

Fusible gG : $ln \leq \frac{I_{c/c \text{ mini}}}{4}$

Disjoncteur type C : $ln \leq \frac{I_{c/c \text{ mini}}}{8}$

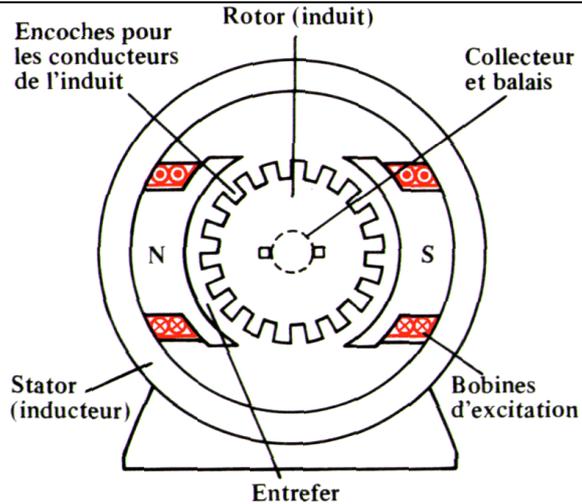
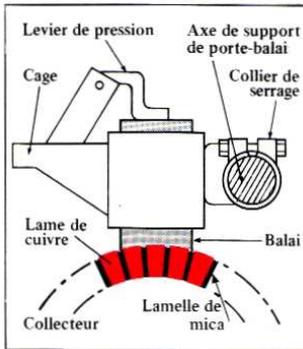
A.N : transfo 24V, 250VA, Ucc=3%,

Vérifier que lors d'un court-circuit direct sur la sortie on peut écrire P=0,03Us Icc et déduire Icc.

Recalculer Icc pour l= 20m avec 1,5mm² et expliquer pourquoi, il est logique de devoir diminuer les calibre de la protection au secondaire.

1. La machine à courant continu ou (MCC)

Zoom sur la partie collecteur et balais



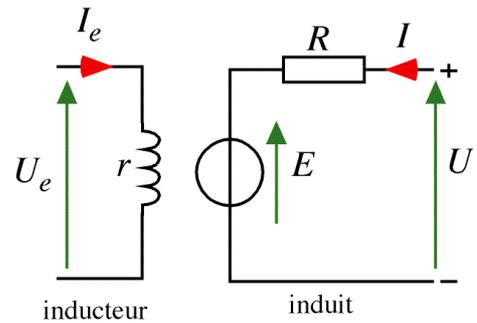
Sachant que :

- les balais sont montés sur la carcasse extérieure donc **fixes**
- deux lames de collecteur diamétralement opposées sont reliées aux deux extrémités de la spire (plusieurs spires en réalité)

1.1. Les deux relations de base de la MCC

Schéma équivalent électrique

(A noter que coté induit on rencontre quelquefois en plus une inductance)



Compléter les textes ci-dessous :

- Fonctionnement en moteur :
 U_e est une tension continue qui permet d'alimenter les b..... qu'on appelle l'i..... et qui sont situées au s..... C'est ainsi qu'on crée le champ magnétique statorique.
 Ce champ traverse l'inévitable e..... et les conducteurs fixés sur le r..... sont baignés dans ce champ magnétique.
 Quand on injecte un courant dans ces conducteurs la force de Laplace s'applique sur eux et entraîne le déplacement du rotor. Cependant sans le c..... le rotor se stabiliserait dans une position dictée par la règle du f..... maximal.
 En effet sitôt que le rotor se met à tourner on injecte le courant par d'autres l..... du c..... ce qui permet d'alimenter une autre série de spire située dans la position optimale pour poursuivre la rotation.
- Fonctionnement en génératrice :
 Le champ statorique est créé de la même façon.
 Quand le rotor est entraîné, les spires au rotor voient un champ magnétique variable.
 Il apparaît donc une f..... qui obéit au phénomène d'induction électromagnétique.
 Le nom donné à l'i..... provient du mode de fonctionnement en génératrice.
 Ici aussi le c..... joue un rôle important car il transforme cette tension variant sinusoïdalement en une tension quasiment continue d'où le nom de génératrice à c..... c.....

MP2	TD N°2	ELECTRONIQUE DE PUISSANCE	2010/11
MCC et moteur pas à pas			

On a $E = k\Phi\Omega$ avec $\Phi = k_e I_e$ et k et k_e , constants, fonction de la constitution de la machine.

- Fonctionnement en moteur :
Pour le fonctionnement en moteur exprimer la tension d'alimentation de l'induit en fonction de E puis Ω .
Sachant qu'à vide le courant absorbé par le moteur est faible expliquer comment on peut faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu.
- Fonctionnement en génératrice :
Pour le fonctionnement en génératrice exprimer la tension fournie par l'induit en fonction de E puis Ω .
Expliquer comment on peut faire varier la tension fournie par l'induit.

Si on suppose que la machine est parfaite, $P_{méca} \approx E I = C\Omega$ d'où $C = k\Phi I$

- Fonctionnement en moteur :
Expliquer les conséquences d'une variation de couple sur l'arbre du moteur
- Fonctionnement en génératrice :
Expliquer les conséquences d'une variation de débit de courant de l'induit

Exercice :

Un moteur possède un inducteur de résistance 130Ω qui absorbe un courant de $1,5A$.

En charge, l'induit de résistance $0,6\Omega$ est alimenté sous une tension de $240V$ et absorbe un courant de $20A$. Il tourne à $1200tr/min$ en fournissant une puissance mécanique sur l'arbre de $4,1kW$.

En déduire E et le rendement du moteur.

1.2. Les deux précautions à prendre avec les MCC

Déduire de la valeur de E à l'arrêt l'ordre de grandeur du courant au démarrage.

Quelle précaution faut-il prendre pour démarrer un moteur CC ?

Exprimer Ω en fonction de Φ et déduire les conséquences d'une coupure d'alimentation de l'inducteur quand le moteur est en train de tourner.

Quelle précaution faut-il prendre pour être sûr que le moteur ne s'emballé pas ?

1.3. Caractéristique $C=f(\Omega)$ du moteur à courant continu

Le moteur idéal devrait pouvoir tourner à la même vitesse quel que soit le couple exercé sur son arbre. En déduire sa caractéristique $C=f(\Omega)$.

On suppose être à excitation constante et alimenter l'induit du moteur avec une tension U constante.

A partir du schéma électrique du moteur à courant continu, déduire :

- L'expression de sa vitesse à vide Ω_0 ($I \approx 0$ car $C \approx 0$) en fonction de U et $k\Phi$
- L'expression de I en fonction de R , $k\Phi$, Ω_0 et Ω en charge.
- L'expression de $C=f(\Omega)$, tracer la caractéristique $C=f(\Omega)$ du moteur à courant continu et expliquer comment on se déplace sur cette caractéristique quand le couple augmente. Comparer cette caractéristique à la caractéristique du moteur idéal

Comment est modifiée la caractéristique précédente si on fait varier U ?

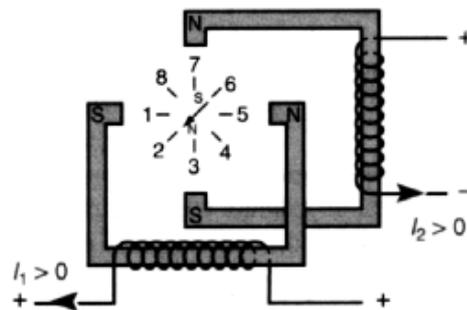
A N : un moteur CC qui tourne à 1600tr/min à vide entraine une charge à 1500tr/min.
 La caractéristique de la charge est $C= 10Nm$.
 En déduire la caractéristique $C=f(\Omega)$ du moteur.

2. Le moteur pas à pas

La grande différence avec le MCC, c'est qu'on alimente plus que les enroulements au stator car le rotor est constitué d'un ou plusieurs aimants permanents.
 Le principe de base est que les pôles opposés de deux aimants s'attirent.

On donne ci-dessous un schéma de principe d'un moteur pas à pas commandé en demi pas.

Moteur 2 phases, 2 pôles au rotor, alimentation bipolaire.



Commande par pas entier

- Donner la position du rotor si :
 - $I_1 > 0$ et $I_2 = 0$
 - puis $I_1 = 0$ et $I_2 < 0$
 - puis $I_1 < 0$ et $I_2 = 0$
 - puis $I_1 = 0$ et $I_2 > 0$
- Déduire le nombre de pas par tour

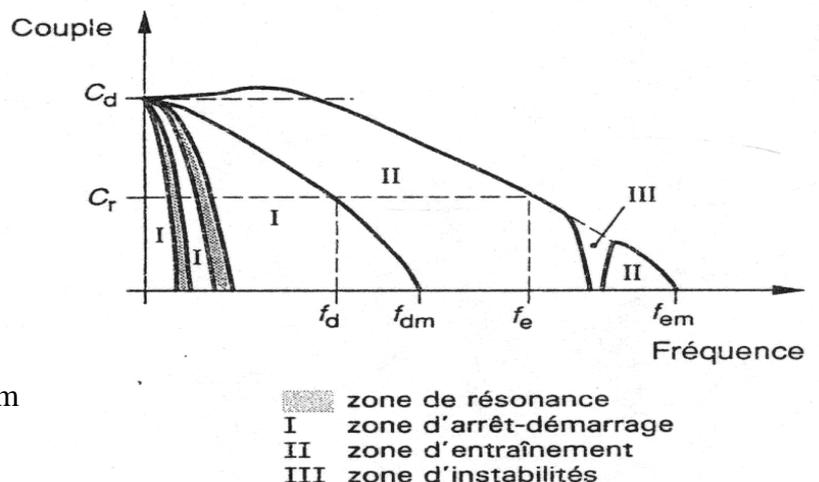
Commande par demi-pas

- On alimente cette fois-ci une fois sur deux les deux enroulements en même temps, déduire comment alimenter successivement les deux bobines pour que de la position stable ci-dessus, le moteur continue à tourner dans le sens horaire.
- Déduire le nombre de pas par tour

Remarque importante :

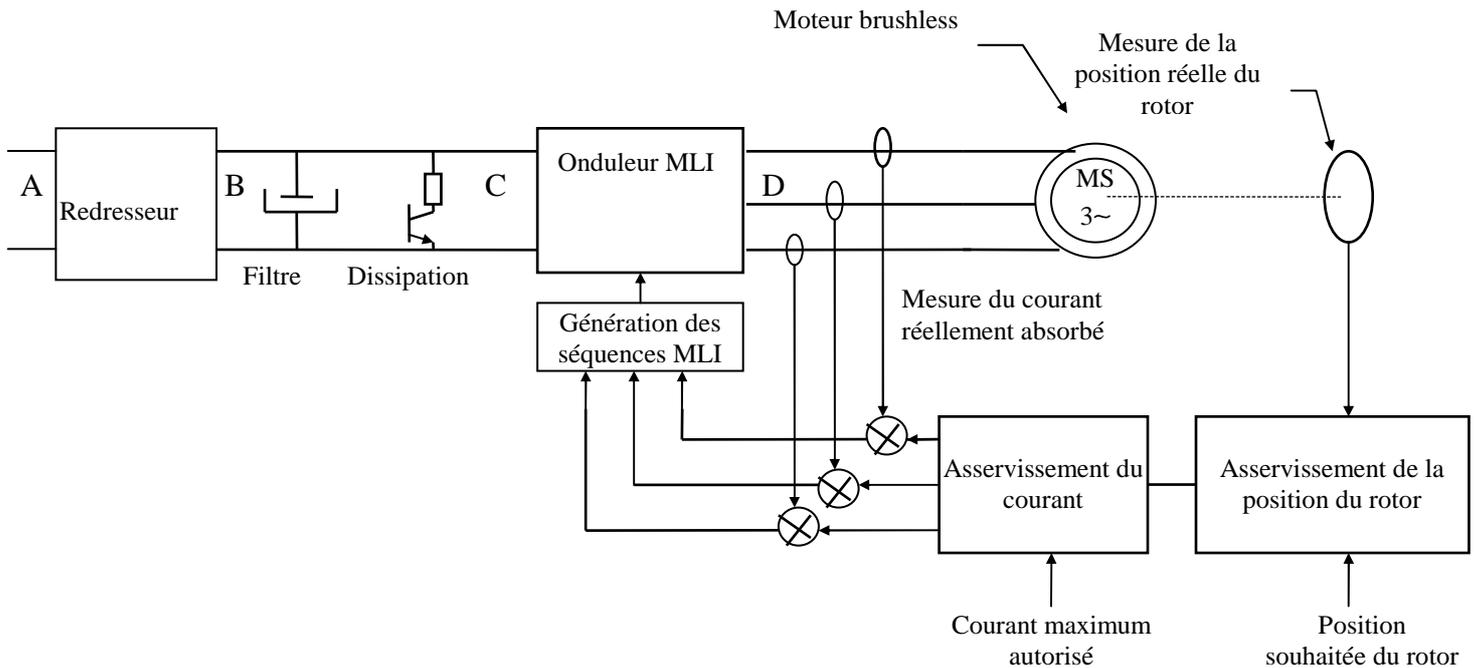
Ce type de moteur est très utilisé en informatique car il évite la mise en oeuvre de capteurs supplémentaires pour connaître la position du rotor. Si la succession d'alimentation des phases au stator n'est pas trop rapide on peut prévoir exactement la position du rotor au bout de N pas.
 Pour le commander la caractéristique fondamentale à se procurer est donnée ci-dessous :

Que se passe-t-il si le moteur partant de l'arrêt, on décide d'entraîner une charge qui impose un couple résistant C_r avec une fréquence de succession des phases supérieure à f_d ?



Il est à noter aussi qu'il existe une pléiade de moteurs pas à pas différents, le maximum de pas par tour se situant vers 500.

1. Principe de la commande du moteur Brushless.

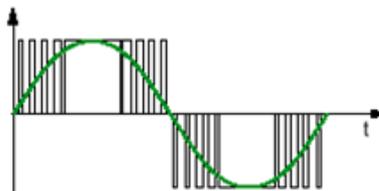


Faire un parallèle entre moteur à continu et le moteur à courant continu sans balais (brushless).
 Où sont inducteur et induit ? collecteur ou pas ?

	Moteur brushless	MCC
Avantages / Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pas d'entretien (pas de collecteur) ➔ Utilisable en atmosphère explosive ■ Electronique interne. ■ Structure d'alimentation et de régulation complexe mais maîtrisée. ■ Prix élevé. ■ Puissance massique élevée ■ Vitesse max élevée ■ Faible inertie (forte accélération). ■ Excellente dissipation thermique (Pj au stator seulement). 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Entretien (balais, collecteur). ■ Pas d'électronique interne. ■ Simplicité du variateur. ■ Pris bas. ■ Adaptée aux basses vitesses où elles ont une régularité de marche excellente.

• **Génération d'une MLI**

La MLI (PWM en anglais) est le signal carré.
 Le signal sinusoïdal est son fondamental.

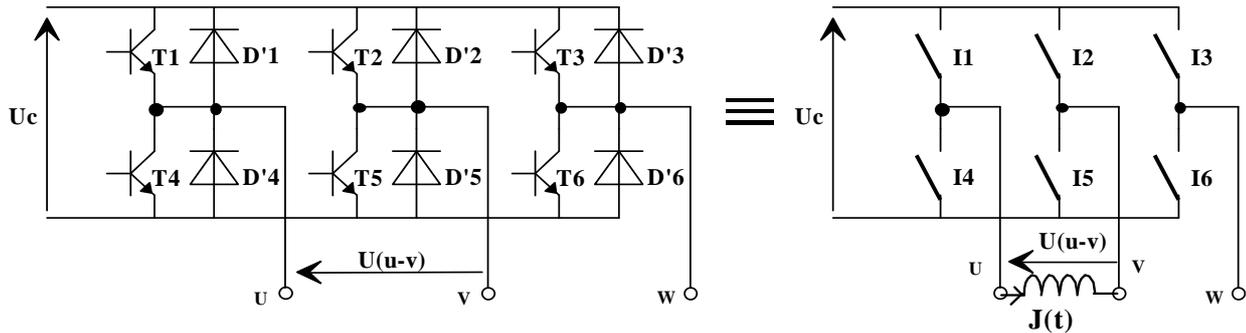


Le stator du moteur brushless est triphasé et est alimenté par trois " bras" de pont dont le schéma est représenté ci-dessous.

Les interrupteurs d'un même bras ont une commande complémentaire.

Entre bras les commandes sont décalées de façon à ce que le fondamental des 3 MLI soient triphasés.

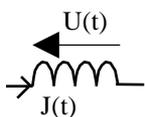
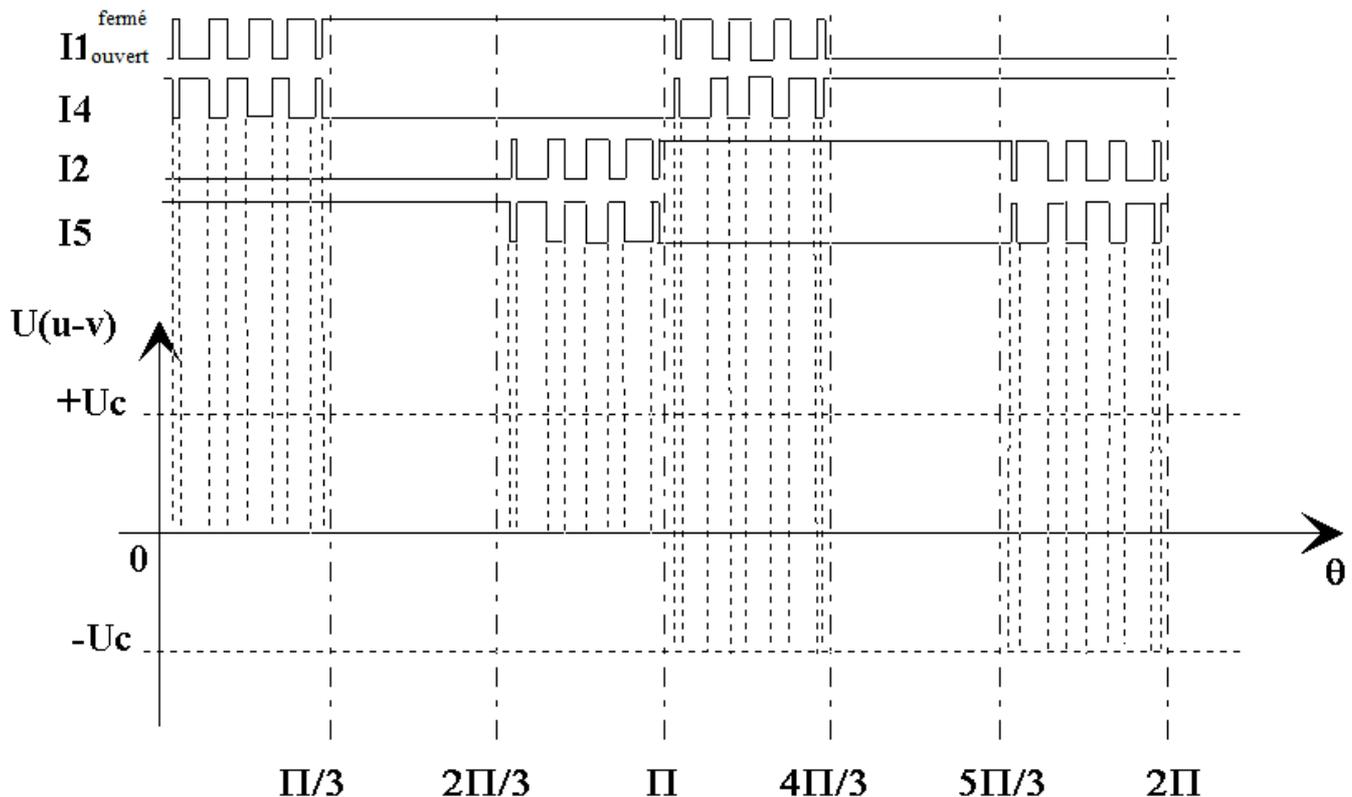
Le moteur Brushless et le moteur asynchrone



On a U_c = tension continue positive.

Donner la valeur de $U(u-v)$ lorsque I1 et I5 fermés puis lorsque I2 et I4 fermés.

Déduire, ci-dessous, la tension composée $U(u-v)$ à partir de la séquence de commande des différents interrupteurs.



Dans le montage ci-contre donner l'expression de $J(t)$ pour $U(t)=+U_c$ et $J(0)=J_0$
Puis l'expression de $J(t)$ pour $U(t)=-U_c$ et $J(0)=J_0$ enfin pour $U(t)=0$.

Remarque : Préciser ce que serait l'allure de $J(t)$ dans le cas d'un dipôle RL avec $R/L \ll 1$.

Reporter sur le graphe de $U(u-v)$, l'allure de $J(t)$ sachant qu'à $J(\pi/2)=J(3\pi/2)=0$.

Attention à la cohérence du tracé, entre $2\pi/3$ et π , I2 est globalement plus souvent ouvert que fermé donc $U(u-v)$ est plus longtemps à 0 qu'à $-U_c$ donc $I(t)$ doit globalement croître.

A quelle forme d'onde vous fait penser l'allure de $J(t)$?

Bilan de cette partie :

Donner l'allure des tensions aux points A, B, C et D du schéma de principe donné en tout début de TD.

2. Le moteur asynchrone

2.1 Théorème de Leblanc simplifié

Pour simplifier au maximum, imaginons l'enroulement de l'inducteur de la MCC.

- Donner l'allure du champ magnétique sur $[0, 2\pi]$ le long du stator en supposant que l'enroulement est alimenté par un courant constant et est réparti de telle façon à créer comme pour la MCC un pôle nord sur un demi-tour et un pôle sud sur l'autre demi-tour.
- Imaginons maintenant que l'enroulement de l'inducteur est réparti le long du stator de façon à ne pas passer brutalement de $-B_M$ à B_M brutalement. Représenter l'allure de ce champ.
- Si la répartition des spires est telle que sur la longueur du stator déroulé, on obtienne une période d'un cosinus pour l'allure du champ magnétique, donner l'expression de B en supposant que son amplitude vaut B_M .
- Si en plus l'enroulement est alimenté par un courant alternatif $I_M \cos(\omega t)$, donner l'expression de B en supposant que son amplitude vaut B_M .

On alimente trois enroulements avec les trois courants triphasés suivants :

- $I_M \cos(\omega t)$
- $I_M \cos(\omega t - 2\pi/3)$
- $I_M \cos(\omega t + 2\pi/3)$

De plus ces trois enroulements sont décalés de $2\pi/3$ sur la longueur, ce qui implique trois champs :

- $B_M \cos(\omega t) \cos(\theta)$
- $B_M \cos(\omega t - 2\pi/3) \cos(\theta - 2\pi/3)$
- $B_M \cos(\omega t + 2\pi/3) \cos(\theta + 2\pi/3)$

en un point θ on aura la somme de ces trois champs c'est à dire,

$$(B_M/2)(3 \cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta - 4\pi/3) + \cos(\omega t + \theta + 4\pi/3))$$

$$B_{\text{au point } \theta} = \boxed{3 B_M/2 \cos(\omega t - \theta)}$$

Conclusion :

Si un observateur se déplace le long du stator à la vitesse w , alors $\omega t = \theta$ et il voit donc un champ constant de valeur $3 B_M/2$.

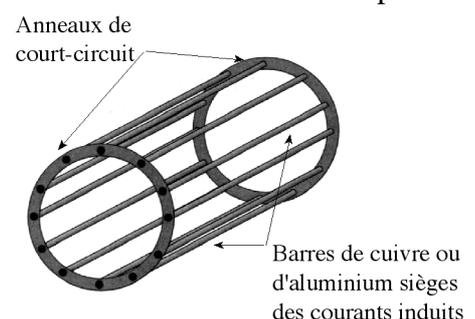
Si un observateur stationne en une position fixe θ , il voit un champ qui varie dans le temps à la pulsation w .

Tout ce passe comme si on avait créé à l'intérieur de la machine **un champ tournant avec des enroulements fixes !**

2.2 Constitution du moteur asynchrone

Au niveau de sa constitution, comme le moteur brushless il possède au stator trois enroulements disposés à 120° , alimentés en triphasé.

Et au rotor il possède des enroulements court-circuités sur eux-mêmes qui voyant le champ magnétique du stator varier créent une fem induite puis un courant qui crée un champ magnétique rotorique.



2.3 Nombre de paires de pôles et glissement

MP2	TD N°3 ELECTRONIQUE de PUISSANCE	2010/11
Le moteur Brushless et le moteur asynchrone		

Coté stator :

Si la répartition des spires le long du stator est telle que sur la longueur du stator déroulé, on obtienne p périodes d'un cosinus (p paires de pôles),

- Donner l'expression de B en fonction de θ lorsque les enroulements sont parcourus par I constant en fonction de B_M , p et θ .
- Rappeler l'expression du champ B de l'enroulement qui est décalé de $2\pi/3$ par rapport à l'enroulement précédent et alimenté aussi par I constant.

Si les 3 enroulements du stator sont alimentés par des courants triphasés, que faut-il rajouter aux expressions des trois champs ?

Déduire l'expression final de $B_{\text{au point } \theta}$.

En déduire Ω_s , la vitesse de rotation du champ statorique.

Application : A quelle vitesse maximale peut tourner un moteur tétrapolaire (p=2) ?

Coté rotor :

Au niveau du rotor, les conducteurs sont répartis uniformément sur le tour et reliés entre eux aux extrémités. A l'arrêt, (rotor fixe), le moteur asynchrone est donc semblable à un transformateur triphasé dont le secondaire serait en court-circuit. Les courants rotoriques sont donc triphasés et de même fréquence que les courants statoriques

On définit le glissement $g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$ avec n la vitesse de rotation et Ω la vitesse angulaire.

Lorsque le rotor tourne à Ω , exprimer Ω en fonction de Ω_s et g.

Peut-on avoir $\Omega = \Omega_s$?

2.4 Commande du moteur asynchrone

Sa commande peut être très simple quand on ne souhaite pas contrôler sa vitesse ou sa position.

Cependant on peut comme pour le moteur brushless maîtriser sa vitesse et sa position.

Et comme pour le brushless, c'est en maîtrisant l'origine temporelle des 3 signaux MLI envoyés au stator qu'on maîtrise la position du champ tournant statorique par rapport à la position du rotor.

On a alors deux types de commande :

- En boucle fermée
Ce n'est pas son utilisation la plus courante.
La commande est alors très proche du moteur brushless car on mesure aussi la position du rotor pour alimenter les phases du rotor avec une MLI.
- En boucle ouverte
L'avantage de cette commande est qu'il n'est pas nécessaire de mesurer la position du rotor.
Il faut entrer les paramètres du moteurs écrits sur sa plaque signalétique et le variateur de vitesse en déduit un modèle mathématique. A noter que les variateurs de vitesse performants possèdent un mode qui permet de faire une mesure exacte des paramètres du moteur.
La précision sur les paramètres du moteur est fondamentale car à partir de ceux-ci le variateur déduit un modèle mathématique.
La position du rotor est alors estimée à partir la mesure des courants statoriques et du modèle mathématique du moteur.
Bien évidemment, les 3 signaux envoyés aux enroulements statoriques sont MLI.

2.5 Brushless ou asynchrone ?

MP2	TD N°3 ELECTRONIQUE de PUISSANCE	2010/11
Le moteur Brushless et le moteur asynchrone		

	Moteur asynchrone	Moteur brushless
Caractéristique vitesse/couple	Vitesse et couples sont interdépendants (glissement)	Réglages indépendants de la vitesse, du couple et de la position
Surcouple	Limité en intensité (1,5 à 2 Cn) et en durée	Surcouple beaucoup plus élevé (2 à 8 Cn)
Surcharge	Autorisée	Au-delà d'une certaine limite, décrochage
Précision et dynamique du positionnement	Moyenne (améliorée avec commande à contrôle vectoriel de flux en boucle fermée)	Excellente
Couple à l'arrêt	Difficulté de maintenir un couple stable à l'arrêt	Pas de difficulté
Capteur pour applications en boucle fermée	Externe	Intégré sur le moteur (servomoteurs)
Dimensions	Forme standard	Toutes formes (cylindrique, "saucisson", carré, ouvert, etc.) permettant de réaliser des machines compactes
Ventilation	Auto-ventilé mais nécessité d'ajouter une ventilation si couple à l'arrêt	Non nécessaire
Masse et inertie pour un couple donné (ex. 7 Nm)	18 kg, 2,1 gm ²	9,6 kg, 0,7 gm ²
Puissance	Jusqu'à plusieurs centaines de kW	Jusqu'à 30 kW
Prix	Faible	Plus élevé, surtout aux puissances élevées (>1 kW)

Moteur asynchrone

différents couplages, montages de base, schéma équivalent

1. Couplage

a) On veut utiliser un moteur asynchrone triphasé 230/400V

Sachant qu'il est constitué de 3 enroulements identiques, indiquer quelle tension maximum peut supporter UN enroulement.

Quelle doit être alors la valeur de la tension entre phase si ses enroulements sont couplés en triangle ?
Même question pour le couplage en étoile.

2. Application : câblage du moteur en TP

Câblage en direct sur la sortie du transformateur triphasé :

- sachant que le transformateur triphasé est câblé en étoile coté primaire et en triangle au secondaire, quel type de réseau propose-t-on au moteur ?
Déduire le type du couplage pour le moteur.

Câblage en sortie du variateur de vitesse ATV11 :

- sachant que l'ATV11 délivre du triphasé 230V entre phase, quel type de couplage faut-il adopter pour le moteur ?

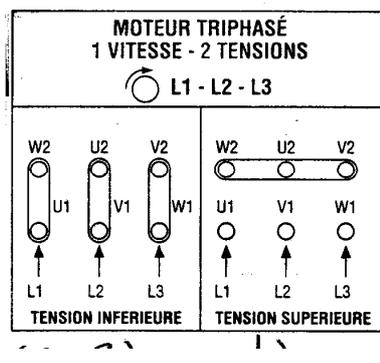
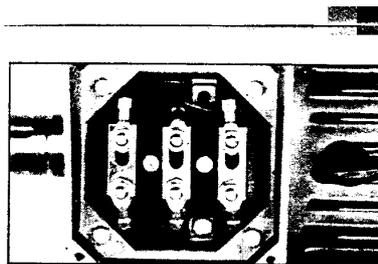
3. Réalisation du couplage sur une plaque à bornes

Sachant que le moteur est constitué de 3 enroulements dont :

- 1 entre U1 et U2
- 1 entre V1 et V2
- 1 entre W1 et W2

Indiquer le type de couplage choisi dans le cas a), en justifiant le terme
TENSION INFÉRIEURE

Indiquer le type de couplage choisi dans le cas b), en justifiant le terme
TENSION SUPÉRIEURE



C5.3 - LES PLANCHETTES A BORNES - SENS DE ROTATION

Les moteurs standard sont équipés d'une planchette à 6 bornes conforme à la norme NFC 51 120, dont les repères sont conformes à la CEI 34 - 8 (ou NFC51 118).

Lorsque le moteur est alimenté en U1, V1, W1 ou 1U, 1V, 1W par un réseau direct L1, L2, L3, il tourne dans le sens horaire lorsqu'on est placé face au bout d'arbre.

En permutant l'alimentation de 2 phases, le sens de rotation sera inversé. (Il y aura lieu de s'assurer que le moteur a été conçu pour les deux sens de rotation).

Lorsque le moteur comporte des accessoires (protection thermique ou résistance de réchauffage), ceux-ci sont raccordés sur des dominos à vis par des fils repérés.

Habituellement on ne connaît pas l'ordre des phases.

Estimer le nombre de possibilités au total pour câbler le moteur et le nombre de possibilités qui aboutissent au même sens de rotation.

Déduire la probabilité de câbler le moteur de façon à ce qu'il tourne dans le sens souhaité et prévoir l'opération à réaliser s'il ne tourne pas dans le bon sens.

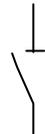
4. Montage de base

4.1 Démarrage direct Pour mémoire (TP d'électricité 2), les symboles de base sont les suivants :

Interrupteur



Sectionneur



Contacteur



Disjoncteur



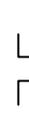
Magnétique



A maxi de courant
(magnétique réglable)



Thermique

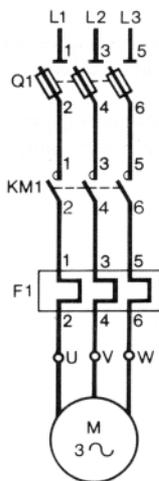


Moteur asynchrone

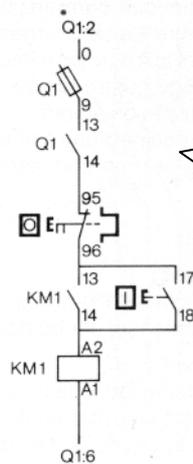
différents couplages, montages de base, schéma équivalent

Commande locale avec sectionneur

Circuit de puissance



Circuit de commande



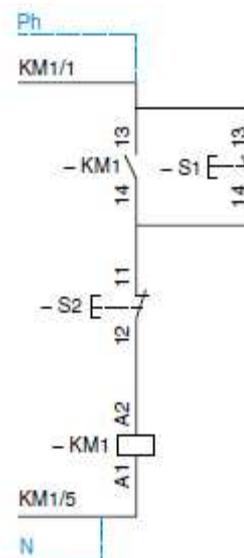
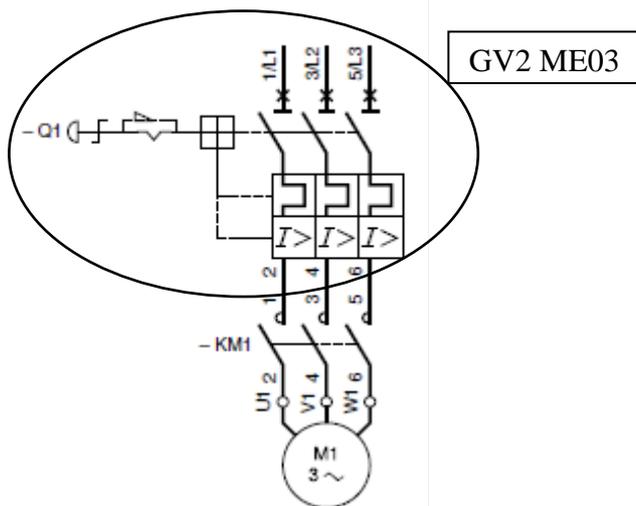
Expliquer ce que représentent :

- le schéma de gauche
- le schéma de droite
- Q1, KM1 et F1

Pour mettre en route le moteur on appuie sur le BP I (entre 17 et 18), indiquer pourquoi il continue à tourner.

Comment arrêter le moteur ?

4.2 Câblage du GV2 ME03 en coffret LG7 K09



Expliquer quel type de protection assure le disjoncteur-moteur magnétothermique GV2 ME03.

Nous avons rajouté un bouton d'arrêt d'urgence, où l'a-t-on inséré dans le schéma de câblage ci-dessus.

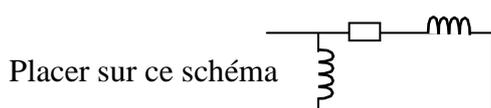
Déduire les différentes possibilités pour mettre en route et arrêter le moteur.

5. Caractéristiques $C=f(\Omega)$ du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone du point de vue électrique est équivalent à un transformateur avec un entrefer entre primaire (le stator) et le secondaire (le rotor).

Cependant il s'agit d'un transformateur un peu particulier car son rapport de transformation dépend de la vitesse de rotation du moteur.

Vu que l'on travaille le plus souvent avec des moteurs à cage on n'a pas accès au secondaire et on utilise le schéma équivalent électrique suivant :



X_μ , R/g , X_s en précisant leur nom et ce qu'ils représentent.

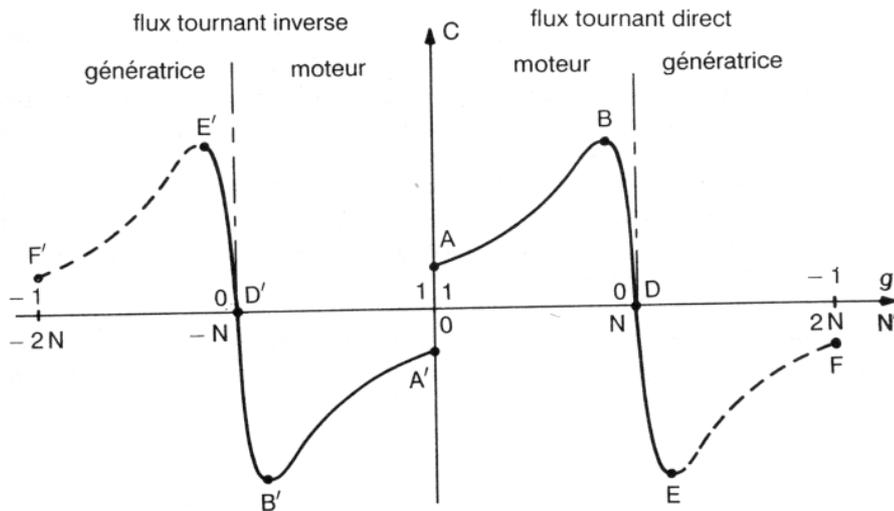
Moteur asynchrone
différents couplages, montages de base, schéma équivalent

Chaque phase du moteur est alimenté par \underline{V}_1 , appliquer le théorème de Boucherot pour exprimer l'expression de la puissance transmise au rotor.

Donner alors l'expression du couple moteur en fonction de Ω et l'allure de la courbe $C=f(\Omega)$.
En déduire l'allure de la courbe $C=f(n)$, n étant la vitesse de rotation du moteur et sachant que

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Vérifier ensuite que la caractéristique de couple correspond à cette courbe :

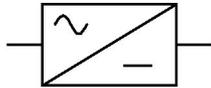


Exploitation de cette caractéristique :

- Quand on démarre le moteur en direct, quelle partie de caractéristique parcourt-on ?
- Comment passer d'un flux tournant direct à un flux tournant inverse ?
- En régime de fonctionnement nominal quelle relation simple lie C et g et la comparer à la caractéristique couple-vitesse du moteur idéal.
- Expliquer comment est modifiée la caractéristique si on augmente V .
Tracer deux caractéristiques pour 2 valeurs de V pour une vitesse de rotation allant de 0 à N .
Si on ne regarde que la zone autour du régime nominal, expliquer comment on peut faire varier la vitesse du moteur.
Quel est l'inconvénient de cette variation de vitesse ?
- Expliquer comment est modifiée la caractéristique si on augmente V en gardant V/f constant .
Tracer deux caractéristiques pour 2 valeurs de V pour une vitesse de rotation allant de 0 à N .
Si on ne regarde que la zone autour du régime nominal, expliquer comment on peut faire varier la vitesse du moteur.
Quel est l'intérêt de cette variation de vitesse mais aussi, quelles sont ses limites.

Le redressement est la conversion d'une tension alternative en une tension continue.
On utilise un convertisseur alternatif-continu pour alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif sinusoïdal.

Symbole :

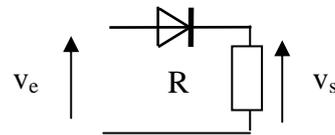


I – LA DIODE

Rappels sur **la diode**, interrupteur unidirectionnel non-commandé :

- Quelle est la condition de mise en conduction d'une diode ?
- Donnez les conditions de blocage d'une diode
- Ses schémas équivalents (diode réelle et diode idéale)

Exercice : La tension v_e est sinusoïdale de période T.



Représentez 2 périodes de v_e et de v_s .

On appelle instant de commutation naturelle, l'instant pour lequel la diode entre en conduction.

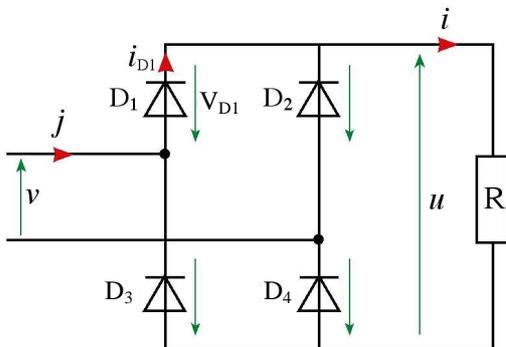
II - REDRESSEMENT MONOPHASE NON-COMMANDE

a. Sur charge résistive

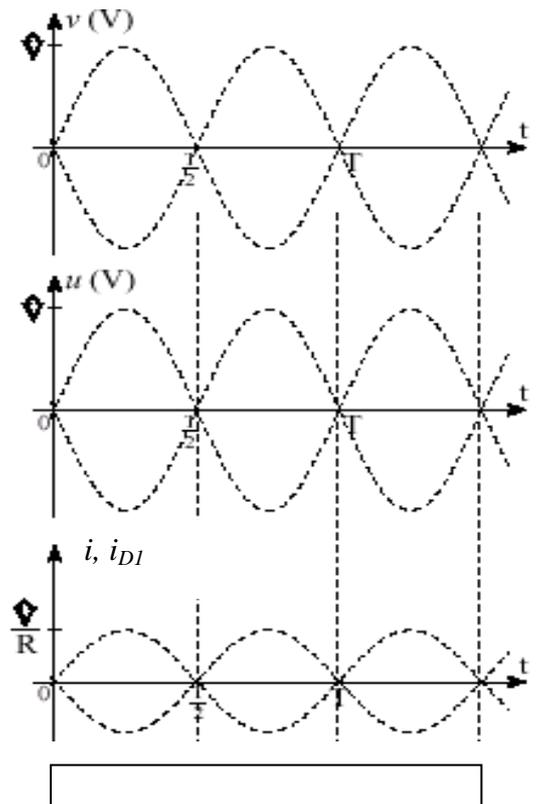
Rappel :

- quand 2 diodes sont à cathodes communes, celle qui a le potentiel anode le plus élevé, conduit
- quand 2 diodes sont à anodes communes, celle qui a le potentiel cathode le plus faible, conduit

Montage PD2



Les tensions de seuil sont négligeables par rapport à la tension d'entrée ; $V=230V$; $R=100\Omega$



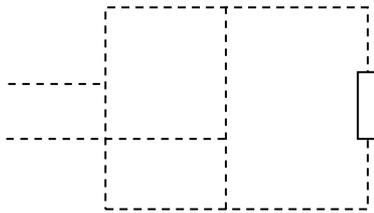
Intervalles de conduction

1. Etude de 0 à T/2 , puis de T/2 à T :

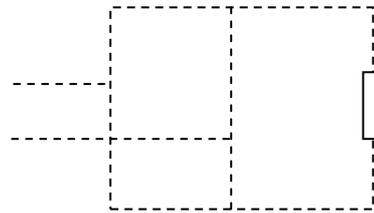
Quelles diodes conduisent ?

Surlignez le schéma suivant pour faire apparaître la circulation du courant.

En déduire l'expression de $u(t)$ et de $i(t)$.



de 0 à T/2
diodes passantes :
 $u(t) =$



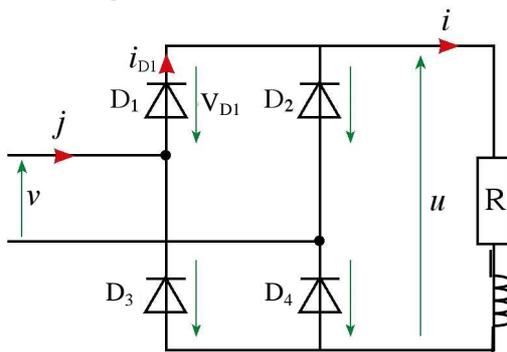
de T/2 à T
diodes passantes :
 $u(t) =$

2. Tracez $u(t)$ et $i(t)$. Expliquez pourquoi les diodes se bloquent.

3. Tracez i_{D1} et v_{D1} .

4. Calculez U_{moy} .

b. Sur charge inductive



Quel est l'effet de la bobine sur le fonctionnement du pont ?

Qu'est-ce qui impose le blocage des diodes ?

L'allure de $u(t)$ sera-t-elle modifiée ? Et celle de $i(t)$?

III- LE THYRISTOR

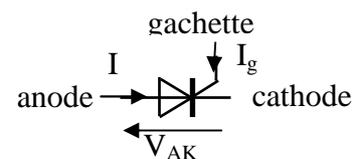
Le thyristor est un interrupteur unidirectionnel commandé à la fermeture

Amorçage du thyristor

Pour commander le thyristor à la fermeture, il faut

$V_{ak} > 0$ et une impulsion du courant de gâchette I_g .

Le thyristor est alors semblable à une diode qui attend l'ordre de conduire sur sa gâchette.



Le thyristor reste passant si $I > I_m$, courant de maintien ; c'est la valeur minimale de I qui maintient l'état de conduction.

Blocage du thyristor

Le courant dans le thyristor doit être $< I_m$ et V_{ak} doit être < 0 pendant une durée supérieure au temps de désamorçage ; si ces conditions ne sont pas respectées, il y aura risque de réamorçage.

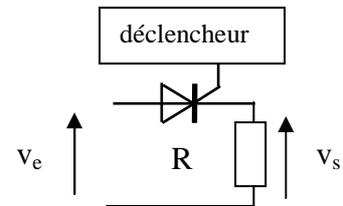
Il y a deux types d'extinction :

- l'extinction naturelle : annulation de I , due au comportement du circuit
- l'extinction forcée : un circuit auxiliaire impose $V_{ak} < 0$ et annule le courant

Exercice sur le thyristor

La tension v_e est sinusoïdale de période T .

Le déclencheur fournit des impulsions de courant à la gâchette aux instants $t_0 + kT$.



t_0 est le **temps de retard à l'amorçage**; c'est le retard par rapport à la commutation naturelle.

1. Représentez u avec $t_0 = T/8$, sur 2 périodes.
2. On appelle θ_0 l'angle de retard à l'amorçage $\theta_0 = \omega t_0$, donnez la valeur de θ_0 et graduez l'axe en angle.
3. Qu'est-ce qui bloque le thyristor ?

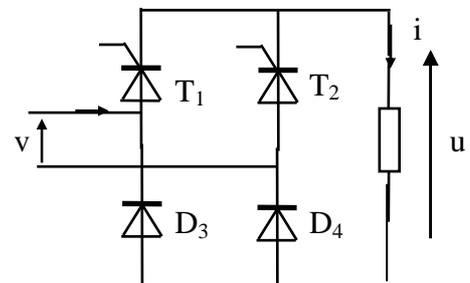
IV - REDRESSEMENT MONOPHASE COMMANDE : CAS DU PONT MIXTE

a. Sur charge résistive

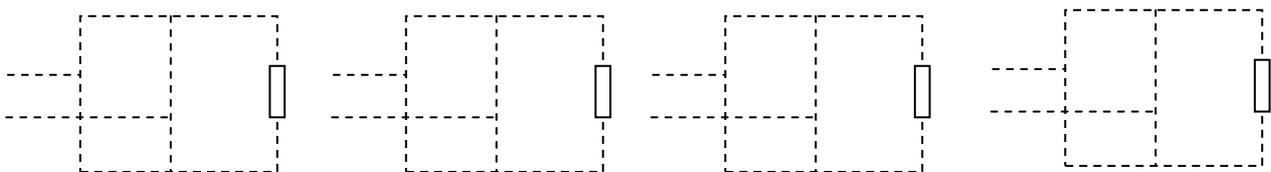
v est une tension sinusoïdale.

L'angle de retard à l'amorçage des thyristors est $\theta_0 = \frac{\pi}{4}$:

T_1 reçoit une impulsion sur sa gâchette à θ_0 et T_2 à $\theta_0 + \pi$.



1. Indiquez sur une période les intervalles de conduction de chaque élément :
 - A quel instant chaque interrupteur est-il mis en conduction ?
 - Interrogez-vous sur ce qui va bloquer les diodes, et sur ce qui va bloquer les thyristors.
 - Pour chaque intervalle, complétez les schémas suivants et exprimez u et i



2. Tracez $u(t)$ et $i(t)$
3. Exprimez U_{moy} en fonction de θ_0 ; quelle est la plage de variation de la tension ?
Conclure sur l'utilisation du montage ; la réversibilité en tension ou en courant est-elle

possible ?

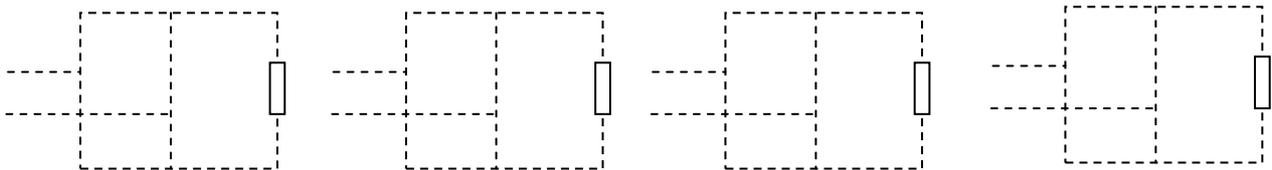
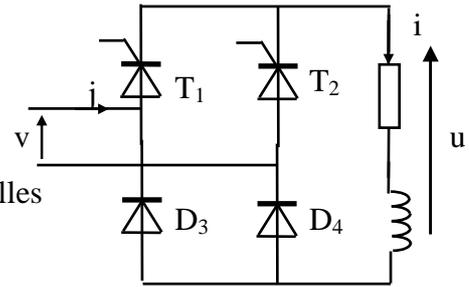
b. sur charge inductive

Cas de la conduction continue.

Quelle sera l'influence de la bobine sur le fonctionnement du pont ?

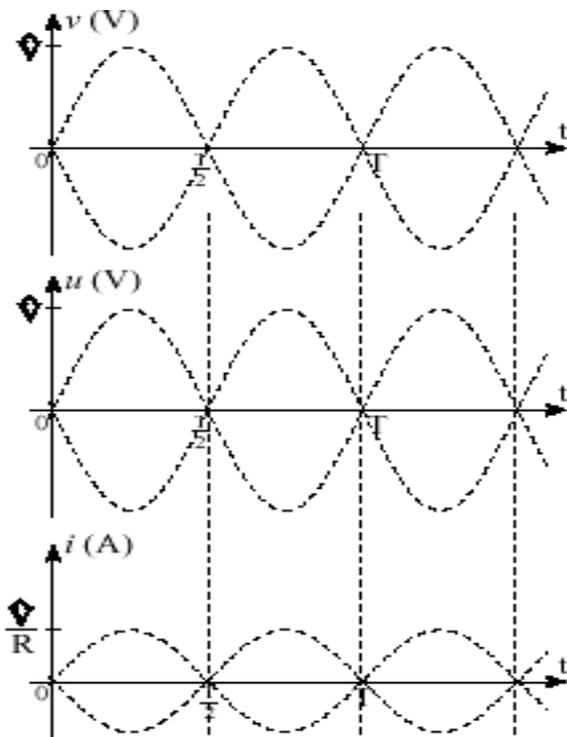
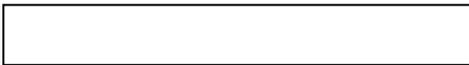
Reprendre les questions précédentes pour obtenir les intervalles de conduction des éléments, et l'allure de $u(t)$.

Repérez les intervalles où la charge est en roue libre.



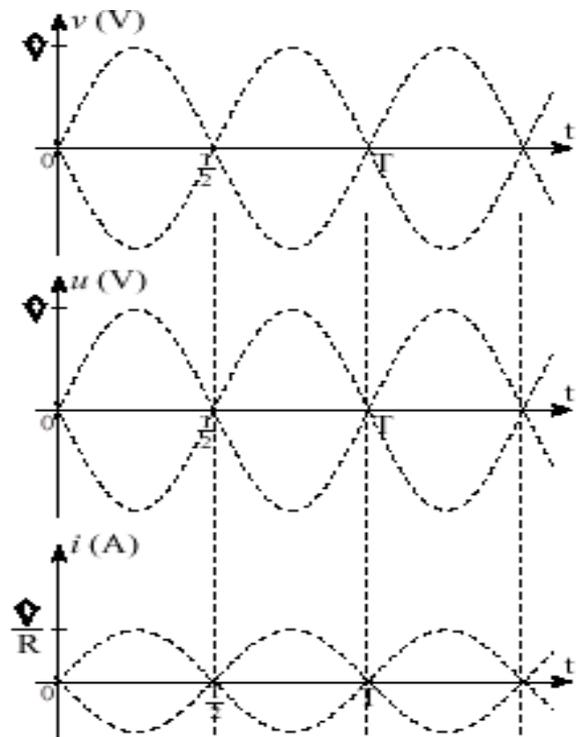
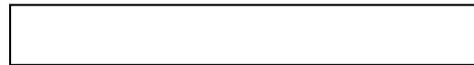
PONT MIXTE SUR CHARGE R

Intervalles de conduction



PONT MIXTE SUR CHARGE RL

Intervalles de conduction



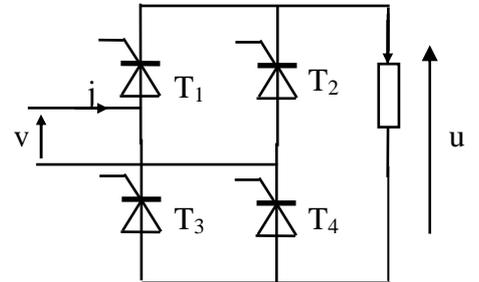
MPh2 TD 6	ELECTRONIQUE DE PUISSANCE REDRESSEMENT MONOPHASE COMMANDE	2010/11
--------------	--	---------

I. PONT TOUT THYRISTOR SUR CHARGE RESISTIVE

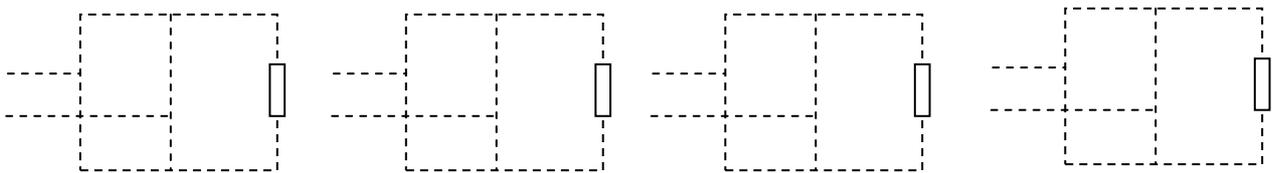
$V=230V$ $R=100\Omega$;

L'angle de retard à l'amorçage des thyristors est $\theta_0 = \frac{\pi}{4}$.

Impulsion du courant de gâchette à θ_0 pour T_1 et T_4 , et à $\theta_0 + \pi$ pour T_2 et T_3 .



1. Indiquez sur une période les intervalles de conduction des thyristors :
 - A quel instant chaque interrupteur est-il mis en conduction ?
 - Interrogez-vous sur ce qui va bloquer les thyristors.
 - Pour chaque intervalle, complétez les schémas suivants et exprimez u et i

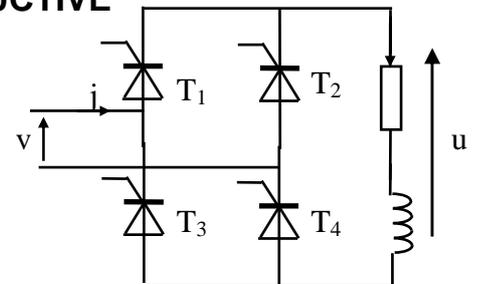


2. Tracez $u(t)$ et $i(t)$

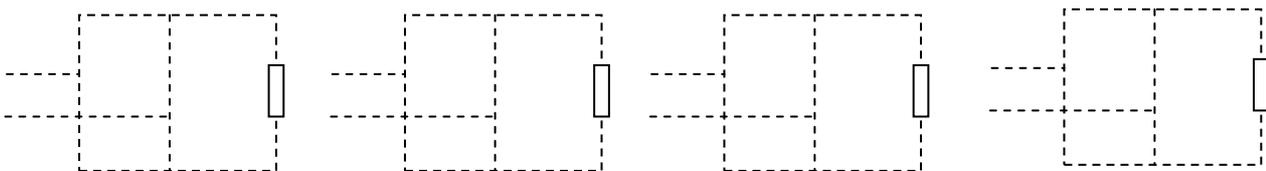
II. PONT TOUT THYRISTOR SUR CHARGE INDUCTIVE

Cas de la conduction continue

L'angle de retard à l'amorçage des thyristors est $\theta_0 = \frac{\pi}{4}$.



1. Quelle sera l'influence de la bobine sur le fonctionnement du pont ?
Reprendre les questions précédentes pour obtenir les intervalles de conduction des éléments.
2. Tracez l'allure de $u(t)$.
3. Tracez V_{T1} et I_{T1}



4. Tracez $u(t)$ pour $\theta_0 = \frac{3\pi}{4}$.

5. Exprimez U_{moy} en fonction de θ_0 ; quelle est la plage de variation de la tension ? Pour quelle valeur de θ_0 , U_{moy} est-elle négative ? Que dire de la charge dans ce cas ? Et de l'alimentation ?

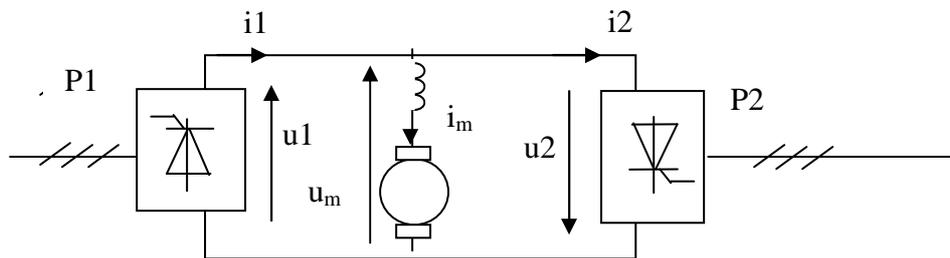
Lorsque la charge est active, elle peut fournir de la puissance au réseau ; le pont fonctionne alors en onduleur assisté par le réseau.

6. L'expression précédente de U_{moy} est-elle valable avec une charge résistive ?

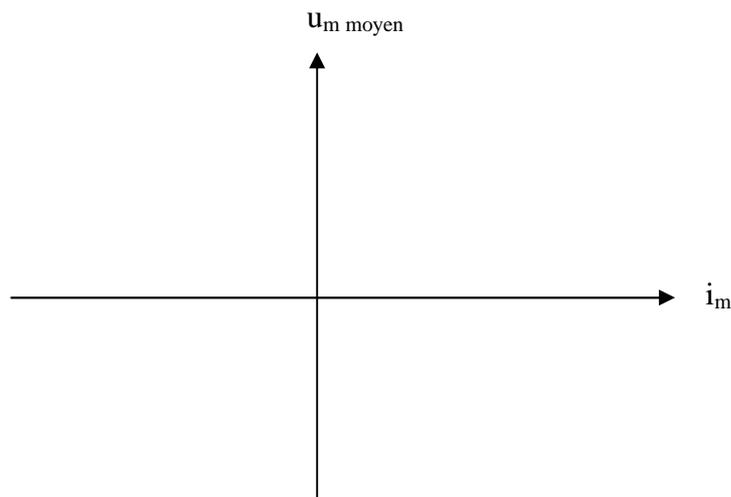
III. ASSOCIATION DE DEUX PONTS

Exemple de la machine à courant continu fonctionnant dans les 4 quadrants.

Une machine à courant continu est alimentée par deux ponts tête-bêche.



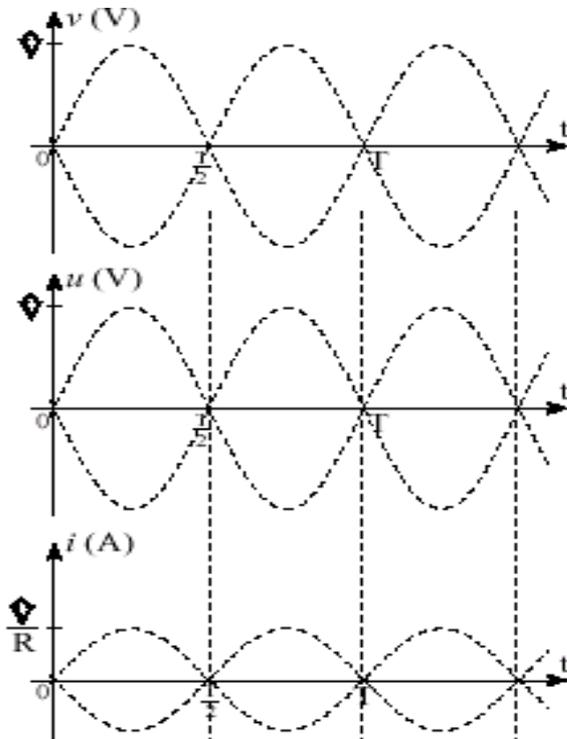
- Rappeler le schéma équivalent de la machine à courant continu. Cette machine est-elle réversible ? Indiquez les signes de u_m et de i_m si la machine fonctionne en moteur, puis en génératrice.
- Indiquez dans chaque quadrant ci-dessous
 - si la machine fonctionne en génératrice ou en moteur
 - le sens de rotation de la machine
 - quel pont fonctionne
 - s'il se comporte en redresseur ou en onduleur



Tracés des courbes

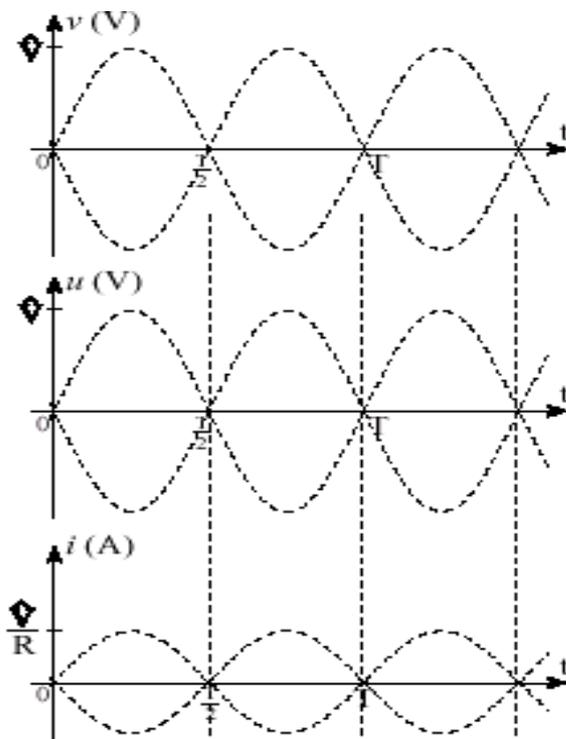
Charge R et $\theta_0 = \frac{\pi}{4}$

Intervalles de conduction



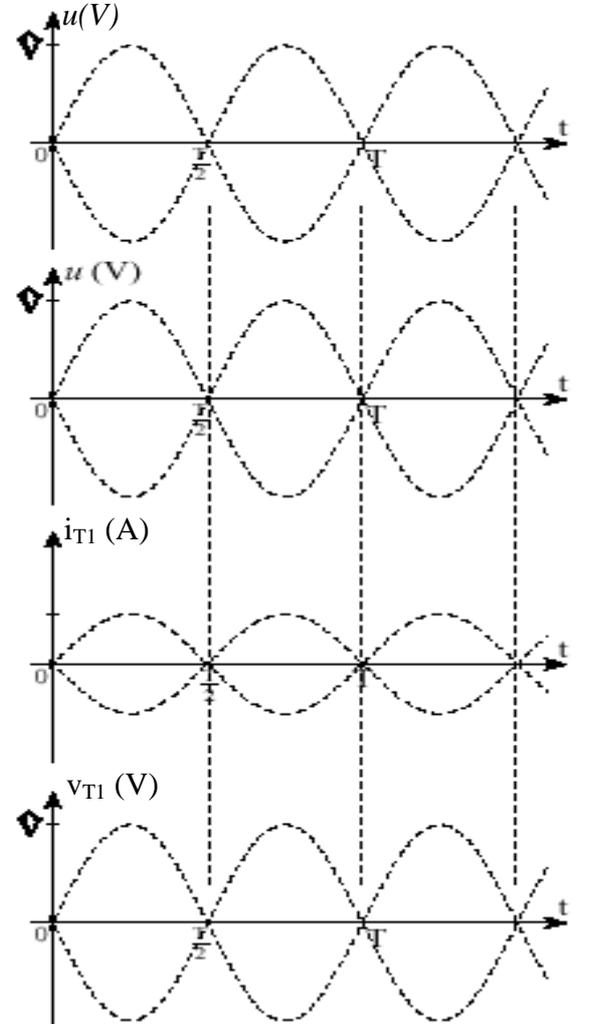
Charge RL et $\theta_0 = \frac{3\pi}{4}$

Intervalles de conduction



Charge RL et $\theta_0 = \frac{\pi}{4}$

Intervalles de conduction



MPh2 TD 7	ELECTRONIQUE DE PUISSANCE	2010/11
REDRESSEMENT TRIPHASE		

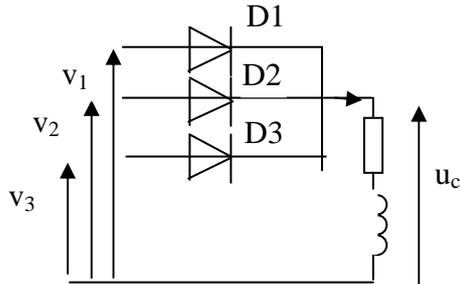
L'alimentation des ponts redresseurs triphasés s'effectue à partir d'un système triphasé de tensions noté v_1, v_2, v_3 (le réseau par exemple).

Comment s'obtient la valeur efficace des tensions composées ?

I- Pont P3

A- P3 non-commandé:

Montage à cathodes communes:



$$v_1 = V\sqrt{2}\sin\omega t$$

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

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

Le pont est alimenté par un générateur triphasé délivrant les tensions v_1, v_2 et v_3 .

1. Sur charge R

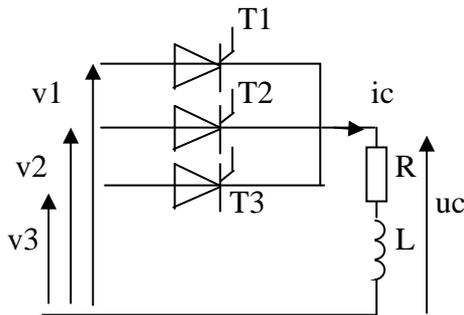
- Quelle est la condition sur les tensions pour que D_1 conduise ?
- Tracez l'allure de la tension u_c . Donnez l'expression de $i(t)$.
- Calculez la valeur moyenne de u_c .

2. Sur charge RL

La charge a une constante de temps L/R très grande devant la période des tensions, on peut donc considérer que le courant dans la charge est lissé.

Mêmes questions que précédemment.

B- Pont P3 commandé :



Les trois thyristors sont commandés avec un angle de retard à l'amorçage $\theta_0 = \frac{\pi}{3}$.

L'angle de retard à l'amorçage θ_0 est l'angle qui sépare la mise en conduction de D_1 (montage précédent) et celle de T_1 ; donc T_1 est amorcé à

T_2 est amorcé avec un retard de $\frac{2\pi}{3}$ par rapport à T_1 , et T_3 est amorcé avec un retard de

$\frac{2\pi}{3}$ par rapport à T_2 .

1. Sur charge R

Allure des courbes de tension :

- Indiquez les intervalles de conduction des thyristors.
- En déduire l'expression de u_c sur chaque intervalle puis l'allure de u_c (attention à la valeur du courant !)

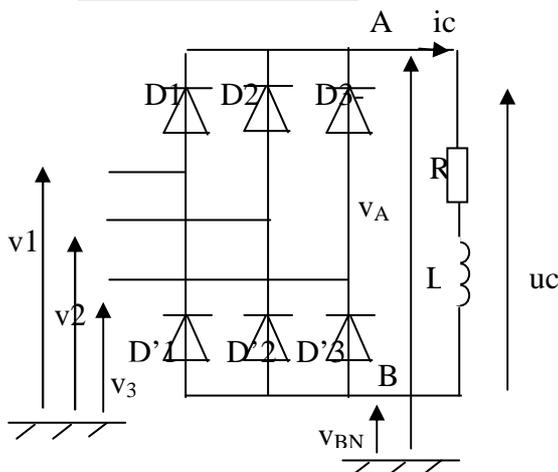
2. Sur charge RL

Le courant i_c est lissé; on admettra pour les calculs qu'il est continu, et on le notera I_c .

- Indiquez les intervalles de conduction des thyristors.
- En déduire l'allure de u_c .
- Exprimez la valeur moyenne de u_c en fonction de θ_0 .

III- Ponts doubles PD3 :

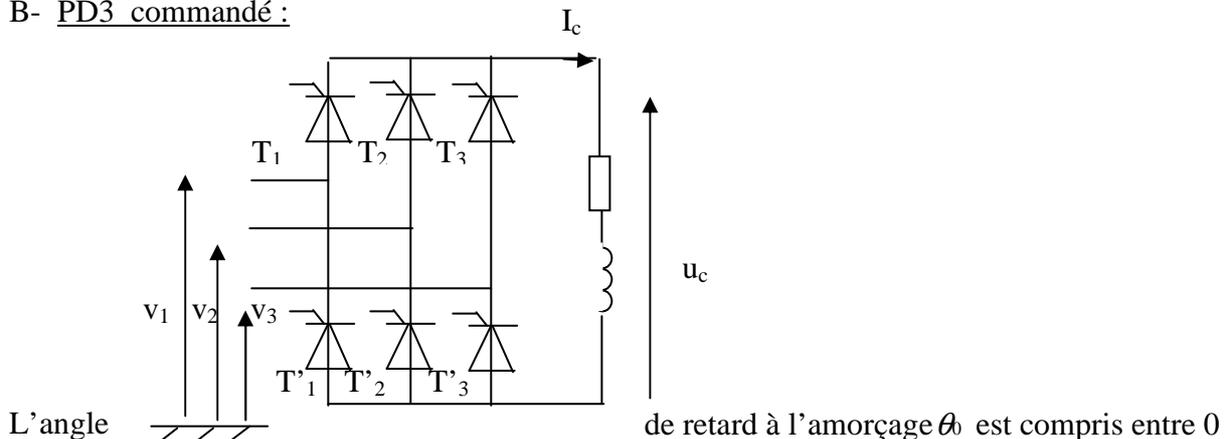
A- PD3 non commandé :



On considère le courant i_c continu.

- Indiquez, en dessous des chronogrammes :
 - les intervalles de conduction de D1, D2 et D3
 - en déduire l'expression de v_{AN} sur chaque intervalle
 - les intervalles de conduction des diodes D'1, D'2 et D'3
 - en déduire l'expression de v_{BN} sur chaque intervalle
- Déduire des résultats précédents la valeur de $u_c = v_{AN} - v_{BN}$ sur une période; tracez u_c .
- Donnez l'expression de $U_{c\text{moyen}}$.

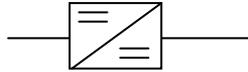
B- PD3 commandé :



et π , on prendra $\theta = \frac{\pi}{3}$ pour les tracés. On considère le courant I_c continu.

- 1- Tracez la tension u_c en procédant de la même manière que précédemment.
 - 2- Exprimez U_{cmoy} en fonction de θ . En déduire son signe en fonction de θ .
 - 3- Si la charge est un moteur à courant continu, donnez le sens du transfert d'énergie pour les différentes valeurs de θ .
 - 4- Pour $\theta = \frac{2\pi}{3}$: tracez u_c et calculez U_{cmoy} .
-

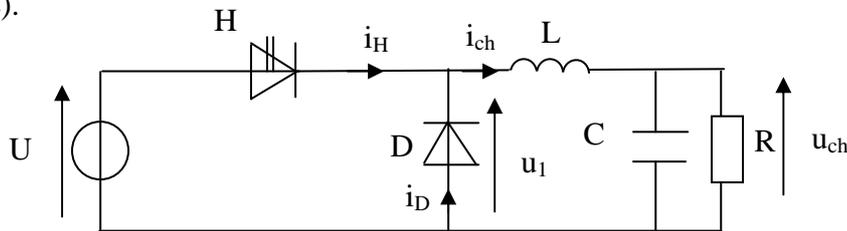
Le hacheur est un convertisseur 'continu- continu' ; il permet de transférer de l'énergie entre deux sources. Symbole :



Nous étudierons notamment le transfert d'énergie d'une source de tension constante vers une charge à courant constant et son application à la variation de vitesse du moteur à courant continu ; puis nous aborderons la réversibilité du convertisseur.

I. Hacheur abaisseur ou hacheur série

U est une source de tension constante ; la charge est inductive (RL) et on suppose l'inductance de bobine suffisamment élevée pour que i_{ch} ne s'annule jamais (conduction continue).



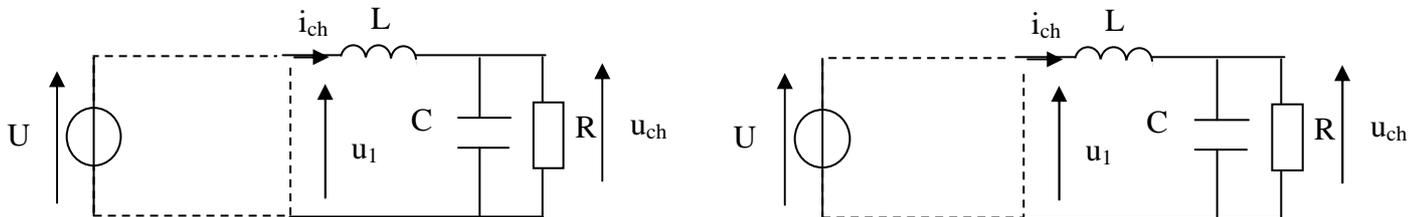
H est un interrupteur commandé: un transistor ou un thyristor avec circuit d'extinction.
D est une diode de roue libre : elle assure la circulation du courant lorsque H est ouvert.
On considère ces interrupteurs parfaits.

1. Fonctionnement :

- Rappeler les caractéristiques d'un interrupteur parfait
- L'interrupteur H est commandé avec un rapport cyclique α . H est fermé de 0 à αT et ouvert de αT à T.
- Compléter les schémas suivants pour chaque intervalle, en indiquant la circulation du courant.

De 0 à αT

de αT à T



- Indiquez sur une période la conduction des interrupteurs
 - Tracer u_1 sur une période
 - Calculer sa valeur moyenne en fonction de U
 - On considère u_{ch} constant, donnez l'allure de i_{ch} de 0 à αT et de αT à T.
 - Ecrire la loi des mailles pour exprimer u_{ch} en fonction de u_1 ; en déduire sa valeur moyenne en fonction de U_{1moy} .

2. Moteur alimenté par le hacheur

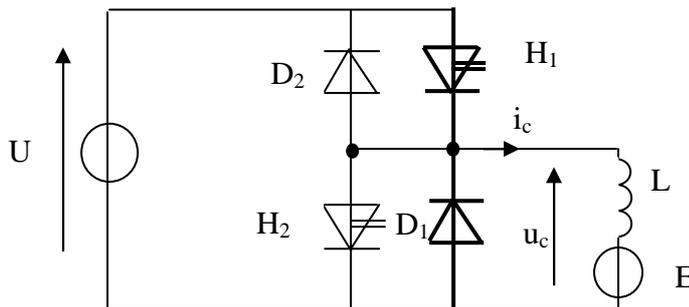
La charge du hacheur est maintenant un moteur à courant continu en série avec une bobine de lissage.

- Représentez le schéma électrique équivalent de la charge.
- u_{ch} est-elle modifiée ?
- Exprimez u_{chmoy} côté charge ; entre quelles valeurs u_{chmoy} peut-elle varier ?
Expliquez comment s'effectue la variation de vitesse du moteur.

II. Hacheur réversible en courant

rappel : fonctionnement du moteur dans les 4 quadrants

Structure du hacheur réversible en courant :



On fait l'hypothèse que les diodes et les thyristors sont parfaits.

H_1 et H_2 sont commandés alternativement :

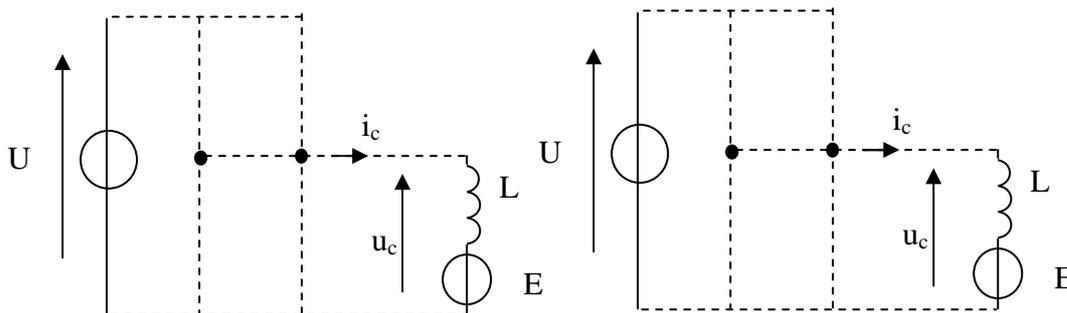
H_1 est commandé à la fermeture de 0 à αT ;

H_2 est commandé à la fermeture de αT à T

La charge est une machine à courant continu dont on néglige la résistance interne.

1. cas n° 1 : le courant i_c est positif

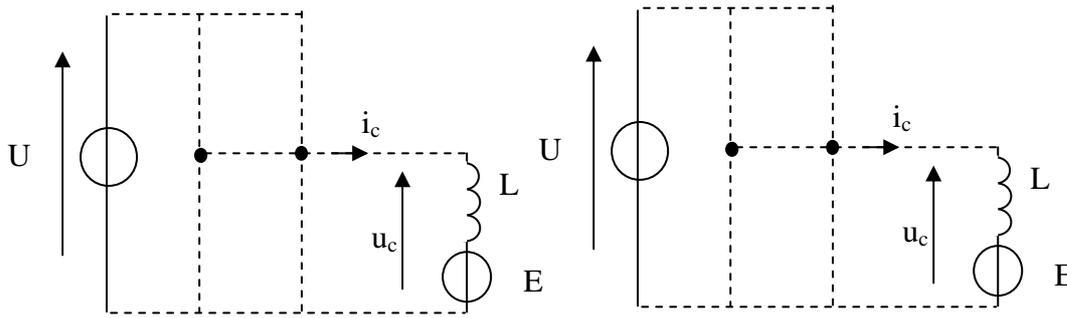
- Pour chaque intervalle, indiquer quels interrupteurs conduisent et complétez les schémas en faisant apparaître la circulation du courant :



- Tracez $u_c(t)$ sur une période. Exprimez U_{cmoy} .
- Déduire du signe de U_{cmoy} le fonctionnement de la machine et le sens de transfert de l'énergie.

2. cas n° 2 : le courant i_c est négatif

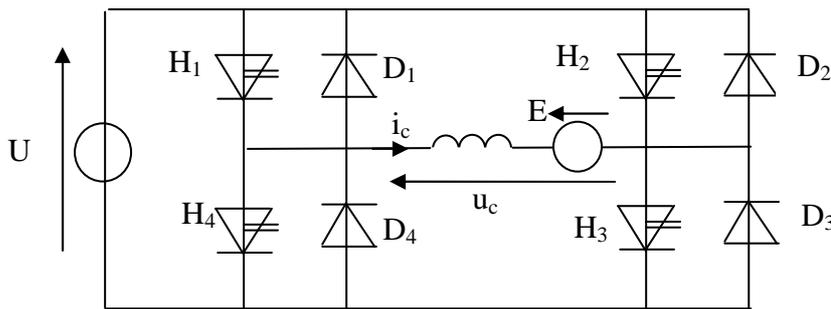
- a. Pour chaque intervalle, indiquer quels interrupteurs conduisent et complétez les schémas en faisant apparaître la circulation du courant :



- b. Déduire du signe de $U_{c\text{moy}}$ le fonctionnement de la machine .
 c. Donnez le sens de transfert de l'énergie, conclure sur la nature de la source U.

III. Hacheur 4 quadrants (ou en H)

C'est la structure de hacheur la plus complète ; elle s'utilise avec une source de tension (U) réversible en courant et une charge également réversible (de type machine CC).



Commande des interrupteurs sur une période de fonctionnement T:

- H_1 et H_3 sont commandés à la fermeture de 0 à αT
 H_2 et H_4 sont commandés à la fermeture de αT à T

Quand $i_c > 0$, quels interrupteurs sont susceptibles de conduire ? Et quand $i_c < 0$?
 Pour chacun des 4 cas ci-dessous, $i_c(t)$ évolue entre I_m et I_M ; la conduction est ininterrompue.

Pour chacun des 4 cas suivants :

1. Indiquez les éléments du convertisseur en conduction
2. Représentez u_c et i_c sur une période
3. Calculer la valeur moyenne de u_c .
4. Quel est le régime de fonctionnement de la machine ?

