



جامعة باتنة 2
الشهيد مصطفى بن بولعيد

2019/2020

Cours : Association machines-convertisseurs

Master 1 : Machines Electriques (S2)



Professeur DRID Saïd

Université de Batna 2

Département Electrotechnique

2019/2020

CONTENU DE LA MATIERE

Chapitre 0 : Généralités sur les entraînements électriques à vitesse variable

- 0.1. Intérêt de la vitesse variable
- 0.2. Entraînements électriques à vitesse variable.
- 0.3. Fonctionnement à quatre quadrants.
- 0.4. Types de Convertisseurs de puissance.
- 0.5. Conclusion.
- 0.6. Références.

Chapitre 1 : Convertisseur-Moteur à courant continu

- 1.1. Rappel sur le moteur à courant continu.
- 1.2. Association MCC-Redresseur.
- 1.3. Association MCC-Hacheur.

Chapitre 2 : Machine asynchrone – Convertisseurs statiques

- 2.1. Procédés de variation de vitesse du moteur asynchrone
- 2.2. MAS – Gradateur triphasé.
- 2.3. MAS – Onduleurs

Chapitre 3 : Machine synchrone - convertisseurs statiques

- 3.1. Moteur synchrone et problème de démarrage.
- 3.2. MS – Onduleurs et Autopilotage.

Chapitre 4 : Machines spéciales– Convertisseurs statiques

- 4.1. Onduleur de tension – Moteur Brushless ;
- 4.2. Alimentation de puissance pour moteurs pas à pas.

Chapitre 5 : Interactions convertisseur-machine

Etudier les effets des harmoniques générés par les CS sur la machine (Pertes supplémentaires, pulsations du couple, etc.).

Programme des TP :

1. Simulation de la machine à courant continu associée à un hacheur ;
2. Simulation de l'association : onduleur de tension à MLI sinus triangle et vectorielle- machine synchrone ;
3. Simulation de l'association onduleur- machine asynchrone.

Mode d'évaluation : Contrôle continu 40% ; Examen : 60%.

Chapitre un : Association Moteur à courant continu-Convertisseur

1.1. Rappel sur le moteur à courant continu

1.2.1. Introduction :

La machine à courant continu est une machine électrique tournante qui fonctionne, comme son nom l'indique, à partir de tensions et de courants continus. Dans le cas de petits moteurs, elle est donc adaptée à des sources d'énergie électrochimiques. Pour les fortes puissances, on la trouve dans les lignes de métro, tramway et TVG où elle fonctionne en moteur (traction) ou en génératrice (freinage).

1.2.2. Constitutions de la machine à courant continu :

Dans une machine à courant continu, on peut distinguer les principaux éléments suivants Le figure (1-1) :

- **L'inducteur** : Il est formé d'aimant pour les « petits moteurs » et de bobine parcouru par le courant d'excitation pour les moteurs plus puissants. Grâce aux progrès sur les aimants ses derniers sont de plus en plus employés. Les aimants ou bobines permettent la création d'un flux magnétique.
- **L'induit** : Il est alimenté par une tension U et parcourue par un courant I , le circuit électrique appelé induit est obtenu en associant en série des conducteurs logés dans des encoches du rotor.
- **Le système balais-collecteur** : Il est formé d'un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement les unes des autres et disposées suivant un cylindre en bout de rotor. Deux balais portés par le stator frottent sur les lames du collecteur. Pôle

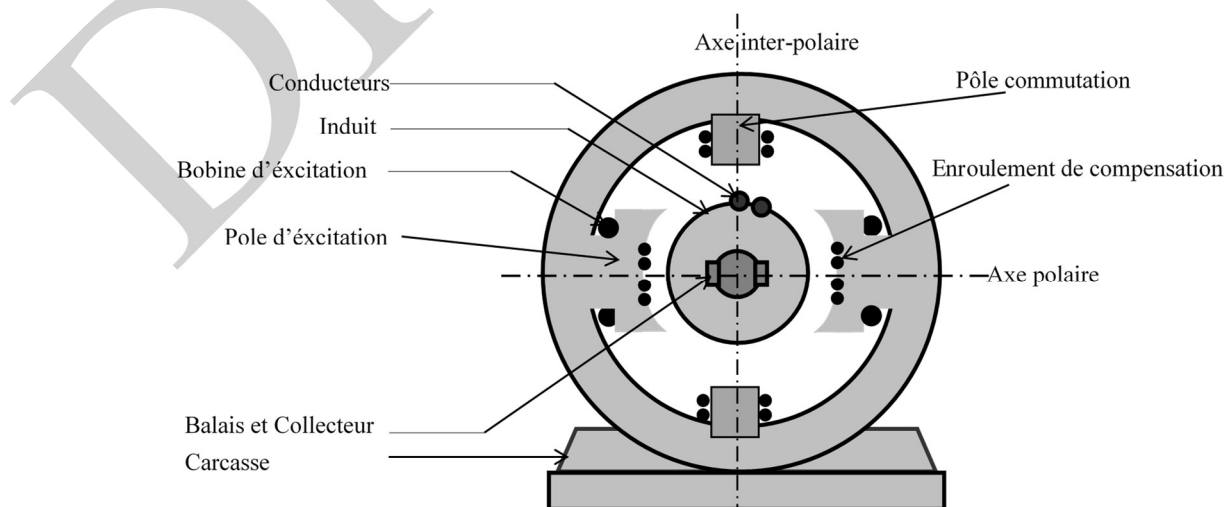


Fig. (1.1) : Constitution de la machine à courant continu

1.2.3. Principe de fonctionnement :

Une spire mobile placée dans un champ magnétique uniforme B , parcouru par un courant continu d'intensité I , est soumise à des forces de Laplace. Ces forces de Laplace créent un couple qui provoque la rotation de la spire, comme indiqué sur la figure (1-2). C'est le principe que le fonctionnement du moteur à courant continu

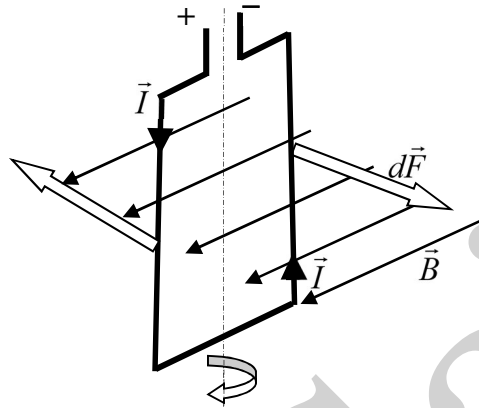


Fig. (1.2) : Force de Laplace.

La réversibilité : La machine à courant continu fonctionne aussi bien en générateur qu'en moteur. On dit qu'elle est réversible. La machine étant excitée par un courant inducteur : Elle fonctionne en génératrice, si on fait tourner l'induit par un procédé d'entraînement.

1.2.4. Différents types d'excitations de la MCC :

Il existe plusieurs méthodes pour alimenter l'inducteur de la machine, chacune d'entre elles conduisant à des caractéristiques de fonctionnement différentes. Nous allons nous placer dans le cas où la machine fonctionne en moteur.

- Machine à excitation séparée.
- Machine à excitation parallèle (shunt).
- Machine à excitation série.
- Machine à excitation composée (on a deux excitation en même temps « série et shunt »).
Il y a plusieurs types : flux additif, soustractif, long dérivation courte dérivation).

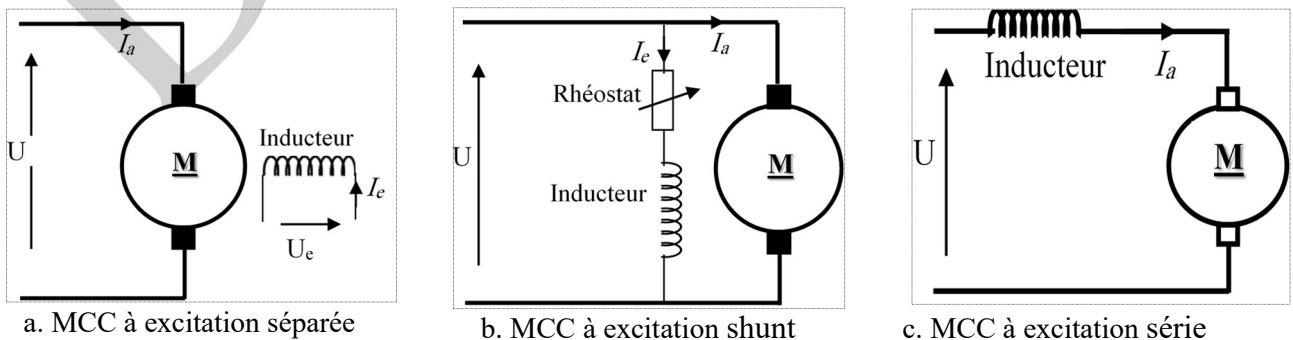


Fig. (1-3) : Types d'excitations des Moteurs à courant continu à excitation shunt

1.2.5. Comparaison entre les différents types de moteurs :

Il intéressant de comparer les propriétés du moteur à courant continu à excitation shunt, séparée et série pour en déduire les domaines d'applications de chaque type de moteur. Le moteur a excitation séparée a les mêmes caractéristiques que le moteur shunt, on conclure que :

Pour un moteur shunt et un moteur a excitation séparée la tension appliquée à l'enroulement d'excitation et par la suite le courant d'excitation sont indépendants de la charge.

La vitesse d'un moteur shunt ou à excitation séparée diminue légèrement lorsque le couple augmente, alors que la vitesse d'un moteur série diminue très rapidement quand le couple augmente. L'emploi du moteur série s'impose donc pour des entraînements qui présentent des démarrages fréquents sous un couple élevé ainsi que de brusques variations de charges. Cependant quand les grandes variations de vitesse en fonction la charge sont tolérables, il faut utiliser un moteur shunt.

1.2.6. Régime dynamique du moteur à courant continu :

Pour simplifie l'étude de le moteur à courant continu, on suppose que :

- Le moteur est bien compensé (réaction magnétique d'induit négligeable).
- Le circuit magnétique n'est pas saturé.
- La dynamique du flux d'excitation est rapide et à excitation séparée.

Pendant le régime transitoire la vitesse, le couple et le courant sont variable et étroitement liés au paramètres du moteur (résistance, inductance, inertie, frottement, flux et tension d'alimentation).

Les équations électromécaniques qui régissent le régime transitoire sont au nombre de deux, l'une d'origine électrique et l'autre d'origine mécanique.

L'équation électrique met en évidence la loi existant entre le courant d'induit I et la tension U appliquée au moteur :

$$U = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (1-1)$$

L'équation mécanique met en évidence la deuxième loi de Newton, elle est donnée comme suit :

$$C_e = C_r + J \frac{d\omega}{dt} + f.\omega \quad (1-2)$$

Tel que la force contre électromotrice et le couple électromagnétique peuvent être écrites comme suit :

$$E = k.\phi.\omega \tag{1-3}$$

$$C_e = K.\phi.I_a \tag{1-4}$$

Où :

U : tension continue appliquée à l'induit. ; Ra : résistance d'induit. ; Ia : courant d'induit. ; ω : Vitesse de rotation (rd/s). ; k : Constante caractéristique de construction ; φ : Flux utile par pôle en webers. ; Ce : le couple moteur pendant le régime transitoire. ; E : (f.c.e.m du moteur) a pour expression : ; Cr : le couple résistant, ; J : le moment d'inertie ; f : le coefficient frottement

1.2.7. Régime permanent du moteur à courant continu :

En régime permanent le modèle (1-1) serait

$$U = R_a I_a + k.\phi.\omega \tag{1-5}$$

$$C_e = K.\phi.I_a$$

Donc la caractéristique électromécanique ω=f(I) est linéaire, on a :

$$\omega = \frac{U}{K.\phi} - \frac{R_a I_a}{K.\phi} \tag{1-6}$$

La caractéristique ω=(I) est décroissante. L'allure globale est donnée sur la figure suivante :

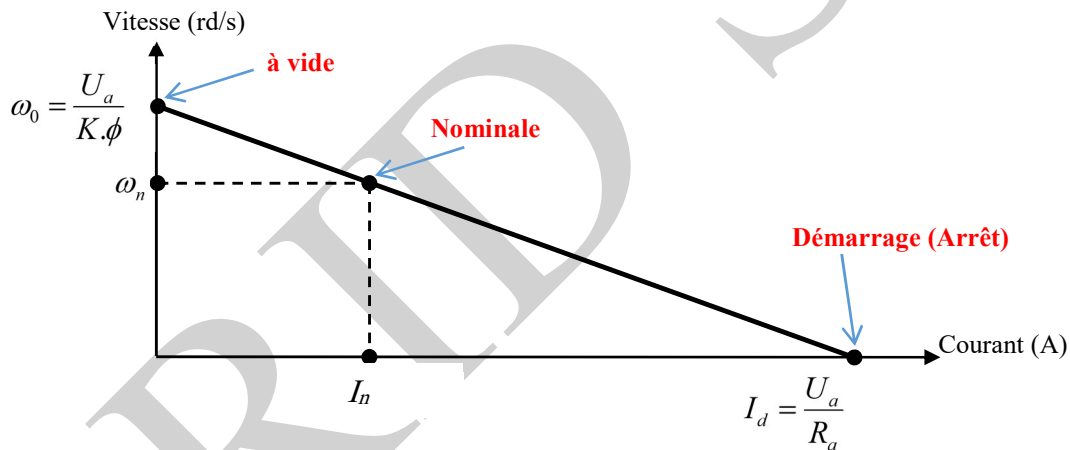


Fig. (1-4) : Courbe Vitesse-Courant du moteur à courant continu

Dans le cas du moteur série, si on considère que la machine n'est pas saturée et que le flux est proportionnel au courant, donc l'équation (1-6) devient :

$$\omega = \frac{U - R_a I_a}{K' I_a} = \frac{U}{K' I_a} - \frac{R_a}{K'} \tag{1-7}$$

Alors, La caractéristique n'est plus linéaire figure (1-5)

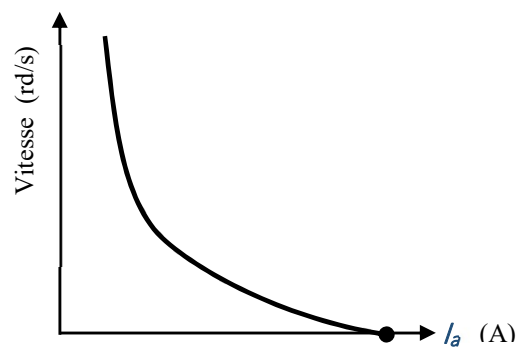


Fig. (1-5) : Courbe Vitesse Courant du moteur série

Remarque : il est interdite de coupé le circuit d'excitation du moteur à courant continu avant d'annule la tension d'induit (risque d'emballage du moteur $\omega \rightarrow \infty$). Aussi il est recommandé de ne pas faire fonctionner le moteur série à vide.

1.2.8. Procédé de commande d'un moteur à courant CONTINU :

L'expression générale de la vitesse montre les trois paramètres $K\phi$, R_{reg} et U que l'on peut régler ce qui donne les trois procédés pour la variation s de vitesse :

Réglage rhéostatique : Il est possible de réduire la vitesse en augmentant la résistance de l'induit avec un rhéostat branché en série avec l'induit tout en fixant la tension et le flux a leurs valeurs nominales, l'expression de la vitesse est :

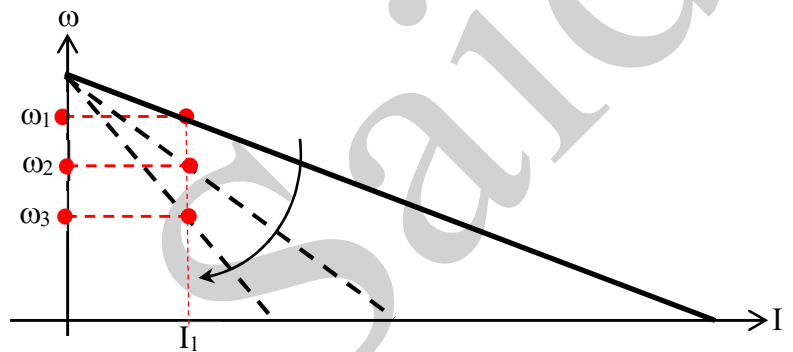


Fig. (1- 6) : Variation de vitesse rhéostatique

$$\omega = \frac{U - (R_a + R_{reg})I_a}{K\phi} \tag{1-8}$$

Ce type de réglage est mauvais du point de vue rendement. Le rhéostat insère à une consommation d'énergie d'autant plus importants que la chute de vitesse est élevée, c'est ainsi que ce procédé de réglage n'est utilisé que pour le démarrage et le freinage.

Réglage par le flux : Au démarrage, un moteur doit absorber un courant important pour pouvoir porter à la vitesse nominale toutes les masses et charges qui sont initialement au repos, d'où la nécessité d'appliquer un flux maximum pour permettre au moteur de développer une force électromotrice d'une valeur suffisante et d'une manière rapide. Ce type de réglage est bon du point de vue technique, et également du point de vue économique car la

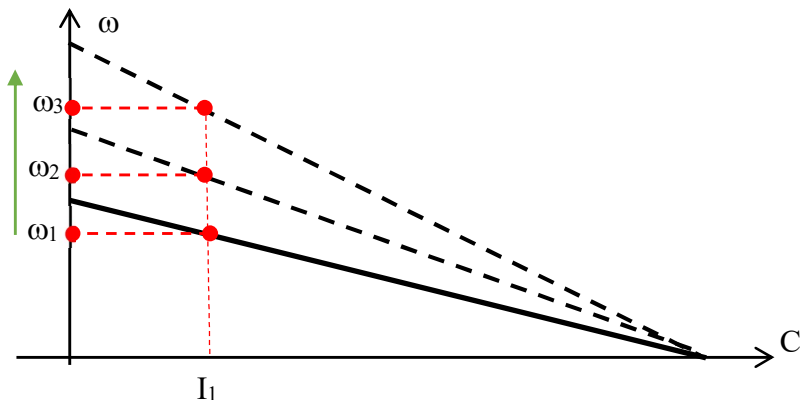


Fig. (1-7) : Variation de vitesse par le flux

puissance dissipée dans l'inducteur étant très faible par rapport à la puissance absorbée, le rendement du moteur ne sera pas modifié.

Réglage par la tension : On applique une tension de valeur moyenne variable entre zéro et une valeur maximale tout en réglant le flux à sa valeur maximale. Ce procédé de réglage de vitesse est excellent du point de vue économique car aucune énergie n'est dissipée dans les rhéostats. Le réglage par la tension permet seulement de diminuer la vitesse.

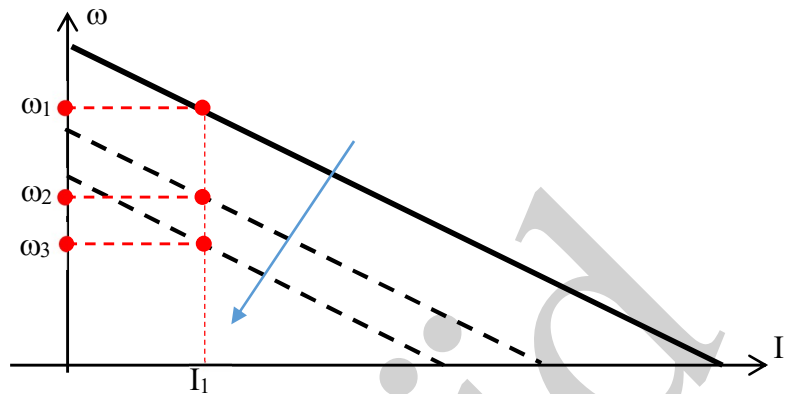


Fig. (1-8) : Variation de vitesse par la tension

La figure (1-9) résume les deux dernières modes de réglage de vitesse. En effet entre zéro et la vitesse nominale (à charge nominale), la variation de vitesse se fait par la tension en maintenant le flux constant. Une fois la tension nominale est atteinte, la variation de vitesse se fait en mode défluxé, dans ce cas il ne faut pas annuler le flux et respect la limitation de vitesse.

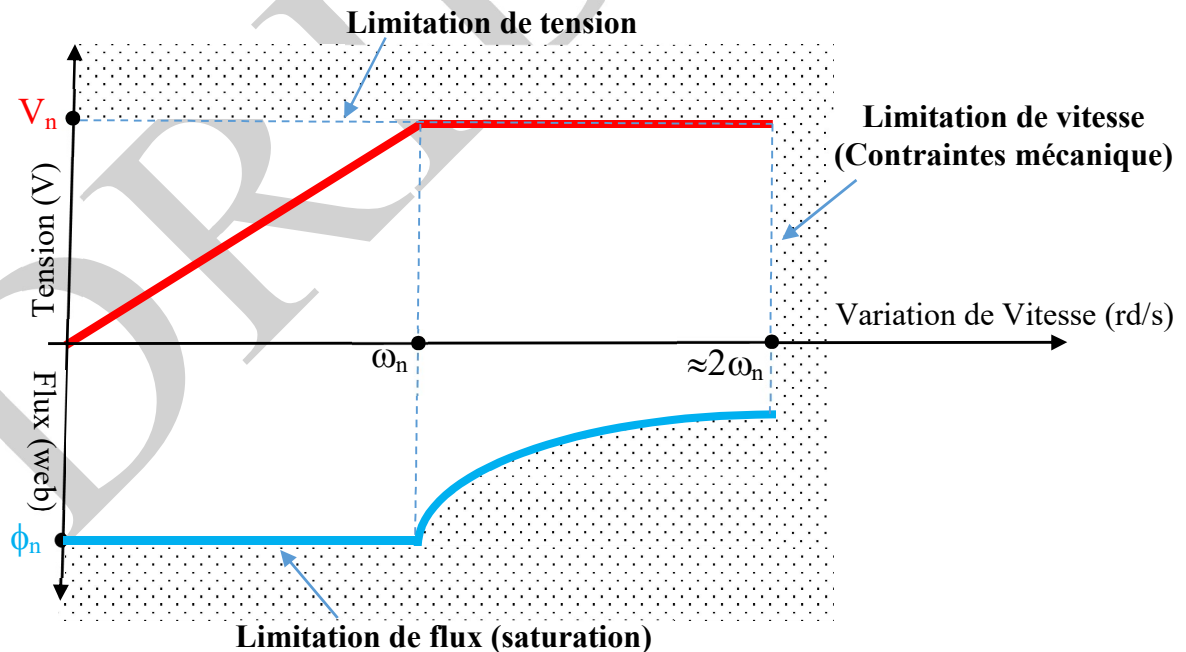


Fig. (1-9) : Modes de variation de vitesse du MCC

Les convertisseurs statiques DC constituent un élément essentiel des systèmes d'entraînement à vitesse variable. Ils peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Ceux utilisant le réseau alternatif.
- Ceux utilisant des sources de tension continue.

Dans ce chapitre, on présentera les principales topologies des convertisseurs les plus répandus dans les entraînements à vitesse variable.

1.2. Association MCC-Redresseur

1.2.1. Redresseurs monophasé :

La conversion du courant alternatif en courant continu est réalisée avec un redresseur contrôlé. Lorsque le redresseur est contrôlé et réversible, il permet le transfert d'énergie en inverse. Le montage est appelé redresseur contrôlé. L'angle de retard est défini par la lettre α .

On distingue deux types :

a. Pont mixte : ce pont est constitué de 2 diodes et de 2 thyristors. La tension d'alimentation : $v(t) = V_{eff} \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$

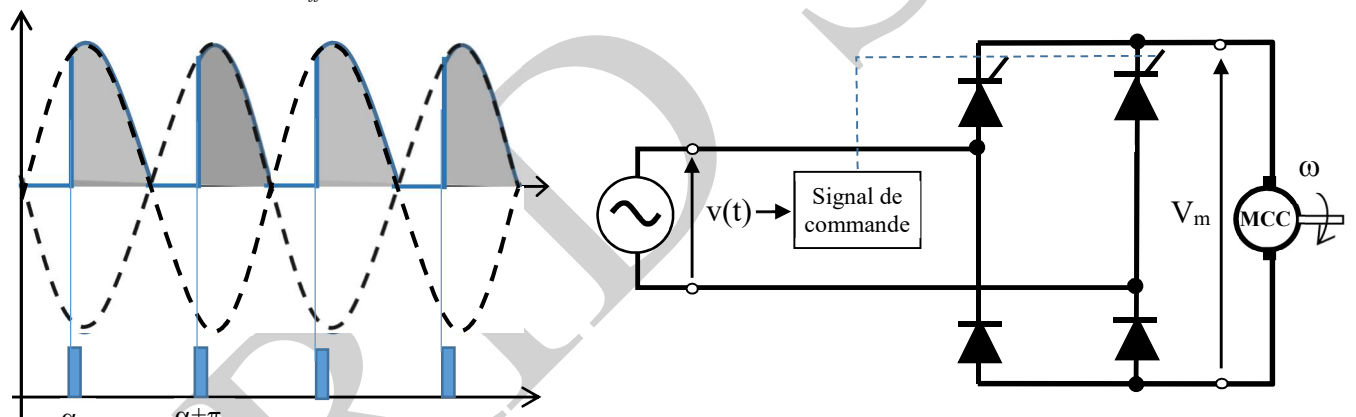


Fig. (1-10) redresseur monophasé en pont mixte

Ce montage ne permet pas de transférer d'énergie en sens inverse. La valeur moyenne de la tension peut se régler avec un angle d'amorçage α mesurant de 0 à π . Valeur moyenne :

$$V_m = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\pi} v(t) \cdot dt = \frac{V_{eff} \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \tag{1-9}$$

En remplaçant l'équation (1-9) dans l'équation (1-6) l'équation de la vitesse de rotation du moteur sera réécrite comme suit :

$$\omega = \frac{V_{eff} \sqrt{2}}{\pi \cdot K \cdot \phi} (1 + \cos \alpha) - \frac{R_a I_a}{K \cdot \phi} \tag{1-10}$$

b. Pont complet : Le pont complet à 4 thyristors dans lequel on fait varier l'angle d'amorçage α

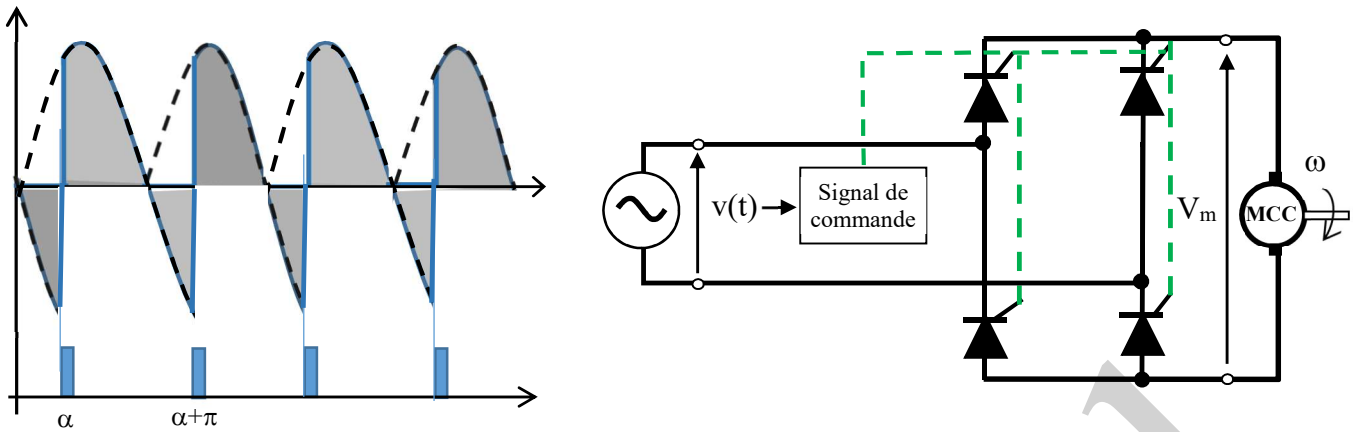


Fig.(1-11) redresseur monophasé en pont complet

$$V_m = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} v(t).dt = 2 \frac{V_{eff} \sqrt{2}}{\pi} \cdot \cos \alpha \quad (1-11)$$

L'équation de la vitesse de rotation du moteur sera réécrite comme suit :

$$\omega = 2 \frac{V_{eff} \sqrt{2}}{\pi \cdot K \cdot \phi} \cdot \cos \alpha - \frac{R_a I_a}{K \cdot \phi} \quad (1-12)$$

Il y a 3 possibilités de fonctionnement dépendant de l'angle d'amorçage α .

- $\alpha < \pi/2$: la tension aux bornes de la machine à courant continu est positive. Il s'agit du fonctionnement en moteur.
- $\alpha = \pi/2$: La tension moyenne aux bornes du récepteur est nulle, il n'y a aucun courant dans le circuit.
- $\pi/2 < \alpha < \pi$: On fonctionne en onduleur. La tension moyenne s'inverse

L'emploi du pont complet se justifie lorsqu'il peut y avoir récupération d'énergie. La figure (1-12) donne l'exemple d'un montage réversible à quatre quadrants composé de deux ponts connectés tête-bêche et fonctionnant en commande séparée. Les montages redresseurs sont naturellement réversibles en tension. Pour obtenir la réversibilité en courant et construire ainsi un convertisseur quatre quadrants, on associe tête-bêche deux redresseurs de même type.

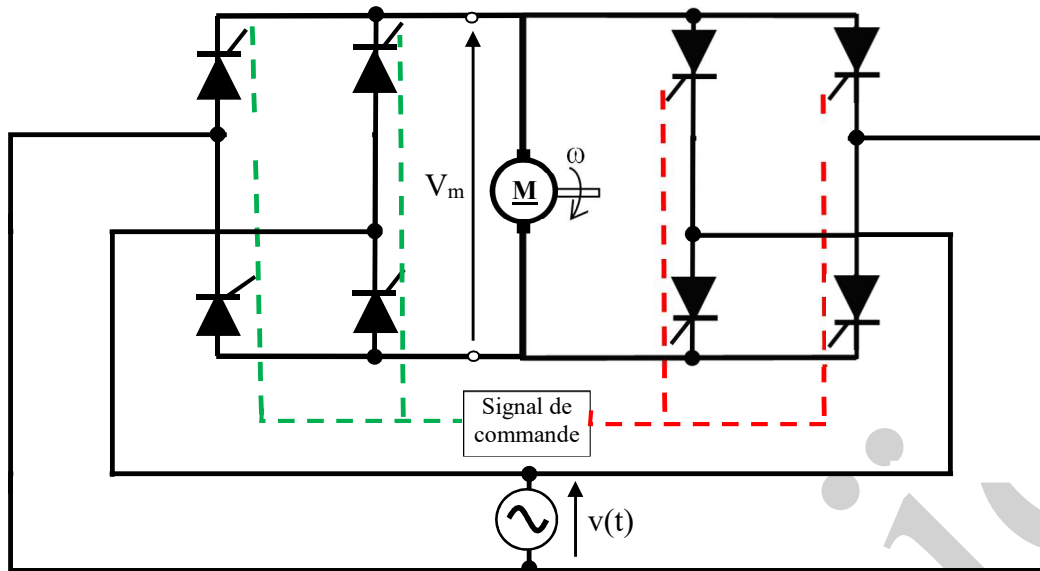


Fig. (1-12) : Montage tête-bêche de deux redresseurs

1.2.2. Redresseurs triphasé :

Les figures ci-dessous est une récapitulation des configurations possibles des redresseurs triphasés

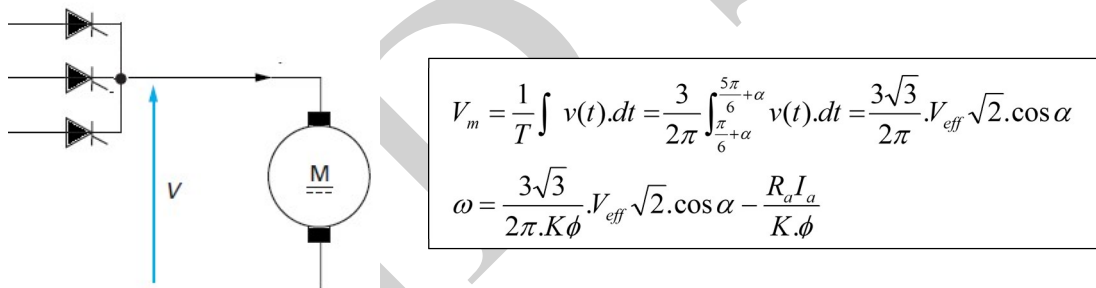


Fig. (1-13) : Redresseur triphasé simple alternance

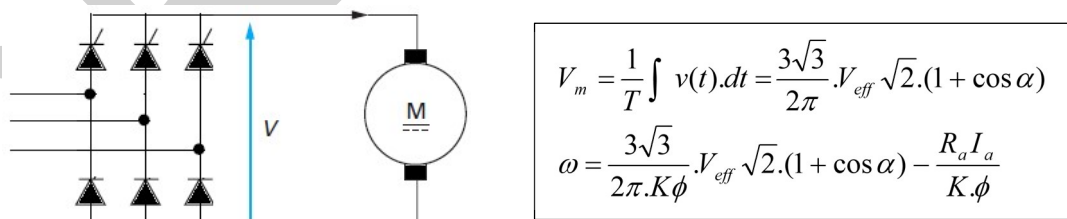


Fig. (1-14) : Redresseur triphasé en pont mixte

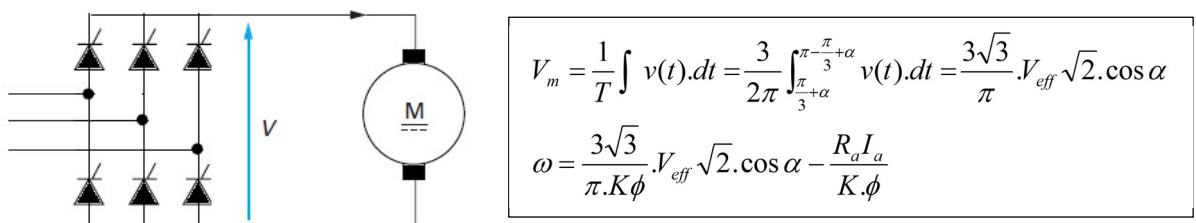


Fig. (1-15) : Redresseur triphasé en pont complet

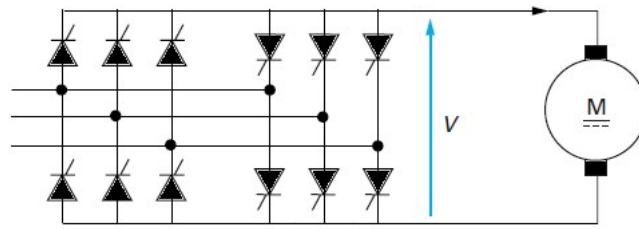


Fig. (1-16) : Redresseur triphasé en tête-bêche (inversion de vitesse)

1.3. Association MCC-Hacheur

1.3.1. Intérêt d'un hacheur

Un hacheur permet d'obtenir une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue constante. Dans un hacheur, on peut utiliser des interrupteurs à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode). Son symbole est :

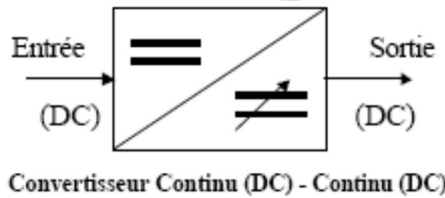


Fig. (1-17) : Symbole de l'hacheur

Il est évident que le procédé le plus simple pour transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable

1.3.2. Principe Du Hacheur Série

Pour faire varier la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu, il faut faire varier la valeur de sa tension d'alimentation. Une solution pour réaliser cela consiste à alimenter le moteur par l'intermédiaire d'un hacheur série, puisqu'il permet la variation de la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge

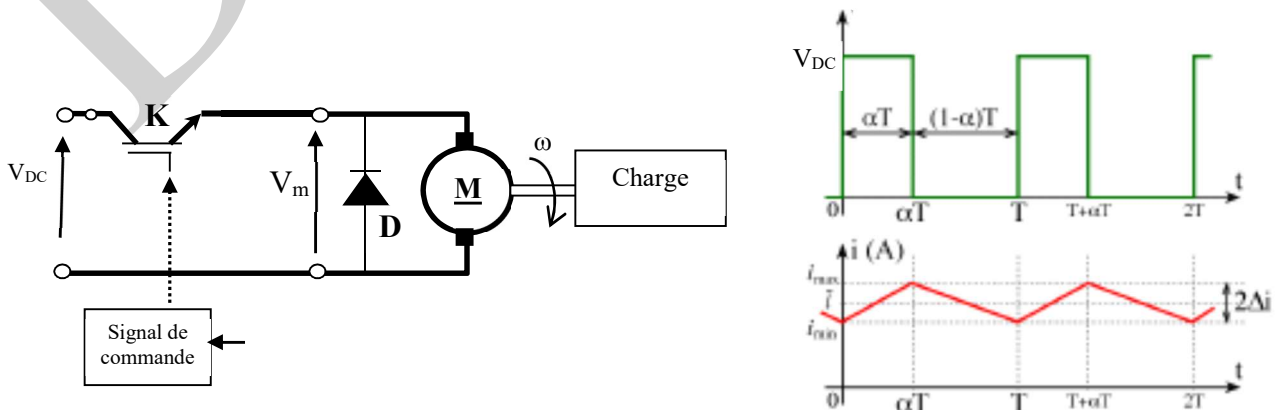


Fig. (1-18) : Association MCC-Hacheur série

Le fonctionnement est défini par l'état des composants de puissance, le Transistor T et la diode D :

- Pendant la période $[0, \alpha T]$; K : passant et D : bloquée
- Pendant la période $[\alpha T ; T]$; K : bloquée et D : passant

Valeur Moyenne :

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} V_{DC} \cdot dt = \alpha \cdot V_{DC} \quad (1-13)$$

Le coefficient α s'appelle le rapport cyclique, $0 < \alpha < 1$, il est sans dimension. En remplaçant l'équation (1-13) dans l'équation (1-6) l'équation de la vitesse de rotation du moteur sera réécrite comme suit :

$$\omega = \frac{\alpha \cdot V_{DC}}{K \cdot \phi} - \frac{R_a I_a}{K \phi} \quad (1-14)$$

Commentaires :

- A l'ouverture de **K**, le courant imposé par la bobine pourra passer par la diode.
- **D** est appelé diode de roue libre car elle est active lorsque la charge n'est pas alimentée. Elle est nécessaire pour un bon fonctionnement du montage.
- • La bobine lisse le courant : Plus **L** est grand, plus Δi sera petit.

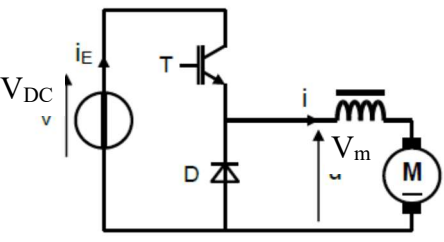
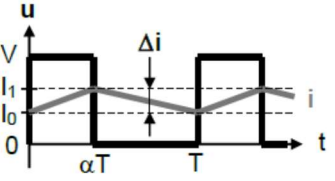
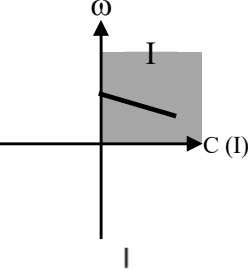
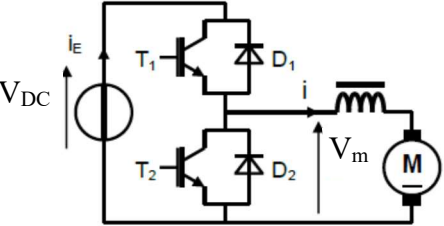
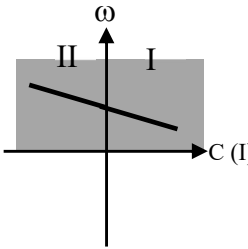
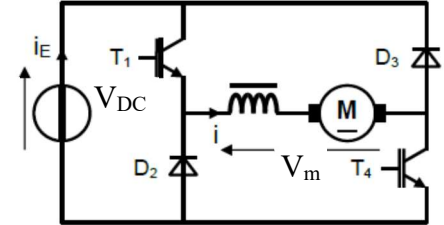
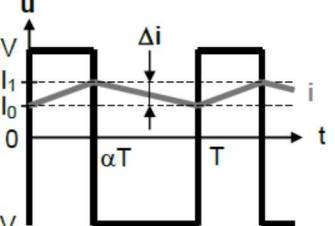
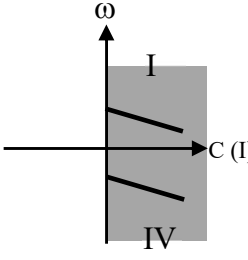
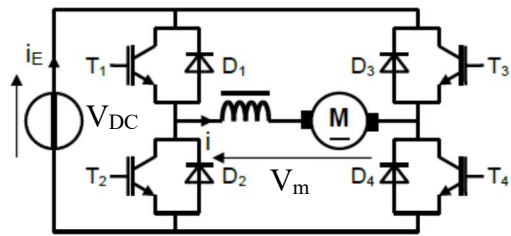
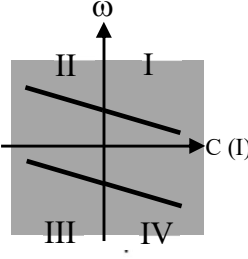
Ondulation du courant dans la charge est donnée par la relation :

$$\Delta i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} = \frac{\alpha(1-\alpha)V_{DC}T}{L} \quad (1-15)$$

Elle peut être mesurée à l'oscilloscope en visualisant la tension aux bornes d'une résistance. Pour diminuer Δi , il faut augmenter l'inductance L ou/et la fréquence de commutation $f=1/T$.

1.3.3. Configuration des Hacheurs

Tableau (1-1) ci-dessous est une récapitulation des configurations possibles des Hacheurs.

	Configuration	Équations	Quadrants de fonctionnement
	Relations fondamentales		fonctionnement
Hacheur série	 <p>[0 ; αT] : T passant - D bloquée [αT ; T] : T bloqué - D passante</p>	 <p>Pour le hacheur série :</p> $i > 0$	 <p>1 sens de rotation sans freinage</p>
Hacheur réversible en courant	 <p>Commande complémentaire des IGBTs</p>	<p>Pour le hacheur réversible en courant :</p> $i > 0 \text{ ou } i < 0$ <p>Dans les deux cas :</p> $V_m = \alpha \cdot V_{DC}$ $\Delta i = \frac{\alpha(1-\alpha) \cdot V \cdot T}{L}$	 <p>1 sens de rotation avec freinage</p>
Hacheur réversible en tension	 <p>[0 ; αT] : T₁, T₄ passants - D₂, D₃ bloquées [αT ; T] : T₁, T₄ bloqués - D₂, D₃ passantes</p>	 <p>Pour le hacheur réversible en tension :</p> $i > 0$	 <p>2 sens de rotation avec freinage</p>
Hacheur réversible en courant et en tension	 <p>Commande complémentaire des IGBTs</p>	<p>Pour le hacheur réversible en courant et en tension :</p> $i > 0 \text{ ou } i < 0$ <p>Dans les deux cas :</p> $V_m = (2\alpha - 1) \cdot V_{DC}$ $\Delta i = \frac{2\alpha(1-\alpha) \cdot V \cdot T}{L}$	 <p>2 sens de rotation avec freinage</p>

Référence : JC ROLIN Lycée G Eiffel Dijon d'après F Costa (http://fltsi.fr/tsi/archives_18_19/)

Tab. (1-1) : Récapitulation des configurations possibles des Hacheurs.

1.4. Commande des interrupteurs

Selon le commande On a type de convertisseurs.

- Le premier type de convertisseurs est constituée par des montages à commutation assistée par le réseau (les redresseurs commandés). L'interrupteur type est le thyristor, voire le triac.

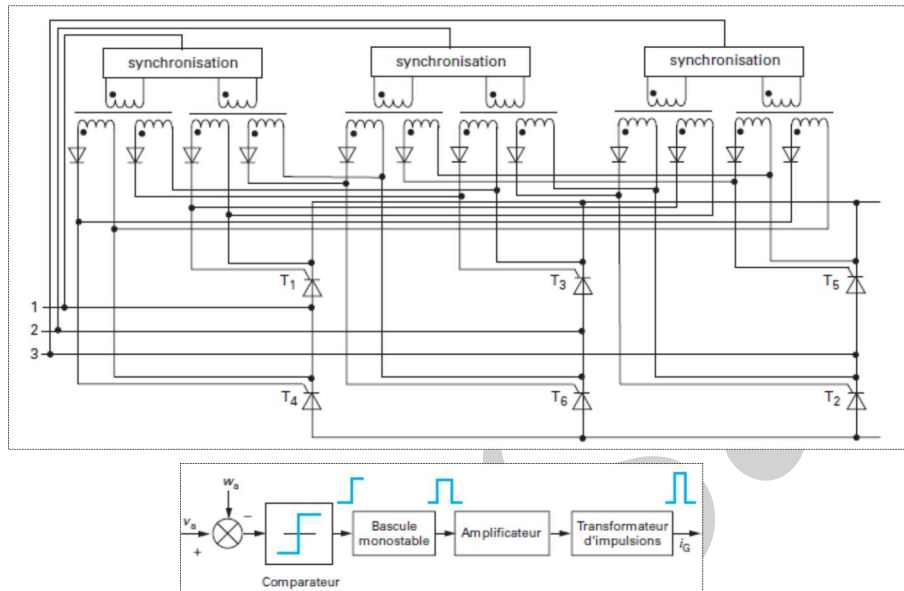


Fig. (1-19) : Schéma de principe de la commutation assistée par le réseau

- Le deuxième type de convertisseurs correspond aux convertisseurs à commutation par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Il s'agit des hacheurs (sur source continue) et des redresseurs MLI (sur source alternative). Ils fonctionnent avec des interrupteurs à commutation forcée mais, dans le cas des redresseurs, ils sont synchronisés avec le réseau de façon à absorber des courants aussi sinusoïdaux que possible et en phase avec le réseau. Les interrupteurs sont des transistors (MOSFET, IGBT) ou des thyristors (GTO, GCT) selon les tensions, puissances et fréquences requises.

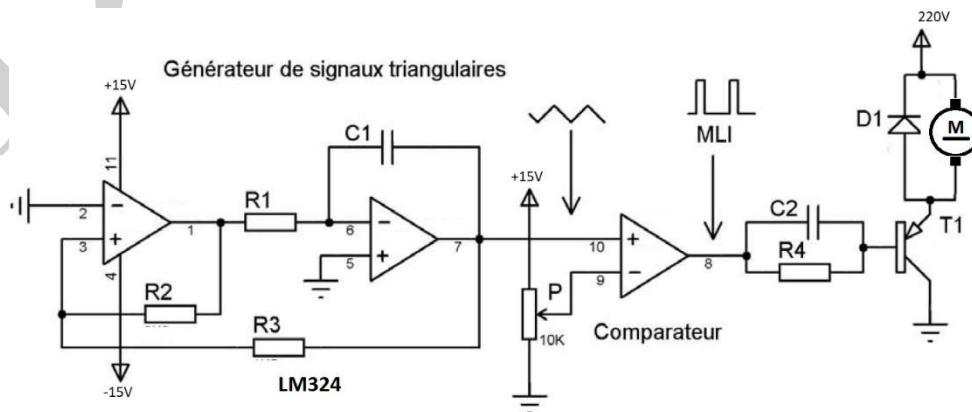


Fig. (1-20) : Schéma de principe de la commande MLI analogique de la MCC

1.5. Conclusion

Ce chapitre est un résumé sur les moteurs à courant continu à vitesse variable ainsi que les topologies de variateurs de vitesse les plus utilisées avec ce type de moteurs.

1.6. Références

- [1] F. Bernot, "Machines à Courant Continu. Constitution et fonctionnement," Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, pages D 3555 1-14, 1999.
- [2] J.-P. Louis et C. Bergmann, "Commande Numérique. Convertisseur-Moteur à Courant Continu," Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, pages D 3641, 1-33, 2002.
- [3] J.-P. Louis et C. Bergmann, "Commande Numérique des Machines. Evolution des Commandes," Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, pages D 3640, 1-17, 2002.
- [4] J.-P. Louis, B. Multon, Y. Bonnassieux et M. Lavabre, "Commande des Machines à Courant Continu (mcc) à Vitesse Variable," Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, pages D 3610, 1-17, 2002.
- [5] J.-P. Louis, B. Multon, Y. Bonnassieux et M. Lavabre, "Régulation des mcc. Structure générale," Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, pages D 3612, 1-12, 2002.
- [6] JC ROLIN Lycée G Eiffel Dijon d'après F Costa (http://fltsi.fr/tsi/archives_18_19/)