



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

Ce cours s'adresse aux étudiants de Master en Electrotechnique et Master en machines électriques,

Objectif de l'enseignement :

La maîtrise des différentes possibilités d'association entre machines électriques et convertisseurs statiques.

Connaissances préalables recommandées :

Machines électriques, modélisation des machines, électronique de puissance, notions de mécanique, asservissement et régulation.

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. MCC – Redresseur triphasé.
- 1.2. 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 zéro : Généralités sur les entraînements électriques à vitesse variable

0.1. Intérêt de la variation de vitesse

Dans les pays industrialisés, plus de la moitié de l'énergie électrique est utilisée pour la production de la force contre électromotrice destinée aux entraînements électriques à vitesse variable. Dès lors, la diversité de ces applications soutenues avec la recherche des solutions optimales entre performances au sens automatique et au sens énergétique en font un axe de recherche tant convoité aussi bien chez les scientifiques que les industriels. Ces dernières décennies, les progrès enregistrés dans les technologies de l'électronique de puissance et de la microinformatique permettent l'utilisation des machines à courant alternatif dans les applications à vitesse variables. Ainsi, il devient possible de contrôler à haute dynamique des systèmes de plus en plus puissants, de conception compacte et de rendement élevé. Désormais, les moteurs électriques sont excellents pour une variété de raisons :

- Gamme de puissance étendue : du Watt au méga-Watt (pompes hydrauliques à couple élevé $> 10^6$ Nm, les laminoirs, etc.)
- Gamme de vitesse variant de zéro jusqu'à des vitesses $> 10^5$ min⁻¹ (centrifugeuses)
- Fonctionnement dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse avec les possibilités de récupération d'énergie.
- Rendement élevé, spécialement en contrôle bouclé.
- Disponibilité immédiate pour la mise en marche sans aucune étape préliminaire de marche en ralenti ou de préchauffage.
- Puissance-massique élevée avec plus de fiabilité et de durée de vie.
- Possibilités de surcharges transitoires relativement élevées.
- Couple continu à faibles vibrations.
- Adaptation environnementale (conditions ambiantes, submergées dans les liquides dangereux ou radioactifs, etc.)
- Maniabilité des commandes électriques avec réalisation de meilleures performances possibles (énergétiques et automatiques).

0.2. Entraînements électriques à vitesse variable

Actuellement l'industrie utilise la motorisation électrique à vitesse variable pour optimiser des processus fabrication, améliorer l'efficacité énergétique, augmentation la cadence de production, diminuer le temps de transport des voyageurs et des marchandises, et ...etc. On peut citer le contrôle du débit d'une pompe, la vitesse de coupe ou d'avance des machines-outils, la vitesse des systèmes de transport (train, tramway, TGV, ...).

Les entraînements électriques sont composés des éléments suivants, Fig. (0-1) :

- Source d'énergie
- Convertisseur de puissance, qui permet d'adapter la source électrique primaire au moteur.
- La commande et le réglage qui assurent le contrôle du comportement dynamique du système (positionnement, vitesse, courant, couple, etc.).
- Le moteur, défini par ses caractéristiques externes et de réglage.
- Le ou les capteurs qui fournissent les informations nécessaires au contrôle.
- La transmission, qui permet d'adapter le mouvement (conversion tournante-linéaire, par exemple) la vitesse, la résolution ou la dynamique du système.

Pour bien choisir un système d'entraînement à vitesse variable, il est nécessaire de connaître les contraintes imposées par la charge à l'ensemble source d'énergie-convertisseur-machine électrique.

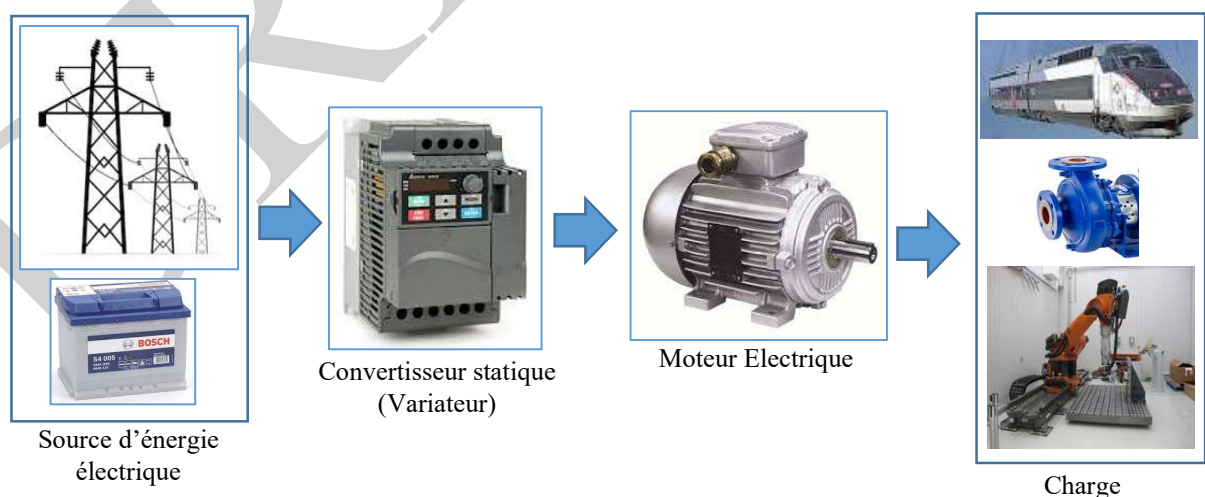


Fig. (0-1) : Entraînement électrique à vitesse variable

Selon la nature de la source d'énergie, on peut classer deux types d'entraînement électrique :

- À courant continu : leur vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation.
- À courant alternatif : leur vitesse est proportionnelle à la fréquence d'alimentation.

0.2.1 Commandes DC à vitesse variable

Les commandes DC d'une machine électrique exigent un convertisseur de puissance capable de réaliser le passage de la tension du réseau alternative ou d'une tension continue constante (batterie d'accumulateurs) à une tension de commande réglable en amplitude et variable, comme le montre sur la figure (0-2).



Fig. (0-2) Commande réglable de la vitesse en mode DC

0.2.2 Commandes AC à vitesse variable

Les commandes AC d'une machine électrique exigent un convertisseur de puissance capable de réaliser le passage de la tension du réseau à amplitude et fréquence constantes à une tension de commande réglable en amplitude et en fréquence est souvent exécuté en deux étages (AC-DC et DC-AC), comme le montre la figure (0-3).

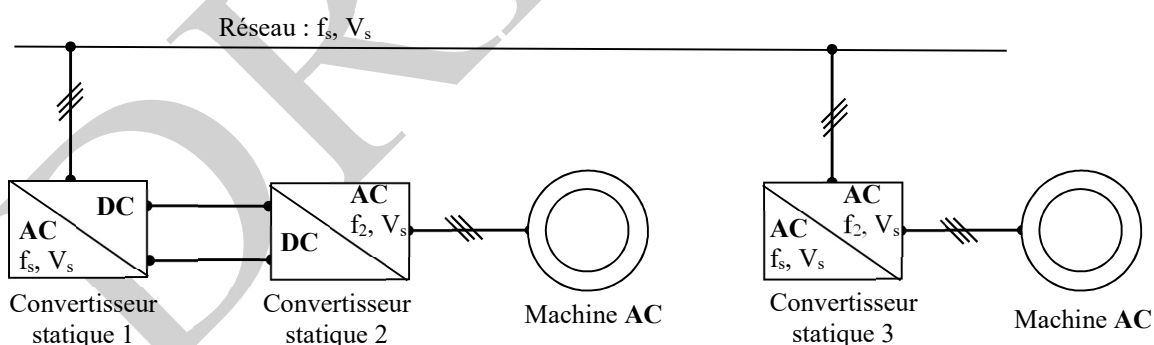


Fig. (0-3) : Commande réglable de la vitesse en mode AC

Le convertisseur du côté réseau (AC-DC) est un redresseur contrôlé (à thyristors) ou non (à diodes). Celui du côté machine (DC-AC) est un onduleur pouvant produire des tensions alternatives d'amplitude et de fréquence variables. Ce convertisseur à deux étages peut être réversible, dans le cas de la génération d'énergie. Il est assez développé dans

l'industrie pour les différents types de machines d'autant plus que les cyclo-convertisseurs (à un seul étage de conversion) sont maintenant disponibles. Le tableau (1.1) récapitule l'ensemble des machines et des convertisseurs les plus employés dans les commandes AC à vitesse variable.

Convertisseurs de puissance		Conversion avec un étage à courant continu				Conversion Directe
Machines AC		Onduleurs de tension à transistor	Onduleurs de tension à thyristor GTO	Onduleurs de courant à thyristor GTO (Commutation forcée)	Onduleurs de courant à thyristor (Commutation naturelle)	Cycloconvertisseur
		A	B	C	D	E
machine synchrone à aimant permanent	1	Petites puissances, hautes performances dynamique (servomoteur) 10kW	Puissances moyennes et grandes 1MW			
Machine à Reluctance	2		Petites et moyennes puissances 100kW			
Machine à Induction à cage	3	Petites puissances, performances dynamiques élevées de vitesse (servomoteur) 100kW)	Puissances moyennes et grandes performances dynamique élevée 2MW	Moyennes et grandes puissances, à grande vitesse 4MW		Grandes puissances, faibles vitesses, hautes performances dynamiques 7.5Mw
Machine à rotor bobiné double alimenté DFIM	4				Grandes puissances mode hypo-synchrone Scherbius 20MW	Grandes puissances, vitesse variable 3MW
Machine synchrone avec amortisseurs	5				Grandes puissances à grande vitesse, 20MW	Grandes puissances, faibles vitesses, hautes performances dynamiques 10MW

Tableau (0-1) : Synthèse des commandes AC à vitesses variables.

L'examen du tableau (0-1) fait ressortir les constatations suivantes :

- (i) Les trois des cinq machines (1, 2 et 5) sont du type synchrone à stator bobiné (naturellement) : (1) est à aimant permanent, (2) à reluctance variable sans enroulement au rotor alors que (5) est à rotor bobiné.
- (ii) Les machines (3) et (4) sont du type asynchrone ou à induction dont (3) est à rotor à cage et (4) à rotor bobiné en mode double alimenté. Les applications de la commande AC exigeant une plage de variation de vitesse limitée de 20% autour de la vitesse de synchronisme peuvent être réalisées par les machines à induction double alimentées.

0.2.3 Caractéristique mécanique des moteurs

Tout moteur électrique est caractérisé par sa caractéristique mécanique $C = f(\Omega)$. Celle-ci retrace l'évolution du couple moteur en fonction de sa vitesse de rotation. Elle permet en outre d'estimer si une machine est adaptée ou non à la charge mécanique à entraîner.

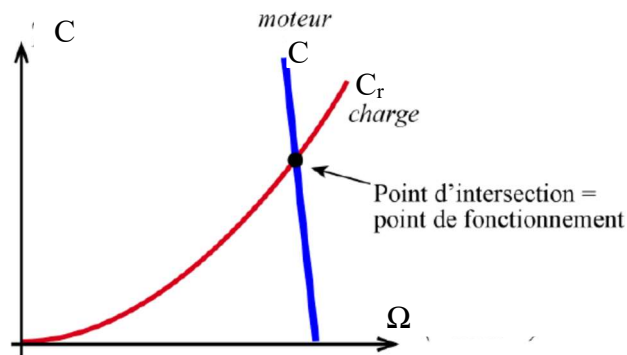


Fig. (0-4) : Point de fonctionnement.

Au régime permanent le couple développé par le moteur est égal au couple imposé par la charge (point de fonctionnement), Fig. (0-4). Les moteurs électriques les plus répons ont les caractéristiques mécaniques suivantes, Fig. (0-5), :

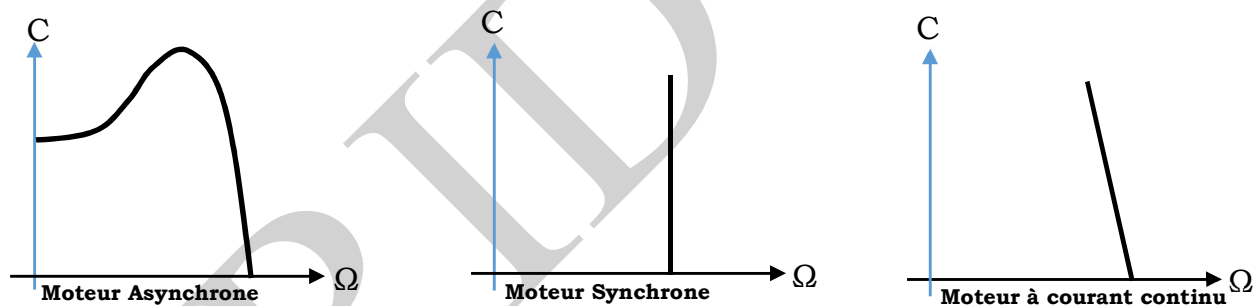


Fig. (0-5) : Caractéristiques mécaniques des moteurs électriques

0.2.4 Caractéristique mécanique des charges

Toute charge mécanique est caractérisée aussi par sa caractéristique mécanique en fonction de la vitesse : $C = f(\Omega)$. Les charges les plus répons sont, Fig. (0-6) :

- Les charges à couple constant $C_r = C^{te}$ représentées par une droite horizontale (machines-outils, perceuse, etc)
- Les charges à couple proportionnel à la vitesse $C_r = K \cdot \Omega$, ce qui donne une droite qui passe par l'origine, pompes hydrauliques.
- Les charges à couple proportionnel au carré de la vitesse $C_r = K \cdot \Omega^2$ ce qui donne une parabole, ventilateurs.

- Les charges à puissance constante $P = Cr \cdot \Omega = K = C^{te}$, ce qui donne une relation du type $Cr = K/\Omega$ et donc une courbe hyperbolique, l'essorage.

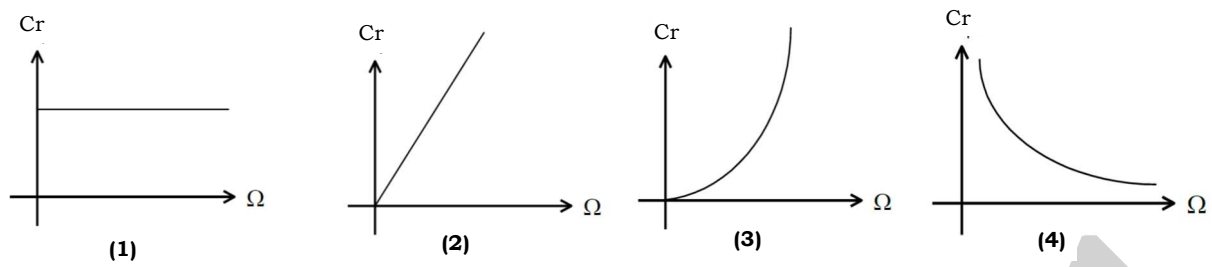


Fig. (0-6) : Caractéristiques mécaniques des charges

0.3. Fonctionnement à quatre quadrants

Les deux paramètres définissent le fonctionnement des moteurs sont le couple et la vitesse. Le couple dépend de la charge qui peut être entraînée ou entraînant. Le signe de la vitesse dépend du sens de rotation du moteur.

Lorsque le moteur entraîne une charge mécanique, il reçoit de l'énergie et la transforme en travail mécanique. Lorsque l'application le permet, la charge peut restituer de l'énergie mécanique. Souvent l'énergie récupérée correspond à l'inertie des masses en mouvement. Lors de cette phase l'énergie est renvoyée au réseau électrique ou dissipée en chaleur dans un système de freinage rhéostatique par exemple, Fig. (0-7).

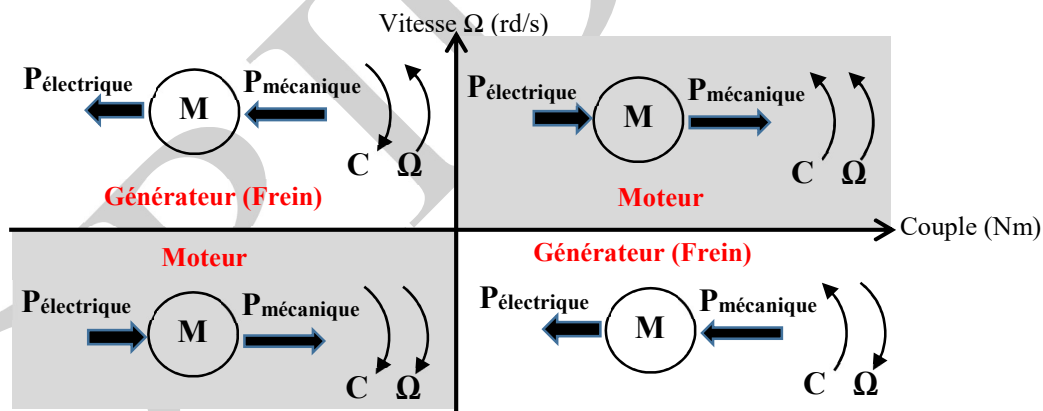


Fig. (0-7) : Fonctionnement à quatre quadrants

Les variateurs de vitesses ont plusieurs fonctions parmi lesquelles Fig. (0-8):

- Le démarrage : le moteur passe de l'arrêt à la vitesse de consigne en un temps qui dépend de la constante du temps du système, en évitant les pics d'intensité excessifs.
- La variation de vitesse : la variation de la vitesse de rotation par accélération ou décélération en un temps donné.
- La régulation : la vitesse de rotation du moteur est maintenue fixe indépendamment des variations de la charge.

- Le freinage : le moteur passe d'une vitesse donnée à une vitesse inférieure ou à l'arrêt.
- L'inversion du sens de rotation : Le moteur peut tourner dans les deux sens de rotation.
- La récupération d'énergie : Lors du ralentissement ou du freinage le moteur peut transformer l'énergie mécanique en énergie électrique (mode générateur).

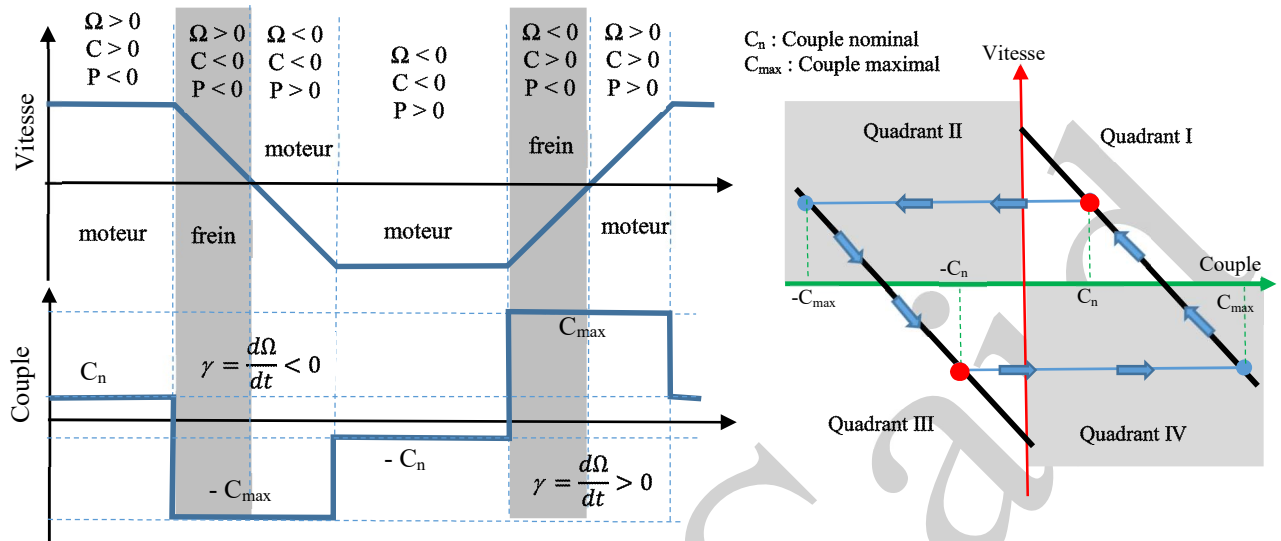


Fig. (0-8) : Régimes de fonctionnement des moteurs électriques

0.4. Types de Convertisseurs de puissance.

Pour des raisons économiques, l'énergie électrique est fournie par des réseaux triphasés (trois tensions sinusoïdales déphasées entre elles de 120°) à la fréquence de 50Hz.

Du point de vue de l'utilisation, l'énergie est parfois utilisée en continu ou à des fréquences différentes de celle du réseau. Jusqu'au début des années 1970 environ, la mise en forme de l'onde électrique, afin de l'adapter aux besoins a été obtenue au moyen de groupes tournants (moteurs-générateurs). Les performances des composants semi-conducteurs de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, triacs, transistors, voir Figure (0-9)) ont ensuite permis de réaliser de telles conversions ; on supprime ainsi les parties tournantes et on réduit la masse, l'encombrement et le coût de ces installations.

Il existe deux types de convertisseurs.

- Les convertisseurs unidirectionnels : Ils permettent le passage de l'énergie électrique uniquement du réseau vers le moteur.
- Les convertisseurs bidirectionnels : Ils permettent le passage de l'énergie électrique, du réseau vers le moteur (lorsque celui-ci entraîne la charge) et du moteur vers le réseau (lorsque la charge est entraînée).

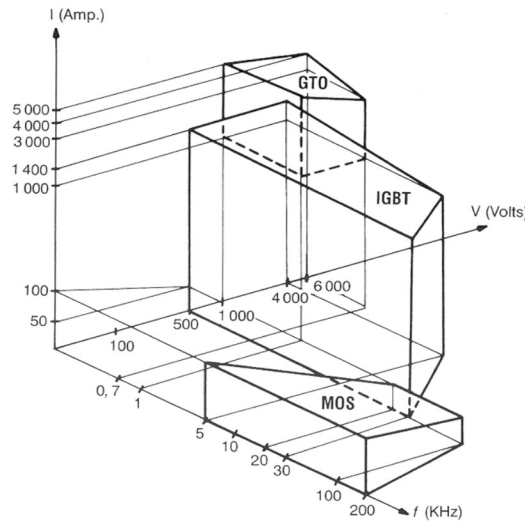


Fig. (0-9) : Performances des interrupteurs

Selon la nature de l'énergie, on différencie quatre configuration de convertisseurs dont le schéma synoptique est donné sur la Figure (0-10) :

- Convertisseur alternatif-continu : Redresseur ;
- Convertisseur Continu-Continu : Hacheur ;
- Convertisseur Continu-Alternatif : Onduleur ;
- Convertisseur Alternatif-Alternatif : Gradateur ou Cyclo convertisseur.

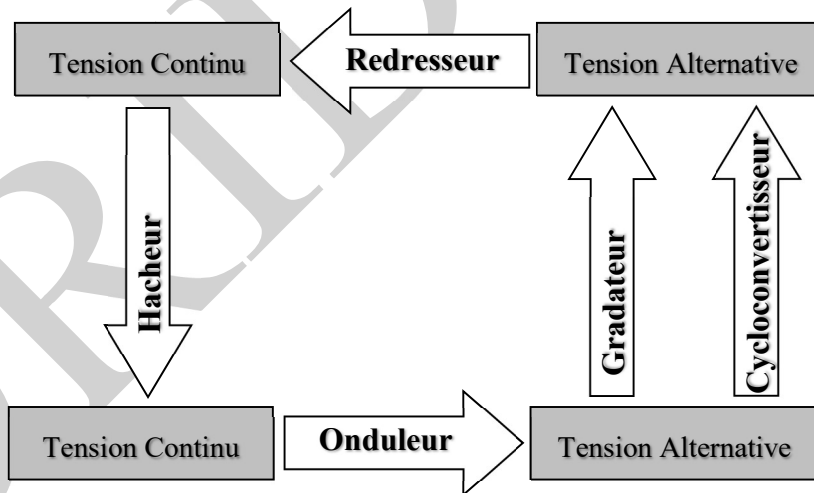


Fig. (0-10) : Les Différents types des convertisseurs

Citons quelques applications des convertisseurs statiques :

- Redresseurs : alimentation des moteurs à courant continu, charge des batteries ;
- Hacheurs : commande des moteurs à courant continu (vitesse variable).
- Onduleurs : production de tensions alternatives, alimentation des appareils électriques autonomes, protection contre les surtensions et coupures de réseau (informatique), commande des machines à courant alternatif.

- Cyclo-convertisseurs : production des vitesses variables en alternatif (levage, machine-outil).
- Gradateur : Variation de la vitesse est moteurs asynchrone, variation d'éclairage, compensateur d'énergie réactive dans les réseaux électriques.

Avantages des convertisseurs électroniques :

- Diminution des pertes mécaniques présentes dans les variateurs mécaniques (poules et courroies, engrenages),
- Limitation des surintensités lors du démarrage,
- Adaptation précise de la vitesse et modification facile,
- Augmentation de la durée de vie des constituants mécaniques des systèmes,
- Limitation du bruit,
- Économies d'énergie.

0.5. Conclusion

Ce chapitre retrace un petit survol sur l'introduction des entraînements à vitesse variable. Il ressort qu'un intérêt certain est accordé pour l'usage de ces systèmes dans les applications de grande puissance aussi bien en fonctionnement moteur que générateur. De par l'optique donnée sur le présent chapitre, il demeure que les entraînements à vitesse variable relèvent d'un domaine prometteur d'une importance économique capitale surtout dans les applications à haut rendement pour la motorisation avec *energy saving*.

0.6. Références

- [1] W. Leonhard, "Adjustable-Speed AC Drives" Invited Paper; Proceedings of the IEEE, Volume: 76, Issue: 4, April 1988, pp.455-471.
- [2] W. Leonhard, "Control Electrical Drives", Springer Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1997, pp. 287-306.
- [3] M.S. Vicatos and J. A. Tegopoulos, "A Doubly-Fed Induction Machine Differential Drive Model for Automobiles" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, June 2003, 18, (2), pp. 225-230.
- [4] E. Blaschke, "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating field machine," *Siemens Review*, vol.34, pp.217-220,1972.
- [5] W. Leonhard, "30 years space vectors, 20 years field orientation, 10 years digital signal processing with controlled AC-drives, a review (Part II)," *EPE Journal*, Vol.1, No.2,pp.89-102, October 1991.

- [6] B.K. Bose, "Technology tends in microcomputer control of electrical machines," IEE Trans. On Indus. Electronics, Vol.35,01, pp.160-177, Feb 1988.
- [7] F. Bernot, "Machines à Courant Continu. Constitution et fonctionnement," Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, pages D 3555 1-14, 1999.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.