

# Chapitre I

## Introduction

### 1. Généralités

#### 1.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de donner des généralités sur la transformation électromécanique. En effet c'est une transformation bidirectionnelle. Elle joue un rôle important dans des domaines variés la traction électrique (transports publics, voitures électriques et hybrides), les machines-outils, les machines d'emballages, les chaînes de production, la microélectronique,...

#### 1.2 Propriétés générales de la conversion électromécanique

La conversion électromécanique présente les caractères communs suivants :

- Recherche d'un rendement de transfert élevé.
- Systèmes réversibles, conversion de l'énergie dans les deux sens.
- La fiabilité et la durée de vie.

#### 1.3 Caractéristiques de la conversion électromécanique

L'étude de la conversion électromécanique est basée sur le principe de conservation de l'énergie. Celui-ci fait appel à une forme intermédiaire d'énergie, il s'agit de l'énergie électromagnétique. La force ou le couple électromécanique résulte de trois formes possibles d'interactions :

- l'interaction entre deux courants,
- L'interaction entre un courant et un circuit ferromagnétique,
- L'interaction entre un aimant et un courant ou un circuit ferromagnétique.

#### 1.4 Système électromécanique

Un système électromécanique est caractérisé par  $k$  circuits électriques repérés par l'indice  $n$  ( $n=1, \dots, k$ ). On peut associer à ceux-ci autant de courants  $i_n$ , de tension  $u_n$  et de flux totalisés  $\varphi_n$ . Ces diverses grandeurs sont reliées par la relation générale :

$$u_n = R_n i_n + \frac{d\varphi_n}{dt}$$

Un tel système, soit un moteur, un relais, un dispositif de mesure, est géométriquement déformable. Il possède  $j$  degrés de libertés, caractérisés par  $j$  coordonnées généralisées  $x_m$  ( $m=1, \dots, j$ ). Il peut s'agir d'un angle ou d'un déplacement linéaire.

**Rq** : les tensions, les courants et les flux sont liés par des équations qui s'interagissent entre eux.

#### 1.5. Caractéristiques des machines tournantes

Les caractéristiques des machines électriques sont d'un intérêt fondamental pour l'utilisateur. Pour l'utilisateur, la machine électrique ne constitue qu'une partie d'un système plus large, par exemple, pour une machine motrice : Alimentation - Machine - Charge - Régulations (vitesse, tension) - Protections ... Dans un tel contexte, il est intéressant de considérer la machine électrique comme une boîte noire possédant des entrées et des sorties liées par des relations qui sont caractéristiques de la machine. Les relations utiles dépendent du problème étudié. Elles peuvent être formulées sous forme :

- de systèmes d'équations différentielles (linéaires ou non) pour l'étude des phénomènes dynamiques, de la stabilité, de la régulation.
- d'équations algébriques réelles ou complexes, linéaires ou non, pour l'étude des fonctionnements en régime.
- de relations vectorielles entre phaseurs pour le fonctionnement en régime des machines à courant alternatif.
- de courbes caractéristiques (mesurées ou prédéterminées) liant les grandeurs intéressantes pour l'utilisateur et paramétrées par des grandeurs de réglage.

Il faut être sensibilisé au fait que toute application des machines électriques nécessite, comme toute application technique :

- un modèle adéquat suffisamment simple basé sur une formulation mathématique bien fondée.
- le choix d'une méthode d'analyse qui s'adapte avec le modèle présenté.
- une interprétation des résultats.

### 1.5.1. Moteurs

La caractéristique fondamentale d'un moteur est la courbe :

couple moteur = fonction(vitesse).  $C_m = f(N)$

Du couple moteur en fonction de la vitesse de rotation, pour une position donnée des organes de réglages du moteur. Suivant la forme de cette courbe, un moteur sera plus ou moins bien adapté à la charge qu'il entraîne. En effet, la charge est également définie par une relation caractéristique :

couple de charge = fonction(vitesse).  $C_r = f(N)$

Entre le couple résistant de l'engin et la vitesse de rotation de ce dernier.

Le fonctionnement de l'ensemble moteur + charge est fixé par la position relative de ces deux caractéristiques. Deux régimes distincts sont à considérer : la mise en vitesse (démarrage) et la vitesse normale (régime permanent).

#### a) Mise en vitesse = démarrage

Comme les phénomènes transitoires, liés au comportement mécanique de l'ensemble moteur+charge, ont des constantes de temps d'ordre de grandeur plus élevé que les phénomènes transitoires électriques liés à l'établissement du flux, on peut supposer le régime électrique établi dans la plupart des cas :  $(\tau_{th} > \tau_{mec} > \tau_{em} > \tau_e)$

A l'instant initial de la mise sous tension, il faut donc que le couple moteur de démarrage soit plus grand que le couple résistant initial.  $C_{md} > C_{ri}$ .

faute de quoi, l'ensemble ne démarrera jamais. Par contre, pour éviter une accélération trop brutale, il ne faut pas que l'écart entre ces deux couples soit trop grand.

La différence entre le couple moteur et le couple résistant est appelé couple accélérateur et on a :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Relation dans laquelle  $J$  représente le moment d'inertie de l'ensemble moteur et engin entraîné. Il faut que la vitesse de régime soit atteinte en un temps suffisamment court. On ne peut en effet admettre, dans l'industrie que le démarrage d'un engin dont on a besoin dure par exemple 1/4 h. D'autre part, dans le cas du moteur asynchrone par exemple, pour lequel le courant de démarrage atteint 5 à 6 fois la valeur du courant nominal, on risquerait d'atteindre un échauffement excessif et donc dangereux du moteur.

Pour déterminer la durée du démarrage, séparons les variables :

$$\int_0^{\Omega_n} \frac{d\Omega_r}{C_m - C_r} = \frac{1}{J} \int_0^{td} dt = \frac{td}{J}$$

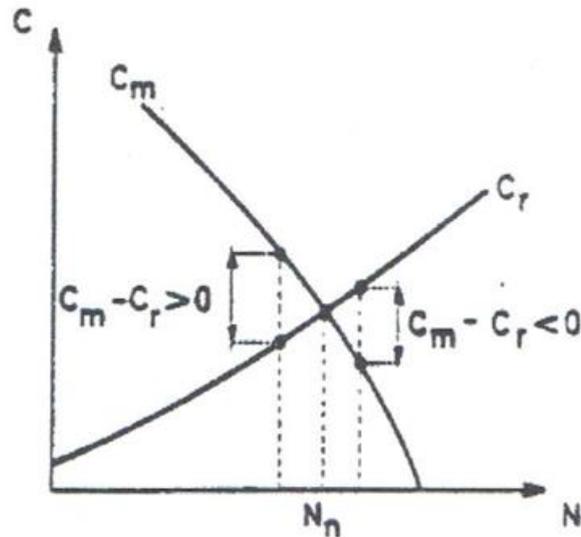
En général, la forme des caractéristiques Couple/Vitesse est assez difficile à exprimer analytiquement et on procède par intégration graphique ou numérique.

La forme de la courbe  $C_m(N)$  peut varier, en cours de démarrage, par actions sur les organes de réglage extérieurs.

### **b. Vitesse normale = régime permanent**

La vitesse de régime est atteinte lorsque  $J \frac{d\Omega}{dt} = 0$  c'est à dire  $C_m = C_r$  (état d'équilibre).

Une fois la vitesse normale est atteinte, elle doit se maintenir même si des légères modifications de fonctionnement viennent à se produire. L'équilibre doit être stable. Si la vitesse tend à croître, il faut que  $C_m - C_r$  soit négatif et inversement, figure (1).



Figure(1) : point de fonctionnement et stabilité d'un système (moteur+charge)

Si le système est instable, deux cas peuvent se présenter, soit un emballement du moteur (voir moteur série) :  $C_m > C_r$  ; l'ensemble accélère dans le sens de  $C_m$ .

soit, lorsqu'on augmente le couple résistant jusqu'à une valeur où les deux courbes n'ont plus d'intersection, calage et l'ensemble moteur + charge ralentit jusqu'à l'arrêt complet :  $C_m < C_r$  .

### 1.5.2. Génératrices

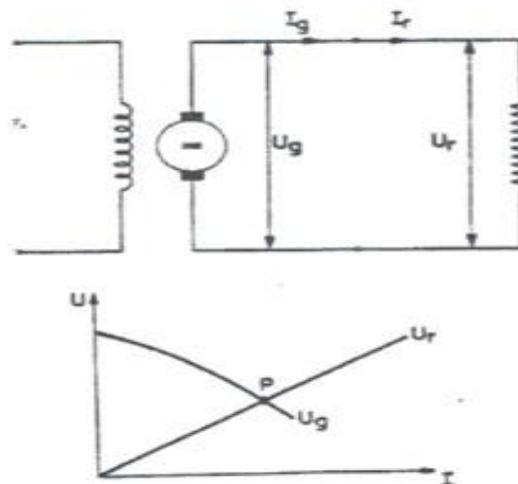
Dans ce cas, la caractéristique fondamentale pour l'utilisateur est la caractéristique externe.

$U_g = f(I)$  pour un courant d'excitation  $i_e$  et vitesse  $N$  cts.

En effet, le circuit de consommation est lui aussi caractérisé par une courbe :  $U_r = f(I)$

Le point **P** de la figure (2) représente le point de fonctionnement pour lequel :

$$U_g = U_r \text{ et } I_g = I_r$$



Figure(2) : point de fonctionnement (génératrice-réseau)

Ce point de fonctionnement sera stable si, quand  $I$  varie, la différence de potentiel  $U_g - U_r$  est telle que le système revient à son état initial. Par exemple, si  $I$  augmente, il faut que :  $U_g < U_r$  de manière à faire diminuer le courant.

Du point de vue mécanique, la stabilité des génératrices est un cas particulier de la stabilité mécanique des ensembles moteur + engin entraîné, la génératrice étant dans ce cas l'engin entraîné.

### 1.6. Les variateurs de vitesse

Un variateur de vitesse est un appareil électronique qui permet la commande et le contrôle de la vitesse d'un moteur électrique. Le choix du variateur est en fonction du moteur utilisé.



#### 1.6.1. Intérêt du variateur

L'utilisation du variateur permet:

- De limiter le couple moteur à une valeur prédéterminée et de supprimer les risques d'endommagement de matériel.
- La réduction de l'intensité au démarrage.
- De travailler sur toute la gamme de vitesse avec rendement énergétique acceptable.

#### 1.6.2. Critères de choix d'un variateur

Le variateur doit être choisi pour:

- vaincre le couple résistant de la machine entraînée dans toute la plage de vitesse utilisée,
- fournir le couple accélérateur nécessaire,
- fournir le couple de freinage éventuellement nécessaire pour décélérer rapidement,
- respecter la gamme de vitesse imposée par le procédé.

Les caractéristiques déterminantes intervenant dans le choix d'un variateur sont:

##### \* La précision

La précision s'exprimant en % de la vitesse affichée est l'écart maximal admissible par rapport à la vitesse de consigne. Cette précision s'étend donc sur toute la gamme de vitesse.

La précision de vitesse dépend du type de lecture de la vitesse.

##### \* La gamme de vitesse

La gamme de vitesse est le rapport entre la vitesse maximale et la vitesse minimale de fonctionnement souhaité. Si on demande à un variateur une gamme de vitesse trop importante par rapport à son emploi normal, sa précision se dégrade. Le variateur doit posséder une gamme de vitesse supérieure à celle que réclame l'application.

### \* Les quadrants de fonctionnement

L'emploi d'un variateur électronique n'exclut pas d'utiliser des moyens conventionnels, mais l'électronique de puissance permet de réaliser les freinages et les inversions de sens de rotation avec souplesse, rapidité, précision et aux moindres frais en consommation d'énergie.

Pour un bon fonctionnement de l'ensemble à mouvoir, il est indispensable de choisir un appareil fonctionnant dans les quadrants désirés.

### \* La puissance

La puissance d'un variateur est définie par le besoin mécanique de l'application (en régime permanent comme en régime transitoire).

Le calcul de la puissance concerne aussi le moteur qui est le premier maillon à définir. La puissance du moto-variateur est définie en fonction:

- de la puissance maximale nécessaire au fonctionnement de la machine en régime établi. Le couple délivré doit être supérieur au couple résistant demandé par la mécanique, ceci sur toute la plage de vitesse.
- du couple de démarrage nécessaire pour la mise en vitesse de la machine dans le temps souhaité. Le couple maximal que peut délivrer l'ensemble moto-variateur doit être supérieur au couple de démarrage.
- du diagramme de charge en cas de fonctionnement cyclique échauffement très variable dans le temps suivant les phases du mouvement (accélération, régime établi, décélération).

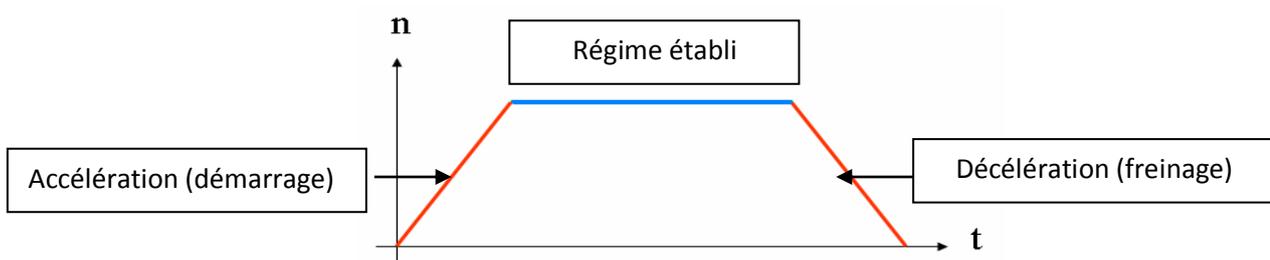


Figure (3) : les phases de mouvements d'un système dynamique

### 1.7. Les convertisseurs en électronique de puissance

Avec le développement de l'automatique de l'électronique de puissance, des convertisseurs statiques utilisant des composants électroniques en commutation, sont apparus. Les avantages de ces convertisseurs sont nombreux :

- Contrôle et même régulation électronique possible du transfert de puissance.
- Système moins lourd et moins encombrant,

- Excellent rendement (plus de 95 %).
- Facilité de mise œuvre grâce à l'automatisation.
- Protections de plus en plus efficaces,
- Cout relatif en baisse grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants.

Les convertisseurs sont Alors :

- **Le hacheur** réalise une conversion **continu-continu**, de type  $(U) \rightarrow (U')$ .
- **Le redresseur** à diodes réalise une conversion non réversible et non commandée **alternatif-continu**, du type  $(V, f) \rightarrow (U)$ .
- Le redresseur à thyristors réalise une conversion commandée alternatif- continu du type  $(V, f) \rightarrow (U')$ .
- **L'onduleur** autonome réalise une conversion réversible **continu - alternatif**, soit de type  $(U) \rightarrow (V', f)$ .
- **Le gradateur** à thyristors ou à triac remplace l'autotransformateur. La conversion est **alternatif- alternatif** de type  $(V, f) \rightarrow (V', f)$ .

### 1.8. Les constructeurs

Les applications sont très vastes de la robotique au TGV, d'où l'existence d'une multitude de variateurs de vitesses.

On peut citer les fabricants suivant : Schneider, Siémsens, Alsthom, Mitsubishi, Texas Instruments, ...

### 1.9. Récapitulation : intérêt des systèmes d'entraînement à vitesse variable

Les intérêts économiques et techniques d'utilisation des systèmes d'entraînement à vitesse variable sont :

Economiques :

- ✓ Amélioration de la qualité du produit et la capacité de production.
- ✓ Réduire les coûts de production via une réduction de la facture énergétique.

Techniques :

- ✓ L'atténuation les pics des courants appelés par les moteurs électriques au moment du démarrage.
- ✓ La diminution de l'absorption de la puissance d'alimentation lors de démarrage direct des moteurs.
- ✓ Un démarrage bien contrôlé, en commandant directement le couple dans les régimes transitoires via des techniques de commande bien adaptés.
- ✓ La réduction des vibrations et du bruit des machines via des techniques spécialisé.

- ✓ L'allongement de la durée de vie des systèmes d'entraînement à vitesse variable. En effet, les démarrages directs sur le réseau provoquent des échauffements importants du rotor du moteur qui conduisent à des dilatations différentielles des parties constitutives du rotor.
- ✓ L'isolation du moteur du réseau, lui évitant ainsi un certain nombre d'inconvénients tel que le déséquilibre des tensions qui provoque des échauffements et des couples parasites.
- ✓ Permet de contrôler l'un ou plusieurs des paramètres suivants :
  - une vitesse (linéaire ou angulaire),
  - un couple ou un effort de traction,
  - une position,
  - une accélération ou un ralentissement,
  - un débit,
  - une pression,
  - une température ;
  - ... etc

**Bibliographie :**

1. Pinard, Michel : « La commande électronique des machines » (2013, Dunod, Paris).
2. Guy Séguier, Francis Labrique, Philippe Delarue : « Electronique de puissance. Structures, commandes, applications ». 10<sup>ème</sup> édition, cours et exercices –Master et écoles d'ingénieurs, Dunod, Paris, 2015.
3. Jean BONAL « Entraînement à vitesse variable. Des machines à compression de fluide », Schneider. 2008
4. Différents Sites internet : cours sitelec.