

Alimentation et commande de la machine à courant continu

1. Organisation de la machine

Dans l'organisation d'une machine à courant continu, on peut distinguer les principaux éléments suivants :

- ◆ les pôles inducteurs avec leurs enroulements ou leurs aimants, placés généralement sur le
- ◆ stator (partie fixe)
- ◆ l'induit, dont les différentes voies d'enroulements sont connectées au collecteur,
- ◆ l'ensemble étant généralement placé sur le rotor (partie tournante)
- ◆ les enroulements de compensation de la réaction magnétique d'induit
- ◆ les enroulements de commutation des voies d'enroulement
- ◆ les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sousensembles

1.1. Pôles inducteurs

Les pôles inducteurs ont pour rôle de créer le flux inducteur dans la machine. Ce flux est généré soit par des enroulements, soit par des aimants. Ce flux est canalisé dans la machine par des matériaux ferromagnétiques (parties hachurées fig.1). Ce flux étant constant dans la partie portant les pôles inducteurs et dans les pôles inducteurs eux-mêmes (hachures ///), le matériau ferromagnétique peut donc être massif. Il est tout de même nécessaire de feuilletter les pôles inducteurs au niveau de l'entrefer, car des variations locales de flux apparaissent du fait des encoches portant les conducteurs d'induit au rotor et des encoches portant les enroulements de compensation au stator. La réluctance n'est donc pas constante tout au long de l'entrefer : elle varie avec la position angulaire du rotor dans le stator, ce qui explique les variations locales de

flux. Pour des raisons pratiques de fabrication, il est possible que le stator soit entièrement feuilleté. Le flux inducteur traverse le rotor avec des lignes de champ fixe (hachures \\\) circulant entre deux pôles inducteurs : ces lignes de champ sont donc fixes par rapport à l'inducteur. Le rotor tournant dans ce flux constant voit donc un champ magnétique variable le traverser : il sera par conséquent feuilleté dans le sens des lignes de champ. La figure 1 présente les pôles inducteurs dans une machine à une paire de pôles.

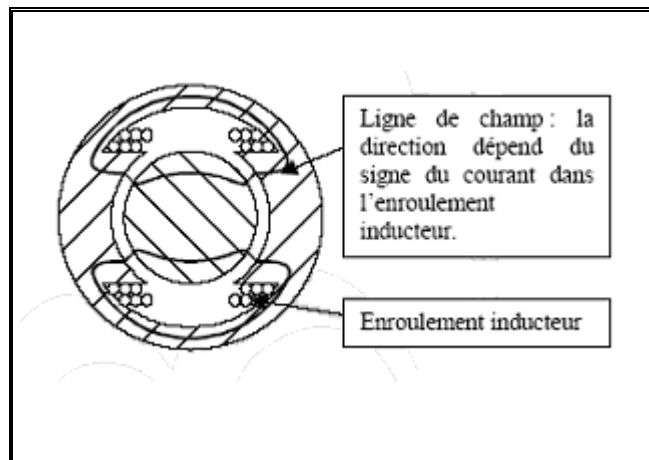


Figure 1 : Pôles inducteurs dans une machine à une paire de pôles.

1.2. Induit

Les enroulements d'induit sont placés sur le rotor, et sont reliés au collecteur de façon à ce que tous les enroulements sous un même pôle soient parcourus par un courant de même sens. Le positionnement des balais sur le collecteur doit permettre une quadrature entre les forces magnétomotrices créées par le rotor et celles créées par le stator sur la machine bipolaire équivalente.

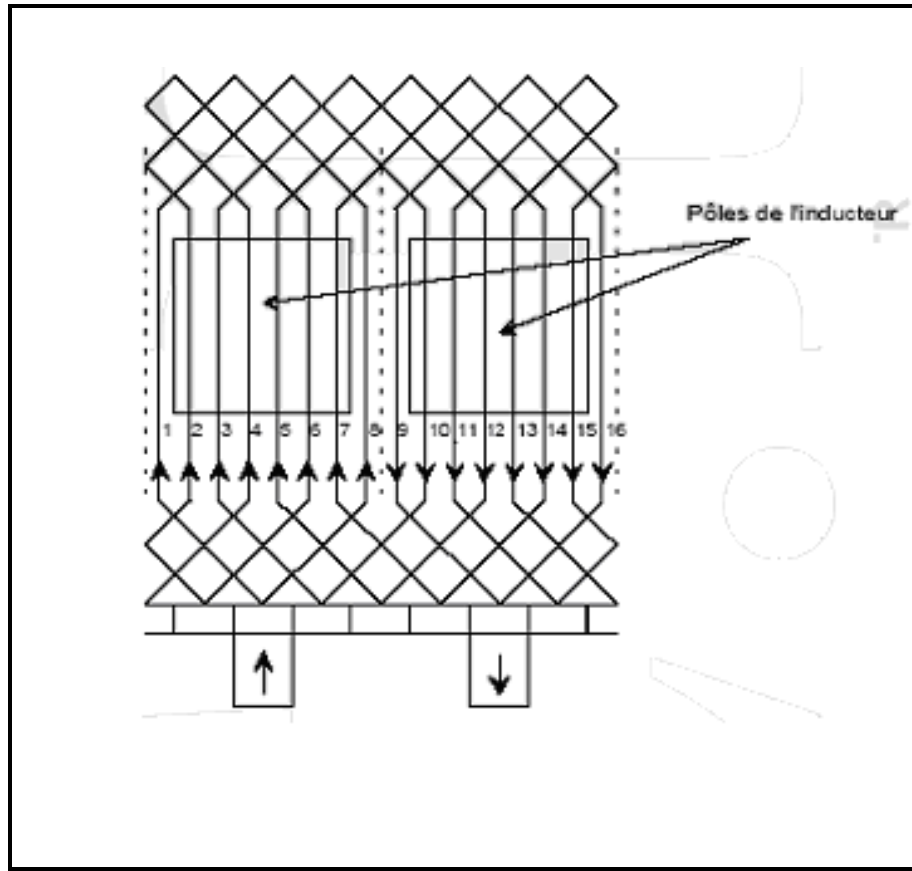


Figure 2 : enroulement d'induit

1.3. Enroulement de compensation magnétique d'induit

Le passage du courant dans les enroulements d'induit provoque l'apparition d'un champ magnétique transversal ayant pour conséquence de déformer les lignes de champs dans la machine. Ceci entraîne généralement une diminution du flux total.

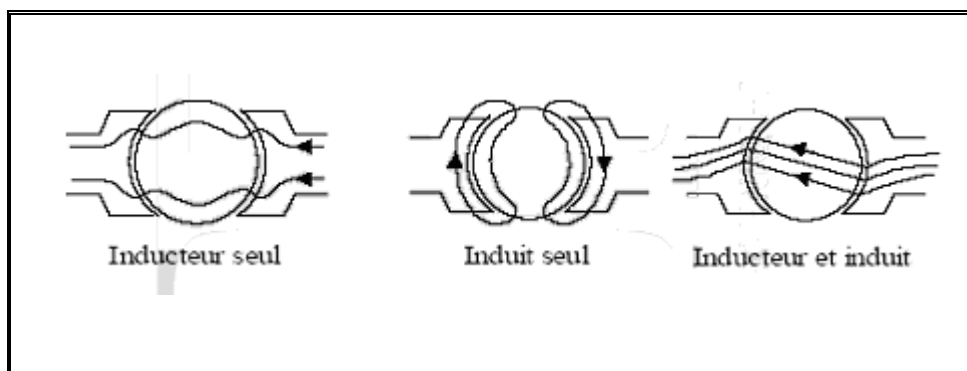


Figure 3 : Réaction magnétique de l'induit

Pour réduire ce phénomène, on place, dans des encoches creusées dans les épanouissements polaires de l'inducteur, des enroulements parcourus par le courant d'induit, ayant pour rôle de créer un champ antagoniste au champ transversal de l'induit (fig. 4).

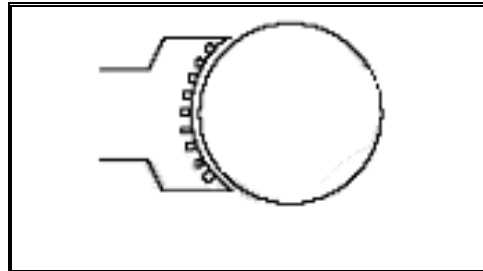


Figure 4 : Enroulement de compensation magnétique de l'induit

1.4. Pôles auxiliaires de commutation (PAC)

Lorsqu'une section (ensemble de conducteurs logés dans des encoches distantes d'un pas polaire : $360^\circ / \text{nombre de paires de pôles}$) passe dans le plan neutre (endroit où la polarité magnétique change de signe dans l'entrefer), le courant doit s'inverser. Lorsque le balai court-circuite la section, on peut écrire : $rI + L \frac{dI}{dt} = 0$. Donc, sans apport d'une force électromotrice extérieure, il est impossible que le courant s'inverse dans la section. Sur les machines de puissance supérieure à quelques kW, il est nécessaire de générer cette f.e.m. de commutation (e_c) à l'aide d'un champ extérieur, créé à l'aide de pôles auxiliaires de commutation.

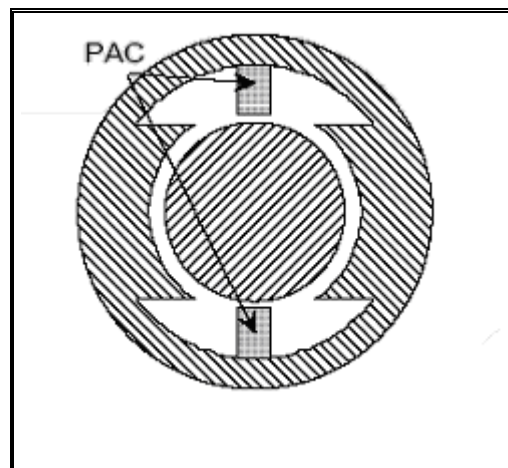


Figure 5 : Pôles auxiliaires de commutation (PAC)

Si T est le temps durant lequel la section est en court circuit et que l'on néglige R , on peut écrire : $e_c = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta I}{T} = L \frac{I}{T}$. On constate que cette f.e.m. est proportionnelle au courant et à la vitesse de rotation. La f.e.m. induite par la présence des PACs étant, elle aussi, proportionnelle à la vitesse de rotation, il suffit pour assurer une bonne commutation que le nombre de spires des PACs soit bien calculé, et que le courant qui les traverse soit proportionnel au courant d'induit.

1.5. Organes mécaniques

Le stator auto-porteur reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux suivant le type de charge (axiale ou radiale). Les pôles inducteurs sont en général vissés sur le stator (ils peuvent aussi en faire partie intégrante). Un ventilateur est placé en bout d'arbre, sur le rotor, pour le refroidissement de la machine. Il peut être complété par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes. Le collecteur, l'ensemble porte-balais et les balais se situent de l'autre côté de la machine (fig. 6).

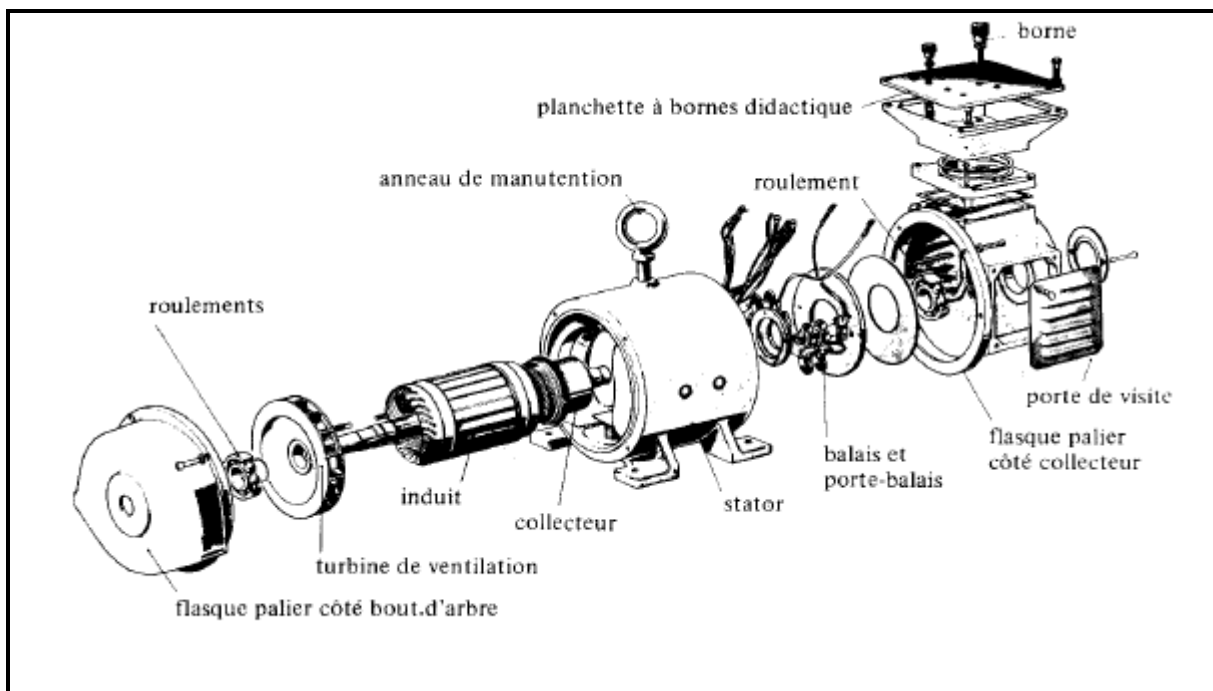


Figure 6 : Différents constituants d'un moteur à courant continu (Leroy Somer)

Vue en coupe

Sur cette vue écorchée (fig. 7), on peut aisément voir :

- ◆ L'induit (1) avec ses encoches recevant les conducteurs en cuivre (absents ici) perforés de manière axiale pour son refroidissement.
- ◆ Le collecteur (2) et l'ensemble porte-balais/balais (3) ainsi que la trappe de visite pour la maintenance (4).
- ◆ Les pôles inducteurs feuilletés (5) vissés sur l'induit.
- ◆ La moto ventilation (6).
- ◆ Le système de fixation par pattes (7).

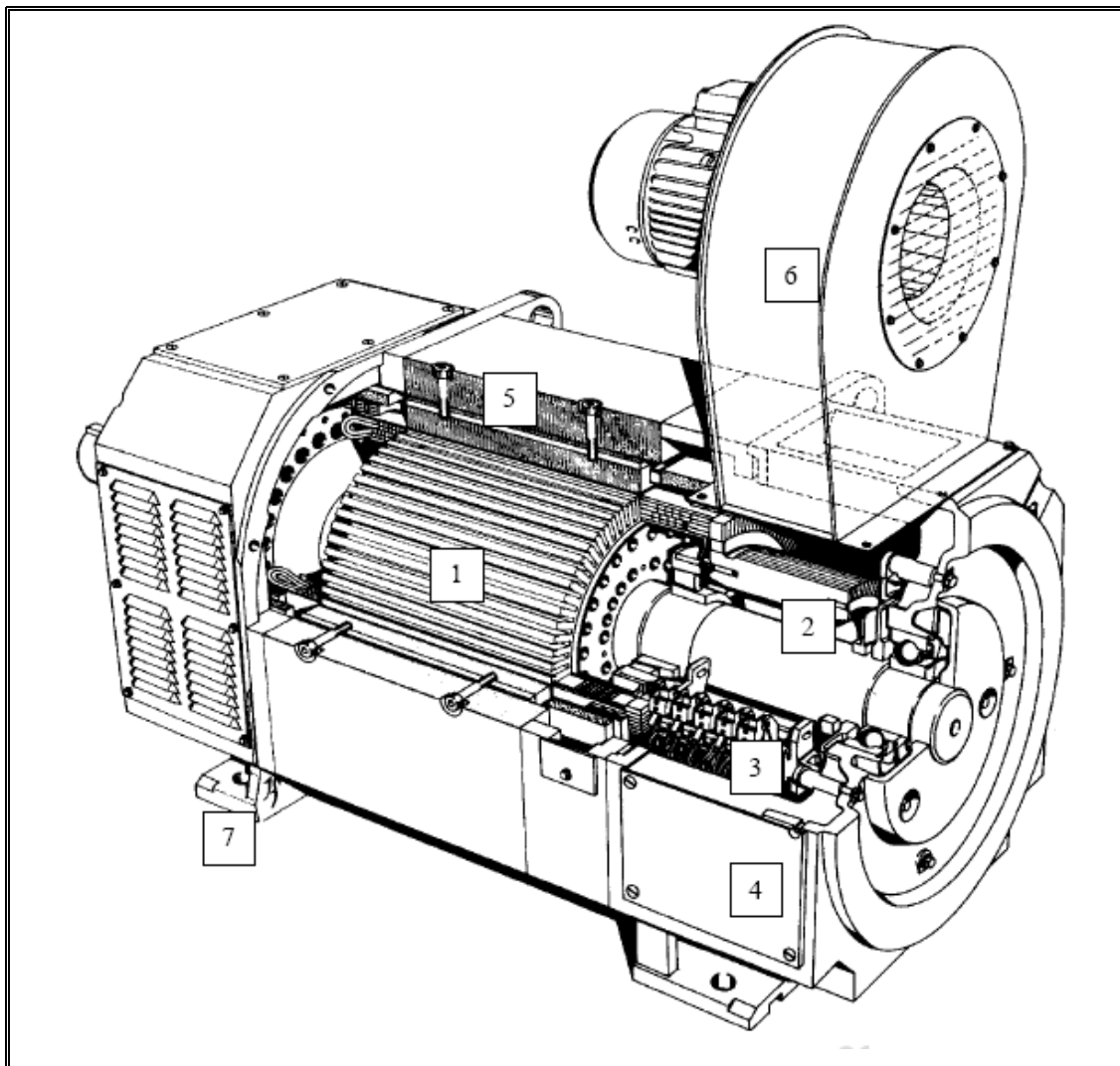


Figure 7 : Vue en coupe d'un moteur à courant continu de forte puissance

2. Caractéristiques

2.1. Caractéristiques en régime permanent

Les équations de fonctionnement de la machine à courant continu en régime établi sont :

$$\begin{cases} U=E+R I \\ E=k_e \Phi \Omega \\ C_e=k_e \Phi I \end{cases} \quad (1)$$

Avec :

- U : tension aux bornes de l'induit
- I : courant dans l'induit
- R : résistance de l'induit (et éventuellement des pôles auxiliaires)
- E : f.é.m de la machine
- U_d : tension d'alimentation de l'inducteur
- R_d : résistance du bobinage inducteur
- Ω : vitesse angulaire de rotation (en rad/s)
- n : fréquence de rotation (en tr/s ou en tr/min)
- k : Constante de la machine (liée au nombre de pôles, au nombre de voies d'enroulement et au nombre de conducteurs actifs à la périphérie de l'induit).

La première relation du système (1) n'est autre que l'expression de la loi d'Ohm pour le circuit d'induit, les deux suivantes peuvent être établies directement mais elles traduisent la conservation de la puissance pour l'induit siège de la conversion :

$$P=C_e \Omega=E I=k_e \Phi \Omega I \quad (2)$$

On déduit la caractéristique couple vitesse :

$$\Omega = \frac{U}{k_e \Phi} \frac{R}{(k_e \Phi)^2} C_e \quad (3)$$

Les caractéristiques (Figure 8 a) sont donc des droites paramétrées par la tension d'alimentation d'induit (zone I) jusqu'à la tension d'alimentation maximale. Il est toutefois possible d'envisager

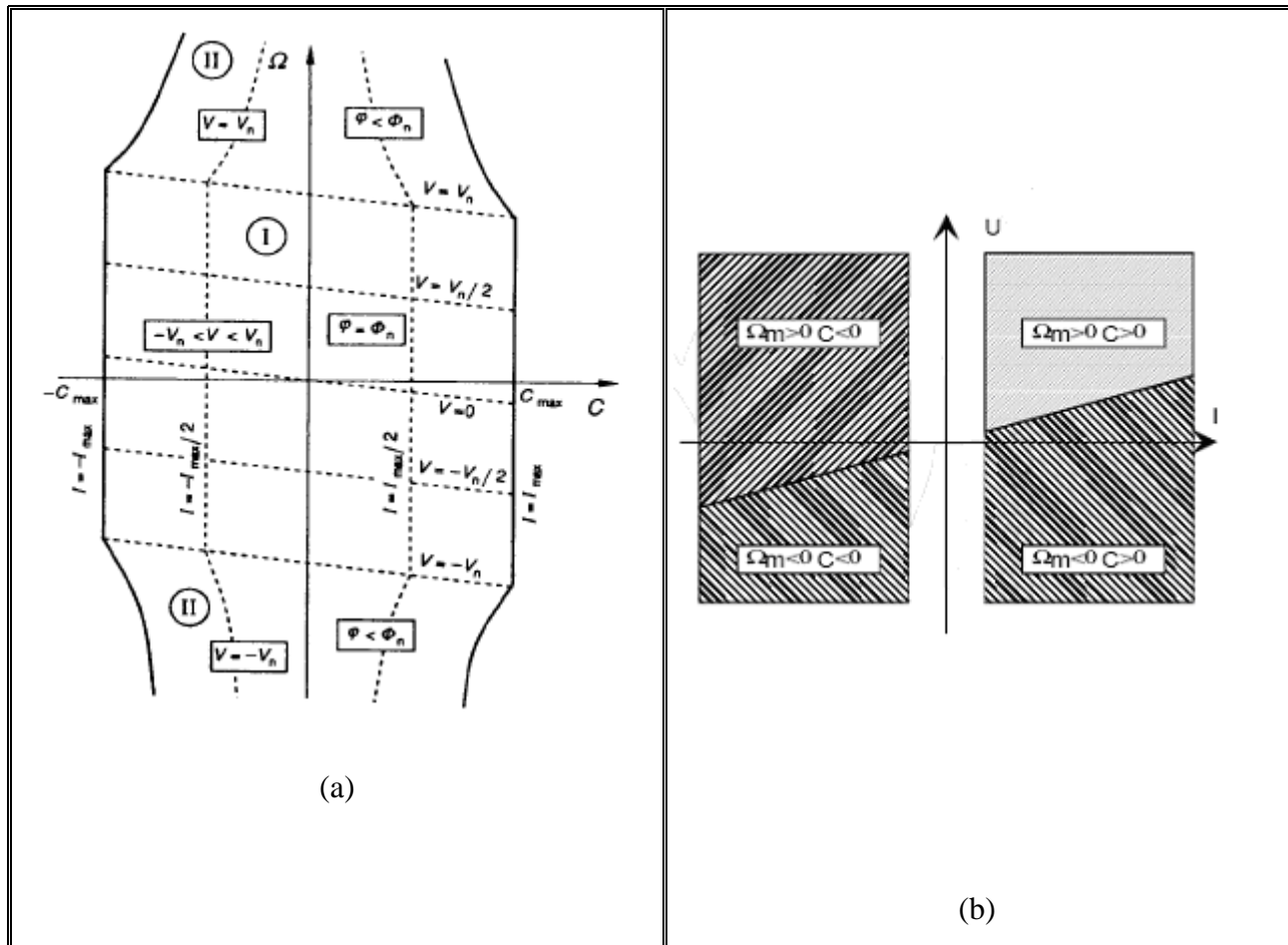


Figure 8 : Caractéristiques de la machine à courant continu

une vitesse plus élevée en défluxant la machine (diminution du courant inducteur), si la caractéristique de la charge entraînée le permet : en effet le couple maximal disponible diminue d'autant (zone II). On distinguera sur cette caractéristique 4 zones de fonctionnement dépendant du signe du couple et de la vitesse. On parlera de quadrant de fonctionnement. Les quadrants I et III traduisent un fonctionnement de la machine en moteur dans les deux sens de rotation, alors

que les quadrants II et IV traduisent un fonctionnement de la machine en génératrice dans les deux sens de rotation. De même, si l'on se place sur un plan électrique (Figure 8 b), il est possible de définir, en fonction des signes des grandeurs électriques d'alimentation (quadrant électrique), les signes des grandeurs mécaniques correspondants (quadrant mécanique). Il faut néanmoins remarquer que si l'on tient compte de la résistance d'induit et des frottements secs, les quadrants de fonctionnement électrique et mécanique ne se superposent pas. **Le nombre de quadrants de fonctionnement est exclusivement limité par le type de convertisseur alimentant la machine.**

2.2. Caractéristique en régime dynamique

Les équations de fonctionnement de la machine à courant continu en régime dynamique sont :

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t, \Omega, \phi) \quad (4)$$

$$e(t, \Omega, \phi) = k_e \phi \Omega(t) = k_t i(t) \quad (5)$$

$$C_e(t) = k_e \phi i(t) = k_t \Omega(t) \quad (6)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e(t) - C_r(t) \quad (7)$$

Le flux d'excitation est supposé constant.

Ces équations deviennent, avec S opérateur de Laplace :

$$U(S) = R(1 + \tau_e S) I(S) + K_t \Omega(S) \quad (8)$$

$$f(1 + \tau_m S) \Omega(S) = K_t I(S) - C_r(S) \quad (9)$$

Soit :

$$I(S) = \frac{1}{(1 + \tau_e S)} (U(S) - K_t \Omega(S)) \quad (10)$$

$$\Omega(S) = \frac{1}{(1 + \tau_m S)} (K_t I(S) - C_r(S)) \quad (11)$$

avec :

$\tau_e = \frac{L}{R}$: Constante de temps électrique de l'induit

$\tau_m = \frac{J}{f}$: Constante de temps mécanique de la machine

La figure 9 présente un schéma bloc permettant la simulation de la machine à courant continu.

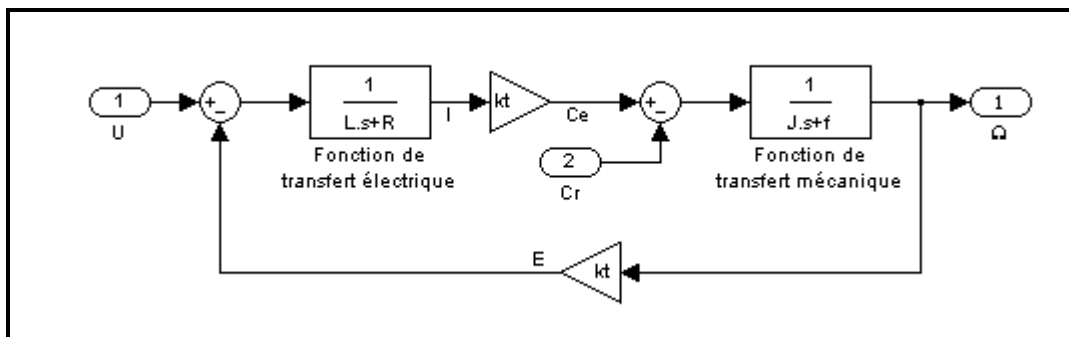


Figure 9 : Schéma block de la machine à courant continu.

Pour simuler la machine , on implante le modèle de la figure 9 sur le logiciel Matlab Simulink.

La machine utilisée a les caractéristiques suivantes :

- ◆ Puissance nominale : $P = 5 \text{ Cv}$;
- ◆ Tension nominale : $U = 240 \text{ V}$;

- ◆ Courant nominal : $I = 18.2 \text{ A}$;
- ◆ Vitesse nominale : $n = 1220 \text{ tr/mn}$;
- ◆ Résistance d'induit : $R = 0.5 \Omega$;
- ◆ Inductance d'induit : $L = 10 \text{ mH}$;
- ◆ Moment d'inertie : $J = 0.05 \text{ kgm}^2$;
- ◆ Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.002 \text{ Nm/rad/s}$

Les conditions de la simulation sont : La machine étant à l'arrêt le flux établi à sa valeur nominale, on applique à l'induit la tension nominale à l'instant 0.2 s. la machine démarre à vide. On applique un échelon de couple résistant à l'instant 1.2 s. La figure 10 montre les résultats de cette simulation.

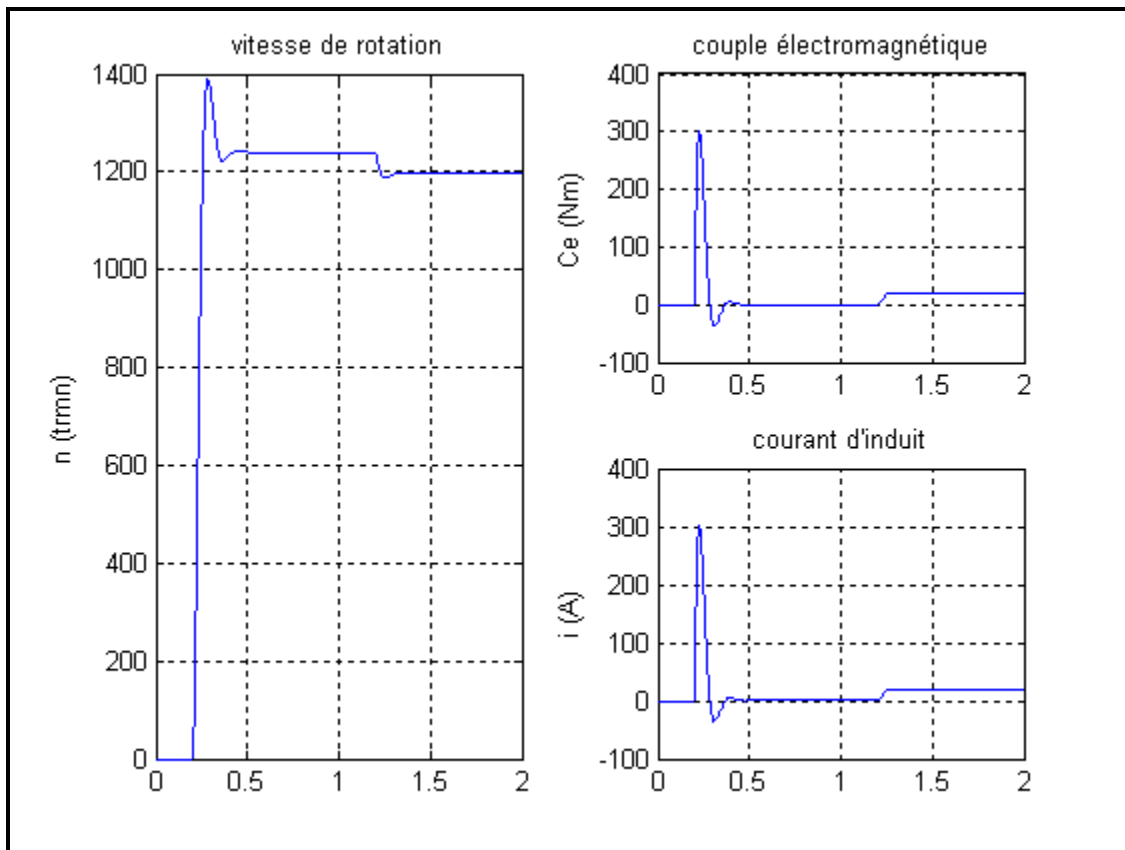


Figure 10 : Résultats de simulation de la réponse de la machine à un échelon de la tension nominale.

On remarque un important pic de courant de démarrage. Ce pic est très dangereux aussi bien sur la machine que sur l'installation. Pour limiter ce courant, il faut :

- ◆ Soit effectuer un démarrage en douceur avec une tension qui augmente progressivement (en rampe par exemple) en utilisant un convertisseur statique.
- ◆ Soit faire un démarrage rhéostatique manuel ou automatique à plusieurs temps.

Démarrage automatique

Il s'agit de placer en série avec l'induit un démarreur constitué d'une série de résistances. La figure 11 présente un démarreur à trois résistances en série.

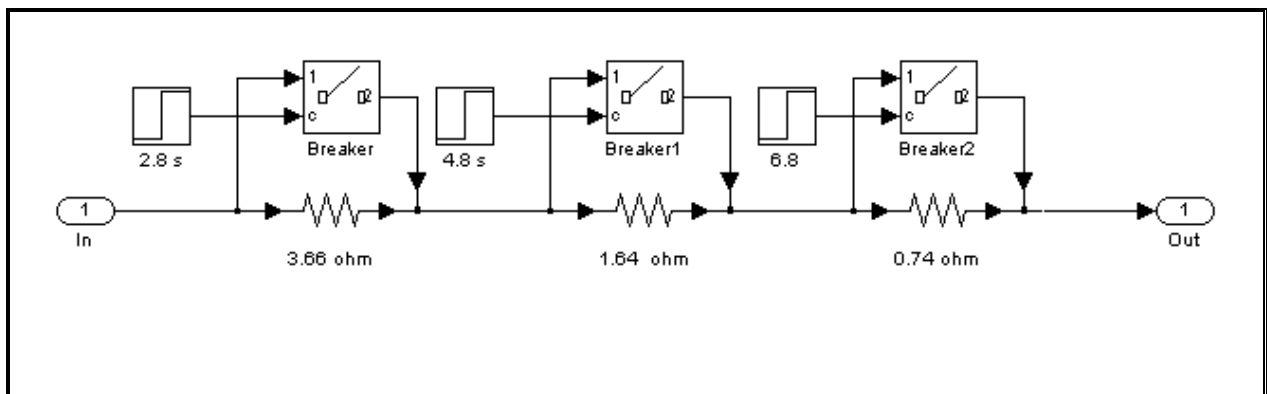


Figure 11 : Démarreur à trois résistances en série

Au moment de démarrage, les trois résistances sont montées en série avec l'induit. Ces résistances sont ensuite court-circuitées successivement une à une aux instants 2,8s, 4,8s et 6,8s. L'élimination des résistances se fait grâce à des contacts temporisés. La figure 12 montre un schéma complet du démarrage par élimination de résistances. La figure 13 présente les résultats de simulation de ce démarrage. On remarque que les pics de courant sont considérablement atténués.

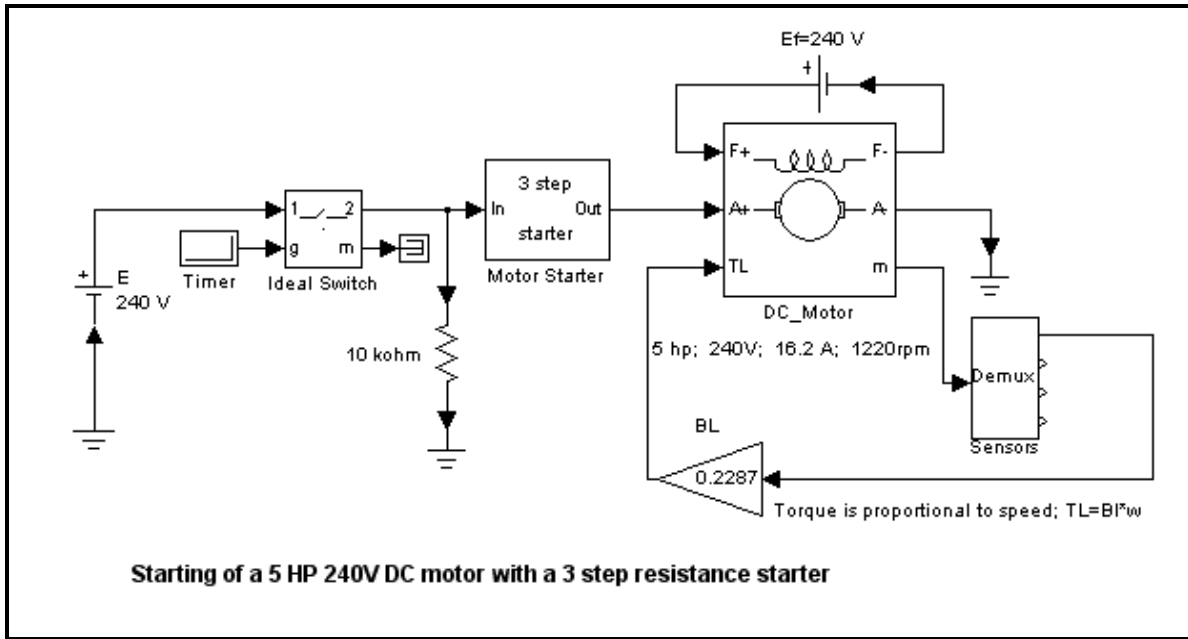


Figure 12 : Démarrage par élimination de résistances

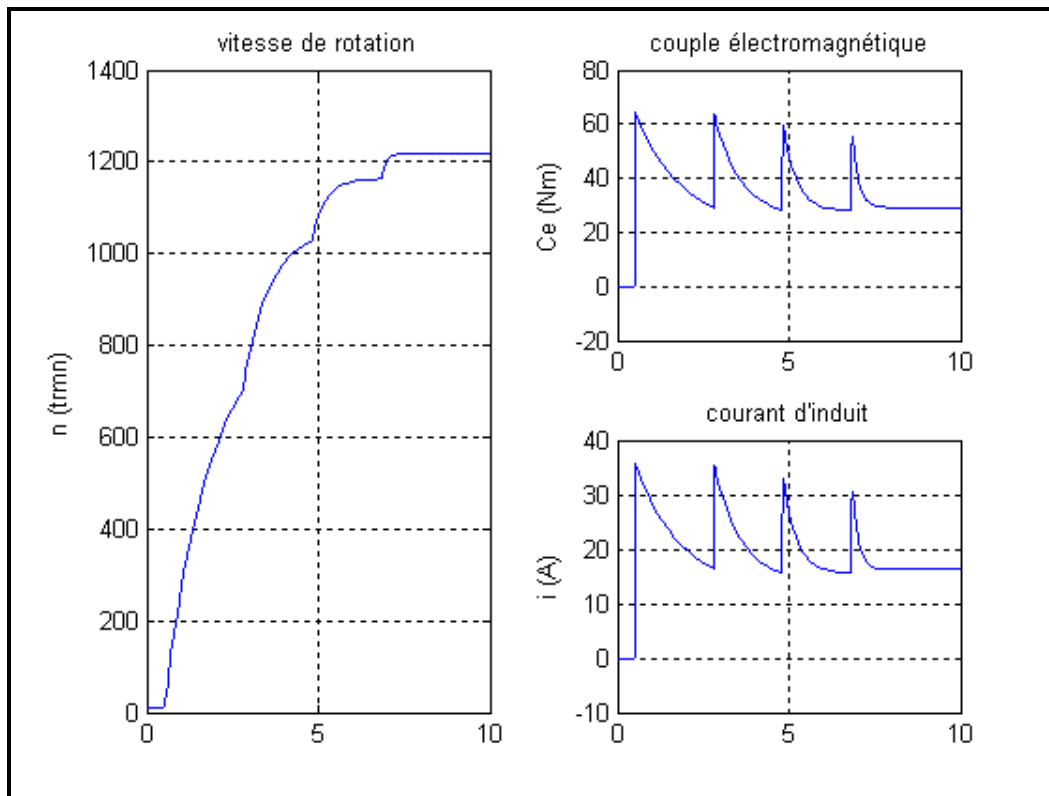


Figure 13 : Résultats de simulation du démarrage par élimination de résistances

3. Réglage en boucle ouverte de la vitesse d'une machine à courant continu

Dans la caractéristique couple vitesse donnée par l'expression (3), on distingue trois paramètres de réglage de la vitesse : R , Φ et U .

3.1. Réglage rhéostatique

On insère un rhéostat en série avec l'induit, l'ensemble est alimenté par une tension $U=U_n$ constante, le flux est également maintenu à sa valeur nominale.

Ce réglage est mauvais sur les plans :

- ◆ Technique : puisque les caractéristiques électromécaniques, $C_e(\Omega)$ sont de plus en plus série ; la chute de vitesse augmente avec la charge (caractérisée par le courant I)
- ◆ Economique : Les pertes par effet joule dans le rhéostat sont importantes et augmentent aux faibles vitesses.

3.2. Réglage par action sur le flux

Ce réglage est satisfaisant de point de vue technique, puisque la chute de vitesse avec la charge n'augmente pas de façon notable. Il est également satisfaisant de point de vue économique puisque le courant d'excitation, de l'ordre de 10% du courant nominal n'entraîne pas des pertes joules considérables.

Toutefois, il faut tenir compte des inconvénients suivants :

- ◆ Avec ce procédé, on ne peut qu'augmenter la vitesse par rapport à sa vitesse nominale
- ◆ Si le couple existant est constant ($C = k \Phi I = \text{constant}$) l'intensité I augmente quand le flux diminue, et le moteur risque de chauffer. Le moteur doit être dimensionné en conséquence.

3.3. Réglage par action sur la tension d'induit

Le flux inducteur est maintenu constant alors que l'induit est alimenté par une tension U variable à l'aide d'un convertisseur statique. La valeur de U ne pouvant que diminuer par rapport

à la valeur nominale U_n . Ce mode de réglage ne permet que la diminution de la vitesse par rapport à la valeur obtenue à vide.

Ce mode de réglage est bon sur le plan technique car d'un côté, les caractéristiques $C_e(\Omega)$ se déplacent parallèlement à elles même, et d'un autre, il offre beaucoup de souplesse, une grande gamme de réglage de la vitesse.

Il est également bon sur le plan économique car aucune énergie n'est gaspillée (absence de rhéostat).

4. Convertisseurs statiques

Pour permettre le réglage de vitesse par action sur la tension d'induit, il faut alimenter l'induit par un convertisseur statique.

4.1. Convertisseurs DC/DC ou hacheurs

[Convertisseurs DC/DC ou hacheurs](#)

4.2. Convertisseurs AC/DC ou redresseurs

[Convertisseurs AC/DC ou redresseurs](#)

5. Structures de régulation

Les structures de régulation sont choisies pour répondre à plusieurs critères :

- Réguler ou asservir la machine de façon que celle-ci impose à la charge la vitesse, la position ou le couple désiré.
- Protéger le système : par exemple
 - En contrôlant l'amplitude du courant (protection contre les surintensités),
 - En limitant les dérives de courant (di/dt) pour permettre la bonne commutation du collecteur même aux limites de fonctionnement,
 - En limitant les échauffements dus aux pertes joules.

5.1. Régulation à boucles convergentes

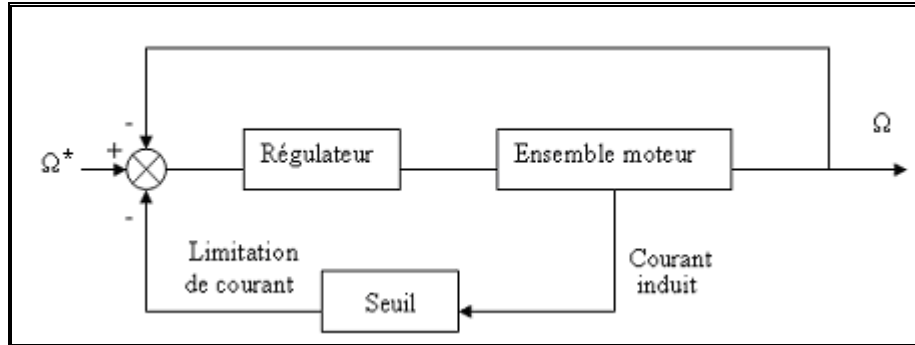


Figure 14 : Système de Régulation à boucles convergentes

Il existe un seul régulateur, pour la variable principale (généralement mécanique). Le seuil pour la variable auxiliaire (généralement électrique) reste bloqué tant que le courant d'induit ne dépasse pas sa valeur limite.

Avantages :

C'est une solution bon marché puisqu'il n'existe qu'un seul régulateur.

Inconvénients

- ◆ Le choix des paramètres du régulateur résulte d'un compromis, ce qui demande plus de travail pour ajuster les gains donc aussi du temps et de l'expérience.
- ◆ Les deux boucles (interne de courant et externe de vitesse) ne peuvent avoir l'une et l'autre la réponse optimale. Il existe une influence réciproque sur les réglages.
- ◆ Le transfert du mode régulation de vitesse au mode de courant est difficile.

5.2. Régulation à boucles parallèles

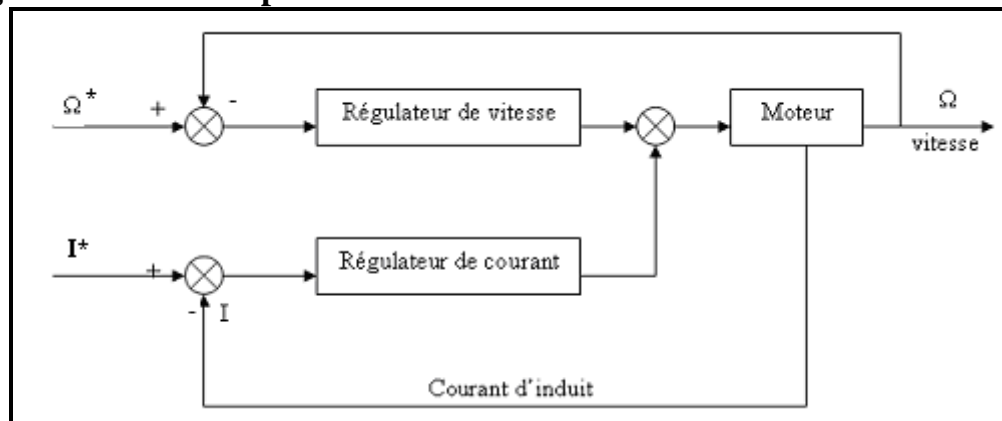


Figure 15 : Système de Régulation à boucles parallèles

Le régulateur de vitesse agit seul tant que $I_{\text{induit}} < I_{\text{limite}}$

Dès que $I_{\text{induit}} = I_{\text{limite}}$ le régulateur de vitesse est hors service et le régulateur de courant commute en service.

- Chaque variable sous contrôle correspond à un régulateur séparé, donc chaque boucle peut être réglée à l'optimum.
- Un seul régulateur fonctionne à tout instant.

5.3. Régulation en cascade

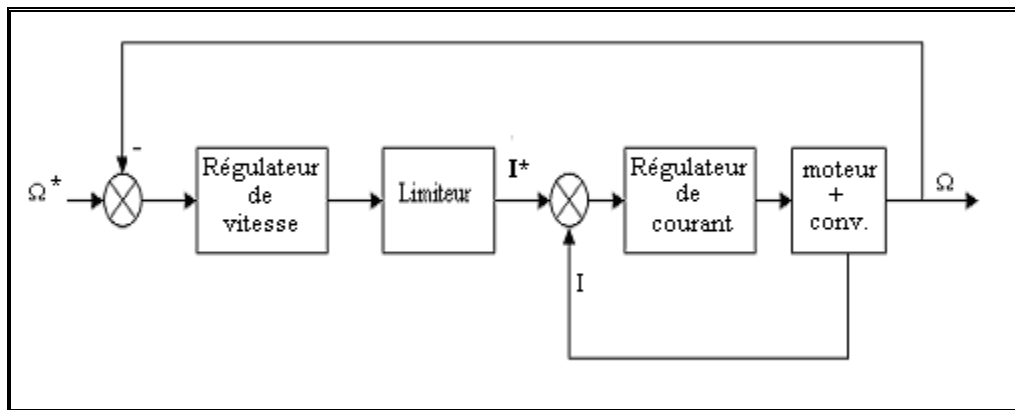


Figure 16 : Système de Régulation en cascade

- Elle comprend une régulation individuelle pour chaque variable à contrôler,
- La variable principale est réglée par la boucle extérieure,
- La sortie du régulateur de vitesse est l'entrée de la boucle interne (courant d'induit). Ainsi en limitant la sortie du régulateur de vitesse, nous limitons le courant de référence.
- La boucle extérieure est déterminée de sorte qu'elle soit au moins deux fois moins rapide que celle immédiatement intérieure.
- On ajuste successivement les régulateurs en partant de la boucle la plus interne.
- C'est le montage le plus utilisé

6. Asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu

6.1. Calcul du régulateur PI de vitesse

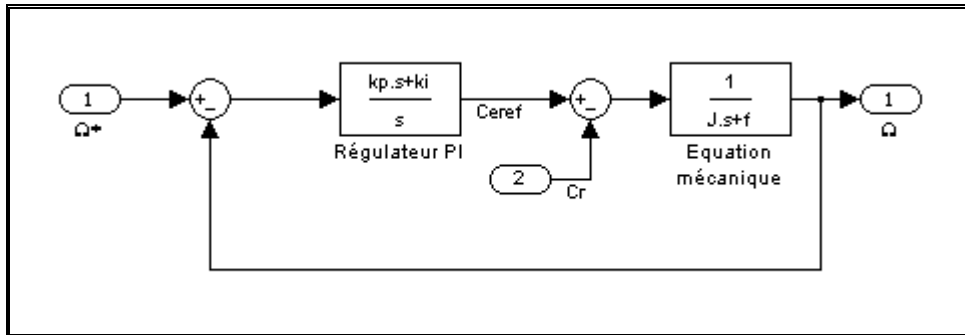


Figure 17 : Synoptique de la régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{\Omega(S)}{\Omega^*(S)} = \frac{\frac{k_p}{J}S + \frac{k_i}{J}}{S^2 + \frac{f+k_p}{J}S + \frac{k_i}{J}} \quad (12)$$

L'équation caractéristique peut se mettre sous la forme :

$$S^2 + \frac{f+k_p}{J}S + \frac{k_i}{J} = S^2 + 2\xi\omega_0 S + \omega_0^2 \quad (13)$$

avec :

- ◆ ξ : facteur d'amortissement
- ◆ ω_0 : pulsation propre du système

Les paramètres k_p et k_i du régulateur sont calculés de façon à répondre aux critères de performance désirés du système à savoir la stabilité, la rapidité, la précision

6.2. Régulateur de courant à hystérésis

Le régulateur à hystérésis (figure 18) permet de maintenir les variations du courant d'induit dans une bande de largeur h autour du courant de référence (figure 19). Soit :

$$I_{ref} - \frac{h}{2} \leq i \leq I_{ref} + \frac{h}{2}.$$

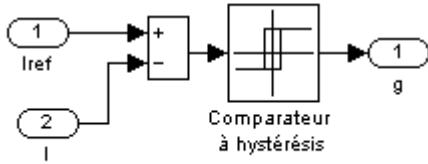


Figure 18 : Régulateur de courant à hystérésis

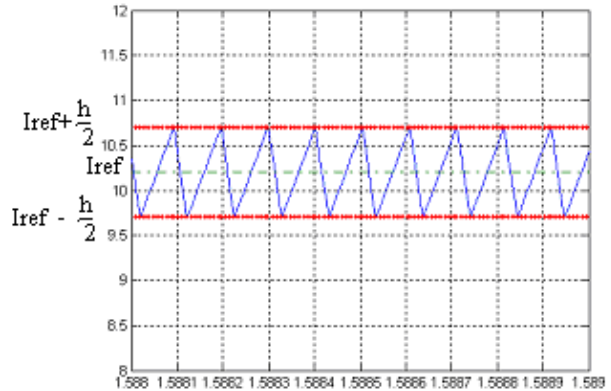


Figure 19 : Courant de référence et courant réel.

6.3. Asservissement de vitesse

La figure 20 montre le schéma de simulation sur matlab de l'asservissement de vitesse d'une machine à courant continu. La vitesse est contrôlée par un régulateur PI alors que le courant est contrôlé par un régulateur à hystérésis. La référence de courant est fournie par le régulateur de vitesse. Une saturation placée à la sortie du régulateur PI de vitesse a pour rôle de limiter le courant à une valeur admissible par la machine et le convertisseur.

L'amplificateur remplace, dans ce cas, le convertisseur statique de puissance.

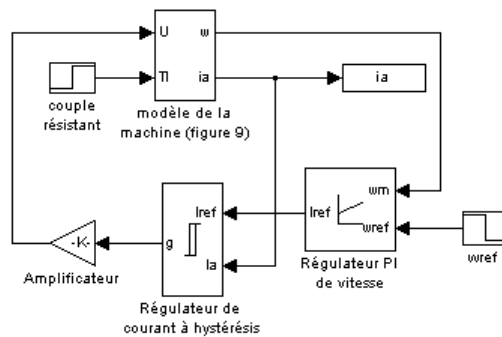
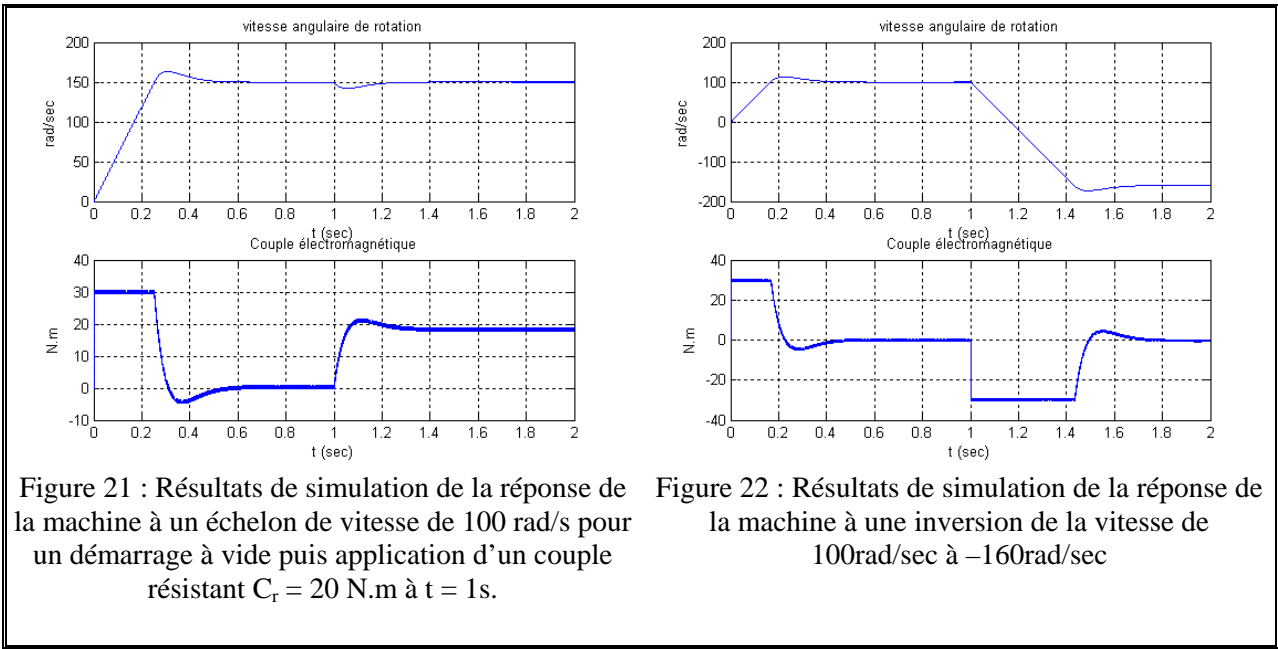
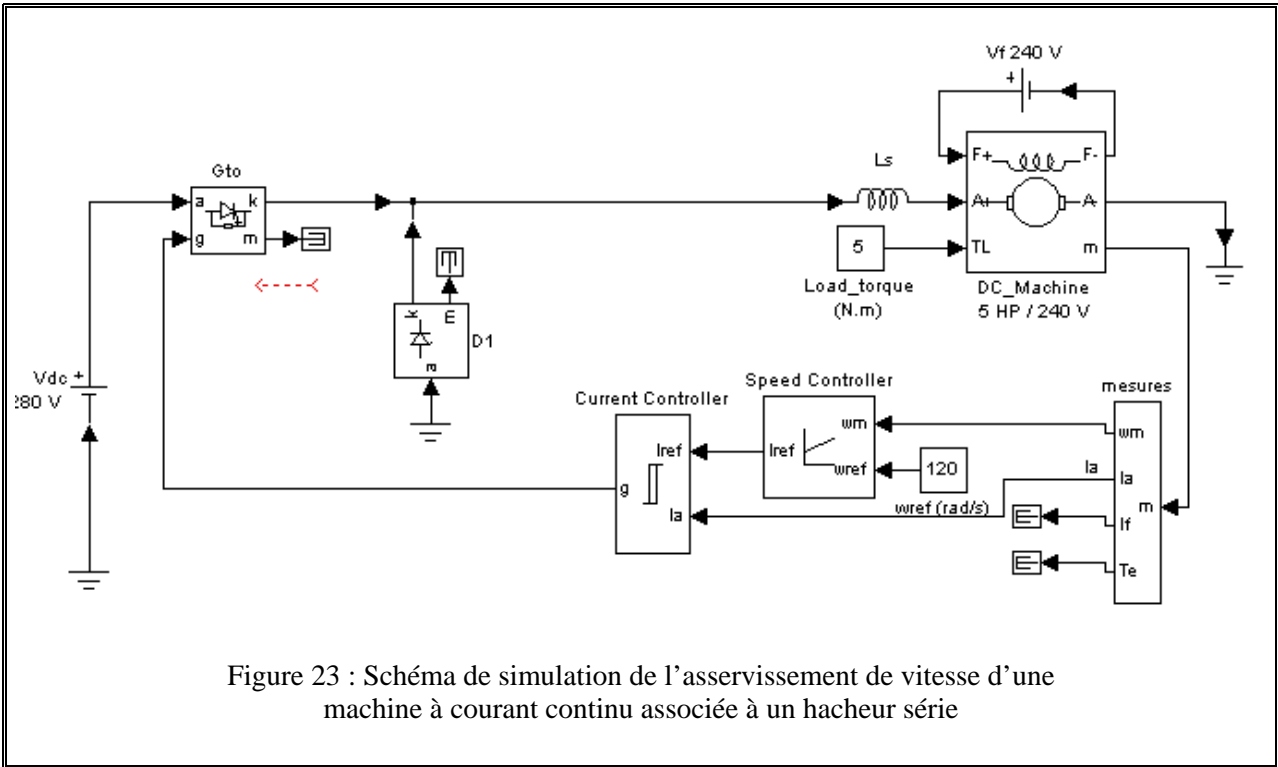


Figure 20 : Schéma de simulation de l'asservissement de vitesse utilisant le modèle de transfert de la machine



6.4. Asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu associé à un hacheur série



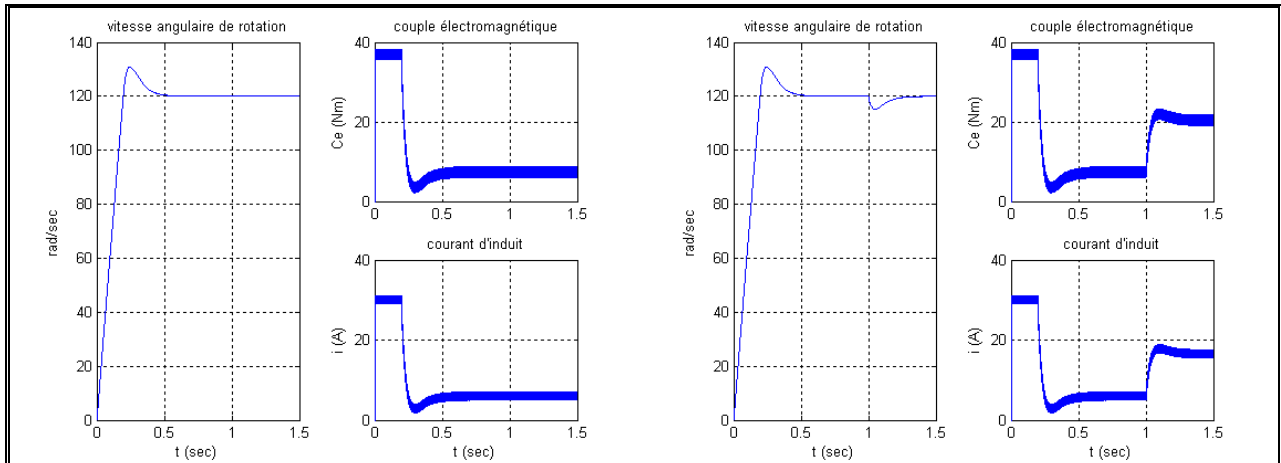


Figure 24 : Résultats de simulation de la réponse de la machine à un échelon de vitesse de 100 rad/s pour un démarrage en charge $C_r = 5$ N.m.

Figure 25 : Résultats de simulation de la réponse de la machine à une perturbation de couple.

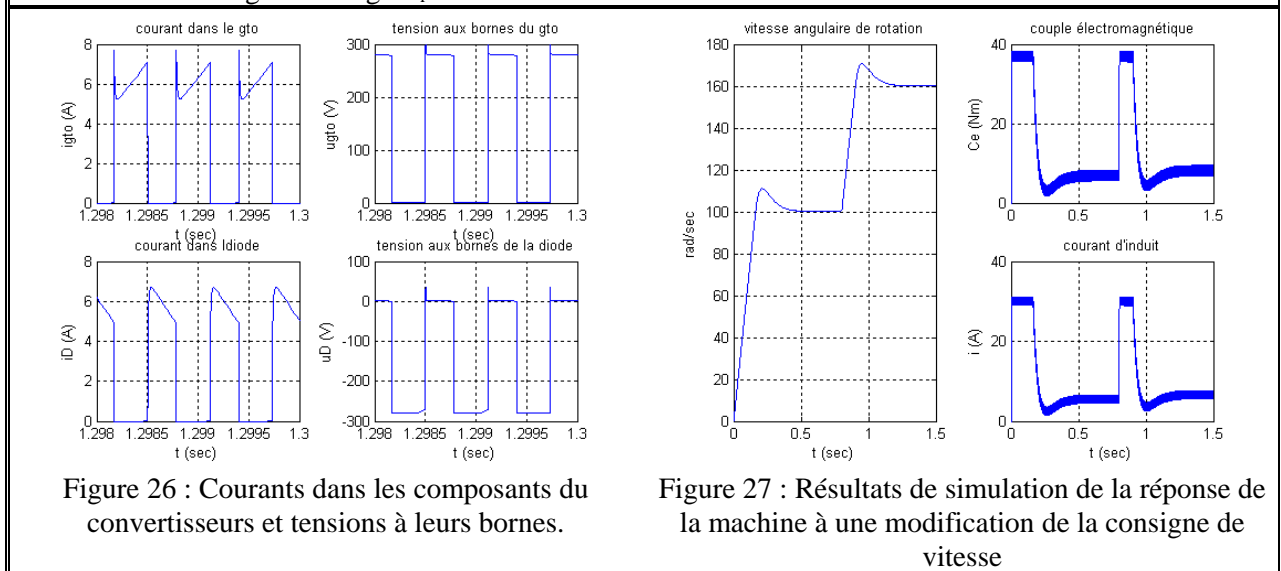


Figure 26 : Courants dans les composants du convertisseurs et tensions à leurs bornes.

Figure 27 : Résultats de simulation de la réponse de la machine à une modification de la consigne de vitesse

7. Asservissement de position d'un moteur à courant continu

Pour assurer l'asservissement de position de la machine à courant continu il suffit d'ajouter au système d'asservissement de vitesse une boucle pilote pour le contrôle de la position. L'erreur de position peut être traité simplement par un régulateur proportionnel qui fournit en sortie la référence de vitesse (figure 28).

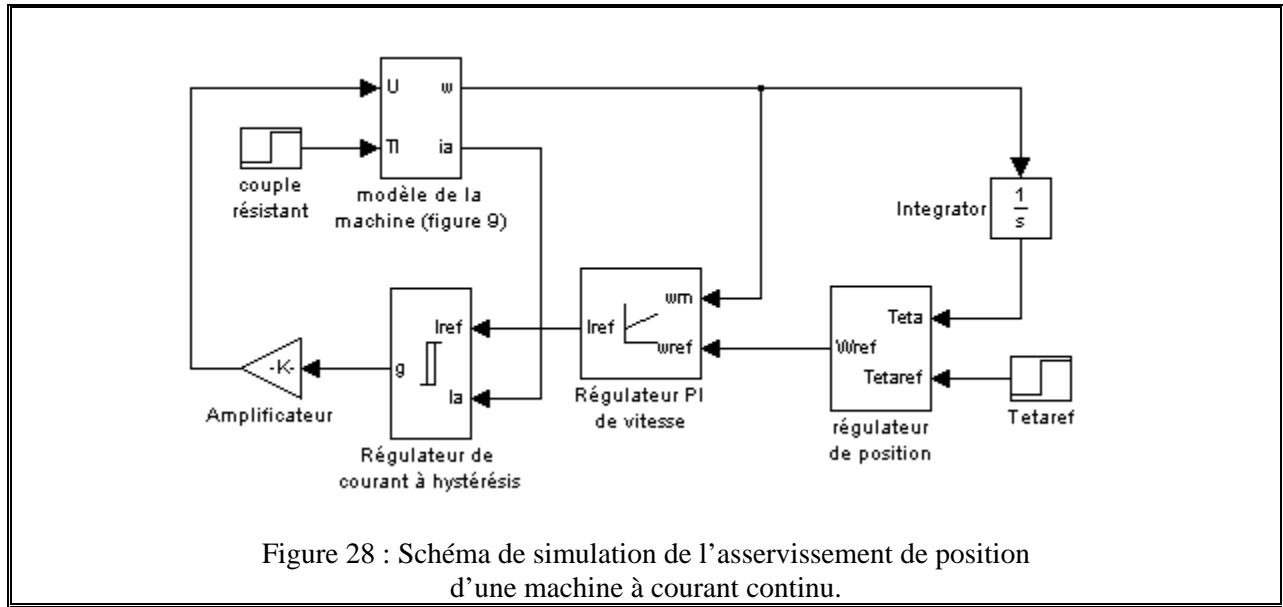


Figure 28 : Schéma de simulation de l'asservissement de position d'une machine à courant continu.

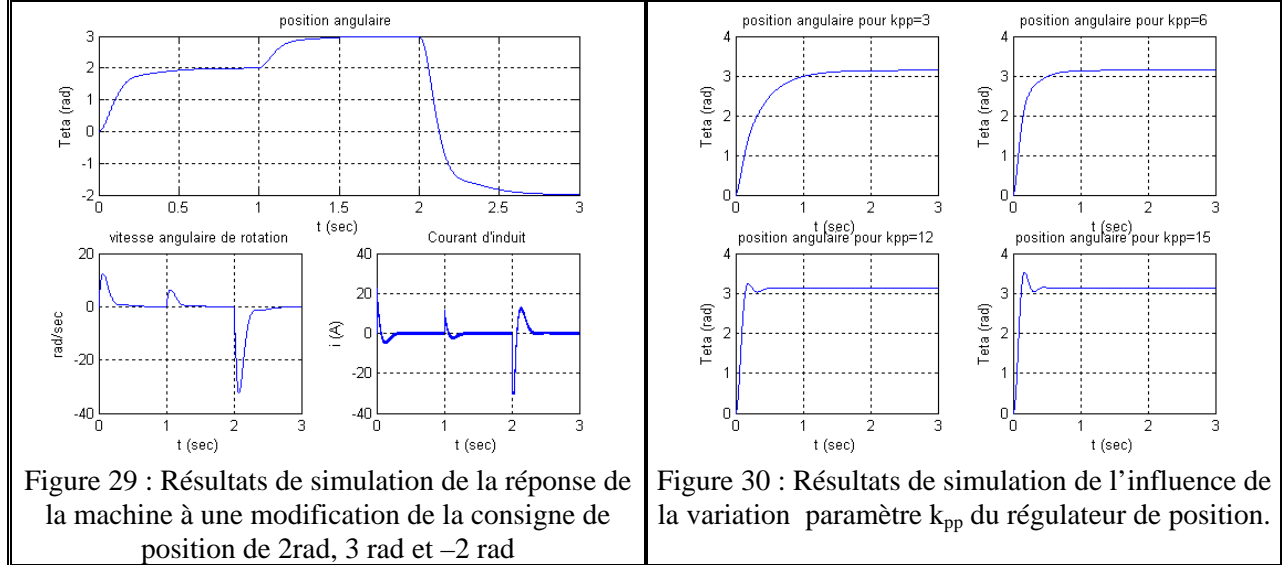


Figure 29 : Résultats de simulation de la réponse de la machine à une modification de la consigne de position de 2rad, 3 rad et -2 rad

Figure 30 : Résultats de simulation de l'influence de la variation paramètre k_{pp} du régulateur de position.

8. Les capteurs

8.1. Les capteurs de courant

On utilise couramment plusieurs types de capteurs :

Les capteurs résistifs : Une résistance peu inductive placée en série sur le circuit d'induit. La mesure n'est pas isolée galvaniquement de la puissance, sauf si l'on utilise un étage d'isolement.

On emploie également des transformateurs de courant situés sur la source alternative, un circuit électronique ne constitue le courant redressé, les performances dynamiques étant alors diminuées.

Les capteurs les plus performants (isolation galvaniques, bande passante élevée) utilisant des sondes à effet Hall). Les sorties de tous les capteurs sont des tensions.

8.2. les capteurs de vitesse

On utilise deux familles de capteurs :

La plus représentatif des capteurs analogiques est la génératrice tachymétrique petite machine à courant continu = aimant permanent délivrant une tension de sortie proportionnelle à la vitesse, on notera K_t le gain de ce capteur.

Les capteurs incrémentaux sont en fait des capteurs de position, on déduit la vitesse par comptage des impulsions pendant un temps donné ou par mesure du temps séparant deux impulsions. Ces deux types de capteurs perdent de leur précision aux basses vitesses.