Machine à courant continu : Pilotage et variation de vitesse



Lycée du Hainaut
Mathématiques spéciales TSI
2005/2006

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Plan

Schémas équivalents électriques

- Inducteur : Une machine, deux types d'excitation
- Induit
- Relations électromécaniques et électrique
- Quadrants de fonctionnement de la MCC

Excitation indépendante

- Parmi les modes d'alimentation, seul l'excitation indépendante est étudiée
- Exemple d'alimentation industrielle
- Caractéristique de couple : détermination et tracé
- Points de fonctionnement en charge

Variation de vitesse

- Action sur la tension d'induit
- Action sur le courant d'excitation
- Problème du démarrage

MCC du point de vue de l'automatique

- Introduction
- Mise en équation (modèle *RLE*)
- Construction du schéma fonctionnel
- Détermination de la transmittance

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

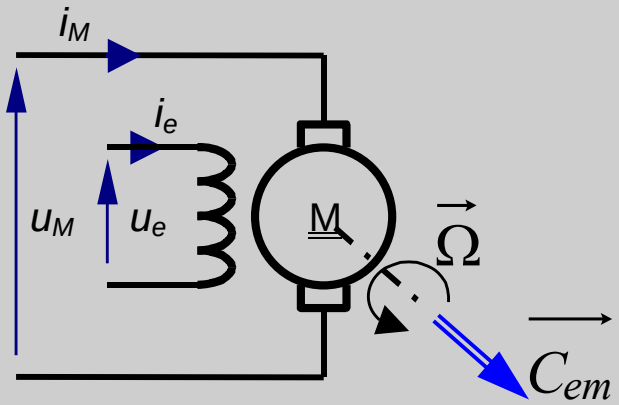
Schémas équivalents électriques

I. Schémas équivalents électriques
I.1 Inducteur : une machine, deux types d'excitation
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Pour créer le champ d'induction B :

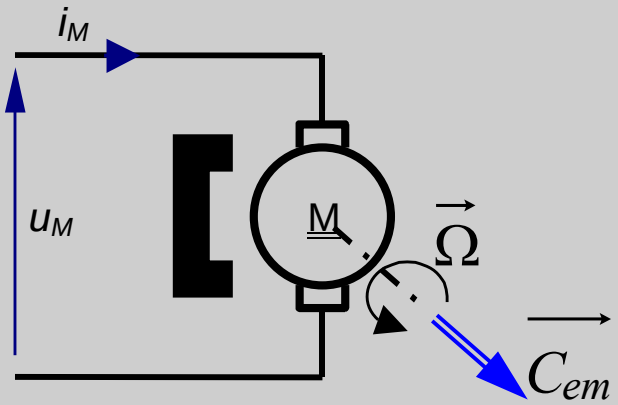
- Une machine, deux moyens :
  - Grâce à un courant dans les enroulements statoriques (circuit d'excitation)
  - Avec des aimants placés au stator

Inducteur à enroulement



- L'enroulement d'excitation est alimenté en courant
- Possibilité de réglage du flux

Inducteur à aimant permanent



- L'induction, donc le flux sont fixés par construction
- Aucun réglage n'est possible

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Inducteur : Présentation

I. Schémas équivalents électriques
I.2 Inducteur : présentation et modèle électrique
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

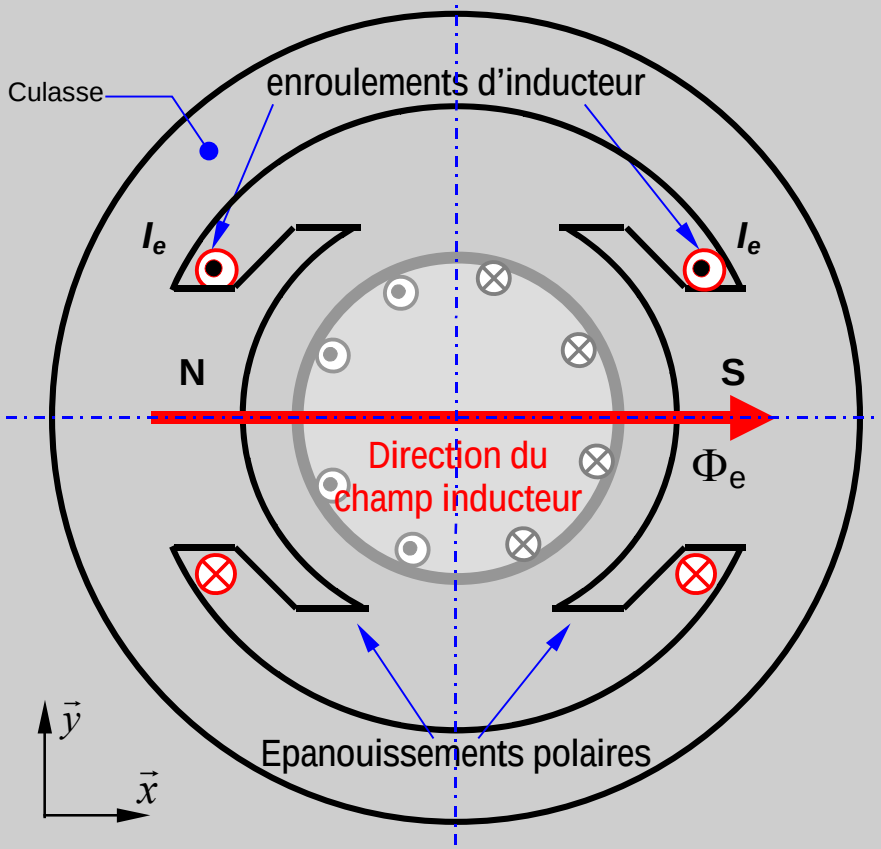
Rôle de l'inducteur

- **Créer le champ d'induction**
  - De direction x
  - Qui englobe tout l'induit
- **Caractérisation**
  - Flux sous un pôle Φ_e

Contraintes de fonctionnement

- **Mise en fonctionnement**
  - **Apport énergétique minimal**
- **Constantes K_E et K_C maximales**
  - **Flux maximum**
  - Juste inférieur à la saturation
- **Grandeurs magnétiques a priori constantes**
  - Circuit magnétique a priori massif
  - Les épanouissements polaires sont feuilletés (en raison des variations locales dues aux encoches)

Positionnement de l'inducteur



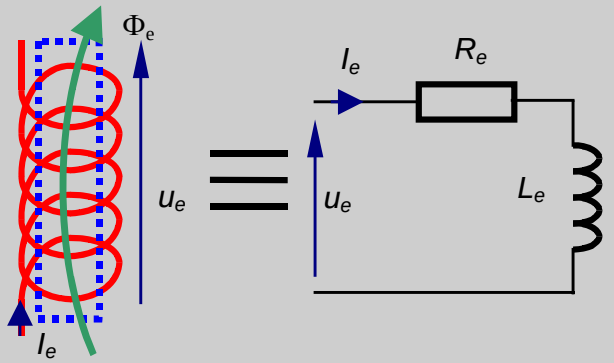
WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Inducteur : Description du modèle électrique

I. Schémas équivalents électriques
I.2 Inducteur : présentation et modèle électrique
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Enroulements d'inducteur

- Conducteurs de cuivre de résistivité ρ :
  - Résistance R_e
- Circuit bobiné, à l'origine du champ B_e :
  - Inductance L_e
- Circuit électrique *RL* équivalent



Circuit à faible apport énergétique

- Résistance R_e élevée
  - Courant d'excitation faible par rapport à celui de l'induit

Pour augmenter le flux

- Choix d'un matériau ferromagnétique
  - Apprécié pour sa perméabilité magnétique μ_r élevée
  - La réluctance est donc faible
- Nombre de spires important
- Conséquence : Inductance propre élevée

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Inducteur : Risques technologiques et précautions

I. Schémas équivalents électriques
I.2 Inducteur : présentation et **modèle électrique**
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Circuit fortement inductif

- En raison de l'inductance élevée
- Le circuit est sensible aux variations du courant, surtout brutales (**discontinuités**)
  - **Risques : Surtensions et arcs électriques**
  - **Conséquence : Prendre la précaution de ne pas interrompre le circuit inducteur**

En cas d'absence de courant d'excitation (pour les machines à excitation)

- Le courant I_e le annule
  - Le flux Φ_e qui en dépend s'annule
- Mais la machine est alimentée par la tension d'induit U
  - La f.e.m. $E = K\Phi_e\Omega$ existe (non nulle)
- Premier type de conséquence : $\Omega = E/K\Phi_e \rightarrow \infty$
  - **Risque d'emballement** à vide (pas de couple résistant)
  - **Destruction de la machine par éclatement centrifuge des bobinages rotoriques**
- Second type de conséquence : $C_{em} = K\Phi_e I_{induit} = 0$
  - **Risque de calage** en charge
  - Donc la f.e.m. annule et ne compense plus la tension d'induit : Le courant d'induit croît
  - **Détérioration voire destruction de la machine par surintensité**

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Induit : Présentation

I. Schémas équivalents électriques
I.3 Induit : présentation …
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

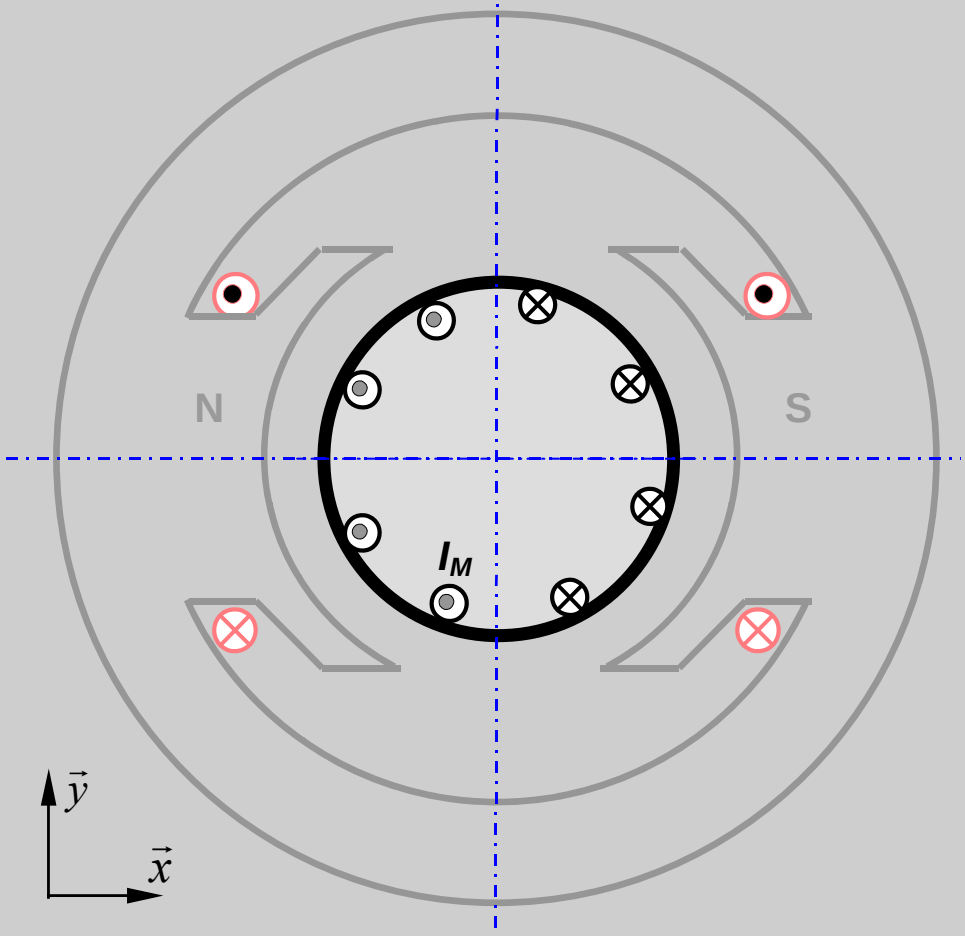
Rôle de l'induit

- Siège des phénomènes induits par son mouvement dans le champ d'excitation
  - Création d'une f.e.m. si le rotor est entraîné (entrée mécanique)
  - Création d'un couple électromagnétique si les enroulements sont alimentés en courant

Contraintes de fonctionnement

- Localisation de la puissance
  - Conducteurs de forte section
  - Contacts glissants très sollicités (doivent assurer les commutations de courant)
- Grandeurs variables
  - Circuit magnétique feuilleté (empilement de tôles) pour limiter les courants de Foucault

Positionnement de l'induit



WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Induit : Réaction d'induit

I. Schémas équivalents électriques
I.3 Induit : … réaction d'induit …
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Origine

- Les courants d'induit créent une induction
- C'est la réaction d'induit B_i ε(I)
- Résultante orthogonale à B_e
  - Réaction dite transversale
- Les deux inductions se composent
  - La résultante B est décalée

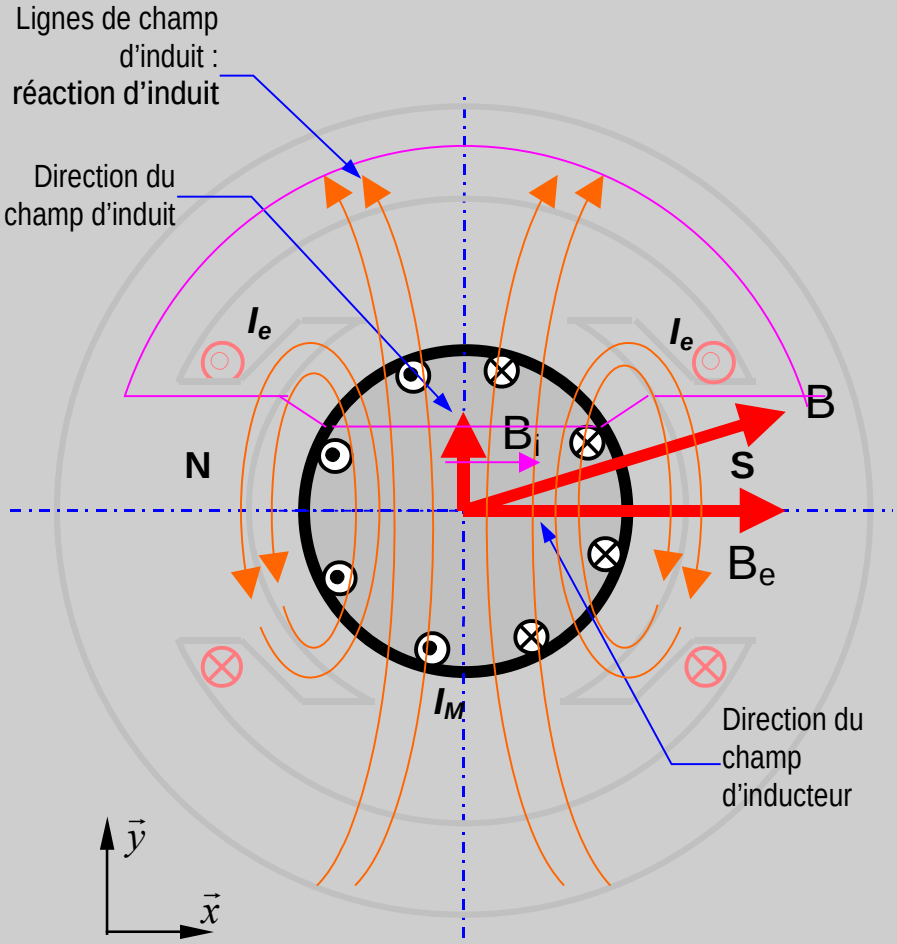
Conséquences

- L'induction *B* (plus élevée) sature les pôles
- Existence d'un flux dans l'air
  - Existence d'une inductance de fuite d'induit
- Inductance plutôt faible
  (car l'entrefer transversal est important)

Remède

- Compenser la réaction par des pôles auxiliaires
  - Parcourus par le courant d'induit
  - Placés en alternance avec les pôles d'inducteur
- On obtient alors une machine compensée
  (donc linéaire)

Positionnement de l'induit



WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

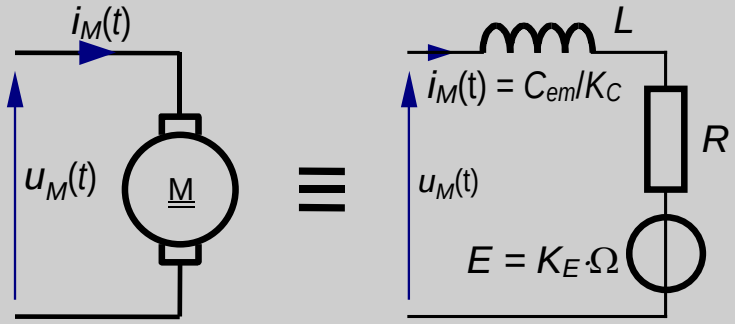
Induit : Modèle électrique

I. Schémas équivalents électriques
I.3 Induit : … modèle électrique
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Éléments du modèle

- **Résistance des conducteurs : *R***
  - Conducteurs de forte section : **Résistance de faible valeur**
  - En cherchant à limiter les pertes Joule d'induit
- **Inductance : *L***
  - Due aux fuites dans les espaces interpolaires
  - De faible valeur (la réluctance transversale élevée)
- **Force électromotrice (f.e.m.) : *E***
  - C'est l'origine même de cette machine
  - Expression issue de l'étude du fonctionnement

Schéma électrique d'induit équivalent



WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

I. Schémas équivalents électriques
I.4 Relations électromécaniques et électrique
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Résultats issus de l'étude du fonctionnement de la MCC

Les relations lient les grandeurs électriques et mécaniques

- Le courant électrique d'induit I_M est l'homologue du couple électromagnétique C_{em}
- La vitesse de rotation Ω est l'homologue de la f.e.m. d'induit E

Lien f.e.m. – vitesse de rotation

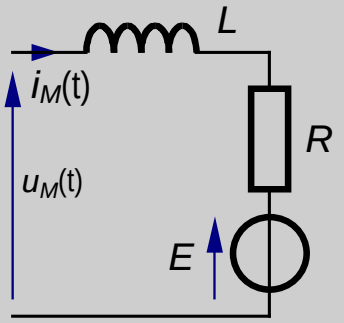
$$E = K \cdot \Phi_e \cdot \Omega \qquad \text{ou} \qquad E = K_E \cdot \Omega$$

Lien couple-courant

$$C_{em} = K \cdot \Phi_e \cdot I_M \qquad \text{ou} \qquad C_{em} = K_C \cdot I_M$$

Relation électrique (à partir du schéma équivalent)

$$u_M(t) = L \frac{\mathrm{d}i_M(t)}{\mathrm{d}t} + R \cdot i_M(t) + E$$

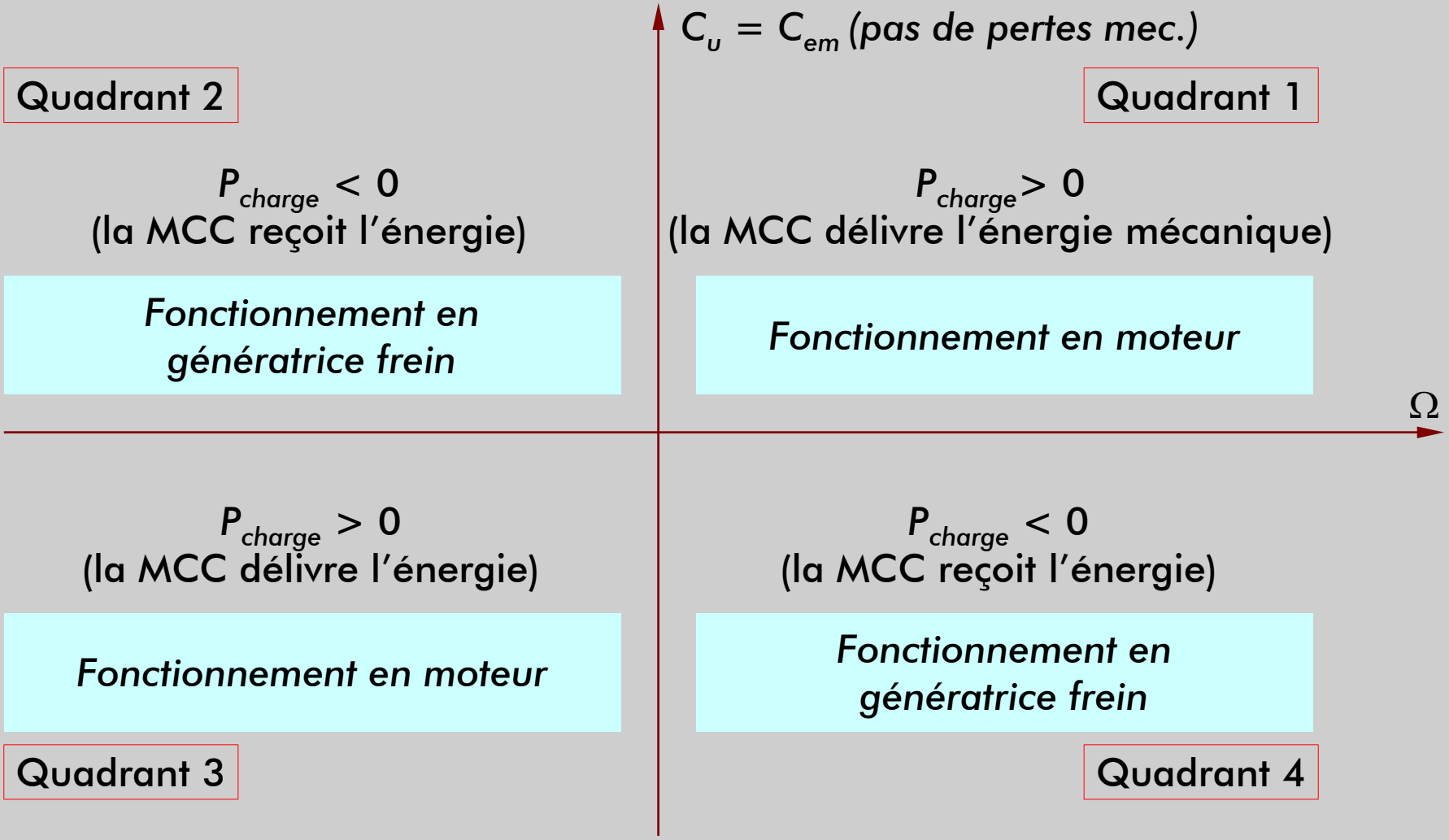


WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Quadrants de fonctionnement de la MCC

I. Schémas équivalents électriques
I.5 Quadrants de fonctionnement de la MCC
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

On travaille dans le plan (C_{em}, Ω)

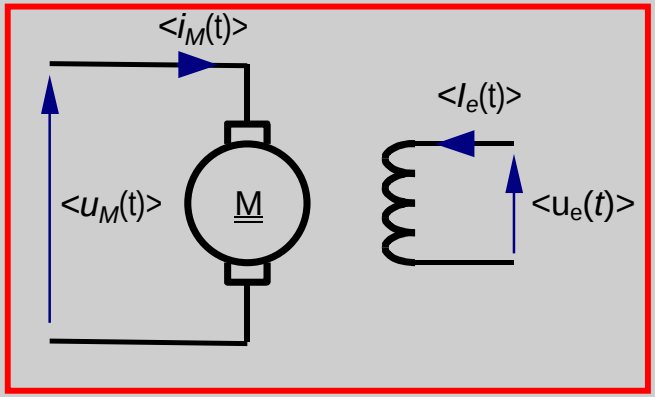


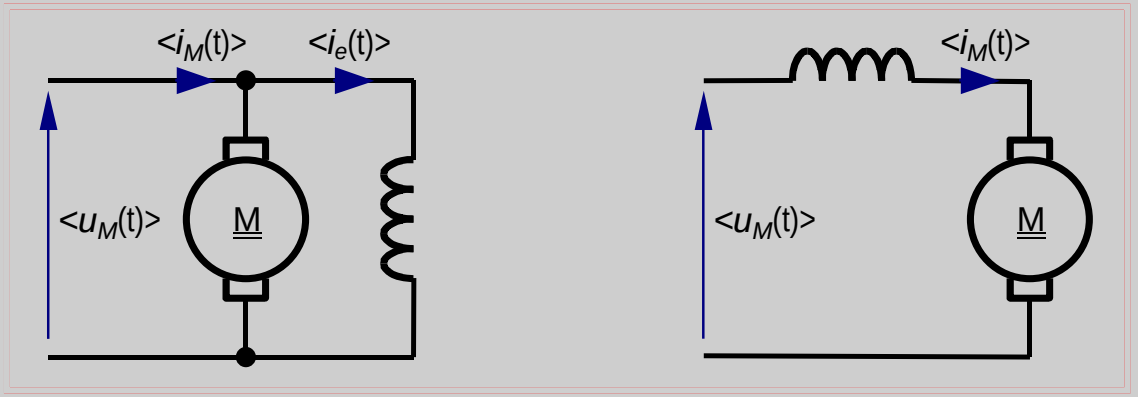
WWW.DZPEN.COM قسم الجزائر

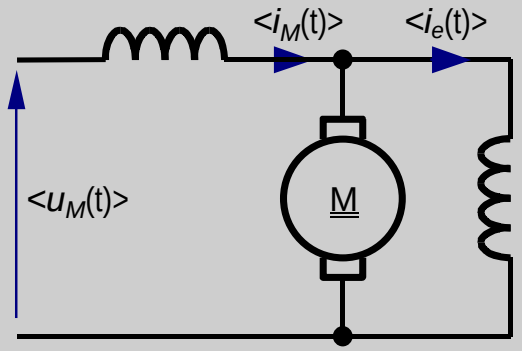
I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
II.1 Modes d'alimentation
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Sources d'alimentation

- Différentes pour l'induit et l'inducteur : **Excitation indépendante**
- Communes pour l'induit et l'inducteur : **Excitation parallèle** (ou dérivée ou shunt)
- Profiter du courant d'induit pour l'excitation : **Excitation série**
- Combiner les deux cas : **Excitation composée** (ou compound)







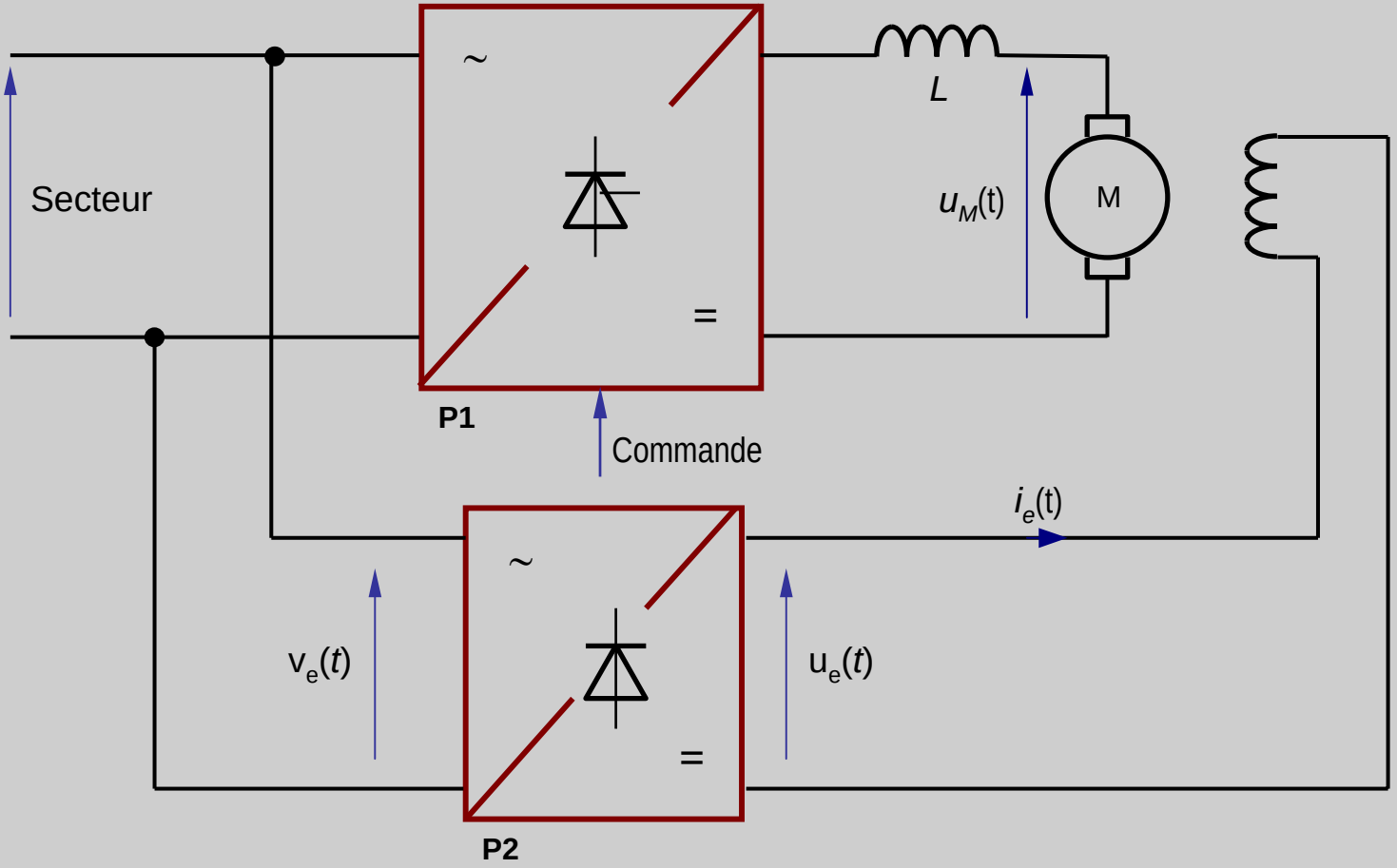
Seul ce mode est étudié

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
II.2 Exemple d'alimentation industrielle
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Exemple de structure industrielle

- Alimenter l'induit
- Alimenter l'inducteur

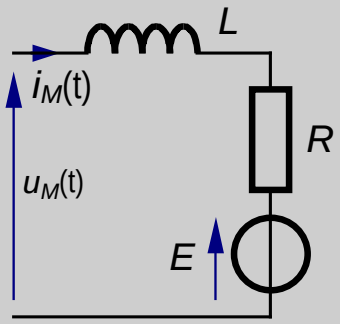


WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Relation électrique (en grandeurs instantanées)

$$u_M(t) = L\frac{\mathrm{d}i_M(t)}{\mathrm{d}t} + R\cdot i_M(t) + E$$

A l'échelle des observations, la f.e.m. est quasi constante vis à vis de i_M et u_M



Traduction en grandeurs moyennes

$$\langle u_M(t)\rangle = L\left\langle\frac{\mathrm{d}i_M(t)}{\mathrm{d}t}\right\rangle + R\cdot\langle i_M(t)\rangle + E$$

Terme nul car le courant $i_M(t)$ est périodique

Relations de couplage électromécanique

$$E = K_E\cdot\Omega \quad \text{et} \quad C_{em} = K_C\cdot\langle i_M(t)\rangle$$

On élimine le courant moyen des relations

$$C_{em} = \frac{K_C}{R}\langle u_M\rangle - \frac{K_E K_C}{R}\cdot\Omega$$

Avec la constante de couple et de f.e.m.

$$C_{em} = \frac{K}{R}\Phi_e\langle u_M\rangle - \frac{K^2}{R}\cdot\Phi_e^2\cdot\Omega$$

Avec le flux d'inducteur Φ_e et la constante $K = \frac{2p}{2a}\cdot\frac{N}{2\pi}$

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Caractéristique de couple : tracé

I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
II.3 Caractéristique de couple : détermination et tracé
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique

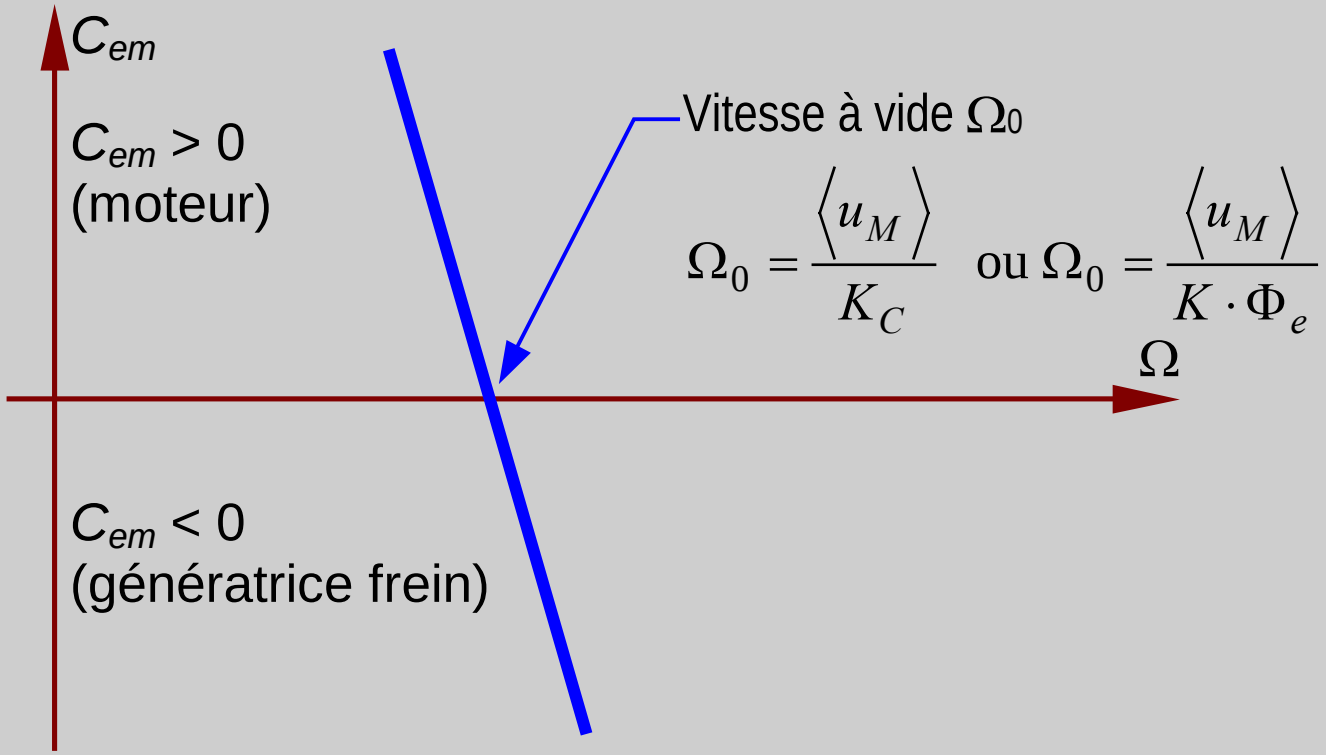
Rappel de la relation établie

$$C_{em} = \frac{K_C}{R}\langle u_M \rangle - \frac{K_E K_C}{R}\cdot\Omega$$

La représentation graphique est une droite décroissante

Pourquoi la caractéristique autour de Ω = 0 n'est-elle pas accessible ?

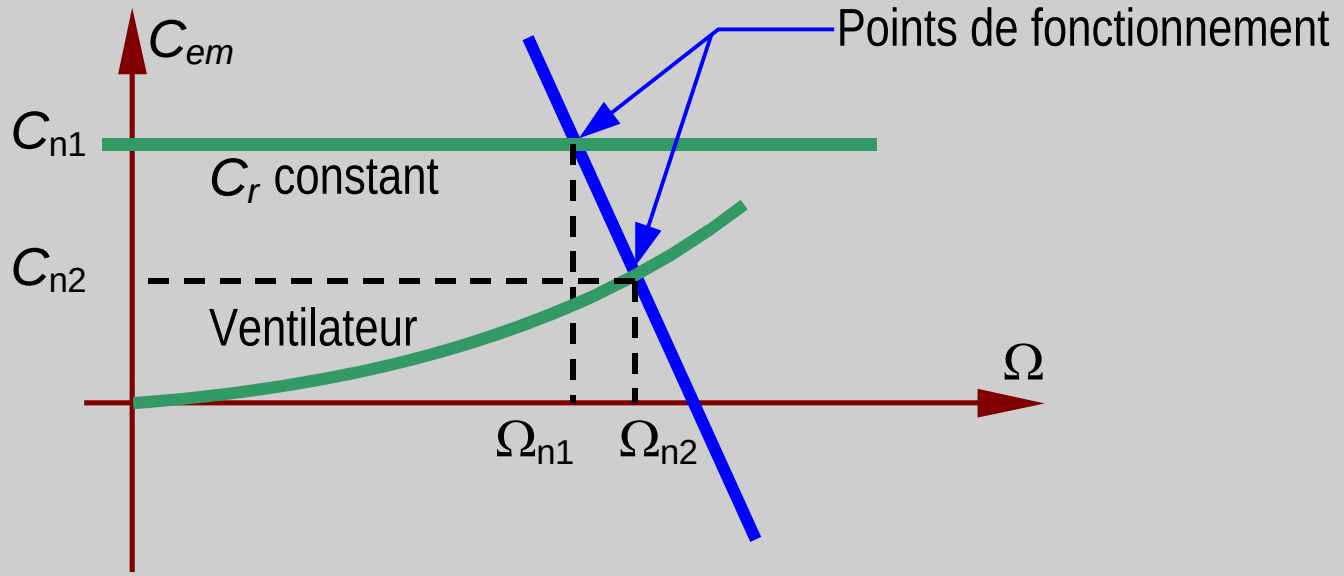
- Ω Faible ⇒ I_M considérable
- Pb de surintensités



WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Comment localiser le point de fonctionnement ?

- Après la phase de démarrage, en régime permanent
- A l'intersection des caractéristiques mécaniques de la MCC et de la charge



Stabilité du point de fonctionnement ?

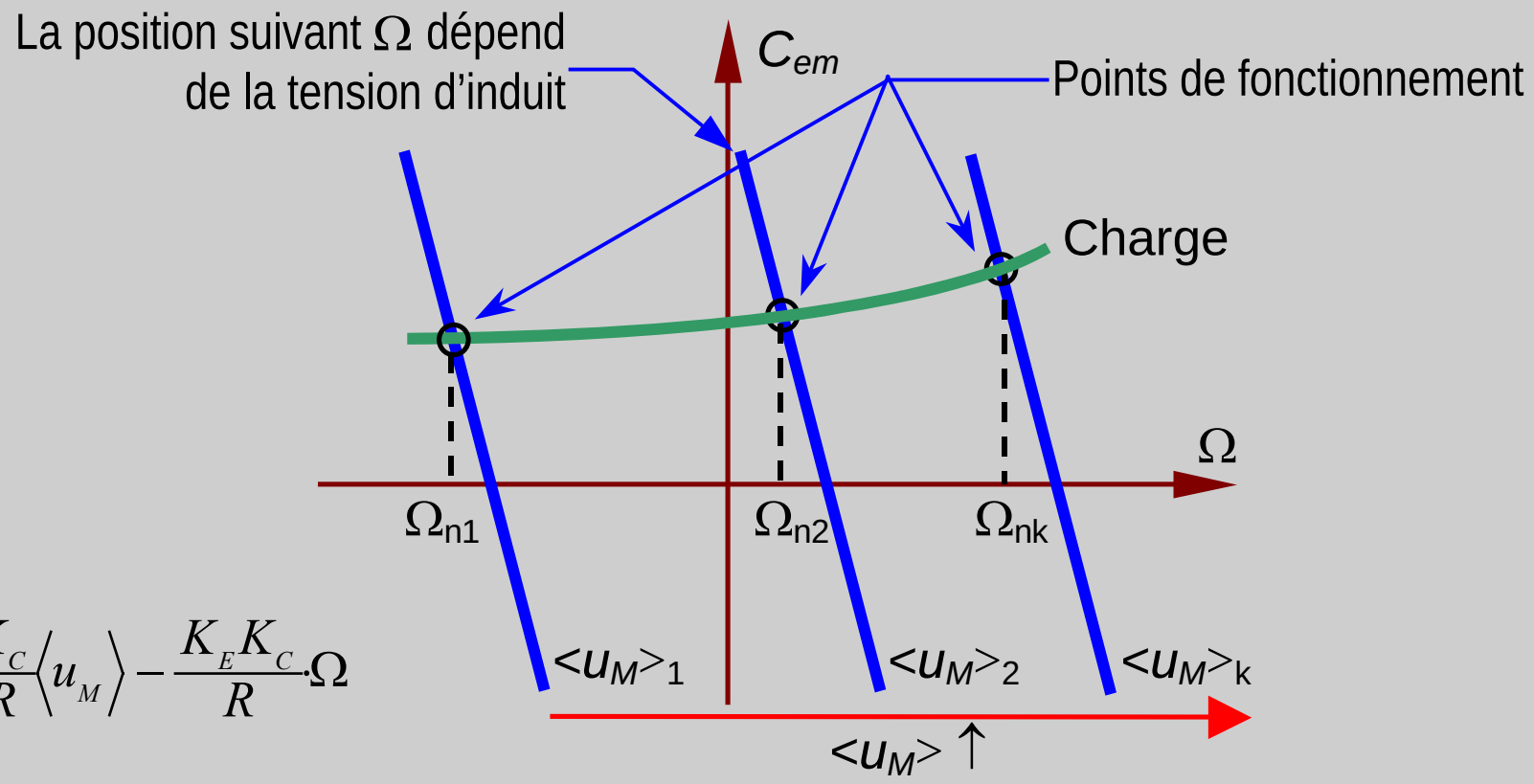
- Retour au point de fonctionnement (position d'équilibre) après changement de vitesse
  - Si Ω ↑, alors C_{em} ↓ donc Ω ↓
  - Si Ω ↓, alors C_{em} ↑ donc Ω ↑

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
III.1 Action sur la tension d'induit
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Action sur la tension d'induit

- Mise en évidence à partir des caractéristiques

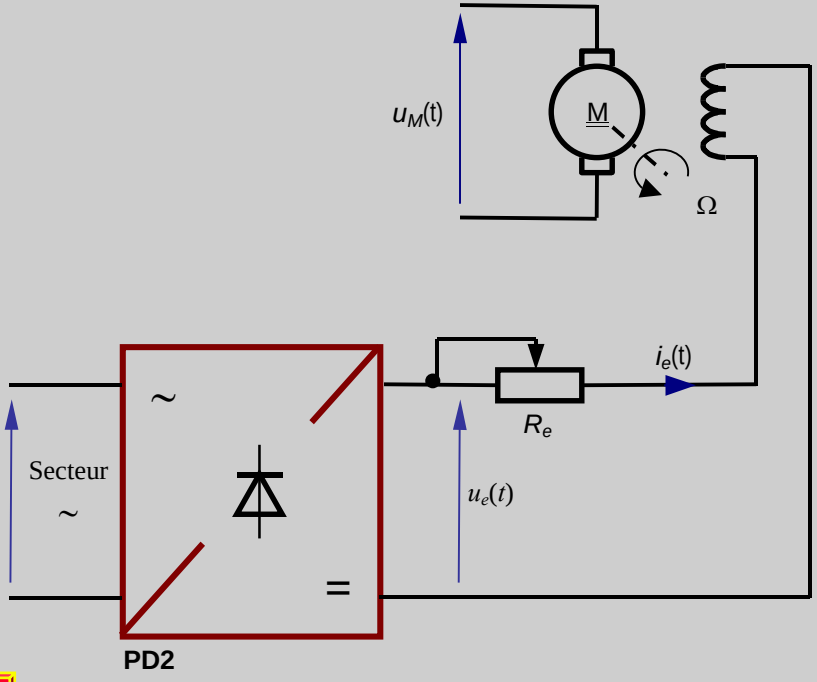


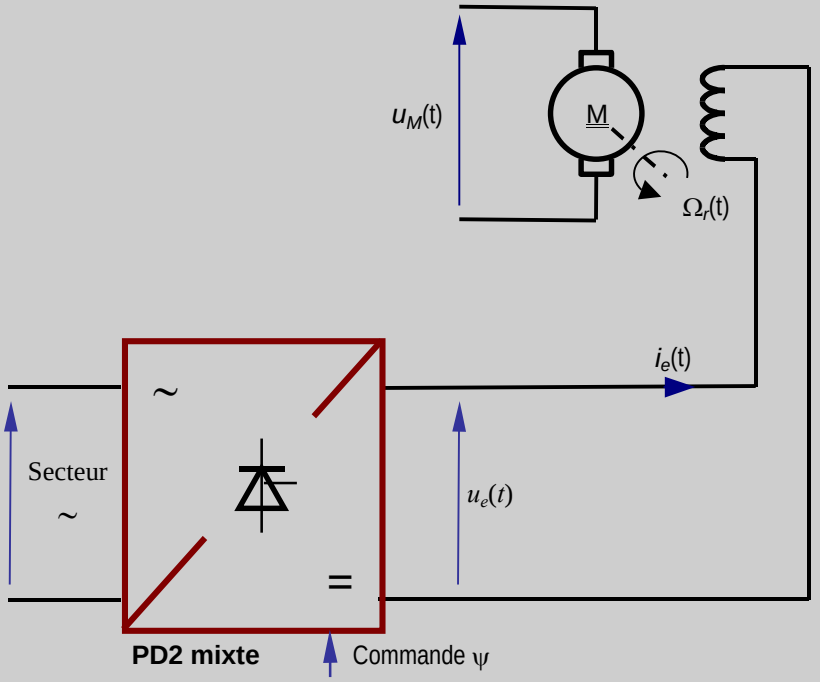
$$C_{em} = \frac{K_C}{R}\langle u_M \rangle - \frac{K_E K_C}{R}\cdot\Omega$$

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Action sur le courant (ou flux) d'excitation

- **Deux moyens pour régler le courant d'inducteur, donc le flux d'excitation**
  - Insérer un rhéostat en série avec l'inducteur
  - Alimenter l'inducteur avec un pont mixte
    (car seul un courant positif est nécessaire sans bidirectionnalité en tension)





WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Expression de $\Omega(\Phi_e)$

- A partir de l'expression

$$C_{em} = \frac{K}{R}\Phi_e \langle u_M \rangle - \frac{K^2}{R}\cdot\Phi_e^2\cdot\Omega \quad \text{Avec} \quad K = \frac{2p}{2a}\cdot\frac{N}{2\pi}$$

- On extrait Ω pour obtenir

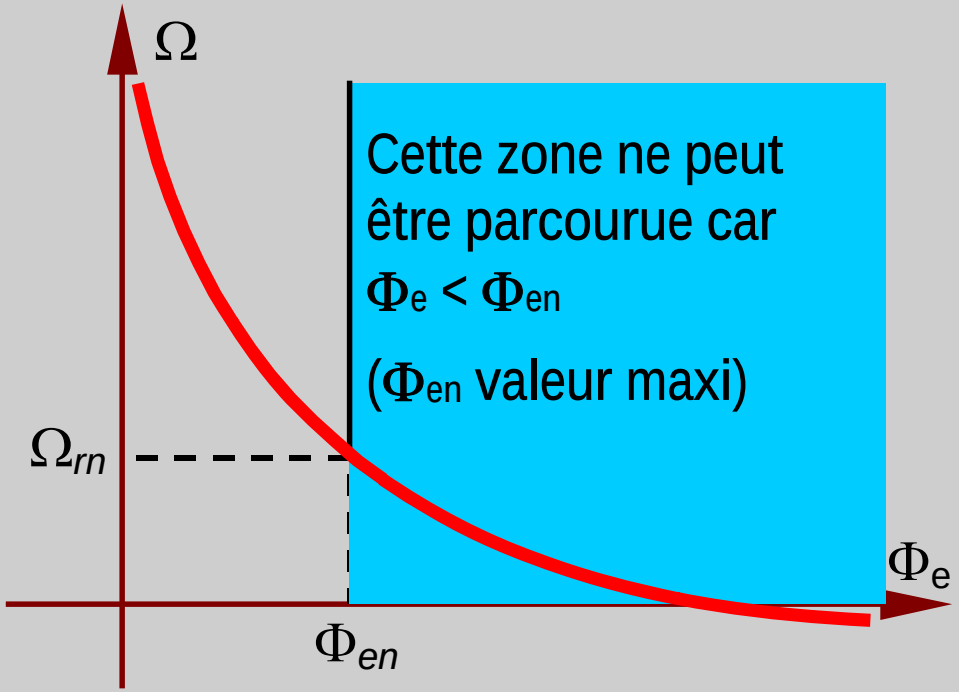
$$\Omega = \frac{\langle u_M \rangle}{K\cdot\Phi_e} - \frac{R}{K^2\Phi_e^2}C_{em}$$

Tracé de $\Omega(\Phi_e)$ si C_{em} et $<u_M>$ constants

Cette méthode de variation a pour inconvénient l'augmentation du courant d'induit au-delà des limites acceptables

Conséquence :

Elle n'est utilisée qu'en cas de légères survitesses nécessaires durant une durée courte.



WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Problème du démarrage (origine)

I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
III.3 Problème du démarrage
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Au démarrage, la vitesse est nulle, donc la f.e.m. aussi :

- $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0$

Le modèle de la MCC est de type *RL*

- Résistance d'induit *R*
- En série avec l'inductance d'induit *L*

En régime permanent électrique, l'inductance *L* n'a aucune influence

L'application de la tension d'induit *U* (constante) conduit au courant

$$I_M = \frac{U}{R}$$

Courant à comparer à celui quand la MCC est en rotation où *E* existe

$$I_M = \frac{U-E}{R}$$

Il en résulte que le courant de démarrage est très important

- De 5 à 10 fois le courant nominal
- L'induit de la MCC ne peut supporter cette surintensité
- Il faut éviter d'atteindre cette situation

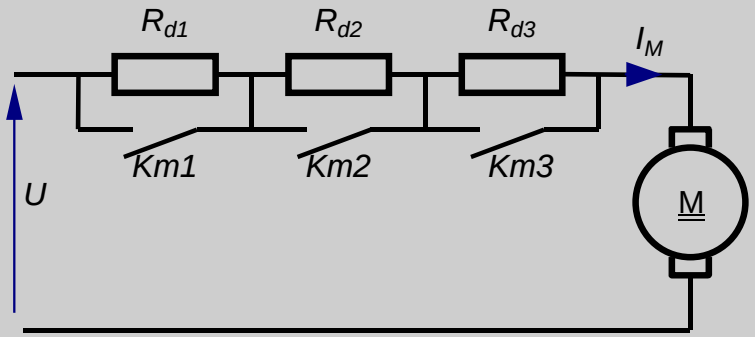
WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

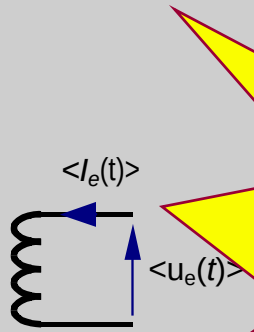
Problème du démarrage (remèdes)

I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
III.3 Problème du démarrage
IV. MCC du point de vue de l'automatique

Éviter que le courant d'induit soit trop important au démarrage : Inférieur à $2I_n$

- En insérant des résistances en série avec l'induit
- Puis en les éliminant progressivement avec la croissance de la vitesse
- Jusqu'au régime permanent





Solution de moins en moins employée en raison de l'utilisation de variateurs utilisant l'électronique de puissance

Augmenter progressivement la tension d'induit

- La tension *U* suit la f.e.m. *E* qui augmente avec la vitesse
- La surintensité est limitée
- Solution industrielle moderne : L'échelon de tension est remplacé par une rampe

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Utilisation de la MCC

- **Comme générateur de puissance (vu précédemment)**
- **Comme actionneur**
  - Nécessité de piloter la MCC
  - Il faut donc connaître son comportement
- **Il faut alors modéliser la MCC en tant que comportement**

Mise en place

- **Modéliser la MCC et la charge entraînée (l'un ne va pas sans l'autre)**
  - Inertie globale J ramenée sur l 'arbre de la machine
  - pertes mécaniques tantôt négligées, tantôt intégrées dans le couple de charge C_r sur l'arbre
  - Flux magnétique d'inducteur constant (MCC à aimants le plus souvent)
  - Variation de vitesse par action sur la tension d'induit
- **Mode d'étude**
  - Étude de fonctionnement dynamique de la MCC : régime transitoire ou harmonique
  - Outils mathématiques : équations différentielles ou fonctions de variables complexes.
  - Allégement des notations : on pose $p = j\omega$ (notations de la transformation de Laplace)



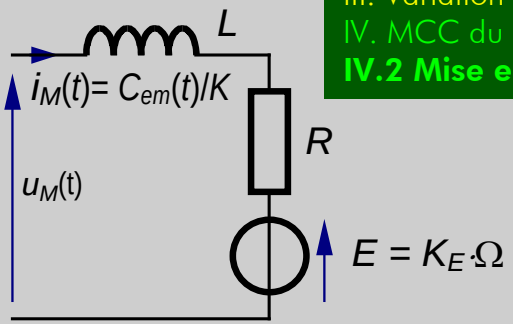
WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Mise en équation (modèle *RLE*)

I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique
IV.2 Mise en équation (modèle RLE)

Relation électrique (maille)

$$u_M(t) = L\frac{\mathrm{d}i_M(t)}{\mathrm{d}t} + R\cdot i_M(t) + E(t)$$



Relation mécanique (PFD)

$$J\frac{\mathrm{d}\Omega(t)}{\mathrm{d}t} = C_{em}(t) - C_r(t)$$

Relations de couplage électromécanique : Lois du convertisseur « MCC »

$$E(t) = K_E\cdot\Omega(t) \quad et \quad C_{em}(t) = K_C\cdot i_M(t)$$

Le passage en relations complexes (variable *p*)

$$u_M(t) = R\cdot i_M(t) + L\frac{\mathrm{d}i_M(t)}{\mathrm{d}t} + E(t) \quad \leftrightarrow \quad \underline{U}_M(j\omega) = \underline{U}_M(p) = (\mathrm{L}p + R)\cdot \underline{I}_M(p) + \underline{E}(p)$$

$$J\frac{\mathrm{d}\Omega(t)}{\mathrm{d}t} = C_{em}(t) - C_r(t) \quad \leftrightarrow \quad J\cdot p\cdot \underline{\Omega}(p) = \underline{C}_{em}(p) - \underline{C}_r(p)$$

$$E(t) = K_E\cdot\Omega(t) \quad et \quad C_{em}(t) = K_C\cdot i_M(t) \quad \leftrightarrow \quad \underline{E}(p) = K_E\cdot\underline{\Omega}(p) \quad et \quad \underline{C}_{em}(p) = K_C\cdot\underline{I}_M(p)$$

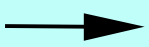
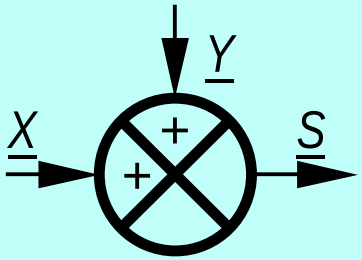
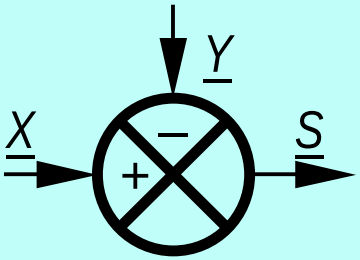
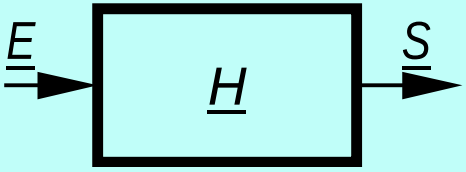
En conclusion on dénombre 4 relations de base

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Construction du schéma fonctionnel (1/2)

I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique
IV.3 Construction du schéma fonctionnel

Rappels : symboles graphiques de base pour les représentations fonctionnelles

Liaison	Sommateur	Soustracteur	Fonction (transmittance)
	$\underline{S} = \underline{X} + \underline{Y}$	$\underline{S} = \underline{X} - \underline{Y}$	$\underline{S} = \underline{H} \cdot \underline{E}$
			

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Construction du schéma fonctionnel (2/2)

I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique
IV.3 Construction du schéma fonctionnel

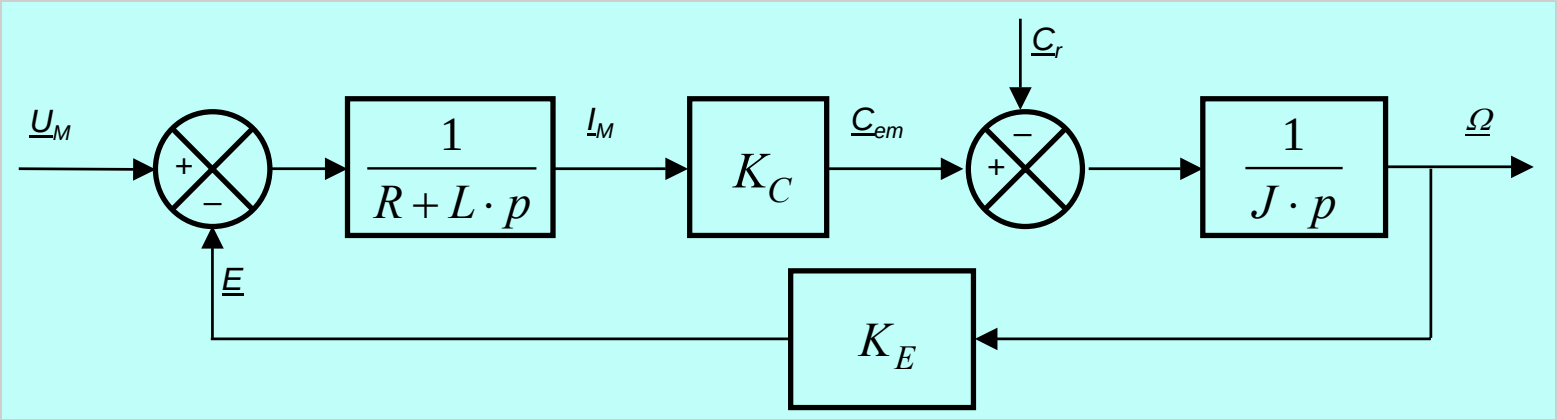
Construction du schéma à partir des relations

$$\underline{U}_M(j\omega) = \underline{U}_M(p) = (Lp + R)\cdot\underline{I}_M(p) + \underline{E}(p) \quad \text{soit} \quad \underline{I}_M(p) = \frac{1}{R+Lp}\left[\underline{U}_M(p) - \underline{E}(p)\right]$$

$$\underline{C}_{em}(p) = K_C \cdot \underline{I}_M(p)$$

$$\underline{\Omega}(p) = \frac{1}{J\cdot p}\left[\underline{C}_{em}(p) - \underline{C}_r(p)\right]$$

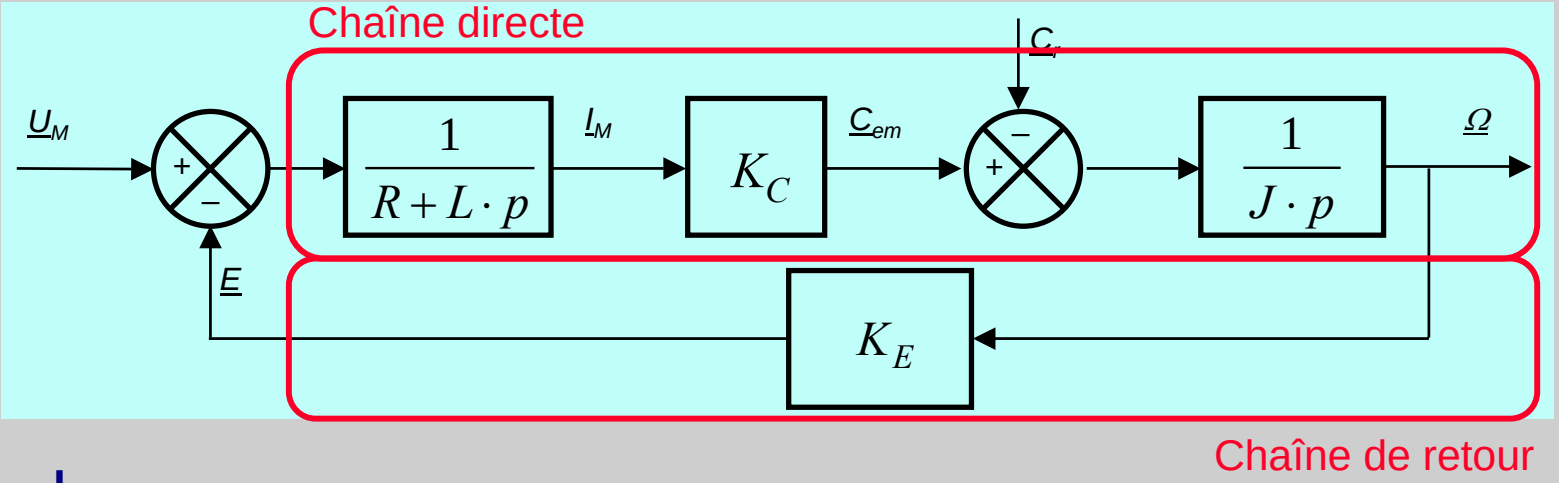
$$\underline{E}(p) = K_E\cdot\underline{\Omega}(p)$$



WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Transmittance de la MCC (1/2)

I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique
IV.4 Détermination de la transmittance



Méthode

- Envisager le cas d'une machine non chargée
  - Pour ne gérer qu'une seul variable d'entrée (U_M)
- Traiter chaque sous-bloc
- Écrire d'abord les relations sur la chaîne directe
- Puis sur la chaîne de retour
- Assembler les expressions
- Exprimer le rapport de la sortie sur l'entrée

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر

Transmittance de la MCC (2/2)

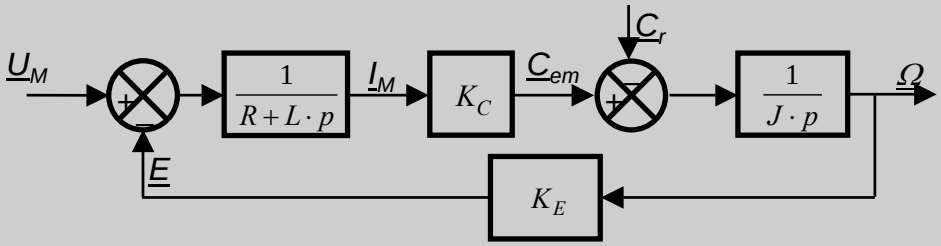
I. Schémas équivalents électriques
II. Excitation indépendante
III. Variation de vitesse
IV. MCC du point de vue de l'automatique
IV.4 Détermination de la transmittance

Chaîne directe

$$\underline{I}_M(p) = \frac{\underline{U}(p) - \underline{E}(p)}{R + Lp}$$

$$\underline{C}_{em}(p) = K_c \underline{I}_M(p)$$

$$\underline{\Omega}(p) = \frac{1}{Jp}(C_{em}(p) - C_r(p))$$



Chaîne de retour

$$\underline{E}(p) = K_E \underline{\Omega}(p)$$

Fonction de transfert

$$\underline{H}_{MCC}(p) = \frac{\underline{\Omega}}{\underline{U}_M} = \frac{1}{K_E} \cdot \frac{1}{1 + \frac{J \cdot R}{K_E \cdot K_C} p + \left(\frac{K_E \cdot K_C}{J \cdot R} p \right)^2}$$

Conclusion

- La MCC associée à sa charge constitue un système du deuxième ordre

WWW.DZPEN.COM قلم الجزائر



Fin de
« Machine à courant continu : Pilotage et variation de vitesse »

Des questions ?