



Travail Pratique 4

ELE 8401 Machines et entraînements électriques

13 avril 2018

Méthodes de contrôle des entraînements électriques

jesus.morales-rodriquez@polymtl.ca

Bureau: A330.6

Programme

Salle : A-328

Horaire : 13h45 – 16h45

TP	Date	Sujet
1	2 février	Introduction à la simulation de circuits électriques dynamiques
2	23 février	Modélisation et simulation des machines électromécaniques rotatifs
3	23 mars	Convertisseurs électriques
4	13 avril	Simulation d'entraînements électriques <ul style="list-style-type: none">• Contrôle Volts/Hertz• Contrôle vectoriel

Structure d'un entraînement électrique

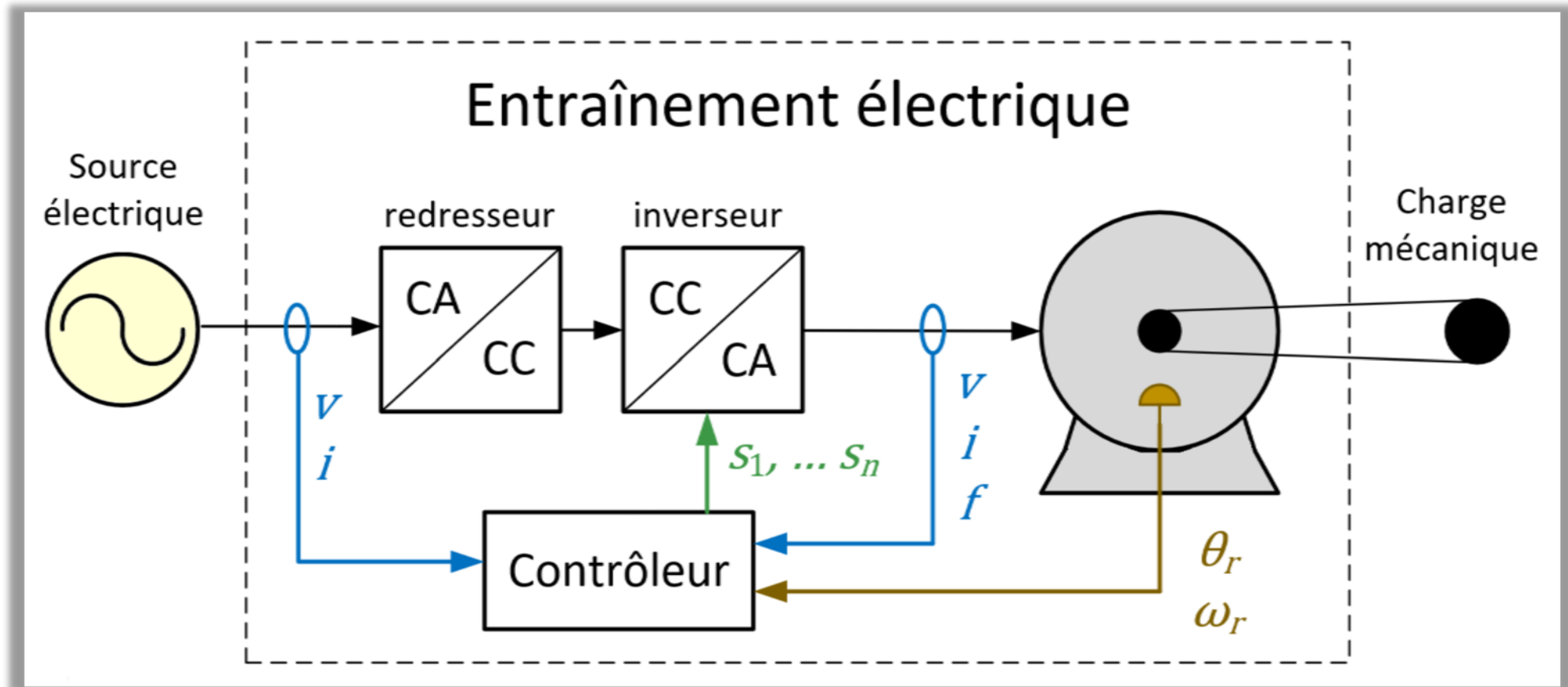


Fig. 1. Système électromécanique contrôlé avec un entraînement électrique.

Techniques de contrôle des entraînements électriques

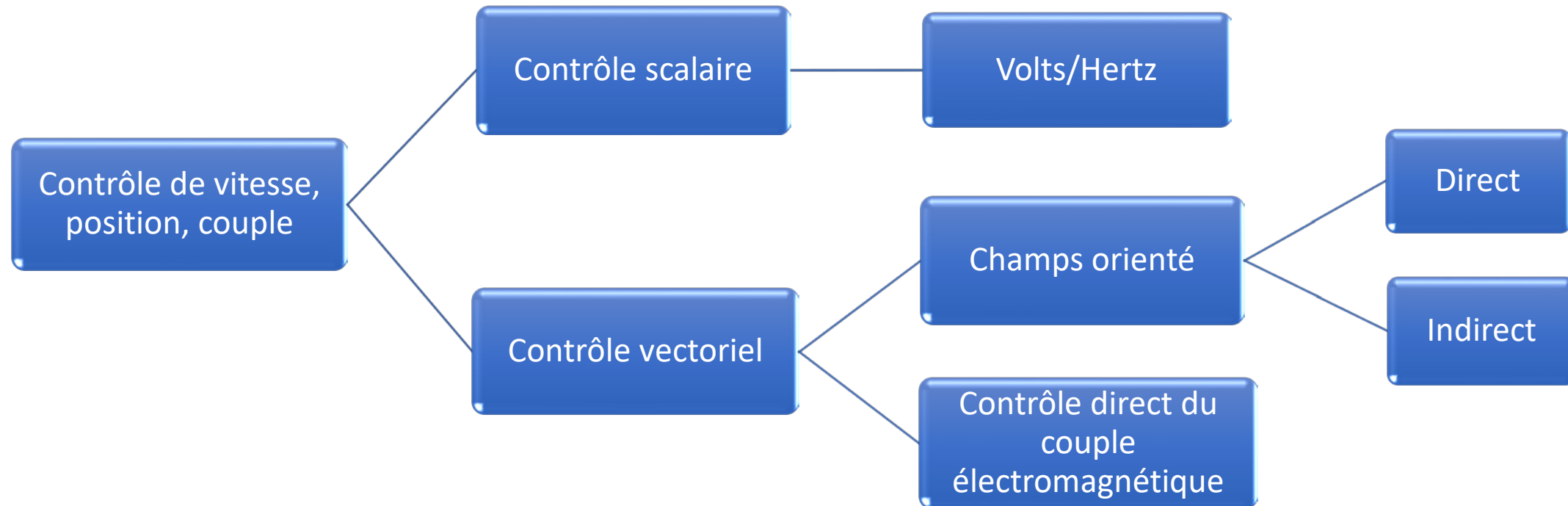


Fig. 2. Méthodes de contrôle des entraînements électriques.

Principe de fonctionnement du contrôle Volts/Hertz

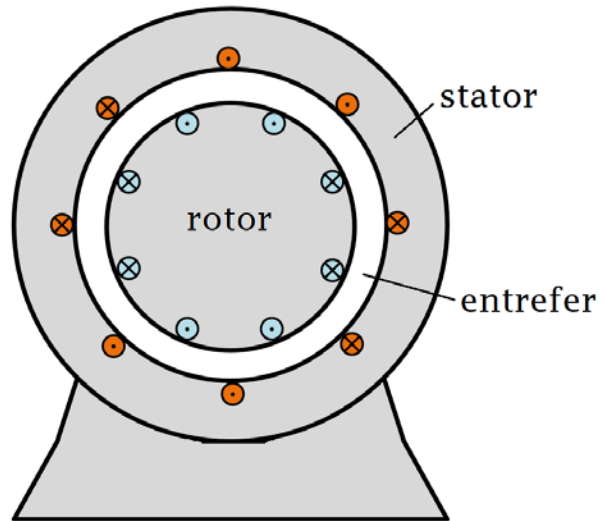


Fig. 3. Moteur d'induction symétrique.

$$v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (1)$$

En régime permanent (haute vitesse) :

$$v_{as} = R_s i_{as} + \omega_s \lambda_{as} \quad (2)$$

où : $\omega_s \lambda_{as} \gg R_s i_{as} \quad (3)$

donc, on peut négliger $R_s i_{as}$ dans (2)

Volts/Hertz contrôle

- Approximation :

$$v_a \approx \omega_s \lambda_a \quad (4)$$

- Selon (4), pour maintenir le flux magnétique λ_a constant (pour éviter saturation), la tension v_a doit être modifiée proportionnellement à la vitesse électrique ω_s .
- **Désavantage** : En fréquences basses, le contrôle est moins efficace car l'approximation donnée par (4) n'est pas précise.

Contrôle PI de la vitesse du rotor

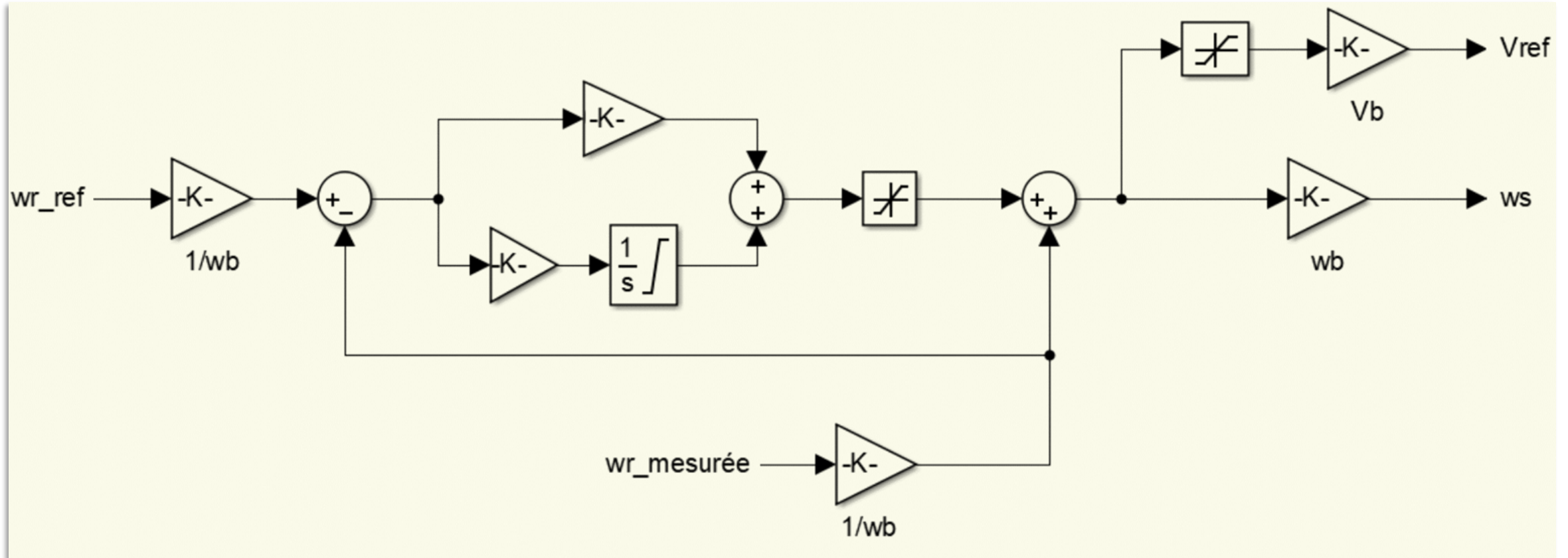


Fig. 4. Contrôleur de vitesse PI.

Inverseur PWM sinusoïdal

- L'inverseur reçoit comme entrées V_{ref} et ω_s pour produire :

$$d_a = d \cos(\theta_s) \quad (5a)$$

$$d_b = d \cos(\theta_s - 2\pi / 3) \quad (5b)$$

$$d_c = d \cos(\theta_s + 2\pi / 3) \quad (5c)$$

avec : $\theta_s = \int \omega_s dt \quad (6)$

$$d = 2V_{ref} / V_{CD} \quad (7)$$

- La composante fondamentale de la tension triphasée de sortie contient une magnitude et fréquence égales à :

$$f_1 = \omega_s / (2\pi) \quad (8)$$

$$\hat{v}_{abc} = \frac{dV_{CD}}{2} = V_{ref} \quad (9)$$

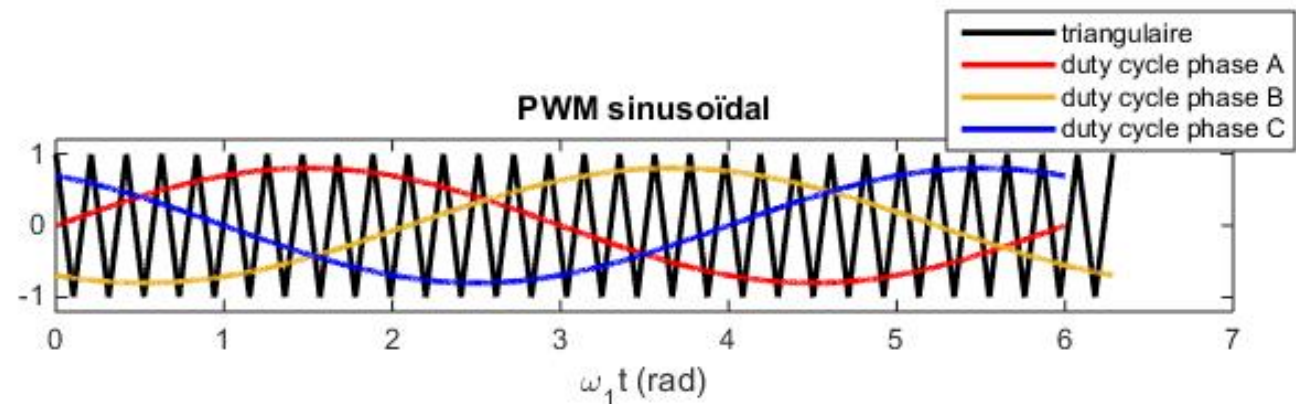


Fig. 5. PWM sinusoïdal.

Simulation d'un entraînement électrique avec contrôle Volts/Hertz

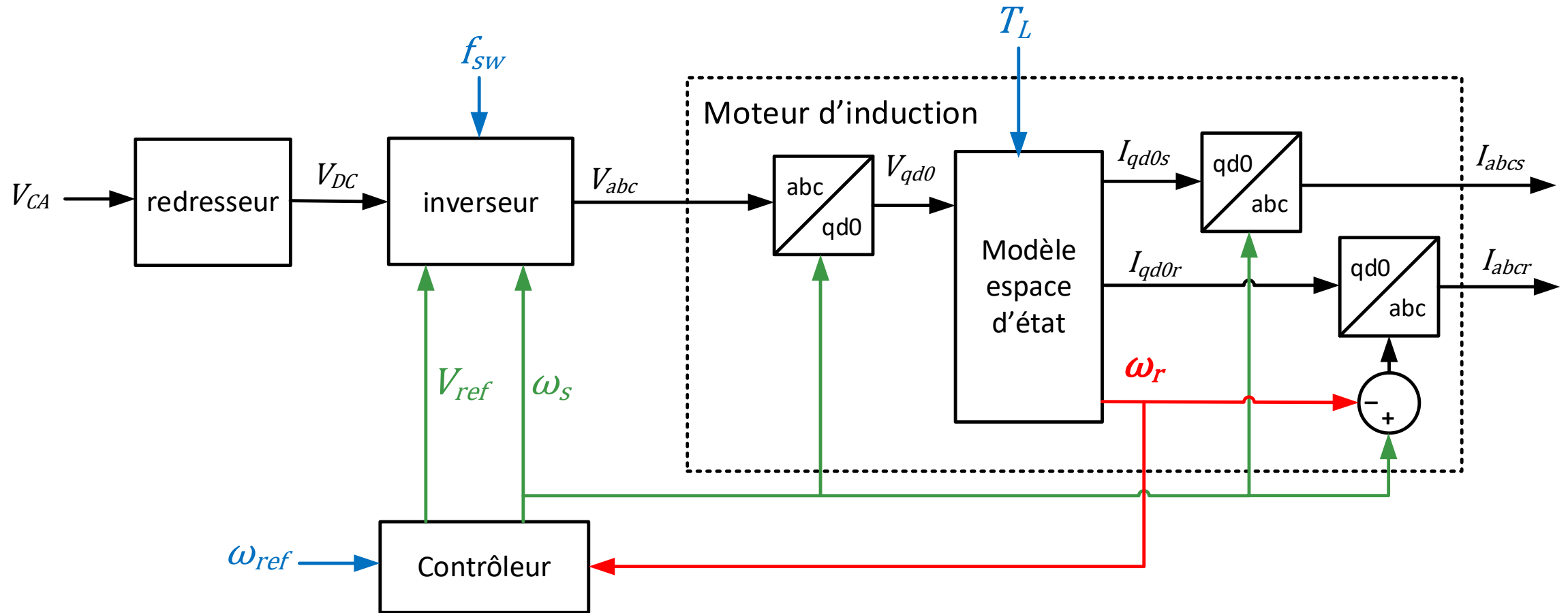


Fig. 6. Schéma de simulation d'un entraînement électrique.

Modèle en code Matlab

- Ouvrez le fichier `entrainement_volts_hz.m`.

Exercice 1. Répondez aux questions suivantes à propos de la simulation présentée.

1. Quelles sont les différences au niveau de la discrétisation du système d'espace d'état du moteur d'induction contrôlé par rapport à la simulation sans contrôle ?
2. Décrivez les évènements simulés dans le fichier.
3. Trouvez les valeurs des variables d'état et variables de contrôle pour initialiser la simulation en régime permanent sans charge.
4. Simulez une augmentation de charge (T_L) de 5 Nm à partir de 0.2 s et 7 Nm à partir de 1.5 s .
 - Utilisez initialisation en régime permanent et $T_{max} = 3 \text{ s}$.
 - Présentez les courbes des variables de contrôle V_{ref} et ω_s , ainsi que la vitesse du rotor et les courants dans le cadre abc.
 - Commentez le fonctionnement du système de contrôle.

Modèle d'espace d'état du moteur d'induction avec contrôle de vitesse

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{0r} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_s \omega_s X_{rr}}{D} & -\omega_s & 0 & \frac{r_s \omega_s X_M}{D} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_s & \frac{-r_s \omega_s X_{rr}}{D} & 0 & 0 & \frac{r_s \omega_s X_M}{D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-r_s \omega_s}{X_{ls}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r_r \omega_s X_M}{D} & 0 & 0 & \frac{-r_r \omega_s X_{ss}}{D} & -\omega_s & 0 & \psi_{dr} \\ 0 & \frac{r_r \omega_s X_M}{D} & 0 & \omega_s & \frac{-r_r \omega_s X_{ss}}{D} & 0 & -\psi_{qr} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r_r \omega_s}{X_{lr}} & 0 \\ \frac{3P^2 X_M}{8J \omega_s D} \psi_{dr} & \frac{-3P^2 X_M}{8J \omega_s D} \psi_{qr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{0r} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{P}{2J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \\ T_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

Averaged models

- Un modèle averaged prends en compte seulement la composante fondamentale de la tension produite par l'inverseur.
- Ouvriez le fichier « **moteur_induction_qd0_controle_vitesse.slx** »
- **Exercice 2.** Reproduisez les simulations faites dans l'exercice 1 avec le modèle averaged de simulink et répondez aux questions suivantes :
 1. Quelles sont les avantages des modèles « averaged » sur les modèles détaillés ?
 2. Quelles sont les différences entre les formes d'onde obtenues par rapport au modèle détaillé ?
 3. Si on superpose les courbes de la vitesse du rotor obtenues par les deux modèles, on va trouver les mêmes valeurs ? Pourquoi ?

Contrôle vectoriel, champs orienté

Le champs orienté (contrôlé) peut être :

- ❖ Flux du stator
- ❖ Flux du rotor
- ❖ Flux du air-gap

- L'objectif est de maintenir le vecteur d'espace (qd) du flux perpendiculaire au vecteur d'espace du courant.
- En choisissant le flux du rotor, il faut donc, maintenir le vecteur du flux sur un axe du système de coordonnées qd et le vecteur du courant sur l'axe restant.

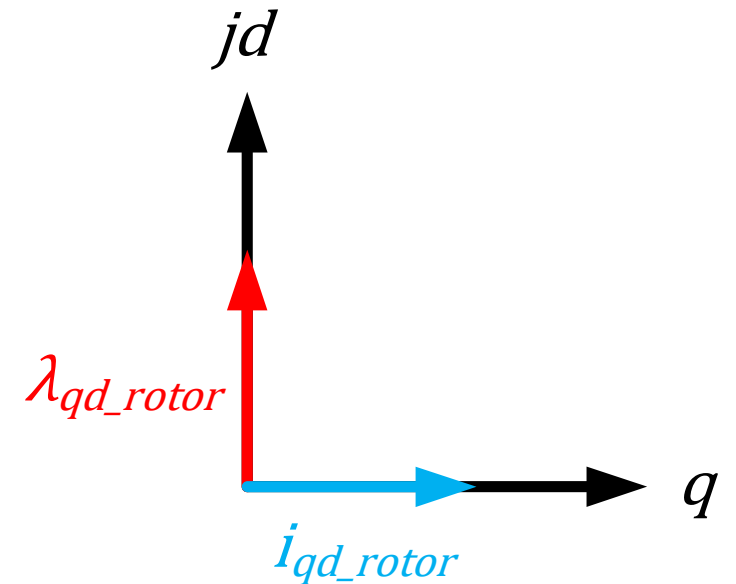


Fig. 7. Principe du contrôle vectoriel.

Contrôle de champs orienté du rotor

- Pour maintenir les vecteurs du flux et courant du rotor sur les axes qd , il faut utiliser le cadre de référence du rotor, donc :

$$\omega_e = \omega_r \quad (11)$$

- Le couple électromagnétique en fonction des variables du rotor est :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr}) \quad (12)$$

- De la Fig. 7, $\lambda_{qr} = 0$ et $i_{dr} = 0$, alors T_e devient :

$$T_e = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{dr} i_{qr}) \quad (13)$$

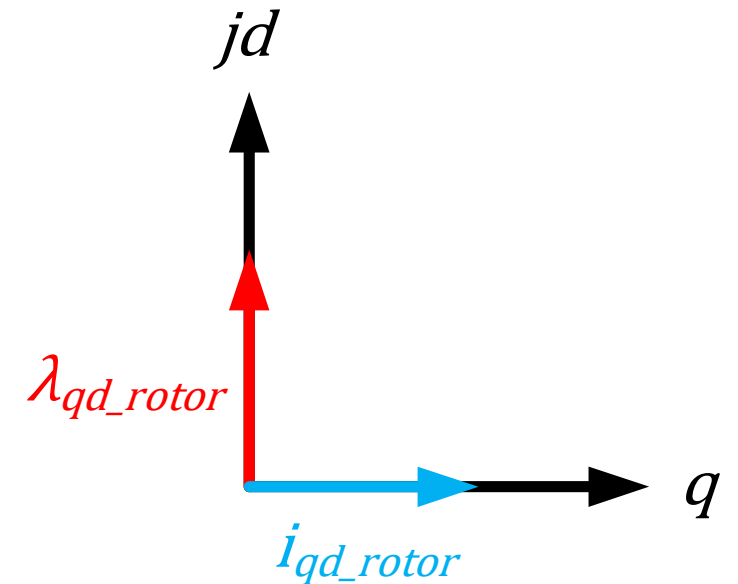


Fig. 7. Principe du contrôle vectoriel.

Contrôle de champs orienté du rotor

- En plus : $\lambda_{qr} = (L_{lr} + L_m)i_{qr} + L_m i_{qs}$ (14) $\lambda_{dr} = (L_{lr} + L_m)i_{dr} + L_m i_{ds}$ (15)

- De (14) et (15), on trouve : $i_{qr} = -\frac{L_m}{L_{lr} + L_m} i_{qs}$ (16) $i_{ds} = \frac{1}{L_m} \lambda_{dr}$ (17)

- En remplaçant i_{qr} dans (13) par (16), on a : $T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_{lr} + L_m} \lambda_{dr} i_{qs}$ (18)

- De (18) on peut trouver :

$$i_{qs} = \frac{2}{3} \frac{2}{P} \frac{L_{lr} + L_m}{L_m \lambda_{dr}} T_e \quad (19)$$

Contrôle de champs orienté direct

$$i_{qs} = \frac{2}{3} \frac{L_{lr} + L_m}{L_m \lambda_{dr}} T_e \quad (19)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{L_m} \lambda_{dr} \quad (17)$$

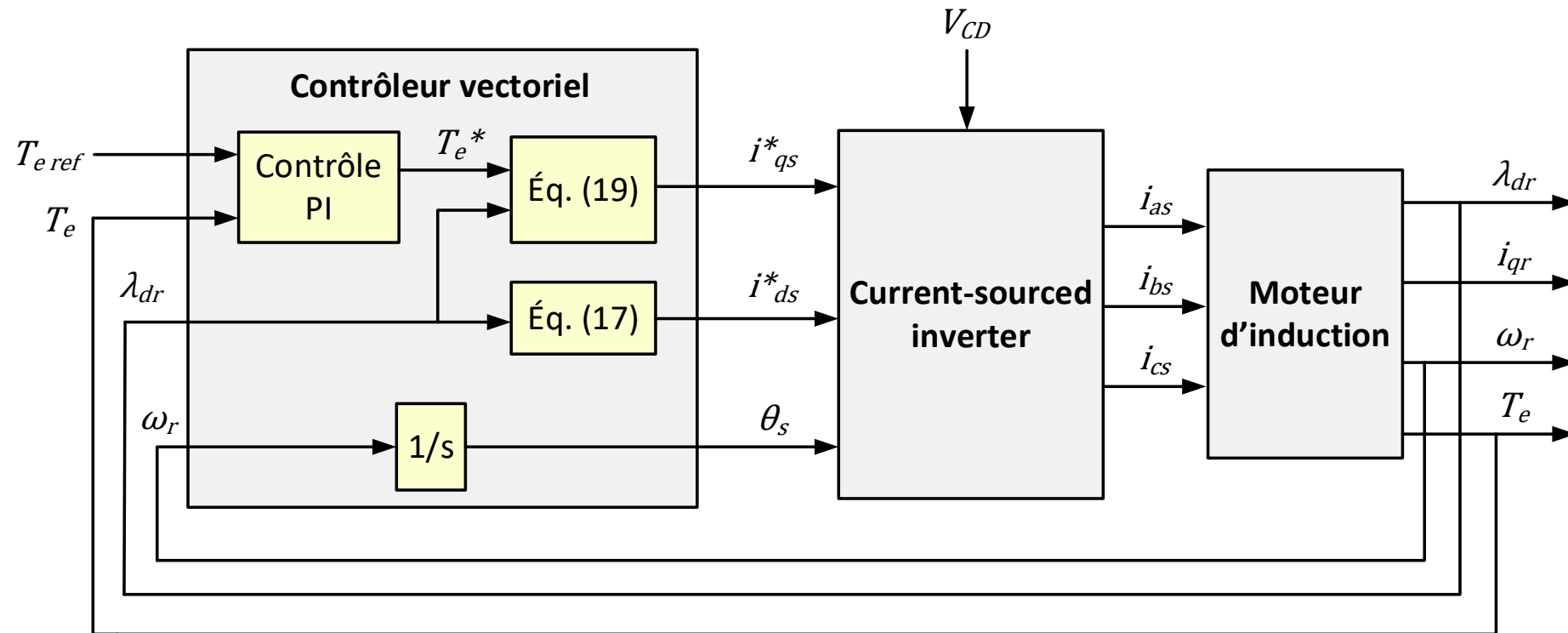


Fig. 8. Contrôle vectoriel direct.

Contrôle de champs orienté

- **Direct** – le flux est directement mesuré et contrôlé.
 - **Indirect** – le flux n'est pas mesuré directement, donc d'autres variables (courants par exemple) sont mesurés et le flux est orienté comme une estimation.
-
- Trouvez un exemple d'un entraînement avec contrôle vectoriel dans le fichier : **Exemple_controle_vectoriel.slx**

Rapport TP4

- Présentez les résultats des exercices dans un rapport.
- Date de remise: 20 avril