

# Méthodologie Causal de modélisation et de commande : application aux machines électriques

K. Hartani, Y. Miloud, A. Miloudi

Université Tahar Moulay de Saida, ALGERIE  
Kada\_hartani@yahoo.fr, Yahiamilouddz@yahoo.fr, amiloudidz@yahoo.fr

Résumé : La commande d'un processus se détermine classiquement à partir d'un modèle mathématique donné sous des formes diverses: équation différentielle, fonction de transfert, lieux de transfert, etc...Les approches classiques donnent des informations tant quantitatives que qualitatives sur les systèmes à modéliser. Dans le cas des systèmes complexes d'autres approches ont été développées pour se focaliser sur l'aspect qualitatif. La notion de Graphe apparaît alors naturellement pour informer sur les relations de cause à effet entre les variables du processus. Divers outils utilisés pour développer une modélisation en vue de la commande, une place particulière étant réservée au Graphe Informationnel Causal (GIC). Le GIC est une proposition de symbolisme et de méthodologie permettant de simplifier et de structurer la commande. Dans ce travail on donne une représentation des principes du GIC et l'application de ce dernier dans la modélisation des machines électriques et la structuration de leurs commandes sous l'environnement MATLAB /SIMULINK.

Mots clés : Graphe Informationnel Causal, Modélisation, Commande de machines à courant continu, machine asynchrone

## 1. Introduction

La conception d'un dispositif de commande repose sur une analyse préalable des dépendances entre grandeurs à contrôler et grandeurs de contrôle. L'approche par des graphes informationnels constitue une aide précieuse dans cette démarche.

Le Graphe Informationnel Causal est outil de description qualitative des phénomènes liés à un système donné. Il permet d'abord l'élaboration d'un modèle pour le système ainsi que la commande de celui-ci.

Bien connaître un système (en avoir un modèle) c'est être capable de savoir comment réagira le processus vis-à-vis des entrées. D'un point de vue commande, avoir un modèle c'est savoir quelles sont les causes et quels sont les effets. On pourra donc définir quelle est la bonne cause à fournir pour obtenir l'effet désiré. Le GIC permet une déduction des lois de commande. Cette opération systématique est appelée l'inversion.

La première partie de ce travail est consacrée à la représentation des principes du GIC.

La deuxième partie de ce travail est dédiée à une commande en vitesse de la machine à courant continu. Cette commande classique, est déduite à l'aide du graphe informationnel causal (GIC).

On a choisi comme une première application la commande de la machine à courant continu. Cette dernière est considérée, même aujourd'hui, comme l'actionneur de référence (notamment pour la simplicité de son modèle). La deuxième raison dans ce choix est aussi liée au fait que le modèle de la machine à courant continu est bien connu et simple. Il nous permet d'illustrer le GIC, dont une présentation détaillée est donnée dans le paragraphe 3.

Nous nous contenterons, dans la troisième partie, d'utiliser les principes de cet outil graphique à la modélisation et la structuration de la commande en couple d'une machine asynchrone.

## 2. Le Graphe Informationnel Causal

Le GIC est un outil de description qualitative des phénomènes liés à un système donné. Son intérêt est double: il permet d'abord l'élaboration d'un modèle pour le système ainsi que la commande de celui-ci.

La construction d'un graphe informationnel causal modélisant un processus est basée sur le strict respect du principe de causalité des systèmes physiques. Une relation entrée-sortie caractérise un objet physique, représenté par un processeur. Les relations utilisées se classent en deux catégories: les relations rigides et les relations causales.



**Figure 1.** Processeurs élémentaires du GIC

Un processeur est le support d'une relation entre une ou plusieurs grandeurs influentes et une grandeur influencée. Cette relation respecte le principe de causalité naturelle qui régit le fonctionnement de tout objet physique. La sortie d'un processeur ne dépend que des valeurs présentes et passées de ses entrées. Une telle formulation revient à exprimer la causalité sous forme intégrale. On retient à exprimer la causalité intégrale:

- si un objet accumule de l'information, la causalité est *interne*: la sortie est nécessairement une fonction de l'état énergétique, la relation alors orientée est dite *causale*. Le temps et l'état initial sont des entrées implicites non représentées. Le processeur est alors une bulle munie d'une simple flèche symbolisant une relation non inversible.

- si un objet n'accumule pas d'information, la causalité est **externe**. La sortie est fonction instantanée de l'entrée, la relation qui n'est pas orientée est alors dite **rigide**. Le processeur correspondant est une bulle avec double flèche

## 2.1 Les objets énergétiques

A l'aide de ces processeurs élémentaires, il est possible de définir plusieurs types d'objet suivant leur fonctions énergétiques:

- les **sources** sont des objets à *causalité implicite* dans le sens où la grandeur de sortie est indépendante de la grandeur d'entrée.

- les **accumulateurs** sont des objets à *causalité interne*: l'énergie fournie à l'objet, sous forme cinétique ou potentielle, est convertie sous sa forme duale par accumulation. Ainsi, pour une bobine, la grandeur influente est nécessairement la tension qui lui est appliquée alors que le flux est la variable influencée représentant l'état énergétique. On trouve en Figure 2 quelques exemples classiques de relation causale.

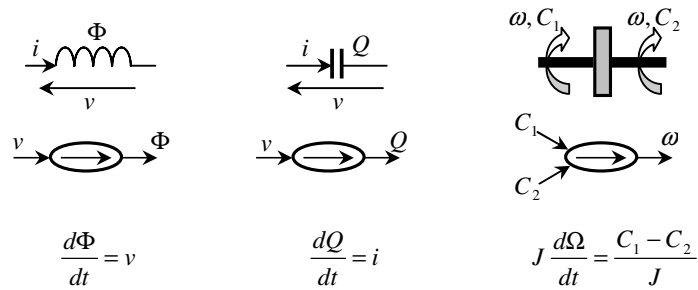


Figure 2. Exemples de relations causales

- les **dissipateurs** sont des objets à *causalité externe*, car établie uniquement par le contexte de leur mise en œuvre. L'énergie, apportée sous une forme quelconque, est totalement dissipée en chaleur: la résistance en électricité, les dispositifs à frottement visqueux en mécanique...

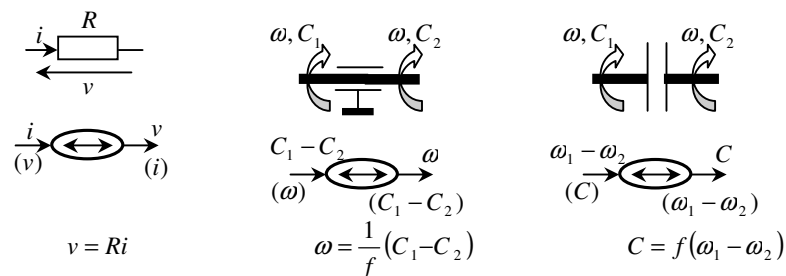
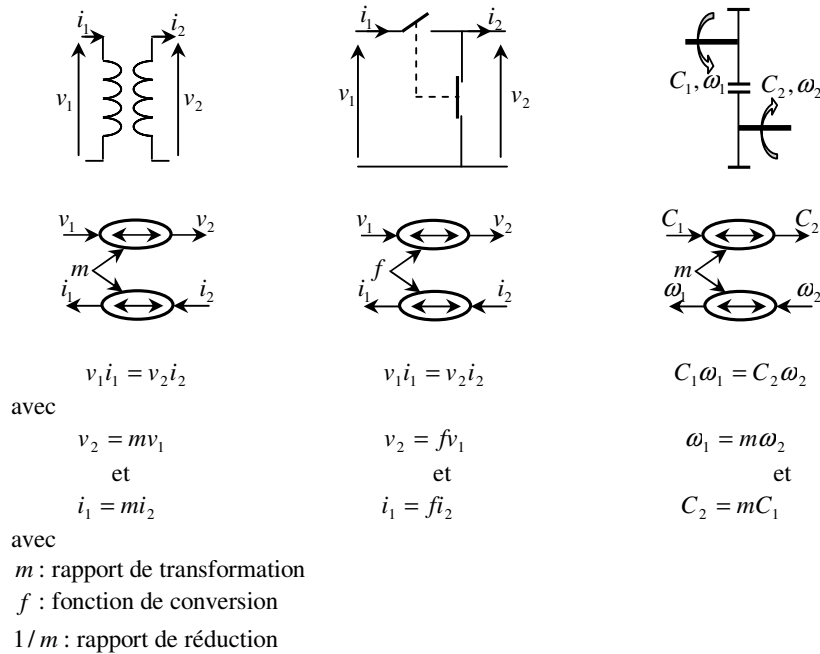


Figure 3. Objets à causalité externe

- les **objets de couplages neutres** sont des dispositifs assurant le transfert de puissance d'un groupement à un autres, sans pertes ni accumulation d'énergie. Cette neutralité entraîne la conservation de la puissance instantanée et n'induit pas la causalité qui est donc *externe*. Les objets neutres peuvent être de deux groupes. On parle de modulateur si l'entrée et la sortie sont de même nature énergétique (cinétique ou potentielle) sinon, il s'agit d'un girateur.



**Figure 4.** Objets de couplage neutres

## 2.2 La construction d'un modèle

A partir de ces objets élémentaires, il est possible de tracer le graphe complet qui sera donc le modèle GIC de système considéré. Ce modèle pourra être exploité pour la simulation [Gui-98] ou pour élaborer une loi de commande [Hau-99] de processus.

Le modèle se construit en 5 étapes:

- Localiser les sources et objets accumulateurs, déterminer leurs grandeurs influentes et influencées.
- Localiser les dissipateurs, déterminer leurs grandeurs influentes et influencées à partir des sorties des sources et accumulateurs.

- Localiser les objets neutres, déterminer leurs grandeurs influentes et influencées à partir des sorties des sources et accumulateurs
- Etablir le Graphe en interconnectant les entrées et les sorties.
- Expliciter les relations.

Le Graphe ainsi obtenu est un modèle du processus. Bien connaître un système (en avoir un bon modèle) c'est être capable de savoir comment réagira le processus vis-à-vis des entrées.

D'un point de vue commande, avoir un modèle c'est avoir quelles sont les causes et quels sont les effets. On pourra donc définir quelle est la bonne cause à fournir pour obtenir l'effet désiré. Le GIC permet une déduction des lois de commande. Cette opération systématique est appelée *l'inversion*.

### 2.3 Le modèle de la commande

Pour la conception de la commande d'un processus on applique le principe d'inversion causale [Hau-99]: "*Commander un processus c'est lui imposer la trajectoire désirée. Cette trajectoire est l'effet d'une cause de sorte qu'il suffit alors de créer la bonne cause pour avoir le bon effet*".

#### - *Le principe d'inversion:*

L'inversion de la relation associée à un processeur détermine une relation de commande elle-même associée à un autre processeur.

• **Relation rigide:** une relation rigide bijective détermine une loi de commande par *inversion directe*. La figure 5. (a) illustre ce premier principe qui conduit à déterminer la grandeur de réglage  $u_{REG}$  à partir de la trajectoire de référence  $y_{ref}$  souhaitée pour  $y$ . Il vient:

$$R \rightarrow y = f(u); \quad R_C \rightarrow u_{REG} = c(y_{ref})$$

$$\text{si } c = f^{-1} \text{ et } u = u_{REG} \text{ alors } y \rightarrow y_{ref}$$

• **Relation causale:** Dans une relation causale, le temps intervient implicitement de sorte que l'effet d'accumulation induit systématiquement une valeur initiale. Dans ces conditions, la grandeur de réglage  $u_{REG}$  est élaborée en prenant en compte, à tout instant, la situation de  $y$  par rapport à sa référence  $y_{ref}$ .

Ce second principe illustré à la figure 5. (b) est celui de l'asservissement qui, visant à minimiser l'écart  $e = y_{ref} - y$ , détermine une loi de commande par *inversion indirecte*. Il vient:

$$R \rightarrow y = f(u); \quad R_C \rightarrow u_{REG} = c(y_{ref} - y)$$

$$\text{si } c \rightarrow \infty \text{ et } u = u_{REG} \text{ alors } y \rightarrow y_{ref}$$

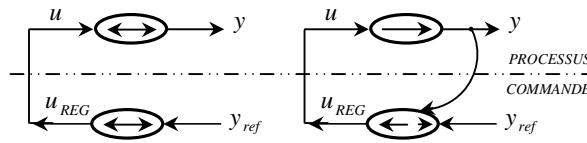


Figure 5. Principe d'inversion

Pour illustrer cette démarche on suppose qu'on doit élaborer la commande du processus présenté à la Figure 6. Ce type de processus est très souvent rencontré dans le domaine de la commande des machines électriques (exemple: la partie électrique d'une machine à courant continu ou une charge mécanique avec réducteur).

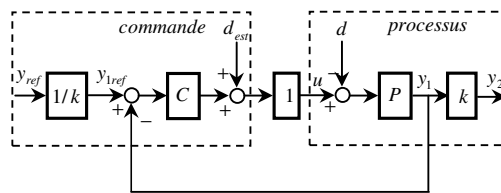


Figure 6. Illustration du principe d'inversion

Pur respecter le principe d'inversion, toute perturbation  $d$  doit être compensée soit par mesure directe, soit par une estimation  $d_{est}$ . Pour trouver la commande d'une action causale  $P$  on se sert d'un asservissement, donc d'un correcteur  $C$ . Une action rigide, symbolisée par le gain  $k$ , a son inverse  $1/k$  dans la partie commande.

On suppose un capteur idéal ainsi que le convertisseur de puissance de coefficient unitaire. Le graphe informationnel causal (GIC) est un formalisme très approprié pour illustrer cette approche. Pour cette raison on le présente en parallèle avec le schéma fonctionnel:

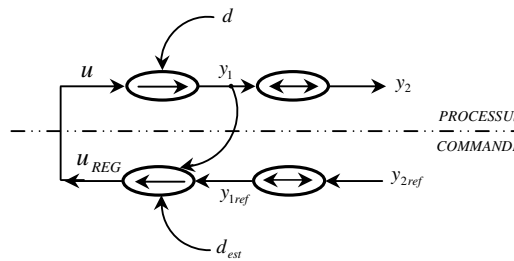


Figure 7. Exemple du principe d'inversion par le GIC

### 3. Application à la machine à courant continu

#### 3.1 Construction du modèle

Le modèle de la machine à courant continu est déduit de l'analyse par les lois physiques (loi de Faraday, loi d'Ampère, loi d'Ohm,...).

Ces lois physiques conduisent d'abord à l'équation électrique des enroulements d'induit, liant le courant  $i_{mcc}$  à la tension d'induit  $u_{ce}$  (en supposant la machine est alimentée par un convertisseur statique délivrant une tension  $u_{ce}$ ) et à la f.é.m.  $e_{mcc}$ , au travers de la résistance  $R$  et de l'inductance  $L$  de l'enroulement:

$$L \frac{di_{mcc}}{dt} = u_{ce} - Ri_{mcc} - e_{mcc} \quad (1)$$

Vient ensuite la relation de conversion électromécanique de l'interaction stator-rotor, liant la f.é.m. à la vitesse  $\Omega_{mcc}$  d'une part, le couple électromagnétique  $C_{mcc}$  au courant d'autre part, au travers de la même variable  $k$  liée au flux inducteur  $\Phi$  :

$$e_{mcc} = k\Phi\Omega_{mcc} \quad (2)$$

$$C_{mcc} = k\Phi i_{mcc} \quad (3)$$

La machine que nous considérons est une machine à courant continu à excitation séparée (à aimants permanents) donc  $k\Phi$  est une constante, appelée dans la suite  $k_\Phi$ .

La loi fondamentale de la mécanique débouche sur la relation liant la vitesse  $\Omega_{mcc}$  aux couples électromagnétique  $C_{mcc}$  et de charge  $C_r$ , à travers l'inertie  $J_{mcc}$  et du coefficient de frottements visqueux  $f_{mcc}$  de l'arbre du rotor:

$$J_{mcc} \frac{d\Omega_{mcc}}{dt} = C_{mcc} - C_r - f_{mcc}\Omega_{mcc} \quad (5)$$

Le GIC de la Figure 8 se déduit d'après les relations (1) à (4).

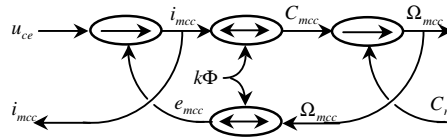


Figure 8. GIC de la machine à courant continu

### 3.2 Elaboration de la commande

Pour trouver la commande il suffit d'inverser la causalité: "de trouver la bonne cause pour produire le bon effet" (principe de l'inversion de la causalité). Une relation rigide est directement inversée, et une relation causale est indirectement inversée au travers d'un asservissement.

Le GIC de la commande est donné à la Figure 9. Une hypothèse simplificatrice est faite: capteurs et conver-tisseurs statiques idéaux.

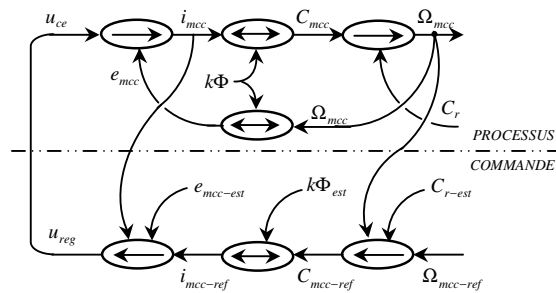


Figure 9. GIC de la commande de la machine à courant continu

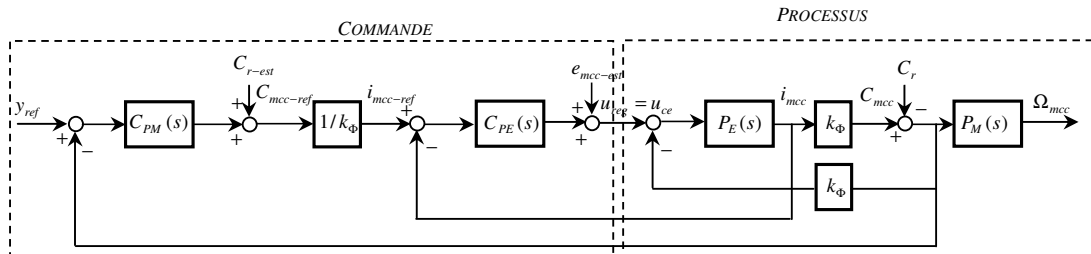


Figure 10. Commande classique d'une machine à courant continu

Le tableau donné ci-dessous donne les relations de la commande déduites de celle du processus.

Dans la partie commande, les compensations nécessaires (de la f.é.m. et du couple de charge) peuvent se faire par des grandeurs mesurées (au moyen de capteurs) ou estimées (reconstituées sur la base d'un modèle temps réel).

La figure 10 donne deux exemples d'observation appliqué à la machine à courant continu.



**Tableau 1.** Illustration des règles d'inversion

<i>Processus</i>	<i>Commande</i>
$R_1 \rightarrow$ $J_{mcc} \frac{d\Omega_{mcc}}{dt} + f_{mcc} \Omega_{mcc} = C_{mcc} - C_r$	$R_{01} \rightarrow$ $C_{mcc-ref} = C_1 \left( \Omega_{mcc-ref} - \tilde{\Omega}_{mcc} \right) + C_r$ (inversion indirecte)
$R_2 \rightarrow C_{mcc} = k_\Phi i_{mcc}$	$R_{02} \rightarrow \tilde{i}_{mcc-ref} = \left( 1 / \tilde{k}_\Phi \right) \tilde{C}_{mcc-ref}$ (inversion directe)
$R_3 \rightarrow$ $L \frac{di_{mcc}}{dt} + Ri_{mcc} = u_{ce} - e_{mcc}$	$R_{03} \rightarrow$ $u_{reg} = C_2 \left( i_{mcc-ref} - \hat{i}_{mcc} \right) + \tilde{e}_{mcc}$ (inversion indirecte)
$R_4 \rightarrow e_{mcc} = k_\Phi \Omega_{mcc}$	$R_{04} \rightarrow \tilde{\Omega}_{mcc-ref} = \left( 1 / \tilde{k}_\Phi \right) \tilde{e}_{mcc-ref}$ (inversion directe)

### 3.3 Description par fonction de transfert

On pose les hypothèses suivantes: source électrique parfaite, convertisseur électrique (hacheur) idéal, de même que les capteurs, flux constant. Le schéma fonctionnel correspondant au GIC de la commande est illustré par la figure 10 suivante.

$P_E$ ,  $P_M$  représentent les fonctions de transfert des parties électrique et mécanique de la machine, et  $C_{PE}$ ,  $C_{PM}$ , les correcteurs associés.

$$P_E(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (8)$$

$$P_M(s) = \frac{1}{J_{mcc}s + f_{mcc}} \quad (9)$$

La Figure 11 représente le modèle Simulink du principe d'inversion par le GIC appliquée à la machine à courant continu.

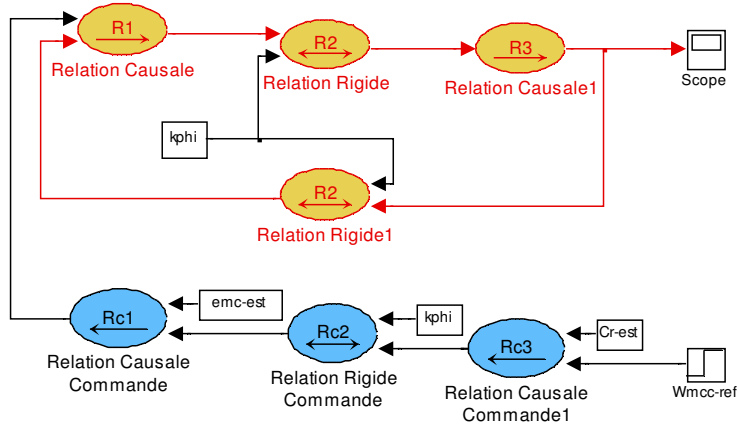


Figure 11. Modèle Simulink de la commande d'une machine à courant continu par le GIC

## 5. Application à la machine asynchrone

### 5.1 Construction du modèle

Les calculs menés et relatifs à la modélisation de la MAS dans le repère de Concordia lié au stator, aboutissant aux expressions des tensions statoriques :

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = R_{sr}i_{s\alpha} + \sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + e_{s\alpha} & [R_\alpha] \\ v_{s\beta} = R_{sr}i_{s\beta} + \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + e_{s\beta} & [R_\beta] \end{cases} \quad (10)$$

Avec :  $R_{sr}$  désigne la résistance totale ramenée au stator.

$\sigma L_s$  désigne l'inductance de fuite totale ramenée au stator.

Les termes  $e_\alpha$  et  $e_\beta$  résultent de couplages électromécanique et électromagnétique entre les enroulements selon les équations :

$$\begin{cases} e_{s\alpha} = e'_\alpha + e''_\alpha \\ e_{s\beta} = e'_\beta + e''_\beta \end{cases} \quad (11)$$

De manière très similaire aux forces électromotrices développées par une machine à courant continu, nous choisissons d'exprimer les tensions  $e'_\alpha$  et  $e'_\beta$  sous la forme:

$$\begin{cases} e'_\alpha = k_\alpha \Omega_m & [R_{g\alpha}] \\ e'_\beta = k_\beta \Omega_m & [R_{g\beta}] \end{cases} \quad (12)$$

avec

$$\begin{cases} k_\alpha = -P \frac{M}{L} \phi_r \sin(\theta_s) & [R_{f\alpha}] \\ k_\beta = P \frac{M}{L} \phi_r \cos(\theta_s) & [R_{f\beta}] \end{cases} \quad (13)$$

où  $\theta_s$  désigne la position angulaire du flux rotorique dans le repère lié au stator.

Le système d'équations (14) complète la modélisation de la conversion électromécanique :

$$\begin{cases} c_{e\alpha} = k_\alpha i_{s\alpha} & [R_{g\alpha 2}] \\ c_{e\beta} = k_\beta i_{s\beta} & [R_{g\beta 2}] \end{cases} \quad (14)$$

Les relations  $[R_{g\alpha}]$  et  $[R_{g\beta}]$  caractérisent un groupement gyrateur de couplage équivalent à celui mis en évidence pour la machine à courant continu (Fig. 8).

Enfin, les échanges d'énergie électromagnétique entre le moteur et son alimentation sont à celui à l'origine de termes de couplage supplémentaires donnés par :

$$\begin{cases} e''_\alpha = -\frac{M}{L_r^2} R_r \phi \cos(\theta_s) \\ e''_\beta = -\frac{M}{L_r^2} R_r \phi_r \sin(\theta_s) \end{cases} \quad (15)$$

L'équation différentielle régissant l'évolution de la vitesse du rotor est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = c_e - c_r \quad [R_m] \quad (16)$$

On exprime le module du flux rotorique en régime permanent par l'équation:

$$\phi_r = M(i_{s\alpha} \cos(\theta_s) + i_{s\beta} \sin(\theta_s)) \quad (17)$$

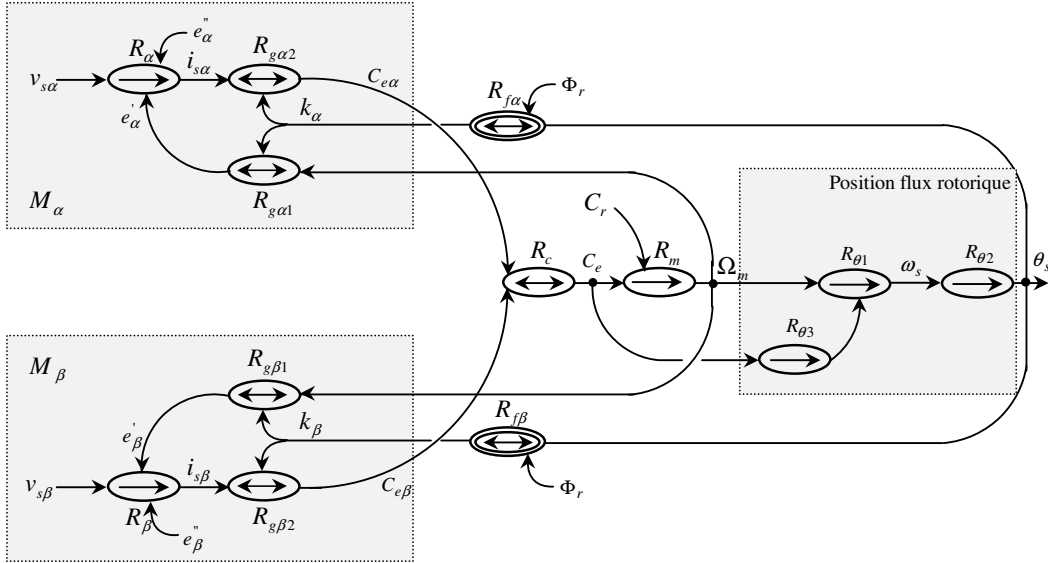
Les relation classiques de cinétique interne sont données par :

$$\omega_s = p\Omega_m + \omega_r \quad [R_{\theta 1}] \quad (18)$$

$$\theta_s = \int \omega_s dt \quad [R_{\theta 2}] \quad (19)$$

où  $\omega_r$  désigne la pulsation de glissement qui s'exprime par:

$$\omega_r = \frac{R_r}{p\phi_r^2} c_e [R_\theta] \quad (20)$$



**Figure 12.** GIC de la machine asynchrone – Production du couple

Le modèle ainsi obtenu montre que la machine généralisée est, d'un point de vue électromécanique, équivalente à l'association de deux machines à courant continu élémentaires fictives ( $M_\alpha$  et  $M_\beta$ , Figure 12), couplées mécaniquement. Chacune est le siège d'une force électromotrice (f.e.m.  $e'_\alpha$  et  $e'_\beta$ ) et contribue au couple électromagnétique global selon l'équation :

$$c_e = c_{e\alpha} + c_{e\beta} [R_c] \quad (21)$$

Le modèle GIC résultant de cette modélisation est donné Figure 12.

## 5.2 Elaboration de la commande

Le modèle GIC (Fig. 12) montre ici que la machine diphasée est équivalente à deux machines à courant continu, de manière équilibrée, au couple électromagnétique

globale développé par la machine triphasée. Dans ces conditions, la structuration de la commande met en évidence la difficulté à définir les couple de référence pour chacune de ces machines fictives: la résolution de ce problème fait l'objet de ce paragraphe.

L'objectif est de déterminer les tensions instantanées de réglage  $v_{s\alpha-ref}$  et  $v_{s\beta-ref}$  à appliquer aux bornes de la machine à partir d'une référence donnée du couple électromagnétique  $c_{e-ref}$ .

L'application du principe d'inversion directe se voit confronté à la non-bijectivité de la relation  $[R_c]$ : en effet, il s'agit alors d'exprimer les références des couples  $c_{e\alpha-ref}$  et  $c_{e\beta-ref}$  à partir d'une seule et même entrée  $c_{e-ref}$ . Il est nécessaire ici de définir une relation supplémentaire pour obtenir totalement la structure de commande. Le degré de liberté supplémentaire offert par l'inversion d'une relation non bijective peut être utilisé dans le but d'optimiser le fonctionnement du processus à commander [HAU99-2].

On fait donc, dans le cadre de la commande développée, le choix classique de maintenir le module du flux rotorique à sa valeur nominale.

Il revient également à considérer que l'évolution du flux rotorique est régie par une succession de permanents. On suppose alors, qu'à chaque instant, le flux rotorique est égal à sa valeur de référence selon l'équation:

$$\Phi = \Phi_{r-ref} \quad (22)$$

En régime permanent, l'expression du flux dans la machine est donnée par l'équation (17). Les expressions des courants  $i_{\alpha s}$  et  $i_{\beta s}$ , fonctions des couples élémentaires  $c_{e\alpha}$  et  $c_{e\beta}$  selon l'équation (14), permettant alors de définir la relation supplémentaire liant  $c_{e\alpha-ref}$  et  $c_{e\beta-ref}$ :

$$c_{e\beta-ref} \sin^2(\tilde{\theta}_s) - c_{e\alpha-ref} \cos^2(\tilde{\theta}_s) = p \frac{\Phi_{r-ref}^2}{2L_r} \sin(2\tilde{\theta}_s) \quad (23)$$

L'inversion de la relation  $[R_c]$  impose:

$$c_{e\alpha-ref} + c_{e\beta-ref} = c_{e-ref} \quad (24)$$

On déduit, des équations (23) et (24), l'expression des couples de référence  $c_{e\alpha-ref}$  et  $c_{e\beta-ref}$ :

$$\begin{cases} c_{e\alpha-ref} = c_{e-ref} \sin^2(\tilde{\theta}_s) - p \frac{\Phi_{r-ref}^2}{2L_r} \sin(2\tilde{\theta}_s) \\ c_{e\beta-ref} = c_{e-ref} \cos^2(\tilde{\theta}_s) + p \frac{\Phi_{r-ref}^2}{2L_r} \sin(2\tilde{\theta}_s) \end{cases} \quad (25)$$

Une manipulation trigonométrique de ces expressions montre que chaque couple de référence est la somme d'un terme constant (égal au demi-couple de référence) et d'un pulsatoire de phase  $2\tilde{\theta}_s$  [DEG00] :

$$\begin{cases} c_{e\alpha-ref} = \frac{1}{2}c_{e-ref} - \frac{1}{2}(c_{e-ref} \cos(2\tilde{\theta}_s) - p \frac{\Phi_{r-ref}^2}{L_r} \sin(2\tilde{\theta}_s)) \\ c_{e\beta-ref} = \frac{1}{2}c_{e-ref} + \frac{1}{2}(c_{e-ref} \cos(2\tilde{\theta}_s) - p \frac{\Phi_{r-ref}^2}{L_r} \sin(2\tilde{\theta}_s)) \end{cases} \quad (26)$$

Il apparaît donc que chacune des machines élémentaires, telles que les définissons au moyen du modèle GIC de la Figure 12, fournit la moitié du couple auquel s'ajoute une composante pulsatoire de même amplitude et de fréquence double de celle de la vitesse électrique de rotation du flux rotorique dans le repère de Concordia lié au stator.

Les couples élémentaires de référence étant totalement définis, nous disposons alors des éléments nécessaires pour déterminer la structure globale de commande (Figure 13).

La structure de commande est obtenue par application des principes systématiques d'inversion du modèle GIC. Les relations de commande se déduisent donc par inversion (relation avec exposant "-1"), les relations d'observation reconstituant des variables internes s'obtiennent simplement par "recopie" (relations et variables repérées par des tildes "~"). Les grandeurs mesurées sont repérées par le symbole "^".

Les références des courants, élaborées par  $R_{s\alpha}^{-1}$  et  $R_{s\beta}^{-1}$  nécessite la connaissance des coefficients de couplage électromécanique  $k_\alpha$  et  $k_\beta$ . Ces derniers sont reconstitués grâce à une estimation de la position angulaire du flux rotorique.

La structure d'estimation de l'angle  $\tilde{\theta}_s$  est donné Figure 13. Basée sur les équations (18) à (19), elle suppose qu'à chaque instant le couple moteur et le flux rotorique sont égaux à leurs valeurs de référence (Relation  $[\tilde{R}_{\theta 1}]$ ). Pour le flux rotorique, cette hypothèse est celle déjà formulée équation (22) et que l'on se propose de vérifier, a posteriori, sur les résultats du contrôle. Concernant le couple électromagnétique, cette hypothèse résulte :

- du caractère rigide des relations liant ce couple aux courant  $i_{s\alpha}$  et  $i_{s\beta}$ .

Enfin, les relations  $R_\alpha^{-1}$  et  $R_\beta^{-1}$  caractérisent les asservi-ssment des courants; ces relations prévoient la compensation des f.e.m.

La figure 15 représente le modèle Simulink du principe d'inversion par le GIC appliquée à la machine asynchrone.

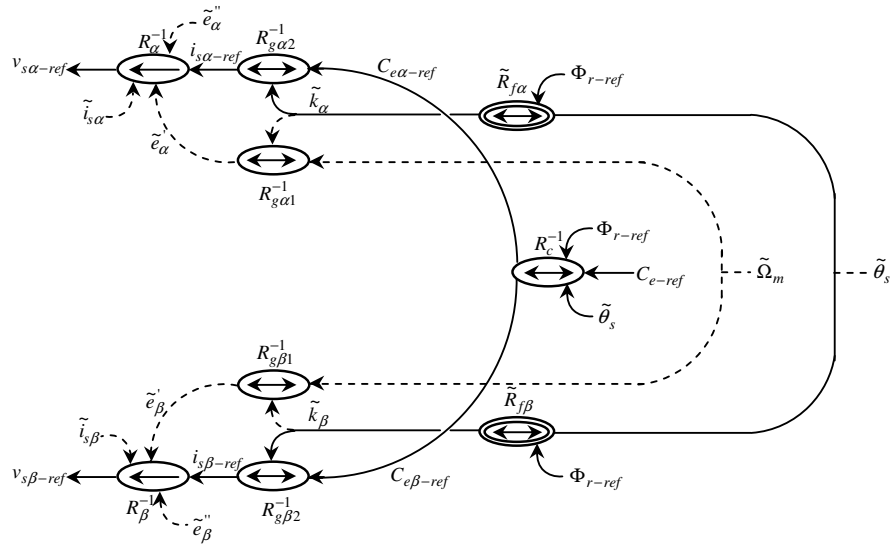


Figure 13. Structure de commande en couple de la machine asynchrone

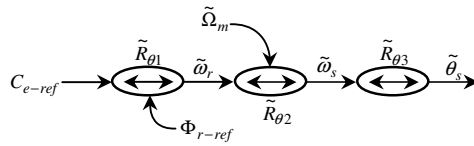


Figure 14. Estimation de position du flux rotorique

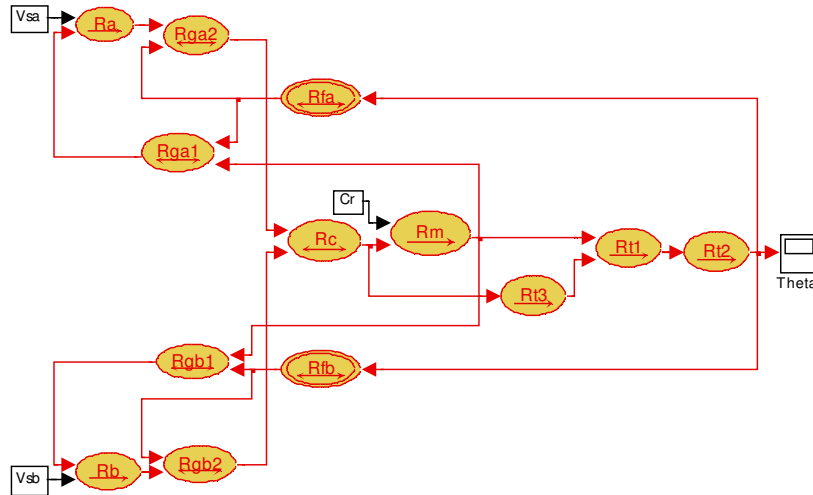


Figure 15. Modèle Simulink GIC de la machine asynchrone

## 6. Conclusion

Dans ce travail, nous avons donné une représentation des principes du graphe informationnel causal (GIC) et l'application de ce dernier dans la modélisation d'une machine à courant continu et une machine asynchrone, et la structuration de leurs commande en vitesse et en couple respectivement. L'approche par le GIC constitue une aide précieuse dans la conception d'un dispositif de commande.

## Bibliographie

1. J. Faucher, M. Grandpierre, : Les graphes informationnels de causalité – Application à la simulation des systèmes électriques. Journée du club EEA Electrotechnique, Paris, (1992)
2. J. Hautier, J. Faucher, : Le graphe informationnel causal Outil de modélisation et de synthèse des commandes de processus électromécaniques. Cahier spécial de l'enseignement Supérieur, pp 51-58,n°785.
3. J. Hautier, : Le graphe informationnel causal en Electrotech-nique. Journée 3EI, (1999)
4. Ph. Degobert, :Modélisation causale appliquée aux systèmes électriques. Séminaire CPGEPTSI. (2004)
5. J.P. Caron, :Systèmes électrotechniques. Edition Technip Sciences et technologies.