
Identification des paramètres d'un entraînement électromécanique motorisé par une MCC à aimants

— Fiche pratique —

Préambule

Les systèmes industriels comportent des constituants électriques et/ou mécaniques, voire thermiques ou fluidiques (hydraulique, pneumatique), dont la modélisation est rendue nécessaire pour leur intégration dans des modèles établis en vue d'étudier leur comportement en simulation.

Cette fiche aborde la mesure des paramètres d'un entraînement électromécanique, c'est à dire une association alimentation-machine-charge mécanique dont l'actionneur est une machine à courant continu à aimants (MCC).

Les paramètres identifiés dans les manipulations proposées dans ce document sont ceux du modèle de connaissance de la MCC obtenus par sa modélisation physique.

Objectifs et intérêt de cette fiche

Cette fiche technique rappelle les différents essais, leur description et le matériel nécessaire à l'identification numérique des paramètres du modèle de l'entraînement électromécanique.

Pour évaluer expérimentalement les éléments de ce modèle, la MCC est placée dans des situations particulières ou alimentée de manière à révéler ou masquer certains paramètres.

Aperçu global du matériel nécessaire

Descriptions	Rep.
Machine(s) à courant continu à identifier	MCC1/2
Alimentation de puissance réglable en tension (exemple : ALMV01)	ALIMP
Maquette « Hacheur-Onduleur » (exemple : Didalab réf. DMS PED020420)	MQhach
Alimentation symétrique +12V/-12V ou +15V/-15V suivant le hacheur	ALIM
Tachymètre manuel pour mesures avec ou sans contact	TACH
Appareils de mesure électriques (voltmètres, ampèremètres, multimètres, etc.)	V/A/M
Oscilloscope avec base de temps lente	OSC
Sondes de tension et de courant isolées	SondeU/I
Charge résistive : rhéostat de puissance, à choisir et régler suivant les besoins	Rh

Remarque : les repères (Rep) sont mentionnés au début des parties descriptives des différents essais expérimentaux pour renvoyer à ce tableau récapitulatif.

I. Modèle dynamique simplifié de l'entraînement avec MCC

I.1. Modèles de la MCC

L'étude de la MCC à aimants permet d'établir son modèle électrique de l'induit (Figure 1) : résistance R en série avec l'inductance L des fuites magnétiques d'induit et une f.e.m e donnée par la relation $e = K \cdot \omega$, où ω est la vitesse angulaire de son rotor et K sa constante électromagnétique.

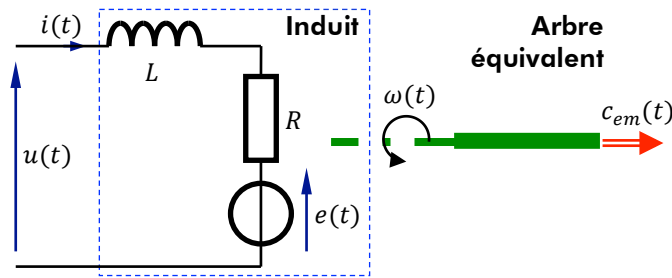


Figure 1 – Modèle d'induit de la MCC.

Différents modèles de la MCC

Suivant le nombre de paramètres pris en compte dans la MCC, nous pouvons définir des modèles plus ou moins fins de la MCC :

- Si le courant n'intervient pas dans la mise en équation de la maille de l'induit, seule la f.e.m. e est prise en compte : c'est le **modèle E** de la MCC. C'est aussi le modèle du convertisseur électromécanique parfait (exempt de défauts) ;
- Si le courant intervient au travers de la chute de tension ohmique ($Ri(t)$ dans la résistance R), nous avons affaire au **modèle R-E** de la MCC. Ce modèle est le plus approprié lors d'une étude en régime permanent ;
- Enfin, quand la dérivée du courant intervient, c'est par la tension aux bornes de l'inductance qui marque un effet dynamique du courant avec le **modèle R-L-E** de la MCC. Ce modèle permet une étude en régime variable (ou dynamique ou transitoire).

En résumé, soit le courant n'intervient pas dans le modèle (i^0), soit il intervient au travers de la résistance R (Ri^1) ou alors par sa dérivée ($L \frac{di(t)}{dt}$).

I.2. Modèle de la charge mécanique

Quand la MCC entraîne une charge mécanique, toutes les masses en mouvement (en translation ou en rotation) constituent un arbre mécanique équivalent de moment d'inertie J . Il est animé du même mouvement de rotation que le rotor : dans l'isolement, l'arbre et le rotor sont solidaires. Il tourne à la vitesse angulaire ω qui est le module du vecteur vitesse angulaire $\vec{\Omega}$ porté par l'axe de l'arbre mécanique (Figure 2).

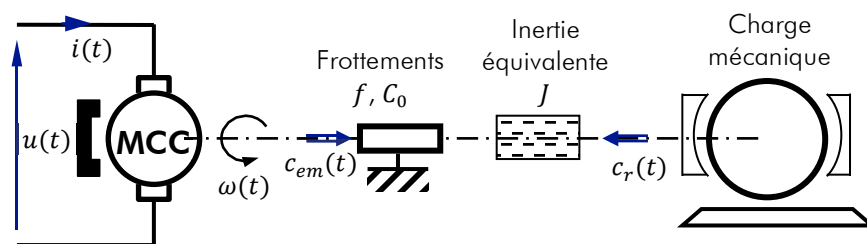


Figure 2 – Association moteur-génératrice.

Le couple c_{em} produit par le rotor est appliqué à l'arbre équivalent. Ce couple est directement proportionnel au courant d'induit de la MCC : $c_{em} = K \cdot i$. Ce couple est compensé par le couple résistant c_r de la charge auquel s'ajoute le couple de pertes mécaniques globalisé c_p au niveau de l'arbre équivalent. Ce couple est le résultat des effets d'un couple de frottement fluide de coefficient de frottement f et d'un couple de frottement sec de module constant C_0 , si bien que par superposition, nous avons :

$$c_p = f \cdot \omega + C_0$$

I.3. Équations dynamiques de l'entraînement

Les équations de fonctionnement dans le domaine temporel issues de la physique et de la description des §1.1 et §1.2 sont rappelées dans le Tableau 1, à gauche. Pour mémoire, et en vue de réaliser les schémas blocs attachés aux relations, leur transformation dans le domaine de Laplace (de variable complexe p , grandeur homogène à une pulsation) s'applique aux variations des grandeurs. Rappel : $TL(x(t)) = TL(\tilde{x}(t)) = X(p)$. Ces relations sont données dans le Tableau 1 à droite.

Domaine temporel	Domaine de Laplace	N°
$u(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t)$	$U(p) = R \cdot I(p) + Lp \cdot I(p) + E(p)$	(R1)
$c_{em}(t) = K \cdot i(t)$	$C_{em}(p) = K \cdot I(p)$	(R2)
$e(t) = K \cdot \omega(t)$	$E(p) = K \cdot \Omega(p)$	(R3)
$J \frac{d\omega(t)}{dt} = c_{em}(t) - f\omega(t) - C_0 - c_r(t)$	$Jp \cdot \Omega(p) = C_{em}(p) - f\Omega(p) - C_r(p)$	(R4)

Tableau 1

II. Identification des paramètres électriques de la machine

II.1. Loi f.e.m. – vitesse et coefficient électromécanique K

Pour établir la loi d'évolution de la f.e.m. en fonction de la vitesse de rotation de la machine, nous nous plaçons en régime permanent (toutes les grandeurs sont constantes, invariantes dans le temps) :

- La machine identifiée **MCC1** est entraînée par une autre machine, identique ou différente (**MCC2**). **MCC1** fonctionne donc en génératrice.
- L'induit n'est relié à aucune charge électrique, elle est donc « à vide », c'est à dire que le courant de l'induit est strictement nul, $I = 0$, puisque le circuit électrique est ouvert :
 - La chute de tension dans la résistance de l'induit est nulle ($RI = 0$) ;
 - La chute de tension dans l'inductance de l'induit est nulle ($R \frac{dI}{dt} = 0$) ;
 - Toute la f.e.m. de l'induit est mesurable aux bornes de l'induit.
- Suivant la configuration ou l'équipement du système, la vitesse de l'arbre peut être mesurée par :
 - Un tachymètre mécanique (**TACH**) au contact de l'arbre ou opto-électronique à son voisinage. Un repère bien net et de bon contraste sera dessiné sur l'arbre ;
 - Une génératrice tachymétrique de coefficient électromécanique K_{gt} connu ;
 - Un codeur opto-électronique délivrant un signal numérique sur l'une de ses voies (le nombre de point par tour doit être connu).
- En restant inférieure à la tension nominale U_n , il faut faire varier la tension de l'induit délivrée par une alimentation de puissance (**TACH**) pour faire varier la vitesse d'entraînement pour relever des couples de points vitesse-f.e.m. ($E-N$).
- Reporter les points de mesure dans une feuille de calcul. Évaluer la pulsation de rotation sur une autre ligne. À défaut de moyens informatiques, effectuer un tracé $E(N)$ manuel.
- Évaluer le rapport des valeurs ou effectuer une régression linéaire pour déterminer la pente de la droite, c'est à dire **la valeur de la constante K** .

II.2. Résistance d'induit

Pour obtenir la résistance de l'induit de la machine, il faut travailler dans les conditions suivantes :

- Régime statique (permanent) pour éviter l'influence de l'inductance de l'induit, $i(t) = I$;
- Éviter tout mouvement de rotation de l'arbre ($\Omega = 0$) pour que la force électromotrice (E) reste nulle ;
- Dans ces conditions, seule la résistance cumulée d'induit avec celle au contact balais-lames de collecteur a un effet.

Pour bloquer l'arbre, utiliser un moyen mécanique qui n'endommage aucune pièce : pince, vis bague avec vis pointeau ou clavette, etc.

Si cela est possible, deux machines identiques peuvent être associées mécaniquement par leur arbre et alimentées « en opposition » (Figure 3) en respectant les polarités indiquées. Elles produisent alors deux couples antagonistes dont la somme est nulle, maintenant les rotors et l'arbre au repos.

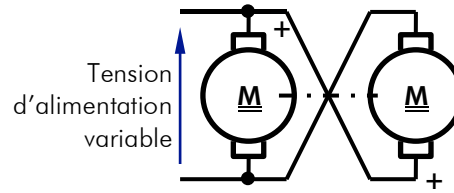


Figure 3 – Association en opposition parallèle des machines.

Pour évaluer les résistances R , identiques, faire croître la tension à partir de zéro jusqu'à ce que le courant circulant dans l'association parallèle atteigne de courant nominal I_n : mesurer ces deux grandeurs, U et I . En déduire la résistance $R = 2U/I$ (2 machines) ou $R = U/I$ avec une seule.

Il est aussi possible de relever plusieurs couples de valeurs, d'évaluer la résistance et de faire la moyenne des évaluations pour en déduire une résistance moyenne : utiliser une feuille de calculs).

Si la durée de manipulation le permet, laisser le courant circuler suffisamment longtemps afin que la résistance d'induit s'échauffe assez pour atteindre l'équilibre thermique de la machine.

II.3. Inductance d'induit

Pour mesurer l'inductance de la machine, son induit est alimenté avec un hacheur 4 quadrants conformément à la représentation de la Figure 4. Deux modes opératoires sont possibles :

- En régime transitoire à rotor bloqué quand le hacheur est piloté à très faible fréquence de hachage ;
- En régime dynamique quand la fréquence de hachage est de quelques kilohertz alors que la machine tourne à vitesse constante.

Une inductance supplémentaire L_s (appelée aussi inductance de lissage) est placée en série avec la machine. L'inductance équivalente $L + L_s$ est notée L_{eq} . Pour les essais, $L_s = 10$ ou 100 mH, ou une autre valeur à choisir suivant les disponibilités matérielles.

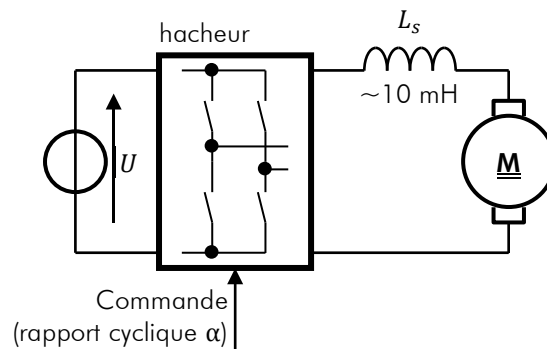


Figure 4 – Alimentation de la machine par le hacheur.

Le montage utilisant la maquette **MQhach** est donné partiellement sur la Figure 5.

Alimentation symétrique (commande)

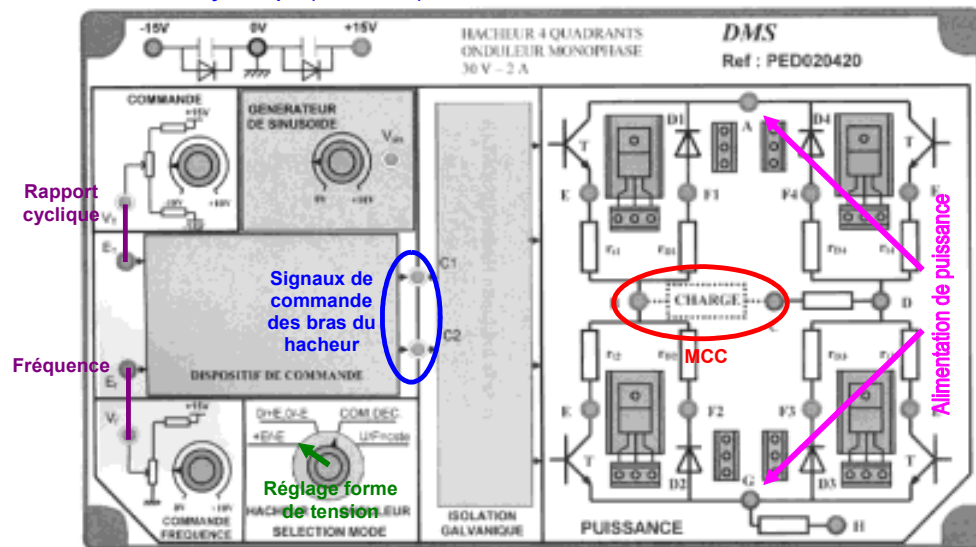


Figure 5 – Câblage de la maquette (cas d'une maquette DMS).

Travail à faible fréquence en régime transitoire électrique à rotor bloqué

La fréquence de hachage $f = \frac{1}{T}$ est choisie pour être minimale et permettre de faire croître le courant de 0 à U/R . Le régime permanent de courant doit être atteint.

- Relever la croissance du courant durant le régime transitoire avec un oscilloscope (**OSC**) ;
- Tracer $i(t)$ à une échelle suffisante pour pouvoir relever sa valeur quand il atteint 63% de sa valeur en régime permanent (U/R , sachant que R provient de la mesure précédente) ;
- À l'intersection de la courbe et de la droite horizontale du courant $0,63U/R$, mesurer le temps qui correspond à la constante de temps électrique $\tau_e = L_{eq}/R$ du circuit ;
- La valeur de l'inductance d'induit est donnée par : $L = \tau_e R - L_s$

Remarque : avec un oscilloscope numérique, il est aussi possible de relever les points de mesure sur un support de stockage (clef USB, par exemple), puis d'importer les valeurs sur un ordinateur par l'intermédiaire d'un fichier CSV. Effectuer ensuite les tracés ou les traitements numériques dans un tableur ou en langage Python, Scilab ou Matlab pour donner directement la valeur de l'inductance.

Travail à fréquence élevée en régime dynamique

La fréquence de hachage $f = \frac{1}{T}$ est maintenant choisie pour être de quelques kilohertz (suivant les possibilités offertes par le hacheur). Cette fois la machine peut être mise en rotation car ce fonctionnement n'a aucune incidence sur le mode d'évaluation de la valeur de L_{eq} .

- Observer le courant avec une sonde de courant (**Sondel**) et un oscilloscope (**OSC**) ;
- Effectuer les réglages du hacheur pour obtenir un courant d'induit en dents de scie (évolution linéaire du courant obtenu grâce à l'ajout de L_s) ;
- Ajuster le rapport cyclique α à $\frac{1}{2}$ pour obtenir l'ondulation crête à crête de courant ΔI maximale. Relever cette valeur ;
- Relever aussi f ou T , et ΔU la variation de tension en sortie du hacheur (voltmètre **V** ou **SondeU**, éventuelle).

Dans ce cas, l'étude du fonctionnement du hacheur montre que :

$$L = \alpha(1 - \alpha) \frac{\Delta U \cdot T}{\Delta I} - L_s = \frac{\Delta U}{\Delta I} \cdot \frac{T}{4} - L_s$$

Ces essais « dynamiques » mettent en œuvre des ressources élaborées avec l'emploi d'un hacheur. L'essai à rotor bloqué peut être simplifié en mettant sous tension le circuit d'induit et en assurant un déclenchement unique de l'oscilloscope (ou « one shot ») pour observer la croissance du courant.

III. Identification des paramètres mécaniques de l'entraînement

Les paramètres mécaniques de la machine concernent l'arbre équivalent quand elle fonctionne à vide, sans charge mécanique solidaire de l'arbre de sortie ($c_r(t) = 0$). On y distingue ainsi :

- Le **couple de pertes** c_p qui résulte d'un **frottement sec** C_0 , indépendant de la vitesse angulaire ω , et d'un **frottement fluide** proportionnel à la vitesse angulaire ω , $c_f = f \cdot \omega$. Ce couple global est donc limité à la superposition de C_0 et c_f : $c_p = f \cdot \omega + C_0$. Les couples dépendant des puissances supérieures, ω^2 en particulier, ne sont pas étudiés.
- Le **moment d'inertie** J de la partie mobile en rotation, à savoir le rotor et l'arbre de sortie.

III.1. Couple de pertes c_p

Les paramètres C_0 et f sont déterminés conjointement par un essai à tension d'induit et vitesse variable en régime permanent mécanique (vitesse constante) et électrique (courant et tension d'induit constants).

Dans ces conditions, le modèle de connaissance de l'EEM se réduit à l'écriture des relations en régime permanent :

$$(R1) - U = R \cdot I + E ;$$

$$(R2) - C_{em} = K \cdot I ;$$

$$(R3) - E = K \cdot \Omega ;$$

$$(R4) - C_{em} = C_0 + f \cdot \Omega.$$

La pulsation de rotation Ω est utilisée pour établir les lois de fonctionnement, mais c'est la fréquence de rotation N qui est utilisée dans la pratique. L'usage d'un tableur ou d'un programme permet de passer aisément de l'une à l'autre de ces grandeurs.

Avec (R1) et (R3) : $U = R \cdot I + K \cdot \Omega$ (R5) et avec (R4) et (R2) : $C_0 + f \cdot \Omega = K \cdot I$ (R6). Parmi U , I et Ω , seules les grandeurs électriques sont relevées tandis que Ω peut être déduite avec (R5) pour éviter l'emploi d'un tachymètre (ou autre, Cf. §II.1). Les paramètres R et K étant déjà déterminés, il ne reste donc qu'à évaluer les deux paramètres C_0 et f .

En résumé, pour déterminer C_0 et f , il suffit de relever le courant I (**A**) et la tension U (**V**) d'induit et d'en déduire la fréquence de rotation N pour différents points de fonctionnement. Deux points de fonctionnement (U_1, I_1) et (U_2, I_2) suffisent, mais de 5 à 10 couples de valeurs peuvent être envisagés pour corriger les évaluations successives.

Nous avons alors :

$$\Omega_1 = \frac{(U_1 - R \cdot I_1)}{K} \text{ et } \Omega_2 = \frac{(U_2 - R \cdot I_2)}{K} \text{ avec (R5),}$$

$$\text{puis } f = K \frac{I_2 - I_1}{\Omega_2 - \Omega_1} \text{ et } C_0 = K \frac{\Omega_1 I_2 - \Omega_2 I_1}{\Omega_2 - \Omega_1} \text{ avec (R6)}$$

Ces relations peuvent être aisément implantées dans une feuille de calcul ou un script pour déterminer les paramètres mécaniques de la charge.

III.2. Moment d'inertie J de l'arbre équivalent

Le moment d'inertie J caractérise le comportement dynamique du mouvement le l'arbre équivalent : un essai dynamique est nécessaire pour déterminer ce paramètre. Cet essai consiste à laisser libre l'arbre de la MCC pour ne le soumettre qu'à ses défauts mécaniques : pas de charge ni de couple moteur. L'arbre est donc « lâché », d'où le nom de l'essai.

Mise en œuvre

À partir de la relation (R4), nous observons que nous éliminons l'effet de la charge avec un essai à vide ($c_r = 0$). Le couple produit par la MCC alors quelle tourne à la vitesse angulaire Ω_0 est supprimé par annulation du courant en ouvrant le circuit d'induit ($i = 0 \Rightarrow c_{em} = 0$, à $t = 0$). Il vient alors :

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = -f\omega(t) - C_0$$

Soit :

$$\frac{J}{f} \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = -\frac{C_0}{f} \quad (R7)$$

Nous pouvons identifier la constante de temps mécanique : $\tau_m = \frac{J}{f}$.

Pour mettre en œuvre la relation (R7), nous relevons la tension aux bornes de l'induit de la MCC avec un oscilloscope (**OSC** et éventuellement **SondeU**) quand il est ouvert : nous avons donc affaire à la f.e.m. d'induit.

La relation (R7) combinée avec (R3) devient :

$$\frac{J}{f} \frac{de(t)}{dt} + e(t) = -K \frac{C_0}{f} \quad (R8)$$

L'équation différentielle (R8) montre que nous pouvons mener l'essai sans capteur de vitesse.

La résolution de (R8) permet d'exprimer la f.e.m. $e(t)$ par :

$$e(t) = \left(E_0 + \frac{KC_0}{f} \right) e^{-\frac{t}{\tau_m}} - \frac{KC_0}{f}$$

E_0 est la f.e.m. (ou la tension d'induit) mesurée juste après l'annulation du courant d'induit i^1 .

À $t = t_a$, la tension e s'annule, tout comme la vitesse ω : la machine s'arrête.

Tous calculs faits, l'expression du moment d'inertie J s'exprime :

$$J = \frac{f t_a}{\ln\left(1 + \frac{f E_0}{K C_0}\right)} \quad (R9)$$

Pour mesurer J , il est donc nécessaire de relever la tension E_0 (**OSC** et éventuellement **SondeU**) entre le début du lâcher, à l'ouverture de l'induit, et la durée d'arrêt t_a .

Variante si le coefficient de frottement fluide f est très faible (seul le couple C_0 subsiste)

Quand le frottement est essentiellement sec, c'est à dire quand $f\omega \ll C_0$, l'équation différentielle est plus simple : $J \frac{d\omega(t)}{dt} = -C_0$, soit $\frac{de(t)}{dt} = -\frac{KC_0}{J}$.

Nous avons alors la solution triviale : $e(t) = -\frac{KC_0}{J} t + E_0$.

La f.e.m. s'annule en $t = t_a$, donc

$$J = \frac{KC_0}{E_0} t_a \quad (R10)$$

Cette solution correspond :

- À l'intersection de la tangente à l'origine de la réponse exponentielle avec l'axe $e = 0$;
- ou à l'équivalent de la relation (R10) quand f est proche de zéro.

Mise en œuvre pratique

Le câblage consiste à mettre en œuvre l'induit comme le montre le montage de la Figure 6.

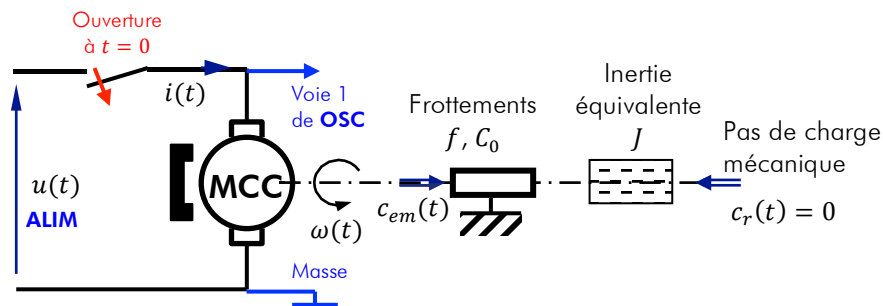


Figure 6 – Schéma pour un essai de lâcher.

¹ À ce propos, noter que $u(0^-) = e(0^-) + Ri(0^-) = E_0 + RI_0$ et $u(0^+) = e(0^+) + Ri(0^+) = e(0^+) = E_0$. Une discontinuité de tension est observée au niveau de la mesure de la tension (en particulier à l'oscilloscope).

IV. Application à l'émulation de charge mécanique

En accouplant deux machines à courant continu, l'une fonctionnant en moteur (**MCC1**), l'autre en génératrice (**MCC2**), il est possible d'obtenir un couple de charge sur l'arbre du moteur de type fluide, c'est à dire proportionnel à la vitesse angulaire (Figure 7).

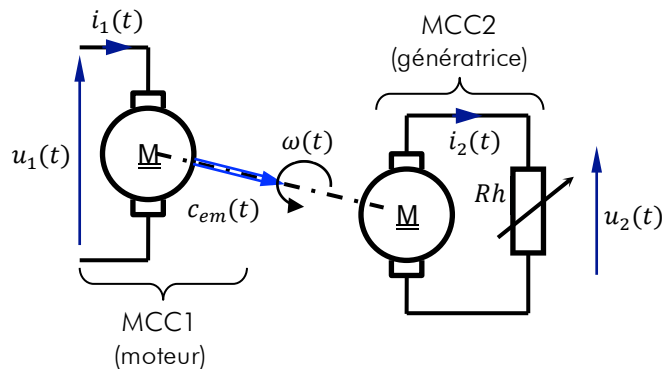


Figure 7 – Association moteur-générateur.

Mise en équation

Les paramètres et grandeurs relatifs à MCC1 sont indicés « 1 ». Pour MCC2, l'indice est « 2 ».

La mise en équation de MCC1, MCC2 et l'arbre équivalent commun en régime permanent donne les relations inscrites dans le Tableau 2.

MCC1	MCC2	Arbre
$U_1 = E_1 + R_1 I_1$ (R11)	$U_2 = E_2 - R_2 I_2$ (R12)	
$C_{em1} = K_1 I_1$ (R13)	$C_{em2} = K_2 I_2$ (R14)	
$E_1 = K_1 \Omega$ (R15)	$E_2 = K_2 \Omega$ (R16)	
	$U_2 = R_h \cdot I_2$ (R17)	$C_{em1} - C_{em2} = C_{01} + C_{02} + (f_1 + f_2) \Omega$ (R18)

Tableau 2

Les relations du Tableau 2 permettent d'exprimer le couple délivré par MCC1 :

Avec (R18) : $C_{em1} = C_{01} + C_{02} + (f_1 + f_2) \Omega + C_{em2}$

Or, avec (R14) : $C_{em2} = K_2 I_2$ et avec (R12), (R16) et (R17) : $C_{em2} = \frac{K_2^2}{R_2 + R_h} \Omega$.

En regroupant ces deux résultats : $C_{em1} = C_{01} + C_{02} + (f_1 + f_2) \Omega + \frac{K_2^2}{R_2 + R_h} \Omega$.

Interprétation

Cette relation laisse apparaître :

- Le couple de frottement sec total, $C_{0t} = C_{01} + C_{02}$;
- Le coefficient de frottement fluide total, $f_t = f_1 + f_2$;
- Le couple de charge de MMC1 par MCC2, $C_{rf} = \frac{K_2^2}{R_2 + R_h} \Omega$.

Conclusion

Le couple de charge opposé par MCC2 sur l'arbre est de type frottement fluide car dépendant de la vitesse angulaire Ω . Il est ainsi possible de réaliser une charge mécanique équivalente présentant un couple de type « frottement fluide ». Le mode de réalisation de cette charge fictive est appelé émulation d'une charge mécanique. Cette méthode peut être généralisée en pilotant le courant I_2 débité par MCC2 avec une source de courant contrôlée pour réaliser tout type de couple résistant : constant, proportionnel à Ω (avec une charge électrique résistive dans le circuit d'induit de MCC2), inversement proportionnel à Ω ou proportionnel à Ω^2 (cas des ventilateurs), etc.