

IV.1-INTRODUCTION :

Parmi les problèmes que pose la commande des systèmes physiques, celui de la synthèse des lois de commande performantes vis-à-vis de la précision mais aussi suffisamment robustes pour assurer la stabilité. La diversité des structures de commandes est liée aux objectifs fixés d'une part et aux contraintes sur la qualité du modèle du procédé. Dans l'espoir d'apporter une contribution à cet axe de recherche, l'étude de ce chapitre porte sur une structure de commande réputée comme une structure de commande robuste en l'occurrence la Commande à Modèle Interne (IMC ; Internal model control). L'IMC a la particularité de se présenter comme une généralisation de la boucle ouverte. A partir d'une commande de modèle on modifie la consigne en prenant en compte l'écart de comportement qu'il peut y avoir entre la sortie du procédé et celle du modèle. En revanche la désadaptation du modèle intervient dans la condition de stabilité du système. Pour pallier ce problème un filtre dit de robustesse est introduit au niveau du signal d'erreur. Pour assurer une erreur nulle entre la consigne et la sortie du procédé, le correcteur doit être égal à l'inverse du modèle. Malheureusement, cette propriété est souvent irréalisable notamment dans le cas d'un système à déphasage non minimal ou d'un système dont le degré relatif est non nul. Dans cette optique, le travail de cette thèse propose des solutions qui permettent de déterminer un correcteur qui s'approche au mieux de l'inverse du modèle.

Ainsi, le travail présenté dans ce chapitre s'inscrit dans le cadre de développement d'une stratégie, pour asservir la vitesse de la (MSAP), basée sur la commande à modèle interne (IMC). En effet, cette approche permet d'injecter une commande additionnelle ; ceci la rend beaucoup plus robuste et surmonte l'inconvénient de la commande vectorielle classique.

En réalité. Le concept de la (IMC) occupe un rôle comportant dans l'analyse de la stabilité transitoire du fait qu'elle est capable d'améliorer les performances obtenues avec le régulateur classique PI aussi bien qu'avec sans découplages des axes (dq).

IV.2-Structure de base de l'IMC:

Comme son nom l'indique, la commande à modèle interne (I.M.C) incorpore une simulation du processus par un modèle M interne dans sa structure de commande.

Le procédé G muni de la structure IMC peut se schématiser comme l'indique la figure 1. C et M sont respectivement les fonctions de transfert du correcteur et du modèle M . Le procédé est représenté par le transfert G reliant sa sortie à la commande. P est une perturbation non mesurée et additive sur la sortie du procédé.

Dans la structure de base de l'IMC, la commande U issue du correcteur C est appliquée simultanément au procédé G et à son modèle M . L'IMC exploite alors cet écart de comportement pour corriger l'erreur sur la consigne. Le signal d'erreur comprend l'influence des perturbations extérieures ainsi que les erreurs de modélisation

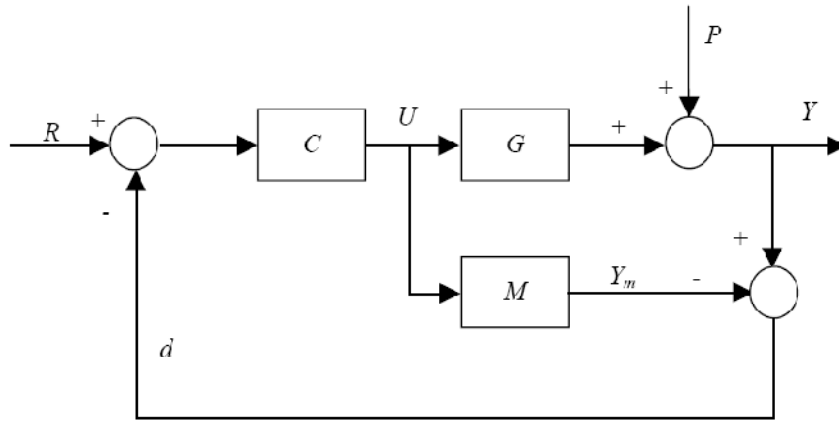


Fig. IV-1 structure de la commande IMC

Les propriétés que nous allons décrire s'appliquent aussi bien en temps continu qu'en temps discret. Dans le but d'alléger les notations on ne précisera pas dans quel cas, continu ou discret, on se place.

Selon la figure 1 on obtient :

$$U = C(R - d) \quad (\text{IV. 1})$$

$$d = (y - y_m) \quad (\text{IV. 2})$$

$$Y = GU + P \quad (\text{IV. 3})$$

$$y_m = MU \quad (\text{IV. 4})$$

$$d = P + (G - M)U \quad (\text{IV. 5})$$

$$U = C(R - P) - C(G - M)U \quad (\text{IV. 6})$$

$$U(1 + C(G - M)) = C(R - P) \quad (\text{IV. 7})$$

Donc, il en résulte :

$$Y = \frac{CG}{1 + C(G - M)}R + \frac{1 - CM}{1 + C(G - M)}P \quad (\text{IV. 8})$$

IV.3- Stabilité :

Si nous supposons pour l'instant que le modèle est une parfaite représentation du modèle, alors le signal de retour est égal à l'influence des perturbations (équation 5). Il n'est donc pas affecté

par l'action de la commande. Ainsi, la structure est équivalente à un schéma en boucle ouverte et le problème de stabilité associé au signal de retour disparaît. Le système global est stable si et seulement si chacun du procédé et du correcteur est stable.

$$Y = CGR + (1 - CG)P \quad (IV. 9)$$

Si le modèle n'imité pas parfaitement le comportement dynamique du procédé alors le signal de retour exprime chacune des influences de la perturbation d'une part et de l'erreur de modélisation d'autre part. Ainsi, cette différence produit un signal d'erreur qui peut déstabiliser la boucle, d'où l'intérêt de filtrer le signal de retour en vue d'avoir une réaction moins rapide aux perturbations pour conférer à l'ensemble une certaine robustesse vis-à-vis d'erreurs de modélisation.

IV.4- Analyse du correcteur

A partir de l'équation 8, il apparaît que si alors on a $C = M^{-1}$ alors, $Y = R$, ceci quels que soient la perturbation P et l'écart entre G et M . Cette propriété sous entend que le procédé est stable. Ceci se révèle en fait inaccessible. Examinons, dans un premier temps, les principaux problèmes que l'on peut rencontrer pour construire l'inverse du modèle. Ce dernier se révèle irréalisable physiquement lorsque le modèle a un degré relatif non nul. Rappelons que dans le cas discret, l'utilisation d'un bloqueur d'ordre zéro pour échantillonner le modèle introduit d'ors et déjà un retard égal à une période d'échantillonnage. D'autre part, lorsque le modèle est à déphasage non minimal, la condition de stabilité du pré compensateur défend de compenser les zéros instables du modèle.

Dans le cas où il n'est pas possible d'inverser le modèle pour une des raisons précédentes, nous avons proposé des méthodes pour la synthèse d'un correcteur stable et physiquement réalisable. Le correcteur obtenu sera un inverse du modèle selon un critère donné. Ce point sera développé en détails dans les deux chapitres suivants

Une solution possible pour résoudre ce problème a été soulevée par divers auteurs. Les auteurs ont choisit un modèle inversible (par exemple un modèle statique), sans se soucier de l'écart qu'il fait avec le procédé. Malheureusement cette solution conduit à un système bouclé souvent instable surtout si le modèle est différent du procédé.

IV.5- Problème lié à la structure de base de l'IMC

A l'application du signal de commande U sur le procédé G et le modèle M en présence de la perturbation, le signal d'erreur ou l'écart d contient deux types de signaux :

$$d = P + (G - M) U \quad (\text{IV. 10})$$

Cet état de fait peut engendrer des phénomènes d'instabilité si le signal d'écart d est en phase avec le signal de commande U . Ceci nécessite donc d'instaurer un filtre permettant de conférer la robustesse en stabilité au système bouclé.

Le degré de conformité du modèle sera en accord avec les performances que l'on peut espérer de la commande si on prend :

$$C = M^{-1} \quad (\text{IV. 11})$$

On a alors un transfert sortie - consigne égal à l'unité :

$$\frac{Y}{R} = 1 \quad (\text{IV. 12})$$

IV.6- Structure de commande à modèle interne modifiée

La stabilité du système est fonction de celles du correcteur C , du modèle M , du procédé G et de la valeur des racines de l'équation caractéristique : $1 + C(G - M) = 0$ Autrement dit, elle dépend de la synthèse du correcteur C vis-à-vis de l'écart $(G-M)$.

Des chercheurs [6-10] proposent de séparer le problème de la synthèse du correcteur, dont le but premier est d'être proche de l'inverse du modèle, du problème de stabiliser le système pour un correcteur C et un écart entre G et M donnés. Pour cela, ils introduisent un filtre F , dit de robustesse, qui sera placé dans la boucle de retour. Son rôle est d'assurer la stabilité du système. Avec un tel filtre, l'équation caractéristique est de la forme

$$1 + CF (G - M) = 0$$

La structure IMC munie du filtre de robustesse peut être schématisée suivant la figure suivante :

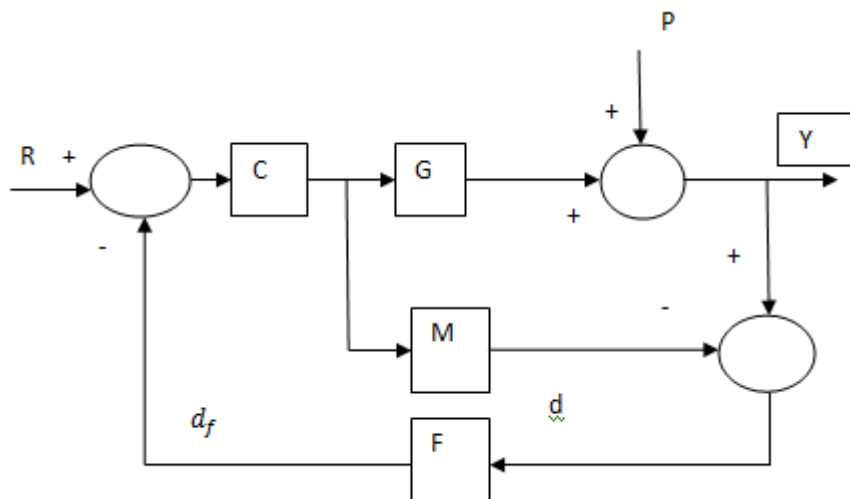


Fig .IV-2 structure de l'IMC avec filtre de robustesse

Le filtre de robustesse permet d'imposer la dynamique de rejet de la perturbation P indépendamment de la dynamique de poursuite de la consigne. Donc son rôle est d'introduire une certaine robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation. Ce filtre est généralement un filtre passe-bas d'ordre faible agissant sur le signal de retour.

La propriété d'annulation de l'erreur statique fait intervenir le filtre F . Dans le cas continu, on doit avoir [1-10] :

$$C(0) F(0)M(0) = 1 \quad (\text{IV.13})$$

Avec, $F(0) = 1$

Il est à noter que le fait de filtrer l'écart d en vue d'assurer la stabilité du système face à un éventuel écart entre G et M , a l'inconvénient de ralentir la dynamique de compensation de la perturbation P non mesurée en sortie, ce qui est inutile puisque ce signal est indépendant de la commande, et donc n'influence pas la condition de stabilité du système.

IV.7-Modèle de référence :

Le modèle de référence noté P_r est introduit au niveau de la consigne. Il permet de spécifier le comportement dynamique que l'on désire obtenir à la sortie du procédé ceci en vue d'adoucir la commande et de l'adapter au mieux à la dynamique du procédé.

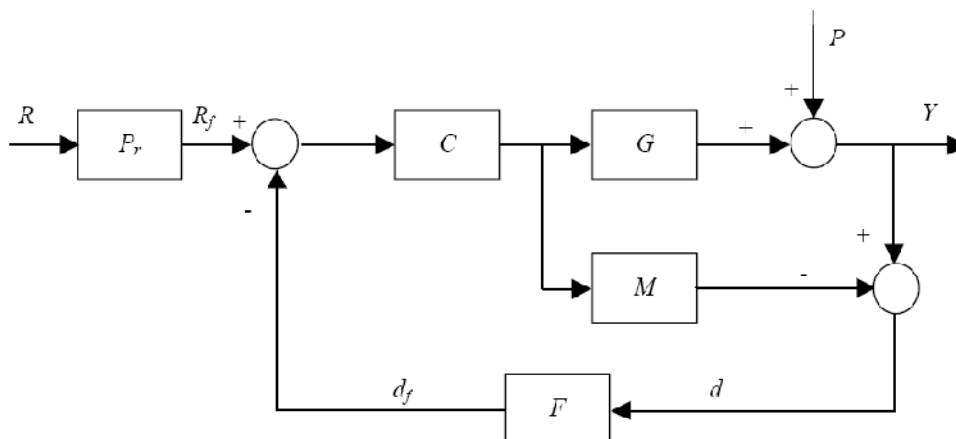


Fig.4-3-Structure de l'IMC avec filtre de robustesse et modèle de référence

L'asservissement de la sortie du procédé se fera en considérant, non pas la consigne, mais la consigne filtrée R_f . Il est à noter que l'écart filtré R_d intervient aussi dans le calcul de la commande

Le schéma de la structure IMC précédent conduit aux équations suivantes :

$$U = \frac{RCP_r}{1 + CF(G - M)} + \frac{(1 - CFM)}{1 + CF(G - M)} \quad (\text{IV. 14})$$

$$Y = \frac{CRP_r}{1 + CG(G - M)} + \frac{(1 + CFM)}{1 + CF(G - M)} \quad (\text{IV. 15})$$

Pour avoir une erreur statique nulle le correcteur, le modèle, le modèle de référence et le filtre doivent satisfaire les relations suivantes :

$$C(0)F(0)M(0) = 1 \quad (\text{IV. 16})$$

$$F(0) = P_r(0) \quad (\text{IV. 17})$$

Si la constante de temps du filtre est très grande, il est clair que lors d'une variation de la perturbation P son estimation sera très lente. Cette constante de temps sera donc un outil de réglage du compromis robustesse performances en régulation.

L'IMC semble très appropriée pour commander des procédés du fait de sa simplicité pour synthétiser les différents blocs :

- Le correcteur C assurera un comportement en régime établi. Pour cela il devra s'approcher le plus possible de l'inverse du modèle.
- Le filtre F permettra de régler explicitement la robustesse du système.
- Le modèle de référence adoucira la loi de commande U en fixant une certaine dynamique au système.

IV.8-Analogie avec la boucle fermée classique :

Il est aisé de passer d'une structure IMC à une structure de commande en boucle fermée dans le cas où le modèle est linéaire et la commande est sans contraintes. Il suffit pour cela de ramener ou d'extraire le modèle dans le bloc correcteur. Ceci est illustré dans la figure-suivante :

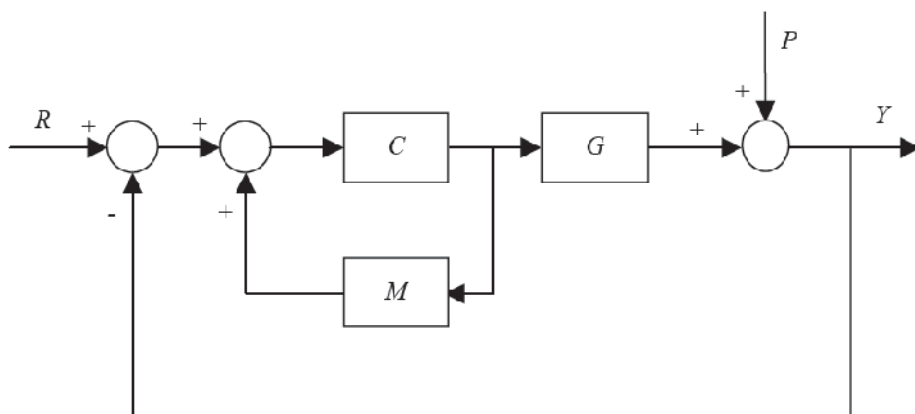


Fig.IV- 4 : Structure de commande en boucle fermée

Les relations permettant de passer d'un correcteur à un autre sont les suivantes :

$$G_{BF} = \frac{C}{1 - CM} \quad (\text{IV. 18})$$

$$C_{IMC} = \frac{C_{BF}}{1 + C_{BF}M_{BF}} \quad (\text{IV. 19})$$

Si la commande est saturée, la structure de la commande à modèle interne n'est plus équivalente à celle de la commande en boucle fermée décrite précédemment (difficulté d'intégration ces non-linéarités dans le correcteur cascade). Dans la structure IMC la même commande U est appliquée simultanément au procédé et à son modèle M ; ce qui permet malgré la saturation de la

commande de modifier la consigne à l'aide de l'écart toujours représentatif de l'évolution entre la sortie du procédé et celle du modèle.

IV.9-Configuration générale du système de commande par IMC:

Le schéma bloc de l'asservissement de vitesse incluant la boucle de commande par modèle interne, étudié dans ce mémoire, est présenté dans la figure (5)

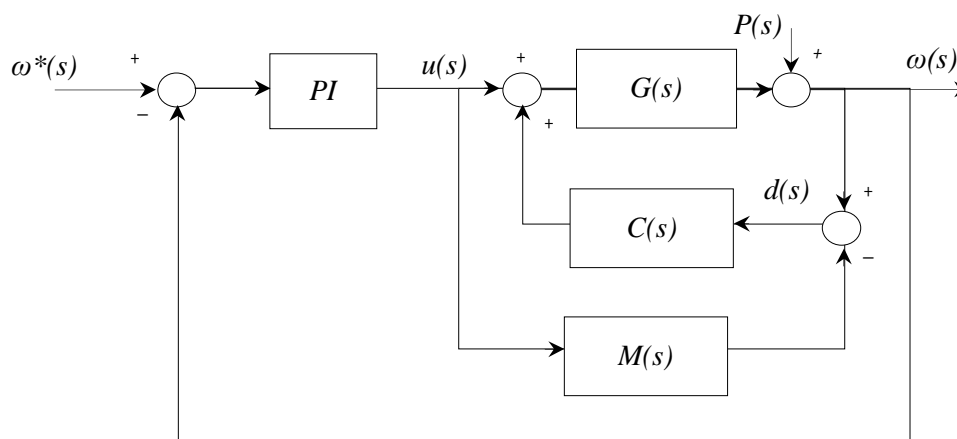


Fig.IV-5 Structure de l'asservissement de vitesse incluant une boucle IMC

Pour Compenser dynamiquement l'effet des comportements mécaniques non modélisables sur la qualité de la boucle de vitesse, un arrangement de commande par modèle interne a été ajouté sur le contrôleur PI (fig.5). Fondamentalement, elle est consistée pour présenter, dans la commande, une variable caractérisant la différence entre la sortie du processus et la sortie du modèle. Sa valeur est alors convertie en image du couple supplémentaire exigé pour compenser les perturbations et est ajoutée à la commande calculée par le contrôleur PI. La boucle de l'IMC (fig.5) repose sur l'emploi d'un observateur de perturbations basé sur un modèle de référence du système commandé, dont sa fonction de transfert est $M(s)$, constitué par le moteur, sa commande rapprochée et le système entraîné.

Si on néglige le temps de réponse des régulateurs de courant ainsi que les frottements dynamiques de la partie mécanique, on déduit que le modèle dynamique se réduit à :

$$M(s) = \frac{K_t}{J.s} \quad (IV.20)$$

$$\text{avec : } K_t = p.\phi_f \quad (IV.21)$$

Comme $M(s)$ se réduit à une action intégrale, le correcteur peut être un simple régulateur proportionnel ($C(s) = K_0$). Cette solution présente des propriétés plus intéressantes en ce qui

concerne sa robustesse vis-à-vis les perturbations (couple résistant, variation d'inertie, etc.) qui peuvent affecter la partie mécanique du système régulé.

IV.10 Résultats de simulations :

IV.10.1 Alimentation par onduleur de tension à 2 niveaux

IV.10.1.1 à vide :

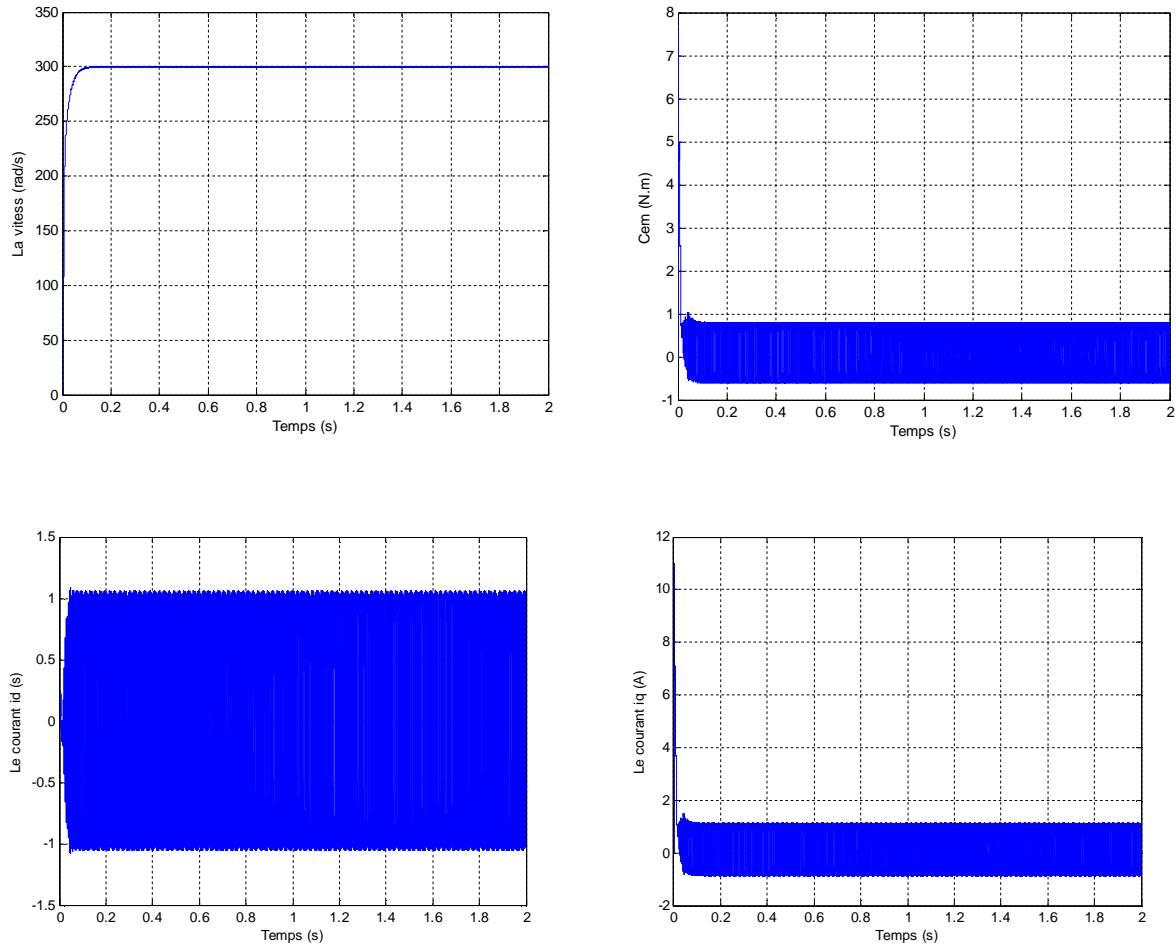


Fig. IV-6: Résultats de simulation de MSAP alimentée par onduleur à 2 niveau lors d'un démarrage à vide pour une consigne de 300 rd/s

IV.10.1.2 En charge :

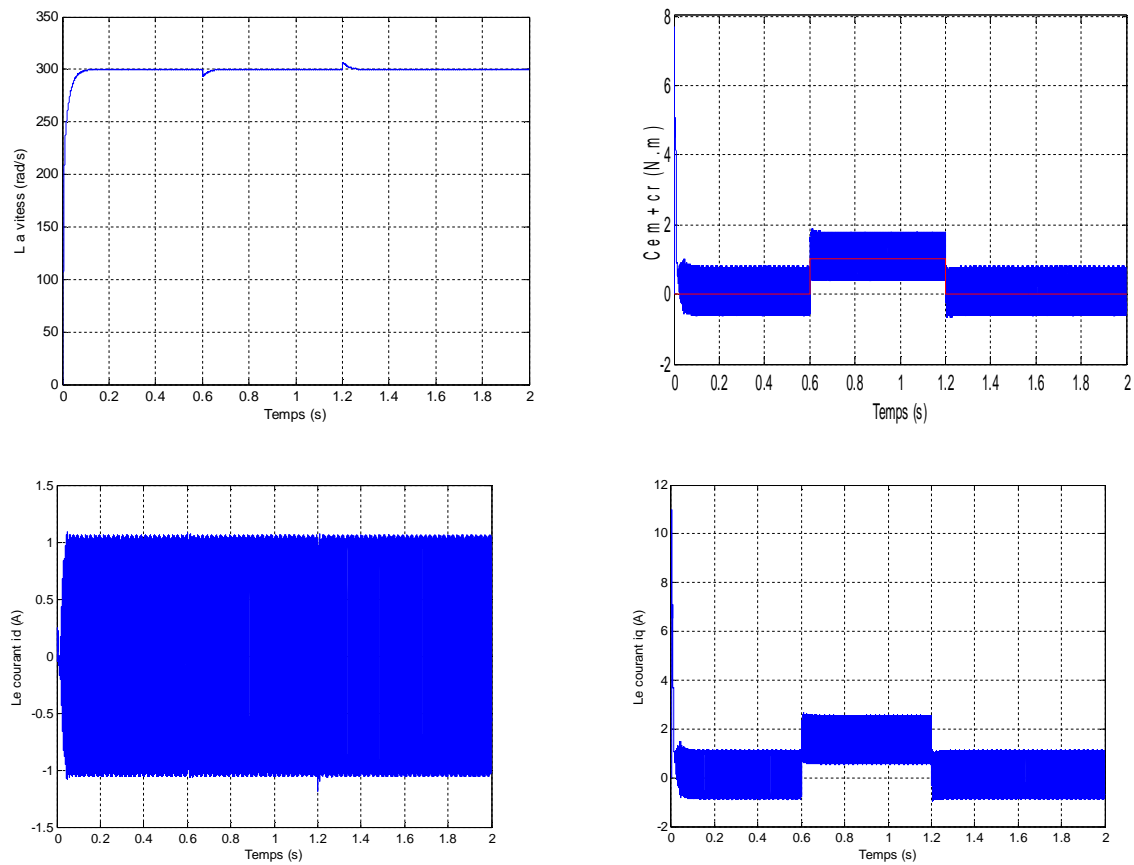


Fig. IV-7: Résultats de simulation de MSAP alimentée par onduleur à 2 niveau lors d'un démarrage en charge pour une consigne de 300 rd/s

IV.10.2 Alimentation par onduleur 3 niveaux

IV.10.2.1 à vide

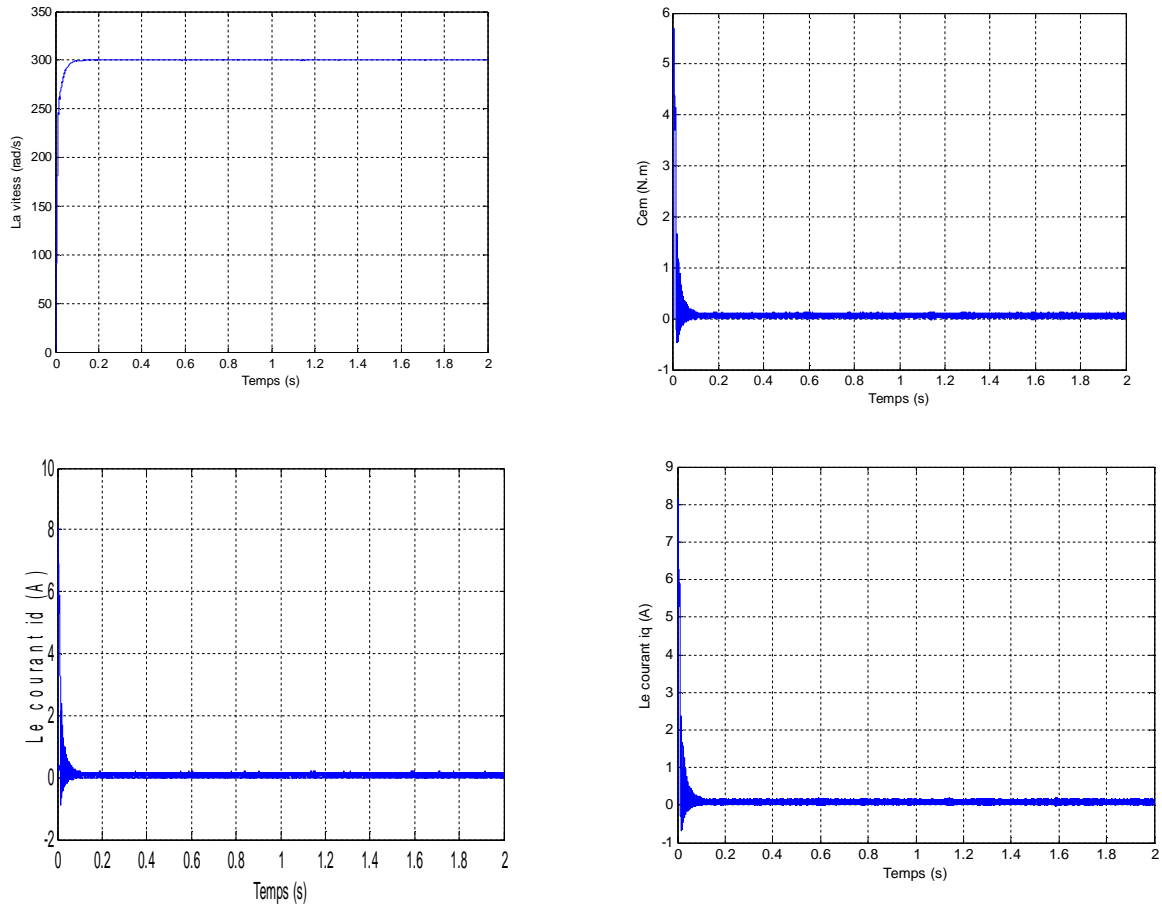
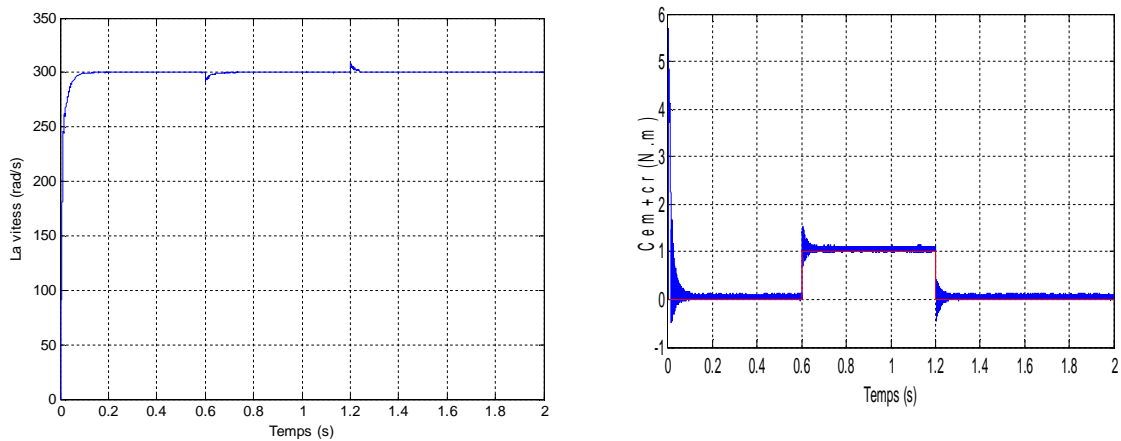


Fig. IV-8: Résultats de simulation de MSAP alimentée par onduleur à 3 niveau lors d'un démarrage à vide pour une consigne de 300 rd/s

IV.10.2.2 En charge



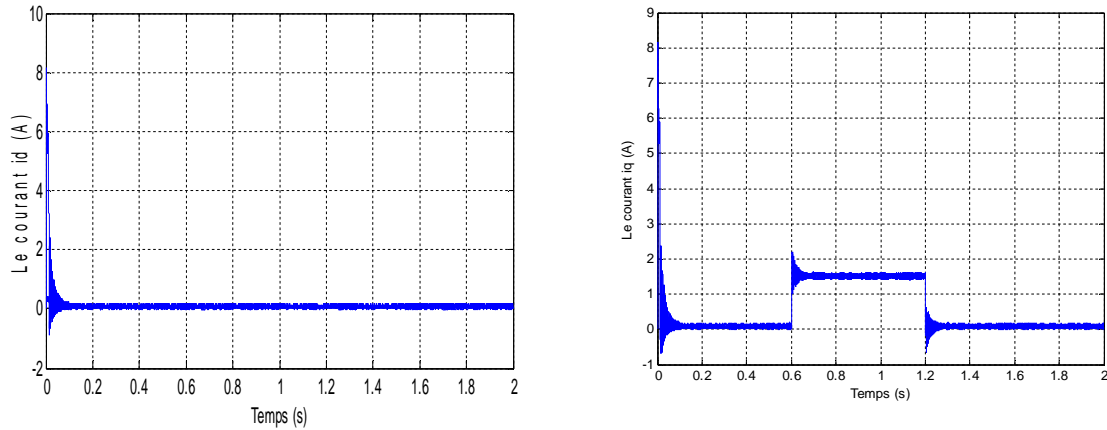


Fig. IV-9: Résultats de simulation de MSAP alimentée par onduleur à 3 niveau lors d'un démarrage en charge pour une consigne de 300 rd/s

IV.11 Conclusion :

L'IMC s'interprète de façon naturelle comme une généralisation de la boucle ouverte classique. Elle permet de traiter des procédés stables ou préalablement stabilisés. Elle est caractérisée essentiellement par la construction d'une commande de modèle et une modification de la consigne en fonction de l'écart entre la sortie du procédé et de son modèle. Elle permet de minimiser les ondulations du couple (vitesse) développé par la machine, compenser d'une façon remarquable les perturbations causées essentiellement par la charge et aux variations paramétriques.