

## Etude statique d'une génératrice asynchrone autonome alimentant un moteur à induction

M. OUALI, W. BAHLOUL, M. CHAABENE et M.B.A KAMOUN

Unité de Commande de Machines et Réseaux de Puissance CMERP-ENIS, Tunisie

E-Mail: [wiss.enis@gmail.com](mailto:wiss.enis@gmail.com) , [manel\\_zouhir\\_ouali@yahoo.fr](mailto:manel_zouhir_ouali@yahoo.fr)  
[maherchaabane@yahoo.com](mailto:maherchaabane@yahoo.com) , [mba.kamoun@enis.rnu.tn](mailto:mba.kamoun@enis.rnu.tn)

### RESUME

Cette étude traite la génératrice asynchrone autonome en vue de son utilisation en site éolien isolé pour assurer le pompage d'eau. Une étude statique a été établie afin d'étudier le comportement d'une génératrice asynchrone auto excitée alimentant un moteur à induction entraînant une pompe. Des résultats de simulation ont été montrés pour justifier et valider la faisabilité des développements effectués.

**Mots clés** — Génératrice asynchrone auto excitée, moteur à induction, pompe, capacité d'excitation, vitesse d'entraînement.

### 1. INTRODUCTION

En raison de la demande croissante en eau dans les zones rurales destinée à l'alimentation en eau potable ainsi qu'à l'irrigation, un grand intérêt est porté sur l'utilisation des systèmes de pompage [1, 2]. Comme de plus ces zones sont généralement isolées et non connectés au réseau électrique, l'utilisation des systèmes autonomes s'avère de grande nécessité.

Un épuisement rapide des ressources énergétiques fossiles comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole, etc., ainsi que leur impact polluant et menaçant sur l'environnement a fait que les sources d'énergies alimentant les groupes motopompes sont généralement des sources non conventionnelles [3, 4, 5]. L'utilisation de l'énergie éolienne pour les applications de pompage est de grande importance surtout que l'énergie photovoltaïque est pénalisée par son faible rendement et son coût élevé.

Dans ce travail, nous analysons les performances statiques d'un système de pompage constitué d'un moteur à induction, une pompe, une génératrice asynchrone auto excitée, une turbine éolienne et un banc capacitif.

### 2. DESCRIPTION DU SYSTEME DE POMPAGE

Diverses études ont été faites sur le système de pompage d'eau, le choix du système d'entraînement, le type de pompes à utiliser et les moyens de contrôle et d'optimisation adoptés [6, 1, 7].

Le système de pompage utilisant l'énergie éolienne comprend une génératrice asynchrone auto excitée entraînée par une turbine et dont la magnétisation est assurée par un banc capacitif [8]. Cette génératrice joue le rôle de la source d'alimentation du moteur à induction entraînant la pompe (moto pompe). La figure 1 schématise le synoptique de ce système.

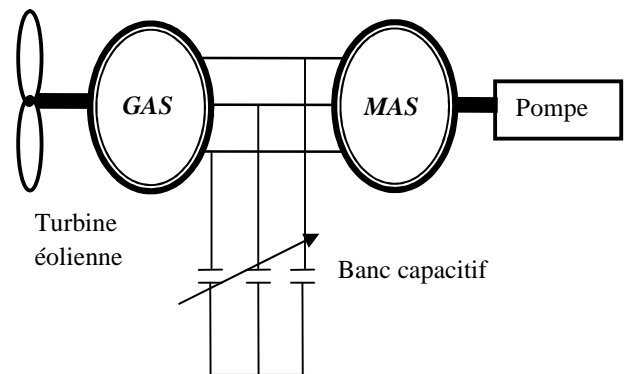


Fig.1 : Système de pompage utilisant l'énergie éolienne

Vu le caractère aléatoire et perturbé du vent entraînant l'instabilité de la génératrice auto excitée et même la coupure de l'alimentation de la moto pompe, l'adaptation de la capacité d'excitation est nécessaire [8].

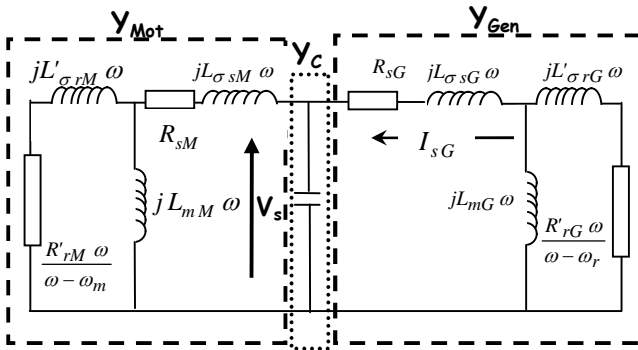
### 3. ETUDE STATIQUE

En raison de ces qualités certaines tel que la robustesse, l'absence de contact glissant, taille et coût réduit, simple maintenance, etc., un intérêt croissant est accordé à la machine asynchrone au détriment des autres machines notamment dans les chaînes éoliennes autonomes de

petite et moyenne puissance et dans les systèmes de pompage.

En régime permanent établi, la machine asynchrone est modélisée selon son schéma équivalent par phase. Le fonctionnement est alors déterminé par les deux types d'équations : électrique et mécanique [9, 10].

Notre modèle d'étude est élaboré à partir du schéma équivalent, considéré à la fréquence fondamentale, de la génératrice asynchrone auto excitée menée de son banc capacitif et alimentant le moteur à induction entraînant la pompe (figure 2).



**Fig.2 :** Schéma équivalent de la génératrice asynchrone alimentant un motopompe

Avec,

- $R_s, R'_r, L_{\sigma s}, L'_{\sigma r}, L_m$  désignent respectivement les résistances, les inductance de fuite du stator et du rotor et l'inductance magnétisante ; l'indice M correspond à la machine asynchrone fonctionnant en mode moteur, alors que l'indice G correspond à celle fonctionnant en mode génératrice autonome.
- C et  $\omega$  désignent respectivement la capacité d'excitation et la pulsation statorique fondamentale.
- $\omega_r$  et  $\omega_m$  désignent respectivement la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice asynchrone et celle de l'arbre du moteur à induction.

La condition d'auto amorçage est donnée par :

$$Y V_s = 0, \quad \forall V_s \Rightarrow Y = 0 \quad (1)$$

Avec,

$$Y = Y_{Mot} + Y_C + Y_{Gen} \quad (2)$$

Tel que,

$$Y_{Gen} = \frac{Y_{sG} (Y_{mG} + Y'_{rG})}{Y_{sG} + Y_{mG} + Y'_{rG}}, \quad Y_{sG} = \frac{1}{R_{sG} + jL_{\sigma sG} \omega},$$

$$Y'_{rG} = \frac{1}{\frac{R'_{rG} \omega}{\omega - \omega_r} + jL'_{\sigma rG} \omega}; \quad Y_{mG} = \frac{1}{jL_{mG} \omega};$$

$$Y_C = jC \omega;$$

Le fonctionnement stable en génératrice asynchrone auto excitée alimentant la motopompe sera assuré si la condition précédente est satisfaite, c'est-à-dire si la partie réelle et la partie imaginaire de l'admittance résultante sont nulles.

$$\begin{cases} F_1 = \text{Re}(Y) = 0 \\ F_2 = \text{Im}(Y) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Le montage étant symétrique, l'expression de  $Y_{Mot}$  peut être déduite de celle de  $Y_{Gen}$  en remplaçant l'indice G par M et  $\omega_r$  par  $\omega_m$ .

En régime permanent établi et en négligeant les pertes mécaniques au niveau de l'arbre du moteur à induction, on peut écrire :

$$P_{méc\_Mot} \cong P_{méc\_pompe} \quad (4)$$

Donc,

$$F_3 = P_{méc\_Mot} - P_{méc\_pompe} = 0 \quad (5)$$

La pompe utilisée dans cette étude est caractérisée par un couple mécanique donnée par [11]:

$$C_{pompe} = K \Omega_{mec} \quad (6)$$

Avec, K est un coefficient donné par le constructeur.

$$P_{méc\_pompe} = C_{pompe} \Omega_{mec} = K \Omega_{mec}^2 \quad (7)$$

$$P_{méc\_Mot} = 3R'_{rM} \frac{1-g}{g} \left| \overline{I'_{rM}} \right|^2 = 3 \frac{R'_{rM} \omega_m}{\omega - \omega_m} \left| \overline{I'_{rM}} \right|^2 \quad (8)$$

Pour déterminer l'expression de  $\overline{I'_{rM}}$ , on applique le théorème de diviseur de tension:

$$\overline{I'_{rM}} = \frac{1}{Z'_{rM}} \frac{Z'_{rM} // Z_{mM}}{Z'_{rM} // Z_{mM} + Z_{sM}} \overline{V_s} \quad (9)$$

$$\overline{V_s} = \frac{Z'_{rG} // Z_{mG} + Z_{sG}}{Z'_{rG} // Z_{mG}} \overline{V_{mG}} \quad (10)$$

Tel que,

$$Z'_{rG} = \frac{1}{Y'_{rG}} ; Z_{mG} = \frac{1}{Y_{mG}} ; Z_{sG} = \frac{1}{Y_{sG}} ; V_{mG} = \omega \phi_{mG}$$

Les expressions de  $Z'_{rM}, Z_{mM}, Z_{sM}$  peuvent être déterminées de la même manière que précédemment en remplaçant l'indice G par M et  $\omega_r$  par  $\omega_m$  dans les expressions de  $Z'_{rG}, Z_{mG}, Z_{sG}$ . Les expressions finales des fonctions  $F_1, F_2$  et  $F_3$  sont données en annexe.

Ainsi, on a un système de trois équations non linéaire et à trois inconnues :

$$\begin{cases} F_1(\omega, \omega_m, L_{mG}) = 0 \\ F_2(\omega, \omega_m, L_{mG}) = 0 \\ F_3(\omega, \omega_m, L_{mG}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Pour une capacité d'excitation et une vitesse de rotation de la turbine données, il est possible de résoudre le système précédent en adoptant la méthode de Newton Raphson et en calculant la matrice Jacobinienne correspondante :

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\delta F1}{\delta \omega} & \frac{\delta F1}{\delta \omega_m} & \frac{\delta F1}{\delta L_{mG}} \\ \frac{\delta F2}{\delta \omega} & \frac{\delta F2}{\delta \omega_m} & \frac{\delta F2}{\delta L_{mG}} \\ \frac{\delta F3}{\delta \omega} & \frac{\delta F3}{\delta \omega_m} & \frac{\delta F3}{\delta L_{mG}} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Nous obtenons alors le triple  $(\omega, \omega_m, L_{mG})$ . Puis, à partir de la caractéristique de magnétisation nous déterminons le flux  $\phi_{mG}$  comme fonction de  $L_{mG}$  et nous déduisons la tension magnétisante  $V_{mG}$ . Les autres grandeurs électriques tel que  $I_c, I_{sG}, V_s$ , etc., peuvent être alors déterminé par un simple calcul complexe.

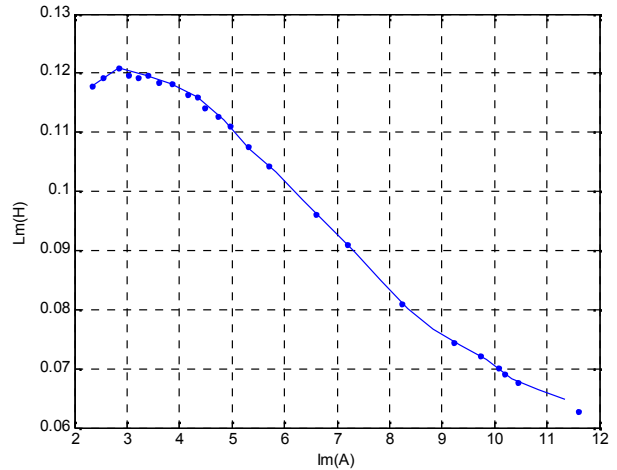
#### 4. RESULTAT DE SIMULATION

A fin de valider le modèle développé, nous avons réalisé des simulations effectuées dans l'environnement Matlab pour étudier le comportement de la génératrice asynchrone auto excitée alimentant une motopompe en régime permanent établi.

Les deux machines asynchrones sont supposées identiques, dont les caractéristiques nominales et les paramètres de leur circuit électrique sont données par :

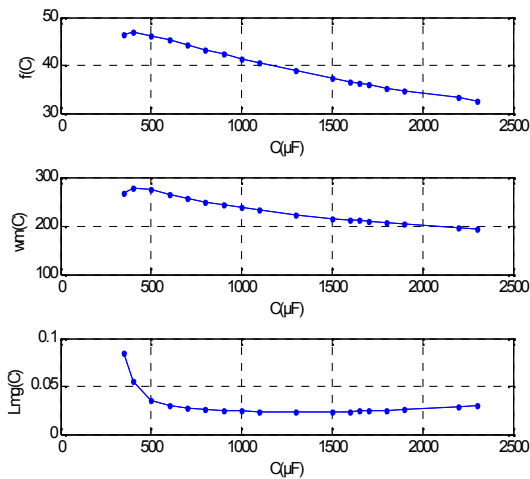
$$\Delta \ 380 / 9.7 ; Y \ 220 / 16.8 ; P_n = 4.4 \text{ Kw} ; p = 2 ; R_s = 1.02 \ \Omega ; R_r = 1.0544 \ \Omega ; f = 50 \text{ Hz} ; L_{\sigma_s} = L'_{\sigma_r} = 0.0056 \text{ H} ;$$

Pour tenir compte du phénomène de saturation dans les simulations, l'évolution de l'inductance magnétisante est représentée par la courbe de la figure 3.



**Fig.3 :** Variation de l'inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant

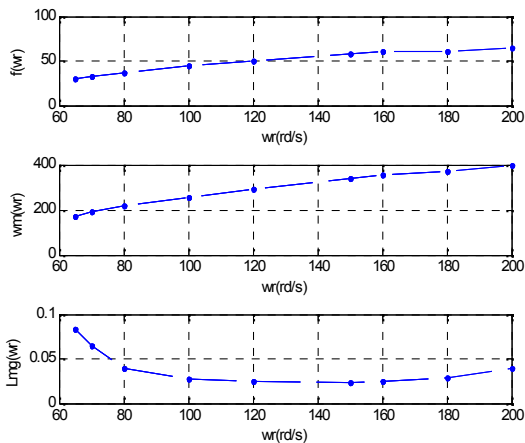
Pour analyser le comportement de ce système en fonction de la vitesse d'entraînement de la turbine et de la capacité d'excitation, on fixe l'un de ces paramètres et on fait varier l'autre. On conserve d'abord la vitesse d'entraînement constante et on représente dans la figure 4 l'évolution de la fréquence statorique  $f$ , la vitesse de rotation du moteur asynchrone entraînant la pompe  $\omega_m$  et l'inductance magnétisante de la génératrice asynchrone auto excitée  $L_{mg}$  en fonction de la capacité d'excitation.



**Fig. 4 :** Variation de la fréquence, l'inductance magnétisante de la génératrice et la vitesse de rotation de la pompe en fonction de la capacité d'excitation pour  $\omega_r = 100 \pi$

Puis, on montre dans la figure 5 l'évolution de  $f$ ,  $\omega_m$  et  $L_{mg}$  en fonction la vitesse d'entraînement, la capacité d'excitation étant maintenue constante.

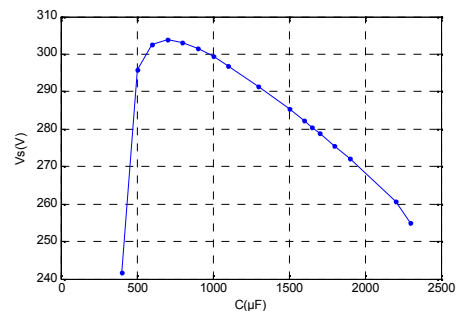
On remarque alors que la fréquence et la vitesse de rotation de la pompe ne cessent pas de chuter avec l'accroissement de la capacité alors qu'elles augmentent en fonction de la vitesse. L'inductance magnétisante se comporte de la même manière pour ces deux fonctionnements ; elle décroît pour passer par un minimum et accroître par la suite.



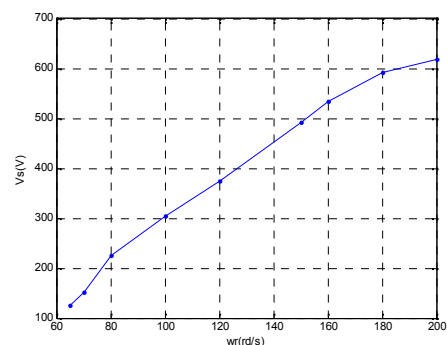
**Fig. 5 :** Variation de la fréquence, l'inductance magnétisante de la génératrice et la vitesse de rotation de la pompe en fonction de la vitesse d'entraînement de la génératrice autonome pour  $C = 700\mu\text{F}$

Les figures 6 et 7 représentent l'évolution de la tension statorique en fonction de la capacité d'excitation et la vitesse d'entraînement respectivement. On remarque pour ce réseaux de courbes l'existence d'une valeur critique minimale de la capacité d'excitation et de la vitesse d'entraînement à partir du quelles l'auto amorçage se reproduit et d'une valeur critique maximale de ces deux derniers au-dessus du quelles l'amorçage ne se reproduit plus.

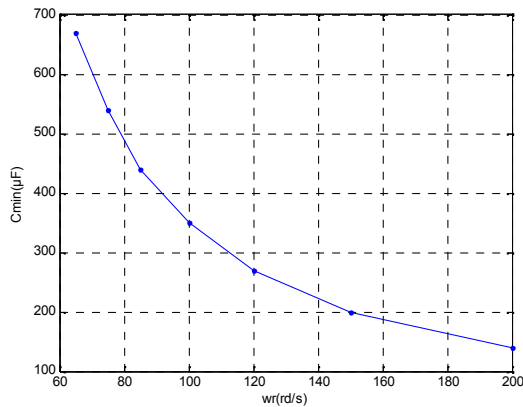
La figure 8 représente la variation de la valeur minimale de la capacité d'excitation  $C_{\min}$  nécessaire à l'amorçage de la génératrice asynchrone en fonction de la vitesse de rotation de la turbine  $\omega_r$ . On remarque que si  $\omega_r$  démunie,  $C_{\min}$  augmente. D'où la nécessité du réajustement de la valeur de la capacité d'excitation en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.



**Fig. 6 :** Variation de la tension statorique en fonction de la capacité d'excitation



**Fig. 7 :** Variation de la tension et du courant statorique de la génératrice autonome en fonction de la vitesse d'entraînement



**Fig. 8:** Variation de la valeur de la capacité d’excitation minimale assurant l’amorçage en fonction de la vitesse d’entraînement

## 5. CONCLUSION

On entraînant une génératrice asynchrone par une turbine et en connectant une batterie de condensateur à son stator pour assurer sa magnétisation, nous pouvons délivrer de l’électricité dans un système autonome tel que le système de pompage.

Les développements effectués dans ce papier présentent un modèle non linéaire d’une génératrice asynchrone auto excitée alimentant un moteur à induction entraînant une pompe. Des résultats de simulation ont été établis pour étudier le comportement en régime statique de ce système de pompage. L’étude de l’impact de la capacité d’excitation et de la vitesse d’entraînement sur la tension et le courant statoriques ainsi que sur la fréquence et la vitesse de rotation du pompe a montré la limitation des performances du système; d’où la nécessité d’une commande assurant le réglage de la fréquence et la tension statoriques.

## 6. REFERENCES

[1] Kala Meah, Sadrul Ula, Steven Barrett , Solar photovoltaic water pumping—opportunities and challenges, *Science direct Renewable & Sustainable energy reviews* 2008,

[2] Abdel-Karim Dauda, Marwan M. Mahmoudb, Solar powered induction motor-driven water pump operating on a desert well, simulation and field tests, *Science direct Renewable energy* 2005,

[3] Abdeen Mustafa Omer , Energy, environment and sustainable development, *Science direct Renewable & Sustainable energy reviews* 2007,

[4] Naim H. Afgana, Darwish Al Gobaisib, Maria G. Carvalhob, Maurizio Cumoc , Sustainable energy development, *Science direct Renewable & Sustainable energy reviews* 1998,

[5] Ji Jie , Liu Keliang , Chow Tin-tai , Pei Gang , He Wei , He Hanfeng, Performance analysis of a photovoltaic heat pump, *Science direct Applied energy* 2008,

[6] K. Benlarbi , L. Mokrani , M.S. Nait-Said, A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system, *Science direct Solar energy* 2004,

[7] M. Arrouf, N. Bouguechal ,Vector control of an induction motor fed by a photovoltaic generator, *Science direct Applied energy* 2003,

[8] SM Alghuwainem, Steady-state analysis of an isolated self-excited induction generator driven by regulated turbine, *IEEE sept 99*,

[9] SM Alghawainem, Steady-state analysis of an isolated self-excited induction generator supplying an induction motor load, *IEEE 99*,

[10] TF Chan, Self-excited induction generators driven by regulated and unregulated turbines, *IEEE June 96* ,

[11] Souhir Sallem, Maher Chaabene, M.B.A. Kamoun Energy management algorithm for an optimum control of a photovoltaic water pumping system, *Science direct Applied energy* 2009,

## 7. ANNEXE

$$F_1 = \frac{\alpha_G}{\beta_G} + \frac{\alpha_M}{\beta_M} = 0$$

$$F_2 = C\omega + \frac{\mu_G}{\beta_G} + \frac{\mu_M}{\beta_M} = 0$$

$$F_3 = 3 \frac{R_{rM} \omega_m}{\omega - \omega_m} \Gamma_M^2 \Gamma_G^2 I_{mG}^2 - K\omega_m^2 = 0$$

Avec,

$$\alpha_G = R'_{rG} R_{gen} + L_{rG} (\omega - \omega_r) Im_{gen} ;$$

$$\mu_G = R_{gen} L_{rG} (\omega - \omega_r) - R'_{rG} Im_{gen} ;$$

$$\beta_G = R_{gen}^2 + Im_{gen}^2 ; \eta_G = R_{rG}^2 + L_{\sigma rG}^2 (\omega - \omega_r)^2$$

$$\Gamma_M^2 = \frac{L_{mM}^2 (\omega - \omega_m)^2}{R_{mot}^2 + Im_{mot}^2} ; \Gamma_G^2 = \frac{R_{gen}^2 + Im_{gen}^2}{\eta_G} ;$$

$$R_{gen} = R_{sG} R'_{rG} - \xi_G \omega (\omega - \omega_r) ; \xi_G = L_{\sigma sG} L_{rG} + L_{mG} L'_{\sigma rG} ;$$

$$Im_{gen} = \Re_G \omega - L_{rG} R_{sG} \omega_r ; \Re_G = L_{rG} R_{sG} + R'_{rG} L_{sG} .$$

Les éléments de la matrice Jacobienne sont donnés par :

$$J_{11} = J_{11a} + J_{11b} ; J_{11a} = \frac{\delta \alpha_{G\omega} \beta_G - \delta \beta_{G\omega} \alpha_G}{\beta_G^2} ;$$

$$J_{11b} = \frac{\delta \alpha_{M\omega} \beta_M - \delta \beta_{M\omega} \alpha_M}{\beta_M^2} ; J_{12} = \frac{\delta \alpha_{M\omega_m} \beta_M - \delta \beta_{M\omega_m} \alpha_M}{\beta_M^2} ;$$

$$J_{13} = \frac{\delta \alpha_{GLmg} \beta_G - \delta \beta_{GLmg} \alpha_G}{\beta_G^2} ; J_{21} = C + J_{21a} + J_{21b} ;$$

$$J_{21a} = \frac{\delta \mu_{G\omega} \beta_G - \delta \beta_{G\omega} \mu_G}{\beta_G^2} ; J_{21b} = \frac{\delta \mu_{M\omega} \beta_M - \delta \beta_{M\omega} \mu_M}{\beta_M^2} ;$$

$$J_{22} = \frac{\delta \mu_{M\omega_m} \beta_M - \delta \beta_{M\omega_m} \mu_M}{\beta_M^2} ; J_{23} = \frac{\delta \mu_{GLmg} \beta_G - \delta \beta_{GLmg} \mu_G}{\beta_G^2} ;$$

$$J_{31} = \frac{3 R'_{rM} \omega_m I_{mG}^2 \Gamma_M \Gamma_G}{\omega - \omega_m} \left[ 2 (\Gamma_G \delta \Gamma_{M\omega} + \Gamma_M \delta \Gamma_{G\omega}) - \frac{\Gamma_M \Gamma_G}{\omega - \omega_m} \right] ;$$

$$J_{32} = \frac{3 R'_{rM} I_{mG}^2 \Gamma_M \Gamma_G^2}{\omega - \omega_m} \left[ 2 \omega_m \delta \Gamma_{M\omega_m} + \frac{\omega \Gamma_M}{\omega - \omega_m} \right] - 2 K \omega_m ;$$

$$J_{33} = \frac{6 R'_{rM} \omega_m I_{mG} \Gamma_M^2 \Gamma_G}{\omega - \omega_m} \left[ \Gamma_G \delta M_{img} + I_{mg} \delta M \Gamma_G \right] .$$

Tel que:

$$\delta \alpha_{G\omega} = \frac{\delta \alpha_G}{\delta \omega} = 2 R_{sG} L_{rG} (\omega - \omega_r) + L_{mG} R'_{rG} (2\omega - \omega_r) ;$$

$$\delta \beta_{G\omega} = \frac{\delta \beta_G}{\delta \omega} = 2 [\Re_G Im_{gen} + \xi_G (\omega_r - 2\omega) R_{gen}] ;$$

$$\delta \alpha_{M\omega_m} = \frac{\delta \alpha_M}{\delta \omega_m} = -[2 R_{sM} L_{rM}^2 (\omega - \omega_m) + L_{mM}^2 R'_{rM} \omega] ;$$

$$\delta \beta_{M\omega_m} = \frac{\delta \beta_M}{\delta \omega_m} = 2 [\xi_M \omega R_{mot} - L_{rM} R_{sM} Im_{mot}] ;$$

$$\delta \mu_{G\omega} = \frac{\delta \mu_G}{\delta \omega} = -(L_{sG} R_{rG}^2 + L_{rG} \xi_G (\omega - \omega_r) (3\omega - \omega_r)) ;$$

$$\delta \alpha_{GLmg} = \frac{\delta \alpha_G}{\delta L_{mg}} = 2 (\omega - \omega_r) (R_{sG} L_{rG} (\omega - \omega_r) + L_{mG} R'_{rG} \omega) ;$$

$$\delta \beta_{GLmg} = \frac{\delta \beta_G}{\delta L_{mg}} = 2 [R_{gen} (L_{\sigma sG} + L'_{\sigma rG}) \omega (\omega - \omega_r) + Im_{gen} (R_{sG} (\omega - \omega_r) + R'_{rG} \omega)]$$

$$\delta \mu_{M\omega_m} = \frac{\delta \mu_M}{\delta \omega_m} = 2 L_{rM} \xi_M \omega (\omega - \omega_m) ;$$

$$\delta \mu_{GLmg} = \frac{\delta \mu_G}{\delta L_{mg}} = -\omega [R_{rG}^2 + (L_{\sigma rG}^2 + 2 \xi_G) (\omega - \omega_r)^2] ;$$

$$\delta \Gamma_{M\omega} = \frac{\delta \Gamma_M}{\delta \omega} = \frac{L_{mM} [\alpha_M - 0.5 (\omega - \omega_m) \delta \beta_{M\omega}]}{\beta_M^{3/2}} ;$$

$$\delta \Gamma_{G\omega} = \frac{\delta \Gamma_G}{\delta \omega} = \frac{\delta \beta_{G\omega} \eta_G - \delta \eta_{G\omega} \beta_G}{2 \Gamma_G \eta_G^2} ;$$

$$\delta M \Gamma_G = \frac{\delta \Gamma_G}{\delta L_{mG}} = \frac{1}{2} \frac{\delta M \beta_G}{\eta_G \Gamma_G} ;$$

$$\delta \Gamma_{M\omega_m} = \frac{\delta \Gamma_M}{\delta \omega_m} = \frac{-L_{mM} [\beta_M + 0.5 (\omega - \omega_m) \delta \beta_{M\omega_m}]}{\beta_M^{3/2}} .$$