

ASUPRA STABILITĂȚII DINAMICE A MAȘINILOR SINCRONE

Aurel CÂMPEANU

Universitatea din Craiova, Facultatea de Inginerie Electrică
 acampeanu@em.ucv.ro

Rezumat. În lucrare se detaliază prin simulare, cu utilizarea modelelor matematice dinamice, evoluțiile cuplurilor electromagnetice ale unui motor sincron de mare putere, la aplicarea unui șoc de cuplu constant.

1. INTRODUCERE

Se are în vedere efectul diversilor curenți de excitație anteriori unui cuplu aplicat brusc M_r , asupra stabilității dinamice. Sunt analizate împrejurările în care procesul dinamic se finalizează cu o autosincronizare sau se trece la o funcționare asincronă oscilantă.

Modelul matematic dinamic este cel corespunzător unei mașini sincrone de mare putere cu poli aparenti.

2. MODELUL MATEMATIC DINAMIC

Modelul matematic este dat în teorie celor două axe, și privește rezolvarea împreună a ecuațiilor de tensiuni care surprind inerțiile electrice de forma,

$$[u] = A \frac{dX}{dt} + BX; [u] = [u_d \quad u_q \quad u_E \quad 0 \quad 0]^T$$

și ecuația de mișcare care consideră inerția mecanică,

$$m - M_r = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt}$$

Pentru curenții i_s, i_E, i_D, i_Q , ca variabile de stare

$$X = [i_d \quad i_q \quad i_E \quad i_D \quad i_Q]^T$$

și matricile corespunzătoare sunt

$$A = \begin{bmatrix} L_{s\sigma} + L_{mdt} & 0 & L_{mdt} & L_{mdt} & 0 \\ 0 & L_{s\sigma} + L_{mq} & 0 & 0 & L_{mq} \\ L_{mdt} & 0 & L_{E\sigma} + L_{mdt} & L_{mdt} & 0 \\ L_{mdt} & 0 & L_{mdt} & L_{D\sigma} + L_{mdt} & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & 0 & L_{Q\sigma} + L_{mq} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} R_s & -\omega(L_{s\sigma} + L_{mq}) & 0 & 0 & -\omega L_{mq} \\ \omega(L_{s\sigma} + L_{mdt}) & R_s & \omega L_{mdt} & \omega L_{mdt} & 0 \\ 0 & 0 & R_E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix}$$

Cuplul electromagnetic este

$$m = \frac{3}{2} p [(L_{md} - L_{mq}) i_d i_q + L_{md} (i_D + i_E) i_q - L_{mq} i_d i_Q]$$

Modelul consideră asimetria magnetică și saturația magnetică statică și dinamică, după axa d . Notațiile utilizate sunt cele larg acceptate în literatură.

Detalii în [1] și în [2] unde se face o analiză exhaustivă a proceselor dinamice din mașinile electrice de curent alternativ.

3. REZULTATELE SIMULĂRILOR

Se are în vedere un motor sincron de 8000 kW, cu parametri precizați în Anexă. Cuplul rezistent constant, este $M_r = 60000$ Nm.

3.1 Considerarea tensiunii de excitație $u_E \geq 2,5$ V

Procesul dinamic este unul de scurtă durată (supratranzitoriu), în care vitezele rotorului și câmpului magnetic principal învartitor ω , ω_ψ , strâns corelate, oscilează în jurul vitezei de sincronism ω_1 (oscilații mai largi sunt pentru ω_ψ) și care se finalizează cu o funcționare sincronă.

În Fig.1 sunt reprezentate împreună caracteristica unghiulară și statică $m(\theta)$. Cuplul maxim supratranzitoriu $M_{max} = 12,1 \cdot 10^4$ Nm, și unghiul final $\theta = 0,69$ rad.

Se observă diferențe structurale între cele două caracteristici. Plasarea punctului final al caracteristicii dinamice, pe caracteristica statică aferentă, le justifică reciproc.

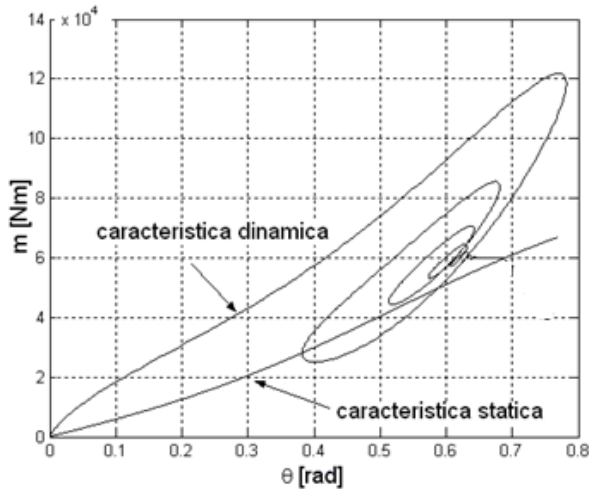


Fig. 1. Caracteristicile $m(\theta)$, statică și dinamică pentru $u_E = 4$ V.

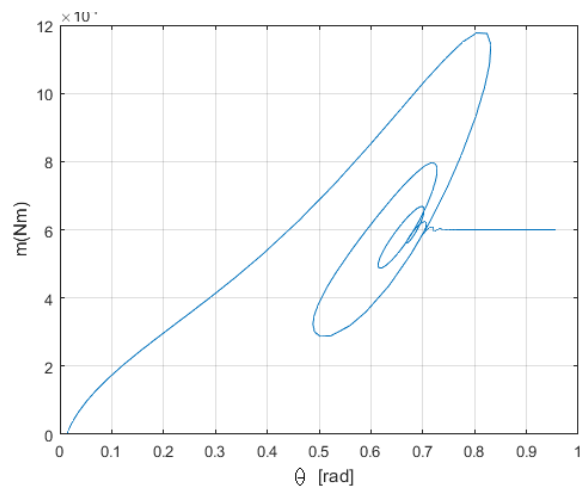


Fig. 2. Caracteristicile $m(\theta)$, statică și dinamică pentru $u_E = 2,5$ V.

Pentru $u_E = 2,5$ V se obține resincronizarea cu evoluții dinamice similare cu $M_{max} = 11,8 \cdot 10^4$ Nm și $\theta = 0,96$ rad., (Fig.2).

3.2 Considerarea tensiunii de excitație $u_E < 2,5$ V

Ca mai sus, apare un proces dinamic supratranzitoriu, urmat de o funcționare aparent sincronă care după un timp T_{max} degenerază într-o funcționare asincronă oscilantă.

Ca urmare, cuplurile electromagnetice înregistrează valori oscilante semnificative; vitezele ω , ω_ψ oscilează de asemenea larg și permanent $\omega < \omega_1$.

O creștere a lui u_E subliniază funcționarea asincronă.

Pentru o imagine de ansamblu privind solicitările mecanice și dinamice, în Fig.3 este reprezentată integral caracteristica $m(t)$, începând cu momentul pornirii cu $M_r = 0$. Șocul de

cuplu are loc la $t=23s$ și $u_E= 2,1 V$. În zona supra tranzitorie se stabilește un cuplu electromagnetic maxim $M_{max}=1,2\cdot 10^5 Nm$; funcționarea aparent sincronă durează până la $t_{max}=38 s$, când se instalează funcționarea asincronă oscilantă permanentă cu $M_{max}=1,5\cdot 10^5 Nm$. O forțare a excitației la $u_E= 4 V$ agravează funcționarea asincronă ($M_{max}=1,7\cdot 10^5 Nm$).

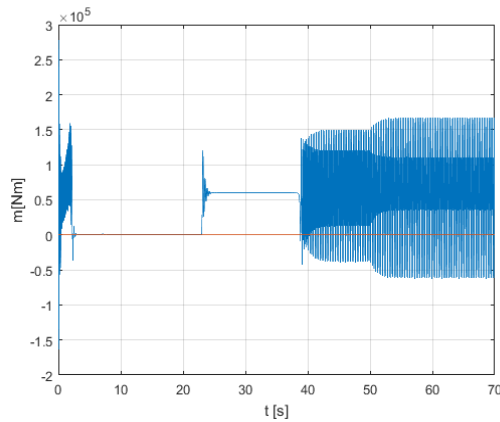


Fig. 3. Caracteristica $m(t)$ pentru $u_E = 2,1V$, respectiv $u_E = 4V$ pentru $t > 50$.

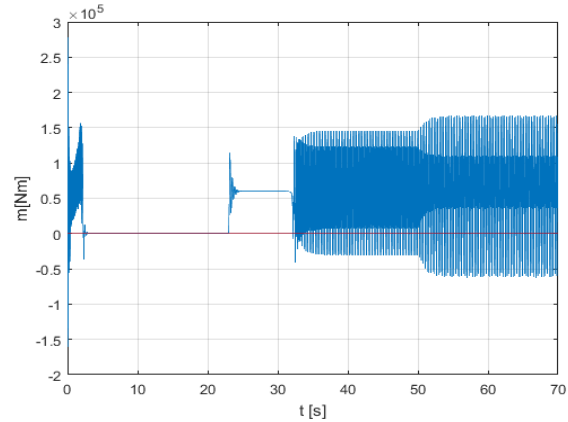


Fig. 4. Caracteristica $m(t)$ pentru $u_E = 1,6V$, respectiv $u_E = 4V$ pentru $t > 50$.

În Fig.4 este reprezentată aceeași caracteristică $m(t)$ pentru $u_E= 1,6 V$ respectiv $u_E = 4V$. Funcționarea asincronă oscilantă apare după $t_{max}=32 s$. Oscilațiile de cuplu sunt practic similare.

Fără a mai reprezenta, pentru $u_E = 2,3 V$ rezultă $t_{max}=43 s$, iar pentru $u_E = 2,4 V$, $t_{max}=47s$.

Informații suplimentare privind evoluțiile dinamice sunt precizate în coordonatele (m, ω) pe cicluri limită bine definite. Rezultă caracterul dezavantajos al creșterii lui u_E ; cresc oscilațiile cuplului electromagnetic și vitezelor rotorului inferioare lui ω_l

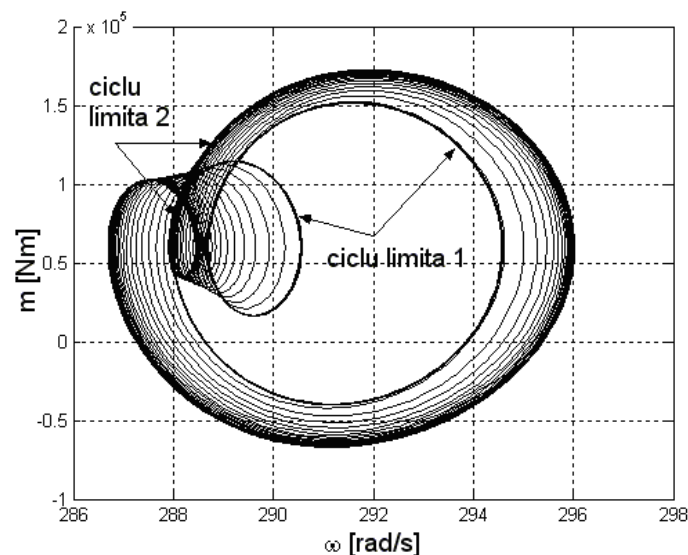


Fig. 5. Caracteristica $m(\omega)$, ciclurile limită 1, 2, $u_E= 2,1V$ respectiv $u_E=4 V$.

În Fig. 5, este reprezentat ciclul limită 1 pentru $u_E = 2,1V$ și trecerea la ciclul limită 2 pentru $u_E = 4V$; în Fig.6 ciclul limită 1 corespunde lui $u_E = 2,1V$ și ciclul limită 2 lui $u_E = 8V$. Pe ciclurile limită 1, 2 din Fig.5, se regăsesc valorile maxime de cuplu din Fig.3.

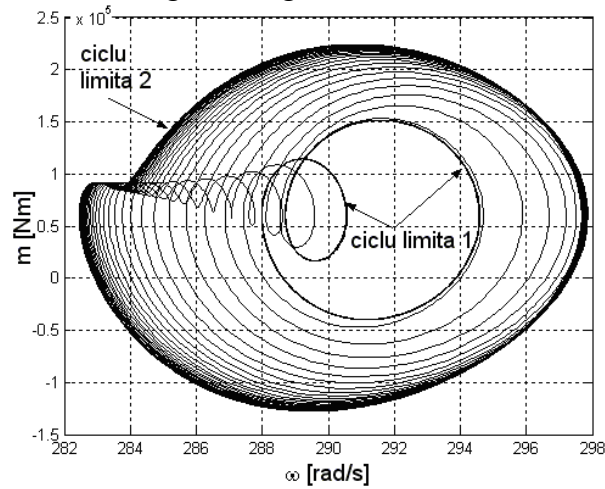


Fig. 6. Caracteristica $m(\omega)$, ciclurile limită 1, 2, $u_E= 2,1 V$ respectiv $u_E= 8 V$.

Observație. În cazul $M_r = 5 \cdot 10^5$ Nm, și $u_E = 2,1V$, se stabilește, după procesul supratranzitoriu, o funcționare asincronă oscilantă permanentă definită în coordonatele (m, ω) de un ciclu limită mult mai complicat, cu viteza de sincronism ω_l în interiorul ciclului. În acest caz o creștere a excitației, în funcție de momentul aplicării ei pe ciclul limită, poate determina sau nu resincronizarea [2].

4. CONCLUZII

Pentru un cuplul M_r dat, există o excitație minimă u_E care, după un proces supratranzitoriu, asigură resincronizarea (cazul 3.1).

Sub această excitație (cazul 3.2) cu cât valorile scad, se reduc timpii T_{max} de la care apare funcționarea asincronă permanentă oscilantă.

Dacă viteza de sincronism ω_l este cuprinsă în interiorul ciclului limită, este posibilă ori nu resincronizarea.

Dacă ω_l este în afara ciclului limită, o creștere a excitației agravează funcționarea asincronă oscilantă.

Valorile cele mai importante ale cuplurilor electromagnetice, apar la funcționarea asincronă oscilantă și sunt comparabile (sau chiar mai mari la tensiuni de excitație importante), cu cele din primele momente ale pornirii motorului.

ANEXA

$P_n = 8000$ kW, $U_n = 2887/5000$ V, $n_l = 1500$ rpm, $f = 50$ Hz, $R_s = 32.967 \cdot 10^{-3}$ Ω , $L_{s\sigma} = 0.795 \cdot 10^{-3}$ H, $L_{E\sigma} = 1.823 \cdot 10^{-3}$ H, $L_{D\sigma} = 0.838 \cdot 10^{-3}$ H, $L_{Q\sigma} = 0.921 \cdot 10^{-3}$ H, $L_{mq} = 6.98 \cdot 10^{-3}$ H, $R_E = 1.798 \cdot 10^{-3}$ Ω , $R_D = 92.046 \cdot 10^{-3}$ Ω , $R_Q = 115.05 \cdot 10^{-3}$ Ω , $J = 616$ Kg m².

Caracteristica magnetică saturată este: $\psi_m(i_{md}) = 1.09 \cdot 9.189 \arctan \frac{i_{md}}{823.867}$.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XX, ediția 2024.

BIBLIOGRAFIE

1. A. Câmpeanu, R. Munteanu, V. Iancu, *About dynamic stability of high power synchronous machine. A Review*, Rev. Roum. Sci. Techn-ElectroTechn et Energ, **62**, 1, Bucarest, 2017.
2. A. Câmpeanu, *Dinamica mașinilor electrice de curent alternativ*, AGIR, București, 2021.