

PROCESE DINAMICE ÎN MASINILE ELECTRICE, UN DOMENIU ACTUAL DE CERCETARE

Aurel CAMPEANU
Universitatea din Craiova
acampeanu@em.ucv.ro

Rezumat. Mașinile electrice sunt o prezență obligatorie în peisajul acționărilor electrice performante actuale. Acestea comportă inevitabil procese dinamice și în consecință, solicitări electrodinamice, magnetice, mecanice și termice care pot afecta durata de viață. Proiectarea dedicată, fundamentată pe modelare și simulare, devine o preocupare actuală de cercetare.

Cuvinte cheie: proiectare dedicată, modelare, simulare.

1. INTRODUCERE

Mașinile electrice ca element vital în sistemele actuale sofisticate de comandă și control ale unor procese tehnologice complexe, trebuie să răspundă adecvat unor condiții specifice regimurilor dinamice, mult diferite de cele staționare, bine cunoscute și statuate. Este vorba de un capitol distinct în teoria mașinilor electrice, cu obiective și mijloace de cercetare particulare.

Pentru mașinile de curent alternativ suportul teoretic este reprezentat de:

- ecuațiile cu fazori reprezentativi (la construcțiile cu simetrie magnetică-mașinile de inducție);
- ecuațiile în teoria celor două axe (la construcțiile cu poli aparenti-mașinile sincrone). Ecuațiile de tensiuni ce decurg, pun în evidență inerțiile electromagnetice;
- ecuația de mișcare care subliniază inerțiile mecanice.

În procesele dinamice, cele două sisteme de ecuații strâns intercondiționate prin variabila comună, viteza unghiulară a rotorului, definesc modelul matematic dinamic neliniar al mașinii și trebuie soluționate numeric simultan.

Pentru a evita posibile solicitări electromagnetice și mecanice periculoase, simularea procesului dinamic dat cu utilizarea modelelor matematice, devine o etapă obligatorie a unei proiectări dedicate.

De calitatea modelelor matematice, sursă a informațiilor, depinde corespondența între rezultatele calculate și cele experimentale.

În cele ce urmează se subliniază cu titlu de exemplu, informațiile oferite de simulări la pornirea în asincron prin conectare directă la rețea, cu sau fără un cuplu rezistent la arbore, a unui motor sincron de mare putere.

2. STRUCTURA LUCRĂRII ȘI REZULTATELE PRINCIPALE

S-au simulat vitezele unghiulare electrice $\omega(t)$, $\omega_p(t)$ ale rotorului și câmpului magnetic principal învârtitor, caracteristicile mecanice $m(\omega)$ și unghiulare $m(\theta)$ statice și dinamice cu detalieri ale unor momente semnificative.

2.1 Pornirea în asincron cu un cuplu rezistent $M_r=0$, urmată de aplicarea după sincronizare, a unui cuplu rezistent $M_r=40000$ Nm

În reprezentări, zona **a** corespunde pornirii în asincron și sincronizării pe seama cuplului reactiv, zona **b** procesului dinamic de resincronizare determinat de introducerea curentului de excitație și zona **c**, aplicării lui M_r .

Figurile 1 (caracteristicile $\omega(t)$, $\omega_\psi(t)$) oferă informații care aruncă o lumină inedită, spectaculoasă, privind mai ales variația lui $\omega_\psi(t)$. Oferită prin simulări, ea se exteriorizează prin consecințe.

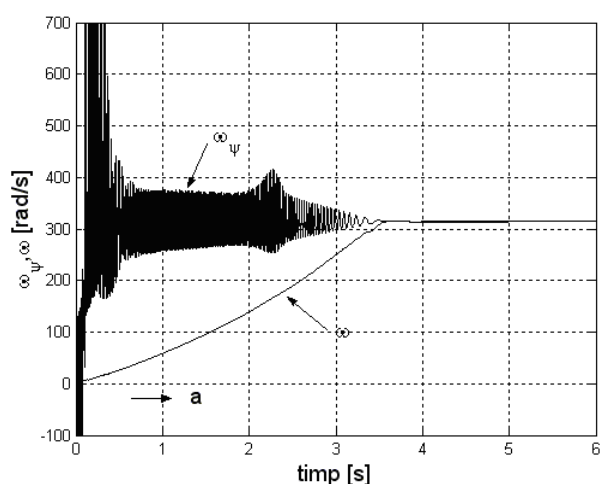


Fig. 1.a - Caracteristicile $\omega(t)$, $\omega_\psi(t)$ în zona **a**.

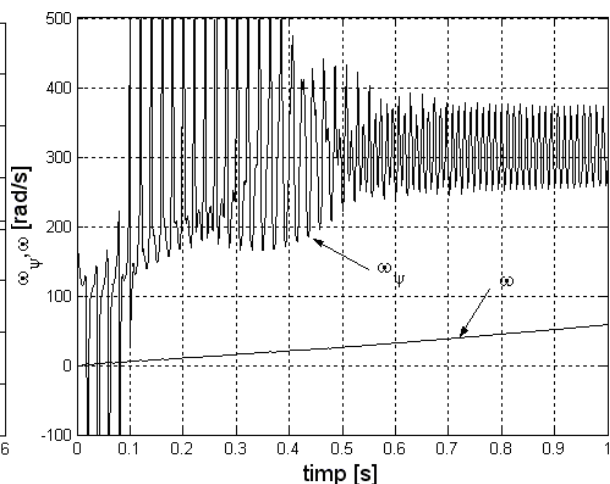


Fig. 1.b - Caracteristicile $\omega(t)$, $\omega_\psi(t)$ -detaliu zona **a**.

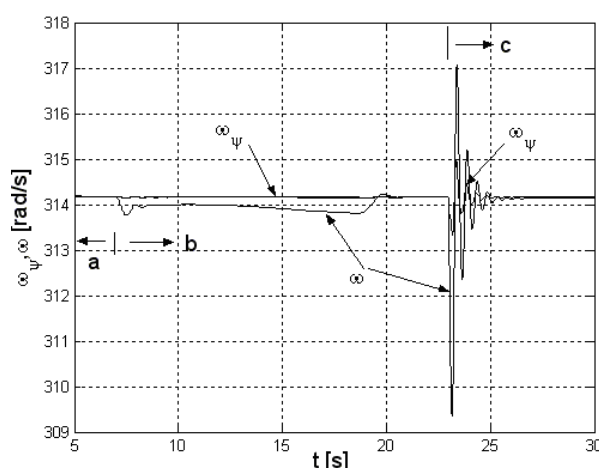


Fig. 1.c - Caracteristicile $\omega_\psi(t)$, $\omega(t)$ -detaliu zonele **b**, **c**.

În zona **a** (Fig.1.a) viteza câmpului învârtitor la $t=0$ este $\frac{1}{2} \omega_{In}$ și crește cu oscilații importante către ω_{In} într-un timp comparabil cu durata procesului tranzitoriu mecanic. În primele momente ale procesului de pornire se constată reversări de sens. Din momentul apariției oscilațiilor suprasincrone în sensul de rotație, dispar reversările de sens. Oscilațiile suprasincrone amortizate ocupă aproape restul intervalului **a**. Această observație este caracteristica generală pentru mașinile de current alternativ. În Fig. 1.a se identifică și efectul cuplului legăturii monoaxiale (fenomenul Gorges) prezent pe caracteristica $\omega_\psi(t)$ la $\omega \approx 1/2 \omega_{In}$.

Caracteristicile $\omega(t)$, $\omega_\psi(t)$ din Fig.1.b detaliază, pentru claritate, începutul zonei **a**. Se observă în porțiunea aferentă reversărilor de sens, consecința evocată și anume înregistrarea de oscilații corespondente în $\omega(t)$ chiar în condițiile unei inerții mecanice importante.

Procese dinamice din zonele **b**, **c** sunt detaliate în Fig.1.c. Oscilațiile rotorului se regăsesc în câmpul învârtitor.

Figurile 2 oferă informații valoroase calitative și cantitative privind evoluția cuplului electromagnetic.

Fără detalieri în Fig.2.a este reprezentată caracteristica $m(\omega)$ în toate zonele.

În Fig.2.b sunt reprezentate împreună caracteristicile unghiulare $m(\theta)$ statică și dinamica, ulterioare excitației mașinii, la aplicarea lui M_r (zona *c*). Se constată diferențe structurale între cele două caracteristici. Acestea se verifică reciproc prin faptul că punctul 3 final al caracteristicii dinamice, se plasează cu precizie pe caracteristica statică.

Trebuie subliniat că, în general, se definesc o mulțime de caracteristici dinamice dependente de parametrii tranzitorii electromagnetici ai mașinii sincrone și esențial de mărimea șocului de cuplu M_r și inerția mecanică a sistemului.

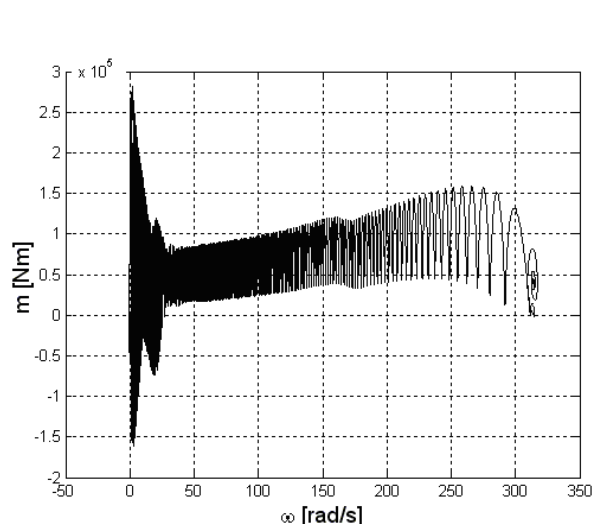


Fig. 2.a – Caracteristica $m(\omega)$.

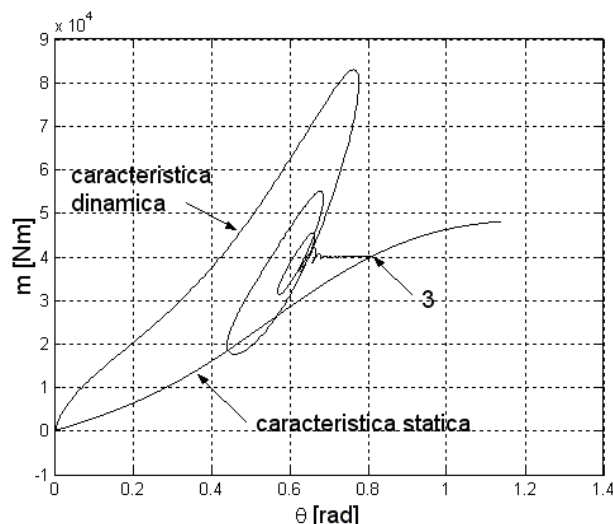


Fig. 2.b – Caracteristicile $m(\theta)$, statică și dinamică pentru $M_r=40000$ Nm.

2.2 Pornirea in asincron cu un cuplu rezistent $M_r= 40000$ Nm

Se considera zona *a* corespunzătoare pornirii în asincron și zona *b* aplicării tensiunii de excitație la momentul $t=30$ s, când se realizează funcționarea sincronă.

Caracteristicile $\omega(t)$, $\omega_\psi(t)$ în zona *a*, reprezentate în Fig.3.a diferă în special prin durată, de reprezentările corespundente din Fig.1.a. În finalul considerat al zonei *a* se instalează o funcționare asincronă oscilantă.

Figura.3.b detaliază zonele adiacente *a, b*. Se obțin cu claritate dimensiunile oscilațiilor din zona *a* și trecerea convenabilă la funcționarea sincronă.

Observăm că alt moment al aplicării excitației, poate determina o sincronizare mult mai complicată sau chiar imposibilitatea acesteia [1].

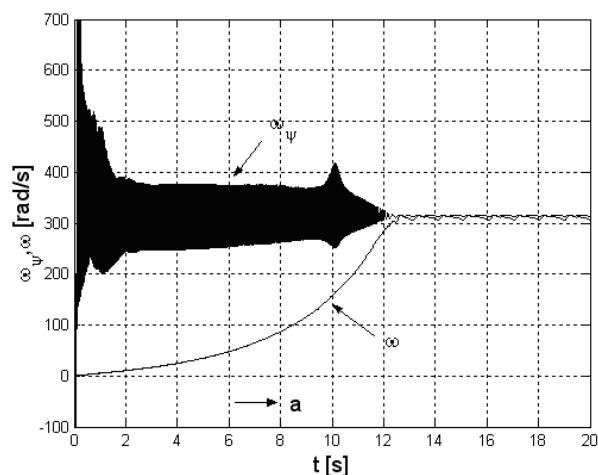


Fig. 3.a – Caracteristicile $\omega(t)$, $\omega_\psi(t)$ în zona *a*.

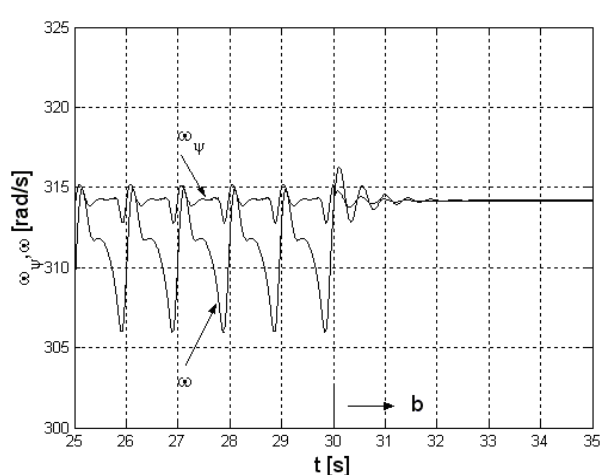


Fig. 3.b – Caracteristicile $\omega(t)$, $\omega_\psi(t)$ în zonele *a, b* – detaliu.

Figura 4.a privește caracteristica $m(\omega)$ în toate zonele. Comparația cu Fig.2.a corespundă, arată practic același cuplu maxim maximorum în primul moment al conectării la rețea și cum era de așteptat pe parcurs, cu excepția duratei, oscilații de amplitudini similare. Părțile finale diferă ca urmare a momentului favorabil evocat al aplicării excitației ulterior funcționării asincrone.

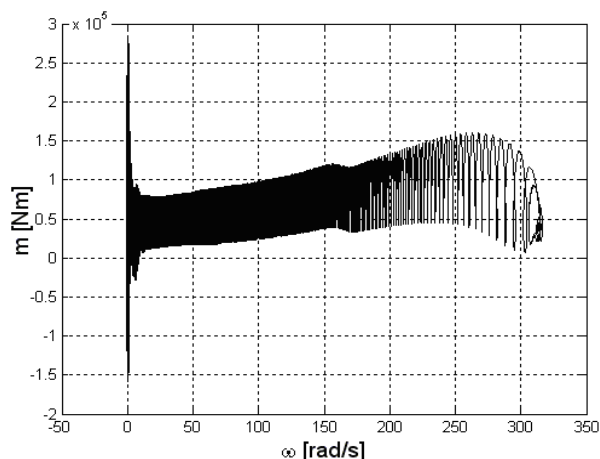


Fig. 4.a – Caracteristica $m(\omega)$.

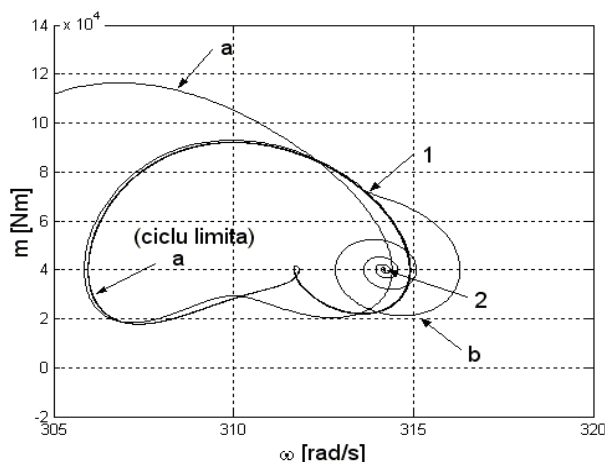


Fig. 4.b – Caracteristica $m(\omega)$ pe ciclul a, b – detaliu.

În Fig.4.b este reprezentat în detaliu finalul zonei **a** și zona **b** a caracteristici $m(\theta)$. Zona **a** aferentă funcționării asincrone permanente oscilante, este reprezentată de un ciclu limită care precizează amplitudinile oscilațiilor de cuplu și ale vitezei rotorului. Aplicarea în punctul **1** a tensiunii de excitație determină zona **b** cu oscilații amortizate în punctul de sincronism **2**.

Fără a mai reprezenta, pe caracteristicile $m(\theta)$ se regăsesc aceleași oscilații de cuplu ca și în Fig.4.b și punctul **2** de funcționare sincronă are aceleași coordonate ca ale punctului **3** din Fig.2.b.

3. OBSERVATII GENERALE

Simulările proceselor dinamice, particularizate pentru mașinile sincrone cu poli aparenti și excitație electromagnetică, oferă informații utile privind dimensiunea solicitărilor electromagnetice și mecanice în etape de interes.

Utilizarea unor modele matematice evolute, care iau în considerație procesele fundamentale, conduce la rezultate în plaja de erori admisibile și se dovedesc obligatorii la o proiectare dedicată.

Considerarea saturației magnetice inclusiv a variației dinamice în conexiune și cu nivelul asimetriei magnetice în modelele matematice dinamice, ridică sensibil nivelul preciziei determinărilor [1].

Ciclurile limită și reprezentarea împreună a vitezelor unghiulare ale câmpului magnetic principal și rotorului, descifrează comportarea dinamică intimă a mașinii.

În analizele de stabilitate dinamică, care implică mașina sincronă, trebuie luate în considerație cu necesitate caracteristicile unghiulare dinamice aferente care se dovedesc în general structural diferite de caracteristicile unghiulare statice.

Simularea este practic singura care poate fi luată în considerație, dacă se urmăresc informații cu acuratețe la nivel de detaliu (de exemplu cunoașterea variației tranzitorii a câmpului magnetic principal sau a solicitărilor electromagnetice și mecanice de vârf de scurtă durată, care pot deveni periculoase la o repetare sistematică [1].

Modelele matematice utilizate, nu discriminează tensiunea la bornele mașinilor de curent alternativ și pot fi egal valorificate și la utilizarea electronicii de putere și control, în vederea optimizării performanțelor.

ANEXA

Valorile nominale și parametrii motorului sincron: $P_n = 8000 \text{ kW}$, $U_n = 2887/5000 \text{ V}$, $n_l = 1500 \text{ rpm}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $R_s = 32.967 \cdot 10^{-3} \Omega$, $L_{s\sigma} = 0.795 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, $L_{E\sigma} = 1.823 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, $L_{D\sigma} = 0.838 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, $L_{Q\sigma} = 0.921 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, $R_E = 1.798 \cdot 10^{-3} \Omega$, $R_D = 92.046 \cdot 10^{-3} \Omega$, $R_Q = 115.05 \cdot 10^{-3} \Omega$, $J = 616 \text{ Kg m}^2$.

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

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

BIBLIOGRAFIE

1. A. Câmpeanu, *Dinamica mașinilor electrice de curent alternativ*, Editura AGIR, Bucuresti, 2021.