

VECTORUL POYNTING- S_p , vs. CONSTANTA MAȘINII - C (Arnold-Esson) ÎN SINTEZA(PROIECTAREA) MAȘINILOR ELECTRICE

Marin MIHALACHE

Universitatea "Politehnica" din București, Spl. Independenței 313, 060042, București

mamihro@yahoo.com

Rezumat. Relația putere-dimensiuni, fundamentală în proiectarea (sinteza) mașinilor electrice, este rezolvată în mod tradițional prin utilizarea "constantei" C (Arnold-Esson); ca o alternativă, autorul a propus utilizarea vectorului Poynting S_p (VA/m²), ca densitate de suprafață a puterii transferate, concept ce permite dimensionarea(sinteza) unei clase mult mai largi de mașini și transformatoare electrice. În lucrarea de față, se obține, pentru diferite tipuri de conversie (radială, axială, radial- axială, etc.),o relație generală între cele două concepte ($S_p = (n \cdot D_c / \pi) \cdot C$),unde D_c (m), reprezintă diametrul mediu al suprafeței de conversie.

Pentru ilustrarea conceptelor și relațiilor de calcul propuse, se realizează aplicații pentru un motor sincron ($P_n=500$ kW, $\cos \varphi_n=0.96$),realizat în varianta *radială*, *axială*, sau *axial-radială* [1],iar în final(Tab.1) sunt prezentate rezultate comparative obținute pentru toate variantele constructive analizate.

1.Introducere

În problema proiectării (sintezei) mașinilor electrice rotative, un rol fundamental îl are încă așa zisa *constantă a mașinii* (Arnold-Esson), ce stabilește o relație simplă putere-dimensiuni (*output-equation*) sub forma generală $S_e = n \cdot C \cdot D^2 \cdot L$ (VA),unde $C \cong (\pi^2 / \sqrt{2}) \cdot A \cdot B_\delta$ (N/m²) [8,10] etc.

Ca alternativă la această formulare, autorul propune utilizarea *vectorului Poynting*, S_p (VA/m²) - ca densitate de suprafață a puterii electromagnetice transferate, respectiv o relație alternativă putere-dimensiuni: $S_e = S_p \cdot A_p$ (VA), unde A_p (m²) reprezintă *suprafața de transfer* a puterii electromagnetice, relație cu mult mai generală (aplicabilă și transformatoarelor), putând fi considerată ca relație fundamentală putere-dimensiuni a convertoarelor electro-magnetice [6],[7].

Pe de altă parte, *constantă mașinii* (C), cât și *vectorul Poynting* (S_p), referindu-se la relația putere-dimensiuni, nu sunt independente, exemplele ce vor fi analizate (structuri electromagnetice de tip sincron,cu *înfășurare toroidală* în întrefier și magneți permanenți), evidențiind aceste relații.

2. Mașina sincronă cu magneți permanenți și conversie radială (fig.1,a,b,c)

2.1 Mașina cu înfășurare polară (mașina uzuală)

$$S_{e,n} = S_p \cdot \pi \cdot D \cdot L \text{ (VA)}, S_p(k_{f,1}) = S_{p,o} \cdot k_{f,1} \text{ (VA/m}^2\text{)}, S_{p,o} = Q_{1,t} / k_s \cdot p_{j1,n}, k_s = S_n / S_{e,n} = k_e \cdot k_{w,1} \\ k_{f,1} = 1 + L_f / L > 1, \text{ cu } L_f = \alpha_f \cdot \tau, \text{ unde } \alpha_f \cong \pi / 2 \text{ (zona frontală, un semicerc)} \quad (1)$$

Înlocuind $S_p = E_s \cdot A_1$ (VA/m²), $E_s = v_1 \cdot B_\delta / \sqrt{2}$ (V/m), $v_1 = \pi \cdot D \cdot n$ (m/s), se obține:

$$S_{e,n} = n \cdot C_p \cdot D^2 \cdot L \text{ (VA)}, \text{ unde } C_p = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_1 \cdot B_\delta \text{ (N/m}^2\text{)} - \text{ constanta mașinii (Arnold-Esson)} \quad (2)$$

respectiv, o relație importantă, vectorul Poynting – constanta mașinii: $S_p = \frac{n \cdot D_c}{\pi} \cdot C_p$ (VA/m²) (3)

unde $D_c = D$ reprezintă diametrul suprafeței de conversie.

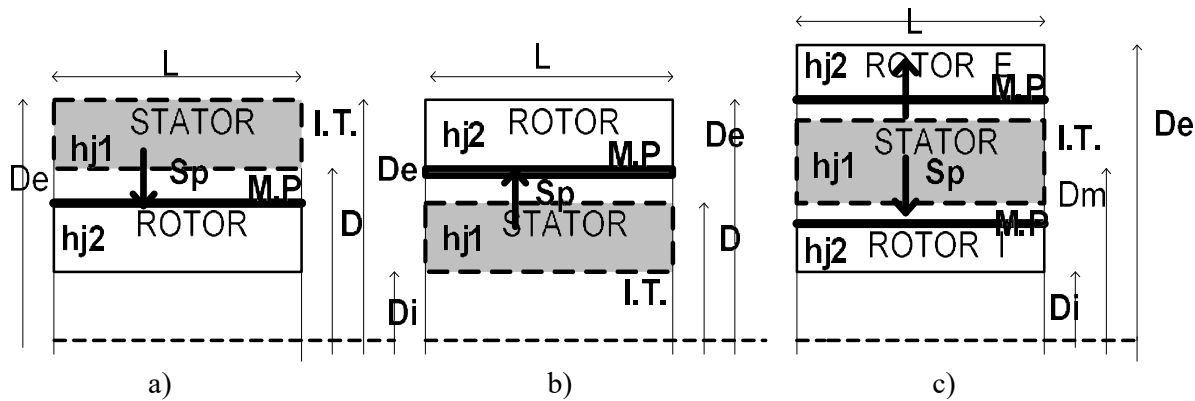


Fig.1. Mașini sincrone cu magneți permanenți și conversie radială

2.2 Mașina cu înfășurare toroidală (fig.1)

a) conversie radială, uniradială, rotor interior, t (fig.1a), sau exterior, u (fig.1b)

$$S_{e,n} = S_p \cdot \pi \cdot D \cdot L \text{ (VA)}, S_p(k_{f,1}) = S_{p,o} \cdot k_{f,1} \text{ (VA/m}^2\text{)}, k_{f,1} = 1 + \frac{L_f}{L} = 2 + k_{j,1} \cdot \frac{D}{L} > 2, k_{j,1} = k_b \cdot B_\delta$$

Înlocuind $S_p = E_s \cdot A_1$ (VA/m²), $E_s = v_1 \cdot B_\delta / \sqrt{2}$ (V/m), $v_1 = \pi \cdot D \cdot n$ (m/s), se obține:

$$S_{e,n} = n \cdot C_t \cdot D^2 \cdot L \text{ (VA)}, \text{ unde } C_t = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_1 \cdot B_\delta \text{ (N/m}^2\text{)} - \text{ respectiv: } S_p = \frac{n \cdot D}{\pi} \cdot C_t \text{ (VA/m}^2\text{)} \quad (4)$$

Pentru mașina fără creștături, cu înfășurare toroidală în întrefier și magneți permanenți dispuși pe suprafața rotorului, rezultă ecuația inducției magnetice din întrefier [2]:

$$B_\delta(k_{f,1}) = \frac{k_{f,m} \cdot i_{m,n} \cdot B_r}{i_{e,M,n} + k_{f,m} \cdot B_r \cdot k_Q \cdot \frac{k_{f,1}^2}{(k_{f,1} - 2)}} \text{ (T)}, k_Q = \frac{2 \cdot p \cdot \rho_1 \cdot Q_{t,1} \cdot k_b}{\mu_o \cdot k_{w,1} \cdot k_{U,1} \cdot k_S \cdot n_1 \cdot p_{j,1,n}^2 \cdot S_n} \text{ (T}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

$$\text{cu un maxim, } B_{\delta,Max} = \frac{k_{f,m} \cdot i_{m,n} \cdot B_r}{i_{e,M,n} + 8 \cdot k_{f,m} \cdot B_r \cdot k_Q} \text{ (T)}, \text{ pentru } k_{f,1} = 4;$$

b) conversie radială, bilaterală, r (fig.1c)

$$S_{e,n} = 2S_p \cdot \pi \cdot D_m \cdot L \text{ (VA)}, S_p(k_{f,1}) = S_{p,o} \cdot k_{f,1} \text{ (VA/m}^2\text{)}, k_{f,1} = 1 + \frac{L_f}{L} = 1 + k_{j,1} \cdot \frac{D_m}{L} > 1, \quad (6)$$

Înlocuind $S_p = E_{s,med} \cdot A_{1,med}$ (VA/m²), $E_{s,med} = v_{1,med} \cdot B_\delta / \sqrt{2}$ (V/m), $v_{1,med} = \pi \cdot D_m \cdot n$ (m/s),

se obține: $S_{e,n} = 2 \cdot n \cdot C_r \cdot D_m^2 \cdot L$ (VA), unde $C_r = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_{1,med} \cdot B_\delta$ (N/m²) - constanta mașinii

$$\text{respectiv, relația invariantă: } S_p = \frac{n \cdot D_c}{\pi} \cdot C_r \text{ (VA/m}^2\text{)}, \text{ unde } D_c = D_m \text{ (fig.1c)}. \quad (7)$$

Pentru mașina fără creștături, înfășurare toroidală în întrefier și magneți permanenți dispuși pe suprafața rotorului, rezultă ecuația inducției magnetice din întrefier [2]:

$$B_\delta(k_{f,1}) = \frac{k_{f,m} \cdot i_{m,n} \cdot B_r}{i_{e,M,n} + 2k_{f,m} \cdot B_r \cdot k_Q \cdot \frac{k_{f,1}^2}{(k_{f,1} - 1)}} \text{ (T)}, \text{ cu } B_{\delta,Max} = \frac{k_{f,m} \cdot i_{m,n} \cdot B_r}{i_{e,M,n} + 8 \cdot k_{f,m} \cdot B_r \cdot k_Q}, (k_{f,1} = 2). \quad (8)$$

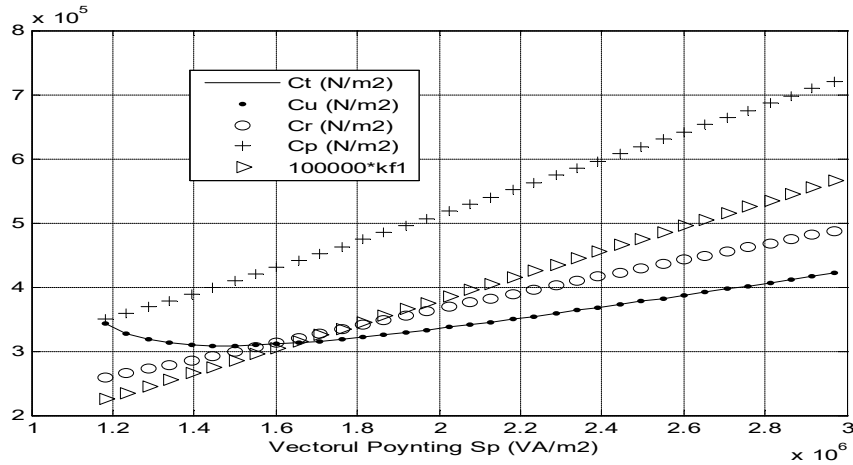


Fig.2. Constanta C vs. Sp, mașina cu conversie radială.

3. Mașina sincronă cu magneți permanenți și conversie axială (fig.3,a,b)

3.1 Mașina cu conversie uniaxială, u (fig 3a)

Având în vedere ca vectorul Poynting ($S_p = E_{S,med} \cdot A_{1,med}$), poate fi considerat constant pe cele două suprafețe de transfer, putem scrie ecuația puterii electromagnetice:

$$S_{e,n} = S_p \cdot \pi \cdot D_m \cdot L \text{ (VA)}, \text{ unde } S_p = S_{p,o} \cdot k_{f,1}, S_{p,o} = \frac{Q_{t,1}}{k_s \cdot p_{j1,n}} \text{ (VA/m}^2\text{)}, \tag{9}$$

cu factorul de geometrie: $k_{f,1} = 1 + \frac{L_{f,1}}{L} = 1 + \frac{L + 2 \cdot h_{j,1}}{L} = 2 + \frac{2 \cdot h_{j,1}}{L} = 2 + k_{j,1} \cdot \frac{D_m}{L} > k_{f,1,Min} = 2$

Înlocuind $S_p = E_{S,med} \cdot A_{1,med}$ (VA/m²), $E_{S,med} = v_{1,med} \cdot B_\delta / \sqrt{2}$ (V/m), $v_{1,med} = \pi \cdot D_m \cdot n$ (m/s),

se obține: $S_{e,n} = n \cdot C_u \cdot D_m^2 \cdot L$ (VA), unde $C_u = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_{1,med} \cdot B_\delta$ (N/m²)- constanta mașinii

respectiv, relația invariantă: $S_p = \frac{n \cdot D_c}{\pi} \cdot C_u$ (VA/m²), unde $D_c = D_m$ (fig.3a). (10)

Pentru mașina fără creștături, cu înfășurare toroidală în întrefier și magneți permanenți dispuși pe suprafața rotorului, rezultă ecuația inducției magnetice din întrefier [2]:

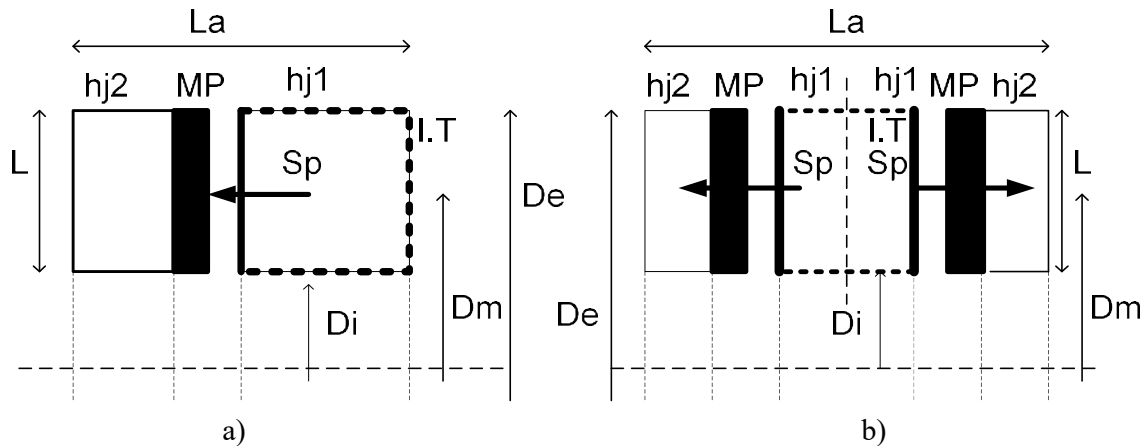


Fig.3. Mașini sincrone cu magneți permanenți și conversie axială.

$$B_{\delta}(k_{f,1}) = \frac{k_{f,m}(\alpha_m) \cdot i_{m,n} \cdot B_r}{i_{e,M,n} + k_{f,m}(\alpha_m) \cdot B_r \cdot k_Q \cdot \frac{k_{f,1}^2}{(k_{f,1} - 2)}} (\text{T}), k_Q = \frac{2 \cdot p \cdot \rho_1 \cdot Q_{t,1} \cdot k_b}{\mu_o \cdot k_{w,1} \cdot k_{U,1} \cdot k_S \cdot n_{1,n} \cdot p_{j1,n}^2 \cdot S_n} (\text{T}^{-1}) \quad (11)$$

cu un maxim, $B_{\delta,Max} = \frac{k_{f,m}(\alpha_m) \cdot i_{m,n} \cdot B_r}{i_{e,M,n} + 8 \cdot k_{f,m}(\alpha_m) \cdot B_r \cdot k_Q} < 1$, pentru $k_{f,1} = 4$.

3.2 Mașina cu conversie biaxială, t (fig 3b)

$$S_{e,n} = 2 \cdot S_p \cdot \pi \cdot D_m \cdot L (\text{VA}), S_p = S_{p,o} \cdot k_{f,1} (\text{VA/m}^2), k_{f,1} = 1 + \frac{L_{f,1}}{L} = 1 + \frac{h_{j,1}}{L} = 1 + k_{j,1} \cdot D_m / L > 1$$

Înlocuind $S_p = E_{S,med} \cdot A_{1,med} (\text{VA/m}^2)$, $E_{S,med} = v_{1,med} \cdot B_{\delta} / \sqrt{2} (\text{V/m})$, $v_{1,med} = \pi \cdot D_m \cdot n (\text{m/s})$, (12)

se obține: $S_{e,n} = 2 \cdot n \cdot C_t \cdot D_m^2 \cdot L (\text{VA})$, unde $C_t = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_{1,med} \cdot B_{\delta} (\text{N/m}^2)$ - constanta mașinii

respectiv, relația invariantă: $S_p = \frac{n \cdot D_c}{\pi} \cdot C_t (\text{VA/m}^2)$, unde $D_c = D_m$ (fig.3b). (13)

Pentru mașina biaxială fără creștături, cu înfășurare toroidală în întrefier și magneți permanenți dispuși pe suprafața rotorului, rezultă ecuația inducției magnetice din întrefier:

$$B_{\delta,n}(k_{f,1}) = \frac{k_{f,m} \cdot i_{m,n} \cdot B_r}{i_{e,M,n} + 2k_{f,m} \cdot B_r \cdot k_Q \cdot \frac{k_{f,1}^2}{(k_{f,1} - 1)}} < 1, \text{cu } B_{\delta,Max} = \frac{k_{f,m} \cdot i_{m,n} \cdot B_r}{i_{e,M,n} + 8 \cdot k_{f,m} \cdot B_r \cdot k_Q}, (k_{f,1} = 2); \quad (14)$$

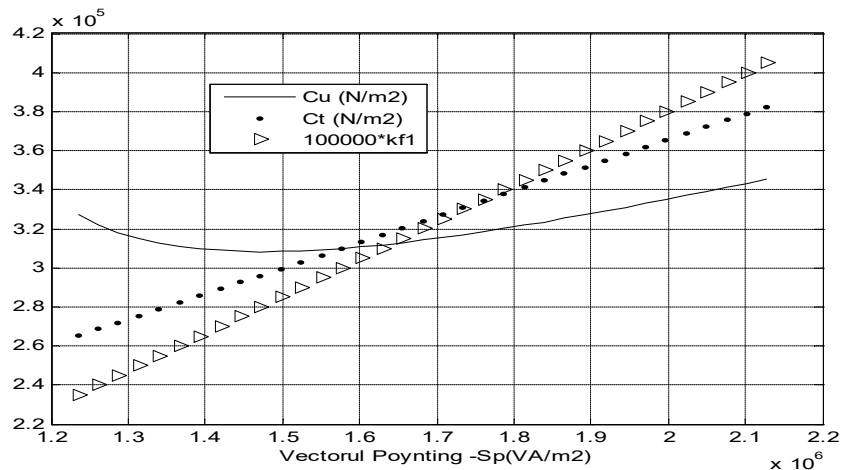


Fig.4. Constanta C vs. Sp, mașina cu conversie axială.

4. Mașina sincronă cu magneți permanenți și conversie axial-radială, nesimetrică (fig.5,a,b,c)

4.1. Mașina cu conversie mixtă, biaxială, radial-interior (Fig.5a), respectiv radial-exterior (Fig.5b)

a) Vectorul Poynting (S_p) și dimensiunile principale ale mașinii (D_m, L):

$$S_{e,n} = S_p \cdot (2\pi \cdot D_m \cdot L + \pi \cdot (D_m \mp L) \cdot L_a) \cong S_p \cdot (2\pi \cdot D_m \cdot L + \pi \cdot D_m \cdot L_a) (\text{VA}), \text{cu } L \ll D_m \quad (15)$$

unde $S_p = S_{p,o} \cdot k_{f,1}$, $S_{p,o} = \frac{Q_{t,1}}{k_S \cdot p_{j1,n}} (\text{VA/m}^2)$, respectiv factorul de geometrie:

$$k_{f,1} = 1 + \frac{L_{f,1}}{L_{c,a}} = 1 + \frac{L_a}{L_a + 2L}, \text{ de unde: } \frac{L_a}{2L} = \frac{k_{f,1} - 1}{2 - k_{f,1}} \text{ cu domeniul de variație } 1 < k_{f,1} < 2.$$

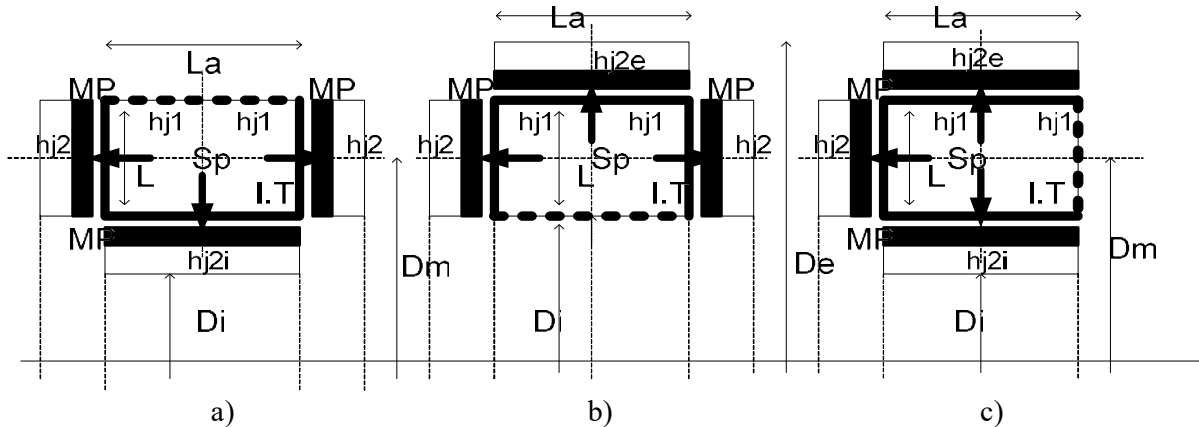


Fig.5. Mașini sincrone cu magneti permanenți și conversie mixtă, axial-radială.

b) Constanta mașinii

Înlocuind $S_p = A_{med} \cdot E_{S,med}$, unde $E_{S,med} = v_{med} \cdot B_{\delta,a} / \sqrt{2}$, $v_{med} = \pi \cdot n_1 \cdot D_m$, se obține: (16)

$$S_{e,n} = S_p \cdot \pi \cdot D_m \cdot L_{c,a} \quad S_{e,n} = n_1 \cdot C_{c,a} \cdot D_m^2 \cdot L_{c,a}, \quad C_{c,a} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_{med} \cdot B_{\delta,a} \text{ (N/m}^2\text{)} \text{ și } L_{c,a} = 2L + L_a.$$

4.2 Mașina cu conversie mixtă, biradial-axială (Fig.5c)

a) Vectorul Poynting (S_p) și dimensiunile principale ale mașinii (D_m , L):

$$S_{e,n} = S_p \cdot (\pi \cdot D_m \cdot L + \pi(D_m + L) \cdot L_a + \pi(D_m - L) \cdot L_a) = S_p \cdot (\pi \cdot D_m \cdot L + 2\pi \cdot D_m \cdot L_a) \text{ (VA)}, \quad (17)$$

unde $S_p = S_{p,o} \cdot k_{f,1}$, $S_{p,o} = \frac{Q_{t,1}}{k_s \cdot p_{j1,n}}$ (VA/m²), respectiv factorul de geometrie:

$$k_{f,1} = 1 + \frac{L_{f,1}}{L_{c,r}} = 1 + \frac{L_a}{L + 2L_a}, \text{ de unde: } \frac{L}{2L_a} = \frac{k_{f,1} - 1}{2 - k_{f,1}} \text{ cu domeniul de variație: } 1 < k_{f,1} < 2.$$

b) Constanta mașinii

Înlocuind $S_p = A_{med} \cdot E_{S,med}$, unde $E_{S,med} = v_{med} \cdot B_{\delta,r} / \sqrt{2}$, $v_{med} = \pi \cdot n_1 \cdot D_m$, se obține: (18)

$$S_{e,n} = n_1 \cdot C_{c,r} \cdot D_m^2 \cdot L_{c,r}, \text{ unde } C_{c,r} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_{med} \cdot B_{\delta,r} \text{ (N/m}^2\text{)}, \text{ și } L_{c,r} = 2L_a + L, \text{ funcțiuni de } k_{f,1}.$$

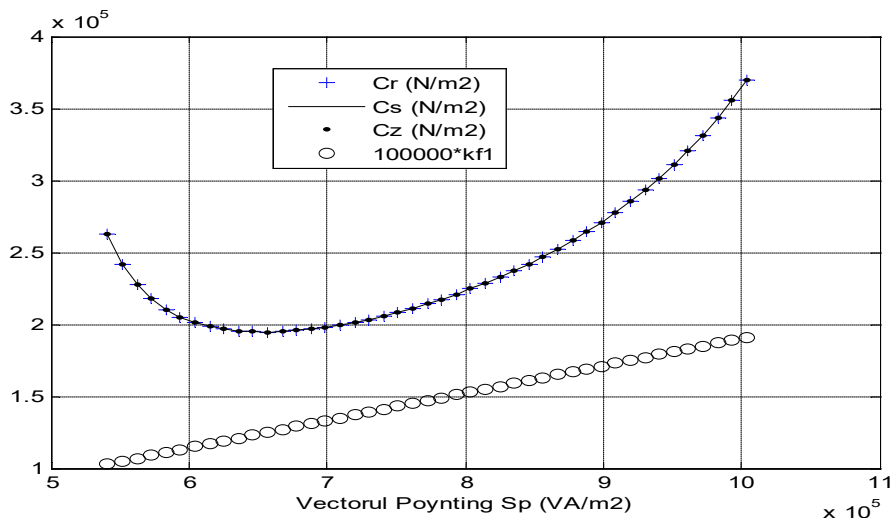


Fig.6. Constanta C vs. Sp, mașina cu conversie mixtă, axial-radială.

c) *Relația inducției magnetice în întrefier (B_{δ})*

Pentru ambele variante, avem:

$$B_{\delta}(k_{f,1}) = B_{\delta,a,r}(k_{f,1}) = \frac{i_{m,n} \cdot B_r}{\left(\frac{i_{e,M,n}}{k_{f,m}} + B_r \cdot k_Q \cdot \frac{k_{f,1}^2}{(k_{f,1} - 1) \cdot (2 - k_{f,1})} \right)}, k_Q = \frac{2p \cdot \rho_{Cu,1} \cdot Q_{t,1} \cdot k_b}{\mu_o \cdot k_{wl} \cdot k_{U,1} \cdot n_1 \cdot k_S \cdot S_n \cdot p_{j1,n}^2}$$

cu un *maxim*, $B_{\delta,Max} = i_{m,n} \cdot k_{f,m} \cdot B_r / (i_{e,M,n} + 8k_{f,m} \cdot B_r \cdot k_Q)$ (T), pentru $k_{f,1,B} = 4/3$. (19)

5. Mașina sincronă cu magneți permanenți, înfășurare toroidală, și conversie axial-radială, simetrică (rectangulară sau circulară)-structuri electromagnetice de calcul (fig.7,a,b)

5.1 Mașina cu conversie axial-radială, rectangulară (r)-fig.7a

a) *Vectorul Poynting (S_p) și dimensiunile principale ale mașinii (D_m, L):*

$$S_{e,n} = S_p \cdot (2\pi \cdot D_{m,r} \cdot L + 2\pi \cdot D_{m,r} \cdot L_a) \cong S_{p,o} \cdot 2\pi \cdot D_{m,r} \cdot (L + L_a) = S_{p,o} \cdot 2\pi \cdot D_{m,r} \cdot L_a \cdot (1 + \alpha)$$
 (VA)

unde $S_p = S_{p,o} = \frac{Q_{t,1}}{k_S \cdot p_{j1,n}} (k_f = 1)$ și $\alpha = L / L_a$ - factorul de geometrie. (20)

b) *Constanta mașinii*

Înlocuind $S_p = A_{med,r} \cdot E_{S,med,r}$, unde $E_{S,med,r} = v_{med} \cdot B_{\delta,r} / \sqrt{2}$, $v_{med} = \pi \cdot n_1 \cdot D_{m,r}$, se obține:

$$S_{e,n} = n_1 \cdot C_{r,r} \cdot D_{m,r}^2 \cdot L_{r,r}, \text{ unde } C_{r,r} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_{med,r} \cdot B_{\delta,r} \text{ (N/m}^2\text{)} \text{ și } L_{r,r} = 2 \cdot (L_a + L) \text{ (m)}. \text{ (21)}$$

c) *Relația inducției magnetice în întrefier (B_{δ})*

$$B_{\delta,r}(\alpha) = \frac{i_{m,n} \cdot B_r}{\left(\frac{i_{e,M,n}}{k_{f,m}(\alpha_m)} + k_{Q,r} \cdot B_r \cdot \frac{(1 + \alpha)^2}{\alpha} \right)} \text{ (T), unde } k_{Q,r} = \frac{4p \cdot \rho_1 \cdot Q_{t,1} \cdot k_{br}}{\mu_o \cdot k_{wl} \cdot k_{U,1} \cdot n_1 \cdot k_S \cdot S_n \cdot p_{j1,n}^2} \text{ (T}^{-1}\text{)} \text{ (22)}$$

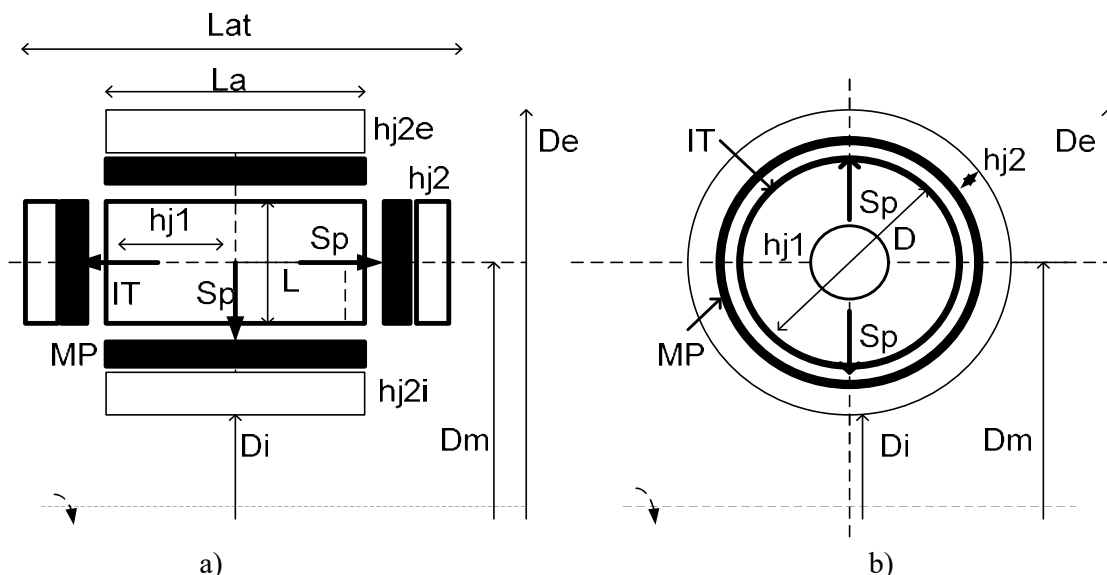


Fig.7. Mașini sincrone (idealizate), cu magneți permanenți și conversie axial-radială, simetrică.

5.2 Mașina cu conversie axial-radială, circulară (c)-fig. 7b

a) Vectorul Poynting (S_p) și dimensiunile principale ale mașinii ($D_c, D_{m,c}$)

$$S_{e,n} = S_p \cdot \pi \cdot D_{m,c} \cdot \pi \cdot D_c = S_{p,o} \cdot \pi^2 \cdot D_c \cdot D_{m,c} \text{ (VA)}, \text{ unde } S_p = S_{p,o} = \frac{Q_{t,1}}{k_s \cdot p_{j1,n}} \text{ (} k_f = 1 \text{)}. \quad (23)$$

b) Constanta mașinii

Înlocuind $S_p = A_{med,c} \cdot E_{S,med,cr}$, unde $E_{S,med,r} = v_{med} \cdot B_{\delta,c} / \sqrt{2}$, $v_{med} = \pi \cdot n_1 \cdot D_{m,c}$, se obține:

$$S_{e,n} = n_1 \cdot C_{c,c} \cdot D_{m,c}^2 \cdot L_{c,c}, \text{ unde } C_{c,c} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_{med,c} \cdot B_{\delta,c} \text{ (N/m}^2\text{)}, \text{ și } L_{c,c} = \pi \cdot D_c \text{ (m)} \quad (24)$$

c) Relația inducției magnetice în întrefier (B_δ)

$$B_{\delta,c}(\alpha_m) = \frac{i_{m,n} \cdot B_r}{k_{Q,c} + i_{e,M,n} / k_{f,m}(\alpha_m)} \text{ (T)}, k_{Q,c} = \frac{4p \cdot \pi \cdot \rho_1 \cdot Q_{t,1} \cdot k_b \cdot B_r}{\mu_o \cdot k_{w1} \cdot k_{U,1} \cdot n_1 \cdot k_s \cdot S_n \cdot p_{j1,n}^2} \text{ (u.r)} \quad (25)$$

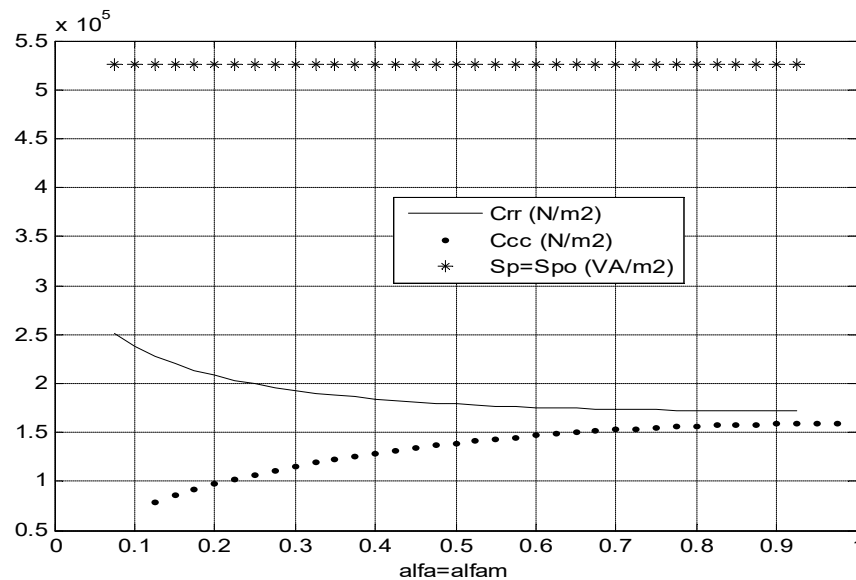


Fig.8. Constanta C vs. Sp, mașina cu conversie mixtă, axial-radială simetrică.

6. Relația generală, Vectorul Poynting ($S_p, \text{VA/m}^2$)-Constanta mașinii ($C, \text{N/m}^2$)

Pentru convertoarele electromagnetice rotative, analizate în lucrare (cu conversie radială, axială sau mixtă) se poate scrie următoarea relație generală:

$$S_p = E_{S,med} \cdot A_{med} = \frac{v_{med} \cdot B_\delta}{\sqrt{2}} \cdot A_{med} = \frac{n \cdot D_{med}}{\pi} \cdot C \text{ (VA/m}^2\text{)}, C \cong (\pi^2 / \sqrt{2}) \cdot A_{med} \cdot B_\delta \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (26)$$

unde D_{med} (m) reprezintă diametrul mediu al suprafeței de conversie, iar n (rot/s)-viteza de rotație.

7. Concluzii

Utilizarea vectorului Poynting ($S_p, \text{VA/m}^2$), ca densitate de suprafață a puterii electromagnetice transferate în mașini și transformatoare electrice, realizează o conexiune directă, fenomenologică, între puterea de calcul electromagnetică (S_e, VA) și suprafața de transfer- suprafața Poynting (A_p, m^2) respectiv, dimensiunile principale ale acestora $S_e = S_p \cdot A_p$, [6],[7] și poate reprezenta o alternativă viabilă tradiționalei relații $S_e = n \cdot C \cdot D^2 \cdot L \text{ (VA)}$, $C \cong (\pi^2 / \sqrt{2}) \cdot A \cdot B_\delta \text{ (N/m}^2\text{)}$ [9,10].

Tabel. 1. Performanțe comparative ale mașinilor sincrone analizate.

Performanțe Mașina	$k_{f,opt}$ (-)	$S_p = S_{p,o} \cdot k_{f,1}$ $\frac{kVA}{m^2}$	D_m (m)	B_δ (T)	E_s $\frac{V}{m}$	A_1 $\frac{A}{m}$	$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot A_1 \cdot B_\delta$ (kN/m ²)	$D_c = D_m$ $= \frac{\pi \cdot S_p}{n \cdot C}$ (m)
1. Radială (fig.1)								
rotor int. (I.T.)	5,25	2760	0,863	0,95	45,6	60500	401	0,865
rotor ext. (I.T.)	4,5	2391	0,816	0,96	43,7	54700	368	0,816
2 rotoare (I.T.)	3,75	1970	0,684	0,9	34,1	57800	362	0,683
rotor int.(I.P.)	1,8	946	0,381	0,65	13,7	69200	313	0,380
2. Axială (fig.3)								
uniaxial (I.T.)	5	2628	0,848	0,96	45	58400	389	0,848
biaxial (I.T.)	3,75	1945	0,682	0,9	34,1	57100	358	0,682
uniaxial (I.P.)	2,8	1471	0,457	0,59	15,1	97500	404	0,457
3. Axial- Radială (asimetrică,fig.5)								
biaxial,radial-inf.	1,75	920	0,405	0,75	16,8	54700	285	0,405
biaxial,radial-sup.	1,75	920	0,405	0,75	16,8	54700	285	0,405
biradial, uniaxial.	1,1	583	0,342	0,83	16,1	36200	210	0,348
4. Axial- Radială (simetrică,fig.7)								
rectangulară (r)	1	526	0,294	0,7	11,4	46300	225	0,294
circulară (c)	1	526	0,515	0,73	20,9	25200	128	0,516

Cu privire la cele două tipuri de relații putere - dimensiuni, se pot sublinia următoarele: a) În raport cu formularea tradițională (C), aplicabilă direct mașinilor standard, cu conversie radială, metoda vectorului Poynting (S_p) este mult mai generală, implicând *suprafețe de transfer*, ceea ce permite sinteza (proiectarea) sistematică a unei clase mult mai largi de mașini electrice cu conversie radială, axială, radial-axială etc.[1].

Observație: Pentru aceste tipuri de mașini, cu simetrie cilindrică, se poate generaliza formularea tradițională: $S_e = n \cdot C_c \cdot D_{m,c}^2 \cdot L_c$, unde $C_c \cong (\pi^2 / \sqrt{2}) \cdot A_c \cdot B_{\delta,c}$, cu L_c -lungimea activă totală, iar $D_{m,c}$ -diametrul mediu al suprafeței de conversie.

b) Spre deosebire de „constantă” C , dependentă direct de solicitările electromagnetice, A, B_δ - mărimi dificil de evaluat în proiectare, vectorul Poynting poate fi exprimat în funcție de mărimi mult mai practice și comod de evaluat ($S_p = S_{p,o} \cdot k_{f,1}$, unde $S_{p,o} = Q_i / k_s \cdot p_{j1,n}$), respectiv în funcție de *solicitările termice* admisibile ($Q_i, W/m^2$), *pierderile Joule* nominale ($p_{j1,n}$, u.r.) și factorul zonei frontale ($k_{f,1} \geq 1$).

c) Pentru mașinile cu simetrie cilindrică, analizate în lucrare, rezultă o relație simplă între vectorul Poynting (S_p) și constanta mașinii (C), respectiv: $S_p = S_{p,o} \cdot k_{f,1} = \frac{n \cdot D_{med}}{\pi} \cdot C$, relație ce permite o evaluare rapidă a diametrului mediu de conversie (D_{med}), în funcție de solicitările termice (Q_t) și electro-mecanice (n, C) ale mașinii (vezi Tabelul 1).

8. Bibliografie

- [1]. M. Mihalache, Algoritmul Poynting și sinteza optimală a mașinilor sincrone cu magneți permanenți și înfășurare toroidală în întrefier, Partea 1, Partea 2, Partea 3, SME'2018, București, 2018
- [2]. M. Mihalache, *Mașini electrice de curent alternativ, Analiza și Sinteza optimală, Ed. MatrixRom, București, 2014*
- [3]. M. Mihalache Analiza și sinteza optimală a mașinilor electrice cu magneți permanenți - Partea 1, Partea 2, SME'2013, București, 2013
- [4]. M. Mihalache, Mașina Sincronă. Analiza și Sinteza optimală, Ed. MatrixRom, București, 2009.
- [5]. M. Mihalache, The Poynting Algorithm a general method în optimal sizing of electrical machines, A.T.E.E.'08, Bucarest, 2008.
- [6]. M. Mihalache, Vectorul Poynting și dimensiunile principale ale mașinilor electrice, Simpozionul Electrotehnica'96, București, 1996
- [7]. M. Mihalache, Vectorul Poynting și dimensiunile principale ale transformatoarelor electrice, E.E.A. Electrotehnica, 42, nr.7, 1994.
- [8]. I. Cioc, C. Nica, Proiectarea mașinilor electrice, Ed. Didactica și Pedagogica, București, 1994.
- [9]. P.S. Sergheev, s.a., Proiectirovanie elektriceskih masin, Energhia, Moskva, 1969.
- [10]. E. Arnold, Die Wechselstromtechnik, Springer, Berlin, 1908.