

UDK 621.313.13

Vpliv dodatnih mas na dinamične karakteristike električnega pogona pri različnih obratovalnih vrtiljajih

BOŽIDAR HRIBERNIK

1. UVOD

V splošnem so znane zakonitosti gradnje električnih strojev tako za statična kakor tudi za dinamična obratovalna stanja. Temeljito analizo najdemo pri Jurkoviću [1]. Najpogostejša zadrega pri izbiri optimalnega motorja je izbira prestavnega razmerja, se pravi gonila; v zadnjem času pa se z izbiro novih motorjev, posebej tistih z elektronsko komutacijo pojavlja možnost za neposredni pogon. Opazovanje se torej osredotoča na alternativni izhod različnih pogonskih motorjev različnih vrtilnih hitrosti in enake moči.

Na podlagi poznavanja zakonitosti gradnje električnih strojev je Jurković [1] izvedel pomembno relacijo, da so

$$M_i \propto V_m \propto G_m \propto C_m \quad (1),$$

pri čemer so M_i imenski moment, ki ga razvija motor, V_m prostornina motorja, G_m teža motorja in C_m cena motorja, α pa pomeni znak za proporcionalnost.

Iz enačbe

$$P_i = M_{im} \omega_i = \text{konst} \quad (2)$$

lahko z enačbo (1) takoj dobimo razmerje

$$C_m \propto \frac{1}{\omega_i} \quad (3),$$

ki da splošni ekonomski sklep, da je motor z večjo vrtilno hitrostjo cenejši. Zgornja razmerja veljajo seveda za motorje iste vrste in statični pogon.

Nekoliko nadrobnejša analiza [2] standardnih asinhronskih motorjev domačih izdelovalcev motorjev (Elektrovina, Rade Končar in Sever) pa je pokazala, da zgoraj navedena linearna razmerja ne držijo, ampak so mnogo bližja naslednja razmerja

$$C_m \propto \frac{1}{\sqrt{\omega_i}} \dots \frac{1}{\sqrt[3]{\omega_i}} \quad (4)$$

in

$$G_m \propto \sqrt{M_i} \dots \sqrt[3]{M_i} \quad (5).$$

Navedene razlike izhajajo iz tega, da motorji iste vrste vendarle niso povsem podobni drug drugemu. Hitro tekoči motorji imajo namreč drugačno razmerje med premerom motorja in rotorja, nekoliko drugačne izdelavne stroške pa tudi morda drugačno cenovno politiko.

Vsekakor pa drži, da so za statični pogon cenejši hitreje tekoči motorji. Poleg tega pa imajo ti še boljši izkoristek in faktor moči.

2. DINAMIČNO OBRATOVANJE

Če smo pri statičnem obratovanju lahko zane-marili vpliv prestavnega razmerja gonila in lastnosti bremena, pa tega pri dinamičnem obratovanju

ne smemo storiti, saj se zaradi pretakanja kinetične energije ekvivalentni vztrajnostni moment prenaša s kvadratom prestavnega razmerja gonila.

Zato moramo pri dinamičnem obratovanju opazovati pogon kot celoto, tako da lahko poganjamo vedno enako breme (enaka hitrost, enak vztrajnostni in bremenski moment) z motorji različnih vrtilnih hitrosti in ustreznimi gonili (različna prestavna razmerja).

Za oceno dinamičnih sposobnosti motorja pa opazujemo naslednje dinamične pojave: hitrost, dinamične izgube, segrevanje navitja in dinamično stabilnost.

Hitrost, tj. trajanje dinamičnega pojava lahko opazujemo z imensko zagonsko časovno konstanto [3]:

$$T_{zi} = J_p \frac{\omega_i}{M_{im}} \quad (6),$$

kjer je J_p ekvivalentni vztrajnostni moment pogona na gredi motorja.

Dinamične izgube opazujemo z enačbo za izgube v rotorju [3], če se vrtiljaji spremenijo iz stanja 1 v stanje 2:

$$W_{1,2} = J_p \omega_s^2 \left[\frac{1}{2} (s_1^2 - s_2^2) + \int_{s_2}^{s_1} \frac{M_b}{M_m - M_b} s ds \right] \quad (7),$$

kjer pomenijo ω_s — sinhronsko kotno hitrost motorja, s_1 in s_2 — slip v začetku oz. na koncu opazovanega prehodnega pojava, M_b — moment bremena in M_m — moment motorja ter s — slip motorja.

Če hočemo opazovati »čiste« dinamične izgube, potem izločimo vpliv bremena $M_b = 0$. Za merilo sposobnosti motorja je dovolj, če opazujemo le izgube med zagonom, torej $s_1 = 1$ in $s_2 = 0$, tako da enačba 7 preide v preprostejšo obliko:

$$W_z = J_p \frac{\omega_s^2}{2} \quad (8).$$

Pri opazovanju segrevanja se zadovoljimo z adiabatnim segrevanjem med prehodnim pojavom [3]:

$$\Delta \vartheta = \frac{W_{1,2}}{m c} \quad (9),$$

kjer sta m — masa telesa, ki se segreva, in c — njegova specifična toplota. Za opazovanje se omejimo na zagon motorja, torej lahko zapišemo

$$\Delta \vartheta = \frac{W_z}{m_{nav} c_{nav}} \quad (10),$$

saj se omejimo le na segrevanje navitja.

Dinamično stabilnost nakazuje razmerje mehanke T_m in električne časovne konstante T_e . To izhaja iz diskriminante karakteristične enačbe [1]:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_e} \pm \sqrt{\frac{1}{T_e} \left(\frac{1}{4T_e} - \frac{1}{T_m} \right)} \quad (11),$$

kjer preide sistem iz asimptotičnega prehodnega pojava (realni koren) v nihajočega (imaginarni koren) prav pri razmerju $4T_e = T_m$. Torej čim večja je mehanska časovna konstanta T_m nasproti štirikratni električni T_e , tem bolj stabilen je pogon.

Analiza zgornjih meril, ki je bila napravljena za referat [2] pri alternativnem izboru motorjev v razmerju vrtljajev $\omega_{i1} : \omega_{i2} = 4 : 1$, je pokazala, da moramo obvezno upoštevati še vztrajnostni moment pogona J_p , nasproti vztrajnostnemu momentu motorja J_m s faktorjem inercije:

$$FI = \frac{J_p}{J_m} \quad (12),$$

Sklepi so naslednji:

1. Hitrost trajanja prehodnega pojava in velikost dinamičnih izgub sta le malo odvisni od izbire hitrosti motorja. Če je FI zelo velik, npr. $FI = 100$, potem praktično ni nobene razlike ne v hitrosti ne v dinamičnih izgubah. Razlike postajajo večje pri majhnih FI . Tako npr. pri $FI = 2$, ($J_m = J_h$) in razmerju vrtljajev $4 : 1$ opazimo približno 20-odstotno povečanje hitrosti prehodnega pojava in enako zmanjšanje dinamičnih izgub pri počasnejšem motorju.

2. Segrevanje motorja v dinamičnih razmerah kaže veliko problematičnost hitro tekočih motorjev, saj je povišanje temperature proporcionalno

$$\Delta \vartheta \propto W_z \cdot \omega_i \quad (13).$$

Torej narašča segrevanje navitja proporcionalno s hitrostjo vrtenja in velikostjo izgub. Ker pa izgube rastejo hitreje pri motorjih z majhnim FI , moramo pri izbiri hitrejših motorjev računati z večjim zvišanjem temperature kakor pri pogonih z večjim FI . Če pa upoštevamo izkušnje iz [2], potem so razmerja nekoliko ugodnejša

$$\Delta \vartheta \propto W_z \cdot \omega_i^{1/2} \text{ do } \Delta \vartheta \propto W_z \cdot \omega_i^{1/3} \quad (14).$$

Torej je zvišanje temperature dejansko mnogo počasnejše.

3. Dinamična stabilnost prav tako pri pogonih z velikim FI ni odvisna od vrste motorja, saj je $T_m \gg 4T_e$. Dinamična stabilnost pada pri majhnih FI , kjer vse bolj vplivajo lastnosti motorja na stabilnost pogona. Pri Jurkoviću [1] najdemo razlago, da so pogoni s počasi tekočimi motorji manj stabilni od tistih s hitro tekočimi.

Iz zgornjih sklepov lahko izdelamo preglednico 1.

Preglednica 1. *Kakovostna primerjava pogonov s počasnimi in hitrimi motorji*

Stroj	počasi tekoči		hitro tekoči	
	majhen	velik	majhen	velik
Statično obratovanje	—	—	+	+
čas trajanja	d+	=	d—	=
Dinamično obratovanje				
izgube	d+	=	d—	=
segrevanje	+	+	—	—
stabilnost	d—	=	d+	=

Razlaga: + ugodno, dobro, primerno, — neugodno, slabo, neprimerno, d+ ali d— delni vpliv, = je enako, ni bistvene razlike.

3. NEPOSREDNI POGON

Kadar so prestavna razmerja majhna, so sklepi iz [2] oz. poglavja 2 zadovoljivi. V mnogih pogonih pa so prestavna razmerja

$$i = \frac{\omega_i}{\omega_h} \quad (15)$$

zelo velika, $i = 20—150$. Da bi dobili pregled čez širša področja, bomo skušali napisati splošno veljavne zakonitosti.

Kakor v [2] izhajamo iz predpostavke, da je pri spreminjanju dimenzij motorja izhodišče razmerja $D_r/L_r = \text{konst.}$, kjer pomenita D_r premer rotorja motorja, L_r pa njegovo dolžino.

Za prostornino rotorja motorja lahko pišemo

$$V_r \propto D_r^2 \cdot L_r \quad (16)$$

in nadalje ob zgornji predpostavki

$$V_r \propto D_r^3 \quad (17).$$

Pri podobni strukturi rotorja lahko pišemo tudi, da je ob upoštevanju enačbe (3)

$$m_r \propto V_r \propto D_r^3 \propto \frac{1}{\omega_i} \quad (18).$$

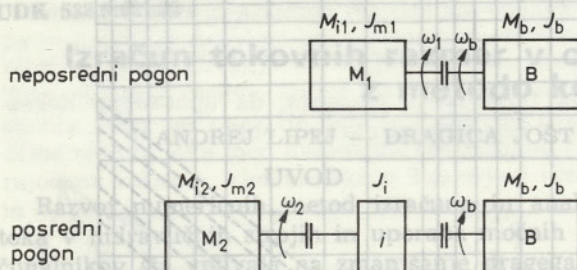
Ker vemo, da je vztrajnostni moment rotorja enak

$$J_r = J_m = m_r D_r^2 \quad (19),$$

kjer sta m_r — masa, V_r pa prostornina rotorja in na podlagi enačbe (18)

$$J_m \propto \frac{1}{\omega_i} \left(\frac{1}{\omega_i} \right)^{2/3} \propto \frac{1}{\omega_i^{5/3}} \quad (20).$$

Za primerjavo vzemimo prvič neposredni pogon in drugič pogon prek gonila s prestavnim razmerjem i na v obeh primerih enako gnano breme kakor prikazuje slika 1. Neposredni pogon označimo z indeksom 1, posredni z indeksom 2.



Sl. 1. Neposredni in posredni pogon

Če trajanje prehodnega pojava opazujemo z mehansko časovno konstanto po enačbi (6), potem si lahko razmerje časovnih konstant zapišemo, ob upoštevanju enačbe (12) kot

$$\frac{T_{zi2}}{T_{zi1}} = \frac{J_{p2}(\omega_{i2}/M_{i2})}{J_{p1}(\omega_{i1}/M_{i1})} = \frac{FI_2 J_{m2}(\omega_{i2}/M_{i2})}{FI_1 J_{m1}(\omega_{i1}/M_{i1})} \quad (21).$$

Ker vemo, da je $M_{i2} = M_b 1/i$, mora veljati pri konstantni moči tudi razmerje:

$$\frac{M_{i2}}{M_{i1}} = \frac{\omega_{i1}}{\omega_{i2}} = \frac{1}{i} \quad (22).$$

Če vzamemo skrajni primer, da v neposrednem pogonu motor zažene le sebe, torej $J_b = 0$, potem je $FI_1 = 1$. Takrat dobi enačba (21) ob upoštevanju enačbe (22) obliko

$$\frac{T_{zi2}}{T_{zim}} = \frac{FI_2 J_{m2} i^2}{J_{m1}} = FI_2 (1/i)^{5/3} i^2 \quad (23),$$

če smo upoštevali še enačbo (20). Torej se čas trajanja prehodnega pojava v čistih dinamičnih razmerah spreminja po enačbi

$$T_{zi} = T_{zim} FI i^{1/3} \quad (24),$$

kjer je T_{zim} normalna zagonska časovna konstanta pogona, T_{zim} pa normalna zagonska časovna konstanta motorja. Enačba je univerzalna in velja tudi za neposredni pogon, tj. $i = 1$.

Čiste dinamične izgube opazujemo z enačbo (8). Če opravimo podobno izvajanje kakor zgoraj, velja za izgube enačba

$$W_z = W_{zm} FI i^{1/3} \quad (25).$$

Torej se tudi izgube spreminjajo premo sorazmerno FI in s tretjim korenem prestavnega razmerja i . Ta razmerja prikažemo na sliki 2 (na strani 158) s polnimi črtami.

Po podobnem postopku lahko določimo zakonitost, po kateri se bo zviševala temperatura, če upoštevamo enačbo (13)

$$\frac{\Delta\vartheta_2}{\Delta\vartheta_1} = \frac{(W_{z2}/c) \omega_{i2}}{(W_{z1}/c) \omega_{i1}} = FI i^{1/3} i = FI i^{4/3} \quad (26)$$

ali če upoštevamo enačbo (13)

$$\frac{\Delta\vartheta_2}{\Delta\vartheta_1} = \frac{W_{z2} \sqrt{\omega_{i2}}}{W_{z1} \sqrt{\omega_{i1}}} \dots \frac{W_{z2} \sqrt[3]{\omega_{i2}}}{W_{z1} \sqrt[3]{\omega_{i1}}} = FI i^{5/6} \dots FI i^{2/3} \quad (27).$$

Po pričakovanju je seveda zvišanje temperature navitja v odvisnosti od hitrosti vrtenja motorja mnogo hitrejše kot povečanje hitrosti sprememb ali izgub (primerjaj z enačbama (24) in (25)). Razmerje

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_m FI i^{5/6} \quad (28)$$

je prikazano na sliki 2 kot črtkana črta. $\Delta\vartheta_m$ je zvišanje temperature pri manevru brez dodatnega bremena in vztrajnostnih mas.

Pri tem opazovanju smo zanemarili ceno pogona. Pogoni z motorji, ki se počasneje vrtijo, zahtevajo dražje motorje (glej enačbi (3) in (4)), vendar moramo v ceno pogona všteti še ceno gonila, ki pa pri neposrednem pogonu v celoti odpade. Motorji z nižjimi imenskimi vrtiljaji obratujejo s slabšimi izkoristki in faktorji moči, vendar je pri pogonih, ki obratujejo pretežno v dinamičnih stanjih ta prednost zanemarljiva. Končno sodbo o uvedbi neposrednega pogona mora dati šele temeljita analiza obravnavanega primera.

4. SKLEP

Opazovanje nekaterih značilnih dinamičnih pojavov nas je pripeljalo do preprostih in splošnih enačb, s katerimi lahko v simulacijah, pred odločitvami o izbiri primerne motorja, sklepamo na nekatere tehnične posledice, ki izhajajo iz takšne izbire. Omejili smo se na motorje enakih moči in različnih vrtilnih hitrosti z gonilom ali brez njega.

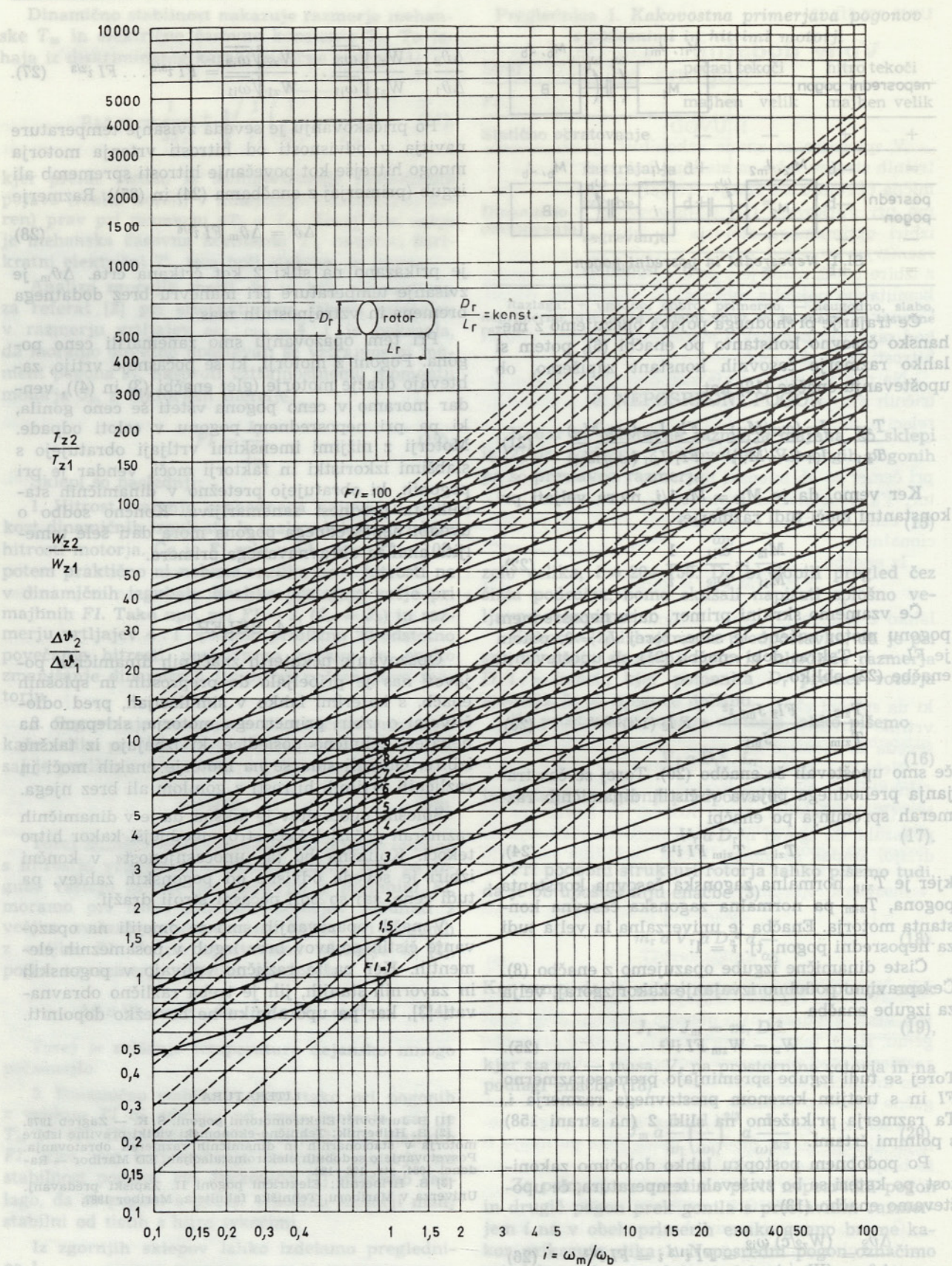
Splošna ugotovitev je takšna, da je v dinamičnih razmerah počasi tekoči stroj ugodnejši kakor hitro tekoči. Kolikšna bo ta »upočasnjeno« v končni izbiri je seveda odvisno od pogonskih zahtev, pa tudi cene, saj so bolj počasni stroji dražji.

V naših opazovanjih smo se omejili na opazovanje čistih pojavov brez izgub v posameznih elementih. Ker pa te različno vplivajo v pogonskih in zavornih stanjih, jih je treba različno obravnavati [3], kar pa uporabniku ne bo težko dopolniti.

LITERATURA

- [1] B. Jurković: Elektromotorni pogoni, S. K. — Zagreb 1978.
- [2] B. Hribnik: Tehnično-ekonomski vidiki pravilne izbire motorja v stacionarnih in dinamičnih razmerah obratovanja. Posvetovanje o sodobnih elektroinstalacijah. ED Maribor — Radenci 1984, str. 108—122.
- [3] B. Hribnik: Električni pogoni II. Zapiski predavanj. Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta, Maribor 1987.

Avtorjev naslov: prof. dr. Božidar Hribnik, dipl. inž.,
Tehniška fakulteta, VTO Elektrotehnika,
računalništvo in informatika, Maribor



Sl. 2. Diagram odvisnosti časovnih konstant T_{z2}/T_{z1} in izgub W_{z2}/W_{z1} (polna črta) ter povečanja segrevanja $\Delta\theta_2/\Delta\theta_1$ (črtkane črte) v odvisnosti od prestavnega razmerja gonila