



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
VET Tanszék

Ruzsa János

**KALICKÁS ASZINKRON GÉP
ELEKTROMECHANIKAI
PARAMÉTERKÉSZLETÉNEK
IDENTIFIKÁLÁSA**

TDK dolgozat

KONZULENSEK

Dr. Számel László
Horváth Sándor Rajmund

BUDAPEST, 2021

Tartalomjegyzék

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Összefoglaló | 4 |
| Abstract | 5 |
| 1 Bevezetés | 6 |
| 2 Általános paraméteridentifikáció | 7 |
| 2.1 A gép paramétereit | 7 |
| 2.1.1 Adattábla és adatlap | 7 |
| 2.1.2 Névleges üzem | 8 |
| 2.1.3 Indítás, zárlat..... | 9 |
| 2.1.4 Túlterhelhetőség..... | 12 |
| 2.1.5 Üresjárás | 12 |
| 2.2 Állórész | 13 |
| 2.2.1 Vastest..... | 13 |
| 2.2.2 Hornyok, pólusosztás, fogak, koszorú | 13 |
| 2.2.3 Tekercselés, hornyok, fogak | 13 |
| 2.2.4 Tekercsfejkinyúlás | 15 |
| 2.2.5 Vezetők mérete | 16 |
| 2.2.6 Fluxus, közepes légrésindukció, kerületi áram, áramsűrűség..... | 16 |
| 2.3 Forgórész | 17 |
| 2.3.1 Vastest..... | 17 |
| 2.3.2 Hornyok, fogak, koszorú | 17 |
| 2.4 Ellenőrzés..... | 18 |
| 2.4.1 Gép tömege | 18 |
| 2.4.2 Indukció | 19 |
| 3 Konklúzió | 21 |
| Irodalomjegyzék | 22 |

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Ruzsa János**, villamosmérnöki BSc szakos hallgató kijelentem, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye.

Kelt: Budapest, 2021. 10. 28.

.....
Ruzsa János

Összefoglaló

A szabályozott villamos hajtások területén a forgómezős váltakozóáramú gépek leginkább elterjedt típusa háromfázisú állórésszel és kalickás forgórésszel rendelkezik. Viszonylag egyszerű felépítése és az utóbbi évtizedekben kiforrott irányításelmélete révén a kalickás aszinkron gép általánosan és megbízhatóan alkalmazható állandó és változó fordulatszámú feladatokra egyaránt.

Az elektronikus konverterről táplált, tipikusan változó fordulatszámú alkalmazások esetében gyakori probléma bizonyos modellparaméterek ismeretének hiánya. A gép és a hajtás optimális illesztéséhez a koncentrált paraméterű helyettesítőkép elemértékeit és egyéb, a dinamikát alapvetően befolyásoló mennyiségeket is meg kell határozni. A korszerű mezőorientált irányítási stratégiák működtetéséhez olyan gépmodellel célszerű dolgozni, amely az áramfüggő és a frekvenciafüggő viselkedést is képes lekövetni.

Jelen dolgozatban egy általánosan alkalmazható módszertan kerül bemutatásra, a roncsolásmentes vizsgálatok, karakterisztikus mérések és mágnesköri számítások kombinálásával meghatározható a kalickás aszinkron gép elektromechanikai paraméterkészlete. A bemutatott eljárások felhasználásával nagy pontosságú – a hajtásvezérlő megfelelő felkészítésével akár önműködésre is képes – finomhangoló algoritmusok implementálása válik lehetővé.

Abstract

Among controlled electrical drives, the most widely used type of rotating field alternating current machines features a three-phase stator and a squirrel-cage rotor. Due to its relatively simple design and mature control theory, the induction machine is generally applicable with high reliability for constant and variable speed duties as well.

When the supply is provided by an electronic converter, typically in case of variable-speed applications, a common problem is the lack of knowledge of certain model parameters. For optimal coupling between the machine and the drive, components of the concentrated (lumped parameter) model and other quantities, that fundamentally affect the dynamics, should also be determined. To operate state-of-the-art field-oriented control strategies, it is proposed to work with a machine model that can consider current-dependent and frequency-dependent behavior.

In this Thesis, a generally applicable methodology is presented to determine the electromechanical parameter set of squirrel-cage induction machine, by combining non-destructive investigations, characteristic measurements and magnetic calculations. Using the procedures presented, high precision fine-tuning algorithms – capable of autonomous testing by a properly prepared drive-controller – can be implemented.

1 Bevezetés

Noha a kalickás aszinkron gép (KAG) felépítését tekintve egyszerű, a szabályozása sokkal több számítást igényel, mint például egy egyenáramú gép. A gép szabályozási elmélete hamarabb megszületett, minthogy a szükséges számítási kapacitás rendelkezésre álljon. Ugyanakkor egyre gyakrabban igény van a kis fordulatszámon való nyomatékképzésre is – elég csak az e-mobilitásra gondolni. Mivel az aszinkron gép a szinkron fordulatszámtól eltekintve bármilyen fordulatszámon képes nyomatékot kifejteni és gyakorlatilag egy forgó transzformátorként is alkalmazható, ezért egyre több hajtásnak része ez a fajta villamos gép.

A KAG névleges üzemét rendszerint a mágnesezési görbe könyökpontjához tervezik. A nagyteljesítményű, változó fordulatszámú hajtások (VSD) széles nyomatéktartományban működnek, és a jó dinamikájú tranziensek érdekében rövid időre a névlegesnél nagyobb gerjesztést is kiadnak a gép kapcsaira, aminek hatására a vasmag betelít, amit megfelelő modellek segítségével analizálni és szabályozni kell, hogy a végeredmény egy pontos és jó dinamikával rendelkező hajtás legyen.

Ahhoz, hogy egy aszinkron gépet be lehessen építeni egy villamos hajtásba és egy frekvenciaváltóról megfelelően működjön, első sorban lehetőleg a gép minél több villamos és mechanikai paraméterére van szükség, hiszen a gép és hajtás optimális illesztése elengedhetetlen a gép biztonságos szabályozásához és üzemeltetéséhez egy VSD esetén. Ha csak a paraméterek kis hányada ismert – vagy csak nagy bizonytalansággal, az igencsak leronthatja a hajtás megbízhatóságát, ami kényszerleálláshoz vezethet, ezzel gazdasági károkat okozva.

Az aszinkron gépes hajtások gyors felparaméterezhetőségét támogató vizsgálati módszerek folyamatos kutatása kiemelt fontosságú [1] pl. a dinamika és a stabilitás továbbfejlesztésének érdekében.

2 Általános paraméteridentifikáció

Egy villamos gép adattábláján szereplő adatok általában ahhoz elegendők, hogy a névleges üzemhez tartozó mennyiségeket gyorsan le lehessen olvasni a gépre pillantva. A gép hajtáshoz való illesztéséhez jóval több paraméterre van szükség, hogy az indítás/rövidzárás üzemet is kezelni tudjuk a védelmi berendezésekkel, és hogy a tranziens folyamatok során minél jobb dinamikával lehessen beavatkozni. Ebben a fejezetben a KAG általános roncsolásmentes paraméteridentifikációja kerül bemutatásra az idevonatkozó karakterisztikus mérésekkel és mágnesköri számításokkal.

2.1 A gép paraméterei

2.1.1 Adattábla és adatlap

| | | | | | |
|------------------------------------------|-------|-------------------|----------------|-----------|---------|
| TYPE TMS2 132M-4 B3 | | | No.16091510861 | | 2016 |
| V | Hz | min ⁻¹ | kW | A | COS φ |
| 400/690 | 50 | 1455 | 7.5 | 14.6/8.43 | 0.84 |
| 400/690 | 60 | 1750 | 9 | 14.6/8.43 | 0.84 |
| ISOL. F | IP 55 | S9 | DE 6308 | | 52.6 kg |
| | | | NDE 6208 | | |
| IE2 - 88.7(100%) - 89.4(75%) - 88.5(50%) | | | | | |

2.1. ábra: A gép adattáblája

A vizsgált gép $2p = 4$ pólusú, $P_n = 7.5$ kW teljesítményű, amelynek szabványos tengelymagassága 132M. A gép fázistekercselésének a névleges feszültsége $U_{1fn} = 400$ V. Így a fázistekercsek kapcsolásától függően, delta kapcsolatban $U_{1vn} = 690$ V, csillag kapcsolatban $U_{1vn} = 400$ V vonali feszültséget kell biztosítani az állórész kapcsain névleges üzemállapotban. Négy pólusú gépről lévén szó, a gép szinkron fordulatszáma

$$n_0 = 60 \cdot \frac{f}{p} = 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot \frac{50 \frac{1}{\text{s}}}{2} = 1500 \frac{1}{\text{min}}. \quad (2.1)$$

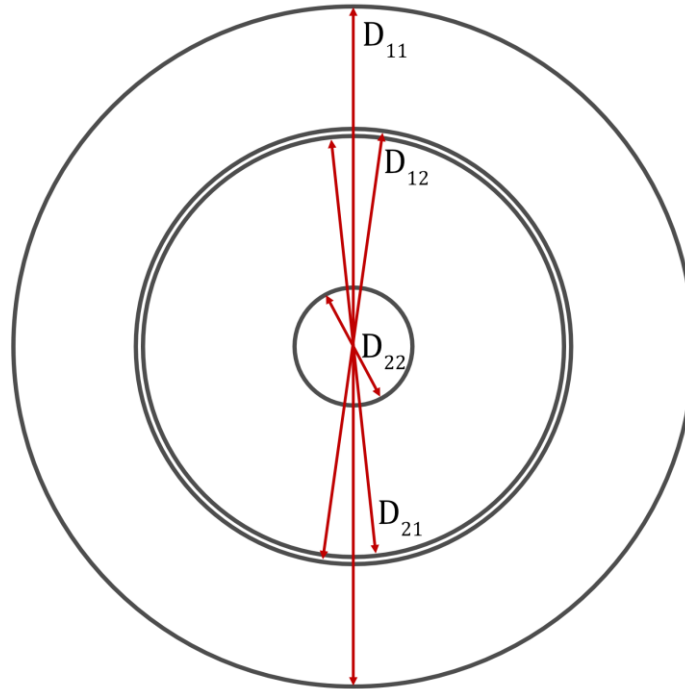
A gyártó weboldaláról letölthető a gép adatlapja [1], amelyben megtalálható többek között az indítási/rövidzárési viszonyszám az áramra és a nyomatékokra vonatkozóan és a gép hatásfoka

$$\frac{M_i}{M_n} = 2.8, \quad \frac{M_b}{M_n} = 2.7, \quad \frac{I_i}{I_n} = 7.7, \quad \eta = 88.7\% \quad (2.2)$$

Ami a gép méretét illeti, az állórész- és a forgórészátmérők mérete:

$$\begin{aligned} D_{11} &= 210 \text{ mm}, & D_{12} &= 136 \text{ mm}, \\ D_{21} &= 135.4 \text{ mm}, & D_{22} &= 38 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

a tengelymagasság pedig 132 mm.



2.2. ábra: A gép átmérői

2.1.2 Névleges üzem

A gép adattáblája és adatlapja alapján egyszerűen kiszámíthatók a névleges üzemállapot fontosabb paraméterei. Első lépésként a gép látszólagos és reaktív teljesítménye

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n \cdot \eta}, \quad (2.4)$$

$$Q_n = \sqrt{S_n^2 - P_n^2}. \quad (2.5)$$

A szükséges vonali áram és a fázistekercselés árama

$$I_{1vn} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1vn}}, \quad (2.6)$$

$$I_{1fn} = I_{1vn} \cdot \left(1 + \text{kapcs} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - 1 \right) \right). \quad (2.7)$$

ahol a kapcs változó értéke a fázistekercsek kapcsolását jelöli, és csillag kapcsolás esetén $\text{kapcs} = 0$, delta kapcsolás esetén $\text{kapcs} = 1$. E paraméter segítségével megkönnyíthető a segédprogrammal végzett számítás, hiszen a gép fázistekercseinek átkapcsolásakor elég egy paramétert megváltoztatni ahhoz, hogy megfelelő eredményt kapjunk.

A wattos és mágnesező áram

$$I_{1fnw} = I_{1fn} \cdot \cos \varphi_n, \quad (2.8)$$

$$I_{1fnm} = \sqrt{I_{1fn}^2 - I_{1fnw}^2}. \quad (2.9)$$

A szlip értéke és a légrésteljesítmény

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}, \quad (2.10)$$

$$P_{\delta n} = M_n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_0}{60}. \quad (2.11)$$

A névleges fázisimpedancia értéke, a soros ellenállások és reaktanciák értéke az állórészre redukált modellparaméterek szerint

$$Z_n = \frac{U_{1fn}}{I_{1fn}}, \quad (2.12)$$

$$R_e = R_1 + R'_2 = Z_n \cdot \cos \varphi_n, \quad (2.13)$$

$$X_s = X_{s1} + X'_{s2} = Z_n \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n}. \quad (2.14)$$

2.1.3 Indítás, zárlat

Az indításhoz tartozó értékek hasonlóképpen meghatározhatók, hogy könnyen összevethessük a mért értékekkel. Lényegében az adott névleges értéket megszorozva a megfelelő viszonyszámmal megkapjuk a zárlati állapotra vonatkozó mennyiséget.

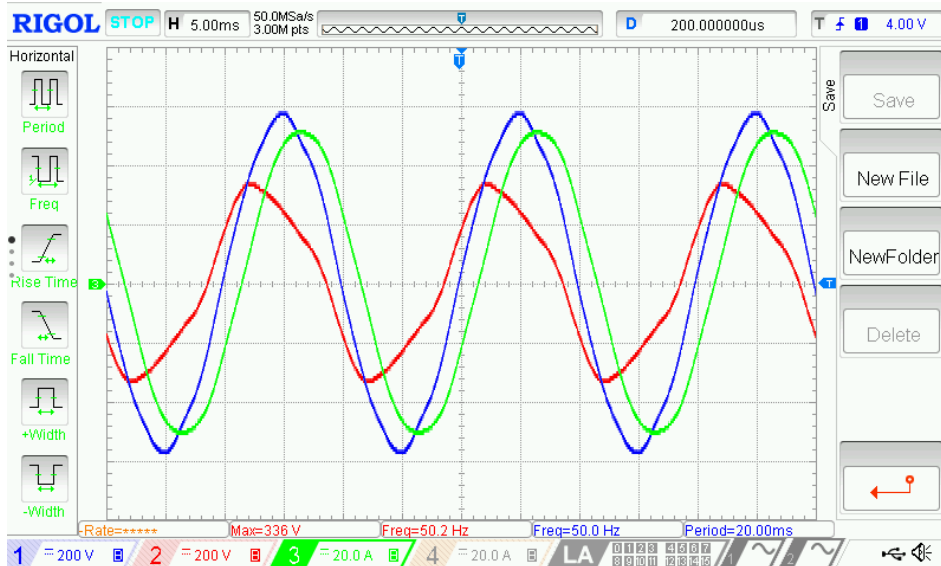
Az indítási nyomaték

$$M_i = \text{prop}_{M_{iM_n}} \cdot M_n. \quad (2.15)$$

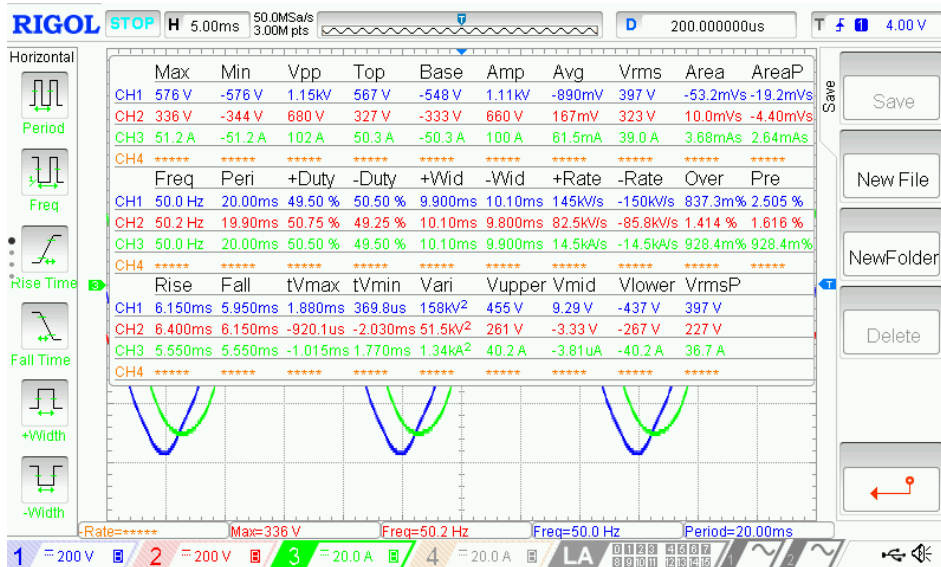
A zárlati áram és az impedancia nagysága

$$I_{1fz} = \text{prop}_{I_{z_{In}}} \cdot I_{1fn} , \quad (2.16)$$

$$Z_z = \frac{U_{1fn}}{I_{1fz}} . \quad (2.17)$$



2.3. ábra: A feszültség és áram alakulása a toroid 90%-os terhelése mellett

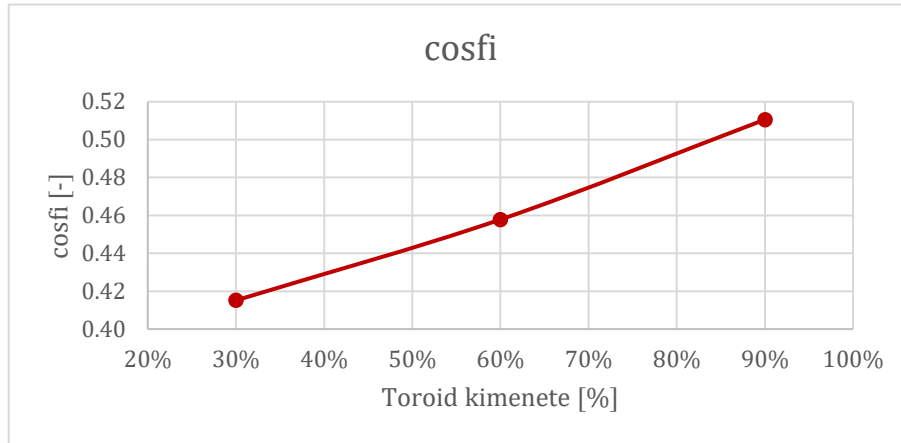


2.4. ábra: Részletes adathalmaz a toroid 90%-os kihasználásakor

A mintavételi periódusidő $T_s = 50 \mu s$. Ha a periódusidő $T = 20 ms$, akkor 400 mintával számolhatunk periódusonként. Az adatsorból egy olyan periódusnak lett kiértékelve a négyzetes középértéke, amelynek a periódus kezdetén és végén nullátmenete van. Így a 2.4 ábrán szereplő V_{rms} értékek kis mértékben eltérnek a teljes adathalmaz feldolgozása során számolt értékektől.

A toroid 90%-os terhelése mellett 323.22 V_{eff} feszültség alakul ki a mért fázisban, a zárlati fázistényező értéke

$$\cos \varphi_z = 0.51 . \quad (2.18)$$

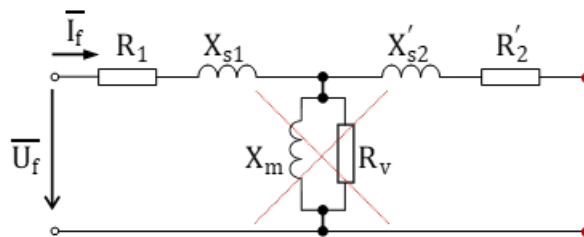


2.5. ábra: A rövidzárlati fázistényező értéke a gerjesztés függvényében

Ebből lineáris interpolációval jó közelítéssel megkapjuk a névleges üzemre vonatkozó értéket:

$$\cos \varphi_n \approx \frac{U_{1f}}{U_{1fn}} \cdot 0.51 = 0.89 . \quad (2.19)$$

Természetesen nagyobb értéket kell, hogy kapjunk, mint a névleges érték, hiszen a párhuzamos ág el van hanyagolva, és a veszteség az árammal négyzetesen növekszik.



2.6. ábra: Modell a rövidzárlati állapot szimmetrikus, állandósult állapotára

A soros ellenállások és a soros reaktanciák értéke

$$R_e = Z_z \cdot \cos \varphi_z , \quad (2.20)$$

$$X_s = Z_z \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_z} . \quad (2.21)$$

A forgórész oldali, primer oldalra redukált ellenállás értéke indításkor (0 szlip) és az állórész oldali ellenállás

$$R'_{2z} = \frac{M_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_0}{60}}{m_1 \cdot I_{1fz}^2}, \quad (2.22)$$

$$R_1 = R_z - R'_{2z}. \quad (2.23)$$

2.1.4 Túlterhelhetőség

A billenő nyomaték és a billenő szlip értéke

$$M_b = \text{prop}_{M_b M_n} \cdot M_n, \quad (2.24)$$

$$s_b = \frac{\frac{2M_b}{M_n} \cdot s_n + \sqrt{\left(\frac{2M_b}{M_n} \cdot s_n\right)^2 - 4s_n^2}}{2} = 15.6\%. \quad (2.25)$$

A billenő fordulatszám

$$n_b = n_0 \cdot (1 - s_b). \quad (2.26)$$

2.1.5 Üresjárás

Üresjárásban célszerű megmérni a drop értékét. Ha egy toroid transzformátorról van táplálva a motor mérés közben, akkor lehetséges, hogy a névleges áramot csak közelíteni lehet. Ez nem gond, hiszen egyfajta korrekciós tényezőként elég a névleges áramhoz viszonyítani a rátáplált U_{1f0} feszültség mellett kialakult I_{1f0} áramot:

$$U_\varepsilon = \frac{I_{1fn}}{I_{1f0}} \cdot U_{1f0}. \quad (2.27)$$

Jelen esetben a drop értéke 17%.

2.1.5.1 Kifutás

A gép tehetetlenségét a gép külső átmérőjéből (D_{11}) és hosszából lehet megbecsülni. Ha pedig méréssel szeretnénk ellenőrizni a számítást, több mód is van rá. A leggyakoribb eljárások a csavarodási oszcilláció, az ingateszt és a kifutási teszt [5].

A gép kifutási idejét úgy lehet megmérni, hogy a névleges érték fölötti fordulatszámon a táplálást elvesszük, és megvárjuk, amíg a forgórész megáll. Mivel nincs mező, a motorban a forgása közben keletkező veszteség lassítja a rotort, amíg teljesen le nem lassul. A mért lefutási idő

$$T_{kf} = 43 \text{ s} . \quad (2.28)$$

A lassulás közben felemészített teljesítmény fedezi a veszteségeket:

$$P_m = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \Theta \Omega^2(t) \right) . \quad (2.29)$$

Mechanikai mennyiségek mérése nélkül a forgórész tehetetlenségét más gyártók [6] létező – hasonló képességű – géptípusai alapján is megbecsülhetjük:

$$\Theta \approx 0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 . \quad (2.30)$$

2.2 Állórész

2.2.1 Vastest

A vastest teljes hossza a lemezelés nettó hosszának és a szellőzőrések szélességének összege:

$$l_{a1} = l_1 + n_{szell1} \cdot b_{szell1} . \quad (2.31)$$

2.2.2 Hornyok, pólusosztás, fogak, koszorú

Az állórészen z_1 horony található. Ebből kiszámítható a pólusonkénti és fázisonkénti horonyszám

$$q_1 = \frac{z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} . \quad (2.32)$$

A pólusosztás és a horonyosztás

$$\tau_p = \frac{D_{12} \cdot \pi}{2p} , \quad (2.33)$$

$$\tau_{h1} = \frac{D_{12} \cdot \pi}{z_1} , \quad (2.34)$$

a pólusonkénti horonyszám pedig

$$\tau_{hp1} = m_1 \cdot q_1 . \quad (2.35)$$

2.2.3 Tekercselés, hornyok, fogak

A tekercselés során figyelembe kell venni az eliminálandó harmonikus rendszámát (ν). [4] szerint egy ν -ad rendű harmonikus zérus, ha

$$\frac{s_1}{\tau_{ph1}} = \frac{v-1}{v}. \quad (2.36)$$

A tekercsszélesség a következők szerint alakul:

$$s_1 = \text{round} \left(m_1 \cdot q_1 \cdot \frac{v-1}{v} \right). \quad (2.37)$$

A hornyok közötti villamos szög

$$\alpha_1 = \frac{2 \cdot p \cdot \pi}{z_1}, \quad (2.38)$$

amelyből a tekerceslési tényező számítható:

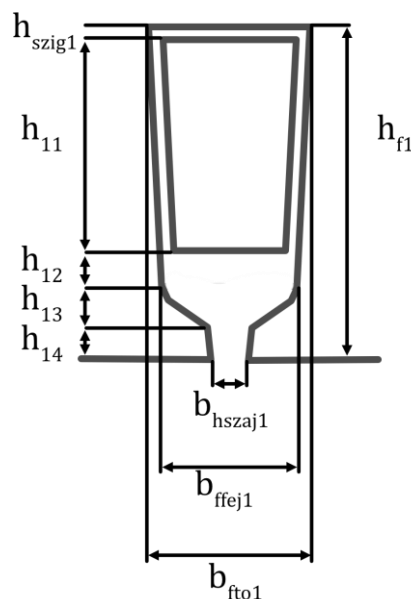
$$\xi_1 = \frac{\sin \left(q_1 \cdot \frac{\alpha_1}{2} \right)}{q_1 \cdot \sin \left(\frac{\alpha_1}{2} \right)}. \quad (2.39)$$

A q_{vez1} huzalkeresztmetszet könnyen mérhető egy tolómérővel is, továbbá elég jól becsülhető a hornyonkénti hatásos vezetős szám (c_{hhat1}) is. Ebből már a menetszám meghatározható, és a tekercsszélesség ismeretében a tekercsfej megbontása nélkül is meghatározható a vezetők hossza és a tekerceslés súlya

$$N_1 = p \cdot q_1 \cdot c_{hhat1}.$$

Az állórészkoszorú magassága $h_{k1} = 20$ mm. Ebből a fogmagasság

$$h_{f1} = \frac{D_{11} - D_{12} - 2h_{k1}}{2}. \quad (2.40)$$



2.7. ábra: Állórészfogmodell

A fog- és horonyméreték ismeretében meghatározhatók a különböző horonyosztások:

$$\tau_{h11} = \frac{(D_{12} - h_{11} - h_{13}) \cdot \pi}{z_1}, \quad (2.41)$$

$$\tau_{h12} = \frac{(D_{12} + h_{f1}) \cdot \pi}{z_1}, \quad (2.42)$$

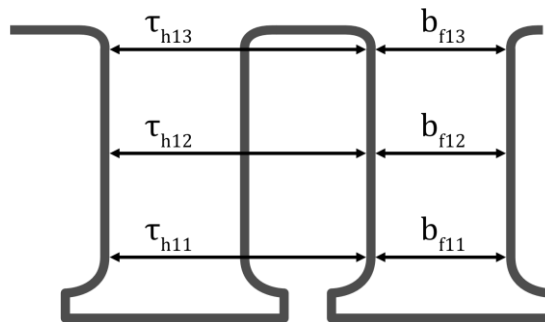
$$\tau_{h13} = \frac{(D_{12} + 2h_{f1}) \cdot \pi}{z_1}. \quad (2.43)$$

A fogméretek pedig a fogtő ismeretében közelíthetők:

$$b_{f11} = \frac{\tau_{h11}}{\tau_{h12}} \cdot b_{fto1}, \quad (2.44)$$

$$b_{f12} = b_{fto1}, \quad (2.45)$$

$$b_{f13} = \frac{\tau_{h13}}{\tau_{h12}} \cdot b_{fto1}. \quad (2.46)$$



2.8. ábra: Fog- és horonyméreték

Ha nincs rá mód megmérni a fogtő szélességét, akkor a horonyszám értékből és a hatásos vezetős szám megbecslésével már jól közelíthető a fogtő mérete is.

2.2.4 Tekercsfeknyúlás

A kevés felharmonikust tartalmazó, szinuszos feszültségrendszer létrehozásához elosztott tekercselést alkalmaznak. A vezetőhöz tartozó kinyúlásnak legalább olyan hosszúnak kell lenni, mint a tekercsszélesség és a közepes horonyosztás szorzata.

A vezetőket $\alpha_{hajlit1}$ szögben meghajlítjuk, viszont a kerület mentén vett távolság $90^\circ - \alpha_{hajlit1}$ szöggel függnek össze:

$$\sin \alpha_1 = \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{hajlit1} \right). \quad (2.47)$$

A szomszédos hornyokból kinyúló, többnyire párhuzamosan futó vezetők távolsága

$$d_{\text{vferde1}} = \sin \alpha \cdot \tau_{\text{hk1}} . \quad (2.48)$$

A kinyúló vezetők hossza

$$l_{\text{vferde1}} = \frac{\tau_{\text{h12}} \cdot s_1}{2 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_1}} , \quad (2.49)$$

ahol τ_{h12} a közepes horonyosztás, s_1 pedig a pólusonkénti horonyszám.

A tekercskinyúlás egy vezetőre van értelmezve, azaz fél menetre. Ezért a vezető mindkét végén lévő kinyúlást figyelembe kell venni:

$$l_{\text{tkinyul1}} = 2 \cdot (l_{\text{vhszaj1}} + l_{\text{vferde1}} + l_{\text{vvege1}}) . \quad (2.50)$$

A tekercsfej kinyúlással együtt a vezető (fél menet) hossza:

$$l_{\text{vez1}} = l_{\text{a1}} + l_{\text{tkinyul1}} . \quad (2.51)$$

2.2.5 Vezetők mérete

Az elemi szál méretének ismeretében könnyen meghatározhatjuk a vezető keresztmetszeti felületét:

$$q_{\text{vez1}} = \frac{D_{\text{vez1}}^2}{4} \cdot \pi , \quad (2.52)$$

aminek ismeretében már kiszámítható a horony mérete és a horonykitöltés is:

$$q_{\text{h1}} = h_{\text{f1}} \cdot \frac{(\tau_{\text{h11}} - b_{\text{f11}}) + (\tau_{\text{h13}} - b_{\text{f13}})}{2} , \quad (2.53)$$

$$k_{\text{hkit}} = \frac{q_{\text{vez1}} \cdot c_{\text{hhat1}}}{q_{\text{h1}}} . \quad (2.54)$$

A horony mérete trapéz formával van közelítve, amelynek h_{f1} a magassága, és $\tau_{\text{h11}} - b_{\text{f11}}$ a hosszabb alap, $\tau_{\text{h13}} - b_{\text{f13}}$ pedig a rövidebb alap.

2.2.6 Fluxus, közepes légrésindukció, kerületi áram, áramsűrűség

A fluxus és a közepes légrésindukció értéke:

$$\Phi = \frac{U_{\text{1fn}}}{4.44 \cdot f \cdot \xi \cdot N_1} . \quad (2.55)$$

$$B_{lk} = \frac{\Phi}{\tau_p \cdot l_{ideal}}. \quad (2.56)$$

A párhuzamos tekercselések és a párhuzamos elemi szálak ismeretében meghatározható a kerületi áram és az áramsűrűség is:

$$A_1 = \frac{I_{1fn}}{\tau_{h1}} \cdot \frac{c_{hhat1}}{a_{pt1}}, \quad (2.57)$$

$$S_1 = \frac{I_{1fn}}{c_{psz1} \cdot a_{pt1} \cdot q_{vez1}}. \quad (2.58)$$

Tehát minél több párhuzamos tekercs vagy minél több párhuzamos szál van, annál inkább csökkenthető az áramsűrűség. Értelemszerűen a vezető keresztmetszetével szintén fordítottan arányos az áramsűrűség.

2.3 Forgórész

2.3.1 Vastest

A forgórész vastestének a hosszát hasonlóképpen az állórészéhez számítjuk:

$$l_{a2} = l_{v1} + n_{szell2} \cdot b_{szell2}. \quad (2.59)$$

2.3.2 Hornyok, fogak, koszorú

Kalickás forgórészről lévén szó, szintén definiálhatók hornyok és fogak. A horonyméreték ismeretében kiszámítható vagy jól becsülhető a rudak tömege és a bennük folyó áramok és a keletkező veszteség.

A forgórészen szintén ismert a hornyok száma (z_2). A fázisonkénti és pólusonkénti horonyszámot rendszerint a következőképpen alakul, hogy a járulékos vasveszteségeket, a szinkron nyomatékot, a különféle zajokat, rezgéseket és a mágneses húzást elkerüljük [4]:

$$q_2 = \frac{z_2}{2 \cdot p \cdot m_1} + \frac{1}{3}. \quad (2.60)$$

Szinkron nyomaték alakul ki n_{sznyom} fordulatszámon, amit kerülni kell hajtás közben:

$$n_{sznyom} = n_0 \cdot \frac{2 \cdot p}{z_2}. \quad (2.61)$$

A horonyosztás és a pólusonkénti horonyszám a következőképpen alakul:

$$\tau_{h2} = \frac{D_{21} \cdot \pi}{z_1}, \quad (2.62)$$

$$\tau_{hp2} = m_1 \cdot q_2. \quad (2.63)$$

A koszorúmagasság ismeretében kiszámítható a fogmagasság:

$$h_{f2} = \frac{D_{21} - D_{22} - 2 \cdot h_{k2}}{2}. \quad (2.64)$$

A horonyméreték hasonlóképpen számíthatók, mint az állórészen. A jelölések indexelése a légrés felől radiálisan növekszik a fogtő irányában.

$$\tau_{h21} = \frac{D_{21} - 2 \cdot (h_{23} + h_{24}) \cdot \pi}{z_2}, \quad (2.65)$$

$$\tau_{h22} = \frac{(D_{21} - h_{f2}) \cdot \pi}{z_2}, \quad (2.66)$$

$$\tau_{h23} = \frac{D_{21} - 2 \cdot (h_{f2} - h_{12} - h_{szig2}) \cdot \pi}{z_2}. \quad (2.67)$$

A fogak mérete:

$$b_{f21} = \frac{\tau_{h21}}{\tau_{h22}} \cdot b_{fto2}, \quad (2.68)$$

$$b_{f22} = b_{fto2}, \quad (2.69)$$

$$b_{f22} = \frac{\tau_{h22}}{\tau_{h22}} \cdot b_{fto2}. \quad (2.70)$$

2.4 Ellenőrzés

Célszerű megvizsgálni, hogy a villamos gép ismert adatai és mérésekből származtatott értékek mennyire vannak összhangban. A gép tömege viszonylag egyszerűen számítható, de egy szabványos gép esetén a fog- és koszorúindukció jellemző értéktartományát is érdemes figyelembe venni.

2.4.1 Gép tömege

A teljes tekercselés tömege

$$G_{t1} = m_1 \cdot c_{psz1} \cdot N_1 \cdot q_{vez1} \cdot 2 \cdot l_{vez1} \cdot \gamma_{tek1}. \quad (2.71)$$

ahol c_{psz1} a párhuzamos szálak száma egy vezetőben, l_{vez1} pedig egy vezető hossza és a tekercskinyúlás összege, γ_{tek} pedig a vezető anyagának, rendszerint a réz fajlagos térfogata.

A kalicka rúdjaik tömege:

$$G_{rudak} = q_{h2} \cdot l_{v2} \cdot \gamma_{vas2} \cdot \quad (2.72)$$

A vastestek tömege:

$$G_{vas1} = \left(\frac{D_{11}^2 - D_{12}^2}{4} \cdot \pi - z_1 \cdot q_{h1} \right) \cdot l_{v1} \cdot \gamma_{vas1} \cdot \quad (2.73)$$

$$G_{vas2} = \left(\frac{D_{21}^2 - D_{22}^2}{4} \cdot \pi - z_2 \cdot q_{h2} \right) \cdot l_{v2} \cdot \gamma_{vas2} \cdot \quad (2.74)$$

Az össztömeg pedig – a ház nélkül

$$G_{össz} \approx G_{t1} + G_{vas1} + G_{vas2} + G_{rudak} \cdot \quad (2.75)$$

A gép tömege az adattábla szerint 52.6 kg. A becsült össztömeg 30–35 kg, noha ez nem tartalmazza többek között sem a motorház, sem a talapzat, sem a szigetelés tömegét. Ez azt jelenti, hogy a motor aktív tömege körülbelül az össztömeg 58–67%-a.

2.4.2 Indukció

[3] szerint kalickás aszinkron esetén névleges üzemben, a vastest kihasználása mellett a közepes légrésindukció csúcserőke és effektív értéke jellemzően

$$\begin{aligned} \hat{B}_\delta &= 0.7-0.9 \text{ T}, \\ B_\delta &= 0.5-0.63 \text{ T}. \end{aligned} \quad (2.76)$$

Az állórészkoszorúban

$$B_{k1} = 1.4-1.7 \text{ T}. \quad (2.77)$$

a forgórészkoszorúban pedig

$$B_{k2} = 1.5-2.2 \text{ T}. \quad (2.78)$$

a jellemző fluxussűrűség. A fogindukció értéke az állórészen

$$B_{f1} = 1.4-2.1 \text{ T}. \quad (2.79)$$

a forgórészen pedig:

$$B_{f2} = 1.5 - 2.2 T \quad (2.80)$$

2.4.2.1 Veszteség

A fog- és koszorúindukció értékéből kiindulva jól becsülhető az indukcióval négyzetesen arányos veszteség:

$$P_{fog} = k_{fog} \cdot p_{fog} \cdot (B_{fog} \cdot k_{Carter})^2 \cdot G_{fogak} \quad (2.81)$$

ahol k_{fog} a fog veszteségi tényezője, p_{fog} a fog anyagára jellemző – indukciótól és frekvenciától függő – tömegre vetített fajlagos veszteségi tényezője, B_{fog} a fogindukció, k_{Carter} pedig a horonyosztást, a légrés- és horonyméreteket figyelembe vevő tényező. Végül pedig G_{fogak} az fogak össztömege.

3 Konklúzió

Jelen dolgozatban bemutattam egy általánosan alkalmazható módszert a kalickás aszinkron gép elektromechanikai paraméterkészletének identifikálására roncsolásmentes mérések végzésével. A karakterisztikus mérések és mágnesköri számítások kombinálásával meghatározható a kalickás aszinkron gép elektromechanikai paramétereinek elég nagy hányada. A bemutatott eljárások felhasználásával nagy pontosságú – a hajtásvezérlő megfelelő felkészítésével akár önműködésre is képes – finomhangoló algoritmusok implementálása válik lehetővé.

Az aszinkron gép működése névleges üzemben még közelíthető a szokásos egyfázisú, koncentrált paraméterű helyettesítő képpel, viszont a széles nyomatéktartományban működő változó fordulatszámú hajtásokban (VSD) a dinamika javítása érdekében a tranziens folyamatokat gyorsítják, aminek következtében a vastest mágnesezési görbéjének a telítési tartományában működik a gép. Erre a jelenségre többféle modellt is alkalmazni lehet, attól függően, hogy milyen a hornyok kialakítása, zártak és/vagy mély hornyokról van-e szó [7].

Érdemes megjegyezni, hogy a különböző karakterisztikus (üresjárású, rövidzárási / lefogott forgórészű) mérések és a terhelt állandósult üzemállapotok tanulmányozását manapság már hatékonyan támogatják a kétdimenziós, planáris modellre elvégzett végelelemes számítások is [8]. További kutatási feladatnak kézenfekvőnek tűnik tehát az efféle örvényáramú (időharmonikus) elektromágneses problémák megoldásának automatizálása.

Irodalomjegyzék

- [1] M. Nell, G. von Pfingsten and K. Hameyer, *Approach for the rapid characterization and control of an induction machine*, 2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/ISEF.2017.8090672
- [2] Agisys: *Motorprospektus*, 2012
- [3] Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabocová, V.: *Design of Rotating Electrical Machines*, 2nd edition, Wiley, 2014
- [4] Asztalos, P.: *Villamosgépek II. példatár*, 1989
- [5] Lekurwale, R.: *Determination of Moment of Inertia of Electrical Machines*, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1, 2012
- [6] ABB: *Low voltage General performance cast iron motors for Europe*, 2021
- [7] E. Mölsä, L. Tiitinen, S. E. Saarakkala, L. Peretti and M. Hinkkanen, *Standstill Identification of an Induction Motor Model Including Deep-Bar and Saturation Characteristics*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 5, pp. 4924-4932, Sept.-Oct. 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3089458.
- [8] A. T. Umoette, O. I. Okoro and I. E. Davidson, *Performance Analysis of a 10hp Three phase Induction Motor Using Classical and Finite-Elements for Varying Load Conditions*, 2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543149.