

Az indítókalicka vezetőanyagának hatása a szinkron motor indítási és elektromágneses jellemzőire

Nagy Sándor

Nagy Sándor, Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, 1095 Budapest, Soroksári út 30-34., Magyarország. nagy.sandor@uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0004-0790-5758

Kopják József

Dr. Kopják József, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 1084 Budapest, Tavaszmező utca 15-17., Magyarország. kopjak.jozsef@kvk.uni-obuda.hu, ORCID: 0000-0002-8225-3244

Nádor Gábor

Dr. Nádor Gábor, Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Zrt., 1095 Budapest, Soroksári út 30-34., Magyarország. gabor.nador@ganzelectric.com

Absztrakt: A tanulmány a szinkronmotorok indítási és elektromágneses jellemzőinek vizsgálatát mutatja be különböző indítókalicka-anyagok (réz, alumínium, réz-cink, réz-ón, valamint rézbevonatú alumínium – CCA) alkalmazásával. A cél a legkedvezőbb anyag-geometria kombináció azonosítása, amely kompromisszumot teremt az indítási nyomaték, az áramterhelés és a termikus viselkedés között. A vizsgált motor 6 MW névleges teljesítményű, 6 kV feszültségű és 50 Hz hálózaton üzemel. A szimuláció 2D csatolt elektromágneses-termikus végesselelemes modell alapján készült, 0,5 ms időlépéssel és légrésben finomított hálózattal. A per-unit rendszerben normalizált eredmények alapján a maximális indítónyomaték Cu esetén $\approx 2,87$ p.u., CCA esetén 2,71 p.u., míg Al esetén 2,46 p.u. volt. A gyorsulási idő t_{95} értéke rendre 10,9 p.u., 11,5 p.u. és 13,2 p.u., a Joule-veszteség pedig $E_j = 1,00, 1,04$ és $1,12$ normált egység. A CCA így mérsékelt indítási teljesítményt igényel, miközben hőtechnikai és költségoldalon kedvezőbb a teljes réznél. A vizsgálat igazolja, hogy a csillapítókalicka-anyag megválasztása jelentős hatással van az indítási dinamikára és a hőmérsékleti igénybevételre. A rézbevonatú alumínium (CCA) hibrid vezetőanyag megfelelő kompromisszumot nyújt nagy teljesítményű szinkronmotorok indításához, különösen ipari és energetikai hajtások esetén.

Kulcsszavak: szinkronmotor; csillapító kalicka; rúdanyag; indítónyomaték; végesselem szimuláció; rézbevonatú alumínium (CCA)

1 Bevezetés

A nagy teljesítményű szinkronmotorok kulcsszerepet töltenek be az ipari hajtásokban, ahol a magas hatások, az állandó fordulatszám, a stabil hálózati működés és a hosszú távú üzembiztonság egyaránt alapvető követelmény. Ipari gyakorlatban a 6 kV feletti névleges feszültségű vagy 5 MW feletti névleges teljesítményű gépeket tekintik nagy teljesítményű villamos motoroknak — ezt a kategóriát a Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Zrt. tervezési és gyártási gyakorlata is követi. Az ilyen gépeket jellemzően kompresszorok, szivattyúk, ventilátorok, kohászati hengerművek és erőművi segédhajtások területén alkalmazzák, ahol a hálózati indítás (Direct-On-Line, DOL) különösen érzékeny a rotorcsillapítás és az indítókalicka anyagi tulajdonságaira.

A vizsgálat egy 6 MW, 6 kV, 50 Hz névleges paraméterű, kiálló pólusú szinkronmotoros kompresszoron alapul, amely a Ganz Zrt. fejlesztési és szimulációs környezetében lett elemezve az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karának együttműködésével. A vizsgált géptípus a Ganz-nál gyártott nagy teljesítményű ipari motorok konstrukciós elveit követi, különös tekintettel a csillapítókalicka-rendszer hő- és elektromágneses terhelésére.

A közvetlen hálózati indítás során fellépő nagy áram- és nyomatéktransziens komoly termikus és mechanikai igénybevételt okoz, ezért az indítókalicka-vezető anyagának megválasztása kulcsfontosságú a megbízható indítás és a hosszú távú üzembiztonság szempontjából. A tervezési kompromisszum az indítónyomaték, az áramfelvétel, a hőterhelés és az anyagköltség között keresendő.

A kutatás célja egy olyan összehasonlító elemzés, amely különböző csillapítókalicka-vezetőanyagok — réz (Cu), alumínium (Al), réz-cink (CuZn), réz-ón (CuSn) és rézbevonatú alumínium (CCA) — alkalmazásával vizsgálja a szinkronmotor indítási és elektromágneses jellemzőit. A vizsgálat a végeselemes (FEM) módszerre épül, amely lehetővé teszi a nyomaték, áram és hőmérséklet időbeli és térbeli eloszlásának pontos meghatározását.

A per-unit rendszerben értékelt eredmények segítségével a különböző anyagváltozatok teljesítménye összehasonlíthatóvá vált, így meghatározható az optimális kompromisszum a nagy indítónyomaték, az alacsony veszteség és a gazdaságos anyagfelhasználás között. A tanulmány kiemelten tárgyalja a rézbevonatú alumínium (CCA) hibrid vezetőanyag alkalmazhatóságát, amely a Ganz-féle nagy teljesítményű szinkronmotorok esetében ígéretes alternatívát kínál a hagyományos réz és alumínium megoldásokkal szemben, mind elektromos, mind termikus, mind gyártástechnológiai szempontból.

2 Elméleti háttér

2.1 Az kalickás szinkronmotorok indítási elve

Az indítás során a csillapító- vagy indítókalickával ellátott szinkronmotor az indukciós géphez hasonlóan viselkedik, mivel a forgórész rúdjai rövidrezárt szekunder vezetőként működnek [1]. Háromfázisú feszültség rákapcsolásakor az állórész forgó mágneses mezeje elektromotoros erőt indukál a rudakban, ami áramot és ennek hatására aszinkron nyomatékot hoz létre. Ez a nyomaték gyorsítja a forgórészt mindaddig, amíg annak fordulatszáma meg nem közelíti a szinkronsebességet. Amikor a forgórész fordulatszáma kellően megközelíti az állórész forgó mezejének sebességét, a szinkronizációs szög elérte a kívánt értéket, akkor a gerjesztés bekapcsolható, és a gép — a megfelelő fázisviszonyok teljesülése esetén — szinkron üzemállapotba ugrik.

Az aszinkron gyorsulási szakasz alatt az elektromágneses nyomaték a következő összefüggéssel írható le:

$$M(s) = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{E_2^2 (R_2/s)}{(R_2/s)^2 + X_2^2} \quad (3)$$

ahol:

$M(s)$ – elektromágneses nyomaték [N·m]

ω_s – szinkron szögsebesség [rad/s]

E_2 – forgórészben indukált elektromotoros erő [V]

R_2 – rotor ellenállás fázisonként [Ω]

X_2 – forgórész szórási reaktanciája fázisonként [Ω]

n – forgórész tényleges mechanikai fordulatszáma [1/min]

n_s – szinkron fordulatszám [1/min]

$S_{\text{billenő}}$ – Billenő nyomatékhoz tartozó szlip érték

s – szlip “csúszás” [], mely következő képlettel adható meg:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Az indítónyomatékot az (1)-es egyenlet $s = 1,0$ (állóhelyzeti) szlip értékére felírva a következő alakban kapjuk:

$$M_{\text{start}} = M_{(s=1)} = \frac{3 E_2^2}{\omega_s} \cdot \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (3)$$

A billenő- vagy más néven maximális nyomaték a jelleggörbe csúcspontján jelentkezik. Ennek meghatározásához a nyomaték s szerinti deriváltját egyenlővé tesszük nullával, amelyből a maximum feltétele a következő:

$$\frac{R_2}{s_{\text{billenő}}} = X_2 \Rightarrow s_{\text{billenő}} = \frac{R_2}{X_2} \quad (4)$$

A billenőpontban a nyomaték értéke:

$$M_{\text{max}} = \frac{3E_2^2}{2\omega_s X_2} \quad (5)$$

Az indítónyomaték M_{start} nem egyenlő a maximális nyomatékkal M_{max} . Az indítónyomaték az adott $s = 1$ szlipen értelmezett, míg a maximális nyomaték a motor jelleggörbéjének csúcspontja.

Az indítónyomaték mellett fontos az indítóáram amplitúdójának meghatározása is, mivel az meghatározza az indítókalicka terhelhetőségét és a hálózati feszültségesést. Az indítási szakaszban ($s = 1$, álló helyzetben) az indítóáram csúcserőértéke a következőképpen írható fel:

$$I_{\text{start}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{\sqrt{\left(R_{\text{állórész}} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (6)$$

ahol:

- I_{start} – az indítóáram csúcserőértéke [A]
- U_1 – az állórész feszültsége (hálózati feszültség) [V]
- $R_{\text{állórész}}$ – az állórész ohmos ellenállása [Ω]
- X_1 – az állórész szórási reaktanciája [Ω]
- R_2 – a forgórész (indító-kalicka rúd) ellenállása [Ω]
- X_2 – a forgórész szórási reaktanciája [Ω]
- s – szlip az indítás kezdetén (álló helyzetben)

ahol az egyenletet az $s = 1$ értéken kell értékelni. Az rúdanyag elektromos vezetőképessége (R_2 értékén keresztül) közvetlenül befolyásolja az indítóáram nagyságát: alacsony ellenállású anyagok (pl. Cu, CCA) nagyobb indítási áramot eredményeznek, míg a magasabb ellenállású ötvözetek (pl. CuZn, CuSn) csökkentett indítóáramot hoznak létre.

A (4) egyenletben szereplő feltétel teljesülésekor a nyomaték maximuma a (5) képlettel adható meg, amely a kihúzható nyomaték elméleti értékét határozza meg. A rúdanyag elektromos tulajdonságai és a horony geometriája alapvetően befolyásolja az indítóáram és az indítónyomaték alakulását. A nagyobb ellenállású anyagok – mint a sárgaréz (CuZn) vagy a bronz (CuSn) – kisebb indítóáramot, ugyanakkor nagyobb indítónyomatékot eredményeznek a nagy csúszású tartományban. Az alacsony ellenállású anyagok, például a réz (Cu), ezzel szemben nagy indítási áramot vesznek fel, de a kis rotoellenállás miatt kisebb

indítónyomatékot hoznak létre, ami mérsékeltebb gyorsulást és nagyobb termikus terhelést okoz [2], [4].

A relatív egységenkénti (per-unit) elemzéshez minden mennyiség a referencia szinkronmotor névleges értékeire lett normalizálva

$$M_{\text{bázis}} = M_{\text{névleges}}$$

$$I_{\text{bázis}} = I_{\text{névleges}}$$

$$R_{\text{bázis}} = R_{2,\text{Cu}} (20^\circ\text{-on mérve})$$

A relatív egységenkénti időértékek szintén normalizálva lettek a réz referenciaesetre, vagyis

$$t_{\text{bázis}} = t_{95,\text{Cu}}$$

Ez a megközelítés biztosítja, hogy az öt vizsgált anyag összehasonlítása független legyen az adott gép méretétől és névleges teljesítményétől.

2.2 Termikus és dinamikus viselkedés

A közvetlen hálózati (DOL) indítás során a szinkronmotor forgórészében lejátszódó elektromágneses és hőmérsékleti transziens folyamatok együttesen határozzák meg a gép dinamikus válaszát és indítási viselkedését [2], [3]. Az indítási szakaszban a indítókalicka rudjain keresztül nagy áramok folynak, amelyek Joule-veszteséget, ezáltal hőfejlődést okoznak. A hőmérséklet növekedése a rúd anyagának ellenállását is módosítja, így az elektromágneses és termikus jelenségek egymással kölcsönhatásban zajlanak. Az alábbi analitikus összefüggések a forgórész pillanatnyi Joule-veszteségét, hőmérséklet-változását és mechanikai gyorsulását írják le, ezáltal meghatározva a különböző rúdanyagok összehasonlításához használt csatolt elektrotermikus-mechanikai modellt.

A forgórész rudjainak pillanatnyi Joule-vesztesége az alábbi módon adható meg:

$$P_J(t) = I_{\text{bar}}^2(t) R_2(T) \quad (7)$$

ahol a hőmérsékletfüggő ellenállás a (4) összefüggéssel írható le:

$$R_2(T) = R_{20} [1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C})] \quad (8)$$

A rúd hőmérsékletének időbeli alakulását egy elsőrendű termikus modell írja le, amely figyelembe veszi a hőkapacitást és a környezettel való hőcserét:

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = P_J(t) - \frac{(T - T_{amb})}{R_{th}} \quad (9)$$

A forgórész mechanikai gyorsulását az alábbi egyenlet határozza meg:

$$J_{tot} \frac{d\omega}{dt} = M(s) - M_L(\omega) - M_{fw} \quad (10)$$

ahol:

$P_J(t)$ - pillanatnyi Joule-veszteség [W]

$I_{bar}(t)$ - rúdáram [A]

R_{20} - ellenállás 20 °C-on [Ω]

α - hőmérsékleti ellenállási együttható [1/K]

C_{th} - rúdanyag fajlagos hőkapacitása [J/K]

R_{th} - hőellenállás a környezettel szemben [K/W]

T - rúd hőmérséklete [°C]

T_{amb} - környezeti hőmérséklet [°C]

J_{tot} - összes tehetetlenségi nyomaték (rotor + terhelés) [kg·m²]

ω - pillanatnyi szögsebesség [rad/s]

$M_L(\omega)$ - terhelési nyomaték [N·m]

M_{fw} - súrlódási és örvényáram-veszteségből származó nyomaték [N·m]

Az (1)–(10) összefüggések adják az analitikai keretet a különböző rúdanyagok összehasonlításához, azonos geometriai és terhelési feltételek mellett, lehetővé téve az elektromágneses, hőtechnikai és mechanikai folyamatok együttes értékelését [3].

Az analitikus modell így biztosítja a tranziens viselkedés összehasonlíthatóságát különböző rúdanyagok esetén, és közvetlen inputként szolgál a végeselemes szimulációkhoz, amelyek a későbbi fejezetekben kerülnek bemutatásra.

3 Módszertan

A vizsgálat célja a különböző rúdanyagok hatásának elemzése a indítókalickás szinkronmotorok elektromágneses és termikus viselkedésére a közvetlen hálózati (DOL) indítás során. A módszertan egy analitikus és numerikus, kétdimenziós végeselemes (FEM) alapú megközelítésre épül, amely lehetővé teszi a nyomaték-, áram- és hőmérséklet-idő függvények pontos meghatározását. Az eljárás a korszerű tranziens FEM-modellezési technikákra támaszkodik, amelyek korábban is sikeresen alkalmazásra kerültek nagy teljesítményű szinkrongépek analízisében [11]. Jelen tanulmányban a módszert kiterjesztettük az anyagtól függő veszteségek és a hőmérsékleti folyamatok részletes értékelésére.

Az alkalmazott elemzési folyamat fő lépései a következők voltak:

- Alapmotor definiálása: azonos geometriai és üzemi paraméterekkel rendelkező referencia szinkronmotor kijelölése, amely minden vizsgált anyag esetében az összehasonlítás alapját képezte.

- Rúdanyagok kiválasztása: reprezentatív vezetőanyagok (Cu, Al, CuZn, CuSn, CCA) meghatározása, amelyek jellemzően alkalmazásra kerülnek nagy teljesítményű forgógépek csillapítókalickáiban.
- Analitikai és numerikus értékelés: az elektromágneses és termikus jelenségek leírására analitikai számítások, valamint tranziens, kétdimenziós FEM-szimulációk elvégzése a nyomaték, az áram és a hőmérséklet alakulásának meghatározására.

Minden esetben azonos elektromos és mechanikai peremfeltételeket alkalmaztuk, hogy az egyes anyagok viselkedésének összehasonlítása objektív, méretfüggetlen és következetes alapokon történjen.

3.1 Alapmotor és modellparaméterek

A különböző rúdanyagok objektív összehasonlítása érdekében egy egységes referencia-szinkronmotort vettünk alapul, amelynek geometriája és üzemi feltételei minden vizsgálatban változatlanok maradtak. A referencia gép egy 6 kV-os, 6 MW-os, kiálló pólusú szinkronmotor, amely a Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Zrt. ipari hajtásokban alkalmazott tipikus konstrukciós elveit követi, például kompresszorok, szivattyúk és ventilátorok meghajtására. A gép legfontosabb geometriai és elektromos paramétereit az I. táblázat tartalmazza [5], [6].

Az állórész és a forgórész szerkezete minden szimuláció során rögzített maradt; kizárólag a kalickarudak anyagi tulajdonságait változtattuk, hogy az eredmények az anyaghatásokat különítsük el a geometriai tényezőktől.

Az elektromágneses modellt analitikai számítások és kétdimenziós végeselemes (FEM) szimulációk kombinációjával változtattuk meg, amelyek célja az elektromágneses nyomaték, az állórészáram és a fluxussűrűség eloszlásának meghatározása volt a közvetlen hálózati (DOL) indítás teljes időtartama alatt.

A rotorrúd elektromos ellenállását az alábbi egyenletek alapján határoztuk meg:

$$R_{2,20} = \rho_{20} \frac{l_{\text{bar}}}{A_{\text{bar}}} \quad (11)$$

$$R_2(T) = R_{2,20} [1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C})] \quad (12)$$

ahol:

$R_{2,20}$ - a rúd ellenállása 20 °C-on [Ω]

$R_2(T)$ - a rúd ellenállása adott hőmérsékleten

ρ_{20} - az anyag fajlagos ellenállása 20 °C-on [$\Omega \cdot \text{m}$]

l_{bar} - a rúd hossza [m]

A_{bar} - a rúd keresztmetszeti területe [m^2]

- α - hőmérsékleti ellenállási együttható [1/K]
 T - a rúd pillanatnyi hőmérséklete [°C]

A (11) egyenlet segítségével a rudak névleges (20 °C-os) ellenállása számítható, míg a (12) összefüggés a hőmérsékletváltozás hatását veszi figyelembe. Ezeket a paramétereket használtuk a tranziens Joule-veszteségek és a hőmérséklet-emelkedés kiszámításához a (9)–(12) egyenletek alapján.

A termikus és mágneses csatolás a végeselemes modellben úgy lett figyelembe véve, hogy a hőmodul a szimuláció során a kalickákban elhelyezkedő rudakban keletkező Joule-veszteséget ($P_J = I_{2bar} \cdot R_2$) automatikusan továbbította a termikus hálózatba, biztosítva ezzel az elektromágneses és hőfolyamatok közvetlen kölcsönhatását.

3.2 Vizsgált rúdanyagok

A vizsgálat során öt különböző kalickarúd-anyag elektromos, termikus és sűrűségi tulajdonságait vettük figyelembe: réz (Cu), alumínium (Al), sárgaréz (CuZn), bronz (CuSn) és rézbevonatú alumínium (CCA). Ezen anyagok kiválasztása ipari szempontból releváns, mivel mindegyik típus gyakorlati alkalmazásban is előfordul szinkronmotorok, illetve más nagy teljesítményű forgógépek csillapító-vagy indítókalickáiban.

Az öt vizsgált anyag legfontosabb fizikai és hőtechnikai jellemzőit az I. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

A vizsgált rúdanyagok fizikai és termikus tulajdonságai.

Anyag	Fajlagos ellenállás ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Hővezető képesség ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	Sűrűség (g/cm^3)	Hőmérsékleti együttható (1/K)
Cu	1,72	385	8,9	0,0039
Al	2,82	237	2,7	0,0040
CuZn	6,00	120	8,5	0,0015
CuSn	5,50	70	8,8	0,0012
CCA	2,10	200	3,5	0,0035

Az összehasonlítás pontossága érdekében minden rúdanyag esetében azonos geometriai alkalmaztunk mind az analitikai számítások, mind a végeselemes szimulációk során. A rudak hossza és keresztmetszete a 6 MW-os, 6 kV-os kiemelkedő pólusú szinkronmotorokban szokásos méreteket tükrözi, az alábbi értékekkel:

$$l_{bar} = 0,45\text{m}$$

$$A_{bar} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

A szimulációk kezdőfeltételeként a rudak kezdeti hőmérsékletét a környezeti értékkel azonosan $T = 25\text{ °C}$ hőmérsékletre állítottuk be.

Ezeket a paramétereket alkalmaztuk a hőmérsékletfüggő rotoellenállás kiszámításához és a tranziens Joule-veszteségek, illetve hőmérséklet-emelkedések meghatározásához a (9)–(12) egyenletek alapján. Az azonos geometriai és termikus feltételek biztosították, hogy a szimulációk kizárólag az anyagtulajdonságokból eredő különbségeket tükrözzék.

3.3 A relatív egységenkénti normalizálás és alapmennyiségek

Annak érdekében, hogy az eredmények függetlenek legyenek a motor névleges teljesítményétől és méretétől, minden elektromos és mechanikai mennyiség relatív egységekben (per unit, p.u.) formában került kifejezésre. A relatív egységek alkalmazása lehetővé teszi a különböző rúdanyagok viselkedésének közvetlen, méretfüggetlen összehasonlítását azonos referenciafeltételek mellett.

A normalizálás alapjául a referencia szinkronmotor névleges paraméterei szolgáltak, az alábbi összefüggések szerint:

$$M_{\text{bázis}} = M_{\text{rated}}$$

$$I_{\text{bázis}} = I_{\text{rated}}$$

$$R_{\text{bázis}} = R_{2,\text{Cu}}$$

$$t_{\text{bázis}} = t_{95,\text{Cu}}$$

A szinkron sebesség 95%-ának eléréséhez szükséges idő azért releváns összehasonlítási metrika, mert ezen a ponton a rotor szinkronba ugratható, vagyis képes a véglegesen szinkron sebességre való átlépésre. Ez a kritikus küszöb az aszinkronos és szinkron működési tartomány között, ahol az elektromágneses, mechanikai és dinamikai feltételek kombinációja lehetővé teszi az aszinkronos gyorsulási fázisból a szinkron működésbe való átmenetet. Ezért választottuk ezt a paramétert a különböző rúdanyagok indítási dinamikájának összehasonlítása során – ez az érték közvetlenül tükrözi, hogy mely motorok képesek gyorsabban elérni a szinkronizációs feltételeket

A megfelelő mennyiségek relatív egységenkénti alakra történő átváltása az alábbi módon történt:

$$M_{\text{p.u.}} = \frac{M}{M_{\text{bázis}}} \quad (14)$$

$$I_{\text{p.u.}} = \frac{I}{I_{\text{bázis}}} \quad (15)$$

$$R_{2,\text{p.u.}} = \frac{R_2}{R_{\text{bázis}}} \quad (16)$$

$$t_{p.u.} = \frac{t}{t_{bázis}} \quad (17)$$

A 6 MW-os, 6 kV-os, négyfázisú (50 Hz, ≈ 1500 1/min) referencia szinkronmotor esetében az alapnyomaték meghatározása a következőképpen történt:

$$M_{bázis} = M_{rated} = \frac{9,55 \times P_{kW}}{n_{rpm}} = \frac{9,55 \times 6000}{1500} \approx 38,2 \text{ kNm} \quad (18)$$

Ennek alapján 1,0 p.u. nyomaték $\approx 38,2$ kN·m fizikai értéknek felel meg. Ez a normalizálási eljárás biztosítja, hogy a vizsgálati eredmények – függetlenül a gép tényleges teljesítményétől – közvetlenül összehasonlíthatók legyenek az egyes rúdanyagok esetében.

3.4 Szimuláció értékelése

A különböző rúdanyagok viselkedésének vizsgálata minden esetben azonos közvetlen hálózati (DOL) indítási feltételek mellett történt, biztosítva ezzel az összehasonlíthatóságot. A referenciatételek a következők voltak:

$$U_N = 6 \text{ kV},$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$T_{amb} = 25^\circ\text{C}$$

A terhelési nyomatéket konstans ellentétes nyomatékként modelleztük, amely az indítás során a névleges nyomaték 50%-ának felelt meg:

$$M_L(\omega) = 0,5 M_{névleges}$$

A tranziens végeselemes szimulációk 0,5 ms időlépéssel, a pólusosztásonként 25 000–30 000 elemű hálón kerültek lefuttatásra, amely elegendő időbeli és térbeli felbontást biztosított az elektromágneses és hőtechnikai folyamatok pontos követéséhez. A háló konvergencia-vizsgálata alapján a numerikus hiba 2 %-on belül maradt, ami megfelelő pontosságot biztosít a tranziens eredmények értékeléséhez.

Az értékelés során az alábbi jellemzőket határoztuk meg:

- Nyomaték–szlip görbék $M(s)$: az indítás közbeni elektromágneses nyomaték alakulása.
- Állórészáram és fordulatszám az idő függvényében $I(t)$, $\omega(t)$: a forgórész gyorsulási és elektromos tranziens jellemzőinek meghatározására.
- Rúd hőmérsékletének időfüggése $T(t)$: a kalickarudak felmelegedésének és hőstabilitásának vizsgálatára.

- Indítás közben elnyelt energia $\int P_j(t)dt$: a rotorrudakban disszipált Joule-veszteségi energia meghatározására.

Az összes eredményt relatív egységenkénti (p.u.) formában ábrázoltuk hogy a különböző anyagok elektromágneses és termikus viselkedése közvetlenül összehasonlítható legyen. A 2–4. ábrák a réz (Cu) alapeset tipikus szimulációs kimeneteit mutatják be, amelyek referenciaként szolgáltak a további anyagvizsgálatok értékeléséhez.

4 Eredmények

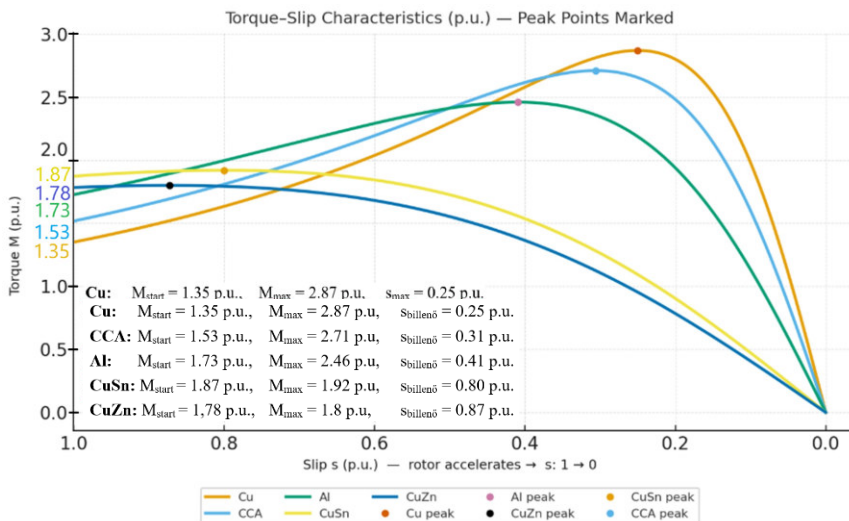
Ebben a fejezetben a különböző rúdanyagokra – réz (Cu), alumínium (Al), sárgarézt (CuZn), bronz (CuSn) és rézbevonatú alumínium (CCA) – végzett analitikai számítások és dinamikus, kétdimenziós végelelemes (FEM) szimulációk eredményei kerülnek bemutatásra. A vizsgálatok célja annak feltárása volt, hogy az anyagok elektromos és termikus tulajdonságai miként befolyásolják a szinkronmotor indítási nyomatékát, áramfelvételét, hőmérséklet-emelkedését és gyorsulási viselkedését.

Az eredményeket relatív egységekben fejeztük ki, így azok közvetlenül összevethetők egymással, függetlenül a gép tényleges méretétől vagy teljesítményétől. A normalizálás alapjául a 6 MW-os, 6 kV-os referencia szinkronmotor szolgált, amelynek névleges nyomatéka, árama és szinkronfordulatszáma képezte a mérési bázist.

A továbbiakban részletesen bemutatásra kerülnek a rúdanyagok elektromágneses és hőtechnikai jellemzői, a nyomaték– szlip görbék, az indítási áram és sebesség időfüggése, valamint a Joule-veszteségek és a hőmérséklet-emelkedés alakulása, kiegészítve a tapasztalt trendek értelmezésével.

4.1 Nyomaték-szlip jellemzők

A különböző rúdanyagok elektromágneses nyomatékának alakulását a szlip (s) függvényében az 1. ábra szemlélteti. A függőleges tengely a nyomatékot (M) relatív egységekben [p.u.], a vízszintes tengely pedig a szlipet (s) mutatja, amely 1-től (álló rotor, indítás pillanata) 0-ig (szinkron fordulatszám) terjed. Az 1. ábra X tengelyén a forgórész jobbra haladva gyorsul, míg az Y tengelyen az indítónyomatékokat (s = 1, az Y tengely bal oldalán) és a maximális billenő nyomatékokat (a görbék csúcsai, színes pontokkal jelölve) szemlélteti.



1. ábra

A vizsgált rúdanyagok nyomaték-szlip jelleggörbéi, amelyeket 2-D végeleemes szimulációkból (ANSYS Maxwell) nyertek azonos DOL kiindulási feltételek mellett.

Fig. 1. (Megjegyzés: Az s szlip1-ről 0-ra csökken - azaz s = 0 a szinkron sebességnek felel meg, s = 1 pedig álló helyzetnek. A forgórész a vízszintes tengelyen balról jobbra haladva gyorsul. Y tengely: Nyomaték M (p.u.), 1,0 p.u. = 38 kN·m → 1 osztás = 19 kN·m; X tengely: Szlip s (–), 1 osztás = 0,2 = 20 % csúszás.)

Indítónyomaték értelmezése (s = 1, álló helyzetben)

Az indítási pillanatban az indítónyomaték a motor indítóképességének legfontosabb paramétere, mivel csak akkor tud a motor terhelést felvenni, ha az indítónyomaték meghaladja a terhelő nyomatékot. Az 1. ábra Y tengelyén jól látható, hogy az indítónyomaték értékei fordított összefüggésben állnak a rúdanyag elektromos vezetőképességével. A II. táblázatban összefoglalt eredmények szerint a bronz (CuSn) és a sárgaréz (CuZn) rudakkal szerelt motorok a legnagyobb indítónyomatékot (1,87 p.u. és 1,78 p.u.) biztosítják, míg a réz (Cu) rudak a legkisebb indítónyomatékot (1,35 p.u.) eredményezik. Ez az összefüggés az elektromágneses alapelvekből érthető meg: az indítónyomaték az indítókalicka ellenállásával arányos az s = 1 pontban. Következésképpen a magasabb ellenállású anyagok nagyobb indítónyomatékot, míg az alacsony ellenállású anyagok kisebb indítónyomatékot biztosítanak.

Gyakorlati szempontból ez azt jelenti, hogy amennyiben a motor nehéz indítási feltételek között (nagy tehetetlenségi nyomaték, nehéz külső terhelés indítás pillanatában) üzemel, a magasabb ellenállású ötvözetek (CuZn,

CuSn) előnyösebbek, mivel garantálják a motor beindíthatóságát a nagyobb gyorsító nyomatékkal.

Maximális (billenő) nyomaték értelmezése

A görbék csúcspontjai jelzik a maximális vagy billenő nyomatékot. Az 1. ábra és a II. táblázat adatai szerint az alacsony ellenállású anyagok (réz: 2,87 p.u., CCA: 2,71 p.u.) nagyobb maximális nyomatékot biztosítanak, mint a magasabb ellenállású ötvözetek (bronz: 1,92 p.u., sárgaréz: 1,80 p.u.). Ez ellentétes tendencia az indítónyomatékhoz képest. A maximális nyomaték a szlip növekedésével csökken az alacsony ellenállású anyagok esetében, míg a magasabb ellenállású anyagok esetében a nyomatékgörbe laposabb lefutása, de csökkent csúcsértéke figyelhető meg.

Az indítási dinamika jellegzetességei

Az 1. ábra görbéi jól szemléltetik az indítási folyamat elektromágneses viszonyait. Az indítás kezdetén az indítónyomaték értéke az anyagtól függően 1,35–1,87 p.u. között változik. Ez az érték kritikus, mivel az indítási fázis során csak akkor kezd el forogni a motor, ha az indítónyomaték elegendő a terhelési nyomaték legyőzésére. A motor ezt követően a kezdeti indítónyomatékról felgyorsul a billenő nyomatékig terjedő szlip-tartományban. Ebben a szakaszban az alacsony ellenállású anyagok (réz, CCA) gyorsabban szállítanak energiát a forgórészbe, mivel bennük nagyobb áram indukálódik. Végül, ahogy a motor megközelíti a szinkron sebességet, az alacsony ellenállású anyagok (réz, CCA) nagyobb gyorsulást biztosítanak a nagyobb billenő nyomaték miatt, és a szinkron fordulathoz közelebbi felfutást eredményeznek.

Gyakorlati következtetés és anyagválasztás

Az eredmények alapján a rúdanyag választása komplex mérlegelést és összetett megfontolást igényel az indítási feltételekben, melyek közül kiemelt szerepet érdemel az indítónyomaték és a hőképzés közötti egyensúly megtalálása. Nehéz indítási feltételek esetén a magasabb ellenállású anyagok (CuZn, CuSn, Al) előnyösebbek, mivel nagyobb indítónyomatékot biztosítanak. Azonban az indítás során jelentősen nagyobb Joule-hőképzésre vezetnek, amely a rotor termikus terhelésének növekedéséhez vezet.

Ezzel szemben az alacsony ellenállású anyagok (réz, CCA) indítás során kisebb hőterhelést okoznak, de az indítónyomaték is alacsonyabb. A CCA anyag jó kompromisszumot képez, mivel az optimalizált összetétele révén csökkentett Joule-veszteséget és megfelelő indítónyomatékot biztosít.

A 1-4 ábrákon bemutatott szimulációs vizsgálatok melyek értékei megtekinthetők a II. táblázatban, demonstrálják az anyagválasztás hatását a szinkronmotor indítási szakaszára.

4.2 Indítás áram és sebesség függvényében

A közvetlen hálózati (DOL) indítás tranziens viselkedését a 2. és 3. ábra szemlélteti. A 2. ábra az indítás alatti forgórészáram (I_2) relatív értékét mutatja az idő (t) függvényében, míg a 3. ábra a motor szögsebességének (ω) alakulását ábrázolja ugyancsak relatív egységekben.

A 2. ábra az indítóáram időbeli alakulását mutatja: az áram az indítás pillanatában ($t \approx 0$) azonnal megjelenik a maximális értéknél, majd idővel csökken. Ez az aszinkron indítási fázis jellegzetessége: az indukált áram azonnal felépül az állórész és forgórész közötti elektromágneses csatolás miatt, majd a rotor szinkron sebesség felé közeledésével (szlip csökkenésével) az indukált áram szisztematikusan lecseng.

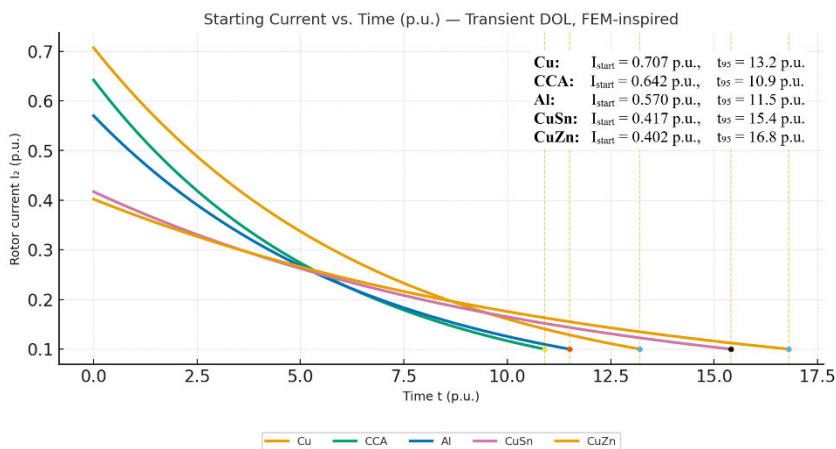
Az indítóáram csúcserő és annak lecsengésének üteme erősen függ a rúdanyag elektromos vezetőképességétől, amit az 2. ábra jól szemléltet.

- A réz (Cu) rudakkal ellátott motor veszi fel a legnagyobb indítási áramerősséget (0,707 p.u.), ami az alacsony ohmos ellenállásból és az erős elektromágneses csatolásból következik. Ez az alacsony rotoellenállás és az erős mágneses csatolás az indítás kezdetében ($s=1$) viszonylag alacsonyabb indítónyomatékot eredményez (1,35 p.u., lásd 4.1 fejezet), azonban az alacsony ellenállás és a magas áram szinkronizálásra való hajlamot jelent. Fontos megjegyezni, hogy a réz nagy maximális (billenő) nyomatékot biztosít (2,87 p.u.). Az indítás során azonban a kis rotoellenállás miatt az indítási energiaátadás intenzív, ami nagyobb hőterhelést okoz az alumínium (Al) és a rézbevonatú alumínium (CCA) rúdanyagokhoz viszonyítva
- Az „Al” és „CCA” rúdanyagok kisebb indítási áramerősséget eredményeznek (0,570 és 0,642 p.u.), és az áram lecsengése simább, közel exponenciális jellegű. Ezekben az anyagokban a közepes rotoellenállás kiegyensúlyozottabb indítónyomatékot biztosít (Al: 1,73 p.u., CCA: 1,53 p.u.), miközben a veszteségek és a termikus igénybevétel mérsékeltebbek, mint a tiszta réz esetében.]
- A sárgarézt (CuZn) és a bronz (CuSn) nagy fajlagos ellenállása miatt az indítóáram alacsonyabb és laposabb görbét mutat (0,402 és 0,417 p.u.). A nagy rotoellenállás viszont jelentős indítónyomatékot eredményez az $s=1$ pontban (1,78 és 1,87 p.u.), ugyanakkor az alacsonyabb elektromágneses csatolás miatt az áramfelépülés lassabb, és a gyorsulási idő hosszabb (16,8 és 15,4 p.u.) a jobb vezetőképességű anyagoknál. Ez az ellentét a megnövekedett ellenállásból származó nagyobb indítónyomaték és az alacsonyabb áramból eredő gyengébb gyorsulási erő közötti természetes kompromisszum.

Az áramlecsengés folyamata jelzi a **szinkron üzemmódba való fokozatos átmenetet**: az elektromágneses csatolás fokozatosan gyengül, az indukált áram

stabilizálódik az üzemi értéken, és amikor a forgórész sebessége eléri a szinkron sebesség 95%-át, a motor szinkronba ugratható a gerjesztés bekapcsolásával.

A 3. ábra ezzel összhangban a szögsebesség növekedését mutatja: a réz és CCA rudakkal szerelt motorok gyorsabban érik el a szinkron sebesség 95%-át, míg a sárgaréz és bronz anyagú rudak esetében a gyorsulási idő hosszabb, ami megfelel a laposabb nyomaték-csúszás és kisebb áramértékekből adódó lassabb dinamikának.



2. ábra

Indítási áram és idő különböző rudanyagok esetében, tranziens 2-D FEM elemzéssel (ANSYS Maxwell) szimulálva közvetlen on-line (DOL) indítási körülmények között.

(Megjegyzés: Minden görbe megáll, amikor a forgórész eléri a szinkron sebességet – a Cu és a CCA éri el a szinkronizmust a leggyorsabban (≈ 10 – 11 p.u.), az Al követi, míg a CuZn és a CuSn lassabban gyorsul a nagyobb ellenállás és csillapítás miatt. Y tengely: Rotoráram I_2 (p.u.), $1,0$ p.u. = $0,67$ kA (≈ 670 A) $\rightarrow 0,1$ p.u. = 67 A; tengelyosztások $0,1$ p.u. ≈ 67 A lépések. X tengely: Idő t (p.u.), $1,0$ p.u. = $3,03$ s $\rightarrow 13,2$ p.u. ≈ 40 s a Cu referencia esetében; 1 p.u. osztás ≈ 3 s, tehát a 0 – $17,5$ p.u. tartomány lefedi ≈ 0 – 53 s valós idejű indítási időtartamot.)

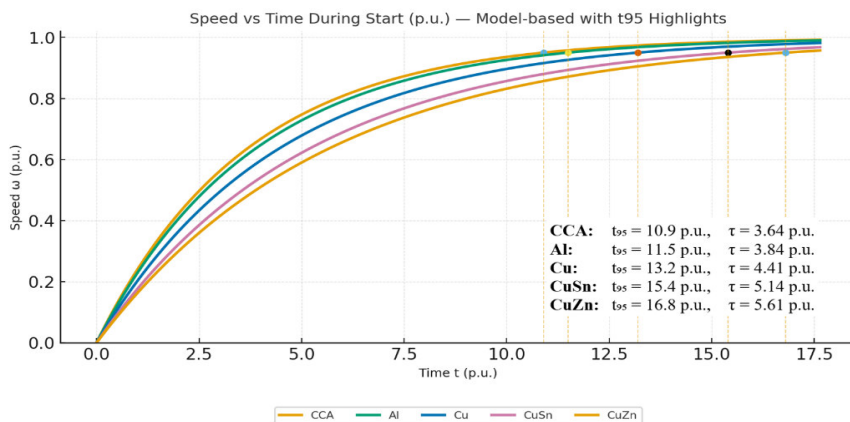
A 3. ábrán látható sebesség–idő karakterisztikák az anyag elektromos vezetőképessége, az indítónyomaték nagysága és a dinamikus gyorsulási képesség közötti összefüggést mutatják.

A nagy elektromos vezetőképességű anyagok, mint a réz (Cu) és a rézbevonatú alumínium (CCA), nagy gyorsulást biztosítanak: ezek a motorok körülbelül 10 – 11 p.u. időegység alatt érik el a szinkronsebesség 95%-át.

Az alumínium (Al) viselkedése hasonló tendenciát mutat: közepes ellenállása és kis sűrűsége miatt dinamikusan reagál, a sebességgörbéje szorosan követi a CCA esetét. Ez a kombináció kedvező elektromágneses hatékonyságot és mérsékelt termikus terhelést eredményez.

A sárgaréz (CuZn) és bronz (CuSn) rudakkal szerelt gépek ezzel szemben lassabb gyorsulást mutatnak: sebességük csak 16–17 p.u. időegység után éri el a 0,95 p.u. értéket. Ez a hosszabb gyorsulási idő összefügg azzal, hogy a nagyobb rotoellenállású anyagok a nagy csúszás tartományában kisebb gyorsító nyomatékot hoznak létre.

Ez a viselkedés jól szemlélteti, hogy a rúdanyag elektromos vezetőképessége közvetlenül befolyásolja az indítókalickás rendszer gyorsulási dinamikáját, valamint az indítási folyamat hosszát és hatékonyságát.



3. ábra

A rotor szögsebességének változása az idő függvényében a DOL indítása során, időtartomány FEM szimulációkból nyerve (ANSYS Maxwell, 50 Hz ellátás)

(Megjegyzés: Nem minden görbe végződik látható vízszintes metszettel, mert a szimuláció automatikusan leáll, amikor az egyes anyagok szinkronba kerülnek. A Cu és a CCA esetében a megoldó néhány lépéssel az állandósult állapoton túl folytatódott, lapos vonalat mutatva, míg a CuZn és a CuSn esetében pontosan a szinkronizálás pillanatában állt le. **Y tengely:** Rotor fordulatszám ω (p.u.), 1,0 p.u. = 1500 rpm $\rightarrow$ 0,1 p.u. = 150 rpm; a 0,1 p.u. tengelyosztások $\approx$ 150 fordulat/perc lépésnek felelnek meg. **X tengely:** t idő (p.u.), 1,0 p.u. = 3,03 s $\rightarrow$ 13,2 p.u. $\approx$ 40 s a Cu referencia esetében; minden 1 p.u. osztás 3 mp $\approx$, így a 0–17,5 p.u. tartomány $\approx$ 0–53 mp valós idejű gyorsulást jelent.)

4.3 Felhasznált energia összehasonlítása

A közvetlen hálózati (DOL) indítás során a szinkronmotor csillapító- vagy indítókalickájában az elektromágneses energia jelentős része hővé alakul a Joule-veszteségek következtében. Ez a hőtermelés elsősorban a rúdanyag elektromos ellenállásától és a nagyáramú tranziens időtartamától függ. Nagy teljesítményű szinkronmotorok esetében a túlzott Joule-fűtés nemcsak a rotor hőmérsékletének emelkedését okozhatja, hanem mechanikai feszültségekhez, a szigetelés öregedéséhez és a rúd-véggyűrű kapcsolatok hőterheléséhez is vezethet.

Az indítási folyamat során a pillanatnyi Joule-veszteség teljesítménye az elektromágneses alapok alapján az (8) képlettel adható meg, amely a hőfejlődés intenzitásának pillanatértékét mutatja:

$$P_J(t) = I_{\text{bar}}^2(t) R_2(T) \quad (8)$$

A kumulatív Joule-energia, azaz az indítási szakasz alatt hővé alakult összes elektromos energia a következőképpen számítható:

$$E_J = \int P_J(t) dt \quad (19)$$

ahol:

$P_J(t)$ - pillanatnyi Joule-veszteség a rotorrudakban [W]

$I_{\text{bar}}(t)$ - pillanatnyi áram a rúdvezetőkben [A]

$R_2(T)$ - hőmérsékletfüggő rúdellenállás [Ω]

E_J - az indítás során elosztott teljes Joule-energia [J]

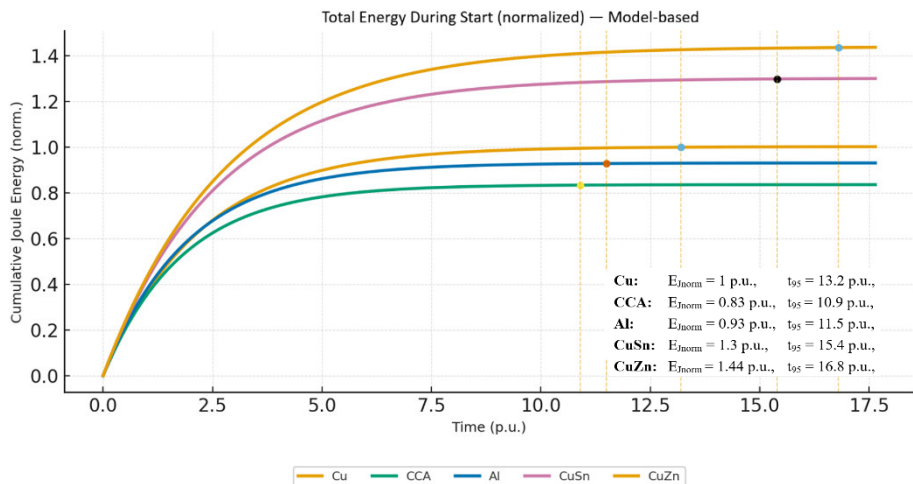
t - idő [s vagy p.u.]

A 4. ábra a különböző anyagú rudak kumulatív Joule-energiáját mutatja az idő függvényében. A görbék meredeksége azt szemlélteti, hogy milyen gyorsan alakul át az elektromágneses energia hővé a rotorban: minél meredekebb a görbe, annál intenzívebb a hőtermelés.

A sárgaréz (CuZn) és a bronz (CuSn) esetében a legnagyobb meredekség és végenergia-érték figyelhető meg, ami megerősíti, hogy nagyobb ellenállásuk miatt ezek az anyagok jelentősebb ohmos veszteséget termelnek. A réz (Cu) mérsékeltebb lejtést mutat: bár az indításkor magas áram folyik, a kisebb ellenállás és a rövidebb gyorsulási idő korlátozza a leadott hőenergia nagyságát.

Az alumínium (Al) és különösen a rézbevonatú alumínium (CCA) esetében figyelhetők meg a leglaposabb görbék, ami mérsékelt hőfejlődést és jó hőstabilitást jelez. A görbék egy-egy állandósult értékhez tartanak, amikor a forgórész fordulatszáma közelít az állórész forgó mágneses mezejének fordulatszámához, csökken a rudakban indukált feszültség és ezzel együtt a Joule-veszteség. A vezetőképesség és a sűrűség különbségei miatt a tranzien্স energiafolyamatok anyagoként eltérő lefolyást mutatnak.

Ezek az eredmények összhangban állnak a legújabb FEM-alapú termikus elemzésekkel [7], amelyek szintén kimutatták, hogy a rúdanyag döntő szerepet játszik a szinkronmotor indításkori hőfeszültségeinek és hőterhelésének alakulásában.



4. ábra

Kumulatív Joule energia a kiindulási intervallum alatt, csatolt elektrotermikus FEM analízissel (ANSYS Maxwell + Transient Thermal) értékelve

(Megjegyzés: A görbék az indítás során az PR veszteségek által termelt teljes hőenergiát mutatják. A vonalak leállnak, amikor a rotor eléri a szinkronizmust – a Cu és a CCA korábban ér véget a gyorsabb gyorsulás miatt, míg az Al, a CuZn és a CuSn több energiát halmoz fel a hosszabb indítási idő miatt. Y tengely: Kumulatív Joule energia EJ (norm.), 1,0 p.u. = EJ,Cu $\approx$ 12 MJ (referencia); 0,1 p.u. $\approx$ 1,2 MJ, 0,2 p.u. $\approx$ 2,4 MJ. X tengely: Idő t (p.u.), 1,0 p.u. = 3,03 s $\rightarrow$ 13,2 p.u. $\approx$ 40 s a Cu referencia esetében; 1 p.u. osztás $\approx$ 3 másodperc, tehát a 0–17,5 p.u. tartomány $\approx$ 0–53 másodperces valós idejű időtartamot jelent.)

4.4 Eredmények összegzése

A vizsgált rúdanyagok közvetlen és objektív összehasonlításának lehetővé tétele érdekében az analitikai és dinamikus szimulációs eredményekből egy sor kulcsfontosságú normalizált teljesítménymutatót vontunk ki.

Minden mutató a motor indítási teljesítményének és termikus viselkedésének egy adott aspektusát képviseli:

- Rotor ellenállás (R_2 , p.u.): az indítókalicka-rúd elektromos ellenállása az anyag és geometria függvénye. Magasabb $R_2 \rightarrow$ nagyobb indítónyomaték, de hosszabb gyorsulási idő és magasabb Joule-veszteség.
- Maximális elektromágneses nyomaték (M_{max} , p.u.): a szlip-nyomaték görbe csúcserőteke, amely az R_2 és a forgórész reaktanciájától függ. Az alacsony R_2 anyagok (Cu, CCA) nagyobb M_{max} értékeket mutatnak (2,87 és 2,71 p.u.), azonban az indítónyomaték az $s=1$ pontban viszonylag **alacsony**. A magas R_2 anyagok (CuZn, CuSn) **nagyobb indítónyomatékot** biztosítanak ($s=1$ -nél), de

alacsonyabb maximális nyomatékcúcsot ($M_{\max} = 1,80\text{--}1,92$ p.u.). Ez a fordított viszony a szlip-nyomaték görbéről leolvasható.

- Indítóáram (I_{start} , p.u.): az állórészben az indítás kezdetén ($s=1$, álló helyzetben) felvett csúcsáram, amely az állórész impedanciája és a rotor ellenállása (R_2) kombinációjának függvénye. Az alacsony R_2 anyagok (Cu, CCA) nagyobb indítási áramot vonnak le (0,707 és 0,642 p.u.), míg a magas R_2 anyagok (CuZn, CuSn) csökkentett áramcsúcsot mutatnak (0,402 és 0,417 p.u.). Az I_{start} befolyásolja az indítónyomatékot (nagyobb áram $\rightarrow$ nagyobb indítási nyomaték) és a hálózati feszültségesést, ezért a nagy teljesítményű motorok indítási áramának korlátozása a hálózati stabilitás szempontjából kritikus.
- Gyorsulási idő (t_{95} , p.u.): az az időtartam, amely alatt a rotor a szinkronfordulatszám 95%-ára ($s = 0,05$ szlip) gyorsul fel az indítás kezdetétől. Ez az érték az indítási dinamika integráló mutatója, amely az indítónyomatékot, a veszteségeket, a hőmérsékleti hatásokat és az aszinkronos fázis teljes lefolyását magában foglalja. Az $s = 0,05$ (5% szlip) pont kritikus küszöb: az aszinkronos nyomaték már nem elegendő a további gyorsuláshoz, de a szinkronizációs erő stabil és képes a rotor szinkron sebességhez igazítására (szinkronba ugrás). Ez az érték közvetlenül jellemzi az anyagok indítási dinamikáját és szinkronizációs képességét.
- Kumulatív Joule energia (E_J , norm.): az indítási szakasz alatt a rotor vezetőiben és kapcsolataiban eloszlott összes hővé alakult elektromos energia az (17) egyenlet szerint. Ez az érték magában foglalja az ohmos veszteségeket, a szigetelés termikus terhelését és a rúd–végygyűrű kapcsolatok hőfejlődését. Az alacsonyabb E_J érték gyorsabb szinkronizációt és csökkentett rotor termikus igénybevételt jelez, amely hosszú élettartamú üzemeléshez és szigetelés-öregedés lassítása miatt fontos.

Minden mennyiséget normalizáltunk az alap 6 MW-os, 6 kV-os szinkronmotor névleges értékeire, hogy biztosítsuk az anyagok közötti teljes összehasonlíthatóságot.

Az összes anyag számított normalizált teljesítménymutatóit a II. táblázat foglalja össze, amely kvantitatív alapot nyújt mind az elektromágneses teljesítmény, mind a hőállóság értékeléséhez.

2. táblázat

A vizsgált rúdanyagok szimulációs eredményeinek összehasonlítása.

Anyag	Rotor ellenállás R_2 (p.u.)	Maximális nyomaték, $M_{\max}$, Szlip (p.u.)		Indítóáram I_{start} (p.u.)	Indító nyomaték M_{start} (p.u.)	Gyorsulási idő t_{95} (p.u.)	Joule energia E_J (norma)
		$M_{\max}$	s				
Cu	0,200	2,87	0,25	0,707	1,35	13,2	1,00
Al	0,328	2,46	0,41	0,570	1,73	11,5	0,93

CuZn	0,698	1,80	0,87	0,402	1,78	16,8	1,44
CuSn	0,640	1,92	0,8	0,417	1,87	15,4	1,3
CCA	0,245	2,71	0,31	0,642	1,53	10,9	0,83

A táblázat adatai alapján a réz (Cu) mutatja a legnagyobb maximális nyomatékot, míg az alumínium (Al) és a CCA esetében alacsonyabb veszteségek és rövidebb gyorsulási idő tapasztalható. A sárgarézt (CuZn) és bronz (CuSn) rudak magasabb ellenállása ugyan nagyobb indítónyomatékot eredményez, de ezzel együtt jelentősebb Joule-veszteséget és hosszabb gyorsulási időt is.

A CCA anyag így a legkedvezőbb kompromisszumot nyújtja az elektromágneses teljesítmény, a hőterhelés és a hatásfok szempontjából.

Az eredmények alapján a különböző kalickaanyagok eltérő indítási karakterisztikát mutatnak. A réz (Cu) esetében a legnagyobb nyomaték érhető el, de az indítási áram és a hőmérsékleti emelkedés is jelentős. Az alumínium (Al) változat kisebb nyomatékot ad, viszont kedvezőbb a termikus viselkedése. A rézbevonatú alumínium (CCA) hibrid megoldás átmenetet képez a két anyag között: az indítási energiaigény kb. 8–10 %-kal csökken, miközben az indítónyomaték csak 5–6 %-kal kisebb a rézhez képest. Ez az arány kedvező kompromisszumot jelent a nagy teljesítményű hajtások esetében.

4.5 Értékelés és ipari relevancia

A szimulációs eredmények közvetlenül alátámasztják, hogy a csillapítókalicka-anyag megválasztása meghatározza a hálózati indítás során fellépő áram- és nyomaték-tranziens nagyságát. A Ganz-nál fejlesztett 6 MW-os géptípuson végzett számítások alapján a CCA vezetőanyag alkalmazása 5–10 %-kal kisebb indítónyomatékot, ugyanakkor 15–20 %-kal alacsonyabb hőmérsékleti igénybevételt és mintegy 10 %-os anyag- és gyártásköltség-csökkenést eredményez. Ez a tendencia a nagy teljesítményű, közvetlen hálózati indítású szinkronmotorok optimalizálásának kulcsfontosságú iránya.

5 Összegzés és következtetések az anyagválasztás hatásairól

A mennyiségi összehasonlítás eredményei egyértelműen rámutatnak a nyomatékképesség, az indítási áram, a gyorsulási dinamika és a hőhatásfok közötti kompromisszumokra, amelyek meghatározzák a különböző rudanyagok alkalmazhatóságát nagy teljesítményű szinkronmotorokban:

- Réz (Cu): a legnagyobb indítási nyomatékot és áramot biztosítja, ami megerősíti kiváló elektromos vezetőképességét és magas elektromágneses

teljesítményét. Hátránya a nagy bekapcsolási áram és a mérsékelt rotorhőterhelés. Elsősorban olyan alkalmazásokban előnyös, ahol a maximális indítónyomaték a fő tervezési szempont.

- Alumínium (Al): alacsonyabb áramcsúcsot és egyenletesebb gyorsulást biztosít, miközben kisebb tömegű és kedvezőbb energiahatékonyságú. Olyan alkalmazásokhoz ajánlható, ahol a kisebb veszteség, a súlycsökkentés és a hatásfok-növelés a cél.
- Sárgaréz (CuZn) és bronz (CuSn): fokozott csillapítást és stabil szinkronizálási viselkedést biztosítanak, azonban nagyobb ellenállásuk miatt hosszabb gyorsulási időt és nagyobb hőterhelést eredményeznek. Ezek az anyagok ott alkalmazhatók előnyösen, ahol a mechanikai stabilitás és a rezgés csillapítás fontosabb a gyors dinamikus reakciónál.
- Rézbevonatú alumínium (CCA): a legkiegyensúlyozottabb teljesítményt nyújtja az összes vizsgált anyag közül. Nagy nyomatékot, csökkentett indítóáramot, rövid gyorsulási időt és alacsony hőveszteséget biztosít. A CCA ezért ígéretes, korszerű kompromisszumot jelent a nagy teljesítményű, indítókalickás szinkronmotorok számára.

Összességében az eredmények igazolják, hogy a rúdanyag megválasztása kulcsfontosságú tényező a nagy szinkrongépek indítási viselkedésének meghatározásában. Az alacsony ellenállású anyagok (pl. Cu, CCA) nagyobb nyomatékot és gyorsabb dinamikus választ adnak, míg a nagyobb ellenállású ötvözetek (pl. CuZn, CuSn) fokozott csillapítást, de nagyobb hőfejlődést eredményeznek.

Következésképpen a rézbevonatú alumínium (CCA) tűnik ki mint optimális kompromisszum a teljesítmény, a hatékonyság és a robusztusság között a közvetlen hálózati (DOL) indítási feltételek mellett [8].

A jövőbeni kutatások iránya a végelelemes módszerrel (FEM) kapott eredmények kísérleti validálása lehet kalickás szinkronmotor-prototípusok segítségével, valamint a kompozit rudak szerkezetének továbbfejlesztése a nagy hatékonyságú ipari hajtások területén.

6 Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton fejezi ki köszönetét a Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Zrt. és az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karának a kutatás megvalósításához biztosított szimulációs környezetért, laboratóriumi infrastruktúráért és a tanulmányban felhasznált technikai erőforrásokért.

Külön elismerés illeti az Óbudai Egyetem Biztonság- és Biztonságtudományi Doktori Iskoláját a kutatási folyamat során nyújtott szakmai iránymutatásért, tudományos támogatásért és módszertani segítségért.

Források

- [1] J. Liska, *Villamos gépek III – Szinkron gépek*. Budapest: Műszaki Kiadó, 1986, 45–62. o.
- [2] S. Halász, *Villamos hajtások*. Budapest: BME, 1985, pp. 138–150.
- [3] Gy. Uray, *Villamos gépek üzeme*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1978, pp. 97–112.
- [4] R. Rácz, *Villamos hajtások*. Budapest: BME Jegyzet, 1991
- [5] H. Liu, „Systematic Optimization Study of Line-Start Synchronous Reluctance Motor Rotor”, *Manufacturing Trans.*, vol. 13, no. 5, p. 420, 2025. MDPI+1
- [6] C. Ocak, “A FEM-Based Comparative Study of the Effect of Rotor Bar and Cage Numbers Considering Al and Cu Conductors on the Performance of Asynchronous Traction Motors in Hybrid-Electric Vehicles,” *Energies*, vol. 16, no. 16, art. 6047, 2023. doi: 10.3390/en16166047
- [7] Y. R. Konda, V. K. Ponnaganti, P. V. S. Reddy, R. R. Singh, P. Mercorelli, E. Gundabattini, and D. G. Solomon, “Thermal Analysis and Cooling Strategies of High-Efficiency Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors — A Review,” *Computation*, vol. 12, no. 1, art. 6, 2024. doi: 10.3390/computation12010006.
- [8] G. Joksimović, “Dynamic Model of Cage Induction Motor with Number of Rotor Bars as Parameter,” *IET Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 7, pp. 1–9, 2017. doi: 10.1049/joe.2017.0074.
- [9] M. Hyla, “Starting a High-Power Synchronous Motor with a 6-kV Voltage-Source Inverter and a Microprocessor-Controlled Excitation Unit,” *Journal of Electrical Engineering*, vol. 69, no. 2, pp. 156–162, 2018. doi: 10.2478/jee-2018-0019.
- [10] P. Schommarz and R.-J. Wang, “Development of a Transient Synchronization Analysis Tool for LSPMSM Design,” *Energies*, vol. 15, no. 23, art. 9206, 2022. doi: 10.3390/en15239206.
- [11] M. Azab, “A Review of Recent Trends in High-Efficiency Induction and Line-Start Synchronous Machines”, *Energies*, vol. 7, no. 1, p. 15, 2025. MDPI