

A villamos gépek tipikus meghibásodásai és diagnosztizálásuk

Dr. SZABÓ Loránd

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamos Gépek Tanszék
400750 Cluj, P.O. Box 358, Románia
e-mail: Lorand.Szabo@mae.utcluj.ro

1. BEVEZETÉS

A villamos gépeket általában 30 éves élettartamra tervezik, de nagyrészüket már 5–10 év után valamilyen formában meghibásodik. Ez a tény készteti a szakembereket a karbantartás, megelőzés, javítás tökéletes elvégzésére hatékonyabb üzemeltetésük érdekében. A megelőzés egyik legjobb módszere a gépek állandó vagy időszakos vizsgálata, amely során észlelhetők a meghibásodások, akár már kialakulásuk kezdeti fázisában, amikor a keletkezett károk még nem jelentősek.

A háromfázisú hálózatról táplált, kalickás forgórészű aszinkronmotor a hajtástechnika legelterjedtebb és legfontosabb része. Ipari környezetben a villamos energia mechanikai energiává való átalakításának szinte kizárólagos eszköze. Gyakran az ipar "igáslovának" is nevezik. Egyedül az Egyesült Államokban a 0,75 kW és 150 kW közötti teljesítménytartományban több mint 40 millió (!) üzemel [1]. Számuk egyre szaporodik, mivel évente közel 30 milliót adnak el belőle szerte a világon. Számos előnyös tulajdonságuk közül csak néhányat említünk: jelleggörbéjük sönt jellegű, közvetlenül csatlakoztathatók a háromfázisú hálózatra, üzembiztosak mivel nincsenek keféik, üzemi és javítási költségük minimálisak, olcsók, súlyuk, illetve tehetetlenségük kicsi, áruk viszonylag alacsony [2, 3].

Mindezek miatt a továbbiakban kizárólag a kalickás forgórészű aszinkrongépek meghibásodásaival és ezek diagnosztizálásával foglalkozunk. Természetesen a szakemberek foglalkoznak valamennyi villamosgép-típus diagnosztizálásával, de ezek fontossága elmarad az aszinkronmotorok diagnosztizálásának jelentősége mellett.

2. AZ ASZINKRONGÉPEK HIBÁI ÉS EZEK MEGNYILVÁNULÁSA

Az aszinkrongép tulajdonképpen egy összetett, bonyolult, több villamos és gépészeti alegységet tartalmazó rendszer. Működése közben a legkülönbözőbb meghibásodásoknak van kitéve. Ezeket a nem kívánt jelenségeket a szakirodalomban általában a következőképpen csoportosítják: a csapágyak hibái, az állórész tekercseinek hibái, a kalickás forgórész rúdjaiknak vagy gyűrűinek hibái, a tengely és a tengelykapcsolók hibái, a külső alkatrészek hibái, stb. [4]. Ezek közül a következőkben csak a legfontosabbakat tekintjük át.

2.1. A csapágyak hibái

A legtöbb villamos gép estében golyóscsapágyakat használnak, amelyek egy külső illetve belső gyűrűből állnak, a gyűrűk között pedig egy sor golyó található, amely biztosítja az egyenletes forgómozgást. Öregedésük miatt a csapágyak, megfelelő beállításuk és egyenletes terhelésük esetén is gyakran elromolhatnak.

A csapágyhibák képezik a villamos gépek összes hibáinak kb. a 40÷50%-át [5]. A csapágyak hibáit különféle jelenségek okozhatják:

- Elégtelen vagy nem megfelelő a kenésük
- Tengelyirányú és radiális túlterheltség a tengely alakváltozásainak következtében
- Hibás szerelés, beállítás

- Savas, nedves, stb. közeg káros hatása
- A súrlódás következtében keletkezett fémpor a villamos gép belsejében

A csapágyak a túlterheltség miatt berezeghetnek, ami súlyosan károsítja a gép gépészeti alkatrészeit és végül a csapágy teljes tönkremenetelét okozhatja.

Ezek a hibák megelőzhetők, ha állandó megfigyelés alatt tartjuk a villamos gép rezgéseit és zajait.

2.2. Az állórész tekercseinek hibái

Az állórész tekercseléseinek meghibásodásai szintén többféle lehet: megszakadhat vagy letestelhet a tekercselés egyik fázisa, rövidzárlat keletkezhet egy fázis, illetve két fázis tekercsei között, illetve meghibásodást okozhat egy tekercs végeinek fordított bekötése is. Ezek a hibák a villamos gépek összes hibáinak kb. a 30÷40%-át teszik ki [5].

Ezeknek a hibáknak a fő okai a következők lehetnek:

- az állórész tekercseinek vagy vastestének túlmelegedése
- a vastest, a tengelykapcsolók nem megfelelő rögzítése
- olaj, nedvesség vagy más szennyező anyagok behatolása a gép belsejébe
- nagy indítási áramok, rövidzárlatok
- villamos kisülések
- a hűtési rendszer meghibásodása
- a villamos gép erős rezgései vagy megütése
- a nem megfelelő minőségű szerelés
- túlterhelés.

Ezek az okok mind kiválthatják az állórész tekercseinek a meghibásodását. Ekkor megváltoznak a gépben a szórási fluxusok és az áramok felharmonikusai, amelyek megfelelő módszerekkel könnyen kimutathatók.

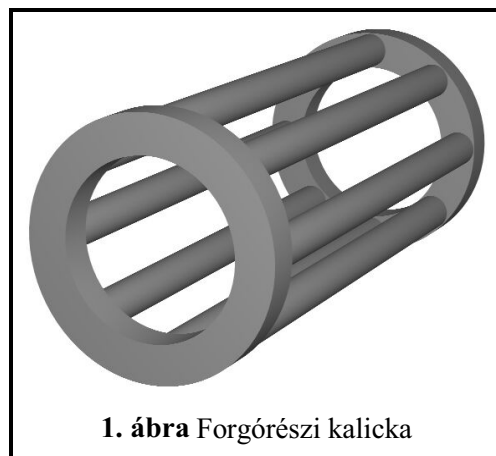
2.3. A forgórész hibái

A forgórész hibái többfélék lehetnek, amelyek lényegében a villamos gép felépítésétől függenek. A kalickás forgórészű aszinkrongépek esetében teljesen más hibákat fordulhatnak elő, mint a tekercselt forgórészűek esetében. Ezek a hibák képezik kb. 5÷10%-át az aszinkrongépek hibáinak [5].

A kalickás forgórész (l. az 1. ábrát) rúdjaiknak törései, illetve a rudak és a vastest homlokoldalán lévő zárógyűrűk közötti illesztés meghibásodásai a kalickás forgórészek főbb hibáit. Sérülékenyséjük miatt régebben ezeket a típusú forgórészeket csak kis teljesítményű aszinkrongépeknél használták. Manapság viszont a fejlett öntési technológiák segítségével akár 3000 kW teljesítményű aszinkrongépeket is készítenek kalickás forgórésszel. Fontos figyelembe venni azt a tényt, hogy a kalickás forgórész meghibásodását gyakorlatilag nem lehet kijavítani [6].

A kalickás forgórészek meghibásodásaink főbb okai lehetnek:

- a forgórész túlmelegedése a gép túlterhelése következtében
- gyártási (leginkább öntési) hibák
- túlzott dinamikus igénybevétel a pulzáló terhelés, az indítások, illetve a nagy nyomatékok következtében, valamint a mágneses- és a centrifugális erők miatt



1. ábra Forgórész kalicka

- a megengedetnél nagyobb mechanikus igénybevétel
- nedves, illetve agresszív környezet korrozív hatása
- mechanikus igénybevétel a csapágyak meghibásodása következtében, stb.

A hibás forgórészben a megszakadt rudak miatt az épen maradt rudakban megnő az áram erőssége, emiatt megnő ezek meghibásodásának a veszélye is.

A kalickás forgórész meghibásodása következtében a nyomaték és sebesség lüktetni kezd, és megváltoznak a szóródási mágneses fluxusok, valamint állórész áramainak felharmonikus komponensei. Továbbá megnő a villamos gép rezgése, zaja és hőmérséklete, forgórészben pedig elektromos ív keletkezhet. Megfelelő módszerek segítségével ezek a tünetek kimutathatók, így azonnal észlelhetők a hibák, és közbe lehet lépni az aszinkrongép teljes tönkrementé előtt.

2.4. Az aszinkrongép hibáinak statisztikája

A villamos gépeket karbantartók számára igen fontos ismerni a meghibásodásoknak a statisztikáit. Több szaktanulmányban közöltek ilyen jellegű statisztikákat [5, 7, 8]. Ezek eredményei néhol különböznek, mivel nem azonos feltételek mellett működő villamos gépek meghibásodásait tanulmányozták. A hibák előfordulásának aránya függ többek között a tanulmányozott gépek teljesítmény tartományától, hogy melyik iparágban, illetve milyen közegben használják ezeket.

Természetesen a fő irányzatok minden tanulmányban azonosak. Az statisztikák átlagos eredményeit a 2. ábrán látható grafikonon ábrázoltuk.

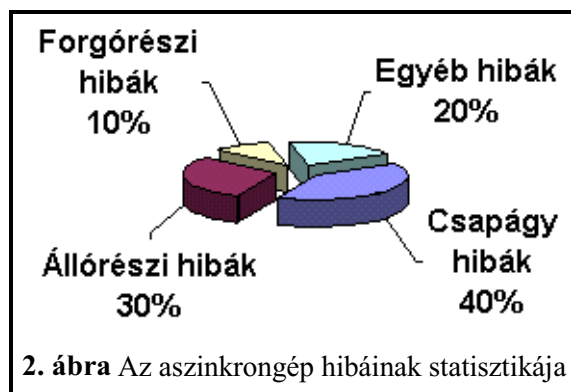
A tanulmányokat elemezve több érdekes megfigyelést emelhetünk ki. A meghibásodott gépek teljesítményét vizsgálva a szerzők megállapították, hogy nem arányos a meghibásodások száma a teljesítmény növekedésével. Az arányosan legtöbb meghibásodást a 101-500 kW teljesítménykategóriában észlelték.

Más jelenség figyelhető meg, ha a gépek tápfeszültségét vizsgáljuk. Amint az előrelátható volt, minél nagyobb a gépeket tápláló feszültség, a tekercsek annál jobban ki vannak téve letesteléseknek, rövidzárlatoknak és ezáltal meghibásodási valószínűségük is magasabb.

Nem ilyen egyértelmű a meghibásodások aránya a fordulatszám függvényében. Ebben az esetben nem lehet valamilyen szabályos változást figyelni meg.

A felmérések eredményei világosan kimutatták, hogy a hibák megjelenésének valószínűsége nagymértékben függ a használt védelemtől is. Így tehát a csak hővédelemmel, elektromágneses védelemmel és olvadó biztosítókkal ellátott aszinkrongépek meghibásodási aránya jóval nagyobb, mint azoknak a gépeknél, amelyeket ezek mellett még hőszenzoros védelemmel is felszereltek. A legkisebb meghibásodási arány azoknál az aszinkrongépeknél figyelhető meg, amelyeknél a rezgések megfigyelését is végzik. Ez az adat is hűen bizonyítja a villamos gépek állandó állapot-felügyeletének szükségszerűségét.

Hasonlóan szoros összefüggés van a gépek üzeme, a napi bekapcsolási számnak és a hibák száma között. A naponta egyszer beindított gépek magas meghibásodási arányát a hosszan tartó üzemmód okozza.



2.5. Az aszinkrongép hibáinak megnyilvánulásai

A különböző hibák, a nem megfelelő üzemeltetés, valamint az aszinkron villamos gép hibás tervezése számos módon nyilvánulhat meg. Egyes meghibásodások könnyen kimutathatók, másokat pedig csak sajátos berendezések segítségével lehet észlelni.

Az egyik legfeltűnőbb meghibásodás az aszinkron gépek túlmelegedése, amelyet a különböző alegységek (például vastestek, tekercsek, csúszógyűrűk, vagy a kefék) melegedése válthatja ki. Az állórész vasteste egyenletesen túlmelegedhet, ha a terhelés meghaladja a névleges értékét, vagy ha a hálózati feszültség nagyobb a tápfeszültség névleges értékénél.

Helyi túlmelegedések keletkezhetnek az állórész vastestében, ha a vasmag egyes lemezei között helyi rövidzárlatok keletkeznek a kivágás közben kialakult sorja, vagy a forgórész és az állórész közötti súrlódás miatt. Ugyanakkor az öreg gépek esetében rövidzárlatok keletkezhetnek a vasmag lemezei között a hibás rögzítő csavarok mentén.

Ha a motor túlterhelt vagy a szellőzés nem működik helyesen, illetve a táplálási feszültsége kisebb a névleges feszültségnél, akkor megnő a motor által felvett áramerősség értéke, az állórész tekercselésén egyenletesen túlmelegedést észlelhetünk.

Ha az állórész egy tekercsének mentei érintkeznek, vagy ha a tekercs rosszul van bekötve, akkor ez túlhevül. A fázisáramok erőssége egyenlőtlen lesz, ennek következtében pedig lecsökken a kifejtett nyomaték és a motor zajossá válik. Hasonlóan túlmelegedik az állórész tekercse abban az esetben is, ha egy fázis tekercse két pontban testzárlatos, vagy ha két fázis között keletkezik rövidzárlat.

Ugyanazok az okok váltják ki a forgórészi tekercs egyenletes melegedését és a fordulatszám csökkenését mint amelyek az állórész melegedését is okozzák.

A forgórész és az állórész is egyaránt fölmelegszik, a motor nehezen indul, illetve nem éri el a névleges fordulatszámát, az állórész árama lüktet és a nyomaték is kisebb a névleges értéknél, továbbá a motor zajossá válik, ha a párhuzamosan kötött tekercsek vagy a tekercsek és a forgórész homlokoldalán levő részek között, illetve a rudak között meghibásodott vagy gyenge minőségű a hegesztés. A csúszógyűrűk és a tekercsek közötti tökéletlen kapcsolata illetve a kefék vagy a rövidrezáró szerkezet kilazult érintkezése hasonlóan zavaró működést válthatnak ki a villamos gépben. Az érintkezések romlását a por, szennyeződések, olaj illetve mechanikai hibák okozhatják.

Megfigyelhető olykor hogy az aszinkrongép nem indul el. Ez a tény abban az esetben következhet be, ha megszakadt az olvadóbiztosító vagy kikapcsolt illetve meghibásodott az automata megszakító, ebben az esetben természetesen nyilvánvaló, hogy a motor állórészében nem folyhat áram, és így a motor nem indulhat el. Ha a forgórész nem tud forogni, vagy ha csak külső segítséggel indul el, vagy ha furcsa hangokat hallat és lüktetésekkel működik, akkor a hálózatról nem kap három fázist, illetve ha a tekercselések csillagkapcsolásban vannak, akkor az állórész egyik tekercse lehet megszakadva.

Ha működés közben szakad meg a motor egyik fázisa, akkor a motor tovább tud működni, nyomatéka és fordulatszáma lecsökken, és az áramerősségek a normál üzemmódhoz képest megnőnek, és a tekercsek veszélybe kerülhetnek.

Ha névleges terhelésnél a forgórész sebessége kisebb a névleges sebességnél, akkor:

- a motor táplálási feszültsége alacsony,
- a forgórész áramkörében hibás érintkezés található
- az állórész tekercselése háromszögbe van kapcsolva

A forgórész áramkörében kilazult érintkezések következtében csökken a motor sebessége, sőt lüktetés jelentkezhet még kis terhelés esetében is, az áramlűktetések szintén erősek.

A motor egyik fázisának megszakadása következtében a forgórész fordulatszáma a névleges érték felére csökkenhet, és ilyenkor furcsa zajt hallat a motor, főleg indításkor.

Továbbá megfigyelhető, hogy az állórész egyik fázisának tekercselése hideg marad, mivel nincs táplálva, de ettől függetlenül a motor stabilan viselkedik indításkor. Mivel a motor csak két fázisa táplált, teljesítménye 1/3-ra csökken, a motor melegedése pedig a terheléstől függ. Megtörténhet tehát, hogy a motor hőmérséklete nem haladja meg a megengedett értékeket.

Ha a kalickás forgórészű aszinkrongép esetében, amelyet indításkor előbb háromszögkapcsolásban majd csillagkapcsolásban táplálják, összecserélődhetnek az állórész fázisai. A kapcsoló is lehet rosszul bekötve. Ekkor a motor nehezen indul és nagyon hangos lesz. Az áramerősségek egyenlőtlenül oszlanak el a fázisokban, üresjáratban pedig nagyobbak a névleges értéknél.

A forgórész abban az esetben súrolhatja vagy érintkezhet az állórészszel, ha meghibásodott illetve kikopott a csapágypersely, ha a csapágyak kimozdultak eredeti helyükből, ha helytelenül szerelték be ezeket, vagy ha a forgórész és az állórész vastestei, illetve a motor tengelye deformálódott a gépben keletkezett nagy erők hatására. Ugyanakkor a forgórész kiegyensúlyozásának helytelen elvégzése is közrejátszhat a forgórész elmozdulásában, úgy, mint az állórészben létrejött különböző típusú rövidzárlatok esetén, amikor a mágneses mező egyenlőtlenül oszlik el a légrésben, és ezáltal a vonzóerők egyoldalúan hatnak a forgórészre.

Ha a motor furcsán zúg és az áramerősségek értéke is különböző az állórész fázisaiban, akkor vagy rövidzárlat keletkezett a tekercsekben, vagy a tekercsek bekötése a hálózatra nem helyes, illetve ha az állórész tekercseléseinek menetszáma nem egyenlő. A zúgást általában a villamos gép fázisainak háromszögbe kapcsolásakor lehet észlelni, illetve akkor, ha a tekercsben a menetek párhuzamosan kapcsolódnak össze. Ellenben sorba- illetve csillagkapcsoláskor a különböző menetszámok miatt nem lesz zajosabb a motor, csak a fázis áramainak erőssége lesz eltérő.

Abban az esetben, ha a tekercsek nem szimmetrikusan oszlanak el az állórész aktív részein, az áramerősségek egyenlők lesznek a motor fázisaiban, viszont a motor alacsony frekvenciájú, mély tónusú zajt hallat. A tekercsek egyenlőtlen eloszlásának hatása erősebb, ha a forgórész és az állórész közötti légrés nem szimmetrikus. Ekkor megnő a motor rezgése.

Az aszinkrongép működés közben magas frekvenciájú, füttyüléshez hasonlítható zajt hallathat, ami csak akkor szűnik meg, ha megszakítjuk a motor táplálását. Ezt a zajt olykor erős rezgések is kísérhetik, ami a forgórész és az állórész fogai rezgésének tulajdonítható. Ez a jelenség akkor jelentkezik, amikor a forgórész és az állórész fogainak az arányát hibásan határozták meg. Ezek a rezgések akkor alakulnak ki, amikor az állórész fogainak szimmetriatengelye megegyezik a forgórész fogainak szimmetriatengelyével, ilyenkor ugyanis komoly egyoldalú vonzóerők hatnak a fogakra, amelyek forgás közben nagy sebességgel forognak, kiváltva a forgórész rezgését. Abban az esetben, ha az állórész nincs megfelelően rögzítve, akkor erre is áttérjedhet a rezgés. A keletkezett rezgések erőssége függ a motor rugalmassági fokától, a vonzóerők frekvenciájától, valamint a gép akusztikai tulajdonságaitól.

Kísérleti tapasztalatok igazolják, hogy ezek az erős rezgések veszélyes értékeket is elérhetnek, amikor a gépet alkotó részek (pl. forgórész) rezgésének frekvenciája megegyezik a gép sajátfrekvenciájával, ilyenkor a motor már nem tud normálisan működni az állórész és forgórész közötti súrlódás miatt.

Továbbá szükséges megvizsgálunk az aszinkrongépek szokásos zúgását, amely minden egyes váltóáramú gépet jellemez. A gép működése közben a forgórész fogai elmozdulnak az állórész fogaihoz képest, ami a mágneses fluxus változását váltja ki, amely a mágneses indukció periodikus és hirtelen változását okozza a forgórész és állórész fogaiiban. Ezáltal létrejön villamos gépek sajátos zúgása. Ennek erőssége egyenesen arányos a motor fogainak telítettségével.

A villamos gépek testzárlatát mérések segítségével nagyon könnyen kimutathatjuk. A testzárlatot kiváltó tényezők a következők lehetnek:

- a motor tekercsei átnedvesedtek, mert hosszútávon nedves környezetben tárolták, vagy ha víz hatolt közvetlenül a gépbe
- főként a nehéziparban használt gépek esetében, ahol a környezetben lévő por behatolhat a motor réseibe és tekercsei közzé, a tekercsek szigetelésének átütését és következésképpen a tekercs testzárlatát okozhatják
- savas vagy bázikus közeg hatására (pl. a vegyiparban) könnyen tönkremehet a tekercsek szigetelése
- ismételt és túlzott túlmelegedés esetén meggyengülhet a tekercs szigetelése
- rövidzárlatok, túlfeszültségek, ki-be kapcsolások esetében keletkezett elektrodinamikus igénybevétel miatt átüthet a tekercs közötti szigetelés, ív keletkezhet, majd rövidzárlat
- a szigetelés természetes öregedésével is számolni kell.

Előfordulhat az érintkezők megszakadása is. Ezek okait a következőkben kell keresni:

- leolvadtak a kábelsaruk és a tekercsek közötti érintkezések a rossz minőségű hegesztés miatt, vagy mert túl könnyen olvadó ötvözzel hegesztették össze őket
- a villamos gép érintkezői túlmelegednek, veszélyeztetve ezáltal a kábelsaruk leolvadását, ha a kábelsarut rögzítő csavarok meglazultak, vagy ha a kapcsok nem elég vastagok.
- a gépek erőteljes rezgése esetén valamennyi érintkezés veszélyben van

Az aszinkrongépekben számos mechanikus hiba is megjelenhet. Egyes gépcsoportok, amelyek nincsenek helyesen beállítva, elveszíthetik kiegyensúlyozottságukat. Az is megtörténhet, hogy a tengelyekre kapcsolt forgórészek nincsenek kellőképpen rögzítve, ebben az esetben a gyenge érintkezéseknél oxidréteg keletkezik, és a rezgések is egyre fokozódnak.

A villamos gépben rezgések keletkezhetnek, és ezek áterjedhetnek az egész meghajtott gépcsoportra, ha a villamos gép rögzítése gyenge, ha meglazultak a rögzítő csavarjai, vagy ha az alapja hibásan van beöntve a betonba. Ilyen módon az aszinkronmotorra is áterjedhetnek más, a közelben lévő gép által gerjesztett rezgések is, az épület falai, illetve az alapján keresztül. Ugyanakkor az alapozás rezonanciába léphet a motorrezgésével bizonyos fordulatszámoknál. Ez a jelenség akkor okoz gondot különösképpen, amikor az alapozás saját rezgéseinek a frekvenciája megegyezik a motor névleges fordulatszámán gerjesztett rezgéseinek frekvenciájával.

Az aszinkrongépknél rendhagyó elektromágneses jelenségeket figyelhetünk meg, ha:

- az állórész tekercseinek kapcsolása helytelen
- a tekercselt forgórészű motor forgórészében rövidzárlat keletkezett, ekkor a gépben a szlip-frekvenciával egyenlő frekvenciájú rezgések keletkeznek.
- megszakadt a kalickás forgórész egy vagy több rúdja.
- a forgórész vasteste alakváltozást szenvedett.
- egyenlőtlen a légrés az állórész és a forgórész között; a motor rezgésének frekvenciája ebben az esetben kétszerese a forgási frekvenciának.

Az aszinkronmotoroknak furcsa zajai lehetnek, ha:

- az állórész vasteste nincs megfelelően rögzítve, összeszorítva. Ennek következtében a vastest lemezeinek rezgése elkerülhetetlen.
- hibásak a tekercsek, a párhuzamos áramutak esetében a tekercselések aszimmetrikusan helyezkednek el.
- a gép, illetve ennek egyes részei rezegnek
- a nagy fordulatszámú gépek esetében fellépő hűtési problémák miatt a levegő nem képes behatolni a hűtési járatokba, stb.

3. A VILLAMOS GÉPEK KARBANTARTÁSA

A villamos gépek karbantartása igen fontos, mivel az időben és szakszerűen elvégzett javításokkal és karbantartási munkálatokkal a gépek élettartamát jelentősen meg lehet növelni [9]. A karbantartások beütemezésében, illetve a hibák megelőzésében nagy segítséget jelenthet a villamos gépeket megfigyelő és az előforduló hibákat diagnosztizáló intelligens berendezés.

Különösen fontos a megelőző karbantartás időben való elvégzése. Ennek keretében rendszeresen ellenőrizni kell a csapágyak kenését, a hűtőrendszert, a tápfeszültségek szimmetriáját, stb. A karbantartás és hibamegoldás célja elkerülni, illetve csökkenteni az esetleges hibák előfordulási esélyét, és az ezek elhárításának javítási költségeit. A megfelelően elvégzett időszakos megelőző karbantartási műveletek komoly pénzmegtakarítást jelenthetnek a javítási költségek csökkentése által, illetve a termelési kiesés minimalizálása révén.

Következésképpen biztos állíthatjuk, hogy minden iparágban szükség van a villamos gépek megfelelő karbantartására, és az esetleg előforduló hibák időbeni diagnosztizálására.

Itt jegyezzük meg, hogy egy másik módja a meghibásodások számának csökkentésére az ún. nagyhatékonyságú villamos gépek alkalmazása, mivel ezek nemcsak energiatakarékosak, hanem jóval megbízhatóbbak, mint hagyományos társaik [10].

4. A VILLAMOS GÉPEK DIAGNOSZTIKÁJA

A villamos gépeket diagnosztikája érdekében ezek állapotát állandó-, vagy időszakos jelleggel felügyelni kell (*condition monitoring*). Minél gyakrabban végezzük el a villamos gép megfigyelését, annál nagyobb a valószínűsége, hogy az előforduló meghibásodásokat észlelni tudjuk, esetleg még mielőtt maradandó károkat okoznának. A villamos gépek megfigyelt jellemzőinek indokolatlan változása egyértelműen meghibásodására utal.

A villamos gépek állapot-felügyeletét a gépek megelőző karbantartásának keretében kell elvégezni. A hibák időbeni kiszűrésével számottevő javítási költség lefaragható, illetve csökkenthető a javítások miatt kiesett termelési idő is.

A következőkben áttekintjük a legelterjedtebb vizsgálati módszereket [4].

4.1. A főbb működési paraméterek megfigyelése

A főbb működési paraméterek megfigyelése (*performance monitoring*) a villamos gép áramának, feszültségének, energiafogyasztásának, nyomatékának valós idejű és állandó mérését jelenti. Ezáltal néhány gyakran előforduló meghibásodás azonnal észlelhető (például az egyik táplálási fázis csökkenése vagy kimaradása, stb.).

4.2. A rezgések megfigyelése

A villamos gépek által élesztett rezgéseket leggyakrabban a gépházra vagy a csapágytestre rögzített piezoelektromos gyorsulásérzékelők (*accelerometer*) segítségével észlelhetjük. A rezgéseket elektromágneses, mechanikus vagy aerodinamikus erők okozhatják.

A szakemberek magállapítottak számos meghibásodást egyértelműen jellemző rezgésfrekvenciát. Figyelemmel kísérve a keletkezett rezgések spektrumát kiszűrhető a villamos gépek több alkatrészének hibája. Amennyiben észlelhető egy ilyen frekvenciájú rezgés erőteljesebb megjelenése, biztosan diagnosztizálható a meghibásodás.

A megfigyelési módszer érzékenysége igen nagy, emiatt széles körben elterjedt ez a diagnosztikai módszer. Többféle meghibásodás észlelhető segítségével (a tekercselések és a csapágyak hibái, stb.) [4].

4.3. A sokk-impulzusok hatásának vizsgálata

A sokk-impulzusok hatásának vizsgálatát (*SPM – Shock-Pulse Monitoring*) ugyancsak piezoelektromos érzékelők segítségével végezhetjük el. Ezek érzékelnik tudják a villamos gép álló- és forgóészei közötti fémes érintkezések, ütések által gerjesztett sokk-hullámokat. Ütődések keletkezhetnek, ha a csapágy hibájából a forgórész nincs kiegyensúlyozva, vagy ha a csapágy alkatrészei nincsenek megfelelően kenve. Ezek az ütések nagyon ártalmasak a villamos gépre, gyors és visszafordíthatatlan rongálódást okozhatnak.

4.4. A villamos gép zajainak megfigyelése

Mint az előbbiekben említettük, a villamos gépekben előfordulhatnak súrlódások, ütődések, amelyek sajátságos zajjal járnak. E zajok megfigyelésével úgyszintén diagnosztizálható többféle, többnyire a gépészeti elemek, meghibásodása.

A zajok érzékeny kondenzátor mikrofonok segítségével rögzíthetők.

4.5. A sebességingadozások megfigyelése

A sebességingadozások megfigyelése érdekében méri a gép sebességét egy teljes fordulat megtétele alatt. Az ez idő alatt megállapított sebességingadozásokból következtetni lehet a forgórész meghibásodásaira, kiegyensúlyozatlanságára, a légrés egyenetlenségeire, a rezgésekre, a csapágyak hibáira, stb.

4.6. Az áramok megfigyelése

A villamos gép által felvett áramok spektrumából szintén következtetni lehet számos meghibásodásra. A módszer a szakirodalomban az áram nyomának analíziséként ismert (*MCSA – Motor Current Signature Analysis*) [11, 12]. A módszer legfontosabb előnye, hogy nem igényli a gép kinyitását és az áramok könnyen mérhetők és rögzíthetők. További előnye, hogy többféle meghibásodás kiszűrhető e diagnosztizálási módszer alkalmazásával [13].

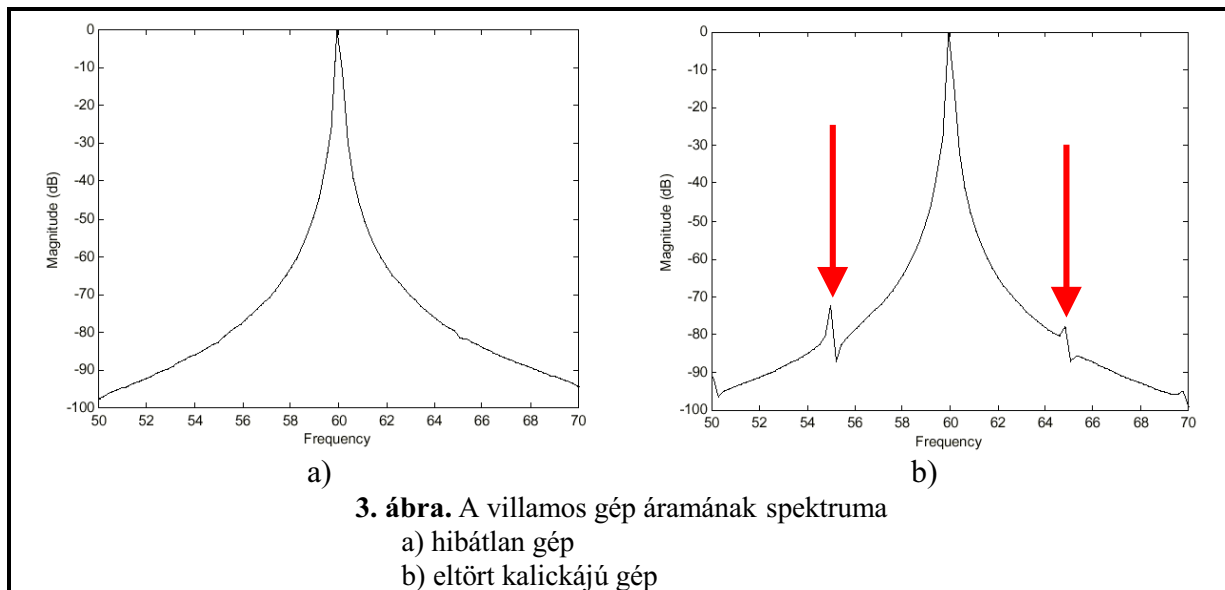
A módszer lényege, hogy rögzítik és vizsgálják a mért áramokat. Ez a vizsgálat az időtartományban is elvégezhető a mai korszerű számítástechnikai eszközökkel, azonban sokkal szemléletesebb, sokszor sokkal gyorsabb, eredményesebb, ha a vizsgálatot frekvencia tartományban végzik el. Ennek végrehajtásához a mért időjelet a frekvenciatartományba kell transzformálni. Erre a legelterjedtebben használt módszer a Fourier-transzformáció. A transzformáció eredményeképpen az időjel frekvenciatérbeli ábrázolását kapjuk. A frekvenciatartományban végzett jelanalízist spektrumanalízisnek is nevezik a szakirodalomban. Segítségével a mért periodikus jelet felbonthatjuk az alapharmonikus és a felharmonikusok összegére. A periodikus összetevők ismertében képet adhatunk a mért jel több tulajdonságáról, amiből megfelelő algoritmusok segítségével a villamos gépek több meghibásodása is kiszűrhető [14].

A különféle meghibásodások más-más hatással vannak az aszinkrongép áramának felharmonikusaira. Az eltört kalickarudak hatására az alábbi frekvenciájú oldalsávi összetevők (*sideband frequency*) hangsúlyozódnak ki a mért áram spektrumában:

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s) \quad (1)$$

ahol f_1 a hálózati frekvencia, s pedig a szlip. A kisebb frekvenciájú összetevő megjelenése közvetlenül az eltört rudakkal hozható kapcsolatba, míg a magasabb rezgésszámú az ebből eredő sebességingadozásokkal. Ennek elméleti magyarázatát lásd a mellékletben.

Példaképp a 3. ábrán bemutatjuk egy hibátlan, és egy eltört kalickarudú villamos gép árama spektrumanalízisének eredményét. Mint egyértelműen látszik, az eltört rúd hatására bizonyos, az (1) összefüggéssel kiszámítható frekvenciájú komponensek megnöttek.



A villamos gép légrése excentricitásának hatására megjelenő felharmonikusoknak a frekvenciáját az alábbi összefüggéssel számíthatjuk ki:

$$f_{ec} = f_1 \left[(N_r \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm 2k + 1 \right], \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

ahol n_d az excentricitás nagyságrendje ($n_d=0$ a sztatikus excentricitás esetében és $n_d=1,2,3,\dots$ a dinamikusban), N_r a forgórész rúdjaainak száma, p pedig a póluspárok száma.

Hasonló összefüggéseket állapítottak meg a szakemberek a villamos gépek egyéb meghibásodásainak esetében is. Például a mért áram bizonyos jól meghatározott felharmonikusainak a megjelenéséből következtetni lehet nemcsak a csapágyak elromlására, de pontosan behatárolható, hogy a csapágy melyik alkotóeleme hibásodott meg [5, 15, 16].

4.7. A kifejtett nyomaték megfigyelése

A kifejtett nyomaték formájának időbeni változásából szintén következtetni lehet a villamos gépekben megjelent aszimmetriákra, melyeket többek között a forgórészi kalicka vagy az állórészi tekercselések meghibásodásai okozhatnak.

4.8. Tesztelés tranziens túlfeszültséggel

A tranziens túlfeszültséggel való tesztelés módszere (*surge test*) jól bevált módszer a tekercselések állapotának vizsgálatára.

A módszer lényege, hogy egyszerre két azonos magasfeszültségű impulzust adnak a villamos gép két fázisára, míg a harmadikat leföldelik. A visszavert feszültség hullám összehasonlító vizsgálatából biztosan megállapítható a tekercsek szigetelésének állapota.

4.9. A szórási fluxus megfigyelése

A villamos gépek szórási fluxusának változásából szintén következtetni lehet a gép számos hibájára, mivel bármilyen meghibásodás a villamos gép fluxusának változását is okozza, tehát a szóródási fluxus is változik.

A szórási fluxust ún. mérőtekercsek (*search coil*) segítségével lehet észlelni.

4.10. A hőmérséklet megfigyelése

A villamos gépek tekercseinek túlmelegedésének időben megakadályozásával elkerülhetők a tekercsek visszafordíthatatlan károsodásai. Ugyancsak mérni lehet a csapágyak hőmérsékletét is, mivel bármilyen meghibásodás gyakorlatilag többlet hő kibocsátást eredményez.

A hőmérsékletek mérésére számtalan igen pontos mérőeszköz áll a szakemberek rendelkezésére.

4.11. Az áramkörök vizsgálata

Az áramkörök vizsgálata abból áll, hogy mérik a villamos gép fázisainak ellenállását, impedanciáját. Ezek alapján felállítható az áramok vektordiagramja, ami egyértelműen kimutatja, ha a villamos gépben valamilyen aszimmetria van. Ez a legtöbb esetben valamilyen meghibásodás következtében jelenik meg.

4.12. Vizuális megfigyelés

A villamos gépek vizuális megfigyelése az egyik legrégebben alkalmazott diagnosztikai módszer. Számos meghibásodásnak van külső jele a gépen, amit egy megfelelő tapasztalattal rendelkező szakember azonnal észrevesz.

Manapság a vizuális megfigyelést a távolból, videokamerák rögzítette felvételek segítségével is el lehet végezni.

5. A VILLAMOS GÉPEK ÁLLAPOT-FELÜGYELETE

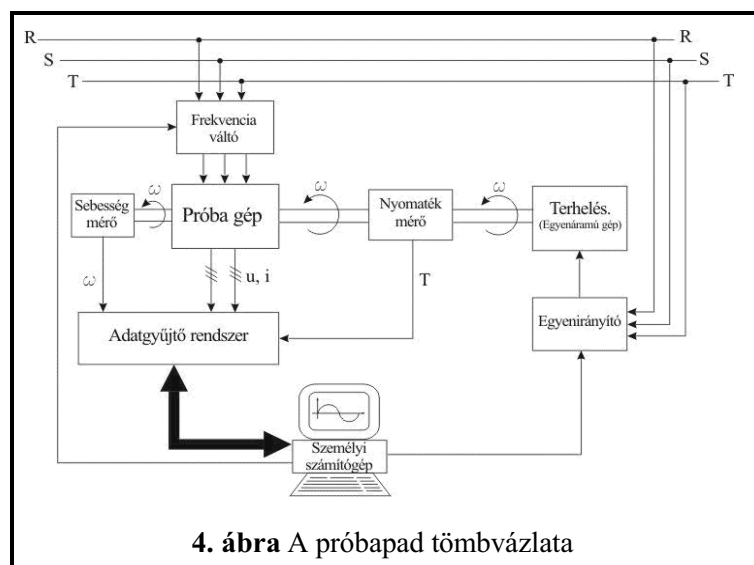
A villamos gépek állapot-felügyeletén ezek állandó vagy időszakos megfigyelését és az előforduló szabálytalanságok, hibalehetőségek időbeni észlelését értjük. Az ehhez szükséges teszteleket, méréseket számos úton lehet elvégezni: próbapadon, hordozható berendezéssel vagy on-line teszteléssel.

5.1. Tesztelés próbapadon

Amennyiben a tesztelést próbapadon végzik el, a villamos gépet le kell szerelni a helyükről, és el kell szállítani a tesztelésre alkalmas speciálisan felszerelt laborokba. A próbapadok általában modern adatgyűjtő és mérőműszerekkel vannak felszerelve. A laborokban részletes vizsgálatnak vetik alá a villamos gépeket, és ha jónak bizonyulnak, akkor visszaszerelhetők a helyükre.

Példaképp a tanszékünkön (Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamos Gépek Tanszék) felállított próbapad elvi rajzát mutatjuk be (l. 4. ábra).

A próbapad két elemi egysége a közös alapra rögzített tesztelendő villamos gép és a fékként (terhelésként) használt egyenáramú gép. A két gép tengelye közé a dinamikus nyomatékot mérő készüléket iktattuk be. A vizsgálandó gépre szerelik fel a különböző



4. ábra A próbapad tömbvázlata

átalakítókat (leggyakrabban Hall elemes áram- és feszültségváltókat, illetve sebesség-mérőket), amelyek jeleit egy PC alapú mérésadatgyűjtő rendszerbe vezettük. Ez megfelelő szoftvertámogatás mellett (főként a LabViewban kialakított virtuális műszerek segítségével) a legkülönbözőbb mérések rögzítésére és kiértékelésére alkalmas [17].

A próbapadon történő tesztelés hátránya, hogy feltétlenül szükséges a villamos gép leszerelése, ami termeléskiesést és pluszköltséget jelenthet. Viszont a próbapadon valamennyi vizsgálatot el lehet végezni és az itt alkalmazott mérőkészülékek is jóval pontosabbak, mint a hordozható berendezések.

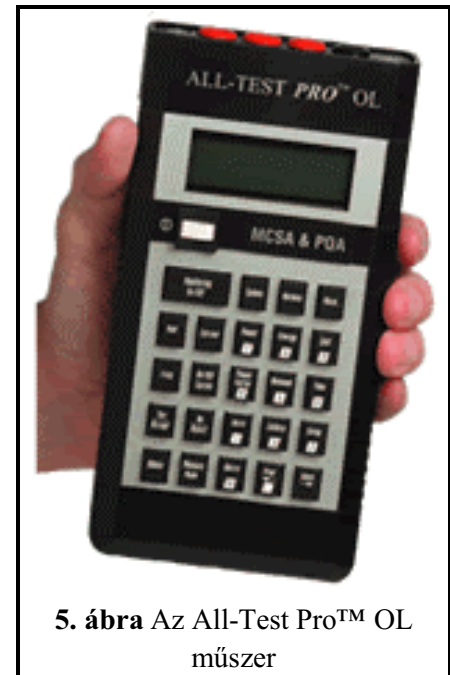
5.2. Gépállapot-felügyelet hordozható berendezésekkel

Számos cég forgalmaz olyan hordozható berendezést, amelyekkel el lehet végezni a villamos gépek vizsgálatát anélkül, hogy le kéne ezeket szerelni a helyükről. Egy ilyen berendezés összetettebb változata általában hordozható számítógépet, adatgyűjtő kártyát, áram- és feszültségváltókat, jelkondicionáló modulokat tartalmaz. A berendezés nagy teljesítőképessége ellenére kicsi és könnyű kell legyen. Fontos megjegyezni hátrányukat, hogy a mért adatok feldolgozásában nem tudnak a próbapadoknál alkalmazott nagyteljesítményű berendezésekkel vetekedni.

A kisméretű hordozható berendezések közül itt először az egyik legjobb ilyen jellegű berendezést szeretnénk bemutatni. Az alig több mint 40 dekás All-Test Pro™ OL (On-Line) műszer (l. az 5. ábrán) kicsi mérete ellenére igen "okos" műszer: csak rá kell helyezni a vizsgálandó gép tápkábeleire a hozzá csatlakoztatott lakatfogós árammérőket és betáplálni a műszerbe az ellenőrizendő villamos gép fő adatait (ezek leolvashatók a gép névtáblájáról), és máris teljes vizsgálóberendezés áll a rendelkezésünkre, amely ki tudja szűrni a vizsgált villamos gép valamennyi hibáját. Automatikusan meg tudja állapítani a gép sebességét, valamint állórésze hornyainak és a kalicka rúdjaianak számát is. Mindemellett a hálózat- mérő és analízátor funkciói is vannak, valamint a gép fogyasztásának költségeiről is tud információt szolgáltatni.

Egy másik elterjedten használt berendezés a MotorSTATUS™ (l. 6. ábrát). Ez más alapleveken működik, mint az előbbieken említett hordozható, SmartSensor jellegű műszer: csak rá kell rögzíteni a vizsgált gép oldalára és méri ennek hőmérsékletét, rezgéseit, illetve a szórt mágneses fluxusát. A rögzített adatokat beépített infravörös adója segítségével továbbítani tudja egy számítógépnek, amely a tesztelő program (a MotorSTATUS™ SmartSensor szoftvermodul) segítségével ki tudja mutatni a gép több mint 15 hibáját.

A vizsgálati berendezések piacán természetesen még sokféle berendezés megtalálható (pl. MOTORMONITOR [18], stb.)



5. ábra Az All-Test Pro™ OL műszer



6. ábra A MotorSTATUS™ műszer

5.3. Villamos gépek on-line állapot-felügyelte

Az on-line tesztelés során a villamos gépek állapot-felügyeletét gyakorlatilag valós időben (*real time*) végzik. Ez a modern tesztelési módszer teszi lehetővé a meghibásodások leghamarabbi (gyakorlatilag azonnali) észlelését. Ezáltal sok komolyabb karosodása a villamos gépeknek elkerülhető.

Az on-line tesztelés leginkább a frekvenciaváltóval táplált aszinkrongépek esetében alkalmazható, mert ezek a berendezések mindenképp rendelkeznek feszültség- és áramváltóval. Ezekre a berendezésekre telepítik, a vezérlő algoritmusok mellé a állapot-felügyelő programokat [19]. Ez a módszer a legbiztonságosabb a villamos gépek szempontjából, mert a gép állandó megfigyelés alatt áll, és a legkisebb rendellenesség észlelésekor azonnal kikapcsolható. E módszer hátránya, hogy ezúton nem lehetséges a villamos gép időigényes összetett vizsgálatát elvégezni, mivel a megfigyelés valósidejű.

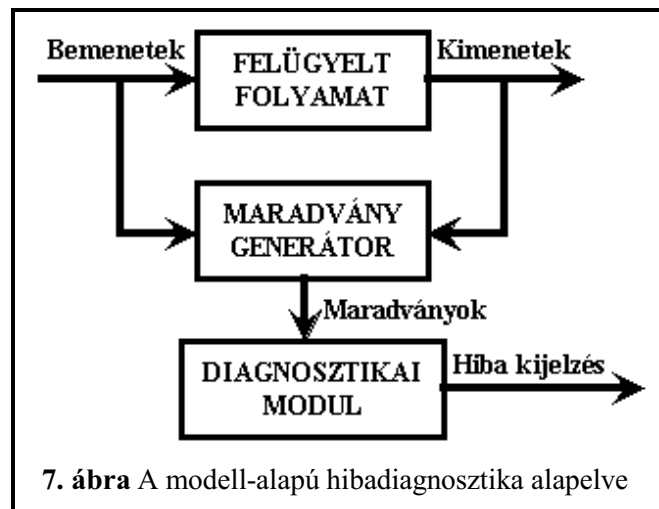
A legtöbb ilyen rendszer a manapság már széles körben elterjedt, és viszonylag olcsó digitális jelfeldolgozó processzorokra (DSP – *Digital Signal Processor*) épül. A berendezés figyeli a vizsgált gép fő jellemzőit (például az állórész áramait és a forgási sebességet), és a beépített algoritmus segítségével képes a vizsgált villamos gép hibás állapotát észlelni, illetve ennek súlyossága függvényében a gépet azonnal leállítani.

A valós idejű felügyeleti rendszerek többféle változata használatos.

A legegyszerűbb változatuk egyszerűen nyomon követi egy vagy több paraméter értékét, és ha ez meghalad egy előre megállapított (valamilyen meghibásodásnak megfelelő) küszöbértéket (*threshold*), akkor ezt kijelzi, illetve megállítja a gépet.

Egy külön kategóriába sorolhatók azok a valós idejű állapot-felügyeleti rendszerek, amelyek a villamos gép matematikai modelljén alapszanak (*model based methods*). Ez a módszer a mért mennyiségek és a matematikai modell kimeneti mennyiségeinek az összehasonlításán alapszik (l. a 7. ábrát).

A maradványgenerátor a hibátlan villamos gép modelljén alapszik. Ha az alkalmazott modell segítségével helyesen szimuláljuk a gép működését, akkor hibátlan működés esetében a kimeneti és a mért mennyiségeknek egyenlőnek kell lenniük. Az



7. ábra A modell-alapú hibadiagnosztika alapelve

összehasonlítás eredményeként fellépő különbségek, ún. maradványok (*residuals*) a rendszer hibás működésre utalnak. E maradványok megfelelő generálása és feldolgozása jelenti a modell alapú hibafelismerés és diagnosztika alapjait. Az észlelt különbség kiértékelését egy speciális összetett algoritmus segítségével végzik el, amelyik képes a hiba típusát is meghatározni [20].

E módszer esetében alkalmazott modellek nagyon változatosak [21]: lehetnek analitikusak, ismeretekre vagy adatokra támaszkodók.

Az analitikus modellek alapulhatnak modern megfigyelőkre (*observer*), amelyek fel tudják becslni közvetlen mérés nélkül egy rendszer bizonyos jellemzőit a mérhető bemeneti és kimeneti mennyiségekből. Más lehetőség felhasználni a szakirodalomban sokat tárgyalt különböző paraméterbecslési (*parameter estimation*) módszereket.

A számítástechnika több újdonságát is megpróbálják felhasználni az állapot-figyelő rendszerekben. Példának említhetnénk a szakértői rendszereket (*expert system*), amelyek

megpróbálják utánozni az emberre jellemző ismerethalmozást, illetve az erre alapozott döntőképességet. Ezeket a rendszereket tanítani kell, azaz nagymértékű ismeretanyaggal kell feltölteni. A döntéshozatal minőségének javítása érdekében össze szokták kapcsolni fuzzy logika (*fuzzy-logic*) alapú szabályozó rendszerekkel is.

Az eddig ismertetett modellezési lehetőségeknek számos hátránya van: nagyon nehéz kidolgozni bármely villamos gép olyan hű modelljét, amelyik figyelembe veszi az abban előforduló valamennyi jelenséget, illetve kölcsönhatásukat, de ugyanakkor nagyon kicsi számítási igényű legyen, hogy meg tudjon felelni a valós idejű működés igen szigorú feltételeinek. A szakértői rendszerek is nehezen alkalmazhatók ebben az esetben, mivel egy nagy tapasztalattal és megfelelő műszerezettséggel rendelkező szakembernek is nagy kihívás megkülönböztetni egy hibátlanul működő villamos gépet egy hibástól, nem is beszélve annak szükségességéről, hogy a meghibásodás jellegét, sőt annak mértékét is megállapítsa.

Mind emiatt egyre nagyobb teret hódítanak az ún. adatokra épülő (*data based*) modellek. Ezek közül a legígéretesebb a neurális hálókon (*neural network*) alapulók [22]. Ezek segítségével felbecsülhető bármilyen, akár nemlineáris függvény is anélkül, hogy szükség lenne matematikailag leírni a kimenet függését a bemeneti mennyiségek változásától. A neurális hálók az emberi agy működését utánozva példákban tanulnak. Egy "alapképzés" után, ami alatt megismertették vele a hibátlan villamos gép működését, illetve az előfordulható hibák hatásait, már használhatók. Hibaérzékelésük minősége tovább finomítható, mivel a működésük alatt előforduló eseményeket feldolgozzák és a levont tanulságokat felhasználják ismeretanyaguk bővítésére [23].

6. IRODALOMJEGYZÉK

1. Scheihing, P.E.: **US Department of Energy's Motor Challenge Program: a National Strategy for Energy Efficient Industrial Motor-Driven Systems**, Office of Industrial Technologies, Washington, 2001.
2. Pálfi Z.: **Villamos hajtások**, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
3. Szabó L.: **Új irányzatok a villamosgépek gyártása terén**, Magyar nyelvű szakelőadások (Terminológia) a 2001–2002-es tanévben, Villamosmérnöki Kar, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2002, pp. 42-54.
4. Thorsen, O.V. – Dalva, M.: **Methods of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors**. ETEP, vol. 8 (1998), no. 5, pp. 383-395.
5. Nandi, S. – Toliyat, H.A.: **Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines – A Review**, Proceedings of the IEEE-IEMDC'99 Conference, Seattle (USA), 1999, pp. 219-221.
6. Szabó L. – Bíró K.Á. – Dobai J.B.: **On the Rotor Bar Faults Detection in Induction Machines**, Proceedings of the International Scientific Conference MicroCAD '2003, Miskolc (Hungary), Section J (Electrotehnics and Electronics), pp. 81-86.
7. Singh, G.K. – Al Kazzaz, S.A.S.: **Induction Machine Drive Condition Monitoring and Diagnostic Research – A Survey**, Electric Power Systems Research, vol. 64 (2004), pp. 145-158.
8. Thorsen, O.V. – Dalva, M.: **A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals and Oil Refineries**, IEEE Transactions on Industry Application, vol. 31 (1995), no. 5, pp. 1186-1196.
9. Péczely Gy.: **A karbantartás korszerű irányzatai**, A. A. Stádium Kft., Szeged, URL: <http://www.aastadium.hu/Szakcikkek/karbir.html>.

10. Bíró K.Á. – Bartos F.J. – Szabó L.: **Energiatakarékos villamos gépek**, ENELKO '2001, az Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság Energetikai és Elektrotechnikai Konferenciája, Kolozsvár, 2001, pp. 20-32.
11. Gopalathnam, T. – Nandi, S. – Toliyat, H.A.: **Feasibility Study to Include Fault Diagnosis as a Housekeeping Function for Motor Drives Application Using the TMS320F240**, Texas Instruments DSPS Fest '99, Houston (TX, USA), 1999.
12. Rusek, J.: **Categorization of Induction Machines in Current Signature Analysis**, Electrical Engineering vol. 84 (2002), pp. 265–273.
13. Szabó L. – Bíró K.Á. – Dobai J.B.: **Az aszinkrongépek hatékony üzemelését segítő diagnosztizáló berendezésekről**, ENELKO '2002, az Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság Energetikai és Elektrotechnikai Konferenciája, Kolozsvár, 2002, pp. 127-134.
14. Szabó L. – Dobai J.B. – Bíró K.Á.: **Rotor Faults Detection in Squirrel-Cage Induction Motors by Current Signature Analysis**, Proceedings of the 2004 IEEE-TTTC - International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, A&QT-R 2004 (THETA 14), Cluj (Romania), Tome I., pp. 353-358, 2004, CD-ROM-on: 2569_Szabo.pdf.
15. Benbouzid, M.H.: **A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Fault Detection**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47 (2000), no. 5, pp. 984-993.
16. Razik, H. – Didier, G.: **Notes de cours le diagnostic de la machine asynchrone**, Groupe de Recherches en Électrotechnique et Électronique de Nancy, Université Henri Poincaré, Nancy, 2003.
17. Kasten, D.G.: **Integrating Computerized Data Acquisition and Analysis into an Undergraduate Electric Machines Laboratory**, Proceedings of the 30th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, Kansas City (MO, USA), 2000.
18. Dabis G.: **MOTORMONITOR rendszer - Új diagnosztikai technika Magyarországon**, A. A. Stádium Kft., Szeged, URL: <http://www.aastadium.hu/Szaccikkek/motmon.html>.
19. Ajtonyi I. – Terstyánszky G.: **Specification and Verification of Real-Time Requirements of Fault Diagnosis**, Proceedings of the UKACC International Conference on Control 1996, pp. 114-120.
20. Bikfalvi P. – Imecs Mária: **Modell alapú hibadiagnosztika – az állapot-megfigyelésen alapuló megközelítés**, ENELKO '2004, az Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság Energetikai és Elektrotechnikai Konferenciája, Kolozsvár, 2004, pp. 13-19.
21. Pöyhönen, S.: **Support Vector Machine Based Classification in Condition Monitoring of Induction Motors**, Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology (Espoo, Finnország), 2004.
22. Yang, D.-M. – Stronach, A.F. – Macconnell, P.: **The Application of Advanced Signal Processing Techniques to Induction Motor Bearing Condition Diagnosis**, Meccanica, vol. 38 (2003), pp. 297–308.
23. Sin, M.L. – Soong, W.L. – Ertugrul, N.: **Induction Machine On-Line Condition Monitoring and Fault Diagnosis – A Survey**, Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC '2003), Christchurch (New Zealand), 2003, on CD paper no. 32.

MELLÉKLET

A hibátlan aszinkronmotornál csak azt a természetszerű jelenséget lehet megfigyelni, hogy a mért áram amplitúdója növekszik a terheléssel. Azonban a hibás (megszakított forgórészű) aszinkrongép esetében jól látható az áramok amplitúdójának időbeni hullámzása, ami a terhelés növekedésével egyre hangsúlyosabbá válik. Nagy terhelésnél ez a jelenség szabad szemmel is jól látható az ampermérő oszcillációjából, illetve észlelhető a terhelés lüktetéséből, illetve az aszinkrongép zajából is.

Ennek megvan az elméleti magyarázata: a forgórész kalickarúdjaik megszakadása megbontja a gép áramainak szimmetriáját. Ebben az esetben alkalmazhatjuk a szimmetrikus összetevők módszerét.

Mivel a gép csillagpontja nincs lekötve, a forgórészi áramok aszimmetrikus rendszerét fel lehet bontani két szimmetrikus rendszerre, egy pozitív (közvetlen) és egy negatív (fordított sorrendűre). Az első egy olyan forgómezőt hoz létre, amelyik

$$n_p = \frac{sf_1}{p} = sn_1 \quad (\text{M1})$$

fordulattal forog a forgórészhez képest a rotor elmozdulásának irányába (ahol s a szlip, p a póluspárok száma, f_1 és n_1 a szinkron frekvencia, illetve fordulatszám).

Ennek a forgómezőnek a sebessége az állórészhez képest:

$$n_p + n = sn_1 + n_1(1 - s) = n_1 \quad (\text{M2})$$

A negatív sorrendű szimmetrikus áramrendszer szintén létrehoz egy forgómezőt, amelyik ugyancsak a (M1) sebességgel forog, azonban fordított irányba.

A negatív irányba forgó mező sebessége az állórészhez képest:

$$n_n - n = sn_1 - n_1(1 - s) = n_1(2s - 1) \quad (\text{M3})$$

A két egymásra tevődő mágneses mező lüktetésének sebessége arányos lesz a fennebb megadott két sebesség összegével:

$$n_l = n_p + n_n = 2n_1s \quad (\text{M4})$$

Az áramok amplitúdójának hullámzása, amint most már nyilvánvalóan látható, függ a szliptől, és közvetve a terhelés mértékétől.