

Modell alapú módszerek alkalmazása az aszinkrongépek diagnosztikájában

Model-based methods used in the diagnosis of induction machines

Utilizarea metodelor bazate pe model în diagnoza mașinilor de inducție

dr. Szabó Loránd¹, dr. Biró Károly Ágoston¹, dr. Fodor Dénes², Fodor Attila²

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar, Villamosgépek Tanszék
RO-400750 Cluj, P.O. Box 358, Románia
Tel.: +40-264-401-827, Fax.: +40-264-593-117
e-mail: Lorand.Szabo@mae.utcluj.ro

² Pannon Egyetem, Műszaki Informatikai Kar, Automatizálás Tanszék
H-8200 Veszprém, Egyetem u. 10., Magyarország
Tel.: +36-88-624-461, Fax.: +36-88-624-545
e-mail: fodor@almos.vein.hu

Abstract: *The early detection of the electrical machine's faults can bring significant savings for all the users. Hence the researches in this field are very intensive. In this paper an overview based on recent publications on the most widely used fault detection and diagnosis methods for the induction machine (especially of that having squirrel cage) is given..*

Rezumat: *Detectarea din timp a defectelor mașinilor electrice poate aduce economii însemnate pentru toți utilizatorii. Din această cauză cercetările din acest domeniu sunt foarte intensive. În acest articol pe baza celor mai recente publicații din acest domeniu trecem în revistă principalele metode de detectarea defectelor și de diagnoză aplicabile la mașinile electrice (în special la cele de inducție cu rotorul în colivie).*

Összefoglaló: *A villamos gépek meghibásodásainak időbeni észlelése hatalmas megtakarításokat tehet lehetővé az ipari felhasználók körében. Emiatt igen intenzívek ezen a téren a kutatások. Cikkünkben áttekintjük a legfrissebb irodalmi forrásokra támaszkodva a villamos gépek (különös tekintettel a kalickás aszinkrongépek) esetében alkalmazható hibaérzékelési és diagnosztikai módszereket.*

Kulcsszavak: aszinkrongép, hibaérzékelési módszerek, diagnosztikai módszerek.

1. BEVEZETÉS

A villamos gépeket (különösképpen a kalickás aszinkronmotorokat) nagyon széles körben használják a legegyszerűbb műhelyektől kedve a bonyolult, és nagy méretű biztonságkritikus üzemekig. Noha felépítésük robosztus és karbantartásigényük pedig igen alacsony, nagy hányaduk már működésük első 5–10 évében valamilyen formában meghibásodik. A bekövetkező hiba nemcsak magát a villamos gépet érinti, hanem a gépet magába foglaló egész termelési folyamatra is igen komoly kihatással van. A bekövetkező meghibásodás megváltoztatja a rendszer tulajdonságait, ezáltal a helyes működését [1].

A villamos gépek hibás működése esetén elengedhetetlen, hogy minél gyorsabban és pontosabban lokalizálni lehessen a hibát, majd ezen információ birtokában el lehessen dönteni, hogy ez milyen káros hatással van a gépre, illetve az egész rendszerre nézve. Ha lehetséges és elegendő információ áll a szakemberek rendelkezésére, akkor gyakran az időben felismert hibát még korrigálni lehet, még mielőtt a rendszer leállása komoly termelés kiesést, illetve egyéb károkat okozna [2].

Cikkünkben áttekintjük friss irodalmi forrásokra támaszkodva a villamos gépeknél (különös tekintettel a kalickás aszinkrongépeknél) alkalmazható hibaérzékelési és diagnosztikai módszereket.

2. HIBAÉRZÉKELÉSI ÉS DIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREK

Meghibásodások előfordulhatnak bármilyen működő rendszerben. A keletkezett hiba hatása, fennállása lehet időszakos (ekkor *zavarról* beszélünk), vagy lehet állandó (*változás*). Amennyiben az eltérés a végrehajtási funkciót is nemkívánatos módon befolyásolja, akkor *meghibásodásról* beszélünk.

Meghibásodásról beszélünk, ha a rendszer működésében olyan esemény következett be, amely a rendszer tényleges funkcionalitásának részleges vagy teljes módosulását vonta maga után, amelynek káros hatásai lehetnek magára a rendszerre, az emberekre és/vagy a környezetre.

Egy *hiba* definiálható úgy, mint egy változó legalább egy nem megengedett eltérése az elfogadható viselkedést leíró időfüggvénytől. A hibák lehetnek additívak vagy multiplikatívak [3].

A *hibadiagnosztika* feladata feltárni és lokalizálni a rendszerben megjelenő hibákat. A diagnosztikai feladat esetében adott a vizsgált fizikai rendszer, és az ennek megfigyeléséből eredő adatok (mérések és tesztek eredményei, a szimptómák leírása, egyéb vizsgálatok eredményei, stb.). A diagnosztikai rendszer feladata meghatározni, hogy a rendszer normális állapotú-e (*hibadetektálás*), és ha nem, mi a rendszer hibamódja, illetve milyen hiba következett be (*hibaizoláció*). Továbbá beavatkozási módot kell keresnie azzal a céllal, hogy a rendszer normális viselkedése mihamarabb visszaálljon az eredeti, hibátlan állapotába (helyreállítás, újrakonfigurálás, stb.) [3].

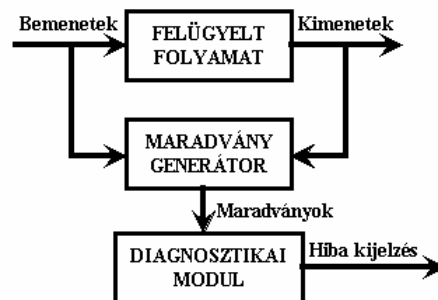
Sokféle, a legkülönbözőbb hibákat érzékelni és diagnosztizálni képes rendszer ismeretes a szakirodalomban. Osztályozásuk több szempont szerint történhet. A legelterjedtebben az alábbi három fő csoportba sorolják az alkalmazható főbb módszereket: modell nélküli módszerek, modell alapú módszerek, illetve tudás alapú módszerek.

A **modell nélküli módszerek** a legegyszerűbbek. Ezek nem használják a rendszer modelljét. Például, ha a rendszer megközelítőleg egy állandósult állapot környezetében működik, akkor legtöbbször a határérték átlépés ellenőrzés jól működik. Ezen módszerek nagy előnye az egyszerűség és a gyorsaság és a megbízhatóság. Nehezen alkalmazható, ha a rendszernek nincs, vagy túl gyakran változik a működési tartománya. Mivel a rendszer bemenete gyakran változhat, ezért a változók határértékének figyelésének beállításai szintén nehéz feladat elé állítják a szakembereket.

A **modell alapú módszerek** lényege a jel és folyamatanalízisen alapuló analitikus redundancia vizsgálata [4]. A mérhető jelek analízise leggyakrabban korrelációs függvényeket, frekvencia-tartománybeli, vagy statisztikai döntésméleti vizsgálati módszereket alkalmaznak [5]. A folyamatok analíziséhez a modell alapú módszerek esetében a folyamatok és meghibásodások matematikai modelljeivel együtt legtöbbször paraméter- és állapotbecslőket, és hibadetektáló szűrőket használnak [6].

Ha a hibaérzékelés és diagnosztika a valós üzemi adatok és egy dinamikus modell által generált predikált értékek összehasonlításán alapszik, akkor *predikció alapú diagnosztikáról* beszélünk [3].

A modell alapú módszereket alkalmazó rendszerek (lásd az 1. ábrán látható blokk-sémát) gyakorlatilag összehasonlítják a felügyelt rendszer mérhető kimeneti és bemeneti jelei által meghatározott viselkedését a rendszer hibamentes működését leíró matematikai modellje által meghatározott viselkedéssel.



1. ábra. Modell alapú módszereket alkalmazó rendszerek tömbvázlata

Az összehasonlítás eredményeként fellépő különbözőségek, az ún. maradványok (*residuals*) a hibás működésről adhatnak információt. A hiba jellegének pontos meghatározása, illetve a hibás alegységek beazonosítása csak e maradványok további feldolgozásával lehetséges [7]. A maradványok megfelelő generálása és feldolgozása jelenti tehát a modell-alapú hibafelismerés és diagnosztika alapjait.

A **tudás alapú módszerek** a megfigyelt szimptómákról és a folyamatrendszerrel rendelkezésre álló heurisztikus ismereteken alapszanak. A *szimptómák* a diagnosztika szempontjából információt hordozó eltérések halmaza, ezek a tudásalapú diagnosztikai módszerek bemenetei. Ha nem áll rendelkezésre információ a hibák és szimptómák ok-okozatiságára vonatkozóan, akkor a tapasztalatok alapján tanított statisztikai vagy geometriai *osztályozó módszereket* alkalmaznak a hibadiagnosztikára. Ha a hibák-szimptómák ok-okozatiságát le lehet írni "ha-akkor" típusú szabályokkal, akkor a *következtetési módszereket* alkalmazhatók.

A tudásalapú diagnosztikai technikák nem csak a felhasznált információk típusában különböznek, hanem a diagnosztikai keresési stratégiákban is. A felhasznált információk (a meghibásodások halmaza, a megfigyelések, szimptómák, és meghibásodások közötti relációt leíró kapcsolatok, stb.) típusa a legfontosabb megkülönböztető sajátosság a tudásalapú diagnosztikai rendszerekben.

A diagnosztikai keresési stratégiák alapján a diagnosztikai módszerek három alapvető típusú algoritmusra különböztethető meg az ismeretgyűjtés és értelmezés formája szerint: osztályozási módszerek, következtető módszerek és a kettő kombinációja.

Az *osztályozási módszerek* a mértani, statisztikai, neurális [8] és polinomiális osztályozásokat foglalják magukba, és általában referencia mintákat használnak fel a tanuláshoz [9]. A *következtető módszerek* nyelvi szabályokon alapszanak. Ezek a diagnosztikai rendszerek legtöbbször fuzzy szabályokat alkalmaznak [10], amellyel egy ún. közelítő következtetést érnek el. Ennek a megközelítésnek az a problémája, hogy nagyon időigényes a szabályok megalkotása és a későbbiekben a szabálybázis módosítása. A két módszert együttesen használják például az adaptív neuro-fuzzy rendszerekben [11] [3].

3. A KALICKÁS ASZINKRONGÉPEK HIBAÉRZÉKELÉSI ÉS DIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREI

A kalickás aszinkrongép alapjában véve egy összetett rendszer, amelyben elektromos, mágneses, mechanikus, termikus, akusztikus, stb. folyamatok játszódnak le. Emiatt valamennyi, az előző fejezetben ismertetett módszert alkalmazhatjuk a hibái felderítésére [12].

A legtöbb hibaérzékelési módszer a modell nélküli kategóriába tartozik. Ezek mindegyike gyakorlatilag az aszinkrongép valamelyik mérhető mennyiségének (áram, feszültség, hőmérséklet, rezgések, zajok, stb.) megfigyelésén alapszik [13], illetve a mért adatok feldolgozásán (például a fázisáramok nyomának analízise [14]).

A modell alapú módszerek alkalmazásának elengedhetetlen feltétele az aszinkrongép megfelelő matematikai modelljének felállítása. A legcélszerűbb az aszinkrongép állapotér (*state space*) modelljével dolgozni, mivel ekkor a legkönnyebb a modell egyenleteit bármilyen számítási platformba átültetni. Ennek általános formája a következő:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(t) \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t); \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (1)$$

ahol $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_c(t) = \begin{bmatrix} i_d & i_q & i_D & i_Q \end{bmatrix}^T$ az állapotvektor, $\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_d & u_q \end{bmatrix}^T$ és $\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} i_d & i_q \end{bmatrix}^T$ a bemeneti változók vektora, illetve a beavatkozó változók vektora.

Az aszinkrongép ismert modellje alapján könnyen megállapíthatjuk a struktúra mátrixokat:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} -R_s(L_r\sigma + M) & \omega M^2 & R_r M & \omega M(L_r\sigma + M) \\ -\omega M^2 & -R_s(L_r\sigma + M) & -\omega M(L_r\sigma + M) & R_r M \\ R_s M & -\omega M(L_s\sigma + M) & -R_r(L_s\sigma + M) & -\omega(\Delta + M^2) \\ \omega M(L_s\sigma + M) & R_s M & \omega(\Delta + M^2) & -R_r(L_s\sigma + M) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} (L_{r\sigma} + M) & 0 \\ 0 & (L_{r\sigma} + M) \\ -M & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Napjainkban, főleg a számítástechnika fejlődésének köszönhetően egyre szélesebb körben elterjedtek az aszinkrongépek esetében is a különböző tudás alapú módszert alkalmazó hibaérzékelési és diagnosztikai rendszerek. Ezek részletes ismertetésével egy elkövetkező cikkben fogunk foglalkozni [15].

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a publikáció a "Magyar–román kormányközi TÉT együttműködés 2006-2007" részét képező "Indukciós gépek modell alapú hibadiagnosztikája" című (szerződészsám: OMFB-00760/06, projektazonosító: RO-47/05) kutatási projekt keretében elvégzett kutatómunka eredményei alapján készült. A szerzők ez úton mondanak köszönetet a kutatási munka finanszírozásáért.

5. IRODALOM

- [1] 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.
- [2] Syggeridou, O.A., Ioannides, M.G., "Diagnostic Methods for AC Electric Motors," *Power and Energy Systems*, 2004, pp.33-47.
- [3] Németh Erzsébet, "Predikción alapuló diagnosztika mesterséges intelligencia módszerek felhasználásával," Doktori (Ph.D.) értekezés, Pannon Egyetem, Műszaki Informatikai Kar, Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Veszprém, 2006.
- [4] Isermann, R., "Model-based fault detection and diagnosis: status and applications," *Proceedings of the 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, St. Petersburg (Oroszország), 2004.
- [5] Awadallah, M.A., Morcos, M.M., "Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives-an overview," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2 (June 2003), pp. 245-251.
- [6] Said, M.S.N., Benbouzid, M.E.H., Benchaib, A., "Detection of broken bars in induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 15, no. 1 (March 2000), pp. 66-70.
- [7] Bikfalvi P., Imecs Mária, "A 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.
- [8] Kolla, S., Varatharasa, L., "Identifying three-phase induction motor faults using artificial neural networks," *ISA Transactions*, vol. 39 (2000), pp. 433-439.
- [9] Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., Vas, P., "Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5 (Oct. 2000), pp. 994-1003.
- [10] Lasurt, I., Stronach, A.F., Penman, J., "A fuzzy logic approach to the interpretation of higher order spectra applied to fault diagnosis in electrical machines," *Proceedings of the 19th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society*, 2000, pp. 158-162.
- [11] Tallam, R.M., Habetler, T.G., Harley, R.G., "Continual on-line training of neural networks with applications in electric machines fault diagnosis," *Proceedings of the IEEE 32nd Power Electronics Specialists Conference*, 2001, pp. 2224-2228.
- [12] Szabó L., Biró 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, pp. 127-134.
- [13] Szabó L., "A villamos gépek tipikus meghibásodásai és diagnosztizálásuk," *XV. Diagnosztika Konferencia és Szakkiállítás, Lajosmizse*, 2005, pp. 19-33.
- [14] 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.
- [15] Albas, E., Arkan, T., Kuzkaya, C., "In-Process Motor Testing Results Using Model Based Fault Detection Approach," *Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, Cincinnati (OH, USA), 2001, pp. 643-647.