

Háromfázisú aszinkron motorok mechanikai eredetű meghibásodásainak előrejelzése és prediktív módszereik fejlesztése

Bendiák István; Dr. Semperger Sándor

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, 1034 Budapest Bécsi út 96/B,
bendiak.istvan@uni-obuda.hu, semperger.sandor@kvk.uni-obuda.hu

Háromfázisú aszinkron motorok kulcsszerepet töltenek be az ipari alkalmazásokban, ahol az üzembiztos működés és a magas hatások alapvető követelmény. E gépek mechanikai állapota jelentős mértékben befolyásolja a teljes rendszer teljesítményét, energiafogyasztását és üzemi megbízhatóságát. A tanulmány egy olyan állapotfelügyeleti megközelítést mutat be, amely az áramjelalak-analízist alkalmazza a mechanikai eredetű degradációk például csapágykopás, tengelybeállítási hiba és forgórész-kiegyensúlyozatlanság detektálására és előrejelzésére. A javasolt módszer nem igényel kiegészítő érzékelőket, mivel a diagnosztikai információ közvetlenül az állórészáram jeléből nyerhető ki. A Fourier-tartománybeli spektrális elemzés, a komponensfrekvenciák követése és a mintázatfelismerés kombinációja lehetővé teszi a mechanikai hibák korai azonosítását. Emellett egy előrejelző algoritmus is kifejlesztésre kerül, amely a hibák fejlődését követi és támogatja az állapotalapú karbantartási döntéseket. Az eredmények igazolják, hogy az áramjelalak-analízis érzékeny és hatékony eszköze a mechanikai állapot felmérésének, csökkenti a nem tervezett leállásokat, és javítja az ipari hajtások energiahatékonyságát. A bemutatott megközelítés fenntartható utat kínál az intelligens karbantartási rendszerek és a villamosmotor-flották hosszú távú megbízhatóságának fejlesztése felé.

Kulcsszavak: háromfázisú aszinkron motor, áramjelalak-analízis, csapágykopás, fenntarthatóság, előrejelzés

1 Háromfázisú aszinkron motorok állapotfelügyelete

A villamos gépek állapotfigyelése fontos [1] szerepet tölt be a korszerű ipari rendszerekben, különösen a megbízhatóság, a hatékonyság és a fenntarthatóság szempontjából. Az ipari automatizálás terjedésével [2] és a prediktív karbantartás iránti igény növekedésével egyre fontosabbá válik a villamos forgógépek üzemi viselkedésének folyamatos megfigyelése. A háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor napjainkban ritkábban alkalmazott géptípus [3], elsősorban a korszerűbb

frekvenciaváltós hajtások térhódítása miatt. Ennek ellenére továbbra is előnyös bizonyos speciális alkalmazásokban, különösen nagy indítónyomatékot igénylő rendszerek esetén, például daruhajtásokban vagy nehézgép-mozgatásban [4].

A csúszógyűrűs aszinkron motor egyik fő előnye a szabályozható indítási jellemző, ugyanakkor sajátos szerkezete különösen a kalicka és rudazat jelenléte miatt fokozottan érzékeny a különféle meghibásodásokra. Ezek a hibák lehetnek villamos eredetűek (pl. szigetelési problémák), mechanikai természetűek (pl. forgórész-törés, excentricitás), vagy a kontaktusokból adódó problémák (ívképződés, érintkezési instabilitás). E hibák időbeni felismerése elengedhetetlen az üzembiztonság megőrzése és a nem tervezett leállások elkerülése érdekében [5].

A vizsgált állapotfigyelő [6] rendszer az állórész- és forgórész-áram spektrumának elemzésére épül, amely nem invazív módon nyújt információt a gép belső állapotáról. Az áramjelek [7] frekvenciaanalízise lehetővé teszi a tipikus hibajelenségek mint például túlmelegedett forgórész rúd, rotor-excentricitás, kiegyensúlyozatlanság azonosítását [8]. A spektrumanalízis során alkalmazott Fourier-transzformáció lehetővé teszi a komplex időbeli jelek frekvenciakomponenseinek vizsgálatát, ami alapja lehet egy automatizált hibadetektáló algoritmusnak.

A jelen kutatás célja egy olyan hatékony és ipari környezetben is alkalmazható állapotfigyelő rendszer (kopási térkép a negyedik fejezetben) bemutatása, amely képes valós idejű diagnosztikai információkat szolgáltatni. A rendszer kiemelt figyelmet fordít a jelminőségre, valamint a zaj- és zavarvédelmi szempontokra, mivel ezek közvetlenül [9] befolyásolják a diagnosztikai pontosságot. A biztonságkritikus ipari környezetben különösen fontos, hogy a mérési rendszer megbízható, ismételhető és megfelelő felbontású adatokat szolgáltatson [10].

A dolgozat részletesen bemutatja a [11] javasolt állapotfigyelő rendszer felépítését, a spektrumanalízis alkalmazott módszertanát, valamint a jelanalízis során fellépő tipikus kihívásokat és azok kezelésének lehetőségeit. Kiemelten tárgyaljuk a statikus és dinamikus [12] hibák spektrumban való megjelenését, valamint a hibafrekvenciák viselkedését különböző [13] üzemállapotokban. A rendszer célja nem csupán a hibák detektálása, hanem azok osztályozása, előrejelzés becslése és a lehetséges következmények mérlegelése [14].

1.1 Prediktív karbantartási módszerek áttekintése

A háromfázisú aszinkron motorok prediktív karbantartása olyan diagnosztikai és előrejelző módszerek összessége, amelyek célja a meghibásodások korai felismerése és a váratlan leállások megelőzése [15]. A legfontosabb alapja a motor állapotfüggő felügyelete, amely során különféle fizikai jellemzőket például áram-, feszültség, rezgés- és hőmérsékletjeleket rögzítenek és elemeznek. Az egyik

legelterjedtebb megközelítés az áramjel-analízis (Motor Current Signature Analysis, MCSA), amely a statoráram frekvenciatartománybeli vizsgálatával azonosítja a csapágy-, rotor- és légrés-hibákat. A rezgésdiagnosztika szintén kulcsfontosságú, mivel a mechanikai hibák (pl. kiegyensúlyozatlanság, tengelyferdeség, csapágykopás) jól kimutathatók a spektrális összetevők változásából [16].

A hőmérséklet-alapú megfigyelés a motor hűtésének és szigetelésének állapotát értékeli, ami különösen fontos a hosszú távú élettartam becsléséhez. Az adatok feldolgozása gyakran gépi tanulási vagy statisztikai modellek segítségével történik, amelyek képesek trendeket, anomáliákat és kopási folyamatokat felismerni. Az FFT (Fast Fourier-Transform), STFT (Short-Time Fourier-Transform) alkalmasak a frekvencia-idő tartománybeli elemzésekre, míg az amplitúdóeloszlás alapú modellek a hibák valószínűségi előrejelzését támogatják.

A prediktív karbantartás modern rendszerei integrált szenzorhálózatokat és IoT-alapú adatgyűjtést alkalmaznak, lehetővé téve a valós idejű felügyeletet és távdiagnosztikát. Az ilyen rendszerek célja nemcsak a hiba előrejelzése, hanem az optimális karbantartási időpont meghatározása is. Ennek eredményeként csökken a leállási idő, nő az energiahatékonyság, és meghosszabbodik a motor élettartama. Összességében a prediktív karbantartás a hagyományos időalapú szervizelés helyett intelligens, adatvezérelt döntéshozatalt biztosít az ipari üzemeltetés számára [17.]

1.1.1. Prediktív módszerek fejlődése az előrejelzési szakaszokban

Egy hatpólusú kalickás aszinkron motor prediktív karbantartásánál a legkorszerűbb, kutatási szintű módszerek elsősorban jelanalízisre és mesterséges intelligenciára épülnek. Az egyik leggyakrabban alkalmazott eljárás a Motor Current Signature Analysis, amely a statoráram spektrumában megjelenő jellegzetes hibafrekvenciák segítségével azonosítja a csapágyhibákat, rotor-rúd töréseket vagy légrés-aszimmetriákat. A módszer különösen alkalmas kalickás rotorok esetében, mivel a törött rudak és az excentrikus mágneses tér egyértelmű spektrális nyomot hagynak. Az MCSA-t gyakran kiegészíti a Park-vektor analízis, amely a háromfázisú áramokat kétdimenziós vektortérben ábrázolja; a 6 pólusú gép esetében ez a forgó Park-vektor alakjában bekövetkező torzulásként jelenik meg, ami a hibák korai felismerését segíti [18].

A rezgésdiagnosztika szintén kulcsszerepet játszik a mechanikai rendellenességek például a tengelyferdeség, kiegyensúlyozatlanság vagy csapágykopás detektálásában. Ehhez gyorsulásérzékelőket és frekvenciaelemző módszereket használtam, mint például a bevezetőben említett Fourier-transzformáció (FFT), a rövid idejű Fourier-transzformáció (STFT), amelyek a hibák időbeli alakulását is képesek nyomon követni. A Wigner–Ville és Hilbert–Huang transzformációk a nemlineáris, illetve változó üzemi állapotokban fellépő jelek pontos feldolgozását

biztosítják, különösen hasznosak a 6 pólusú motor változó terhelési körülményei mellett [19].

A legújabb kutatásokban egyre nagyobb szerepet kap a gépi tanulás és a mély neurális hálózatok (pl. CNN: Convolutional Neural Network, konvolúciós neurális hálózat, LSTM: Long Short-Term Memory, hosszú-rövid távú memóriahálózat) alkalmazása, amelyek a motor [20] állapotjelzéseiből például áram- vagy rezgés-spektrogramokból automatikusan felismerik és osztályozzák a hibákat. A valószínűségi modellek és Bayes-hálók a kopási folyamatok előrejelzésére szolgálnak, lehetővé téve a meghibásodások időbeli becslését [21].

A hatpólusú kalickás aszinkron motorokra vonatkozó modern diagnosztikai rendszerek adatfúziós megközelítést alkalmaznak, ahol az áram-, rezgés-, hőmérséklet- és zajadatokat együttesen elemzik. Ezek a felhőalapú platformok valós idejű felügyeletet és távdiagnosztikát [22] biztosítanak. Az így kialakított prediktív karbantartási rendszer képes a motor állapotának folyamatos értékelésére, a hibák korai felismerésére és azok időbeli előrejelzésére, ezáltal növelve az üzembiztonságot és meghosszabbítva a gép élettartamát [23].

2. Kopás, mint központi kérdés

A kopási, mint [24] központi kérdés a műszaki karbantartásban, célszerű megvizsgálni, mihez lehet jól hasonlítani, amely kiemeli a jelentőségét. Pl.: A kopásból eredő műszaki értelemben vett anyagi veszteség mekkora százalékot tehet a GDP-hez mérten? A pontos érték országonként és iparáganként eltérő, de a tribológiai (súrlódásból és kopásból eredő) veszteségek a legtöbb szakirodalmi becslés szerint az éves GDP 3–5%-át is elérhetik. Ez a tág intervallum azt mutatja, hogy egyes helyeken és alkalmazásokban a kopási problémák (ideértve a súrlódási veszteségeket, karbantartási költségeket, anyag- és energiafelhasználást, állásidőt stb.) jelentősen növelhetik a gazdasági terheket, másutt pedig a fejlettebb technológiák és jobb karbantartási gyakorlatok mérsékelhetik ezeket a költségeket.

A kopás és a súrlódás csökkentésére irányuló kutatások, fejlesztések és intézkedések nemcsak a gépek élettartamát növelik, hanem a nemzetgazdaság szintjén is megtakarításokat eredményezhetnek (például az energiahatékonyság javításával és a meghibásodásokból fakadó állásidők mérséklésével). Számos publikáció foglalkozik a kopással és analízisével [24].

Az ipari forgógépek (pl. motorok, turbinák, szivattyúk, kompresszorok, hajtóművek stb.) üzembiztonsága és élettartama szempontjából a csapágyságok kiemelt fontosságúak. Ezek biztosítják a forgórészek megfelelő alátámasztását, a gördülési (illetve csúszási) súrlódás minimalizálását, és így szerepük létfontosságú a gépek hatékonysága, valamint a karbantartási költségek szempontjából. Az alábbiakban összefoglalom, hogy miért kell különösen odafigyelni a

gördülőcsapágyak kopására, miért kulcsfontosságú a kopáselmélet, valamint mit érdemes tudni a gépészetben eddig alkalmazott kopási térképekről.

2.1. Kopásvizsgálati tényezők

Szennyeződések jelenléte esetén a hatpólusú kalickás aszinkron motor csapágyainak állapotértékelése és élettartam-előrejelzése különösen nagy pontosságot igényel. Az élettartam-előrejelzési modellek a gördülőelemek és futópályák fáradási folyamatait valószínűségi megközelítésben írják le, figyelembe véve a valós üzemeltetési tényezőket, mint a terhelés, hőmérséklet, fordulatszám, kenőanyag minősége és a külső szennyeződések jelenléte. A por, nedvesség vagy fémszemcsék bejutása a csapágyba gyorsítja a fáradási kopást, ezért a kopáselmélet mélyebb ismerete nélkülözhetetlen a pontos előrejelzéshez és a diagnosztikai adatok helyes értelmezéséhez [24].

A kopási jelenségek modellezése a csapágyban fellépő különböző mechanizmusok például fáradási repedésképződés, anyagleválás, mikropitting vagy csiszolóhatás alapján történik. Ezek a modellek lehetővé teszik a csapágygeometria, anyagválasztás, kenőanyag-típus és felületi megmunkálás optimalizálását, különösen olyan környezetben, ahol a szennyeződés jelenléte fokozott igénybevételt okoz.

A diagnosztika és megelőzés területén a kopásfolyamat előrehaladásának ismerete kulcsfontosságú. Ennek segítségével a rezgésanalízis, ultrahangos vizsgálat és olajelemzés módszerei pontosabban kalibrálhatók, így a csapágyak sérülései még a korai szakaszban detektálhatók. A szennyeződések által kiváltott kopási mintázatok felismerése lehetővé teszi, hogy előre meghatározható legyen az a kritikus üzemállapot, amelynél a csapágykárosodás első jelei várhatók. Ezáltal a prediktív karbantartási rendszer nemcsak a hibát azonosítja, hanem az élettartam csökkenésének ütemét is képes becsülni, támogatva az időben történő beavatkozást és a motor üzembiztonságának fenntartását [24].

2.1.1. Kopási térképek jellemzői

A kopási térképek (angolul wear maps vagy tribological maps) a tribológiában (kopás- és súrlódáselméletben) használatosak. Általában két- vagy többdimenziós diagramok, ahol a tengelyeken különböző üzemeltetési tényezők, paraméterek szerepelnek (pl. terhelés, relatív sebesség, kenési viszonyok), és a diagram különböző tartományaiban eltérő kopásmechanizmusok dominálnak [24].

A kopási térkép egy grafikus ábrázolás, amely megmutatja, hogy a csapágy mely üzemeltetési körülményei (például terhelés, sebesség, hőmérséklet, kenési viszonyok) mellett milyen kopásmechanizmus (pl. gördülő-kontakt fáradás, dörzskopás) dominál, illetve milyen kopási sebesség várható.

Gyakorlati haszna: A kopási térkép alapján optimalizálni lehet a csapágy anyagát, kenőanyagát, terhelési tartományát és fordulatszámát. Ezáltal csökkenthető a meghibásodások esélye és a karbantartási költség, miközben a gép rendelkezésre állása nő.

Cél: Megmutatni, hogy adott körülmények (terhelés, sebesség, hőmérséklet, kenés típusa, anyagtulajdonságok stb.) mellett milyen kopásfajta várható, illetve milyen mértékű kopási sebességre kell számítani.

Eredmény: Tervezéskor és üzemeltetéskor segít a megfelelő kenőanyag kiválasztásában, a terhelési határok felmérésében, valamint a szükséges anyagpárosítás meghatározásában.

3. Kutatásban alkalmazott matematikai háttér bemutatása

A Wigner-Ville eloszlás (WVD) egy idő-frekvencia elemzési módszer, amely a jel energiaeoszlását mutatja meg az idő és a frekvencia függvényében. A hagyományos idő-frekvencia technikáknál (mint az STFT, azaz a rövid idejű Fourier-transzformáció) általában kompromisszumot kell kötni az időbeli és a frekvenciafelbontás között. A Wigner-Ville eloszlás ezzel szemben nagy felbontást biztosít mindkét tartományban, és lineáris ablakozás helyett nemlineáris módszert alkalmaz, így a Heisenberg-féle határozatlansági elvet „optimálisabb” módon közelíti meg [4].

Tegyük fel, hogy $x(t)$ egy időtartománybeli jel (lehet valós vagy komplex). Ekkor a Wigner-Ville eloszlása a következőképpen definiálható:

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

Amelyben:

t : az idő

f : a frekvencia

τ : időkétszletelési tag

$x^*(t)$: az $x(t)$ komplex konjugáltja

j : képzetes egység ($j^2 = -1$)

Jellemzése:

$x(t+\tau/2) x^*(t-\tau/2)$ szorzattal a jel két τ -val eltolt mintája közti korrelációt vesszük, egy időbeli környezetben belül.

Az így kapott eredményt a $e^{-j2\pi f\tau}$ tényezővel súlyozzuk és integráljuk τ szerint.

A kapott $W_x(t, f)$ függvény a jel energiájának eloszlását mutatja az idő-frekvencia síkban.

3.1. Wigner-Ville eloszlás, nagy idő-frekvencia felbontás

A WVD az egyik legoptimálisabb az idő-frekvencia reprezentáció, mert ablak nélkül, kvázi-autokorrelációs módon lehet számol. Energiatartalom számítása a jelben [4.]

$$\text{Ha } x(t) \text{ jelnek } E = \int |x(t)|^2 dt \quad (2)$$

Energiája, akkor azt a WVD integrálva is visszakapjuk (Marginal-integrálok):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, f) dt df = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = E \quad (3)$$

A teljes energia tehát megtalálható a WVD-ben. Time-shift invariancia: Ha eltoljuk a jelet:

$$x(t - t_0) \quad (4)$$

Formában írható fel, akkor a Wigner-Ville eloszlás is ugyanúgy tolódik el.

$$W_x(t - t_0, f) \quad (5)$$

Ez hasonló az időablakos módszerek invarianciájához, de a WVD esetén a nemlineáris jelleg miatt egyéb tulajdonságok is előfordulnak.

Nemlineáris módszer: A Wigner-Ville eloszlás nemlineáris a jel függvényében: például, ha két diszkrét frekvenciakomponenst tartalmazó jelet vizsgálunk, „interferencia” (ún. cross-term) jelenik meg a két komponens között.

Kereszttagok (interferencia): A legfontosabb „hátrány”: több frekvenciakomponens együttes jelenlétében a WVD jelentős interferenciaterméseket mutat, amelyek a valóságban nem tényleges frekvenciaösszetevők. Ez megnehezítheti a spektrum értelmezését, különösen komplex jelek esetén.

Interferencia (cross-terms) jelenség: Ha például a jel két szinuszos komponens összege:

$$x(t) = e^{j2\pi f_1 t} + e^{j2\pi f_2 t} \quad (6)$$

akkor a Wigner-Ville eloszlás nemcsak a két frekvenciára külön-külön ad energiacsúcsok, hanem megjelenik egy interferencia típusú tag is, amely a két komponens közötti vegyes tagból származik. Ez az idő-frekvencia síkon zavaró, oszcilláló mintázat formájában jelenik meg.

3.1.1. Wigner-Ville eloszlás, megoldási módszerek

Szűrt Wigner-Ville eloszlás (Smoothed WVD): bizonyos simító, ablakozó függvények beiktatása, amely csökkenti a cross-termeket [4].

Gabor-Wigner eloszlás: a Wigner-Ville és a Gabor-transzformáció (STFT) hibrid változata, amely ablakozással javítja az értelmezhetőséget.

Más idő-frekvencia módszerek: Wavelet-transzformáció, Choi-Williams eloszlás, Cohen-osztályba tartozó többi idősűrűség-eloszlás stb.

A Wigner-Ville eloszlás a klasszikus idő-frekvencia analízis egyik legerőteljesebb, ugyanakkor nemlineáris módszere.

Kiemelkedően jó idő- és frekvenciafelbontást ad, megőrzi a jel teljes energiáját.

Adhat több információt a komponensek közötti interferenciákról.

Hátrányok: Keresztagok (cross-terms) megjelenése, ami sokszor nehezíti vagy zavarja az értelmezést,

Viszonylag nagy számítási igény (főleg nagy mintaszámnál). Mikor lehet célszerűen alkalmazni a Wigner-Ville eloszlást?

Ha nem-stacionárius jelek (gyorsan változó vagy tranziens jelenségek) esetén mind időben, mind frekvenciában nagy felbontást igénylünk, és ha tisztában vagyunk a keresztagok okozta nehézségekkel (vagy akár ki is szeretnénk használni azokat).

Alternatívaként, ha a keresztagok nagyon zavarók, érdemes lehet a szűrt Wigner-Ville vagy más, Cohen-osztályba tartozó idősűrűség-eloszlások, illetve a Wavelet-alapú módszerek alkalmazása.

3.2. Rövid idejű Fourier-transzformáció (Short-Time Fourier Transform, STFT)

A rövid idejű Fourier-transzformáció (STFT) az egyik legelterjedtebb módszer nem-stacionárius jelek elemzésére. Alapötlete, hogy a teljes jelet (amelynek spektruma időben változhat) rövid időablakokra (ún. szeletekre) bontjuk, és mindegyik szeletre külön elvégezzük a Fourier-transzformációt. Ezzel idő-

frekvencia reprezentációt kapunk, amelyet gyakorlati alkalmazásokban gyakran spektrogram formájában jelenítenek meg [4].

Legyen $x(t)$ egy folytonos (vagy diszkrét) időben adott jel. Az STFT-t úgy határozhatjuk meg, hogy egy csúszó ablakfüggvénnyel (például $w(\tau)$) megszorozzuk a jelet, majd annak a részletnek vesszük a Fourier-transzformációját. Folytonos esetben a képlet:

$$X_{\text{STFT}}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (7)$$

Amelyben: n a csúszó ablak középpontjának (diszkrét) időindexe, k a frekvenciapont (szintén diszkrét index, $0 \leq k < N$, N a DFT hossza (egy adott ablakban ennyi mintát veszünk figyelembe) ω az alkalmazott ablakozó függvény diszkrét változata [4].

3.2.1. Az ablakfüggvény szerepe

A STFT lényege, hogy a jel egy-egy rövid időtartománybeli szeletének (ablakának) Fourier-transzformációjával kapunk képet arról, hogy abban az időpillanatban mely frekvenciák dominánsak. Az ablak hossza (T) és formája nagyban befolyásolja a felbontást:

Hosszú ablak: Optimális frekvenciafelbontás, mert a Fourier-transzformáció több periódust lát egy-egy szeletben. Viszont rossz időfelbontás, mert a hosszú ablak „átlagolja” a jel több időpillanatát.

Rövid ablak: Optimális időfelbontás, mivel pontosabban mutatja, mikor következett be egy jelváltozás.

Korlátozott frekvenciafelbontás, hiszen egy nagyon rövid szelet nem tartalmaz sok periódusnyi információt.

Ez a Heisenberg-féle határozatlansági elv analógiája az idő-frekvencia elemzésben: nem lehet tetszőlegesen jó időbeli és frekvenciabeli felbontást egyszerre elérni

4. Háromfázisú aszinkron motoron elvégzett diagnosztikai mérések bemutatása

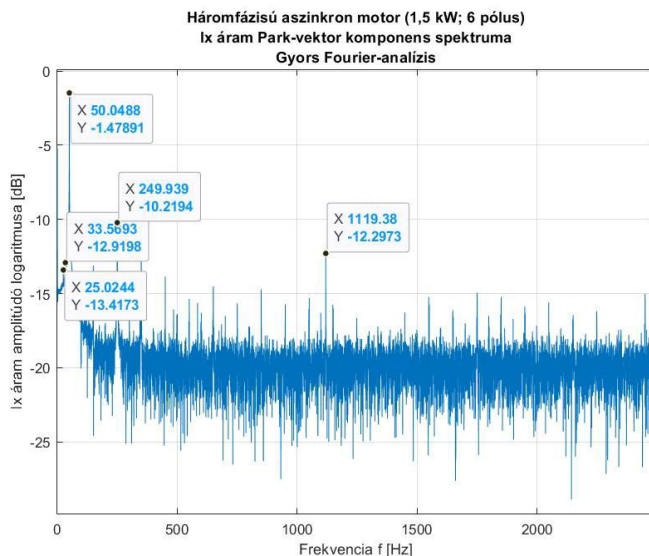
A háromfázisú aszinkron motorok állapotfelügyeletében a Park-vektor pályageometria és az áramjelek frekvenciaanalízise egymást kiegészítő, nagy pontosságú diagnosztikai módszerek. A Park-transzformáció segítségével a

háromfázisú áramok két ortogonális komponensre – I_x és I_y – bonthatók, amelyek vektoriális ábrázolása révén meghatározható a motor elektromágneses viselkedése. Ideális szimmetria esetén a pálya kör alakú, míg feszültség- vagy áramaszimmetria, illetve mechanikai hibák (pl. rotor- vagy csapágykárosodás) esetén a pálya ellipszissé vagy torzult alakzattá válik.

A Park-vektor pálya vizuálisan mutatja meg a motor elektromágneses állapotát, míg az ebből származó I_x komponens frekvenciaspektruma kvantitatív információt ad a hibák jellegéről. A gyors Fourier-analízis (FFT) segítségével kimutathatók a jellegzetes hibafrekvenciák, amelyek például a 50 Hz-es alapharmonikus mellett megjelenő mellékfrekvenciákban vagy oldalsávokban figyelhetők meg. Ezek a csúcsok a rotor-rúd törésekre, csapágykopásra vagy mágneses excentricitásra utalhatnak.

4.1. Villamosjel-analízis alkalmazása Park-vektor segítségével

A két módszer együttes alkalmazása a Park-vektor geometriai torzulásainak és az I_x spektrum komponenseinek egyidejű elemzése – lehetővé teszi a motor hibáinak korai és megbízható felismerését. A bemutatott ábrák egy 1,5 kW teljesítményű, 6 pólusú kalickás aszinkron motor valós mérési eredményeit szemléltetik, ahol a spektrumban megjelenő csúcsok és a pálya enyhe torzulása a rendszer természetes aszimmetriáira utalnak. Ez az összetett vizsgálati módszer a prediktív karbantartás és az üzembiztonság növelésének egyik legfontosabb alapját képezi.



1. ábra. állórész áram Park-vektor komponens spektruma, első részlet.

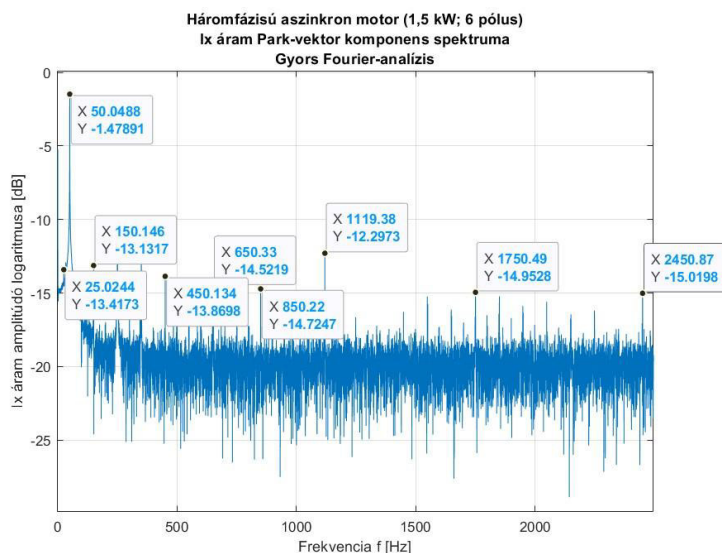
A képen (1. ábra) egy háromfázisú aszinkron motor (1,5 kW; 6 pólus) – I_x áram Park-vektor komponensének spektruma látható, amelyet gyors Fourier-analízissel (FFT) állítottam elő. Az ábrán (1-2. ábrák) az x-tengely a frekvenciát (f [Hz]) mutatja, az y-tengely pedig az I_x áram logaritmikusan ábrázolt amplitúdó [dB].

1. táblázat. 1. ábrához tartozó spektrum értékei, frekvencia és logaritmikusan ábrázolt amplitúdó

Spektrum értékei	
f [Hz]	Amplitúdó [dB]
25,024	-13,4173
33,859	-12,9198
50,0488	-1,47891
249,939	-10,2194
1119,38	-12,2973

A spektrum alapján (2. ábra) a legnagyobb amplitúdójú komponens a 50 Hz-es hálózati alapharmonikushoz tartozik, míg a többi kisebb csúcs magasabb rendű harmonikusokat vagy mellékfrekvenciákat jelez (1. táblázat).

A jelleggörbe általános formája zajjal terhelt frekvenciaspektrum, amelyből jól kivehetők az alapharmonikusok és annak jellemző harmonikusai, ami a Park-vektor komponens rezgés- és áramanalíziséhez szolgál diagnosztikai alapként.



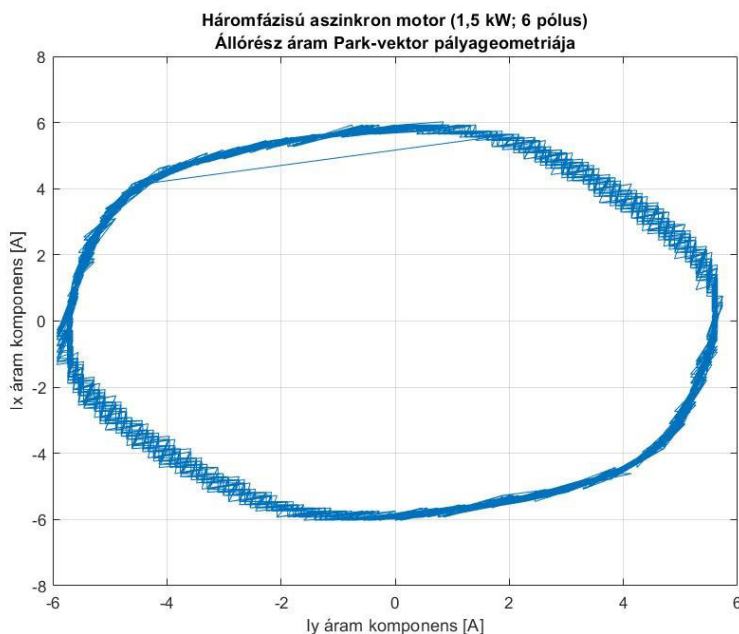
2. ábra. Állórész áram Park-vektor komponens spektruma, második részlet.

2. táblázat. 2. ábrához tartozó spektrum értékei, frekvencia és logaritmikusan ábrázolt amplitúdó

Spektrum értékei	
Spektrum frekvencia f [Hz]	Amplitúdó [dB]
25,024	-13,4173
50,0488	-1,47891
150,146	-13,1317
450,314	-13,8698
650,33	-13,8916
850,22	-14,7247
1119,38	-12,2973
1750,49	-14,9528
2450,87	-15,0198

A legnagyobb amplitúdó a 50 Hz-es alaphfrekvenciánál jelentkezik (-1,48 dB), ami a hálózati frekvencia hatását mutatja. A további csúcsok magasabb rendű harmonikusokat és mellékfrekvenciákat képviselnek, amelyek a motor elektromágneses és mechanikai jelenségeiből (pl. rotor- és csapágyhatásokból) származhatnak (2. táblázat).

Állórész áram alakja jól szemlélteti a Park-vektor komponens (3. ábra) amplitúdótartománybeli eloszlását, amely diagnosztikai szempontból alkalmas a forgógép állapotának, szimmetria- és kiegyensúlyozatlansági hibák korai felismerésére. A spektrumban megjelenő (1-2. ábrák) mellékfrekvenciák és amplitúdó-eloszlások pontos információt adnak a gép hibafrekvenciáinak jelenlétéről, valamint a rotor és a csapágyak mechanikai viselkedéséről. Az ilyen jellegű frekvenciaanalízis lehetővé teszi a rezgés- és áramalapú hibadetektálás integrálását, ezáltal a motor prediktív karbantartásának megbízható alapját képezi. A módszer külön előnye, hogy nem igényel kiegészítő szenzorokat, mivel a diagnosztikai információk közvetlenül a statoráram jeléből kinyerhetők, így valós idejű, költséghatékony állapotfelügyeletet biztosít.



3. ábra. Háromfázisú aszinkron motor állórész áram Park-vektora.

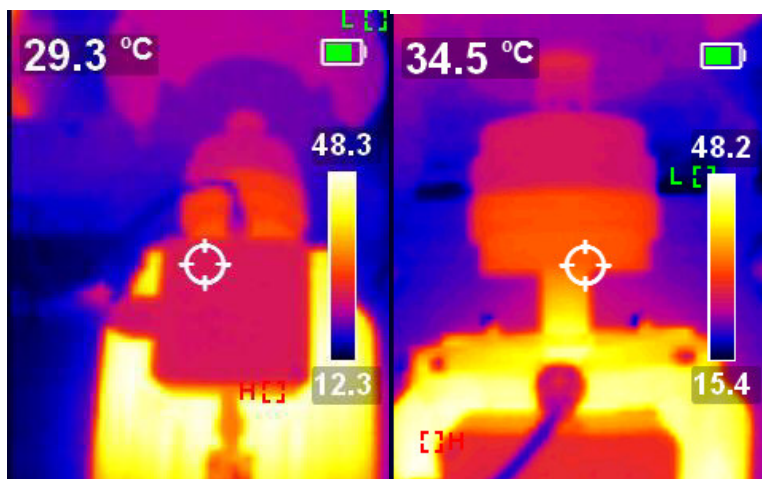
A képen (3. ábra) egy háromfázisú aszinkron motor (1,5 kW; 6 pólus) állórészáram Park-vektor pályageometriája látható. x-tengely az I_y áramkomponenst [A]. y-tengely pedig az I_x áramkomponenst [A] ábrázolja. A görbe egy zárt, ellipszis-szerű pályát mutat, amely a háromfázisú áramok Park-transzformációja után kapott vektoriális ábrázolás. Ideális, teljesen szimmetrikus motor esetén a pálya kör alakú lenne, mivel az áramkomponensek azonos amplitúdójú és 120° -os fáziseltolású jeleket képviselnek. A képen látható enyhén torzult, ovális forma arra utal, hogy a motorban kisebb aszimmetria van jelen ez lehet például fáziseltérés, rotor- vagy stator-egyensúlytalanság, esetleg hálózati feszültség-aszimmetria következménye.

A Park-vektor pályaelemzés az egyik alapvető diagnosztikai eszköz a háromfázisú gépek állapotfelügyeletében, mivel az áramvektor geometriája jól tükrözi a mágneses és elektromos egyensúlyi viszonyokat. A térvektor elmélet gépszabályozásban is előnyösen használható.

4.2. Aszinkron motor termikus állapotértékelése

A hőkamerás vizsgálat a háromfázisú aszinkron motorok nem invazív diagnosztikai módszerei közé tartozik, amely a gép felületi hőeloszlásának elemzésével ad információt az üzemi állapotról, a hűtés hatékonyságáról és az esetleges rendellenességekről. A termográfias képek segítségével azonosíthatók a

melegedési gócpontok, amelyek csapágykopásra, túlzott súrlódásra, elektromágneses veszteségre vagy szellőzési hibákra utalhatnak. A vizsgálatok során a motor hőeloszlását valós üzemi körülmények között, több időpillanatban rögzítették, így a felmelegedési folyamat és a termikus stabilizáció is nyomon követhető.



4. ábra. Terhelési mérés alatti tengelykapcsoló melegedési viszonyok, első részlet.

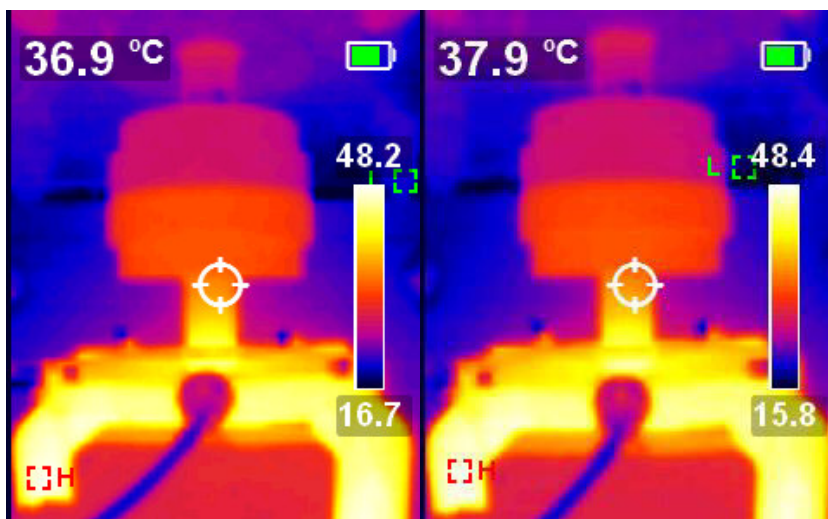
A képen (4. ábra) egy termográfiai felvétel látható, amely egy forgógép egy 1,5 kW-os aszinkron motor termikus állapotát mutatja.

A hőkép szintartománya 12,3 °C és 48,3 °C között van, ahol a hidegebb területek kék–lila, a melegebb részek pedig sárga–piros színekben jelennek meg. A középen elhelyezett célkereszt a mérési pontot jelzi, amelyen a hőmérséklet 29,3 °C. Az emissziós tényező (ϵ) 0,95-re van beállítva, ami fémes, festett vagy oxidált felületekre megfelelő érték.

A legmelegebb zóna a motor alsó részén, a tengelykimenet és csapágyház környékén figyelhető meg (sárga-piros terület), ami a működés közbeni mechanikai és elektromos veszteségek, illetve súrlódási hőtermelés következménye lehet. A felső rész hőmérséklete fokozatosan csökken, ami megfelel a természetes hőáramlással hűtött motorokra jellemző hőeloszlásnak.

A képen egy hőkamerás felvétel látható egy forgógépről (valószínűleg aszinkron motorról). A hőtartomány 15,4–48,2 °C, a célkereszt pontján mért hőmérséklet 34,5 °C. A legmelegebb terület a tengely és csapágyház környékén figyelhető meg, ami súrlódási vagy elektromágneses veszteségre utalhat.

Az emissziós tényező 0,95, a kép a motor hőeloszlását és üzemi állapotát mutatja termográfiai diagnosztikai célból.



5. ábra. Terhelési mérés alatti tengelykapcsoló melegedési viszonyok, második részlet.

A képen (5. ábra) egy hőkamerás felvétel látható egy aszinkron motorról. A mért hőmérséklet a célkereszt pontján 36,9 °C, a teljes tartomány 16,7–48,2 °C. A legmelegebb zóna továbbra is a tengely–csapágyház környékén figyelhető meg, ami a súrlódásból és elektromágneses veszteségekből eredő hőtermelést jelzi. A kép jól mutatja a motor termikus állapotának stabilizálódását a működés során.

A képen egy aszinkron motor hőkamerás felvétele látható. A célkereszt pontján a hőmérséklet 37,9 °C, a hőtartomány 15,8–48,4 °C. A legmagasabb hőmérséklet továbbra is a tengely–csapágyház környékén figyelhető meg, ami a mechanikai veszteségek és a csapágymelegedés következménye. A kép (5. ábra) a motor üzemi hőstabilitásának ellenőrzésére szolgál a termográfiás diagnosztika keretében.

A hőkamerás vizsgálatok eredményei alapján a vizsgált háromfázisú, 1,5 kW-os, 6 pólusú kalickás aszinkron motor üzemi hőviselkedése kiegyensúlyozottnak és stabilnak tekinthető. A mért hőmérsékletek (külső érték) egyik esetben sem haladták meg a 48 °C-os maximális értéket, ami a motor megfelelő hűtését és normál üzemi terhelését jelzi. A hőterképek alapján a legmagasabb hőmérsékletű zóna minden esetben a tengely–csapágyház környékén koncentrálódik, ami természetes jelenség a forgó alkatrészek súrlódási veszteségei miatt. Ezen a területen jelentkezik a legnagyobb mechanikai igénybevétel, így a helyi melegedés értékelése különösen fontos a csapágyállapot és a kenési rendszer vizsgálata szempontjából.

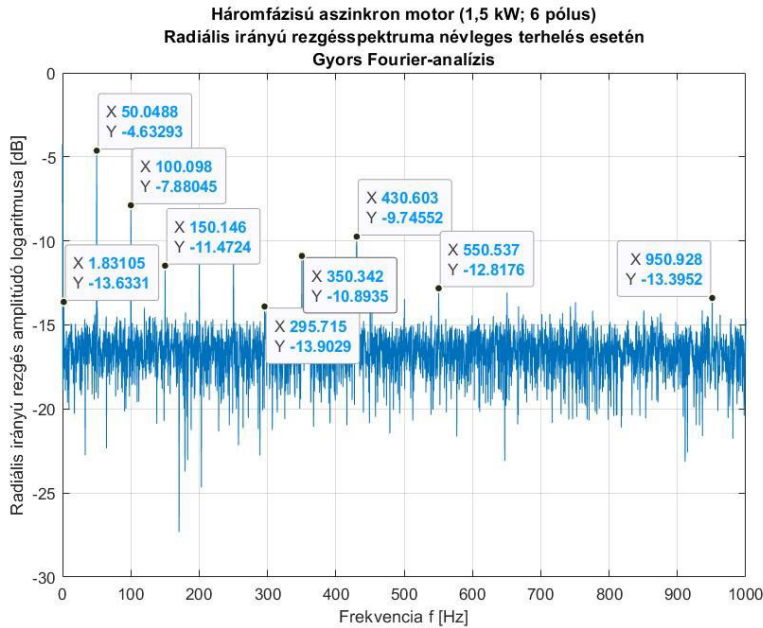
A sorozatban készült termográfiás képek jól mutatják a motor felmelegedési és hőstabilizálódási folyamatát: a hőmérséklet fokozatosan növekedett, majd állandósult, ami a rendszer termikus egyensúlyának beállását jelzi. Részben figyelhető meg (kezdeti állapot) olyan lokális túlmelegedés vagy aszimmetrikus

hőeloszlás, amely részleges tekercs- vagy csapágyhibára utalna. Az emissziós tényező ($\epsilon = 0,95$) megfelelően beállított, így a mért értékek megbízhatóan tükrözik a felületi hőmérsékletet.

Összességében a vizsgálat azt igazolja, hogy a motor termikus működése üzemszerű, és a hőkamerás diagnosztika hatékonyan alkalmazható a prediktív karbantartási rendszer részeként. A módszer lehetőséget biztosít a hűtési hatások, csapágyállapot és elektromágneses veszteségek folyamatos megfigyelésére, ezáltal hozzájárul a megbízhatóság növeléséhez és az élettartam meghosszabbításához.

4.3. Radiális és tangenciális irányú rezgésvizsgálatok

A következő fejezetben a rezgésvizsgálatok kerülnek bemutatásra. A spektrumon (6. ábra) egy háromfázisú aszinkron motor (1,5 kW; 6 pólus) radiális irányú rezgésspektruma látható, névleges terhelés mellett végzett gyors Fourier-analízis (FFT) eredményeként. Az x-tengely a frekvenciát (f [Hz]), míg a y-tengely a radiális irányú rezgés logaritmikus skálán ábrázolt amplitúdó [dB] mutatja.



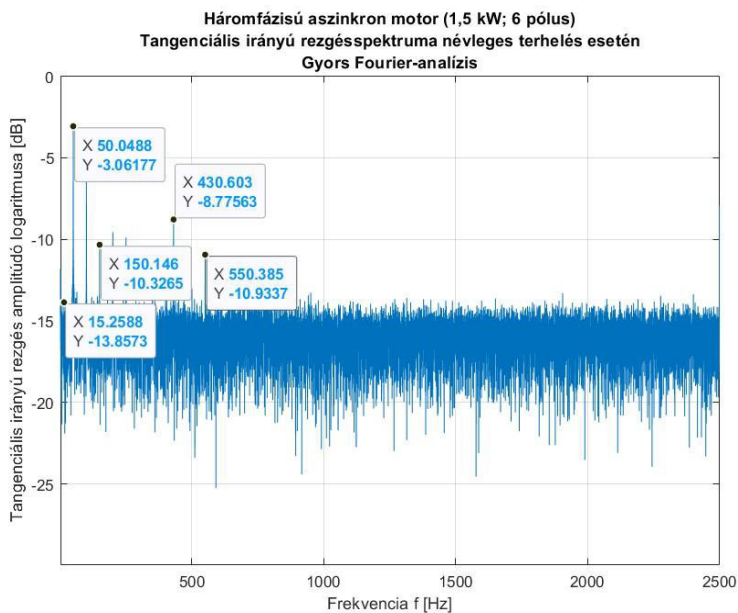
6. ábra. Radiális irányú rezgésspektrum névleges terhelés esetén.

3. táblázat. 6. ábrához tartozó spektrum értékek.

Spektrum értékei	
Spektrum frekvencia f [Hz]	Amplitúdó [dB]

50,0488	-4,63293
100,099	-7,88045
150,146	-11,4724
183,105	-13,6331
295,715	-13,9029
350,342	-10,8945
430,603	-9,74552
550,537	-12,8176
950,928	-13,3952

A legnagyobb amplitúdójú komponens 50 Hz-nél jelenik meg, ami a forgórész frekvenciájához és a hálózati tápfrekvenciához köthető. A magasabb rendű csúcsok (100–550 Hz között) a rendszer mechanikai sajátfrekvenciáihoz, illetve rezonancia-jelenségekhez kapcsolhatók. A spektrum alakja kiegyensúlyozott, jelentős hibakomponenst nem mutat, ami a motor stabil mechanikai állapotát jelzi névleges üzemben.



7. ábra Tangenciális irányú rezgésspektrum névleges terhelés esetén.

A spektrumban (7. ábra) egy háromfázisú aszinkron motor (1,5 kW; 6 pólus) tangenciális irányú rezgésspektruma látható, amelyet névleges terhelés mellett rögzítettek gyors Fourier-analízis (FFT) alkalmazásával. Az x-tengely a frekvenciát (f [Hz]), a y-tengely pedig a tangenciális irányú rezgés logaritmikus skálán ábrázolt amplitúdó [dB] mutatja.

4. táblázat. 7. ábrához tartozó spektrum értékek.

Spektrum értékei	
Spektrum frekvencia f [Hz]	Amplitúdó [dB]
15,2588	-13,8573
50,0488	-3,06177
150,146	-10,3265
430,603	-8,77563
550,385	-10,9337

A legnagyobb amplitúdójú komponens 50 Hz-nél található (4. táblázat), amely a hálózati tápfrekvenciával és a forgórész fordulatszámával áll kapcsolatban. A kisebb csúcsok a harmonikusokhoz és a tangenciális rezgésirány frekvenciáihoz köthetők. A spektrum lefutása és alacsony amplitúdósíntje arra utal, hogy a motor mechanikai egyensúlya megfelelő, és nincs jelentős vibrációs rendellenesség névleges üzemállapotban.

A radiális és tangenciális irányú rezgésspektrumok összehasonlítása alapján a vizsgált háromfázisú, 1,5 kW-os, 6 pólusú aszinkron motor mechanikai állapota megfelelő, üzemszerűnek tekinthető. Mindkét irányban a legnagyobb amplitúdójú komponens a 50 Hz-es hálózati frekvencián jelentkezik, amely a motor aszinkron forgási frekvenciájával áll összefüggésben. A spektrumokban megfigyelhető kisebb csúcsok (100–550 Hz tartományban) a forgórész harmonikusaihoz, csapágyrezonanciákhoz vagy a szerkezeti sajátfrekvenciákhoz kapcsolhatók, de amplitúdójuk alacsony.

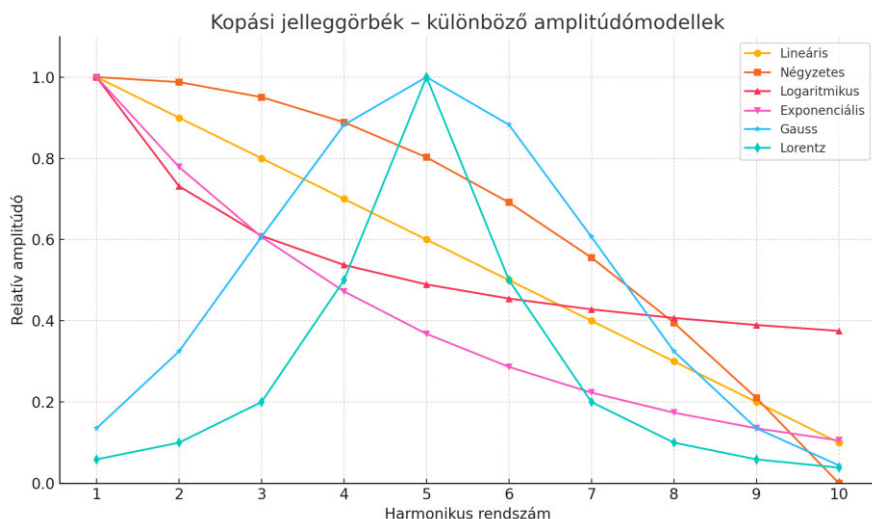
A radiális irányban a rezgésszintek kissé magasabbak, mivel ebben az irányban jelentkezik leginkább a forgórész dinamikus kiegyensúlyozatlansága és a csapágyterhelés. A tangenciális irányú spektrum ezzel szemben egyenletesebb lefutású.

Összességében a rezgésanalízis eredményei alapján a motor kezdeti tengelybeállítási és kiegyensúlyozási hibát mutat, amit a hőkamerás képek is alátámasztanak. A spektrumok harmonikus eloszlása és amplitúdósíntje megfelel a névleges terhelésű, stabil üzemi állapot jellemzőinek, így a gép rezgésdiagnosztikai szempontból még nem mutat túlzott tönkremenetelt.

4.4. Valószínűségi vizsgálatok és kopási térkép elemzése

A következő fejezetben a kopási folyamatot valószínűségi oldal vizsgálom meg. A diagram a kopási jelleggörbéket mutatja, amelyek különböző amplitúdócsökkenési modellek szerint írják le a harmonikus komponensek változását. Az x-tengely a harmonikus rendszámot, az y-tengely a relatív amplitúdót ábrázolja.

A hat különböző modell a következő: Narancssárga (Lineáris): az amplitúdó egyenletesen csökken minden harmonikusnál. Lila (Négyzetes): a csökkenés gyorsabb, a magasabb harmonikusok hamarabb lecsengenek. Piros (Logaritmus): kezdetben gyors, majd fokozatosan ellaposodó csökkenés. Rózsaszín (Exponenciális): meredek, nemlineáris esés, amely jól jellemzi az előrehaladott kopást. Zöld (Gauss): a középső harmonikusoknál mutat csúcspontot, szimmetrikus eloszlással. Világoskék (Lorentz): a csúcspont egy szűk frekvenciasávban jelentkezik, majd hirtelen lecsökken.

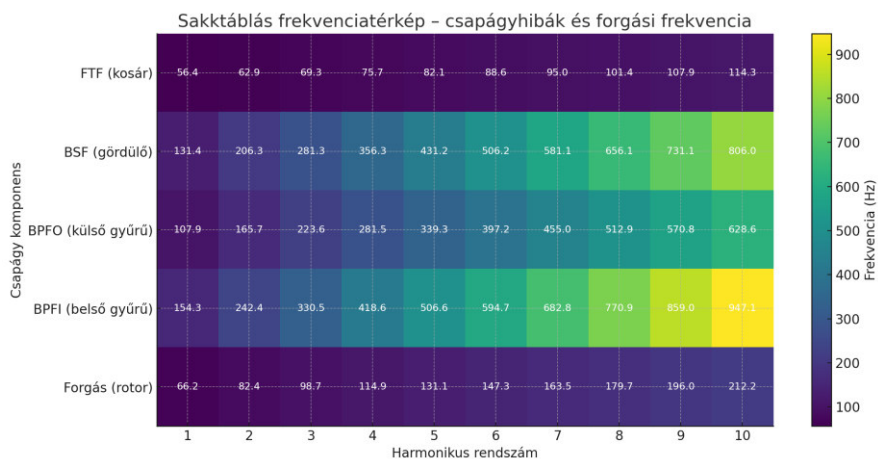


8. ábra. Kopási jelleggörbék különböző amplitúdó modellek alkalmazásával.

A görbék (8. ábra) különböző kopási és hiba-lefutási jelenségeket modelleznek. A Gauss és Lorentz típusú eloszlások a lokális kopási zónákat vagy rezonanciás viselkedést, míg a lineáris és exponenciális görbék az egyenletes vagy gyorsuló romlást írják le. A modell összehasonlítás célja, hogy meghatározható legyen, mely függvény illeszkedik legjobban az adott gépdiagnosztikai amplitúdótrendhez, így támogatva a kopás előrejelzését és a hibafolyamat modellezését.

A képen (9. ábra) egy sakktáblás frekvenciatérkép látható, amely a csapágyhibák és a forgási frekvencia közötti kapcsolatot mutatja. Az x-tengely a harmonikus rendszámot (1–10), az y-tengely a csapágy komponenseket jelöli.

FTF (kosárfrekvencia), BSF (gördülőelem-frekvencia), BPFO (külső gyűrű), BPFI (belső gyűrű), valamint a forgórész forgási frekvenciája.



9. ábra. Mechanikai (csapágy és forgási frekvencia) hibákra kialakított kopási térkép.

A szintérkép (9. ábra) a frekvenciaértékeket [Hz] mutatja, ahol a világosabb színek magasabb frekvenciát jelentenek. A legmagasabb értékek a BPFI komponens (belső gyűrű hiba) esetén jelentkeznek, amelyek 900 Hz körüli tartományba esnek, míg a legalacsonyabb frekvenciák a kosárfrekvenciához (FTF) és a forgási frekvenciához tartoznak.

A diagram jól szemlélteti, hogy a különböző csapágykomponensek hibái jellegzetes frekvenciasávokban jelentkeznek, és harmonikusaik rendszeres mintázatot alkotnak. Ez a megjelenítés alkalmas a hibaforrások azonosítására, illetve a rezgés és áramalapú diagnosztikai mintázatok összevetésére a mért spektrumokkal, támogatva a prediktív karbantartás és a hibaosztályozás folyamatát.

Összefoglalás

A vizsgálatok során a háromfázisú, 1,5 kW-os, hatpólusú aszinkron motor áram- és rezgésspektrumainak elemzése alapján meghatározhatók voltak a főbb harmonikus és hibakomponensek, amelyek a gép elektromágneses és mechanikai állapotát tükrözik. Az áram Park-vektor spektrum 50 Hz-es alapkomponeense mellett megjelenő frekvenciák a motor belső aszimmetriáira és a rotor-kiegyensúlyozatlanságra utalnak. A radiális és tangenciális rezgésspektrumok kiegyensúlyozott eloszlása azt jelezte, hogy a gép mechanikailag stabil, és nem mutat jelentős (korai stádiumban van, a jelenlegi elemzés nem terjed ki a teljes életciklus modellre) excentricitást vagy csapágyhibát.

A valószínűségi eloszlásmodellek (lineáris, négyzetes, Gauss, Lorentz, exponenciális) segítségével leírható a harmonikus amplitúdók időbeli csökkenése,

ami a kopási folyamat statisztikai viselkedését jellemzi. Ezek az eloszlások alkalmasak a rezgésösszetevők eloszlásának előrejelzésére, illetve a hiba súlyosságának kvantitatív becslésére. A kopási jelleggörbék alapján megállapítható, hogy a magasabb harmonikusok amplitúdója gyorsabban csökken, ami a rendszer természetes csillapodását és a dinamikus kopás mértékét mutatja.

A csapágykomponenseket tartalmazó frekvenciaterkép (sakktáblás 9. ábra) szisztematikusan mutatja be a különböző hibafrekvenciák FTF, BSF, BPFO, BPFI és forgási komponens harmonikus eloszlását. Ez a térkép kulcsfontosságú az azonosítási folyamatban, mivel a hibaforrások frekvenciatartománya egyértelműen meghatározható belőle és lépésváltozatok létrehozhatók. A spektrumok, valószínűségi modellek és frekvenciaterképek együttes alkalmazása átfogó képet ad a motor elektromágneses, mechanikai és tribológiai állapotáról, lehetővé téve a kopás előrejelzését, az üzemállapot felügyeletét és a prediktív karbantartás optimalizálását.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki kollégámnak és konzulensemnek Dr. Semperger Sándornak a kutatási munka során nyújtott szakmai támogatásért és együttműködésükért. Értékes javaslataik és tapasztalataik nagyban hozzájárultak a vizsgálatok pontosságához és a dolgozat szakmai színvonalához. Köszönöm a műhelyben és laborban meglévő technikai segítséget és a folyamatos támogatást.

Források

- [1] Molnár László, dr. Varga László, Gördülőcsapágyazások tervezése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [2] Dr. Fodor György, Elméleti elektrotechnika II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1989, ISBN 9631816095
- [3] Bendiák István, Semperger Sándor, Aszinkron motorok mechanikai eredetű hibáinak elemzése áramjelalak-analízis módszerével: Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; Molnár, György (szerk.) XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Kiadvány kötet Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2022) 419 p. pp. 33-48. , 15 p.Tudományos
- [4] Boualem Boashash, Time-Frequency Signal Analysis and Processing, Academic Press is an imprint of Elsevier, 125 London Wall, London, EC2Y 5AS, UK, 525 B Street, Suite 1800, San Diego, CA 92101-4495, USA, 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2016 ,ISBN: 978-0-12-398499-9
- [5] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 2010, 1999, 1989 by Pearson Higher Education, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458. Pearson Education Ltd., London ISBN-13: 978-0-13-198842-2

- [6] G. Niu, X. Dong and Y. Chen, "Motor Fault Diagnostics Based on Current Signatures: A Review," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-19, 2023, Art no. 3520919, doi: 10.1109/TIM.2023.3285999.
- [7] V. Becker, T. Schwamm, S. Urschel and J. Antonino-Daviu, "Fault Detection of Circulation Pumps on the Basis of Motor Current Evaluation," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 5, pp. 4617-4624, Sept.-Oct. 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3085697.
- [8] J. Yang, Z. Li, P. Zhang, K. Zhang and Y. Xu, "Motor Current Time-Varying Quadratic Phase Coupling Analysis and Its Application in Traction Motor Fault Detection Under Varying-Speed Condition," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 8, pp. 12877-12886, 15 April 15, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3371491.
- [9] M. S. Rafaq, M. Faizan Shaikh, Y. Park and S. B. Lee, "Reliable Airgap Search Coil Based Detection of Induction Motor Rotor Faults Under False Negative Motor Current Signature Analysis Indications," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 5, pp. 3276-3285, May 2022, doi: 10.1109/TII.2020.3042195.
- [10] J. Bonet-Jara, J. Pons-Llinares and K. N. Gytakis, "Comprehensive Analysis of Principal Slot Harmonics as Reliable Indicators for Early Detection of Interturn Faults in Induction Motors of Deep-Well Submersible Pumps," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 11, pp. 11692-11702, Nov. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3231333.
- [11] T. C. Krause, Ł. Huchel, D. H. Green, K. Lee and S. B. Leeb, "Nonintrusive Motor Current Signature Analysis," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-13, 2023, Art no. 9000213, doi: 10.1109/TIM.2022.3232645.
- [12] Z. Zou, C. Li, D. Li, G. Shen, F. Gu and A. D. Ball, "Gearbox Lubricant Condition Monitoring Based on Motor Current Signals From Closed-Loop Control Drive," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-15, 2024, Art no. 3531315, doi: 10.1109/TIM.2024.3436089.
- [13] M. E. E. -D. Atta, D. K. Ibrahim and M. I. Gilany, "Broken Bar Fault Detection and Diagnosis Techniques for Induction Motors and Drives: State of the Art," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 88504-88526, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3200058.
- [14] S. B. Lee, J. Shin, Y. Park, H. Kim and J. Kim, "Reliable Flux-Based Detection of Induction Motor Rotor Faults From the Fifth Rotor Rotational Frequency Sideband," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 9, pp. 7874-7883, Sept. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3016241.
- [15] V. Aviña-Corral, J. Rangel-Magdaleno, C. Morales-Perez and J. Hernandez, "Bearing Fault Detection in Adjustable Speed Drive-Powered Induction Machine

by Using Motor Current Signature Analysis and Goodness-of-Fit Tests," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 12, pp. 8265-8274, Dec. 2021, doi: 10.1109/TII.2021.3061555.

[16] H. Li, G. Feng, D. Zhen, F. Gu and A. D. Ball, "A Normalized Frequency-Domain Energy Operator for Broken Rotor Bar Fault Diagnosis," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-10, 2021, Art no. 3500110, doi: 10.1109/TIM.2020.3009011.

[17] S. Hajnayeb, M. H. Marzebali, V. Abolghasemi and J. Faiz, "Broken Rotor Bar Fault Detection of Induction Machine Based on Rectified Orthogonal Axes of Stator Current," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 73, pp. 1-13, 2024, Art no. 3539913, doi: 10.1109/TIM.2024.3476552.

[18] R. R. Kumar et al., "Induction Machine Stator Fault Tracking Using the Growing Curvilinear Component Analysis," in IEEE Access, vol. 9, pp. 2201-2212, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047202.

[19] R. Puche-Panadero et al., "New Method for Spectral Leakage Reduction in the FFT of Stator Currents: Application to the Diagnosis of Bar Breakages in Cage Motors Working at Very Low Slip," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-11, 2021, Art no. 3511111, doi: 10.1109/TIM.2021.3056741.

[20] C. E. Sunal, V. Dyo and V. Velisavljevic, "Review of Machine Learning Based Fault Detection for Centrifugal Pump Induction Motors," in IEEE Access, vol. 10, pp. 71344-71355, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3187718.

[21] D. V. Spyropoulos, P. A. Panagiotou, I. Arvanitakis, E. D. Mitronikas and K. N. Gytakis, "Extraction of Frequency Information for the Reliable Screening of Rotor Electrical Faults Via Torque Monitoring in Induction Motors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 6, pp. 5949-5958, Nov.-Dec. 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3112137.

[22] K. Yatsugi, S. E. Pandarakone, Y. Mizuno and H. Nakamura, "Common Diagnosis Approach to Three-Class Induction Motor Faults Using Stator Current Feature and Support Vector Machine," in IEEE Access, vol. 11, pp. 24945-24952, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3254914.

[23] S. Ray and D. Dey, "Development of a Comprehensive Analytical Model of Induction Motor Under Stator Interturn Faults Incorporating Rotor Slot Harmonics," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 2, pp. 2037-2047, Feb. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3165294.

[24] Bharat Bhushan, Introduction to Tribology second edition, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, This edition first published 2013, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, ISBN: 978-1-119-94453-9