

Aszinkron motorok mechanikai eredetű hibáinak vizsgálata állandósult üzemállapotban

Bendiák István

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, bendiak.istvan@uni-obuda.hu

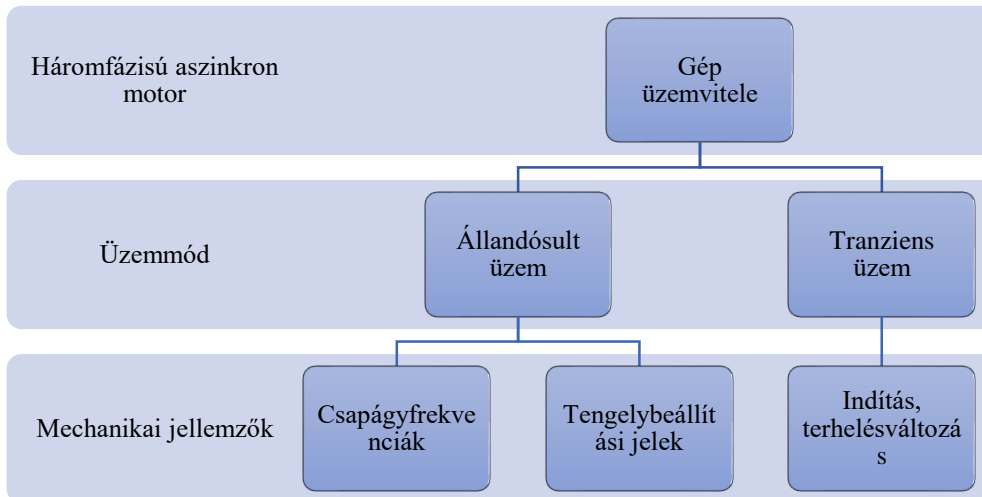
A dolgozat célterülete aszinkron motorok állandósult üzemállapotának vizsgálata villamos jelanalízis módszerével. A forgógépek üzemeltetési körülményeit jelentősen átalakította az informatika és a mesterséges intelligencia fejlődése. A mérés és feldolgozás világszintű elemzése egy olyan változó tendenciát mutat, amely jelentősen átalakította a villamos gépek mérésének oktatási, kutatási, ipari alkalmazásának kérdéseit. A pályamunka a szakterületen folyó széleskörű tudományos munkákat vizsgálva helyezi előtérbe elmúlt évek kutatási eredményeit.

1. Bevezető

A villamos forgógép diagnosztikában a beszélhetünk statikus és tranziens üzemállapotokról. A mindkét üzemtípusnak eltérő követelményei vannak. A gépekről alkotott életciklus-modell létrehozásához szükség van a statikus viselkedés minél alaposabb ismeretére [1-34]. A diagnosztikai mérések feldolgozása alatt folyamatosan új módszerek kidolgozása a cél, amely közelebb segít a gépüzem-idejének biztonságos megismeréséhez.

2. Aszinkron motorok mechanikai hibáinak felosztása

A vizsgált villamos motor háromfázisú rövidrezárt forgórészű kalickás aszinkron gép 3 kW négypólusú, az EVIG (Egyesült Villamosgép Gyár) által egykor gyártott VZ motorsorozat családjába tartozik. A következő blokkdiagrammok mutatják mérési elképzeléseket [25].

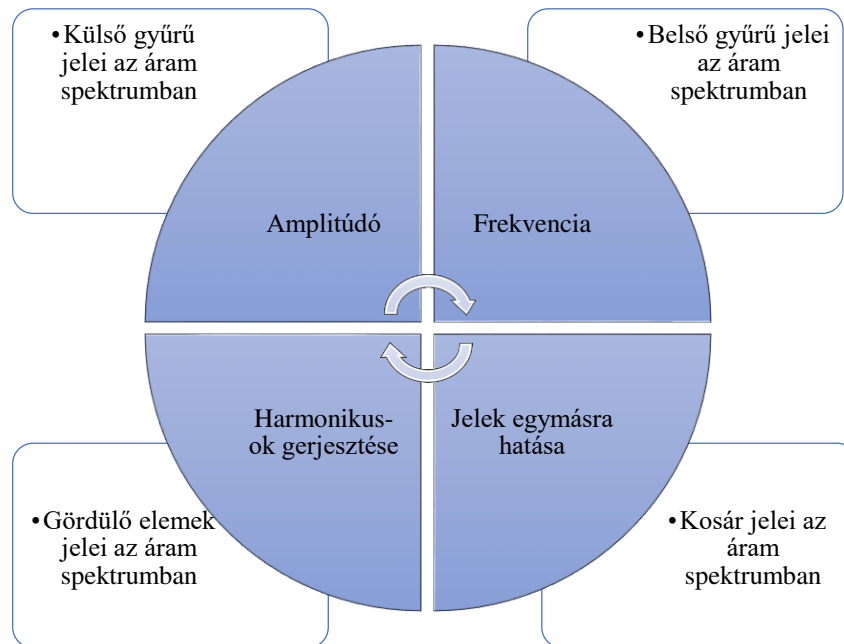


2.1. ábra. Mérési koncepciók kalickás aszinkron motor esetén [25].



2.2. ábra. Intelligens hajtás diagnosztika elvi vázlata [25].

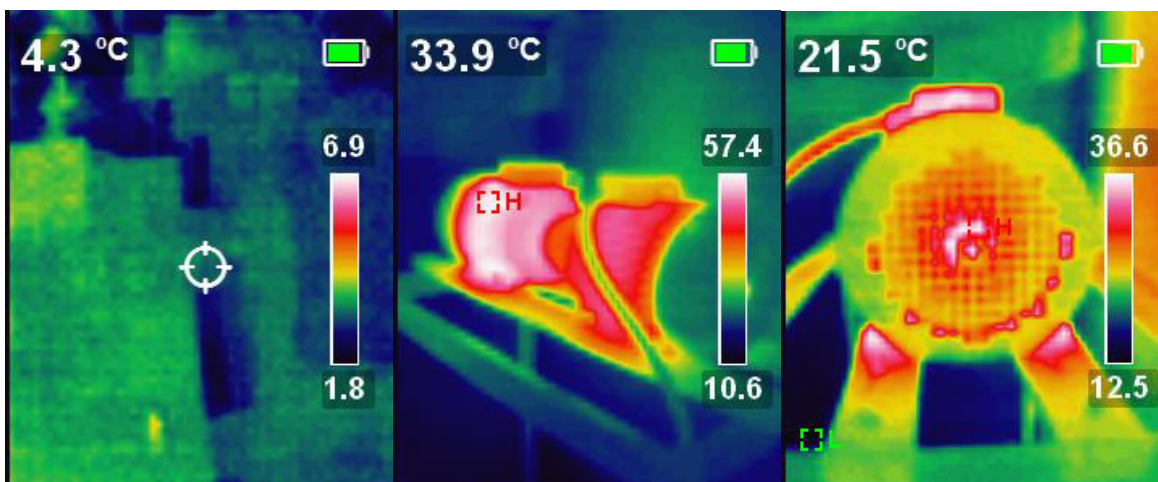
A 2.1-2. ábrák mutatják a mérések alapvető koncepcióját, amelyet a jelenlegi mérések követtek.



2.3. ábra Mechanikai jelek felosztása és mérlegelése [25].

Villamos forgógépek esetén a mechanikai hibajeleket alapvetően a csapágy és tengelybeállítási hibákra lehet felosztani (2.3. ábra). A felsorolás nem teljes, mert jelen munkafolyamat nem tér ki a forgórész rúdszakadás és egyéb forgórész meghibásodások okaira, amelyek kiegyensúlyozási jelenségként is felléphetnek.

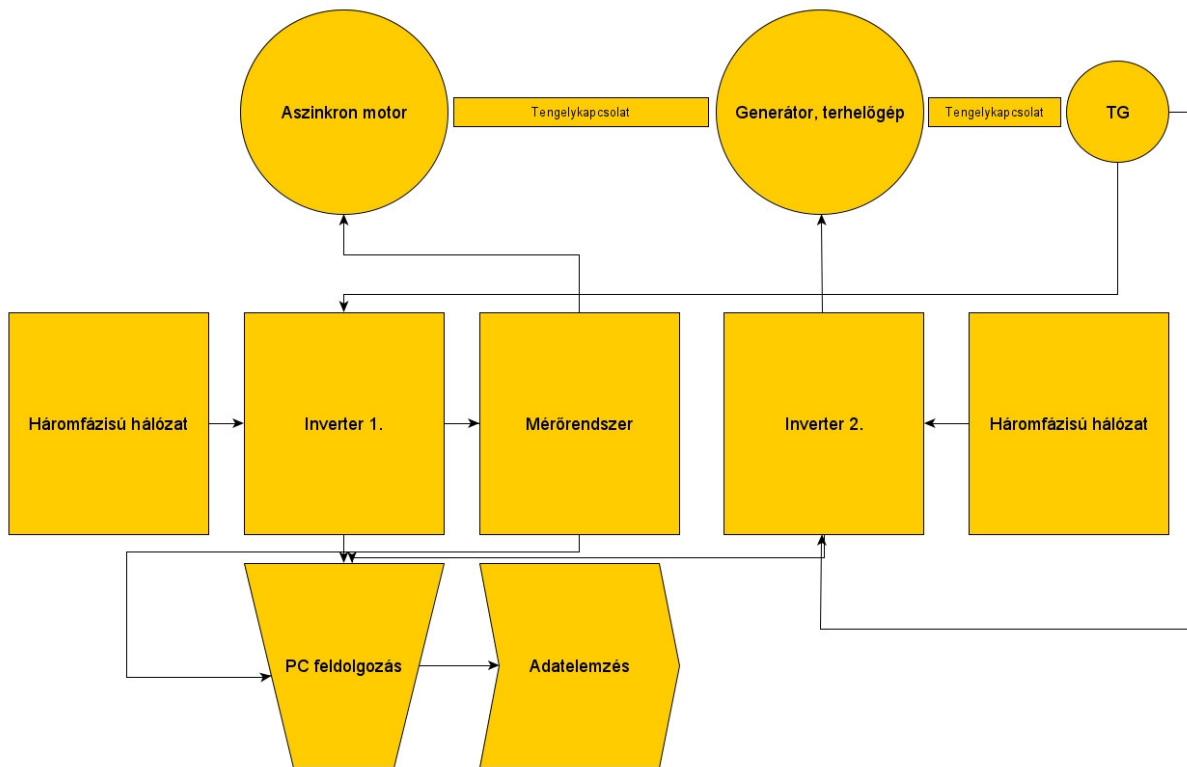
A 2.4. ábrán látható termográfiai képek a mérés közbeni folyamatok hőkamerás felvételeit mutatják, ahol a gép környezetében keletkező hőátadási viszonyok jól megfigyelhetők.



2.4. ábra Termográfiai felvételek a változó paraméterű terhelési mérés alatt. A képeken jól láthatók a gépalapnak átadott melegedési viszonyok.

A gépcsoport mérési egyszerűsített mérési blokkvázlata a 2.5. ábrán látható [25]. A mérések frekvenciaváltóról táplált esetet vizsgálnak. A háromfázisú hálózatra csatlakozik a

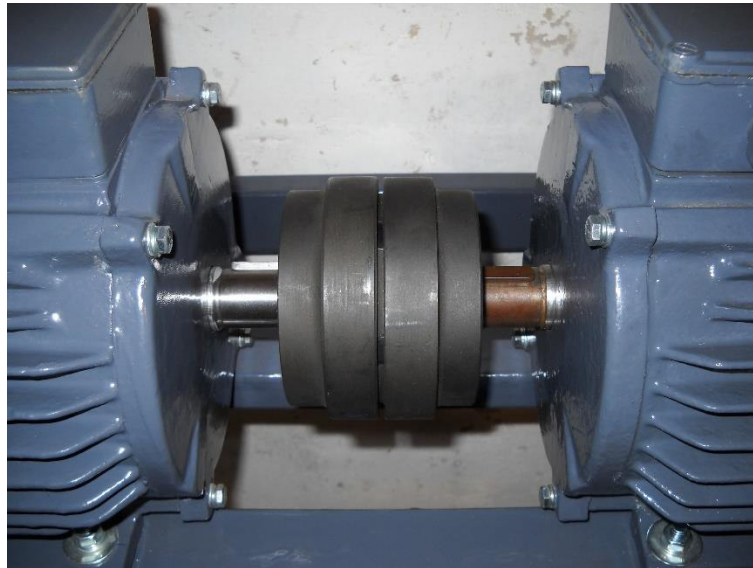
frekvenciaváltó, utána a mérőrendszer összehasonlítja az inverterről kapott értékekkel. A gépcsoport változó terhelési állapottal üzemel, ezért láthatóak különböző melegedést mutató hőkamerás felvételek. A gépcsoportot ért különböző melegedési viszony, a tengelykapcsolatban okoz deformációt, ennek oka lesz a tengelykapcsoló betét kopása, sérülése.



2.5. ábra Egyszerűsített mérési elrendezés blokkvázlata [25].

A mérőrendszer NI (National Instruments) feszültség és árammérő kártyák segítségével mérték a motor jellemző adatait.

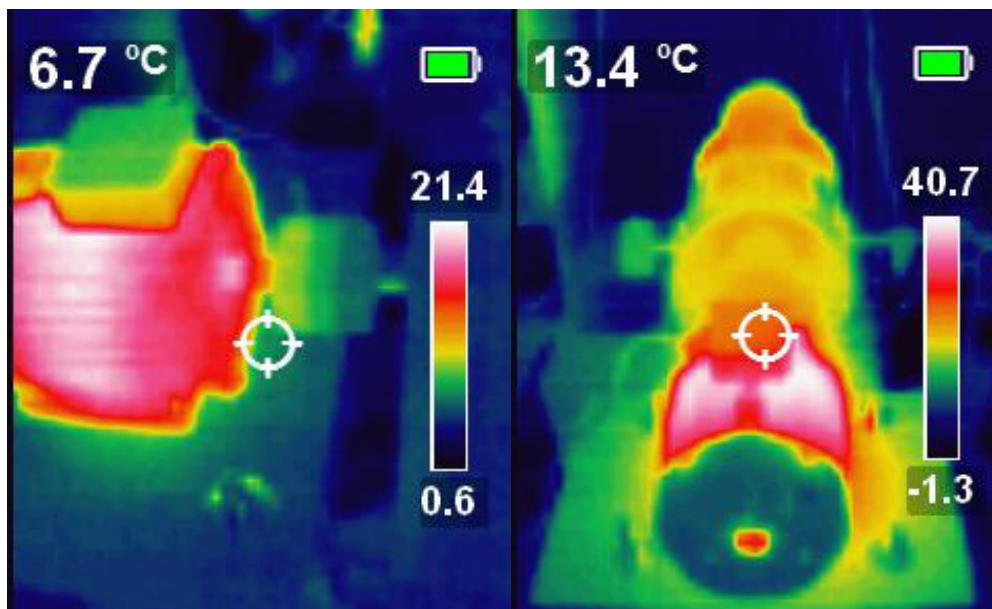
A 2.5. ábra szemléltet egy vizsgált gépkapcsolatot, ahol körmös tengelykapcsolók biztosítják a mechanikai összekötést.



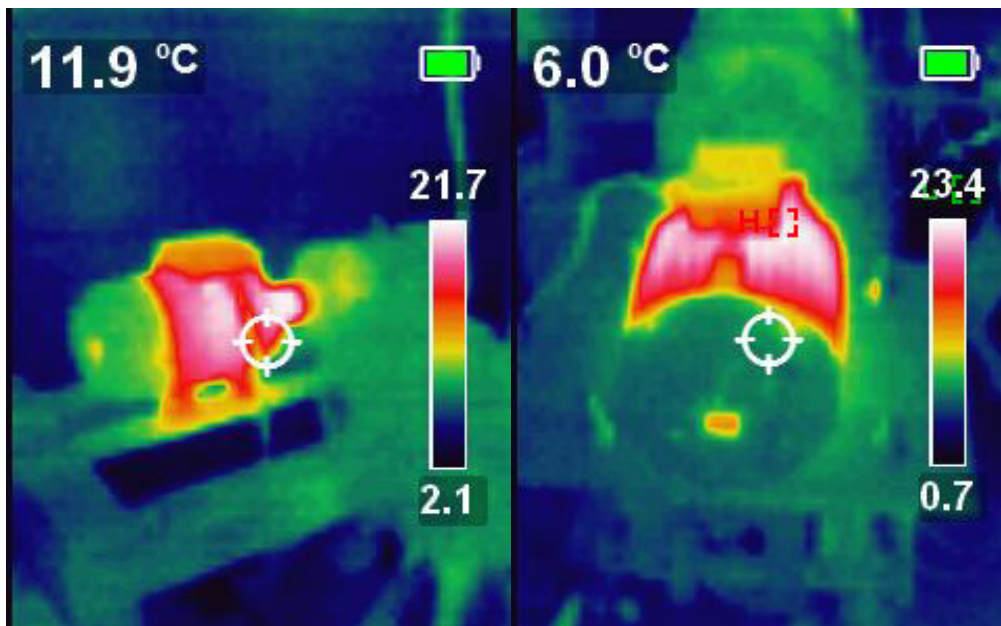
2.6. ábra Aszinkron motor-generátor gépcsoport, tengelybeállítási hibaelemzés.

A pályamunka készítése alatt kontrolmérésre mindig felhasználásra kerül a termográfiai mérések, amelyeken jól végig követhető a motor és tengelykapcsoló aszimmetrikus melegedése (2.6-9. ábrák).

A hőkamera felvételek jól látható, ahogyan a kamera követi leghidegebb és legmelegebb pontokat. Kezdeti szakaszban a motorházra fókuszál, majd a terhelési állapot előre haladtával csapágyfészek irányába.



2.7. ábra Aszinkron motor tengelykapcsolójának aszimmetrikus melegedés folyamata.

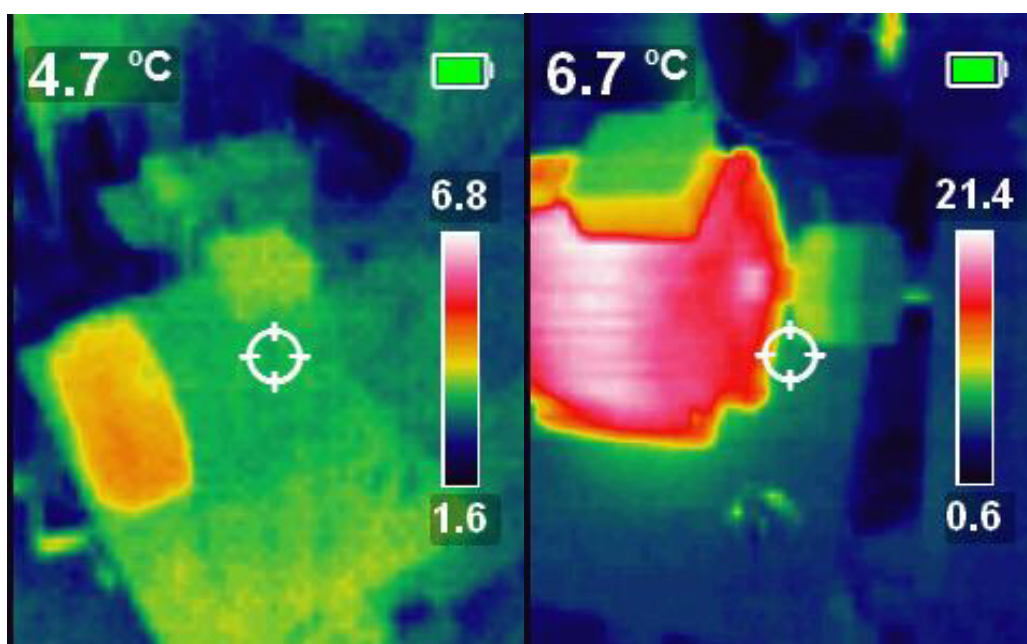


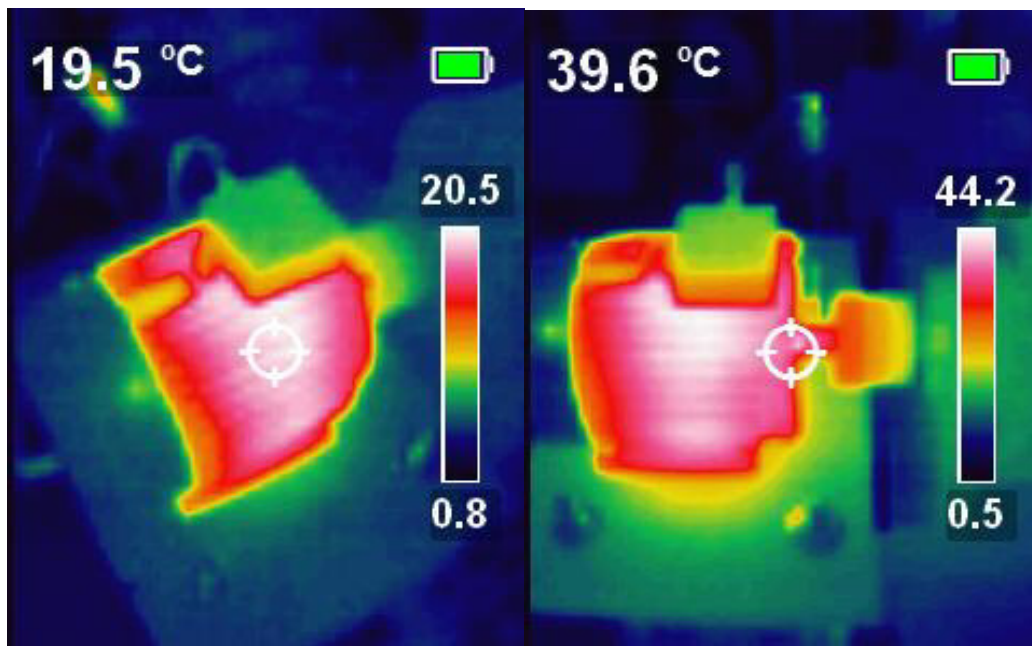
2.8. ábra Aszinkron motor tengelykapcsolójának aszimmetrikus melegedés folyamata.

A motoron körmös tengelykapcsoló van és betétkopás, hőmérsékletváltozás, tengelybeállítási hiba jelentkezik. Ez folyamat hosszabb üzemóra alatt.

A 2.8-10. ábrák már tartós üzemi állapotot mutatnak (terhelésváltozással), ahol kamera már a csapágy külső gyűrűre összpontosít, a munkagép oldali rész kevésbé melegszik.

A hiba eredetét nem egyszerű megállapítani. Nem jelenhető még egyértelműen, hogy a nem megfelelő tengelybeállítás okozza a jelenséget, mert gépek egyébként sem melegednek szimmetrikusan. Vizsgálat eredménye hasznos és szükséges, de nem elégséges feltétele a hibaterület szűkítésének és megismerésének.





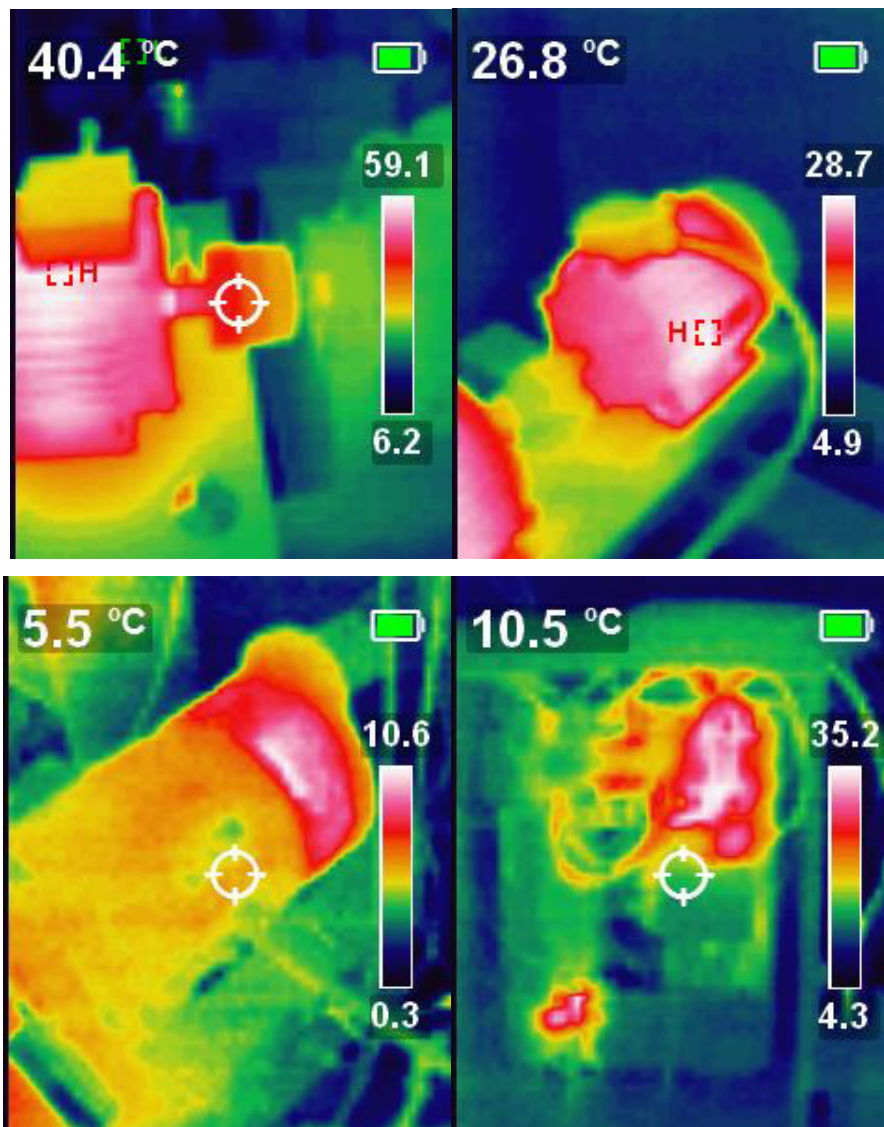
2.9. ábra. Aszinkron motor tengelykapcsolójának és motorház felületének aszimmetrikus melegedése.

A termográfiai felvételek nagyban segítik a hibakeresést, de nem minden esetben használhatóak.

A villamos gépek mérése alatt az egyik alapvető követelmény rendszer specifikáció elkészítése, ami nagyban a mérési körülményeken is múlik.

Ilyen jellemzők pl.:

- Ipari létesítmény hőmérsékleti viszonyai, környezeti és átadott melegdések.
- Vasbeton szerkezetek rezgési tulajdonságai.
- Gépcsoportok telepítésének sajátosságai, gépalap, betonszerkezet, gumitalp, lágytalp jelenség, lengési hajlamosság, részben mechanikai, részben villamos eredetű oka is lehet.
- Hálózati jellemzők: Feszültségstabilitás, feszültségkiamaradás, frekvenciaváltozás, szigetüzemi generator és tartalék üzemi generátorok szinkronizálása, ezek egymásra hatása.



2.10. ábra Aszinkron motor és terhelő egyenáramú generátor melegedési folyamata. A felső ábra a körmös tengelykapcsoló melegedése, a jobb felső ábra a mérés kezdetén lévő tengelykapcsoló melegedési jellege, a bal alsó ábra a terhelőgép, egyenáramú generátor kommutátor és kefe melegedése, a jobb alsó ábra a kapcsolószekrényben a motort tápláló mágneskapcsoló behúzó tekercs és fázisvezetőkön keletkező melegedés.

A forgógép diagnosztika ma már nélkülözhetetlen eleme villamos jelanalízisen történő mérés és számítás. Ennek részletezése a harmadik fejezetben történik.

A 2.10. ábrák a méréseknek széleskörű képeit mutatják, ahol az egyenáramú fékező gép kommutátor melegedése is mérve volt (a képek közül, a bal alsó rész). A mérlegenerátor hűtése kényszerventiláció, ami azt jelenti, hogy szellőző csatorna úgy van kialakítva, hogy nem befolyásolja a mérendő motor gépház hűlését. Jelentős problémát okozna, egy korrekt melegedésmérés alatt, ha külső hatás akár kis mértékben is befolyásolná a mérendő motor melegedésviszonyait. A szellőző rendszer a mérendő motor felől zárt, azonban ez nem mindig van így. A nem laboratóriumi mérések alatt számos olyan eset van, amikor ez módszer nem használható ezzel a megfontolással, mert a többi dolgozó gépről átadott hőmérséklet

megváltoztatja a gépek környezetét. A jobb alsó képen látni (2.10. ábra) a kapcsolószekrényben lévő mágneskapcsoló és szakaszoló kapcsolók érintkezőinek melegedését. Gyakran előfordul egy géphiba keresésénél, hogy jelentős hálózati és bekötési hiba is társul a be nem tervezett géphibához.

3. Aszinkron gép, mint modell és gépi intelligencia előkészítése

Néhány gondolatban át kell tekinteni azokat a matematikai készleteket, amelyeket feltétlenül fel kell használni a forgógépek diagnosztikai elemzése során [24].

A klasszikusan ismert Dirac-impulzus segítségével a formálisan kibővíthetjük a differenciálható függvények körét. Ha ugyanis a Dirac-impulzust függvényként kezeljük, akkor a véges ugrással rendelkező függvényeket is differenciálhatónak tekintjük. Valamely $f(t)$ függvény $f'(t)$ általánosított deriváltján olyan általánosított függvényt értünk, amelyre felírható [24]:

$$f(t) = \int_{-\infty}^t f(x) dx, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0$$

Tipikus ilyen függvény az $1(t)$ egységugrás. Ennek ebben az értelemben vett differenciálhányadosa:

$$\dot{1}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \text{nincs értelmezve,} & t = 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}$$

Nyilvánvaló, hogy $\dot{1}(t)$ ismeretében $1(t)$ nem állítható elő (1) alapján integrálással, mert a $t=0$ helyen $1(t)$ nincs értelmezve.

Be kell vezetni az $\dot{1}(t, \tau)$ függvényt az alábbi definícióval [24]:

$$\dot{1}(t, \tau) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t/\tau, & 0 < t < \tau \\ 1, & \tau < t. \end{cases}$$

Ennek határértéke $\tau \rightarrow 0$ esetén az $1(t)$ egységugrás. A $\delta(t, \tau)$ függvény definíciójából következik, hogy:

$$1(t, \tau) = \int_{-\infty}^t \delta(x, \tau) dx, \quad \dot{1}(t) = \delta(t, \tau).$$

Képezzük a $\tau \rightarrow 0$ határértéket, akkor:

$$1(t) = \int_{-\infty}^t \delta(x) dx, \quad \dot{1}(t) = \delta(t)$$

A Dirac-impulzus integrálja tehát az egységugrást adja és ennek megfelelően az egységugrás általánosított deriváltja a Dirac-impulzus [24].

Ennek alapján képezhetjük bármely szakadásos $\varphi(t)$ függvény általánosított deriváltját.

Legyen:

$$\varphi(t) = [1 - 1(t - t_1)] f_1(t) + 1(t - t_1) f_2(t)$$

ahol $f_1(t)$ és $f_2(t)$ folytonosak és differenciálhatók.

Képezzük ennek általánosított deriváltját a szorzatra vonatkozó differenciális szabály formális alkalmazásával:

$$\varphi''(t) = -\delta(t - t_1)f_1(t) + [1 - (t - t_1)]f_1''(t) + \delta(t - t_1)f_2(t) + 1(t - t_1)f_2''(t)$$

A folytonos $f_1(t)$ függvényekre $f_1''(t) = \dot{f}_1'(t)$, míg pl.:

$$\delta(t - t_1)f_1(t) = \delta(t - t_1)f_1(t_1)$$

Hiszen $\delta(t - t_1)$ a t_1 hely kivételével mindenütt nulla.

Így tehát:

$$q''(t) = [1 - 1(t - t_1)]\dot{f}_1'(t) + [f_2(t_1) - f_1(t_1)]\delta(t - t_1) + 1(t - t_1)\dot{f}_2'(t)$$

Mivel $1''(t) = \delta(t)$ vagyis a $t=0$ helyen fellépő egységnyi ugráshoz a $\delta(t)$ derivált tartozik, akkor a t_1 helyen fellépő $\Delta_1 = f_2(t_1) - f_1(t_1)$ ugráshoz nyilván a $\Delta_1\delta(t - t_1)$ ugrás tartozik. A

$q''(t)$ derivált integrálásával és

$$1(t) = \int_{-\infty}^t \delta(x)dx, \quad 1(t) = \delta(t)$$

figyelembevételével visszkapjuk:

$$\varphi(t) = [1 - 1(t - t_1)] f_1(t) + 1(t - t_1) f_2(t)$$

függvényt.

Az itt formálisan bevezetett és később felhasznált általánosított derivált fogalma és néhány tétele matematikailag szigorúan is igazolható a disztribúcióelmélet vagy az operátorszámítás segítségével. Az „általánosított” derivált megegyezik a „disztribúció” értelemben vett deriválttal [24].

3.1. Laplace-transzformáció alkalmazása

A koncentrált paraméterű lineáris invariáns hálózatok átmeneti jelenségeinek törvényszerűségeit matematikailag közönséges, lineáris, állandó együtthatós differenciálegyenletek írják le, amelyek megoldásának kiindulási értékeit ismerjük [24].

Tudjuk, hogy a teljes megoldás meghatározását nagymértékben megkönnyíti a Laplace-transzformáció alkalmazása. Alábbiakban össze kell foglalni a legfontosabb szabályokat.

A Laplace-transzformáció egy $f(t)$ valós változós (de esetleg komplex értékű) függvényhez egy $F(s)$ komplex változós függvényt rendel [24]:

$$F(s) = \mathcal{L}f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Megjegyzendő, hogy a gyakorlatban az $F(s)$ függvényeket általában elemi úton számíthatjuk ki, vagy megfelelő táblázatból vesszük [24].

A Laplace-transzformáció néhány tétele:

A transzformáció lineáris, tagonként elvégezhető és az állandó szorzó kiemelhető:

$$\mathcal{L} \sum_{k=1}^n C_k f_k(t) = \sum_{k=1}^n C_k \mathcal{L}f_k(t) = \sum_{k=1}^n C_k F_k(s)$$

Az integrált függvény transzformáltja [24]:

$$\mathcal{L} \int_0^t f(\tau) d\tau = \frac{1}{s} F(s)$$

A derivált függvény transzformáltja:

$$\mathcal{L}f'(t) = sF(s) - f(-0)$$

Az ún. hasonlósági tétel:

$$\mathcal{L}f(kT) = \frac{1}{k} F\left(\frac{s}{k}\right), k > 0$$

Az ún. eltolási tétel:

$$\mathcal{L}[1(1 - T)f(t - T)] = e^{-sT}F(s)$$

A tétel megfordítása:

$$\mathcal{L}^{-1}[e^{-sT}F(s)] = 1(t - T)f(t - T) = \begin{cases} 0, & t < T \\ f(t - T), & t > T \end{cases}$$

Az ún. csillapítási tétel:

$$\mathcal{L}[f(t)e^{-\gamma t}] = F(s + \gamma)$$

Itt a γ lehet komplex is.

A konvolúció-tétel [24]:

$$f(t) = f_1(t) \cdot f_2(t) = \int_0^1 f_1(\tau)f_2(t - \tau) d\tau$$

$$F(s) = \mathcal{L}[f_1(t) \cdot f_2(t)] = F_1(s)F_2(s)$$

A határérték-tételek:

$$f(+0) = \lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$$

Utóbbi akkor alkalmazható, ha $F(s)$ minden szingularitásának valós része negatív, megengedve azonban az $s=0$ szingularitást.

A transzformáció megfordítását elvileg a Reimann-Mellin inverziós integrál szolgáltatja [24]:

$$I(t)f(t) = \mathcal{L}^{-1}F(s) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{st} ds, \quad \sigma > \sigma_0$$

Ahol σ_0 az $F(s)$ konvergencia –abszcisszája. A gyakorlatban a fenti tételt ritkán alkalmazzák.

Ha $F(s)$ racionális tört, akkor az inverz transzformáció a kiejtési tétellel végezhető. Legyen

$M(s)$ és $N(s)$ polinomok, $N(s)$ minden zérusra egyszeres, akkor:

$$F(s) = \frac{M(s)}{N(s)}, f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{M(s_k)}{N'(s_k)} e^{s_k t}, t > 0$$

$$N(s_k) = 0, N''(s) \neq 0, k = 1, 2, \dots, n;$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} F(s) = 0$$

A kifejtési tétel egy másik alakja [24]:

$$F(s) = \frac{M(s)}{N(s)}, f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{M(s_k)}{N_k(s_k)} e^{s_k t}, t > 0$$

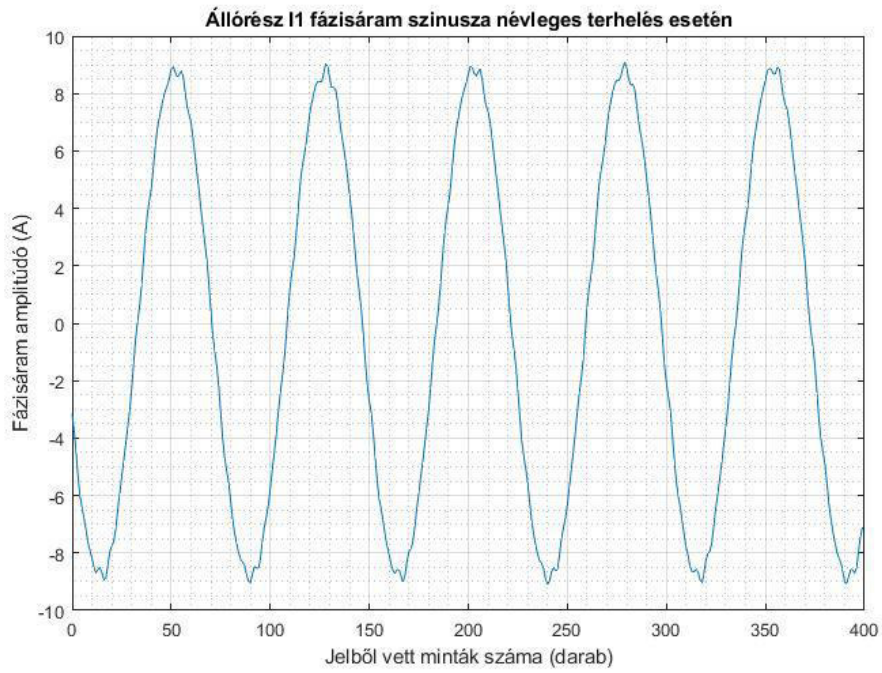
$$N(s_k) = 0, N_k(s) = \frac{N(s)}{s - s_k}, N_k(s_k) \neq 0$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} F(s) = 0$$

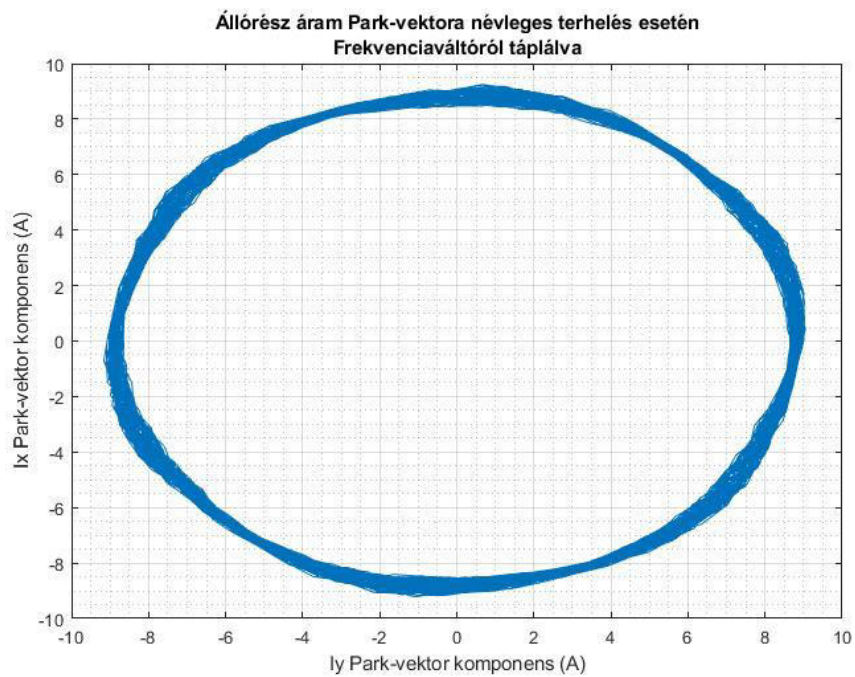
Ha $F(s)$ számlálója és nevezője megegyező fokszámú-vagyis $F(s)$ nem tart a végtelenben nullához-, akkor az áltörtet átalakítjuk egy állandó és egy valódi tört összegévé.

4. Aszinkron motorok monitoring rendszereinek alapvető kérdései

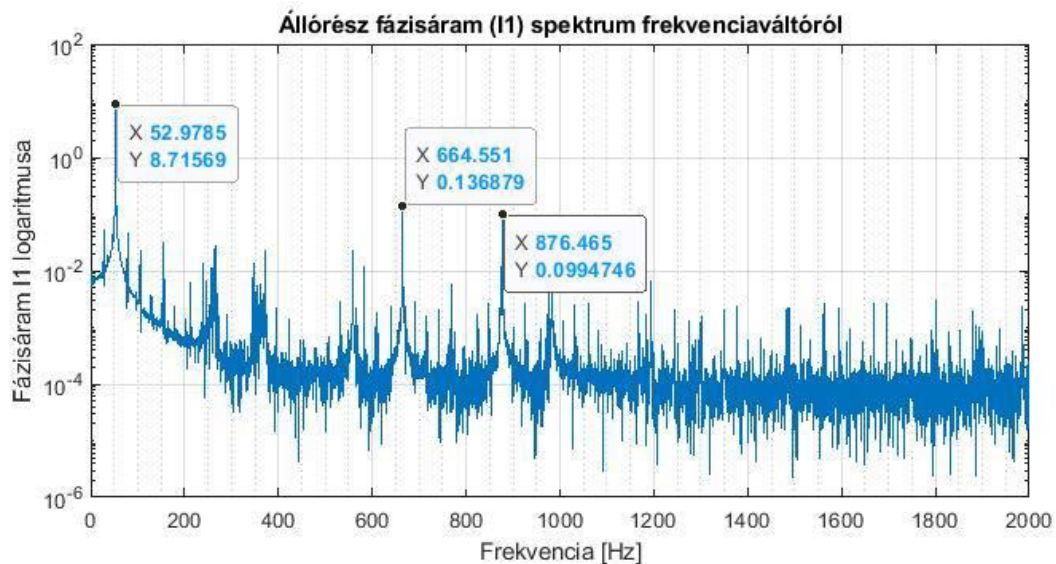
A 4.1. ábrán látható az aszinkron I_1 fázisának áram szinusza névleges terhelés esetén. Ebből az áram szinuszból lett képezve FFT (Fast-Fourier Transform) spektrum (4.3. ábra). Ennek a motor működési jellemzően feltárása első lépésben. Természetesen mindhárom fázisáram vagy vonali áram szinusz vizsgálata szükséges, ebből térvektor képzése és elemzése. A 4.2. ábra mutatja a háromfázisú aszinkronmotor állórész áram Park-vektor jellege terhelt üzemiállapotban. A motor áramfelvételére jellemző a pályageometria-alak változása.



4.1. ábra. Állórész áram I_1 fázisáram spektrumának képzése frekvenciaváltós üzemben.

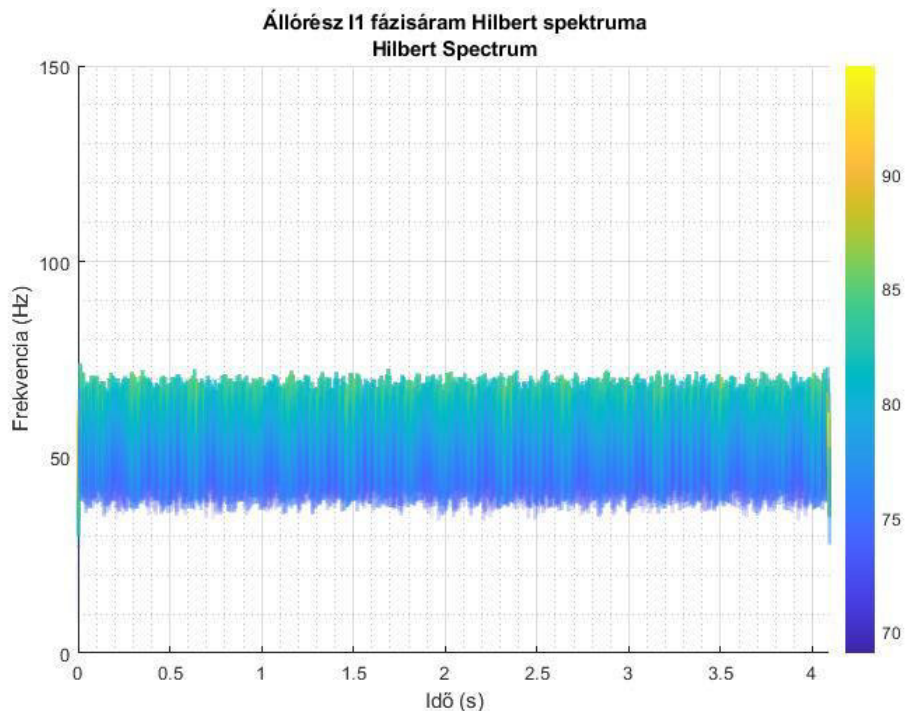


4.2. ábra Háromfázisú aszinkronmotor állórész áram Park-vektor jellege terhelt üzemállapotban.



4.3. ábra. Állórész áram I₁ fázisáram spektrumának képzése frekvenciaváltós üzemben, FFT.

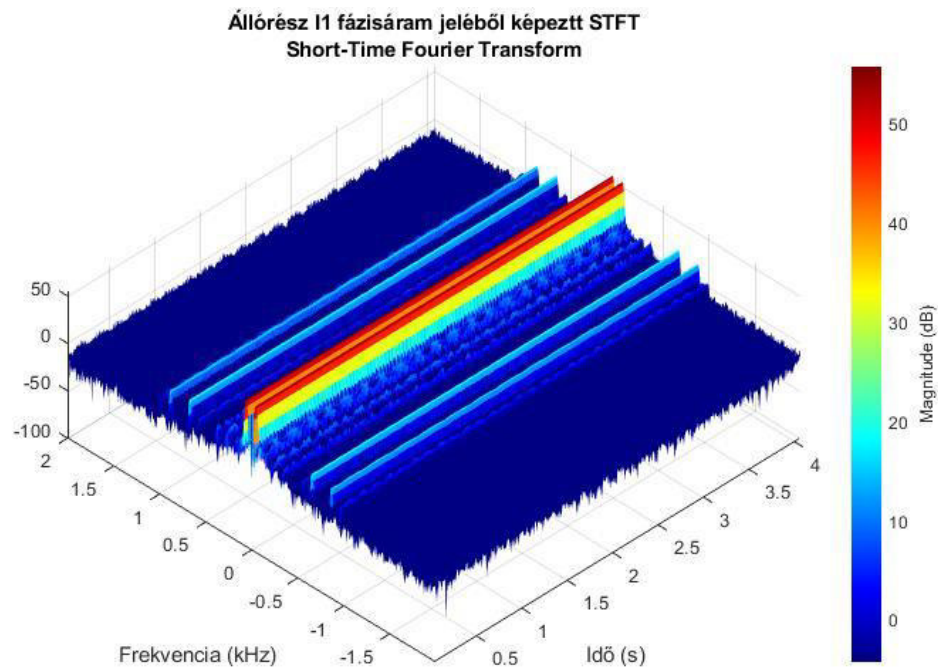
A 4.3. ábra célja a tengelybeállítási frekvenciák keresése. A hibakomponensek jelentős nincs bejelölve a spektrumban, de a spektrumra számított frekvencia összetevők mindig elemzésre kerülnek



4.4. ábra. Állórész áram I₁ fázisáram spektrumának képzése frekvenciaváltós üzemben.

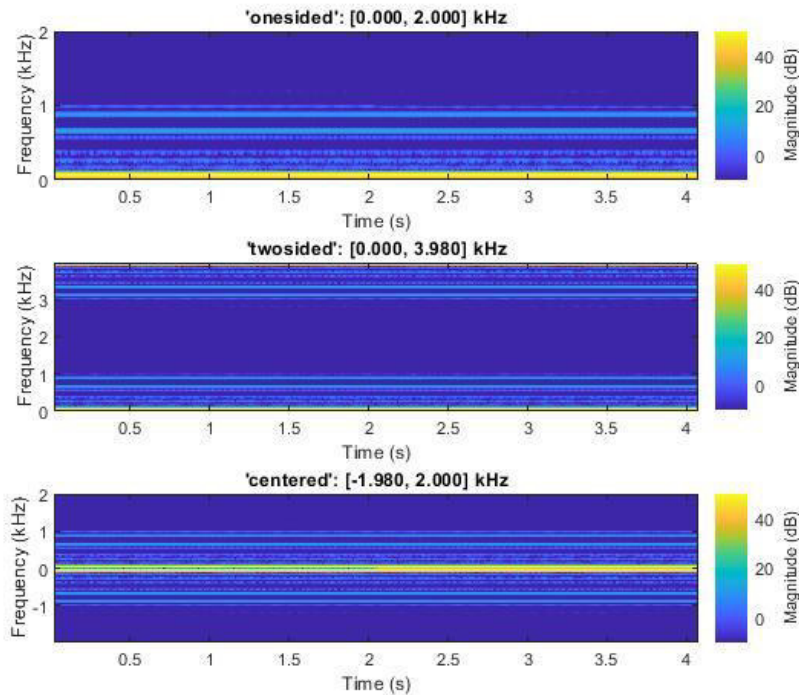
A 4.4. ábra a fázisáram Hilbert-spektrumát mutatja. Ennek a transzformációnak a célja a frekvencia-idő-amplitúdó intenzitás együttes vizsgálata, hasonlóan , a Short-Time Fourier Transform (STFT) 4.5-6. ábrákhoz. Az időben gyorsan változó tranziens jeleknél kifejezetten

előnyös, jelenleg állandósult üzemállapot látható, amely célja az 50-53 Hz tartomány vizsgálata, vagyis az alapharmonikus ellenőrzése.



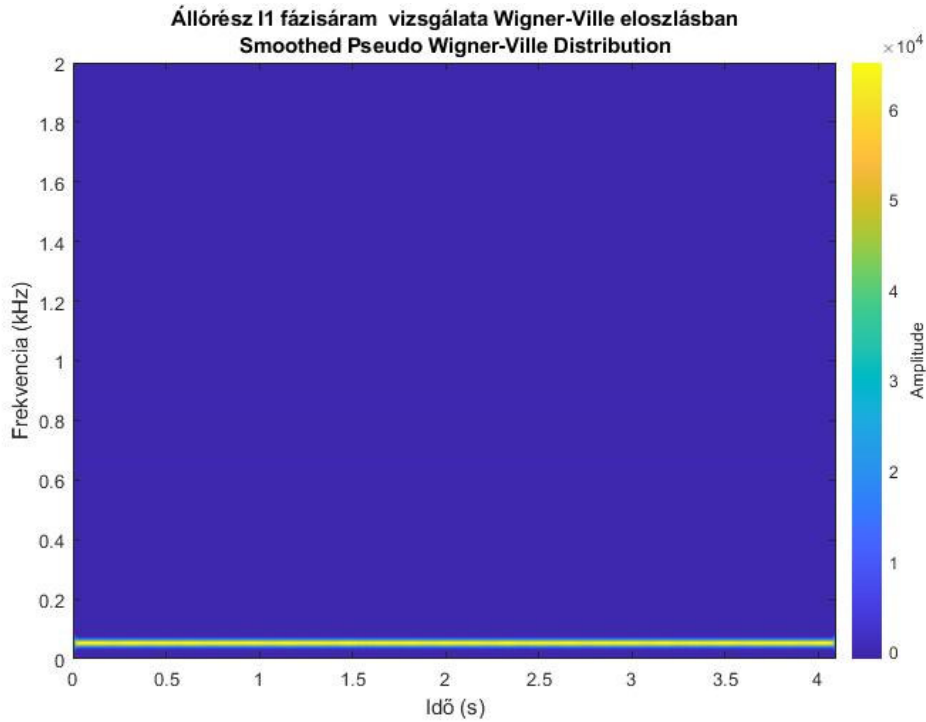
4.5. ábra. Aszinkron motor állórész áram I_1 fázisáram vizsgálata frekvencia-idő-amplitúdó tartományban és frekvenciaváltós üzemben, Short-Time Fourier Transform (STFT).

A mintavételezési frekvenciától függően több spektrum is összehasonlításra került a 4.6. ábra alapján. A három spektrum képen látni lehet az 1 kHz alatti modulált harmonikusokat, valamint ettől nagyobb 3-4 kHz-ig. A frekvenciaváltós táplálás modulálja/modulálni fogja a mechanikai hibajeleket nagyobb frekvenciás tartományokba.

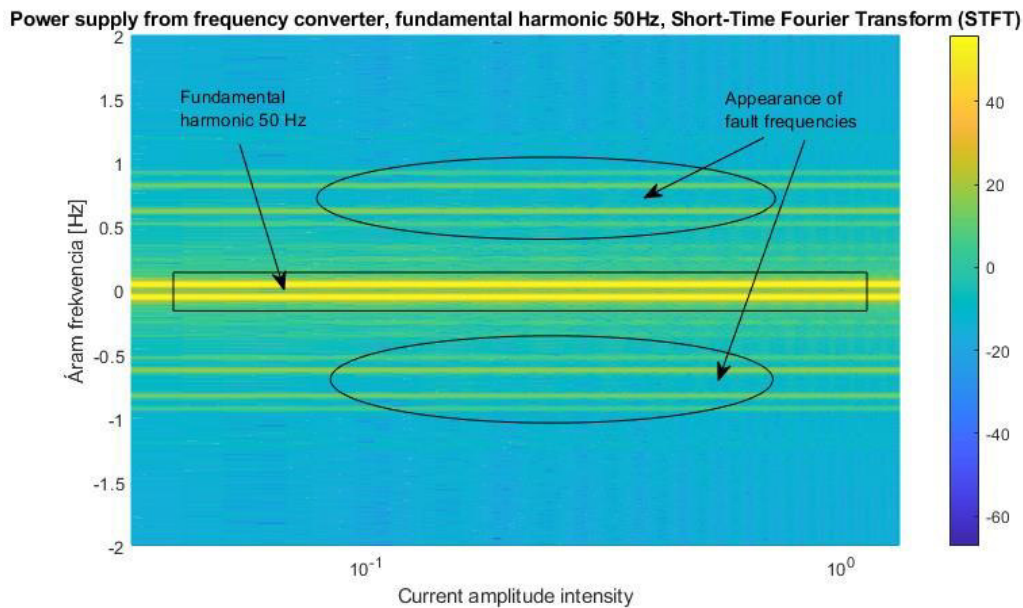


4.6. ábra. Aszinkron motor állórész áram I_1 fázisáram vizsgálata frekvencia-idő-amplitúdó tartományban és frekvenciaváltós üzemben, Short-Time Fourier Transform (STFT), frekvencia osztott megjelenítéssel.

A 4.5-6. ábrák STFT alkalmazásával számítják a keresendő mechanikai hibajeleket. Ez a számítás szükséges, de nem elégséges feltétele komplex adatelemzés kialakításához. A 4.7. ábra az állórész fázisáram vizsgálatát mutatja Wigner-Ville eloszlásban. Az adat szűrt, látni a korábbi spektrumokhoz képest, leginkább az 53 Hz környezet látható amplitúdó intenzitás tekintetében.



4.7. ábra. Aszinkron motor állórész áram I₁ fázisáram vizsgálata frekvencia-idő-amplitúdó tartományban és frekvenciaváltós üzemben, Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution (SPWVD).



4.8. ábra. Aszinkron motor állórész áram I₁ fázisáram vizsgálata frekvencia-idő-amplitúdó tartományban és frekvenciaváltós üzemben, Short-Time Fourier Transform (STFT).

A 4.8. ábra STFT transzformációnak egy olyan változatát mutatja, ahol a hibajel tartományok vannak kijelölve. A táplálás ebben az esetben frekvenciaváltóról történik.

5. Összefoglalás

Villamos forgógépek állapotfelügyelete széleskörű elemzési módszereket követel meg. A kiválasztási lépések következőképpen történtek. A pályamunka nagyrészt kapcsolódik a 2022-ben megjelent publikációkhoz [25], aminek a folytatásának tekinthető. A tengelykapcsoló esetén a betét cseréje szükséges volt a tranziens üzemi indítások miatt kialakult alakváltozás miatt. Folytatódott tovább, a motor folyamatos üzemének mérése, áram jelalakból spektrum és hibametria képzése, a bemutatott transzformációk alapján. Állórész fázisáram számítása és abból spektrumok képzése. Tengelybeállítási hibára utaló hibafrekvencia keresése és hibametria felállítása, operációkutatás alkalmazása a hibáról alkotott függvényben.

A csapágycsúcsok által generált jelek vizsgálata az áramjel alapján, itt felvetődik a kérdés, hogy mekkora harmonikusig célszerű számítani a spektrumban szereplő amplitúdó értékeket? Erre alapvetően nehéz korrekt választ adni. Intelligens villamos hajtás fejlesztése esetén minél nagyobb értékig, -ami függ a mintavételezési időtől is- számítani és folyamatos összehasonlításokat végezni egy korábbi terhelési állapottal.

A bemutatott transzformációk közül a STFT (valamint Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution, SPWVD) többségi információt adó rész az frekvencia-idő-amplitúdó intenzitás együttes ábrázolása. Indítás vagy terhelés átkapcsolás pillanatában nemcsak az alapharmonikus játszik döntő szerepet, hanem a vele együttesen keletkező többszörös harmonikusok is.

A mérési tapasztalatok azt mutatták, hogy mélyrehatóbban kell foglalkozni a mechanikai számításokkal, mert a gépelemek pontos megismerése nem nélkülözhető még átmenetileg sem. A gépek életciklusában a mechanikai követelmények közel felét adják, valamint a nagyobb teljesítmény felé közeledve a kenés-technikai is egyre inkább belép az indítási folyamatba. Kis motorokat is érint (néhány kilowatt esetén is), de ahogy növekszik a geometriai méret és hajtás öntömege is, egyre fokozódik ez a követelmény.

A pályamunka újdonságkeresési iránya az állandósult és tranziens üzemállapot sajátos hibajelek megjelenési és lengési hajlamain alapszik (indítás, fékezés, különösen időkorlással megvalósítva).

6. Irodalomjegyzék

- [1] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése gyakorlati szemszögből, 2013. november 14. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [2] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése gyakorlati szemszögből, 2014. április 23. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [3] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése iparjogvédelmi szemszögből, 2014. november 19. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [4] Bendiák István, Háromfázisú pólusátkapcsolással rendelkező ötvözött forgórészű aszinkron gép, szabadalom, Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala, Ügyiratszám: P1500106/24, 2015.03.13 Budapest
- [5] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, 2015. április 22. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [6] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, XXXI. Kandó Konferencia 2015 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [7] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése gyakorlati szemszögből, OTDK 2015 március 25-27. Műszaki Tudományi Szekció, Budapest
- [8] Bendiák István, Aszinkron motorok gyakorlati kérdései, XXXII. Kandó Konferencia 2016 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [9] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, OTDK 2017 április 6-8. Műszaki Tudományi Szekció, Dunaújváros
- [10] Bendiák István, Aszinkron motorok tervezése, XXXIII. Kandó Konferencia 2017 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [11] Bendiák István, Villamos hajtásrendszerek rezgései, XXXIII. Kandó Konferencia 2017 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [12] Bendiák István, Aszinkron motorok csapágydiagnosztikája, 2019. április 25. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [13] Bendiák István, Aszinkron motorok újratekerceselési technológiáinak hatása a magas hatásfokú aszinkron motorok paramétereire, TDK dolgozat, Budapest 2019
- [14] Bendiák István, Aszinkron motorok diagnosztikai módszerei, 2019. november 12. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [15] Bendiák István, Aszinkron motorok csapágyhibáinak elemzése, XXXV. Jubileumi Kandó Konferencia 2019, Budapest
- [16] Bendiák István, Forgógépek diagnosztikai eljárásai és alkalmazási lehetőségük felmérése, 2020. április 29. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest

- [17] Dr. Prohászka János, Bevezetés az anyagtudományba I. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1988, ISBN 963 8354 (A Szerkezetvizsgálat módszerei és mechanikai tulajdonságok című fejezetek.)
- [18] Dr. Nagy István, Állapotfüggő Karbantartás, Műszaki Diagnosztika I. Rezgésdiagnosztika, Delta-3N Kft. Paks, 2006
- [19] Dr. Timár Peregrin László-Fazekas Albert-Kiss József-Miklós András-Dr. S. J. Yang, Villamos gépek zaja és rezgése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986
- [20] Lukács Ottó, Matematikai Statisztika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 2002
- [21] Zombori Béla, Elektronika (5.kiadás), Nemzeti Tankönyvkiadó-Tankönyvmester Kiadó, Budapest, 2004
- [22] Ctirad Smetana, Zaj-és rezgésmérés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975
- [23] Molnár László, dr. Varga László, Gördülőcsapágyazások tervezése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [24] Dr. Fodor György, Elméleti elektrotechnika II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1989, ISBN 9631816095
- [25] Bendiák István, Semperger Sándor, Aszinkron motorok mechanikai eredetű hibáinak elemzése áramjelalak-analízis módszerével: Temesvári, Zsolt; Wührl, 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
- [26] By Brian P. Graney and Ken Starry, Rolling Element Bearing Analysis, From Materials Evaluation, Vol. 70, No. 1, pp: 78-85, Copyright 2011 The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Materials Evaluation- January 2012
- [27] I. Chernyavska and O. Vitek, "Analysis of air-gap eccentricity in inverter fed induction motor by means of motor current signature analysis and stray flux of motor," 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, Greece, 2017, pp. 72-76, doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062336.
- [28] V. F. Pires, D. Foito, J. F. Martins and A. J. Pires, "Detection of stator winding fault in induction motors using a motor square current signature analysis (MSCSA)," 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga, Latvia, 2015, pp. 507-512, doi: 10.1109/PowerEng.2015.7266369.
- [29] I. Ishkova and O. Vitek, "Diagnosis of eccentricity and broken rotor bar related faults of induction motor by means of motor current signature analysis," 2015 16th International

Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2015, pp. 682-686, doi: 10.1109/EPE.2015.7161130.

[30] J. Antonino-Daviu and P. Popaleny, "Detection of Induction Motor Coupling Unbalanced and Misalignment via Advanced Transient Current Signature Analysis," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018, pp. 2359-2364, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506949.

[31] S. Yeolekar, G. N. Mulay and J. B. Helonde, "Outer race bearing fault identification of induction motor based on stator current signature by wavelet transform," 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2017, pp. 2011-2015, doi: 10.1109/RTEICT.2017.8256951.

[32] M. Zagirnyak, D. Mamchur and A. Kalinov, "Induction motor diagnostic system based on spectra analysis of current and instantaneous power signals," IEEE SOUTHEASTCON 2014, Lexington, KY, USA, 2014, pp. 1-7, doi: 10.1109/SECON.2014.6950721.

[33] J. Garrido, E. R. Rodríguez-García, F. Rueda-Martínez and Q. Hernández-Escobedo, "Speed estimation of an induction motor by current signature analysis," 2020 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV), Boca del Rio, Mexico, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEV50249.2020.9289658.

[34] E. Geetha and C. Nagarajan, "Induction Motor Fault Detection and Classification Using Current Signature Analysis Technique," 2018 Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS), Tiruchengode, India, 2018, pp. 48-52, doi: 10.1109/ICEDSS.2018.8544272.