

Aszinkron villanymotorok hibáinak diagnosztizálása

Szerző: Rahne Eric, okl. villamosmérnök
Copyright © PIM Professzionális Ipari Méréstechnika Kft.

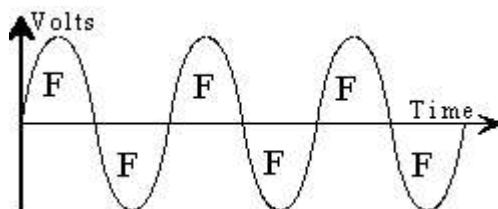
Mechanikus rendszerként a villamos forgógépek ugyanazokkal a módszerekkel vizsgálhatók, mint bármilyen más forgógép. De a villamos forgógépek felépítéséből és működéséből adódik, hogy esetükben nemcsak a hajtott forgógépeknél fellépő gépészeti (mechanikai) erőhatások és az ebből eredő rezgések fordulnak elő. A villamos forgógépekben történő elektromechanikai energiaátalakítás elektromágneses terek közvetítésével megy végbe. A keletkező erőhatások nemcsak a kívánt forgatónyomatékot eredményezik, hanem az egyes gépelemek időben és irányban változó igénybevételét - és mechanikai deformációját - is okozzák.

Ha a villamos forgógép valamelyik elektromos eleme villamos szempontból megsérül, akkor ez egyenlőtlen eloszlású elektromágneses tér kialakulásához vezet. Ennek következményeképpen az egyes gépelemek nagyobb, aszimmetrikus, illetve időben erősen változó mechanikus terhelésére kell számítani. Ilyenkor a motorok esetében nagyobb villamosenergia-felvétel mellett kisebb mechanikus teljesítmény nyerhető, a generátoroknál csökken a leadott villamos energia ugyanakkorra mechanikus energiával történő hajtás mellett. A hatásfok csökkenését kísérő nagyobb veszteségek hővé alakulnak át, és így az alkatrészek termikus terhelése is fokozódik.

A villamosan ébresztett mechanikus rezgések okai

Felmágnesezési frekvencia (magnetrostrikiós hatás)

A villamos forgógépek forgatónyomatéka az álló- és a forgórész elektromágneses terének kölcsönhatása révén jön létre. Ha például egy aszinkron motor állórésze 50 Hz-es hálózatra kapcsolódik, akkor az állórész pólusai a hálózat egy-egy periódusa alatt kétszer felmágneseződnek (lenti ábra). Ez azt jelenti, hogy az állórész pólusai és az elektromágneses térükben lévő összes alkatrész a hálózati frekvencia kétszeresével pulzáló szinuszos erőhatásnak van kitéve (magnetrostrikiós hatás).



A periodikus erők keletkezése

Az aszinkron motorok állórészének pólusai mindig párosan vannak elhelyezve, hogy a mágneses tér erővonalai átmenjenek a forgórészen. Egyébként nem lenne indukció, így nem lenne erőhatás sem és végül forgatónyomaték sem. Mellesleg a páros elrendezésnek köszönhetően - hengersizmetrikus álló- és forgórészt, valamint a forgórésznek az állórész közepén való tökéletes elhelyezését feltételezve - a radiális (rezgést keltő) erők pont kiegyenlítik egymást. Mivel a mágneses térerő erősen függ a forgó- és állórész közötti légréstől, nyilvánvaló, hogy egy nem a mágneses tér közepén elhelyezkedő forgórész esetén egyenlőtlen radiális erők keletkeznek.

Ugyanez a rezgéskeltő jelenség lép fel akkor, ha eleve aszimmetrikus elektromágneses tér jön létre, pl. ha az állórész tekercseiben nem egyforma nagyságú áramok folynak vagy maguk a tekercsek különböző mágneses tereket generálnak. Ez gyártási (konstrukciós) hibák, meglazult kábelcsatlakozások vagy tekercs-záratok miatt is felléphet. Az ebből eredő erők mindenképpen a hálózati frekvencia kétszeresével lépnek föl.

Megjegyzés: Az egyfázisú aszinkron motorok esetén nem alakul ki a fent említett ideális – szimmetrikus - mágneses tér, hanem egy ún. forgó elliptikus elektromágneses tér keletkezik. Ez az elliptikus elektromágneses tér felbontható egy nagy amplitúdójú forgásfrekvenciájú (50 Hz-es), valamint egy ellentétes forgásirányú, kisebb amplitúdójú 100 Hz frekvenciájú mágneses forgótérre. Ezért ezeknél a motoroknál mindig is érezhetően jelen van a 100 Hz-es rezgéscsúcs és ennek szlipfrekvenciájú oldalsávjai.

Forgórészrúd- ill. horonyfrekvenciájú rezgés

A villanymotor forgórésze általában nem homogén test. Például a következőkben tárgyalt indukciós motorokat (aszinkron motorok) beépített áramvezetőkkel (forgórészrudak) szerelik fel. Ezek döntő fontosságúak a kívánt elektromágneses kölcsönhatás kialakulásában: a forgórész forgása során a forgórészrudak elhaladnak az állórész pólusai előtt. Eközben feszültség indukálódik a rudakban, ezért áram folyik bennük, amely elektromágneses teret hoz létre körülöttük. Az egyes forgórészrudak körül fellépő tér és az állórész forgó elektromágneses terének kölcsönhatásából létre jön a villanymotor forgatónyomatéka. A két tér kölcsönhatásaként ébresztett erő minden egyes forgórészrúd pólus előtti elhaladásakor eléri a pillanatnyi maximumát, tehát a forgásfrekvencia és a forgórészrudak számának szorzatával egyenlő frekvenciájú - az úgynevezett rúdfrekvencián található - rezgések lépnek fel.

Ugyanezzel a jelenséggel találkozhatunk akkor is, ha az állórész tekercseiben nem ugyanakkora áramok folynak, vagy maguk a tekercsek különböző mágneses tereket generálnak. Ez például meglazult kábelcsatlakozások vagy tekercszárlat miatt fordulhat elő. Az ebből eredő erő mindenképpen a hálózati frekvencia kétszeresével (és ennek többszöröseivel) hat a villanymotor alkatrészeire.

Módszer a rezgés villamos vagy mechanikus eredetének eldöntésére

Kapcsoljuk le a villanymotor táplálását! A villamosan gerjesztett rezgések azonnal megszűnnek, a mechanikus eredetű rezgések a rezonanciakereséssel foglalkozó korábbi cikkünkben említett lefutásvizsgálatnál leírtaknak megfelelően a fordulatszám arányosan csökkennek.

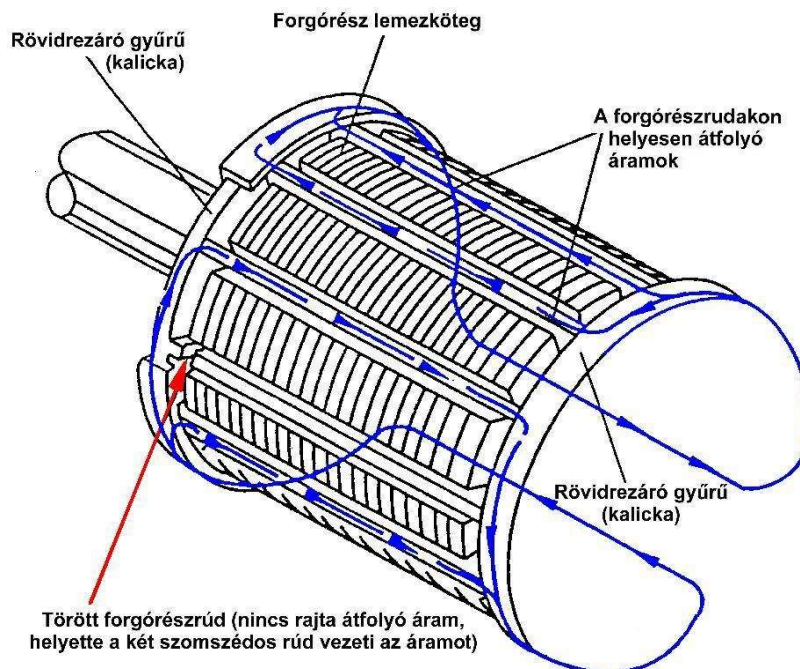
Villamos problémák esetén fellépő rezgések

A villamos problémák okozta rezgéseket két nagy csoportba oszthatjuk: rezgések forgórészhibák esetén, illetve rezgések állórészhibák esetén. Első lépésben a forgórész hibáinak következtében fellépő rezgéseket részletezzük.

Rezgések forgórészhibák esetén

Forgórészrúd (-pálca) törései

A villamosan gerjesztett rezgések gyakran a hálózati frekvenciával és annak kétszeresével lépnek fel. Ha a forgórész egy-egy áramvezető rúdja (pálca) törött, az indukciós áram csak a mellette lévő rudakon folyhat (lenti ábra). Törött forgórészrudak esetén tehát a mágneses terek kialakulása és az így keletkező erőhatás nem egyenletes. Emiatt torziós rezgések keletkeznek, amelyek általában a következő oldalon szemléltetett formában válnak láthatóvá a mechanikus rezgésspektrumban



Aszinkron villanymotor forgórészén átfolyó áramok rúdtörés esetén
[forrás: J. E. Berry: Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis III]

A forgórészen lévő rudak törései miatt keletkező egyenetlen erőhatás torziós rezgésekhez vezet, amelyek általában a következő formában válnak láthatóvá a mechanikus rezgésspektrumban:

- kétszeres szlipfrekvenciájú oldalsávok a fordulatszám körül;
- kétszeres szlipfrekvenciájú oldalsávok a hálózati frekvencia kétszerese körül;
- nagy amplitúdók a fordulatszámon, illetve a fordulatszám kétszeresén;
- nagy amplitúdók a rúdfrekvencián;
- kétszeres hálózati frekvenciájú oldalsávok a rúdfrekvencia körül;
- pólusmodulációs (=szlipfrekvencia \times pólusszám) oldalsávok a fordulatszám, illetve többszöröse körül;
- pólusmodulációs frekvenciájú oldalsávok a hálózati frekvencia kétszerese körül.

(Megjegyzés: Törött forgórészrudak esetén a géprezgek amplitúdómodulációja terhelésfüggő, excentrikus forgórész esetén nincs terhelésfüggő változás. Normál üzemű villanymotoroknál megfigyelhető még, hogy a forgórészrúd töréseinek számával arányosan csökken a motor mechanikus teljesítménye, illetve forgatónyomatéka, valamint ezáltal - változatlan mechanikus terhelés mellett - a fordulatszáma.)



Példák forgórészrúd törésekre [forrás: CSi, DDC]

A német VDI 3839 szabvány villanymotor forgórészhibák miatt ébredő rezgésekre vonatkozó részlete:

A forgórész aszimmetriája a forgásfrekvenciájú csapágy- és házrezgések kétszeres szlipfrekvenciával történő modulációjához vezet. Ez többnyire a géphang lebegéseként hallható. Az állórész áramfelvételében is fellép lebegés, amelynek frekvenciája egyenlő a szlipfrekvencia és a hálózati frekvencia kétszeres szorzatával. Ez analóg árammérőn a mutató periodikus elmozdulásából ismerhető fel, és oszcilloszkóppal jól megjeleníthető.

A kalicka aszimmetriája vagy meghibásodása miatt keletkező moduláció a kalickaáram növekedésével erősödik fel, tehát a motor teljesítményével együtt emelkedik. Ez kétpólusú gépeknél többnyire egyértelműen megfigyelhető és mérhető. Ha a motor csapágyrezgéseiben üzem közben hirtelen amplitúdómoduláció jelenik meg, és ez a moduláció a teljesítménytől függ, nagy biztonsággal forgórészhibára következtethetünk.

Ha az amplitúdómoduláció mindig is jelen volt, illetve nincs teljesítményfüggése, valószínűleg forgórész-excentricitás van jelen.

A forgórész excentricitása

A forgórész elektromágneses tere excentricitásának oka a forgórész excentrikus geometriája, illetve rudak vagy kalickák törése lehet. Az alábbiakban csak a forgórész geometriai hibájából eredő jelenségekkel foglalkozunk (a törött rudakat vagy kalickákat az előzőekben már tárgyaltuk).

A forgórész geometriai excentricitása gyártási pontatlanságok vagy üzem közbeni - többnyire termikus - hatások következménye. Mivel általában a gyártási folyamatok végén történik a forgórészek kiegyensúlyozása, ezért a gyártási hibára visszavezethető excentricitás által okozott mechanikus (statikus és dinamikus) kiegyensúlyozatlanság többnyire nem észlelhető (mivel ezt kiegyenlítették). Az üzem közbeni alakváltozások - például termikus deformációk - viszont kiegyensúlyozatlanságot is okoznak, amely azonnal észrevehető a kiegyensúlyozatlanságra jellemző forgásfrekvenciájú rezgéscúcsból. A forgórész geometriai excentricitása minden esetben változó légrést eredményez (a legkisebb és legnagyobb légrés a forgórésszel együtt körbe forog az állórészben). Ez az elektromágneses térerő periodikus változását vonja maga után és természetesen rezgéseket is kelt.

A forgórész geometriai excentricitása minden esetben változó légréseket eredményez. (A legkisebb és legnagyobb légrés a forgórésszel együtt körbeforog az állórészben.) Ez mindenképpen rezgéseket és az elektromágneses térerő periodikus változásait eredményezi.

Forgórész-excentricitás esetén megnövekedett rezgésamplitúdók figyelhetők meg a hálózati frekvencia kétszeresén (és ennek többszörösein), de akár maga a hálózati frekvencián is.

Továbbá megfigyelhetők a rúdfrekvencia körül kétszeres hálózati frekvenciájú oldalsávú rezgések, valamint pólusmodulációs frekvenciájú oldalsávok a hálózati frekvencia kétszerese körül. Maga a pólusmodulációs frekvencia is jelentkezik alacsonyfrekvenciás rezgésként.

A forgórész excentricitása esetén megnövekedett rezgésamplitúdók figyelhetők meg a hálózati frekvencia kétszeresén (és ennek többszörösein), de akár magán a hálózati frekvencián is. Továbbá megfigyelhetők a rúdfrekvencia körüli kétszeres hálózati frekvenciájú oldalsávú rezgések is, valamint a pólusmodulációs frekvenciájú oldalsávok a hálózati frekvencia kétszerese körül. Maga a pólusmodulációs frekvencia is jelentkezik kisméretű rezgésként.

Ha az excentrikus forgórész kialakulásának oka termikus deformáció, akkor a forgásfrekvenciájú rezgéskomponens az üzemidővel (a motor felmelegedésével) együtt folyamatosan nő. Emellett a görbe tengelyre jellemző rezgésjelenségek (kiegyensúlyozatlanságra utaló forgásfrekvenciájú, stabil fázisszögű radiális rezgések, valamint 180°-os fáziskülönbséget mutató axiális rezgések) is fellépnek, egyre erősödve. Megjegyzendő, hogy hibás tengelybeállítású vagy "puha" lábú motorok esetén is változó légrés alakulhat ki, amely hasonlóan mutatkozik meg, mint a forgórész excentricitása.

A német VDI 3839 szabvány a forgórész elektromágneses excentricitásáról:

Egy excentrikusan az állórészbe elhelyezett centrikus (központos) forgórész nem gerjeszt rezgéseket.

Excentrikusan felépített forgórész centrikus elhelyezéssel is kiegyensúlyozatlanságra jellemző rezgéseket, valamint a szlipfrekvencia és a hálózati frekvencia kétszeres szorzatának megfelelő frekvenciájú amplitúdómodulációt okoz.

Ha a motor rezgései amplitúdómodulációt mutatnak, és annak mértéke nem függ a terheléstől, nagy valószínűséggel forgórész-excentricitás van jelen. (Ha ez a moduláció a terheléstől függ, nagy biztonsággal törött forgórészrudakra következtethetünk.)

A CSI Pocked Vibration Troubleshooter's Guide a rezgések okairól:

- Kisfrekvenciájú modulációt mutató időjelek excentrikus elektromágneses teret okozó forgórészproblémákra utalnak.
- Hálózati frekvenciájú rezgések meghajlott vagy excentrikus forgórészre jellemzők.
- Kis amplitúdójú axiális rezgések enyhén elhajlott forgórész esetén lépnek fel.
- Nagy amplitúdójú axiális rezgések az ideális elektromágneses térből kimozdult forgórészre, illetve a forgórész excentrikus deformációjára engednek következtetni.

Rezgések állórészhibák esetén

Az aszinkron villanymotorok állórésze tulajdonképpen a pólusok körül elhelyezett tekercsekből (fázisonként legalább egy-egy), az állórészhornyokból és a lemezkötegből áll. Az alkalmazás követelményei alapján a konstrukciós megoldások nagyban eltérnek egymástól.

A leggyakoribb hibaként a tekercsek rövidzárlata (szigetelési problémák), az állórész excentricitása, a tekercsek törései, valamint a laza lemezkötegek, illetve kötegrészek említhetők. A tekercsek és egyéb alkatrészek közötti rövidzárlat és a tekercsek törése (szakadása) elsősorban öregedés, üzemi rezgésterhelés, dinamikus igénybevétel, illetve villamos vagy termikus túlterhelés miatt fordulhat elő. Rövidzárlatot egy póluspáron belül, különböző póluspárok között, valamint a pólusok és a lemezköteg között figyelhetünk meg.



Nagyfeszültségű aszinkron villanymotor állórésze [Forrás: Lloyds - Dynamowerke, Bremen]

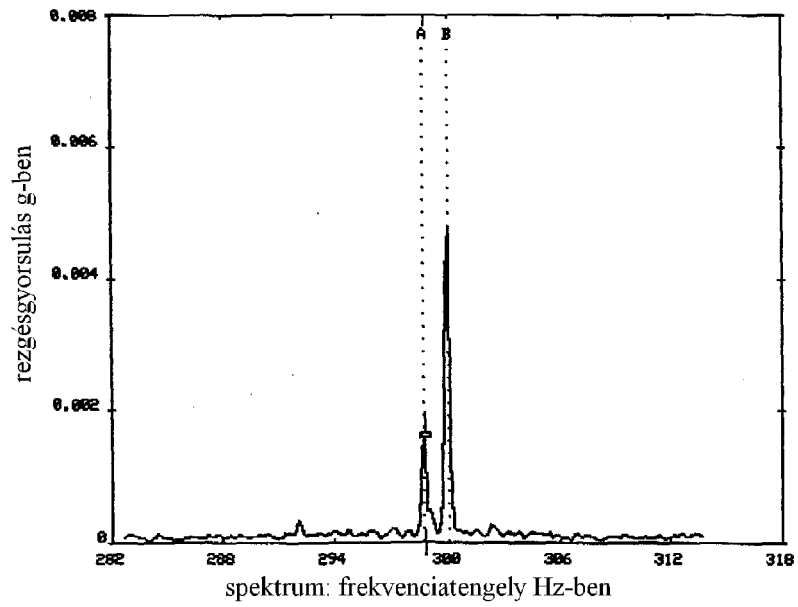
Az állórész elektromágneses terének excentricitása az állórész tekercseiben, illetve azok térbeli elhelyezésénél előforduló geometriai hibák, anyagminőségi problémák (inhomogenitások), valamint az állórész mechanikai vagy termikus deformációja (ez eredményezi a kerület mentén eltérő légrésméretet) következtében adódhat. Az állórész elektromágneses excentricitása tehát gyártási pontatlanságok vagy üzem közbeni meghibásodások (például termikus hatások, rezgésterhelés) eredménye egyaránt lehet.

Az állórészhiba esetén fellépő rezgések általános jellemzői:

- a nagy amplitúdójú, kétszeres hálózati frekvenciájú radiális rezgések excentricitásra, kiegyenlítetlen fázisokra, zárlatos tekercsekre vagy meglazult vasmagra utalnak;
- az axiális rezgés általában csekély, kivéve, ha forgórészproblémák is fennállnak;
- pólusmodulációs frekvenciájú oldalsávok fordulnak elő a forgásfrekvencia és többszörösei körül.

Megjegyzések:

Itt is megjegyzendő, hogy a meghajlott alapok, illetve "puha" lábbal felállított motorok esetén gyakran eltérő légrésméreteket lehet találni a kerület mentén. Így az állórész excentricitásából adódó hibajelenségek is kialakulnak. Másrészt a hibás tengelybeállítású vagy labilis ("puha" lábazzal) felállított motoroknál szintén a kétszeres hálózati frekvencián kiemelkedő értékeket mutató rezgések léphetnek fel.

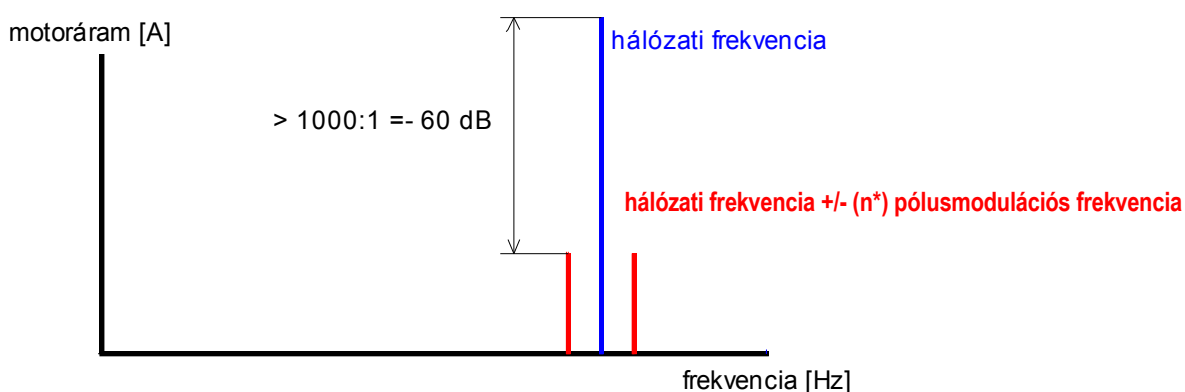


Tipikus frekvenciaspektrum hálózati felharmonikussal [forrás: CSI]

Rúdtörések diagnosztizálása villamos jelenségek alapján

A forgórész rúdjai, gyűrűi vagy kalickái törésének felderítésére leggyakrabban alkalmazott módszer a kisfrekvenciás tartományban végzett áramfelvétel fázisonkénti vizsgálata. Ehhez külön-külön mindegyik fázis áramát árammérő lakatfogó alkalmazásával kell megmérni. A hálózati frekvencia körüli tartományról minél nagyobb felbontású frekvenciaanalízis készítenőd. Az így nyert áramspektrumban a hálózati frekvencia és annak pólusmodulációs frekvenciájú oldalsávjai között megfigyelhető amplitúdóarány nyújt információt a hibadetektáláshoz. Ez az arány jellemzi az elektromágneses tér fordulatonkénti pulzálásának mértékét.

Az amerikai CSI cég a lakatfogóval történő áramspektrum-felvétel mellett a hordozható fluxustekercs alkalmazásával rögzíthető mágneses térerősségspektrumok kiértékelését is ajánlja. Azokban az esetekben, amikor az áramfelvétel mérése lehetetlen vagy veszélyes, a fluxusmérés-alapú spektrumanalízis jelenti az egyetlen megoldást az elektromágneses jelenségek rögzítésére. Az irodalmakban különböző határértékek találhatók a hálózati frekvencia és annak pólusmodulációs frekvenciájú oldalsávjai között megfigyelhető amplitúdóarányra.

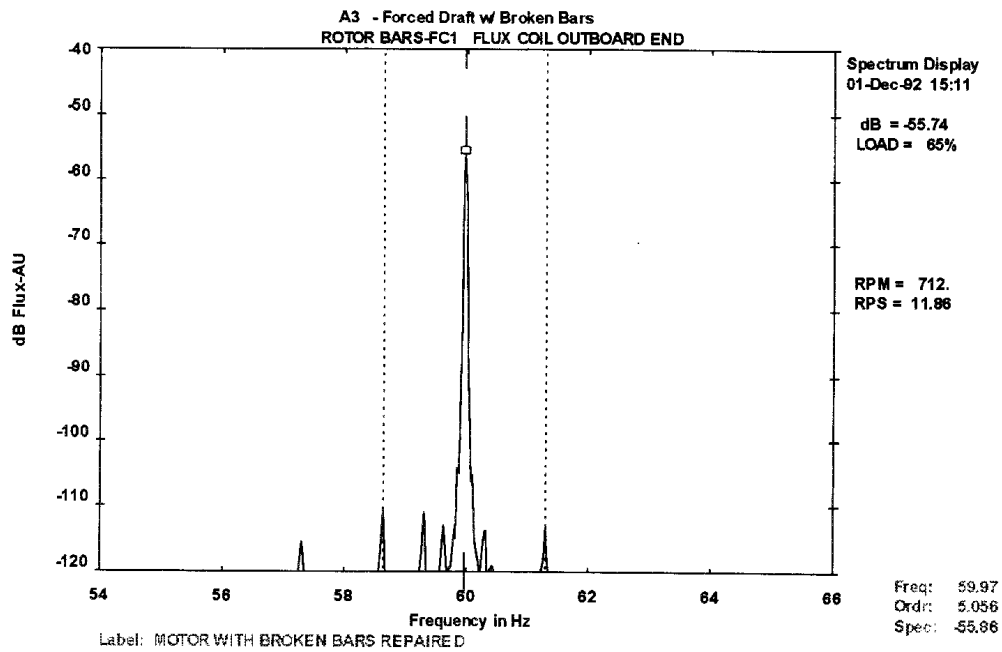
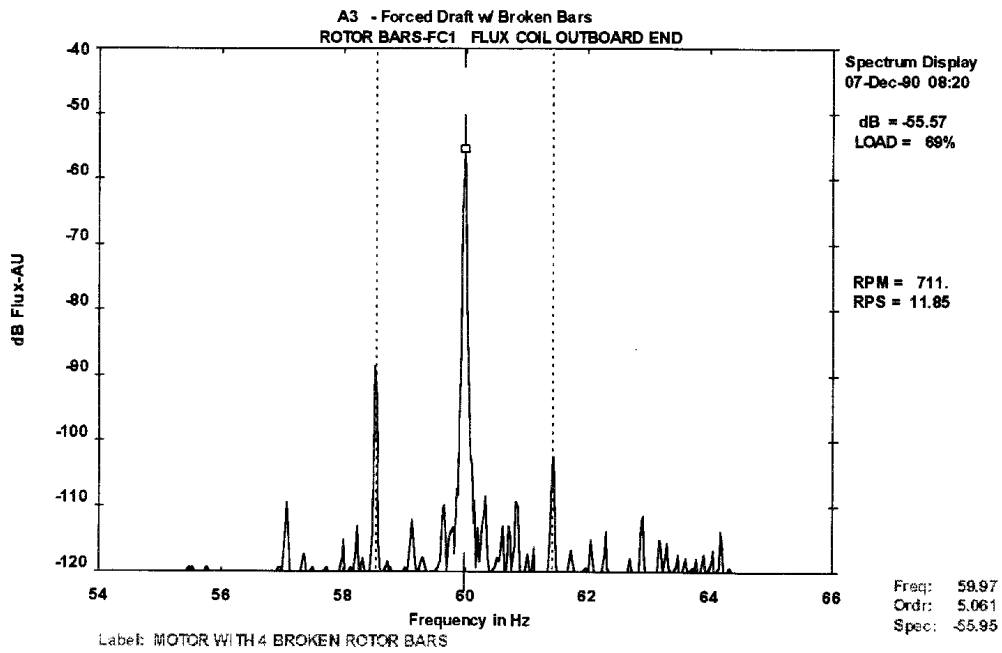


Forgórészrúd törésének identifikálása a motoráram spektrumában, illetve a kisfrekvenciás elektromágneses tér spektrumában [forrás: PIM]

Az irodalomban a hálózati frekvencia és a pólusmodulációs frekvenciájú oldalsávjai között megfigyelhető amplitúdóarányra a következő határértékek találhatók:

Forrás	CSI áram ill. fluxus	Mitchell áram
rendben	> 54 dB	> 45 dB
figyelmeztetés	54 - 45 dB	
riasztás	45 - 40 dB	35 - 45 dB
üzemzavar	< 40 dB	< 35 dB

Forrás	Technical Associates Of Charlotte (áram)	Megjegyzés
kiváló	> 60 dB	
jó	54 - 60 dB	
elfogadható	48 - 54 dB	trendfigyelés ajánlott
figyelmeztetés	42 - 48 dB	sérült forgórészrúd vagy nagyellenállású kontaktus
riasztás I	36 - 42 dB	törött forgórészrúd vagy több nagyellenállású kontaktus
riasztás II	30 - 36 dB	sok törött forgórészrúd, kalicka- ill. kontaktushiba
üzemzavar	< 30 dB	súlyos hibák (többféle is egyszerre)



Forgórészrudak törésének azonosítása az elektromágneses tér kisfrekvenciás spektrumában
 Fenti spektrum: 4 törött forgórészrúd
 Lenti spektrum: javított állapot
 [forrás: CSI]

Az előforduló szakkifejezések magyarázata

Szlipfrekvencia

A mechanikai forgásfrekvenciának és a szinkron elektromágneses tér forgásfrekvenciájának különbsége indukciós motoroknál. A szlip a növekvő terheléssel együtt nő, emiatt a motorproblémák legjobban teljes terhelés alatt vizsgálhatók meg. A szlip mértékét dimenzió nélküli szám jelzi.

$s = 1 - (F_r / F_{syn})$, ahol

F_r = motor-forgásfrekvencia (Hz-ben) = motorfordulatszám (fordulat/perc-ben) / 60

F_{syn} = szinkron elektromágneses tér forgási frekvenciája (Hz-ben) = $(2 * F_h / P)$

F_h = hálózati frekvencia (Hz-ben)

P = a motor pólusainak darabszáma

Rúdfrekvencia

A forgórészen lévő áramvezető rudak számának és a forgásfrekvenciának a szorzata. Villamosan gerjesztett mechanikus (tehát rezgés-) frekvencia.

$F_{rúd} = F_f * R$, ahol

F_f = a motor forgásfrekvenciája (Hz-ben) = motorfordulatszám (fordulat/perc-ben) / 60

R = a forgórész rúdjaik száma

Pólusmodulációs frekvencia

A pólusszám és a szlipfrekvencia szorzata. Az elektromágneses térben (illetve a tápáramban) előforduló villamosan gerjesztett frekvencia. Csak aszinkron motoroknál fordul elő, mechanikus rezgéseket okoz.

$F_{polm} = F_s * P$, ahol

F_s = a motor szlipfrekvenciája (Hz-ben) = $2 * F_h / P - F_f$

F_f = a motor forgásfrekvenciája (Hz-ben) = motorfordulatszám (fordulat/perc-ben) / 60

F_{syn} = az elektromágneses tér szinkronfrekvenciája (Hz-ben) = $2 * F_h / P$

P = a motor állórész pólusainak darabszáma