

# Frekvenciaváltós aszinkron motorok elektromágneses eredetű rezgéseinek vizsgálata

Váradiné Szarka Angéla

Miskolci Egyetem  
Gépészmérnöki Kar, Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék

## Abstract

*The heating plant in the city of Miskolc, North Hungary, provides hot water for six thousands of homes and 120 community buildings. In the boiler house one pump is carrying a mixture of hot water and small solid particulars and the pump is driven by an induction motor with one pump and spare-motor fed by one inverter. This up-to-date drive was put into practice by a well-known manufacturer recently. At the beginning the drive was running in an excellent way. Some time later, however, unexpected noise was observed and it developed further like knocking noise and hammer beat. Fault finding verified that roller bearings and connecting mechanical components damaged, therefore the other drive (no. 2) had to be supplied by the inverter due to switch over. Some time later the same phenomenon came up again at the motor (2). Tests of vibration and eccentricity did not reflect to any manufacturing or assembly faults. The author leading a scientific team worked out a hypothesis for exact diagnosis. The hypothesis for the fault-finding was that the reason of roller bearing damage was stochastic, sudden and frequent appearances of parasite torque resulting in counter torque braking. Plugging can be carried out by the inverter and/or the supply network and can appear several times within one revolution. To make sure of the reality of the hypothesis a series of measurements and analysis have been performed. In this paper results of the diagnostics is discussed.*

## Bevezetés

Ebben a cikkben egy olyan kooperációs kutatómunkát bemutatunk be, amely kiváló példája a multidiszciplináris tudományoknak. A munkát egy miskolci vállalat gépészmérnök szakembereinek felkérésére a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai - Elektronikai Tanszékén végeztük. A kutatást azok a váratlan csapás meghibásodások motiválták, amelyek az egyik hőközpontban működő szivattyúmotoroknál fordultak elő, miután a motorokat tápláló régi frekvenciaváltót új berendezésre cserélték.

A hőközpontban két nagyteljesítményű szivattyú motor üzemel váltott üzemben, egy közös, frekvenciaváltóról. A frekvenciaváltó berendezés átkapcsolható üzemben vagy az 1. számú vagy a 2. számú szivattyú motort működteti. Az új frekvenciaváltó üzembe helyezését követően a működtetett szivattyú motor mechanikája, egyre erősödő kopogó hangot adva, meghibásodott, majd a másik szivattyú motorra történő átkapcsolás után, hasonló (nem villamos jellegű) hibával ez a motor is meghibásodott. A második motor meghibásodása után felmerült a kérdés, hogy a frekvenciaváltó esetleges elégtelen működése, a változtatható tápfeszültség torzulása, egyéb nemkívánatos felharmonikus összetevők okozhatják-e a motorok csapásainak meghibásodását. A vállalat szakembereinek kérése alapján azt vizsgáltuk, hogy előfordulhat-e összefüggés a 0,4 kV-os városi hálózatról érkező villamos energia, illetve a frekvenciaváltó berendezés által szolgáltatott villamos energia minősége és a motorok meghibásodása között.

## Mérési és analízis módszer kidolgozása

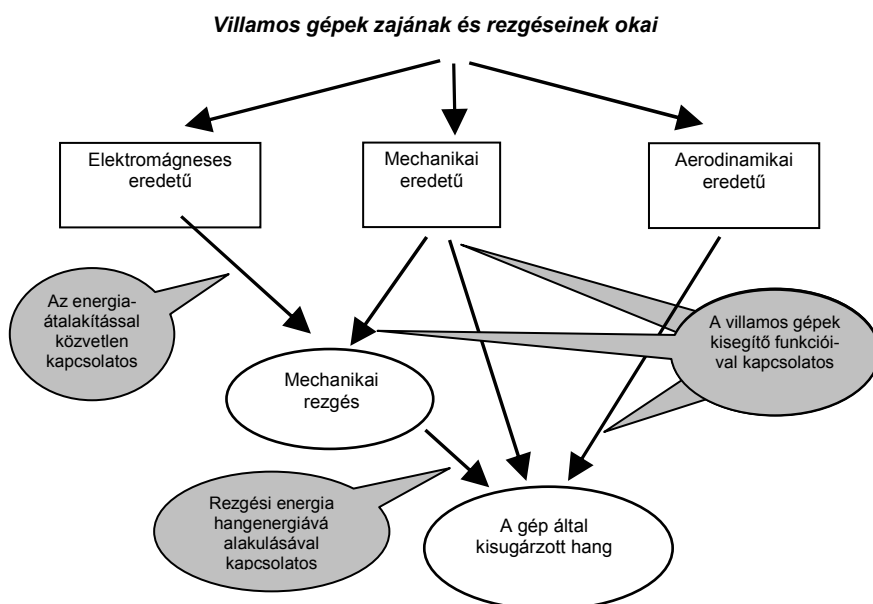
A felmerült probléma megoldására vizsgálati módszert és mérési eljárást dolgoztunk ki. Ennek a lényege röviden:

Tekintettel arra, hogy a szivattyú motorok meghibásodása mechanikai jellegű volt, tanulmányoztuk a forgó villamos gépek mechanikai rezgéseinek okait, eredetét, amelyet az [1]. számú irodalom alapján mutat be az 1. számú ábra.

A rezgéseltő hatások vizsgálata azt mutatja, hogy a hibák közvetlen okozója lehet a forgórész (esetleg állórész) fordulatszámfüggő rezgése, rezonanciája. Ilyet kiválthat több nem villamos eredetű ok is, pl. a hajtott

oldal (szivattyú, keringtető rendszer visszahatása, egytengelyűségi eltérés, stb.) hibája, de a forgórész rezgését okozhatják a villamos energiát szolgáltató berendezések hibás beállításából adódó parazita nyomatékok is.

Ahhoz, hogy ezen parazitanyomatékok hatását felderítsük, megvizsgáltuk és kiszámoltuk a csapágyak számos irodalomból jól ismert fordulatszámfüggő rezgési frekvenciáit (6-8) képletek, és a megfelelő rezgési frekvenciákat összehasonlítottuk a motor által felvett áram felharmonikus összetételével. A motor áramában fellépő, mechanikai rezgést keltő legfontosabb felharmonikus összetevők számításának módszereit az (1-5) képletek mutatják be, terjedelmi korlátok miatt a teljesség igénye nélkül.



1. ábra

*Forgó villamos gépek mechanikai rezgéseinek és zajkeltésének eredete és okai [1]*

3 fázisú aszinkron motorok elektromágneses eredetű rezgéseinek frekvenciái:  
 Állórész gerjesztés térbeli felharmonikusának frekvenciája:

$$f_{v_r} = f_1 \quad (1)$$

Forgórész gerjesztés térbeli felharmonikusának frekvenciája:

$$f_{\lambda_r} = f_1 \left[ 1 + \frac{g \cdot z_2}{p} \cdot (1-s) \right] \quad (2)$$

ahol  $p$  – póluspárok száma,  
 $z_2$  – forgórész-horonszám,  
 $s$  – szlip  
 $g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Mágneses vezetőképesség dinamikus excentricitási felharmonikusai:

$$f_e = \frac{f_1(1-s)}{p} \quad (3)$$

Forgórész excentricitási indukció-felharmonikusai:

$$f_{\lambda_e} = f_1 + f_e(g \cdot z_2 \pm 1) \quad (4)$$

Forgórész telítésből származó maradék tér felharmonikusai:

$$f_{\lambda_s} = f_1 \left[ 3 + \frac{g \cdot z_2}{p} \cdot (1 - s) \right] \quad (5)$$

Forgó gépek csapágyrezgéseinek frekvenciái:

Kosár, a gördülő elemek eltérései:

$$f_{bc} = \frac{r_i}{r_i + r_0} \cdot n \quad (6)$$

ahol  $r_i$  - belső futófelület sugara,  $r_0$  - külső futófelület sugara,  $n$  - fordulatszám [1/s]

Gördülő elemek hibája:

$$f_{re} = \frac{r_i \cdot r_0}{r_r \cdot (r_i + r_0)} \cdot n \quad (7)$$

ahol  $r_r$  - gördülő elemek sugara

Gyűrűk hibája:

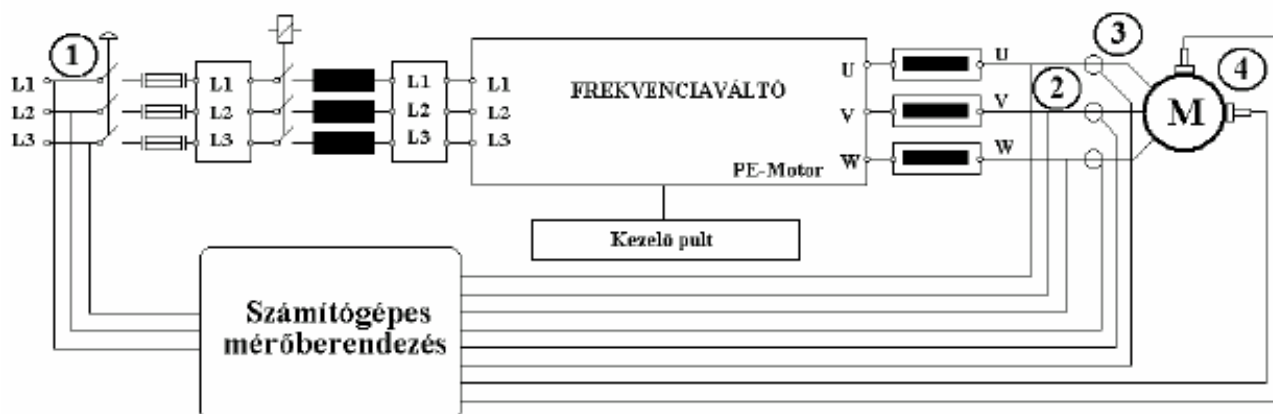
$$f_r = \frac{r_i}{r_i + r_0} \cdot Z_b \cdot n \quad (8)$$

ahol  $Z_b$  - golyók száma

A fenti elmélet alapján azt a feladatot tűztük ki, hogy olyan felharmonikusokat keressünk az áram spektrumokban, amelyek megegyeznek a szivattyú motor csapágyának rezgésfrekvenciáival.

A vizsgálatok során a 2. ábrán bemutatott pontokban az alábbi méréseket végeztük el:

1. Háromfázisú 0,4kV-os hálózati feszültség hullámalakjának mérése és frekvencia analízise
2. A frekvenciaváltó berendezés által szolgáltatott háromfázisú feszültség mérése és rögzítése
3. A motor vonali áramai hullámalakjának rögzítése és frekvencia analízise
4. A motor csapágyrezgéseinek rögzítése és frekvencia analízise



2. ábra

A mérési helyeket bemutató elvi rajz

A méréseket a szivattyú motor fordulatszámának lépcsőzetes növelésével, a tápfeszültség 20-40 Hz közötti tartományában, kb. 1 Hz-es lépésközönként végeztük el. A számítógépes mérőberendezés 12 csatornán, csatornánként 30 kHz-es frekvenciával gyűjtötte a nagyfelbontású frekvencia analízishez szükséges mintaszámot. Ez lehetővé tette az áram felharmonikusok és rezgésfrekvenciák 0-15 000 Hz közötti tartományban történő vizsgálatát.

## Mérési eredmények feldolgozása

### A 0,4 kV-os hálózatról vételezett villamos energia minőségének vizsgálata

A vonali feszültségek bármelyikének effektív értéke a vizsgálati idő alatt mindvégig jobb volt, mint a szabványelőírásokban megengedett eltérés maximuma, illetve minimuma ( $U_N +5,2\%$ ,  $-8,7\%$ ).

A mért értékek 392 és 411 V között változtak, amely

$$U_{\text{MÉRT}} = 400 \text{ V} \pm 2,75\%$$

értékhatár között mozog.

A frekvenciaváltó kikapcsolt üzeme esetén a vonali feszültségek hullámalak torzulása lényegesen alacsonyabb volt, mint a megengedett érték. A nemlinearitások mértékére bevezetett teljes harmonikus torzítás ( $THD_U$ ) értéke, valamint az egyedi harmonikus torzítás ( $D_U$ ) a mérés teljes időtartama alatt az alábbi maximumot mutatta:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} \cdot 100\% < 1,4\%$$
$$D_U = \frac{U_k}{U_1} \cdot 100\% < 1,1\%$$

ahol  $U_1$  az alapharmonikus feszültség,  $U_k$  a  $k$  rendszámú felharmonikus feszültség effektív értéke.

A mérések alapján megállapítható, hogy a hálózati villamosenergia minősége jobb, mint a szabványban előírt minőség, a mért paraméterek stabil energiaellátási feltételeket bizonyítanak, amely, semmiképpen nem okozhatják a szivattyú motorok meghibásodását, vagy a frekvenciaváltó hibás működését.

### A frekvenciaváltóról vételezett villamos energia és a csapágyrezgések vizsgálata

Az alkalmazott frekvenciaváltó berendezés korszerű teljesítmény-elektronikával, automatikus AVC (ún. Auto-Vector-Control) szabályozással és maximum 10 kHz (minimum 2,5 kHz) frekvenciájú feszültség-fluxus (FMC) modulációval üzemel. A moduláció üteme, frekvenciája, meghatározott terhelési állapotokban automatikusan változhat, ami a szivattyú motorok működésével együtt járó zajszint csökkenését eredményezheti.

A méréseket a frekvenciaváltó által szolgáltatott feszültség (a motorra kényszerített áram) frekvenciájának 20-40 Hz közötti változtatása mellett 0,5...1 Hz osztással 26 lépcsőben végeztük el.

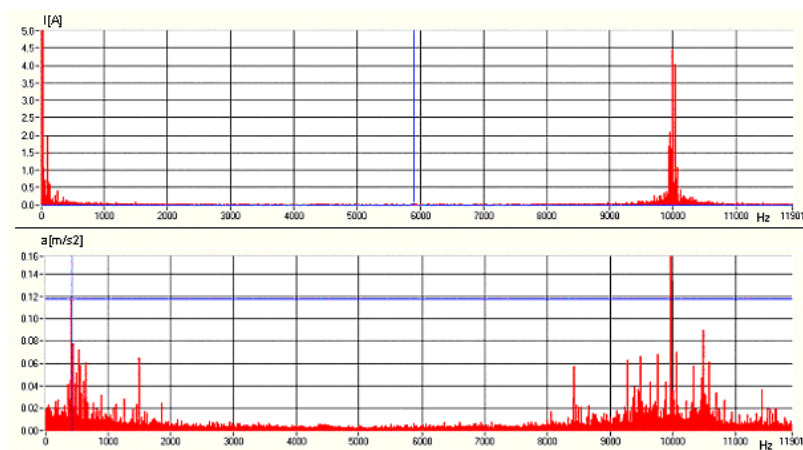
A mérési eredményekből megállapítható, hogy az FMC modulációval kialakított háromfázisú feszültség olyan – szimmetrikus háromfázisú – áramjel alakokat hoz létre, mely a nyomaték igényeknek megfelelő és szükséges forgó fluxus kialakítását biztosítja.

A vonali áramok felharmonikus tartalma meghatározó mértékben a 130 Hz alatti tartományban és jellemző módon a 10 kHz környezetében található, értéke kis mértékben fordulatszámfüggő (lásd 1-5. képletek).

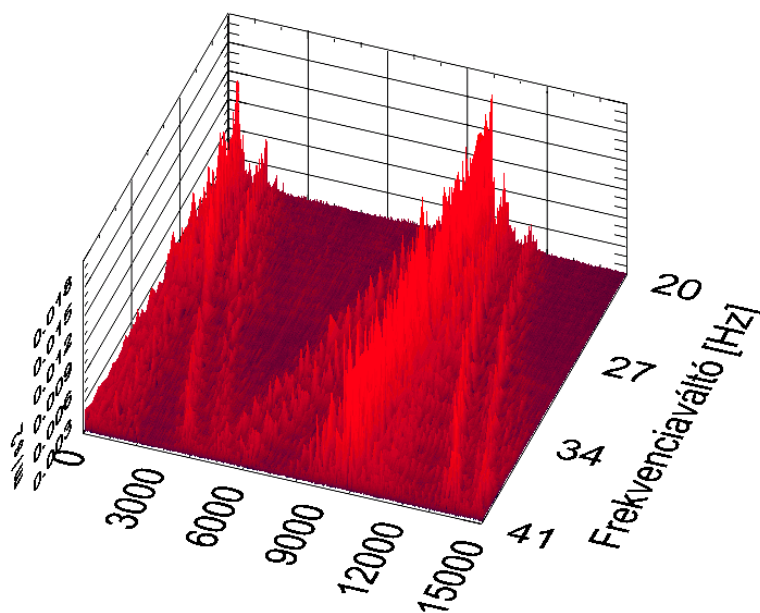
A teljes áram harmonikus torzítás:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \cdot 100\% < 3,51\%$$

A csapágyrezgések számítása és mérése az áramjelekkel összehasonlítva (3. ábra) azt mutatja, hogy a csapágyak rezgései a 100...1500 Hz közötti tartományban, valamint a 10 kHz környezetében jelentősek. Az alsó tartományban néhány mérés és frekvencia esetében, a felső tartományban egyértelműen minden mérésnél megállapítható, hogy a csapágyrezgések frekvenciája pontosan megegyezik a frekvenciaváltó által szolgáltatott áram felharmonikusával és azokkal teljes mértékben rezonál. A rezgés 3D-s ábráján (4. ábra) jól megfigyelhető, hogy a motor összetett rezgést végez, a rezgések amplitúdója alacsonyabb fordulatszámon és kis frekvenciákon, valamint bármely fordulatszámon a 10 kHz környezetében markánsan kiemelkedik, amely frekvenciafüggő változás bizonyos fordulatszámokon az áramjel felharmonikusával találkozik és azzal rezonálva, meghibásodást okozhat a motor csapágyaiban.



3. ábra  
*A motor vonali áramának és csapágyrezgésének frekvencia spektruma*



4. ábra  
*A motor rezgésének 3D-s ábrája*

### Felhasznált irodalom

- [1] Dr. Timár Peregrin L.: Villamos gépek zaja és rezgése. Műszaki Könyvkiadó, Bp, 1986.
- [2] T. Szarka, A. Varadine: Investigation of Electrical Network Disturbances Hazardous for Operation of Control Systems. WESIC 2003. 4th Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration, Miskolc, 2003. pp. 221-227.
- [3] E. Kovacs, L. Radacs, T. Szarka, A. Varadine: Measurement Methods for Quality Assurance of Electrical Energy Supply in the North Hungarian Region. International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, Slovakia, 2003. pp. 428-432.