Vibrace asynchronního stroje buzené jednostranným magnetickým tahem při různých poruchách rotoru

Jan Šobra
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Fakulta elektrotechnická
Západočeská univerzita v Plzni
jsobra@kev.zcu.cz

Vibrations of Induction Machine Excited by Unbalanced Magnetic Pull Caused by Various Rotor Faults

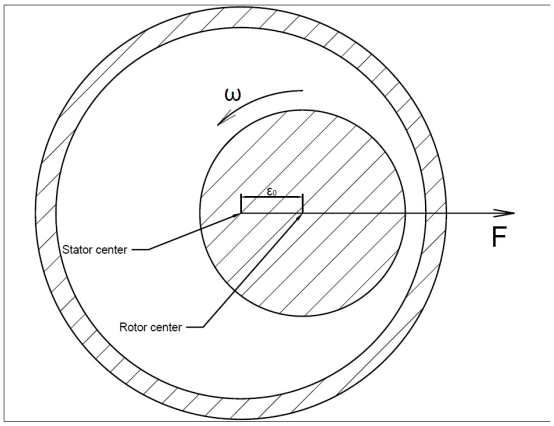
Abstract – **Experimental analyses of squirrel-cage induction machine vibrations under several rotor fault conditions causing unbalanced magnetic pull are carried out in the paper. These fault conditions include dynamic eccentricity, different number of broken rotor bars and one case of fault combination. Frequency vibration spectra of faulty operational states are compared to the one of healthy machine.**

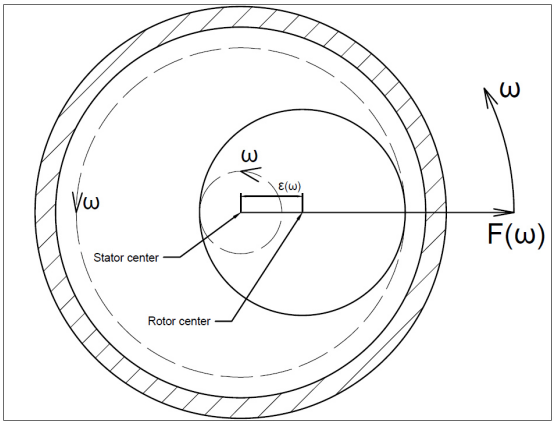
Keywords – Induction machine; Unbalanced magnetic pull; Vibrations

I. ÚVOD

V elektrických strojích se každá porucha mechanického i elektromagnetického původu projevuje vznikem, případně nárůstem, vibrací na určité frekvenci. Jednostranný magnetický tah vzniká nerovnoměrným rozložením radiálních magnetických sil po obvodu vzduchové mezery elektrického stroje. Ve směru výslednice magnetických sil pak dochází k přídavnému namáhání rotoru na ohyb a zvýšenému opotřebení ložisek. Jednostranný magnetický tah lze z hlediska klasifikace poruch zařadit mezi poruchy elektromagnetické, ačkoli jeho působení může následně vyvolat poruchy mechanické (průhyb hřídele, předčasné opotřebení ložisek nebo v krajním případě tření rotoru o stator). To znamená, že jím buzené vibrace by měly zaniknout ihned po odpojení napájecího napětí.

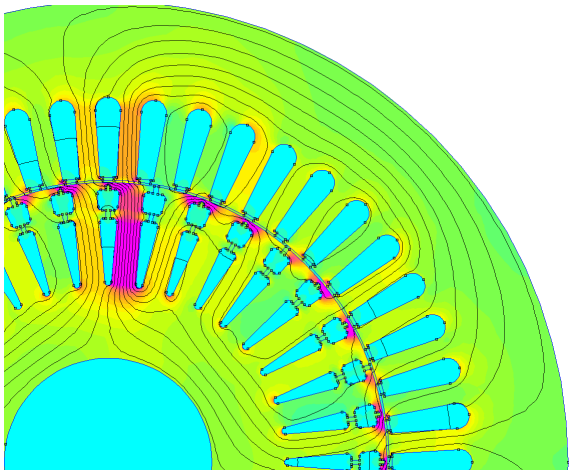
Pokud je rotor uložen do statoru excentricky, působí jednostranný magnetický tah ve směru nejmenší vzduchové mezery. V případě statické excentricity (Obrázek I) je pozice minimální vzduchové mezery v čase stálá a velikost a směr jednostranného magnetického tahu se tedy nemění. Lze jí popsat dokonale tuhým hřídelem, který je do statoru namontován s určitou výchylkou od osy statoru, ale otáčí se okolo své vlastní osy. V případě dynamické excentricity (Obrázek II) se spolu s pozicí minimální vzduchové mezery mění i směr jednostranného magnetického tahu. Dynamická excentricita je většinou způsobena ohnutím hřídele již během výroby nebo teplotní nevyvážeností rotoru během provozu. Osy statoru a rotoru jsou tedy opět posunuté, ovšem tentokrát se rotor otáčí okolo osy statoru. V praxi se často vyskytuje smíšená excentricita, která je kombinací statické a dynamické excentricity. U elektrických strojů se obecně připouští maximální excentricita 10% velikosti vzduchové mezery.





Obrázek I. **Statická excentricita [1]** ***Obrázek II.*** **Dynamická excentricita [1]**

Pokud dojde k přerušení tyče rotoru, zaniká v dané tyči elektrický proud a tím pádem také rozptylový magnetický tok v okolí tyče. Následkem je přesycení zubu rotoru sousedícího s přerušenou tyčí ve směru otáčení. To vede ke vzniku poměrně veliké radiální magnetické síly, která se otáčí společně s rotorem a způsobuje jednostranný magnetický tah podobně jako dynamická excentricita. Navíc proud, který přerušenou tyčí původně protékal, se rozdělí mezi okolní tyče a tím dochází k jejich nadměrnému zahřívaní. Rozložení magnetického pole v okolí přerušené tyče rotoru je pro názornost zobrazeno na Obrázku III.



Obrázek III. **Přesycený zub rotoru. Přerušená tyč se nachází vpravo od zubu [1].**

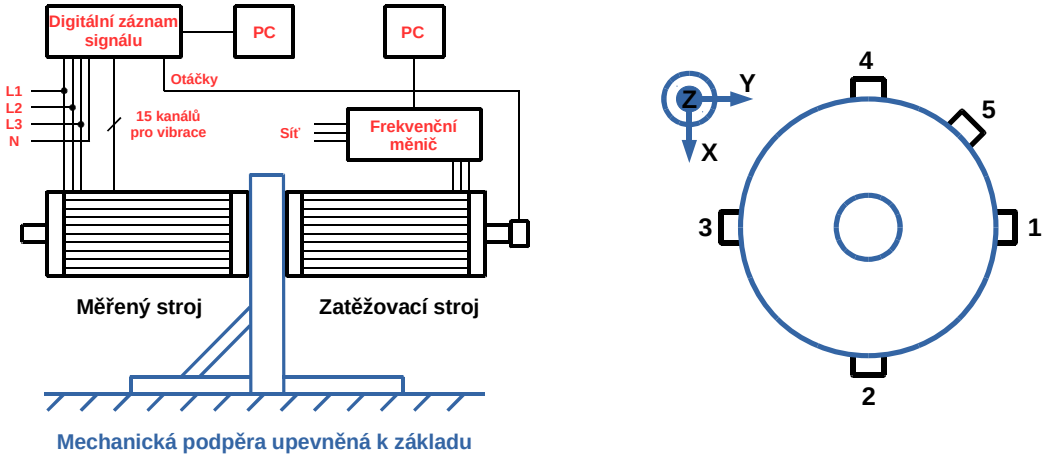
Jelikož se v obou případech (dynamická excentricita i přerušená tyč) mění pozice jednostranného magnetického tahu s otáčením rotoru, jsou tím buzeny vibrace na otáčkové frekvenci (1). Právě vibrace na této frekvenci a jejích harmonických jsou sledovanými složkami v naměřených spektrech vibrací.

$$f_{1x} = \frac{RPM}{60} \tag{1}$$

II. MĚŘENÍ A VÝSLEDKY

Měřený stroj je čtyřpólový asynchronní motor s klecí nakrátko o výkonu 18 kW. Vinutí je zapojeno do hvězdy a stroj je měřen při jmenovitém zatížení. Dynamická excentricita odpovídá 28,5 % velikosti vzduchové mezery. Měřený stroj je napájen z autotransformátoru a je zatížen identickým strojem napájeným z frekvenčního měniče.

Po obvodu kostry měřeného stroje je umístěno pět tříosých akcelerometrů, ovšem vzhledem k teoretickým předpokladům jsou zde vyhodnoceny pouze vibrace v radiálním směru. Měřené signály jsou ukládány do PC se vzorkovací frekvencí 10 kHz. Zapojení měření a rozmístění akcelerometrů po obvodu kostry je schematicky znázorněno na Obrázku IV [2].



Obrázek IV. **Schéma měření a rozmístění akcelerometrů [2].**

Pro měřený stroj je k dispozici několik náhradních rotorů a postupně jsou tak naměřeny vibrace bezvadného stroje, stroje s dynamickou excentricitou (v tabulce jako DEC), jednou (1BB), dvěma (2BB) a třemi (3BB) sousedními přerušenými tyčemi, dále s dvěma přerušenými tyčemi, mezi nimiž se nachází čtyři bezvadné tyče (1x2BB) a kombinací dynamické excentricity a dvěma nesousedními přerušenými tyčemi (DEC_1x2BB). Naměřené průběhy vibrací jsou podrobeny FFT analýze a níže jsou vyhodnoceny poměry amplitud vibrací na sledovaných frekvencích při jednotlivých poruchových stavech vůči amplitudám vibrací bezvadného stroje. Spektra jsou vyhodnocena ve frekvenčním rozsahu do 300 Hz, kde jsou zahrnuty otáčkové frekvence do osmé harmonické. Jelikož jsou spektra ve všech měřených pozicích téměř shodná, jsou níže vyhodnoceny pouze údaje z akcelerometru číslo 1. Poměry amplitud vibrací porucha/bezvadný stroj jsou uvedeny v Tabulce I.

TABULKA I. POMĚR AMPLITUD VIBRACÍ PORUCHA/BEZVADNÝ STROJ

Porucha	**Harmonická otáčkové frekvence**							
	1x	**2x**	**3x**	**4x**	**5x**	**6x**	**7x**	**8x**
DEC	9.99	1.05	1.29	0.51	2.24	7.35	3.59	1.09
1BB	3.51	2.28	0.98	0.06	11.67	5.71	7.13	14.59
2BB	1.07	2.60	3.37	0.39	12.06	47.21	6.46	2.08
3BB	5.66	13.28	4.24	0.96	86.15	35.06	21.94	10.16
1x2BB	8.55	3.66	1.39	0.06	7.77	55.72	10.47	2.55
DEC_1x2BB	4.85	2.05	1.73	0.62	6.51	3.74	14.05	4.86

Jak lze vidět v tabulce, u všech poruch dochází k nárůstu vibrací na všech harmonických otáčkové frekvence s výjimkou čtvrté, kde je naopak zaznamenán pokles vibrací. U stroje s jednou přerušenou tyčí, pak ještě nastává nepatrný pokles vibrací na třetí harmonické otáčkové frekvence. Velmi výrazný nárůst vibrací nastává u některých poruch na páté až osmé harmonické.

U základní harmonické, která je z hlediska diagnostiky daných poruch nejdůležitější, dochází k největšímu nárůstu vibrací u dynamické excentricity. Velikost vibrací u této poruchy je však závislá na velikosti excentricity. Zajímavý je pouze malý nárůst vibrací u rotoru se dvěma přerušenými tyčemi. Ten je však zaznamenán ve všech měřených pozicích, čímž lze vyloučit chybu snímače nebo jeho špatného uchycení. Nárůst vibrací na druhé a třetí harmonické je však již dostatečně výrazný. V případě kombinace dynamické excentricity a dvou přerušených tyčí se čtyřmi bezvadnými mezi nimi dochází k výraznému nárůstu vibrací základní harmonické oproti bezvadnému stroji, ovšem tento nárůst je podstatně menší než u samotných DEC a 1x2BB poruch. To je způsobeno odlišným směrem působení složek jednostranného magnetického tahu od dynamické excentricity a přerušených tyčí.

III. ZÁVĚR

V článku je vysvětlen způsob vzniku vibrací při dynamické excentricitě a přerušených tyčích rotoru. Dále je zde popsán způsob měření a vyhodnocení vibrací při dynamické excentricitě, různém počtu přerušených tyčí rotoru a kombinaci obou druhů poruch. Všechny tyto poruchy se vyznačují nárůstem vibrací na otáčkové frekvenci a proto je pro jednoznačné určení poruchy často nutné provést další testy, případně vyjmout rotor a provést jeho vizuální kontrolu.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2016-006 a projektu SGS-2015-038: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích II.

LITERATURA

[1] J. Sobra, V. Kindl and B. Skala, "Determination of the force caused by broken rotor bar and static eccentricity in an induction machine," *ELEKTRO 2014*, Rajecke Teplice, 2014, pp. 375-378.

[2] J. Sobra, T. Vaimann, and A. Belahcen, “Mechanical vibration analysis of induction machine under dynamic rotor eccentricity,” *17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2016)*, pp.413-416.