FAKULTA Elektrotechnická Západočeské Univerzity V plzni

Oddělení: Zpráva č.: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky 22160-012-2013

# Vliv excentricity na sílu působící na rotor asynchronního stroje

| Druh úkolu:    | vědecko - výzkumný         |
|----------------|----------------------------|
| Řešitelé:      | Ing. Jan Šobra             |
| Vedoucí úkolu: | Ing. Vladimír Kindl, Ph.D. |
| Počet stran:   | 15                         |
| Datum vydání:  | listopad 2013              |
| Verze:         | 1.0                        |

Tato práce je podporována projektem SGS-2012-071

© F E L Z Č U

2013

### Anotace

Zpráva se zabývá působením sil ve vzduchové mezeře asynchronního stroje při nestejné vzduchové mezeře. Je proveden teoretický popis sil ve vzduchové mezeře respektující drážkování statoru i rotoru. Metodou konečných prvků je zjišťována celková velikost a směr síly působící na rotor stroje při různé excentricitě.

#### Abstract

The report deals with forces acting in the air gap of induction machine with unequal air gap. The theoretical air gap force description respecting both, the stator and the rotor slotting is performed. Total value and direction of the force acting on the rotor of the machine with different eccentricity is determined via Finite Element Method.

## Seznam symbolů a zkratek

| MMF | magnetomotorická síla (magnetomotive force)    |
|-----|--|
| МКР | metoda konečných prvků                         |
| MST | Maxwell stress tensor (maxwellův tenzor pnutí) |

## Obsah

| Anotace  | 2  |
|--|----|
| Seznam symbolů a zkratek                           | 3  |
| Obsah  | 4  |
| 1 Úvod   | 5  |
| 2 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře | 6  |
| 2.1 Základní harmonická MMF                        | 6  |
| 2.2 Permeance magnetického obvodu                  | 6  |
| 2.3 Magnetická indukce                             | 7  |
| 3 Popis modelu                                     | 8  |
| 3.1 Geometrie modelu                               | 9  |
| 4 Vyhodnocení modelu                               | 10 |
| 5 Závěr  | 12 |
| Reference  | 13 |
| Seznam obrázků                                     | 14 |
| Historie revizí                                    | 15 |

## 1 Úvod

Rozložení sil ve vzduchové mezeře má na činnost asynchronního stroje významný vliv[1, 2]. Tento vliv může být pozitivní, ale také negativní. Pozitivním vlivem je zejména vytvoření momentu na hřídeli, zatímco mezi negativní vlivy lze počítat například vznik chvění statorového svazku a kostry [3] nebo jednostranný magnetický tah v případě ohnutého nebo excentricky uloženého rotoru [4].

Magnetické pole ve vzduchové mezeře je ovlivněno mnoha faktory. Mezi tyto vlivy patří zejména drážkové harmonické, způsobené drážkováním statoru i rotoru a také vyšší harmonické magnetomotorické síly (MMF) obou vinutí [1].

Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře lze vypočítat jako součin permeance magnetického obvodu a MMF [1, 5]. Tento výpočet uvažuje vyšší harmonické MMF, otáčivou rychlost rotoru, čas a drážkování rotoru i statoru. Výpočet uvedený v této zprávě je však mírně zjednodušený, aby lépe odpovídal platnosti konečně prvkových modelů [6].

Prezentované konečně prvkové modely slouží k určení celkové velikosti a směru síly působící na rotor asynchronního stroje při excentrickém uložení hřídele. Nejprve je zjišťována síla pro vystředěný rotor a poté pro tři různé excentricity. Modelován je asynchronní motor SIEMENS 1LA7 163-4AA10 o výkonu 11 kW.

## 2 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Permeance magnetického obvodu asynchronního stroje se po obvodu vzduchové mezery pravidelně mění. Důvodem je rozdílná permeabilita v zubové a drážkové části magnetického obvodu statoru i rotoru. S ohledem na tuto skutečnost se mění také magnetická indukce ve vzduchové mezeře, kterou lze vyjádřit jako součin permeance a MMF. Vyšší harmonické MMF, otáčení rotoru a úhlová frekvence pole statoru jsou zanedbány [6].

## 2.1 Základní harmonická MMF

Základní harmonickou MMF pro symetrické třífázové statorové vinutí lze určit jako:

$$F_1(x) = A_p \sin(px) \tag{1}$$

kde  $A_p$  - amplituda průběhu, p - počet pólových dvojic a x - úhlová poloha na vnitřním obvodu statoru.

#### 2.2 Permeance magnetického obvodu

Za předpokladu neměnné pozice rotoru vůči statoru a drážkování statoru i rotoru je možné vyjádřit permeanci vzduchové mezery následujícím způsobem:

$$\Lambda(x) = c_0 + c_1 \cos(Q_1 x) + c_1 \cos(Q_2 x)$$
<sup>(2)</sup>

kde 
$$c_0 = \frac{1}{\delta k_{c1} k_{c2}}, \ c_1 = \frac{1}{\delta k_{c2}} \beta \left(\frac{b_s}{\delta}\right) F_1\left(\frac{b_s}{t_s}\right)$$
 a  $c_1 = \frac{1}{\delta k_{c1}} \beta \left(\frac{b_r}{\delta}\right) F_1\left(\frac{b_r}{t_r}\right)$ 

a  $Q_1, Q_2$  - počet drážek statoru/rotoru,  $k_{c1}, k_{c2}$  - Carterův činitel statorového/rotorového vinutí,  $\delta$  - velikost vzduchové mezery,  $b_s, b_r$  - šířka drážek statoru/rotoru ve vzduchové mezeře,  $t_s, t_r$  - drážková rozteč statoru/rotoru a  $\beta\left(\frac{b_s(b_r)}{\delta}\right), F_1\left(\frac{b_s(b_r)}{t_s(t_r)}\right)$  - koeficienty dané charakteristikami v [5].

## 2.3 Magnetická indukce

Hodnotu magnetické indukce ve vzduchové mezeře danou základní harmonickou MMF a drážkováním rotoru a statoru lze tedy určit jako:

$$B(x) = F(x)\Lambda(x) = A_{p}c_{0}\sin(px) -\frac{1}{2}A_{p}c_{1}\left[\sin((p-Q_{1})x) + \sin((p+Q_{1})x)\right] -\frac{1}{2}A_{p}c_{1}\left[\sin((p-Q_{2})x) + \sin((p+Q_{2})x)\right]$$
(3)

### **3 Popis modelu**

Celková velikost a směr síly, působící na rotor stroje při excentricky uloženém hřídeli, je zjišťována pomocí konečně prvkového modelu v programu FEMM 4.2. Jak je uvedeno výše, jedná se o model skutečného asynchronního motoru. Štítkové parametry stroje jsou uvedeny na Obr. 1.

| parameter name       | unit                 | value     |  |
|----------------------|----------------------|-----------|--|
| Power                | [kW]                 | 11        |  |
| Voltage $\Delta$ / Y | [V]                  | 230/400   |  |
| Current $\Delta / Y$ | [A]                  | 37.3/21.5 |  |
| RPM                  | [min <sup>-1</sup> ] | 1460      |  |
| Number of poles      | [-]                  | 4         |  |
| cos φ                | [-]                  | 0.84      |  |

Obr. 1. Štítkové parametry modelovaného stroje

Na statoru je navinuto čtyřicet osm drážek, na rotoru je dvojitá klec nakrátko s třiceti šesti tyčemi. Vinutí statoru je modelováno se šesti matematickými fázemi a v každé drážce je navinuto patnáct závitů. Efektivní délka stroje je  $l_e = 1365 mm$ . Magnetický obvod statoru i rotoru je skládaný z plechů tloušťky 0,35 mm, vyrobených z oceli typu M350-50A. Hřídel je vytvořena z nemagnetické oceli.

Modelován je tzv. ideální stav naprázdno, kdy je rotor stroje v úplné synchronizaci s magnetickým polem statoru. Úloha je tedy modelována jako magnetostatická (f = 0) a mechanické ztráty vznikající v ložiskách stroje a třením rotujících částí o vzduch nejsou uvažovány [7].

Motor je modelován nejprve s vystředěným rotorem, tedy s nulovou excentricitou. V dalších modelech je pak síla zjišťována pro pět různých velikostí excentricity. Velikost vzduchové mezery je  $\delta = 0.35 mm$  a síly jsou vždy vyhodnocovány v jejím středu. Síly v programu FEMM jsou počítány přes křivkový integrál pomocí Maxwellova tenzoru pnutí [8]. Síla v konkrétním bodě je počítána následujícím způsobem:

$$dF = \frac{1}{2} \left( H \left( B \cdot n \right) + B \left( H \cdot n \right) - \left( H \cdot B \right) n \right) \tag{4}$$

kde n – normála k ploše v daném bodě.

Excentricita je vytvořena posunutím celého rotoru o požadovanou vzdálenost v záporném směru na ose *y*. Jedná se tedy o statickou excentricitu, která se vyznačuje tím, že minimální vzduchová mezera se nachází stále ve stejném místě. Výsledná síla potom působí právě ve směru minimální vzduchové mezery. Modelované hodnoty excentricity jsou uvedeny na Obr. 2.

| e [mm] | 0 0 | 0,01 0,035 | 5 0,05 | 0,1 | 0,175 |
|--------|-----|------------|--------|-----|-------|
|--------|-----|------------|--------|-----|-------|

Obr. 2. Hodnoty modelované excentricity

#### 3.1 Geometrie modelu

Na Obr. 3 je zobrazena geometrie modelu pro nulovou excentricitu. Počátek souřadného systému je ve všech případech umístěn ve středu statoru. Horizontální osa je pak označována jako x, vertikální osa jako y.



*Obr. 3.* Geometrie modelu pro nulovou excentricitu

## 4 Vyhodnocení modelu

Mapy rozložení magnetické indukce pro tři vybrané případy jsou uvedeny na Obr. 4, 6 a 7. Zatímco při excentricitě e = 0 mm je rozložení magnetické indukce ve stroji prakticky rovnoměrné, při vzrůstající velikosti excentricity je v ose y patrné větší sycení magnetického obvodu ve směru nejmenší vzduchové mezery. Tento fakt je nejvíce zřejmý v jádru statoru.



*Obr. 4.* Rozložení magnetické indukce pro e = 0 mm

Velikost celkové síly působící na rotor ve směru os x a y je uvedena na Obr. 5.

| e [mm]             | 0      | 0.01     | 0.035     | 0.05      | 0.1       | 0.175     |
|--------------------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| F <sub>x</sub> [N] | 11.00  | 1.02     | 7.41      | 10.21     | - 1.36    | 19.63     |
| $F_{y}[N]$         | - 9.06 | - 434.52 | - 1503.97 | - 2141.99 | - 4316.32 | - 7665.01 |

| Obr. 5. | Velikost sil ve směru os x a y |
|---------|--------------------------------|
|---------|--------------------------------|



*Obr. 6.* Rozložení magnetické indukce pro e = 0,035 mm



*Obr.* 7. Rozložení magnetické indukce pro e = 0,175 mm

#### 5 Závěr

Narůstající velikost síly ve směru zvětšující se excentricity je zřejmá na Obr. 5. Při excentricitě e = 0 mm by celková síla, vzhledem k rovnoměrnému rozložení magnetického pole, měla být teoreticky nulová. Skutečnost, že model vykazuje malé silové působení ve směru obou os, může být způsobena určitou chybou při vyhodnocení MST.

Všeobecně by u všech typů elektrických točivých strojů neměla velikost excentricity překračovat hodnotu jedné desetiny velikosti vzduchové mezery. V případě modelovaného stroje odpovídá tato velikost hodnotě e = 0,035 mm. Větší hodnoty excentricity byly modelovány zejména pro demonstrativní účely. Při této excentricitě působí na rotor ve směru minimální vzduchové mezery síla  $F_y = -1503,97 N$ . Pokud je uvažována velikost tíhového zrychlení  $g = 9,81 m \cdot s^{-2}$ , lze odvodit, že tíha působící na rotor v tomto směru odpovídá hmotnosti m = 153,31 kg. To je zhruba desetinásobek hmotnosti rotoru!

Následkem tohoto působení je zejména přídavné namáhání ložisek. Působící síla by také mohla vyvolat vibrace v konstrukčních částech stroje. Vzhledem k malé délce rotoru  $(l_e = 1365 mm)$  nelze předpokládat průhyb hřídele.

Pro experimentální výzkum na stroji SIEMENS 1LA7 163-4AA10 lze z modelovaných variant doporučit pouze velikost excentricity e = 0,01 mm. V tomto případě působí na rotor tíha odpovídající hmotnosti m = 44,3 kg, což je přibližně trojnásobek hmotnosti rotoru.

#### Reference

- [1] Heller B. and Hamata, V., "Additional fields, forces and losses in the induction machine," NCSAV, Praha, (1961)
- [2] Jimoh, A. A.; Findlay, R. D., "Parasitic torques in saturated induction motors," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.3, no.1, pp.157,163, Mar 1988
- [3] Onodera, S.; Yamasawa, K., "Electromagnetic vibration analysis of a squirrel-cage induction motor," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.29, no.6, pp.2410,2412, Nov 1993
- [4] Golebiowski, L.; Mazur, D., "The effect of strong parasitic synchronous and asynchronous torques in induction machine with rotor eccentricity," Electrotechnical Conference, 2000. MELECON 2000. 10th Mediterranean, vol.3, no., pp.982,985 vol.3, 29-31 May 2000
- [5] Heller, B. and Jokl, A.L., "Tangential Forces in Squirrel-Cage Induction Motors," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol.PAS-88, no.4, 484-492 (1969)
- [6] Šobra, J.; Kindl, V., "FEM Model of Induction Machine's Air Gap Force Distribution," 10th International Conference Mechatronics 2013, Mechatronics 2013, pp.307-313, Springer 2013, ISBN 978-3-319-02293-2
- [7] Hruška, K. "Problematika kotev nakrátko asynchronních strojů," Dizertační práce, FEL ZČU, Plzeň, (2011)
- [8] Meeker, D. C., "Finite Element Method Magnetics, Version 4.2 (11Oct2010 Build), " http://www.femm.info, 2006

## Seznam obrázků

| Obr. 1 | Štítkové parametry modelovaného stroje          | 8  |
|--------|---|----|
| Obr. 2 | Hodnoty modelované excentricity                 | 9  |
| Obr. 3 | Geometrie modelu pro nulovou excentricitu       | 9  |
| Obr. 4 | Rozložení magnetické indukce pro $e = 0 mm$     | 10 |
| Obr. 5 | Velikost sil ve směru os x a y                  | 10 |
| Obr. 6 | Rozložení magnetické indukce pro $e = 0,035 mm$ | 11 |
| Obr. 7 | Rozložení magnetické indukce pro $e = 0,175 mm$ | 11 |

## Historie revizí

| Dav  | Vanitala | Donie změru           | Datum        |
|------|----------|-----------------------|--------------|
| Rev. | καριτοία | Popis zmeny           | Jméno / Kat. |
| 1.0  | Věe      | První verze dokumentu | 13.11.2013   |
| 1.0  | v 3C     |                       | Šobra / KEV  |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |
|      |          |                       |              |