

Zachycení sil působící na statorová vinutí extrémně namáhaných točivých strojů

Stauber J., Sládek V., Krupauer P.
BRUSH SEM s.r.o. Plzeň

Anotace

Text is focused on questions concerning with forces reduction interacting at stator windings. On an example of special machine (short-circuit generator) there are shown basic methods how to solve stator windings with respect to forces reduction. This is solving of dynamic problem (shape of oscillation, natural frequency). At conclusion there is shown a relationship with generators and especially with turbogenerators of ultimate power.

ÚVOD

Příspěvek navazuje na článek „Vliv chvění statorového vinutí na izolační systém“ zveřejněný na konferenci DIAGNOSTIKA '05, který se věnoval návrhu statorového vinutí s ohledem na upevnění statorového vinutí a ukazoval možnosti omezení vibrací čel vinutí běžných (energetických) strojů. Zatímco u turbogenerátoru je zkrat mimořádná událost, tak zkratový generátor jich ročně absoluuje tisíce. Konstruktivní řešení je podřízeno zejména požadavku zachytit značné elektrodynamické síly působící na vinutí po celou dobu životnosti stroje. Znamená to volbu takového řešení, které eliminuje co nejvíce ohybové namáhání. To nejlépe splňuje jednovrstvové vinutí s evolventními čelními spojkami uspořádaných ve dvou rovinách kolmých na osu stroje. Ohybové namáhání je omezeno na krátký úsek na výstupu z drážky.

SÍLY PŮSOBÍCÍ NA STATOROVÉ VINUTÍ

V drážkové části působí na vinutí elektrodynamické síly vznikající na základě vzájemného působení

proudu ve vinutí a rozptylových polí v drážce. Vzhledem k tomu, že vinutí je jednovrstvové, tak síly namáhají izolaci jen v tlaku.

V čelech vinutí působí dominantní síly, které jsou vyvolány:

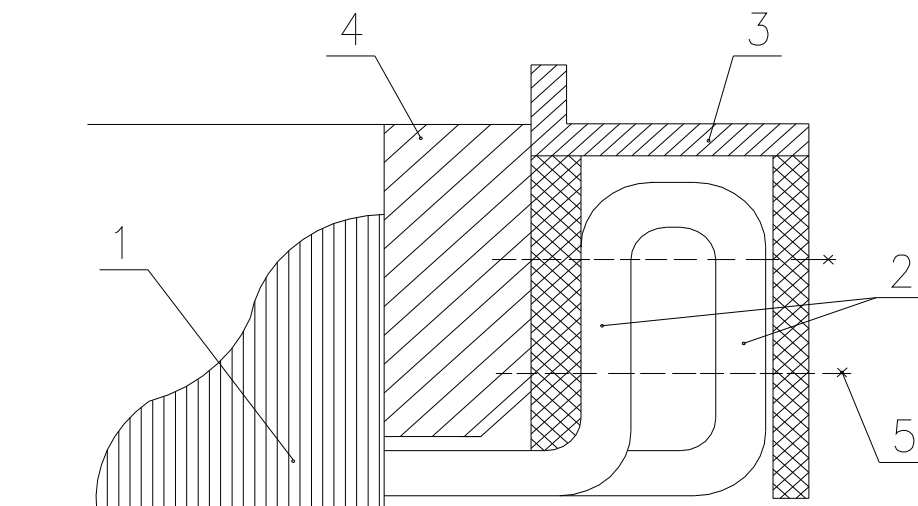
- Elektrodynamickými sílami dvojnásobné frekvence vznikající v důsledku vzájemného působení proudu a rozptylových polí v čelním prostoru. Maximální jsou radiální složky sil a dosahují hustot 200 – 600 N/mm (na jednotkovou délku čela vinutí)
- Síly vznikající v důsledku tepelných dilatací.

UPEVNĚNÍ ČEL VINUTÍ

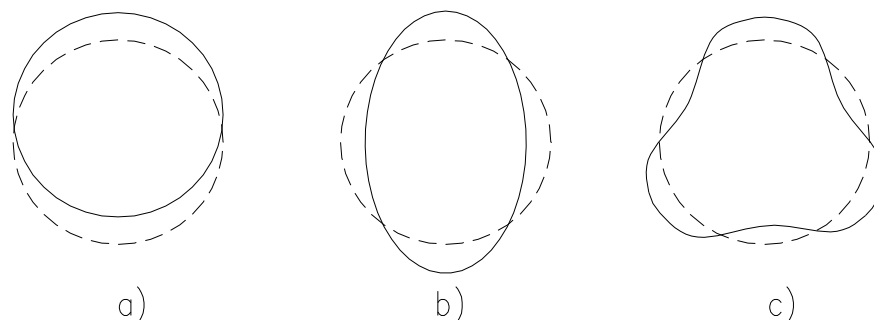
Schématiké uspořádání čel statorového vinutí je v obr. 1. Vinutí je upevněno v drážkách statoru 1 zaklínováním.

Čela vinutí 2 jsou navzájem i vůči vnější bandáži 3 vytužena (vločkami s vhodným výplňovými materiály případně i zalitím) a jsou přitažena ke stahovací desce magnetického

obvodu 4 s pomocí šroubů 5 .



Obr.1: Schématické uspořádání čel



Obr. 2: a-dvou-uzlový, b-čtyř-uzlový, c-šesti-uzlový tvar kmitu

Upevnění čel vinutí musí zajistit zachycení sil působících na čela jak při mezních zkratech, tak i při mnoha opakovaných zkratech. Z toho vyplývá požadavek na podstatně větší tuhost čel ve srovnání s běžnými turbogenerátory byť i mezních výkonů. Běžné generátory totiž pracují tak, že čela vinutí kmitají v nadrezonanční oblasti. Pokud by se tuhost

čel nezvýšila výrazně nad rezonanční frekvenci, tak by vynucené kmitání v blízkosti rezonanční frekvence mohlo poškodit upevňovací systém čel vinutí a ve svém důsledku omezit výrazně životnost statorového vinutí.

CHARAKTER KMITÁNÍ ČEL VINUTÍ ZKRATOVÉHO GENERÁTORU

Rotující magnetické pole jakéhokoliv točivého stroje vyvolává síly, jejichž radiální složka působí na stator a vyvolává radiální tvary kmitání. Obdobně působí i elektrodynamické síly v čelním prostoru. Základní tvary kmitu vyvolaných radiální složkou sil jsou v obr. 2 (a) – dvou-uzlový, b) – čtyř-uzlový, c) šesti-uzlový tvar kmitu). Nejnebezpečnější je čtyř-uzlový kmit, který je nejsilněji vybuzen jak rotujícím magnetickým polem, tak i elektrodynamickými silami v čelním prostoru. Vlastní frekvence čtyř-uzlového kmitu a

všech vyšších (šesti-, osmi-uzlového) statoru zkratového generátoru je nad provozní frekvenci.

URČENÍ VLASTNÍ FREKVENCE ČEL VINUTÍ

Vlastní frekvenci čel vinutí lze určit výpočtem pomocí metody konečných prvků. Vytvoření matematického modelu čelního prostoru je pro tento

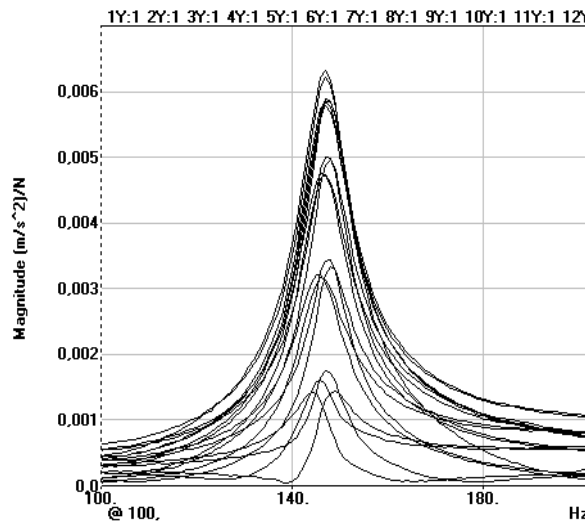
p stroje problematické a to zejména s ohledem na možnosti určení vlastností materiálů potřebných pro výpočet (anizotropie, závislost vlastností na frekvenci i teplotě). Takže výpočet je spíše orientační a skutečnou vlastní frekvenci je nutné určit experimentálně.

Vzhledem k charakteru výroby statorového vinutí (koš vinutí se vyrábí samostatně a jednotlivé tyče se spojují až po montáži na stroji), je možné určit vlastní

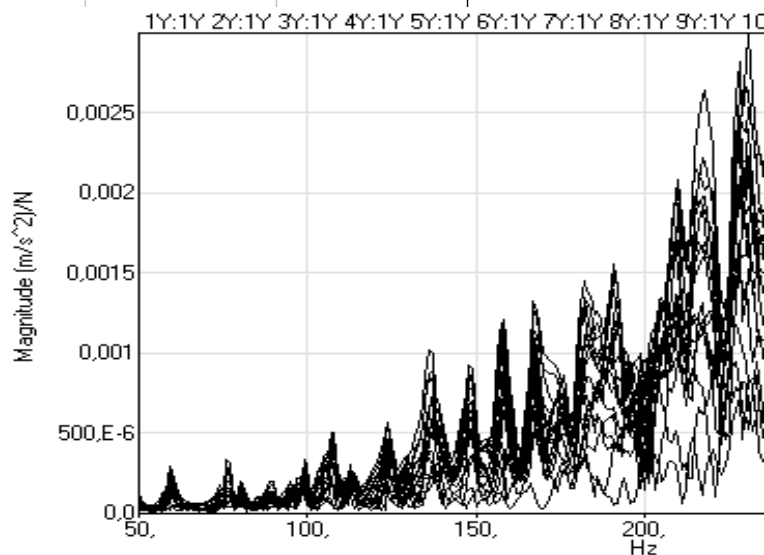
frekvenci samostatného koše před montáží na stator a pak po jeho montáži.

Vlastní frekvenci samostatného koše čel vinutí lze určit tak, že koš vinutí se zavěsí na dostatečně dlouhé závěsy a změří se vlastní frekvence samostatného koše. Frekvenční charakteristika viz obr. 3. Tvar kmitu příslušný vlastní frekvenci 146,7 Hz - viz obr. 4.

Hz - viz obr. 6.



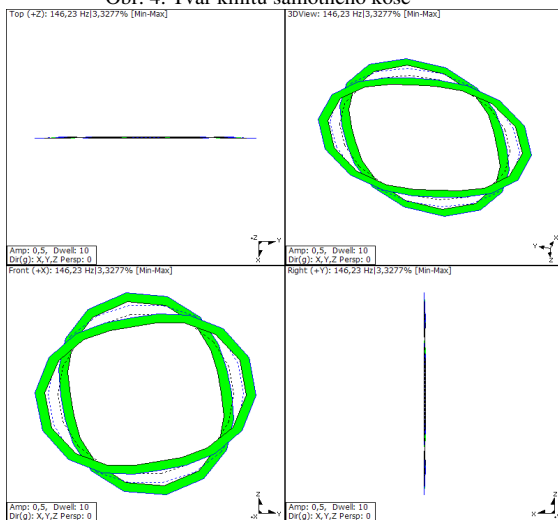
Obr. 3: Vlastní frekvence samotného koše čel



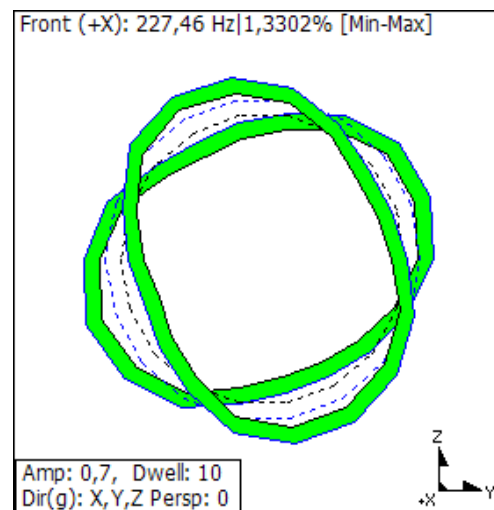
Obr. 5: Vlastní frekvence koše čel nasazeného na stator

Vlastní frekvence koše čel vinutí výrazně změní po navinutí charakter. Frekvenční charakteristika - viz obr. 5. Tvar kmitu příslušný vlastní frekvenci 227,5

Obr. 4: Tvar kmitu samotného koše



Obr.6: Tvar kmitu koše nasazeného na stator



ukázáno jak upevnění vinutí na stator výrazně ovlivní dynamické vlastnosti čel vinutí.

ZÁVĚR

Příspěvek se zabývá zachycením sil působících na čela vinutí zkratového generátoru jakožto dynamické úlohy. Zatímco u běžných turboalternátorů (pro energetiku) je vlastní frekvence čel vinutí pod frekvencí pracovní (stroj pracuje v nadrezonanční oblasti), tak vlastní frekvence vinutí zkratového generátoru je nad frekvencí pracovní. Současně je

LITERATURA

1. Stauber, J.: Vliv chvění statorového vinutí na izolační systém Diagnostika `05, ISBN 80-7043-368-X. Plzeň: ZČU 2005.

2. Lambrecht, D.: Integrated End-winding Ring Support for Water-cooled Stator Winding. IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-102, No. 4 April 1983, s. 998-1006

AUTOŘI

Ing. Jiří Stauber, BRUSH SEM s.r.o., Edvarda Beneše 39, 301 00 Plzeň; e-mail: *jstauber@sem.fki-et.com*

Ing. Vladimír Sládek; BRUSH SEM s.r.o., Edvarda Beneše 39, 301 00 Plzeň; e-mail: *vsladek@sem.fki-et.com*

Ing. Petr Krupauer, Ph.D, BRUSH SEM s.r.o., Edvarda Beneše 39, 301 00 Plzeň; e-mail: *pkrupauer@sem.fki-et.com*