

核电多相星形无刷励磁机定子励磁绕组匝间短路故障特征分析

郝亮亮¹, 曹磊¹, 熊国都², 王晓明³, 段贤稳⁴, 汪南华⁵, 屈天龙⁶, 何鹏⁷

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 阳江核电有限公司, 广东 阳江 529500;

3. 福建宁德核电有限公司, 福建 宁德 352100; 4. 中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518172;

5. 广西防城港核电有限公司, 广西 防城港 538000; 6. 大亚湾核电运营管理有限责任公司, 广东 深圳 518124;

7. 辽宁红沿河核电有限公司, 辽宁 大连 116001)

摘要:相比于常规的三相绕组,多相星形电枢绕组的联接方式更为复杂灵活。以 $3n(n=2,3,\dots)$ 相 P 对极的星形无刷励磁机为研究对象,从定、转子间磁势的性质及其相互作用入手,通过理论推导得出在定子励磁绕组中感应出的谐波电流特性。以某6相星形励磁机为例,依据每相各分支绕组相对空间位置、三相绕组相对空间位置分析定子励磁绕组匝间短路故障的特征。理论分析与仿真结果均表明,6相星形无刷励磁机正常运行时励磁电流中主要含有直流分量与6倍次谐波分量,当发生定子励磁绕组匝间短路故障后,励磁电流中还会出现 $3/4$ 及其倍数次特征谐波电流。

关键词:多相星形电枢绕组;无刷励磁机;励磁绕组匝间短路故障;谐波分析

中图分类号:TM 301

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107031

0 引言

核电作为一种清洁能源具有广阔的发展前景。预计到2050年,中国核电装机容量将达到 3×10^8 kW(约占全国发电量的15.2%)^[1],这对核电机组的可靠性提出了更高的要求。无刷励磁方式取消了发电机的碳刷和滑环,维护方便,安全可靠,是大型核电发电机组的首选励磁方式。而励磁机作为无刷励磁系统的重要组成部分,其安全运行至关重要。

为了产生高品质的直流电,核电无刷励磁机的电枢绕组常采用多相结构。在不增加各相电力电子器件功率等级的情况下,多相结构可使励磁机总功率提高,且能增强系统的容错性能^[2]。此外多相励磁机能够大量消除无效谐波磁动势,提高电机运行效率^[3]。与三相电机中采用的三角形接法和星形接法类似,实际中的核电多相励磁机电枢绕组可以接成角形(也称环形或多边形)结构及星形结构。

文献[4-5]将无刷电机的角形接线与星形接线进行了比较,分析了2种接线方法的差异和优劣。实际工程中,红沿河与宁德核电站^[6]采用了角形接法,而阳江与防城港核电站采用了星形接法。与应用于舰船供电等场合的多相发电机^[7]不同的是,星

形接法的励磁机电枢各并联分支对于基波是同相位的,其本质仍然是三相,但在故障分析中往往涉及谐波,因此本文将其定义为 $3n(n=2,3,\dots)$ 相。文献[7]分析了发电机中定子电枢绕组组合模式对磁动势与参数的影响,但未对多相电枢绕组进行星形、角形连接方式的对比研究。文献[8]针对多相角形无刷励磁机及旋转整流系统进行了运行状态的分析,揭示了多相角形无刷励磁机及旋转整流系统的导通换相规律。有别于角形结构,本文将对星形结构进行论述,并进行励磁绕组匝间短路故障特征分析。

励磁绕组匝间短路故障^[9]作为一种常见的发电机电气故障,也容易发生在无刷励磁机中。若不能及时切除,短期内会造成励磁电流增加,机组振动加剧,长期故障运行还可能使短路点处局部过热演化为定子励磁绕组一点甚至两点接地故障,烧伤绕组和铁芯。为针对故障实现及时保护,Kryukhin首先提出了利用短路故障下电枢绕组并联支路中的偶次谐波环流来检测转子匝间短路故障的方法^[10],但对于采用多极结构的发电机,短路故障后电枢环流中也可能出现分数次谐波^[11-12]。除此以外,在传统检测方法^[13]的基础上,又衍生出了多种针对同步发电机的励磁绕组匝间短路故障的检测方法,如探测线圈法^[14]、轴电压检测法^[15]、机械振动检测法^[16]等。而针对核电励磁机转枢式的特定结构,只能通过静止侧励磁绕组电流实现对励磁绕组短路故障的实时监测(相比于传统检测方法),该方法无需安装附加的探测装置,也避免了轴电压检测法中碳刷与转轴接触不可靠的问题,对比现有核电工程中配备的励磁绕组定子过电流保护,在灵敏度以及故障区分能

收稿日期:2020-09-30;修回日期:2021-06-02

基金项目:中国广核集团有限公司科技项目(百万千瓦级核电机组无刷励磁机故障特征分析和继电保护配置研究及实施)
Project supported by the Science and Technology Project of CGN (Research and Implementation of Fault Characteristic Analysis and Relay Protection Configuration of Brushless Exciter for Million-kilowatt Nuclear Power Units)

力上可以得到显著的提高。在故障特征分析方面,现有文献^[17-18]多针对传统同步发电机,从仿真与数学模型角度对故障前后的励磁电流谐波特征进行了分析,这对核电多相无刷励磁机定子励磁绕组短路故障的研究具有一定借鉴意义。

文献[19-20]从发电机定转子间的电磁关系出发,从实验与仿真2个角度对三角形励磁机进行了励磁绕组短路故障特征分析。在角形接法中, n 相绕组首尾顺次相连,当相数 n 确定后,角形电枢绕组结构唯一确定,而星形接法作为一种三相多分支结构,其绕组组合方式更加复杂多样,有每相并联2、4或16分支等(现场中多分别称为6相、12相或48相等)。且不同于角形结构分析方法统一,对于每种特定结构的星形绕组,其电磁分析过程、故障后的故障特征并不相同。为此,本文引入每相各分支绕组相对空间位置、三相绕组相对空间位置2种变量,并以某6相星形无刷励磁机为研究对象,结合上述2种变量,对正常运行、励磁绕组匝间短路故障情况下定、转子绕组反应磁势性质及气隙磁场的相互作用进行理论推导,并对应进行仿真分析,得出其所特有的励磁电流谐波特征。本文的分析方法适用于各类星形多相无刷励磁机,为无刷励磁机定子匝间短路故障在线监测与保护提供了依据。

1 多相星形无刷励磁机结构特点

核电多相星形无刷励磁机为转枢式结构,即励磁侧为定子部分,电枢侧为转子部分。由于该种结构下的励磁电流便于监测,实际工程中常采用发生故障时励磁电流的特征作为故障判断依据。多相星形无刷励磁系统如图1所示。多相星形励磁机电枢绕组由若干组三相星形绕组组成,其绕组总数为 $3n(n=2,3,\dots)$,每相绕组引出一整流桥臂与直流侧负载相连。在原动机的带动下,电枢绕组与整流桥臂一同随轴转动,并在直流侧实现对主发电机励磁绕组的供电。

对于 $3n$ 相绕组,可看作U、V、W三相电枢绕组

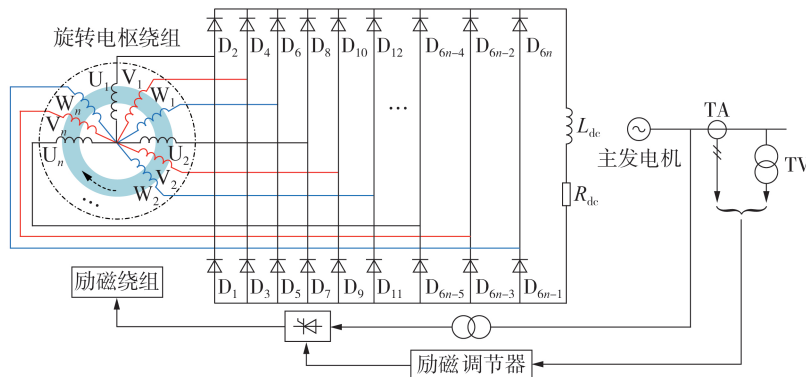


图1 多相星形无刷励磁系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-phase star brushless excitation system

每相含有 n 个分支,则所有的电枢绕组可以用 U_n 、 V_n 、 W_n 表示。电枢绕组上产生的磁势波按正弦规律分布,可用相应的矢量进行表示,如图2所示。由于各相绕组所处空间位置不同,各磁势波之间存在相位差(相隔一个波长则相位上相差 2π)。以一相绕组产生的基波磁势矢量 U_1 所在空间位置为基准,其余相产生的基波磁势矢量 U_n 、 V_n 、 W_n 与其的相位差可分别用 α_{U_n} 、 α_{V_n} 、 α_{W_n} 表示(即谐波磁势在空间上的电角度差)。相比于角形结构采用的 n 相电枢绕组首尾顺次相连,彼此相差 $2P\pi/n$ (P 为极对数)倍电角度,星形结构中通常采用每相各分支绕组等间距分布(例如绕组 U_1 、 U_2 、 U_3 、 \dots 、 U_n)、三相绕组等间距分布的方式(例如绕组 U_1 、 V_1 、 W_1)。

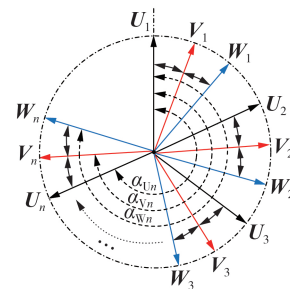


图2 星形电枢绕组基波磁动势矢量图

Fig.2 Vector diagram of fundamental magnetic motive force of star armature winding

2 多相星形无刷励磁机的定子励磁电流特征的理论分析

2.1 励磁绕组正常运行时的定子励磁电流分析

多相星形无刷励磁机是一种凸极同步电机,其励磁绕组采用集中式结构。在正常运行状态下,励磁绕组在每极下产生的磁动势分布情况相同,只是相邻极下由于绕向相反而方向相反。正常励磁绕组的磁动势空间分布如图3所示。图中,横轴建立在励磁绕组上, θ_{se} 为空间电角度; f_{rl} 为励磁绕组磁动势; i_{rl} 为励磁电流大小; N_{rl} 为每极线圈匝数。由图可见,磁动势在空间上呈矩形波分布。

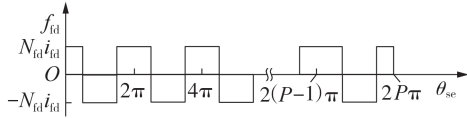


图3 正常励磁的绕组磁动势空间分布

Fig.3 Spatial distribution of magnetic motive force of excitation winding under normal condition

根据图3列写正常情况下励磁绕组磁动势为:

$$f_{fd}(\theta_{se}) = \begin{cases} N_{fd}i_{fd} & 2i\pi \leq \theta_{se} < \frac{\pi}{2} + 2i\pi, \frac{3\pi}{2} + 2i\pi \leq \theta_{se} < 2(i+1)\pi \\ -N_{fd}i_{fd} & \frac{\pi}{2} + 2i\pi \leq \theta_{se} < \frac{3\pi}{2} + 2i\pi \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i=0, 1, \dots, P-1$ 。

对式(1)进行傅里叶分析,可得:

$$f_{fd}(\theta_{se}) = c_0 + \sum_{k=1,2,\dots} \left[a_k \cos\left(\frac{k}{P}\theta_{se}\right) + b_k \sin\left(\frac{k}{P}\theta_{se}\right) \right] \quad (2)$$

$$c_0 = \frac{1}{2P\pi} \int_0^{2P\pi} f_{fd}(\theta_{se}) d\theta_{se} = 0$$

$$a_k = \frac{1}{P\pi} \int_0^{2P\pi} f_{fd}(\theta_{se}) \cos\left(\frac{k}{P}\theta_{se}\right) d\theta_{se} =$$

$$\frac{4N_{fd}i_{fd}}{k\pi} \sin\left[\frac{k\pi}{2P} \frac{\sin(k\pi)}{\sin\left(\frac{k}{P}\pi\right)} \right]$$

$$b_k = \frac{1}{P\pi} \int_0^{2P\pi} f_{fd}(\theta_{se}) \sin\left(\frac{k}{P}\theta_{se}\right) d\theta_{se} = 0$$

经计算知, f_{fd} 只含有空间基波以及3、5等奇数次谐波磁动势。该励磁磁动势在气隙中建立的励磁磁场表达式为:

$$B(\theta_{se}) = f_{fd}(\theta_{se}) \lambda(\theta_{se}) =$$

$$\sum_{k=2l} F_{fd,k} \cos(k\theta_{se}) \left[\frac{\lambda_0}{2} + \sum_{2l} \lambda_{2l} \cos(2l\theta_{se}) \right] = \sum_{k=2l} \left\{ F_{fd,k} \frac{\lambda_0}{2} \cos(k\theta_{se}) + \sum_{2l} \frac{1}{2} F_{fd,k} \lambda_{2l} \cos[(k \pm 2l)\theta_{se}] \right\} \quad (3)$$

$k=1, 3, 5, \dots$

其中, $B(\theta_{se})$ 为励磁磁场; $\lambda(\theta_{se})$ 为气隙磁导^[21]; $\lambda_0/2$ 和 $\lambda_{2l}(l=1, 2, \dots)$ 分别为气隙磁导中直流分量和偶数次谐波分量的幅值; $F_{fd,k}$ 为 k 次励磁磁动势谐波幅值。

由式(3)可知,谐波磁动势在气隙中产生的谐波磁场的次数可能会与谐波磁动势次数有所不同,但是次数的性质并不会改变。励磁电流产生的各奇数次谐波磁场与电枢绕组有同步速的相对运动,在各相电枢绕组中感应奇数次谐波电流。

对于 $3n$ 相星形励磁机可直接列写出转子电枢电流方程,如式(4)所示。

$$\begin{cases} i_{U_n,\mu} = \sqrt{2} I_\mu \cos[\mu(\omega t - \alpha_{U_n})] \\ i_{V_n,\mu} = \sqrt{2} I_\mu \cos[\mu(\omega t - \alpha_{V_n})] \\ i_{W_n,\mu} = \sqrt{2} I_\mu \cos[\mu(\omega t - \alpha_{W_n})] \end{cases} \quad (4)$$

其中, $i_{U_n,\mu}$ 、 $i_{V_n,\mu}$ 、 $i_{W_n,\mu}$ 分别为 U_n 、 V_n 、 W_n 的电流; ω 为同步转速; I_μ ($\mu=1, 3, 5, \dots$) 为 μ 次谐波电流有效值; n ($n=1, 2, \dots$) 为三相绕组对应分支数。

电枢电流在电枢绕组中感应出磁动势,对一相电枢绕组的磁动势进行傅里叶分析可知,每相磁动势中存在各次谐波分量^[22],即任意一相电枢绕组的 μ 次谐波电流产生的 ν ($\nu=1, 2, \dots$) 次空间谐波磁势为:

$$\begin{cases} f_{U_n,\mu,\nu} = F_{\mu,\nu} \cos[\mu(\omega t - \alpha_{U_n})] \cos[\nu(\theta_{re} - \alpha_{U_n})] \\ f_{V_n,\mu,\nu} = F_{\mu,\nu} \cos[\mu(\omega t - \alpha_{V_n})] \cos[\nu(\theta_{re} - \alpha_{V_n})] \\ f_{W_n,\mu,\nu} = F_{\mu,\nu} \cos[\mu(\omega t - \alpha_{W_n})] \cos[\nu(\theta_{re} - \alpha_{W_n})] \end{cases} \quad (5)$$

其中, $f_{U_n,\mu,\nu}$ 、 $f_{V_n,\mu,\nu}$ 、 $f_{W_n,\mu,\nu}$ 分别为 U_n 、 V_n 、 W_n 的 μ 次谐波电流产生的 ν 次空间谐波磁势; $F_{\mu,\nu}$ 为谐波磁动势幅值,其大小由 I_μ 决定; θ_{re} 所在坐标轴建立在转子上,其和 θ_{se} 的关系如式(6)所示。

$$\theta_{re} = \theta_{se} + \omega t \quad (6)$$

各相电枢绕组产生的磁势均为脉振磁势,可以分解为正转磁势和反转磁势,分别如式(7)和式(8)所示。

$$\begin{cases} f_{U_n,\mu,\nu}^+ = \frac{1}{2} F_{\mu,\nu} \cos[\mu\omega t - \nu\theta_{re} - (\mu - \nu)\alpha_{U_n}] \\ f_{V_n,\mu,\nu}^+ = \frac{1}{2} F_{\mu,\nu} \cos[\mu\omega t - \nu\theta_{re} - (\mu - \nu)\alpha_{V_n}] \\ f_{W_n,\mu,\nu}^+ = \frac{1}{2} F_{\mu,\nu} \cos[\mu\omega t - \nu\theta_{re} - (\mu - \nu)\alpha_{W_n}] \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} f_{U_n,\mu,\nu}^- = \frac{1}{2} F_{\mu,\nu} \cos[\mu\omega t + \nu\theta_{re} - (\mu + \nu)\alpha_{U_n}] \\ f_{V_n,\mu,\nu}^- = \frac{1}{2} F_{\mu,\nu} \cos[\mu\omega t + \nu\theta_{re} - (\mu + \nu)\alpha_{V_n}] \\ f_{W_n,\mu,\nu}^- = \frac{1}{2} F_{\mu,\nu} \cos[\mu\omega t + \nu\theta_{re} - (\mu + \nu)\alpha_{W_n}] \end{cases} \quad (8)$$

其中,上标“+”、“-”分别表示正、反转磁势,后同。

电机绕组设计的一个基本原则是:对应于空间基波磁场,同相各分支位置相同,而在三相绕组空间上互差 $2\pi/3$ ^[23]。在该原则下,将相同转向的磁动势分别进行合成,正、反转合成磁势可以分别表示为:

$$f_{\mu,\nu\Sigma}^+ = \frac{n}{2} F_{\mu,\nu} \cos\left[\mu\omega t - \nu\theta_{re} - (k-1)(\mu - \nu) \frac{2\pi}{3}\right] \quad (9)$$

$$f_{\mu,\nu\Sigma}^- = \frac{n}{2} F_{\mu,\nu} \sum_{k=1}^3 \cos\left[\mu\omega t + \nu\theta_{re} - (k-1)(\mu + \nu) \frac{2\pi}{3}\right] \quad (10)$$

其中, $f_{\mu,\nu\Sigma}^+$ 、 $f_{\mu,\nu\Sigma}^-$ 分别为正、反转合成磁势。

对式(9)进行分析后可知,当且仅当 $\nu = \mu - 3n_i$

($n_1 \in \mathbf{N}$) 时, $f_{\mu, \nu \Sigma}^+$ 才不为0, 电枢反应中只存在 $\mu - 3n_1$ 次正转分量。同理, 当且仅当 $\nu = 3n_1 - \mu$ ($n_1 \in \mathbf{N}$) 时, $f_{\mu, \nu \Sigma}^-$ 才不为0, 电枢反应中只存在 $3n_1 - \mu$ 次反转分量。

同时, 电枢电流产生的偶数次空间谐波磁势在每个磁极下励磁绕组中感应的电势大小相等, 但在相邻极下由于励磁绕组绕向相反而方向相反, 故偶次电枢反应磁势在励磁绕组中感应电势之和为0。即对于 $\nu = \mu - 3n_1, \nu = 3n_1 - \mu$, 只有 n_1 为偶数时才有意义。因此, 在以下讨论中均不再考虑偶数次电枢反应磁势。

电枢反应合成磁动势在气隙中建立电枢反应合成磁场(以正转分量为例), 根据式(6)将位于转子坐标系下的正转磁场变换到定子坐标系下, 得到:

$$B_{\mu, \nu \Sigma}^+(\theta_{se}) = f_{\mu, \nu \Sigma}^+(\theta_{se}) \lambda(\theta_{se}) = F_{\mu, \nu \Sigma}^+ \cos[\mu\omega t - \nu(\theta_{se} + \omega t)] \left[\frac{\lambda_0}{2} + \sum_{2l} \lambda_{2l} \cos(2l\theta_{se}) \right] = F_{\mu, \nu \Sigma}^+ \left\{ \frac{\lambda_0}{2} \cos[(\mu - \nu)\omega t - \nu\theta_{se}] + \sum_{2l} \frac{\lambda_{2l}}{2} \cos[(\mu - \nu)\omega t - (\nu \pm 2l)\theta_{se}] \right\} \quad (11)$$

其中, $B_{\mu, \nu}^+(\theta_{se})$ 为变换到定子坐标系下的正转磁场。

式(11)中的谐波磁场在励磁绕组上感应出电动势。 ν 次合成磁场相对励磁绕组的同步转速为 $(\mu - \nu)\omega/\nu$, 其在励磁绕组上感应出 $\mu - \nu$ 次谐波电动势; $\nu \pm 2l$ 次合成磁场相对励磁绕组的同步转速为 $(\mu - \nu)\omega/(\nu \pm 2l)$, 其在励磁绕组上也感应出 $\mu - \nu$ 次谐波电动势, 即正转合成磁动势在励磁绕组上感应出 $\mu - \nu$ 次谐波电动势。同理, 反转合成磁动势在励磁绕组上感应出 $\mu + \nu$ 次谐波电动势。

正转分量满足 $\mu - \nu = 3n_1$, 反转分量满足 $\mu + \nu = 3n_1$, 且 n_1 为偶数。因此, 在 $3n$ 相星形励磁机正常运行时, 励磁电流中除了直流分量外主要含有6倍次谐波分量。

2.2 定子励磁绕组匝间短路故障下的定子励磁电流分析

励磁绕组发生匝间短路故障后的励磁磁动势在各极下的分布与正常运行时不再相同, 包含极内短路、极间短路故障等形式, 此时的磁动势可以看作正常励磁绕组通正向电流与短路励磁绕组通反向励磁电流时的磁动势的合成。以1极金属性匝间短路故障为例, 假设短路匝数为 ΔN_{fd} , 则该极未短路匝数为 $N'_{fd} = N_{fd} - \Delta N_{fd}$ 。故障的励磁绕组产生的磁动势空间分布如图4所示, 图中变量定义类似图1, 此处不再赘述。

图4中, 随着短路匝数增加, 相应极上损失的磁动势越多, 励磁磁动势波形畸变越严重。对励磁磁动势进行傅里叶分析可知, 励磁故障回路会削弱基

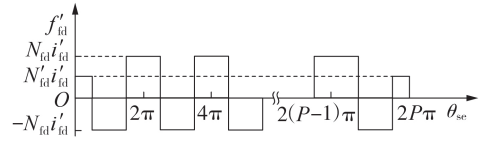


图4 故障励磁绕组磁动势空间分布

Fig.4 Spatial distribution of magnetic motive force of excitation winding under fault condition

波及奇数次谐波空间磁动势, 并且产生分数次空间磁动势。该谐波磁动势通过气隙作用于电枢绕组, 并在电枢绕组上产生电枢电流, 其表达式如下:

$$\begin{cases} i_{U_n, \frac{\mu}{P}} = \sqrt{2} I_{\frac{\mu}{P}} \cos\left[\frac{\mu}{P}(\omega t - \alpha_{U_n})\right] \\ i_{V_n, \frac{\mu}{P}} = \sqrt{2} I_{\frac{\mu}{P}} \cos\left[\frac{\mu}{P}(\omega t - \alpha_{V_n})\right] \\ i_{W_n, \frac{\mu}{P}} = \sqrt{2} I_{\frac{\mu}{P}} \cos\left[\frac{\mu}{P}(\omega t - \alpha_{W_n})\right] \end{cases} \quad (12)$$

其中, $i_{U_n, \frac{\mu}{P}}, i_{V_n, \frac{\mu}{P}}, i_{W_n, \frac{\mu}{P}}$ 分别为谐波磁动势通过气隙在电枢绕组 U_n, V_n, W_n 上产生的电枢电流; $I_{\frac{\mu}{P}}$ 为 μ/P 次谐波电流有效值, $\mu \neq 2n_2 P$ ($n_2 = 1, 2, \dots$)。

电枢电流在电枢绕组中感应出磁动势, 任意一相电枢绕组的 μ/P 次谐波电流产生的 ν/P ($\nu = 1, 2, \dots$) 次空间谐波磁势为:

$$\begin{cases} f_{U_n, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} = F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos\left[\frac{\mu}{P}(\omega t - \alpha_{U_n})\right] \cos\left[\frac{\nu}{P}(\theta_{re} - \alpha_{U_n})\right] \\ f_{V_n, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} = F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos\left[\frac{\mu}{P}(\omega t - \alpha_{V_n})\right] \cos\left[\frac{\nu}{P}(\theta_{re} - \alpha_{V_n})\right] \\ f_{W_n, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} = F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos\left[\frac{\mu}{P}(\omega t - \alpha_{W_n})\right] \cos\left[\frac{\nu}{P}(\theta_{re} - \alpha_{W_n})\right] \end{cases} \quad (13)$$

其中, $f_{U_n, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}, f_{V_n, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}, f_{W_n, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}$ 分别为 U_n, V_n, W_n 的 μ/P 次谐波电流产生的 ν/P 次空间谐波磁势, $F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}$ 为对应的幅值。

将各相绕组产生的脉振磁势分解为正、反转磁势, 如式(14)所示。

$$\begin{cases} f_{U_n, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm} = \frac{1}{2} F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos\left(\frac{\mu}{P}\omega t \pm \frac{\nu}{P}\theta_{re} - \frac{\mu \pm \nu}{P}\alpha_{U_n}\right) \\ f_{V_n, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm} = \frac{1}{2} F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos\left(\frac{\mu}{P}\omega t \pm \frac{\nu}{P}\theta_{re} - \frac{\mu \pm \nu}{P}\alpha_{V_n}\right) \\ f_{W_n, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm} = \frac{1}{2} F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos\left(\frac{\mu}{P}\omega t \pm \frac{\nu}{P}\theta_{re} - \frac{\mu \pm \nu}{P}\alpha_{W_n}\right) \end{cases} \quad (14)$$

电枢反应合成磁动势经过气隙建立电枢反应合成磁场 $B_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm}(\theta_{se})$, 如式(15)所示。

$$B_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm}(\theta_{se}) = f_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm}(\theta_{se}) \lambda(\theta_{se}) \quad (15)$$

分析可知, 当定子励磁绕组发生匝间短路故障

时,电枢绕组上的奇数次和分数次谐波磁势在短路匝绕组上产生 $(\mu \pm \nu)/P$ 次感应电动势,即定子励磁电流中存在 $(\mu \pm \nu)/P$ 次谐波电流。但并非所有 $(\mu \pm \nu)/P$ 次谐波都能呈现,这与励磁机的电枢绕组分布密切相关。

本文以某实际 8 对极 6 相星形无刷励磁机为例进行分析,该励磁机的参数见附录 A 表 A1。根据附录 A 表 A2 所示的电枢绕组联结方式画出该励磁机电枢绕组的分布图,如图 5 所示。该励磁机的三相绕组各包括 2 个分支,每相的 2 个分支空间上相差 8π 。U₁ 超前 V₁ $16\pi/3$,超前 W₁ $32\pi/3$ (U₂、V₂、W₂ 同理),则对应的空间基波磁势矢量位置如图 6 所示,其中同相各分支基波磁势矢量位置相同,三相绕组基波磁势矢量空间上相差 $16\pi/3$ 。对于其他次谐波,其磁势空间分布与谐波次数有关。

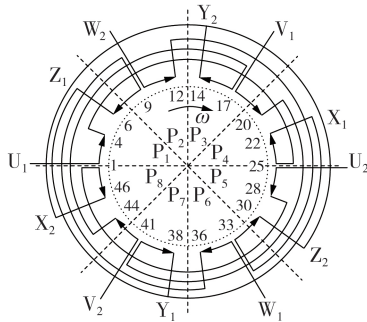


图 5 6 相星形电枢绕组分布与联接示意图

Fig.5 Schematic diagram of distribution and connection of 6-phase star connected armature winding

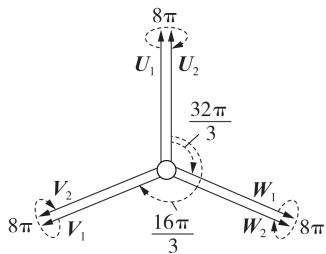


图 6 6 相星形励磁机基波磁势矢量图

Fig.6 Vector diagram of fundamental magnetic motive force of 6-phase star exciter

由式(12)可得 6 相星形励磁机电枢绕组上的 μ/P 次谐波电流为:

$$\begin{cases} i_{U_1, \frac{\mu}{P}} = \sqrt{2} I_{\frac{\mu}{P}} \cos \left[\frac{\mu}{P} (\omega t) \right] \\ i_{V_1, \frac{\mu}{P}} = \sqrt{2} I_{\frac{\mu}{P}} \cos \left[\frac{\mu}{P} \left(\omega t - \frac{16\pi}{3} \right) \right] \\ i_{W_1, \frac{\mu}{P}} = \sqrt{2} I_{\frac{\mu}{P}} \cos \left[\frac{\mu}{P} \left(\omega t - \frac{32\pi}{3} \right) \right] \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} i_{U_2, \frac{\mu}{P}} = \sqrt{2} I_{\frac{\mu}{P}} \cos \left[\frac{\mu}{P} (\omega t - 8\pi) \right] \\ i_{V_2, \frac{\mu}{P}} = \sqrt{2} I_{\frac{\mu}{P}} \cos \left[\frac{\mu}{P} \left(\omega t - \frac{40\pi}{3} \right) \right] \\ i_{W_2, \frac{\mu}{P}} = \sqrt{2} I_{\frac{\mu}{P}} \cos \left[\frac{\mu}{P} \left(\omega t - \frac{56\pi}{3} \right) \right] \end{cases} \quad (17)$$

6 相电枢绕组谐波电流产生的脉振磁动势,可分解为正、反转分量,以正转分量为研究对象(反转分量的分析同理),结合式(14)可得到 6 相电枢绕组的正转磁势为:

$$\begin{cases} f_{U_1, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm} = \frac{1}{2} F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos \left(\frac{\mu}{P} \omega t - \frac{\nu}{P} \theta_{re} - 0 \right) \\ f_{V_1, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm} = \frac{1}{2} F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos \left(\frac{\mu}{P} \omega t - \frac{\nu}{P} \theta_{re} - \frac{16\pi}{3} \frac{\mu - \nu}{P} \right) \\ f_{W_1, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm} = \frac{1}{2} F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos \left(\frac{\mu}{P} \omega t - \frac{\nu}{P} \theta_{re} - \frac{32\pi}{3} \frac{\mu - \nu}{P} \right) \\ f_{U_2, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm} = \frac{1}{2} F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos \left(\frac{\mu}{P} \omega t - \frac{\nu}{P} \theta_{re} - 8\pi \frac{\mu - \nu}{P} \right) \\ f_{V_2, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm} = \frac{1}{2} F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos \left(\frac{\mu}{P} \omega t - \frac{\nu}{P} \theta_{re} - \frac{40\pi}{3} \frac{\mu - \nu}{P} \right) \\ f_{W_2, \frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}}^{\pm} = \frac{1}{2} F_{\frac{\mu}{P}, \frac{\nu}{P}} \cos \left(\frac{\mu}{P} \omega t - \frac{\nu}{P} \theta_{re} - \frac{56\pi}{3} \frac{\mu - \nu}{P} \right) \end{cases} \quad (18)$$

各次谐波磁动势可看作旋转的磁势矢量,其转速与相位差均由谐波次数决定。在上述矢量的合成过程中,并非所有的特征次谐波都可以得到显现,这是因为部分磁势矢量空间上对称分布,其合成结果为 0。分别对比式(18)、(19)中的 3 个公式可知,任意一相两分支绕组(U₁和 U₂、V₁和 V₂、W₁和 W₂)产生的 $(\mu \pm \nu)/P$ 次谐波磁动势相差 $8\pi(\mu \pm \nu)/P$ 电角度。由式(18)可知,U₁、V₁、W₁上产生的谐波磁动势彼此相差 $16\pi(\mu \pm \nu)/(3P)$ 电角度(U₂、V₂、W₂同理)。则可展开以下两方面的讨论。

一方面,对于 $(\mu \pm \nu)/P$ 次谐波磁动势,若每相的 2 个分支绕组相差电角度满足:

$$8\pi \frac{\mu \pm \nu}{P} = (2i + 1)\pi \quad i = 0, 1, \dots \quad (20)$$

则任意一相两分支绕组对应的谐波磁动势矢量刚好在空间位置上反方向对称,相互抵消,合成的谐波磁动势为 0,如图 7(a)所示。

另一方面,当三相绕组对称(如图 7(b)所示)时,若满足式(21),则三相对应分支组合成的谐波磁动势为 0。

$$\frac{16\pi}{3} \frac{\mu \pm \nu}{P} = \frac{2\pi}{3} + 2i\pi, \frac{4\pi}{3} + 2i\pi \quad i = 0, 1, \dots \quad (21)$$

综上所述,该无刷励磁机发生定子励磁绕组匝间短路故障时有:

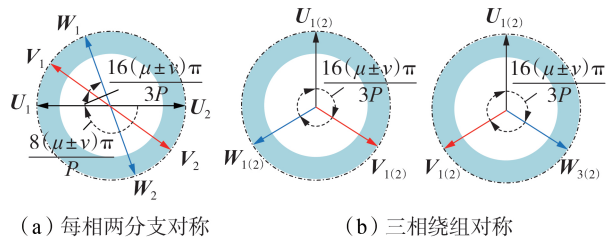


图7 谐波磁势矢量图

Fig.7 Vector diagram of harmonic magnetic motive force

$$\frac{\mu \pm \nu}{P} \neq \frac{2+3i}{8}, \frac{1+3i}{8}, \frac{1+2i}{8} \quad i=0, 1, \dots \quad (22)$$

即该励磁机发生励磁绕组短路故障后,稳态励磁电流中含有的谐波次数为:

$$\frac{\mu \pm \nu}{P} = \frac{3i}{4} \quad i=1, 2, \dots \quad (23)$$

上述分析表明,当该8对极6相星形无刷励磁机发生励磁绕组短路故障时,励磁绕组中会产生出相应的3/4次及其倍数次谐波。

3 仿真结果分析

3.1 有限元仿真模型

对上述8对极6相星形无刷励磁机搭建 ANSYS 有限元仿真模型,如图8所示。仿真模型分为励磁机本体模型与外电路两部分,外电路包括励磁绕组回路与电枢绕组回路。其中励磁绕组采用8对极结构,对应的外电路如图9(a)所示。图中,62.22 V 的直流电压源 U_{fd} 附加在励磁绕组两侧,并在励磁绕组上建立起励磁磁场; L'_{fd} 、 R'_{fd} 和 L_{fd} 、 R_{fd} 分别为短路励磁绕组和正常励磁绕组的电感、电阻,在励磁机正常运行过程中, $L'_{fd}=0$ 、 $R'_{fd}=0$ 。当发生励磁绕组匝间短路故障时,对应仿真模型外电路中故障开关S闭合,此时故障绕组阻抗 L'_{fd} 、 R'_{fd} 不再为0,其值由短路匝数决定。电枢绕组作为旋转部分,其转速设置为 1000 r/min,即电枢感应电势基波频率为 133.33 Hz。电枢绕组为48槽双层叠绕组结构,其连接方式见附录A表A2。外电路中对应的6相星形电枢绕组如图9(b)所示,其与一6相整流桥相连。在励磁机运行过程中,电枢绕组上感应出的电枢电流经6相整流桥整流后通入负载 L_{dc} 、 R_{dc} (主发电机励磁绕组阻抗)中。

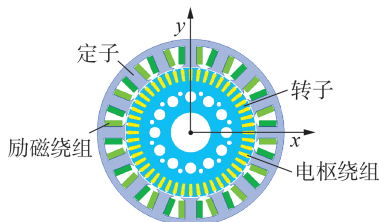


图8 6相无刷励磁机仿真模型

Fig.8 Simulation model of 6-phase brushless exciter

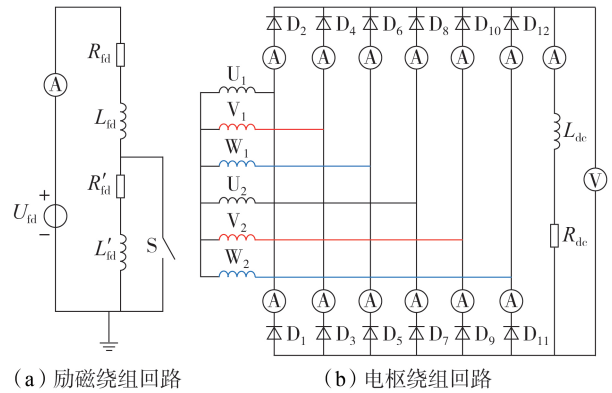


图9 6相无刷励磁机外电路仿真模型

Fig.9 Simulation model of external circuit of 6-phase brushless exciter

3.2 仿真数据分析

为了体现不同励磁绕组短路匝数下故障特征的变化规律,分别对励磁机进行不同短路匝数的仿真分析,正常运行、1极短路、2极短路后的励磁电流波形如图10所示。由图可见,故障前励磁电流保持在 38.4 A 左右,主要含有直流分量和明显的谐波分量。故障发生后,励磁电流幅值增大,并出现明显的故障特征谐波。

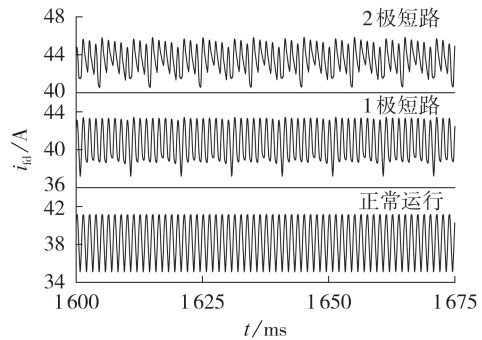


图10 稳态励磁电流波形

Fig.10 Steady-state waveform of excitation current

为进一步研究故障谐波特征,取故障前0~60 ms 和故障后 1600~1660 ms 的稳态励磁电流进行快速傅里叶分析,结果如图11所示。

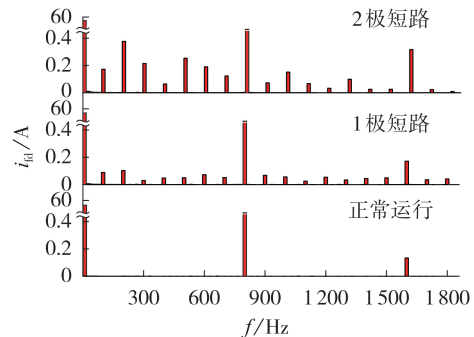


图11 励磁电流频谱图

Fig.11 Spectrum diagram of excitation current

由图11可知,在正常运行时,多相星形结构不同于常规三相绕组结构、多相角形结构^[17],励磁电流中除了直流分量外,还含有6次(800 Hz)及其倍数次谐波电流。当发生励磁绕组短路故障后,励磁电流中出现明显的3/4次(100 Hz)及其倍数次谐波分量,该结果与理论分析结果一致。且从图中还可看出,随着短路匝数增多,定子励磁绕组中的故障特征更为明显。

4 结论

本文以核电多相星形无刷励磁机为研究对象,分析了多相星形无刷励磁机正常运行、定子励磁绕组匝间短路故障时的稳态励磁电流谐波特征。通过理论与仿真分析可以得到如下结论。

1)在多相星形无刷励磁机正常运行状态下,励磁绕组上的奇数次谐波磁动势作用于电枢绕组并感应出奇数次电枢电流;在电枢反应合成磁场的作用下,励磁绕组上感应得到特有的6倍次谐波电动势。

2)在励磁绕组发生匝间短路故障后,励磁短路匝绕组除产生基波及奇数次谐波磁动势以外,还产生分数次谐波磁动势;在奇数次和分数次电枢反应合成磁场的作用下,励磁电流中出现星形结构下特有的3/4及其倍数次谐波电流。

本文为多相星形无刷励磁机发生定子励磁绕组匝间短路故障后的励磁电流谐波特征提供了一种通用理论分析方法,故障后的定子励磁电流谐波特征与电机极对数以及电枢绕组联接方式直接相关。将故障工况与正常工况下的定子励磁电流谐波特征进行对比,为定子励磁绕组匝间短路故障的检测与诊断提供了重要的依据。

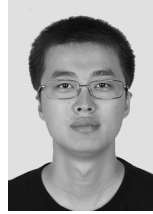
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张扬健,陈德胜. 我国核电现状及发展趋势分析[J]. 节能与环保,2017(1):52-55.
ZHANG Yangjian, CHEN Desheng. Analysis of present situation and development trend of nuclear power in China[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2017(1): 52-55.
- [2] APSLEY J, WILLIAMSON S. Analysis of multiphase induction machines with winding faults[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(2): 465-472.
- [3] WILLIAMSON S, SMITH S. Pulsating torque and losses in multiphase induction machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 986-993.
- [4] 谭建成. 多相无刷直流电机绕组拓扑结构的探讨[J]. 微电机, 2013, 46(10): 1-4.
TAN Jiancheng. Discussion about multiphase winding topology in brushless DC motor[J]. Micromotors, 2013, 46(10): 1-4.
- [5] FRANKLIN P W. Theory of the bridge-rectified synchronous generator with a large number of stator phases-part I[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, PAS-93(1): 137-145.
- [6] 胡德剑,王建立,王黔. 宁德核电厂无刷励磁机原理、结构和运行监测[J]. 东方电气评论, 2013, 27(4): 60-64.
HU Dejian, WANG Jianli, WANG Qian. Principle, structure and operating inspection of brushless exciter for Ningde nuclear power station[J]. Dongfang Electric Review, 2013, 27(4): 60-64.
- [7] 吴新振,王东,郭云珺,等. 多相电机定子绕组组合模式对磁动势与参数的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2944-2951.
WU Xinzen, WANG Dong, GUO Yunjun, et al. Effect of stator winding combination modes for multiphase electric machines on MMFs and parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2944-2951.
- [8] 郝亮亮,张扬,屈天龙,等. 多相多边形无刷励磁机及旋转整流系统的运行状态分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 159-165.
HAO Liangliang, ZHANG Yang, QU Tianlong, et al. Operating state analysis of multi-phase angular brushless exciter and rotating rectifier system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 159-165.
- [9] 郝亮亮,吴俊勇. 同步发电机转子匝间短路故障在线监测的研究评述与展望[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 137-143, 150.
HAO Liangliang, WU Junyong. Review and prospect of online rotor inter-turn short circuit monitoring for synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 137-143, 150.
- [10] KRYUKHIN S S. A new principle for synchronous machine protection from rotor winding inter-turn and double earth faults[J]. Elektrichestvo, 1972, 2(5): 47-59.
- [11] SOTTILE J, TRUTT F C, LEEDY A W. Condition monitoring of brushless three-phase synchronous generators with stator winding or rotor circuit deterioration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(5): 1209-1215.
- [12] 孙宇光,郝亮亮,王祥珩. 隐极同步发电机励磁绕组匝间短路的多回路电感参数计算[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 55-60.
SUN Yuguang, HAO Liangliang, WANG Xiangheng. Calculation of the multi-loop inductances for inter-turn short circuits of field windings in non-salient pole synchronous machines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 55-60.
- [13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 隐极式同步发电机转子匝间短路测定方法: JB/T 8446—2005[S]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [14] 刘庆河,蔡维铮,徐殿国. 汽轮发电机转子绕组匝间短路在线检测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 234-237.
LIU Qinghe, CAI Weizheng, XU Dianguo. Study of on-line detection of interturn short circuit in turbogenerator rotor windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 234-237.
- [15] 武玉才,李永刚,李和明. 基于轴电压的隐极同步发电机转子典型故障诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 178-184.
WU Yucai, LI Yonggang, LI Heming. Diagnosis of non-salient pole synchronous generator rotor's typical faults based on shaft voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 178-184.
- [16] 武玉才,李和明,李永刚,等. 在线检测发电机转子绕组匝间短路的新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2698-2703.
WU Yucai, LI Heming, LI Yonggang, et al. New on-line diagnosis method for generator rotor winding inter-turn short circuit[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2698-2703.
- [17] 孙宇光,王祥珩,桂林,等. 同步发电机励磁绕组匝间短路的仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 5-10.
SUN Yuguang, WANG Xiangheng, GUI Lin, et al. Simulation research on inter-turn short circuits of field windings in synchronous machines[J]. Advanced Technology of Electrical En-

- gineering and Energy, 2008, 27(2): 5-10.
- [18] 孙宇光, 郝亮亮, 王祥珩. 同步发电机励磁绕组匝间短路的数学模型与故障特征[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 45-50.
SUN Yuguang, HAO Liangliang, WANG Xiangheng. Math model and fault characteristics of field winding inter-turn short circuit of synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 45-50.
- [19] 郝亮亮, 常江, 李洪学, 等. 核电多相角形无刷励磁机定子匝间短路故障特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6726-6736.
HAO Liangliang, CHANG Jiang, LI Hongxue, et al. Characteristics analysis of stator inter-turn short circuits in nuclear power multi-phase angular brushless exciter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6726-6736.
- [20] HAO Liangliang, CHANG Jiang, HU Liang, et al. Analysis of the inter-turn short circuits of stator field windings in multi-phase angular brushless exciter at nuclear power plant[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2126-2136.
- [21] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 5-11.
- [22] 许实章. 交流电机的绕组理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985: 1-82.
- [23] 陈世坤. 电机设计[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1990: 51-54.

作者简介:



郝亮亮

郝亮亮(1985—), 男, 北京人, 副教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力系统主设备故障分析及保护、直流输电控制与保护、励磁控制等(**E-mail**: llhao@bjtu.edu.cn);

曹磊(1996—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为多相星形无刷励磁系统的故障监测及其保护(**E-mail**: 18121423@bjtu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Characteristic analysis of inter-turn short circuit fault of stator excitation winding in nuclear power multi-phase star brushless exciter

HAO Liangliang¹, CAO Lei¹, XIONG Guodu², WANG Xiaoming³, DUAN Xianwen⁴,
WANG Nanhua⁵, QU Tianlong⁶, HE Peng⁷

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang 529500, China;

3. Fujian Ningde Nuclear Power Co., Ltd., Ningde 352100, China;

4. China Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen 518172, China;

5. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538000, China;

6. Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd., Shenzhen 518124, China;

7. Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., Ltd., Dalian 116001, China)

Abstract: Compared with the conventional three-phase windings, the connection mode of multi-phase star armature windings is more complex and flexible. Taking the general $3n$ -phase ($n=2, 3, \dots$) P -pair-pole star brushless exciter as the research object, the characteristics of harmonic current induced in stator excitation winding are theoretically analyzed based on the magnetic field produced by stator and rotor windings and their mutual induction. Taking a 6-phase star brushless exciter as an example, the characteristics of inter-turn short circuit fault of stator excitation winding are analyzed according to the relative space position of each branch winding of each phase and the relative space position of three-phase winding. Both the theoretical analysis and simulative results show that the excitation current of the 6-phase star brushless exciter mainly contains DC component and 6 times harmonic component during normal operation, and another $3/4$ and its multiples harmonic component appears after inter-turn short circuit fault of stator excitation winding occurs.

Key words: multi-phase star armature windings; star brushless exciter; inter-turn short circuit fault of excitation winding; harmonic analysis

附录 A

表 A1 6 相星形励磁机基本参数

Table A1 Basic parameters of 6-phase star exciter

参数	数值
额定功率/kW	20
额定励磁电压/V	62.22
额定励磁电流/A	47.9
额定转速/ (r · min ⁻¹)	1000
额定频率/Hz	133.33
转子槽数	48
转子绕组节距	3
气隙/mm	1.5
极对数	8

表 A2 6 相星形电枢绕组联结方式

Table A2 Connecting mode of 6-phase star connected armature winding

U ₁	1	-4'	7'	-4	7	-10'	13'	-10
	13	-16'	19'	-16	19	-22'	25'	-22
V ₁	17	-20'	23'	-20	23	-26'	29'	-26
	29	-32'	35'	-32	35	-38'	41'	-38
W ₁	33	-36'	39'	-36	39	-42'	45'	-42
	45	-48'	3'	-48	3	-6'	9'	-6
U ₂	25	-28'	31'	-28	31	-34'	37'	-34
	37	-40'	43'	-40	43	-46'	49'	-46
V ₂	41	-44'	47'	-44	47	-2'	5'	-2
	5	-8'	11'	-8	11	-14'	17'	-14
W ₂	9	-12'	15'	-12	15	-18'	21'	-18
	21	-24'	27'	-24	27	-30'	33'	-30