

# 核电站无刷励磁系统的电枢电流谐波分析研究

刘念<sup>1</sup> 王贺新<sup>2</sup> 赵欣<sup>2</sup>

(1. 四川大学锦城学院新能源工程系, 四川 成都 611731; 2. 四川大学电气工程系, 四川 成都 610065)

**摘要:** 无刷励磁系统是核电站汽轮发电机组的重要组成部分。无刷励磁系统的旋转整流器同转子一起旋转时, 旋转整流器由于承受着强离心力的作用会出现各种故障, 而不同故障时电枢电流的谐波是不同的。针对六相无刷励磁系统励磁机旋转整流器在正常运行、一臂开路和一臂短路3种情况下的电枢电流谐波进行理论分析, 并在 Matlab 中 Simulink 的环境下搭建三相、六相无刷系统进行仿真分析。通过与三相无刷励磁系统进行比较, 得出六相无刷励磁系统的故障特征与三相无刷励磁系统相似, 三相无刷励磁系统故障检测方法可以用于六相无刷励磁系统。

**关键词:** 无刷励磁系统; 旋转整流器; 谐波分析; 故障诊断

中图分类号: TM31 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)01-0017-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.004

## Analysis on Harmonic of Armature Current for Brushless Excitation System of Nuclear Plant

Liu Nian<sup>1</sup>, Wang Hexin<sup>2</sup>, Zhao Xin<sup>2</sup>

(1. Department of New Energy Engineering, Jincheng College of Sichuan University, Chengdu 611731, Sichuan, China; 2. Department of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** Brushless excitation system is an important part of turbine-generator unit in nuclear plants. When the rotating rectifier of brushless excitation system rotates with the rotor together, there will be some different failures because the rotating rectifier bears a strong centrifugal force, and the harmonic of armature current of different failures is different. The harmonic of armature current is analyzed theoretically aiming at three conditions, that is, exciter rotating rectifier of six phase brushless excitation system in normal operation, one arm open and one arm to be short circuit. The three-phase and six-phase brushless system are established in Matlab/Simulink for simulation analysis. Through comparing with three-phase brushless excitation system, it is concluded that the fault characteristics of six-phase brushless excitation system are similar to three-phase brushless excitation system. So the fault detection method of three-phase brushless excitation system can be used for six-phase brushless excitation system.

**Key words:** brushless excitation system; rotating rectifier; harmonic analysis; fault diagnosis

## 0 引言

无刷励磁系统是核电站汽轮发电机组的重要组成部分,其基本功能是:向汽轮发电机提供励磁电流;当负载工况变化时,维持机端电压稳定;当电力系统受到扰动时,保持发电机稳定运行;当发电机出现异常工况时,通过励磁调节限制运行工况,保护发电机。它的性能和可靠性直接影响到发电机组和电

网的安全运行和送电能力,是发电机组和电网系统中极其重要的一环<sup>[1]</sup>。

无刷同步发电机励磁系统的主励磁机是转枢式同步电机,与转子同轴旋转的电枢绕组感应出的交流电流经与主轴一起旋转的二极管整流后,直接送到主同步发电机的转子励磁绕组。交流主励磁机的励磁电流由同轴的交流副励磁机经过静止的晶闸管整流器后供给。由于这种励磁系统取消了集电环和电刷装置,故称为无刷励磁系统。由于取消了电刷

和集电环,减少了大量的维护工作并消除了因为电刷与集电环的机械性接触摩擦造成的噪声、火花和发热等不安全因素,因此无刷励磁同步电机在大容量核电机组中得到广泛的应用<sup>[2]</sup>。

在实际运行过程中,整流二极管处于高速旋转的状态将承受十分强大的离心力,故发生故障的概率非常高。一旦发生故障,如一臂开路、一臂短路等,将造成二极管的损坏,严重时不能给主发电机提供励磁电流从而影响发电机的正常安全运行,最后可能造成严重的后果。针对无刷励磁系统旋转整流器的故障诊断,国内外做了很多的研究,多数研究的是三相无刷励磁系统和11相(或多相)无刷励磁系统,而研究六相无刷励磁系统却很少<sup>[3-6]</sup>。

六相无刷励磁系统不仅可以降低大功率励磁系统对单个二极管的容量要求,还能提高整流电压的质量,改善系统的容错性,因此得到了广泛的应用。下面重点对六相无刷励磁系统励磁机旋转整流器在正常运行、一臂开路和一臂短路3种工况下进行交流励磁机电枢电流谐波分析,并在Matlab中Simulink的环境下进行仿真计算。

## 1 旋转整流器正常运行时的理论分析

六相无刷励磁同步发电机的主交流励磁机的电枢电流由副交流励磁机经过可控硅整流之后提供,主同步发电机的励磁电流由主交流励磁机经过旋转整流器整流后输出到主同步发电机的转子绕组上提供。该旋转整流器所接的负载可以认为是大电感负载,负载电流 $I_d$ 为同步发电机转子励磁电流,其六相无刷励磁同步电机励磁系统接线图如图1所示。

带整流器负载的主交流励磁机的电枢电流可以认为是正弦波形,定子电枢每相感应电压均为正弦波,相角依次相差 $60^\circ$ 。但是由于交流励磁机的电枢绕组存在电抗,导致电枢电流不能突变,所以电枢电流是非正弦的,并存在一个换相重叠角 $\gamma$ 。 $U_a$ 相电枢电流波形如图2所示。

为了简化计算,这里忽略电枢绕组的电抗,认为电枢电流是正弦波形,则 $U_a$ 相电枢电流波形如图3所示。

图3所示的电枢电流在一个周期内的表达式可以用分段函数表示,则交流励磁机的旋转整流器在正常运行时 $U_a$ 相的电枢电流为

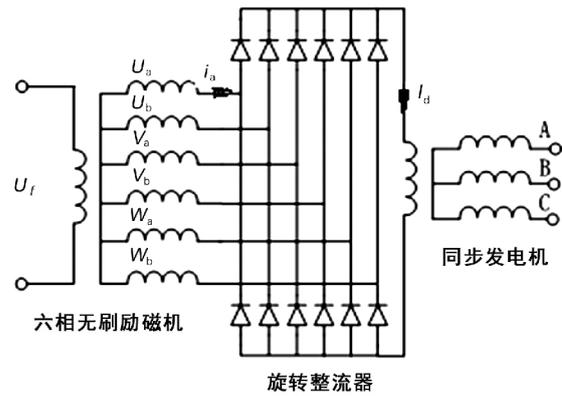


图1 六相无刷励磁系统接线图

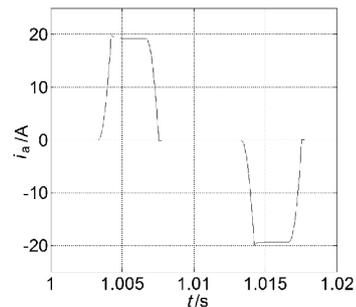


图2 实际的 $U_a$ 相电枢电流波形

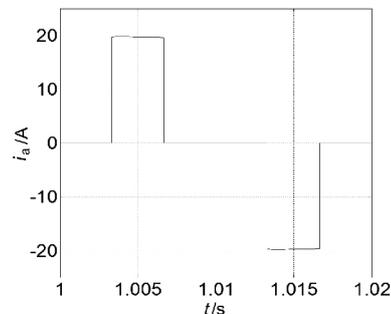


图3 简化后的 $U_a$ 相电枢电流波形

$$i_a = \begin{cases} I_d & \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3} \\ -I_d & \frac{4\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{3} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $I_d$ 为负载电流。从电枢电流的波形和公式可以看出,电枢电流是周期函数且满足狄利克雷定理,故可以对电枢电流进行傅里叶分解,得到分解后的电枢电流为

$$i_a = \frac{4I_d}{n\pi} \sin n\omega t \quad (n = 1, 3, 5 \cdots) \quad (2)$$

即

$$i_a = \frac{4I_d}{n\pi} \sin n\omega t = \frac{4I_d}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \cdots \right) \quad (3)$$

从电枢电流的傅里叶分解可以看出交流励磁机的旋转整流器在正常运行时电枢电流不含有直流分

量和偶次谐波,仅含有奇次谐波,其中3次、5次和7次谐波的含量最多,且谐波含量随着谐波次数的增加而降低。

## 2 旋转整流器一臂开路时的理论分析

同旋转整流器正常运行时的分析方法一样,为了简化计算,同样忽略电枢绕组的电抗,认为电枢电流是正弦波形,则  $U_a$  相一臂开路时的电枢电流波形如图4所示。

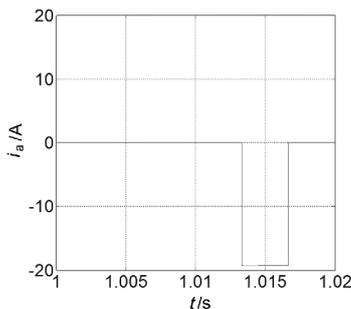


图4  $U_a$  相一臂开路时电枢电流波形

图4所示的电枢电流同样用分段函数表示,则交流励磁机的旋转整流器在一臂开路时  $U_a$  相的电枢电流为

$$i_a = \begin{cases} -I_d & \frac{4\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{3} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

可以看出电枢电流还是周期函数并且满足狄利克雷定理,同样在一个周期内的表达式可以用傅里叶分解,得到

$$i_a = \frac{I_d}{6} + \frac{2I_d}{n\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (A + B) \quad (5)$$

$$A = -2 \sin \frac{n\pi}{3} \cos n\omega t$$

$$B = \left( \cos n\pi - 2 \cos \frac{n\pi}{3} \right) \sin n\omega t \quad (n = 1, 2, \dots)$$

从一臂开路时电枢电流的傅里叶分解可以看出,交流励磁机的旋转整流器在一臂开路时电枢电流不仅含有奇次谐波,还出现了直流分量和偶次谐波,其中2次和4次谐波含量很多并且谐波含量随着谐波次数增加而降低。

## 3 旋转整流器一臂短路时的理论分析

用同样的方法来分析整流旋转器在一臂短路时

的电枢电流,则  $U_a$  相一臂短路时的电枢电流波形如图5所示。

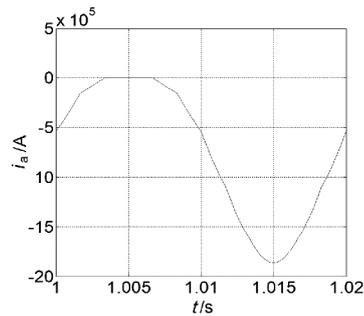


图5  $U_a$  相一臂短路时电枢电流波形

图5所示的电枢电流波形同样还是周期函数并且满足狄利克雷定理,同样在一个周期内的表达式可以用傅里叶分解,但是由于短路时的电枢电流波形明显不能用一个显函数来表示并且也不易用分段函数来表示。为了简化计算,这里采用 Matlab 拟合工具箱将短路时的电枢电流波形进行了拟合,得到一个拟合函数为

$$i_a = a_1 \sin(b_1 \omega t + c_1) + a_2 \sin(b_2 \omega t + c_2) + a_3 \sin(b_3 \omega t + c_3) + a_4 \sin(b_4 \omega t + c_4) \quad (6)$$

由傅里叶分解可以知道一个非标准正弦函数的分解除了直流分量以外,其奇次偶次谐波含量是随着谐波次数的增加成幂数的减少,可见在短路发生时电枢电流的直流分量和低次谐波的含量较多,如2次谐波、3次谐波等。

## 4 旋转整流器正常和故障时仿真分析

在 Matlab 中的 Simulink 环境下建立三相、六相无刷励磁系统的仿真模型<sup>[7-8]</sup>,三相无刷励磁机用 Matlab 的三相同步电机模块来进行仿真,如图6所示;六相无刷励磁机采用六相电压源模块进行仿真,如图7所示。

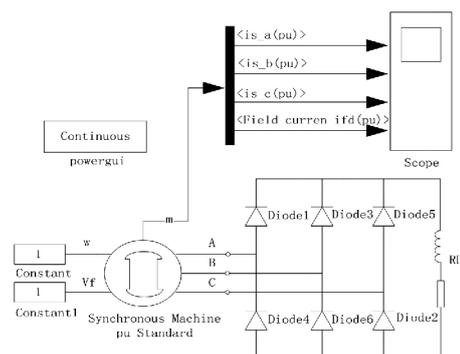


图6 三相无刷励磁系统的仿真模型

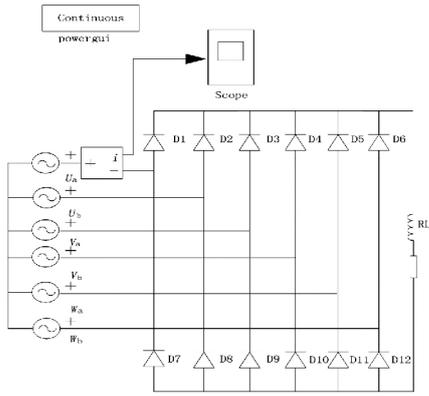


图 7 六相无刷励磁系统的仿真模型

仿真模型中的无刷励磁机参数和同步发电机转子参数如表 1 所示,其中  $x_d^*$  为励磁机  $d$  轴电抗标么值;  $x_q^*$  为励磁机  $q$  轴电抗标么值;  $r_a^*$  为励磁机电枢电阻标么值;  $x_o^*$  为励磁机电枢漏抗标么值;  $R_L^*$  为同步发电机转子绕组阻抗标么值。

表 1 无刷励磁机参数和同步发电机转子参数

无刷励磁	$x_d^*$	$x_q^*$	$r_a^*$	$x_o^*$	$R_L^*$
六相系统	1.563	0.921	0.532	0.023	2.563
三相系统	1.236	0.732	0.463	0.015	2.132

通过仿真分析,分别获得三相、六相交流励磁机旋转整流器在正常运行时的电枢电流波形和谐波成分,如图 8 和图 9 所示。而图 10 和图 11 分别是三相、六相交流励磁机旋转整流器发生一臂开路时的电枢电流波形和谐波成分。另外,图 12 和图 13 分别是三相、六相交流励磁机整流器发生一臂短路时电枢电流的波形和谐波成分。

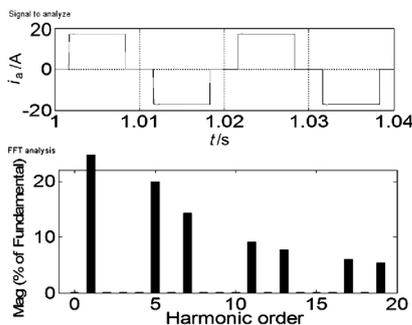


图 8 正常运行时  $U_a$  相电枢电流波形和谐波(三相)

从仿真结果可以看出,六相无刷励磁系统励磁机旋转整流器在正常运行、一臂开路和一臂短路三种情况下,电枢电流的谐波次数和含量与三相无刷励磁系统励磁机旋转整流器在正常运行、一臂开路和一臂短路 3 种情况下基本相同。出现不同的地方在于旋转整流器正常运行时,三相励磁系统中的电

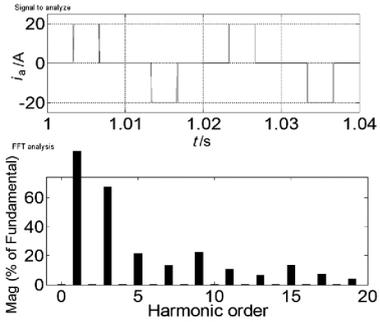


图 9 正常运行时  $U_a$  相电枢电流波形和谐波(六相)

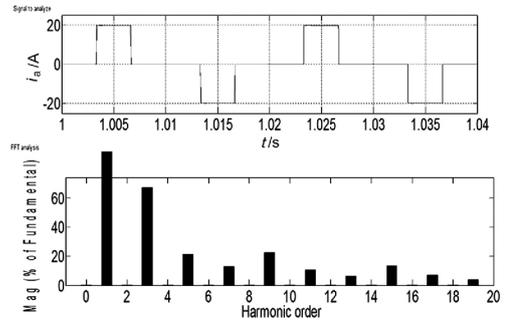


图 10 一臂开路时  $U_a$  相电枢电流波形和谐波(三相)

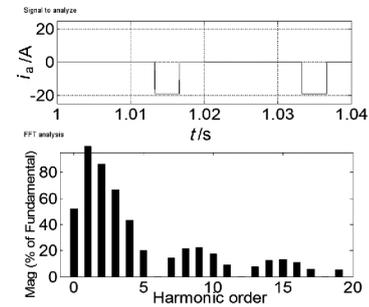


图 11 一臂开路时  $U_a$  相电枢电流波形和谐波(六相)

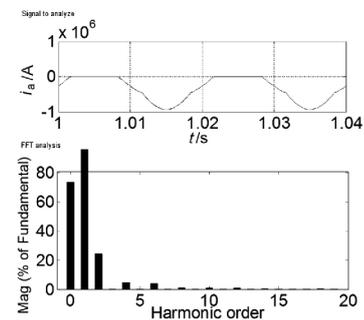


图 12 一臂短路时  $U_a$  相电枢电流波形和谐波(三相)

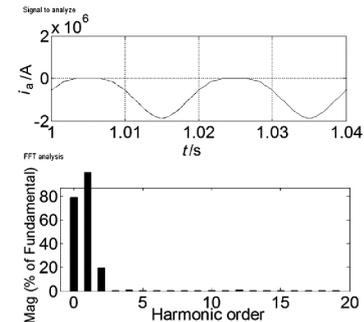


图 13 一臂短路时  $U_a$  相电枢电流波形和谐波(六相)

枢绕组是星型连接,故3次及3的整数倍谐波不存在,而对于六相励磁系统则是6次及6的整数倍谐波不存在。但是总体的故障特征并没有改变,例如:正常运行时奇次谐波含量较多;一臂开路时直流分量、基波和2次、4次谐波含量较多;一臂短路时直流分量、基波和2次谐波含量较多。

因此,根据励磁机转子侧出现不对称电流可以在励磁机定子侧感应出相应的谐波电流的原理,可在定子侧进行谐波电流的成分检测(例如正常运行时6次谐波含量最大、一臂开路时基波含量最大、一臂短路时2次谐波含量最大)达到故障诊断目的,或者检测定子侧电流基波含量与6次谐波含量的比值、基波含量与2次谐波含量的比值作为故障类型的判断。

## 5 结 语

针对六相无刷励磁系统励磁机在正常运行、一臂开路和一臂短路3种情况下对电枢电流进行谐波理论分析和仿真计算,得出仿真结果与理论分析一致;与三相无刷励磁系统进行了比较,得出六相无刷励磁系统的故障特征与三相相似,三相无刷励磁系统故障检测方法可以用于六相无刷励磁系统。

### 参考文献

[1] 赵昌宗. 岭澳核电发电机用无刷励磁机的技术特点 (上接第16页)

## 4 结 语

以新疆电网实际运行中遇到的调峰与新能源出力之间的矛盾为出发点,通过基于极端学习机的预测方法,以调峰能力和电力平衡约束为主要手段,确定新疆电网满足调峰要求的最小开机方式与最大新能源出力的最优解,为新疆电网明确开机方式,实现经济调度奠定基础。

### 参考文献

[1] 魏磊,张琳,姜宁,等. 包含风电的电力系统调峰能力计算方法探讨[J]. 电网与清洁能源,2010,26(8):59-63.  
[2] 闫广新,施海,刘新刚,等. 电网在调峰能力约束下接纳风电能力的估算[J]. 电力与能源,2012,33(3):260

[C]. 中国电机工程学会大电机专业委员会学术年会,2009.

[2] 鲁勇勤. 广东岭澳二期1150 MW核发电机无刷励磁系统[J]. 东方电机,2009,15(5):42-47.  
[3] 刘念,曾德纯,谢应璞,等. 交流励磁机旋转整流器故障的微机识别快速报警装置研究[J]. 电气应用,1993,10(1):11-13.  
[4] 刘念. 无刷励磁旋转整流器电流波形分析及其故障的微机识别[J]. 电力系统自动化,1994,18(4):19-26.  
[5] Zouaghi T, Poloujadoff M. Modeling of Polyphase Brushless Exciter Behavior for Failing Diode Operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1998,13(3):214-220.  
[6] Xiao C J, Li Q F, Lai J S, et al. Analysis of Polyphase Brushless Exciter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2001,37(6):1720-1726.  
[7] 郝亮亮,王善铭,邱阿瑞,等. 多相无刷励磁系统励磁机定子电流谐波特性[J]. 清华大学学报(自然科学版),2011,51(1):58-62.  
[8] 郝亮亮,王善铭,邱阿瑞,等. 多相无刷励磁系统旋转整流器故障的仿真与识别[J]. 电工技术学报,2012,21(4):138-144.

### 作者简介:

刘念(1956),博士、教授,主要从事高电压技术及电力设备状态监测与故障诊断等方面的教学与研究;

王贺新(1989),硕士研究生,研究方向为电力设备故障与诊断;

赵欣(1992),硕士研究生,主要从事大电机安全分析与运行监控技术研究。

(收稿日期:2017-10-18)

-263.

[3] 张学清,梁军,张熙,等. 基于样本熵和极端学习机的超短期风电功率组合预测模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):33-39.  
[4] 武峰雨,乐秀璠,南东亮. 相空间重构的极端学习机短期风速预测模型[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(1):136-141.  
[5] 刘士荣,李松峰,宁康红,等. 基于极端学习机的光伏发电功率短期预测[J]. 控制工程,2013,20(2):372-376.  
[6] 刘德伟,黄越辉,王伟胜,等. 考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):77-81.  
[7] 李子寿,许梁,徐箭,等. 以调峰能力为约束的湖北电网接纳风电能力研究[J]. 机电工程,2016,33(5):625-628.

### 作者简介:

宋朋飞(1987),硕士研究生,主要从事电力系统控制与分析。  
(收稿日期:2017-09-08)