

基于励磁磁动势差值的汽轮发电机转子匝间短路 在线识别方法

李华忠,张琦雪,王光,陈俊

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102)

摘要: 汽轮发电机转子绕组发生匝间短路时会引起励磁磁动势缺失,但在励磁系统恒压闭环调节作用下,励磁电流将增大以补偿励磁磁动势缺额。分析了汽轮发电机转子匝间短路故障时励磁磁动势变化特征,以故障后由励磁电流计算得的“视在”励磁磁动势大于发电机当前工况下所需的励磁磁动势为理论依据,提出了基于励磁磁动势差值的转子匝间短路在线识别方法。试验结果表明了采用所提方法可有效在线识别转子匝间短路故障。

关键词: 汽轮发电机; 励磁绕组匝间短路; 励磁磁动势; 励磁系统; 在线识别

中图分类号: TM 311

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.026

0 引言

转子绕组匝间短路是汽轮发电机较常见的故障类型之一^[1-4]。由于转子绕组的设计布置、制造工艺、运行中受电热及机械应力等影响,转子匝间容易出现磨损、断裂、垫条滑移等问题,造成匝间短路或间歇性匝间短路。虽然轻微匝间短路对机组运行影响不大,但如果不及及时发现,一旦故障继续发展,可能会导致转子绕组发生转子一点接地或两点接地故障、烧轴瓦和轴颈、大轴磁化等严重后果,使得机组被迫停机,造成巨大经济损失^[5-7]。如果在匝间短路初期就能及时预报,不仅可以避免严重事故的发生,而且有利于安排机组检修,提高故障处理效率。

目前国内外学者对转子匝间短路故障特征及监测方法已有大量研究。传统的转子绕组匝间短路离线检测方法,如直流电阻法、交流阻抗与功率损耗法、空载和短路特性试验法等^[8-9],虽然比较成熟,但需在机组静止或不带负载的情况下检测,无法实现在线监测。文献^[10-14]提出采用微分线圈测法,该方法适合在空载及机端三相对称短路时监测汽轮发电机转子是否发生匝间短路以及判断短路的严重程度,但受电枢反应引起的气隙磁场畸变、铁芯饱和以及需加装探测线圈等因素影响,该方法应用受到限制。文献^[15-16]提出以转子绕组匝间短路时定子相绕组内部会出现分数次谐波的稳态环流为故障特征量作为监测判据,但绝大部分汽轮机组中性点仅引出3个端子,不具备分支电流互感器安装条件。鉴于以上情况,本文提出基于励磁磁动势差值原理的汽轮发电机转子匝间短路在线监测方法,并在样机上进行试验验证。

1 转子匝间短路励磁磁动势特征分析

图1为汽轮发电机正常运行及匝间短路时励磁磁动势分布示意图,图中 α 为电角度, F_{fd} 为正常运行时励磁基波磁动势 F_{fd} 的幅值, f_m 为励磁磁动势阶梯波幅值, F'_{fd} 为匝间短路时励磁基波磁动势 F'_{fd} 的幅值。当汽轮发电机正常运行时,励磁磁动势在空间上可近似认为是阶梯形或梯形分布,如图1中点划线部分所示,图中实线正弦波为励磁基波磁动势分布情况。当汽轮发电机转子绕组发生匝间短路时,由于转子绕组有效匝数减少,励磁磁动势局部发生缺失,导致励磁磁动势峰值和励磁基波磁动势也随之降低,如图1中虚线部分所示。

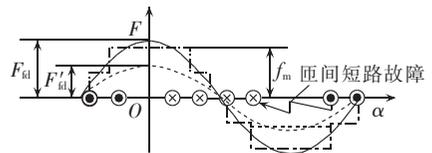


图1 汽轮发电机正常运行及匝间短路时励磁磁动势分布示意图

Fig.1 Exciting MMF distribution during normal operation and inter-turn short circuit of steam-turbine-generator

由于励磁磁动势局部发生缺失,汽轮发电机电压降低,此时汽轮发电机励磁恒压闭环调节系统必然会增大励磁电流,以补偿因转子匝间短路而引起的励磁磁动势缺额。图2为汽轮发电机励磁恒压闭环调节系统示意图(图中TA、TV、ET分别为电流互感器、电压互感器和励磁变压器)。

在励磁系统增磁作用下, F'_{fd} 逐渐增大,直至其与机组当前运行工况所需的励磁基波磁动势相同,记此时励磁绕组基波磁动势为 F''_{fd} 。如果故障后机组工况未变化,则 F''_{fd} 与故障前的 F_{fd} 相同。

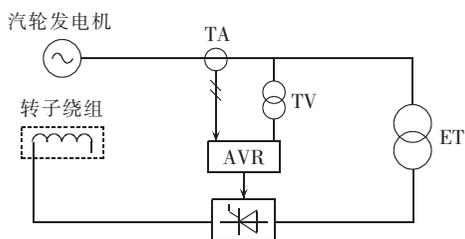


图 2 发电机励磁恒压闭环调节系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of constant-voltage closed-loop control system for generator excitation system

定义此时实测励磁电流对应的“视在”励磁基波磁动势为 F_{js} ，其幅值计算公式如下：

$$|F_{js}| = \frac{1}{2} k_f N_f I_{fd}'' \quad (1)$$

其中， k_f 为励磁磁动势的波形系数； N_f 为励磁绕组的串联总匝数； I_{fd}'' 为励磁电流直流分量。由于励磁电流的增加且采用励磁绕组总匝数计算，所以该“视在”励磁基波磁动势必然大于故障前或机组正常运行时所需的励磁基波磁动势。

根据以上励磁磁动势变化特征可得到的结论如下。

a. 转子匝间短路后在励磁恒压闭环调节作用下，励磁基波磁动势 F_{fd}'' 与机组当前运行工况所需的励磁磁动势相同。若故障前后机组工况未变化，则 F_{fd}'' 与故障前的 F_{fd} 相同，满足：

$$|F_{fd}''| = |F_{fd}| \quad (2)$$

b. 进行励磁系统闭环调节后，虽然汽轮发电机励磁基波磁动势和故障前相同，但“视在”励磁基波磁动势 F_{js} 的幅值已经增大了，且大于故障前或机组当前所需的励磁基波磁动势 F_{fd}'' 的幅值，关系式如下：

$$|F_{js}| - |F_{fd}''| > 0 \quad (3)$$

2 转子匝间短路在线识别方法

2.1 转子匝间短路在线识别主判据

基于上述分析，以式(1)—(3)为依据，利用当前实测励磁电流计算得到的“视在”励磁磁动势幅值与汽轮发电机当前工况下转子基波磁动势幅值的差值是否大于监测门槛作为监测判据，判据如下：

$$|\Delta F_{fd}| = |k_c F_{js}| - |F_{fd}''| > \varepsilon \quad (4)$$

其中， $|\Delta F_{fd}|$ 为励磁磁动势差值幅值； k_c 为磁动势测量计算环节的校正系数； ε 为励磁磁动势差值监测门槛。

当汽轮发电机正常运行时，由励磁电流计算出的“视在”励磁磁动势与当前汽轮发电机运行工况计算出的励磁磁动势应相同，励磁磁动势差值为 0；当汽轮发电机转子绕组发生匝间短路时，两者则出现差值，如果差值大于监测门槛，则经延时报警。监测门槛按可靠躲过最大不平衡励磁磁动势整定，报警

延时躲过系统振荡、励磁调节等影响。

2.2 辅助判据

由于转子绕组发生匝间故障时，不影响定子绕组侧电枢磁动势的对称性，因此，为提高判别的可靠性，增加三相电压对称度的判别：

$$\max\{U_{ga}, U_{gb}, U_{gc}\} < 1.2 \times \min\{U_{ga}, U_{gb}, U_{gc}\} \quad (5)$$

其中， U_{ga} 、 U_{gb} 和 U_{gc} 为汽轮发电机机端三相电压值。该判据能可靠防止汽轮发电机内部或外部短路故障时导致装置误报警。

3 关键技术

因为判据式(4)中“视在”励磁磁动势 F_{js} 可经式(1)求得，所以准确计算出当前工况下对应励磁磁动势基波 F_{fd}'' 成为匝间短路识别判据的关键点。

3.1 励磁磁动势计算模型

根据电机学理论，汽轮发电机合成磁动势 F_δ 由转子励磁基波磁动势 F_{fd} 和电枢反应磁动势 F_a 共同构成：

$$F_\delta = F_{fd} + F_a \quad (6)$$

$$F_a = 1.35 \frac{W_1 I_1}{p} k_{dp1} \quad (7)$$

其中， W_1 为一相定子绕组串联的总匝数； I_1 为汽轮发电机电枢基波电流； k_{dp1} 为基波绕组系数； p 为极对数。这些参数均可通过汽轮发电机参数或测量得到。故求出汽轮发电机合成磁动势即可求得励磁基波磁动势。

由于隐极汽轮发电机在空载和有载情况下，磁场气隙均匀，主磁通的磁路情况没有变化，所以气隙电动势和合成磁动势也应符合空载特性曲线关系^[17]，如图 3 所示，其中汽轮发电机空载特性曲线可由试验测得。而气隙电动势 E_δ 可由汽轮发电机机端电压 U_1 、电枢电流 I_1 、定子绕组电阻 r 及定子漏抗 X_σ （不考虑铁芯饱和和影响）求得，再根据空载特性曲线及隐极汽轮发电机电动势—磁动势向量图确定的向量关系，即可求得合成磁动势 F_δ 。将求得的 F_δ 和 F_a 代入式(6)，即可求得相应的 F_{fd} 。

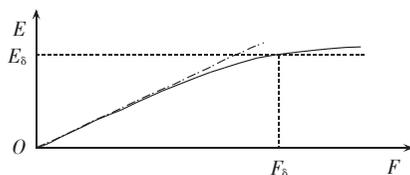


图 3 合成磁动势与气隙电动势的对应关系

Fig.3 Corresponding relationship between compound MMF and air-gap electromotive force

3.2 基于拉格朗日插值法的分段气隙磁动势算法

在铁芯不饱和的情况下，气隙电动势与合成磁动势呈线性关系，如图 3 中点划线所示；当铁芯饱和（如

汽轮发电机正常励磁或过励磁情况)时,气隙电动势与合成磁动势为非线性关系,如图3中实线所示。为准确计算气隙电动势对应的合成磁动势,采用了基于拉格朗日插值法的分段磁动势算法,如式(8)所示。

$$\begin{cases} F(E) = F_k l_k(E) + F_{k+1} l_{k+1}(E) + F_{k+2} l_{k+2}(E) \\ l_k(E) = \frac{(E - E_{k+1})(E - E_{k+2})}{(E_k - E_{k+1})(E_k - E_{k+2})} \\ l_{k+1}(E) = \frac{(E - E_k)(E - E_{k+2})}{(E_{k+1} - E_k)(E_{k+1} - E_{k+2})} \\ l_{k+2}(E) = \frac{(E - E_k)(E - E_{k+1})}{(E_{k+2} - E_k)(E_{k+2} - E_{k+1})} \end{cases} \quad (8)$$

其中, E 为汽轮发电机气隙电动势; $F(E)$ 为气隙电动势对应的合成磁动势; (F_k, E_k) 、 (F_{k+1}, E_{k+1}) 和 (F_{k+2}, E_{k+2}) 为相邻3组气隙电动势及合成磁动势数据; $l_k(E)$ 、 $l_{k+1}(E)$ 和 $l_{k+2}(E)$ 为拉格朗日二次多项式插值系数。

4 试验验证

基于上述提出的转子匝间短路在线识别方法,将具有该功能的转子匝间监测装置在某动模实验室A1533样机上进行试验验证。

A1533样机额定容量为15 kV·A,额定功率为12 kW,额定功率因数为0.8,额定频率为50 Hz,额定转速为1000 r/min,额定电压为400 V,额定电流为21.7 A,额定励磁电压为27 V,额定励磁电流为16 A。A1533样机与转子匝间监测装置接线图如图4所示,转子绕组总匝数为 $123 \times 6 = 738$ (匝),中间引出了5个抽头(编号为2、3、4、5、6)。

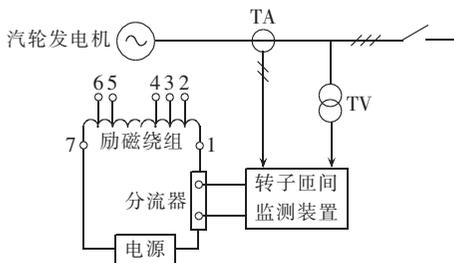


图4 A1533样机与转子匝间监测装置接线图

Fig.4 Wiring connection between inter-turn short circuit monitoring device and prototype A1533

在计算过程中,以汽轮发电机额定电压、额定电压及励磁空载额定电流为基值,将各励磁磁动势计算统一换算成标么值,励磁磁动势差值门槛按躲过最大不平衡励磁磁动势差值整定,依据试验工况,将监测门槛值整定为0.010 p.u.,记录试验情况如表1所示,表中 I_g 为汽轮发电机定子基波电流。

表1试验结果表明,当试验机组未发生转子匝间短路时,励磁磁动势差值小,监测装置不报警;当短接匝数大于61匝(短路匝比8.26%)时,装置均能实现有效识别,但当短路匝数小于20匝(短路匝比

表1 A1533样机转子匝间短路试验记录
Table 1 Records of inter-turn short circuit experiment for prototype A1533

| 短接编号 (带载情况) | 短接 匝数 | 短路 匝比/% | $ F_{\text{st}}'' $ | $ k_c F_{\text{js}} $ | $ \Delta F_{\text{st}} $ |
|--------------------------|----------|------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|
| 6、7短接, $I_g = 1.31$ A | 344 | 46.61 | 0.461 | 0.761 | 0.299 |
| 4、5短接, $I_g = 1.31$ A | 321 | 43.50 | 0.462 | 0.739 | 0.277 |
| 1、4短接, $I_g = 1.31$ A | 61 | 8.26 | 0.470 | 0.487 | 0.017 |
| 6、7短接, $I_g = 0$ A | 344 | 46.61 | 0.470 | 0.768 | 0.272 |
| 4、5短接, $I_g = 0$ A | 321 | 43.50 | 0.459 | 0.732 | 0.272 |
| 1、4短接, $I_g = 0$ A | 61 | 8.26 | 0.470 | 0.487 | 0.017 |
| 1、3短接, $I_g = 1.31$ A | 20 | 2.71 | 0.459 | 0.464 | 0.005 |
| 无匝间短路 (空载或正常运行) | 0 | 0 | 0.004 | 0.003 | 0.001 |

2.71%)时,监测装置则无法识别。

5 结论

本文提出了一种基于励磁磁动势差值原理的转子匝间短路在线识别方法,主判据由实测励磁电流计算的“视在”励磁磁动势与汽轮发电机当前工况下所需的励磁磁动势差值构成,门槛值按可靠躲过最大不平衡励磁磁动势整定,此外为提高可靠性增加了三相电压对称度判别作为辅助判据。本文方法易于实现,能够有效识别转子匝间短路故障,为转子绕组匝间绝缘情况及故障分析提供了有效参考,提高了排查效率,理论分析和样机试验均验证了方法的可行性。

但本文方法尚有局限性,灵敏度还不够高,主要原因是合成磁动势与气隙电动势之间受工况影响呈非线性关系,进一步的研究工作可以尝试通过有限元电磁场分析计算方法,得到汽轮发电机不同负荷工况下合成磁动势与气隙电动势之间的曲线簇,细化磁动势计算。此外,为提高监测灵敏度,汽轮发电机定子电压、电流宜采用测量级互感器。

参考文献:

- [1] 唐芳轩,许艳霞. 秦山第二核电站汽轮发电机转子匝间短路故障的诊断与处理[J]. 电力设备,2005,6(1):67-69.
TANG Fangxuan, XU Yanxia. Diagnosis and treatment of turn-to-turn short circuit fault for generator rotor in Qinshan No.2 Nuclear Power Station[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(1): 67-69.
- [2] 邹炯斌,赵锋,宁颖辉. 1000 MW 机组汽轮发电机转子绕组匝间短路故障分析[J]. 热力发电,2012,41(6):74-76.
ZOU Jiogbin, ZHAO Feng, NING Yinghui. Analysis of inter-turn short-circuit fault occurred in generator's rotor winding[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(6): 74-76.

- [3] 杨素华. 丹江口电厂汽轮发电机转子匝间短路的诊断与处理[J]. 云南水利发电, 2005, 23(2): 95-97.
YANG Suhua. Diagnosis and treatment of turn-to-turn short circuit of generator's rotor in Danjiangkou Hydropower Plant[J]. Yunnan Water Power, 2005, 23(2): 95-97.
- [4] TAVNER P J. Review of condition monitoring of rotating electrical machines[J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(4): 215-247.
- [5] 李伟清. 汽轮发电机故障检查分析及预防[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [6] 郝亮亮, 吴俊勇. 同步汽轮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.
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.
- [7] HUANG Haizhou, ZHANG Kanjun, ZHANG Yong. Detection of turbine generator field winding serious inter-turn short circuit based on the rotor vibration feature[C]//Proceedings of the 44th Universities Power Engineering Conference. Glasgow, UK: IET, 2009: 1-5.
- [8] 全国旋转电机标准化技术委员会. 隐极式同步汽轮发电机转子匝间短路测定方法: JB/T8446—2005[S]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [9] 彭发东, 张征平, 陈杰华, 等. 大型汽轮发电机转子匝间短路故障的分析与诊断[J]. 大电机技术, 2010(6): 17-19.
PENG Fadong, ZHANG Zhengping, CHEN Jiehua, et al. Analysis and diagnosis of large turbo generator rotor inter-turn short-circuit fault [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2010(6): 17-19.
- [10] 徐剑, 李永刚, 李和明. 隐极式转子匝间短路在线监测[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 70-74.
XU Jian, LI Yonggang, LI Heming. On-line monitoring of inter-turn short circuit in distributed polar rotor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 70-74.
- [11] STOLL R L, HENNACHE A. Method of detecting and modeling presence of shorted turns in DC field winding of cylindrical rotor synchronous machines using two air gap search coils[J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications, 1988, 135(6): 281-294.
- [12] RAMIREZ-NINO J, PASCACIO A. Detecting interturn short circuits in rotor windings[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2001, 14(4): 39-42.
- [13] ALBRIGHT D R, ALBRIGHT D J, ALBRIGHT J D. Flux probes provide on-line detection of generator shorted turns[J]. Power Engineering, 1999, 103(9): 28-32.
- [14] 刘念, 谢驰, 陈实, 等. 基于小波分析的发电机转子匝间短路故障诊断方法研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 49-51.
LIU Nian, XIE Chi, CHEN Shi, et al. Diagnosis of generator rotor inter-turn short-circuit based on wavelet analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 49-51.
- [15] 孙宇光, 郝亮亮, 王祥珩. 同步汽轮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.
- [16] 黄春礼, 黄春阳. 定子相绕组横联电势分析及励磁绕组匝间短路故障监测[J]. 东方电气评论, 1998, 12(3): 142-145.
HUANG Chunli, HUANG Chunyang. Analysis of transverse electromotance in stator phase-windings and monitoring fault of shorted turns in field winding[J]. Dongfang Dianqi Pinglun, 1998, 12(3): 142-145.
- [17] 李发海, 陈汤铭. 电机学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1991: 299-300.

作者简介:



李华忠

李华忠(1983—), 男, 福建三明人, 工程师, 硕士, 主要从事电力主设备继电保护研究、开发工作(E-mail: lihz@nrec.com);

张琦雪(1974—), 男, 江苏沭阳人, 研究员级高级工程师, 博士, 主要从事电力主设备继电保护研究、开发工作;

王光(1980—), 男, 内蒙古达拉特旗人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力主设备继电保护研究、开发及管理工作;

陈俊(1978—), 男, 江苏姜堰人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力主设备继电保护研究、开发及管理工作。

Online inter-turn short circuit identification based on exciting MMF difference for rotor winding of steam-turbine-generator

LI Huazhong, ZHANG Qixue, WANG Guang, CHEN Jun

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The rotor-winding inter-turn short circuit of steam-turbine-generator may cause the loss of exciting MMF(Magnetic Motive Force), which will be compensated by the increased exciting current under the constant-voltage closed-loop control. The variation characteristics of exciting MMF during the inter-turn short circuit fault are analyzed and a method of online inter-turn short circuit identification based on exciting MMF difference for the rotor winding is proposed based on the theoretical analysis that the apparent exciting MMF calculated according to the exciting current during the short circuit fault is larger than the exciting MMF needed by the generator at that moment. The test results show that, with the proposed method, the rotor-winding inter-turn short circuit can be effectively online identified.

Key words: steam-turbine-generator; rotor-winding inter-turn short circuit; exciting magnetic motive force; excitation system; online identification