

交流无刷发电机故障诊断研究综述

张超, 夏立

(海军工程大学, 湖北 武汉 430033)

摘要: 对交流无刷发电机故障诊断技术进行了详细的分类和总结, 认为目前的研究进展落后于发电机故障保护和电动机故障诊断领域, 并分析了其主要原因。最后提出了发电机故障诊断领域的发展方向和发展重点。

关键词: 交流无刷发电机; 故障诊断; 多回路理论

中图分类号: TM307+.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)05-0103-04

Reviews on Fault Diagnosis for AC Brushless Generators

Zhang Chao, Xia Li

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In view of classification and summary of the fault diagnosis technology of AC brushless generators, the lag behind research development on generator fault protection and its diagnosis at present are analyzed. At last the research direction and its emphasis in the future are put forward.

Key words: AC brushless generator; fault diagnosis; multi-loop theory

0 引言

采用旋转整流器式无刷交流发电机, 是现代独立电力系统的重要方案之一。由于其具有维护简单、可靠性高、可长期连续运行而不需要保养的优点, 无刷交流发电机在舰船电力系统中得到了广泛的应用。无刷交流发电机自50年代发明以来, 其冷却方式、材料及工艺得到了不断的完善和发展, 其功率密度越来越大, 可靠性显著提高。同时也应指出, 当前我国发电机的制造水平、运行管理水平、机组安装及检修质量还存在不少问题, 给发电机的安全稳定运行带来了极大的隐患。发电机是电力系统的核心, 一旦出现故障, 不但威胁电力系统的稳定运行, 还可能损坏发电机设备。随着单机容量的不断增大, 发电机的运行可靠性显得尤为重要和突出。特别是在大型舰船电力系统中, 无刷交流发电机是否正常运行对舰船的生命力和战斗力有着决定性的影响。因此, 对交流无刷发电机开展故障诊断研究, 具有十分重要的意义。

近20年来, 各国学者都开展了状态监测和诊断技

术方面的研究, 并取得了一定的进展, 各种诊断手段、方法层出不穷。当前, 世界上一些国家采用和正在研制的发电机状态监测和诊断系统内容比较广泛, 包括定子绕组、铁芯、转子、氢油水系统及机组轴系等各个方面。本文主要针对交流无刷发电机的各种电气故障, 对其研究现状进行分类和总结, 并提出未来的研究方向和研究重点。

交流无刷发电机的电气故障主要包括定子绕组故障、转子绕组故障和旋转整流器故障。交流无刷发电机故障诊断技术的研究热点也集中在这3个方面。

1 定子绕组故障诊断方法

定子绕组故障主要是指定子绕组的绝缘故障, 包括定子绕组的内部短路和对地短路。定子铁心槽内上下线棒之间绝缘水平高于线棒对地(铁心)绝缘水平, 因此, 绝缘损坏首先表现为定子绕组单相接地故障。一般情况下, 定子槽内绝缘破坏后是先发生单相接地, 然后发展为内部短路。但王维剑^[1]指出: 定子绕

收稿日期: 2007-07-22

作者简介: 张超(1980-), 男, 湖北武汉人, 海军工程大学博士生, 主要研究方向为电机状态监测和故障诊断。

组有首先发生内部短路的可能,并且大型汽轮发电机定子绕组同相同槽的数量占总槽数的近50%,应该考虑发生内部短路的可能性。实际运行经验表明,由于绝缘受潮、老化、机械振动和机械损伤等原因,电机定子绕组内部故障是常有发生的。交流电机定子绕组,在同槽的上下层线棒之间和线圈的端部交叉处都有可能发生短路。这样的内部短路故障包括同支路的匝间短路,同相不同支路的匝间短路和相间短路,是电机中常见的破坏性很强的故障。

在定子绕组内部短路故障的诊断研究方面,文献[2]的作者认为,定子绕组发生短路时(匝间或相间),在定子绕组上产生正序的3次谐波电压。而电机正常情况下,定子绕组上只有零序的3次谐波电压,因此将正序3次谐波电压作为定子绕组故障时的故障特征。李和明等^[3]研究了定子绕组短路对发电机并联支路环流特性的影响,得出定子绕组故障将引起定子绕组并联支路之间的基波环流增加,且幅值随短路程度的增加而增加。此研究方法需要在定子绕组并联支路内装设传感器,不易实现。文献[4]的作者通过测量励磁机电枢电流的谐波成分来检测发电机定子绕组故障,将励磁机电枢电流的400 Hz谐波分量作为故障特征。万书亭等^[5]研究了定子绕组匝间短路对发电机定转子径向振动特性的影响,得出匝间短路时,定子垂直方向频率以2倍工频的振动速度变大的结论。夏长亮等^[6]用R/S分析和小波变换,对绕组匝间短路故障提取故障特征,利用小波变换的显微能力,聚焦故障信息的低频分量,再应用R/S分析法计算故障时电机的相电压、相电流暂态波形一定尺度下低频分量的分形维数,得到分形维数曲线,并作为故障特征来识别3种不同类型的匝间短路,但结论缺乏一般性。关于定子绕组单相接地故障的诊断研究的文献很少。

值得一提的是,无论是定子绕组的单相接地故障还是内部短路故障,对其进行故障保护方面的研究却非常多。以单个线圈为分析单元的交流电机多回路理论是由我国学者高景德、王祥珩首次提出的^[7],并将它成功地应用于发电机定子绕组内部短路电量计算,以及保护方案灵敏度的仿真分析中^[8-10]。在处理发电机定子绕组内部故障时,多回路理论可以考虑绕组内部故障时影响重大的(如故障空间位置和绕组型式等)因素,从而可以较为准确地获得绕组故障后的内部电磁关系和绕组电流分布,对发电机定子绕组内部故障保护装置的设计、制造和运行起到了积极的推动作用。但是多回路法是磁路分析方法,不能考虑发电机实际运行时气隙磁场饱和效应和实心转子涡流效应产生的影响,具有一定的局限性。多回路法与磁场有限元法相结合的场路耦合法^[11]解决了上述问题,并成功地应用于定子绕组单相接地故障保护方案的研究中^[12-14]。

对定子绕组进行故障诊断研究,首先要明确和区分故障诊断和故障保护的概念。故障诊断主要研究在故障的早期阶段,怎样准确判断故障种类和方位、预防故障的发生。而故障保护主要研究故障发生后,怎样快速有效地切除“故障源”的影响。两者的作用时间段完全不同。在发电机的实际运行中,当定子绕组绝缘损坏后,定子绕组开始发生短路。如果短路类型为绕组内部短路,则在经历很短的时间后(如1/4周期),短路故障迅速扩大,很快进入到故障保护的领域,而留给故障诊断施展的空间很小。因此,针对定子绕组内部短路的故障诊断研究的实际应用前景并不明朗。但在定子绕组单相接地故障方面,故障诊断研究仍有较大的发展空间。

2 转子绕组故障诊断方法

转子绕组故障的初期表现为转子绕组匝间短路,因此,转子绕组故障诊断主要针对匝间短路故障进行。文献[2]的研究者根据分析定子绕组内环流的谐波成分,认为在定子绕组并联支路内,奇数次谐波环流的出现和增长是转子短路故障的特征。并用实验验证了随着短路情况的严重,频率为30 Hz的环流几乎成线性增长。李和明等^[3]认为,转子绕组短路故障引起定子绕组并联支路二次谐波环流的增加,且幅值随短路程度的增加而增加。Jerance N.等^[15]利用发电机磁网络模型,分析了转子匝间短路时定子每相并联支路间的环流特性。但对于实际运行的发电机,并联支路的接头在发电机的机壳内,测试不方便。史进渊等^[16]将励磁电流信号和转子径向工频振动幅值作为转子匝间短路故障的特征量。李永刚等^[17]利用相量图和发电机的磁化曲线,计算出某一确定状态下(一定的输出无功、有功及端电压)的励磁电流的标准值,将励磁电流的理论计算值和实测值的相对误差作为故障判据。但由于发电机参数受运行方式和条件的影响,准确计算励磁电流非常困难。文献[18]的研究者认为,发电机励磁绕组的绕线结构影响励磁绕组匝间短路的表现形式。并试图寻找一种对所有可能的发电机转子绕组布置都有效的检测方法。选用传递特性(表示单位励磁机励磁电流所产生的发电机电枢电压)作为故障特征参数。文献[4]中,作者将励磁机电枢电流的频率成分作为转子绕组短路故障特征。文献[19]的作者提出一种基于神经网络的在线监测方法,但需要测量发电机正常状态极限运行范围内的大量样本,并且避开电机暂态过程影响。李之昆等^[20]根据发电机在端电压,有、无功功率不变的条件下,励磁电流增加,但磁势不变的分析,直接计算获取故障样本,用人工神经网络诊断转子绕组匝间短路故障及其严重程度。陈小玄等^[21]应

用小波变化对探测线圈法进行改进,采用小波分析法对电势波形的一阶微分信号进行处理,通过发现信号畸(突)变点及小波变换幅值极大值处,从而判断匝间短路故障的存在及故障点的位置。刘庆河^[22]提出了探测线圈信号的小波消噪法。刘靖^[23]认为,神经网络与模糊系统的结合使故障诊断能更充分利用语言形式的知识,更好地处理不精确的信息,实现故障诊断的智能化。从而开展了基于模糊神经网络的发电机转子绕组短路故障诊断方面的研究。

可以看出,上述文献提出了很多新的检测判据和检测方法,但是由于没有对绕组匝间短路详尽的、定量的故障分析,提出的检测方法和判据缺乏一般性,离工程实践还有很长的距离。

3 旋转整流器故障诊断方法

Huang Y. Q.等^[24]在励磁机的定子槽中安放一个探测线圈,将探测线圈感应电压的基波分量和二次谐波分量的幅值作为特征参数,通过与参考值进行比较来确定故障是否发生。这种方法的缺点有两个:1)在所有的二极管故障下,基波和二次谐波的幅值都变大,因此该方法不能进行故障识别。2)线圈感应电压随着励磁机负载电流的变化而变化,所以当励磁机负载电流离额定值较远时,该方法不能有效地检测故障。Li X. Y.^[25]通过微型计算机应用模式识别的算法解决了上述2个缺点。将探测线圈的感应电压的基波至6次谐波的幅值作为特征参数,利用“最近领域原则”进行故障间的模式识别。刘念^[26]对正常和故障运行时,交流励磁发电机电枢电流波形和电枢电流产生的高次谐波磁场作了较详细的理论分析,认为一管开路时,探测线圈上二次谐波电势幅值最大;一管短路时,基波幅值最大。以上方法的最大缺点是需要励磁机上安装额外的设备。Batzel T. D.等^[18]认为,当发生二极管故障时,发电机励磁电流会增加。因此,可以将通过测量与发电机励磁电流近似成比例的励磁机励磁电流来检测故障的发生。Gong C. Y.^[27]借助计算机数字仿真,分析了带旋转整流器的无刷电机,在正常时和出现各种励磁故障时,励磁机励磁绕组电流的谐波成分及其幅值,提出了各种转子故障下,谐波成分及其幅值各有不同,因此,可将励磁机励磁电流作为故障特征。文献^[28]中,作者提出了一种对无刷励磁机旋转整流器二极管故障的非侵入式检测方法。并以大量实验数据为基础,对励磁机励磁电流进行频谱分析,认为励磁电流谐波成分对负载不敏感,并发现基波成分与直流量分量的比值在3种状态下变化很明显,可以将它们作为故障特征变量。文献^[2]中,作者通过二极管短路试验指出:故障情况下励磁机励磁电流中频率为120、240和360 Hz的谐波成分稳定增长,尤其是频率为120 Hz

的谐波分量,增长更加明显(发电机电枢电压基频为60 Hz)可作为故障特征变量。肖乐明等^[29]通过实测波形得出以下结论:当励磁机励磁电流有比较规整的二次谐波时,则为励磁机转子绕组故障;当励磁机励磁电流有畸变较大的一次谐波,则为旋转二极管故障(包括短路和开路)。

大量文献表明,对旋转整流器的故障诊断方法主要集中在对励磁机励磁电流的谐波成分分析上。但结论不大一样,并且大多为定性描述。此外,旋转整流器故障分为二极管短路和开路故障。但在实际运行中,二极管因故障出现短路后会在很短时间内转化为开路故障。考虑到故障早期多为一管故障,应该将二极管一管开路作为旋转整流器故障诊断的研究重点。

4 发电机故障诊断的发展方向和重点

由于发电机本身的重要性,发电机故障诊断的研究一直是一个热点问题。虽然经过多年的发展,在定子绕组故障、转子绕组故障和旋转整流器故障方面不断提出了新的方法和判据,但与发电机故障保护领域和电动机故障诊断领域的研究进展相比,离实际现场应用还有很远的距离。出现这样的局面,主要有3个方面的原因:

1)相对于电动机而言,发电机是电力系统的电源,其结构、参数和运行工况对故障特征的影响更为复杂,需要进行更为深入的研究。

2)部分学者对发电机的现场运行情况缺乏足够的了解,没有认清故障诊断的内涵以及和故障保护的差别,为了研究而研究,导致研究的应用前景不明。

3)发电机故障诊断领域缺乏严谨理论体系的支撑。多回路理论在发电机故障保护和电动机故障诊断中经常作为故障分析的工具,而在发电机故障诊断领域应用较少。

发电机故障诊断的研究对象应该偏向于转子绕组匝间短路、旋转整流器二极管一管开路以及定子绕组单相接地等故障。而其研究重点应该放在定量故障分析和有效可测故障特征的提取上。研究方法上应采用多回路理论建立各种故障的故障模型,进行大量仿真研究,再通过动模机组进行试验验证。因此,应用多回路法以及场路耦合法对发电机的各种故障进行定量的故障分析,是发电机故障诊断研究的发展方向。

5 结语

交流无刷发电机的故障诊断,主要分为定子绕组单相接地故障诊断、转子绕组匝间短路故障诊断和旋转整流器二极管一管开路故障诊断。经过多年的发展,目前的研究进展仍落后于发电机故障保护和电动

机故障诊断领域,离工程实践较远。应用多回路理论及其改进方法对发电机的各种故障进行定量的故障分析,并找出有效的故障特征,是发电机故障诊断研究的发展方向和发展重点。

参考文献:

- [1] 王维俭. 汽轮发电机定子绕组匝间短路保护的必要性[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(7): 47-49.
- [2] 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 (9-10): 1209-1215.
- [3] 李和明, 万书亭, 李永刚. 基于定子绕组并联支路环流特性的发电机故障识别方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 75-78.
- [4] Penman J, Jiang H. The Detection of Stator and Rotor Winding Short Circuits in Synchronous Machines by Analyzing Excitation Current Harmonics[C]/IEE International Conference on Opportunities and Advances in International Power Generation. Durham: [s.n.], 1996: 137-142.
- [5] 万书亭, 李和明, 许兆凤, 等. 定子绕组匝间短路对发电机定转子径向振动特性的影响[J]. 电机工程学报, 2004, 24(4): 157-161.
- [6] 夏长亮, 金雪峰, 方红伟, 等. 基于R/S分析和小波变换的同步发电机定子绕组匝间短路故障分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(6): 101-105.
- [7] 王祥珩. 凸极同步电机多回路理论及其在分析多分支绕组内部故障时的应用[D]. 北京: 清华大学, 1985.
- [8] 张龙照. 同步电机定子绕组不对称状态的研究[D]. 北京: 清华大学, 1989.
- [9] 屠黎明. 同步发电机定子绕组内部故障分析方法及其应用的研究[D]. 南京: 东南大学, 1999.
- [10] Kulig T S, Buchley G W, Lambrecht D, et al. A New Approach to Determine Transient Winding and Damper Currents in Case of Internal and External Faults and Abnormal Operation. III. Results[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1990, 5(1): 70-78.
- [11] 孙宇光. 同步发电机定子绕组内部故障的暂态仿真和保护分析[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [12] 毕大强. 大型水轮发电机定子绕组单相接地故障及保护方案的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [13] 许伯强, 王祥珩, 毕大强, 等. 基于多回路-有限元耦合数学模型的同步发电机定子单相接地故障保护方案校验方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 84-89.
- [14] 许伯强, 王祥珩, 毕大强, 等. 同步发电机多回路-有限元耦合数学模型及其应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 33-37.
- [15] Jerance N, Rostaing G, Rognon J P, et al. Synchronous Machines Fault Detection and Isolation by Using Reluctance Network Model[C]/15th International Conference on Electrical Machines. Brugge: [s.n.], 2002: 起止页码不详.
- [16] 史进渊, 杨宇, 孙庆, 等. 大型汽轮发电机故障特征规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7):44-47.
- [17] 李永刚, 李和明, 赵华, 等. 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 112-116.
- [18] Batzel T D, Swanson D C, Defenbaugh J F. Predictive Diagnostics for the Main Field Winding and Rotating Rectifier Assembly in the Brushless Synchronous Generator[C]/4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Atlanta: [s.n.], 2003: 349-354.
- [19] Vilaragut M, Costa A, Lopez X M. Diagnostic of Turbo generator Rotor Short circuit Turns Utilizing Artificial Neural Network[C]/15th International Conference on Electrical Machines. Brugge: [s.n.], 2002: 起止页码不详.
- [20] 李之昆, 马宏忠. 基于ANN的发电机转子绕组匝间短路诊断方法[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 31-33.
- [21] 陈小玄, 罗大庸, 单勇腾. 小波分析在转子绕组匝间短路故障诊断中的应用[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(2): 143-147.
- [22] 刘庆河. 基于小波消噪的汽轮发电机转子匝间短路在线检测[J]. 大电机技术, 2006(2): 1-5.
- [23] 刘靖. 基于模糊神经网络的发电机转子绕组短路故障诊断研究[D]. 成都: 四川大学, 2003.
- [24] Huang Y Q, Li X Y. Principles and Controls of excitation Systems of Synchronous Machines[M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1994.
- [25] Li X Y. A Microprocessor-based Fault Monitor for Rotating Rectifiers of Brushless AC Exciters using A Pattern-recognition Approach[C]/IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Hamamatsu (Japan): [s.n.], 1994: 394-397.
- [26] 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.
- [27] Gong C Y, Yan Y G. Rotor Fault Diagnosis of Brushless AC Generator with Rotary Rectifier[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1995, 12(1): 64-71.
- [28] McArdle M G, Morrow D J. Noninvasive detection of brushless exciter rotating diode failure[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2004, 19(2): 378-383.
- [29] 肖乐明, 蔡大杰. 无刷发电机转子故障仿真与疑难故障检测[J]. 中国修船, 1997(3): 27-29.