

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

郝亮亮, 吴俊勇

(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 目前转子匝间短路故障在线监测主要有基于磁场探测的故障监测法、冲击脉冲法、轴电压监测法、电气量监测法和机组振动特性监测法, 对这几种方法的原理进行了阐述和评价。从故障的数学建模、故障特征及其机理、基于定子相绕组内部不平衡电流有效值的故障监测方案 3 个方面说明了电气量监测法的相关研究进展, 从无死区灵敏监测、不具备分支电流互感器安装条件发电机的故障监测、故障在线定位 3 个方面对转子匝间短路故障在线监测技术的研究进行展望, 并给出了初步思路。

关键词: 同步发电机; 励磁绕组; 匝间短路; 故障诊断; 监测

中图分类号: TM 772; TM 461

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.025

0 引言

同步发电机作为电能生产的基本设备, 对电力系统的安全运行起着至关重要的作用。伴随电力系统的快速发展, 发电机的容量也在不断地增加, 人们对大型发电机安全运行的要求越来越高。近年来, 国际大电网会议(CIGRE)的历届年会中, 发电机的故障保护及监测一直是旋转电机专业委员会(SC-A1)的重点议题^[1]。

转子匝间短路是同步发电机常见的一种电气故障, 近年来对该故障的报道屡见不鲜^[2-5], 三峡发电机在机组检修中就曾发现转子匝间短路; 而仅中国广东省在 2009 年至 2011 年, 就已经有十余台 400~1000 MW 等级的发电机出现了转子匝间短路故障, 在 2010 年就已确认发生了 5 起。

轻微的短路故障不会给发电机带来严重的后果, 但若无法实现故障的早期诊断, 而任其不断恶化, 会引起励磁电流的增加、输出无功能力的降低以及机组振动的加剧。故障还有可能恶化为发生在励磁绕组与转子本体之间的一点或两点接地故障, 严重时还可能会烧伤轴颈、轴瓦, 给发电机组及电力系统的安全稳定运行带来巨大的威胁^[6]。由转子匝间短路故障引起损失的例子也不胜枚举, 20 世纪 90 年代中国某火电厂 4 台 300 MW 发电机中就有 3 台因转子匝间短路等原因最终导致大轴磁化, 其中 2 台还烧坏护环; 2002 年某核电站 2 号发电机组在更换 C 相主变后的起机过程中, 由于转子匝间短路在主变事故冲击下发展为接地故障, 机组被迫停机检修^[7];

2005 年凤滩水电站 6 号发电机的转子匝间短路故障还引起了主保护的动作。

现场常用的监测发电机转子匝间短路故障传统方法主要包括: 开口变压器法、直流阻抗法、交流阻抗和功率损耗法、空载及短路特性试验法、两极电压平衡试验、绕组分布电压测量、冲击脉冲法试验、红外热成像法等^[1-2, 7-8]。这些方法有的已在现场应用多年, 并且积累了很多经验, 适用于离线的故障监测或定位, 但不能在实际运行工况下对故障进行在线监测, 有的方法甚至要将转子抽出, 应用效果往往不太理想。文献[8]对各种离线监测方法进行了详细介绍。

除加工工艺不良以及绝缘缺陷等原因造成的稳定性转子匝间短路外, 发电机转子高速旋转中励磁绕组承受离心力造成绕组间的相互挤压及移位变形、励磁绕组的热变形、通风不良引起的局部过热以及金属异物等是导致转子发生匝间短路的重要原因, 这些原因引起的动态匝间短路故障多在发电机的实际运行中发生。如果能够在发电机运行中实现对转子匝间短路故障的在线监测, 及时发现处于萌芽期的小匝数早期故障, 监视其发展并确定是否需要检修, 就能避免轻微的故障恶化成为严重的匝间短路或转子接地故障, 这对保障大型发电机的安全运行具有重要的意义。因此, 近年来国内外专家学者更加关注于对发电机转子匝间短路故障在线监测的研究。

本文首先总结了转子匝间短路故障的在线监测技术方案, 对其基本原理及优缺点进行了全面客观的评述。在此基础上, 重点对基于运行中电气量的在线监测方法及相关研究进行了探讨, 结合当前的研究现状指出目前研究中存在的不足, 并对该领域的研究趋势进行了展望。

收稿日期: 2012-09-28; 修回日期: 2013-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307005); 中国博士后科学基金资助项目(2012M520155); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013JBM081)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307005), China Postdoctoral Science Foundation(2012M520155) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2013JBM081)

1 转子匝间短路故障在线监测方法的原理及评述

近年来国内外专家学者对同步发电机转子匝间短路故障的在线监测进行了大量的研究,并提出了很多方法。

1.1 基于磁场探测的故障监测方法

同步发电机发生转子匝间短路后,转子主极磁场和漏磁场都将不同于正常运行,通过在气隙中布置探测导体或线圈提取磁场特征进行故障监测是一种可行的方案。

单导线微分法^[9]是我国哈尔滨大电机研究所提出的一种方法,并在太原热电厂试验成功。该方法将一根与发电机轴向平行的探测导线固定在定子槽中或槽楔上,通过该导线感应电动势的微分波形对故障进行监测。图 1 为该方法的原理示意图,由转子表面的磁场分布可知,探测导线的感应电动势波形呈现阶梯状,而每一阶梯的高低取决于对应槽的磁通变化率,与匝数有关。若各槽绕组的匝数相等,正常运行时各槽磁通变化率也相等,各阶梯的高度也就相等;当某槽内有短路匝时,相应匝数减少,那么阶梯的高度就会降低。同时,利用微分电路将所有阶梯降到同一水平面进行比较,依据此便可判断某槽是否发生了短路。显然该方法仅适合空载时的故障监测,发电机负载时会受到电枢反应的影响,使监测结果失效。

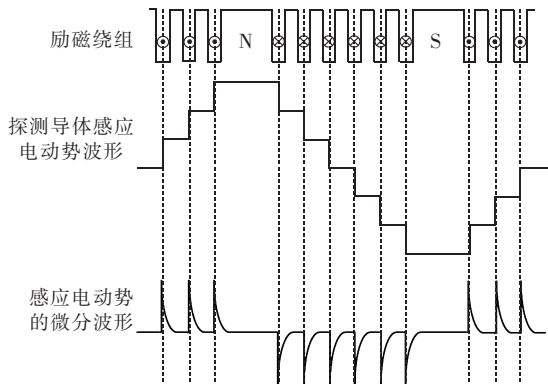


图 1 单导线微分法的原理图

Fig.1 Schematic diagram of single-wire differential method

微分线圈动测法^[10]是英国学者 Albright 提出的,围绕该方法学者们进行了大量的研究^[11-13]。由于主磁场是由所有线圈共同产生的,转子匝间短路虽然会影响主磁通的强度,但是由于所占比例很小,不容易测量。而漏磁通分别交链于各槽的励磁绕组,其大小与该槽内线圈匝数成正比,能直接反映出各槽线圈匝数的变化。因此该方法将探测线圈固定在定子上,并使其尽量靠近转子铁芯,同时测量转子漏磁通的径向分量和切向分量,并对其进行微分,通过

对微分波形的分析可判断发电机是否发生了转子匝间短路故障。

图 2 是发电机空载运行时微分线圈动测法的原理示意图。如果励磁绕组不存在匝间短路,则探测线圈感应电压波峰的包络线连续平滑,其波峰个数和序号与转子槽一一对应。当励磁绕组某槽线圈存在匝间短路时,交链于该槽的漏磁通就会减少,在探测线圈上所感应出的电动势就会相应降低。因此,当探测线圈感应电压波形的某一特征波峰离开包络线凹缩变短时,即表明它对应槽中的绕组存在匝间短路故障。

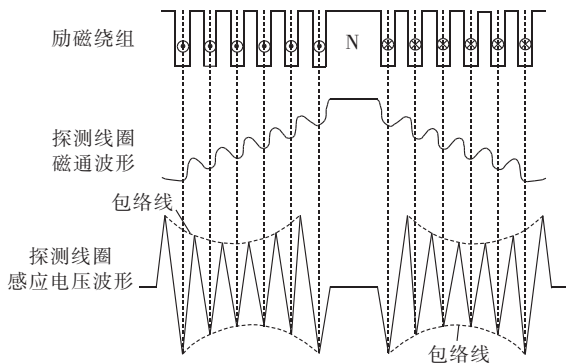


图 2 微分线圈动测法的原理图

Fig.2 Schematic diagram of differential coil dynamic test

微分线圈动测法一定程度上弥补了单导线微分法在发电机负载时的局限性,最适合在空载及机端三相对称短路时监测发电机转子是否存在匝间短路以及判断短路的严重程度。但在实际运行时,电枢反应引起的气隙磁场畸变以及铁芯饱和等因素,仍给匝间短路的准确判断带来了困难^[14]。有学者在微分线圈动测法的基础上,将小波变换应用于对探测线圈感应电动势波形特征的提取^[15],一定程度上克服了该困难,起到了较好的效果。因目前绝大多数发电机出厂时未装设探测线圈,在已经投运的发电机上加装该线圈十分困难,也较难被电厂所接受,因此该方法的应用受到了一定的限制。

1.2 冲击脉冲法

英国的 Wood J. W. 等学者提出的冲击脉冲法^[16]是建立在行波理论的基础上。如图 3 所示,利用信号

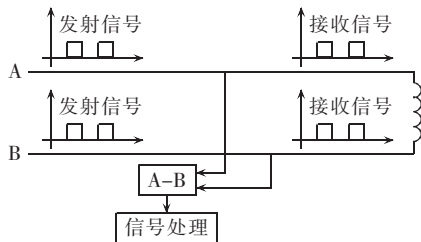


图 3 冲击脉冲法原理图

Fig.3 Schematic diagram of shock pulse method

发生器发出连续的陡前沿脉冲波,将该脉冲波同时加在励磁绕组的两端,在监测点可测到2组响应曲线。若发电机的励磁绕组不存在匝间短路,则2组响应曲线的差值为一条直线;反之,若励磁绕组存在匝间短路,这时两响应曲线不重合,差值不再是一条直线。因此,可以用显示在示波器上的2组响应特性曲线之差的合成波形来判定发电机是否存在励磁绕组匝间短路,波形有突起的地方说明存在匝间短路,并且突起的波幅大小反映了短路的严重程度。理论上即使励磁绕组出现1匝的短路故障,应用冲击脉冲法也有较高的灵敏度^[17-18]。

冲击脉冲法所需的监测装置简单,且灵敏度较高,适用于在转子静态下对故障进行监测及辅助定位,而用于机组运行状态下在线监测的研究也正在开展,但效果尚不理想^[19-20]。

1.3 利用机组振动特性

机组的振动特性为电机及变压器的绕组内部故障监测提供了一种崭新的思路,Trutt F. C.等学者对此进行了大量研究^[21-24]。实际中确实曾出现较多由于转子匝间短路故障引起的机组振动超标的案例。在工程实践中,当电厂运行人员发现机组瓦振或轴振超标,且振动幅值与励磁电流和无功功率呈现较为一致的变化趋势时,就会怀疑发电机发生了转子匝间短路^[25]。华北电力大学的万书亭等学者在转子匝间短路对发电机定子和转子振动特性影响方面进行了大量开创性的理论研究工作^[26],推导了故障时定子和转子的振动特性方程,并指出:“对于转子,故障将激发工频振动;对于1对极发电机的定子,2倍机械转频振动下降;对于多对极发电机的定子,工频、2倍频振动增加。”

但当短路匝数较少时,故障引起的机组振动不明显,且实际中引起发电机振动的因素也很多(比如转子热不平衡、风路堵塞、轴瓦碰磨、偏芯、机座下沉等),尚无法单纯利用振动特性来诊断包括转子匝间短路在内的发电机内部故障,一般只能作为辅助判据。

1.4 利用轴电压

轴电压是指由磁不对称等原因引起的存在于电机主轴两端的交流电压。若防护不当,轴电压将可能引起破坏性的轴电流,因此近年来国内外学者对轴电压进行了广泛且深入的研究^[27-28],也有学者尝试利用发电机的轴电压进行转子匝间短路故障的监测^[29-30]。文献[29]以1台30 kV·A的2对极汽轮发电机为例,分析了转子匝间短路时转子的轴电压谐波特征,得出故障发生后将产生2倍频、4倍频和6倍频的轴电压。文献[30]提出利用齿槽谐波轴电压诊断转子匝间短路故障的方法:发电机定子齿槽效应可以导致发电机气隙磁通密度畸变,在转轴两端

感应频率与齿槽数相对应的轴电压特征分量,可以利用该特征分量诊断转子匝间短路故障。

但由于引起轴电压的原因很多,每一种磁场的不对称都有可能引起不同幅值及频率的轴电压,使得轴电压的频率成分非常复杂。除此之外,静电电荷、静态励磁系统、剩磁及电容电流等原因均可能造成各种复杂的轴电压频率分量^[1]。而目前利用轴电压进行发电机转子匝间短路故障监测还仅局限于定性分析与实验,也仅可作为一种辅助的监测手段。

1.5 利用运行中的电气量

利用运行中的电气量实现对转子匝间短路故障的在线监测不需对发电机一次侧进行改造,且针对性强,能发现运行中的动态短路,是目前的研究热点。

文献[31]提出了利用发电机运行监测数据中的励磁电流进行故障诊断的方法。文中的理论分析和实验表明,转子匝间短路会引起励磁电流的增大和无功功率的减少,可以把故障后发电机的输出状态(包括有功功率、无功功率、定子电压和电流等)看成是发电机定、转子绕组均正常的运行结果,用正常发电机的数学模型计算出励磁电流,将励磁电流的正常理论计算值与实测值的相对偏差作为是否存在转子匝间短路及短路严重程度的判据。但因发电机参数受运行方式和条件的影响,由发电机的输出状态量准确计算励磁电流比较困难。

文献[32-33]对转子匝间短路时的励磁电流特性进行了分析,实验表明了转子匝间短路故障时励磁电流附加交流分量的存在,而且附加谐波电流的幅值还可反映转子匝间短路故障的严重程度。但励磁电流附加交流谐波分量比较小,无法据此区分是转子匝间短路还是其他电气故障(比如定子绕组内部故障等)。文中也仅限于对谐波产生原因进行定性分析,没有研究不同的定子绕组形式对励磁电流谐波成分的影响,而且没有考虑附加谐波成分对气隙磁场及定、转子电流带来的影响,更不能准确地定量计算。文献[34]以定子单个线圈为基本对象,对转子匝间短路时定子和转子电流特征进行分析,但文中的分析并没有全面考虑定子单个线圈之间的联接关系,而事实上,定子绕组的分布及连接方式也会对故障后的定转子电流频率特性产生本质的影响。

针对采用无刷励磁方式的同步发电机,文献[35]基于对转子匝间短路故障特征传递规律的研究,创造性地提出利用励磁机励磁电流监测主发电机的转子匝间短路故障。但同时文中也指出了励磁机励磁电流的故障特征幅值对发电机的励磁方式和自动电压调节器(AVR)的整流方式较为敏感,选取合适的监测阈值还需要进一步研究,这首先需要对不同运行方式下发生不同匝数短路时的励磁机励磁电流进

行定量计算。

文献[36]还提出了一种基于神经网络的在线监测方法,无需建立精确的发电机数学模型,但此方法需要测量发电机正常状态极限运行范围内的励磁电流、无功功率以及有功功率等大量数据样本,在实际应用中有一定局限性。

监测转子匝间短路的另一种方法是将定子绕组本身作为探测线圈,利用转子匝间短路时定子并联支路中产生的环流来监测故障。此法是 Kryukhin 首先提出的^[37],并在英国的许多发电机上得到应用。大型汽轮发电机一般只有 1 对极,每相的 2 个分支分布在不同极的相同位置,并且绕向相反。正常运行时,转子磁场的基波及奇数次谐波在同相不同分支中感应出相同的电动势,不会产生环流。但当转子发生匝间短路时,将出现偶数次空间谐波转子磁场,进而会在同相 2 个并联分支中感应出大小相等、方向相反的电动势,引起定子相绕组内的偶次谐波环流。

国内学者在这方面也做了很多实验和理论分析工作^[38]。空载实验和并网负载实验都表明,发生转子匝间短路后,定子同相的 2 个并联分支之间存在偶次谐波环流,而且其大小随短路匝数的增加而上升。其中文献[39]针对气隙均匀的汽轮发电机,用磁网路法计算转子匝间短路引起的定子环流大小,在计算中把励磁电流当作已知的常量来考虑励磁绕组产生的磁动势。由于定子环流产生的电枢反应磁场影响了气隙磁场,又会引起励磁电流(包括励磁绕组正常部分电流和短路匝电流)的变化,这种计算定子环流的方法在某些故障情况下会出现较大误差,还有待进一步完善。

文献[40]的实验表明,1 台 4 对极、每相 2 分支的同步发电机发生转子匝间短路时,定子绕组中会产生 1/2 及 3/2 等分数次谐波的环流。事实上,对多极的同步发电机,转子匝间短路后定子相绕组中环流的谐波成分还与定子绕组结构(包括每相分支数以及各分支的位置)有关,有些电机会出现偶次谐波环流,也有些电机出现分数次谐波的环流,需要进一步深入分析并准确计算其大小。

2 基于电气量在线监测的相关研究进展

通过上述分析可以看出,虽然近年来学者们对转子匝间短路故障监测进行了大量研究,但实际应用中还存在局限性:或无法实现在线监测(传统监测法及冲击脉冲法等);或需对发电机一次侧进行改造(基于磁场探测);或监测结果缺乏针对性(利用机组振动及轴电压)。所认识到的电气故障特征往往十分微弱、模糊,且多种因素交织在一起,无法对故障进行准确的在线分析和诊断。基于此,近年来围绕

着基于电气量的转子匝间短路故障在线监测,笔者进行了大量研究,取得了初步的研究成果。

2.1 故障的数学建模

由于转子匝间短路破坏了发电机电气参数的对称性,引起气隙磁场的畸变和定子相绕组内部的不平衡电流,对称分量法及相坐标法均不再适用。为突破以往无法准确计算故障时发电机电气量的研究瓶颈,文献[41]采用多回路分析法按照定、转子的实际回路列出了以定、转子所有回路电流为变量的状态方程:

$$(M' + M_T)pI' + (pM' + R' + R_T)I' = E \quad (1)$$

式(1)相关的符号解释见文献[41],该式为同步发电机转子匝间短路故障的数学模型,对凸极机和隐极机均适用。

采用诸如 Runge-Kutta 等数值方法对式(1)进行求解,可得自故障发生到进入稳态的整个过渡过程。但对于极对数和阻尼回路多的大型水轮发电机,式(1)的维数很高,迭代求解到稳态将花费大量机时,实用性不强。为此文献[42]根据同步发电机转子匝间短路故障后的气隙磁场及其在定、转子回路中感应电流的一般性分析,提出了故障的稳态数学模型,该模型将式(1)的时变系数微分方程组转化成以定、转子电流的各次谐波的正弦和余弦分量幅值为变量的线性代数方程组,可直接求得故障后的稳态电流,实现故障的快速求解。

2 种数学模型的计算结果均经过了模拟样机的实验验证。

2.2 故障特征及其机理

文献[43]以 1 台 12 kW、3 对极的隐极同步发电机样机为例,通过对转子绕组和定子绕组产生的磁动势性质及其在气隙磁场中相互作用的理论分析,对实验中出现的定、转子各次谐波分量进行物理解释。在此基础上,文献[44]基于对该台发电机定子绕组 3 种不同形式的变换(转子保持不变),利用故障的数学模型对不同定子绕组形式的电机所发生的同一种转子匝间短路故障进行了计算;通过傅里叶分解得到了稳态故障电流的谐波特征,并进行比较分析,揭示了定子绕组形式对故障稳态电流谐波特征的影响。进而得到 1 对极大型汽轮发电机及常见定子绕组形式的大型水轮发电机故障时的稳态电流特征^[45],并对故障特性量的影响因素(包括结构完整的阻尼绕组、分布式励磁绕组短路位置、短路匝数等)进行了理论分析^[46]。

理论分析和仿真计算都表明,转子匝间短路故障后相绕组内部会出现偶数次或与极对数有关的分数次谐波的稳态不平衡电流,这种故障特征与其他常见电气故障及系统振荡等不正常状态的特征存在

明显差异,为故障监测提供了理论依据。

2.3 基于定子相绕组内部不平衡电流有效值的故障监测方案

由于定子绕组内部故障对发电机的破坏力极大,大型发电机一般都配置了主保护。若发电机主保护配置的电流互感器在反应定子内部故障的同时也能实现对转子匝间短路故障的监测将是十分有意义的。

为此,文献[47]以三峡左岸 VGS 发电机为例,通过定量分析转子匝间短路故障对主保护不平衡电流的影响,提出了基于定子相绕组内部稳态不平衡电流总有效值的故障监测原理。计算与分析表明,该故障监测原理能解决依靠单一谐波监测所带来的一系列问题,可较灵敏地反应转子的小匝数短路故障。而且这种监测方法只需利用主保护配置的分支(组)电流互感器或中性点连线间电流互感器,工程可行性较强。根据该原理研制的故障在线监测装置已于 2012 年 3 月在浙江新安江水电站投入试运行。

3 转子匝间短路故障在线监测技术的研究展望及初步思路

3.1 无死区灵敏监测方案

虽然基于定子相绕组内稳态不平衡电流总有效值的故障监测原理已实现了对稳态故障特征量的最大程度提取,但由于发电机机端和中性点两侧的电流感器特性不完全一致以及发电机的制造偏差等原因,正常运行时也会有不平衡电流进入故障监测装置,这会引起监测灵敏性的下降。例如对于彭水 ALSTOM 1 号发电机,实测正常时进入不完全裂相横差保护的不平衡电流总有效值为 432.6 A,而经过计算可知,当励磁绕组短路 11 匝(短路匝比为 0.92%)时引起的不平衡电流才与正常时相当,可见监测的灵敏性还不够高。因此,需要进一步深入研究励磁绕组全范围内无死区的匝间短路监测方案。

监测原理可不拘泥于利用稳态电气特征,比如可尝试利用暂态电气特性进行故障监测。根据超导体闭合回路的磁链守恒可知,当发生转子匝间短路故障的发电机定子相电流变小的瞬间,为了保持励磁故障附加回路的磁链不变,该回路中将引起相应的较大的瞬变电流,这一瞬变电流反过来将引起定子相绕组内不平衡电流的增加。这是转子匝间短路故障所特有的(必须有不对称的励磁故障附加回路),可在此基础上研究基于暂态不平衡电流的故障监测新原理。当然,这里仅是给出一种可能的研究思路,还需进一步进行研究论证。若该原理可行,那么显然短路匝数越少监测灵敏性越高,可弥补利用稳态电流进行监测的小匝数短路死区。

3.2 不具备分支电流互感器安装条件的发电机故障监测

除少量俄供机型外,中国绝大多数的大型汽轮发电机中性点仅引出 3 个端子,尚不具备分支电流互感器的安装条件。而实际上,相比水轮发电机而言,汽轮发电机的工作环境更为恶劣,转子匝间短路故障发生几率更高。对不具备分支电流互感器安装条件发电机的故障监测可通过以下途径展开。

3.2.1 基于转子励磁磁动势的故障监测原理

转子匝间短路首先将引起励磁绕组拓扑结构的改变,进而引起不同于正常运行时的励磁磁动势。而发生转子匝间短路故障后,相电压和相电流均以基波分量为主,同步电机的相矢量图仍然适用。因此,可根据相电压、相电流建立实际运行时发电机基波励磁磁动势 F'_n 的准确计算模型,然后与正常运行时根据励磁电流和转子绕组实际分布计算得到的基波励磁磁动势 F_n 相比较。理论上正常运行时两者应相同,而转子匝间短路时将有 $F'_n < F_n$,由此即可实现对短路故障的判断。

由于该方法基于转子励磁磁势的计算与比较,因此不论励磁调节器如何动作、负载如何变化,该方法均不受影响。实现这一原理监测的关键点有 2 个:首先是实际运行时励磁磁动势的准确计算模型,模型中的参数应受发电机运行工况影响较小;另外,还需研究其他故障对监测判据的影响,以采取相应的闭锁等解决方式。

3.2.2 基于机组振动的监测方案

目前对转子匝间短路故障时定、转子振动特性的理论分析研究还较为初步,在分析时大都没有全面地考虑故障后定、转子各种时间电流所产生的各种空间谐波磁场之间的相互作用,因此分析还有局限性,得不到严谨、完整的结论。

可在已有研究的基础上^[25-26],更进一步细致分析故障后定、转子的振动特性(包括切向和径向),以期找到故障所独有的振动特性,并明晰其影响因素和变化规律,在此基础上研究基于振动的监测方案。

3.3 故障在线定位

目前对同步发电机转子匝间短路故障在线定位的研究还较少,多数情况下是利用分布电压法或冲击脉冲法进行故障的离线定位。对于受转子旋转影响的动态匝间短路(如因相互挤压引起的短路),即使在线监测发现了故障,但在停机后可能无法找到故障位置。这就需要对故障在线定位进行研究,在发现故障后找到对应的故障磁极(对于隐极电机还需找到短路槽)。

一种较初步的思路是,引入发电机的转子鉴相信号,找到故障后电气量的时域特点或某些时间谐波的相位特点与转子位置的关系。初步的分析表明,

这种关系可能受定子绕组的空间连接与分布影响。

4 结语

近年来大型发电机转子匝间短路故障频发,已引起很多电厂的重视。虽然转子小匝数短路故障不会引起励磁电流、无功及振动的显著变化,对发电机运行影响不大。但初步的分析表明,越是小匝数的短路越容易受到其他故障或过渡过程(起停机等)的冲击而恶化(转子接地等)。

从文中的展望中还可以看到,对大型汽轮发电机转子匝间短路故障监测的研究更为迫切。故笔者呼吁大型汽轮发电机的设计专家与制造厂商能够改变目前的中性点3端子引出方式,已有的研究成果已充分论证了引出分支电流的可行性^[48],若能加以推广必将实现对发电机的定、转子绕组的高质量保护或监测,进一步提高运行可靠性。

参考文献:

- [1] 马宏忠. 电机状态监测与故障诊断[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:927-929.
- [2] 邹炯斌,赵锋,宁颖辉. 1000 MW 机组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 Jiongbin,ZHAO Feng,NING Yinghui. Analysis of inter-turn short-circuit fault occurred in 1000 MW generator's rotor winding[J]. Thermal Power Generation,2012,41(6):74-76.
- [3] 唐芳轩,许艳霞. 秦山第二核电站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.
- [4] 杨素华. 丹江口电厂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 fault for generator rotor in Danjiangkou power station[J]. Yunnan Water Power,2005,23(2):95-97.
- [5] TAVNER P J. Review of condition monitoring of rotating electrical machines[J]. IET Electric Power Applications,2008,2(4): 215-247.
- [6] 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,England:IET, 2009:1-5.
- [7] 全国旋转电机标准化技术委员会. JB/T8446—2005 隐极式同步发电机转子匝间短路测定方法[S]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [8] 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 turbogenerator rotor inter-turn short-circuit fault[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2010 (6):17-19.
- [9] 赵玉升. 大型汽轮发电机转子线圈动态匝间短路的检测[J]. 大电机技术,1982(5):18-23.
- [10] ZHAO Yusheng. Detection of rotor dynamic inter-turn short-circuit of large turbogenerator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,1982(5):18-23.
- [11] ALBRIGHT D R. Interturn short-circuit detector for turbine-generator rotor windings[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1971,PAS-90(2):478-483.
- [12] 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 airgap search coils[J]. IEE Proceedings:Electric Power Applications,1988,135(6): 281-294.
- [13] RAMIREZ-NINO J,PASCACIO A. Detecting interturn short circuits in rotor windings[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2001,14(4):39-42.
- [14] FISÉR R,MAKUC D,LAVRIČ H,et al. Modeling,analysis and detection of rotor field winding faults in synchronous generators [C]//Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Machines. Rome,Italy:IEEE,2010:1-6.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] WOOD J W. Rotor winding short detection[J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications,1986,133(3):30-35.
- [18] EI-SHARKAWI M A,MARKS R J II,OH S,et al. Localization of winding shorts using fuzzified neural networks[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1995,10(1):140-143.
- [19] STREIFEL R J,MARKS R J II,EI-SHARKAWI M A. Detection of shorted-turns in the field winding of turbine-generator rotors using novelty detectors—development and field test [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1996,11(2):312-317.
- [20] GUTTORMSSON S E,MARKS R J II,EI-SHARKAWI M A,et al. Elliptical novelty grouping for on-line short-turn detection of excited running rotors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1999,14(1):16-22.
- [21] KULKARNI A S,EI-SHARKAWI M A,MARKS R J II,et al. Development of a technique for on-line detection of shorts in field windings of turbine-generator rotors:circuit design and testing[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2000,15(1): 8-13.
- [22] DING F,TRUTT F C. Calculation of frequency spectra of electromagnetic vibration for wound-rotor induction machines with winding faults[J]. Electric Machines and Power Systems,1988, 14:137-150.
- [23] TRUTT F C,SOTTILE J,KOHLER J L. Detection of AC machine winding deterioration using electrically excited vibrations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2001,37(1):10-14.
- [24] TRUTT F C,SOTTILE J,KOHLER J L. Condition monitoring of induction motor stator windings using electrically excited vibrations[C]//Proceedings of the 37th Industry Applications Annual Meeting. Pittsburgh,Pennsylvania,USA:IEEE,2002:2301-2305.
- [25] TSYPKIN M. Induction motor condition monitoring:vibration analysis technique—a practical implementation[C]//Proceedings

- of the 8th International Electric Machines and Drives Conference. Niagara Falls, State of New York, USA; IEEE, 2011: 406-411.
- [25] 张征平, 刘石. 大型汽轮发电机转子匝间短路故障在线诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 148-152.
- ZHANG Zhengping, LIU Shi. Online diagnosis of interturn short circuit for large turbine generator's rotor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 148-152.
- [26] 万书亭. 发电机绕组与偏心故障交叉特征分析及其检测方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- WAN Shuting. Research on intersectional characteristic and diagnosis method of generator winding and eccentric fault[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005.
- [27] ZARE F. Practical approach to model electric motors for electromagnetic interference and shaft voltage analysis[J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(9): 727-738.
- [28] SHAMI U T, AKAGI H. Identification and discussion of the origin of a shaft end-to-end voltage in an inverter-driven motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 25(6): 1615-1625.
- [29] ALAN M, MIRKO C. Experimental research on rotor fault diagnosis using external coil voltage analysis and shaft voltage signal analysis[C]//Proceedings of the Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Vienna, Austria; IEEE, 2005: 1-4.
- [30] 武玉才. 发电机故障的交叉特性分析及机电联合故障诊断研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
- WU Yucai. Generator faults cross-feature analysis and mechanical-electrical joint diagnosis study[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [31] LI Yonggang, ZHAO Hua, LI Heming. The new method on rotor winding inter turn short-circuit fault measure of turbine generator[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Madison, Wisconsin, USA; IEEE, 2003: 1483-1487.
- [32] WAN Shuting, LI Heming, LI Yonggang, et al. The diagnosis method of generator rotor winding inter-turn short circuit fault based on excitation current harmonics[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Singapore; IEEE, 2003: 1669-1673.
- [33] NETI P, NANDI S. Analysis and modeling of a synchronous machine with structural asymmetries[C]//Proceedings of 2006 IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering. Ottawa, Canada; IEEE, 2006: 1236-1239.
- [34] 张超, 夏立, 吴正国, 等. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征规律分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1506-1512.
- ZHANG Chao, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Analysis on fault characteristics law of interturn short circuit in synchronous generator rotor winding[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1506-1512.
- [35] 张超, 夏立, 吴正国, 等. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征传递规律[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 52-57.
- ZHANG Chao, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Transfer law of fault characteristics of interturn short circuit in synchronous generator rotor winding[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 52-57.
- [36] MARCOS F S, ANGELO V D, PYRAMO P. Detection of shorted turns in the field winding of turbogenerators using the neural network MLP[C]//Proceedings of 2010 International Conference Systems Man and Cybernetics. Arizona, Tucson, USA; IEEE, 2001: 1930-1935.
- [37] KRYUKHIN S S. A new principle for synchronous machine protection from rotor winding inter-turn and double earth faults[J]. Electric Technology, 1972, 2(5): 47-59.
- [38] LI Y G, LI H M, ZHAO H, et al. Fault identification method of rotor inter turn short-circuit using stator winding detection[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China; IEEE, 2003: 856-860.
- [39] WAN S T, LI H M, LI Y G, et al. Reluctance network model of turbo-generator and its application-part 1: model[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing, China; IEEE, 2005: 1988-1993.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] HAO Liangliang, SUN Yuguang, QIU Arui, et al. Steady-state calculation and online monitoring of interturn short circuit of field windings in synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(1): 128-138.
- [43] 孙宇光, 郝亮亮, 王祥珩. 同步发电机励磁绕组匝间短路故障时的稳态电流谐波特征研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 51-57.
- SUN Yuguang, HAO Liangliang, WANG Xiangheng. Steady-state currents harmonic characteristics of synchronous machine with interturn short circuits of field windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 51-57.
- [44] 郝亮亮, 孙宇光, 邱阿瑞, 等. 定子绕组形式对同步发电机励磁绕组匝间短路稳态电流特征的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30): 61-68.
- HAO Liangliang, SUN Yuguang, QIU Arui, et al. Effects of stator winding configurations on steady-state currents characteristics of synchronous generator with inter-turn short circuits of field windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(30): 61-68.
- [45] 郝亮亮, 孙宇光, 邱阿瑞, 等. 大型水轮发电机励磁绕组匝间短路的稳态故障特征分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 40-45.
- HAO Liangliang, SUN Yuguang, QIU Arui, et al. The steady-state fault characteristics of large hydro-generator with interturn short circuit of field windings[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 40-45.
- [46] 郝亮亮, 孙宇光, 邱阿瑞, 等. 隐极发电机励磁绕组匝间短路故障定位及短路匝数估算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 85-92.
- HAO Liangliang, SUN Yuguang, QIU Arui, et al. Fault location and short circuit turns estimation of inter-turn short circuits of field windings in non-salient-pole synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 85-92.
- [47] 郝亮亮, 孙宇光, 邱阿瑞, 等. 基于主保护不平衡电流有效值的

application of automatic relay algorithm for 10 kV distribution network powerline communication[J]. Electric Power,2012,45(11):82-85.

[16] 彭启伟,张浩. 基于多叉树遍历的中压配电线路载波自适应中继算法[J]. 电力系统通信,2009,30(197):81-84.

PENG Qiwei,ZHANG Hao. Adaptive relay algorithm in MV distribution line carrier based on enumerating multi-branch tree[J]. Telecommunications for Electric Power System,2009,30(197):

81-84.

作者简介:

胡正伟(1978-),男,山东昌邑人,讲师,博士,研究方向为智能电网通信关键技术(E-mail:hzwizard@hotmail.com);

谢志远(1964-),男,河北辛集人,教授,博士,研究方向为配网自动化和电力系统通信。

10 kV power line communication networking based on communication quality between terminals

HU Zhengwei,XIE Zhiyuan,GUO Yihe,LIU Shan

(Department of Electronic and Communication,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: A dynamic networking method based on the communication quality between terminals is proposed to realize the best routing selection according to the communication quality between concentrator and terminal,which generates the original networking information by establishing the communication between concentrator and terminal,sets the hierarchical layers according to the number of relay stages between concentrator and terminal,counts the successful communication times between any two terminals,calculates the communication quality of each routing for each statistical cycle,and selects the best communication routing between terminal and concentrator. The statistical cycle should be properly set to fit the time variation feature of power line communication and the routing information should be updated for each cycle. Compared with the theoretical networking method,the proposed method is easy to implement with less calculation load. Its practical implementation needs some relative protocols and hardware supporting. Simulative results verify its validity and effectiveness.

Key words: power line communication; distribution automation; networking; communication

(上接第 143 页 continued from page 143)

转子匝间短路故障监测[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):83-87,107.

HAO Liangliang,SUN Yuguang,QU Arui,et al. Monitoring of field winding inter-turn short circuit based on unbalanced current effective value in main protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(13):83-87,107.

[48] 桂林,王祥珩,王维俭,等. 大型汽轮发电机中性点引出方式及

保护配置方法:中国,CN101702512A[P]. 2005-09-07.

作者简介:

郝亮亮(1985-),男,山东烟台人,讲师,博士,研究方向为电力系统主设备继电保护、新能源与电力电子技术、电力系统分析与控制(E-mail:hll.bjtu@gmail.com)。

Review and prospect of online rotor inter-turn short circuit monitoring for synchronous generator

HAO Liangliang,WU Junyong

(School of Electrical Engineering,Beijing Jiaotong University,Beijing 100044,China)

Abstract: The principles of five online rotor inter-turn short circuit monitoring methods are introduced and evaluated: fault monitoring based on magnetic field measurement, shock pulse, shaft voltage monitoring, electrical parameter monitoring and unit vibration monitoring. The research progress of electrical parameter monitoring method is introduced in three aspects: the fault mathematical modeling, the fault characteristic and mechanism and the fault monitoring based on the internal unbalanced current of stator phase windings. The researches of online rotor inter-turn short circuit monitoring techniques are prospected from three aspects: the sensitive monitoring without dead-zone, the fault monitoring of generator unequipped with branch current transformer and the online fault location, and some preliminary concepts are given.

Key words: synchronous generators; field winding; inter-turn short circuit; fault diagnosis; monitoring