

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202161

故障机理深度关联的大型发电机保护新原理探讨

尹项根^{1,2}, 王义凯^{1,2}, 谭力铭^{1,2}, 乔健^{1,2}, 卢庆辉^{1,2}, 张春辉³

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 中国长江电力股份有限公司技术研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 基于“碳达峰、碳中和”发展目标, 新能源发电渗透率逐年提高, 但其故障穿越能力差、不确定性强等问题愈发凸显。传统发电机组容量巨大, 作为系统的主力支撑电源, 其功率调节和安全支撑作用更为重要, 增强其继电保护的性能和作用显得尤为紧迫。在配置和改进发电机保护原理时, 应该与故障机理深度关联并提炼故障特征。对发电机零序横差保护不平衡电流的产生机理进行分析, 得出零序横差不平衡电流与气隙电动势成正比的结论, 并提出基于气隙电动势制动的零序横差保护判据, 能够提高内部小匝差短路故障时保护的灵敏度。基于对定子单相接地故障风险的深度分析, 利用接地故障电流反映故障风险, 据此构建的定子接地保护方法能够通过发电机安全风险自适应选择出口方式。研究结果拟为基于故障机理的大型发电机组保护改进提供思路。

关键词: 大型发电机保护; 故障机理深度关联; 零序横差保护; 气隙电动势; 定子接地保护; 故障风险

Discussion on a new principle of large generator protection deeply associated with fault mechanisms

YIN Xianggen^{1,2}, WANG Yikai^{1,2}, TAN Liming^{1,2}, QIAO Jian^{1,2}, LU Qinghui^{1,2}, ZHANG Chunhui³

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. Technology and Research Center, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract: Given a development goal of "carbon peak and carbon neutrality", the penetration of new energy power generation has been increasing year on year. However, problems such as poor fault ride-through capability and uncertain power output are increasingly prominent. Traditional generators have large capacity. As the main supporting power sources of the system, their power regulation and safety support effects are important, and it is particularly urgent to enhance the performance and function of their relay protection. To configure and improve the generator protection principle, it is necessary to deeply associate with the fault mechanism and extract the fault characteristics. In this paper, the unbalanced current's generating mechanism of the generator zero-sequence transverse differential protection is analyzed. The conclusion is drawn that it is proportional to the main air gap Electromotive Force (EMF). Thus, a zero-sequence transverse differential protection criterion based on the air gap EMF brake is proposed. This can improve protection sensitivity under internal short-circuit faults with small turn-difference. Based on the in-depth analysis of the fault risk under single-phase stator ground faults, the ground fault current is used to reflect the fault risk. Then, a corresponding stator ground fault protection is proposed, one which can adaptively determine the tripping mode according to the security risk. Research results are intended to provide technical ideas for the improvement of large generator protection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877089).

Key words: large generator protection; deep association with fault mechanism; zero-sequence transverse differential protection; air gap electromotive force; stator ground fault protection; fault risk

0 引言

第七十五届联合国大会上, 我国提出“碳达峰、

碳中和”的发展政策, 国家电网公司也发布“碳达峰、碳中和”行动方案, 承诺 2025 年输送清洁能源占比达到 50%^[1]。随着可再生能源接入电网规模逐年升高, 其间歇性发电不可控、故障穿越能力差等缺点增加了电力系统运行风险^[2], 这使得传统电厂

(含抽蓄电厂)功率调节和安全支撑作用凸显。大型传统发电厂单机容量巨大,火电、水发电机组已达 1 000 MW,核发电机组已达 1 750 MW,作为电力系统的主力支撑电源,其本机安全和对电网安全都极为关键,增强继电保护的性能和作用显得尤为重要^[3]。

大型发电机结构复杂,内部故障时常发生,如 2018 年某 250 MW 发电机发生分支开焊故障,2012 年某 800 MW 水轮发电机发生匝间短路故障。若保护灵敏度不足将对发电机安全构成极大威胁。另一方面,大机组保护不合理切机是引发大停电事故的重要原因,如 2003 年的美加大停电^[4],发电机保护无序跳闸导致大量机组退出运行造成系统崩溃。从保障电网安全和机组安全双重目标出发,提高大型机组继电保护性能涉及到以下要求:更灵敏的内部故障保护、更有效的防误动措施、更智能的安全切机机制(譬如,在保障机组安全前提下避免不恰当突然切机造成的冲击)。

准确、充分、有效地提取故障特征是实现继电保护的关键^[5]。故障特征提取方法有两大类:数据统计分析方法(简称为数据驱动)和物理特征分析方法(简称为机理关联)。前者是近年来随着物联网、大数据而发展兴起的,通过大数据分析和人工智能算法实现对故障特征的挖掘和分类,提取多维、多尺度、多变量的故障特征量,目前在电气设备故障诊断等方面得到应用^[6-8]。由于继电保护对可靠性要求很高,追求 100% 正确动作,故优先关注研究被保护对象故障机理和特征量,关联构造动作判据和机制才是正确的思路,才能满足继电保护“四性”要求。实际上继电保护装置可视为物联网系统中具有自治能力的边缘处理终端,很多学者也倾向于其控保策略应主要以就地被控设备动态物理特性分析为基础^[9-12]。当然,在当前复杂设备和系统背景下,为提高保护性能需要更深入的故障机理分析和构造与之深度关联的动作判据,这正是本文所要探讨的。

1 基于不平衡电流机理的发电机制动式零序横差保护

零序横差保护装设在发电机分组中性点连线上,是最灵敏反应匝间短路和分支开焊故障的主保护^[13]。影响其灵敏度的主要因素是发电机正常运行和外部故障时流过中性点连接线的不平衡电流,主要由分支绕组电气参数的一致和主气隙分布的不均匀造成,励磁系统特性和运行工况也会产生一定的影响^[14]。如何保证零序横差保护的安全性和灵敏度是关键问题。

1.1 现有零序横差保护不平衡电流特征

工程中认为最大零序横差不平衡电流在机端三相短路时产生,由零起升流实验数据线性延拓获得。但机端三相短路时,励磁电流产生的磁势与具有去磁作用的电枢反应磁势叠加,合成气隙磁势很小,零序横差不平衡电流也较小。某容量为 700 MW 的大型水轮发电机组启动试验录波数据结果表明:零起升流试验过程中当短路电流超过发电机额定电流时,零序横差不平衡电流不再升高反而下降,因此线性外推法得到的零序横差不平衡电流值并不能真实反映机端三相短路时的零序横差不平衡电流。

某容量为 120 MW 的水轮发电机组启动试验录波数据结果显示:零起升流试验测得的零序横差不平衡电流数值很小,几乎为零;零起升压试验至额定电压,零序横差电流和机端电压呈线性关系,并网后负荷增加,零序横差电流逐渐增大,但负荷继续增加时,零序横差电流逐渐减小。某容量为 1 000 MW 的大型水轮发电机组启动试验录波数据结果表明:零起升压试验测得的零序横差不平衡电流数值很小,几乎为零,零起升流试验至额定电流,零序横差电流和机端电流近似呈线性关系。综上,最大零序横差不平衡电流应综合零起升流试验、零起升压试验、负荷试验数据进行选取。

过流判据通过整定值躲过最大零序横差不平衡电流,影响其灵敏度。引入制动特性是防止外部故障误动的有效措施,但如何在零序横差保护中正确反映制动量是研究重点。现有基于相电流制动的零序横差保护方法,外部故障制动特性好,但零序横差不平衡电流与机端相电流大小之间没有明确关系;匝间短路故障时横差电流增大,相电流也可能增大,影响灵敏度;正常运行低于额定功率时,制动量减少,增加误动可能性。因此,现有基于相电流制动的零序横差保护难以提升保护性能,需要选取更合理的制动量。

1.2 零序横差不平衡电流机理分析

发电机由于设计、制造、安装和运行等各方面原因,其内部结构并非绝对对称。图 1 为发电机多分支定子绕组结构示意图,各分支绕组电感参数差异和气隙分布不均匀引起气隙磁通不平衡,造成定子绕组感应电动势不平衡,从而在中性点连线上产生零序横差不平衡电流,其大小与发电机内部结构不对称程度和气隙磁通强度有关。

设 E_1 、 E_2 为发电机分组中性点 O_1 、 O_2 各相各分支的综合等效电动势等效感应电动势, Z_1 、 Z_2 为等效内阻抗。则中性点连线上的不平衡电流为

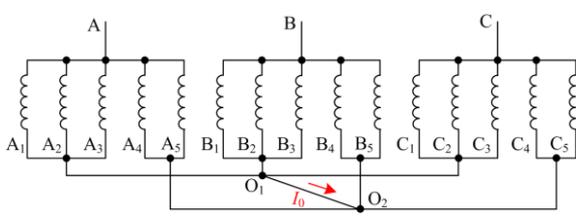


图1 发电机多分支定子绕组结构示意图

Fig. 1 Schematic of multi-branch generator stator winding

$$I_0 = \frac{|E_1 - E_2|}{Z_1 + Z_2} = \frac{\Delta E}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

式中, ΔE 为定子绕组不平衡感应电动势。由于定子绕组感应电动势由主气隙磁通随时间交变产生, 则

$$\Delta E = 4.44 f N k_{N1} \Delta \Phi_m \quad (2)$$

式中: $\Delta \Phi_m$ 为定子绕组不平衡主气隙磁通; f 为工频频率; N 为定子绕组匝数; k_{N1} 为绕组系数。主气隙磁通满足式(3)。

$$\Phi_m \propto LI \quad (3)$$

式中: L 为发电机绕组综合等效电感; I 为发电机定转子综合等效电流。则不平衡主气隙磁通与主气隙磁通间关系可表示为

$$\Delta \Phi_m \propto \frac{\Delta L}{L} \Phi_m \quad (4)$$

式中, ΔL 为各分支绕组的电感参数差异, 反映了发电机内部结构的不对称程度, 对于某一安装成型的发电机而言, 该值固定。结合式(1)~式(4)可知, 零序横差不平衡电流大小与主气隙磁通强度 Φ_m 成正比。由于主气隙磁通强度与气隙电动势 E_δ 成正比, 因此可基于气隙电动势反映气隙分布的不均匀, 进而反映零序横差不平衡电流大小。

1.3 基于气隙电动势制动的零序横差保护

根据零序横差不平衡电流的产生机理提出基于气隙电动势制动的零序横差保护判据为

$$\begin{cases} I_0 > I_{0n} & E_\delta \leq E_{\delta n} \\ I_0 > \frac{E_\delta}{E_{\delta n}} I_{0n} & E_\delta > E_{\delta n} \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_0 为实测零序横差电流; E_δ 为实测气隙电动势; $E_{\delta n}$ 整定为发电机正常运行时的气隙电动势; I_{0n} 整定为发电机正常运行时的最大零序横差不平衡电流。其中, E_δ 由式(6)计算得到。

$$\dot{E}_\delta = \dot{U}_g + \dot{i}_g (R_a + jX_\sigma) \quad (6)$$

式中: R_a 和 X_σ 分别为发电机定子绕组电阻和漏电抗, 为发电机的固有参数; \dot{U}_g 和 \dot{i}_g 分别为发电机机端电压和电流。

对某水电站 800 MW 发电机进行内部故障仿真

分析, 测试单元件横差保护方案的性能。在发电机定子绕组槽内和端部设置同相同支、同相异支和异相短路故障共计 16 800 种。仿真结果表明传统过电流判据能够正确反应其中 16 537 种故障, 相电流制动判据能够正确反应其中 16 654 种故障, 而气隙电动势制动判据能够正确反应其中 16 745 种故障, 气隙电动势制动判据对内部故障的灵敏度最高, 能有效提高单元件横差保护的性。

2 反映接地故障风险的发电机定子绕组接地保护

定子绕组单相接地故障是发电机最常见的故障类型之一^[15-18]。较大的接地故障电流会造成定子铁芯叠片烧结, 导致绝缘破坏并进一步扩大事故, 严重时对发电机造成的损伤难以修复^[19-21]。接地故障电流可用于评估故障风险, 计算故障电流需要实现故障定位并考虑三次谐波电流的影响。

2.1 发电机定子接地故障定位

大型发电机中性点多为高阻接地方式, 此时定子绕组接地故障示意图如图 2 所示。

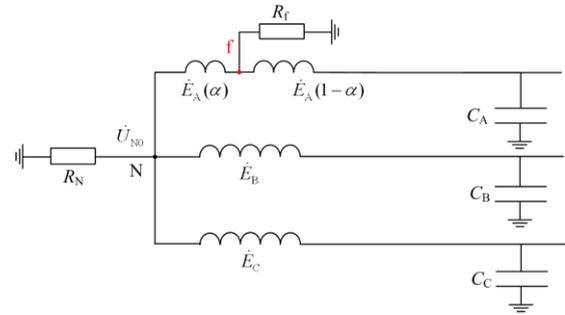


图2 大型发电机定子绕组接地故障示意图

Fig. 2 Large generator stator winding ground fault diagram

发电机中性点 N 处的 KCL 方程为

$$\frac{\dot{U}_{N0}}{R_N} + \frac{\dot{U}_{N0} + \dot{E}_A(\alpha)}{R_f} + j\omega C_2 \dot{U}_{N0} = 0 \quad (7)$$

式中: \dot{U}_{N0} 为中性点电压; R_N 为中性点接地电阻; R_f 为故障接地电阻; C_2 为各相对地电容之和, 可依据文献[22]所提低频注入式保护装置实时更新; α 为故障点到中性点的绕组匝数占分支绕组匝数百分比; $\dot{E}_A(\alpha)$ 为故障感应电势。

大型汽轮发电机定子绕组电势满足 60°相带分布特征。据此文献[23]提出故障感应电势与相电势之间的几何关系, 结合式(7)构建关于故障位置的方程组, 可以同时求解 R_f 与 α , 实现精确故障定位。

大型多分支水轮发电机定子绕组电压分布通常

不满足 60°相带分布特征, 不能对故障过渡电阻和故障位置进行同时求解。但对于实际故障位置而言, 其故障感应电势与实际零序电压测量值必定严格满足式(7)所示的相量方程。据此将绕组接地故障定位问题转化为从故障分支中诊断最有可能发生故障的线圈问题, 并基于式(7)所示的幅值相位方程建立式(8)所示健全线圈评价函数。

$$f = \text{abs}\left(\frac{\dot{U}_{N0}}{R_N} + \frac{\dot{U}_{N0} + \dot{E}_A(n)}{R_f} + j\omega C_\Sigma \dot{U}_{N0}\right) \quad (8)$$

式中: n 为线圈连接点编号; $\dot{E}_A(n)$ 为第 n 个线圈连接点处的故障感应电势。在发电机定子接地故障时, 实际故障位置的健全线圈评价函数为零, 据此将健全线圈评价函数值最小的连接点对应的线圈定义为故障线圈。

文献[24]指出在不同故障位置和过渡电阻的情况下可能存在相同的中性点零序电压, 此时基于式(8)进行定子接地故障定位可能出现多解。对于未装设注入式保护的大型发电机, 将不同定位结果均作为故障备选集, 依次筛查故障备选集确定实际故障位置。对于装设注入式保护的大型发电机, 考虑到不同的定位结果对应的过渡电阻不同, 基于注入式保护装置测得的接地过渡电阻阻值对定位多解结果进行对比校正, 得到实际的故障位置。

2.2 发电机定子接地故障电流计算

某发电机定子绕组近中性点侧发生单相接地故障时的接地故障电流时域与频域波形示意图如图 3 所示。分析可知, 接地故障电流主要由基波分量和三次谐波分量构成。

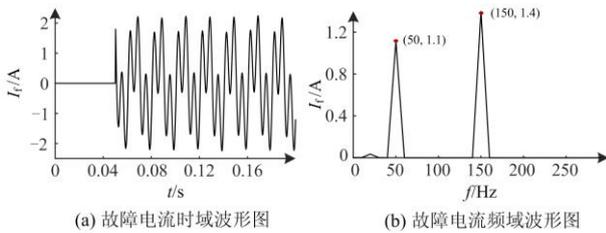


图 3 发电机定子绕组接地故障电流波形

Fig. 3 Generator stator winding ground fault current waves

2.2.1 基波电流计算方法

发电机定子绕组单相接地故障基波零序等值电路如图 4 所示。

根据图 4 计算得到基波故障电流 \dot{I}_{f1} 为

$$\dot{I}_{f1} = 3\dot{I}_0 = -3 \left[\frac{1}{3R_N} + j\omega(C_f + C_\omega) \right] \dot{U}_{N0} \quad (9)$$

式中: C_f 、 C_ω 分别为发电机定子绕组和外部连接设备每相对地电容, 其余变量与前文定义一致。

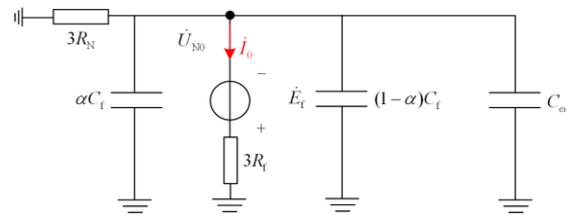


图 4 发电机定子绕组单相接地故障基波零序等值电路

Fig. 4 Fundamental zero sequence equivalent circuit under the generator stator winding single-phase ground fault

2.2.2 基于故障定位结果的三次谐波电流计算方法

发电机定子绕组单相接地故障三次谐波等值电路如图 5 所示。

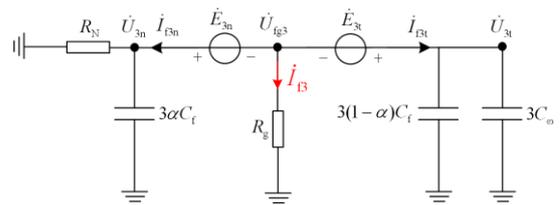


图 5 发电机定子绕组单相接地故障三次谐波等值电路

Fig. 5 Third harmonic equivalent circuit under the generator stator winding single-phase ground fault

图中: \dot{U}_{3n} 和 \dot{U}_{3t} 分别为在发电机中性点和机端测得的三次谐波电压; \dot{E}_{3n} 和 \dot{E}_{3t} 分别为故障点到发电机中性点和机端的三次谐波相电动势; \dot{I}_{f3} 为三次谐波接地故障电流, \dot{I}_{f3n} 和 \dot{I}_{f3t} 分别为中性点和机端的接地故障电流分量; \dot{U}_{fg3} 为故障点对地三次谐波电压, 其余变量与前文定义一致。

忽略定子绕组阻抗上的压降, \dot{E}_{3n} 可通过故障定位结果确定, 则故障点对地三次谐波电压如式(10)所示。

$$\dot{U}_{fg3} = -\dot{E}_{3n} + \dot{U}_{3n} \quad (10)$$

结合式(10)可以得出三次谐波故障电流为

$$\dot{I}_{f3} = \frac{\dot{U}_{fg3}}{R_g} = \frac{-\dot{E}_{3n} + \dot{U}_{3n}}{R_g} \quad (11)$$

上述方法用于经过渡电阻接地的故障情况。

2.2.3 基于故障分量的三次谐波电流计算方法

对于金属性接地故障, 基于故障分量原理, 做出发电机定子绕组单相接地三次谐波分量等值电路如图 6 所示。

图中: $\dot{U}_{3n}^{(0)}$ 、 $\dot{U}_{3t}^{(0)}$ 、 $\dot{U}_{fg3}^{(0)}$ 分别为中性点、机端、故障点对地三次谐波电压正常分量; $\Delta \dot{U}_{3n}$ 、 $\Delta \dot{U}_{3t}$ 、 $\Delta \dot{U}_{fg3}$ 分别为中性点、机端、故障点对地三次谐波电压故障分量。故障点对地三次谐波电压满足式(12)。

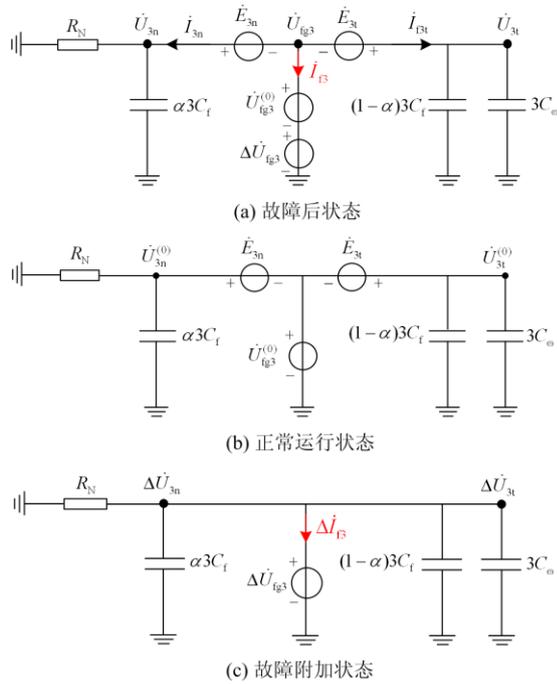


图 6 发电机定子绕组单相接地故障三次谐波分量等值电路
Fig. 6 Third harmonic component equivalent circuit under the generator stator winding single-phase ground fault

$$\dot{U}_{fg3} = \dot{U}_{fg3}^{(0)} + \Delta \dot{U}_{fg3} \quad (12)$$

由于在正常运行状态下, 故障点的入地电流数值很小, $\dot{U}_{fg3}^{(0)}$ 可忽略不计。因此在短路故障附加状态下, 由 $\Delta \dot{U}_{fg3}$ 引起的接地电流故障分量 $\Delta \dot{i}_{fg3}$ 是 \dot{i}_{fg3} 的主要成分, 则三次谐波接地故障电流为

$$\dot{i}_{fg3} = \Delta \dot{i}_{fg3} = -\Delta \dot{U}_{fg3} \left[\frac{1}{R_n} + j3\omega(3C_f + 3C_0) \right] \quad (13)$$

定子绕组阻抗远小于对地容抗, 在故障附加状态中绕组阻抗压降可以忽略, 可认为整个定子绕组范围内任一点三次谐波对地电压都为 $\Delta \dot{U}_{fg3}$, 工程中可用机端或中性点三次谐波电压变化量代替。

2.3 基于故障风险的发电机定子接地保护

为保证大型发电机的安全, 不使单相接地故障发展为相间或匝间短路, 应该使单相接地故障处不产生电弧或者使接地电弧瞬间熄灭, 这个不产生电弧的最大接地电流被定义为发电机单相接地的安全电流, 其值与发电机额定电压有关, 通常为 1~4 A^[25]。发电机发生单相接地故障后, 通过式(9)、式(11)和式(13)计算其接地故障电流。当接地故障电流小于安全电流时, 保护发信, 经过转移负荷后平稳停机; 当接地故障电流大于安全电流时, 为保障发电机的安全, 需要立刻跳开 GCB, 并进行灭磁停机。

采用准分布参数模型进行仿真验证, 以某大型水轮发电机为例, 其额定容量为 888.9 MVA, 额定电压为 20 kV, 定子绕组每相由 8 个分支组成, 每分支由 35 匝线圈串联, 极对数为 40, 每分支定子绕组电阻为 1.233 mΩ, 定子绕组漏电感为 4.41 mH, 每相定子绕组电容为 3.846 μF, 对应槽距电角为 17.14°。设该发电机的安全接地电流为 1 A, 仿真结果如表 1 所示, 将线圈从中性点侧开始编号, 故障线圈 2 表示从中性点侧开始的第 2 匝线圈。

表 1 某水轮发电机定子单相接地故障诊断仿真测试结果

Table 1 Simulation results of single-phase ground fault diagnosis of a hydro-generator stator

故障场景		零序电压测量信息		故障定位诊断结果			故障风险诊断结果				
故障线圈序号	过渡电阻/Ω	幅值/kV	相位/(°)	过渡电阻/Ω	定位线圈	目标函数	基波/A	三次谐波/A	全电流/A	实测电流/A	保护动作结果
2	0	0.690	-25.78	0.285 6	2	0.000 06	3.52	20.70	20.99	21.07	切机
	200	0.383	-51.70	197.34	2	0.000 06	1.94	7.02	7.28	7.41	切机
	1 000	0.124	-68.75	977.41	2	0.024 40	0.61	1.57	1.69	1.74	切机
	2 000	0.068	-71.45	2 027.3	2	0.037 16	0.32	0.78	0.85	0.88	告警
12	0	4.117	-19.38	0.378 5	12	0.000 90	20.99	15.93	26.35	26.46	切机
	200	2.268	-45.52	200.73	12	0.002 25	11.55	5.41	12.75	12.78	切机
	1 000	0.717	-63.20	988.97	12	0.003 69	3.64	1.22	3.83	3.84	切机
	2 000	0.384	-66.73	1 990.5	12	0.043 47	1.94	0.61	2.02	2.03	切机
22	0	7.450	-10.98	0.286 4	22	0.000 60	37.99	12.32	39.93	40.00	切机
	200	4.103	-37.18	201.06	22	0.002 53	20.90	4.19	21.32	21.33	切机
	1 000	1.295	-54.92	1 002.3	22	0.004 20	6.58	0.96	6.65	6.65	切机
	2 000	0.691	-58.53	1 978.1	22	0.004 99	3.50	0.50	3.54	3.54	切机
32	0	10.62	-2.44	0.084 2	32	0.000 47	54.12	14.24	55.96	56.00	切机
	200	5.85	-28.66	200.88	32	0.001 65	29.79	4.84	30.18	30.19	切机
	1 000	1.84	-46.454	1 006.7	32	0.006 93	9.38	1.12	9.44	9.44	切机
	2 000	0.983	-50.106	2 012.9	32	0.009 37	4.99	0.58	5.02	5.02	切机

仿真结果表明,所提接地故障定位方法能够精确定位故障线圈。故障点靠近机端时,接地故障电流基波分量较大;故障点靠近中性点时,接地故障电流三次谐波分量较大。二者综合考虑得到接地故障全电流与实测接地电流接近,能够准确反映接地故障风险,据此可自适应决定发电机定子接地保护的出口方式,在保证机组安全的前提下提升对系统的支撑能力。

3 结语

大型发电机组自身安全和对系统的影响在“双碳”背景下尤为重要,在目前广泛关注数据驱动情况下,本文强调通过故障机理深度关联改进大型发电机保护原理,并得出以下结论:

1) 对于安装好的发电机,零序横差不平衡电流与气隙电动势成正比,据此提出基于气隙电动势制动的零序横差保护判据,能够提高发电机内部小匝差故障下保护的灵敏度。

2) 接地故障电流能够反映定子接地故障的危害风险,据此提出基于故障风险的发电机定子接地保护方法,能够自适应决定发电机切机控制方式,提升大型发电机组对系统的支撑作用。

本文研究结果拟为基于故障机理的大型发电机组保护改进提供思路。

参考文献

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.
- [2] 余浩,肖彭瑶,林勇,等.大规模海上风电高电压穿越研究进展与展望[J].智慧电力,2020,48(3):30-38.
YU Hao, XIAO Pengyao, LIN Yong, et al. Review on high voltage ride-through strategies for offshore doubly-fed wind farms[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 30-38.
- [2] 李旭升.大型发电机故障仿真及保护测试技术研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
LI Xusheng. Study on large generator protection fault simulation and protection test technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [3] 印永华,郭剑波,赵建军,等.美加8.14大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J].电网技术,2003,27(10):8-11,16.
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected north America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11, 16.
- [5] 杨启洪,秦川,刘杰荣,等.基于对比歧化和深度置信网络的配电网故障类型识别[J].电网与清洁能源,2019,35(2):52-57.
YANG Qihong, QIN Chuan, LIU Jierong, et al. Fault identification of distribution network based on contrast disproportionate algorithm and deep belief network[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(2): 52-57.
- [6] 吴瞻宇,董明,王健一,等.基于模糊关联规则挖掘的电力变压器故障诊断方法[J].高压电器,2019,55(8):157-163.
WU Zhanyu, DONG Ming, WANG Jianyi, et al. Fault diagnosis of power transformer based on fuzzy association rules mining[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 157-163.
- [7] 陈东超.基于贝叶斯网络的汽轮发电机组故障诊断方法及应用研究[D].北京:华北电力大学,2018.
CHEN Dongchao. Research on methods and application of fault diagnosis for turbo-generator unit based on Bayesian network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [8] 盛海华,王德林,马伟,等.基于大数据的继电保护智能运行管控体系探索[J].电力系统保护与控制,2019,47(22):168-175.
SHENG Haihua, WANG Delin, MA Wei, et al. Exploration of intelligent operation management system of relay protection based on big data[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 168-175.
- [9] 侯俊杰,宋国兵,徐瑞东,等.交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(14):176-187.
HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 176-187.
- [10] 王开科,熊小伏,肖扬,等.基于负序电流的主动配电网单相断线故障保护方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):10-18.
WANG Kaike, XIONG Xiaofu, XIAO Yang, et al. Single-phase break fault protection method for an active distribution network based on negative sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 10-18.
- [11] YANG Xiao, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution

- network considering the influence of neutral grounding modes[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-w.
- [12] 郑博文, 王增平, 吕哲, 等. 基于暂态量的继电保护研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 18-25.
ZHENG Bowen, WANG Zengping, LÜ Zhe, et al. Research on transient-based relay protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 18-25.
- [13] YIN Xianggen, WANG Yikai, QIAO Jian, et al. Multi-information fusion-based hierarchical power generation-side protection system[J]. *Energies*, 2021, 14(2).
- [14] 张侃君. 特大型水轮发电机保护系统及其动模试验新技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
ZHANG Kanjun. Protection system and new dynamic simulation experiment technology of huge hydro generator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [15] 包明磊, 李玉平, 桑建斌, 等. 双频式定子接地保护的分析和改进[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(20): 106-112.
BAO Minglei, LI Yuping, SANG Jianbin, et al. Analysis and improvement of the dual frequency stator ground fault protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(20): 106-112.
- [16] 黄少锋, 贾文超. 大型汽轮发电机定子单相接地故障定位新方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(9): 35-40.
HUANG Shaofeng, JIA Wenchao. A new fault location method for stator single-phase ground fault in large turbine generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(9): 35-40.
- [17] KHALED A J, HAMID A T. Performance analysis of synchronous generators under stator windings ground faults near the star point-experimental verification[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(3): 1402-1410.
- [18] KHALED A J, AMIR N, HAMID A T. Modeling and experimental verification of a 100% stator ground fault protection based on adaptive third-harmonic differential voltage scheme for synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(4): 3379-3386.
- [19] WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. The fault-current-based protection scheme and location algorithm for stator ground fault of a large generator[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, 28(4): 871-879.
- [20] 吴建福, 周移华. 发电机定子接地保护动作分析及防范措施[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(5): 111-114, 131.
WU Jianfu, ZHOU Yihua. Analysis and preventive measures of generator stator ground fault protection action[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(5): 111-114, 131.
- [21] WU A Y. MV generator ground fault arcing power damage assessment[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(1): 912-915.
- [22] 王育学, 尹项根, 张哲, 等. 基于接地电流的大型发电机定子接地保护及精确定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 147-154, 18.
WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A novel protection and precise location method based on grounding currents for stator ground faults of large generators[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(31): 147-154, 18.
- [23] 徐彪, 欧阳帆, 朱维钧, 等. 基于绕组分布的大型汽轮机定子接地故障定位方法[J]. *湖南电力*, 2021, 41(3): 46-52.
XU Biao, OUYANG Fan, ZHU Weijun, et al. Novel fault location method of large steam turbine generator stator grounding considering winding distribution[J]. *Hunan Electric Power*, 2021, 41(3): 46-52.
- [24] 殷林鹏, 桂林, 张琦雪, 等. 基于基波电势分布特征的大型发电机定子接地故障定位方法[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(7): 141-146.
YIN Linpeng, GUI Lin, ZHANG Qixue, et al. Stator grounding fault location method based on distribution characteristics of fundamental wave potential[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(7): 141-146.
- [25] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2001.

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-09-30

作者简介:

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

王义凯(1996—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 742657004@qq.com

谭力铭(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 904632172@qq.com

(编辑 周金梅)