

[电气系统]

发电厂电气系统保护调试中的故障定位与处理策略

文/朱同

上海电力建设启动调整试验所有限公司

在现代发电厂的运营中，电气系统的稳定性和安全性是至关重要的。电气系统保护调试涉及到复杂的技术和程序，旨在确保系统在面对故障时能迅速有效地响应和处理问题。系统地探讨发电厂电气系统在保护调试过程中面对的主要挑战，详细介绍故障定位的主要技术，包括故障录波分析、行波故障定位法以及基于阻抗的故障定位方法，并提出一系列针对性的故障处理策略，如快速隔离故障区域和故障后系统恢复的措施。最后，论述系统测试的重要性和实施方法，以确保所有保护和调试措施的有效性和可靠性。

电力系统故障的早期诊断与快速处理不仅关乎电力系统本身的稳定性，更是确保经济活动和社会生活不受重大影响的基石。

发电厂电气系统保护调试是电力系统安全稳定运行的重要保障，涉及到发电厂内部及其与电网连接的多个环节，包括发电机、变压器、断路器、继电保护装置和自动化控制系统等关键组件的功能验证与性能优化，目的在于根据科学的测试程序和精确的故障诊断技术确保电力系统在各种运行条件下的可靠性和安全性。电气系统保护调试通过模拟各种故障情况来验证系统中的保护策略是否能够有效地识别和隔离故障，从而避免或最小化潜在的损害和故障扩散。调试过程中不仅要保护装置本身的性能进行详细测试，还需评估与系统其他部分的交互作用以及整个保护方案的协调一致性。此外，系统的自动化程度也对保护调试的复杂性有着直接影响。因此，在现代发电厂中，自动化控制系统的集成测试成为保护调试不可或缺的一环。此过程包括系统响应时间的测量、保护逻辑的验证以及故障录波器的精确配置。发电厂电气系统保护调试旨在通过技术手段提高系统的故障识别能力和处理速度，从而增强

电网的整体韧性和对外部干扰的应对能力。

发电厂电气系统故障定位技术

1. 故障录波分析

故障录波分析在发电厂电气系统保护调试中起着至关重要的作用，根据实时监测和记录电气参数的突变，可为故障的精确定位提供关键数据支持。本节将详细探讨基于实时监测的故障录波分析的应用及其对应的算法实现。故障录波分析依赖于连续监测电气系统中的电压和电流，这些数据由故障录波器在故障发生前后进行记录，确保能够捕获到故障发生时的瞬态行为。为解析这些数据，采用傅立叶变换将时间域的信号转换为频域信号，方便分析故障特征频率，其基本公式表示为

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

式中， $x(t)$ 为时间域中的信号； $x(f)$ 为频域中的信号； f 为频率； t 为时间。

通过该变换，可以识别出故障信号中的主要频率成分，从而判断故障的类型和可能位置。接着，为了进一步分析故障源，实施基于频域分析的阻抗计算，其公式为

$$Z(f) = \frac{V(f)}{I(f)} \quad (2)$$

式中， $Z(f)$ 为故障点的阻抗； $V(f)$ 和 $I(f)$ 分别为故障点的电压和电流的频域。

此阻抗计算有助于确定故障点与测量点之间的距离，进而精确定位故障位置。计算故障距离的公式为

$$D = \frac{V_{ph} - Z(f)I_{ph}}{V_{ph}/L} \quad (3)$$

式中， D 为故障距离； V_{ph} 为相电压； I_{ph} 为相电流； L 为线路总长。

这种方法可以根据对比不同相之间的故障录波数据，来精确识别和定位系统内部的故障。

2. 行波故障定位法

行波故障定位法是发电厂电气系统保护调试中一个高效的故障定位技术，其核心是利用故障发生时电气线路中产生的行波（电气扰动波）进行故障点定位。该方法特别适用于长距离输电线路，能够在短时间内准确识别故障位置，是一种基于行波时间差定位的技术。行波故障定位法需要计算行波在输电线路中的传播速度 v ，通常取值为光速的比例，具体计算公式为

$$v = \frac{2L}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

式中， L 为线路的总长度； t_1 和 t_2 分别为行波从故障点到两个测量点（A点和B点）的传播时间。

为了精确测量这些时间，需要在电网的关键位置安装高速采样设备，实时记录电压和电流的变化。确定行波速度后，可计算故障点到测量点A的距离 d_1 的公式为

$$d_1 = v \times t_1 \quad (5)$$

此算法的实现依赖于对行波传播时间的精确测量，这通常利用同步测量技术实现，确保两个测量点的时钟完全同步。为提高定位的准确性和可靠性，还需要考虑行波在传输过程中可能受到的衰减和频率分散影响，这要求对行波的传播特性有深入的理解和准确的数据支持。根据这一算法，不仅可以迅速准确地确定故障位置，还可以大幅度缩短故障处理时间，提高电力系统的稳定性和可靠性。

3. 基于阻抗的故障定位法

在发电厂电气系统保护调试领域，阻抗法故障定位技术是一种有效的工具，对确保电力系统稳定运行具有重要意义。该方法主要通过测量发生

故障点至保护装置之间的阻抗值来确定故障位置，利用电气传输线路参数和故障时的电流数据、电压数据，按照预设的数学模型计算得出故障距离。具体操作中，该技术利用距离保护继电器测定线路阻抗。继电器内部的阻抗设置值与实际测得的阻抗比较，当测量阻抗小于或等于设定阻抗时，系统判定为故障，并执行切断故障区段的操作。该方法的优点在于反应速度快、准确度较高，能够迅速隔离故障，减少故障对电网的影响。然而，基于阻抗的故障定位法也存在一定的局限性，如线路参数变化、系统运行状态的复杂性会影响故障定位的准确性，导致保护动作误判或拒动。此外，阻抗法在处理多回路系统、复杂接地系统的故障定位时，由于系统阻抗计算的复杂性及其变化范围较大，需要辅以其技术手段进行验证和修正。

发电厂电气系统故障处理策略

1. 快速隔离故障区域

在发电厂电气系统的保护调试过程中，快速隔离故障区域是确保系统整体稳定和安全的策略之一。当系统检测到故障时，迅速而准确地判定并隔离故障区域能有效防止故障的扩散，减少对系统其他部分的潜在损害。这一过程依赖于故障检测和隔离系统（FDIS）的高效运作，该系统集成了故障检测、故障决策和执行隔离操作的功能，其核心包括故障诊断算法、继电保护逻辑以及断路器的快速动作。为展示这一策略的实施效果，可以参考一组系统内的实际操作数据，其中包括故障检测时间、故障分析时间、隔离决策时间和断路器响应时间。表1详细列出了在一个月内记录的10次故障事件中各个时间段的数据。

表1 故障检测与隔离系统应用数据

（单位：ms）

故障编号	故障检测时间	故障分析时间	隔离决策时间	断路器响应时间	故障位置
01	2	5	3	20	A区段
02	3	7	4	25	B区段
03	1	6	4	18	C区段
04	2	7	5	20	D区段
05	3	8	6	22	E区段
06	2	6	3	15	F区段
07	2	5	4	20	G区段
08	3	5	5	18	H区段
09	1	4	3	16	I区段
10	2	6	4	20	J区段

在分析这些数据时，关键在于评估从故障检测到断路器响应整个过程的总时间，以及这些时间如何影响到故障区域的有效隔离。根据系统的自动化测试和定期维护，保护调试人员可以优化故障诊断算法和继电保护逻辑，以减少故障处理的整体时间，实现更快的故障响应速度。此外，这些数据还可以用来指导未来系统升级和改进策略，例如根据升级断路器的响应机制或优化故障检测算法，以提高系统的可靠性和安全性。

2. 故障后系统恢复

故障后系统恢复是发电厂电气系统保护调试中的一个关键环节，它确保在发生故障后电力系统能够迅速恢复到正常运行状态，涉及故障区域的隔离，更包括整个系统的稳定性和可靠性恢复。系统恢复策略的设计需考虑多种因素，如系统的冗余设计、备用电源的配置以及自动化控制系统的响应能力。此外，还应包括故障数据的分析和故障经验的总结，以优化未来的故障响应。在恢复操作中，首要任务是评估故障对系统造成的影响，这通常根据分析故障录波器记录的数据完成，紧接着是对受影响部分进行必要的修复或调整。这些准备工作完成，系统的逐步重启可以开始。重启过程中需密切监控系统参数，如电压、电流以及频率等，以确保它们在安全和允许的范围内变化。系统恢复的最终阶段是将系统重新接入主电网，这需要与电网调度中心密切合作，以确保同步操作的准确性。实现快速而安全的系统恢复，不仅需要高效的技术方案和策略，还依赖于操作人员的专业技能和快速反应能力。此外，故障后的系统恢复过程也提供了宝贵的数据和经验，对于提升系统设计、改进保护策略以及优化操作流程具有重要价值。

系统测试

实测数据集是通过在实验室模拟的输电线路系统中人为制造电气故障来获取的，确保每个数据点都反映故障发生时的真实响应。实验数据集共包含5组独立测试数据，全都用于系统的功能测试，没有进行模型训练的部分。因为实验的目的是评估系统对实际故障的响应能力而非开发预测模型。数据集集中的每条数据都详细记录故障发生的具体时间和地点，以及与故障相关的电压和电流的读数，利用

同步测量技术实时记录。整个测试共执行5遍，以5组独立的数据进行测试，每组数据代表一个单独的故障事件。测试指标主要包括故障检测时间、故障分析时间、隔离决策时间以及断路器响应时间，这些指标共同构成了评估系统性能的基础。其中，故障检测时间指的是系统检测到故障发生到记录该事件的时间；故障分析时间是系统分析故障数据并确定故障性质的时间；隔离决策时间涉及系统做出隔离故障区域决策的速度；断路器响应时间则是从系统发送隔离指令到断路器实际执行动作的时间。这些指标直接关联到系统在真实故障情况下的操作效率和可靠性。测试数据见表2。

表2 测试数据

(单位: ms)

测试编号	故障检测时间	故障分析时间	隔离决策时间	断路器响应时间
01	2.34	5.12	3.25	20.43
02	2.98	5.23	3.87	21.37
03	1.76	4.89	2.95	19.85
04	2.59	5.01	3.14	20.22
05	3.05	4.97	3.55	22.45

从测试结果中可以观察到，各测试组中故障检测时间、故障分析时间、隔离决策时间以及断路器响应时间都保持在相对低的范围内，显示出系统具有快速反应的能力。尤其是故障检测时间和故障分析时间，这两个指标的快速表现确保了故障定位的即时性，这对于避免故障扩散和减轻系统损伤至关重要。此外，断路器的响应时间虽然相对较长，但仍在可接受范围内，说明系统整体的响应和处理流程是高效的。

结束语

发电厂电气系统保护调试的研究不仅涉及深入的理论研究，更包含对应的技术实践和系统测试，其目的在于通过科技进步来实现电力系统的高效与安全运行。通过不断优化故障定位技术和处理策略，可以显著提升电网的稳定性和可靠性，为社会经济发展提供坚实的电力保障。因此，深化此领域的研究，不仅有助于推动电力工程技术的发展，也对保障国家能源安全、促进经济社会持续健康发展具有深远意义。EA

(收稿日期: 2024-11-08)