

数字化变电站继电保护以及自动化系统设计

黎 卡

深圳市输变电工程有限公司, 广东 深圳 518055

[摘要]在现代电力系统中,变电站的作用不可忽视。作为电力传输与分配的关键节点,变电站不仅承担着电能的转换与分配任务,还承担着设备安全与系统稳定的重要责任。随着电力需求的快速增长及对电力质量的日益重视,变电站的继电保护技术显得尤为重要。继电保护系统能够迅速检测故障并采取相应措施,确保设备的安全运行与电力供应的稳定。然而,传统的继电保护方法面临着响应速度慢、故障判断不准确等诸多挑战。为此,智能化、数字化的技术手段被引入继电保护领域,以提升其灵活性与可靠性。本篇文章将对变电站的继电保护技术进行深入探讨,分析其发展现状及未来趋势,为电力系统的安全运营提供理论支持与实践指导。

[关键词]变电站;继电保护;自动化

DOI: 10.33142/ucp.v1i4.14167

中图分类号: TM77

文献标识码: A

Design of Digital Substation Relay Protection and Automation System

LI ka

Shenzhen Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518055, China

Abstract: In modern power systems, the role of substations cannot be ignored. As a key node in power transmission and distribution, substations not only undertake the task of converting and distributing electrical energy, but also bear important responsibilities for equipment safety and system stability. With the rapid growth of electricity demand and the increasing emphasis on power quality, relay protection technology for substations has become particularly important. The relay protection system can quickly detect faults and take corresponding measures to ensure the safe operation of equipment and stable power supply. However, traditional relay protection methods face many challenges such as slow response speed and inaccurate fault diagnosis. Therefore, intelligent and digital technological means have been introduced into the field of relay protection to enhance its flexibility and reliability. This article will delve into the relay protection technology of substations, analyze its current development status and future trends, and provide theoretical support and practical guidance for the safe operation of power systems.

Keywords: substation; relay protection; automation

引言

变电站继电保护系统的历史可追溯至电力行业的早期发展。随着电力系统的不断演进,保护技术经历了从简单机械继电器到现代数字保护设备的转变。面临设备故障快速响应与准确定位的挑战,传统保护方式的局限性愈加明显,而现代电力系统对安全性与可靠性提出了更高的要求,以适应日益复杂的供电环境。同时,智能电网的发展为继电保护技术的创新提供了良好的契机。借助智能化手段,实时监控设备的能力得以实现,而通过大数据分析,优化保护策略成为可能。结合物联网、人工智能等新兴技术,变电站的继电保护正在逐步迈向更高的智能化与自动化水平,为后续研究奠定了坚实基础。

1 变电站一次侧计算与设计

变电站一次侧的计算与设计,对于电力系统的安全、可靠性及经济性,至关重要。该过程的核心内容包括负荷计算、主变压器选型、功率因数补偿、短路电流计算以及接线系统设计,以下将对此进行详细探讨。

1.1 负荷计算

负荷计算作为变电站设计的基础,其目的在于精确确定所需设备的容量。通常,历史数据与未来负荷预测作为计算的依据。视在功率可用以下公式表示: $S = P + jQ$ 。S代表视在功率(kVA),而P与jQ分别为有功功率(kW)与无功功率(kVAR)。为提升计算的准确性,负荷曲线分析法被广泛应用。通过分析不同时间段与季节的负荷特征,最大负荷的预测可以通过以下公式进行: $P_{\max} = k \times P_{\text{avg}}$, $P_{\max}$ 为最大负荷, P_{avg} 表示平均负荷, k则为负荷系数。负荷计算的精确性,直接影响着变电站的选型及配置,从而对整体电力系统的运行效率产生影响。

1.2 主变压器选型

在主变压器的选型中,需要综合考虑负荷计算结果、系统电压等级与短路电流等多个参数。变压器容量S的确定可通过以下公式进行: $S = \frac{P_{\max}}{\eta}$, η 表示变压器的效率。

系统电压等级的选择,需考虑额定电压及过电压保护的要素。

求。常见的变压器类型包括油浸式与干式，前者适用于高容量与高可靠性的环境，而后者则更适合空间有限且有环保要求的场合。短路阻抗也被视为选型的重要因素，通常设定在 5%~10% 之间。

1.3 功率因数补偿方法

提高功率因数是提升电力系统效率的关键环节，接近 1 的理想值为 0.95 以上。补偿方法主要分为静态与动态补偿。静态补偿通过安装电容器来实现，所需补偿容量可通过以下公式计算： $Q_c = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$ ，在该公式中， Q_c 为所需的无功功率， $\tan\phi_1$ 与 $\tan\phi_2$ 分别代表补偿前后的功率因数角。动态补偿一般采用静态无功补偿装置 (SVC) 或静态同步补偿装置 (STATCOM)，这些设备能够实时调整无功功率，以适应负荷的变化，从而确保系统的稳定与经济性。

1.4 短路电流计算

短路电流的计算，是保障电力系统安全的重要步骤，其目的是评估电力设备的承受能力及保护设置。在短路情况下，短路电流的计算公式为： $I_{sc} = \frac{U_n}{Z_{total}}$ ，其中， I_{sc} 表示短路电流， U_n 为系统额定电压， Z_{total} 为系统总阻抗，包括变压器、线路及负荷的阻抗。在进行短路电流计算时，各类设备的阻抗特性需被综合考虑，以确保合理选择与配置短路保护装置。同时，设备的冲击电流能力也应予以考虑，以有效防止短路事故对设备造成的损坏。

1.5 接线系统设计

接线系统的设计，是变电站一次侧设计的关键环节，其目的是确保电力设备之间的有效连接与安全运行。常见的接线方式包括单母线、双母线及环形接线等。在设计时，需遵循几个基本原则：保障电流的安全流通，提高供电的可靠性，以及便于设备的检修与维护。同时，电气设备的接地及保护接地设计也需充分考虑，以确保在发生故障时有效避免电气事故^[1]。

在接线系统的设计过程中，电气设备的连接方式与电缆的选型明确至关重要。合理的接线设计，有助于提升系统的稳定性与安全性，降低电力系统运行中的能量损耗，从而进一步提高整体效率。

2 电气设备继电保护整定计算

2.1 母线保护

母线作为电力系统的重要组成部分，其在输电与配电中的作用显得尤为重要，因此对其保护的关注不可或缺。母线保护主要通过差动保护与过流保护来实现。在差动保护中，基于“进出电流相等”的原则，当母线发生故障时，进出的电流不再相等，从而触发保护装置的动作。

差动保护整定值的计算公式如下： $I_{set} = K \cdot I_{max}$ ，在此， I_{set} 代表整定电流， I_{max} 为母线最大工作电流，而 K 为

整定系数，通常设定在 0.3 至 0.5 之间。通过监测各支路电流，若差动电流 I_d 超过整定值，保护装置便会立即切断电源，以防止事故扩大： $I_d = |I_{in}| - |I_{out}|$ ，其中， I_{in} 与 I_{out} 分别为进入与离开母线的电流。一旦 I_d 超过设定阈值，保护装置将启动，切断电源，阻止事故进一步恶化。

过流保护同样适用于母线，监测过流情况至关重要。整定值一般设定为母线额定电流的 1.2 至 1.5 倍，以确保在短路或故障情况下能够及时切断电源^[2]。在短路情况下，

母线短路电流的计算公式如下： $I_{sc} = \frac{U_n}{Z_{total}}$ ，在此， I_{sc} 为

短路电流， U_n 为母线额定电压， Z_{total} 为母线的总阻抗。

2.2 变压器保护

在电力系统中，变压器具的保护措施包括过流、过载、短路及温度保护等。变压器保护的整定计算通常涵盖选择保护类型与设定整定值两个步骤。

过流保护同样适用于变压器，整定计算可表示为： $I_{set} = K \cdot I_{rated}$ ，其中， I_{rated} 是变压器的额定电流， K 的取值范围一般在 1.2 至 1.5 之间，以适应短期过载的需求。过流保护的作用在于防止变压器因过流导致的过热或损坏。变压器保护中，差动保护也具有重要意义，尤其在高压变压器中，其工作原理与母线保护相似，主要通过比较变压器输入与输出电流来实现。若两者之间的差动电流超过设定值，保护装置将立即触发。依赖温度传感器监测变压器的工作温度。整定值应根据变压器的额定温度设定，通常设定在 80℃ 至 90℃ 之间。当温度超过设定值时，保护装置将自动切断变压器供电，以防止过热造成设备损坏^[3]。

2.3 电容器保护

在电力系统中，电容器用于改善功率因数与稳定电压，其保护措施同样重要，涵盖过流、过压及失步保护等方面。电容器的过流保护通常采用定时器与电流继电器结合使用，以防止过流对电容器造成损坏。当系统电压超过设定值时，保护装置将立即动作，其整定值可通过以下公式计算： $U_{set} = K \cdot U_{rated}$ ，其中， U_{rated} 是电容器的额定电压， K 一般设定为 1.1 至 1.2。失步保护主要用于防止电容器在切换或操作过程中发生失步，失步检测通常依赖电流变化的速率，当电流在短时间内剧烈变化时，保护装置将触发，切断电源，以保障系统安全。

3 自动化系统设计

3.1 变电站系统结构

变电站作为电力网络中的关键节点，其自动化系统结构设计直接影响电力的传输与分配效率。一般而言，变电站系统由监控层、控制层及执行层三个主要部分构成。数据的采集与状态监测由监控层负责，通过传感器实时获取运行参数，如电压、电流、功率与温度等。控制层的任务是对采集到的数据进行处理与分析，利用 SCADA (监控与数据采集) 系统实时监控，并根据设定逻辑调整系统的运

行状态^[4]。执行层由各类控制设备与执行机构组成，具体执行控制层发出的指令，从而确保设备正常运行。

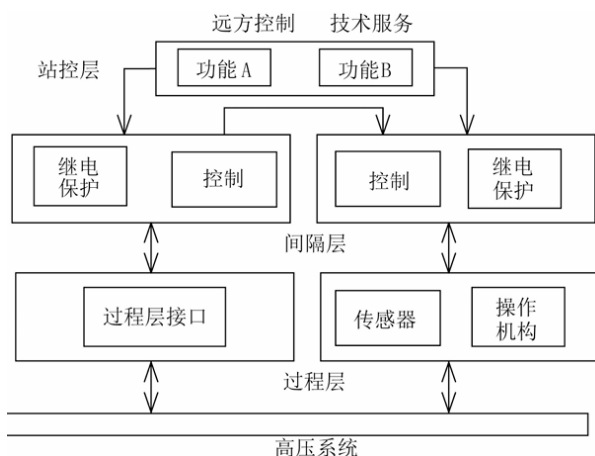


图1 变电站自动化系统结构

图1展示了变电站自动化系统的基本结构，体现了监控、控制与执行之间的有效互动。各层之间的紧密配合使得变电站能够实现对电力设备的精准管理与高效调度。在结构设计时，通信协议的选择至关重要，直接关系到各层数据传输的效率与稳定性。常见的通信协议包括 Modbus 与 IEC 61850。其中，IEC 61850 因其高度的兼容性与可扩展性而受到青睐，已成为现代变电站设计的首选。

3.2 35kV 线路保护配置

在电力系统中，35kV 线路的保护配置显得尤为重要。合理的保护措施能够有效监测线路状态，并在故障发生时迅速切断电源，从而保障系统安全稳定运行。线路保护主要包括过流保护、差动保护及地故障保护。差动保护的实现基于比较进出线路的电流，遵循“输入电流等于输出电流”的原则。超过设定整定值时，保护装置迅速触发，保障线路的安全运行。地故障保护作为 35kV 线路保护的重要组成部分，主要通过零序电流互感器实现。零序电流的计算公式为： $I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$ ，在此， I_a 、 I_b 、 I_c 分别为三相电流。

若 I_0 超过设定值，则表明发生了地故障，保护设备会立即切断故障部分电源，以防止事故的扩展。

3.3 自动化系统功能实现

自动化系统的主要包括监测、控制、报警及数据处理等多个方面。监测功能通过传感器与监控系统实时获取变电站各项运行数据，如电流、电压及功率。在此基础上，控制系统能够远程对设备进行控制，利用逻辑控制与设定的运行策略，确保设备的精确调度。报警系统依据设定的阈值进行监测，任何参数超出正常范围时，系统立即触发报警，提示操作人员采取相应措施。报警的实现可用以下逻辑表达式表示： $A = \text{if}(P > P_{\max}) \text{ then Alarm}$ ，在此，A表

示报警信号，P为监测参数， $P_{\max}$ 为设定的最大阈值。数据处理作为自动化系统核心功能之一，通过对监测到的数据进行分析与处理，生成设备运行状态的历史记录与统计报表。这些数据不仅为日常维护提供依据，也为后续的设备优化与故障预测提供支持。

总之，变电站的自动化系统设计涵盖了系统结构、线路保护及功能实现等多个方面。通过合理配置保护措施，结合先进的监测与控制技术，变电站的运行效率与安全性得以有效提高。随着电力系统不断发展，变电站的自动化水平必将持续提升，为电力行业的可持续发展奠定坚实基础。

4 变电站继电保护的技术优势

4.1 实时监测

变电站继电保护系统具备强大的实时监测能力，能够持续跟踪电力设备的运行状态。通过高效的传感器与数据采集装置，关键参数如电流、电压、功率与温度等得以持续收集。这些数据的即时获取，确保了对设备状况的全面掌控，使潜在的故障隐患可以被及早识别。在实时监测过程中，现代继电保护系统通常应用高频率采样技术，以每秒几百次的频率对电流与电压进行连续监测。快速更新的数据使监测结果几乎实时可见，为后续决策提供了可靠依据。当异常情况出现时，系统能够立即发出警报，通知相关人员采取必要措施，从而有效降低事故发生风险^[5]。该系统还具备远程访问能力，在人员无法直接到达现场的情况下，数据分析平台不仅实时显示设备状态，还能够存储历史数据，为后期分析与优化使用提供支持。

4.2 故障诊断

故障诊断能力是继电保护系统的另一大优势，迅速定位与处理故障的能力在电力系统中至关重要。通过分析实时监测数据，继电保护系统能够准确判断故障类型与位置，并及时采取相应的保护措施。当故障发生时，继电保护装置利用多种保护策略，如差动保护、过流保护与地故障保护，迅速识别故障原因。例如，系统通过差动电流变化来判断故障。当检测到这种变化时，能够快速确定故障源，方法是比较进入与退出设备的电流。此外，智能算法可对故障进行分类，如短路故障、接地故障或设备过热，基于特定特征进行对比分析，以最短时间做出判断。

4.3 系统可靠性

继电保护技术的系统可靠性作为核心优势，现代继电保护系统采用冗余设计与多重保护策略，确保在各种情况下系统均能正常工作。无论是硬件还是软件，系统均具备高抗干扰能力与故障容忍度。在硬件层面，继电保护装置通常配置双重或多重电源，以避免因电源故障导致系统瘫痪。此外，重要组件如传感器与计算单元也可实现冗余配置，从而确保单一设备失效时系统依然能够正常运行。在软件方面，继电保护系统采用模块化设计，确保各个功能模块独立运行。若某个模块发生故障，其他模块仍可保持

正常功能。此种设计提升了系统的可维护性,运维人员可在不影响整体系统的情况下,对故障模块进行检修或更换。在实际应用中,通过自动化控制,现代继电保护技术实现了快速切断故障设备,显著降低了事故对整个电力系统的影响。电力系统恢复的迅速性与可靠性确保了电力供应的连续性,为用户提供了稳定的电力服务。

5 结论

随着智能化、数字化及网络化的深入推进,传统保护技术向更高效与更可靠的方向发展。智能算法与大数据分析的结合,大幅提升了故障预测与诊断的准确性。物联网技术的引入,确保了设备间信息的共享与协同处理。在技术进步的同时,安全性与标准化问题也应受到重视。在保障网络安全的基础上,设备与系统间的互联互通显得尤为关键。行业标准的制定与实施,进一步促进了设备间的兼容性与系统的灵活性,从而提升了整体运行效率。未来,变电站继电保护将继续朝着智能、绿色与可持续的方向发

展,以应对不断变化的电力市场需求与技术挑战。

【参考文献】

- [1] 宋小舟,刘怀宇,陈昊,等.面向功能的新型智能变电站通用 IED 设计及其应用[J].广东电力,2022,35(9):67-74.
 - [2] 姜明学.智慧矿山建设供电保护装置通讯问题分析及研究[J].能源科技,2023,21(3):84-86.
 - [3] 顾敏,顾玲玲,浦源.智能变电站技术及其工程应用[J].电工技术,2023(20):164-166.
 - [4] 徐聪,徐念云,沈晓东.智能变电站电子式电流互感器输出异常缺陷处理[J].山西电力,2024(1):24-28.
 - [5] 王力,王军,黄文辉,等.基于 Labview 的配电网变电站短路电流计算[J].电气传动自动化,2024,46(2):47-50.
- 作者简介:黎卡(1986.4—),男,广东高州人,广东工业大学电气工程及其自动化专业,深圳市输变电工程有限公司技术专家,高级工程师(副高级)。