

# 电力系统保护与控制策略研究

戴威林

江西赣坤电力设计有限公司 江西南昌 330000

**摘要：**本文系统研究了现代电力系统背景下的保护与控制策略。首先，阐述了保护与控制的基本理论、协同关系及新能源接入带来的新要求。其次，针对传统保护的局限性，深入探讨了自适应保护、广域保护系统等先进保护策略的设计与实现，并提出了提升保护装置可靠性与快速性的方法。再次，在控制策略方面，分析了系统稳定控制、智能控制技术应用、分布式电源接入下的控制调整以及系统恢复与黑启动等关键策略。研究表明，通过保护与控制的深度融合与智能化升级，构建协同、自适应、快速响应的体系，是应对现代电力系统复杂性、保障其安全稳定运行的核心路径与必然趋势。

**关键词：**电力系统；继电保护；稳定控制；自适应保护

## 引言

电力系统是国民经济的关键基础设施，其安全稳定运行至关重要。继电保护与控制系统作为保障电网安全的“第一道防线”和“第二道防线”，是维系系统稳定的核心技术。然而，随着电网规模持续扩大、结构日趋复杂，特别是以风、光为代表的分布式电源大规模接入，电力系统的动态特性与故障特征发生了深刻变化，传统基于固定整定值和本地信息的保护控制策略面临适应性差、选择性不足、响应速度慢等严峻挑战。在此背景下，研究面向现代电力系统的先进保护与控制策略，提升其智能化、协同化与自适应水平，已成为当前电力领域亟待解决的重大课题。

## 一、电力系统保护与控制的基本理论

### （一）电力系统保护的基本概念与分类

电力系统保护是检测系统异常或故障，采取措施隔离故障元件、限制影响范围，保障系统安全稳定运行的技术体系。其功能包括故障检测、定位、切除及系统恢复。按保护对象分，有发电机、变压器、线路、母线及电动机保护等；按保护原理分，有过电流、距离、差动、方向及频率保护等。各类保护装置需满足选择性、速动性、灵敏性和可靠性要求，确保准确快速动作，减少设备损坏和停电范围。保护技术进步，如数字化保护、智能终端应用，提升了系统故障处理与自动化水平。

### （二）电力系统控制的基本任务与方式

电力系统控制的基本任务是维持系统频率、电压、功率潮流等参数在规定范围，确保电能质量与系统稳定。

控制方式有自动与手动控制，自动控制又分本地与远方控制。本地控制基于就地测量信号，如AVR、AGC等；远方控制依托调度自动化系统，如EMS、WAMS等，实现全局优化控制。控制策略分稳态与动态控制，稳态控制针对正常运行参数调节，如电压调整、无功优化；动态控制应对系统扰动或故障，如低频减载、自动重合闸等。现代电力系统控制强调实时性、精确性与协调性，通过多时间尺度控制手段，实现不同工况下系统稳定运行<sup>[1]</sup>。

### （三）保护与控制之间的关系与协同机制

电力系统保护与控制虽然功能不同，但在系统安全运行中密切相关、相辅相成。保护侧重于故障后的快速响应，通过切除故障元件防止事故扩大；控制则侧重于系统状态的实时调节，通过参数优化维持系统稳定。二者之间的协同机制主要体现在以下几个方面：一是信息共享，保护装置的动作信号可作为控制系统的输入，如故障位置信息用于调整系统潮流；二是功能互补，控制系统通过预防性措施减少故障发生概率，保护系统通过快速动作减轻控制系统负担；三是时间配合，保护动作通常在毫秒级完成，控制响应则在秒级至分钟级实现，形成快速保护与慢速控制的时序协同；四是目标一致，二者共同致力于提高系统的安全性、可靠性与经济性。现代电力系统中，保护与控制的协同已从传统的独立运行向一体化方向发展，如广域保护系统（WAPS）与广域测量系统（WAMS）的融合，进一步提升了系统的整体安全性与可靠性。

### （四）现代电力系统对保护与控制的新要求

随着电力系统规模的扩大、结构的复杂化及新能源

的大规模接入，传统保护与控制技术面临新的挑战，现代电力系统对保护与控制提出了更高要求。一是高可靠性，要求保护与控制系统在极端工况下（如新能源波动、多故障并发）仍能准确动作，避免误动或拒动；二是快速性，要求保护装置在毫秒级内完成故障检测与切除，控制系统在秒级内实现稳定恢复，以适应系统动态特性的变化；三是灵活性，要求保护与控制策略能够根据系统运行方式的变化自适应调整，如新能源出力波动、负荷突变等情况下的动态响应；四是智能化，要求引入人工智能、大数据分析等技术，实现故障预测、风险评估及优化决策，提升系统的自愈能力与运行效率；五是兼容性，要求保护与控制系统能够与新能源设备、分布式电源及智能电网设备无缝对接，支持多能源互补与协同运行。这些新要求推动了保护与控制技术的创新与发展，为现代电力系统的安全、稳定、高效运行提供了重要支撑<sup>[2]</sup>。

## 二、电力系统保护策略研究

### （一）传统保护策略的局限性分析

传统电力系统保护策略基于固定整定值与预设逻辑，主要针对稳态运行工况设计，在系统结构简单、运行方式稳定的条件下具备较高可靠性。然而，随着电力系统规模扩大、结构复杂化及新能源大规模接入，传统保护策略的局限性日益凸显。一是适应性不足，传统保护装置的整定值通常基于离线计算，难以适应系统运行方式的动态变化，如新能源出力波动、负荷突变等情况，易导致保护误动或拒动；二是选择性受限，在复杂网络或多故障并发情况下，传统保护难以准确识别故障区域，可能造成非故障区域误切，扩大停电范围；三是速动性不足，传统保护依赖本地测量信息，缺乏全局视角，故障检测与切除时间较长，难以满足现代电力系统对快速恢复的要求；四是可靠性挑战，传统保护装置在极端工况（如电磁干扰、设备老化）下易出现性能下降，影响系统安全。这些局限性促使电力系统保护策略向智能化、自适应化方向发展。

### （二）自适应保护策略的设计与实现

自适应保护策略通过实时监测系统运行状态，动态调整保护参数与逻辑，以适应系统变化。其设计核心包括状态感知、参数整定与逻辑优化三个环节。状态感知依托同步相量测量单元（PMU）、智能电子设备（IED）等实时采集系统电压、电流、频率等关键参数，构建系统动态模型；参数整定基于在线计算与人工智能算法，如神经网络、模糊逻辑等，根据系统运行方式自动调整保护定值，确保保护动作的准确性与选择性；逻辑优化通过引入专家系统与决策树，优化保护动作顺序，减少

误动与拒动风险。自适应保护的实现需依托高速通信网络与高性能计算平台，如基于IEC 61850标准的数字化保护系统，实现数据的实时传输与处理。实际应用中，自适应保护已在新能源并网、特高压输电等场景中展现出显著优势，有效提升了系统的灵活性与可靠性<sup>[3]</sup>。

### （三）广域保护系统的构建与关键技术

广域保护系统（WAPS）通过全局测量与协同控制，实现电力系统的大范围故障检测与隔离。其构建包括测量层、通信层、决策层与执行层四个部分。测量层部署PMU、IED等设备，采集全网同步相量数据；通信层依托光纤网络、5G等高速通信技术，实现数据的低延时传输；决策层采用集中式或分布式架构，通过人工智能算法（如深度学习、强化学习）分析系统状态，识别故障类型与位置；执行层通过断路器、保护装置等设备执行隔离与恢复操作。关键技术包括同步相量测量技术、广域通信技术、智能决策算法与协同控制策略。其中，同步相量测量技术确保数据的时空一致性；广域通信技术保障数据传输的实时性与可靠性；智能决策算法提升故障识别的准确性与速度；协同控制策略实现多区域保护的联动动作。广域保护系统的应用，显著提升了电力系统对复杂故障的应对能力，为大规模互联电网的安全运行提供了技术支撑。

### （四）保护装置的可靠性与快速性提升方法

保护装置的可靠性与快速性是电力系统安全运行的核心保障。可靠性提升方法包括硬件冗余设计、软件容错技术与状态监测与维护。硬件冗余设计采用双套或多套保护装置并行工作，通过“三取二”等逻辑避免单点故障；软件容错技术通过模块化设计、异常检测与自动恢复机制，减少软件缺陷导致的保护失效；状态监测与维护依托传感器与数据分析，实时监测装置运行状态，预测潜在故障并提前干预。快速性提升方法包括高速采样技术、并行处理算法与优化动作逻辑。高速采样技术通过提高采样率（如每周波256点），缩短故障检测时间；并行处理算法利用多核处理器或FPGA，实现数据采集、分析与执行的并行处理；优化动作逻辑通过简化判据、减少中间环节，缩短保护动作时间。此外，新型保护装置（如基于IEC 61850-9-2的数字化保护）的应用，进一步提升了可靠性与快速性，为现代电力系统的高效运行提供了保障<sup>[4]</sup>。

## 三、电力系统控制策略研究

### （一）电力系统稳定控制的基本策略

电力系统稳定控制的核心目标是维持系统在受到扰

动后能够迅速恢复到稳定运行状态，防止失稳、振荡或崩溃。其基本策略包括预防控制、紧急控制与恢复控制三个层次。预防控制通过在线监测系统运行状态，评估稳定裕度，提前调整发电机出力、负荷分配或无功补偿，以避免系统进入不稳定区域；紧急控制则在检测到系统失稳迹象（如功角振荡、频率偏移）时，快速执行切机、切负荷、投制动电阻等措施，限制扰动影响范围；恢复控制侧重于系统扰动后的重建，包括同步并网、负荷恢复与电压调整等操作。稳定控制策略的实施依赖于精确的模型计算、快速的决策逻辑与可靠的执行机构，是保障电力系统安全运行的关键环节。

### （二）智能控制在电力系统中的应用

智能控制技术通过引入人工智能、机器学习与自适应算法，提升电力系统控制的精度与适应性。模糊控制利用模糊逻辑处理系统中的不确定性与非线性，适用于电压调节、频率控制等场景；神经网络控制通过训练历史数据，建立系统动态模型，实现负荷预测、故障诊断与优化决策；专家系统结合领域知识与规则库，为复杂工况提供决策支持，如无功优化、故障恢复等；自适应控制则根据系统实时状态调整控制参数，增强系统对扰动的鲁棒性。智能控制技术的应用，显著提升了电力系统的自动化水平与响应速度，为复杂工况下的稳定运行提供了技术保障<sup>[5]</sup>。

### （三）分布式电源接入下的控制策略调整

分布式电源（如光伏、风电、储能）的大规模接入，改变了电力系统的传统结构与运行特性，对控制策略提出了新的要求。一是功率波动控制，分布式电源出力受天气影响较大，需通过储能系统、需求响应或虚拟电厂技术平抑波动；二是电压与频率调节，分布式电源的惯性较低，需引入虚拟同步机技术或快速调频装置，维持系统电压与频率稳定；三是保护配合调整，分布式电源的接入改变了短路电流分布，需重新整定保护参数或采用方向性保护，避免误动或拒动；四是孤岛运行控制，在主网故障时，分布式电源需具备孤岛检测与自主运行能力，确保局部供电可靠性。控制策略的调整，需结合分布式电源的特性与系统需求，实现新能源与传统电源的协同运行。

### （四）系统恢复与黑启动控制策略

系统恢复与黑启动控制是电力系统在大面积停电后快速重建的关键技术。黑启动控制策略依托具备自启动能力的电源（如水电、燃气轮机），逐步恢复系统供电，其核心步骤包括黑启动电源启动、骨干网络重建、负荷

逐步接入与系统同步并网。系统恢复控制则侧重于恢复过程中的电压、频率与潮流控制，避免过电压、过负荷或振荡等问题。为提升恢复效率，需制定分区恢复方案，优先恢复重要负荷（如医院、通信），并通过无功补偿、负荷投切等措施维持系统稳定。此外，黑启动试验与仿真分析是验证控制策略有效性的重要手段，可为实际恢复操作提供参考。系统恢复与黑启动控制策略的完善，显著提升了电力系统应对极端事件的能力，为供电可靠性提供了最终保障。

### 结语

面对现代电力系统的新挑战，保护与控制技术正从传统的独立、静态模式向协同、动态、智能化的方向深刻变革。自适应保护与广域保护系统的应用，显著提升了故障处理的精准性与全局性；智能控制技术与针对分布式电源的专项控制策略，有效增强了系统运行的灵活性与鲁棒性。展望未来，随着数字孪生、人工智能、物联网等新一代信息技术的深度融合，电力系统保护与控制将迈向更高阶的“智慧”阶段。未来的研究应聚焦于基于全景信息的保护控制一体化决策、海量数据驱动的系统风险预测与自愈控制，以及极端事件下的系统韧性提升，最终构建起具备高度感知、智能决策、快速响应和自愈能力的现代化电力系统，为实现“双碳”目标和能源转型提供坚实保障。

### 参考文献

- [1] 张伟亮. 直流微网群落功率平衡控制与短路故障保护策略研究[D]. 西安理工大学, 2022.
- [2] 张明锐, 宋柏慧, 王佳莹, 等. 基于模型预测控制的固态变压器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 047(001): 129-137. DOI: 10.7667/PSPC171853.
- [3] 范小红, 孙士云, 张雪娟, 等. 双馈风电场短路电流特性对距离保护的影响及保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190594.
- [4] 杨海柱, 岳刚伟, 康乐. 微网分段动态自适应下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 8. DOI: 10.7667/PSPC180543.
- [5] 康晴, 罗奕, 卢新佳, 等. 基于变流器控制策略的微电网故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 047(002): 147-153. DOI: 10.7667/PSPC180040.