

电力系统的控制与优化

高学军¹ 高恺阳²

1. 鄂尔多斯供电公司变电管理二处 内蒙古 鄂尔多斯 017100

2. 石河子大学 新疆 石河子 832061

摘要: 在全球能源结构转型与电力需求增长的双重驱动下, 电力系统正面临前所未有的技术挑战。本文探讨了电力系统的控制与优化的核心作用, 分析了传统控制方法与现代控制方法的原理及应用场景, 综述了经济调度、最优潮流及智能优化算法等优化方法。阐述了控制与优化方法在电力系统稳定性、分布式能源与微电网、智能电网及灵活性提升中的具体应用, 包括宽频带振荡抑制、多能源协同调度、源网荷储一体化控制等创新实践。研究指出, 随着新能源占比提升及用户侧负荷特性复杂化, 控制与优化技术将成为电力系统向低碳化、智能化转型的关键支撑。

关键词: 电力系统; 控制方法; 优化方法; 应用

引言: 控制与优化方法作为电力系统的“智慧大脑”, 通过实时感知、智能决策与自主优化, 成为应对这些挑战的关键手段。本文从控制与优化方法的重要性出发, 系统梳理了其发展脉络与方法体系, 并深入分析了在电力系统稳定性、分布式能源与微电网控制、智能电网及灵活性提升等场景中的具体应用。通过揭示控制与优化技术对电力系统发展的支撑作用, 旨在为构建高效、可靠、低碳的现代电力系统提供理论参考与技术指导。

1 控制与优化对电力系统发展的重要性

随着全球能源结构的转型和电力需求的持续增长, 电力系统正面临前所未有的挑战与机遇。在这一背景下, 控制与优化技术作为电力系统的核心支撑, 其重要性体现在以下方面: (1) 保障电力系统安全稳定运行。电力系统需实时平衡发电与负荷, 任何扰动(如设备故障、负荷突变)都可能引发连锁反应。先进的控制技术(如自动电压控制、频率调节)能够快速响应异常, 抑制系统振荡, 防止大面积停电。优化算法则通过精准预测负荷与新能源出力, 合理分配发电资源, 降低系统过载风险, 提升稳定性。(2) 提升能源利用效率与经济性。传统电力系统存在发电成本高、弃风弃光等问题。优化技术通过经济调度和最优潮流模型, 在满足安全约束的前提下, 最小化发电成本与网损。(3) 支撑高比例新能源并网。风电、光伏等新能源具有间歇性和波动性, 大规模接入对系统调峰、调频能力提出更高要求。控制技术(如虚拟同步机、储能协调控制)可模拟传统发电机的惯性响应, 增强系统灵活性; 优化技术则通过多时间尺度调度, 平衡新能源出力与负荷需求, 提升消纳能力。(4) 推动智能电网与能源互联网发展^[1]。智能电网依赖信息物理系统实现设备互联与数据共享, 控制

与优化技术是其实时感知、决策与执行的基础。

2 电力系统控制方法

2.1 传统控制方法

2.1.1 经典PID控制在频率与电压调节中的应用

PID控制通过比例、积分、微分三个环节的组合, 实现对系统偏差的快速响应与稳态误差消除。在电力系统频率调节中, PID控制器根据频率偏差调整发电机出力, 维持系统频率稳定; 在电压调节中, 通过控制变压器分接头或无功补偿装置, 保持节点电压在允许范围内。传统AGC(自动发电控制)系统采用PID控制实现区域频率偏差的快速修正, 但其参数需根据系统运行工况手动调整, 难以适应新能源出力波动与负荷突变场景。

2.1.2 线性最优控制(LQR)与鲁棒控制策略

LQR通过二次型性能指标的最小化, 设计出最优状态反馈控制器, 在发电机励磁控制、调速控制中广泛应用。LQR控制器可优化发电机转子角速度与端电压的动态响应, 抑制低频振荡。然而, LQR依赖系统精确模型, 对参数不确定性与外部扰动敏感。鲁棒控制通过引入不确定性描述, 设计出对模型误差与干扰具有鲁棒性的控制器, 在多机互联系统中可有效抑制次同步振荡, 但其设计复杂度较高, 需权衡保守性与性能。

2.2 现代控制方法

2.2.1 状态空间法与模型预测控制(MPC)

状态空间法通过构建系统状态方程, 实现多变量、强耦合系统的统一描述。在电力系统动态安全分析中, 基于状态空间模型的时域仿真可预测系统受到扰动后的暂态响应, 为控制策略设计提供依据。MPC则在此基础上, 通过滚动优化与反馈校正, 实现多目标协同控制。在风电并网系统中, MPC可同时优化频率调节、电压

支撑与经济调度目标,通过预测未来风电出力与负荷需求,提前调整机组出力与储能充放电策略,提升系统灵活性与经济性。

2.2.2 分布式控制与多智能体系统(MAS)

分布式控制通过局部信息交互实现全局目标,适用于大规模互联系统。在微电网中,各分布式电源通过通信网络交换状态信息,基于一致性算法实现功率均分与电压协调控制。MAS则进一步引入智能体自主决策能力,通过协商机制解决资源分配冲突^[2]。在电力市场环境下,多个发电单元作为智能体,通过拍卖机制竞争出清电价,实现经济调度与系统安全的协同。

3 电力系统优化方法

3.1 经济调度与最优潮流(OPF)

经济调度(ED)与最优潮流(OPF)是电力系统优化的经典框架。ED通过最小化发电成本函数,在满足负荷需求与机组出力约束的条件下,确定各发电机组的出力分配。其核心是构建以燃料成本为目标的二次规划模型,利用拉格朗日乘数法或内点法求解,实现发电资源的经济性利用。但ED仅关注发电侧成本,未考虑网络损耗与电压约束,可能导致局部过载或电压越限。OPF在此基础上引入潮流方程约束,将网络损耗、电压幅值、相角差等物理量纳入优化目标,形成非线性规划问题。通过求解OPF,可同时优化发电成本与系统运行状态,例如在新能源高渗透场景下,通过调整风电、光伏的出力与储能的充放电策略,降低弃风弃光率与网损。但OPF的计算复杂度随系统规模呈指数增长,传统方法难以应对大规模互联电网的实时优化需求。

3.2 智能优化算法

智能优化算法通过模拟自然现象或生物行为,在解空间中高效搜索最优解,成为解决大规模电力系统优化问题的关键工具。粒子群优化(PSO)算法通过模拟鸟群觅食行为,利用个体最优与全局最优的引导机制,快速收敛至近似最优解。在机组组合问题中,PSO可同时考虑机组启停成本与运行成本,通过迭代更新粒子位置与速度,避免陷入局部最优。遗传算法(GA)则借鉴生物进化原理,通过选择、交叉、变异等操作实现解的优胜劣汰。在无功优化中,GA可对变压器分接头位置、无功补偿装置容量等离散变量进行编码,通过适应度函数评估解的质量,逐步逼近最优配置。深度强化学习进一步将深度神经网络与强化学习结合,通过与系统环境的交互学习最优控制策略。

3.3 多目标优化与权衡分析

现代电力系统需同时兼顾经济性、安全性、环保性等

多重目标,传统单目标优化方法难以满足需求。多目标优化(MOO)通过构建包含多个冲突目标的数学模型,寻求最优解集,为决策者提供多样化的权衡方案。在新能源并网规划中,MOO可同时最小化投资成本、网络损耗与碳排放量,通过解的分布特性揭示各目标间的制约关系。权衡分析则进一步量化不同目标间的相对重要性,为决策提供科学依据。层次分析法通过构建判断矩阵,将定性指标转化为定量权重,适用于政策导向较强的优化场景;模糊综合评价法则利用隶属度函数处理目标的不确定性,适用于新能源出力波动下的短期调度^[3]。随着分布式能源与需求响应资源的广泛接入,多目标优化与权衡分析将更加注重时空分布特性与用户行为偏好。

4 电力系统中控制与优化方法的应用

4.1 在电力系统稳定性中的分析与控制

电力系统稳定性其核心是应对各类扰动(如短路故障、负荷突变、新能源出力波动)后,系统能否维持同步运行并恢复至稳态。传统稳定性分析主要基于时域仿真、特征值分析等方法,但面对高比例新能源接入的复杂系统,传统方法难以捕捉系统动态特性的非线性、时变特征。为此,现代稳定性控制技术从以下三方面展开应用:

(1) 宽频带振荡监测与抑制。新能源发电单元(如风电机组、光伏逆变器)通过电力电子设备并网,其快速响应特性可能引发宽频带振荡(如次同步振荡、高频谐波振荡)。基于相量测量单元的广域测量系统可实时监测系统振荡模式,结合Prony分析、小波变换等信号处理技术提取振荡特征。在此基础上,采用附加阻尼控制器或优化储能系统的充放电策略,可有效抑制振荡。(2) 暂态稳定快速控制。暂态稳定控制需在扰动发生后数百毫秒内采取措施,防止系统解列。传统切机、切负荷策略依赖固定阈值,易导致控制过度或不足。基于机器学习的暂态稳定评估方法(如卷积神经网络处理PMU数据)可实时预测系统稳定性,并动态调整控制策略。通过深度强化学习训练的控制策略,可根据系统状态自动选择最优切机方案,在保证稳定性的同时减少切负荷量。(3) 电压稳定与无功优化。新能源接入可能导致局部电压越限,威胁系统安全。基于多智能体系统(MAS)的分布式电压控制方法,通过相邻节点间的信息交互协调无功补偿设备的投切,可实现全局电压优化。

4.2 在分布式能源与微电网控制

分布式能源(如风电、光伏、燃气轮机)的间歇性与不确定性,以及微电网“即插即用”的运行需求,对控制技术提出了更高要求。微电网控制需兼顾经济性、可靠性与环境效益,其核心应用包括以下方面:多能源

协同调度。微电网内包含多种能源形式，需通过优化调度实现互补运行。基于模型预测控制的能量管理系统，可结合短期负荷预测与新能源出力预测，动态调整各单元出力。该系统通过滚动优化策略，在每个控制周期内根据实时数据更新预测模型，生成未来时域内的最优控制序列。在调度过程中，需考虑不同能源的启动/停机成本、爬坡速率约束及环境排放指标，通过加权目标函数实现多目标优化。（2）孤岛/并网模式平滑切换。微电网需具备孤岛与并网模式的无缝切换能力。基于虚拟同步发电机技术的逆变器控制方法，通过模拟同步发电机的惯性响应与调频调压特性，可增强微电网的孤岛运行稳定性。VSG控制策略通过引入虚拟惯量、阻尼系数及一次调频/调压环节，使逆变器在孤岛模式下表现出与同步发电机相似的动态特性。在模式切换过程中，需设计协调控制策略以平滑过渡，避免频率/电压突变。（3）需求响应与用户侧控制。基于区块链技术的去中心化需求响应平台，可实现用户与微电网运营商之间的透明交易。该平台通过智能合约自动执行负荷调整指令，并利用加密技术保障交易数据的安全性与不可篡改性。用户侧控制需设计分层架构，上层负责需求响应策略制定，下层实现分布式设备的本地控制。通过引入用户偏好模型，可优化负荷调整方案，提升用户参与积极性。

4.3 在智能电网中的控制与优化

智能电网通过信息通信技术与电力技术的深度融合，实现系统的全面感知、智能决策与自主优化。其控制与优化技术主要体现在以下方面：（1）状态估计与广域监测。基于同步相量测量单元与智能电表的海量数据，智能电网可构建高精度状态估计模型，实时感知系统运行状态。（2）多时间尺度优化调度。智能电网需兼顾日前计划、日内滚动、实时控制的协同优化。基于混合整数线性规划与鲁棒优化的调度模型，可处理新能源出力与负荷的不确定性。（3）网络安全与弹性控制。智能电网的信息化特性使其面临网络攻击风险。基于零信任架构的网络安全防护体系，结合动态拓扑重构与弹性控制策略，可提升系统抗攻击能力。

4.4 在电力系统灵活性提升中的控制与优化应用

随着新能源占比的持续攀升及用户侧负荷特性的复杂化，电力系统的灵活性需求愈发迫切。控制与优化技术在提升系统灵活性方面展现出显著价值，主要体现在以下三方面：（1）储能系统协同优化调度。储能装置（如电池储能、抽水蓄能）作为灵活性资源，其充放电策略需与新能源出力、负荷需求精准匹配。基于强化学习的储能调度模型可动态学习系统运行规律，通过构建“储能-新能源-负荷”协同优化框架，实现储能容量在削峰填谷、频率调节、新能源消纳等多场景下的高效利用。（2）柔性负荷主动参与调控。工业、商业及居民负荷中的柔性资源（如可中断负荷、可调节空调）可通过需求侧响应技术参与系统调控。基于博弈论的激励机制设计，可引导用户根据电价信号或系统紧急需求自主调整用电行为。（3）源网荷储一体化控制架构。传统电力系统控制以“源随荷动”为主，而源网荷储一体化架构通过信息物理系统实现发电、输电、配电、用电及储能环节的协同调控^[4]。基于数字孪生技术的虚拟电厂平台，可实时映射物理系统的运行状态，并通过多智能体协调算法优化各环节的调度策略。

结束语：电力系统控制与优化技术作为保障能源安全、提升能源利用效率、推动能源转型的核心手段，其重要性在能源结构转型与智能电网发展的背景下愈发凸显。从传统控制方法到现代智能优化技术，从单一环节优化到源网荷储一体化协同，控制与优化技术的演进不断推动着电力系统向更高效、更灵活、更可靠的方向发展。

参考文献

- [1] 齐宇文, 兰兵权, 王强. 新能源电力系统控制与优化措施浅析[J]. 模型世界, 2024(3):132-134.
- [2] 姬凯英. 新能源电力系统的控制与优化措施分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(12):222-223.
- [3] 茹琦. 新能源电力系统优化控制方法及关键技术[J]. 现代工业经济和信息化, 2019, 9(3):51-52.
- [4] 翁智敏, 朱振山, 温步瀛, 郑海林, 陈哲盛, 林文键. 高比例新能源电力系统研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2021(11):1-7.