

基于多源协调控制的孤网电力系统频率稳定性优化策略研究

张贻娜

中广核研究院有限公司 广东 深圳 518000

摘要：本文聚焦基于多源协调控制的孤网电力系统频率稳定性优化策略。阐述了孤网运行定义、特点及频率稳定性问题，指出多源协调控制的重要性。介绍多源协调控制策略与关键技术，包括策略设计、储能技术优化、智能控制算法应用等。最后设计基于多源协调控制的频率稳定性优化策略总体架构，提出多源电源协调控制策略、频率稳定闭环控制算法及通信与协调机制，为孤网电力系统频率稳定运行提供理论支持。

关键词：孤网电力系统；多源协调控制；频率稳定性；优化策略

1 孤网电力系统概述

1.1 孤网运行定义与特点

孤网运行是指电网与大电网断开连接，独立运行的电力系统。这种情况可能出现在一些偏远地区、海上平台或特定工业园区，由于地理位置、经济成本或技术条件限制，无法与大电网实现互联互通。孤网运行具有诸多显著特点，从电源结构上看，孤网中的电源类型往往较为单一或有限，可能以柴油发电机、小型水电站或风力、太阳能等可再生能源发电为主。这种电源结构的单一性使得孤网在应对负荷变化和故障时，调节能力相对较弱。在负荷特性方面，孤网的负荷通常具有波动大、变化快的特点。由于孤网覆盖区域较小，负荷类型可能较为集中，如工业园区的生产负荷会随着生产计划的变化而大幅波动，居民负荷也会随着作息时间呈现明显的峰谷差异。从稳定性角度而言，孤网由于缺乏大电网的支持，其频率和电压的稳定性更容易受到干扰。当电源出力与负荷需求不匹配时，孤网的频率和电压会发生较大变化，若不及时采取有效措施，可能导致系统崩溃，造成停电事故，严重影响孤网内用户的正常生产和生活。

1.2 孤网电力系统频率稳定性问题

孤网电力系统的频率稳定性是系统安全稳定运行的关键指标之一。频率稳定性问题主要源于电源出力与负荷需求之间的动态不平衡。当孤网内负荷突然增加时，若电源出力不能及时跟上，发电机的转速会下降，导致系统频率降低。频率降低会对孤网内的各类设备产生不利影响。对于电动机类负荷，频率降低会使电动机转速下降，影响其正常运行效率，甚至可能导致设备损坏。频率降低还可能引发保护装置误动作，进一步扩大事故范围^[1]。相反，当孤网内负荷突然减少时，电源出力过

剩，发电机转速上升，系统频率升高。频率升高会使发电机、变压器等设备的铁损增加，降低设备寿命，还可能影响一些对频率敏感的精密设备的正常运行。孤网电力系统的频率稳定性还受到电源调节特性的限制，不同类型的电源，如传统发电机、储能装置和可再生能源发电，其调节速度和调节范围各不相同。传统发电机调节速度相对较慢，可再生能源发电受自然条件影响较大，调节能力有限，这些都增加了维持孤网频率稳定性的难度。

1.3 孤网电力系统中的多源协调控制

在孤网电力系统中，多源协调控制是保障系统安全稳定运行的重要手段。由于孤网电源类型多样，包括传统发电机、储能装置、可再生能源发电等，各电源具有不同的运行特性和调节能力，因此需要通过多源协调控制来实现电源之间的优化配合。多源协调控制的目标是在满足孤网内负荷需求的前提下，合理分配各电源的出力，提高系统的频率稳定性和电压稳定性，降低运行成本，提高能源利用效率。在实际应用中，多源协调控制需要考虑各电源的实时运行状态、负荷需求预测、能源价格等因素。通过建立有效的协调控制机制，使各电源能够在不同工况下协同工作，共同应对孤网内的各种变化和故障。

2 多源协调控制策略与关键技术

2.1 多源协调控制策略设计

多源协调控制策略设计是孤网电力系统稳定运行的核心。在设计过程中，需要综合考虑孤网的电源结构、负荷特性、运行目标等因素。一种常见的多源协调控制策略是基于分层控制的思想。将孤网控制系统分为上层调度层、中层协调控制层和下层执行层。上层调度层主要负责根据负荷预测和能源价格等信息，制定孤网的长

期运行计划，确定各电源的发电任务和储能装置的充放电计划。中层协调控制层则根据上层调度层的指令，结合各电源的实时运行状态，对各电源的出力进行动态调整，确保系统频率和电压的稳定。下层执行层负责具体执行中层协调控制层的指令，控制各电源和储能装置的运行^[2]。另一种策略是基于优化算法的控制策略，通过建立孤网运行的多目标优化模型，将频率稳定性、电压稳定性、运行成本等作为优化目标，利用智能优化算法（如遗传算法、粒子群算法等）求解最优的电源出力分配方案。这种策略能够充分考虑孤网运行的各种约束条件，实现系统的优化运行。

2.2 储能技术的应用与优化

储能技术在孤网电力系统中具有重要作用，能够有效解决孤网内电源出力与负荷需求不匹配的问题，提高系统的频率稳定性和电压稳定性。常见的储能技术包括电池储能、超级电容储能、飞轮储能等。电池储能具有能量密度高、储能时间长等优点，适用于应对孤网内的长时间负荷波动。超级电容储能则具有充放电速度快、循环寿命长等特点，可用于快速调节孤网内的功率平衡。飞轮储能通过高速旋转的飞轮储存能量，具有响应速度快、效率高的优点，在孤网频率调节方面具有很好的应用前景。为了优化储能技术的应用，需要对储能装置的充放电策略进行合理设计。根据孤网的负荷需求预测和电源出力情况，确定储能装置的最佳充放电时间和功率，以实现储能装置的经济高效运行。同时还需要考虑储能装置的容量配置，根据孤网的规模和运行要求，合理确定储能装置的容量，确保其能够满足孤网在不同工况下的调节需求。

2.3 智能控制算法与优化调度策略

智能控制算法在孤网电力系统的多源协调控制中发挥着重要作用。随着人工智能技术的不断发展，越来越多的智能控制算法被应用于孤网控制领域。模糊控制算法能够处理孤网运行中的不确定性和非线性问题，通过建立模糊规则库，对孤网内的各电源进行智能控制。神经网络算法具有强大的自学习和自适应能力，能够根据孤网的历史运行数据，预测负荷需求和电源出力，为优化调度提供依据。强化学习算法则可以通过与孤网环境的交互，不断优化控制策略，实现孤网的最优运行。在优化调度策略方面，除了基于多目标优化模型的传统调度策略外，还可以结合智能控制算法，实现孤网的实时优化调度。

2.4 需求侧响应与负荷调控

需求侧响应和负荷调控是孤网多源协调控制的重要

组成部分。通过引导用户参与需求侧响应，调整用户的用电行为，可以在一定程度上缓解孤网内电源出力与负荷需求不匹配的问题。需求侧响应的方式包括价格型需求侧响应和激励型需求侧响应。价格型需求侧响应通过制定不同的电价政策，引导用户在电价低谷时段增加用电，在电价高峰时段减少用电。激励型需求侧响应则通过给予用户一定的经济补偿，鼓励用户在孤网需要时调整用电负荷。负荷调控技术主要包括直接负荷控制和间接负荷控制。直接负荷控制是指电力公司通过远程控制装置，直接切断或调节用户的部分用电设备。间接负荷控制则是通过发布负荷调控指令，引导用户自主调整用电负荷。在孤网电力系统中，可以根据孤网的运行状态，灵活运用需求侧响应和负荷调控技术，实现孤网内负荷的合理分配和优化调节^[3]。

3 基于多源协调控制的频率稳定性优化策略设计

3.1 优化策略总体架构设计

基于多源协调控制的频率稳定性优化策略总体架构设计需要考虑孤网电力系统的整体运行需求和各组成部分的相互关系。该架构主要包括数据采集层、分析决策层和控制执行层。数据采集层负责实时采集孤网内各电源的运行参数（如发电功率、电压、频率等）、负荷需求信息以及储能装置的状态信息等。这些数据是后续分析和决策的基础。分析决策层是优化策略的核心，它利用采集到的数据，结合多源协调控制策略和智能控制算法，对孤网的频率稳定性进行分析和评估，并制定相应的优化控制方案。该层需要考虑孤网的各种运行约束条件，如电源出力限制、储能装置充放电限制等，确保优化方案的可行性和有效性。控制执行层根据分析决策层制定的优化控制方案，对孤网内的各电源、储能装置和负荷进行实时控制，调整各电源的出力和储能装置的充放电功率，以实现孤网频率的稳定优化。

3.2 多源电源协调控制策略

多源电源协调控制策略在孤网电力系统中占据着核心地位，是实现孤网频率稳定性优化的关键所在。在实施协调控制的过程中，精准把握各电源的运行特性和调节能力，并以此为依据合理分配发电任务，是保障孤网稳定运行的重要前提。传统发电机具备调节速度较慢但调节范围较大的显著特点。当孤网频率变化相对较小且变化率较慢时，传统发电机能够凭借其较大的调节范围，承担起主要的频率调节任务。它就像一位沉稳的“调节者”，缓慢而有力地维持着孤网频率的基本稳定，确保系统在常规波动下能够平稳运行。可再生能源发电虽然清洁环保，但其出力受自然条件影响极大，具有很大的不确定性。

性。因此需要结合储能装置对其进行有效调节。当可再生能源发电充足时，储能装置就像一个巨大的“能量仓库”，将多余的电能储存起来；而当可再生能源发电不足时，储能装置则及时放电，补充电能，从而维持孤网的频率稳定。另外，在满足孤网频率稳定性的前提下，还需充分考虑各电源之间的经济性。优先启动成本较低的电源发电，不仅可以降低孤网的运行成本，还能提高能源利用效率，实现经济效益与环境效益的双赢。

3.3 频率稳定闭环控制算法

频率稳定闭环控制算法在孤网电力系统中扮演着至关重要的角色，是确保孤网频率稳定性的关键手段。该算法的核心在于实时监测孤网的频率变化情况，依据频率偏差精准地调整各电源的出力和储能装置的充放电功率，以此维持孤网频率在合理范围内波动，保障系统稳定运行。其中，基于比例-积分-微分（PID）控制算法是一种较为常见且应用广泛的频率稳定闭环控制算法。PID控制算法的计算依据是孤网频率的偏差、偏差变化率以及偏差积分值。通过对这些参数的综合考量，算法能够计算出合适的控制量，进而对电源出力和储能装置充放电功率进行及时调整。这种算法具有结构简单、易于实现等诸多优点，在许多传统工业控制场景中表现良好。然而，孤网运行环境复杂多变，存在诸多非线性和不确定性问题，如电源出力的突然变化、负荷的随机波动等。面对这些问题，单纯的PID控制算法可能难以达到理想的控制效果，此时就需要结合其他智能控制算法，如模糊控制、神经网络控制等，对其进行改进和优化，以提高算法对复杂环境的适应能力和控制精度。另一种基于模型预测控制（MPC）的频率稳定闭环控制算法则具有独特的优势。MPC算法通过建立孤网的动态模型，能够提前预测孤网在未来一段时间内的频率变化趋势。基于这些预测结果，算法可以制定出最优的控制策略，充分考虑孤网运行中的各种约束条件，如电源出力限制、储能装置充放电能力等，从而实现孤网频率的精确控制，为孤网的安全稳定运行提供有力保障。

3.4 通信与协调机制设计

通信与协调机制设计在孤网电力系统中占据着基础且关键的地位，它是保障孤网多源协调控制和频率稳定性优化策略得以有效实施的重要前提。在孤网电力系

统这一复杂网络里，各电源、储能装置、负荷以及控制中心之间必须进行实时、可靠的信息交互。任何信息传输的延迟或错误，都可能导致控制指令无法及时准确执行，进而影响整个系统的稳定运行。因此通信网络必须具备高带宽、低延迟、高可靠性的显著特点，以此确保各类数据能够准确无误地传输^[4]。在实际应用中，可以采用有线通信和无线通信相结合的方式。鉴于孤网内各设备分布情况多样、运行环境复杂，需根据具体场景选择合适的通信技术，例如在距离较近且环境稳定的区域可采用有线通信，而在设备分布分散或布线困难的区域则采用无线通信。协调机制设计同样不容忽视，它需要明确各设备之间的信息交互流程和控制权限。在孤网正常运行过程中，各设备要严格按照控制中心下达的指令，及时调整自身的运行状态。另外，各设备之间还应具备一定的协调能力，当孤网出现局部故障或异常情况时，能够自动进行协调调整，避免故障扩大化，从而确保孤网的整体稳定运行，为孤网内各类用户的正常用电提供坚实保障。

结束语

本文围绕孤网电力系统频率稳定性优化，深入探讨了基于多源协调控制的策略。通过分析孤网运行特性与频率稳定性问题，明确了多源协调控制在其中的关键作用。从策略设计、技术应用等多方面展开研究，提出一系列针对性措施。未来，随着技术发展，可进一步优化多源协调控制策略，提升孤网电力系统的智能化水平，保障其安全稳定运行，为偏远地区等孤网场景提供更可靠的电力供应。

参考文献

- [1] 李国庆, 刘先超, 辛业春, 等. 含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(03): 1165-1181.
- [2] 杨德健. 电力系统稳定性对大规模照明负荷影响的研究[J]. 中国照明电器, 2024, (03): 107-109.
- [3] 丁崎峰. 风电升压站变电对电力系统稳定性的影响及控制策略[J]. 光源与照明, 2025, (01): 225-227.
- [4] 袁娜. 电力系统动态潮流分析与暂态稳定性控制策略[J]. 光源与照明, 2024, (08): 207-209.