

电力系统中的无功优化与电压稳定控制研究

卢艳艳 赵雪洁

山东中茂实业集团有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i4.6663

[摘要] 随着可再生能源的大规模接入和电力电子设备的广泛应用，电力系统的无功特性发生了显著变化。可再生能源的间歇性和波动性给电力系统的无功平衡带来了新的挑战。同时，电力电子设备的非线性特性也对电压稳定产生了影响。这些因素使得无功优化与电压稳定控制问题变得更加复杂和多样化。因此，章聚焦于电力系统中的无功优化与电压稳定控制问题，旨在提升系统性能和保障稳定运行，通过对无功优化和电压稳定控制的深入研究，可以揭示两者之间的协同作用，在此基础上，提出了基于协同优化的控制策略，期望能为电力系统的优化与发展提供新视角。

[关键词] 电力系统；无功优化；电压稳定

Research on Reactive Power Optimization and Voltage Stability Control in Power Systems

Lu Yanyan and Zhao Xuejie

Shandong Zhongmao Industrial Group Co., Ltd

[Abstract] With the large-scale integration of renewable energy and the widespread application of power electronic devices, the reactive power characteristics of power systems have undergone significant changes. The intermittency and volatility of renewable energy pose new challenges to the reactive power balance of the power system. Meanwhile, the nonlinear characteristics of power electronic equipment also have an impact on voltage stability. These factors make reactive power optimization and voltage stability control problems more complex and diverse. Therefore, the chapter focuses on reactive power optimization and voltage stability control in the power system, aiming to improve system performance and ensure stable operation. Through in-depth research on reactive power optimization and voltage stability control, the synergistic effect between the two can be revealed. Based on this, a control strategy based on collaborative optimization is proposed, hoping to provide a new perspective for the optimization and development of the power system.

[Key words] power system; Reactive power optimization; Voltage stability

引言

电力系统的稳定运行对于现代社会至关重要，而无功优化与电压稳定控制则是保障其稳定性的两大关键问题。随着电力负荷的不断增长和电网结构的日益复杂，无功优化面临着新的挑战，其涉及系统中有功功率和无功功率的平衡，直接影响系统效率和电能质量。同时，电压稳定作为衡量电力系统安全性的关键指标，其控制策略的优化也显得尤为重要。无功优化与电压稳定控制之间密切相关，两者相互影响、相互促进。本文旨在深入探讨电力系统中的无功优化与电压稳定控制问题，分

析其内在关系，并提出有效的协同优化策略。通过本文的研究，期望能够为电力系统的安全稳定运行提供新的思路和方法，推动电力系统的优化与发展。

一、电力系统中无功优化的理论与方法

1. 无功优化的基本概念与原理

无功优化是电力系统运行管理中的重要环节。其旨在通过调整系统中的无功功率分布，实现系统电压水平的改善、网络损耗的降低以及电能质量的提高。在电力系统中，无功功率与电压水平密切相关，合理的无功配置是保证系统电压稳定和高

效运行的关键。无功优化的基本原理是基于电力系统潮流计算和无功平衡分析，通过优化算法求解出一组最优的无功补偿或调整策略，使得在满足系统约束条件的前提下，实现某个或多个优化目标的最优化。

2. 无功优化的数学模型与求解方法

无功优化的数学模型是一个复杂的非线性优化问题，其涉及到系统潮流方程、无功平衡方程以及各种约束条件的表达。通常，无功优化的数学模型可以表示为一个多目标、多约束的优化问题，其中目标函数可以是系统网络损耗的最小化、电压偏差的最小化等，约束条件则包括功率平衡约束、电压约束、无功设备容量约束等。在求解无功优化问题时，常用的优化算法包括数学规划法、智能优化算法以及启发式算法等。数学规划法如线性规划、非线性规划等，通过数学模型的建立和解析求解，能够找到问题的最优解或次优解。然而，由于无功优化问题的非线性和复杂性，数学规划法在实际应用中往往受到一定的限制；智能优化算法如遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等，通过模拟自然界的进化过程或群体行为，具有全局搜索能力和较好的鲁棒性，能够较好地处理无功优化问题中的非线性和约束条件，这些算法通过迭代搜索，不断寻找更优的解，直至满足收敛条件或达到预定的迭代次数；启发式算法则是基于经验和规则的优化方法，如基于专家系统的优化、基于模糊逻辑的优化等，这些算法根据电力系统的特点和运行经验，通过启发式规则来指导搜索过程，来寻找满足要求的解，启发式算法具有简单、直观的特点，但可能无法得到全局最优解^[1]。在实际应用中，为了求解无功优化问题，通常需要结合电力系统的特点和具体需求，选择合适的优化算法或算法组合，并进行适当的调整和优化。此外，还需要考虑算法的收敛性、计算效率以及在实际系统中的可实施性等因素。

二、电压稳定控制策略与技术 1500

1. 电压稳定的基本概念与影响因素

电压稳定是电力系统中的一个核心概念，其指的是在给定运行方式和受到扰动后，电力系统维持所有母线电压在允许范围内的能，当电力系统中的负荷逐渐增加时，如果不进行适当的控制，电压可能会逐渐下降，最终导致系统崩溃。因此，确保电压稳定对于电力系统的安全、可靠和经济运行至关重要。影响电压稳定的因素众多，主要包括电源容量、负荷特性、网络结构、无功功率分布等，电源容量的不足会限制系统提供无功支持的能力，从而影响电压稳定；负荷特性的变化如电动机的启动和停止，会对系统电压产生冲击；网络结构的强弱和合

理性直接影响电压的分布和稳定性；而无功功率的分布更是与电压稳定密切相关，合理的无功补偿和调整对于维持电压稳定至关重要

2. 电压稳定控制策略

为了维持电力系统的电压稳定，需要采取一系列控制策略。这些策略可以根据控制对象的不同，分为基于无功补偿的控制策略、基于有功调整的控制策略以及其他先进控制策略。其中，无功补偿是通过在系统中合理配置无功补偿设备，如电容器、电抗器等，可以改善系统的无功平衡，提高电压水平，常见的无功补偿方式包括固定补偿、分组自动投切补偿和动态无功补偿等。固定补偿方式简单可靠但缺乏灵活性；分组自动投切补偿方式可以根据系统需求自动调整补偿容量能提高补偿效果；动态无功补偿方式则可以根据实时测量的系统参数，实时调整补偿容量以实现更精确的控制；而有功调整是通过调整发电机的有功出力、改变负荷的有功消耗或调整网络中的有功潮流分布，可以影响系统的电压水平，例如，在负荷高峰时段，可以通过增加发电机的有功出力来提供额外的电压支撑。在负荷低谷时段，则可以适当减少发电机的有功出力，从而避免电压过高^[2]；电压稳定控制策略除以上两种策略外，还有其他先进控制策略，例如，基于模糊逻辑的控制策略可以根据系统的模糊信息，实现更灵活的控制；基于神经网络的控制策略可以通过学习系统的历史数据，预测未来的电压变化趋势，并提前采取相应的控制措施；基于广域测量系统的控制策略则可以利用实时的系统信息，实现全局的电压稳定控制。

3. 电压稳定控制技术在电力系统中的应用

电压稳定控制技术在电力系统中的应用广泛而深入，目前常见的有自动电压控制 (AVC) 系统、无功电压优化 (VVO) 技术、动态无功补偿装置、基于柔性交流输电系统 (FACTS) 的控制技术。自动电压控制 (AVC) 系统是通过监测系统中各节点的电压和无功功率进行实时监测和计算，自动调整发电机的无功出力、变压器分接头位置以及无功补偿设备的投切，以实现系统的电压优化和无功平衡，AVC 系统可以提高电压质量、降低网络损耗，并有助于改善系统的电压稳定性；无功电压优化 (VVO) 技术是通过监测系统无功源和负荷进行建模，建立优化模型并采用合适的优化算法求解最优的无功配置方案，VVO 技术可以在满足系统约束条件的前提下，实现电压质量的提升、网络损耗的降低以及系统稳定性的改善；动态无功补偿装置可以根据实时监测到的系统无功功率和电压信息，自动调整补偿容量，提供实时的无功支持，动态无功补偿装置可以有

效地改善系统的无功平衡和电压稳定性，特别是在系统受到扰动或负荷变化较大的情况下，能够迅速作出反应，从而防止电压崩溃的发生；柔性交流输电系统（FACTS）利用可控的电力电子装置对电力系统的参数进行灵活控制，包括电压、相位、阻抗等，从而实现对系统潮流和电压的稳定控制，FACTS 技术中的典型设备包括静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）等，这些设备能够快速响应系统变化，提供连续可调的无功支持，对于提高电压稳定性和改善系统性能具有重要作用。

三、无功优化与电压稳定控制的协同研究 1200

1. 无功优化与电压稳定控制的关联性分析

无功优化与电压稳定控制在电力系统中是两个密切相关、相互影响的重要方面。两者共同作用于电力系统的电压和无功功率，无功功率的合理分配和调节有助于改善电压分布，提高电压稳定性；而电压稳定控制则需要考虑无功功率的供应和需求，以确保系统电压的稳定。因此，两者在电力系统的运行中相互依存、相互促进。具体来说，无功优化通过调整系统中的无功源和无功负荷，实现无功功率的平衡和优化。这不仅可以降低网络损耗，提高经济效益，还可以改善电压质量，减少电压波动和偏差。同时，无功优化还可以提高系统的电压稳定性，通过对无功功率的灵活调节，增强系统对扰动的抵抗能力。而电压稳定控制则需要充分利用无功优化的成果，通过实时监测和调整系统的电压和无功功率，确保电压的稳定。电压稳定控制策略通常包括无功补偿、有功调整以及网络结构的优化等，这些策略的实施需要综合考虑系统的无功需求和供应情况，以及电压的分布和稳定性要求^[3]。

2. 无功优化对电压稳定的影响研究

无功优化对电压稳定具有显著的影响。无功优化通过改善系统的无功功率分布，可以降低系统中的无功损耗，从而提高电压的稳定性。当无功功率得到合理分配时，系统中的电压波动和偏差会相应减少，电压水平得到提升；无功优化还可以优化系统中的无功补偿设备配置，通过合理配置电容器、电抗器等无功补偿设备，可以实现对系统无功功率的灵活调节和补偿。这不仅可以提高系统的功率因数，降低网络损耗，还可以改善电压质量和增强电压稳定性；此外，无功优化还可以通过调整发电机的无功出力、改变变压器的分接头位置等方式，实现对系统电压的精确控制。这些措施可以根据系统的实时运行

状态和需求，灵活调整电压水平，提高电压稳定性。然而，值得注意的是无功优化并不是万能的，在某些情况下，如系统结构不合理、无功源不足等，单纯依靠无功优化可能无法完全解决电压稳定问题。因此，在实际应用中，需要综合考虑系统的实际情况和需求，采取多种措施协同作用，以实现电压稳定的目标。

3. 基于协同优化的电力系统控制策略

基于协同优化的电力系统控制策略是一种综合考虑无功优化和电压稳定控制的方法。该策略旨在实现无功优化和电压稳定控制的协同作用，提高电力系统的整体性能和稳定性。基于协同优化的控制策略需要建立综合考虑无功优化和电压稳定的数学模型，该模型应能够准确描述系统的无功功率分布、电压水平以及电压稳定性等关键指标，并考虑各种约束条件和限制因素；协同优化控制策略还需要考虑控制机制的设计和实现，这包括确定控制变量的调整范围、制定控制策略的调整规则以及实现控制策略的实时调整和优化等，通过合理的控制机制设计，可以确保无功优化和电压稳定控制在系统中的协同作用，实现系统性能的提升和稳定性的改善^[4]。在实际应用中，基于协同优化的电力系统控制策略还需要考虑系统的实时性和可靠性要求。通过实时监测系统的运行状态和参数变化，及时调整控制策略和优化算法，可以确保系统在各种运行条件下都能保持良好的电压稳定性和性能表现。

结语

综上所述，对电力系统中的无功优化与电压稳定控制研究具有重要意义。随着智能电网的深入发展，无功优化将更趋精准，电压稳定控制将更加智能化，希望学者们将继续深入研究，争取这一领域取得更多突破，为电力系统的安全稳定运行保驾护航。

[参考文献]

- [1]刘桂龙, 王维庆, 张新燕, 等. 无功优化算法综述[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(01): 4-8.
- [2]朱鹰屏, 张绪红, 董湘君. 电力系统无功优化的改进遗传算法研究[J]. 广东技术师范学院学报, 2010, 31(12): 1-4.
- [3]程浩忠, 顾颖中, 熊宁. 考虑电压稳定约束的电力系统无功规划[J]. 电力与能源, 2011, 1(01): 39-42.
- [4]韩学山, 李克强. 适应新型电力系统发展的协同调度理论研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(05): 14-23.