电力系统无功优化与电压控制方法

杨　昕　谢华东　周　雪
国网恩施市供电公司　湖北　恩施　445000

摘　要：无功优化与电压控制是电力系统稳定运行、提高电能质量、降低网络损耗的重要手段。本文综述了电力系统无功优化的目的、意义、分类及常用方法，并探讨了电压控制的基本原理、方法及实际应用。通过深入分析无功功率与电压之间的密切关系，本文旨在为电力系统的优化运行提供理论支持和实践指导。

关键词：电力系统；无功优化；电压控制

引言

随着现代电力系统的不断发展，电网规模日益扩大，结构日益复杂。无功功率在电力系统中起着至关重要的作用，它直接影响电压的稳定性和电能质量。因此，无功优化与电压控制成为电力系统研究的重要课题。本文旨在探讨电力系统无功优化与电压控制的方法，为电力系统的安全、稳定、经济运行提供参考。

1 电力系统无功优化的目的与意义

无功优化的核心目的在于，通过科学、合理地配置无功补偿设备，如电容器、电抗器等，有效提升电力系统的功率因数。这一举措能够显著减少无功功率在电网中的传输，进而降低网络损耗，提高能源利用效率。同时，无功优化还致力于改善电压质量，确保各节点电压稳定在允许范围内，为电力用户提供更加优质、稳定的电能。无功优化对于电力系统的经济性、可靠性和稳定性具有深远的意义。它不仅能够降低有功损耗，减少电力运行成本，还能够增强电压稳定性，有效防止电压波动过大甚至电压崩溃事故的发生，为电力系统的安全稳定运行提供有力保障。

2 电力系统无功优化的分类

电力系统无功优化是一个复杂而重要的领域，根据研究问题的时间跨度以及电力系统的稳定性要求，可以将其细分为运行优化和规划优化两大类。

2.1 运行优化

运行优化，顾名思义，是针对电力系统当前的运营状态进行的无功优化。它主要依据现有的设备和实际情况，制定出无功设备在短期内的运行规划。这类优化问题更加关注系统在当前运行条件下的无功平衡和电压控制，通过调整无功补偿设备的投切状态、变压器分接头位置等手段，确保系统在短期内的稳定性和经济性。运行优化通常需要考虑实时的负荷变化、设备故障等不确定性因素，因此具有较高的时效性和灵活性。

2.2 规划优化

规划优化则是从更长远的角度考虑电力系统的无功优化问题。它根据整个电网的长期运行计划，在安全稳定的约束条件下，对无功补偿设备的选址、选型、容量确定等方面进行具体规划。规划优化的目标是确保系统在未来一段时间内的稳定运行和经济性，为电力系统的长远发展提供有力支撑。

3 电力系统无功优化的常用方法

3.1 常规优化方法

3.1.1 非线性规划法

非线性规划法是处理电力系统中非线性问题的有效手段。在无功优化中，由于电力系统的非线性特性，如电压与无功功率之间的非线性关系，使得非线性规划法成为了一种重要的优化方法。简化梯度法是一种基于梯度信息的优化方法。它通过计算目标函数对控制变量的梯度，并沿着梯度的反方向进行搜索，以找到最优解。该方法具有计算简单、收敛速度较快的优点，但在处理复杂非线性问题时可能陷入局部最优解[1]。为了改进这一点，研究者们提出了多种变步长梯度法或结合其他优化策略的方法，以提高全局搜索能力。牛顿法则是一种基于二阶导数信息的优化方法。它通过计算目标函数的Hessian矩阵，并利用其逆矩阵进行搜索，以加快收敛速度。牛顿法在处理非线性问题时具有较高的精度和收敛速度，但计算量较大，且对初值的选择较为敏感。为了降低计算复杂度，研究者们提出了拟牛顿法或简化Hessian矩阵的方法。此外，还有其他非线性规划方法，如共轭梯度法、变尺度法等，它们也在无功优化中得到了广泛应用。这些方法各有优缺点，需要根据具体问题的特点和需求进行选择。

3.1.2 线性规划法

线性规划法是一种将非线性问题转化为线性问题来求解的优化方法。在无功优化中，可以通过对非线性函

数进行线性化近似，或者将非线性约束条件转化为线性约束条件，从而应用线性规划法来求解。线性规划法具有计算速度快、算法稳定等优点，特别适用于处理大量约束条件的无功优化问题[2]。然而，由于线性化近似可能引入误差，因此线性规划法在求解非线性问题时可能无法得到全局最优解。为了减小误差，研究者们提出了多种线性化近似方法，如分段线性化、泰勒展开等。

3.1.3 混合整数规划法

混合整数规划法是一种能够较准确地体现无功优化实际问题的优化方法。在无功优化中，常常存在离散的控制变量，如变压器的分接头位置、无功补偿设备的投切状态等。这些离散变量的存在使得无功优化问题成为了一个混合整数规划问题。混合整数规划法通过引入整数变量来表示离散的控制变量，并结合线性或非线性规划方法来求解无功优化问题。该方法能够较准确地反映无功优化的实际情况，但计算量大，解算复杂，且可能存在多解或无解的情况。为了降低计算复杂度，研究者们提出了分支定界法、割平面法等求解混合整数规划问题的有效方法。

3.1.4 动态规划法

动态规划法是一种适用于解决多阶段决策过程最优化问题的优化方法。在无功优化中，可以将电力系统的运行过程划分为多个阶段，每个阶段都对应着一组控制变量和状态变量。通过动态规划法，可以求解出每个阶段的最优控制策略，从而实现整个电力系统的无功优化。动态规划法具有处理多阶段决策问题的优势，能够考虑电力系统的动态特性和时序约束。然而，随着状态变量数目的增加，动态规划法的计算量将呈指数级增长，出现“维数灾”问题。为了降低计算复杂度，研究者们提出了状态空间分解、近似动态规划等方法。

3.2 现代人工智能算法

由于常规无功优化方法均不同程度存在问题，如计算量大、易陷入局部最优解等，人们逐渐将研究转向人工智能优化方向。人工智能算法具有强大的搜索能力和全局优化能力，能够有效解决常规方法难以解决的问题。

3.2.1 遗传算法

遗传算法是一种基于自然选择和进化机制的全局优化算法。在无功优化中，可以将控制变量编码为染色体，通过选择、交叉、变异等遗传操作来搜索最优解。遗传算法具有全局搜索能力强、不依赖于梯度信息等优点，适用于处理离散的、多变量的组合优化问题。遗传算法在无功优化中的应用非常广泛。通过合理的编码方式和遗传操作设计，可以有效地搜索到全局最优解。然而，遗传算法的计算量较大，且参数选择对算法性能有较大影响。为了提高遗传算法的效率，研究者们提出了多种改进方法，如精英保留策略、自适应交叉变异率等。

3.2.2 人工神经网络法

人工神经网络是一种模拟人脑神经元网络结构的计算模型。在无功优化中，可以通过训练神经网络来逼近无功优化问题的最优解。人工神经网络法具有速度快、并行处理能力强等优点，但依赖于训练数据和网络结构的选择。为了训练一个有效的神经网络模型，需要大量的历史数据作为训练样本。同时，网络结构的设计也对模型的性能有很大影响。如果训练数据不足或网络结构设计不合理，可能导致神经网络无法准确逼近最优解。因此，在实际应用中需要谨慎选择训练数据和网络结构。

3.2.3 专家系统

专家系统是一种结合专家经验和数值计算程序进行无功优化的智能系统。它通过模拟专家的决策过程，利用知识库和推理机制来求解无功优化问题。专家系统能够充分利用专家的经验和知识，提高无功优化的智能化水平。专家系统的核心在于知识库和推理机制的设计。知识库中包含了专家的经验和规则，而推理机制则负责根据当前的状态和知识库中的规则进行推理和决策。然而，专家系统的推理速度受限，且知识库的完善和更新需要耗费大量时间和精力。因此，在实际应用中需要权衡知识库的规模和推理速度之间的关系。除了上述几种人工智能算法外，还有模糊优化法、禁忌搜索、模拟退火算法等也在无功优化中得到了广泛应用。模糊优化法通过引入模糊集合和模糊逻辑来处理无功优化中的不确定性问题；禁忌搜索通过设置禁忌表来避免搜索过程中的重复和无效操作；模拟退火算法则通过模拟物理退火过程来跳出局部最优解并寻找全局最优解。

4 电压控制的基本原理与方法

4.1 基本原理

电力系统的电压控制基于无功功率与电压之间的密切关系。在电力系统中，无功功率的流动是影响电压水平的主要因素。当系统中的无功功率供应不足时，电压水平会下降；反之，若无功功率过剩，则电压水平会上升。因此，维持无功功率的平衡是保持电压稳定的关键。电压控制的基本原理可以通过电力系统的简化模型来理解。在电力系统中，发电机、变压器和负荷等元件相互连接，形成复杂的网络[3]。发电机作为无功功率的主要来源，其输出电压可以通过调节励磁电流来控制。变压器则通过改变变比来适应不同负荷下的电压需求。负荷则消耗无功功率，其变化会直接影响系统电压的稳定性。

4.2 常用方法

4.2.1 调节发电机电压

发电机是电力系统中无功功率的主要来源，通过调节发电机的励磁电流，可以改变其输出电压，从而实现对系统电压的控制。当系统电压偏低时，增加发电机的励磁电流，提高输出电压；当系统电压偏高时，减少励磁电流，降低输出电压。这种方法具有响应速度快、调节范围大等优点，是电压控制的重要手段之一。在实际应用中，发电机的电压调节通常通过自动电压调节器（AVR）来实现。AVR能够根据系统电压的实时变化情况，自动调节发电机的励磁电流，以维持电压在允许范围内。

4.2.2 调节变压器变比

变压器是电力系统中连接不同电压等级网络的关键设备。通过改变变压器的变比，可以改变其输出电压，以适应不同负荷下的电压需求。当系统电压偏低时，提高变压器的变比，增加输出电压；当系统电压偏高时，降低变压器的变比，减少输出电压。变压器变比的调节通常通过有载调压开关来实现。有载调压开关可以在变压器带电的情况下进行变比调节，具有操作方便、调节范围广等优点。但需要注意的是，频繁调节变压器变比可能会影响变压器的寿命和性能，因此在实际应用中需要综合考虑。

4.2.3 利用无功补偿设备

无功补偿设备是电力系统中用于调节无功功率平衡的重要设备。常见的无功补偿设备包括并联电容器、并联电抗器等。通过投切无功补偿设备，可以调节系统无功功率的平衡，从而实现对电压的控制。并联电容器主要用于提供无功功率支持，提高系统功率因数，降低网络损耗。当系统无功功率不足时，投入并联电容器可以增加无功功率供应，提高电压水平；当系统无功功率过剩时，切除并联电容器可以减少无功功率供应，降低电压水平。并联电抗器则主要用于吸收系统过剩的无功功率，防止电压过高。在轻负荷或线路较长的情况下，系统可能会产生过剩的无功功率，导致电压升高[4]。此时投入并联电抗器可以吸收过剩的无功功率，维持电压稳定。

4.2.4 自动电压控制（AVC）

自动电压控制（AVC）是一种先进的电压控制方法，它利用先进的控制技术和算法，实时监测电网电压和无功功率，自动调整无功补偿设备和变压器分接头的档位，以实现电压的稳定控制。AVC系统通常包括电压测量模块、无功功率计算模块、控制策略模块和执行模块等组成部分。电压测量模块负责实时监测电网各节点的电压水平；无功功率计算模块根据电压测量数据和系统参数计算无功功率的流动情况；控制策略模块根据无功功率的计算结果和电压控制目标制定控制策略；执行模块则负责执行控制策略，调整无功补偿设备和变压器分接头的档位。AVC系统具有响应速度快、控制精度高、自动化程度高等优点，能够显著提高电力系统的电压稳定性和供电质量。在实际应用中，AVC系统通常与电力系统的调度自动化系统相结合，实现电压的实时控制和优化管理。

5 无功优化与电压控制的协调

无功优化与电压控制是密不可分的两个环节。无功优化通过合理配置无功补偿设备来提高系统的功率因数、降低网络损耗和改善电压质量；而电压控制则通过调节无功功率来保持系统电压的稳定。因此，在实际应用中，需要综合考虑无功优化和电压控制的需求，实现二者的协调优化。无功优化和电压控制的协调可以通过以下几个方面来实现：一是制定合理的无功补偿设备配置方案，确保系统在不同负荷下都能保持无功功率的平衡和电压的稳定；二是优化变压器的变比调节策略，根据系统电压和无功功率的实际情况进行灵活调节；三是利用AVC系统等先进技术手段，实现电压的实时控制和优化管理；四是加强电力系统的监测和分析能力，及时发现并解决无功功率和电压方面的问题。

结语

本文综述了电力系统无功优化与电压控制的方法，并探讨了二者之间的密切关系。通过深入分析无功功率与电压之间的相互作用机制，本文为电力系统的优化运行提供了理论支持和实践指导。未来，随着电力系统的不断发展和新技术的不断涌现，无功优化与电压控制方法将进一步完善和发展，为电力系统的安全、稳定、经济运行提供更加有力的保障。

参考文献

[1]柯国华,陈新河,周琪,等.电力系统无功优化的算法概述[J].机电信息,2022,(01):83-85.

[2]陈来迎,林雨.电力系统无功优化智能算法研究[J].粘接,2020,42(06):78-81.

[3]贺贤疆,王鹏.电力系统中基于人工智能的电压稳定性控制策略[J].中国战略新兴产业,2024,(12):95-97.

[4]徐兴东.电力系统电压稳定综合增强控制策略研究[D].山东理工大学,2022.