

“双碳”目标下配电网无功优化技术综述

李 艳 毕远胜

(广州智光电气技术有限公司)

摘要：本文综述配电网无功优化技术的重要意义及其发展动态。在“双碳”目标的政策背景下，无功优化在提升电能质量、减少能量损耗以及增强电力系统稳定性方面发挥着至关重要的作用。首先阐述无功优化的基本原理，并针对新能源配电网的特点，介绍多种无功优化模型的构建方法。继而，本文集中探讨了应用于新能源配电网无功优化的多种求解策略，包括数学规划、智能优化算法以及基于人工智能的技术。对这些算法的优劣性、适用性进行深入分析，并根据实际电网运行的需求，综述了相应的无功优化策略。

关键词：碳达峰碳中和；配电网；无功优化；新能源

0 引言

配电网作为电力系统的末端环节，其运行效率和供电质量直接影响到用户的用电体验。在配电网中，无功功率的优化管理不仅关系到电压质量、网损降低和电力设备的有效利用，而且是实现电力系统经济运行和节能减排的重要手段。因此，对配电网无功优化技术的研究具有重要的理论价值和实践意义。

新型配电系统作为电力系统的重要组成部分，在传统配电网的基础上，通过深度融合 5G 通信、人工智能等前沿技术，实现了电能的分布式智能管理和调控。该系统不仅是新能源的有效消纳平台，其接入也对电网的正常运行带来显著影响，特别是在新能源、储能和电动汽车等多样化电源的管理上，给电网的高效、可靠、可持续和安全运行带来前所未有的挑战^[1]。新型配电系统是实现能源互联网的关键环节。随着分布式能源的大规模接入，如何有效地解决网络损耗和

潮流分布问题，成为实现能源多元互联的核心。这不仅需要先进的控制策略，还需要对新型配电系统中的各种设备进行智能管理和优化。

配电网无功优化技术旨在通过合理的无功配置和调节，优化系统的无功潮流分布，以达到提升电压质量、减少线路损耗、提高电力设备运行效率的目的。近年来，随着智能电网、新能源接入、储能技术等多种技术的发展和應用，配电网无功优化技术面临着新的挑战和机遇。传统的无功优化方法，如基于优化算法的无功规划、基于自动电压控制的无功电压优化等，在实际应用中表现出一定的局限性和不适应性。因此，研究新型的配电网无功优化技术，以适应现代电力系统的发展需求，成为当前电力领域的研究热点之一。在此背景下，本文旨在综述配电网无功优化技术的研究现状和发展趋势，分析现有技术的优缺点，探讨新型无功优化技术在配电网中的应用前景，并为

配电网无功优化技术的进一步研究和实践提供理论支持和参考依据。

1 新能源电网无功优化的必要性

随着新能源大规模接入配电网，配电网的形态和潮流走向亦经历显著变革，图1是含新能源电源的配电网示意图， U_1 与 U_2 分别表示系统电压与并网点电压， R 与 X 分别表示线路的电阻和电抗参数。

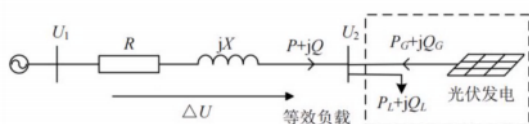


图1 新能源配电网示意图

由文献[3]可知，接入新能源电源前后配电网电压降落的表达式 $\Delta U'$ 可以表示为：

$$\Delta U' = \frac{(P_L - P_G)R + (Q_L - Q_G)X}{U} \quad (1)$$

式中， U 为线路的额定电压； P_L 与 Q_L 分别为有功负荷与无功负荷； P_G 与 Q_G 分别为光伏逆变器注入配电网的有功功率与无功功率。

由式(1)可知，新能源电源的有功注入可以缓解配电网电压跌落的问题，可见适度的新能源电源对提升整个电力系统的电压质量起到了积极的作用。然而当光伏容量过大时，有可能出现 $\Delta U' < 0$ 的现象，因此有必要增加有效的干预，以解决并网点附近电压越上限的问题。

如何利用现有的资源，通过优化资源配置，提高新能源的消纳能力的同时，高效改善电压质量，提高供电可靠性，提高电网运行的安全性和稳定性是未来研究的重点。

2 新能源配电网无功优化求解方法

随着电力系统的不断演进，配电网的无功优化

降损问题日益成为电力系统研究的热点。在传统电力系统中，无功优化主要依赖于无功补偿设备和变压器分接头等电压调节设备的协同优化调控。这些方法通过改善系统的无功功率分布，从而实现网络损耗的降低。常用的优化方法包括线性/非线性规划法、内点法、混合整数规划法和动态规划法等。随着分布式电源渗透率的不断提升，配电网的无功潮流分布变得更加复杂，使得传统无功优化方法在实际工程应用中的效能受到限制，难以满足现代电网对无功优化的多元化需求。本节将分别介绍新能源配电网无功优化的两种常见的求解方法。

2.1 启发式算法

针对新能源配电网的无功优化问题，其本质上是一个高度复杂的非线性、多变量、多约束的离散优化问题。受自然界运行规律的启发，现代启发式人工智能算法得以蓬勃发展，并在电力系统运行优化问题中展现出广泛的应用前景^[2-3]。这些算法通过模拟自然过程或借鉴生物行为，为求解复杂问题提供了一种高效且智能的优化手段。目前主流的启发式智能优化算法包括模拟退火算法、粒子群算法、遗传算法和纵横交叉算法等。

遗传算法是一种模拟自然选择和遗传学原理的搜索算法。粒子群优化模拟鸟群觅食行为，通过每个粒子代表一个候选解，并根据个体和全局最优位置来更新粒子速度和位置^[4]。在配电网无功优化中，采用上述两种优化算法过程中设计的目标函数可以是最小化有功网损（ $\min F_1$ ），最小化无功补偿成本（ $\min F_2$ ），提高电压稳定性（ $\min F_3$ ）：

$$\min F_1 = \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} V_i V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (2)$$

$$\min F_2 = \sum_{k \in SC} C_k Q_{ck} \quad (3)$$

$$\min F_3 = \sum_{k \in SL} (V_{i\max} - V_i) \quad (4)$$

式中, S 、 SC 、 SL 分别为节点集合、包含无功补偿装置的节点集合、负荷节点集合; V_i 、 V_j 为节点电压; C_k 、 Q_{ck} 为单位补偿成本以及补偿容量。

倘若在优化过程中, 需要同时考虑上述多个目标对无功功率流动的影响, 则可以采用多目标优化, 此时的目标函数可以表示为:

$$\min F = \omega_1 F_1 + \omega_2 F_2 + \omega_3 (-F_3) \quad (5)$$

式中, ω 为权重系数, 可采用各类层次分析法或者经验值法来确定该值的大小^[4]。

2.2 数学规划方法

在高比例新能源接入电网的背景下, 无功电压优化问题呈现出显著的复杂性, 它是一个典型的多变量、多目标、多约束条件的非线性规划问题。这一问题涉及的控制变量类型多样, 既包括有载调压变压器分接头档位、并联电容器组的投切组数等离散型变量, 也涵盖新能源设备出力、无功补偿设备出力等连续型变量。数学规划^[5]方法是解决新能源配电网无功优化问题的一种有效手段, 它通过建立数学模型来寻找最优解。常见的数学规划方法有线性规划 (LP)、二次规划 (QP)、混合整数规划 (MIP)、非线性规划 (NLP)、混合整数非线性规划 (MINLP)、二阶锥规划 (SOCP)、混合整数二阶锥规划 (MISOCP) 等^[15-17]。

二次规划问题通常具有以下形式:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x \\ \text{s.t.} & A x \leq b \\ & x_l \leq x \leq x_u \end{cases} \quad (6)$$

式中, x 和 c 为优化变量和性项系数向量; Q 为正定或半正定的二次项系数矩阵。

二阶锥规划问题可以表示为:

$$\begin{cases} \min c^T x \\ \text{s.t.} & \|A_i x + b_i\| \leq r_i^T x + t_i \\ & x_l \leq x \leq x_u \end{cases} \quad (7)$$

式中, A_i 和 b_i 为第 i 个二阶锥约束。

混合整数线性规划问题具有以下形式:

$$\begin{cases} \min c^T x \\ \text{s.t.} & A x \leq b \\ & x_l \leq x \leq x_u \\ & x_i \in \mathbf{Z}, \quad i \in I \\ & x_j \in \mathbf{R}, \quad j \in J \end{cases} \quad (8)$$

式中, x 为连续变量或 0~1 变量; I 和 J 为对应变量的集合。

3 新能源配电网无功优化建模方法

在当前的能源转型过程中, 新能源作为传统能源的替代者, 逐渐成为能源结构变革的核心驱动力。新能源不仅具有可再生性, 能够显著缓解全球能源紧张的状况, 而且因其清洁性而受到国际社会的广泛关注。在现代电力系统中, 传统的无功补偿策略已难以满足源-荷-储之间高效互动的需求^[6], 导致弃风弃光现象频发。因此, 迫切需要探索相应的技术解决方案, 以打破源-荷-储之间的障碍, 实现资源的高效整合和利用。传统配电网和新型配电网的对比示意图, 如图 2 所示。

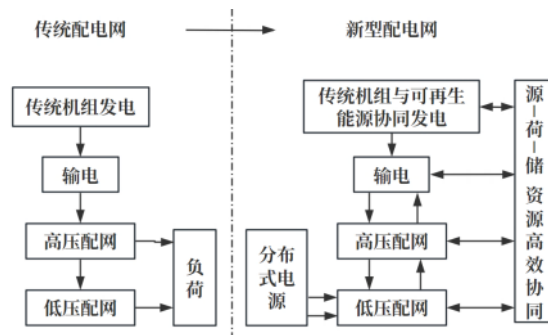


图 2 传统配电网与新能源配电网对比示意图

3.1 电网分区电压控制

无功电压控制分区策略在电力系统电压管理中扮演着至关重要的角色。通过精细划分电网, 形成众多

既独立又相互联系的控制子区域，这一策略显著提高了电压调节的效率和响应速度。在这一策略的研究进程中，郑建华等学者^[7]首先指出了传统集中控制模式的不足，提出了基于配电网的分区控制策略，为电压管理开辟了新思路。胡丹尔^[8]利用全维雅可比矩阵从电气灵敏度角度进行区域划分，为无功电压控制分区研究提供了新的理论基础。张紫薇^[9]的研究强调了二级电压控制中合理区域划分的重要性，并提出了一种新的区域划分策略，从而提升了电压控制的效率。成煜^[10]则提出了一种逆向分区方法，先划分负荷节点再归并无功源节点，这一方法在实际应用中显示出高度的适应性和灵活性。

3.2 多时间尺度无功优化

在新能源配电网电压调控的研究领域，多时间尺度电压调节策略已被广泛认可为提升系统电压稳定性和经济运行效率的关键技术。在现有的学术研究中，文献[11]提出了一种创新的多时间尺度电压调控策略，该策略通过在日前-日内-实时阶段协同调控有载调压变压器、并联电容器组、光伏输出及STATCOM等关键设备，有效降低了集中式光伏电站的内部电压偏差，增强了并网运行的稳定性裕度。仿真实验结果表明，该策略在降低电压越限风险和电压控制精度方面取得了显著成效。文献[12]进一步将配电网电压调节策略细分为日前优化调节和实时滚动调控两个层面。

3.3 源网荷储协同优化

随着分布式发电系统的广泛接入，新能源在配电网中的位置选择对电压分布与网络损耗产生了显著影响。面对海量光伏接入带来的电压波动问题，马伟博士提出了针对性的电压控制策略，通过协调源-网两侧资源实现对电压波动的高效控制。陈鹏伟博士针对新能源接入后的潮流不确定性，提出了一种潮流分析方法，确保新能源接入后配电网的安全稳定与高效

运行^[13]。黄伟博士针对分布式光伏发电与海量电池储能系统接入场景，提出了一种多时间尺度无功优化方法，并从运营角度提出了光-储双层容量配置策略^[14]。在可再生能源广泛接入、电力需求快速增长、配电基础设施老化以及电网拓扑日益复杂的背景下，新型配电系统的电压控制面临诸多挑战。在此情境下，如何有效调动源-网资源、充分挖掘负荷侧柔性资源、释放储能技术的潜力，成为降低系统损耗、提高运行效率与稳定性的关键。文献[15]探讨了柔性温控负荷与多种储能协同运行对新型配电网承载能力的影响，为降低碳排放提供了新途径。文献[16]构建了风-光-储系统优化模型，实现了源网荷储的协同优化，显著提高了配电系统的韧性与故障恢复能力。

4 结束语

电力系统无功优化是确保系统稳定性、提升经济效益及保障能源安全的关键环节。随着新能源电源在配电网中的大规模渗透，其固有的波动性、间歇性和不确定性特质，为电网的稳定运行带来了新的挑战。本研究深入剖析了新能源并网对配电网电压和潮流的具体影响，明确了无功补偿在维持系统稳定性中的核心作用。此外，本文对比分析了传统无功补偿策略与基于启发式智能算法的现代无功优化方法，并探讨了源网荷储互动在新能源配电网无功优化中的潜在效能。

参考文献

- [1] 郑重，苗世洪，李超，等. 面向微型能源互联网接入的交直流配电网协同优化调度策略[J]. 电工技术学报，2022，37(1): 192-207.

- [2] 王泽祺, 刘友波, 任鹏哲, 等. 配电网精准投资理论与关键技术综述 [J]. 电网技术, 2022, 46 (7): 2665-2678.
- [3] 宫帅, 方圆, 曹弯弯, 等. 可再生能源接入下配电网协同调度策略研究 [J]. 自动化仪表, 2023, 44 (10): 106-110.
- [4] 包晶晶. 分布式发电系统并网技术的关键问题研究 [J]. 电气技术与经济, 2024 (5): 25-27.
- [5] 侯元红, 李世俊, 岳雷. 基于主动配电网的分布式电源规划方案研究 [J]. 电气技术与经济, 2023 (2): 22-25.
- [6] 王继飞, 王永星, 杨宇静, 等. 光伏电站并入农配网对地区电网的影响 [J]. 中国电力, 2018, 51 (6): 150-154.
- [7] 郑建华, 马骏毅, 李梓丘, 等. 面向主配协同的新型配电网多层次自治策略 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(11): 90-99.
- [8] 胡丹尔. 数据驱动的主动配电网无功-电压控制策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [9] 张紫薇. 考虑网省协调和定关断角控制的交直流系统三级电压控制方法 [D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
- [10] 成煜. 基于云理论的二级电压控制分区及系统中枢点识别 [D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [11] 寇凌峰, 吴鸣, 李洋, 等. 主动配电网分布式有功无功优化调控方法 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1856-1865.
- [12] 路怡. 含光伏电源配电网的无功优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [13] 潘忠志, 孔宁, 王燕涛. 改进新能源消纳的配电网资源优化配置研究 [J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(6): 71-78.
- [14] 宋爽. 主动配电网多时间尺度动态无功优化 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- [15] 熊军华, 赵迪迪, 刘国庆. 基于多目标粒子群算法的配电网无功优化 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(3): 26-32.
- [16] 胡珺如, 窦晓波, 李晨, 等. 面向中低压配电网的分布式协同无功优化策略 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 47-54.

(收稿日期: 2024-07-02)