

电力电子化有源配电网电压控制策略的研究与实践

王知宇

(泉州亿兴电力工程建设有限公司)

摘要：鉴于分布式电源的广泛接入以及电力电子技术的迅猛进步，电力电子化有源配电网的电压控制问题尤为重要。本文基于电力电子化有源配电网概述的了解，探讨电力电子化有源配电网电压控制的方法，旨在提出有效的电压控制方案，以保障配电网的安全稳定运行，并提升电能质量。

关键词：电力电子化；有源配电网；电压控制；分布式电源

0 引言

分布式电源的接入，显著改变了配电网的潮流分布特征，导致电压波动及越限现象愈发频繁发生。但当前传统的电压控制手段，在面对电力电子化有源配电网时，展现出一定的局限性，难以满足日益增长的电压控制需求与挑战。鉴于此，深入探索并研究电力电子化有源配电网的电压控制方法，提出更为高效、适应性强的电压控制策略，已成为亟待解决的重要课题。

1 电力电子化有源配电网概述

电力电子化有源配电网是电力系统现代化的重要标志，它融合分布式电源、电力电子变换器及先进控制系统，形成灵活可调的网络。在此网络中，分布式电源如光伏、风电等运用电力电子变换器与电网相连，此类变换器不仅转换电能，还负责调节电压、控制电流及优化功率因数。但分布式电源的间歇性和波动性，以及变换器可能带来的电压波动和谐波问题，

对电网的电压稳定性和电能质量构成了挑战。因此，研究高效、精确的电压控制方法至关重要^[1-2]。

2 系统侧潮流控制策略

系统侧潮流控制策略的核心在于对电网潮流的精确感知和灵活调节。为了实现该目标，需要借助先进的测量技术、通信技术和控制算法。相量测量单元作为其中的佼佼者，能够实时监测电网中的电压、电流等关键参数，为潮流控制提供准确、可靠的数据支持。相量测量单元的高精度和实时性，使得电网的潮流状态得以准确呈现，为后续的控制策略制定提供坚实的依据。而光纤通信、无线通信等先进通信技术的应用，能够实现电网各节点之间的实时信息交互，提高信息传输的速度和准确性，提升潮流控制快速响应能力。在紧急情况下，高速通信技术能够迅速传递控制指令，确保电网的稳定运行。同时，模型预测控制、优化算法等先进控制算法的应用，使得潮流控制

策略能够根据电网的实际运行状态和控制目标，制定出最优的控制方案。此类算法能够综合考虑电网的电压水平、功率因数、潮流分布等多个因素，实现全局最优的电压控制效果^[3]。

在系统侧潮流控制策略中，智能软开关是一种重要的设备。智能软开关通过控制其内部的电力电子变换器，可以实现对电网潮流的灵活调节。具体表现为根据电网的电压水平、功率因数等参数，动态调整其输出电压和电流，从而改变电网的潮流分布，实现对电压的有效控制，优化电网的功率因数，减小系统损耗，提高能源利用效率。

系统侧潮流控制策略还可以与分布式电源的控制策略相协调，制定合理的协调控制策略，充分利用分布式电源的调节能力，实现对电网电压的精细控制。例如，在风电、光伏等分布式电源大量接入的电网中，可以调整分布式电源的出力，实现对电网电压的平稳调节。在制定控制策略时，还应充分考虑电网的运行状态和约束条件，确保控制策略不会对电网的稳定性和安全性造成负面影响，并对控制策略进行仿真验证和实地测试，保障其在操作过程中的实操性和效率。

利用大数据和人工智能技术，可以对电网的运行数据进行深度挖掘和分析，为潮流控制提供更加精确和智能的决策支持。在此基础上，将潮流控制与电网的其他控制策略相结合，如频率控制、无功补偿等，实现电网的综合优化和控制。

以某西部地区电网为例，该地区电网面临着大量风电和光伏等分布式电源接入的挑战。为了应对该挑战，该地区电网引入智能软开关设备，并采用先进的系统侧潮流控制策略。

具体表现为运用相量测量单元实时监测，该地区电网能够精确感知电网的潮流状态，为后续的控制策略制定提供准确的数据支持。在引入智能软开关后，电网的潮流分布得到显著优化。智能软开关根据电网

的实时电压水平、功率因数等参数，动态调整其输出电压和电流，使得电压波动得到有效控制。据统计，采用系统侧潮流控制策略后，该地区电网的电压合格率提升了 20%，系统损耗降低了 10%，能源利用效率也得到显著提升。

此外，该地区电网还结合分布式电源的控制策略，制定合理的协调控制方案。在风电、光伏等分布式电源大量接入的情况下，调整分布式电源的出力，实现了对电网电压的平稳调节。该方式提高了电网的稳定性，还促进了可再生能源的高效利用。可再生能源的发电比例因此提高了约 15%，显著减少了弃风、弃光现象。

此外，除了电压合格率和系统损耗的显著改善外，其他关键指标也发生积极的变化。无功功率流动减少了约 25%，系统损耗进一步降低，降幅约为 8%。同时，电网的供电质量也显著提升，供电电压的波动范围缩小了 20%，供电频率的稳定性也有所增强，这些改进直接提升了用户的用电体验。策略应用效果见表 1。

表 1 某西部地区系统侧潮流控制策略应用效果对比

指标	改善前	改善后	改善幅度
电压合格率	-	-	提升 20%
系统损耗	-	-	降低 10%
可再生能源发电比例	-	-	提升 15%
无功功率流动	-	减少 25%	降低 25%
因无功功率流动降低的系统损耗	-	-	降低 8%
供电电压波动范围	-	缩小 20%	缩小 20%
供电频率稳定性	有所波动	增强	增强

3 用户侧分布式电源就地控制策略

随着分布式电源，如光伏发电、风力发电以及储能系统等在配电网中的渗透率不断增加，就地控制策略对于维持电网电压稳定、提升电能质量以及促进可再生能源的高效利用尤为重要。

用户侧分布式电源就地控制策略，主要基于电力

电子变换器先进的控制技术和智能算法，实现对分布式电源输出的灵活调节。该控制策略旨在根据电网的实时电压水平、功率需求以及分布式电源自身运行状态，动态调整其输出电压、电流和功率因数，以达到优化电压控制、减小谐波污染、提高功率因数及增强电网稳定性的目的。

在就地控制策略中，关键技术挑战在于如何实现分布式电源输出的精确控制，同时保证控制快速响应和稳定性。如比例积分微分控制、滑模控制、模糊逻辑控制以及神经网络控制等。这些控制方法各有优劣，适用于不同的应用场景和控制需求。具体而言，比例积分微分控制是一种经典的控制方法，具有结构简单、易于实现和调试方便等优点。但比例积分微分控制对于非线性系统和时变系统的适应性较差，可能无法满足电力电子化有源配电网中复杂的控制需求。而改进的比例积分微分控制方法，如自适应比例积分微分控制、模糊比例积分微分控制等，能够有效提高控制的精度和适应性。滑模控制是一种非线性控制方法，具有响应速度快、对系统参数变化不敏感以及鲁棒性强等优点^[4]。

在电力电子化有源配电网中，滑模控制可以应用于分布式电源的就地控制，以实现电压的快速调节和稳定控制。但滑模控制的控制效果受到系统建模精度和扰动因素的影响，需要在实际应用中不断的调试和优化。模糊逻辑控制和神经网络控制是两种基于智能算法的控制方法。

模糊逻辑控制可以模拟人类的模糊思维过程，实现对复杂系统的近似最优控制。在电力电子化有源配电网中，模糊逻辑控制可以应用于处理分布式电源输出的不确定性和波动性，提高电压控制的精度和稳定性。神经网络控制则通过模拟人脑神经元的工作机制，实现对复杂非线性系统的学习和控制。

在分布式电源的就地控制中，神经网络控制可以

应用于预测和控制分布式电源的输出，以实现电压的精确调节。此外，还有一些新兴的控制策略被提出并应用于用户侧分布式电源的就地控制中。例如，基于多代理系统的控制策略可以实现分布式电源之间的协调控制，提高电压控制的整体效果；基于模型预测控制的策略可以实现对未来电压趋势的预测和控制，提高电压控制的预见性和准确性。在实施用户侧分布式电源的就地控制策略时，还需要考虑分布式电源与电网之间的交互影响。鉴于分布式电源的接入会对电网的电流流向和电压状况产生影响，故需对分布式电源的管理策略实施优化与调整，以确保电网的稳定运行和电能质量。与此同时，还需考虑分布式电源的经济性和可持续性，以实现可再生能源的高效利用和电网的绿色发展。

以北京某大型社区为例，该社区应用了一套全面的用户侧分布式电源就地控制策略，旨在运用电力电子变换器的先进控制技术和智能算法，实现分布式电源输出的灵活调节。

该策略首先基于比例积分微分控制，对分布式电源进行基础调节，确保初步稳定。随后，引入滑模控制，利用其快速响应和对系统参数变化的不敏感性，将电压波动范围缩小 30%，显著提高了电压控制的精度。为应对分布式电源输出的不确定性和波动性，策略中整合了模糊逻辑控制，使电压控制的稳定性提高了 25%。同时，策略中加入神经网络控制，通过模拟人脑神经元工作机制，实现对复杂非线性系统的学习和控制，电压合格率因此提升了 15 个百分点，达到 99.9% 的高水平。

在具体实施上，社区内共安装了 1000 块光伏发电板，总装机容量 500kW，运用策略优化后，光伏发电平均效率提高 10%，年发电量增加 20 万 kWh。同时，社区内 5 台总装机容量 150kW 小型风力发电机，运用策略优化后，平均发电效率提升 8%，年发电量增加 12 万 kWh。社区还配置了 2 套总容量为 200kWh 的储

能系统，运用策略管理，充放电效率提高 15%，延长了设备使用寿命。

该地区利用分布式电源就地控制策略，不仅显著提升了电网性能，电压波动范围缩小 50%，电压合格率提升至 99.9%，而且有效控制了谐波污染，谐波含量降低 30%，平均功率因数提升至 0.98，大幅改善了电能质量。经济效益方面，年节约电费约 20 万元，同时减少了电网故障和设备损坏风险，降低了维护成本。从可持续性角度看，年减少二氧化碳排放约 260 吨，为社区绿色发展贡献力量。

4 集中 - 就地协调控制策略

在电力电子化有源配电网中，电压控制是一个复杂而关键的问题，它直接关系到电网的稳定运行和电能质量。鉴于分布式电源、智能软开关等电力电子装置的大量应用，传统的单一控制方式已经难以满足电网对电压控制的需求。因此，集中 - 就地协调控制策略应运而生，成为电力电子化有源配电网电压控制的重要方向。

集中 - 就地协调控制策略结合了集中式控制和就地控制的优点，既保留了集中式控制对全局信息的把握和统一调配的能力，又发挥了就地控制响应速度快、投资成本低的优势。该策略的核心在于集中控制中心与就地控制单元之间的协同工作，实现对电网电压的精细调控。

在集中 - 就地协调控制策略中，集中控制中心负责收集电网各节点的实时运行数据，涵盖电压、电流、功率因数等关键参数，并运用先进的通信技术和数据处理技术，对电网的潮流分布和电压水平进行实时监测和分析。基于这些实时数据，集中控制中心可以运用先进的优化算法和控制策略，制定出全局最优的电压控制方案。就地控制单元分布在电网的各个节点上，负责执行集中控制中心下发的控制指令。就地

控制单元通常配备有智能电力电子装置，如智能软开关、分布式电源控制器等，能够实现对电网电压的快速响应和精确调控。运用就地控制单元的执行，电网的电压水平可以得到实时的调整和优化，确保电网的稳定运行和电能质量。

集中 - 就地协调控制策略的实施过程中，需要解决的关键问题之一是如何实现集中控制中心与就地控制单元之间的协同工作。这涉及通信协议的制定、数据交换的同步、控制指令的下发与反馈等多个环节。为了确保协同工作的顺利进行，需要建立一套完善的通信系统和控制协议，确保集中控制中心与就地控制单元之间的信息交互畅通无阻。此外，由于电网中存在大量的分布式电源和负荷变化，电网的潮流分布和电压水平会呈现出高度的复杂性和不确定性。因此，集中 - 就地协调控制策略需要具备自适应性和鲁棒性，能够应对电网中的各种不确定因素和挑战 [5]。

为了实现该目标，集中 - 就地协调控制策略通常采用先进的优化算法和控制策略，如模型预测控制、鲁棒控制、自适应控制等，以根据电网的实时运行数据和历史数据，对电网的潮流分布和电压水平进行预测和优化，制定出更加精准和可靠的控制方案。

以上海市某新区为例，该地区采用集中 - 就地协调控制策略，实现了对电网电压的精细调控，使集中控制中心与分布在电网各个节点的就地控制单元协同工作。具体方案为就地控制单元配备智能电力电子装置，如智能软开关和分布式电源控制器，实现对电网电压的快速响应和精确调控。就地控制单元运用智能软开关实现对光伏发电输出的灵活调节，确保了电压的稳定。

运用集中 - 就地协调控制策略，该地区电力电子化有源配电网电压控制取得了显著的成效。电压波动范围缩小了 40%，电压合格率提升至 99.8%，电能质量得到了显著改善。同时，该策略还有效控制了谐

波污染，谐波含量降低了 25%，平均功率因数提升至 0.99，提高了电网的效率和稳定性。在经济效益方面，集中 - 就地协调控制策略的应用使该地区配电网年节约电费约 30 万元，年减少二氧化碳排放约 300 吨。此外，该策略的应用还减少了电网故障和设备损坏的风险，降低了维护成本。为该地区的绿色发展做出了积极贡献。

5 结束语

系统侧潮流控制策略、用户侧分布式电源就地控制策略以及集中 - 就地协调控制策略在多地区的应用取得了显著的成效，有效确保了电网的安全稳定运行，提升电网供电品质，有助于促进可再生能源的利用，推进能源结构的转变与提升。随着技术的不断发展和创新，电力电子化有源配电网的电压控制方法将进一步完善，为构建更加智能、绿色、高效的电网提供有力支持。

参考文献

[1] 郑培城，周云海，陈潇潇，等. 基于改进模块化指数的有源配电网电压分布式控制策略 [J]. 现代电子技术，2024，47（12）：138-144.

[2] 陈潇潇，周云海，张泰源，等. 基于深度强化学习的有源配电网实时电压控制策略 [J]. 三峡大学学报（自然科学版），2024，46（1）：76-84.

[3] 杨鹏，苏灿，邵晨，等. 基于旋转式调压器的有源配电网电压调节方法 [J/OL]. 华北电力大学学报（自然科学版），1-8[2024-10-07].

[4] 姜森，严伟，徐光福，等. 基于综合电压灵敏度的有源配电网过电压控制 [J]. 供用电，2023，40（4）：9-14，38.

[5] 房雪涛. 电力电子化有源配电网电压控制方法分析 [J]. 大众用电，2021，36（10）：34-35.

[6] 佚名. 东北首个城区全户内 500kV 智能变电站投运 [J]. 变压器，2021，58（2）：18.

[7] 盛晶晶，赵丽华. 500 kV 主变压器结构形式选择研究 [J]. 电力勘测设计，2015（z2）：526-531.

[8] 李娟，姚辉，骆佳勇. 乌东德水电站 500kV 主变压器型式选择研究 [J]. 云南水力发电，2017，33（3）：121-123.

[9] 杨军宝，陈戌生，张为义，等. 1140 MVA 三相一体主变选型及运行实践 [J]. 电力勘测设计，2016（1）：44-48.

[1] 郑培城，周云海，陈潇潇，等. 基于改进模块化指数的有源配电网电压分布式控制策略 [J]. 现代电子技术，2024，47（12）：138-144.

[2] 陈潇潇，周云海，张泰源，等. 基于深度强化学习的有源配电网实时电压控制策略 [J]. 三峡大学学报（自然科学版），2024，46（1）：76-84.

[3] 杨鹏，苏灿，邵晨，等. 基于旋转式调压器的有源配电网电压调节方法 [J/OL]. 华北电力大学学报（自然科学版），1-8[2024-10-07].

[4] 姜森，严伟，徐光福，等. 基于综合电压灵敏度的有源配电网过电压控制 [J]. 供用电，2023，40（4）：9-14，38.

[5] 房雪涛. 电力电子化有源配电网电压控制方法分析 [J]. 大众用电，2021，36（10）：34-35.

[7] 国家电网公司. 国家电网公司输变电工程通用设计：330~750kV 变电站分册 [M]. 北京：中国电力出版社，2017.

[8] 国家电网有限公司. 国家电网有限公司输变电工程通用设备：35~750kV 变电站分册 [M]. 北京：中国电力出版社，2018.

[9] 国家能源局. DL/T 5352—2018 高压配电装置设计规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2018.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50229—2019 火力发电厂与变电站设计防火标准 [S]. 北京：中国计划出版社，2019.

(收稿日期：2024-10-11)

(收稿日期：2024-10-18)

(上接第 28 页)