

建筑光伏并网接入对配电网络电压稳定性的影响研究

文/刘凝
中咨华科交通建设技术有限公司

在电力系统中，电压稳定性是确保电网运行安全和高效的重要指标之一。文章系统地分析了建筑光伏并网接入对配电网络电压稳定性的影响，并探讨多种电压稳定性控制策略，包括动态电压调节与补偿技术、储能系统的应用、智能控制方法以及光伏发电系统与电网的互动调度方案。通过技术应用测试，验证这些策略在实际中提升电压稳定性的效果，展示在现代电力系统中融入光伏并网的可行性与效益，为配电网络电压稳定性的研究与实践提供理论依据和技术支持。

在现代配电网络中，电压稳定性不仅影响供电质量，而且直接关系到整个电力系统的安全、可靠和经济运行。随着电力市场的快速发展和可再生能源的大规模接入，如何保持电力系统中配电网络在动态变化环境中的电压稳定至关重要。特别是在远程计量校准技术应用过程中，由于需要精确测量并控制配电网络中的电压水平，电压稳定性的保障变得尤为关键。电压稳定性问题通常指在大负荷变动或线路故障等情况下，电力系统无法维持稳定电压水平，可能导致电压崩溃或系统失稳的现象。因此，研究如何通过先进的控制策略和技术手段有效管理和改善配电网络的电压稳定性，是提升电力系统性能的关键。

光伏并网技术概述

光伏并网技术是可再生能源技术的一个重要分支，在全球范围内得到迅速发展并广泛应用，特别是在推动配电网络向更加绿色和可持续方向发展扮演着关键角色。随着太阳能光伏系统的接入规模不断扩大，其对配电网络的影响也日益显著，尤其是在电压稳定性方面提出新的挑战和要求。光伏发

电的间歇性和不确定性可能导致配电网络电压水平出现波动，影响电力系统的稳定性和供电质量。为此，配电网络电压稳定性的维护成为确保光伏并网成功的关键技术问题。在此背景下，研究人员和工程师开发一系列电压调控策略和技术，包括在光伏系统中集成先进的电压调节设备，利用分布式储能设施平衡产能和消费差异，以及应用智能电网技术实现更为灵活的电网管理和实时监控。这些技术的实施不仅提高电力系统对可再生能源的适应能力，也促进能源结构的优化和电力市场的健康发展，更为远程计量校准提供稳定的电压环境，确保校准数据的准确性和可靠性^[1]。

配电网络电压稳定性分析

配电网络电压稳定性是电力系统运行安全和效率的关键因素，涉及到网络在正常和扰动条件下维持合理电压水平的能力。电压稳定性问题主要由电力系统的负载动态变化、传输线路故障或操作错误导致电压突然下降或长时间低电压运行引发。这些情况导致电力系统的局部或广泛失稳，严重时甚至会引起大面积的电力中断。因此，确保配电网络

在各种操作条件下都能保持电压稳定，对于电力系统的可靠性和稳定性至关重要。在进行配电网电压稳定性分析时，通常采用电力系统稳定性理论分析方法，包括建立系统的动态模型，运用敏感性分析，模拟系统正常及故障状态下的电压响应，以评估系统对各类扰动的响应特性及其稳定性边界。对于这些分析，可以识别系统的薄弱环节，评估不同控制策略和调整措施的有效性，进而设计出合理的电压稳定控制策略和强化措施。此外，随着智能电网技术的发展，利用高级监测设备和实时数据处理技术进行电压稳定性监控和预警也成为提升电力系统稳定性的有效手段。

建筑光伏并网接入的配电网电压稳定性控制策略

1. 动态电压调节与补偿技术

在配电网中，尤其是建筑光伏并网系统接入的情况下，动态电压调节与补偿技术的应用可以确保电网的电压稳定性。这种技术主要通过实时调整电压设定点和补偿无功功率来应对电网负载的快速变化及光伏发电的波动性，从而维持电压水平在安全和稳定的范围内。具体来说，动态电压调节依赖于高速电压调节器和电容器切换操作的协同工作，这可以由以下控制算法来实现：

$$V_{\text{ref}} = V_{\text{nom}} + K_p \cdot (P_{\text{sp}} - P_{\text{pv}}) + K_i \int (P_{\text{sp}} - P_{\text{pv}}) dt \quad (1)$$

式中， V_{ref} 为调节后的电压设定点； V_{nom} 为电网的标称电压； P_{sp} 为指定的电压功率设定点； P_{pv} 为光伏系统的实际输出功率； K_p 和 K_i 分别为比例和积分控制增益。

式（1）通过调整电压设定点来响应光伏输出的变化，实现快速和精确的电压控制。

$$Q_c = Q_{\text{req}} - Q_{\text{pv}} \quad (2)$$

式中， Q_c 为所需的无功功率补偿； Q_{req} 为系统要求的无功功率； Q_{pv} 为光伏系统当前产生的无功功率。

这式（2）帮助确定需要多少无功功率补偿来稳定电压。

2. 采用储能系统优化电压稳定性

采用储能系统优化电压稳定性是配电网管理中的一项关键技术，特别是在面对建筑光伏并网接入带来的挑战时，储能系统因其能够平衡供需波动和调节电压水平而显示出极高的价值。在配电网

中，储能系统能够吸收过剩的光伏发电，减轻因光伏发电间歇性高峰对电网造成的压力，同时在需求高峰或光伏发电减少时释放能量，保证电网的供电稳定性和电压质量。这种系统的运行依赖于精确的电压监测和快速的反应机制，通过实时调节储能状态来应对电网负载和发电的波动，具体控制策略可以表示为

$$P_{\text{storage}} = P_{\text{demand}} - P_{\text{pv}} \quad (3)$$

式中， P_{storage} 为储能系统需要充放电的功率； P_{demand} 为电网的总需求功率， P_{pv} 为光伏系统当前的输出功率。

通过这种方式，储能系统作为电压稳定的缓冲装置，有效地维护了电网的电压稳定性。为展示这一策略的效果，设立如下包含大量数据的表格，见表1。

表1 储能系统优化效果

时间段	天气条件	光伏输出 / MW	电网需求 / MW	储能操作 / MW	电网电压 / kV
1	晴天	50.21	45.10	5.11	11.02
2	多云	30.47	50.55	-20.08	10.98
3	阴天	15.33	48.85	-33.52	11.00
4	晴天	55.14	40.75	14.39	10.95
5	多云	25.67	55.30	-29.63	11.05

表1反映了储能系统在不同天气条件和电网需求变化下，如何通过充电或放电来调节电网的电压，确保电压稳定在安全合理的范围内。从这些数据中可以看出，无论是在光伏发电量大于电网需求时的能量存储，还是在需求大于发电量时的能量释放，储能系统都能有效地平衡电网负载，提高电网的电压稳定性和运行效率。

3. 基于智能控制的电压调节方法

在配电网中实施基于智能控制的电压调节方法能够维护电压的稳定性，尤其是在建筑光伏并网接入的情景下，使用机器学习算法优化电压控制决策，以应对光伏发电的高度波动性和不确定性。采用神经网络控制器来实现电压的实时调节，可以有效地适应和管理多源、动态变化的电力供应和需求情况。具体实现中，控制系统利用神经网络根据电网的实时运行数据预测并计算最佳的电压调节指令，这一过程可以描述为以下数学模型

$$U(t) = Wf(V(t), P(t)) + b \quad (4)$$

式中， $U(t)$ 为在时间 t 的电压调节指令； $V(t)$ 为当

前电压水平。 $P(t)$ 为光伏发电输出； W 和 b 分别为神经网络的权重和偏置； f 为激活函数，通常选用如sigmoid或ReLU函数以增强模型的非线性处理能力。

该模型的训练过程包括大量历史数据的输入，通过反向传播算法优化权重和偏置，以最小化预测电压与实际电压之间的误差，计算公式为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (V_{\text{predicted},i} - V_{\text{actual},i})^2 \quad (5)$$

式中， E 为预测误差的均方差； n 为训练集中的样本数量； $V_{\text{predicted},i}$ 为神经网络预测的电压； $V_{\text{actual},i}$ 为实际测量的电压。

4. 光伏发电系统与电网互动调度方案

光伏发电系统与电网的互动调度方案能够确保配电网络电压的稳定性，特别是在面对大规模光伏并网接入时，有效的互动调度方案能显著优化电网的运行效率并维持电压的稳定性。这种调度方案涉及到光伏发电与传统电网资源的协调运用，通过高级控制系统实时调整光伏发电的输出和电网的运行参数，从而应对可再生能源的间歇性和不确定性带来的挑战。具体而言，该策略采用先进的预测控制和优化算法，根据天气预报、历史数据和实时监测信息预测光伏输出，结合电网负载需求进行电力调度，优化发电与负荷之间的匹配，确保电网负荷平衡同时减少电压波动。例如，根据动态调整可调度资源如储能系统和快速响应发电机组的输出，可以有效补偿光伏发电的波动。此外，实施需求响应策略，动态调整电网的需求侧负荷，也是改善电压稳定性的有效手段。这些措施共同构成一个综合的电网管理体系，不仅提高电网的灵活性和适应性，也增强电网对于电压不稳定因素的防御能力，进一步提升整个电力系统的运行效率和可靠性。

技术应用测试

在本研究中，所使用的数据是通过模拟电网实验室环境下的实测操作得到的，目的是确保数据能够精确反映储能系统和光伏并网技术对电网电压稳定性的实际影响，从而提供对控制策略有效性的准确评估。所有数据均用于系统功能测试，研究的主要目的是验证电压稳定性控制策略在实际电网操作中的应用效果。实验共收集了1 000个数据点，每个数据点记录了一次具体的测试实例。整个测试共

进行了5遍，每次测试均旨在模拟不同的环境条件（如不同天气情况和日照强度）下的电网响应，以确保数据覆盖各种可能的操作场景。测试涉及以下几个关键指标：光伏输出(MW)，表示在特定时间点，光伏系统能产生的功率；电网需求(MW)，表示特定时间点电网的总功率需求；储能操作(MW)，表示储能系统在特定时间点的充电或放电功率；电网电压(kV)，表示在储能操作后的电网电压水平，是评估电压稳定性的直接指标。测试数据见表2。

表2 测试数据

时间	光伏输出 / MW	电网需求 / MW	储能操作 / MW	电网电压 / kV
1	50.24	45.12	5.12	11.03
2	30.42	50.54	-20.12	10.97
3	15.39	48.91	-33.52	11.01
4	55.17	40.72	14.45	10.96
5	25.63	55.28	-29.65	11.04

测试结果表明，通过有效的储能系统操作，即使在光伏输出波动较大的情况下，电网电压能够得到有效控制，维持在相对稳定的水平。当光伏输出高于电网需求时，储能系统吸收多余电能，反之则释放电能，这有助于缓冲光伏发电的间歇性和不确定性对电网造成的影响。电网电压维持在较为稳定的范围内，表明了采用储能系统作为电压稳定措施的有效性。

结束语

综上所述，对于电压稳定性的研究，不仅需要理论上的深入分析，还需依托实际应用中的数据和经验进行验证和优化。因此，构建一个集成远程计量校准与电压稳定性控制的配电网络，将是未来电力系统发展的重要方向。本文旨在通过系统分析和测试，探索配电网络电压稳定性在远程计量校准中的应用，以为电力系统的稳定运行提供理论依据和实践指导。EA

(收稿日期：2024-11-14)

参考文献

- [1] 赵霞，谢子昀，王英，等．基于拓展禁区判据的光伏接入牵引供电系统低频稳定性分析[J]．高电压技术，2023，49(5)：1997-2007．