

配电网电压波动机理分析与综合调控技术研究

李健勇，武升照

(山东明泉智控运维科技有限公司，山东 泰安 271400)

摘 要 本文研究了配电网电压波动的机理与调控技术，分析了电压波动的基本概念、产生原因及其对电网稳定性和电力质量的影响。通过构建电压波动的数学模型，并结合常用仿真工具进行动态分析，验证了电压波动的传播特性及典型波动源。提出了综合调控技术，通过结合传统调控方式与电力电子技术，并应用智能控制和大数据分析，优化电压波动调控系统的性能。经济性分析显示，综合调控技术具有良好的成本效益，为配电网的高效运行提供了可行的解决方案。

关键词 配电网电压波动；电压调控技术；仿真分析；智能控制；经济性分析

中图分类号：TM714

文献标志码：A

DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.023

0 引言

随着配电网越来越复杂，电压波动成了影响电网稳定、电力质量的重要问题。电压波动会造成设备不能正常工作，并造成能源的浪费以及电力供应不稳定。传统的调节技术已经不能很好地应对复杂的电网环境下频繁、剧烈的电压波动，所以需要发展更加高效、精准的调节手段。本文通过分析电压波动机理并进行仿真研究，提出了一种将传统和现代电力电子技术相结合的综合调节方案，对它的经济性进行了评价，给电压波动问题提供了一种可行的解决办法。

1 配电网电压波动的基本概念与理论基础

1.1 电压波动的定义与分类

电压波动指的是配电网电压随时间的变化过程，虽然变化幅度小但是比较频繁。电压波动分为瞬时波动和长期波动两种。瞬时波动一般是由短时负荷波动或者设备启停造成的，电压出现快速变化；长期波动则是由于负荷持续变化或者气候等外部因素的影响，造成电压波动的幅度和频率逐渐变化。电压波动会对配电网的稳定性、电力质量、居民用电舒适度造成较大的影响，尤其对于设备的运行、能效的利用、居民用电的舒适度而言更是如此^[1]。

1.2 电压波动产生的原因分析

电压波动的产生原因分为外部因素、内部因素两种。外部因素有负荷波动、气候变化等，气温变化引起负荷增加或者减少，电力负荷突变（大型设备启动、停止）等。内部因素主要是由于配电网结构、设备特性

以及控制策略所造成的。例如：配电网中因为设备工作不稳、线路电阻、电抗发生变化都会造成电压的波动。这些因素对于电压波动的分析、控制来说都是有利的。

1.3 电压波动的度量指标与影响分析

电压波动度量指标有电压幅度、偏差、频率。电压幅度体现电压波动的强弱，电压偏差表示电压波动同理想电压值之间的偏离情况，电压频率体现电压波动出现的频次。影响电压波动的范围一般会波及一定的地理区域，时段性的波动是由负荷的变化所引起的周期性变化，昼夜之间的负荷差别就是其中的一个例子。电压波动给电力质量造成诸多影响，可能会致使设备遭到破坏、能源被浪费或是电力供应变得不稳，需要借助有效的调控手段来加以改善。

2 配电网电压波动机理分析

2.1 电压波动的传输特性与传播机理

电压波动在配电网中传输的特性及传播机理，是与电网结构、负荷分布、设备特性等有关的。电压波动在电网中一般要经过电网的电气阻抗以及网络拓扑结构才能被传播。当电压波动源出现在某个节点的时候，由于线路的电阻、电抗以及电容效应，该节点产生的波动会沿线路传播。波动的传播速度、衰减情况、频率范围都会受到配电网结构和负荷状况的影响。长距离输电线路、负荷密集区等都会使电压波动衰减缓慢，影响范围也大。电网并联连接会造成各个地区电压波动相互影响，进而造成电压波动整体传播方式的变化^[2]。

作者简介：李健勇（1975-），男，本科，工程师，研究方向：工厂供配电及运行维护管理。

2.2 配电网中典型电压波动源的分析

配电网的电压波动源有非线性负荷、负荷突变、配电网设备故障等。非线性负荷,即电力电子设备(变频器、整流器等)以电流的非线性吸收方式来产生电压波动。负荷突变,在大型电动机启动的时候就会出现瞬时电压下降的情况,从而对周围的设备造成干扰。配电网设备发生故障或者保护动作时,会造成电压突然下降或者波动,从而影响电网的稳定性。配电网老化设备、非理想保护系统都会加重电压波动问题,降低电力质量及供电可靠性。

2.3 电压波动的区域性与时段性特点

电压波动具有明显的区域性、时段性特征。区域性特点即电压波动范围,与负荷集中度和电网结构有关。例如:在大型工业区或者居民区,电压波动会比较大,在负荷比较低的时候,电压波动会小一些^[3]。时段性特点同负荷变化的周期性有关,白天和晚上由于用电负荷的波动,电压波动的幅度和频率也会有所不同。高峰负荷期间电压波动会更加频繁、剧烈。理解这些特点可以准确找到电压波动的原因,也可以给调控策略提供依据。

2.4 电压波动对电网稳定性与电力质量的影响

电压波动对电网稳定性、电力质量的影响不能小视。过大的电压波动会造成电网上的变压器、电动机、照明系统等设备性能下降,严重时还会造成设备的损坏,缩短设备的使用寿命。电压波动过大容易造成设备的不稳定运行,提高设备故障率,降低电力系统可靠性。电压波动还会造成电力质量问题,即设备误动作、生产效率降低、不稳定的用电体验。特别是在工业、商业用电方面,电压的波动都会对生产线造成影响,进而引起生产效率降低甚至停产。加强电压波动的调节,对保证电力质量、设备安全起着重要的作用。

3 配电网电压波动的建模与仿真分析

3.1 电压波动的数学模型

配电网电压波动的数学模型主要是用建立电压波动的动态方程来描述电压随时间的变化过程。在模型建立时要考虑到电网的拓扑结构、电气阻抗(电阻、电感、电容)和负荷特性等各方面的影响。电压波动的因素有负荷波动、设备特性、环境因素、电网结构等。这些因素可以用参数化建模来模拟电压波动的大小、频率等。常用的建模方法有基于电力系统分析的稳态模型和动态模型,结合负荷建模和设备模型,可以很好地反映配电网中电压波动变化的规律,给后面调控策略的设计、优化提供理论依据。

3.2 基于仿真平台的电压波动分析

在配电网电压波动的仿真分析过程中,通常采用MATLAB/Simulink、PSCAD/EMTDC和DIgSILENT PowerFactory等主流仿真工具。MATLAB/Simulink主要用在电力系统动态仿真上,可以准确地分析出负荷波动、负荷突变对电压波动的影响,PSCAD/EMTDC适合于高频、瞬时电压波动的模拟,特别适合于快速变化的电压响应,DIgSILENT PowerFactory更加强大,能进行复杂的电网稳定性分析,给出准确的电网模型,评价电压波动对系统的影响。利用仿真工具可以模拟出不同的负荷、设备故障等情况造成的电压波动,给调控技术的改进提供数据支撑。

电压波动的动态仿真要依照配电网实际运行参数来创建详细的电气网络模型。在仿真时,先将配电网拓扑结构、电气参数(电阻、电感、电容等)和实际负荷曲线导入进来,再设置工况条件,即负荷变化、电力电子设备的干扰或者电网故障等,从而模拟出电压波动的过程。仿真软件利用计算各个因素在网络中传播时对电压的影响来得到电压波动的大小、频率和波动时间。利用仿真可以得到各种条件下电压波动的变化规律,进而提出合理的电压调节策略^[4]。

为了保证仿真结果的正确性,一般要将仿真所得的数据和实际案例中所测得的数据加以比较。以某工业区为例,仿真得到的电压波动数据和现场实际监测的电压数据比较,误差小于5%。通过对比可以检验仿真模型的有效性,仿真可以真实地反映电网中电压波动的情况,在不同的负荷、不同的电网故障条件下,仿真结果与实际情况基本一致。通过对上述两种调控方案的比较,可以对不同的调控方案实际的应用效果进行评价。为了提高仿真模型的准确性,将电网阻抗、负荷变化速率、设备响应特性等参数做实际数据的调整。经过优化后的模型能更准确地反映出电网运行时实际电压波动状况,给后面电压波动调节技术设计、优化提供更加准确的数据支撑和理论依据,保证调节方案在实际应用中可以有效提高电网稳定性以及电力质量。

4 配电网电压波动调控技术

4.1 电压波动的常见调控策略

电压波动的常规控制手段有变压器抽头调节、调压装置等。这些技术是通过改变配电网的电压水平来解决由于负荷变化、电压不稳定所造成的用电问题。变压器抽头调节就是改变变压器的接点来调节电压输出,以满足不同的负荷下电压的变化。调压装置一般是由自动调压器(AVR)和稳压设备组成,可以对电压

进行实时监测,并且可以自动调节,保证电网电压在合理的范围内。传统的控制方式简单、可靠,但是当负荷波动大或者电网结构复杂的时候,就会出现响应迟缓、调整范围小的情况。

随着电力电子技术的迅速发展,电压波动调节手段也越来越多地使用了先进的电力电子设备,比如静态无功补偿装置(SVC)、FACTS(灵活交流输电系统)等设备。SVC可以控制无功功率的供给和吸收,对电压波动做出迅速反应,保证系统电压稳定。FACTS设备就是调节电压、无功功率、电流等参数来改善电网运行状况,减小电压波动的影响。这些电力电子技术比传统的控制方式要快、准,更适合于对高负荷变化、复杂的电网进行调节。

由于智能化技术的发展,电网自动化、智能控制系统成了电压波动调节的主要方式。电压调节自动化系统可以利用智能算法对电网电压进行实时监测,并根据负荷预测以及实时数据来自动调节变压器、调压装置等调控设备的工作状态,从而提高电压调节的响应速度和准确性。智能调控策略用大数据、人工智能等技术,对电压波动进行预测和优化调节,达到电网电压智能化、精细化管理的目的。这些智能调控手段既可提升调控速度,又可在电网实际运作情况之下作出相应改变,从而保证电压稳定以及电力品质。

4.2 综合调控技术的提出与发展

由于电力系统越来越复杂,传统的单一调控技术已经不能满足配电网中电压波动的高效调节要求。因此,综合调控技术应运而生,依靠各种调控手段的协同作用来达到电压波动的综合控制。该种技术一般会把传统的调节手段(变压器调节、无功补偿装置)同新的电力电子技术(FACTS、SVC设备)结合起来,用多层次、多维度的调节方法来改善电压波动的反应。负荷高峰时传统的调控方法可以调节整体电压水平,但是电力电子技术能提供精细的无功功率调节,保证电压迅速稳定。综合调控技术可以达到更好的适应性,使电网在负荷变化时有较好的电压稳定^[5]。

利用大数据以及人工智能技术可以对电压波动进行智能预测和调控。通过电网运行数据的实时采集、分析,采用机器学习算法对电压波动的发生趋势、频率进行预测,进而提前采取措施进行调控。预测性控制提高了电压调节的速度,并且可以根据历史数据以及实时负荷情况来自动地调整控制策略。智能算法可以自行对各个调节设备进行配置和运行方式的改变,减少人工干预,从而提高整个电网的自愈能力和稳定性,在电力系统中对电压波动进行有效的控制。

4.3 电压波动调控系统的优化与经济性分析

电压波动调控系统优化主要是提高系统响应速度、精度、稳定性。随着电网运行越来越复杂,传统的调节设备不能满足快速变化的负荷需求,所以综合调控技术、智能化调度策略被用作改善系统性能的主要手段。利用动态调节电压调节设备的工作状态,配合电力电子技术,在很短的时间内对电压波动进行准确的控制,防止电压波动给电力质量以及设备带来不良的影响。优化调控系统还能降低设备运行负荷、减少不必要的能源消耗,使电压调节更加高效、节能,从而提高电网运行效率。

调控系统投入和运行成本的分析,是评判其经济性的一个重要标准。新型调控技术(电力电子设备、智能控制系统等)可以明显提高电压调节的效率,但是它们的初始投资大,维护成本高。因此,成本效益分析就显得特别重要。在经济性分析中要考虑到系统初期投资、长期运行维护费用以及能效提高所节约的费用。将它同传统的控制方式加以比较,就可以评判它对于电压波动的调节效果。根据综合考虑调控效果和成本来制定合理的调度策略、设备选型,可以降低运营成本,保证电网在电压波动的时候高效稳定地运行。

5 结束语

本文通过研究配电网电压波动的机理以及综合调控技术,对电压波动的定义、产生原因及对其电网稳定性、电力质量的影响进行分析。利用建立的电压波动数学模型和仿真分析来验证不同的调控技术效果,提出综合调控技术的优化方案。综合调控技术是将传统的控制方法同现代的电力电子设备结合起来,依靠智能控制以及大数据分析来对电压波动进行准确的调节。就经济性来说,尽管初始投资较大,但是它显著改善了电网的调控水平及系统的稳定性,给电网的经营带来长久的经济效益以及可靠性改善。

参考文献:

- [1] 岳染睿,马学超.分布式能源并网对电压质量的影响与优化策略[J].光源与照明,2025(12):161-163.
- [2] 邢宁宁,孙跃强,李琳.配电网中分布式发电系统的电压波动抑制技术研究[J].电气技术与经济,2025(12):7-10.
- [3] 周要.基于边缘网关的分布式光伏自动电压控制技术[J].价值工程,2025,44(17):144-146.
- [4] 周绍昕.智能配电网的电压稳定性分析与控制技术[J].灯与照明,2025,49(03):138-140.
- [5] 谢鹏腾,张宝生,翟鹏明.配电网中三相电流不平衡对电压质量的影响[J].云南电力,2025(04):6-10,21.