

电压越限对电网末端设备的影响及应对措施

李东霖 宁怡雯 李汉君 何 龙

国网新疆电力有限公司昌吉供电公司 新疆 昌吉 831100

【摘要】: 电压稳定性是衡量电能质量的重要指标,直接关系到电力系统的安全稳定运行。随着配电网规模的不断扩大和分布式能源的大规模接入,电网末端电压越限问题日益突出,严重威胁着末端用电设备的安全运行。本文系统分析了电压越限对电网末端设备的影响机理,建立了电压越限影响评估模型,并通过仿真实验验证了不同电压偏差条件下末端设备的运行特性。结果表明,电压升高会导致设备过热、绝缘老化加速,电压降低则会造成设备性能下降、寿命缩短。本文从技术和管理两个维度提出了针对性的应对措施,包括优化无功补偿、调整变压器分接头、应用电压调节装置以及加强监测预警等,为提升电网末端电压质量、保障用户设备安全提供了理论依据和实践指导。

【关键词】: 电压越限; 末端设备; 电能质量; 电压调节; 实验分析

DOI:10.12417/3083-5526.25.02.006

1 引言

随着配电网规模的不断扩大和分布式能源的大规模接入,电网末端电压稳定性问题日益突出。电压作为电能质量的核心指标,其偏差范围直接关系到用电设备的运行性能和使用寿命。根据国家标准的明确规定,20kV 及以下三相供电电压偏差不得超过标称电压的 $\pm 7\%$,但在实际运行中,由于线路阻抗压降、负荷波动等因素的影响,末端电压越限现象时有发生^[1]。

电压越限问题不仅影响用户的正常用电,还可能带来严重的经济损失和安全风险。特别是在配电网末端,由于供电半径长、负荷分散等特点,电压质量问题更加突出。因此,深入研究电压越限对末端设备的影响规律,探索有效的治理措施,具有重要的理论价值和现实意义。

本研究通过搭建实验平台,模拟不同电压偏差条件下的设备运行环境,量化分析电压越限对设备性能的影响程度,并在此基础上提出系统化的解决方案,为提升配电网供电质量提供技术支持^[2]。

2 电压越限的影响机理分析

2.1 电压升高的影响机理

电压升高对电网设备的影响是多方面的,首先,对于铁芯设备,如变压器和电动机,其铁芯的磁通密度与电压成正比,因此电压升高会导致铁芯进入磁饱和区,从而使得励磁电流急剧增加和铁损显著增大,这不仅影响设备的正常运行,还可能引发过热等问题。其次,过高的电压还会使得绝缘材料承受的电场强度增加,导致电应力加剧,进而加速绝缘老

化过程,显著降低设备的使用寿命。此外,电压的升高还会根据焦耳定律加剧热效应,设备发热量与电压平方成正比,因此电压升高会导致设备温升明显加剧,这不仅会缩短设备的使用寿命,还可能引发安全隐患,对电网的稳定运行构成威胁。这些影响强调了电压控制的重要性,以确保电网设备和系统的安全可靠运行^[3]。

2.2 电压降低的影响机理

电压降低对电网设备的运行带来了一系列不利影响。首先,对于电磁设备,如电动机,其输出转矩与电压的平方成正比,因此电压的降低会显著减少设备的输出转矩,直接影响其带载能力,导致设备无法提供足够的动力支持。其次,电压降低还会使设备的工作点偏离设计最佳值,这不仅降低了设备的运行效率,还可能增加能耗,从而提高了运行成本。此外,现代设备普遍采用电子控制系统进行精密控制,电压的降低可能会干扰控制电路的正常工作,影响系统的稳定性和可靠性,严重时甚至可能导致控制失效,影响生产流程和设备安全。因此,维持电网电压的稳定对于确保设备高效、稳定运行至关重要^[4]。

3 实验设计与方法

3.1 实验系统构建

为了精确评估电压越限对设备性能的影响,研究团队构建了一套综合性的实验系统,如图 1 所示。该系统由多个关键组件构成,以确保实验结果的准确性和可靠性。核心组件包括 Chroma 61512 型可编程交流电源,具备 15kVA 的输出

作者简介: 李东霖 (1993.01—), 男, 汉族, 河南省登封市人, 本科, 职称: 中级职称, 研究方向: 电压越限对电网末端的影响, 任国网昌吉供电公司监控值班员, 精通监控系统操作与异常预警, 擅长设备运行状态研判及应急联动处置, 积累了丰富的现场监控实战经验。

功率和 $\pm 0.1\%$ 的高调节精度，能够提供稳定且可控的电源条件。同时，采用 Yokogawa WT1800 型功率分析仪，其测量精度高达 $\pm 0.02\%$ ，确保了电力参数的高精度测量。数据采集系统采用了 NI PXIe-1071，支持高达 100kHz 的采样频率，能够实时捕获电压和电流的动态变化。此外，为了监测设备温升，系统还配备了 FLIR T1040 红外热像仪，能够精确测量设备表面温度分布。实验中还使用了可调电阻负载箱作为负载模拟装置，以便在不同的负载条件下模拟电压越限的影响。这些组件的集成使用，为研究电压越限对设备影响的实验提供了强大的技术支持。

3.2 被试设备选择

为了全面评估电压波动对末端设备的影响，实验选择了五种具有代表性的设备作为研究对象，包括 4kW 的三相异步电动机（Y2-112M-4）、36W 的 LED 照明灯具（飞利浦）、40W 的电子镇流器荧光灯（欧司朗）、350W 的开关电源（明纬）以及 3kW 的电阻加热炉。实验分为两个主要阶段进行：第一阶段是电压升高实验，电压范围从 220V 递增至 250V，以 5V 为步长，每个电压等级下设备持续运行 2 小时，期间记录电气参数和设备的温升数据；第二阶段则是电压降低实验，电压范围从 220V 递减至 190V，同样以 5V 为步长，记录各电压等级下设备的运行特性。通过这两个阶段的实验，研究人员旨在获取电压波动对设备性能的详细信息，以便为电网的电压管理和设备的设计提供科学依据。

4 实验结果与分析

4.1 电压升高实验结果

表 1 电压升高对设备性能的影响实验数据

电压值 (V)	电动机温升 (℃)	电动机 效率 (%)	LED 灯 具温度 (℃)	荧光灯镇 流器温度 (℃)	开关电 源谐波 (%)
220 (基准)	65	87.5	68	72	28.5
225	71	86.8	72	76	30.2
230	76	86.1	75	81	32.8
235	82	85.3	79	86	35.4
240	88	84.5	83	92	38.1
245	95	83.6	88	98	41.3
250	103	82.7	94	105	45.2

实验数据分析：

通过对电压升高条件下不同设备性能的实验研究，我们

发现电压的升高对设备的温升特性和效率产生了明显的负面影响。当电压升高 10% 时，电动机的温升增加了 58%，LED 灯具的温度升高了 38%，而荧光灯镇流器的温度升高了 46%，这些温升的显著增加可能会导致设备的过热和绝缘性能下降。同时，当电压从 220V 升至 250V 时，电动机的效率下降了 4.8 个百分点，这表明电动机在较高电压下的运行效率降低，可能导致能源浪费和额外成本。此外，开关电源的电流总谐波畸变率（THD）从 28.5% 上升至 45.2%，这一变化表明电压升高加剧了电流的谐波畸变，可能会影响电源系统的稳定性和设备的使用寿命。这些实验结果揭示了电压升高对电动机、LED 灯具和荧光灯镇流器等设备温升特性、效率和谐波影响的具体表现，为电压质量管理提供了重要的实验依据。

4.2 电压降低实验结果

表 2 电压降低对设备性能的影响实验数据

电压值 (V)	电动机 转矩 (N·m)	电动机 电流 (A)	LED 光 通量 (lm)	荧光灯启辉 时间 (s)	电阻炉升 温时间 (min)
220 (基准)	26.5	8.7	3200	0.8	28.5
215	25.1	8.9	3050	1.2	30.2
210	23.8	9.2	2900	1.8	32.1
205	22.4	9.6	2750	2.5	34.3
200	21.0	10.1	2600	3.4	36.8
195	19.7	10.7	2450	4.6	39.5
190	18.3	11.4	2300	6.2	42.6

实验数据分析：

研究结果表明，电压降低对各种设备的运行性能产生了显著影响。具体来看，当电压降低 10% 时，电动机的输出转矩大幅下降 31%，导致其驱动能力减弱，而 LED 灯具的光通量也减少了 28%，影响照明效果。此外，电压降低导致荧光灯的启辉时间延长了 6.75 倍，这一变化严重影响了设备的正常使用，可能会造成启动困难或频繁熄灭等问题。在工作效率方面，电阻炉在电压降低的情况下，达到设定温度所需的时间延长了 49%，这不仅降低了生产效率，也可能增加能耗和维护成本。这些数据共同揭示了电压降低对电动机、LED 灯具和荧光灯等设备输出特性、启动性能和工作效率的负面影响，强调了电压质量管理在保障设备正常运行中的重要性。

5 应对措施研究

5.1 技术措施

在当今电力系统中，配电网末端电压质量的稳定性对于

保证各类用户供电可靠性至关重要。自动无功补偿装置作为一种提升电网功率因素和电压质量的有效手段，在电力系统中得到了广泛应用。无功补偿装置能够通过对无功功率的实时调节，优化电网的运行状态，降低线损，提高供电效率。

为了适应不同负荷变化对无功功率的需求，建议实施分级投切策略，以便更加精准地调节无功功率。在轻载时段，由于电网中的无功功率需求较低，可以投入固定电容器组进行补偿。固定电容器组的投切能够有效提高电网的功率因素，减少线路损耗，同时也有助于维持电压水平，保证电机的正常运行。

在重载时段，电网中的无功功率需求增加，此时启用动态无功补偿装置显得尤为重要。动态无功补偿器能够根据负荷的变化快速响应，及时调整无功功率的输出，保持电压的稳定。这种补偿方式不仅能够适应负荷的快速变化，还能够有效抑制电压波动，提高电网的动态稳定性。

面对特殊工况，如电压波动较大或对无功补偿精度要求较高的场合，静止无功发生器的应用能够提供更为精确的补偿。SVG采用电力电子技术，能够实现无功功率的连续调节，对电网的电压和功率因素进行精细控制，确保在复杂工况下电压和功率因素的稳定性。

通过实施分级投切策略，不仅能够根据电网的不同运行状态进行无功功率的实时调节，还能够提高电网的运行效率和供电质量。这种策略的运用对于优化配电网的运行性能，提升用户供电体验，以及促进电力系统的可持续发展具有重要的实践意义。随着技术的不断进步和电力系统需求的日益增长，无功补偿技术将继续向着更高效、更智能、更环保的方向发展。

5.2 管理措施

为了全面提升电压质量管理水平，首先建立了一个涵盖变电站出口、线路中段以及末端用户的三级电压监测网络体系。这一体系能够实时监控电压状况，确保从电源到用户的每一个环节都能得到有效监测。同时，根据电压偏差的严重程度，构建了三级预警机制，其中一级预警对应电压偏差超过5%，二级预警对应电压偏差超过7%，而三级预警则对应电压偏差超过10%，这样的分级预警能够及时发出警报，指导相关部门采取相应措施。此外，为了优化运行维护工作，制定了详尽的设备巡检计划，建立了电压质量档案，以记录

和分析电压变化趋势，并且定期对设备进行预防性试验，确保设备处于最佳工作状态，减少因设备故障引起的电压质量问题，从而保障电力系统的稳定运行和供电质量。这些措施共同构成了一个全面、高效的电压质量管理策略。

6 结论

通过深入的研究与分析，本研究揭示了电压越限对末端设备影响的显著性和规律性，发现电压升高将导致设备过热和绝缘老化，而电压降低则会影响设备的出力 and 运行效率。实验数据进一步表明，当电压偏差超过 $\pm 5\%$ 时，设备性能将明显恶化；超过 $\pm 7\%$ 时，设备寿命会显著缩短；而超过 $\pm 10\%$ 时，设备则有发生故障的风险。针对这些问题，本研究提出了综合治理方案，强调技术措施和管理措施的有效结合，认为技术措施是改善末端电压质量的基础，而管理措施则是保障，两者的协同配合是实现良好效果的必要条件。展望未来，研究将聚焦于分布式能源接入对电压质量的影响机理、智能电压调控系统的开发、新型电力电子设备在电压调节中的应用，以及构建更加完善的电压质量评估体系，以期在理论和实践层面推动电压质量管理技术的进步。

参考文献：

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12325-2008 电能质量供电电压偏差[S]. 北京：中国标准出版社，2008.
- [2] 王兆安，刘进军. 电力电子技术[M]. 北京：机械工业出版社，2009.
- [3] 张尧，陈建福，王克英. 配电网电压质量分析与控制[M]. 北京：中国电力出版社，2015.
- [4] 李建强，邹晓峰，王承民. 分布式发电对配电网电压质量的影响分析[J]. 电力系统自动化，2013，37(12): 30-35.
- [5] IEEE Standard 1159-2009. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality[S]. New York: IEEE, 2009.
- [6] 陈柏超. 电力系统电压稳定性分析[M]. 北京：中国电力出版社，2014.