

输配电系统电压稳定性分析与控制策略研究

刘礼涛 钮玉锋

嘉兴市恒光电力建设有限责任公司南湖分公司 浙江 嘉兴 314033

摘要: 输配电系统电压稳定性关乎电力系统安全运行,其核心是无功功率供需平衡。本文阐述电压稳定性基本概念,剖析电压失稳物理机理,介绍静态、暂态、中长期电压稳定分析方法。分析负荷特性、无功补偿、网络结构等因素对电压稳定性的影响,提出预防性、自动电压控制(AVC)、紧急、恢复及含新能源系统等控制策略,为提升输配电系统电压稳定性提供理论支持与实践指导。

关键词: 电压稳定性; 新能源接入; 动态无功补偿

引言: 在新型电力系统发展进程中,输配电系统电压稳定性成为保障电力安全、可靠、经济运行的关键问题。电压失稳会引发负荷丧失、线路跳闸等严重事故,造成巨大损失。随着新能源大规模接入,电压稳定面临新挑战。深入研究输配电系统电压稳定性,分析其机理、影响因素,并制定有效控制策略,对提升电力输送质量、保障电网安全、推动新型电力系统建设具有重要意义。

1 输配电系统电压稳定性基本概念

输配电系统电压稳定性是保障电力系统安全、可靠、经济运行的核心指标之一,指系统在给定初始运行条件下,受到扰动(如负荷波动、设备故障、新能源出力变化等)后,所有节点电压能够维持在允许范围内,或通过自身调节恢复至额定电压水平,避免出现电压持续下降、崩溃等失稳现象的能力。其核心本质是系统无功功率的供需平衡,电压稳定与否直接决定电力输送的质量和效率,影响用电设备正常运行及电网整体安全^[1]。我国《电能质量供电电压偏差》明确规定了不同电压等级的允许偏差范围,其中35kV及以上供电电压正负偏差绝对值之和 $\leq 10\%$,220V居民用电允许+7%至-10%。电压失稳可能引发负荷丧失、线路跳闸、级联停电等严重事故,造成巨大经济损失和社会影响,因此深入研究电压稳定性是新型电力系统发展的重要课题。

2 电压稳定性机理与评估方法

2.1 电压失稳的物理机理

电压失稳的核心物理机理是系统无功功率供需失衡,当系统无法满足负荷及设备的无功需求时,会导致节点电压持续下降,最终引发电压崩溃。从物理过程来看,电力系统中无功功率主要用于维持电气设备的电场,其传输存在较大损耗,且无法远距离高效输送,当负荷侧无功需求激增、无功补偿装置失效,或输电线路

故障导致无功传输受阻时,系统电压会出现初始跌落。若此时系统调节能力不足,如发电机励磁限制、有载调压变压器动作滞后等,会进一步加剧无功短缺,形成“电压下降—无功需求增加—电压进一步下降”的恶性循环。另负荷特性、网络阻抗、新能源出力波动等因素会加速这一过程,不同类型的电压失稳(静态、暂态、中长期)其物理机理略有差异,但均以无功供需失衡为核心诱因。

2.2 静态电压稳定分析方法

静态电压稳定分析方法主要用于评估系统在小扰动(如负荷缓慢增长、小幅无功波动)下的电压稳定状态,核心是基于潮流方程或修改后的潮流方程,通过线性化分析确定系统电压稳定极限。常用方法包括灵敏度分析法、连续潮流法和奇异值分解法。灵敏度分析法通过计算节点电压对无功功率的灵敏度指标,快速识别系统薄弱环节,适用于预想事故筛选,但其仅能提供局部信息,无法全面反映系统稳定性。连续潮流法通过逐步增加负荷水平直至潮流方程发散,绘制PV曲线,精确获取电压稳定极限和临界点,在电网规划和运行分析中应用广泛,但计算过程复杂、耗时较长。奇异值分解法通过对雅可比矩阵进行分解,利用最小奇异值及其对应向量,识别最危险的电压失稳模式,数学严密性高,但大规模电网计算量较大。

2.3 暂态电压稳定分析方法

暂态电压稳定分析方法针对系统遭受大扰动(如短路故障、发电机跳闸、线路切除等)后的秒级时间尺度电压响应,核心是计及各类设备动态特性,模拟扰动后系统的电压恢复过程。常用方法包括时域仿真法、小干扰分析法和能量函数法。时域仿真法通过对电力系统微分代数方程进行数值积分,利用PSCAD/EMTP等工具模拟故障后毫秒级电压跌落过程,直观展示系统动态行为,但计算量大,

且对仿真步长选择敏感。小干扰分析法基于线性化系统模型，通过分析特征值和特征向量判断小扰动下的电压稳定性，可定位系统薄弱环节，但仅适用于小扰动场景。能量函数法将系统能量变化与电压稳定性关联，通过计算能量函数判断系统是否会发生电压失稳，物理概念清晰，但构造合适的能量函数难度较大。

2.4 中长期电压稳定分析

中长期电压稳定分析聚焦于扰动后分钟至小时级的电压演化过程，主要关注慢动态元件的影响，如负荷自恢复特性、有载调压变压器分接头动作、发电机励磁限制器动作等，这类元件的滞后响应可能引发渐进式电压崩溃。常用分析方法包括中长期动态仿真法、准静态时序仿真法和电压崩溃临近指标法。中长期动态仿真法覆盖分钟级时间尺度，模拟慢动态元件的动作过程，评估其对电压稳定的影响，是目前应用最广泛的方法。准静态时序仿真法将时间分解为多个时间段，逐步计算每个时间段的系统潮流，分析电压随时间的变化趋势，兼顾计算效率和精度^[2]。电压崩溃临近指标（VCPI）基于戴维南等值电路计算节点阻抗比，当指标超过阈值时触发预警，可实现中长期电压失稳的早期检测，为控制策略制定提供依据。

3 输配电系统电压稳定性影响因素

3.1 负荷特性因素

负荷特性是影响输配电系统电压稳定性的关键因素，不同类型负荷的电压响应特性差异较大，直接决定系统电压的动态变化规律。负荷按特性可分为恒阻抗负荷、恒功率负荷和恒电流负荷，其中恒功率负荷对电压稳定性影响最大，当电压下降时，其无功需求会显著增加，加剧系统无功失衡，易引发电压失稳。感应电动机等动态负荷在电压跌落时会进入欠励限制区，进一步消耗无功功率，恶化电压状况；空调、热水器等恒阻抗负荷在电压恢复过程中可提供一定支撑，但负荷集中增长时仍会给系统带来较大压力。

3.2 无功补偿因素

无功补偿装置是维持系统无功平衡、提升电压稳定性的核心设备，其配置合理性、调节能力和响应速度直接影响电压稳定水平。合理配置无功补偿装置可实现无功功率就地平衡，减少无功传输损耗，避免电压跌落。常用的无功补偿装置包括并联电容器组、静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）等，其中STATCOM响应速度可达毫秒级，无功调节能力强，能有效抑制暂态电压波动，适用于新能源高渗透率区域。若无功补偿容量不足，会导致系统无功短缺，引发电压

下降；若补偿容量过剩，则可能造成电压过高，同样影响系统稳定。此外，无功补偿装置的投切时机、调节精度，以及不同补偿装置之间的协同配合，也是影响电压稳定性的重要因素，配置不当会加剧电压波动。

3.3 网络结构因素

输配电网络结构的合理性的直接决定无功功率传输效率和电压分布均匀性，是影响电压稳定性的重要基础因素。网络结构过于薄弱，如输电线路长度过长、导线截面过小，会导致线路阻抗过大，无功传输损耗增加，末端节点电压易偏低，且抗扰动能力弱，一旦发生线路故障，易引发电压失稳^[3]。电网分区不合理、联络线容量不足，会导致区域间无功传输受阻，出现局部无功盈余与短缺并存的现象，加剧电压波动。电网拓扑结构的灵活性、设备冗余度也会影响电压稳定性，若电网结构僵化，缺乏备用线路和灵活调节设备，当某一设备故障时，无法快速切换供电路径，会导致局部电压持续下降。随着分布式新能源规模化并网，电网结构向分布式、多源化发展，进一步增加了电压稳定控制的复杂性。

4 电压稳定性控制策略

4.1 预防性控制策略

预防性控制策略是电压稳定控制的第一道防线，核心是在系统发生扰动前，通过提前调整运行状态，提升系统电压稳定裕度，预防电压失稳事故发生。其核心原则是“防患于未然”，主要措施包括优化电网运行方式、合理配置无功补偿装置、预留充足的无功备用容量。具体而言，通过实时监测系统电压、无功功率分布，调整发电机无功出力、变压器分接头位置，确保各节点电压处于允许范围；根据负荷预测和新能源出力预测，提前投切无功补偿装置，实现无功功率就地平衡；优化电网拓扑结构，减少无功传输损耗，强化薄弱区域的电压支撑。此外，建立电压稳定预警机制，通过分析电压稳定指标，及时识别潜在风险，提前采取调整措施，可有效降低电压失稳概率，保障系统安全稳定运行。

4.2 自动电压控制（AVC）

自动电压控制（AVC）是一种实时闭环控制策略，通过自动化系统实现对输配电系统电压的精准、快速调节，是维持系统电压稳定的核心手段。其工作原理是通过PMU同步测量装置实时采集各节点电压、无功功率等运行数据，由控制中心根据预设的电压目标值，自动生成控制指令，调节发电机励磁电流、无功补偿装置投切状态、变压器分接头位置等。AVC系统采用分层分区控制模式，兼顾全网电压平衡和局部电压调节，可实现毫秒级响应，有效抑制电压波动。在并网运行场景中，

AVC系统可控制发电机切换至定功率因数或定无功模式,接受调度主站指令,参与全网电压分层调控;同时协调不同调压设备的动作,避免调节冲突,确保系统电压稳定在设定范围内,提升电能质量和系统运行效率。

4.3 紧急控制策略

在电力系统运行中,紧急控制策略至关重要。当系统遭受严重扰动,如短路故障、大容量机组跳闸等,电压会急剧下降,濒临失稳边缘,若不及时干预,极有可能引发电压崩溃,导致大面积停电,造成巨大的经济损失和社会影响。紧急控制策略的核心在于“快速响应、精准干预”。常用措施丰富多样,低电压减载(UVLS)是其中最为常用的手段。当电网中某些节点电压低于预先设定的阈值时,系统会依据负荷优先级,有序切除非关键负荷,以此减少无功需求,缓解电压跌落的压力,避免出现电压雪崩效应。紧急无功补偿则是投入备用的无功补偿装置,像电容器组等,快速补充系统缺失的无功功率,为电压恢复提供有力支撑。发电机强励能在短时间内大幅提升励磁电流,增加发电机的无功出力,助力电压回升。切除故障线路可快速隔离故障源,防止故障进一步扩大。不过,实施紧急控制策略并非易事,需要兼顾快速性和合理性。既要迅速采取行动遏制电压恶化,又要避免过度切除负荷或盲目调节,力求在保障系统安全稳定运行的同时,最大限度降低事故造成的损失。

4.4 恢复控制策略

恢复控制策略是在系统电压失稳得到遏制、电压初步恢复后,通过系统性调整,使系统逐步恢复至正常运行状态,防止电压再次失稳的控制措施。其核心是“循序渐进、协同恢复”,主要包括负荷逐步恢复、无功补偿装置优化调整、发电机运行状态恢复、电网拓扑重构等。在电压恢复初期,需按照“先重要负荷、后一般负荷”的原则,逐步恢复被切除的负荷,避免负荷骤增导致电压再次跌落;同时调整无功补偿装置的运行状态,优化无功功率分布,确保电压稳定在额定范围。此外,恢复发电机的正常励磁状态,调整变压器分接头位置,重构合理的电网拓扑结构,恢复系统的正常供电能力,也是恢复控制的重要内容。恢复控制需结合系统运行状

态,实时监测电压变化,灵活调整控制措施,确保系统平稳恢复。

4.5 含新能源系统的电压控制策略

随着分布式光伏、风电等新能源规模化并网,其出力的随机性和波动性给输配电系统电压稳定带来了新挑战,需针对性制定专用电压控制策略。核心思路是协调新能源发电设备与传统调压设备,实现电压协同控制^[4]。具体措施包括利用新能源逆变器的无功调节能力,采用恒功率因数控制、Q(U)控制等策略,实时调整无功输出,抑制电压波动;通过分布式发电集群划分与协同控制,改善新能源对外整体特性,提升局部电压支撑能力。同时配置STATCOM等动态无功补偿装置,弥补新能源出力波动带来的无功缺口;优化新能源并网位置和容量,减少潮流反送引发的电压越限问题。建立多时间尺度耦合分析模型,整合机电-电磁混合仿真,揭示新能源接入后电压失稳的演变规律,为控制策略优化提供依据,保障含新能源系统的电压稳定。

结束语

输配电系统电压稳定性研究意义重大。本文全面探讨了电压稳定性相关内容,从基本概念到机理评估,从影响因素到多种控制策略,涵盖传统与含新能源系统场景。未来,随着电力系统不断发展,需持续深入研究电压稳定性,结合新技术、新方法优化控制策略,提升系统应对复杂情况的能力,保障电力稳定供应,推动电力行业高质量发展。

参考文献

- [1]张乖润,杨永军.输配电及用电工程质量标准对电网安全稳定性的影响[J].消费电子,2026(6):176-178.
- [2]罗海荣,蔡建辉,张爽,等.基于三相输配电联合潮流仿真的电压稳定裕度评估[J].宁夏电力,2022(6):1-7.
- [3]张婷婷,刘沛汉,唐光辉,等.小电流接地系统输配电线路接地保护配置方案设计及选型分析[J].科技与创新,2024(3):34-37.
- [4]库敖沛,张琳,马豫,等.新型环保开关在高压输配电系统中的适用性研究[J].电力系统装备,2025(4):25-26,39.