

电力系统电压稳定性分析与控制策略

郭 艳

国能生物发电集团有限公司 北京 100052

摘要: 随着电力系统规模的扩大和负荷需求的增长,电压稳定性问题日益突出,成为影响电力系统安全稳定运行的关键因素之一。本文旨在深入分析电力系统电压稳定性的基本概念、分类及其分析方法,并探讨有效的电压稳定控制策略,以期为电力系统的规划、运行和维护提供理论支持和实践指导。

关键词: 电力系统; 电压稳定性; 控制策略

引言

电力系统电压稳定性是指在给定初始运行状态下,系统遭受扰动后维持所有母线电压在可承受范围内的能力。随着电力市场的开放和远距离、大容量输电技术的发展,电压稳定性问题变得愈加复杂和重要。因此,对电力系统电压稳定性进行深入分析和有效控制具有重要意义。

1 电压稳定性的基本概念与分类

1.1 电压稳定性的定义

电压稳定性是电力系统在正常运行或遭受扰动后,能够维持所有母线电压在可承受的稳态值范围内的能力。它是电力系统稳定运行的关键指标,直接关系到电力供应的连续性和可靠性。当系统无法维持电压稳定性时,电压可能会急剧下降或上升,导致设备损坏、系统崩溃,进而引发大面积停电事故,对社会经济和生活造成严重影响。

1.2 电压稳定性的分类

根据扰动的大小和研究时间框架的不同,电压稳定性可分为小干扰电压稳定性和大干扰电压稳定性。这两种稳定性在电力系统的运行和维护中都具有重要意义。

1.2.1 小干扰电压稳定性

小干扰电压稳定性是指电力系统在遭受小扰动后,能够维持电压稳定的能力。小扰动可能包括负荷的缓慢变化、小规模可再生能源(如风电或太阳能发电)的接入或切除、系统参数的微小变化、线路阻抗的轻微变动等。这种稳定性主要由系统的负荷特性、连续控制(如自动电压调节器AVR的控制策略、无功补偿设备的自动调节等)和离散控制(如电容器或电抗器的投切策略、有载调压变压器的分接头调整策略等)共同决定。小干扰电压稳定性关注的是系统在长期运行和小幅扰动下的电压稳定表现^[1]。它要求系统在正常负荷变化、小规模可再生能源接入等常见情况下,能够保持电压的稳定,确

保电力设备的正常运行和电力供应的连续性。对于电力系统的日常稳定运行和维护具有重要意义。

1.2.2 大干扰电压稳定性

大干扰电压稳定性是指电力系统在遭受大扰动后,能够维持电压稳定的能力。大扰动可能包括系统故障(如发电机故障、线路故障等)、大规模可再生能源的突然接入或切除、系统参数的显著变化(如负荷的急剧增加或减少)、保护装置的误动作等。这种稳定性不仅受负荷特性、连续控制和离散控制的影响,还受到保护措施的相互作用、系统备用容量的配置等因素的影响。大干扰电压稳定性关注的是系统在极端情况下的电压稳定表现。它要求系统在遭受严重故障或大规模扰动时,能够迅速调整电压,防止电压崩溃,确保系统的稳定运行和电力供应的连续性。对于防止系统崩溃、减少停电范围、提高电力系统的抗灾能力和可靠性具有重要意义。同时,大干扰电压稳定性也是电力系统规划和设计的重要考虑因素,需要在系统建设和升级时充分考虑并采取有效的控制措施。

2 电压稳定性的分析方法

2.1 静态分析方法

2.1.1 P-V曲线法

P-V曲线法是通过绘制系统的有功功率P与节点电压V之间的关系曲线来评估电压稳定性。具体做法是,在给定系统基态潮流计算结果的基础上,逐步增加系统负荷,求出系统各运行点,并利用负荷特性,得到一系列反映负荷实际吸收功率与节点电压关系的(P, V)点,将这些点相连便形成P-V曲线。其关键点包括: P-V曲线的拐点通常被认为是电压稳定的分界点。拐点右侧的高电压区被认为是电压稳定区,而拐点左侧的低电压区则被认为是电压不稳定区。当前系统运行点距离拐点的距离远近反映了系统的电压稳定裕度。然而,需要注意的是, P-V曲线法在某些情况下可能存在误差。例如,当考

考虑系统元件的动态特性时，系统可能在P-V曲线的右侧高电压区就已失稳，或者直到左侧低电压区仍能保持电压稳定。

2.1.2 V-Q曲线法

V-Q曲线法是另一种基于潮流方程的静态分析方法，通过绘制系统的无功功率Q与节点电压V之间的关系曲线来评估电压稳定性。具体做法是，在选择的节点加入一台虚拟调相机，保持节点电压不变，通过改变调相机的无功输出，计算得到节点的V-Q曲线。V-Q曲线上的点表示了在不同无功功率需求下节点的电压水平。曲线上的某些特定点（如调相机输出为零的点）可以反映电网的解以及节点的无功裕度。V-Q曲线还可以用来分析节点电压对无功功率的灵敏度，这有助于识别系统中的薄弱环节和可能的电压失稳区域。V-Q曲线法在处理发散问题方面具有一定的优势，能够在潮流计算收敛性不好或发散的情况下获得解^[2]。此外，它还可以考虑发电机无功极限、变压器变化等非线性环节以及负荷的电压特性。

2.1.3 总结

静态分析方法（如P-V曲线法和V-Q曲线法）在电压稳定性评估中具有计算速度快、易于实现等优点。然而，由于它们不考虑系统元件的动态特性，因此在处理复杂系统或极端扰动情况下的电压稳定性问题时可能存在一定的局限性。在实际应用中，通常需要结合动态分析方法以获得更全面的电压稳定性评估结果。

2.2 动态分析方法

2.2.1 时域仿真法

时域仿真法是通过数值积分的方法求解电力系统的微分-代数方程组（DAEs），以模拟系统在特定扰动下的动态响应过程。这些方程组描述了系统中各元件（如发电机、负荷、控制器等）的动态特性及其相互作用关系。通过时域仿真，可以得到系统在扰动后电压、电流、功率等变量的时域变化波形，从而分析系统的电压稳定性。关键步骤包括：（1）建立模型：首先，需要建立系统的详细动态模型，包括各元件的数学模型和它们之间的连接关系。这通常需要基于物理定律和工程经验，对元件的动态特性进行准确的描述。（2）设置扰动：在模型中设置特定的扰动，如负荷突变、发电机跳闸、线路故障等，以模拟实际运行中可能遇到的情况。（3）数值积分：利用数值积分算法（如欧拉法、龙格-库塔法等）对微分-代数方程组进行求解，得到系统在扰动后的动态响应。（4）结果分析：对仿真结果进行分析，评估系统的电压稳定性。通常关注电压的最低点是否低于允许值，以及系统是否能够恢复到稳定状态。其优点是

能够详细模拟系统的动态过程，提供丰富的动态响应信息；适用于任何电力系统动态模型，具有较高的通用性和准确性。然而其计算量大，特别是对于大规模复杂系统；仿真时间可能较长；结果可能受到模型精度和数值积分算法的影响。

2.2.2 特征值分析法

特征值分析法是通过计算电力系统状态矩阵的特征值来评估系统的稳定性。状态矩阵描述了系统动态元件之间的相互作用关系以及它们对系统稳定性的影响。特征值分析的核心思想是利用线性系统理论中的稳定性判据（如所有特征值的实部都为负则系统稳定）来判断系统的稳定性。关键步骤为：（1）线性化处理：首先，将系统的非线性微分-代数方程组在某一平衡点附近进行线性化处理，得到线性化的状态空间模型。（2）计算特征值：利用数值方法计算状态矩阵的特征值及其对应的特征向量。（3）稳定性分析：根据特征值的性质（如实部的正负）判断系统的稳定性；利用特征向量分析系统各状态变量对稳定性的贡献程度。其优点为计算速度快，能够快速评估系统的稳定性；能够揭示系统失稳的主要模式和关键节点；适用于大规模复杂系统的初步稳定性评估。然而其难以处理系统的非线性特性；只能提供系统稳定性的定性判断而无法给出详细的动态响应信息；结果可能受到线性化处理精度的影响。

3 电力系统电压稳定控制策略

3.1 无功补偿控制

无功补偿是电力系统中一种重要的电压稳定控制策略。其核心思想是通过在系统中引入特定的无功补偿设备，如静止无功补偿器（STATCOM）和可变无功补偿器（SVC），来有效地控制无功功率的流动，进而实现对电压水平的精确调节。静止无功补偿器（STATCOM）是一种基于电力电子技术的先进设备，它能够通过快速、连续地调节其输出的无功功率，来有效地维持接入点的电压稳定。STATCOM具有响应速度快、控制精度高、谐波含量低等优点，因此在电力系统电压稳定控制中得到了广泛的应用。可变无功补偿器（SVC）则是一种通过调节其内部的电抗器或电容器来改变输出无功功率的设备。SVC能够根据系统的无功需求进行自动调节，从而维持系统的电压稳定。与STATCOM相比，SVC的投资成本相对较低，但其响应速度和控制精度可能稍逊一筹。无功补偿控制策略的优点在于其能够快速、准确地响应系统电压的变化，有效地抑制电压的波动和闪变，提高电力系统的电压稳定性。然而，这种控制策略也存在一些局限性^[3]。首先，无功补偿设备的投资成本较高，可能

增加电力系统的整体建设成本。其次，无功补偿的效果受到系统无功容量和网络结构的限制。如果系统的无功容量不足或网络结构不合理，那么即使投入了大量的无功补偿设备，也可能无法达到预期的电压稳定效果。

3.2 发电机控制

发电机作为电力系统的核心组件，是电压稳定控制的重要对象。通过精细调节发电机的励磁电流和机械功率输出，可以实现对发电机电压输出的有效控制，从而达到电压稳定的目的。发电机的励磁电流控制是电压稳定的关键。励磁电流的大小直接影响发电机的端电压。当系统电压下降时，通过增加励磁电流，可以迅速提升发电机的端电压，从而有助于恢复系统的电压稳定。反之，当系统电压上升时，减小励磁电流可以降低发电机的端电压，防止电压过高。除了励磁电流控制，发电机的机械功率输出也是电压稳定控制的重要手段。通过调整发电机的燃料供给或水流量，可以改变其机械功率输出，进而影响发电机的电磁功率和电压输出。在系统电压不稳定时，适当调整发电机的机械功率输出，可以有效地帮助恢复电压稳定。发电机控制的优点在于其响应速度快、调节精度高。由于发电机是电力系统的核心设备，其控制策略可以直接作用于系统的电压稳定问题，因此具有较快的响应速度和较高的调节精度。然而，这种控制策略也对发电机的励磁系统和控制系统提出了较高的要求。励磁系统和控制系统的稳定性和精度直接影响发电机控制的效果。此外，由于发电机及其控制系统的复杂性和高精度要求，其成本也相对较高。发电机控制是电力系统中实现电压稳定的重要手段。通过精细调节发电机的励磁电流和机械功率输出，可以有效地控制发电机的电压输出，进而实现电压的稳定控制。然而，这种控制策略也对发电机的励磁系统和控制系统提出了较高的要求，并且成本较高。在实际应用中，需要综合考虑系统的具体需求和条件，选择合适的发电机控制策略。

3.3 系统优化控制

系统优化控制是一种全面而精细的电压稳定控制策略，它综合考虑了电力系统中的多种因素，旨在实现系统的最佳运行状态。这一策略的核心在于对系统中发电机输出功率、线路传输功率以及负荷分配等关键参数

进行优化调整。在系统优化控制中，首先需要对发电机的输出功率进行精确控制。通过调整发电机的有功和无功输出，可以确保系统在满足负荷需求的同时，保持电压的稳定。此外，优化控制还考虑了线路的传输功率，通过合理的潮流分配，可以降低线路的损耗，提高传输效率，进一步增强系统的电压稳定性。负荷分配也是系统优化控制的重要环节。通过智能的负荷管理策略，可以平衡系统中的负荷分布，避免局部过载导致的电压失稳。这包括了对各类负荷的实时监测和动态调整，以确保它们在不影响系统稳定性的前提下得到合理的供电。要实现系统优化控制，需要强大的计算和模拟能力作为支撑。这包括对电力系统模型的精确建立，以及对实时电力负荷、传输线路参数等数据的准确监测和快速处理。通过这些手段，可以实时地掌握系统的运行状态，为优化控制提供准确的数据支持^[4]。系统优化控制是一种全面、精细且高效的电压稳定控制策略。它通过综合考虑电力系统中的多种因素，并借助强大的计算和模拟能力，实现了对发电机输出功率、线路传输功率和负荷分配等参数的最优调整。这不仅提高了系统的电压稳定性，还进一步提升了电力系统的整体运行效率。

结语

电力系统电压稳定性是保障电力系统安全稳定运行的关键因素之一。通过对电压稳定性的深入分析和有效控制策略的研究，可以有效提高电力系统的电压稳定性，防止电压崩溃事故的发生。未来，随着智能电网技术的发展和运用，电压稳定性的监测和控制手段将更加先进和有效，为电力系统的安全稳定运行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1]肖荣荣,孙孟.电力系统稳定性分析及控制策略研究[J].产品可靠性报告,2023,(09):109-110.
- [2]程莉.交直流电力系统电压稳定性控制方法[J].科技创新与应用,2024,14(25):160-164.
- [3]宋海明.负荷特性对电力系统电压稳定性的影响[J].自动化应用,2023,64(05):212-214.
- [4]徐兴东.电力系统电压稳定综合增强控制策略研究[D].山东理工大学,2022.