

# 电力系统运行中的电压稳定性分析

王旭辉 朱嘉勇

中国联合工程有限公司 浙江 杭州 310051

**摘要:** 在电力系统中,电压稳定性是保障系统稳定运行、避免大面积停电的关键因素。它涉及到电力网络中电压的动态变化、设备的过载保护以及电力质量的维持。本文将深入探讨电力系统运行中的电压稳定性问题,分析其影响因素,并提出有效的控制策略。

**关键词:** 电力系统运行;电压;稳定性

## 1 引言

电力系统,作为现代社会运行的基石,其稳定性和可靠性直接关系到经济社会的正常运转。在日益复杂和动态的电力网络中,电压稳定性扮演着至关重要的角色。它不仅影响设备的正常运行,还对电力系统的整体性能和用户供电质量产生深远影响。一旦电压稳定性问题得不到妥善解决,轻则导致局部电网电压崩溃,重则可能引发大规模停电,造成严重的经济损失和社会影响。随着全球能源结构的转型,可再生能源的广泛应用和电力电子设备的普及,电力系统正经历前所未有的变革。这些变革带来了诸多挑战,其中包括传统稳定性问题的演变以及新兴的稳定性问题的出现。

随着全球能源结构的转型,可再生能源的广泛应用和电力电子设备的普及,电力系统正经历前所未有的变革。这些变革带来了诸多挑战,其中包括传统稳定性问题的演变以及新兴的稳定性问题的出现。特别是,大扰动失稳问题在“双高”(高比例可再生能源、高比例电力电子设备)电力系统中显得尤为突出。电力电子设备,如逆变器,其独特的控制策略和动态行为,对电力系统稳定性构成了新的威胁。

## 2 电力系统电压稳定性基础

电力系统,作为全球能源网络的核心组成部分,是现代平稳运行的基石。它将发电厂的电能转换、传输和分配到各地的用户,确保电力供应的可靠性和质量。电压稳定性是电力系统稳定运行的关键指标之一,它反映了系统在各种运行条件下的电压水平维持能力,对电力设备的安全运行、电力质量的保障以及整个电网的稳定性至关重要。

(1) 电压稳定性的定义源自于电力系统理论,它描述了系统在受到扰动后,电压能够恢复到或保持在某个特定范围内,不发生不可接受的下降或升高。电压稳定性通常分为静态稳定性和动态稳定性两个层次。静态稳

定性是指系统在受到小扰动后的恢复能力,也就是系统能否在新的平衡点稳定下来。动态稳定性则关注系统在受到大扰动后的行为,即系统恢复到稳定状态所需的时间和过程。

(2) 电压稳定性的分类通常基于扰动的性质和规模。小扰动电压稳定性,也称为操作稳定性,主要研究系统在正常运行条件下,如负荷变化、设备投切等引起的扰动后的稳定状态。而大扰动电压稳定性,又称故障稳定性,关注的是系统在遭遇严重故障,如线路或发电机故障时的稳定性。

(3) 影响电压稳定性的因素多种多样,这些因素相互交织,共同作用于电力系统。首先,系统结构,包括网络拓扑、设备参数和地理分布,决定了系统对扰动的响应。其次,电源类型,包括传统的机械励磁发电机和现代的电力电子设备,它们的特性和控制策略对电压稳定性产生显著影响。此外,负荷特性,特别是动态负荷的崛起,如电动汽车充电和可再生能源的波动性,增加了电压稳定性的挑战。再者,系统控制策略,如自动电压控制(AVC)、静止无功补偿器(SVG)等在电压稳定维护中起着关键作用。最后,通信和信息网络的性能,以及控制信号的实时性,也会影响电压稳定性的评估和控制。

(4) 电力系统的电压稳定性问题在“双高”背景下变得更加复杂。可再生能源的波动性和电力电子设备的固有特性,如逆变器的快速响应和控制机制,对电压稳定性提出了新的要求。电力电子设备如逆变器的控制保护系统,如锁相环(PLL)的同步问题和直流电容电压的稳定性,对电压稳定性有直接影响。同时,逆变器的故障穿越能力,即在故障后能否继续并网运行,对整个系统稳定性的维持至关重要。

## 3 电压稳定性的数学模型

在深入探讨电力系统运行中的电压稳定性问题时,

数学模型扮演着至关重要的角色。它们是分析、预测和控制电力系统行为的基石，通过数学模型，复杂的电力系统动态可以被简化为易于处理的数学表达式。

#### (1) 潮流计算模型

潮流计算是电力系统分析的基础，它描述了系统在给定运行点时的电压和功率分布。在经典的新古典潮流(NCPF)模型中，系统被简化为一个由节点和支路组成的网络，节点代表发电机、负荷或电压控制点，支路代表输电线路。通过库仑定律和基尔霍夫定律，可以计算出各节点电压、各支路的功率以及整个系统的功率平衡。然而，在“双高”电力系统中，潮流计算需要考虑电力电子设备的特殊特性，如逆变器的控制策略和直流电容的电压稳定性。对于逆变器，其功率注入取决于其控制环路，如电压和频率的反馈，这些特性可以通过附加非线性方程来描述。

#### (2) 敏感度分析模型

敏感度分析是评估系统对参数变化反应的一种工具，这对于理解系统稳定性至关重要。在电压稳定性中，敏感度分析关注的是系统电压对负荷变化、发电机输出变化等扰动的敏感程度。这种分析通常基于偏导数或梯度计算，可以识别出系统对电压稳定性影响最大的区域和参数，为改善电压稳定性的策略提供指导。在电力电子设备日益重要的今天，敏感度分析需要考虑这些设备的参数，如锁相环的参数、直流电容的容量等，以及它们对系统电压影响的非线性特性。这使得敏感度分析模型变得更加复杂，但同时也是评估系统稳定性的关键。

#### (3) 动态模型

对于分析大扰动电压稳定性，动态模型是必不可少的工具。这些模型描述了系统在受到扰动后的动态响应，通常采用微分方程或差分方程的形式。在传统的机械励磁发电机主导的系统中，动态模型可能包括机械惯性、励磁控制和电力网络的电磁暂态。在“双高”电力系统中，模型需要考虑电力电子设备的动态特性，如逆变器的快速响应、直流电容电压的瞬态行为以及故障穿越策略。

#### (4) 多时间尺度和序贯切换模型

电力电子设备的控制策略经常涉及多时间尺度的交互，比如快速的电流控制与较慢的电压控制。多时间尺度模型能够捕捉这些不同动态层的相互影响，对于理解和预测“双高”系统中电压稳定性的复杂行为至关重要。此外，电力电子设备的控制策略中常常包含序贯的开关操作，例如升压斩波和电压频率转换，这需要复杂

的序贯切换模型来描述。

数学模型在电压稳定性分析中起着核心作用，它们为理解、预测和控制电力系统的复杂行为提供了工具。在“双高”电力系统背景下，数学模型需要适应电力电子设备的特殊特性，考虑多时间尺度的交互和序贯切换操作，以准确地模拟和评估系统在各种运行条件下的电压稳定性。未来的研究将致力于发展更精确、更高效的数学模型，以提升电力系统的稳定性和可靠性。

### 4 电压稳定性的评估方法

电压稳定性评估是电力系统运行管理中的核心环节，它通过一系列方法和指标，评估系统在受到扰动后的电压恢复能力。随着电力电子设备的广泛应用，电压稳定性的评估方法也在不断更新和发展，以适应“双高”电力系统的特点。本节将深入探讨几种主要的电压稳定性评估方法，包括静态电压稳定性评估、动态电压稳定性评估以及小干扰稳定性评估。

#### (1) 静态电压稳定性评估

静态电压稳定性评估主要关注系统在小扰动下的恢复能力，是基于潮流计算模型来判断系统在新平衡点的稳定性。评估方法通常基于灵敏度分析和等面积法则。灵敏度分析通过计算系统参数对电压的微小变化响应，识别可能的电压崩溃点。等面积法则则通过比较系统在正常运行点和扰动后的运行点之间的功率面积，如果面积相等，则认为系统在新平衡点是稳定的。

#### (2) 动态电压稳定性评估

动态电压稳定性评估则关注系统在大扰动下的恢复能力，通常采用动态模型，如描述电力系统电磁暂态和控制系统的微分方程组。评估方法包括Lyapunov函数法、模态分析和时间域仿真。Lyapunov函数法是一种分析系统动态稳定性的理论工具，它通过找到系统状态空间的负定函数，来证明系统在其吸引域内的稳定性。模态分析则通过对系统矩阵进行特征值分解，识别系统的自然振荡频率和阻尼比，从而评估系统的动态特性。时间域仿真则是通过实际模拟系统在扰动后的动态响应，直观地观察电压的恢复过程。

#### (3) 小干扰稳定性评估

小干扰稳定性评估是评估系统在受到小扰动后能否迅速恢复到稳定状态的一种方法。它通常基于线性化技术，对系统在正常运行点附近的行为进行分析。小干扰稳定性可以通过计算系统在扰动下的Lyapunov指数，来判断系统是否具有吸引子，进而判断系统是否稳定。在电力电子设备主导的系统中，小干扰稳定性评估常常结合电力电子设备的特性，例如逆变器的控制策略和动态

行为。

#### (4) 应用与挑战

这些评估方法在实际电力系统运行中扮演着重要角色，为系统规划、运行管理和故障诊断提供重要依据。然而，随着电力系统规模的扩大、异构性的增强，以及电力电子设备的复杂动态特性，评估方法也面临着新的挑战。例如，如何在保证计算效率的同时，精确地模拟电力电子设备的动态行为；如何处理多时间尺度的交互，以及电力电子设备的序贯切换操作等。

电压稳定性的评估方法是维护电力系统安全稳定运行的基石。在未来的研究中，我们不仅需要改进现有的评估方法，使其更适应“双高”电力系统的特点，还需要探索新的评估策略，以应对电力系统复杂性和不确定性的不断增加。这些研究将有助于提升电力系统的稳定性和可靠性，确保电力系统的长期可持续运行。

### 5 电压稳定性的控制与改善策略

在电力系统中，电压的稳定性至关重要，因为它直接关系到设备的正常运行、电能质量以及整个网络的稳定性。随着电力电子设备的广泛使用，传统控制策略必须不断升级和创新，以应对“双高”电力系统中电压稳定性所面临的挑战。

(1) 电力系统稳定器 (PSS) 是提高电压稳定性的传统手段。PSS通过调整发电机的励磁电流，以抵消由于电流扰动引起的电压波动。在“双高”电力系统中，PSS设计需考虑电力电子设备的特殊特性，如逆变器的交流注入电压与频率控制，以确保在扰动发生时，系统能快速恢复电压稳定。现代PSS技术，如基于广义导纳的PSS，能够更好地适应电力电子设备的动态特性，提供更精确的控制效果。

(2) 自动电压调节器 (AVR) 是另一种在发电机侧调控电压的重要手段。AVR通过实时监测发电机端电压，调整励磁电流，以维持电压在设定范围内。对于现代电力系统，AVR应具备自适应能力和快速响应特性，以应对可再生能源并网带来的快速变化的功率需求。例如，基于模型预测控制 (MPC) 的AVR能够提前预测系统状态，提供更为前瞻性的电压控制。

(3) 柔性交流输电系统 (FACTS) 设备，如静止无功补偿器 (SVG)、静止同步补偿器 (STATCOM) 和统一潮流控制器 (UPFC)，在电压稳定性控制中扮演着关键角色。这些设备能够快速、灵活地调节系统无功功率，从而增强系统动态电压支撑。

(4) 在系统规划和运行策略上，优化也至关重要。随着电力系统规模的扩大和异构性增强，电力调度中心需要采用更加精细化的管理策略。例如，通过建立多目标优化模型，同时考虑电压稳定、经济性、环保等目标，以制定更合理的调度计划。此外，采用分布式的控制策略，允许局部节点根据自身信息和局部扰动进行控制，可以提高系统的整体鲁棒性。智能电网技术的发展，如先进的通信网络和大数据分析，为精确预测、优化调度提供了强大支持。

(5) 同时，对电力系统进行适当的结构优化，例如增强网络的灵活性和冗余度，也能有效提高电压稳定性。例如，通过增设备用线路、增强互联电网的互操作性，可以缓解局部故障对整个系统的影响此外，研究并推广新型电力电子设备，如虚拟同步机，其内置的动态控制机制可以提供等效惯性，增强系统稳定性。

除了上述策略，对电力电子设备的控制策略进行创新也是关键。例如，设计更为智能的锁相环 (PLL) 控制算法，以提高逆变器的同步性能；优化直流电容电压的控制，确保在扰动时的稳定性。同时，研究电力电子设备的故障穿越策略，保证设备在故障后能迅速恢复并网，防止系统级失稳。

电压稳定性的控制与改善策略需涵盖从设备侧的PSS、AVR和FACTS设备，到系统侧的规划与运行优化，以及设备控制策略的革新。这些策略的实施需要电力行业的持续投入与创新，以应对“双高”电力系统带来的挑战，确保电力系统的安全、稳定运行。未来的研究将致力于进一步开发和应用这些策略，以提升电力系统的稳定性和适应性，支撑能源转型的进程。

#### 结束语

对电力系统运行中电压稳定性的深入分析和有效管理，对于确保电力系统的安全、可靠和高效运行至关重要。通过科技的进步和智能控制技术的引入，我们有理由期待未来电力系统的电压稳定性将得到进一步提升，以适应日益增长的能源需求和日益复杂的系统环境。在面对新的挑战时，持续的研究和创新将为电力系统的稳健运行提供有力保障。

#### 参考文献

- [1]冯建辰,孙赛.高渗透可再生能源并网电力系统的稳定性与控制研究[J].电气技术与经济,2024,(05):207-209.
- [2]赵凯.柔性直流配电网暂态电压稳定性控制方法研究[J].电力与能源,2024,45(02):164-168.