

无功补偿装置在电力系统稳定性维护中的实践与探索

张旭旭¹ 张利明²

1. 镇江中船现代发电设备有限公司 江苏 镇江 212000

2. 航发优材（镇江）钛合金精密成型有限公司 江苏 镇江 212000

摘要：无功补偿装置在电力系统稳定性维护中的实践与探索，旨在通过先进的技术手段，提升电力系统的整体运行效率和稳定性。本文深入分析了无功补偿装置的工作原理及其在电压稳定、功率因数提升和电能质量改善等方面的应用实践。通过实际案例和数据分析，展示了无功补偿装置在维护电力系统稳定性方面的重要作用。同时还探讨无功补偿装置的发展趋势，为未来的电力系统稳定性维护提供有益的参考。

关键词：无功补偿装置；电力系统稳定性；维护

1 无功补偿装置的基本原理

1.1 无功功率的概念

无功功率是电路中感性元件（或容性元件）中的磁场能（或电场能）与电路中的电能相互转化所需的功率。在交流电路中，许多用电设备如变压器、电动机等都是基于电磁感应原理工作的，它们需要建立交变磁场才能进行能量的转换和传递。为建立交变磁场和感应磁通而需要的电功率，就被称为无功功率。无功功率的单位是乏（var），它与有功功率（单位为瓦特W）不同，不直接转化为机械能或热能。在供用电系统中，无功功率和有功功率都是必不可少的。系统中的电机设备多为感性负载，需要无功功率来维持其正常运行。因此无功功率并不是“无用”的功率，而是电力系统中不可或缺的一部分。

1.2 无功补偿的原理

无功补偿的基本原理是通过在电力系统中安装无功补偿装置，来减少电源通过线路输送的无功功率，从而提高功率因数，达到节能的目的。在交流供电系统中，电感负载中的电流滞后于电压 90° ，而纯电容的电流则超前电压 90° 。由于电容中的电流与电感中的电流相位相差 180° ，它们可以相互抵消。电力系统中的负载大部分是感性负载，因此总电流将滞后于电压一个角度。如果将并联电容器与负载并联，电容器的电流将抵消一部分电感电流，从而使总电流减小，相位角也相应减小。这样，功率因数就得到了提高，无功功率得到了就地平衡^[1]。无功补偿装置通常并联在电力系统中，它们能够向系统提供或吸收无功功率，从而维持系统的无功平衡。当系统中无功功率需求增大时，无功补偿装置可以迅速响应，提供所需的无功功率，避免发电厂通过调相方式加大无功功率输出，从而降低有功功率的输出量。无功补偿不

仅可以提高功率因数，还可以减小流过线路及变压器的电流，减缓导线及变压器的绝缘老化速度，延长使用寿命。同时它还可以改善电压质量，减少线路压降，提高电能质量。通过合理的补偿，还可以消除力率电费，降低电力用户的电费支出。

1.3 无功补偿装置的类型

无功补偿装置根据其工作原理和特性可以分为多种类型，主要包括以下几种：（1）电力电容器：电力电容器是最常见的无功补偿装置之一。它们通过并联在电力系统中，向系统提供容性无功功率，从而抵消感性负载所需的无功功率。电力电容器具有结构简单、维护方便、成本低廉等优点，因此被广泛应用于各种电力系统中。（2）SVG动态无功发生器：SVG（Static Var Generator）是一种基于电力电子技术的无功补偿装置。它能够根据系统的无功需求快速调节输出的无功功率，实现动态无功补偿。SVG具有响应速度快、调节范围广、补偿效果好等优点，特别适用于需要快速响应和精确控制的电力系统。（3）磁控式动态无功补偿装置：磁控式动态无功补偿装置利用磁控电抗器的原理，通过调节电抗器的磁导率来改变其输出的无功功率。这种装置具有响应速度快、调节精度高等优点，但相对于SVG来说，其成本较高且维护较为复杂。（4）相控式动态无功补偿装置（TCR）：TCR（Thyristor Controlled Reactor）是一种基于晶闸管控制的动态无功补偿装置。它通过串联晶闸管和电抗器来改变系统的无功功率。TCR具有响应速度快、调节范围广等优点，但同样存在成本高、维护复杂等问题。

2 无功补偿装置在电力系统稳定性维护中的作用机制

2.1 提高功率因数

功率因数是衡量电力系统电能利用效率的重要指

标,它反映了电力系统中有功功率与视在功率之间的比例关系。当电力系统中存在大量的感性负载时,这些负载会消耗无功功率,导致功率因数下降。功率因数低不仅会增加电力系统的损耗,还会降低设备的利用效率,甚至引发电网的不稳定。无功补偿装置通过向系统提供或吸收无功功率,可以显著地提高功率因数。当系统功率因数较低时,无功补偿装置会自动检测并投入运行,向系统提供所需的容性无功功率,以抵消感性负载产生的无功功率。这样,系统中的无功功率流动得到了有效调节,功率因数随之提高。提高功率因数不仅可以减少电力系统的损耗,还可以提高设备的利用效率,降低电网的运行成本,功率因数的提高还有助于改善电力系统的电能质量,减少谐波污染和电压波动,为电力系统的稳定运行提供有力保障。

2.2 稳定电压水平

电压稳定是电力系统稳定运行的基础。在电力系统中,电压水平受到多种因素的影响,包括负载变化、线路阻抗、无功功率分布等。当系统中的无功功率分布不均或负载发生突变时,电压水平可能会受到影响,导致电压波动或电压崩溃。无功补偿装置通过调节系统中的无功功率流动,可以有效地稳定电压水平。当系统中的无功功率不足时,无功补偿装置会向系统提供所需的容性无功功率,以维持电压的稳定^[2]。相反,当系统中的无功功率过剩时,无功补偿装置会吸收多余的无功功率,防止电压过高。通过无功补偿装置的调节,电力系统中的电压水平可以保持在合理的范围内,避免了电压波动和电压崩溃的发生。

2.3 增强系统稳定性

电力系统的稳定性是指系统在受到各种扰动后能够迅速恢复到平衡状态的能力。无功补偿装置通过调节系统中的无功功率流动,可以显著地增强系统的稳定性。一方面,无功补偿装置可以提高电力系统的阻尼特性。阻尼特性是衡量电力系统在受到扰动后能否迅速恢复稳定的重要指标。无功补偿装置通过向系统提供或吸收无功功率,可以改变系统中的阻尼比,从而提高系统的阻尼特性。这有助于系统在受到扰动后更快地恢复到平衡状态,增强了系统的稳定性。另一方面,无功补偿装置还可以改善电力系统的动态响应特性,在电力系统中,当负载发生突变或发生故障时,系统需要迅速调整无功功率的分布以保持电压的稳定。无功补偿装置具有快速响应和精确控制的特点,可以在短时间内向系统提供或吸收所需的无功功率,从而改善系统的动态响应特性。这有助于系统在面对各种扰动时保持稳定的运行状态。

另外,无功补偿装置还可以提高电力系统的输电能力和抗故障能力,通过调节系统中的无功功率流动,无功补偿装置可以优化电力系统的潮流分布,提高输电线路的传输效率。当系统中发生故障时,无功补偿装置可以迅速调整无功功率的分布,防止故障扩散和电压崩溃的发生,提高了系统的抗故障能力。

3 无功补偿装置在电力系统稳定性维护中的应用

3.1 无功补偿装置在电压稳定中的应用

在电力系统中,电压稳定是确保系统安全稳定运行的关键要素之一。无功补偿装置通过动态调节系统中的无功功率,对维持电压稳定起到了至关重要的作用。当电力系统中的无功功率供需不平衡时,会导致电压波动,严重时甚至引发电压崩溃。无功补偿装置能够实时监测系统中的无功功率需求,并快速响应,提供或吸收所需的无功功率。在电压下降时,无功补偿装置释放容性无功功率,帮助系统恢复电压水平;而在电压过高时,则吸收感性无功功率,防止电压进一步上升。这种动态调节能力,使得无功补偿装置成为维护电压稳定的重要工具。特别是在长距离输电和大型负载接入的场景中,无功补偿装置的应用尤为重要。长距离输电线路存在较大的线路电抗,容易引发电压降落;而大型负载的接入,尤其是感性负载,会消耗大量的无功功率,进一步加剧电压波动。通过合理配置无功补偿装置,可以有效补偿线路和负载所需的无功功率,确保电压稳定,提高电力系统的输电能力和负载接入能力。

3.2 无功补偿装置在功率因数提升中的应用

功率因数是衡量电力系统电能利用效率的指标,它反映了系统中无功功率与视在功率的比例关系。在电力系统中,感性负载如电动机、变压器等是消耗无功功率的主要来源。这些负载在运行过程中需要建立磁场,而磁场的建立和维持需要消耗无功功率。无功补偿装置通过并联在系统中,向感性负载提供所需的容性无功功率,从而抵消感性无功功率,提高功率因数。功率因数的提升不仅减少电力系统的无功损耗,提高电能利用效率,还有助于降低电网的运行成本^[3]。高功率因数还可以减少线路的电流,降低线路损耗和电压降落,提高电力系统的稳定性和可靠性。另外,对于电力用户而言,提高功率因数还可以减少力率电费的支出,降低用电成本。

3.3 无功补偿装置在电能质量改善中的应用

无功补偿装置在改善电能质量方面发挥着重要作用。首先,无功补偿装置能够减少电力系统的谐波污染,谐波是电力系统中常见的电能质量问题之一,它主要由非线性负载如整流器、逆变器等产生。谐波的存在

会导致电压和电流的波形畸变,影响电力设备的正常运行。无功补偿装置通过并联电容器组或采用有源滤波技术等手段,可以有效地吸收或抵消谐波电流,减少谐波污染,提高电能质量。其次,无功补偿装置能够改善电力系统的电压波动和闪变问题,电压波动和闪变主要由负载的突变或系统故障引起,它们会导致电力设备的性能下降和用户的用电体验恶化。无功补偿装置通过快速响应和精确控制,可以动态调节系统中的无功功率,平抑电压波动和闪变,提高电力系统的稳定性和可靠性。另外,无功补偿装置还可以提高电力系统的频率稳定性,在电力系统中,频率的稳定性对于保持供需平衡和确保系统安全稳定运行至关重要。

4 无功补偿装置在电力系中的发展趋势

4.1 智能化、自动化技术的发展对无功补偿装置的影响

智能化、自动化技术的快速发展正在深刻改变无功补偿装置的设计与应用。传统的无功补偿装置主要依赖人工操作和预设参数进行工作,其响应速度和调节精度有限。而随着智能化技术的引入,无功补偿装置开始具备自我监测、自我诊断和自我调节的能力。智能化技术使得无功补偿装置能够实时监测电力系统的运行状态,包括电压、电流、功率因数等关键参数。通过内置的智能算法,装置能够迅速分析并判断系统的无功需求,从而自动调整补偿策略,实现快速、精确的无功补偿。自动化技术也为无功补偿装置的远程监控和管理提供了可能。通过集成远程通信模块,运维人员可以实时获取装置的运行数据,对其进行远程监控和故障诊断。这不仅提高运维效率,还降低了运维成本。自动化技术也使得无功补偿装置能够更好地融入电力系统的整体自动化体系中,实现与调度中心、变电站等关键节点的无缝对接,进一步提升电力系统的智能化水平。

4.2 新型无功补偿装置的研发与应用前景

随着电力电子技术和材料科学的不断进步,新型无功补偿装置的研发与应用前景广阔。传统的无功补偿装置如并联电容器、电抗器等,虽然具有结构简单、成

本低廉等优点,但在响应速度、调节精度和环保性等方面存在局限性。而新型无功补偿装置如静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)等,则在这些方面表现出显著的优势^[4]。SVC和STATCOM等新型无功补偿装置采用电力电子器件作为开关元件,能够实现快速、连续的无功补偿。它们不仅响应速度快、调节精度高,还能够根据电力系统的实际需求进行动态调节,实现无功功率的实时平衡。这些新型装置还具有占地面积小、噪音低、维护方便等优点,更符合现代电力系统的需求。在应用前景方面,新型无功补偿装置在智能电网、新能源发电、城市轨道交通等领域具有广泛的应用潜力。智能电网需要高效、智能的无功补偿装置来支撑其稳定运行和调度优化;新能源发电如风电、光伏等则需要无功补偿装置来抑制电网波动和提高电能质量;城市轨道交通则对无功补偿装置提出了更高的可靠性和稳定性要求。

结束语

随着电力系统的不断发展和智能化水平的提升,无功补偿装置在电力系统稳定性维护中的作用日益凸显。通过不断的实践与探索,我们已经取得了显著的成果。面对未来电力系统更加复杂多变的运行环境,仍需继续努力,不断创新和完善无功补偿装置的技术和应用,为电力系统的安全、稳定和高效运行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1]肖勇,肖小兵,金鑫,等.含储能和分布式光伏的配电网系统计及静态电压稳定性的多目标优化[J].广东电力,2024,37(04):24-32.
- [2]彭琦,涂建,高珍,等.基于蛇优化算法的电力系统无功优化[J].现代电子技术,2024,47(08):126-130. DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2024.08.020.
- [3]孟垂懿,孙笑雨,宋孚红,等.无功补偿技术在智能电网中的应用[J].电工材料,2021(02):75-77.
- [4]陈红刚,吴南群,潘忠潮.电力自动化中的智能无功补偿技术的应用[J].集成电路应用,2021,38(01):32-33.