

Application of Intelligent Reactive Power Compensation Technology in Power Automation

Heying Zhang

State Grid Intelligent Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

With the rapid development of global energy transition and power automation technologies, the scale of power grids continues to expand, the proportion of renewable energy keeps increasing, and power quality issues have become increasingly prominent. Reactive power, as a key factor affecting grid efficiency and stability, has an increasingly urgent need for dynamic compensation. Traditional reactive power compensation technologies, due to their lagging response, low compensation accuracy, and lack of intelligence, struggle to meet the modern power system's requirements for real-time performance, flexibility, and reliability. Against this backdrop, intelligent reactive power compensation technology based on power electronic devices and smart algorithms has emerged as a crucial approach to improving power quality, reducing grid losses, and supporting renewable energy integration. This paper first elaborates on the theoretical foundations of intelligent reactive power compensation technology, then analyzes its critical role in power automation, and finally examines its application scenarios, aiming to provide valuable references for related research.

Keywords

Intelligent reactive power compensation technology; Power automation; Application scenarios

智能无功补偿技术在电力自动化中的应用

张鹤瀛

国网智能科技股份有限公司，中国·山东 济南 250000

摘要

随着全球能源转型与电力自动化技术的快速发展，电网规模不断扩大，新能源占比持续提升，电能质量问题日益凸显。无功功率作为影响电网效率与稳定性的关键因素，其动态补偿需求愈发迫切。传统无功补偿技术因响应滞后、补偿精度低、缺乏智能化等缺陷，难以满足现代电力系统对实时性、灵活性与可靠性的要求。在此背景下，基于电力电子器件与智能算法的智能无功补偿技术应运而生，成为提升电能质量、降低电网损耗、支撑新能源消纳的重要手段。本文先是详细阐述了智能无功补偿技术理论基础，随后具体分析了智能无功补偿技术在电力自动化中的关键作用，最后具体分析了智能无功补偿技术的应用场景，以期为相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

智能无功补偿技术；电力自动化；应用场景

1 引言

在“双碳”目标与能源转型的驱动下，电力自动化系统需同时满足高比例新能源接入、高密度负荷供应与高可靠性运行的多重需求。无功功率作为交流电网中不可或缺的组成部分，其不合理分布会导致电压波动、线损增加及设备损耗加剧，甚至引发系统崩溃风险。传统无功补偿装置（如并联电容器、SVC）因采用固定补偿或开环控制策略，难以适应动态负荷与间歇性新能源的快速变化。近年来，以静止同步补偿器（SVG）、级联 H 桥结构为代表的智能无功补偿技术，通过集成智能算法与实时监测模块，实现了无功功率

的精准、快速补偿，成为解决现代电网复杂问题的有效途径。本文从技术原理、应用价值与发展趋势三方面展开论述，为电力自动化领域的技术选型与策略制定提供参考。

2 智能无功补偿技术理论基础

2.1 无功功率的基本概念

无功功率（Reactive Power）是交流电力系统中电感、电容等储能元件周期性能量交换产生的功率分量，单位为乏（Var），虽不直接消耗能量，却是维持电压稳定、保障设备正常运行的关键——电动机需其建立磁场，变压器需其变换电压，输电线路需其补偿电抗以减少电压降。若系统无功不足，电压下降会导致设备效率降低甚至损坏；若过剩，则可能引发电压过高威胁绝缘安全。电压稳定性与无功功率密切相关，根据电路理论，电压降落公式（ $\Delta U=(PR+QX)/U$ ）

【作者简介】张鹤瀛（1990-），男，中国山东枣庄人，本科，工程师，从事电力工程技术方向研究。

表明,无功功率 Q 的波动会显著影响电压质量: Q 增大时电压降落增加,末端电压下降;反之则电压升高。功率因数 ($\cos \phi$) 作为衡量无功占比的指标,定义为有功功率与视在功率 ($S = \sqrt{(P^2+Q^2)}$) 的比值,低功率因数会增加线路损耗与设备容量需求,降低经济性,因此无功补偿的核心目标是通过调节 Q 维持电压稳定并提升功率因数。

2.2 传统无功补偿技术分析

传统无功补偿技术中,并联电容器组通过电容容性无功输出抵消感性无功,原理简单、成本低,但固定补偿方式无法跟踪负荷动态变化,易出现过补或欠补,且电容投切时冲击电流影响设备寿命^[1];同步调相机作为运行于过励或欠励状态的同步电动机,虽补偿能力强、稳定性高,但响应速度慢(秒级)、运行损耗大(约 1.5%~3% 额定容量),还需配套励磁系统,维护复杂;SVC 以晶闸管为核心实现动态补偿,响应速度达毫秒级,却存在固定补偿特性依赖电容配置、谐波干扰需额外滤波、控制滞后易振荡等局限。总体而言,传统技术或因机械响应慢,或因谐波与控制问题,难以满足现代电网对实时性、灵活性与电能质量的高要求。

2.3 智能无功补偿技术的核心原理

智能无功补偿技术以电力电子器件为核心实现动态补偿,其中 SVG (STATCOM) 采用电压源换流器,通过直流侧电容储能与逆变器生成同相位补偿电流,具备毫秒级响应速度、宽范围补偿能力(可同时发出/吸收感性/容性无功)、多电平拓扑抑制谐波及紧凑型设计(占地仅为 SVC 的 1/3~1/2)等优势。智能控制算法进一步优化性能:模糊控制将专家经验转化为规则库以应对非线性问题,神经网络通过数据训练预测负荷变化以减少超调,专家系统集成运行规则实现故障自诊断与自适应保护。装置通过 CT/PT 实时采集电压、电流等参数,结合算法计算补偿量并驱动电力电子器件调整输出,部分装置还联动上级调度系统,在新能源场站中可自动跟踪风电/光伏波动,支撑电网电压稳定。

3 智能无功补偿技术在电力自动化中的关键作用

3.1 提升电能质量

智能无功补偿技术凭借对电网参数的实时监测与动态补偿策略调整,成为提升电能质量的核心手段。在电压稳定控制上,其毫秒级响应特性可精准应对负荷突变:当工业电机启动产生冲击电流或新能源发电出力骤降时,SVG (静止同步补偿器) 能瞬间输出感性或容性无功功率^[2],将电压波动范围严格控制在 $\pm 2\%$ 以内,有效抑制电压闪变现象,保障敏感设备稳定运行。针对电网谐波污染问题,该技术通过多电平拓扑结构与 PWM 调制技术的协同作用,使设备自身谐波畸变率降至 1% 以下,同时通过补偿基波无功功率间接优化功率因数,使系统功率因数稳定维持在 0.95 以上。这一过程不仅减少了无功电流在电网中的无效流动,降低了线

路损耗,更显著提升了变压器、电动机等用电设备的运行效率,为电力系统的经济高效运行提供了坚实支撑。

3.2 降低电网损耗

智能无功补偿技术通过精准调控无功功率分布,为电力系统带来显著的降损增效成果。在输电环节,SVG (静止同步补偿器) 可实时感知负荷需求并就地提供无功支撑,避免无功电流在长距离线路中无效流动,使线损率大幅降低 20%-40%。以 110kV 输电线路为例,通过动态补偿可将线路电流削减 15%,年节约电能损耗可达数十万度,相当于减少数千吨标准煤消耗。在设备运行层面,该技术通过提升功率因数优化关键设备效率:变压器因无需预留额外容量,负载率提升 10%-15%,单位容量输送能力显著增强;发电机定子电流中的无功分量减少后,铜损降低 5%-8%,设备发热量与机械应力同步下降,既延长了设备使用寿命,又降低了运维成本。这种从输电网络到发电设备的全链条优化,使电力系统整体运行效率提升 5%-10%,为能源清洁低碳转型提供了重要技术支撑。

3.3 增强系统稳定性

智能无功补偿技术作为电网稳定运行的“缓冲器”,凭借其卓越的动态响应特性,为电力系统筑牢安全防线。当遭遇短路故障或新能源出力骤减等突发状况时,SVG (静止同步补偿器) 可在 10 毫秒内输出峰值补偿电流^[3],精准支撑关键节点电压,有效遏制电压崩溃风险,确保电网在极端工况下仍能维持稳定运行。面对新能源大规模接入带来的间歇性出力挑战,该技术通过自适应控制策略实现精准治理:针对风电功率的随机波动,SVG 融合风速预测模型提前预调补偿容量,平滑功率曲线;对于光伏发电的昼夜出力差异,则采用分时段补偿策略,确保电网电压全天候稳定。实验数据印证了其显著成效——配备智能补偿装置的新能源场站,并网点电压波动范围缩减 60%,系统抗干扰能力提升近一倍,为高比例新能源电力系统的安全运行提供了关键技术支撑。

3.4 实现智能化管理

智能无功补偿技术通过深度融入电力自动化体系,全面推动电网管理模式向智能化跃迁。该技术设备严格遵循 IEC 61850 标准,与 SCADA 系统实现无缝数据交互,每秒实时上传电压、电流、谐波畸变率等 20 余项核心参数,为调度中心构建起全维度监测网络。依托大数据分析平台,机器学习算法可基于历史数据精准预测负荷变化趋势,自动生成 SVG (静止同步补偿器) 的动态补偿策略,在用电高峰来临前调整输出容量,将人工干预频率降低 70% 以上。其远程运维模块支持设备状态自诊断与参数云端修改,使单次巡检时间从 4 小时缩短至 30 分钟,运维效率提升超 50%。在区域电网层面,多台 SVG 通过 EMS 系统形成协同控制网络,实现无功功率的跨区域优化分配,既保障了电压稳定率达 99.9%,又将线损率控制在 3% 以内,达成经济性与安全性的动态最优平衡。

4 智能无功补偿技术的应用场景分析

4.1 工业配电系统

在工业领域，电弧炉、轧机等冲击性负荷的频繁启停，常引发电网电压剧烈波动，造成设备停机甚至损坏等严重后果。而智能无功补偿技术凭借 SVG（静止同步补偿器）的毫秒级响应特性，能实时精准跟踪负荷变化，动态输出感性或容性无功功率，将电压波动范围牢牢控制在 $\pm 2\%$ 以内。以钢铁企业电弧炉冶炼为例，SVG 可有效抑制电压闪变，让焊接质量稳定性大幅提升 30%。对于大型工厂复杂的多电平补偿需求，采用级联 H 桥结构的 SVG，运用多电平拓扑技术，不仅把谐波畸变率降至 1% 以下，还具备大容量补偿能力，单台补偿容量可达 100Mvar 以上，充分满足石化、冶金等行业对电能质量的严苛标准。

4.2 新能源发电领域

新能源场站里，风电、光伏发电的间歇性出力特性，极易致使并网点电压超出规定限值，给电网稳定运行带来挑战。智能无功补偿技术凭借双模式控制策略达成精准调节：在风电场中，SVG 与风速预测模型深度融合，提前预判并调整补偿量。一旦风速突增使出力大幅跃升，SVG 能在 10ms 内迅速输出容性无功，有力支撑电压稳定。在光伏电站，采用分时段补偿策略，白天满发时吸收过剩无功，避免电压过高；夜间低载时补偿感性无功，防止电压过低，使电压波动率大幅降低 60%。对于分布式发电系统，多台 SVG 借助虚拟同步机技术实现协调控制，在微电网中构建起无功功率共享机制，既提升了新能源的消纳能力，又增强了系统抵御干扰的稳定性。

4.3 城市配电网升级

在智能台区建设进程中，智能无功补偿装置与 AMI（高级计量架构）实现了深度融合。该装置能够实时精准监测变压器出口的各项参数，并依据这些数据自动生成科学合理的补偿策略。以居民区配变过载情况为例，当负载率攀升至 120% 时，SVG（静止同步补偿器）会迅速优先补偿无功功率，将负载率有效降至 90%，同时使线损率降低 25%。在需求响应场景中，装置可根据 DR（需求响应）信号灵活调整补偿模式：用电高峰时段，减少无功输出以降低线路电流，缓解供电压力；用电低谷时段，增加补偿提升功率因数，优化

电能使用效率，达成源网荷的互动优化。某城市开展的试点项目表明，采用智能补偿策略后，台区综合线损从 8.2% 大幅降至 5.1%，年节约电费超百万元。

4.4 轨道交通与数据中心

在轨道交通牵引供电系统里，列车频繁启停会引发谐波与无功冲击，进而造成电压畸变，影响供电质量。而智能 SVG 运用 LCL 滤波与有源阻尼技术^[4]，可将谐波含量严格控制在 3% 以内，同时借助能量回馈单元，把列车制动产生的能量回收再利用，节能率高达 15%。在数据中心场景中，高密度 IT 负载对电能质量要求极高，模块化 SVG 采用分布式部署方式，实现分区精准补偿，能将电压暂降持续时间从 100ms 大幅缩短至 20ms，有力保障服务器稳定不间断运行。以某超算中心的应用案例来看，智能补偿系统成效显著，使 UPS（不间断电源）放电频率降低 80%，年运维成本直接减少 300 万元，极大提升了数据中心的经济性与可靠性。

5 结语

综上所述，智能无功补偿技术凭借电力电子器件与智能算法的优势，有效解决了传统技术响应滞后等难题，在提升电能质量、降低电网损耗、增强系统稳定性以及实现智能化管理等方面成效斐然，因而被广泛应用于工业、新能源、城市配电网等多个领域。展望未来，智能无功补偿技术将不断优化升级，多目标协同控制与模块化标准化设计将助力其进一步降低成本、提升性能。随着深度学习、边缘计算等智能算法的深度融合，补偿装置将朝着全数字化、智能化方向迈进。此外，该技术还将与能源互联网、虚拟电厂深度融合，成为构建新型电力系统的关键支撑力量，为能源转型和电力自动化发展提供源源不断的强大动力。

参考文献

- [1] 贺子凝.智能无功补偿技术在电力自动化中的应用研究[J].科技创新与生产力,2025,46(11):147-149.
- [2] 陈星宇.无功补偿技术在电力电气自动化中的应用[J].光源与照明,2025,(03):203-205.
- [3] 刘娜.电力系统自动化中智能无功补偿技术应用实践[J].电力设备管理,2024,(17):138-140.
- [4] 陈群.电力自动化中智能无功补偿技术的应用探讨[J].光源与照明,2023,(01):204-206.