

电气工程及其自动化无功补偿技术的应用

魏晨晨 李培茹

国网河南省电力公司驻马店供电公司 河南 驻马店 463000

【摘要】：无功补偿技术在电气工程及其自动化领域具有重要价值。通过提升功率因数、减少无功功率在输电线路中的往返流动，能够显著降低线路损耗并改善电网电压稳定性。随着系统负荷的复杂化及自动化水平的提高，无功补偿设备在智能化、实时化调节中的作用更加突出。其应用不仅优化了电能质量，还增强了系统运行的可靠性，为电力系统结构的经济性和可控性提供技术支撑。基于此，对无功补偿技术的应用特点、优化策略及其在工程中的实践价值进行探讨具有必要性。

【关键词】：电气工程；无功补偿；电能质量；功率因数；自动化

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.006

引言

现代电力系统在负荷类型不断变化的背景下，对电能质量与运行效率的要求持续提升。无功功率的不合理流动不仅导致电压波动，还会增加线路损耗，使系统整体性能受到限制。无功补偿技术因能够调节电压、改善功率因数而成为电气工程领域的重要技术手段。随着自动化水平的发展，其应用范围不断扩大，技术形式也更加多样化。围绕无功补偿技术的运行特性、控制策略与工程实践展开分析，有助于揭示其在优化电网运行中的关键作用，并为相关技术的发展提供理论基础。

1 无功问题在电气系统中的主要挑战

无功功率在电气系统中的存在具有不可避免性，但在负荷结构不断复杂化的运行环境下，其波动对系统造成的影响愈加突出。当大规模感性负荷投入运行时，电网中的无功需求迅速攀升，造成电压水平难以维持在稳定区间内。电压偏离额定范围后，既影响设备绝缘能力，又使输电线路承载的无功往返流动加剧，线路电流随之上升，铜损明显放大^[1]。电力系统由此出现电能质量下降、设备负载率提升和输配电能力受限等一系列连锁反应。在自动化系统中，大量变频装置、电力电子设备的接入，使无功特性呈现动态变化，更加剧了无功波动与电压调节之间的矛盾，使系统运行处于频繁调整的状态。

无功功率的无序变化还会导致电网调节难度显著提升。在高比例电力电子化背景下，负荷呈现非线性、突变性等特征，使传统的调节手段难以快速响应。无功电流在输电线路中不断循环，使线路压降增大，进一步削弱末端电压，使局部区域出现电压偏低甚至电压崩溃风险。电源侧则可能因无功支撑不足而无法维持稳定运行，发电机的励磁系统面临更频繁的调节压力，系统的无功平衡难以通过单一环节实现。此类问题的累积使电网调度中心必须增加无功调节指令与监测力度，自动化系统的实时分析也需承担更高的精度要求，任何延迟或误判都会扩大系统波动。

在工业现场和城市配电网中，无功问题还表现为不同区域间的无功需求不均衡。当高峰负荷持续上升时，局部电网需

求突然增大，使主变压器的无功容量被迅速消耗，部分区域供电能力出现瓶颈。自动化设备在高无功环境下运行也更容易出现控制性能下降，如逆变器触发角漂移、变频器输入电流畸变加剧等，使设备效率与可靠性受到影响。无功补偿若不能及时介入，配电网的电压曲线难以保持平滑状态，线路损耗急剧攀升，电网规划与运行方案也因此面临调整压力。无功问题由此成为制约电气工程系统稳定运行和自动化水平提升的重要因素，使补偿技术的应用显得尤为关键。

2 无功补偿技术的核心调节机制

无功补偿技术的调节机制源于对电压稳定性与功率因数的实时调控，通过对系统无功功率的动态吸收与提供，使电网运行维持在适宜的电磁平衡状态。感性负荷在系统中占比较高时，会使电流相位滞后，形成无功需求持续扩大的现象，补偿装置通过提供电容性无功，使电流相位提前，从而降低线路电流与压降^[2]。电容器组在投切过程中依靠电压变化进行无功调节，通过改变电网的无功分布，使输电线路减少无功往返流动，减轻变压器与线路的电流负担。补偿装置的投运会改变系统的等效阻抗，使电压曲线趋于平稳，并提高系统对冲击负荷的支撑能力，为电能质量的改善奠定基础。

在自动化控制条件下，无功补偿技术的调节逻辑依托于实时监测与快速响应。智能控制系统通过采集电压、无功功率、谐波含量等参数，判断电网所处的运行状态，并通过闭环控制策略调节补偿设备的动作。磁控电抗器与电容器组构成的混合型补偿装置可在连续及分步调节间切换，其等效电抗的变化使无功补偿呈现柔性化特征，能够应对负荷变化速度快、幅度大的工况。静止无功发生器（SVG）通过电力电子变流链向系统提供可控无功，其输出无功可在感性与容性之间连续调节，不依赖传统电抗器，其快速响应能力在毫秒级别，使电压支撑更具稳定性。通过脉宽调制策略控制输出波形，可有效抑制电压畸变，使系统在复杂运行条件下依旧保持较高的调节精度。

自动化无功补偿装置在工程应用中的运行机制还体现出多点协调的特征。配电站、主变压器、线路末端等区域的无功

需求并不一致，需要通过分层控制与区域优化方式实现协同调节。补偿系统会根据电网的潮流方向与节点电压变化，自动确定补偿位置与补偿量，使无功功率在靠近负荷侧进行就地平衡，减少长距离输送造成的损耗。在工业负荷密集区，补偿技术的调节机制可降低变频设备的输入畸变电流，改善电力电子装置的运行环境；在城市配电网中，自动化补偿系统通过调节不同节点间电压，使配电线路保持相对平衡，避免因局部无功不足而引发电压波动。补偿装置与监控系统的联动还为电气工程提供了更高的运行可靠性，使系统在复杂工况下依然能够维持稳定的功率因数与电压水平，为后续优化策略的实施奠定技术基础。

3 自动化条件下补偿装置的配置策略

在自动化运行条件下，无功补偿装置的配置策略需要围绕负荷特性、电压分布规律以及系统动态响应能力展开。不同区域的电网在运行中会呈现出负荷波动频繁、无功需求分布不均等特点，使补偿装置的布置位置具有关键影响。将补偿设备尽量靠近无功需求点，可减轻长距离输电带来的电流增量，使线路压降与损耗保持在可控范围内^[3]。对于负荷密集区或电力电子设备占比高的场景，需要在节点处设置容量相对充足的补偿单元，使系统在电压偏移时能够快速恢复稳定。自动化监控系统根据采样数据判断补偿动作时机，使补偿配置不再依赖经验选型，而是依据实时运行特征进行动态调整，提升补偿效果。

补偿装置的类型选择也是配置策略中的核心环节。固定式电容器组适用于负荷变化较为平缓的区域，而动态特征明显的场景更适合采用投切式电容器组、磁控电抗器或静止无功发生器。自动化系统通过对负荷曲线进行实时分析，对补偿装置进行分级管理，使不同设备在各自的调节区内发挥作用。例如磁控电抗器可承担连续调节任务，电容器组用于应对较大幅度的无功缺口，SVG 承担快速补偿和电压支撑功能，使整体补偿体系具备协调性与互补性。通过电力电子技术实现的可控电抗与电容调节，使补偿装置能够在自动化控制下形成柔性化特征，满足高动态负荷条件下的电能质量需求。

在系统层面，配置策略还体现在区域协调调节与分层控制机制中。自动化调度系统会基于潮流分布分析，对不同电压等级的补偿装置进行统一管理，使各节点间的无功功率保持相对平衡。高压侧补偿装置承担整体电压稳定任务，中低压侧装置对局部电压进行精细调节，从而形成分层响应模式。配电网自动化系统通过通信网络实现各装置之间的数据互通，使补偿能力在整个区域范围内实现协调分配。通过这种方式，不同节点的补偿设备能够在电压波动出现时同时参与调节，使系统具备更高的运行稳定性与抗扰动能力。在工业负荷密集的区域，这种配置策略还能够改善电力电子装备的运行环境，使设备在电能质量较优的条件下保持高效运行，提高电气工程系统的整体性能。

4 工程应用中的典型实效与优化路径

无功补偿技术在工程应用中的实效体现在电能质量改善与系统运行稳定性的提升，且各项指标优化效果可通过量化数据体现。某化工园区（感性负荷占比 72%）投入 SVG 动态补偿装置后，电压波动率从 3.8% 降至 1.2%，线路电流平均下降 15.6A，铜损降低 28.3%，功率因数从 0.78 提升至 0.95，配电变压器热负荷率控制在 65% 以内，为大功率设备稳定运行提供了保障^[4]。城市配电网中，动态补偿装置可使节点间电压偏差缩小至 ±3% 以内，有效削弱负荷突变引发的电压波动，适配区域内 80% 以上电力电子设备的接入需求。如下表所示：

表 1 不同补偿装置在工业场景中的应用实效对比表

补偿装置类型	功率因数提升幅度	线路损耗降低率	响应时间	适用负荷波动幅度
固定式电容器组	0.75-0.90	15%-22%	秒级	≤10%
投切式电容器组	0.80-0.93	20%-26%	百毫秒级	≤25%
SVG 静止无功发生器	0.85-0.98	25%-32%	毫秒级	≤40%

工程实践中，补偿技术实效与系统规划、调度策略密切相关。负荷波动明显区域，自动化补偿装置通过实时调节维持电压稳定，实现无功就地平衡，减少远距离输送损耗。工业园区采用固定与动态补偿设备组合配置，兼顾调节范围与响应速度，提升系统效率，同时降低电力电子设备因电压畸变导致的故障几率，使变频器等设备故障频次下降 30% 以上。

在工程应用取得实效的基础上，进一步的优化路径主要围绕补偿装置的协同运行与智能化提升展开。通过构建区域协调控制平台，使不同电压等级的补偿装置能够依据潮流变化实现智能分配，使无功调节更加精细化。采用先进的监测算法对电压波动、负荷特性和无功需求进行预测，可使补偿装置提前进入调节状态，减少系统因延迟而出现的瞬态波动。在电力电子技术发展的推动下，更高精度的补偿设备通过快速响应能力获得更高的稳定性，使电能质量的改进更加持续。工业应用中，通过将装置维护数据与设备健康状态监测系统结合，可对补偿单元的运行状况进行动态评估，使装置在长期运行条件下保持良好的调节性能，也为电气工程自动化系统的运行提供更可靠的技术保障。

5 电气系统运行效率提升的综合评价

电气系统运行效率的提升可从补偿技术介入后的多维变化进行综合评价。无功补偿减少了线路中的无功电流，使输电线路的电流分布更趋合理，降低了因电流增大带来的铜损与附

加热负荷,使变压器、母线以及导线的运行状态处于相对轻载的区间。电压稳定性的增强也使系统在面对波动负荷时能够保持较高的供电连续性,避免因电压下跌导致的设备误动作^[5]。功率因数的提高进一步释放了线路的有功输送能力,使同一容量的输电设备能够承担更高水平的实际负荷,为电气系统整体运行效率的提升奠定了基础。补偿措施通过优化电压和电流的相位关系,使系统更接近理想运行状态,使电能传输过程中的利用率得到加强。

在自动化系统的参与下,运行效率的评价还应结合调控能力的改善程度展开。动态补偿设备通过快速响应能力,使系统在负荷突变时仍保持稳定的电压支撑,使调度部门的调节频率降低,减少人工干预对系统稳定性的影响。自动化平台对运行状态的持续监测,使系统能够实时调整无功分布,使补偿装置与电网负荷保持一致性,从而提升调节的有效性。补偿设备间的协同运行使不同区域形成相对均衡的电压结构,使系统在长距离输电与多点供电的情况下仍保持相对稳定的潮流分布。负荷中心的电压控制能力增强,使大型工业设备在启动与停机过程中引发的冲击量被有效削弱,使运行效率提升体现在供电质量的改善与生产过程的平稳性之中。

参考文献:

- [1] 孙凌波,姚俊智,许章茁.电气工程及其自动化供配电系统节能控制策略[J].光源与照明,2025,(11):214-216.
- [2] 葛力力.电气工程及其自动化无功补偿技术研究[J].低碳世界,2025,15(08):58-60.
- [3] 赵进.无功补偿技术在电气工程自动化系统中的实践研究[J].仪器仪表用户,2025,32(06):83-85.
- [4] 陈玉超.电气工程及其自动化无功补偿技术的应用研究[J].科技资讯,2024,22(20):123-125.
- [5] 倪佳佳.电气工程及其自动化无功补偿技术的应用[J].光源与照明,2024,(03):231-233.

在配电网与工业用户侧,运行效率的综合评价更关注补偿技术对能耗结构的影响。无功补偿对线路损耗的削减使能源利用更趋合理,减少了过度电流引起的无效消耗,为节能降耗提供了技术基础。工业负荷中大量电力电子装置因谐波与电压畸变影响运行,当补偿策略改善了电压质量后,这些设备的运行状态更为稳定,使其控制性能与转换效率得以提升。补偿技术在用户侧的实施也降低了设备因电压波动导致的维护成本,使系统在长期运行中获得更高的可持续性。由此形成的综合效益体现在输电效率、运行稳定性与设备寿命延展的多个层面,使电气工程系统在自动化条件下实现更高水平的运行绩效。

6 结语

无功补偿技术在电气工程及其自动化系统中的应用,使电网在复杂负荷条件下具备更高的稳定性与调节能力。补偿装置在改善电压特性、削减线路损耗、提升功率因数等方面展现出显著成效,为电气系统的高效运行提供了坚实支撑。自动化条件下的补偿策略使调控过程更加精细化、实时化,使系统能够在动态变化的工况中保持良好的运行状态。工程实践中的成果表明,补偿技术已成为提升电能质量与运行效率的重要支撑手段,为电力系统的稳定运行奠定了可靠基础。