

# 无功补偿技术在电气工程自动化系统中的应用

支瑞君<sup>1</sup> 赵娟<sup>2</sup>

1. 中国电建电力投资有限公司 甘肃兰州 730010

2. 国家电网平凉电力公司 甘肃平凉 744000

**摘要:** 无功补偿技术核心功能在于调节功率因数、平衡无功功率流动,对保障系统安全平稳运行、实现节能降耗具有关键作用。鉴于现代电气自动化系统因结构复杂、感性设备多,普遍存在功率因数偏低、电能损耗大、设备故障频发等问题,本文围绕无功补偿技术展开研究,系统阐述其技术原理、核心特点与应用价值,同时深入探索该技术在工业生产、新能源发电、建筑电气自动化等场景中的应用方法,明确装置选型、补偿方式、容量确定及安装调试等实操要点,旨在优化电气自动化系统运行状态,提升系统运行效率与经济性。

**关键词:** 电气工程; 自动化系统; 无功补偿技术

## 引言

近年来,随着科技水平进步,现代电气工程普遍部署自动化控制系统,显著改善了控制效果,并提高系统整体运行效率。与此同时,电气自动化系统结构较为复杂,存在大量感性设备,初始功率因数偏低,由此引发电能损耗增加、电压频率波动、设备故障频发等问题,增加了电气系统运行成本与风险系数。这一背景下,通过无功补偿技术,可以实时感知电气系统功率结构,精准输出/吸收无功功率,从而保障电气自动化系统安全平稳运行。

## 一、无功补偿技术概述

### (一) 原理

无功补偿技术是在电气自动化系统内加装补偿装置,以平衡无功功率流动为目标,实时监控系统系统状态,向系统注入无功功率,功率规模和负载规模密切相关,长期维持系统电压、频率稳定状态,并把功率因数保持在0.9乃至0.95以上。具体来讲,无功补偿技术具备需求识别、动态输出、优化传输三重作用机理。一是需求识别。利用配套仪表和传感器,全天候监测电气自动化系统运行过程,以功率因数、无功电流、电压等核心参数作为监测内容,精准识别无功需求,确认功率类型<sup>[1]</sup>。二是动态输出。在生成需求识别结果后,同步制定并执行补偿指令,极短时间内投入无功补偿装置,向负载提供所需无功功率,并在补偿结束后切除相应容量无功元件。三是优化传输。在电能传输环节,长期把输

电线路功率因数维持在0.9以上,功率因数越高,实际线损率越低,电能传输损耗越少。

### (二) 特点

一是动态响应。实时感知负载功率变化情况,精准调节补偿量,装置响应速度在毫秒级至秒级不等。二是自适应调节。无功补偿装置具备一定的逻辑判断能力,主动分析电气自动化系统在不同工况/场景下最为适配的无功补偿模式,自行切换补偿方式,调整补偿规模。三是安全稳定。精准提供无功补偿服务,有助于提高电气自动化系统稳定性,预防电压波动、闪变、设备过载停机等问题发生。四是经济节能。通过提高功率因数来减少线路输电、主变压器运行等环节的无功损耗,大幅降低电气自动化系统整体能耗水平。此外,无功补偿装置类型众多,包括并联电容器、静止无功发生器、静止无功补偿器等,各类装置的运行特性存在差异。以并联电容器为例,具备成本低廉、补偿容量固定、响应速度慢的性能特点,整体补偿效果较差,当前主要用于负荷稳定的电气自动化系统,如工业企业低压配电网。

### (三) 应用价值

从现实需求角度出发,基于电气工程自动化系统运行问题,无功补偿技术应用价值体现在运行支撑、提高容量利用率、辅助能源管理三方面,有效解决多项问题,确保电气自动化系统长期维持平稳、高效运行工况。一是运行支撑。通过调节功率结构,把电压、频率两项核心参数波动量限制在较小幅度,确保PLC控制器、伺服电机等核心设备运行状态免受影响,避免因出现电压跌

落等问题而导致自动化设备故障停机。二是提高容量利用率。在改善功率结构、提高功率因数的前提下,现有变压器、电缆可以承载更大规模负载,无需对电气自动化系统进行扩容升级,由此节省大量建设成本。三是辅助能源管理。保持无功补偿装置和能源管理模块联动状态,共享利用无功补偿数据,精准输出能耗分析报告,打造“补偿-监测-优化”闭环流程<sup>[2]</sup>。

## 二、无功补偿技术在电气工程自动化系统中的典型应用场景

### (一) 工业生产场景

工业生产场景即为工业配电系统,向工业生产设备持续稳定供电,并随着生产计划调整而同步切换配电系统运行模式。工业生产场景具备负载波动大和冲击性强的鲜明特性,频繁切换生产模式和投入/退出大容量负载设备,对无功补偿装置的环境适应能力、调节精度和响应速度提出严格要求。从现实角度来看,为减轻管理负担,取得理想补偿效果,推荐采取动态无功补偿方式,可选装置包括TSC晶闸管投切电容器与SVG静止无功发生器,禁止选用电容器组。实现基础功率补偿功能的前提下,额外关注谐波治理、分区补偿两项问题。对于谐波治理问题,变频器、电弧炉等工业设备运行期间持续生成谐波,伴随出现谐波污染问题,致使设备受损,尽量选用具备有源滤波功能的新型无功补偿装置,或是配备常规型号补偿装置,在补偿回路内串联电抗器。对于分区补偿问题,根据负载特性、负载规模,准确区分车间类型,采取分区补偿方式,取代集中补偿方式,各负载分区内设置独立补偿柜,高度适配负载特性来强化补偿效果。

### (二) 新能源发电场景

新能源发电场景即为光伏电站、风电场等新能源发电系统,具备出力波动性强的共性特征,输出功率无规律波动,并网运行模式下,电网遭受剧烈冲击,如果大规模接入分布式能源,极易出现电压波动、设备过载烧毁等问题,存在安全隐患。在新能源发电场景,无功补偿技术以平抑波动、化解并网冲击作为功能定位,长期维持电网电压稳定状态。无功补偿技术落地应用期间,重点关注容量适配、并网联动、适应多变场景三项问题。一是容量适配。提前确认新能源发电系统最大出力值,合理设定补偿容量,补偿装置装机容量控制在新能源发电系统10%~20%最大出力值,高度适配功率波动范围,确保并网电压波动幅度不超过 $\pm 2\%$ 额定电压<sup>[3]</sup>。二是并

网联动。将无功补偿装置接入电网自动化控制系统,共享新能源发电系统运行数据,向逆变器和无功补偿装置联动下达控制指令,精准调节补偿容量。三是适应多变场景。新能源发电系统类型多,必须围绕系统运行特性,量身制定无功补偿方案,如在建筑屋顶光伏系统上部署低压SVG装置,大型光伏电站上部署高压SVG装置。

### (三) 建筑电气自动化场景

建筑电气自动化场景即为建筑供配电系统,相比其他场景,此类场景具备负载类型多样和用电高峰集中的鲜明特性,功率结构随着人员活动变化而变化,商业建筑与公共建筑用电高峰集中在白天,民用住宅建筑用电高峰集中在夜间。无功补偿技术落地应用期间,重点关注分时段补偿、联动控制、空间适配三项问题。一是分时段补偿。统计建筑用电高峰时段与低谷时段,确定各时段平均负载规模,专项设置无功补偿阈值,理论上,用电高峰时段全额投入无功补偿装置,用电低谷时段酌情降低补偿容量。二是联动控制。将无功补偿装置控制权提交给智能楼宇系统,通过现场传感器,实时监测建筑用电情况,精准识别功率补偿需求,按需动态提供无功补偿服务。三是空间适配。建筑室内无法提供足够空间来部署大型无功补偿装置,并对装置能耗水平较为敏感,必须配备紧凑型、低能耗的补偿装置。

## 三、无功补偿技术在电气工程自动化系统中的应用方法

### (一) 装置选型

装置选型环节,考虑到各类无功补偿装置的性能特点、运行特性有着显著差别,必须提前了解电气工程自动化系统相关信息,主动适配场景特点来选择装置类型,并要求所选无功补偿装置具备较快响应速度与强大谐波处理能力。从现实层面来看,主流无功补偿装置包含并联电容器组、SVG静止无功发生器、SVC静止无功补偿器。对于并联电容器组,本身具备智能电容柜,精准投切分组电容,具备成本低廉、结构简单和易于维护管理的优势作用,当前主要用于负载规模稳定的电气自动化系统,根据负载设备是否含有谐波成分来选择电容器型号,负载设备不含有谐波工况下,直接配备常规自愈式并联电容器组即可;负载含有少量谐波成分工况下,重点抑制3次谐波和5次谐波,串联设置6%~12%电抗器。对于SVG静止无功发生器,具备响应速度快、同步补偿容性无功与感性无功、具备谐波治理能力、精准调节补偿容量的性能优势,当前主要用于包含大量波动性负载

设备和冲击性负载设备的电气自动化系统，按照系统配电电压等级来决定SVG装置接入电压等级。对于SVC静止无功补偿器，响应速度适中，同体积装置中补偿容量相对较大，当前多用于高压大容量电气自动化系统，如大型工业配电系统和高压输变电工程，要求系统电压等级不低于35kV，且无功需求大于10Mvar。

### （二）确认补偿方式

无功补偿方式众多，基于电气工程自动化系统运行特性来看，可选补偿方式包括集中补偿、分散补偿、混合补偿，各类补偿方式的工作原理、适用场景和实操判断依据存在差异。对于集中补偿方式，电气自动化系统总进线端部署无功补偿装置，向系统全部负载设备统一提供无功补偿服务，适用于配电架构简单、无明显负载差异、全部负载无功需求趋势基本一致的电气自动化系统，如普通工业车间配电系统和小型办公楼配电系统。对于分散补偿方式，也被称为就地补偿，在电气自动化系统内标记各台大容量负载设备，如大型变频器，大型负载上独立部署小型无功补偿装置，补偿容量取决于负载容量，适用于单台设备无功占比超过30%、负载设备远离总进线端的电气自动化系统，如冶金车间配电系统和大型数据中心配电系统。对于混合补偿方式，并行采取集中补偿与分散补偿技术，总进线端部署大型无功补偿装置，重点负载上部署小型无功补偿装置，分别以维持全局功率因数和抑制局部波动作为功能定位，适用于同时存在总无功波动和局部负载波动问题的电气自动化系统，如集中式光伏电站<sup>[4]</sup>。

### （三）确认补偿容量

理论上，无功补偿容量和配电自动化系统无功需求保持一致，可以最大限度发挥无功补偿装置功效作用，减少前期建设成本。但从现实角度来看，电气自动化系统具备扩容需求，随着时间推移，系统容量有所增加，需要频繁更换无功补偿装置和扩充容量。为解决上述问题，无功补偿容量计算环节，先按照电气自动化系统总体容量和功率因数目标，计算基础容量，计算公式为 $Q_c = P \times (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$ ， $Q_c$ 是无功补偿容量， $P$ 是系统实际有功功率， $\tan \phi_1$ 和 $\tan \phi_2$ 分别是补偿前后功率因数角。基于负载特性，对基础容量计算结果进行修正处理，系统负载含有冲击性无功时，额外增加20%–30%补偿容量；电气自动化系统为新能源发电系统时，无功补偿容量直接设定为10%–20%装机容量<sup>[5]</sup>。此外，选用并联电

容器组作为无功补偿装置时，还应把总体容量分解为各组投切容量，要求最小一组电容器容量限制在1.5倍系统最小负载无功需求以内，电容器组数量超过3组，各组投切信号均接入PLC控制器或是DCS装置，根据电气自动化系统负载变化情况，动态调整电容器组投入数量。

### （四）安装调试

无功补偿装置安装环节，可能出现错误操作行为，装置安装位置、接线方式和设计方案不一致，或是因运输颠簸和现场保管不当，致使装置内部元件受损，未能取得预期无功补偿效果。为预防上述问题发生，无功补偿技术落地应用期间，重点关注无功补偿装置安装调试问题。合理选择安装位置，集中补偿模式下靠近总进线柜安装无功补偿装置，分散补充模式下紧贴负载配电柜安装无功补偿装置，如果选用SVG、SVG等高压补偿装置，还应单独部署接地网。无功补偿装置安装就位后，衔接开展调试检查作业，初步调试参数，把电压/电流信号接入电气自动规划系统，要求采样误差小于2%，依次测试投切逻辑和故障联动情况，模拟负载变化，观察无功补偿装置是否正确投入退出，人为模拟故障问题，观察系统是否触发报警程序和采取相应处理措施。

### 结语

综上所述，无功补偿技术改善了电气自动化配电系统运行态势，当前已成为建设高品质电气工程的重要技术类型。工作人员应加强无功补偿技术的实践研究，结合电气自动化系统运行特点，制定专项无功补偿方案，并规范装置选型、补偿方式、容量设定、安装调试等环节的操作要点，保证电气系统运行的稳定性。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 彭竞达. 智能无功补偿技术在自动化系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(11): 256–257.
- [3] 李静, 戚亦可, 吕泽昆. 智能无功补偿技术在电力自动化中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(05): 304–305.
- [4] 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.
- [5] 童理. 分析电气自动化控制中无功补偿技术的运用[J]. 电气技术与经济, 2023, (03): 101–104.