

一种低压配电系统无功补偿综合控制方法

黄春光¹ 商晓峰²

(1. 安科瑞电气股份有限公司, 上海 201801;
2. 中国电子工程设计院有限公司, 南京 210000)

摘要 无功补偿是低压配电系统电能质量治理的重要环节。在现有的无功补偿技术中, 针对多个无功补偿柜采用多个独立的无功补偿控制器, 正常工作时各个控制器之间无法实现有效调配, 造成柜内电容不断反复投切, 从而导致满负荷的无功柜过快老化甚至损坏; 同时, 柜内的静止无功发生器 (SVG) 无法与电容进行整体控制, 其毫秒级的响应速度使自身一直处于满负荷工作状态, 无法发挥其优势。为此, 本文提出一种无功补偿综合控制方法, 通过实时采集电力系统中的电压、电流及功率, 实时协调控制 LC 和 SVG 补偿模块。将此方法应用于实际工程中, 结果表明该控制方法可改善供电品质、提高系统功率因数。

关键词: 无功补偿; LC; 静止无功发生器 (SVG); 无功补偿综合控制; 低压配电系统

A comprehensive control method for reactive power compensation in low-voltage power distribution system

HUANG Chunguang¹ SHANG Xiaofeng²

(1. Acrel Co., Ltd, Shanghai 201801;
2. China Electronic Engineering Design Institute Co., Ltd, Nanjing 210000)

Abstract Reactive power compensation is an important link in the power quality management of low-voltage power distribution system. With the existing reactive power compensation technologies, multiple independent reactive power compensation controllers are used for multiple reactive power compensation cabinets, which makes it difficult to effectively allocate them during normal operation, causing repeated switching of capacitors inside the cabinets, and resulting in rapid aging and damage of the fully loaded reactive power cabinet. At the same time, the static var generator (SVG) cannot achieve the overall control of the capacitors, and the millisecond level response speed keeps itself in a fully loaded working state, unable to leverage its advantages. So a comprehensive control method for reactive power compensation is proposed, which controls the LC and SVG compensation modules in real-time by collecting voltage, current, and power in the power system, and it is applied to actual engineering projects. The application results show that this control method has good effects on improving power supply quality and increasing the power factor of the system.

Keywords: reactive power compensation; LC; static var generator (SVG); integrated control of reactive power compensation; low-voltage power distribution system

0 引言

随着经济的不断发展, 医疗、商业、生产制造等行业的整体用电量激增, 变压器扩容后所需的无功功率补偿容量随之增加, 每台变压器所配置的无功补偿柜也不断增多。无功补偿设备不仅有传统的

LC, 静止无功发生器 (static var generator, SVG) 的用量也在逐年递增^[1-2]。在这种情况下, 用户不仅希望能够灵活均衡地控制各个无功补偿柜内的电容电抗, 还希望能够实时有效调配电容和 SVG 的工作比例, 实现综合控制, 从而保证整个系统工作在一个有序健康的环境中^[3]。

国内外学者对低压配电系统无功补偿综合控制方法开展了深入的研究和分析。文献[4]提出一种 SVG+ 晶闸管投切电容器 (transistor switched capacitor, TSC) 的混合补偿器及基于专家决策的混杂控制方法, 充分利用 SVG 和 TSC 的优势, 解决了 SVG 在复杂环境中的稳定性和鲁棒性问题^[4]; 文献[5]结合原有 LC 电容器组补偿设备的特性, 提出基于 SVG+LC 的混合补偿系统, 该系统能够协调控制 LC 与 SVG 对负载无功功率进行精确补偿^[5]; 文献[6]提出一种 SVG+LC 的混合补偿器, 既可利用小容量 SVG 的快速精确动态补偿, 又可利用原有 LC 应对三相不平衡补偿中的粗补偿需求, 并研究了其总体协调与子系统的控制策略^[6]; 文献[7]提出一种新型无功功率补偿主电路形式, 将无功补偿装置 SVG 与 LC 无源滤波器并联使用, 详细分析了该主电路形式并给出了实例验证^[7]; 文献[8]提出一种由 H 桥级联型 SVG 与晶闸管控制电抗器 (thyristor controlled reactor, TCR) 型静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 组成的新型拓扑, 结合 SVG 的快速可控性和 SVC 大容量的优势直接对高压配电网的大容量无功、谐波同时进行治理。

基于上述参考文献, 结合 LC 补偿和 SVG 补偿各自的优劣, 本文提出一种低压配电系统无功补偿综合控制方法, 给出综合控制的工作原理和操作流程, 以期综合无功补偿控制系统的研究提供参考。

1 无功补偿概述

从能量角度进行分析, 电力系统中大多数的非线性负载是感性负载, 比如变压器、电动机、压缩机、空调等。传统的无功补偿是将感性负载与提供容性功率负荷的设备 (如并联电容器或同步调相装置) 并联在同一电路中, 从而为感性负载提供所需的无功功率。无功能量流动示意图如图 1 所示。

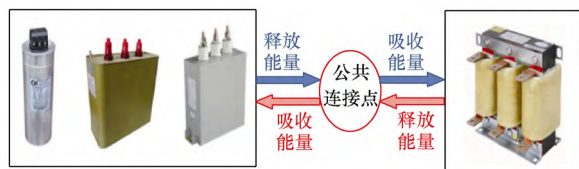


图1 无功能量流动示意图

从无功相位角度 (感性/容性) 进行分析, 纯阻性负载的电压和电流同相位, 感性负载的电压超前电流, 容性负载的电压滞后电流。无功相位分析如图 2 所示。

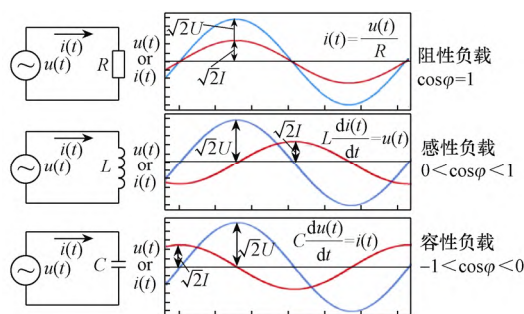


图2 无功相位分析

从相量角度进行分析, 分析电路如图 3 所示, 相量图如图 4 所示, 当电路中未并联补偿电容器 C 时, 电感 L 中的电流为 $\dot{I}_L$, 电阻 R 的电流为 $\dot{I}_R$, 电网侧的电流为 $\dot{I}_1$, 有 $\dot{I}_1 = \dot{I}_R + \dot{I}_L$, 此时电压和电流的相位差为 φ_1 , 功率因数为 $\cos\varphi_1$ ^[9]; 当并联补偿装置 C 后, 由于电感电流 $\dot{I}_L$ 与电容电流 $\dot{I}_C$ 方向相反, 根据相量分析, 电网侧电流 $\dot{I}_1$ 减小为 $\dot{I}_2$, 此时 $\dot{I}_2 = \dot{I}_R + (\dot{I}_L - \dot{I}_C)$, 电压和电流的相位差由 φ_1 减小到 φ_2 , 功率因数由 $\cos\varphi_1$ 提高到 $\cos\varphi_2$ ^[9]。

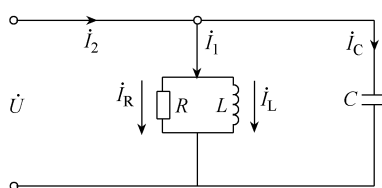


图3 分析电路

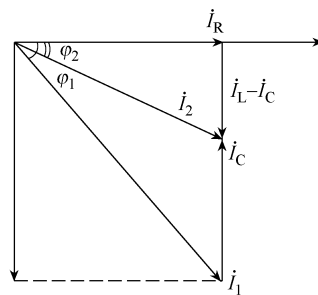


图4 相量图

2 无功补偿形式

2.1 LC 补偿控制

GB/T 15576—2020《低压成套无功功率补偿装置》对“低压成套无功功率补偿装置”的描述为: 由一个或多个低压开关设备、低压电容器和与之相关的控制、测量、信号、保护、调节等设备, 由制造厂家负责完成所有内部的电气和机械的连接, 用结构部件完整地组装在一起的一种组合体^[10]。LC

电容电抗补偿整柜并联在整个供电系统中,集无功补偿、电网监测功能于一体,通过互感器采集电流并输入功率因数控制器进行功率因数高低的判断,进而控制开关投切电容器。无功补偿电气原理图如图 5 所示。

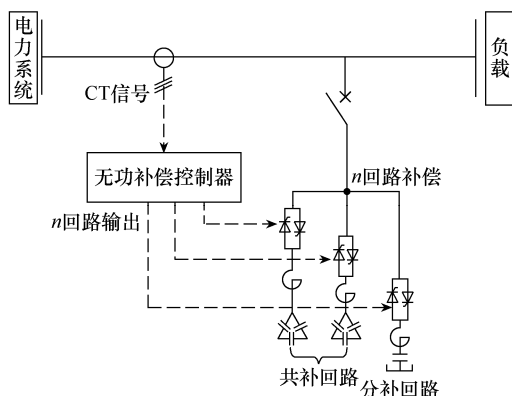


图 5 无功补偿电气原理图

2.2 SVG 补偿控制

SVG 将三相桥式电路通过电抗器直接并联在电网,适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值或直接控制其交流侧电流^[11],使该电路吸收或发出满足要求的无功电流,从而实现动态无功补偿的目的。SVG 工作原理如图 6 所示。

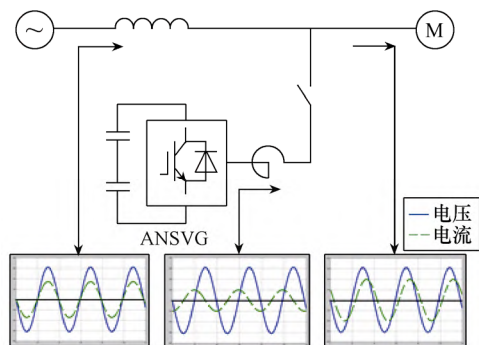


图 6 SVG 工作原理

2.3 LC 与 SVG 补偿对比

在成本价格方面,LC 补偿比 SVG 更经济,但在功能和产品性能方面,LC 补偿相对较差。例如,LC 补偿柜采用多个独立的无功补偿控制器,正常工作时各个控制器之间无法有效调配,造成柜内电容不断重复投切;在负荷变化较快或存在冲击负荷时,由于电容器内部放电影响无法做到快速响应补偿;控制器控制投切开关反复投切,出现分组投切阶梯式无功输出,容易出现过补偿或欠补偿的问题^[12]。同时,LC 补偿装置中的并联电容器对谐波电流具有放大作用,一般可放大 2~3 倍,谐振(串/并联谐

振)时可放大 20 倍以上^[13]。SVG 作为一种新型电力电子动态无功补偿装置,可对大小变化的感性/容性无功及负序量进行连续快速的补偿(连续可调),避免过补偿和欠补偿情况的发生,且不会与系统或负载设备产生谐振,适用于负载快速变化的场合,但其成本也相应较高^[14]。

3 无功补偿综合控制方法

结合 LC 和 SVG 补偿各自的优势及现场应用特点,本文提出一种无功补偿综合控制方法,该方法主要包括以下内容:

1) 实时采集电力系统中的电参量。电参量包括三相电压、三相电流、三相有功功率、三相无功功率、三相视在功率、三相功率因数、谐波电压畸变率、谐波电流畸变率等。

2) 实时检测电力系统中的电气告警保护。电气告警保护包括过电压告警、欠电压告警、过电流告警、过电压谐波告警、过电流谐波告警、过频告警、欠频告警、过温告警、电网断相告警、电网错序告警等。

3) 实时判断是否存在电气告警。

4) 保护动作。保护动作包括电容器组保护(快速切除工作的电容器组)、SVG 保护(控制 SVG 进入关机模式)、需要重新进行无功补偿初始化标记。

5) 计算无功补偿分配方案。包括剩余无功功率计算和 SVG 补偿系数修正。剩余无功功率计算是根据实时采集数据和预设目标功率因数,以及 LC 已投入容量,计算电力系统中需要补偿的剩余无功功率;SVG 补偿系数修正是根据剩余无功功率和系统中负载侧总无功功率,计算出 SVG 补偿系数,并进行实时修正。

6) 无功补偿初始化。包括 LC 补偿初始化,此时 LC 响应速度大于 SVG 响应速度,LC 补偿电力系统负载侧大部分无功功率,补偿稳定后,LC 补偿初始化结束;SVG 补偿初始化,此时 SVG 响应速度大于 LC 响应速度,SVG 补偿系统中剩余的无功功率。

7) SVG 补偿功率实时检测模块。包括 SVG 补偿功率大小检测(实时检测 SVG 输出无功功率大小)和 SVG 补偿功率方向检测(实时检测判断 SVG 输出无功功率是容性还是感性)。

8) SVG 补偿功率反馈比较模块。包括判断 SVG 输出功率大小 SVG_I 是否大于设定的容性无功功率

反馈值 m ，并且持续时间 T 是否大于时间设定值 t_1 ；判断 SVG 输出功率大小 SVG_I 是否大于设定的感性无功功率反馈值 n ，并且持续时间 T 是否大于时间设定值 t_2 。

9) LC 补偿控制模块。包括电容队列投切模块，在有效电容器组序列中投入一组电容器组或在有效电容器组序列中切除一组电容器组；电容有效性判定模块，判断电容器组投入是否有效，并进行有效或无效标记。

10) SVG 补偿控制模块。包括 SVG 关机模块、SVG 待机模块、SVG 补偿模块。SVG 关机模块控制 SVG 进入关机模式，停止运行；SVG 待机模块控制 SVG 进入待机模式，降低补偿响应速度，进入补偿等待状态；SVG 补偿模块控制 SVG 进入补偿模式，提高响应速度，实时补偿无功功率。SVG 补偿控制模块用于补偿负载侧剩余的无功功率，减小因负载波动而引起的系统功率因数波动，在提高功率因数的同时，维持和稳定系统侧功率因数。

4 无功补偿综合控制方法步骤

无功补偿综合控制方法主要包括实时采集、实时保护模块、计算无功补偿分配方案、SVG 补偿功率实时监测模块、SVG 补偿功率反馈比较模块、无功补偿综合控制模块 6 个流程，其详细流程如图 7 所示，具体步骤说明如下。

步骤 1：实时采集电力系统中的电参量。

步骤 2：实时检测电力系统中的电气告警保护。

步骤 3：实时判断是否存在电气告警。

步骤 4：在电气告警的情况下执行保护动作。

步骤 5：在不存在电气告警的情况下，计算无功补偿分配方案。

步骤 6：判断是否需要无功补偿初始化。

步骤 7：在需要无功补偿初始化的情况下，执行无功补偿初始化。

步骤 8：SVG 补偿功率方向检测，实时检测判断 SVG 输出无功功率是容性或是感性。

步骤 9：在 SVG 输出无功功率是容性无功的情况下，判断 SVG 输出功率大小 SVG_I 是否大于设定的容性无功功率反馈值 m ，并且持续时间 T 是否大于时间设定值 t_1 。

步骤 10：在 SVG 输出无功功率是感性无功的情况下，判断 SVG 输出功率大小 SVG_I 是否大于设定的感性无功功率反馈值 n ，并且持续时间 T 是

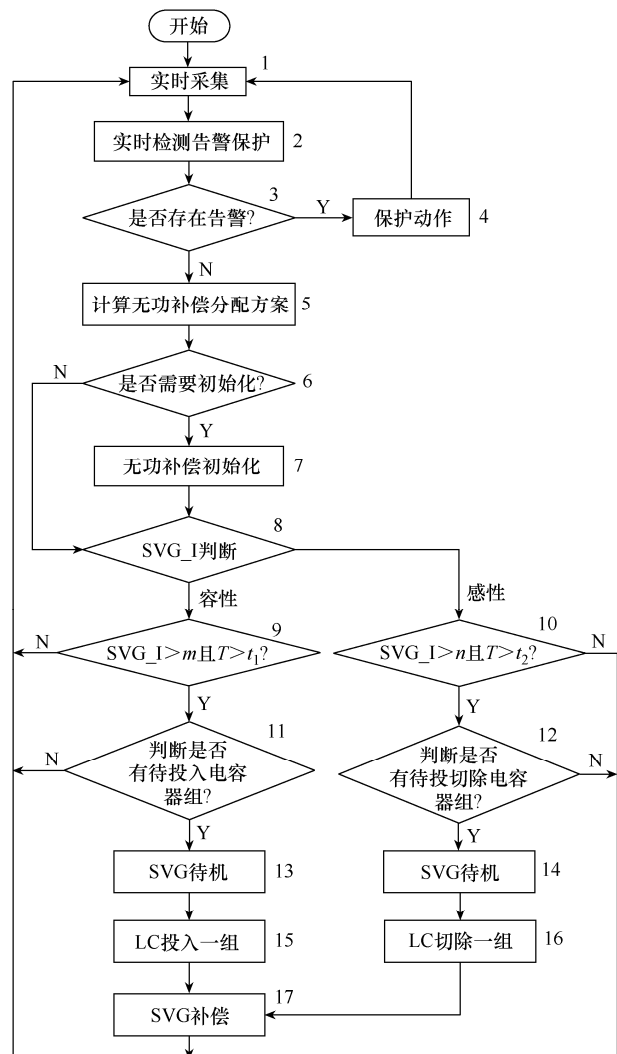


图 7 无功补偿综合控制方法详细流程

否大于时间设定值 t_2 。

步骤 11：在 SVG 输出功率大小 SVG_I 大于设定的容性无功功率反馈值 m ，并且持续时间 T 大于时间设定值 t_1 的情况下，判断是否有待投入电容器组。应注意容性无功功率反馈值 m 、感性无功功率反馈值 n 、时间设定值 t_1 、时间设定值 t_2 都需要提前设置。

步骤 12：在 SVG 输出功率大小 SVG_I 大于设定的感性无功功率反馈值 n ，并且持续时间 T 大于时间设定值 t_2 的情况下，判断是否有待切除电容器组。

步骤 13：在有待投入电容器组的情况下，执行 SVG 待机模块，控制 SVG 进入待机模式，降低补偿响应速度，进入补偿等待状态。

步骤 14：在有待切除电容器组的情况下，执行

SVG 待机模块, 控制 SVG 进入待机模式, 降低补偿响应速度, 进入补偿等待状态。

步骤 15: 电容队列投切模块, 遵循循环投切算法, 在有效电容器组序列中投入一组电容器组。

步骤 16: 电容队列投切模块, 遵循循环投切算法, 从有效电容器组序列中切除一组电容器组。

步骤 17: SVG 补偿模块, 控制 SVG 进入补偿模式, 提高响应速度, 实时补偿无功功率。

电容队列投切模块在有效电容器组序列中投入一组电容器组后, 还会进行电容有效性判定, 在电容器组投入前记录无功功率有效值, 电容器组投入 10s (可设置, 设置范围在 2~30s) 后记录无功功率有效值 (应该对应分补或混合补的情况), 如果前后无功功率差值小于该电容器组设定值的 20%, 则相关计数器加 1, 否则相关计数器清零。如果相关计数器连续累加计数超过 5, 就说明连续 5 次出现该电容器组的投入基本无效, 则生成相关故障记录, 并将该电容器组脱离有效电容器组序列。

5 实际工程案例

本文所提无功补偿综合控制方法已应用于无功补偿综合控制器单元产品中, 下面结合实际工程应用案例分析其优越性。

江苏某生产陶瓷厂的主要负荷为球磨机, 球磨机采用变频驱动。由于原材料体积不规则, 导致球磨机在运行时的电流冲击很大, 影响电力系统的稳定状态, 致使无功补偿电容器损坏较多、系统功率因数较低。现场变压器容量为 1 600kV·A, 负荷率较低, 现场原电容柜容量 300kV·A。无功补偿综合控制装置投入前的电能质量如图 8 所示。

无功补偿容量按照变压器容量的 30% 进行配置, 预估整柜容量为 500kvar (两套 250kvar), 采用 SVC+SVG 综合控制器控制的混合无功补偿方案, 考虑到现场谐波主要以 3 次、5 次和 7 次谐波为主, 电容电抗 SVC 应配置 14% 的串抗率^[15], 单套 250kvar 整柜配置方案见表 1。

无功补偿综合控制装置投入后的电能质量如图 9 所示。通过采用 SVC+SVG 综合控制器控制的混合无功补偿方案, 协调 SVC 和 SVG 的无功输出, 对比无功补偿综合控制装置投入前后数据可以看到, 功率因数由 0.86 提高到 0.98 以上, 由于 SVG 装置在补偿无功功率的同时也可以治理 3 次、5 次、7 次和 11 次以内的谐波, 电流畸变率由原来的 23.28%



图 8 无功补偿综合控制装置投入前的电能质量

表 1 单套 250kvar 整柜配置方案

设备名称	数量	型号
控制器	1 个	无功补偿综合控制器
SVG	1 台	ANSVG—S—G—100kvar
电容器	5 台	ANBSMJ—0.525—30—3
电抗器	5 台	ANCKSG—0.525—4.2—14
投切开关	5 个	AFK—TSC—3D/30—2

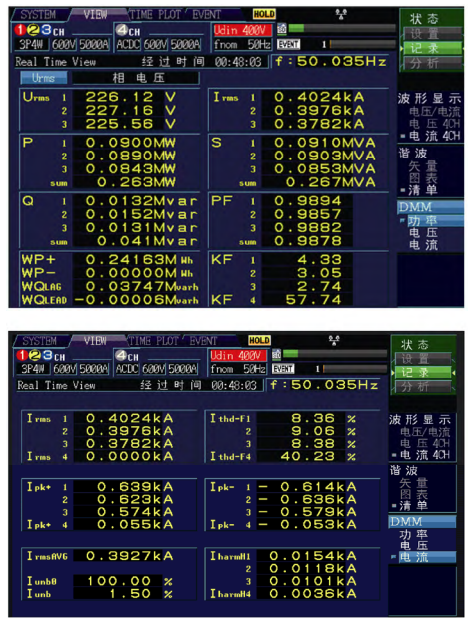


图 9 无功补偿综合控制装置投入后的电能质量

降低到 9.06%，效果较明显。

6 结论

本文提出的无功补偿综合控制方法，通过实时采集电力系统中的电流、电压及功率，实时控制 LC 补偿控制模块和 SVG 补偿控制模块对电力系统进行无功补偿。参考实际工程应用案例，选用综合补偿控制装置，对比前后的治理效果，解决了现有技术中 LC 和 SVG 无法统一调配而导致的空载或满载问题，以及 LC 频繁投切的问题，能够灵活均衡地控制各个无功柜内的电容电抗，同时电容和 SVG 的工作比例也可进行实时有效调配，从而改善了供电品质，提高了功率因数。

参考文献

- [1] 王兆安, 刘进军, 王跃. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [2] 李宏仲, 金义雄, 王承民. 地区电网无功补偿与电压无功控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 坎鹏程, 宗寿松, 沈若娴, 等. 一种模块化可扩展的无功补偿综合控制单元[P]. 中国: CN201621250556.7, 2021-12-24.
- [4] 李强, 罗安, 刘秋英. TSC-DSTATCOM 混合型动态无功补偿器及其混杂控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 12-19.
- [5] 郑凯凯, 陈洁, 阿不都艾尼·阿不都克力木, 等. 基于 SVG+LC 的混合无功补偿系统研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(3): 23-28, 35.
- [6] 陈晓科, 钟榜, 李钙, 等. 配网三相不平衡混合补偿器的控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 44-48.
- [7] 陈玉龙, 陈君诚. 一种新型有源补偿主电路结构与电感参数计算[J]. 科技创新导报, 2010, 7(35): 21, 24.
- [8] 张定华. 高压配网直挂式电能质量混合补偿技术及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [9] 张淘, 张天宇, 黄春光. ANSVC 无功补偿装置在江苏环保能源项目的应用[J]. 电工技术, 2023(5): 120-122, 125.
- [10] 低压成套无功功率补偿装置: GB/T 15576—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [11] 焦绪强, 朱耿峰, 陈啸旭, 等. 自冷式静止无功补偿发生器的控制策略[J]. 电气技术, 2021, 22(6): 17-21.
- [12] EUGENE N O. Literature review of the operational characteristics of static var compensator (SVC) in electric power system[J]. Innovative Systems Design and Engineering, 2019, 10(7): 5-21.
- [13] 吴涛. 谐波对无功补偿电容器装置的影响及抑制方法[J]. 中国新技术新产品, 2012(21): 126-127.
- [14] 游建章, 郭谋发. 含四桥臂 H 桥变流器的不对称配电网综合补偿方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2849-2858.
- [15] 袁松林, 郑凯, 倪高俊. 低压无功补偿中串联电抗器选择分析[J]. 现代建筑电气, 2020, 11(3): 14-16.

收稿日期: 2023-05-22

修回日期: 2023-06-25

作者简介

黄春光 (1995—), 男, 河南省濮阳市人, 硕士, 工程师, 研究方向为低压电能质量治理产品研发和配电网可靠性预测。