

基于 SiC 的多端口综合柔性调控装置设计与 协同控制策略研究

韩笑¹, 龚林静¹, 石春虎², 鲁一科¹

(1. 南京工程学院电力工程学院, 南京 211167; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106)

摘要: 针对配电台区三相四线制系统在不平衡工况下直流侧不均压的难题, 本文提出一种面向配电台区治理的基于碳化硅(SiC)的多端口柔性调控装置(V-UPQC)。利用 SiC 的高频特性构建了共直流母线模块化拓扑架构, 减小了滤波器体积并提升了功率密度。在控制策略上, 对串联侧交流电压外环策略进行改进, 针对三相四线制系统中的不平衡问题, 提出了一种基于比例-积分-谐振(PIR)控制器的中点电位平衡策略, 有效抑制了直流电压上下不均压的问题。最后, 通过仿真验证了所提装置在电压动态补偿及不平衡治理方面的有效性。

关键词: 配电网; 碳化硅(SiC); 多端口柔性调控; 串联侧交流电压外环策略; 中点电位平衡

Research on the Design and Coordinated Control Strategy of SiC-based Multi-port Integrated Flexible Regulation Device

HAN Xiao¹, GONG Linjing¹, SHI Chunhu², LU Yike¹

(1. College of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. NARI Technology Company Limited, Nanjing 211106, China)

Abstract: To address the issue of uneven DC-side voltage in three-phase four-wire distribution systems under unbalanced conditions, this paper proposes a silicon carbide (SiC)-based multi-port flexible control device(V-UPQC) aimed at distribution network management. By leveraging the high-frequency characteristics of SiC, a modular topology with a common DC bus is constructed, reducing filter size and enhancing power density. In terms of control strategy, the outer loop strategy of the series-side AC voltage is improved, and for the unbalance problem in three-phase four-wire systems, a midpoint potential balancing strategy based on a proportional-integral-resonant (PIR) controller is proposed to effectively suppress DC voltage imbalance. Finally, simulations verify the effectiveness of the proposed device in voltage dynamic compensation and unbalance mitigation.

Keywords: distribution network; silicon carbide (SiC); multi-port flexible regulation; series-side AC voltage outer loop strategy; midpoint potential balance

0 引言

在现代配电网中,随着分布式可再生能源高比例接入,线路末端及敏感工业负荷侧面临的电压暂升、暂降等动态电压越限问题日益凸显^[1-3]。这类电能质量问题可能导致生产中断、设备损坏等严重后果,对供电可靠性构成了直接威胁^[4-5]。统一电能质量调节

器(unified power quality conditioner, UPQC)采用“串联变压器补偿”方式^[6],通过调节串联变压器的副边电压来实现负载侧电压的补偿调节,主要用于治理配电台区或 0.4 kV 低压线路电压过高或过低、三相电压及电流不平衡、功率因数低等各种电能质量问题,是一种功能强大、性价比高的电能质量综合治理产品^[7-9]。

目前,国内外对于 UPQC 的研究主要集中在拓

收稿日期:2025-12-01; 修回日期:2025-12-22

基金项目:南京工程学院研究生科技创新基金项目(TB202517084)。

Project Supported by Graduate Science and Technology Innovation Fund Project of Nanjing Institute of Technology (TB202517084)。

拓扑结构的变化以及控制策略的改变这两个方面。文献[10]提出五桥臂容错拓扑与复合模型预测控制策略,旨在提高系统在单相故障下的运行能力。文献[11-12]将九开关 UPQC 与改进虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制结合,用于构网型风电机组的电能质量治理与故障穿越。但在特定调制策略下,其直流母线电压利用率可能低于传统拓扑,或者需要通过更复杂的调制技术来改善,增加了控制难度。在控制方面,模型预测控制(model predictive control, MPC)、滑模控制及线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)等先进算法被相继提出^[13-17],以提升系统的动态响应与稳态精度。然而,上述研究多基于传统的硅(Si)基 IGBT 器件^[18-19]。受限于 Si 基器件的物理特性,其开关频率通常限制在 5~10 kHz 左右,导致滤波电感与直流电容等无源元件体积庞大,难以满足配电台区对装置高功率密度和紧凑化的需求^[20-22]。此外,传统方案在处理三相四线制系统严重的负载不平衡时,往往面临直流母线电压利用率低或中点电位控制复杂的挑战^[23-28]。

针对上述问题,本文提出一种基于第3代宽禁带半导体 SiC 的多端口综合柔性调控装置(virtual unified power quality conditioner, V-UPQC),该装置核心在于解决现代城市配电网中治理需求升级与

安装空间受限之间的矛盾。本研究在器件层面选用高性能 SiC-MOSFET,具有更高的开关频率、更低的导通电阻和更高的工作结温等优点,为实现功率模组装置的小型化与高效化奠定基础,有利于降低城市配电网升级改造中的土建成本,这对于寸土寸金的城市中心电力治理具有极强的工程应用价值。在拓扑与系统集成层面,设计了一种“共直流母线、左并右串”的模块化拓扑,形成了一种结构更紧凑、能量调度更直接的新型功率模组。在控制策略方面,改进了串联侧交流电压外环控制策略;针对配电网常见的不平衡工况,设计了包含 PIR 中点电位平衡的复合控制策略。最后通过仿真验证了本方案的有效性。

1 多端口柔性调控装置拓扑及工作原理

1.1 拓扑电路设计

针对传统配电网治理装置功能单一、集成度不足的问题,本文首先基于模块化设计理念构建了 V-UPQC 的主电路架构。图 1 所示为常规的“单输入、单输出”V-UPQC 拓扑结构,设计由总输入断路器 QF₁、串联变压器、输入 AC/DC 模块、输出 DC/AC 模块、DC/AC 输出 KM₃、旁路接触器 KM₁ 及 KM₂、旁路晶闸管等组成,确保装置在故障或检修状态下的无缝投切与旁路运行。

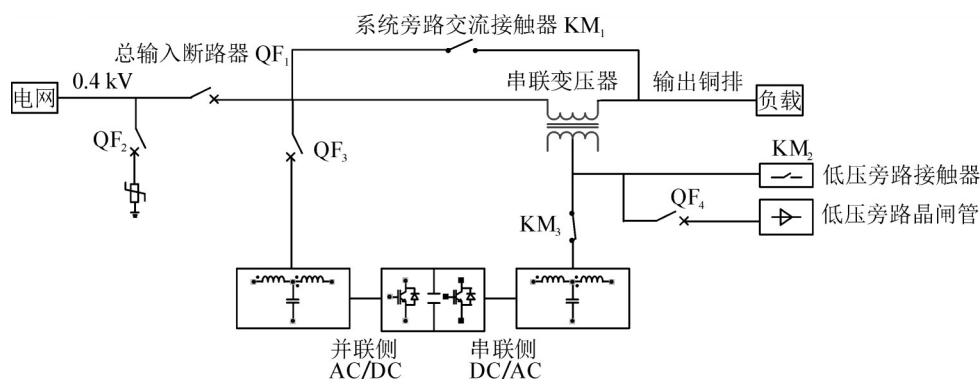


图1 “单输入、单输出”V-UPQC装置拓扑图

Fig. 1 Single-input, single-output V-UPQC device topology diagram

用串联变压器补偿方式,在配变 0.4 kV 低压出口或 0.4 kV 低压线路的中后段串联接入设备,并联侧 AC/DC 模块按照直流电压(U_{dc})下垂控制模式进行工作,各串联侧 DC/AC 模块工作于交流电压频率(VF)控制模式,通过 DC 750 V 直流母线连接,一进多出,根据不同线路的负荷特性,差异化电压调控,可使多用户电压合格率最优。“共直流母线”多支路电压串补图如图 2 所示。

并联侧 AC/DC 变流器工作于 U_{dc} 模式,从交流电网吸取能量,稳定直流母线电压,还可利用富余

容量进行负载无功及不平衡补偿,提升功率因数。除谐波补偿外,具有以下 3 类容量需求:1)可为 n 个串联侧 DC/AC 提供稳定的直流有功功率 P_1 ;2)为电网三相不平衡的有功及无功电流提供补偿,包括分相有功功率 P_2 、分相无功功率 Q ;3)为直流端口提供稳定的直流有功功率 P_3 。根据上述 3 类补偿需求,计算并联侧变流器的容量为

$$S_{AC/DC} = \sqrt{(P_1 + P_2 + P_3)^2 + Q^2} \quad (1)$$

串联侧 DC/AC 变流器主要工作于 VF 模式,实

现输出电压动态精准补偿,可对 A、B、C 分相电压进行独立补偿。串联变压器低压侧的调压范围为 $\pm\gamma_1\% \times U_N$, 流过低压侧的额定电流与供电主回路负荷电流 I_N 相同,若负荷最大功率 S_N ,则可计算出单个串联变压器的容量为

$$S_T = \gamma_1\% \times U_N \times I_N = \gamma_1\% \times S_N / 3 \quad (2)$$

串联变压器原副边的功率守恒,得出串联侧 DC/AC 变流器的容量设计为三相串联变压器之和,公式为

$$S_{DC/AC} = \gamma_1\% \times S_N \quad (3)$$

即若串联补偿调压范围 20%,则串联变压器和串联侧 DC/AC 变流器的容量仅为配电线路负载的 20%,实现了以较低的装置容量对全功率负荷电压的有效调控。

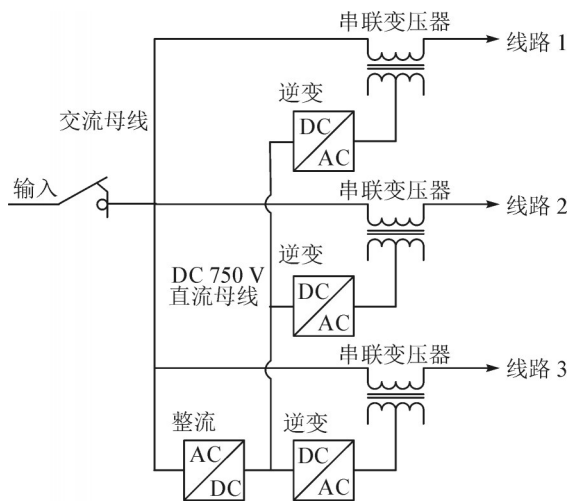


图2 共直流母线多支路电压串补图

Fig. 2 Multiple-branch voltage series compensation diagram of a common DC bus

1.2 工作原理分析

1.2.1 串联补偿原理

串联补偿的核心是为负载提供一个稳定的正弦波电压,这主要由串联侧逆变器完成。当装置输出接负载时,假设输入电压为 U_{in} ,串联侧模块工作于 VF 模式,逆变出电压 ΔU ,输出电压 U_{out} 计算公式为

$$U_{out} = U_{in} - \Delta U \times \text{SeriesT_Ratio} \quad (4)$$

式中, SeriesT_Ratio 为变压器变比(44 V/220 V)。

根据当前串联变压器原副边同名端的对应关系,当需要升压时,逆变出负的电压;当需要降压时,逆变出正的电压。

1.2.2 潮流转供原理

本装置采用“共直流母线”架构,打破了传统独立治理装置的能量孤岛效应。各线路串联变流器

与并联变流器在直流母线处实现功率解耦与交换。当多条线路负载不均或电压波动不一致时,装置呈现出功率互济的特性:能量过剩的线路输出能量,经由整流馈入直流母线,直接调度至亏缺线路进行利用。这种跨线路的能量动态路由机制,实现了不同馈线间的有功潮流转供,在协同治理电压问题的同时,大幅降低了配电台区对上级变压器总容量的冗余需求。

1.2.3 多端口系统级协同控制策略

为实现并联侧与多个串联侧模块间的有序联动,本装置构建了系统级协同控制逻辑。

系统以直流母线为功率交换纽带,实时监测各端口功率需求。并联侧利用下垂控制确保直流电压支撑,串联侧根据各馈线偏差量调整补偿指令,通过母线实现功率在不同端口间的按需分配^[29-30]。协同控制策略根据电网工况在不同状态间进行平滑切换。电网电压正常且无不平衡治理需求时,串联侧处于旁路运行状态以降低自身损耗,但当线路电压偏移超限时,各串联模块进入 VF 控制模式输出补偿电压,协同并联侧的有功支撑实现稳压。在三相四线制出现严重不平衡工况下,激活 N 桥臂的 PIR 中点电位平衡策略,协同抑制直流电压二次纹波并修正电位偏移。

这种基于多状态平滑切换的协同控制策略,使得装置能够根据配电网实际工况动态调整能量流向,在最大限度发挥 SiC 器件高频治理优势的同时,提升了系统对极端复杂工况的适应性与整机运行效率。

2 基于 SiC-MOSFET 的功率模组关键设计

2.1 主功率电路参数设计

1) SiC MOSFET 功率器件选型

装置的直流母线电压设定为 750 V。综合考虑开关管关断时的电压尖峰与杂散电感影响,为预留充足的安全裕度,本文选取额定阻断电压为 1 200 V 的 SiC MOSFET 作为主功率器件。同时,基于 1.25 倍长期过载运行需求,核算最大负载电流有效值约为 475 A,以此确定器件的通流能力等级,确保其始终工作于安全工作区内。

2) LCL 滤波器设计

传统硅基 IGBT 器件受限于开关损耗,开关频率通常限制在 20 kHz 以下,导致滤波电感和直流电容体积庞大,限制了装置的功率密度。本装置采用 SiC MOSFET,将开关频率提升至 30 kHz。LCL 滤波器逆变侧电感 L 的设计需权衡电流纹波大小与电感体

积。过大的纹波电流会导致输出电流的部谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)增加及磁性元件损耗增大,而过小的纹波要求则会导致电感体积和重量显著增加。综合考虑 SiC 器件的高频开关特性,本文设计选取额定峰值电流的 20% 作为最大允许纹波电流 ΔI 。装置最大输出电流有效值约为 95 A,则峰值电流 I_{peak} 约为 134.3 A。设定 $\Delta I = 0.2I_{\text{peak}} \approx 27$ A,将其代入公式

$$L = \frac{U_{\text{dc}}}{4f_s \Delta I} \quad (5)$$

式中: U_{dc} 取 750 V; f_s 取 30 kHz,得到 L 为 0.23 mH。更高的开关频率使得滤波电感的体积减小了约 50%,极大地提高了装置的功率密度与动态响应速度。

2.2 SiC 器件应用的系统级性能增益分析

针对城市配电台区对补偿装置高功率密度与长效经济性的需求,本节对比分析了基于 SiC MOSFET 与传统 Si IGBT 方案在高频工况下的性能。对比分析如表 1 所示。

表 1 SiC-MOSFET 与 Si-IGBT 方案性能指标定量对比
Table 1 Quantitative comparison of performance indicators between SiC-MOSFET and Si-IGBT solutions

性能指标	Si-IGBT	SiC-MOSFET
滤波电感感值/mH	0.7	0.23
单管开关损耗	E	0.25 E
整机能量效率/%	约 97	约 98.5
热管理需求	高	低
峰值效率/%	98	99

1) 功率损耗

功率模组的总损耗 P_{loss} 主要由导通损耗 P_{cond} 与开关损耗 P_{sw} 组成。对于 SiC MOSFET 器件,其单管损耗模型可表示为

$$P_{\text{cond}} = I_{\text{rms}}^2 R_{\text{ds(on)}}(T_j) \quad (6)$$

$$P_{\text{sw}} = f_s (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \frac{U_{\text{dc}}}{U_{\text{test}}} \quad (7)$$

式中: I_{rms} 为有效值电流; $R_{\text{ds(on)}}$ 为结温 T_j 下的导通电阻; E_{on} 和 E_{off} 为单次开关能量。

由于 SiC 为单极性器件,没有传统 Si 基器件固有的电荷存储效应及拖尾电流,所以单次开关能量极低,仅为同规格 Si 基器件的 20%~30%。在本文 30 kHz 的开关频率下,虽然频率提升至传统方案的 3 倍,但由于单次开关损耗的大幅下降,总发热量仍降低了约 70%,大幅减轻了散热系统的压力。整机效率提升 1.5% 左右。

2) 无源元件小型化与功率密度

为量化宽禁带半导体的应用优势,将本文 SiC 方案与传统 Si 基方案进行对比。在相同纹波限制下,高频化使电感感值从 0.7 mH 降至 0.23 mH,大幅缩小了磁性元件的物理尺寸。

3) 全寿命周期经济性评价

随着新能源汽车、储能、光伏发电行业的大力发展,目前 1 200 V 中 40 mΩ、32 mΩ 等 TO247 封装的碳化硅裸管已得到批量化应用,器件价格比 IGBT 约高 30%。但由于开关频率高,主电路电感、电容等无源器件变小以及散热器变小,整机 BOM 成本仅高 10% 左右。但带来的能效提升具有显著的长期经济效益。以 250 kW 并联侧容量为例,效率提升 1.5% 意味着每年可减少约 3.2 万度电的能耗损失,大约可在 2.5 年内通过节省损耗回收成本溢价,符合现代绿色配电网节能降碳的发展需求。

2.3 控制算法

2.3.1 并联侧控制算法

并联侧的任务是确保从电网吸收的电流是正弦波,且与电网电压同相位,同时维持直流母线电压稳定。其控制结构是一个典型的双闭环控制:外环是直流电压环,内环是电网电流环。

1) 直流电压外环控制策略

并联侧 AC/DC 工作于 U_{dc} 下垂控制模式,通过调节电网电流中的有功分量来维持直流母线电压的稳定,将交流侧三相电压、电流分别相乘再相加,得到三相总瞬时功率,公式为

$$\sum_{i=a,b,c} P_i = 1.5[E_p I_p \cos \alpha + E_N I_N \cos(\phi - \theta) + E_p I_N \cos(2\omega t + \phi) + E_N I_p \cos(2\omega t + \alpha + \theta)] \quad (8)$$

当电网电压或电流存在负序分量时,即式中 I_N 或 E_N 不为 0,总瞬时功率中存在 2 倍频分量,将引起直流母线电压 2 次纹波。即

$$P(i) = P_0 + P_{2\omega} \cos(2\omega t + \phi) \quad (9)$$

该二次功率 $P_{2\omega}$ 会直接耦合至直流母线,导致直流电压出现的二次纹波。若直接将采样电压反馈至电压环 PI 控制器,该纹波会作为扰动进入电流内环,导致网侧电流发生畸变。为此,本文在电压反馈通道中引入二阶陷波器(NotchFliter),其传递函数设计为

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (10)$$

式中: $\omega_0 = 2\pi \times 100$ rad/s,为中心频率; ξ 为阻尼比,取 0.707,以兼顾滤波深度与动态响应。

为实现多个 AC/DC 间的功率自主分配并提升系统阻尼,引入下垂系数 k 。此时电压外环的控制方程见式(11),控制图见图 3。

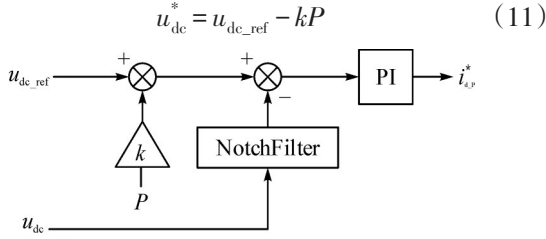


图3 U_{dc} 下垂直流电压外环
Fig. 3 U_{dc} vertical DC voltage outer loop

2) 电流内环控制策略

根据图 1,可建立三相四线制 UPQC 在两相旋转 dq 坐标系下的数学模型。对 UPQC 的并联侧 AC/DC 建立两相同步旋转 dq 坐标系下的数学模型,引入电流反馈、电网扰动及电阻压降进行前馈补偿,由此分别得到并联侧与串联侧的电流控制器,如式(12)所示。

$$\begin{cases} u_{shd}^* = -(k_p + k_i/s)(i_{shd}^* - i_{shd}) - R_{sh}i_{shd} + \omega L_{sh}i_{shq} + u_{1d} \\ u_{shq}^* = -(k_p + k_i/s)(i_{shq}^* - i_{shq}) - R_{sh}i_{shq} - \omega L_{sh}i_{shd} + u_{1q} \end{cases} \quad (12)$$

式中: u_{1d} 和 u_{1q} 分别是电网电压的 d 、 q 轴分量; i_{shd} 和 i_{shq} 分别是并联侧换流器的输入电流的 d 、 q 轴分量; u_{shd} 和 u_{shq} 分别是并联侧换流器的交流侧三相电压的 d 、 q 轴分量; k_p 和 k_i 表示换流器的电流控制器的比例、积分系数。

根据如上内环控制方程,再结合整流侧换流器的外环功能,得到如图 4 所示的并联侧电压电流双闭环控制框图。

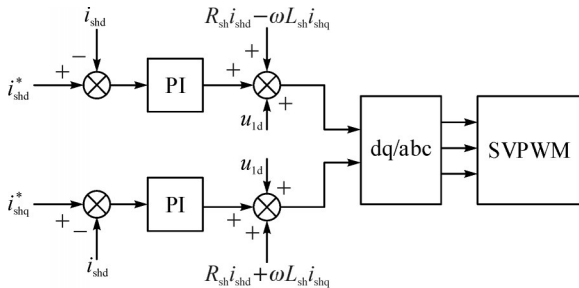


图4 并联侧电流内环控制图
Fig. 4 Parallel-side current inner loop control diagram

2.3.2 串联侧控制算法

串联侧的任务是为负载提供一个稳定、纯净的正弦波电压。它主要处理由负载无功和谐波电流引起的电压质量问题,其控制核心是电压环控制。

1) 交流电压外环控制策略

串联侧电压环工作于 VF 模式,如图 5 所示。不同于传统的做法在 dq 坐标系下针对正序分量进行 PI 调节,其将电压外环分解为正序、负序与零序独立提取环路。其控制目标是让逆变器输出一个电压,使得负载电压无限接近于理想指令。当期望交流侧输出三相不相等的电压时,虚线框中的负序电压外环指令、零序电压外环指令将不为零。假设三相交流电压目标有效值为 U_A 、 U_B 、 U_C ,得出三相电压指令峰值 $U_{A_pk_t}$ 、 $U_{B_pk_t}$ 、 $U_{C_pk_t}$ 。用于求解正序电压、负序电压和零序电压指令。

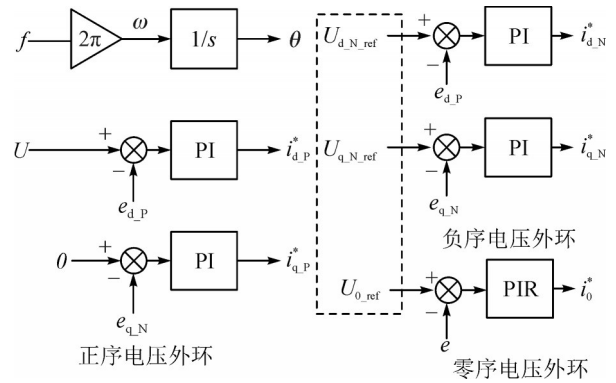


图5 VF 交流电压外环
Fig. 5 VF AC voltage outer loop

① 正序电压补偿量指令

正序电压指令即为分相电压指令平均值 U_{pk_0} , 在 dq 旋转坐标系下,正序电压指令为

$$\begin{cases} U_{d_ref} = U_{pk_0} = (U_{A_pk_t} + U_{B_pk_t} + U_{C_pk_t})/3 \\ U_{q_ref} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

② 负序电压补偿量指令

将分相电压指令减去分相电压指令的平均值,得到的结果将仅包含负序电压补偿量指令与零序电压指令,得到三相不平衡电压指令 U_{A_pk} 、 U_{B_pk} 、 U_{C_pk} 为

$$\begin{cases} U_{A_pk} = U_{A_pk_t} - U_{pk_0} \\ U_{B_pk} = U_{B_pk_t} - U_{pk_0} \\ U_{C_pk} = U_{C_pk_t} - U_{pk_0} \end{cases} \quad (14)$$

为简化计算,假设当前电网相位角 0° ,则根据三相不平衡电压补偿量指令,得到不平衡部分的三相电压目标值为

$$\begin{cases} A_s = U_{A_pk} \times \cos 0^\circ \\ B_s = U_{B_pk} \times \cos(0 - 120^\circ) \\ C_s = U_{C_pk} \times \cos(0 + 120^\circ) \end{cases} \quad (15)$$

通过 Park 变换,得到在 dq 旋转坐标系下,负序电压指令为

$$\begin{cases} U_{d_N_ref} = \text{Alpha} = (2A_s - B_s - C_s)/3 \\ U_{q_N_ref} = \text{Beta} = 0.5774 \times (B_s - C_s) \end{cases} \quad (16)$$

③零序电压补偿量指令

以当前相位角 θ , 以及三相不平衡电压指令, 得到零序电压指令为

$$U_{0_ref} = U_{A_pk} \times \cos(\theta) + U_{B_pk} \times \cos(\theta - 120^\circ) + U_{C_pk} \times \cos(\theta + 120^\circ) \quad (17)$$

2) 电流内环控制策略

串联侧电流内环采用与并联侧相同的矢量控制架构。在 dq 同步旋转坐标系下, 通过引入输出电压前馈与交叉解耦项, 实现 d, q 轴电流的独立跟踪控制。其控制方程与图 4 所示的并联侧控制结构在数学形式上完全一致, 此处不再赘述。该控制器能够快速响应电压外环输出的电流指令, 确保对负载电压的高精度动态补偿。

2.3.3 直流侧中点电位平衡

针对配电台区典型的三相四线制系统, 负载不平衡将不可避免地产生显著的零序电流。传统的裂相电容拓扑虽然结构简单, 但依靠无源电容中点提供零线通路, 在大电流不平衡工况下极易导致直流侧上下电容电压严重发散, 甚至引发过压故障。为此, 本装置采用三相四线制四桥臂拓扑结构, 引入独立的第 4 桥臂 (N 桥臂) 作为零序电流的主动流通路径。在此拓扑下, A, B, C 三相桥臂用于控制正序与负序分量, 而 N 桥臂则独立用于控制零序分量, 实现了三相电流与中线电流的解耦控制。

该控制策略如图 6 所示, 采用电压外环与电流内环的级联结构: 采集母线上下电容压差 $u_{dc1} - u_{dc2}$ 作为反馈量与目标差值 0 作比较。误差信号经过 PI 调节器进行调节, 其输出作为均压补偿电流指令叠加至原始零序电流指令 i_0^* , 构成修正后的总零序电流参考值, 这意味着系统将主动注入一个额外的零序电流分量用来平衡电容电压。

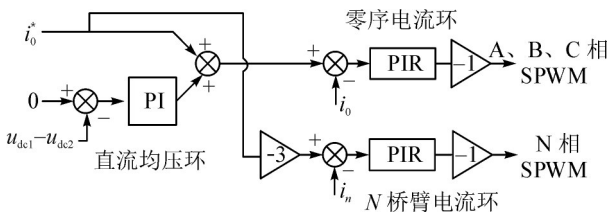


图6 直流控制均压环路

Fig. 6 DC control equalization loop

在三相四线制不平衡工况下, 流过 N 桥臂的零序电流为工频交流信号。基于内模原理, 传统的 PI 控制器仅在直流处具备无穷大增益, 而在 50 Hz 基波频

率处的开环增益有限, 这将不可避免地导致交流信号跟踪存在稳态静差与相位滞后。其传递函数为

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (18)$$

为此, 本装置引入 PIR 控制器, 该控制器传递函数设计为:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{2K\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (19)$$

式中, ω_0 设定为工频角频率。

PI 与 PIR 控制器的波特图对比分析如图 7 所示。由图 7 可知, PIR 制器的幅频特性曲线在低频段呈现积分特性, 保证了直流电压的稳态精度。更为重要的是, 在工频 50 Hz 处, 通过引入谐振环节, 控制器构建了一个显著的增益尖峰。极大提升了对零序电流指令的跟踪精度。同时, 由于谐振峰带宽极窄, 系统在其余频段仍保持了良好的相位裕度, 确保了控制回路的稳态精度与动态鲁棒性, 从而极大地提升了装置对不平衡负载的治理度, 并保证了直流侧均压控制的执行效力。该控制策略巧妙地利用了 N 桥臂的控制自由度, 在不增加额外均压硬件电路的前提下, 实现了低成本拓扑下的中点电位自平衡。

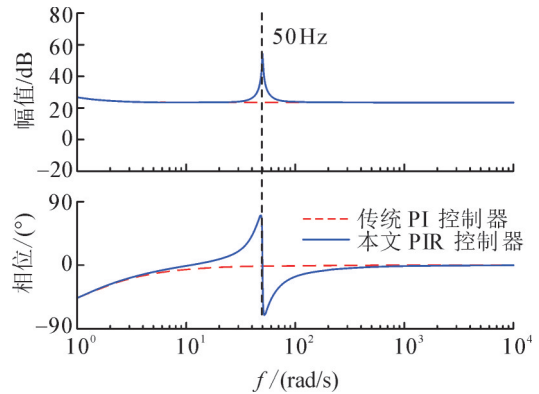


图7 PI与PIR控制器的波特图对比分析

Fig. 7 Bode plot comparative analysis of PI and PIR controllers

3 仿真实验

为验证本文提出的基于 SiC 器件的多线路综合柔性调控装置 (V-UPQC) 拓扑及控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建了系统模型。设计并联侧容量为 250 kW 按照 U_{dc} 下垂控制模式进行工作, 3 个串联侧容量为 100 kW 工作在 VF 交流稳压控制模式。V-UPQC 参数设计为: 电网电压 380 V, 直流侧电压 750 V; 直流侧电容为 10 mF; 串联侧滤波电感为 0.23 mH, 串联侧滤波电容为 60 μ F; 并联侧滤波电感为 0.23 mH, 滤波电容为 60 μ F; 串联侧变压器比为 1:5; 开关频率为 30 kHz。

3.1 多线路电压协同治理与潮流转供验证

为验证装置在配电网多线路复杂故障下的协同控制能力,设计两组线路1和线路2进行串联补偿电压调控,线路1发生电压暂升故障,电压升至265 V;线路2发生电压暂降故障,电压跌至176 V。仿真波形如图8-9所示。

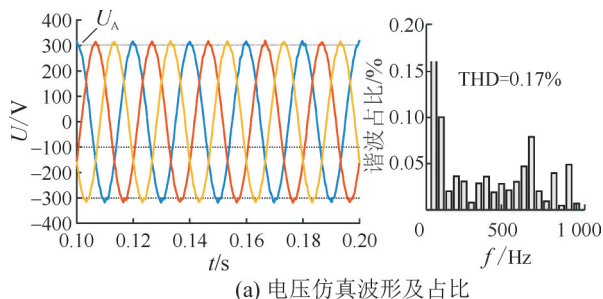


图8 线路1仿真波形图

Fig. 8 Simulation waveform of line 1

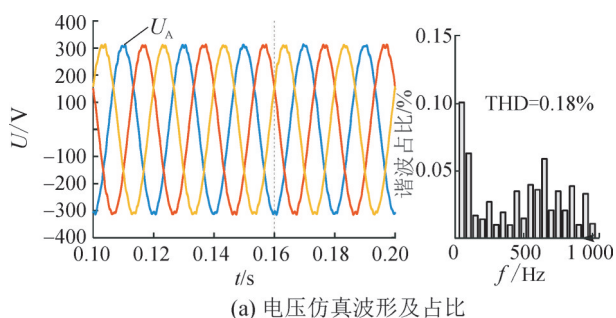


图9 线路2仿真波形图

Fig. 9 Simulation waveform of line 2

进行串联补偿后,线路1和线路2相电压分别从265 V变为220 V、176 V变为220 V,两条线路的负载电压均维持在额定值,波形为标准正弦波,通过对补偿后的稳态电压进行FFT频谱量化分析可见,线路1与线路2的总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)分别为0.17%和0.18%,远优于电能质量标准要求。265 V高电压支路的串联侧DC/AC有功功率为-80 kW,176 V低电压支路的串联侧DC/AC有功功率为80 kW,在2个支路电压治理的同时,实现了潮流从高电压支路流向低电压支路,实现了跨线路的能量互济。

3.2 非对称负载投切与中点电位平衡性能验证

为验证本文提出的V-UPQC装置在极端不对称工况下的动态响应速度及中点电位平衡控制策略的有效性,设置单相负载突变工况。在0~0.1 s阶段,系统运行于A相负载缺失的严重不平衡状态,用来考核装置对零序电流的处理能力;在0.1 s时,投入A相额定负载,系统瞬间恢复至三相对称运行,以验证装置的动态响应速度。实验波形如图10-11所示。

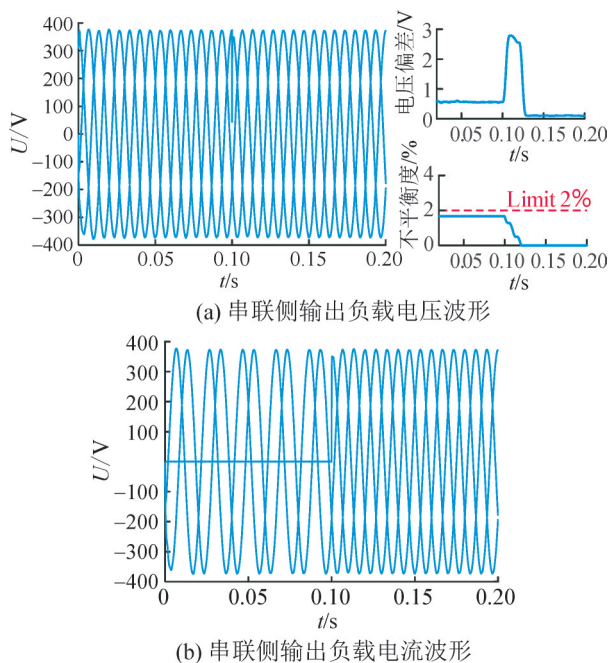
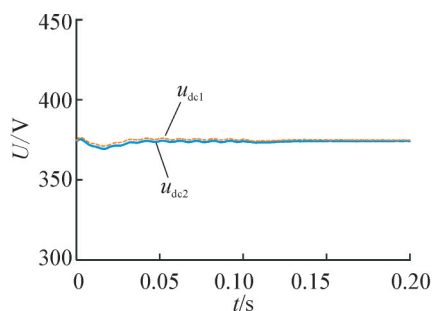


图10 不平衡负载突变工况下负载侧电压与电流波形
Fig. 10 Voltage and current waveforms on the load side under unbalanced load sudden change conditions

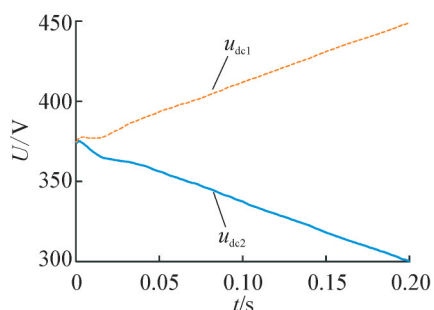
图10(a)展示了串联侧输出负载电压波形。 $t=0\sim 0.1$ s时,负载单相断路,由于PIR控制器在工频处具备极高的增益,负载电压始终保持标准正弦波,幅值与相位均未发生偏移。量化分析表明,即使在严重不对称条件下,负载电压有效值的最大偏差仍控制在0.8 V以内,电压不平衡度始终维持在

1.65%左右,远优于国家电网运行标准,有效保障了非故障相敏感负荷的供电安全。在0.1 s负载切除的瞬间,瞬时电压偏差在5 ms内即达到峰值并受控回落,系统在20 ms内彻底消除稳态误差,恢复至额定运行状态,表现出优异的抗干扰性能。三相平衡运行后,稳态误差进一步下降至0.2 V左右,电压不平衡度趋于0。图10(b)的负载电流波形进一步验证了上述结论。在0.1 s故障切除后,缺失相电流在约5 ms内迅速建立,系统在极短时间内实现了从单相运行到三相标准正弦运行的平滑切换。

图11(a)为PIR控制策略下,直流母线电压响应波形。在不平衡运行阶段时,基于四桥臂拓扑的中点电位平衡策略发挥了关键作用。观察可见,上电容电压与下电容电压始终保持高度重合,动态压差维持在3 V以内,未出现传统三桥臂电容分压结构上下不均压的问题。本文引入了传统PI控制策略作为对比,如图11(b)所示。在0~0.1 s的不平衡负载阶段,由于传统PI控制器对工频交流零序电流的跟踪能力不足,直流侧中点电位迅速偏移,上下电容电压呈现严重发散态势。充分验证了所提策略在治理直流侧电压不平衡方面的显著优越性。



(a) PIR 控制下, 直流母线电压响应波形



(b) PI 控制下, 直流母线电压响应波形

图11 直流侧中点电位平衡性能对比

Fig. 11 Comparison of DC-side midpoint potential balancing performance

4 结语

本文针对配电台区中存在的电压暂升/暂降、潮流分配不均以及三相负载严重不平衡等电能质量

问题,设计了一种基于碳化硅(SiC)器件的左并右串式多端口柔性调控装置(V-UPQC),并对其拓扑结构、参数设计及协同控制策略进行了深入研究:基于SiC器件的高开关频率特性,优化了LCL滤波器参数设计,显著提升了装置的功率密度;针对线路电压暂升与暂降并存的复杂工况,改进了交流电压外环控制策略,使串联侧变流器能够快速输出补偿电压,将负载端电压严格维持在额定电压。同时,装置实现了跨线路的功率潮流转供,有效解决了配电网局部过载与电压越限问题。针对配电网典型的单相断路及非线性投切工况,本文提出的四桥臂拓扑配合PIR中点电位平衡策略表现出优异的鲁棒性。

但在工程化实现方面,本装置仍面临以下技术挑战:1)SiC器件具有极高的 du/dt ,易引发驱动回路振荡与共模干扰,需设计极低感量驱动电路与高抑制比隔离技术;2)功率回路中的杂散电感在高频开关下会产生剧烈电压尖峰,工程上需采用层叠母排技术实现回路的紧凑化与低感化,以确保器件运行安全。

未来研究希望能够探索V-UPQC在高比例分布式能源接入场景下的构网支撑能力,实现与储能、电动汽车充电桩等灵活性资源的协同调控。并且针对SiC器件在高频热应力。

参考文献

- [1] 江进波,姚延东,赵青,等. 基于有限元的高频变压器分布参数计算与分析[J]. 高压电器, 2024, 60(12): 66-74.
JIANG Jinbo, YAO Yandong, ZHAO Qing, et al. Calculation and analysis of distributed parameters of high-frequency transformer based on finite - solid - element method[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 66-74.
- [2] 蔡修闻,赵涛,张铭洲,等. 三电平UPQC的线性自抗扰模型预测控制策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(1): 218-226.
CAI Xiuwen, ZHAO Tao, ZHANG Mingzhou, et al. Linear active disturbance rejection model predictive control strategy for three-level UPQC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1): 218-226.
- [3] 李凤然,杨雅淮,尹忠东,等. 适应高比例分布式能源接入的UPQC研制与应用[J]. 电力电子技术, 2024, 58(11): 72-76.
LI Fengran, YANG Yahuai, YIN Zhongdong, et al. Development and application of UPQC adapted to high-penetration distributed energy integration[J]. Power Electronics Technology, 2024, 58(11): 72-76.
- [4] 王波,季子越,汪万兴,等. 柔性互联装备中零序电压注入的相间功率均衡控制[J]. 西安工程大学学报, 2024,

- 38(2):34-40.
- WANG Bo, JI Ziyue, WANG Wanxing, et al. Phase - to - phase power balance control in flexible interconnection equipment by injecting zero sequence voltage[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(2): 34-40.
- [5] 李琮琮, 王清, 荆臻, 等. 面向新型电力系统的电能质量扰动分类研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(11): 111-119.
- LI Cong cong, WANG Qing, JING Zhen, et al. Research on classification of power quality disturbance in novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11): 111-119.
- [6] 李凤然, 何静, 尹忠东, 等. 双高有源台区电能质量综合治理装置相关研究[J]. 电力电子技术, 2024, 58(10): 79-83.
- LI Fengran, HE Jing, YIN Zhongdong, et al. Research on comprehensive power quality management devices for dual-high active distribution networks[J]. Power Electronics Technology, 2024, 58(10): 79-83.
- [7] TAKPIRE V H, KUMAR M, JADHAO S S. Enhancement of power quality using UPQC with adaptive fuzzy neural network-bidirectional long short-term memory-based bubble-net motion interactive optimization[J]. Computers and Electrical Engineering, 2026, 130: 110843.
- [8] KOUSSER S, DHEEP R G, BANSAL C R. Artificial rabbit optimized neural network control of battery and pv-powered UPQC for micro-grid application[J]. Smart Grids and Sustainable Energy, 2025, 10(3): 79-89.
- [9] 朱纯, 龚波涛, 程启明, 等. 非理想电网电压下 MMC-UPQC 的 PBC-SMC 控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(11): 192-202.
- ZHU Chun, GONG Botao, CHENG Qiming, et al. Research on PBC-SMC control strategy for MMC-UPQC under non-ideal grid voltage[J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2023, 27(11): 192-202.
- [10] 李金洪, 周建萍, 夏文豪, 等. 基于五桥臂 MMC-UPQC 的复合模型预测控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 179-187.
- LI Jinhong, ZHOU Jianping, XIA Wenhao, et al. Research on composite model predictive control of five-leg MMC-UPQC[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 179-187.
- [11] 杭雨祺, 任永峰, 徐峰, 等. 九开关 UPQC 提升构网型风电机组电能质量[J]. 太阳能学报, 2025, 46(9): 122-132.
- HANG Yuqi, REN Yongfeng, XU Feng, et al. Nine-switch UPQC enhances power quality of networked wind turbines[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2025, 46(9): 122-132.
- [12] 范嘉伟, 任永峰, 杭雨祺, 等. 构网型储能与九开关 UPQC 联合控制提升风电系统稳定性[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 11-21.
- FAN Jiawei, REN Yongfeng, HANG Yuqi, et al. Joint control of network-type energy storage and nine-switch UPQC to enhance wind power system stability[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 11-21 249.
- [13] 车玉秋, 江豪. 基于多尺度时频深度网络的电池 SOH 预测[J]. 电池, 2026, 56(1): 154-160.
- CHEYuqiu, JIANG Hao. SOH prediction of battery based on multi-scale time-frequency deep network[J]. Dianchi (i (Battery Bimonthly)), 2026, 56(1): 154-160.
- [14] 蔡修闻, 赵涛, 张铭洲, 等. 统一电能质量调节器的改进 LADRC-MPC 策略研究[J]. 电气自动化, 2025, 47(4): 74-78.
- CAI Xiuwen, ZHAO Tao, ZHANG Mingzhou, et al. Research on the Improved LADRC-MPC strategy for unified power quality regulators[J]. Electrical Automation, 2025, 47(4): 74-78.
- [15] 李雨腾, 吴学智, 唐芬, 等. 三相 UPQC 串联/并联侧二倍频功率解耦控制策略[J/OL]. 电力自动化设备, 1-13[2026-01-23]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v.>
- LI Yuteng, WU Xuezhi, TANG Fen, et al. Decoupling control strategy for double-frequency power on series/parallel sides of three-phase UPQC[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 1-13[2026-01-23]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v.>
- [16] SARKER K, SARKER J, SARKAR K, et al. Power quality enhancement in smart grids using DFIG-PV-IG integrated UPQC with unequal step multilevel inverter for sensitive electric vehicle and medical loads[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2025(1): 1-32.
- [17] YADAV K S, YADAV B K. An optimized fractional order PI controller for enhancing the power quality of three-phase solar PV, BESS and wind integrated UPQC[J/OL]. Chinese Journal of Electronics, 1-16[2026-01-23]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v.>
- [18] YANG R, JIN J, ZHOU Q, et al. Superconducting magnetic energy storage based DC unified power quality conditioner with advanced dual control for DC-DFIG[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(5): 1385-1400.
- [19] 涂春鸣, 贾文慧, 郭祺, 等. 面向配电网接地故障暂稳态协同调控的 UPQC 优化运行方法[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1810-1819.
- TU Chunming, JIA Wenhui, GUO Qi, et al. UPQC optimal operation method for coordinated control of temporary steady-state in distribution network grounding faults[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1810-1819.
- [20] 叶剑桥, 周建萍, 茅大钧, 等. 基于无源滑模和滑模 PI 的 UPQC-PV 控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 106-116.

- YE Jianqiao, ZHOU Jianping, MAO Dajun, et al. UPQC-PV control strategy based on passive sliding mode and sliding mode PI[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 106-116.
- [21] ZHAO X, ZHANG C, CHAI X, et al. Balance control of grid currents for UPQC under unbalanced loads based on matching-ratio compensation algorithm[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(6): 1319-1331.
- [22] 杨用春, 肖湘宁, 郭世泉, 等. 基于模块化多电平变流器的统一电能质量调节器工程实验装置研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3743-3755.
- YANG Yongchun, XIAO Xiangning, GUO Shixiao, et al. Research on an engineering experimental device of unified power quality conditioner based on modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 33(16): 3743-3755.
- [23] 黄晓明, 范志华, 刘子文, 等. 基于有功和无功功率协调分配的统一电能质量调节器控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 177-183.
- HUANG Xiaoming, FAN Zhihua, LIU Ziwen, et al. Control strategy of unified power quality conditioner based on coordinated allocation of active and reactive power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 177-183.
- [24] 周灵芳. 基于储能型UPQC新能源直连系统构网与电能质量协同控制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(1): 101-107.
- ZHOU Lingfang. Collaborative control method of grid structure and power quality based on energy storage type UPQC new energy direct connection system[J]. Power Capacitors and Reactive Compensation, 2026, 47(1): 101-107.
- [25] 杨岚, 周国华, 冯立, 等. 基于矩阵式背靠背变换器的统一电能质量控制器补偿策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 20(5): 148-158.
- YANG Lan, ZHOU Guohua, FENG Li, et al. Research on compensation strategy of unified power quality controller based on matrix back-to-back converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 20(5): 148-158.
- [26] 胡传芳, 张忠山, 陈敏. 电化学储能技术在电力系统中的应用现状[J]. 电池, 2025, (2): 382-388.
- HU Chuanfang, ZHANG Zhongshan, CHEN Min. Application status of electrochemical energy storage in new power system[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(2): 382-388.
- [27] 叶峰, 魏业文, 侯希伦, 等. 末端配电网负荷三相不平衡状态监测及优化控制策略研究[J]. 东北电力技术, 2024, 45(10): 1-7.
- YE Feng, WEI Yewen, HOU Xilun, et al. Research on monitoring and optimizing control strategy of three-phase unbalanced state of end distribution network load[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(10): 1-7.
- [28] 黄亚峰, 孙博延, 郝建锋, 等. 基于构建故障性质判据的配电网中性点动态接地系统研究[J]. 电瓷避雷器, 2025(5): 1-9.
- HUANG Yafeng, SUN Boyan, HAO Jianfeng, et al. Research of neutral dynamic grounding system in distribution network based on constructing fault nature criterion[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(5): 1-9.
- [29] 苏成, 简翔浩, 孔志达, 等. 基于IGCT器件的配电网柔性直流互联策略[J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 183-190. DOI:10.16516/j.ceeec.2024.6.19.
- SU Cheng, JIAN Xianghao, KONG Zhida, et al. Flexible interconnection strategy of distribution network based on IGCT [J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(6): 183-190.
- [30] 王举重, 白海东, 刘浩, 等. 三相 PWM 整流器低开关频率分层模型预测控制 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 119-129.
- WANG Juzhong, BAI Haidong, LIU Hao, et al. Low switching frequency multi-layered model predictive control strategy for three-phase PWM rectifier [J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(5): 119-129.

作者简介:

韩笑(1969—),男,教授,研究方向为电网运行与控制技术。

龚林静(2001—),女,硕士研究生,主要从事电网运行与控制技术。E-mail:592868018@qq.com。