



城轨牵引供电系统多功能双向变流装置及其控制方法

窦泽春, 王 雄, 尹维恒, 谭 宇, 易韵岚
(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 传统双向变流器是城轨牵引供电及再生制动能量利用的关键装备。如何设计一套兼容DC 1 500 V和DC 3 000 V双电压制式, 且具备无功补偿、谐波治理及负序补偿多种功能的装置一直是行业技术难点, 为此, 文章提出一种多功能双向变流装置及其控制方法。首先分析了传统双向变流器在实际工况下面临的电压制式兼容性与电能质量问题; 然后设计了一种新型多制式双向变流装置拓扑结构, 并提出在与整流机组并联或单相交流制式混合应用场景下的无功补偿、谐波治理及负序补偿综合控制策略; 最后通过建立系统仿真模型进行分析。结果表明, 该方案能有效改善电能质量, 验证了其技术可行性和工程应用价值。

关键词: 双向变流器; 多制式; 谐波治理; 负序补偿; 无功补偿; 城市轨道交通

中图分类号: U239.5; U223.5 **文件标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)03-0081-09

0 引言

构建“综合-绿色-安全-智能”的立体化现代化城市轨道交通系统, 已成为当前城市轨道交通发展的主流方向, 这一发展模式不仅是建设绿色智慧城市的有效途径, 而且是落实“交通强国”战略、推动社会经济低碳高效可持续发展的重要举措^[1]。以双向变流装置为核心的主动式智能城市轨道交通牵引供电系统具有能耗低、供电能力强、智能化程度高等特点, 是城市轨道交通供电系统发展的方向。相较于基于24脉波整流器的传统牵引供电系统, 采用一套12脉波整流机组和一套双向变流装置的混合供电架构是目前主动式牵引供电系统的主流方案。该方案兼具传统系统的可靠性与主动式系统的技术优势, 通过两种技术的有机融合, 实现了供电性能的优化提升^[2-3]。然而, 该混合供电架构在并网点仍面临功率因数偏低和谐波含量较高等电能质量问题。

目前, 国内外城市轨道交通的直流供电制式主要有DC 750 V、DC 1 500 V以及DC 3 000 V^[4]。其中,

DC 750 V直流制式因电压等级较低, 存在供电范围受限、线路损耗大等缺点, 已逐渐被淘汰, 仅应用于国内极少数地铁线路。DC 1 500 V是国内城轨线路采用的主要直流制式, 随着市域铁路的快速发展, DC 3 000 V供电制式因其显著的技术经济优势而备受关注^[5]。市域轨道交通部分线路采用AC 25 kV交流供电, 部分线路采用DC 3 000 V直流供电; 而城区轨道交通通常采用DC 1 500 V直流制式。在换乘站设置的交直流混合牵引所内, 当交流侧列车启动及运行时, 易导致35 kV母线会出现严重的三相不平衡问题。此外, DC 3 000 V与DC 1 500 V两种制式下的双向变流器需独立设计, 存在成本高、开发周期长的弊端。

鉴于上述分析, 开发兼容DC 1 500 V与DC 3 000 V双电压制式, 且集无功补偿、谐波治理及负序补偿功能于一体的双向变流装置, 已成为当前行业研究的热点与重要方向。

1 主动式城轨牵引供电系统

主动式城轨牵引供电系统采用新型供电架构, 通

通信作者: 窦泽春, 男, 正高级工程师, 主要从事轨道交通与新能源融合供能系统等方面的研究; E-mail: douzc@csrzc.com

引用格式: 窦泽春, 王雄, 尹维恒, 等. 城轨牵引供电系统多功能双向变流装置及其控制方法[J]. 机车电传动, 2025(3): 81-89. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.010.

Citation: DOU Zechun, WANG Xiong, YIN Weiheng, et al. Multi-functional bi-directional converter device and control method for traction power supply systems in urban rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 81-89. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.010.

过将传统牵引变电所中的24脉波整流机组和再生制动能量利用装置替换为“12脉波整流机组和双向变流装置”的组合方案。在该系统中，双向变流装置直流侧

通过接入直流母线与接触网相连，其交流侧接入35 kV环网，具体系统拓扑如图1所示。

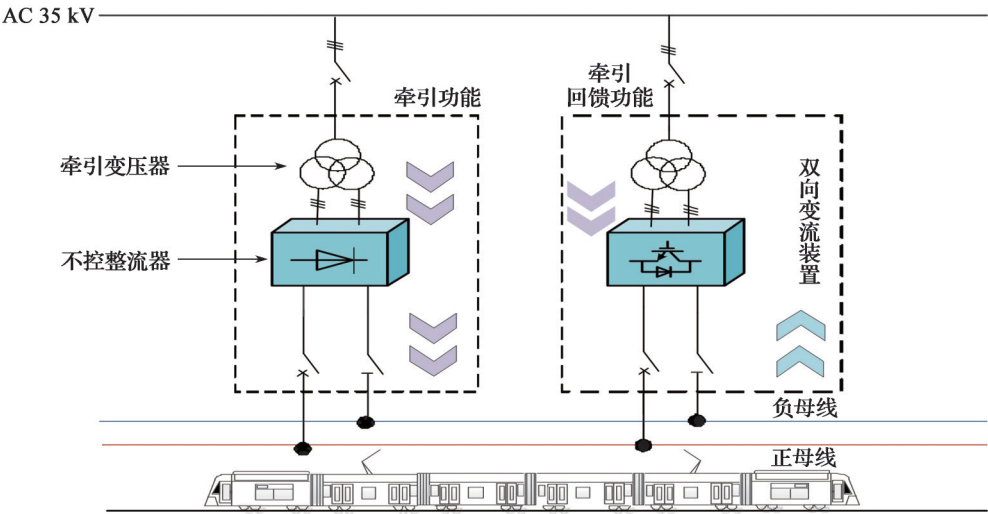


图1 基于双向变流器的牵引供电系统拓扑

Fig. 1 Topology of traction power supply system based on bi-directional converter

2 双向变流装置拓扑方案

DC 3 000 V双向变流器采用两台DC 1 500 V功率单元(UV1和UV2)串联结构实现DC 3 000 V输出。两台功率单元的交流侧分别连接变压器二次侧绕组，通过绕组隔离有效避免了运行过程中的环流问题^[6]。每

台DC 1 500 V功率单元采用二极管箝位型三电平拓扑结构，其每相桥臂由4个带反并联二极管的功率开关管和2个箝位二极管构成。直流侧采用两个等值电容 C_1 和 C_2 串联作为支撑，每组电容承受 $U_{dc}/4$ 的电压，共同维持直流侧电压稳定，如图2所示。在该拓扑中，所有功率器件均需承受 $U_{dc}/4$ 的电压应力，适用于高电压、大功率的场合。

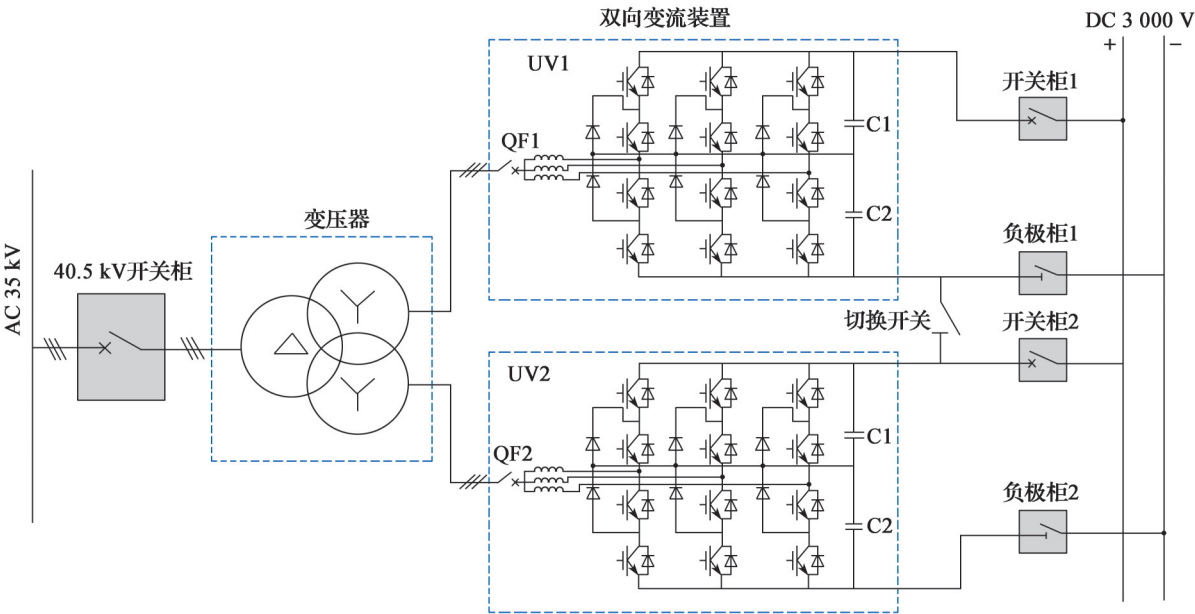


图2 双向变流装置主电路拓扑图

Fig. 2 Main circuit topology of the bi-directional converter device

两台功率单元的串联回路间配置了切换开关用于串并联模式切换：①并联模式：切换开关断开，同时闭合开关柜1、开关柜2、负极柜1和负极柜2；②串联模式：切换开关闭合，开关柜1和负极柜2闭合，开关

柜2和负极柜1断开；③负序补偿模式：需断开切换开关，并分断正极直流开关柜和负极的隔离开关，以确保系统安全运行。该设计通过灵活的拓扑切换，兼顾了宽电压范围内的可靠性与安全性。

3 控制系统建模

双向变流装置的核心为大功率电压源型PWM变流器, 通过精确控制IGBT的开关动作实现交直流能量的双向转换^[7]。为简化双向变流器基本单元拓扑特性的分析, 假设条件如下: ① 电网电动势为三相对称且幅值恒定的理想正弦波。② 网侧滤波电抗器为理想线性元件, 忽略磁饱和效应。

由基尔霍夫电压定律可得如下方程:

$$\left. \begin{aligned} v_a &= L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a \\ v_b &= L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b \\ v_c &= L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: v_a 、 v_b 、 v_c 分别为交流侧输出三相电压; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为输出三相电流; e_a 、 e_b 、 e_c 分别为电网二次侧三相等效电压; L 为滤波电感值; R 为等效电阻。

通过坐标变换, 可将三相静止坐标系转换为同步旋转坐标系, 具体如下:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \frac{di_d}{dt} + R & -\omega L \\ \omega L & L \frac{di_q}{dt} + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: v_d 、 v_q 为同步旋转坐标系下双向变流器的交流侧电压; e_d 、 e_q 为同步旋转坐标系电网电压; i_d 、 i_q 为交流侧电流。

3.1 双向变流稳压控制

双向变流装置具有双向稳压控制功能, 可实现牵引供电与再生制动能量的高效管理。在列车牵引工况下, 当检测到直流网压低于预设整流阈值时, 双向变流装置启动整流模式, 将交流电转换为稳定的3 000 V直流电为牵引网供电; 在列车制动工况下, 牵引电机进入发电状态时, 将列车的动能、势能转为电能回馈至电网, 当直流网压高于逆变阈值时, 双向变流装置转为逆变模式, 将再生制动能量回馈至35 kV交流电网^[8]。本文采用经典的电压、电流双闭环变流器控制策略, 通过外环电压环维持直流侧电压稳定, 内环电流环实现网侧单位功率因数运行, 确保系统在不同工况下的快速切换与稳定运行^[9]。

1) 电压环控制策略

图3为串联模式下的电压环控制策略。由图3可知, 电压外环同时为UV1和UV2功率单元提供参考电流指令。该控制环通过实时检测UV1和UV2的直流电压 U_{dcT1} 、 U_{dcT2} , 将其与设定的稳压参考值 $0.5U_{dc}^*$ 进行比较, 并采用闭环控制策略, 确保装置能够按照预设电压值稳定输出, 在额定功率范围内实现直流母线电压

的精确调节和稳定控制^[10]。

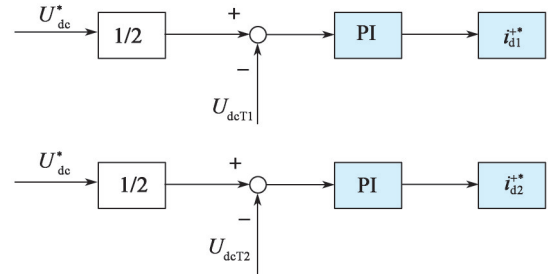


图3 串联模式下电压环控制策略

Fig. 3 Voltage loop control strategy in series mode

2) 电流环控制策略

电流环控制策略如图4所示。UV1和UV2功率单元的电流内环采用独立控制结构, 分别采集双分裂变压器低压侧的电流信号, 并通过锁相环(PLL)获取网侧电压相位信息, 实现坐标变化和前馈解耦控制。该策略能够对有功电流和无功电流进行独立闭环调节, 通过设定相应的参考值, 实现单位功率因数运行和双向变流装置的四象限灵活控制^[11]。

3.2 谐波补偿和无功补偿控制

双向变流装置兼具动态谐波补偿与无功补偿双重功能。针对系统中以5、7、11、13次为主的特征低次谐波, 不同于传统有源电力滤波器(active power filter, APF), 本文采用多同步旋转坐标系下的指定次谐波电流控制策略^[12]。

图5为谐波治理控制策略框图, 整体控制思想为: 对于指定补偿的 n 次谐波电流, 将其变换至 n 倍基波角频率的同步旋转坐标系。在此坐标系下, 其他频次的电流信号表现为交流量, 可通过低通滤波器滤除, 从而获得表征该次谐波信息的直流量。随后, 采用PI控制器即可实现对指定次谐波电流的无静差跟踪控制^[12]。具体实现流程如下: 待补偿的负载并网点电流经采样滤波、Clark变换后, 进行变压器高/低压绕组角度差值补偿及电流系数折算。处理后的信号经指定次谐波提取环节, 生成双向变流装置各功率单元的谐波电流指令值^[13]。同时, 对各功率单元的输出电流进行相应次数的谐波提取, 作为谐波控制器的反馈量。各正、负序谐波控制器的输出电压经反变换至三相静止坐标系后, 与基波正、负序控制器的输出电压进行叠加, 合成最终的总输出电压指令值, 然后将其送入调制波生成环节。

基于三相四线制系统任意次谐波提取方法^[14], 本文建立了从三相静止坐标系(abc)到 n 次谐波同步旋转坐标系的变换矩阵。进一步地, 推导出两相静止坐标系($\alpha\beta$)到 n 次谐波同步旋转坐标系的旋转变换矩阵。其中, n 次正序谐波变换矩阵用式(3)表示, 其对应的负序谐波变换矩阵用式(4)表示, 相应的 n 次正序谐

标下 d 轴和 q 轴的谐波电流目标控制值; i_{dn} 、 i_{qn} 分别为 d 轴和 q 轴的电流反馈值。

3.3 负序补偿控制

双向变流装置在串、并联模式下均可实现负序补偿功能, 由于负序补偿时产生的负序功率会导致直流侧电压脉动, 这种周期性的脉动电压与原额定电压叠加导致其峰值电压高于原额定电压, 进而可能影响系统耐压能力, 并联模式通过独立控制策略能有效抑制该影响, 因此通常在并联模式下进行负序治理。在交流换乘车站的牵引供电系统中, 牵引所同时包含直流与交流牵引供电系统, 两者共用 35 kV 母线并联运行, 如图 6 所示。当交流侧列车正常发车启动或运行时, 由于单相牵引负荷特性, 35 kV 母线易出现严重的三相不平衡, 此时, 双向变流装置通过外部电流互感器信号实时检测交流支路各相电流, 并基于二阶广义积分器^[17] (second order generalized integrator, SOGI) 和瞬时对称分量法^[18] 从不平衡电流中快速分离出负序分量, 然后将负序电流分量反向生成补偿参考指令, 注入与负序分量幅值相等、相位相反的补偿电流, 实现并网点的负序补偿。

为实现负序补偿功能, 需对采集的电流进行正负序检测, 并采用解耦控制策略对其进行独立调节。负序指令电流检测方案如图 7 所示, 首先通过电流互感器

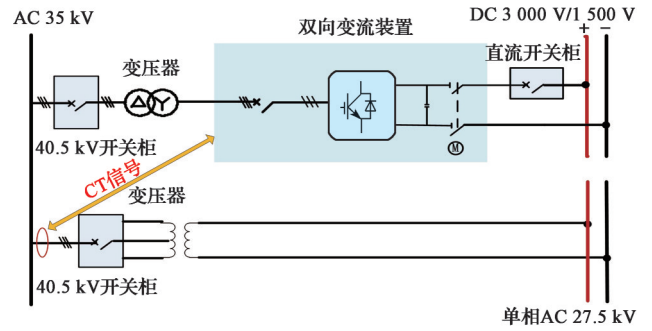


图 6 双向变流器+单相交流 27.5 kV 牵引供电系统拓扑

Fig. 6 Topology of bi-directional converter and single-phase AC 27.5 kV traction power supply system

采集单相牵引负载交流并网点电流信号 i_{a0} 、 i_{b0} 、 i_{c0} , 经 Clark 变换转换至两相静止坐标系 ($\alpha\beta$)。随后, 对 $\alpha\beta$ 坐标系电流进行变压器高、低压侧角度差补偿。将补偿后的信号输入至二阶广义积分器 (SOGI), 实现滤波并生成同相和正交分量。基于瞬时对称分量法, 从该正交信号中解耦提取 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流正负序分量, 再将负序分量通过坐标变换转换至负序同步旋转坐标系下的负序电流分量。最后, 将负序电流分量乘以变压器高、低压侧电流折算系数和功率单元分配比例系数 $-1/2$, 生成双向变流装置两个功率单元负序电流的补偿指令, 包括有功参考值 i_{d1}^* 、 i_{d2}^* 和无功参考值 i_{q1}^* 、 i_{q2}^* 。

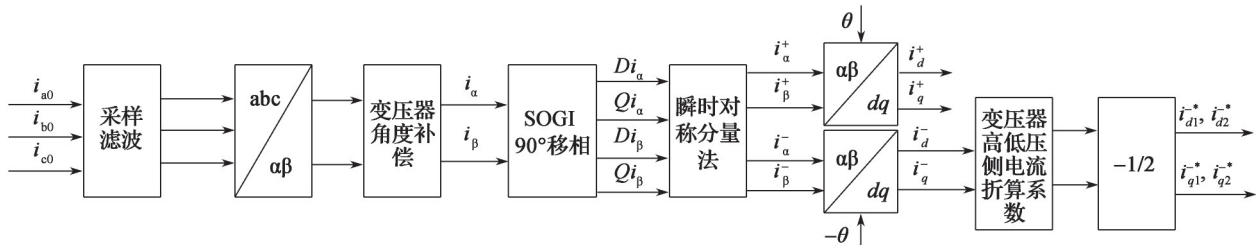


图 7 负序电流检测及指令生成

Fig. 7 Negative-sequence current detection and instruction generation

负序补偿过程中产生的负序功率会导致直流母线电压的二次脉动, 如该电压波动分量引入电压控制环路, 将造成同步旋转 dq 坐标系下有功电流指令的二倍频振荡, 最终在并网电流中引入 3 次、5 次等低次谐波电流。为解决谐波问题, 双向变流装置采用经典的电压-电流双闭环控制策略。以功率单元 UV1/UV2 为例, 并联模式工作时的电压环控制策略如图 8 所示。电压外环通过实时检测直流侧电压, 并在采样通道中增设 100 Hz 带阻滤波器消除二倍频脉动分量, 经 PI 闭环调节后分别生成各功率单元电流内环的有功电流参考值。该策略确保在额定功率范围内各功率单元能独立精确跟踪电压指令, 并通过电流内环的快速响应维持直流母线电压稳定, 从而有效抑制谐波。

电流内环作为系统的底层控制核心, 控制框图如图 9 所示。该环节实时采集功率单元 UV1/UV2 的直流侧电

压和交流侧电流信号, 通过正负序分离及正负序坐标变换, 将交流电流转换为正负序双同步旋转坐标系下的直流分量。基于此, 采用双同步旋转坐标系解耦控制策略, 分别对正、负序电流的有功分量和无功分量进行独立闭环控制, 实现功率单元的精准电流跟踪控制。

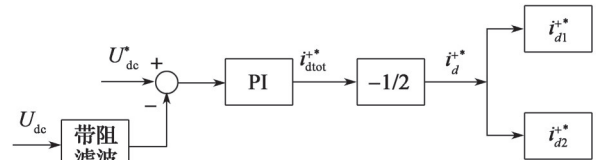


图 8 并联模式下电压环控制策略

Fig. 8 Voltage loop control strategy in parallel mode

由图 8、图 9 可知, i_d^* 决定有功功率传输, U_{dc}^* 为直流母线稳压目标值。直流侧给定电压 U_{dc}^* 与实际电压 U_{dc} 的误差经 PI 调节器生成电流内环的有功电流给定值

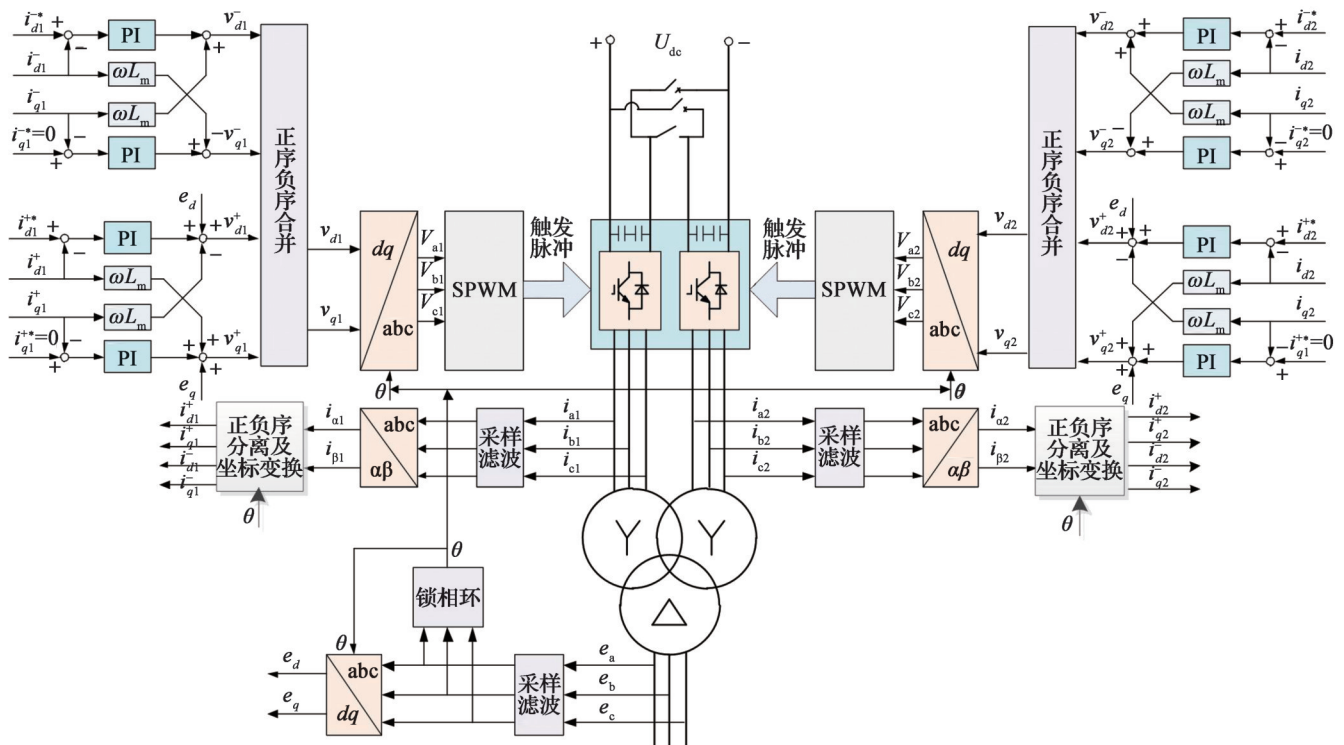


图9 系统电流内环控制框图

Fig. 9 Block diagram of system current inner loop control

i_d^{+*} , 该值与实际有功电流 i_d^+ 的误差通过 PI 调节器及前馈解耦控制生成 d 轴控制信号 v_d^+ ; q 轴因解耦后呈一阶线性特性, 其控制信号 v_q^+ 可由单 PI 调节器直接生成。同时, 双向变流装置通过检测和分解交流侧电流获取实时负序有功和无功电流, 将其与参考值比较得到的误差经 PI 调节器和前馈解耦控制生成控制信号 v_d^- 和 v_q^- 。将上述 v_d^+ 、 v_q^+ 、 v_d^- 、 v_q^- 合成得到 v_d 和 v_q , 再经同步旋转坐标变换及零序分量注入生成三相调制波, 该调制波与三角载波比较后生成驱动 IGBT 的 PWM 信号, 最终实现负序电流的动态补偿与电能质量优化。

在同时进行直流供电与负序补偿时, 双向变流装置的容量由三相电流峰值最大值决定。假设正/负序功率的功率因数均为 1, 则容量分配遵循以下原则: 当双向变流装置与牵引网功率流向一致时, 即同为整流状态或同为逆变状态, 负序补偿容量约为 $2 \times$ (装置总容量 - 正序传输容量), 正序容量约为 $2 \times$ (装置总容量 - 负序补偿容量); 当功率流向不一致时, 负序补偿容量约为装置总容量 - 正序传输容量。其物理本质在于同向工况下负序电流需在两相反向生成, 导致容量需求倍增; 而异向工况下负序与正序容量可线性叠加。

4 仿真验证

为验证多功能双向变流装置及其控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台中建立了相应系统模型。基于设定的典型参数, 重点进行了并联/串联模式运行、谐波治理、无功补偿及负序补偿等关键工况

的仿真分析。其中, 图 10 为两个 DC 1 500 V 功率单元在并联模式下的工作波形, 图 11 为两个 DC 1 500 V 功率单元在串联模式下的相应工作波形。

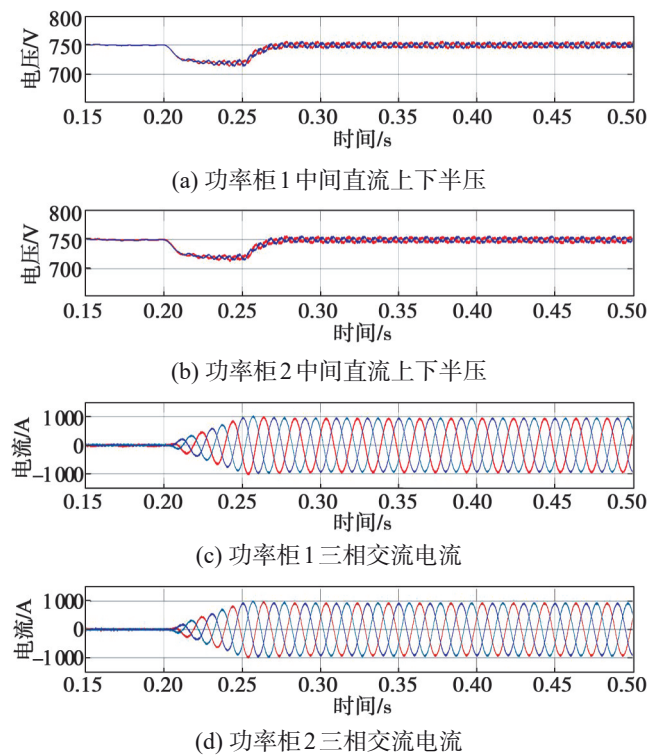


图 10 DC 1 500 V 工况电压电流(两个 DC 750 V 半压)

Fig. 10 Voltage and current in DC 1 500 V condition (two half voltages at DC 750 V)

由图 10、图 11 可知, 在串联与并联模式下, 双向变流装置的中间直流电压波动较小, 直流半压之间的

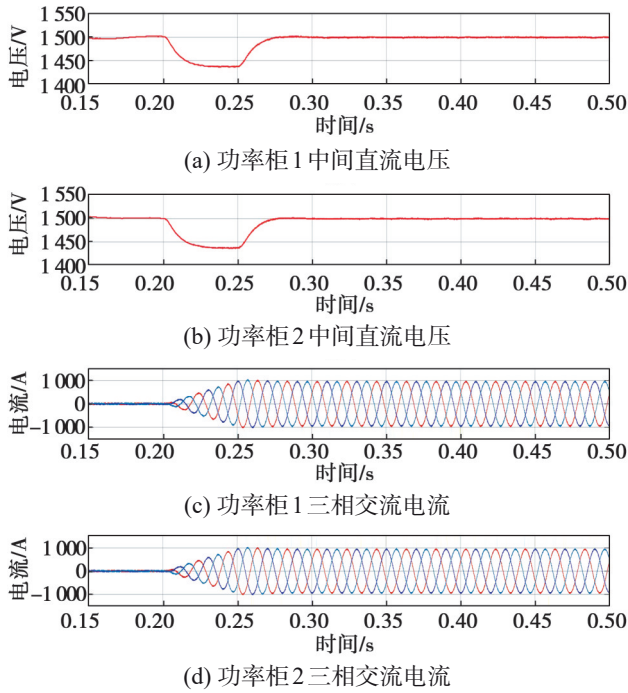


图 11 DC 3 000 V 工况电压电流(两个 DC 1 500 V 半压)
Fig. 11 Voltage and current in DC 3 000 V condition (two half voltages at DC 1 500 V)

电压分配均衡, 且串联模式下半压电压均衡度达到 98%, 功率输出保持均衡。

将 12 脉波二极管整流器与工作于 1 500 V 模式的双向变流装置同步接入 35 kV 电网, 并在十二脉波二极管整流器的并网点处采集电流信号, 通过仿真验证双向变流装置的谐波治理和无功补偿性能。

图 12 为谐波治理前后的仿真电流对比波形。结果表明, 双向变流装置有效抑制了电网谐波, 将并网点电流总谐波畸变率 (THDi) 由治理前的 4.87% 降至 0.98%, 提升了并网电流质量。

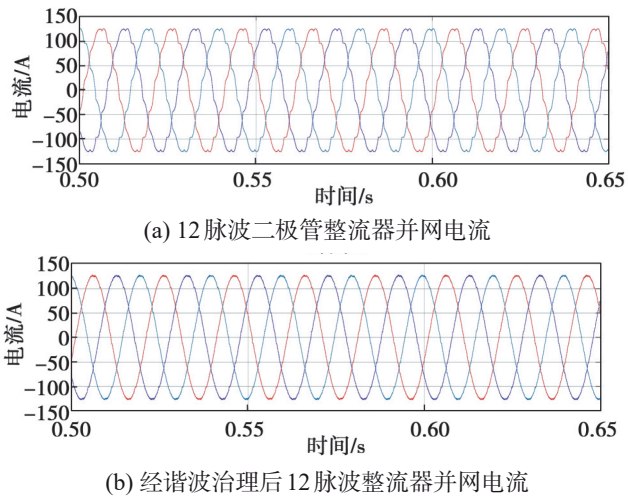


图 12 谐波治理前后谐波对比
Fig. 12 Comparison of harmonics before and after harmonic control

图 13 为无功补偿前后的仿真对比波形, 通过双向变流装置进行补偿后, 并网点的功率因数由补偿前的

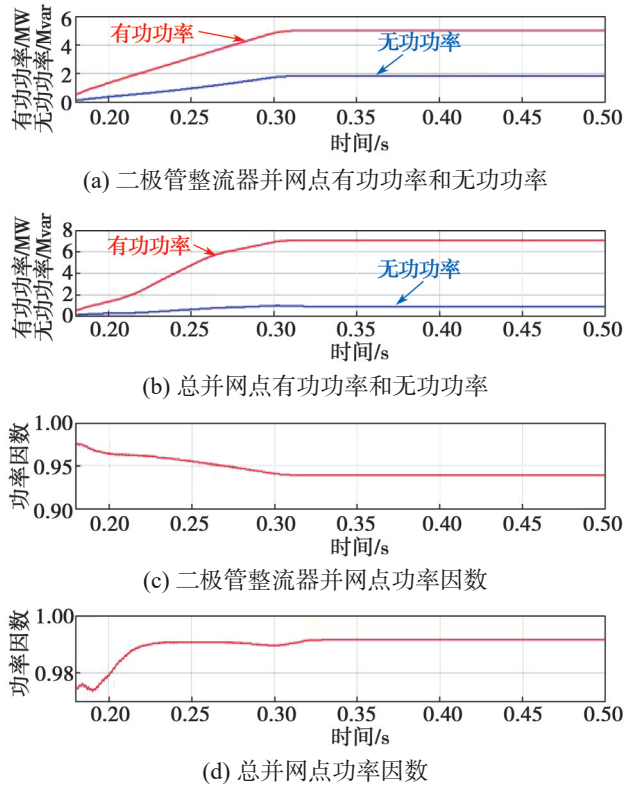


图 13 无功补偿前后功率和功率因数对比
Fig. 13 Comparison of power and power factor before and after reactive power compensation

约 0.94 提升至 0.99 以上, 显著改善了并网点的电能质量。

图 14 为同时进行谐波与无功补偿时双向变流装置功率柜的输出电流波形。补偿过程会消耗和占用装置的可用容量, 这是系统设计时需要予以考虑的关键约束因素。

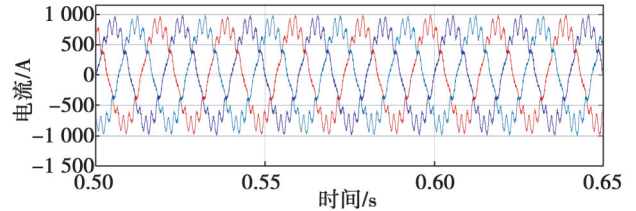
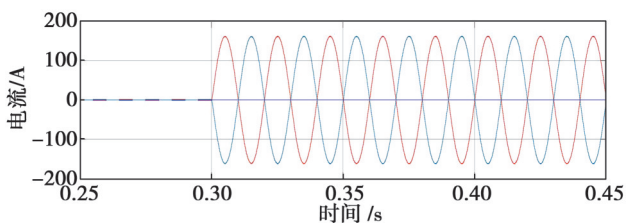


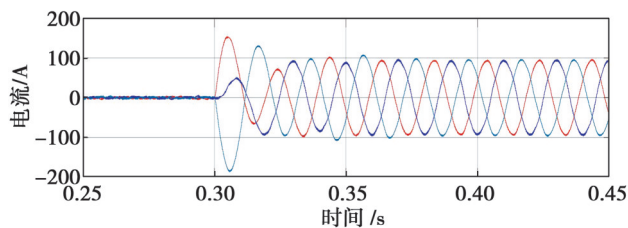
图 14 谐波补偿及无功补偿时的功率柜电流
Fig. 14 Power cabinet current during harmonic compensation and power compensation

为评估 PWM 整流器在 1 500 V 直流母线电压工况下的负序补偿能力, 对其进行了仿真分析。通过单相变压器将电阻负载接入 35 kV 电网, 并在并网点采集电流波形进行对比。

图 15 为采用单独负序补偿电流的波形, 双向变流



(a) 单相电阻负载在并网点的电流



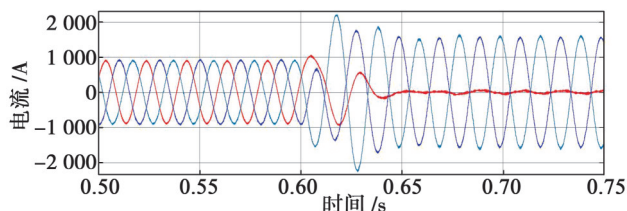
(b) 经负序补偿后单相电阻负载在并网点的电流

图 15 负序补偿前后电流对比

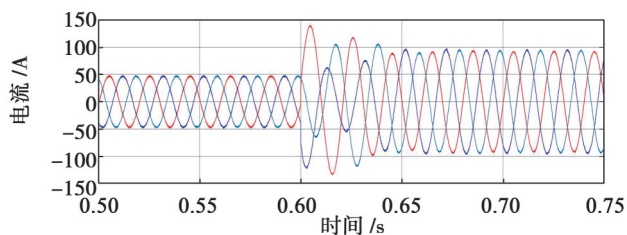
Fig. 15 Comparison of current before and after negative sequence compensation

装置有效补偿了并网点电流中的负序分量, 将电流不平衡度从 100% 降低至 2%, 使三相电流恢复平衡。

图 16 为双向变流装置整流运行叠加负序补偿的波形。在整流工况下, 该装置能有效补偿并网点负序电流, 使三相电流恢复平衡, 其负序补偿功能响应迅速, 响应时间约为 50 ms。



(a) 功率柜 1 三相交流电流



(b) 总并网点三相交流电流

图 16 整流运行叠加负序补偿波形

Fig. 16 Waveform of rectification operation with negative sequence compensation

5 结束语

针对城轨牵引供电系统需求, 本文提出了一种多功能双向变流装置, 集成了宽电压范围稳压、谐波治理、无功补偿及负序补偿等功能, 提升了系统性能与适应性。主要结论如下:

①在宽电压适应性方面, 提出了串/并联模式差异化电压外环控制策略, 有效保障了装置在宽电压范围内的稳定运行, 实现了中间直流电压低波动、功率器件均压与功率输出均衡, 串联半电压均衡度达到 98%, 兼容 DC 1 500 V 及 DC 3 000 V 供电制式。②针对谐波治理和无功补偿, 应用多同步旋转坐标系下指定次谐波电流补偿策略, 显著改善了并网点电能质量。试验结果表明, 并网点 THDi 由 4.87% 降至 0.98%, 功率因数由 0.94 提升至 0.99, 满足与 12 脉波二极管整流机组的并联运行需求。③在负序补偿功能方面, 采用 SOGI

和瞬时对称分量法实现正负序分量的提取, 提出基于双同步旋转坐标系的正负序分离控制策略及二次脉动抑制方案, 实现不同绕组间高效负序治理, 将电流不平衡度由 100% 降至 2%, 为双向变流装置在交流牵引供电系统中的可靠应用提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 沈茂盛, 刘志刚, 张钢, 等. 采用三电平电压型 PWM 整流器的地铁牵引供电系统[J]. 电工技术学报, 2007, 22(7): 74-77. SHEN Maosheng, LIU Zhigang, ZHANG Gang, et al. Traction power supply system in subway adopting three-level voltage source PWM rectifier[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2007, 22(7): 74-77.
- [2] 肖岚, 陈良亮, 李睿, 等. 基于有功和无功环流控制的 DC-AC 逆变器并联系统分析与实现[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 7-12. XIAO Lan, CHEN Liangliang, LI Rui, et al. Analysis and realization of DC-AC inverter parallel system based on active and reactive circulating-current control[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2005, 20(10): 7-12.
- [3] 成吉安. 城市轨道交通双向变流器牵引供电技术的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(12): 110-113. CHENG Ji'an. Application of traction power supply technology with bidirectional converter for urban rail transit[J]. Urban mass transit, 2019, 22(12): 110-113.
- [4] 张刚, 刘志刚, 牟富强. 双向变流器在城轨牵引供电系统中的运用[J]. 都市轨道交通, 2014, 27(4): 109-112. ZHANG Gang, LIU Zhigang, MOU Fuqiang. Application of bi-directional converter in urban railway traction power supply system[J]. Urban express rail transit, 2014, 27(4): 109-112.
- [5] 陈德胜. 城轨新型能馈式牵引供电集成技术研究及实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. CHEN Desheng. Research and realization of integration technology for the new energy feedback traction power supply in the urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [6] 卢德祥, 杜伟. 双向 DC-AC 变流器及其运用综述[J]. 电气开关, 2017, 55(3): 1-4. LU Dexiang, DU Wei. Review of bidirectional DC-AC converter and its application[J]. Electric switcher, 2017, 55(3): 1-4.
- [7] 张志学, 何多昌, 张铁军, 等. 城市轨道交通牵引供电系统采用 PWM 回馈电能方案研究[J]. 铁路技术创新, 2011(5): 22-25. ZHANG Zhixue, HE Duochang, ZHANG Tiejun, et al. Research on the scheme of using PWM feedback power in urban rail transit traction power supply system[J]. Railway technical innovation, 2011(5): 22-25.
- [8] 陈息坤, 林新春, 康勇, 等. 大功率 UPS 的并联控制技术[J]. 电力电子技术, 2002(4): 34-36. CHEN Xikun, LIN Xinchun, KANG Yong, et al. Parallel control technique of high power UPS modules[J]. Power electronics, 2002(4): 34-36.
- [9] 张钢, 刘志刚, 沈茂盛, 等. 组合式变流器错时矢量调制技

- 术及并联控制方案[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2008, 32(2): 35-38.
- ZHANG Gang, LIU Zhigang, SHEN Maosheng, et al. Interleaved space vector modulation technique and parallel control scheme of multi-modular converter[J]. Journal of Beijing jiaotong university, 2008, 32(2): 35-38.
- [10] 李建林, 王立乔, 刘兆桑, 等. 一种新型的组合同步整流器采样空间矢量调制技术分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 142-146.
- LI Jianlin, WANG Liqiao, LIU Zhaoshen, et al. Analysis on a novel multi-modular converter with sample time staggered SVM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 142-146.
- [11] 张戡, 刘炜, 周瑞兵, 等. 基于双向变流装置的城市轨道牵引供电系统潮流计算[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 92-98.
- ZHANG Jian, LIU Wei, ZHOU Ruibing, et al. Power flow calculation of urban rail traction power supply system based on two-way converter device[J]. China railway science, 2020, 41(1): 92-98.
- [12] 张树全, 戴珂, 谢斌, 等. 多同步旋转坐标系下指定次谐波电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 55-62.
- ZHANG Shuquan, DAI Ke, XIE Bin, et al. Selective harmonic current control based on multiple synchronous rotating coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 55-62.
- [13] 伍小杰, 罗悦华, 乔树通. 三相电压型PWM整流器控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2005(12): 7-12.
- WU Xiaojie, LUO Yuehua, QIAO Shutong. A control technical summary of three-phase voltage-source PWM rectifiers [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2005 (12): 7-12.
- [14] 杨柳, 刘会金, 陈允平. 三相四线制系统任意次谐波电流的检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 41-44.
- YANG Liu, LIU Huijin, CHEN Yunping. A new algorithm for random harmonic current detection in three phase four wire system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 41-44.
- [15] NELSON J J, VENKATARAMANAN G, BEIHOFF B C. Investigation of parallel operation of IGBTs[C]//IEEE. Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh: IEEE, 2002: 2585-2591.
- [16] 郭希铮, 韩强, 杨耕, 等. 可选择谐波型有源电力滤波器的闭环控制和实现[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 51-56.
- GUO Xizheng, HAN Qiang, YANG Geng, et al. Closed-loop control method and implementation of selective harmonic type active power filters[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2006, 21(9): 51-56.
- [17] 张纯江, 赵晓君, 郭忠南, 等. 二阶广义积分器的三种改进结构及其锁相环应用对比分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 42-49.
- ZHANG Chunjiang, ZHAO Xiaojun, GUO Zhongnan, et al. Three improved second order generalized integrators and the comparative analysis in phase locked loop application [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2017, 32 (22): 42-49.
- [18] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于空间矢量的基波正序、负序分量及谐波分量的实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 1-5.
- ZHANG Guibin, XU Zheng, WANG Guangzhu. Study and simulation of real-time detecting method for fundamental positive sequence, negative sequence components and harmonic components based on space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 1-5.

Multi-functional bi-directional converter device and control method for traction power supply systems in urban rail transit

DOU Zechun, WANG Xiong, YIN Weiheng, TAN Yu, YI Yunlan

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Traditional bi-directional converters serve as the key equipment for traction power supply and regenerative braking energy utilization in urban rail transit. However, designing these devices that are compatible with dual-voltage systems—specifically at DC 1500 V and DC 3000 V—while incorporating the functions of reactive power compensation, harmonic control, and negative sequence compensation remains a technical challenge in the industry. For this purpose, the paper proposes a multi-functional bi-directional converter device and control method. Firstly it analyzes the deficiencies of traditional bi-directional converters in actual application conditions, regarding compatibility with voltage system modes and power quality issues. It presents the topological design of a new multi-mode bi-directional converter device, along with a comprehensive control strategy for scenarios where the device is connected in parallel with a rectifier unit or used in combination with the single-phase AC mode. The proposed strategy encompasses reactive power compensation, harmonic control, and negative sequence compensation. Subsequent analysis based on a system simulation model verifies the effectiveness of the proposed solution in improving power quality, and demonstrates its technical feasibility and engineering application value.

Keywords: bi-directional converter; multi-mode; harmonic control; negative sequence compensation; reactive power compensation; urban rail transit