

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0183-13

引用格式: 陈民武, 张演洋, 于国旺, 等. 集成准 Z 源 DVR 的同相牵引供电系统建模与控制策略[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 183-195.

Citation: Chen Minwu, Zhang Yanyang, Yu Guowang, et al. Modeling and control strategy of co-phase traction power supply system with integrated quasi-Z-source DVR[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 183-195.

# 集成准 Z 源 DVR 的同相牵引供电系统建模与控制策略

陈民武<sup>1</sup>, 张演洋<sup>1</sup>, 于国旺<sup>1,2</sup>, 李东杰<sup>1</sup>, 李 喆<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756;

2. 国能朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 沧州 062350)

**摘 要:** 在电气化铁路接入外部电源条件受限时, 通常将为电力机车供能的牵引变电所与为通信信号设施供电的电力所进行合建 (简称“牵引电力合建所”)。大功率牵引负荷的单相不对称和强冲击特性易导致高压电网侧三相电压不平衡和低压电力侧电压暂降问题。首先, 基于同相供电原理提出一种适用于牵引电力合建所的同相牵引供电系统拓扑结构, 包括单相牵引变压器、基于模块化多电平变流器 (MMC) 的潮流控制器 (PFC) 及准 Z 源动态电压恢复器 (DVR), 由 PFC 直流母线为准 Z 源 DVR 提供直流电源; 其次, 提出由 PFC 负序优化补偿策略和准 Z 源 DVR 电压暂降补偿策略构成的“负序-电压暂降”综合补偿策略, 推导以负序功率限值约束的 PFC 补偿电流及满足电压暂降限值的准 Z 源 DVR 补偿电压计算方法; 然后, 考虑 PFC 直流母线电压波动对 DVR 性能的影响, 提出基于 MMC 的 PFC 预测电流与均压控制, 并融合准 Z 源直流链稳压控制与 DVR 交流逆变控制, 实现负序与电压暂降的综合补偿; 最后, 基于 MATLAB/Simulink 仿真与 StarSim HIL 实时仿真试验, 对所建拓扑结构和“负序-电压暂降”综合补偿策略的正确性和有效性进行验证。结果表明: 集成准 Z 源 DVR 的同相牵引供电系统能够在不同牵引负荷工况下实现高压电网侧负序与低压电力侧电压暂降的综合补偿; PFC 可将高压电网侧三相电压不平衡度稳定在 2% 左右, 准 Z 源 DVR 可在 2 个周波内输出补偿电压, PFC 与准 Z 源 DVR 的综合控制维持低压电力侧电压稳定; 集成准 Z 源 DVR 的同相牵引供电系统具有结构集成度高、补偿响应快和控制协调性好的优点。

**关键词:** 同相牵引供电系统; 牵引电力合建所; 电压暂降; 负序补偿; 动态电压恢复器; 潮流控制器

**中图分类号:** U223.6

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.14

铁路作为国民经济大动脉, 统筹规划我国西部地区铁路建设, 对促进西部地区资源优化配置、拉动地区经济建设与社会发展起着重要作用<sup>[1-3]</sup>。西北地区受电网输电距离远、电源接入点有限等条件制约, 工程中采用牵引变电所与铁路电力所合建 (简称牵引电力合建所) 的方式, 通过共享外部电源实现建设成本优化与运维效率提升<sup>[4-5]</sup>。虽然采用牵引电力合建所的方式具有一定的经济性与便捷性, 但是西北部地区电网结构薄弱、短路容量小、

无功支撑不足等, 以及大功率电力机车在运行时具有强冲击性和单相不对称性, 一方面将造成合建所牵引供电系统接入点的三相电压不平衡, 影响系统安全稳定运行<sup>[6]</sup>; 另一方面将导致合建所铁路电力系统产生电压暂降问题, 引起电力所内的通信设备误动作或损坏, 造成铁路电力系统通信、信号设备供电中断<sup>[7-8]</sup>。

目前, 治理牵引供电系统的三相电压不平衡最简单的方法是采用相序轮换接线或采用平衡变压

收稿日期: 2025-02-05; 修订日期: 2026-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52277126, 52507149); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2682026CX191)

第一作者: 陈民武 (1983—), 男, 安徽宿州人, 教授, 博士研究生导师, 博士。E-mail: chenminwu@home.swjtu.edu.cn

通讯作者: 李东杰 (1997—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生。E-mail: davids@swjtu.edu.cn

器,但是由于机车负荷的随机性和波动性,上述方案对三相电压不平衡治理效果不佳,安装补偿装置成为三相电压不平衡治理的有效措施<sup>[9-11]</sup>。潮流控制器(Power Flow Controller, PFC)近年来被广泛应用于电气化铁路的电压不平衡治理<sup>[12]</sup>。文献[13]提出了一种由新型Ynvd平衡变压器、综合潮流控制器组成的同相供电系统,该系统不仅能够治理负序等电能质量问题,还能降低整套装置的成本和占地空间。文献[14]针对树形双边贯通供电系统中的三相电压不平衡问题,提出一种采用PFC的负序补偿方案,实现公共连接点处的负序补偿。但是由于列车功率、发车密度的不断增加<sup>[15]</sup>,在高压大功率的发展趋势下,基于模块化多电平变流器(Modular Multilevel Converter, MMC)结构的同相牵引供电系统被提出。MMC具有开关频率低、开关损耗小、谐波含量少、输出性能好等特点<sup>[16]</sup>,通过基于MMC的潮流控制器实现了不同牵引负荷工况下负序电流的有效补偿<sup>[17-18]</sup>。其中文献[17]针对牵引变电所的负序问题和电分相问题,采用MMC作为同相补偿装置,提高了牵引供电系统的供电可靠性,实现不同牵引负荷工况下负序的有效补偿;文献[18]结合MMC与Vv接线变压器构建新型同相牵引供电系统,取消了传统高压匹配变压器配置,在提高牵引供电系统经济性的同时,实现了负序的快速补偿。既有研究仅针对牵引供电系统开展,在牵引电力合建所场景下牵引供电系统与铁路电力系统的建模及其控制策略仍需进一步研究。

在电压暂降治理方面,现有治理装置主要分为以下3类:电压补偿型、电流补偿型、混合补偿型。文献[19]在风电并网系统中,采用动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorer, DVR)在风电机组低压穿越期间生成补偿电压,实现电压暂降的治理,提升了风电机组的稳定性与系统运行的可靠性。文献[20]通过静止同步补偿器动态注入无功电流维持并网点电压稳定,快速支撑节点电压。文献[21]采用电能质量调节器,通过同时注入补偿电压和补偿电流,可治理由无功、雷击、短路等引起的电压波动,保证电压的稳定性。基于DVR的电压暂降补偿方法由于使用场景丰富、拓展性强、能够快速响应电压的变化等特点得到了广泛的关注<sup>[22-24]</sup>。文献[25]建立了基于级联H桥多电平变流器的高压直挂式DVR模型,提出dq解耦控制策略,保证了DVR的补偿精度与响应速度。文献

[26]提出了一种基于直接AC-AC变换器的DVR拓扑结构,基于该拓扑的DVR在幅值和相位矫正方面的补偿能力得到提升。然而,以上围绕DVR的建模与控制都是建立在其直流侧为理想直流电压源的基础上,而当DVR应用到电气化铁路场景时其直流侧接入同相牵引供电系统PFC的直流环节时,由于电力机车在运行时具有强冲击和单相不对称性,造成PFC的直流侧网压波动,容易影响DVR的稳定运行。针对DVR直流侧电源波动问题,集成准Z源DVR的方案被提出,该方案将准Z源作为并网逆变装置,可同时实现单级升压和降压的作用<sup>[27]</sup>,对直流链电压和交流相电压进行调制,适用于输入电压变化范围较大的应用场合<sup>[28-29]</sup>。然而,由于牵引供电系统与铁路电力系统共用外部电源,如何在牵引负荷强冲击下兼顾电压不平衡与电压暂降的补偿问题需要研究。

本文首先提出一种适用于牵引电力合建所的同相牵引供电系统拓扑结构,建立同相牵引供电系统与准Z源DVR的数学模型并分析其运行机理。其次,以负序功率限值为约束,推导PFC负序电流计算模型,并计及负序影响,给出满足电压暂降限值的准Z源DVR补偿电压计算式,提出“负序-电压暂降”综合补偿策略。然后,根据DVR性能依赖PFC直流母线电压稳定性的特点,提出基于MMC的PFC预测电流和子模块直流电容均压控制方法,并将准Z源直流链稳压控制与DVR交流逆变控制融合,实现电压暂降的精确补偿。最后,基于MATLAB/Simulink仿真与StarSim Hardware-in-the-Loop(HIL)实时仿真试验,验证所提拓扑结构与综合补偿策略的正确性和有效性。

## 1 集成准Z源DVR的同相牵引供电系统拓扑结构与运行机理

### 1.1 拓扑结构

集成准Z源DVR的同相牵引供电系统中,牵引变电所与电力所合建共同接入110 kV三相电网,其中牵引变电所由基于MMC的PFC、单相牵引变压器(Traction Transformer, TT)和高压匹配变压器(High voltage Matching Transformer, HMT)组成。电力所由电力变压器和准Z源DVR组成,其中准Z源DVR的主电路采用三单相逆变拓扑,每相支路完全相同。在该系统中,PFC从三相电

网取电,控制 $\beta$ 相变流器输出功率,实现负序的补偿,PFC采用MMC变流器,确保直流母线提供稳定的直流电源;准Z源DVR接入PFC的直流环节当中,当电力所发生电压暂降时,准Z源DVR从直流母线取电,经准Z源逆变后输出匹配的补偿电压,控制DVR输出相应补偿电压至10 kV电网当中,实现电压暂降的补偿。基于上述集成准Z源DVR的同相牵引供电系统拓扑,通过协同设计PFC负序补偿、准Z源DVR电压暂降补偿及MMC直流稳压控制策略,实现负序和电压暂降的综合治理,提升系统的供电质量与运行可靠性。

集成准Z源DVR的同相牵引供电系统拓扑结构

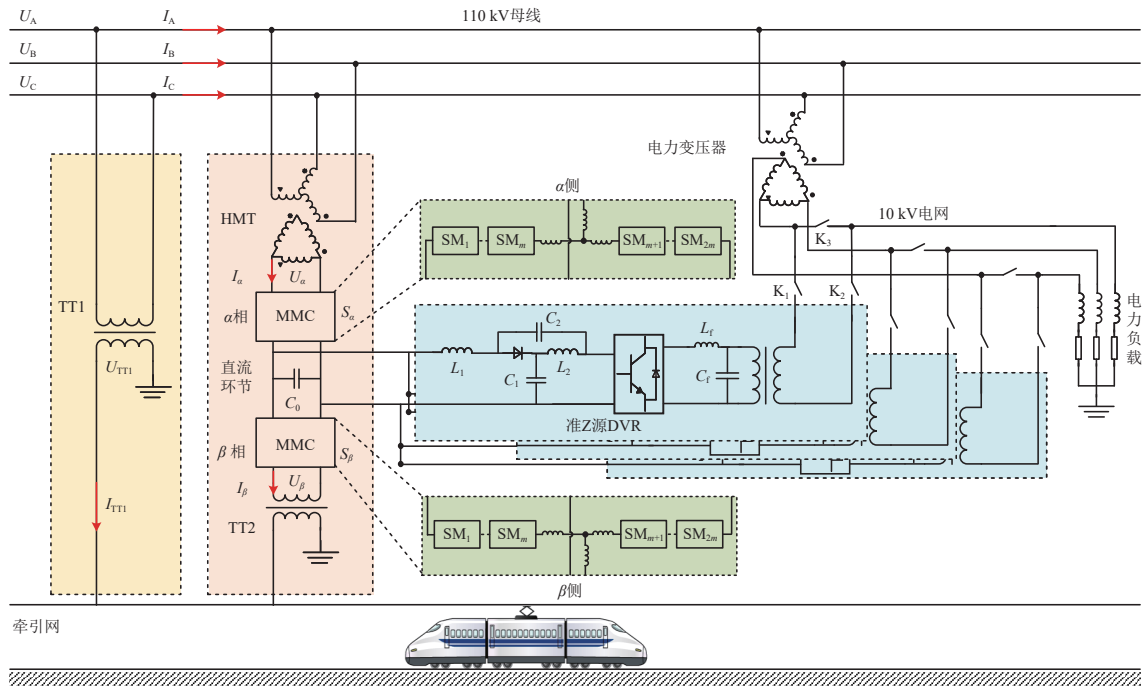


图1 集成准Z源DVR的同相牵引供电系统拓扑结构

## 1.2 运行机理

### 1) 同相牵引供电系统

设牵引负荷视在功率为 $S_L$ ,单相牵引变压器TT1传输视在功率为 $S_{TT}$ ,PFC的传输视在功率为 $S_{PFC}$ ,系统总的负序视在功率为 $S^-$ ,则各功率之间的关系可表示为

$$S_L = S_{TT} + S_{PFC} \quad (1)$$

$$S^- = S_{TT} - S_{PFC} \quad (2)$$

国标规定的负序功率允许值设为 $S_{lim}$ ,由此可得通过单相变压器和PFC的传输视在功率分别为

$$S_{TT} = \frac{1}{2} (S_L + S_{lim}) \quad (3)$$

$$S_{PFC} = \frac{1}{2} (S_L - S_{lim}) \quad (4)$$

如图1所示。图中： $U_r$ 和 $I_r$ 为110 kV三相电网电压和电流，相数 $r=A, B, C$ ； $K_1, K_2$ 和 $K_3$ 为交流接触开关； $SM_\lambda$ 为MMC第 $\lambda$ 个子模块（Sub-Module, SM）， $\lambda=1, 2, \dots, 2m, m$ 为MMC子模块数量；TT1和TT2为单相牵引变压器1和单相牵引变压器2； $U_{TT1}$ 和 $I_{TT1}$ 分别为TT1的二次侧电压和电流； $U_x$ 和 $I_x$ 分别为PFC变流器 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相的电压和电流， $x=\alpha, \beta$ ； $S_\alpha$ 和 $S_\beta$ 分别为PFC的 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相变流器的容量； $C_0$ 为PFC直流侧电容； $C_y$ 和 $L_y$ 分别为准Z源的电容和电感， $y=1, 2$ ； $C_f$ 和 $L_f$ 分别为滤波电容和滤波电感。

根据式（1）—式（4）可以得到同相牵引供电系统的负序补偿容量示意图如图2所示。

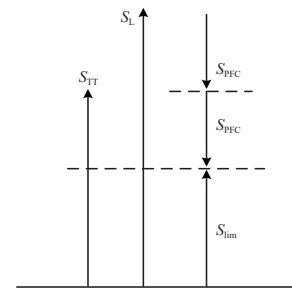


图2 同相牵引供电系统负序补偿容量示意图

由式（3）和式（4）及图2分析可知，通过调节流过PFC的功率可以实现负序问题的治理。牵引供电系统的短路容量越大，PFC的补偿功率越

小,且PFC的补偿功率为牵引负荷功率与负序功率允许值之差的一半。若想要完全补偿系统的功率,则PFC的补偿功率为牵引负荷功率的一半。

MMC的每个子模块灵活度高,可实现独立控制,对单相MMC进行建模如图3所示。图中: $O$ 为公共直流母线的参考电压点; $M$ 为交流侧的中性点; $j$ 为MMC交流侧的输入端; $w$ 和 $n$ 分别表示上桥臂和下桥臂; $i_{sj}$ 为交流侧电流; $u_{sj}$ 为交流侧电压; $i_{wj}$ 为上桥臂电流; $i_{nj}$ 为下桥臂电流; $u_{wj}$ 为上桥臂电压; $u_{nj}$ 为下桥臂电压; $i_{zj}$ 为桥臂间环流; $u_{jO}$ 为交流输入电压; $L$ 为滤波电感; $L_s$ 为网侧等效电感; $U_{in}$ 为公共直流母线电压。

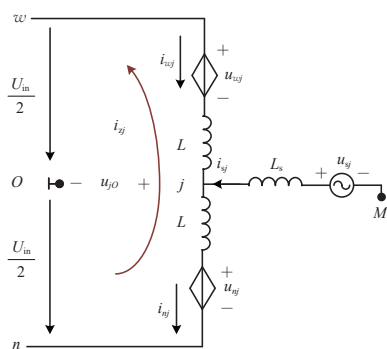


图3 单相MMC模型

根据基尔霍夫电流定律,可得交流侧电流和桥臂间环流分别为

$$i_{sj} = i_{nj} - i_{wj} \quad (5)$$

$$i_{zj} = -\frac{1}{2}(i_{wj} + i_{nj}) \quad (6)$$

根据基尔霍夫电压定律,可得 $wOj$ 回路、 $nOj$ 回路和 $OjM$ 回路的电压方程分别为

$$\frac{1}{2}U_{in} = u_{wj} + L \frac{di_{wj}}{dt} + u_{jO} \quad (7)$$

$$\frac{1}{2}U_{in} = u_{nj} + L \frac{di_{nj}}{dt} - u_{jO} \quad (8)$$

$$u_{jO} = u_{sj} - L_s \frac{di_{sj}}{dt} + u_{MO} \quad (9)$$

式中: $t$ 为时间。

整理后可得交流侧电压为

$$u_{sj} = \frac{1}{2}(u_{nj} - u_{wj}) + \left(L_s + \frac{L}{2}\right) \frac{di_{sj}}{dt} + u_{MO} \quad (10)$$

为保证桥臂电压的平衡,公共直流母线的参考电压点 $O$ 和交流侧的中性点 $M$ 均接地,因此 $O$ 点和 $M$ 点之间的电压 $u_{MO} = 0$ 。根据式(10)可建立单相MMC的简化等效模型如图4所示。图中: $R_e$ 和 $L_e$ 分别为等效电阻和等效电感; $u_e$ 为MMC的等效输出电压。

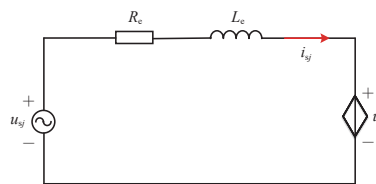


图4 单相MMC简化等效模型

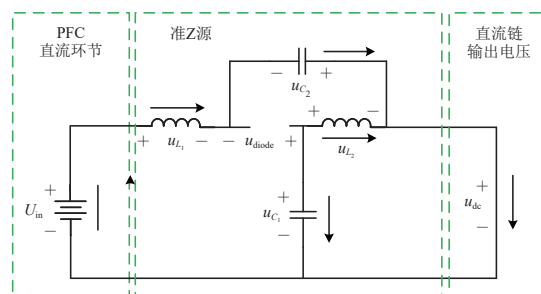
$L_e$ 和 $u_e$ 的表达式分别为

$$L_e = L_s + \frac{L}{2} \quad (11)$$

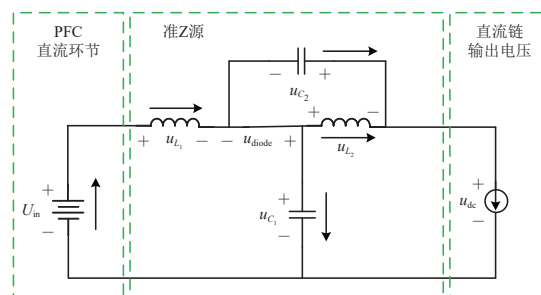
$$u_e = \frac{(u_{nj} - u_{wj})}{2} \quad (12)$$

## 2) 准Z源DVR

准Z源DVR通过控制逆变器的逆变调制比与准Z源的直流调制比输出补偿电压,实现电压暂降的补偿。准Z源DVR直流侧的工作状态等效电路如图5所示。图中: $u_{L1}$ 和 $u_{L2}$ 为准Z源中电感的电压; $u_{C1}$ 和 $u_{C2}$ 为准Z源中电容的电压; $u_{diode}$ 为二极管的电压; $u_{dc}$ 为准Z源输出的直流电压。



(a) 直通状态



(b) 非直通状态（逆变状态）

图5 准Z源DVR直流侧工作状态等效电路

根据基尔霍夫电压定律可得

$$u_{L1} = \begin{cases} U_{in} + u_{C2} & \text{直通状态} \\ U_{in} - u_{C1} & \text{非直通状态} \end{cases} \quad (13)$$

$$u_{L2} = \begin{cases} u_{C1} & \text{直通状态} \\ -u_{C2} & \text{非直通状态} \end{cases} \quad (14)$$

$$u_{dc} = \begin{cases} 0 & \text{直通状态} \\ u_{C1} + u_{C2} & \text{非直通状态} \end{cases} \quad (15)$$

$$u_{\text{diode}} = \begin{cases} u_{C_1} + u_{C_2} & \text{直通状态} \\ 0 & \text{非直通状态} \end{cases} \quad (16)$$

当电路工作在稳定状态时,根据电感伏秒平衡以及电容充放电平衡,在准Z源DVR的1个工作周期 $T$ 中电感 $L_1$ 和 $L_2$ 两端的平均电压 $u_{L_1,\text{avg}}$ 和 $u_{L_2,\text{avg}}$ 均为0 V,由此可得

$$u_{L_1,\text{avg}} = \frac{T_0(U_{\text{in}} + u_{C_2}) + T_1(U_{\text{in}} - u_{C_1})}{T} = 0 \quad (17)$$

$$u_{L_2,\text{avg}} = \frac{T_0(u_{C_1}) + T_1(-u_{C_2})}{T} = 0 \quad (18)$$

其中,

$$T = T_0 + T_1$$

式中: $T_0$ 和 $T_1$ 分别为电路处在直通状态和非直通状态的时间。

从式(15)一式(18)可得准Z源输出的直流电压为

$$u_{\text{dc}} = u_{C_1} + u_{C_2} = \frac{T}{T_1 - T_0} U_{\text{in}} = \frac{1}{1 - 2D_0} U_{\text{in}} = BU_{\text{in}} \quad (19)$$

其中,

$$B = \frac{1}{1 - 2D_0}$$

$$D_0 = \frac{T_0}{T}$$

式中: $D_0$ 为直通占空比; $B$ 为准Z源DVR的升压因子。

此时,逆变器单元输出的补偿电压 $u_g$ 为

$$u_g = \frac{1}{2} gBU_{\text{in}} \quad (20)$$

式中: $g$ 为逆变器的调制系数, $0 < g < 1$ 。

由式(13)一式(20)可知,准Z源DVR利用准Z源不同的工作状态实现单级升压和电压匹配的作用。根据系统升压大小的不同,直通信号可以替换非直通信号,也可以插入非直通信号中间,成为其中的一部分。当系统处于直通状态,此时逆变器桥臂的开关器件均导通,交流侧输出电压为零。因此准Z源DVR将直通信号插入非直通信号中,不会影响交流侧的输出波形。

## 2 集成准Z源DVR的同相牵引供电系统综合补偿策略

为有效治理同相牵引电力合建所的电能质量问题,提出了“负序-电压暂降”综合补偿策略,其

由PFC负序优化补偿策略和准Z源DVR电压暂降补偿策略构成,流程图如图6所示。

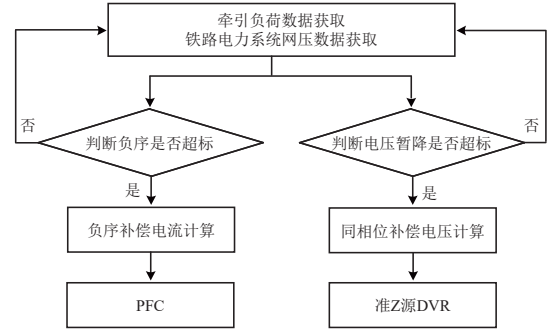


图6 “负序-电压暂降”综合补偿策略流程图

“负序-电压暂降”综合补偿策略,首先以补偿容量最小为目标,以负序功率限值为约束,设计PFC的负序优化补偿策略,推导PFC各端口负序电流计算模型;其次,计及负序对电压暂降检测精度的影响,给出满足电压暂降限值的准Z源DVR补偿电压计算式,提出基于同相位补偿的电压暂降补偿策略;最后,输出参考电压电流计算指令至PFC与准Z源DVR。

### 2.1 PFC负序优化补偿策略

PFC通过控制 $\beta$ 相变流器的输出功率实现负序治理。采用PFC负序优化补偿策略时,PFC的负序补偿目标取牵引负荷原始三相电压不平衡度与补偿限制值中的较小值,即

$$\epsilon_{\text{target}} = \min(\epsilon_L, \epsilon_{\text{lim}}) \quad (21)$$

其中,

$$\epsilon_L = \frac{\sqrt{3} U_s |I^-|}{S_d} \times 100\%$$

式中: $\epsilon_{\text{target}}$ 为PFC的负序补偿目标; $\epsilon_L$ 为补偿前牵引负荷引起的高压电网侧三相电压不平衡度; $\epsilon_{\text{lim}}$ 为高压电网侧三相电压不平衡度限值,取2%; $U_s$ 为原边的线电压; $S_d$ 为电网公共连接点的短路容量; $I^-$ 为高压电网侧的负序电流矢量。

确定补偿目标之后,即可求得PFC的总补偿电流产生的负序电流为

$$I_{\alpha}^- + I_{\beta}^- = I_L^- - \frac{\epsilon_{\text{target}} S_d}{100 \sqrt{3} U_s} \quad (22)$$

式中: $I_L^-$ 和 $I_{\alpha}^-$ ,  $I_{\beta}^-$ 分别为变压器牵引侧负载电流和PFC的 $\alpha$ 相, $\beta$ 相变流器电流单独作用下在原边引起的负序电流。

根据功率平衡原则可以得到单相牵引变压器的运行电流和PFC的补偿电流分别为

$$\begin{cases} I_{TT1p} = \frac{1}{2} I_{Lp} \\ I_{TT1q} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} I_{ap} = \frac{\sqrt{3} N_2}{2 N_1} I_{Lp} \\ I_{aq} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} I_{\beta p} = \frac{N_3}{2} I_{Lp} \\ I_{\beta q} = N_3 I_{Lq} \end{cases} \quad (25)$$

式中： $I_{TT1p}$ 和 $I_{TT1q}$ 分别为牵引变压器TT1电流的有功和无功分量； $I_{ap}$ 和 $I_{aq}$ 为PFC的 $\alpha$ 相变流器电流的有功和无功分量； $I_{\beta p}$ 和 $I_{\beta q}$ 为PFC的 $\beta$ 相变流器电流的有功和无功分量； $N_1$ 和 $N_3$ 分别为单相牵引变压器TT1和TT2的变比； $N_2$ 为高压匹配变压器HMT的变比； $I_{Lp}$ 和 $I_{Lq}$ 分别为牵引侧负载电流的有功和无功分量。

## 2.2 准Z源DVR电压暂降补偿策略

电力机车在运行时具有强冲击和单相不对称性，造成高压电网侧三相电压不平衡，从而影响电压暂降的补偿精度。计及负序电压在 $dq$ 坐标下引起的2倍频分量对电压暂降检测精度的影响，推导电网三相电压正序分量和负序分量进行 $dq$ 变换后的表达式分别为

$$\begin{cases} U_d^+ = U_m^+ \cos \varphi - U_m^- \cos(2\omega t + \xi) \\ U_q^+ = U_m^+ \sin \varphi + U_m^- \sin(2\omega t + \xi) \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} U_d^- = U_m^- \cos \xi - U_m^+ \cos(2\omega t + \varphi) \\ U_q^- = U_m^- \sin \xi + U_m^+ \sin(2\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (27)$$

式中： $U_d^+$ 和 $U_q^+$ 分别为电网电压经正序 $dq$ 变换后得到的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量； $U_d^-$ 和 $U_q^-$ 分别为电网电压经负序 $dq$ 变换后得到的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量； $U_m^+$ 和 $U_m^-$ 分别为电网正序电压分量和负序电压分量的幅值； $\varphi$ 和 $\xi$ 分别为电压 $U_m^+$ 和 $U_m^-$ 的初始相角。

根据式(26)和式(27)可知，电网电压经正序 $dq$ 变换后，正序电压表现为直流分量，负序电压表现为2倍频交流分量；经负序 $dq$ 变换后，负序电压表现为直流分量，正序电压表现为2倍频交流分量。

定义电网电压的采样周期为 $T_s$ ，对于电网正序电压 $U_m^+$ 的 $d$ 轴和 $q$ 轴直流分量进行3个采样周期的连续采样，分别得到 $U_d^+(t-T_s)$ ， $U_q^+(t-T_s)$ ， $U_d^+(t)$ ， $U_q^+(t)$ ， $U_d^+(t+T_s)$ ， $U_q^+(t+T_s)$ ，将3组连续的电压采样值代入式(26)，并利用三角函数和差化积关系，可得电网正序电压在 $d$ 轴和 $q$ 轴上的直流分量 $\overline{U}_d^+$ 和 $\overline{U}_q^+$ 的表达式为

$$\begin{cases} \overline{U}_d^+ = U_m^+ \cos \varphi = \frac{U_d^+(t+T_s) + U_d^+(t-T_s) - 2U_d^+(t) \cos(2\omega T_s)}{4 \sin^2(\omega T_s)} \\ \overline{U}_q^+ = U_m^+ \sin \varphi = \frac{U_q^+(t+T_s) + U_q^+(t-T_s) - 2U_q^+(t) \cos(2\omega T_s)}{4 \sin^2(\omega T_s)} \end{cases} \quad (28)$$

同理可得，电网负序电压在 $d$ 轴和 $q$ 轴上的直流分量 $\overline{U}_d^-$ 和 $\overline{U}_q^-$ 的表达式为

$$\begin{cases} \overline{U}_d^- = U_m^- \cos \xi = \frac{U_d^-(t+T_s) + U_d^-(t-T_s) - 2U_d^-(t) \cos(2\omega T_s)}{4 \sin^2(\omega T_s)} \\ \overline{U}_q^- = U_m^- \sin \xi = \frac{U_q^-(t+T_s) + U_q^-(t-T_s) - 2U_q^-(t) \cos(2\omega T_s)}{4 \sin^2(\omega T_s)} \end{cases} \quad (29)$$

由式(28)和式(29)可知，通过对3个连续采样点的电压进行计算即可快速提取相应的直流分量，并滤除电网电压正负序分量中的2倍频交流分量，则电网电压正负序分量的矢量 $U_m^+$ 和 $U_m^-$ 分别为

$$U_m^+ = U_m^+ \angle \varphi \quad (30)$$

$$U_m^- = U_m^- \angle \xi \quad (31)$$

由式(30)和式(31)可得暂降后电网电压矢量 $U_m$ 为

$$U_m = U_m^+ + U_m^- \quad (32)$$

电压暂降补偿策略采用同相位补偿策略。补偿后各电压之间关系为

$$U_1 = U_m + U_{DVR} \quad (33)$$

式中： $U_1$ 为准Z源DVR暂降补偿后电网电压； $U_{DVR}$ 为准Z源DVR输出的补偿电压。

根据矢量计算，可以得出准Z源DVR输出补偿电压的幅值 $U_{DVR}$ 为

$$U_{DVR} = \sqrt{U_1^2 + U_m^2 - 2U_1 U_m \cos(\gamma - \theta)} \quad (34)$$

式中： $\theta$ 和 $\gamma$ 分别为暂降后和暂降补偿后电网电压的相位跳变角。

采用同相位补偿策略后，准Z源DVR输出补偿电压的相角为 $\theta$ ，因此，准Z源DVR输出电压的幅值为

$$U_{DVR} = U_1 - U_m \quad (35)$$

电压暂降同相位补偿向量图如图7所示。图中：Re和Im分别表示复平面的实轴和虚轴。由图

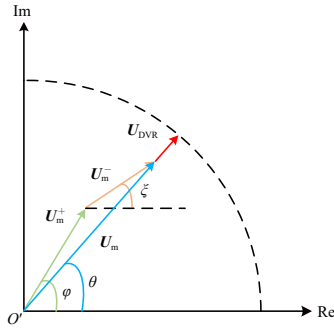


图7 电压暂降同相位补偿向量

7可知：发生电压暂降后，首先根据式(26)一式(29)求出滤除2倍频交流分量后的电网电压正负序分量，然后由矢量相加求出暂降后的电网电压 $U_m$ ，最后结合同相位补偿策略计算准Z源DVR输出电压 $U_{DVR}$ 的幅值和相位。

### 3 集成准Z源DVR的同相牵引供电系统控制策略

为实现“负序-电压暂降”动态跟踪补偿，提出集成准Z源DVR的同相牵引供电系统控制策略，该策略由基于MMC的PFC预测电流与子模块直流电容均压控制和准Z源DVR直流链稳压与交流逆变控制构成，如图8所示。由图8可知：该控制策略首先将MMC子模块直流电容的电压均值控制分量与平衡控制分量叠加，得到其均压控制分量，再将该信号与预测电流控制输出的变流器控制信号作差，得到PFC综合控制信号；其次，将准Z源DVR直流链稳压控制的直通信号以及交流逆变控制的调制信号，通过或门计算共同形成驱动信号，控制驱动电路工作；最后，实现牵引电力合建所负序-电压暂降的综合补偿。

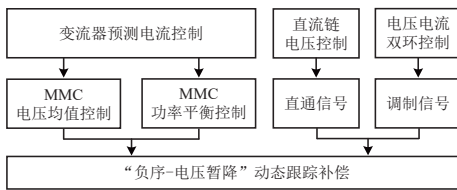


图8 集成准Z源DVR的同相牵引供电系统控制策略

#### 3.1 基于MMC的PFC预测电流与均压控制

由前文分析可知，准Z源DVR从PFC的直流环节取电，由于电力机车在运行时具有强冲击和单相不对称性以及各MMC子模块之间相互独立且存在控制时延等情况，将导致PFC的直流侧网压波

动，影响潮流的输出性能。因此，提出基于MMC的PFC预测电流与均压控制方法，确保MMC子模块直流电容电压稳定。

假设MMC子模块直流电容电压的平均值为 $U_{C\_avg}$ ，参考值为 $U_{C\_ref}$ ，第 $\lambda$ 个模块直流电容的电压为 $U_{C\lambda}$ 。对MMC子模块电容电压的平均值和参考值作差后经电压外环PI控制器，得到桥臂环流的参考值 $i_z^*$ 为

$$i_z^* = (U_{C\_ref} - U_{C\_avg}) \left( k_1 + \frac{k_2}{s} \right) \quad (36)$$

式中： $k_1$ 和 $k_2$ 分别为电压外环PI控制器的比例系数和积分系数； $s$ 为拉普拉斯算子。

将桥臂环流的参考值与实际值作差后经电流内环PI控制器，得到MMC子模块直流电容的电压均值控制分量 $U_A^*$ 为

$$U_A^* = (i_{zj} - i_z^*) \left( k_3 + \frac{k_4}{s} \right) \quad (37)$$

式中： $k_3$ 和 $k_4$ 分别为电流内环PI控制器的比例系数和积分系数。

MMC子模块的电压均值控制框图如图9所示。由图9可知：电压外环主要用于实现子模块电容电压平均值的稳定，电流内环用于抑制桥臂环流，实现上下桥臂所有模块电压的平均值趋于稳定，从而保证子模块的正常工作。

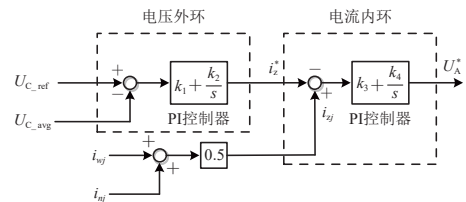


图9 MMC子模块直流电容的电压均值控制框图

为确保MMC子模块直流电容电压的稳定，还需对MMC子模块采用功率平衡控制。对MMC子模块电容电压与其参考值作差，求得

$$\Delta U_{C\lambda} = U_{C\_ref} - U_{C\lambda} \quad (38)$$

式中： $\Delta U_{C\lambda}$ 为直流电容电压的差值。

通过比例调节环节将 $\Delta U_{C\lambda}$ 放大后，乘控制指令符号 $\sigma_\lambda$ ，得到功率平衡控制分量 $U_{B\lambda}^*$ 为

$$U_{B\lambda}^* = \Delta U_{C\lambda} k_5 \sigma_\lambda \quad (39)$$

其中，

$$\sigma_\lambda = \begin{cases} 1 & U_{C\lambda} > U_{C\_ref} \\ 0 & U_{C\lambda} = U_{C\_ref} \\ -1 & U_{C\lambda} < U_{C\_ref} \end{cases}$$

式中： $k_5$ 为MMC功率平衡控制比例调节环节的比

例系数。

MMC子模块的功率平衡控制框图如图10所示。由图10可知：通过将MMC子模块电容电压与其参考值进行比较作差，再经过比例调节环节和控制指令符号环节输出功率平衡控制分量 $U_{Ba}^*$ 。

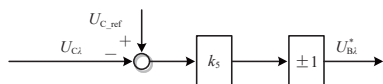


图10 MMC子模块的功率平衡控制框图

电压均值控制分量 $U_A^*$ 与功率平衡控制分量 $U_{Ba}^*$ 叠加后得到MMC子模块的均压控制分量 $U_A^*$ ，将该信号与预测电流控制输出的变流器控制信号作差即得到MMC子模块的综合控制信号。

### 3.2 准Z源DVR直流链稳压与交流逆变控制

准Z源DVR自PFC的直流侧引入直流电源供电，直流电源电压的波动将对变流器输出侧的波形质量造成较大影响。为保证准Z源DVR能够准确快速地输出补偿电压，提出准Z源DVR的直流链控制方法。其控制过程方程为

$$\Delta u_{dc} = u_{dc\_ref} - u_{dc} \quad (40)$$

$$i_{dc} = \Delta u_{dc} \left( k_6 + \frac{k_7}{s} \right) \quad (41)$$

式中： $u_{dc\_ref}$ 为直流链电压参考值； $\Delta u_{dc}$ 为直流链电压参考值与实际值之差； $i_{dc}$ 为直通控制信号； $k_6$ 和 $k_7$ 分别为准Z源DVR直流链控制PI控制器的比例系数和积分系数。

为实现电压暂降补偿效果，提出准Z源DVR输出电压反馈与滤波电感电流反馈相结合的交流逆变控制策略，其控制过程方程为

$$i_{L\_ref} = (U_{DVR\_ref} - U_{DVR}) \left( k_8 + \frac{k_9 s}{s^2 + (100\pi)^2} \right) \quad (42)$$

$$i_o = k_{10} (i_{L\_ref} - i_{L_t}) \quad (43)$$

式中： $i_{L\_ref}$ 为滤波电感电流参考值； $U_{DVR\_ref}$ 为准Z源DVR输出电压参考值； $i_{L_t}$ 为滤波电感电流实际值； $i_o$ 为逆变控制电流； $k_8$ 和 $k_9$ 分别为PR控制器的比例系数和谐振系数； $k_{10}$ 为准Z源DVR交流侧逆变比例调节环节的比例系数。

根据式(40)一式(43)得到准Z源DVR的直流链稳压与交流逆变控制框图如图11所示。由图11可知：直流链电压参考值与实际值作差后，经PI控制器生成直通信号，通过调节直通占空比实现直流链电压的稳定；准Z源DVR输出电压参考值与实际输出电压作差后，经PR控制器生成滤波

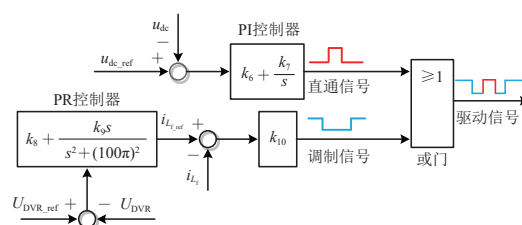


图11 准Z源DVR直流链稳压与交流逆变控制框图

波电感电流参考值，再与实际滤波电感电流作差，经比例控制器生成调制信号，以调节交流侧输出电压；当准Z源DVR输出补偿电压时，直通信号与调制信号通过逻辑或运算后，共同形成驱动信号，控制驱动电路工作。

## 4 算例分析

为验证集成准Z源DVR的同相牵引供电系统拓扑结构与控制策略的正确性，在MATLAB/Simulink环境中搭建集成准Z源DVR的同相牵引供电系统仿真模型，三相电网电压为110 kV，短路容量为500 MV·A，PFC的 $\alpha$ 相变流器容量15 MV·A， $\beta$ 相变流器容量13 MV·A，直流侧电容50 mF，准Z源电感为1 mH，准Z源电容为1 mF，输出滤波电感为30 mH，输出滤波电容为50  $\mu$ F<sup>[30-32]</sup>。

### 4.1 负序补偿仿真分析

图12给出在不同高压电网侧三相电压不平衡度下采用优化补偿策略时PFC输出的有功功率和补偿电流波形以及高压电网侧三相电压不平衡度。仿真时，在0~0.2 s期间，未接入PFC， $S_L$ 为13 MV·A， $\epsilon_L$ 为2.6%；在0.2~0.4 s期间，接入PFC， $S_L$ 为13 MV·A， $\epsilon_L$ 为2.6%；在0.4~0.6 s期间， $S_L$ 为18 MV·A， $\epsilon_L$ 为3.6%；在0.6~0.8 s期间， $S_L$ 为15 MV·A， $\epsilon_L$ 为3.0%。

由图12可知：未接入PFC时，PFC不输出有功；接入PFC后，高压电网侧三相电压不平衡度能迅速稳定至2%左右，且随着牵引负荷功率的变化，PFC输出的有功功率也随之变化，当牵引负荷功率为13 MV·A、三相电压不平衡度为2.6%时PFC输出的有功功率为1.5 MW，当牵引负荷功率为18 MV·A、三相电压不平衡度为3.6%时PFC输出的有功功率为4 MW，当牵引负荷功率为15 MV·A、三相电压不平衡度为3%时PFC输出的有功功率为2.5 MW；PFC变流器 $\alpha$ 相、 $\beta$ 相能够迅速有效地输出补偿电流，实现负序的补偿。通过

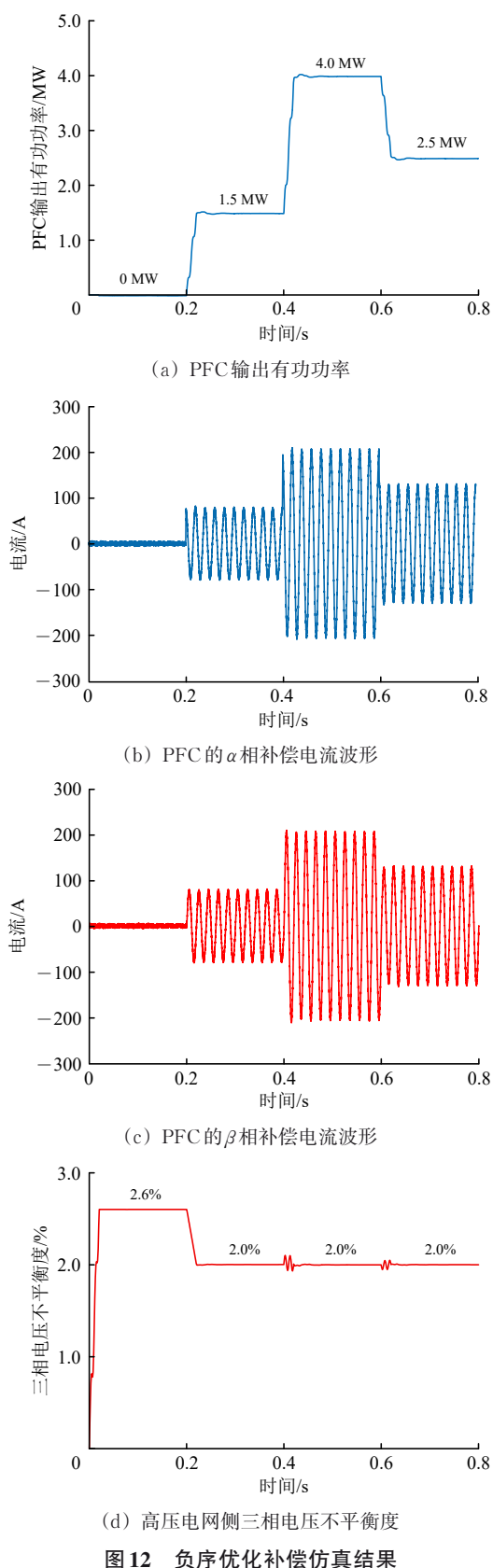


图12 负序优化补偿仿真结果

仿真证明, PFC可通过控制变流器实现负序补偿, 且负序优化补偿策略能够将三相电压不平衡度稳定至2%左右。

## 4.2 电压暂降补偿仿真分析

为验证在牵引负荷的冲击下准Z源DVR可实现电力所电压暂降的有效治理。图13给出准Z源DVR输出补偿电压波形以及补偿后电网电压波形。仿真时, 在0~0.4 s期间, 电网电压在0.2 s时发生电压暂降, 各相电压跌幅为20%; 在0.4~0.8 s期间, 电网电压在0.6 s时发生电压暂降, A相、C相的电压跌幅为30%。

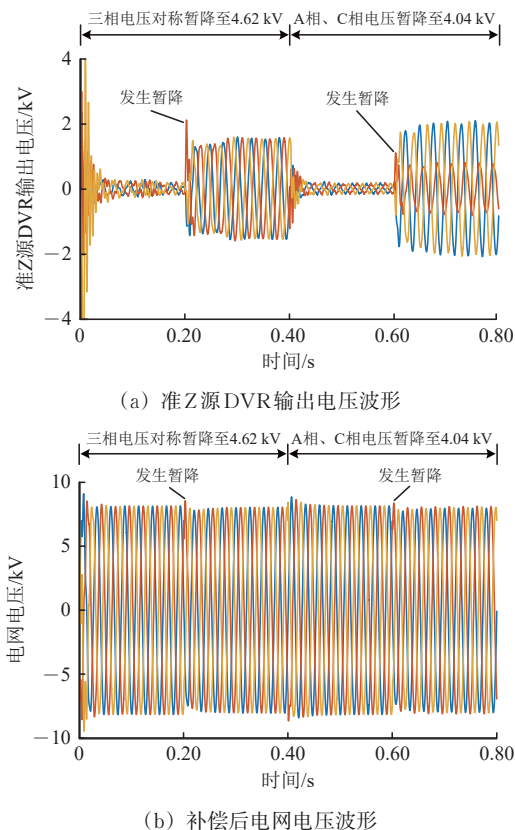


图13 电力所电压暂降仿真波形

由图13可知: 电网电压对称暂降至4.62 kV时, 准Z源DVR在26 ms (1.3个周波) 内输出补偿电压; 电网电压A相、C相暂降至4.04 kV时, 准Z源DVR在40 ms (2个周波) 内输出补偿电压; 在0~0.4 s期间电网发生对称暂降对负载电压几乎无影响, 在0.4~0.8 s期间电网发生不对称暂降对负载电压几乎无影响。通过仿真证明, 在铁路电力所发生电压暂降时, 准Z源DVR可迅速响应, 并输出补偿电压保证牵引电力合建所的电网电压不受牵引负荷波动的影响。

## 5 试验验证

基于上述仿真模型, 依托StarSim HIL实时仿真

试验平台，搭建集成准Z源DVR的同相牵引供电方案的综合控制模型，试验参数与仿真参数保持一致。

5.1 负序补偿试验

根据表 1 设定牵引负荷的功率试验工况，在 StarSim HIL 实时仿真试验平台上开展试验验证。

表 1 牵引负荷工况

| 工况 | 仿真时间/s | 牵引负荷视在功率 $S_L/(MV \cdot A)$ | 三相电压不平衡度 $\epsilon_L/\%$ |
|----|--------|-----------------------------|--------------------------|
| 1  | 0~3    | 18                          | 3.6                      |
| 2  | 3~6    | 25                          | 5.0                      |
| 3  | 6~10   | 10                          | 2.0                      |

图 14 为负序补偿试验波形。由图 14 可知：在三相电压不平衡度大于 2% 时 PFC 输出电流对负序进行了补偿，维持三相电压不平衡度为 2%，且在三相电压不平衡度为 2% 时 PFC 不再输出补偿电流，证明了 PFC 负序优化补偿策略以及变流器控制方法的有效性，实现牵引电力合建所负序问题的有效治理。

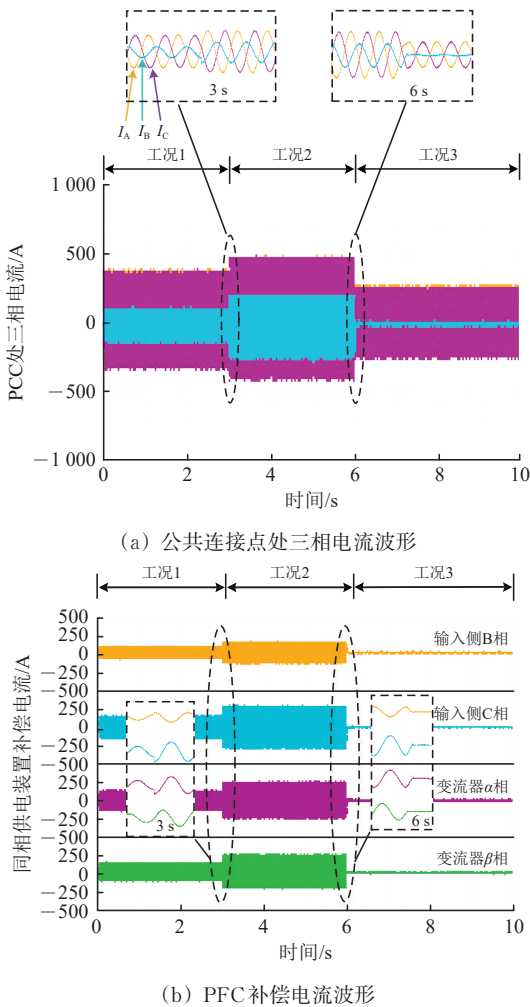


图 14 负序补偿试验波形

5.2 电压暂降补偿试验

图 15 为电压暂降补偿试验波形。由图 15 可知：电网电压发生电压暂降时，负载电压幅值恒定，且不受牵引负荷波动的影响，证明了在牵引负荷功率变化时，准Z源DVR可实现电网电压的动态补偿，提高了设备供电的可靠性；准Z源DVR输出补偿电压迅速，证明了准Z源DVR电压暂降策略及控制方法的有效性，实现了同相牵引电力合建所电压暂降问题的有效治理。

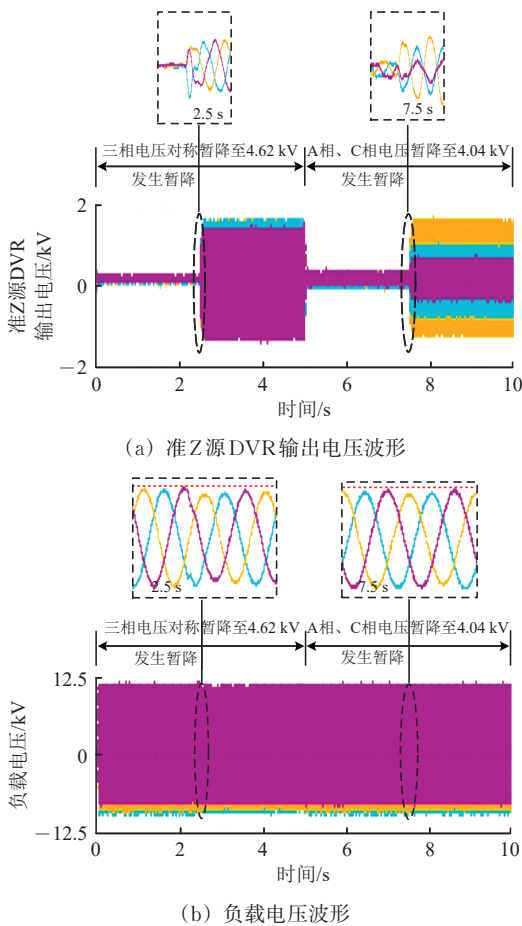


图 15 电压暂降补偿试验波形

6 结 语

围绕牵引电力合建所中高压电网侧三相电压不平衡与低压电力侧电网电压暂降的联合治理问题，提出一种集成准Z源DVR的同相供电系统拓扑结构并分析其运行机理。首先，基于该结构提出以负序功率限值为约束的PFC负序优化补偿策略与计及负序影响的电压暂降同相位补偿策略。然后，计及PFC直流母线电压稳定性对DVR性能的影响，提出基于MMC的PFC预测电流与子模块直流电容均

压控制方法,并将准Z源直流链稳压控制与DVR交流逆变控制融合,实现同相牵引电力合建所负序与电压暂降的综合补偿。最后,基于MATLAB/

Simulink仿真与StarSim HIL实时仿真试验,验证了同相牵引电力合建所拓扑和“负序-电压暂降”综合补偿策略的正确性和有效性。

## 参 考 文 献

- [1] 本刊讯.国家发展改革委印发《“十四五”推进西部陆海新通道高质量建设实施方案》[J].招标采购管理,2021(9):8.  
News from Our Journal. National development and reform commission issued the implementation plan for promoting high-quality construction of the new western land-sea corridor during the 14th Five-Year Plan period[J]. Bidding and Procurement Management, 2021(9): 8.
- [2] 刘雪莹,谭克虎.高铁网络驱动下的产业链韧性:流动、活跃与升级——基于数字化水平的调节作用[J].中国铁道科学,2024,45(4):189-206.  
Liu Xueying, Tan Kehu. Resilience of the industrial chain driven by high-speed rail network: mobility, activity and upgrading—an analysis of the moderating effect of digitalization level[J]. China Railway Science, 2024, 45(4): 189-206.
- [3] 孙媛媛,许庆桑,马钊,等.数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J].电力系统自动化,2024,48(6):154-169.  
Sun Yuanyuan, Xu Qingshen, Ma Zhao, et al. Key technologies for harmonic source tracing in new power system in background of digitalization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 154-169.
- [4] 辛宇.哈大铁路客运专线牵引电力合建变电所优化设计[J].铁道标准设计,2012(5):134-135,146.  
Xin Yu. Optimized design of combined substation for power & traction on Harbin-Dalian passenger dedicated line[J]. Railway Standard Design, 2012(5): 134-135, 146.
- [5] Chen Minwu, Chen Yingtao, Chen Yinyu, et al. Unified power quality management for traction substation groups connected to weak power grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4178-4189.
- [6] 李群湛.我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J].铁道学报,2010,32(4):119-124.  
Li Qunzhan. On some technical key problems in the development of traction power supply system for high-speed railway in China[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4): 119-124.
- [7] He Hanyang, Zhang Wenhui, Wang Ying, et al. A sensitive industrial process model for financial losses assessment due to voltage sag and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1293-1301.
- [8] 孙媛媛,葛俊,许庆桑,等.计及多频耦合影响的谐波解耦贡献评估[J].中国电机工程学报,2025,45(21):8268-8281.  
Sun Yuanyuan, Ge Jun, Xu Qingshen, et al. Decoupling harmonic contribution evaluation considering multi-frequency coupling effects[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(21): 8268-8281.
- [9] 罗培,杨维民,张敏.高铁再生制动工况下公用电网负序电流优化[J].中国铁道科学,2018,39(6):126-132.  
Luo Pei, Yang Weimin, Zhang Min. Optimization of negative sequence current in public power grid under regenerative braking condition of high speed railway[J]. China Railway Science, 2018, 39(6): 126-132.
- [10] 崔贵平.电气化铁路电能质量与制动能量回收控制系统研究[D].长沙:湖南大学,2020.  
Cui Guiping. Research on power quality and braking energy recovery control system of electrified railway[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [11] Mousavi Gazafrudi S M, Tabakhpour Langerudy A, Fuchs E F, et al. Power quality issues in railway electrification: a comprehensive perspective[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3081-3090.
- [12] Langerudy A T, Mariscotti A, Abolhassani M A. Power quality conditioning in railway electrification: a comparative study[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 6653-6662.
- [13] 崔贵平,罗隆福,李勇,等.基于新型YNvd平衡变压器的电气化铁道同相供电系统[J].电力自动化设备,2019,39(2):158-163,180.  
Cui Guiping, Luo Longfu, Li Yong, et al. Co-phase power supply system based on novel YNvd balanced transformer for electrified railway[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 158-163, 180.
- [14] 郭旭刚.采用潮流控制器的贯通型牵引供电系统负序治理模型及控制策略[J].中国铁道科学,2024,45(1):155-161.  
Guo Xugang. Negative sequence governance model and control strategy of the interconnected traction power supply system using the power flow controller[J]. China Railway Science, 2024, 45(1): 155-161.

- [15] Liu Yuanli, Chen Minwu, Cheng Zhe, et al. Robust energy management of high-speed railway co-phase traction substation with uncertain PV generation and traction load[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(6): 5079-5091.
- [16] Shu Zeliang, Xie Shaofeng, Li Qunzhan. Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 334-343.
- [17] 陈民武, 陈天舒, 代先锋, 等. 基于 MMC 的储能型同相供电系统模型及控制策略[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(3): 132-143.  
Chen Minwu, Chen Tianshu, Dai Xianfeng, et al. Modeling and control strategy of energy storage co-phase power supply system based on MMC[J]. China Railway Science, 2022, 43(3): 132-143.
- [18] 魏光. 基于 MMC 和 Vv 接线的同相牵引供电系统研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(8): 2077-2082.  
Wei Guang. Research on co-phase traction power supply system based on MMC and Vv connection[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(8): 2077-2082.
- [19] Musarrat M N, Fekih A, Islam M R. An improved fault ride through scheme and control strategy for DFIG-based wind energy systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-6.
- [20] 康勇, 林新春, 潘辰, 等. 弱电网下采用 SVC 与 SVG 补偿后新能源并网变换器的功率传输特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2115-2125.  
Kang Yong, Lin Xinchun, Pan Chen, et al. Analysis of power transmission characteristics of renewable energy grid-connected converter considering SVC and SVG compensation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2115-2125.
- [21] 汪颖, 钟啟明, 刘育权, 等. 新型电力系统的电能质量扰动治理关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(22): 8670-8691.  
Wang Ying, Zhong Qiming, Liu Yuquan, et al. Review and prospects of key technologies for power quality disturbance mitigation in new-type power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(22): 8670-8691.
- [22] Du Wei, Schneider K P, Wiegand G P, et al. A supplemental control for dynamic voltage restorers to improve the primary frequency response of microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 878-888.
- [23] Yang Ruohuan, Jin Jianxun, Chen Xiaoyuan, et al. A battery-energy-storage-based DC dynamic voltage restorer for DC renewable power protection[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(3): 1707-1721.
- [24] Tu Chuanming, Guo Qi, Jiang Fei, et al. A comprehensive study to mitigate voltage sags and phase jumps using a dynamic voltage restorer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1490-1502.
- [25] 唐绪青, 马俊鹏, 肖先勇. 基于级联 H 桥变流器的动态电压恢复器电压补偿控制[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 15-24.  
Tang Xuqing, Ma Junpeng, Xiao Xianyong. Voltage compensation control for dynamic voltage restorer based on cascaded H-bridge converter[J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 15-24.
- [26] Jothibasu S, Mishra M K. An improved direct AC-AC converter for voltage sag mitigation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 21-29.
- [27] Fang Xupeng, Wang Xuguang, Chen Zhiqiao. A single-phase AC power supply based on modified quasi-Z-source inverter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 1-5.
- [28] Abualkasim B, Gaber M, Andrii C, et al. Predictive control based on ranking multi-objective optimization approaches for a quasi-Z source inverter[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(6): 1152-1160.
- [29] Zhang Yun, Fu Chuanzhi, Sumner M, et al. A wide input-voltage range quasi-Z-source Boost DC-DC converter with high-voltage gain for fuel cell vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 5201-5212.
- [30] Liang Zipeng, Hu Sideng, Yang Huan, et al. Synthesis and design of the AC current controller and impedance network for the quasi-Z-source converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 8287-8296.
- [31] Chen Ling, Chen Minwu, Chen Yingtao, et al. Modelling and control of a novel AT-fed co-phase traction power supply system for electrified railway[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 106405-106414.
- [32] 张新闻, 同向前. 电容耦合型动态电压恢复器参数建模与控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 212-218.  
Zhang Xinwen, Tong Xiangqian. Parameter modeling and control of capacitor-coupled dynamic voltage restorer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 212-218.

## Modeling and control strategy of co-phase traction power supply system with integrated quasi-Z-source DVR

Chen Minwu<sup>1</sup>, Zhang Yanyang<sup>1</sup>, Yu Guowang<sup>1,2</sup>, Li Dongjie<sup>1</sup>, Li Zhe<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 611756, China;

2. Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Cangzhou Hebei 062350, China)

**Abstract:** When access to an external power source is constrained for an electrified railway, the traction substation supplying electric locomotives is commonly co-located with the power substation supplying communication and signaling facilities. This configuration is referred to as an integrated traction and power substation. The single-phase asymmetry and strong impact characteristics of high-power traction loads cause three-phase voltage unbalance on the high-voltage grid side and voltage sags on the low-voltage power-supply side. Based on the principle of co-phase power supply, a co-phase traction power supply system topology structure suitable for integrated traction and power substations is first proposed. The topology consists of a single-phase traction transformer, a modular multilevel converter (MMC)-based power flow controller (PFC), and a quasi-Z-source dynamic voltage restorer (DVR), where the DC bus of the PFC supplies DC power to the quasi-Z-source DVR. An integrated negative-sequence and voltage-sag compensation strategy is then proposed by combining the negative-sequence optimal compensation strategy of the PFC with the voltage-sag compensation strategy of the quasi-Z-source DVR. Calculation methods are derived for the PFC compensation current constrained by the negative-sequence power limit and the quasi-Z-source DVR compensation voltage satisfying the voltage-sag limit. Considering the influence of PFC DC-bus voltage fluctuations on DVR performance, predictive current control and voltage-balancing control are proposed for the MMC-based PFC. These control methods are coordinated with quasi-Z-source DC-link voltage stabilization control and DVR AC inverter control to achieve integrated compensation of negative-sequence components and voltage sags. Finally, MATLAB/Simulink simulations and StarSim HIL real-time simulation experiments verify the correctness and effectiveness of the proposed topology and integrated negative-sequence and voltage-sag compensation strategy. The results show that the co-phase traction power supply system integrated with the quasi-Z-source DVR compensates for negative-sequence components on the high-voltage grid side and voltage sags on the low-voltage power-supply side under different traction load conditions. The PFC maintains the three-phase voltage unbalance factor on the high-voltage grid side at approximately 2%, while the quasi-Z-source DVR generates the compensation voltage within two cycles and maintains a stable voltage on the low-voltage power-supply side. The proposed system provides a highly integrated structure, a fast compensation response, and effective coordination among the control functions.

**Key words:** Co-phase traction power supply system; Integrated traction and power substation; Voltage sag; Negative-sequence compensation; Dynamic voltage restorer; Power flow controller

(责任编辑 金 燕)