

DOI: 10.7667/PSPC160304

基于三相-单相变换的新型同相供电系统方案

漆炜之¹, 刘全景², 谢永强², 李雪²

(1. 江苏省电力公司淮安供电公司, 江苏 淮安 223002; 2. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对当前电气化铁路供电系统中存在的负序、无功、谐波和电分相等问题, 顺应铁路高速化、重载化的潮流, 提出一种基于三相-单相变换的新型同相供电系统方案。该同相供电方式的整流侧采用不控整流电路, 逆变侧采用 H 桥级联多电平单相 SPWM 变流器。由电压有效值和瞬时值双闭环控制, 抑制不控整流电路的直流电压波动对逆变侧交流电压的不良影响, 为机车负载提供稳定的电压支撑。分析了该新型同相供电系统的工作原理及其在不同工况下的供电性能, 并在 Matlab/Simulink 平台上建立了系统模型。仿真结果验证了该方案的正确性与可行性。

关键词: 电气化铁路; 同相供电; 三相-单相变换器; 不控整流; 多电平单相 SPWM 逆变器

A new cophase power supply system based on three-phase to single-phase converter

QI Weizhi¹, LIU Quanjing², XIE Yongqiang², LI Xue²

(1. Huaian Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Huaian 223002, China; 2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to solve the problems existed in the current electrified railway power supply system, such as negative sequence, reactive power, harmonics and split sections, and to conform to the trend of high speed and heavy load, a new cophase power supply system based on three-phase to single-phase converter is proposed. The uncontrolled rectifier circuit is adopted in the rectifier side of the system, and the cascaded H-bridge multilevel single-phase SPWM converter is adopted in the inverter side. In order to suppress the negative effect of the DC voltage fluctuation on the AC voltage of the inverter side, and to provide stable voltage support for traction load, output voltage of the inverter side is controlled by voltage effective value and instantaneous value double closed-loop. Operating principle of the cophase power supply system and its power supply performance under different conditions are analyzed, and the system model is established on the Matlab/Simulink platform. Simulation results verify the correctness and feasibility of the proposed scheme.

Key words: electrified railway; cophase power supply; three-phase to single-phase converter; uncontrolled rectifier; multilevel single-phase SPWM inverter

0 引言

目前中国的电气化铁路供电系统广泛采用单相工频交流制, 通过牵引变压器把 110 kV 或 220 kV 三相公共高压变为两相 27.5 kV 电压, 分别接入两边的供电臂。该方式不但给三相公共电力系统带来了负序、无功和谐波等一系列电能质量问题^[1-3], 同时其自身存在的电分相还会使机车的牵引力和速度遭受损失, 不利于电气化铁路向高速重载的方向发展。针对上述问题, 文献[4]指出了电气化铁路同相供电的必要性, 并提出通过对称补偿技术来实现同相供电。文献[5-9]分别阐述了动态平衡补偿装置与阻抗匹配平衡变压器、YNd11 接线变压器、Vv 接

线变压器、Scott 接线变压器、YNvd 接线变压器等常用牵引变压器构成的同相供电系统, 均能获得较好的补偿效果。

在电气化铁路较发达的国家中, 德国利用自建电网以 15 kV/16.67 Hz 单相交流形式为电力机车供电, 是一种较为理想的贯通式同相供电方式, 但其建设初期所需的投资较高, 电压制式与中国不兼容, 因此不能直接采用德国的同相供电模式。随着电力电子技术的发展和电力电子器件耐压耐流水平的提高, 取消三相-两相牵引变压器、采用基于电力电子器件的三相-单相供电方式成为可能。该供电方式能够主动消除负序, 减少谐波并提高功率因数, 有利于彻底取消电分相, 实现贯通式同相供电。文献[10]

提出了一种基于多电平三相-单相PWM变换器的同相供电系统方案,其整流侧和逆变侧各采用五电平三相 PWM 整流器和二极管箝位式五电平单相 PWM 逆变器。借助 PWM 变流器的优势,其供电质量高,输入电流谐波含量低,功率因数高,同时电力机车再生制动等工况下产生的能量可以回馈至公共电网。然而 PWM 变流器采用的全控型器件成本高、控制方式复杂、高频开关损耗大、效率及可靠性低,这些弊端在大功率场合表现更加明显。基于不控电力电子器件的多脉波整流器由于成本低、运行损耗小、可靠性高,在大功率场合广泛应用,如地铁和城轨等直流输电场合。但其输入电流谐波含量大、功率因数低,随着整流脉波数的提高,3、5、7次等低频谐波可基本消除,仅剩少量高次谐波^[11]。

鉴于多脉波不控整流在大功率场合的优势,结合现有的电气化铁路同相供电理论,本文提出一种采用不控整流和 PWM 逆变相结合的同相供电方式。分析了该同相供电方式的系统结构、工作原理及其在增减载工况下的供电性能,并在 Matlab/Simulink 平台上建立了系统模型,通过仿真证明其正确性与可行性。

1 新型同相供电系统结构

同相供电是指整个牵引供电系统中,所有牵引变电所负载侧的电压幅值、相位保持一致的供电方式,能够取消电分相环节,迎合电气化铁路高速、重载的需求。为避免故障时出现环流,保持各牵引变电所的独立性以便于检修,只需在相邻的变电所之间安装分段器,邻近的牵引变电所可互为备用。本文只讨论单独牵引变电所的情形。

新型同相供电方式的系统结构如图 1 所示。

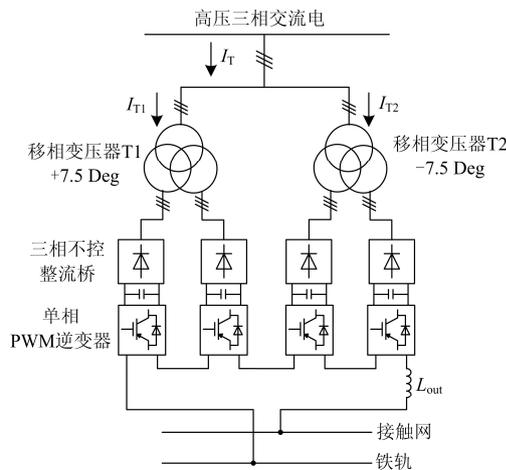


图 1 同相供电方式的系统结构

Fig. 1 Structure of cophase power supply system

该同相供电系统中,三相高压先经两台并联的整流变压器降压,每台变压器设有两个次边绕组,分别为 Y 型和 Δ 型接线,绕组线圈的匝数比为 $1:\sqrt{3}$,形成一对幅值相同、彼此错开 30° 相位角的电压,分别接入 6 脉波不控整流电路,控制各个整流电路的功率使其保持一致,即得到与 12 脉波整流电路相同的输入电流谐波水平。两个整流变压器原边利用延边绕组分别移相 $+7.5^\circ$ 和 -7.5° ,使两变压器电压形成 15° 相位差,若变压器二次侧功率均相等,对于高压母线而言,牵引变电所即可等效为一个 24 脉波整流电路负载,输入电流谐波较小,功率因数高,不需要添加额外的滤波装置。整流电路输出的直流电压经双闭环控制的级联 H 桥变流器进行逆变,形成单相 27.5 kV 电压并通过平波电抗供给接触网。整个线路中所有逆变器调制波的参考相位信息由 GPS 同步时钟和正弦信号发生器确定,保证整个线路中逆变器的输出电压相位保持一致。

2 三相-单相变换的实现方式

2.1 整流侧实现方式

目前在大功率整流场合中,综合考虑电力电子器件的耐压耐流水平和交流侧输入谐波含量,12 脉波整流和 24 脉波整流的应用最为广泛^[12]。12 脉波整流电路中,忽略移相变压器的移相角,根据三相整流电路的特点^[13],变压器 T1 网侧输入电流的傅立叶展开式为

$$I_{T1} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega t - \frac{1}{11} \sin 11 \omega t - \frac{1}{13} \sin 13 \omega t + \frac{1}{23} \sin 23 \omega t + \frac{1}{25} \sin 25 \omega t + \dots) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \sin \omega t + \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \sum_{m=12k \pm 1}^{\infty} (-1)^k \frac{1}{m} \sin \omega t \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中, I_d 为直流侧电流。若两个整流变压器移相后并联运行,形成等效 24 脉波整流电路,两变压器网侧输入总电流更接近正弦波,其傅立叶展开式为

$$I_T = I_{T1} + I_{T2} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega t - \frac{1}{23} \sin 23 \omega t - \frac{1}{25} \sin 25 \omega t + \frac{1}{47} \sin 47 \omega t + \frac{1}{49} \sin 49 \omega t + \dots) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \sin \omega t + \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \sum_{n=24k \pm 1}^{\infty} (-1)^k \frac{1}{n} \sin \omega t \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

由式(1)可知, 12 脉波整流电路的输入电流消除了 6 脉波整流中的 3、5 次等含量较大的低次谐波, 但 11、13 次谐波含量依然较高, 输入电流的总谐波畸变率(THD)较大。通常以添加补偿装置或辅助电路的形式降低 11、13 次谐波, 使输入电流的 THD 接近 24 脉波整流电路的水平^[14], 但这需要增加额外投资, 且降低了系统可靠性。式(2)表明, 24 脉波整流的输入电流中, 低次谐波已经消除, 高次谐波主要为 23、25 次, 且含量较低。由于线路阻抗与谐波次数成正比, 对于少量的 23、25 次谐波而言, 线路阻抗较大, 谐波衰减速度快, 因此可以不添加输入侧滤波装置。目前 24 脉波整流电路已广泛应用在地铁、城轨和矿井牵引供电等大功率场合, 工程运用较为成熟, 性能及可靠性高。兼顾输入谐波和牵引供电系统的容量要求, 本文以多个 6 脉波整流电路通过变压器并联运行的方式, 使高压母线侧的输入电流谐波降低至 24 脉波整流电路的水平, 其结构如图 2 所示, 为便于展示, 图中变压器的每个二次侧仅接入一个整流电路。

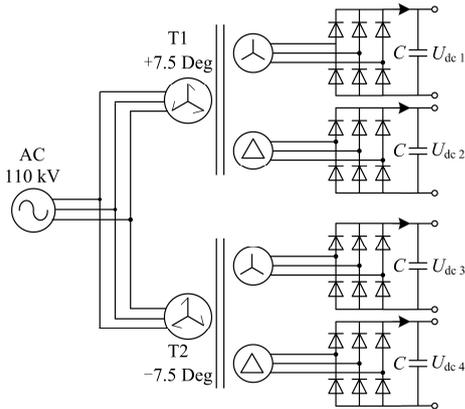


图 2 整流侧电路结构

Fig. 2 Structure of rectifier circuit

6 脉波整流电路输出的空载直流电压平均值与输入交流线电压有效值的关系为

$$U_{dc} = 1.35U_{in} \quad (3)$$

在实际工程应用中, 考虑到变流器输出电压和器件的耐压耐流水平, 变压器各二次侧需要接入 n 个整流电路, 形成 $4n$ 个直流电压, 只需控制整流电路的输出功率, 使变压器各个二次侧承担的总功率一致, 这样反映到高压母线侧的输入电流谐波就与 24 脉波整流电路相同。本文变压器的每个二次侧接入 4 个相同的整流电路, 形成 16 个直流电压。

多脉波不控整流的一个显著缺点是输出直流电压不可调, 且稳定性较差, 容易随着负载的改变而波动。因此在逆变侧需要优化控制方式, 抑制直流

侧电压波动给交流输出电压带来的不良影响。

2.2 逆变侧实现方式

逆变侧需要输出稳定的 27.5 kV 交流电压, 由于目前电力电子器件耐压耐流水平的限制, 一般将器件串并联来承受高压、大电流, 但这需要采取额外的控制电路对器件进行均压、均流。目前在高压大功率场合通常使用多电平技术^[15], 多电平技术能够大大降低电力电子器件的耐压耐流要求, 减小开关频率, 同时使得输出电压更接近正弦。在文献[10]提出的同相供电方案中, 逆变侧采用了二极管箝位式五电平 PWM 变流器, 该变流器不易向更多的电平数扩展, 且需要大量的箝位二极管, 增加了逆变侧成本。

相对于飞跨电容型和二极管箝位型, H 桥级联多电平逆变器不需要箝位电容和箝位二极管, 易于实现模块化, 可根据输出电压和容量要求灵活选择串联的模块数, 便于设置冗余单元。鉴于上述优势, 本文采用 H 桥级联多电平逆变器, 结合算法较简便的 SPWM 调制方式。常用的 SPWM 调制方式主要有载波层叠(CD)与载波移相(CPS)两类, 载波移相调制方式的突出优点是可以自然实现各个 H 桥逆变电路的功率均衡^[16], 使整流变压器各个二次侧的功率保持一致, 因此本文采用载波移相 SPWM 调制策略, 如图 3 所示。H 桥级联多电平变流器中, N 个逆变模块共用一个调制波, 各自的载波依次移相 π/N 角度, 其运算不随着模块数的增加而变得复杂, 控制器的运算量较小。等效开关频率为实际频率的 $2N$ 倍, 随着 N 的增大, 输出电压更接近正弦波, 可以适当降低开关频率, 以 GTO 等器件代替 IGBT 来减小开关损耗。此外电力电子器件承受的电压变化率变小, 降低了电磁干扰(EMI)。 N 个逆变器输出侧串联形成 27.5 kV 交流电压, 通过平波电抗连接至接触网。

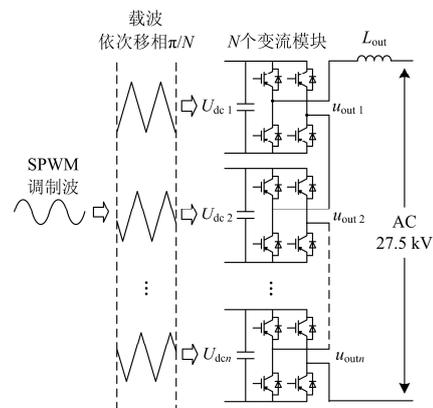


图 3 H 桥级联多电平变流器结构

Fig. 3 Structure of cascaded H-bridge multilevel converter

针对不控整流电路直流电压不可调，且容易随着负载的改变而波动的特点，逆变侧利用电压有效值和瞬时值双闭环控制，抑制直流电压波动给逆变侧输出电压带来的不良影响，为负载提供稳定的电压支撑。电压有效值和瞬时值双闭环控制方式如图 4 所示。

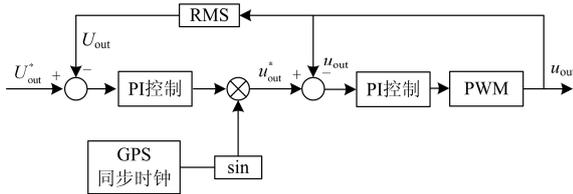


图 4 电压有效值和瞬时值双闭环控制

Fig. 4 Voltage effective value and instantaneous value double closed-loop control

在该控制方式中，给定逆变侧输出的交流电压有效值 U_{out}^* (此处取 27.5 kV)，对实际输出电压 u_{out} 进行计算，取其有效值 U_{out} ，与 U_{out}^* 对比后经 PI 控制器进行调节，避免电压有效值出现较大偏差，电压有效值和正弦信号相乘，形成输出电压瞬时指令值 u_{out}^* ， u_{out} 与瞬时电压指令值 u_{out}^* 比较后经 PI 控制器进行调节，形成多电平级联 SPWM 逆变器的控制信号。其中正弦信号采用 GPS 同步时钟提供相位信息，以确保整个线路中所有牵引变电所的输出电压相位一致，实现同相供电。

3 仿真分析

根据上文分析的整流侧和逆变侧实现方式，在 Matlab/Simulink 平台上建立基于三相-单相变换的同相供电系统单个牵引变电所模型。两台移相整流变压器的各个二次侧均并联连接 4 个整流电路，每个整流电路的直流输出端经并联电容与 H 桥逆变器连接，可将不控整流电路、储能电容和 H 桥逆变器视为一个变换单元，共形成 16 个变换单元。根据式(3)所述的输入输出电压关系，将整流变压器的变比设为 110 kV/3.3 kV，等腰三角形载波频率为 1000 Hz，16 个变换单元输出侧串联形成 27.5 kV 交流电压。鉴于当前电力机车正逐步向交直交型转变，其谐波含量低，功率因数接近 1，在此以纯电阻模拟机车负载。0~0.15 s 时负载电阻为 200 Ω；0.15 s 时增载，电阻变为 100 Ω；0.3 s 时减载，电阻变为 400 Ω。整流电路的直流侧平均电压如图 5 所示，可以看出直流电压在 0.15 s 和 0.3 s 时分别出现了较大幅度的突降和突增，这是由不控整流电路的输出特性所致，且不可调节。

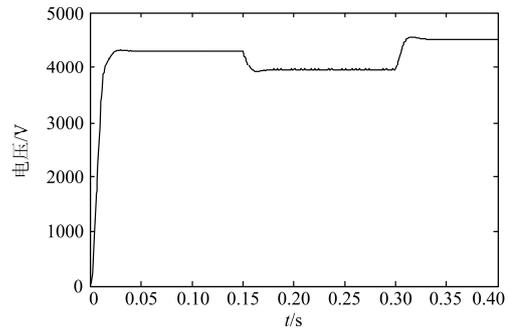


图 5 整流电路的直流侧平均电压

Fig. 5 Average DC side voltage of rectifier

若不加入闭环控制，逆变侧输出电压必然会随着直流电压的波动而产生更大的误差，加入电压有效值和瞬时值双闭环控制后，直流侧波动引起的逆变侧输出电压波动幅度变小，且能够很快恢复至给定值，无电压闭环控制和含电压闭环控制情况下的接触网电压如图 6 所示。

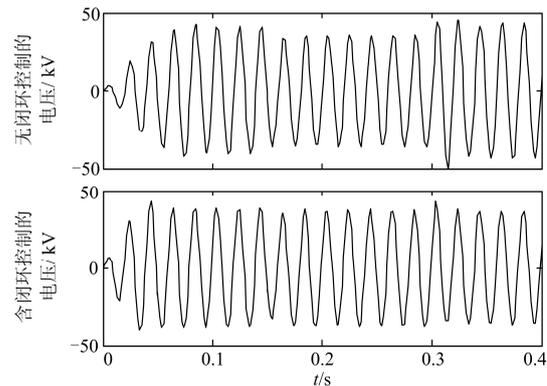


图 6 接触网电压

Fig. 6 Voltage of contact line

变换单元的输出电压如图 7 所示，其中前 3 行是单个逆变器输出的电压 PWM 波形(共 16 个变换单元，此处仅列出其中 3 个)，第 4 行是 16 个变换单元输出端串联后形成的总电压，可以看出总输出电压波形接近正弦波，经平波电抗与接触网连接后，接触网电压质量较高。

由于所有的逆变器以串联方式运行，其电流相同，电压共用一个调制波，因此电压基波也相同，串联的逆变器输出电流和 3 个变换单元的功率如图 8 所示(共 16 个变换单元，此处仅列出其中 3 个)，可以看出变换单元的功率一致，反映到整流变压器各个二次侧的总功率相等，因此高压母线的输入电流谐波可以降低至 24 脉波不控整流电路的水平。

基于三相-单相变换的新型同相供电系统方案能够实现贯通式供电，从而使得牵引供电系统能够独立于上一级高压电网^[17]，主动消除了负序，降低了谐波含量，并显著改善了功率因数。

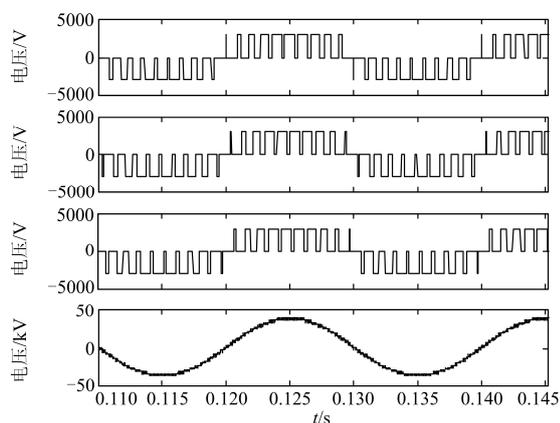


图7 逆变器输出电压

Fig. 7 Output voltage of inverter

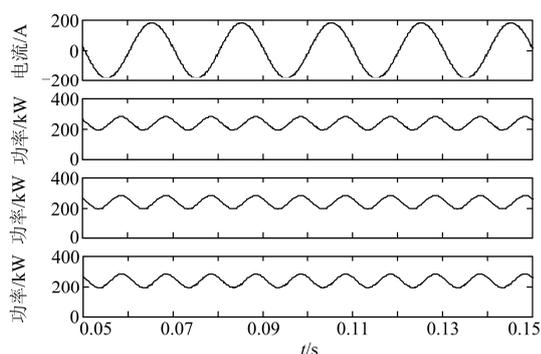


图8 逆变侧电流和变换单元的功率

Fig. 8 Current of inverter side and power of converter units

4 结论

本文在现有同相供电理论的基础上, 提出了一种基于三相-单相变换的新型同相供电方式, 其整流侧采用低价、高性能、高可靠性的不控整流电路, 逆变侧采用由电压有效值和瞬时值双闭环控制的SPWM逆变器, 结合易于实现的CPS-PWM调制方式, 能够为接触网提供稳定的电压支撑。目前国内尚无基于三相-单相变换的同相供电系统投入使用, 本文所述方案可以为实现贯通式同相供电提供一种新的思路。

该同相供电方式存在一个显著缺陷, 即机车在再生制动等工况下产生的能量不能回馈至电网, 这是由不控整流电路不具备四象限运行的能力所致。但随着AT供电方式和上、下行接触网并联运行方式的普及, 结合先进的调度方案使得列车行驶密度增大, 一个牵引变电所供给两列及以上电力机车的概率很大, 机车产生的能量不仅可以供其自身设施用电, 还可以通过接触网供给同一线路上的其他机车, 因此需要回馈的能量并不多。若采用双边供电甚至贯通式同相供电方式, 则能量完全不需要回馈,

这样相对于PWM整流器, 廉价、控制简单、损耗小、可靠性高的不控整流器更能在电气化铁路供电系统中显示其巨大优势。

参考文献

- [1] 周末, 王果, 常文寰, 等. 适于电气化铁路的三相两臂混合有源补偿研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 100-104.
ZHOU Mo, WANG Guo, CHANG Wenhuan, et al. Study on hybrid active compensation based on three-phase two-leg inverter for electrification railway[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 100-104.
- [2] 罗培, 陈跃辉, 罗隆福, 等. 铁路电能质量控制系统容量优化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 181-188.
LUO Pei, CHEN Yuehui, LUO Longfu, et al. Railway power quality manage system capacity optimization design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 181-188.
- [3] 张晨萌, 陈柏超, 袁佳歆, 等. 基于V/V牵引变压器的同相供电系统电能质量混合补偿研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 496-504.
ZHANG Chenmeng, CHEN Baichao, YUAN Jiixin, et al. Research on a hybrid compensation system for V/V co-phase railway power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 496-504.
- [4] 李群湛, 贺建闽. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 9-11.
LI Qunzhan, HE Jianmin. Electrified railway feeding system without phase exchange and symmetrical compensation technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4): 9-11.
- [5] 曾国宏, 郝荣泰. 基于有源滤波器和阻抗匹配平衡变压器的同相牵引供电系统[J]. 铁道学报, 2003, 25(3): 49-54.
ZENG Guohong, HAO Rongtai. Cophase traction supply system based on active power filter and impedance-matching balance transformer[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(3): 49-54.
- [6] 曾国宏, 郝荣泰. 采用有源滤波器实现平衡变换的供电系统研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 48-53.
ZENG Guohong, HAO Rongtai. A novel three-phase balanced traction supply system based on active power filter[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 48-53.
- [7] 张秀峰, 李群湛, 吕晓琴. 基于有源滤波器的V, v接同相供电系统[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 98-103.
ZHANG Xiufeng, LI Qunzhan, LÜ Xiaoqin. V, v connection cophase power supply system based on active

- power filter[J]. China Railway Science, 2006, 27(2): 98-103.
- [8] 张秀峰, 连级三. 基于斯科特变压器的新型同相 AT 牵引供电系统[J]. 机车电传动, 2006(4): 14-18.
ZHANG Xiufeng, LIAN Jisan. A new cophase AT traction power supply system based on Scott transformer[J]. Electric Drive for Locomotives, 2006(4): 14-18.
- [9] 赵元哲, 朱鹏, 李群湛. 基于 YNvd 平衡变压器和模拟负载的同相供电试验系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 143-148.
ZHAO Yuanzhe, ZHU Peng, LI Qunzhan. Co-phase supply test system based on YNvd balanced transformer and simulated load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 143-148.
- [10] HE Xiaoqiong, SHU Zeliang, PENG Xu, et al. Advanced cophase traction power supply system based on three-phase to single-phase converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5323-5333.
- [11] 陆佳政, 朱思国, 李波, 等. 特高压输电线路直流融冰交流系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 124-129.
LU Jiazheng, ZHU Siguo, LI Bo, et al. DC ice-melting converter system design for EHV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 124-129.
- [12] 王铁军, 方芳, 姜晓弋, 等. 圆形变压器在 24 脉波整流系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 172-179.
WANG Tiejun, FANG Fang, JIANG Xiaoyi, et al. Application of round-shaped transformers in 24 pulses rectifier systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 172-179.
- [13] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [14] FUKUDA S, OHTA M, IWAJI Y. An auxiliary-supply-assisted harmonic reduction scheme for 12-pulse diode rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1270-1277.
- [15] 汪玉凤, 张立, 褚占军. 载波调换调制技术在级联多电平 SAPF 中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 14-18.
WANG Yufeng, ZHANG Li, CHU Zhanjun. Application of carrier exchange modulation technique in multi-level cascaded SAPF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 14-18.
- [16] 孙宜峰, 阮新波. 级联型多电平逆变器的功率均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 126-133.
SUN Yifeng, RUAN Xinbo. Power balance control schemes for cascaded multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 126-133.
- [17] 陈民武, 宫衍圣, 李群湛, 等. 电气化铁路电能质量评估及新型控制方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 141-147.
CHEN Minwu, GONG Yansheng, LI Qunzhan, et al. Assessment of power quality of electrified railway and the research on the new control scheme[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 141-147.

收稿日期: 2016-03-09; 修回日期: 2016-04-09

作者简介:

漆炜之(1975-), 男, 高级工程师, 长期从事电力生产、电网规划等技术及管理工作;

刘全景(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, 牵引同相供电理论. E-mail: liuquanjing2010@163.com

(编辑 葛艳娜)