

应用于电气化铁路的级联储能装置及其功能验证

申志广¹, 张金斗¹, 王 建¹, 王海洋²

(1. 山东华天电气有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 随着高比例新能源的不断接入, 电网面临着新能源消纳困难的挑战, 同时也对电气化铁路安全稳定运行造成了不利影响。提出了一种电气化铁路级联储能装置方案, 旨在解决电气化铁路面临的新能源消纳、负序与谐波的难题。首先, 介绍了电气化铁路的电能质量问题原因及危害, 以及储能在电气化铁路中的应用研究现状; 然后, 在牵引供电系统常用的 V/v 接线方式下, 详细介绍了现有铁路供电网中如何通过级联储能装置实现新能源消纳、负序与谐波治理功能; 最后, 进行了仿真分析以及功能验证, 结果表明所述方案具有可行性。

关键词: 级联储能; 电气化铁路; 综合补偿技术; 新能源消纳

Cascaded energy storage application to electrified railway and its function simulation

SHEN Zhiguang¹, ZHANG Jindou¹, WANG Jian¹, WANG Haiyang²

(1. Shandong Hoteam Technologies Co., Ltd., Jinan 250101, China;

2. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: With the continuous access of high proportion of new energy, the power grid was faced with the challenge of new energy consumption, and the electrified railway safety and stability was also impacted. The Cascaded Energy Storage device of electrified railway was proposed. The device aimed to use single device to realize negative sequence current and harmonic current comprehensive compensation solution, new energy consumption and catenary ice melt. The causes and hazards of electrified railway power quality problems, the application and research status of electrified railway energy storage were introduced. Based on common three-phase V/v transformer, how to realize negative sequence and harmonic current compensation, new energy consumption were proposed in detail. The proposed device function effectiveness was verified by both simulation and physical objects.

Keywords: cascaded energy storage; electrified railway; comprehensive compensation solution; new energy consumption

0 引言

电气化铁路中牵引供电系统的电能质量问题主要包括谐波、无功以及三相不平衡。由于牵引

供电系统的线路较长, 极易发生谐波放大, 我国自2007年高速铁路运行以来已发生多起谐振事故^[1]; 负序电流会污染电网, 也造成发电机振动

并产生额外损耗；此外，牵引供电系统的低频振荡问题已经严重影响了机车的稳定运行^[2]。我国目前所采用的牵引供电方式多为三相110 kV或220 kV供电系统，采用单相27.5 kV牵引供电，变压器主要采用Y/△或V/v接线方式，这种接线方式造成高压侧负序分量增大，目前常采用轮转换向和分相分区的供电策略，以降低电力系统公共连接点的三相不平衡。电气化铁路的电能质量不仅影响自身的安全稳定运行，也对电网中的其他设备造成影响，特别是对一些新能源占比高的薄弱电网，其影响将更为严重^[3]。因此，电气化铁路的电能质量问题获得了广泛关注。

国内外对电气化铁路的电能质量负序和谐波问题进行了大量研究。文献[4]提出了同相供电技术，但两端网络不能完全补偿负序电流，在一些场合会造成系统功率因数降低，损耗加大；而采用多端口网络的同相供电技术需对变电所进行大量改造，因而不能完全适配现有牵引供电网络。国外学者根据所在国家铁路特点，主要研究方向为通过铁路调度优化以及铁路功率调节器（Railway Power Conditioner, RPC）供电方式来提升电能质量^[5-6]。我国由于新能源的大力发展，目前新能源的消纳难也成为了亟待解决的问题。电气化铁路作为我国用电大户，未来承担的新能源消纳任务极为艰巨^[7]。由于机车负载周期性和可预测性，文献[8-10]将储能与新能源系统接入RPC系统直流侧，采用变压器升压的低压储能方案以及同相供电系统，实现新能源发电的利用。此外，“源-网-车-储”一体化供电系统^[11]进一步提高了新能源的消纳。文献[12]利用飞轮储能和超级电容储能实现对再生制动能量的吸收。

综上所述，我国目前电气化铁路存在电能质量和新能源消纳问题，由于现有的方案配置成本高、占地面积大且需要对现有变电站进行改造以满足功能，因此难以进行大面积推广。本文提出一种应用于电气化铁路的级联储能装置方案，不仅具有三相不平衡、谐波及无功补偿功能，而且能够通过能量存储解决新能源消纳问题，具有很高的经济性和实用效益。

1 级联储能装置综合控制方案

高压级联储能技术^[13]近些年在电力系统获得了大量应用，与传统的低压电化学储能相比，具有如下优势：去除了变压器设备，提升了5%的转化效率；占地面积节约20%~30%；设备采用模块化电池仓，便于维护，也便于散热风道设计，电池工作整体一致性高，电池管理系统（Battery Management System, BMS）便于监控与控制；响应速度快，准确度高；初始安装容量与传统电化学储能相比低6%~7%；在大容量储能配置中更具优势，用于牵引供电系统的高压级联储能装置。V/v接线的变压器高压级联储能方案如图1所示。

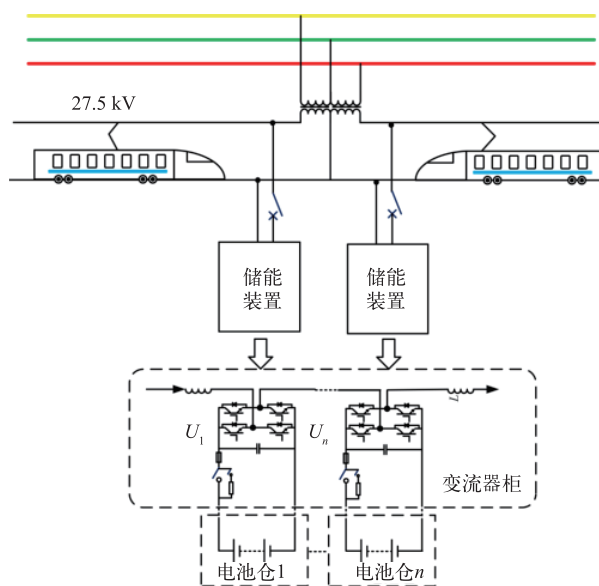


图1 V/v接线变压器高压级联储能方案

Fig. 1 High-voltage cascaded energy storage scheme of V/v transformer

级联储能装置接于铁路变电所27.5 kV供电臂上，其储能系统由电池仓、变流器柜组成。每个电池仓与变流器模块组成一个级联单元，各级联单元通过串联方式接入牵引供电系统，为了降低开关频率造成的高次谐波污染，增加了输出滤波电抗器。级联储能装置控制系统的工作原理为：通过采集电力系统公共连接点（Point of Common Coupling, PCC）的电压和电流，对PCC点的有功、无功、谐波大小以及所在分时电价区间生成指令信号。由主控制器将指令下发到

各个级联单元，级联单元控制器根据自身的母线电压以及储能状态微调指令，通过H桥电路输出对应的电流，实现补偿的功能。

2 级联储能装置数学模型及补偿机理

我国牵引供电所PCC电压等级多为110 kV或220 kV，牵引供电系统采用27.5 kV，牵引供电系统以B相为公共端的V/v接线变压器的两侧电流、电压关系为

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \frac{1}{K} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix} = \frac{1}{K} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中， I_a 、 I_b 、 I_c 分别为PCC A相、B相、C相的相电流； U_a 、 U_b 、 U_c 分别为PCC A相、B相、C相的相电压； I_α 、 I_β 分别为供电臂 α 、 β 的电流； U_α 、 U_β 分别为供电臂 α 、 β 的电压； K 为变压器电压比， $K=U_L/U_\alpha$ ， U_L 为PCC点线电压，令A相电压初相角为0，即 $U_a=\sqrt{2}U\cos\omega t$ ，其中 U 为系统相电压， ω 为角频率。

利用锁相环生成有效值为1的方向向量，则有 $e_a=\sqrt{2}U\cos\omega t$ 。根据式(2)得

$$\begin{cases} e_{\alpha p} = \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \\ e_{\alpha q} = \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \\ e_{\beta p} = \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ e_{\beta q} = \sqrt{2} \cos(\omega t + \pi) \end{cases} \quad (3)$$

式中， $e_{\alpha p}$ 、 $e_{\alpha q}$ 分别为供电臂 α 的基波有功与无功方向向量； $e_{\beta p}$ 、 $e_{\beta q}$ 分别为供电臂 β 的基波有功与无功方向向量。

PCC三相电流一般表达式为

$$\begin{cases} i_a(t) = \sum_{n=1}^m \sqrt{2} I_{an} \cos(n\omega t - \varphi_{an}) \\ i_b(t) = -i_a(t) - i_c(t) \\ i_c(t) = \sum_{n=1}^m \sqrt{2} I_{cn} \cos(n\omega t - \varphi_{cn}) \end{cases} \quad (4)$$

式中， n 为谐波次数； m 为最高次谐波； φ_{an} 、 φ_{cn} 分别为A相、C相 n 次谐波相角。

将式(1)、式(3)代入式(4)中，得

$$\begin{cases} i_{\alpha p} = KI_{a1} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{a1}\right) e_{\alpha p} \\ i_{\alpha q} = KI_{a1} \sin\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{a1}\right) e_{\alpha q} \\ i_{\alpha h} = \sum_{n=2}^m \sqrt{2} I_{Lan} \cos(n\omega t - \varphi_{an}) \\ i_{\beta p} = KI_{c1} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{c1}\right) e_{\beta p} \\ i_{\beta q} = KI_{c1} \sin\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{c1}\right) e_{\beta q} \\ i_{\beta h} = \sum_{n=2}^m \sqrt{2} I_{cn} \cos(n\omega t - \varphi_{cn}) \end{cases} \quad (5)$$

式中， $i_{\alpha p}$ 、 $i_{\alpha q}$ 、 $i_{\alpha h}$ 分别为供电臂 α 的基波有功电流、无功电流和谐波分量； $i_{\beta p}$ 、 $i_{\beta q}$ 、 $i_{\beta h}$ 分别为供电臂 β 的基波有功电流、无功电流和谐波分量。

从式(5)可以看出，通过在供电臂上调整有功、无功以及谐波分量，能够使系统电能质量满足电网要求。

忽略谐波分量时，V/v接线的补偿向量图如图2所示。图中， $I'_{\alpha p}$ 、 $I'_{\alpha q}$ 分别为供电臂 α 补偿并反馈到PCC的无功电流和有功负序电流， $I'_{\beta p}$ 、 $I'_{\beta q}$ 分别为供电臂 β 补偿并反馈到PCC的无功电流和有功负序电流。补偿后电流 $I_a = I_a + I'_{\alpha p} + I'_{\alpha q}$ ， $I_c = I_c + I'_{\beta p} + I'_{\beta q}$ ，补偿后的电流满足 $|I_a|=|I_b|=|I_c|$ 且与各相电压同相位。

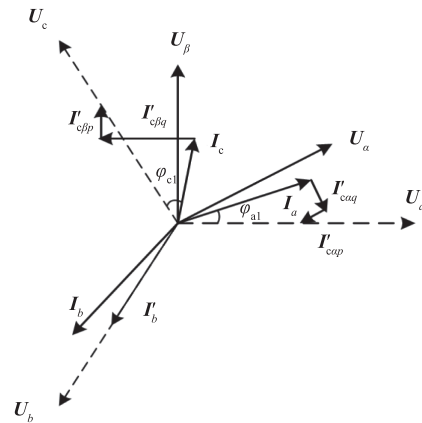


图2 补偿原理向量图

Fig. 2 Compensation principle vector diagram

两供电臂有功功率 P_α 、 P_β 计算式为

$$P_\alpha = i_{\alpha p} u_{\alpha p} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_L I_{a1} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{La1}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} U_L I_{a1} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{La1}\right) \cos^2\left(2\omega t - \frac{\pi}{3}\right) + e_{\beta p} \quad (6)$$

$$\sum_{n=2}^m \sqrt{2} I_{an} \cos(n\omega t - \varphi_{an}) e_{\alpha p} + S_\alpha P_{b\alpha}$$

$$P_\beta = i_{\beta p} u_{\beta p} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_L I_{c1} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{c1}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} U_L I_{c1} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{c1}\right) \cos^2\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) e_{\beta p} + \quad (7)$$

$$\sum_{n=2}^m \sqrt{2} I_{cn} \cos(n\omega t - \varphi_{cn}) e_{\beta p} + S_\beta P_{b\beta}$$

式中, u_α 、 u_β 分别为供电臂 α 、 β 的电压瞬时值, 其方向分别与 $e_{\alpha p}$ 、 $e_{\beta p}$ 一致; U_α 、 U_β 分别为供电臂 α 、 β 的电压有效值, 且 $U_\alpha = U_\beta$; S_α 、 S_β 分别为供电臂 α 、 β 上的储能装置主动充放电状态, 主动充电状态为1, 主动放电状态为-1, 未开启为0; $P_{b\alpha}$ 、 $P_{b\beta}$ 为储能装置充放电功率。

S_α 、 S_β 及 $P_{b\alpha}$ 、 $P_{b\beta}$ 可以根据峰谷电价及荷电状态(State of Charge, SOC)等参数进行调节以实现新能源消纳, 其控制原理如图3所示。

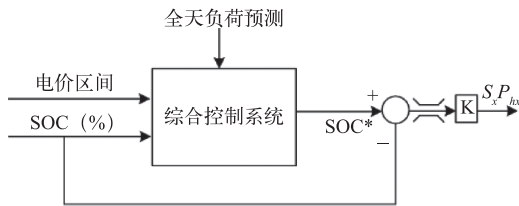


图3 储能装置SOC控制原理

Fig. 3 Principle of SOC control

综合控制系统的主要功能是根据电价区间以及储能电池状态进行充放电管理, 能够充分利用铁路运行的可预测特点, 对储能装置进行充放电管理, 以保证在高电价区间释放能量, 在低电价区间吸收能量, 进而实现降低铁路运行成本和节能减排的目的。同时, 为保证设备可靠运行, 增加限幅与区间控制, 保证SOC在正常工作范围内。

总的稳态功率大小为

$$\bar{P} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_L I_{a1} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{La1}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} U_L I_{c1} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi_{Lc1}\right) + S_\alpha P_{b\alpha} + S_\beta P_{b\beta} \quad (8)$$

式(8)不适合用于控制, 利用式(6)、式(7)得到

$$\bar{P} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_L i_{a1} e_{\alpha p} + \frac{\sqrt{2}}{2} U_L i_{c1} e_{\beta p} + S_\alpha P_{b\alpha} + S_\beta P_{b\beta} \quad (9)$$

将总的稳态功率平均分配到PCC三相中, 各相稳态功率为 $\bar{P}/3$, 此时补偿后两供电臂电流为

$$\begin{cases} i'_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\bar{P}}{U_\alpha} \cos \omega t \\ i'_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\bar{P}}{U_\beta} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (10)$$

由式(5)和式(10)得到补偿后电流为

$$I_{cxp} = \frac{P}{\sqrt{3}U_x} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{\sqrt{3}}{2} e_{xp} = K_p \frac{P}{2\sqrt{2}U_x} e_{xp} - i_{xp}$$

$$I_{cxq} = \frac{P}{\sqrt{3}U_x} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{2} e_{xq} = K_q \frac{P}{2\sqrt{6}U_x} e_{xq} - i_{xq} \quad (11)$$

$$I_{chx} = -i_{hx}$$

$$I_{cx} = I_{cxp} + I_{cxq} + I_{chx}$$

式中, I_{cxp} 、 I_{cxq} 、 I_{chx} 分别为补偿有功分量、无功分量与谐波分量; x 为供电臂标识 α 、 β ; 储能装置 K_p 、 K_q 分别为有功、无功补偿度(取值范围0~1), 全补偿时均为1。 K_p 、 K_q 可根据负序允许电流以及实际负序电流进行自适应调节, 以满足负序补偿度的要求。

补偿电流检测原理如图4所示。

$P_b^* = S_\alpha P_{b\alpha} + S_\beta P_{b\beta}$, 表示储能装置从电网吸收或释放的有功功率, 即图3输出信号; PLL为锁相环, 用于获取供电臂的方向向量; FFT为快速傅里叶算法, 用于获取供电臂谐波分量; LPF为低通滤波器, 用于获取稳态有功分量。

控制原理如图5所示。装置控制分为功率控制和SOC均衡控制。功率控制环节包含总补偿电流经过PI闭环控制的电流指令信号、总直流母线经过PI闭环控制的电压指令信号以及交流电压前馈控制得到的功率控制指令 i_{cx}^* 。SOC均衡控制环节包含各级联单元的SOC闭环控制与单元直流电压控制。SOC闭环控制用于实现单个储能单元与平均SOC之间的均衡, 保证各储能单元储存能量接近一致; 直流电压控制用以实现各功率模块出

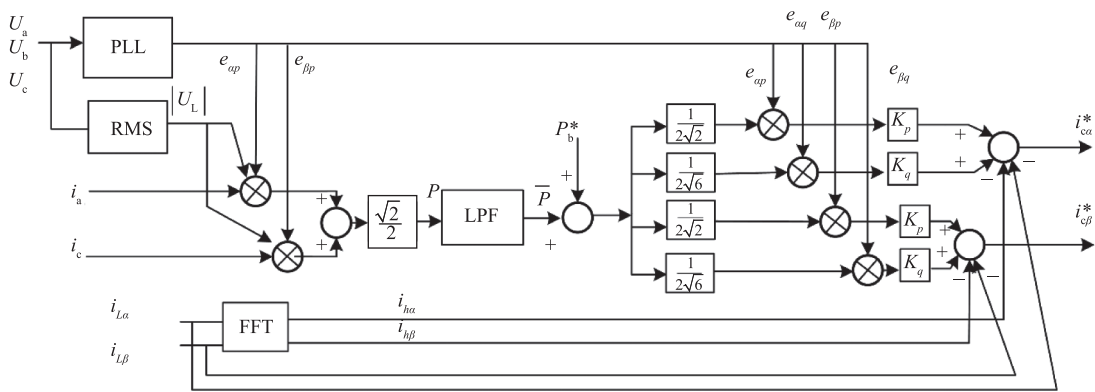


图4 补偿电流检测原理图

Fig. 4 Principle of compensation current detection

力均衡，保证各单元瞬时出力接近一致。将三者的和作为指令信号与载波进行比较，获取指令信号驱动功率柜的H桥电路得到相应的补偿电流。载波调制采用移相SPWM技术，使等效开关频率大大增加，降低设备输出谐波。

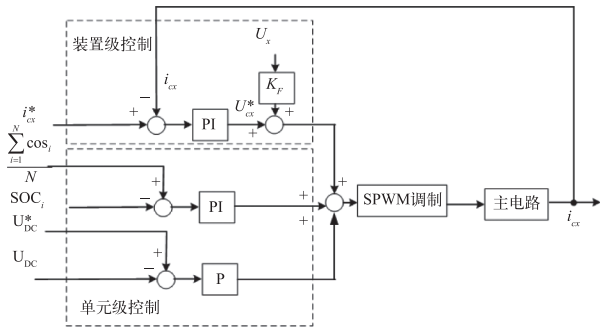


图5 控制原理图

Fig. 5 Principle diagram of compensating current control

储能容量配置可根据三相不平衡度情况、融冰功率和系统需求等进行设计。

3 功能仿真验证

利用MATLAB/Simulink建立仿真模型。以某货运铁路变电所数据作为仿真依据，详细参数见表1。

忽略电网电压波动的影响，假设整套设备能够在整个运行区间内完全补偿负序，储能装置配置为每个供电臂5 MW/4 MW·h，实际可根据负荷和负序要求进行调整。储能装置采用56个功率模块级联，单个模块装置开关频率为1 kW，两个单相电抗率均为3%，忽略器件损耗，均考虑

为理想器件。

表1 仿真参数表

Tab.1 Main simulation parameters

参数名称	说明
系统	供电电压 110 kV，短路容量 1 500 MV·A，供电距离 40 km
变压器	110 kV/27.5 kV，(20+20) MV·A VV-0 接线，短路阻抗 AB 座 8.57%，CB 座 8.63%，空载损耗 25.19 kW，负载损耗 159.62 kW
供电臂	车速 120 km/h，最小负荷 96 A，最大负荷 298 A，平均功率因数 0.93

3.1 负序谐波补偿功能仿真测试

考虑不平衡最严重的工况，当仅有一个供电臂供电且供电臂按照最大电流稳定运行时，系统的三相不平衡度最大。对仅有 α 供电臂的工况进行全补偿仿真验证。补偿前谐波含量如图6所示。PCC谐波畸变率为12.16%，其中3次谐波超标严重，3次谐波含有率为10.76%。

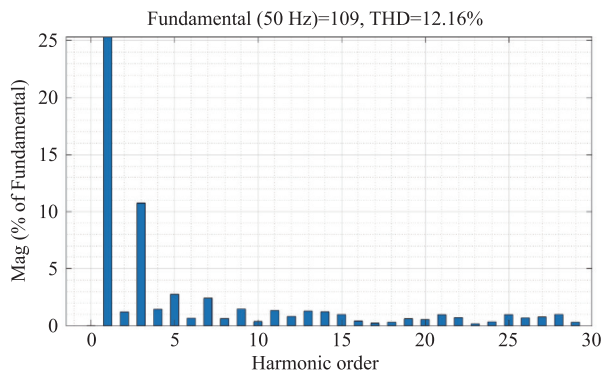


图6 滤波前 PCC 电流谐波 FFT 分析

Fig. 6 FFT analysis of PCC current harmonics before filtering

从图7~图9可以看出,只有 α 供电臂有电流,A相和B相有负荷电流,C相仅有微小的线路空载电流。此时负序电流最大。通过级联储能装置补偿后,系统谐波明显减少,从12.16%下降到1.74%,三相电流也趋于平衡。

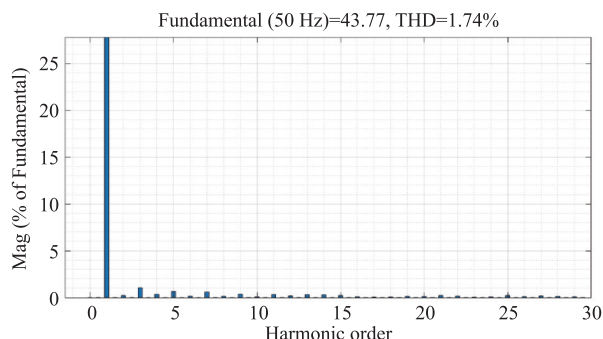


图7 滤波后PCC电流谐波FFT分析

Fig. 7 FFT analysis of PCC current harmonics after filtering

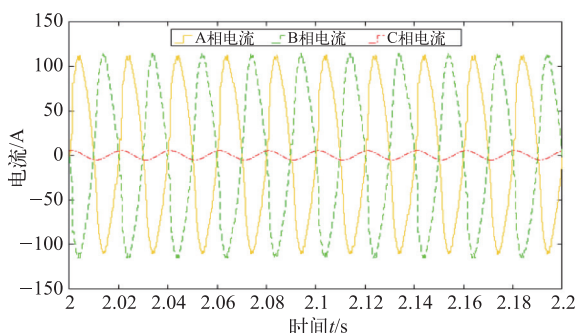


图8 补偿前三相电流

Fig. 8 Three phase current before compensation

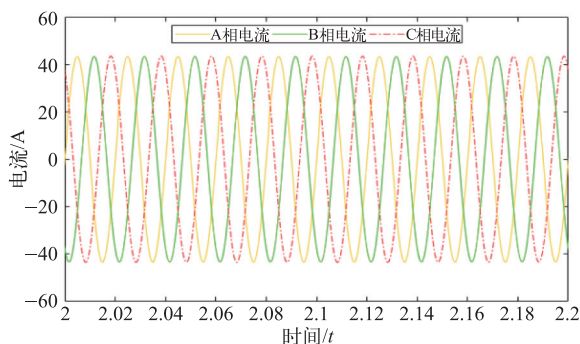


图9 补偿后三相电流

Fig. 9 Three phase current after compensation

3.2 综合控制储能功能仿真测试

主要用于测试综合控制功能,实现储能装置容量根据电价与SOC进行综合控制,对此部分进

行简化仿真测试,验证其综合控制功能。假定只有两个电价区间,在高电价区间4~7 s分别主动输出功率1.6 MW;在低电价区间7~10 s分别主动吸收功率0.8 MW。在整个仿真过程中,考虑机车 α 供电臂以最大负荷匀速运行, β 供电臂以最小负荷匀速运行。两套储能装置初始SOC为50%。

如图10和图11所示,0~2 s为储能装置待机工况,此时两供电臂负荷均由电网提供。由此可以看出:两供电臂负荷不平衡;2~4 s开启储能装置,仅进行不平衡和谐波补偿,不进行综合控制。此时,两供电臂电流逐渐均流, SOC_{α} 下降, SOC_{β} 开始上升,但从电网吸收的总功率保持不变;4~7 s进入高电价区间,此时储能装置主动释放能量, SOC_{α} 下降速率增加,由于机车不平衡负荷的存在, SOC_{β} 无法下降,但上升速率减缓,从电网吸收的总能量也开始下降;7 s后进入低电价区间,此时储能装置主动吸收能量, SOC_{α} 下降速率减缓, SOC_{β} 上升速率增加,从电网吸收的总功率也上升。

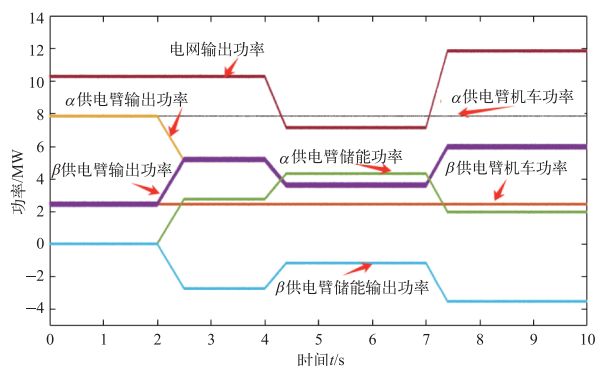


图10 不同运行模式功率变化图

Fig. 10 Power variation in different operating modes

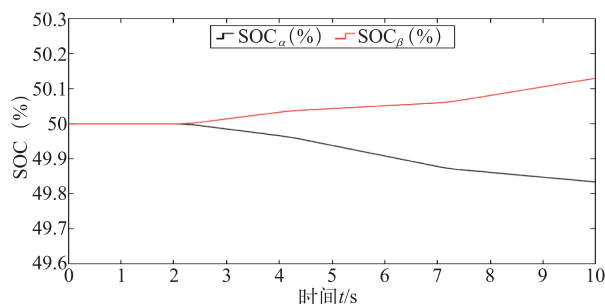


图11 两供电臂SOC%变化图

Fig. 11 Two power arm SOC variation

综上所述可以看出，通过下发指令，级联储能装置能主动调节输出功率，通过控制优化铁路运行成本，实现节能减排。

3.3 实验室功能验证

实验室采用35 kV系统进行PCC模拟实验，由于储能装置位于供电臂端，仅采集PCC的电流，电压等参数，该参数仅与PT/CT的电压比/电流比有关，故采用35 kV实验系统替代110 kV进行实验模拟是可行的。具体参数见表2。

表 2 实验系统相关数据表

Tab. 2 Relate data of experimental system

参数名称	说明
系统	供电电压 35 kV，系统容量 200 MV·A
变压器	35 kV/27.5 kV，（5+5）MV·A VV-0 接线，短路阻抗 AB 座 8.60%，CB 座 8.63%，空载损耗 5.8 kW，负载损耗 36 kW
采样	CT 电流比 400 A/5 A，PT 电压比 35 kV/0.1 kV
级联储能装置	2×5 MW/4 MW·h，单台 56 个模块级联配置 2×3% 的滤波电抗器，逆变器开关频率 1kW
单相负载系统	2×5 MV·A

利用单相负荷模拟器模拟机车运行过程，变电站供电时长为40 km/120 (km/h)≈0.33 h。分别考虑两车相向而行（ α 负荷最大， β 负荷最小）与仅单台机车 α 供电臂运行（不平衡最严重），为保证单机车工况下放电的充分性，将 α 、 β 供电臂储能装置分别充电至3 MW·h、1 MW·h。不同运行方式供电臂储能装置能量见表3。

表 3 不同运行方式供电臂储能装置能量

Tab. 3 The energy of feeding section storage device in different intervals

(单位: kW·h)				
运行方式	供电臂	时间	储能装置能量	储能装置释放能量
相向而行	α	运行前	2 010.3	1 549.0
		运行后	455.3	
	β	运行前	2 005.9	-354.1
		运行后	2 360.0	
单车运行	α	运行前	3 008.5	913.5
		运行后	2 095.0	
	β	运行前	1 006.2	1 965.2
		运行后	2 971.4	

供电臂的负荷为8.18 MW，根据式（6）～

式（10），以及理论计算与实测数据分析，可得：①理论计算相向运行时，储能装置释放能量分别为1.529 MW·h和-0.359 MW·h，由于设备损耗、变压器损耗等的存在，实际测试分别为1.555 MW·h与-0.354 MW·h，误差率为1.70%和1.39%；②理论计算单车运行时，储能装置释放能量分别为0.900 MW·h和-1.800 MW·h，实际测试为0.914 MW·h和-1.765 MW·h，误差率为1.56%和1.9%，由于设备的损耗通常在1%左右，可以认为与理论计算基本一致。

由于相向运行时，系统的不平衡和谐波比例与单车运行时占比小得多，故仅列出单车运行的不平衡谐波补偿前后波形，如图12、图13所示。图中黄色代表PCC A相电压；绿色、紫色、红色分别代表PCC A、B、C相电流。可以看出，补偿前C相电流仅有很小的容性电流，系统的不平衡度高；在补偿开启后，三相电流接近于平衡。

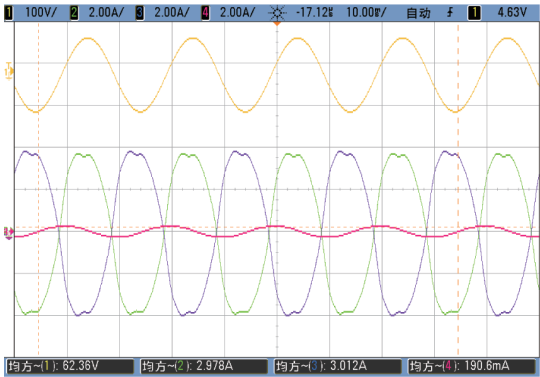


图 12 补偿前系统电压电流波形

Fig. 12 Three phase system voltage current before compensation

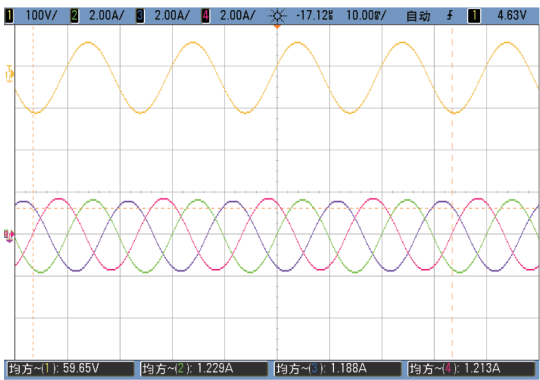


图 13 补偿后系统电压电流波形

Fig. 13 Three phase system voltage current after compensation

4 结束语

针对电气化铁路存在的谐波以及不平衡问题,利用向量分解,给出谐波补偿以及不平衡补偿的补偿电流公式。利用级联储能装置调整PCC的有功、无功以及谐波,实现系统补偿以及新能源消纳。采用功率级控制以及SOC均衡控制,实现电流输出以及各储能模块间的均衡控制。通过仿真和实验验证了策略的有效性。与其他方案相比,在我国现有供电系统中,采用级联装置无须对变电所牵引变进行大幅度改造,仅需要增加级联储能装置即可,具有很高的实用价值以及现实意义。

此外,由于铁路运输的可规划性以及可预测性,对于综合控制系统,可通过先进控制算法优化主动储能功能,降低铁路运营成本,大幅度提升新能源消纳能力。

参考文献

- [1] 牛晨. 高速铁路牵引供电系统高次谐振分析及抑制[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [2] LI Zhiyong, PI Jiahua, CAO Yuan, et al. Research on transient low-frequency oscillation of electrified railway vehicle-grid coupling system[J]. IEEE Access, 2023(11): 29483-29499.
- [3] 徐元成. 基于数据挖掘技术的电气化铁路电能质量控制研究[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 77-81.
- [4] 李群湛, 贺建闽, 解绍峰. 电气化铁路电能质量分析与控制[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011: 9-18.
- [5] 克帕依吐·吐尔逊, 焦春雷, 李明, 等. 格库电气化铁路接入对新疆电网电压不平衡影响分析及治理措施[J]. 电气工程学报, 2022, 17(4): 318-326.
- [6] 王翼云, 胡海涛, 黄毅, 等. 电气化铁路分区所多功能潮流控制系统及其控制策略研究 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14[2024-04-10]. [http://kns.](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20230616.1656.027.html)

[cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20230616.1656.027.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20230616.1656.027.html).

- [7] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.
- [8] 张丽艳, 贾瑛, 韩笃硕, 等. 电气化铁路同相储能供电系统能量管理及容量配置策略 [J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 22-29.
- [9] LI Chi, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Research on evaluation method of renewable energy accommodation capability based on LSTM[C]. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China, 2018: 1-5.
- [10] LIU Peng, LAI Junhong, CHEN Tianshu, et al. Coordination control strategy of co-phase traction power supply system integrated with hybrid energy storage systems[C]. 2022 5th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). Chongqing, China, 2022: 1000-1005.
- [11] 胡海涛, 葛银波, 黄毅, 等. 电气化铁路“源-网-车-储”一体化供电技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4374-4391.
- [12] 徐云飞, 肖湘宁, 孙雅旻, 等. 级联双极型大容量电池储能系统及其控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 103-109.
- [13] 祁琦, 盛晓东, 王宇. 基于级联多电平换流器的链式储能系统控制策略及直流侧谐波抑制策略研究 [J]. 电气应用, 2023, 42(7): 91-96.

作者简介

申志广 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力电子、电气化铁路储能。

(收稿日期: 2024-11-29)