

DOI: 10.7667/PSPC170613

新型电气化铁路电能质量管理系统

唐宏伟, 唐杰, 林立

(多电源地区电网运行与控制湖南省重点实验室(邵阳学院), 湖南 邵阳 422000)

摘要: 为改善高速牵引系统电能质量及运行效率, 提出一种新型电气化铁路电能质量管理系统。依托于常规背靠背电气化铁路电能质量治理装置, 将回馈工况与牵引工况统一归入电能质量补偿范畴, 解决了一次侧功率因数低、电流不平衡度高等基波电能质量问题。将机车回馈能量送至电网或其他机车利用, 避免了使用能耗电阻引起的不必要损耗或增大投资安装储能装置。基于实测数据, 在 Matlab/Simulink 中搭建了仿真模型。仿真结果表明, 系统运行后三相电流不平衡度明显减小, 功率因数有大幅提高, 明显改善了一次侧的电能质量。同时, 机车回馈工况下的能量可为其他牵引工况机车所利用, 提高了系统运行效率。

关键词: 电气化铁路; 电能质量; 管理系统; 牵引工况; 回馈工况

New power quality management system in electrical railway

TANG Hongwei, TANG Jie, LIN Li

(Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-Power Sources Area,
Shaoyang University, Shaoyang 422000, China)

Abstract: In order to improve the power quality and operation efficiency of high-speed traction systems, a new electrical railway power quality management system is proposed. Based on the normal back-to-back power quality control facility in electrical railways, the primary fundamental power quality problems such as poor power factor, three-phase current unbalance, etc. are solved by considering traction and regeneration condition together for compensation. The unnecessary power loss on dissipation resistors and extra investment on storage facility are saved by taking the feedback energy into the primary-side grid or other traction-condition locomotives. A simulation model is established in Matlab/Simulink based on some measured data. Simulation results show that the unbalance of three-phase current is significantly reduced, the power factor is greatly raised, and the primary-side power quality is obviously improved. On the other hand, the regeneration energy can be used by other traction locomotive, and the system operation efficiency is enhanced.

This work is supported by the Planned Science and Technology Project of Hunan Province (No. 2016TP1023) and Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (No. 15A170 and No. 16A191).

Key words: electrical railway; power quality; management system; traction condition; regeneration condition

0 引言

电力机车因其具有运量大、速度快、无污染等优点得到了大力的推广与应用^[1-2]。但由于大量电力电子器件的使用, 电力机车表现出极强的非线性特性, 给牵引网和电力系统带来了诸多电能质量问题, 如功率因数低、电压电流畸变严重等。同时, 由于电力机车为非对称供电(单相供电)且具有极大的波

动性和随机性, 所以, 三相电网侧存在较大的负序电流^[3]。大量无功和负序电流不仅带来巨大的能量损耗, 同时也大大降低了牵引变压器的容量利用率及线路的有功传送能力。随着牵引技术的不断向前发展, 越来越多的电力机车尤其是高速电力机车采用先进的四象限牵引传动系统, 系统可以实现单位功率因数并几乎不产生低次谐波电流, 可以大大改善牵引网的供电质量, 但不平衡问题不但没能得到缓解, 在一定程度上反而因牵引功率的增大和行车密度的增加而进一步加剧^[4]。

对于电气化铁路牵引供电系统电能质量问题的

基金项目: 湖南省科技计划项目(2016TP1023); 湖南省教育厅重点项目(15A170; 16A191)

治理, 国内外学者已经做了研究, 并提出了诸多的有、无源解决方法。对于有源治理方案, 三相两臂并联型混合有源补偿器可以有效地抑制电力机车负载对电力系统产生的负序问题, 抑制无功和谐波对电网影响, 提高电网电能质量^[5]。但由于电力机车工况复杂多变, 无源滤波器不仅设计困难、补偿效果不佳, 且存在与系统或机车发生串并联谐振风险^[6]。为缓解因机车负荷不对称而带来的负序问题, 平衡变压器在牵引系统中得到广泛的应用^[7-8], 但由于平衡变压器的负序抑制能力依赖于负荷的对称程度^[9], 即负荷越对称, 其负荷抑制效果越好, 所以也难以从根本上解决一次侧负序电流问题。基于先进电力电子器件和控制技术的有源电能质量治理方案可以很好的弥补无源方案的不足。通过与负荷并联有源电力滤波器, 注入与负荷侧谐波反相的谐波电流可以达到抑制电源侧谐波电流的目的^[10]。但由于该装置对开关频率要求较高, 难以在如电气化铁路等中、大功率场合得到应用^[11]。与谐波补偿相比, 基波补偿在电气化铁路中相对容易实现, 单相静止无功补偿器(Static var compensator, SVC)和静止同步补偿(Static synchronous compensator, STATCOM)在铁路电能质量治理方面得到了较大的应用^[12-13]。

铁路静止功率调节器(Railway static power conditione, RPC)在 STATCOM 的基础上通过背靠背结构将两臂无功补偿装置连接在一起, 不仅实现了两臂无功的独立补偿, 还通过转移两臂有功实现了对负序的治理, 是一种综合性能较高的电气化铁路电能质量治理系统^[14-16]。基于该系统, 同时考虑电网在某些情况下对能量回馈具有一定的接纳能力及交流电力机车车载整流器的四象限运行能力, 本文提出了一种将对高速电力机车能量回馈情况纳入电能质量治理范畴的新型电气化铁路电能质量管理体系。当前, 已有不少学者研究了城轨、地铁等系统中吸收回馈能量的方式, 一般都是采用特定的储能装置如蓄电池、飞轮或超级电容等对回馈的能量加以储存, 并在有需要的情况下加以释放^[17]。本文将回馈工况下机车发出的能量直接用于牵引工况下的机车, 其余部分在保证电能质量的情况下回送电网, 在实现电气化铁路牵引工况和回馈工况下一次侧电能质量统一治理的同时, 避免了因在机车上加装能耗电阻用于消耗回馈能量而带来的损耗、发热及占用空间问题, 或因加装储能装置而带来的额外成本。

1 系统典型接线

本文所提系统的典型接线如图 1 所示。从图 1 可以看出, Vv 牵引变压器将三相电网电压变换成单

相牵引电压给电力机车供电, 两臂供电电压和供电电流分别为 v_α 、 i_α 和 v_β 、 i_β 。由于 v_α 和 v_β 的电压等级为 27.5 kV, 所以一般类型的单相背靠背系统无法直挂供电臂, 需通过耦合降压变压器与馈线 α 和馈线 β 相连。需要注意的是, 由于馈线 α 和馈线 β 的参考点均为地且没有相互隔离, 所以耦合降压变压器还起到隔离保护的作用。考虑到单重单相背靠背变流器的容量一般无法满足所有牵引工况的补偿要求, 所以在实际应用中, RPC 通常是采用多重单相背靠背变流器相并联的结构, 并且每重变流器可利用变压器的漏阻抗来充当交流侧的连接电抗以减小投资成本及占地面积, 同时增强系统的集成度。鉴于大容量变流器开关频率一般只有几百赫兹, 所以每一重变流器电流纹波很大。但通过载波移相技术可以增大整个补偿系统的等效开关频率, 大大降低耦合变压器一次侧输出电流的谐波含量并使之满足工业要求。可以很清楚地从图 1 中知道, 由于 RPC 接通了两牵引供电臂, 所以可以实现功率融通并独立补偿机车所需无功, 实现牵引变压器二次侧端口的实时平衡, 达到改善一次侧电能质量的目的。

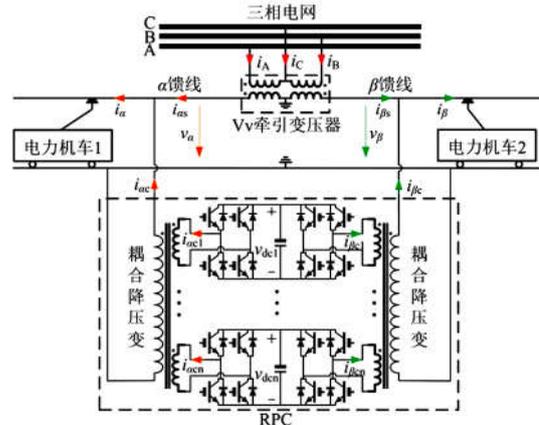


图 1 系统典型接线

Fig. 1 System typical connection

2 补偿策略

由于本文将机车回馈工况归入电能质量治理的范畴, 同时考虑到只有交流机车才具备回馈能力, 所以本文只讨论与交流机车(功率因数取 1, 且不考虑谐波)相对应的补偿策略。首先定义一、二次侧电压参考矢量如式(1)所示。

$$\begin{cases} V_A = V_A \angle 0^\circ = V_A D_A \\ V_B = V_B \angle -120^\circ = V_B D_B \\ V_C = V_C \angle 120^\circ = V_C D_C \\ V_\alpha = V_\alpha \angle -30^\circ = V_\alpha D_\alpha \\ V_\beta = V_\beta \angle -90^\circ = V_\beta D_\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中： D_A 、 D_B 、 D_C 、 D_α 、 D_β 分别为各个电压的方向矢量； V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_α 、 V_β 分别为各个电压的幅值。

2.1 两臂均为牵引工况

取 α 和 β 臂电流与 α 和 β 臂电压同相，且 α 臂重载， β 臂轻载得一、二次侧电压电流的矢量关系如图2所示。从图2可以看出，当补偿电流与负荷电流满足

$$\begin{cases} I_{\alpha c} = I_\alpha - I_{\alpha s} \\ I_{\beta c} = I_\beta - I_{\beta s} \\ I_{\alpha s} = 0.5(I_\alpha + I_\beta)D_A \\ I_{\beta s} = 0.5(I_\alpha + I_\beta)D_B \end{cases} \quad (2)$$

则一次侧电流 I_A 、 I_B 、 I_C 为

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta s} \\ -(I_{\alpha s} + I_{\beta s}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 K 为 V v变压器变比。从式(1)和式(3)可以看出一次侧电流平衡且各相分别与其电压同相位，达到一次侧电能质量治理的目的。

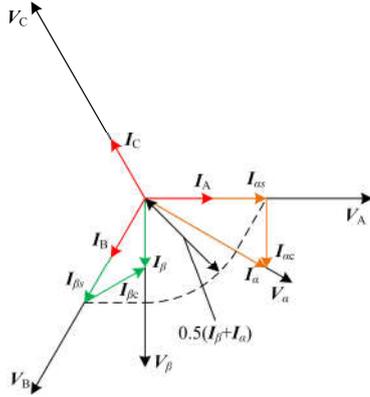


图2 二臂均为牵引工况下电压电流矢量关系

Fig. 2 Current and voltage phasor relationship when both feeders are on load condition

2.2 一臂为牵引工况另一臂为回馈工况

取 α 臂为牵引工况(即 α 臂电流与 α 臂电压同相) β 臂为回馈工况(即 α 臂电流和 β 臂电压反相)且 α 臂重 β 臂轻，则一、二次侧电压电流的矢量关系如图3所示。从图3可以看出，当补偿电流与负荷电流满足

$$\begin{cases} I_{\alpha c} = I_\alpha - I_{\alpha s} \\ I_{\beta c} = I_\beta - I_{\beta s} \\ I_{\alpha s} = 0.5(I_\alpha - I_\beta)D_A \\ I_{\beta s} = 0.5(I_\alpha - I_\beta)D_B \end{cases} \quad (4)$$

一次侧电流 I_A 、 I_B 、 I_C 可由式(3)求得，且一次侧电流平衡且各相分别与其电压同相位，达到一次侧电能质量治理的目的。

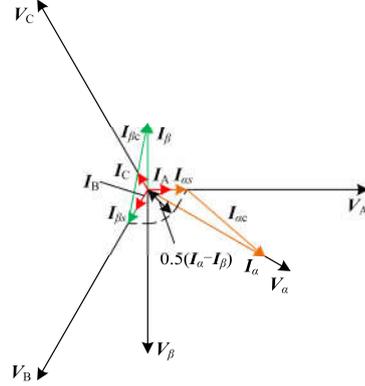


图3 α 臂为牵引工况 β 臂为回馈工况时电压电流矢量关系
Fig. 3 Current and voltage phasor relationship when α feeder is on load condition and β feeder is on regeneration condition

2.3 两臂均为回馈工况

取 α 和 β 臂电流与 α 和 β 臂电压反相，且 α 臂重 β 臂轻载，则一、二次侧电压电流的矢量关系如图4所示。从图4可以看出，当补偿电流与负荷电流满足

$$\begin{cases} I_{\alpha c} = I_\alpha - I_{\alpha s} \\ I_{\beta c} = I_\beta - I_{\beta s} \\ I_{\alpha s} = -0.5(I_\alpha + I_\beta)D_A \\ I_{\beta s} = -0.5(I_\alpha + I_\beta)D_B \end{cases} \quad (5)$$

一次侧电流 I_A 、 I_B 、 I_C 同样可由式(3)求得，且一次侧电流平衡且各相分别与其电压反相，一次侧电网吸收机车回馈的电能，同时一次侧电能质量满足要求(无谐波、无功和负序电流)。

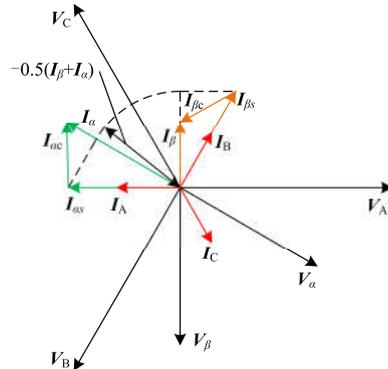


图4 二臂均为回馈工况下电压电流矢量关系
Fig. 4 Current and voltage phasor relationship when both feeders are on regeneration condition

3 检测与控制

3.1 检测方法

根据以下补偿原理, 令瞬时电流 i_α , i_β 为

$$\begin{cases} i_\alpha = A_{i\alpha} \sin(\omega t - 30^\circ) \\ i_\beta = A_{i\beta} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

在牵引工况下 $A_{i\alpha} > 0$, $A_{i\beta} > 0$; 回馈工况下 $A_{i\alpha} < 0$, $A_{i\beta} < 0$ 。

为了提取 i_α , i_β 的实际大小及方向, 将式(6)中一、二式分别与其方向向量 D_α , D_β 相乘得

$$\begin{cases} i_\alpha \sin(\omega t - 30^\circ) = \frac{A_{i\alpha}}{2} - \frac{A_{i\alpha} \cos(2(\omega t - 30^\circ))}{2} \\ i_\beta \sin(\omega t - 90^\circ) = \frac{A_{i\beta}}{2} - \frac{A_{i\beta} \cos(2(\omega t - 90^\circ))}{2} \end{cases} \quad (7)$$

由于 $A_{i\alpha}$, $A_{i\beta}$ 即包含有方向信息也包含有大小信息, 所以无论 i_α , i_β 处于何种工况, $0.5A_{i\alpha} + 0.5A_{i\beta}$ 也将包含有 $i_{\alpha s}$ 和 $i_{\beta s}$ 的大小与方向信息。通过低通滤波器(LPF)将式(7)中一、二式直流分量提出相加, 并与 $i_{\alpha s}$ 和 $i_{\beta s}$ 的方向矢量 D_A 和 D_B 相乘即可得到 $i_{\alpha s}$ 和 $i_{\beta s}$ 的瞬时表达式, 即

$$\begin{cases} i_{\alpha s} = \left(\frac{A_{i\alpha}}{2} + \frac{A_{i\beta}}{2}\right) \sin(\omega t) \\ i_{\beta s} = \left(\frac{A_{i\alpha}}{2} + \frac{A_{i\beta}}{2}\right) \sin(\omega t - 120^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

将 i_α 和 i_β 分别与 $i_{\alpha s}$ 和 $i_{\beta s}$ 相减即可得到补偿电流的瞬时表达式为

$$\begin{cases} i_{\alpha c} = i_\alpha - i_{\alpha s} \\ i_{\beta c} = i_\beta - i_{\beta s} \end{cases} \quad (9)$$

基于以上过程, 可得系统检测方法如图 5 所示。带“*”上标量为相应量的参考值。

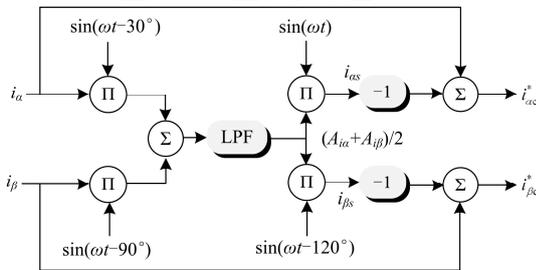


图 5 补偿电流检测方法

Fig. 5 Method of compensation current detection

3.2 控制部分

本文采用幅相控制方法, 现以图 6 为基础, 对其控制原理加以说明。

在图 6 中, v_1 、 v_2 分别为电网电压及变流器输出电压; i 为变流器输出电流; L 为连接电抗。由于本文中只考虑基波补偿, 所以 v_2 只取其等效的基波

分量, 忽略其高频分量(当采用正弦脉冲宽度调制(SPWM)时, 高频分量主要集中在开关频率及其整数倍频率附近)。图 7 为其矢量关系图。

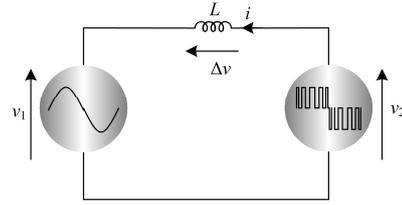


图 6 变流器系统简化等效电路

Fig. 6 Simplified equivalent circuit of converter system

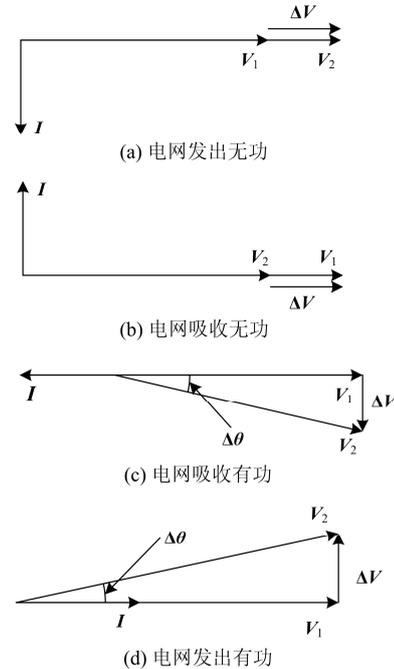


图 7 变流器系统电压电流矢量关系

Fig. 7 Voltage and current phasor relationship of converter system

从图 7(a)和(b)可以看出, 当系统发出或吸收无功时, 电流大小主要由网侧电网和变流器输出电压幅值差来决定; 当系统发出或吸收有功时, 电流大小主要由网侧电压和变流器输出电压相位差来决定。基于该事实, 考虑通过由: 1) 输出参考电流与输出实际电流的有功分量做差经比例积分(PI)控制器得到的信号作为输出电压调制信号方向参量; 2) 输出参考电流与输出实际电流的无功分量做差经比例积分(PI)控制器得到的信号作为输出电压调制信号大小参量来构造调制信号。具体控制框图如图 8 所示。

对于图 8, 在此做两点说明: 1) 对于潮流控制系统, 两侧变流器应一侧控制有功(α 侧), 一侧控制直流电压(β 侧)以保证有功潮流畅通; 2) 对于多重背靠背变流系统, 除稳压控制外一般还需均压控制以保证各重变流器工况基本一致。

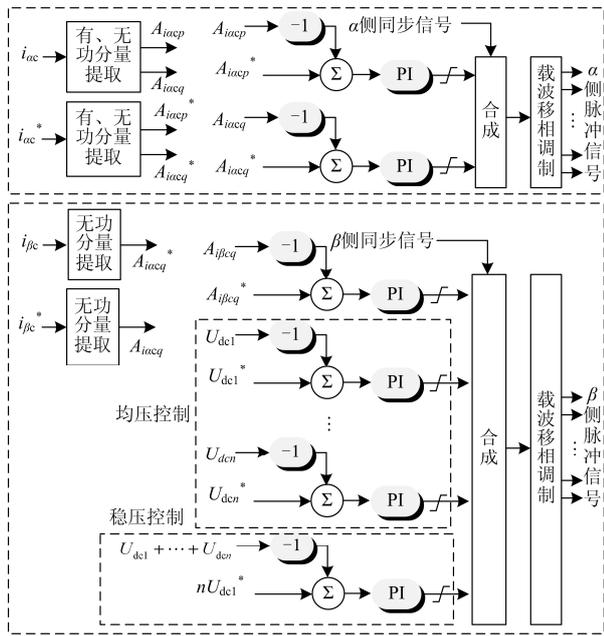


图 8 控制框图
Fig. 8 Control diagram

4 仿真验证及结果分析

为验证本文所提出系统的正确性，基于实测负荷数据在 Matlab/Simulink 中搭建了仿真模型，利用受控电流源模拟高速电力机车牵引及回馈工况，并利用幅相控制方法对变流器实施控制。系统仿真参数如表 1。

4.1 牵引工况

在 0.1 s 启动系统开始补偿，牵引工况下的仿真结果如图 9 所示。从图 9(a)中可以看出，补偿后一次侧电流波形较补偿前不平衡度有了极大改善，且一次侧电压电流基本同相位，功率因数有大幅提高。补偿前，负荷电流波形与变压器出口电流波形相同，两者存在 60° 的相位差；补偿后，由于补偿电流的注入，该相位差由 60° 变为 120° 且幅值接近。从图 9(c) 和 (d) 可以看出由于变流器载波频率只有 500 Hz，每重背靠背单元输出电流存在较大的开关纹波，但由于载波移相，4 重背靠背单元输出电流的纹波相互抵消从而使耦合变压器一次输出的补偿电流补偿畸变大大减小。由于直流侧没有加装 2 次调谐支路以滤除 2 倍频功率波动，所以直流侧电压有一定的 2 次纹波。

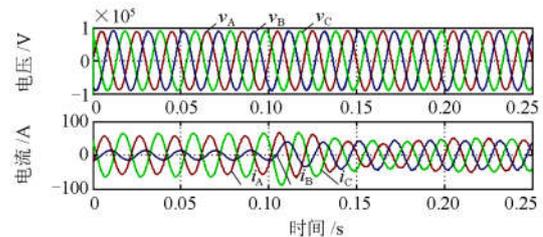
4.2 回馈工况

在 0.1 s 启动系统开始补偿，回馈工况下的仿真结果如图 10 所示。从图 10 可以看出由于系统处于回馈状态，补偿后一次侧电压电流是反相的，表明系统处于吸收机车回馈的电能，即回馈侧(α 侧)机车

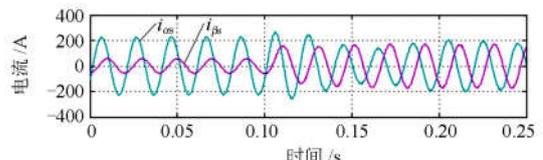
能量在供给牵引侧(β 侧)机车以外，剩余能量回送上网，提高了系统运行效率。对于回馈工况下的电能质量，补偿后较补偿前也是有极大改善的，因为三相电流波形已基本对称且基本与电压反相。同样，由于单相系统功率传递必然会有 2 次功率波动，所以直流侧电压也具有 2 次纹波。

表 1 系统仿真参数

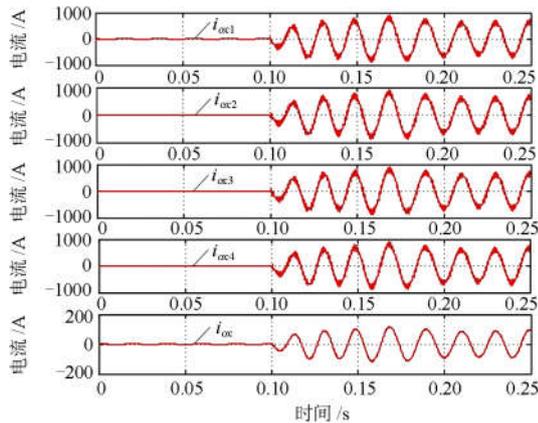
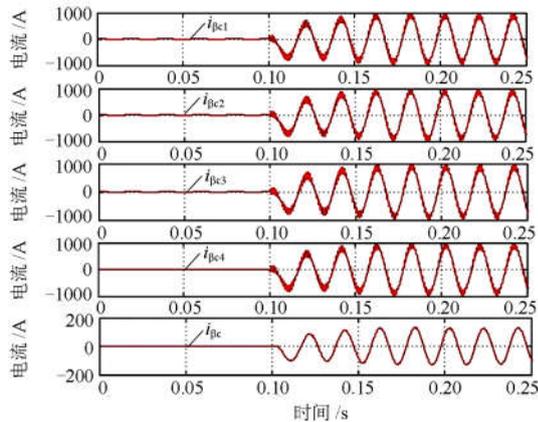
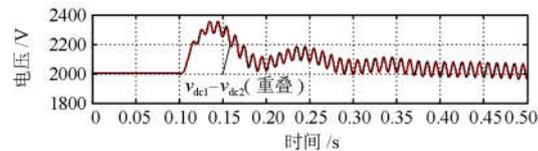
Table 1 System simulation parameters		
参数		取值
三相电网	电压/kV	110
	短路容量/MVA	500
Vv 牵引变压器	变比	110/27.5
	容量/MVA	20
牵引工况	α 侧负荷/MW	4
	β 侧负荷/MW	1
回馈工况	α 侧回馈/MW	-4
	β 侧回馈/MW	-1
耦合变压器	变比	27.5/1
	容量/MVA	4
	二次绕组数	4
	容量/MVA	1
靠背单元	连接电抗/mH	2
	直流电容/mF	15
	直流电压/kV	2000
α 侧控制器	载波频率/Hz	500
	P 参数	4.02×10^{-8}
β 侧控制器	I 参数	3.6×10^{-5}
	P 参数	4.02×10^{-8}
稳压控制器	I 参数	1.6×10^{-3}
	P 参数	9.54×10^{-4}
均压控制器	I 参数	1.6×10^{-3}
	P 参数	9.54×10^{-4}



(a) 网侧电压电流波形



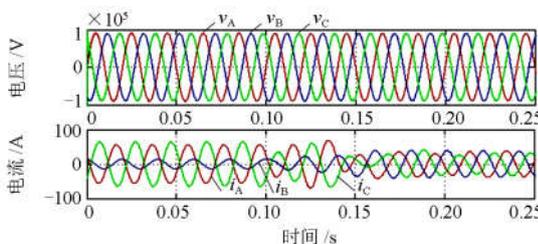
(b) 变压器出口电流波形

(c) α 侧变流器输出单元及补偿输出电流波形(d) β 侧变流器输出单元及补偿输出电流波形

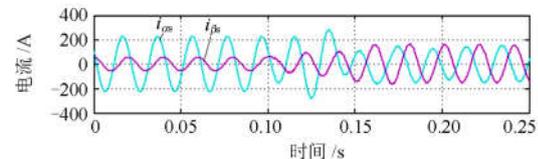
(e) 直流侧电压波形

图 9 牵引工况下仿真结果

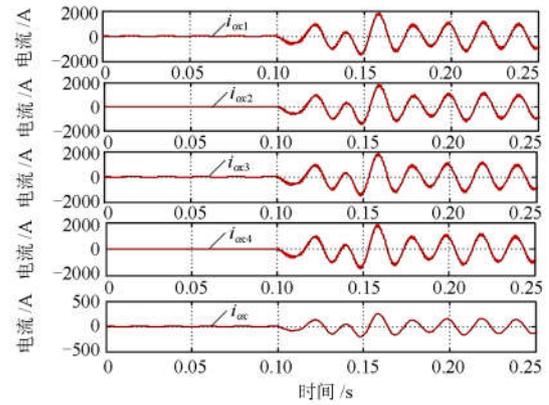
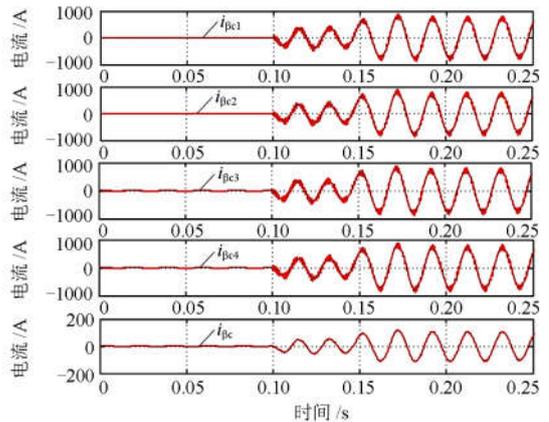
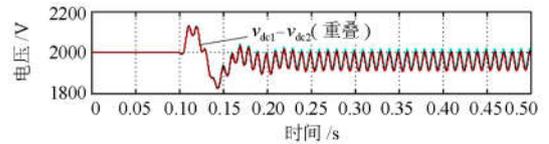
Fig. 9 Simulation results on load condition



(a) 网侧电压电流波形



(b) 变压器出口电流波形

(c) α 侧变流器输出单元及补偿输出电流波形(d) β 侧变流器输出单元及补偿输出电流波形

(e) 直流侧电压波形

图 10 回馈工况下仿真结果

Fig. 10 Simulation results on regeneration condition

从仿真结果可以看出, 由于采用的是幅相控制, 有、无功电流不能做到完全解耦, 同时考虑到控制参数不是最优, 所以系统的动态性能还有较大的改进空间。在后续的研究过程, 将着重针对本文所提系统中存在的不足提出更加合适的控制方案。同时, 考虑在条件允许的情况下, 设计系统样机以对所提系统加以实验验证。

5 结论

本文提出了将回馈工况也纳入电能质量治理范畴的综合电气化铁路电能质量管理系统, 简要介绍了系统拓扑接线, 并对补偿原理和系统控制加以详细说明。在此基础上, 搭建了基于实测数据的仿真模型, 仿真结果表明不管是系统处于牵引工况还

是回馈工况，一次侧电能质量都可以得到极大的改善。由于该系统不仅可以治理电能质量问题，并可以对机车回馈能量以适当的方式加以利用以提高系统运行效率，具有一定的实用和推广价值。

参考文献

- [1] 周新军, 薛峰. 铁路“以电代油”效应评价及未来发展趋势[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2010(2): 23-28.
ZHOU Xinjun, XUE Feng. Evaluation on effect of replacing oil by electrical power in railway and its future development tendency[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2010(2): 23-28.
- [2] 孟金岭, 肖勇, 王文, 等. 适用于高速电气化铁路的低成本电能质量综合补偿装置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 73-80.
MENG Jinling, XIAO Yong, WANG Wen, et al. A low cost power quality compensation scheme for high-speed electric railway[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 73-80.
- [3] 周胜军, 于坤山, 冯满盈, 等. 电气化铁路供电电能质量测试主要结果分析[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 54-57.
ZHOU Shengjun, YU Kunshan, FENG Manying, et al. Analysis on main results of power quality test of power supply for electrified railway[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 54-57.
- [4] 辛业春, 李国庆, 王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 72-78.
XIN Yechun, LI Guoqing, WANG Chaobin. Compensation control of reactive power and three-phase unbalance load based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 72-78.
- [5] 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 passive filter applied to traction power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 100-104.
- [6] 李丹丹, 周福林, 刘浅, 等. 考虑滤波器的牵引供电系统谐波模型及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 52-60.
LI Dandan, ZHOU Fulin, LIU Qian, et al. Harmonic model and application of traction power supply system considering filter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 52-60.
- [7] 常文寰, 王果. 组合式同相供电系统容量配置优化及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 94-101.
CHANG Wenhuan, WANG Guo. Optimizing and analyzing of capacity configuration in combined co-phase power supply system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 94-101.
- [8] 陈博, 邱建, 曾耿晖, 等. 计及阻抗匹配平衡牵引变压器的电网短路计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 33-39.
CHEN Bo, QIU Jian, ZENG Genghui, et al. Short-circuit calculation methods for the grid considering impedance-matching balance traction transformers[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 33-39.
- [9] 蒋寿生, 周有庆, 刘光晔, 等. Y/∇ 平衡变压器运行特性分析与模型试验[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 102-106.
JIANG Shousheng, ZHOU Youqing, LIU Guangye, et al. Operation characteristic analysis and model tests of Y/∇ connected balance transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 102-106.
- [10] 李达义, 孙玉鸿, 熊博, 等. 一种并联型有源电力滤波器的新型控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 112-117.
LI Dayi, SUN Yuhong, XIONG Bo, et al. A novel control method of shunt active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 112-117.
- [11] 赵伟, 涂春鸣, 罗安, 等. 适用于电气化铁路的单相注入式混合有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 51-56.
ZHAO Wei, TU Chunming, LUO An, et al. A novel single-phase hybrid active power filter applied to electrical railway system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 51-56.
- [12] 马茜, 罗培, 戴瑜兴. V/v 牵引供电所混合式电能质量控制非对称补偿设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 221-230.
MA Qian, LUO Pei, DAI Yuxing. Asymmetric compensation design of hybrid power quality manage

- system for V/v traction substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 221-230.
- [13] 高聪哲, 姜新建, 李永东. 基于级联有源滤波器与静止无功补偿器的综合补偿控制方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 92-98.
- GAO Congzhe, JIANG Xinjian, LI Yongdong. A universal compensation control scheme based on cascade active power filter and static var compensator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 92-98.
- [14] 朱红萍, 罗隆福. 新型电气化铁道电能质量综合治理装置[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 72-76.
- ZHU Hongping, LUO Longfu. Power quality improving device for electric railroads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 72-76.
- [15] 常非, 李群湛, 赵丽平, 等. 电气化铁路背靠背 SVG 补偿系统方案研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(5): 117-120.
- CHANG Fei, LI Qunzhan, ZHAO Liping, et al. Research on back-to-back SVG compensation scheme used in electrified railway[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2011, 32(5): 117-120.
- [16] 马伏军, 罗安, 吴传平, 等. V/V 牵引供电系统中铁路功率调节器的控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 63-70.
- MA Fujun, LUO An, WU Chuanping, et al. Control methods of railway static power regulator for V/V electrified traction railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 63-70.
- [17] 杨俭, 李发扬, 宋瑞刚, 等. 城市轨道交通车辆制动能量回收技术现状及研究进展[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 26-33.
- YANG Jian, LI Fayang, SONG Ruigang, et al. Review of the utilization of vehicular braking energy in urban railway transportation[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2): 26-33.

收稿日期: 2017-05-02; 修回日期: 2017-07-12

作者简介:

唐宏伟(1982—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子与电能质量控制; Email: thwei2008@126.com

唐杰(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电能质量先进控制技术及装备。Email: 706648502@qq.com

(编辑 张爱琴)