

Analysis of Power Quality Issues of Electrified Railway System

Jinhao Wang¹, Long Xu¹, Lei Feng¹, Huipeng Li¹, Xiaohui Lv², Yonghai Xu²

¹Shanxi Electric Power Company and Electric Power Research Institute, Taiyuan Shanxi

²School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Email: xiaohui19931125@163.com

Received: Mar. 2nd 2016; accepted: Mar. 24th, 2016; published: Mar. 28th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Railway electrification has advantages such as high speed, heavy load, high energy utilization and good economic benefits. But the traction load of electrified railway is a high power, single phase and nonlinear load, its access to the grid will bring about power quality problems such as harmonics, three-phase imbalance which go against safe and economic operation of power system. Firstly after electrified railway connects to power system the characteristics of power quality are introduced in this paper. The main problems, harmonic and negative sequence caused by the traction load of electrified railway, are analyzed in detail. Then, the influence of harmonic and negative sequence on power system is summarized. Finally, the current measures to improve the power quality of the utility grid are classified. A reference is provided for the power quality evaluation and treatment after the electrified railway connects to power system.

Keywords

Electrified Railway, Power Quality, Harmonics, Three-Phase Imbalance, Evaluation, Treatment

电气化铁路电能质量问题分析

王金浩¹, 徐 龙¹, 冯 磊¹, 李慧蓬¹, 吕晓慧², 徐永海²

¹国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原

²华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

Email: xiaohui19931125@163.com

收稿日期：2016年3月2日；录用日期：2016年3月24日；发布日期：2016年3月28日

摘要

电气化铁路具有高速化、重载化、能源利用率高、经济效益好等优点。但电气化铁路牵引负荷属于大功率非线性单相负荷，接入电网后会对给其供电的电力系统带来谐波、三相不平衡等电能质量问题，不利于公用电网安全、经济运行。本文首先介绍了电气化铁路接入电网电能质量特性，主要对电气化铁路牵引负荷引起的两大主要电能质量问题谐波和负序进行详细分析；然后对电气化铁路接入电网后产生的谐波、负序对电力系统各环节的影响进行了总结；最后对目前常用的改善公用电网电能质量措施进行分类，为电气化铁路接入电网电能质量评估、治理提供参考依据。

关键词

电气化铁路，电能质量，谐波，三相不平衡，评估，治理

1. 引言

近年来，我国电气化铁路发展迅速。电气化铁路牵引负荷主要是交直型和交直交型电力机车，交直型电力机车以韶山(SS)型机车为代表，交直交型机车主要有HXD系列和CRH系列。电力机车一方面从公用电网获得电能，另一方面，作为大功率非线性单相负荷，电力机车将会产生谐波和负序电流注入公用电网，危害电网安全经济运行。电气化铁路发展至今，其给电力系统带来的谐波和三相不平衡等电能质量问题等一直备受关注，这些电能质量问题会给电力系统各个环节带来危害[1]-[3]。

本文首先描述了电气化铁路接入电网带来的电能质量问题，重点介绍了单相非线性牵引负荷接入三相系统后引起的谐波、负序问题。其次，对谐波、负序给电力系统带来的危害进行了总结。最后对改善公用电网电能质量问题的措施进行分类，主要分为两大类：一类是对牵引供电系统做出的改进；一类是补偿装置的应用。改善公用电网电能质量需要电力部门与铁路部门的协同合作，正确认识电气化铁路牵引负荷接入电网带来的电能质量问题并采取针对性的治理措施，实现电力部门和铁路部门的双赢。

2. 电铁负荷接入电网电能质量特性

2.1. 谐波特性

电力机车为波动性很大的大功率单相整流负荷，具有不对称、非线性、波动性等特点，产生的谐波具有以下特点[4]：

- 1) 谐波幅值随机波动。谐波电流随基波电流剧烈波动，谐波电流峰值持续时间较短，且波动范围很大。
- 2) 谐波相位广泛分布。电气化铁路牵引负荷相位分布广泛，各次谐波向量可在复平面四个象限间随机分布。
- 3) 谐波次数奇次为主。电气化铁路稳态运行时牵引负荷只产生奇次谐波，其中以3次谐波含量最大。
- 4) 谐波电流影响范围广。电气化铁路牵引负荷产生的任意次谐波都通过110 kV/220 kV电压等级注入并进一步影响其他电压等级，并且不受变压器接线方式的影响。

2.1.1. 交直型电力机车谐波特性

我国交直型电力机车主要有韶山型(SS型)机车，很长一段时间内被广泛应用于客运、货运。SS系列

机车主要有 SS3、SS4、SS6、SS8、SS9 等车型，目前，很多车型仍旧被使用。交直型电力机车采用直流传动方式，机车工作原理图如图 1，由于采用大量电力电子设备，将会产生谐波电流注入电网，影响电网电能质量。文献[5]通过对 SS 系列机车谐波含有率进行分析，总结出了 SS 型各典型车型的谐波含量值如表 1 所示，通过表 1 可以看出不同型号交直型电力机车谐波特性大体相同，谐波含量较高，且主要以 3、5、7 次等奇次谐波为主。

2.1.2. 交直交型电力机车谐波特性

我国交直交型电力机车目前投入使用的主要有 CRH 系列和 HXD 系列。交直型电力机车工作原理图如图 2，谐波电流主要由整流装置产生，不同型号交直交型电力机车整流装置不同。其中，CRH2 型机车采用三电平四象限 PWM 整流装置，CRH1、CRH3、CRH5 型机车采用并联二重化的两电平整流装置，而 HXD 系列机车使用的整流装置为单相两电平四象限整流装置[6]。交直交型机车的谐波特性因整流装置的不同而有所差异。整体来说，交直交型机车谐波含量较交直型机车低，畸变率也大大降低，但会产生频谱较宽的高次谐波，主要集中于载波频率偶数倍附近。比如 CRH2 四象限变流器的载波频率为 1250 Hz，其高次谐波主要为 45、47、49、51、53、55 等次谐波，CRH5 两个四象限整流器的三角载波频率同为 250 Hz，其高次谐波主要含有 15、17、19、21、23、25 等次谐波。

2.2. 负序特性

电气化铁路牵引负荷是单相工频交流负荷，电力系统向其供电时，电铁牵引负荷将向电力系统注入大量负序电流，引起电力系统三相不平衡。公用电网中的三相电通过牵引变压器转化为单相电供给牵引负荷，因此不同接线形式的牵引变压器将引起负序电流的不同。目前我国牵引变压器普遍采用的接线方式有：YNd11 接线、V/V 接线、Scott 接线和阻抗匹配平衡接线。研究表明[7]，V/V 接线和 YNd11 接线方式下，其牵引负荷对电力系统的负序影响相同，当两供电臂电流相同时，负序影响最小；而 Scott 接线与阻抗匹配平衡接线在电力系统中引起的不平衡度相当，特别的当两臂负荷相同时，电力系统三相对称，负序影响最小，此时不平衡度为 0。总体来说，Scott 接线和阻抗匹配平衡接线牵引变压器对电力系统带来的负序影响最小。

2.3. 功率因数低

我国电力机车大多采用整流型电力机车，由于交流侧电流波形畸变以及整流换向过程中重叠导通角的影响造成功率因数偏低，一般为 0.8~0.85。由于牵引网阻抗的影响，牵引变电所牵引变压器低压侧功率因数要降低 0.01~0.05；高压侧功率因数要降低约 0.05 [7]。采用交直交型电力机车后，功率因数较交直型电力机车大大提高。电力机车功率因数低使得无功功率过大，造成供用电设备利用率降低，电能损失增加，输电线路的电压损失增加等。

3. 谐波、负序对公用电网的危害

谐波和负序问题是电气化铁路接入电网引起的主要电能质量问题，对公用电网的危害主要可分为以下几个方面[1]-[3]：

- 1) 电机。引起发电机附加损耗和振动，降低容量利用率，危害安全经济运行。
- 2) 变压器。变压器处于三相不平衡状态下运行会导致变压器容量不能充分利用；另外，谐波的存在会引起变压器额外损耗，负序电流中含有谐波时，额外发热导致变压器寿命缩短。
- 3) 输电线路。谐波和负序导致线路除正常运行产生的损耗外，还会增加负序电流及谐波电流产生的附加损耗，增大线路网损，不利于系统的经济运行。

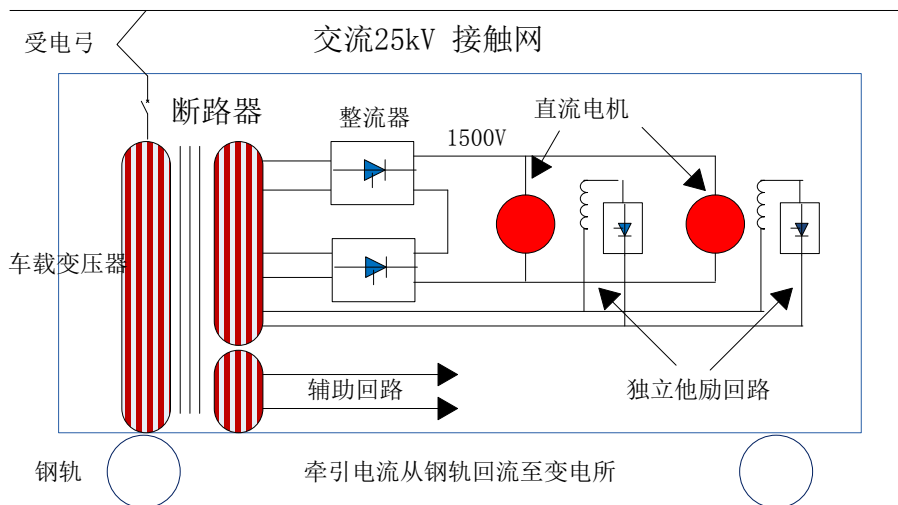


Figure 1. Working diagram of AC-DC electric locomotive
图 1. 交直型电力机车工作原理图

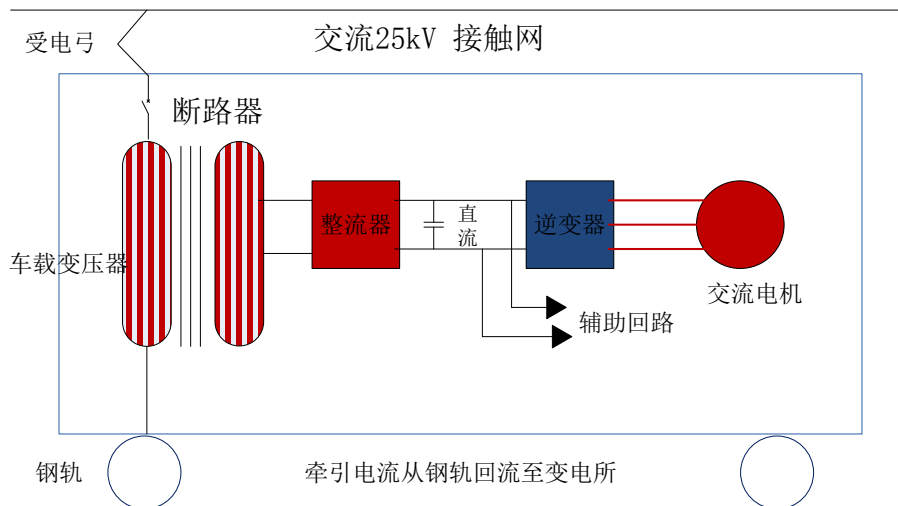


Figure 2. Working diagram of AC-DC-AC electric locomotive
图 2. 交直交型电力机车工作原理图

Table 1. Harmonic content of typical models of type SS locomotive (%)
表 1. SS 型机车典型车型谐波含量(%)

机车类型 谐波次数	SS3	SS3B	SS4	SS6	SS8	SS9
3	25	33.3	23	26	29	17
5	14	18.2	11	15	19	6.5
7	9	12.4	7	10	15	2.3
9	5.5	9.5	4.5	7	6	3.5
11	4	7.8	2.4	4	4.5	5
13	1.7	5.9	1.2	2	3	1.8

4) 继电保护和自动装置。谐波、负序分量较大,可能会造成系统中一些继电保护和自动装置误动作,不利于系统安全运行。这些保护如,发电机保护、母线差动保护和线路保护等。

5) 电能计量。配电系统中广泛使用的仪表,如电压表、电流表、功率表等,在谐波的影响下可能会出现计量误差。

4. 改善公用电网电能质量的方法

电铁负荷接入电网带来的谐波、负序、功率因数低等电能质量问题不容忽视,目前国内外常用的治理措施主要分为两大类:针对电气化铁路牵引供电系统的改进及补偿装置的应用。

4.1. 针对牵引供电系统做出的改进

针对电气化铁路牵引供电系统做出的改进措施主要有:提高外部系统的短路容量,对牵引变压器的改进,牵引网的换相序连接及同相供电系统的研究等。

4.1.1. 提高外部系统短路容量

公共连接点(PCC)的电压畸变率、电压不平衡度等与短路容量成反比,因此,为缓解电铁负荷接入电网引起的电能质量问题,应尽可能提高外部系统的短路容量[8]。一般来说,供电电压等级越高,对应的系统短路容量也越大。牵引供电系统的进线电压采用高电压等级可以减小电铁负荷对电力系统的谐波负序影响,与此同时,采用高电压等级供电也可增加系统的供电可靠性,满足电气化铁路可靠性要求。

4.1.2. 平衡变压器

电气化铁路牵引变压器按接线方式可分为:单相接线牵引变压器、三相接线牵引变压器(V/V 接线、YNd11 接线)和三相/两相平衡接线牵引变压器(Scott 接线、阻抗匹配平衡接线)。从负序特性的分析得出,两臂负荷接近时采用平衡接线变压器降低负序影响效果较为理想,针对平衡接线变压器及电气化铁路需要,我国基于自主知识产权开发多种平衡变压器产品[9] [10],同时为使其改善电能质量效果更为理想,在原有负序治理的基础上,兼顾滤除高次谐波、无功补偿的新型三相/两相牵引变压器也被研究[11] [12]。

4.1.3. 同相供电

为缓解电气化铁路带来的三相不平衡问题,现阶段电气化铁路多采用轮流换相技术。轮流换相本身不增加额外设备,是一种低成本、可靠性高的负序抑制措施,但换接相序导致电分相的出现,不利于电气化铁路高速运行。针对相邻供电区段电分相引起的列车速度及牵引力损失等问题,同相供电技术应运而生。

同相供电系统是指线路上不同变电所供电的区段接触网电压相位相同、线路上无电分相环节的牵引供电方式[13]。同相供电系统取消变电所出口处电分相,减少高速铁路速度损失的同时实现了电能质量的综合解决,很好的抑制负序、补偿无功。除此之外,同相供电方式有利于提高变压器容量利用率,可减少变压器安装容量,具有良好的经济性[14]。同相供电技术还未成熟,我国电气化铁路基本还采用异相供电。基于同相供电的优势,许多学者对此做了大量研究去完善该技术。西南交通大学在同相供电研究方面做出了突出贡献[15]-[17],2010年成昆铁路眉山牵引变电所同相供电装置投入试运行,这是由西南交通大学主持的国家重大科研项目。同相供电装置的试运行,是我国电气化铁路领域的一项重大变革。

4.2. 补偿装置的应用

目前我国电气化铁路中普遍采用并联电容补偿(Fixed Capacitor, FC)加装 LC 滤波器,兼顾无功补偿与谐波滤除。随着电力电子技术的发展,静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)、静止同步补偿器

(Static Synchronous Compensator, STATCOM)和有源电力滤波装置(Active Power Filter, APF)等也引起了学者们的关注。根据安装位置的不同,可将补偿装置分为:在电力机车上采取的补偿措施、牵引系统侧补偿措施和供电系统侧补偿措施。

4.2.1. 电力机车补偿措施

电气化铁路的谐波、负序、功率因数低等问题根源来自于电力机车。在电力机车上装设补偿装置,可以从源头解决电气化铁路引起的电能质量问题。20世纪90年代初,我国在一部分机车上安装了车载动态无功补偿装置,具体方法是在机车牵引绕组上装设晶闸管投切的3次谐振电容补偿装置(Thyristor Switched Capacitor, TSC),在动态吸收感性无功的同时还可以吸收部分谐波电流;另外还可在机车主变压器二次侧跨接滤波器,常用的有RC、LC和RLC三种方式[18]。

通过在电力机车上安装补偿装置和滤波电路,可以避免谐波电流在传播过程引起损耗及谐波电流放大的问题,相比于在其他地方安装滤波装置效果要好。但补偿电路抗扰能力差,受干扰后易发生故障。

4.2.2. 牵引侧补偿措施

SVC装置具有控制简单、体积小等优点,安装在牵引变电所二次侧附近的SVC装置对于提高功率因数、谐波治理效果显著。目前,我国南昆线电气化铁路采用了TCR+FC型SVC,宁夏银川迎水桥牵引变电所安装了单相SVC;在国外,日本东北新干线、东海道新干线、英法海底隧道电气化铁道等均有SVC投入使用。也有学者提出基于SVC的改进措施进行电铁电能质量的治理,文献[19]提出一种采用三相电压源变流器(VSC)结合晶闸管投切电容器(TSC)构成的电能质量补偿系统,用于负序、谐波和无功综合补偿。

STATCOM装置以铁路功率调节器(Railway Static Power Conditioner, RPC)为代表,1993年,日本学者提出铁路功率调节器RPC[20],治理效果优异,有较强的通用性,但大补偿容量和高成本限制了它的推广。RPC优异的补偿效果,引起学者们的广泛关注。各种改进方案被提出[21]-[25],主要从减小RPC补偿容量、降低成本作出改进。随着电力电子技术的发展,多电平变换器在高压大功率领域应用受到关注,有学者提出了基于多电平铁路功率调节器(MRPC)的电气化铁路电能质量治理方法[26][27]。

统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)作为有源滤波器家族的重要组成,近些年来,受到越来越多的关注。其基本结构如图3,UPQC主要由串联有源滤波器和并联有源滤波器两部分组成,并联部分主要用于谐波及无功的补偿,串联部分则用于调节负载电压,提高供电可靠性。已有学者对UPQC的控制策略、能量优化补偿策略等进行研究[28],用于综合解决电铁负荷带来的电能质量问题。

APF初期投资成本大,对于大容量补偿需要大的装置容量,为实现在动态改善电网电能质量的同时降低补偿装置容量和投资成本,混合型电力滤波器在电铁供电系统的应用引起学者们的关注[29][30]。其基本思想大都是将有源滤波器与无源滤波器相结合,两者共同承担补偿任务,降低有源补偿的容量。

4.2.3. 系统侧补偿措施

安装于系统侧的SVC装置在国外已有应用。日本提出并采用V接线型不平衡功率调节器(SUP)和变相位无功补偿装置SVC的用于改善高速铁路电能质量,主要针对三相系统不平衡的抑制。我国神朔电气化铁路实现了三相SVC装置的应用,三相式SVC装置基于电纳补偿原理实现对牵引站无功电流和负序电流的综合补偿。用于电网侧STATCOM装置主要有电网侧三相STATCOM装置和电网侧两相STATCOM装置。目前日本在电铁供电系统STATCOM装置的研究和工程实践方面处于领先地位。

5. 未来发展方向

针对电气化铁路未来治理措施的研究,主要是对这些现有措施进行优化,比如:同相供电技术的完

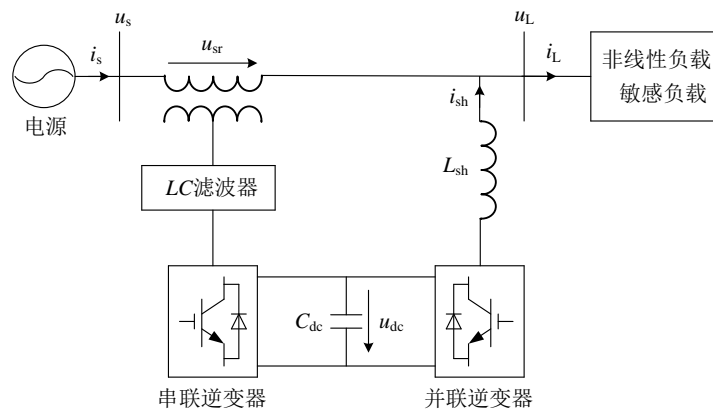


Figure 3. Basic structure diagram of UPQC

图 3. UPQC 基本结构图

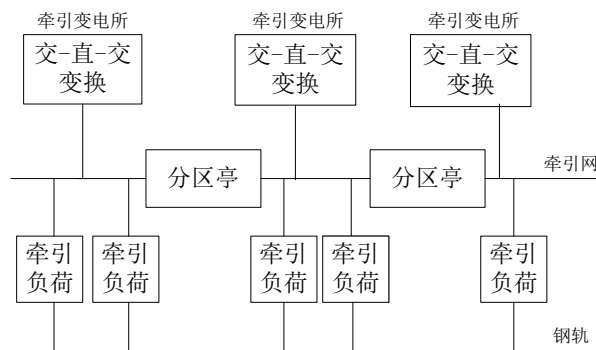


Figure 4. Structure diagram of independent co-phase power supply system

图 4. 独立同相供电方式系统结构图

善。我国西南交通大学学者提出了采用独立同相供电方式的想法，独立的同相供电方式为从根本上解决电气化铁路牵引负荷带来的三相不平衡问题提供了新的思路。电力电子技术的快速发展，更有利于独立同相供电方式的实现。图 4 所示为独立同相供电方式的系统结构图，图中牵引变电所由公用电网供电，通过“交-直-交”大功率电力电子变流装置实现电气化铁道内部牵引网的单相同相供电。牵引网从公用电网侧看进去是一个对称负荷，故不存在三相不平衡的问题。除此之外，该系统可以很大程度上将牵引供电系统与电力系统隔离开来，使得电力系统与牵引供电系统互不影响。同时，该方式下电分相环节被取消，有利于列车高速运行。独立的同相供电方式不仅满足电气化铁路高速重载的要求，并且对于负序治理效果显著。

6. 结论

本文论述了电气化铁道牵引负荷接入电网后带来的谐波、负序等电能质量问题及其对电力系统各环节的影响。对目前常用的改善公用电网电能质量的治理措施进行了分类总结，并提出未来治理可能的发展方向，可为正确认识电气化铁路接入电网后的电能质量问题及后续治理提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 高然, 永海, 夏瑞华. 电气化铁路负序电流对发电机负序过电流保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 41-45.

- [2] Liu, Y.-Q., Wu, G.-P., Hua, H.-S. and Wang, L. (2011) Research for the Effects of High-Speed Electrified Railway Traction Load on Power Quality. *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, **10**, 569-573.
- [3] 刘育权, 吴国沛, 华煌圣, 等. 高速铁路牵引负荷对电力系统的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 150-154.
- [4] 王紫珏. 电气化铁路牵引负荷电能质量评估[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013: 7-8.
- [5] 张渊源. 典型非线性负荷接入电网电能质量特性分析与评估[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2014: 15-17.
- [6] 刘莹. 电气化铁路接入对电网电能质量的影响评估及治理研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2014: 24.
- [7] 谭秀炳. 交流电气化铁路牵引供电系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009: 1, 184-185.
- [8] 李亚楠. 电气化铁路牵引供电容量优化的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2013: 8.
- [9] 刘福生, 聂光前. 利用阻抗匹配方案构成的新型平衡变压器[J]. 铁道学报, 1998, 10(4): 16-22.
- [10] 郭宝库. 三相变两相平衡变压器[P]. 中国专利: ZL92232298.8.
- [11] 张志文. 星形-双梯形接线三相变四相或三相变两相平衡变压器原理研[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 78-82.
- [12] Deng, M.-L., Wu, G.N., Zhang, X.Y., Fan, C.-L., He, C.-H. and Ye, Q. (2008) The Simulation Analysis of Harmonics and Negative Sequence with Scott Wiring Transformer. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, 21-24 April 2008, 513-516.
- [13] 李群湛, 张进思, 贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究[J]. 铁道学报, 1988, 10(4): 23-31.
- [14] 祁忠永. 电气化铁路同相供电方案及经济性分析[J]. 电气化铁道, 2013(4): 23-26.
- [15] 夏焰坤, 李群湛, 解绍峰, 等. 电气化铁道贯通同相供电变电所控制策略研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(8): 25-31.
- [16] 张刚毅, 李群湛. 电气化铁道异相供电方式向同相供电方式的转换[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 142-145.
- [17] 解绍峰. 电气化铁路理想同相供电系统供电方案及其优化研究[J]. 学术动态, 2012(2): 10-13.
- [18] 于坤山, 周胜军, 王同勋, 乔光尧, 等. 电气化铁路供电与电能质量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 204.
- [19] 许志伟, 罗隆福, 张志文. 一种新型电气化铁道电能质量综合补偿[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 266-272.
- [20] Mochinaga, Y., Hisamizu, Y., Takeda, M., Miyashita, T. and Hasuike, K. (1993) Static Power Conditioner Using GTO Converters for AC Electric Railway. *Conference Record of the Power Conversion Conference*, Yokohama, 19-21 April 1993, 641-646. <http://dx.doi.org/10.1109/pccon.1993.264181>
- [21] 张鑫, 江全元. 基于 V/v 接线变压器的铁路功率调节器容量配置和能量优化补偿策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 102-108.
- [22] 张志文, 王丹, 胡斯佳, 等. 一种混合型电气化铁道电能质量综合治理系统及其容量分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 89-94.
- [23] Ma, F.J., Luo, A., Xu, X., Xiao, H., Wu, C. and Wang, W. (2013) A Simplified Power Conditioner Based on Half-Bridge Converter for High-Speed Railway System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **60**, 728-738. <http://dx.doi.org/10.1109/tie.2012.2206358>
- [24] 陈柏超, 张晨萌, 袁傲, 等. 基于 V_v 牵引供电系统的混合式电能质量补偿研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 60-69.
- [25] 马伏军, 罗安, 徐先勇, 等. 大功率混合型电气化铁路功率补偿装置[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 93-102.
- [26] 荆龙, 唐芬, 王之赫. 基于模块化多电平换流器的牵引供电系统电能质量治理方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 173-179.
- [27] 王之赫, 童亦斌, 荆龙. 基于 MMC 的铁路功率调节器方案对比[J]. 电气传动, 2015, 45(4): 46-59.
- [28] Pei, S.P. and Chen, Y.G. (2011) The Control and Compensation Strategy Research of Unified Power Quality Conditioner. *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, Xianning, 16-18 April 2011, 1775-1778.
- [29] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 牵引变电所电能质量混合态治理技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 48-55.
- [30] 寇磊, 罗安, 吴传平, 等. 基于两相三线变流器的新型高铁电能质量补偿装置[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 224-229.