

SVC 和 STATCOM 在电气化铁路中应用新进展

万庆祝¹, 张 辉¹, 陈建业², 吴命利¹, 朱桂萍², 王 科²

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044;

2. 清华大学 电力系统及大型发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要:随着我国高速铁路的快速发展, 牵引供电负荷造成的负序分量、供电臂功率不平衡等电能质量问题正愈加严重, 成为制约电力系统和高速铁路安全稳定运行的一个因素。文章详细介绍了国内外 Static Var Compensator (SVC) 和 Static Synchronous Compensator (STATCOM) 在电气化铁路中的具体应用, 并进行了比较, 提出了适合我国高速铁路的供电方式。

关键词: 高速铁路; 牵引供电; SVC; STATCOM

中图分类号: U223.5³

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)05-0053-06

Current Progresses on SVC and STATCOM Applications in the Electrified Railway

WAN Qing-zhu¹, ZHANG Hui¹, CHEN Jian-ye², WU Ming-li¹, ZHU Gui-ping², WANG Ke²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Lab. Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the rapid development of high-speed railway in China, power quality problems, including negative sequence, power unbalance of traction feeders, etc., caused by the traction power-supply load are more serious, which becomes one of the constraints to safe and stable operation for the power system and high-speed rail. Practical applications of SVC and STATCOM in electrical railways are set forth and compared. The way fit in current applications for high-speed rail is proposed.

Key words: high-speed railway; traction power supply; SVC; STATCOM

0 引言

根据《中长期铁路网规划(2008年调整)》方案, 到2020年, 全国铁路总里程将达到12万km以上, 其中电气化铁路达7.2万km以上, 包括将建设200 km/h及以上的客运专线1.6万km。在“十一五”期间, 将修建11条客运专线, 按200 km/h及以上速度设计的超过9 800 km。这一

规模超过了目前全世界已经建成的所有高速铁路的总里程。

然而由于电气化铁路牵引供电系统存在的特殊性, 随着高速铁路和重载货运铁路的投入运行, 必将给铁路牵引供电系统带来很大的冲击^[1,2]。目前我国高速铁路和重载铁路供电主要采用两相V/v、Scott连接的AT供电方式, 当两供电臂负荷不满足一定条件时, 必然导致反馈回电力系统中的电流含有大量负序电流, 也有可能存在输电臂功率不平衡问题, 例如大同至秦皇岛电气化铁道由于地形的特点, 导致行车组织上的不平衡排车, 使供电臂功率严重不平衡, 加剧了供电臂过负荷程度。为了减少这种危害, 实践中已经采用了一些方法, 如通过改进电路结构等来减少负序电流, 但不能从

收稿日期: 2010-08-02

作者简介: 万庆祝(1975-), 讲师, 博士, 研究方向为电力电子技术、电力系统中的应用、电气化铁道电能质量、电力电子计算机仿真技术等研究。

基金项目: 北京交通大学科技基金项目(2008RC032、KJJB10008536); 铁道部科技研究开发计划基金项目(2009J007-G)

根本上解决问题。随着电力电子技术的发展,以Static Var Compensator(SVC)和Static Synchronous Compensator (STATCOM) 装置为代表的并联型动态无功补偿技术满足这一要求,克服了固定电容等传统补偿措施普遍存在的治理目标单一、对大范围波动的牵引负荷适应性差的缺点。尤其是STATCOM装置在技术手段和补偿性能方面存在的优越性,使其在对电气化铁路牵引变电站恶劣的电能质量问题综合补偿上具有良好的应用前景。

1 牵引供电系统

牵引供电系统主要由牵引变电所和牵引网构成。牵引变电所的主要作用是电能变换及控制,完成单相牵引网与三相电力系统之间的衔接和电压变换;牵引网则负责向行驶中的列车供给电能。牵引供电系统是一个特殊的输配电系统,它大量采用特殊接线的变压器,造成拓扑结构特殊;牵引网供电采用单相、工频供电,其导线、运行条件和网络拓扑结构都具有一定的特殊性。

目前,我国电气化铁路的供电侧电压等级为110 kV 或者220 kV,通过牵引变压器(纯单相接线变压器、三相变压器、Scott变压器等)将三相系统转换为二相27.5 kV 的系统为机车供电,如图1所示。

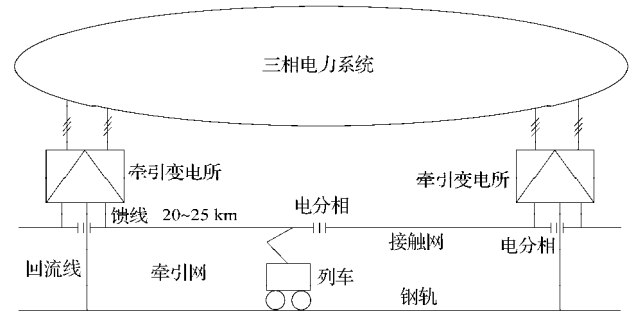


图1 牵引供电系统
Fig. 1 Traction power supply system

以采用三相变压器实现供电的Yd11供电方式为例,其主接线如图2所示。图中牵引变压器的高压侧为Y接线,接到110 kV的三相交流电网上;牵引变压器的低压侧接为三角形,比如,将低压侧的c相接到钢轨或接地母线上,a、b相分别接到27.5 kV的牵引母线上,由于两侧牵引网电位不同,因此在接触网上必须相互绝缘。由于 α 相与 β 相为两个独立的供电区间,其中负荷的运行也相互独立,等效于V型接线。牵引变压器二次侧可当作电流源负荷来处理。根据电路原理分析,可以得到不平衡系统运行工况下的谐波传输特性,此时,三相系统侧谐波分量不仅包含正序分量,也包含大量的负序和

零序分量。

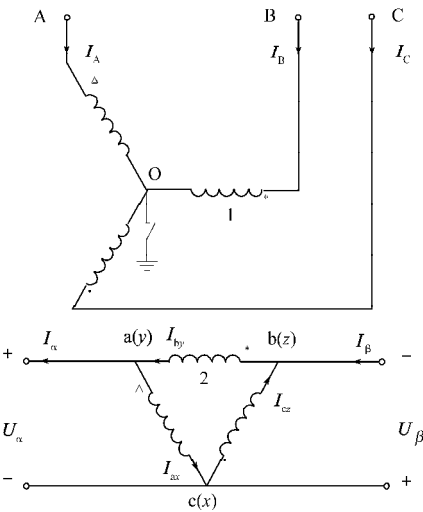


图2 Yd11变压器接线图

Fig. 2 Wiring diagram of the Yd11-connected transformer

针对上述问题,设计中已经从牵引供电方式和安装无功补偿装置两方面对其进行了改进。采用特殊的供电方式和牵引变压器,可以在一定程度上抑制负序分量。如将牵引变电所的供电臂轮换接入电力系统的不同相,如果三个牵引变电所的负荷相等,则从系统侧看是对称负荷。日本的新干线,韩国以及我国很多地方的牵引变压器均采用三相—二相平衡变压器。虽然采用阻抗平衡变压器和Scott接线方式变压器等特殊接线型式的变压器和供电方式,可以减轻这种单相负荷不平衡对系统的影响,但前提是保证牵引变电所两供电臂负荷平衡。由于目前条件的限制,这种前提难以满足,所以采用结构上的补偿不可能达到良好的结果。因此,寻找一种随负荷变动动态调节各相补偿度的方法是有效地控制电气化铁路负序分量危害的关键。

2 静止无功补偿器(SVC)在电气化铁路中的应用

并联无功补偿的直接目的就在降低无功电流和负序电流。采用三相SVC是治理电气化铁路负荷所产生的谐波、负序和电压波动等问题,并综合提高电网电能质量的技术成熟、有效的手段。SVC通过晶闸管控制的电抗器(TCR)、采用基于“Steinmetz”原理^[3-4]的三相平衡化控制策略,进行动态无功功率补偿、电压控制和负序治理。这种控制方法既能平衡三相无功功率,同时也能平衡三相有功功率,因而是一种效果较好的方法。

国外的很多电气化铁路采用了SVC补偿技术。在澳大利亚的昆士兰铁路^[5-6],9套安装在牵引变电所的SVC动态调节总容量达到600 Mvar,平均每套SVC约

70 Mvar;英国的Channel Tunnel Rail Link用于补偿负序的 SVC 可调范围是 $-80\sim+170$ Mvar, 远大于最大负荷 140 MVA。采用三相 SVC 进行动态无功功率补偿、电压控制和负序治理已经在实践中被证明是行之有效的方法。投入 SVC 后昆士兰铁路的负序电压降到了 0.8 %, Channel Tunnel Rail Link 的负序降到了 0.1 %,此外日本进行的模拟试验也表明采用三相 SVC 可以使负序电流减小 70 % 以上^[7-8]。

SVC 动态无功补偿装置的使用,使得牵引负荷动态的无功需求得以满足,可以很好地补偿系统所需的无功功率;但是引入 SVC,也给牵引系统带来了谐波问题^[9]。由于牵引负荷的非线性已经导致了系统中谐波含量较高,再加上 SVC 中 TCR 部分本身产生的谐波,使得牵引变电所在使用 SVC 补偿装置时,不仅要考虑无功、负序问题,同时还要考虑滤波问题。

对于电气化铁道这种时变负荷,如果选择适当的无源器件(L,C)对不平衡的负荷进行固定补偿,不可能得到良好的效果,所以采用晶闸管连续控制的电抗(TCR)与固定电容器(FC)或晶闸管投切的电容器(TSC)并联的方法来调节系统的负序阻抗显然是一个可行的选择。

常用的补偿装置主要有两种:

(1) 两相 TCR 补偿

对两个供电臂进行补偿的装置如图 3 所示,该装置于 1992 年起应用于日本东海道新干线西相模变电所^[10],适用于 SCOTT 结线的铁道供电系统,总容量为 $\pm 15 \times 2$ MVA 用于补偿功率为 20 MW 的高速动车。其控制方案为检出负荷中的负序电流,根据负荷特性(即负序电流和参考电压的相位关系)计算控制量,即应当注入补偿电路 SVC 中的无功电流的数值,并据此对 TCR 中的晶闸管触发信号加以控制,从而达到补偿的目的。

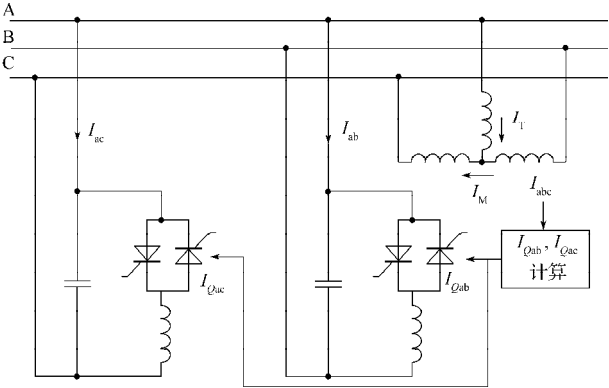


图 3 两相 TCR 负序电流补偿 SVC
Fig. 3 Two-phase TCR negative current compensating SVC
(2) 三相 TCR 补偿

适用于 Y/Δ 连接的三相变电所的三相无功补偿装置如图 4 所示,该装置应用于澳大利亚 Grantleigh, 同样也是利用固定电容(构成 3, 5 次滤波器)与 TCR 相并联实现的^[11-12]。它根据实时计算的各相所需的补偿量来独立控制三相 TCR 的开通。SVC 的最大补偿容量是根据 PCC 点受不平衡负载影响的程度决定的。当负载超出了 SVC 所能够补偿的范围时,负序电流会迅速增长。实验结果,负序电压由 SVC 投运前的最大 4.5 % 下降到 0.8 %,具有很好的负序治理效果,显示如图 5 所示,图中, U_1 为正序电压; U_2 为负序电压。

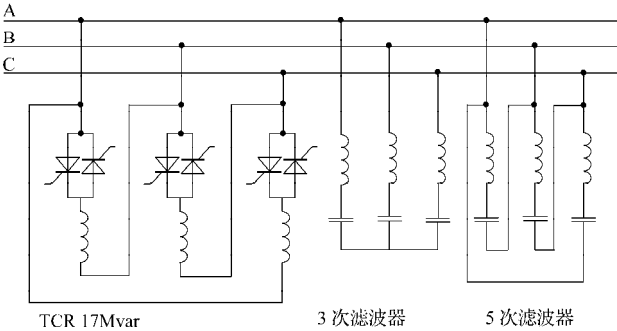


图 4 三相 TCR 补偿装置 (Grantleigh)
Fig. 4 Three-phase TCR compensating equipment (Grantleigh)

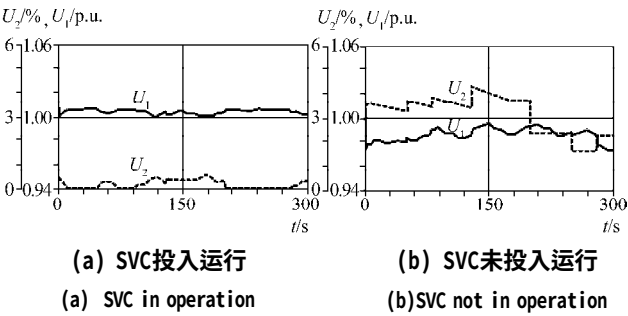


图 5 SVC 补偿效果
Fig. 5 Compensating effect of SVC

实践证明上述两种方法均可得到良好的补偿效果。

目前我国利用 SVC 进行负序补偿的工程实例还不多,大多数 SVC 是用来进行动态无功、功率因数的调节。2006 年京沪线电气化改造完成后,针对改造后的电铁污染问题越来越引起人们的关注。为此,2007 年铁道部将京沪线上的安定、三界、南翔 3 个牵引变电所作为试点工程进行电气化铁路电能质量治理,安装了 SVC 和 SVG 装置^[13]。

京沪铁路的安定变电所安装了 SVC 装置,如图 6 所示。牵引变电所装设两台单相接线牵引变压器,作 V/V 连接。变压器一次侧分别接入电力系统的 BC 相和 AC 相;二次侧各有一端分别接到牵引侧的两相母线上,另一端与轨道及接地网连接,bc 相向左边供电臂的牵引网供电,ac 相向右边供电臂的牵引网供电,即通常所说

的60°接线。在二次侧两牵引相上各装设一组固定滤波器加晶闸管控制电抗器(FC+TCR),固定滤波器分为3、5、7次3个单调谐滤波支路。测试结果表明,3、5、7次谐波含量明显减少,功率因数从0.78提高到0.94^[9]。

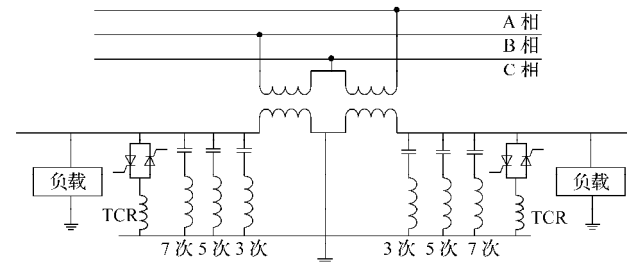


图6 安定牵引变电所 SVC 装置原理图
Fig. 6 Schematic diagram of SVC equipment for AnDing traction substation

SVC 补偿方法的特点是结构简单,所用的器件为普通的晶闸管,因此造价相对较低;由于我国可以自行生产晶闸管,且应用技术也较为成熟。虽然其响应速度较之采用GTO 的无功发生器而言要慢,但是由于电气化铁道负荷为连续变化的负荷,而对于短时间的冲击性负序电流,电力系统的承受能力较强,所以完全可以得到满意的补偿效果^[14]。

但是,针对电气化铁路的负序问题,国内目前只有少数几个牵引变电所专门安装SVC 来解决。

3 静止同步补偿器 (STATCOM)

相对于SVC 而言,STATCOM 具有相应速度更快、负荷率适应性好、工作效率高、输出谐波含量小的优点。尤其是采用两相结构的STATCOM 可以实现有功、无功功率的四象限控制,可在对变电所两供电臂无功动态补偿的同时,调节两供电臂的有功潮流,实现其负荷的动态平衡。

国外从20 世纪80 年代开始研究STATCOM 动态电压补偿技术^[15]。由于STATCOM 通常在直流侧仅利用电容提供直流电压支撑,因此它一般不能提供持续的有功功率;但若将直流侧改换为一个电源,作为电压源逆变器的STATCOM 就可以用来与系统交换能量。在Scott 变压器的两条供电臂上各接一个单相变流器,它们通过中间直流环节实现互连。控制两个变流器的工作方式,使它们互为对方的直流电源,从而在两条供电臂之间实现有功功率融通;当然这种结构也具有普通STATCOM 的功能,可以进行无功补偿,提高电压稳定性。在采用阻抗匹配平衡变压器或Scott 接线变压器时,两供电臂有功负荷平衡,则可以完全消除负序。据此可以通过在牵引变压器二次侧(27.5 kV 侧)安装两个单相

STATCOM 装置,通过进行无功补偿和有功功率的相间转换,实现牵引变电站的功率因数补偿和负序改善。

基于以上原理,日本研制出了能量融通型铁路功率调节器(Railway Power Conditioner,简称RPC),它包括通过中间直流电容耦合的两个单相变流器,分别连接到两相负荷的牵引臂上^[16-17],如图7 所示。它利用变流器可以输出与吸收有功功率的特点,通过共用中间直流电容作为换能环节的两个单相变流器,使负荷小的一侧的变流器从牵引电网吸收二臂负荷差的一半的有功功率送入电容,而负荷大的供电臂所连接的变流器则从中间直流电容吸收该部分有功功率送入牵引电网,从而达到二臂功率平衡的目的。实现两个供电臂之间的有功功率融通的同时,还可以利用变流器的无功补偿能力维持相应供电臂的电压恒定。

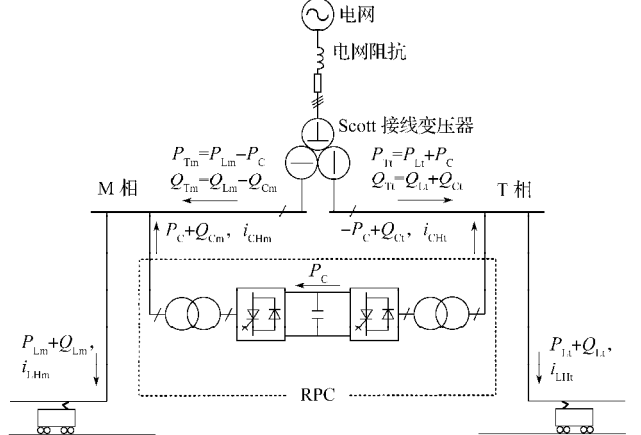


图7 能量融通型补偿装置 (RPC) 系统结构图
Fig. 7 System configuration of compensation equipment with energy exchange (RPC)

图7 中,有功功率的流动满足式(1):

$$\left. \begin{aligned} P_C &= (P_{Lm} - P_{Lt}) / 2 \\ P_M &= P_{Lm} - P_C = (P_{Lm} + P_{Lt}) / 2 \\ P_T &= P_{Lt} + P_C = (P_{Lm} + P_{Lt}) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由式(1) 看出,当 $P_M = P_T$ 时,M 相、T 相负荷有功平衡。

图7 中,无功功率的流动满足式(2):

$$\left. \begin{aligned} Q_{Cm} &= -Q_{Lm} \\ Q_{Ct} &= -Q_{Lt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, P_{Lm} 、 P_{Lt} 、 Q_{Lm} 、 Q_{Lt} 分别为两个供电臂机车的有功、无功负荷; P_C 为RPC 中间直流环节传输的有功负荷。

由于两个变流器向电容注入与吸出的有功功率之和为零,所以电容电压将始终维持恒定,RPC 所传输的有功功率、无功功率和所吸收的谐波电流大小装配比率可以在变流器容量范围内灵活地设定,因此RPC 可以成功地应用于各种类型接线的电气化铁路牵引变电所的不对称补偿之中。

法国国家电网公司要求牵引变电站与电网接口的电压变化、负载平衡度和谐波要达到所规定的要求，而建设新的线路要耗费大量的时间和投资，所以在法国的Evron牵引变电站安装了ABB公司生产的SVC Light设备^[18]（在ABB公司，STATCOM亦称做SVC Light），如图8所示。

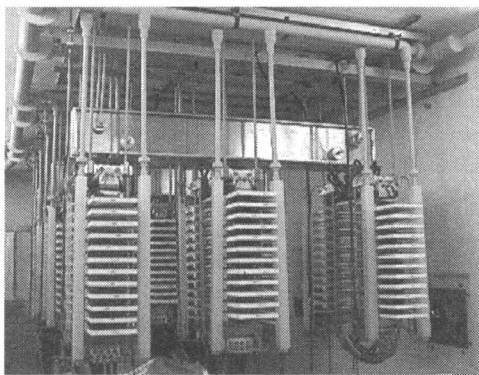


图8 SVC Light 阀体
Fig. 8 Valve of SVC Light

STATCOM装置不但改善了由于单相供电引起的相间问题，而且起到了有源滤波的作用，补偿装置额定电压为90 kV，容量为16 Mvar，单相可提供17 MW的有功负荷，基本结构如图9所示。当短路容量大于600 MVA时，电压的不平衡率保持在1%以下；当短路容量在300 MVA与600 MVA之间时，电压的不平衡率保持在1.5%以下。该装置的投入，明显改善电能质量，实测结果如图10所示。

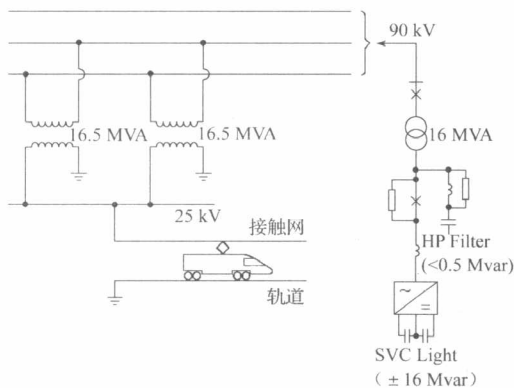


图9 Evron 90kV 负荷平衡器的单线图
Fig. 9 Single-line diagram of the Evron 90kV Load Balancer

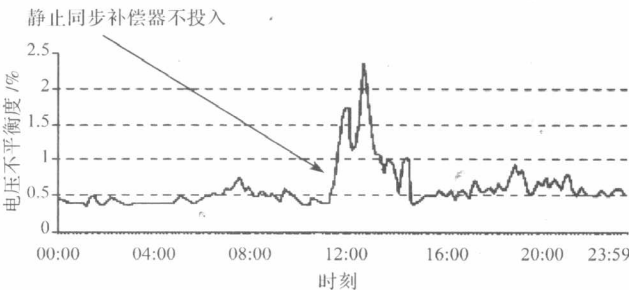


图10 实测的电压不平衡度
Fig. 10 Measurement of voltage unbalance

在电气化铁路领域另一做法是采用一个比电网频率适当低的单相交流系统进行供电。ABB与Siemens合作在德国联邦铁路采用了类似的背靠背式的变频装置，也是一种基于GTO或IGCT的、间接式三相变单相系统，如图11所示。电网侧三相变流器的负荷为直流中间环节，对于电网而言，它可以提供良好的三相对称特性。

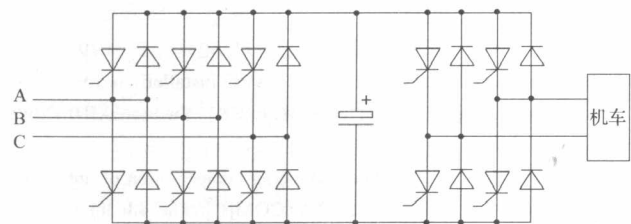


图11 背靠背供电系统
Fig. 11 Back-to-back power supply system

4 结语

负序和功率不平衡问题一直困扰着牵引供电系统，虽然通过改变接线的结构，可以消除一部分负序分量，但是没有从根本上解决问题。SVC较好地解决了负序和谐波的问题，而且由于其技术成熟，应用较多。大容量STATCOM研究的进展为从根本上解决该问题提供了方法，它可以同时解决负序和功率平衡等问题。

我国正在兴建的高速客运专线和重载货运线，由于多数采用了交-直-交流型电力机车，因此，机车产生谐波小、功率因数高。但机车牵引功率大，牵引站的负荷也大，由此产生的负序电流较过去的电气化铁路更严重。比如，对于大秦线而言，由于外部电源薄弱造成接触网电压偏低，牵引变压器过负荷，限制了大秦线运输能力的提高。现有的补偿装置一般旨在解决包括电压质量、负序补偿和功率因数补偿等多项指标。我们可以设计新型的STATCOM补偿装置，在不增加原来变电站容量的前提下，充分利用整个设计容量，大幅度降低改造成本，同时又满足重载列车运行的需要。

参考文献：

[1] 吴命利. 牵引供电系统电气参数与数学模型研究[D]. 北京：北京交通大学，2006.
[2] 王同勋，于坤山. 电气化铁路负荷对电网电能质量的影响及对策[J]. 供用电，2009，26(3)：8-12.
[3] 米勒T.J.E. 电力系统无功功率控制[M]. 北京：水利电力出版社，1990.
[4] 林海雪. 电力系统的三相不平衡[M]. 北京：中国电力出版社，1998.
[5] Ledwich G, George T A. Using phasors to analyze power system negative phase sequence voltages caused by unbalanced loads[J]. IEEE Transactions on Power systems, 1994, 9(3)：1226-1232.

- [6] Ledwich G, George T A. Negative-phase-sequence reduction with adjacent static reactive-power compensators[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1994, 4(5): 259-263.
- [7] 電気学会, 静止形無効電力補償装置の省エネルギー技術調査専門委員会. 静止形無効電力補償装置の省エネルギー技術[G]//日本東京: 電気学会技術報告 第973号. 2006.
- [8] 電気学会, 鉄道におけるパワーエレクトロニクス技術調査専門委員会. 鉄道におけるパワーエレクトロニクス技術[G]//日本東京: 電気学会技術報告 第979号. 2006.
- [9] 麻建宗. 牵引变电所电能质量治理测试与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [10] 持永芳文. 静止反相电流补偿装置[J]. 电学论B, 1992(7).
- [11] ABB Power Transmission. Multiple SVC installations for traction load balancing in central Queensland[R]. Sweden: ABB Power Systems AB.
- [12] Zhu Yongqiang, Liu Wenhua. Balancing compensation of unbalanced load based on single phase STATCOM[C]//The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2004), 2004: 425-429.
- [13] 黄足平, 姜齐荣. 京沪线南翔牵引变电所有源无源混合补偿方案[J]. 电气化铁道, 2009, (5): 1-5.
- [14] 文 珺, 陈建业. SVC和STATCOM在电气化铁道中的应用[J]. 机车电传动, 2003(3): 7-11.
- [15] 罗承廉, 纪 勇, 刘遵义. 静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [16] Celli G, Pilo F, Tennakoon S B. Voltage regulation on 25kV AC railway systems by using thyristor switched capacitor[C]//Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings, 2000(2): 633-638.
- [17] Tetsuo UZUKA, Shouji JKED0, Keiji UEDA. A Static Voltage Fluctuation Compensator for AC electric railway[C]//2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen Germany, 2004: 1869-1873.
- [18] Gruenbaum R. FACTS for power quality improvement in grids feeding high speed rail traction[C]//IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2007), Antalya, TURKEY, 2007: 618-623.

.....

(上接第48页)

5 结语

双轮直驱电动汽车相对于传统电动汽车有着质量轻、节能、响应速度快等优点,但是由于减去了机械差速器,需要对驱动轮同步控制。本文提出的一种新型的电机同步控制策略,转速能够反映驱动轮上的负载扰动;直线行驶时,要求驱动轮速度完全一致;转向运行时,要求驱动轮存在速度差,实现对电动汽车操纵性的控制。通过仿真进一步验证同步策略的可行性,转速能够跟随设定值,实现了在直线和转向过程中的稳定运行,能够保证恒速续航,并且能够克服环境的干扰,实现汽车的稳定运行。

参考文献:

- [1] 王成元, 夏加宽, 杨俊友, 等. 电机现代控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] Massimo C, Lorenzo F, Antonella F, et al. Vehicle Yaw Control via Second-Order Sliding-Mode Technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 3908-3916.
- [3] 余卓平, 姜 炜, 张立军. 四轮轮毂电机驱动电动汽车扭矩分配控制[J]. 同济大学学报, 2008, 36(8): 1115-1119.
- [4] Cong Geng, Toshiyuki U, Yoichi H. Body slip angle estimation and control for electric vehicle with in-wheel motors[C]//The 33rd

Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, 2007: 351-355.

- [5] Yang Yee-Pien, Lo Chun-Pin. Current distribution control of dual directly driven wheel motors for electric vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2008(16): 1285-1292.
- [6] Zhao Y E, Zhang J W, Guan X Q. Modeling and Simulation of Electronic Differential System for an Electric Vehicle with Two-Motor-Wheel Drive[J]. IEEE International Conference, 2009 (10): 1209-1214.
- [7] Toshiyuki Uchida, Shin-ichiro Sakai, Yoichi Hori. Vehicle Stability Improvement Based on MFC Independently Installed on 4 Wheels-Basic Experiments using "UOT Electric March 1"[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Osaka, Japan: 2002: 582-587.
- [8] Nobuyoshi Mutoh, Yuki Nakano. Dynamic Characteristic Analyses of the Front-and Rear-Wheel Independent Drive Type Electric Vehicle (FRID EV) When the Drive System Failed during Running under Various Road Conditions[C]//Vehicle power and Propulsion conference. 2009: 1162-1169.
- [9] 宋明国. 轻型汽车线控转向技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [10] Mutoh N, Takahashi Y, Tomita Y. Failsafe Drive Performance of FRID Electric Vehicles With the Structure Driven by the Front and Rear Wheels Independently[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2306-2315.
- [11] Francisco J, Perez-Pinal, Ilse Cervantes. Stability of Electric Differential for Traction Applications[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007, VPPC 2007, IEEE, Arlington, TX, 2007: 771-776.