

STATCOM 治理电弧炉的研究

刘华东, 王卫安, 黄燕艳

(株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 电弧炉在冶金行业的广泛应用引起了一系列的电能质量问题。文章根据电弧炉负载特性, 结合 STATCOM 补偿装置快速的响应能力和良好的电压电流特性, 采用 STATCOM 的电压电流双闭环控制策略来抑制电弧炉引起的电压闪变。仿真和试验结果表明, 该闭环控制策略补偿电弧炉负载是可行和有效的。

关键词: 电能质量; STATCOM; 电弧炉; 闪变; 双闭环控制

中图分类号: TM761+.1; TM748.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-8410(2011)04-0065-05

Study of STATCOM Used for Governing the Electric Arc Furnaces

LIU Hua-dong, WANG Wei-an, HUANG Yan-yan

(Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The extensive application of EAF in the metallurgical industry has caused a series of power quality problems. According to the characteristics of EAF, combining with the quick response and good voltage and current characteristics of STATCOM device, this paper adopts STATCOM voltage and current double closed-loop control strategy to restrain the voltage flicker caused by EAF. Simulation and experimental results show that the STATCOM voltage and current double closed-loop strategy used for compensating EAF is feasible and effective.

Key words: power quality; STATCOM; electric arc furnace (EAF); flicker; double closed-loop control

0 引言

电弧炉以其灵活性、可靠性、较快的冶炼速度、较优的冶炼质量及较少的投资费用等优势在冶金行业得到广泛应用^[1]。但由于其冶炼过程中有功功率和无功功率会发生频繁而急剧的变化, 且正常情况下供电系统的阻抗比系数很小, 无功功率的剧烈变化将引起公共联结点电压短时而快速地变化, 从而导致其他用电设备不能正常工作, 甚至损坏。因此, 国内外都相继推出了一系列的电压波动和闪变标准以保证供电系统的电能质量^[2-6]。

为减小电弧炉给电网带来的电压闪变和波动, 目前较为传统的补偿方式为静止无功补偿器(SVC), 其

基本原理就是使电弧炉和SVC补偿装置所吸收的无功功率(电流)之和尽可能小, 从而使系统中公共点的电压脉动降到最小, 达到抑制闪变的目的^[7]。由于电弧炉的工作电流往往急剧变化, SVC的响应速度相对较慢, 而且闪变抑制的效果与补偿容量和响应速度直接相关。而基于可关断器件的STATCOM装置能够快速平滑地吸收无功功率, 调节系统电压, 校正功率因数。因此为了抑制电弧炉电压闪变, STATCOM逐渐成为研究热点^[8-10]。

本文首先通过原理分析和实测波形来说明电弧炉的负载特性, 其次介绍了STATCOM的电流电压特性, 然后再根据电弧炉负载特性, 并结合STATCOM的电压电流特性, 最终建立了STATCOM的电压电流双闭环控制模型。大量的仿真和试验结果都表明, 本文所提出的治理电弧炉的STATCOM电压双环控制模型是正确的。

收稿日期: 2011-06-10

作者简介: 刘华东(1982-), 男, 工程师, 从事无功补偿及谐波治理研究工作。

1 电弧炉负载特性

电弧炉冶炼过程可以简单地分为熔化期和精炼期。电力负荷在熔化期(起弧→穿孔→塌料阶段)变化剧烈,而在精炼期逐渐趋于稳定。电弧炉在熔化期出现的电弧截断及短路现象,将使三相电流急剧变化,产生无功冲击。

图1为电弧炉运行的功率圆图,当电弧炉运行处于熔化期时,三相电极与炉料短路,对应图1中的B点,此时电流无规则变化,无功功率最大波动量为 Q_{max} 。电弧炉运行中无功功率变化如图2所示。实测表明,此时无功功率波动最大,而功率因数很低,约为0.1至0.2,负荷波动最大值为1.5~3倍电弧炉变压器的额定容量(数值取决于系统和电炉的有关参数)。

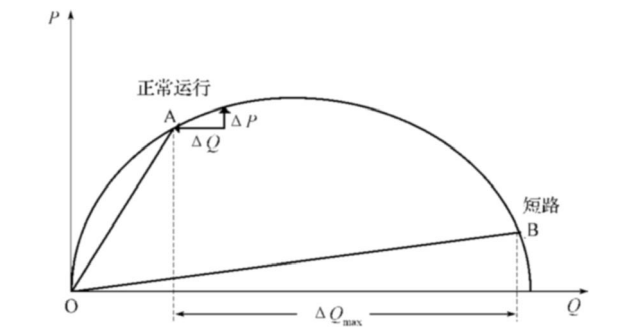


图1 电弧炉运行功率圆图
Fig.1 Power circle diagram of EAF running

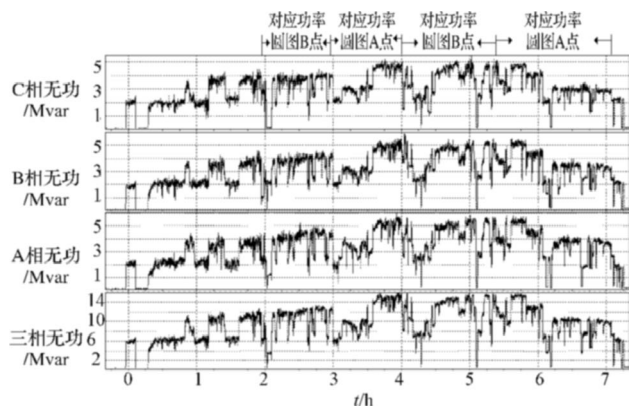


图2 电弧炉运行中无功功率变化趋势
Fig.2 The changing trends of reactive power when the EAF is running

当电弧炉正常运行时,对应图1中的A点,此时的功率因数约为0.7至0.85 无功功率和有功功率都趋于稳定;当电弧炉熄弧时,对应图中的O点,此时电流为0。

由于各相不平衡电流、各相断续电流和半波不平衡电流(图3)导致电网在不同时间和不同相位产生的有功功率和无功功率值发生变化,这样不规则的电流会使电网电压波动,产生闪变效应,同时将产生谐波电流注入电网,使电网电压发生畸变。

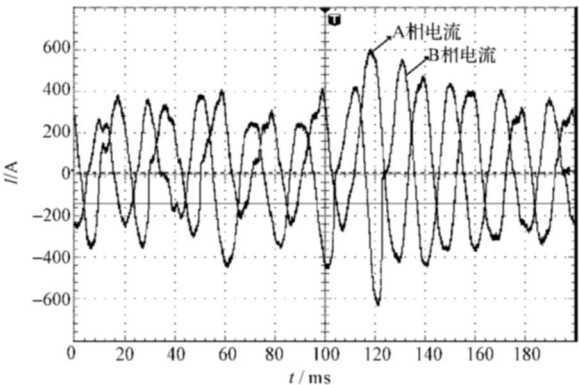


图3 母线电流急剧变化
Fig.3 Abrupt changes of bus current

2 STATCOM 的特性

STATCOM 的基本工作原理可以用单相等效电路图来说明,如图4所示。电网电压和STACOM输出的交流电压分别用矢量 U_s 和 U_i 表示,则连接电抗 X 上的电压 U_L 即为 U_s 与 U_i 的矢量差,而连接电抗上的电流是可以由其电压来控制的。这个电流就是STATCOM从电网吸收的电流 I 。因此,改变STATCOM交流侧输出电压 U_i 及其相对于 U_s 的相位,就可以改变连接电抗上的电压,从而控制STATCOM从电网吸收电流的相位和幅值,也就控制了STATCOM吸收无功功率的性质和大小^[11]。

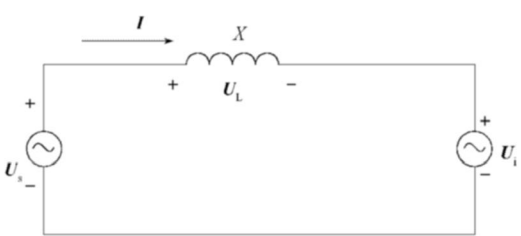


图4 STATCOM单相等效电路
Fig.4 STATCOM single-phase equivalent circuit

STATCOM本质上是一个幅值和相位均可以控制的、与电网同频率的交流电压源,其V-I和V-Q特性如图5所示。从图5可以得知:

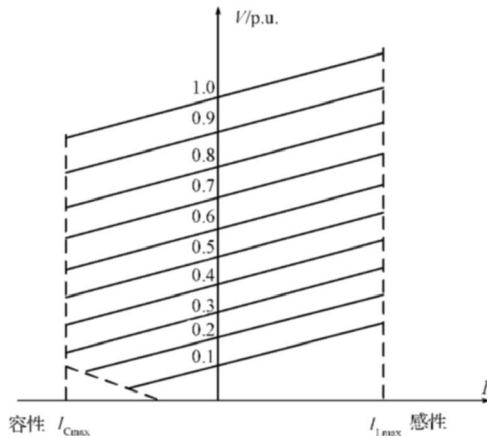
(1) STATCOM控制系统的参数(电网电压的参考值 U_{ref})可以使V-I曲线上下移动,而且当电网电压下降、STATCOM的V-I特性向下调整时,STATCOM可以调整变流器交流侧电压的幅值和相位,以使得其所能提供的最大无功电流 I_{Cmax} 和 I_{Lmax} 维持不变;

(2) STATCOM吸收的最大感性和容性无功功率与电网电压成线性关系;

(3) 由于STATCOM输出的电流不受电网电压影响,且STATCOM采用可关断器件,所以如果对STATCOM补偿的无功电流或无功功率进行反馈控制,

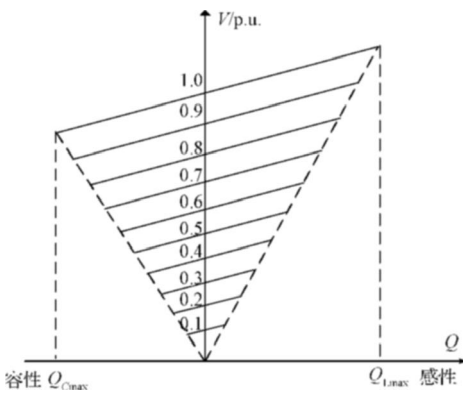
其响应速度(小于5 ms)将超过传统的SVC(20 ms)。

双闭环采用电压外环和电流内环的结构。



(a) V-I 特性

(a) V-I characteristics



(b) V-Q 特性

(b) V-Q characteristics

图5 STATCOM 的 V-I 和 V-Q 特性

Fig. 5 V-I and V-Q characteristics of STATCOM

3 STATCOM 的电压电流双环控制

在电弧炉负载供电系统中,电流的变化随机无规则,电压波动原因不易明白,系统参数不易测定;而 STATCOM 为柔性补偿装置,对电网电压不敏感,输出最大容量不受电网电压影响。所以在设计 STATCOM 控制系统时,可以直接对电网电压进行闭环控制,建立 STATCOM 的电压电流双环控制模型。

STATCOM 接入电弧炉供电系统中的单相示意图如图6所示。图中,电源电压为 U_s , 输电线路阻抗为 $R_s + j\omega L_s$, U_{pcc} 为电网公共点 Pcc 的电压,电弧炉负载为 $R_L + j\omega X_L$; STATCOM 包括连接电抗 L_f , 变流器 T, 直流电容 C_d 和控制器。控制器采集电网电压 U_{pcc} 、变流器电流 i_c 和直流侧电压 U_d , 调节出脉冲 P 来控制变流器 T 发出的电压 U_i 的幅值和相角以稳定电网电压 U_{pcc} 。

为了抑制电弧炉配电网中公共点 Pcc 的电压波动,本文中的 STATCOM 采用电压电流双闭环的控制策略。

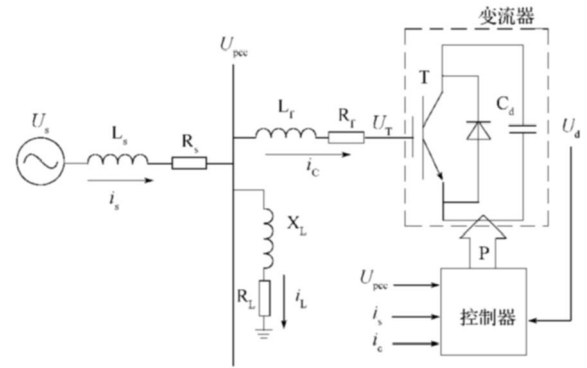


图6 STATCOM 在配电系统中的单相示意图

Fig. 6 STATCOM single-phase diagram in distribution network

如图7所示,电网公共点的目标电压 U_{ref} 与实际电压 U_{pcc} 的差值经过 PI 调节器调节出系统所需的无功电流 i_{qref} , 构成交流电压外环,用于稳定电弧炉系统中的电网电压;变流器直流侧目标电压 U_{dref} 与实际直流电压 U_d 的差值通过 PI 调节器调节出 STATCOM 系统所需的有功电流 i_{dref} , 构成直流电压外环,用于稳定变流器的直流电压。

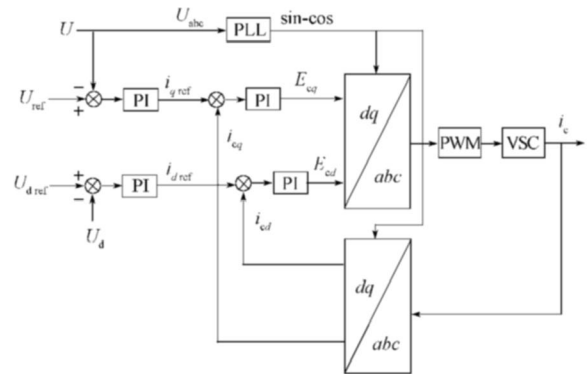


图7 STATCOM 双闭环控制

Fig. 7 STATCOM double closed-loop control

交流电压环调节出的目标无功电流指令 i_{qref} 与 STATCOM 实际输出无功电流 i_{cq} 通过 PI 调节器, 构成无功电流内环; 直流电压环调节出的目标有功电流指令 i_{dref} 与 STATCOM 实际输出有功电流 i_{cd} 通过 PI 调节器, 构成有功电流内环。这样, 无功电流内环和有功电流内环分别调节出变流器在 dq 坐标系下的电压指令 U_d 和 U_q 。 U_d 和 U_q 通过 dq-abc 坐标变换后, 得到变流器所需的电压调制波, 再与三角波比较后, 得到 PWM 信号来驱动变流器, 以控制发出电压 U_i 的幅值和相位。

图7中 PLL 为锁相环, 既可以通过简单的过零锁相实现, 也可以通过 dq 旋转实现。本文采用 dq 旋转实现, 三相 PLL 通过将 d 轴分量控制为零, 从而实现相位和频率的锁定。

4 系统仿真和试验

为了验证本文所提出的治理电弧炉的 STATCOM 电压电流双闭环控制策略 运用 Matlab/Simulink Power System Blockset(PSB)软件对一个补偿容量为 ± 2.4 Mvar 的 STATCOM 系统进行仿真。电弧炉模型由 3 个受控电流源组成 ,如图 8 所示。根据实测电弧炉在熔化期的三相电流波形 ,利用示波器产生电流波形数据 ,将数据导入到 Matlab WorkSpace 模块中 再将数据导入到 Simulink 的受控电流源中 ,从而实际模拟了电弧炉负载电流。

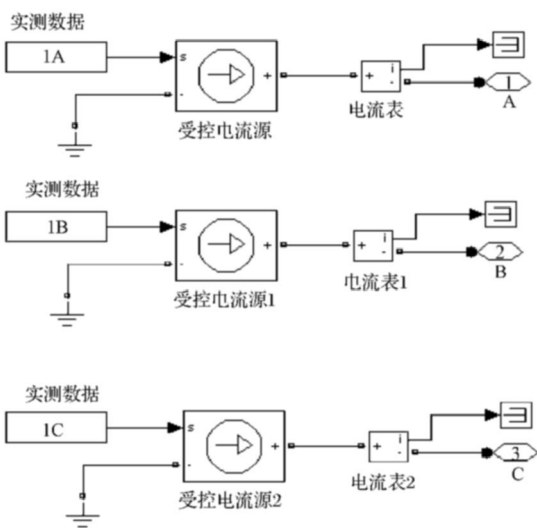


图8 电弧炉仿真模型
Fig.8 EAF simulation model

STATCOM 仿真系统包括 10 kV/550 V 的 $/Y_n$ 型联结变压器 ; 变流器采用三重化并联结构 ,每重采用均流控制 ,每重变流器包括 40 Ω 充电电阻和充电断路器、0.2 mH 连接电抗器和支路断路器、三相 IGBT 桥、20 mF 直流电容和 STATCOM 控制器。直流侧电压为 1 100 V ,开关频率为 2 kHz。

STATCOM 控制器如图 9 所示 ,首先模拟量采集模块对 STATCOM 电流、电网电压和直流电压进行采集 ,

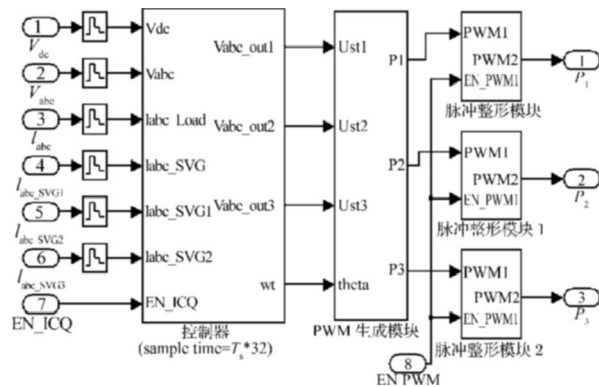


图9 STATCOM 控制模型
Fig.9 STATCOM control model

根据图 7 中的控制思路调节出 E_d 和 E_q ,再经 dq 反变换产生调制波 ,最后利用 SPWM 法产生 PWM 脉冲并进行脉冲整形 ,生成死区和滤除窄脉冲。

如图 10 所示 ,STATCOM 在 0.5 s 之前没有补偿无功 ,只是稳定直流侧电压在额定值 1 050 V ,输出电流接近于零 ;在 0.5 s 后开始输出容性电流以补偿电弧炉的感性电流。

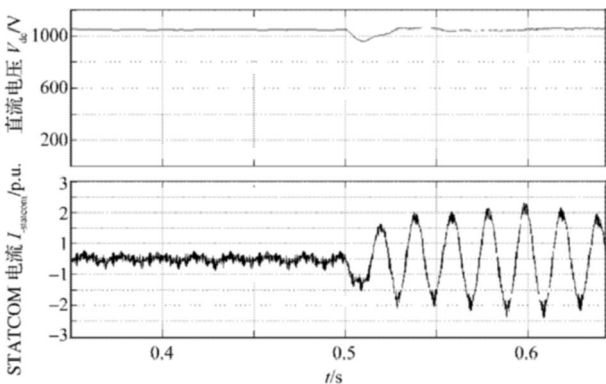


图 10 STATCOM 补偿电流和直流电压
Fig. 10 STATCOM compensative current and DC voltage

如图 11 所示 ,在 STATCOM 补偿前 ,母线电流(图 6 中 i_s)和负载电流(图 6 中 i_L)都剧烈波动 ,同时 Pcc 点电压也波动较大。在 0.5 s 时 ,STATCOM 开始补偿电弧炉电流 ,母线电流波动得到了抑制 ,畸变率变小 ,同时 Pcc 点电压也不再波动 ,稳定在额定值。

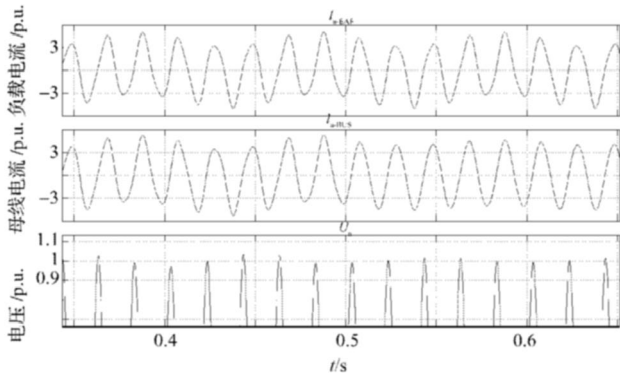


图 11 STATCOM 补偿前后电流、电压对比
Fig. 11 Comparison of current and voltage before and after STATCOM compensation

基于 IGBT 的多重化 STATCOM 样机完成制作后 ,在实验室对本文的控制策略进行了试验验证。系统容量和主电路参数均与上文仿真中一样 ,电抗器选用 0.2 mH 铁心电抗器 ,变流模块由 4 个 1 700 V/600 A 的 IGBT 模块并联而成。通过频繁投切电抗器和电容器来模拟快速变化的感性和容性冲击负荷 ,用示波器来记录试验波形。

如图 12 所示 ,当 STATCOM 处于稳定补偿状态时 ,直流电压维持额定电压值 1 100 V 不变 ,同时 STATCOM

输出相反的无功电流来补偿负载的无功电流。

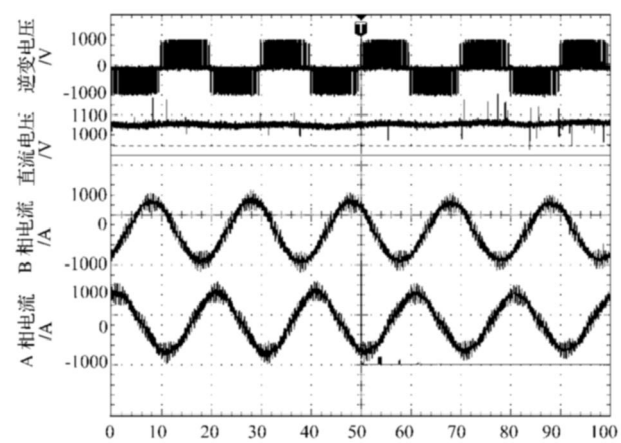


图 12 STATCOM 稳定补偿波形

Fig. 12 Stable compensation waveforms of STATCOM

如图13所示,当部分负载突然切除后,STATCOM控制系统检测到负载变化并计算出电流指令和调制波,改变逆变器的输出电压,从而改变STATCOM输出的补偿电流以抑制电网电压的波动。

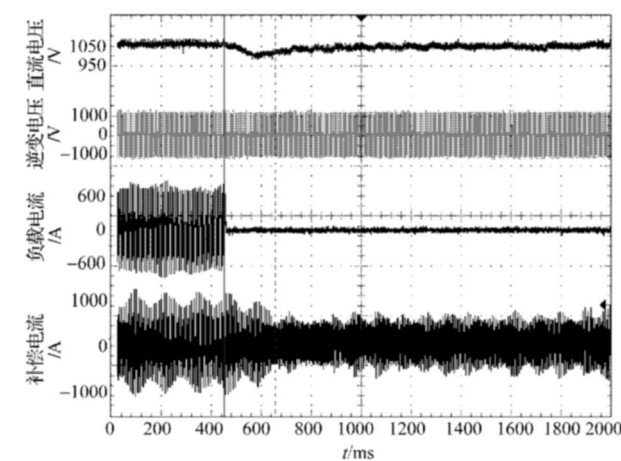


图 13 STATCOM 动态补偿波形

Fig. 13 Dynamic compensation waveforms of STATCOM

由此可见,本文的控制策略能够使STATCOM稳定

地运行,并能快速地响应负荷的变化。

5 结语

本文通过对电弧炉负载和STATCOM特性分析,总结出STATCOM适用于补偿电弧炉负载的原因,并建立了STATCOM补偿电弧炉负载的电压电流双闭环控制模型,仿真和试验结果验证了其控制模型的正确性。

由于STATCOM在治理电弧炉负载电压闪变方面有其独特的优势,随着其在配电领域的不断深入应用,有益于配电系统电能质量的提高。

参考文献：

[1] 张定华,桂卫华,王卫安,等. 大型电弧炉无功补偿与谐波抑制的综合补偿系统[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 23-29.

[2] 刘小河,杨秀媛. 电弧炉电气系统谐波分析的频域方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 30-35.

[3] 翁利民,陈允平,舒立平. 大型炼钢电弧炉对电网及自身的影响和抑制方案[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 64-67.

[4] Ghosh A, Joshi A. A new approach to load balancing and power factor correction in power distribution system[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(1): 417-422.

[5] Toshihiko Tanaka, Shigeyuki Funabiki, Akira Nabae. A new approach to individual-phase reactive power compensator for nonsinusoidal and unbalanced three-phase system[J]. Electrical Engineering in Japan, 2002, 139(3): 73-80.

[6] 《钢铁企业电力设计手册》编委会. 钢铁企业电力设计手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.

[7] 吴杰. 大型电弧炼钢炉SVC方案设计及其实效效果[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 76-79.

[8] 李旷,刘进军,魏标,等. 静止无功发生器补偿电网电压不平衡的控制及其优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 58-63.

[9] 许湘莲,邹云屏,丁凯,等. 基于相移级联多电平逆变器的STATCOM研究[J]. 高压技术, 2005, 31(6): 59-62.

[10] 栗春,姜齐荣,王仲鸿. STATCOM电压控制系统性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 46-50.

[11] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

(上接第12页)

表1 供电系统主要指标对比

Tab.1 Comparison of main parameters of power supply system

	电压波动 / %	最大无功倒送量 / Mvar	平均功率因数
补偿前	2.4	13.48	0.86
补偿后	0.6	0.64	0.95

4 结语

本文对地铁牵引供电系统主要负荷进行建模,分析了负荷无功特性及其对电网的影响,提出了合理的解决方案,并结合国内某地铁工程的具体情况进行验

证。结果表明,该补偿方式能很好地抑制电压波动,提高了地铁供电的可靠性。

参考文献：

[1] 钟俊. 浅谈动态无功补偿装置SVG在地铁供电系统中的应用[J]. 铁道勘测与设计, 2009(3): 84-86.

[2] 高磊,蒋平. 南京地铁供电网络交直流潮流计算[J]. 江苏电机工程, 2006(2): 44-47.

[3] 李夏青,李力. 牵引供电系统采用SVG实现有源无源补偿方法研究与仿真[J]. 铁道学报, 1999(2): 21-24.

[4] 郑瞻虹,张明锐. 城市轨道交通牵引供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.

[5] 穆志光,李汉卿. 轨道交通供电系统无功补偿的研究[J]. 电气化铁道, 2006(4): 33-34.