

静止无功补偿器和发射器在电弧炉 动态无功补偿系统中的应用^{*}

卢 晶¹, 茆华风¹, 傅 鹏^{1,2}, 李 俊¹, 沈显顺^{1,2}, 吴亚楠¹

(1. 中国科学院 等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 合肥 230031)

摘 要: 发展高效绿色电炉冶炼技术是淘汰落后产能、钢铁产业调整升级的重要举措。电弧炉作为核心生产设备,防止其生产运行中无功冲击造成的电压跌落至关重要。而目前单一的有源、无源补偿方式无法同时满足电弧炉负荷日益增长的大容量且快速响应的无功补偿需求。研究了静止无功补偿器(SVC)和静止无功发射器(SVG)相结合的混联补偿方式,分析了 SVC 在分相不平衡大容量补偿及 SVG 在无功快速响应方面中的特性,并针对某钢厂电弧炉工作运行情况,计算其无功需求,充分利用其原有的 SVC 装置,设计混联 SVG 方案来抵消剩余无功缺口,使用 PSCAD/EMTDC 进行了联合应用仿真,证实其理论有效性。

关键词: 电弧炉; 动态无功补偿; SVC/ SVG 联合装置; PSCAD/EMTDC 系统仿真

中图分类号: TM712

文献标志码: A

doi:10.11884/HPLPB201931.180349

Application of static var compensation and static var generator in dynamic reactive power compensation system of electric arc furnace

Lu Jing¹, Mao Huafeng¹, Fu Peng^{1,2}, Li Jun¹, Shen Xianshun^{1,2}, Wu Ya'nan¹

(1. *Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*

2. *Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China*)

Abstract: The development of high-efficiency green electric furnace smelting technology is an important measure to eliminate backward production capacity and upgrade the steel industry. It is essential to prevent voltage drops caused by reactive power shocks in electric arc furnace operations. At present, the single active or passive compensation method cannot meet the need of both the increasing large capacity load and fast response period of reactive power compensation device. The hybrid compensation method combining static var compensation(SVC) and static var generator(SVG) is studied in this paper. The characteristics of SVC in phase-separated unbalanced large-capacity compensation and SVG in fast response of reactive power are analyzed. The reactive power demand of an electric arc furnace is calculated. A hybrid scheme is designed to offset the residual reactive power gap, and PSCAD/EMTDC is applied for joint application simulation to confirm the theoretical validity.

Key words: electric arc furnace; dynamic reactive power compensation; SVC/ SVG joint device; PSCAD/EMTDC system simulation

PACS: 84.70.+p; 88.80.H-; 88.50.Mp

静止无功补偿器(SVC)相对于机械投切电容器组式的无功补偿装备,实现了无功功率精确、平滑补偿,是目前较为先进实用的无功补偿装置,已经得到了广泛应用。另外,SVC 装置具有良好的分相补偿能力,对于电弧炉工作中造成的三相电压、电流不平衡有着独特的治理效果;且晶闸管比全控型半导体开关器件造价低,有着更高的额定电压电流参数,适合拓展于高压、大容量场合。静止无功发生器(SVG)有着更快的响应时间,且可以不借助于无源支路,灵活的产生容性或感性无功功率进行调节。虽受限于目前全控型开关器件的电压容量及经济成本,然而在已经装设了 SVC 装置的工业现场,不改动已有的无源滤波支路,使用 SVG 配合 SVC 进

^{*} 收稿日期:2018-12-03; 修订日期:2019-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51707190)

作者简介:卢 晶(1989—),男,博士,助理研究员,主要从事无功补偿、有源滤波控制方面研究;lujing@ipp.ac.cn。

通信作者:吴亚楠(1986—),男,博士,副研究员,主要从事大容量特种电源与电网兼容性研究;wyn@ipp.ac.cn。

行剩余无功功率补偿,具有非常大的应用拓展空间。本文针对广西某钢厂电弧炉现场,通过 PSCAD/EMTDC 对 SVC 和 SVG 联合方案进行了系统仿真验证^[1-4]。

1 SVC 与 SVG 无功补偿的基本原理

工业现场 SVC 有多种类型,主要有五种型式:磁阀控制电抗器型(MCR 型)、可控硅控制空芯电抗器型(TCR 型)、可控硅阀控制高阻抗变压器型(TCT 型)、可控硅开关控制电容器型(TSC 型)及自饱和电抗器型(SSR 型)。基本原理及仿真主要围绕 TCR 型 SVC。而本文所述的某钢厂电弧炉现场的负荷及 SVC+SVG 补偿装置的电压等级均为 35 kV,并联于同一条母线下。

1.1 基于斯坦门茨理论的 SVC 补偿原理

TCR 型 SVC 的基本原理是以母线三相电压矢量为基准, SVC 装置发出与负荷基波无功电流幅值相等、相位相反的基波电流抵消负荷无功,而无源支路的容性无功容量与负荷最大感性无功基本持平,晶闸管阀控制单元根据负荷功率的变化调控电抗器感值灵活控制 SVC 需要补偿的无功功率^[5],其基本结构如图 1 所示。

根据斯坦门茨(Steinmetz, Charles Proteus)平衡化补偿原理^[6],控制单元根据负荷无功计算出相应的电纳值,然后由电纳值推导出相应的触发角发送到晶闸管阀组。电纳值 B 与触发角 α 的关系式为

$$B(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \frac{2\pi + \sin 2\alpha - 2\alpha}{\pi} \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; L 为电抗值。

而斯坦门茨平衡化原理是由三相参考电压与负荷电流分别求出各相的电纳值。其基本关系式为

$$B_{ab} = \frac{(\text{Re}(\dot{U}_{bc} \tilde{I}_{al}) + \text{Re}(\dot{U}_{ca} \tilde{I}_{bl}) - \text{Re}(\dot{U}_{ab} \tilde{I}_{cl}))}{\sqrt{3}U_{ab}^2} \quad (2)$$

$$B_{bc} = \frac{(\text{Re}(\dot{U}_{ca} \tilde{I}_{bl}) + \text{Re}(\dot{U}_{ab} \tilde{I}_{cl}) - \text{Re}(\dot{U}_{bc} \tilde{I}_{al}))}{\sqrt{3}U_{bc}^2} \quad (3)$$

$$B_{ca} = \frac{(\text{Re}(\dot{U}_{ab} \tilde{I}_{cl}) + \text{Re}(\dot{U}_{bc} \tilde{I}_{al}) - \text{Re}(\dot{U}_{ca} \tilde{I}_{bl}))}{\sqrt{3}U_{ca}^2} \quad (4)$$

式中: $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ 为母线三相参考电压矢量; $\tilde{I}_{al}, \tilde{I}_{bl}, \tilde{I}_{cl}$ 是负荷三相相电流矢量。

根据斯坦门茨原理公式(2),(3)和(4)求出的电纳 B 值,由式(1)查表,分别求出三相触发角,实现无功开环算法^[7],其结构如图 2 所示。

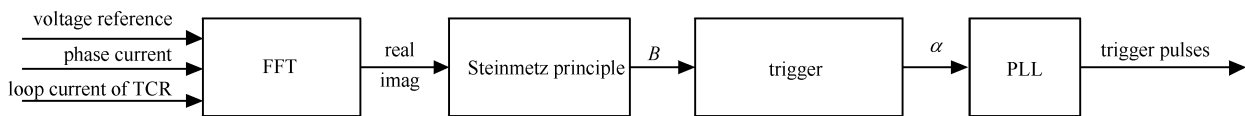


Fig. 2 SVC control block

图 2 SVC 控制结构框图

1.2 基于瞬时功率理论的 SVG 补偿原理

SVG,相较于基于半控型晶闸管控制的 SVC 装置,有着更快的响应时间。不同于根据斯坦门茨原理来计算电路的等值电纳,SVG 装置使用脉冲调制技术来驱动开关管器件。而目前常用的控制技术主要有基于快速傅里叶变换的电流控制技术和基于瞬时无功功率理论的控制方法。由于基于傅里叶变换的控制技术在原理上至少存在一个周期的延时,因此在快速响应的补偿场合,大多使用基于无功功率理论的控制方法。图 3 所示典型 SVG 逆变器的电路拓扑。

求解上述电路的数学模型,并将态电路函数先进行 PARK 变换到 d-q 域,然后进行拉普拉斯变换,可有

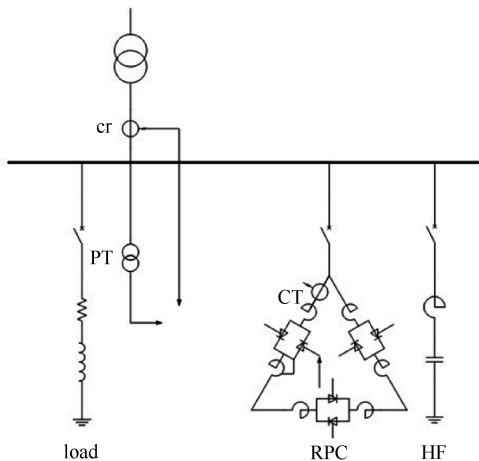


Fig. 1 TCR+FC type SVC

图 1 TCR 型 SVC 结构图

$$\begin{cases} (sL + R)i_d = u_{sd} - u_{rd} + \omega L i_q \\ (sL + R)i_q = u_{sq} - u_{rq} + \omega L i_d \\ u_{dc} = \frac{3}{2} sC (S_d i_d + S_q i_q) \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_d, i_q 为 i_a, i_b, i_c 经过 PARK 变换在旋转 p-q 坐标系下的分量; S_a, S_b, S_c 为三相桥臂的开关状态, $S=1$ 表示该相桥臂上管开通, 下管关断; $S=0$ 表示该相下管导通, 上管关断, 经过 p-q 变换后为 S_d, S_q 。

针对参考电流,根据瞬时无功功率理论,如图 4 所示,先经 p-q 变换求出其在旋转坐标系下的直流量,然后经过低通滤波器、p-q 反变换得出其基波无功电流的参考量^[8]。

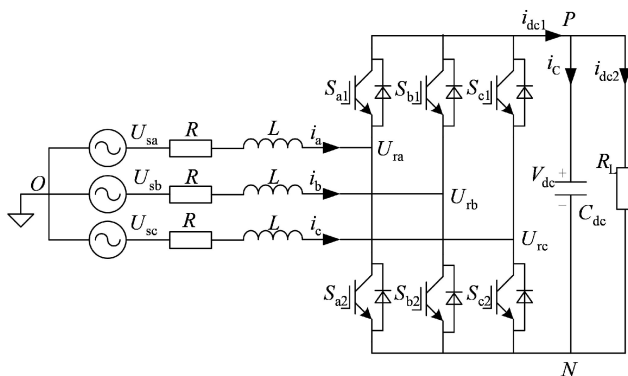


Fig. 3 Typical topology of SVG

图 3 典型 SVG 逆变器的电路拓扑

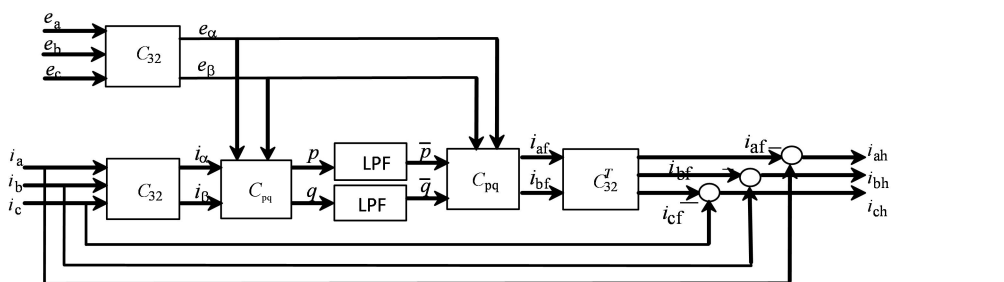


Fig. 4 Harmonic detection algorithm based on p-q theory

图 4 基于 p-q 理论的谐波检测算法

根据瞬时无功功率理论得出参考电流量后,逆变器的控制器和实际控制框图如图 5 所示。

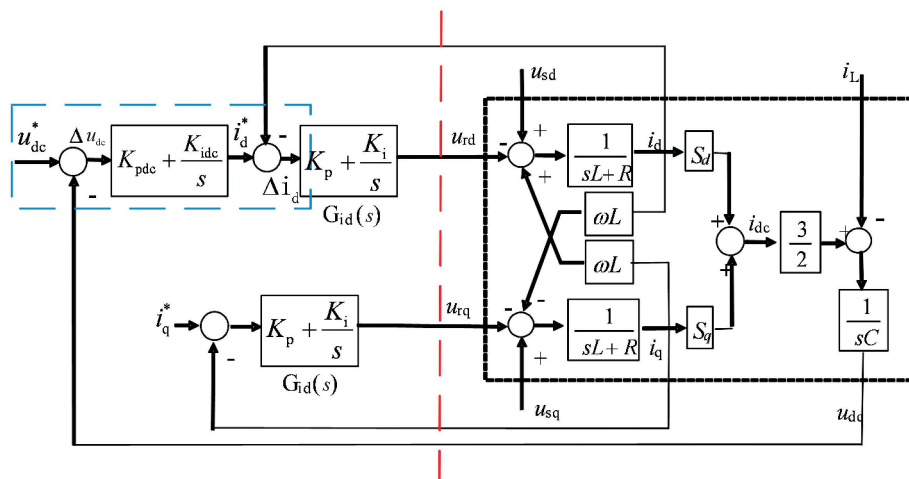


Fig. 5 Control block of SVG

图 5 SVG 逆变器的控制框图

在工业现场,通常将 SVG 装置直接并联于负荷母线下进行无功补偿^[9-10]。本文提出的方案将 SVG 与 SVC 并联然后并联于同一母线的负荷下。

2 广西某钢厂电弧炉的无功补偿现状

广西某钢厂 110 kV 高压变电站母线接入最小短路容量 576 MV · A, 安装 50 MV · A 主变压器一台, 主变压器中压侧负荷主要为电炉和精炼炉负荷, 低压侧主要为高压电动机负荷, 目前场内 35 kV 母线侧安装 TCR+FC 型 SVC, 设置 2 次 C 型、3 次、4 次及 5 次单调谐滤波支路, 总基波补偿容量 25 Mvar(兆乏), 系统主

接线如下图 6 所示。

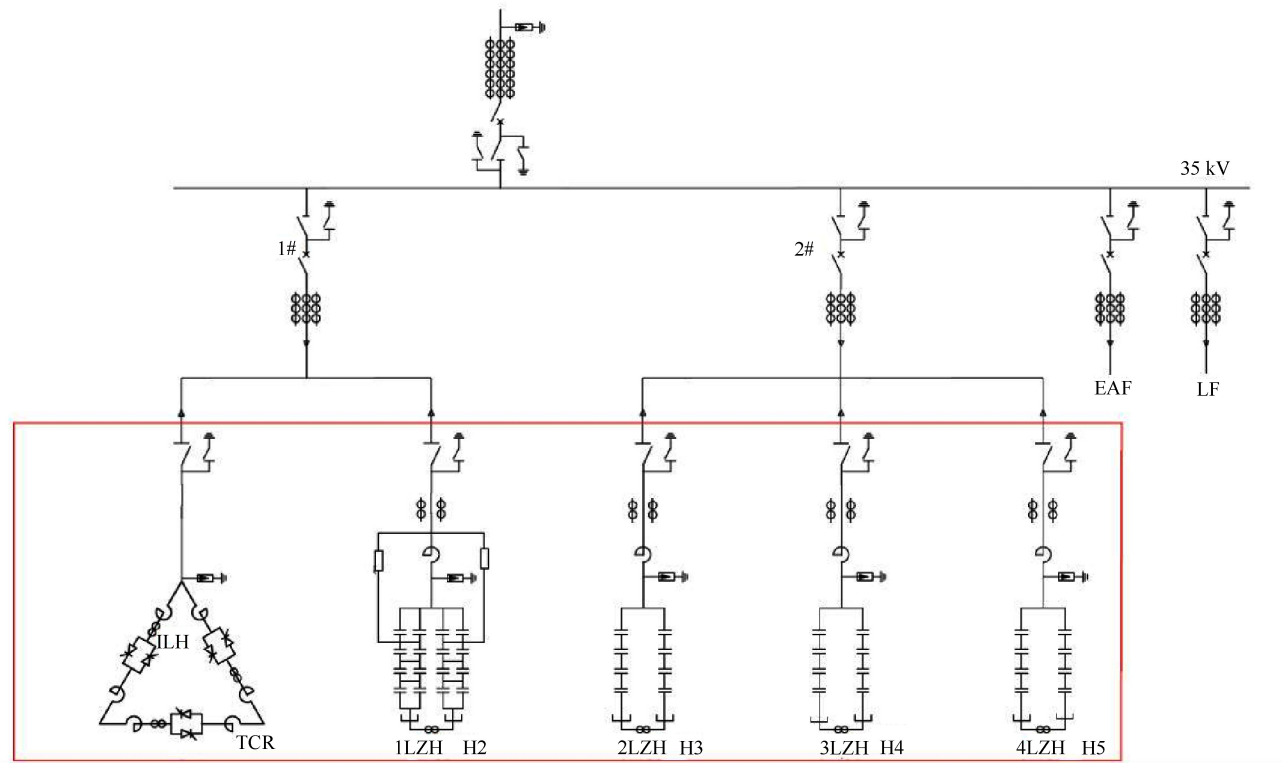


Fig. 6 Main topology of EAF system in a steel mill

图 6 某钢厂电弧炉系统主接线图

而该钢厂电弧炉经过改造后,发出的无功功率远超原始无功量,因此需重新计算,并于实际比对。无功需求量计算应综合考虑初炼交流电弧炉(EAF)和精炼电弧炉(LF)的最大无功发生量和同时率,工程推荐值按照下式确定

$$Q_D = k_1 Q_{EAF, \max} + k_2 Q_{LF, \max} \quad (6)$$

式中: k_1 为 EAF 无功发生量的计算系数,工程推荐值为 $0.9 \sim 1.2$; k_2 为 LF 无功发生量的计算系数,工程推荐值为 $0.4 \sim 0.6$; $Q_{EAF, \max}$ 为 EAF 最大无功发生量,单位为兆乏(Mvar); $Q_{LF, \max}$ 为 LF 最大无功发生量,单位为兆乏(Mvar); Q_D 为无功需求量,单位为兆乏(Mvar)。

根据计算,EAF,LF 同时运行时 35 kV 所需最大无功发生量为 35.25 Mvar。

35 kV 母线所带轧机总装机容量为 11 MV · A,取功率因数为 0.7,功率因数提高至 0.92,按公式可知

$$Q = P \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right) = 4.57 \text{ Mvar} \quad (7)$$

式中: φ_1 为 EAF 的功率因数角; φ_2 为 LF 的功率因数角。因此,35 kV 母线总无功补偿容量为 39.82 Mvar,考虑一定的补偿裕度并结合电能质量测试报告,最终确定主变 35 kV 母线 SVC 装置的基波补偿容量为 40 Mvar。针对原先 25 Mvar 的 SVC 系统,出现将近 15 Mvar 的无功缺口。

3 基于 PSCAD/EMTDC 的 SVC/SVG 联合应用仿真

SVC 具备良好的分相补偿能力,能更好适应三相不平衡工况,但响应时间较长;而 SVG 有着更快响应时间。结合二者优点,针对该钢厂电弧炉现场无功补偿实际,仍可利用原先的 SVC 装置,由 SVG 填补电弧炉改造产生的增多的无功功率。将 SVG 单元前置与 SVC 单元之前,两装置独立检测、独立工作。先投入 SVC 及 SVG 装置,稳定之后一定时间内投入负荷无功源,使用 PSCAD/EMTDC 进行系统仿真,电弧炉负荷利用无功波动源模拟,仿真步长设为 $156 \mu\text{s}$ 。系统的仿真结构图如图 7 所示,SVG,SVC 和无功波动源都接于 35 kV 母线。

SVC 控制算法是根据式(1),(2),(3),(4)编写而成的 C 语言模块,然后由 FORTRAN 文件编写接口^[11-12]。而 SVG 单元是由基本模块串联而成的三相桥^[13],控制模块根据式(5)及图 4、图 5 所示的控制算法搭

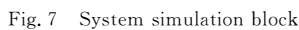


图 7 系统仿真结构图

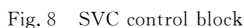


图 8 SVC 控制模块

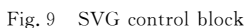


图 9 SVG 控制模块

无功波动源是最大 0~40 Mvar 可变的三相不平衡感性无功波动源,充分模拟该钢厂的电弧炉无功功率变化。图 10 为投入无功源之后 TCR 环内电流,可以看出三相 TCR 环内电流并不同步,响应了相应的不平衡。

图 11 为无功源投入之后,SVG 发出的无功功率。SVG 发出最大近 16 Mvar 的容性无功功率,且感性无功值基本均小于 0.3 Mvar,从另一个角度可以看出 SVG 响应速度优异。

为了考察 SVG 补充功率的真实效果,首先投入 SVC,然后投入波动无功负荷,并不投入 SVG,仿真结果如图 12 所示。

在图 12 中, Q_L 为负荷无功波动源无功功率, $Q_{1_35\text{ kV}}$ 为 35 kV 母线处的无功功率,在 4.5 s 负荷产生较大的无功波动,而此时只投入 SVC,母线处仍有将近 18 Mvar 的感性无功,这种现象在 5.5 s 处负荷波动中也有类似的情况,证明在进行电弧炉改造后,SVC 系统并不能完全补偿负荷的无功功率;而在 5.3 s 处,母线有将近 20 Mvar 的容性无功过冲,对比图 11 可知,此处的容性无功冲击在 SVG 并没有呈现,且不是负荷造成,因此是由于 SVC 不能及时响应造成的,也说明 SVC 较 SVG 响应较慢^[14-15]。

进一步将 SVC 和 SVG 联合注入后,如图 13 所示。与图 12 相比,在 4.5 s 和 5.5 s 处母线的无功缺口功率基本得到了抑制,结合图 11,SVG 起到了快速抑制剩余无功的作用。

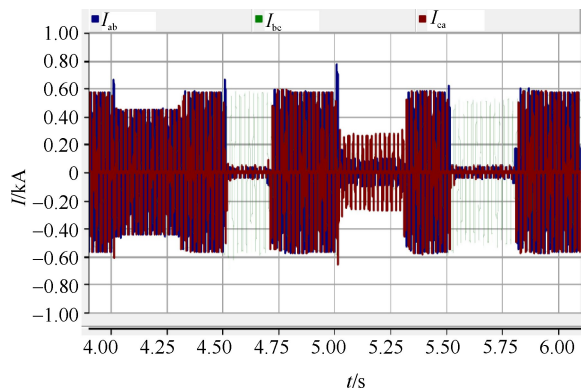


Fig. 10 Phase current of TCR

图 10 TCR 环内电流

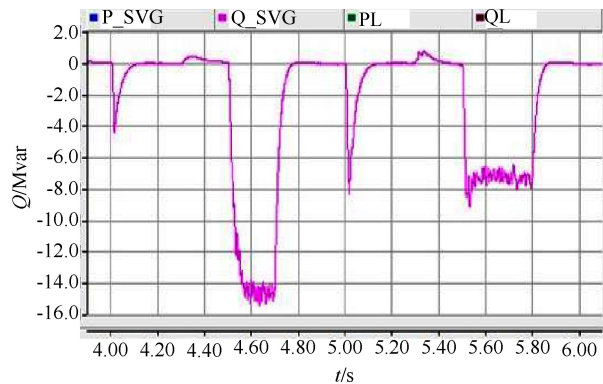


Fig. 11 Reactive power generated by SVG

图 11 SVG 发出的无功量

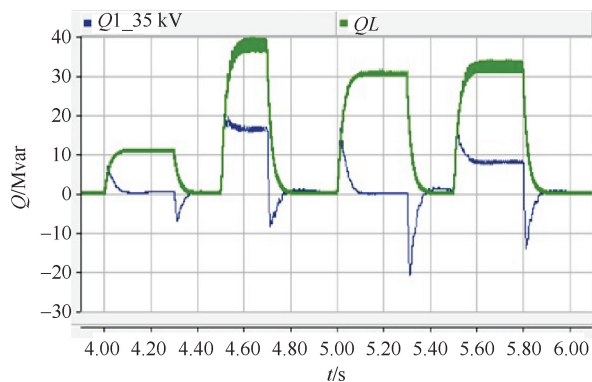


Fig. 12 Reactive power on load and grid without SVG

图 12 投入 SVC,未投 SVG 负荷和母线的无功功率

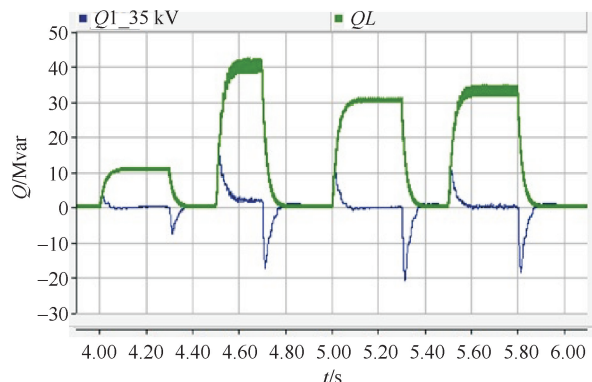


Fig. 13 Reactive power on load and grid with SVG and SVC

图 13 负荷与母线的无功功率

4 结 论

电弧炉现场无功补偿系统进行 SVC 和 SVG 联合应用探索,需要明确两种装置各自的功能空间,即以 TCR 配套 FC 为无功功率补偿主体,并特别针对不平衡、负序等工况;而 SVG 以其优良的更快速的响应性能,承担剩余无功功率抑制的任务。在这种分工前提下,参考补偿点位置至关重要,本文提出的方案 SVC 装置是无法捕捉到 SVG 功率补偿信息,即 SVG 参考位置在 SVC 上端,进行剩余无功功率补偿。但在实际中,SVC 和 SVG 不可能同时响应,存在一定延时,因此对于容量有限的 SVG,必须做前置限幅来防止过容量补偿指令带来的系统故障保护。处理完善参考点之后进行了 PACAD/EMTDC 系统仿真,从仿真结果来看,SVC 和 SVG 联合应用可以起到预定的功率补偿效果,为其向广西电弧炉现场应用提供了理论和仿真级参考。

参考文献：

- [1] 李思锐, 江秀龙, 马德武, 等. 我国电弧炉炼钢发展现状及前景[J]. 四川冶金, 2018, 40(2):19-21,42. (Li Sirui, Jiang Xiulong, Ma Dewu, et al. The development and challenge of EAF. Sichuan Metallurgy, 2018, 40(2):19-21, 42)
- [2] 郭宏图. SVG 与 SVC 在煤矿供电系统应用比较[J]. 电子科技, 2010, 23(S1):10-12. (Guo Hongtu. SVC and SVG comparison of power supply system in coal mine. Electronic Science and Technology, 2010, 23(S1):10-12)
- [3] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. (Wang Zhaoan, Yang Jun, Liu Jinjun, et al. Harmonic suppression and reactive power compensation. Beijing: China Machine Press, 2010)
- [4] 周潮, 邢文洋, 李宇龙. 电力系统负荷预测方法综述[J]. 电源学报, 2012(6):32-39. (Zhou Chao, Xing Wenyang, Li Yulong. Summarization on load forecasting method of electrical power system. Journal of Power Supply, 2012(6):32-39)
- [5] 刘华东, 张定华, 邓建华, 等. SVC 在电弧炉治理中的应用研究[J]. 大功率变流技术, 2009(5):51-56. (Liu Huadong, Zhang Dinghua, Deng Jianhua, et al. Application Research of SVC for electric arc furnace governance high power converter technology. High Power Converter Technology, 2009(5):51-56)
- [6] 孙聪, 王昇凡, 陈国柱, 吴新科. 基于 Steinmetz 原理与瞬时无功理论的 SVC 装置防过补偿控制策略[J]. 机电工程, 2013, 30(10):1246-1249, 1272. (Sun Cong, Wang Yifan, Chen Guozhu, et al. Anti-overcompensation control strategy in SVC based on Steinmetz principle and instantaneous reactive power theory. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(10):1246-1249, 1272)
- [7] 杜亚鹏, 范兴明, 张鑫, 等. 基于 PSCAD 的 TCR+FC 型 SVC 控制策略研究[J]. 电焊机, 2012, 42(9):25-29. (Du Yapeng, Fan Xingming, Zhang Xin, et al. Research on control strategy for TCR-FC type SVC based on PSCAD. Electric Welding Machine, 2012, 42(9):25-29)
- [8] 张俊敏, 田微. 基于瞬时无功功率理论谐波检测方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008(18):33-36. (Zhang Junmin, Tian Wei. Study on harmonic detection methods based on instantaneous reactive power theory. Power System Protection and Control, 2008(18):33-36)
- [9] Li W, Zhao J, Chen W, et al. The 3-layer coordinated control of the hybrid operation of SVC and SVG[R]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016.
- [10] 许敏敏. 级联 H 桥 SVG 无功补偿控制策略研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2016. (Xu Minmin. Study on control strategy of cascade H-bridge SVG in reactive power compensation. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2016)
- [11] 邹宁, 方存洋, 刘育鑫, 等. PSCAD/EMTDC-MATLAB 联合仿真技术在 SVC 控制系统仿真建模中的应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(5):40-44. (Zou Ning, Fang Cunyang, Liu Yuxin, et al. Application of PSCAD / EMTDC-MATLAB co-simulation technology in SVC control system simulation modeling. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(5):40-44)
- [12] Pathak A K, Sharma M P, Gupta M. Modeling and simulation of SVC for reactive power control in high penetration wind power system [C]//12th IEEE India International Conference INDICON 2015 Electronics, Energy, Environment, Communications, Computer, Control (E3-C3). 2016.
- [13] Hu S G, Gao D Y, Wang S H, et al. Simulation study on three-phase three-wire system low voltage SVG in PSCAD[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1049/1050:703-707.
- [14] Wu Yanan, Xu Liuwei, Fu Peng, et al. Testing of SVC compensation and filtering performance with Tokamak PF converter[J]. Journal of Fusion Energy, 2014, 34(1):84-92.
- [15] Luo R, He Y, Liu J. Research on the unbalanced compensation of delta-connected cascaded h-bridge multilevel SVG[J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8667-8676.