doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202002006

动态无功补偿在中型材生产中的应用

胡长友,陈乐柱,赵耀武,黄滔滔,沈 忱

(安徽工业大学 电气与信息工程学院,安徽 马鞍山 243000)

摘要:通过对安徽某钢厂供电系统的拓扑结构及负载的电气参数对补偿容量和各次谐波含量的 具体分析,根据无功补偿原理,确定了基于静态无功补偿装置 SVG 与滤波器 FC 组合的电能质 量治理方案。根据轧钢生产的现实运行情况,对方案投入前后的电网状况进行了比对剖析,得 出如下结论:(1)投入 SVG + FC 动态无功补偿装置后,系统电压和电流波形同相位且接近于标 准正弦波,达到了期待的补偿效果和滤波效果;(2)系统的平均功率因数由装置投运前的0.80 提高到 0.94,降低了线路损耗,提高了变压器和供电线路的带载能力;(3) SVG 可以自动跟踪补 偿电网,减少对电网的冲击,有效地降低了现场生产对电网的污染。

关键词:电能质量;无功补偿;谐波治理

中图分类号:TM761.1 文献标志码:A

轧机是钢铁行业中主要的加工生产设备,具 有无功功率变化速度快、平均功率因数低、谐波含 量大等电能质量问题。解决这些问题最有效的措 施就是在负载端加入静止无功补偿装置。

静止无功补偿装置主要分为3大类。第一类 是带有饱和电抗器的无功补偿装置,该装置中铁 芯长时间处于磁饱和状态,损耗大,还会发生振动 和噪音,并且动态响应慢,调整时间长。第二类是 晶闸管控制投切电容器和电抗器,该补偿装置功 率连续可调,响应速度快,但是装置运行时会产生 大量谐波,运行损耗大,设备体积也比较大。第三 类是由可关断电力电子器件组成自换相桥式变流 器进行动态无功补偿,即静止无功发生器(SVG), 该装置采用多电平、多重化和 PWM (脉冲宽度调 制)技术控制,可以有效减少电流谐波含量^[1-4], 获得很好的补偿效果,且比 TCR(晶闸管控制电 抗器)技术调节速度更快,调节范围更宽。该装 置如与滤波电容器 FC 配合使用,利用 FC 对供电 系统滤波,可以同时解决无功补偿与谐波治理的 问题。

文章编号:1671-5322(2020)02-0029-07

1 静止无功发生器(SVG)

1.1 SVG 工作原理

SVG 主要由控制柜、启动柜、功率柜、连接电抗器和冷却系统构成^[5],其单相稳态等效电路如图1所示。图中 U_s 表示电网电压基波分量,U_r 表示 SVG 输出交流电压基波分量。



Fig 1 SVG single-phase steady-state equivalent circuit

不考虑变流装置有功情况下,电流*i*与电压 U₁相位相差90°,实际相角不等于90°,主要原因 是电流中有补偿电网电路损耗的有功分量。 SVG 吸收的无功功率可通过幅值调整来调 节电流 *i* 的大小,这里可分为3 种情况。 (1) 空载运行情况下, *U*_s = *U*₁, 如图 2a 所示。 此时, SVG 不起补偿作用。



图 2 SVG 工作原理图 Fig 2 SVG working principle diagram

(2)感性运行情况下, U_s > U₁, 输出电流滞后 于电网电压, 如图 2b 所示。SVG 发出持续可调 的容性无功。

(3)容性运行情况下, U_s < U₁,输出电流超前 电网电压, 如图 2c 所示。SVG 发出连续可调的感 性无功。

1.2 理论计算

安徽某钢厂两段10 kV 电源供电系统分别来

自于 301 总降 101 开关柜和 206 开关柜,10 kV 母 线最小运行方式下的短路容量为 259 MVA,现场 配电系统一次图如图 3 所示。两段 10 kV 母线正 常情况下独立运行,母联断开;当一路变压器故障 或者检修时,母联闭合,另一路变压器带两段负荷 运行。

由于轧钢的特殊工艺,轧钢过程中轧机的速 度在不断变化,需要变频调速装置来控制电机速





Fig 3 Primary diagram of the power distribution system

度,即通过不同的电流频率来控制钢坯在传送过 程中的速度,以精确控制钢坯在压力环境下停留 时间的长短,达到所需的加工目标^[6]。因此,生 产线的负载实质上就是由各种变频调速装置驱动 的交流电机。生产线上 I 段母线各电机和变频器 参数如表 1 所示。 由表1可知,轧钢生产线上 I 段母线开坯区 有2台开坯机,精轧区有6台精轧机、1台分段飞 剪、1台热锯,精整区有2台矫直机和2台锯子, 总功率为P = 15 905 kW。取同时工作系数 $K_A =$ 0.75,功率因数为 cos $\varphi_1 = 0.8$,补偿过后目标功 率因数为 cos $\varphi_2 = 0.95$ 。其中, φ_1 为功率因数0.8 表1 中型材生产线负载参数

17)1 64-70

时的相角, φ_2 为功率因数 0.95 时的相角 $[7-8]$	0
将上述数据代入无功补偿容量计算公式	
$Q = P \times K_A \times (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$	(1)

经订异侍:	
$Q_1 = 15\ 905\ \times\ 0.\ 75\ \times\ (\ \mathrm{tg}\ \varphi_1 \ -\ \mathrm{tg}\ \varphi_2)$	=
5 033 kvar	

Table 1 Load parameters of profile production line					
	山友女母		交流变频器		
	议	电机切能/ K W	型号	容量	
开	1#开坯机	3 600	TMdrive-70e2	9 MVA	
坯区	2#开坯机	3600	TMdrive-70e2	9 MVA	
<u>1</u>	1#轧机	1 000	6SL3320-1TG41-3AA3	1 200 kW	
	2#轧机	1 000	6SL3320-1TG41-3AA3	1 200 kW	
	3#轧机	1 000	6SL3320-1TG41-3AA3	1 200 kW	
有	4#轧机	1 000	6SL3320-1TG41-3AA3	1 200 kW	
乳豆	分段飞剪	380	6SL3320-1TG38-8AA3	900 kW	
X.	5#轧机	1 000	6SL3320-1TG41-3AA3	1 200 kW	
	6#轧机	1 000	6SL3320-1TG41-3AA3	1 200 kW	
	热锯	315	6SL3320-1TG34-1AA3	400 kW	
**	700 矫直机	450	6SL3320-1TG37-4AA3	710 kW	
精	900 矫直机	560	6SL3320-1TG38-8AA3	900 kW	
整	固定锯	500	6SL3320-1TG37-4AA3	710 kW	
X	移动锯	500	6SL3320-1TG37-4AA3	710 kW	

故 I 段母线需要补偿的无功功率为 5 033 kvar。

II 段母线配电变压器总容量为 10 200 kVA (文中未列出),负荷相对稳定。取同时工作系数 $K_A = 0.75$,功率因数为 0.85,补偿后目标功率因 数为 0.95。其中, φ_1 为功率因数 0.85 时的相角, φ_2 为功率因数 0.95 时的相角。

根据上述数据,由式(1)计算得:

 $Q_2 = 10\ 200\ \times\ 0.\ 75\ \times\ (\ {
m tg}\ \varphi_1 \ -\ {
m tg}\ \varphi_2) =$

2 400 kvar

故Ⅱ段母线需要补偿的无功功率为2400 kvar。

2 滤波支路参数设计

滤波支路采用单调谐滤波器,基本工作原理 就是应用电路的串联谐振,使其在某个特定频率 下的支路串联等效阻抗为最低阻抗值时,吸收该 次谐波电流,让其不能注入电网^[9-10]。单调谐滤 波支路电容器最小容量计算公式如下:

$$Q_c = \frac{3U_c^2 \times I_k}{\sqrt{h} \times \sqrt{U_c^2 - \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \cdot \frac{U_M}{\sqrt{3}}\right)^2}} \quad (2)$$

在确定各次滤波支路补偿容量后,计算各次 电容器参数 C 的公式如下:

$$C = \frac{Q_{c(h)} \left(1 - \frac{1}{h^2}\right)}{\omega_1 U_{(1)}^2}$$
(3)

计算出电容参数后,根据谐振频率求电感L。

$$L = \frac{1}{(h\omega_1)^2 C} \tag{4}$$

滤波器的品质因数 q 为

$$q = \frac{h\omega_1 L}{R_{fh}} = \frac{1}{h\omega_1 C R_{fh}} = \frac{\sqrt{L/C}}{R_{fh}}$$
(5)

考虑到器件损耗,品质因数 q 一般取 30 ~ 60。

电阻值可由下式得出。

$$R_{fh} = h\omega_1 L/q \tag{6}$$

实际工程计算中,为了防止元器件老化造成 谐振点偏移影响滤波效果,在计算相关参数时经 常将谐振点左偏,取左偏系数为0.97。通过设备 出厂数据得出各次谐波量,根据上述公式计算5、 7、11次谐波支路的补偿容量、电抗器、电容器、电 阻等参数值,如表2所示。

3 SVG 无功补偿 + FC 滤波安装前后的比较分析

将 SVG 无功补偿与 FC 滤波装置安装于主电路中, SVG 功率因数设定为 0.95。按功率因数 自动补偿运行正常后,用德国 A. Eberle 公司生产

表 2 各次 FC 滤波支路参数 Table 2 Parameters of each FC filtering branch

	支路	安装容量/kvar	补偿容量/kvar	基波电流/A	谐波电流/A	电容/µF	电阻/Ω	电感/mH
I段	H5	1 800	1 200	74	52	36.62	0.45	11.45
	H7	1 500	900	64	40	33.21	0.36	6.63
	H11	1 800	1 200	76	50	40.42	0.19	2.24
Ⅱ段	Н5 Н7	2 100 1 500	1 500 900	86 63	56 40	45.78 33.21	0.38 0.36	9.82 6.63

的 PQ-Box 200 电能质量分析仪进行测量,并与 SVG 与 FC 滤波安装前的测量数据进行比较。

图 4、图 5 分别为 SVG 与 FC 滤波安装前、后的谐波电流含量分布。由图 4 可知, SVG 与 FC 滤波安装前谐波电流 *I*₅、*I*₇、*I*₁₁分别为 22.3A、17.2

A、25. 3A; 由图 5 可知, SVG 与 FC 滤波安装 后谐波电流 I_5 、 I_7 、 I_{11} 分别为5. 2A、4. 2A、6. 5A。 显然, SVG 与 FC 滤波安装后谐波电流 I_5 、 I_7 、 I_{11} 均 明显下降,且均在国标(GB/T 14549—1993)限值 以下。



图 4 SVG 与 FC 投入前谐波电流含量 Fig 4 Harmonic current content before SVG and FC are put into operation



图 5 SVG 与 FC 投入后谐波电流含量 Fig 5 Harmonic current content after SVG and FC are put into operation

SVG与FC滤波安装前、后功率因数曲线如图6、图7所示。比较图6、图7,可以发现装置投

人运行后,无功功率补偿效果非常理想,系统的平均功率因数稳定在0.94 左右。



图 6 SVG 与 FC 投入前功率因数曲线 Fig 6 Power factor curve before SVG and FC are put into operation





SVG 与 FC 滤波安装后电压效值曲线如图 8 所示。由图 8 可知,装置投入运行后电路对冲击 性无功功率快速响应,有效抑制了电网电压的闪 变,使电网电压基本稳定在 10 480 V 附近,最大 波动不超过 100 V,保证了用电设备的安全运行。

理想的补偿效果归功于 SVG 响应速度小于 等于5 ms。极快的响应速度可以对冲击性无功 进行有效抑制,从而对电网电压闪变的抑制能力 更强,谐波补偿效果更理想。

SVG 与 FC 滤波安装后电压电流波形如图 9 所示。由图 9 可知,装置投入运行后系统电压和 电流波形同相位且接近于标准正弦波,达到了期 待的补偿效果和滤波效果。



图 8 SVG 与 FC 工作后电压效值曲线 Fig 8 Voltage effect curve of SVG and FC after operation



图 9 SVG 与 FC 工作后电压电流波形 Fig 9 Voltage and current waveform of SVG and FC after operation

4 结论

通过 SVG + FC 的治理方案对安徽某钢厂用 电状况的比较分析,得出如下结论:

(1)投入 SVG + FC 动态无功补偿装置后,系 统电压和电流波形同相位且接近于标准正弦波, 达到了期待的补偿效果和滤波效果。

(2)系统的平均功率因数由装置投运前的 0.80提高到 0.94,降低了线路损耗,提高了变压 器和供电线路的带载能力。

(3)SVG 可以自动跟踪补偿电网,减少对电 网的冲击,有效地降低了现场生产对电网的污染。

参考文献:

- [1] 黄占勇. 电力系统静止无功补偿技术的现状及发展[J]. 科技视界,2016(1):117.
- [2] 刘文华,卢军锋,郑征,等. 基于 SHE-PWM 的 D-STATCOM 的控制器和脉冲发生器的设计[J]. 清华大学学报(自然 科学版),2002,42(9):1188-1191.
- [3] 梁旭,刘文华,陈建业,等. 基于多重化逆变器的静止无功发生器直流侧电流分析[J]. 电工技术学报,2000(1):52-56.
- [4] 王归新,金申义.基于三相电压型 PWM 整流器控制策略研究[J].电气传动,2019,49(10):34-38.
- [5] 段海雁,段海兵. SVG 动态无功补偿装置在高线轧钢生产线的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(4):26-31.
- [6] 张强. 浅析轧钢传动工艺[J]. 科技创新导报, 2018, 15(25): 115-116.
- [7] 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,2006.
- [8] 李春龙. 基于 SVG 无功补偿与 FC 滤波的电能质量改造研究[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(9): 72-75.
- [9] 刘宇静. 滤波无功补偿技术在煤矿高压供电系统的应用[J]. 自动化应用, 2018(11): 103-104.
- [10] 王兆安,刘进军.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2009.

Application of Dynamic Reactive Power Compensation in Medium Profile Production

HU Changyou, CHEN Lezhu, ZHAO Yaowu, HUANG Taotao, SHEN Chen

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan Anhui 243000, China)

Abstract: Through the specific analysis of the topological structure of the power supply system and the electric parameters of the load on the compensation capacity and the content of each harmonic of a steel plant in Anhui Province, according to the principle of reactive power compensation, the power quality control scheme based on the combination of static reactive power compensation device SVG and filter FC is determined. The conclusions are as follows: (1) after the SVG + FC dynamic reactive power compensation device is put into operation, the voltage and current waveforms of the system are in phase and close to the standard sine wave, achieving the expected compensation effect and filtering effect. (2) The average power factor of the system is increased from 0.80 to 0.95 before the device is put into operation, which reduces the line loss and improves the carrying capacity of the transformer and the power supply line. (3) SVG can automatically track and compensate the power grid, reduce the impact on the power grid, and effectively reduce the pollution of field production to the power grid.

Keywords: power quality; reactive power compensation; harmonic control

(责任编辑:李华云)