

基于APF的SVC优化系统实验研究

访宝钢股份能环部高级工程师顾建军

■ 胡 颖/本刊记者



顾建军 教授级高工
宝钢股份能环部高级工程师

宝钢电炉SVC系统谐波超标，兼顾无源滤波器和有源滤波器的特点，在现有系统结构基础上，提出了一种基于APF的SVC优化系统。

在冶金行业，电弧炉负载的大功率、强冲击以及严重的非线性等特性，会造成供配电系统电压波动与闪变、谐波电压和负序电压等危害，进而严重影响同一供电系统下其他负载的安全稳定运行。因此，为了维持供配电系统运行电压的稳定性，增大线路的输送能力，优化无功潮流，降低线路无功和谐波损耗，达到减少吨钢消耗指标的目的，冶金供配电系统中设置了大量SVC无功补偿装置。目前宝钢电炉SVC系统谐波超标，兼顾无源滤波器和有源滤波器的特点，在现有系统结构基础上，提出了一种基于APF的SVC优化系统。为了对此有更多的了解，本刊记者特别采访了宝钢股份能环部高级工程师顾建军。

实验系统构成

电气应用：您好！非常感谢您在百忙之中接受我刊的采访！提出一种基于APF的SVC优化系统的缘由是什么？请您详细介绍一下此实验系统的结构组成以及各组成部分的功能情况。

顾建军：宝钢由于当时SVC装置设计紧凑，以及设备长时间运行引起参数变化等原因，造成目前SVC装置性能欠佳，有些谐波指标超标。为了彻底解决该问题，同时又尽量利用原有设备，减少设备改造投资，并兼顾无源滤波器和有源滤波器的特点，可在现有结构上改变拓扑，引入注入式混合APF，提出一种基于APF的SVC优化系统。

对宝钢电炉总降SVC系统进行改造后，其实验系统构成如图1所示，主要可分为基于APF的SVC装置和SVC系统负载。

系统负载包括可编程谐波电流源和相控整流柜，主要完成功能是为整个SVC系统提供实验所需的无功和谐波电流。通过在程序中对可编程谐波电流源进行输出谐波电流的谐波次数、幅值和相位等信息的设定，使

可编程谐波电流源向电网注入谐波电流。相控整流柜与

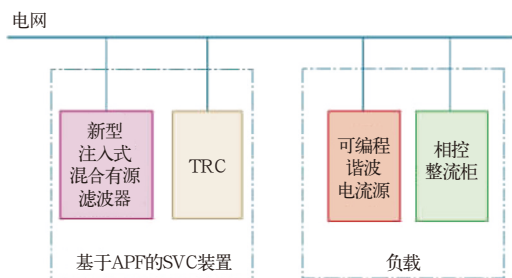


图1 基于APF的SVC系统结构

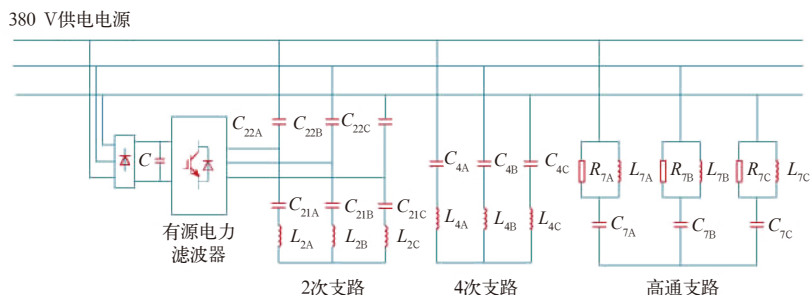


图2 优化方案的小功率实验系统原理图

控制系统设计

电气应用：根据您多年工作的经验，请您总结一下如何对控制系统进行设计？

顾建军：控制系统是SVC优化系统的核心，决定了系统各项主要性能和指标。DSP是一种实时、快速，特别适用于实现各种数字信号处理运算的微处理器。针对DSP具有丰富的硬件资源、改进的哈佛结构、高速数据处理能力和强大的指令系统等功能，本系统采用了以DSP为核心的数字控制系统，并根据对控制系统的要求，采用了双DSP结构，分别是TI公司TMS320C32和TMS320F240。其中TMS320C32因其强大的运算能力主要用于浮点计算和数据处理；而TMS320F240拥有较强的接口能力和可输出PWM波的事件管理器，主要完成数据采集和PWM波的发生，两者通过一片16K×16 bit的双口RAM进行数据交换。

因此，整个控制电路的框架如图3所示。从图中可以看出本系统的控制电路是以双DSP结构为核心的，整体上可以分为数字系统和模拟系统两大部分。

模拟系统主要是由各种输入信号的调理电路保护、报警及一些I/O接口电路组成。模拟信号调理电路主要包括负载电流以及电网电流调理电路，直流母线电压调理电路；保护电路分为以下几个部分：直流母线过电压保护、过电流保护和短路保护；I/O接口电路，输出系统

电网并联连接，输出的无功电流可以任意调节。其主电路采用三相桥式整流电路，包括主接触器、大功率晶闸管、快速熔断器、直流电抗器、换相过电压吸收和交流过电压吸收电路等。

基于APF的SVC装置主要由注入式混合APF和晶闸管控制电抗器(TCR)两部分组成。其中注入式混合APF主要结构如图2所示，包括LC无源滤波器组和APF两部分，主要提供基波容性无功功率，并起到谐波抑制的功能。SVC装置投入后，理论上电网的电流谐波含量会降到较低的水平。

的当前的工作状态，主要指面板上的LED指示。系统的工作状态包括运行、停止和过载。

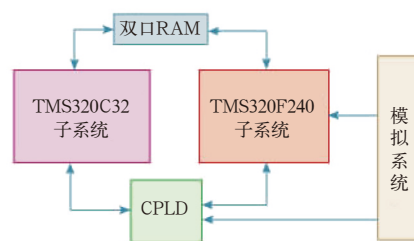


图3 控制系统整体结构

优化系统实验研究

电气应用：为了得到SVC优化系统在滤波和无功补偿方面的有效性，应从哪些方面对优化系统实验进行研究？

顾建军：为了验证SVC优化系统的谐波抑制和无功动态补偿功能，可在实验样机上进行小功率稳态实验研究。主要分为两个步骤：①系统补偿前，系统负载挂接电网，SVC优化系统从电网系统中断开。②系统补偿后，负载和SVC优化系统都挂接于电网系统中。补偿前后通过控制可编程谐波电流源和相控整流柜，使负载向电网系统输入2、4、5、7、11和13等次数的谐波电流和一定的无功功率。对检测到的电网电流进行时域波

形、频域谐波含量和功率因数分析，得到系统补偿前后的谐波和无功情况。通过上述实验，可以从对比分析的角度，得到SVC优化系统在滤波和无功补偿方面的有效性。

(1) 系统谐波抑制效果的实验研究

首先可进行系统谐波抑制实验，其中系统谐波抑制前指的是系统中谐波源投入而SVC系统未投入；而系统谐波抑制后则指SVC优化系统投入运行。实验工作条件为：系统电网电压380 V；系统电流包括基波、2、4、5、7、11和13次谐波等。图4为电网电流谐波抑制前后波形对比。

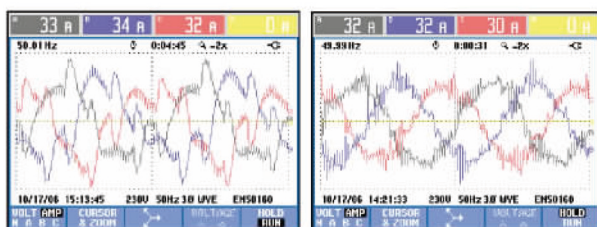


图4 电网电流谐波抑制前后对比

从时域波形可以直观地看到SVC系统在谐波抑制方面起到的作用。SVC系统投入之前，电网电流波形严重畸变，几乎丧失正弦波特性。经系统投入抑制谐波后，波形基本上恢复了正弦波。

(2) 系统无功补偿效果的实验研究

SVC系统投入前，电网电流滞后电压，产生感性无功。待SVC投入系统后，系统中的基波无功功率得到完全补偿。这一点从电网电压波形图中也可以明显看出，电压和电流的相位完全一致。图5为SVC系统投入前后电网电压和电流波形。

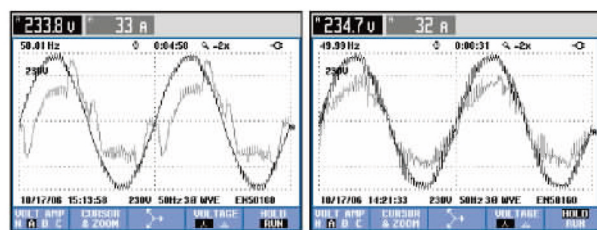


图5 SVC投入前后的电网电压和电流

图6是TCR和APF支路的电压电流波形对比。可以看出TCR支路电流相位滞后于电压约 90° ，主要产生感性无功功率。APF支路的电流相位超前电压约 90° ，主要产生容性无功功率。对其功率和电能分析可知，和注入式混合有源滤波器产生的三相总有功功率都很小，注入式混合有源滤波器的基波功率因数和总功率因数都

接近为0。

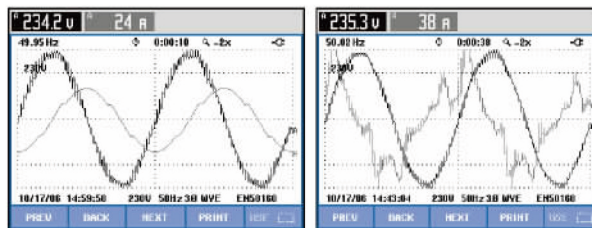


图6 TCR和APF支路系统电压和电流对比

下表是对SVC系统各部分的无功功率情况进行简略列表。可以清楚地看出，补偿后C相电网电流明显下降，同时有功功率增大，系统总功率因数也由0.74增加到0.97，实现了谐波抑制和无功补偿的功能，满足了改造要求，解决了先前问题。

表 C相无功补偿测试结果

比较项目	比较内容	线 电流/ A	有功 功率/ kW	无功 功率/ kvar	基波 功率 因数	总 功率 因数
补偿前	负载	32	6.1	5.6	0.78	0.74
	混合 APF	37	0.1	8.7		
补偿后	TCR 输出	23	0.3	5.4	1.00	0.97
	电网侧	30	6.8	1.8		

电气应用：补偿后的电流波形出现了比较明显的高频谐波成分，造成此现象的原因是什么？

顾建军：补偿后的电流波形，出现了比较明显的高频谐波成分。分析其可能原因：①来自于电网中其他负载的影响，使电网电流在SVC系统投入前，除了典型次数的谐波电流外，还具有一定程度的高频畸变。②所使用的分析记录设备Fluke 434引入的系统误差，使波形在显示上有一定程度的失真。③本次小功率实验中的各装置容量都很小，系统中的电流也不大，这无形中也放大了高频成分对波形的影响。④SVC系统中的APF引入的高频分量。分析APF中的逆变器工作时，开关频率为3 kHz。逆变器的输出电压/电流中难免会含有开关次的谐波成分。实际的APF应用中，主电路输出会接滤波器以滤除开关次谐波对系统的影响。在本次小功率实验系统当中，由于现场条件的限制，没有给APF采取高频滤波的措施，所以实验结果中的波形可以看到很明显的高频成分。但是，观测电流的频谱可以看出，计划要滤除的典型次谐波都基本滤除，达到了实验目的，这结果是不受高频分量影响的。**EA**