

电炉SVC系统优化方案滤波性能分析

针对现场SVC系统存在的谐波超标问题，对提出的SVC优化系统进行了理论分析。选定的混合有源滤波器控制方式可使混合滤波器对2~5次、7次谐波以及高次谐波进行谐波抑制。稳态仿真分析结果很好地证明了优化系统稳态滤波效果。

顾建军/宝山钢铁股份有限公司



顾建军/高级工程师

电弧炉是一种利用电弧产生的热量来高效熔炼金属的电炉，从电气特性来讲，它也是一种剧烈变动的非线性重负荷。在工作时，电弧炉频繁地给电网带来无功冲击，使电网产生波形畸变和三相不平衡、引起电压闪变和波动，导致电网电能质量污染^[1-2]。因此，宝钢于1996年引进150 T直流电弧炉系统时，配套有动态无功补偿装置（SVC），以实现无功功率补偿和谐波电流吸收，从而较好地保证33 kV系统无功功率平衡、电压稳定和电能质量改善。但受限于当时的设计制造能力和器件水平，以及随着时间推移，器件老化和参数漂移，33 kV母线处部分谐波电压、谐波电流超出了国家标准（比较明显的是2次谐波电流含量比较大），给系统正常运行带来了一系列问题^[3-4]。为解决电炉SVC系统存在的谐波超标问题，需要对SVC装置进行优化改造，以降低系统母线电流的谐波含量。

优化方案

根据文献[5]提出的优化方案，可在现有装置结构的基础上，引进有源滤波器，将无源滤波器改造为混合型有源滤波器（Active Power Filter, APF），即

电炉SVC优化系统，以此来改善滤波器装置的滤波效果，解决电炉SVC系统存在的谐波问题。优化系统能够在补偿大功率的同时，进一步减小有源滤波器的容量，降低有源滤波补偿系统的投资，提高性能价格比，实现谐波抑制的目的。

电炉SVC系统的优化改造方案拓扑结构如图1所示。其中，点画线框内的为改造的部分，其余部分均与原系统一致。改造前，原系统带有2次滤波器和3次滤波器，其中两条滤波通道都采用C型滤波器结构。改造后，原系统中2次滤波器中的电阻被替换为有源滤波器装置。此时的SVC系统结构为混合滤波器（2次滤波器加有源滤波器改造部分、3次滤波器、4次滤波器、5次滤波器和7次滤波器）和TCR装置两部分。将无源滤波器和有源滤波器相结合构成混合滤波器，兼顾了无源滤波器和有源滤波器各自的优点。这样一方面能够有效改善滤波效果，解决系统中存在的2次谐波含量较大，改善SVC装置的滤波性能，另一方面有助于减少滤波补偿系统的初期投资，提高性能价格比，达到APF实用化的目的。

理论分析

TCR是电炉SVC系统的原有部分，其主要工作原理是对系统中的无功功率进行补偿。主要控制方式为恒功率控制或恒电流控制。而改造后的混合型有源滤波器，从理论上说，其控制方式可有：电流源前馈控制、电流源反馈控制、电压源前馈控制和电压源反馈控

关键词/Keywords

SVC ·
谐波 ·
有源滤波器 ·

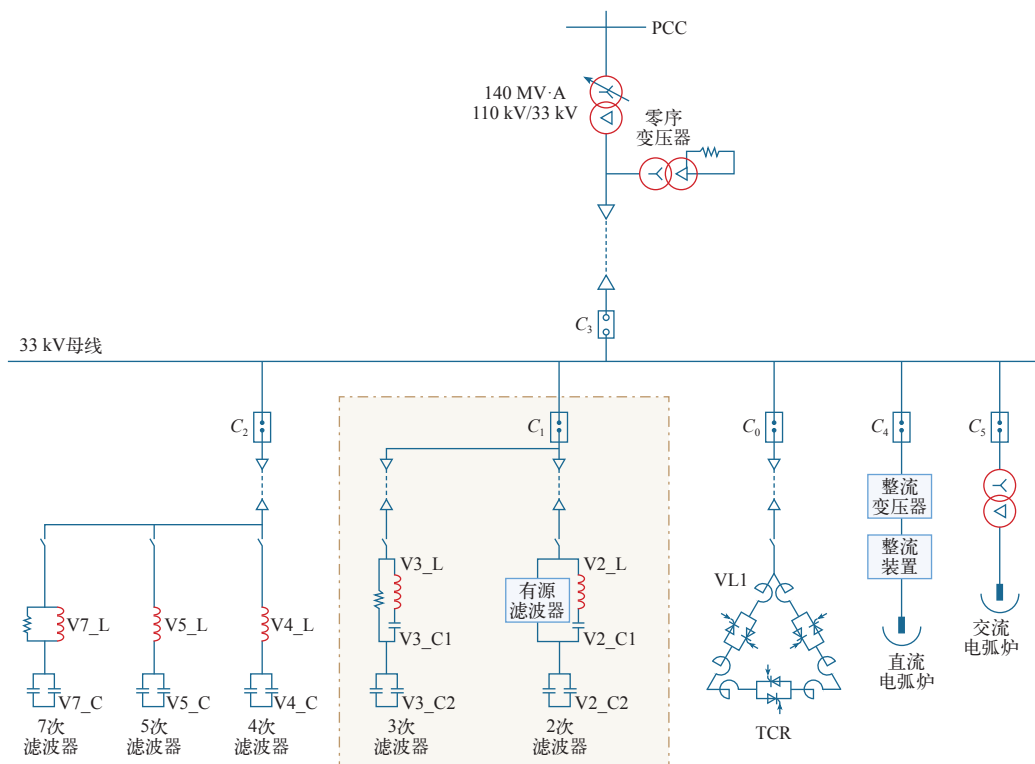


图1 优化系统拓扑结构

制。在理想状态下，这4种控制方式都可以实现滤出电炉SVC系统谐波电流。如何确定一个最好且最实用的方案，需要比较它们之间的优劣。

在反馈控制和前馈控制的选择上，由于反馈控制在参数选取上只有APF的增益参数取无穷大时，才能达到理想的滤波效果。这在实际改造中是不可能实现的。而当增益不够大时，滤波效果又呈现了明显的不理想特性，再加上增益越大导致APF容量递增的可能性非常大。因此反馈控制在此不适合。

在前馈控制的前提下，有源滤波器控制成电流源还是电压源的选择上，虽然两者都能得到比较理想的滤波效果，但是电流源方案有一个明显的劣势，就是动态响应时间相当长，当滤波效果近似理想的时候，已经经过了若干秒的时间，这对于电弧炉负载这样动态变化的谐波情况来说不理想。而电压源的方案在响应时间上基本可在负载变化后的1个工频周期内，达到理想的滤波效果。因此，对于本文的混合型有源滤波器，可确定采用电压源前馈控制方式。

在电压源前馈控制方式下，根据混合滤波器的工作原理，可以得到33 kV母线谐波电流的表达式，即

$$I_{sh} = \frac{-(K - Z_{21})I_{Lh}}{Z_s + (\frac{Z_s}{Z_L} + 1)Z_{21}} \quad (1)$$

式中， I_{sh} 为母线谐波电流； I_{Lh} 为负载谐波电流； Z_s 为系统阻抗； Z_L 为负载阻抗； Z_{21} 为负载阻抗； K 为前馈系数。

若前馈系数 K 满足式（2），33 kV母线谐波电流为零，说明此时混合滤波器完全滤掉系统中的谐波电流。

$$K = Z_{21} = \frac{1}{jn\omega_0 C_{21}} \quad (2)$$

针对系统中负载存在的典型次谐波，可以求出各次谐波不同的 K 值， n 为谐波次数。由于 C_{21} 已知，则前馈参数 K 与滤波次数 n 是反比关系。

根据等式表示出前馈参数 K 与谐波次数 n 之间的对应关系，如图2所示。可以看出随着谐波次数的增加，前馈系数 K 在逐渐减小。2次谐波的前馈

系数最大,为24.68,当谐波次数增大到20时,前馈参数 K 减小2.50左右。在谐波次数小时,前馈参数 K 变化比较快,在谐波次数大时,前馈参数 K 变化缓慢。在实际情况下,混合滤波器针对2次、3次、4次、5次、7次谐波和17次、19次高次谐波进行谐波抑制。

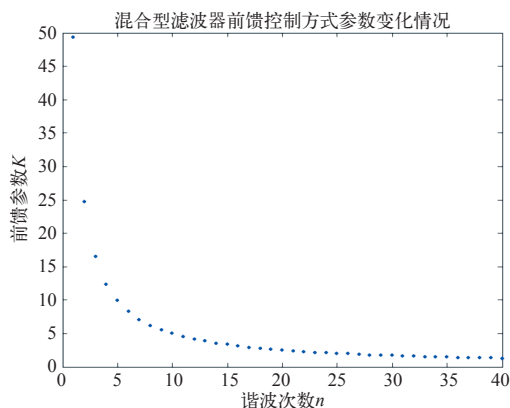


图2 前馈参数 K 与滤波次数 n 的对应关系

仿真分析

稳态分析是指负载为恒定谐波电流源的情况下对混合有源滤波器进行的仿真分析。恒定谐波电流源的幅值和谐波含量的具体设定按照电弧炉负载现场实测数据分析结果。谐波电流源负载中主要次数谐波的幅值如图3所示。基波电流为2 000 A,2次谐波电流为30 A,3次谐波电流为20 A,4次谐波电流为30 A,5次谐波电流为20 A,7次谐波电流为15 A。

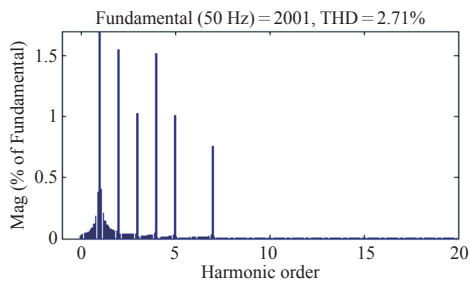


图3 谐波源负载的电流频谱

从图3中可以看出:2次谐波的含有率为1.5%,3次谐波的含有率为1%,4次谐波的含有率为1.5%,5次谐波的含有率为1%,7次谐波的含有率为0.8%。负载电流总畸变率为2.71%。

1. 无源滤波器组的滤波效果

无源滤波器组由5条滤波支路组成,针对2次、3次、4次、5次和7次以上的高次谐波具有滤波效果。经过无源滤波器组补偿后的33 kV母线电流得到改善,趋近于正弦波,如图4所示。

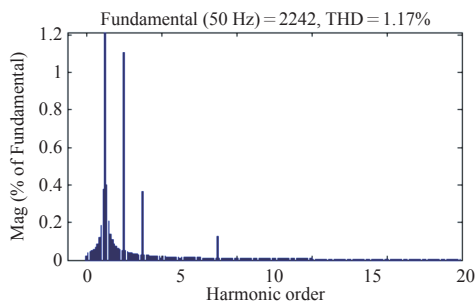


图4 无源滤波器组作用下33 kV母线电流频谱

从图4中也可以明显看出,33 kV母线电流的总畸变率为1.17%;2次谐波含量为1.1%,幅值约为24.7 A;3次谐波含量为0.38%,幅值约为8.52 A;7次谐波含量为0.15%,幅值约为3.36 A;4次和5次谐波含量很小,接近于0。

可以很直观地发现,无源滤波器对4次、5次谐波具有很好的滤波效果。对于2次、3次和7次滤波效果不是很理想,特别是2次谐波仅滤除了17.7%的谐波,导致系统中2次谐波含量较高。

2. 有源滤波器的滤波效果

混合有源滤波器在0.4 s时投入系统开始工作,33 kV母线电流的THD变化曲线如图5所示。

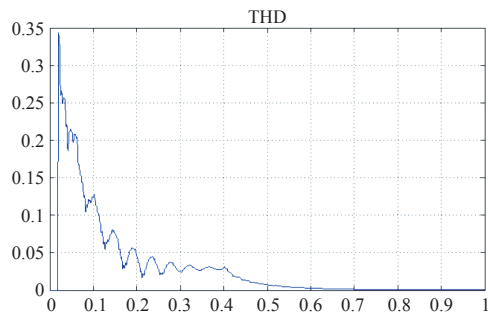


图5 有源滤波器作用下33 kV母线电流THD值变化

从图5中可以看出,APF投入前33 kV母线电流的THD值约为0.03;APF投入后,经过约10个周期,THD值迅速减小接近于0,最终完全滤除了33 kV母线电流谐波分量。

33 kV母线电流频谱图如图6所示。

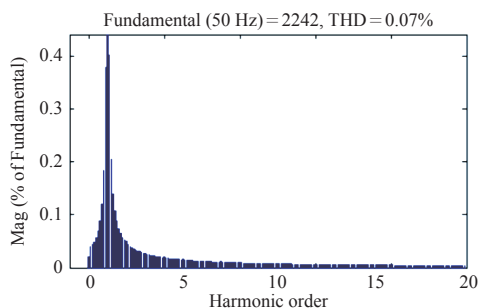


图6 有源滤波器作用下33 kV母线电流频谱

33 kV母线电流的总畸变率已经降到了0.07%，各次谐波含量减少到0.05%左右，2~5次和7次谐波得到完全滤除。可见在稳态情况下，混合有源滤波器具有很好的滤波效果。

下表为无源滤波器组和混合有源滤波器的仿真结果进行对比。从下表中可以看出，无源滤波器组和混合有源滤波器对2次谐波的滤出对比很大，其2次谐波含有率由1.1%降到了0.06%。同样对其他次要谐波，滤出率也大幅提高。数据结果充分说明混合有源滤波器具有显著的滤波效果。

表 混合有源滤波器和无源滤波器组滤波效果对比

	2次谐波 含有率 (%)	3次谐波 含有率 (%)	4次谐波 含有率 (%)	5次谐波 含有率 (%)	7次谐波 含有率 (%)
无源滤波器组	1.1	0.38	0.06	0.05	0.15
混合有源滤波器	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01

结束语

针对现场SVC系统存在的谐波超标问题，可引入有源滤波器，以此改造成SVC优化系统。优化系统既可改善滤波效果，又可减少投资。通过对混合有源滤波器控制方式的分析，选定的电压源前馈控制可使混合滤波器对2~5次、7次谐波以及次高次谐波进行谐波抑制。稳态仿真分析结果很好地说明了优化系统对稳定谐波源具有明显的谐波抑制效果。

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] 胡立强, 晁勤, 吐尔逊. 静止无功补偿器在电力系统无功补偿中的仿真[J]. 低压电器, 2007(19): 39-42.
- [3] 方忠民, 赵延明. 基于SVC的电弧炉谐波抑制研究[J]. 中国仪器仪表, 2008(2): 62-65.
- [4] 陈恺, 王如玫. 电力系统谐波治理与有源滤波器[J]. 华东电力, 2008, 36(8): 55-58.
- [5] 顾建军. 基于APF的SVC优化系统实验研究[J]. 电气应用, 2014, 33(4): 34-37.

(收稿日期: 2015-06-24) EA

让绝缘变得轻松自如!

干变、油变绝缘件、高低压开关柜绝缘件、充气柜绝缘件, SMC板、环氧板销售加工

中国知网 万方网 维普网 龙源网 知网网 www.cnki.net

baiPO 佰珀新材料
青春 谦学 责任 奉献

上海佰珀新材料有限公司地处上海青浦，以独特的区位优势，深得中国经济发展先机。佰珀新型材料已经成为中国知名的SMC材料、模压制品、绝缘板材供应商。

产品广泛应用于电工电气、汽车、卡车、农业机械、轨道交通、建材、卫浴用品等领域。公司拥有丰富的研发资源，出众的工程技术。

地址：上海市青浦区天淀路168号 Post Code: 201713
Add: Shanghai city Qingpu District days Lake Road No.168
Fax: 021-59831666 57766999
M.T: 138 1612 7328
http: www.bai-poo.com
E-mail: 401071998@qq.com