

转炉炼钢高压静电除尘电源系统的开发与应用

高压静电除尘电源作为高压静电除尘器的重要组成部分，对除尘效率的提高起着关键性作用。先对常用的除尘电源电路拓扑和特点进行理论分析和仿真验证，然后重点介绍IGBT硬开关型高压电源及滞环电流控制在工程上的应用。结果证明，采用该滞环电流控制器的高压静电除尘电源可以使钢铁企业满足国家粉尘排放标准，同时可以节省电能、降低能耗以及提高除尘效率。

段 巍^{1,2} 李崇坚¹ 薄 强¹ 许海涛^{1,2} 杨 涂³/1.中国钢研冶金自动化研究设计院 2.北京金自天正智能控制股份有限公司 3.北京博谦工程技术有限公司

0 引言

目前，中国工业正处于快速上升的重要阶段，随着国务院“中国制造2025计划”的提出，中国的工业增速将会持续加快。“绿色发展，结构优化”是“中国制造2025计划”的基本方针之一，钢铁作为我国工业的重要支柱，理应在绿色发展、节能减排方面起到标杆作用。有数据显示，2016年中国转炉炼钢产出的钢铁产量同比2015年增长了1.2个百分点，粗钢产量达到了8.08亿t。与此同时，中国的最新环保法规定转炉炼钢的烟气粉尘颗粒物排放标准是50 mg/Nm³，排放标准的严格加上处罚力度的增加促使钢铁企业转型升级并寻找高性能的减排装置。通过改良炼钢工艺和采用优异的除尘电源拓扑及控制方法可以从根本上降低炼钢成本、增加资源利用率以及提高除尘效率。

干法（LT法）除尘技术和湿法（OG法）除尘技术一直是工业除尘的主流方案，现在已经越来越多地应用到工业生

产中。OG法自最初开发以来就一直被钢铁企业广泛采用，但其主要缺点是废水难处理、耗能不循环以及占地面积大等。LT法相对于OG法明显降低了能耗，很少或不需要耗水，安装简单，现已在全世界得到广泛应用，目前LT法在炼钢行业的使用逐年增长，取得了明显的经济效益和社会效益。高压静电除尘电源作为高压静电除尘器（ESP）的核心设备，其性能的优劣是除尘效率能否提高的关键。本文在分析了大型转炉炼钢LT法工艺和原理后，首先对常用的几种ESP电源的电路拓扑及其控制特点进行了理论分析和仿真研究，然后在此基础上详细分析了IGBT硬开关型高压电源的滞环电流模式控制和工程应用。分析、比较工程应用数据的结果表明采用该种除尘器可以使钢铁企业在满足国家粉尘排放标准的同时减少支出、节省电能及提高效率。

1 转炉炼钢静电除尘工艺和原理

转炉炼钢的静电除尘工艺如图1所示。ESP的特点要求转炉在冶炼的过程中排放的高温烟气只有经过冷却后才能进入ESP中进行除尘过程。ESP要求经过其中的粉尘温度不得高于200℃，而转炉出来的高温烟气温度一般达到850~1200℃，因此需要蒸发冷却器的热交换作用将烟气温度降低到规定的温度以下再送入到ESP中进行进一步除尘处理。另外，工业现场试验表明，粉尘的比电阻大小也会影响除尘的效率，蒸发冷却器的作用除了对高温烟气进行降温外还能对高温烟气



段 巍/高级工程师

关键词/Keywords

粉尘排放 ·
静电除尘 ·
高压除尘电源 ·
滞环电流控制器 ·
IGBT硬开关 ·

进行调质处理,使粉尘更加有利于除尘器集电极的收集。为使烟气气流被吸引到除尘器内部并加快粉尘流动过程,需要采用主引风机的导向作用为粉尘气流提供动力。ESP除尘后的烟气再进一步排放到放散塔或者经过煤气冷却塔处理后排放到煤气柜中。收集后的粉尘经过进一步处理(如压块等)以防止再次扬尘的出现^[1]。

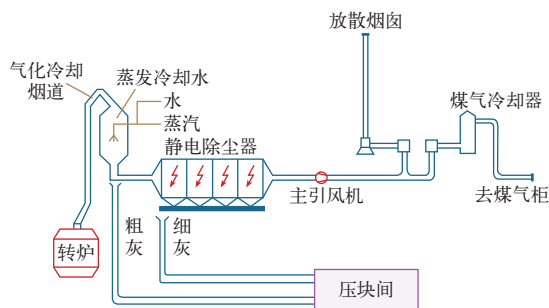


图1 转炉静电除尘工艺流程

ESP的除尘原理如图2所示。高压整流变压器产生的高压直流电加在放电极和集尘极之间,放电极和集尘极分别接地形成闭合的电场,工作时在放电极发生电晕放电,形成大量的自由电子和正离子^[8]。当被蒸发冷却器处理过的烟气经过ESP时,高压电源产生的大量正、负离子就会充分荷电粉尘颗粒,负电荷荷电的粉尘粒子在电场力作用下被吸附到集尘极上,正离子也会荷电粉尘粒子并向放电极运动,但由于正离子就是在放电极产生的,导致正离子到放电极的线程很短,荷电的粉尘粒子极少,一般可以忽略不计。在集尘极上由于电吸附作用,荷电的粉尘粒子就大量集聚在集尘极上,当粉尘堆积达到一定厚度时,就可

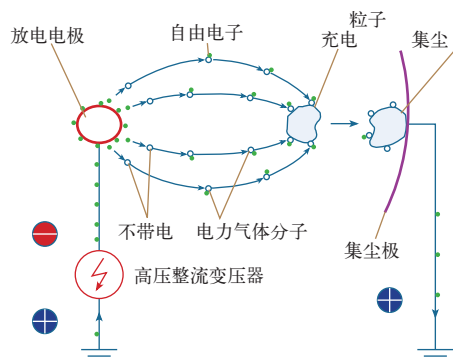


图2 高压静电除尘器除尘原理

以通过机械循环振打装置将吸附的尘粒振打下来传送到粉尘箱里,从而达到除尘的目的。

由上述除尘原理可知,高压电源产生正负电荷的多少影响了粉尘荷电的效率,并且高压电源幅值的大小也对吸附粉尘的电场力有决定作用。为充分荷电并收集粉尘,同时避免再次扬尘和闪络的发生,必须采取性能优异的除尘器电源拓扑。

2 高压电源电路拓扑及特点

ESP电源的发展与新型电力电子器件的发展密切相关。最初除尘电源是采用晶闸管(SCR)器件作为电源的主控器件,晶闸管由于其容量可以达到12 kV/1 kA、6 500 V/6 000 A的等级,在很长一段时间内一直是除尘电源的首选,但因其移相控制导致电网侧的谐波很大,并且晶闸管只能开通不能自关断的特性限制了它在实时控制较强场合的使用。IGBT是一种可控型器件,因其具有良好的控制特性、较高的开关频率和较低的开关损耗等优点,使ESP的电源获得了新的控制特性,目前高压IGBT的制造水平可以达到6.5 kV/1 kA的等级。在工业现场上较多使用的除尘高压电源有晶闸管(SCR)高压电源、IGBT中高频高压电源和脉冲高压电源。

2.1 晶闸管(SCR)电源

图3a为ESP最常见的晶闸管单相高压电源的电路拓扑,三相电网中的一相经过一对反并联的晶闸管移相控制后通过限流电抗器的限流作用输入给高压工频(50 Hz)变压器,再经过高压硅堆的整流作用加到除尘器上。图3b为这种晶闸管电源供电闪络工况下的ESP电压和电流的典型波形。从图中可以看出,加到除尘器上的电压是幅值波动比较大的脉动直流,100 Hz的脉动频率是由电网电压决定的,直流电压的波动 ΔV ($\Delta V = V_{\max} - V_{\min}$)取决于除尘器的电容值和电晕电流大小,这是由除尘器本体的机械尺寸和工艺条件引起的,不会随着外部工艺而改变。

晶闸管相控电源具有容量大、结构简单以及投资少等优点,所以目前中国大多数钢铁企业的

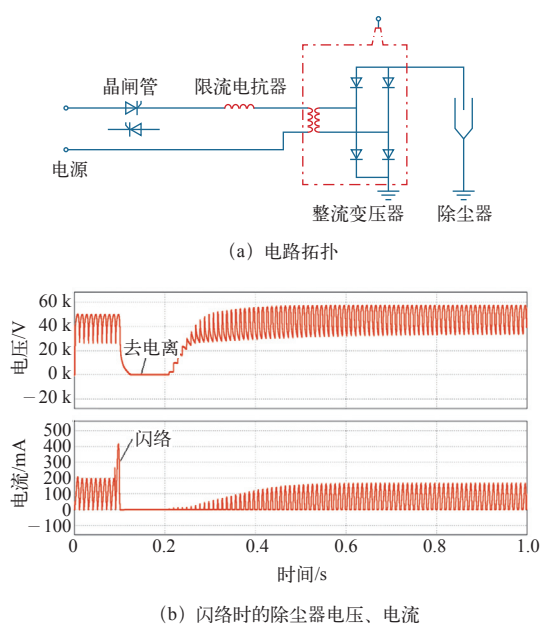


图3 晶闸管高压电源

高压静电除尘电源仍然采用该晶闸管电源供电。在此基础上发展起来的三相晶闸管高压电源是单相高压电源的改进，它由三对反并联的晶闸管经过三相高压工频整流变压器后对除尘器本体供电，可以解决单相时的供电不平衡等问题。但是必须看出由于晶闸管是半控型器件，无法快速响应除尘器发生闪络或击穿时的极端工况，当发生闪络或击穿时只能在晶闸管的下个控制周期调整电源的输出电压、电流，动态响应很慢，不能满足除尘过程实时性强的要求。另外，晶闸管的相控特性导致输入侧低次谐波污染严重，并且工频变压器的供电会使整个电源装置体积大、占地多。因此必须寻求高性能、快反应的除尘电源。

2.2 IGBT中高频高压电源

IGBT由于具有良好的控制特性和较大的开关频率（达20 kHz），目前已经成为除尘电源企业的研发重点，国内外许多企业都开发出了基于IGBT的高压除尘电源，国外比较有代表性的有德国西门子的500 Hz中频高压电源和法国阿尔斯通公司的高频电源等。相比传统除尘电源中的工频变压器，中高频变压器在开关频率、磁心材料和损耗等方面显著不同，传统的工频设计方法不能直接应用在中高频变压器设计上。与传统的晶

管电源相比，IGBT中高频高压电源可以快速提高ESP在闪络以及去电离等极端工况下的快速反应能力；由于具有较短的时间间隔，在严重反电晕情况下可以取得间歇性操作的优势，并且控制周期可以大大缩短，有效提高了除尘器的性能和效率。因此，基于IGBT的中高频高压除尘电源成为环保企业的重点研发方向。

根据IGBT开关损耗的不同，IGBT中高频高压电源又可分为软开关谐振型高压电源和硬开关型高压电源两种。

(1) IGBT软开关谐振型高压电源

IGBT软开关谐振型电源的电路拓扑如图4a所示。三相电网电压经过三相整流和电容器滤波作用后再经过IGBT单相全桥逆变后给LC谐振电路，最后经过高压高频变压器的升压作用后通过高压硅堆整流加到除尘器本体上。除尘器发生闪络后的电压、电流特性如图4b所示，可以看出相比传统晶闸管电源其对闪络的反应特性快了许多。软开关谐振型高压电源一个突出优点是可以方便地实现IGBT的软开关控制，在减小器件功率损耗的同时也增加了器件的开关频率，另外，高频变压器的分布电容和杂散电感可以全部或部分作为谐振元件，这是利用高频变压器分布电容和杂散电感的很典型的例子。所以，IGBT软开关谐振型高

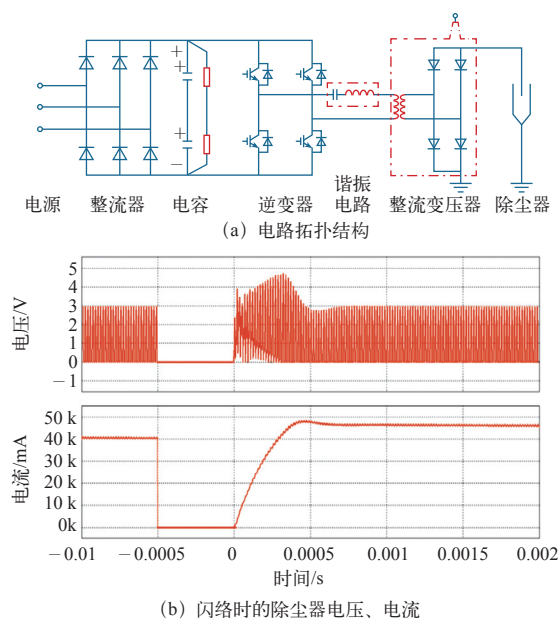


图4 IGBT软开关谐振型高压电源

压电源适用于采用高压高频变压器的应用场合^[2]。

分析表明,软开关谐振型高压除尘电源IGBT器件的工作频率最高可达20~50 kHz,在这么高的工作频率下,虽然软开关作用使器件功率损耗降低,但总的损耗并不一定低于硬开关型或者中频电源。并且,要设计一个具有低杂散电感和低杂散电容的高频变压器非常困难,为降低变压器损耗,变压器铁心和绕组也需要特殊设计,目前大容量高频变压器的设计和研发还处于实验室阶段,并没有进入现场大量生产。另外,除尘器在高比阻粉尘下易发生闪络,导致电压较低,由于软开关高压电源的输出电压与开关频率成正比,因此电压较低时开关频率降低导致除尘器在闪络工况下的控制性能较差。最后,参与谐振的电感 L 、电容 C 的参数选取也很困难,因为必须要考虑到高频变压器的杂散电感和分布电容同时参与谐振的影响。由于上述原因,IGBT软开关型高压电源的容量一般在100 kW以下,并且很少进入工业现场实用化阶段。

(2) IGBT硬开关高压电源

IGBT硬开关高压电源的电路拓扑如图5a所示。与IGBT软开关谐振型高压电源拓扑不同的是,IGBT硬开关高压电源的单相全桥逆变器的输

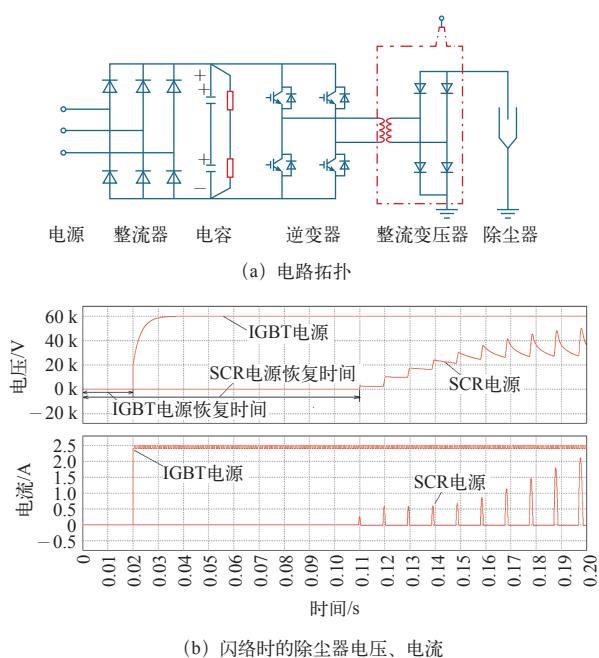


图5 IGBT硬开关高压电源

出不需要接 LC 谐振器件,而是直接接到高压变压器的输入端(有些需要加滤波电抗器),其他都相同。由于IGBT电源具有高开关频率和除尘器的电容特性,因此逆变器输出经过高压整流变压器后可以产生一个相当恒定的无纹波电压供给静电除尘器负载^[3-4]。图5b为IGBT硬开关高压电源和晶闸管高压电源在除尘器发生闪络后的电压反应对比情况,由图中可以看出,IGBT硬开关高压电源的输出电压可以是无波动的直流电压,并且IGBT电源的反应也比晶闸管电源要快得多。

与软开关电源最大100 kW容量相比,硬开关型电源最大容量可达300 kW,并且由于没有闪络电流的增加,对变压器的频率要求也没软开关型那么高。最大电压、电流的提高使IGBT硬开关高压电源可以取得更高的平均电功率和更低的粉尘排放水平,这对除尘器除尘效率的增加至关重要。

2.3 脉冲高压电源

理论和试验证明,采用脉冲高压电源(电压脉冲在毫秒级)不但可以大幅度增强粉尘颗粒的荷电量,而且可以避免无效的空气电离造成的能量损失,降低了能耗,提高了效率。图6a为脉冲高压电源电路拓扑,其基本原理为:在基础高压直流电源之上间歇性地叠加一系列频率、幅值和宽度(毫秒级)可调的脉冲电压,根据不同的除尘

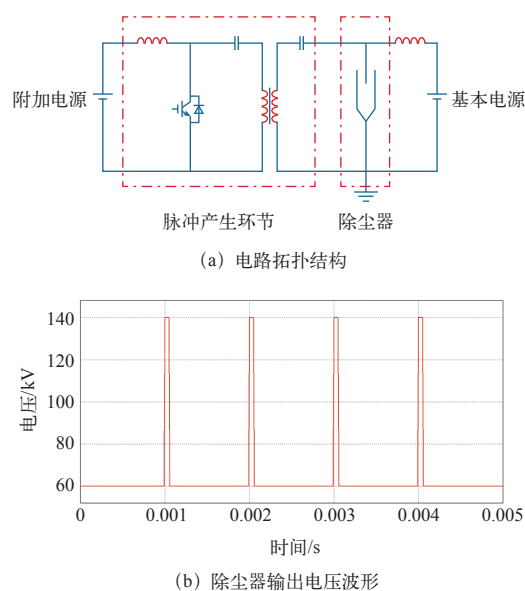


图6 脉冲高压电源

工况提供合适的电压波形^[5]。

脉冲电压电源的基础电源部分可以提高粉尘荷电的数量和均匀性，窄脉冲部分可以有效避免反电晕现象的发生，同时可以对细小的粉尘提供更好的荷电和电流分布，降低了粉尘再发生的概率，对转炉炼钢等产生高比阻粉尘较多的场合尤为有利。

基于脉冲除尘电源的上述优点，脉冲供电将是第三代高压静电除尘电源的发展方向之一，在工业现场的多电场区域配合其他除尘电源的协调配置，除尘效率将会大大提高。但是必须注意到，脉冲供电需要在直流电源的基础上新增一套脉冲发生装置，这不仅增加了ESP电源系统的结构复杂性，还增加了控制系统设计的难度。目前，脉冲高压电源在国内尚处于实验室阶段，国外比较成熟的产品有丹麦Smidth公司的CORMAX脉冲电源系统和西门子的微秒脉冲电源系统等。

3 硬开关型三相IGBT中高频高压电源的仿真和试验分析

三相IGBT中高频高压电源已经开始逐步在高压静电除尘领域推广开来，其中以硬开关型最为典型，本节以硬开关型三相IGBT高压电源为例介绍其滞环电流模式控制方法和工程应用。值得关注的是，本文采用的滞环电流模式控制与传统的电流滞环完全不同，并且是滞环电流模式控制在除尘领域的首次应用，工程试验可以证明其具有良好的控制特性。

3.1 滞环电流模式控制方法的仿真和试验结果分析

IGBT硬开关高压电源主回路仿真电路拓扑如图7a所示。所采用的控制方法为滞环电流模式控制，控制框图如图7b所示。核心是滞环控制器，滞环控制器包括三个输入参数和两个输出参数。输入的三个参数分别是采集的除尘器端电压 V_{out} 、给定电压 V_{out}^* 以及变压器一次侧电感电流 I_{prim} ；输

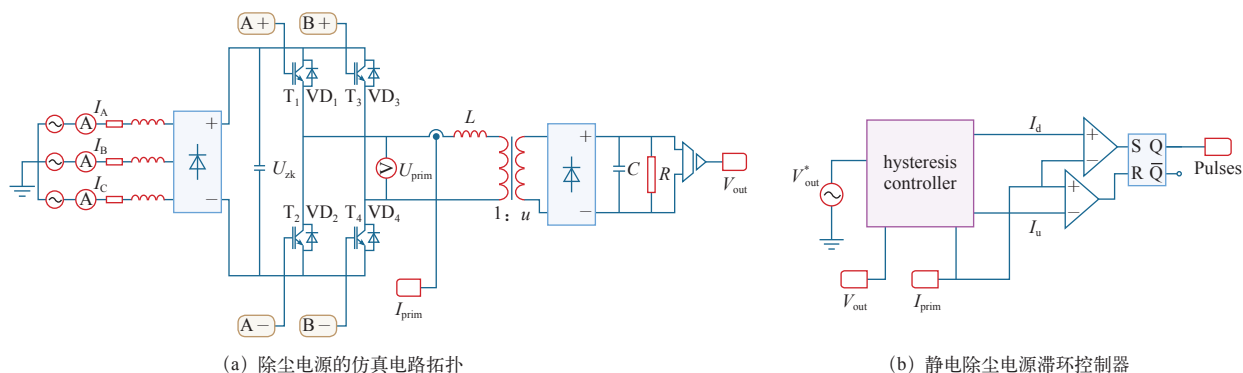


图7 IGBT硬开关型

出的两个参数是电感电流滞环带的阈值上限值 I_u 和阈值下限值 I_d ，并且阈值上、下限是与除尘过程有关的变量，经过滞环比较器后输出单相全桥逆变器四个IGBT的触发脉冲Pulses，其中 V_{out}^* 的幅值是专家系统根据除尘工况优化得到的，仿真中可以任意设定幅值（千伏级）。

图8a为变压器一次电压、电流的仿真波形，IGBT逆变器输出电流频率是500 Hz，可以看出一次电流从正电流状态转变到负电流状态时，尽管有变压器寄生电感 L 限制，但转变速度仍然很快，

这说明当用滞环电流模式控制时，系统可以对不同的工作状况进行快速的调节而不依赖于主回路其他电参数的值。图8b的试验波形也佐证了这一点。单相全桥逆变器由两步电流法控制，如果超过上限阈值 I_u 则关闭IGBT命令，如果该值低于下限阈值 I_d 则打开IGBT命令。在这两个上、下限阈值之间时逆变器就像开关一样，以大约10 kHz的频率进行开关操作。IGBT极短的开关时间（大约300 ns）可以使除尘器系统很快地响应闪络发生时的工况，满足了较高实时控制性能的要求。逆变器的

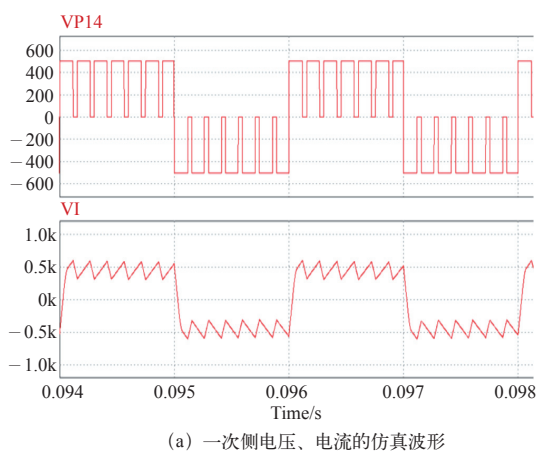
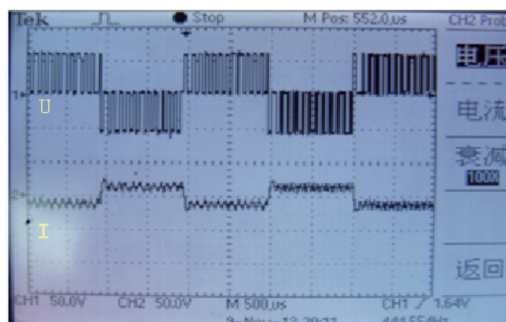


图8 一次侧电压、电流波形

操作频率为500 Hz意味着变压器的铁心可以小于传统的工频变压器。

3.2 闪络情况下的仿真和试验波形分析

为充分荷电粉尘颗粒, ESP要尽可能地运行在最高电压值下, 与此同时, 电流也在最大效率电流内。但当ESP电压增加到接近闪络阈值水平时就会发生闪络放电, 为避免频繁发生闪络导致除尘器除尘效率降低, ESP运行电压应该控制在击穿电压之下。达到击穿电压之后, 由于粉尘粒子有很高的荷电密度, 那么就会形成一个等离子通道, 随之发生闪络现象。另外, 闪络阈值随着不同的工作条件而变化, 因此闪络是不可避免的^[1], 它是一个动态过程, 但闪络可以通过测量相应的电参数和模糊逻辑控制的方法来预测, 预测的值送给控制器引出下一步的开关动作。由前文可知, 相比传统的晶闸管电源, 采用滞环电流模式控制的单相全桥IGBT逆变器对闪络现象的反应能力更快, 在ESP发生闪络时的电压仿真波形如图9a所示, 中间最低电压值是消电离时间段, 作用是为了防止闪

络的再发生, 可以看出重新建立的运行电压要比除尘器发生闪络前的电压值略低。图9b为除尘器发生闪络情况时的电压、电流试验波形, 可以看出系统在发生闪络时电压、电流反应很快, 证明了滞环电流模式控制的优异控制性能。

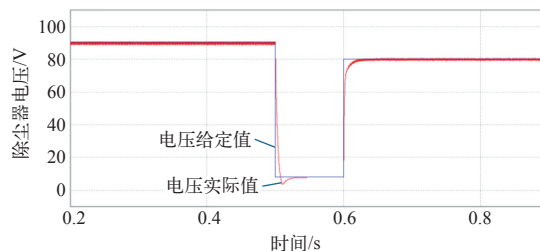
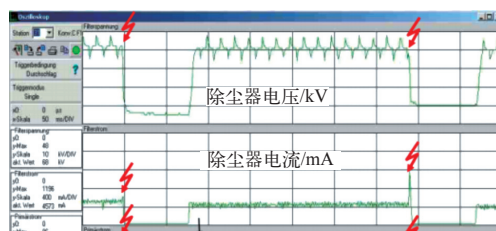


图9 除尘器闪络情况下的电压、电流波形

在除尘器运行过程中, 闪络率随着操作条件的不同而变化, 一次侧电流 I_{prim} 也随着变化, 并且受杂散电感 L 的限制, 即

$$L \frac{dI_{\text{prim}}}{dt} + U_f = U_{\text{prim}}$$

式中, $U_f = V_{\text{out}}/u$, u 为变压器的电压比。

当除尘器发生闪络击穿时, U_f 的值会急剧降低, 此时根据上式可知, dI_{prim}/dt 会由于 U_f 的降低而变得非常大, 并且可以通过上式估算出来。此时在滞环控制器的快速反应下进入消电离时间段, 击穿完成后可以迅速进入一个新的工作状态。

4 结束语

采用IGBT硬开关高压电源的输出电压基本是恒定的无纹波电压, 电流控制比晶闸管电源更加平稳, 并且除尘器的电压、电流可以随着不同的粉尘排放水平而自适应变化。试验证明, IGBT硬开关高压电源综合耗电量相比晶闸管系统节省了30%, 而效率提高了40%~50%, 可以使钢铁企业

- [1] 转炉干法除尘应用技术编委会. 转炉干法除尘应用技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [2] 刘军. LCC-SPRC 高压高频大功率电除尘电源理论分析与功率参数设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [3] Grass N. 150 kV/300 kW high voltage supply with IGBT inverter for large industrial electrostatic precipitators [C]. 42nd IEEE IAS Annual Meeting, Conference Record, New Orleans; IEEE Industry Applications Society, 2007: 23-27.
- [4] Parker K R. Applied electrostatic precipitation [M]. London; Blackie Academic & Professional, 1997.
- [5] 刘琰. 电除尘器脉冲供电的基础研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [6] Norbert Grass, Werner Hartmann, Michael Klöckner. Application of different types of high-voltage supplies for electrostatic precipitators [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40 (6) .
- [7] Wu K I, Hung S H, Shieh S Y, et al. Current-mode adaptively hysteretic control for buck converters with fast transient response and improved output regulation [J]. 2014 IEEE International Symposium

[8] 谢广润, 陈慈宣. 高压静电除尘 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

[9] 梁曦东, 周远翔, 曾嵘. 高电压工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

[10] Soeiro T B, Mühlethaler J, Linnér J, et al. Automated design of a high-power high-frequency LCC resonant converter for electrostatic precipitators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (11) : 4805-4819.

[11] 沈湛. 96 kVA高压中频变压器优化设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.

[12] Zhan S, Long J, You J, et al. High voltage, high power and medium-frequency power transformer parameters design [C]. International Conference on Electrical Machines and Systems, IEEE, 2014: 2449-2453.

[13] 朱思国, 欧阳红林, 刘鼎. 基于电流滞环控制的 H 桥级联型逆变器新型调制方法 [J]. 电工技术学报, 2013 (2).

[14] Grass N, Fischer T. High voltage power supply and control technologies for electrostatic precipitators in biomass applications [C]. Industry Applications Society Annual Meeting, 2014 IEEE, 2014; 1-4.

[15] 段巍, 李崇坚. 冶金转炉静电除尘高压电源系统[J]. 冶金自动化, 2015 (6): 14-18, 51.

(收稿日期: 2017-03-17) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告