

电解锰新型综合节能可断流 6 脉波整流系统

李世军^{1,2}, 罗隆福², 余双翔³, 刘路路², 施晓蓉^{1,4}

(1. 湖南工程学院 电气信息学院 风力发电机组及控制湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411101;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 中国电建集团中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014;

4. 湖南省风电装备与电能变换协同创新中心, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 针对传统直流电解锰高耗能问题, 提出了一种新型综合节能大功率可断流的 6 脉波整流系统。此系统在传统 6 脉波整流系统基础之上, 对晶闸管触发信号进行一段时间的封锁来实现断流, 达到频率、占空比以及电流 3 个参数可变; 重点针对 3 个可变参数对网侧谐波畸变的影响进行分析与研究, 并利用基于谐波磁通抑制机理的感应滤波变压器, 从阀侧处谐波源就近抑制和补偿无功, 在一定程度上减少了谐波污染和无功损耗。仿真和中试试验结果表明, 该系统节能效果显著, 验证了脉流电解锰的高效节能优势。

关键词: 脉流电解锰; 可断流 6 脉波; 整流器; 感应滤波变压器; 谐波抑制; 无功补偿; 节能降耗

中图分类号: TM 422

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.020

0 引言

传统的电解锰采用直流电解技术, 即三相交流电经过三相整流桥整流成 6 脉波或 12 脉波直流, 整流后的直流接入电解槽。其被冠以高污染、高耗能、高排放的“电老虎”帽子。其电流效率约为 65%~75%, 直流度吨耗为 5800~6500 kW·h/t。国内外对新电解方式的研究有了较好的进展, 文献[1]采用脉冲电解, 通过改变电流大小、脉冲频率和占空比 3 个参数, 占空比为 0.5、频率为 100 Hz、电流密度为 400 A/m² 时脉冲电解金属锰的电流效率最高, 达到 82.1%; 在相同电流密度条件下, 脉冲电解金属锰的电耗比直流电解金属锰低 38.0%。文献[2]研究表明: 脉冲电解通过提高电流密度、降低浓差极化、减少析氢效应的不良影响, 可以加快锰的沉积速度, 将电流效率提高 10%~15%; 同时通过利用电流脉冲的通断变化, 可以有效提高阴极的活性极化, 从而降低了对添加剂的依赖。但是由于工业生产线的电解锰的直流电流可达几千至上万安培, 要实现用直流刀闸直接断流斩波的方式非常困难, 所以目前的研究与成果都只是基于实验室小功率脉冲电源的电解制备。在实际工程中, 还没有电流达到上万安的大功率脉流电源用于电解锰。目前我国电解锰行业并没有大功率的脉冲脉流电源, 严重制约了电解锰行业电流效率和产量的提高。

本文从脉冲电解锰的理论上进行剖析, 创新性地提出一种大功率可断流的 6 脉波整流系统方案,

重点对可断流系统进行仿真, 以及对所引起的谐波畸变进行分析; 并将新型整流变压器的感应滤波技术应用于此脉流系统中, 达到较好的谐波治理与无功补偿效果, 实现电源系统综合节能, 大幅提高电源效率。此大功率脉流电源在国内某大型电解锰厂进行中试试验, 取得了较好的试验效果, 其平均电流效率达 70%~80%, 直流度吨耗为 5400~5800 kW·h/t。从工程上实践性地验证了采用新型节能 6 脉波大功率可断流系统进行电解锰的高效节能优势。

1 新型可断流 6 脉波整流系统的实现方案

在大功率可断流 6 脉波整流系统的研制方面, 传统的方法是通过斩波控制对直流实现断流。控制 IGBT 的通断实现断流的电路拓扑图如图 1 所示, 这种方法控制简单, 在原有设备的基础上增加 IGBT 斩波控制电路进行改造即可实现可断流。但是结合电解锰行业的大电流、低电压实际工况 (如某公司电解锰整流系统输出的直流电压为 564.46 V, 直流电流为 16.24 kA), 以及考虑到 IGBT 的开关损耗、所能承受的最大电流和 IGBT 容量以及价格等因素, 图 1 的方法在电解锰脉冲电源的研制中是不可行的。

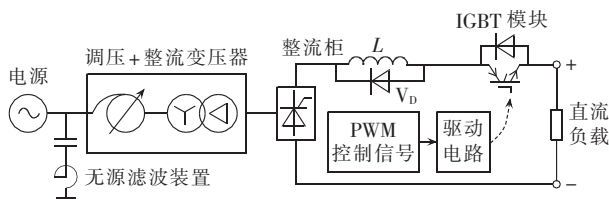


图 1 斩波实现直流断流的系统方案图

Fig.1 Schematic diagram of DC cut-off by chopper

通过控制整流器晶闸管导通和关断来实现断流, 这种方法只是在原来整流设备的基础上, 对晶闸管触

收稿日期: 2015-05-25; 修回日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51377001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51377001)

发信号进行一段时间的封锁来实现断流或在设计触发信号时在规定时间内不给出脉冲信号以实现断流。如图 2 所示,即晶闸管双窄脉冲触发信号与 PWM 脉冲封锁信号进行逻辑与结合,再送至晶闸管进行触发,其中在信号的封锁过程中,晶闸管原始触发信号是继续发出的。

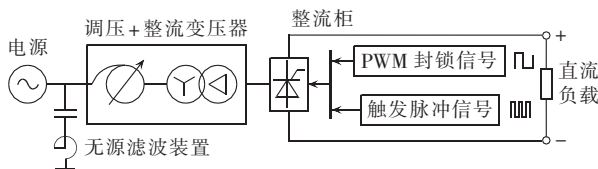


图 2 对晶闸管的触发信号进行封锁实现断流的方案图

Fig.2 Schematic diagram of DC cut-off by thyristor triggering signal blocking

2 可断流仿真与谐波畸变分析

在实际的电解生产中,整流系统的负载等效为电阻与电容的串联模型,双电层电容可以忽略,如果浓差极化作用不明显,那么等效电路可以简化为溶液电阻和电化学电阻的简单串联^[1-2]。根据中试试验中的电解槽参数可以算出等效电阻为 0.018 7 Ω,直流输出电压为 564.46 V,额定功率为 9 166.83 kW,触发角 $\alpha = 7^\circ$ (当需要较大范围改变直流电压时,调节变压器的有载调压开关),漏感 $L_b = 0.8$ mH。网侧绕组容量 $S_1 = 12\,500$ kV·A,绕组电压 $U_1 = 35$ kV(Y 联结方式),绕组电流 $I_1 = 206$ A;网侧绕组容量 $S_2 = 12\,500$ kV·A,绕组电压 $U_2 = 552.8$ V,绕组电流 $I_2 = 13\,056$ A。利用 MATLAB 中的 SimPowerSystems 仿真平台搭建可断流 6 脉波整流器模型,晶闸管双窄脉冲触发信号与 PWM 脉冲封锁信号进行逻辑与运算,再送至触发晶闸管。其三相电压、脉冲触发信号、封锁信号、封锁后信号和输出电流波形如图 3 所

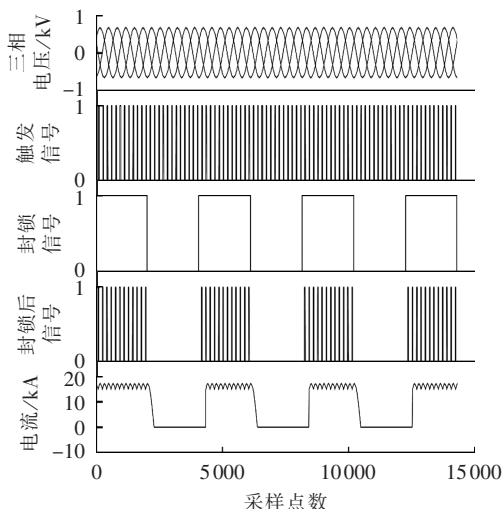


图 3 可断流 6 脉波整流系统直流输出波形图

Fig.3 Waveform of DC output of interruptible 6-pulse rectifier system

示。输出电流断流期间为 0,幅值期间为多脉波。

对于传统的电解锰 6 脉波整流系统,交流侧电压和电流波形如图 4(a)所示,其电流基波和各次谐波有效值为^[3]:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \\ I_n = \frac{\sqrt{6}}{n\pi} I_d \quad n = 6k \pm 1, k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (1)$$

由此可见,传统电解锰 6 脉波整流系统中主要是 5、7 次和 11、13 次谐波成分,一般通过在网侧安装无源滤波装置进行谐波滤除和一定的无功补偿。其交流侧带谐波的三相线电流可表示为:

$$\begin{cases} i_a = \sum_{n=1,5,7,11,\dots} I_n \sin(n\omega t) \\ i_b = \sum_{n=1,5,7,11,\dots} I_n \sin[n(\omega t - 120^\circ)] \\ i_c = \sum_{n=1,5,7,11,\dots} I_n \sin[n(\omega t - 240^\circ)] \end{cases} \quad (2)$$

三相谐波电流从相位来看始终是对称的,而且单相波形上、下半波以过零点为中心呈奇对称性,且该波形是奇函数,如图 4(a)所示。因此在进行断流时,脉冲信号封锁的过程中,要尽量保证三相电流波形的对称性和单相电流波形在数学表达式上是一个奇函数。

当加上封锁信号时,晶闸管的导通受到限制,使这种循环周期改变,就难以保证单相周期波形和三相周期波形的完整流通。因此,越是保证这种导通循环性的完整,流过整流系统的三相电流的波形以及谐波含量就越趋近于传统 6 脉波整流系统^[3-4]。

可断流脉冲输出的占空比和脉冲频率的大小决定着三相电流波形的对称程度和单相电流波形的奇对称程度。从图 4(b)来看,由于周期太短,造成三相电流波形不能流通一个完整周期,三相波形极度不对称,单相电流上、下半波更没有形成奇对称性。而当周期 T 为 0.08 s、占空比 D 为 0.3 时,整流器的导通时间为 0.024 s,基本相当于一个工频周期,此时三相电流中的两相非常对称。当占空比为 0.5 和 0.7 时,三相电流是基本对称的。当周期为 0.2 s 时,三相电流波形对称性更好。由图 4(b)、(d)、(f)可以看出,当占空比一定时,脉冲电源周期越长,三相电压完整波形导通的个数越多,三相电流的对称性也就越好,单相电流上、下半波的奇对称性就越完整。

表 1 为可断流整流系统在不同参数下的三相电流总谐波畸变率(THD)。当周期为 0.08 s、占空比 D 为 0.5 以上时,三相电流的谐波量最小也最对称。而周期为 0.02 s 时,无论怎么调节占空比,三相电流谐波量总是很大。当脉流周期大于或等于 0.02 s 时,频率越小,占空比越大,则三相电流波形越对称,单相电流波形的奇对称性越好,谐波含量也就越小;频

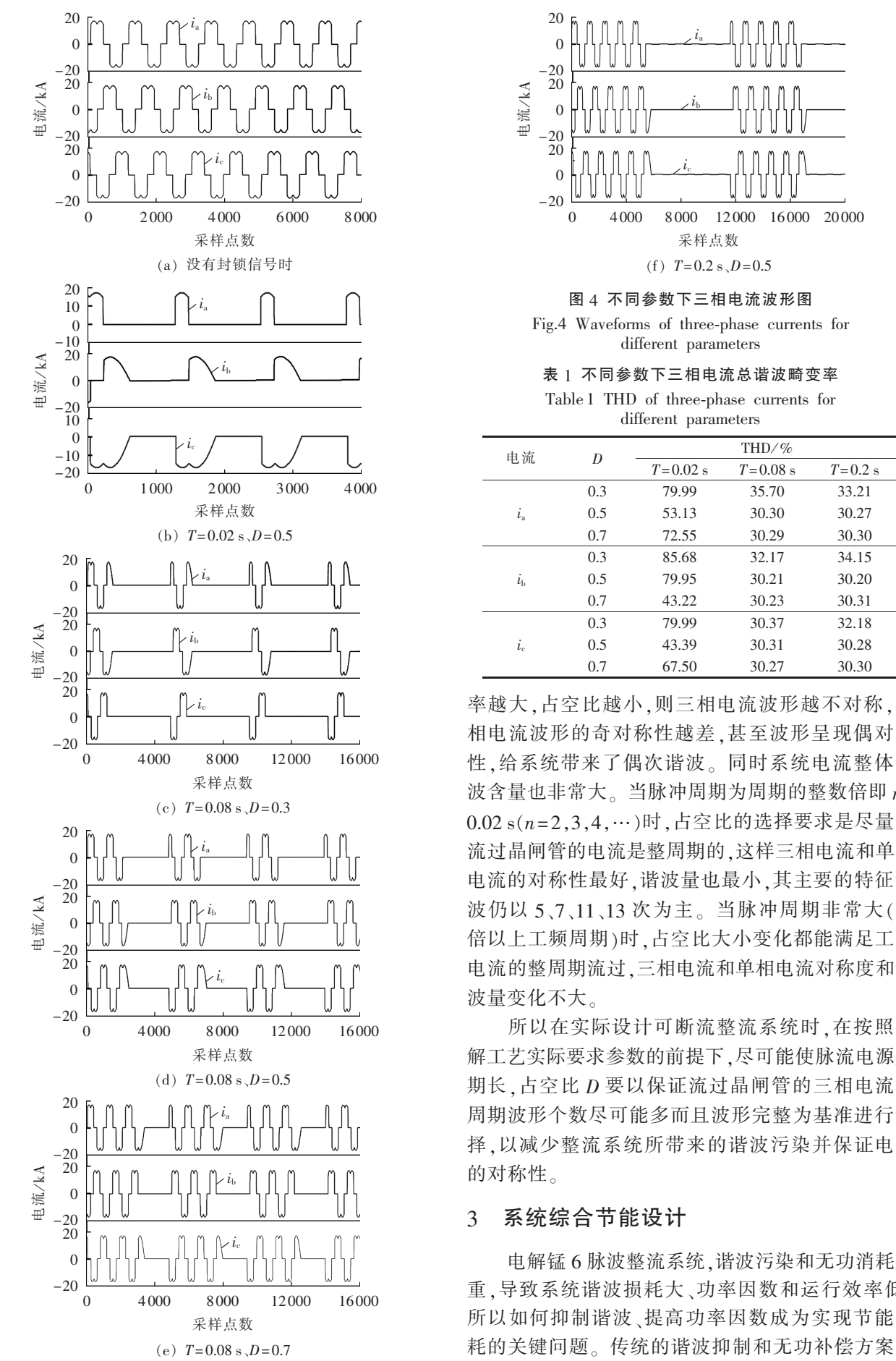


图 4 不同参数下三相电流波形图
Fig.4 Waveforms of three-phase currents for different parameters

表 1 不同参数下三相电流总谐波畸变率
Table 1 THD of three-phase currents for different parameters

电流	D	THD/%		
		$T=0.02\text{ s}$	$T=0.08\text{ s}$	$T=0.2\text{ s}$
i_a	0.3	79.99	35.70	33.21
	0.5	53.13	30.30	30.27
	0.7	72.55	30.29	30.30
i_b	0.3	85.68	32.17	34.15
	0.5	79.95	30.21	30.20
	0.7	43.22	30.23	30.31
i_c	0.3	79.99	30.37	32.18
	0.5	43.39	30.31	30.28
	0.7	67.50	30.27	30.30

率越大,占空比越小,则三相电流波形越不对称,单相电流波形的奇对称性越差,甚至波形呈现偶对称性,给系统带来了偶次谐波。同时系统电流整体谐波含量也非常大。当脉冲周期为周期的整数倍即 $n\times 0.02\text{ s}(n=2,3,4,\cdots)$ 时,占空比的选择要求是尽量让流过晶闸管的电流是整周期的,这样三相电流和单相电流的对称性最好,谐波量也最小,其主要的特征谐波仍以 5、7、11、13 次为主。当脉冲周期非常大(10 倍以上工频周期)时,占空比大小变化都能满足工频电流的整周期流过,三相电流和单相电流对称度和谐波量变化不大。

所以在实际设计可断流整流系统时,在按照电解工艺实际要求参数的前提下,尽可能使脉流电源周期长,占空比 D 要以保证流过晶闸管的三相电流整周期波形个数尽可能多而且波形完整为基准进行选择,以减少整流系统所带来的谐波污染并保证电流的对称性。

3 系统综合节能设计

电解锰 6 脉波整流系统,谐波污染和无功消耗严重,导致系统谐波损耗大、功率因数和运行效率低,所以如何抑制谐波、提高功率因数成为实现节能降耗的关键问题。传统的谐波抑制和无功补偿方案是

无源滤波和有源滤波技术,都是在变压器的网侧进行滤波和无功补偿,谐波电流通过变压器的原、副边绕组,整流变压器承受全部的谐波和无功分量,造成变压器绕组和铁芯损耗、振动和噪声增大,增加了整流变压器绝缘和热设计的难度等,从而增加变压器的损耗,这不仅降低了电网的供电质量,而且造成了巨大的电能浪费。而感应滤波技术是近年来得到大力发展的集谐波治理和无功补偿于一体的电能质量控制新技术^[5]。

鉴于此,将本文上述的 6 脉波可断流系统采用感应滤波技术,构建集谐波治理与无功补偿于一体的电解锰新型综合节能 6 脉波可断流系统,图 5 所示为新型谐波抑制整流变压器及其滤波系统接线方案与电压相量图。整流变压器采用三绕组结构,一次侧电源绕组由三相绕组 AO、BO 和 CO 构成,采用星形接法,中性点引出接地;二次侧由 2 套绕组构成,均采用三角形接法,其中一套为负载绕组,由三相 a_1b_1 、 b_1c_1 、 c_1a_1 构成,接整流器,另一套为滤波绕组,由三相 a_2b_2 、 b_2c_2 、 c_2a_2 构成,引出接 5/7、11/13 次全调谐滤波器。 U_{a1b1} 、 U_{a1c1} 、 U_{b1c1} 、 U_{b1a1} 、 U_{c1a1} 和 U_{c1b1} 的相位依次相差 60° ,从而共同组成 6 脉动整流器所需要的换相

线电压。对滤波器采用独特的零阻抗设计,使得 5、7、11 和 13 次等特征谐波电流被就近抑制,且不注入电网。与其他变压器网侧实施的滤波方式相比,本文方式具有诸多优势:由于谐波电流不流经变压器,一方面使得变压器损耗减小,另一方面可大幅减少变压器铁芯的谐波磁通,有效解决因谐波导致的变压器振动与噪声等问题;同时,对于基波而言,阀侧滤波在整流变压器阀侧补偿部分无功,剩余的无功功率由网侧高通滤波器和可投切电容器组来补偿,在一定程度上降低了无功电流给变压器带来的运行损耗;可实现就地补偿系统换流过程中消耗的无功功率,从而改善变压器网侧的电能质量^[6-8]。

3.1 谐波就近抑制节能

感应滤波整流变压器及其滤波系统的谐波抑制机理是利用靠近铁芯的 2 个二次侧绕组即负载绕组和滤波绕组之间的谐波安匝平衡,削弱变流器所产生的谐波电流通过负载绕组时在变压器铁芯中产生的谐波磁通,从而抑制谐波电流向一次侧高压绕组传递,即中间的滤波绕组隔断了负载绕组和电源绕组之间的谐波传递路径,从而起到谐波的隔离和屏蔽作用。

对于变流器负载中某特征次谐波,当新型谐波抑制整流变压器滤波绕组按照零等值阻抗设计,滤波器按照全调谐设计时,变压器一次侧电源绕组中相应次特征谐波含量为零,并且此特征次谐波电流全部在滤波绕组和滤波器支路中构成闭合回路流通,从而实现阀侧谐波源处就近抑制谐波^[9-10]。

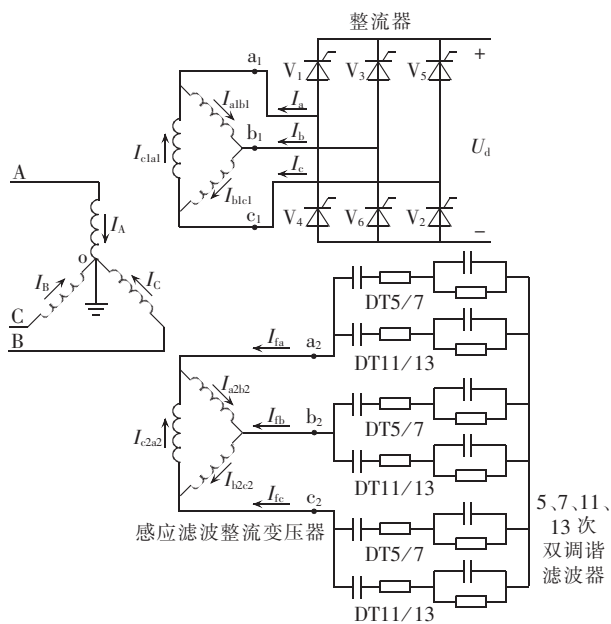
3.2 无功补偿节能

传统工业整流系统无功补偿方案中,网侧滤波装置补偿部分无功,剩余的无功功率通过投切电容器组来补偿,可以看出变流器所产生的无功电流仍然全部通过整流变压器,无法降低无功电流给整流变压器带来的运行损耗。新型系统中,阀侧滤波装置在整流变压器阀侧补偿部分无功,剩余的无功功率由网侧高通滤波器和可投切电容器组来补偿,在一定程度上降低了无功电流给变压器带来的运行损耗。

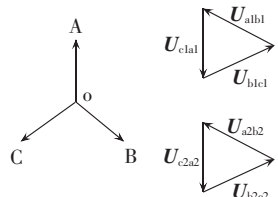
从图 5 中列出阀侧负载绕组 a_1 、 b_1 、 c_1 和滤波绕组 a_2 、 b_2 、 c_2 处电流方程为:

$$\begin{cases} I_a = I_{a1b1} - I_{c1a1} \\ I_b = I_{b1c1} - I_{a1b1} \\ I_c = I_{c1a1} - I_{b1c1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_{fa} = I_{a2b2} - I_{c2a2} \\ I_{fb} = I_{b2c2} - I_{a2b2} \\ I_{fc} = I_{c2a2} - I_{b2c2} \end{cases} \quad (4)$$



(a) 新型 6 脉波整流系统结构



(b) 相量图

图 5 新型 6 脉波整流系统结构和电压相量图
Fig.5 Structure of 6-pulse rectifier system and voltage phasor charts

以电压 U_A 为参考轴,可画出各绕组电压和电流相量图如图 6 所示,以 A 相为例,设负载电流 I_a 相位滞后电压 α 角度,由 I_{a1b1} 与 I_{c1a1} 大小相等、相位相差 120° ,可根据式(3)对 I_a 相量作底角为 30° 的等腰

三角形得到 I_{c1a1} 相量;由 U_{a2c2} 相量可得 U_{a20} 相量, a_2 处接入的滤波器基波下呈容性,故滤波支路电流 I_{fa} 超前相电压 U_{a20} 相位 90° 。同理根据式(4)对 I_{fa} 相量作底角为 30° 的等腰三角形得到 I_{c2a2} 相量,最后根据磁势平衡原理,不计励磁电流,可求得 A 相等效一次合成电流 I'_A 相量。从上面分析可知,在整流变压器阀侧滤波绕组抽头处接入滤波器,可实现阀侧补偿部分无功功率,降低网侧绕组电流中的无功分量,使得系统功率因数相应地得到明显提高^[11-15]。

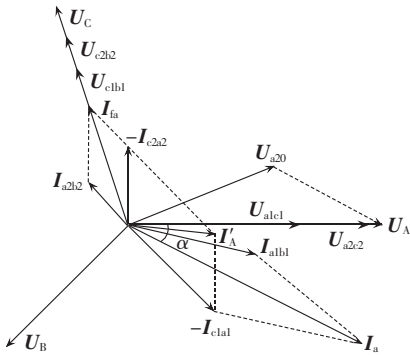


图 6 绕组电压和电流相量图
Fig.6 Phasor chart of winding voltages and currents

4 中试试验测试

该系统在国内某大型电解锰厂进行中试试验,为电解槽提供频率在 100 Hz 以内、占空比 0.3~0.8 可调、电流可调范围为 0~16 000 A 的可断流脉波。在占空比为 0.7、 $T=0.08\text{ s}$ 时所测试到的直流输出电压波形和网侧三相电流波形如图 7 所示。输出的直流电压、电流符合电解槽所需要的脉冲电压、电流。在导通时间与关断时间之间三相电流保持对称,且单相电流保持奇对称。采用电能质量分析仪所测试的在不同参数下网侧电流波形如图 7 和图 8 所示,其电流谐波含量及 THD 如表 2 所示。周期越长、占空比越大时 THD 越低。超过 10 个周期后,THD 基本不变。从表 2 可以看到, $T=0.04\text{ s}$ 、 $D=0.3$ 时,三相电流 THD 最大值为 71.88%,而 $T=0.04\text{ s}$ 、 $D=0.5$ 时,

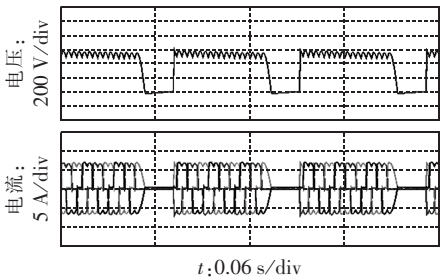


图 7 $T=0.08\text{ s}$ 、 $D=0.7$ 时直流输出电压和网侧绕组三相电流实测波形

Fig.7 Experimental waveforms of DC output voltage and three-phase grid-side winding currents, when $T=0.08\text{ s}$ 、 $D=0.7$

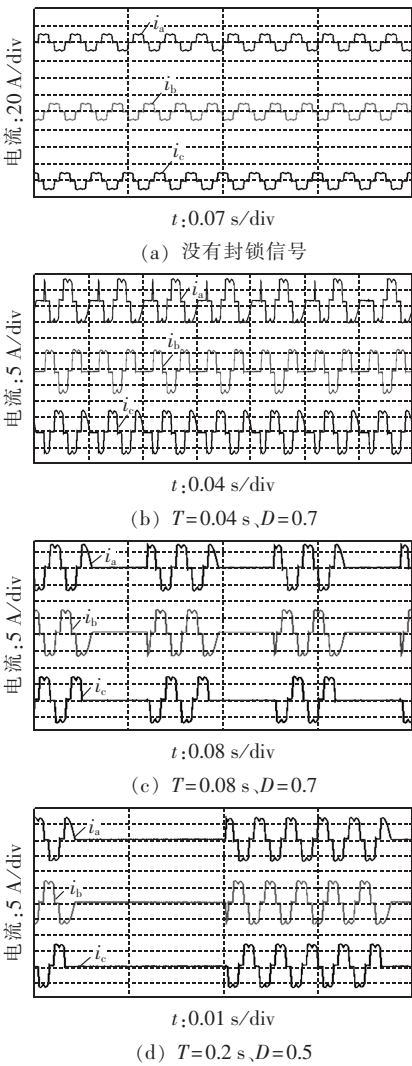


图 8 不同参数下三相电流波形图
Fig.8 Waveforms of three-phase currents for different parameters

表 2 不同参数下三相电流总谐波畸变率
Table2 THD of three-phase currents for different parameters

电流	D	THD/%		
		T=0.04 s	T=0.08 s	T=0.2 s
i_a	0.3	71.88	41.90	31.00
	0.5	32.19	32.34	30.85
	0.7	33.64	29.92	30.45
i_b	0.3	36.44	39.93	29.62
	0.5	30.90	30.49	30.61
	0.7	33.70	31.58	30.22
i_c	0.3	31.70	33.23	31.13
	0.5	30.68	31.37	30.30
	0.7	36.00	28.17	30.25

三相电流 THD 分别为 32.19%、30.90%、30.68%;而 $T=0.04\text{ s}$ 、 $D=0.7$ 时,三相电流 THD 分别为 33.64%、33.70%、36.00%。从三相电流的波形可以看出,这是由于当 $D=0.5$ 时,可关断信号的周期正好使工频电流流过一个整周期,保证了三相电流波形的完整性。当 $T=0.08\text{ s}$ 、 $D=0.5$ 时,三相电流 THD 分别为

32.34%、30.49%、31.37%；当 $T=0.08\text{ s}$ 、 $D=0.7$ 时，三相电流 THD 分别为 29.92%、31.58%、28.17%。以上数据与没有断流的 6 脉波整流器的三相电流 THD 30.98%、32.02%、29.73% 相比，三相电流的对称性和谐波量有明显降低。当 $T=0.2\text{ s}$ ，三相电流 THD 与没有断流的 6 脉波整流器三相电流 THD 基本一致。这是由于当周期变大时，流过晶闸管整周期工频电流的个数越多，所得到的三相电流越趋向于不断流时三相电流的对称性和谐波特性，可断流整流器的网侧三相电流的波形越对称，谐波量越少。

在中试试验过程中，采用不同参数进行试验。最终确定在 $T=0.08\text{ s}$ 时，电流密度保持在 300 A/m^2 。其试验数据和参数见表 3。可以看出当占空比在 0.5 以下时，占空比越小则电解电流效率越低，直流度吨耗越高。占空比超过 0.5 后，电流效率直线升高，直流度吨耗直线下降。当占空比在 0.65~0.75 之间时，试验效果最好，电解效率和产量最高。脉流电解的电流效率可达到 70%~80%，直流度吨耗为 5400~5800 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$ ，相比直流电解的电流效率 65%~75% 和直流度吨耗 5800~6500 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$ ，具有明显的节能优势。

表 3 脉流试验数据表
Table 3 Data of pulse-current electrolyzation test

T/s	D	电流密度/ ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)	电流 效率/%	直流度吨耗/ ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$)
0.08	0.2	300	55	7020
0.08	0.3	300	65	6525
0.08	0.4	300	68	6410
0.08	0.5	300	70	5808
0.08	0.55	300	72	5701
0.08	0.6	300	75	5600
0.08	0.65	300	77	5560
0.08	0.7	300	80	5400
0.08	0.75	300	80	5468
0.08	0.8	300	75	5650
0.08	0.85	300	68	6350
0.08	0.9	300	60	6680

5 结论

针对传统直流电解锰高耗能问题，本文提出一种新型综合节能大功率可断流的 6 脉波整流系统用于电解锰，在传统 6 脉波整流系统的基础上，对晶闸管触发信号进行封锁一段时间来实现断流，达到频率、占空比以及电流 3 个参数可变；并利用基于谐波磁通抑制机理的感应滤波变压器，从阀侧处谐波源就近抑制和补偿无功，解决了谐波污染和无功损耗的问题，实现电源系统综合节能，大幅提高电解效率。此大功率脉流电源在国内某大型电解锰厂进行中试试验，取得了较好的试验效果，其平均电流效率达到 70%~83%，直流度吨耗为 5400~5800 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$ 。从

仿真分析和工程上实践验证了该系统进行电解锰相比于直流电解的高效节能优势。

参考文献：

[1] 周朝昕,王庆,韩红艳,等. 脉冲参数对电解金属锰的影响[J]. 中国锰业,2012,30(1):33-37.
ZHOU Zhaoxin,WANG Qing,HAN Hongyan,et al. The influence of pulse parameters on manganese electrodeposition[J]. China's Manganese Industry,2012,30(1):33-37.

[2] ADELKHANI H,GHAEMI M. Nano-structural tailoring of manganese dioxide by using pulse current deposition[J]. Solid State Electronics,2008(170):2278-2283.

[3] 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,2005:100-108.

[4] CHENG Potai,BHATTACHARYA S,DIVAN D M. Application of dominant harmonic active filter system with 12 pulse nonlinear loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(2):642-647.

[5] 李勇,罗隆福,刘福生,等. 变压器感应滤波技术的发展现状与应用前景[J]. 电工技术学报,2009,24(3):86-92.
LI Yong,LUO Longfu,LIU Fusheng,et al. Application foreground of transformer inductive filtering technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(3):86-92.

[6] 李建英,罗隆福,许加柱,等. 采用谐波抑制整流变压器的新型工业整流系统[J]. 高电压技术,2011,12(37):3164-3170.
LI Jianying,LUO Longfu,XU Jiazhu,et al. Novel rectifier system using harmonic suppression rectifier transformer[J]. High Voltage Engineering,2011,12(37):3164-3170.

[7] 许加柱,罗隆福,李季,等. 自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器的接线方案和原理研究[J]. 电工技术学报,2006,21(9):44-50.
XU Jiazhu,LUO Longfu,LI Ji,et al. Principle and connection scheme of self-coupled compensating and suppressing harmonic converter transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(9):44-50.

[8] 宁志毫,罗隆福,李勇,等. 基于感应滤波的大功率整流系统原理分析及综合节能设计[J]. 电工技术学报,2012,27(2):224-228.
NING Zhihao,LUO Longfu,LI Yong,et al. Analysis and synthesis energy saving design of large power rectifier system based on inductive filtering technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(2):224-228.

[9] 宁志毫,罗隆福. 节能滤波型变压器及其整流系统关键问题研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):20-25.
NING Zhihao,LUO Longfu. Key techniques of rectifier system based on energy-saving and filtering transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):20-25.

[10] LI Yong,LUO Longfu,REHTANZ C,et al. An industrial DC power supply system based on an inductive filtering method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59(2):714-722.

[11] 刘路路. 电解锰可断流 6 脉波整流器研制[D]. 长沙:湖南大学,2013.
LIU Lulu. The research of on-off six-wave rectifier in electrolytic manganese industry[D]. Changsha:Hunan University,2013.

[12] 李勇,罗隆福. 新型直流输电系统阀侧绕组无功补偿特性分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(8):52-55.
LI Yong,LUO Longfu. Characteristics of reactive power compen-

- sation of valve winding of a novel DC transmission system[J]. Aotumation of Electric Power Systems,2007,31(8):52-55.
- [13] 王灿,罗隆福,李勇,等. 新型高效工业整流机组的运行特性分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(18):80-86.
- WANG Can,LUO Longfu,LI Yong,et al. Analysis on operating characteristics of a novel efficient industrial rectifier unit[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(18):80-86.
- [14] 张晓虎,罗隆福,李勇,等. 大功率工业整流系统能效在线监测系统及其远程校准算法[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):123-130.
- ZHANG Xiaofu,LUO Longfu,LI Yong,et al. Online energy efficiency monitoring system for large-power industrial rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):123-130.
- [15] 高蕾,孟凡刚,杨世彦,等. 过移相和欠移相对 12 脉波整流系统的影响及抑制措施[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):85-93.
- GAO Lei,MENG Fangang,YANG Shiyang,et al. Influence of over/under phase-shift on 12-pulse rectifier system and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):85-93.
- [16] 刘书铭,施红,冯蕾,等. 考虑集肤效应与邻近效应的变压器谐波损耗模型[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):133-139.
- LIU Shuming,SHI Hong,FENG Lei,et al. Transformer harmonic loss model considering skin effect and proximity effect[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):133-139.

作者简介:



李世军

李世军(1982—),男,湖南浏阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向为大功率整流系统、新型变压器等(E-mail:B12090018@hnu.edu.cn);

罗隆福(1962—),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,研究方向为交直流电能变换及其装备制造;

余双翔(1989—),男,湖南邵阳人,硕士,研究方向为交直流电能变换。

Synthetic energy-saving interruptible 6-pulse rectifier system for manganese electrolyzation

LI Shijun^{1,2},LUO Longfu²,SHE Shuangxiang³,LIU Lulu²,SHI Xiaorong^{1,4}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Wind Generator and Its Control, College of Electrical & Information Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Power China Zhongnan Engineering Co., Ltd., Changsha 410014, China; 4. Hunan Province Cooperative Innovation Center for Wind Power Equipment and Energy Conversion, Xiangtan 411101, China)

Abstract: Aiming at the huge power consumption of traditional DC manganese electrolyzation, a synthetic energy-saving high-power interruptible 6-pulse rectifier system is proposed, which, based on the traditional 6-pulse rectifier system, blocks the triggering signal of thyristor for a certain period to achieve three variable parameters: frequency, duty cycle and current. The influences of these three parameters on the AC-side harmonic distortion are studied in detail and an inductive filtering transformer based on the harmonic flux suppression is applied at the valve side for restraining the harmonic close to its source and compensating the reactive power, which lowers the harmonic pollution and reactive power loss to a certain extent. Results of simulation and pilot test show that, the energy-saving effect of the proposed system is remarkable, verifying the high efficiency and energy saving advantage of the pulse-current manganese electrolyzation.

Key words: pulse-current electrolytic manganese; interruptible 6-pulse; electric rectifiers; inductive filtering transformer; harmonic suppression; reactive power compensation; energy saving