

双反星型整流电路在电解中的应用

姚 广, 蒋大明
(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 为解决目前电解行业普遍采用模拟控制电路带来的参数漂移大、控制策略过于简单、可靠性低等缺点,采用带平衡电抗器的双反星型晶闸管整流电路,使用锁相环技术捕获同步信号以及相应的数字触发装置能有效地跟踪输入信号频率的变化,克服电网电压波动和畸变的影响,并且能精确地输出晶闸管整流电路所需的移相触发脉冲。实验结果表明:配套运用锁相环技术和数字触发装置提高了控制精度,实现了对整流电流的控制,并可对电解过程进行有效监控。

关键词: 电解; 整流; 数字触发

中图分类号: TM 461.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)10-0054-03

0 引言

电解是通过直流电的作用,使金属在电源阳极析出的一种冶炼金属的方法。电解一般在专用的电解槽中进行,电解槽是一种需要直流电能的电化学反应器,其直流电压为数十至数百伏,电流由几百安培到几千安培。从变电站送出的三相高压交流电需要在通到电解槽之前进行整流,晶闸管整流装置就是把供电系统的高压交流电变成低压直流电的设备^[1-3]。目前,最普遍的方式是采用小规模模拟控制电路,其可靠性很难得到保证。主要缺点有:

- a. 由于用锯齿波与直流控制信号相比较获得移相脉冲,控制精度和对称性不高;
- b. 模拟调节器的参数设定后,在电解过程中不能修改,在电解的不同阶段,控制效果很难一致,从而引起系统振荡,电能消耗加大,产品质量不稳定。

为了有效解决这些问题,采用带平衡电抗器的双反星型晶闸管整流电路,并且使用锁相环技术获得所需同步信号,同时基于锁相环技术的高精度数字触发装置能够提供精确的触发脉冲。

1 带平衡电抗器的双反星型晶闸管整流系统设计

1.1 整流电路简介

图 1 所示为本系统所用带平衡电抗器的双反星型晶闸管整流电路的电路图^[4]。

整流变压器的副边每相有 2 个匝数相同、极性相反的绕组,分别接成 2 组三相半波电路。由图可看出,双反星型电路实际上是由 2 组三相半波整流电路并联而成,每组只供给总负载电流的一半。它与 2 组三相半波电路串联而成三相桥式电路相比,输出电流可以增大一倍。而且由于其变压器副边两绕组的极性相反,可消除铁芯的直流磁化。

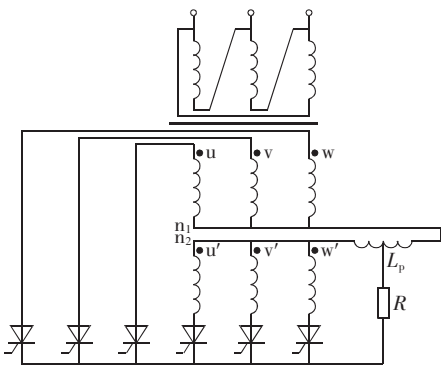


图 1 带平衡电抗器的双反星形晶闸管整流电路
Fig.1 The double inverse star rectifying circuit with paralleling reactor

在这种并联电路中,2 个星形中间连接着带有中间触头的平衡电抗器,这是因为 2 个直流电源并联运行时,只有当 2 个电源的瞬时值完全相同时,才能使负载电流平均分配,在双反星型电路中,虽然 2 组整流电压 U_{d1} 、 U_{d2} 的平均值相等,但它们的脉动相位相差 60° ,瞬时值不同。现在把 6 个晶闸管的阴极连在一起,因而 2 个星型的中点 n_1 和 n_2 的电压等于 U_{d1} 和 U_{d2} 之差。这是一个 3 倍基频的近似三角波(见图 2)。这个电压加在平衡电抗器 L_p 上面,产生相应的

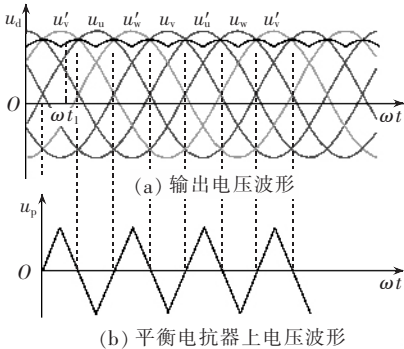


图 2 输出电压和平衡电抗器上电压波形图
Fig.2 Waveforms of output voltage and paralleling reactor voltage

交流电流 i_p , 而 i_p 通过 2 个星型绕组自成回路, 不会到达负载上, 故称平衡电流^[5]。可以导出平衡电抗器两端电压和整流输出电压的数学表达式:

$$u_p = u_{d2} - u_{d1} \tag{1}$$

$$u_d = u_{d2} - \frac{1}{2} u_p = u_{d1} + \frac{1}{2} u_p = \frac{1}{2} (u_{d1} + u_{d2}) \tag{2}$$

将 u_{d1} 和 u_{d2} 波形按傅里叶级数展开, 可得 $\alpha=0$ 时的 u_{d1} 和 u_{d2} , 即

$$u_{d1} = \frac{3\sqrt{6} U_2}{2\pi} \left(1 + \frac{1}{4} \cos 3\omega t - \frac{2}{35} \cos 6\omega t + \frac{1}{40} \cos 9\omega t - \dots \right) \tag{3}$$

$$u_{d2} = \frac{3\sqrt{6} U_2}{2\pi} \left(1 + \frac{1}{4} \cos 3(\omega t - 60^\circ) - \frac{2}{35} \cos 6(\omega t - 60^\circ) + \frac{1}{40} \cos 9(\omega t - 60^\circ) - \dots \right) =$$

$$\frac{3\sqrt{6} U_2}{2\pi} \left(1 - \frac{1}{4} \cos 3\omega t - \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \frac{1}{40} \cos 9\omega t - \dots \right) \tag{4}$$

由式(1)和式(2)可得:

$$u_p = \frac{3\sqrt{6} U_2}{2\pi} \left(-\frac{1}{2} \cos 3\omega t - \frac{1}{20} \cos 9\omega t - \dots \right) \tag{5}$$

$$u_d = \frac{3\sqrt{6} U_2}{2\pi} \left(1 - \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \dots \right) \tag{6}$$

电流有效值为

$$I_T = I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{I_d}{2} \right)^2 \times \frac{2\pi}{3}} = \frac{I_d}{2\sqrt{3}} = 0.289 I_d \tag{7}$$

归纳起来, 带平衡电抗器的双反星型整流电路有如下特点:

a. 2 组三相半波电路双反星型并联工作, 得到的整流电压波形与六相整流的波形相同, 整流电压的脉动情况比三相半波时小得多;

b. 同时有两相导电, 变压器磁路平衡, 不存在直流磁化的问题;

c. 与六相半波整流电路相比, 变压器二次绕组的利用率提高了 1 倍, 所以变压器的设备容量比六相半波整流时要小;

d. 每一整流器件承担负载电流 I_d 的一半, 整流器件流过电流的有效值在感性负载时是 $0.289 I_d$, 所以与其他的整流电路相比, 提高了整流器件承受负载的能力。

1.2 同步信号的捕获

一般, 得到三相同步信号的方法有 3 种^[6]。

a. 软件法: 系统上电后, 整流脉冲发出之前, 先检测一次交流过零点, 并确定好相序, 在以后系统的运行过程中, 软件以此过零点为初始同步点, 启动软件定时器, 输出第 1 个触发脉冲的定时时间为 60° 的相位角加上控制角 α , 此后每过 60° 的相位角时间, 就对相应晶闸管送出触发脉冲。此方法的优点是硬件简单, 同时也不存在外部信号给系统带来干扰

的问题; 其缺点是没有考虑到在有干扰的工业控制环境里三相交流电源相位与频率的波动, 因此会造成同步误差, 更严重的是, 这种误差是积累的。

b. 硬件法: 在每次交流过零点均同步 1 次, 这种方法不存在上面所述问题, 但是很明显硬件电路要复杂得多。

c. 软硬件结合法: 这种方法是每隔 20 ms 与外三相电源同步 1 次, 在 20 ms 内的同步由软件实现。这种同步不会使同步误差积累, 但是在单个周期内还是存在同步误差; 另外, 也不能检测大部分的缺相情况, 因此, 在动静态性能要求高的系统中不宜采用。

本文综合考虑了 3 种方法的优缺点, 采用一种利用锁相环技术获得同步信号的电路。由于该系统使用的带平衡电抗器的双反星型整流电路可以看成 2 组三相半波可控整流电路的并联, 所以需要 2 套触发电路, 每套触发电路触发 1 组三相半波可控整流电路中的 3 只晶闸管。当负载电感量足够大的时候, 可以控制三相半波可控整流电路的输出电压在空载到短路之间变化, 相应的控制角 α 的调节范围是 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。每套触发电路间隔 120° 产生 1 个触发脉冲, 而 2 台触发电路产生的相邻触发脉冲间隔 60° 。控制角 α 的起始点(自然换相点)是相电压的交点(线电压的过零点)。

通过上面的分析, 可以用 1 只单相同步变压器取代传统的三相同步变压器。具体做法是: 用 1 只同步单相变压器取出电源变压器初级的 A 相线电压, 此信号的正向过零点正对应着正组相应晶闸管的自然换相点。从该点开始每隔 60° 就是一只晶闸管的自然换相点。如果对此信号 3 倍频, 则可得到正组 3 只晶闸管的自然换相点(3 倍频信号的正向过零点)以及反组 3 只晶闸管的自然换相点(3 倍频信号的负向过零点)。考虑到电网频率波动及电网电压波形畸变, 必须对同步信号进行一些处理, 使其能够自动跟踪电网频率的变化, 并能克服电网电压波形畸变造成的影响。锁相环就是一种输出信号频率自动跟踪输入信号频率的电路^[7], 而且其内部的低通滤波器具有良好的抗干扰能力, 同时利用锁相环电路可以方便地实现对输入信号的 3 倍频。因此, 可利用锁相环实现同步信号的采样。

图 3 为基于锁相环的同步电路的组成框图。



图 3 同步电路组成框图

Fig.3 Block diagram of synchronization circuit

交流同步信号取自电源变压器一次侧线电压 u_{ab} 。此同步信号经衰减后送入电压比较器, 再经过整形为方波后送入锁相环。锁相环的作用有 2 个: 一方面它可以及时、精确地跟踪输入信号频率的变化, 克服电网频率波动以及畸变造成的影响; 另一方面可以输出占空比为 50 %、频率为 3 倍电网频率的

方波信号^[8]。这个方波信号的上升沿和双反星型电路的自然换相点是严格对应的,这种严格的对应关系由锁相环对输入信号频率的跟踪能力保证,而无锁相环的数字同步信号是难以做到的。

1.3 数字触发装置

基于锁相环的高精度数字触发器工作原理^[9-10]是:交流同步信号经锁相环3倍频以后,分别以同相和反相输出。锁相环输出的3倍频方波的上升沿分别对应6只晶闸管的自然换相点。在软件上设置2个定时器T0和T1,分别作为正组晶闸管^[3]和反组晶闸管的控制角定时器,定时器内预先装入当量化控制角时间常数。外部启动信号的上升沿启动定时器工作,并且当启动信号为高电平时保持定时,低电平时停止定时。定时器定时到了后,即申请中断,并依次向相应的晶闸管组发送触发脉冲。由于2个定时器是间隔60°交替工作,不会出现中断竞争现象,所以对定时器的中断响应速度很快,保证了系统的精确运行。

2 结语

综上所述,相比于以往使用的模拟整流控制电路,采用双反星型整流电路,并且配套运用锁相环技术和数字触发装置,能够有效地跟踪输入信号频率的变化,克服在生产中电网电压波动和畸变的影响,并且精确地输出整流所需要的移相触发脉冲,提高了电解行业的生产自动化水平和控制精度。

参考文献:

- [1] MATSUKAWA T, SHIMADA K, SHIOYAMA M, et al. Low voltage, high current DC power supply with self commutated converter using power-MOSFET [C]//Fusion Engineering, 1999. 18th Symposium on. Albuquerque, NM, USA: [s. n.], 1999: 137-140.
- [2] 黄大华, 张伟, 郝建, 等. 电解铝用超大功率整流器的设计[J]. 电源技术应用, 2000, 24(3): 94-97.

HUANG Da-hua, ZHANG Wei, HAO Jian, et al. Design of su-

perhigh power rectifier for use in electrochemistry [J]. Power Technical Application, 2000, 24(3): 94-97.

- [3] 俞萍. 国外电力电子技术发展综述[J]. 电力电子技术, 1992, 26(4): 25-27.
- YU Ping. Summary of power electronic technology abroad [J]. Power Electronics, 1992, 26(4): 25-27.
- [4] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [5] 刘俊萍. 带平衡电抗器的双反星形电路的相量分析法[J]. 吉林工学院学报, 1995, 16(12): 67-70.
- LIU Jun-ping. Phasor analysis of double inverse star circuit with paralleling reactor [J]. Journal of Jilin Institute of Technology, 1995, 16(12): 67-70.
- [6] MURPHY J M D, TURNBULL F G. Power electronic control of AC motors [M]. London, England: Pergamon Press, 1988.
- [7] 李爱国, 龚尚福, 朱宇. 一种基于锁相环同步的高精度数字晶闸管触发器[J]. 煤矿自动化, 1998, 3(3): 53-55.
- LI Ai-guo, GONG Shang-fu, ZHU Yu. A digital thyristor of high accuracy based on phase locked loop synchronization [J]. Coal Mine Automation, 1998, 3(3): 53-55.
- [8] 宋国兵, 冕勤. 基于锁相环同步的晶闸管触发器的改进[J]. 研究与设计, 2001, 31(8): 23-25, 34.
- SONG Guo-bing, MIAN Qin. An improvement on thyristor trigger based on synchronous circuit of phase locked loop [J]. Research and Design, 2001, 31(8): 23-25, 34.
- [9] 牛秀金, 张秀平. 晶闸管交流调压器的全数字触发[J]. 煤炭学报, 1997, 22(6): 664-667.
- NIU Xiu-jin, ZHANG Xiu-ping. Full digital controlled trigger for three phase thyristor AC regulator [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(6): 664-667.
- [10] 张涛, 张忠理. 高精度交流采样远动终端的研制[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 19-21.
- ZHANG Tao, ZHANG Zhong-li. Development of a high accuracy AC sampling RTU device [J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 19-21.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

姚广(1982-), 男, 湖南望城人, 硕士研究生, 研究方向为智能控制(E-mail: yg14407@gmail.com);

蒋大明(1956-), 男, 北京人, 副教授, 现从事铁路信号、智能控制方面的研究。

Application of double inverse star rectifying circuit in electrolysis

YAO Guang, JIANG Da-ming

(Institution of Electronics and Information Engineering,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Regarding to problems of analog control circuit generally adopted in the electrolytic industry, such as the large offset of parameter, the insufficient control strategy and the low reliability, an improved circuit is proposed. It adopts the double inverse star circuit with paralleling reactor, PLL (Phase Locked Loop) technique to capture synchronization signal and relevant digital trigger equipment, which tracks the variation of the input signal frequency, overcomes the influence of the network voltage fluctuation and distortion, and accurately outputs the phase-shift trigger pulse for the thyristor rectifying circuit. Circuit parameters are designed with experimental study. Results prove that it achieves high control accuracy of rectifying current and realizes the monitoring of electrolysis process.

Key words: electrolysis; rectification; digital triggering