

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.023

实现损耗均衡的新型相移控制策略的研究

孙元月,王菲菲,戴凯奇,陈辉明*

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:针对全桥电路采用传统相移控制时,主桥臂上的损耗一直高于相移臂上损耗的问题,为了实现移相控制时主桥臂和相移臂上损耗的自动均衡分配,对相移臂和主桥臂的周期性功能切换做了研究,提出了一种基于数字信号处理器的新型数字移相控制的方法,使得在两个输出周期内全桥电路开关管在主桥臂和相移臂功能之间可以实现自动切换。为了验证新型移相控制方法的可行性,在搭建的 150 kW 全桥感应加热电源样机平台上对新型移相控制方法做了测试,并采用新型移相控制方法在满功率下对各个开关管的开通和关断电流情况做出了对比和分析。研究表明,该新型移相控制方法较好地解决了传统相移控制时电路存在的桥臂损耗不一致的问题,同时可以实现传统移相控制的所有功能。

关键词:相移控制;损耗均衡;全桥拓扑

中图分类号:TM13

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0543-04

New phase-shifted control with equal loss distribution

SUN Yuan-yue, WANG Fei-fei, DAI Kai-qi, CHEN Hui-ming

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the problems that disequilibrium of loss distribution of arms of full-bridge topology with phase-shifted control, research was made to fulfill equal loss distribution by function exchange between main arm and phase-shifted arm. A new digital phase-shifted control strategy based on digital signal processor was proposed, and test was made on a 150 kW inductive heating power source based on full bridge topology to testify the feasibility of the proposed control strategy by analyzing the current on IGBT when it turning-on or turning-off. The results indicate that the proposed control strategy can balance the power loss between two arms equally while achieving all the functions traditional phase-shifted control has.

Key words: phase-shifted control; equal of loss distribution; full-bridge topology

0 引言

当对电源功率要求较大时,工业上应用的感应加热电源往往采用全桥拓扑结构,相比于变频控制而言,相移控制损耗相对较小,当功率比较大时,为了提高电源效率,一般采用相移控制^[1-2]。

在进行功率调节时,相移控制通过改变主桥臂

和相移臂之间的相位差来改变输出电压,从而改变功率。然而对于传统的相移控制而言,主桥臂和相移臂位置固定,相位差大于零时,主桥臂和相移臂上开关管的关断电流并不相同,主桥臂上开关管的关断电流总是大于相移臂,相位差越大,这种差异越明显。文献[3]所提出的 ZVZCS 控制本身并没有实现零电流关断,而且不适用于感应加热;文献[4]两个电源并联时采用移相控制来进行均流减小纹波,基

收稿日期:2016-10-30

作者简介:孙元月(1990-),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要从事感应加热电源方面的研究. E-mail:751059913@qq.com

通信联系人:陈辉明,男,浙江杭州人,教授,硕士生导师. E-mail:huiming@zju.edu.cn

本可以实现两个电源之间的损耗均衡,但对于单个电源,没有解决主桥臂和移相臂之间的损耗问题;文献[5]通过连续计算可以根据负载的不同计算出最优的输出频率,以使效率最高,但主要是从分析 ZVS 的角度来提高效率,而不关注损耗的分布情况;文献[6]可以使相移臂从轻载到满载都实现 ZVS,提高效率,但主桥臂和相移臂的关断电流依然不一致。开关管关断电流的不一致导致损耗不一致,开关管发热不一致,从而给感应加热电源的热处理带来麻烦,同时,由于开关管损耗的不一致,导致主桥臂和相移臂上开关管的使用寿命不一致,从而提高了成本。为了实现损耗的均衡,可以使相移臂和主桥臂在两个输出周期内自动切换^[7],然而用硬件搭建出这种驱动过程太过复杂,不易控制,硬件电路由于元件较多,在信号传输过程中会引入较大延迟,使控制的动态响应降低,且驱动部分体积较大,不利于电源整体小型化的目标。

本研究将提出一种改进的数字式相移控制方法,只通过一片数字信号处理器芯片以实现主桥臂和相移臂之间实现功能的对换。

1 原理与设计

1.1 传统相移控制原理及其问题

相移控制是全桥拓扑下的功率控制方法,全桥电路拓扑如图 1 所示。

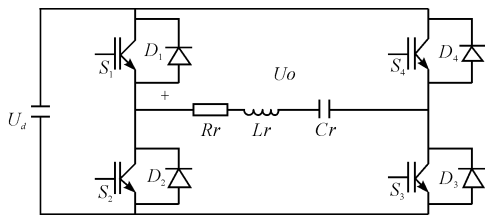


图 1 全桥电路

全桥拓扑下,传统相移控制驱动波形和输出电压电流信号波形如图 2 所示。

图 2 中, S_3, S_4 驱动一直超前于 S_1, S_2 , 所以 S_3, S_4 所在的半桥是主桥臂, S_1, S_2 所在的半桥是相移臂。进行功率调节时, ϕ 在 $0 \sim 180^\circ$ 之间变化,对应输出功率从额定功率到 0 变化,也就是,随着 ϕ 值的变大,输出功率逐渐变小。当 $\phi = 0^\circ$ 时,开关管 S_1 和 S_3, S_2 和 S_4 同时开通和关断,因此,主桥臂和相移臂上开关管损耗一致。然而,当 $\phi > 0^\circ$ 时,主桥臂上开关管 $S_3,$

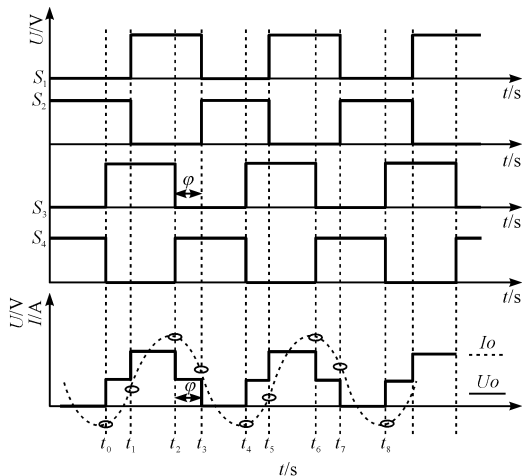


图 2 传统 PS 控制驱动和输出电压电流波形
 ϕ —相移角; S_1, S_2, S_3, S_4 —开关管 S_1, S_2, S_3, S_4 的驱动波形; U_o —输出电压波形; I_o —输出电流波形^[8]。

S_4 和相移臂上开关管 S_1, S_2 的关断电流大小并不一样, ϕ 值越大,对应相移臂上开关管关断电流和主桥臂上关断电流相差越大,损耗不一致现象越明显。

如图 2 中所示, $t_0 \sim t_7$ 8 个时间点为两个输出周期内的开关切换点。 t_0 和 t_4 为 S_4 关断时刻, t_2 和 t_6 为 S_3 关断时刻, t_1 和 t_5 为 S_2 关断时刻, t_3 和 t_7 为 S_1 关断时刻。

由图 2 可以看出, S_3 和 S_4 关断电流比 S_1 和 S_2 大很多,在大功率场合下, S_3 和 S_4 的损耗比 S_1 和 S_2 大很多,导致 IGBT 模块寿命不一致。这种主桥臂和相移臂间损耗的不均衡是传统相移控制方法的通病。

1.2 改进的相移控制原理

在传统相移控制方法下,主桥臂和相移臂的损耗不均衡,本质上来说是由于主桥臂和相移臂位置固定不变导致的,笔者采用新型的相移控制策略,使用数字控制的方式产生需要的驱动波形,使得两个输出周期内,全桥电路 4 个 IGBT 上的损耗一致,从而使 4 个 IGBT 上的损耗一致,达到损耗均衡的效果。

改进的数字相移控制驱动波形和输出的电压电流波形如图 3 所示。

$t_0 \sim t_{12}$ 为一个控制周期,对应两个输出周期, t_0, t_7 为 S_4 的开关切换点, t_0 时刻关断电流比较大, t_7 时刻关断电流比较小;

类似的, t_1, t_6 为 S_2 的开关切换点, t_1 时刻关断电流比较小, t_6 时刻关断电流比较大; t_3, t_{10} 为 S_1 的开关切换点, t_3 时刻关断电流比较大, t_{10} 时刻关断电流比较

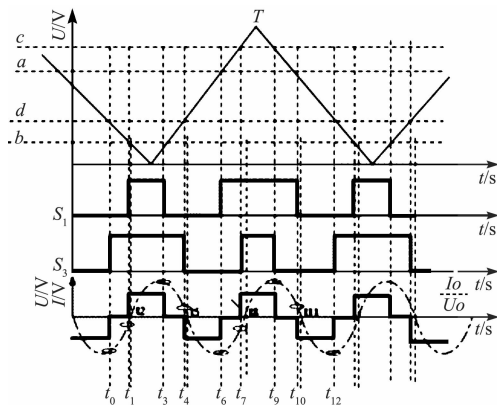


图3 改进 PS 控制驱动和电压电流波形

小; t_4, t_9 为 S_3 的开关切换点, t_4 时刻关断电流比较小, t_9 时刻关断电流比较大。

可见, 一个控制周期内, 开关管 S_1, S_2, S_3, S_4 各有两次关断, 分别有一次比较大的关断电流和一次比较小的关断电流, 以使开关管损耗保持一致。

该相移控制方法中, 改变参考 b 的值, 可以调整功率, 当 $b = 0$ 时, 输出功率 $P = 0$; 当 $b = T/4$ 时, 输出功率达到 100%, $0 \leq b \leq T/4$ 。

2 实验结果和分析

为了验证该改进型数字相移控制的可行性, 本研究搭建了一台 150 kW 全桥拓扑感应加热电源样机。

开关管采用英飞凌 FF450R12KT4 半桥模块, 主电路结构采用串联谐振, 谐振电热电容容量 $C_r = 20 \mu\text{F}$, 串联谐振电感和串联电阻由感应炉等效而来, 谐振电感 $L_r = 79.1 \mu\text{H}$, 输出电流由一 200:1 的电流互感器采样经电阻转换为电压得到。

样机对管 S_1 和 S_3 驱动波形如如图 4 所示。

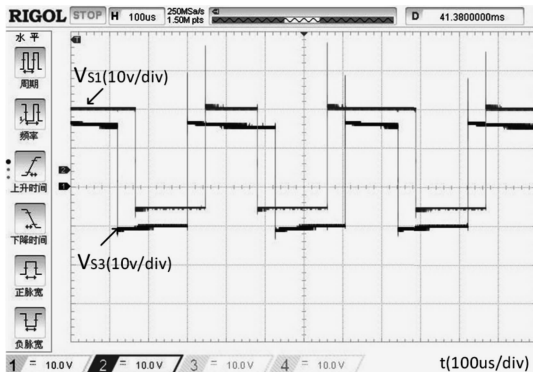


图4 改进相移控制对管驱动波形

IGBT 两端电压波形和流过模块的电流波形如图 5 所示。

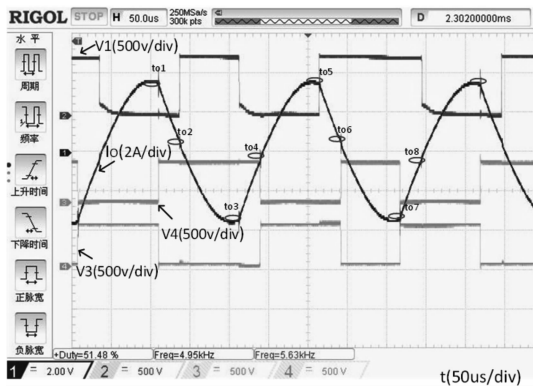


图5 开关管两端电压和流过模块电流波形

V_1, V_3, V_4, I_o 分别是开关管 S_1, S_3, S_4 两端电压波形和输出电流波形, 开关管两端电压上升沿处为对应开关管的关断点, t_{o1}, t_{o6} 处 S_4 关断, t_{o4}, t_{o7} 处 S_3 关断, t_{o2}, t_{o5} 处 S_1 关断, 剩下的 t_{o3}, t_{o8} 处为 S_2 关断时刻。从图 5 中可以清晰的看到, 在一个控制周期内, $t_{o1} \sim t_{o8}$ 8 个开关关断点处, 每个开关管各有一次大的关断电流和一次小的关断电流, 这样就保证了在一个控制周期内, 全桥电路的 4 个开关管损耗一致。

3 结束语

本研究提出了实现损耗均衡的新型数字式相移控制方法, 该控制方法可以在 2 个输出周期内使得主桥臂和相移臂功能在前后半桥上的自动切换, 并通过一台 150 kW 实验样机得到了实验的验证。实验结果表明, 该数字相移控制方法可以很好地在 2 个输出周期内使 IGBT 关断电流状况一致。由于相移控制本身可以实现 ZVS, 从而该方法可以使得 IGBT 在两个输出周期内损耗状况基本一致, 从而实现整个时间内开关管损耗的均衡。该控制方法也为以后的研究提供了参考依据。

参考文献 (References) :

- [1] 蒋炜炜, 沈锦飞, 汪义旺, 等. 新型串联谐振逆变器移相控制策略[J]. 计算机仿真, 2008, 25(7): 306-309.
- [2] 李国伟. IGBT 超音频串联移相调功感应加热电源的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学机电工程学院, 2010.
- [3] 丁志林, 广长林, 吴小江. 基于 pspice 的全桥移相控锁 ZVZCS 电路的研究[J]. 电源技术应用, 2015(1): 32-36.
- [4] 杜帅林, 贾晓宇, 胡长生, 等. LLC 谐振变换器的移相控制特性分析[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 51-53.
- [5] MALLIK A, KHALIGH A. Variable switching frequency state feedback control of a phase shifted full bridge DC/DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,

2016(10):99.

- [6] LIN B R. Analysis and implementation of wide zero-voltage switching dual full-bridge converters[J]. *Iet Power Electronics*, 2016, 9(4): 751-760.
- [7] VICENTE ESTEVE J, ESTEBAN SANCHIS-KILDERS. Improving the reliability of series resonant inverters for induction

heating application[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(5): 2564-2572.

- [8] 余 恒, 林立文, 武 霆, 等. 基于数字控制的移相全桥 ZVS-PWM 变换器的设计[J]. *电源技术应用*, 2008, 11(1): 1-5.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

孙元月, 王菲菲, 戴凯奇, 等. 实现损耗均衡的新型相移控制策略的研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(5): 543-546.

SUN Yuan-yue, WANG Fei-fei, DAI Kai-qi, et al. New phase-shifted control with equal loss distribution[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(5): 543-546.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 508 页)

谷物干燥机共设置了 6 个谷物温度检测位置, 谷物温度的波动范围从 27.9 °C 至 58.4 °C (见图 7)。其中 4 个位置(L1、L4、R1、R4)的谷物温度均未超过试验方案对谷物种子烘干温度 45 °C 的要求; 另两个位置(R2、L2)的谷物温度超过 45 °C 要求, 最高分别达到 58.4 °C 和 47.2 °C。

综上分析, 谷物干燥机的 6 个谷物温度检测位置中, 有 2 个位置(R2、L2)的谷物温度(分别为 58.4 °C、47.2 °C)超过了试验方案确定的种子烘干温度 45 °C 的要求, 超差约 13 °C。谷物干燥机局部位置存在谷物烘干温度超差情况。

3 结束语

本次对谷物干燥机的烘干温度对种子发芽率的影响得到了试验验证, 试验结果表明经过谷物干燥机烘干的种子, 发芽率下降了 8% (烘干前为 69%, 烘干后为 61%)。从试验分析, 主要原因有 4 个方面:

(1) 原机配温度传感器测试温度与比对温度传感器测试温度存在较大偏差, 影响烘干温度的准确性;

(2) 出现最高温度(风道温度)的位置均在谷物干燥机箱体的后部。谷物干燥机热风道结构的设计使得风道温度的波动范围较大, 影响相邻谷物的温度, 对谷物温度的控制会产生不利的影 响。导致谷物干燥机局部位置的谷物温度超差;

(3) 局部位置的谷物温度超过了烘干工艺要求的 45 °C。谷物干燥机内温度分布的不均匀, 导致局部位置的谷物温度超差;

(4) 谷物干燥机配置的温度传感器未能全面反应机内各个区域的温度分布情况, 未能正确反应最高温度位置, 导致局部位置温度失控超差。

我国近十年来对谷物干燥机的结构进行了大量的理论研究与实践, 在干燥工艺上基本达到了国际水平。

随着科学技术的进步^[8-11], 智能控制技术将广泛应用于谷物种子干燥机, 采用微电脑全自动控制系统, 科学合理布置谷物干燥机内的温度传感器, 实时全面监控机内风道温度、谷物温度, 实现谷物干燥机温度分布均匀、温度精确控制, 将成为谷物干燥机技术进步的重要方向之一, 也是确保种子发芽率的必要手段。

参考文献(References):

- [1] 王 忠, 顾蕴洁, 陈 刚, 等. 稻米的品质和影响因素[J]. *分子植物育种*, 2003(12): 231-241.
- [2] 张慧明, 郑先哲, 宋翔宇. 不同收获期稻谷及时干燥与延时干燥后品质对比研究[J]. *东北农业大学学报*, 2012(8): 30-33.
- [3] 高 翔. 谷物干燥机使用与维护[M]. 北京: 中国三峡出版社, 2008.
- [4] 刘相东, 于才渊, 财德仁. 常用工业干燥设备及该应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 于才渊, 王宝和, 王喜忠. 干燥装置设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] 葛汉林, 张艳梅, 姜 芳. 谷物烘干机温度控制系统的设计[J]. *安徽农业科学*, 2010, 8(13): 6944-6945.
- [7] 孟祥国. 稻谷及时干燥工艺、品质研究及干燥机设计[D]. 哈尔滨: 东北农业大学工程学院, 2014.
- [8] 彭桂兰, 吴文福, 韩 峰. 现代干燥的发展趋势—精准干燥[C]. 2005 年中国农业工程学会学术年会, 广州: 中国农业工程学会, 2005.
- [9] 孟繁华, 吴贵茹, 陈坤杰. 稻谷干燥技术的研究进展[J]. *江西农业学报*, 2009, 21(9): 131-134.
- [10] 李长发, 赵海华. 日本的谷物干燥技术发展趋向[J]. *中国农工业化*, 2007(10): 39-41.
- [11] 徐泽敏, 殷勇光. 日本的稻谷干燥机械化发展研究[J]. *农机化研究*, 2007(6): 210-212.

[编辑:张 豪]