

软开关谐振过程稳定性分析与 PWM 控制波形优化

朱志明^{1,2}, 杨中宇¹, 夏铸亮¹, 汤莹莹¹

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 在移相控制全桥功率变换器的软开关谐振过程解耦分析基础上, 针对电源启动和焊接电弧负载频繁剧烈的动态变化过程, 提出了一种“1-2-1”的余弦模式 PWM 控制波形。根据数字信号处理(DSP)的数字化脉冲宽度调制(PWM)生成原理, 设计实现了基于“1-2-1”余弦模式的移相 PWM 控制波形, 并进行了控制效果的试验验证。结果表明, 采用此模式对全桥功率变换器进行移相 PWM 控制, 不仅可以满足电源输出特性对 PWM 控制有效占空比的要求, 而且可以保证超前臂并联谐振网络和变压器原边串联谐振网络的软开关谐振过程的动态稳定性, 保持功率器件在电源启动和负载动态变化过程中的软开关状态。

关键词: 控制波形优化; 移相 PWM 控制; 软开关谐振; 全桥变换器

中图分类号: TG 434 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2014)08-0005-04

0 序 言

应用于电弧焊接和切割电源的功率变换器, 由于电弧负载工作范围宽, 不仅存在空载和短路等极限工作状态, 而且伴随熔滴过渡、脉冲焊接等频繁、剧烈的负载动态变化过程。因此采用软开关技术, 不仅希望在更宽的负载范围、甚至全负载范围内(包括空载和短路)实现功率器件的软开关^[1], 而且期望在负载动态变化过程中能继续保持功率器件的软开关状态, 以充分发挥和体现软开关在功率变换器高效、稳定、可靠等方面的优势。

全桥功率变换器与经过优化的移相 PWM 控制策略配合, 可实现一定负载范围甚至全负载范围内的功率器件软开关^[2], 适用于电弧焊接和切割等大中功率电源。与模拟控制相比, 数字化控制具有众多优点。数字信号处理器 DSP 等控制芯片的飞速发展, 使数字化控制技术在各种功率变换器中的应用愈来愈普及并展现明显优势^[3], 利用 DSP 芯片内部自带的 PWM 生成模块, 可以根据设计要求产生灵活的 PWM 控制波形, 满足软开关控制需要。

在解耦分析移相控制全桥功率变换器的超前臂并联谐振网络和变压器原边串联谐振网络谐振工作过程的基础上, 从保证电源启动和负载动态变化过程中谐振网络动态过程稳定性的角度, 对移相 PWM

控制波形的生成模式进行研究和优化, 充分利用 DSP 的 PWM 生成模块的灵活性, 设计实现所提出的新型 PWM 控制波形, 以保持功率器件在电源启动和负载动态变化过程的软开关状态, 并进行了控制效果的试验验证。研究工作对进一步提高电源工作的稳定性和可靠性具有重要意义。

1 软开关谐振过程

图1所示为移相控制全桥零压零流软开关(ZVZCS)功率变换电路原理。超前臂功率器件(Q_1 和 Q_3)通过与之并联的电感电容辅助谐振网络实现零压软开关(ZVS), 滞后臂功率器件(Q_2 和 Q_4)通过与变压器原边串联的隔直电容和饱和电感构成的谐振网络实现零流软开关(ZCS)。

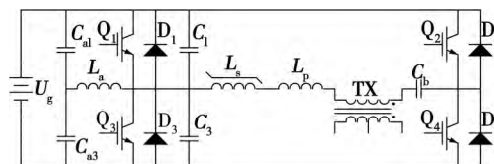


图1 移相控制全桥 ZVZCS 功率变换电路

Fig. 1 Phase-shift controlled full-bridge ZVZCS power converter topology

为了保证在全负载范围内实现功率器件的零压或零流软开关, 超前臂并联谐振网络的参数设计侧重于小负载电流(甚至是空载), 变压器原边串联谐振网络的参数设计则侧重于大负载电流。对它们的

收稿日期: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075231); 教育部博士学科点专项科研基金资助项目(20100002110064); 铁道部科技研究开发计划重大资助项目(2008G001-C)

谐振过程分析,可以解耦后独立进行。

1.1 超前臂并联谐振

图 2 所示为超前臂并联谐振网络的简化等效电路,用于对 Q_1 关断后的半个周期内的超前臂并联谐振网络的谐振过程进行分析。图 1 中 C_{a1} 、 C_{a3} 的作用是分压,在图 2 中被简化为恒压源 $U_g/2$; 图 1 中的 C_1 、 C_3 之间存在对称性,在图 2 中被合并成一个电容; 图 1 中的变压器原边电流在图 2 中视为恒流源。分析表明,图 2 的简化等效电路实现了与变压器原边串联谐振网络的解耦,用于超前臂并联 LC 网络的谐振过程分析是合理有效的。

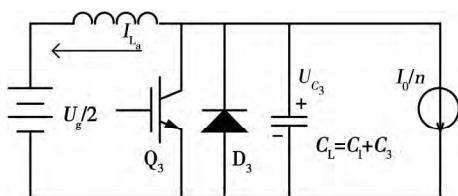


图 2 超前臂并联谐振网络等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of leading-leg parallel resonant network

在超前臂并联 LC 网络的谐振过程中, Q_3 的并联电容电压 U_{C3} 和辅助谐振电感电流 I_{L_a} 的波形和相图如图 3 所示。 $t_0 \sim t_1$ 之间为 C_L 和 L_a 之间的谐振过程, t_1 时刻 U_{C3} 降至 0, 二极管 D_3 导通, 此时可以实现 Q_3 的零电压开通, 直至 t_2 时刻; 同时 $t_1 \sim t_3$ 之间, I_{L_a} 在电压源 $U_g/2$ 的作用下线性下降。

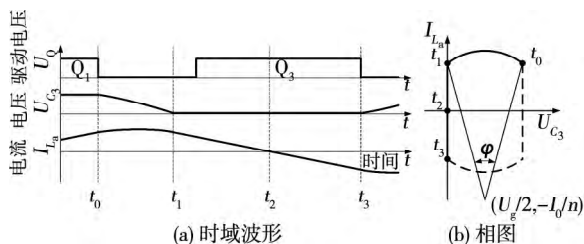


图 3 超前臂并联 LC 网络的谐振波形与相图

Fig. 3 Resonant waveforms and phase diagram of leading-leg parallel LC network

1.2 变压器原边串联谐振

夏铸亮等人^[4]对变压器原边串联 LC 谐振网络进行深入的解耦分析, 分析得到了原边谐振网络等效电路, 获得了一般状态和输出低压时两种情况的变压器一次电流、隔直电容电压的时域波形和相图。核心是如何保证隔直电容 C_b 上的电压谐振稳定, 重点关注的是大电流情况。相应的变压器一次电流、隔直电容电压的时域波形和相图可用于对变压器原

边谐振过程稳定性的分析及 PWM 控制波形的优化。

2 谐振过程的动态稳定性

移相 PWM 控制波形不仅要满足电源稳态输出对占空比的要求, 实现功率器件的软开关, 还要尽量保证软开关谐振过程在电源启动和负载动态变化时的稳定性, 以保持功率器件的软开关状态。

电源系统稳定工作时, 在功率器件开关切换的强制激励和杂散阻尼的作用下, 全桥功率变换器中的所有谐振网络均会达到稳态, 只要参数设计合理, 此时的谐振网络完全能够满足实现功率器件软开关的要求。但是在功率变换器开始工作, 谐振网络起振阶段, 或者电源稳定工作时输出负载剧烈变化导致电源进入暂态波动过程时, 谐振网络要经历一定的波动过程, 才能进入新的稳态。如果控制不合理, 暂态波动过程的谐振波形就不一定能满足功率器件软开关的要求。由于焊接电源的电弧负载常常存在频繁且剧烈变化的情况, 因此有必要对谐振网络暂态工作过程的稳定性进行分析。

2.1 超前臂并联网络的谐振稳定性

对于超前臂并联 LC 网络的谐振来说, 关键是如何保持辅助谐振电感 L_a 中电流的稳定, 而它取决于超前臂功率器件的开关驱动波形。

将 C_{a1} 和 C_{a3} 等效为恒压源, 忽略 Q_1 和 Q_3 的死区时间后, 可以将辅助谐振电感电路等效为如图 4a 所示电路。图 4b 所示是辅助电感理想的起振电流波形和对应的 Q_1 和 Q_3 开关驱动波形。可见起振时, 理想的开关驱动波形应该是“1-2-1”的形式, 即首先 Q_1 开通 $T_s/4$ 时间, 然后 Q_3 开通 $T_s/2$ 时间, 最后 Q_1 再开通 $T_s/4$ 时间。以上波形与余弦波形类似, 因此称之为余弦模式 PWM 波形。

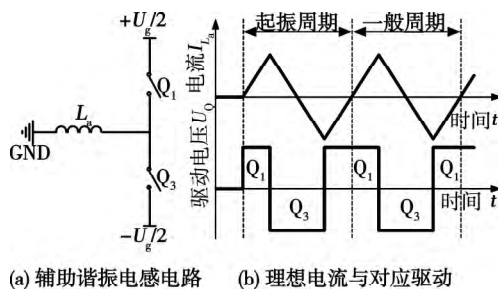


图 4 超前臂并联谐振网络的余弦模式起振过程

Fig. 4 Cosine mode oscillation starting process of leading-leg parallel resonant network

当电源进入稳态工作后, 只要保持 Q_1 和 Q_3 的驱动脉宽一致, 则每个周期内 Q_1 和 Q_3 的驱动波形

自然满足余弦形式. 虽然负载的波动会造成死区时间下限波动, 导致实际驱动脉宽出现差异, 但这种影响比较微弱, 不会破坏谐振稳定性. 因此为了维持超前臂谐振网络的稳定, 可采取如下措施: (1) 采用余弦模式的 PWM 波形起振; (2) 除起振周期外, 其它周期保证 Q_1 和 Q_3 的驱动脉宽一致.

2.2 变压器原边串联网络的谐振稳定性

对于滞后臂来说, 关键是如何保持变压器原边串联 LC 网络的谐振稳定性, 也即如何保持隔直电容 C_b 上的电压稳定. 将与隔直电容 C_b 相关电路简化后, 可得如图 5a 所示等效电路. 起振过程中 C_b 上的理想电压波形和对应的功率器件占空比波形如图 5b 所示. 可见理想的占空比波形也是“1-2-1”的余弦模式. 同时可以看到, 只要每个周期内的占空比满足“1-2-1”的余弦模式, 在理想状态下, C_b 上的电压总是正负对称的, 十分稳定, 不易受到占空比变化的影响.

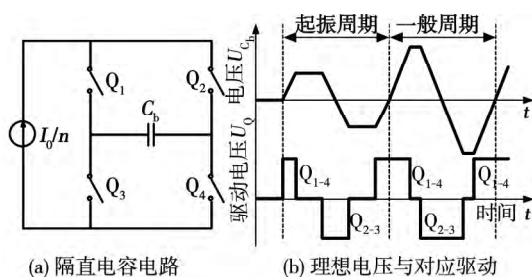


图 5 隔直电容电路与变压器原边余弦模式起振波形

Fig. 5 Equivalent circuit of blocking capacitor and cosine mode oscillation starting waveform of transformer primary side

除此之外在余弦模式的占空比波形驱动下, 变压器的励磁电流也将按图 5b 中的梯形波变化, 从而在每个周期结束时, 磁通回归零点, 可有效防止起振过程或占空比突变时, 因励磁电流波动过大而使变压器发生偏磁饱和.

总之为了维持变压器原边串联 LC 网络的谐振稳定, 应当保证功率变换电路中功率器件的开关占空比波形满足“1-2-1”的余弦模式.

3 移相 PWM 控制波形的数字化生成

研究采用的数字化控制芯片为 Freescale 公司生产的 DSP56F805 型 DSP, 芯片内部自带 PWM 生成模块, 其产生 PWM 波的方式如图 6 所示.

在控制电平比三角波高时, PWM 波输出高电平. 采用半个 PWM 周期重载, 每次 PWM 模块更新

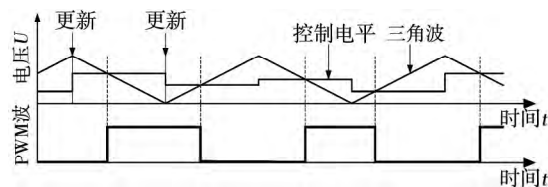


图 6 PWM 模块的基本工作原理

Fig. 6 Basic operation principle of PWM module

后, 会产生一个更新信号, 控制程序可以通过该信号与 AD 模块保持同步, 从而进行 AD 同步采样并运行相应的控制算法.

在设计移相 PWM 控制波形时, 首先应当将占空比波形和三角波对齐, 然后根据占空比 (D) 波形得到每一个功率器件的开关驱动波形. 最终设计的满足谐振过程动态稳定性要求的移相 PWM 控制波形, 实现方案如图 7 所示.

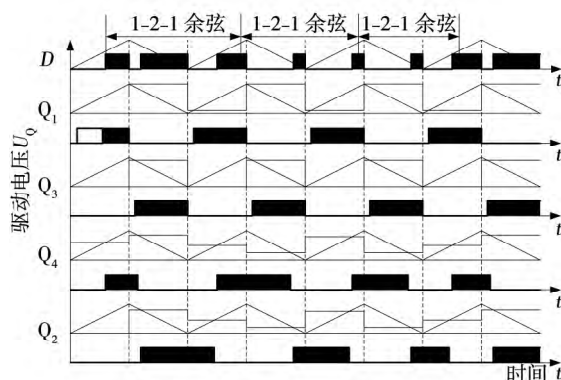


图 7 余弦模式的移相 PWM 控制脉冲生成方案

Fig. 7 Generation scheme of cosine mode phase-shift PWM control pulse

如前所述为了使超前臂并联 LC 网络保持谐振稳定, 需要保证超前臂功率器件的开关波形一致, 而超前臂功率器件的开关切换对应的是每个占空比的下降沿, 因此每个占空比的下降沿都和三角波的峰值或谷值对齐; 为了使变压器原边网络谐振稳定, 需要保证占空比按“1-2-1”进行余弦组合. 采取的措施是 Q_1 和 Q_4 导通时间取当前周期和前一周期占空比的平均值, Q_2 和 Q_3 导通时间取当前周期的占空比, 从而得到图 7 所示“1-2-1”余弦模式的占空比波形.

至于起振周期, 按照前文的分析, 对 Q_1 驱动波形进行特殊处理, 使 Q_1 和 Q_3 的驱动波形在起振阶段满足“1-2-1”的余弦模式.

4 谐振稳定性控制效果

表 1 为所设计的移相控制全桥软开关功率变换

表 1 移相控制全桥 ZVZCS 变换电路中的各器件参数

Table 1 Device parameters of phase-shift controlled full-bridge ZVZCS converter

IGBT 并联电容 $C_1, C_3 / \text{nF}$	辅助电感 $L_a / \mu\text{H}$	半桥电容 $C_{a1}, C_{a3} / \mu\text{F}$	饱和电感 $L_s / \mu\text{Wb}$	变压器漏感 $L_p / \mu\text{H}$	变压器 TX 变比 s	隔直电容 $C_b / \mu\text{F}$	交流输入电压 U_1 / V	开关频率 f_s / kHz
134	200	50	1 500	7.2	6:1	12	380	15

电路器件参数,图 8 所示是系统输出占空比在 0 ~ 20% 之间振荡,负载电阻 0.1 Ω 时所获得的辅助电感电流、变压器原边电流、隔直电容电压波形。

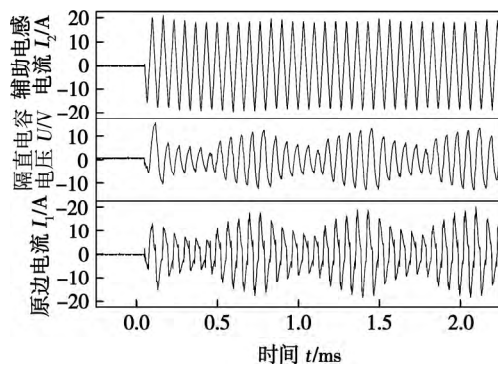


图 8 LC 网络的谐振稳定性

Fig. 8 Resonant stability of LC network

由图 8 可见,采用“1-2-1”余弦模式的 PWM 占空比控制,可以使得超前臂并联 LC 网络和变压器原边串联 LC 网络的谐振过程动态稳定,谐振电压和电流波形具有良好的对称性,完全满足电源起振和负载动态变化时对 LC 网络谐振稳定性的要求。

5 结 论

(1) 为同时满足电源输出对 PWM 控制占空比和软开关谐振稳定性的要求,采用“1-2-1”余弦模式的移相 PWM 占空比控制波形是合理的。

(2) 采用“1-2-1”余弦模式控制波形起振,除起振周期之外,其它周期 Q_1 和 Q_3 驱动脉宽相同,可以有效保证超前臂并联谐振网络的工作稳定性。

(3) 只要在每个周期内,功率器件 Q_1, Q_4 和 Q_2, Q_3 的控制占空比满足“1-2-1”余弦模式,可使变压器原边隔直电容上的电压正负对称,保证原边谐

振网络的工作稳定性。

(4) 采用“1-2-1”余弦模式的控制波形起振和 PWM 占空比控制,可有效保持在电源起振和负载动态剧烈变化时的功率器件软开关状态,并避免变压器原边可能出现的偏磁饱和问题。

参考文献:

- [1] 张光先,邹增大,尹海,等. 软开关逆变式弧焊电源的设计[J]. 焊接学报,2002,23(1): 14-18.
Zhang Guangxian, Zou Zengda, Yin Hai, et al. The design of main loop for soft-switching inverter arc welding power source[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(1): 14-18.
- [2] 朱志明,赵港,陈杰,等. 全负载范围零压零流软开关焊接逆变电源[J]. 焊接学报,2009,30(2): 9-12.
Zhu Zhiming, Zhao Gang, Chen Jie, et al. Full-load range zero-voltage zero-current soft-switching inverter arc welding power supply[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 9-12.
- [3] 李远波,黄石生. 基于 DSP 的软开关逆变式双丝高速脉冲焊装备[J]. 焊接学报,2010,31(5): 1-4.
Li Yuanbo, Huang Shisheng. Soft-switching inverting high-speed double wire pulsed welding equipment based on DSP[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(5): 1-4.
- [4] 夏铸亮,朱志明,陈俊杰. 移相控制全桥零压零流软开关功率变换器谐振过程分析和参数设计方法[J]. 电焊机,2013,43(1): 9-14.
Xia Zhuliang, Zhu Zhiming, Chen Junjie. Resonant procedure analysis and parameters design approach for phase-shift controlled full-bridge power converter with zero-voltage and zero-current soft-switching[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(1): 9-14.

作者简介: 朱志明,男,1964 年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要从事焊接过程控制及自动化、现代功率电子技术与电能变换、人工智能与焊接工程软件方面的研究和开发工作。发表论文 80 余篇。Email: zzmdme@mail. tsinghua. edu. cn

MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

Effect of welding methods on impact toughness of ultra-low carbon martensitic stainless steel welding wire deposited metal

DU Bing^{1,2}, SUN Fenglian¹, XU Yujun², LI Xiaoyu², LÜ Xiaochun², QIN Jian² (1. College of Material Science and Engineering , Harbin University of Science and Technology , Harbin 150001 , China; 2. Harbin Welding Institute , Harbin 150028 , China) . pp 1 - 4

Abstract: As for the low impact toughness of weld metal for large hydro-turbine runner , effect of welding methods and gas content on impact toughness of ultra-low carbon martensitic stainless steel welding wire deposited metal is investigated. The results show that the Laser-MIG hybrid welding in addition to TIG welding can greatly improve the impact toughness. TIG can be used for weld repairs of stainless steel runner. Laser -MIG welding could promote the using in the group welding of laminas , vanes and band. The impact toughness decreased with the increase of C , [O] and [N] content of deposited metal , and [O] is the major factor. Spherical oxide inclusion can generate crack in deposited metal with high [O] condition , and decrease crack initiation and expansion energy.

Key words: martensitic stainless steel; welding method; impact toughness; hydro-turbine runner

Dynamic stability analysis of soft-switching resonant process and optimization of PWM control waveform

ZHU Zhiming^{1,2}, YANG Zhongyu¹, XIA Zhuliang¹, TANG Yingying¹ (1. Department of Mechanical Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China; 2. Key Lab. for Advanced Materials Processing Technology , Ministry of Education , Tsinghua University , Beijing 100084 , China) . pp 5 - 8

Abstract: Based on the decoupled analysis of soft-switching resonant process in phase-shift controlled full-bridge power converter , a "1-2-1" cosine mode PWM control waveform is proposed , which is aimed at dealing with the process of power-start and frequently violent dynamic change on welding arc load. According to the generating principle of digital PWM control waveform in DSP , a phase-shift PWM control waveform with "1-2-1" cosine mode is designed , and its control effect is verified experimentally. The results show that , by using this phase-shift PWM mode to control full-bridge power converter , it can not only meet the requirement of effective duty cycle in PWM control pulse with regard to the power output characteristics , but also guarantee the dynamic stability in soft-switching resonant process of leading-leg parallel resonant network and transformer primary side serial resonant network , so that the soft-switching state of power devices will be maintained in the process of power-start and frequently violent dynamic change on welding arc load.

Key words: control waveform optimization; phase-shift pulse width modulation control; soft-switching resonance; full-

bridge converter

Influence of TRIP on calculated results of residual stress in a low temperature transformation steel joint

DENG Dean¹, MURAKAWA Hidekazu², MA Ningxu² (1. College of Materials Science and Engineering , Chongqing University , Chongqing 400045 , China; 2. Joining and Welding Research Institute , Osaka University , Osaka 567-0047 , Japan) . pp 9 - 12

Abstract: In this study , a computational approach based on JWRIAN software was developed to predict welding residual stress in low temperature transformation (LTT) steel joint with considering solid-state phase transformation. The main objective was to clarify the influences of volume change , yield strength variation and transformation induced plasticity (TRIP) on the welding residual stress by means of the developed numerical method. Numerical results indicate that both volume change and yield strength variation during austenite-martensite have significant influences on the formation of welding residual stress in the LTT steel joint. In addition , TRIP also has somewhat influence on the welding residual stress , and it can relax the change tendency of both longitudinal and transverse stresses during phase transformation to some extent.

Key words: solid-state phase transformation; numerical simulation; residual stress; transformation induced plasticity

Fiber laser-assisted TIG welding weld characteristics and influencing factors

YIN Yan¹, TA Jinguo¹, WANG Zhan-chong¹, ZHANG Ruihua^{1,2} (1. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys , Lanzhou University of Technology , Ministry of Education , Lanzhou 730050 , China; 2. China Iron & Steel Research Institute Group , Beijing 100081 , China) . pp 13 - 16

Abstract: On the base of active welding method , laser aided activating TIG welding was proposed. At first , the surface of weld was melted by the mini power laser protected by oxygen. Then the conventional TIG was used to cover the weld , which achieved the target of the weld with deeper penetration and narrower width. The results show that with the increase of welding current , the penetration and width of weld melted and unmelted by laser increased , but the penetration of weld melted increased faster. The increase of welding speed led to decrease of penetration and width. With increase of power laser , the penetration increased , but width decreased. With the increase of pre-melting speed , the penetration increased first and then decreased , the width decreased and then increased. The weld , its penetration increased significantly and appearance was good , was gained by optimum parameters. Thus laser aided activating TIG welding was developed as a novel active welding method.

Key words: activating TIG welding; laser; oxygen; penetration increase