

基于多级耦合电感的限流型等离子切割电源

陈龙¹, 胡克满¹, 胡国伟¹, 宋孙浩²

(1. 宁波职业技术学院 电子信息工程学院, 浙江 宁波 315800;

2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘要: 等离子切割电源的电弧稳定性和弧电流的精细度限制了等离子加工的切割效果, 提出了一种基于多级耦合电感的新型DC-DC变换器, 既能使电弧电流快速响应, 又能有效地对桥臂及输出回路起到限流的作用, 不仅能提升电弧的稳定性, 而且也改善了电弧电流精度。首先分析了新型DC-DC变换器的拓扑结构, 在建立多级耦合电感(MCI)数学模型的基础上, 在Simulink模型中验证了MCI参数变化对变换器的限流能力, 并进一步探讨MCI变换器的可行性。最后, 搭建了10 kW等离子切割电源实验平台, 验证了MCI变换器限流的正确性和可行性。

关键词: 等离子电弧; 多级耦合电感; 快速响应; 数学模型

中图分类号: TM464; TM401 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21828

A Plasma Cutting Power with Current Limited Based on Multi-stage Coupled Inductor

CHEN Long¹, HU Keman¹, HU Guowei¹, SONG Sunhao²

(1. School of Electronic Information Engineering, Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, Zhejiang, China;

2. Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering CAS, Ningbo 315201, Zhejiang, China)

Abstract: The stability of plasma arc and the precision of arc current limit the cutting effect of plasma cutting of the plasma cutting power supply. A novel DC-DC converter based on multi-stage coupled inductor (MCI) was proposed, which can not only fastly respond to arc current, but also effectively limit the current of bridge arm and output circuit, thus can improve the stability and the accuracy of arc current. Firstly, the topology of the new DC-DC converter was analyzed, the current limiting ability of the converter was verified based on the mathematical model of multi-stage coupled inductor(MCI) using the Simulink model. Moreover, the feasibility of MCI converter was discussed. Finally, an experimental platform of 10 kW plasma cutting power supply was built to verify the correctness and feasibility of current limiting with the MCI converter.

Key words: plasma arc; multi-stage coupled inductor (MCI); fast response; mathematical model

等离子切割电源是在压缩空气、机械、热、电磁共同作用下, 利用气体的冲击力拉出了等离子弧, 而起弧的过程则要求电弧电流能够快速响应^[1-3]。与此同时, 随着精密加工及智能制造概念的提出, “高精细”等精密加工的市场需求也大大增加。虽然, 等离子切割电源在加工中具有切口光滑、切割速度快、切割成本低等优势, 但在“高精细”加工方面仍存在一定的不足^[4-6]。

目前, 等离子切割电源通常采用不对称半桥或全桥变换电路, 科研机构就其控制算法进

行深入研究并优化, 但是电源中普遍存在电弧电流纹波较大的问题^[7-8], 导致切割表面不够光滑或挂渣现象, 因此, 在寻求控制算法的优化过程中, 对电源的变换器电路进行研究也至关重要。

本文提出了一种基于等离子切割电源的多级耦合限流型直流变换器, 引入多级耦合电感(multi-stage coupled inductor, MCI)桥连2组全桥电路^[9-10], 通过深入研究MCI的特征, 优化MCI参数及绕制工艺, 有效降低了电流的纹波, 提升电弧电流的精度, 同时, 提出的新型结构能够大大

基金项目: 浙江省自然科学基金(LGG18E070006)

作者简介: 陈龙(1987—), 男, 硕士, 工程师, Email: chenglong302@126.com

提高电弧电流的动态响应能力,对精细切割具有很好的指导意义。

1 MCI数学模型

1.1 MCI直流变换器拓扑结构

多级耦合电感(MCI)新型DC-DC变换器如图1所示,由2组单相全桥多级耦合电路组成,每组单相全桥多级耦合电路由2个半桥模块和1组多级耦合电感(MCI)构成。通过调节左右2组单相全桥输出能量大小即可在负载端得到电流指令跟随,在动态响应能力上有突出的表现^[11-12]。

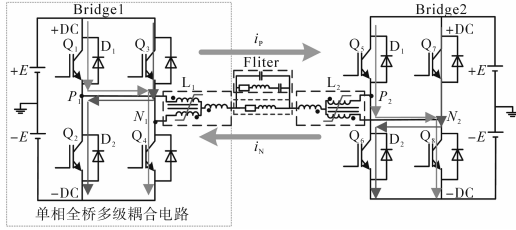


图1 多级耦合电感新型DC-DC变换器拓扑图

Fig.1 Topology of novel DC-DC converter with multi-stage coupled inductor

多级耦合电感的设计与其工艺有很大的关联,多级耦合电感(MCI)绕制工艺如图2所示,采用异名端连接方式,在U型磁芯上采用“分段-交叉”的绕制方法,整个电感总共由4段电感组成,包括2个差分绕组(L_{s1}, L_{s2}),2个小段输出绕组(L_{s3}, L_{s4}),因此,在磁路中能够得到多组交叉耦合效果,其耦合效果如表1所示。

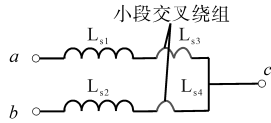


图2 绕制工艺

Fig.2 Winding process

表1 多级耦合效果

Tab.1 Effect of multi-stage coupled

电感间关系	耦合效果	互感量
$L_{s2} \rightarrow L_{s1}, L_{s1} \rightarrow L_{s2}$	强	M_{21}, M_{12}
$L_{s1} \rightarrow L_{s4}$	强	M_{14}
$L_{s2} \rightarrow L_{s3}$	强	M_{23}
$L_{s3} \rightarrow L_{s2}$	弱(可忽略)	—
$L_{s4} \rightarrow L_{s1}$	弱(可忽略)	—
$L_{s4} \rightarrow L_{s3}, L_{s3} \rightarrow L_{s4}$	弱(可忽略)	—

由于小段电感结构的原因,部分耦合效果有限(偏弱,可忽略),因此,单组MCI等效电路模型如图3所示,结合图1,能够有效地抑制回路中的交流分量及开关管的尖峰电流,而耦合电感输出端的直流分量将呈现同向耦合的状态,增强了负

载回路上的电感量,更能清晰显示耦合电感的分级耦合限流特性。

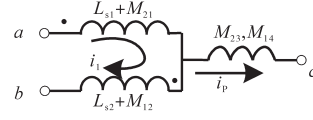


图3 单组MCI等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model of single MCI

1.2 MCI直流变换器数学模型

图4为单路全桥多级耦合等效电路,是多级耦合电感新型DC-DC变换器中的一组单相桥等效电路^[13-14]。

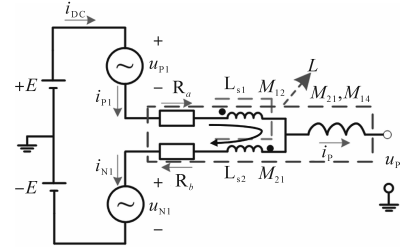


图4 单路全桥多级耦合等效电路

Fig.4 Single equivalent circuit of full-bridge with multi-stage coupled

耦合电感可等效为LR电路。结合图2,假定多级耦合主电感的内外绕组参数一致,则a, c两端的电感量为 L_s ,差分绕组自感量 $L_{s1}=L_{s2}=L_{sa}$,其互感量为 $M_{12}=M_{21}=M_1$,等效电阻 $R_a=R_b=R$,输出绕组电感量 $L_{s3}=L_{s4}=L_{sb}$,差分绕组对输出绕组的互感量为 $M_{14}=M_{23}=M_2$,则定义电感总感量为

$$L_s = L_{sa} + L_{sb} \quad (1)$$

结合图2、图4和表1,将单相全桥的上、下桥臂等效为交流电压源,其幅值分别为 u_{P1}, u_{N1} 。

根据基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, KVL),对于图4上、下桥臂电压分别为

$$\begin{cases} u_P = E - u_{P1} - i_{P1} R_a - (L_{s1} + L_{s3}) \frac{di_{P1}}{dt} - M_{21} \frac{di_{N1}}{dt} - M_{23} \frac{di_{N1}}{dt} \\ u_P = -E + u_{N1} + i_{N1} R_b + (L_{s2} + L_{s4}) \frac{di_{N1}}{dt} + M_{12} \frac{di_{P1}}{dt} + M_{14} \frac{di_{P1}}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_P 为桥臂输出交流电压; i_{P1}, i_{N1} 分别为上、下桥臂电流; u_{P1}, u_{N1} 分别为上、下桥臂开关管两端电压。

MCI桥臂的输出电感在反向耦合状态下的等效电感为 L_a ,则满足:

$$L_a = L_s - M_1 - M_2 \quad (3)$$

电感输出侧满足:

$$i_P = i_{P1} - i_{N1} \quad (4)$$

整理式(2)~式(4),可得交流侧输出特征方程为

$$u_p = \frac{u_{N1} - u_{P1}}{2} - \frac{R}{2} i_p - \frac{L_a}{2} \frac{di_p}{dt} \quad (5)$$

根据式(1)~式(3),图4中的上、下桥臂构成的直流侧回路,列写的KVL方程有:

$$U_{dc} = 2E = u_{P1} + u_{N1} + (i_{P1} + i_{N1})R + L_s \left(\frac{di_{P1}}{dt} + \frac{di_{N1}}{dt} \right) + M_1 \left(\frac{di_{P1}}{dt} + \frac{di_{N1}}{dt} \right) + M_2 \left(\frac{di_{P1}}{dt} + \frac{di_{N1}}{dt} \right) \quad (6)$$

由于差分绕组与输出绕组的自感量相同,因此定义差分绕组间耦合系数 $k_1 = M_1/L_{sa}$,主输出绕组间耦合系数 $k_2 = M_2/\sqrt{L_{sa}L_{sb}}$,MCI在设计时采用分段的方法,因此,设定主输出绕组的感量分配系数 α (即桥臂差分电感量与输出电感的分配系数),则满足:

$$\alpha = \frac{L_{s1}}{L_{s3}} = \frac{L_{s2}}{L_{s4}} = \frac{L_{sa}}{L_{sb}} \quad (7)$$

结合式(3),有

$$L_s + M_1 + M_2 = \frac{1 + \alpha(1 + k_1) + k_2 \sqrt{\alpha}}{1 + \alpha(1 - k_1) - k_2 \sqrt{\alpha}} L_a \quad (8)$$

将式(8)代入式(6),可得系统直流侧特征方程为

$$\frac{U_{dc}}{2} = \frac{u_{P1} + u_{N1}}{2} + i_{dc} R + \frac{1 + \alpha(1 + k_1) + k_2 \sqrt{\alpha}}{1 + \alpha(1 - k_1) - k_2 \sqrt{\alpha}} L_a \frac{di_{dc}}{dt} \quad (9)$$

由式(5)和式(9)可得MCI直流变换器的交流侧数学模型如图5所示。

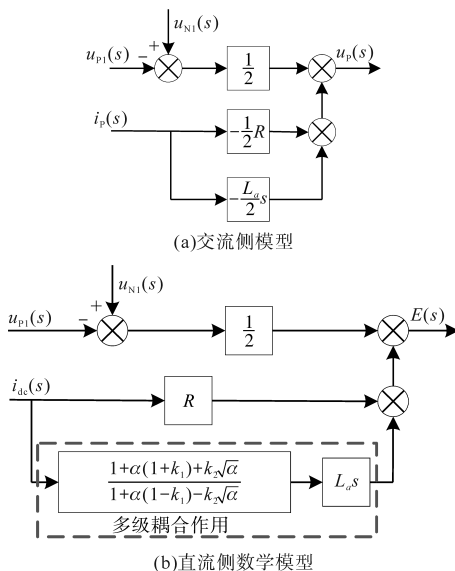


图5 MCI直流变换电路数学模型

Fig.5 Mathematical model of DC-DC converter with MCI

从式(5)中可看出MCI对交流输出功率无明显的影响,而对直流侧有较大的抑制作用,其抑制作用的强度与主输出绕组的感量分配系数 α 及电感的耦合系数 k 有关。如图1所示,在工程应用过程中,每个桥臂的电流由 i_{P1}, i_{N1}, i_P (或 i_{P2}, i_{N2}, i_N) 保持平衡,输出耦合等效感量 L_{s3} 对输出纹波具有不同的抑制效果,电感间的多级耦合程度对独立桥臂的脉动电流具有良好的抑制效果。

2 仿真验证

2.1 仿真模型

为了验证多级耦合电感对MCI直流变换器电流的抑制效果,结合图4假定MCI直流变换器的耦合差分电感 $L_{s1} = L_{s2}$,耦合输出电感为 L_{s3} ,MCI耦合系数为 $k_1 = k_2 = k$ 。仿真关键参数为:开关频率 $f_w = 25$ kHz,耦合差分电感 $L_{s1} = 150$ μ H,耦合差分电感 $L_{s2} = 150$ μ H,耦合输出电感 $L_{s3} = 10$ mH(c 短接),输出滤波电容 $C_{filter} = 0.76$ μ F,匹配电容 $C_{match} = 0.54$ μ F,匹配电阻 $R_{match} = 20$ Ω 。仿真模型如图6所示。

2.2 MCI耦合程度对限流作用的效果验证

依据设定的仿真参数及模型,对比MCI不同耦合系数 k 对电路电流的影响,其仿真波形如图7所示,图8为不同耦合系数 k 下的桥臂脉动电流波形。由图7、图8可知,在相同的电感参数下,MCI电感的耦合系数 k 越大,则桥臂脉动电流抑制效果越明显,仿真结果与理论相符合。

增大耦合系数等效于增大相应电感量,但工程实践中难以达到全耦合效果,因此,可适当地增大MCI差分电感的感量来增大耦合感量,进而能提高桥臂电流的抑制效果。图9为在固定的耦合系数 $k = 0.8$ 时,不同的MCI差分电感量下桥臂电流 i_{P1} 的电流波形。从图9中的包络线可见,随着桥臂差分电感量的增大,能够有效地抑制桥臂电流的脉动电流幅值(见包络线)。

2.3 MCI输出耦合对电弧电流纹波的效果验证

根据工程需求,假定 $L_{s1} = L_{s2}$,MCI的耦合系数恒定时,调节MCI支路电感(输出耦合电感 L_{s3})的电感量能有效地提升电弧电流的纹波。图10为切割电源在40 A切割电流情况下,不同的耦合电感对输出电流(电弧电流)的抑制效果。

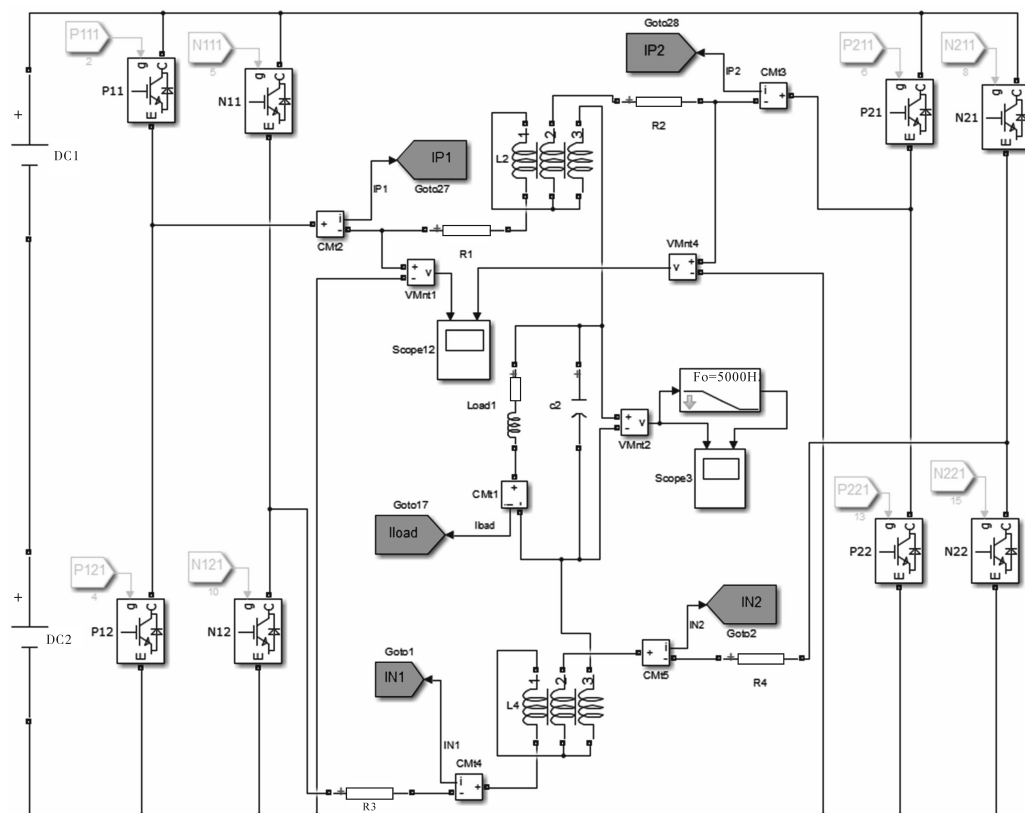


图6 MCI直流变换电路仿真模型

Fig.6 Simulation model of DC-DC converter with MCI

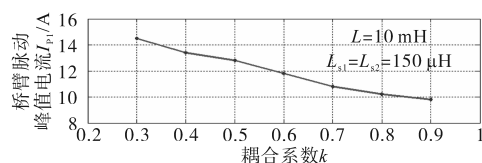


图7 桥臂脉动峰值电流(I_{p1})与耦合系数(k)关系图

Fig.7 Relationship between the peak pulse current (I_{p1}) and the coupling coefficient (k) of the bridge

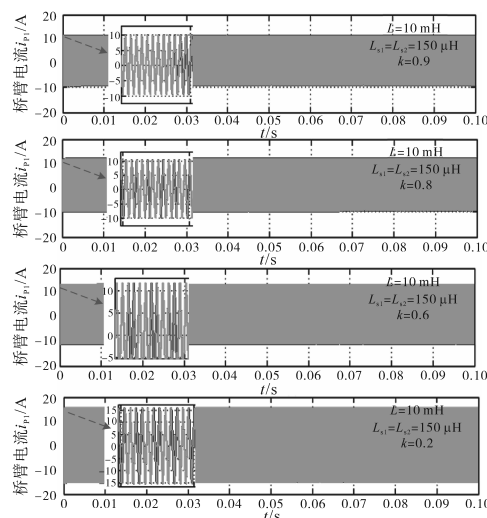


图8 不同耦合系数(k)下的桥臂脉动电流(i_{p1})波形图

Fig.8 Waveforms of bridge current (i_{p1}) in different coupling coefficient (k)

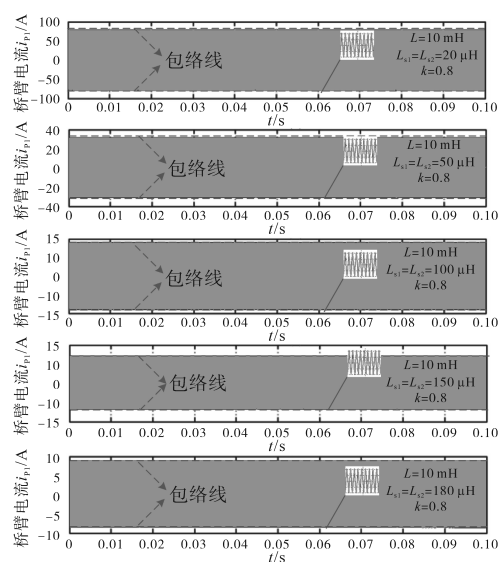
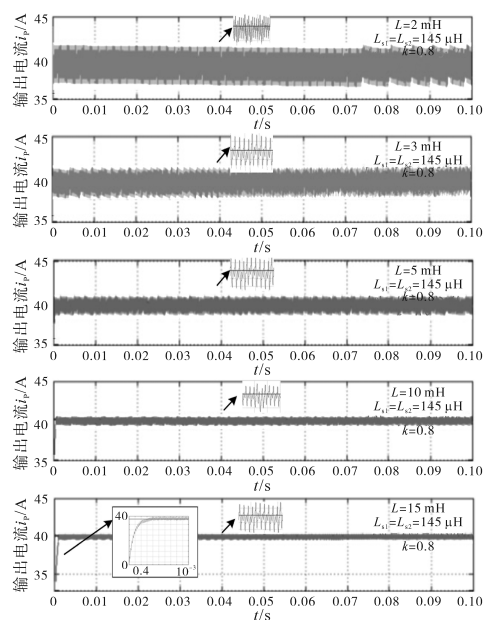


图9 MCI差分耦合电感对桥臂电流 i_{p1} 的影响

Fig.9 Influence on bridge current (i_{p1}) with differential coupling inductors of MCI

同时,图10在动态响应能力上表现突出,响应时间在百 μ s级别,有利于电弧电流的快速建立,避免断弧的出现。

图11为切割电源在40 A切割电流情况下,MCI耦合电感对电弧电流的纹波的影响波形图,由图可见,MCI输出电感对输出的电弧电流的扰

图10 MCI耦合电感对输出电流 i_p (40 A)的影响Fig.10 Influence on output current i_p (40 A) with different coupling inductors of MCI

动电流信号具有很好的抑制作用,实现电路的低纹波控制要求,进而能够使得切割精度得到了提升。

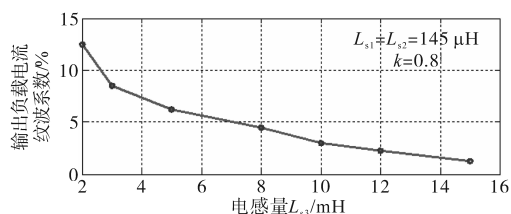


图11 MCI耦合电感对电弧电流(40 A)纹波的影响

Fig.11 Influence on ripple arc current (40 A) with different coupling inductors of MCI

MCI电感量的选择需结合输出电流的响应能力及纹波系数折中考虑,可遵循下述原则:

- 1)主感量 L 对输出电流动态响应影响较大,对输出电流纹波抑制明显,可优先考虑;
- 2)耦合电感 L_{s1}, L_{s2} 对桥臂电流纹波影响较大,其耦合程度越高,对纹波的抑制效果越明显。

3 实验分析

为了验证MCI直流变换器的动态响应能力以及变换器的限流能力,搭建了10 kW 逆变式等离子切割电源,将MCI电应用于切割电源中,图12为等离子切割电源MCI实验平台。输入电压为AC380 V,切割电流范围为25~60 A。



图12 等离子切割电源MCI实验平台

Fig.12 Experimental platform of plasma cutting power with MCI

图13为MCI等离子切割电源电弧电流工作波形。图13中, U_{Q1} 为驱动电压, U_{Arc} 为输出电压, i_{Ref} 为设置电流, i_{Cut} 为切割电流。由图13a可见,在30 A切割电流条件下,切割电流 i_{Cut} 的精度得到了较大的提升,电弧电流的动态响应时间约为320 μs ;由图13b可见,在50 A切割电流条件下,电弧电流的动态响应时间约为400 μs 。

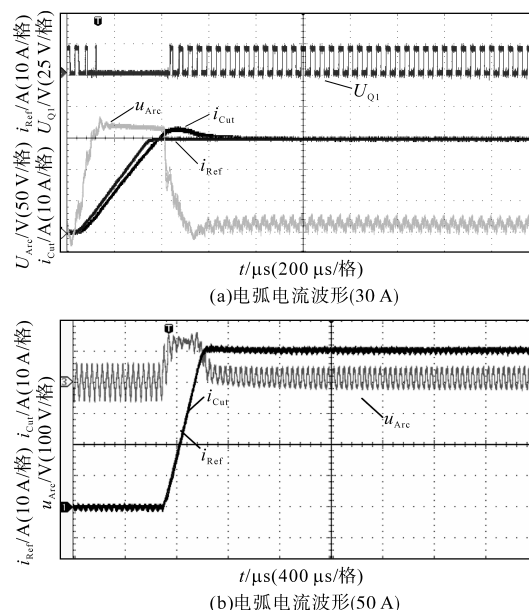


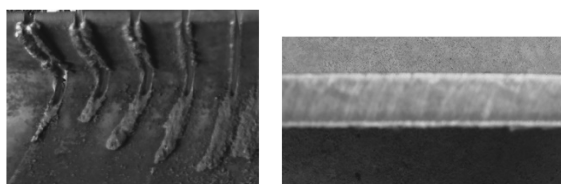
图13 MCI切割电源电弧电流波形

Fig.13 Arc current waveforms of cutting power supply with MCI

由于等离子电弧在起弧过程中受到气压、电磁场以及热场的影响,是一种典型的非线性时变系统,其干扰因素不定,因此容易出现断弧的现象。因此,快速的动态响应能力能大大减免电弧断弧的现象,保障了等离子电弧的稳定性。

与此同时,由图13可见,电弧电流(输出电流)的纹波约为3%左右。而传统的等离子切割电源其电弧纹波均在20%左右,因此难以满足精密加工的要求。而新型变换器的使用大大抑制了直流输出侧的干扰(MCI变换器直流侧抑制数学模型见图5b),验证了MCI直流变换器有效限流的可行性及正确性。

图14为等离子切割效果对比图。



(a)传统结构

(b)新型拓扑

图14 等离子切割效果对比图

Fig.14 Contrast chart of plasma cutting effect

4 结论

针对多级耦合电感直流变换器进行了深入的分析,建立了多级耦合电感(MCI)交、直流数学模型,在Simulink模型中验证了动态响应及限流特性的正确性。最后在10 kW等离子切割电源中得到了验证。实验结果证明,文中提出的一种多级耦合限流型直流变换器在等离子切割电源中能有效地解决非线性时变系统所引起的干扰因素,大大提升电源装置的动态响应能力,避免了电弧断弧现象,同时,大幅降低输出电流的纹波,提升电弧电流的精度,具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] 郑洛斌,余世明,唐厚君,等.大功率等离子切割机引弧电路的分析与设计[J].电力电子技术,2017,51(1):108-111.
- [2] 张新,王振民,方小鑫.精细等离子弧切割实现方法及进展[J].焊接技术,2013,42(10):1-6.
- [3] Jia Deli, You Bo, Ren Wenbo, *et al.* Decoupling control based on PID neural network for plasma cutting system [C]//IEEE Proceedings of the 27th Chinese Control Conference, 2008: 659-662.
- [4] Patel Parthkumar, Nakum Bhavdeep, Abhishek Kumar, *et al.* Machining performance optimization during plasma arc cutting of AISI D2 steel: application of FIS, nonlinear regression and JAYA optimization algorithm[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(4): 240.
- [5] Sanajit Narongrit, Jangwanitlert Anuwat. Improved performance of a plasma cutting machine using a half-bridge DC/DC converter [C]// Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009: 1601-1606.
- [6] 陈月峰,严得忠,程定富,等.国内数控等离子弧切割技术的发展与应用[J].焊接技术,2017,46(8):1-4.
- [7] 渠浩,姚辰,杨喜军,等.等离子切割电流源平波电感直接储能控制研究[J].电力电子技术,2015,49(4):42-45.
- [8] 宋晓清,赖晓阳,唐厚君,等.大功率等离子切割机引弧系统的研究[J].电力电子技术,2015,49(7):100-102.
- [9] 袁义生,朱本玉.一种基于耦合电感的模块化多电平变流器控制[J].电工技术学报,2015,30(6):216-224.
- [10] 高伟,罗全明,张阳,等.一种零输入电流纹波高增益DC-DC变换器[J].电工技术学报,2018,33(2):284-292.
- [11] 陈桂鹏,陈鑫,陶勇,等.基于耦合电感的零电压开关同步Buck变换器[J].电工技术学报,2016,31(z1):102-110.
- [12] 林雪凤,许建平,周翔.谐振软开关耦合电感高增益DC-DC变换器[J].电工技术学报,2019,34(4):747-755.
- [13] 郭华越,张兴,赵文广,等.双有源桥DC/DC变换器的最小电流应力优化[J].电力电子技术,2019,53(3):120-122.
- [14] 安峰,杨柯欣,王嵩,等.基于模型前馈的双有源全桥DC-DC变换器电流应力优化方法[J].电工技术学报,2019,34(14):2946-2956.

收稿日期:2020-04-23

修改稿日期:2020-05-19