

单电源驱动多路电弧方法对比研究

陈杰¹ 李陈莹¹ 靖子洋² 吴淑群^{2*}

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院 南京 211103; 2. 南京航空航天大学 南京 211106)

A Comparative Study on the Methods of Multiple Arcs Driven by One Power Supply

CHEN Jie¹, LI Chenying¹, JING Ziyang², WU Shuqun^{2*}

(1. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract The method of generating multiple arcs is of great significance for improving the efficiency of material processing or organic gas synthesizing. At present, multiple power sources are usually required when multiple arcs are generated, which significantly increases the application cost. Therefore, this article focuses on the comparative study of the method of driving multiple arcs with a single power supply and designs three circuits: multiple pairs of electrodes in series, multiple pairs of electrodes in parallel (series capacitors in branch), and multiple pairs of electrodes in parallel (series capacitors or inductances in branch). All the circuits have realized the function of starting and maintaining the stability of multiple arcs. The article analyzes the breakdown characteristics and the voltage or current characteristics of the arc and draws the following conclusions: when multiple pairs of electrodes are connected in series, multiple arc starting is closely related to the output voltage of the power supply, that is, the more electrode pairs, the higher the required open-circuit voltage; when multiple pairs of electrodes are connected in parallel (series capacitors in branch), multiple arc starting is closely related to the output current of the power supply, that is, the more the electrode pairs, the greater the required output current; when multiple pairs of electrodes are connected in parallel (series capacitors or inductances in branch), the magnetic saturation effect of the inductor in the circuit causes a sudden change in the voltage and current of each element, which affects the stability and power distribution of each arc. So, this article compares and studies three methods of generating multiple arcs from a single power supply, which can effectively reduce application costs and provide technical support for arc applications in material processing and organic gas synthesizing.

Keywords Arc discharge, Jacob's ladder arc, Multiple arc, Arc characteristics

摘要 多路电弧的产生方法对提升材料处理或气体合成的效率具有重要意义,而目前产生多路电弧时通常需要多个电源,显著增加了应用成本。因此,本文重点对比研究了单电源驱动多路电弧的方法,设计了多对电极串联、多对电极并联(支路串联电容)以及多对电极并联(支路串联电容或电感)共三种电路结构,均实现了起弧与电弧稳定维持,并对击穿特性、电弧稳定电压电流特性进行了分析。结果表明:在多对电极串联时,多路起弧与电源输出电压紧密相关,即电极对数越多所需开路电压越高;在多对电极并联(支路串联电容)时,多路起弧与电源输出电流紧密相关,即电极对数越多则所需输出电流越大;在多对电极并联(支路串联电容或电感)时,电路中电感的磁饱和效应造成各元件电压电流的突变,影响各电弧的稳定与功率分配。本文对比研究了单电源产生多路电弧的三种方法,可有效降低应用成本,为电弧在材料处理与气体合成应用提供技术支撑。

关键词 电弧放电 滑动电弧 多路电弧 电弧特性

中图分类号:TM501+.2

文献标识码:A

doi:10.13922/j.cnki.cjvst.202108026

收稿日期:2021-08-31

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021137)

* 联系人:E-mail:wushuqun@nuaa.edu.cn

滑动电弧作为一种特殊的电弧放电形式,以其具备在非平衡放电下保持较大的电子密度和较高的温度等显著特点,被广泛应用于材料表面处理、气体合成与分解以及燃烧试验等多个领域^[1-10]。在上述领域中,有时需要等离子体具有更高的浓度或更大的面积以提升相应效率或性能,因此常采用多电极同时起弧的方式,故如何产生多路电弧尤为重要。

为了提高工件的加工效率,Bobzin 等^[11]采用脉冲电源输出多路脉冲,分别施加到多对电极上,通过控制各脉冲的间隔实现多对电极依次导通。然而,该方法需要对脉冲间隔进行精准控制,且要求输出多路脉冲电压,从而对电源的控制和结构要求很高。Huang 等^[12]同样采用高压脉冲电源但在外电路结构上做了改变,将电极与限流电阻、开关管以及二极管串联形成支路,并各支路间串入电容形成多个回路。通过控制开关管实现多电极依次放电,其中各支路间的电容保证了未放电电极与工件间维持高压。而该方法需要开关管能够耐受高压。且上述研究的放电类型都为火花放电,输出暂态间歇式的放电,而不是电弧放电(具有持续放电特征),从而对电源、电路连接方式、电极结构的要求存在不同。

在多路电弧放电的产生方面,林启富等^[13]采用 50 kHz 交流高压电源为三对环形排列的电极进行供电,对三路电弧的电弧特性与等离子体空间分布进行了深入研究,但是该研究是采用三个独立电源对各电极进行供电。随着电极对数增多,相应的需要电源数量线性增加,具有成本较高且结构冗杂的特点。Tetsuro 等^[14]则采用三相交流电源供电,并通过两个三相变压器进行升压且其中一个变压器对电压反向,输出的六路电压连接到六个刀片电极上使其产生滑动电弧。然而,该实验中电极对数受限于电源输出相数,导致扩展性不高,且无法在同一时刻产生稳定电弧。综上所述,当前多路电弧的产生方法仍有待进一步研究。为此,本文以单个 24 kHz 的交流高压电源作为电弧电源,以雅各布天梯电弧作为研究对象,设计了多对电极串联、多对电极并联(含串联电容)、多对电极并联(含串联电容与电感)共三种电路结构,均实现了多路电弧稳定产生,并分析比较了三种多路电弧的击穿特性、电弧特征及产生方法优劣。

1 实验装置

实验装置由电弧电源、起弧电极以及电感与电容无功元件组成。其中,电弧电源由直流供电电源、逆变电路、谐振转换器、控制器以及高频高压变压器组成。其中直流供电电源输出电压可调,而逆变器将电压由直流转换为交流,并经谐振转换器提高频率,最后通过变压器升压输出。因此电弧电源具有高电压低电流的特点,频率约为 24 kHz,最大开路电压 30 kV,最大输出电流 0.5 A。

起弧电极为由一对直径 2 mm 的铜制羊角电极,电极底端中心间距 6 mm,顶端间距 15 mm。电压电流测量采用了电压探头 Tektronix P6015A、电流探头 Pearson 6585 以及示波器 Tektronix MDO3034。

本文对比了三种多路电弧产生方法,图 1 为装置示意图。图 1(a)为单个电源驱动且三对起弧电极串联,电弧电源的输出与第一个起弧电极一端连接,随后该电极另一端与下一个起弧电极一端连接,依次形成串联结构最后末端接地;图 1(b)为单个电源驱动三对并联的起弧电极,每个并联支路由起弧电极与高压聚苯乙烯薄膜电容串联组成;图 1(c)为单电源驱动两对并联的起弧电极,一条并联支路由电弧电极与电容串联组成,另一条并联支路由电弧电极与非晶高电感纳米晶铁芯电感串联组成。

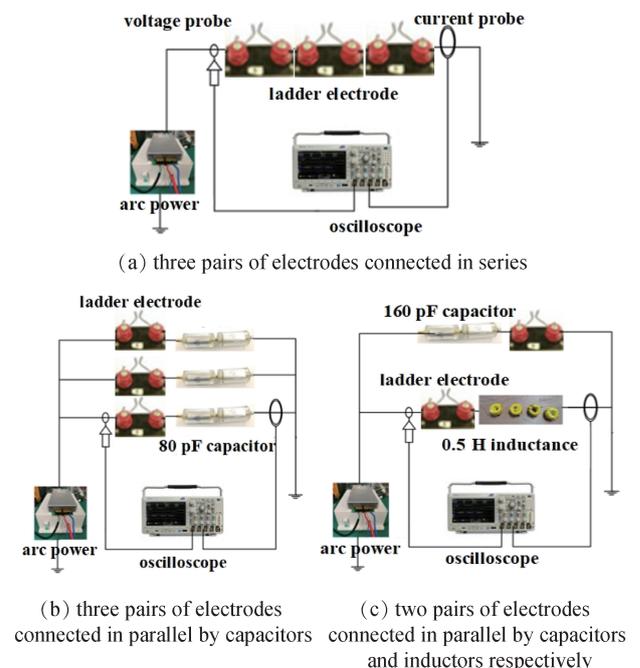


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

2 实验结果

2.1 起弧电极串联

依照图1(a)的单电源驱动三对串联起弧电极,逐步提高电弧电源输出电压,三对电极同时起弧成功,如图2所示,形成了3个稳定的雅各布天梯电弧。图3为三对电极起弧瞬间的电压电流波形图。电流波形中在76、91以及103 μs 处出现了三个明显的电流尖峰,相应的电压波形也出现了电压跌落,即对应发生了三次气体放电。然而,第一、二次放电未能使得三对电极都发生击穿,电压跌落不显著,直到第三次放电使得三对电极都发生了击穿,从而形成整个电路导通,电压从23 kV骤降为0。



图2 三对电极串联情况下成功起弧

Fig.2 Successful arc starting with three pairs of electrodes in series

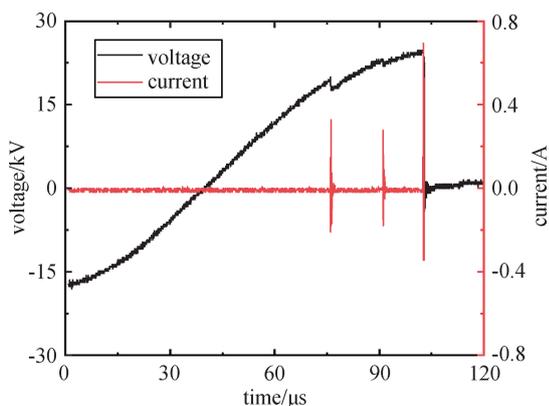


图3 起弧瞬间的波形

Fig.3 Waveforms at the moment of arc starting

为了进一步了解多对电极串联情况下气体击穿特点,研究了串联电极对数对全部电极间隙击穿所需电源开路电压的影响。此处的开路电压指与击穿所有电极所需电源直流侧条件相同的情况下电源开路时的输出电压。图4为电源开路电压与串联电极对数的关系曲线。随着电极对数从1增加至4,电源开路电压从8.8 kV显著增加至15.2 kV,即意味着随着电极对数增加所需电源输出电压的能力增强。

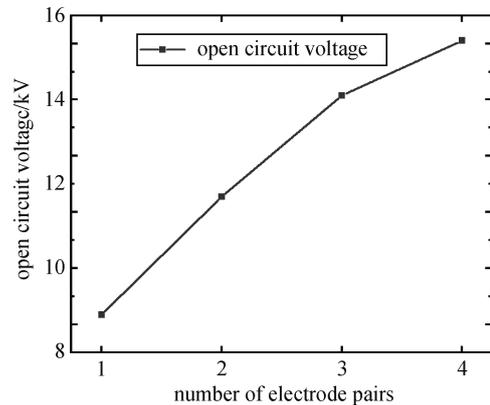


图4 串联电极对数与所需电源开路电压的关系曲线

Fig.4 The relationship between the number of electrode pairs in series and the required open-circuit voltage of the power supply

图5为多对电极串联情况下电弧成功起弧后电源的输出电压电流波形,由(a)到(d)分别代表单对电极到四对电极串联的情况。当电弧成功起弧并保持稳定后,将电弧电源输出的电流幅值固定为150 mA。随着串联电极对数从1增加至4,为了保持稳定电弧,电弧电源的输出电压幅值从1.56 kV增加至7.6 kV,而电流幅值则保持基本不变,这意味着电弧电源输出功率相应增大。从电压电流波形上看,电压电流的相位差约 3° ~ 6° ,近乎纯阻性。同时,在电流过零点附近位置会发生畸变,出现一段零电流区域,该现象为电弧特有的“零休”现象。在该电路结构中,起弧成功后每对电极上的维持电压波形近乎重合,电压幅值大约为1.6 kV。因此,当结构相同的多对电极串联时,各对电极上电弧电压电流波形几乎一致。

2.2 起弧电极并联(含串联电容)

在多对电极串联的方法中,随着串联电极对数增加,所需击穿电压显著升高。为了能够降低所需击穿电压,将多对电极进行并联。然而,若是多对电极简单并联,则当一条支路起弧成功,则电弧电源的输出电压从开路电压骤降到导通电压,而该导通电压并不能使其余支路上的电极成功导通。因此需在各支路上串联电容,从而保证其余未导通的支路上有足够的电压以实现电极间隙击穿。

对于电极来说,其击穿电压 U_b 可根据Paschen曲线的经验公式中得到^[15],如式(1),其中 σ 为相对空气密度, d 为电极间距。

$$U_b = 24.5\sigma d + 6.4\sqrt{\sigma d} \quad (1)$$

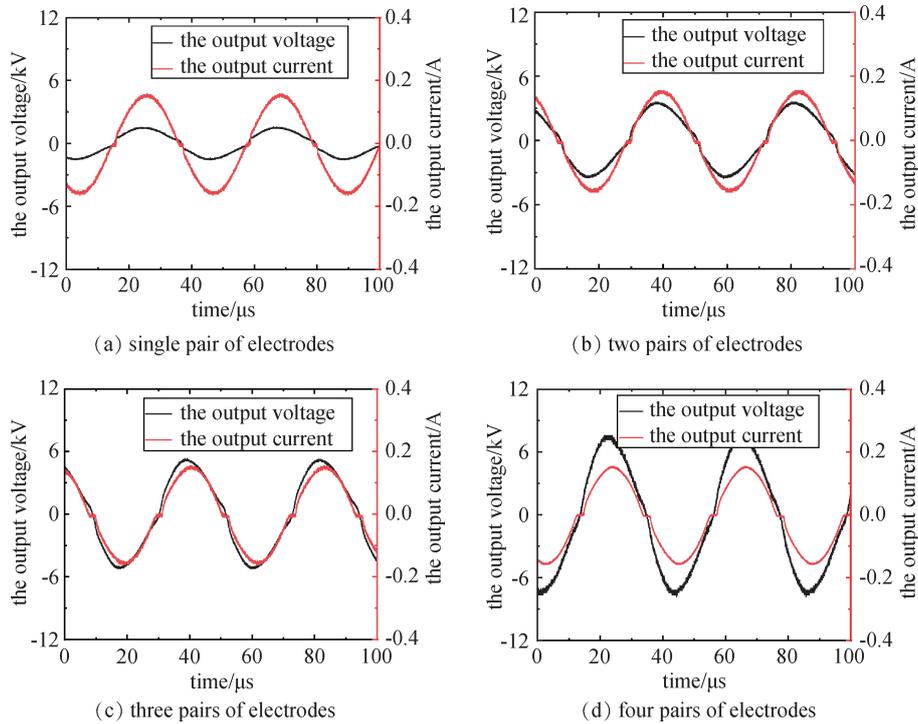


图 5 多对电极串联情况下成功起弧后的波形

Fig.5 Waveform after successful arc starting with multiple pairs of electrodes in series

当某支路上的电极击穿后,支路导通,其支路电压 U_a 变为电弧电压与电容电压之和,如式(2)。式中 R_{arc} 为电弧电阻, I 为电源输出电流, n 为外电路支路数, f 为电源频率, C 为电容容值。

$$U_a = R_{arc} I - j \frac{1}{2\pi f C} \frac{1}{n-1} \quad (2)$$

而电弧电阻 R_{arc} 可根据 Warrington 模型估算^[16], 如式(3)所示,其中 K 与 α 为拟合参量,分别取 28688 与 0.4, L 为电弧长度, I_{arc} 为电弧电流。

$$R_{arc} = \frac{K}{I_{arc}^{\alpha+1}} L \quad (3)$$

因此为使电极击穿,需满足 $|U_a| \geq |U_b|$, 并以此确定电容的容值,即式(4)所示。

$$C \leq \frac{1}{\sqrt{10^6 (24.5\sigma d + 6.4 \sqrt{\sigma d})^2 - (\frac{KL}{I_{arc}^\alpha})^2}} \quad (4)$$

而本实验电弧电极下端间距 0.6 cm, 电弧电源频率 24 kHz, 最高可输出 0.5 A 的电流, 支路数 n 为 3, 根据式(4)计算得为保证各支路电弧顺利导通, 试验所需电容应不大于 87 pF, 故最终选取 80 pF 的耐高压电容作为试验电容。

图 6 为三对电极并联情况下成功起弧, 而图 7

为三对电极并联情况下电极发生击穿瞬间的电压电流波形。电流波形中出现了三个明显的电流尖峰, 对应三次气体放电, 其时间间隔分别为 3.98 与 4.395 μs 。电流尖峰位置处对应电压明显跌落, 第一次气体击穿时电压从 17.8 跌落至 6.4 kV, 第二次气体击穿时电压从 15.8 下降至 7.8 kV, 第三次气体击穿时电压从 16.8 降至 10.4 kV。



图 6 三对电极并联情况下成功起弧

Fig.6 Successful arc starting when three pairs of electrodes are connected in parallel

为了进一步了解多对电极串联情况下气体击穿特点, 研究了串联电极对数对全部电极间隙击穿所需电源输出电流(电源最小输出电流)影响。图 8 为多对电极并联情况下电极对数与成功起弧所需电源最小电流关系曲线图, 随着电极对数从 1 增加至 3, 成功起弧所需电源最小输出电流峰值从

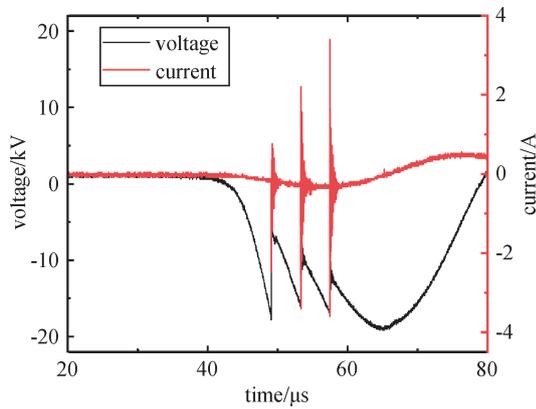


图7 起弧瞬间波形

Fig.7 Waveforms at the moment of arc starting

0.13增加至0.34 A。

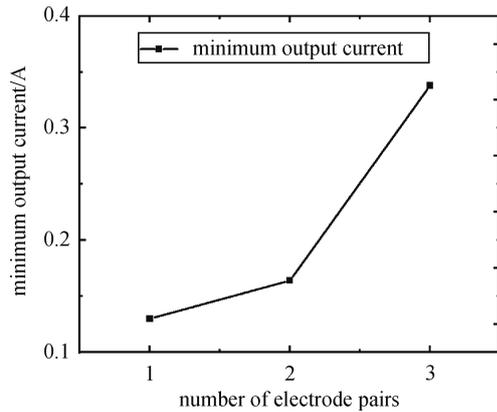
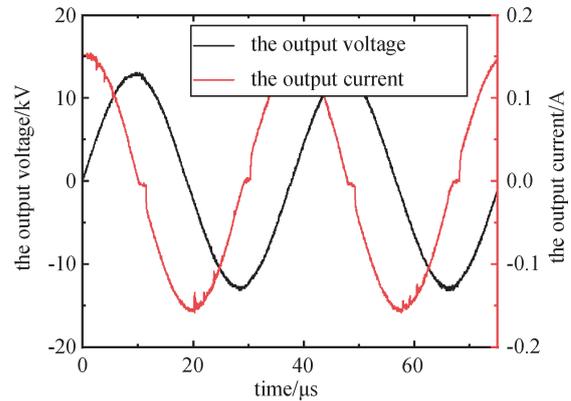


图8 电极对数与所需电源最小输出电流的关系曲线

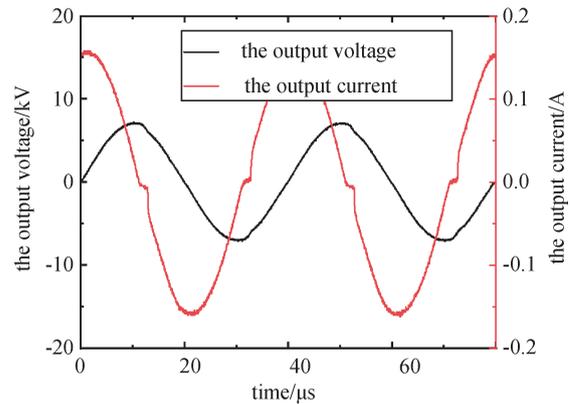
Fig.8 The relationship between the number of electrode pairs and the minimum output current of the required power supply

图9为多对电极并联情况下成功起弧后电源输出的电压电流波形。当电弧电源输出的电流幅值都为150 mA时,并联支路数越多,电源输出电压越低。只有一对电极时,电源输出电压幅值为13.2 kV,电流相位超前电压 82° ;当有两对电极并联时,电源输出电压幅值为7.4 kV,电流相位超前电压 78° ;当有三对电极并联时,电源输出电压幅值为5.1 kV,电流相位超前电压 70° 。其中,电源输出电压下降的主要原因如下:随着并联支路数增加,负载等效阻抗降低,而电源输出电流固定不变,从而使得电源输出电压降低。且在该电路结构中,各支路的电流幅值与相位近乎相同。因此,电弧电源输出的有功功率平均分配到每个电弧。然而,由于每条支路中串入电容,增加了电源输出的无功功率,

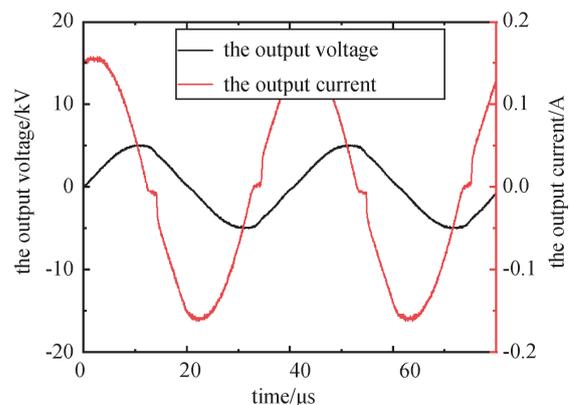
降低了电源输出功率中的有功占比,其中各支路上有功功率为67 W,无功功率约为190 Var,有功功率占比仅约为26%。



(a) single pair of electrodes



(b) two pairs of electrodes



(c) three pairs of electrodes

图9 150 mA不同电极对数的稳定波形

Fig.9 The stable waveforms of different electrode pairs at 150 mA

2.3 起弧电极并联(含串联电容电感)

为了提升电源输出有功占比,在上述电路中新增电感,即一条并联支路中起弧电极与80 pF电容串联,另一条支路中起弧电极与电感串联。电感的

磁芯为非晶高电感纳米晶铁芯,该电感感值约为 0.5 H,图 10 为两对电极并联情况下成功起弧。图 11 为两对电弧电极击穿瞬间的电压电流波形。从电流波形可知,在 146 μs 时发生气体击穿后,电压骤降至接近 0,随后继续出现了多个明显的电流尖峰,表明发生了 6-8 次放电,直到电弧稳定维持。这说明相对上述两种电弧产生方式,在含电感的多对电极并联情况下电极间隙击穿的初期不容易稳定。

图 12 为两对电极并联情况下成功起弧后并各



图 10 两对电极并联情况下成功起弧

Fig.10 Successful arc starting when two pairs of electrodes are connected in parallel

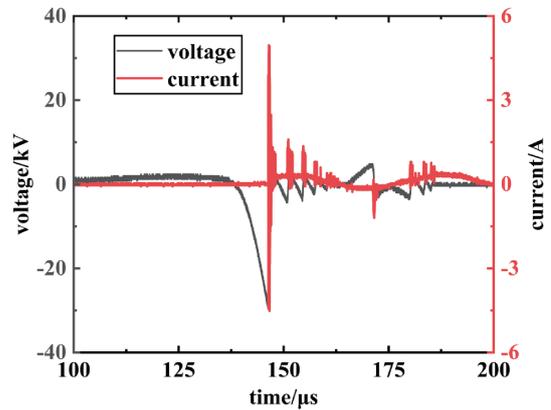


图 11 起弧瞬间波形

Fig.11 Waveforms at the moment of arc starting

个支路和元件上的电压电流波形。在图 14(a)中的 9.4 μs 时,电弧电源输出电压(即端口电压)存在明显跌落,电压从 4.0 降到 1.1 kV,而此时电弧电源输出电流存在明显尖峰,其峰值约为 0.4 A。图 12(b)中电感电流出现显著增加,而电感电压则迅速下降,表明电感出现了磁芯饱和现象,电感值急剧下降。

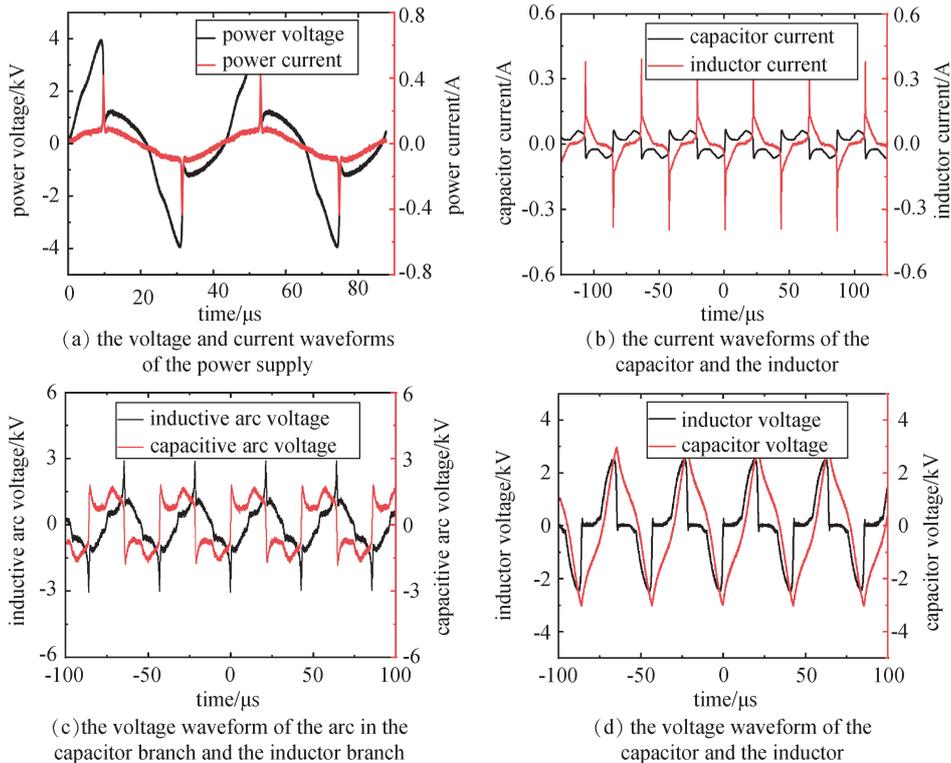


图 12 稳态下各支路电流与元件电压波形图

Fig.12 The current and component voltage waveforms of each branch in steady state

由电感的磁滞曲线可知,电感的磁通与外加电压的时间积分相关,当电压的时间积分达到 $6 \text{ V}\cdot\text{ms}$ 时,磁通在到达最大值;由于磁芯饱和后的磁通量不再增加,所以无法维持电感两端电压,电感的感值迅速下降,接近短路。在半个电压周期中,电弧电源首先向电容与电感充电,电容与电感的电压上升;当电感电压上升到 2.5 kV 时,电感饱和,接近短路,而电容电压则维持不变;电源与电容向电感支路输送能量,此时电容支路电流由 40 变为 -65 mA ,电感支路电流迅速增加,而电源电压则迅速下降。随着电弧电源输出电流增大,电容电流随之增大,电容电流达到最大值 60 mA ;依据图 12(a) 中电弧电源的输出电压电流波形,获得电源输出的有功功率约为 115.6 W ,视在功率约为 140.8 VA ,有功功率约占电弧电源输出功率 82.1% ,显著高于仅含电容的

多对电极并联方法。

为更加清晰地了解电感饱和对电弧电极的影响,本文采用仿真软件 MATLAB 进行了仿真研究。电容容值为 80 pF ,电源电流输出幅值为 80 mA 的正弦波。为模拟电感饱和现象,电感设置为非线性。其中,电感未饱和时的感值为 0.5 H ,饱和后电感接近短路。根据图 11 的波形,获得电感饱和点为电压积分为 $6 \text{ V}\cdot\text{ms}$ 。仿真电路中电弧采用 Mayr 模型,电弧的耗散功率为经验值。图 13 仿真的电压电流波形。电容支路电流在半个周期内呈现“凹”型,两个峰值均在 60 mA 左右,电感支路电流在电感饱和后呈下降趋势,两支路的电弧电压波形的变化,均与实验结果接近。然而,电源输出为理想正弦电流波形,并未在电感饱和时刻出现电流尖峰。

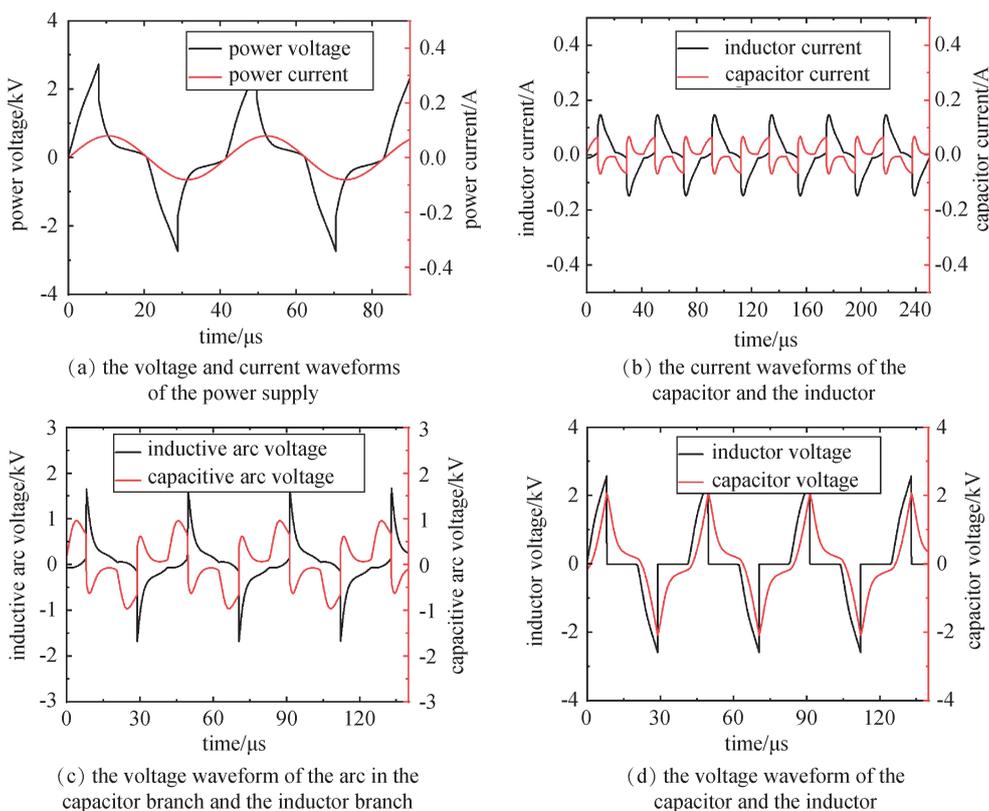


图 13 仿真波形图

Fig.13 Waveform of simulation circuit

与实际实验结果相比,仿真结果的差异主要为电感支路电流出现尖峰且峰值高。通过降低 Mayr 电弧模型的电弧耗散功率,减小电弧电阻,可增加电感支路电流峰值。如图 14 所示,将电感支路的电弧耗散功率 (P_L) 从 28.5 降低到 26 W ,将电容支路的

电弧耗散功率 (P_C) 从 20 下降到 18 W 。当电感支路的电弧耗散功率下降时,电感峰值从 0.12 上升到 0.14 A 。当电容支路电弧的耗散功率下降时,电容支路电弧阻值下降,电感峰值从 0.12 上升到 0.23 A 。上述两种情况中,电感峰值的增大是电容向电感支

路充电的结果,调节电弧耗散功率可以使电感饱和瞬间的电感支路电流升高,但电容支路电流同样升高,但仍明显低于实验电感支路电流尖峰。因此,电感支路电流尖峰不仅受电路参数影响,而且可能与电弧电源特性紧密相关。

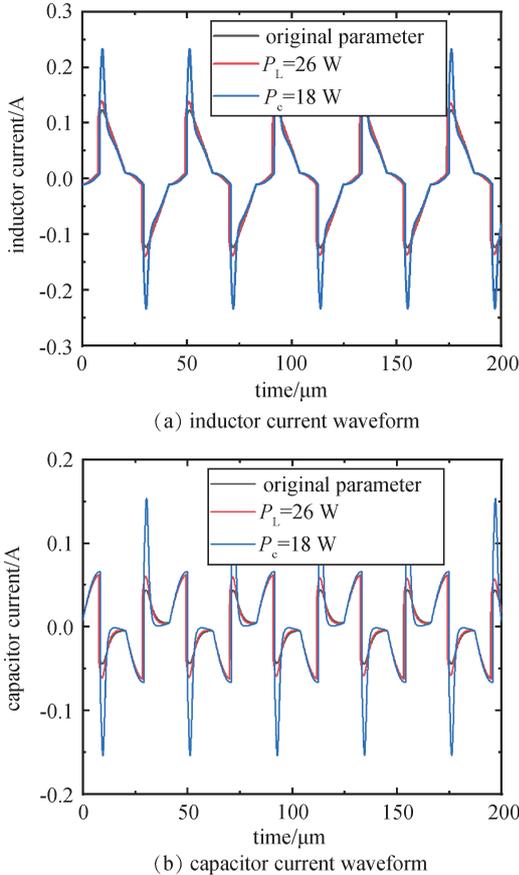


图 14 电弧参数对各支路电流波形影响

Fig.14 The influence of arc parameters on the current waveform of each branch

2.4 三种单电源驱动多路电弧方法比较

针对上述三种多路雅各布天梯电弧产生方法,即多对电极串联、多对电极并联(电容与电极串联)以及多对电极并联(电感与电极串联、电容与电极

串联),比较三种方法的优缺点,如表 1 所示。

在放电击穿方面,多对电极串联时,当单个电极间隙发生击穿后,而所有间隙并未完全击穿时,电弧电源输出电压几乎全部降落在未击穿的电极间隙上,从而可逐一击穿。在仅含电容的多对电极并联时,当单个电弧电极击穿时,由于电容的电压钳位作用,使得电弧电源输出电压能够维持,保障其他未发生击穿的电极两端电压足以达到击穿电压。在含电容电感的多对电极并联时,由于电感存在饱和现象,电极在被击穿后的初期较难形成稳定的放电通道。

在电源输出功率方面,多对电极串联时,电源输出电压电流波形相位差小,电弧电源输出功率中有功功率占比超过 95%。在含仅电容的多对电极并联时,引入了电容元件,电容的电抗值要大于电极的等效电阻值,导致无功功率升高,电弧电源输出功率中有功功率占比下降到 30% 左右。在含电容电感的多对电极并联时,由于电感元件的接入抵消了部分电容元件产生的无功功率,因此电弧电源的有功功率占比达 80% 以上。

在电弧电源要求方面,多对电极串联时,随着电极对数增多,所需电源输出电压显著提高。因此,由于单个雅各布天梯电弧的击穿电压就达到数千伏甚至十千伏以上,通常首先于电弧电源的输出电压等级,难以将电极对数扩展至数十对。当多对电极并联时,由于支路对电源输出电流具有分流的作用,因此随着电极对数的增多,所需电源的输出电流也同样会增大,因此电极对数越多对电源的要求越高。

3 结论

针对单一电源驱动多路电弧方法,本文搭建多路电弧实验平台,设计了多电弧串联、各电弧串电容后并联、两电弧分别串电容和电感后并联的三种电路结构进行研究,发现在多对电极串联的电路结

表 1 三种单电源驱动多路电弧方法比较

Tab.1 Comparison of three single power supply driving multiple arc methods

连接类型	优点	缺点
起弧电极串联	电路简单;外电路纯阻性;电极功率相同;	电极对数越多,所需电源输出电压越高;较难扩展
起弧电极并联(电容与电极串联)	各支路功率相同;所需电源电压低;易扩展	电极对数越多,所需电源输出电流越大;无功功率占比较大
起弧电极并联(电感与电极串联、电容与电极串联)	有功功率占比高;所需电源电压低;易扩展	电感磁通存在饱和;击穿时放电通道不稳定;所需电源输出电流大

构中,起弧成功与电源输出电压紧密相关,即只有当电源的输出电压足够高,以使各电极间隙全部击穿时,才能产生多路电弧,且随着电极对数的增多,所需电源输出电压越高。

在并联支路中串入电容的电路结构中,一条支路电弧导通后,通过同支路上电容电压钳位及电源电压升高以促使其余支路电极击穿,产生多路电弧;随着电极对数的增多,所需电源输出电流增大。但由于引入了电容,该电路结构下电源输出功率中存在相当一部分的无功功率,且有功功率率占比不足30%。

进一步提出了在多对电极并联的结构中引入匹配的电感元件与电容元件以提高电源输出有功占比。尽管将电感引入并联电路,可有效平衡电容元件造成的无功损耗,但电感元件需考虑磁饱和现象。发现电感饱和后的电感电压将迅速下降至零,近似于短路,易引起电路中各元件电压电流突变,不利于电弧稳定维持。因此,后续工作中可采用增大磁芯面积或改用新型磁芯材料等方法,避免电感饱和。

综上所述,本文对比研究了单一电源驱动多路电弧的三种方法,均实现了成功起弧与电弧稳定维持,可以有效降低多电源产生多路电弧的高昂成本,同时也为单电源驱动多路其他放电形式提供借鉴思路。

参 考 文 献

- [1] Czernichowski A. Gliding Arc: Application to Engineering and Environment Control[J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(6):1301-1310
- [2] Yukihiro K, Bent F S, Tom L A, et al. Adhesion Improvement of Glass-Fibre-Reinforced Polyester Composites by Gliding Arc Discharge Treatment[J]. Adhesion, 2013, 89(06):433-459
- [3] Kusano Y, Teodoru S, Leipold F, et al. Gliding Arc Discharge—Application for Adhesion Improvement of Fibre Reinforced Polyester Composites[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(22-23):5579-5582
- [4] Yukihiro K, Tom L A, Helmuth L T, et al. Plasma Dry Reforming of Methane in an Atmospheric Pressure AC Gliding Arc Discharge: Co-Generation of Syngas and Carbon Nanomaterials[J]. Materials Engineering Innovation, 2014, 5(02):122-137
- [5] Xia Y, Lu N, Wang B, et al. Dry Reforming of CO₂-CH₄ Assisted by High-Frequency AC Gliding Arc Discharge: Electrical Characteristics and the Effects of Different Parameters[J]. Hydrogen Energy, 2017, 42(36): 22776-22785
- [6] Bo Z, Yan J, Li X, et al. Scale-up Analysis and Development of Gliding Arc Discharge Facility for Volatile Organic Compounds Decomposition[J]. Hazardous Materials, 2008, 115(03):494-501
- [7] Wang W, Mei D, Tu X, et al. Gliding Arc Plasma for CO₂ Conversion: Better Insights by a Combined Experimental and Modelling Approach[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 330(15): 11-25
- [8] Tu X, Christopher J W. Plasma Dry Reforming of Methane in an Atmospheric Pressure AC Gliding Arc Discharge: Co-Generation of Syngas and Carbon Nanomaterials[J]. Hydrogen Energy, 2014, 39(18):9658-9669
- [9] 李陈莹, 陈杰, 张伟, 等. 电缆表面温度对电弧引燃电缆及火焰蔓延影响[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(02):180-184
- [10] Li C, Chen J, Zhang W, et al. Influence of Arc Size on the Ignition and Flame Propagation of Cable Fire[J]. Energies, 2021, 14(18):56-75
- [11] Bobzin K, Öte M. Modeling Multi-Arc Spraying Systems [J]. Therm Spray Tech, 2016, 25:920-932
- [12] Huang R, Yi Y, Guo G. Investigation of Multielectrode Multiloop with Series Capacitance Pulse Generator for EDM[J]. 2020, 109:143-154
- [13] Lin Q, Zhao Y, Duan W, et al. Characteristics of Non-Thermal AC Arcs in Multi-Arc Generator[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(12):259-271
- [14] Tetsuro B, Takeuchi Y. Study of 6 Electrodes Gliding Arc Discharge Configuration[J]. Electrical Review, 2012, 88(06):86-88
- [15] Abu O A, Ghanim M, Sheikh E M, et al. Effects of Processing Parameters of Tungsten-Copper Composites[J]. Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 35:207-212
- [16] Warrington A, Van C. Reactance Relays Negligibly Affected by Arc Impedance[J]. Electrical World, 1931, 19: 502-505