

介质阻挡放电负载调功原理分析

邵建设^{1,2}, 严萍¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

Analysis on the Load Power Regulation Principle of Dielectric Barrier Discharging

SHAO Jian-she^{1,2}, YAN Ping¹

(1. Institute of Electrical Engineering for Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

摘要: 利用电路谐振产生高频高幅值的正弦波电压的介质阻挡放电电源, 通过调整电源的逆变电路的直流输入电压, 同时逆变电路开关频率跟踪电路谐振频率, 可以实现介质阻挡放电负载功率的近似线性调整。研究表明, 随着逆变器直流输入电压的增加, 负载放电电流逐渐增大, 负载功率逐渐接近于给定直流电压下的电源输出的最大功率, 负载功率因数逐渐增大, 逆变器输出因数逐渐接近于 1, 电源效率逐渐增加。

关键词: 介质阻挡放电; 高频高压交流电源; 谐振; 频率跟踪; 线性调功

中图分类号: TM832

文献标识码: A

Abstract: Through circuit resonance, dielectric barrier discharge power supply outputs a high frequency and high voltage of sine waveform to produce dielectric barrier discharge. Through DC input voltage regulation and circuit resonant frequency tracing, approximate linear load power regulation can be realized by the power supply. With the increasing of inverter DC input voltage, load discharging current, load power factor and the power supply efficiency increases gradually; load power approaches the maximal output power of the power supply gradually in the certain DC input voltage, and the inverter output power factor approaches to 1 gradually.

Key words: dielectric barrier discharge; high frequency and high voltage power supply; circuit resonance; frequency tracing; linear load power regulation

0 引言

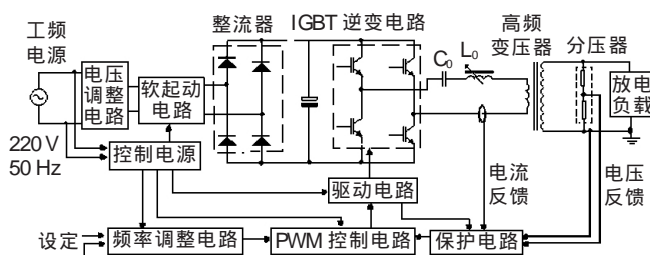
介质阻挡放电(简称 DBD)是产生非平衡的低温等离子体的一种很有效的方法。在很多工业等离子体的应用中, 要求功率密度均匀和适中的低温等离

子体。介质阻挡放电负载性质为一个非线性负载, 其电路等效参数随着外加电源电压的幅值、频率和波形的不同而不同^[1-3]。这就要求电源的输出电压参数能够灵活调整, 从而达到灵活调整等离子体反应器的放电功率的目的^[4]。应用一种电压幅值和频率都可以单独调整的高频高压交流电源用于研究大气压下空气中的介质阻挡放电特性, 研究了电源逆变电路交流侧电路处于谐振状态下的负载阻抗和电源阻抗匹配关系^[5]。研究结果表明: 在调整电源的逆变电路直流输入电压的同时, 对逆变电路采取频率跟踪, 可以实现介质阻挡放电负载功率的近似线性调整。

1 介质阻挡放电电源负载调功原理

1.1 介质阻挡放电装置及其等效电路

图 1(a) 为介质阻挡放电实验系统原理框图。负载为一个放电间隙为 8 mm、放电区域长度为 500 mm 的同轴结构介质阻挡放电等离子体反应器。电源装置的工作原理是, 采用 AC-DC-AC 主电路结构, 通过电路谐振, 将工频 220 V 交流电压变成幅值足够高的高频正弦波电压, 作用在 DBD 等离子体反应器上产生气体放电。 C_0 为隔直电容; L_0 为可调谐振电感。



(a)

收稿日期: 2006-02-17; 修回日期: 2006-04-17

作者简介: 邵建设(1970-), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 在读博士研究生, 主要从事高频高压电源技术及在气体放电中的应用的研究。

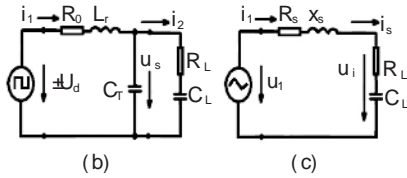


图1 介质阻挡放电实验电源电路原理框图及其等效电路

图1(b)为DBD等离子体发生器及其介质阻挡放电电源等效电路原理图。将IGBT逆变电路直流侧用一个幅值为 u_d 、输出直流电流为 i_d 的等效电压源替代。高频变压器用其等效电路替代,设 R_2, L_2, C_2 和 R_3, L_3, C_3 分别为高频变压器低压侧和高压侧的等效电阻、等效漏感和等效电容。 n 为变压器的变比。将高频变压器的高压侧分布参数及负载归算到低压侧。由于实际的高频高压变压器的原边线圈的匝数相对副边的线圈匝数很小, $C_2 \ll C_3$,所以可忽略 C_2 。将等离子体反应器的各等效电路参数也规算到高频变压器的低压侧。 u_1, i_1 分别为逆变器输出电压、输出电流。 u_s, i_s 分别为归算到变压器低压侧的等离子体反应器的负载电压和放电电流。当等离子体发生器的放电状态达到稳定状态后,负载电路(归算到变压器低压侧)可以等效为一个电阻 R_L 和电容 C_L 相串联的形式,电路可进一步简化为图1(c)。

其中: $R_0=R_2+(R_3/n^2)$, $L_1=L_0+L_2+(L_3/n^2)$, $C_1=n^2C_3$

从负载侧向电源侧看去的电源的等效阻抗为:

$$Z_S=R_S+jX_S=(R_0+j\omega_s L_1) // [1/(j\omega_s C_1)]$$

式中:“//”表示并联, ω_s 为开关角频率。

负载的等效阻抗为:

$$Z_L=R_L+jX_L=R_L + j[1/(\omega_s C_L)]$$

1.2 谐振状态下负载功率、电源效率与负载阻抗之间的关系

当逆变电路开关频率 f_s 与电路的固有频率 f_r 相等时,从逆变电路交流侧向负载电路看去,电路产生谐振。此时, $X_L=-X_S$,整个电路呈阻性。

逆变器输出交流侧输出电压可以用逆变器输出方波电压的基波电压表示为:

$$u_1=4U_d \sin(\omega_s t) /$$

谐振电流有效值为:

$$I=4U_d / [(R_S+R_L)] \quad (1)$$

负载功率为:

$$P_L=16R_L U_d^2 / [(R_S+R_L)]^2 \quad (2)$$

电源效率为:

$$=\frac{R_L}{R_S+R_L} \quad (3)$$

图2(a)为负载电抗和电源电抗相等时,负载功率、电源效率随着负载电阻和电源内阻的比值的变化曲线($U_d=80V, R_S=4.6, X_S=X_L=2$)。图2(b)为负载电阻和电源内阻相等时,负载功率、电源效率随着负载电抗和电源电抗的比值的变化曲线($U_d=80V,$

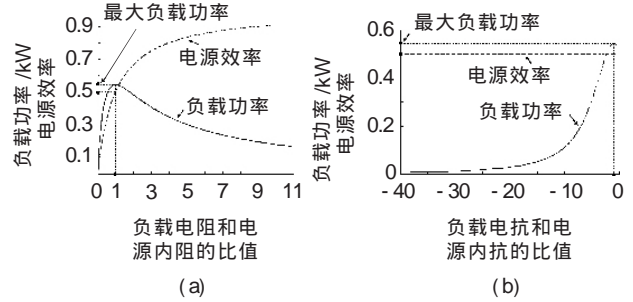


图2 电源效率、负载功率随着负载电阻、负载电抗的变化图

$R_L=R_S=4.6, X_S=2$)。

从图2(a)中可以看出,电源的效率随着负载等效电阻 R_L 的增加而逐渐增大。在 $R_L < R_S$ 时,负载功率随着负载电阻的增大而逐渐增大;当 $R_L > R_S$ 时,负载功率随着负载电阻的增大而逐渐减小;在 $R_L=R_S$ 时,负载获得最大功率。从图2(b)中可以看出,当 $R_L=R_S$ 时,电源效率保持50%不变。在 $X_L > -X_S$ (负载为容性)时,负载功率随着负载电抗的减小而逐渐增大;当 $X_L < -X_S$ (负载为感性)大于电源内阻时,负载功率随着负载电抗的减小而逐渐减小;当 $X_L=-X_S$ 时,负载获得最大功率。

从图2中曲线可以看出,当电路产生谐振时,电路产生最大的电流,但负载不一定获得最大功率。当且仅当 $Z_L=Z_S^*$,即 $R_L=R_S, X_L=-X_S$ 时,负载获得最大功率,由式(2)计算出最大负载功率为 $P_{Lmax}=4U_d^2 / (R_S^2)$,但由式(3)计算出来此时的电源效率仅为50%。

2 实验结果及其分析

实验研究电路跟踪电路的谐振频率时,负载放电状态(负载电压、放电电流、放电功率、负载功率因数)、逆变器输出有功、逆变器输出因数和电源效率随着逆变器输入电压的变化规律,见图3。图3(a),3(b)和3(c)中虚线左侧为负载发生放电对应的曲线部分;虚线右侧为负载发生了放电对应的曲线部分。

(1) 电路谐振频率和负载性质的变化规律

当 $U_d < 33V$ 时,不发生放电,电路的谐振频率(约21.3kHz)保持不变。从图3(b)可以看出,负载未放电之前,负载功率很小,基本上不消耗有功,负载呈容性,且负载电容量保持不变。当 $U_d > 33V$,开始发生放电,负载等效电容量增大,电路谐振频率急剧减小(约为18.5kHz)。随后当逆变器输入直流电压在一个小的变化范围($33V < U_d < 133V$)之内,负载等效电容量维持相对稳定,电路谐振频率保持相对稳定(约为18.5kHz)。随着逆变器输入直流电压的继续增大($U_d > 133V$),负载电容量又急剧降低,并在 U_d 继续增大的一个小的变化范围内,负载电容量保持相对稳定,电路的谐振频率也保持相对稳定(约为

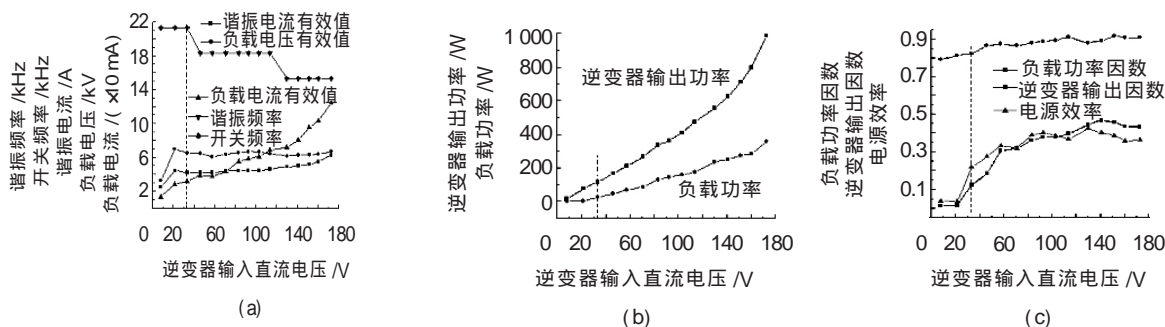


图3 介质阻挡放电电源负载功率调整实验结果

15.3 kHz)。

从图 3(b) 中可以看出, 发生放电后, 随着逆变器输入直流电压的增加, 负载消耗的有功近似线性增加, 负载功率因数也逐渐增加。可见, 发生放电后, 负载为阻容性。

从图 3(a) 中可以看出, 放电前, 负载电压随着直流电压 U_0 的增加而增加; 而在放电后, 负载电压随着 U_0 增加维持相对稳定, 负载电流随着 U_0 的增加而近似线性增加, 因此可以看出负载等效电阻随着 U_0 的增加有逐渐减小的趋势。

(2) 谐振电流、负载电流和负载电压的变化规律

从图 3(a) 可以看出, 随着 U_0 的增加, 谐振电流以较小的速率逐渐增大, 负载电流以较大的速率逐渐增大, 负载电压在放电后相对保持稳定。根据式 (1), U_0 逐渐增加, 负载等效电阻逐渐减小, 电源等效电阻保持近似不变, 因而谐振电流逐渐增大。负载电压 $U_L = |Z_L|$, 负载等效阻抗的大小有逐渐减小的趋势, 谐振电流有逐渐增大的趋势, 因而负载电压随着逆变器输入直流电压的增大保持相对稳定。

(3) 逆变器输出功率、负载功率和逆变器输出因数的变化规律

从图 3(b), 3(c) 可以看出, 逆变器的输出功率和负载功率都随着逆变器的输入直流电压的增加逐渐增大, 负载功率因数逐渐增大, 电源效率也逐渐增大并接近于 50%。由于电路采用了频率跟踪, 逆变电路交流侧等效电路负载性质接近阻性, 因而逆变器输出因数(数值大于 0.8)逐渐增大并逐渐接近于 1。因为随着逆变器输入直流电压的增加, 负载等效电阻和等效电抗都有减小的趋势, 并且逐渐接近于电源的等效阻抗, 所以从图 2(a)、(b) 中可以看出, 随着逆变器输入直流电压的增加, 电源效率逐渐降低, 并且逐渐接近 50%。负载功率逐渐增大且逐渐接近于在给定直流电压下的电源输出的最大功率值。

3 结语

介质阻挡放电高频高压交流电源, 在采用调整

逆变电路输入直流电压的同时, 逆变电路开关频率始终跟踪电路谐振频率的方法, 实现负载功率近似线性调整。随着逆变器直流输入电压的增加, 逆变器输出功率近似线性增加; 逆变器输出因数(接近于 1)保持相对稳定; 负载电压在发生放电之前线性增加, 而在负载发生放电后保持相对稳定; 负载电流近似线性增加; 负载功率因素近似线性增加; 负载功率近似线性增加并且逐渐接近给定直流电压下的最大电源输出功率; 电源效率近似线性增加并且逐渐接近 50%。

可见, 介质阻挡放电电源逆变交流侧电路处于谐振工作状态时, 放电负载不一定获得最大功率, 仅当负载放电强度越大(负载电流越大, 放电强度越大), 负载等效阻抗趋于电源等效阻抗的共轭值时, 负载功率接近在给定逆变器直流输入直流电压下的电源输出的最大的功率, 但此时电源效率仅为 50%。

这种针对介质阻挡放电负载的负载功率调整方法, 能够输出高频的对称的正弦波高压而形成稳定的介质阻挡放电; 同时电源逆变电路开关器件工作在软开关状态, 可以减小器件的开关损耗; 开关频率可以得到提高, 输出正弦波高压的频率可以得到提高, 有利于减小高频升压变压器的体积, 提高电源的功率密度。因而, 这种介质阻挡放电负载功率调整方法是一种在实际的工业等离子体应用中可取的方法。

参考文献:

- [1] Roth J Reece, Rahel Jozef, Dai Xin, et al. The Physics and Phenomenology of One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAUGDP) Reactors for Surface Treatment Applications[J]. J.Phys. D: Appl. Phys. 2005, 38(4): 555-567.
- [2] 黄玉水, 胡长生, 张仲超, 等. 基于闭环控制策略的负载谐振型臭氧发生器电源[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 91-94.
- [3] 彭燕昌, 严萍. 介质阻挡放电大功率高频高压电源的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 35-36.
- [4] 李成榕, 王新新, 詹花茂, 等. 等离子体表面处理与大气压下的辉光放电[J]. 高压电学, 2003, 39(4): 46-51.
- [5] 周克定, 张文灿. 电工理论基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.