

大气压短间隙介质阻挡放电等效负载模型

王 帅, 邱 祁, 刘星亮, 胡斯登, 何湘宁
(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 大气压介质阻挡放电反应器的精确等效是影响电源参数准确设计的关键。现有的反应器等效模型通常未考虑介质等效电容在放电过程中的非线性变化,使得在大气压短间隙工况下模型精度受限。为解决这一问题,本文在传统非线性钳位模型的基础上根据放电的不同阶段将介质等效电容进行分段等效,并给出一种分段等效负载模型及其测量方法。同时,推导出带分段负载模型的电压源谐振变换器关键参数,并搭建了一台 1kW 谐振电压源样机。实验证明,当气隙长度大于 4mm 时,分段负载模型与传统的非线性钳位模型相近;在气隙长度更小时,分段模型准确度更高,有利于准确地描述负载放电功率与单周期放电时间等重要参数。

关键词: 反应器; 介质阻挡放电; 等效负载模型; 大气压; 短间隙

DOI: 10.12067/ATEEE1802035 **文章编号:** 1003-3076(2018)11-0009-06 **中图分类号:** TM46

1 引言

大气压下向两电极间插入绝缘介质并施加交流高压能形成可控的气体放电,这种放电称为大气压介质阻挡放电 (Dielectric Barrier Discharge, DBD)^[1,2]。DBD 是产生低温等离子体的有效手段,被广泛应用于气体处理、臭氧生成、材料表面改性等领域^[3,4]。DBD 电源是 DBD 应用中的关键环节,其输出功率、单周期放电时间等参数的精准设计依赖负载模型的精确等效,直接影响 DBD 电源在气体处理、材料改性等领域的应用效果^[5,6]。目前工业中常用 DBD 电源为断续 LC 谐振电压源,其典型拓扑如图 1 所示, R_a 和 C_a 分别为采样电阻和电容^[3]。

在空气条件下,大气压 DBD 通常表现为细丝放电形式^[7,8]。其放电电流波形不规则,单个周期内放电强度不断变化,这增加了负载等效电气模型建立的难度。尤其是在大气压短间隙工况下,反应器空间电场对放电状态的影响增大,负载等效难度增大,电源单周期放电时间、放电功率等参数准确设计挑战增大^[9]。由此造成的设计工作点偏移,降低了 DBD 在相关领域的应用效果^[10]。综上所述,建立适

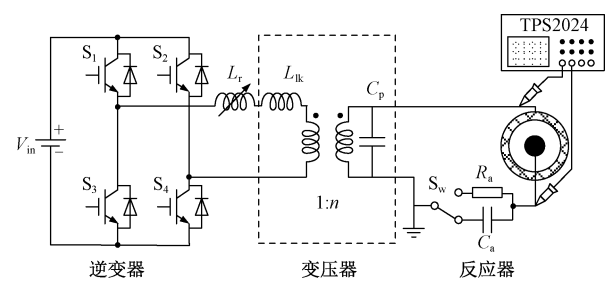


图 1 LC 谐振电压源拓扑
Fig. 1 Topology of LC resonant voltage source

当的大气压 DBD 等效负载模型对 DBD 电源精准设计及提高其在相关领域应用效果具有重要意义。

针对负载等效电气模型现有研究主要包括三类。文献[11,12]采用阻容并联模型,如图 2(a)所示。该模型将反应器等效为阻容并联模型,用等效电阻模拟放电通道的功率损耗。该模型简化了等效电路,但精度较低,且难以描述 DBD 负载放电特性。文献[13,14]采用受控源模型,如图 2(b)所示。该模型较为复杂,多用于定性描述 DBD 放电波形形貌,难以用于 DBD 电源参数计算和设计。目前较为常用的是非线性钳位模型,如图 2(c)所示。该模型

收稿日期: 2018-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777188)

作者简介: 王 帅(1993-),男,河南籍,硕士研究生,研究方向为特种电源及其工业化应用;
何湘宁(1961-),男,湖南籍,教授,博导,博士,研究方向为电力电子技术及其工业应用,包括大功率变换器与智能控制系统、特种电源及其工业应用(通讯作者)。

能较准确地描述一个放电周期内负载状态的切换,得到不同状态下的等效电路^[15,16],但该模型假设介质电容在放电期间保持不变,未考虑实际放电过程中随着介质表面电荷的积累,放电强度发生变化,进而使介质等效电容发生非线性变化^[13]。这导致其在大气压短间隙工况下精度受限,并最终导致基于此设计出的电源在特定工况下难以达到设计要求,影响电源应用效果^[9]。同时,文献[9,16]表明,放电电荷在介质表面积累将导致 DBD 李萨茹图形并非标准的平行四边形,介质等效电容随放电状态而发生阶跃变化,但并未对此提出相应的等效模型。为此,针对大气压短间隙 DBD 具有放电均匀、初始放电剧烈、放电强度衰减快等特点^[17,18],本文从传统非线性钳位模型的等效机理出发,给出了一种分段负载模型及其测量方法。实验表明,短间隙条件下,分段负载模型更加准确地描述了负载放电功率与单周期放电时间,有助于针对不同工况实现 DBD 电源的精准设计。当气隙长度大于 4mm 时,分段负载模型退化为传统的非线性钳位模型。

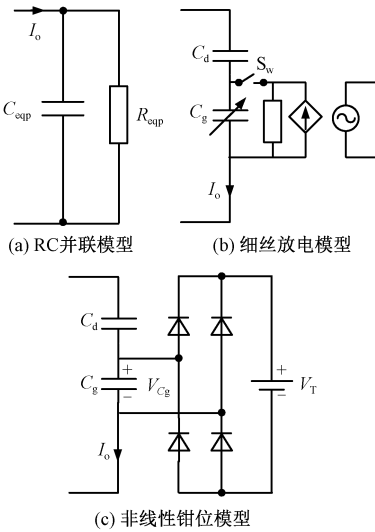


图 2 三种典型的介质阻挡放电负载模型
Fig. 2 Three typical load models of dielectric barrier discharge

2 反应器模型等效

考虑介质等效电容在不同放电阶段的非线性变化是提高大气压短间隙工况下传统非线性钳位模型精度的关键。本节在讨论传统非线性钳位模型的基础上,研究放电不同阶段反应器介质等效电容的形成机理,构建出一种新的 DBD 负载模型。

传统的非线性钳位模型如图 2(c)所示。 C_d 和 C_g 分别表示介质和气隙的等效电容,二极管和电压源 V_T 模拟了气隙电容 C_g 的双向钳位特性^[9],主要反映了反应器气隙电压的非线性行为。即当反应器气隙电压 V_{C_g} 小于 V_T 时,气隙不放电,此时等效模型中的钳位二极管不导通,反应器等效为 C_g 与 C_d 串联的模型。当气隙电压 V_{C_g} 达到 V_T 时,气隙开始放电,此时等效模型中的钳位二极管导通,反应器等效为 C_d 与电压源 V_T 串联的模型。等效模型参数 C_d 、 C_g 和 V_T 通常采用李萨茹法求取^[3]。可见,传统模型在负载放电和不放电阶段将介质电容均等效为 C_d ,该方法忽略了整体放电过程中放电强度的变化对介质电容的影响,因此,影响了分析的准确性。

实际放电时,随放电的进行,电荷积累在阻挡介质表面,形成内电场 E_r ,如图 3 所示,该电场与外加电压形成的电场将共同影响放电强度,进而影响介质等效电容。半个放电周期内,介质表面电荷积累和反应器外加电压的示意图如图 4 所示。放电开始时,由于前一个放电周期电荷的反向积累,介质表面积累电荷形成的电场与反应器外加电压形成的电场方向一致,此时介质表面电荷的存在增强了反应器气隙电场,放电较为剧烈。随着放电的进行,电荷在介质表面逐渐耗散并反向积累。设内电场 E_r 增加的速度为 δ_r ,由反应器外加电压而形成的电场为 E_m ,其增加的速度为 δ_m 。气隙内的电场强度为 $E_m - E_r$ 。当 δ_m 大于 δ_r 时放电得以维持,且放电强度较强。该阶段成为剧烈放电期,此时介质等效电容 C_{di} 较大,气隙电容 C_g 电压被钳位,反应器等效为介质电容和钳位电压源串联模型。当 δ_m 等于 δ_r 时气隙电场强度达到最强。当 δ_m 小于 δ_r 时气隙电场减小,气隙放电强度迅速减弱,该阶段成为放电衰减期。此时,气隙放电细丝减少,介质电容等效面积减小,介质等效电容减小为 C_{dd} ,模型等效为气隙电容 C_g 和介质电容 C_{dd} 串联的模型。由此可以看出,介质电容 C_d 在整个放电过程中存在非线性变化过程。

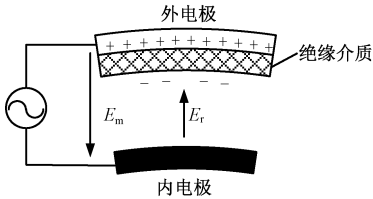


图 3 介质表面电荷积累示意图
Fig. 3 Schematic diagram of charge accumulation on surface

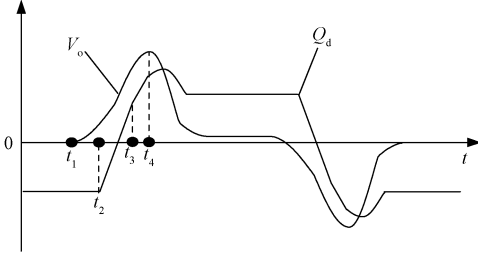


图4 电荷积累与外加电压曲线

Fig. 4 Charge accumulation and applied voltage curve

合并以上三个工作状态,得到大气压短间隙介质阻挡放电分段模型,如图5所示。模型由气隙电容、气隙钳位电压源和可变介质电容构成。分段负载模型将负载的整个工作过程划分为三个阶段,介质电容按工作阶段拆分成两个不同的值。其中当气隙电容电压达到钳位电压 V_T 后,气隙开始放电,气隙电压被钳位至 V_T 。当反应器施加电压大于放电强度转换电压 V_{ch} 时,串联介质电容容值由 C_{di} 变为 C_{dd} 。与图2(c)中的传统模型相比,分段模型更加精确地描述了负载在不同工作阶段的等效电容值,因此在定量分析电源参数和放电参数时具有更高的准确性。

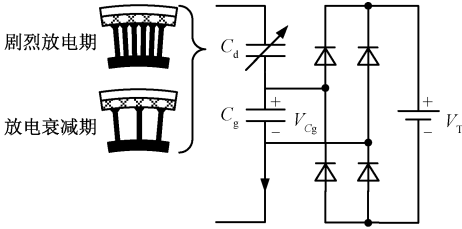


图5 分段负载模型

Fig. 5 Piecewise load model

以电源输出电压 v_o 为横轴,以流过采样电容 C_a 的电荷 q_o 为纵轴,可绘出分段负载模型 $Q-V$ 李萨如图形,如图6所示。与传统模型不同,理想分段模型的李萨如图形为六边形。其中 AB 段代表未放电阶段,其斜率为 k_1 ; BC 段代表剧烈放电期,其斜率为 k_2 ; CD 段代表放电衰减期,其斜率为 k_3 。BC 与横轴的交点为气隙钳位电压 V_T ,C 点对应的电压为放电转换电压 V_{ch} 。由几何关系可得气隙电容和介电电容满足: $C_g = k_1 k_2 / (k_1 + k_2)$, $C_{di} = k_2$, $C_{dd} = k_3$ 。

3 电源关键参数描述

用图5中的分段负载模型替换图1中的负载,可得 LC 谐振电压源供电条件下系统拓扑。采用文献[3]的时域法对系统状态进行分段描述,通过求

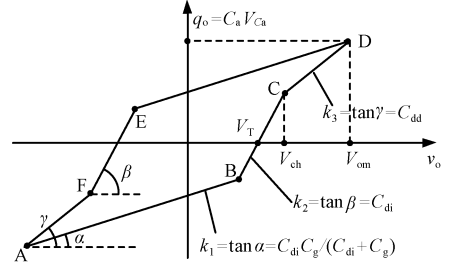


图6 分段负载模型李萨如图形示意

Fig. 6 Piecewise load model Lissajous graphics

解时域系统状态方程,可得系统剧烈放电期时间 T_i 、放电衰减期时间 T_d 和放电功率 P 的表达式为:

$$T_i = \sqrt{L_{ts} C_s} \left(\arcsin \frac{V_{ch} - V_{ins}}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} - \arctan \frac{K_1}{K_2} \right) \quad (1)$$

$$T_d = \sqrt{L_{ts} C_m} \arctan \left(- \frac{\sqrt{(C_s/C_m)[K_1^2 + K_2^2 - (V_{ch} - V_{ins})^2]}}{V_{ch} - V_{ins}} \right) \quad (2)$$

$$P = f_s \left\{ (C_{di} - C_{dd}) (V_{om} - V_{ch})^2 + 4 C_{di} V_T V_{om} - \frac{(C_{di} + C_g) [2 C_{di} V_T - (C_{di} - C_{dd}) (V_{om} - V_{ch})]^2}{C_{di}^2} \right\} \quad (3)$$

式中

$$K_1 = (V_T - V_{Cgs}) \frac{C_g + C_{di}}{C_{di}} - (V_{os} + V_{ins})$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{2 C_f}{C_s} (V_T - V_{Cgs}) (V_{os} + V_{ins}) \cdot \sqrt{\frac{C_{di} + C_g}{C_{di}} - (V_T - V_{Cgs})^2 \left(\frac{C_{di} + C_g}{C_{di}} \right)^2}}$$

$$C_s = C_p + C_{di}, C_m = C_p + C_{dd}$$

$$C_f = \frac{C_p + C_{di} C_g}{C_{di} + C_g}$$

V_{ins} 和 L_{ts} 分别为输入电压 V_{in} 和变压器原边侧等效电感折算到变压器副边的值; V_{Cgs} 、 V_{os} 分别为气隙电容电压和电源输出电压初始值; f_s 为逆变器工作频率; V_{om} 为电源输出电压峰值。则分段钳位模型下,放电总时间为 $T_{dis} = T_i + T_d$ 。放电时间 T_{dis} 和平均功率 P 是电源设计的关键参数,也是本文检验分段模型准确度的主要依据。

4 实验验证

基于图1的实验电源拓扑,搭建大气压 DBD 实验系统,如图7所示。系统由电源、反应器和测试环节构成。电源为带升压变压器的交流谐振电压源,

逆变器工作频率为 20 ~ 50kHz 可调,电源输出电压峰峰值为 0 ~ 25kV 可调。反应器为同轴圆柱式反应器,其中内电极为不锈钢圆柱,外径为 30mm,长度为 600mm;中间绝缘介质为石英管,石英管内径和外径分别为 34mm 和 40mm,长度为 600mm;外电极 of 铜网,其内径和外径分别为 40mm 和 41mm,长度为 400mm。采用 Tektronix 数字示波器 TDS2014C 记录系统放电李萨茹图形,采用 Canon 700D 记录放电照片。该实验系统下,典型的放电李萨茹图形如图 8 所示。理想的放电李萨茹图形近似为六边形,实际测得的李萨茹图形在放电状态转换处呈现弧形过渡。对应的放电图像和放电波形分别如图 9、图 10 所示。由图 9 可以看出,此时的放电状态为典型的细丝放电^[7,8]。

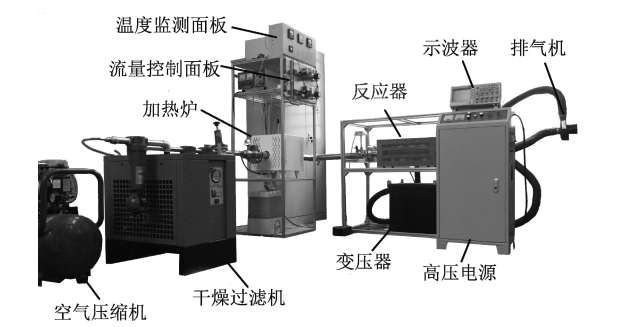


图 7 实验装置实物图

Fig. 7 Physical diagram of experimental device

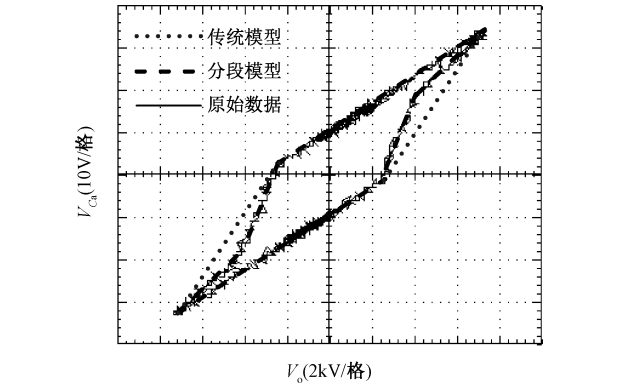


图 8 短间隙介质阻挡放电李萨茹图形

Fig. 8 Dielectric barrier discharge Lissajous figure in short gap

由式(1)~式(3)可知,通过控制串联电感值 L 和输出电压幅值 V_{om} 可以实现单周期放电功率和放电时间的解耦控制。为了验证模型的准确性,本文依次调节 L 和 V_{om} ,从而改变单周期放电时间和放电功率。为了验证模型的准确性,需要准确测量实际的放电时间和放电功率。单周期放电时间的测量常

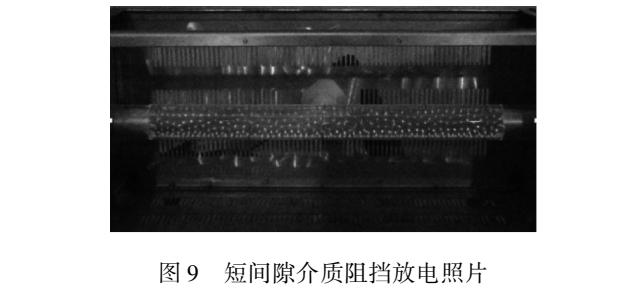


图 9 短间隙介质阻挡放电照片

Fig. 9 Short gap dielectric barrier discharge photo

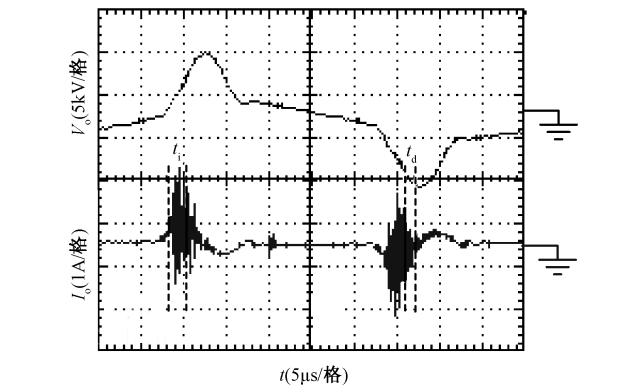


图 10 电压源谐振变换器输出电压电流波形

Fig. 10 Voltage and current waveform of voltage source resonant converter

用直接测量法,在实际的放电波形上直接读取^[9],如图 10 所示。单周期放电功率的测量常采用面积积分法,即将李萨茹图形所围的面积进行积分^[16]。将测量的结果与分段模型理论计算结果、传统非线性钳位模型理论计算结果进行对比,对比结果如图 11、图 12 所示。可见,分段钳位模型用于设计电源的放电时间和放电功率时具有更高的准确度。

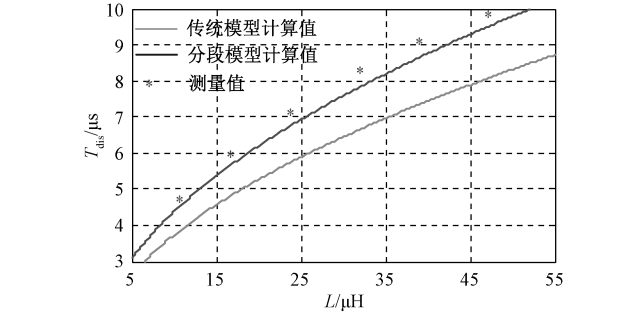


图 11 不同串联电感下理论值和测量值对比

Fig. 11 Comparison of theoretical values and measured values under different series inductors

由图 3 可知,反应器气隙长度对介质表面积累电荷 E_s 影响巨大。为了验证在不同气隙长度条件下分段模型的适用性,本文在电源输出电压和频率

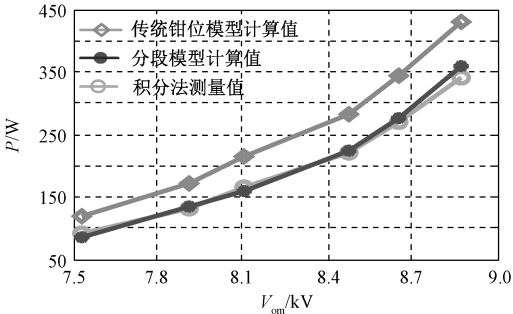


图 12 不同输入电压下模型计算值与积分值对比
Fig. 12 Comparison of calculated value and integral value under different input voltages

分别为 8kV 和 25kHz 条件下,在 2.0 ~ 4.5mm 范围内逐渐调节反应器气隙长度 L_e ,得到分段模型参数随气隙长度的变化如图 13 所示。

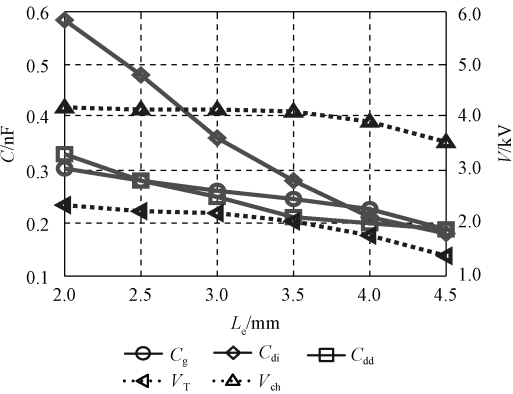


图 13 气隙长度对等效模型参数的影响
Fig. 13 Influence of air gap length on equivalent model parameters

可以看出, V_T 和 V_{ch} 随 L_e 的上升而下降。 C_g 随 L_e 的上升而下降。 C_{di} 随 L_e 上升而迅速下降, C_{dd} 随 L_e 的上升而缓慢下降, L_e 值越大 C_{di} 和 C_{dd} 越为接近,李萨茹图形越接近四边形。当 L_e 大于 4mm 时, C_{di} 和 C_{dd} 几乎相等,此时系统放电的李萨茹图形变为平行四边形,分段模型和传统钳位模型等效。

5 结论

本文针对大气压短间隙介质阻挡放电给出一种分段等效负载模型及其测量方法,并结合分段负载模型,给出了断续电流模式下谐振变换器的关键参数。实验证明,在大气压短间隙条件下,与非线性钳位模型相比,该模型具有更高的精度,可以用于 DBD 电源参数的精准设计。最后研究了气隙长度对该等效模型参数的影响。实验表明,随着气隙长

度的增大,系统放电李萨茹图形由平行六边形变为平行四边形,分段模型逐渐趋于传统钳位模型。

参考文献 (References):

[1] 邵涛,章程,王瑞雪,等 (Shao Tao, Zhang Cheng, Wang Ruixue, et al.). 大气压脉冲气体放电与等离子体应用 (Atmospheric pressure pulse gas discharge and plasma application) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (3): 685-705.

[2] 李清泉,房新振,许光可,等 (Li Qingquan, Fang Xinzen, Xu Guangke, et al.). 沿面型介质阻挡放电的电气特性 (Electrical characteristics of surface dielectric barrier discharge) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (1): 26-29.

[3] 陈昌仪 (Chen Changyi). 介质阻挡放电聚合物表面改性的谐振变换器电流波形研究 (Study on current waveform of dielectric barrier discharge polymer surface modified resonant converter) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2017.

[4] 唐雄民,余亚东,李思琪,等 (Tang Xiongmin, Yu Yadong, Li Siqi, et al.). 典型调节方式下串联谐振供电的 DBD 型臭氧发生器负载调节特性研究 (Research on load regulation characteristics of DBD type ozone generator under typical adjustment strategies) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (5): 54-58.

[5] 郝世强,陈昌仪,李武华,等 (Hao Shiqiang, Chen Changyi, Li Wuhua, et al.). 实现全功率范围能量压缩的电流源谐振型等离子体驱动源 (A current source resonant plasma drive source for full power range energy compression) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (24): 25-34.

[6] 钟侃,聂勇,汪晶毅,等 (Zhong Kan, Nie Yong, Wang Jingyi, et al.). 填充石英球对 DBD 等离子体转化 NO 的影响 (Effect of packed quartz pellets on DBD plasma treating with NO) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2007, 26 (4): 71-74.

[7] 王新新 (Wang Xinxin). 介质阻挡放电及其应用 (Dielectric barrier discharge and its application) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2009, 35 (1): 1-11.

[8] Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications [J]. Plasma Chemistry & Plasma Processing, 2003, 23 (1):

- 1-46.
- [9] 赵斌, 梁翠翠, 赵剑利, 等 (Zhao Bin, Liang Cuicui, Zhao Jianli, et al.). 板板式介质阻挡放电等离子体直接合成过氧化氢研究 (Direct synthesis of hydrogen peroxide using plate-plate type dielectric barrier discharge) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2009, 28 (3): 73-76.
- [10] Zille A, Oliveira F R, Souto A P. Plasma treatment in textile industry [J]. Plasma Processes & Polymers, 2015, 12 (2): 98-131.
- [11] Hothongkham P, Kinnares V. Measurement of an ozone generator using a phase-shifted PWM full bridge inverter [A]. The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA [C]. 2010. 1552-1559.
- [12] Kinnares V, Hothongkham P. Circuit analysis and modeling of a phase-shifted pulsewidth modulation full-bridge-inverter-fed ozone generator with constant applied electrode voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (7): 1739-1752.
- [13] Williamson J M, Trump D D, Bletzing P, et al. Comparison of high-voltage AC and pulsed operation of a surface dielectric barrier discharge [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39 (20): 4400-4406.
- [14] Shao Tao, Long Kaihua, Zhang Cheng, et al. Experimental study on repetitive unipolar nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41 (21): 215203.
- [15] 祁泽武, 张伟, 李平林, 等 (Qi Zewu, Zhang Wei, Li Pinglin, et al.). DBD 高频高压放电电源的设计及其放电特性 (Design and discharge characteristics of DBD high frequency and high voltage discharge power supply) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (3): 807-812.
- [16] 赵卫东, 蔡忆昔, 韩文赫, 等 (Zhao Weidong, Cai Yixi, Han Wenhe, et al.). 同轴圆柱结构 DBD 装置放电功率的模拟计算及实验研究 (Simulation and experimental study of the discharge power of a coaxial cylindrical DBD device) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2010, 46 (6): 25-28.
- [17] 郝艳捧, 刘耀阁, 郑彬 (Hao Yanpeng, Liu Yaoge, Zheng Bin). 大气压下氦气介质阻挡辉光放电过程的 Lissajous 图形分析 (Lissajous graphic analysis of helium gas dielectric barrier glow discharge at atmospheric pressure) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2012, 38 (5): 1025-1032.
- [18] Fricke K, Steffen H, Von Woedtke T, et al. High rate etching of polymers by means of an atmospheric pressure plasma jet [J]. Plasma Processes & Polymers, 2011, 8 (1): 51-58.

Equivalent load model of dielectric barrier discharge in short gap at atmospheric pressure

WANG Shuai, QIU Qi, LIU Xing-liang, HU Si-deng, HE Xiang-ning
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The exact equivalent of atmospheric pressure dielectric barrier discharge reactor is the key to the design of power supply parameters. The common equivalent model of the reactor does not take into account the nonlinear variation of the dielectric equivalent capacitance during the discharge process, and the precision is limited under the short gap condition of the atmospheric pressure. In order to solve this problem, based on the traditional nonlinear clamping model, the equivalent dielectric capacitance of the dielectric is made to be equivalent according to the different stages of the discharge. And a piecewise equivalent load model and its measurement method are proposed, and the key parameters of the voltage source resonant converter with a piecewise load model are derived. Then a prototype of 1kW resonant voltage source is set up. The experiment shows that compared with the traditional nonlinear clamping model, the segmented model describes the load discharge power and the single period discharge time more accurately. When the air gap length is more than 4mm, the piecewise load model is degenerated to the traditional nonlinear clamping model.

Key words: reactor; dielectric barrier discharge; equivalent load model; atmospheric pressure; short gap