

飞机电脉冲除冰电源系统的研究

陈鹏 葛红娟 杨宗翰

(南京航空航天大学 南京 210016)

摘要: 为了使电脉冲除冰(electro-impulse de-icing, EIDI)系统中的高压储能电容器组高效、安全地充电,研究了一种基于DSP控制串联谐振型拓扑结构的脉冲电源。通过建立不同工作模式时的等效电路,理论分析并推导了电容器组的平均充电电流,同时通过合理设计脉冲电源的工作频率和谐振元件参数,使其工作在欠谐振状态,从而实现在较宽电压范围内的电容器的恒流充电和零电流软开关工作。因此当除冰用传感器检测到机翼表面有冰层时,即可使脉冲电源工作以达到除冰要求。

关键词: 电容器充电电源;串联谐振;恒流充电

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research on power supply of the aircraft electro-impulse de-icing system

Chen Peng Ge Hongjuan Yang Zonghan

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to achieve the high voltage capacitor bank of the electro-impulse de-icing system efficiently and safely charging, a series resonant topology pulse power supply based on DSP is researched in this paper. The average charging current of the capacitor bank is concluded by establishing the equivalent circuit of the different working mode, then the operating frequency and resonant parameters are designed, which ensure power supply work in under resonance state, in order to achieve a wide range of constant current charging and zero current soft switching state. Therefore, when the sensor detects the ice of the wing surface, the pulse power supply will work to de-icing.

Keywords: capacitor charging power supply; series resonant; constant current charging

1 引言

飞机结冰主要发生在机翼、发动机进气道、风挡玻璃和测量用各种传感器头等部位^[1]。结冰不仅增加了飞机的重量,而且改变了飞机的气动性能,可能引发飞行事故,因此需要检测蒙皮表面的结冰情况,以触发除冰系统脉冲电源来除/防冰,将结冰带来的危害降低到最低。

以往对电脉冲除冰系统的研究主要集中于利用电动力学模型进行除冰预测及使用有限元分析软件进行电磁场分析^[2-3],很少有人分析与研究除冰系统的脉冲电源^[4]。何况仅有的设计了电脉冲除冰电源系统的相关学者^[5],还是利用继电器和断路器等传统的电气方法实现的,而且还不能实现自动充放电。因此设计了一串联谐振型可实现自动充放电的脉冲电源,通过合理设计脉冲电源的谐振参数,使主

功率管工作在零电流开通和关断状态,从而减少了电源的开关损耗。

2 电脉冲除冰系统原理简介

飞机电脉冲除冰系统原理如图1所示,当电容器充至额定电压时,触发晶闸管导通使电容器向脉冲线圈放电。由于脉冲线圈本身的电阻、电感值均很小,因此放电过程中脉冲线圈流过瞬时大电流,同时脉冲电流在线圈周围产生瞬变磁场^[6]。因脉冲线圈和铝蒙皮间的间距很小,瞬态磁场会在铝板蒙皮上感应出很大的涡流,涡流与瞬态磁场相互作用产生持续时间极短、峰值可达到上百甚至上千牛顿的电磁力作用在飞机蒙皮上。此作用力产生的强加速度可使机翼表面的冰层与蒙皮剥落,并在气流的作用下将其带走以达到除冰效果。

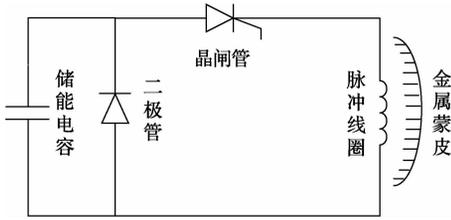


图 1 电脉冲除冰系统原理

3 串联谐振型充电电源设计

3.1 电路原理分析

图 2 为本文设计的应用于电脉冲除冰系统的串联谐振型充电电源原理图。其中带有反并联二极管的 4 只 IGBT 主功率管 Q1~Q4 构成了全桥逆变电路， L_r 为串联谐振电感，包含了变压器的漏感， C_r 为串联谐振电容，T 为高频升压变压器，二次侧对一次侧的变比为 n ， C 为高压储能电容器组，三相输入电压为航空用 115V/400 Hz^[7-8]。

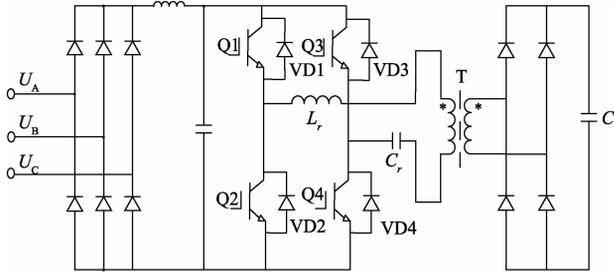


图 2 全桥串联谐振型充电电源原理

图 3 给出了脉冲宽度控制的全桥串联谐振型脉冲电源工作于断续工作模式，即 $f_s < \frac{1}{2}f_r$ 时的谐振电流工作波形，其中 f_s 为开关频率， $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ 为谐振频率。

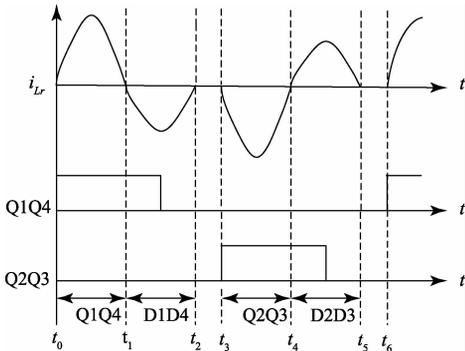


图 3 断续模式的谐振电流工作波形

由图可知断续模式下串联谐振电路包含 6 种工作模式，即开关管的导通顺序为：

Q1Q4→VD1VD4→Q2Q3→VD2VD3。其中在 Q1Q4

和 Q2Q3 导通之前还有个谐振电流为零的断续模式，分别对应为： $t_5 \sim t_6$ 和 $t_2 \sim t_3$ 。开关管导通的时候都是零电流开通，在关断的过程中由于谐振电流通过其反并联的二极管续流，即流过开关管的电流为零，因此串联谐振型脉冲电源工作于零电流(ZCS)软开关状态，降低了开关损耗，提高了电源效率。

3.2 恒流充电特性推导

在分析之前，先做如下假设：

- 1) 所有开关管和整流桥堆均为理想器件；
- 2) 所有电感、电容和高频变压器是理想元器件^[9]；
- 3) 逆变桥采用脉冲宽度控制，对桥臂同时导通和关断；
- 4) 利用变压器原副边等效的方法，把储能电容器组等效到原边，即 $C' = n^2 C$ ，等效之后充电电容作为串联谐振电容的一部分，只因 $C' \gg C_r$ ，即忽略掉它对谐振电容的影响，同时忽略高频变压器^[10]的分布电容影响；
- 5) 在一个开关周期内认为储能电容两端的电压保持不变，即当作一个电压源。

图 4 为经过等效处理后 4 种不同工作模式的等效电路图。其中 V_{in} 为三相交流电经过整流之后的等效输入电压。设谐振电感电流为 i_{L_r} ，谐振电容电压为 V_{C_r} ，等效充电电容 C' 上电压为 V_0 ，各元件的电压电流为关联参考方向。

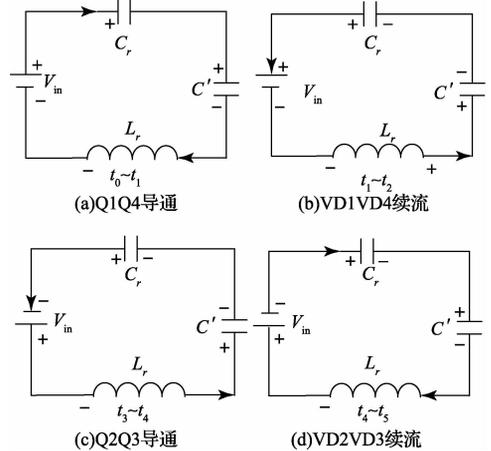


图 4 不同工作模式的等效电路模型

在电流正向谐振阶段，即 $t_0 \sim t_1$ Q1Q4 导通阶段，根据图 4(a) 所示等效电路，利用电路原理可得：

$$\begin{cases} \frac{di_{L_r}}{dt} = \frac{V_{in} - V_{C_r} - V_0}{L_r} \\ \frac{dV_{C_r}}{dt} = \frac{i_{L_r}}{C_r} \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{i_{L_r}}{C'} \end{cases} \quad (1)$$

每个开关周期开始时谐振电感电流均为零，即 $i_{L_r}(t_0) = 0$ 。假设 t_0 时刻谐振电容和充电电容的初值分别为：

$$V_{C_r}(t_0) = V_{C_r}(0), V_0(t_0) = V_C(0)$$

其中 $t_1 - t_0$ 为 $1/2$ 的谐振周期。

求解微分方程得:

$$\begin{cases} i_{L_r}(t_1) = 0 \\ V_{C_r}(t_1) = \frac{2C'(V_{in} - V_{C_r}(0) - V_0(0))}{C_r + C'} + V_{C_r}(0) \\ V_0(t_1) = \frac{2C_r(V_{in} - V_{C_r}(0) - V_0(0))}{C_r + C'} + V_0(0) \end{cases} \quad (2)$$

在该段时间内,储能电容器组的电压增量为:

$$\Delta V_{C'}(1) = \frac{2C_r(V_{in} - V_{C_r}(0) - V_0(0))}{C_r + C'} \quad (3)$$

按照模式(a)的求解过程,得到储能电容器在一个开关周期内的电压增量为:

$$\Delta V_{C'}(2 \cdot T_r) = \frac{8C_r C' - 8C_r^2}{(C_r + C')^2} V_{in} \quad (4)$$

根据库仑定理和变压器的相关知识,可得储能电容器的平均充电电流为:

$$\bar{I}_0 = \frac{C' \Delta V_{C'}(2 \cdot T_r)}{n \cdot T_s} = \frac{C'(8C_r C' - 8C_r^2)}{n T_s (C_r + C')^2} V_{in} \approx \frac{8C_r}{n \cdot T_s} V_{in} \quad (5)$$

由式(5)可知,当脉冲电源的开关频率、高频升压变压器的变比和谐振电容的容值确定之后,电容器的平均充电电流是保持不变的,即具有恒流充电特性。

3.3 谐振参数设计

本文设计了一储能电容器组为 $180 \mu\text{F}$ 、最大输出电压 $1\,000 \text{ V}$ 、最大输出功率为 600 W 的脉冲电源。其中工作频率为 15 kHz , $n=11:3$ 为高频升压变压器二次侧对一次侧的变比。根据式(5)及断续工作模式开关频率与谐振频率之间的关系可得,谐振电容 $C_r=0.07 \mu\text{F}$,取谐振电感 $L_r=230 \mu\text{H}$,包括变压器的漏感。

4 实验结果分析

基于以上分析的基础上,搭建了以 TMS320F28335 为控制核心的 PWM 调制硬件平台,分析了串联谐振型充电电源的工作过程,实验相关参数如下所示:

$C_r=0.07 \mu\text{F}$, $L_r=230 \mu\text{H}$, $U_{\text{omax}}=1\,000 \text{ V}$ 。使用泰克示波器检测到的脉冲充电电源实验波形如图 5 所示。

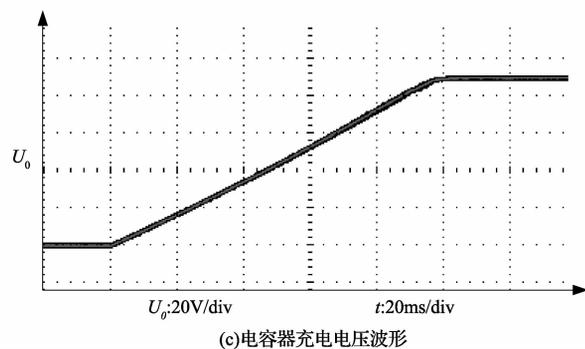
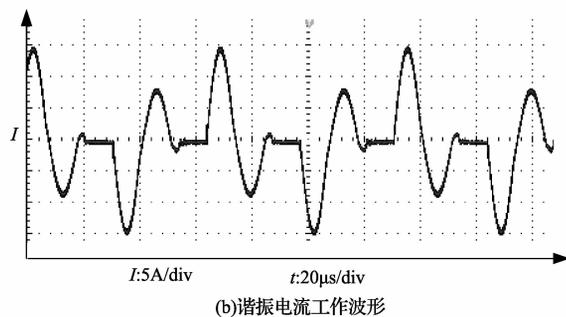
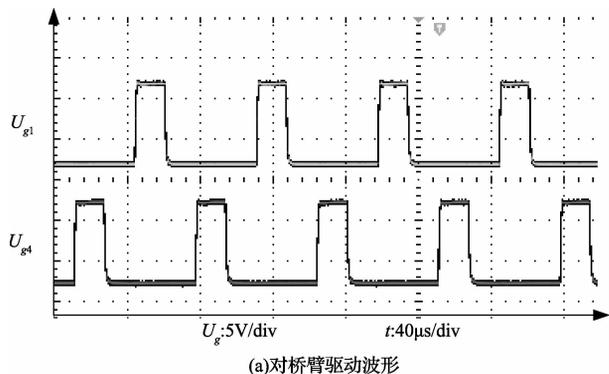


图 5 脉冲电源相关实验波形

由图 5(a)可知全桥逆变电路的对管互补导通。当脉冲电源工作于欠谐振模式时,谐振电流断续,如图 5(b)所示,每个谐振周期内都会发生两次谐振并最后回到零电流状态。由于开关管开通前,电路处于电流为零的断流工作状态,即零电流开通,而关断时谐振电流通过功率管反并的二极管续流,同样工作于零电流关断状态,因此脉冲电源属于零电流开关(ZCS),减小了开关损耗,提高了工作效率。同时储能电容器的充电电压一直线性上升,且最终电压值达到了 $1\,000 \text{ V}$,如图 5(c)所示,即验证了串联谐振型充电电源具有恒流充电特性,同时达到了设计要求。

5 结 论

对串联谐振型脉冲电源进行理论分析,并推导了其具有的恒流充电特性,同时研制了一谐振型脉冲电源原理样机验证了设计的合理性和电路具有的恒流充电特性。在实际应用中当机翼表面除冰检测传感器监测到冰层时,除冰系统发出信号使充电电源工作,当电容器组充电至 $1\,000 \text{ V}$ 时触发电脉冲除冰电路工作,并在蒙皮表面产生小幅振动。因此电脉冲除冰电源系统进行多次的充放电即可除冰。

参考文献

- [1] 杜寒. 电脉冲除冰系统设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009:1-71.
- [2] 李广超,何江,林贵平. 电脉冲除冰(EIDI)技术研究[J]. 航空动力学报,2011,26(8):1728-1736.

(下转第 92 页)