南京航空航天大学

论文集

（二〇〇七年） 第15册

自动化学院

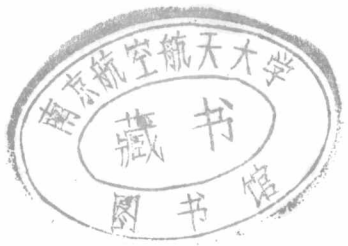
（第4分册）

南京航空航天大学科技部编

二〇〇八年三月

自动化学院

032 系



99	杨孟雄 阮新波	硕士 正高	032 032	Soft Start Strategy for Bi-directional DC-DC converter	IEEE Power Electronics Specialists Conference	2007
100	杨善水 黄陆建	副高 硕士	032 032	基于Saber环境的CCFL建模及仿真技术	电工技术学报	2007，22（10）
101	杨善水 魏秦华 黄仙密 居蓉蓉 王　莉	副高 正高 硕士 硕士 副高	032 外 032 032 032	REDUNDANCY TECHNOLOGY FOR AIRCRAFT MULTI-CHANNEL DC POWER SUPPLY SYSTEM	Trans. of NUAA	2007，24（4）
102	杨善水 王　莉 马双伟	副高 副高 硕士	032 032 032	一种新型结构机电混合式功率控制器技术研究	航空学报	2007,28（5）
103	马运东 阮新波 严仰光	副高 正高 正高	032 032 032	电压箝位ZVS推挽三电平直流变换器	东南大学学报	2007，37（4）
104	揭东华 马运东	硕士 副高	032 032	3kVA功率因数校正装置研制	电力电子技术	2007，41（7）
105	许　德 马运东 陈道炼	硕士 副高 正高	032 032 032	推挽正激式高频环节逆变器研究	电力电子技术	2007，41（5）
106	陈志辉 金艳梅 严仰光	副高 硕士 正高	031 031 031	微型无刷直流电动机的改进设计	微特电机	2007，35（9）
107	高　翔 陈志辉	硕士 副高	031 031	基于MSP430F1232的温湿度监控系统设计	电子元器件应用	2007，9(3)
108	高　翔 陈志辉	硕士 副高	031 031	利用ST16C2552实现DSP高速串行通讯口的扩展	国外电子元器件	2007.(8)
109	孙祖勇 陈志辉	硕士 副高	031 031	多路隔离输出全数字伺服系统开关电源设计	电源技术应用	2007，10(6)
110	孙祖勇 陈志辉	硕士 副高	031 031	全数字交流永磁伺服系统离散的模型的研究	中国电源学会第十七届学术年会	
111	苏国庆 葛红娟 刘伯华	硕士 正高 硕士	032 032 032	MC-PMSM矢量控制系统调制策略比较	电机与控制学报	2007　年50卷6期
112	葛红娟 苏国庆 薛　嘉	正高 硕士 硕士	032 032 032	输入不对称条件下矩阵变换器双电压控制策略	电工技术学报	2007　年22卷增期
113	葛红娟 吴海华 刘伯华	正高 正高 硕士	032 032 032	某型直升机发电机带不对称负载时的模型分析	直升机技术	2007 年150卷2期
114	王培强 葛红娟 张绍	硕士 正高 硕士	032 032 032	输入不对称条件下矩阵变换器调制策略的实现	电力电子技术	2007 年41卷4期
115	葛红娟 周　波 苏国庆 张　绍	正高 正高 硕士 硕士	032 032 032 032	矩阵变换器—永磁同步电机矢量控制系统的新型电流控制方法	电工技术学报	2007　年22卷3期
116	张　航 姚　远 肖华锋 谢少军	硕士 硕士 博士 教授	032 032 032 032	一种低电流应力的不对称控制零电流开关PWM电流源型半桥变换器	电工技术学报	2007,22(1)

117	陈东华 江　晨 谢少军 周　波	博士 硕士 教授 教授	032 032 032 032	一种适用于独立小容量交流电网的APF电流基准产生方法	中国电机工程学报	2007,27(16)
118	阚加荣 谢少军	硕士 教授	032 032	无互联线逆变器并联系统中数字锁相环的设计	电力电子技术	2007，41（4）
119	秦　岭 谢少军	硕士 教授	032 032	一族基于改进ZCS开关单元的PWM变换器	电工技术学报	2007,22(4)
120	张超 华　汤 雨 谢少军	硕士 博士 教授	032 032 032	基于Buck-Boost的AC/AC变换器设计	电工技术学报	2007,22(8)
121	肖华锋 谢少军	博士 教授	032 032	一种适合UPS应用的新型零电压开关双向DC-DC变换器	中国电机工程学报	2007,27(36)
122	阚加荣 谢少军	硕士 教授	032 032	提高无互联线逆变器并联稳定性的一种功率运算方法	电工技术学报	2007，22（3）
123	汤　雨 张超华 谢少军	博士 硕士 教授	032 032 032	Single-phase four switches Z-source AC-AC converter	APEC 会议交流 IEEE	2007
124	肖华锋 谢少军	博士 教授	032 032	采用逆阻型IGBT的零电流开关PWM电流源型半桥变换器	中国电机工程学报	2007,27(31)
125	许泽刚 谢少军	博士 教授	032 032	人体动能收集的发电装置研究	常州工学院学报	2007,20(4)
126	邓甫华 谢少军	硕士 教授	032 032	开关频率抖动控制对DC/DC变换器EMI抑制研究	电气应用	2007,26(2)
127	刘海春 谢少军	博士 教授	032 032	一种新颖的应用于三相四线有源电力滤波器的混合电流控制方法	山东大学学报	2007,37(6)
128	周成 军　刘 小宝 谢少军	硕士 硕士 教授	032 032 032	一种采用新型辅助网络的移相全桥零电压开关PWM DC/DC 变换器	电工技术学报	2007,22(1)
129	秦　岭 谢少军	硕士 教授	032 032	A Novel family of PWM converters based on improved ZCS switch cell	PESC会议交流	2007
130	肖华锋 过　亮 谢少军	硕士 硕士 教授	032 032 032	A new ZVS bidirectional DC-DC converter with phase-shift plus PWM control	APEC 会议交流 IEEE	2007
131	汤　雨 张超华 谢少军	博士 硕士 教授	032 032 032	Z-source AC-AC converters solving commutation problem	IEEE Trans on PE	2007，22（6）
132	肖华锋 谢少军	硕士 教授	032 032	一种新型零电流开关PWM电流源型半桥变换器	电力电子技术	2007，41（3）
133	邓甫华 谢少军	硕士 教授	032 032	近正弦输入三相整流器研究	电力电子技术	2007，41（3）
134	周成 军 谢少军	硕士 教授	032 032	新型无源互助电路ZVS-PWM移相全桥变换器研究	电力电子技术	2007,41(11)
135	秦岭 谢少军	硕士 教授	032 032	一种新型ZCS-PWM BUCK变换器研究	电力电子技术	2007，41（2）
136	蔡振鸿 谢少军	硕士 教授	032 032	多通道逆变器空间矢量调制调压技术研究	电力电子技术	2007,41(7)
137	汤　雨 谢少军 张超华	博士 教授 硕士	032 032 032	单相四开关Z源AC-AC变换器	南京航空航天大学学报	2007,39(5)

138	汤　雨 谢少军 张超华	博士 教授 硕士	032 032 032	Z-source AC-AC converters solving the commutation problem	PESC会议交流	2007,22(6)
139	李　丹 周　波 黄佳佳 方斯琛	硕士 正高 硕士 博士	032 032 032 032	新型无扇区空间矢量脉宽调制算法研究	全国电源技术年会论文集	2007
140	黄佳佳 周　波 方斯琛 李　丹	硕士 教授 博士 硕士	032 032 032 032	基于滑模控制的永磁同步电机伺服系统的研究	全国电源技术年会论文集	2007
141	骆薇薇 方斯琛 周　波	硕士 博士 硕士	032 032 032	永磁同步电机-双机共轴余度调速系统的研究	中国电源学会论文集	2007
142	汪俊杰 周　波 马长山	硕士 正高 博士	032 032 032	无刷直流电机的新型滑模变结构控制	全国电源技术年会论文集	2007
143	胡朝燕 周　波 魏佳丹	硕士 正高 博士	032 032 032	电磁式双凸极电机起动发电一体化建模	全国电源技术年会论文集	2007
144	尹　航 周　波 魏佳丹	硕士 正高 博士	032 032 032	双凸极电机主功率变换器开路故障在线诊断	全国电源技术年会论文集	2007
145	宋　飞 周　波 吴小婧	硕士 正高 硕士	032 032 032	无刷直流电机宽转速范围内转矩脉动策略研究	全国电源技术年会论文集	2007
146	仇红奎 周　波	硕士 正高	032 032	矩阵变换器的输出电压闭环策略研究	全国电源技术年会论文集	2007
147	魏佳丹 周　波 张永帅	博士 正高 硕士	032 032 032	Direct driven doubly salient electrical wind generator with exterior rotor	Wind Power Shanghai 2007	2007
148	魏佳丹 周　波 程　方舜	博士 正高 硕士	032 032 032	Research and Implementation of Double-salient Wind Power Generator Syste	Wind Power Shanghai 2007	2007
149	田质广 周　波 张慧芬	博士后 正高	032 032	基于自适应遗传算法和BP网络的汽轮发电机组故障诊断	汽轮机技术	2007，47（4）
150	李路菁 周　波 王　莉	硕士 正高 副高	032 032 032	永磁同步电动机起动问题的分析与解决	微特电机	2007，（1）
151	张　绍 周　波 葛红娟	博士 正高 正高	032 032 032	基于双空间矢量调制的矩阵变换器-永磁同步电机矢量控制系统	电工技术学报	2007，22（4）
152	马长山 周　波	博士 正高	032 032	Fault diagnosis and fault tolerant control of position signal for doubly salient permanent magnet motor	ICEMS	2007，8
153	马长山 周　波	博士 正高	032 032	A novel optimal control strategy of turn-on angle and turn-off angle for doubly salient permanent magnet motor	ICEMS	2007，8
154	姜田贵 张　峰 王慧贞	硕士 硕士 正高	032 032 032	松耦合感应能量传输系统中补偿网络的分析	电力电子技术	2007，41（8）

155	李　丹 周　波 方斯琛 黄佳佳	硕士 正高 博士 硕士	032 032 032 032	伺服电机用超高精度码盘分频接口设计	电机与控制学报	2007，11（5）
156	马长山 周　波	博士 正高	032 032 032	永磁式双凸极电机新型开通关断角控制策略	中国电机工程学报	2007，27（24）
157	张　乐 周　波 马长山	博士 正高 博士	032 032 032	一种新的永磁双凸极电机非线性磁链电感建模方法	中国电机工程学报	2007，27（3）
158	方斯琛 周　波 李　丹	博士 正高 硕士	032 032 032	三轴无刷转台交流伺服放大器	南京航空航天大学学报	2007，39（6）
159	吕　飞 周　波 魏佳丹	硕士 正高 博士	032 032 032	基于双绕组电励磁双凸极电机的双余度发电系统	中国电机工程学报	2007，27（6）
160	马长山 周　波 张　乐	博士 正高 博士	032 032 032	永磁式双凸极电机新型调速系统	中国电机工程学报	2007，27（9）
161	魏佳丹 周　波 姜　雷	博士 正高 硕士	032 032 032	基于全桥变换器的电励磁双凸极电机中点电位的研究	中国电机工程学报	2007，27（30）
162	黄文新 张兰红 胡育文	正高 博士 正高	032 032 032	18kW异步电机高压直流起动发电系统设计与实现	中国电机工程学报	2007，27（12）
163	常正峰 黄文新 胡育文	正高 博士 正高	032 032 032	基于二维解析法的光滑表面实心转子感应电机附加损耗的研究	中国电机工程学报	2007，27（21）
164	黄文新 胡育文	正高 正高	032 032	基于空间矢量调制策略270V高压直流笼型异步发电系统	电工技术学报	2007，22（1）
165	黄文新 李　勇 胡育文	正高 博士 正高	032 032 032	用空间电压矢量调制异步电动机的直接转矩控制	南京航空航天大学学报	2007，39（1）
166	周扬忠 胡育文 黄文新	博士 正高 正高	032 032 032	直接转矩控制电励磁同步电机初始转子位置估计	电工技术学报	2007,22(12)
167	刘贤兴 胡育文	博士 正高	032 032	永磁同步电机的神经网络逆动态解耦控制	中国电机工程学报	2007,27(27)
168	高　瑾 胡育文 黄文新	博士 正高 正高	032 032 032	超空间矢量下无刷直流电机的直接转矩控制	中国电机工程学报	2007,27(24)
169	高　瑾 胡育文 黄文新	博士 正高 正高	032 032 032	基于反电势形状函数法的无刷直流电动机直接转矩控制	南京航空航天大学学报	2007,39(04)
170	周扬忠 胡育文 黄文新	博士 正高 正高	032 032 032	基于直接转矩控制电励磁同步电机转子励磁电流控制策略	南京航空航天大学学报	2007,39(04)
171	陈光辉 胡育文 黄文新	硕士 正高 正高	032 032 032	定子双绕组感应发电机励磁控制的研究	电气传动	2007,37(1)
172	黄志峰 胡育文 黄文新	硕士 正高 正高	032 032 032	基于DSP的无刷直流电机直接自控制低速性能的改进	电机与控制应用	2007,34(4)

173	鲁文其 胡育文 黄文新	博士 正高 正高	032 032 032	空调室内外机通信电路的分析与设计	电子测量技术	2007,30(6)
174	高　瑾 胡育文 黄文新	博士 正高 正高	032 032 032	六边形磁链轨迹的无刷直流电机直接自控制	中国电机工程学报	2007,27(15)
175	张彦召 胡育文 黄文新	硕士 正高 正高	032 032 032	基于Freescale DSP56F8346的永磁交流伺服系统硬件设计	伺服控制	2007,11(5)
176	刘贤兴 胡育文 黄文新	博士 正高 正高	032 032 032	基于精确线性解耦的永磁同步电机空间矢量调制系统	中国电机工程学报	2007,27(30)
177	李　勇 胡育文 黄文新	博士 正高 正高	032 032 032	Control of a novel dual stator-wingding induction generator for wide speed-rang operaton	IEEE industry electronics society	2007年
178	李　勇 胡育文 黄文新	博士 正高 正高	032 032 032	The dual stator-winding induction generator for wide speed range operation	IEEE power electronics 2007年	2007年
179	陈新	副高	032	功率因数校正的数字控制技术应用研究	南京航空航天大学学报	2007，39（2）
180	何中一 邢　岩 付大丰	硕士 正高 中级	032 032 032	模数混合分布式逆变器并联控制方法	中国电机工程学报	2007，27（4）
181	方　宇 裘　迅 邢　岩 胡育文	博士 副高 正高 正高	032 外 032 032	Research on Three-Phase High Power Factor Correction Based on Predictive Current Controller	The 22rd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference	2007
182	杨双景 方　宇 裘　迅 邢　岩	硕士 博士 副高 正高	032 032 外 032	Voltage Sharing Control for Interleaving Series-Parallel Dual Two-Transistor Forward Converter	The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society	2007
183	王　儒 方　宇 邢　岩	硕士 博士 正高	032 032 032	三相高功率因数PWM变换器可逆运行研究	电工技术学报	2007，22（8）
184	王　儒 裘　迅 方　宇 邢　岩	硕士 副高 博士 正高	032 032 032 032	无电网电压传感器的三相PWM变换器可逆运行研究	电工技术学报	2007，22（增刊1）
185	徐中华 何中一 叶　楠 邢　岩	硕士 博士 硕士 正高	032 032 032 032	基于变环宽滞环控制和重复控制的DPM逆变器	电工技术学报	2007，22（增刊1）
186	祁飙杰 方　宇 何　亮 邢　岩	硕士 博士 硕士 正高	032 032 032 032	三电平半桥PFC变换器控制策略的研究	电气自动化	2007，5
187	孟丽婵 方　宇 邢　岩	硕士 博士 正高	032 032 032	Boost PFC变换器并联系统均流控制技术	电力电子技术	2007，41（2）
188	李　卿 何礼高	硕士 副高	032 032	两相不对称交流感应电机矢量控制的仿真研究	电机技术	2007，5
189	陈鑫兵 何礼高	硕士 副高	032 032	基于模糊控制的三电平逆变器中点电位平衡策略	电工技术学报	2007，22（10）

190	陈鑫兵 何礼高	硕士 副高	032 032	Research on neutral point potential balance of three-level inverter based on fuzzy logic control strategy	ICCEP'2007	2007
191	王　峰 何礼高	硕士 副高	032 032	AC-MODULE最大功率输出的控制策略研究	通信电源技术	2007，6
192	韩　璐 王　勤 王兆坤	硕士 副高 硕士	032 032 032	基于反激变换器的太阳能最大功率电池最大功率跟踪器	电工技术学报	2007，22（8）

2007年 38th IEEE Power Electronics Specialists Conference

Soft Start Strategy for Bi-directional DC-DC Converter

Mengxiong Yang, Ke Jin, Xinbo Ruan, *Senior Member*, *IEEE* and Min Xu

Aero-Power Sci-tech Center, College of Automation Engineering

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics

Nanjing, 210016, Jiangsu Province, China

E-mail: mengxiong_y@hotmail.com

***Abstract*-Traditional soft start method will give rise to large inverse inductor current at startup of bi-directional converter at double sources application, and result in damage of devices. This paper proposes a novel soft start strategy--two-phase soft start strategy to implement soft start at double sources application, which can avoid inverse induct -or current. Experimental results are given to verify the effectiveness of two-phase soft start strategy.**

I. INTRODUCTION

Bi-directional DC-DC converter can find application from uninterrupted power supplies, battery charging/ discharging system to auxiliary power supply in hybrid electrical vehicles. In the near future, photovoltaic generation, wind generation and fuel cell these emerging areas will provide wide applica -tion field for bi-directional DC-DC converter[1~4].

Ref. [5] proposes a hybrid fuel cell power system, which is composed of a fuel cell, a uni-directional converter, a bi-directional converter, an inverter and a battery, the block diagram is showed in fig.1. The uni-directional converter converts the wide voltage of fuel cell (200-400VDC) to 360VDC and is delivered to the inverter to produce 220V/50Hz AC. A 220V battery is paralleled with the DC Bus via bi-directional converter, which can transmit energy in both directions. Buck-Boost bi-directional converter is selected in fuel cell power system, for the merits of simple configuration, easy control and rapid response[6][7].

Soft start method can reduce input inrushing current of DC-DC converter at startup, and it is widely used in uni-directional converters. In fuel cell power system in Fig.1, bi-directional converter is at double sources application—DC Bus and battery at two ports, where traditional soft start method fails to serve. This paper will analyze the problem of traditional soft start and proposes a novel soft start strategy—two-phase soft start strategy.

II. THE PROBLEM OF TRADITIONAL SOFT START

Fig.2 shows the block diagram of Buck-Boost bi-directional converter. V_H is at high-voltage port and V_L is at low-voltage port. Switches Q_1, Q_2 are in complemented operation. In Buck mode, Q_1 is controlled to regulate the output voltage, therefore Q_1 is defined active switch, and Q_2 is defined passive switch. Likewise in Boost mode, Q_2 is defined active switch and Q_1 is passive switch.

Traditional soft start method makes the switch's duty cycle increase gradually, so output voltage increases slowly. At double sources application, if the bi-directional converter works in Buck mode, V_H supply energy to V_L. In traditional soft start, the duty cycle of Q_1 is small and that of Q_2 is large at startup. V_H-V_L is applied on inductor with short time per switch period while -V_L with long time. As shown in Fig.3, the inductor current inversely increases rapidly, as a result, the inductor is saturated and devices are damaged by large current. In Boost mode, traditional soft start also gives rise to the problem.

As to other bi-directional DC-DC converters: Buck/Boost bi-directional converter, Cuk bi-directional converter, Zeta-Sepic bi-directional converter, Forward bi-directional converter and Flyback bi-directional converter, because the opposite switches are in complemented operation, traditional soft start will also produce inverse current from the output source. Traditional soft start cannot serve at double sources application. New soft start strategy should be employed.

III. PASSIVE SWITCH DRIVE DELAY METHOD

In traditional soft start, conduction of passive switches brings in inverse current from output source. Therefore, passive switch can be shut and inductor current freewheels

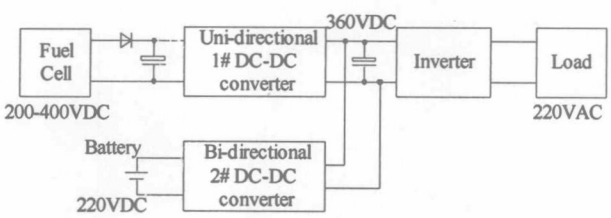


Fig.1 Fuel cell power system

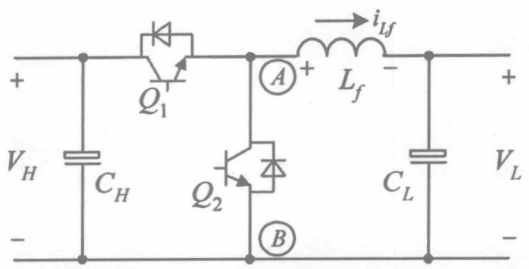


Fig.2 Buck-Boost bi-directional converter

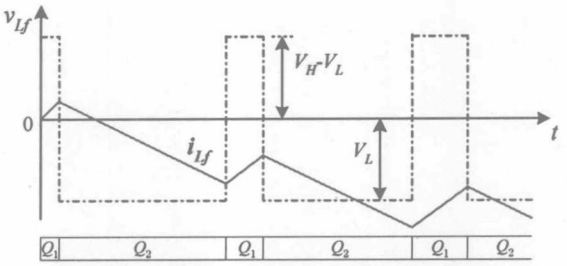


Fig.3 Inverse inductor current in traditional soft start

through the source-drain diode. After soft start, passive switch drive signal will be released.

This method is effective when the converter is in CCM. If It is in DCM at light load, release of passive switch drive signal will make it change from DCM into CCM immediately. In the transition, inverse current will increase inversely. Fig.4 shows the simulation result of passive drive delay strategy. Before t_1, the converter is in Boost DCM, V_L=220V and V_H =340V. At t_1, the passive switch drive signal S_2 is released, inductor current i_L rapidly changes to -14.2A, while i_L= 0.44A in steady state。

As analyzed above, Passive drive delay method will give rise to inverse inductor current at light load.

IV. PRINCIPLES AND CIRCUIT OF TWO-PHASE SOFT START STRATEGY

Traditional soft start makes active switch duty cycle increase gradually. If passive switch's duty cycle gradually increases in the same way as active switch, discontinuous inductor current will smoothly transit into continuous current—this is two-phase soft start strategy.

Two-phase soft start strategy has two methods. In method 1, given a delay after active switch stabilizes, passive switch duty cycle begins to increases. In method 2, passive switch duty cycle increases immediately after active switch stabilizes.

Fig.5(a) and Fig.6(a) shows method 1's block diagram and illustrative graphs. At t_0 startup, Current source I_S begins to charges external soft start capacitor C_{S1}. Soft start capacitor voltage V_{S1}, output voltage close loop output V_{EA_Vo} and saw-tooth signal V_{RAMP1} are delivered to *PWM Comparator* to obtain active switch drive signal S_1. S_1's duty cycle increases from zero gradually. Pulse B_2 is complement to S_1. In this stage, output voltage/current slowly increases and because passive switch is shut, inverse inductor current is prevented.

At t_1, S_1 increases to rated duty cycle and will keep stable later. At this time the output voltage stabilizes.

At $t_0+\triangle t$, current source $I_S(t_0+\triangle t)$ begins to charge external soft start capacitor C_{S2}. V_{S2} ascends from zero linearly. It intercepts with saw-tooth signal V_{RAMP2} and obtain pulse D_{SS}. *Dss*'s duty cycle increases gradually from zero to "1".

From t_2, as the result of D_{SS} "and" B_2, S_2's duty cycle begins to increase gradually from zero. In this stage at light load, inductor current can transit smoothly from DCM into CCM, avoiding large inverse current.

From t_3, because D_{SS} end "1" duty cycle, S_2 reaches stable and it is complement to S_1. Two-phase soft start finishes.

Fig.5(b) and Fig.6(b) shows method 2's block diagram and illustrative graphs. At t_0 startup, voltage close loop output V_{EA_Vo} is high level. It intercepts with saw-tooth signal V_{RAMP1}, so pulse B_1 is "1" duty cycle and B_2 is zero. Current source I_S begins to charges external soft start capacitor C_{SS}. V_{SS} ascends linearly from zero. It intercepts with saw-tooth signal V_{RAMP2} and obtain auxiliary pulse D_{SS}. *Dss*'s duty cycle increases gradually from zero to "1". Active switch drive signal S_1 is obtained by B_1 "and" D_{SS} logically, so S_1's duty cycle increases gradually. Passive switch drive signal S_2 is obtained by B_2 "and" D_{SS} logically and S_2 is zero.

At t_1, S_1 increases to the stable duty cycle and the output voltage stabilizes. V_{EA_Vo} will be lowered. S_2 is zero.

At t_2, V_{EA_Vo} intercepts with V_{RAMP1} and determine B_2 of stable duty cycle, while D_{SS} keeps increasing. Consequently, S_1 retains stable duty cycle and S_2's duty cycle begins to increase from zero.

From t_3, because D_{SS} end "1" duty cycle, S_2 reaches stable and it is complement to S_1. Two-phase soft start finishes.

Two-phase soft start strategy is applicable to other bi-directional converters. With multiple auxiliary pulses working on switches, two-phase soft start strategy can be extended to multi-level bi-directional converter.

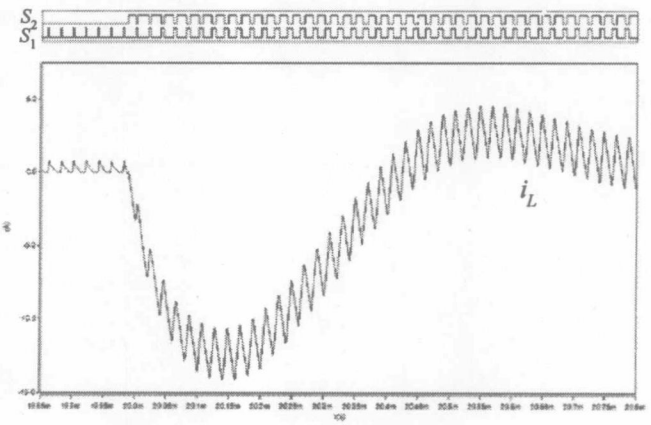
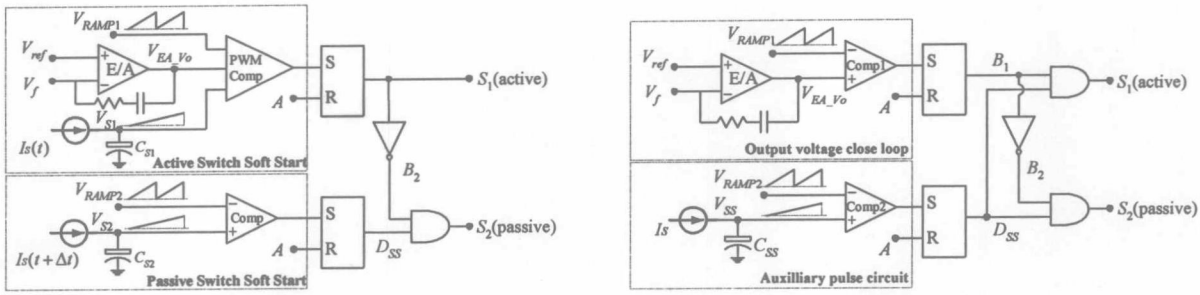
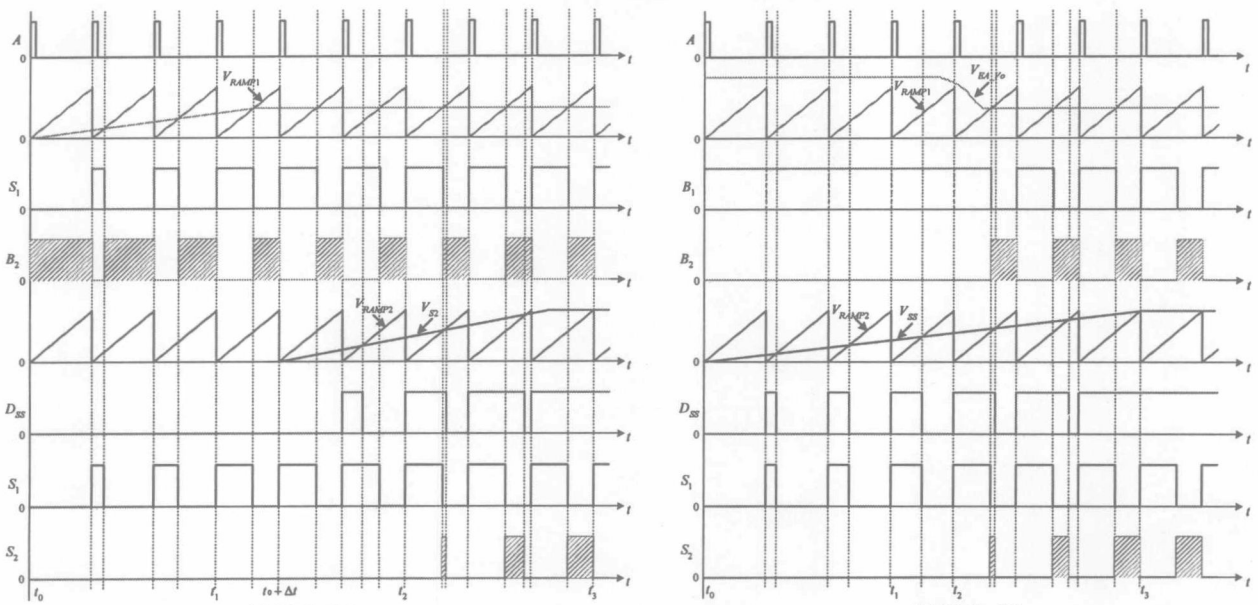


Fig.4 Passive switch drive delay method simulation waveforms



(a) Method 1 (b) Method 2

Fig.5 Block diagram of two-phase soft start strategy



(a) Method 1 (b) Method 2

Fig.6 Illustrative graphs of two-phase soft start

V. EXPERIMENTAL RESULT

In order to verify the effectiveness of two-phase soft start strategy, a prototype converter is built in lab: C_H=1120uF, C_L=1120uF, Lf = 400uH, fs=50kHz, Switch: $IRF460$. At double sources application in Buck mode, V_H=340V, V_L= 240V. Battery at output port is charged. In Boost mode, battery is discharged at input port; V_H is boosted from 320V to 340V. A 220V/7Ah battery is employed and constant-current/ constant voltage charge mode is employed.

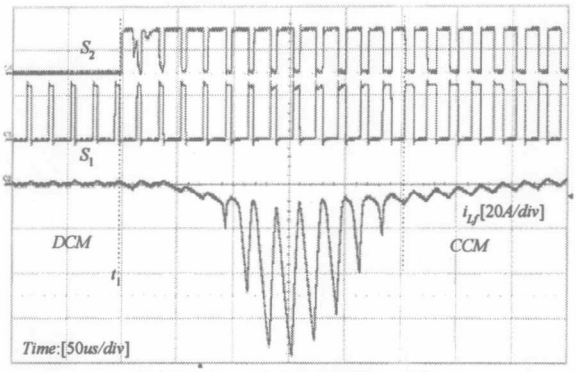
Fig.7 shows inductor current experimental waveforms of passive switch drive delay method and two-phase soft start in Boost mode at light load. In Fig.7(a) passive switch drive delay method, before t_1, the converter is in DCM. At t_1, passive switch drive signal S_2 is released. In the transition from DCM into CCM, maximum inverse current is as large as -76A. Because inductor is partially saturated, current slope ratio is enlarged in the transition. In Fig7(b) two-phase soft start strategy, because S_2's duty cycle increases gradually, inductor current smoothly changes and large inverse current is avoided.

Fig.8 shows bi-directional converter two-phase soft start experiment result in fuel cell power system, V_H is DC bus and V_L is battery. Fig. 8(a) is Buck mode output voltage and inductor current waveforms. After startup, the converter maintains 1.5A charging current. Battery voltage increases from 200V slowly and will enter floating charge. Fig. 8(b) is Boost mode output voltage and inductor current waveforms. After startup, the converter first maintains 2A discharging current. After DC Bus voltage raises to 340V, it maintains 340V output, and discharging current is 1.6A.

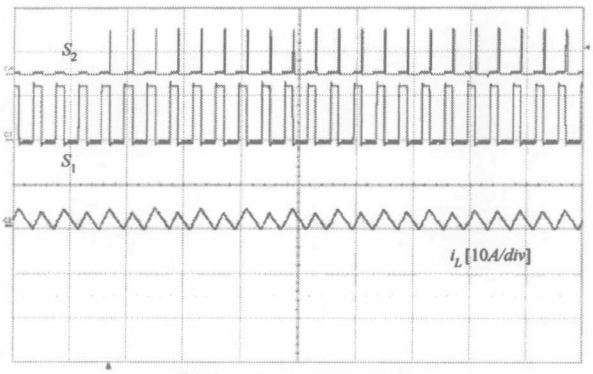
As can be seen above, two-phase soft start strategy works well to implement soft start of bi-directional converter in double sources application.

VI. CONCLUSION

This paper discusses the problem of traditional soft start for bi-directional converter at double sources application, analyzes the drawback of passive switch drive delay method and proposes two-phase soft start strategy. Two-phase soft start strategy has two methods to can implement soft start in double sources application, avoiding inverse inductor current.

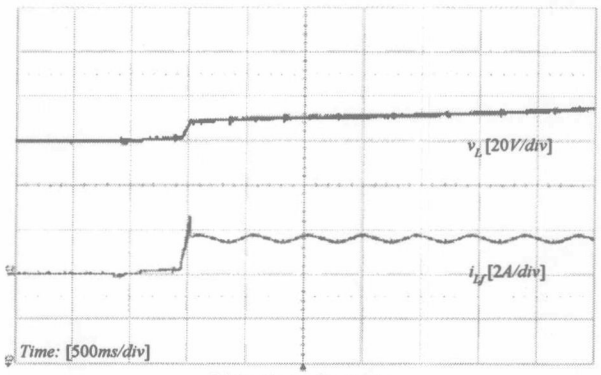


(a) Passive switch drive delay mathod

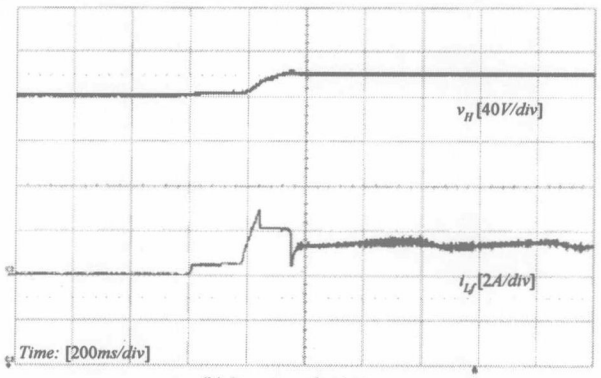


(b) Two-phase soft start strategy

Fig.7 Experimental waveforms of passive switch drive delay method & two-phase soft start strategy at light load



(a) Buck mode startup



(b) Boost mode startup

Fig.8 Two-phase soft start in fuel cell power system

Experimental results are given to verify the effectiveness of two-phase soft start strategy.

REFERENCES

[1] M. Jain and P.K. Jain. "A bidirectional dc-dc converter topology for low power application," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol.15, pp.595-606, July 2000.

[2] A. Capel *et al.*, "A bidirectional high power cell using large signal feedback control with maximum current control for space applications," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, June 1986, pp.684–695.

[3] K. Wang, C.Y. Lin, L. Zhu, D. Qu, F.C. Lee and J.S. Lai. "Bi-directional dc to dc converters for fuel cell systems," *Power Electron. in Transportation*, pp.47-51, 1998;

[4] F.Z. Peng, H. Li, G.J. Su and J.S. Lawler. "A new zvs bidirectional dc-dc converter for fuel cell and battery application," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol.19, pp.54-65, Jan.2004;

[5] K. Jin, X.B. Ruan, M.X. Yang, and M. Xu. "A novel hybrid fuel cell power system," in *Proc. IEEE PESC*, Korea, June 2006, pp.2024-2030.

[6] D.M. Sable, F.C. Lee and B.H. Cho, "A zero-voltage-switching bidirectional battery charger/discharger for the NASA EOS satellite," in *Proc. IEEE APEC*, Blacksburg USA, February 1992, pp.614-621.

[7] J.N. Marie-Francoise, H. Gualous and A. Berthon, "DC to DC converter with neural network control for on-board electrical energy management," in *Proc. IEEE IPEMC*, Belfort, France, August 2004, Vol. 2, pp. 521-525.

基于 Saber 环境的 CCFL 建模及仿真技术

杨善水 黄陆建
（南京航空航天大学自动化学院电气工程系 南京 210016）

摘要 冷阴极荧光灯（CCFL）目前在液晶显示器上得到广泛应用。但由于其非线性特性，在设计驱动电路时难以进行建模仿真计算。本文借鉴曲线拟合法，采用指数函数模型，使得拟合的数学模型既能满足 CCFL 点亮后的电压-电流特性，也能满足 CCFL 点亮之前的电压-电流特性。在此基础上，首次建立了一种基于 Saber 的仿真模型，实验验证了仿真模型的有效性，为设计优化 CCFL 驱动电路提供了一个有效的模型。

关键词：冷阴极荧光灯 Saber 仿真模型 曲线拟合 非线性
中图分类号：V242.3；TN464

Modeling and Simulation of CCFL Based on Saber Software

Yang Shanshui Huang Lujian
（Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016 China）

Abstract The cold cathode fluorescent lamps (CCFL) are used widely in liquid crystal display (LCD). However, it is very difficult to carry the simulative calculation during the process of the driver circuit designing because of its non-linear characteristic. In this paper, the curve fitting method is applied to obtain an exponential model which can satisfy the *i-v* characteristics for CCFL both before and after lighting. A simulation model in Saber software is proposed for the first time. The validity of the lamp model is verified by the simulation and experimental results. The model is useful for the driver circuit designing.

Keywords: CCFL, Saber simulation model, curve fitting, non-linearity

1 引言

大多数液晶显示器用冷阴极荧光灯（Cold Cathode Fluorescent Lamp, CCFL）作背光源。冷阴极荧光灯和标准热阴极荧光灯的发光形式相似，但其工作状态是在高电压下的辉光放电。其阴极不涂发射材料，而是用由铁和镍制成的中空圆柱形，最常用的放电介质是 Hg 蒸汽，灯里填充惰性气体（如 Ar、Kr 等）辅助启动，汞原子电离放出辐射能，经激发管壁的荧光粉发出可见光[1]。CCFL 具有高亮度、长寿命，不受启动次数影响，光输出可调制得很低、即使在很低的环境温度下灯仍能瞬时启动等优点，但驱动时对起辉电压和工作电压有特殊的要求。

目前针对 CCFL 的驱动电路已有大量的研究成果[2-3]，也有很多的驱动电路产品。由于 CCFL 呈非线性的电压–电流特性，在击穿之前呈近似开路状态，点亮之后呈交流电弧特性，所以对 CCFL 的建模仿真比较困难，在驱动电路的设计中，一般都是近似计算后进行现场调试，因此设计的参数未必是完美的。若能建立 CCFL 的模型，并将得到的模型用于系统仿真分析，进行其驱动电路的优化设计和稳定性分析，不仅可以节约设计成本，提高工作效率，并且能检验设计思想的有效性。

目前，关于气体放电灯及荧光灯的建模主要有四种：物理类模型[2-4]、经验类模型[5-6]、曲线拟合类模型[7-9]和小信号模型[10-11]。

物理类模型适合不同频率，但方程复杂，计算量大，数学形式为多值函数或隐函数，难于求解，仿真困难；模型有些参数是灯制造商的保密数据，很难得到。

收稿日期 2006-09-07 改稿日期 2006-11-14

经验类模型忽略次要量来建立灯的电阻(或电导)与电压电流的函数关系。经验类模型的参数少，原理简单，容易实现仿真，但模型不精确，要解微分方程，计算量大，不适合对电子镇流器进行优化设计。

曲线拟合类模型是应用数学方法对得到的实验波形进行曲线拟合，用数学公式逼近，得到曲线的数学表达式，进而得到灯的数学模型。该方法简单，运算量小，容易仿真；针对具体的曲线逼近，精度较高。但是模型通用性差，物理意义不明确。

小信号模型使电路工作者能够应用经典控制理论来判别电子镇流器与气体放电灯构成的照明系统在额定工作点的稳定性。但到目前为止，小信号模型的具体参数仍未确定。

根据上述对荧光灯的建模分析可知，目前的研究主要还是集中在如何解决好模型的精度和模型的复杂度这一对矛盾。但到目前为止，还没有得到一个非常适合 CCFL 的模型。CCFL 与其他气体放电灯原理基本一样，但又略有区别。Saber 仿真软件兼有 Matlab 和 PSPICE 软件的优点，目前在电力电子电路设计中得到重视。本文针对所研究的 CCFL，借鉴曲线拟合方法，并考虑 CCFL 开通前的状态，建立了在 Saber 环境下的模型，通过对实际电路进行仿真和实验对比，收到了良好的效果。

2 冷阴极荧光灯参数提取及模型原理

图 1 所示为测量某型冷阴极荧光灯参数的电路图。其中测量仪器包括：驱动电路为自行研制的逆变器；R_s 为电流采样电阻；测电压用高压探头：Tektronix P5100, 100∶1, 100MΩ, 2.75pF；测电流用差分探头：LDP—6002；示波器：Tektronix TDS2012。

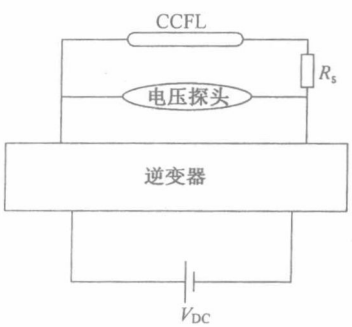


图 1 CCFL 参数测量电路

Fig.1 CCFL test circuit

根据图 1 的测量电路，得到某型 CCFL 的电参数的电流有效值 I_{rms} 和电压有效值 V_{rms} 的关系曲线，如图 2 所示。

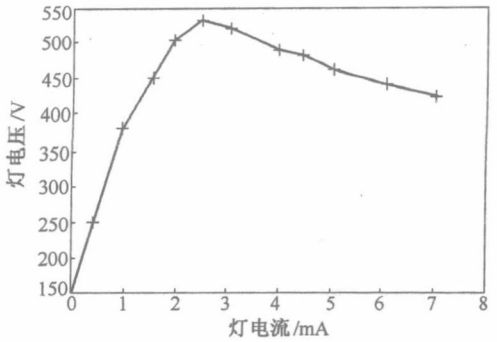


图 2 CCFL 电压-电流曲线

Fig.2 CCFL voltage versus current

对上述曲线的描述一般有以下几种函数：直线、二次方程、三次方程和指数函数。但是一次方程、二次方程误差较大，而三次方程关系式存在收敛误差问题[12]。经过研究，提出采用指数函数模型

$$V_{rms} = A_0 + A_1\exp(-A_2 I_{rms}) - A_3\exp(-A_4 I_{rms}) \quad (1)$$

由式（1）可知，此模型不但能够反映 CCFL 灯管击穿稳定后的负阻抗特性，还能反映 CCFL 在点亮前的正阻抗特性以及 CCFL 在灯功率调至非常小时灯电压电流有效值特性发生突变的情况，这样的模型能有效地反映调光特性，可以使模型更精确。

利用 Matlab 拟合工具[11]得到拟合系数 A_0=230，A_1=847，A_2=209，A_3=930，A_4=577，如图 3 所示。

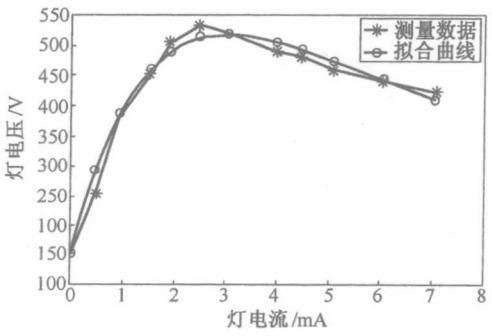


图 3 拟合曲线

Fig.3 Fitting curve

由于在高频状态下灯管内的电离状态不再随着灯的工作电流而迅速变化，从而在整个工作周期内形成几乎恒定的等离子体密度和灯阻抗，这时灯的 *V-I* 特性趋于线性[13]，冷阴极荧光灯相当于纯电阻，其等效阻抗

$$R = V_{rms} / I_{rms} \quad (2)$$

由式（2）可得电压瞬时值 V_t 与电流瞬时值 I_t 的关系为

$$V_t = RI_t$$
$$= \{A_0 + A_1\exp(-A_2 I_{rms})$$
$$-A_3\exp(-A_4 I_{rms})/I_{rms}\}I_t \quad (3)$$

3　冷阴极荧光灯 Saber 模型构造

Saber 软件是目前唯一的多技术、多领域混合信号仿真软件。与传统仿真软件不同，Saber 在结构上采用硬件描述语言 Mast 和单内核混合仿真方案，对仿真算法进行了改进，仿真速度更快、更加有效，应用也越来越广泛。当 Saber 元件库中没有所需要的模型时，可以用四种方法来解决：①给通用模型的参数赋值；②组合建模，即建立宏模型；③建立行为模型；④建立图解模型。其中第三种行为模型被建模者广泛采用。

本文通过 Saber 现有的通用元件，建立适当的 Mast 模型，利用 Saber 提供的图形环境 SaberSketch，使仿真过程图形化。

根据式（3），利用受控源及特定的 Mast 模板，构造出 CCFL 的仿真模型，如图 4 所示。其中 CCVS，VCVS，VCCS 为受控源，SQRT、VCVS_EXP 分别是由 Mast 语言描述的有效值模块与式（3）函数模块。

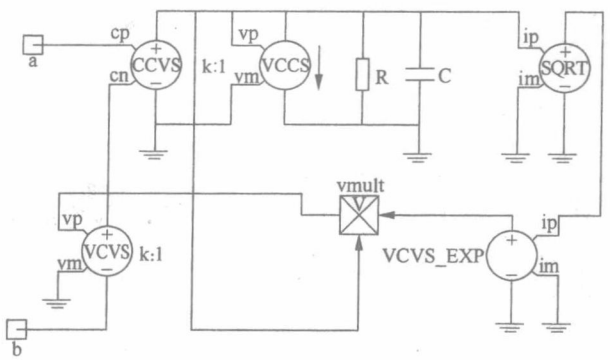


图 4　CCFL 仿真模型

Fig.4　CCFL simulation model

VCVS_EXP 的 Mast 语言描述如下：

```
template vcvs_exp ip im vp vm=k
electrical ip,im,vp,vm
number        k=1
{
var i iout
val v vout,vin
values{
vin=v(ip)-v(im)
vout=k*(230+847*exp(-209*vin) -930*exp(-577*vin))/vin
}
equations{
i(vp->vm)+=iout
iout:v(vp) -v(vm)=vout
}
}
```

4　电路仿真与实验对比

图 5 所示为 CCFL 驱动电路。它是一自激推挽式升压电路，又称 Royer 电路。其中 R_2 为启动电阻，L 为变压器 T 的中心抽头提供一个较高的交流输入阻抗。

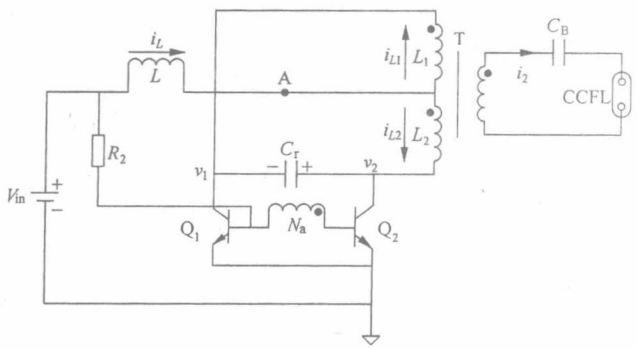


图 5　CCFL 驱动电路原理图

Fig.5　CCFL drive circuit

该电路是典型的单管 CCFL 驱动电路[14]。其工作原理为：由于开关管 Q_1、Q_2 的性能不可能绝对一致，所以在接通电源的瞬间，直流电源 V_{in} 向两开关管基极注入的电流也不可能绝对平衡，流经两开关管集电极的电流也不可能完全一致。设 $i_{L1} > i_{L2}$，则变压器的磁通大小与方向由 i_{L1} 决定。磁通的变化在反馈绕组产生感应电势，其极性在图中反馈绕组的“·”端为负。反馈绕组的感应电势使 Q_2 基极的电位下降，Q_1 的基极电位上升，从而对 Q_2 形成负反馈，使 Q_2 的集电极电流 i_{L2} 渐小；对 Q_1 形成正反馈，使 Q_1 的集电极电流 i_{L1} 渐大，合成磁通渐大。磁通的变化及感应电势的相互作用使 Q_1 饱和导通、Q_2 截止，此时，磁通达到最大值，而与磁通变化率呈正比的感应电势也为零。反馈绕组上感应电势的消失使 Q_1 的基极电位下降，Q_1 的集电极电流也下降，电流的变化率反向，引起磁通的变化率反向，从而导致绕组的感应电势反向，即反馈绕组的“·”端为正。这样引起 Q_2 的基极电位上升，Q_1 的电位下降，从而对 Q_1 形成负反馈，使 Q_1 的集电极电流 i_{L1} 越小，对 Q_2 形成正反馈，使 Q_2 的集电极电流 i_{L2} 越大。合成磁通也越大，磁通的变化及感应电势的

相互作用使 Q_2 饱和导通、Q_1 截止，此时，磁通达到最大值，而与磁通变化率呈正比的感应电势也为零。

上述两种过程不断循环，从而在变压器的二次侧形成振荡，而谐振电容器 C 的存在使振荡电路按照特定的频率进行简谐振荡。

根据上述原理，在 Saber 中建立 Royer 电路仿真电路，并以建立的 CCFL 模型作为负载，系统仿真模型如图 6 所示。

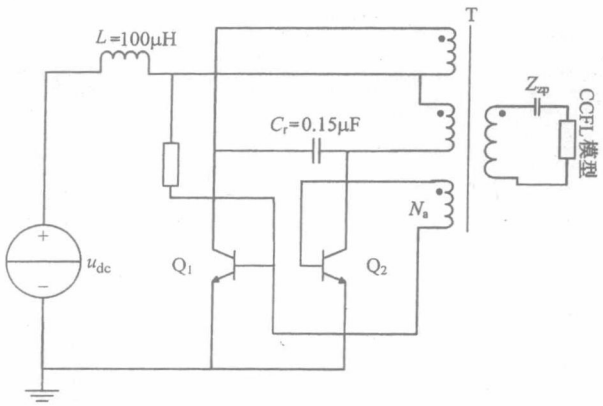


图 6 系统仿真模型

Fig.6 System simulation model

图 7 所示为 CCFL 的启动特性，可以看出，CCFL 在完全点亮之前有一个高的启动电压。图 8 所示为输出功率 1.5W 时的电压和电流波形，图 9 为输出功率 3W 时的电压和电流波形，从图 8 和图 9 可以看出，CCFL 在完全点亮之后，电压基本不变，功

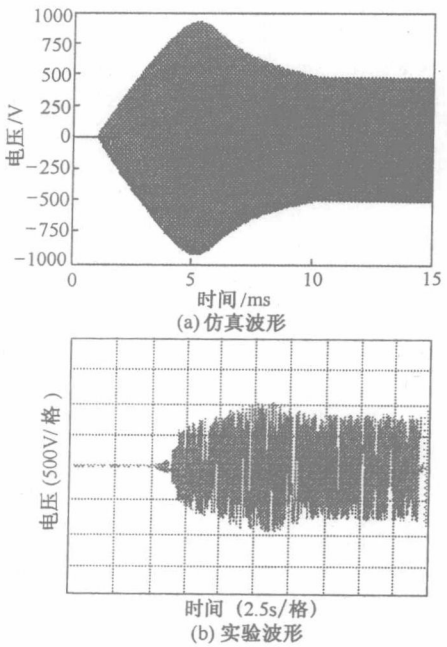


图 7 启动过程的电压仿真与实验波形

Fig.7 Simulation and experimental voltage waveforms while CCFL starting

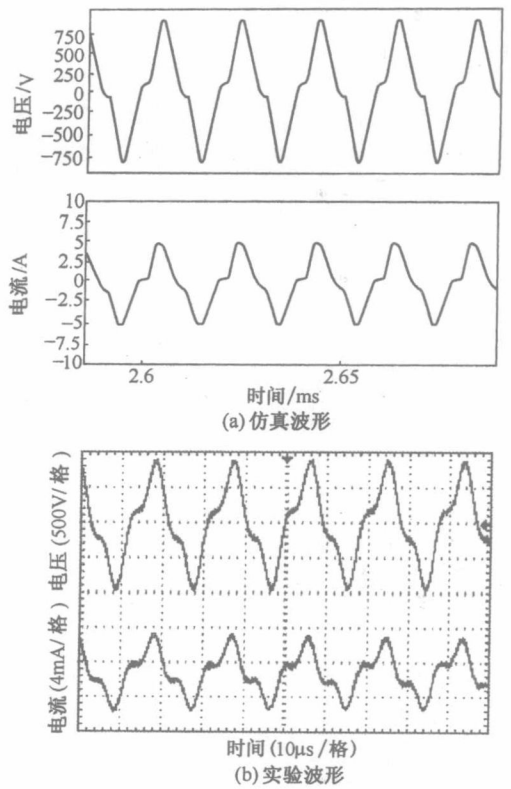


图 8 输出功率 P=1.5W 时的电压电流波形

Fig.8 Voltage and current waveforms while P=1.5W

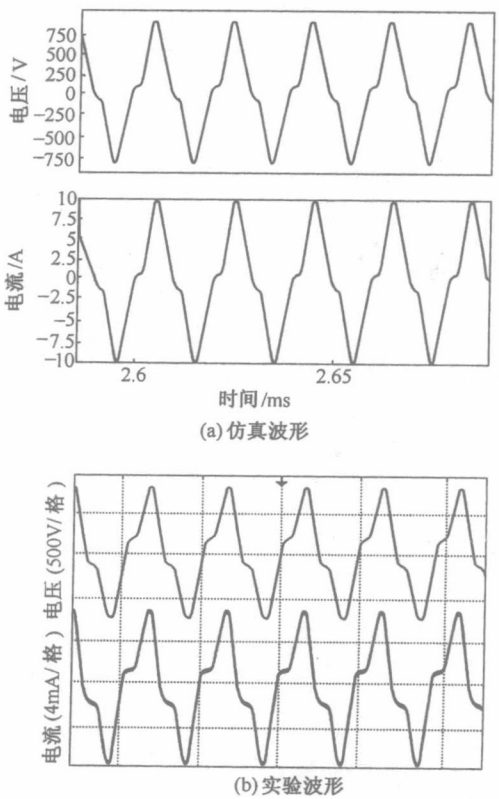


图 9 输出功率 P=3W 时的电压电流波形

Fig.9 Voltage and current waveforms while P=3W

率的变化主要体现在电流上，所以，进行 CCFL 调光设计是基于 CCFL 电流的。图 10 所示为系统仿真的 CCFL 电压与电流有效值，从图中可以看出，仿真结果基本上与实验测量值及拟合曲线一致，从而说明了模型的有效性。

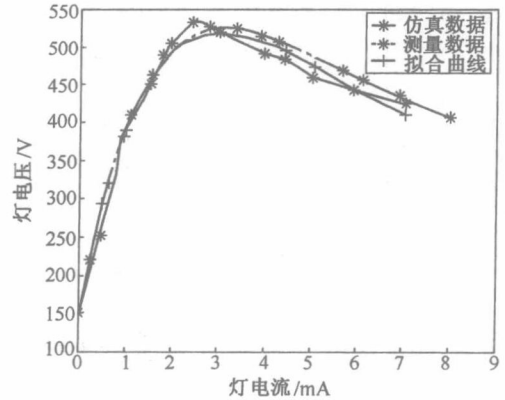


图 10　测试数据、拟合数据及仿真数据曲线图

Fig.10　Measured, fitting and simulation waveforms

5　结论

本文根据 CCFL 的电特性给出一种 Saber 模型，从仿真结果和实验数据上可以看出，该模型能准确描述 CCFL 在导通前、后的电压-电流特性，模型的参数较少，容易通过实验得到，为 CCFL 驱动电源的计算机辅助设计和分析开辟了一条新的途径。

参考文献

[1] 王尔镇，王春锋．高效率冷阴极荧光灯开发技术[J]. 现代显示，2002, 2: 34-40.
Wang Erzhen, Wang Chunfeng. Developmental technology of high-efficac cold-cathode fluorescent lamps[J]. Advanced Display, 2002, 2: 34-40.

[2] Cao X. Lamp arc resistance modeling of high intensity discharge (HID) lamps[J]. IEEE Proc. SMT, 2002, 149(1): 45-48.

[3] Georges Zissis, David Buso. Using full physical model for fluorescent lamps in ballast engineering[C]. Proc. of IEEE IAS'03, 2003:1024-1030.

[4] Chen Min, Qian Zhaoming. A fluorescent lamp model based on its physical characteristics[C]. Proc. of IEEE PEBS'03, 2003:1132-1136.

[5] Ponce M. A simple Pspice high-frequency dynamic model for discharge lamps[C]. COMPEL'00, 2000: 293-297.

[6] Correa J. Modeling of low power metal-halide and HPS lamps operated at high frequency[C]. IEEE CIEP'02, 2002: 233-238.

[7] Ribarich. T. J. Ribarich. A new high-frequency fluorescent lamp model[C]. IEEE IAS Annual Meeting, 1998, 13: 2049-2098.

[8] Moo C S, Yen H C, Hsieh Y C, et al. A fluorescent lamp model for high-frequency electronic ballasts[C]. IEEE IAS Annual Meeting Records, 2000: 457-461.

[9] Cervi M, Fortes E C, Seidel A R, et al. Fluorescent lamp model employing tangent approximation[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2002: 908-912.

[10] Deng E, Cuk S. Negative incremental impedance and stability of fluorescent lamps[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997: 1050-1056.

[11] 戴国骏，袁挚虞．荧光灯的小信号模型[J]. 中国照明电器, 1998(8): 31-34.
Dai Guojun, Yuan Zhiyu. The small signal model of fluorescent lamps[J]. China Light & Lighting, 1998(8): 31-34.

[12] 范影乐，杨胜天．Matlab 仿真及其应用[M]. 北京：人民邮电出版社，2001.

[13] 路秋生．电子镇流器的设计与调光技术[M]. 北京：科学出版社, 2005.

[14] 薛坚．冷阴极荧光灯驱动电源的研究[D]. 南京：南京航空航天大学, 2005.

作者简介

杨善水　男，1969 年生，副教授，研究方向为电力电子与电力传动、航空航天供电系统和配电系统。

黄陆建　男，1982 年生，硕士研究生，研究方向为电力电子与电力传动。