

一种新型直流固态功率控制器行为模型

阮立刚, 王莉*

南京航空航天大学 电气工程系 江苏省新能源发电与电能变换重点实验室, 江苏 南京 210016

摘要: 提出一种适用于大型飞机电气系统数字仿真的直流(DC)固态功率控制器(SSPC)的行为模型。利用受控电压源控制 SSPC 两端电压按照线性规律变化以模拟 SSPC 的慢开通和慢关断特性。分析了该行为模型在稳态导通和稳态关断时的工作状态,考虑了实际直流 SSPC 的漏电流,对该模型进行了改进。分析该模型带各种负载的开通关断过程。在 Saber 软件中实现该行为模型,并通过仿真和实验验证其与各种性质负载的兼容性。快速性测试结果表明,相比基于真实结构和器件模型,该行为模型能够显著提高仿真速度和收敛性能。

关键词: 飞机电气系统;行为模型;仿真;固态功率控制器;负载兼容性

中图分类号: V242.3; TM56 **文献标识码:** A

目前大型飞机正朝着多电化和全电化的方向发展^[1-3],其配电系统朝着分布式的固态自动配电的方向发展。和常规配电以及遥控配电相比,固态自动配电在减轻配电系统重量、提高综合控制能力,保证电能质量,提高系统冗余容错能力以及系统可靠性方面具有很大优势^[4-6]。固态功率控制器(Solid State Power Controller, SSPC)作为固态自动配电系统中核心部件和终端的执行部件,具有接通断开负载、故障保护和隔离、状态反馈和自检等功能^[7-9]。

大型飞机供配电系统结构和控制的规模、复杂程度相比以往有了很大的提高,电气系统容量大大增加,系统中使用大量的电力电子装置,带来了电能质量的问题,包括:谐波畸变、电流浪涌、电压尖峰等瞬态变化过程,这可能对设备的性能产生不利的影响。许多问题在系统集成之前是不容易发现的,在集成完成之后再对设计进行更改需要付出很大的代价。因此大型飞机电气系统设计、研制和维

护更加依赖于先进的系统集成仿真技术。

目前大型飞机电气系统的集成仿真成为了国内外研究的热点^[10-11],包括关键部件如发电机及控制器、变压整流器、静止变流器、SSPC 等的建模。为了分析 SSPC 对系统性能的影响,评估系统中出现过流或者短路故障时,SSPC 如何对故障进行保护和隔离,国内外学者对 SSPC 的数字仿真模型展开了研究^[10,12-15]。文献[10]通过对国际空间站电力系统中直流 SSPC 的小信号建模,发现当负载为功率变换器等恒功率负载时, MOSFET 的极间电容可能会导致整个系统不稳定。文献[12]建立了一种考虑环境温度和导线温度的模型,能够根据负载的电流、环境温度和导线的温度决定过载时的跳闸保护时间。文献[13]利用 Saber 软件的层次建模功能,对 SSPC 的实现电路进行封装,建立了器件级模型,与实际的 SSPC 性能有很好的一致性。文献[10]、文献[12]和文献[13]的建模方法基于实际结构和器件,其优

收稿日期:2011-02-22; 退修日期:2011-03-19; 录用日期:2011-09-29; 网络出版时间:2011-10-14 15:05

网络出版地址:www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20111014.1505.001.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20111014.1505.001

基金项目:航空科学基金(20091952022);2010年南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金

* 通讯作者. Tel.:025-84893497 E-mail: liwang@nuaa.edu.cn

引用格式: Ruan L G, Wang L. A novel behavioral model of solid state power controller. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 129-137. 阮立刚,王莉.一种新型直流固态功率控制器行为模型.航空学报,2012,33(1):129-137.

点是能够准确地模拟实际的电气性能,并且对SSPC的电路设计有比较好的指导作用。但是其缺点也是显而易见的:由于在大型飞机配电系统中SSPC的数量可以达到数百个,如果都采用基于实际结构和器件的模型,那么必然会花费大量仿真时间,甚至导致仿真不收敛而失败。因此基于实际结构和器件的模型并不适用于大型飞机电力系统的仿真。文献[14]和文献[15]提出了一种行为建模方法,不依赖于实际电路结构和器件,仿真速度快,适用于大型复杂系统的仿真。该模型把SSPC当做受控电流源来建模,虽然能够很好地处理纯阻性负载和阻容性负载,但存在以下问题:

① 没有考虑实际SSPC的漏电流问题。

② 需要实时检测负载阻抗的大小。当该模型带阻感性负载时,由于电感电流初值为零,检测负载阻抗得到无穷大的结果,出现奇异点,导致仿真失败。

③ 当SSPC级联使用时,存在纯电流源割集,这是电路仿真软件不善于处理的,如Saber和MATLAB软件都无法处理这种情况。

为解决以上问题并正确模拟SSPC的慢开通和慢关断特性,提出一种新的开环方式工作的行为模型,模型简单且不需要检测负载阻抗的大小,并且准确地模拟了带各种性质负载(包括阻感性负载)的电气外特性。仿真和实验结果表明了该模型的准确性和快速性。

1 新型SSPC行为模型的提出

图1为一般直流SSPC的原理图,主要包括电源模块、隔离控制电路、内部控制电路和功率部分。功率部分由功率MOSFET和检测电阻组成。内部控制电路包含MOSFET驱动电路、短路保护电路、状态检测和锁存电路等。

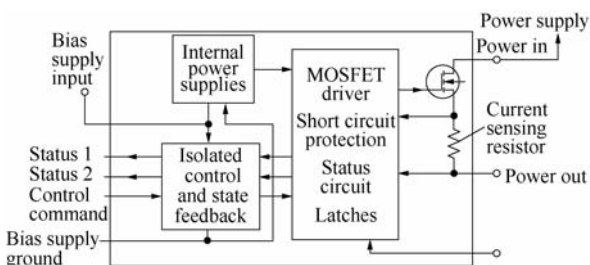


图1 直流SSPC原理图

Fig. 1 Schematic diagram of DC SSPC

直流SSPC接收上位机的控制命令,通过控制MOSFET的栅源电压实现负载的软接通和软关断;当负载发生过流故障时,根据反时限保护曲线跳闸;当出现短路故障时,可以在数十微秒内将MOSFET关断,实现故障负载的隔离。从文献[14]和文献[15]中提供的美国Sensitron公司和DDC公司的产品实验测试结果可以看出:一般直流SSPC带纯阻性负载时,在负载开通和关断过程中,负载电压是线性上升和下降的;带阻容性负载时,开通过程中负载电压线性上升,关断过程中负载电压非线性下降,且比阻性负载下关断得慢。SSPC这种慢开通特性有利于减小容性负载开通过程中的冲击电流,慢关断特性有利于减小感性负载关断过程中的电压应力,因此SSPC的负载兼容性较好。本文的重点是建立能够正确反映直流SSPC软接通和软关断电气特性的行为模型。

图2是本文提出的基于受控电压源的直流SSPC行为模型,分为开关逻辑、斜坡信号产生、功率回路、反时限过流检测和短路检测5个模块。

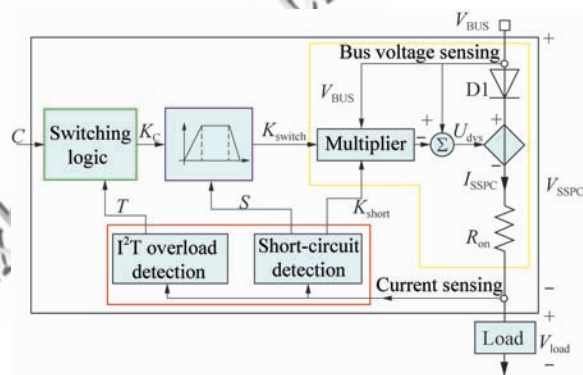


图2 基于受控电压源的直流SSPC行为模型原理图

Fig. 2 Schematic diagram of DC SSPC behavioral model based on dependent voltage source

开关逻辑模块将上位机发出的开通关断命令C与反时限过流检测模块发出的过流关断信号T以及短路电流检测模块发出的关断信号S进行逻辑运算得到Kc信号。Kc为高电平时表示软接通负载命令,Kc为低电平则表示软关断负载命令。

当负载出现过载时,反时限过流检测模块发出低电平T给开关逻辑模块;当负载出现短路故障时,短路检测模块发出低电平命令S给开关逻辑模块,并使 K_{short} 在微秒时间内从1下降到0,而

未检测到短路故障时 $K_{\text{short}}=1$ 。 K_{short} 从 1 下降到 0 的时间即为 SSPC 的短路保护时间。

功率模块由理想二极管 D1、受控电压源 U_{dvs} 和电阻 R_{on} 构成。D1 是为了保证 SSPC 的单向导电性。电阻 R_{on} 是为了模拟实际 SSPC 的导通电阻,可从产品数据手册中查到。受控电压源的电压由斜坡信号产生模块的 K_{switch} 、短路检测模块产生的 K_{short} 和汇流条电压 V_{BUS} 运算得到。

斜坡信号产生模块与功率模块的受控电压源 U_{dvs} 负责控制负载电压的上升和下降。因为汇流条电压 V_{BUS} 等于 SSPC 电压降 V_{SSPC} 与负载电压降 V_{load} 之和,通过控制 SSPC 的电压降按照线性规律变化也就完成了对负载电压线性变化的控制。

图 3(a) 是斜坡信号产生模块的原理图,输入信号为 K_{C} ,输出信号为 K_{switch} 。积分环节带有上下限幅,上限幅值为 1,下限幅值为 0,积分器的初值设为零。

T_{on} 和 T_{off} 是开通和关断时间,可从数据手册中查到。若 t_1 时刻发出开通命令, K_{C} 为逻辑高电平,选择开关输入指向 $1/T_{\text{on}}$, t_2 时刻发出关断命令, K_{C} 为逻辑低电平,选择开关输入指向 $1/T_{\text{off}}$ 。输出信号 K_{switch} 为

$$K_{\text{switch}} =$$

$$\begin{cases} \frac{t-t_1}{T_{\text{on}}} \in [0,1] & \text{During on operation} \\ 1 & \text{Steady on state} \\ 1 - \frac{t-t_2}{T_{\text{off}}} \in [0,1] & \text{During off operation} \\ 0 & \text{Steady off state} \end{cases} \quad (1)$$

K_{C} 和 K_{switch} 的时序关系如图 3(b) 所示。根据图 2 可得

$$U_{\text{dvs}} = V_{\text{BUS}} - K_{\text{short}} K_{\text{switch}} V_{\text{BUS}} \quad (2)$$

$$V_{\text{load}} = V_{\text{BUS}} - U_{\text{D1}} - U_{\text{dvs}} - R_{\text{on}} I_{\text{SSPC}} = K_{\text{short}} K_{\text{switch}} V_{\text{BUS}} - U_{\text{D1}} - R_{\text{on}} I_{\text{SSPC}} \quad (3)$$

式中: U_{D1} 为 D1 的正向压降; I_{SSPC} 为 SSPC 的电流。不发生短路故障时, $K_{\text{short}}=1$,式(3)变为

$$V_{\text{load}} = K_{\text{switch}} V_{\text{BUS}} - U_{\text{D1}} - R_{\text{on}} I_{\text{SSPC}} \quad (4)$$

若忽略 U_{D1} 和 R_{on} 上的压降,可以得出

$$V_{\text{load}} = K_{\text{switch}} V_{\text{BUS}} \quad (5)$$

从式(1)和式(5)可以看出,负载电压是线性上升和下降的。

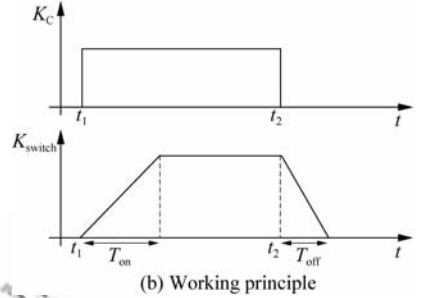
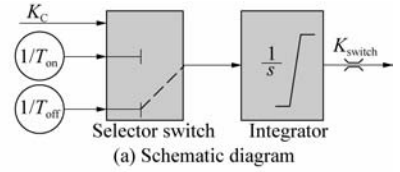


图 3 斜坡信号产生模块原理图和波形

Fig. 3 Schematic diagram and working principle of ramp generating block

当 SSPC 处于稳态开通状态时, $K_{\text{switch}}=1$, SSPC 中流过正向的电流,而理想二极管 D1 的压降 $U_{\text{D1}}=0$,所以式(4)变为

$$V_{\text{load}} = V_{\text{BUS}} - R_{\text{on}} I_{\text{SSPC}} \quad (6)$$

从式(6)可以看出 SSPC 等效为一个开路电压为 V_{BUS} 、内阻为 R_{on} 的电压源,这和 SSPC 的实际特性一致,如图 4 所示。

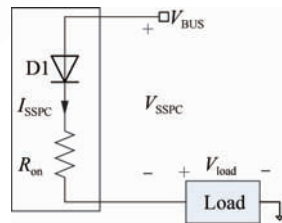


图 4 图 2 中行为模型稳态开通时的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of behavioral model in Fig. 2 during steady on state

当 SSPC 处于稳态关断状态时, $K_{\text{switch}}=0$, $U_{\text{dvs}}=V_{\text{BUS}}$,因此功率回路的电压源之和为零,所以 $I_{\text{SSPC}}=0$, $U_{\text{D1}}=0$,得到

$$V_{\text{load}} = 0V_{\text{BUS}} - R_{\text{on}} I_{\text{SSPC}} = 0 \quad (7)$$

可以看出负载电压虽然为零,但此时 SSPC 等效为一个开路电压为零、内阻为 R_{on} 的电压源。所以该模型在稳态关断状态下和实际 SSPC 关断时的高阻抗特性不一致,为此对图 2 所示模型进行改进,得到图 5 所示的改进的行为模型。

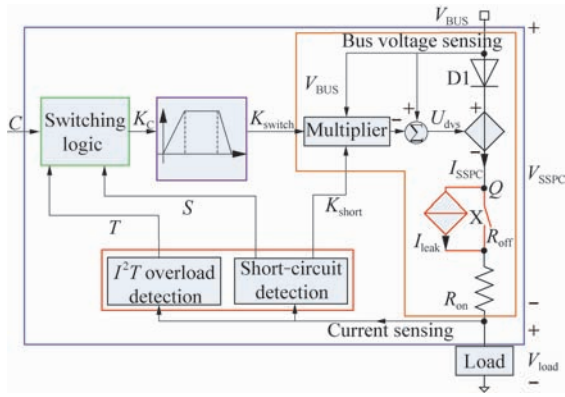


图5 改进的直流SSPC行为模型原理图

Fig. 5 Schematic diagram of improved DC SSPC behavioral model

改进的行为模型在功率回路中增加了串联的开关X和压控电流源 I_{leak} 。其中开关X的开关逻辑设定如下:

① 当 $K_{switch}=0$ 时,开关X处于关断状态,关断时的电阻为 R_{off} 。

② 当 $K_{switch}>0$ 时,开关X闭合,压降为零,压控电流源 I_{leak} 被短接。

压控电流源 I_{leak} 是为了模拟SSPC关断状态下的漏电流。这里假设:关断状态下的漏电流 I_{leak} 与SSPC所承受的电压 V_{SSPC} 成正比,即

$$I_{leak} = gV_{SSPC} \quad (8)$$

式中: g 为压控电压源的转移导纳,可以利用式(9)根据SSPC产品数据手册间接计算得到。

$$g = I_{leak}^N / U_N \quad (9)$$

式中: U_N 为额定电压; I_{leak}^N 为关断状态下SSPC承受额定电压 U_N 时的漏电流。

当SSPC处于开通关断过程或者正常稳态开通状态时, $K_{switch}>0$,开关X导通,压控电流源被短路,改进的行为模型(图5)与原有行为模型(图2)完全一致。

当SSPC处于稳态关断状态时,开关X关断,设定 $R_{off}=V_{BUS}/I_{leak}$ 。由于此时 $U_{dvs}=V_{BUS}$,且二极管D1为理想二极管,所以Q点的电位为零。将受控电流源 I_{leak} 和开关X做如图6所示的戴维南等效:其中 $U_{op}=I_{leak}R_{off}=V_{BUS}$ 。改进的行为模型在稳态关断状态下更直观模型如图7所示,这说明图5的行为模型在关断时是高阻抗的,与实际SSPC关断时的特性一致。

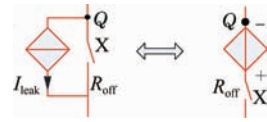


图6 受控电流源和并联电阻的戴维南等效电路
Fig. 6 Thevenin equivalent circuit of controlled current source and paralleled resistor

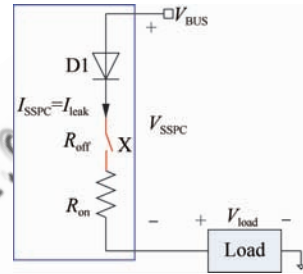


图7 改进的直流SSPC行为模型稳态关断时的等效电路
Fig. 7 Equivalent circuit of improved DC SSPC behavioral model during steady off state

2 直流SSPC行为模型带载开关过程分析

直流SSPC应具有较好的负载兼容性。下面对图5中模型带纯阻性、阻容性和阻感性3种典型负载的开通关断过程作分析。在开通过程、关断过程以及稳态开通状态时, $K_{switch}>0$,图5中开关X导通,压控电流源被短路,改进的行为模型与原有行为模型(图2)完全一致。分析负载开通关断过程时均对照对应的简化电路进行。

2.1 纯阻性负载

图8(a)是带纯阻性负载在非稳态关断时的简化电路, R_{load} 为负载电阻,二极管D1处于正向导通状态, $U_{D1}=0$,且

$$V_{load} = K_{switch}V_{BUS} - R_{on}I_{SSPC} \quad (10)$$

由于负载为纯阻性,所以

$$V_{load} = R_{load}I_{SSPC} \quad (11)$$

$$V_{load} = \frac{R_{load}}{R_{load} + R_{on}}K_{switch}V_{BUS} \quad (12)$$

$$I_{SSPC} = \frac{1}{R_{load} + R_{on}}K_{switch}V_{BUS} \quad (13)$$

从式(12)和式(13)可以看出,阻性负载下该SSPC模型实现了负载电压和负载电流开通时线性上升,关断时线性下降,如图8(b)所示。

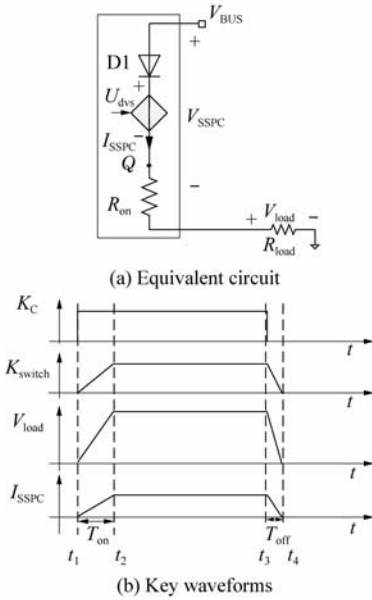


图 8 带纯阻性负载的直流 SSPC 行为模型

Fig. 8 DC SSPC behavioral model with pure resistive load

2.2 阻容性负载

图 9(a)是带阻容性负载在非稳态关断时的简化电路, C_{load} 为负载电容。

t_1 时刻发接通信号时, 二极管 D1 处于正向导通状态, 负载电压线性上升。忽略 SSPC 导通电阻, 理论推导可得开通过程中的 I_{SSPC} 为

$$I_{SSPC}(t) = \frac{V_{BUS}}{R_{load}} K_{switch} + C_{load} \frac{V_{BUS}}{T_{on}} [1 - \epsilon(t - t_1 - T_{on})] \quad (14)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为阶跃函数。 I_{SSPC} 波形示意图见图 9(b)。

据式(14)可以看出, I_{SSPC} 分为 2 个部分: ①由于负载电阻引起的稳态分量; ②负载电容引起的暂态分量, 这个暂态分量正比于负载电容值和直流条电压的乘积, 反比于开通时间 T_{on} 。

t_4 时刻发关断信号, 当负载电容比较大时, 放电速度较慢, 二极管 D1 在关断命令发出后的一段时间内截止, 负载电容上的能量完全通过负载电阻泄放, 直到关断过程结束。

2.3 阻感性负载

SSPC 带感性负载时需要在负载两端反并联一个续流二极管, 如图 10(a)中的 D2。同分析阻容性负载开通过程一样, 若忽略导通电阻的压降,

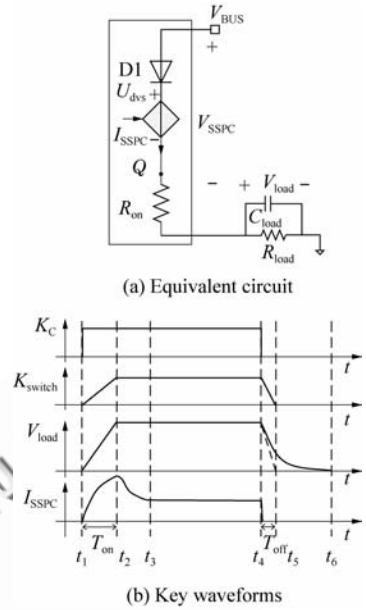


图 9 带阻容性负载的直流 SSPC 行为模型

Fig. 9 DC SSPC behavioral model with resistive and capacitive load

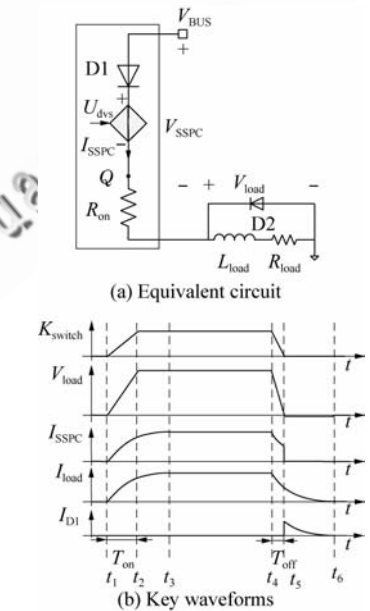


图 10 带阻感性负载的直流 SSPC 行为模型

Fig. 10 DC SSPC behavioral model with resistive and inductive load

开通时负载电压 V_{load} 也是线性上升的, 而负载电流 I_{load} 即电感电流滞后于 V_{load} 的上升。

t_4 时刻发出关断命令, 负载电压 V_{load} 在 T_{off} 时间内下降至零, 而负载电流 I_{load} 滞后于负载电压 V_{load} 的下降, 并没有下降到零。 t_5 时刻 $K_{switch} = 0$, 开关 X 断开, 电感电流从 D2 续流。设

D2 导通压降为 U_{D2} , 则负载电压被箝位在 $-U_{D2}$, 电感电流 I_{load} 等于 D2 的电流 I_{D2} , 在 D2 中一直续流直至电感电流衰减至零, D2 自然关断 (t_6 时刻)。开通关断过程波形如图 10(b) 所示。

3 模型仿真结果和实验验证

为了验证本文中行为模型的正确性, 选取美国 Sensitron 公司产品 SPDP10D270 (270 V/10 A) 作为本文行为模型的验证对象。利用 Saber 软件根据图 5 搭建行为模型, 并根据产品手册和实验测试结果, 对模型参数做相应配置后将仿真结果和文献[14]中的部分波形和实测波形进行比较。

图 11(a) 为 270 V/10 A SSPC 带纯阻性负载 (27 Ω) 时的开通关断波形, 图 11(b) 为对应实验条件下采用行为模型的仿真波形。

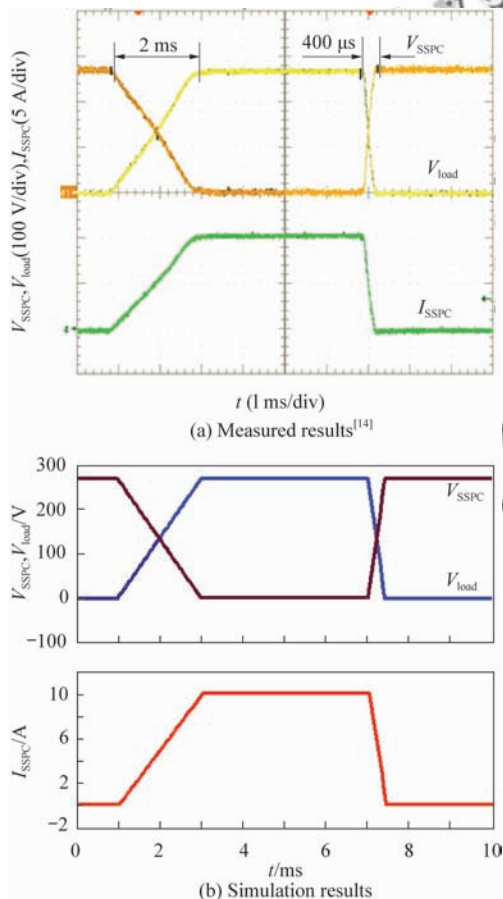


图 11 SSPC 带纯阻性负载下开通关断实测波形和仿真波形

Fig. 11 Measured and simulation results during on-off operation of SSPC with pure resistive load

图 12(a) 为 270V/10A SSPC 带阻容性负载 (27 Ω 电阻和 12 μF 电容并联) 时的开通关断波形, 图 12(b) 为仿真波形。

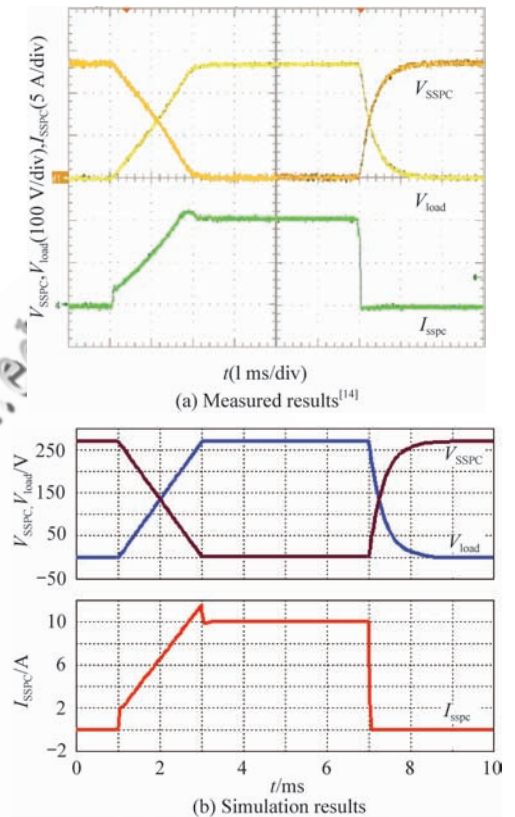
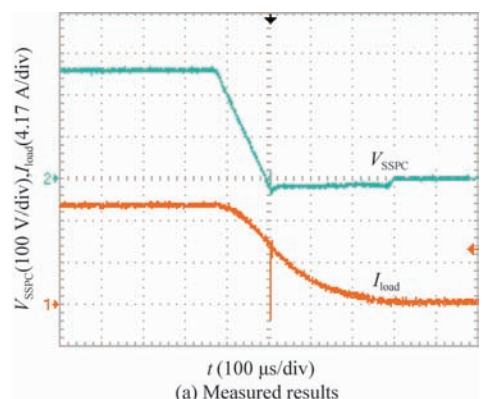


图 12 SSPC 带阻容性负载下开通关断实测波形和仿真波形

Fig. 12 Measured and simulation results during on-off operation of SSPC with resistive and capacitive load

270 V/10 A SSPC 带阻感性负载 (27 Ω 电阻和 3.6 mH 电感串联) 时的关断实验结果如图 13 (a) 所示, 相应仿真波形如图 13(b) 所示。



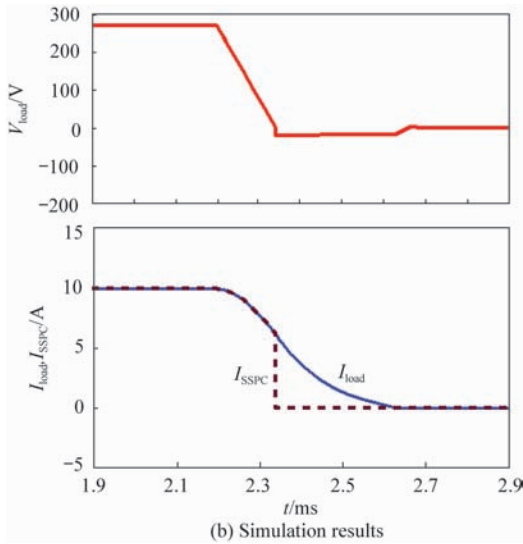


图 13 SSPC 带阻感性负载下关断实测波形和仿真波形
Fig. 13 Measured and simulation results during off operation of SSPC with resistive and inductive load

从实验和仿真结果可以看出,该行为模型能够很好地反映实际直流 SSPC 的慢开通和慢关断特性,并具有较好的负载兼容性。

4 数字仿真测试平台下行为模型的快速性测试

为验证所提出的行为模型的快速性,在 Saber 软件中搭建如图 14 所示的数字仿真测试平台。

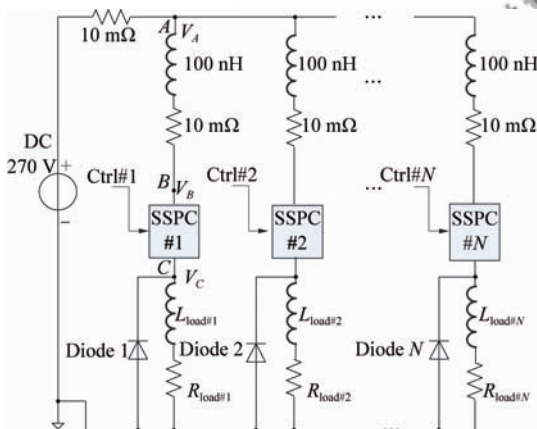


图 14 仿真速度测试平台

Fig. 14 Simulation speed test bench configuration

电源电压为直流 270 V,内阻为 10 mΩ。N 个阻感性负载通过 SSPC #1~SSPC #N 连在直

流母线上;从直流母线到每个 SSPC 的这段馈电线的电阻设为 10 mΩ,电感设为 100 nH。其中 SSPC 模型分别使用文献[13]中模型和本文提出的行为模型;所有 SSPC 的额定电压为 270 V,额定电流为 10 A,负载电阻为 27 Ω,负载电感为 3.6 mH,负载两端反并联二极管 Diode 1~Diode N。控制信号 Ctrl#1~Ctrl#N 为频率 100 Hz、占空比 0.3 的脉冲信号,并依次设置 1 ms 延时。总的仿真时间设为 100 ms,仿真步长为 1 ns。图 14 中 V_A 为直流母线电压, V_B 为 SSPC #1 功率输入端电压, V_C 为 $L_{load\#1}$ 和 $R_{load\#1}$ 的电压。

仿真花费时间的情况见表 1。可以看出行为模型的仿真速度远快于文献[13]的模型;并且 SSPC 数量越多,仿真速度的差异越明显。在数量达到 5 时,文献[13]的模型出现了仿真不收敛的情况(表 1 中 Failed 表示仿真失败),而本文的行为模型仍具有较好的收敛性和仿真速度。

表 1 仿真花费时间对比

Table 1 Comparison of simulation time

Number of SSPC	Truncation error	Simulation time/s	
		Model in Ref. [13]	Behavioral model
1	10^{-3}	23.3	1.23
	10^{-4}	26.0	1.42
	10^{-5}	33.2	1.72
5	10^{-3}	Failed	8.11
	10^{-4}	Failed	9.80
	10^{-5}	Failed	13.40
25	10^{-3}	Failed	42.40
	10^{-4}	Failed	52.10
	10^{-5}	Failed	69.10
100	10^{-3}	Failed	202.00
	10^{-4}	Failed	232.00
	10^{-5}	Failed	302.00

图 14 中 SSPC 数量为 100 时,关键位置仿真波形如图 15 所示。图中: $I_{load\#1}$ 为 $L_{load\#1}$ 的电流; $I_{SSPC\#1}$ 为 SSPC #1 的电流; I_{Diode1} 为 Diode 1 的电流。由于电源内阻以及线路阻抗的存在,负载的开通关断对母线电压有影响。负载端的电压电流波形与理论分析一致。

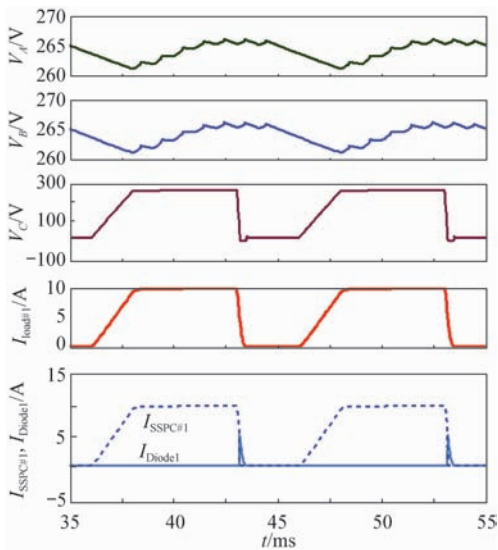


图 15 关键仿真波形

Fig. 15 Key waveforms by simulation

5 结论

提出一种基于受控电压源的 SSPC 行为模型,其具有以下特点:

1) 模型准确,负载兼容性好。仿真和实验结果表明该模型在各种性质负载下都能够较为准确地模拟实际 SSPC 软接通和软关断的电气特性;并且该模型能够模拟 SSPC 的漏电流。

2) 所需信息少,配置性好。不依赖于实际 SSPC 的内部结构,不需要知道实际电路构成和元器件参数大小,只需根据 SSPC 的参数或者实测结果即可以完成对 SSPC 的建模。

3) 仿真速度快,收敛性好。快速性测试结果表明基于受控源的 SSPC 行为模型仿真速度远快于基于结构和器件的模型,适合于使用固态配电的大型飞机电气系统数字仿真。

本文着重论述了 SSPC 行为模型在开通关断过程中的电气特性和负载兼容性,而对于反时限热保护以及短路保护功能在行为模型中的具体实现,限于篇幅没有展开讨论,将另行文介绍。

参 考 文 献

[1] Rosero J A, Ortega J A, Aldabas E, et al. Moving towards a more electric aircraft. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007, 22(3): 3-9.
[2] Weimer J A. Electrical power technology for the more

electric aircraft. *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference*. 1993; 445-450.

- [3] Howse M. All electric aircraft. *Power Engineer*, 2003, 17(4): 35-37.
[4] Maldonado M A, Korba G J. Power management and distribution system for a more-electric aircraft (MAD-MEL). *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1999, 14(12): 3-8.
[5] Maldonado M A, Shah N M, Cleek K J, et al. Power management and distribution system for a more-electric aircraft (MAD-MEL)-program status. *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. 1997; 274-279.
[6] Hart D S, Prickett G B, Schwarz C R, et al. A solid state power controller module for the international space station EXPRESS rack. *Energy Conversion Engineering Conference*. 1997; 280-285.
[7] Weimer J A. Power management and distribution for the more electric aircraft. *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. 1995; 273-277.
[8] Friedman S N. Solid-state power controller for the next generation. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1992, 7(9): 24-29.
[9] Izquierdo D, Barrado A, Raga C, et al. Protection devices for aircraft electrical power distribution systems; a survey. *IEEE Industrial Electronics Society*. 2008; 903-908.
[10] Panov Y V, Lee F C. Modeling and stability analysis of a DC power system with solid state power controllers. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 1996; 685-691.
[11] Bozhko S V, Wu T, Asher G M, et al. Accelerated functional-level modeling of more-electric aircraft electrical power system. *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*. 2010; 1-6.
[12] Barrado A, Izquierdo D, Raga C, et al. SSPC model with variable reset time, environmental temperature compensation and thermal memory effect. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2008; 1716-1721.
[13] Zhao J W, Wang L. Modeling and simulation analysis of DC solid-state power controller. *Power Electronics*, 2009, 43(9): 74-78. (in Chinese)
赵建伟, 王莉. 直流固态功率控制器的建模与仿真分析. *电力电子技术*, 2009, 43(9): 74-78.
[14] Barrado A, Izquierdo D, Sanz M. Behavioural modeling of solid state power controllers (SSPC) for distributed power systems. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2009; 1692-1697.
[15] Izquierdo D, Barrado A, Sanz M. Modeling methods for solid state power controllers (SSPC). *Compatibility and Power Electronics*. 2009; 265-270.

作者简介: 王莉 女,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:航空航天器供配电系统、系统故障诊断与健康管理和新能源发电和变换。
阮立刚 男,博士研究生。主要研究方向:固态配电系统。
Tel: 025-84893497 Tel: 025-84893497
E-mail: ruanligang@nuaa.edu.cn E-mail: liwang@nuaa.edu.cn

A Novel Behavioral Model of Solid State Power Controller

RUAN Ligang, WANG Li *

Jiangsu Province Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Electrical Engineering Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: A novel behavioral model of direct current (DC) solid state power controller (SSPC) is proposed in this paper, which is suitable for simulation of large aircraft power distribution systems. A dependent voltage source is employed in this model to achieve slow switching on and off by controlling the linearity of the voltage drop across the SSPC. Taking into consideration the leakage current, improvements are made on the SSPC behavioral model by analyzing its steady on and steady off states. Switching on and off dynamics of the proposed model with different kinds of load is studied. This model is implemented in Saber software and the compatibility for different kinds of load is validated by simulation and experimental results. Speed test results show that the proposed behavioral model is much faster and possesses better convergence property as compared with the model based on real structure and components.

Key words: aircraft power system; behavioral model; simulation; solid state power controller; load compatibility

Received: 2011-02-22; **Revised:** 2011-03-19; **Accepted:** 2011-09-29; **Published online:** 2011-10-14 15:05

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20111014.1505.001.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20111014.1505.001

Foundation items: Aeronautical Science Foundation of China (20091952022); 2010 Postgraduate Open Foundation of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

* **Corresponding author.** Tel.: 025-84893497 E-mail: liwang@nuaa.edu.cn