

# 电力电子技术在有载分接开关中应用研究

高桂英<sup>1</sup>,董锐<sup>1</sup>,夏小晴<sup>1</sup>,侯瑞<sup>2</sup>,董非<sup>2</sup>

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司培训中心,内蒙古 呼和浩特 010010;

2. 内蒙古电力集团综合能源有限责任公司,内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:**机电混合式有载分接开关在抑制燃弧功率、降低过渡损耗等方面,成为优化机械式有载分接开关性能的解决方案。为深刻理解机电混合式有载分接开关工作原理,验证控制策略的可行性,进行了多仿真平台研究。分别建立了基于Matlab的离线仿真、基于dSPACE的半实物仿真及基于Matlab/dSPACE/RTDS的实时仿真模型,对切换开关时序及功率器件控制策略进行了仿真计算。分别搭建了常规基于过渡电阻的有载分接开关样机以及基于晶闸管的机电混合式有载分接开关试验样机,通过对比测试结果,机电混合式拓扑结构可有效抑制电弧,过渡损耗约为常规开关损耗的1/20,并可辨识各开关动作位置,与仿真结果具有一致性。

**关键词:**机电混合式有载分接开关;离线仿真;半实物仿真;实时仿真;控制策略

**中图分类号:**TP391.9;TM564 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20856

## Study on Power Electronics Application in On-load Tap Changer

GAO Guiying<sup>1</sup>, DONG Rui<sup>1</sup>, XIA Xiaoqing<sup>1</sup>, HOU Rui<sup>2</sup>, DONG Fei<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia Electric Power(Group) Co., Ltd. Training Center, Huhhot 010010, Nei Monggol, China;

2. Inner Mongolia Power Group Synthesis Energy Co., Ltd., Hohhot 010020, Nei Monggol, China)

**Abstract:** Electromechanical hybrid on-load tap changer is a solution to optimize the performance of mechanical on-load tap changer in the field of arc power suppression and transition loss reduction. In order to deeply understand the working principle of electromechanical hybrid on-load tap changer and verify the feasibility of the control strategy, a multi-simulation platform was studied. The off-line simulation based on Matlab, semi-physical simulation based on dSPACE and real-time simulation model based on Matlab/dSPACE/RTDS were established respectively, and the divertering switch timing and power device control strategy were simulated and calculated. The prototype of the conventional on-load tap changer based on transition resistance and the electromechanical hybrid on-load tap changer based on thyristor were respectively set up. By comparing the test results, the electromechanical hybrid topology structure can effectively suppress the arc, the transition loss is about 1/20 of the conventional switching loss, and identify the action position of each switch, which is consistent with the simulation results.

**Key words:** electromechanical hybrid on-load tap changer (EHOLTC); off-line simulation; semi-physical simulation; real-time simulation; control strategy

有载分接开关在输、配电领域具有调节电压和无功功率的作用,具有便捷、高效的特点。调节过程伴随燃弧及过渡损耗制约了其性能的进一步提高。真空开关式结构设计可以满足对电弧的抑制,但截流过压问题需要解决。机电混合式结构设计可以解决电弧及附加损耗问题,利用电力电子器件实现换流、抑制燃弧的同时,可以消除切换损耗。

本文针对机电混合式有载分接开关,开展了多平台仿真研究,验证了其工作原理及控制策略的可行性。

## 1 离线仿真

现代电力系统的发展与仿真技术密切相关,新技术、新研究成果的检验和论证无不先经过仿真系统测试和验证。通常在针对某一电气研究

问题时,借助仿真平台进行前期学习和了解,该平台操作属于离线仿真过程。因仿真仅在PC机上独立运行,离线仿真过程受限于计算机性能、模型规模以及仿真步长等参数。模型规模过大或步长过小,可能会导致内存溢出现象。故离线仿真实际消耗时间与设置仿真时间不一致,这是与实时仿真系统之间最大的差异。具有代表性的离线仿真平台或环境包括: Matlab/Simulink/ SimPowerSystem, PSCAD, EMTD/ ATP, PSIM, BPA, NETOMAC等。这些软件平台各有特点,如表1所示。针对仿真对象及研究内容,可选用不同平台<sup>[1-5]</sup>。

表1 几种电力系统离线仿真软件汇总

仿真平台	开发商	特点
Matlab/SimPowerSystem	美国 MathWork	电气领域稳态及暂态仿真
PSCAD/EMTDC	加拿大曼尼托巴	电磁暂态仿真
EMTP/ ATP	加拿大	电磁暂态仿真
PSIM	美国	电力电子及电机驱动仿真
BPA	美国/中国	机电暂态仿真
NETOMAC	德国西门子	电力领域稳态就暂态仿真
PSS/E	美国	电力系统潮流计算
PSASP	中国电力科学研究院	机电暂态仿真

从统计情况来看,不同软件侧重点不同,在选择仿真平台时,一方面根据实际需求而定,另外也要考虑软件操作的难易程度,再有就是软件版权等也制约了平台的选择。Matlab平台凭

借功能强大,易于安装等特点,使用频次较高,可以满足电气领域的基本仿真需求。

### 1.1 模型搭建

机电混合式有载分接开关模型原理及时序如图1所示。图1中,  $K_1 \sim K_4$  由 switch 代替,代表切换开关K在A,B两抽头之间的切换过程,  $S_1, S_2$  为背靠背并联晶闸管,作为换流电子开关。

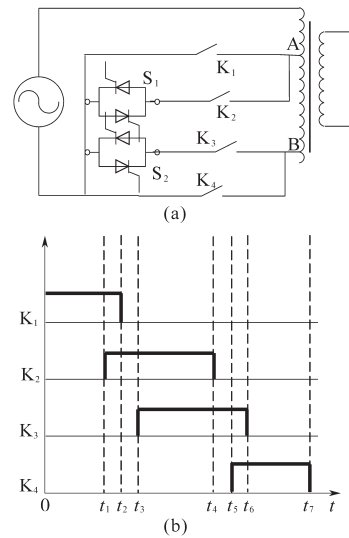


图1 机电混合式有载分接开关仿真电路及工作时序图

Fig.1 Simulation circuit and working sequence diagram of EHOLTC

为保证负载不开路、绕组不短路,需要设置两电子开关控制策略。机电混合式有载分接开关控制策略流程图如图2所示。通过判断电子开关端部电压、判断切换阶段,实现对电子开关触发,完成负载电流的切换。

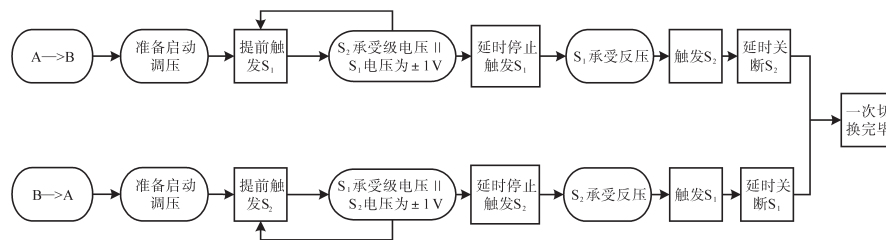


图2 机电混合式有载分接开关控制策略流程图

Fig.2 Control strategy flow chart of EHOLTC

### 1.2 仿真结果

机电混合式有载分接开关仿真电路及工作时序图如图3所示。按照图1b,首先验证了  $K_1 \sim K_4$  动作时序,如图3a所示。各开关动作时间间隔暂任意给定,仿真结果与预期一致。图3b为两电子开关触发信号及  $K_1 \sim K_4$  各支路电流,切换

方向为  $K_1$  至  $K_4$ 。  $S_1$  单元触发信号由  $S_2$  端部电压作为判据控制,实现了提前引入,确保  $i_{k1}$  至  $i_{k2}$  的电流转移,两电子开关在电流过零处完成切换,通过设置延时,  $S_2$  触发信号在  $K_4$  闭合后自动退出,验证了控制策略的可行性。仿真结果表明了该结构可以抑制  $K_1$  开断燃弧工况。

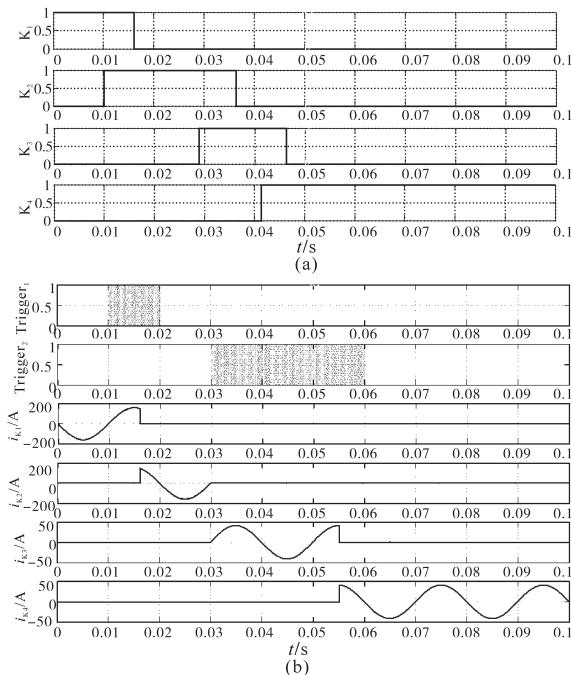


图3 机电混合式有载分接开关仿真电路及工作时序图

Fig.3 Simulation circuit and working sequence diagram of EHOLT

## 2 半实物仿真

早期电气设备的开发,需要在硬件、软件两部分同时完成后,方可对设备进行调试和实验。该过程存在周期长、效率低的问题。随着仿真技术的发展,在硬件开发之前,可在实际环境下单独对软件控制策略进行验证和调控,以便及时发现、修改控制程序,该过程称为快速控制原型(rapid control prototyping, RCP)半实物仿真;与该过程类似,当控制程序及控制电路制作完成后,为验证功能的正确性,可无需连接实际设备,而通过接口与虚拟设备相连,构成原型控制器与虚拟功率设备的回路测试系统,称为硬件在环路(hardware in the loop, HIL)半实物仿真;还有一种仿真系统,利用实际控制电路和功率设备,如逆变器单元等,通过虚拟仿真平台控制器经功率放大器等放大设备与实际外设建立仿真系统,因加入了功放设备,故该仿真回路称为功率硬件在环路(power hardware in the loop, PHIL)半实物仿真<sup>[6]</sup>。

以上三种半实物仿真区别在于控制器的实、虚或功率设备的实、虚。虚拟控制器+实际功率设备为RCP半实物仿真;实际控制器+虚拟功率设备为HIL半实物仿真;实际控制器+功率放大器+实际功率设备为PHIL半实物仿真。图4可以清楚地说明其间关系。

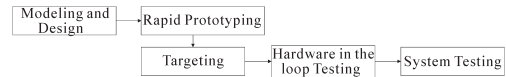


图4 半实物仿真功能结构图

Fig.4 Hardware-in-the-loop simulation function structure diagram

图4中可以看出从初期的模型设计到最后的系统及调试,经历了RCP和HIL两个半实物仿真阶段。随着技术的推进,市场上可见的半实物仿真产品较多,其中dSPACE控制系统最为成熟。以DS1103 PPC控制器为例,内部包含了Power PC和TMS320F240 DSP两种控制单元。前者用于浮点运算,可实现ADC、DAC和I/O功能,后者可实现PWM信号的I/O输出。该硬件设计保证了平台功能的强大。由德国公司开发的dSPACE系统基于Matlab/Simulink平台,可与Matlab模型实现无缝对接,实现RCP、HIL及PHIL测试环境。利用其ADC、DAC和I/O可完成与实际外设间的采样、开入、开出等功能,光纤接口(GBIC)可作为上位机PC与dSPACE的通讯节点,完成模型Model向C代码的转换与下载,进而实现RCP功能。当已有实际控制器电路时,更希望测试控制器功能,可利用dSPACE建立被控对象模型,同样利用ADC、DAC和I/O接口与实际控制器通信,完成测试,实现HIL功能。

利用dSPACE的优势在于,其配套开发软件ControlDesk是综合实验与测试平台,能够识别Matlab/Simulink模型。在进行RCP建模时,只需将原模型中的功率回路删去,留下控制策略部分。通过RTI(real-time interface)与Matlab建立连接,模型文件通过编译成为dSPACE板卡可识别的C代码,通过RTW(real-time workshop)完成代码转换和下载。在ControlDesk中绘制显示模块,包括示波器、数字表等,用于输出监视使用<sup>[7-8]</sup>。

通过了解目前市场现有产品,汇总了几种仿真平台,信息如表2所示。

表2 几种半实物仿真平台对比数据

Tab.2 Hardware-in-the-loop simulation function structure diagram

平台	开发商	成本	硬件	软件	市场比例
dSPACE	德国dSPACE公司	高		RTI, RTW, ControlDesk, Targetlink等	高
HRT1000	中国华力创通	较高	需要	SimSoft等	低
IHawk	美国并行	高	专业硬件系统	NightStar/NightTrace	较低
Typhoon	瑞士台风	较高		Typhoon HIL Control Center	低
MT RCP	中国远宽	较高		StarSim RCP	较低
Cspace	安徽合动智能	较低		cSpaceWatch	较低

表2中列举的平台均可实现半实物仿真,但作为半实物仿真的早期开创者,dSPACE的市场占有率较高。

### 2.1 平台搭建

利用DS1103 PPC Controller Board 板卡,搭建半实物仿真平台如图5所示。DS1103板卡共有20路主ADC通道、8路主DAC通道,50个主I/O接口,具有RS232,CAN等通讯接口。dSPACE系统作为控制回路,通过外设接口实现对功率回路电流、电压模拟量的采集,控制开关以及电力电子器件通断,实现切换工序。平台设备参数为:自耦变压器TDGC2J,安捷伦DSO7104A,正泰F4-22,MTC100-10<sup>[9]</sup>。

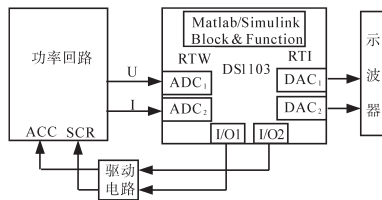


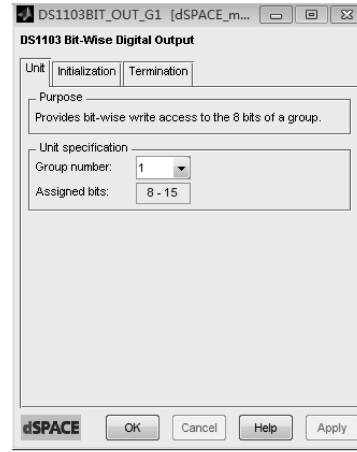
图5 dSPACE仿真平台工作结构原理图  
Fig.5 Working structure schematic diagram of dSPACE simulation platform

### 2.2 测试过程

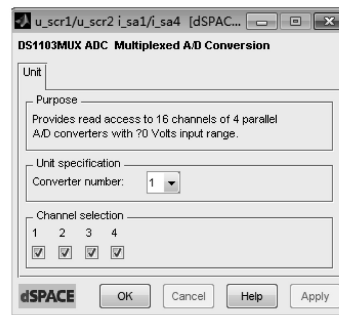
在仿真平台中完成系统控制策略的建模,不包含功率元件部分。

图6a为通用DS1103BIT\_OUT\_I/O模块属性设置对话框,模型共用了8~15号8个I/O节点,分别为 $K_1 \sim K_4$ 控制开出量以及4路半导体器件触发信号开出量。因dSPACE的I/O模块仅识别boolean变量信号,而内嵌的Embedded Function程序输出信号均为double型,故需要进行变量类型转换。图6b选择4路通道 $ADC_1 \sim ADC_4$ 对输入信号进行了采样处理,为便于后续分析,除了两功率开关单元端电压之外,利用CT对其两支路电流进行了采样。ADC模块要求采样信号在 $\pm 10V$ 以内,程序计算过程中要注意进行等比例还原,否则程序判定有误。图6c为DS1103DAC模块属性设置窗口。使用该模块是为了方便外部对信号的监视,被监视信号为两功率单元支路电流。输出数据要考虑ADC口的10倍衰减以及CT变比,故确保与实际一致。

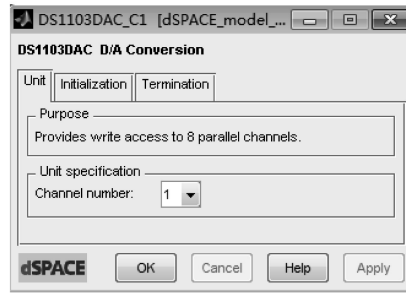
1)实测ACC动作时序。设置了4个ACC开关的动作时序,利用了模型库RTI Blockset中的DS1103BIT\_OUT\_G1 I/O模型,将其中的1~4 Pin作为ACC的控制输出端,5~6 Pin作为晶闸管单



(a)



(b)



(c)

图6 通用I/O,ADC及DAC属性设置对话框

Fig.6 Universal I/O, ADC and DAC property Settings dialog boxes

元触发板输入信号,再经晶闸管触发板输出给晶闸管。图7a为I/O模块输出的 $K_1 \sim K_4$ 开关动作时序,幅值为3.3V。该时序之间满足 $K_1 \sim K_4$ 阶梯关系,动作时间间隔无特殊设定。切换方向由 $K_4$ 至 $K_1$ 。

2)测试 $S_1, S_2$ 单元换流过程。图7b为上、下两个晶闸管单元 $S_1$ 和 $S_2$ 之间的换流暂态波形。可以看出,按照控制时序, $S_1$ 触发信号开通后经延时关断,在过零附近,判断 $S_1$ 端部承受反压,达到阈值后开通 $S_2$ 触发信号而导通,实现换流。可以看出 $K_1$ 开断位置,电流自然转移至 $S_1$ 单元,无燃弧过程,因ACC动作存在振动与干扰,导致 $K_1$ 开断前, $S_1$ 电流有微弱波动。

3)测试负载电流。图8为RL负载下负载整体电流,在换流点处,电流幅值发生跳变。

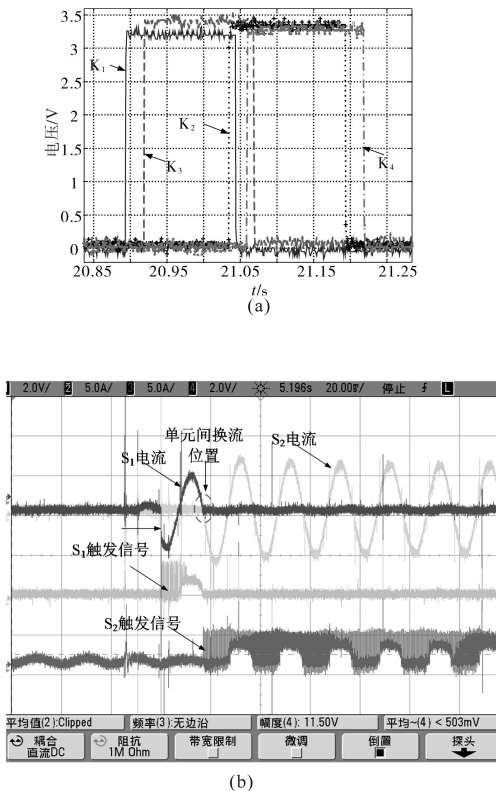


图7 开关动作时序及触发信号与支路电流

Fig.7 Switch action sequence, trigger signal and branch current

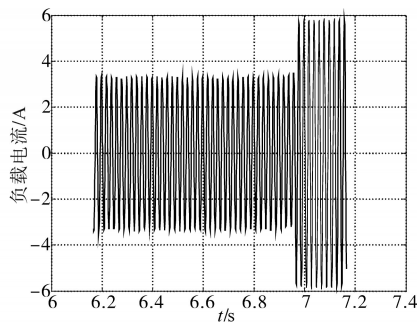


图8 负载电流切换波形

Fig.8 Load current switching waveform

仿真结果验证了模型设计的准确性。

### 3 实时仿真

实时仿真系统作为电力系统重要的在线仿真技术,具有系统动态实时响应和在线跟踪、调节等功能,优越于前述提到的离线仿真技术。在线仿真技术包括基于相似理论的以实际旋转电机为代表的电力系统动态模拟仿真系统、数模混合实时仿真系统、全数字实时仿真系统。离线仿真技术是在数字计算机上为电力系统的物理过程建立数学模型,用数学方法求解,进行仿真研究的过程,其仿真速度与实际系统的动态过程不

等。按照不同的动态过程可分为电磁暂态仿真、机电暂态仿真、中长期动态过程仿真三类<sup>[10]</sup>。

在原理性仿真与半实物仿真的基础上,为了验证不同仿真平台及方式之间的差异,构建了 Matlab/dSPACE/RTDS 多平台联合仿真测试。RTDS(real time digital simulator)实时数字仿真器是由加拿大曼巴托尼直流研究中心开发的电力系统实时数字仿真系统,其并行硬件结构可实现大规模实时仿真运算。通过实时调整参数,实现动态人机界面的交互,是研究大规模电力系统运行特性的有效手段。在利用 RTDS 开发平台 RSCAD 建立实际模型中,需要注意大步长系统与小步长系统的连接问题。晶闸管驱动信号属于小步长模型,将其与变压器、线路、开关等大步长系统相连时,需要经过 VSC INTERFACE 模块,用于大小步长之间的转换。亦可通过设置节点电压实现大小步长系统互联<sup>[11]</sup>。

1)平台搭建。所用 RTDS 为单 RACK 配置,1 个 WIF 板卡(workstation interface card)、1 个 GPC 板卡(giga processor card)、1 个 GTDI 板卡(gigabit transceiver digital input card)、1 个 GTA0 板卡(gigabit transceiver analogue output card)。WIF 卡用于 RACK 与外设的通讯,通过网口与 PC 相连,需要设置对应的 IP 地址建立连接。GPC 卡是主处理器板卡,包含两个 IBM PPC750GX PowerPC processors,用于仿真过程网络及逻辑计算单元,可解决 54 个节点及 56 个断路网络。GTDI 卡用于外部设备连接 RTDS 的数字接口,包括 64 个光独立输入通道。GTA0 板卡用于产生模拟信号,包括 12 个 16 位模拟输出通道,可提供  $\pm 10\text{V}$  输出信号。通过配置 GPC 卡的 config file 文件,可以实现对 RTDS 硬件的操作。设计平台 RSCAD 用于完成模型构建、运行监控和结果分析等操作,内嵌了 EMTP 电磁暂态算法。可通过 Draft 模块搭建系统模型,生成 dft 文件,保存模型内容。图 9 为 RTDS 硬件及软件间基本结构和关系图。

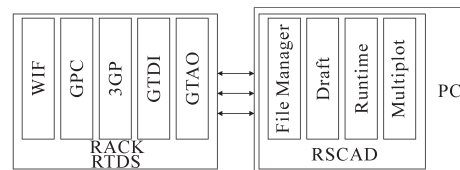


图9 RTDS软硬件结构图

Fig.9 RTDS software and hardware structure diagram

2)测试过程。本仿真过程中涉及了三个仿真平台, Matlab/Simulink, dSPACE 和 RTDS, Mat-

lab/Simulink用于仿真控制策略建模,含机电混合式有载分接开关工作过程时序控制、电力电子器件触发信号控制等策略。dSPACE作为控制策略硬件执行机构,充当控制电路,用于采集模拟信号与输出控制信号。RTDS作为功率部分的模拟,取代实际功率回路设备,在RSCAD中建立功率回路模型,经GTAO,GTDI等板卡,接收外设传送的数字控制信号,以及输出模型中各采样点的模拟信号,完成RTDS板卡与dSPACE板卡之间的数据交换,实现整个闭环仿真。仿真结构如图10所示。

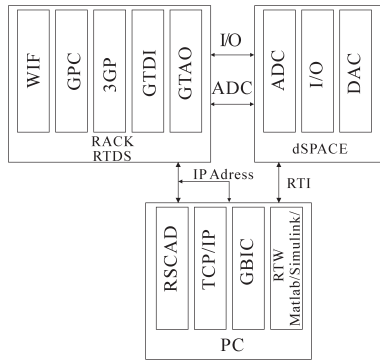


图10 Matlab, dSPACE 和 RTDS联合仿真结构图  
Fig.10 Joint simulation structure diagram of Matlab, dSPACE and RTDS

RTDS与dSPACE之间进行数字信号与模拟信号的交互,完成采样与驱动控制;dSPACE与PC之间进行控制策略设计、编译及下载;RTDS与PC之间进行功率回路的建模、仿真设置及输出显示等步骤,完成整个仿真过程的监视及调节。

在上位机RSCAD中建立了变压器、晶闸管组合、断路器、交流源等模型,利用4个Breaker开关模拟滑动触头动作过程。设置仿真步长为50 μs。将dSPACE的两路ADC和I/O通道与RTDS的GTAO和GTDI板卡对应通道保持物理连接。利用实际控制电路对RSCAD平台下功率回路开关器件模型进行信号控制,实现了RTDS实时仿真过程。

图11a为RSCAD波形监控的K<sub>1</sub>~K<sub>4</sub>支路一次切换电流波形。与图11b中Matlab离线仿真波形对比可以看出,多平台联合仿真结果是可行的。三种仿真平台中,半实物仿真平台与实际最为接近,因被控对象为实际功率回路,离线仿真可以较为方便地实现初期思路验证,简单易行,实时仿真平台能够检验多设备间控制信号传输的准确性及时效性,均具有理论分析价值。

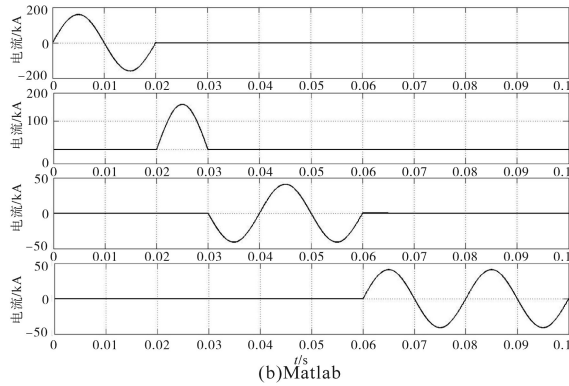
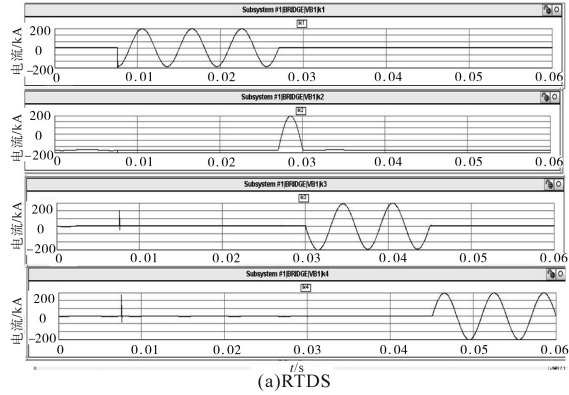


图11 仿真结果  
Fig.11 Simulation result

#### 4 实测研究

在前述仿真基础上,依据图1所示拓扑及开关时序,搭建了实验样机。主控电路采用了TI公司的F28335单元,电压信号经差分电路采样进入主控单元内部AD,经计算输出驱动信号。SCR驱动电路采用脉冲变压器结构,门极电压约为3.5 V。采用4路继电器输出驱动ACC的时序动作,设定各动作时间为: $t_1=0.0199\text{ s}$ , $t_2=0.0349\text{ s}$ , $t_3=0.055\text{ s}$ , $t_4=0.0809\text{ s}$ , $t_5=0.1069\text{ s}$ , $t_6=0.123\text{ s}$ , $t_7=0.143\text{ s}$ 。

实测开关动作时序及两S单元换流暂态波形如图12所示。K<sub>1</sub>~K<sub>4</sub>开关动作时序与图7a仿真结果一致,实测电压约为3.3 V。图12b中换流前后S<sub>1</sub>与S<sub>2</sub>单元电流分别为12 A和6 A,与图7b基本一致。因ACC动作存在分散性,导致每次实测各开关动作位置不尽相同,但不影响对工作原理的判定。另外,K<sub>1</sub>开断处无明显燃弧过程,实现了消弧切换,与理论分析一致。将两SCR换流暂态放大后,如图13a所示。可以看出两S单元换流存在一定延时,约为0.5 ms,该时间为S<sub>1</sub>延时关断与S<sub>2</sub>延时开通时间之和,由器件固有属性决定,可通过使用动态性能较好的器件予以缩短。图

13b为两S单元电流及端部电压分布情况,可实现对开关动作时刻的辨识。 $K_1$ 开断后, $S_1$ 出现电流, $S_1$ 端部电压存在一定干扰,与 $K_1$ 接触电阻有关。两单元换流后, $S_1$ 承受级绕组电压, $S_2$ 为器件通态压降;待 $K_2$ 开断, $S_1$ 端部电压衰减为零。 $K_4$ 闭合后, $S_2$ 端部电压开始衰减,与理论分析一致。

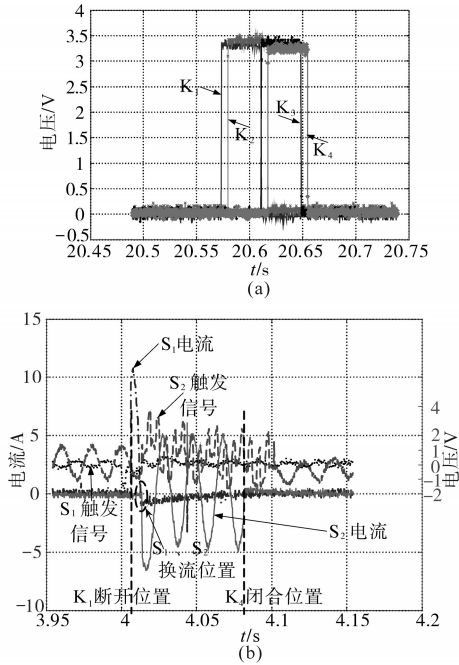


图12 实测开关时序及换流波形

Fig.12 Switch timing and diverter current waveforms measured

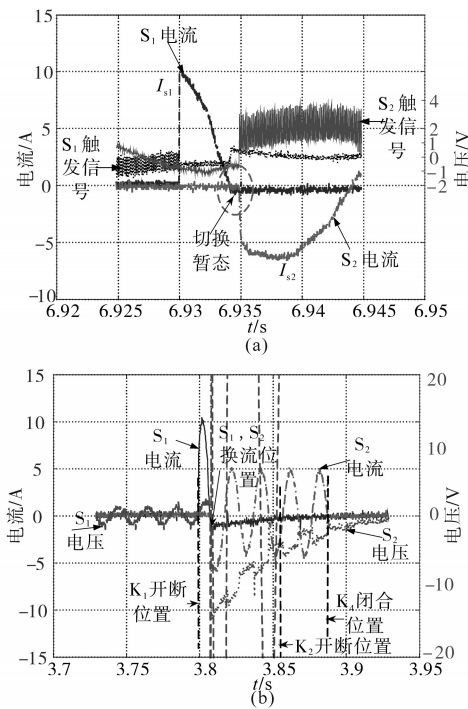


图13 电流、电压分布波形

Fig.13 Waveforms of current and voltage distribution

通过仿真与样机设计验证了电力电子技术在有载分接开关设备中应用的可行性。为证明该拓扑结构的优势所在,搭建了常规有载分接开关实测平台,结构和控制时序与机电混合式样机一致,仅将SCR替换为过渡电阻即可。相同工况下,再次测试了切换波形。两样机平台中过渡元件的损耗及开关燃弧损耗数据如图14所示。

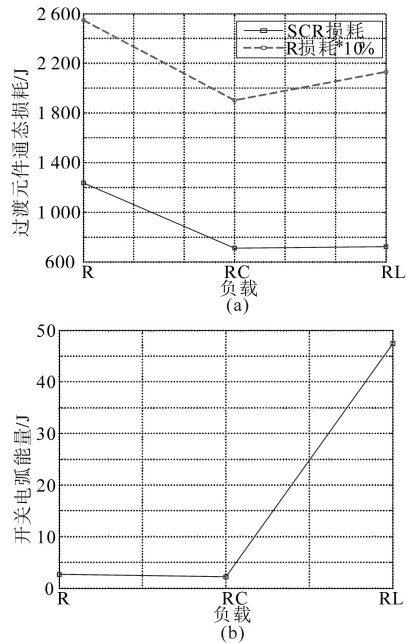


图14 过渡元件损耗及开关燃弧损耗波形

Fig.14 Transition component loss and switching arc loss waveform

共测试了三种负载工况,因负载电流的差异决定了数据的不同。图15a中过渡电阻损耗数据缩小了90%后仍高于SCR损耗,表明了电力电子技术实现了结构优化。图15b中仅给出了常规有载分接开关开断燃弧损耗,当加入SCR器件后,基本无燃弧工况。

## 5 结论

本文基于常规有载分接开关结构及工作原理,介绍了离线仿真、半实物仿真以及实时仿真等平台的基本概念、组成及各自特点,分类汇总对比了各类仿真软件。完成了机电混合式有载分接开关的离线仿真、半实物仿真及实时仿真计算。搭建了常规开关及机电混合式开关试验样机,实测了两平台的切换时序及切换暂态参数,对比了机电混合式有载分接开关的仿真与实测结果,具有较好的一致性。计算了常规开关与机电混合式开关过渡元件损耗及开关燃弧能量数据,确定了机电混合式拓扑结构性能最佳。

参考文献

[1] 高立艾,霍利民,黄丽华,等. 基于贝叶斯网络时序模拟的含微网配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7):2033-2040.

[2] 谢荣彬,夏关荣,李江涛,等. 基于EMTP-ATP的风力发电电机雷电电磁暂态特性分析[J]. 电力大数据, 2019, 22(8): 60-66.

[3] 李生民,何欢欢,胡丁尹. 基于PSCAD的双馈风力发电系统DTC策略研究[J]. 电气传动, 2013, 43(4):61-65.

[4] 王晓蔚,石振刚,杨潇,等. 基于PSASP的短路计算分析[J]. 电气传动自动化, 2010, 32(2):57-60.

[5] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究[J]. 电网技术, 2002, 24(12):1-4.

[6] 马培蓓,吴进华,纪军,等. dSPACE实时仿真平台软件环境及应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4):667-670.

[7] Patrick W. Rapid manufacturing and rapid tooling for metal

parts gain support[J]. Manufacturing Engineering, 2003, 131(5):30-63.

[8] Oh S J, Yoo C H, Chung I Y, et al. Hardware-in-the-loop simulation of distributed intelligent energy management system for microgrids[J]. Energies, 2013, 6(7):3263-3283.

[9] Avedillo M J, Quintana J M, Roldan H P. Increased logic functionality of clocked series-connected RTDS[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2006, 5(5):606-611.

[10] 汤涌. 电力系统全过程动态(机电暂态与中长期动态过程)仿真技术与软件研究[D]. 北京:中国电力科学研究院, 2002.

[11] Jeon J H, Kim J Y, Kim H M, et al. Development of hardware in-the-loop simulation system for testing operation and control functions of microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12):2919-2929.

收稿日期:2019-09-10

修改稿日期:2019-09-24

(上接第72页)

$$V = V_0 \times \frac{L + d_L - L_{act}}{L + d_L} \times k \quad (10)$$

式中:  $V_0$  为降速前的初始速度;  $L_{act}$  为停车程序启动后运行的距离, 可由程序块输出 YP 处理得到;  $k$  为比例调节系数, 用于根据生产工艺要求做变比例调节。

### 3 结论

文中 S 曲线程序块以加速时间和圆弧时间作为输入参数, 符合工程应用习惯。程序块输出实时加速度值和最短停车距离, 方便使用者根据工艺要求进行惯量补偿和定位停车控制。此外, 程序块以 SCL 编程实现, 可以方便地移植到其它支持 SCL 语言的 PLC 中, 也可以编译成 STL 语言后,

移植到支持 STL 的 PLC 中。目前, 该 S 曲线程序块已在多款 PLC 中用于平整机、轧机、连续退火等生产线的速度、张力控制, 并取得良好的效果, 具有较好的参考和实用价值。

参考文献

[1] 朱晓春, 屈波, 孙来业, 等. S 曲线加减速控制方法研究[J]. 智能控制技术, 2006, 35(23):38-40.

[2] 郑仲谦, 王兴飞, 李松, 等. 基于加减速时间控制的 S 形速度规划新算法研究[J]. 2014, 31(4):425-430.

[3] 陈宝罗, 胡鹏飞. 加减速算法分析及优化软件的设计[J]. 电子元器件应用, 2008, 10(5):74-77.

收稿日期:2019-10-22

修改稿日期:2019-11-12