DOI: 10.7667/PSPC171244

适用于 UPFC 多个控制策略间平滑切换的建模

周绍元[1]，李志勇[2]，陈 卓[3]，张晓娜[1]，陈世永[1]，陈大鹏[1]

(1.许继电气股份有限公司，河南 许昌 461000；2.许昌开普检测技术有限公司，河南 许昌 461000；
3.贵州大学电气工程学院，贵州 贵阳 550025)

摘要：统一潮流控制器(UPFC)集成了多种控制策略可以顺序完成多种运行工况，而多个控制策略间的平滑切换，对 UPFC 系统的稳定运行非常重要。提出了一种适用于多个控制策略间平滑切换的触发控制逻辑，结合各控制策略的“软切换”逻辑，实现了 UPFC 多个控制策略间的平滑切换，确保输电系统的稳定运行。在 RTDS 平台上搭建了统一潮流控制器仿真系统，设计了 UPFC 系统不同控制策略间平滑切换的仿真算例，对所提出的控制逻辑进行验证。试验结果表明所提出的控制逻辑是有效可行的。

关键词：潮流控制器；平滑切换；RTDS

Modeling of smooth handoff suitable for UPFC between multiple control strategies

ZHOU Shaoyuan[1], LI Zhiyong[2], CHEN Zhuo[3], ZHANG Xiaona[1], CHEN Shiyong[1], CHEN Dapeng[1]

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 3. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Unified Power Flow Controller (UPFC) integrates a variety of control strategies, which can complete multiple operating conditions in sequence, and the smooth switching between multiple control strategies is important for the stable operation of UPFC. A trigger control logic suitable for free switching between multiple control strategies is proposed, which can realize the smooth handoff between UPFC multiple control strategies and ensure the stable operation of power transmission system combined with the soft switching logic of each control strategy. The simulation system of UPFC is built on the RTDS platform, and simulation tests of smooth switching between different control strategies of UPFC system are designed for testing the proposed control logic. The experimental results show that the improved control algorithm is effective and feasible.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467003).

Key words: UPFC; smooth handoff; RTDS

0 引言

统一潮流控制器(UPFC)是一种由并联型和串联型换流器所组成，具有无功补偿、调压移相、控制线路潮流等功能的柔性交流输电系统(FACTS)[1-6]。UPFC 的上述功能均是由并联侧换流器和串联侧换流器经多个控制策略相互协调控制所实现的，其中，并联侧换流器的控制策略有：交流侧电压幅值控制、交流侧无功功率控制、直流侧母线电压控制、直流侧功率控制等。可以控制 UPFC 直流母线电压，维持 UPFC 系统有功功率平衡，还能吸收或发出无功功率实现对交流系统无功功率的补偿，进一步实现并联侧交流电压幅值的调节。串联侧换流器的控制策略有：恒压移相控制、串联补偿控制、潮流控制等。通过控制串联侧变压器输出电压的幅值、相位或控制输电线路的电流幅值，可以完成线路电压调节、串联补偿、移相控制和潮流控制等诸多功能[7-12]。UPFC 系统在启动、停机或运行过程中，均涉及到多个控制策略间的协调控制和相互切换，若控制不当则输电线路易引起过冲电压和过冲电流，诱发交流系统振荡，损伤一次设备。因此，UPFC 系统中不同控制策略间的平滑切换，对输电系统的稳定运行至关重要。

文献[13]分析了统一潮流控制器的结构和运行

基金项目：国家自然科学基金项目资助(51467003)

原理，并提出了 UPFC 的并联侧换流器和串联侧换流器的平滑启动和平滑停运策略，并详细介绍了具体的启动和停机步骤，实现了线路电流在 UPFC 串联侧变压器和旁路开关之间的平滑转移。文献[14]以南京西环网 UPFC 示范工程为例，介绍了一种具有线路功率越限控制功能的 UPFC 系统级控制策略。文献[15]详细介绍了 UPFC 串联侧多种运行模式的工作原理，并介绍了多种运行模式的仿真建模方法，在 RTDS 仿真平台中验证了恒压移相、潮流控制等多个功能的动态性能。上述文献对 UPFC 系统中所设计到的控制策略的介绍均是相对孤立的，并未深入地描述 UPFC 系统启停过程中的顺序操作步骤，也未系统地介绍 UPFC 系统中控制策略间的协调控制，给 UPFC 仿真建模研究带来一定的不便。

将 UPFC 系统中各控制策略进行模块化管理，围绕各模块间的平滑切换展开研究，提出了一种适用于多个控制策略间平滑切换的触发控制逻辑，结合各控制策略的“软切换”逻辑，实现了 UPFC 多个控制策略间的平滑切换，确保输电系统的稳定运行。在 RTDS 平台上搭建了统一潮流控制器仿真系统，设计了 UPFC 系统不同控制策略间平滑切换的仿真算例，对所提出的控制逻辑进行验证，试验表明所提出的控制逻辑是有效可行的。

1　UPFC 系统及控制策略概述

1.1 UPFC 系统结构概述

UPFC 系统结构图如图 1 所示，主要有 UPFC 一次系统和控制系统组成。UPFC 一次系统主要由并联侧换流器、串联侧换流器、串联侧变压器和旁路开关组成。其中，S_I 和 S_R 分别为送端、接收端交流系统，T_{Shunt} 和 T_{Series} 分别为并联侧变压器和串联侧变压器，Bypass 为旁路开关，I_1 为线路电流，V_2 为 UPFC 串联侧输出电压，I_B 为旁路开关电流，I_T 为串联变压器绕组电流。$p_{a1}(t)$ 等为 MMC 换流器的控制策略输出的调制波，采用最近电平逼近调制方式(Nearest Level Modulation, NLM)进行处理，分别驱动并联侧、串联侧换流器，实现 UPFC 无功补偿、调压移相以及定向、定量潮流控制等功能。

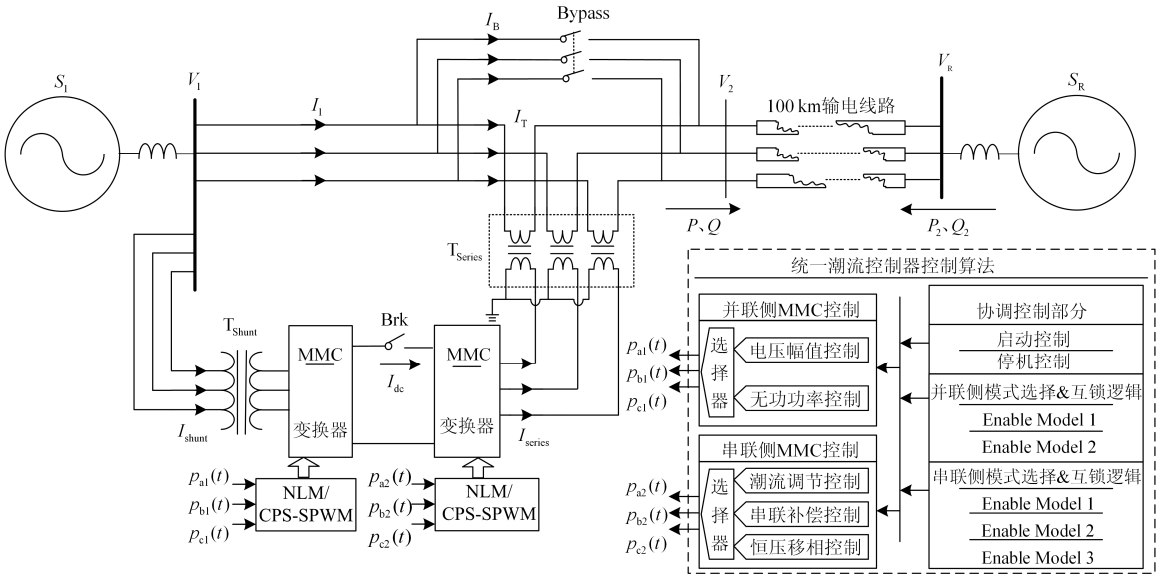


图 1　UPFC 系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of UPFC system

统一潮流控制器(UPFC)控制算法如图 1 右下所示，可以划分为三部分：并联侧 MMC 控制部分、串联侧 MMC 控制部分以及上层协调控制部分。并联侧控制主要包含有：并联侧母线电压幅值控制和并联侧无功功率控制；串联侧控制主要包含有：潮流调节控制、串联补偿控制、恒压移相控制等。基于串并联侧控制策略，提出了上层协调控制部分，主要有启动、停机控制、并联侧控制模式选择及互锁逻辑、串联侧模式选择及互锁逻辑。协调控制部分将 UPFC 系统中各控制策略进行模块化管理，围绕各模块间的平滑切换展开研究，提出了一种适用于多个控制策略间平滑切换的触发控制逻辑，结合各控制策略的“软切换”逻辑，实现了 UPFC 多个控制策略间的平滑切换及稳定运行。

1.2 UPFC 控制策略概述

UPFC 系统的核心功能均是基于串、并联侧换

流器的控制实现的，文献[14-15]中对各种控制策略均进行了详细的介绍。并联侧和串联侧换流器的控制策略结构图可概括为图 2 所示，其中，虚线框①所示为控制策略主体部分，根据不同的控制对象需求，经双闭环控制部分产生调制波信号，并作为虚线框②的输入。虚线框②所示为换流器驱动信号产生部分，调制波经最近电平逼近调制方式(NLM)调制产生脉冲序列，驱动串、并联侧换流器工作。

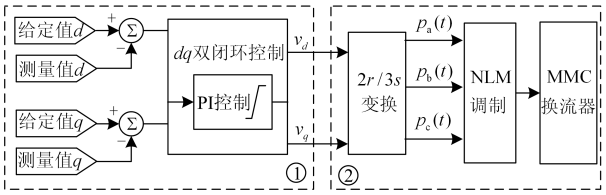


图 2 换流器双闭环控制结构图

Fig. 2 Structure of double closed loop control of converter

在 UPFC 系统中串联侧、并联侧的诸多功能实现，均是基于两侧的换流器作为控制主体实现的，即串并联侧的 MMC 换流器在不同时刻分别对应不同控制策略的调控。为了更便捷地实现不同控制策略的自由转换以及转换过程中确保输电系统平滑过渡，无过冲电压、电流，潮流平稳，将 UPFC 系统中各控制策略进行模块化管理，提出了一种适用于多个控制策略间平滑切换的触发控制逻辑，并结合各控制策略的“软切换”逻辑，可以实现 UPFC 多个控制策略间的自由切换及平滑过渡，确保 UPFC 系统稳定运行。

2　多个控制策略间平滑切换触发控制逻辑

图 3 所示为 UPFC 系统中上层协调控制策略切换结构图，将串联侧或并联侧的各个控制策略进行模块化管理，并对各个模块的输出进行顺序编号，如 model01 控制策略的输出部分为 model01d 和 model01q。而 MMC 换流器调制波输入部分(U_d 和 U_q)分别由 *Slecter* 控制多路选择器进行选择，当 *Slecter*=1 时，两个多路选择器的 1 通道导通，即 U_d=model01d，U_q=model01q，此时换流器为控制 model01 的工作模式下。

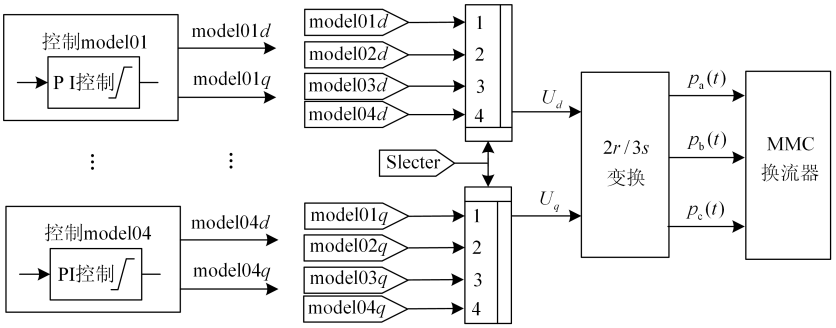


图 3 多个控制策略切换结构图

Fig. 3 Switching structure diagram of multiple control strategies

多路选择器的 Slecter 控制信号由图 4 所示的选择触发控制逻辑部分产生。图 4 所示为 UPFC 上层控制策略部分的多种控制策略选择、闭锁控制逻辑结构图，虚线框①—③分别对应三种不同的控制策略。虚线框①中， EnBut01 和 Ext01 均为控制策略 01 使能触发信号，经或逻辑产生脉冲信号 plus1，当 plus1 为高电平时，表示控制策略 01 处于使能状态，plus2、plus3 分别表示控制策略 02 和控制策略 03 的使能状态。DisBut01 和 restplus 信号均为控制策略 01 闭锁触发信号，Slecter01 为虚线框 01 最终输出信号值，当控制策略 01 处于使能状态时，Slecter01=1，反之 Slecter01=0。同理，当控制策略 02 处于使能状态时，Slecter02=2，反之 Slecter02=0；当控制策略 03 处于使能状态时，Slecter03=3，反之 Slecter03=0。三种制策略的输出信号 Slecter01、Slecter02 和 Slecter03 进行求和，作为 Slecter 的值，该值表示了 MMC 换流器当前的工作模式，结合图 3 所示的结构图，可以选择对应工作模式的控制策略调制信号。

对虚线框①中的控制策略而言，plus2、plus3、restplus 及 DisBut01 均是该控制策略的闭锁信号。即当某一控制策略处于触发使能状态时，会令其他控制策略处于闭锁状态。图 3 和图 4 所示结构图共同组成了 UPFC 系统多种控制策略自由切换的控制触发逻辑，基于该触发逻辑所组成的控制部分，可以更加便捷地实现控制策略间的自由转换。在切换过程中实现 UPFC 系统的平滑过渡，还需要“软切换”逻辑进行协调控制，如图 5 所示为控制策略的“软切换”控制策略结构图。

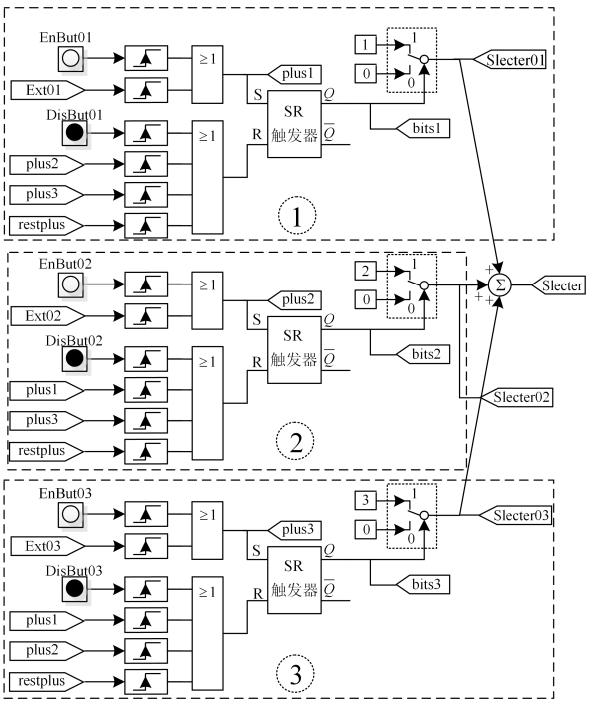


图 4 选择触发控制逻辑

Fig. 4 Structure diagram of selecting trigger control logic

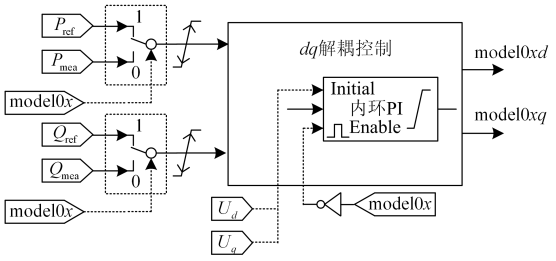


图 5 控制策略间的软切换结构图

Fig. 5 Soft handoff structure of control strategies

为了确保不同控制策略转换过程中 UPFC 系统保持平滑过渡，需从两个方面对常规控制策略进行改善。其一，改进控制策略的给定值部分，确保不同控制策略切换的时候，给定值能够平滑过渡。如图 5 所示，P_{ref}、P_{mea}、Q_{ref}、Q_{mea} 分别为线路有功功率给定值、有功功率测量值、无功功率给定值和无功功率测量值。当 model0x=0 时，潮流控制策略为闭锁状态，该控制策略的给定值切换为实时功率测量值 P_{mea} 和 Q_{mea}，当 model0x=1 时，该控制策略使能，控制系统的输入值突变为 P_{ref} 和 Q_{ref}，在选择开关后边增设斜率控制模块，实现了控制策略使能状态下，给定值的缓慢变化。即当 UPFC 系统由其他控制策略切换到潮流控制策略时候，系统给定值将由上一时刻的功率测量值经预设的斜率缓慢变化到给定值。其二，改进控制策略输出值部分，使其输出值的初始值为切换前控制策略的输出值。当 model0x=0 时，图 5 所示的控制策略处于闭锁状态，内环 PI 控制模块处于复位状态，且 PI 控制模块的初始值分别为换流器调制信号的 U_d 和 U_q 输入通道的实时动态值。当 model0x=1 时，该控制策略使能，内环 PI 模块从初始值(U_d 和 U_q)开始更新输出值，在 PI 模块中，积分环节占主要部分，该控制策略由闭锁状态切换到使能状态时，换流器的调制信号输入值并不会引起突变。图 3 和图 4 所示部分为所提出了一种适用于多个控制策略间平滑切换的触发控制逻辑，图 5 部分所示为各控制策略的“软切换”逻辑，二者相互协调控制，可以实现 UPFC 多个控制策略间的平滑切换，确保输电系统的稳定运行。

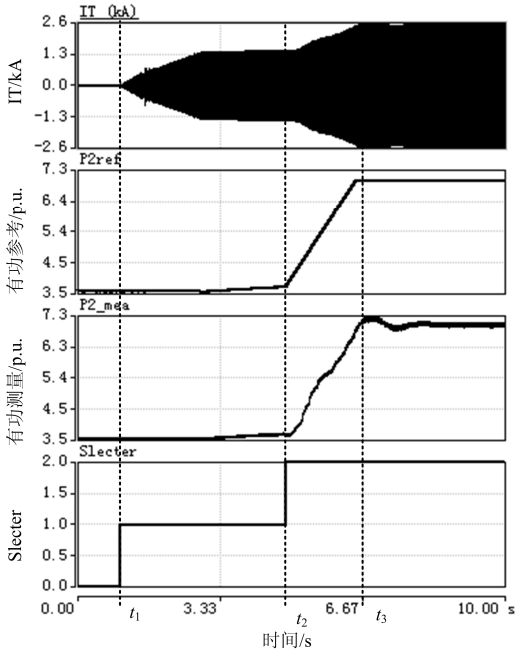
3 仿真算例

为了验证所提出的适用于多个控制策略间平滑切换触发控制逻辑的正确性，在 RTDS 实时仿真平台上搭建了 UPFC 系统的仿真模型，并基于该控制逻辑实现了 UPFC 串联侧部分启动运行过程的仿真。UPFC 串联侧的启动过程中，涉及到电流控制状态、自然功率状态和潮流控制状态三种工况的顺序发生，即电流控制状态下，控制线路电流由旁路开关平滑转移到串联侧变压器绕组；自然功率状态下，断开旁路开关，线路电流均流过串联侧变压器；潮流控制状态下，实现线路潮流的定向、定量稳定控制。

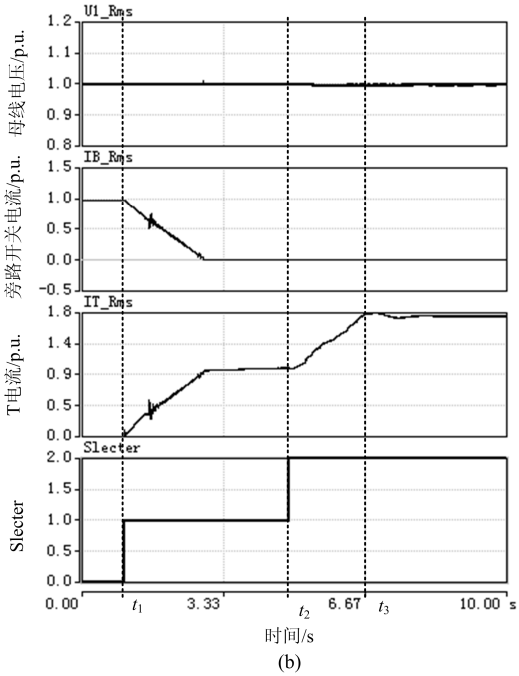
图 6 所示为 UPFC 串联侧系统启动过程中关键参量的波形观测。图 6(a)中从上到下依次为：串联变压器绕组电流测量值、系统有功功率给定值(p.u.)、系统有功功率测量值(p.u.)、多路选择器控制信号 Slecter。图 6(b)中从上到下依次为：母线电压 V_1 有效值测量(p.u.)、旁路开关电流有效值(p.u.)、串联侧变压器绕组有效值(p.u.)、多路选择器控制信号 Slecter。图 6(c)中：BrkWZ，旁路开关位置信号；BrkTW 旁路开关跳闸信号；Ext01，控制模式 01 外部使能信号；restplus，控制模式闭锁信号；bits1—bits4 和 plus1—plus4 所表示的信号在图 4 中已作说明。

由图 6 分析可知 UPFC 串联侧部分启动过程如下：0~t_1 时间段内，串联侧换流器处于闭锁状态，旁路开关闭合，输电线路电流流经旁路开关；t_1~t_2 时间段内，触发电流控制策略驱动串联侧换流器，控制线路电流由旁路开关平滑转移到串联侧变压器绕组，由图 6 可知，该阶段内，Slecter=1，为电流控制策略使能状态，旁路开关电流逐渐降低，串联

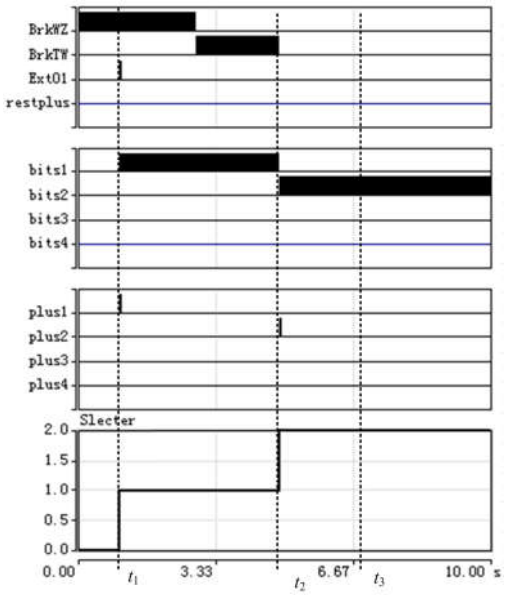
侧变压器电流逐渐增大，线路潮流保持平滑稳定。待线路电流完全转移到串联侧变压器绕组，跳开旁路开关，进入下一个控制环节；t_2~t_3 时间段内，Slecter=2，潮流控制策略进入使能状态，系统有功功率给定值平滑变化到给定值，系统潮流在控制策略下平滑变化。分析图 6(c)可知，电流控制策略和潮流控制策略互为使能、闭锁状态，并且控制策略切换期间系统潮流表现平滑稳定，表明所提多种控制策略间切换的触发控制逻辑是正确可行的。



(a)



(b)



(c)

图 6 仿真算例波形观测

Fig. 6 Waveform of simulation

4　结论

对 UPFC 系统中的多个控制策略进行模块化管理，针对诸多控制策略进行了上层协调控制部分的划分，围绕不同控制策略间的平滑切换建立了触发控制逻辑建模方案，结合各控制策略转换过程中的“软切换”控制，可以实现 UPFC 系统不同控制策略间的自由切换和平滑过渡，确保输电系统稳定运行。并在 RTDS 实时仿真平台上搭建了 UPFC 控制策略自由切换的仿真算例进行验证，试验结果表明所提出的平滑切换控制逻辑是正确可行的。该触发控制逻辑不仅适用于 UPFC 的控制系统，同时对 FACTS、柔性直流输电等控制系统也具有一定的参考意义。

参考文献

[1] 朱鹏程. 用于 UPFC 的串、并联双变流器控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 36-37.
ZHU Pengcheng. Study on the control of the series-parallel double conversion system for UPFC[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 36-37.

[2] 张曼, 张春朋, 姜齐荣, 等. 统一潮流控制器多目标协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1008-1013.
ZHANG Man, ZHANG Chunpeng, JIANG Qirong, et al. Study on multi-objective coordinated control strategy of unified power flow controller[J]. Power System Technology,

2014, 38(4): 1008-1013.

[3] 陈峰, 江道灼, 周洋, 等. 基于故障电流控制的新型UPFC-FCL设计[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 145-150.
CHEN Feng, JIANG Daozhuo, ZHOU Yang, et al. Design of UPFC-FCL based on fault current control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 145-150.

[4] 周飞, 陆振纲, 于弘洋, 等. 统一潮流控制器多时间尺度混合实时数字仿真[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2848-2855.
ZHOU Fei, LU Zhengang, YU Hongyang, et al. Research on multiple time scale hybrid real-time digital simulation and testing of unified power flow controller[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2848-2855.

[5] 仉志华, 徐丙垠, 陈青. 基于统一潮流控制器的配电环网潮流优化控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 122-126.
ZHANG Zhihua, XU Bingyin, CHEN Qing. Control strategies for UPFC-based optimal power flow of distribution network with normally closed-loop operation[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 122-126.

[6] 阎博, 汪可友, CROW M L, 等. UPFC状态反馈精确线性化潮流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 42-48.
YAN Bo, WANG Keyou, CROW M L, et al. UPFC power flow control strategy based on exact linearization via feedback[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 42-48.

[7] 梁寰宇, 苏建徽, 秦喆, 等. 基于MMC模块化多电平STATCOM的环流抑制均压控制策略研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 60-65.
LIANG Huanyu, SU Jianhui, QIN Zhe, et al. Circulating current suppression and capacitance voltage balancing strategy for modular multilevel converter based STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 60-65.

[8] 汪谦, 宋强, 许树楷, 等. 基于RT-LAB的MMC换流器HVDC输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.
WANG Qian, SONG Qiang, XU Shukai, et al. Real-time simulation of MMC based HVDC power transmission system using RT-LAB[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 36-40.

[9] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.

[10] 刘青, 马朋, 邹家平. UPFC无功潮流控制引起负交互影响的解决方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 76-81.
LIU Qing, MA Peng, ZOU Jiaping. Solution to negative interaction caused by reactive power flow controlling of UPFC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 76-81.

[11] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[12] 宋洁莹, 冯献强, 崔福博, 等. MMC-UPFC动态建模及内部特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊1): 67-75.
SONG Jieying, FENG Xianqiang, CUI Fubo, et al. Dynamic modeling and internal characteristic simulation research of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 67-75.

[13] 王海潜, 祁万春, 乔黎伟, 等. UPFC三节点功率注入模型及其工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 145-151.
WANG Haiqian, QI Wanchun, QIAO Liwei, et al. A three-bus power injection model of UPFC and its engineering application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 145-151.

[14] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网UPFC示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western Power Grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.

[15] 庄良文, 张彦兵, 荆雪记, 等. 基于RTDS仿真的MMC UPFC串联侧间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 56-62.
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC_UPFC indirect current control strategy based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 56-62.

收稿日期：2017-08-18；　　修回日期：2017-09-24

作者简介：

周绍元(1973—)，男，本科，工程师，从事特高压直流输电及柔性直流输电控制保护技术研究；

李志勇(1986—)，男，硕士，工程师，从事电力系统动模仿真及继电保护装置自动化检测技术研究；

陈　卓(1980—)，女，通信作者，博士，副教授，主要研究方向为柔性直流输电系统的分析与控制。E-mail: zhangyanbing@ketop.cn

(编辑　周金梅)