

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.05.016

限流式 UPFC 特性研究综述

吴鸣鸣¹, 吕文韬², 陈 峰², 胡鹏飞²,
杨 滢³, 杨 逸¹, 王晓光¹, 江道灼^{2*}

(1. 浙江省湖州电力局, 浙江 湖州 313000; 2. 浙江大学 电气工程学院,
浙江 杭州 310027; 3. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对柔性输配电装置(FACTS)普遍存在的过载与抗冲击能力弱的问题,提出了“韧性电力系统”的概念,结合该概念,提出并研究了限流式 UPFC“柔性”和“坚强性”两方面特性;采用 PSCAD/EMTDC 建模仿真的方法,验证了限流式 UPFC 在正常运行时与常规 UPFC 一样,能够实现输电线路潮流等的柔性控制与灵活调节;在电网短路时,限流式 UPFC 中的限流器模块能够迅速抑制系统短路故障电流,同时可有效保护 UPFC 装置,使其免受短路电流的冲击而损毁。研究结果表明,限流式 UPFC 的特点符合韧性电力系统的特征,是实现韧性电力系统的一种新颖且功能强大的装置。

关键词:韧性电力系统;短路电流;冲击;统一潮流控制器

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)05-0660-06

Reviews on characteristics of UPFC with fault current limit

WU Ming-ming¹, LV Wen-tao², CHEN Feng², HU Peng-fei², YANG Ying³,
YANG Yi¹, WANG Xiao-guang¹, JIANG Dao-zhuo²

(1. Zhejiang Huzhou Power Supply Company, Huzhou 313000, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that flexible alternating current transmission devices (FACTS) are generally vulnerable against overload or fault operation, the concept of resilient power system was proposed. Considering the requirement of resilient power system, the characteristics of unified power flow controller with fault current limit (UPFC-FCL) was proposed and researched. While operating normally, UPFC-FCL were able to obtain soft control, such as adjust line flow, easily as general UPFC. Under fault operating circumstances, the fault current limiter within UPFC-FCL will limit the system fault current to protect the device from overcurrent. Study results demonstrate that UPFC-FCL is a novel and powerful device which matches the requirement of resilient power system.

Key words: resilient power system; fault current; impact; unified power flow controller (UPFC)

0 引 言

20 世纪 80 年代中期,美国电力科学研究院 (EPRI) N. G. Hingorani 博士^[1]首次在 EPRI 期刊上提出柔性交流输电 (flexible AC transmission) 的概念:通过应用大功率、高性能的电力电子元件制成可控的有

功或无功电源以及电网的一次设备等,实现对输电系统的电压、阻抗、相位角等的灵活控制,提高了电力系统的灵活性和运行稳定性,使得现有输电线路的输送能力得以提高。

柔性输配电装置具有响应快速、控制灵活等诸多优点^[2-5],能够实现对电力系统运行的“柔性”控制。

收稿日期:2014-12-08

作者简介:吴鸣鸣(1973-),女,浙江湖州人,工程师,主要从事电力系统运行管理方面的研究。E-mail:94236589@qq.com

通信联系人:江道灼,男,教授,硕士生导师。E-mail:dzjiang@zju.edu.cn

但目前 FACTs 装置(尤其是串联型装置)普遍存在过载或抗冲击能力低的弱点,因此实际应用中必须配置完善的保护,否则极易因电网故障等引起的过流、过压冲击而损毁。如统一潮流控制器^[6-8](UPFC),由于其串联侧换流器通过串联变压器直接耦合串接入电网主回路,当其安装处附近电网发生短路故障时,UPFC 的串联侧换流器就极易被耦合到串联变压器副边的短路电流冲击损毁,实际应用中必须采取完善的保护措施^[9-11]。文献[12]提出了具有短路限流功能的统一潮流控制器(UPFC-FCL),将固态限流器与 UPFC 结合起来,在灵活控制系统潮流的同时,可有效抑制系统短路电流及其对 UPFC 装置的冲击,从而提高系统暂态稳定和设备运行安全^[13-18]。

本研究将以限流式 UPFC 为例,分析其在智能电网中同时具备的“柔性”与“坚强性”。

1 韧性电力系统基本概念

各国对智能电网的理解不尽相同。例如美国能源部认为,现代智能电网应具有“自愈、互动、抵御攻击能力、满足 21 世纪电能质量的需求、协调优化发电和储能、电力市场化、资产优化与高效运行”等重要特性。我国国家电网公司提出了以超(特)高压电网为骨干网架,各级电网协调发展,建设“坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动”智能电网的总体目标。

从国内外已开展的智能电网相关研发内容与工程应用试点情况看,对基于电力电子的柔性电力装备的应用研发与工程试点也开始受到重视。而对于未来包含风能等间隙性新能源并网发电、规模化电动汽车等非线性负荷接入并实现跨大区联网等的广域复杂电力系统,如何充分利用基于电力电子的柔性电力装备与现代先进通讯、控制技术,以期有效增强广域复杂电力系统抗击重大自然灾害等引发的多重或多点连锁大扰动的能力,提高系统自适应和故障自愈能力,确保电力系统安全稳定运行,在理论及工程应用方面缺乏系统与深入。本研究提出韧性电力系统(resilient power system)的概念。

所谓韧性电力系统,是指同时具备自适应柔性灵活控制和强抗冲击能力的电力系统,该系统无论在正常运行或短路故障等大扰动情况下,都能够实现“自适应”柔性灵活控制,并确保安全稳定运行。韧性电力系统必须具有如下特点:

(1)合理的一次系统拓扑结构。系统中(特别是关键节点处)合理配置一定数量的基于电力电子、微电子及现代控制技术的智能柔性电力装备,可灵活、方

便地实现智能柔性操作;

(2)配备完善的二次系统。该系统包括电网状态智能传感器阵列、终端(现场)智能测控装置、高速可靠的信息通讯网络及后台智能监控处理中心等,能够实时监测电网的各种运行状态并快速做出“自适应”响应,通过智能柔性电力装备等实现协同控制,尤其对于短路等大扰动故障能够实现最小影响范围的故障区域快速定位与隔离,以及“自动寻优”恢复控制。

具有上述特点的韧性电力系统能够实现对电网运行状态的实时监测与“柔性”控制,能够承受各种随机扰动并自动进行优化处理,特别是对于多重或连续故障等大扰动冲击,能够“自适应地”采取优化柔性控制策略或措施,并使系统快速恢复到正常运行状态。

韧性电力系统的主要研究内容及关键技术:①适应韧性电力系统的一次系统网络拓扑及优化、重构方法;具有强抗干扰能力与通讯链路自适应寻优修复(自愈)的电力信息物理融合系统(CPS)研究;②韧性电力系统电力信息安全评估与保障方法研究;③韧性电力系统优化调度和协调控制策略(包括故障定位、隔离与自愈恢复等控制策略)研究;④适应韧性电力系统的柔性 FACTs 设备及综合协调控制技术,以及安全保护与自动控制策略研究等。

构建韧性电力系统少不了基于电力电子的高可靠性智能可控电力设备,如故障电流限制器^[19-23](FCL)、限流式统一潮流控制器^[24-25](UPFC-FCL)等,换句话说,同时具备“柔性”控制与“坚强”抗冲击能力的 FACTs 装置是构建“韧性电力系统”的基础条件之一。限流式 UPFC 在正常运行时的功能与常规 UPFC 完全一样,能够通过“柔性”控制,对输电线路潮流、系统无功/电压等实现灵活连续调节,使电网运行在最佳状态;在电网发生短路情况下,其限流器模块能够迅速动作并抑制系统短路故障电流,同时有效保护 UPFC 装置免受短路电流冲击而损毁。所以限流式 UPFC 的特点符合“韧性电力系统”的特征要求,是实现韧性电力系统的一种新颖且功能强大的装置。

2 限流式 UPFC 的拓扑结构

本研究将传统 UPFC 右侧串联变压器的中性点打开,接入三相桥式固态限流器^[26-27],构成限流式 UPFC 主拓扑,如图 1 所示。

3 限流式 UPFC 的“柔性”功能

UPFC 单线结构图如图 2 所示。它由两个电压源

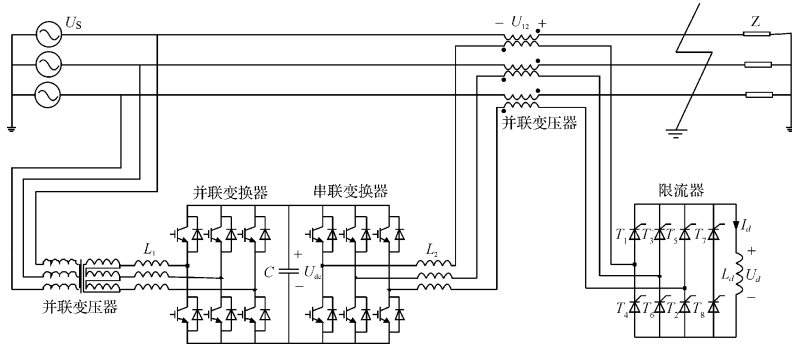


图 1 限流式 UPFC 拓扑结构

U_s —系统电源; U_{12} —UPFC 的串入电压; L_1, L_2 —并联侧和串联侧滤波电感; C —直流电容;
 L_d —限流电感; U_{dc}, U_d —直流电容电压和限流电感电压; I_d —限流电感电流; Z —系统等值阻抗

型换流器(并联换流器和串联换流器)通过共用直流母线以背靠背的方式组成。并联换流器通过并联变压器并入系统,串联换流器通过串联变压器串入系统。

有功功率可以在两个换流器的交流端之间双向流动。此外,每个换流器的交流端也可以独立向系统输出或吸收无功功率。

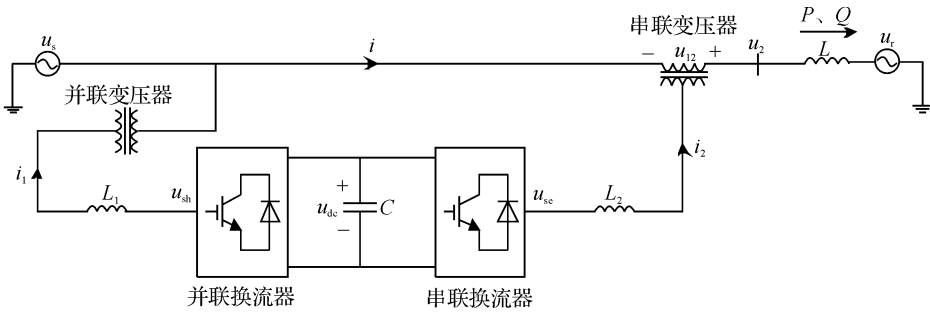


图 2 UPFC 单线结构图

UPFC 的并联换流器部分相当于静止同步补偿器 (STATCOM),串联换流器部分相当于静止同步串联补偿器 (SSSC)。文献[28]提出的一种基本的 UPFC 数学模型如图 3 所示。

平衡,维持直流母线电压恒定;无功分量 I_{1q} 与系统电源 U_s 正交,用于 UPFC 并联换流器与系统间的无功功率交换^[29-30]。

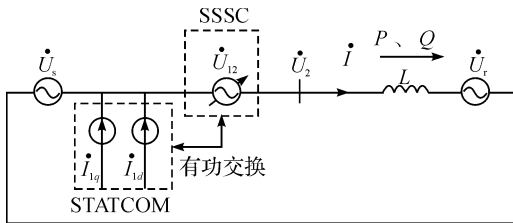


图 3 UPFC 数学模型

其中,SSSC 部分向系统串入一个幅值和相位都可调的电压 \dot{U}_{12} ,进而改变线路始端电压 \dot{U}_2 的幅值和相位,故 SSSC 部分可等效为一个广义的可调同步电压源,流经该电压源的线路电流 i 使串联换流器与系统之间的有功和无功功率交换。STATCOM 部分相当于一个注入电流源,其注入电流可以分解为有功分量 \dot{I}_{1d} 和无功分量 \dot{I}_{1q} 。其中有功分量 \dot{I}_{1d} 与系统电源 \dot{U}_s 同相或反相,用来为 UPFC 内部提供有功功率

UPFC 的电压补偿范围分析如图 4 所示。 \dot{U}_{12} 的相角在 $0 \sim 2\pi$ 之间变化,幅值在 $0 \sim U_{12max}$ 之间变化(U_{12max} 取决于串联换流器的补偿容量),因此 UPFC 的电压补偿范围是一个以系统电压 \dot{U}_s 的终点为起点,以 U_{12max} 为半径的圆,线路始端电压 \dot{U}_2 的终点落在圆上。

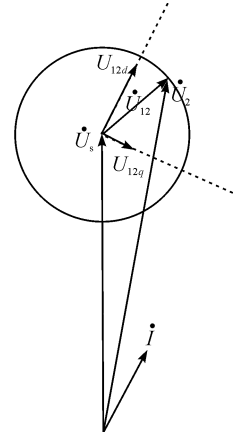


图 4 UPFC 的电压补偿范围

可以看出,限流式 UPFC 与传统 UPFC 一样,可以快速、灵活地调节点电压、系统无功与线路传输功率,体现其“柔性”。

4 限流式 UPFC 的“坚强性”

限流式 UPFC 短路限流的动态过程如图 5 所示。限流动态过程等效电路如图 6 所示。本研究结合图 5、图 6 和图 1 对以及电路各物理量的动态变化进行详细分析:

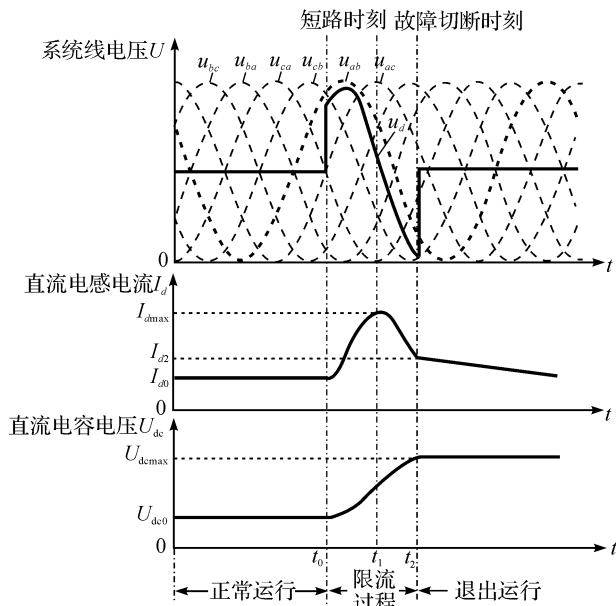


图 5 短路限流动态过程

(1) 稳定运行到 t_0 时刻。系统处于正常运行状态,限流电感 L_d 恒定在串联变压器副边交流电流峰值水平上(忽略电阻),直流电压 U_d 值接近于 0,限流器模块对整个系统呈现零阻抗状态。

(2) t_0 时刻。系统发生三相短路故障,控制系统检测到故障信号后封锁 UPFC 和限流器的触发脉冲,续流管 T_7 、 T_8 承受反向电压自动关断,等效工作电路如图 6 所示。

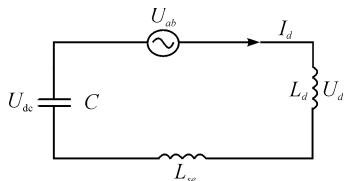


图 6 限流动态过程等效电路

(3) $t_0 \sim t_1$ 时段。晶闸管整流桥尚未完全关断,进入自然换流状态,直流电感电压为正值,系统短路电流向直流电感 L_d 充磁, I_d 也从稳态电流值 I_{d0} 不断上升;同时系统短路电流通过 UPFC 串联变换器反向二极管流入直流电容,直流电容电压 U_{dc} 也从稳态电压值 U_{dc0}

不断上升。

(4) t_1 时刻。系统电压 U_{ab} “负向过零”(直流电感电压 U_d 亦随之过零点),直流电感短路电流 I_d 达到最大峰值 I_{dmax} 。

(5) $t_1 \sim t_2$ 时段。系统电压 U_{ab} 转为负值(U_d 亦从正变负),直流电感 L_d 中的能量开始流入系统侧,直流电感短路电流 I_d 开始不断下降;与此同时,短路电流方向不变,继续通过串联变换器反向二极管流入直流电容,直流电容电压 U_{dc} 继续处于上升阶段,上升率随着短路电流 I_d 的不断减小而变缓。

(6) t_2 时刻。控制系统采用的是逆变续流混合式瞬断方式,在直流电感能量通过三相整流桥流入系统侧一部分之后,重新给续流管 T_7 和 T_8 发送触发信号,直流电感电流通过续流管进入自然续流状态。至此,限流器模块退出运行,耦合变压器二次侧相当于断开,保护 UPFC 模块不受到短路冲击而损坏。而等效到串联耦合变原边的电抗值将决定流过系统原边的稳态短路电流,本研究采用的串联耦合变为饱和型变压器,此时其原边等效电抗(即等效漏抗值)大小可根据短路限流要求设计,因此短路电流可以通过设计达到满足要求的可控静态值。

通过上述分析可以得出,在短路故障发生的瞬间,限流式 UPFC 装置中限流电感自动插入耦合变压器副边回路限制短路电流,不需要控制系统发出任何动作,自动限流成为限流式 UPFC 的最大优点。而为了最终切断短路电流,控制系统仍需要采取一定的控制措施:

(1) 短路故障发生后,控制系统检测并确认短路之后,立即封锁 UPFC 串联变换器触发脉冲。该控制的目的是避免全控型开关器件(IGBT 等)在短路冲击电流的条件下工作而造成损害。要提的一点是,在关断串联变流器桥路后,若没有限流装置的保护,即使开关器件停止了工作,但其并联的反向续流二极管会组成三相桥式不控整流电路继续工作,短路电流会继续向 UPFC 直流侧电容迅速充电,直流侧电容电压会迅速增大。一方面巨大的短路电流有烧毁反向二极管的可能;另一方面直流侧电容,串、并联变换器开关器件都将承受系统高电压。由此可见,限流器模块的无延时自动串入电网限流对保证 UPFC 模块串入电网部分的安全性是必不可少的。

(2) 控制系统检测并确认短路故障后,会立即封锁限流器模块中三相桥路整流器($T_1 \sim T_6$)和续流管桥臂($T_7 \sim T_8$)。这一点的目的是将限流器模块从正常工作状态转换到整流状态,开始进入逆变续流混合式瞬断方式,为彻底断开串联变压器副边回路做准备。

(3) 在 t_2 时刻, 控制系统重新触发导通续流桥臂 T_7 和 T_8 。控制的目的是: 迫使三相桥路晶闸管承受反向电压而关断, 使限流器模块退出运行, 与耦合变压器二次侧回路相连部分相当于断开, 以切断故障; 与此同时, 短路电流 I_d 将从三相桥路转移到续流桥臂 T_7 和 T_8 上续流衰减。 t_2 的选择需要考虑两方面的因素, 一方面从切断故障的角度来说, 当然希望时间尽量提前, 以减少短路电流对 UPFC 模块的影响; 另一方面考虑到续流桥臂 T_7 和 T_8 所能承受的压力, 续流时间也不宜过长。因此在实际控制中, 会综合考虑进行折中选择, 通常情况下会滞后短路电流峰值时刻 $60^\circ \sim 120^\circ$ 电角度。

可见, 限流式 UPFC 在系统发生短路故障时, 能够自动限制短路电流, 采取一定的控制措施后, 能够切断短路电流, 保护设备不被过流、过压冲击损毁, 保证电网安全可靠运行。

5 结束语

限流式 UPFC 在电网正常运行时, 限流器模块呈现零阻抗, 装置等效为常规 UPFC 对系统进行综合补偿, 柔性控制, 快速、灵活地调节节点电压、系统无功与线路传输功率; 当电网(装置安装点附近)发生短路故障时, 限流器模块在瞬间自动转变为高阻抗串入线路中将系统及流经 UPFC 的短路电流限制到安全水平, 并在 20 ms(1 个周波)内切断短路电流, 使得 UPFC 免受系统高电压和短路大电流冲击, 保护设备, 使得设备与系统的运行更加安全可靠, 更加坚强。

限流式 UPFC 的特点符合韧性电力系统的兼具“柔性”与“坚强性”的特征, 是实现韧性电力系统的一种新颖且功能强大的装置。

参考文献 (References):

[1] HINGORANI N G. Flexible AC transmission[J]. **Spec-trum**, 1993; 30(4): 40-45.

[2] HINGORANI N G, GYUGYI L. Understanding FACTS: concept and technology of flexible AC transmission systems [M]. New York, NY, USA: IEEE Press, 1999.

[3] 黄柳强. 灵活交流输电设备间交互及协调研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013.

[4] 费万民, 张艳莉, 吕征宇. 基于 IGCT 的新型桥式固态短路故障限流器[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 60-64.

[5] FUJITA H, WATANABLE Y, AKAGI H. Transient analysis of a unified power flow controller and its application to design of the DC-Link capacitor[J]. **IEEE Transactions On Power Electronics**, 2001, 16(5): 735-740

[6] 朱鹏程. 用于 UPFC 的串、并联双变流器控制策略研究

[D]. 武汉: 华中科技大学电气与电子工程学院, 2005.

[7] 刘黎明, 康 勇, 陈 坚, 等. UPFC 的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 42-48.

[8] GUO J, CROW M L, SARANGAPANI J. An improved UP-FC control for oscillation damping [J]. **IEEE Trans on Power Systems**, 2009, 24(1): 288-296.

[9] 赵中原, 吕征宇, 江道灼. 新型固态限流器三相主电路拓扑及控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 42-46.

[10] 蔡永华. 固态限流器的研制[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2004.

[11] 王 栋, 姚纓英, 江道灼, 等. 新型桥式固态限流器中耦合变压器特性的研究[J]. 机电工程, 2007, 24(8): 80-83.

[12] 阎 博, 江道灼, 吴兆麟, 等. 具有短路限流功能的统一潮流控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 69-73.

[13] 阎 博, 江道灼, 吴兆麟, 等. 具有短路限流功能的统一潮流控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 69-73.

[14] YAN Bo, ZANG Yu-qing, JIANG Dao-zhuo, et al. Dynamic analysis and experiment of unified power flow controller with fault current limiting [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2012, 36(13): 101-105.

[15] 桂 帆, 江道灼, 林志勇, 等. 一种新型限流式统一潮流控制器的设计与研究[J]. 电网技术, 2013(8): 2187-2193.

[16] FARMAD M, FARHANGI S, AFSHARNIA S, et al. Modelling and simulation of voltage source converter-based interphase power controller as fault-current limiter and power flow controller[J]. **IET Generation, Transmission and Distribution**, 2011, 5(11): 1132-1140.

[17] YAN Bo, JIANG Dao-zhuo. Control Strategy of Transformer Coupling Solid state Fault Current Limiter and Its Experimental Study with Capacitance Load [C]// Proceedings of International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing [s. n.], 2009: 1-7.

[18] 沈 忱. 限流式统一潮流控制器的启停控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 101-105.

[19] 范 宇, 江道灼, 吕文韬. 基于限流电抗电流控制的新型桥式固态限流器[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 776-781.

[20] 蔡永华, 江道灼, 吴兆麟. 新型固态限流器控制系统的研制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 62-66.

[21] 莫育杰, 江道灼, 田中山, 等. 新型固态限流器中饱和型耦合变压器设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 103-108.

[22] 陈 刚, 江道灼, 蔡永华, 等. 具有旁路电感的新型固态

- 限流器研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):200-205.
- [23] 江道灼,杨贵玉,吕征宇,等. 变阻抗自耦变压器型短路限流器[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2010.
- [24] 田中山. 10 kV 限流式 UPFC 试验样机研制[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2013.
- [25] 吕文韬. 限流式统一潮流控制器在电力系统应用中的若干关键问题研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2013.
- [26] 陈刚,江道灼,吴兆麟. 固态短路限流器的研究与发展[J]. 电力系统自动化,2003,27(10):1-6.
- [27] 蔡永华,江道灼,吴兆麟. 新型固态限流器控制系统的研制[J]. 电力系统自动化,2004,28(7):62-66.
- [28] SEN K K, STACEY E J. UPFC-unified power flow controller: theory, modeling, and applications[J]. **IEEE Transactions On Power Delivery**,1998,13(4):1453-1460.
- [29] 阎博,藏玉清,江道灼,等. 限流式统一潮流控制器的动态分析与实验[J]. 电力系统自动化,2012,36(13):101-105.
- [30] 蔡松,段善旭,蔡礼. 基于交叉耦合与交叉解耦的 UPFC 控制性能对比[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):45-49.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

吴鸣鸣,吕文韬,陈峰,等. 限流式 UPFC 特性研究综述[J]. 机电工程,2015,32(5):660-665.

WU Ming-ming, LV Wen-tao, CHEN Feng, et al. Reviews on characteristics of UPFC with fault current limit[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(5):660-665.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 595 页)

(1)建立了面向转矩实时控制的履带车辆转向动力学模型,结合电机效率及外特性台架实验建立了驱动系统模型;

(2)在原有转向控制策略的基础上,基于模糊理论提出了一种转向/回正补偿控制策略;

(3)本研究基于 dSPACE 半实物仿真技术建立了驾驶员-测试控制器在环的转向控制实时仿真平台,对提出策略进行了仿真验证。仿真结果表明:与直接转矩策略相比,基于模糊的转向补偿控制策略提高了系统的转向和回正响应能力(系统响应时间分别提前了 0.873 s 和 0.550 s),为同类车辆的转向系统稳定性与灵敏性研究提供了参考。

参考文献(References):

- [1] JANARTHANAN B, PADMANABHAN C. Lateral dynamics of single unit skid-steered tracked vehicle[J]. **International Journal of Automotive Technology**,2011,12(6):865-875.
- [2] WONG J Y. Theory of ground vehicles[M]. 3rd ed. Ottawa: John Wiley & Sons Inc,2011.
- [3] 孙逢春,张承宁. 装甲车辆混合动力电传动技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [4] 陈泽宇,赵光耀,翟丽. 基于模糊 PID 算法的双侧电传动履带车辆转向控制策略研究[J]. 中国机械工程,2013,2(24):410-425.
- [5] 王良曦,王红岩. 车辆动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [6] 闻新,周露,李东江. Matlab 模糊逻辑工具箱的分析与应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [7] 马云龙,章玮. 开关磁阻电机的模糊自适应简化控制[J]. 机电工程,2014,31(1):93-96.
- [8] 徐丽芳,宋文斌. 交流电动控制技术在叉车中的应用研究[J]. 机电工程,2010,11(1):58-59.
- [9] 徐东明,舒利盛. 具有弱磁调速功能的直流他动电机控制器[J]. 轻工机械,2013,31(3):40-42.
- [10] 于亚利,武丽. 过程控制实验平台的设计与实现[J]. 机电工程,2010,8(8):36-37.
- [11] THAI T D, Tatsuro Muro. Numerical analysis to predict turning characteristics of rigid suspension tracked vehicle[J]. **Journal of Terra-mechanics**,36(2013):183-196.

[编辑:张豪]