

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.019

限流式 UPFC 样机设计与实验研究^{*}

陈 峰¹, 陈晓宇², 蔡重凯², 江道灼^{1*}, 李 电²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力公司 绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要:针对限流式统一潮流控制器(限流式 UPFC)的样机和实验设计问题,对限流式 UPFC 的工作原理及数学模型进行了概述,提出了简单、有效的环形系统接线,能够节约设备和场地,对其中的串联变压器与桥式限流器中桥臂晶闸管的选型进行了分析,同时详细阐述了限流式 UPFC 控制系统的分层架构,最后在此基础上进行了样机研制与实验验证。研究结果表明,结合 UPFC 和桥式限流器的限流式 UPFC 能实现多种系统调节功能并能有效应对系统短路故障,提出的限流式 UPFC 样机与实验设计有效、实用。

关键词:统一潮流控制器;桥式限流器;实验设计;实验验证

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1238-04

Experimental design of unified power flow controller with fault current limiting

CHEN Feng¹, CHEN Xiao-yu², CAI Chong-kai², JIANG Dao-zhuo¹, LI Dian²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Shaoxing Electirc power Supply Company, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Aiming at the design problem of prototype and experiment of unified power flow controller with fault current limiting (UPFC-FCL), intensive study is carried out in this paper. The working principle and the mathematical model of UPFC-FCL was briefly outlined. A simple and effective ring wiring was proposed as well, which could save the cost and space. And the selection and design of the series transformer and thyristors in the FCL was also mentioned. Afterwards, layered architecture of UPFC-FCL control system was elaborated. Finally the prototype was developed and tests of the UPFC-FCL were performed. The results indicate that UPFC-FCL which combines UPFC and bridge-type FCL has a variety of regulatory functions and responds to short-circuit fault effectively, and the proposed design of UPFC-FCL is practical.

Key words: unified power flow controller (UPFC); bridge-type FCL; experimental design; experimental verification

0 引 言

统一潮流控制器是目前综合性能最为强大的柔性交流输电系统装置(flexible alternative current transmission systems, FACTS),能对系统潮流、电压和无功进行较为准确和迅速的控制^[1-2]。但随着现代电力系统的规模的增大,结构的复杂,其短路容量也迅速增加。因此文献[3-4]也提出 UPFC 装置附近发生系统短路时 UPFC 设备必须要退出运行,否则其串并联侧的电力

电子设备极易因承受系统高电压和短路大电流的冲击而烧毁,对系统产生严重的影响,也难以满足电力系统的要求^[5-8]。

为了实现对短路故障的自动隔离切除,将 UPFC 和固态限流器(solid-state fault current limiter, SSFCL)耦合在一起,组成一种新型 FACTS 装置——具有短路限流功能的统一潮流控制器(unified power flow controller with solid-state fault current limiting, 限流式 UPFC 或 UPFC-FCL)^[9-10]。截止目前,已经有文献对限流式

收稿日期:2015-05-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863 计划”)资助项目((2008AA05Z213);浙江省重点科技创新团队自主资助项目(2012R10004-01)

作者简介:陈 峰(1990-),男,浙江绍兴人,主要从事柔性交流输电方面的研究. E-mail:chenfengnai@163.com

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

UPFC的工作原理、设计做出了一定的摸索与研究,显示出限流式UPFC具有较好的理论前景,但高压的实验样机由于存在以下问题仍然没有完成:①电压等级的提高带来设备绝缘等级的提高,使得设备选型存在困难。②限流式UPFC系统相对复杂,系统接线以及两端高压电源较难处理。③高压大电流环境对控制系统的干扰对实验产生影响等。

本研究将针对限流式UPFC样机设计实验方案,分别从系统接线、参数设计、控制系统等方面进行详细设计,环形接线方式有效地降低了实验成本和场地设施;通过参数设计保证设备能安全地应对各种工况;采用分层、开放式且便于移植的控制系统设计模式,提高了控制系统的灵活性及可扩展性;最后通过实验,验证提出设计的有效性。

1 限流式UPFC的工作原理及数学模型

1.1 正常运行工作原理

限流式UPFC装置的拓扑结构如图1所示。该装置按照UPFC-限流器的顺序进行启动。UPFC模块的启动过程与常规UPFC无异。此时,由于限流器模块处于开路状态,UPFC串联侧补偿电压和系统电压将在串联变压器 T_{se} 上叠加一个较大的正向电压,并通过变压器副边施加在限流器模块的整流桥上,此后,晶闸管T1~T8触发导通,限流电抗 L_d 经过短暂的暂态充磁过程而趋于稳定(限流电抗电流 I_d 达到线路电流峰值),其与线路电流的差值将通过续流管T7和T8续流,限流器模块对外呈现零阻抗,相当于短路。故限流式UPFC正常运行时与常规UPFC相同。

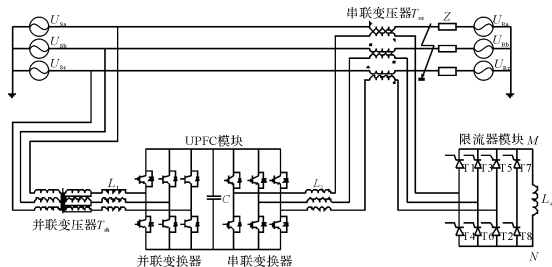


图1 限流式UPFC主拓扑

1.2 短路限流工作原理

当系统在图1标示处发生短路时,串联变压器 T_{se} 将承受几乎全部系统电压,并通过串联变副边施加在整流桥上。同时,随着短路电流急剧增加,续流管T7和T8将迅速关断,限流器的限流电抗将通过整流桥迅速插入线路进行限流。与此同时,UPFC串、并联侧变换器将在检测到故障的瞬间封锁脉冲,变成三相不控

整流桥,此时,短路电流经串联变压器、限流器模块、限流电抗、UPFC串联侧逆变器反向二极管和直流电容形成一个暂态限流回路,直到系统短路故障被彻底切除。其具体原理和过程在文献[10]中已有阐述,本研究不再赘述。

2 限流式UPFC系统接线

限流式UPFC实验系统接线如图2所示。环形接线将限流式UPFC两侧均连接至同一条交流母线实验,即限流式UPFC两侧电压等级相同,相角差为 0° 。这种系统接线,实际上是通过串联变压器的漏抗作为系统负载,UPFC补偿的电压加到串联变压器的漏抗上由其消耗,同时将一个两侧电源供电的系统通过一个电源来模拟。并联侧滤波电感出口处是一个用于UPFC启动阶段直流电容充电的自动控制电路,串联侧滤波电感出口处并接了一个电容过压保护电路。

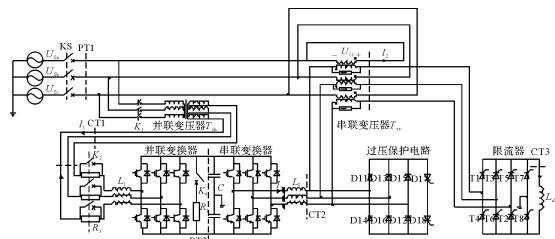


图2 限流式UPFC系统接线图

3 参数设计

限流式UPFC中关键的元器件为直流电容 C 和直流电抗 L_d ,两者参数设计和串并联侧滤波电感的设计依据已有文献详细研究^[11-12],本研究不再做详细分析,这里仅对串联变压器和限流器整流桥的设计与选型作一些说明。

3.1 串联变压器

串联变压器是连接UPFC模块和限流器模块的主要器件,同时也是限流式UPFC装置接入电网主回路的重要器件。结构上,其绕组一次侧串联在线路中,绕组二次侧连接UPFC串联换流器与限流器模块;功能上,其既在UPFC正常工作时作为串联补偿电压的施加载体,也在短路限流时作为等效限流电抗的一部分。

在具体选型时,针对低电压场合,可以考虑采用传统的非饱和型变压器,设计容易,应用广泛;针对高压大容量场合,选择饱和型自耦变压器来降低设计难度和容量体积。

另一方面,串联变压器的变比由于与UPFC模块

串联侧补偿效果及控制策略相关,同时会影响限流器模块整流桥晶闸管的设计选型,以及限流式 UPFC 装置内大部分电力电子器件和限流电抗的 I^2t 校验,因此串联变压器的变比选择因综合考虑上述因素。

3.2 限流器整流桥

整流桥晶闸管需要正常运行和短路故障中引起的最大正、反向电压峰值,根据桥臂承受的最大峰值选取合适的晶闸管后,需要校验正常工作时晶闸管的额定工作电流和短路过程中的 I^2t 值以满足以下条件:

$$\begin{cases} I_{T(AV)} \geq \frac{k_{se} I_2}{1.57} \\ I^2t \geq I^2t_{max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_{se} —串联变压器变比, I_2 —线路工作电流, $I_{T(AV)}$ —晶闸管的通态平均工作电流, I^2t_{max} —短路过程中冲击电流耐受量 I^2t 可能出现的最大值。

4 控制系统设计

根据通信系统的开放互联(open system interconnection, OSI)模型^[13],限流式 UPFC 控制系统的分层架构可分为如下几个部分:交互层,通信层,控制层,驱动层和功率层,控制系统的分层架构如图 3 所示。其中,交互层主要实现操作人员对系统运行的控制、显示与反馈;通信层用于交互层与控制层之间的通信;控制层是限流式 UPFC 控制系统的核心部分,其中:AD 采样模块完成所需电压电流信号的采样、故障信号的监测,同时锁相环 SPLL(software phase loop)计算采样数据得到系统电压瞬时相位,任务调度机根据上层调度指令按照一定节拍分别执行 AD 采样、SPLL 以及限流式 UPFC 运行中的 STATCOM 启动、SSSC 启动、SSSC 退出、STATCOM 退出、FCL 监测,最后输出 IGBT 及晶闸管的脉冲调制逻辑;驱动层将 IGBT 和晶闸管的脉冲调制逻辑转化为桥路的开关信号并经驱动器放大后驱动功率器件,同时底层硬件保护实时监测电力电子器件的电流和温度,实现过流过温保护;功率层实现 UPFC 与系统的功率交换。

控制层的功能由 TI 公司的 32 位浮点 DSP 芯片 TMS320F28335 实现,它集成了多种先进的外围设备,其中的 ePWM 模块是 UPFC 并联换流器和串联换流器触发脉冲生成的核心部分。采样电路采用 ADI 公司的高精度 14 位 AD 芯片 AD7657。

驱动层将 DSP 输出的触发信号转化为光信号进而通过光纤发送至驱动电路,增大了驱动能力,同时将一次系统和二次系统隔离。

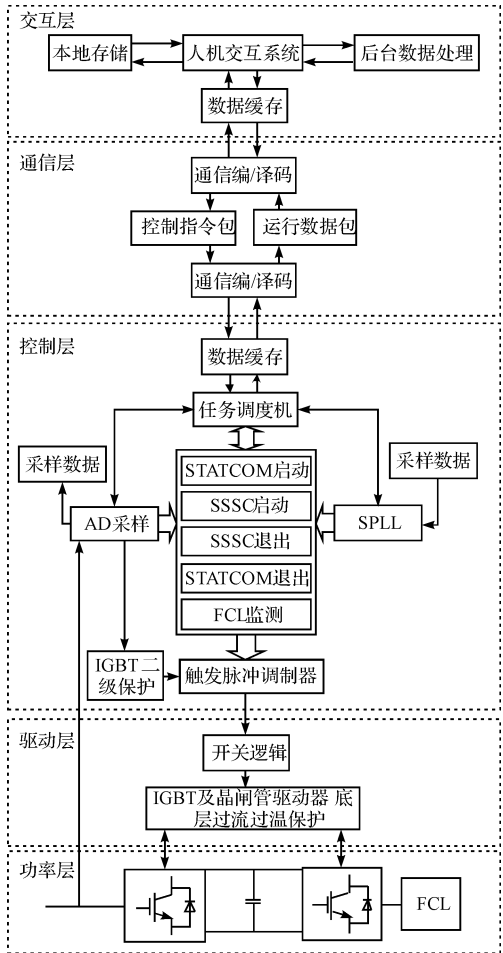


图 3 控制系统的分层架构

5 实验验证

主要实验参数如表 1 所示。本研究根据图 2 所示接线图接线进行实验验证。

表 1 限流式 UPFC 仿真参数

参数	数值	参数名称	数值
系统线电压 U_s/kV	1	直流电容 $C/\mu\text{F}$	8 000
系统频率 f/Hz	50	限流电抗电感/ mH	5
并联变压器	1 kV/500 V (Y,d11)	启动电阻 R_1/Ω	100
串联变压器	800 V/800 V (Y,y)	放电电阻 R_2/Ω	500
滤波电感 L_1/mH	0.357	滤波电感 L_2/mH	0.167

限流式 UPFC 启动阶段直流电容电压和并联换流器交流侧出口单相电流的波形图如图 4 所示。18 s 之前系统不控整流,直流电容电压上升至并联侧线电压峰值 707 V 左右,稳定之后并联侧换流器定电压可控整流,电压以斜坡函数上升至设定值 1 000 V 左右,可控整流开始阶段,电压和电流波动较大,稳定后,基本在 1 000 V 附近。

UPFC 启动正常运行后,通过定补偿电压模式调

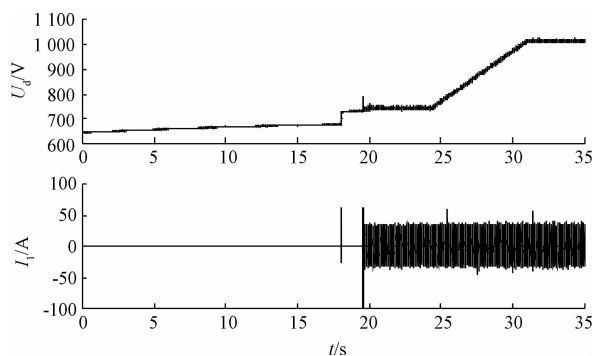


图4 启动波形

节潮流,UPFC 补偿线电压调节图如图5所示。其中两条曲线分别为系统线电压 u_s 与滤波处理后的 UPFC 补偿线电压 u_2 。在 41.46 s 左右对补偿电压 V_d 、 V_q 的幅值设定从 $V_d=0$ V, $V_q=50$ V 变为 $V_d=-200$ V, $V_q=0$ V。由图5可见,系统线电压 u_s 与滤波处理后的 UPFC 补偿线电压 u_2 从 90° 夹角到反向,补偿线电压 u_2 的幅值也从 50 V 左右升至 200 V 左右。可见,实验样机可以按照指令对系统线路进行电压补偿,调整插入系统的电压幅值和相位,相应地调节系统潮流。

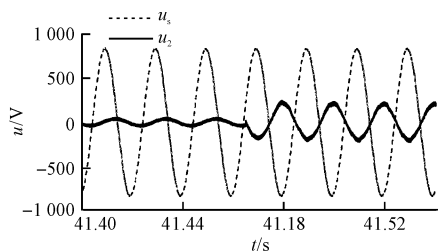


图5 潮流调节波形

系统进入稳态运行后,装置安装点通过涌流模拟三相短路故障。系统线路单相的短路波形如图6所示。由图6可见,系统短路后,线路短路电流第一波峰到达峰值,之后短路电流迅速被限制下来,短路电路周期分量有效值稳定在 0.7 kA 左右,达到了限流的目的。

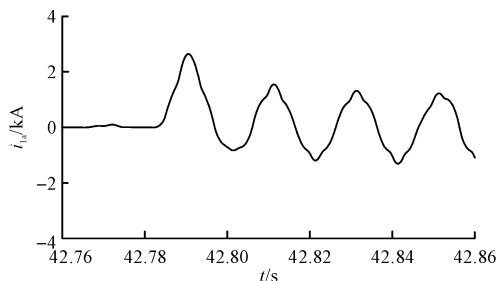


图6 短路后线路电流波形

6 结束语

本研究分别从系统接线、参数设计、控制系统对限流式 UPFC 的实验方案进行了设计。环形接线方式有效地降低了实验成本和场地设施;通过参数设计保证设备能安全地应对各种工况;采用分层、开放式且便于移植的控制系统设计模式,提高了控制系统的灵活性及可扩展性;最后进行了实验,验证了所提设计的有效性。同时,本研​​究所述方法对限流式 SSSC 等所有可以加装限流器的串联型 FACTS 设备的设计都具有一定的参考意义。

参考文献 (References):

- [1] HINGORANI N G, GYUGYI L. Understanding FACTS: concept and technology of flexible AC transmission systems [M]. New York, NY, USA: IEEE Press, 1999.
- [2] L, SCHAUDER C D, WILLIAMS S L, et al. The unified power flow controller: a new approach to power transmission control[J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1995, 10(2): 1085-1097.
- [3] 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.
- [4] GUO J, CROW M L, SARANGAPANI J. An improved UPFC control for oscillation damping [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2009, 24(1): 288-296.
- [5] 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.
- [6] DONG L, CROW M L, YANG Z, et al. A reconfigurable FACTS system for university laboratories [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2004, 19(1): 120-128.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 沈 忱,江道灼,吕文韬,等. 限流式统一潮流控制器参数设计及设计实例[J]. *电力建设*, 2013, 34(11): 1-6.
- [12] 桂 帆,江道灼,吕文韬,等. 限流式统一潮流控制器参数设计及优化[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(11): 160-164.
- [13] 侯朝勇,胡学浩,惠 东. 锂电池储能并网变换器的设计与实现[J]. *电网技术*, 2012, 36(3): 246-251.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

陈 峰,陈晓宇,蔡重凯,等. 限流式 UPFC 样机设计与实验研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(9): 1238 - 1241.

CHEN Feng, CHEN Xiao-yu, CAI Chong-kai, et al. Experimental design of unified power flow controller with fault current limiting[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(9): 1238 - 1241.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>