

限流式统一潮流控制器参数设计及优化

桂帆,江道灼,吕文韬,田中山,吴兆麟

(浙江大学电气工程学院,浙江杭州 310027)

摘要:以系统限流指标、统一潮流控制器最大补偿度、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)电压电流限值和直流电压限值为依据,改进了限流式统一潮流控制器(UPFC-FCL)的短路数学模型。为保证短路过程中直流电容电压不超过限值,提出了一种新的直流电容计算方法。将直流电容纳入短路限流回路,对直流限流电感的选择进行了优化,提高了装置的可靠性和经济性。建立了100 V/3 kV·A小样机实验模型,验证了限流式统一潮流控制器设计参数的合理性和有效性。

关键词:统一潮流控制器;桥式限流器;直流电容;限流电感;参数设计;数学模型;优化

图分类号: TM 72

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.028

0 引言

统一潮流控制器(UPFC)是目前综合性能最为强大的柔性交流输电系统(FACTS)装置,能同时对线路电压、阻抗和相角进行调节,实现对系统潮流、电压和无功的灵活控制,提高了线路的输送能力,因此受到了学术界的广泛关注。目前对UPFC的研究主要集中在实验及工程样机的研制^[1-3]、串并联侧控制策略的优化与协调^[4-7]、静态动态特性的改善与提高^[8-9]、拓扑结构的改进与优化^[10-11]等方面。

随着电力系统的规模越来越大,结构日益复杂,短路容量迅速增加。而作为一种全控型电力电子装置,现有的UPFC过载能力十分有限,一旦其安装点附近发生短路,UPFC必须迅速退出运行,否则其串、并联变换器等设备极易因承受系统高电压和巨大短路电流的冲击而在极短时间内烧毁,这也是UPFC在电力系统中广泛应用需要解决的重要问题之一。

基于运行安全可靠性和提高线路输送能力两方面考虑,将UPFC和固态限流器SSFCL(Solid-State Fault Current Limiter)通过串联耦合变压器进行连接,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,简称限流式UPFC或UPFC-FCL(Unified Power Flow Controller with Fault Current Limiting)。

目前,还没有对UPFC直流电容的标准化的选择方法,文献^[12]认为电容电压波动是由于输入电容和输出电容的有功功率不平衡所致,并假设并(串)联侧变换器工作模式由最大功率整流突变到最大功率逆变时,所引起的能量偏差全部积累在电容上,以此来计算直流电容的取值;文献^[13]认为,直流电容中的储能是用来平衡暂态过程中线路电感的能量波动,并假设直流电容提供串联侧的全部暂态

有功功率,以此计算直流电容的取值;文献^[3]为保证限流式UPFC短路切除过程中最大短路容量和最大允许短路电流不超过线路约束,按照三相桥式限流器的设计方法,对限流式UPFC的限流电感进行设计。但由于UPFC串联侧和限流器将共同在限流式UPFC短路时参与限流过程,极大的短路冲击电流会向直流电容充电,使电容电压急剧升高,所以前2种电容设计方法极有可能导致短路限流时电容电压超过限值,损坏昂贵的IGBT换流器,不能保证UPFC的安全,而第3种限流电感设计方法为了求解复杂的微分方程组,进行了参数和条件简化,忽略了直流电容在短路限流中的作用,所以仍有优化的空间。本文在文献^[3]的基础上,改进了限流式UPFC故障下的数学模型并进行了动态过程分析;给出了一种新的直流电容的计算方法,并对直流限流电感的选择进行了优化,保证了装置的可靠性和经济性;对100 V/3 kV·A限流式UPFC装置进行参数设计并进行了短路实验,验证了限流式UPFC设计参数的可行性和有效性。

1 限流式UPFC的短路控制策略及数学模型

1.1 短路控制策略

限流式UPFC装置的拓扑结构如图1所示。正常运行时,三相桥式限流器等效阻抗为零,装置工作在UPFC模式。发生短路时,续流管 V_{T7} 和 V_{T8} 迅速关断,限流器的限流电感迅速插入线路进行限流,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、限流电感、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^[3]中已有阐述,本文不再赘述。

1.2 短路数学模型及分析

在整个短路过程中,限流式UPFC的短路限流等

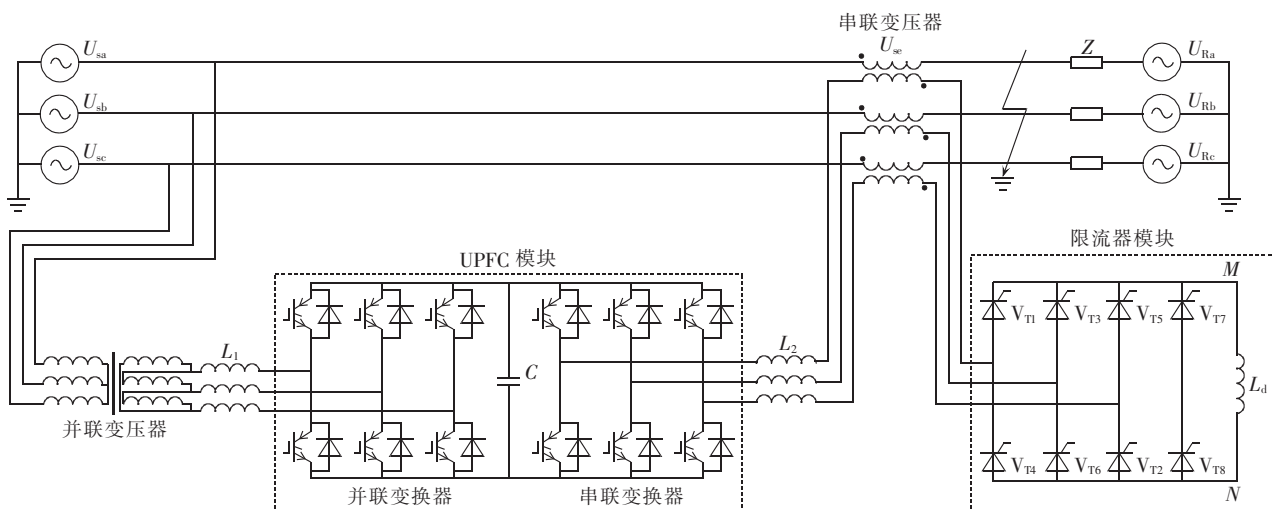


图 1 限流式 UPFC 的拓扑结构

Fig.1 Topology of UPFC-FCL

效电路如图 2 所示,其中串联侧滤波电抗和串联变压器漏抗用 L_{se} 等效,IGBT 整流桥反向二极管用 V_D 表示。

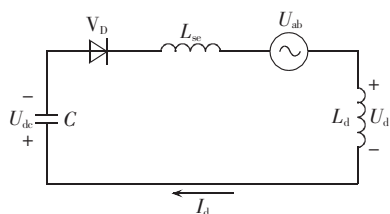


图 2 限流式 UPFC 短路限流等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of short circuit current limiting of UPFC-FCL with current limiting

如图 3 所示,当系统负载前端在 U_{ab} 的相角为 60° 时,即 t_0 时刻发生三相接地短路,其短路冲击电流和短路持续时间会达到最大值^[14-15],其短路限流过程中各物理量变化如下。

a. $t_0 \sim t_1$ 时段:系统线电压 U_{ab} 大于直流电容电压 U_{dk} ,短路电流 I_d 从初始值 I_{d0} 不断上升,限流电感从系统中吸收能量。

b. t_1 时刻:系统线电压 U_{ab} 和直流电容电压 U_{dk} 相等,短路电流达到峰值 I_{dmax} 。

c. $t_1 \sim t_2$ 时段:系统线电压 U_{ab} 小于直流电容电压 U_{dk} ,短路电流从峰值逐渐下降,限流电感将能量返送回系统。

d. t_2 时刻:三相桥式限流器续流管触发,限流式 UPFC 二次侧等效为开路^[3],系统短路故障被彻底切除。

针对上述限流过程,忽略 L_{se} ,可以列写 UPFC 短路过程的数学模型为:

$$\begin{cases} L_d \frac{dI_d}{dt} = U_{ab} - U_{dk} \\ C \frac{dU_{dk}}{dt} = I_d \\ I_d \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

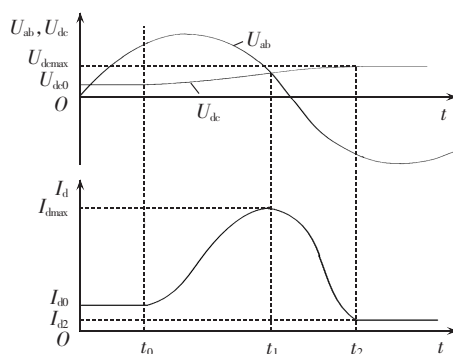


图 3 限流式 UPFC 短路过程波形图

Fig.3 Waveforms of UPFC-FCL during short circuit

2 限流式 UPFC 参数设计及优化

2.1 限流电感的设计与优化

根据图 3 和式(1)可以得出系统发生最严重短路时,限流电感的计算公式为:

$$L_d = \frac{\int_{t_0}^{t_1} (U_{ab} - U_{dk}) dt}{I_{dmax} - I_{d0}} = \frac{S_1}{I_{dmax} - I_{d0}} \quad (2)$$

其中, S_1 表示电感电压曲线从 t_0 时刻到 t_1 时刻的积分。

在设计常规限流式 UPFC 或桥式限流器时,认为 U_{dk} 难以计算,但数值恒为正,因而将其省去,这样计算出的限流电感 L_d 将大于理论值,其多出的部分被设计成安全裕度^[3]。

本文认为,在短路过程 $t_0 \sim t_2$ 时段内,电容电压一直处于上升阶段,即 U_{dk} 不小于电容电压正常工作值 U_{dk0} ,而正常运行时,不论采取哪种调制方式, U_{dk0} 都不小于最大补偿线电压幅值 $\sqrt{2} U_{semax}$ ^[8]。因此近似计算时,可以根据系统最大的补偿度指标和限流指标来设计限流电感,式(1)改为:

$$\begin{cases} L_d = \frac{\int_{t_0}^{t'_1} (U_{ab} - \sqrt{2} U_{semax}) dt}{I_{dmax} - I_{d0}} = \frac{S_2}{I_{dmax} - I_{d0}} \\ U_{dc} \geq U_{dk0} \geq \sqrt{2} U_{semax} \\ S_2 > S_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, t'_1 是最大补偿线电压幅值 $\sqrt{2} U_{semax}$ 与系统线电压 U_{ab} 的交点时刻, 如图 4 所示。图中, 横线阴影部分为 S_1 , 横线阴影和竖线阴影部分之和为 S_2 , 可以看出 $S_2 > S_1$, 其多出的部分, 将被设计成保证限流器可靠性的安全裕度。

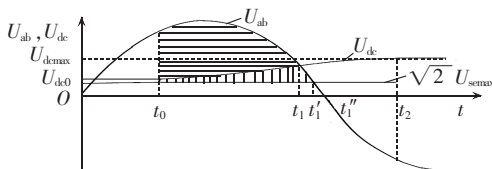


图 4 限流电感设计示意图

Fig.4 Schematic diagram of current limiting inductor design

实际系统中, 由于 U_{semax} 比 U_{ab} 小很多, 在已经设计充足的安全裕度的情况下, 可以用系统电压过零的时刻 t''_1 替代 t'_1 进行计算, 则式(3)最终变为:

$$\begin{aligned} L_d &= \frac{\int_{t_0}^{t''_1} (U_{ab} - \sqrt{2} U_{semax}) dt}{I_{dmax} - I_{d0}} = \\ &= \frac{\int_{\pi/3}^{\pi} (\sqrt{2} U_1 \sin \omega t - \sqrt{2} U_{semax}) d\omega t}{\omega (I_{dmax} - I_{d0})} = \\ &= \frac{9\sqrt{2} U_1 - 4\pi \sqrt{2} U_{semax}}{6\omega (I_{dmax} - I_{d0})} \end{aligned} \quad (4)$$

然后再校验 $I_d^2 T$ 是否满足 UPFC 功率模块的安全限度即可。

按照本文所述方法, 对于补偿度为 20% 的限流式 UPFC, 在保证一定安全裕度的情况下, 设计出的限流电感比常规方法小 27.9%, 这有效降低了大电流限流电感的设计难度和制造价格, 减少了其占地面积, 显著提高了限流式 UPFC 的经济性能。

2.2 直流电容的设计与整定

在第 2.1 节确定 L_d 取值之后, 进行直流电容的设计。考虑整个短路持续时间 $t_0 \sim t_2$ 内, 短路电流 I_d 不断向直流电容充电, 电容电压不断上升。为使电容电压不超过 IGBT 变换器最大耐压 U_{Tmax} , 结合式(1)可以得到:

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t (U_{ab} - U_{dc}) dt \\ I_d \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} C = \frac{1}{\Delta U_{dc}} \int_{t_0}^{t_2} I_d dt \\ \Delta U_{dcmax} = U_{Tmax} - U_{dk0} \end{cases} \quad (6)$$

其中, ΔU_{dc} 及 ΔU_{dcmax} 分别为短路过程中直流电容电

压的上升值及其最大值。

式(5)和式(6)是一个带约束条件的二阶微分方程, 求解十分困难, 故参考 2.1 节的分析方法, 用最大补偿线电压幅值 $\sqrt{2} U_{semax}$ 代替电容电压 U_{dc} , 改写式(5)如下:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{1}{L_d} \int_{t_0}^t (U_{ab} - \sqrt{2} U_{semax}) dt = \\ &= \frac{1}{\omega L_d} \int_{\omega t_0}^{\omega t} (\sqrt{2} U_1 \sin \omega t - \sqrt{2} U_{semax}) d\omega t \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $I_d \geq 0$, 代入式(7), 可得 $U_{semax} \leq 31.8\% U_1$, 即本方法适用于补偿度小于等于 31.8% 的限流式 UPFC, 这已满足目前大多数 UPFC 的补偿度要求[8]。

已知常规桥式限流器会在 ωt_2 为 240° 时彻底切除系统故障[14-15], 故可将式(7)代入式(6), 计算得:

$$C = \frac{\int_{t_0}^{t_2} I_d dt}{U_{Tmax} - U_{dk0}} = \frac{(\pi + 2\sqrt{3}) U_1 - \pi^2 U_{semax}}{\sqrt{2} \omega^2 L_d (U_{Tmax} - U_{dk0})} \quad (8)$$

式(7)中 I_d 较理论值略大, 所以计算出的电容值也会略大, 其多出的部分将被设计成系统的安全裕度。由式(7)和式(8)还可以看出, 对于少数最大补偿度大于 31.8% 的限流式 UPFC, 其计算出的短路电流 I_d 和直流电容值 C 都会比式(8)的小, 故可以利用本文方法, 按照 31.8% 的补偿度来设计其直流电容值。

2.3 仿真对比

在 PSCAD 中建立 10 kV/1 MV·A 限流式 UPFC 仿真模型, 将本文的参数设计与已有方法进行比较, 其具体参数如下: 系统两端电压均为 10 kV, 相角差为 0° ; 系统等效负载为 0.8 mH; 并联侧变压器(星-三角连接)变比为 20:1, 串联变压器(星形连接)变比为 1:1; UPFC 并联侧滤波电感 L_1 为 0.465 mH, UPFC 串联侧滤波电感 L_2 为 0.16 mH; 直流电压值 U_{dk0} 为 1.1 kV; IGBT 换流器耐压 U_{Tmax} 为 3 kV; 限流电感正常运行电流 I_{d0} 为 1 kA; 允许最大短路电流值 I_{dmax} 为 10 kA; $t=2$ s 时系统发生短路。

按本文所述方法计算, 直流电容值 C 为 30000 μ F, 限流电感值 L_d 为 7.1 mH, 下面分别就限流电感和直流电容参数进行仿真比较。

a. 限流电感参数对比。

按照文献[14]所述方法, 计算得限流电感值为 8.2 mH, 并进行短路限流仿真实验, 得到限流电感的仿真对比图如图 5 所示。

图 5(a)中限流电感为 8.2 mH, 短路电流峰值为 6.73 kA; 图 5(b)中限流电感为 7.1 mH, 短路电流峰值为 7.47 kA。这表明, 在不超过最大短路电流且留有一定安全裕度的条件下, 本文所述方法能提高短路容量的利用率, 从而减少限流电感的取值, 这有

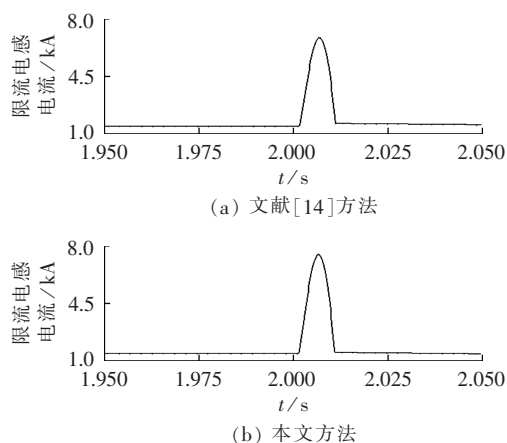


图 5 限流电感短路电流仿真对比图

Fig.5 Simulative comparison of short circuit current of current limiting inductor

效降低了大通流能力限流电感的设计难度和制造价格,减少了其占地面积,提高了限流式 UPFC 的经济性能。

b. 直流电容参数对比。

按照文献[12-13]所述方法计算的直流电容值分别为 14 000 μF 与 3 800 μF ,取其较大者与本文所设计参数进行比较,其仿真结果见图 6。

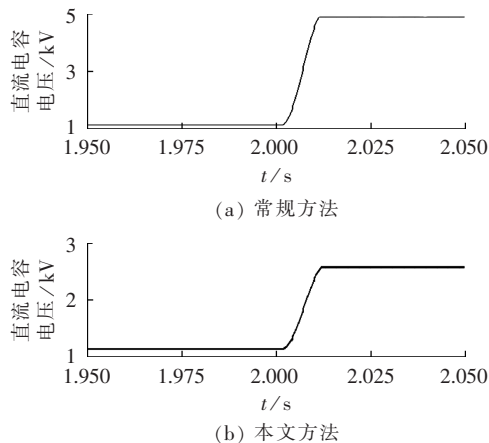


图 6 电容电压短路波形对比图

Fig.6 Comparison of short circuit waveforms of capacitor voltage

可以看出,图 6(a)中的短路电容电压峰值已达到 5 kV,远远超过 IGBT 换流器耐压,这必然会烧毁昂贵的 IGBT 设备,影响限流式 UPFC 的限流动作,极有可能对整个电网造成严重的冲击,故文献[12-13]的设计方法不能用于限流式 UPFC 的设计;图 6(b)中短路电容电压峰值为 2.54 kV,略低于 IGBT 换流器耐压,证明本文所述直流电容设计方法能保障限流式 UPFC 的安全性和可靠性。

3 实验验证

为验证本文所述参数设计方法的可靠性与有效性,建立了 100 V/3 kV·A 限流式 UPFC 小样机实

验模型,并进行了短路限流实验。实验样机一次侧拓扑见图 1,其参数如下:系统两端电压均为 100 V,相角差为 0° ;系统等效负载 Z 为 $25 + j8.8 \Omega$;UPFC 最大补偿度为 20%,即最大逆变补偿线电压 U_{semax} 为 20 V;并联侧变压器(星-三角连接)变比为 380:190;串联变压器变比为 66:110;UPFC 并联侧滤波电感 L_1 为 8 mH,UPFC 串联侧滤波电感 L_2 为 3 mH;直流电容值 C 为 1 000 μF ;限流电感 L_d 为 50 mH;直流电压值 U_{dk0} 为 70 V;IGBT 换流器耐压 U_{Tmax} 为 150 V;限流电感正常运行电流 I_{d0} 为 2 A;短路电流峰值 I_{dmax} 为 12 A。

在限流式 UPFC 启动之后进行了短路限流实验,以验证本文参数设计的合理性和有效性。如图 7 所示,正常运行时,电感电流约为 2 A,电容电压约为 70 V;当短路发生后,续流管反向关断,限流电感迅速插入系统进行限流, $t_0 \sim t_1$ 时段,电感电压为正值,限流电感短路电流迅速上升至约 11 A 的峰值, $t_1 \sim t_2$ 时段,电感电压变为负值, I_d 迅速下降,接近 0 时,续流管重新导通,故障被彻底切除,整个限流过程在 20 ms 之内完成;由于电感 I_d 电流持续向直流电容充电,电容电压在 $t_0 \sim t_2$ 时段内不断上升,直至达到约 125 V 的最大值。可以看出,在短路过程中,限流电感电流 I_d 和直流电容电压 U_{dk} 都在规定的指标内波动,且较大程度利用了指标给定的范围,充分验证了本文限流式 UPFC 参数设计的可靠性和经济性。

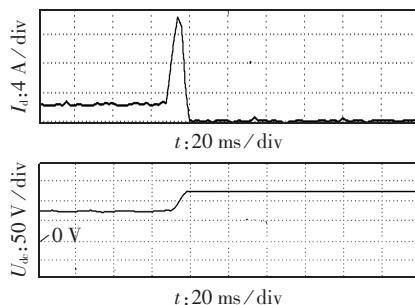


图 7 限流电感电流和直流电容电压短路波形图

Fig.7 Short circuit waveforms of capacitor voltage and inductor current

4 结语

本文改进了限流式 UPFC 故障下的数学模型并进行了分析;提出了一种新的直流电容的计算方法和思路,并优化了现有直流限流电感的选择,保证了装置的可靠性和经济性;设计了 100 V/3 kV·A 限流式 UPFC 样机,并进行了短路实验,验证了本文限流式 UPFC 设计参数的经济性和可靠性。同时,本文所述方法对限流式静止同步串联补偿器等所有可以加装限流器的串联型 FACTS 设备的参数设计都具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] YAN Bo,JIANG Daozhuo. 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,China: [s.n.],2009:1-7.
- [2] 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.
YAN Bo,JIANG Daozhuo,WU Zhaolin,et al. Design of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(4):69-73.
- [3] 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.
YAN Bo,ZANG Yuqing,JIANG Daozhuo,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.
- [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] 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.
LIU Liming,KANG Yong,CHEN Jian,et al. Cross-coupling control scheme and performance analysis for power flow control of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(10):42-48.
- [6] 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.
CAI Song,DUAN Shanxu,CAI Li. Comparison of UPFC performance between cross coupling and decoupling controls[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(5):45-49.
- [7] 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.
- [8] 唐爱红,朱鹏程,程时杰,等. 统一潮流控制器实验装置的研究[J]. 电工技术学报,2006,21(6):122-126.
TANG Aihong,ZHU Pengcheng,CHENG Shijie,et al. Study of the test equipment for UPFC[J]. Transactions of China Electro-technical Society,2006,21(6):122-126.
- [9] 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.
HOU Zhaoyong,HU Xuehao,HUI Dong. Design and implementation of grid-connected converter for lithium battery energy storage system[J]. Power System Technology,2012,36(3):246-251.
- [10] SCHAUDER C D,WILLIAMS S L. The unified power flow controller:a new approach to power transmission control [J]. IEEE Trans on Power Delivery,1995,10(2):1085-1097.
- [11] HINGORANI N G,GYUGYI L. Understanding FACTS:concept and technology of flexible AC transmission systems[M]. New York,USA:IEEE Press,1999:322-410.
- [12] 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.
ZHU Pengcheng. Study on the control strategy of the series-parallel double conversion system for UPFC[D]. Wuhan,Huazhong University of Science and Technology,2005.
- [13] FUJITA H,WATANABE 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.
- [14] 蔡永华. 固态限流器的研制[D]. 杭州:浙江大学,2004.
CAI Yonghua. Development of a solid state current limiter[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2004.
- [15] 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.
CAI Yonghua,JIANG Daozhuo,WU Zhaolin. Study on control system of three-phase solid state fault current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(7):62-66.

作者简介:

桂 帆(1990-),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为柔性交流输电技术(E-mail:guifan@zju.edu.cn);

江道灼(1960-),男,福建福州人,教授,主要研究方向为交直流电力系统运行与控制、电力电子及柔性交流输电应用、电力系统现场智能测控及配电网自动化(E-mail:dzjiang@zju.edu.cn);

吕文韬(1989-),男,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为柔性交流输电技术(E-mail:mailtolwt@163.com)。

Parameter design and optimization of unified power flow controller with fault current limiting

GUI Fan,JIANG Daozhuo,LÜ Wentao,TIAN Zhongshan,WU Zhaolin
(College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027,China)

Abstract: The mathematical short circuit model of UPFC-FCL(Unified Power Flow Controller with Fault Current Limiting) is improved,which takes the current limit of power system,the maximum compensation degree of unified power flow controller,the voltage and current limits of IGBT and the DC voltage limit as its basis. A method for DC capacitor calculation is put forward to ensure the DC capacitor voltage lower than the limit during short circuit. The DC capacitor is added into short circuit current limiting loop and the DC current limiting inductor is optimally selected to enhance the reliability and economy of UPFC-FCL. A 100 V/3 kV·A UPFC-FCL experimental model is established,which verifies the rationality and validity of the design parameters of UPFC-FCL.

Key words: unified power flow controller; bridge-type current limiter; DC capacitor; current-limiting inductor; parameter design; mathematical models; optimization