

220 kV 限流式统一潮流控制器设计

杜莹莹¹ 郝文斌²

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要: 限流式统一潮流控制器 (UPFC-FLC) 通过故障限流器与统一潮流控制器的结合, 组成了能有效控制系统短路电流的新型 FACTS 装置。针对 220 kV 线路, 为缩短限流时间, 减小装置体积和成本, 实现更高效的短路故障切除, 提出了一种采用饱和型自耦变压器作为串联变压器, 二次侧限流支路采用 RLC 串联谐振电路的新型限流式 UPFC。对其拓扑结构、限流过程进行了分析, 设计了装置的主要参数, 仿真结果表明新型限流式 UPFC 相较于常规型在体积成本更小的基础上具有更佳的限流效果。

关键词: 限流式 UPFC; 饱和型自耦变压器; RLC 串联谐振; 短路电流

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)04-0028-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.04.007

Design of 220 kV Unified Power Flow Controller with Fault Current Limiting

Du Yingying¹, Hao Wenbin²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The unified power flow controller with fault current limiting (UPFC-FLC) combines a fault current limiter with a unified power flow controller to form a new FACTS device that can effectively control short-circuit current of the system. For 220 kV voltage class, in order to shorten the current-limiting time, reduce the device volume and cost and achieve more efficient short-circuit fault removal, a new UPFC-FLC is proposed, that is, taking saturated autotransformer as series transformer and adopting RLC series resonant circuit for the secondary side current limiting branch. Its topological structure and current limiting process are analyzed, and the main parameters of the device are designed. The simulation results show that the new UPFC-FLC has a better current limiting effect than the conventional one in terms of smaller volume cost.

Key words: unified power flow controller with fault current limiting; saturated autotransformer; RLC series resonance; short-circuit current

0 引言

近年来,中国各省市电网的短路电流超标问题日益突出,而现有的限流措施仍以运行方式调整、网架结构改变和加装电抗器等传统方式为主,对电网运行灵活性、可靠性、安全性造成影响^[1-4]。限流式统一潮流控制器作为一种新型 FACTS 装置,在灵活控制线路电压、相角、阻抗实现系统潮流优化,增加输电容量的同时,可以对系统短路电流进行有效控制^[5]。在电力系统短路容量不断增大的趋势下,限流式 UPFC 的优异性能可以提高电网和装置的安全

性,为此受到电力界广泛关注。

江苏省 UPFC 的投运处于全国领先水平,南京西环网 UPFC 示范工程和苏州南部电网 UPFC 示范工程分别在 2015 年年底和 2017 年年底投运^[6-7]。针对实际已投运的江苏省含 UPFC 电网,文献[8]提出了模块化多电平 UPFC(MMC-UPFC)单相接地故障后的保护策略,在 220 kV 南京西环网项目中进行了验证,但 MMC-UPFC 会影响距离保护性能。文献[9]针对苏州南部电网项目,将 UPFC 与串联电抗器相结合,设计了既能控制短路电流又能调节线路潮流的电抗器阻值,但当短路电流超标节点较多时,电抗器的优化布点难度大。在学术性研究方面,

文献[10-13]对10 kV电压等级下的限流式UPFC进行了研究,采用桥式限流器与UPFC协调配合的方法,基于常规限流式UPFC构建新型拓扑结构,取得了较好的效果,但是不适用于220 kV线路。

下面针对220 kV线路,提出了一种饱和型自耦串联变压器与RLC串联谐振支路相耦合的桥式限流UPFC。对其拓扑结构和限流过程进行详细分析说明,建立故障阶段数学模型,给出主要元件参数的设计方法。通过仿真验证所提方案的有效性和可行性。

1 限流式UPFC的电路拓扑

1.1 常规限流式UPFC拓扑结构

常规的限流式UPFC电路拓扑结构如图1所示,其中: u_s 、 u_r 为系统电源; L 为线路阻抗; i_d 、 i_L 分别为短路电流和稳态电流;并联变压器 T_{sh} 及串联变压器 T_{se} 分别将UPFC并联侧和串联侧与电网、限流器相连。串并联变换器经直流电容 C 背靠背连接,其交流侧滤波电感分别为 L_{sh} 和 L_{se} 。限流器模块中, T_1-T_6 组成晶闸管三相桥式整流电路, T_7-T_8 为续流晶闸管, L_d 、 R_d 为限流电感和电阻。

1.2 新型限流式UPFC拓扑结构

适用于高压大容量电力系统的新型限流器一般

串联在系统线路中,所提出的用于220 kV线路的限流式UPFC电路拓扑结构如图2所示。图2在图1的基础上进行了如下改进:用饱和型自耦变压器AT替代了常规串联变压器 T_{se} ,使得整个限流器设备的体积与成本减小,变压器容量被充分利用;在限流器模块中,将由反向二极管、限流电容 C_d 、电力电子开关 S 组成的RLC串联谐振电路作为新的限流电抗支路。

2 新型限流式UPFC的工作过程

限流器的基本原理是通过控制串联在线路中的等效阻抗实现正常低阻与故障高阻的功能^[14]。对新型限流式UPFC应提出更高的要求,需要实现故障时限流器灵敏可靠地限制短路电流,正常运行时仅作为常规UPFC,减小限流器对线路造成的影响。同时,在等效阻抗变化过程中对自身元器件和系统均不产生较大的负面影响。因此,要求新型限流式UPFC的限流器模块凭借自身工作原理快速检测故障电流、迅速切换等效阻抗,不借助因判断与出口动作具有延时而导致限流器难以应对短路电流第一周波峰值的继电保护装置或其他装置。

假设系统故障发生在 t_1 时刻,对限流式UPFC的工作过程分3个阶段进行分析,限流过程示意图见图3。

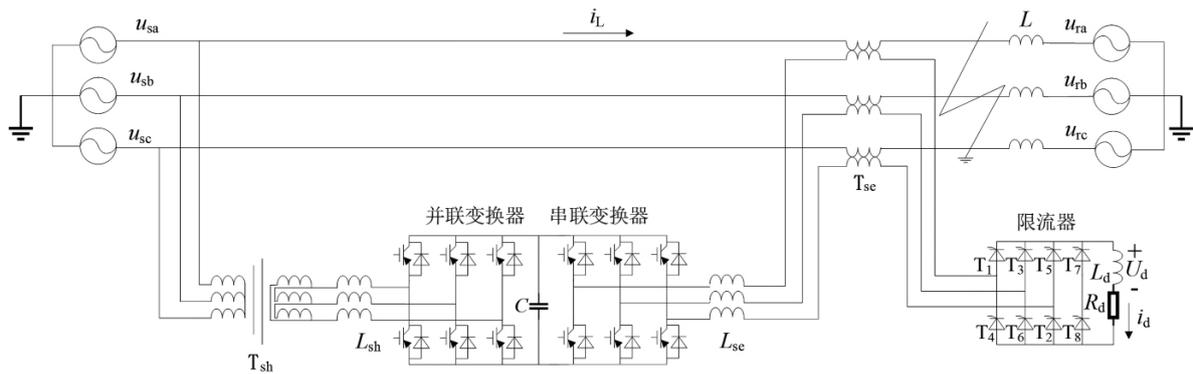


图1 常规限流式UPFC电路拓扑

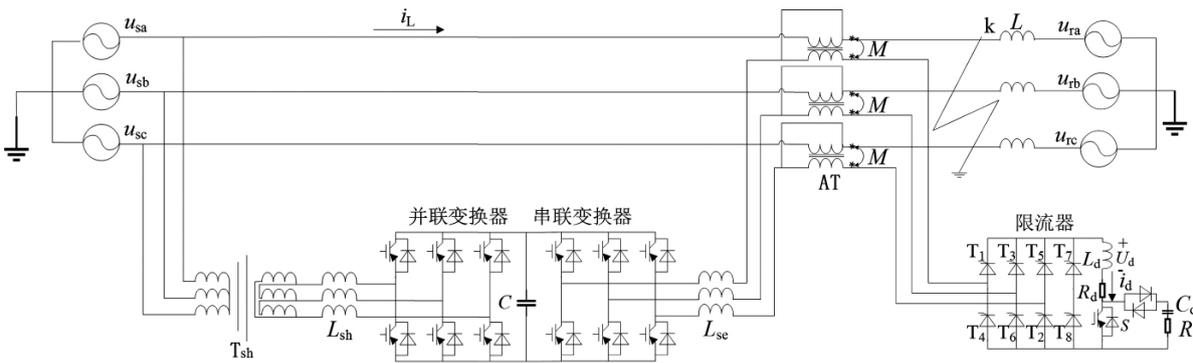


图2 新型限流式UPFC电路拓扑

2.1 正常运行工作阶段

系统在 t_1 之前正常运行。正常运行时图 2 中的饱和型自耦变压器 AT 等同于常规变压器,其公共绕组两端短接。限流器模块中, $T_1 - T_6$ 工作在 180° 模式, $T_7 - T_8$ 续流, 开关 S 关断, RC 支路接入, 形成 RLC 串联谐振电路, 呈现零阻抗状态。短路电流 i_d 图 3 所示, 保持不变。此时限流器模块整体体现零阻抗, 等效为常规 UPFC, 系统运行损耗较小, 满足新型限流式 UPFC 的要求。

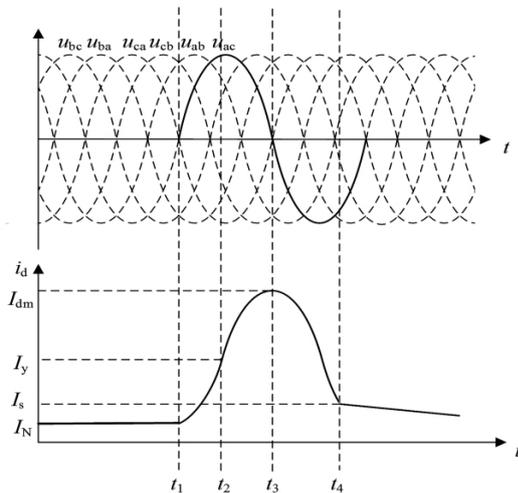


图3 限流过程

2.2 过渡限流阶段

$t = t_1$ (系统电压正过零点) 发生短路故障, 如图 3 所示。 T_5 被迫关断, T_1, T_6 继续导通, T_7, T_8 承受反向电压关断, 开关 S 导通, RC 支路短接。此时线路绝大部分电压经 AT 加于限流电抗 L_d , 即 L_d 自动串入回路, 限制短路电流 i_d 的上升, 有效抑制 i_d 第一周波峰值。过渡限流阶段的等效电路如图 4 所示。图中 L_1, L_2 分别为自耦变压器 AT 的一、二次绕组自感; M 为互感; u_{ac} 为 AT 副边的三相六脉电压; r 为系统内电阻和限流电阻等效值的和。

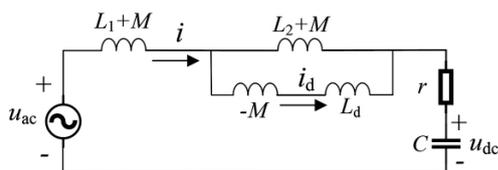


图4 过渡限流阶段等效电路

在过渡限流阶段, 限流器的等效限流电感为

$$L_{q2} = L_1 + L_2 + L_d + 2M - \frac{(L_2 + M)^2}{L_2 + L_d} \quad (1)$$

根据式(1)可知, 限流器的等效限流电感很大, 可以实现对第一周期电流峰值的有效抑制。

直流侧电容 C 两端电压 u_{dc} 为

$$u_{dc} = \frac{1}{C} \int_{t_1}^t i_d dt \quad (2)$$

由式(2)可知, 短路电流经串联自耦变压器 AT 向 C 充电, 导致其两端电压迅速上升, 易造成电容及换流器等设备的损坏。为此, 检测到短路故障时, 需对并联侧立即采取定电压控制, 使功率倒送回系统, 将电容电压稳定于 U_{dc} 。

i 和 i_d 满足式(3):

$$\begin{cases} u_{ac} - U_{dc} = ri + (L_1 + M) \cdot \frac{di}{dt} + (L_d - M) \cdot \frac{di_d}{dt} \\ (L_d - M) \cdot \frac{di_d}{dt} = (L_2 + M) \cdot \frac{d(i - i_d)}{dt} \\ i_d(t_1) = I_N \\ u_{ac} = \sqrt{2}U_{ac} \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_N 为正常运行时线路电流幅值; U_{ac} 为 u_{ac} 的有效值。由于电压几乎全部通过 AT 加在 L_d 两端, U_{dc} 可忽略以简化计算, 解得线路电流和短路电流分别为

$$i(t) = e^{-\frac{rC(t-t_1)}{L_{q2}}} \left(i(t_1) + \frac{\sqrt{2}U_{ac}}{z} \cos(\omega t_1) \right) - \frac{\sqrt{2}U_{ac}}{z} \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$i_d(t) = \frac{(L_2 + M)(i - i(t_1))}{L_2 + L_d} + I_N \quad (5)$$

式中: L_{q2} 表达式为式(1); $z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$ 。

由于故障时间极短, 为简化公式, 可将式(4)指数项视为 1, 同时忽略 r , 式(4)、式(5)可化简为

$$i(t) = i(t_1) + \frac{\sqrt{2}U_{ac}}{\omega L_{q2}} (1 - \cos\omega t) \quad (6)$$

$$i_d(t) = I_N + \frac{\sqrt{2}U_{ac}(L_2 + M)}{(L_2 + L_d)\omega L_{q2}} (1 - \cos\omega t) \quad (7)$$

根据式(6)、式(7), 在过渡限流阶段, i_d 迅速上升, $t = t_2$ 时, i_d 达到阈值 I_y , 控制系统判定电路发生短路故障, 封锁 $T_1 - T_8$ 的触发脉冲, 此时仅 T_1, T_6 仍处于封锁前的导通状态(晶闸管半控特性)。 i 和 i_d 一直增大到 t_3 时刻达到峰值 I_m, I_{dm} 。

$$I_m = i(t_1) + \frac{2\sqrt{2}U_{ac}}{\omega L_{q2}} \quad (8)$$

$$I_{dm} = I_N + \frac{2\sqrt{2}U_{ac}(L_2 + M)}{(L_2 + L_d)\omega L_{q2}} \quad (9)$$

对式(7)进行求导, 得到

$$\frac{di_d(t)}{dt} = \frac{\sqrt{2}U_{ac}(L_2 + M)}{(L_2 + L_d)L_{q2}} \sin\omega t \quad (10)$$

由式(10)可得, 在 $t > t_1$ (系统电压正过零点),

即故障发生后的一段时间内,式(10)大于0。说明限流电抗在故障发生后无需故障判断延时,立即串入电路对短路电流第一周波上升率进行限制,等效限流电感值 L_{q2} 越大,短路电流上升速度越慢。

2.3 完全限流阶段

控制系统检测到 i_d 到达峰值后,延迟 $120 \sim 150^\circ$,即在 $t = t_4$ 时刻,开始进入完全限流阶段,再次触发导通续流管 $T_7 - T_8$,整流桥退出运行。 i_d 通过 $T_7 - T_8$ 续流,此时AT公共绕组两端开路,AT相当于“带铁心的电抗器”,其公共绕组和串联绕组串联接入电路。由AT的等效电抗实现稳态限流, i_d 逐渐衰减到0。等效电路如图5所示(忽略系统内电阻和内电感)。

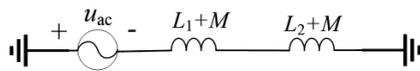


图5 完全限流阶段等效电路

此时的串联等效电感为

$$L_{q3} = L_1 + L_2 + 2M \quad (11)$$

由式(11)可知,完全限流阶段,AT的一、二次绕组串联限流,而常规的非自耦串联变压器结构的限流电路只有变压器一次绕组参与限流,其等效电感约为 L_1 。将常规串联变压器用饱和型自耦变压器替代后增强了其限流能力,使 L_1 、 L_2 及 M 的设计参数值显著减小,节省了绕组导体和铁心材料。

3 新型限流式UPFC的关键参数设计

3.1 限流电感参数设计

为了使限流电感体积尽量减小,以满足限流电感能量最优为目的来进行限流电感参数的设计。短路故障发生后,限流电感 L_d 储能为

$$E = \frac{1}{2} L_d i_d^2 \quad (12)$$

将式(9)中最大短路电流代入式(12):

$$E = \frac{1}{2} L_d \left(I_N + \frac{2\sqrt{2}U_{ac}(L_2 + M)}{(L_2 + L_d)\omega L_{q2}} \right)^2 \quad (13)$$

要使能量最优,求 E 的极值点,得到此时 L_d 满足的方程:

$$\frac{(L_2 + L_d)L_{q2}}{L_2 + M} = \frac{2\sqrt{2}U_{ac}}{\omega I_N} \quad (14)$$

式中:饱和型自耦变压器AT的参数为 L_1 、 L_2 ; M 短路故障后的值可由有限元分析得到^[15]; L_{q2} 的值可由式(1)得到。

3.2 限流电容参数设计

系统正常运行时,限流器部分组成RLC串联谐振电路, L_d 和 C_d 的串联等效电阻为0,则有

$$C_d = \frac{1}{\omega^2 L_d} \quad (15)$$

L_d 对限流器限流水平起重要作用,一定的稳态短路电流幅值要求下,越高的电压等级需要越大的 L_d ,从式(15)可以看出 L_d 和 C_d 成反比,则需要的电容 C_d 就相应越小,在实际高电压等级系统中更易于配置。说明RLC串联谐振电路作为限流电抗支路较适合所提的220 kV高压系统。

3.3 直流电容参数设计

直流电容参与限流过程,因此设计的电容值不仅需要达到维持UPFC两侧功率平衡和电容电压稳定的目标,还要确保装置安全性及限流效果。

短路故障的发生使得短路电流快速为直流电容充电,导致直流电容电压急剧上升。在检测到短路故障后对并联侧立即采取了定电压控制,电容电压被稳定于 U_{dc} 。为此,需要将直流电容稳定前的最大充电电压值 U_{dcm} 限制在IGBT耐压值以下,保证UPFC串并联换流器的安全。设在 t_m 时刻直流电容电压达到 U_{dcm} ,则

$$U_{dcm} = U_{dc0} + \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_m} i dt \quad (16)$$

i 的表达式为式(6),由式(16)可以计算出直流电容的合理取值 C 。

4 算例分析

在Matlab/Simulink中对220 kV/1.5 kA(额定电压220 kV,额定电流1.5 kA)系统进行限流式UPFC在正常运行和短路限流情况下的仿真分析。主要仿真参数如表1所示。

4.1 正常运行

正常运行时,限流式UPFC等效为常规UPFC,对线路的潮流分布进行控制。在某节点处当线路的有功和无功指令分别发生阶跃变化时,仿真结果如图6所示。

表1 主要仿真参数

主要仿真参数	数值
系统线电压/kV	220
线路额定电流 I_N /kA	1.5
限流电容 C_d /mF	1.6
限流电感 L_d /mH	10
直流电容 C_d /mF	3.6
AT 变比	3:1
AT 一次侧电感 L_1 /mH	17.3
AT 二次侧电感 L_2 /mH	3.6
AT 一二次侧互感 M /mH	7.22

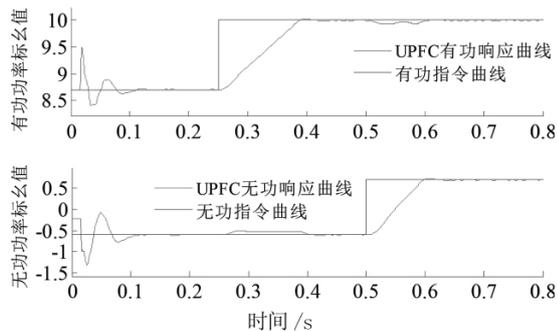


图6 线路潮流调节曲线

从图6可以看出,初始时刻有功、无功标么值分别为8.7和-0.6,系统在启动后的0.1s内有功功率和无功功率存在轻微振荡,之后保持稳定,对系统影响很小。在0.25s时有功控制指令阶跃到10,UPFC可以使有功功率快速准确跟踪指令变化,且无功功率基本没有波动。在0.5s时无功控制指令阶跃到0.7,UPFC可以使无功功率快速准确跟踪指令变化,且有功功率基本没有波动。说明正常运行时,限流式UPFC可以实现等效为常规UPFC,控制线路的潮流分布。

4.2 短路限流仿真

在0.2s时系统发生三相短路,安装常规UPFC、安装限流式UPFC、安装所提的新型限流式UPFC的系统短路波形分别如图7至图9所示。

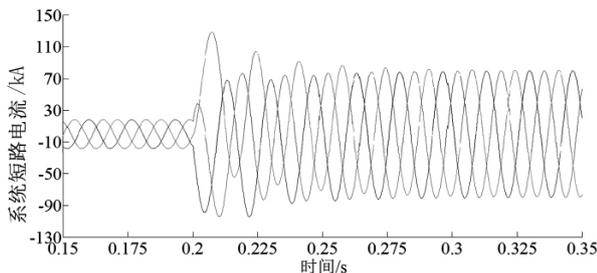
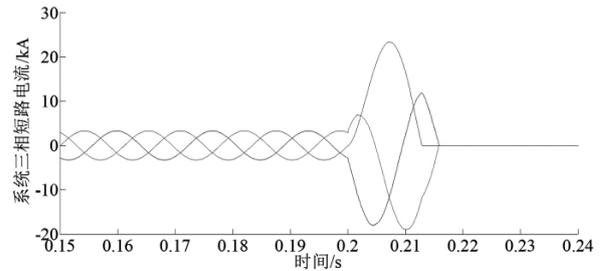
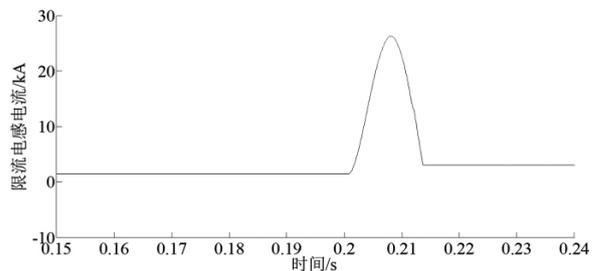


图7 常规UPFC三相短路电流

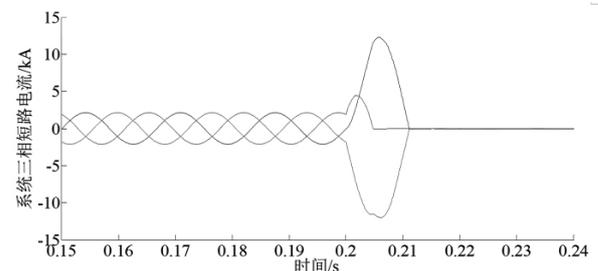


(a) 系统三相短路电流波形

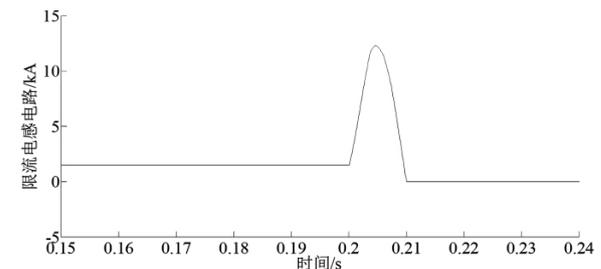


(b) 限流电感电流波形

图8 常规限流式UPFC短路波形



(a) 系统三相短路电流波形



(b) 限流电感电流波形

图9 新型限流式UPFC短路波形

从图7可知,常规UPFC在短路故障中三相短路电流最大峰值超过了110kA,将对系统稳定运行和UPFC装置的正常工作造成严重影响。从图8可以看出,采用限流式UPFC后,短路故障时的电流峰值降低到了30kA以下,故障后约14ms整流桥退出运行,相比于常规UPFC性能得到了很大提升,但是短路电流衰减速度较慢,衰减为0耗时长。从图9可以看出,采用所提出的限流式UPFC后,短路故障时的电流峰值被限制到15kA以下,从短路故障发生到短路电流衰减为0用时10ms左右。表2为3

(下转第84页)

(上接第32页)

种类型 UPFC 的限流情况对比表。综上,新型限流式 UPFC 相较于常规限流式 UPFC 限流效果更佳。

表2 限流情况对比

UPFC 类型	短路电流峰值/kA	限流时间/ms
常规 UPFC	148	
常规限流式 UPFC	27	14
新型限流式 UPFC	12	10

5 结 语

针对 220 kV 线路的潮流调节和短路电流超标问题,提出了改进后的新型限流式 UPFC,采用饱和型自耦变压器作为串联变压器,RLC 串联谐振电路作为限流电抗支路,减少了装置体积和成本。通过对正常运行、过渡限流、完全限流 3 个阶段的电路分析以及主要元件参数的设计,证明了其理论上的可靠性。最后,仿真结果表明新型限流式 UPFC 能缩短限流时间,大大减小短路电流峰值且短路电流很快衰减为 0,可以作为 220 kV 线路的限流式 UPFC 装置。

参考文献

[1] 刘民伟,郭洪芹,胡凯. 云南电网短路电流超标原因及限制措施研究[J]. 云南电力技术, 2018, 46(5): 35-38.

[2] 关文婷,陈成. 新疆准东电网短路电流综合限制措施[J]. 云南电力技术, 2018, 46(3): 23-24.

[3] 张汉花,田蓓,顾雨嘉,等. 宁夏电网短路电流超标原因及限制措施研究[J]. 宁夏电力, 2018(1): 7-12.

[4] 徐杰,李燕. 特高压换流站单相短路电流抑制措施及对电网可靠性的影响分析[J]. 四川电力技术, 2018, 41(4): 69-72.

[5] 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.

[6] 蔡晖,祁万春,黄俊辉,等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 73-78.

[7] 杨林,蔡晖,汪惟源,等. 500 kV 统一潮流控制器在苏州南部电网的工程应用[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 47-53.

[8] 陈勇,曹伟伟,柏彬,等. MMC-UPFC 单相接地故障下运行特性分析及整体保护策略设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 599-610.

[9] 蔡晖,张文嘉,吕翔,等. 苏州南部电网串联电抗器与统一潮流控制器协调优化研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(6): 119-123.

[10] 徐帅,杜钦君,张晓飞,马浩,王延博. 新型限流式统一潮流控制器限流分析与参数设计[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 558-565.

[11] 郭易木,江道灼,陈峰,等. 限流式 UPFC 对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2087-2093.

[12] 吕文韬,沈忱,江道灼,等. 具有电容限压功能的限流式统一潮流控制器[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(5): 877-881.

[13] 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.

[14] 陈峰. 限流式统一潮流控制器样机设计与实验[D]. 杭州:浙江大学, 2016.

[15] 郭易木. 220 kV 新型固态限流器实用化样机优化设计[D]. 杭州:浙江大学, 2017.

作者简介:

杜莹莹(1994), 硕士, 研究方向为线路短路电流柔性控制;

郝文斌(1976), 博士, 教授级高级工程师, 从事电力系统规划及调度运行研究。

(收稿日期: 2019-05-08)