

基于故障电流控制的新型 UPFC-FCL 设计

陈 峰,江道灼,周 洋,范 宇,郭易木,陈 可

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 针对统一潮流控制器(UPFC)的系统短路保护问题,提出了一种基于故障电流控制的新型限流式统一潮流控制器(UPFC-FCL)拓扑结构。通过在限流电抗支路上投切耗能电阻,配合 UPFC 并联侧控制,限制线路故障电流的上升速率和幅值并保护设备安全。详细阐述了拓扑结构与工作原理,并进行了数学建模和关键参数设计。仿真结果表明,该新型 UPFC-FCL 能较精确地控制故障电流并可灵活调整限流值以配合继电保护电流整定值和断路器遮断电流,故障消除后恢复迅速且适用于多次故障和自动重合闸等情况,同时降低了装置成本以及 UPFC 的损坏风险。

关键词: 统一潮流控制器; 故障限流器; 设计; 故障电流控制; 拓扑

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.022

0 引言

统一潮流控制器 UPFC(Unified Power Flow Controller)是一种可以同时控制节点电压和线路输送功率的 FACTS 元件,它综合了许多 FACTS 器件的灵活控制手段,被认为是最有创造性且功能最强大的 FACTS 元件。限流式 UPFC(UPFC-FCL)是一种结合 UPFC 和限流器的新型柔性交流输电装置,能在实现 UPFC 控制功能的同时,有效应对系统的短路故障,保障装置和电网的安全性,因此受到各国电力界的高度重视^[1-4]。

针对电力系统短路保护问题,采用桥式固态限流器作为限流措施,已有不少研究且比较成熟^[5-8]。文献[9]提出一种固态三相短路限流器,其由一个晶闸管可控桥、续流桥臂和桥路直流侧串联的限流电抗组成,在正常工作时三相桥路全开通,限流电抗通过续流晶闸管续流,限流器对外亦呈现零阻抗;故障发生后续流管被强制关断,限流电抗插入限制短路电流。文献[10]在上述限流器基础上引入全控开关与限流电抗串联,检测到故障即通过全控开关断开桥路切除线路,速度更快。

但目前关于 UPFC 有效应对系统的短路故障、保障装置安全性的研究以及在系统中仿真比较有限,文献[11]提出了一种在原有 UPFC 拓扑基础上采用适当的控制方法利用装置本身来限流的方法,但由于 UPFC 装置容量的限制,限流能力有限,无法承受高电压和短路电流的冲击。文献[12]采用串联变压器的漏抗来限流,但漏抗值很难设计,正常

运行时为减小串联变压器上的电压损失,漏抗值不宜设计得过大;短路时需要可靠地将短路电流限制到安全水平,漏抗值又不能设计得过小。文献[13-16]提出一种改进的 UPFC 拓扑,其由 UPFC 部分和固态桥式限流器部分通过 UPFC 的串联变压器的副边耦合在一起组成,系统短路故障时限流电抗能迅速插入限流,并及时退出 UPFC 运行。但该拓扑在短路故障发生后直接退出桥路运行,由串联变压器励磁电抗限制故障电流,励磁电抗往往数值很大,从而故障电流很小。文献[17]对上述拓扑进行了改进,在桥式限流器限流电抗支路上串接了一个全控开关,该拓扑在故障发生后能更快关闭桥路,降低设备成本,在系统短路后通过全控开关直接切除故障,断开线路。但是上述拓扑均无法灵活控制故障电流,不利于继保判断,同时在故障切除后均无法自动恢复,且不适用于自动重合闸。

本文针对 UPFC-FCL 的拓扑结构和限流要求,提出了一种基于故障电流控制的新型 UPFC-FCL 拓扑。文中分析了其正常运行和短路限流的工作原理,并建立了短路数学模型;给出了限流电感值和耗能电阻的参数设计方法,并对新型 UPFC-FCL 与已有装置的工作性能进行了比较;对新型 UPFC-FCL 进行了建模仿真,结果验证了该拓扑能较精确地控制故障电流并可灵活调整限流值以配合继电保护电流整定值和断路器遮断电流,故障消除后恢复迅速且适用于多次故障和自动重合闸等情况,同时降低了装置成本以及 UPFC 的损坏风险。

1 新型 UPFC-FCL 的电路拓扑

图 1 是本文提出的新型 UPFC-FCL 拓扑结构,UPFC 并联侧经并联变压器 T_{sh} 与系统相连,串联侧和限流器通过串联变压器 T_{sc} 副边连接在一起,并通过

收稿日期:2014-12-21;修回日期:2015-10-09

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA-050402)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA-050402)

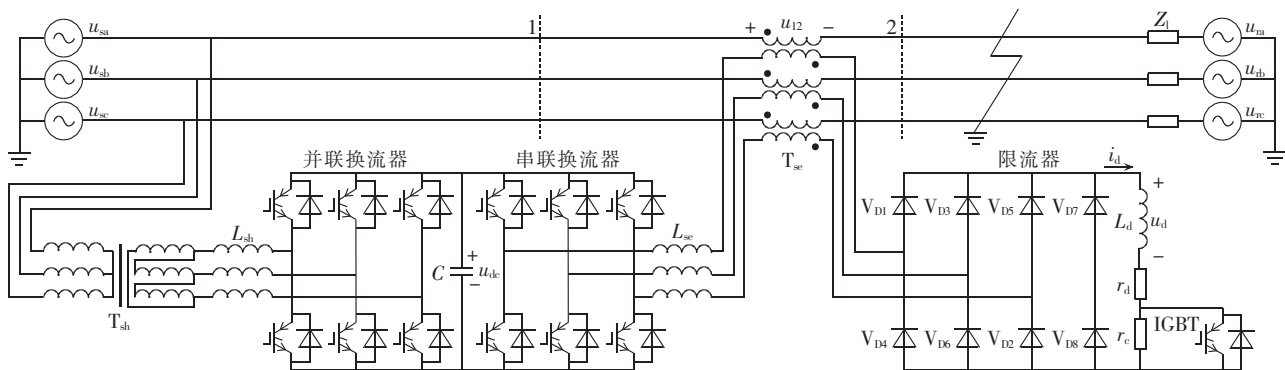


图 1 新型 UPFC-FCL 的拓扑结构

Fig.1 Topological structure of proposed UPFC-FCL

T_{se} 原边接入系统,串联侧和并联侧通过直流电容 C 连接在一起。限流器部分由 $V_{D1}—V_{D6}$ 组成基于二极管的不控整流桥, V_{D7} 和 V_{D8} 构成续流桥路, r_d 、 L_d 分别为限流电抗的电阻和电感。与文献[13-16]所提的 UPFC-FCL 相比,该拓扑在限流电抗支路中串入了并接的耗能电阻 r_c 和投切开关 IGBT。在短路故障发生后并不直接退出桥路运行,而是通过耗能电阻的投切控制故障电流,以配合继电保护判断。

2 新型 UPFC-FCL 的工作原理

2.1 正常运行工作原理

正常工作情况下,IGBT 开通短接耗能电阻,启动后限流器模块三相整流桥路不控整流,限流电抗电流 i_d 达到副边交流电流峰值后保持恒定,之后通过 V_{D7} 、 V_{D8} 续流,若忽略晶闸管的导通压降,三相桥路的交流输入端三点等效为短接,UPFC-FCL 装置等效于常规 UPFC。由此得出正常运行下串联变换器和限流器回路的等效电路如图 2 所示。其中, X_1 、 X_m 分别为耦合变压器原边漏抗和励磁电抗; X'_2 、 X'_c 分别为折算到一次侧的副边漏抗、滤波电感电抗和容抗; Z_l 为负载阻抗。

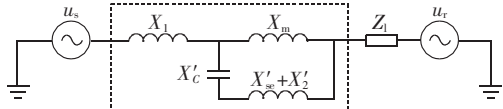


图 2 正常运行下的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of normal operation

当 UPFC-FCL 启动、停机、潮流调节、电网波动等行为发生时,限流电抗会短时插入系统参与暂态过程,系统稳定后重新恢复至稳态。

2.2 过渡限流阶段

短路故障发生后,故障电压全部加在串联变压器 T_{se} 一次侧并通过桥路对限流电抗进行充电,限流电抗电流 i_d 不断增加,从而限流电抗中储存的能量也不断增大。续流二极管 V_{D7} 、 V_{D8} 由于承受 u_d 反压被强制关断,电感无延时插入电路限制短路电流。

其过渡限流阶段串联变换器和限流器回路的等效电路如图 3 所示。在这一过程中,串入线路的限流器等效电抗值由于限流电抗的插入迅速增大。同时故障电压 u_s 全部加在串联变压器 T_{se} 上,如果关断 UPFC 并联侧换流器脉冲,短路电流将通过串联变压器 T_{se} 向直流电容 C 充电,导致电容电压急剧上升,损坏电容以及换流器等设备。因此在一检测到短路故障后,立即对并联侧定电压控制,将功率倒送回系统,稳定电容电压于 U_{dc} 。将图 3 虚线框中的等效电路做进一步简化,假定 T_{se} 变比为 1,忽略原边漏抗,且认为励磁电抗远大于系统其他电抗。则串联变换器和限流器回路的等效电路图如图 4 所示。其中, U_{dc} 为直流电容电压值,通过并联侧控制保持基本恒定; u_{ac} 为串联变副边电压,为三相六脉波,如图 5 所示。

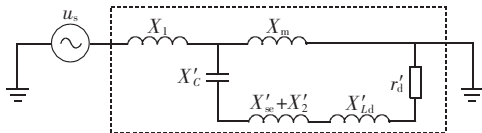


图 3 过渡限流阶段的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of current limiting at transition stage

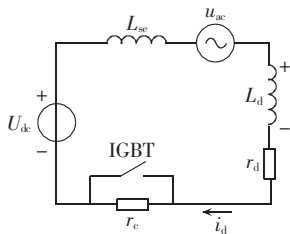


图 4 简化的过渡限流阶段等效电路

Fig.4 Simplified equivalent circuit of current limiting at transition stage

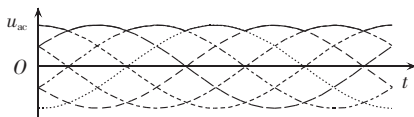


图 5 过渡限流阶段串联变副边电压波形

Fig.5 Secondary voltage waveform of series transformer at transition stage of current limiting

假设在 $t=t_0=0$ s 时刻发生短路故障,其数学模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} r i_d + (L_d + L_{se}) \frac{di_d}{dt} = u_{ac} - U_{dc} \\ i_d(0) = I_N \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_N 为短路前限流电抗上的电流,即正常运行时线路电流的幅值。当 IGBT 开通时, $r=r_d$; IGBT 关断时, $r=r_c+r_{d0}$ 。

为简化微分方程求解,将串联变副边电压 u_{ac} 视为三相六脉波的有效值 U_{ac} 。过渡限流时, IGBT 开通,求解式(1),解得限流电抗的电流如式(2)所示:

$$i_d(t) = e^{-rt/L} \left(I_N - \frac{U_{ac} - U_{dc}}{r} \right) + \frac{U_{ac} - U_{dc}}{r} \quad (2)$$

其中, $L=L_{se}+L_d$; $r=r_{d0}$ 。

若之后 IGBT 保持开通,即始终不投入 r_c ,则 i_d 的稳态值为:

$$I_d = \frac{U_{ac} - U_{dc}}{r} \quad (3)$$

由于限流电抗的阻值很小,若令 $r_d \approx 0$,对式(2)在 $t=0$ 处求导,有:

$$\left. \frac{di_d}{dt} \right|_{t=0} \approx \frac{U_{ac} - U_{dc}}{L} > 0 \quad (4)$$

由式(4)可知,限流电抗无需故障判断延时,故障发生后即插入电路限制短路电流第一波上升速率,限流电抗值越大,相应的短路电流上升速度也越慢,留给控制系统反应、控制的时间亦越多,但限流电抗的体积和成本也越大。

此时的线路短路电流 i_L ,根据图 3 的等效电路和电路原理满足:

$$\sqrt{2} U \sin \omega t = L_1 \frac{di_L}{dt} + r_1 i_L \quad (5)$$

其中, L_1 和 r_1 分别为图 3 虚线框中的等效电感和等效电阻; U 为系统电压有效值。

式(5)的解即为过渡限流阶段短路的全电流:

$$\begin{aligned} i_L = & -\frac{\sqrt{2} U}{z} \sin(\omega t_0 - \alpha) e^{-r_1(t-t_0)/L_1} + \\ & \frac{\sqrt{2} U}{z} \sin(\omega t - \alpha) \\ z = & \sqrt{r_1^2 + \omega^2 L_1^2} \\ \alpha = & \arctan \frac{\omega L_1}{r_1} \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 电流控制限流阶段

短路故障后,限流电抗电流 i_d 不断增加,当达到设定的限流值 I_{set} 时,通过控制 IGBT 的导通与关断控制 r_c 的投切, L_d 充电增加的能量由 r_c 消耗,从而维持 i_d 基本恒定。由于采用二极管三相不控整流桥,整个过程中保持限流并且无需切断线路。

若在 t_1 时刻,限流电抗电流上升到设定的限流值 I_{set} ,此时耗能电阻 r_c 投入限流电抗支路运行,此时 i_d 的表达式由式(2)变为式(7):

$$i_d(t) = e^{-r(t-t_1)/L} \left(I_{set} - \frac{U_{ac} - U_{dc}}{r} \right) + \frac{U_{ac} - U_{dc}}{r} \quad (7)$$

其中, $r=r_d+r_{c0}$ 。

对 i_d 在 $t=t_1$ 处求导,考虑 $r \approx r_c$,有:

$$\left. \frac{di_d}{dt} \right|_{t=t_1} \approx \frac{U_{ac} - U_{dc}}{L} - \frac{r_c I_{set}}{L} \quad (8)$$

对比式(8)和式(4)可知, r_c 的投入使得电流 i_d 斜率减小甚至变负。因此需要选择合适的 r_c 值使其投入后 i_d 逐渐下降,当控制系统检测到 i_d 小于 I_{set} 后再切除 r_c ,从而使 i_d 在电流控制限流阶段保持在 I_{set} 附近。以下根据图 6 具体分析工作过程。

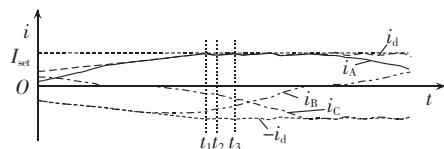


图 6 电流控制限流阶段原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of current limiting at current control stage

如图 6 所示, $t=t_1$ 时, i_d 到达设定值 I_{set} , IGBT 关断,耗能电阻 r_c 投入, i_d 以式(8)的斜率下降, IGBT 在 $\Delta t_1=t_2-t_1$ 的时间内保持关断。 $t=t_2$ 时,由于 $i_d < I_{set}$, IGBT 再次导通,耗能电阻 r_c 切除, L_d 充电, i_d 由减小变为以式(4)的斜率增大,直到再次到达 I_{set} ,循环相同的限流过程。因此整个电流控制限流过程中, i_d 保持在 I_{set} 附近。 $\pm i_d$ 是三相线路电流的包络线,相应地,线路电流 i_L 也同时被 i_d 箝位在 $\pm I_{set}$ 之间。

2.4 故障消除阶段

故障消除后的动态过程如图 7 所示,当 $t=t_4$ 时,短路故障消除,三相线路电流在半个周期以内迅速恢复至线路正常运行的幅值 I_N 。由于此时 $i_d > I_N$,并且桥路由二极管组成,限流器部分将自动进入续流状态, i_d 在 r_d 的作用下逐渐减小至正常工作时的幅值 I_N 。

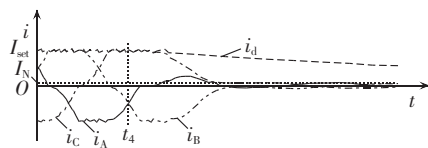


图 7 故障消除阶段原理示意图

Fig.7 Schematic diagram of current limiting at fault clearing stage

3 新型 UPFC-FCL 关键参数设计

3.1 限流电抗的参数设计

限流电抗的参数设计考虑如下 2 个因素:第一,

从限流电抗能量最优角度考虑,使限流电抗的体积尽可能地小;第二,从满足限流要求角度考虑,使故障电流在故障发生后到控制器检测到故障的时间内不超过电流设定值 I_{set} 。2 种方案设计出来后首先应该满足限流要求,其次考虑使限流电抗能量最优、体积最小。

(1) 能量最优角度。

结合式(2),并有 $L \approx L_d$,得到故障情况下限流电感中的储能为:

$$E = \frac{L_d}{2} \left[e^{-rt/L_d} \left(I_N - \frac{U_{ac} - U_{dc}}{r} \right) + \frac{U_{ac} - U_{dc}}{r} \right]^2 \quad (9)$$

要使 E 取得最小值,可对变量 L_d 求极值。解得:

$$L_d = \frac{rt_1}{\ln \left(\frac{U_{ac} - U_{dc}}{U_{ac} - U_{dc} - I_N r} \right)} \quad (10)$$

(2) 限流要求角度。

考虑 UPFC-FCL 装置检测到故障并作出判断的故障延时 Δt_2 ,应使 t_1 的到来时刻满足 $t_1 \geq \Delta t_2$,即在故障电流上升到设定限流值前,控制系统应提前检测到故障并作出相应反应。

$t = t_1$ 时刻限流电抗电流 i_d 上升到 I_{set} ,即 $i_d(t_1) = I_{\text{set}}$,并将式(3)代入求解,可以得到回路电感如式(11)所示:

$$L = \frac{rt_1}{\ln \left(\frac{I_d - I_N}{I_d - I_{\text{set}}} \right)} \quad (11)$$

从而可以得到限流电抗的电感值如式(12)所示:

$$L_d = \frac{rt_1}{\ln \left(\frac{I_d - I_N}{I_d - I_{\text{set}}} \right)} - L_{sc} \quad (12)$$

其中,故障电流限制值 I_{set} 应满足:①大于继电保护电流整定值,以使继电保护能及时判断故障类型并动作;②小于线路断路器遮断电流值,以使线路断路器能够根据继电保护顺利动作。

3.2 耗能电阻的参数设计

耗能电阻主要用于消耗 L_d 充电所增加的能量,由式(8)可知,投入 r_c 使得 i_d 的上升速率减小或者变负。理论上要保持故障电流在 I_{set} ,应使式(8)恒等于零,此时得到耗能电阻值如式(13)所示:

$$r_c = \frac{U_{ac} - U_{dc}}{I_{\text{set}}} \quad (13)$$

实际上,由于 U_{ac} 为三相六脉波 u_{ac} 的有效值且故障发生时刻随机,难以满足式(8)恒等于零。因此应乘以裕度系数 k ,保证投入 r_c 后短路电流不再上升,如式(14)所示。

$$r_c = k \frac{U_{ac} - U_{dc}}{I_{\text{set}}} \quad k > 1 \quad (14)$$

若保持 i_d 在上升和下降时速率相等,根据式(4)、(8)可得 $k=2$ 。

4 仿真

对图 1 所示 UPFC-FCL 拓扑结构在 PSCAD 中搭建样机模型进行仿真。主要仿真参数如下:系统线电压为 10 kV,系统频率为 50 Hz,系统两端电压相位差为 0° ,并联变压器为 10 kV/500 V(Y,d),串联变压器为 800 V/800 V(Y,y),并联侧滤波电感为 0.357 mH,串联侧滤波电感为 0.167 mH,直流电容为 8000 μ F,限流电抗电感为 50 mH,限流电抗电阻为 1 Ω ,耗能电阻为 50 Ω ,限流设定值为 1 kA。仿真结果验证了参数选择方案以及系统拓扑结构的有效性。具体分析如下。

4.1 正常运行

正常运行状态下,1.25 s 时设定节点 2 处线路无功 -0.5 Mvar、有功 0 MW;1.4 s 时设定有功 1 MW;1.5 s 时设定无功 0.5 Mvar;1.8 s 时设定有功 -1 MW;2 s 时设定有功 0 MW、无功 0 Mvar。仿真波形如图 8 所示,潮流调整能够迅速准确响应,UPFC-FCL 相当于常规 UPFC。

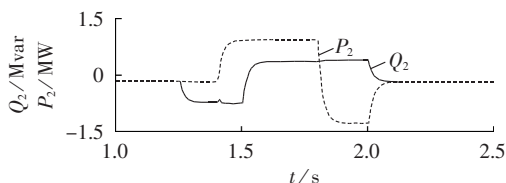


图 8 新型 UPFC-FCL 正常运行潮流调节

Fig.8 Power flow control of proposed UPFC-FCL in normal operation

4.2 短路故障

系统运行过程中,2 s 时在节点 2 处发生三相接地短路,UPFC-FCL 并联侧在检测到故障后迅速定电压控制。直流电容电压波形如图 9 中虚线所示,对比短路故障后直接关闭并联侧 PWM 脉冲的实线曲线可以发现,短路故障后直接关闭脉冲将使电容电压迅速上升,损毁电容。线路三相电流和限流电抗电流波形如图 10 所示,故障后线路电流迅速升高,到达限流设定值 1 kA 以后,IGBT 投切耗能电阻维持线路电流在限流设定值附近。

4.3 多次故障

系统运行过程中,2 s 时在节点 2 处发生两相接

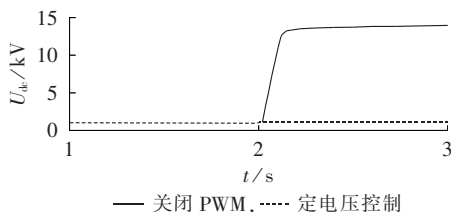


图 9 短路故障后直流电容电压变化对比

Fig.9 Comparison of DC capacitor voltage change after short circuit fault

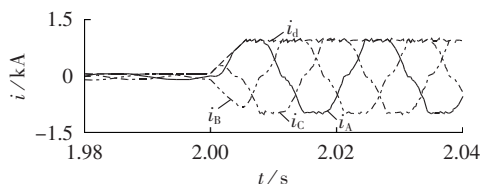


图 10 短路故障后线路和限流电抗电流波形
Fig.10 Current waveform of line and reactance after short circuit fault

地短路,故障持续 0.1 s 消除;2.3 s 时发生三相接地短路,持续 0.1 s 后消除。线路三相电流和限流电抗电流波形如图 11 所示,从仿真波形中可以看出,故障切除后线路电流马上降到 0,限流器部分在 0.1 s 左右迅速恢复至稳态。这表明该 UPFC-FCL 在发生一次故障后能自动快速恢复,适用于短时内多次故障。

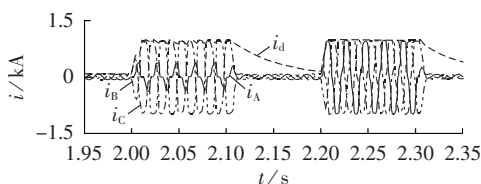


图 11 多次故障仿真波形
Fig.11 Simulation waveform of multiple faults

4.4 故障重合闸

系统运行过程中,2 s 时在节点 2 处发生三相接地短路,持续 0.1 s 后断路器切断线路,又 0.1 s 后线路自动重合闸,仿真波形如图 12 所示,可以看出线路自动重合闸后,该 UPFC-FCL 也能迅速限制故障电流。

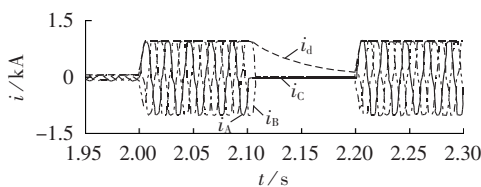


图 12 故障重合闸仿真波形
Fig.12 Simulation waveform of fault reclosing

5 结语

本文提出一种控制故障电流的新型 UPFC-FCL 拓扑,并进行理论分析、数学建模、参数设计和仿真研究,验证了其可行性和有效性。所提出的拓扑和短路控制策略具有以下特点:

a. 该 UPFC-FCL 能根据电力系统继电保护电流整定值和断路器遮断电流等因素较准确地控制故障电流并可灵活调整限流值以配合;

b. 系统短路故障时,通过 UPFC 并联侧的定电压控制可以防止 UPFC-FCL 的直流电容电压的骤升,从而降低了直流电容的设计值和装置成本,保证了装置的安全;

c. 短路故障后,串联变压器副边不断开,直流电容参与限流,将故障功率从并联侧返回系统,分流一部分故障电流,降低了限流电抗的设计值和装置成本;

d. 系统短路故障消除后,该 UPFC-FCL 能迅速恢复工作,适用于短时内多次故障和线路自动重合闸等故障情况。

参考文献:

- [1] GYUGYI L, SCHAUDER C D, WILLIAMS S L, et al. The unified power flow controller: a new approach to power transmission control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1097.
- [2] HINGORANI N, GYUGYI L. Understanding FACTS: concept and technology of flexible AC transmission systems[M]. New York, NY, USA: IEEE Press, 1999: 1-26.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 姚磊, 钱彦锋, 梅军, 等. 基于铁芯控制的串联补偿型故障限流器[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 169-173.
YAO Lei, QIAN Yingfeng, MEI Jun, et al. Series-compensation-type FCL based on core control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 169-173.
- [7] 李晓明, 梁军, 王葵, 等. 新型磁控式故障限流器[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 42-46.
LI Xiaoming, LIANG Jun, WANG Kui, et al. Magnetic-control-type fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 42-46.
- [8] 吴峰, 郑建勇, 梅军, 等. 基于可控串补的故障限流器[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 53-57.
WU Feng, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. Theoretical study and simulation of TCSC based fault current limiter[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 53-57.
- [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.
ZHAO Zhongyuan, LÜ Zhengyu, JIANG Daozhuo. Study on three-phase main circuit topology and control strategy for a new-type solid-state current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 42-46.
- [10] 张艳莉, 费万民, 吴勤. 基于单可控开关的短路故障限流器[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 46-50.

- ZHANG Yanli,FEI Wanmin,WU Qin. Fault current limiter based on single controllable switch[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):46-50.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] YAN Bo,JIANG Daozhao. 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.
- [14] 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 Daozhao,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.
- [15] 阎博,臧玉清,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 Daozhao,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.
- [16] 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.
- GUI Fan,JIANG Daozhao,LÜ Wentao,et al. Parameter design and optimization of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):160-164.
- [17] 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,2013,37(8):2187-2193.
- GUI Fan,JIANG Daozhao,LIN Zhiyong,et al. Design and research of a novel unified power flow controller with fault current limiter[J]. Power System Technology,2013,37(8):2187-2193.

作者简介:



陈 峰

陈 峰(1990—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向为柔性交流输电技术(E-mail: chenfengnai@163.com);

江道灼(1960—),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为交直流电力系统控制、电力电子及柔性交流输电、配电网自动化(E-mail: dzjiang@zju.edu.cn)。

Design of UPFC-FCL based on fault current control

CHEN Feng,JIANG Daozhao,ZHOU Yang,FAN Yu,GUO Yimu,CHEN Ke

(College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: For the short circuit protection of UPFC(Unified Power Flow Controller),a topology of UPFC-FCL (UPFC with Fault Current Limiting) is proposed based on the fault current control. The on-off switching of the power-consumption resistor in current-limiting reactor branch is cooperated with the parallel-side control of UPFC to limit the rising rate and amplitude of fault current and ensure the safety of equipment. The topological structure and working principle are introduced,the mathematical models established and the key parameters designed. Simulative results show that,the proposed UPFC-FCL controls the fault current more precisely and adjusts the current-limit setting flexibly to match the current settings of relay protection and circuit breaker;its post-fault recovery is fast;it is suitable for multiple faults and automatic reclosing;and its cost and damage risk are reduced.

Key words: unified power flow controller; fault current limiter; design; fault current control; topology