

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230768

抑制分布式静止串联补偿器对线路保护影响的方法研究

潘磊, 马秀达, 林艺哲, 谢华, 吴飞翔, 任铁强

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 分布式静止串联补偿器(distributed static series compensator, DSSC)通过调节注入线路的电压可改变线路功率, 优化电网潮流分布。针对现有交流线路保护算法难以适应 DSSC 串入线路运行的问题, 提出了抑制 DSSC 对线路保护影响的方法。首先, 分析了 DSSC 对交流线路保护的影响, 证明了 DSSC 注入电压可能改变距离保护的阻抗测量值, 导致距离保护有拒动或误动的风险。然后, 提出了利用 DSSC 本体过流保护快速将 DSSC 旁路、或基于故障辅助判据主动将 DSSC 注入电压降为 0 的方法, 以抑制不同类型的线路故障时 DSSC 对线路保护的影响。最后, 基于硬件在环 RTDS 实时仿真平台以及浙江湖州 DSSC 示范工程现场进行试验, 验证了所提抑制 DSSC 对交流线路保护影响的方法的有效性。

关键词: 分布式静止串联补偿器; 线路保护; 距离保护

Method of suppressing the influence of distributed static series compensator on line protection

PAN Lei, MA Xiuda, LIN Yizhe, XIE Hua, WU Feixiang, REN Tieqiang

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: A distributed static series compensator (DSSC) can change the power of a transmission line by adjusting the voltage injected into the line to optimize the power flow distribution of the power grid. In response to the problem that existing AC line protection algorithms are difficult to adapt to the operation of a DSSC, a method to suppress the influence of the DSSC on line protection is proposed. First, the impact of a DSSC on AC line protection is analyzed, and it is proved that the injection voltage of the DSSC may change the impedance measurement value of distance protection, leading to the risk of the protection rejecting or mis-operating. Then, a method to quickly bypass the DSSC using the overcurrent protection of the DSSC, or to actively reduce the injection voltage of the DSSC to 0 based on fault auxiliary criteria is proposed. This is to suppress the impact of the DSSC on line protection during different types of line faults. Finally, based on the hardware-in-the-loop RTDS real-time simulation platform and on-site testing of the Zhejiang Huzhou DSSC demonstration project, the effectiveness of the proposed method is verified.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of the State Grid Corporation of China (No. 5100-202255005A-1-1-ZN).

Key words: distributed static series compensators; line protection; distance protection

0 引言

随着电力负荷需求不断增长, 需要提高电网输电能力, 而由于电网潮流的自然分布特性, 部分线路长期处于重载状态, 而部分线路却处于轻载状态, 导致电网输电能力受限, 重载线路的故障可能影响

系统的安全稳定运行^[1]; 另一方面, 电网规模的扩大与现代化城市产生矛盾, 新建线路投资大且受限于土地征用难度, 新的输电通道修建阻力大^[2-4]。为了提高线路输电能力、优化电网潮流分布, 晶闸管控制串联补偿器(thyristor controlled series compensator, TCSC)^[5]、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)^[6]和统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)^[7]等柔性交流输电装置逐渐应用于电力系统^[6-10], 上述装置可产生可控的

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5100-202255005A-1-1-ZN)

补偿电压, 等效串入线路一个可变的阻抗, 进而改变电网的潮流分布。但受限于成本问题, 大型的集中潮流控制器难以在电力系统中广泛应用, 文献[11]提出了分布式静止串联补偿器(distributed static series compensator, DSSC)的概念, 模块换流器通过子模块级联直接串进线路, 各模块通过分布式布置可直接悬挂于线路杆塔或地面支撑, 各模块可拆卸以及重复利用, DSSC 可实现 SSSC 相近的功能, 但制造成本和可靠性远远优于 SSSC^[12-16]。爱尔兰和希腊等国已成功将 DSSC 应用于电网^[17], 我国浙江湖州和杭州也于 2020 年相继建成投运 220 kV DSSC 工程^[18-21]。

DSSC 的并网对传统线路的继电保护带来了新的挑战, 作为直接串联进线路的装置, 其运行特性将改变测量电压、电流中的稳态分量和暂态分量, 特别是对于距离保护, 将由于 DSSC 的接入使得保护性能大幅劣化。对于串联补偿器接入电网对线路保护的影响研究, 目前主要分为两方面内容, 一是分析串联补偿器并网对交流线路继电保护的影响, 文献[22]提出了 SSSC 本体保护与距离保护的协调配合策略, 通过修改定值并引入旁路断路器位置接点和旁路晶闸管触发信号实现保护定值的切换; 文献[23]分析了串联补偿器对零序差动和分相差动保护动作特性的影响, 并给出了串联补偿线路保护装置的改进建议。二是提出含有串联补偿器线路的新型保护算法或定值整定方法, 文献[24]采用改进的小波包熵算法提取含 SSSC 线路故障时线路两端的暂态分量, 并给出对应的双端暂态保护算法; 文献[25]根据线路故障时短路电流与电流整定值的关系, 提出临界过渡电阻的概念, 提出了自适应距离保护方案; 文献[26]提出了一种含有 UPFC 的线路距离保护方案, 基于线路微分方程模型计算故障点到保护安装处的距离, 并根据故障距离计算结果及其波动程度识别区内和区外故障。对于含有串联补偿器的新型线路保护算法研究, 需要大量的理论研究和工况遍历以保证保护的可靠性, 还对电网调度管理工作提出了更高的要求, 因此优化目前线路保护难度较大。

本文通过改变 DSSC 运行特性, 重塑了含串联补偿器线路在故障期间的电气特性, DSSC 在短路期间保护快速动作或主动控制改变注入电压, 实现对线路保护影响的抑制, 无需更改原有线路保护功能和定值, 具备更高的可靠性和灵活性。最后, 基于 RTDS 仿真平台以及现场系统试验, 验证了该策略的有效性。

1 系统结构及基本原理

DSSC 的系统结构如图 1(a)所示, DSSC 每相由多个 H 桥模块级联组成, 模块内部配置 4 组 IGBT 和二极器件、模块旁路接触器 KM、晶闸管旁路开关(thyristor bypass switch, TBS)、均压电容 C 和均压电阻 R, 线路侧配置旁路开关(bypass switch, BPS)。在正常运行时 BPS 和 KM 分闸, 级联模块直接串联接入交流输电线路, 通过改变输出电压实现对线路潮流的调节; 当线路或 DSSC 本体发生故障时, TBS、KM 和 BPS 快速合闸以保护 DSSC 一次设备。图 1 中, X_L 表示线路等效电抗, V_1 和 V_2 分别表示线路首端和末端电压有效值, δ 表示首端电压超前末端电压的角度, θ 表示线路功率因数角。

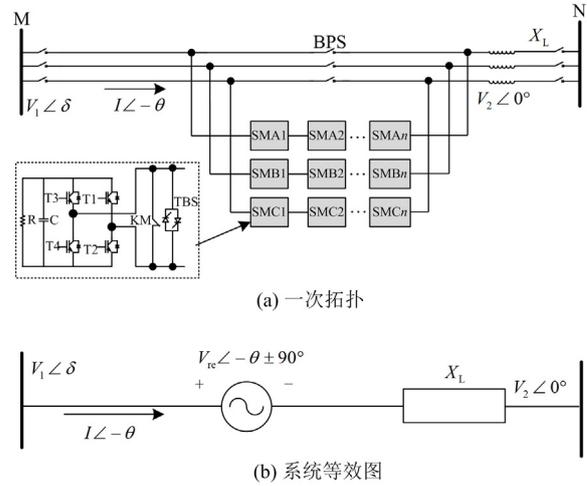


图 1 DSSC 系统结构图

Fig. 1 System structure of DSSC

如图 1(b)所示, DSSC 向线路注入的等效电压 V_{re} 与线路电流 I 方向垂直, 超前或滞后的方向取决于系统需求。

当电压分量超前于线路电流 90° 时, DSSC 等效为电感, 向电网注入感性电压; 当电压分量滞后于线路电流 90° 时, DSSC 等效为电容, 向电网注入容性电压。为后续简化分析, 将 V_{re} 以矢量值表示, 并规定注入感性电压时 V_{re} 为正, 注入容性电压时 V_{re} 为负, 则 \dot{V}_{re} 可表示为:

$$\dot{V}_{re} = V_{re} \angle -\theta + 90^\circ \quad (1)$$

线路侧电流可表示如式(2)所示。

$$j = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2 - \dot{V}_{re}}{jX_L} = \frac{V_1 \sin \delta - j(V_1 \cos \delta - V_2)}{X_L} \quad (2)$$

$$(1 + V_{re} \frac{V_1 \sin \delta}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos \delta}})$$

有功 P 和无功 Q 表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \left(1 + \frac{V_{re}}{\Delta} \right) = P' \left(1 + \frac{V_{re}}{\Delta} \right) \\ Q = \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta)}{X_L} \left(1 + \frac{V_{re}}{\Delta} \right) = Q' \left(1 + \frac{V_{re}}{\Delta} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\Delta = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \delta}$; P' 和 Q' 分别表示无 DSSC 并网时的有功和无功功率。

基于式(3)可知,通过调节 DSSC 串联电压 \dot{V}_{re} 的大小和方向,即可实现对线路有功和无功的调节。

2 DSSC 对线路保护影响分析

DSSC 直接串联进交流线路,其不存在并联支路,不影响线路保护的制动电流和差动电流测量和计算,但串联支路会影响线路的阻抗,进而影响线路距离保护,因此本文主要分析 DSSC 对距离保护的影响。

DSSC 串联等效电抗如式(4)所示。

$$\dot{X}_{re} = \frac{\dot{V}_{re}}{\dot{I}_L} = j \frac{V_{re} X_L}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \delta} + V_{re} \sin \delta} \quad (4)$$

含 DSSC 的交流线路等效阻抗如式(5)所示,等效电路如图 2 所示。

$$\dot{X} = jX_L \left(1 + \frac{V_{re}}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \delta} + V_{re} \sin \delta} \right) \quad (5)$$

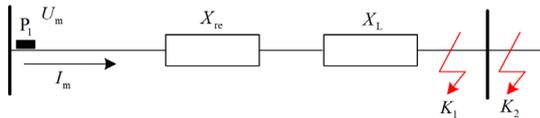


图 2 含 DSSC 线路短路故障示意图

Fig. 2 Schematic diagram of AC fault for line with DSSC

DSSC 串联接入改变了线路的等效电抗大小,等效阻抗与注入电压的大小、方向、线路两端电压以及电压相角差相关,当线路发生短路故障时,线路电压和相角差的变化将使得 DSSC 等效电抗发生较大变化,改变线路保护的测量阻抗,进而影响距离保护。

以相电压极化的阻抗继电器为例分析距离保护,继电器的工作电压 \dot{U}_{OP} 为

$$\dot{U}_{OP} = \dot{U}_m - \dot{I}_m Z_{set} \quad (6)$$

式中: \dot{U}_m 、 \dot{I}_m 分别表示保护安装处测量电压和电流; Z_{set} 为线路距离保护一段的整定值。

距离继电器的比相动作方程如式(7)所示。

$$90^\circ < \arg \frac{\dot{U}_{OP}}{\dot{U}_m} < 270^\circ \quad (7)$$

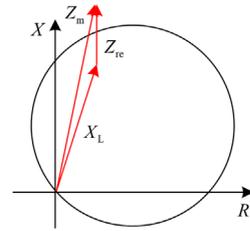
当图 2 中的 K_1 或 K_2 点发生故障时,线路首端侧线路保护的工作电压为

$$\dot{U}_{OP} = \dot{U}_m - \dot{I}_m Z_{set} = \dot{U}_m \left(1 - \frac{Z_{set}}{X_L + X_{re}} \right) \quad (8)$$

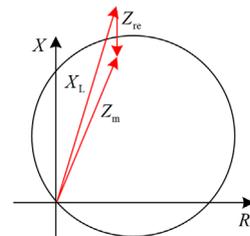
当无 DSSC 并网时,即 $V_{re} = 0$,线路距离保护 I 段的整定值 Z_{set} 一般按照本线路阻抗 X_L 的 0.8~0.85 倍来整定,满足比相动作方程式(7),距离保护可靠动作。

当 K_1 点发生区内故障时,若 DSSC 等效注入线路感抗, $X_{re} > 0$,可能使得保护 P_1 计算得到的阻抗满足 $Z_{Lk} + Z_{re} > Z_{set}$ 的条件,如图 3(a)所示,无法满足比相动作方程式(7),导致保护拒动。

当 K_2 点发生区外故障时,若 DSSC 等效注入线路容抗, $X_{re} < 0$,可能使得保护 P_1 计算得到的阻抗满足 $Z_{Lk} + Z_{re} < Z_{set}$ 的条件,如图 3(b)所示,满足比相动作方程式(7),既而导致保护误动。



(a) 区内故障导致保护拒动



(b) 区外故障导致保护误动

图 3 含 DSSC 线路短路故障时线路保护阻抗圆

Fig. 3 Line protection impedance circle in case of short circuit fault for line with DSSC

3 抑制 DSSC 对线路保护影响方法

3.1 DSSC 快速保护动作

当 DSSC 接入的交流线路或邻近线路发生金属性短路故障时,流过 DSSC 的电流增大,为了保护一次设备安全,对 DSSC 配置快速过流保护,其整定值 I_{Lset} 设置原则为

$$I_{Lset} = kI_{Lmaxp} \quad (9)$$

式中: k 表示可靠系数, 大于 1; I_{Lmaxp} 表示流过线路的最大稳态电流的峰值。

当线路电流 I_L 的瞬时值大于整定值 I_{Lset} 时, DSSC 本体保护动作, 经短时保护延时, 发出 IGBT 闭锁指令、TBS 导通指令、KM 合闸指令以及 BPS 合闸指令, 其中 TBS 可在 1 ms 内导通、KM 可在 3 ms 内完成合闸, 考虑保护动作时间, 因此在线路发生金属性短路故障后, DSSC 可在 5 ms 内实现快速旁路。

交流线路保护一般在金属性短路故障发生至少 10 ms 后动作, 而快速过流保护功能可保证 DSSC 在 5 ms 内实现旁路, 从而可消除 DSSC 对线路保护的影响。

对于考虑重合闸的线路保护(如单相短路故障), 当线路重合闸重新带电后, DSSC 可执行重启逻辑, 分闸 BPS 和 KM, 重新运行于故障前状态, 向线路注入等效电压^[21]。

3.2 DSSC 主动限制注入电压

对于非金属性短路故障, 由于过渡电阻的存在, 故障发生时短路电流较小, DSSC 本体的过流保护可能无法动作, 此时 DSSC 若继续保持故障前运行状态, 注入电压影响线路电压和电流, 可能会导致距离保护误动或拒动。

若 V_{re} 为 0, 则 X_{re} 为 0, 由式(8)可知, 含 DSSC 线路与无 DSSC 线路的测量阻抗一致, 则对线路保护无任何影响, 另一方面, 非金属性故障可能会在短时间内消失, 线路会恢复至正常状态, 因此, 若在非金属故障发生时将注入电压 V_{re} 降为 0 维持运行, 在故障消失后恢复 DSSC 正常故障前注入电压, 不仅可以抑制 DSSC 对线路保护的影响, 同时可避免频繁投切, 提高了系统可靠性。

为了实现对故障状态的可靠监测, 设置零序电流大于其设定值和相电压有效值小于其设定值作为 DSSC 限制注入电压的触发条件。

条件 1: 当零序电流大于其设定值时, 限制 DSSC 注入电压, 如式(10)所示。其中, V_{re}^0 表示故障前 DSSC 注入电压, I_{0set1} 和 I_{0set2} 分别表示零序电流动作定值以及零序电流复归定值, 其设置原则为 $I_{0set1} > I_{0set2}$ 。

$$\begin{cases} I_0 > I_{0set1}, V_{re} = 0 \\ I_0 < I_{0set2}, V_{re} = V_{re}^0 \end{cases} \quad (10)$$

当线路正常运行时, 零序电流为三相不平衡电流, 其数值较小, DSSC 正常注入系统电压; 当线路发生不对称故障时, 零序电流为零序综合序网产

生的电流, 其数值较大, 将 DSSC 注入线路的电压降为 0, 不影响线路保护的测量阻抗, 可保证保护的可靠性。

条件 2: 当相电压有效值小于其设定值时, 限制 DSSC 注入电压, 如式(11)所示。其中, U_{set1} 和 U_{set2} 分别表示电压动作定值以及电压复归定值, 其设置原则为 $U_{set1} > U_{set2}$ 。

$$\begin{cases} U_{ABC}^{min} < U_{set1}, V_{re} = 0 \\ U_{ABC}^{min} > U_{set2}, V_{re} = V_{re}^0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, U_{ABC}^{min} 表示三相相电压有效值的最小值。

当线路发生单相、两相和三相非金属接地故障时, 故障相电压为过渡电阻产生的压降, 小于额定电压。 U_{set1} 和 U_{set2} 的选取值需要结合实际工程的距离保护定值。

条件 1 和条件 2 互为补充, 可对线路发生非金属性故障进行可靠检测以及快速抑制。

综上所述, 抑制 DSSC 对线路保护影响的流程如图 4 所示。

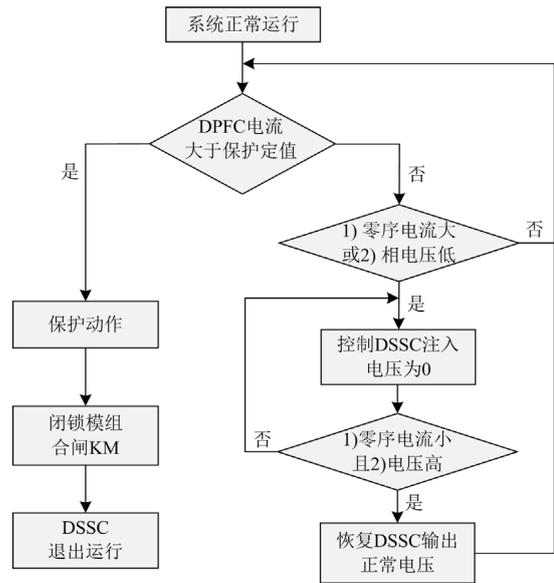


图 4 抑制 DSSC 对线路保护影响流程图

Fig. 4 Flow chart of suppressing the impact of DSSC on line protection

4 试验验证

4.1 试验背景

浙江湖州 220 kV 电网某局部地区环网运行, 如图 5 所示, 常年来, 祥福—甘泉线重载运行, 而扬子—妙西线轻载运行, 两个通道常年处于潮流分布不均的情况; 另一方面, 当祥福—甘泉线出现 N-1 故障导致单回线运行时, 将有出现过载的风险。

为了提高扬子—妙西线的有功传输水平，避免祥福—甘泉线路在发生 $N-1$ 故障时会出现过载问题，在双回线路上的祥福变电站侧布置 DSSC，通过灵活调整注入线路的电压，实现局部电网潮流优化，经计算，最大可实现 140 MW 的潮流转移能力。单套 DSSC 以及线路参数如表 1 所示，其中，DSSC 的过流保护定值按照两段保护设置定值，I 段过流保护定值为 1.3 p.u.，延时 300 μ s，II 段过流保护定值为 1.15 p.u.，延时 2 s。为了在故障时将 DSSC 注入电压降为 0，设置故障辅助判据：零序电流大于 300 A 时，限制 DSSC 注入线路的电压；相电压有效值低于 0.9 p.u.时，限制 DSSC 注入线路的电压。

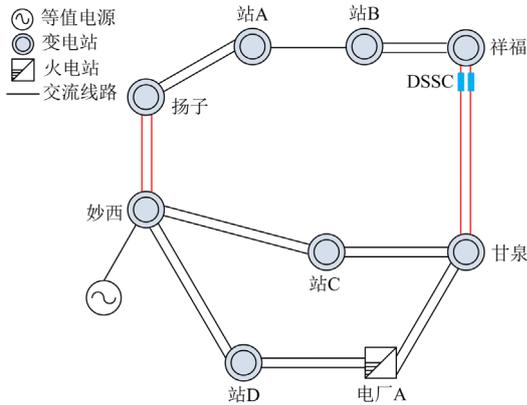


图 5 湖州地区局部电网示意图

Fig. 5 Schematic diagram of local power grid in Huzhou area

DSSC 布置于祥福—甘泉线路，根据系统需求串入感抗或容抗，如表 1 所示，当 DSSC 正常运行时最大可能串入线路的容抗或感抗大于 3 Ω (DSSC 最大补偿相电压/额定电流)，而祥福—甘泉线路的正序电抗为 3.86 Ω 。假设 $Z_{set} = 0.85X_L = 3.28 \Omega$ ，如不采取抑制措施，在祥福—甘泉线路区内故障、DSSC 串入感抗时，保护 P_1 计算得到的阻抗会出现大于 3.28 Ω 的工况，即 $Z_m > Z_{set}$ ，保护会出现拒动；在祥福—甘泉线路区外故障、DSSC 串入容抗时，保护 P_1 计算得到的阻抗会出现小于 3.28 Ω 的工况，即 $Z_m < Z_{set}$ ，保护会出现误动。

4.2 仿真试验验证

基于硬件在环 RTDS 实时仿真平台，参照图 1 建立双回线路 DSSC 应用的拓扑结构，母线 M、N 侧外部电网均基于电压源与阻抗等效，搭建的仿真平台如图 6 所示。系统模型运行于 RTDS 仿真服务器内，FPGA 实现换流阀模块运算，DSSC 控制保护装置与仿真服务器之间传输模拟量和数字量，实现系统控制和状态反应。

表 1 湖州地区局部电网参数

Table 1 Parameters of local power grid in Huzhou area

参数	数值	
等值电源参数	电压额定值/kV	230
	等值正序阻抗/ Ω	5.25
	等值零序阻抗/ Ω	7.5
电厂 A 电源参数	发电机容量/MVA	2 \times 660
	正序电抗/ Ω	3.86
祥福—甘泉线路	零序电抗/ Ω	8.19
	正序电抗/ Ω	3.89
甘泉一站 C 线路	零序电抗/ Ω	8.5
	正序电抗/ Ω	1.54
甘泉—电厂 A 线路	零序电抗/ Ω	4.28
	正序电抗/ Ω	10.5
扬子—妙西线路	零序电抗/ Ω	29.3
	正序电抗/ Ω	0.6
妙西一站 C 线路	零序电抗/ Ω	1.87
	正序电抗/ Ω	1.59
站 D—电厂 A 线路	零序电抗/ Ω	3.2
	正序电抗/ Ω	3.5
站 D—妙西线路	零序电抗/ Ω	12
	正序电抗/ Ω	7.4
站 A—扬子线路	零序电抗/ Ω	21
	正序电抗/ Ω	3.51
站 A—站 B 线路	零序电抗/ Ω	10.5
	正序电抗/ Ω	5.47
站 B—祥福线路	零序电抗/ Ω	11.8
	最大补偿(相)电压/kV	5.4
单套 DSSC	额定电流/A	1800
	容量/MVA	30

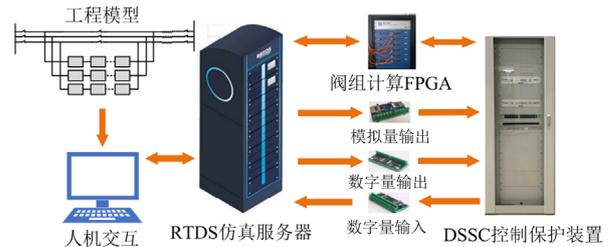


图 6 RTDS 仿真平台示意图

Fig. 6 Schematic diagram of RTDS simulation platform

试验初始状态为祥福—甘泉双回线路运行，每回线路的有功功率为 586 MW，DSSC 注入电压为 1 p.u.，为了验证本文提出的 DSSC 抑制措施的有效性，在母线 N 处分别开展金属性短路和非金属性短路试验。

4.2.1 线路金属性短路故障试验

图 7 为母线 N 侧线路发生 A 相发生金属性接地故障的仿真波形，在 0.05 s 时 DSSC 侧的 A 相电压

降至接近于 0, A 相电流急剧增大, 故障约 1 ms 后 A 相电流瞬时值大于 1.3 p.u.(对应线路电流峰值 3.3 kA), DSSC 的 I 段过流保护延时 300 μ s 后动作。当保护动作后, DSSC 所有模块的 KM 在 3 ms 内全部合闸, 此时 DSSC 的模块已处于旁路状态, DSSC 串联等效电抗 $X_{re} = 0$, 故障状态下线路保护测量的电压和电流不受 DSSC 影响, 保证保护动作的正确性。BPS 在保护动作约 45 ms 后合闸成功, DSSC 完全从线路侧旁路。

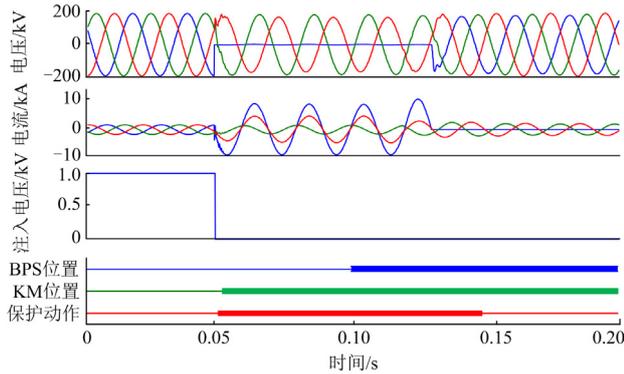


图 7 线路发生金属性接地故障时的仿真波形图

Fig. 7 Simulation waveform diagram of a metallic grounding fault on a line

综上, 当线路发生金属性短路故障时, 基于 DSSC 的快速保护动作以及模块旁路接触器 KM 的快速合闸, 使得交流线路保护不受 DSSC 注入电压的影响, 保证了线路保护动作的正确性。

4.2.2 线路非金属性短路故障试验

图 8 为母线 N 侧线路 A 相发生 50 Ω 过渡电阻接地故障的仿真波形, 在故障发生后, A 相电压降低, 三相电流均未超过保护动作定值, 因此 DSSC 维持运行, 但故障后零序电流急剧增大, 故障发生约 1 ms 后, 零序电流大于定值 300 A, DSSC 将注

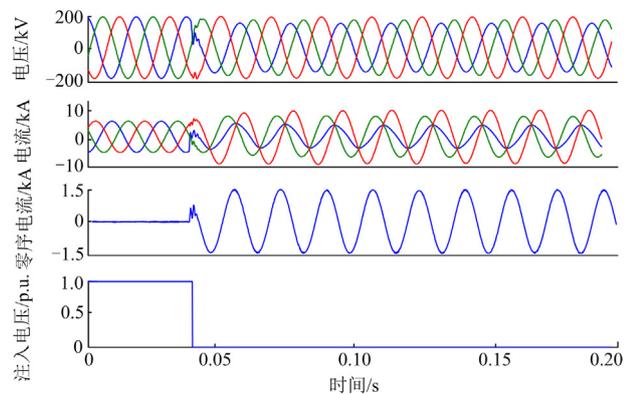


图 8 线路发生非金属性接地故障时的仿真波形图

Fig. 8 Simulation waveform diagram of a non-metallic grounding fault on a line

入电压由 1 p.u.降为 0, 由式(8)可知, 故障状态下的线路保护能可靠测量线路实际阻抗, 保证保护动作的正确性。

综上, 当线路发生非金属性短路故障时, 虽然过流保护不会动作, 但 DSSC 会通过检测零序电流大或相电压低的判据, 将注入电压降为 0, 使得 DSSC 串联等效电抗 $X_{re} = 0$ 、交流线路保护测量的电压和电流不受 DSSC 影响, 保证了线路保护动作的正确性。

4.3 现场试验验证

2021 年 6 月, 为测试 DSSC 设备的故障响应特性以及 DSSC 与交流线路保护的配合时序, 现场开展祥福—甘泉交流线路人工接地短路试验, 接地点设置在距离 DSSC 安装处约 6 km 附近, 被测试故障相为 A 相, 故障期间的试验波形如图 9 所示。

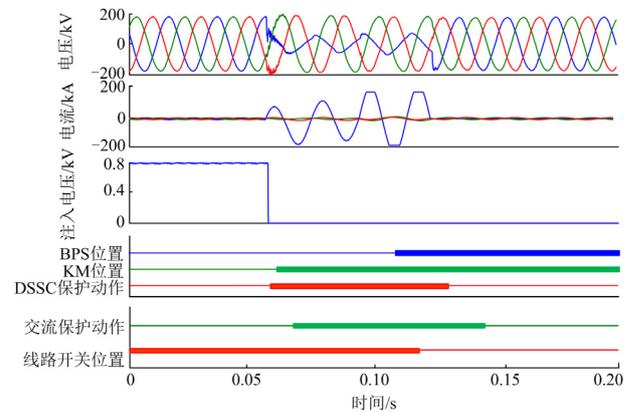


图 9 现场线路人工接地短路故障波形图

Fig. 9 Waveform diagram of artificial grounding short circuit fault on site

现场 DSSC 控制保护装置中控制功能的最小执行周期为 100 μ s, 保护功能的执行周期为 100 μ s。约 0.06 s 时 DSSC 侧的 A 相电压降低, A 相电流急剧增大, 故障约 500 μ s 后 A 相电流大于 1.3 p.u., I 段过流保护延时 300 μ s 后动作。保护动作后, 所有模块的 KM 在 3 ms 内全部合闸, DSSC 的模块已处于旁路状态, 保证了故障状态下线路保护测量的短路电流不受 DSSC 影响。

根据现场交流线路保护装置的动作报文, 在故障发生 14 ms 后线路保护动作, 被测试线路在祥福变电站侧的交流线路开关在线路保护动作后约 40 ms 后跳开, 线路保护动作时 DSSC 所有模块的 KM 开关均已合闸, 既保证 DSSC 安全从系统中隔离出来, 又保证了交流线路保护动作时序的正确性。

经上述人工接地短路试验验证后, 湖州的 DSSC 工程投入运行, 采用定电抗的运行模式, 并根据电

网应用需求调节注入线路的电抗, 工程持续运行至今未发生该区域交流保护误动或拒动的情况。

5 结论

本文分析了 DSSC 对线路距离保护的影响, 当 DSSC 注入电压为感性时, 可能导致区内故障时保护拒动; 当 DSSC 注入电压为容性时, 可能导致区外故障时保护误动。为了抑制 DSSC 并网对线路保护的影响, 本文分别提出了利用 DSSC 本体过流保护快速将 DSSC 旁路以及基于故障辅助判据主动抑制 DSSC 注入电压的逻辑方法, 基于 RTDS 仿真平台以及现场试验验证了本文所提方法的有效性, 所得结论如下:

1) 当线路区内或区外近区发生金属性短路时, 在 1 ms 内 DSSC 的快速过流保护动作, 子模块的旁路接触器 KM 在 3 ms 内实现快速合闸, 可在保护动作前快速将 DSSC 从线路中旁路, 保证不影响线路保护动作;

2) 当线路发生非金属性短路或远区故障导致的故障电流不大时, DSSC 的过流保护不会动作, 通过零序电流或相电压作为故障辅助判据, 将 DSSC 注入电压降为 0, 不影响距离保护的阻抗测量, 保证了线路保护的正确动作。

参考文献

[1] 董昱, 董存, 于若英, 等. 基于线性最优潮流的电力系统新能源承载能力分析[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 1-8. DONG Yu, DONG Cun, YU Ruoying, et al. Renewable energy capacity assessment in power system based on linearized OPF[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 1-8.

[2] HAN W, ZHU T, GAN Z X. Special column for the distributed energy system with renewable energy and natural gas[J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29(5): 1095-1096.

[3] FENG Shirui, WU Xi, WANG Zhenquan, et al. Damping forced oscillations in power system via interline power flow controller with additional repetitive control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 264-275.

[4] 高磊, 刘玉田, 汤涌, 等. 基于多 FACTS 的网侧协调阻尼控制机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4913-4922. GAO Lei, LIU Yutian, TANG Yong, et al. Research on coordinated control and interaction mechanism among multiple FACTS damping controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4913-4922.

[5] 李湘旗, 章德, 廖长风, 等. 针对特高压直流接入受端

电网的 TCSC 装置定容选址规划[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 82-89.

LI Xiangqi, ZHANG De, LIAO Changfeng, et al. Capacity and location planning of TCSC for UHVDC receiving end power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 82-89.

[6] 李群, 张宁宇, 王新宝, 等. 电力潮流灵活控制技术应用综述[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 50-60. LI Qun, ZHANG Ningyu, WANG Xinbao, et al. Review on application of flexible power flow control technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 50-60.

[7] 袁佳歆, 许顺凯, 余梦泽, 等. 一种配电网多线路混合式统一潮流控制器[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 2-10. YUAN Jiaxin, XU Shunkai, YU Mengze, et al. A multi-line hybrid unified power flow controller for distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 2-10.

[8] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.

[9] PADIYAR K R. FACTS controllers in power transmission and distribution[M]. New Delhi: New Age International Publishers, 2007.

[10] 黄如海, 曹冬明, 董云龙, 等. 静止同步串联补偿器的启停策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 114-118. HUANG Ruhai, CAO Dongming, DONG Yunlong, et al. Start-up and shutdown control strategy for static synchronous series compensator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 114-118.

[11] DIVAN D, JOHAL H. Distributed FACTS—a new concept for realizing grid power flow control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(6): 2253-2260.

[12] 詹雄, 王宇红, 赵刚, 等. 分布式静止同步串联补偿器研究与设计[J]. 电力电子技术, 2019, 53(3): 95-98. ZHAN Xiong, WANG Yuhong, ZHAO Gang, et al. Research and design of distributed static synchronous series compensator[J]. Power Electronics, 2019, 53(3): 95-98.

[13] 钟亮民, 陈涵, 赵静波, 等. 基于集中控制的分布式潮流控制器策略研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 38-43. ZHONG Liangmin, CHEN Xiong, ZHAO Jingbo, et al. Strategy research of distributed power flow controller based on centralized control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 38-43.

[14] 管敏渊, 沈建良, 楼平, 等. 级联 H 桥分布式潮流控制器的电压、阻抗和功率等值建模[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(7): 40-47. GUAN Minyuan, SHEN Jianliang, LOU Ping, et al.

- Equivalence analysis of voltage, impedance and power relationships of distributed power flow controller based on cascaded H-bridge converter[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2021, 40(7): 40-47.
- [15] 王智伟, 张振宇, 李征, 等. 提升高渗透率新能源电网承载能力的 DSSC 优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 179-187.
WANG Zhiwei, ZHANG Zhenyu, LI Zheng, et al. Optimized DSSC configuration to enhance load-carrying capacity of the new energy grid with high permeability[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 179-187.
- [16] 汪进锋, 唐爱红, 郭国伟, 等. 分布式潮流控制器的阻尼控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(10): 163-171.
WANG Jinfeng, TANG Aihong, GUO Guowei, et al. Damping control with a distributed power flow controller[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 163-171.
- [17] BRISSETTE A, MAKSIMOVIC D, LEVRON Y. Distributed series static compensator deployment using a linearized transmission system model[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(3): 1269-1277.
- [18] 谢浩铠, 黄晓明, 王松, 等. 多级分布式潮流控制器的平滑启停策略[J]. *浙江电力*, 2021, 40(9): 62-69.
XIE Haokai, HUANG Xiaoming, WANG Song, et al. Smooth startup and shutdown strategies for multi-series distributed power flow controllers[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2021, 40(9): 62-69.
- [19] 沈诚亮, 曹建伟, 唐明, 等. 分布式潮流控制器实时控制优化应用功能研究[J]. *浙江电力*, 2021, 40(9): 55-61.
SHEN Chengliang, CAO Jianwei, TANG Ming, et al. Smooth startup and shutdown strategies for multi-series distributed power flow controllers[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2021, 40(9): 55-61.
- [20] 裘鹏, 唐爱红, 徐华, 等. 分布式潮流控制器控制保护策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(8): 130-138.
QIU Peng, TANG Aihong, XU Hua, et al. A control and protection strategy for a distributed power flow controller[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(8): 130-138.
- [21] 林艺哲, 潘磊, 马秀达, 等. 集中布置型 DSSC 的交流线路故障穿越策略[J]. *电力电子技术*, 2022, 56(8): 93-95.
LIN Yizhe, PAN Lei, MA Xiuda, et al. AC fault riding through strategy for DSSC with centralized installation[J]. *Power Electronics*, 2022, 56(8): 93-95.
- [22] 方雨康. 静止同步串联补偿器本体保护配置及对距离保护影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
FANG Yukang. Research on protection configuration and distance relay in the presence of SSSC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [23] 李振动, 赵青春, 董杰, 等. 串联补偿对差动保护的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(10): 139-143.
LI Zhendong, ZHAO Qingchun, DONG Jie, et al. Research on influence of series compensation on differential protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(10): 139-143.
- [24] 刘青, 常彦彦. SSSC 串补线路两端暂态保护的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(2): 82-87.
LIU Qing, CHANG Yanyan. Research on two-end transient protection principle for series compensated transmission lines with SSSC[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(2): 82-87.
- [25] 方雨康, 于弘洋, 陆振纲, 等. 一种接入 SSSC 的交流线路自适应距离保护方法[J]. *华北电力大学学报*, 2017, 44(3): 50-58.
FANG Yukang, YU Hongyang, LU Zhenggang, et al. Adaptive distance protection scheme in presence of SSSC[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2017, 44(3): 50-58.
- [26] 孔祥平, 袁宇波, 高磊, 等. 含 UPFC 线路的距离保护方案研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(19): 5219-5226.
KONG Xiangping, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. Study of distance protection scheme for transmission line including UPFC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(19): 5219-5226.

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-11-03

作者简介:

潘磊(1985—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为潮流控制器、柔性直流输电、柔性低频输电的控制保护系统; E-mail: panl@nrec.com

马秀达(1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为潮流控制器、柔性直流输电的控制保护系统。E-mail: maxd@nrec.com

林艺哲(1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为潮流控制器、柔性直流输电、柔性低频输电的控制保护系统。E-mail: maxd@nrec.com

(编辑 张颖)