

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211244

分布式潮流控制器控制保护策略研究

裘鹏^{1,2}, 唐爱红³, 徐华⁴, 钱平⁴, 宋金根⁴, 翟晓辉³, 徐政¹

(1. 浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310015; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;
3. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070; 4. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 近些年, 随着波动性与间歇性新能源电源的大规模接入, 具有成本效益与功能强大优势的分布式潮流控制器(Distributed Power Flow Controllers, DPFC)在国内外逐步得到关注, 并有多个工程项目相继投产运行。为提高DPFC运行的安全可靠, 结合DPFC的组成结构, 研究了DPFC运行时可能发生的故障类型, 并构建了各故障类型对应的等效电路。基于等效电路模型, 分析并提取了串联耦合变压器故障、IGBT器件故障、触发信号丢失/直流电源损坏等故障情况下DPFC装置子模块的外在表现特征。结合故障特征与DPFC的启停动作时序, 提出了DPFC的保护配置方案, 并提出了DPFC变压器过压、直流电容过流、直流电容过压以及直流电容失压的保护策略。基于PSCAD/EMTDC构建了含DPFC的电磁暂态模型。仿真结果表明, 所提保护配置方案及保护策略可以有效兼顾DPFC多种故障保护的需求。

关键词: 分布式潮流控制器; 变压器故障; IGBT击穿; 故障分析; 控制保护策略

A control and protection strategy for a distributed power flow controller

QIU Peng^{1,2}, TANG Aihong³, XU Hua⁴, QIAN Ping⁴, SONG Jinggen⁴, ZHAI Xiaohui³, XU Zheng¹

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
4. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: With the large-scale access of volatile and intermittent new energy sources, gradually increasing attention has been paid to distributed power flow controller (DPFC) technology with its cost-effectiveness and function advantages, and a number of engineering projects have been put into operation. To improve the safety and reliability of DPFC operation, combined with the structure of DPFC, this paper studies the types of faults that may occur during operation. The equivalent circuit corresponding to each fault type is constructed. Based on these, the external performance characteristics of the sub-modules of the DPFC device under fault conditions such as series coupled transformer failure, IGBT device failure, trigger signal loss/DC power supply damage, etc., are analyzed and extracted. Combining the fault phenomenon and the DPFC start-stop action timing, a protection configuration scheme for the DPFC is developed. DPFC transformer over-voltage protection, DC capacitor over-current/over-voltage protection, as well as DC capacitor voltage loss protection strategies are proposed. The electromagnetic transient model containing DPFC is completed using PSCAD/EMTDC. Simulation results show that the protection configuration and strategy proposed can satisfy the protection requirements of DPFC.

This work is supported by the Technical Innovation Special Major Project of Hubei Province (No. 2019AAA016).

Key words: distributed power flow controller; transformer fault; IGBT breakdown; fault analysis; control and protection strategy

0 引言

随着电力需求的日益增加以及环保理念不断深

化, 以风能、太阳能为代表的新能源发电规模正快速扩大^[1-3], 新能源电力自身的波动性与间歇性、含新能源电源的电力系统双侧随机性以及线路输送能力限制, 可能会导致传输线路存在过载和双向潮流问题^[4-6], 丰富电力系统的潮流调控手段极其迫切。

DPFC 是一种利用低压变流器模块叠加进行线

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目资助(2019AAA016); 国网浙江电力有限公司科技项目资助《DPFC 关键技术研究及工程示范应用》(5211DS20008F)

路补偿的分布式串联型柔性交流输电设备, 由于每个变流器模块具备独立的控制单元, 其可分布式安装在站内、线路或杆塔上以协同满足电网的多种调控需求, 可分群分组投入与控制, 各子模块互为冗余, 运行损耗小且可靠性高。DPFC 将会是未来柔性交流输电技术的重点研究对象, 具有广阔的推广应用前景^[7-8]。

目前, 众多学者已在 DPFC 的数学模型、控制策略以及选址定容等理论上作了不少研究积累。文献[9]与文献[10]分别从电磁暂态层面与机电暂态层面研究了 DPFC 的数学模型; 文献[11]提出了一种基于非线性反馈的 DPFC 装置级控制策略, 改善了 DPFC 的动态响应特性; 文献[12]提出了用于分布式静态串联补偿器的线性 Heffron-Philips 模型, 基于该模型设计用于单机和多机电源系统中低频振荡的辅助阻尼控制器, 并利用粒子群算法实现控制; 文献[13]在综合考虑 DPFC 直流电压约束、输出电压约束以及线路潮流极限等目标, 提出了基于多目标协调优化的 DPFC 装置级控制器参数优化方法; 针对 DPFC 多子模块协调控制, 目前广泛采用的方法有均分法和比例法^[14-16], 文献[17]提出一种集群控制策略, 使得 DPFC 可以在整个运行范围内都稳定地保持补偿效率; 文献[18]在提高系统负载能力和可靠性之间达成了折衷, 利用混合整数线性规划方法, 提出了一种使用直流潮流模型找到 DPFC 最佳位置以增强系统负载能力和可靠性的方法; 文献[19]采用对初值选取不敏感的半定规划法建立了含 DPFC 的系统最优潮流模型, 并提出了一种基于原对偶内点法的求解方法; 文献[20]以输电断面潮流分布均衡性和 DPFC 装置全寿命周期收益率为目标, 提出了 DPFC 的优化配置模型及其求解方法; 文献[21]依据世界首个 220 kV DPFC 示范工程实际, 建立了多级 DFC 控制系统架构, 提出了分级启动和零压停运的平滑启停策略。

国内外已有多项 DPFC 工程投入运行, 其中, 浙江省的 2 项 DPFC 工程是目前世界上容量最大的。文献[22-28]针对统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)和静止同步串联补偿器(Static Synchronous Series Compensator, SSSC)进行了控制保护策略的研究。其中, 文献[22]从 MMC-UPFC 拓扑结构与工作原理出发, 提出将并联侧及串联侧分区进行保护, 设计了装置的整体保护配置方案; 文献[23]基于苏南 500 kV UPFC 工程, 提出了 UPFC 工程保护策略, 并结合线路故障后 UPFC 系统的控制保护逻辑, 通过建立含 UPFC 的电力系统故障等值模型, 分析并提出 UPFC 接入对

线路两侧距离保护动作特性的影响及应对性策略^[24], 进而提出了一种不受 UPFC 多变的运行模式和控制参数的影响的新型距离保护方案^[25]。针对 SSSC 的保护策略研究很少, 工程上大多参考 UPFC 串联侧保护策略^[26-27]。为提高 SSSC 保护的可靠性和灵活性, 文献[28]提出一种引入晶闸管撬棒和压敏电阻的新拓扑。

但 DPFC 故障类型及故障现象与 SSSC、UPFC 大不相同, 控制保护策略也更为复杂。本文将结合 DPFC 的结构组成, 研究 DPFC 运行时可能存在的故障类型, 分析各故障情况下的等效电路模型, 提取对应的电压、电流表现特征; 结合故障现象与 DPFC 启停动作, 提出 DPFC 保护配置及策略, 并仿真验证所提 DPFC 控制保护策略的有效性与可靠性, 为日后成套的 DPFC 控制保护策略体系的制定提供参考。

1 DPFC 的工作原理

DPFC 由多个单相电压源变流器模块构成, 一个单相电压源变流器即一个 DPFC 子模块, 具体如图 1 所示。

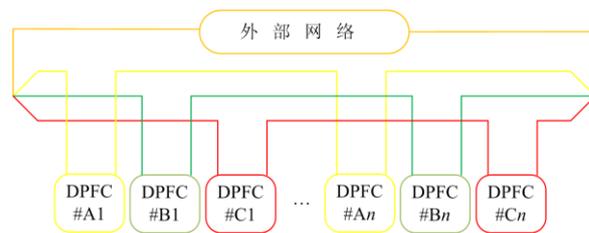


图 1 DPFC 布置结构图

Fig. 1 Diagram of DPFC allocation

每个 DPFC 子模块可单独接收控制指令并逆变出与电流相角垂直的电压, 可分别工作于电抗控制模式、电压控制模式和潮流控制模式(具体如图 2 所示), 根据需要进行模式切换, 以满足电网不同的调控需求。

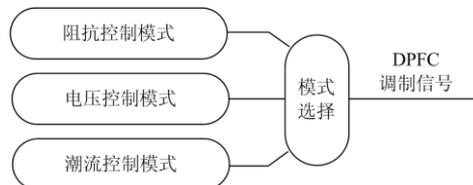


图 2 DPFC 控制策略

Fig. 2 Control strategy of DPFC

2 DPFC 故障分析

2.1 DPFC 子模块构成

每个 DPFC 子模块均是基于全控型器件组成的

变流器，其结构如图 3 所示。

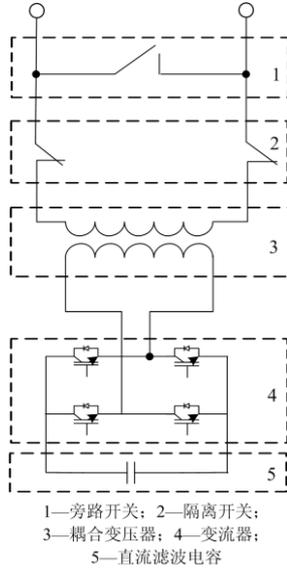


图 3 DPFC 子模块的构成

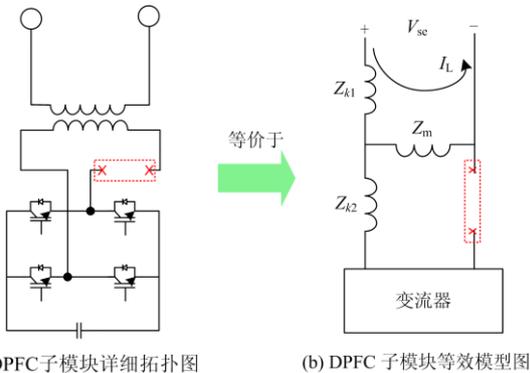
Fig. 3 Constitution of DPFC sub-module

由图 3 可见，构成 DPFC 子模块的主设备包括旁路开关、隔离开关、耦合变压器、变流器以及直流滤波电容。在 DPFC 子模块正常运行时，旁路开关为常开状态、隔离开关为常闭状态；当线路或 DPFC 子模块发生故障时，旁路开关可实现快速闭合，隔离开关可快速断开 DPFC 子模块与线路的电气联系。

2.2 DPFC 装置故障特征分析

2.2.1 串联耦合变压器故障

DPFC 子模块的串联耦合变压器副边发生短引线断开的示意图如图 4 所示。



(a) DPFC 子模块详细拓扑图 (b) DPFC 子模块等效模型图

图 4 DPFC 串联耦合变压器副边发生短引线断开的示意图

Fig. 4 Diagram of the short lead disconnection on secondary side of DPFC series coupling transformer

图中， Z_m 为变压器励磁阻抗， Z_{k1} 为折算到原边的变压器原边漏抗， Z_{k2} 为折算到原边的变压器副边漏抗， I_L 为线路电流， V_{se} 为 DPFC 串联注入被

控线路的电压。

因为变压器副边断路时，线路与 DPFC 的回路变成了线路与变压器的回路，所以此时 DPFC 等效的接入线路的阻抗为

$$Z_{dpfc} = Z_{k1} + Z_m \quad (1)$$

由于 Z_m 非常大，远大于线路阻抗，近似于线路开路状态，因此，线路电路电流将大幅度下降，线路首末端的压差将完全加在 V_{se} 上。一方面， V_{se} 会远大于 DPFC 子模块变压器的耐压水平，这将导致变压器励磁电流激增而烧毁；另一方面，由于线路处于近似开路的作用，其他 DPFC 子模块将无法正常工作。因此，为维持其他 DPFC 子模块正常工作以及避免故障子模块的进一步损坏，快速退出串联耦合变压器副边发生短引线断开的 DPFC 子模块是必要的。

2.2.2 器件故障

变流器装置由 IGBT 和反并联二极管等电力电子器件组成，其电压、电流过载能力较弱。IGBT 击穿故障是 DPFC 子模块最常见的故障类型，IGBT 会无视门极驱动信号，维持在直通状态，具体如图 5 所示。

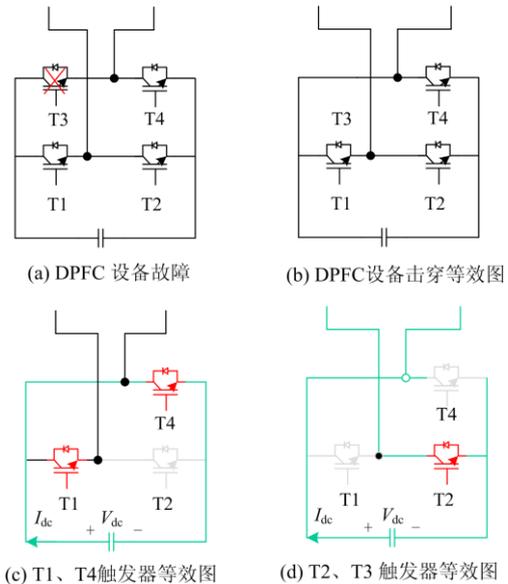


图 5 DPFC 器件故障示意图

Fig. 5 Diagram of the IGBT breakdown fault in DPFC

由图 5(a)与图 5(b)可见，IGBT 器件击穿等效于该器件被短路。当 T1、T4 触发时，由于 T4 与 T3 直通，电容与 T3、T4 形成放电回路，由于器件导通阻抗极小，电容会快速放电，使电流迅速上升，电压迅速下降。当 T2、T3 触发时，其控制逻辑能正常实现，但因为直流电容在 T4 导通的时候已经

进行了快速放电, 所以 T2、T3 即使能接收到触发信号, DPFC 仍无法工作在正常逆变状态。此外, 在实际中, T4 导通时流过的过电流可能会导致 T4 严重发热, 从而使 DPFC 其他器件进一步损坏, 因此, 当发现器件存在击穿故障时, 应快速退出该 DPFC 子模块。

2.2.3 触发信号丢失

当触发信号丢失或直流供电电源损坏时, IGBT 无法导通, 此时 DPFC 子模块结构示意图如图 6 所示。

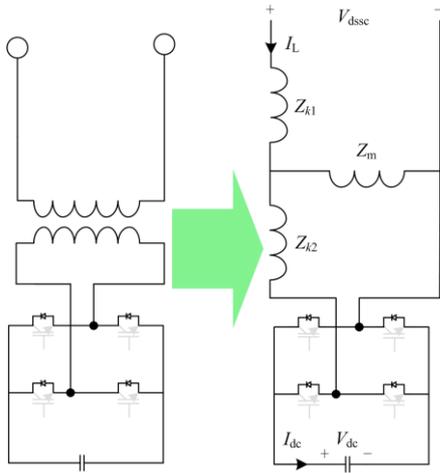


图 6 当触发信号丢失或直流供电电源损坏时 DPFC 的结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of DPFC when trigger signal is lost or DC power supply is damaged

由于 DPFC 子模块变流器只剩下由 4 个二极管组成的不可控 H 桥电路, 此时变流器会进入不控整流, I_{dc} 为 I_L/k (k 为变压器变比) 的绝对值, 直流电容电压 V_{dc} 缓慢上升至饱和, V_{se} 亦随之达到最大值。此时, V_{se} 电压约等于 DPFC 所在支路首末端压差, 故障子模块电容电压 V_{dc} 等于 kV_{se} 峰值, 这导致桥式电路中的二极管无法满足正向导通条件, DPFC 装置等效于变压器副边侧开路, 具体等效如图 4 所示。因此, 当 DPFC 子模块发生该故障时需立刻退出运行, 以免进一步造成更严重的损害。

3 DPFC 保护配置及策略

根据上述故障特性分析, 可以发现 DPFC 子模块可能面临过压、过流问题。为保障 DPFC 在发生故障时能迅速退出工作, DPFC 需要配置变压器过压保护、直流电容过流保护、直流电容过压保护以及直流电容失压保护四部分, 具体保护逻辑框图如图 7 所示。

DPFC 保护与启停时序的配合如图 8 所示。

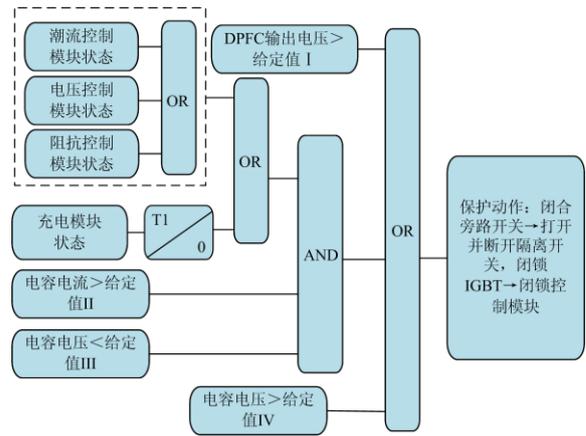


图 7 DPFC 保护逻辑框图

Fig. 7 Diagram DPFC protection logic

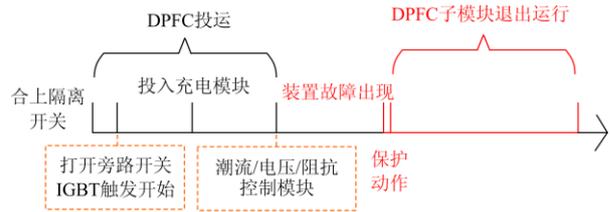


图 8 DPFC 保护与启停时序的配合示意图

Fig. 8 Schematic diagram of DPFC protection and start-stop timing sequence

在初始状态下, DPFC 隔离开关断开, 旁路开关闭合, IGBT、充电模块以及潮流/电压/阻抗控制模块均处于闭锁状态。当 DPFC 需要投入运行时, 其按照“隔离开关闭合→旁路开关开断、IGBT 触发启动→投入充电模块→投入潮流/电压/阻抗控制模块”的顺序依次执行。

若运行时发生不同的故障, 各自的保护均会根据图 7 中的逻辑进行动作。

(1) 串联耦合变压器故障

串联耦合变压器副边断线故障会引起变压器原边电压迅速上升, 越过变压器过压保护阈值, 从而引起保护动作。

(2) 器件故障

IGBT 击穿引起的直流电容下降和直流电容电流增大, 越过直流电容失压保护或直流电容过流保护的阈值, 从而引起保护动作。

(3) 触发信号丢失

触发信号丢失引起的直流电容电压越限将触发直流电容过压保护, 从而引起保护动作。

上述保护动作均为快速退出 DPFC 子模块, 具体按照“闭合旁路开关→开断隔离开关、闭锁

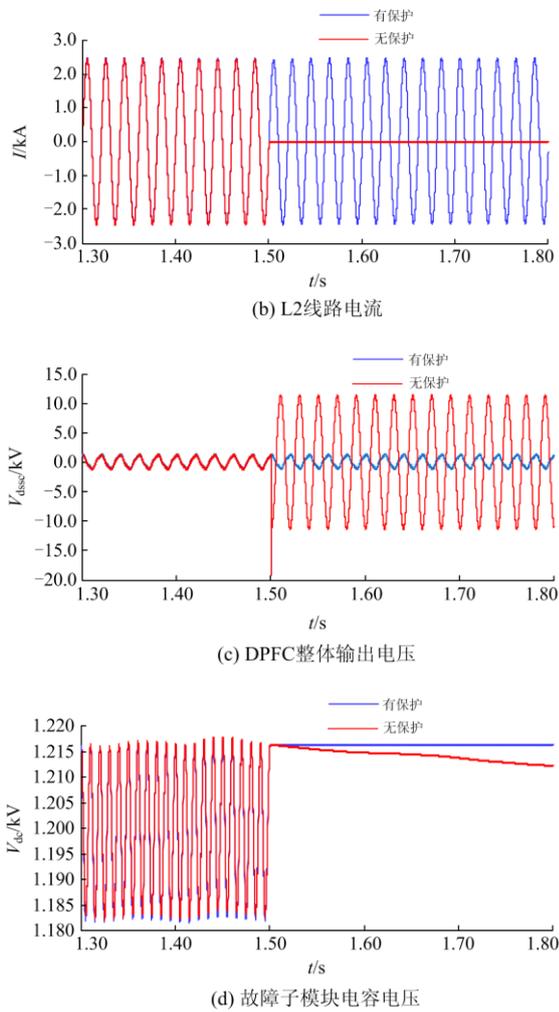


图 11 串联耦合变压器故障仿真对比图

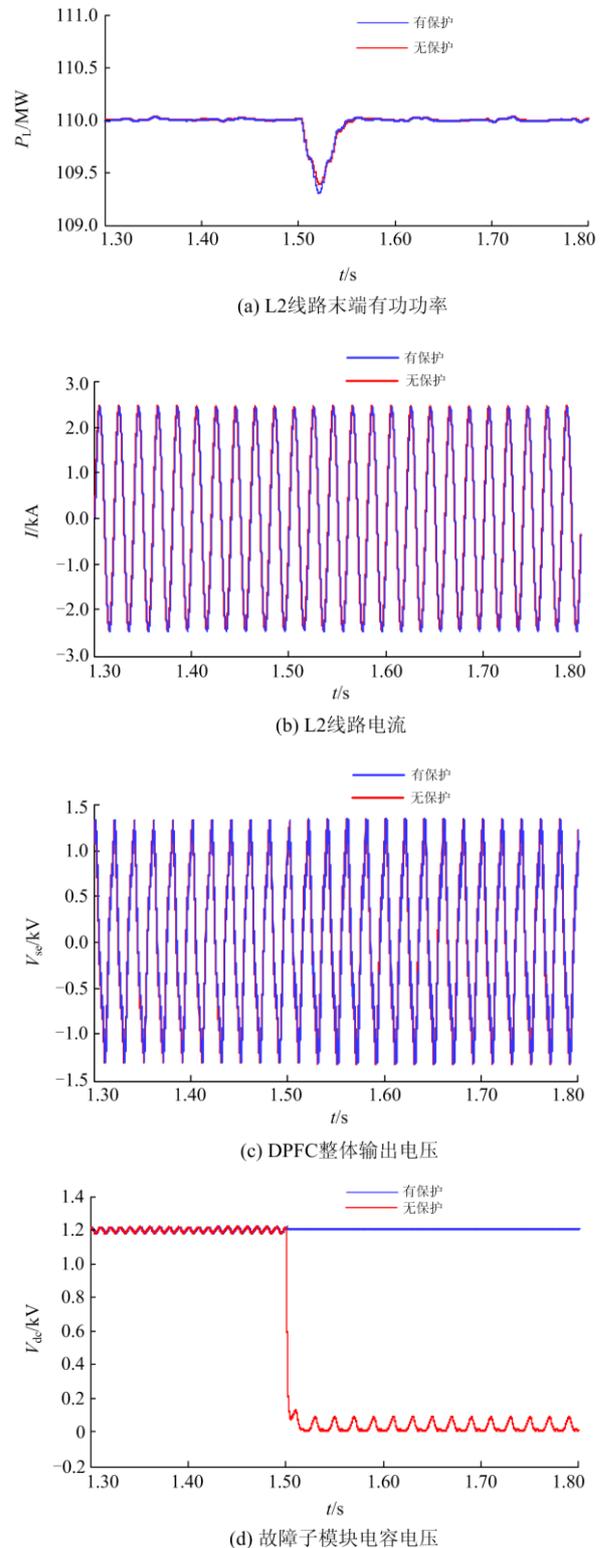
Fig. 11 Comparison diagram of fault simulation for series coupling transformer

串联耦合变压器原边电压迅速增大至母线 I 与母线 II 的电压差(DPFC 整体的输出电压总和也接近于母线 I 与母线 II 的电压差); 由于子模块与系统没有回路, 故障的 DPFC 子模块电容电压经自身放电回路缓慢放电。在含保护的情况下, 由于故障子模块在 1.5 s 发生故障后被迅速切除, DPFC 整体输出电压总和几乎不变; 虽然线路有功功率略有波动, 但在经约 0.1 s 后仍能稳定在给定值 110 kW。证明了本文所设计的 DPFC 变压器过压保护能保证故障子模块的快速切除, 从而维持其他 DPFC 子模块的正常运行。

4.2 器件故障

在 1.5 s 时, 设置线路上其中一个 DPFC 子模块的 IGBT 器件发生击穿故障, 图 12 为故障发生时含保护与不含保护的仿真结果。

由图12(a)、(b)、(c)可知, 由于单个子模块容量与线路潮流相比很小, 因此在 1.5 s 发生 IGBT 击穿故障时, 有无保护对线路电流、线路功率以及 DPFC 整体输出电压几乎没有影响。



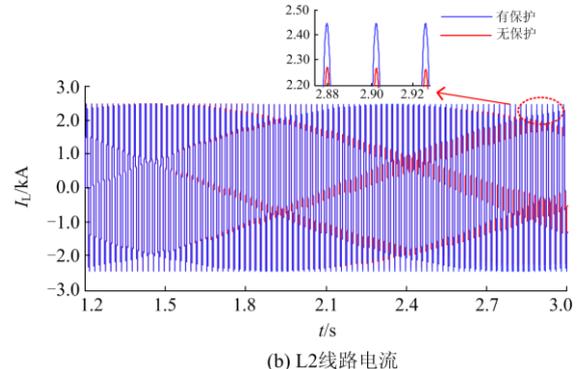
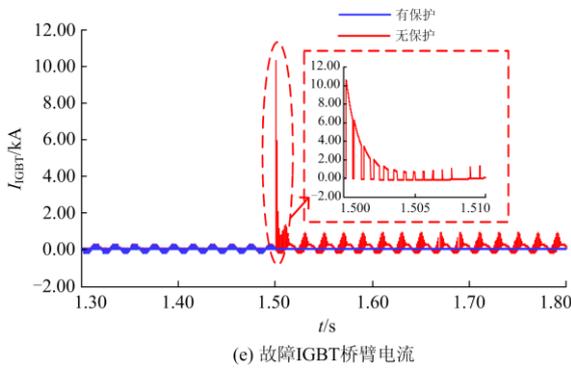


图 12 IGBT 击穿故障仿真对比图

Fig. 12 Comparison diagram of fault simulation for IGBT breakdown

由图 12(d)、(e)可知，在无保护时，故障 DPFC 子模块的电容电压迅速下降至 0，故障 IGBT 的桥臂与电容形成回路，使其产生很大的冲击电流；在有保护时，由于 DPFC 子模块因触发了直流电容过流保护阈值而退出工作，故障子模块直流电容电压在发生故障后几乎不变，且 IGBT 闭锁导致电容没有其他放电回路，因此，故障子模块的 IGBT 电流又迅速变为零。证明了本文所提出的保护策略能对 DPFC 子模块器件故障进行快速切除与隔离，保证线路与其他 DPFC 子模块正常运行。

4.3 触发信号丢失

在 1.5 s 时，闭锁线路上其中一个 DPFC 子模块的触发信号，以此模拟触发信号丢失故障，图 13 为故障发生时含保护与不含保护的仿真结果。

由图 13 可知，无保护时，故障 DPFC 子模块直流电容电压与输出电压在故障发生后逐渐上升，DPFC 整体输出电压也随之逐渐上升，线路有功功率与电流逐渐下降；有保护配置时，故障 DPFC 子模块直流电容过压保护将启动，故障子模块被迅速切除，IGBT 被闭锁，电容电压将稳定于过压整定值 1.8 kV，线路有功功率、电流以及 DPFC 整体输出电压几乎不变。

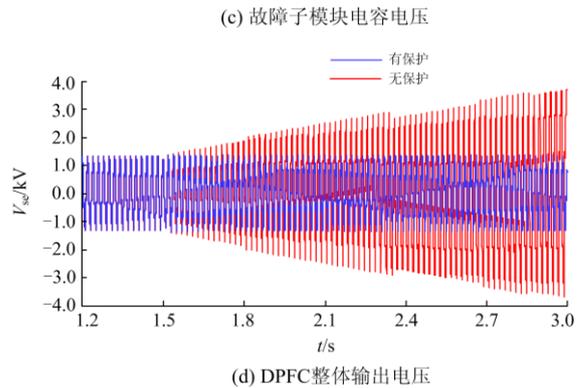
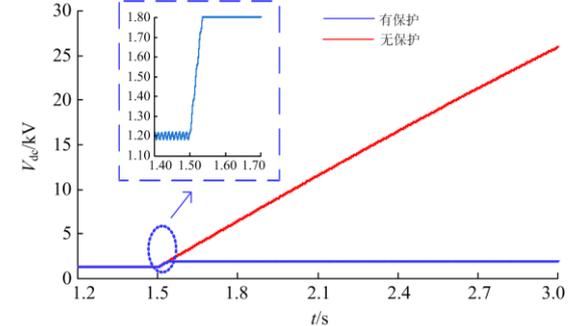
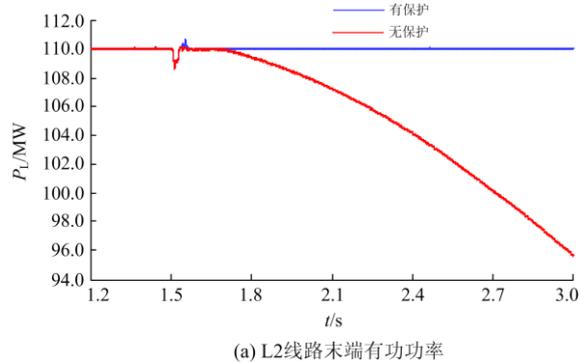


图 13 触发信号丢失/直流供电电源故障仿真对比图
Fig. 13 Comparison diagram of fault simulation for trigger signal loss/DC power supply



5 结论

本文分析了 DPFC 可能存在的故障类型，研究了各种故障凸显的独有特征现象，并据此提出了 DPFC 的变压器过压保护、直流电容过流保护、直流电容过压保护以及直流电容失压保护的配置及策略，基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件构建了能模拟多种故障类型的 DPFC 仿真系统，验证了本文所提的 DPFC 保护策略，所得结论如下：

1) 当发生串联耦合变压器与触发信号丢失故障时，DPFC 子模块最终会呈现出高阻抗状态，使 DPFC 所在支路首末端的电压差全部施加在变压器原边侧，从而导致 DPFC 子模块会发生过电压现象。

此外, 该模块故障会致使线路潮流无法传输, 等效为线路发生断路故障, 本文所提出的保护配置及策略能有效切除故障子模块, 从而保护线路正常运行。

2) 当发生 IGBT 击穿故障时, 不会对线路及其他子模块的运行造成影响, 但由于电容放电环流会使其他正常 IGBT 器件严重发热, 从而可能导致该子模块进一步损坏。本文所提出的配置及保护策略可快速切除 IGBT 发生击穿故障的 DPFC 子模块, 从而避免故障子模块进一步损坏导致二次事故。

3) 本文所提出的保护配置及策略能兼顾 DPFC 串联耦合变压器故障、器件故障、触发信号丢失故障发生时的保护需求, 能为 DPFC 工程系统调试、保护策略的设计提供指导。

参考文献

- [1] 陈忠华, 高振宇, 陈嘉敏, 等. 考虑不确定性因素的综合能源系统协同规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 32-40.
CHEN Zhonghua, GAO Zhenyu, CHEN Jiamin, et al. Research on collaborative planning of integrated energy system considering uncertain factors[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 32-40.
- [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] 刘正富, 王朋, 郭敬梅, 等. 基于 MMC 的风电机组低电压穿越测试装置控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 38-47.
LIU Zhengfu, WANG Peng, GUO Jingmei, et al. Control strategy of wind turbine LVRT test equipment based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 38-47.
- [4] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [5] YUAN H, XU Y. Preventive-corrective coordinated transient stability dispatch of power systems with uncertain wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3616-3626.
- [6] 孙立明, 杨博. 基于鲁棒无源控制的增强风电接入下电力系统稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 164-172.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust passive control for power system stability enhancement with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 164-172.
- [7] 唐爱红, 高梦露, 黄涌, 等. 协调分布式潮流控制器串并联变流器能量交换的等效模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 30-36.
TANG Aihong, GAO Menglou, HUANG Yong, et al. Equivalent model for energy exchange of series and parallel converters in coordinated distributed power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 30-36.
- [8] 唐爱红, 卢俊, 宣俭, 等. 分布式潮流控制器对系统功率控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 15-20, 26.
TANG Aihong, LU Jun, XUAN Jian, et al. Study of the power control ability of the distributed power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 15-20, 26.
- [9] 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.
- [10] YOON H J, CHO Y H. Imbalance reduction of three-phase line current using reactive power injection of the distributed static series compensator[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2019, 14(3): 1017-1025.
- [11] TANG A H, SHAO Y L, XU Q S, et al. Study on control method of a distributed power flow controller[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2019, 14(11): 1617-1623.
- [12] KHAYYATZADEH M, TOUSI B. Damping of power system oscillations via quantum particle swarm optimization based distributed static series compensator[J]. Electric Machines & Power Systems, 2013, 41(7): 729-746.
- [13] TANG A H, SHAO Y L, XU Q S, et al. Multi-objective coordination control of distributed power flow controller[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 348-354.
- [14] QIAN M H, ZHAO D W, MA J, et al. A centralized frequency regulation strategy of PV power plant based equal adjustable capacity proportion mode[C] // 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 17-19, 2018, Tianjin, China: 1797-1801.
- [15] ELGEBALY A E. Optimized design of single tum transformer of distributed static series compensators using FEM based on GA[C] // 2019 21st International

Middle East Power Systems Conference (MEPCON), December 17-19, 2019, Cairo, Egypt: 1133-1138.

[16] 刘斌, 刘君, 熊勇, 等. 按容量比例分配功率的微电网逆变器并联技术[J]. 电力电子技术, 2016, 50(1): 49-52. LIU Bin, LIU Jun, XIONG Yong, et al. Technology of power proportionally distributed for paralleled inverters in microgrid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2016, 50(1): 49-52.

[17] 王倩, 施荣, 李宁. 分布式柔性交流输电系统的高效集群控制研究[J]. 电气传动, 2018, 48(9): 51-55. WANG Qian, SHI Rong, LI Ning. Research on high efficiency cluster control of distributed flexible AC transmission system[J]. Electric Drive, 2018, 48(9): 51-55.

[18] GHAMSARI M D, FIRUZABAD M F, AMINIFAR F, et al. Optimal distributed static series compensator placement for enhancing power system loadability and reliability[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(11): 1043-1050.

[19] 唐爱红, 石诚成, 郑旭, 等. 基于半定规划法的含分布式潮流控制器最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 119-125. TANG Aihong, SHI Chengcheng, ZHENG Xu, et al. Optimal power flow with distributed power flow controller based on semi-definite programming method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 119-125.

[20] 徐雨田, 刘涤尘, 黄涌, 等. 用于提高输电均衡性的DPFC优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 94-102. XU Yutian, LIU Dichen, HUANG Yong, et al. DPFC optimization configuration strategy for increasing transmission equilibrium[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 94-102.

[21] 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.

[22] 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. CHEN Yong, CAO Weiwei, BAI Bin, et al. Operation Characteristics analysis under single-phase grounding fault and overall protection scheme design of MMC-UPFC device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 599-610.

[23] 张宝顺, 董云龙, 潘磊, 等. 苏南UPFC工程保护配合策略研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 132-139. ZHANG Baoshun, DONG Yunlong, PAN Lei, et al. Protection coordination strategy of southern Suzhou UPFC project[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 132-139.

[24] 孔祥平, 李鹏, 黄浩声, 等. 统一潮流控制器对线路纵联保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 14-21. KONG Xiangping, LI Peng, HUANG Haosheng, et al. Impact analysis of unified power flow controller on transmission line pilot protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 14-21.

[25] 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, 5403. 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, 5403.

[26] GHORBANI A, EBRAHIMI S Y, GHORBANI M. Active power based distance protection scheme in the presence of series compensators[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 57-69.

[27] 吕哲, 王增平, 许琬昱, 等. 基于母线关联出线暂态频谱信息的UPFC线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 139-146. LÜ Zhe, WANG Zengping, XU Wanyu, et al. Vertical protection of UPFC line based on bus associated outgoing transient spectrum information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 139-146.

[28] BASHAR E, ROGERS D, WU R, et al. A new protection scheme for an SSSC in an MV network by using a varistor and thyristors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 102-113.

收稿日期: 2021-09-09; 修回日期: 2021-10-21

作者简介:

袁鹏(1985—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为高压直流输电和柔性直流输电及大功率电力电子技术; E-mail: qiupeng5000@163.com

唐爱红(1969—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事柔性交直流输电、电力系统运行与控制与智能电网研究工作。E-mail: tah@whut.edu.cn

(编辑 张爱琴)