

DOI: 10.7667/PSPC171439

基于模块化多电平的统一潮流控制器换流器和直流侧故障特征分析及保护配置

祁欢欢¹, 陆振纲¹, 陈静², 李鹏², 李厚源³, 郑涛³

(1. 全球能源互联网研究院, 先进输电技术国家重点实验室, 北京 102209; 2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211102; 3. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)是为实现对交流线路的实时控制和动态补偿而提出的串并联混合型灵活交流输电系统装置, 其换流器和直流侧的故障特征复杂, 对保护要求高。首先介绍基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的UPFC基本结构与工作原理, 其次分析了换流器和直流侧几种典型故障的故障特征。在此基础上, 给出了换流器和直流侧保护配置方案。针对换流器桥臂单相接地故障和直流侧单极接地故障情况下保护可靠性低的问题, 提出了改进的保护配置方案。最后结合RTDS仿真实验, 验证了所给出的UPFC保护配置方案的有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 统一潮流控制器; 故障特性; 保护配置; 差动保护

Converter and DC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on modular multilevel converter

QI Huanhuan¹, LU Zhengang¹, CHEN Jing², LI Peng², LI Houyuan³, ZHENG Tao³

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211102, China; 3. State Key Laboratory of New Energy Power System (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: The Unified Power Flow Controller (UPFC) is one of the Flexible AC Transmission System (FACTS) devices used in transmission line for real-time control and dynamic compensation. The converter and DC side have complicated fault characteristics, the effect of fault is an inevitable issue. This paper first introduces the basic structure and operating principle of MMC-UPFC, next analyzes fault characteristics of several typical converter side and DC side fault. According to the analysis, the protection scheme for MMC-UPFC converter and DC side is proposed. Moreover, aiming at the problem that conventional differential protection for converter arm single-phase-to-ground fault and DC side single-pole-to-ground fault cannot meet the requirement of reliability, an improved protection scheme is proposed. Simulation results based on Real-Time Digital Simulator (RTDS) verify the proposed protection scheme.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Company (No. J2017041).

Key words: modular multilevel converter; unified power flow controller; fault characteristics; protection scheme; differential protection

0 引言

统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)是串并联混合型的FACTS装置, 它可以通过

改变其控制规律来分别或同时实现串补、并补、移相以及调压等作用, 能够对交流线路进行实时控制和动态补偿^[1-4]。根据不同的换流器结构, 可以将UPFC分为三种: 基于两电平换流器的UPFC、基于二极管钳位三电平换流器的UPFC和基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的UPFC。其中, MMC由于其模块化程度高、谐波

基金项目: 国网江苏省电网公司科技项目资助(J2017041): 500 kV统一潮流控制器系统应用技术研究

含量少、故障处理能力强、更适应于高电压大容量输电而得到广泛关注^[5-14]。

目前,国内外对 MMC-UPFC 的研究多集中于 MMC 的拓扑结构、系统故障与控制保护方案的研究,其中,对于系统故障和控制保护的研究多集中于交流侧部分,尤其集中于串联变压器^[11,15-21],而对于换流器和直流侧部分的研究较少,且缺乏较为完备的保护方案。文献[22]讨论了 MMC-HVDC 的永久性直流故障,利用双晶闸管开关,消除二极管续流影响,使得直流故障电流衰减至零,该方案可不依靠断路器动作,仅靠晶闸管开关消除故障;文献[23]设计了一种新型的 MMC 拓扑结构,将半桥结构与箝位电路相结合,直流侧故障情况下可以阻塞故障电流;文献[24]将附加直流无源元件、新型换流器控制与传统机械断路器结合,确保一个直流支路故障时,其他支路不中断运行;文献[25]介绍了一种应用于架空线路传输的双极模块化多电平换流器拓扑结构。以上均只涉及 MMC 拓扑结构对故障的抑制或自清除,并没有涉及具体的保护配置方案。

MMC-UPFC 的直流侧和换流器侧与基于 MMC 的高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)在结构上类似,MMC-HVDC 的故障特性及保护配置有一定的借鉴意义,但 MMC-HVDC 的直流线路大多电压等级高,传输距离长,当换流器和直流线路发生非永久性故障时,更希望通过换流器自身的拓扑对故障进行自清除。然而对于 MMC-UPFC,其直流母线位于 UPFC 站内,发生故障后,可能导致桥臂电容放电,由于其放电回路阻尼较小,故障后的短时过电流可能很严重。而且直流母线故障通常是由于 UPFC 站内绝缘损坏引起的,可视作永久性故障处理,需要保护立即闭锁换流器,并退出 UPFC,直到故障清除后才能重新启动。综上,MMC-UPFC 直流侧和换流器侧故障情况较为特殊,难点较多,全面分析其故障特性,深入研究其保护配置,有助于保证 MMC-UPFC 的可靠安全运行。

本文首先介绍 MMC-UPFC 的基本结构及工作原理,通过对换流器和直流侧几种典型故障进行仿真分析,研究其故障特性并提出相应的保护要求。在理论分析的基础上,进一步详细讨论了 MMC-UPFC 示范工程中的换流器和直流侧保护配置及配合方案,提出较为完善的保护配置方案。结合 RTDS 实时数字仿真结果,验证了所提保护配置方案的有效性。

1 MMC-UPFC 基本结构及工作原理

1.1 MMC-UPFC 基本结构

MMC-UPFC 的基本结构如图 1 所示。串联侧

和并联侧换流器交流侧通过换流变压器与交流电网连接,直流侧通过公共直流母线构成背靠背接线形式。

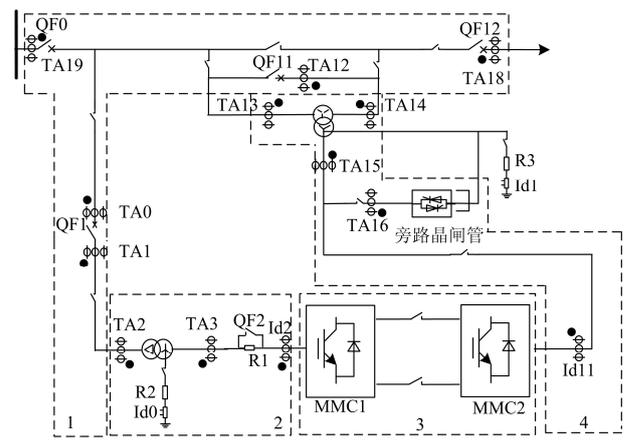


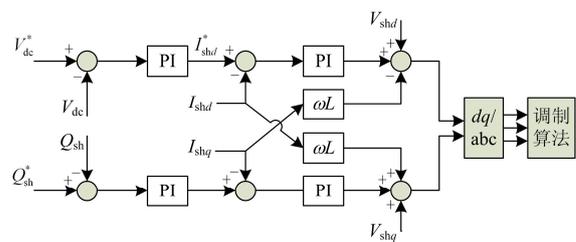
图 1 MMC-UPFC 基本结构

Fig. 1 Basic structure of MMC-UPFC

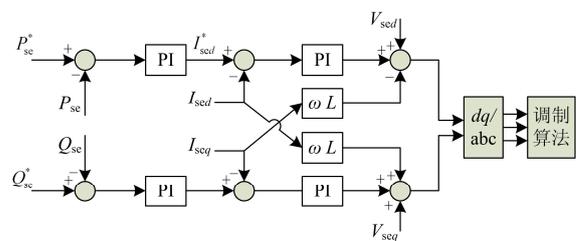
图 1 中,虚线框 1 为交流短引线部分,虚线框 2 为并联侧变压器及其交流母线部分,虚线框 3 为换流器及直流侧部分,虚线框 4 为串联侧变压器及其交流母线部分。

1.2 MMC-UPFC 基本工作原理

MMC-UPFC 的并联变压器采用 Δ/Y 连接,其中性点经电阻接地;串联变压器采用 III(开口 Y)/Y 连接,其中性点不接地;控制策略采用正负序电流解耦控制,其中并联侧换流器采用定直流电压和无功功率控制,串联侧换流器采用定有功功率和无功功率控制,其控制框图如图 2 所示。



(a) UPFC 并联侧换流器控制框图



(b) UPFC 串联侧换流器控制框图

图 2 UPFC 换流器控制框图

Fig. 2 Control process of UPFC

图 2 中, V_{dc}^* 和 Q_{sh}^* 分别为并联侧换流器直流电压参考值和无功功率参考值, V_{dc} 和 Q_{sh} 分别为并联侧直流电压测量值和无功功率测量值, V_{shd} 、 V_{shq} 、 I_{shd} 和 I_{shq} 分别为并联侧系统电压电流经过 dq 变换后的值, P_{se}^* 和 Q_{se}^* 分别为串联侧换流器有功功率参考值和无功功率参考值, P_{se} 和 Q_{se} 分别为串联侧有功功率测量值和无功功率测量值, V_{sed} 、 V_{seq} 、 I_{sed} 和 I_{seq} 分别为串联侧系统电压电流经过 dq 变换后的值。本文基于 RTDS 实验平台构建了 UPFC 仿真系统模型, 其主要参数如表 1 所示, 仿真模型如附录中图 15、图 16 和图 17 所示。

表 1 仿真模型主要参数

参数	数值	参数	数值
系统电压/kV	230	串、并联 MMC 容量/MVA	50
直流电压/kV	51.2	子模块电容电压	1.6
		额定值/kV	1.6
桥臂模块数	34	并联侧变压器漏抗/%	9.13
桥臂电感值/mH	15	并联变压器绕组变比	252/22
子模块电容值/ μ F	8 500	串联变压器绕组变比	3.83/14.72
串联侧变压器漏抗/%	9.08	接地电阻阻值/ Ω	200
子模块过压定值/kV	2.8	子模块过流定值/kA	2.1

2 MMC-UPFC 换流器和直流侧故障

2.1 并联侧换流器桥臂故障

2.1.1 并联侧换流器桥臂单相接地故障

以并联侧换流器上桥臂 A 相接地短路故障为例, 其故障点位置和故障电流通路如图 3 所示。

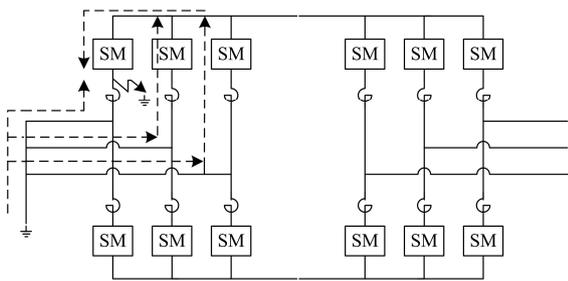


图 3 并联侧换流器上桥臂单相接地故障位置及故障电流通路

Fig. 3 Fault location and fault current path of shunt side converter upper arm single-phase-to-ground fault

故障仿真波形如图 4 所示。

并联侧桥臂单相接地故障特性如下:

1) 由于并联变压器中性点经大电阻(200 Ω)接地, 故障电流较小, 桥臂电流变化不明显, 桥臂内不会出现过流和过压现象;

2) 桥臂子模块电容电压基本保持不变;
3) 单相接地故障时, 故障相对地电压为 0, 故障点出现基波零序分量, 造成直流正负极电压出现基频波动。

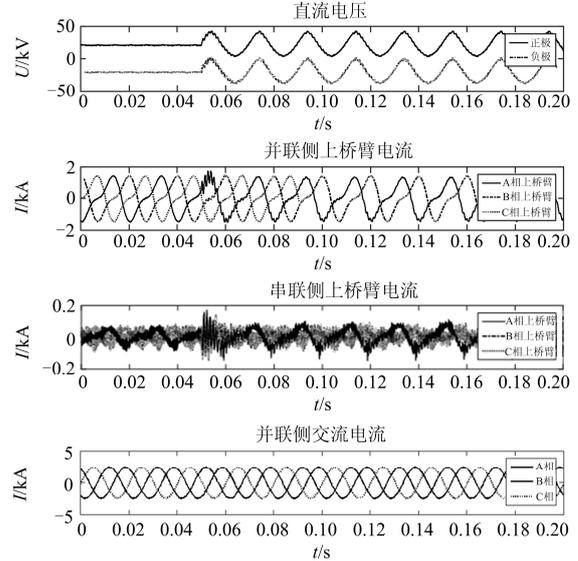


图 4 并联侧上桥臂单相接地故障仿真波形

Fig. 4 Waveforms of shunt side upper arm single-phase-to-ground fault

2.1.2 并联侧换流器桥臂相间短路故障

以并联侧换流器上桥臂 AB 相间短路故障为例, 其故障点位置和故障电流通路如图 5 所示。

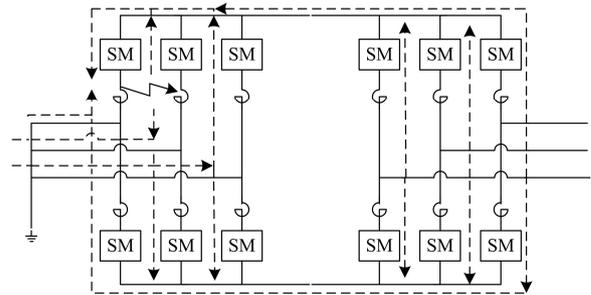


图 5 并联侧换流器上桥臂相间短路故障位置及故障电流通路

Fig. 5 Fault location and fault current path of shunt side converter upper arm phase-to-phase fault

故障仿真波形如图 6 所示。

并联侧桥臂相间短路故障特性如下。

1) 故障发生后, 阀侧交流母线和换流器桥臂均出现过流, 故障电流由两部分组成: 一是并联变压器网侧提供的交流电流; 二是换流器子模块电容放电产生的放电电流。

2) 相间故障影响了由并联侧向串联侧传递的能量, 直流电压发生波动。

3) 由于功率传输的降低, 直流电压、串联侧桥臂子模块电容电压和串联侧交流电压均降低。

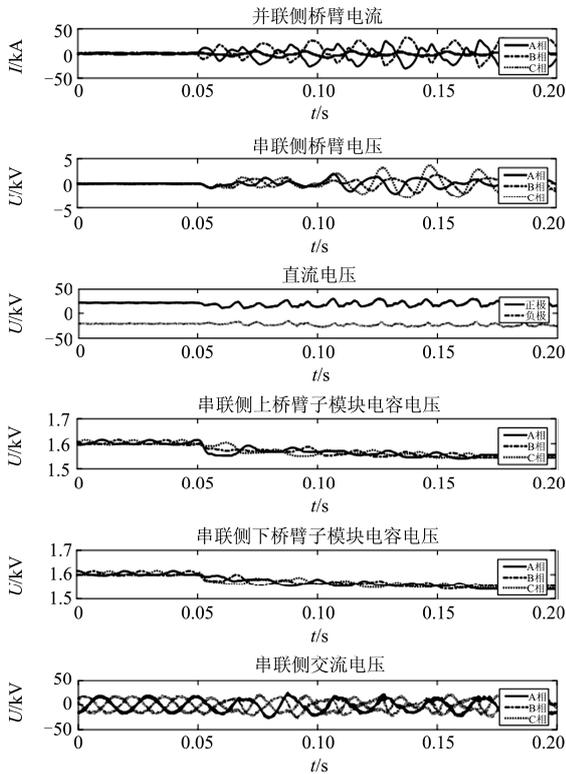


图 6 并联侧上桥臂相间短路故障仿真波形

Fig. 6 Waveforms of shunt side upper arm phase-to-phase fault

2.2 直流侧单极接地故障

当直流侧发生单极接地故障, 以正极接地为例, 其故障位置与故障电流通路如图 7 所示。

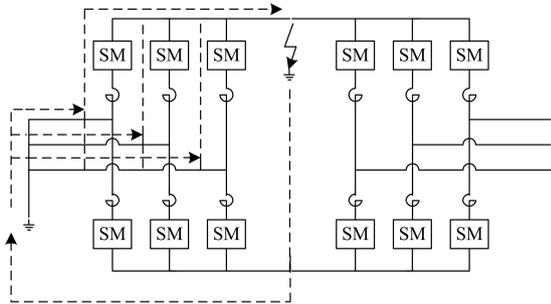


图 7 直流侧正极单极接地故障位置及故障电流通路

Fig. 7 Fault location and fault current path of DC side single-pole-to-ground fault

故障仿真波形如图 8 所示。

直流侧正极单极接地故障特性如下:

1) 由于并联侧变压器中性点经大电阻(200 Ω)接地, 因此在故障发生的瞬间, 正极电压被强制箝位为 0, 负极母线电压上升为直流电压, 交流出口零序电位升高, 出现直流偏置;

2) 各电流和桥臂电容电压几乎不变。

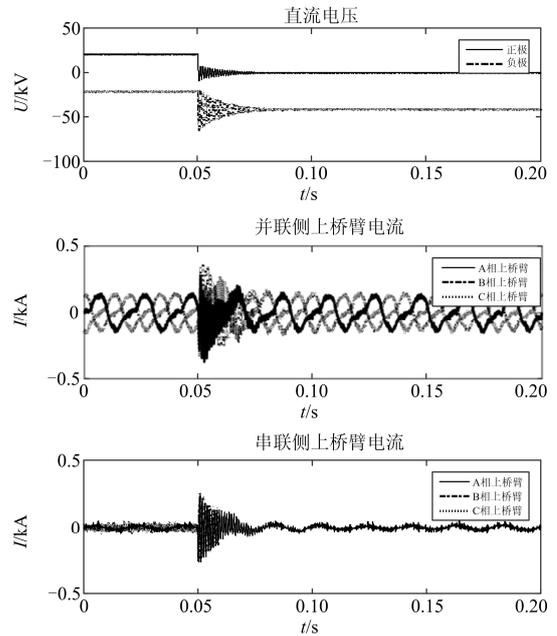


图 8 直流侧正极单极接地故障波形

Fig. 8 Waveform of DC side positive pole single-pole-to-ground fault

2.3 直流侧双极短路故障

当直流侧正、负极之间发生短路故障, 故障电流流经通路如图 9 所示, 其故障仿真波形如图 10 所示。

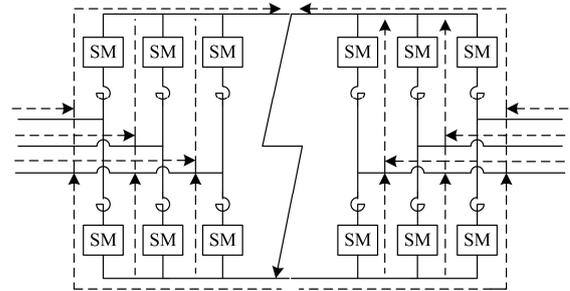


图 9 直流侧极间短路故障位置及故障电流通路

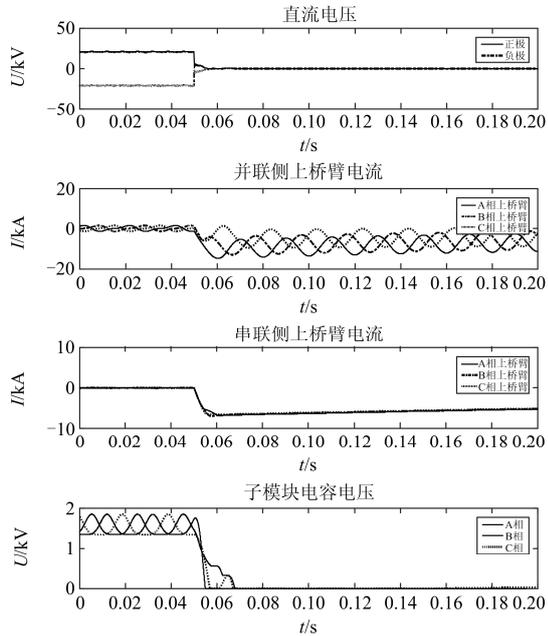
Fig. 9 Fault location and fault current path of DC side pole-to-pole short circuit fault

故障特性如下:

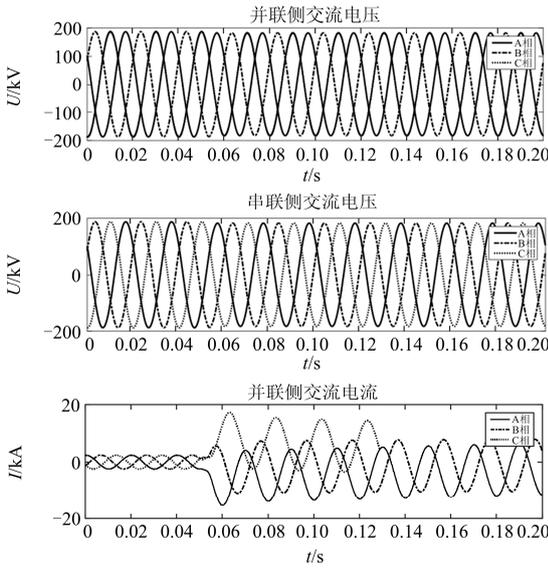
1) 故障发生后, 直流电压大幅下降, 上下桥臂电容电压急剧下降;

2) 直流侧极间短路故障对于交流侧线路来说相当于三相短路, 其具有三相短路的故障特征, 且串、并联换流器交流出口处电流迅速增大;

3) 故障期间, 桥臂电流增大, 且含有较大的直流分量和基频分量, 同时影响桥臂子模块电容电压的波动幅度, 使三相子模块电容电压失衡。



(a) 直流侧极间短路故障直流侧波形



(b) 直流侧极间短路故障交流侧波形

图 10 直流侧极间短路故障波形

Fig. 10 Waveform of DC side pole-to-pole short circuit fault

3 MMC-UPFC 换流器和直流侧保护配置

3.1 MMC-UPFC 换流器和直流侧保护配置方案

根据第 2 节对 MMC-UPFC 换流器和直流侧故障特性的分析, 给出相应的保护配置如表 2 所示。

3.2 桥臂分相差动保护

换流器桥臂分相差动保护范围如图 11 所示虚线区域。以并联侧换流器上桥臂为例, 差动保护利用并联侧换流器上桥臂电流互感器 Id23 和 Id25 构成, 动作电流和制动电流如式(1)所示。

表 2 换流器和直流侧保护配置

区域	主保护	后备保护
直流极母线	上桥臂三相综合差动保护 下桥臂三相综合差动保护	直流电压保护
并联侧换流器	并联侧上桥臂分相差动保护	并联侧桥臂过流保护
桥臂	并联侧下桥臂分相差动保护	
串联侧换流器	串联侧上桥臂分相差动保护	串联侧桥臂过流保护
桥臂	串联侧下桥臂分相差动保护	

$$\begin{cases} I_d = |I_{Id23} - I_{Id25}| \\ I_{res} = \frac{1}{2} |I_{Id23} + I_{Id25}| \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_d 、 I_{res} 分别为动作电流和制动电流; I_{Id23} 、 I_{Id25} 分别为电流互感器 Id23 及电流互感器 Id25 的电流。

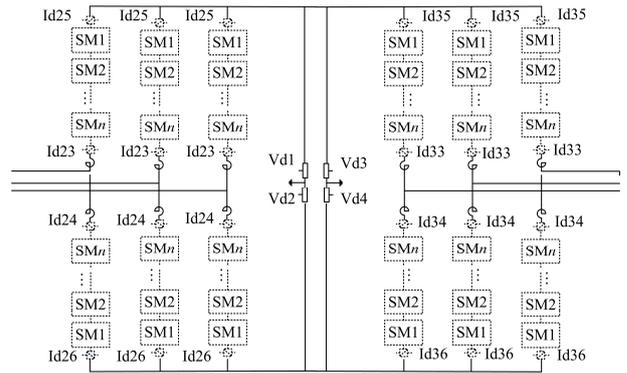


图 11 桥臂分相差动保护范围

Fig. 11 Protective zone of converter arm split phase differential protection

如第 2 节故障特性分析所述, 并联侧换流器上桥臂发生单相接地故障时, 由于中性点采用较大电阻接地, 桥臂过流程度低, 根据 MMC-UPFC 示范工程实际情况, 桥臂分相差动保护的動作电流设置为 $0.3I_{Narm}$ (I_{Narm} 为桥臂额定电流), 若采用桥臂分相差动保护, 其差动电流达不到最小动作电流, 保护拒动。当并联侧换流器上桥臂发生相间短路故障时, 并联侧桥臂过流程度较大, 差动电流能够满足动作阈值, 保护能够正确动作。

为解决此类问题, 加装故障分量电流差动保护以配合。故障分量电流是以故障后电流减去故障前一个周期的电流得到的, 通常以“ Δ ”表示。以换流器上桥臂为例, 故障分量电流差动保护利用并联侧换流器上桥臂电流互感器 Id23 的故障分量电流和电流互感器 Id25 的故障分量电流构成, 其动作电流和制动电流如式(2)所示。

$$\begin{cases} I_d = |\Delta \dot{I}_{Id23} + \Delta \dot{I}_{Id25}| \\ I_{res} = |\Delta \dot{I}_{Id23} - \Delta \dot{I}_{Id25}| \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta \dot{I}_{Id23}$ 和 $\Delta \dot{I}_{Id25}$ 分别为电流互感器 Id23 和电流互感器 Id25 的故障分量电流。

为验证故障分量电流差动保护能否正确动作并反映换流器上桥臂单相接地故障, 分别计算故障后分相差动保护的差动电流和故障分量电流差动保护的差动电流, 其波形如图 12 所示。

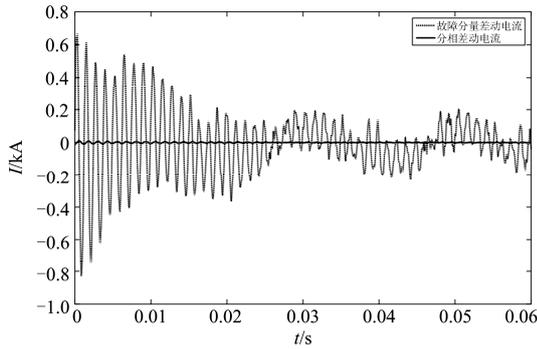


图 12 两种差动保护的差动电流波形

Fig. 12 Waveforms of two kinds of differential protections' differential current

从图 12 中可以看出, 桥臂分相差动保护的差动电流很小, 小于最小动作电流, 因此桥臂分相差动保护无法动作以反应故障。而故障分量电流差动保护的差动电流较大, 且明显大于桥臂分相差动保护的差动电流, 能够达到差动保护的動作定值, 因此故障分量电流差动保护能够正确动作并反映故障。

故障分量电流差动保护是桥臂分相差动保护的补充, 能够弥补高阻接地下换流器桥臂差动保护灵敏度不足的缺点, 两个差动保护结合, 能够正确地反映换流器桥臂上的所有故障。

3.3 桥臂三相综合差动保护

桥臂三相综合差动保护的保護范围为直流正负极母线, 其保护范围如图 13 所示虚线区域。以直流正极母线为例, 差动保护利用并联侧换流器上桥臂电流互感器 Id25 和串联侧换流器上桥臂电流互感器 Id35 构成, 动作电流和制动电流如式(3)所示。

$$\begin{cases} I_d = |\dot{I}_{Id25} + \dot{I}_{Id35}| \\ I_{res} = \max(|\dot{I}_{Id25}|, |\dot{I}_{Id35}|) \end{cases} \quad (3)$$

式中, \dot{I}_{Id25} 和 \dot{I}_{Id35} 分别为并联侧换流器上桥臂电流互感器 Id25 三相电流之和及串联侧换流器上桥臂电流互感器 Id35 三相电流之和。

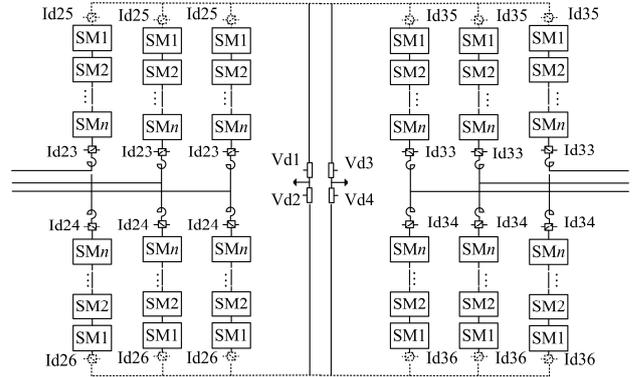


图 13 桥臂三相综合差动保护范围

Fig. 13 Protective zone of converter arm three phase differential protection

如第 2 节故障特性分析所述, 当直流侧发生极间短路故障时, 并联侧和串联侧桥臂过流过压程度较大。根据 MMC-UPFC 示范工程实际情况, 桥臂三相综合差动保护的動作电流设置为 $0.2I_{NDC}$ (I_{NDC} 为直流母线额定电流), 差动电流能够满足動作电流, 保护可以正确动作。而当直流侧发生单相接地故障时, 并联侧和串联侧桥臂没有明显过流过压, 差动电流小于最小動作电流, 保护发生拒动。为解决此类问题, 可以通过直流侧低电压保护来解决。

3.4 直流侧电压保护

直流侧电压保护的保護范围为直流正负极母线, 可以具体细分为以下两种: 直流单极低电压保护和直流电压不平衡保护。以并联侧为例, 直流单极低电压保护和直流电压不平衡保护的動作方程分别如式(4)和式(5)所示。

$$|U_{Vd1}| < U_{set} \text{ 或 } |U_{Vd2}| < U_{set} \quad (4)$$

$$|U_{Vd1} + U_{Vd2}| > U_{set} \quad (5)$$

式中, U_{Vd1} 及 U_{Vd2} 分别为电压互感器 Vd1、Vd2 上的电压, 即并联侧直流正负极线路对地电压, 取直流分量。

为验证直流侧电压保护能否正确动作并反映直流侧单相接地故障, 计算桥臂三相综合差动保护的差动电流并测量直流侧电压保护的直流电压, 其波形如图 14 所示。

从图 14 可以看出, 桥臂三相综合差动保护的差动电流较小, 明显无法达到保护動作定值, 因此桥臂三相综合差动保护不能动作并反映单相接地故障。而对于直流侧电压保护, 根据 MMC-UPFC 实际情况, 直流低电压保护和直流电压不平衡保护定值分别设置为 $0.6U_{NDC}$ 和 $0.4U_{NDC}$ (U_{NDC} 为直流母线额定电压), 单相接地故障发生后, 正极电压迅速降

为零, 明显满足直流低电压保护动作条件; 直流电压不平衡保护中, 单极接地故障发生后, 正、负极电压之和不再为 0 并迅速上升至直流电压, 明显满足保护动作条件, 因此直流侧电压保护均能够正确动作并反映直流侧单极接地故障。

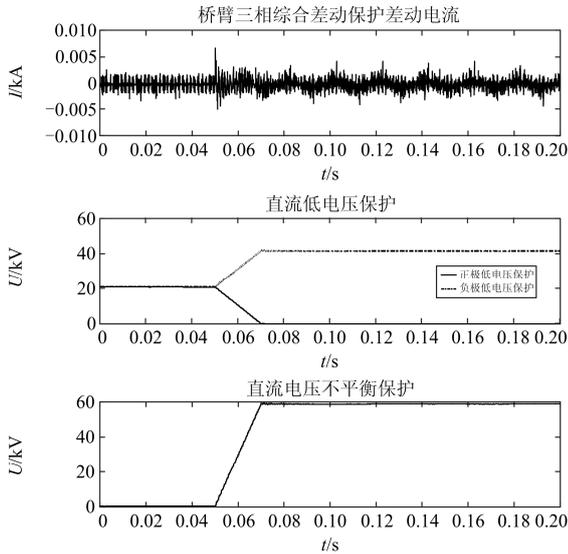


图 14 三相综合差动保护差动电流波形和直流电压保护电压波形

Fig. 14 Waveform of converter arm three phase differential protection differential current and DC side voltage protection

直流侧电压保护作为桥臂三相综合差动保护的补充, 能够弥补高阻接地情况下桥臂三相综合差动保护在直流侧单极接地故障下灵敏度的不足, 两种保护进行配合, 能够正确反映直流侧的所有故障。

4 结论

本文通过对 MMC-UPFC 换流器和直流侧部分典型故障进行理论分析, 并通过 RTDS 实时数字仿真, 采用理论分析和仿真分析相结合的方式对故障特性进行分析, 结合 MMC-UPFC 示范工程, 提出保护配置方案, 所得结论如下:

1) 换流器桥臂发生单相接地故障, 由于变压器中性点采用大电阻接地, 桥臂过流程度低, 且存在零序分量, 桥臂分相差动保护无法正确动作。而发生桥臂相间短路故障时, 桥臂过流程度大, 桥臂分相差动保护能够正确反映故障。配合以故障分量电流差动保护, 可以弥补桥臂分相差动保护灵敏度不足的缺点, 能够正确反映换流器的所有故障。

2) 直流侧发生单极接地故障和极间短路故障, 三相综合差动保护仅能正确反映极间短路故障。通过配置直流电压保护(直流低电压保护和直流电压不平衡保护), 可以正确反映直流侧的所有故障。

通过 RTDS 实时数字仿真实验, 验证了故障分析的正确性与保护配置的合理性。

附录

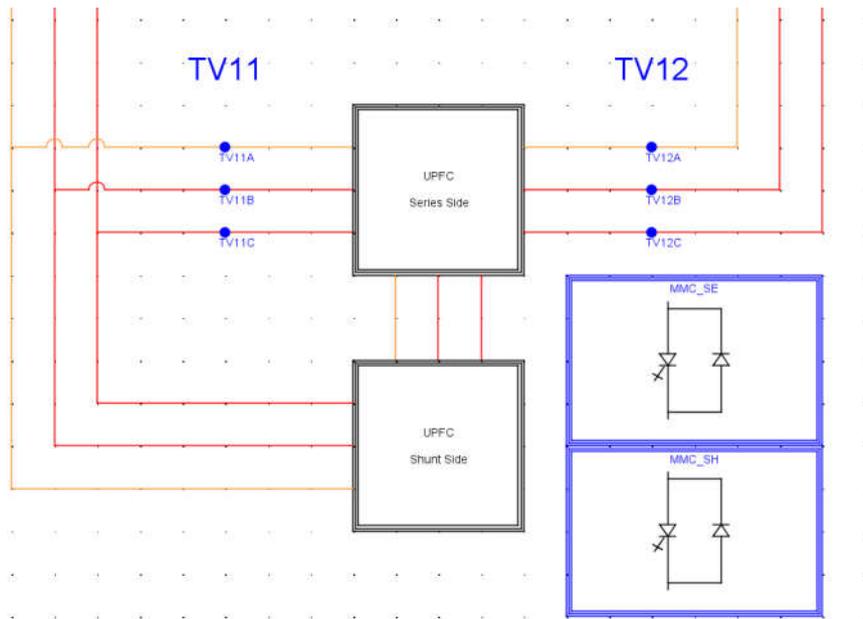


图 15 基于 RTDS 的 MMC-UPFC 仿真模型

Fig. 15 Simulation model of MMC-UPFC based on RTDS

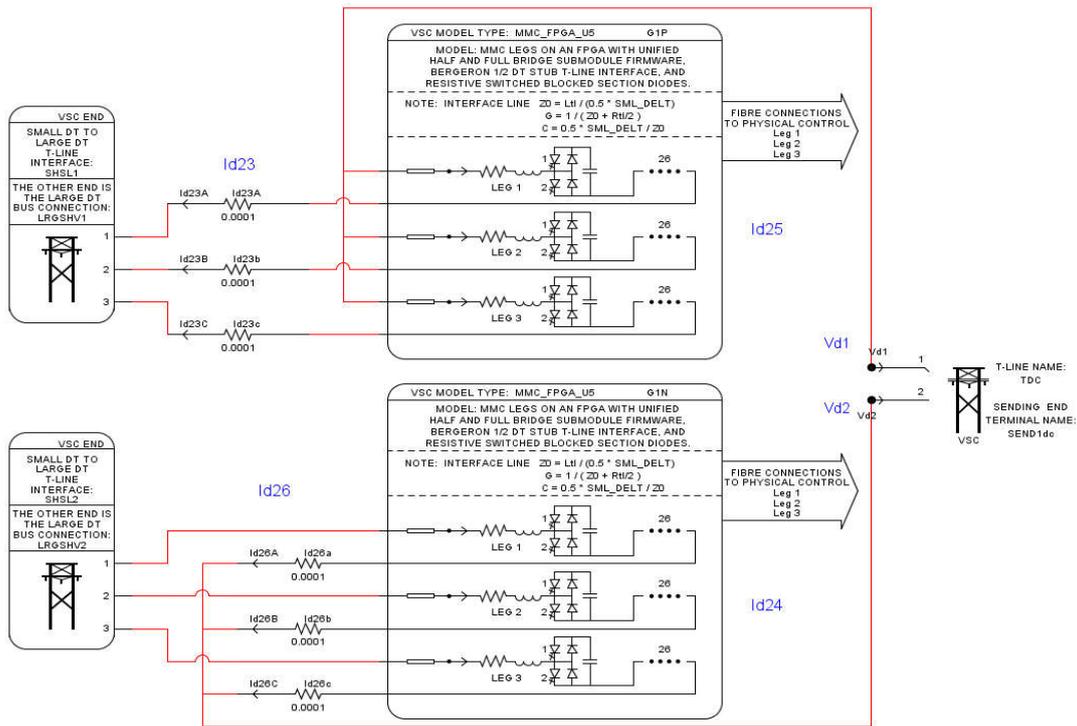


图 16 基于 RTDS 的 MMC-UPFC 并联侧 MMC 仿真模型

Fig. 16 Simulation model of shunt side MMC in MMC-UPFC based on RTDS

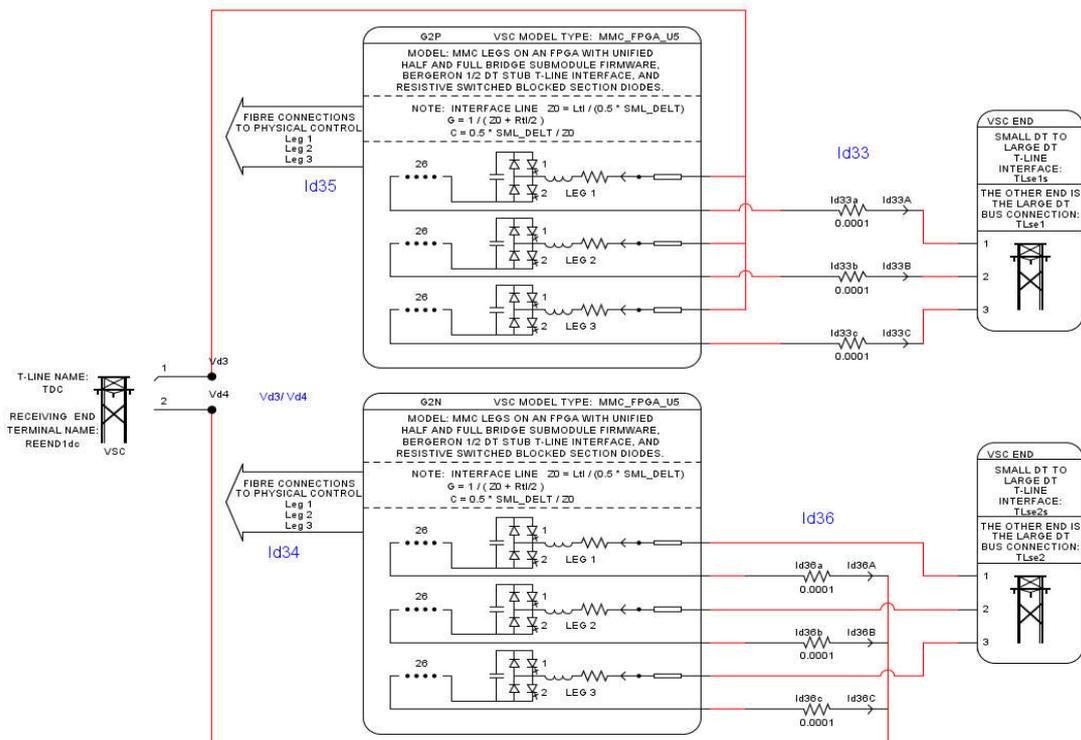


图 17 基于 RTDS 的 MMC-UPFC 串联侧 MMC 仿真模型

Fig. 17 Simulation model of series side MMC in MMC-UPFC based on RTDS

参考文献

- [1] 马凡, 谷双魁, 刘黎明, 等. UPFC 控制及动态特性实验研究[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 64-69.
MA Fan, GU Shuangkui, LIU Liming, et al. Experimental study on control and dynamic characteristic of UPFC[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 64-69.
- [2] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [3] 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.
- [4] 李欢, 田新成, 张建坡. 模块化多电平换流器改进型子模块拓扑仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 95-101.
LI Huan, TIAN Xincheng, ZHANG Jianpo. Simulating research of improved topologies of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 95-101.
- [5] 王珊珊, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压换流器的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Modeling of modular multilevel voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 1-8.
- [6] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 64-68.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 64-68.
- [7] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉. 基于 MMC 离散数学模型的 MMC-HVDC 系统直流电压控制[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2403-2409.
CAI Xinhong, ZHAO Chengyong, PANG Hui. A novel DC voltage control MMC-HVDC power transmission system based on discrete mathematical model of MMC[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2403-2409.
- [8] 杨晓峰, 林智钦, 郑琼林, 等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 1-14.
YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG Qionglin, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-14.
- [9] 崔福博, 宋洁莹, 周飞, 等. 基于 MMC 的统一潮流控制器建模方法及其内部动态特性仿真分析[J]. 智能电网, 2014, 2(12): 1-12.
CUI Fubo, SONG Jieying, ZHOU Fei, et al. Dynamic modeling and internal characteristic simulation analysis of UPFC based on MMC[J]. Smart Grid, 2014, 2(12): 1-12.
- [10] 周月宾, 江道灼, 胡鹏飞, 等. 一种 MMC-HVDC 的直流电压波动抑制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 36-43.
ZHOU Yuebin, JIANG Daozhuo, HU Pengfei, et al. A new approach for suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 36-43.
- [11] 崔福博, 郭剑波, 荆平, 等. MMC-UPFC 接地设计及其站内故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1-9.
CUI Fubo, GUO Jianbo, JING Ping, et al. The grounding design and internal fault characteristic of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1-9.
- [12] 荆平, 周飞, 宋洁莹, 等. 采用模块化结构的统一潮流控制器设计与仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 356-361.
JING Ping, ZHOU Fei, SONG Jieying, et al. Design and simulation of unified power flow converter based on modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 356-361.
- [13] 崔福博, 郭剑波, 周飞, 等. 基于模块化多电平换流器的统一潮流控制器桥臂电容电压平衡控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1939-1945.
CUI Fubo, GUO Jianbo, ZHOU Fei, et al. A balance control strategy for bridge arm capacitor voltage of MMC based UPFC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1939-1945.
- [14] 庄良文, 张彦兵, 荆雪记, 等. 基于 RTDS 仿真的 MMC UPFC 串联侧间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 56-62.
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC_UPFC indirect current control strategy based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 56-62.
- [15] CHEN X, ZHAO C, CAO C. Research on the fault characteristics of HVDC based on modular multilevel converter[C] // Electrical Power and Energy Conference, October 3-5, 2011, Winnipeg, Canada: 91-96.
- [16] 裘鹏, 章姝俊, 黄晓明, 等. MMC-HVDC 系统中阀侧交流母线故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 150-154.
QIU Peng, ZHANG Shujun, HUANG Xiaoming, et al.

- Research on protection strategies of internal AC bus fault based on MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 150-154.
- [17] 周浩, 沈扬, 李敏, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站绝缘配合[J]. 电网技术, 2013, 27(4): 879-890.
ZHOU Hao, SHEN Yang, LI Min, et al. Research on insulation for converter stations of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2013, 27(4): 879-890.
- [18] 梁少华, 田杰, 曹冬明, 等. 柔性直流输电系统控制保护方案[J]. 电力系统及其自动化, 2013, 37(15): 59-65.
LIANG Shaohua, TIAN Jie, CAO Dongming, et al. A control and protection scheme for VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 59-65.
- [19] 潘伟勇. 模块化多电平直流输电系统控制和保护策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
PAN Weiyong. Research on control and protection strategy of modular multilevel converter-HVDC systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [20] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 采用 MMC 变流器的 VSC-HVDC 系统故障态研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(9): 69-71.
SONG Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. Research on the VSC-HVDC system using modular multilevel converters under fault condition[J]. Power Electronics, 2010, 44(9): 69-71.
- [21] 李斌, 李晔, 何佳伟, 等. 基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 1-8.
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.
- [22] LI X, SONG Q, LIU W, et al. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 483-490.
- [23] LI R, FLETCHER J E, XU L, et al. A hybrid modular multilevel converter with novel three-level cells for DC fault blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 2017-2026.
- [24] LI R, XU L, HOLLIDAY D, et al. Continuous operation of radial multiterminal HVDC systems under DC fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(1): 351-361.
- [25] XUE Y, XU Z. On the bipolar MMC-HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission: configuration, control, and dc fault analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2420-2429.

收稿日期: 2017-09-26; 修回日期: 2017-12-12

作者简介:

祁欢欢(1986—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、配网与新能源接入等; E-mail: qihuanhuan6666@163.com

陆振纲(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性输配电系统分析设计技术与应用; E-mail: luzhengang@geiri.sgcc.com.cn

陈静(1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性输电技术、电力系统运行与控制等。E-mail: chenjing1902@126.com

(编辑 魏小丽)