

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201222

交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究

侯俊杰, 宋国兵, 徐瑞东, 郭冰, 尹利帅, 吕江涛

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 随着交直流混合程度加深, 电网运行难度明显增加, 保障交直流混合电网安全运行已成为我国电网重大而紧迫的需求。换流站是交直流混合电网的枢纽, 区别于传统同步机电源, 故障耦合特性呈现复杂性。从换流站对扰动的响应与传递特性出发, 阐述了其耦合特性及产生机理, 为交直流混合电网的故障分析与保护研究提供了理论基础。在此基础上评估了交直流线路保护适应性, 并研究了不同故障时段的继电保护新原理。最后提出了控制与保护协同作用的建议与设想, 探讨了进一步的研究方向。

关键词: 交直流混合电网; 故障耦合特性; 继电保护; 控保协同

Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid

HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, GUO Bing, YIN Lishuai, LÜ Jiangtao

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: As the amount of AC/DC hybridization increases in power systems, the difficulty of grid operation has increased significantly. Therefore, ensuring the safe operation of AC/DC hybrid grid has become a major and urgent issue for China. The converter station is the hub of an AC/DC hybrid grid. Different from the traditional synchronous machine power supply, its fault coupling characteristics are complicated. In this paper, starting from the response and transfer characteristics of the converter station to the disturbance, this paper explains the coupling characteristics and generation mechanism first. This provides a theoretical basis for the fault analysis and protection research of the AC/DC hybrid grid. Furthermore, it evaluates the adaptability of AC and DC line protection and studies new principles of relay protection in different fault periods. Finally, it puts forward an idea for control and protection coordination, and discusses further research directions.

This work is supported by the Joint Fund Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. U1766209) and the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 52094020006U).

Key words: AC/DC hybrid grid; fault coupling characteristics; relay protection; control and protection coordination

0 引言

随着交直流混合程度加深, 电网运行难度明显增加。国家电网公司统计显示, 仅2013年迎峰度夏期间, 华东电网共发生5起因交流系统扰动导致的直流闭锁的事件, 给电网的安全运行带来巨大挑战^[1]。因此, 保障交直流混合电网安全运行已成为重大而紧迫的国家需求。

作为电力系统安全稳定运行的首道防线, 继电保护依据被保护元件的故障特征而动作。故障特征

分析是继电保护研究的基础, 故障建模则为故障特征分析和继电保护研究提供验证平台, 现有文献针对交直流电网的故障耦合特征分析、继电保护原理研究、故障恢复策略方面展开了研究。

换流站对故障的响应特征主要表现为换流器件脆弱性带来的弱馈性, 即短路电流受限特征, 如文献[2-4]指出当换流站附近交流线路发生故障时, 换流器快速作出反应, 开始调节, 使得直流侧对外显示出弱电源系统特性。换流站对故障的传递特性则主要表现为交流系统动态对直流系统的影响和直流系统动态对交流系统的影响。如文献[5-6]对互联系统电磁暂态交互作用进行研究, 得到直流系统与交流系统的电磁暂态影响作用的相关结论; 文献[7]分

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1766209); 国家电网公司总部科技项目(52094020006U)

析了交流系统故障时直流系统注入的基频与谐波分量与交流系统换流母线的基频与谐波分量之间的关系; 文献[8]给出换流站交、直流侧谐波交互机理; 文献[9]研究表明, 在换流变压器经电阻接地的情况下, 直流单极接地故障会使得交流侧的电压出现零序偏置现象且交流回路出现零序电流分量; 文献[10-11]分别从暂态功率倒向、序阻抗的幅值和相位畸变、谐波畸变等方面阐述了动态过程中直流系统对交流系统变化特性的影响。

由上述研究现状可以看出, 目前对于换流站或换流器耦合特性的研究大多基于单一故障耦合特性, 对于换流器耦合特性的研究缺乏系统性。此外, 在耦合特性的分析中, 并未考虑故障不同阶段换流站的特性差异性。

目前围绕交直流混合电网中交流侧与直流侧输电线路的继电保护, 国内外学者开展了相应研究。

当前继电保护主要利用两类信息^[12-13]作出判断: (1) 基于暂态量信息构建保护; (2) 基于稳态量信息构建保护。随着交直流电网混合程度的加深, 上述两类保护在换流器的作用下仍存在如下适应性问题: (1) 对基于暂态量的保护, 换流器的快速调节会导致暂态量不纯净, 适用条件受限; (2) 对基于稳态量的保护, 换流器的弱馈特性导致短路电流受限, 使得基于稳态量的保护灵敏度下降。

继电保护动作后, 需要考虑通过重合/重启进行故障恢复。目前对逆变侧交流系统重合闸的研究主要集中在交、直流并联输电情况下单相及三相重合时序对系统暂态稳定性及保护动作特性的影响, 并有以下三点结论: (1) 单相重合时序设置判据为系统等值阻抗较小的一侧首先重合^[14]; (2) 三相重合时序设置判据为当逆变侧系统电抗较小时, 由故障线路首端先重合, 当整流侧系统电抗较大时, 由故障线路末端先重合, 从而减小非故障线路距离保护误动的概率; (3) 发生换相失败时, 即使三相重合时序不同, 越前触发角和故障电压分量的变化趋势一致, 测量阻抗随故障电压分量的增大而增大, 健全线路测量阻抗随越前触发角的增大而减小^[15]。对于直流侧系统而言, 存在重合与重启两种概念, 目前, 直流输电的重合主要应用于舰船、地铁等场景中; 直流输电的重启研究主要集中在传统直流和柔性直流的重启优化^[16]。

由上述研究现状可以看出, 当前的故障识别由于未充分考虑换流器特性及其控制作用带来的影响, 多种保护原理在交直流混合电网中存在适应性问题。当前的故障恢复多为盲目的自动重合/重启方案, 未考虑利用换流器控制作用来实现主动式故障

探测, 从而提高重合/重启成功率。

本文对换流器耦合特性进行分析, 研究不同故障时段下适用于继电保护研究的模型等效及故障分析方法。通过避开或利用换流器控制作用, 研究适用于故障不同时段的保护新原理。通过换流器附加控制, 实现故障后的控制与保护融合和恢复前的控制与恢复融合。

1 交直流混合电网故障耦合机理分析

典型交直流混合电网如图1所示, 当换流器不存在或者换流器在故障初瞬未调节时, 各支路对故障点的注入电流也会相互影响, 这种耦合关系是由于网架拓扑结构存在电路或电磁场的联系, 即这种耦合由拓扑关联性决定, 传统故障分析理论针对这种耦合关系的分析已非常完备。

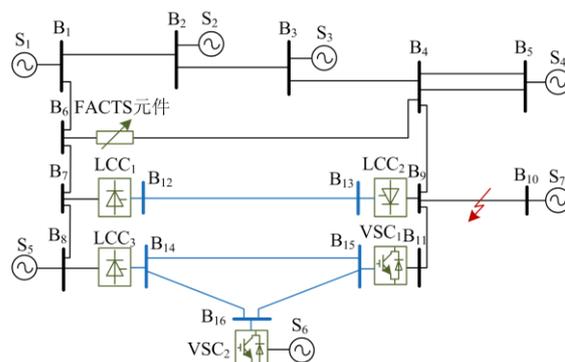


图1 交直流混合电网典型网架

Fig. 1 Typical grid structure of AC/DC hybrid grid

除了网架拓扑结构决定的关联关系外, 换流器作为交直流混联电网的枢纽, 沟通了直流与交流电网之间的联系, 理清换流器调节过程对交直流电网的耦合作用至关重要。调控过程中换流器工作状态的时变特性, 换流器斩波过程引入的两侧电气量的离散非线性关系, 换流器异常工况带来的两侧系统的不确定性联系, 这些因素加剧了交直流电网耦合关系的复杂性与分析难度, 因此, 本文立足于分析以换流站为组带的交直流混联电网耦合关系。

换流站包括换流阀、换流变压器、平波滤波与补偿装置、控制与保护装置等。换流阀是换流站的核心设备, 由开关器件、阻尼均压电路及阀控单元组成。换流系统中电感电容等储能元件的存在, 使得换流站对不同频率信号具有不同的响应特性; 换流站控制系统的存在, 使得换流站对不同类型的扰动具有不同的响应特性; 此外, 不同的换流器拓扑结构也使得两侧电气量表现出不同的特性。图2将换流站当作一个整体看待, 研究其在故障不同阶段

的响应特性和传递特性。对交直流电网而言，响应特性是故障线保护整定的依据，传递特性是相邻线后备保护整定的依据。

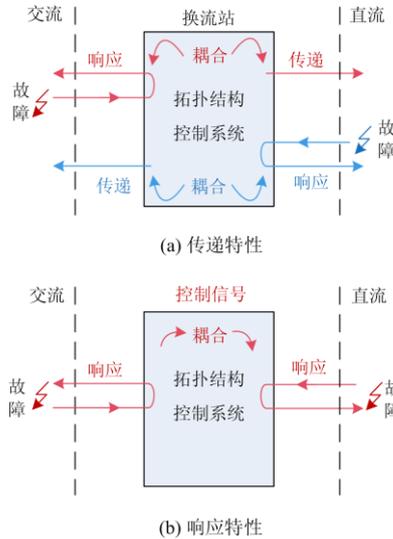


图 2 故障耦合特性

Fig. 2 Fault coupling characteristic

为了详细分析换流站各组成部分在故障各阶段对扰动的响应和传递特性，现将图 2 中的换流站进行简化，其简化模型如图 3 所示。模型中仅保留了换流站中对信号起调控与滤波作用的元件，即变压器、补偿电路、换流器、阻尼均压电路、滤波电路等元件。

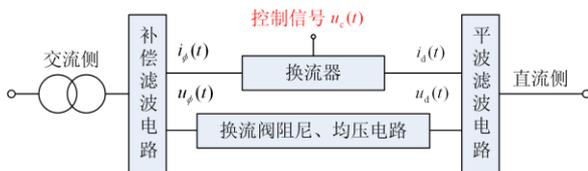


图 3 换流站耦合特性简化模型

Fig. 3 Model of coupling characteristics of converter station

为了便于分析换流站在故障各阶段的响应与传递特性，以换流器所处的调控状态为依据，将换流站对扰动的响应分为 3 个阶段：第 1 阶段为故障后到换流器开始调控前，即故障初瞬；第 2 阶段为换流器检测到扰动并开始调节直到进入新的稳态，即换流器动态调节阶段；第 3 阶段为故障稳态阶段。

1.1 故障初瞬阶段

第 1 阶段为故障发生初瞬，换流器尚未响应扰动，如图 4 所示。该阶段时间短，为初始行波阶段，信号能量集中在高频段。由于平波电抗器、滤波器、补偿电路的存在，该类高频信号被阻隔在滤波电路之外而不能到达换流器，即换流站对于高频信号相

当于开路，本阶段仅需考虑换流站滤波回路对外部传来的高频信号的响应作用即可，无需考虑换流站对高频信号的传递作用。



图 4 故障初瞬换流站简化模型

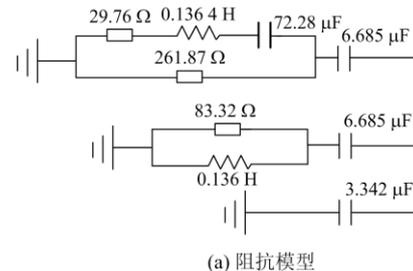
Fig. 4 Model of converter station at the beginning of fault

在直流输电系统的换流站中，换流器交流侧的电压和电流、直流侧的电压和电流都含有多种谐波分量，即换流器在交流侧和直流侧都会产生谐波电压和谐波电流，所以需要装设谐波滤波器以减少谐波分量。

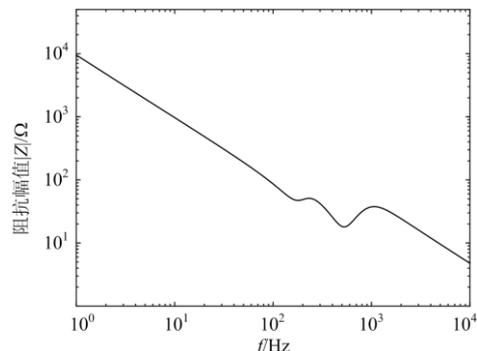
1) 交流边界

在交流侧，既要减小谐波，又要能供给换流器所需的基波无功功率，广泛采用并联滤波器，起到滤波与补偿的作用。

图 5 是 CIGRE 直流输电标准模型的交流滤波器示意图与其阻抗示意图，可以看出其阻抗幅频特性很大程度上受电容支路的影响。



(a) 阻抗模型



(b) 幅频特性

图 5 交流边界

Fig. 5 Boundary of AC system

2) 直流边界

在直流侧，主要利用串联的平波电抗器来平抑

直流谐波, 对于架空直流输电线路有时还需要另加滤波装置, 分别起到平波和滤波的作用。图 6 给出一种常见的直流侧滤波器以及平波电抗器的阻抗幅频曲线。

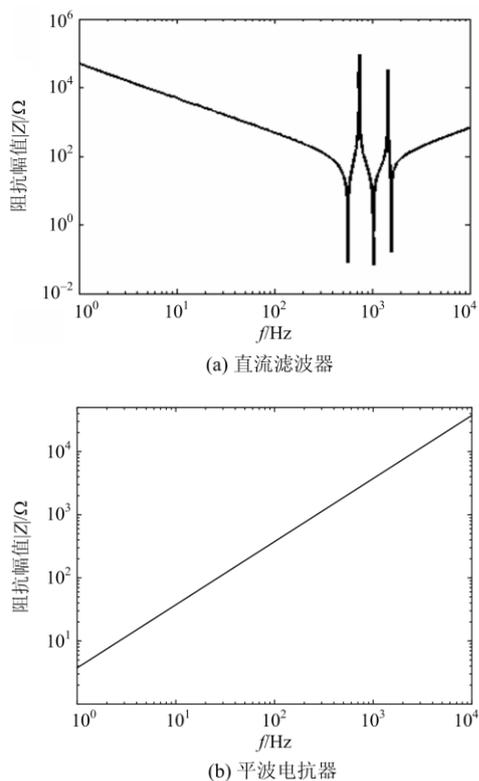


图 6 直流边界

Fig. 6 Boundary of DC system

1.2 换流器动态调节阶段

第 2 阶段为换流器动态响应阶段, 如图 7 所示。该阶段表明换流器控制系统已经检测到故障并开始调节, 本阶段为动态过程, 信号频带相对较宽, 换流系统的相关元件都参与了扰动的响应与传递。该动态过程中, 换流系统中具有能量储存能力的电感电容元件对扰动的响应与传递逐渐减弱, 换流器对扰动的响应与传递逐渐增强, 在控制系统的作用下, 该阶段换流器两侧电气量具有时变特征, 但其有确定关系且满足能量平衡。

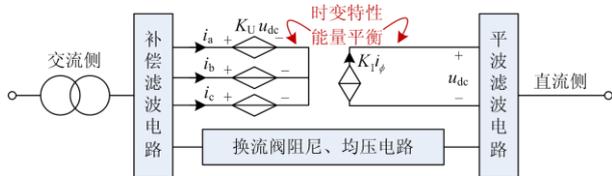


图 7 换流站动态调节阶段模型

Fig. 7 Model of converter station dynamic adjustment stage

此时对于故障耦合特性的响应特性, 分别体现在交直流侧系统。对于交流侧系统, 换流器的电力电子器件在控制作用下体现出非线性时变特性, 因此系统侧阻抗将体现出波动性, 具体体现为序阻抗的波动性。以典型系统为例, 其正负序阻抗的 R 和 L 参数的波动性如图 8 所示。

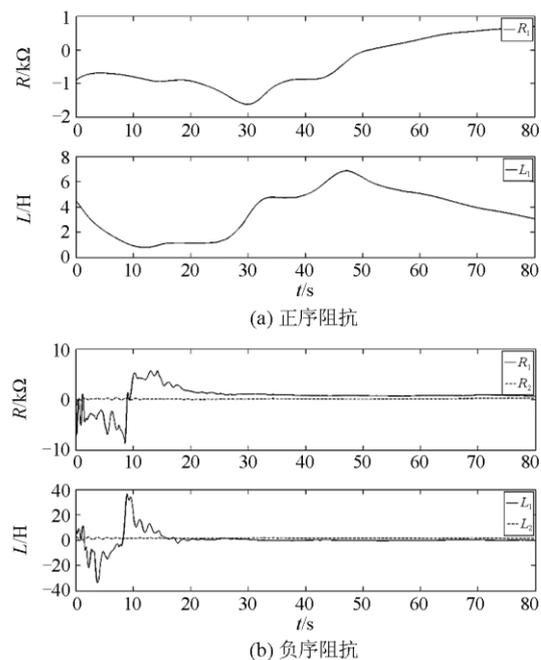


图 8 交流侧系统等效阻抗故障特征

Fig. 8 Fault characteristics of equivalent impedance of AC side system

对于输出的故障电压与电流, 其电气量特征体现出非线性时变特征。

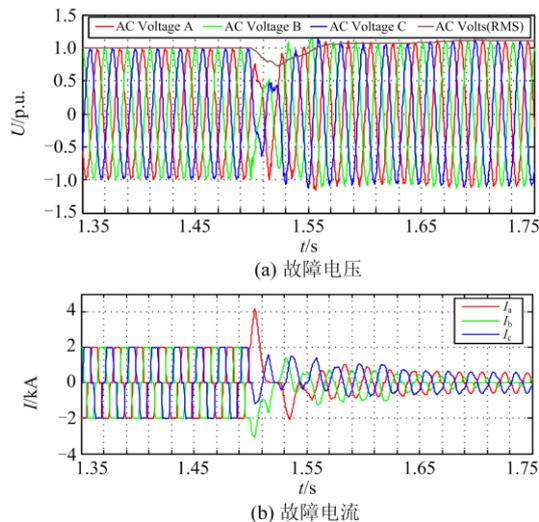


图 9 电压、电流故障特征

Fig. 9 Fault characteristics of voltage and current

由图 8、图 9 可知，交流侧响应特性表现为电气量和系统阻抗的非线性时变特征。

对于直流侧系统的响应特征主要体现为换流站控制策略和拓扑结构的双重影响，响应特征具有阶段性。以 LCC-HVDC 系统为例，其阶段性故障响应特征可表征为三阶段，具体分为换流器控制未作用阶段、换流器动态调节阶段、稳态阶段如图 10 所示。

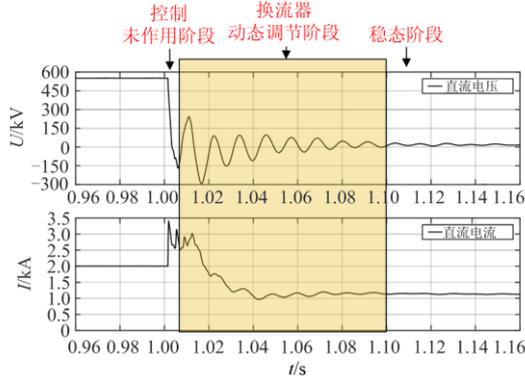


图 10 直流侧系统故障响应阶段特征

Fig. 10 Stage characteristics of fault response of DC side system

在换流器动态调节阶段中，基于电流源型换流器的交直流电网，在逆变侧发生交流故障时，由于换相电压降低，换相电流增大，可能发生换相失败，其对直流系统的影响体现为强非线性时变特性。

由于换相失败与故障发生时刻、非故障交流系统强度、故障前逆变器的触发超前角、直流系统控制策略及等值换相电抗等因素有关，因而故障特征表现出强非线性和时间离散性特征。其交流母线单相接地故障引发换相失败时的直流电压 U_{DC} 、电流 I_{DC} 波形如图 11 所示。

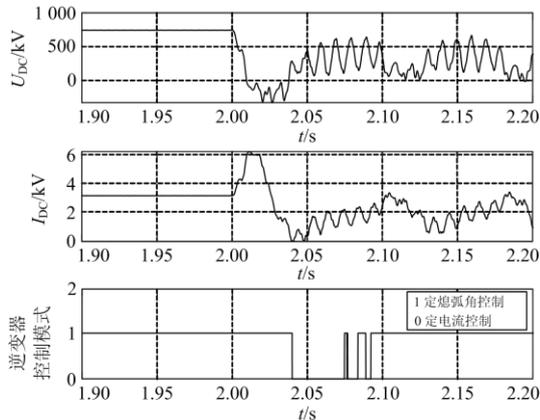


图 11 逆变侧换相失败时的直流电压、电流故障特征

Fig. 11 Fault characteristics of DC voltage and current when communication failure occurs on inverter side

综上，在换流器动态调节阶段，交流侧系统的故障响应特性体现为强非线性、时间离散性和复故障特征，因此该阶段下需要考虑传统交流保护的适应性问题。直流侧系统的故障响应特征主要受控制策略和电路拓扑结构及其参数的共同作用，该阶段下的保护原理需要考虑控制作用对系统的影响。

1.3 故障稳态阶段

第 3 阶段为故障稳态阶段，如图 12 所示。该阶段换流器两侧的具有电能储存能力的补偿、滤波电路对电能的存储与交换具有周期内平衡的特点，即周期内该类元件可视为不存在，仅需考虑换流器的作用即可。该阶段换流器两侧电气量进入稳态，其有确定关系且满足能量平衡。

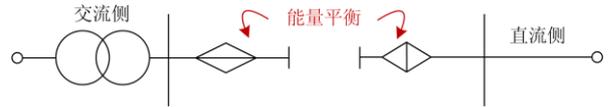


图 12 换流站故障稳态阶段模型

Fig. 12 Model of fault steady state of converter station

处于故障稳态阶段时，借助开关函数理论分析换流站两侧电气量的耦合特性，可得到两侧电气量的频率、幅值传递关系的解析表达。对于交直流两侧的电压电流关系可以表示为

$$\begin{cases} u_d = u_a S_{ua} + u_b S_{ub} + u_c S_{uc} \\ i_a = i_d S_{ia} \\ i_b = i_d S_{ib} \\ i_c = i_d S_{ic} \end{cases} \quad (1)$$

式中： u_d 为直流侧电压； u_a 、 u_b 、 u_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别是交流侧三相电压和电流； S_{ua} 、 S_{ub} 、 S_{uc} 和 S_{ia} 、 S_{ib} 、 S_{ic} 分别为三相电压开关函数和电流开关函数。

通过将开关函数按照傅里叶级数展开并取其主要分量进行计算，可以发现从交流到直流，换流器对于交流系统的正负序分量具有不同的传递特性。

$$\begin{aligned} f_{dc}^+ &= f_{ac}^+ - f_0 \\ f_{dc}^- &= f_{ac}^- + f_0 \end{aligned} \quad (2)$$

从直流到交流，直流侧的扰动分量将在交流侧产生频率不同的正负序分量。

$$\begin{aligned} f_{ac}^+ &= f_{dc} + f_0 \\ f_{ac}^- &= f_{dc} - f_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中： f_{ac}^+ 和 f_{ac}^- 分别表示交流侧的正序和负序频率分量； f_{dc}^+ 和 f_{dc}^- 分别表示由交流侧的正序和负序分量变换至直流侧的扰动分量； f_0 表示工频分量。

由式(2)、式(3)可知，换流站在稳态下的传递特性为：频率为 f_m 的交流侧正序扰动分量将在直流侧

变换为频率为 $|f_m - f_0|$ 的扰动; 频率为 f_m 的直流侧扰动分量将在交流侧变换为频率为 $f_m + f_0$ 的正序扰动和频率为 $|f_m - f_0|$ 的负序扰动。

1.4 小结

1) 研究换流站故障耦合特性是构建交直流混合电网故障分析理论的基础。在故障不同阶段对扰动起主要作用的元件不同, 使换流站表现出时变非线性特征, 故障过程呈现出阶段性特征。

2) 建立故障初瞬未响应阶段的换流站等效模型, 主要考虑线路边界元件的特性。对于换流器动态调节阶段, 交流系统等效模型的非线性时变特征, 直流系统响应的阶段性特征, 这些特性取决于换流器拓扑结构和控制策略。对于故障稳态阶段, 换流器两侧电气量进入稳态, 具有确定关系且满足能量平衡。利用开关函数理论, 可确定换流站两侧电气量耦合特征关系。

3) 包含故障初瞬、换流器动态调节、故障稳态的三阶段分析方法可以简化换流站耦合关系的分析。另外, 从扰动产生、响应、传递、交互等角度展开故障特征分析, 便于量化换流站两侧电气量的联系, 从而为保护原理研究和方案配置提供理论依据。

2 保护适应性评估

本节主要针对线路传统保护适应性进行分析与研究, 其研究思路如图 13 所示。

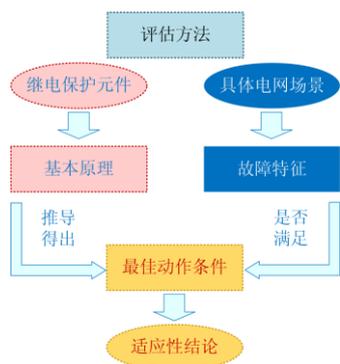


图 13 适应性分析理论

Fig. 13 Adaptive analysis theory

由图 13 可知, 本节从保护判据的最佳动作条件入手, 根据最佳动作条件与交直流混合电网的某特定场景故障特征吻合程度进行适应性分析。

其最佳适用条件如表 1 所示。由最佳适用条件, 适应性分析结果如表 2 所示。

结合表 1 和表 2 可知, 基于时域、全量的保护原理理论上与电源特性无关, 适用于输电线路。另外, 对于零序保护原理在拓扑结构确定时, 考虑其

与电源特性无关, 因此同样适用于输电线路。

表 1 保护最佳适用条件

保护原理	最佳适用条件
过电流保护	被保护元件阻抗具有单调性
距离保护	被保护元件(如输电线路)可以等效为阻抗模型
差动保护	被保护元件可以等效为集中参数模型
零序保护	零序网络稳定, 零序阻抗角确定
行波保护	被保护元件具有分布参数特性

表 2 适应性分析结果

常规保护元件类型	是否适用	影响因素	
工频量距离	否	工频提取	
全量时域距离	是	不受影响	
工频变化量距离	否	弱馈特性	
比相式距离	否	工频提取	
选相元件	相电流选相 序分量选相	否 否	阻抗波动 阻抗波动
方向元件	相故障分量方向 序故障分量方向	否 否	阻抗波动 阻抗波动
纵联保护	全量电流差动 故障分量电流差动 纵联方向 纵联距离	差 差 差 差	弱馈特性 弱馈特性 投入时间 工频提取

3 新型继电保护原理研究

在充分认识换流器对扰动响应的阶段性, 以及换流器的响应和传递特性基础上, 提出了系列继电保护新原理。其总体思路如图 14 所示。

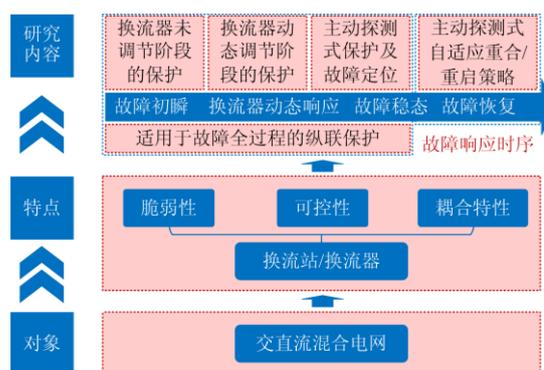


图 14 保护新原理实现思路

Fig. 14 Realization of new protection principles

3.1 被动检测式

3.1.1 利用故障初瞬阶段信息的单端量超高速保护

柔性直流输电系统具有阻尼小、惯性低的特点, 当直流线路发生故障后, 故障电流快速上升, 因此对线路保护的速动性提出了更高的要求。输电线路

的参数频变特性和线路故障信号的宽频特征使得利用波前(行波的前沿)形状检测故障成为可能。输电线路的参数频变特性使得不同频率分量信号在线路中传播的速度不同,表现为传播过程中故障行波前沿被拉长,产生畸变,这称为行波色散现象。在线路发生故障后,故障传播的距离不同导致行波各频率分量的色散程度不同,进而影响波前畸变程度。理论上,过渡电阻不影响波前的形状,只影响其幅值。这些特性使得波前形状既含有故障距离信息,又含有故障严重程度信息^[17]。

以典型输电线路为例,图 15(a)为相同过渡电阻下距离故障点 50 km、200 km、400 km、600 km 处测得的电流波前形状;图 15(b)为相同故障距离下不同过渡电阻下测得的电流波前形状。

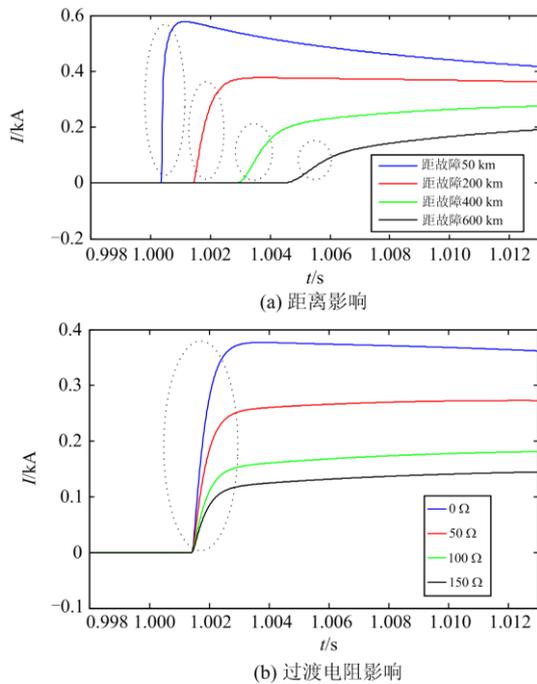


图 15 保护原理验证

Fig. 15 Protection principle verification

由图 15 可以看出,波前畸变程度与故障距离有关,而波前幅值和过渡电阻有关,理论上可以利用波前形状多维信息实现保护与定位。在波前形状识别方面,需要研究波前变化率、积分面积、峰值等参量之间的关系,构建波前多维信息识别模型,探索仅依靠波前形状即可确定故障距离与故障严重程度的超高速保护新原理。由于波前保护利用的是行波前沿,所利用的数据窗比微分保护和行波保护长,因此该保护预期将有更高的可靠性。

3.1.2 利用换流器动态调节阶段信息的暂态量保护

由于直流系统故障发展速度快、电力电子器件

过流能力低的限制,要求能够在换流站动态调节阶段切除故障。模块化多电平换流器(MMC)子模块的投切过程相当于对直流输电线路施加一个频率确定的电压源激励,该频率即为调制方式决定的固有特征频率^[18]。只要 MMC 子模块能够正常投切,该频率将始终存在。通过分析直流线路区内、外故障时该固有频率信号的幅值差异,即可构造利用 MMC 调制频率的单端暂态量保护。

根据上述分析,在 PSCAD 中建立采用最近电平逼近控制的 11 电平 MMC 输电线路模型。仿真结果如图 16 所示。

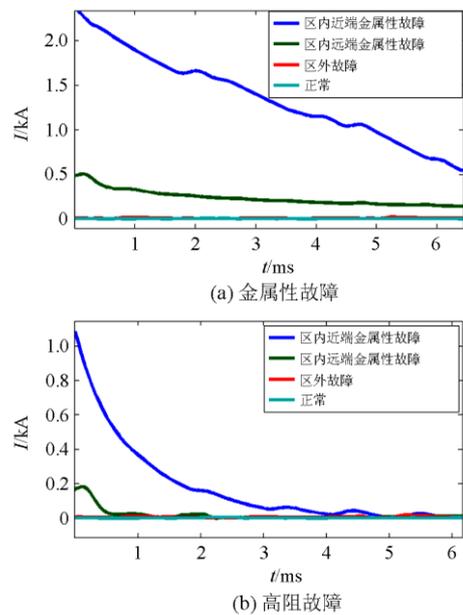


图 16 保护原理验证

Fig. 16 Protection principle verification

由仿真结果可以看出,故障初期的 6 ms 内,全线范围内金属性故障时 2 kHz 频率成分电流的幅值都远大于区外故障和正常状态的电流幅值,由此可构造判据进行区内外故障判别,并具有较高灵敏度。该方法原理简单,仅需特定频率电流即可实现区内外故障判别,且故障初期具有较高的灵敏度,适用于需要快速动作的场合。

在直流线路故障或线路电流波动较大时,换流站控制系统主要依靠定电流控制来调节直流电流。在直流线路正常运行和发生故障时,定电流控制的特性明显不同^[19]。利用线路两端直流电流构造坐标,直流线路正常运行和发生故障时的稳态运行点如图 17 所示,其中, I_{dR} 为整流侧直流电流, I_{dI} 为逆变侧直流电流, S 为直流线路的正常运行点, A 为区外故障的稳态运行点, B 为区内故障的稳态运行点。

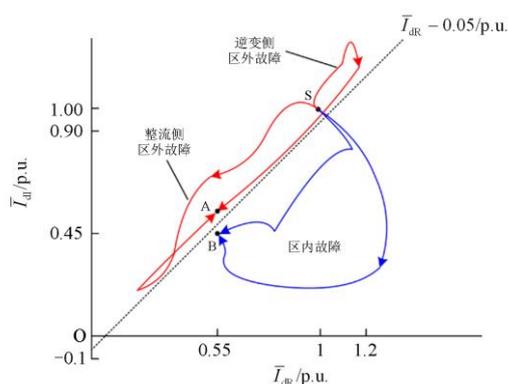


图 17 直流系统两侧电流决定的运行点及其变化规律
Fig. 17 Operating point and its change rule determined by the current on both sides of the DC system

由图17可以看出, 区外故障和区内故障的运行轨迹和稳态运行点存在明显差异, 据此可实现基于换流站控制特性稳态运行点的纵联保护。该原理仅利用线路两端直流电流, 或仅需两侧系统稳态运行点信息, 即可实现区内外故障判别。

3.1.3 适用于长时投入的故障全过程纵联保护

受到长距离输电线路电容效应和数据同步等因素的影响, 传统的差动保护只能在故障稳态阶段投入, 缺乏能够长时投入的保护原理。电荷不能独立生成和湮灭, 对外绝缘的孤立系统电荷守恒。对于直流输电线路而言, 线路与大地之间建立起电势差的过程中伴随着电荷的充放电过程^[20]。对于电容值 C 而言, 其存储电荷量 Q 与所加电压 U 的关系如式(4)所示。

$$Q = CU \quad (4)$$

当正极直流线路区内发生故障时, 故障暂态过程中由两端换流器净注入线路的电荷量为正值; 当发生区外故障时, 故障暂态过程中由于存在电压降低过程, 线路分布电容将对外放电, 形成放电电流, 此时两端净注入的电荷为负值。因此可利用该特征构成相应能够长时投入的故障全过程纵联保护。以典型的高压直流工程为例, 区内外故障时的判别结果如图 18 所示。

由仿真结果可知, 保护原理具有较强的抗过渡电阻和抗干扰性能, 可用于直流线路故障全过程。

在故障暂态到故障稳态的全过程中, 当发生区内线路故障时, 整流侧与逆变侧的故障差值表现为正极性特征^[21]。而对于区外故障, 在故障初瞬换流器未响应阶段呈现负极性特征, 而在换流器动态调节阶段直到故障稳态时逐渐稳定为 0。

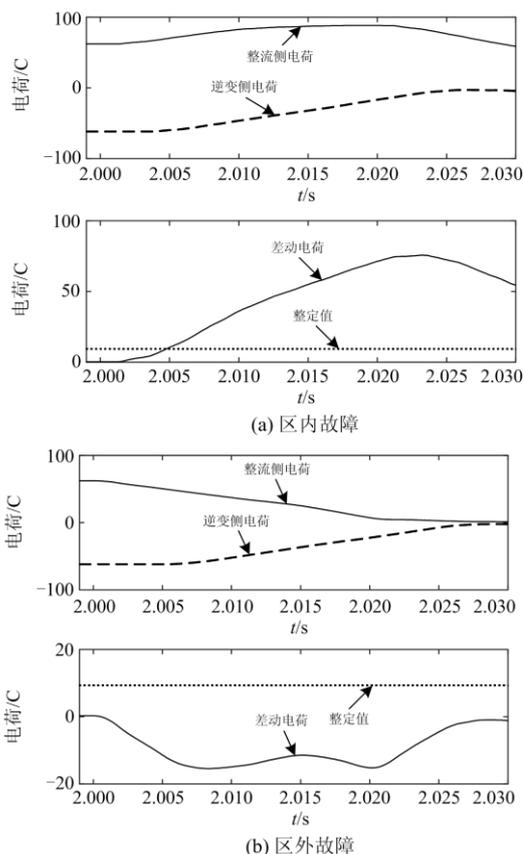


图 18 保护原理验证

Fig. 18 Protection principle verification

3.2 主动探测式

与传统电网相比, 交直流混联电网具有更高的灵活性、电能质量、自愈能力, 主要体现在分布式电源、微电网、主动配电网、移动储能等技术要素。同时赋予了电网更多灵活有效的扰动应对策略, 且电网中存在变流器、电力电子变压器等大量可控的电力电子型电力装备, 它们为交直流混联电网的故障隔离与快速、主动故障恢复提供了可能。

利用换流阀的高可控性, 在故障时对其施加附加控制, 在故障回路产生特定故障特征, 有助于继电保护装置进行故障识别; 在故障后通过对换流阀的控制向输电线路注入探测信号, 进而实现输电线路故障存在与否的探测。

3.2.1 故障时

发生故障时, 考虑交直流混联电网中大规模电力电子器件的利用, 使得原有继电保护原理面临挑战, 具体表现如图 19 所示。

由图 19 可知, 一方面, 受换流器脆弱性影响, 输出的短路电流受限, 直流侧故障后快速闭锁, 故障信息的获取受限; 另一方面, 由于换流器的高可

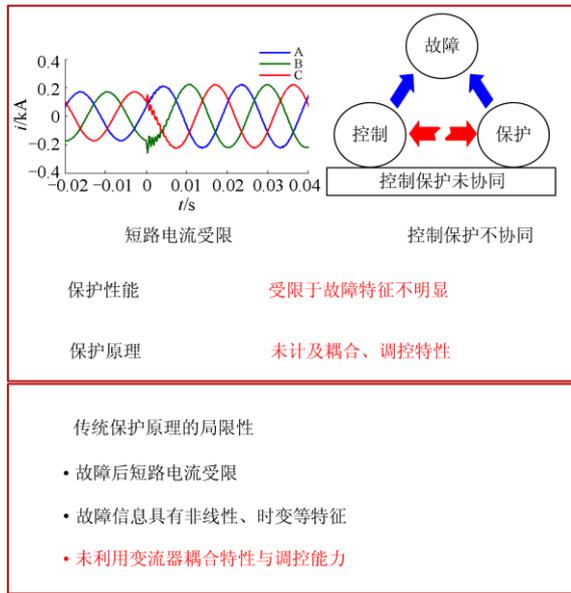


Fig. 19 Challenges faced by traditional protection when faults

控性，使得故障后的电气量受控，故障过程呈现阶段式的非线性时变特征。综上，考虑换流器的脆弱性与高可控性，使得传统被动式保护原理的可靠性与灵敏度降低。

针对所面临的传统保护挑战，可利用换流器、双向 DC-DC 变换器、直流断路器等高可控电力电子设备向被保护线路注入特征信号，提出变流器在不同控制策略下产生特征信号的方法；归纳脉冲信号、阶跃、斜变、正弦等不同种类信号的注入时刻、注入信号幅值、信号注入持续时间、注入信号的频率的选择原则，其研究思路如图 20 所示。

由图 20 可知，结合注入信号与被保护线路参数、被保护线路的模型拓扑、行波传输理论等关系，归纳不同种类特征信号作用于输电线路的响应特征差异。利用故障与非故障工况下，输电线路对于注入信号的响应差异性，构造相应的探测式保护原理，对线路故障进行识别^[22-24]。

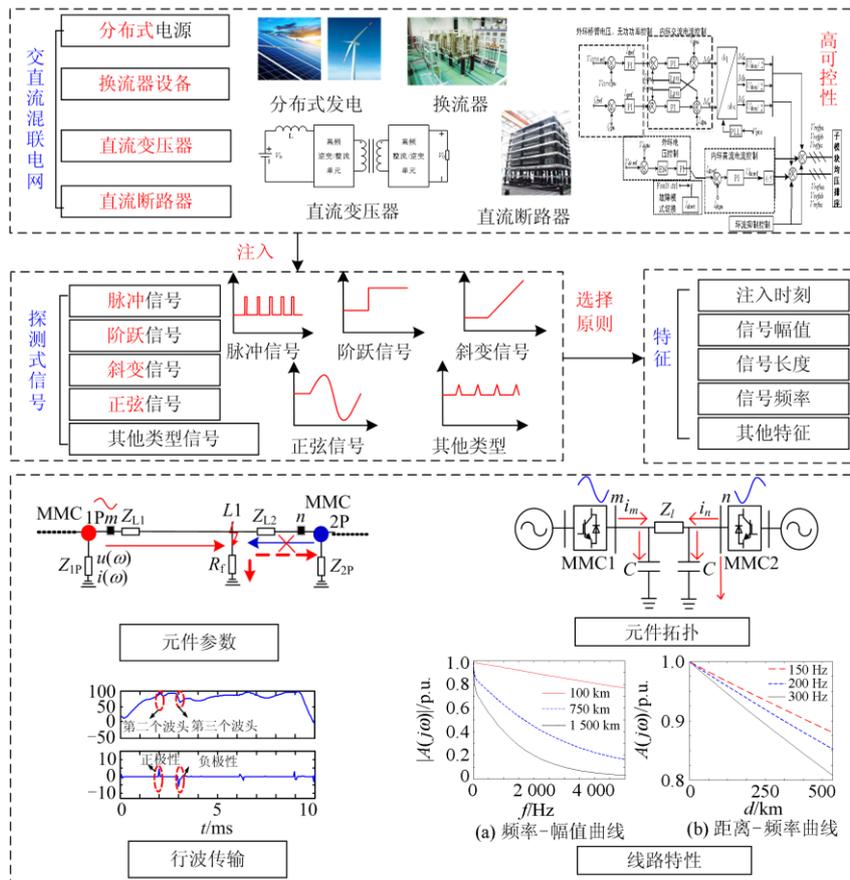


Fig. 20 Implementation method of injected signal

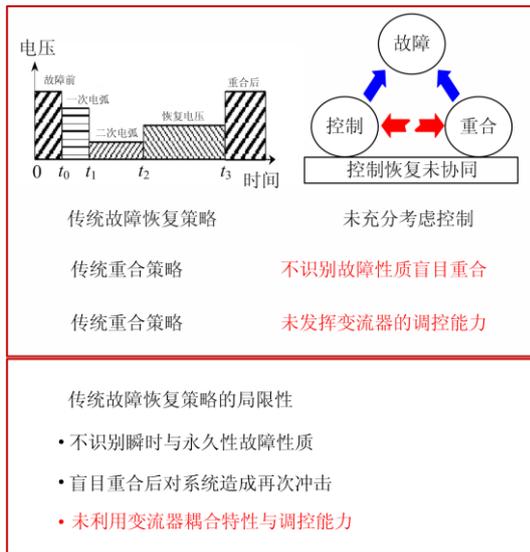


图 21 传统故障恢复策略在故障后面临的挑战

Fig. 21 Challenges faced by traditional fault recovery strategies after fault

3.2.2 故障后

发生故障后, 考虑交直流混联电网中存在大量电力电子器件, 使得系统发生故障时如果不能快速切除, 换流器、断路器的安全运行将受到考验。原有面向常规能源系统的故障恢复策略面临挑战, 具体表现如图 21 所示。

直流系统盲目重合/重启造成的二次冲击会对直流系统尤其是换流器和断路器带来严重危害, 甚至导致电网崩溃。另外, 重启时间过长会造成停电期间直流系统功率的大面积转移, 易引发安全自动装置的连锁动作, 最终造成系统瓦解的严重后果。另一方面, 换流器的高可控性, 使得故障后的电气量信息受控, 为自适应故障恢复策略创造条件, 所以必须深入研究混合直流系统的故障特征, 在此基础上提出适用于混合多端直流系统的快速保护和重合闸方案。

针对所面临的故障恢复挑战, 一方面可利用故障分析法: 考虑无故障时, 输电线路可以等效为电容模型; 故障时, 输电线路可以等效为电容与弧道电阻的并联模型。利用换流器注入到输电线路的电气量, 求解输电线路是否符合无故障模型, 判别故障性质; 另一方面, 可以在非故障极主动注入扰动信号, 通过测量故障极的响应判断故障是否消失, 也可以通过在故障极注入脉冲信号(或电流信号), 探测故障支路是否消失(或绝缘水平有所降低), 进而作出是否重合/重启的决定, 实现主动探测式的自适应重合/重启, 提高重合/重启成功率^[25-27]。具体如图 22 所示。

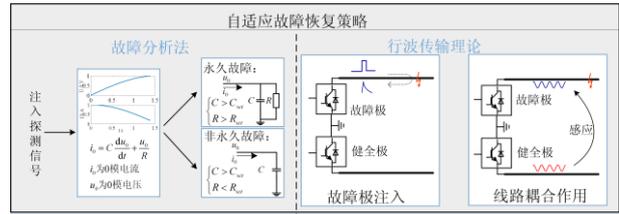


图 22 控制保护协同策略

Fig. 22 Strategy of the synergy of control and protection

主动探测式永久故障判别方法主要针对保护动作后仍然有换流器与线路连接的系统, 并利用该换流器实现故障性质的探测。

3.3 小结

在充分认识交直流混联电网故障过程的阶段性、换流器的响应和传递特性基础上, 提出了系列继电保护新原理。

1) 针对被动式检测的继电保护新原理: ① 在换流器未响应阶段提出利用故障初瞬波前信息的直流线路超高速保护; ② 在换流器动态调节阶段提出利用换流器开关特征频率的单端量全线速动保护; ③ 在故障全过程提出基于电荷量变化特征的纵联保护。

2) 针对主动探测式故障保护与故障甄别研究方面: ① 在故障稳态阶段提出主动探测式单端量保护和纵联保护; ② 在故障恢复阶段提出利用换流器高可控性, 结合电气量传播规律, 实现主动探测式重合、重启策略。

4 总结与展望

随着交直流混联电网的不断发展, 电力电子化的电力系统成为未来的发展趋势。换流站是交直流混合电网的枢纽, 区别于传统同步机系统, 故障耦合特性呈现复杂性。本文从换流站故障耦合特性、保护适应性、保护新原理三个方面出发, 阐述了相应的科学技术, 并提出了相应的建议与展望。

1) 在故障耦合机理分析方面, 换流站两侧电气量具有耦合关系, 具体表现为两侧电气量的频率、幅值在传递过程中的变化规律。交流侧故障后的响应特性表现为谐波含量复杂和等效阻抗的时变非线性, 直流侧故障受换流站控制策略和拓扑结构的双重影响, 响应特征具有阶段性。

2) 在换流站等效模型研究方面, 故障初瞬未响应阶段的换流站等效模型与线路边界元件(平波电抗器、滤波器、补偿电路)的特性有关。换流器动态调节阶段的交/直流系统等效模型具有非线性、时变、阶段性特征, 取决于换流器拓扑结构和控制策略。

3) 在继电保护适应性分析方面, 传统继电保护原理的最佳适用条件与电网故障新特征的匹配程度直接相关。交流侧保护的灵敏度与可靠性易受弱馈、谐波含量高、背侧系统阻抗变化影响。

4) 在新型继电保护原理研究方面, 提出的新型继电保护原理涵盖了换流器阶段性故障全过程, 具有较高的可靠性与灵敏度。

5) 对于交直流混联电网的控制保护与融合策略研究中, 针对保护与故障定位原理, 应当在交直流混联系统故障控制需求的前提下, 通过控制策略加强或减弱故障特征, 改善保护原理性能, 提高故障定位精度。针对故障的恢复策略, 可利用换流站、直流断路器、无功补偿装置等可控设备, 向被保护线路注入特征信号, 实现自适应故障快速恢复。控制保护融合技术将成为未来含电力电子化电力系统继电保护研究领域的重要发展方向。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 张健康, 索南加乐, 何方明, 等. 交直流混联电网工频变化量距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 98-103.
ZHANG Jiankang, SUONAN Jiale, HE Fangming, et al. Performance analysis of distance protection based on industrial frequency variation applied to AC-DC hybrid power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 98-103.
- [3] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [4] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.
SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [5] 陈水明, 余占清, 黄璐璐, 等. 互联系统电磁暂态交互作用研究IV: 直流侧对交流侧的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1590-1597.
CHEN Shuiming, YU Zhanqing, HUANG Lulu, et al. Transient interaction of HVAC and HVDC in converter station in HVDC, IV: effects of DC sides on AC sides[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1590-1597.
- [6] 陈水明, 余占清, 谢海滨, 等. 互联系统电磁暂态交互作用研究III: 交流侧对直流侧的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1082-1092.
CHEN Shuiming, YU Zhanqing, XIE Haibin, et al. Transient interaction of HVDC and HVDC in converter station in HVDC, III: effects of AC sides on DC sides[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1082-1092.
- [7] 麦国浩. 直流互联系统的交流电网故障分析方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
MAI Guohao. Study on fault interaction analysis and calculation model of AC/DC system and its application[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [8] 唐欣, 张武其, 曾祥君. 柔性直流输电系统的谐振问题及主动抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5352-5359.
TANG Xin, ZHANG Wuqi, ZENG Xiangjun. Resonance problem analysis and active suppression method for VSC-HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5352-5359.
- [9] CARMINATI M, RAGAINI E, TIRONI E. DC and AC ground fault analysis in LVDC microgrids with energy storage systems[C] // 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), June 10-13, 2015, Rome, Italy: 1047-1054.
- [10] 李晓华, 蔡泽祥, 黄明辉, 等. 交直流电网故障暂态功率倒向解析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 61-66.
LI Xiaohua, CAI Zexiang, HUANG Minghui, et al. Transient power converse in an AC/DC interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 61-66.
- [11] 索南加乐, 张健康, 焦在滨, 等. 交直流混联电网交流系统故障特征分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1461-1467.
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, JIAO Zaibin, et al. AC fault characteristic analysis of AC-DC hybrid transmission grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1461-1467.
- [12] 王永进, 樊艳芳, 李自乾. 基于突变量能量波形特征的特高压直流输电线路单端保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 55-61.
WANG Yongjin, FAN Yanfang, LI Ziqian. Single-end protection method for UHVDC transmission line based on characteristics of sudden energy waveform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 55-61.
- [13] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 基于模型识别的VSC-HVDC直流输电线路方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 78-83.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Directional element for VSC-HVDC transmission Lines based of model identification[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 78-83.
- [14] 孙士云, 束洪春, 于继来. 单相重合时序对特高压交

- 直流并联系统暂稳影响的机理分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 106-113.
- SUN Shiyun, SHU Hongchun, YU Jilai. Mechanism analysis of single-phase reclosure sequence's influence on ultra-high voltage AC/DC parallel system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 106-113.
- [15] 孙士云, 束洪春, 韩军强, 等. 交直流并联系统中三相重合时序对距离保护动作特性的影响[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 32-39.
- SUN Shiyun, SHU Hongchun, HAN Junqiang, et al. Influence of three-phase reclosure sequence on distance protection in AC-DC parallel system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 32-39.
- [16] 周晓风, 吴彦维, 李乾, 等. 特高压直流输电线路故障重启策略优化研究[J]. 电气技术, 2016, 17(7): 36-40, 47.
- ZHOU Xiaofeng, WU Yanwei, LI Qian, et al. Research on the optimization of UHVDC line fault recovery strategy[J]. Electrical Engineering, 2016, 17(7): 36-40, 47.
- [17] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3548-3557.
- ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3548-3557.
- [18] 乔立华, 陶然, 宋国兵, 等. 直流线路边界特性保护综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 179-186.
- QIAO Lihua, TAO Ran, SONG Guobing, et al. A summary of the boundary characteristics used in DC system relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 179-186.
- [19] 刘琪, 宋国兵. 基于电流偏差均值控制特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2159-2167.
- LIU Qi, SONG Guobing. A novel pilot protection for HVDC transmission lines using mean current error control characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2159-2167.
- [20] 宋国兵, 陈哲鸿, 侯俊杰, 等. 基于电荷量变化特征的高压直流线路纵联保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 9-16.
- SONG Guobing, CHEN Zhehong, HOU Junjie, et al. Pilot protection for HVDC transmission lines based on charge variation characteristics[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(10): 9-16.
- [21] 侯俊杰, 宋国兵, 常仲学, 等. 基于故障分量差动电流极性特征的直流线路故障全过程保护原理[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 11-19.
- HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. DC line fault protection principle based on polarity characteristics of differential current of fault components for whole process of failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 11-19.
- [22] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Active injection for single-ended protection in DC grid using hybrid MMC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1651-1662.
- [23] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 82-96. DOI: 1186/s41601-020-152-z.
- [24] HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Single-end fault identification scheme for multi-terminal DC grid based on amplitude similarity of injection signal[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 131.
- [25] 宋国兵, 侯俊杰, 郭冰. 基于主动探测式的混合 MMC 直流输电系统单端量故障定位[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 730-740.
- SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing. Single-ended fault location of hybrid MMC-HVDC system based on active detection[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 730-740.
- [26] 宋国兵, 王婷, 张保会, 等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析与发展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 173-183.
- SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospective of detective fault identification technologies using power electronic device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 173-183.
- [27] 张维, 宋国兵, 刘健, 等. 利用电压暂态量的电压时间型馈线自动化反向合闸闭锁策略改进措施[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 166-173.
- ZHANG Wei, SONG Guobing, LIU Jian, et al. Blocking reverse-closed strategy improvement measures with voltage transients for the voltage-time feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 166-173.

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-12-01

作者简介:

侯俊杰(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 826686025@qq.com

宋国兵(1972—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: song.gb@mail.xjtu.edu.cn

徐瑞东(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: xuruidong111@126.com

(编辑 张爱琴)