

DOI: 10.7667/PSPC161392

接入 MMC-HVDC 的交流系统线路自适应距离保护研究

王鹤¹, 刘宇超¹, 李国庆¹, 李鸿鹏², 毕鹏³

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网安徽省电力公司电力经济技术研究院, 安徽 合肥 230022; 3. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610021)

摘要: 接入 MMC-HVDC 的交直流混合系统中, 当与柔性直流线路直接相连的下级交流线路保护不能正确切除区内故障时, 将由上级交流线路的距离 II 段或 III 段动作切除故障。柔性直流输电线路运行方式的变化将导致上级线路距离保护 II 段的保护范围缩小, 以很大的概率发生拒动, 此时只能依靠距离保护 III 段动作, 故障清除时间延长。针对这一问题开展研究, 深入分析了 MMC-HVDC 运行方式对交流系统距离保护的影响, 提出了一种基于柔性直流输电公共连接点处量测信息的自适应距离保护方法。该方法能够有效降低 MMC-HVDC 对上级交流线路距离保护的影响, 保证距离 II 段的正确动作, 减小了故障的清除时间。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中搭建含 MMC-HVDC 的交直流混合系统, 仿真验证了所做分析和所提出方法的有效性。

关键词: 模块化多电平换流器型直流输电; 交直流混合系统; 距离保护; 系统运行方式

Adaptive distance protection of AC system in the presence of modular multilevel converter based HVDC

WANG He¹, LIU Yuchao¹, LI Guoqing¹, LI Hongpeng², BI Peng³

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Anhui Institute of Electric Power Corporation Economic & Technology, Hefei 230022, China; 3. Chengdu Power Supply Company of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610021, China)

Abstract: In AC/DC hybrid systems consisting modular multilevel converter based HVDC (MMC-HVDC), it needs the distance protection stage II or stage III of higher AC line action to remove fault when the protection of lower AC line which is directly connected with the MMC-HVDC cannot correctly removes fault zone. The changes of MMC-HVDC operation mode will result that the scope of higher line distance protection stage II is narrowed. It has a great probability to refuse tripping. At this point it can only rely on distance protection stage III to operate which may lead to fault clearing time extended. This paper carries out research on this issue, deeply analyzes the effects of MMC-HVDC operation mode on AC line distance protection. A complex characteristics distance protection based on the measurement information of MMC-HVDC common connection point is developed. This adaptive distance protection can reduce the adverse impact on the AC line distance protection and ensure the correct operation of the protection device to work. In PSCAD/EMTDC, AC/DC hybrid systems consisting MMC-HVDC is established to verify the proposed method and analysis.

This work is supported by Science and Technology Development Plan of State Grid Corporation of China (No. NEDU20150002).

Key words: MMC-HVDC; AC-DC hybrid system; distance protection; system operation mode

0 引言

近年来, 随着直流输电技术的不断发展, 柔性直流输电因其可控性强等优点得到快速发展。柔性直流输电与采用电流源型换流器的常规直流输电相

比, 具有有功和无功可独立快速调节、占地和环境影响小、不存在换相失败问题、可作为黑启动电源及易于构建多端直流系统等特点^[1-2]。模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)由于其开关损耗小、波形质量高和故障处理能力强的特点^[3-4], 已成为电压源型换流器高压直流输电的重要拓扑^[5]。

对于含柔性直流输电的交直流混合系统, 其继

基金项目: 国家电网公司科技发展计划项目 (NEDU20150002)

电保护的机理、配置和测试技术都与传统交流系统存在较大区别^[6]。因此有必要对交直流混合系统的故障形式和故障机理进行详尽的分析,对交直流混合系统的继电保护原理及保护判据进行深入的研究,对交直流混合系统的保护测试及实验方法进行设计和验证。

目前含柔性直流输电的交直流混合系统中,交流系统、换流站以及直流输电线路各部分的控制保护都已经形成一定的理论基础^[7-10],而针对各部分之间故障的交互影响和控制保护策略配合方面文献资料十分缺乏。

国内外专家与学者已经研究了同样为电力电子设备的柔性交流输电设备(静止同步串联补偿器 SSSC、静止同步补偿器 STATCOM 和统一潮流控制器 UPFC)对线路距离保护的影响^[11-14]。

本文深入研究了 MMC-HVDC 系统运行方式对交流线路距离保护的影响,得出了定量分析的结论,并提出了一种基于柔性直流输电公共连接点处量测信息的自适应距离保护,在 PSCAD/EMTDC 中搭建含 MMC-HVDC 的交直流混合系统,仿真验证本文所提方法能够有效减小 MMC-HVDC 对交流线路距离保护不良影响,保证保护装置的正确动作。

1 MMC-HVDC 的拓扑结构及运行控制

1.1 模块化多电平换流器(MMC)拓扑结构

三相模块化多电平换流器的拓扑结构如图 1 所示。与传统 VSC 不同,交流电抗器直接与 N 个子模块串连在一起,组成 MMC 的一个桥臂。MMC 的每相由上、下两个桥臂组成。

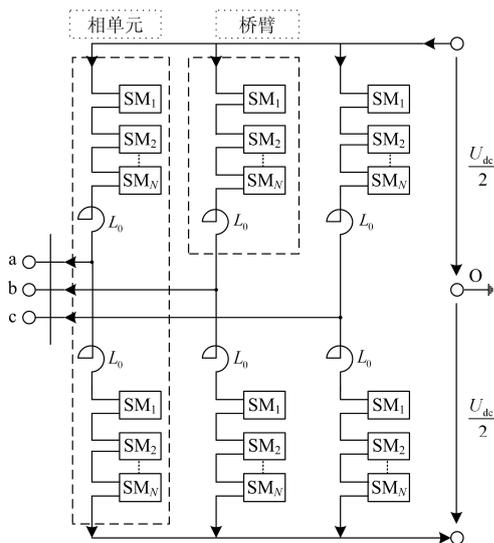


图 1 MMC 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MMC

MMC 的子模块拓扑结构如图 2 所示,由两个 IGBT、两个反并联二极管和一个子模块直流侧电容器构成。

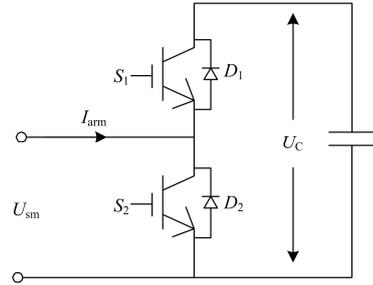


图 2 MMC 子模块拓扑结构

Fig. 2 Sub-module topology of MMC

1.2 MMC-HVDC 的系统级控制

MMC-HVDC 的系统级控制策略如图 3 所示,包括有功功率控制和无功功率控制。有功功率控制模块接受有功调度指令 P_{set} 和有功功率调节信号 P_m,它们经过有功功率指令调节环节生成有功功率的参考信号 P_{ref}。

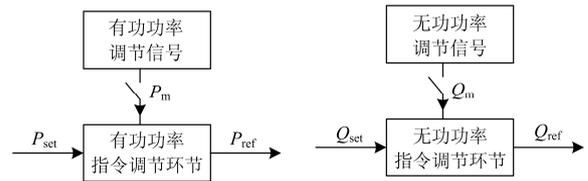


图 3 系统级功率控制策略

Fig. 3 System level power control strategy

有功功率调度指令 P_{set} 主要取决于当地电网各种运行方式和电网自动调度方式。在风电并网或孤岛供电等场合,根据频率变化及时调整有功功率输出。加入有功功率调节指令 P_m 的目的是使柔性直流输电系统能够阻尼系统振荡,提高交流系统的静态稳定性,提供紧急功率支援,保证交流系统在受到大扰动之后能够保持稳定。

无功功率控制模块接受无功调度指令 Q_{set} 和无功功率调节信号 Q_m,它们经过无功功率指令调节环节生成无功功率的参考信号 Q_{ref}。

无功功率调度指令 Q_{set} 主要取决于当地电网各种运行方式和电网自动调度方式。在风电并网或孤岛供电等场合,根据交流电压变化及时调整无功功率输出。加入无功功率调节指令 Q_m 的目的是:通过快速调节无功功率输出抑制交流系统电压闪变,在交流系统故障后大幅输出无功功率。

综上所述,当柔性直流输电系统运行方式发生变化时,系统级有功功率控制和无功功率控制将通过附加控制器改变有功功率的参考信号 P_{ref} 和无功

功率的参考信号 Q_{ref} 。进而改变柔性直流输电的有功功率和无功功率输出, 使得柔性直流输电线路注入交流系统的电流发生变化。

2 接入 MMC-HVDC 后的传统距离保护 II 段的不足

距离保护是通过测量被保护线路始端电压和线路电流的比值而动作的一种保护。为了满足速动性、选择性和灵敏性的要求, 目前广泛使用具有三段式阶梯型时限特性的距离保护。

交流输电线路所连交流母线在接入 MMC-HVDC 后, MMC-HVDC 运行方式的变化使得交流输电线路的距离保护 II 段存在不足(或不适应), 有拒动的可能。

如图 4 是一个接入 MMC-HVDC 的交直流混合系统。当 BC 线路发生短路(F 点)时, 假设短路点的过渡电阻 R_g 为 0。根据继电保护的选择性, 此时应由保护 2 的距离保护切除故障。F 点短路属于保护 2 的区内故障, 其测量阻抗为保护安装处到短路点 F 的线路阻抗, 不受公共连接点上所连柔性直流输电线路的影响, 正常情况下能够正确动作清除故障。

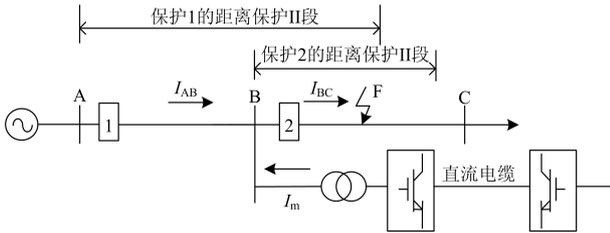


图 4 接入 MMC-HVDC 的交直流系统图

Fig. 4 AC-DC hybrid system containing MMC-HVDC

当保护 2 的距离保护本身发生故障而未动作时, 需要保护 1 的距离保护 II 段或 III 段动作切除故障。保护 1 的距离保护 II 段作为部分相邻线路的后备保护, 可以以较小的延时切除 BC 线路的部分故障, BC 线路上超出保护 1 的距离保护 II 段保护范围的故障将由保护 1 的距离保护 III 段动作切除, 延时较大。

从系统稳定运行的角度, 希望尽可能快地切除故障, 即当保护 2 的距离保护本身发生故障而未动作时, 尽量由保护 1 的距离保护 II 段切除部分故障, 避免距离 III 段动作带来的时延增加。

图 4 中, 对于保护 1 的 II 段整定, 柔性直流输电线路相当于一个分支线路。传统的交流分支线路可以通过引入分支系数来处理, 但柔性直流输电的运行方式十分灵活, 调节范围很大, 即可以表现为助增分支, 也可以表现为外汲分支, 下面将对其影

响进行详细分析。

保护 1 距离保护 II 段的测量阻抗为

$$Z_{m1}^{II} = \frac{U_A}{I_{AB}} \quad (1)$$

式中, U_A, I_{AB} 是保护 1 所测得的电压和电流。

根据基尔霍夫定律

$$U_A = Z_{AB} \cdot I_{AB} + Z_k \cdot I_{BC} \quad (2)$$

式中: Z_{AB} 是线路 AB 的阻抗; I_{BC} 是线路 BC 的电流; Z_k 是母线 B 到故障点的阻抗。

将式(2)代入式(1)中, 得

$$Z_{m1}^{II} = Z_{AB} + K_b \cdot Z_k \quad (3)$$

$$K_b = \frac{I_{BC}}{I_{AB}} \quad (4)$$

式中, K_b 称为分支系数。

保护 1 距离保护 II 段的整定阻抗为

$$Z_{set1}^{II} = K_{rel}^{II} \cdot (Z_{AB} + K_{bmin} \cdot Z_{set2}^I) \quad (5)$$

式中: K_{rel}^{II} 一般取 0.8; K_{bmin} 为分支系数的最小值。

通过系统级、换流站级、换流阀级的三级控制使得 MMC-HVDC 平稳地在不同运行方式和运行点之间切换。由上文分析可得柔性直流输电输出的有功功率和无功功率随系统各种运行方式而变化, 进而使 MMC-HVDC 注入 B 点电流 I_m 随系统各种运行方式变化而变化。

当 $I_m > 0$ 时, $I_{BC} > I_{AB}$, $K_b > 1$, 柔性直流输电线路分支表现为助增分支, 对应电流为助增电流; 当 $I_m < 0$ 时, $I_{BC} < I_{AB}$, $K_b < 1$, 柔性直流输电线路分支表现为外汲分支, 对应电流为外汲电流。

按照式(5)采用外汲分支时的最小分支系数 K_{bmin} 对保护 1 的距离 II 段进行整定, 得到的整定值较小, 不能满足灵敏度校验的要求(灵敏度 ≥ 1.25)。

由式(3)和式(5), 保护 1 的距离 II 段保护相邻线路的距离可以用阻抗表示为

$$Z_{set1}^{II} - Z_{AB} = K_{rel}^{II} \cdot (Z_{AB} + K_{bmin} \cdot Z_{set2}^I) - Z_{AB} \quad (6)$$

当测量阻抗位于动作范围边界时, 测量阻抗等于距离 II 段的整定阻抗, 则

$$Z_k = \frac{K_{rel}^{II} \cdot (Z_{AB} + K_{bmin} \cdot Z_{set2}^I) - Z_{AB}}{K_b} \quad (7)$$

式(7)中右侧的分子是一个定值, 所以保护 1 的距离 II 段保护相邻线路的实际距离 Z_k 和实际运行的分支系数 K_b 成反比例关系。

柔性直流输电线路分支注入电流 I_m 随系统运行方式变化, K_b 以很大的几率表现为助增分支, 即 K_b 由小于 1 变化为大于 1。随着 K_b 的增大, 保护 1

的传统距离保护 II 段保护相邻线路的实际范围将不断缩小, 有很大的概率发生拒动。

由于测量元件的误差和过渡电阻的影响, 传统距离保护 II 段的保护范围将进一步被缩小, 严重时本线路末端发生故障时传统距离保护 II 段可能发生拒动, 无法实现安全覆盖本线路故障的目的。此时需要传统距离保护 III 段动作, 故障清除时间延迟。故障时间越长, 对电力系统稳定性影响越大。因此接入 MMC-HVDC 后, 传统距离保护 II 段保护存在不足, 需要研究保护改进策略, 避免误动。

文献[15]讨论了柔性直流输电线路的无功功率控制对保护 1 距离 II 段的影响, 无功功率控制将在故障时影响交流母线 B 点电压, 造成测量阻抗被高估, 使保护拒动。从本文的分析, 这一影响也可以认为是无功功率控制使柔性直流输电向母线 B 注入电流增加导致故障时 K_b 增大, 进而使保护 1 距离 II 段的保护范围进一步缩小造成的。

3 基于柔性直流输电公共连接点处量测信息的自适应距离保护

自适应继电保护是根据电力系统运行方式和故障状态的变化而实时改变保护性能、特性或定值的保护。现代微机运算速度快、拥有强大的记忆力和逻辑判断力, 使整定计算在线化成为可能。随着广域量测技术的发展, 通过同步相量测量装置能够把检测到的交直流混合系统的运行状态作为整定计算中的参数, 从而实现自适应继电保护。

本文采用自适应距离保护来消除 MMC-HVDC 运行方式变化对保护 1 距离保护 II 段的影响。广域量测系统的测量单元安装在柔性直流输电线路的公共连接点处, 与保护 1 的保护安装处之间的距离为线路 AB 的长度。随着广域量测技术的发展, 量测信号的传输时延能够控制在 10 ms 以内, 保证自适应距离保护以很小的延时切除故障。

采用具有方向圆特性的阻抗保护, 其动作特性为

$$\left| Z_m - \frac{1}{2} Z_{set1}^{II} \right| \leq \left| \frac{1}{2} Z_{set1}^{II} \right| \quad (8)$$

式(8)中保护 II 段的整定值为

$$Z_{set1}^{II} = K_{rel}^{II} (Z_{AB} + K_{bm} Z_{set2}^I) \quad (9)$$

$$K_{bm} = \frac{I_{BCm}}{I_{ABm}} \quad (10)$$

式中: K_{bm} 为利用柔性直流输电公共连接点处量测信息得到的分支系数; I_{ABm} 和 I_{BCm} 分别是广域量测系统实时测量的线路 AB 和 BC 上的电流。

图 5 给出了自适应距离保护与传统距离保护的

对比分析。从图中可以看出, 随着 K_b 的增大, 传统距离保护的整定方法使保护 1 的 II 段保护范围迅速缩小, 不能起到保护相邻线路的作用; 自适应距离保护根据柔性直流输电公共连接点处量测信息得到的分支修正系数实时调节整定值, 其整定值随 K_b 的增大而增大, 有效抑制柔性直流输电运行方式变化引起的距离保护 II 段保护范围缩小, 避免出现因覆盖下一线路过短引起的线路末端短路故障时引起的保护拒动风险。

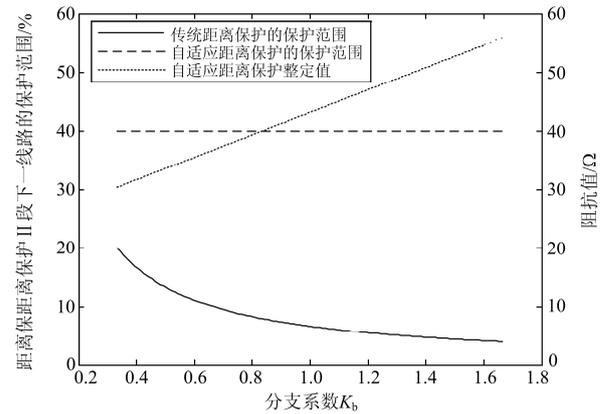


图 5 自适应距离保护与传统距离保护的对比分析

Fig. 5 Comparative analysis of adaptive distance protection and distance protection of traditional

4 仿真分析

4.1 仿真模型的建立

在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下, 建立交直流混合系统模型, 如图 6 所示。主要研究不同工况(即 MMC-HVDC 输送的有功功率和无功功率不同时), 传统距离保护 II 段动作情况; 并对比传统距离保护和本文提出的自适应距离保护的動作情况。MMC1 换流站内部采用定直流电压和定无功功率控制, MMC2 换流站内部采用定有功功率控制和定无功功率控制。故障点设在 BC 线路距 B 母线 20 km 处(线路长度的 20%)F1 点和 40 km 处(线路长度的 40%)F2 点, 故障类型为单相接地短路, 故障发生在 3 s 时刻, 持续 1 s。KM9 为保护 1 的動作断路器, KM7 为保护 2 的動作断路器, 假设 KM7 自身发生故障无法切除 F1 点和 F2 点的短路故障。主要仿真参数如表 1。

建立输电线路三段式距离保护模型。距离保护 I 段无延时, 保护本线路 80%; 距离保护 II 段延时 0.5 s, 保护本线路全长及下一线路的一部分; 距离保护 III 段延时 2.5 s, 保护本线路全长及下一线路全长。采用比幅式原理的阻抗继电器实现距离保护。

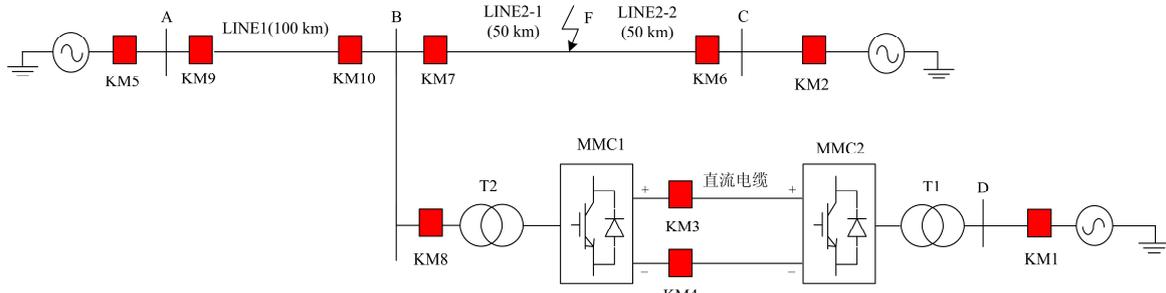


图 6 交直流混合系统图

Fig. 6 AC-DC hybrid system

表 1 仿真系统主要参数

Table 1 Main parameters of the simulation system

项目	参数	附注
换流器额定容量 S_N	300 MVA	1.0 p.u.
交流电网电压	220 kV	
交流线路单位阻抗	0.3 Ω /km	
换流变变比	220 kV/110 kV	Y/ Δ
换流器桥臂等效电抗	53 mH	
换流器桥臂等效电阻	0.02 Ω	
直流母线电压	± 100 kV	
子模块电容	0.7 mF	
子模块额定运行电压	20 kV	
桥臂子模块数量	10	

为了对比传统距离保护和本文提出的自适应距离保护动作情况的不同, 需要建立自适应距离保护模型。自适应距离保护模型测量图 6 线路 AB 的电流 I_{ABm} 和线路 BC 的电流 I_{BCm} , 按照式(10)计算, 得到修正后的分支系数 K_{bm} 。将修正后分支系数代入式(9)计算, 得到保护 1(KM9 断路器)保护 II 段的自适应整定值。最后将自适应整定值输入到比幅式原理的阻抗继电器实现自适应距离保护, 如式(8)所示。

4.2 仿真结果及其分析

通过对柔性直流输电线路的运行方式和交流线路 AB、BC 的传输容量进行分析, 设计柔性直流输电线路的运行方式变化时分支系数的变化范围为: $1/3 \leq K_b \leq 5/3$, 传统的距离保护按照 $K_{bmin} = 1/3$ 进行 II 段定值的整定。

通过改变换流站 MMC1 的有功功率的参考信号 P_{ref} 和无功功率的参考信号 Q_{ref} , 进而改变柔性直流输电的实际有功功率和无功功率输出, 实现使得柔性直流输电线路注入交流系统的电流发生变化, 进而实现了分支系数的调整。

工况一: 故障点为 F1 点, 调节功率参考值 P_{ref} 和 Q_{ref} , 使得柔性直流输电的 MMC1 换流站吸收功率, 外汲分支系数 $K_b = 1/3$ 。

工况二: 故障点为 F1 点, 调节功率参考值 P_{ref} 和 Q_{ref} , 使得柔性直流输电的 MMC1 换流站吸收功率, 外汲分支系数 $K_b = 2/3$ 。

工况三: 故障点为 F2 点, 调节功率参考值 P_{ref} 和 Q_{ref} , 使得柔性直流输电的 MMC1 换流站向 B 母线注入功率, 助增分支系数 $K_b = 5/3$ 。

图 7 为采用传统距离保护时保护 1(KM9 断路器)距离保护 II 段的动作情况。图中工况一情况下按照最小分支系数运行, 此时柔性直流输电线路的 K_b 与整定时的计算值 K_{bmin} 相同, 保护能够正确动作, 以 0.5 s 延时切除 F1 点的故障; 工况二情况下柔性直流输电线路仍表现为外汲分支, 但 K_b 增大为 2/3, 此时其测量阻抗没有进入保护 1 距离 II 段的保护范围, 保护拒动。

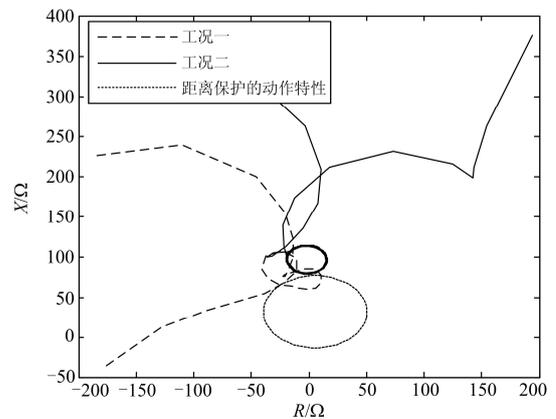


图 7 不同工况下传统距离保护 1 动作情况

Fig. 7 Action case of traditional distance protection 1 under different conditions

当 K_b 继续增大时, 保护 1 距离 II 段的实际保护范围将进一步缩小, 不仅 F1 点故障时保护拒动, F1 点左侧的故障也将不能够正确动作, 只能依靠保护 1 的 III 段动作来切除故障, 造成故障清除时间的增加。

图 8 为工况 3 情况下采用传统距离保护和自适

应距离保护时保护 1(KM9 断路器)距离保护 II 段动作情况的对比分析。此时柔性直流输电线路的运行方式发生变化,分支系数 $K_b=5/3$,柔性直流输电线路表现为助增分支。传统的距离保护 II 段为图中较小的阻抗圆特性,保护拒动;自适应距离保护为图中较大的阻抗圆特性,其整定值按照式(9)自动调整,能够正确动作。

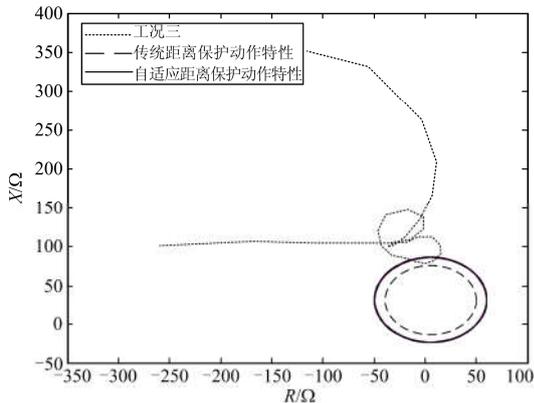


图 8 工况 3 保护 1 距离 II 段动作情况对比分析

Fig. 8 Comparison of action case of distance protection stage II of protection 1 under condition 3

根据上述仿真分析,利用柔性直流输电公共连接点处广域量测信息的自适应距离保护能够根据 K_b 的变化自适应调节整定值,能够保证柔性直流输电线路不同运行方式下保护 1 距离保护 II 段的正确动作。因此,本文提出的自适应距离保护方法能够克服 MMC-HVDC 运行方式变化对线路距离保护 II 段的不良影响。

5 结语

本文研究接入 MMC-HVDC 系统后的传统距离保护的不足,提出了基于柔性直流输电公共连接点处量测信息自适应距离保护方法,在 PSCAD/EMTDC 中搭建交直流混合系统进行仿真验证,得到以下结论:

(1) 柔性直流输电线路运行方式发生变化时,导致使用现有整定方法时,相邻上级交流线路距离保护 II 段的保护范围随实际分支系数的增大而迅速减小,由于测量元件的误差和过渡电阻的影响,保护范围将进一步被缩小,严重时本线路末端发生故障时距离保护 II 段可能发生拒动,无法实现安全覆盖本线故障的目的。

(2) 本文从整定方法上出发,提出的基于柔性直流输电公共连接点处量测信息的自适应距离保护方法能够克服柔性直流输电线路对距离保护 II 段的影响。这样可以避免出现因保护覆盖下一线路过短时,

本线路末端短路故障引起的距离保护 II 段保护拒动的风险,减小了故障的清除时间,对电力系统的稳定运行具有重要的意义。

参考文献

[1] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.

[2] 杨煜, 孙大卫, 谢小荣, 等. 模块化多电平换流器型柔性直流系统的等效仿真方法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 43-48.
YANG Yu, SUN Dawei, XIE Xiaorong, et al. Comparative study on the accelerated models of MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 43-48.

[3] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.

[4] 鲁国正, 高亮, 梁智敏. 电压源换流器接地方式对直流配电系统的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 43(19): 125-130.
LU Guozheng, GAO Liang, LIANG Zhimin. Influence of voltage source converter grounding mode on DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 43(19): 125-130.

[5] 徐政, 屠卿瑞, 裘鹏. 从 2010 国际大电网会议看直流输电技术的发展方向[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3070-3077.
XU Zheng, TU Qingrui, QIU Peng. New trends in HVDC technology viewed through CIGRE 2010[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3070-3077.

[6] 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.

[7] 周杨, 贺之渊, 庞辉, 等. 双极柔性直流输电系统站内接地故障保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4062-4069.
ZHOU Yang, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. Protection

- of converter grounding fault on MMC based bipolar HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4062-4069.
- [8] ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. The research of SM topology with DC fault tolerance in MMC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1561-1568.
- [9] 王一, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2312-2319.
WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2312-2319.
- [10] 冯亚东, 汪涛, 卢宇, 等. 模块化多电平柔性直流换流器阀组本体保护的设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 64-68.
FENG Yadong, WANG Tao, LU Yu, et al. Valve protection design of modular multilevel converter for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 64-68.
- [11] 李卫国, 陈洁, 徐双, 等. 基于结构保留模型的 SVC 非线性最优控制器设计[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(1): 17-23.
LI Weiguo, CHEN Jie, XU Shuang, et al. A nonlinear optimal control of SVC based on structure-preserving model[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2011, 31(1): 17-23.
- [12] MORAVEJ Z, PAZOKI M, KHEDERZADEH M. Impact of UPFC on power swing characteristic and distance relay behavior[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 261-268.
- [13] KHEDERZADEH M, GHORBANI A. Impact of VSC-based multilines FACTS controllers on distance protection of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 32-39.
- [14] 李少飞, 李生虎. STATCOM 不对称控制策略下线路距离保护测量阻抗的改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 65-70.
LI Shaofei, LI Shenghu. Improved algorithm for transmission distance protection measuring impedance with STATCOM under unbalanced control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 65-70.
- [15] HE L, LIU Chen-Ching, PITTO A, et al. Distance protection of AC grid with HVDC-connected offshore wind generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 493-501.

收稿日期: 2016-08-28; 修回日期: 2016-10-22

作者简介:

王鹤(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为柔性直流输电、新能源发电技术;

刘宇超(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电, 电力系统继电保护; E-mail: 916969975@qq.com

李国庆(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统的安全性与稳定性分析、柔性直流输电、控制与决策、配电系统自动化。

(编辑 周金梅)