

计及控保协同的自适应电流差动保护方法

张博, 王聪博, 詹荣荣, 余越

(电网安全全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192)

摘 要: 大规模新能源经柔性直流输电(以下简称“柔直”)送出系统已成为中国新型电力系统中的典型场景, 然而新能源场站与柔直换流器之间的交流输电线路两侧均为电力电子装置, 短路电流受到不同换流器控制策略影响导致波形畸变严重, 使得传统纵联保护灵敏度降低, 拒动风险增大。提出了计及控保协同的自适应电流差动保护方法。以柔直换流器故障穿越策略为基础, 分析了故障时两侧的故障电流特征, 并将换流器控制参考值与保护判据相结合, 构建了控制与保护协同的自适应保护判据。基于 PSCAD 搭建新能源经柔直送出系统的模型, 仿真结果表明: 所提保护可快速识别故障区间内不同类型故障, 与传统差动保护原理相比, 灵敏度提高了两到三倍, 满足新型电力系统安全稳定运行对保护灵敏性与可靠性的需求。

关键词: 交流线路; 故障穿越; 控保协同; 柔性直流

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202407104

0 引言

近年来, 新能源经柔性直流输电(voltage sourced converter based HVDC, VSC-HVDC)(以下简称“柔直”)送出系统被广泛应用, 推动全球电力向着清洁和绿色发展^[1-3]。但是, 新能源经柔直送出系统的交流输电线路受两端电力电子装置及控制策略影响, 故障时短路电流会存在波形畸变、相角受控、幅值受限等特征^[4]。基于同步机电源特性的传统保护原理, 在新场景下会存在适应边界减小、灵敏性降低甚至不正确动作的风险^[5-6]。因此, 针对双侧受控交流线路中保护的薄弱环节, 进行新保护原理的研究尤为重要^[7]。

目前, 继电保护主要分为单端量与双端量保护。其中, 双端量保护因具有天然的选择性而作为主保护, 在新场景下有良好的前景。文献[8]通过构造数据矩阵, 放大电流突变量的差异, 进而提出了基于时域突变特征的纵联保护, 克服了传统基于工频分量的差动保护难以提取持续工频分量的问题, 但易受采样率、时间窗长的影响。文献[9-10]提出了基于电流波形相似度的纵联保护新原理, 解决了短路电流受控制策略影响波形

畸变后差动保护灵敏度下降的问题, 但其动作整定值设置需要大量仿真支持, 工程应用推广性不佳。文献[11]采用差分法实时计算有功无功, 进而提出了基于能量变化的时域差动保护, 在复杂工况中表现良好, 但在故障特征较弱时, 动作时间较慢, 无法满足对电力电子电源快速保护的動作需求。另外, 行波及暂态量等新型保护原理也存在受噪声干扰和算法计算较为复杂的局限性^[12]。

此外, 文献[13]指出控保协同技术是提升保护动作性能的重要解决思路。文献[14]提出了基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)主动限流的双极短路故障保护方法, 将柔直换流器主动限流控制与故障识别相结合, 实现故障的快速识别与切除。文献[15]提出了基于控保协同的主动注入式保护方法, 在故障期间控制电源主动向电网注入特征信号, 消除了新场景下外界环境与控制策略对保护产生的影响, 实现保护与控制的协同配合。文献[16]利用光伏场站中逆变电源控制策略进行正负序分配系数优化, 使传统保护的動作条件达到理想状态。然而, 以上方法仅停留于理论指导与仿真验证, 工程实用性较差, 并对于双端受控的交流线路保护, 该技术的应用仍处于空白。

针对上述问题, 本文首先分析了新能源经柔直送出系统两端换流器控制策略对故障电流的影

收稿日期: 2024-07-23; **修回日期:** 2024-12-16。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(JB83-23-005)。

响,并对送出交流线路传统保护进行适应性分析。然后,结合柔直换流器控制参考值与保护数据,通过引入故障穿越策略的参考电压系数,实现自适应调整纵联保护动作门槛,提高了保护灵敏度,正确识别故障区间。最后,基于PSCAD仿真平台,搭建新能源经柔直送出系统的电磁暂态模型,仿真验证所提保护方法的动作性能。

1 系统拓扑与控制策略

本文研究对象为新能源场站经柔直系统送出的 220 kV 交流输电线路,系统拓扑如图 1 所示。新能源经逆变器并通过变压器升压之后,经交流输电线路到达柔直换流站,之后通过直流系统并入电网。

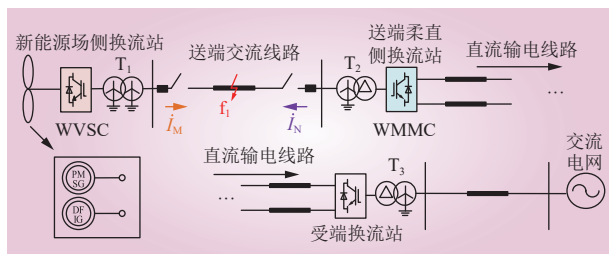


图 1 新能源场经柔直交流线路送出系统拓扑
Fig. 1 Topology of VSC-HVDC system with the new energy stations

低电压穿越控制策略如图 2 所示。故障后,新能源场站通过检测并网点正序电压的跌落程度,并调节输出的无功电流以支撑电网电压,最终实现低电压穿越,即

$$I_{wqref} = I_{qref} - k_1 (U_{ref} - U_{mv}) \quad (1)$$

式中: I_{wqref} 为故障穿越中的无功电流值; I_{qref} 为

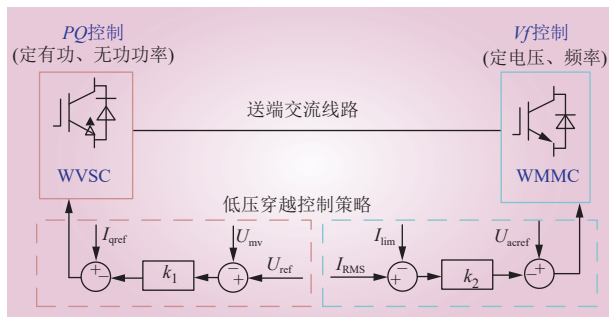


图 2 新能源场站侧与柔直侧故障穿越控制策略
Fig. 2 Fault ride through control strategy for double terminal converter station

无功参考电流; U_{mv} 为新能源并网点故障电压; U_{ref} 为系统额定电压; k_1 为无功电流增益系数。

柔直换流器则采用主动降压法实现低电压穿越,进而使新能源输出功率降低^[17],消除柔直系统中的有功功率积累。即,当线路发生故障时,故障电流急剧上升,当 $I_{RMS} > I_{lim}$ 时 (I_{RMS} 为电流量测值, I_{lim} 为电流限值),柔直换流器降低交流参考电压值,以实现抑制故障电流的增长。此时控制系统电压跟踪值^[18]可表示为

$$E_{mmc} = U_{acref} - k_2 (I_{RMS} - I_{lim}) \quad (2)$$

式中: E_{mmc} 为柔直换流器的控制系统电压跟踪值,可视为等效内电势; U_{acref} 为柔直换流器的交流参考电压值; k_2 为柔直控制系统的电压调整系数。

2 传统差动保护适应性分析

由图 1 所示,保护元件配置在交流送出线路两侧, I_M 与 I_N 分别为两侧保护元件所测量到的工频电流,以线路两侧换流器到线路的方向为正方向。比率制动式电流差动保护判据可表达为

$$\begin{cases} I_d > I_{op} \\ I_d > k I_{res} \\ I_d = |I_M + I_N| \\ I_{res} = |I_M - I_N| \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_d 为差动电流; I_{res} 为制动电流; k 为制动系数,典型取值范围为 0.5~0.9; I_{op} 为差动保护的動作门槛^[19]。

在不含新能源的交流送出线路中,传统差动保护对区内区外故障的识别具有绝对的可靠性。然而,在新能源经柔直送出线路中,由于故障电流受两侧换流器控制策略的影响,在不同故障场景下电流相角差将在 0~180° 之间摆动,可得静止坐标系和正负序 dq 同步旋转坐标系之间关系的空间矢量图,如图 3 所示。其中,静止坐标系包括三相静止 abc 与两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系。

假设交流送出线发生 BC 两相短路故障,过渡电阻为零不会产生相角跳变,且故障穿越控制目标为消除负序电流。没有零序和负序电流的影响下,新能源侧的三相短路电流中只包含正序分量,因此 A、B、C 三相短路电流对称且之间互差 120°。而柔直侧短路电流中同时包含了正序电

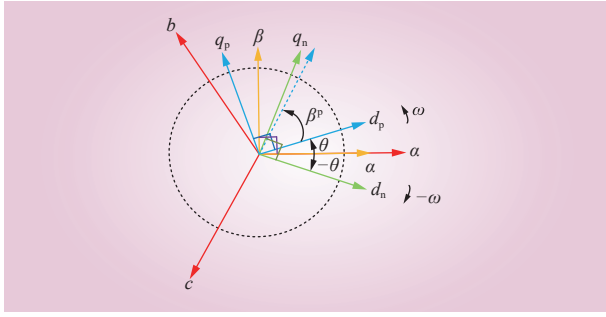


图 3 静止与旋转坐标系的空间矢量关系

Fig. 3 The space vector relationship between the stationary and rotating coordinate systems

流和负序电流，因此三相短路电流之间不再相互对称。如图 4 所示， I_{wa} 、 I_{wb} 、 I_{wc} 和 I_{sa} 、 I_{sb} 、 I_{sc} 分别为新能源侧和柔直侧的三相电流。

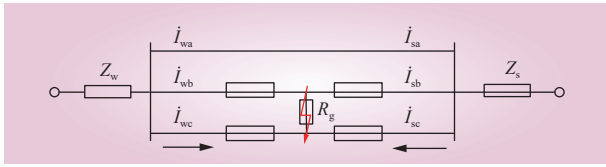


图 4 交流送出线路相间故障

Fig. 4 Phase-to-phase fault in AC line

故障相的电流满足基尔霍夫定律，即

$$I_{wb} + I_{wc} = -I_{sb} - I_{sc} \quad (4)$$

由于新能源侧只存在正序分量电流，可知 $I_{wa} = I_{wb} - I_{wc}$ ，故式 (4) 可进一步改写为

$$I_{wa} = I_{sb} + I_{sc} \quad (5)$$

由于两侧换流器的限流控制作用，两侧短路电流幅值相差不会很大，但柔直侧没有抑制负序电流，所以柔直侧的短路电流会大于新能源侧短路电流。假设柔直侧的短路幅值为新能源侧短路电流幅值的 2 倍，则可以推导出在相间故障下柔直侧的两故障相电流之间的相角差约为 160° 。

柔直侧电流 I_{sc} 与 I_{sb} 和新能源侧的电流 I_{wa} 之间的关系满足式 (5)。当 I_{sb} 与 I_{wa} 之间的相角为 $0^\circ \sim 40^\circ$ 时，C 相两端的电流相位差为 $-40^\circ \sim 0^\circ$ ，B 相两端的电流相位差为 $-120^\circ \sim 80^\circ$ ，可知 C 相的电流差动保护灵敏性会下降，B 相存在拒动风险。当 I_{sb} 与 I_{wa} 之间的相角为 $40^\circ \sim 160^\circ$ 时，C 相两端的电流相位差处于 $0^\circ \sim 120^\circ$ ，B 相两端的电流相位差为 $-80^\circ \sim 40^\circ$ ，此时 B 相的电流差动保护灵敏性会下降，而 C 相将会存在拒动风险。

综上所述，由于柔直换流器控制策略，电流故障特性受到有功、无功参考值、控制目标等因素的影响，短路电流受到了控制作用的抑制，幅值差异较小，相角受控，相比于传统新能源接入交流系统的场景，新场景下交流线路两侧的故障电流相位差将增加，传统电流差动保护的拒动风险进一步升高。

3 计及控保协同的电流差动保护

3.1 保护原理

交流线路发生故障时，柔直侧换流器采用主动降压法的控制策略以实现系统的故障穿越，即根据式 (2)，降低换流器交流参考电压，从而对交流线路电压进行调节，达到限流的效果。然而，电流随控制参数改变而改变，会直接影响到保护的動作性能。因此，本文将低压穿越控制策略中的参考电压变化趋势考虑进保护判据的构造中，在此定义控制系数 α_c 为

$$\alpha_c = \frac{E_{mmc}}{U_{acref}} \quad (6)$$

电流差动保护判据可改写为

$$\begin{cases} I_d > I_{op} \\ I_d > \alpha_c k I_{res} \end{cases} \quad (7)$$

正常运行时，式 (2) 中 I_{RMS} 小于 I_{lim} ，两者之差为负值，此时 E_{mmc} 的数值增大，动作门槛值与制动项增大，此时动作系数进一步小于制动系数，保护可靠不动作。当被保护线路发生短路故障时，柔直侧的控制参数发生变化，通过降低参考电压值来限制故障电流。此时，式 (2) 中 I_{RMS} 大于 I_{lim} ，两者之差为正值，使得 E_{mmc} 的数值降低。根据式 (6)， α_c 会随着 E_{mmc} 的降低而减小，令差动电流进一步大于动作门槛值与制动项，从而使制动系数随故障的发生进行自适应调整，提高保护的灵敏性与可靠性。

3.2 保护性能对比分析

在继电保护领域，灵敏度系数是衡量保护原理性能的重要指标。在发生区内故障时，灵敏度系数可以作为保护动作与否的评判标准，确保差动保护能够正确动作。通常，电流差动保护原理的灵敏度系数 K_{sem} 定义为其动作方程中差动项与

制动项的比值, 即

$$K_{sem} = \frac{|I_d|}{k|I_{res}|} \quad (8)$$

根据式(8), 若两端线路上的电流差动保护灵敏度系数大于1, 即差动项比制动项大, 保护可正常动作, 并且该系数越大, 证明该保护装置动作性能越好, 灵敏度越高; 反之, 若该系数小于1, 保护装置不会动作。

因此, 将1设为保护的整定门槛值, 可通过 K_{sem} 与数值1的比较来判断保护动作情况, 并以大于1的幅度进行保护原理灵敏性的判断。式(8)可改写为

$$K_{se} = \frac{|I_d|}{k\alpha_c|I_{res}|} \quad (9)$$

式中: K_{se} 为计及控保协同的自适应差动保护原理的灵敏度系数。

显然, K_{se} 与 k 和 α_c 有关, 现将所提保护原理构造的新制动系数设为 $K_m = \alpha_c k$ 。 K_m 越小, 保护的灵敏度系数越高; 反之, 保护的灵敏度系数越低。通常, 传统的电流差动保护将 k 值取为 0.5~0.9, 该值不能过低, 否则会导致区外故障的误动。根据所提保护原理的判据, 制动系数 K_m 可随着换流站控制策略的切换自适应整定, 与传统差动保护的制动系数相比更加灵活, 能够在故障发生后显著提高保护的灵敏性, 大大降低了保护原理在新场景下拒动的风险。由 $K_m = \alpha_c k$, 并联立式(2)(9), 得到 K_m 为

$$K_m = k \left[1 - k_2 \frac{(I_{RMS} - I_{lim})}{U_{acref}} \right] \quad (10)$$

现以交流线路发生单相接地故障时的仿真实例进行保护原理灵敏性分析, 制动系数与灵敏度系数在故障前后的变化如图5所示。图5中, 根据工程经验, 传统保护制动系数定值 k 取 0.8。

根据图5 a) 与式(10), 在正常运行状态下(2.5 s前), I_{RMS} 小于 I_{lim} , 两者差值为负值, 则 K_m 的值将大于 k 值, 即在正常运行状态下所提保护的可靠性更高, 防止发生误动情况; 根据图5 b), 在故障发生后, I_{RMS} 变为正常运行状态的2倍以上, 两者差值为正值, 此时 K_m 的值将随着故障电流的增加而减小, 达到降低制动门槛, 差动项与 K_m 的比值增大, 即自适应保护的灵敏度系数较传统保护原理有明显提升。

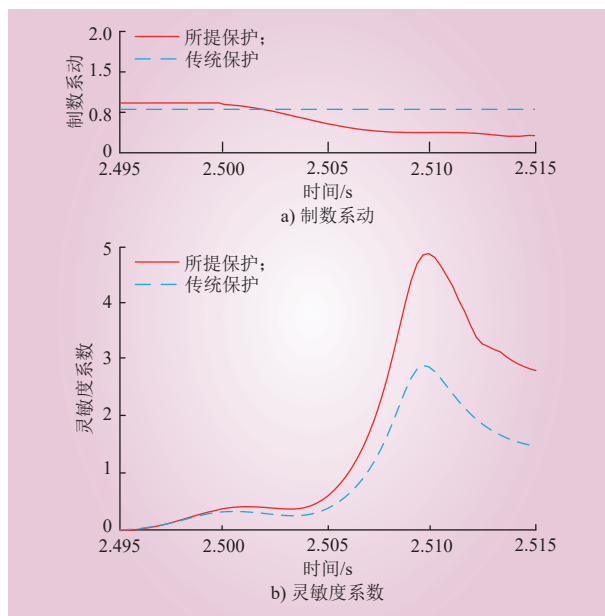


图 5 制动系数与灵敏度系数变化规律

Fig. 5 Variations of braking coefficient and sensitivity coefficient

3.3 保护方法实现

现有继电保护装置为确保各插件间数据通信的可靠性, 一般采用高性能的内部通信总线, 支持分布计算且具有良好的拓展性^[20-21]。因此, 实现本文所提方法可利用光纤直连的方式, 并基于 OTHER 私有协议将柔直控制器中的交流电压参考值实时传送给交流线路保护装置。

当被保护线路发生故障时, 保护装置根据柔直控制器输出的参考值变化动态调整制动系数门槛, 使差动电流远远大于制动电流, 当保护装置计算结果连续3次满足式(7)时, 保护动作。此外, 为了避免区外故障产生不平衡电流所导致的保护装置误动, 系数 $\alpha_c k$ 大于 0.2。另外, 当柔直控制器与保护装置通信异常或出现中断时, 保护判据恢复到原来只含 k 的传统判据。

4 仿真实验与分析

为验证所提保护的有效性, 本文在 PSCAD 中搭建图6所示的新能源经柔直送出系统仿真模型。共设置了6个故障点。其中, 区内故障设置在新能源侧线路出口处 f_2 (10%)、线路中点处 f_1 (50%) 以及柔直侧线路出口处 f_3 (90%)。区外故障设置在了 f_4 和 f_5 点处。此外, 在相邻线路

设置故障点 f_6 用于验证同塔双回线路下的相邻线路故障后的所提保护是否会发生误动。

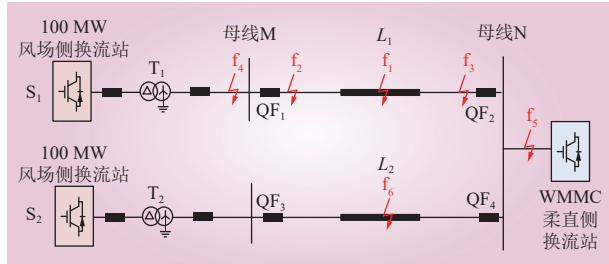


图6 PSCAD故障测试仿真模型
Fig. 6 PSCAD simulation test system

4.1 保护动作情况分析

在 f_1 — f_5 故障点处分别设置了4种典型短路故障，分别为单相接地故障（AG）、两相相间故障（BC）、两相接地故障（BCG）以及三相相间故障（ABC）。仿真结果见表1。

表1 不同故障情况下所提保护仿真结果
Table 1 Simulation results of the proposed protection under different fault conditions

故障位置	故障类型	灵敏度 K_{se}			动作情况
		A相	B相	C相	
区内故障	f_2	AG	4.7531		正确动作
		BC		6.1326	正确动作
		BCG	6.1753	3.8389	正确动作
		ABC	2.725	3.8531	正确动作
	f_1	AG	3.5131		正确动作
		BC		5.9503	正确动作
		BCG	6.0279	3.4721	正确动作
		ABC	2.6724	3.2832	正确动作
	f_3	AG	3.4042		正确动作
		BC		5.3241	正确动作
		BCG	5.5793	3.3441	正确动作
		ABC	2.2134	2.9027	正确动作
区外故障	f_4	AG	0.0042		不动作
		BC		0.0043	不动作
		BCG	0.0044	0.0036	不动作
		ABC	0.0024	0.0038	不动作
	f_5	AG	0.0058		不动作
		BC		0.0039	不动作
		BCG	0.0032	0.0049	不动作
		ABC	0.0035	0.0034	不动作

由表1可知，故障发生在区内时，各相灵敏度系数 K_{se} 均大于1的整定门槛，保护均正确动作，且动作性能表现良好；故障发生在区外时， K_{se} 均未超过1，保护可靠不动作。说明所提保护在典型故障类型下，可满足系统安全稳定运行的需求。

为了更清晰地展示所提保护的動作性能，以故障点 f_1 （50%）处为例（ $t=2.5$ s 为故障时刻），仿真结果如图7所示。由图7可知，在交流线路发生不同短路故障时，所提保护方法均能够可靠动作，其速动性表现良好，动作所需时间不超过10 ms。验证了该方法可有效改善传统差动保护灵敏度下降的问题。

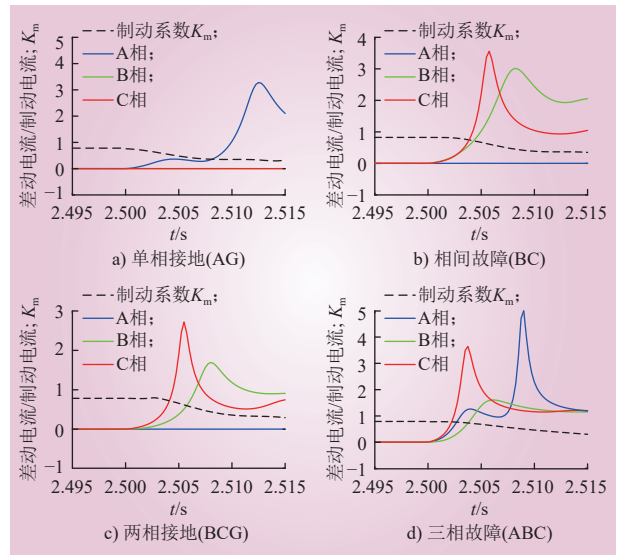


图7 交流线路故障后的保护动作性能
Fig. 7 Protection performance after AC line fault

4.2 保护算法抗过渡电阻能力

为了验证过渡电阻对所提保护的影响，以故障点 f_1 （50%）处为例，设置在不同过渡电阻（25 Ω 、50 Ω 、75 Ω 、100 Ω ）情况下单相接地、两相接地和两相短路故障。受到过渡电阻的影响，导致 I_d/I_{res} 最大值有所下降，但是单相接地故障、两相故障、两相接地故障以及三相对称接地故障下所提保护依然可以正确识别区内故障，不会发生拒动，仿真结果如表2所示。

4.3 与传统差动保护性能对比

为了更好地展示所提保护的优越性，本文将所提保护与传统差动保护进行对比，以三相短路故障为例，得到仿真结果如图8所示。

表 2 不同过渡电阻情况下所提保护性能
Table 2 Performance of the proposed protection under different transition resistance scenarios

故障类型	过渡电阻/ Ω	灵敏度 K_{se}		
		A相	B相	C相
AG	25	3.119 1	0.009 4	0.005 2
	50	2.259 7	0.008 0	0.007 1
	75	2.140 2	0.003 6	0.007 2
	100	1.845 7	0.008 1	0.007 9
BC	25	0.006 2	5.373 7	2.871 1
	50	0.005 3	5.072 2	2.054 1
BCG	25	0.006 6	4.096 8	2.129 0
	50	0.008 3	3.717 8	1.908 1
	75	0.007 3	3.510 6	1.833 1
	100	0.004 4	3.107 7	1.746 4

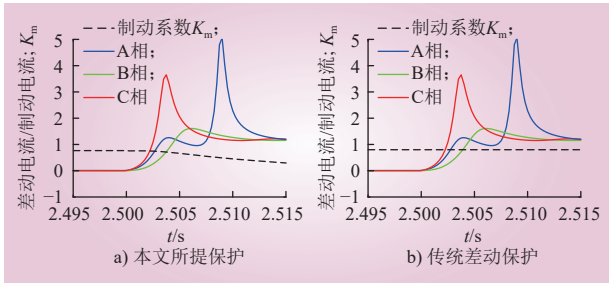


图 8 保护性能对比

Fig. 8 Comparison of protection performances

由图 8 可知，三相故障发生后，所提保护的制动系数下降，与传统电流差动保护相比，灵敏度有明显提升。

为了全方位展现所提保护的動作性能，现于不同故障情况下进行仿真测试，取故障后 7 ms 时刻的灵敏度进行对比，计算结果如表 3 所示。由表 3 可知，所提保护相比于传统差动保护，性能更好，灵敏性提升了两到三倍。

表 3 保护动作灵敏度对比
Table 3 Comparison of protection action times

故障类型	保护新原理灵敏度 K_{se}			传统差动保护灵敏度		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
AG	3.513 1			1.841 1		
BC		5.950 3	3.005 8		2.543 7	1.285 0
BCG		6.027 9	3.472 1		2.697 5	1.553 8
ABC	2.672 4	3.283 2	3.163 7	1.222 0	1.376 4	1.352 5

4.4 抗邻线故障影响能力

新能源场站一般经多条线路汇集后再经过柔直系统送出，而相邻线路的故障也会导致柔直流换流器启动低穿策略，因此要验证相邻线路故障时保护是否误动。

为了验证所提保护是否会发生误动，建立同塔双回线路下的相邻线路故障模型，于相邻线路 f_4 处设置单相接地故障、两相故障、两相接地故障以及三相对称接地故障，得到仿真结果如图 9 所示。

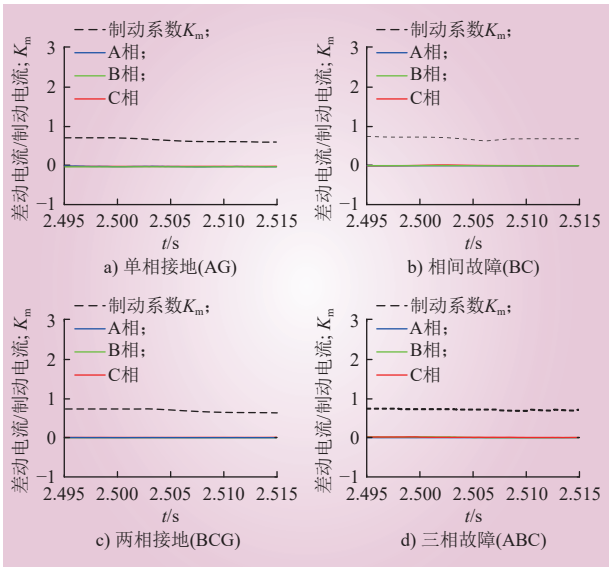


图 9 邻线故障影响下所提保护动作性能

Fig. 9 Performance of the proposed protection under the influence of adjacent line faults

因为相邻线路故障同样会导致换流器启动降压限流控制，同时保护门槛将自适应随着控制而改变，但是此时无论在何种故障情况下的灵敏度系数都极小，不会超过保护门槛，因此在同塔双回线路下的相邻线路故障后所提保护具有较高的可靠性，不会发生误动。

5 结论

本文针对新能源场站与柔直流换流器之间的交流输电线路中传统差动保护灵敏度降低的问题，提出了计及控保协同的自适应电流差动保护方法，经仿真测试，得到如下结论。

1) 所提保护可以准确判断区内外不同类型故障，在保证可靠性的前提下大大提高了差动保护

的速动性和灵敏度。与传统差动保护原理相比，灵敏度提高两到三倍；

2) 该方法在 $100\ \Omega$ 过渡电阻故障条件下仍能可靠动作，且具有抗邻线故障影响的能力，适用性较好；

3) 该方法结合柔直换流器控制参考值与保护判据，通过引入故障穿越策略的参考电压系数，实现了自适应调整纵联保护动作门槛，逻辑简单且易实现，工程实用性好。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划 2035 年远景目标纲要 [N]. 人民日报, 2021-03-13(001).
- [2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806–2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806–2819.
- [3] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461–475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, *et al.* New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461–475.
- [4] 袁志昌, 郭佩乾, 刘国伟, 等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述 [J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1460–1475.
YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, *et al.* Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1460–1475.
- [5] HUANG N, FAN C J, JIANG S. Research of protection for AC transmission lines based on characteristic of grid-side inverter[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(16): 3240–3245.
- [6] 赖逸洋, 王增平, 王彤. 电流差动保护在柔直接入的交流电网中适应性分析及改进措施研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 145–154.
LAI Yiyang, WANG Zengping, WANG Tong. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 145–154.
- [7] LIANG Y Y, HUO Y T, ZHAO F. An accelerated distance protection of transmission lines emanating from MMC-HVdc stations[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(5): 5558–5570.
- [8] 余越, 王聪博, 沙兆义, 等. 基于矩阵突变特征的风电经柔直送出交流线路保护 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5441–5450.
YU Yue, WANG Congbo, SHA Zhaoyi, *et al.* AC transmission line protection for wind farms integrated with VSC-HVDC system based on matrix mutation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5441–5450.
- [9] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018–5027, 5221.
CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, *et al.* Waveform similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018–5027, 5221.
- [10] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012–2019, 2216.
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, *et al.* Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012–2019, 2216.
- [11] DANTAS D T, PELLINI E L, MANASSERO G. Time-domain differential protection method applied to transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(6): 2634–2642.
- [12] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西, 等. 行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 184–191.
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi, *et al.* Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(19): 184–191.
- [13] 郑玉平, 吕鹏飞, 李斌, 等. 新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 3–15.
ZHENG Yuping, LYU Pengfei, LI Bin, *et al.* Problems faced by relay protection in new power system and their solution ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 3–15.
- [14] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于控保协同的多端柔性直流配电系统线路保护 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2559–2568.
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, *et al.* Line protection for multi-terminal flexible DC distribution system based on control and protection coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2559–2568.
- [15] 戴志辉, 吴桐, 何静远, 等. 基于控保协同的有源配网主动注入式保护方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 94–103.

- DAI Zhihui, WU Tong, HE Jingyuan, *et al.* An active distribution network active injection protection method based on control-protection coordination[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(3): 94–103.
- [16] 康涛, 翁汉琨, 林湘宁, 等. 考虑储能系统控保协同体系的光伏场站送出线路突变选相能力恢复策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(11): 4273–4286.
- KANG Tao, WENG Hanli, LIN Xiangning, *et al.* Phase selection capacity recovery strategy for transmission line of photovoltaic station based on the control and insurance cooperative of energy storage system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(11): 4273–4286.
- [17] 彭放, 高厚磊, 郭一飞, 等. 构网逆变电源故障穿越控制策略及其对保护影响的研究综述[J]. *电网技术*, 2024, 48(9): 3673–3685.
- PENG Fang, GAO Houlei, GUO Yifei, *et al.* A review of fault ride-through control strategies of grid-forming inverter-based resources and the influence on protection[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(9): 3673–3685.
- [18] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(20): 20–32.
- ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, *et al.* AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(20): 20–32.
- [19] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [20] 张沛超, 高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(1): 77–82.
- ZHANG Peichao, GAO Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(1): 77–82.
- [21] 杨国生, 樊沛林, 王聪博, 等. 基于能量分布的新能源场站送出线路纵联保护[J]. *电网技术*, 2023, 47(4): 1415–1422.
- YANG Guosheng, FAN Peilin, WANG Congbo, *et al.* Pilot protection based on energy distribution for transmission line connected to renewable power plants[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(4): 1415–1422.
-
- 作者简介:**
张博(1999—), 男, 硕士研究生, 从事新能源电力系统保护与控制技术研究, E-mail: zbocepri@163.com;
王聪博(1990—), 男, 通信作者, 博士, 从事电力系统保护与控制技术研究, E-mail: wangcongbo107@163.com。
- (责任编辑 许晓艳)

Adaptive Current Differential Protection Method Considering Control and Protection Coordination

ZHANG Bo, WANG Congbo, ZHAN Rongrong, YU Yue

(National Key Laboratory of Grid Security (China Electrical Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: The VSC-HVDC transmission system for large-scale new energy has become a typical scenario in China's new power system. However, the transmission line between the new energy station and the flexible direct converter is special with its both sides being power electronic devices, and affected by different converter control strategies, the short-circuit current waveform is seriously distorted, which reduces the sensitivity of traditional longitudinal protection and increases the risk of rejection. Therefore, an adaptive current differential protection method considering control and protection coordination is proposed. Based on the fault ride through strategy of the VSC-HVDC, the fault current characteristics on both sides are analyzed, and an adaptive protection criterion for control and protection coordination is constructed by combining the control reference value of the converter and the protection criterion. Finally, a VSC-HVDC transmission system model for new energy is built based on PSCAD, and the performance of the proposed protection is verified by simulation. The results show that the proposed protection can quickly identify different fault types in the fault region with the sensitivity improved by 2~3 times compared with the traditional differential protection principle, which can meet the requirements of the new power systems for protection sensitivity and reliability.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (No.JB83-23-005).

Keywords: AC lines; fault ride through; control and insurance coordination; VSC-HVDC