

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200735

应对线路差动主保护丢失的后备保护应急方案

王英英^{1,2}, 金明亮^{1,2}, 王玉龙³, 谢俊^{1,2}, 赵青春³, 陈祥文^{1,2}

(1. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430000; 2. 柳焕章劳模创新工作室, 湖北 武汉 430000;
3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 超高压输电系统中, 存在单间隔或多间隔线路差动主保护丢失后后备保护在线路区内故障时可能存在动作延时长、失配导致的误动或拒动风险。针对单间隔或多间隔线路保护装置闭锁、通信设备异常、通信通道故障导致的线路差动主保护丢失工况, 分析了后备保护的适应性, 提出了基于站域开关量信息采集来判断不同工况导致主保护丢失的识别逻辑。并制定了基于站域共享信息的后备保护主动和被动加速自调整应急优化方案, 缩短后备保护的動作时间和自适应调整后后备保护的動作范围, 并通过仿真验证。仿真表明, 优化后的应急后备保护实现线路差动主保护丢失后由距离保护和零序保护快速有序切除故障。

关键词: 主保护丢失; 后备保护; 闭锁; 加速自调整; 通道故障; 差动

Emergency plan for backup protection against loss of line differential main protection

WANG Yingying^{1,2}, JIN Mingliang^{1,2}, WANG Yulong³, XIE Jun^{1,2}, ZHAO Qingchun³, CHEN Xiangwen^{1,2}

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430000, China; 2. Lamor Innovation Studio of Liu Huanzhang, Wuhan 430000, China; 3. NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In a UHV transmission system, there is an abnormal working condition in which the single or multiple interval line differential main protections are lost. If the fault protection in the line area after the main protection is lost, there may be a long action delay, mismatch or mis-operation risk caused by mismatch. The adaptability of back-up protection is analyzed in view of the loss of line differential main protection caused by single or multiple line protection device blocking, communication equipment abnormalities and communication channel failure. An identification logic, for judging the loss of main protection caused by different operating conditions, based on the collection of switch information in the substation domain is proposed. An emergency optimization plan for active and passive acceleration self-adjustment of backup protection based on the shared information of the station domain is formulated to shorten the operation time of the backup protection and adaptively adjust the range of the backup protection. This is verified by simulation. The simulation shows that the optimized emergency backup protection shows that distance protection and zero sequence protection can quickly and, in an orderly fashion, remove the faults after line differential main protection is lost.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Central China Branch (No. SGH80000DKJS1900219) and the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-201919020A-0-0-00).

Key words: loss of main protection; backup protection; blocking; acceleration self-adjustment; channel failure; differential protection

0 引言

随着高压输电线路的建设和通信技术的快速发

展, 采取强化主保护、后备保护整定简化和不完全配合的策略^[1-4]。但保护装置的闭锁、复用通道通信设备失电、通信通道故障等极端工况下可能会导致变电站单间隔、多间隔甚至全站线路失去差动主保护, 这些极端工况下因后备保护简化或失配而导致在线路故障时拒动或越级动作^[5-9], 给电网的稳定性和设备安全性造成巨大损失。

基金项目: 国家电网公司华中分部科技项目资助 (SGH80000DKJS1900219); 国家电网公司总部科技项目资助 (5100-201919020A-0-0-00)

近年来, 全站失电和通道故障再故障的极端工况时有发生, 二次系统隐性故障可能引发连锁故障^[10-13], 故障线后备保护可能拒动或动作时延长, 邻线后备保护可能误动或没按远后备配置。国内外开展了相关后备保护在各种复杂工况下的优化研究, 文献[14]研究了线路传输通道异常时单纯加速后备保护II段的策略, 但多间隔或全站主保护失去时存在线路区内故障相邻线后备保护加速越级误动的风险。文献[15-17]研究了变电站内保护闭锁下进行保护定值校核的策略研究和定值风险的评估, 但对于定值的实时性和可靠性调整依赖人工或通信网络而增加运维难度。文献[18-22]针对后备保护的冗余优化、全站保护直流失电和传统间隔保护失去等多个方面提出了冗余的广域、区域保护和主子站系统概念, 该方案借助额外的通信手段进行数据传输来优化区域后备保护, 导致建设成本高且通信要求高。

针对线路差动主保护丢失的多种电网极端工况, 本文通过站域开关量信息实现导致差动保护丢失的极端工况识别和判别, 并完成后备保护的主动和被动加速配合策略, 同时根据主保护丢失工况情况实现距离保护的自适应调整范围策略, 解决极端工况下区域内线路后备保护的长延时动作、无序误动风险和灵敏度不够问题, 提高后备保护应急快速切除故障的能力。

1 后备保护适应性分析

1.1 后备保护整定原则

对于 220~750 kV 电压等级的线路保护而言,

一般接近后备原则进行整定。距离保护 II 段首先考虑灵敏度, 同时和邻线的 I 段或主保护进行整定配合, 若考虑时间配合一般时间定值在 0.5~1.7 s, 简化后部分地区将 II 段动作时间一致性整定^[16]。距离保护 III 段根据规程要求灵敏度较大, 同时和邻线距离保护 II 段或 III 段进行配合整定, 当电网结构满足配合条件时才作为邻线的远后备保护, 对远后备的灵敏系数不作要求, 动作时间躲过最大振荡周期, 一般在 1.7~4.0 s^[23-26]。

零序保护灵敏段整定时线路对侧母线金属性故障有灵敏度, 同时与邻线路对应灵敏段整定配合, 时间不小于 1.0 s。零序保护末段用于后备距离保护的补充和切除区内过渡电阻故障, 一次整定值一般取 300 A, 与邻线路对应末段配合整定, 起始时间躲过最长非全相运行时间^[23-26]。

现有的后备保护考虑完全配合时则动作时间长, 但失配时随电网运行方式的调整后备保护选择性混乱。

1.2 主保护丢失后备保护适应性分析

根据现有整定原则的分析, 后备保护不能随电网结构调整而适应保护范围和选择性要求, 进而导致复杂电网极端工况下失配或越级动作。图 1 中线路 L1—L3 采用双重化配置线路差动保护, 同时各线路后备保护按照简化和近后备原则进行配置整定, 假定站 B 发生保护装置失电闭锁①、通信设备异常②和通道故障③等三种极端工况进行适应性分析。

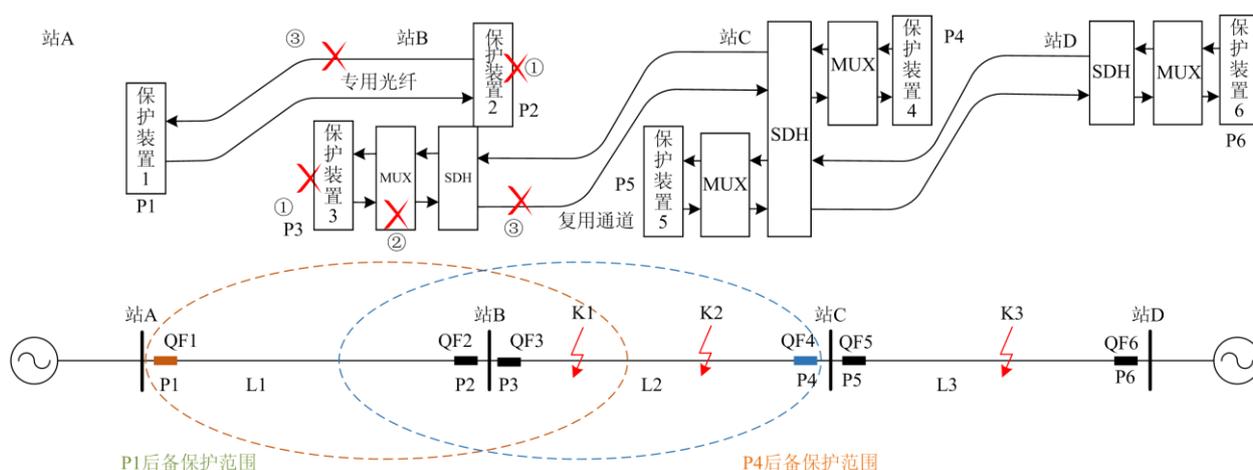


图 1 输电系统保护配置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of power transmission system protection configuration

1) 站B保护装置闭锁

图 1 中当站 B 保护 P3 直流失电, 线路 L2 的差

动主保护丢失, 线路 L2 发生区内故障时则寄希望保护 P1 和 P4 快速切除故障。图 1 中若故障点 K1

在保护 P1 后备保护范围内，若不做特殊处理则按正常配合延时动作。故障切除较慢可能导致设备的严重烧毁。若故障点在 K2，则保护 P4 能切除故障但保护 P1 接近后备整定则不能切除故障可能拒动。当全站保护闭锁时同样存在相邻站后备保护拒动或动作慢的问题。

2) 站B通信设备异常

线路L2采用复用通道，站B通信直流电源失电时则该线路失去主保护。若K1故障点在后备II段范围内，其动作时间至少0.5 s，当涉及多级差时则动作延时更长，不利于故障迅速隔离。但是由于主保护的丢失，线路L2故障可能会同时进入相邻线P1和P6的后备保护范围，时间整定一致或失配时相邻线会越级误动而扩大故障切除范围。若全站线路保护均为复用通道，通信设备异常导致全站线路主保护丢失，后备保护时间按级差整定则动作延时长，若动作时间加速缩短到一样时可能导致邻线后备保护越级误动，存在严重失配风险。对于专用光纤差动而言主保护不受影响。

3) 通道故障

站B线路L2通道故障且区内发生故障在后备II段范围内，当涉及多级差延时则保护动作延时长，不利于故障快速切除。当站B全站通道均故障，则线路L1和L2主保护均失去，线路L1或L2故障可能会进入相邻线的后备保护范围，时间整定一致或失配时相邻线会越级误动，同时切除时间可能较长。

2 后备保护应急优化方案

不管保护闭锁、通信设备异常或者通道故障导致的线路差动主保护后，按现有的简化和近后备保护整定方案均存在动作延时长、拒动或误动的风险。在电网极端工况下，均需要开关量的采集和判别，根据极端工况的判别实现后备保护的保护区和动作时间的自调整。

变电站设计规范中要求保护电源和通信电源独立，但极端工况下存在直流失电的可能，从而开关量的采集设备采用保护电源和通道电源双电源供电模式用于极端工况的判别。

2.1 极端工况的判别

1) 站内保护闭锁判别

当保护装置闭锁时各间隔双重化线路保护输出“装置闭锁”和“通道异常”信号，保护装置通过误码和丢帧情况进行通道异常判别。若全站保护失电时则站内直流屏输出“保护直流失电”信号，从而基于站域开关量采集判别出站内线路保护闭锁，其判别逻辑见图2。

图2中站域开关量信号满足后经延时T1输出“站内保护闭锁信号”，将该信号发送给各间隔线路保护装置，T1躲过保护装置修改定值的闭锁重启时间，一般小于500 ms。

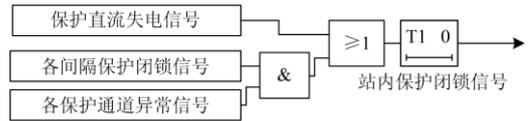


图 2 站内线路保护间隔闭锁判别

Fig. 2 Discrimination of blocking of line protection interval in station

2) 站内通信设备异常判别

当复用通道MUX通信闭锁时各间隔双重化MUX设备输出“装置闭锁”信号，同时对应间隔保护装置输出“通道异常”信号，若全站通信电源失电时则站内通信直流屏输出“通信电源失电”信号，从而判别出站内通信设备闭锁。其判别逻辑见图3。

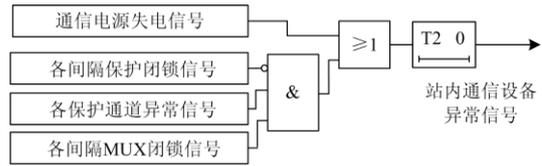


图 3 站内线路通信设备异常判别

Fig. 3 Abnormal discrimination of line communication equipment in the station

图3中站域开关量满足后经T2延时，T2为站内通信异常信号确认延时，躲过MUX设备重启时间。通信设备的异常使得线路的主保护丢失但保护装置的自身后备保护功能逻辑正常。

3) 通道故障判别

外部通道异常故障时，当两个站之间为双回或多回运行时近似认为单间隔通道故障。若该站连接多个站时，则出现多间隔通道异常认为多间隔通道故障，多间隔的判别便于保护级差配合，判别逻辑见图4。

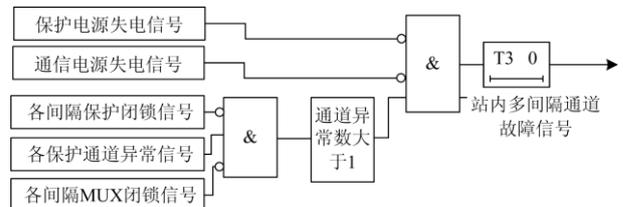


图 4 站内多间隔线路通道故障判别

Fig. 4 Fault identification of multi-interval line channels in the station

图 4 中保护和通信电源均不失电, 只有通道异常信号, T3 为站内多间隔通道故障信号确认延时, 一般取 1 s。该通道故障排除装置闭锁和通信设备异常导致的通道异常, 通道故障时线路的主保护丢失但保护装置的自身后备保护功能逻辑正常。

通过站内开关量的采集和逻辑判断从而区别保护闭锁、通信设备异常和通道故障, 给线路保护的后备保护配置和优化奠定了基础。

2.2 后备保护的应急加速自调整策略

目前的线路差动保护能够实现自身通道的检测且通道传输容量扩大, 结合电网极端工况的判别从而可以实现线路差动主保护丢失后相邻区域内线路后备的加速自调整, 保证与邻线的配合, 同时加快故障隔离速度。

为了保证通用性, 线路保护中增加“后备自调整控制字”用于在标准线路保护装置上投退该功能, 增加“站内保护闭锁信号”、“站内通信设备异常信号”和“站内多间隔线路通道故障信号”开入来实现不同的后备自调整策略, 同时增加“远后备距离保护定值”用于电网极端工况下自适应调整距离保护范围。

1) 站内线路保护闭锁后备保护策略

以图 1 中站 B 发生保护闭锁为例, 当站 B 全站保护闭锁或部分保护闭锁, 站 A 保护 P1 和站 C 保护 P4 后备保护需要自适应加速。当站 B 部分间隔保护闭锁时站内主保护不丢失的线路保护将收到“站内保护闭锁信号”, 并通过光纤传输给对侧, 触发对侧后备保护优化, 间隔闭锁的对侧线路保护根据通道异常和站内极端工况判别情况进行被动自适应加速, 相邻站的后备保护被动自适应加速触发逻辑如图 5。

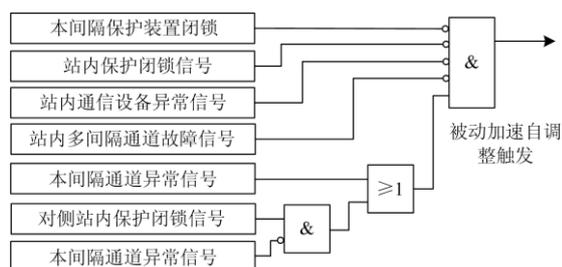


图 5 保护被动加速自调整触发逻辑

Fig. 5 Protection passive acceleration self-adjustment trigger logic

结合图 5 中保护被动加速自调整触发逻辑, 其条件为本间隔线路保护装置不闭锁, 站内没有保护闭锁、通信设备异常和多间隔通道故障, 同时本间隔通道异常或对侧站内保护闭锁信号。当站 B 有间

隔线路保护闭锁, 站 A 和站 C 的保护 P1 和 P4 则需要自适应加速调整后备策略, 距离保护 II 段加速至 t_{22} , 线路对侧母线金属性故障满足规程灵敏度要求。距离保护 III 段动作时间加速至 t_{24} , 保护范围扩大至邻线对侧母线, 距离 III 段阻抗定值自适应改为整定的“远后备距离保护定值”。零序 II 段加速至 t_{L2} , 零序 III 段加速至 t_{L4} 。保证快速切除区内故障的同时, 加速后动作时间需躲过正常相邻线的主保护和失灵保护动作时间, $t_{22}=t_{L2}=0.5$ s, t_{24} 躲过线路最长振荡时间取 1.8 s, t_{L4} 与 t_{24} 保留一个时间级差取 0.2 s。

2) 站内通信设备异常闭锁后备保护策略

以图 1 中站 B 发生 MUX 故障为例, 不管站 B 全站线路主保护丢失或部分间隔线路主保护丢失, 站 B 通信设备异常间隔线路后备保护与丢失主保护的相邻线后备保护动作时间需要进行配合和加速。站 B 中线路保护装置将收到“站内通信设备异常信号”, 结合线路保护装置的通道异常信号进行主动自适应加速触发, 自适应加速触发逻辑如图 6, 通道异常的对侧线路保护装置进行被动自适应加速触发, 逻辑同图 5。被动加速比主动加速多一个时间级差从而实现站内保护与相邻站保护时间配合。



图 6 保护主动加速自调整触发逻辑

Fig. 6 Protection active acceleration self-adjustment trigger logic

图 6 的主动加速自调整触发条件为本间隔保护不闭锁但通道异常, 且站内通信设备异常或站内存在其他间隔通道异常。结合图 5 和图 6 中保护被动和主动加速自调整触发逻辑, 图 1 中假设站 B 中线路均是复用通道且通信电源失电, 站 B 中保护 P1 与保护 P3 配合, 保护 P4 与保护 P2 配合, 则保护 P1、P2、P3、P4 均需要自适应加速。保护 P2 和 P3 距离保护 II 段加速至 t_{21} , 距离保护 III 段加速至 t_{23} , 距离阻抗定值按现有整定原则整定, 零序 II 段加速至 t_{L1} , 零序 III 段加速至 t_{L3} 。保护 P1 和 P4 的自适应加速策略同图 5, 为了保证区内故障的切除速度, 同时邻线与本线后备保护有配合关系, 则动作时间需满足 $t_{21} < t_{22} < t_{23} < t_{24}$ 、 $t_{L1} < t_{L2} < t_{L3} < t_{L4}$ 、 $t_{23} < t_{L3}$ 、 $t_{24} < t_{L4}$, 为了保留级差 $t_{21}=t_{L1}=0.3$ s, $t_{23}=1.6$ s, t_{L3} 与 t_{23} 保留一个时间级差取 1.8 s。

3) 站内多间隔线路通道故障后备保护策略

以图 1 中站 B 发生通道故障为例, 站 B 存在多间隔线路主保护丢失时线路的后备功能没有缺失, 站 B 中通道故障间隔的线路后备保护动作延时需小于相邻 A、C 变电站中失去主保护线路的后备保护加速时间。站 B 中线路保护装置将收到“站内多间隔通道故障信号”, 结合线路保护装置的通道异常信号进行主动自适应加速触发, 自适应加速触发逻辑见图 6, 通道异常的对侧线路保护装置进行被动自适应加速触发, 逻辑见图 5。

结合图 5 和图 6 中保护被动和主动加速自适应调整触发逻辑, 站内多间隔线路通道故障后备保护策略同站内通信设备异常闭锁后备保护策略, 但只有单间隔通道故障时执行被动自适应加速触发。

针对电网中出现的线路保护装置闭锁、通信设备异常和通道故障等极端工况, 提出了后备保护的主动和被动加速自适应调整触发逻辑, 主动加速与被动加速之间存在 0.2 s 的时间级差, 从而保证极端工况变电站相邻变电站内线路后备保护之间的配合。从图 5、图 6 和对应的后备保护策略, 当差动主保护丢失再故障, 后备保护配合并加速隔离故障, 同时保证了站内多间隔线路主保护丢失后站内保护装置与对侧站内保护之间动作时间和保护范围配合, 避免了故障范围扩大的风险和后备保护失配导致的拒动风险。

3 仿真试验

在标准超高压线路保护上实现了上述后备保护加速自适应调整触发逻辑, 同时对线路保护的零序后备动作时间和动作范围, 根据触发逻辑进行了

自调整, 另外开发了双电源采集开关量的极端工况判别装置。对保护逻辑和后备保护策略进行了系统性仿真试验。

根据图 1 建立仿真试验环境, 在站 A—站 D 每个站配置一台双电源开关量采集装置, 线路 L1—L3 的单位正序阻抗 $Z_1 = 0.02 + j0.28 \Omega/\text{km}$ 、单位零序阻抗 $Z_0 = 0.19 + j0.84 \Omega/\text{km}$, 线路 L1—L3 各自长 100 km、40 km 和 60 km。线路 L1—L3 的保护 P1—P6 均投入差动保护功能, 后备保护距离 I 段按 70% 可靠性整定, 距离 II 段按简化考虑灵敏度整定, 其他定值按配合整定, 保护一次定值如表 1。

表 1 仿真试验保护定值一次值

定值	单位	P1	P2	P3	P4	P5	P6
距离 I 段	Ω	19.6	19.6	7.9	7.9	11.8	11.8
距离 II 段	Ω	37.9	37.9	16.8	16.8	23.6	23.6
	s	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
距离 III 段	Ω	38.9	38.9	27.3	35.5	27.6	27.6
	s	2.2	1.8	2.0	2.0	1.8	2.2
零序 II 段	A	860	600	720	720	600	860
	s	1.6	1.2	1.4	1.4	1.2	1.6
零序 III 段	A	300	300	300	300	300	300
	s	2.8	2.4	2.6	2.6	2.4	2.8
远后备	Ω	51.1	51.1	36.5	51.1	36.5	36.5

模拟站 B 不同类极端工况下线路 L2 不同位置的故障, 选取的故障点距离变电站 B 母线占线路 L2 全长的 20%、80% 和 100%, 记录不同故障点 P1—P6 后备保护在优化前后的动作情况, 通过“后备自调整控制字”投退实现优化前后的比较, 动作结果见表 2—表 4。

表 2 L2 线路 20% 处故障时保护动作行为

Table 2 Protection action when L2 line has a short circuit fault at 20%

故障点	极端工况	保护动作行为	P1/ms	P2/ms	P3/ms	P4/ms	P5/ms	P6/ms
20% 处	P3 保护闭锁	优化前	824	—	—	822	—	—
		优化后	528	—	—	523	—	—
	P2 和 P3 保护闭锁	优化前	825	—	—	822	—	—
		优化后	526	—	—	522	—	—
	L2 线路 MUX 故障	优化前	—	—	22	824	—	—
		优化后	—	—	21	524	—	—
	L1 复用时全站 MUX 故障	优化前	—	—	23	825	—	—
		优化后	—	—	24	523	—	—
	L2 通道故障	优化前	—	—	22	822	—	—
		优化后	—	—	22	523	—	—
	L1 和 L2 通道故障	优化前	—	—	23	824	—	—
		优化后	—	—	24	523	—	—

表 3 L2 线路 80%处故障时保护动作行为

Table 3 Protection action when L2 line has a short circuit fault at 80%

故障点	极端工况	保护动作行为	P1/ms	P2/ms	P3/ms	P4/ms	P5/ms	P6/ms
80%处	P3保护闭锁	优化前	829	—	—	19	—	—
		优化后	529	—	—	20	—	—
	P2和P3保护闭锁	优化前	826	—	—	19	—	—
		优化后	526	—	—	21	—	—
	L2线路MUX故障	优化前	829	—	823	21	—	—
		优化后	—	—	324	20	—	—
	L1复用时全站MUX故障	优化前	829	—	824	20	—	—
		优化后	—	—	323	22	—	—
	L2通道故障	优化前	828	—	824	21	—	—
		优化后	—	—	523	21	—	—
	L1和L2通道故障	优化前	829	—	822	22	—	—
		优化后	—	—	322	21	—	—

表 4 L2 线路 100%处故障时保护动作行为

Table 4 Protection action when L2 line has a short circuit fault at 100%

故障点	极端工况	保护动作行为	P1/ms	P2/ms	P3/ms	P4/ms	P5/ms	P6/ms
100%处	P3保护闭锁	优化前	1 613	—	—	23	—	—
		优化后	515	—	—	20	—	—
	P2和P3保护闭锁	优化前	1 616	—	—	22	—	—
		优化后	516	—	—	20	—	—
	L2线路MUX故障	优化前	—	—	828	19	—	—
		优化后	—	—	326	20	—	—
	L1复用时全站MUX故障	优化前	—	—	827	22	—	—
		优化后	—	—	326	21	—	—
	L2通道故障	优化前	—	—	827	20	—	—
		优化后	—	—	525	21	—	—
	L1和L2通道故障	优化前	—	—	828	21	—	—
		优化后	—	—	326	20	—	—

表 2 中优化后的后备保护动作时间减少 300 ms; 表 3 中因 MUX 故障或通道故障时优化前保护 P1 存在越级动作情况, 优化后均由保护 P3 主动加速, 在 330 ms 左右切除, 避免相邻线越级误动; 表 4 中保护闭锁时相邻线按正常系统整定时动作时间在 1.5 s 以后, 优化后后备保护的動作时间均缩短, 若定值整定较小时则会拒动, 远后备保护定值保证了后备灵敏度。另外模拟 L3 线路故障时站 B 不同极端工况下的动作行为, 后备保护均可靠不动作。

站 B 在不同的极端工况下, 当线路 L3 发生故障时保护 P5 和 P6 均由差动保护可靠切除, 保护 P1—P4 均不动作。从表 2—表 4 的保护动作结果表明, 优化前按现有的后备保护原理和整定原则, 不同极端工况下的线路故障后备保护存在切除故障时间长、动作越级或拒动问题。通过开关量信息识别出保护闭锁、通信设备异常和通信通道故障等极端工况后, 后备保护能加速切除线路故障, 降低了后

备保护越级动作风险。

4 结论

电网中线路保护装置闭锁、通信设备异常和通道故障等极端工况的发生, 变电站中单间隔、多间隔甚至全站线路丢失主保护, 本文提出了线路主保护丢失的极端工况识别和后备保护应急加速自调整策略。

(1) 在变电站中引入双电源站域开关量采集装置, 实现了对保护装置闭锁、通信设备异常和通道故障导致的单间隔、多间隔线路主保护丢失的判别, 进而给后备保护的应急策略提供外部决策信息。

(2) 根据站内极端工况的判别, 提出了线路保护主动和被动自适应后备保护加速触发机制, 实现因极端工况丢失主保护的站内线路保护与相邻站的线路保护在后备保护的保護范围和動作时间上的合理配合。仿真试验表明后备保护应急策略缩短了故障

线后备保护和邻线远后备保护的故障切除时间，避免了邻线动作时间长或越级误动的出现。

(3) 由于本文所选取线路主保护丢失的工况不能涵盖所有电网极端工况，因此下一步工作将主要围绕电网中的其他极端工况进行后备保护的研究。

参考文献

[1] 陈祥文, 谢俊, 王玉龙, 等. 超高压线路距离保护自适应方案的研究[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 132-140.
CHEN Xiangwen, XIE Jun, WANG Yulong, et al. Study on scheme of self-setting for distance protection of EHV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 132-140.

[2] 李会新, 谢俊, 王玉龙, 等. 超高压输电线路保护装置自适应整定及性能优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 148-154.
LI Huixin, XIE Jun, WANG Yulong, et al. Adaptive-setting and optimization of performance for EHV transmission line protection device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 148-154.

[3] AHMADINIA M, SADEH J. A modified wide-area backup protection scheme for shunt-compensated transmission lines[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 183: 1-9.

[4] 陈梦骁. 输电线路距离后备保护的整定优化及区域后备保护方案研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
CHEN Mengxiao. Research on setting calculation of distance relays and a regional-area backup protection scheme for transmission lines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[5] 盖午阳. 高压输电系统分布式广域后备保护系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
GAI Wuyang. Research on distributed wide-area back-up protection system for high-voltage transmission system[D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[6] 李一泉, 王增超, 刘玮, 等. 相邻变电站交互型广域后备保护应对站用直流失压方法[J]. 浙江电力, 2019, 38(6): 17-20.
LI Yiquan, WANG Zengchao, LIU Wei, et al. A method of wide-area backup protection based on interaction with adjacent substation for substation's DC power loss[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(6): 17-20.

[7] 任罡, 李世倩, 季宁, 等. 智能电网层次化广域保护系统的关键技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(17): 93-98.
REN Gang, LI Shiqian, JI Ning, et al. Key technologies of hierarchical wide-area protection system for smart grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020,

57(17): 93-98.

[8] 刘琨, 曹润彬, 董新洲. 避免事故过负荷条件下远后备保护不合理动作的解决方案[J]. 广东电力, 2015, 28(7): 78-83, 108.
LIU Kun, CAO Runbin, DONG Xinzhou. Solution to avoid unreasonable action of remote backup protection under post-fault overload condition[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(7): 78-83, 108.

[9] 金能, 林湘宁, 徐宁, 等. 应对直流电源丢失问题的中压变电站二次系统性能提升方案及远方冗余保护新判据研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5479-5489.
JIN Neng, LIN Xiangning, XU Ning, et al. Research on performance improvement strategy of secondary system and novel criterion of remote redundancy protection coping with DC power loss within MV substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5479-5489.

[10] 周虎兵, 张焕青, 杨增力, 等. 二次系统隐性故障的多指标综合风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 120-127.
ZHOU Hubing, ZHANG Huanqing, YANG Zengli, et al. Multi-criteria integrated risk assessment of secondary system hidden failures[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 120-127.

[11] 张焕青, 雷鸣, 严利雄, 等. 面向智能变电站继电保护可靠性评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 57-62.
ZHANG Huanqing, LEI Ming, YAN Lixiong, et al. Research on reliability evaluation method of relay protection for smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 57-62.

[12] 张玮. 防止大电网连锁跳闸事故的广域后备保护策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
ZHANG Wei. Study on wide area backup protection control strategy against cascading outages[D]. Jinan: Shandong University, 2008.

[13] MOUSAVI S A E, CHABANLOO R M, FARROKHIFAR M, et al. Wide area backup protection scheme for distance relays considering the uncertainty of network protection[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 1-7.

[14] 杨向飞, 刘革明, 朱小红, 等. 光纤通道异常时加速线路II段后备保护技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 123-126.
YANG Xiangfei, LIU Geming, ZHU Xiaohong, et al. Technology of accelerating back-up protection of transmission line zone II with abnormal fiber channel[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 123-126.

- [15] 蒋航, 刘进, 熊俊, 等. 基于线路二次设备实时信息的保护定值风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 97-103.
JIANG Hang, LIU Jin, XIONG Jun, et al. Research on relay protection setting risk assessment based on real-time information of line secondary facility[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 97-103.
- [16] BOLANDI T G, YAZDANINEJADI A. Vulnerability assessment approach for real-time and regional monitoring of backup protections: minimising number of GPS-based distance relays[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(14): 2687-2697.
- [17] YU Fangzhu, BOOTH C, DYSKO A, et al. Wide-area backup protection and protection performance analysis scheme using PMU data[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2019, 110: 630-641.
- [18] 戴光武, 谢华, 徐晓春, 等. 基于区域电网信息的变电站二次直流失电保护系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 117-121.
DAI Guangwu, XIE Hua, XU Xiaochun, et al. Protection system of substation's secondary DC power loss based on regional power grid information[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 117-121.
- [19] 戴光武, 谢华, 徐晓春, 等. 基于变电站二次直流失电的区域距离保护[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(3): 25-28.
DAI Guangwu, XIE Hua, XU Xiaochun, et al. Power loss area distance protection based on substation's secondary DC power loss[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3): 25-28.
- [20] 李正红, 丁晓兵, 冯宝成, 等. 基于 HSR 环网的“花瓣”型配电网区域备自投系统研究及应用[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 64-70, 77.
LI Zhenghong, DING Xiaobing, FEN Baocheng, et al. Research and application of regional power grid auto transfer system for the petal-shape distribution networks based on HSR network[J]. Electric Power, 2019, 52(8): 64-70, 77.
- [21] 王幸主, 戚宣威, 王松, 等. 变电站二次直流失电保护系统的可靠性分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(11): 40-45.
WANG Xingzhu, QI Xuanwei, WANG Song, et al. Reliability analysis for protection system of secondary DC power loss in substation[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(11): 40-45.
- [22] MALLIKARJUNA B, VARMA P V V, SAMIR S D, et al. An adaptive supervised wide-area backup protection scheme for transmission lines protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 229-244. DOI: 10.1186/s41601-017-0053-1.
- [23] 张健康, 粟小华. 超高压线路后备保护整定原则探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 120-125.
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua. Discussion on setting calculation of backup protection for EHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 120-125.
- [24] 张永浩, 龚仁敏, 王利强, 等. 220~750 kV 电网线路后备保护整定配合探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 136-142.
ZHANG Yonghao, GONG Renmin, WANG Liqiang, et al. Discussion on the coordination of backup protection relay settings in the 220~750 kV network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 136-142.
- [25] 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 559—2019[S]. 北京: 国家电网公司, 2019.
Setting guide for 200 kV~750 kV power system protection equipment: DL/T 559—2019[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2019.
- [26] 陈梦骁, 王慧芳, 何奔腾. 距离 II 段保护简化整定方法及区域式后备保护方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 151-156, 163.
CHEN Mengxiao, WANG Huifang, HE Benteng. A simplified method of distance relay zone-II setting calculation and a region-based backup relaying scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 151-156, 163.

收稿日期: 2020-06-28; 修回日期: 2020-09-12

作者简介:

王英英(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护分析及整定计算; E-mail: 15926317495@126.com

金明亮(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护分析及整定计算; E-mail: 875765209@qq.com

王玉龙(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护原理及产品开发。E-mail: wangyulong@nrec.com

(编辑 许威)