

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201612

输电线路二次自动重合闸方案的设计与验证

王震宇¹, 孙正伟¹, 王开白¹, 李卫星², 刘家庆¹, 王哲浩³, 晁璞璞³, 鲍斌¹

(1. 国家电网有限公司东北分部, 辽宁 沈阳 110180; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 哈尔滨工业大学电气工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 目前 220 kV 及以上电压等级线路二次重合闸的必要性与可行性研究尚无完善的技术路线, 对于二次重合闸成功与否的影响因素缺乏深入研究, 仅将其简单地归结为时间延迟的长短是不够合理的。针对这一问题, 以东北电网 220 kV 及以上电压等级输电线路为研究对象, 通过其历史故障信息、重合闸动作情况、以及手动强送结果的梳理和分析, 论述了输电线路采用二次自动重合闸的必要性。然后, 分析了输电线路重合闸成功与否的影响因素, 解析了二次重合闸的时序动作过程。最后, 设计了二次自动重合闸的重合方式、整定延时和动作逻辑, 形成了较完善的二次自动重合闸方案, 并进行了仿真验证。结果表明, 所提出的二次自动重合闸方案对 220 kV 和 500 kV 电压等级线路具有良好的适应性。

关键词: 输电线路; 故障统计; 二次重合闸; 方案设计

Design and verification of second automatic reclosing scheme for transmission lines

WANG Zhenyu¹, SUN Zhengwei¹, WANG Kaibai¹, LI Weixing², LIU Jiaqing¹, WANG Zhehao³, CHAO Pupu³, BAO Bin¹

(1. Northeast Branch of State Grid Corporation of China, Shenyang 110180, China; 2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. School of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: At present, there is no perfect technical framework for the necessity and feasibility study of secondary reclosing of 220 kV and above transmission lines. There is a lack of in-depth research on influencing factors of the success of secondary reclosing, and it is unreasonable to simply attribute the influencing factor to the length of time delay. This paper takes the 220 kV and above transmission lines of the Northeast Power Grid as the research object. By analyzing historical fault information, reclosing actions and manual reclosing results, the need for the second automatic reclosing of transmission lines is demonstrated. Then factors affecting the success of the reclosing of transmission lines are investigated, and the sequential action process of the second reclosing is analyzed. Finally, a secondary automatic reclosing strategy, including the reclosing method, setting delay and action logic of the secondary automatic reclosing, is proposed. The simulation results show that the proposed secondary automatic reclosing strategy has good adaptability to 220 kV and 500 kV transmission lines.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGDB0000DKJS2000104).

Key words: transmission lines; fault collection; secondary reclosing; optimal design

0 引言

东北电网历史故障统计数据表明, 架空线路故障超过 90% 是瞬时性的, 重合闸成功率有 70% 左右, 尚有约 20% 的故障可以通过合理选择二次重合闸方式^[1-2], 将故障由“重合不成功”转变为“重合成功”,

从而大大提高电力系统运行的安全性和供电可靠性, 并带来巨大的经济效益和社会效益^[3-5]。

二次重合闸仅在配电网馈线上有一定的应用, 在输电网中的研究和应用较少, 尚停留在理论研究和方案试验阶段^[6]。在配电网方面, 文献[7]结合广州地区配电系统, 对于含特别重要负荷的馈线, 提出了二次重合闸的配置思路。文献[8]分析了操作回路接线方式对二次重合闸功能的影响, 提出了接线方式测试方法。文献[9]以南瑞 10 kV 馈线保护装

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGDB0000DKJS 2000104)

置为例,研究了二次重合闸时间延迟整定方法。文献[10]引进智能算法,实现了二次重合闸参数设置的自整定。文献[11]根据两次故障电流之间的差异,提出了区分临时故障和永久故障的方法,减少二次重合闸对配电系统永久性故障的不利影响。文献[12-13]提出了多种配电线路自适应重合闸的实现方法,并完成了配电网故障的快速定位与隔离。文献[14]针对微电网不间断供电场景,通过线路自适应重合闸,减少瞬态故障电池能量储存系统的使用,优化了二次重合闸方案。文献[15]为快速识别并隔离直流极间故障、实现多端直流配电网的极间故障快速恢复,提出了一种基于直流断路器快速重合闸的故障隔离恢复策略。文献[16]针对分布式电源并入配电网的运行情况,着重分析了分布式电源对配电网电流保护、自动重合闸和电能质量的影响,分布式电源并网可能会导致线路电流保护失效、拒动或误动作,也会造成配电网的非同期重合和故障点电弧重燃,同时分布式电源会对其所接入的变电站母线和其他馈线的电压都有抬升作用。

在输电网层面,重合闸问题的研究多集中在自适应重合闸方面,对于二次自动重合闸的研究较少^[17-18]。自适应重合闸侧重于对瞬时性故障与永久性故障的鉴别,避免重合闸盲目动作,防止重合于永久性故障^[19-24],文献[20]通过线路的电压、电流、序分量来判断故障是否消失,对不同类型的线路分别设计了对应故障类型的自适应重合闸方案,文献[22]在线路跳闸后投入附加电容器,根据电容电流的变化特征,判断线路是否处于故障状态,提出了自适应重合闸策略。文献[23]为提高系统的稳定运行水平,会在大容量、远距离的电力系统中加装串补装置,但加装串补装置会破坏线路均匀性,使线路上出现严重操作过电压,严重危害电力设备的绝缘。分析了断路器合闸过程中绝缘衰减率 RDDS 和合闸时间分散性对合闸时刻的影响,得出不同关合特性下的最佳合闸时刻。对于不同类型的线路,自适应重合闸需要按照不同的故障类型分别设计相应的方案,具有定制性特征,目前尚无广泛认可的通用自适应重合闸方案^[24]。二次重合闸则是在一次重合闸失败后,装置经过一定的延时进行第二次自动重合闸,代替手动二次强送,克服手动合闸等待时间较长的问题,降低系统发生不利运行方式的可能性^[25-29]。文献[25]根据 220 kV 架空输电线路故障统计资料,论述了二次重合闸的概念。文献[26]设计了继电保护和自动重合闸的协调动作方案,一次重合闸之后主继电器接收来自快速傅里叶变换的线路电流采样数据,判断故障类型进而决定断路器的开断。文献[27]探讨了在高压、超高压输电线路采用二次自动重合闸的有益影响,介绍了华北电网超高压输电线路

上试点应用二次自动重合闸装置的设计思路。在此基础上,文献[28]论证了 500 kV 输电线路二次重合闸对华北电网的实用价值,设计了 500 kV 输电线路二次重合闸的动作逻辑,并在华北电网进行了试点运行。进一步地,文献[29]介绍了文献[27]设计的二次重合闸装置、动作逻辑与国网公司“六统一”规范要求的不匹配问题,对 500 kV 输电线路二次自动重合闸方案和装置设计进行了适应性改造。

综上,相较于自适应重合闸,二次自动重合闸改造成本低、实现简单、适应性强、可靠性高。但目前 220 kV 及以上电压等级线路二次重合闸的必要性与可行性研究尚无完善的技术路线,对于二次重合闸成功与否的影响因素缺乏深入研究,仅将其简单地归结为时间延迟的长短不够合理。针对这一问题,本文通过对东北电网 220 kV 及以上电压等级线路的历史故障情况、重合闸动作情况及强送结果的梳理和分析,论述了东北电网 220 kV 及以上电压等级线路进行二次重合闸的必要性,解析了二次重合闸的时序过程,分析了二次重合闸成功率的关键影响因素,设计了二次重合闸方案,通过仿真分析论证了其有效性。

1 二次重合闸的必要性

1.1 220 kV 线路故障情况分析

根据东北电网 2010—2019 年的 220 kV 输电线路故障日志,按故障原因进行分类统计,结果如表 1 所示。由表 1 可知,过去十年间,东北电网 220 kV 输电线路共计故障 570 次。其中,单相接地故障 526 次,约占总故障次数的 92.3%;相间短路故障 31 次,约占总故障次数的 5.4%;两相接地故障和三相短路故障共计 13 次,约占总故障次数的 2.3%。

表 1 220 kV 线路故障信息统计表

Table 1 Fault information statistics of 220 kV transmission lines

故障类型 故障原因	相间 故障/次	三相 故障/次	两相 接地/次	单相 故障/次
雷击	9	4	6	159
自然 鸟害	1	0	0	114
然 风偏	2	0	0	27
灾 雨雪	3	1	0	4
害 覆冰	2	0	0	3
山火	0	0	0	5
非 对树放电	1	0	0	15
自 漂浮物	2	0	1	39
然 吊车	0	0	0	13
灾 设备老化	3	0	0	31
害 记录不详	8	1	0	116
总计	31	6	7	526

在已知原因的故障中, 雷击引起的故障次数最多, 占比达到 40.1%; 鸟害引起的线路故障, 占比为 25.9%。同时也能看出, 由雷击、鸟害、风偏和山火导致的输电线路故障绝大多数是单相接地故障; 由雨雪和覆冰引起的故障, 单相和多相故障各占一半。

1.2 500 kV 线路故障情况分析

类似地, 搜集了 2010—2019 年东北电网 500 kV 输电线路的故障日志, 按照故障原因归类统计, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, 过去十年间, 500 kV 输电线路共计故障 410 次。其中, 单相接地故障共计 363 次, 约占总故障次数的 88.5%; 相间短路故障共计 45 次, 约占比 11.0%; 两相接地故障发生 2 次, 没有发生严重的三相短路故障。

在已知原因的故障中, 雷击引起的故障次数最多, 占比达到 37.0%; 鸟害、漂浮物和风偏占比均超过 10%。由雷击和鸟害所导致的输电线路故障基本全是单相接地故障; 由覆冰、漂浮物、风偏和雨雪引起的相间故障占比较高。其中, 由覆冰引发的 30 次故障中, 有 13 次为相间故障; 由雨雪导致的 6 次故障中, 有 5 次为相间故障。

表 2 500 kV 线路故障信息统计表

Table 2 Fault information statistics of 500 kV transmission lines

故障类型	相间故	三相故	两相接	单相故
故障原因	障/次	障/次	地/次	障/次
雷击	1	0	0	125
自然	1	0	0	52
灾	7	0	1	30
害	13	0	0	17
覆冰	1	0	0	15
山火	5	0	0	1
雨雪	0	0	0	7
对树放电	10	0	0	33
非自然	0	0	0	6
灾	1	0	0	15
害	6	0	1	62
记录不详				
总计	45	0	2	363

1.3 二次重合闸的必要性分析

根据东北电网 2010—2019 年的重合闸运行统计数据, 整理了一次重合闸和手动强送的成功率信息, 具体如表 3 和表 4 所示。

由表 3 和表 4 可知, 发生故障比例最高的是雷击和鸟害, 多为瞬时故障, 一次重合闸成功率较高, 达 90% 左右。故障发生后, 多数能在短时间内自动切除故障并恢复供电。部分极端情况下, 如连续雷击时, 容易发生重合闸失败而导致恶劣事故。

表 3 220 kV 线路重合闸动作情况

Table 3 Reclosing actions of 220 kV transmission lines

故障诱因	一次重合闸			手动强送			平均延时
	重合数	成功数	成功率	强送数	成功数	成功率	
雷击	101	96	95%	4	4	100%	37 min
鸟害	71	70	99%	0	0	—	—
漂浮物	27	15	56%	12	10	83%	44 min
雨雪	4	4	100	0	0	—	—
覆冰	2	1	50%	2	1	50%	25 min
风偏	7	2	29%	4	4	100%	24 min
吊车	12	2	17%	8	7	86%	67 min
设备老化	12	0	0%	5	0	0%	33 min
山火	4	1	25%	2	1	50%	41 min
对树放电	6	1	17%	5	5	100%	88 min
总计	246	192	78%	42	32	76%	—

表 4 500 kV 线路重合闸动作情况

Table 4 Reclosing actions of 500 kV transmission lines

故障诱因	一次重合闸			手动强送			平均延时
	重合数	成功数	成功率	强送数	成功数	成功率	
雨雪	1	0	0%	1	1	100%	49 min
雷击	124	111	90%	11	10	91%	58 min
鸟害	52	50	96%	2	2	100%	59 min
漂浮物	32	13	41%	12	10	83%	79 min
覆冰	17	9	53%	7	6	86%	170 min
风偏	28	6	21%	21	20	95%	48 min
吊车	6	0	0%	5	5	100%	58 min
设备老化	12	0	0%	7	1	14%	56 min
山火	13	2	15%	10	10	100%	62 min
对树放电	7	1	14%	5	5	100%	58 min
总计	292	192	66%	81	70	86%	—

对于漂浮物引发的故障, 一次重合闸成功率在 50% 左右。漂浮物将物体刮至线路带电部位与地电位之间, 破坏了空气的绝缘性能而发生绝缘击穿造成线路跳闸, 或是异物将线路相间短路。如果异物体积大, 一次短路电流不易烧断, 将造成重合闸不成功。如果异物较小, 一次短路电流已将异物烧断, 重合闸多会成功。

对于覆冰引发的故障, 铁塔和导线覆冰以后, 致使其荷载与迎风面积同时加大, 超出了杆塔的设计标准及其承受自然灾害的极限。每年的秋冬、冬春交替季节, 东北地区风力较大, 易造成导线舞动, 覆冰和风力共同作用, 使得一次重合闸的成功率较低。

对于风偏引发的故障, 通常在强风等恶劣的天气中发生, 强风的持续时间通常会超过重合闸时间, 使得重合闸成功率较低, 且多为两相或三相故障, 直接影响系统的安全稳定运行。

对于吊车作业引发的故障, 比较容易发现和清

除, 虽然一次重合闸成功率较低, 但二次重合闸的成功率较高。

对于设备老化引发的故障, 属于设备自身故障, 一次和二次重合闸的成功率均较低, 不适合进行二次自动重合闸。

对于山火和对树放电引发的故障, 一次重合闸的成功率较低, 手动合闸成功率较高。这些故障往往需在巡线时人为清除后才可成功合闸, 二次自动重合闸难以胜任。

另外, 由表 3 和表 4 可知, 东北电网 220 kV 及以上电压等级输电线路的 75% 以上的故障, 强送等待时间超过 30 min; 40% 的故障, 强送等待时间超过 60 min; 10% 的故障, 强送等待时间超过 120 min。采用二次自动重合闸, 能够克服手动合闸等待时间较长的问题, 降低电网发生多重故障的概率。

综上所述, 系统中存在大量一次重合闸因为延时较短而失败和手动强送等待时间过长的问题, 这些情况下如果采用合适的二次自动重合闸策略, 大多数故障都能被有效地清除, 减少停电时间和多重故障发生的概率, 提高电网安全稳定性。另外, 二次自动重合闸系统应具有基本的故障识别功能, 在应用初期或故障识别功能不够完善时, 可以根据历史故障统计规律, 有针对性地选择相应输电线路装设二次自动重合闸。

2 二次重合闸的时序过程解析

输电线路的重合闸设备分为一次设备和二次设备。一次设备主要指用来接通和开断电路的断路器, 二次设备主要指继电器等构成的保护与自动装置。统计结果表明, 东北某省 220 kV 及以上电压等级输电线路全部采用 SF₆ 型断路器, 其结构形式主要分为组合电器、罐式和瓷柱式三类, 操作机构主要分为液压碟簧、液压和弹簧三类, 具体如表 5 所示。

表 5 东北某省电网的断路器配置情况

Table 5 Configuration of circuit breakers in a province of northeast power grids in China

断路器类型		断路器台数	
		500 kV	220 kV
结构 型式	组合电器	212	204
	罐式	122	83
	瓷柱式	132	190
操作 机构	液压碟簧	242	118
	液压	81	49
	弹簧	143	310

断路器一次重合闸动作时序如图 1 所示。图 1 中: ΔT_1 为断路器分闸时间, 约为 30 ms; ΔT_2 为重合闸分合时间, 一般为 600 ms; ΔT_3 为断路器合分

时间, 一般在 50 ms 以内。

断路器二次重合闸动作时序如图 2 所示, 各个时间的含义与一次重合闸相同。其中, ΔT_4 为合闸弹簧储能时间, ΔT_5 为二次重合闸时间。综合图 1 和图 2 可知, 从第一次重合闸失败到断路器完成第二次重合, 需经过保护动作、合闸弹簧释能后重新储能的过程。为确保断路器能够有效二次重合, 断路器两次重合闸之间的时间间隔必须大于断路器做好第二次重合闸准备的最大时间。

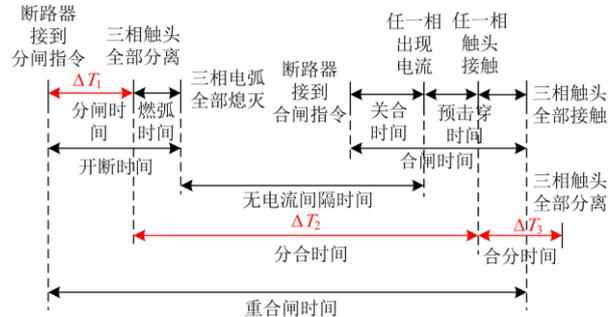


图 1 一次重合闸的动作时序

Fig. 1 Action time sequence of single reclosing

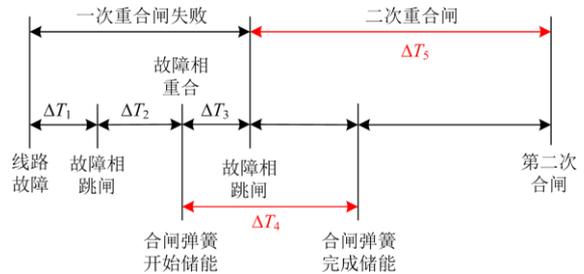


图 2 二次重合闸的动作时序

Fig. 2 Action processes of secondary reclosing

统计表明, SF₆ 断路器在故障切除后, 灭弧室的绝缘恢复时间不大于 25 ms, 重合闸无电流间隔时间约为 300 ms。断路器的“分-合-分”动作序列只要间隔时间大于 300 ms 即可满足其气体绝缘的安全性。同时, 断路器操作机构的储能时间也在 10 s 以内, 而二次重合闸的时间一般建议设置为分钟级, 完全符合断路器的绝缘性能和弹簧储能准备时限, 能够为第二次重合闸做好充分准备。因此, 当一次重合闸失败后, 若重合闸动作时限、线路的熄弧和绝缘恢复以及断路器的恢复开断能力时间小于第二次重合闸整定时间, 断路器准备就绪, 即可实现第二次重合闸功能。

3 二次重合闸方案设计

3.1 重合闸方式设计

东北电网重合闸方式统计表明, 40% 的 220 kV

输电线路采用单相自动重合闸, 54%的采用三相自动重合闸; 另有 6%未配置或停用重合闸; 500 kV 输电线路全部采用单相自动重合闸。

当一次重合闸采用三相重合闸方式时, 断路器一般不具备按相操作能力, 所以二次重合闸方式考虑用三相重合闸; 当一次重合闸采用单相重合闸方式时, 二次重合闸可分为二次单相重合闸和二次三相重合闸两种方式。

当二次重合闸采用单相重合方式时, 一次重合闸失败后, 故障相跳开, 直到第二次合闸前, 系统处于非全相运行状态, 对于故障点附近的发电机, 非全相运行产生的负序电流会导致发电机转子局部过热, 还会使发电机组产生振动和噪音, 严重影响发电机的安全稳定运行。对于未配置间隙过流保护的中性点不接地变压器, 非全相运行使其放电间隙出现持续放电现象, 容易造成变压器中性点绝缘的损坏。此外, 非全相运行所产生的零序电流可能会使变压器零序保护动作, 特别是重负荷输电线路非全相运行时危害更大。

对于 220-500 kV 线路, 无论一次重合闸方式整定为三相重合闸还是单相重合闸, 重合闸失败后都跳三相。因此, 考虑到与现有一次重合闸方式进行衔接, 减少对现有一次重合闸逻辑的修改, 同时避免非全相运行的危害, 建议二次重合闸采用三相重合方式。

3.2 重合闸整定延时设计

合理的重合闸整定延时是二次重合闸成功的关键, 需要综合考虑设备约束、故障类型约束和电网稳定性约束。

1) 设备约束

设备约束是二次重合闸可靠动作的前提条件, 只有当重合闸相关设备(主要指断路器、输电线路)具备再一次合闸的条件时, 才能成功重合。设备约束包括三个方面: 断路器的灭弧、断路器的储能和输电线路潜供电流的熄灭。

断路器的灭弧时间:目前 220 kV 及以上系统全部采用 SF₆ 断路器, 断路器无电流间隔时间约为 300 ms, 考虑到断路器短时间两次灭弧的影响, 留有裕度, 二次重合闸整定延时建议不少于 1 s。

断路器操作机构的储能时间:对 32 台主流断路器储能时间现场测试数据进行统计, 储能时间最大不超过 10 s, 因此在一次重合闸失败后, 断路器的操作机构经过 10 s 就可以完成弹簧储能, 考虑裕度值, 二次重合闸整定延时建议不少于 12 s。

输电线路潜供电流的熄灭时间:一次重合闸失败后, 由于线路耦合作用的影响, 线路故障点会产生潜供电流^[30], 如果二次重合闸整定延时小于潜供电流熄灭的时间, 二次重合时故障仍然会存在, 导

致重合失败。对不同输电线路的潜供电流熄灭时间进行研究, 发现潜供电流熄灭的最长时间不超过 2 s, 考虑裕度, 二次重合闸整定延时建议不少于 4 s。

综合考虑各类设备约束, 二次重合闸整定延时不应少于 12 s。

2) 故障类型约束

实际电网故障类型多样, 持续时间长短不一, 需要选择合适的整定延时, 以确保二次重合闸在尽可能多的故障场景下能够成功重合。

基于《东北电网 220-500 kV 线路故障明细表》、《东北电网 220-500 kV 线路故障日志统计》对不同故障类型的持续时间进行了统计分析, 具体情况如下所述。

(1) 多重雷击引发的故障, 一般持续 1~2 s, 考虑到潜供电流的影响并留有裕度, 整定延时推荐为 4~5 s。

(2) 鸟害引发的故障, 故障持续时间较短, 一般 1 s 左右故障就会消失, 推荐二次重合闸整定延时为 2~3 s。

(3) 风偏引发的故障, 大风导致的舞动可能持续几分钟甚至几小时, 二次重合闸的整定延时无法满足; 小风引发的故障, 几十秒就可以平息, 推荐延时 40~60 s。

(4) 山火引发的故障, 通常会持续几小时, 不推荐采用二次重合闸。

(5) 覆冰分为覆冰舞动和融冰闪络两种情况, 第一种覆冰舞动与风偏较为类似, 推荐整定延时为 40~60 s; 第二种融冰闪络, 推荐整定延时为 30 s。

(6) 漂浮物引发的故障, 需考虑线路两次短路的绝缘恢复时间, 推荐延时 10~20 s。

(7) 树放电引发的故障, 通常需要巡线, 将树木砍掉, 才能强送成功, 二次重合闸难以胜任。

(8) 吊车引发的故障, 属人为因素, 为了尽可能保证吊车能够在二次重合闸之前移开, 推荐整定延时为 1 min。

综合考虑各类故障的特性及延时约束要求, 二次重合闸整定延时推荐为 60 s。

3) 电网稳定性约束

一次重合闸失败后, 系统阻尼发生变化, 潮流重新分配, 系统经历过渡过程后趋于稳定, 如果二次重合闸与一次重合闸的间隔时间太短, 第二次重合闸一旦失败, 将对系统十分不利。必须待系统稳定后, 才能进行第二次合闸操作。因此, 在设定二次重合闸延时, 需考虑电网稳定性约束。本文中的电网稳定约束是指线路发生故障且一次重合闸失败后的电气量振荡平息过程, 选取功角和功率振荡

量为代表，平息的判定指标为波动量小于预设值。为了确定东北电网一次重合闸失败后振荡的平息时间，建立了东北电网仿真模型，选取 100 条 220 kV 电压等级输电线路和 50 条 500 kV 电压等级输电线路，分别设置相应的故障类型，仿真一次重合闸失败后系统的振荡平息过程，记录各条输电线路一次重合闸失败后系统的稳定情况与功率振荡情况。筛选出功角与功率变化幅度较大、振荡平息时间较长的 4 条输电线路，具体线路名称(均为化名)和振荡平息时间如表 6 所示。

表 6 功角与功率振荡平息时间较长的 4 条输电线路

Table 6 Four transmission lines with relatively long power angle and power oscillation time

电压等级	线路名称	首端母线	末端母线	振荡时间
220 kV	#华线	#民变	#二厂	14 s
	#双线	#郊变	#阳变	
	#丹线	丹#变	#家变	
	#东线	林#变	#林变	
500 kV	#西线	#云变	#西变	16 s
	#合线	#嘉变	#心变	
	#鞍线	#穆站	#山变	
	#巴线	#巴变	#流站	

从电网稳定性约束角度分析，220 kV 和 500 kV 电压等级输电线路一次重合闸失败后，系统会发生功角和功率振荡，需要经过一段时间的衰减，才能恢复稳定。由仿真结果可知，系统振荡的平息时间最长为 16 s，考虑到极端情况并保留裕度，二次重合闸的整定时间推荐为 32 s。

综上所述，从设备约束角度出发，二次重合闸的整定延时推荐为 12 s 以上；从故障类型约束角度出发，二次重合闸的整定延时推荐为 60 s 左右；从电网稳定性约束角度出发，二次重合闸的整定延时推荐为 32 s 以上。结合高压交流断路器标准 GB/T 1984-2014 的规定，高压交流断路器“合分-t-合分”中的时间间隔推荐为 60 s 和 180 s^[31]，为了尽快恢复线路可靠供电，保证系统的稳定性，选择国标推荐的 60 s。因此，本文二次重合闸延时整定时间推荐为 60 s。

3.3 重合闸逻辑设计

根据一、二次重合闸的逻辑配合关系，并考虑最小化改造成本，第二次重合闸的启动逻辑设计如图 3 所示。第二次重合闸处于充电状态，第一次重合闸处于未充电状态，且外部线路保护跳闸信号返回后，第二次重合闸启动，第二次重合闸等待时间开始计时。

二次重合闸启动后的动作逻辑如图 4 所示。二次重合闸等待时间大于“二次重合闸整定延时”定

值，检查检同期条件及合闸压力条件是否满足，若满足则二次重合闸动作，合闸命令发出；若不满足，则经“检同期最长等待”延时，第二次重合闸放电，不再重合。

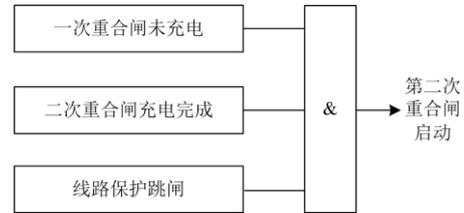


图 3 第二次重合闸启动逻辑

Fig. 3 Start logic of the second reclosing

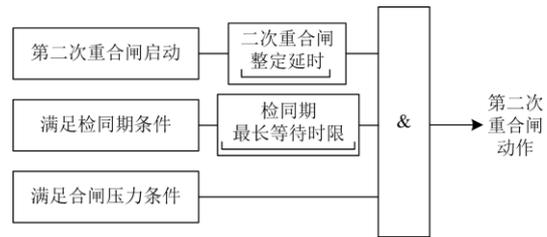


图 4 第二次重合闸动作逻辑

Fig. 4 Action logic of the second reclosing

以 500 kV 输电线路为例，其主接线一般为 3/2 接线，线路每一侧都对应边开关和中开关两个断路器，两个断路器重合闸等待时间设置有级差，当先合的断路器重合闸失败后，后合的断路器不再重合，以避免对系统不必要的冲击；当装置有外部闭锁重合闸信号输入时，一次重合闸放电，实现对重合闸功能的闭锁。第二次重合闸只能在线路故障跳闸后启动，在开关偷跳时不启动。线路保护第一次重合于故障时输出的闭锁信号不应闭锁第二次重合闸。多相故障时，重合对系统的冲击较大，某些场合可能希望这种情况下二次重合闸不动作，因此重合闸装置应具备一定的故障选相功能，实现多相故障时闭锁第二次重合。

4 仿真分析

根据上节二次重合闸配置方案，选取某 220 kV 和某 500 kV 区域线路，分别进行二次重合闸的仿真验证。

1) 220 kV 区域线路验证

某 220 kV 区域线路如图 5 所示，选取线路 4-5 进行二次重合闸验证，验证提出的二次重合闸配置方案对系统稳定性的影响。线路 4-5 在 2 s 时发生 A 相接地短路故障，2.03 s 时保护动作，A 相跳闸，

2.6 s 时一次重合闸, 由于故障未消失, 重合闸失败, 2.65 s 时三相跳闸。采用图 4 的二次重合闸逻辑, 62.6 s 时进行三相重合, 系统的功角和功率振荡情况如图 6 所示。可以看出, 采用提出的重合闸配置方案可以很好地覆盖一次设备的恢复时间, 并躲过系统的功角和功率振荡。

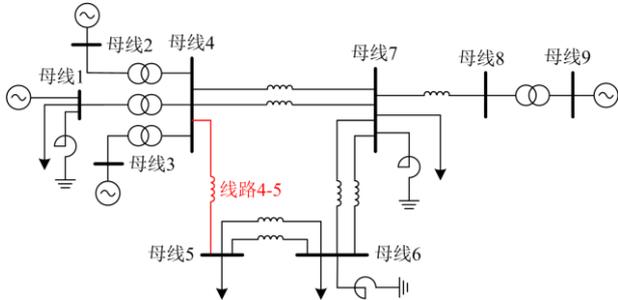
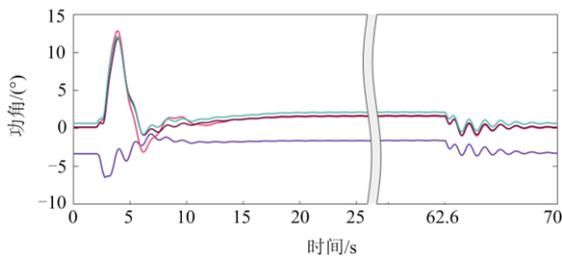
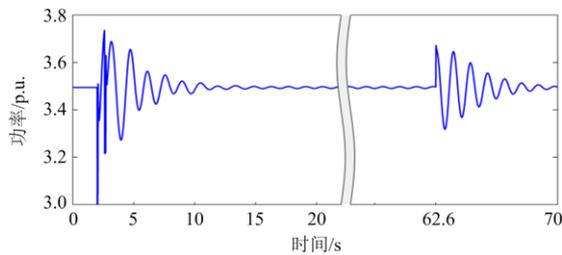


图 5 某 220 kV 区域线路

Fig. 5 220 kV transmission lines in a regional grid



(a) 功角变化情况



(b) 功率振荡情况

图 6 线路 4-5 二次重合闸恢复过程

Fig. 6 Recovery process of second reclosing on line 4-5

2) 500 kV 区域线路验证

某 500 kV 区域线路如图 7 所示, 选取线路 3-8 进行二次重合闸验证, 观察二次重合闸对系统稳定性的影响。类似地, 线路 3-8 在 2 s 时发生 A 相接地故障, 2.03 s 时保护动作, A 相跳闸, 2.6 s 时一次重合闸, 由于故障未消失, 重合闸失败, 2.65 s 时三相跳闸, 62.6 s 时进行三相重合。系统的功角和功率振荡情况如图 8 所示。可以看出, 采用提出的重合闸方案, 同样可以很好地覆盖一次设备的恢复时间, 躲过系统的功角和功率振荡。

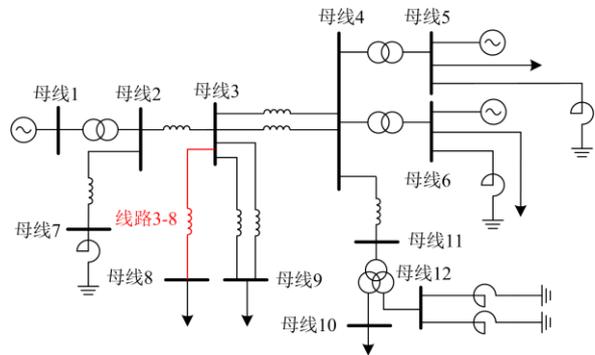
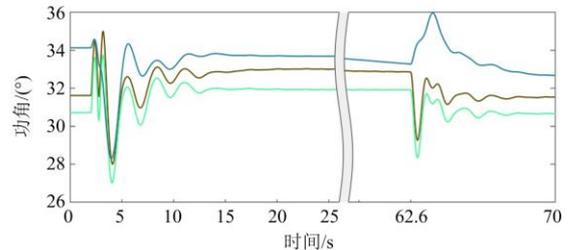
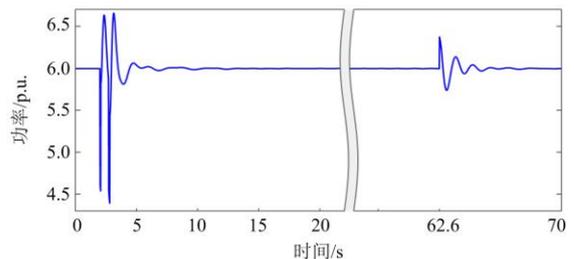


图 7 某 500 kV 区域线路

Fig. 7 500 kV transmission lines in a regional grid



(a) 功角变化情况



(b) 功率振荡情况

图 8 线路 3-8 二次重合闸恢复过程

Fig. 8 Recovery process of second reclosing on line 3-8

4 结论

电网中存在大量一次重合闸因为延时较短而失败的情况, 如果采用合适的二次重合闸方案, 大多数故障能被有效地清除, 从而减少手动强送的等待时间, 降低电网发生多重故障的概率, 提高电网运行的安全性和可靠性。

研究表明, 当前电网的一次设备断路器可以满足二次重合闸要求, 仅需更新二次装置的动作逻辑和整定延时, 即可实现线路二次重合闸的改造。仿真结果表明, 提出的二次重合闸方案, 对不同电压等级输电线路具有良好的适应性。

对于由山火、对树放电等引发的线路故障而言, 虽然手动强送有较高的成功率, 但这些故障一般持续较久或需要人工清除, 二次自动重合闸未必能够适用, 所以二次自动重合闸应具有基本的故障识别

功能。在应用初期或故障识别功能不够完善时,可以根据历史故障统计规律,有针对性地选择相应输电线路装设二次自动重合闸。

参考文献

- [1] 甄玉杰, 蔡青青, 闫斌斌. 500 kV 液压机构断路器重合闸异常分析[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 255-260.
ZHEN Yujie, CAI Qingqing, YAN Binbin. Analysis on an abnormal reclosing event of the 500 kV circuit breaker with hydraulic operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 255-260.
- [2] 罗薇. 输电线路单相自适应重合闸方法及应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
LUO Wei. Method and application of single-pole adaptive reclosure in transmission lines[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [3] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院. 电力系统继电保护原理及动作解析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [5] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [6] 齐郑, 高玉华, 孙海新, 等. 基于电压-时间型重合闸的配电网单相接地故障自动隔离技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 32-36.
QI Zheng, GAO Yuhua, SUN Haixin, et al. Technology research of fault automatic isolation in distributed single phase-to-ground based on voltage-time type recloser[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 32-36.
- [7] 陈明辉, 张少凡, 文福拴. 二次重合闸与二级二次重合闸在配电系统中的应用[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2011, 38(2): 21-26.
CHEN Minghui, ZHANG Shaofan, WEN Fushuan. Applications of twi-reclosures and two-stage twi-reclosures in distribution systems[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2011, 38(2): 21-26.
- [8] 浮明军, 杨生苹, 胡宝. 基于 RTDS 的二次重合闸功能仿真测试研究[J]. 电气自动化, 2016(6): 24-26.
FU Mingjun, YANG Shengping, HU Bao. A research about the simulation test on the function of the twi-reclosure based on RTDS[J]. Electrical Automation, 2016(6): 24-26.
- [9] 何伟杰. 关于 10 kV 馈线保护二次重合闸试验的验证[J]. 电子质量, 2011(8): 67-68.
HE Weijie. Verification on 10 kV feeder protection secondary reclosing test[J]. Electronics Quality, 2011(8): 67-68.
- [10] 王宇. 关于 FTU 二次重合闸联调遇到的问题及解决措施[J]. 大科技, 2016(7): 90-91.
WANG Yu. Problems and solutions of FTU secondary reclosing joint adjustment[J]. Super Science, 2016(7): 90-91.
- [11] LUU H V Q. Modeling the transient energy margin for accessing the transient stability with double shot automatic line reclosing in power system[C] // International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP), 2018.
- [12] 刘健, 张志华, 芮俊, 等. 一二次配合的配电线路自适应重合闸[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 26-32.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, RUI Jun, et al. Adaptive reclosing of distribution lines based on primary and secondary device coordination[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 26-32.
- [13] 张维, 宋国兵, 豆敏娜, 等. 基于自适应重合闸的配电网快速故障定位与隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 60-67.
ZHANG Wei, SONG Guobing, DOU Minna, et al. A quick fault location and isolation method in distribution network based on adaptive reclosure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 60-67.
- [14] GHORE S, BISWAL M. Uninterrupted power supply to microgrid[M] // Microgrid: Operation, Control, Monitoring and Protection, 2020.
- [15] 时伯年, 李岩, 孙刚, 等. 基于快速重合闸的多端直流配电网极间故障隔离恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 88-95.
SHI Bonian, LI Yan, SUN Gang, et al. Fault isolation recovery strategy for multi-terminal DC distribution network based on DC breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 88-95.
- [16] 窦小晶, 薛钊, 叶日新, 等. 10 kV 分布式电源并网对配电网继电保护的影响分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 117-122.
DOU Xiaojing, XUE Zhao, YE Rixin, et al. Influence of 10 kV DG integration on relay protection in distribution network[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 117-122.
- [17] KHAN W A, BI Tianshu, JIA Ke. A review of single phase adaptive auto reclosing schemes for EHV transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 205-214. DOI: 10.1186/s41601-019-0133-5.
- [18] 梁振锋, 崔若巍, 杨宁宁, 等. 三相不对称输电线路单相自适应重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 31-36.
LIANG Zhenfeng, CUI Ruowei, YANG Ningning, et al. Study on single-phase adaptive reclosure of the

- asymmetrical three-phase transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(8): 31-36.
- [19] 杨启洪, 秦川, 刘杰荣, 等. 基于对比歧化和深度置信网络的配电网故障类型识别[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(2): 52-57.
- YANG Qihong, QIN Chuan, LIU Jierong, et al. Fault identification of distribution network based on contrast disproportionate algorithm and deep belief network[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(2): 52-57.
- [20] 罗勋华. 输电线路自适应重合闸方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- LUO Xunhua. Research on the adaptive auto-reclosure method of transmission lines[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [21] 沈军, 舒治淮, 陈军, 等. 自适应重合闸在电力系统中的应用实践[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 152-156.
- SHEN Jun, SHU Zhihuai, CHEN Jun, et al. Application of adaptive auto-reclosure in power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 152-156.
- [22] 解超, 李凤婷, 樊艳芳, 等. 应用附加电容器的不带并联电抗器输电线路自适应三相重合闸策略[J]. *高压电压技术*, 2019, 45(6): 1811-1818.
- XIE Chao, LI Fengting, FAN Yanfang, et al. Adaptive three-phase reclosing scheme of transmission lines without shunt reactors using additional capacitors[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(6): 1811-1818.
- [23] 方春恩, 李煜昊, 陈川江, 等. 基于 Prony 算法的串补空载线路选相关合最佳合闸时刻研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(12): 15-22.
- FANG Chun'en, LI Yuhao, CHEN Chuanjiang, et al. Optimal instant for controlled switching of the serially compensated transmission lines based on Prony algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(12): 15-22.
- [24] 林达. 自适应重合闸和自适应电流保护技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- LIN Da. Research on adaptive reclosure and adaptive current protection technologies[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [25] 赵跃宇, 甄文波, 白延博, 等. 110 kV 架空输电线路故障原因分析及建议[C] // 江苏省电机工程学会输配电及电力系统专委会学术年会, 2011.
- ZHAO Yueyu, ZHEN Wenbo, BAI Yanbo, et al. Fault analysis and suggestions of 110 kV overhead transmission line[C] // Annual Meeting of Transmission and Distribution and Power System Special Committee of Jiangsu Society of Electrical Engineering, 2011.
- [26] CHOTHANI N G, BHALJA B R, DESAI A K. A new algorithm for coordination of relay and auto-reclosure in 220 kV transmission system[C] // 2013 Annual IEEE India Conference, December 13-15, 2013, Mumbai, India: 1-6.
- [27] 刘奎, 杨慧敏, 沈军, 等. 二次自动重合闸在超高压输电线路上的应用研究[C] // 2015 年中国电机工程学会年会论文集, 2015: 1-5.
- LIU Kui, YANG Huimin, SHEN Jun, et al. Research of two-shot auto-reclosing used on EHV transmission lines[C] // Proceedings of 2015 Annual Meeting of China Society of Electrical Engineering, 2015: 1-5.
- [28] 刘奎, 杨慧敏, 沈军, 等. 超高压输电线路二次自动重合闸应用研究[J]. *高压电器*, 2017, 53(12): 140-144.
- LIU Kui, YANG Huimin, SHEN Jun, et al. Research on two-shot auto-reclosing for EHV transmission lines[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(12): 140-144.
- [29] 刘奎, 杜鹃, 陆金凤, 等. 基于“六统一”规范的 500 kV 输电线路二次重合闸改进方案研究[J]. *电气技术*, 2020, 21(6): 111-115, 121.
- LIU Kui, DU Juan, LU Jinfeng, et al. Research on improving scheme of two-shot auto-reclosing used on 500 kV transmission lines basing on the six-unified standards[J]. *Electrical Engineering*, 2020, 21(6): 111-115, 121.
- [30] 方春恩, 李煜昊, 陈川江, 等. 基于 Prony 算法的串补空载线路选相关合最佳合闸时刻研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(12): 15-22.
- FANG Chun'en, LI Yuhao, CHEN Chuanjiang, et al. Optimal instant for controlled switching of the serially compensated transmission lines based on Prony algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(12): 15-22.
- [31] 全国高压开关设备标准化技术委员会. 高压交流断路器: GB/T 1984—2014[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2014.
- High Voltage Switchgear Standardization Technical Commission of the People's Republic of China. High-voltage alternating-current circuit-breakers: GB/T 1984—2014[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2014.

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-03-03

作者简介:

王震宇(1980—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电网调度管理和电力系统分析; E-mail: 801118@sina.com

孙正伟(1972—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: sunzhengwei_123@sina.com

王开白(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: wangkaibai@sina.com

(编辑 姜新丽)