

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.12.023

超高压输电线路二次自动重合闸应用研究

刘 奎¹, 杨慧敏², 沈 军¹, 刘东超¹, 赵青春¹, 杨心平²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102; 2. 华北电网有限公司, 北京 100053)

摘要: 目前中国超高压输电线路普遍采用一次自动重合闸,对二次自动重合闸鲜有研究。笔者分析了在某些超高压输电线路合理设置第二次自动重合闸对系统的有利影响,提出了应用于500 kV输电线路的二次自动重合闸装置的设计思路,并介绍了在现有保护装置上增加第二次重合闸功能的一种具体实施方法。分析结果表明,在某些超高压输电线路实施二次自动重合闸,能够提高电力系统的稳定性。依据研究开发的二次自动重合闸装置在华北电网试点运行效果良好。

关键词: 二次重合闸; 超高压输电线路; 电力系统稳定性

Research on Two-shot Auto-reclosing for EHV Transmission Lines

LIU Kui¹, YANG Huimin², SHEN Jun¹, LIU Dongchao¹, ZHAO Qingchun¹, YANG Xinping²

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. North China Grid Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: In China, EHV transmission lines usually adopt one-shot auto-reclosing scheme. In this paper, the favorable effects of properly designed two-shot auto-reclosing scheme for some EHV transmission lines are analyzed, and the design idea of a two-shot auto-reclosing device for 500 kV transmission lines is introduced. Furthermore, the implementation method of adding second-shot auto-reclosing function to existing protection devices is discussed. Analysis shows that the stability of the power system can be improved by applying two-shot auto-reclosing scheme to some EHV transmission lines. The two-shot auto-reclosing devices have been applied to the North China Power Grid and have achieved good operation effect.

Key words: two-shot auto-reclosing; EHV transmission lines; power system stability

0 引言

在电力系统中,大多数故障是输电线路(特别是架空线路)的短路故障,因此如何提高输电线路工作的可靠性,就成为电力系统重要任务之一^[1]。在输电线路故障后采用自动重合闸装置进行快速重合,是保证电力系统安全稳定运行的一项重要措施,在国内外电力系统中得到了极为广泛的应用。电力系统的运行资料统计表明,自动重合闸的动作成功率相当高,一般在60%~90%之间。自动重合闸对于提高瞬时性故障时供电的连续性、双侧电源线路系统并列运行的稳定性、以及纠正由于断路器或继电保护

误动作引起的误跳闸,都发挥了巨大的作用^[2]。长期以来,为提高自动重合闸的成功率,减少重合闸失败对系统的不利影响,国内外学者进行了大量研究,在传统的重合闸方式之外,提出了自适应重合闸^[3-6]、最佳重合闸时刻^[7-9]等概念和方法,并在我国电网中有一定的应用^[10-11]。

按照重合闸动作的次数分,自动重合闸可分为一次自动重合闸和二次(多次)自动重合闸^[12]。一次自动重合闸在故障后仅重合一次,若重合失败则不再进行重合。二次(多次)自动重合闸则是在故障后可进行两次(多次)自动重合闸。目前在中国的输电网中,普遍采用一次自动重合闸。在220~1 000 kV的架空线路上,多采用单相一次自动重合闸^[13-15];在

收稿日期:2017-05-09; 修回日期:2017-07-21

110 kV 电网,多采用三相一次自动重合闸方式^[16]。

在中国,目前二次自动重合闸仅在配电网馈线上有一定应用,在输电网中基本没有应用。配电网馈线上的二次重合闸主要用于快速隔离故障点,恢复对非故障馈线支路的供电^[17-18]。

1 超高压输电线路二次自动重合闸的作用

采用自动重合闸的目的主要有二:其一是保证并列运行系统的稳定性;其二是尽快恢复瞬时故障元件的供电,从而自动恢复整个系统的正常运行^[12]。不同电压等级电网中,上述两种自动重合闸的作用有不同的侧重。对于电压等级较高的输电网,一般为网状拓扑,输电线路故障跳开并不会导致某一节点的负荷失电,此时自动重合闸的作用主要在于提高系统稳定性;对于电压等级较低的配电网,一般为辐射状拓扑,输电线路故障跳闸不会导致稳定问题,但会引起负荷失电,此时自动重合闸的作用主要在于快速恢复供电。

在中国高压、超高压电网普遍采用一次自动重合闸。第一次重合失败后,故障为永久性故障的可能性很大,若短时间内进行第二次重合闸,会对系统造成第二次冲击,对系统稳定性造成不利影响,因此二次自动重合闸在高电压等级电网中应用很少。

一般超高压输电线路故障后,若一次重合闸失败,自动重合闸装置不再重合,此后由检修人员对故障线路进行一次手动试合闸,若手合成功,则线路恢复运行;若手合后保护再次跳闸,则进一步通过巡线等方式查找故障点。上述过程中,自动重合闸失败后等待检修人员进行手动试合闸需要很长的时间,在此期间,若系统中其他线路发生故障,会导致系统出现 N-2、N-3 等不利的运行方式,需要采取大量的稳控措施,甚至有可能造成系统失去稳定。针对上述情况,如能适当缩短人工试合闸的等待时间,则有利于提高系统的稳定性。

以华北电网为例,由于气候因素,2012 年一年内该网 500 kV 输电断面上发生了 4 次严重故障,包括两次 N-3 故障,两次 N-2 故障,直接导致重要断面失去送电能力^[19]。由于变电站运行中有严格的操作流程,从重合闸失败到运行人员手动试合闸,必然要经过较长的时间,这是人工操作无法克服的,这导致恶劣气候条件下多重故障的发生概率较高。

在第一次重合闸失败后,如果由重合闸装置经过一定的延时进行第二次自动重合闸,代替手动试合闸,则能够克服手动合闸等待较长时间的问题。第二次自动重合闸的等待时间可根据系统稳定性要求

进行计算和整定(几十秒到几分钟),以减小第二次合于故障的不利影响;同时要考虑使断路器有足够时间恢复开断故障电流的能力。相比于手动合闸,第二次重合闸的间隔时间可以大大缩短,从而减少系统中发生多重故障的概率,提高系统的安全稳定裕度。

仍以华北电网为例进行分析。华北电网 500 kV 主要输电线路包括万顺三回、沽太双回、源安双回、源霸双回等,对这些线路上发生故障后采取不同重合闸措施对系统稳定性影响进行计算和分析,故障类型选取较严重的三相短路、相间短路接地和相间短路,重合闸次数分别选取一次重合闸、二次重合闸。计算和分析的结果显示:①第二次重合闸失败对系统的影响主要表现在线路功率的振幅增大和系统阻尼的降低,而对母线电压和系统频率的影响相对较小;②第二次重合闸成功对提高系统阻尼,快速抑制线路功率、母线电压、系统频率波动均有良好的作用;③第二次重合闸失败的情况下,重合闸等待时间越长,对系统的不利影响越小;第二次重合闸成功的情况下,重合闸等待时间越短,对系统的有利影响越大;综合考虑两种因素,线路断开后 60 s 系统振荡基本平息,第二次重合闸等待时间设置为 60 s 左右是比较合适的。

从上述分析的结果可以看出,如果在第一次重合闸后约 60 s 进行第二次自动重合闸,由于此时系统振荡基本平息,第二次重合闸失败对系统的不利影响与人工合闸相比差别不大。

综上,在超高压输电线路可考虑实施二次自动重合闸,第一次重合闸的作用与传统重合闸相同,提高系统的稳定性;第一次重合闸失败后,启动第二次重合闸,第二次重合闸用于代替手动合闸,缩短线路停运时间,带来如下两点好处:①快速恢复线路供电,减少发生 N-2 或 N-3 的严重故障的可能性;②提高系统阻尼,快速抑制线路功率、母线电压、系统频率的波动。为了减小第二次合于故障对系统的冲击,同时考虑断路器在一次“分—合—分”操作后恢复开断能力的时间,第二次重合闸等待时间可整定较长(约 60 s)。

根据华北电网历年运行经验,超高压输电线路故障且第一次重合闸失败后,手动试合闸成功的概率超过一半以上。因此采用第二次自动重合闸代替手动试合闸来缩短合闸时间,对提高系统的稳定性具有巨大的实用价值。

2 500 kV 输电线路二次自动重合闸设计

以上文所述研究结果为基础,设计一种应用于

超高压输电线路的二次自动重合闸装置。笔者以 500 kV 线路为例设计对应的二次自动重合闸装置,其他电压等级超高压输电线路的二次自动重合闸可参考文中思路。

500 kV 线路一般多为系统重要联络线、重载线路或是电厂重要送出线路,考虑到其重要性,二次重合闸功能应用于 500 kV 线路时,需根据其特点进行设计,确保提高系统的稳定性;同时还应考虑与第一次重合闸的配合,做到逻辑清晰、功能可靠、便于现场实施。目前国内 500 kV 输电线路在变电站的接线基本都采用 3/2 接线方式,重合闸普遍采用按断路器配置^[20],即线路的重合闸由各个断路器的保护装置实现。第二次重合闸功能与第一次重合闸联系密切,考虑到对原有保护功能影响最小、现场二次回路修改最少、节省投资等因素,文中设计的第二次重合闸功能也选择由断路器保护装置实现。

目前国内 500 kV 断路器保护装置的一次重合闸功能配置有以下特点:①利用软件模拟电容器充电原理构成一次重合闸,一般 10~15 s 左右充电完成;②重合闸基本都设置为单重方式;③重合闸启动方式包括线路保护跳闸启动和位置不对应启动两种;④500 kV 主接线一般为一个半断路器接线,每条线路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;⑤当装置有外部闭重信号输入时,一次重合闸放电,实现对重合闸功能的闭锁。

在上述一次重合闸功能的基础上,第二次重合闸的设计思路如下:

1)线路保护在一次重合闸失败时会固定三跳,因此二次重合闸固定按三相重合闸考虑。

2)重合闸操作涉及线路两侧共 4 个断路器,为了减少合于故障对系统和设备不必要的冲击,第二次重合闸由其中一个断路器先合;若最先合闸的断路器合于故障并跳开后,另外三个断路器应不再重合。

3)应具备闭锁第二次重合闸的信号输入接口,用于外部条件闭锁第二次重合闸。

4)第二次重合闸只能在线路故障跳闸后启动,在开关偷跳时不应启动。

5)二次重合闸正是要在一次重合闸失败后发挥作用,因此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。

6)在 500 kV 线路发生多相故障时,重合于故障对系统的冲击较大,在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,可实现多相故障时闭锁第二次重合。

3 二次重合闸装置的开发及应用

依据上述设计思路,开发具备二次重合闸功能的保护装置,装置的功能设计及与外部配合关系如下:

1)第二次重合闸也采用电容器充放电原理,设置独立的第二次重合闸充电状态标识,只有第二次重合闸充电完成的情况下,第二次重合闸才有可能启动和动作;保护未启动、第二次重合闸未启动、断路器处于合位时,第二次重合闸经 10 s 延时充电完成。

2)第二次重合闸固定为三重方式,不需要控制字整定。

3)增加“二次重合闸时间”、“检同期最长等待”定值,前者用于设置第二次重合闸动作延时,后者用于设置第二次重合闸延时满足后等待同期条件满足的最长时间。

4)先合的一个断路器合于故障后,其他 3 个断路器不再重合,这可通过重合闸检同期和检无压的设置实现:第二次重合闸先合的断路器整定为检无压方式,其余 3 个断路器整定为检同期方式。线路故障跳闸后,第一个合闸的断路器检无压条件满足发合闸命令;若合闸成功,其余 3 个断路器检同期条件满足,经固定延时合闸;若第一个断路器合闸失败,其余 3 个断路器检同期条件不满足,经“检同期最长等待”延时,二次重合闸放电,不再重合。

5)闭锁第二次重合闸的外部信号通过保护装置原有的闭锁重合闸开入端子输入,即两次重合闸共用外部闭锁重合闸输入接口,从而减少现场接线需要进行的改动。在共用闭重输入接口的情况下,为防止第一次重合于故障时线路保护的闭重输出信号导致第二次重合闸放电,应取消线路保护闭重输出信号至断路器保护装置闭重输入端子之间的接线。

6)第二次重合闸的启动逻辑如下。第二次重合闸处于充电状态,且第一次重合闸处于未充电状态,保护装置收到线路保护跳闸信号,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,见图 1。

7)第二次重合闸启动后的动作逻辑如下。第二次重合闸等待时间大于“二次重合闸时间”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,见图 2。

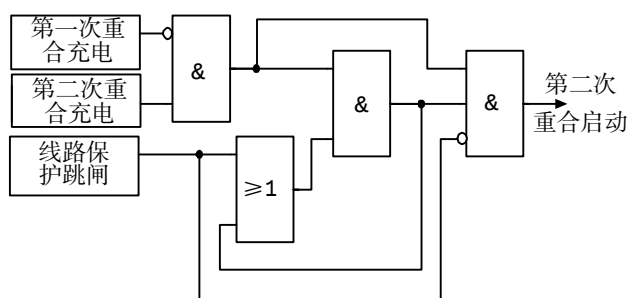


图1 第二次重合闸启动逻辑

Fig. 1 Logic diagram of second shot initiating

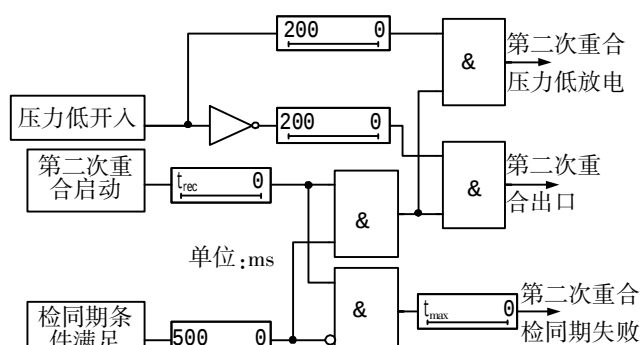


图2 第二次重合闸动作逻辑

Fig. 2 Logic diagram of second shot acting

8)对于线路同一侧的两个断路器,第一次先合的断路器合于故障后,线路保护三跳,会导致后合的断路器第一次重合闸放电(单重方式下三跳导致放电),后合断路器不会启动第一次重合闸;按照图1所示逻辑,后合断路器能够启动二次重合闸。即后合断路器不需要进行第一次重合闸,直接启动二次重合闸,减少了不必要的合闸冲击。

9)增加“多相故障闭锁二次重合闸”控制字;设置简单的故障选相逻辑,根据电流电压和线路保护跳闸信号进行故障选相,此选相用于区分故障为单相故障还是多相故障;若选相逻辑判别为多相故障,且“多相故障闭锁二次重合闸”控制字投入,则第二次重合闸放电,不再重合。

依据文中研究成果开发的具备二次自动重合闸功能的断路器保护装置,通过了基于实时数字仿真测试仪(RTDS)的数模仿真测试,测试结果表明其重合闸功能在各种设定工况下能够按照预期的逻辑正确动作。该型号保护装置已于2014年开始在华北电网部分500 kV输电线路试点运行,运行至今效果良好。

4 结语

在某些超高压输电线路实施二次自动重合闸,用来代替人工试合闸,只要重合闸等待时间设置合理,可充分利用二次重合闸成功对系统的有利影

响,且二次重合闸失败对系统的不利影响与人工合闸相比没有显著变化,有利于电网运行的稳定性。笔者介绍的试点应用于华北电网的500 kV输电线路二次重合闸装置的设计思路和实施方法,可作为后续二次重合闸推广应用的参考。

参考文献:

- [1] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理[M].增订版.北京:中国电力出版社,2004.
HE Jiali, SONG Congju. Scheme of protective relaying in electric power systems[M]. Enlarged edition. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 袁越,张保会.电力系统自动重合闸研究的现状与展望[J].中国电力,1997,30(10):44-47.
YUAN Yue, ZHANG Baohui. Present state and prospects of power system automatic reclosure research[J]. Electric Power, 1997, 30(10): 44-47.
- [3] GE Yaozhong, SUI Fengha, XIAO Yuan. Prediction methods for preventing single-phase re-closing on permanent fault[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [4] 葛耀中.在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久性故障的方法[J].西安交通大学学报,1984,18(2):23-32.
GE Yaozhong. Identification of temporary fault and permanent fault for single-phase reclosure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(2): 23-32.
- [5] 宋国兵,索南加乐,孙丹丹.输电线路永久性故障判别方法综述[J].电网技术,2006,30(18):75-80.
SONG Guobing, SUONAN Jiale, SUN Dandan. A survey on methods to distinguish permanent faults from instantaneous faults in transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 75-80.
- [6] 葛耀中.自适应继电保护及其前景展望[J].电力系统自动化,1997,21(9):42-45.
GE Yaozhong. Adaptive protection relay and its prospect of development[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 42-45.
- [7] 张保会,袁越,薄志谦.最佳重合闸时间及其整定计算[J].中国电力,1995,28(2):12-16.
ZHANG Baohui, YUAN Yue, BO Zhiqian. Optimal reclosing time and its setting calculation[J]. Electric Power, 1995, 28(2): 12-16.
- [8] 袁宇春,张保会.基于EEAC的重合闸最佳时刻的计算[J].电力系统自动化,1999,23(17):10-12.
YUAN Yuchun, ZHANG Baohui. Calculation of the optimal reclosing time based on EEAC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(17): 10-12.
- [9] 吴洋,张保会.优化重合闸时刻的策略与效益[J].电力自动化设备,2002,22(8):12-15.

- WU Yang,ZHANG Baohui. Strategy and benefit of optimizing re-closing time[J]. Electric Power Automation Equipment,1999,23(17): 10-12.
- [10] 董吉林,陈阳,孙艳,等.500 kV 同杆双回线自适应重合闸在瀑布沟水电站的应用[J]. 水电站机电技术,2010(6):56-58.
- DONG Jilin,CHEN Yang,SUN Yan,et al. Application of adaptive reclosure of 500 kV common-tower double circuit transmission line in Pubugou hydropower station[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station,2010(6): 56-58.
- [11] 黄巍,陆榛,黄见虹,等.500 kV 同塔自适应重合闸线路保护配置及 GPS 试验验证[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(21): 69-72.
- HUANG Wei,LU Zhen,HUANG Jianhong,et al. Configuration of relays adaptive realosing and GPS testing for 500 kV common-tower double circuit transmission lines[J]. Power Sytem Protection and Control,2008,36(21): 69-72.
- [12] 张保会,尹项根.电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- ZHANG Baohui,YIN Xianggen. Power system protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press,2005.
- [13] 路改强,刘敏.浅析 500 kV 系统中 3/2 接线方式线路重合闸[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):141-144.
- LU Gaiqiang,LIU Min. Analysis of 3/2 connection mode line reclosing in 500 kV system[J]. Power System Protection and Control,2009,37(23): 141-144.
- [14] 李斌,李永丽,贺家李,等.750 kV 输电线路保护与单相重合闸动作的研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(13): 73-76.
- LI Bin,LI Yongli,HE Jiali,et al. Research on protective relaying and single-phase reclosure of 750 kV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(13): 73-76.
- [15] 韩彬,林集明,班连庚,等.1 000 kV 特高压交流试验示范工程单相重合闸研究[J]. 电网技术,2009,33(16): 20-23.
- HAN Bin,LIN Jiming,BAN Liangeng,et al. Study on single-phase reclosing issues for 1 000 kV UHVAC transmission pilot project[J]. Power System Technology,2009,33(16): 20-23.
- [16] 戴列峰,苏理,戴湘宁.110 kV 及以上电力系统重合闸运行方式综述[J]. 水电自动化与大坝监测,2012,36(2): 58-62.
- DAI Liefeng,SU Li,DAI Xiangning. Review of automatic recloser used on 110 kV and above power system[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring,2012,36(2): 58-62.
- [17] 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,2011,38(2):21-26.
- CHEN Minghui,ZHANG Shaofan,WEN Fushuan. Application of twi-reclosuers and two stage twi-reclosuers in distrbution systems[J]. Journal of North China Electric Power University,2011,38(2): 21-26.
- [18] 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 Sytem Protection and Control,2010,38(1): 32-36.
- [19] 汪洋,梁明亮,张雷,等.2012 华北电网 500 kV 线路故障分析与思考[J]. 电力系统自动化,2013,37(21):39-44.
- WANG Yang,LIANG Mingliang,ZHANG Lei,et al. An analysis of and Inspiration from contingencies of 500 kV transmission lines in North China Power Grid in 2012[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(21): 39-44.
- [20] 刘伟良,庄洪波.500 kV 3/2 接线微机重合闸与保护配合方法探讨[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(5):78-80.
- LIU Weiliang,ZHUANG Hongbo. Discussion about the cooperative methods between microprocessor-based reclosure and relay protection for 500 kV 3/2 circuit breaker connections[J]. Power Sytem Protection and Control,2008,36(5): 78-80.
- 刘奎(1984—),男,硕士,工程师,研究方向为电网继电保护。
- 杨慧敏(1984—),女,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为继电保护。
- 沈军(1975—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网继电保护。