

特高压直流保护动作策略优化

赵森林¹, 卢亚军², 吕鹏飞³, 阮思焯³, 张建锋¹, 刘凯¹, 冯宇⁴

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209; 3. 国家电力调度通信中心, 北京 100031; 4. 中国电力科学研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要:特高压直流输送容量大, 一极停运对两端交流系统的冲击很大, 且导致单极大地回线运行, 很大的入地直流电流对交流系统及附近的金属件产生不利影响, 尤其对在运的换流变以及换流站近端的变压器产生直流偏磁, 威胁换流变及变压器的安全运行。文中对特高压直流保护中的换流器差动保护、接地极线过负荷保护、接地极线不平衡保护以及线路重启逻辑的动作策略进行了优化, 可大大缩短上述保护动作一极闭锁后单极大地回线运行的时间, 减少流入大地的直流电流对交流系统、金属件、换流变及变压器的影响; 并针对接地极引线增加了接地极线差动保护和接地极线差动监视报警功能, 提高了接地极线的保护水平。文中的策略已应用于哈郑、灵绍直流工程, 现场试验效果良好。

关键词:特高压直流输电; 保护优化; 重启逻辑; 接地极线保护

中图分类号: TM723

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0143-07

0 引言

特高压直流输电技术是支撑国家能源战略的重要技术, 在国务院《大气污染防治行动计划》、《政府工作报告》中都强调, 增加清洁能源供应, 节能减排、环境治理, 通过跨区送电, 优化能源配置。目前, 已经建成6条特高压直流输电通道, 承担西北风电、西南水电的集中送出任务, 在缓解东部地区用电缺口的同时, 减轻环境污染压力。未来五年, 还有超过8条输电线路将建成投运。目前特高压直流工程容量也越来越大, 向上特高压直流工程容量为6400 MW, 锦苏特高压直流工程容量为7200 MW, 哈郑、溪浙特高压直流工程容量为8000 MW, 锡盟—泰州、上海庙—临沂特高压直流工程容量为10 000 MW, 当直流满负荷运行时, 当某一极故障导致直流保护动作停极, 将会损失约一半的功率, 对两端交流系统的扰动较大; 且在一极闭锁后直流系统将会单极大地回线运行, 非常大的直流电流使换流站附近大地形成较大电位差, 将对交流系统、地下金属件等产生不利影响; 也可能对在运换流变以及附近的变压器产生直流偏磁, 威胁换流变或变压器的安全运行^[1-9]。因此对特高压直流输电的可靠性和安全性提出了更高要求。

本文对特高压直流工程的换流器差动保护、接地极过负荷保护、接地极不平衡保护^[10-12]和线路保护重启逻辑策略进行了优化, 大大缩短了上述保护动作后一极闭锁后单极大地回线运行的时间, 减少

了流入大地的直流电流对交流系统、金属件、换流变及变压器的影响, 增加了换流器个数的可用率。另外, 对接地极线增加接地极线差动保护和接地极线差动监视报警功能, 提高接地极线的保护水平, 提高特高压直流输电系统的可靠性和可用率。

1 换流器差动保护动作策略优化

从目前特高压运行经验来看, 直流侧高压穿墙套管是运行设备中一个薄弱环节, 2015年1月25日国内某特高压换流站由于套管故障导致极母线差动保护动作停极。

早期特高压直流工程TA配置如图1所示, 高压侧穿墙套管在极母线差动保护的范围内, 若将阀厅内TA外移, 则穿墙套管故障可以作为换流器区域故障, 可以通过优化换流器差动保护的策略, 并和极差动保护(换流器差动保护后备保护)配合, 使健全换流器能够继续运行。

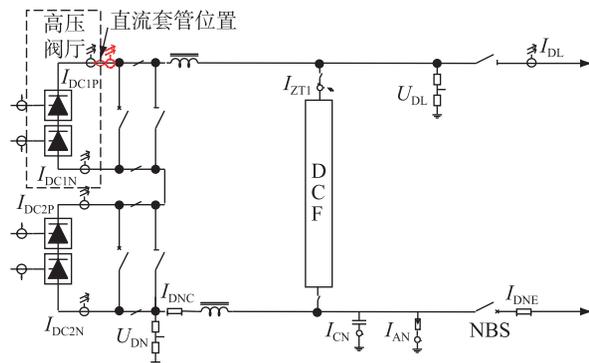


图1 特高压直流工程测点配置图

Fig.1 Measurement configuration of UHVDC

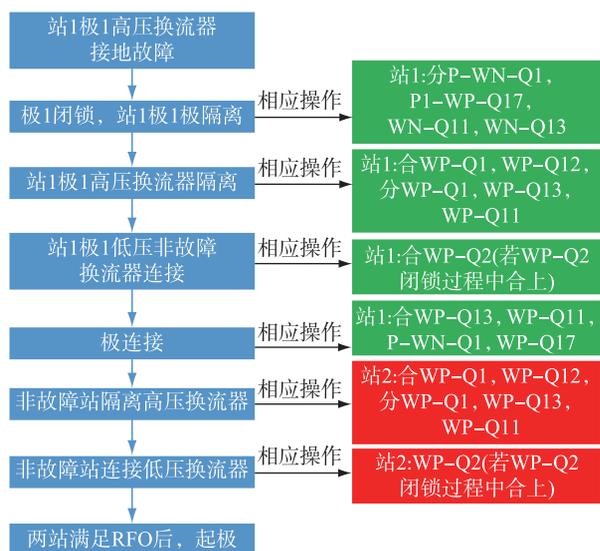


图3 自动恢复健全换流器操作流程

Fig.3 Flowchart of auto deblocking healthy converter

压换流器穿墙套管故障,故障前极1、极2均为双极功率全压运行,运行功率8000MW。在RTDS上模拟站1高压侧套管故障100ms。

1.3 动作结果

站1高压换流器差动保护II段动作后,闭锁极1,跳开站1高压换流器换流变进线开关,站1依次进行极隔离,隔离高压换流器,连接低压换流器(闭锁过程中可能会合旁通开关,连接换流器操作主要拉开旁通开关),极连接;站2无需进行极隔离,站2依次隔离高端换流器,连接低端换流器,两站满足准备运行(简称RFO)后,极1低压换流器自动恢复运行,恢复后极1单换流器运行于双极功率控制模式,极2正常运行于双极功率控制模式,总功率水平维持极1闭锁后的双极总功率不变,极1、极2双极电流平衡。主要动作过程如图4所示。故障前的运行状态如图5所示。

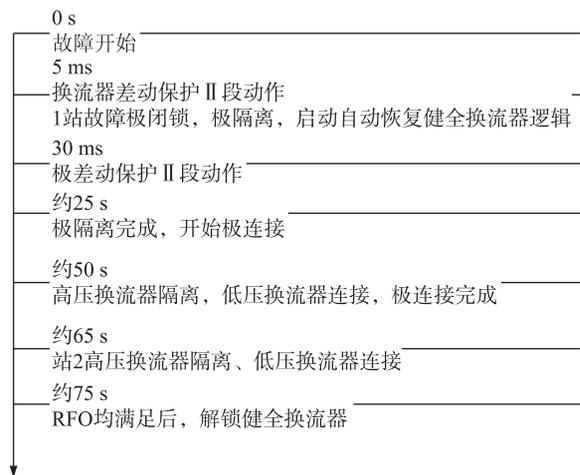


图4 套管故障控制保护动作过程

Fig.4 Operation of control and protection after bush fault

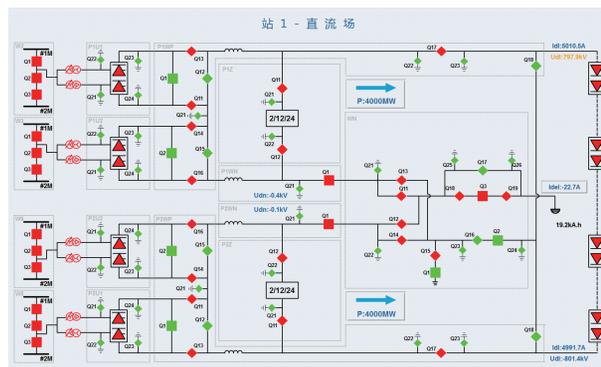


图5 故障前站1运行状态

Fig.5 Operation status of station 1 before fault

极1闭锁后的RFO运行状态如图6所示,高压换流器进行隔离,低压换流器不进行隔离,处于换流器连接状态。低压换流器自动恢复运行后运行状态如图7所示。

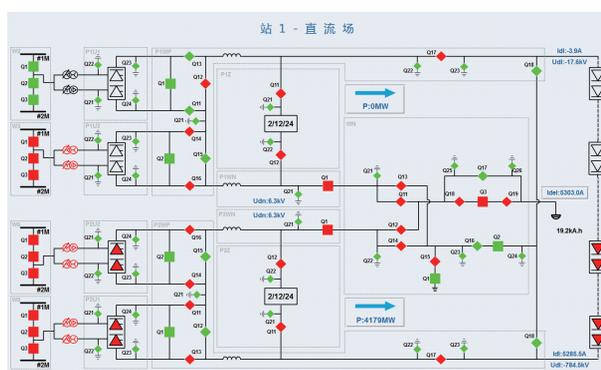


图6 P1闭锁后站1运行状态

Fig.6 Operation status of station 1 after P1 blocked

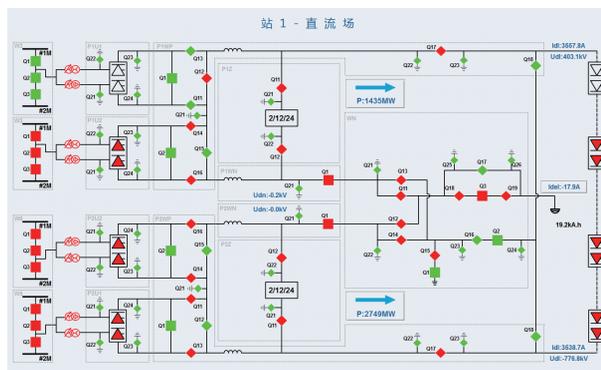


图7 自动恢复后站1运行状态

Fig.7 Operation status of station 1 after auto deblocked

通过对非故障换流器的自动恢复运行,使流过接地极线电流降至最小,并且在运换流器比优化前多,提高了设备可用率。

2 接地极线保护优化

2015年7月13日某特高压工程穿墙套管故障闭锁时由于中性线电压波动较高,导致接地极线绝

缘击穿从而发生接地极引线接地故障,由于故障电流较大,导致部分接地极线被烧坏,接地极区故障示意图如图 8 所示。

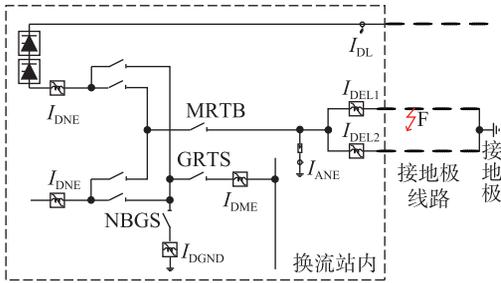


图 8 接地极区故障示意图

Fig.8 Fault diagram of electrode line area

目前接地极线区保护配置了接地极线过负荷和接地接线路不平衡保护。

(1) 接地极线过负荷保护原理,即:

$$|I_{DEL1}| > I_{set} \text{ or } |I_{DEL2}| > I_{set} \quad (4)$$

式(4)中: I_{DEL1} 为接地极线 1 靠近站内直流电流; I_{DEL2} 为接地极线 2 靠近站内直流电流。

系统双极运行时执行极平衡,单极运行时执行功率回降,目前该工程的动作定值为 0.75 p.u.,动作时间为 120 s。

(2) 接地极线不平衡保护,即:

$$|I_{DEL1} - I_{DEL2}| > I_{set} \quad (5)$$

延时 1 s 动作报警。通过分析事件记录,可以得到接地极线过流情况,如图 9 所示。

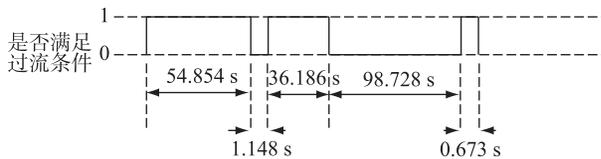


图 9 直流接地极线路故障时接地极线过流情况

Fig.9 Electrode line overload after grounding fault

目前接地极线过负荷保护没有展宽,由于中间保护返回,保护重新计时导致接地极线过负荷保护未动作。

(3) 针对上述情况,可将接地极线过负荷保护中增加展宽时间,且约为动作时间的 2%,并适当缩短定值,上述接地极线过负荷可动作。动作后直流系统将进行功率回降,接地极线将不会被烧坏,但接地故障不会消除。此时不平衡保护也只是报警,不能消除故障。因此需对接地极线不平衡保护进行优化,针对单根接地极线路发生接地短路、不能熄弧的故障,增加保护动作段,保护动作判据建议:

$$|I_{DEL1} - I_{DEL2}| > I_{set1} \& |I_{DEL1}| > I_{set2} \& |I_{DEL2}| > I_{set2} \quad (6)$$

3 个条件同时满足时保护出口,后 2 个条件的判据是为了排除接地极引线断线的可能。保护动作结果为单极运行时执行移相重启,使故障点熄弧,重启后仍满足上述判据,则自动转换成金属回线运行;双极运行时执行极平衡,故障点就无电流,系统可以继续运行。

(4) 为了避免产生中间状态下的风险,自动转金属回线开始一段时间内如未完成则整个工程自动停运。但在某些情况下,譬如两根接地极线在同一地点同时接地故障,此时不平衡保护将不会动作。为了更好的保护接地极线,可以在接地极址侧增加 TA(I_{DEE1}, I_{DEE2}), I_{DEE1} 为接地极线 1 靠近接地极址直流电流, I_{DEE2} 为接地极线 2 靠近接地极址直流电流,与换流站内的 TA 作差,配置接地极线差动保护,保护 TA 配置图如图 10 所示。

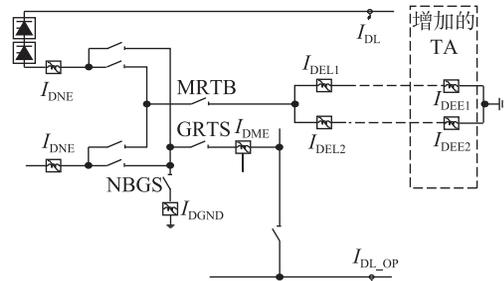


图 10 增加接地极侧测点配置图

Fig.10 Configuration of adding electrode side measurement

保护原理为:

$$|I_{DEL1} - I_{DEE1}| > (I_{set}, k * |I_{DEL1}|) \text{ or } |I_{DEL2} - I_{DEE2}| > (I_{set}, k * |I_{DEL2}|) \quad (7)$$

动作结果为单极运行时执行移相重启,重启不成功闭锁;双极运行时执行极平衡。目前国内哈郑特高压工程的定值 I_{set} 为 100 A, k 取值 0.1,单极移相重启时间取值 5 s,重启不成功 1 s 后闭锁;双极极平衡时间为 1.5 s。

图 11 为哈郑工程单极最小功率接地极线末端故障(距离站内 99%)波形图。从图 11 可以看到,即使在线路末端,差流明显,保护正确动作。

另外,接地极线还配置了接地极线阻抗监视^[13,14],当系统双极平衡运行时,接地极线故障主要靠接地极线阻抗监视报警,但目前在建工程阻抗监视经常误报警,给运维带来不便。因此,可以通过增加接地极线差动监视报警来监视双极平衡运行时的接地故障。

(5) 该策略要求两端 TA 测量精度较高,目前特高压站 I_{DEL1}, I_{DEL2} 都配置了大小量程的 TA,小量程的 TA 额定值为 50 A,测量精度为 0.2%,因此建

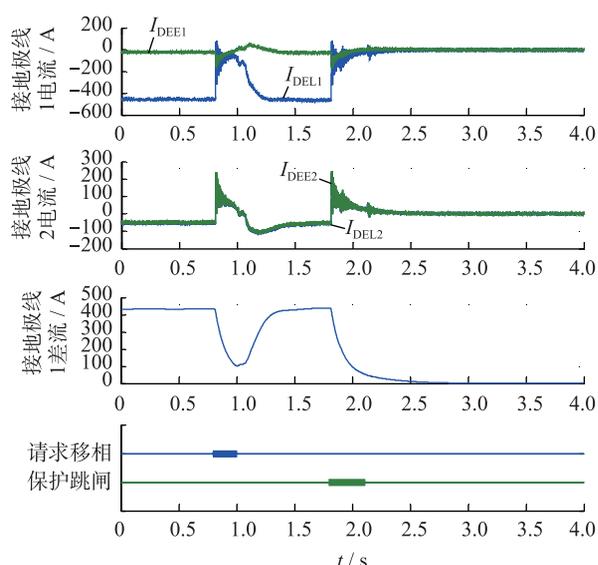


图 11 接地极线末端故障波形图

Fig.11 Wave of fault at the end of electrode line 1

议 I_{DEE1} , I_{DEE2} 亦配置大小量程的 TA, 精度与 I_{DEL1} , I_{DEL2} 保持一致。大量程用于接地极线差动保护, 小量程用于接地极线差动监视报警。报警的原理为:

$$|I_{DEL1} - I_{DEE1}| > I_{set} \text{ or } |I_{DEL2} - I_{DEE2}| > I_{set} \quad (8)$$

I_{set} 推荐取值 2 A, 延时 5 s 报警, 为了防止上述监视误报警, 当 $|I_{DEL1}| > 50$ A 或 $|I_{DEL2}| > 50$ A 闭锁上述报警功能。而当双极平衡运行时, 理论上接地极线电流为 0, 即使有故障接地极线差动报警也不起作用。为了能让接地极线差动报警监视功能起作用, 可以在两极的电流控制器中定时叠加一个 ± 5 A 的附加量, 总功率保持不变, 持续时间 10 s, 可以自动触发, 每天一次, 也可以由运行人员手动触发, 这样接地极线将流过 10 A 电流。可以结合接地极阻抗监视, 就可以准确地判断接地极线是否存在故障。

图 12 为哈郑直流 P1 电流 510 A, P2 电流 500 A 双极运行工况下接地极引线 1 末端接地(距离站内 99%)故障波形图。由图 12 可以看出, 差流超过 2 A, 保护能够正确报警。

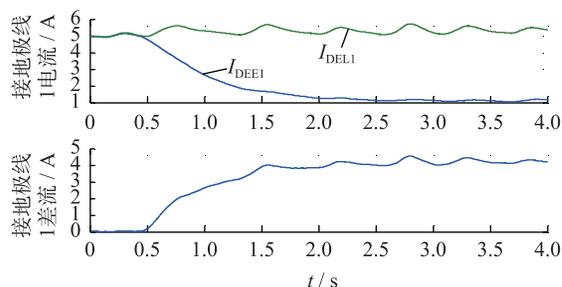


图 12 双极运行时接地极线末端故障波形图

Fig.12 Wave of fault at the end of electrode line 1 in bipolar operation

3 线路重启策略优化

直流线路保护动作一般会启动直流线路故障重启功能, 用于直流架空输电线路瞬时性故障后迅速清除故障恢复送电, 最大限度确保直流系统的正常运行^[15-18]。目前特高压工程线路故障时重启策略采用 2 次原压重启、一次降压重启, 降压重启不成功跳闸。

为了避免线路故障停极后较长一段时间内单极运行, 线路保护在重启逻辑跳闸以后可以进行优化, 重启逻辑跳闸动作后不跳高低压换流变进行开关, 进行极隔离, 自动恢复高压换流器, 此时双极运行的总功率与单极闭锁的后总功率不变, 增加双极运行的概率, 减少了单极大的运行时间, 增加了换流器运行的数量, 提高了设备的可用率。对于分层接入的特高压直流工程, 需要恢复的换流器根据系统要求进行选择。

线路故障自动重启逻辑过程如图 13 所示, 其重启过程与换流器差动保护自动恢复非故障换流器类似, 操作过程基本一致, 与其不同的是线路故障需要两站都进行极隔离, 防止闭锁时由于两站合上旁通开关导致故障点无法熄弧的, 影响单换流器自动重启。

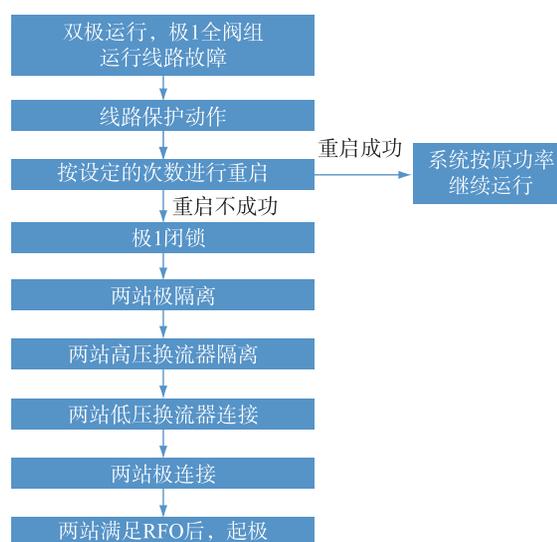


图 13 线路故障重启逻辑流程图

Fig.13 Flow chart of restart logic after line fault

4 结论

通过对换流器差动保护和线路重启策略优化, 大大缩短了单极大的运行时间, 降低了其他换流变及换流站周边变压器遭受直流偏磁的风险, 提高了换流器的可用率, 提高直流系统的可靠性。通过

优化接地极线过负荷和不平衡保护,并增加接地线差动保护和报警监视功能,大大提高了接地极引线的保护水平,为特高压稳定可靠运行提供了重要保障。目前特高压直流保护优化策略已在哈郑、灵绍、酒湖特高压直流中应用,现场试验效果较好,为后续特高压直流建设提供了有益的参考和借鉴价值。

参考文献:

- [1] 肖 华. 特高压直流输电引起的变压器直流偏磁问题的研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.
XIAO Hua. Research on transformer DC bias caused by UHVDC transmission[D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2010.
- [2] 王 建,陈文涛,李晓光,等. 哈密电网变压器直流偏磁实测分析[J]. 电力建设,2015,36(2):80-85.
WANG Jian, CHEN Wentao, LI Xiaoguang, et al. Measurement research on transformer DC magnetic bias in hami power grid [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(2): 80-85.
- [3] 黄道春,魏远航,钟连宏,等. 我国发展特高压直流中一些问题的探讨[J]. 电网技术,2007, 31(8):6-10.
HUANG Daochun, WEI Yuanhang, ZHONG Lianhong, et al. Discussion on several problems of developing UHVDC transmission in China [J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 6-10.
- [4] 李新年,蒋卫平,李 涛. 交直流线路同塔输电对换流变直流偏磁的影响[J]. 电力系统自动化,2011, 35(11):87-91.
LI Xinnian, JIANG Weiping, LI Tao. Influence of same-tower AC/DC hybrid transmission lines on DC bias of converter transformer [J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(11): 87-91.
- [5] 蒯狄正,万 达,邹 云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化,2005, 29(2):81-82.
KUAI Dizheng, WANG Da, ZOU Yun. Analysis and handling of impact of geomagnetically induced current upon electric network equipment in DC transmission [J]. Automation of Electric Power System, 2005, 29(2): 81-82.
- [6] 李长益. 直流单极运行对交流变压器的影响[J]. 华东电力, 2005, 33(1):36-39.
LI Changyi. Effect of DC monopolar operation on ac transformers [J]. East China Electric Power, 2005, 33(1): 36-39.
- [7] 王明新,张 强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析[J]. 电网技术,2005, 29(3):9-14.
WANG Mingxin, ZHANG Qiang. Anyalysis on influence of ground electrode current in hvdc on ac power network [J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 9-14.
- [8] 吴 鹏,田 猛,陆云才,等. 锦—苏特高压直流对江苏电网直流偏磁的影响[J]. 江苏电机工程,2014,33(1):5-7.
WU Peng, TIAN Meng, LU Yuncai, et al. Impacts of Jin-Su HVDC project on transformer DC magnetic bias in Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(1): 5-7.
- [9] 文继锋,张晓宇,程 骁,等. 换流变压器直流偏磁与饱和保护[J]. 江苏电机工程,2013,32(2):28-30.
WEN Jifeng, ZHANG Xiaoyu, CHEN Xiao, et al. DC bias and saturation protection of protection of converter transformer [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(2): 28-30.
- [10] 陶 瑜. 直流输电控制保护系统分析及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2015:242-260.
TAO Yu. Analysis and application of HVDC control and protection system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 242-260.
- [11] 石 岩,韩 伟,张 民,等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术,2007,31(2):11-15.
SHI Yan, HAN Wei, ZHANG Min, et al. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 11-15.
- [12] 张 民,石 岩,韩 伟. 特高压直流保护动作策略的研究[J]. 电网技术,2007, 31(10):10-16.
ZHANG Min, SHI Yan, HAN Wei. Research on action strategy of UHVDC project [J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 10-16.
- [13] 王 磊. PEMO2000 接地极线检测特性分析[J]. 电力建设,2008,29(8):41-43.
WANG Lei. Analysis of ground wire monitoring characteristics of PEM2000 [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(8): 41-43.
- [14] 滕予非,王 鱼,焦在滨,等. 特高压直流输电系统接地极引线阻抗监视策略[J]. 电工技术学报,2016, 31(11):157-163.
TENG Yufei, WANG Yu, JIAO Zaibin, et al. Impedance monitoring scheme for ground electrode line of ultra high voltage DC transmission system [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 157-163.
- [15] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:143-144.
ZHAO Wan Jun. HVDC transmission engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 143-144.
- [16] 浙江大学发电教研组. 直流输电[M]. 2版. 北京:水利电力出版社,1985: 208.
Power generation teaching and research group of Zhejiang University. DC transmission(second edition) [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1985: 208.
- [17] 王海军,吕鹏飞,曾南超,等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启功能研究[J]. 电网技术,2006, 30(23):32-35.
WANG Haijun, LYU Pengfei, ZENG Nanchao, et al. Research on DC line fault recovery sequence of Guizhou-Guangzhou HVDC project [J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 32-35.
- [18] 周红阳,刘映尚,余 江,等. 直流输电系统再启动功能改进措施[J]. 电力系统自动化,2008,32(19):104-107.
ZHOU Hongyang, LIU Yingshang, YU Jiang, et al. Analysis and improvement of force retard function of HVDC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 104-107.

作者简介:



赵森林

赵森林(1981—),男,安徽桐城人,工程师,研究方向为直流控制保护开发与研究(E-mail:zhaosl@nrec.com);

卢亚军(1982—),男,河南虞城人,高级工程师,研究方向为特高压直流成套设计及仿真分析(E-mail:luyajun@chinasperi.sgcc.com.cn);

吕鹏飞(1979—),男,山东烟台人,高级工程师,研究方向为继电保护管理(E-mail:lv_pengfei@sgcc.com.cn);

阮思焯(1992—),男,福建宁德人,高级工程师,研究方向为继电保护管理(E-mail:ruansiye@sgcc.com.cn);

张建锋(1977—),男,江苏洪泽人,高级工程师,研究方向为直流控制保护(E-mail:zhangjf@nrec.com);

刘凯(1986—),男,江苏宿迁人,工程师,研究方向为特高压直流控制保护技术(E-mail:liukai@nrec.com.cn);

冯宇(1978—),男,内蒙古呼和浩特人,高级工程师,研究方向为电力互感与电能质量(E-mail:fengyu@epri.sgcc.com.cn)。

Optimization of UHVDC Protection Action Strategy

ZHAO Senlin¹, LU Yajun², LYU Pengfei³, RUAN Siye³, ZHANG Jianfeng¹, LIU Kai¹, FENG Yu⁴

(1. Nanjing Nari-relays Electric Co., Ltd, Nanjing 211102, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China; 3. National Power Dispatching & Communication Center, Beijing 100031, China; 4. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: UHVDC transmission capacity is large, there will be a great impact on both sides of connecting ac system while one pole is outage, leading another pole in monopolar ground circuit operation mode. At this time the high amplitude dc current flowing into ground will have negative effects on the AC system and the metal parts nearby, producing DC magnetic biasing in converter transformers in operation and transformers nearby, threatening the safety operation of converter transformers and other transformers. Optimizations of the protection strategy in UHVDC including the converter differential protection, the grounding electrode line overload protection, the grounding electrode line unbalance protection and line fault restart logic is described in this paper, extremely shortening the operation time of the monopolar ground circuit operation mode after action of above protections, reducing influence of DC current flowing into the earth on the AC system, metal parts, converter transformers and other transformers. In order to improve the electrode line protection level, the grounding electrode line differential protection and supervision are added. These strategies have been applied in Hami-Zhengzhou UHVDC project and Linzhou-Shaoxin UHVDC project, the result of field test is effective and good.

Key words: UHVDC; protection optimization; restart logic; grounding electrode line protection

(编辑 徐林菊)