

避免高补偿度线路直流偏置风险的断路器合闸控制方法

李海涛¹, 须雷¹, 曹树江², 刘东超¹, 刘鹏¹, 魏颖莉²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要:断路器在关合带并联电抗器的空载线路时, 尤其线路补偿度较高或过补偿时, 合闸电流的直流分量较大, 常伴有合闸电流长时间不过零的现象。在电流不过零期间若断路器分断, 则会产生无法灭弧的风险。针对上述问题, 在对直流偏置电流产生的原理及可能引发故障进行分析的基础上, 比较和分析了装设合闸电阻、调整补偿度、相位控制等抑制直流偏置的常规措施及其局限性, 提出了一种结合选相合闸技术及逐相动态延迟合闸的断路器合闸控制方法, 有效避免了断路器触头持续长时间烧蚀或损坏的风险, 并通过实时数字仿真系统(RTDS)和工程应用验证了该方法的有效性。

关键词: 并联电抗器; 高补偿度; 直流偏置; 选相合闸

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)01-0056-06

0 引言

近年来投运的长距离输电线路的并联补偿度往往比较高, 多个 500 kV 线路的基建、改造工程调试经验表明, 当线路并联补偿度较高时, 在高抗投入状态下对线路进行投切试验曾多次观察到充电电流长时间不能过零的情况^[1]。在分闸过程中, 因直流偏置的存在造成电流长时间没有稳定过零点, 燃弧时间可持续数百毫秒甚至更长, 持续的燃弧将烧蚀灭弧室部件、劣化绝缘气体, 当断口两侧恢复电压较高时将引发重燃或重击穿, 继而产生高幅值的过电压冲击。在 SF₆ 气体被电弧过度加热、介质强度显著下降时, 极端情况下断路器主触头到达分位后仍不能灭弧, 甚至损坏断路器本体, 并可能最终发展成为对地闪络等严重故障^[2-5]。

电流直流偏置的存在对断路器设备的正常开断产生了较大风险, 线路补偿度越高, 线路合闸出现直流偏置的现象越严重。尤其当线路过补偿时, 上述问题更加突出, 需采取相应措施避免此类风险。

在分析高补偿度线路空载合闸时直流偏置产生机理的基础上, 提出一种结合选相合闸技术及基于过零检测的逐相动态延迟合闸的断路器控制方法, 并通过实时数字仿真系统(RTDS)和工程现场应用验证。文中所述方法可有效降低线路空载合闸直流偏置电流所导致的断路器无法灭弧的风险, 避免触头长时间烧蚀或损坏, 为提高断路器操作可靠性提供了有效手段, 有利于电力系统安全稳定运行。

收稿日期: 2018-09-21; 修回日期: 2018-10-25

1 直流偏置电流的产生及常见抑制措施

1.1 直流偏置电流的产生

带有并联电抗器的线路, 其空载合闸时电流产生直流偏置的根本原因在于电抗器的电流不能突变。以单相为分析对象, 假设在 $t = 0$ 时刻断路器合闸, 电抗电感为 L , 电阻为 R , 如图 1 所示。

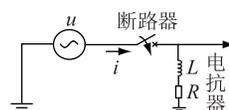


图 1 合闸等效示意图

Fig.1 Equivalent circuit for line energization

合闸前, 系统中的电压 u 和电流 i 分别为:

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (2)$$

式中: U_m , I_m 分别为系统电压、电流峰值; α 为合闸前电源电压初相角; φ 为合闸前电压与电流夹角。

合闸后根据基尔霍夫电压定律:

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

解微分方程得:

$$i = I_{mp} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + \beta \quad (4)$$

$$I_{mp} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (5)$$

$$\varphi_k = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (6)$$

$$\beta = [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{mp} \sin(\alpha - \varphi_k)] e^{-t/\tau} \quad (7)$$

式中: I_{mp} 为交流分量的幅值; φ_k 为合闸后电压与电流的夹角; β 为衰减非周期分量; $\tau = L/R$ 为衰减时

间常数^[2]。

从式(4)可以看出,合闸电流由两部分构成,一部分为周期性交流分量,另一部分为衰减非周期分量。电流直流偏置的严重程度,主要与以下因素相关:电流工频分量的幅值、直流偏置起始值的大小、直流分量的衰减时间常数。因电抗器的电感与电阻之比变化不大,故可以认为直流偏置的衰减速度大致固定,影响直流偏置的因素主要为电流工频与直流分量的幅值,当直流分量幅值大于工频分量时,合闸后线路电流的不过零时间较长。在自由分量没有衰减到足够低时就不会过零,工程中直流偏置电流导致燃弧时间可持续数百毫秒甚至更长,而此时断路器分闸将存在不能熄弧的故障风险。

1.2 直流偏置电流的常见抑制措施

削弱线路合闸电流直流偏置的常见措施主要有装设合闸电阻、调整补偿度、相位控制等^[5]。断路器加装合闸电阻在补偿度过高的状态下,很难抑制高幅值的直流分量,只有在线路补偿度不超过80%时才能完全避免直流偏置的风险^[1]。另一方面由于合闸电阻本身有一定的故障风险,增加了断路器故障概率。

近年来新建线路的补偿度一般在80%以上^[1],若从抑制直流偏置的角度降低补偿度,对降低直流偏置的风险具有积极作用,需将线路总补偿度降至50%~60%^[3-4]以下才能完全避免直流偏置的发生。这将大大降低并联电抗器无功补偿和抑制工频过电压的作用,在实际工程中难以实现。相位控制技术日趋成熟,从理论上只要相位控制在母线电压峰值时进行合闸即可达到抑制直流偏置的目的^[6-11]。但是断路器合闸时间存在固有分散性,若未能准确在预定相位合闸,仍然存在故障风险^[12-17]。

综上,现有措施均存在一定不足和缺陷,无法完全避免断路器分闸过程不能灭弧的风险,目前仍缺乏切实有效的解决方案。

2 断路器合闸控制方法

2.1 控制策略

针对带高抗线路空载合闸直流偏置电流所引发的断路器无法分闸的风险,提出如下断路器合闸控制策略:

(1) 断路器每一相合闸时均采用选相控制,以期在合闸时间分散性小时消除或降低直流分量。

(2) 断路器采用动态延时逐相合闸策略,在检测到本相合闸电流有过零点后再合下一相:在某相合闸完成后,若合闸相位偏差较小,电流迅速过零;

若合闸相位偏差较大,则仍产生直流偏置,此时持续检测本相电流过零点,等待至电流存在过零点之后,再进行下一相合闸。

(3) 重复上述步骤,直至三相均实现成功关合。

(4) 若在关合过程中发现任何一相故障跳闸,即刻终止后续合闸控制,此时已合闸的非故障相电流已经存在过零点,故断路器可靠开断。待故障消除后,再重新进行断路器合闸。

断路器合闸控制流程如图2所示,断路器接收到合闸命令后,首先判定电源侧母线电压及线路电压,若合闸前母线和线路均有电压,则此时判断为同期操作,三相快速合闸;若判定为从母线空充线路的操作,则进行选相合闸控制,在无故障的情况下,继续对合闸电流进行检测,等待本相电流衰减至具有过零点后,再进行下一相的合闸控制。考虑到断路器合闸时间分散性,若断路器合闸于系统电压峰值处,则该相合闸电流迅速过零;若合闸相位偏差较大导致出现直流偏置,则继续等待该相电流衰减至存在过零点之后,再进行下一相的合闸控制。

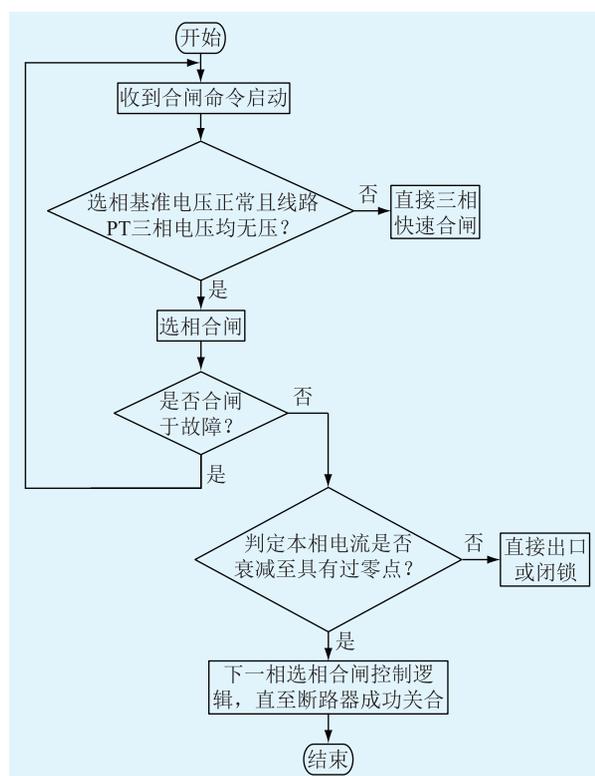


图2 断路器合闸控制流程

Fig.2 Controlled closing process of CB

上述方法结合了选相控制技术及基于过零检测的逐相动态延迟合闸策略,在选相合闸控制存在偏差时仍可消除断路器无法灭弧的风险。

2.2 控制步骤

设定故障判定时间 T_1 , 直流偏置电流最大衰减

时间 T_2 , 且满足 $T_1 < T_2$ 。其中故障判定时间 T_1 应为断路器合闸于故障时经特征量计算且判为故障的时间, 加上继电保护动作出口及断路器切除故障所需时间, 并考虑适当裕度。直流偏置电流最大衰减时间 T_2 为随机合闸时产生的直流偏置电流衰减时间的最大值, 并考虑适当裕度, 可根据具体线路的仿真结果选取。

对断路器采用动态延时逐相合闸, 将目标合点设置为各相系统电压峰值, 因系统三相具备对称性, 原则上各相合闸的前后顺序可以变化。以当前合闸相为例, 在本相完成合闸后, 在进行下一相合闸之前, 可能发生如下情况。

情况 1: 如图 3 所示, T_1 时间到达之前检测到合闸电流可靠过零, 此时应等待至 T_1 到达之后, 再开放下一相的合闸控制, 并引入选相控制延时后发出下一相合闸命令。

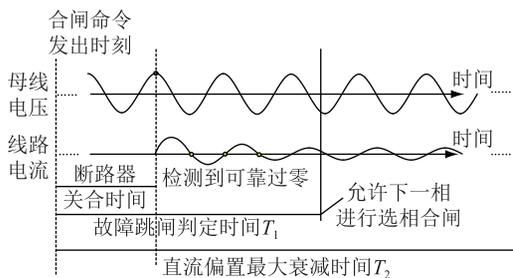


图 3 T_1 到达前存在可靠过零

Fig.3 Closing current cross zero before T_1

引入故障判定时间 T_1 的目的, 在于防止检测到故障电流过零点提前发出下一相合闸指令, 若本相合闸于故障, 在下一相完成合闸且存在直流偏置期间, 仍存在继电保护跳闸后切断非故障相不过零电流的风险。

情况 2: 如图 4 所示, 故障判定时间 T_1 到达之后且直流偏置电流最大衰减时间 T_2 到达之前检测到合闸电流存在可靠过零点, 此时在检测到合闸电流可靠过零点时, 开放下一相的合闸控制, 并引入选相控制延时后发出下一相合闸命令。

此类情况因选相合闸相位存在偏差, 导致合闸电流存在一定的直流偏置, 且在 T_1 时间内仍未充分衰减, 导致 T_1 时间内电流持续不过零, 待衰减一段时间后, 在 T_2 到达之前电流过零。

情况 3: 如图 5, 极端情况下, 合闸在最恶劣的相位且线路补偿度较高, 直流偏置电流很大, 在最大衰减时间 T_2 到达之后仍无法检测到合闸电流存在可靠过零点, 此时可根据预设方式选择是否出口。若认为经过 T_2 长时间的衰减, 直流偏置已经很小, 不会给断路器分闸造成风险, 则可选择开放下一相

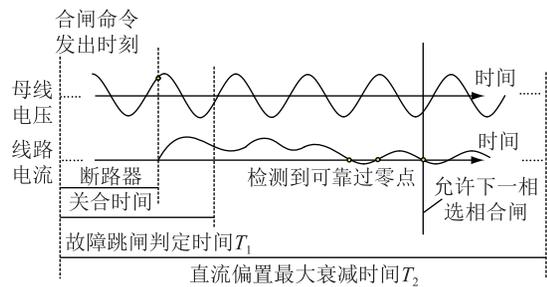


图 4 T_1 和 T_2 之间检测到可靠过零

Fig.4 Closing current cross zero between T_1 and T_2
合闸控制, 否则选择为闭锁出口。

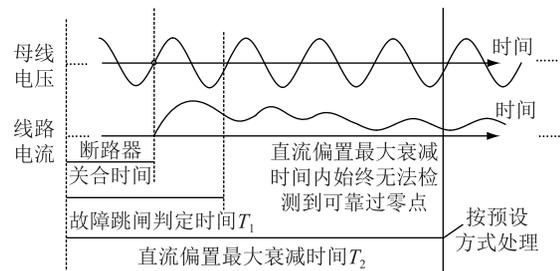


图 5 T_2 到达后仍未检测到可靠过零

Fig.5 Closing current not cross zero before T_2

T_2 时刻设定原则为不小于直流偏置电流衰减时间的最大值, 装置可提供闭锁非全相保护的输出接点, 若在合闸控制期间不闭锁非全相保护功能, 则 T_2 时刻选取还需要考虑和非全相时间进行配合。

3 RTDS 系统仿真及验证

搭建 RTDS 仿真试验系统, 如图 6 所示。将开关位置等状态量接入断路器合闸控制设备, RTDS 模拟量输出经过功率放大器转换为 57.7 V/1 A 信号, 送给断路器合闸控制装置, 试验中 RTDS 仿真系统自动记录系统电压、电流信号以及合闸控制信号等, 断路器合闸控制设备也可进行控制过程录波。

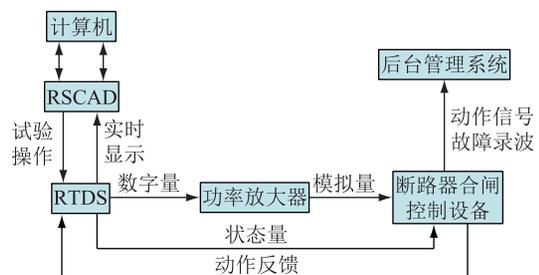


图 6 实验系统连接示意图

Fig.6 RTDS simulation experimental system connection

系统等值参数设置电压为 525 kV, 正序阻抗为 $20 \angle 85 \Omega$, 零序阻抗为 $30 \angle 82 \Omega$, 线路参数如表 1。并联电抗器为线路高抗, 按照 90% 补偿度, 高抗每

相电感取为 5.55 H,中性点小电抗取为 0.637 H。
CT 变比为 200 0 A/1 A,PT 变比为 525 kV/100 V。

表 1 线路参数
Table 1 Line parameter

项目	参数
正序电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.019 6
正序感抗/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.280 1
正序并联容抗/ $(\text{M}\Omega \cdot \text{km})$	0.235 7
零序电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.182 8
零序感抗/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.860 5
零序并联容抗/ $(\text{M}\Omega \cdot \text{km})$	0.346
线路长度/km	150

通过控制断路器的合闸相位,发现当断路器各相均合闸于对应相电压的过零点时,不过零时间最长。如图 7 所示,第一个通道为母线电压互感器(PT)电压,第 2、3、4 通道分别为线路 A、B、C 三相的电流。可见,因合闸过程电流存在衰减非周期分量,导致叠加电流交流分量之后,合闸电流完全偏向于零轴的一侧,在数百毫秒内没有过零点。按照逐相延时合闸策略,在 A 相合闸电流衰减至存在过零点后,才发出 B 相合闸命令,C 相类似。通过本次操作,验证了在断路器选相合闸相位偏差最恶劣的情况下,仍可以通过延时合闸策略避免电流不过零期间断路器无法灭弧的风险。

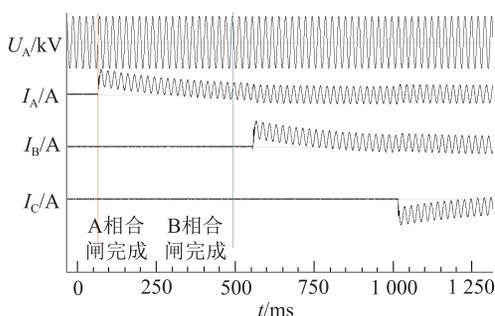


图 7 合闸于母线电压过零

Fig.7 Close at busbar voltage zero

如图 8 所示,通过调整断路器合闸控制装置中的断路器各相合闸时间参数,并将目标合闸角度设定为系统电压峰值处,可见当各相合闸于电压峰值时,合闸电流的直流偏置消除并迅速过零,在故障判定时间到达后随即发出下一相合闸指令,不会对断路器分闸造成风险。

4 工程应用及验证

线路高抗过补偿会引起线路充电过程中合闸电流直流偏置问题,一旦送电到故障线路,继电保护跳闸,可能因非故障相电流长时间不过零,导致

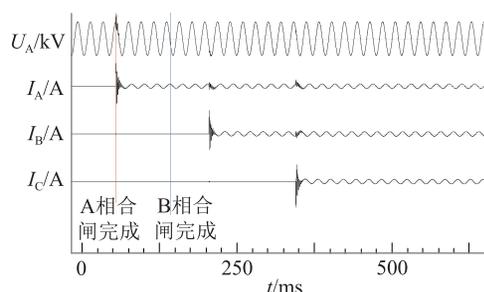


图 8 合闸于母线电压峰值

Fig.8 Close at busbar voltage peak

开关无法断弧,存在开关触头损坏甚至爆炸的风险,威胁电网安全运行。针对国内某些超高压线路存在补偿度较高的问题,经过现场论证,采用断路器合闸控制装置,实现母线电压峰值选相关合及基于合闸电流过零检测的动态延时控制策略,现场应用效果验证了文中所述方法的有效性。

断路器合闸控制装置工程应用时接线示意图如图 9 所示,装置在保护室内组屏,接入母线电压单相 PT 信号、线路三相 PT 及电流互感器(CT)信号,将测控下发的合闸命令接入装置内,装置分相的合闸命令输出接入操作箱分相合闸端子。考虑二次回路修改后对事故总信号的影响,通过回路设计配置合后继电器 KKJ',并和原合后继电器 KKJ 并联,保证事故总逻辑正确性。考虑到 500 kV 线路开关非全相保护整定延时约为 2.5 s,为避免对非全相动作逻辑的影响,设定合闸控制装置最长等待 1 s 后进行下一相合闸,将三相非全相时间最大值控制在 2 s 左右,以实现和非全相的时间配合。合闸控制策略仅在空充时起作用,若检测到线路 PT 任意相有电压则自动退出延时控制逻辑。

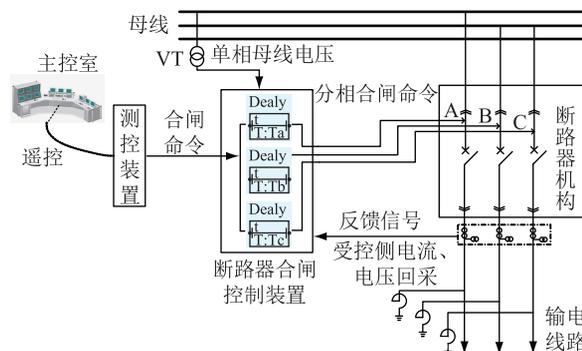


图 9 断路器合闸控制装置接线示意图

Fig.9 CB controller connection

合闸控制装置将单相合闸命令发出之后,设定一个时间窗口用以判定是否合闸于故障,现场设定为 150 ms 内无断路器故障跳闸,装置则认为合闸成功。当断路器合闸时间比较稳定时,通过选相控制可以消除或极大程度减小电流直流偏置。工程投

运波形如图 10 所示,第 1 个通道为母线电压,第 2、3、4 通道分别为 A、B、C 相线路电流。可见,各相合闸相位均比较理想,基本消除了合闸电流的直流偏置,合闸后各相电流均迅速过零。

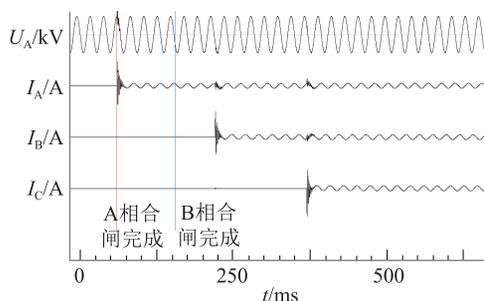


图 10 500 kV 线路电压峰值关合时直流偏置被消除

Fig.10 DC offset in current is eliminated when 500 kV line CB close at busbar voltage peak for each phase

需注意的是,工程运行中的一些断路器因开关老化等因素,合闸时间分散性较大,故实际关合点也可能偏离电压峰值。所以,仅仅依靠选相控制无法完全避免直流偏置的风险。这种情况下,合闸控制装置将通过检测电流过零点进行延迟逐相合闸,延时时间根据电流衰减情况动态变化,仍可以避免断路器开断不过零电流的风险。

故文中提出的合闸控制方法和传统的选相控制不同,本方法放宽了对断路器合闸时间分散性的要求,即使没有合闸在理想相位,仍然可以通过延迟合闸策略实现断路器的可靠投入。工程投运波形如图 11 所示,因断路器合闸时间分散性,导致 B 相合闸偏差较大,造成电流不过零时间变长,故等待 B 相电流衰减至有可靠过零点之后,控制装置才发出 C 相合闸命令,保证此时已合闸相已存在可靠的电流过零点,不会对断路器开断造成风险。

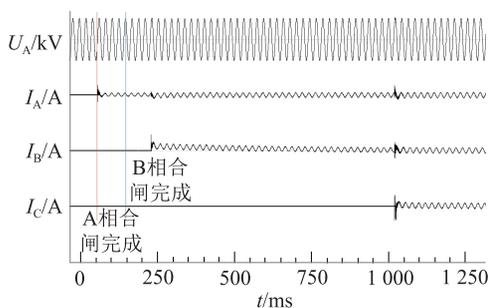


图 11 500 kV 线路关合时 B 相存在关合偏差

Fig.11 Deviation of phase B when 500 kV line CB closing

5 结语

针对高补偿度线路空充时直流偏置电流所引发的断路器无法分闸的风险,常用的装设合闸电

阻、调整补偿度、相位控制等措施均存在一定程度的不足和缺憾。

文中提出的结合选相合闸及基于过零点检测的逐相动态延迟合闸的断路器合闸控制方法,在关合相位控制准确时可以消除电流直流偏置,在关合相位控制偏差较大时,仍然能通过检测合闸电流过零点进行延迟关合,降低了对断路器关合时间分散性的要求,可完全避免分闸对断路器触头长时间烧蚀或损坏的风险,有效解决了高补偿度线路投运时的实际问题,有利于开关设备可靠性及系统安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 李雨,徐党国,孙云生,等. 应用相控合闸技术抑制并联补偿线路断路器直流偏置问题的研究[J]. 高压电器,2013,49(2):103-108.
LI Yu, XU Dangguo, SUN Yunsheng, et al. Application of phase control technology in the prevention of DC offset risk of circuit breaker of EHV transmission line with parallel reactance [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 103-108.
- [2] 黄然,赵现平,马仪,等. 并联补偿线路合闸操作直流偏置研究[J]. 云南电力技术,2014,42(1): 82-85.
HUANG Ran, ZHAO Xianping, MA Yi, et al. Research on DC offset in closing operation of transmission lines with shunt reactors [J]. Yunan Electric Power, 2014, 42(1): 82-85.
- [3] 杜宁,徐瑞林,项祖涛,等. 带高抗 500 kV 长线路合闸引起的电流直流偏置问题及应对措施[J]. 电网技术,2012,36(12):200-204.
DU Ning, XU Ruilin, XIANG Zutao, et al. Research on direct current offset caused by switching on 500 kV long-distance transmission lines with high voltage shunt reactors and its countermeasures [J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 200-204.
- [4] 邓春,李雨,徐党国,等. 超高压输电线路并联补偿配置原则研究[R]. 北京:华北电力科学研究院有限责任公司,2009.
DENG Chun, LI Yu, XU Dangguo, et al. Research on parallel compensation of extra-high voltage transmission lines [R]. Beijing: North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., 2009.
- [5] 张孔林,廖福旺,邓超平,等. 断路器投切高补偿度 500 kV 空载线路的风险与对策[J]. 电力与电工,2010(4): 5-8.
ZHANG Konglin, LIAO Fuwang, DENG Chaoping, et al. Risk and countermeasure of high-level 500 kV load line of circuit breaker [J]. Electric Power and Electrical Engineering, 2010(4): 5-8.
- [6] 娄殿强,姚其新. 断路器的相位控制技术及应用[J]. 高压电器,2008,44(4):353-355.
LOU Dianqiang, YAO Qixin. Phase control technology of circuit breaker with application [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 353-355.
- [7] 罗干平. 126 kV SF6 断路器分闸时间特性统计分析[J]. 高

- 电压技术,2001,27(1):67-68.
- LUO Ganping. Statistical analysis of opening time of 126 kV SF6 circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1): 67-68.
- [8] High-voltage switchgear and controlgear-Part 302: alternating current circuit-breakers with intentionally non-simultaneous pole operation; IEC/TR 62271-302—2010[S].
- [9] 陈梦涛,张兆君,谭风雷,等. 电动汽车充电站多阶段选址规划[J]. 电力工程技术,2017,36(6):117-121.
- CHEN Mengtao, ZHANG Zhaojun, TAN Fenglei, et al. Multi stage location planning of electric vehicle charging station [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 117-121.
- [10] 周沛洪,戴敏,娄颖,等. 1 000 kV 交流断路器开断电流的直流分量时间常数与零偏现象[J]. 高电压技术,2009,35(4):722-730.
- ZHOU Peihong, DAI Min, LOU Ying, et al. DC component time constant and zero offset phenomena of breaking current for 1 000 kV circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 722-730.
- [11] 娄殿强,姚其新. 断路器的相位控制技术的应用[J]. 高压电器,2008,44(4):353-355.
- LOU Dianqiang, YAO Qixin. Phase control technology of circuit breaker with application [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 353-355.
- [12] 崔忠宁,文远芳,唐波,等. 断路器取消合闸电阻限压措施的探讨[J]. 水电能源科学,2011,29(2):150-152.
- CUI Zhongning, WEN Yuanfang, TANG Bo, et al. Discussion on breaker overvoltage-control measures for elimination closing resistance [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2011, 29(2): 150-152.
- [13] 丁富华,邹积岩,段雄英. 相控开关的最佳投切相位研究[J]. 高压电器,2005,41(6):408-411.
- DING Fuhua, ZOU Jiyang, DUAN Xiongying. Research on optimum switching phase of phasing switches [J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(6): 408-411.
- [14] 段雄英,廖敏夫,丁富华,等. 相控开关在电网中的应用及关键技术分析[J]. 高压电器,2007,43(2):113-117.
- DUAN Xiongying, LIAO Minfu, DING Fuhua, et al. Application and key technology analysis of controlled switching [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 113-117.
- [15] 段雄英,黄智慧,李蕊,等. 两种故障电流相控开断电流零点预测算法对比[J]. 高压电器,2011,47(1):5-9.
- DUAN Xiongying, HUANG Zhihui, LI Rui, et al. Comparison between two methods of zero-cross point prediction for controlled fault current interruption [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1): 5-9.
- [16] 王剑,朱芸. 500 kV 输电线路断路器合闸电阻配置原则[J]. 电力系统自动化,2008,32(19):100-103.
- WANG Jian, ZHU Yun. Configuration criterion of circuit breaker closing resistors in 500 kV transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 100-103.
- [17] 司马文霞,庞锴,杨庆. ±800 kV 特高压换流站直流侧操作过电压的仿真与研究[J]. 高压电器,2008,2(2):126-128.
- SIMA Wenxia, PANG Kai, YANG Qing. Simulation and investigation on switching overvoltage at DC side of UHVDC converter station with capacity of ±800 kV [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 2(2): 126-128.

作者简介:



李海涛

李海涛(1984),男,硕士,高级工程师,从事断路器选相控制技术及其一次设备在线监测研究(E-mail:liht@nrec.com);

须雷(1976),男,硕士,研究员级高级工程师,从事智能变电站过程层及电子式互感器的研究(E-mail:xul@nrec.com);

曹树江(1968),男,硕士,研究员级高级工程师,从事继电保护专业工作。

Control method of circuit breaker to avoid DC offset risk in closing transmission lines with high level of compensation

LI Haitao¹, XU Lei¹, CAO Shujiang², LIU Dongchao¹, LIU Peng¹, WEI Yingli²

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: DC offset in current of circuit breaker is non-ignorable during transmission lines energizing with shunt reactors, especially when transmission lines have a high level of compensation or overcompensated. In most cases, there is a long time without any zero-crossing point of current when energizing, and it will cause arc extinction problem for the circuit breaker if there is a trip operation. Based on the principle of DC offset generation and the failure risks of circuit breakers caused by DC offset, conventional measures to suppress DC offset are discussed, which include addition of closing resistors for the circuit breaker, reducing compensation degree and controlled closing. A method which combine the controlled closing technology and dynamic delay closing for each phase are proposed, then the risk can be successfully eliminated during transmission lines energizing. The effectiveness of above method is validated by RTDS simulation and field test on several transmission lines.

Keywords: high level of compensation; DC offset; controlled closing

(编辑 钱悦)