

变压器式可控高抗对线路差动保护的影响及对策研究

刘革新, 杨 琰, 吴殿峰, 周启文, 胡 习, 徐晓春, 朱晓彤

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 通过研究变压器式可控高抗工作原理, 分析了线路上并联了变压器式可控高抗后对线路差动保护的影响, 比较了几种解决方案的优缺点。提出适用于并联了可控高抗输电线路的时域电容电流补偿计算方法。该方法可以满足长距离超高压线路差动保护暂态补偿电容电流的要求, 提高差动保护的灵敏度。提出配置带补偿和不带补偿功能的差动保护方案, 有效地保证了可控高抗 CT 异常时差动保护的可靠性。通过工程应用验证了适用于并联了可控高抗输电线路的时域电容电流补偿计算方法的可行性。

关键词: 可控并联电抗器; 变压器式可控高抗; 线路差动保护; 电容电流补偿; 时域补偿

A study of effect of controllable shunt reactor of transformer type on line differential protection and countermeasures

LIU Geming, YANG Yan, WU Dianfeng, ZHOU Qiwen, HU Xi, XU Xiaochun, ZHU Xiaotong
(Nanjing NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Through the study of Controllable Shunt Reactor of Transformer Type (CSRT), the effect of CSRT used on transmission line for line differential protection is analyzed and different solutions are proposed and compared. A new method of time domain compensation for CSRT used on transmission line is presented. The transient capacitive current compensation requirements and high sensitivity of line differential protection are satisfied by this method. High reliability of line differential protection is ensured by the configuration with and without compensation in parallel while CT installed on CSRT is abnormal. The feasibility for the method above is verified by an engineering application.

Key words: controllable shunt reactor; controllable shunt reactor of transformer type (CSRT); line differential protection; capacitive current compensation; time domain compensation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0133-06

0 引言

作为长距离超高压输电系统中的重要设备, 并联电抗器具有降低线路有功损耗、补偿长线电容效应、防止谐振过电压、减少潜供电流、限制工频电压升高、抑制操作过电压等多种功能。与传统的固定并联电抗器相比, 可控并联电抗器控制灵活, 能有效协调输电系统限制过电压和无功调节间的矛盾, 提高电网的运行效益, 因此可控并联电抗器具有广阔的应用前景。但是运行中调节并联电抗器的容量会导致线路保护装置中的差动电流实时发生变化, 这给传统线路差动保护的定值整定、电容电流补偿以及补偿参数校核等方面带来诸多困难, 之前国内的可控并联电抗器基本仅在母线上使用, 没有在输电线路使用。

为了解决可控并联电抗器在输电线路使用给线路保护带来的问题, 本文详细研究了可控高抗对线路差动保护的影响及对策, 并以西北第二通道工程“沙洲-鱼卡”线路为工程案例, 验证了线路差动保护应对可控高抗策略的可行性。

1 变压器式可控高抗的工作原理

可控高抗主要分为两大类: 磁饱和式可控高抗 (Magnetically Saturation Controlled Reactor, MCSR) 和变压器式可控高抗 (Controllable Reactor of Transformer Type, CRT)^[1]。磁饱和式可控高抗通过直流控制电流的激磁改变铁心的磁饱和度, 能平滑调节无功输出^[2]。但是磁饱和式可控高抗的工作电流中存在较大的谐波成分, 同时响应速度慢^[3], 所以超高压输电线路通常选用谐波电流更小、响应速度更快、

功率损耗更小的变压器式可控高抗。

变压器式可控高抗的结构如图 1 所示, 是将变压器和电抗器设计成一体, 将变压器的漏抗设计为 100%, 充分利用了变压器的降压作用, 使晶闸管阀能工作在低电压下, 在变压器的低压侧接入晶闸管阀进行调节, 实现感性无功功率的控制。变压器式可控电抗通过打开、闭合其二次侧的开关组合, 使电抗器根据需要输出不同补偿度的无功容量(如 10%、40%、70%、100%)。

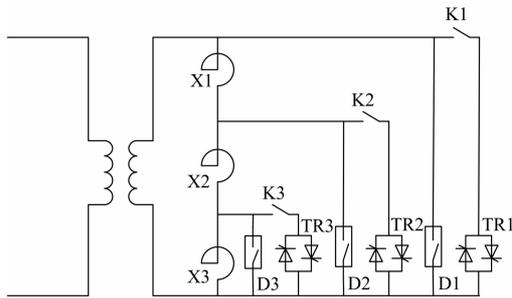


图 1 变压器式可控高抗结构图
Fig. 1 Structure of CSRT

线路正常运行时, 可控高抗可根据需求投入 10%或 40%或 70%的容量, 保证联网通道输电能力, 提升系统薄弱点故障后电压恢复水平。线路故障后, 线路两侧的可控高抗快速联动调节至 100%容量, 有效抑制系统过电压和潜供电流。

2 变压器式可控高抗对线路差动保护的影响

2.1 差动保护的整定

以 750 kV 沙洲-鱼卡线路为例, 线路全长 324.5 km, 线路上电容电流一次值约为 600 A, 线路两侧同时配置可控高抗, 可控高抗调节至 100%容量时电抗器中流过的一次电流约为 260 A。当线路两侧可控高抗调节至 100%容量时, 线路上的差动电流约为 80 A; 当线路两侧可控高抗调节至 10%容量时, 线路上的差动电流约为 548 A。由于沙洲-鱼卡线路两侧系统不强, 为保证切除高阻故障的灵敏度, 差动保护电流定值可能会整定为 400 A, 可能小于实际线路运行中的稳态差动电流。按照《220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程》中规定, “零序电流差动差流定值和分相电流低定值躲不过线路稳态电容电流须经线路电容电流补偿”。可见, 如果不解决电容电流补偿问题, 整定差动保护定值无法兼顾灵敏性和可靠性。

2.2 电容电流的补偿

传统并联固定容量高抗的输电线路中, 差动保护装置一般通过设置线路两侧的电抗器定值和线路

容抗定值完成电容电流补偿功能, 无论是稳态补偿方式还是时序暂态补偿方式, 都能提高差动保护的灵敏度。但并联了变压器式可控高抗后, 电抗器容量在运行中实时调节变化, 显然通过整定电抗器定值的方式已经不再适用。取消电容电流补偿功能, 抬高差动保护定值的做法, 对于长距离输电线路, 必然牺牲了差动保护的灵敏度, 因此需要研究新的电容电流补偿方法。

2.3 补偿参数的校验

传统并联固定容量高抗的输电线路中, 可以根据线路容抗参数和电抗器参数估算出线路理论上的差动电流, 结合实际采样感受到的差动电流就可以判断出保护装置整定的补偿参数是否正确。但是并联可控高抗后, 装置感受到的差动电流也在动态变化, 因此需要研究新的补偿参数校验方案。

3 解决对策

3.1 可控高抗的电流补偿方案

根据叠加原理, 带高抗的线路电容电流可以认为由不带高抗时输电线路的容性电流和线路两侧高抗电流两部分组成。由于输电线路的容抗参数固定, 所以仍然可以采用现有的稳态补偿或者时域暂态补偿方式计算出不带高抗时输电线路存在的容性电流。对于线路两侧可控高抗流过的电流, 分析出有以下几种解决方案。

(1) 线路差动保护通过增加开入量, 获取变压器式可控高抗容量的档位调节开出信息(如第 1 档、第 2 档、第 n 档), 动态调整保护装置使用的电抗器参数, 然后结合现有的稳态或暂态补偿方式完成高抗电流的计算。

(2) 线路差动保护与变压器式可控高抗的控制调节设备通信, 获取变压器式可控高抗的补偿度信息(如 10%、40%、70%、100%), 结合现有的稳态或暂态补偿方式完成高抗电流的计算。

(3) 线路差动保护直接采集变压器式可控高抗的电流, 完成高抗电流的补偿。

上述方案中, 方案(1)需要针对工程应用定制开发线路保护装置, 通用性较差, 因为变压器式可控高抗的档位调节数量并不固定, 而且档位调节开出的特性也不固定。方案(2)利用通信获取可控高抗的容量信息, 通用性较好, 但差动保护的可靠性和实时性依赖于通信质量和通信速度, 所以很难应用于线路保护。方案(3)需要增加采样环节, 硬件成本较方案(1)、(2)稍高, 但通用性、实时性及可靠性更优, 在常规变电站或数字化变电站的线路保护中都能应用, 即使针对磁饱和式可控高抗也能适用, 因此建

议采用方案(3)。

3.2 带补偿功能的差动电流计算方法

图 2 为超高压长距离两侧带高抗的[]型等效线路。文献[5]的仿真表明时域补偿差动判据能够有效补偿暂态电容电流, 有利于降低动作门槛, 从而大大提高保护的灵敏度和动作速度, 但是文献[5]中的时域差动判据仅适用于固定容量的高抗, 不适用于容量可变的高抗, 因此需要研究新的带补偿功能的差动保护判据。由于线路分布电容参数固定不变, 因此仍然可以采用文献[5]中时域补偿方法对线路电容电流进行补偿, 高抗电流的时域补偿可以通过采集瞬时值完成, 那么改进后带补偿功能的线路两侧电流瞬时值为

$$i_j^a(t) = i_j^a(t) - i_{C_j}^a(t) - i_{L_j}^a(t) = i_j^a(t) - \left(\frac{c_{pg}}{2} \frac{u_j^a(t + \Delta t) - u_j^a(t - \Delta t)}{2\Delta t} + \frac{c_{pp}}{2} \frac{u_j^a(t + \Delta t) - u_j^a(t - \Delta t)}{\Delta t} - \frac{c_{pp}}{2} \frac{u_j^b(t + \Delta t) + u_j^c(t + \Delta t)}{2\Delta t} + \frac{c_{pp}}{2} \frac{u_j^b(t - \Delta t) + u_j^c(t - \Delta t)}{2\Delta t} \right) - i_{L_j}^a(t) \quad (1)$$

$$i_k^a(t) = i_k^a(t) - i_{C_k}^a(t) - i_{L_k}^a(t) = i_k^a(t) - \left(\frac{c_{pg}}{2} \frac{u_k^a(t + \Delta t) - u_k^a(t - \Delta t)}{2\Delta t} + \frac{c_{pp}}{2} \frac{u_k^a(t + \Delta t) - u_k^a(t - \Delta t)}{\Delta t} - \frac{c_{pp}}{2} \frac{u_k^b(t + \Delta t) + u_k^c(t + \Delta t)}{2\Delta t} + \frac{c_{pp}}{2} \frac{u_k^b(t - \Delta t) + u_k^c(t - \Delta t)}{2\Delta t} \right) - i_{L_k}^a(t) \quad (2)$$

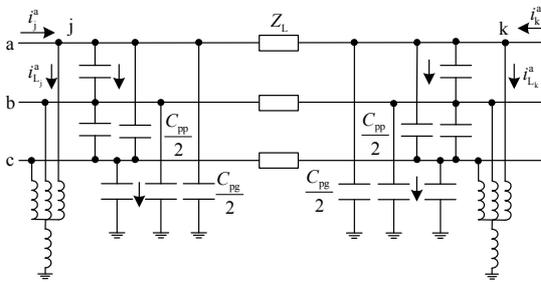


图 2 两侧带高抗线路的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of transmission line with one shunt reactor on each side of the line

补偿后的差动电流瞬时值为 $i_d^a(t) = i_j^a(t) + i_k^a(t)$, 补偿后的制动电流瞬时值为 $i_r^a(t) = i_j^a(t) -$

$i_k^a(t)$, 然后结合传统差动保护原理完成动作方程即可。

3.3 线路保护功能的配置方案

采集变压器式可控高抗的电流是为了解决差动保护的灵敏度问题, 但是可控高抗 CT 与边开关、中开关 CT 的重要性不同, 因为可控高抗不是电源点, 可控高抗 CT 出现异常时不应牺牲线路差动保护的全部性能。因此针对并联了变压器式可控高抗的线路建议配置两种差动保护, 第一种为带电容电流补偿功能的差动保护(见图 3 或图 4), 引入线路两侧的开关电流和可控高抗的电流参与计算, 此差动保护的動作门槛比较低, 可以保证动作灵敏度; 第二种为不带电容电流补偿功能的差动保护(见图 5), 仅引入线路两侧的开关电流参与差动保护计算, 此段差动保护的動作门槛较高, 一般躲投入最低容量的可控高抗时线路上的容性电流, 不受可控高抗 CT 的任何影响, 保证金属性故障及绝大多数高阻故障时线路差动保护的可靠性。两种差动保护并行计算, 保证线路差动保护的最优性能。另外, 可控高抗对距离保护和零序保护的影响不大, 所以距离、零序等后备保护用的电流仅采用边开关、中开关的 CT 和电流, 与可控高抗的 CT 电流无关。

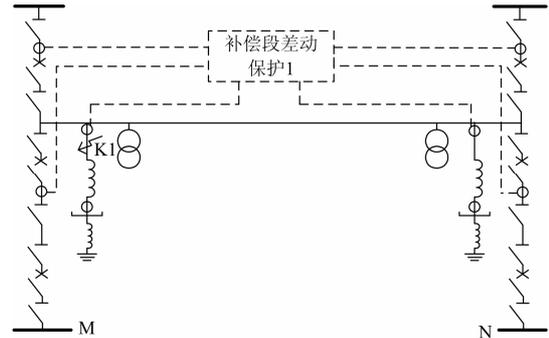


图 3 带补偿功能的差动保护配置 1 示意图

Fig. 3 Configuration 1 of line differential protection with compensation

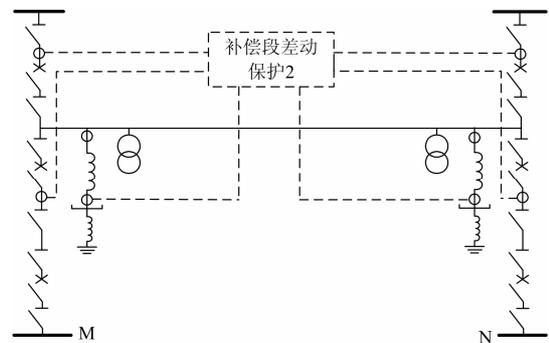


图 4 带补偿功能的差动保护配置 2 示意图

Fig. 4 Configuration 2 of line differential protection with compensation

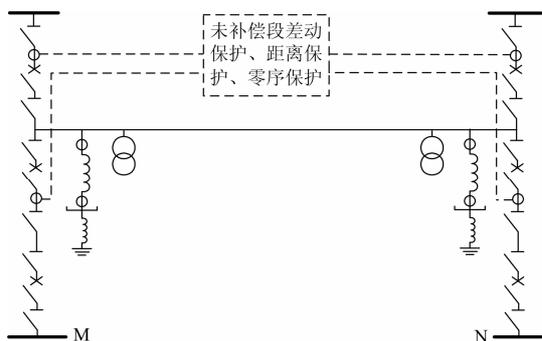


图 5 不带补偿功能的差动保护、距离保护、零序保护配置示意图

Fig. 5 Configuration of line differential protection without compensation, distance protection and zero sequence protection

3.4 CT 异常的处理原则

由于可控高抗 CT 与边开关、中开关 CT 的重要性不同, 根据上述线路差动保护的配置方案, 各 CT 异常时建议处理原则如下:

1) 对于数字化采样或者传统模拟采样的线路保护, 当边开关或者中开关 CT 断线时, 仍然根据线路保护“CT 断线闭锁差动”的控制字来选择是否闭锁线路所有差动保护功能。当可控高抗 CT 断线时, 仅退出带电容电流补偿功能的差动保护, 仍然保留不经补偿的差动保护。

2) 对于数字化采样的线路保护, 当边开关或者中开关 CT 电流的品质无效或失步时, 闭锁线路所有差动保护功能。当可控高抗 CT 电流的品质无效或者失步时, 退出带电容电流补偿功能的差动保护, 仍然保留不经补偿的差动保护。

3.5 电抗器 CT 选择

采集变压器式可控高抗的电流可以来自首端 CT 或者尾端 CT。如果选择可控高抗首端 CT 的电流, 那么线路保护经过补偿后的差动保护范围见图 3 所示。如果选择尾端 CT 的电流, 那么线路保护经过补偿后的差动保护范围见图 4 所示。由于线路差动保护和高抗保护动作后都会跳开边断路器和中断路器, 所以理论上选择首端 CT 或者尾端 CT 都可以满足工程应用需求。但是工程实际应用中高抗首端、尾端的 CT 通常选用 P 级, 而且 CT 变比一般小于 600:1(或者 600:5), 这样 K1 点(见图 3)发生金属性故障时, 可能造成高抗首端 CT 严重饱和。选择首端 CT 参与补偿计算的线路差动保护必须具备极强的 CT 饱和识别能力才能保证 K1 点故障时线路差动保护不动作。但是从保护系统的角度出发, 这种严重故障如果线路差动保护不动作, 将给单套

配置的高抗保护带来极大的动作压力, 一旦高抗保护拒动将给系统带来非常严重的危害。而选择尾端 CT 的电流参与补偿后线路差动保护计算, 不仅可以避免首端 CT 的严重饱和问题, 而且可以将线路差动保护当作高抗保护的后备保护, 更有利于保护系统。因此选择尾端 CT 参与线路差动保护的补偿计算相对较优。

3.6 补偿参数的校验方案

采集了变压器式可控高抗的电流后, 线路差动保护装置中仅须保留线路容抗参数, 因此仅校验线路容抗参数是否整定正确。根据容抗参数可以估算出线路理论上的容性电流, 根据边开关、中开关、可控高抗中的电流可以计算出线路实测容性电流, 两者对比即可以判断出线路容抗参数是否整定正确。

4 工程应用案例

西北规划建设的新疆与西北主网联网的 750 kV 第二通道输变电工程沙洲-鱼卡双回线路共配置 4 组线路变压器式 750 kV 可控高抗, 每组容量 390 Mvar, 固定容量 39 Mvar, 可调容量 351 Mvar, 3 级可调, 单极容量 117 Mvar^[4]。沙洲-鱼卡线路两侧的开关 CT 变比为 2 500 A/1 A, 电抗器 CT 变比为 400 A/1 A, 线路全长 326.4 km, 折算到二次侧的线路全长参数如下: $Z_1 = 30.71 \Omega$, $Z_0 = 90.11 \Omega$, $\Phi_1 = 87^\circ$, $\Phi_0 = 77^\circ$ 。将新的时域补偿方案应用于沙洲-鱼卡线路保护装置中, 并于 2013 年 6 月底成功投运。投运前, 沙洲-鱼卡 II 回线在沙洲侧出口进行了 A 相接地的人工短路试验, 故障前可控高抗投入 70% 容量, 故障后线路保护跳闸, 可控高抗控制器收到跳闸令后将可控高抗调节至 100% 容量, 沙洲侧保护装置录波如图 6 所示, 鱼卡侧保护装置录波如图 7 所示。

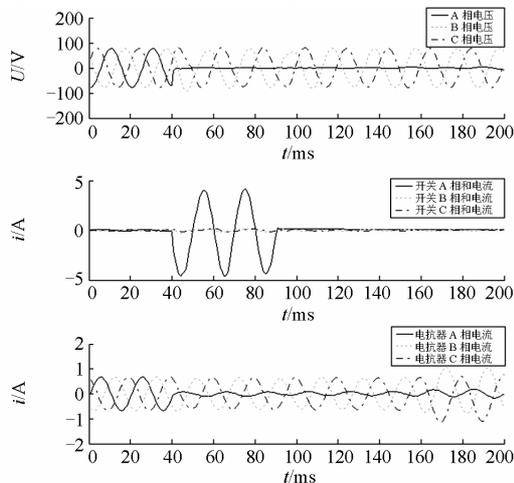


图 6 沙洲侧保护装置录波图

Fig. 6 Wave of protection installed on Shazhou side

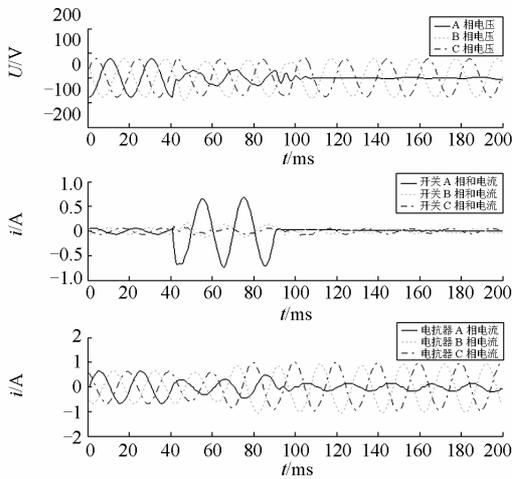


图7 鱼卡侧保护装置录波图

Fig. 7 Wave of protection installed on Yuqia side

图8为保护装置录波中非故障相补偿前、后的差动电流对比图,可以看出补偿后的差动电流远小于补偿前的差动电流,证明采集变压器式可控高抗电流的方案有效实现了暂态补偿功能。对于非故障相,补偿前的差动电流会随着故障切除后高抗容量提升而变小,但是补偿后的差动电流基本稳定不变,验证了改进后的时域补偿方法不受可控高抗调节的影响。图9为保护装置录波中故障相补偿前、后的差动电流对比图,由于故障电流远大于线路容性电流,所以故障相的补偿效果不明显。由于含可控高抗的时域方法中只采用了一个 Π 型集中参数网络求解,对暂态分量补偿还不够精确,所以还不能完全补偿暂态电容电流,但是已经能够满足工程应用了。

采用新时域补偿方案的线路差动保护装置从投运至今,运行状况良好,很好地满足了并联了变压器式可控高抗的超高压输电线路的保护要求。

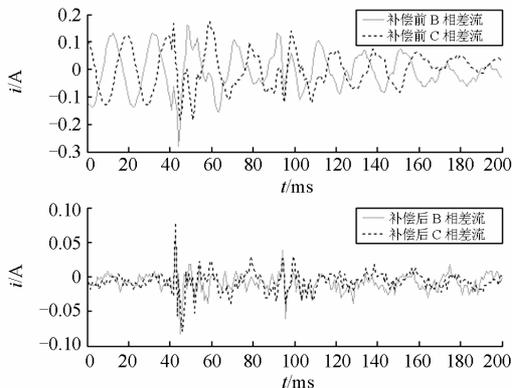


图8 非故障相补偿前、后的差动电流

Fig. 8 Differential current wave of non fault phase with and without compensation

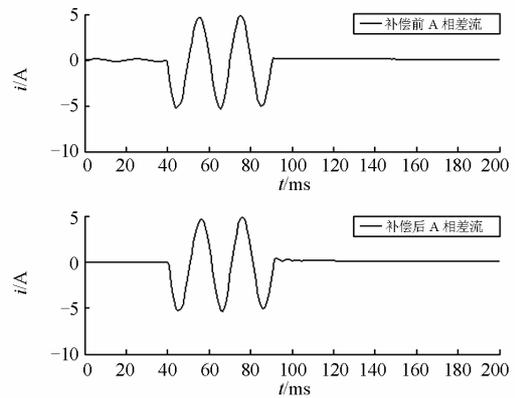


图9 故障相补偿前、后的差动电流

Fig. 9 Differential current wave of fault phase with and without compensation

5 结论

直接采集变压器式可控高抗的末端电流是解决并联可控高抗输电线路暂态补偿的最佳方案,能够有效保证线路差动保护的可靠性和灵敏性。并行配置带补偿和不带补偿功能的两种差动保护方案,可以保证线路差动保护在可控高抗CT异常时不失去全部主保护性能,对超高压线路稳定运行起到积极作用。

参考文献

- [1] 田铭兴, 安潇, 顾生杰, 等. 磁饱和式和变压器式可控电抗器的电压控制方法及其仿真分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 791-796.
TIAN Mingxing, AN Xiao, GU Shengjie, et al. Voltage-controlling methods and simulation analysis of magnetically saturated and transformer-type controllable reactors[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 791-796.
- [2] 田翠华, 陈柏超. 可控电抗器在西北750 kV系统中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 18-21.
TIAN Cuihua, CHEN Baichao. Application of controlled reactor in Northwest 750 kV power system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 18-21.
- [3] 田铭兴, 励庆孚. 变压器式可控电抗器的谐波分析和功率级数计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 168-171.
TIAN Mingxing, LI Qingfu. Harmonic current and power-step number of controllable shunting reactors of transformer type[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 168-171.
- [4] 左玉玺, 王雅婷, 邢琳, 等. 西北750 kV电网大容量新型FACTS设备应用研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8):

- 2349-2354.
ZUO Yuxi, WANG Yating, XING Lin, et al. Applied research on new types of high capacity FACTS devices in northwest 750 kV Power Grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2349-2354.
- [5] 吴通华, 郑玉平, 朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 61-67.
WU Tonghua, ZHENG Yuping, ZHU Xiaotong. Current differential protection based on transient capacitance current compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 61-67.
- [6] 余梦泽, 陈柏超, 曹志煌, 等. 110 kV 并联可控电抗器及其应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 87-91.
YU Mengze, CHEN Baichao, CAO Zhihuang, et al. A novel 110 kV shunt controllable reactor and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 87-91.
- [7] 姚晴林, 李瑞生, 粟小华, 等. 分级式高压可控并联电抗器微机保护配置及原理分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 58-65.
YAO Qinglin, LI Ruisheng, SU Xiaohua, et al. Configuration and principle analysis of microcomputer protection for classified high-voltage controllable shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 58-65.
- [8] 潘雄, 丁新良, 黄明良, 等. 可控高压电抗器应用于西北 750 kV 电网的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 104-107.
PAN Xiong, DING Xinliang, HUANG Mingliang, et al. Simulation analysis on application of controllable reactors in 750 kV Northwest China Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 104-107.
- [9] 刘仁, 赵国生, 王欢, 等. 三相磁阀式可控电抗器的特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 110-114.
LIU Ren, ZHAO Guosheng, WANG Huan, et al. Characteristic simulation analysis of three-phase magnetic valve type controlled reactor[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 110-114.
- [10] 易强, 周浩, 计荣荣, 等. 特高压线路高抗补偿方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 98-105.
YI Qiang, ZHOU Hao, JI Rongrong, et al. Research on high-voltage reactor compensation of UHV AC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 98-105.
- [11] 王世荣, 李民族. 变耦电抗式可控串补的过电压分析及其保护措施的确 定[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 102-109.
WANG Shirong, LI Minzu. The over-voltage analysis and protection measure determination of thyristor controlled reactance series compensation by adjustable coupling[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 102-109.
- [12] 桑丙玉, 王晓茹. 特高压长线路电流差动保护自适应电容电流补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 2-5.
SANG Bingyu, WANG Xiaoru. Adaptive compensation scheme of capacitance current to differential protection in UHV lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 2-5.

收稿日期: 2014-11-05

作者简介:

刘革新(1980-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: liugm@nari-relays.com

(编辑 魏小丽)