

# 末端制动的新型数字式高压并联电抗器纵差保护

邹卫华<sup>1</sup>, 苏毅<sup>2</sup>, 邹东霞<sup>2</sup>, 屠黎明<sup>1</sup>, 黄少锋<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 高压并联电抗器内部线圈接地故障或引出线的接地及相间短路故障是电抗器常见的故障形式, 电抗器纵差保护是这些故障形式的主保护, 但是在空投电抗器以及区外扰动的暂态过程中, 由于直流分量而且衰减慢可能引起 CT 直流饱和而导致纵差保护误动。针对上述问题, 提出了一种取电抗器末端电流作为制动电流、采用三段式比率制动特性的数字式纵差保护的方法。本保护具有电抗器空投检测功能、间隙性电流互感器断线检测判据以及电流互感器直流饱和检测判据。经动模试验及现场运行结果证明该保护灵敏反应内部故障, 并在空投和区外扰动情况下可靠闭锁保护。

**关键词:** 并联电抗器; 纵差保护; 末端制动; 饱和

## Numerical differential protection restrained by end terminal current for HV shunt reactor

ZOU Wei-hua<sup>1</sup>, SU Yi<sup>2</sup>, ZOU Dong-xia<sup>2</sup>, TU Li-ming<sup>1</sup>, HUNAG Shao-feng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring & Control under Ministry of Education in North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China)

**Abstract:** For HV shunt reactor, severe faults include mainly ground fault in its interior coil, inter-phase fault and ground fault in leading-out wire. Saturation of TA, which caused by the high level DC current and slow current attenuation when switch-on reactor or exterior faults, may lead to the misoperation of the differential protection. This paper presents a new numerical longitudinal differential protection whose restraint current is from end terminal of reactor. The ratio differential protection is of triple-folded characteristic. The protection is very complete since it can also detect switching-on reactor, intermissive line-broken of TA as well as direct current (DC) saturation of TA. The results show that the differential protection never mal-operates and can detect internal faults correctly.

**Key words:** shunt reactor; longitudinal differential protection; restraint in end terminal of HV reactor; saturation

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)15-0001-03

## 0 引言

330~1000 kV 的超高压、特高压系统, 电能输送容量大, 输电损耗小, 在长距离、大容量输电工程中占有绝对优势, 是电力系统中的骨干网架, 其安全稳定运行是关系到国计民生的大事<sup>[1]</sup>。由于超高压输电线的对地电容电流很大, 因此必须装设并联电抗器以吸收这种容性功率, 限制系统的操作过电压, 还可限制单相重合闸时的潜供电流<sup>[2]</sup>。

为保证高压并联电抗器的安全运行, 需装设高压并联电抗器保护装置。当该保护装置判别出电抗器内部发生故障时, 若预先的过电压计算表明高压并联电抗器内部故障切除可能引起不能允许的过电压或高压并联电抗器首端无专用断路器, 需要同时跳开线路两侧的断路器。因此, 高压并联电抗器保护若运行中不正确动作, 后果不堪设想<sup>[3]</sup>。

电抗器内部线圈接地故障或引出线的接地

及相间短路故障是电抗器常见的故障形式, 纵差保护是针对这些故障形式的主保护。纵差保护因具有高可靠性、速动性、选择性和灵敏性, 几乎成为所有高电压等级元件保护的主保护。但高压并联电抗器有其自身的特点, 不应照搬其它元件保护的现有纵差原理, 因此提高纵差保护性能是高压并联电抗器保护的关键技术之一。

## 1 高压并联电抗器纵差保护需要特殊考虑之处

运行经验表明, 在投入高压并联电抗器时, 由于电感中的电流不能突变, 因此冲击电流中含有较大的直流分量。由于电抗器的电抗相对很大, 回路电流的衰减时间常数长, 直流分量衰减很慢。直流分量的长期存在, 将引起电流互感器的暂态饱和, 并将使电流的波形偏向时间轴的一侧<sup>[4]</sup>, 若差动保护两侧的电流互感器特性不一致, 将有可能导致纵

差保护的误动。

另外,在电抗器区外故障或系统扰动的暂态过程中,流过主电抗器的工频电流不会很大<sup>[4]</sup>,不足以使 CT 发生饱和从而导致纵差保护误动。因此对差动保护影响较大的是因直流分量衰减慢而导致电流互感器饱和(称为直流饱和)。如果电抗器首末端 CT 特性不一致,两端饱和程度不同,则纵差保护可能会误动。因此要保证高压并联电抗器纵差保护可靠运行,需要有完善的 CT 直流饱和判据。

现场中 CT 二次回路更容易出现似断非断而非彻底断线的现象,若纵差保护只考虑 CT 彻底断线的情况,则在 CT 二次回路出现似断非断情况下将导致差动保护的误动。

针对上述问题,为保护高压并联电抗器内部线圈及其引出线接地故障或引出线相间短路故障,提出了一种取电抗器末端电流作为制动电流的高压并联电抗器纵差保护方案。该方案包括:电抗器空投检测功能、电抗器两端 CT 二次回路间断性断线判据、CT 直流饱和判据,从而构成完整的末端制动的微机高压并联电抗器纵差保护。

## 2 比率制动纵差原理

### 2.1 保护原理介绍

电抗器的比率制动纵差特性,由差动速断、比率制动特性组成,其中比率制动采用三段折线特性,如图 1 所示。大型的电抗器为单相式,故对每相采用上述的差动特性。当任一相满足式(1)或式(2)时,差动速断或比率差动保护动作。

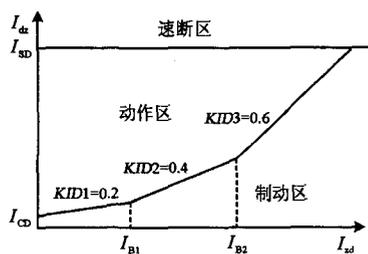


图 1 比率制动的差动保护特性

Fig.1 Characteristics of ratio restraint differential protection

差动速断的动作方程见式(1):

$$I_{dz} > I_{SD} \quad (1)$$

式中:  $I_{dz}$  为动作电流,  $I_{SD}$  为差动速断电流定值。

差动速断保护的主要作用是保证在区内发生严重故障时快速切除电抗器以确保设备的安全。比率制动差动保护的方程见式(2):

$$\begin{cases} I_{dz} > K_{ID1} \times I_{zd} + I_{CD} & I_{zd} < I_{B1} \\ I_{dz} > K_{ID2} \times (I_{zd} - I_{B1}) + K_{ID1} \times I_{B1} + I_{CD} \\ I_{B1} \leq I_{zd} < I_{B2} \\ I_{dz} > K_{ID3} \times (I_{zd} - I_{B2}) + K_{ID2} \times (I_{B2} - I_{B1}) + \\ K_{ID1} \times I_{B1} + I_{CD} & I_{B2} \leq I_{zd} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $I_{zd}$  为制动电流;  $K_{ID1}$ 、 $K_{ID2}$ 、 $K_{ID3}$  分别为各段的比率制动斜率,装置内部分别固定为 0.2、0.4 和 0.6;  $I_{B1}$ 、 $I_{B2}$  均为拐点电流,其中  $I_{B1}$  在装置内部固定为  $0.5I_{r12n}$ ,  $I_{B2}$  在装置内部固定为  $I_{r12n}$ ;  $I_{CD}$  为差动起动电流定值。

比率制动特性采用三折线特性,可以在未达到额定电流时就开始制动,虽然缩小了保护动作区,但保证在空投电抗器、线路故障重合后又跳开等区外扰动时不误动。

500 kV 的并联电抗器均为铁芯油浸式结构,铁芯由若干个铁芯饼叠置而成,铁芯中带有气隙。因为气隙的存在剩磁较小,空投时励磁涌流较小,且励磁涌流对于差动保护而言是穿越性电流,所以差动保护中不考虑二次谐波制动。

### 2.2 动作电流和制动电流的选取

动作电流  $I_{dz}$  和制动电流  $I_{zd}$  的计算公式为:

$$\begin{cases} I_{dz} = |I_1 + I_2| \\ I_{zd} = |I_2| \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $I_1$ 、 $I_2$  分别为电抗器首端和末端电流,首端电流为经过平衡补偿后电流,均以流入电抗器为正方向。式(3)制动电流选取末端电流作制动。

采取末端电流制动的办法,在并联电抗器空投、并网运行或外部故障时,与采用首末端电流作为制动方案的制动电流大小相同。当电抗器内部线圈及其引出线接地故障或引出线相间短路故障时,故障相末端电流接近于零,无制动作用,具有很高的灵敏度;而在电抗器并网瞬间,穿越性电流较大时,有较大的制动作用。因此将末端电流作为制动电流的纵差保护方案与将首末端电流差作为制动电流的方案相比,内部故障时保护具有很高的灵敏度,外部故障时差动可靠不误动,兼顾了保护的可靠性和灵敏度。

### 2.3 平衡补偿

当首端和末端 CT 变比不一致时,选取末端电流为基准侧,首端电流的平衡系数计算由软件完成。将首端电流与平衡系数相乘,即得补偿后的各相电流。

当首端和末端 CT 变比一致时,平衡系数为 1。

### 2.4 电抗器空投判据和直流饱和判据

为提高空投过程或区外故障中纵差保护的可靠性, 一方面需要设置空投检测功能, 另一方面还需要设置有 CT 直流饱和检测功能。

**空投检测判据:** 当检测到电抗器电流从无到有时自动短时提高差动定值, 防止因冲击电流使纵差保护误动, 同时又能保证空投于内部故障时纵差保护正确动作。

**CT 直流饱和判据:** 要能正确判别出区外饱和与区内饱和, 保证在区外饱和的情况下差动保护不误动, 并且在区内饱和时差动保护快速而正确动作。在区外饱和的暂态短路电流中, 有偏于时间轴一侧的直流分量, 这将使电流互感器的传变特性严重恶化, 故障电流不与坐标原点对称, 正负半周波形不对称意味着电流中含有较大的偶次谐波分量<sup>[5]</sup>。而在不包含直流分量时, 畸变的二次电流呈脉冲形<sup>[6]</sup>, 正负半周波形大体对称, 电流中含有较大的奇次谐波分量。可见在稳态短路稳态下只会出现有奇次谐波出现, 只有在暂态下 CT 饱和才会有偶次谐波出现, 利用偶次谐波抗 CT 的暂态饱和是正确的选择<sup>[7]</sup>。

因此在考虑对 CT 饱和的判别时, 综合利用了电流中 2、3 次谐波含量的大小, 并辅助判别电流波形对称度, 容错复判来识别 CT 饱和。并联电抗器的首端和末端 CT 均考虑 CT 饱和判别。当判出饱和后, 闭锁比率差动保护。

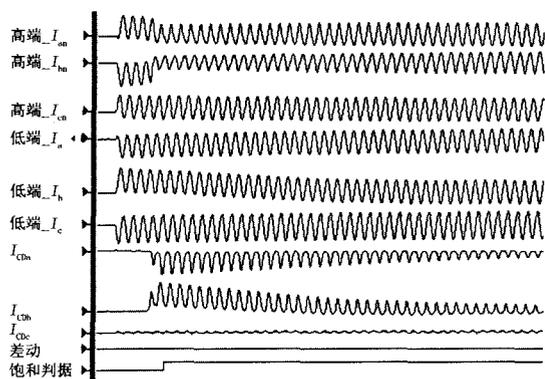


图 2 空投高抗时首端 CT 饱和

Fig.2 Saturation status of TA in head terminal of HV reactor when it is switched on

CT 直流饱和判据具体为: ①相电流差流基波大于一定数值; ②相电流差流 2 次谐波比大, 3 次谐波比小; ③相电流差流波形偏向时间轴一侧; ④相电流大于一定数值时解除 CT 直流饱和判别。

举例说明, 图 2 给出了电抗器动模试验中空投高抗时的波形, 电抗器首末端的 CT 存在很大的直流分量, 在电抗器的差动回路中感受到了很大的差

流 (图中的  $I_{cb}$ ), 饱和判据及时判出可靠闭锁了差动保护。

### 2.5 CT 异常判别

采用零序电流和相电流相结合的综合判据, 能可靠检测出 CT 二次回路间隙性断线, 保证在 CT 似断非断的情况下差动保护不误动。具体判据如下: ①电抗器首末端 CT 中一端自产零流大, 另一端自产零流小; ②电抗器首末端 CT 中, 零流大的一端有一相电流减小, 该端其它相以及另一端的三相电流无变化; ③电抗器首末端三相共六个电流都小于  $1.1I_{r2ln}$ ; ④无零序电压。

图 3 给出了发生间歇性 CT 断线时典型的波形, 保护能可靠检测出 CT 断线并闭锁相关保护。

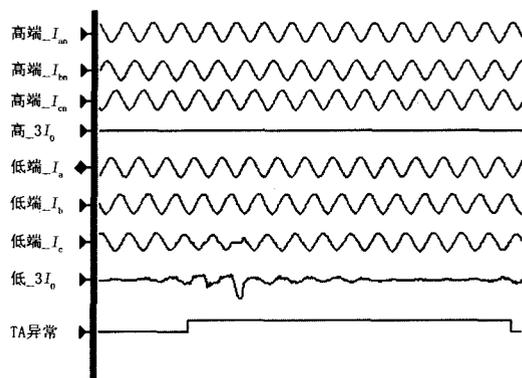


图 3 高抗末端 CT 一相发生间歇性断线故障

Fig.3 Single-phase intermissive line-broken of CT in end terminal of HV reactor

## 3 结语

本文提出的三段折线式末端制动的高压并联电抗器纵差保护方案, 在保证可靠性的前提下提高了差动保护的灵敏性。采用完善的电抗器空投判据、CT 直流饱和检测判据、CT 断线检测判据, 大大提高了纵差保护的可靠性、安全性。采用该方案的纵差保护研制的高压并联电抗器保护已在现场运行多套, 运行情况稳定可靠。

### 参考文献

[1] 贺家李, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (24) :1-6.  
HE Jia-li, et al. Protection Configuration Scheme for UHV Transmission Line[M]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24):1-6.  
[2] 能源部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.472-473.

(下转第 13 页 continued on page 13)

## 5 结论

本文针对广域保护系统对信息交换类型和交换方式的不同要求,讨论了基于 IEC61850 的广域保护系统通信服务模型。通信服务模型和通信网络都是通信系统不可缺少的部分,前者主要解决通信一致性和不同装置之间的互操作性问题,并从上层确保数据通信延时和可靠性满足广域保护系统要求;后者从物理上提供措施确保通信性能满足要求。本文讨论了通用变电站事件 GSE 的报文结构和通信机制,提出用 GSE 中的 GSSE 传输状态量信号、用采样测量值传输类模型传输模拟量的观点和一般方法。

### 参考文献

- [1] IEC 61850, Communication Networks and Systems in substations[S].
- [2] 高湛军,潘贞存,卞鹏,等.基于 IEC 61850 标准的微机保护数据通信模型[J].电力系统自动化,2003,27(18):43-46.  
GAO Zhan-jun, PAN Zhen-cun, BIAN Peng, et al. A Data Communication Model for Microprocessor Based Protection Based on IEC 61850 Standard [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 43-46.
- [3] 彭晖,金午桥,成海彦,等.广域网中 TASE.2 协议的实现及现场应用[J].电网技术,2003,27(5):43-46.  
PENG Hui, JIN Wu-qiao, CHENG Hai-yan, et al. Implementation and On-site Application of TASE.2 Protocol in Wide Area Network [J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 43-46.
- [4] 徐立子. IEC 61850 对变电站自动化系统报文性能的要求[J].电网技术,2002,26(11):1-2.  
XU Li-zi. Requirement of IEC61850 to Performance of Messages for Substation Automation System [J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 1-2.
- [5] 孙军平,盛万兴,王孙安.基于以太网的实时发布者/订阅者模型研究与实现[J].西安交通大学学报,2002,36(12):1299-1302.  
SUN Jun-ping, SHENG Wan-xing, WANG Sun-an. Research on the Real-time Publisher/subscriber Model based on Ethernet and Its Implementation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(12): 1299-1302.
- [6] 薛涛,冯博琴.内容发布订阅系统路由算法和自配置策略研究[J].软件学报,2005,16(2):251-259.  
XUE Tao, FENG Bo-qin. Research on Routing Algorithm and Self-configuration in Content-based Publish-subscribe System [J]. Journal of Software, 2005, 16(2): 251-259.
- [7] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等.基于 IEC 61850 标准的采样值传输模型构建及映射实现[J].电力系统自动化,2004,28(21):38-42.  
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. Modeling and Mapping Implementation of a Sampled Value Model Based on IEC61850 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 38-42.

收稿日期:2007-01-04; 修回日期:2007-01-29

#### 作者简介:

刘英亮(1970-),男,硕士,讲师,主要研究方向为电力系统自动化;E-mail:lyl610@sdu.edu.cn

丛伟(1978-),男,博士,讲师,主要研究方向为电力系统继电保护;

张洁(1973-),女,本科,工程师,主要研究方向为电力系统自动化。

### (上接第3页 continued from page 3)

Designing Institute of Northwest China, Electric Designing Handbook of Electric Power Engineering[M]. Beijing:China Water Power Press, 1990.472-473.

- [3] 邹颖男.高压并联电抗器保护的现场调试[J].电力建设,2004,25(8):39-41,53.

ZOU Ying-nan. Field Test of Protection for HV Shunt Reactor[J]. Electric Power Construction, 2004,25(8): 39-41,53.

- [4] 陈松林,王志鸿,郑玉平,等.新型微机电抗器保护的研制与开发[J].电力系统自动化,2003,27(24):70-73.

CHEN Song-lin, WANG Zhi-hong, ZHENG Yu-ping, et al. Research and Development of New Numerical Protection for Reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(24): 70-73.

- [5] 朱声石.差动保护的暂态可靠性[J].继电器,2002,30(8):1-6.

ZHU Sheng-shi. Transient Reliability of Differential Protection[J]. Relay,2002,30(8):1-6.

- [6] 袁季修.盛和乐.电流互感器的暂态饱和及应用计算[J].

继电器.2002,30(2):1-5.

YUAN Ji-xiu, SHENG He-le. Transient Saturation and Applying Calculation of Current Transformer[J]. Relay, 2002,30(2):1-5.

- [7] 朱声石.高压电网继电保护原理与技术[M].北京:中国电力出版社,2005.304-305.

ZHU Sheng-shi. Principle and Technology of High-voltage Electric Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.304-305.

收稿日期:2006-12-15; 修回日期:2007-04-10

#### 作者简介:

邹卫华(1974-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护及其自动化;E-mail:Zouweihua@sf-auto.com

苏毅(1978-),男,硕士,工程师,主要从事元件保护的研究和开发工作;

邹东霞(1969-),女,硕士,高级工程师,主要从事元件保护的研究和开发工作。