

# 特高压输电线路保护的方案研究——纵联差动保护

樊占峰, 李瑞生, 张红霞, 李峥峰

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 根据特高压输电线路结构和运行特点, 通过建立 750 kV 特高压输电线路的 RTDS 实时数据仿真系统数学模型进行仿真, 结合仿真数据介绍 750 kV 输电系统的电气特征, 着重分析了线路的电容电流、谐波分量、非周期分量等对分相电流差动保护的影响, 并针对问题提出具体的对策, 仿真测试结果表明, 该文提出的差动保护方案解决了 750 kV 特高压输电线路系统对差动保护影响, 同时简要介绍了光纤差动保护的配置及实现方案。

关键词: 特高压输电线路; 分相电流差动保护; 实时数据仿真系统

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)19-0005-05

## 0 引言

由于特高压输电线路是联系系统或大区域电网的骨架, 其安全可靠运行对于全系统的安全运行起决定性的作用, 故对所采用的各个继电保护装置应满足“四性”(速动性、灵敏性、选择性、可靠性)要求的基础上, 能够实现性能互补、动作协调, 使整个保护系统在整体上和更高的水平上满足“四性”要求。

分相电流差动纵联保护从原理上是理想的保护方式, 具有绝对的选择性, 不受振荡的影响, 不受运行方式的影响, 受过渡电阻的影响小, 本身具有选相功能, 另外随着电力光纤网的普及和光纤通信技术的成熟, 光纤分相电流差动纵联保护已成为高压及超高压输电线路保护首选的纵联保护。但由于 750 kV 特高压输电系统的特殊性, 如线路分布电容大、故障时暂态过程严重且衰减缓慢等, 给差动保护带

来一定的影响。本文结合数学模型的仿真数据, 首先论述 750 kV 特高压输电系统对差动保护的具体影响及对保护要求, 再提出问题的解决方案, 经过仿真分析及实验验证表明其可行性, 最后介绍一种适用于特高压输电系统的分相电流差动保护的配置及实现方案。

## 1 模型建立

根据西北电力设计院提供的 2006 年西北 750 kV 电网网络及各技术参数, 通过 RTDS 实时数据仿真系统, 模拟出西北 750 kV 电网的数学模型。并根据中国电力科学研究院提供的七种运行方式及各运行方式下的故障类型做了仿真试验, 仿真出多种运行方式下各类故障的数据; 输电线路的模拟系统见图 1。

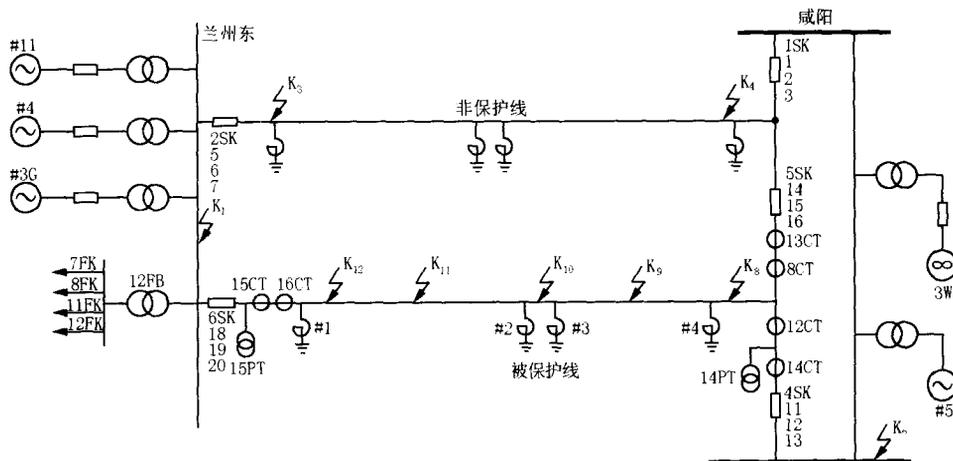


图 1 兰州东 - 咸阳 750 kV 长距离 (497 km) 输电系统模拟系统图

Fig 1 Simulation diagram of transmission system for East Lanzhou to Xiayang 750 kV line

输电线路主要参数如下:

$$Z_1 = 0.01274 + j0.2605 (\Omega/\text{km})$$

$$Z_0 = 0.300085 + j0.991872 (\Omega/\text{km})$$

$$C_1 = 0.0142 (\mu\text{F}/\text{km})$$

$$C_0 = 0.009596 (\mu\text{F}/\text{km})$$

## 2 特性分析

特高压输电线路为了提高其传输能力,减小其电压损耗和能量损耗,必须尽可能地减小其每公里的电阻和电感,减小漏电流,增大每公里的电容,以提高输电线路的自然功率。750 kV 线路通常采用 4~6 分裂导线,这种结构对线路有很大的影响,从而特高压输电系统的电气特征与高压和超高压输电系统有较大的区别,下面结合仿真数据着重将 750 kV 输电系统对差动保护的影响方面的特性进行分析。

### 2.1 长距离线路中分布电容产生较大的电容电流

在特高压输电线路中,相相、相地之间存在较大的分布电容,由此引起的电容电流相当大,这对线路两端的电流大小及相位产生一定影响,尤其当负荷电流和短路电流较小时其影响更为明显。不同电压等级架空线路典型分布电容值(每公里)及电容电流如表 1。

表 1 不同电压等级架空线路典型分布电容值(每公里)及电容电流

Tab 1 Typical value of distributed capacitance and capacitance current of different voltage degree aerial line

线路电压 /kV	每公里正序电容 / $\mu\text{F}$	每公里零序电容 / $\mu\text{F}$	每 100 km 电容电流 /A
330	0.01113	0.00763	66
500	0.0123	0.0084	111
750	0.0142	0.00959	193

RIDS 实时数字仿真系统模拟兰州东 - 咸阳 750 kV 系统中双回线运行方式下,负荷电流约 300 A 运行水平下,兰州侧电流约为 417 A;咸阳侧电流约为 707 A;其相位角变为 80 左右(正常值应为 180°);电容电流测量值约为 958 A。

差动保护动作的基本原理是流入保护区的电流之和为 0。由于受线路分布电容的影响,其和不为 0,主要表现为线路电容电流;电容电流为区内故障电流性质,若不进行任何处理,则只能通过抬高定值门槛来躲电容电流,这将导致保护灵敏度降低,甚至使差动保护不能使用。

### 2.2 分布电容使暂态过程中谐波含量大

在特高压输电线路中较大的分布电容在暂态过程中将引起各种谐波分量,在稳态过程中将使输电

线路中的电压、电流的大小和相位都产生严重畸变,尤其小系统、长距离线路区外故障时,这种影响更为严重。

RIDS 模拟兰州东 - 咸阳 750 kV 输电系统,模拟兰州东侧发电机退出,仅带负荷变压器,咸阳侧为短路容量 30 000 MVA 的等值系统,如图 1 在咸阳侧 K<sub>4</sub> 点发生区外单相故障时两侧的电流量波形如图 2。

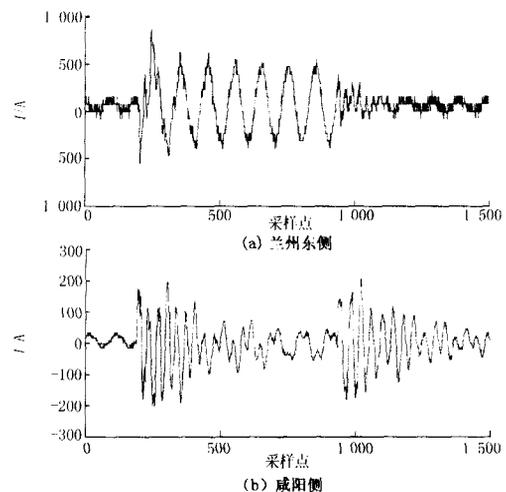


图 2 故障相电流波形

Fig 2 Current wave of faulted phase

从仿真数据得出在故障发生初期,由于电容的影响,线路两端的电流出现很大的偏移;进而对基于两端电流差动保护造成很大的影响,如不对暂态电容进行处理,将导致区外故障差动保护误动作。

### 2.3 非周期分量导致 CT 饱和

特高压输电线路一般要求采用并联电抗器以吸收无功功率,以改善电网无功功率分布及沿线电压分布,另在操作及故障时,可以限制系统工频过电压;但是由于并联电抗器的影响加之 750 kV 线路的时间常数大,导致系统短路时故障电流中含有较大的非周期分量且衰减慢,使电流互感器更容易饱和,从而对差动保护造成影响。

由于特高压输电线路长度较长,区外故障时不会产生较大穿越电流,故一般不存在由于大穿越电流使电流互感器饱和问题;但是由于 750 kV 系统主接线采用一个半断路器接线方式,将两组开关的 CT 引入保护;在母线附近发生故障时两组开关的 CT 将有较大的故障电流流过,可能引起 CT 饱和。

RIDS 模拟兰州东 - 咸阳 750 kV 输电系统,如图 1 咸阳侧 k<sub>4</sub> 发生故障,在边开关饱和而中开关不饱和时,分相电流差动保护很容易误动,仿真波形如图 3。

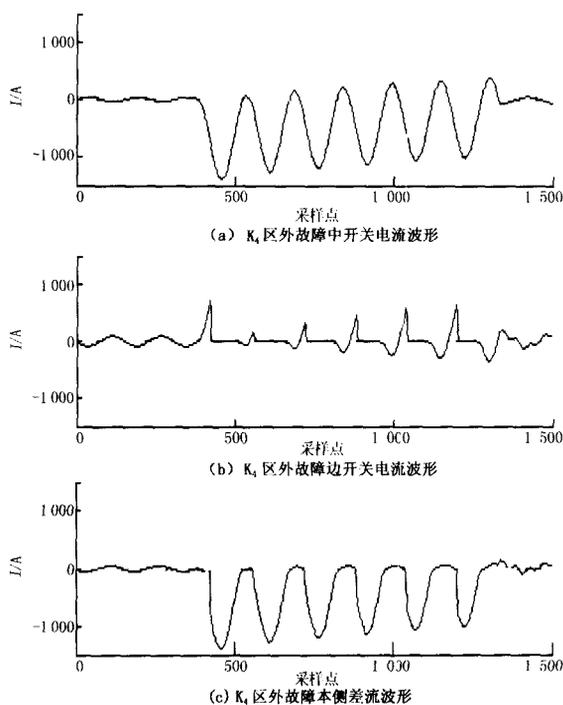


图 3 区外故障时电流波形

Fig 3 External fault current wave

### 3 方案对策

#### 3.1 自适应补偿方案消除电容电流的影响

本差动保护运用实时电容电流补偿手段消除稳态电容电流影响。线路两侧装置采用各补偿一半的方法,每端利用本端电压和用户提供的线路参数测出电容电流  $I_c$ ,然后从每端的测量电流中减去  $I_c/2$ ,向对侧传送的电流值是经过补偿后的电流值,不增加额外的工作量,以补偿后数据进行差动计算,如此补偿后对于正常运行和区外故障都能予以较好的补偿,使差动保护的灵敏度得到较大的提升。

电容电流补偿基本公式 ( $I_c$  为总电容电流值的一半):

$$I_c = \frac{1}{2} Y_{C1} U_1 + \frac{1}{2} Y_{C2} U_2 + \frac{1}{2} Y_{C0} U_0$$

由  $Y_{C1} = Y_{C2}$  上式可化为:

$$I_{\phi C} = \frac{1}{2} U_{\phi} \cdot Y_{C1} + \frac{1}{6} (U_A + U_B + U_C) \cdot (Y_{C0} - Y_{C1})$$

式中:  $Y_{C1}$ 、 $Y_{C0}$  是对应于线路全长的正序、零序容纳,作为定值项根据线路实际参数整定。

RIDS模拟兰州东-咸阳 750 kV 输电系统,双回线运行方式下的电容电流值及经过补偿后电流值对比如图 4。

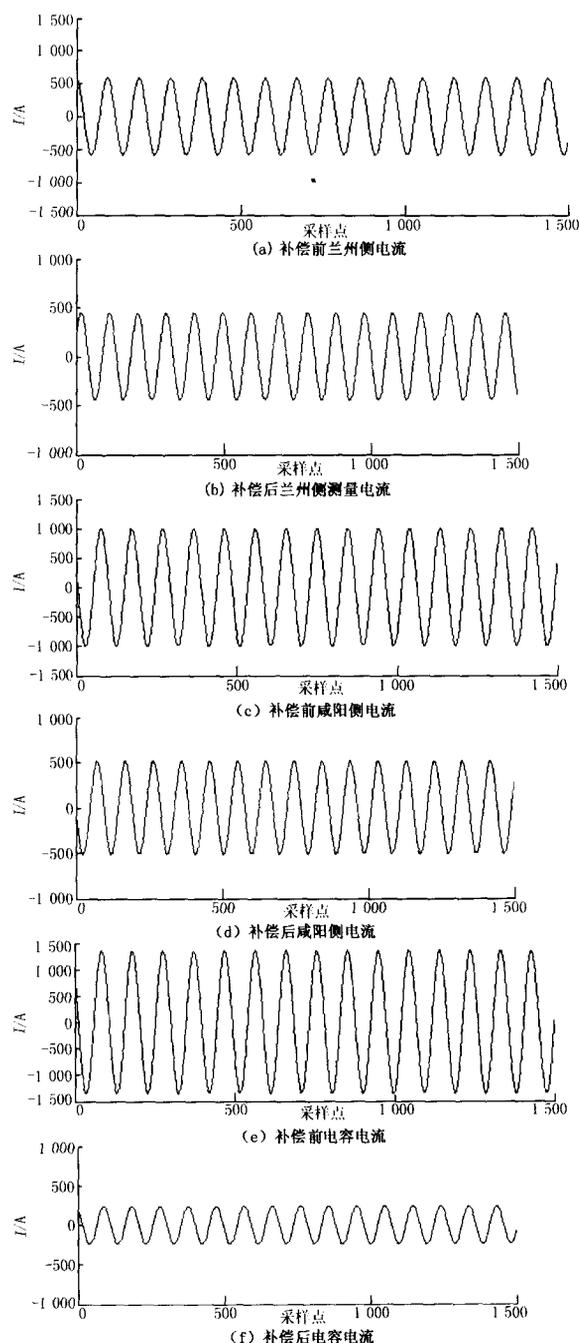


图 4 补偿前后电容电流对比

Fig 4 Capacitance currents with or without compensation

#### 3.2 增加快速数字滤波器消除谐波分量的影响

本差动保护在硬件滤波和傅氏滤波基础上采用增加截止频率为 50 Hz 的巴特沃斯数字滤波器,从而大大地消除了低次谐波对保护的影响;

滤波器的离散传递函数定义为:

$$G(z) = H_0 \times \frac{1 + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2}}{1 + B_1 z^{-1} + B_2 z^{-2}}$$

该数字滤波器的幅频特性曲线如图 5 所示。

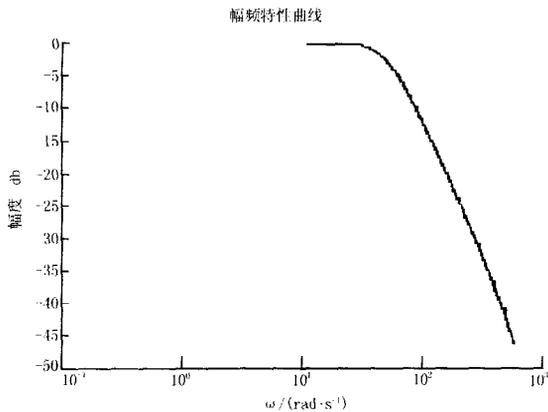


图 5 数字滤波器的幅频特性曲线

Fig 5 Amplitude-frequency characteristics curve line of digital filter

从曲线可以看出二次谐波的衰减幅度为 80%，因此该滤波器可以有效地滤除 50 Hz 以上的谐波分量。

针对上面提到的 750 kV 线路在小系统、长距离线路区外故障时，由于谐波影响导致线路两侧的电流量严重不一致的情况，通过巴特沃斯数字滤波器后的效果如下所述。

本文图 2 提供的咸阳侧  $K_4$  点发生区外单相故障时两侧的滤波前的电流波形，故障时咸阳侧的故障电流经巴特沃斯数字滤波器前后谐波分析如表 2，从谐波分析可以看出故障电流谐波含量较大的低次谐波得到较大的滤除。

表 2 谐波分析表

Tab 2 Harmonics analysis

	基波		3次谐波		4次谐波		5次谐波	
	幅值	百分比	幅值	百分比	幅值	百分比	幅值	百分比
滤波器前	0.119	35.4 7%	0.421	26.08%	0.031	2.6 08%	0.027	22.77%
滤波器后	0.204	87.2%	0.178	11.30%	0.023	1.1 30%	0.013	6.59%

故障电流滤波前后的波形如图 6。

### 3.3 抗 CT 饱和和方案

750 kV 系统主接线采用一个半断路器接线方式时，保护需要两组开关的 CT 的电流，本差动保护根据引入保护装置的 CT 方式（分 CT 接入及合 CT 接入方式），采用不同的解决方案。

#### 3.3.1 分 CT 接入差动保护抗饱和和方案

如图 1 对于咸阳侧差动保护分别引入中开关的 8CT 及边开关的 12CT，本差动保护充分利用母线附近发生故障时本侧保护采集到的两组开关 CT 中故障初期电流特征；如图 7 中的电流流向，首先识别出故障电流的流向，并根据流向判别是否在母线附近发生了区外故障，如确定区外故障则自动提高制动

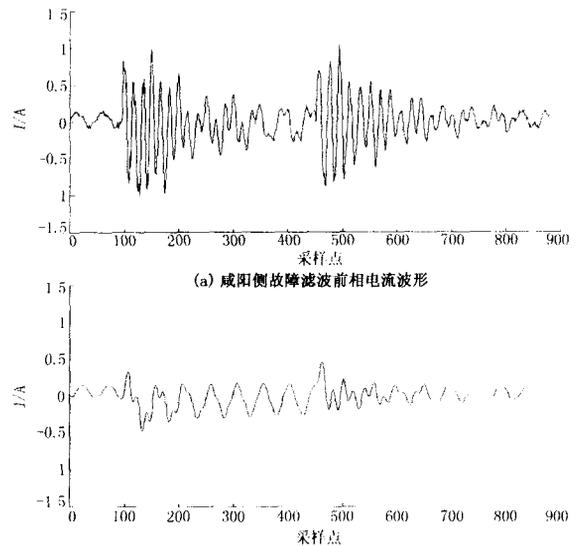


图 6 故障电流滤波前后的波形

Fig 6 Fault current waves with or without filter

系数，从而防止了区外故障 CT 饱和导致保护误动，具体判据如下：

对于本侧在保护启动后  $t_{qd} < T_1$  内有  $n$  点满足：

$$|i_{n1} - i_{n2}| > k |i_{n1} + i_{n2}|$$

其中： $t_{qd}$  为故障发生后的时间； $T_1$  为考虑区外故障 CT 的时间，可取 1.5 ms。

则判别为故障电流的流向指向母线侧，即母线附近发生了区外故障，保护将制动系数  $k$  自动提高到 1.2，并将信息通过通道传至对侧，从而可靠解决了因母线附近故障，由于中开关或边开关饱和及特性不一致造成差动保护误动；另由于本差动保护的采样率为 96 周，使  $n$  的选取有较大的裕度。

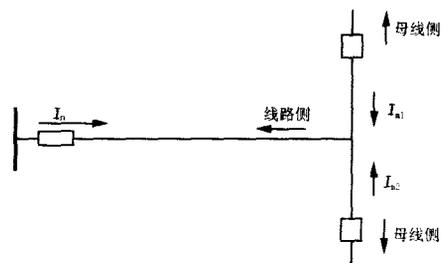


图 7 一个半断路器接线方式故障时的电流流向示意图

Fig 7 Schematic diagram of fault current direction in 3/2 breaker connection way

#### 3.3.2 合 CT 接入差动保护抗饱和和方案

如图 1 对于咸阳侧差动保护引入中开关的 8CT 及边开关的 12CT 的和，导致保护无法利用两组开关 CT 中故障初期电流特征，在这种情况下差动保

护通过传送两端的电流采样值信息,利用两端的采样信息,判别原理同分CT接入差动保护情况相同,在启动 $T_1$ 内判别是否为区外故障,如判别区外则提高制动系数 $k$ ,判据为:

$$|i_m - i_n| > k|i_m + i_n|$$

综合以上CT两种接线方式下的差动保护抗饱和的方案,本方案充分利用CT未饱和时CT线性传变的时间,方案考虑CT故障后2ms饱和,在线性传变的时间内快速识别区外故障,并适当提高差动保护制动系数,方案简单可靠,通过RTDS模拟兰州东-咸阳750kV输电系统时,模拟咸阳侧区外故障时中开关或边开关的CT 2ms以上的饱和,差动保护可靠不误动。

#### 4 整体方案

本差动保护的方案充分考虑特高压系统给线路保护带来的特殊影响,在着力解决750kV系统特殊问题基础上,保证保护常规下的整体动作性能。

##### 4.1 保护配置及实现方案

差动保护由工频变化量比率差动保护、稳态量比率差动保护和零序比率差动保护构成全线速动主保护,由三段式相间距离和三段式接地距离以及四段式零序方向保护构成后备保护;配置基于双端量的高精度测距元件。

差动保护数据通道可采用专用光纤通道、64kbit/s同向接口复接通道或2M口的复接通道,并支持双通道热备用方式。

##### 4.2 硬件实现方案

本差动保护的硬件采用许继公司成熟、可靠、先进的基于32位DSP的硬件平台,采用多CPU冗余方案。

#### 5 结论

本文提出针对750kV特高压输电线路保护的

差动保护方案,并结合对750kV特高压输电特殊问题进行仿真分析,提出了具体问题的解决方案,通过RTDS实时数据仿真系统建立的西北750kV电网的数学模型上进行了大量仿真试验,结果表明本文提出的差动的整体方案,完全满足750kV特高压输电的要求。

#### 参考文献:

- [1] 贺家李,李永丽,郭征,等.特高压继电保护配置方案(一)特高压输电线的结构与运行特点[J].电力系统自动化,2002,26(23):1-6  
HE Jia-li, LI Yong-li, GUO Zheng, et al Relay Protection for UHV Transmission Lines, Part One: Construction and Operation Characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 1-6
- [2] 贺家李,李永丽,李斌,等.特高压继电保护配置方案(二)保护配置方案[J].电力系统自动化,2002,26(24):1-6  
HE Jia-li, LI Yong-li, LI Bin, et al Relay Protection for UHV Transmission Lines, Part Two: Disposition of Relay Protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 1-6
- [3] 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,1995.  
ZHU Sheng-shi Principle and Technology of Protective Relaying in HV System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

收稿日期: 2005-02-28; 修回日期: 2005-05-24

作者简介:

樊占峰(1974-),男,硕士研究生,工程师,从事继电保护研究与设计工作; E-mail: zhanfeng@xjgc.com

李瑞生(1966-),男,硕士,从事继电保护研究与设计工作;

张红霞(1971-),女,工程师,从事科研管理工作。

#### Research on UHV transmission line protection——pilot differential protection

FAN Zhan-feng, LI Rui-sheng, ZHANG Hong-xia, LI Zheng-feng

(XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** According to the structure of UHV transmission line and operation characteristics, the RTDS model of 750 kV UHV transmission line is constructed and simulated. Based on the simulation, the electrical feature of 750 kV transmission system and the influence on phase segregated current differential protection of the capacitance current, harmonic component, aperiodic component are analyzed and emphasized respectively. The solutions are introduced. RTDS simulation shows that differential protection can meet the special demands of 750 kV UHV transmission line system. Overall configuration and implementation scheme of fiber optical current differential protection are proposed.

**Key words:** UHV transmission line; phase segregated current differential protection; RTDS