

超高压线路差动保护电容电流的精确补偿方法

毕天姝^{1,2}, 于艳莉³, 黄少锋^{1,2}, 杨奇逊^{1,2}

(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, 北京市 102206)

(2. 华北电力大学四方研究所, 北京市 102206; 3. 浙江省金华电业局, 浙江省金华市 321000)

摘要: 针对超高压输电线路分布电容电流对差动保护的影响, 提出了一种电容电流的精确补偿方法。通过把各种因素对分布电容电流的影响统一归入分布电容参数的变化, 实时在线计算分布电容参数值, 从而更准确地进行电容电流补偿, 提高差动保护动作的速度和准确性。ATP 仿真结果表明该补偿方法比传统的基于给定分布电容参数进行补偿的方法有更好的补偿效果。

关键词: 差动保护; 电容电流; 精确补偿; 超高压输电线路

中图分类号: TM773

0 引言

超高压线路的电能输送容量大, 输电损耗小, 对于我国西部开发建设和“西电东送”工程具有显著意义。采用快速、准确的继电保护装置, 保证超高压线路安全稳定运行对于整个电力系统的正常运行具有重要意义。

电流差动保护原理简单、动作速度快, 能够适应各种故障和不正常运行状态, 已被广泛应用^[1]。但在保护原理上, 电流差动保护要受分布电容电流的影响。这主要是由于电容电流的存在使线路两端的测量电流不再满足基尔霍夫电流定律, 从而直接影响了保护的灵敏度和可靠性。在电压等级不高、线路不长的情况下, 其分布电容量很小, 对输电线路的电流和电压影响不大, 可忽略其对继电保护的影响; 而在高压长输电线上, 分布电容的等值容抗将大大减小, 分布电容电流对继电保护的影响就不可忽略。文献[2~5]分析了电容电流对电流差动保护的负面影响, 并提出了采用固定半补偿的方法消除分布电容电流的影响。

本文提出了一种实时计算分布电容参数的方法, 并据此对电容电流进行更精确的实时补偿, 以提高保护的可靠性和灵敏度。ATP 仿真结果证明, 该补偿方法比传统的基于给定分布电容参数进行补偿的方法有更好的补偿效果。

1 电容电流对电流差动保护的影响

为提高超高压输电线路的传输能力, 减小其电压损耗和能量损耗, 使其达到最佳运行状态和最大经济效益, 必须尽可能减小输电线路单位长度的电

阻和电感, 减小漏电导, 增大电容。超高压系统输电线路大都采用多根分裂导线构成相线, 这使得线路感抗减小, 分布电容增大。同时, 超高压输电线路往往要承担远距离大容量的电力输送任务, 较长的线路使分布电容的等值容抗大大减小, 导致电容电流进一步增大, 从而影响电流差动保护动作正确性。

目前常用的数字式分相电流差动保护相量动作判据为^[1]:

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > I_{zd} \quad (1)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > K |\dot{I}_m - \dot{I}_n| \quad (2)$$

式中: $\dot{I}_m$ 和 $\dot{I}_n$ 分别表示线路 m 侧和 n 侧的电流相量; I_{zd} 为制动电流门槛; K 为制动系数 ($0 < K < 1$)。

式(1)为辅助跳闸判据, 主要用于防止线路空投或空载情况下装置因某种原因误动作, 式(2)为主判据。式(1)和式(2)同时满足时差动元件动作。

电流差动保护故障分量动作判据与相量动作判据相似, 只需将动作量由相量 $\dot{I}_m$ 和 $\dot{I}_n$ 置换为相应的故障分量 $\Delta \dot{I}_m$ 和 $\Delta \dot{I}_n$ 即可。

由式(1)和式(2)可知, 在不计电容电流时, 当系统正常运行或区外故障时, 线路两侧电流大小相等, 方向相反, 差流为 0, 这是差动保护的基础。当计及线路分布电容电流后, 正常运行或区外故障时, 线路两侧电流和为该线路上的电容电流。电容电流的存在使线路两端的测量电流不再满足大小相等方向相反的条件, 从而直接影响了保护的灵敏度和可靠性。

我们以三相短路稳态情况为例, 分析长线路发生内部故障时, 由于分布电容电流的影响, 导致保护拒动的原因^[5]。系统接线如图 1 所示, 输电线路以 Π 型等效网表示。

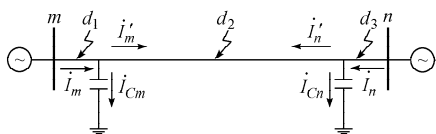


图 1 内部故障时的系统接线

Fig. 1 One-line diagram of system for internal fault case

当线路空载情况下分别在 d_1 、 d_2 和 d_3 点发生短路时,两侧电流和电压相量图如图 2 所示。由相量图可见,由于电容电流的存在,两侧电流幅值减小,降低了保护的灵敏度。在线路出口短路时,远故障侧电流不仅幅值减小,相位偏移也较大,因此,线路两侧故障比中点故障受电容电流的影响更严重^[5]。

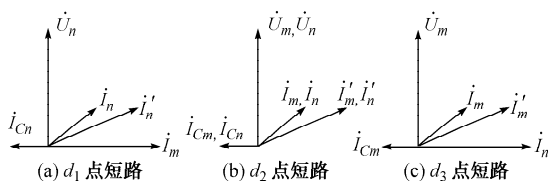


图 2 线路空载时内部故障相量图

Fig. 2 Phasor diagram for internal fault case without load

线路在负载状态下发生短路时,两侧相量图如图 3 所示。在送电端短路时,受电端电流因电容电流的影响,其相位向超前方向偏移,在负荷较大时,这种影响反而有利于保护跳闸。在线路中点故障时影响不大。在受电端短路时,若负荷电流较大,电容电流使两侧电流相量的相位差增大,可能造成保护拒动。因此,短路点越靠近受电端,保护受电容电流的影响越严重^[5]。

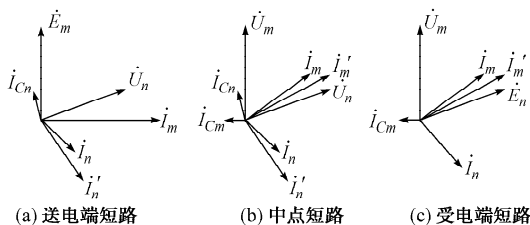


图 3 线路带负荷时内部故障相量图

Fig. 3 Phasor diagram for internal fault case with load

对于不对称短路,可应用对称分量法进行类似的分析。

综上所述,超高压线路中,分布电容电流的存在通常使两侧电流幅值减小,降低保护动作的灵敏度,靠近受电端短路时,还会改变两侧电流的夹角,造成保护可能拒动。因此,在超高压线路电流差动保护中,分布电容电流增大,必须对其进行补偿。本文主要目的是通过对分布电容电流的精确补偿,使保护在区内故障时可靠动作,区外故障可靠不动作。

2 精确电容电流补偿原理

超高压输电线路的分布电容参数受系统运行方式和外界条件如沿线地质、气候等因素的影响,其数值可能明显偏离给定值。这是造成电容电流固定补偿不精确的一个重要原因。然而,这些因素对线路分布电容电流的影响是不确定的,甚至是随机的。本文把各种因素对线路分布电容电流的影响统一归入线路分布电容参数的变化,在线路正常运行时,利用线路两端的电流、电压的采样值,实时在线计算线路分布电容参数,并据此进行电容电流补偿,以提高补偿的精确度。

由于分布参数电路已知,当无须研究均匀线路各处电流、电压分布,而只须计算线路始端与终端电流、电压关系时,可将线路看成四端网络,利用集中参数四端网络的 T 型或 II 型等效电路来代替分布参数线路^[6]。超高压线路的 II 型等效网络如图 4 所示。

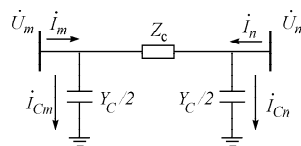


图 4 超高压线路的 II 型等效网络

Fig. 4 II type equivalent circuit for a UHV line

由二端口网络性质可写出两端电气量关系为:

$$\dot{U}_m = A_{11}\dot{U}_n + A_{12}\dot{I}_n \quad (3)$$

$$\dot{I}_m = A_{21}\dot{U}_n + A_{22}\dot{I}_n \quad (4)$$

式中: $\dot{U}_m$ 、 $\dot{U}_n$ 、 $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$ 分别为线路两端的电压、电流相量。

由图 4 所示的等效电路图,可推出:

$$A_{11} = 1 + \frac{Z_c Y_c}{2}$$

$$A_{12} = -Z_c$$

$$A_{21} = \left(1 + \frac{Z_c Y_c}{4}\right) Y_c$$

$$A_{22} = -\left(1 + \frac{Z_c Y_c}{2}\right)$$

将 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 、 A_{22} 代入式(3)和式(4)可得:

$$\dot{U}_m = \left(1 + \frac{Z_c Y_c}{2}\right) \dot{U}_n - \dot{I}_n Z_c \quad (5)$$

$$\dot{I}_m = Y_c \left(1 + \frac{Z_c Y_c}{4}\right) \dot{U}_n - \left(1 + \frac{Z_c Y_c}{2}\right) \dot{I}_n \quad (6)$$

在式(5)和式(6)中, $\dot{U}_m$ 、 $\dot{U}_n$ 、 $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$ 可由线路两端电压、电流采样值实时计算获得, Z_c 、 Y_c 为未知量。假设电压、电流、阻抗和导纳分别表示如下:

$$\dot{U}_m = U_{mr} + jU_{mi}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_n &= U_{nr} + jU_{ni} \\ \dot{I}_m &= I_{mr} + jI_{mi} \\ \dot{I}_n &= I_{nr} + jI_{ni} \\ Z_c &= Z_r + jZ_i \\ Y_C &= jY_i\end{aligned}$$

将相量的上述表达式带入式(5)和式(6),根据复数实、虚部分别相等的原则,将式(5)和式(6)整理后可求得 Y_C 。

$$Y_i = \frac{2(I_{mi} + I_{ni})}{U_{mr} + U_{nr}} \tag{7}$$

$$Y_C = jY_i \tag{8}$$

则线路两端分布电容电流可按照下式进行补偿:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{Cm} &= \dot{U}_m \frac{Y_C}{2} \\ \dot{I}_{Cn} &= \dot{U}_n \frac{Y_C}{2}\end{aligned}$$

3 ATP 仿真模型及仿真目标

本文以官亭-兰州东 750 kV 线路为例(见图 5)进行仿真计算。线路长度为 146 km,按照分布参数建立了它的 ATP 模型。

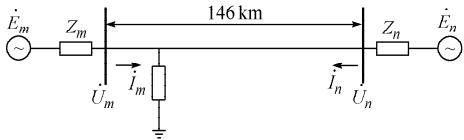


图 5 官亭-兰州东 750 kV 线路

Fig. 5 Diagram of the 750 kV line from Guanting to Lanzhou

线路参数如下: $C_0 = 0.009\ 596\ \mu\text{F}/\text{km}$; $C_1 = 0.014\ 2\ \mu\text{F}/\text{km}$; $Z_1 = (0.012\ 74 + j0.260\ 5)\ \Omega/\text{km}$; $Z_0 = (0.300\ 085 + j0.991\ 872)\ \Omega/\text{km}$ 。电抗器参数如下:容量 $3 \times 100\ \text{Mvar}$,额定电压 $800/\sqrt{3}\ \text{kV}$,中性点小电抗 $500\ \Omega$ 。

仿真目标为:①超高压线路区内、区外故障时,分布电容电流的特点及其对电流差动保护的影响。②超高压线路正常运行及内、外部故障时,进行电容电流补偿和不进行电容电流补偿的情况下保护动作特性的对比。③超高压线路正常运行及内、外部故障时,以改变系统运行方式为例来说明外界因素对分布电容数值的影响,比较实时计算电容数值补偿和固定补偿电容电流的效果。

4 仿真结果分析

1)分布电容电流对电流差动保护的影响

本文通过改变线路长度,观察输电线路区内、区外故障时,不同分布电容电流对电流差动保护的相量差动判据和故障分量判据的影响。表 1 给出了不同长度的输电线路区内单相接地故障时,电流差动保护的相量差动判据和故障分量判据的动作时间比较。

表 1 不同长度线路单相接地时差动保护动作时间
Table 1 Operating time of differential relays for different length lines with single-phase grounding fault

线路长度/km	相量差动判据 动作时间/ms	故障分量差动判据 动作时间/ms
122	20.0	2.37
200	20.0	4.03
250	23.1	6.52
300	*	*
400	*	*
500	*	*

注: * 代表保护不动作。

从仿真结果可以看出:随着输电线路长度的增加,分布电容电流增大,使得差动保护的动作时间延长,甚至保护拒动,这是不能容许的。因此,在线路长度较长时,必须进行电容电流补偿。

对采样数据进行处理时,本文采用全周期傅里叶差分算法。因为傅里叶算法的动态特性^[7],相量差动保护必须在故障后等待 1 个周期才能计算,从而使得保护动作时间加长;而故障分量差动保护能很好地避免这个问题。但是故障分量却只存在于故障后短暂的时间段内,因此在故障后的前 2 个周期内,采用故障分量为主的电流差动判据,在 2 个周期后采用相量差动判据为主的电流差动判据会有较好的保护效果。

2)电容电流补偿后相量差动保护动作情况

对不同线路长度的超高压线路各种区内故障进行了仿真,结果表明,经过电容电流补偿后,电流相量差动保护均能可靠动作。表 2 给出了采用电容电流补偿前后线路单相接地故障时的电流相量差动保护的動作时间。

表 2 电容电流补偿前后差动保护动作时间
Table 2 Operating time of differential relay with and without capacitance current compensation

线路长度/km	未补偿时 动作时间/ms	补偿后 动作时间/ms
146	20.0	20.0
200	20.0	20.0
250	23.1	20.0
300	*	20.0
400	*	20.0
500	*	20.0

注: * 代表保护不动作。

3)分别采用实时计算分布电容值的电容电流补偿和给定分布电容参数值的电容电流补偿时,电流相量差动保护的動作情况比较

高压输电线路的分布电容参数会随着外界条件和运行方式等因素的不同而有所改变,由于这些因素是随机的、不确定的,本文把这些因素对线路分布电容参数的影响统一归入线路分布电容参数的变化。以投入/切除并联电抗器为例,说明外界因素变化对分布电容参数的影响,进而仿真验证提出的精确补偿算法。仿真结果表明,此算法可以实时计算分布电容数值,达到电容电流的精确补偿,补偿效果较传统的分布电容参数为定值的补偿效果要好。

通过仿真发现,在超高压输电线路正常运行和区外故障时,不论系统运行方式改变,还是受其他外界因素影响,实时计算分布电容值的方法总能实时修正分布电容的数值,电容电流补偿后,保护的差动电流几乎为 0(见图 6)。因此,门槛值整定得小一些,可以提高差动保护的灵敏度,而且区外故障时差动电流远远小于制动电流,保护可靠不动作;区内故障时,差动电流则远远大于制动电流,保护可靠动作。而采用分布电容参数为定值的半补偿方式时,在超高压线路正常运行和区外故障时,系统运行方式和电容参数的改变对其影响很大,保护误动或濒临误动(见图 7);在输电线路区内故障时,差动电流与制动电流相差较小,保护动作的灵敏度较低。

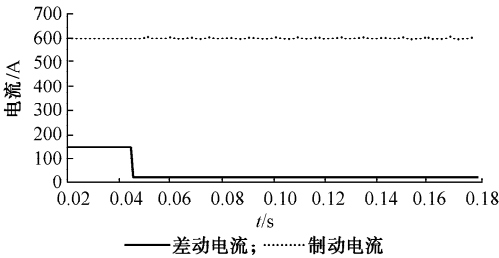


图 6 精确电容电流补偿下正常运行时差动制动电流
Fig. 6 Differential and restraining currents of normal states with accurate compensation method

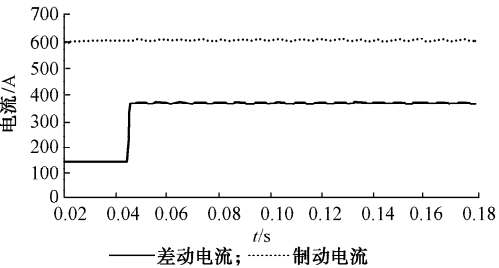


图 7 固定电容参数情况下正常运行时差动制动电流
Fig. 7 Differential and restraining currents of normal state with fixed compensation method

由于篇幅所限,下面仅给出了并联电抗器投入/

切除时,各种故障的分布电容数值(见表 3)及差动保护动作情况(见表 4)。

表 3 并联电抗器投入/切除时分布电容数值
Table 3 Capacitance values when switching on/off shunt reactor

工况	参数	并联电抗器投入		并联电抗器切除	
		计算电容值	给定电容值	计算电容值	给定电容值
正常运行	Y_1	103.0	326	326	326
	Y_0	120.1	220	318	220
区内经电阻单相接地	Y_1	103.0	326	326	326
	Y_0	120.1	220	474	220
区内直接单相接地	Y_1	103.0	326	326	326
	Y_0	120.1	220	474	220
区外单相接地	Y_1	103.0	326	326	326
	Y_0	62.0	220	180	220
区内两相接地	Y_1	103.0	326	326	326
	Y_0	120.1	220	474	220
两相相间短路	Y_1	103.0	326	326	326
	Y_0	120.1	220	474	220
区内三相接地	Y_1	103.0	326	326	326
	Y_0	120.1	220	474	220
三相相间短路	Y_1	103.0	326	326	326
	Y_0	120.1	220	474	220

注: Y_1 、 Y_0 分别表示分布电容的正序和零序参数值。

表 4 并联电抗器投入/切除时差动保护动作情况
Table 4 Behaviors of differential relay when switching on/off shunt reactor

工况	并联电抗器投入		并联电抗器切除	
	精确补偿	固定补偿	精确补偿	固定补偿
正常运行	正确不动作	误动作	正确不动作	正确不动作
区内经电阻单相接地	正确动作	正确动作	正确动作	正确动作
区内直接单相接地	正确动作	正确动作	正确动作	正确动作
区外单相接地故障	正确不动作	正确不动作	正确不动作	正确不动作
区内两相接地	正确动作	正确动作	正确动作	正确动作
两相相间短路	正确动作	正确动作	正确动作	正确动作
区内三相接地	正确动作	正确动作	正确动作	正确动作
三相相间短路	正确动作	正确动作	正确动作	正确动作

由仿真结果可以看出,并联电抗器投入/切除会改变分布电容数值,传统的固定半补偿方式不能反映这一变化,有可能造成保护不正确动作;而提出的基于实时计算分布电容值的电容电流补偿方法能够跟踪电容参数的变化,更为精确地补偿分布电容电流,使保护在区内故障时可靠动作,正常运行或区外故障时可靠不动作。

5 结语

本文提出了一种基于实时计算分布电容值的电容电流补偿方法。理论分析和 ATP 仿真结果表明,超高压输电线路的分布电容电流很大,为了确保保护可靠准确动作,必须进行电容电流补偿。基于实时计算分布电容值的电容电流补偿方法比传统的基于给定分布电容参数的半补偿方法有更大的优越性,可以满足超高压输电线路对于继电保护可靠性和灵敏度的要求。

参考文献

- [1] 郑玉平,吴通华,丁琰,等.基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据.电力系统自动化,2004,28(23):50—55.
ZHENG Yu-ping, WU Tong-hua, DING Yan et al. Applied Criterion of Current Differential Protection Based on Bergeron Model. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 50—55.
- [2] 文明浩,陈德树,尹项根.超高压长线相量差动保护的研究.电力系统自动化,2000,24(20):37—40.
WEN Ming-hao, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen. Study of Current Phasor Differential Protection for Long UHV Transmission Line. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 37—40.
- [3] 李岩,陈德树,张哲,等.超高压长线电容电流对差动保护的影响及补偿对策仿真分析.继电器,2001,29(6):6—9.
LI Yan, CHEN De-shu, ZHANG Zhe et al. The Emulation Analysis for the Influence of Capacitance Current of UHV

Transmission Line on Differential Current Protection and Compensating Countermeasure. Relay, 2001, 29(6): 6—9.

- [4] 李清波,刘沛.光纤纵差保护的应用及灵敏度的提高.电力自动化设备,2002,22(4):21—24.
LI Qing-bo, LIU Pei. Applications of Fiber Differential Protection and Sensitivity Improvement. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(4): 21—24.
- [5] 伍叶凯,邹东霞.电容电流对差动保护的影响及补偿方案.继电器,1997,25(4):4—8.
WU Ye-kai, ZOU Dong-xia. The Effects and Compensation Method of Capacitance Current to Differential Protection. Relay, 1997, 25(4): 4—8.
- [6] 高中德.超高压电网继电保护专题分析.北京:中国电力出版社,1990.
GAO Zhong-de. Special Analysis of UHV Power Network. Beijing: China Electric Power Press, 1990.
- [7] 杨奇逊,黄少锋.微型机继电保护基础.北京:中国电力出版社,2004.
YANG Qi-xun, HUANG Shao-feng. The Basis of Digital Protection. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

毕天姝(1973—),女,副教授,研究方向为电力系统继电保护与控制及人工智能在电力系统中的应用。E-mail: tsbi@ncepubj.edu.cn

于艳莉(1980—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护技术。

黄少锋(1958—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护与控制。

Novel Accurate Compensation Method of Capacitance Current of UHV Transmission Line

BI Tian-shu^{1,2}, YU Yan-li³, HUANG Shao-feng^{1,2}, YANG Qi-xun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

(2. Sifang Research Institute, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

(3. Jinhua Power Supply Bureau, Jinhua 321000, China)

Abstract: Based on the study about the influence of the distributed capacitance current of UHV transmission line on differential current protection, a novel accurate compensation method of capacitance current is proposed. The proposed method takes account of all the factors that affect the capacitance current by the variation of the capacitance value. The capacitance value can be calculated online, based on which the capacitance current can be compensated accurately. Simulation results demonstrate that the proposed method is superior to the fixed compensation method.

Key words: differential current protection; capacitance current; accurate compensation; UHV transmission line