输电线路分布电容对快速母线差动保护的影响

陆征军, 吕 航, 李 力

(南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211100)

摘要: 分析了高压长距离输电线路的分布电容在短路暂态过程中对快速母线差动保护动作特性的影响。指出分布电容在短路暂态过程中引起的振荡高频分量,可以导致快速母差保护拒动,其影响在保护设计时应引起重视。RCS-915型母差保护装置的保护方案考虑了线路分布电容的影响。

关键词: 母差保护; 分布电容; 暂态

中图分类号: TM77 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)01-0068-05

0 引言

微机母线差动保护由于自身具有的优势而得到迅速推广和应用。这些新型母线差动保护都至少包括一种快速差动保护方案,以满足快速切除母线故障的要求。值得注意的是这些快速保护所取的数据窗是从故障起始开始的短暂区间(≤10 ms),必须要考虑高压电网的短路暂态过程。随着500 kV等级主干网的建设,数百公里长度的线路已有多条投入运行,西北还将建设从咸阳到兰州东长度达497 km的750 kV输电线路,高压电网中长距离输电线路的分布电容对母线差动保护动作特性影响需要引起我们的重视。常见有文献分析其对线路保护动作特性的影响,包括阻抗、方向、电流差动等各种原理。少见输电线路的分布电容在短路暂态过程中对母线差动保护动作特性影响的分析,本文试分析之。

1 快速母线差动保护方案简述

首先对这类快速母线差动保护方案做一些描述和说明。其基本原理是分相电流比率差动。为保证在快速切除母线故障的同时,避免母线区外故障时电流互感器饱和造成的不平衡电流(差电流)致使母差保护误动,这些快速差动保护方案不约而同利用了即使电流互感器严重饱和,在故障发生的初始阶段仍存在一个线性传变区这一特性,使用比率判据着重判断故障起始约5 ms内差电流与和电流间的关系,结合其他判据来判断是否母线区内故障。下式为瞬时值比率差动判据式:

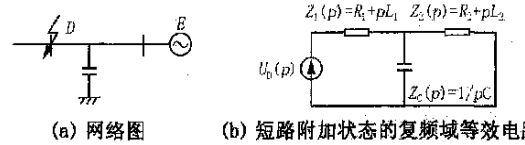
$$\begin{cases} i_d > i_{set} \\ i_d / i_r > K \end{cases} \quad (1)$$

其中: i_d 为差电流, i_r 为和电流, K 为比率制动系数,一般取值0.6~0.8。

由于数据窗长度的限制,计算过程中不会采用严格的滤波算法,往往在差分后采用瞬时值差动或半波积分算法。式(1)或相类似的判据是保护方案的根本,如果数据窗中的电流全部或多数满足该判据,差动保护即动作,否则差动保护会延时动作或不动作。引入和电流制动可以使差动保护在母线区外故障电流互感器有误差时(特别是互感器饱和时)不误动,但同时母线区内故障当有电流流出母线时,或流入电流相位相差较大时差动保护可能不动作。方案中其他判据与本文内容关系不大,在此不一一详述。

2 分布电容的存在对故障电流的影响

长距离输电线路的分布电容不容忽略,精确地考虑分布电容的影响需要用分布参数等值电路来描述输电线路。但对母差保护来说,1)关心的是线路始端或终端流经的电流而不是沿线各点的电压、电流;2)长线暂态短路电流中虽有无穷多个高频分量,但频率越高幅值越小,保护装置也越容易滤除,所以仍然可以使用线路集中参数的一个等效T型网来分析,计算结果相当于高频分量中频率为最低的,其误差在定性分析允许范围内。图1(b)是用拉氏变换法进行三相短路故障计算的复频域等效图。



(a) 网络图 (b) 短路附加状态的复频域等效电路

图1 母线故障时有分布电容线路的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of transmission line with distributed capacitance at busbar fault

具体计算过程可参见参考文献[1,2]。计算结

果短路电流是三个分量的叠加,包括工频分量(稳态故障电流)、衰减的非周期分量和振荡的高频分量。在发生不对称短路时,也可以通过复合序网导出同样结论。其中周期性工频分量就是稳态的故障电流;产生非周期分量暂态电流的物理概念是由于线路电感中的电流不能突变,这一分量不流经电容支路而仅在线路中穿越性流过,分布电容对其的影响可以忽略;而衰减的振荡高频分量是由于分布电容中储存的能量在短路后经线路和系统阻抗与电容构成的 R、L、C 串联电路中振荡形成的,其物理含义是保证短路时刻分布电容上的电压不突变。这是在考虑了分布电容后所特有的分量,也是本文重点分析的对象。

2.1　高频分量的振荡频率

用集中参数计算时,由于回路电阻很小该频率接近回路的谐振频率,对应于 300 km 长的线路其最低的振荡频率约为 250～500 Hz(与系统阻抗的大小有关)。如果用分布参数来研究,那么运用波的传输理论,上述高频电流的出现,是在发生短路时电磁波在输电线路上传播,并在短路点与电源阻抗间来回反射而形成的。其最低的振荡频率在 $(1/4\,T、1/2\,T)$ 之间,T 为电磁波在线路上的传播时间,对 300 km 长的线路 $T=1$ ms,那么频率就相当于 250～500 Hz,这与集中参数计算得出的结论是一致的。微机保护装置的低通滤波电路设计时为减少这个环节的响应时间,其截止频率和频率响应特性只要满足采样定理要求即可,通频带不会做的非常窄。对每周波 24 点采样率来说,装置的硬件滤波对上述最低频率的振荡电流不能完全滤除(约有 1/3～1/6 倍的衰减),因此该高频分量能进入 A/D 转换、最终参与差动计算。当然对更高频率的信号完全可以滤除(1/10 倍以上的衰减),所以上述计算只用了一个 T 型网的设定条件是成立的。

2.2　高频振荡电流的幅值和初相角

求解微分方程得出的通解十分复杂,大致可以写成如下形式

$$i_{(t)} = (A_1\cos\varphi\cos\omega_c t + A_2\sin\varphi\sin\omega_c t)\,e^{-Bt} \quad (2)$$

其中:φ 为短路点的电压的初相角;ω_c 为高频角频率。

有两个有用的结论:

1) 短路前短路点的电压和相位决定此高频电流的大小,$\varphi=90$ 时高频分量为最大,当电源容量很小时,流经故障母线侧的高频分量电流远超过稳态电流。

2) 高频分量的初始相角与稳态故障电流的初始相角有对应关系。

3　对快速母差保护动作特性的影响

3.1　母线区外故障

当母线区外发生故障时,不论短路电流的大小和构成的分量如何,由于是穿越母线而过,如果不考虑电流互感器特性的差异,都不会产生差电流,对保护判据没有影响。短路电流大小和构成分量的不同对电流互感器特性的影响不是本文讨论的范畴。

3.2　母线区内故障

母线区内发生故障时,分布电容的存在使得稳态故障电流的幅值和相位都有变化,但从上文对比率判据的分析我们知道,只有使故障电流小于差电流整定值或相位差达到 60°以上才有可能使比率差动保护拒动(见表 1),而分布电容对稳态故障电流的影响远远达不到这一数量级。

表 1　不同相位和频率的电流比率差动的计算结果

Tab. 1　Calculation results of different phase and frequency with current differential algorithm

电流表达式	$I_d/I_r<k$ 的点数		
	<0.6	<0.7	<0.8
$I_1(i)=\sin(i*\pi/12)$ $I_2(i)=\sin(i*\pi/12+\pi/3)$	3	3	3
$I_1(i)=\sin(i*\pi/12)$ $I_2(i)=\sin(4.2*i*\pi/12)$	5	6	6
$I_1(i)=\sin(i*\pi/12)$ $I_2(i)=\sin(5.2*i*\pi/12)$	4	4	5
$I_1(i)=\sin(I*\pi/12)$ $I_2(i)=\sin(4.2*i*\pi/12)/3$	3	4	5
$I_1(i)=\sin(I*\pi/12)$ $I_2(i)=\sin(5.2*i*\pi/12)/3$	3	4	4

振荡的高频分量则不同。对两个工频正弦波来说,要使比率判据(式 1)不满足,相位差至少达到 60°以上,但如果一个是工频正弦波,另一个却是 250 Hz 以上的高频正弦波,不论它们的初相角是否相同,在 10 ms 内至少会有 3 个异符号区间,只要这个高频量足够大,就可以使比率判据不满足。表 1 所列为:假设高频电流(频率分别为 210 Hz、260 Hz)与工频电流的幅值相同或仅为工频量的 1/3,保护每 20 ms 采样 24 点,当制动系数分别整定为 0.6、0.7 和 0.8 时,在 10 ms 数据窗内比率差动计算结果不满足比率判据的统计点数。如果考虑高频电流不同的初相角,统计点数还将增加。表中结果显示在假设条件下,快速比率差动极有可能拒动。而且母线

保护比率系数的常规整定值大都在 0.6～0.8 之间,所以靠改变定值来提高保护的灵敏度并不可行。

那么在实际系统中分布电容引起的高频电流能不能满足这一假设条件呢?完全可以。如果线路的对侧没有电源,母线故障时该线路短路暂态过程中将只流过高频电流,虽经保护滤波回路的抑制,当其他支路电源提供的母线故障电流不是很大时,上述条件完全能够满足。这就是说当高压母线所处系统在小运行方式下,母线所连一长距离输电线路空载或带纯负荷,发生母线区内故障,快速母差保护将会拒动。这与不考虑分布电容的存在,只有工频电流的情况就完全不同了。装置设计过程中一般不会想到这种特殊情况,但实际系统中确实存在。

若长距离输电线路对侧有电源那么上述情况将大为改善,因为短路暂态过程中的高频电流叠加上了稳态工频电流,这个稳态电流与其他电源提供的故障电流相位相近,不但减少了该支路电流与其他支路电流异符号的持续时间,而且增大了母线差电流工频量。即使如此,由于故障电流还叠加有非周期的直流分量,波形相对于坐标轴并不对称,起始第一个周波稳态工频电流的上升比高频分量的变化要慢,还是有异符号区间产生,快速母差保护的动作仍然受到影响。

4 动模仿真波形及分析

由于获取各种条件下实际系统故障时的保护采样数据有困难,所以用动模仿真来实际验证以上的分析,动模系统简图如图 2。

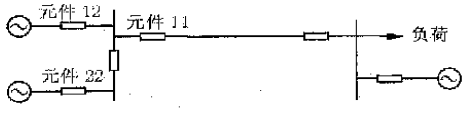


图 2 动模系统图

Fig. 2 Schematic diagram of dynamic simulation system

故障母线为分段母线, I段连有元件11长距离输电线,元件12发电机; II段连有元件22大系统,模拟 500 kV 系统,流经元件 11 的电流记为 I_{11},流经元件 12 的电流记为 I_{12},流经元件 22 的电流记为 I_{22},分别在元件11长度为 150 km、300 km,对侧有电源、无电源的条件下模拟母线各种故障。为更好的体现保护动作分析的真实性,采用 RCS-915 型母线保护装置本身的录波数据,并按上述保护算法计算出差动比率系数。

图 3 是比较典型的元件11长度为 300 km 且对侧无电源时母线单相接地的保护录波图(此时母联电流与 I_{22}完全相等),图中的横坐标是保护的采样点数,每周波 24 点、故障前录两个周波,即第 48 点为故障起始点。

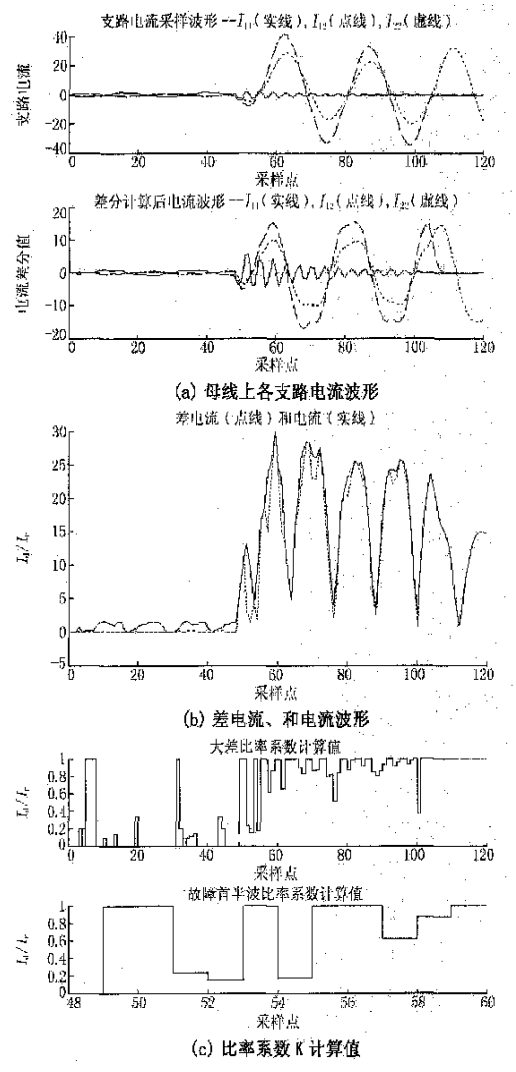


图 3 300 km 输电线路对侧无电源、母线单相接地时,故障相波形

Fig. 3 Wave analysis of the fault current at busbar connected a 300 km transmisson line with single-phase earthing

I_{11}由于其对侧无电源,所以可以很清晰的看到高频分量,频率约为 280 Hz 并不断衰减,与另两个支路的电流反复异符号,这与理论分析是完全一致的;注意经 30°差分计算后该分量相对于基频电流来说还有所放大;图中差电流与和电流可以看出明显的不同,直到高频分量消失后两者的波形基本一致了。分别计算瞬时值和半波积分值的比率系数,与普遍使用的定值 0.6～0.8 比较,故障的第一个半波都有 2～3 个点小于定值,这将使快速差动保护不能

动作,试验结果证实了这一点——保护动作时间大大延迟了。

经过多次试验,故障类型(接地、相间)对快速差动保护是否动作影响不大,起决定作用的因素归纳如下:

1) 输电线路长度,即最大幅值高频电流的频率。一般 500 kV 线路 150 km 以上即有可能使快速差动保护延迟。

2) 输电线路对侧有无电源。即使线路长度在 300 km 以上当对侧有电源时,快速差动保护只会偶尔不能动作,这是因为经过滤波抑制的高频分量与稳态故障电流叠加,大多数情况下不能使故障电流异符号;而对侧无电源时,影响却非常明显。所以线路空载时对快速差动保护尤其不利。

3) 比率系数的算法。瞬时值算法受到的影响比半波积分算法要大。但是由于该高频分量不是整次谐波,采用数字算法很难滤除而且由于必须对每条支路的电流进行运算,计算量非常大。

为建设 750 kV 输电线路做准备,电科院做了陕西咸阳到兰州东 750 kV 输电系统的动模试验。录波图表明高频分量的影响更加突出。系统接线如图 4 所示。

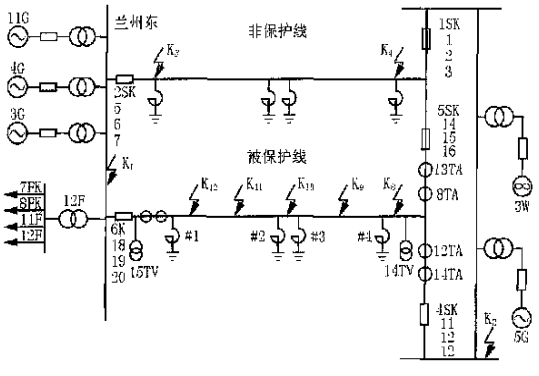


图 4　兰州东-咸阳 750 kV 长距离输电系统模拟接线图

Fig. 4　Simulation connections of 750 kV long-distance power system from Lanzhou to Xianyang

输电线路的主要参数如表 2 所示。

表 2　输电线路主要参数(每 100 km)

Tab. 2　Primary parameters of power transmission line (per 100 km)

U_n	X_1	φ_1	C_1	X_0	φ_0	C_0
750 kV	26.8 Ω	87.4°	1.367 μF	84 Ω	72°	0.93 μF

咸阳侧母线采用一个半开关接线方式,兰州东母线采用双母线接线方式。

输电线路的兰州东侧装有一台容量为 3 * 100 Mvar 的并联电抗器,线路中点装有两台容量为 3 * 100 Mvar 的并联电抗器,咸阳侧装有一台容量为 3 * 90 Mvar 的并联电抗器。

该系统六种运行方式中的弱电方式一(线路:单回运行,两侧开关均合;兰州东侧:发电机退出,负荷变投入,负荷退出;咸阳侧:发电机退出,等值系统短路容量:30 000 MVA)就是上文指出的线路高频电流对母差保护影响最大的情况,图 5 是此方式下 K_2 点 AB 相故障时,咸阳侧的线路录波图。

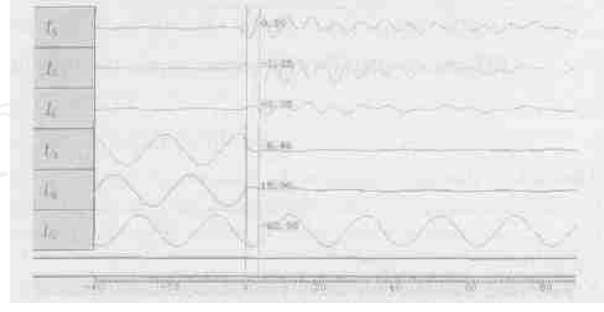


图 5　K_2 点 AB 相故障时的咸阳侧线路录波

Fig. 5　Wave record of line on Xianyang side when phase A to phase B fault occurs at K_2

图 5 中高频电流的频率约为 180 Hz,已接近 3 次谐波的频率,低通滤波回路已不能对其有效抑制。故障发生在 A 相电压最大时,高频电流的幅值最大达到约 2 000 A,其衰减时间更长达 80 ms 以上,对母线保护快速动作非常不利。

5　结语

如果不重视高压电网长线路的分布电容在短路暂态过程中引起的高频分量对快速母差保护的影响,在母线连接长线路对侧无电源的情况下发生母线故障,母差快速保护可能拒动。虽说随着高频分量的衰减,常规比率差动可以保证母差保护装置最终能够动作,但为避免 TA 饱和导致常规比率差动误动作,其动作时间一般都要在 30 ms 以上(往往更长)而且灵敏度也比不上快速保护。这对快速切除母线故障、减少损失是不利的。

但只要认识到这一问题的存在,通过分析和试验搞清楚其影响快速母线保护动作的根本原因,在工程上有多种方法来完善保护方案,解决问题。各型母差保护的研究人员可以根据各装置本身的具体情况采取最合适的应对措施。RCS-915 型母差保护装置的保护方案就考虑了线路分布电容的影响,已经解决了这一问题。

参考文献:

[1] 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 High Voltage Power System[M]. Beijing:China Electric Power Press,1995.

[2] 高中德. 超高压电网继电保护专题分析[M]. 北京:中国电力出版社,1990.

GAO Zhong-de. Special Analysis of Protective Relaying in Super High Voltage Power System [M]. Beijing:China Electric Power Press,1990.

收稿日期: 2004-04-16; **修回日期**: 2004-09-16

作者简介:

陆征军(1973 -),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护和自动装置的研究工作; E-mail: luzj@nari-relays.com

吕 航(1971 -),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护和自动装置的研究工作;

李 力(1970 -),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护和自动装置的研究工作。

Effects of distributed capacitance on fast busbar differential protection in transmission line

LU Zheng-jun, LÜ Hang, LI Li

(NARI-RELAYS Electric Co., Ltd, Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper analyzes the influence of fast busbar differential protection caused by distributed capacitance in high-voltage long-distance transmission line during transient process. The high frequency component caused by distributed capacitance in transient process, may result in maloperation of busbar differential protections, which should be taken seriously in designing of RCS915 differential protection.

Key words: busbar differential protection; distributed capacitance; transient states

(上接第 59 页 continued from page 59)

陈赤培(1954 -),男,高级工程师,兼职教授,长期从事电网自动化系统工程设计和规划;

刘静芳(1977 -),女,硕士研究生,从事电力自动化系统的研究。

Research and design of the integrated PAS/DMS/DMIS/TMR system

LUO Jie[1], CHEN Chi-pei[2], LIU Jing-fang[1]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Jiangxi Electric Power Design Institute, Nanchang 330006, China)

Abstract: To build the integrated power supervision and control automatic system is a general idea in power industry and technology standard groups. The paper discusses the necessity and complexity of information exchange for the interrelated automatic subsystems in initial stages of electric power, and points out the objective of the integrated system based on IEC 61970 and CIM/XML is seamless. On the basis of database system, network and communication technology, the integrated platform, with which data and information can be sharable to the interrelated automatic subsystems, is built up. In the end, both the technology in process of building the system and the marked advantages of the system are discussed.

Key words: power supervision and control automatic system; integration; SCADA/PAS; CIM/XML

(上接第 67 页 continued from page 67)

ZHAO Huai-lin. The Research on Computer Measuring and Data Error Processing [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2002,39(5):33-36.

收稿日期: 2004-04-28; **修回日期**: 2004-05-25

作者简介:

陈忠仁(1971 -),男,硕士研究生,工程师,研究方向为配电网自动化技术; E-mail: chenzhen0520@sohu.com

吴维宁(1964 -),男,高级工程师,研究方向为电力系统监控技术和电磁兼容技术;

陈家宏(1960 -),男,教授级高工,研究方向为电力系统监控技术和高压探测技术。

Development of a new measuring-control system of automatic arc-suppression device

CHEN Zhong-ren[1,2], WU Wei-ning[2], CHEN Jia-hong[2], ZHANG Qin[2]

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan High Voltage Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper introduces a new measuring-control system of automatic arc-suppression device. The hardware and software for the system are devised in light of measurement precision and control accuracy. To make sure that the device operates reliably in substation, this paper adopts effective anti-interference measures.

Key words: arc-suppression device; measuring-control system; development