

## 输电短线路的相间自适应距离保护

康小宁, 赵选宗, 索南加乐, 刘志良, 刘林林, 张军民

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对常规距离保护应用到传统意义的短线路时常常因为末端故障时残压小造成保护超越而退出工作的情况, 简要分析了影响距离元件测量误差的因素, 并利用仿真数据定量分析了短线路保护范围末端故障时, 阻抗测量误差与系统阻抗和线路阻抗比(电源线路阻抗比)的关系。在此基础上提出一种根据系统阻抗和线路阻抗比自适应调整距离保护动作范围的短线路相间距离保护方案。该方案在线路发生故障时, 假定故障发生在保护末端, 结合实测的电源线路阻抗比按可能出现的最大测量误差调整保护范围, 从而消除了短线路末端相间故障时距离保护的超越问题, 保证了选择性。EMTP 仿真验证, 说明该方法可以有效地避免短线路末端故障时距离保护的超越问题, 改善了短线路距离保护的性能。

**关键词:** 距离保护; 短线路; 自适应; 电源线路阻抗比

### Phase-to-phase adaptive distance relay for transmission short line

KANG Xiao-ning, ZHAO Xuan-zong, SUONAN Jia-le, LIU Zhi-liang, LIU Lin-lin, ZHANG Jun-min

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Common distance relay is always out of work when it is used in short line, as the relay overreach is caused by small residual pressure. Factors that affect the measuring error of distance element have been qualitatively analyzed, besides, the relationship between measuring error of distance element and impedance and line impedance ratio have been quantitatively analyzed with simulation data when fault happens at the end of protection zone. The protection program that distance relay for short line can be set by use of system impedance and line impedance ratio has been advanced. In this program, fault is assumed to happen at the end of the protection wherever it happened, the great possible error can be used as the basis for the protection of adjust with real-time measuring system impedance and line impedance ratio, so that the override of distance relay for short line can be eliminated and selectivity can be ensured. EMTP simulation shows that this method eliminates the override of distance relay effectively, so the performance of distance relay for short line can be improved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50677051 and No.50877061), National Science and Technology Key Project (No. 2005BA208C) and Special Fund of the National Basic Research Program of China (973) (No.2009CB219704).

**Key words:** distance relay; short line; adaptive; source impedance ratio

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0022-06

## 0 引言

距离保护在高压以及超高压输电线路应用广泛。目前城市电网中, 短距离高压输电线路不断增加, 距离保护应用于短线路面临诸多问题。例如, 由于线路阻抗很小, 相间短路的弧光电阻相对于其

整定阻抗较大, 继电器的动作范围受短路点的弧光电阻影响较大, 距离保护抗过渡电阻能力大大下降, 从而影响距离保护的正确动作; 由于线路阻抗小, 线路末端故障时保护安装处的残压很小, 则电容式电压互感器(CVT)的传变特性造成的误差就很大, 再加上A/D的转换误差, 很容易造成保护的超越<sup>[1]</sup>。当被保护线路的长度很短时, 保护很可能没有保护范围。而现在通常都按可靠系数为0.8~0.85来进行距离保护的整定, 这适用于一般的中长线, 对于短线路或者系统阻抗较大的中长线, 0.15~0.2的裕

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50677051, 50877061); 国家科技攻关项目(2005BA208C); 国家973项目(2009CB219704)

度并不能涵盖所有的误差因素, 因此很容易造成保护的超越。

目前, 尚未有适合于短线路的、性能完善的保护装置, 一般都是将适用于绝对意义上的长线路保护直接挪用到短线路上, 常出现整定困难, 保护暂态超越的问题。且目前针对以线路的绝对长度定义的短线路提出的各种解决措施, 都有一定缺陷<sup>[2-5]</sup>。

本文离线仿真分析了短线路末端发生相间故障时, 测量元件最大误差和线路长短以及过渡电阻、CVT、CT 等的关系并得到误差关系图。在线应用时, 以实测的电源线路阻抗比作为区分线路长短的依据, 根据电源线路阻抗比以及分析得到的误差关系图实时调整保护的動作范围, 在保证末端故障不超越的基础上保证内部故障的选择性。

## 1 短线路自适应距离保护的基本思想

在短线路末端发生相间故障时, 母线电压较低, 测量阻抗的计算精度受过渡电阻、CVT、CT 等的暂态过程影响严重, 往往造成保护的超越, 从而出现非选择性的动作。为避免上述问题, 短线路的距离保护在工程上通常退出工作。这种方案可以避免距离保护超越, 但降低了整个保护系统的可靠性。如果距离保护可以根据其测量误差的大小在线地调整其保护范围, 则可以避免距离保护的超越问题, 同时发挥距离保护的作用。

由于 CVT、CT、A/D 转换器以及过渡电阻对测量阻抗的误差是一个综合的效应, 不一定是一个线性关系, 理论上很难分析出来, 而且上述因素共同作用时也不一定同时为正误差或者负误差, 存在相互抵消的可能, 因此单独靠误差的累加可能会放大误差。

短线路自适应距离保护就是基于这一思想。首先在考虑不同电源线路阻抗比、不同故障时刻、不同过渡电阻以及电源侧负荷侧的情况, 通过离线仿真, 得到线路的相对长短与线路末端故障时距离元件最大测量误差之间的关系图, 从而确定末端故障时距离元件可能的最大误差。线路故障时, 首先界定线路的相对长短, 在假设故障发生在线路末端的基础上, 根据关系图得到的最大误差自适应调整距离保护的定值即动作范围。该方案可以有效避免线路末端故障时距离保护超越, 同时也保证了出口故障的选择性, 避免了距离保护应用于短线路时的盲目退出。

这一方案的实现需要解决以下几个问题: 一是线路长短如何界定, 二是影响短线路距离保护测量误差的各种因素分析及误差关系图的获取。

## 2 长短线的界定

对于究竟多长的线路才可以认为是长线路, 而多长的线路是短线路? 迄今为止, 美国国家标准化协会 (ANSI)、美国电气及电子工程师协会 (IEEE) 或国际电工委员会 (IEC), 对此尚无一明确的定义或者说明。目前比较合理的是用系统阻抗和线路阻抗的比来确定<sup>[2]</sup>:

$$S = \text{系统阻抗 } Z_S / \text{线路阻抗 } z_l \quad (1)$$

当系统阻抗和线路阻抗之比很小时, 可以认为是长线路; 当系统阻抗和线路阻抗之比很大时, 可认为是短线。而对于  $S \geq 50$  的线路就不宜采用距离保护<sup>[6]</sup>, 可认为是短线, 反之为长线。因此若  $S$  可以在线计算得到, 则可以通过计算电源线路阻抗比  $S$  作为界定线路长短的依据。

如图 1, 发生内部故障时, 由叠加定理可得:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_h + \Delta \dot{U} \quad (2)$$

$$\dot{i}_m = \dot{i}_h + \Delta \dot{i} \quad (3)$$

其中:  $\dot{U}_m$ ,  $\dot{i}_m$  为故障状态下 M 端的电压电流;  $\dot{U}_h$ ,  $\dot{i}_h$  为正常状态下的负荷电压电流;  $\Delta \dot{U}$ ,  $\Delta \dot{i}$  为故障分量电压电流。从而故障分量电压电流为:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_m - \dot{U}_h \quad (4)$$

$$\Delta \dot{i} = \dot{i}_m - \dot{i}_h \quad (5)$$

据此求得:

$$Z_m = -\frac{\Delta \dot{U}}{\Delta \dot{i}} \quad (6)$$

即发生故障时, 利用故障分量电压与电流的比可求得系统阻抗  $Z_m$ 。对于已知长度的线路, 其线路阻抗可以实测或计算得到, 由公式 (1) 就可得电源线路阻抗比  $S$ , 从而可界定线路长短。

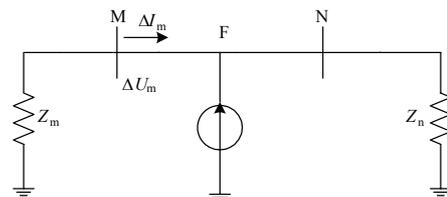


图 1 内部故障网络图

Fig.1 Network of internal fault

## 3 影响距离元件测量误差的因素及其分析

对于短线路距离保护, 由于线路内部故障时, 保护处电压比较低, 因此 CVT、CT 的传变误差和保护装置内部数据采集误差是影响距离元件测量精度的主要因素, 下面对此进行简要分析。

### 3.1 传变误差影响分析

对于大系统或者长线路, 系统阻抗值比较小,

电源线路阻抗比小,相应而言,受 CVT 的暂态误差影响比较小;而对于短线路与超短线路末端发生故障时,由于线路阻抗值很小,电源线路阻抗比很大,受 CVT 的传变误差影响大,相对测量电压的幅值误差也比较大。一般来讲,CT 饱和后,二次测量电流减小,测量阻抗增大,不会发生误动的问题,但是随着电力系统的发展,系统短路容量不断增大,短线增多,线路末端故障时,CT 也有可能出现饱和的现象。由于保护用的电流互感器要承受很大的短路电流,特别是短线路,一般为其额定电流的 10~40 倍,很容易饱和,通常认为电流互感器的最大误差为 10%<sup>[7]</sup>。而 A/D 转换器的量化误差,在保护安装处残余电压比较大时可以忽略;但是在故障线路比较短的情况下,由于本身的残压比较低,A/D 转换的有效位数比较少,A/D 的量化误差会很大,从而引起的测量阻抗的误差也比较大。

对于实际运行中的线路,由 CVT、CT、A/D 转换器引起的距离元件的测量误差并不一定是线性的关系,也不一定是正误差或者负误差,可能相互抵消,而单独靠误差的累加可能会放大误差。

为了说明阻抗测量误差与以上因素的关系,图 2 给出了由 CVT、CT、A/D 转换等因素引起的阻抗测量误差同向叠加时总的测量阻抗误差与电源线路阻抗比的关系,由该曲线可以看出电源线路阻抗比和阻抗测量误差间的变化趋势。当电源线路阻抗比大时(弱馈情况),测量阻抗的误差很大,即使是绝对的长线路也应以短线路来看待,相反,即使是绝对意义上很短的线路,当电源线路阻抗比小时,测量阻抗的误差也可能比较小,可以看作长线路处理。应当指出,图 2 仅给出的是测量阻抗误差的变化趋势,实际的测量阻抗误差变化规律需通过大量的仿真确定。

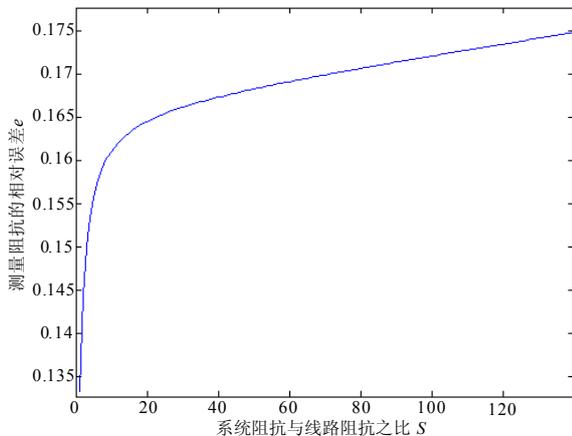


图 2 电源线路阻抗比 S 与误差的关系图

Fig.2 Relationship between error and source impedance ratio S

### 3.2 过渡电阻的误差影响分析

高压输电线路中存在较大的过渡电阻,无论是绝对意义上的长线路还是短线路在线路末端故障时,都很容易引起距离保护超越。下面主要对双侧电源末端故障的情况进行分析。

由图 3 当输电线路的末端发生 BC 相经过渡电阻短路时,可得:

$$\dot{U}_{mB} - \dot{U}_{mC} = Z_1(\dot{I}_{mB} - \dot{I}_{mC}) + \dot{I}_g R_f \quad (7)$$

其中:  $\dot{I}_g = (\dot{I}_{mB} + \dot{I}_{nB}) - (\dot{I}_{mC} + \dot{I}_{nC})$ ;  $Z_1$  为线路阻抗;  $R_f$  为过渡电阻。则 M 端保护的测量阻抗为

$$Z_k = \frac{\dot{U}_{mB} - \dot{U}_{mC}}{\dot{I}_{mB} - \dot{I}_{mC}} = Z_1 + \Delta Z \quad (8)$$

其中,  $\Delta Z$  为发生相间短路时的附加阻抗。假设电源两端电势的幅值相等,可算得:

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \left(1 + \frac{\dot{I}_{nB} - \dot{I}_{nC}}{\dot{I}_{mB} - \dot{I}_{mC}}\right) R_f = \left(1 + \frac{\dot{E}_{nB} - \dot{E}_{nC}}{Z_n} \frac{Z_m + Z_1}{\dot{E}_{mB} - \dot{E}_{mC}}\right) R_f = \\ &= \left(1 + \frac{E_n}{E_m} \angle \delta_1 \times \left| \frac{Z_m + Z_1}{Z_n} \right| \angle \delta_2\right) R_f = \\ &= \left(1 + \left| \frac{Z'_m}{Z_n} \right| \angle (\delta_1 + \delta_2)\right) R_f \end{aligned} \quad (9)$$

其中:  $Z'_m = Z_m + Z_1$ ;  $\delta_1$  为两端电源电势的相角差;  $\delta_2$  为故障点两端的系统和线路阻抗角之差。

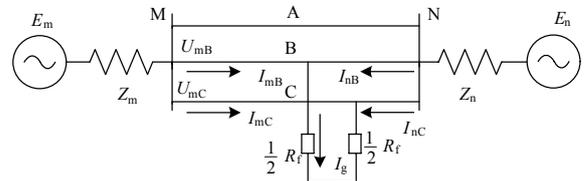
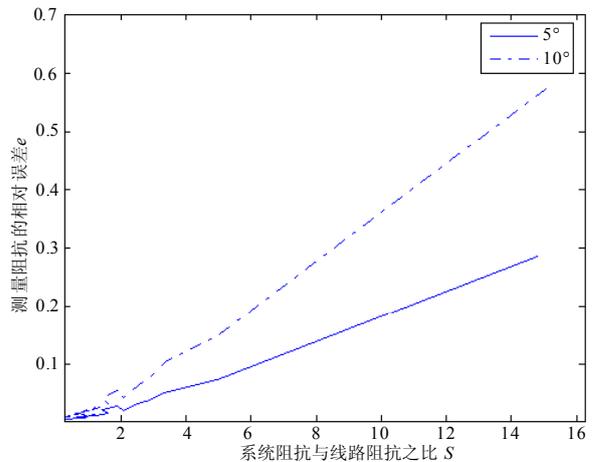
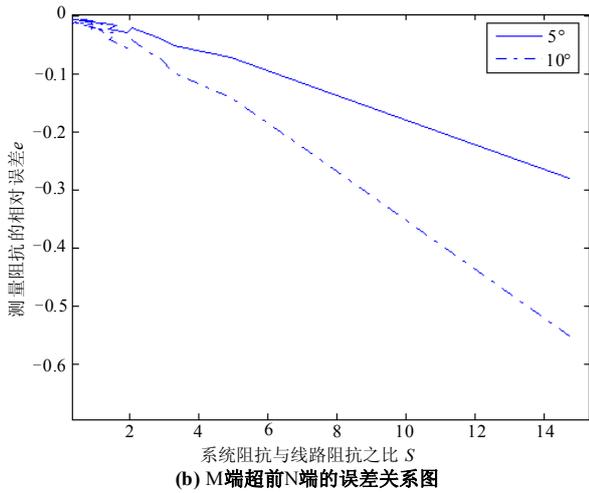


图 3 经过渡电阻短路网络图

Fig.3 Short circuit network by fault resistance



(a) M端滞后N端的误差关系图

图4 电源线路阻抗比  $S$  与测量阻抗的误差关系图Fig.4 Error relationship between source impedance ratio  $S$  and measuring impedance

若线路两端系统阻抗角相差不大, 当故障发生前  $\dot{E}_m$  超前  $\dot{E}_n$  时,  $i_{mB} - i_{mC}$  超前  $i_{nB} - i_{nC}$ , 得到的附加阻抗呈现容性; 当故障发生前  $\dot{E}_m$  与  $\dot{E}_n$  同相时,  $i_{mB} - i_{mC}$  与  $i_{nB} - i_{nC}$  同相, 得到的附加阻抗呈现电阻的性质; 当故障发生前  $\dot{E}_m$  滞后  $\dot{E}_n$  时,  $i_{mB} - i_{mC}$  滞后  $i_{nB} - i_{nC}$ , 得到的附加阻抗呈现感性。由于阻抗继电器只反应测量阻抗的电抗分量, 因此很容易造成距离保护的超越或者拒动。而图4给出了两端电源电势角度相同时, M端系统阻抗角比N端小  $5^\circ$  和  $10^\circ$  与M端系统阻抗角比N端大  $5^\circ$  和  $10^\circ$  时, 测量阻抗的相对误差与电源线路阻抗比  $S$  的关系图。由图可知, 随着  $S$  的增大, 无论是绝对意义上的长线路还是短线路, 测量阻抗的误差越来越大, 很容易造成保护的超越或者拒动。

受两端系统相角差的影响, 过渡电阻上产生的附加阻抗可能呈现纯阻性、阻感性或者阻容性, 从而导致测量阻抗发生变化。相同的过渡电阻, 负荷电流越大, 测量阻抗的变化也越大。仿真也发现一般位于送电侧的阻抗继电器由于附加阻抗呈阻容性而易超越; 受电侧阻抗继电器的附加阻抗呈阻感性而可能拒动。

#### 4 自适应距离保护原理

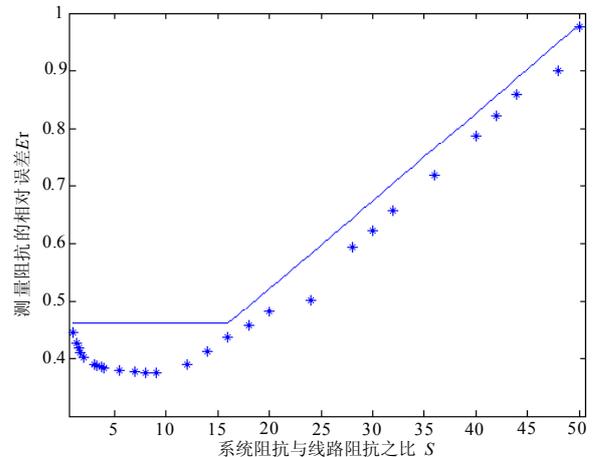
距离保护的测量阻抗为测量电压除以测量电流, 上述各种因素引起的误差反应在测量阻抗中时, 即为当测量阻抗小于实际线路阻抗时, 可能造成保护的超越。利用仿真得到的距离元件的最大测量误差与电源线路阻抗比之间的关系曲线, 可以构成如式(10)的短线路自适应距离保护判据:

$$X \leq pX_{set} \quad (10)$$

式中:  $X$  为测量电抗;  $X_{set}$  为距离保护 I 段的整定值, 已知;  $p$  为自适应整定系数。  $p$  的大小可以根据  $S$  的实测值查曲线得到。

该方案的本质是故障启动后根据在线计算得到的电源线路阻抗比, 在假设故障是发生在保护末端的情况下, 根据测量元件的误差实时调整保护范围, 这样可以有效避免末端故障距离保护超越, 保证选择性。本文在仿真中, 均假定故障发生于保护线路末端<sup>[8]</sup>, 原因为: ①本文的自适应相间距离保护主要是防止距离保护超越误动作, 在线路末端故障时, 只要保护不发生超越, 在其他位置故障保护就不会发生超越; ②距离继电器严格地讲为阻抗平面上的区域分类, 其性能主要表现在临界点, 对于区内, 测量阻抗的误差大小并不影响继电器的正确动作。

而误差曲线的获得, 是在考虑空载线路的情况以及重载线路的情况下, 在不同故障时刻、不同的过渡电阻时, 仿真得到的可能的最大误差曲线, 并依据此误差曲线作为故障时的测量元件的误差, 对保护定值进行相应调整。由于相间短路的故障电阻主要为电弧电阻, 一般在数欧姆至十几欧姆, 本文仿真分析中取最大过渡电阻为  $30 \Omega$ 。仿真中考虑过渡电阻在  $0 \sim 30 \Omega$  变化时, 不同负载水平、不同故障初始相位等各种情况下, 得到测量阻抗的误差并取最大值得到测量阻抗误差与电源阻抗比的关系曲线如图5<sup>[9]</sup>。在图5的基础上, 再考虑一定的裕度得到自适应调整系数如图6所示。

图5 电源线路阻抗比  $S$  与测量误差的关系Fig.5 Relationship between source impedance ratio  $S$  and measuring impedance error

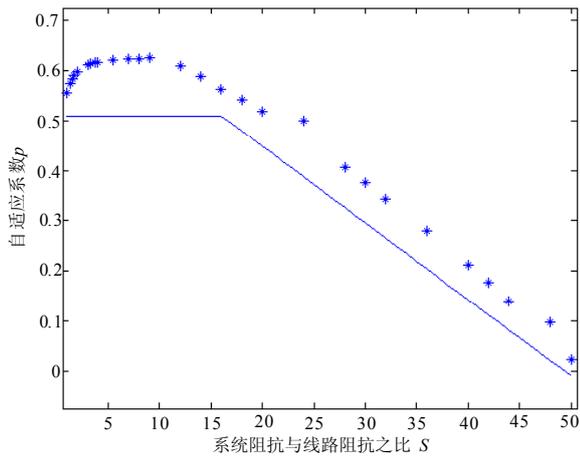


图 6 电源线路阻抗比  $S$  与自适应系数  $p$  的关系图

Fig.6 Relationship between source impedance ratio  $S$  and adaptive setting coefficient  $p$

由图 5、6 可知，当电源线路阻抗比大时，误差相应的就比较大，则自适应整定系数  $p$  就比较小；反之  $p$  就比较大，从而利用此计算测量阻抗的误差进行距离保护定值的调整，以保证保护的选择性。同时也说明当  $S > 50$  时，测量阻抗的误差很大，甚至超过本条线路的全长，距离保护没有保护范围，可认为线路是短线路，则需要将距离保护退出工作<sup>[10]</sup>。

### 5 仿真分析

本文采用 ATP/EMTP（电磁暂态程序）进行数字仿真实验，对 500 kV 输电线路进行仿真，输电线路采用分布参数模型，使用 16 位的 A/D 转换器，模型中考虑了 CVT 和 CT 的影响。其中线路的参数为：

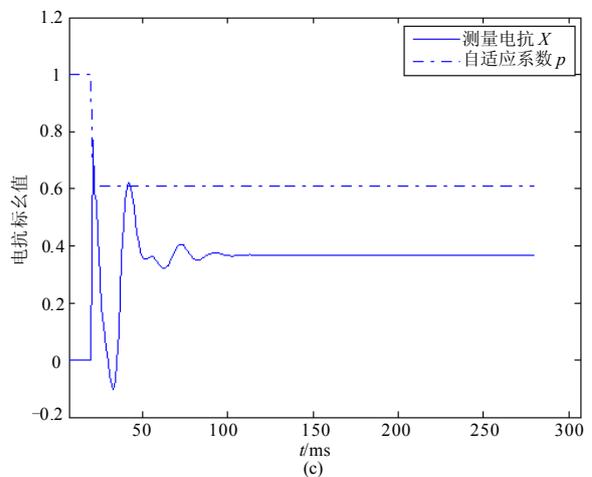
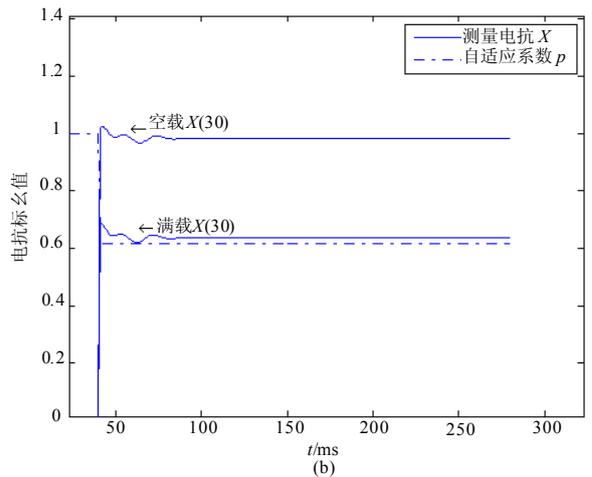
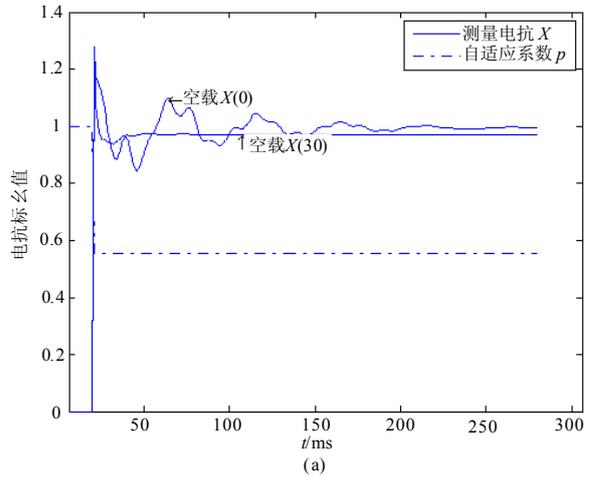
$$R_0 = 0.2036 \Omega/\text{km}, \quad \omega L_0 = 1.0901 \Omega/\text{km}$$

$$R_1 = 0.0256 \Omega/\text{km}, \quad \omega L_1 = 0.2640 \Omega/\text{km}$$

$$C_1 = 0.01324 \mu\text{F}/\text{km}, \quad C_0 = 0.00726 \mu\text{F}/\text{km}$$

图 7 给出了各种情况下的仿真计算结果用以验证保护的动作行为。图中测量电抗  $X$  采用以实际线路电抗为基准值的标么值表示，在 20 ms 时，发生故障。其中图 7 (a) 图给出在空载线路末端，分别在金属性短路和经过 30  $\Omega$  过渡电阻短路时短路的情况，其中  $S=1$ ，可见保护都可靠不动。图 7 (b) 给出分别在空载和满载线路末端经过 30  $\Omega$  过渡电阻短路的情况，其中  $S=4$ ，保护不超越。图 7 (c) 给出在重负荷线路侧，在线路内部 80% 处经过 30  $\Omega$  过渡电阻短路的情况，其中  $S=12$ ，可见区内故障时，保护可以没有延时动作。图 7 (d) 给出了在  $S=20$  的线路，在负荷侧区外经过 30  $\Omega$  过渡电阻发生相间短路的情况，保护不超越。图 7 (e) 给出了在  $S=40$  的线路在重载情况下，分别经过 10  $\Omega$  和 30  $\Omega$  过

渡电阻发生区外故障的比较图，可见保护可靠不动作。图 7 (f) 给出在  $S=25$  的线路在负荷侧区内 70% 处发生经 30  $\Omega$  过渡电阻相间短路的情况，在这种情况下，按照保护的计算，保护范围没有开放到 70%，保护没有动作，但是从所有的仿真结果来看，利用现有的判据均可以避免在末端或者区外故障时保护的超越问题。



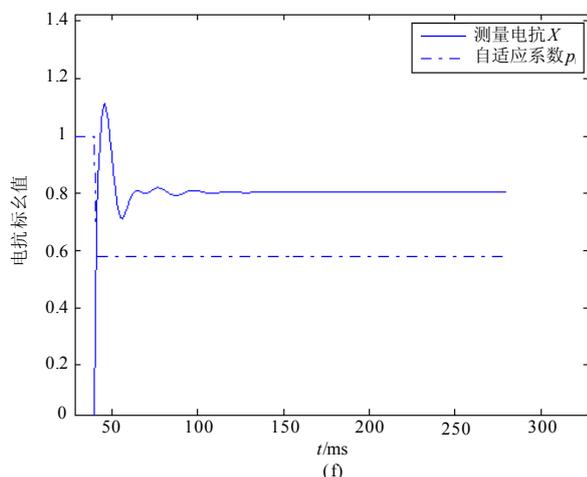
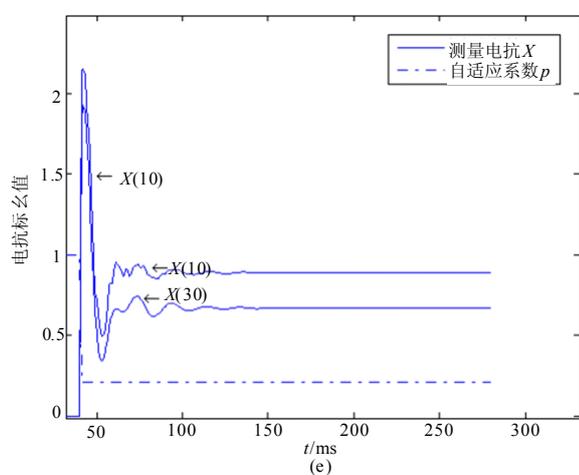
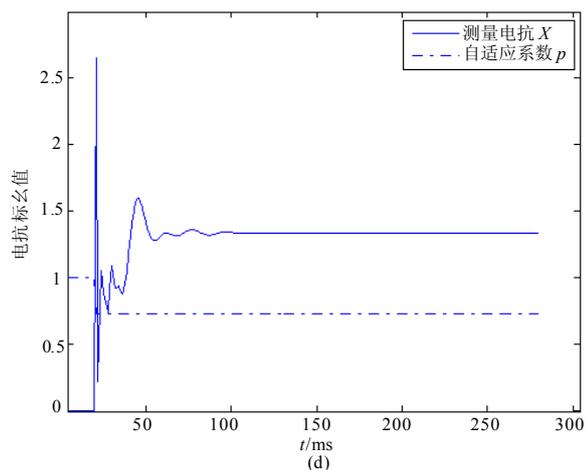


图7 各种情况下的仿真结果

Fig.7 Emulation result in all cases

由上述的仿真分析可知, 当测量阻抗满足式(10)时, 保护可靠动作; 当计算的测量阻抗满足  $X > pX_{set}$  时, 保护可靠不动作, 从而保证保护的选择性。可见本方案提高了距离保护的适用范围避免了距离保护应用于短线路时的盲目退出。

## 6 结论

(1) 提出了依据实时计算的电源线路阻抗比作为判断线路长短的判据。发生故障时, 利用故障分量算得系统阻抗对已知长度的线路可得电源线路阻抗比, 利用此电源线路阻抗比进行长线和短线的区分, 从而确保短线路距离保护的動作特性。

(2) 基于对计算测量阻抗误差估计的仿真分析, 提出了自适应保护原理。并得出利用该方法进行短线路距离保护定值的实时调整, 保证了保护的选择性, 提高了短线路距离保护适应各种运行方式的能力。而且也很好解决了中长距离输电线路弱馈侧距离保护超越问题。

## 参考文献

- [1] 何奔腾, 周春霞. 短线路两相短路时距离保护误差分析[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(11): 12-13.  
HE Ben-teng, ZHOU Chun-xia. The error analysis of distance relay for two-phase short-circuit of short line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 12-13.
- [2] 李宏任. 实用继电保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 李一泉. 电容式电压互感器(CVT)对超(特)高压输电线路保护影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
LI Yi-quan. The study of influence of CVT for relay of extra (ultra) high voltage transmission line[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [4] 唐建华. 短线路距离保护动作特性的分析[J]. 华东电力, 1999(12): 44-45.  
TANG Jian-hua. The analysis of the characteristics for distance relay of short line[J]. East China Electric Power, 1999(12): 44-45.
- [5] 曹承亮. 在短线路上采用微机距离保护的探讨[J]. 供用电, 1998, 15(3): 17-18.  
CAO Cheng-liang. The study of computer distance relay for short line[J]. Distribution & Utilization, 1998, 15(3): 17-18.
- [6] 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.
- [7] 卢晓华. 距离保护可靠系数及I段最小保护范围的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.  
LU Xiao-hua. The study of reliable coefficient of distance relay and the least protection zone in the setting of reliable coefficient[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [8] 索南加乐, 许庆强, 宋国兵, 等. 自适应接地距离继电器[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 54-58.

(下转第32页 continued on page 32)

达到文献[3]所用改进延迟相关法的同步效果(通过定时偏移估计方差曲线基本一致可以得出),而且更重要的是成功解决了改进延迟相关法可能会引起误判,阈值  $m_{th}$  选择裕度小这一缺点。同时与改进延迟相关算法比较,新判决准则算法计算量更小,判决阈值选择裕度更大。

### 3 结语

本文提出一种符号定时同步新判决准则,采用该定时同步新方法实现了低压电力线 OFDM 载波通信系统的准确符号同步。在基于 OFDM 的 PLC 系统的实验环境中对真实的接收信号分别进行延迟相关法、改进延迟相关法和本文提出的新同步方法的定时同步性能对比分析,实验测试结果表明延迟相关法在噪声突然减小时容易产生误判,而改进延迟相关同步算法则通过采用计及双窗口功率均值和符号定时估计均值的措施,避免了判决函数值异常增大引起误判的可能性,但在噪声的相关度比较高的情况下,噪声  $m_n$  数值波动很可能会超过设定的判决阈值  $m_{th}$  而引起误判,同时判决阈值裕度选择小,本文采用定时同步新判决准则不但克服了延迟相关法判决函数值异常增大引起误判的缺陷,而且判决阈值裕度比改进延迟相关法大,计算量也相对较小。本文提出的符号定时同步新算法稳定可靠、精度高,是一种有效的低压电力线 OFDM 载波通信系统符号定时同步方法。

### 参考文献

[1] Schmidl T M, Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Trans on Communications, 1997, 45 (12): 1613-1621.  
 [2] Schmidl T M, Cox D C. Low-complexity burst

synchronization for OFDM[C]. //IEEE International Conference on Communications. 1996: 1301-1306.  
 [3] 罗春风,程时杰,熊兰,等. 低压电力线 OFDM 载波通信系统符号定时同步方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (9): 65-71.  
 LUO Chun-feng, CHENG Shi-jie, XIONG Lan, et al. Timing synchronization methods for low-voltage OFDM power line communication system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (9): 65-71.  
 [4] 姜霞, Guimbis J N, 程时杰. 低压配电网载波通信噪声特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (11): 30-35.  
 JIANG Xia, Guimbis J N, CHENG Shi-jie. Noise characteristics investigation in low voltage powerline communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (11): 30-35.  
 [5] HE Hai-bo, CHENG Shi-jie, ZHANG You-bing, et al. Analysis of reflection of signal transmitted in low-voltage powerline with complex wavelet[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004,19 (1): 86-91.  
 [6] Proakis J G. Digital communications fourth edition[M]. Singapore: McGraw-Hill International: Electrical Engineering Series, 2001.

收稿日期: 2009-09-23; 修回日期: 2009-12-05

#### 作者简介:

罗春风(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统载波通信和继电保护运行管理; E-mail: winds8@sohu.com

文劲宇(1970-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制;

杨慧敏(1983-),女,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制。

(上接第 27 页 continued from page 27)

SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, SONG Guo-bing, et al. Adaptive earth fault distance relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (17): 54-58.  
 [9] 索南加乐,宋国兵,许庆强,等. 任意长度数据窗幅频特性一致的正交相量滤波器设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 45-49.  
 SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, XU Qing-qiang, et al. The design of orthogonal phase filter with identical magnitude-frequency characteristics and optional data-window[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 45-49.  
 [10] 沈冰,何奔腾,张武军. 新型自适应距离继电器[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7): 39-44.

SHEN Bing, HE Ben-teng, ZHANG Wu-jun. New type adaptive distance relay with improved performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (7): 39-44.

收稿日期: 2009-10-12; 修回日期: 2009-11-11

#### 作者简介:

康小宁(1968-),男,副教授,研究方向为电力系统自动化和继电保护技术;

赵选宗(1985-),男,硕士研究生,研究方向为自适应继电保护; E-mail: xuanzong0329@163.com

索南加乐(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护领域的研究。