

输电线路相差保护新原理

张苏敏¹, 古斌¹, 曹良丰², 朱烈锋¹

(1. 绍兴文理学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 湖南省常德供电分公司, 湖南 常德 415001)

摘要: 相差纵联保护具有区别电力系统振荡与短路的优越性能, 但传统相差保护在内部故障时灵敏度易受负荷电流和过渡电阻的影响, 且应用于双回线或环网时其性能受线路分布电容影响, 在外部故障时保护可能误动。基于无损线路分布参数模型及故障分量保护原理, 提出了新型相差保护原理。理论上保护性能不受负荷电流和过渡电阻的影响, 且完全杜绝了外部故障时保护误动的可能性, 极大地提高了保护安全性, 且各种内部故障时可靠动作。理论分析表明所提原理适用于各种故障类型, 其性能不受故障电阻及系统运行状态等的影响。大量的仿真也证明了该原理的正确性。

关键词: 安全性; 分布参数模型; 双回输电线路; 相差保护; 故障分量网络

A novel phase comparison protection principle for transmission lines

ZHANG Sumin¹, GU Bin¹, CAO Liangfeng², ZHU Liefeng¹

(1. Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Changde Electrical Industries Bureau, Hunan Province Electric Power Company, Changde 415001, China)

Abstract: Phase comparison protection possesses the superior performance of distinguishing between power system oscillation and fault, but the sensitivity of conventional phase comparison protection during internal faults is susceptible to the influence of load current and the fault resistance, and its performance is significantly influenced by the distributed capacitance of ultra high voltage (UHV) transmission lines, which leads to the maloperation of phase comparison relay. A novel distributed parameters model based positive sequence superimposed components phase comparison protection principle is proposed. The protection performance of the novel principle is not affected by load current and the fault resistance theoretically. On the other hand, the novel principle completely overcomes the effects of distributed capacitance to protection, greatly improves the security of protection. The protection maloperation problem as the external fault of long distance UHV line occurs as well as the maloperation of non-faulty circuit as fault occurs in one of the double-circuit line on the same tower can be solved. Extensive simulations are performed to evaluate the performance of the proposed algorithm. The results show that the algorithm is reliable for UHV power transmission line protections. Also it is immune to fault resistances and system condition.

Key words: security; distributed parameters model; double-circuit transmission lines; phase comparison protection; fault component network

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0076-08

0 引言

由于纵联保护在理论上具有绝对的选择性, 因此是高压和超高压输电线路的主要保护方式^[1-2]。方向纵联保护^[3-4]利用线路两侧的方向元件分别对故障方向做出判断, 然后通过通讯通道进行综合判断, 即对两侧的故障方向进行比较来决定是否跳闸。这种方式能较快地切除线路发生的各种故障, 使得方向纵联保护在高速保护中扮演了重要的角色^[5-7]。但其方向元件的性能受系统运行方式和电压回路工作

状况的影响, 对于强电源侧或高阻故障等情况下的方向元件, 在长线路对侧末端短路时保护安装处故障分量电压过低, 影响了保护的灵敏性和可靠性, 可能导致误判, 这已被现场运行所证实^[8-10]。

相差纵联保护具有区别电力系统振荡与短路的优越性能, 简单可靠, 在电力系统中的中短线路上获得了广泛的应用^[11]。它通过比较输电线两端电流的相位来判别故障区域以实现保护。传统的相差保护通过比较线路两端工频电流 $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ 的相位来判别故障区域(\dot{I}_1 为正序电流, \dot{I}_2 为负序电流, k 为系

数), 在内部故障时灵敏度易受负荷电流和过渡电阻的影响, 严重时还会导致拒动^[12-16]。文献[11-14]提出了故障分量相差保护原理, 理论上保护性能不受负荷电流和过渡电阻的影响, 亦与两端电源电势摆开角无关, 但相差保护应用于双回线或环网时, 其性能受线路分布电容影响在外部故障时保护可能误动。为了消除这种影响, 常用的办法是在保护装置中采取补偿措施, 但这些补偿措施均是基于集中参数线路模型的, 并不能完全补偿线路上的分布电容电流。为消除输电线路分布电容对保护的影响, 继电保护工作者相继提出了基于线路分布参数模型的分相电流差动保护及距离保护^[17-18], 理论上可完全消除输电线路分布电容对保护的影响。

随电力系统输电线路的增长及输电容量的增大, 目前实际系统中相差保护应用已经较少, 但是相差保护作为理论研究还是有其价值的。本文基于无损分布参数线路模型及故障分量保护原理, 提出了新型相差保护原理, 理论上完全消除了线路分布电容电流的影响, 杜绝了外部故障时保护误动的可能性, 保护可靠性和灵敏度得以极大提高。理论分析表明所提原理适用于各种故障类型, 其性能不受故障电阻及系统运行状态等的影响。大量的仿真也证明了该原理的正确性。

1 正序故障分量相差保护基本原理

对双端电源输电系统发生故障时, 如电流正方向为母线指向线路, 考虑正序故障分量网络, 则内部故障判据为^[11-12]

$$\arg(\Delta \dot{I}_{m1} / \Delta \dot{I}_{n1}) \approx 0^\circ \quad (1)$$

外部故障判据为

$$\arg(\Delta \dot{I}_{m1} / \Delta \dot{I}_{n1}) \approx 180^\circ \quad (2)$$

上述式中, $\Delta \dot{I}_{m1}$ 与 $\Delta \dot{I}_{n1}$ 为两侧保护安装处的基波电流突变量相量。

2 外部故障时相差保护动作行为分析

2.1 单回线区外故障分析

如图1, X_{ms1} 、 X_{ns1} 为两侧系统等值电抗, X_1 为线路等值电抗, X_{c1} 为容抗, 其数值为全线等值容抗^[19]; 由无损线路分布参数模型并按图1 电流正方向有

$$\Delta \dot{I}_{m1} = j \frac{\Delta \dot{U}_{n1}}{Z_{c1}} \sin \beta l - \Delta \dot{I}_{n1} \cos \beta l = \Delta \dot{I}_{n1} \left(\frac{X_{ns1}}{Z_{c1}} \sin \beta l - \cos \beta l \right) \quad (3)$$

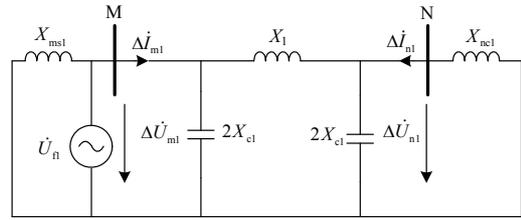


图1 外部故障时正序故障分量网络

Fig. 1 Positive sequence fault component network at external fault

式中: $\beta = \omega \sqrt{L_1 C_1}$ 为相位系数; $Z_{c1} = \sqrt{L_1 / C_1}$ 为特征阻抗; L_1 为线路单位长度等效正序电感; C_1 为线路单位长度对地等效电容; l 为线路长度。

$$\arctg \left(\frac{Z_{c1}}{X_{ns1}} \right) > \beta l \quad (4)$$

当式(4)成立时, 可推算知式(3)等号右侧括弧中算式值为负, 即 $\Delta \dot{I}_{m1}$ 与 $\Delta \dot{I}_{n1}$ 反相^[11]。

相位系数越大及特征阻抗越小对式(4)的成立越为不利。根据典型架空输电线路参数^[20], 计算各种电压等级的相位系数(文献[20]给出的是对应于60 Hz 的传播常数 γ 的值, 这里已折算为对应于50 Hz 的相位系数值)及特征阻抗如表1所示。可见, 不同电压等级的相位系数相差不大, 分析中相位系数取表1中最大值 $\beta = 1.0840 \times 10^{-3}$ (1/km), 特征阻抗取表1中最小值 $Z_{c1} = 230 \Omega$ (从 β 的取值可知一般有 $\beta l < 90^\circ$, 除非线路长达1448 km以上时, βl 才大于 90°)。这时线路长度及系统等效阻抗为决定式(4)是否成立的主要因素, 考虑极为不利情况, 式(4)中取 X_{ns1} 等于 Z_{c1} 即 230Ω 时, 线路长度须大于724 km才导致式(4)不成立, 当线路长度足以使式(4)不成立时, 外部故障时保护将误动。需要指出的是, 由于线路特征阻抗一般较大, 系统阻抗通常较小, 故实际上出现上述情况的可能性不大。即正序故障分量电流相差保护应用于一定长度单回线时, 外部故障保护性能不受分布电容影响。

表1 不同电压等级线路的相位系数及特征阻抗

Table 1 Phase coefficient and characteristic impedance of different voltage transmission line

额定电压/kV	230	345	500	765	1100
相位系数 β ($\times 10^{-3}$) (1/km)	1.0703	1.0745	1.0840	1.0665	1.0599
特征阻抗 Z_{c1}/Ω	380	285	250	257	230

2.2 双回线路或环网外部故障分析

在双回线路或环网发生故障时，正序故障分量网络如图2所示。此时线路两侧正序故障分量电压 $\Delta\dot{U}_{m1}$ 与 $\Delta\dot{U}_{n1}$ 由故障点位置决定，但总会出现它们相等的情况^[11]，此时非故障回线上将流过大小相等、方向相同的电容电流。

此时相差保护将误判^[11]。

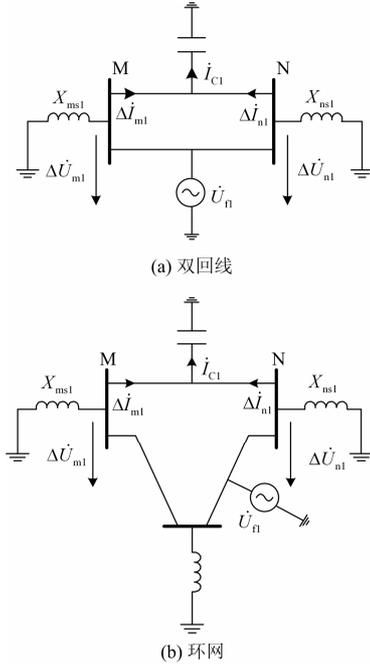


图2 双回线及环网外部故障时正序故障分量网络

Fig. 2 Positive sequence fault component network of double circuit and ring network at external fault

$$\Delta\dot{I}_{M1} = \Delta\dot{I}_{N1} = \frac{1}{2} \dot{I}_{C1} \quad (5)$$

3 基波正序故障分量相差保护新原理

如图3所示两端电源输电系统，其正序故障分量网络如图4。图中 k 为线路参考点(选为线路中点)。其余参数对应于系统中各点的正序故障分量电流、电压相量，其中 $\Delta\dot{I}'_{mk1}$ 、 $\Delta\dot{I}'_{nk1}$ 为参考点 k 点两侧实际电流值。定义 $\Delta\dot{I}_{mk1}$ 为由M侧保护安装处的正序故障分量电压、电流相量经无损线路分布参数模型求得的 k 点正序故障分量电流相量(正方向与图4中 $\Delta\dot{I}'_{mk1}$ 相同)， $\Delta\dot{I}_{nk1}$ 为由N侧保护安装处的正序故障分量电压、电流相量经无损线路分布参数模型求得的 k 点正序故障分量电流相量(正方向与图4中 $\Delta\dot{I}'_{nk1}$ 相同)，新的相差保护原理判据为 $\Delta\dot{I}_{mk1}$ 、 $\Delta\dot{I}_{nk1}$ 同相

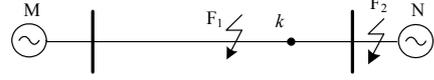


图3 输电线路系统

Fig. 3 Diagram of transmission system

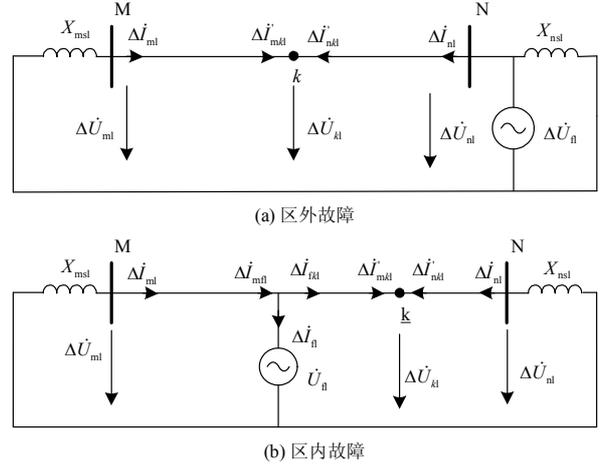


图4 正序故障分量网络

Fig. 4 Positive sequence fault component network

时判为内部故障，反相时判为外部故障。首先分析外部故障的情况。

3.1 外部故障分析

考察图4(a)，由两侧保护经无损线路分布参数模型求得 k 点正序电流：

$$\begin{cases} \Delta\dot{I}'_{mk1} = -j \frac{\Delta\dot{U}_{m1}}{Z_{C1}} \sin \beta l_{mk} + \Delta\dot{I}_{m1} \cos \beta l_{mk} \\ \Delta\dot{I}'_{nk1} = -j \frac{\Delta\dot{U}_{n1}}{Z_{C1}} \sin \beta l_{nk} + \Delta\dot{I}_{n1} \cos \beta l_{nk} \end{cases} \quad (6)$$

式中， l_{mk} 、 l_{nk} 分别为M及N侧保护距 k 点线路长，由于外部故障时被保护线路无故障点，无损线路分布参数模型全线成立，这时显然 k 点两侧实际电流值 $\Delta\dot{I}'_{mk1}$ 、 $\Delta\dot{I}'_{nk1}$ 与归算值 $\Delta\dot{I}_{mk1}$ 、 $\Delta\dot{I}_{nk1}$ 分别相等，而

$$\Delta\dot{I}'_{mk1} = -\Delta\dot{I}'_{nk1} \quad (7)$$

则对外部故障显然有

$$\Delta\dot{I}_{mk1} = -\Delta\dot{I}_{nk1} \quad (8)$$

即

$$\arg(\Delta\dot{I}_{mk1} / \Delta\dot{I}_{nk1}) = 180^\circ \quad (9)$$

3.2 内部故障分析

如图4(b)有

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{I}'_{mk1} &= -j \frac{\dot{U}_{f1}}{Z_{C1}} \sin \beta l_{fk} + \Delta \dot{I}_{fk1} \cos \beta l_{fk} = \\
&-j \frac{(\Delta \dot{U}_{m1} \cos \beta l_{mf} - j Z_{C1} \Delta \dot{I}_{m1} \sin \beta l_{mf})}{Z_{C1}} \sin \beta l_{fk} + \\
&\left(-j \frac{\Delta \dot{U}_{m1}}{Z_{C1}} \sin \beta l_{mf} + \Delta \dot{I}_{m1} \cos \beta l_{mf} - \Delta \dot{I}_{f1} \right) \cos \beta l_{fk} = \\
&-j \frac{\Delta \dot{U}_{m1}}{Z_{C1}} \sin \beta l_{mk} + \Delta \dot{I}_{m1} \cos \beta l_{mk} - \Delta \dot{I}_{f1} \cos \beta l_{fk} = \\
&\Delta \dot{I}_{mk1} - \Delta \dot{I}_{f1} \cos \beta l_{fk}
\end{aligned} \quad (10)$$

式中: l_{fk} 为故障点距 k 点线路长; l_{mf} 为 M 侧保护距故障点线路长; $\Delta \dot{I}_{mk1}$ 为由 M 侧保护安装处的正序故障分量电压、电流相量经无损线路分布参数模型求得的 k 点正序故障分量电流相量。

再由图 4(b) 故障点处电流参考方向有

$$\Delta \dot{I}_{fk1} = -C_N \Delta \dot{I}_{f1} \quad (11)$$

$C_N = \frac{X_{M1}}{X_{M1} + X_{N1}}$ 为 N 侧电流分配系数, 可视为实数,

X_{M1} 、 X_{N1} 分别为故障点到 M、N 侧系统中性点的等值正序电抗。并且

$$\dot{U}_{f1} = -j X_{\Sigma 1} \Delta \dot{I}_{f1} \quad (12)$$

式中, $X_{\Sigma 1} = \frac{X_{M1} X_{N1}}{X_{M1} + X_{N1}}$ 为从故障点看向系统的等值正序电抗。计及式(11)、式(12), 则式(10)可表示为

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{I}'_{mk1} &= -j \frac{\dot{U}_{f1}}{Z_{C1}} \sin \beta l_{fk} + \Delta \dot{I}_{fk1} \cos \beta l_{fk} = \\
&\left(\frac{X_{\Sigma 1} \sin \beta l_{fk}}{C_N Z_{C1}} + \cos \beta l_{fk} \right) \Delta \dot{I}_{fk1}
\end{aligned} \quad (13)$$

再由式(10)、式(11)有

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{I}_{mk1} &= \Delta \dot{I}'_{mk1} + \Delta \dot{I}_{f1} \cos \beta l_{fk} = \\
\Delta \dot{I}'_{mk1} &- \frac{\Delta \dot{I}_{fk1} \cos \beta l_{fk}}{C_N}
\end{aligned} \quad (14)$$

式(13)代入式(14)得

$$\Delta \dot{I}_{mk1} = \frac{X_{N1} (X_{M1} \sin \beta l_{fk} - Z_{C1} \cos \beta l_{fk}) \Delta \dot{I}'_{mk1}}{X_{L1} \sin \beta l_{fk} + C_N Z_{C1} \cos \beta l_{fk}} \quad (15)$$

式中, $X_{L1} = X_{M1} + X_{N1}$ 。

对式(15)等号右侧分子中括弧内算式, 考察如下算式:

$$\arctg \left(\frac{Z_{C1}}{X_{M1}} \right) > \beta l_{fk} \quad (16)$$

当该式成立时, 式(15)等号右侧分子中括弧内算式为负。对式(16)考虑极不利情况, M 侧系统正序电抗 X_{ms1} 取为线路特征阻抗 Z_{C1} 即 230 Ω ; 单位长线路电抗 $x_1 = \beta Z_{C1}$, 由 3.1 节参数可得 x_1 为 0.25 Ω/km , 故障点至 M 侧母线的线路电抗为 $l_{mf} x_1$, 则 $X_{M1} = X_{ms1} + l_{mf} x_1$; 从式(16)可看出, l_{fk} 与 l_{mf} 取得越大则对该式成立越不利, 由于参考点 k 选为线路中点, l_{fk} 与 l_{mf} 之和为 0.5 倍全线长度, 两者的最大可能值也都为 0.5 倍全线长度, 这里为说明问题, l_{fk} 与 l_{mf} 都取为 0.5 倍全线长度, 虽然这是不可能出现的情况。这时式(16)变为

$$\arctg \left(\frac{230}{230 + 0.5 l x_1} \right) > 0.5 \beta l \quad (17)$$

此时满足式(17)成立的线路长度范围为不大于 1 045 km。如同 3.1 节所述, 由于线路特征阻抗一般较大, 系统阻抗通常较小, 且 l_{fk} 与 l_{mf} 不可能同时取最大值, 这样在实际系统中要使得式(16)不成立的线路长度要远大于 1 045 km, 而这通常可能性不大。这样一般有

$$X_{M1} \sin \beta l_{fk} < Z_{C1} \cos \beta l_{fk} \quad (18)$$

即 $\Delta \dot{I}_{mk1}$ 与 $\Delta \dot{I}'_{mk1}$ 反相而与 $\Delta \dot{I}'_{nk1}$ 同相, 对图 4(b) 有

$$\Delta \dot{I}'_{nk1} = -j \frac{\Delta \dot{U}_{n1}}{Z_{C1}} \sin \beta l_{nk} + \Delta \dot{I}_{n1} \cos \beta l_{nk} = \Delta \dot{I}_{nk1}$$

即 $\Delta \dot{I}_{nk1}$ 与 $\Delta \dot{I}'_{nk1}$ 相同, 则 $\Delta \dot{I}_{mk1}$ 与 $\Delta \dot{I}_{nk1}$ 同相:

$$\arg(\Delta \dot{I}_{mk1} / \Delta \dot{I}_{nk1}) = 0^\circ \quad (19)$$

3.3 动作判据

考虑闭锁角后保护动作判据为^[14]

$$\left| \arg(\Delta \dot{I}_{mk1} / \Delta \dot{I}_{nk1}) \right| \leq 180^\circ - \varphi_b \quad (20)$$

或

$$\left| \arg(\Delta \dot{I}_{mk1} / \Delta \dot{I}_{nk1}) \right| \geq 180^\circ + \varphi_b \quad (21)$$

式中, φ_b 为闭锁角。计及最不利情况^[11]及双端通信延时、装置误差等因素^[14], φ_b 整定为 100° 。

3.4 故障分量提取及基波正序故障分量算法

保护启动后先对电压、电流进行低通滤波以滤除高频暂态量并采用下式计算电压、电流突变量^[8]:

$$\Delta f(t) = [f(t) - f(t-2T)] - [f(t-2T) - f(t-4T)] \quad (22)$$

式中, T 为基波周期。然后采用全波傅氏算法及滤波算法进行基波正序故障分量的计算。

4 仿真测试

利用 EMTDC/PSCAD 电磁暂态仿真软件分别对本文提出的相差保护新原理及高速算法进行了仿真试验。仿真模型如图 5 为 500 kV 系统，保护位于双回线的某一回线。

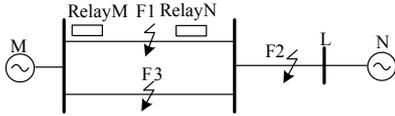


图 5 仿真系统图

Fig. 5 Simulation system

双回线互参数为： $R_m=0.0065 \Omega/\text{km}$ ； $L_m=45.798 \mu\text{H}/\text{km}$ ； $C_m=312.65 \text{ pF}/\text{km}$ 。

线路参数为：双回线路等长，长度为 360 km；单回线路长度为 280 km； $R_1=0.00758 \Omega/\text{km}$ ； $R_0=0.15421 \Omega/\text{km}$ ； $L_1=0.83922 \text{ mH}/\text{km}$ ； $L_0=2.6439 \text{ mH}/\text{km}$ ； $C_1=0.01397 \mu\text{F}/\text{km}$ ； $C_0=0.009296 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

M 侧等效电源参数为： $Z_{m1}=1.05+j43.18 \Omega$ ； $Z_{m0}=j29.09 \Omega$ ；N 侧等效电源参数为： $Z_{n1}=1.06+j44.92 \Omega$ ； $Z_{n0}=j37.47 \Omega$ 。

参考点 k 为线路中点。由线路参数可知其正序系统特征阻抗 Z_{C1} 为 245Ω ，其正序系统相位系数 β 为 $1.075 \times 10^{-3} (1/\text{km})$ ，考虑线路全长时， $l=360 \text{ km}$ 时， βl 为 0.387，则 $\cos \beta l$ 为 0.926， $\sin \beta l$ 为 0.377，式(6)的各补偿系数 $\cos(\beta l/2)$ 为 0.981337， $\sin(\beta l/2)$ 为 0.1922947。

采样频率为 2 kHz，故障开始时间为 0.2 s。仿真案例中 φ_1 为 $\arg(\Delta \dot{I}_{mk1} / \Delta \dot{I}_{nk1})$ ， φ_2 为 $\arg(\Delta \dot{I}_{m1} / \Delta \dot{I}_{n1})$ ； i_{ma} 、 i_{mb} 、 i_{mc} 分别为被保护线路 M 侧三相电流。

4.1 典型故障仿真

图 5 中，区内故障为 F1 点(距离 M 侧 200 km)，区外故障为 F2 点(距离 L 侧 180 km)，故障电阻为 15Ω ，故障仿真见图 6、图 7。可见在各种区内故障时保护可靠动作，各种区外故障时保护可靠制动。

4.2 高阻故障

图 8 描述了 F1 及 F2 点 A 相接地高阻故障的情形(故障电阻 400Ω)。从仿真可看出保护具有故障分量保护的特征，其性能不受过渡电阻影响。

4.3 双回线外部故障

图 9 仿真了双回线 F3 点故障的情况(距离 M 侧 90 km)。从仿真结果可知，传统方向保护在线路两侧都判为正方向故障，保护必然误动。而新原理可正确判为区外故障。

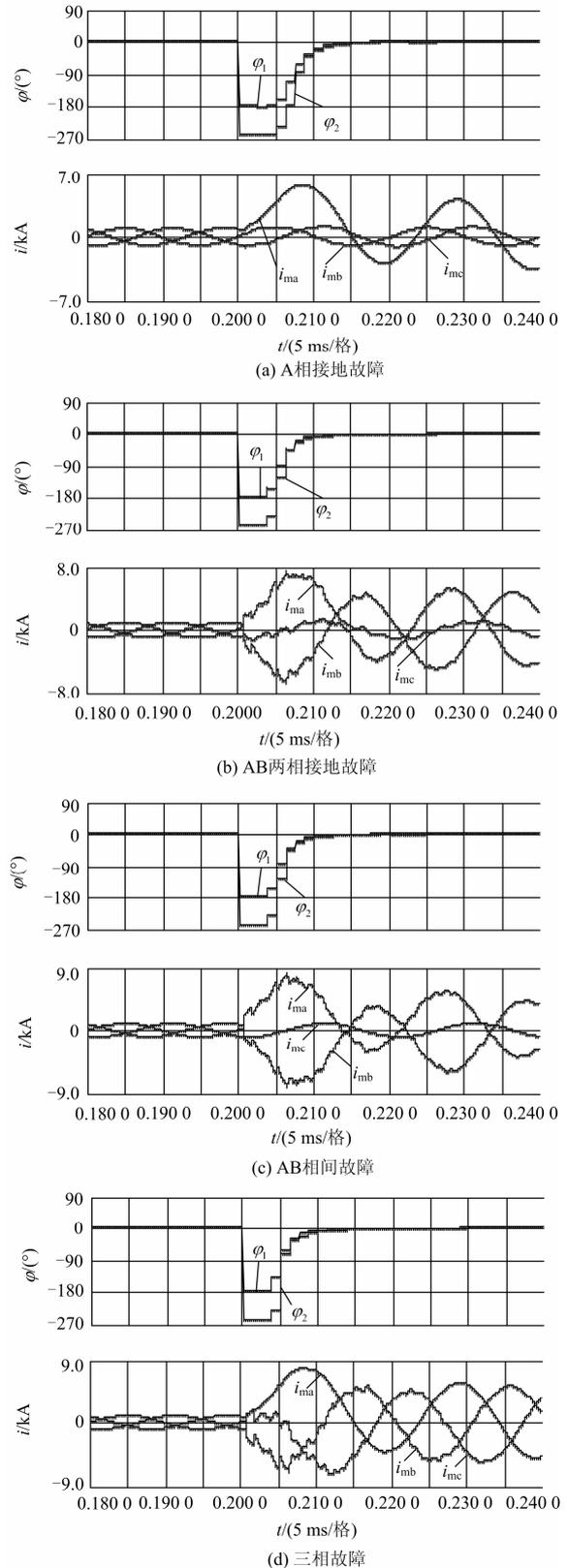
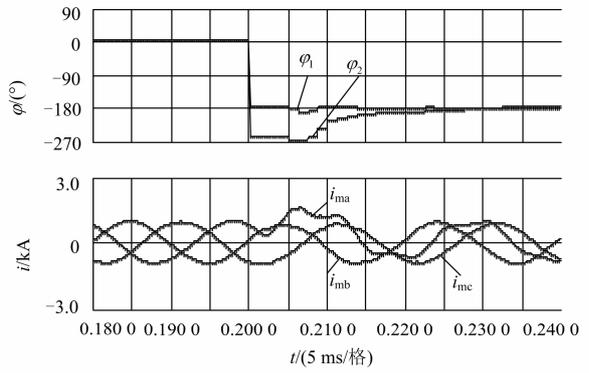
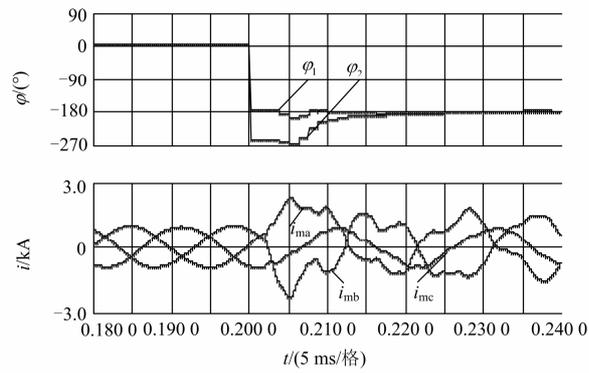


图 6 区内故障仿真结果

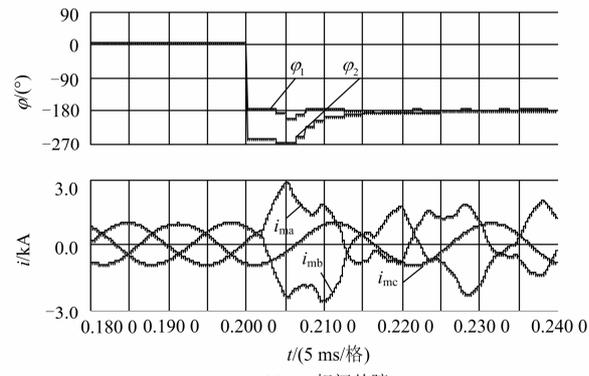
Fig. 6 Waveforms for internal faults



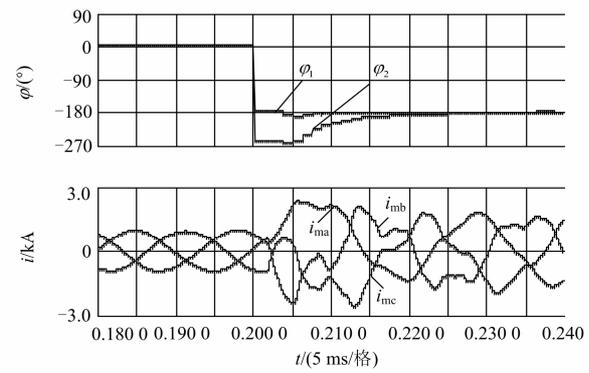
(a) A相接地故障



(b) AB两相接地故障



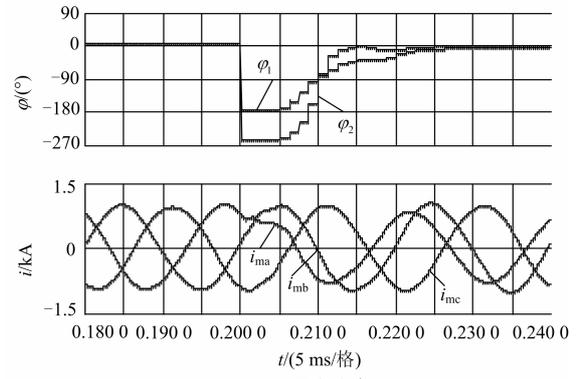
(c) AB相间故障



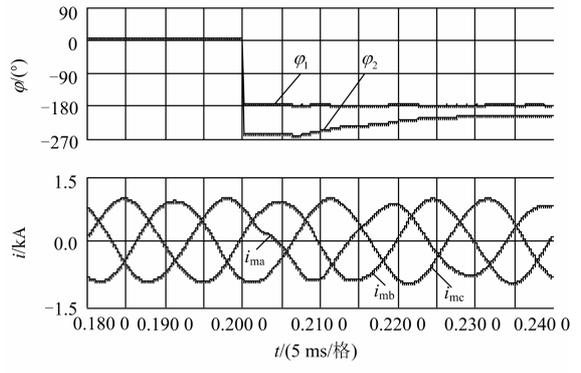
(d) 三相故障

图 7 区外故障仿真结果

Fig. 7 Waveforms for external fault



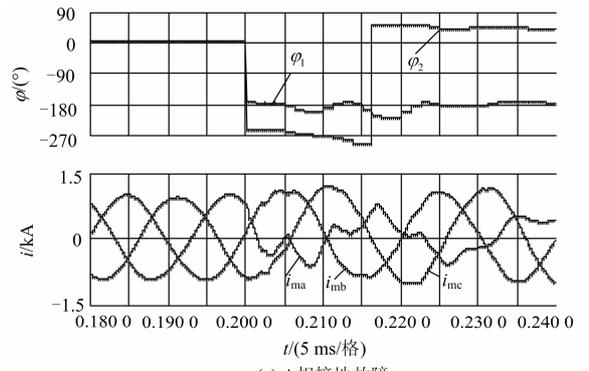
(a) 区内故障



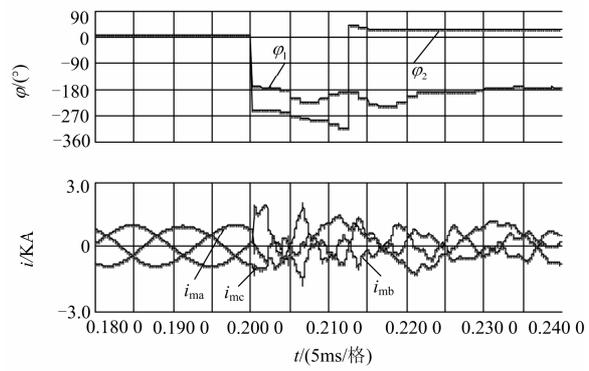
(b) 区外故障

图 8 单相接地高阻故障仿真结果

Fig. 8 Waveforms for a A-G fault with fault resistance of 400 Ω



(a) A相接地故障



(b) AB两相接地故障

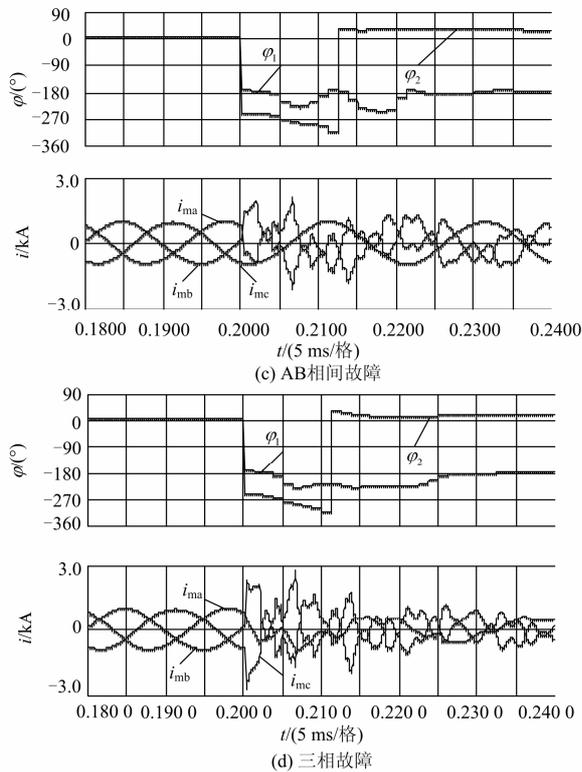


图9 双回线外部单相接地故障仿真结果

Fig. 9 Waveforms for double-circuit line external A-G fault

5 结论

论文提出了一种新型基波正序突变量相差保护原理。该原理基于故障分量保护原理及输电线路分布参数模型, 不仅具备故障分量保护的所有优点, 而且还自动地考虑了电容电流的影响, 不再需要进行电容电流补偿, 完全克服了分布电容对保护的影响, 在单回长输电线路及双回输电线路区外故障时保护不误动, 极大地提高了保护的安全性。理论分析及大量仿真说明, 所提原理在各种区内故障时保护可靠动作, 区外故障时可靠制动, 适合于各种故障类型, 其性能不受故障电阻及系统运行状态等的影响, 具有良好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 杨赢, 郇能灵, 郁惟慵. 基于复小波的快速相差保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 12-16.
YANG Ying, TAI Nengling, YU Weiyong. New phase comparison pilot protection based on non-power frequency current[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 12-16.
- [2] 计策, 张艳霞, 杨钢. 相差高频保护中操作元件比相动作判据的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 55-59.

- Ji Ce, ZHANG Yanxia, YANG Gang. Study on phase comparison criterion of operating component in phase differential high frequency protection[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 55-59.
- [3] 金恩淑, 汪有成, 王红艳, 等. 基于负序功率方向比较原理的广域继电保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 1-6.
JIN Enshu, WANG Youcheng, WANG Hongyan, et al. A wide-area relaying protection algorithm based on negative sequence power direction comparison principle[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 1-6.
- [4] 刘超, 杨永明, 熊小伏. SVC 对故障分量方向保护影响的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 110-115.
LIU Chao, YANG Yongming, XIONG Xiaofu. Analysis of the impact of fixed SVC on fault component directional protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 110-115.
- [5] ROMMEL A, FABIAN P, EDUARDO O, et al. The directional feature of current transients, application in high-speed transmission-line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1175-1182.
- [6] EISSA M M, MAHFOUZ M M A. New high-voltage directional and phase selection protection technique based on real power system data[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(11): 1075-1085.
- [7] HASHEMI S M, HAGH M T. Transmission-line protection: a directional comparison scheme using the average of superimposed components[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 955-964.
- [8] GAO Houlei, CROSSLEY P A. Design and evaluation of a directional algorithm for transmission-line protection based on positive sequence fault components[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission & Distribution, 2006, 153(6): 711-718.
- [9] 刘凯, 李晓滨, 索南加乐, 等. 基于故障分量正序电抗的方向元件[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 67-71.
LIU Kai, LI Xiaobin, SUONAN Jiale, et al. Directional element based on fault component positive sequence reactance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 67-71.
- [10] 许庆强, 索南加乐, 李瑞生, 等. 正序故障分量方向元件误动的原因分析及对策[J]. 继电器, 2005, 33(9): 12-15.
XU Qingqiang, SUONAN Jiale, LI Ruisheng, et al.

- Maloperation analysis of positive sequence fault components based directional relay and its counter measure[J]. Relay, 2005, 33(9): 12-15.
- [11] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 130-136.
- [12] 荣英义, 高中德. 一种新的相差高频保护的操作电流——正序电流突变量[J]. 继电器, 1990, 5(2): 2-8.
RONG Yingyi, GAO Zhongde. A new operating current of phase differential carrier protection positive sequence current fault component[J]. Relay, 1990, 5(2): 2-8.
- [13] 杨红, 尹项根, 陈卫, 等. 基于分相电流突变量相位比较的广域继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 1-6.
YANG Hong, YIN Xianggen, CHEN Wei, et al. Wide area protection based on phase comparison of segregated current fault component[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 1-6.
- [14] 徐松晓, 贺家李, 李永丽, 等. 特高压输电线分相电流相位差动保护的研究[J]. 继电器, 2007, 35(3): 1-5.
XU Xiaosong, HE Jiali, LI Yongli, et al. Research on segregated current phase differential protection for UHV transmission lines[J]. Relay, 2007, 35(3): 1-5.
- [15] 温荣, 谭建成. 串联电容补偿线路的相差保护特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 86-90.
WEN Rong, TAN Jiancheng. Study on phase comparison protection for series compensated lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 86-90.
- [16] 杨春明, 葛耀中, 马一太. 相差高频保护存在问题的探讨[J]. 继电器, 1997, 25(5): 11-15.
YANG Chunming, GE Yaozhong, MA Yitai. Discussion on the problems existing in phase-comparison pilot relay[J]. Relay, 1997, 25(5): 11-15.
- [17] XU Zhengyu, DU Zhiqun, LI Rui. A current differential relay for a 1000 kV UHV transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1392-1399.
- [18] XU Zhengyu, LI Rui, DU Zhiqun. A distance protection relay for a 1000 kV UHV transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1795-1803.
- [19] 索南加乐, 刘凯, 粟小华, 等. 基于故障分量综合阻抗的输电线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 54-61.
SUONAN Jiale, LIU Kai, SU Xiaohua, et al. A novel transmission line pilot protection based on fault component integrated impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 54-61.
- [20] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 139-140.

收稿日期: 2014-04-15; 修回日期: 2014-06-29

作者简介:

张苏敏(1966-), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护的研究;

古斌(1969-), 男, 博士, 主要从事电力系统继电保护的研究; E-mail: gb1108@126.com

曹良丰(1972-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力系统自动化的研究。