

改进能量方向保护及其 在特高压输电线路上的应用

刘浩芳¹, 王增平², 刘汉青³, 刘俊岭⁴

- (1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206; 3. 东方地球物理公司 装备事业部, 河北省 涿州市 072750; 4. 胜利油田胜利工程设计咨询有限责任公司, 山东省 东营市 257026)

Improved Energy Directional Protection and Its Application in UHV Transmission Lines

LIU Haofang¹, WANG Zengping², LIU Hanqing³, LIU Junling⁴

- (1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;
2. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;
3. Department of Equipment BGP Inc., CNPC, Zhuozhou 072750, Hebei Province, China;
4. Shengli Engineering & Consulting Co., Ltd., Dongying 257026, Shandong Province, China)

ABSTRACT: To remedy the defect in energy directional protection that during the time interval from 2 ms to 10 ms after the occurrence of the fault the fault direction cannot be judged correctly, an improved energy directional protection, which can judge fault direction in whole period after the occurrence of the fault precisely, is proposed. When the voltage amplitude of fault component modulus is not equal to zero, the fault direction can be judged precisely by use of the energy function of the fault component modulus. Results of theoretical research show that the improved algorithm can effectively improve the performance and operation correction rate of energy directional protection and accelerate its operation speed while there is UHV transmission lines at the back side of the protection or there is shunt reactor in UHV transmission lines. Simulation results verify above-mentioned conclusion.

KEY WORDS: fault component; energy function; modulus of voltage; modulus of current; energy directional protection; UHV transmission line

摘要: 针对能量方向保护在故障后 2~10 ms 时间段内不能正确判断故障方向这一问题, 提出一种改进的能量方向保护方法, 该方法在故障后的整个时段内均可准确判断故障方向。当故障分量模量电压幅值不为零时, 利用该模量的故障分量能量函数均可准确判断故障方向。理论研究表明, 当背侧系统含特高压输电线路或特高压输电线路带并联补偿电抗器时, 改进算法均可有效改善能量方向保护的性能, 提高了保护的動作速度与准确性。仿真实验验证了所得结论。

关键词: 故障分量; 能量函数; 模量电压; 模量电流; 能量

方向保护; 特高压输电线路

0 引言

随着通信技术的发展, 高压输电线路方向纵联保护得到了广泛应用^[1-9]。输电线路故障分量方向保护与传统的功率方向保护相比, 具有卓越的動作速度, 且不受负荷、串补电容等的影响, 受系统振荡的影响也很小^[10]。故障分量方向保护大致可分为 2 类: 第 1 类是行波保护, 其优点是動作速度快, 但只能在故障后很短的时间内保持正确的方向性, 其灵敏度受故障初始角的影响较大^[11-14]; 第 2 类是比较故障电压分量和电流分量与系统复阻抗乘积之间的极性^[15-17], 由于系统模型简化引起的误差, 这类保护在故障后某些时刻会出现方向的误判, 且受故障暂态谐波分量的影响较大, 影响了保护的動作速度。

文献[18]提出故障分量构成的能量函数具有方向性, 可构成能量方向保护, 并对能量方向保护进行了全面深入的研究, 其后的研究^[19]提出了实用的自适应方向判据, 解决了系统振荡引起的不平衡量的影响和无穷大电源系统中灵敏度不足的问题。文献[20]的研究表明故障后能量方向保护的性可分 3 个阶段: 第 1 阶段(初始阶段, 5 μ s~2 ms), 即暂态能量的充电阶段, 故障分量能量函数可准确反映故障方向; 第 2 阶段为谐波平均功率阶段(故障后

2~10 ms), 在此阶段, 由于受谐波影响, 故障分量能量函数较难可靠、正确地判别故障方向; 第3阶段(约故障发生 10 ms 后)为功率方向保护, 谐波退化为次要矛盾, 基波功率流成为主要矛盾, 能量方向保护能够正确判别故障方向。

特高压输电线路输电距离一般较长, 若发生接近线路端部的故障, 则故障波到达两侧保护的时间差可能会达到 1~2 ms, 因此对于特高压输电线路而言, 稳定能量方向保护第2阶段的性能对于提高保护速度与性能至关重要。本文将分析现有能量方向保护的性, 并在此基础上提出改进措施, 使其在故障后的所有时段均能可靠、准确地判断故障方向, 从而使得该保护应用于特高压输电线路时能够快速、准确地动作。

1 基本原理

1.1 故障分量能量函数

所分析输电系统的故障附加电路如图1所示。图中 relay 代表保护。

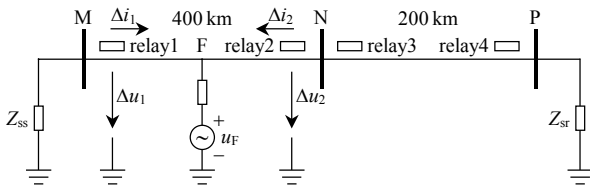


图1 特高压输电系统的故障附加电路图

Fig. 1 Superimposed circuit of UHV transmission system

首先分析背侧系统阻抗在基波故障电压、电流分量作用下的故障分量能量函数。设 t_1 时刻保护检测到故障发出波, 则 t_2 时刻的故障分量能量函数为

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \Delta u \Delta i dt \quad (1)$$

设基波故障电压表达式为

$$\Delta u_1 = \Delta U_{1m} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中: Δu_1 为基波故障电压瞬时值; ΔU_{1m} 为其幅值; ω 为基波角频率; φ 为电压故障分量初相位。

为分析方便, 先不考虑故障波在输电线路上的传播, 假设为线路出口处故障, 则故障附加电压源即为基波故障电压 Δu_1 。对于该模型, 设保护背侧系统等效阻抗为 $Z_s = R_s + jX_s$, 此时计算故障分量能量函数的等值电路见图2。图中: R_s 、 L_s 分别为保护背侧系统的等值电阻和电感; R_g 为故障接地电阻。则该电路的微分方程为

$$L_s \frac{d\Delta i}{dt} + (R_g + R_s)\Delta i = \Delta u_1 \quad (3)$$

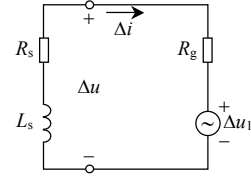


图2 计算故障分量能量函数的等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit to calculate the energy function

利用三要素法解此微分方程, 得

$$\begin{aligned} \Delta i = & \frac{\Delta U_{1m}}{\sqrt{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2}} \sin(\varphi - \theta') e^{-t/\tau} - \\ & \frac{\Delta U_{1m}}{\sqrt{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2}} \sin(\omega t + \varphi - \theta') = \\ & \frac{\Delta U_{1m}}{\sqrt{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2}} [\sin(\varphi - \theta') e^{-t/\tau} - \\ & \sin(\omega t + \varphi - \theta')] \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\theta' = \arctan[\omega L_s / (R_s + R_g)]$ 。

因此故障分量能量函数为

$$\begin{aligned} e_1 = \int_0^t \Delta u \Delta i dt = & -\frac{\Delta U_{1m}^2}{2\sqrt{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2}} t \cos \theta' - \\ & \frac{\Delta U_{1m}^2}{2\sqrt{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2}} \frac{\sin(2\varphi - \theta')}{2\omega} + \\ & \frac{R_g \Delta U_{1m}^2}{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2} \left[\sin^2(\varphi - \theta') \frac{\tau}{2} + \frac{t}{2} + \frac{\sin(\varphi - \theta')}{4\omega} \right] - \\ & \frac{R_g \Delta U_{1m}^2}{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2} \sin^2(\varphi - \theta') \frac{\tau}{2} e^{-2t/\tau} - \\ & \frac{\Delta U_{1m}^2 \sin(\varphi - \theta')}{\sqrt{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2}} \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} [\tau \sin(\omega t + \varphi) + \\ & \omega \tau^2 \cos(\omega t + \varphi)] e^{-t/\tau} + \frac{R_g \Delta U_{1m}^2}{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2} \cdot \\ & \frac{2 \sin(\varphi - \theta')}{1 + \omega^2 \tau^2} [\tau \sin(\omega t + \varphi - \theta') + \omega \tau^2 \cos(\omega t + \varphi - \\ & \theta')] e^{-t/\tau} + \frac{\Delta U_{1m}^2}{2\sqrt{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2}} \frac{\sin(2\omega t + 2\varphi - \theta')}{2\omega} - \\ & \frac{R_g \Delta U_{1m}^2}{(R_s + R_g)^2 + (\omega L_s)^2} \frac{\sin(2\omega t + \varphi - \theta')}{4\omega} \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知, 该能量包含与电压初相位及电路总的阻抗角有关的时间线性函数项、常数项、衰减直流项、衰减基波项及衰减二次谐波项, 直接由表达式难以描述该能量在不同故障时刻、故障接地电阻情况下随时间变化的规律。因此以下将借助 Matlab 进行编程来研究在不同的背侧系统阻抗、故障时刻及故障接地电阻对故障分量能量函数的影响。

故障时刻对故障分量能量函数的影响如图3所示。由图可知,能量方向保护性能与故障时刻有关,当故障电压与电流乘积为由负到正过零点时故障对保护最为不利,而在该乘积由正到负的过零点时故障对保护最为有利。

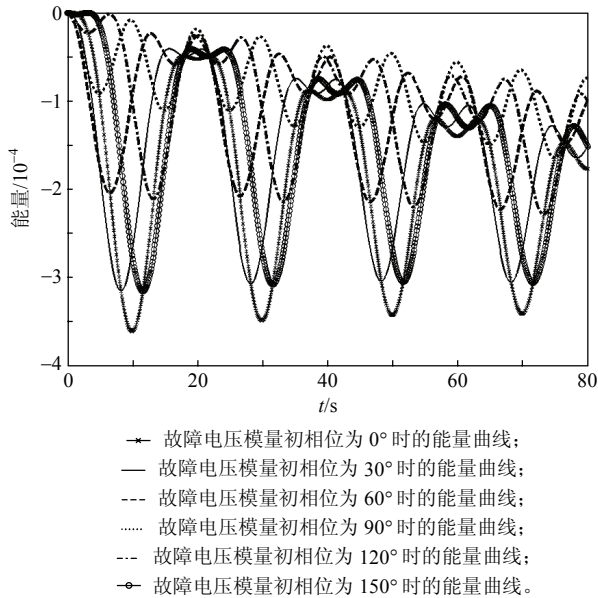


图3 故障时刻对能量方向保护性能的影响
 Fig. 3 Influence of fault inception instant on energy directional protection

研究表明能量方向保护的能与背侧系统参数密切相关。背侧系统阻抗角相同的情况下,系统阻抗模值越小越有利于能量方向保护的快速正确动作。背侧系统阻抗模值相同的情况下,系统阻抗角越小越有利于能量方向保护的快速正确动作。当故障接地电阻较大时,能量函数绝对值上升缓慢,致使故障后某些时刻的能量函数值接近零,实际电力系统故障时还会有高频噪声存在,此时极易造成能量方向保护不能正确判断故障方向。即使故障接地电阻为零时,不同故障时刻也会使得能量函数绝对值需经一定的延时才会上升较快。此情况下能量函数值受故障高频量的影响会出现不稳定的情况,使得能量方向保护的動作速度与可靠性下降。以上分析仅针对线路出口处的故障,若沿线其他位置发生故障,则故障波会首先行至保护安装处,再到系统阻抗处。这种情况与出口处故障的区别在于故障波沿线路传播时会有衰减和相移,由于高频量沿线路衰减较低频量更为严重,所以保护安装处的高频量幅值会更小,保护性能主要受基波量的影响,因此以上分析仍可定性说明各种故障距离时能量方向保护的性能。

1.2 改进的能量方向保护

实际电力系统中,故障时刻及故障接地电阻都是随机的,属于不可控制量。当保护背侧系统阻抗角比较小时,对于故障分量而言,其功率因数较大,因此瞬时功率较大,使得故障分量能量函数绝对值能够较快地增长,从而保证能量方向保护的方向性。据此提出了改进能量方向保护算法,即:在故障初瞬,故障发出波作用于背侧系统阻抗时,相当于对一零状态感性电路的充电过程,因此故障波第一次达到保护安装处后的 2 ms 内能量方向保护的方向性可得到保证。所以故障后 2 ms 内故障分量能量函数仍按式(1)进行计算。此后可由瞬时故障附加电流与 2 ms 之前的故障附加电压乘积的积分作为计算能量,以此达到减小基波故障附加电压与反相故障附加电流的相位差 θ 的目的。

由于故障过程中会有很多频率分量的信号,但其中起主要作用的仍然是 50 Hz 的工频分量。对于工频分量,若瞬时故障附加电流与 2 ms 之前的故障附加电压相乘,则相当于在相量图上将电流分量的相位超前了 36° ,使得功率因数增大,因此故障分量的瞬时功率会增大,从而使故障分量能量函数的绝对值增长较快。而对于高频量而言,此相位差则成倍增长,但由于高频量能量较小,因此不作为主要因素来考虑。

对于能量方向保护,此时间差的选择主要考虑 2 方面的因素:一是系统电路的充电时间(此时间内能够保证能量方向保护的方向性);二是此时间差所造成的系统阻抗角变化。一般而言,这 2 方面是互相协调的:如果背侧系统 L/R 较大,则系统阻抗角较大,可调节的相角差较大,而此时由于充电时间常数较大,因此能量方向保护能够保证方向性的时间也较长,此时可以将时间差略定大些;反之,时间差可以小一些。此外,还应考虑故障高频分量等的影响,留出合适的裕度。在上述分析的基础上,并结合该系统的仿真曲线,得出文中系统的时间差可取为 2 ms。因此其改进后的能量计算公式为

$$E' = \int_{t_1}^{t_2} \Delta u(t - 2 \times 10^{-3}) \Delta i dt, \quad t_1', t_2' \geq 2 \text{ ms} \quad (6)$$

对于其中的基波稳态分量,改进能量方向保护的物理意义可由图4定性说明,即正方向故障时改进能量函数减小更快(绝对值增大更快),反方向故障时改进能量函数增大更快,这有利于正确判断故障方向。

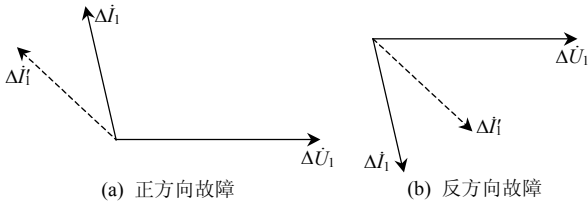


图4 改进算法对基波故障电压和故障电流相位的影响
Fig. 4 Influence of the improved algorithm on the phase of voltage and current fault component with power frequency

考虑了暂态过程后，能量方向保护及其改进算法的曲线如图5所示，仿真条件为故障接地电阻为0、故障时刻为故障电压模量初始角为120°。其他故障条件时的仿真曲线类似。由仿真曲线可知，在能量的暂态充电过程(约为2ms)基本结束后起主要作用的为基波分量，因而改进能量方向保护算法可有效改善保护的動作速度及動作性能。

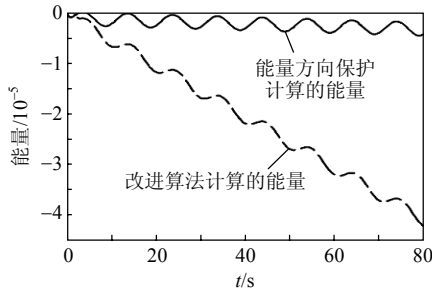


图5 故障接地电阻为零、故障初始角为120°时的能量曲线

Fig. 5 Energy curves when fault-earth resistance is 0Ω and fault inception angle is 120°

特高压输电线路为有效抑制过电压，当线路较长时往往会在线路中间合适地址建设开关站。特高压输电线路较超高压输电线路的分布电容更大，若将保护背侧线路(如图1中保护2背侧的线路NP)考虑在内后其背侧系统阻抗仍呈感性，则改进能量方向保护亦可应用于此类特高压输电线路。

由传输线理论可知，对于图6所示电路，有如下关系式：

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \text{ch}(\gamma L) + Z_c \dot{I}_2 \text{sh}(\gamma L) \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \text{ch}(\gamma L) + \dot{U}_2 \text{sh}(\gamma L) / Z_c \end{cases} \quad (7)$$

式中： \dot{U}_2 、 \dot{I}_2 分别为此时传输线负载侧的电压、电流；系统阻抗 Z_s 则为传输线负载 Z_2 ，即 $Z_2 = Z_s$ ，

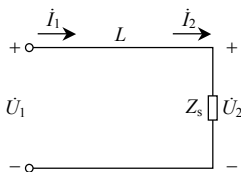


图6 将线路包括在内的背侧阻抗计算示意图
Fig. 6 Circuit to calculate the back system impedance when a transmission line is in the back system

所以 $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_s$ ，于是

$$Z_{eq} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{Z_2 \text{ch}(\gamma L) + Z_c \text{sh}(\gamma L)}{\text{ch}(\gamma L) + Z_2 \text{sh}(\gamma L) / Z_c} = \frac{Z_s \text{ch}(\gamma L) + Z_c \text{sh}(\gamma L)}{\text{ch}(\gamma L) + Z_s \text{sh}(\gamma L) / Z_c} \quad (8)$$

式中： Z_c 为输电线路波阻抗； γ 为输电线路的传播常数； L 为输电线路长度。

由表达式(8)可知， Z_{eq} 与 Z_s 的关系比较复杂，包含双曲函数。对于线模量，其传播常数为 γ_1 ，对于零模量，则传播常数为 γ_0 ；同理对于线模量，波阻抗为正序波阻抗，对于零模量，波阻抗为零序波阻抗。通过做等效阻抗与线路长度之间的关系曲线可知：不管对于线模量还是零模量，当线路长度小于1000km时，该等效阻抗对于改进算法仍呈感性。而特高压输电线路长度一般不会超过500km。综上，改进能量方向保护应用于特高压输电线路时可有效改善能量方向保护的性能。

1.3 改进能量方向保护在带并联补偿的特高压输电线路上的应用

实际中长距离特高压输电线路为有效抑制过电压，一般会装设并联电抗器。为了维护检修方便，高压并联电抗器通常装设于线路端部。对于两侧装设并联电抗器的特高压输电线路，求取保护(如图1中的保护2)背侧系统(包括线路)等效阻抗的等效电路如图7所示。

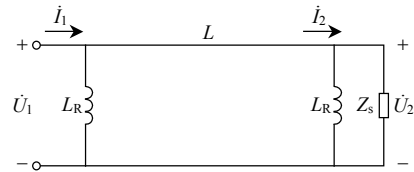


图7 两侧装设并联电抗器的特高压输电线路保护背侧等效阻抗计算电路

Fig. 7 Circuit to calculate the equivalent back system impedance of the protection for the UHV lines with shunt reactors at two ends

此情况下，有

$$Z_2 = \frac{Z_s \times j\omega L_R}{Z_s + j\omega L_R} \quad (9)$$

因此

$$Z_{eq} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{Z_2 \text{ch}(\gamma L) + Z_c \text{sh}(\gamma L)}{\text{ch}(\gamma L) + Z_2 \text{sh}(\gamma L) / Z_c} // (j\omega L_R) \quad (10)$$

由电路原理可知，由于并联电抗器的影响，对于保护背侧有特高压输电线路的保护，装设并联电抗器的特高压输电线路与未装设并联电抗器的特

高压输电线路相比，其背侧系统的等效阻抗角更大。如果不采取改进措施，则在某些不利的故障时刻能量方向保护的性能会变差，即保护在正方向故障时需经更长时间才会稳定输出负值，而反方向故障时也会经更长时间才会稳定输出正值。采用改进算法，可确保能量函数准确反映故障方向，有效改善了能量方向保护的動作性能，提高了其動作速度。

2 保护方案

将电压电流故障分量进行克拉克模变换，即

$$\begin{cases} \Delta u_1 = 2\Delta u_a - \Delta u_b - \Delta u_c \\ \Delta u_2 = \Delta u_b - \Delta u_c \\ \Delta u_0 = \Delta u_a + \Delta u_b + \Delta u_c \\ \Delta i_1 = 2\Delta i_a - \Delta i_b - \Delta i_c \\ \Delta i_2 = \Delta i_b - \Delta i_c \\ \Delta i_0 = \Delta i_a + \Delta i_b + \Delta i_c \end{cases}$$

模1、模2及模0量的故障分量能量函数计算公式为

$$\begin{cases} e_1 = \sum_{k=1}^n \Delta u_1(k) \Delta i_1(k) \\ e_2 = \sum_{k=1}^n \Delta u_2(k) \Delta i_2(k) \\ e_0 = \sum_{k=1}^n \Delta u_0(k) \Delta i_0(k) \end{cases}$$

改进能量方向保护的故障分量能量函数计算公式为

$$e'_1 = \begin{cases} e_1, & k < N \\ \sum_{k=N+1}^n \Delta u_1(k-N) \Delta i_1(k), & k \geq N+1 \end{cases}$$

$$e'_2 = \begin{cases} e_2, & k < N \\ \sum_{k=N+1}^n \Delta u_2(k-N) \Delta i_2(k), & k \geq N+1 \end{cases}$$

$$e'_0 = \begin{cases} e_0, & k < N \\ \sum_{k=N+1}^n \Delta u_0(k-N) \Delta i_0(k), & k \geq N+1 \end{cases}$$

式中 N 为 2 ms 内的采样点数。

3 仿真验证

3.1 背侧系统阻抗对能量方向保护及其改进算法的影响

对于图1所示系统，其参数如下：线路正序电容为 $C_1 = 13.792 \text{ nF/km}$ ；线路零序电容为 $C_0 = 9.1341 \text{ nF/km}$ ；线路正序阻抗为 $Z_1 = 0.008489 + j0.263076 (\Omega/\text{km})$ ；线路零序阻抗为 $Z_0 = 0.190468 + j0.681620 (\Omega/\text{km})$ ； $Z_{ss} = 0.1Z_L$ ； $Z_{sr} = 0.5Z_L$ (Z_L 为

600 km 全线路的正序阻抗)。保护2的背侧系统阻抗模值较保护1的背侧系统阻抗模值要大，而其背侧系统阻抗的阻抗角基本相同。当故障电压模量初相位为 90° 、距离保护 10 km 处发生 A 相金属性接地故障时，保护1所测故障分量的能量函数曲线如图8、9所示。由图9可知，由于A相接地故障时，模2量为非故障相的能量函数，其值很小，为故障相感应的结果，不能正确反映故障方向，在保护中可通过设定动作阈值或选相避免保护误判。

保护2的模1和模0故障分量能量函数曲线如图10所示。由图8与图10可知，背侧阻抗不同时，能量函数值的增速不同，系统阻抗模值较小时能量函数绝对值增长得较快，更加有利于方向保护正确动作。各种背侧阻抗情况下，正方向故障时改进算法均能有效改善能量方向保护的性能。

保护2背侧母线A相金属性接地故障，模1故障电压初相位为 90° 时，其故障分量能量函数曲线

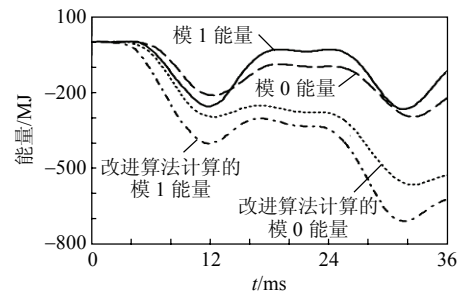


图8 保护1前方10 km处模1和模0能量函数曲线
Fig. 8 Modal 1 and modal 0 energy curves of relay 1

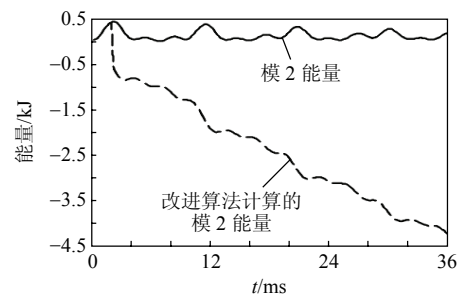


图9 保护1前方10 km处模2能量函数曲线
Fig. 9 Modal 2 energy curves of relay 2

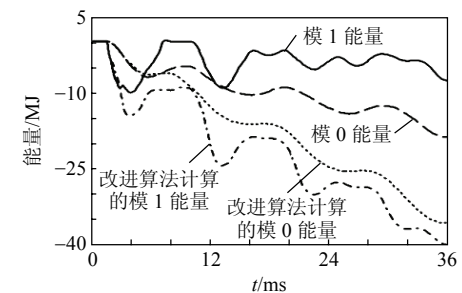


图10 保护2前方390 km处模1和模0能量函数曲线
Fig. 10 Modal 1 and modal 0 energy curves of relay 2

如图 11 所示。由图可知,对于反方向故障,改进算法亦可改善其保护性能,进一步保证保护不误动。

其他不同故障条件下正方向故障时的故障分量能量函数曲线及其改进算法的能量函数曲线与图 8—10 类似,而反方向故障时的能量函数曲线及其改进算法的能量函数曲线则与图 11 所示曲线类似,限于篇幅,不再一一列出。

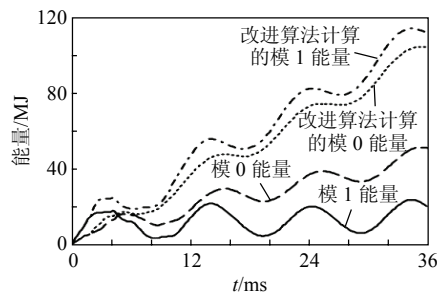


图 11 保护 2 背侧母线 A 相金属性故障时模 1 和模 0 能量函数曲线

Fig. 11 Energy curves of relay 2 for its backward fault

3.2 故障时刻对能量方向保护及其改进算法的影响

不同故障时刻的仿真结果表明:对于正方向故障,当故障电压模量与故障电流模量的乘积为由正到负的过零点故障时对能量方向保护最为有利;当故障电压模量与故障电流模量的乘积为由负到正的过零点故障时对能量方向保护最为不利。反方向故障时则相反。改进算法的能量方向保护可有效改善能量方向保护的性,使其在任意故障时刻均可在故障后的整个时段内可靠准确地判断故障方向。

3.3 故障接地电阻对能量方向保护及其改进算法的影响

不同故障接地电阻时的仿真结果表明:当故障接地电阻较大时,由于作用于背侧系统阻抗的故障电压模量幅值较小,使得能量方向保护可能出现误判。故障接地电阻越大,能量方向保护的灵敏度越低。而改进算法则可有效改善其性能。

4 结论

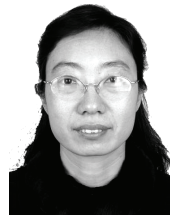
能量方向保护与其他暂态量保护相比的优越之处在于:由于能量方向保护利用故障后的所有频率分量来判断故障方向,因此故障后随着时间的推移其性能会更加能够得到保证。也正是这个原因使得能量方向保护的性几乎不受高频量沿线路衰减情况的影响。因此对于能量方向保护而言,只要故障后该电压模量幅值不为零,则该模量的故障分量能量函数均可在一定的时段内准确判断故障

方向,而改进能量方向保护则可使故障分量能量函数在故障后的整个时段内均可准确判断故障方向,有效地改善了原有能量方向保护的性速度与准确性。

参考文献

- [1] 赵青春, 邹力, 刘沛. 基于数学形态学的线路超高速方向保护[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 75-80.
Zhao Qingchun, Zou Li, Liu Pei. An ultra-high-speed directional protection for power transmission line based on mathematical morphology[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 75-80(in Chinese).
- [2] 王海港, 董新洲, 薄志谦. 一种灵敏可靠的输电线路电流差动保护判据[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 90-93, 99.
Wang Haigang, Dong Xinzhou, Bo Zhiqian. A sensitive and reliable operational criterion for current differential protection of transmission line[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 90-93, 99(in Chinese).
- [3] 苏永智, 潘贞存, 刘志清, 等. 基于无线 CDMA 通信的馈线纵联保护研究[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 88-92.
Su Yongzhi, Pan Zhencun, Liu Zhiqing, et al. Feeder's pilot protection based on wireless CDMA communication[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 88-92(in Chinese).
- [4] 王增平, 林富洪. 基于分布参数模型的 T 型输电线路电流差动保护新原理[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 204-209.
Wang Zengping, Lin Fuhong. A new current differential protection for three-terminal transmission lines based on distributed parameters model[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 204-209(in Chinese).
- [5] 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, 2009, 31(13): 86-90.
Wen Rong, Tan J C. Study on phase comparison protection for series compensated line[J]. Power System Technology, 2009, 31(13): 86-90(in Chinese).
- [6] 赵庆明, 贺家李, 李永丽. 基于希尔伯特-黄变换的超高速方向保护研究[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 79-83.
Zhao Qingming, He Jiali, Li Yongli. Study of ultra-high-speed directional protection of transmission lines based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 79-83(in Chinese).
- [7] 胡文丽, 焦彦军, 崔鸿斌. 基于小波变换的新型暂态行波方向保护[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 68-71.
Hu Wenli, Jiao Yanjun, Cui Hongbin. A novel transient traveling wave based directional protection using wavelet transform[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 68-71(in Chinese).
- [8] 张举, 张晓东, 林涛. 基于小波变换的行波电流极性比较式方向保护[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 51-54.
Zhang Ju, Zhang Xiaodong, Lin Tao. A directional protection based on traveling current polarity comparison using wavelet transform[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 51-54(in Chinese).
- [9] 白嘉, 徐玉琴, 王增平, 等. 基于组合模量的行波电流极性比较式方向保护原理[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 69-72.
Bai Jia, Xu Yuqin, Wang Zengping, et al. Principle of combination modulus based traveling wave current directional protection with polarity comparison[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 69-72(in Chinese).
- [10] 何奔腾, 金华烽, 李菊. 能量方向保护原理和特性研究[J]. 中国

- 电机工程学报, 1997, 17(3): 166-170.
- He Benteng, Jin Huafeng, Li Ju. Principle and property research of the energy directional protection[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 166-170(in Chinese).
- [11] Chamia M, Liberman S. Ultra high speed relay for EHV/UHV transmission lines: development, design and application[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978; 97(6): 2104-2116.
- [12] Vitins M. A fundamental concept for high speed relaying[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(1): 163-168.
- [13] Engler F, Lanz O E, Hanglli M, et al. Transient signals and their processing in an ultra high speed directional relay for EHV/UHV transmission line protection[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6): 1463-1473.
- [14] Johns A T, Martin M A, Barker A, et al. A new approach to EHV direction comparison protection using digital signal processing techniques[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(2): 24-34.
- [15] Prakash K S, Malik O P, Hope G S, et al. Amplitude comparator based algorithm for directional comparison protection of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4): 2032-2041.
- [16] Thomas D W P, Christopoulos C. Ultra-high speed protection of series compensated lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 139-145.
- [17] 沈国荣, 隋风海, 陈涛, 等. LFP-901 型超高压线路成套快速保护装置[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(6): 52-56.
- Shen Guorong, Sui Fenghai, Chen Tao, et al. EHV line fast protection relay LFP-901[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(6): 52-56(in Chinese).
- [18] 何奔腾. 输电线路暂态能量法超高速方向保护原理[D]. 杭州: 浙江大学, 1994.
- [19] 何奔腾, 金华烽, 李菊. 能量方向保护的实现和试验[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 171-174.
- He Benteng, Jin Huafeng, Li Ju. Realization and test of the energy directional protection[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 171-174(in Chinese).
- [20] 袁荣湘, 陈德树, 张哲. 能量方向保护原理的分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 17-20,28.
- Yuan Rongxiang, Chen Deshu, Zhang Zhe. Analysis of the principle of energy directional protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 17-20,28(in Chinese).



刘浩芳

收稿日期: 2010-05-05。

作者简介:

刘浩芳(1970), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为超高压及特高压输电线路保护, E-mail: liuhaofang@epri.sgcc.com.cn;

王增平(1964), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护;

刘汉青(1957), 男, 工程师, 研究方向为石油勘探及信号处理技术;

刘俊岭(1974), 男, 工程师, 主要从事电力系统通信及保护系统的设计与研究工作。

(责任编辑 李兰欣)