

带并联电抗器输电线路单相故障性质识别判据

石光¹, 邵文权^{2,3}, 郭耀珠¹, 刘巍¹, 索南加乐², 宋国兵²

(1. 河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049;
3. 西安工程大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对带并联电抗器超特高压输电线路, 分析了瞬时性故障时低频分量频率基本不受系统阻抗及故障点位置变化的影响, 在低频分量频率离线准确计算的前提下, 提出采用最小二乘拟合方法快速检测断开相并联电抗器电流低频分量和工频分量幅值实现的单相故障性质识别新判据。瞬时性故障时, 低频分量幅值接近或超过工频分量幅值; 永久性故障时, 低频分量幅值接近 0。判别算法仅利用断开相并抗电流, 原理简单可靠, 且易于实现。大量 ATP 仿真验证表明, 该判据正确有效, 能快速实现单相故障性质判别, 有望提高单相重合闸动作的成功率。

关键词: 电力系统; 输电线路; 单相自适应重合闸; 最小二乘拟合; 并联电抗器电流

Identification criterion of permanent single-phase fault for transmission lines with shunt reactors

SHI Guang¹, SHAO Wen-quan^{2,3}, GUO Yao-zhu¹, LIU Wei¹, SUONAN Jia-le², SONG Guo-bing²

(1. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on characteristics analysis of resonant component under different system impedance for transmission lines with shunt reactors, this paper proposes a criterion using amplitudes of the resonant component and power-frequency component in the open phase current from shunt reactor to detect transient faults and permanent faults. In the case of a transient fault, the current from shunt reactor in the open phase consists of resonant component and power frequency component. But for permanent fault, the current contains power frequency periodic component. Therefore, a method uses a prescribed fitting function of the open phase current from shunt reactor to acquire the amplitudes of resonant component and power frequency component, and then utilizes the amplitudes character to distinguish the permanent faults from transient faults. The criterion is simple and reliable, as it only uses the open fault phase current with high precision. ATP simulations show that the criterion is correct and effective and can detect the nature of single-phase fault quickly, thus is promised to improve the success rate of the single-phase adaptive reclosure.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50677051 and No.50877062).

Key words: power system; transmission line; single-phase adaptive reclosure; least squares fitting; shunt reactor current

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0053-06

0 引言

输电线路采用单相自动重合闸技术快速恢复供电是国内外广泛采用的一种有效措施。但是现有自动重合闸的动作具有一定的盲目性, 存在重合于永久性故障给系统带来严重的二次冲击的危险。因此, 研究自动识别永久性和瞬时性故障避免盲目重合的自适应重合闸具有重要意义。

自适应重合闸的核心就是区分瞬时性和永久性故障, 按其利用的电气量可分为两类: 基于电压量和基于电流量判别方法。电压量判别方法主要包括电容耦合电压幅值^[1]及相位特性^[2]、拍频特性^[3]、一次二次电弧特征^[4]等。此类方法在电压信号获取精度高的前提下具有较好的适用性; 但对于带并抗补偿的超/特高压电网由于断开相电压幅值较小, 线路电压互感器的测量精度难以满足要求, 会导致该类判别方法工程应用存在一定的局限性。而利用电流量包括正交性检测低频自由分量、断开相并抗电流和中性点小电抗电流幅值比、电流差动

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677051, 50877062); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060698014)

原理的方法^[5-6]；由于利用了测量精度高的并联电抗器电流，且信号获取可靠性高，为带并联电抗器的线路的单相故障性质判别提供了新的可行思路。

本文结合带并抗补偿线路的自由分量拉普拉斯等值电路分析了系统阻抗及故障点位置变化对断开相并抗电流低频分量频率的影响，在低频分量频率准确计算的前提下，预设断开相并抗电流最小二乘拟合模型以求取低频分量和工频分量的幅值，由电流幅值特性实现瞬时性和永久性故障的判别。该方法判别原理简单，计算量较小，能够方便地应用于工程实际。

1 断开相电流低频自由分量特点

超/特高压输电线路发生永久性故障时，由于故障点一直存在，线路电容对地可靠放电，断开相并抗电流主要以工频成分为主，不含低频振荡分量。在瞬时性故障时，故障点二次电弧熄灭以后断开相储存的能量经并联电抗器与线路电容构成的 LC 振荡回路释放，导致恢复阶段的电压电流量除了工频分量以外，还存在幅值接近或超过工频量的低频振荡分量，以致断开相并联电抗器电流存在明显拍频现象^[5-6]。

以图1所示的两端带并联电抗器线路系统为例进行分析说明。

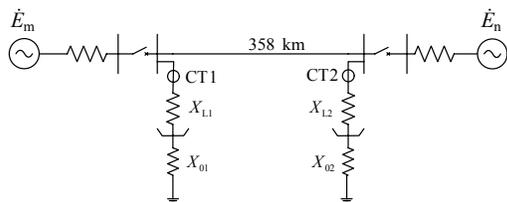


图1 500 kV 带并联电抗器输电线路系统
Fig.1 500 kV line system with shunt reactors

图1所示系统参数和线路参数如下：m侧系统 $X_{m1}=49.36 \Omega$ ， $X_{0m}=41.34 \Omega$ ；n侧系统 $X_{n1}=46.03 \Omega$ ， $X_{0n}=103.36 \Omega$ ；线路参数 $r_1=0.0195 \Omega/\text{km}$ ， $r_0=0.1675 \Omega/\text{km}$ ， $l_1=0.9134 \text{ mH}/\text{km}$ ， $l_0=2.719 \text{ mH}/\text{km}$ ， $c_1=0.014 \mu\text{F}/\text{km}$ ， $c_0=0.00834 \mu\text{F}/\text{km}$ ；电抗器参数 $X_{L1}=X_{L2}=1680.56 \Omega$ ， $X_{01}=X_{02}=434 \Omega$ 。

瞬时性故障时，在故障点电弧熄灭瞬间，由于潜供电流为电容性，可近似认为此时能量储存于故障相对地电容中。假定A相发生瞬时性故障，图2给出了前述线路系统的自由分量的拉普拉斯等值电路。

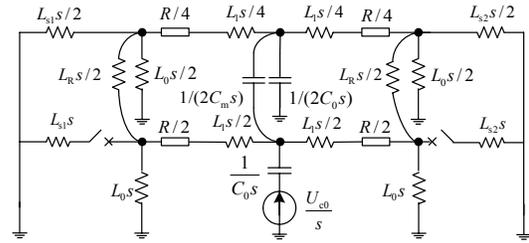


图2 自由分量等值电路
Fig.2 Equivalent circuit of resonant component

图2中： L_{s1} 、 L_{s2} 分别为双端电源系统等效电感； L_R 、 L_0 分别为并联电抗器相间等效电感和对地等效电感； R 、 L_1 分别为线路自电阻和自电感； C_m 、 C_0 分别为线路相间电容和对地电容； U_{c0} 为熄弧瞬间线路对地电容电压。

自由分量的衰减系数和频率由式(1)求出：

$$s^7 + a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \quad (1)$$

式中： $a_6, a_5, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0$ 为等值电路参数相关的系数，由于表达式过于复杂，这里不给出具体形式。

为分析系统阻抗变化对自由振荡分量衰减时间 T_s 和频率 f_L 的影响，对图1所示线路系统进行了大量仿真计算分析，其结果如图3所示。

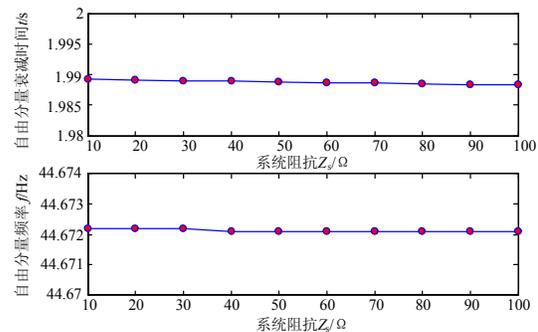


图3 系统阻抗变化对自由振荡分量频率影响分析
Fig.3 Analysis on f_L with variable system impedance

由图3可以看出，系统运行方式变化对低频分量的衰减时间和频率影响很小，该自由振荡分量的衰减时间和频率近似为定值。对于图1所示系统，其自由分量的衰减时间 $T_s=1.989 \text{ s}$ ，对应频率 $f_L=44.672 \text{ Hz}$ 。

对于带固定补偿度并联电抗器的线路来说，电抗器电感器参数为常数，自由分量频率可离线准确计算；对于带可控并联电抗器线路来说，当并联电抗器补偿度变化时对应等值电感参数也随之变化，但等值电感可由故障前的电气量信息计算得到，之后

计算低频自由分量频率。另外, 考虑到线路自阻抗只有几十欧, 远小于自由振荡回路的数千欧的容抗和感抗, 因此线路自阻抗对自由分量频率的影响甚微, 即低频振荡分量频率基本不受故障点位置的影响。

实际上, 线路模型参数的误差会影响自由分量频率计算的精度。自由分量频率由式(2)确定。

$$f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}} \quad (2)$$

式(2)中: L_{eq} 、 C_{eq} 分别充放电回路等值电感、电容。假定等值电感、电容与真实值的最大误差达10%, 即 $0.90L_{eq0} \leq L_{eq} \leq 1.10L_{eq0}$, $0.90C_{eq0} \leq C_{eq} \leq 1.10C_{eq0}$, 则 $0.91f_{L0} \leq f_L \leq 1.11f_{L0}$ (L_{eq0} 、 C_{eq0} 、 f_{L0} 为对应真实值)。即使等值电感、电容同时为-10%的误差时对应的低频分量频率误差近10%, 仍具有较高计算精度。

以上分析表明, 不管是固定补偿度线路还是可控补偿线路, 自由分量频率基本不受系统阻抗及故障点位置变化影响, 计算自由分量频率具有较高的精度。因此, 在准确计算自由分量频率的前提下, 提出一种基于断开相并抗电流低频自由分量和工频分量幅值特性的单相自适应重合闸快速判别算法。该算法利用最小二乘拟合原理, 可在一个工频周期内快速计算断开相并抗电流的低频自由分量和工频分量幅值, 且基本不受直流分量和整次谐波影响。

2 最小二乘拟合模型

假定线路A相发生瞬时性故障, 对断开相M侧并联电抗器电流 $i_{ma}(t)$ 预设如下模型, 即

$$i_{ma}(t) = I_0 e^{-\lambda_0 t} + I_L e^{-\lambda_L t} \sin(\omega_L t + \theta_L) + \sum_{n=1}^5 I_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (3)$$

式中: I_0 为 $t=0$ 时的直流分量幅值; I_L 为 $t=0$ 时的低频自由分量幅值; I_n 为第 n 次谐波分量幅值; λ_0 为直流分量衰减时间常数 T_0 的倒数; λ_L 为低频自由分量衰减时间常数 T_s 的倒数; θ_L 为低频自由分量初相位; θ_n 为第 n 次谐波分量初相位; ω_L 为低频自由分量角频率; ω_1 为工频。

对于低频自由分量频率 ω_L 可按前节所述方法求出。对于图1所示系统, 可求得对应低频自由分量角频率 $\omega_L = 280.682 \text{ rad/s}$ 。

通常来说, 对超/特高压输电系统来说, 直流分量衰减很快, $e^{-\lambda_0 t}$ 近似由 $1 - \lambda_0 t$ 代替; 而低频自由分量衰减时间较长, 在重合闸重合之前的1 s时间

内, 幅值变化很小, $e^{-\lambda_L t}$ 可近似取1。

由此, 对式(3)进行简化为式(4):

$$i_{ma}(t) = I_0(1 - \lambda_0 t) + I_L \sin(\omega_L t + \theta_L) + \sum_{n=1}^5 I_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) = I_0 - I_0 \lambda_0 t + I_L \cos\theta_L \sin(\omega_L t) + I_L \sin\theta_L \cos(\omega_L t) + \sum_{n=1}^5 I_n \cos\theta_n \sin(n\omega_1 t) + \sum_{n=1}^5 I_n \sin\theta_n \cos(n\omega_1 t) \quad (4)$$

显然, 瞬时性故障时断开相并联电抗器电流 $i_{ma}(t)$ 每一时刻的采样值都满足式(4)。对于采样值 $i_{ma}(t_1)$ 、 $i_{ma}(t_2)$ 、...、 $i_{ma}(t_N)$ 构成 N 个方程, 可表示成式(5)矩阵方程形式:

$$[\mathbf{A}]_{N \times 14} [\mathbf{X}]_{14 \times 1} = [\mathbf{B}]_{N \times 1} \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \sin\omega_L t_1 & \cos\omega_L t_1 & \sin\omega_1 t_1 & \cos\omega_1 t_1 & \dots & \sin 5\omega_1 t_1 & \cos 5\omega_1 t_1 \\ 1 & t_2 & \sin\omega_L t_2 & \cos\omega_L t_2 & \sin\omega_1 t_2 & \cos\omega_1 t_2 & \dots & \sin 5\omega_1 t_2 & \cos 5\omega_1 t_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_N & \sin\omega_L t_N & \cos\omega_L t_N & \sin\omega_1 t_N & \cos\omega_1 t_N & \dots & \sin 5\omega_1 t_N & \cos 5\omega_1 t_N \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = [I_0, -I_0 \lambda_0, I_L \cos\theta_L, I_L \sin\theta_L, I_1 \cos\theta_1, I_1 \sin\theta_1, \dots, I_5 \cos\theta_5, I_5 \sin\theta_5]^T;$$

$$\mathbf{B} = [i_{ma}(t_1), i_{ma}(t_2), \dots, i_{ma}(t_N)]^T。$$

\mathbf{A} 为系数矩阵, 可离线计算完成; \mathbf{X} 为待求参数矩阵, 包含14个待求参数; \mathbf{B} 为常数矩阵, 由对应的电流 $i_{ma}(t)$ 的采样值构成。理论上, 对于式(5)中的参数可由14个独立的线性方程完成, 但通常为了提高计算精度而采取扩大矩阵 \mathbf{A} 的规模的冗余方法。对应的矩阵 \mathbf{X} 的求取可由式(6)完成:

$$[\mathbf{X}]_{14 \times 1} = [\mathbf{A}]_{N \times 14}^+ [\mathbf{B}]_{N \times 1} \quad (6)$$

式(6)中: $[\mathbf{A}]_{N \times 14}^+$ 为广义逆矩阵, 其具体计算方法可参照相关数学方法完成, 本文不再赘述。

3 基于电流幅值特征的新判据

由前面的分析可知, 低频自由分量的存在是导致瞬时性故障电流拍频现象的直接原因, 而永久性故障时以工频分量和直流分量为主要形式。因此, 据低频分量这一特点可实现单相故障瞬时性和永久性故障的区分。理论上, 瞬时性故障时断开相并联电抗器电流的低频自由分量的幅值 I_L 接近或大于工频分量的幅值 I_1 ; 而永久性故障时, 断开相并联电抗器电流以工频分量和直流分量为主要形式, 不存在低频分量, 此时对应的低频电流分量幅值 I_L 应接近0。

实际上, 自由分量频率的计算误差会影响工频、自由分量幅值计算精度, 但由于采用了具有稳

定良好的最小二乘拟合方法,可在一定程度上减小自由分量频率误差带来的误差,因此在整定判据门槛时要考虑该因素影响。

据上述特点可由以下判据实现瞬时性故障和永久性故障的区别

$$I_L \geq K_k I_1 \quad (7)$$

其中:可靠系数 $K_k = 0.3 \sim 0.5$,考虑各种误差及裕度。

当式(7)成立时,判为瞬时性故障,发出重合命令;否则,判为永久性故障,重合闸不动作。

为了提高上述判据的可靠性,只有判据(7)持续成立一段时间(时间长度可为5~20 ms)才给出重合闸动作命令;否则,断路器保持断开状态。

对于前节所述矩阵向量 $[X]$,本文提出的判别方法只需要计算出低频自由分量幅值 I_L 和工频分量幅值 I_1 。因此,对于系数 $[A]^+$ 矩阵只需要第3~6列,再乘以矩阵 $[B]$,可求得矩阵 $[X]$ 的 $I_L \cos \theta_L$ 、 $I_L \sin \theta_L$ 、 $I_1 \cos \theta_1$ 、 $I_1 \sin \theta_1$,即可由式(8)求出电流量的低频分量和工频分量的幅值。

$$\begin{cases} I_L = \sqrt{(I_L \cos \theta_L)^2 + (I_L \sin \theta_L)^2} \\ I_1 = \sqrt{(I_1 \cos \theta_1)^2 + (I_1 \sin \theta_1)^2} \end{cases} \quad (8)$$

之后,将 I_L 和 I_1 代入式(7)即可进行瞬时性和永久性故障判别。

4 算例验证

利用ATP对图1所示模型进行仿真验证。图4(a)、4(b)分别给出了上述线路系统在电角差为 60° 出口处(M端)发生金属性瞬时和永久接地时断开相并抗电流低频自由分量和工频分量的幅值计算结果。其中采样频率为2 000 Hz,最小二乘拟合数据窗长度为20 ms,从断路器跳闸后100 ms开始计算。

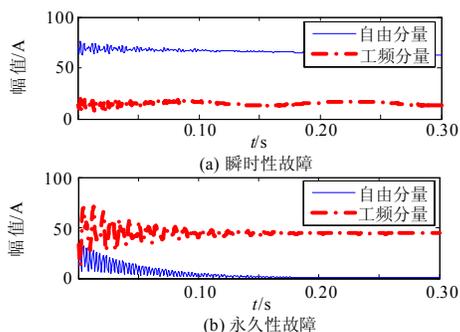


图4 电流分量幅值计算结果

Fig.4 Results of current components

由图4可以看出,在瞬时性故障时,电流低频自由分量幅值大于工频分量幅值;在永久性故障时,电流低频分量幅值很小,在二次电弧熄灭后其幅值接近0。图4所示断开相并抗电流的低频振荡分量和工频分量幅值计算结果与前面理论分析一致。

考虑到自由分量频率估算存在一定误差,图5给出了自由分量频率 $\pm 10\%$ 误差时瞬时性故障电流分量幅值计算结果。与图4(a)对比看出,尽管自由分量频率误差对电流两分量幅值计算精度有一定的影响,在自由分量频率误差为 $\pm 10\%$ 时自由分量仍具有较大幅值;但自由分量频率误差对永久性故障时电流分量幅值计算精度影响甚小,永久性故障时自由分量幅值接近0。因此,在自由分量频率误差较大的情况下,瞬时性和永久性故障时的自由分量幅值特征依旧区分明显,能够正确区分瞬时性和永久性故障。

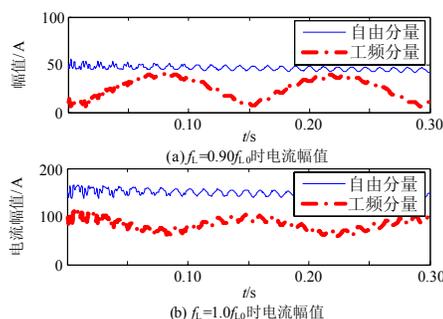
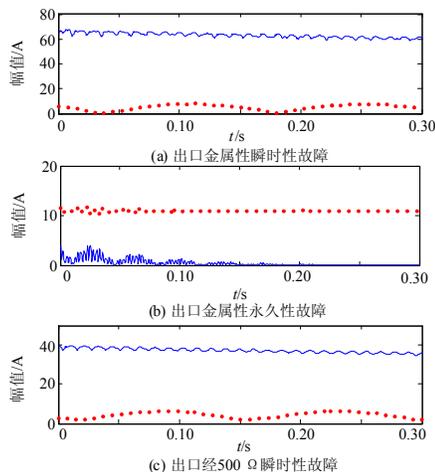


图5 自由分量频率误差对电流分量幅值影响

Fig.5 Results of current components by variable free frequency

接下来结合本文所提判据,图6给出了系统电势差为 60° 时典型故障情况下的判别算法验证结果。其中: $K_k I_1$ 为制动量(点线所示); I_L 为动作量(实线所示);可靠系数 K_k 取0.4。



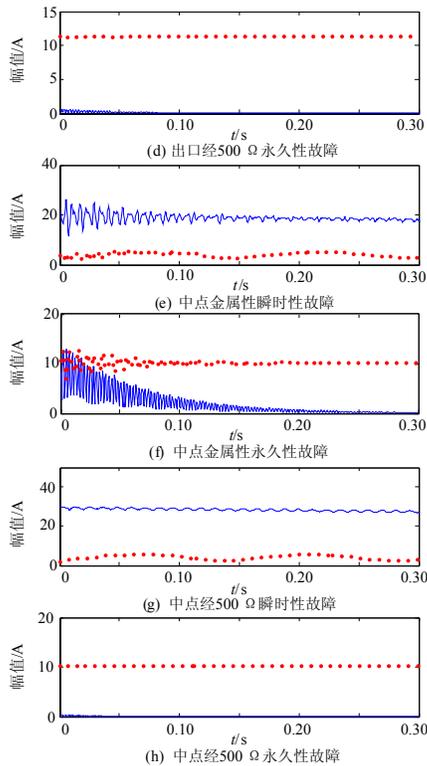


图6 动作量和制动量对比

Fig.6 Comparison of operating quantities with restricting quantities

由图6可以看出,瞬时性故障时电弧熄灭以后,动作量幅值大于制动量幅值,判为瞬时性故障;而永久性故障下,不论是金属性接地还是经500Ω电阻接地,0.10s后动作量幅值均小于制动量幅值,可靠判为永久性故障。在金属性故障的情况下,暂态过程对本文所提判据的性能有一定影响,相应的计算结果波动剧烈,可适当延长判别时间以提高判别结果的可靠性。

为验证不同负荷电流对判据的影响,图7给出在线路出口100km处经过渡电阻为100Ω时不同负荷情况下(两端电源电角差 δ 分别为 10° 、 30° 、 50°)的仿真结果。

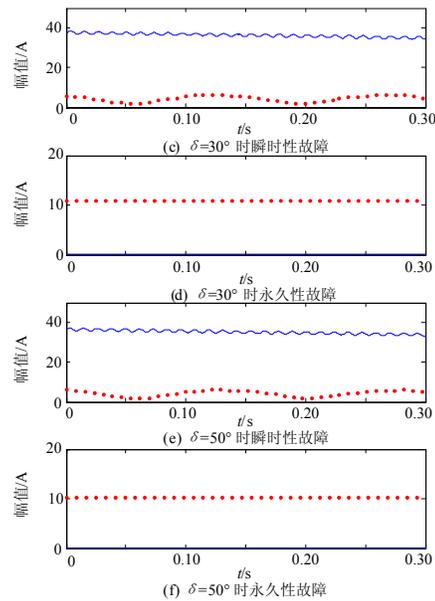
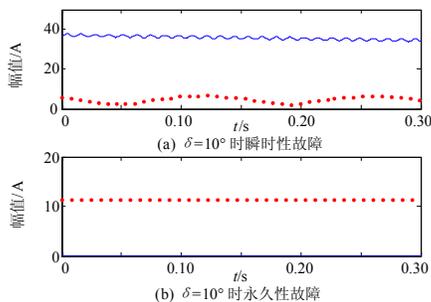
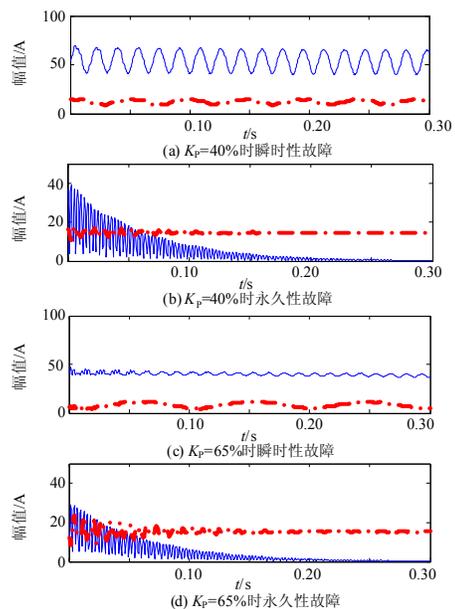


图7 不同负荷电流的故障仿真结果

Fig.7 Results under different load conditions

由图7可以看出,在线路带不同负荷的情况下,瞬时性和永久性故障特征区别明显,所提判据仍能有效可靠区分瞬时性和永久性故障。

对于可控并联电抗器线路系统,考虑不同补偿度时判据的性能,图8给出系统电势差为 45° 时线路出口处100km处经过渡电阻100Ω时不同补偿度下(并联补偿度 K_p 分别取40%、65%、90%,相间电容补偿度 K_m 取80%)的仿真结果。



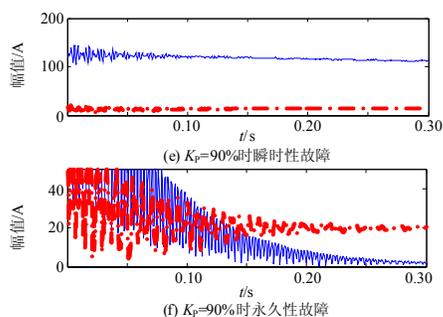


图 8 不同并联补偿度下仿真结果

Fig.8 Results under different shunt compensation

图8的结果表明，在线路在不同补偿度的情况下，瞬时性和永久性故障的电流自由分量幅值特征差异显著，能够可靠区分故障性质。对于判别初始阶段受暂态过程影响较大，可通过延长判别时间提高判别结果的可靠性。

由于篇幅有限，本文只给出了两端带并抗补偿线路的典型故障情况下的算法仿真验证；对于一端带并抗补偿线路，本文所提判据同样适用。

5 结论

提出一种适用于带并联电抗器线路的单相故障性质识别实用算法，具有以下特点：①利用获取精度高的并联电抗器电流量，不滤除低频分量，降低了滤波要求；②计算量较小，降低了对硬件计算速度的要求；③基本不受系统运行方式、故障位置、过渡电阻及负荷电流的影响。

参考文献

[1] 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.

[2] 李斌, 李永丽, 黄强, 等. 单相自适应重合闸相位判据的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 41-44. LI Bin, LI Yong-li, HUANG Qiang, et al. Study on Phase Criterion for Single-pole Adaptive Reclosure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 41-44.

[3] 刘浩芳, 王增平, 等. 带并联电抗器的超/特高压输电

线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 29-34.

LIU Hao-fang, WANG Zeng-ping, et al. Criterion for Determining Fault Nature in Adaptive Single-Phase Reclosing for Shunt Compensated EHV/UHV Transmission Lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 29-34.

[4] 李斌, 李永丽, 曾志安, 等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53-57.

LI Bin, LI Yong-li, ZENG Zhi-an, et al. Study on Single-pole Adaptive Reclosure Based on Analysis of Voltage Harmonic Signal[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 53-57.

[5] 刘浩芳, 王增平, 刘峻岭. 带并补的超高压输电线路单相自适应重合闸新判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 62-66.

LIU Hao-fang, WANG Zeng-ping, LIU Jun-ling. A New Criterion for Single-phase Adaptive Reclosure of Shunt Reactor Compensated EHV Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 62-66.

[6] 索南加乐, 宋国兵, 邵文权, 等. 两端带并联电抗器输电线路永久性故障判别[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 56-60.

SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, SHAO Wen-quan, et al. Identification of Permanent Faults Based on Differential Current Protection for Transmission Lines with Two Shunt Reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 56-60.

收稿日期: 2009-03-02; 修回日期: 2009-12-15

作者简介:

石光 (1971-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护技术工作;

邵文权 (1978-), 男, 博士生, 讲师, 主要从事输电线路继电保护及自适应重合闸研究; E-mail: swq0426@stu.xjtu.edu.cn

索南加乐 (1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事新型继电保护技术研究。

(上接第 52 页 continued from page 52)

[5] 周西峰. 系统辨识与建模方法[J]. 信息与控制, 2006, 4(2): 131-138. ZHOU Xi-feng. System Identification and Modeling Methods[J]. Information and Control, 2006, 4(2): 131-138.

收稿日期: 2009-05-14; 修回日期: 2009-06-01

作者简介:

刘毅敏 (1974-), 男, 高级工程师, 从事继电保护工作;

高广峰 (1980-), 男, 助理工程师, 从事继电保护工作. E-mail: 2000ggf@sina.com