

基于电容参数识别的永久性故障判别方法

邵文权^{1,2}, 加玛力汗³, 宋国兵¹, 索南加乐¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安工程大学电子信息学院, 710048, 西安;
3. 新疆大学电气工程学院, 830008, 乌鲁木齐)

摘要: 提出一种适用于双端带并联电抗器输电线路单相重合闸永久性故障的判别方法. 该方法以线路瞬时性故障模型为参考模型, 建立参数识别网络方程, 将线路电容参数作为待求解参数, 根据电容计算值与实际值差异实现故障性质的判别. 如果电容求解值与实际差异很小, 则实际故障模型与参考模型一致, 判为瞬时性故障; 如果电容求解值与实际值差异大, 则实际故障模型与参考模型不一致, 判为永久性故障. 该方法仅利用双端并联电抗器电流量, 原理简单, 易于实现, 且不受低频振荡分量影响. ATP 仿真表明, 该方法能够有效区分瞬时性故障和永久性故障, 能够提高单相自适应合闸动作的成功率.

关键词: 输电线路; 单相自适应重合闸; 并联电抗器; 电容参数; 电流量

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)06-0708-05

Permanent Fault Identification Method Based on Capacitance Parameter

SHAO Wenquan^{1,2}, JIAMA Lihan³, SONG Guobing¹, SUONAN Jiale¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Electrical Engineering Department, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 3. Electrical Engineering Department, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

Abstract: A novel single-phase adaptive reclosure scheme based on capacitance parameter of transmission line is proposed, where transient fault model is considered as the prototype, and the capacitance as the unknown parameter to evaluate the difference between the calculated capacitance and the actual one for distinguishing the transient and permanent fault. In the case of transient fault, the difference is small for the actual fault model is consistent to the prototype, but for the permanent fault, the difference is notable, and the actual fault model does not coincide with the prototype. By means of only using the currents from the two-terminal shunt reactors, the criterion gets simple to perform. Moreover, the algorithm is independent of the low-frequency swing component. ATP simulation results show that the scheme enables to effectively distinguish permanent fault from transient fault, and improve the action success rate of the single-phase adaptive reclosure in transmission lines with shunt reactors.

Keywords: transmission line; single-phase adaptive reclosure; shunt reactor; capacitance parameter; current component

超、特高压输电线路采用单相自动重合闸是快速恢复供电和维持系统稳定运行的重要举措, 但重合于永久性故障则会给系统带来比短路时更加严重

的二次冲击, 其危害不容忽视. 线路发生单相故障的性质直接决定着重合闸动作成功率, 因此在重合前判断故障的性质即采用单相自适应重合闸对电力系

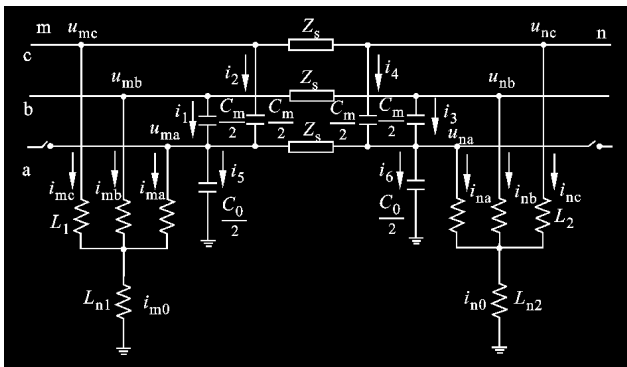
统稳定运行具有重要意义^[1].

在带有并联电抗器高压输电线路中,由于并联电抗器的补偿作用,断开相恢复电压较小,线路侧电压互感器无法准确获取该电压量,限制了基于恢复电压特性^[2-5]的各种判别原理的有效应用.考虑到并联电抗器侧通常装有电流互感器,其变比较小,小电流时测量精度高,能够准确测量几安培的小电流,断开相电流一般有几十安培,利用并联电抗器侧电流互感器获取断开相电流具有很高的精度^[6].当发生瞬时性故障时,断开相恢复电压和电流包含有幅值与工频分量接近的低频振荡分量,该分量导致目前基于工频量的判别原理需要长达数百毫秒的延时,严重地限制了快速重合闸的应用.

本文提出一种基于线路电容参数识别的永久性故障判别方法.该方法以两端带并联电抗器线路的瞬时性故障模型为标准模型,建立相应的参数识别方程,利用线路两端并联电抗器电流量求解线路电容参数,根据最小二乘优化解得到的线路电容参数与实际电容参数的差异来判断实际故障模型是否吻合标准模型,从而确定故障性质以实现单相自适应重合闸.

1 瞬时性故障模型分析

输电线路 m、n 端均带并联电抗器,假定 a 相为故障相,发生瞬时性故障时故障点消失以后的 π 型等值电路如图 1 所示.



i_{ma} 、 i_{mb} 、 i_{mc} 分别为流过 m 端并联电抗器电流; i_{na} 、 i_{nb} 、 i_{nc} 分别为流过 n 端并联电抗器电流; i_{m0} 、 i_{n0} 分别为 m、n 端中性点小电抗器电流; i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 分别为故障相相间电容电流; i_5 、 i_6 分别为故障相对地电容电流; u_{ma} 、 u_{na} 分别为线路跳闸后故障相电压; u_{mb} 、 u_{mc} 、 u_{nb} 、 u_{nc} 分别为线路健全相电压; C_0 为全线路对地电容; C_m 为相间电容; Z_s 为线路自阻抗; L_1 、 L_2 、 L_{n1} 、 L_{n2} 分别为两端并联电抗器和中性点小电抗器电感

图 1 瞬时性故障 π 型等值模型

将图 1 简化为如图 2 所示电路,其中 u_{m0} 、 u_{n0} 分别为 m、n 端并联电抗器中性点等效电压源的电压, u_{xl} 为 a 相全线路电感耦合电压.

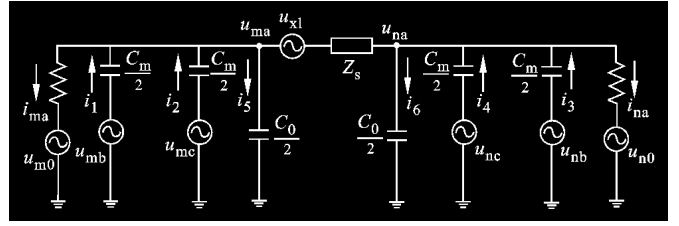


图 2 A 相简化等值电路

由图 2 可得

$$i_{ma} + i_{na} = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 - i_5 - i_6 \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{C_m}{2} \frac{d(u_{mb} - u_{ma})}{dt}; & i_2 &= \frac{C_m}{2} \frac{d(u_{mc} - u_{ma})}{dt} \\ i_3 &= \frac{C_m}{2} \frac{d(u_{nb} - u_{na})}{dt}; & i_4 &= \frac{C_m}{2} \frac{d(u_{nc} - u_{na})}{dt} \\ i_5 &= \frac{C_0}{2} \frac{du_{ma}}{dt}; & i_6 &= \frac{C_0}{2} \frac{du_{na}}{dt} \end{aligned}$$

代入式(1)整理得

$$\begin{aligned} i_{ma} + i_{na} &= \\ C_m \left[\frac{d(u_{mb} + u_{mc})}{dt} + \frac{d(u_{nb} + u_{nc})}{dt} \right] / 2 - \\ &\left(C_m + \frac{C_0}{2} \right) \left[\frac{du_{ma}}{dt} + \frac{du_{na}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

考虑到本文利用双端并联电抗器电流量,即 i_{ma} 、 i_{mb} 、 i_{mc} 、 i_{na} 、 i_{nb} 、 i_{nc} 为已知量,式(2)中的电压量可由已知电流量求出

$$\left. \begin{aligned} u_{ma} &= L_{n1} \frac{di_{m0}}{dt} + L_1 \frac{di_{ma}}{dt} \\ u_{mb} &= L_{n1} \frac{di_{m0}}{dt} + L_1 \frac{di_{mb}}{dt} \\ u_{mc} &= L_{n1} \frac{di_{m0}}{dt} + L_1 \frac{di_{mc}}{dt} \\ i_{m0} &= i_{ma} + i_{mb} + i_{mc} \end{aligned} \right\} \quad (3a)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{na} &= L_{n2} \frac{di_{n0}}{dt} + L_2 \frac{di_{na}}{dt} \\ u_{nb} &= L_{n2} \frac{di_{n0}}{dt} + L_2 \frac{di_{nb}}{dt} \\ u_{nc} &= L_{n2} \frac{di_{n0}}{dt} + L_2 \frac{di_{nc}}{dt} \\ i_{n0} &= i_{na} + i_{nb} + i_{nc} \end{aligned} \right\} \quad (3b)$$

将式(2)化简可得到双端并联电抗器电流量与模型参数的关系式如下

$$\begin{aligned}
i_{ma} + i_{ra} = & \frac{C_m}{2} \left[2L_{n1} \frac{d^2(i_{ma} + i_{mb} + i_{mc})}{dt^2} + \right. \\
& L_1 \left(\frac{d^2 i_{mb}}{dt^2} + \frac{d^2 i_{mc}}{dt^2} \right) + 2L_{n2} \frac{d^2(i_{ra} + i_{nb} + i_{nc})}{dt^2} + \\
& \left. L_2 \left(\frac{d^2 i_{nb}}{dt^2} + \frac{d^2 i_{nc}}{dt^2} \right) \right] - \left(C_m + \frac{C_0}{2} \right) \cdot \\
& \left[L_{n1} \frac{d^2(i_{ma} + i_{mb} + i_{mc})}{dt^2} + L_1 \frac{d^2 i_{ma}}{dt^2} + \right. \\
& \left. L_{n2} \frac{d^2(i_{ra} + i_{nb} + i_{nc})}{dt^2} + L_2 \frac{d^2 i_{ra}}{dt^2} \right]
\end{aligned}$$

上述关系式可写成

$$f(C_0, C_m, L_1, L_2, L_{n1}, L_{n2}) = 0 \quad (4)$$

由式(4)可知,根据电流量进行微分运算即可得到线路模型参数.为了降低求解阶数,本文仅保留电容参数 C_0 和 C_m 作为待求参数,其他参数为已知.式(4)可整理成如下形式

$$A_1 C_m + A_2 (C_m + C_0/2) = B_0 \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned}
A_1 = & \left[\frac{d(u_{mb} + u_{mc})}{dt} + \frac{d(u_{nb} + u_{nc})}{dt} \right] / 2 \\
A_2 = & - \left[\frac{du_{ma}}{dt} + \frac{du_{ra}}{dt} \right]; B_0 = i_{ma} + i_{ra}
\end{aligned}$$

2 电容参数识别

2.1 最小二乘参数估计

式(5)中 u_{ma} 微分对应的离散形式为

$$\begin{aligned}
\frac{du_{ma}}{dt} \Big|_{t=kT_s} = & \\
L_{n1} \left[\frac{i_{m0}(k+1) - 2i_{m0}(k) + i_{m0}(k-1)}{2T_s^2} \right] + & \\
L_1 \left[\frac{i_{mb}(k+1) - 2i_{mb}(k) + i_{mb}(k-1)}{2T_s^2} \right] & \quad (6)
\end{aligned}$$

式中: T_s 为采样周期.同理,可得到其他电压的微分离散形式.

由式(6)可知,连续取4个采样点数据构成两个独立方程即可求解电容参数 C_0 和 C_m .但是,由于模型简化误差的影响,瞬时性故障时的低频振荡分量对电容参数的影响明显,导致线路电容参数的计算值不稳定.为了提高辨识结果的精度,采用最小二乘法求解电容参数值.

采用数据冗余的方式,即用一段时间的采样值得出一个参数估计值,然后顺次推移数据窗,用另外的一组数据又可得到另一个参数估计值,如此重复即可得到待求参数的序列.

参数识别方程(5)的离散形式如下所示

$$A_{1k} C_m + A_{2k} (C_m + C_0/2) = B_k \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned}
A_{1k} = & \left[\frac{u_{mb}(k+1) - u_{mb}(k-1)}{2T_s} + \right. \\
& \frac{u_{mc}(k+1) - u_{mc}(k-1)}{2T_s} + \\
& \frac{u_{nb}(k+1) - u_{nb}(k-1)}{2T_s} + \\
& \left. \frac{u_{nc}(k+1) - u_{nc}(k-1)}{2T_s} \right] / 2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{2k} = & - \left[\frac{u_{ma}(k+1) - u_{ma}(k-1)}{2T_s} + \right. \\
& \left. \frac{u_{ra}(k+1) - u_{ra}(k-1)}{2T_s} \right]
\end{aligned}$$

$$B_k = i_{ma}(k) + i_{ra}(k) \quad k = 1, 2, \dots, n$$

可得

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} \\ A_{12} & A_{22} \\ \vdots & \vdots \\ A_{1n} & A_{2n} \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} C_m \\ C_m + C_0/2 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix}$$

式(7)可表示为 $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$,求得 $\mathbf{X} = [\mathbf{A}_{2 \times n}]^+ [\mathbf{B}]$,即可求出对应的电容参数 C_0 和 C_m .

2.2 故障性质判别

根据计算得到电容参数 C_0 和 C_m 即可对线路发生的瞬时性和永久性故障进行识别.理论上,如果线路实际发生瞬时性故障,则实际故障模型与所建立的分析模型吻合,即所计算的电容参数 C_0 和 C_m 应与线路实际电容参数一致,而不应随时间变化.当线路发生永久性故障时,实际故障模型与分析模型不一致,则所求解的线路电容参数与真实电容参数相差大,甚至求解结果波动剧烈.考虑到模型简化误差、采样误差等因素的影响,瞬时性故障时所计算的线路电容参数与真实电容参数有一定的差距,因此在实际进行故障性质判别时,判据要留有一定裕量.

根据求解的电容参数 C_0 和 C_m 序列,可利用如下具体判据进行瞬时性故障识别

$$\left. \begin{aligned} \frac{|C_0(i) - C_{0r}|}{C_{0r}} &< \lambda_1 \\ \frac{|C_m(i) - C_{mr}|}{C_{mr}} &< \lambda_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

式中: m 为计算结果序列长度; C_{0r} 和 C_{mr} 为线路实际电容参数; λ_1 和 λ_2 为裕度系数.

当式(8)成立时,判为瞬时性故障,否则判为永

久性故障。

由于电容参数计算结果的波动剧烈程度与故障具体情况和数据精度有关,裕度系数 λ_1 和 λ_2 的整定有一定的困难。根据大量不同情况下的故障仿真分析结果,裕度系数 λ_1 和 λ_2 取0.10~0.20可满足故障性质判别要求。

3 原理仿真验证

为了验证上述判据的正确性,本文利用ATP对双端带并联电抗器输电线路进行仿真,并利用MATLAB软件进行分析验证。

3.1 仿真模型参数

双端带并联电抗器的输电系统如图3所示。线路参数为

$$R_1 = 0.019\ 5\ \Omega/\text{km};$$

$$R_0 = 0.167\ 5\ \Omega/\text{km}$$

$$L_1 = 0.913\ 4 \times 10^{-3}\ \text{H}/\text{km};$$

$$L_0 = 2.719 \times 10^{-3}\ \text{H}/\text{km}$$

$$C_1 = 0.014 \times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km};$$

$$C_0 = 0.008\ 34 \times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km}$$

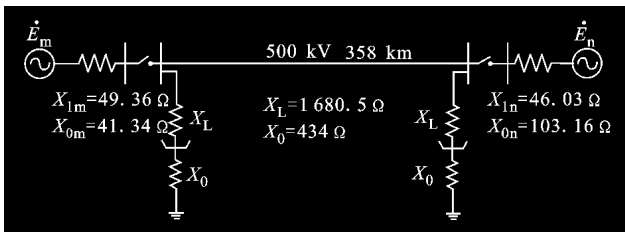


图3 双端带并联电抗器 500 kV 输电系统

线路实际电容参数为

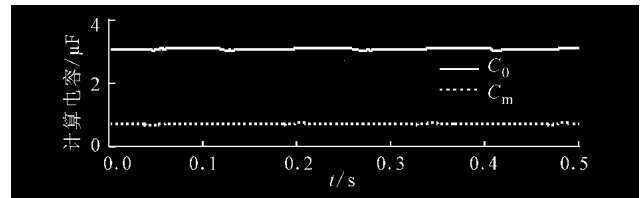
$$C_{0r} = 2.985\ 7\ \mu\text{F};\ C_{mr} = 0.675\ 4\ \mu\text{F}$$

3.2 仿真结果及分析

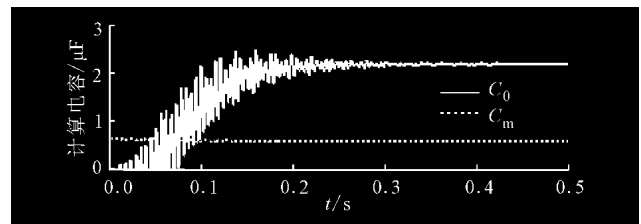
利用ATP对上述线路模型进行不同故障情况下的仿真。假定两端电源电势差为 45° ,故障相为a相。利用MATLAB进行数据处理,a相断开100 ms后开始计算,采样频率为2 000 Hz,最小二乘所用数据窗长度为20 ms,即利用40个连续采样点数据求解电容参数 C_0 和 C_m 。图4给出了不同故障情况下的电容参数 C_0 和 C_m 的计算结果。

为了说明电容参数计算值与真实值的相对关系,图5给出了由式(8)得到的计算值与真实值误差分析结果,裕度系数 λ_1 和 λ_2 取0.10。由于篇幅限制,本文只给出了两端电源电势差为 45° 时线路出口、中点处的典型故障情况仿真计算结果。

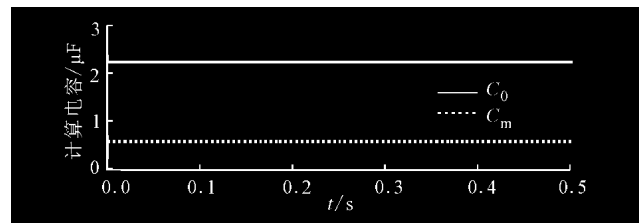
由图4、图5可以得出:①瞬时性故障情况下,电弧熄灭以后,线路电容参数的计算值 $C_m(i)$ 、 $C_0(i)$ 分别与对应的实际值 C_{mr} 、 C_{0r} 非常接近,且计算结果稳定,相对误差小于10%,小于裕度系数 λ_1 和 λ_2 ;②永久性故障情况下线路电容参数计算值与实际值差异明显,尤其在金属性永久接地时的计算结果波动剧烈,且经500 Ω 电阻永久接地时,电容计算值仍与实际值差异明显,相对误差大于裕度系数 λ_1 和 λ_2 ;③尽管金属性永久接地时0.3 s以后的电容计算结果较稳定,但是其计算值与真实值相差较大,不满足式(8),不会发生误判;④该方法基本不受故障点位置、过渡电阻的影响,能够可靠判断故障性质。



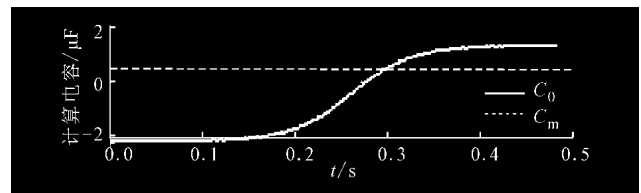
(a)瞬时性故障



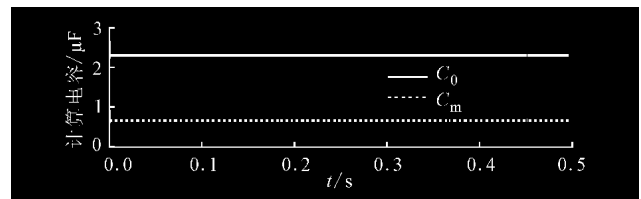
(b)出口金属性永久接地



(c)出口经500 Ω 电阻永久接地

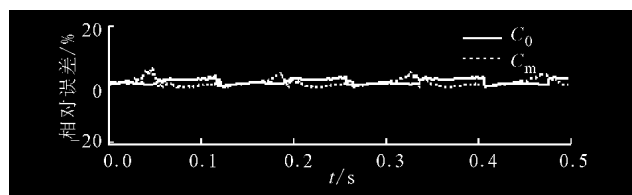


(d)中点金属性永久接地

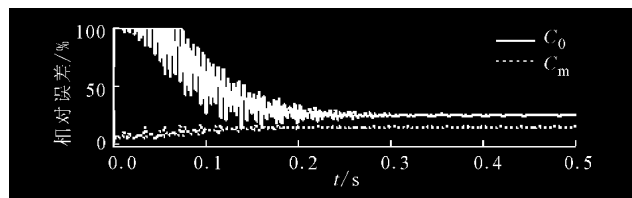


(e)中点经500 Ω 电阻永久接地

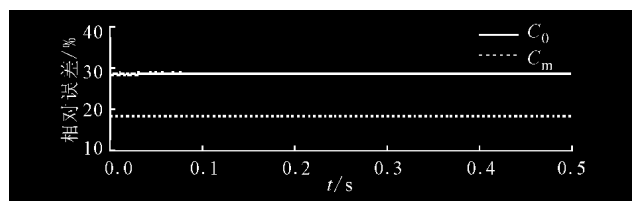
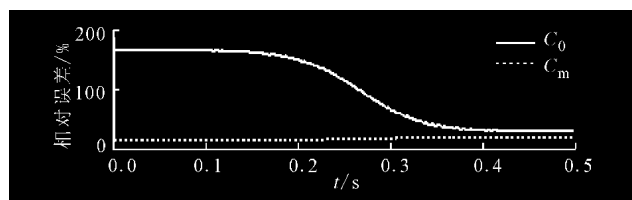
图4 电容参数计算值与实际值对比



(a) 瞬时性故障



(b) 出口金属性永久接地

(c) 出口经 500 Ω 电阻永久接地

(d) 中点金属性永久接地

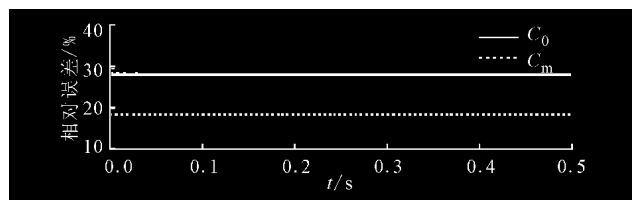
(e) 中点经 500 Ω 电阻永久接地

图5 电容参数相对误差分析

4 结 论

对于带并联电抗器线路来说,由于并联电抗器的补偿作用,导致基于断开相恢复电压特性的单相自适应重合闸永久性故障判别方法无法有效应用。本文提出一种利用线路电容参数进行故障性质判别的方法。瞬时性故障时,电容参数计算值与真实值接近,永久性故障时,电容参数计算值与真实值相差较大。该方法仅利用两端并联电抗器获取高精度电流,并且基本上不受低频振荡分量的影响,不需要长窗滤波,能够快速确定故障性质。不同条件下的大量仿真结果表明,在全线范围内,该方法能够可靠地区

分永久性故障和瞬时性故障,且具有足够的灵敏度。该判据对采样率要求不高,计算量小,有利于提高快速重合闸动作的成功率。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时性故障和永久性故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-32.
GE Yaozhong. Identification of temporary fault and permanent fault for single-phase reclosure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(2): 23-32.
- [2] GE Yaozhong, SUI Fengha, XIAO Yuan. Prediction methods for preventing single-phase re-closing on permanent fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [3] 范越, 施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44-47.
FAN Yue, SHI Wei. Modification of voltage criterion in the single-pole automatic reclosing of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 44-47.
- [4] 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 Yongli, HUANG Qiang, et al. Study on phase criterion for single-pole adaptive reclosure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 41-44.
- [5] 索南加乐, 刘辉, 吴亚萍, 等. 基于故障测距的单相自动重合闸永久故障电压自适应补偿判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 80-84.
SUONAN Jiale, LIU Hui, WU Yaping, et al. An adaptive voltage compensation criterion for permanent fault in the single phase automatic re-closing based on fault location[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 80-84.
- [6] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟, 等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 75-81.
SUONAN Jiale, SUN Dandan, FU Wei, et al. Identification of permanent faults for single-phase auto-reclosure on transmission lines with shunt reactors[J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(11): 75-81.

(编辑 杜秀杰)