

基于模型识别的平行线路零序方向元件

杨铖, 索南加乐, 孙成

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 分析指出, 平行线路区内故障时的零序电源可等效为一个位于区内的电压源, 零序电路符合电感模型, 线路区外故障时的零序电源则可等效为一区内电压源和一区外电压源的叠加, 零序电路不再满足电感模型. 所以区内故障时, 电感模型误差很小, 区外故障时, 电感模型误差很大. 通过计算模型误差, 结合传统的零序方向元件, 提出了一种基于模型识别的平行线路零序方向元件的新原理, 能够有效防止区外故障时的保护误动, 当本线内部故障时, 保护的灵敏度随动作时间自适应提高, 可以快速动作切除故障. 理论分析和 EMTP 仿真实验表明, 新原理利用全部故障暂态信息, 在时域中计算而无需滤波, 区内故障时保护动作灵敏, 区外故障时保护则快速闭锁, 可靠性很高.

关键词: 模型识别; 参数识别; 输电线路; 方向元件

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)02-0102-06

A New Type of Zero-Sequence Directional Relay Based on Model Recognition for Parallel Lines

YANG Cheng, SUONAN Jiale, SUN Cheng

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

Abstract: The mal-operation of pilot zero-sequence direction protection working on parallel lines is usually caused by the zero-sequence mutual inductance. By analyzing zero-sequence network of parallel lines, an inductance circuit model is established for the internal fault, and a novel zero-sequence directional relay based on model recognition is proposed for parallel lines. When the internal fault occurs, the model error is small and decreases quickly, and when the external fault occurs, the model error is large and oscillates. By computing the model error, the performance of the conventional zero-sequence directional relay is improved. The theoretic analysis demonstrates the validation of the new relay.

Keywords: model recognition; parameter distinguishing; transmission line; directional relay

故障分量方向保护具有方向性明确、动作速度快、不受运行方式和系统振荡影响等优点^[1-2]. 零序方向元件所用电气量是故障分量, 且可长期获得, 同时它还具有灵敏度高、高压电网零序故障网络结构比较固定等优点^[3], 一般作为纵联方向保护中反映接地故障的标准配置.

为了有效利用土地和降低电力建设投资, 在同一出线走廊内往往平行架设多回线路. 平行线路间

的零序互感对继电保护有很大影响, 在许多情况下可能导致保护误动或拒动^[4]. 文献[5]针对各种结构平行线路上的零序方向元件进行的安全性分析指出, 保护是否误动取决于平行线路间的联系是磁强还是电强. 文献[6]将基于故障类型的方向元件^[3]用于弱电强磁的平行线路上, 有效改善了纵联方向保护的性能, 但该方法依赖于选相元件的准确动作.

由于传变特性较好的光互感器在电力系统中的

应用,利用故障暂态分量的参数识别^[7-11]保护原理得到了快速发展.本文分析指出:平行线路区内故障时的零序电源可等效为一个位于区内的电压源,零序电路符合电感模型;线路区外故障时的零序电源,可等效为一区内电压源和一区外电压源的叠加,零序电路不再满足电感模型.利用参数识别的思想计算模型误差,可有效改善传统零序方向元件的动作性能.区内故障时,电感模型误差很小,且保护灵敏度随动作时间自适应提高,能够快速切除故障;区外故障时,电感模型误差很大,保护能够可靠闭锁.

1 零序互感平行线路故障特征分析

不同接线方式或运行方式对于零序功率方向元件的影响不一样.有零序互感的平行线路可以分为以下两种结构:两端均无电气连接的平行线路,一端或两端有电气连接的平行线路.文献[5]分析指出,对于两端均无电气连接的零序互感平行线路,平行线路间仅有磁的联系而无电的联系,邻线接地故障,本线测量反映为内部故障,工程应用中通过设置门槛防止误动.考虑到高压电网多以环网运行,且同一输电断面内通常有多回线路并联运行,所以这种结构的平行线路并不多见.以下分析有电气连接的零序互感平行线路的故障特征.

1.1 线路区内故障

图 1a 为零序互感平行线路区内故障时的零序网络等效电路图.依据叠加原理,图 1a 可分解为只有唯一电源的图 1b 和图 1c.由图 1b、图 1c 可得

$$u_{m1} = -R_{sm}i_{m1} - L_{sm}di_{m1}/dt \quad (1)$$

$$u_{m2} = -R_{sm}i_{m2} - L_{sm}di_{m2}/dt \quad (2)$$

式(1)与式(2)相加得到

$$u_m = -R_{sm}i_m - L_{sm}di_m/dt \quad (3)$$

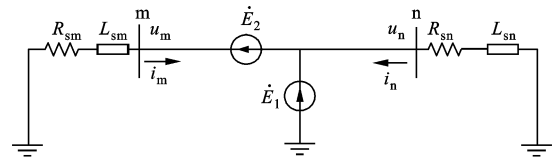
式中: $u_m = u_{m1} + u_{m2}$; $i_m = i_{m1} + i_{m2}$. 同理可得

$$u_n = -R_{sn}i_n - L_{sn}di_n/dt \quad (4)$$

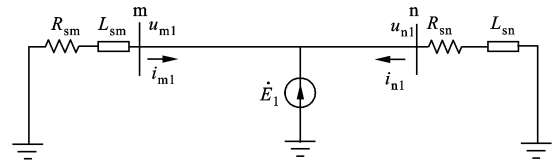
观察式(3)、式(4),当零序互感平行线路区内故障时,线路两端的零序电压、电流均满足电感模型,相应计算得到的电感模型误差很小.电感模型误差函数定义如下

$$\Delta F = \frac{\int_0^T |u + Ri + Ldi/dt| dt}{\int_0^T |u| + |Ri + Ldi/dt| dt} \quad (5)$$

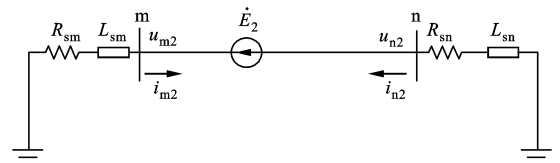
式中: $T=10$ ms. 利用参数识别的方法,可在线求解模型方程系数,计算出模型误差,具体实现可参考文献[10-11].



(a) 包含两等效电源的内部故障零序网络



(b) 只含横向等效电源的内部故障零序网络



(c) 只含纵向等效电源的内部故障零序网络

$\dot{E}_1$ 为故障点处等效零序电压源; $\dot{E}_2$ 为零序互感等效电压源; u_m 、 u_n 及 i_m 、 i_n 为两端保护安装处的零序电压、电流; R_{sm} 、 L_{sm} 及 R_{sn} 、 L_{sn} 为线路两侧等效系统阻抗中的电阻、电感参数

图 1 区内故障时的零序网络

1.2 线路区外故障

图 2a 为零序互感的平行线路区外故障时的零序网络等效电路图,其中 R_l 、 L_l 为线路的等效电阻和电感参数,其他符号与图 1 相同.

根据叠加原理,可将图 2a 分解为只有唯一电源的图 2b 和图 2c.由图 2b、图 2c 可得 m 侧

$$u_{m1} = -R_{sm}i_{m1} - L_{sm}di_{m1}/dt \quad (6)$$

$$u_{m2} = -R_{sm}i_{m2} - L_{sm}di_{m2}/dt \quad (7)$$

式(6)与式(7)相加得到

$$u_m = -R_{sm}i_m - L_{sm}di_m/dt \quad (8)$$

m 侧的零序电压、电流仍满足电感模型.对于 n 侧

$$u_{n1} = (R_{sm} + R_l)i_{n1} + (L_{sm} + L_l)di_{n1}/dt \quad (9)$$

$$u_{n2} = -R_{sn}i_{n2} - L_{sn}di_{n2}/dt \quad (10)$$

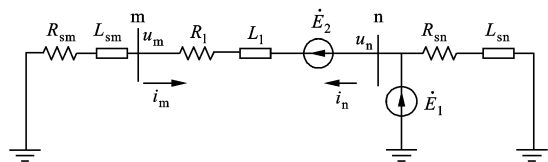
式(9)与式(10)相加得到

$$u_n = -R_{sn}i_n - L_{sn}di_n/dt + \sigma \quad (11)$$

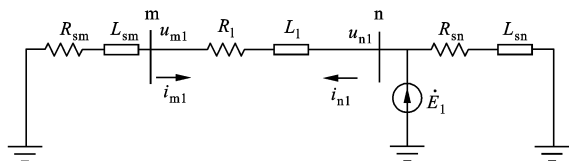
式中

$$\sigma = (R_{sn} + R_{sm} + R_l)i_{n1} + (L_{sn} + L_{sm} + L_l)di_{n1}/dt \quad (12)$$

即 n 侧零序电压、电流并不满足电感模型.综合式(8)、式(11)可知,线路区外故障时,必有一侧的零序电压、电流不满足电感模型,相应的模型误差很大.



(a) 包含两等效电源的外部故障零序网络



(b) 只含横向等效电源的外部故障零序网络

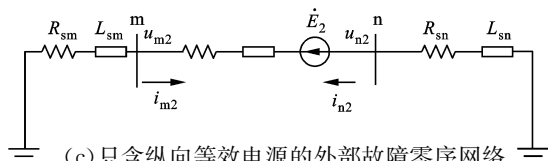


图2 区外故障时的零序网络

2 基于模型识别的平行线路零序方向元件

2.1 平行线路零序方向元件的模型识别判据

由前面的分析可知,当有零序互感的平行线路发生区内故障时,线路两端的零序电压、电流均满足式(3),符合电感模型,计算得到的模型误差很小.当线路区外发生故障时,线路两端的零序电压、电流必有一侧不符合电感模型,该侧计算得到的模型误差很大.由此得到平行线路零序方向元件的模型识别判据为

$$\Delta F < K_{zd} \quad \text{延时 } 10 \text{ ms} \quad (13)$$

式中: $0 < K_{zd} < 1$,在本文中整定为0.2.

2.2 模型识别判据在平行线路上的工作特性

对于有零序互感的平行线路,当发生区内故障时,线路两端的零序电压、电流均满足式(3),符合电感模型,模型误差理论上应为0.由于故障暂态过程中不仅包括工频分量,还包括非周期分量和高频分量,其中非周期分量的能量主要集中在直流和低频,所以工频和非周期分量基本都符合电感模型,不会带来模型误差.由分布电容引起的高频分量则不符合电感模型,实际模型误差并不为0.考虑到高频分量较小,计算得到的模型误差仍然很小,且由于集肤效应和大地电导率的下降,高频分量衰减很快,所以模型误差不仅小而且快速衰减,模型识别判据的灵敏度在故障后持续提高.

当发生区外故障时,必有一侧的零序电压、电流不符合电感模型,计算得到的模型误差很大.实际模

型误差由 σ 决定,观察式(12)可发现, σ 正比于零序网络的全系统阻抗参数(包括线路阻抗和两侧等效系统阻抗),模型误差将会很大.另一方面,模型误差还正比于 i_{n1} (i_{n1} 由外部故障等效电压源 $\dot{E}_1$ 和零序网络结构决定).当平行线路间只有磁的联系而无电的联系时(无电强磁),邻线故障时本线路的 $\dot{E}_1$ 为0,相应的 i_{n1} 和 σ 为0,电感模型误差失效,保护退回到传统的零序方向元件.

2.3 模型识别判据在单回线上的工作特性

由于输电线路可能停运检修,原来有零序互感的平行线路可能变单回线运行,所以有必要考虑模型识别判据在单回线上的动作特性.

单回线区内故障时的零序网络如图1b所示,由式(1)可知,线路两端的零序电压、电流均符合电感模型,模型识别判据动作.单回线区外故障时的零序网络如图2b所示,由式(6)、式(9)可知,线路两侧也均符合电感电路模型

$$u = Ri + Ldi/dt \quad (14)$$

式中:对于m侧, $R = -R_{sm}$ 、 $L = -L_{sm}$;对于n侧, $R = R_{sn} + R_1$ 、 $L = L_{sn} + L_1$.

由上述分析可知,模型识别判据在单回线上运行时,无法识别反向故障,不能单独工作,可利用传统零序反方向元件闭锁模型识别判据.

2.4 基于模型识别的零序方向元件的动作逻辑

模型识别原理的本质是基于故障后暂态过程中丰富的频谱信息,利用最小二乘法在线识别网络方程系数,并计算相应的模型误差,从而识别区分内外故障,具体原理方法可参考文献[10-11].基于模型识别的适用于平行线路的零序方向元件的动作流程如图3所示.

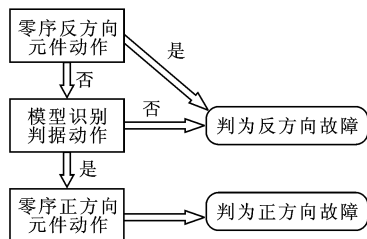


图3 基于模型识别的零序方向元件动作流程

3 EMTP 仿真实验

为验证本文所提方法的有效性,根据兰州东经平凉到乾县的有零序互感的双回长线参数,利用EMTP建立了相应的仿真模型,如图4所示,其中

L_1 与 L_2 为 200 km 有零序互感的两条 500 kV 平行线路, L_2 经 100 km 无零序互感线路(阻抗为 Z_{L1})与 L_1 联于母线 m, $\dot{E}_m$ 、 $\dot{E}_{n1}$ 与 $\dot{E}_{n2}$ 为等效电源, Z_{sm} 、 Z_{sn1} 与 Z_{sn2} 为等效系统阻抗, K_1 、 K_2 、 K_3 分别为距离 m 侧 50、100、150 km 的故障位置。线路参数如下。

线模: $R_l=0.013\ 05\ \Omega/\text{km}$, $X_l=0.259\ 9\ \Omega/\text{km}$
 $C_l=0.016\ 3\times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km}$ 。线间模: $R_{ll}=0.013\ 86\ \Omega/\text{km}$, $X_{ll}=0.355\ 8\ \Omega/\text{km}$, $C_{ll}=0.012\ 72\times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km}$ 。地模: $R_G=0.451\ 64\ \Omega/\text{km}$, $X_G=1.513\ \Omega/\text{km}$, $C_G=0.008\ 48\times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km}$ 。

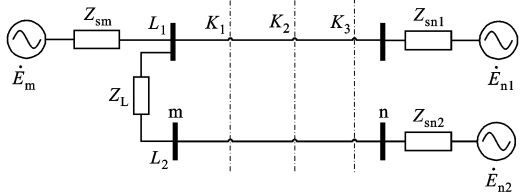


图 4 仿真实验模型

3.1 零序互感导致方向元件误动实验

假定传统的零序正方向元件动作判据为

$$-180^\circ < \arg(\dot{U}_0/\dot{I}_0) < 0^\circ \quad (15)$$

图 5 给出了 L_2 线 K_1 点单相接地时, L_1 线两侧零序方向元件的动作结果。

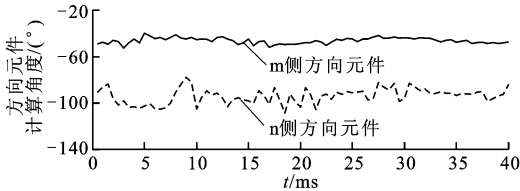


图 5 传统零序方向元件动作结果

由图 5 可见,按照式(15)的动作判据,此时健全线 L_1 两侧的传统零序方向元件均判为正方向故障,保护将要误动。

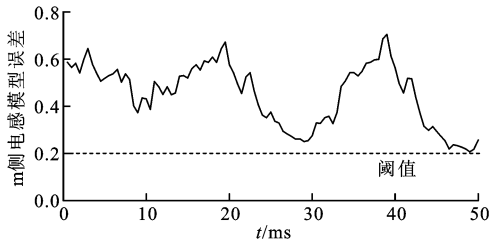
3.2 线路区外故障时的模型识别判据动作结果

图 6 给出了 L_2 线 K_1 、 K_2 、 K_3 点故障时, L_1 线 m 侧模型识别判据的动作结果。

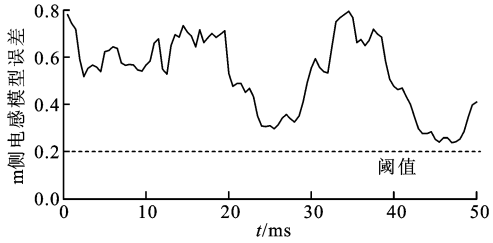
由图 6 可见,当线路一侧母线反方向故障时,该侧电感模型误差将会很大,且一直振荡波动。采用带有小延时的模型识别判据式(13),可以有效闭锁零序正方向元件,防止保护误动。

3.3 线路区内故障时的模型识别判据动作结果

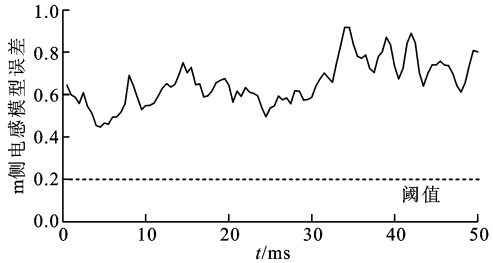
图 7 给出了 L_1 线区内 K_1 、 K_2 、 K_3 点故障时, L_1 线两侧模型识别判据的动作结果。由图 7 可见,当线路区内故障时,线路两侧的模型误差都很小,且



(a) 区外 K_1 点故障



(b) 区外 K_2 点故障



(c) 区外 K_3 点故障

图 6 区外故障时的模型识别判据动作结果

快速衰减,模型识别判据的灵敏度随动作延时而自适应提高,一般可在 30 ms 内动作切除故障。

图 6、图 7 的实验都是基于图 4 的结构模型,两回线部分平行($Z_L \neq 0$),实际可能有两回线出自同一变电所且全线平行的情况,这其实是图 4 结构所包含的一个特例,即 $Z_L=0$ 。图 8 给出了此时线路区内、外故障时,模型识别判据的动作结果。

由图 8 所示可知,对于两回线出自同一变电所且全线平行的情况,模型识别判据动作性能依旧很好,外部故障时可靠闭锁,内部故障时动作灵敏。

4 结 论

本文基于模型识别的思想,提出了一种适用于零序互感平行线路的零序方向元件新原理,通过理论分析和仿真实验可以得到以下结论:

1) 对于有零序互感的平行线路,区内故障时,线路两侧均符合电感模型,模型误差很小,且快速衰减,保护灵敏度随动作延时而自适应提高。外部故障时,必有一侧不符合电感模型,模型误差很大,且振荡波动,利用带有小延时的模型识别判据,能够可靠

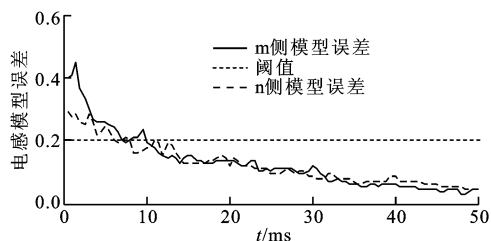
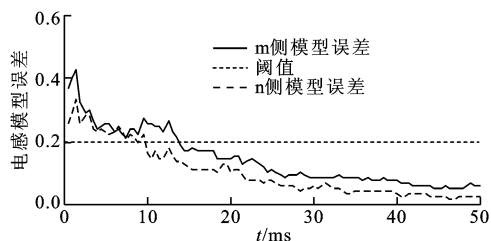
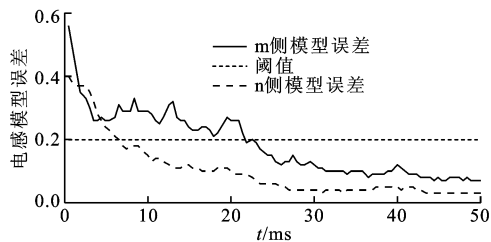
(a)区内 K_1 点故障(b)区内 K_2 点故障(c)区内 K_3 点故障

图7 区内故障时的模型识别判据动作结果

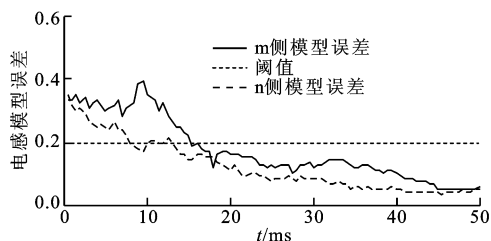
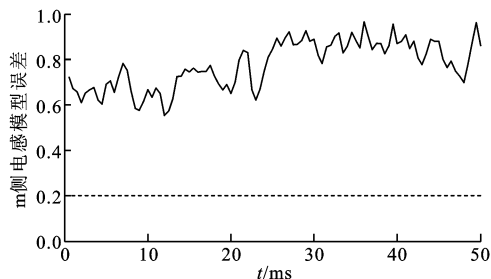
(a)区内 K_1 点故障(b)区外 K_3 点故障

图8 全线平行时的模型识别判据动作结果

闭锁保护。

(2)采用带有小延时的模型识别判据,模型误差计算整定简单,无需和邻线配合,区内故障时可以提高保护灵敏度,区外故障时能可靠闭锁保护。

(3)模型识别判据在时域中计算,利用全部故障暂态信息,无需滤波。

(4)新原理在无零序互感的单回线上工作时,无法判定反方向故障,不能独立工作,需要利用零序反方向元件闭锁模型识别判据。对于无电、强磁的零序互感平行线路,模型识别判据失效,本文方法退化为传统的零序方向元件法。

参考文献:

- [1] 沈国荣. 工频变化量方向继电器原理的研究[J]. 电力系统自动化, 1983, 7(1): 28-38.
SHEN Guorong. Study of principle of power frequency variation directional relay[J]. Automation of Electric Power System, 1983, 7(1): 28-38.
- [2] RADOJEVIC Z M, TERZIĆ A V V, DJURIC M B. Numerical algorithm for overhead lines arcing faults detection and distance and directional protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 31-37.
- [3] 索南加乐, 孟祥来, 陈勇, 等. 基于故障类型的零序方向元件[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 25-30.
SUONAN Jiale, MENG Xianglai, CHEN Yong, et al. A novel zero sequence directional element based on fault type[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 25-30.
- [4] 汪萍, 陈久林. 纵联零序方向保护误动原因分析及其对策[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 122-125.
WANG Ping, CHEN Jiulin. Analysis of longitudinal zero-sequence direction protection misoperation and its countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 122-125.
- [5] 李一泉, 焦邵麟, 张弛, 等. 平行线路纵联零序方向保护安全性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 104-107.
LI Yiquan, JIAO Shaolin, ZHANG Chi, et al. Safety analysis on pilot zero sequence direction relay applied in parallel wrong judgment of zero-sequence directional relay applied in parallel lines[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(6): 104-107.
- [6] 樊占峰, 叶东印, 李瑞生, 等. 平行线路弱电磁模型下零序方向元件改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 100-103.
FAN Zhanfeng, YE Dongyin, LI Ruisheng, et al. Improvement of zero-sequence directional relay for the

parallel line with magnetically strong and electrically weak connection[J]. Automation of Electric Power System,2008,32(17):100-103.

[7] 邵文权,加玛力汗,宋国兵,等. 基于电容参数识别的永久性故障判别方法[J]. 西安交通大学学报,2008,42(6):708-712.

SHAO Wenquan, JIAMA Lihan, SONG Guobing, et al. Permanent fault identification method based on capacitance parameter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(6):708-712.

[8] 索南加乐,王向兵,孟祥来,等. 基于 $R-L$ 模型的参数识别快速方向元件[J]. 西安交通大学学报,2006,40(6):689-693.

SUONAN Jiale, WANG Xiangbing, MENG Xianglai, et al. Quick directional element based on $R-L$ model parameter identification[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2006,40(6):689-693.

[9] 索南加乐,薛晓辉,高峰,等. 小电流接地系统单相接地故障选线的研究[J]. 西安交通大学学报,2008,42(4):472-476.

SUONAN Jiale, XUE Xiaohui, GAO Feng, et al. Fault line selection in non-solid earthed network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(4):472-476.

[10] 索南加乐,陈福锋,齐军,等. 串补线路故障点位置的模型识别方法 [J]. 中国电机工程学报,2005,25(1):66-72.

SUONAN Jiale, CHEN Fufeng, QI Jun, et al. New method for identifying the fault location on series compensated lines based on different fault models[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(1):66-72.

[11] 索南加乐,杨铨,杨忠礼,等. 基于模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化,2008,32(24):30-34.

SUONAN Jiale, YANG Cheng, YANG Zhongli, et al. New type of transmission line pilot protection based on model identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(24):30-34.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 99 页)

[7] 袁江波,单小彪,谢涛,等. 悬臂梁单晶压电发电机的实验[J]. 光学精密工程,2009,17(5):72-76.

YUAN Jiangbo, SHAN Xiaobiao, XIE Tao, et al. Experiment of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure [J]. Optics and Precision Engineering, 2009,17(5):72-76.

[8] 程光明,庞建志,唐可洪,等. 压电陶瓷发电能力测试系统的研制[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(2):367-371.

CHENG Guangming, PANG Jianzhi, TANG Kehong, et al. Development of measuring system for electricity generating capacity of piezoelectric ceramics[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007,37(2):367-371.

[9] 阚君武,唐可洪,王淑云,等. 压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析[J]. 光学精密工程,2008,16(1):71-75.

HAN Junwu, TANG Kehong, WANG Shuyun, et al. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators[J]. Optics and Precision Engineering, 2008,16(1):71-75.

[10] 曲远方. 功能陶瓷的物理性能[M]. 北京:化学工业出版社,2007:183-185.

[11] 胡洪平. 低频压电俘能器研究[D]. 湖北:华中科技大学电气工程学院,2006.

[12] 石胜君,陈维山,刘军考,等. 一种基于纵弯夹心式换能器的直线超声电机[J]. 中国电机工程学报,2007,27(18):30-35.

SHI Shengjun, CHEN Weishan, LIU Junkao, et al. Ultrasonic linear motor using longitudinal and bending multimode bolt-clamped Langevin type transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(18):30-35.

(编辑 杜秀杰)