

模型识别用于继电保护的理論初探

索南加乐¹, 杨 铖¹, 宋国兵¹, 王 柳²

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049; 2. 河南驻马店供电公司, 河南 驻马店 463000)

摘要:通过对被保护元件的区内、区外故障分析, 分别建立区内故障模型及区外故障模型, 采用时域中短数据窗, 分别计算故障实测信号与两种模型的匹配程度, 判别内、外部故障, 从而构成模型识别的保护新原理。物理分析指出, 对与实测故障信号相匹配的故障模型, 计算出的模型方程系数由真实元件参数所决定, 唯一稳恒, 其模型误差恒为零; 对不匹配的故障模型, 计算出的模型系数没有物理意义, 模型误差很大且非平稳波动。数学分析指出, 与实测故障信号相匹配的故障模型方程恒成立, 模型误差为零; 不匹配的故障模型的方程系数则是频率相关的, 模型误差很大。ATP 仿真实验进一步证明了上述分析结果, 利用故障暂态过程中的全频域信息可以实现基于模型识别的保护, 该原理可靠性高、动作速度快。

关键词: 电力系统; 输电线路; 模型识别; 参数识别; 继电保护

Survey on relay protection based on model recognition

SUONAN Jia-le¹, YANG Cheng¹, SONG Guo-bing¹, WANG Liu²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Henan Zhumadian Power Supply Company, Zhumadian 463000, China)

Abstract: Based on the analysis of the characteristics of the external fault and the internal fault of the component, both the external fault model and the internal fault model are established. The internal fault and external fault can be identified through using time domain medium short data window to compute the matching degree between real-time fault signals and the two fault models, which construct a novel protection theory for model identification. The physical analysis indicates that as for the fault model matching the real-time fault signals, the model equation coefficient is determined by real component parameters, and it is unique and steady with steady zero model error; as for the fault model not matching the real-time fault signals, the computed model coefficient is of no physical significance, and the model error is large and unstable. The mathematical analysis shows that the fault model matching the real-time fault signals has a steady valid equation and a zero model error; as for the fault model not matching the real-time fault signals, the equation coefficient is relevant to frequency and the model error is quite large. ATP simulation proves the above analysis results, and shows that relay protection based on model recognition can be realized by using whole frequency domain information in fault transient process. The new principle has high reliability and the operation is fast.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50677051, No.50877061 and No.51037005).

Key words: power system; transmission line; model recognition; parameter distinguishing; relay protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0023-07

0 引言

超(特)高压电网发生故障, 保护装置必须可靠、快速地切除故障元件, 否则就可能带来设备损坏甚至系统稳定性破坏等严重事故^[1]。因此, 提高保护装置的快速性和可靠性是继电保护工作者奋斗的目标。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677051, 50877061); 教育部博士点基金(20070698057); 国家重点基础研究发展计划(2009CB219704); 国家自然科学基金重点项目(51037005)

传统工频电气量的保护原理^[2-5]可靠、灵敏、应用广泛, 发挥了重要作用。由于只利用了有限的故障信息, 工频电气量的保护原理通常依赖于限制性的系统模型假设, 且受故障暂态过程影响较大。单端量保护如距离保护, 以牺牲灵敏度、延时开放来克服暂态超越; 双端量保护如电流差动保护, 动作性能受长线电容电流影响, 需要滤波、计算补偿电容电流, 保护动作速度很难进一步提高。

为提高保护动作速度, 诸多学者相继提出了能量保护^[6-7]、暂态量保护^[8-10]、行波保护与测距^[11-12]等, 这些新原理都在利用故障暂态信息提高保护性能方面做了有益尝试, 尤以行波测距在现场应用较

为成功。

文献[13-16]提出的参数识别保护原理,利用全频域的故障信息计算识别被保护元件的参数,构成保护判据,理论上不受故障暂态的影响,可靠性高、动作速度快。实际由于故障网络的复杂性,准确识别具体元件参数往往归结为一个非线性问题的求解,从而增加了判据计算的复杂度,降低了保护的速率甚至可靠性。

为了避免参数识别可能遇到的非线性问题,基于模型识别的保护原理^[17-20]得到了重视和发展。模型识别保护通过分析被保护元件区内、外故障特征,分别建立合理简化的区内故障模型和区外故障模型,无需求解具体的元件参数,只计算比较模型误差,确认与实测故障信号相匹配的故障模型,从而实现故障判别。传统的故障分量保护通常基于工频,需要滤波或延时躲过暂态影响,而模型识别保护原理采用全频域的故障信号实现保护,无需滤波,故障高频分量更有利于提高保护的灵敏度,模型误差采用时域中的短数据窗计算,保护动作速度更快。另一方面,随着传变特性更好的光电互感器的推广应用,模型识别保护原理对故障信号准确传变的高要求也有望得到解决。

本文重点分析模型识别用于继电保护的可行性,以及利用故障信号进行故障模型识别的本质特征,从而为以后模型识别系列保护原理的改进和实用化提供理论指导。

1 模型识别的原理

基于模型识别的保护原理,首先分析被保护元件的区内、区外故障特征,通过合理简化建立相应的低阶数学模型方程,再分别计算两种模型与实测电气量的匹配程度,从而区分内外部故障。同参数识别保护一样,模型识别也是利用全频域信息在时域中计算判据,实现保护原理的,但模型识别原理不具体求解元件参数,而只需计算模型误差。

对于任一被保护元件,分析其区外故障状态特征,总可以将其看作一个等效的RLC线性网络;同理,分析其区内故障状态特征,也可以将其等效为一个RLC线性网络。两种网络模型如图1所示。

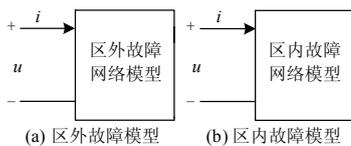


图1 两种故障网络模型

Fig.1 Internal fault model and external fault model

根据电路原理,可得区外故障网络的电路模型方程如式(1):

$$f(u) = g(i) \quad (1)$$

$$\text{其中: } f(u) = \sum_{k=0}^m a_k \frac{d^k u}{dt^k}; \quad g(i) = \sum_{k=0}^n b_k \frac{d^k i}{dt^k}。$$

定义式(1)电路模型方程对应的区外故障模型误差为:

$$E = \frac{|f(u) - g(i)|}{|f(u)| + |g(i)|} \quad (2)$$

同理,分析得到区内故障网络的电路模型方程如式(3):

$$\tilde{f}(u) = \tilde{g}(i) \quad (3)$$

其中: $\tilde{f}(u) = \sum_{k=0}^p \tilde{a}_k \frac{d^k u}{dt^k}; \quad \tilde{g}(i) = \sum_{k=0}^q \tilde{b}_k \frac{d^k i}{dt^k}$ 。且通常区内故障模型方程(3)与区外故障模型方程(1)具有不同的阶数,即 $m \neq p, n \neq q$ 。

定义式(3)电路模型方程对应的区内故障模型误差为:

$$\tilde{E} = \frac{|\tilde{f}(u) - \tilde{g}(i)|}{|\tilde{f}(u)| + |\tilde{g}(i)|} \quad (4)$$

要计算式(2)、(4)的模型误差,需要已知电路模型方程系数 $a_k, b_k, \tilde{a}_k, \tilde{b}_k$,而它们是由实际元件参数(RLC)决定的,有些参数可能无法准确测得,所以实际计算模型误差时,我们采用一定的数据窗实时识别出模型方程的系数,再计算该数据窗所对应的平均模型误差,从而大大增强了保护的自适应性。

利用实测故障信号 (u, i) ,分别计算比较两种模型误差 E, \tilde{E} ,即可得到与故障信号相匹配的故障模型,模型识别保护判据一般如式(5):

$$\text{保护判据: } E > k_{rel} \tilde{E} \quad (5)$$

区内故障时,实测故障信号 (u, i) 与区内故障模型相匹配,计算区内故障模型误差 \tilde{E} 时,识别出的区内故障模型方程各系数均由真实元件参数所决定,是稳恒的,所以区内模型误差 \tilde{E} 恒为零。若以此区内故障时的实测信号 (u, i) 计算区外故障模型误差 E 时,识别出的区外模型方程各系数没有任何物理意义,是频率相关而时变的,模型误差 E 很大。

以下我们针对某一被保护元件区外故障的等效网络(如图2所示),给出其相应的模型方程及模型误差。

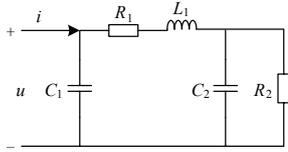


图2 模型实例

Fig.2 Model example

由图2得输入电压、电流满足模型方程式 (6):

$$u = c_1 i + c_2 \frac{du}{dt} + c_3 \frac{di}{dt} + c_4 \frac{d^2 u}{dt^2} + c_5 \frac{d^2 i}{dt^2} + c_6 \frac{d^3 u}{dt^3} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + R_2 \\ -(R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1) \\ L_1 + R_1 R_2 C_2 \\ -(L_1 C_1 + R_1 C_1 R_2 C_2) \\ R_2 C_2 L_1 \\ -R_2 C_2 L_1 C_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

模型误差:

$$E = \frac{|u - c_2 \frac{du}{dt} - c_4 \frac{d^2 u}{dt^2} - c_6 \frac{d^3 u}{dt^3} - c_1 i - c_3 \frac{di}{dt} - c_5 \frac{d^2 i}{dt^2}|}{|u - c_2 \frac{du}{dt} - c_4 \frac{d^2 u}{dt^2} - c_6 \frac{d^3 u}{dt^3}| + |c_1 i + c_3 \frac{di}{dt} + c_5 \frac{d^2 i}{dt^2}|} \quad (8)$$

由式(7)可见, 该网络的模型方程系数是元件参数(RLC)的非线性方程, 参数识别原理无法快速可靠地求解出各元件参数, 而模型识别只需求解线性方程的系数, 通过计算模型误差实现判据, 从而避免了参数识别的非线性问题, 而又保留了参数识别保护的所有优点。

2 模型误差分析

模型识别的保护判据归结为模型误差的计算, 如果某故障模型与实测故障信号相匹配, 计算出的该模型误差很小; 反之, 则很大。

以下假设某被保护元件进行故障分析后, 得到其区内故障模型可等效为一电感模型, 模型方程如式(9)所示; 区外故障模型可等效为一电容模型, 模型方程如式(10)所示。若当前发生区内故障, 则实测到的故障信号(u, i)应满足式(9), 电感模型是当前故障信号的匹配模型, 电容模型则是不匹配模型。

区内故障的电感模型:

$$u = -L \frac{di}{dt} \quad (9)$$

区外故障的电容模型:

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (10)$$

假设电流 $i = I \sin(\omega t + \varphi_i)$, 由于实测故障信号与电感模型相匹配, 可得电压 u 一定满足:

$$u = -L \frac{di}{dt} = -I \omega L \cos(\omega t + \varphi_i) \quad (11)$$

实际计算识别出的电感模型方程系数有 $L = -u / \frac{di}{dt}$, 是由被保护元件的各参数所决定的, 真实存在且唯一稳恒。

区内故障模型误差:

$$\tilde{E} = \frac{|u + L \frac{di}{dt}|}{|u| + |L \frac{di}{dt}|} \equiv 0 \quad (12)$$

计算区外故障模型误差时, 先识别模型方程系数为:

$$C = \frac{i}{\frac{du}{dt}} = \frac{i}{-L \frac{d^2 i}{dt^2}} = \frac{1}{L \omega^2} \quad (13)$$

显然模型方程系数 C 是频率相关的, 则区外故障模型误差为:

$$E = \frac{|i - C \frac{du}{dt}|}{|i| + |C \frac{du}{dt}|} = \frac{|i - \frac{1}{L \omega^2} \frac{du}{dt}|}{|i| + |\frac{1}{L \omega^2} \frac{du}{dt}|} \quad (14)$$

此时, 对与实测故障信号相匹配的故障模型(电感模型), 识别出的模型方程系数(L)是真实存在且唯一稳恒的, 模型误差恒为零; 对于不匹配的故障模型(电容模型), 识别出的模型方程系数是没有物理意义的, 且数值上是频率相关的, 模型误差非平稳而不恒为零。

上述推导中假设了故障信号(u, i)为单一频率分量的周期信号, 实际电网故障时, 故障信号(u, i)频谱极为丰富, 可近似看作无穷多个周期分量信号的叠加。对与实测故障信号相匹配的故障模型, (u, i)中所有分量均满足其模型方程式, 模型误差恒为零; 对于不匹配模型, 由于识别出的模型方程系数是频率相关的, 且(u, i)中各频率分量大小不同、衰减快慢迥异, 计算出的模型误差远大于零且非平稳波动。

3 ATP仿真实验

本文利用 ATP 仿真工具进行模型识别的计算实验。以式 (9)、(10) 所示最简单的电感、电容模型电路为例, 验证各种故障信号下, 模型方程系数和模型误差的计算结果。仿真模型如图 3 所示, 其中 S 为电流信号源, C 为电容参数取为 $C=2.7 \mu\text{F}$ 。

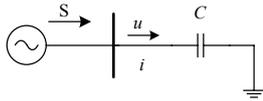


图3 仿真实验模型

Fig.3 Simulation model

$$\text{当取信号源 } S = \sum_{i=1}^3 S_i, \quad S_i = A \sin(\omega_i t + \varphi)$$

时, 进行模型方程系数和误差的计算, 结果如图 4 所示 (注: $A=500$ 、 $\varphi=30^\circ$ 、 $\omega_1=50 \text{ Hz}$ 、 $\omega_2=150 \text{ Hz}$ 、 $\omega_3=300 \text{ Hz}$)。

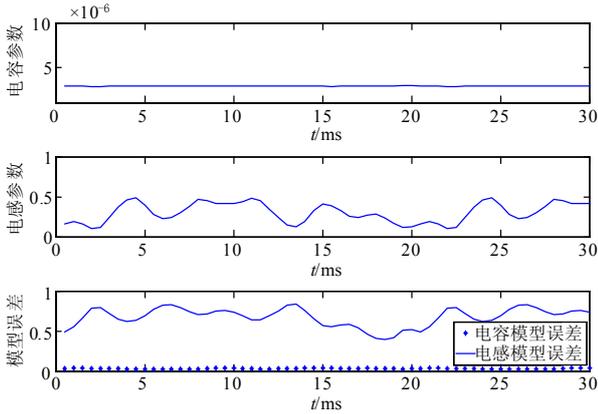


图 4 信号 $S = \sum_{i=1}^3 S_i$ 的识别结果

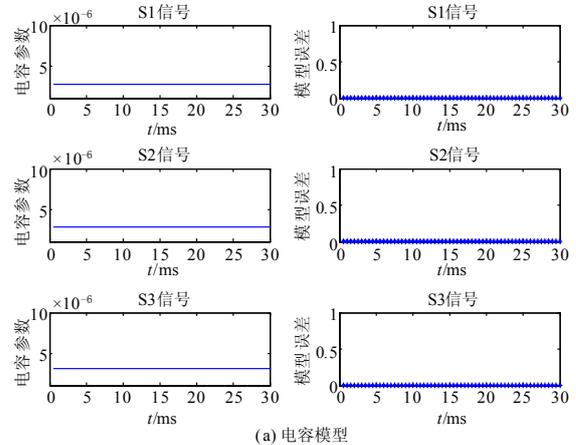
Fig.4 Simulation results with signal of $S = \sum_{i=1}^3 S_i$

由图 4 可以看出, 由于故障信号来源于电容电路模型, 即电容模型为匹配模型, 所以识别出的电容模型系数恒等于真实参数; 而电感模型为不匹配模型, 识别出的电感模型方程系数则在 0.1~0.5 之间波动。电容模型误差恒为 0, 而电感模型误差则在 0.4~0.9 间波动。

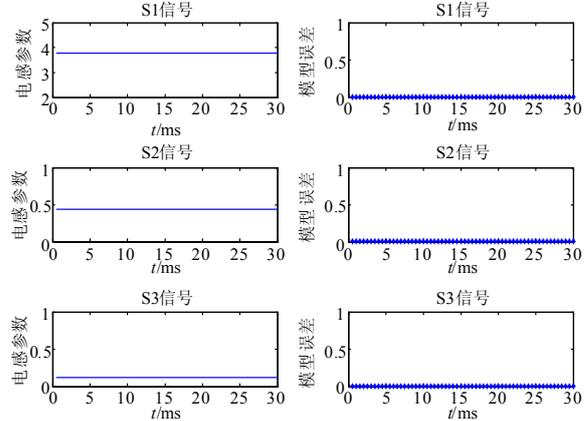
当分别取单一频率信号源 $S=S_i, i=1, 2, 3$ 时, 进行模型方程系数和模型误差的计算, 结果如图 5 所示。

由图 5 可见, 在任一单频率信号下, 电容模型系数都可以准确识别, 且恒等于元件真实值, 电容模型误差计算为零。另一方面, 电感模型误差同样恒为零, 且电感模型参数也识别出一个恒定值, 所以

单一频率信号将无法区分电容、电感模型。但不同频率分量识别出的电感结果差别很大, 频率越高识别出的电感值越小, 这与式 (13) 的结果一致。



(a) 电容模型



(b) 电感模型

图5 信号 $S=S_i, i=1, 2, 3$ 的识别结果

Fig.5 Simulation results with signal of $S=S_i, i=1, 2, 3$

取信号源 $S=S_1+S_i, i=2, 3$ 时, 进行模型系数和模型误差的计算, 并与 $S=S_1+S_2+S_3$ 的实验结果进行比较, 如图 6 所示。

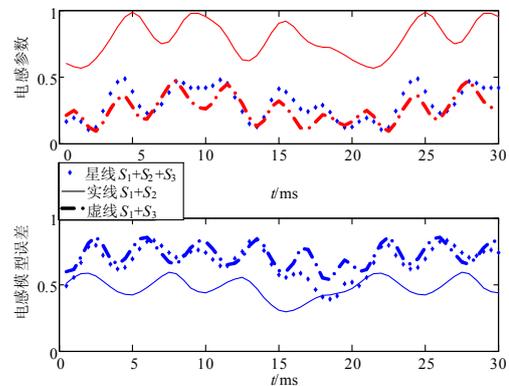


图6 信号 $S=S_1+S_i, i=2, 3$ 的识别结果

Fig.6 Simulation results with signal of $S=S_1+S_i, i=2, 3$

由图6可见, 去掉高频分量S3后, 电感模型误差显著变小, 识别出的电感系数则会变大; 而保留高频分量S3, 仅去掉S2, 电感模型误差以及识别出的电感系数几乎都无变化。可见, 不同于传统保护将高频分量看作干扰, 模型识别保护则将高频分量作为有效信息加以利用, 在高频分量充足的暂态过程中, 模型识别原理的保护将更加灵敏。

在高压电网的故障暂态过程中, 不仅有各次谐波还有衰减非周期分量, 本文采用图7所示的故障来模拟加入非周期分量 S_0 , 其中 $RC=120\text{ ms}$ 。

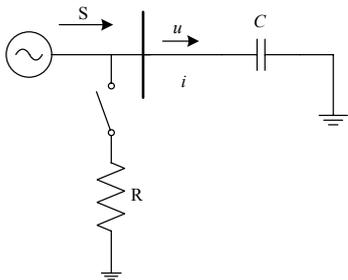


图7 信号 $S = \sum_{i=0}^3 S_i$ 的实验模型

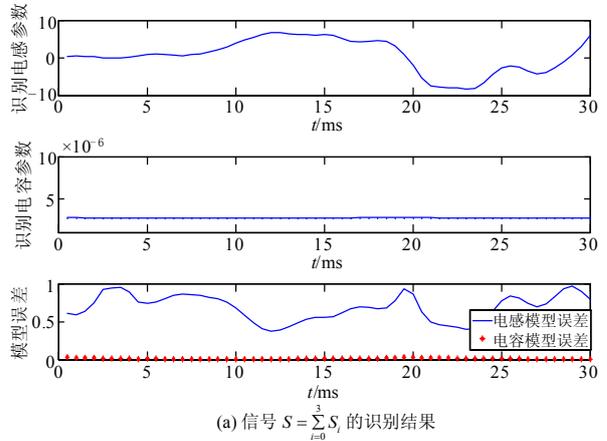
Fig.7 Simulation model of signal $S = \sum_{i=0}^3 S_i$

采用电压、电流突变量信号来进行模型系数的识别和模型误差的计算, 结果如图8所示。

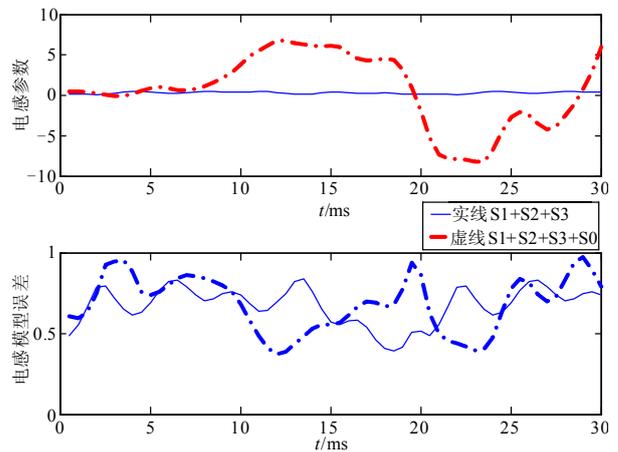
由图8可见, 衰减非周期分量的加入, 对电容模型方程系数的识别及电容模型误差的计算均无影响。但电感参数的波动幅度明显增大, 达到了 $-10\sim 10$; 电感模型误差却变化不大。这是由于电压、电流信号中的非周期分量不是成对出现的, 实际高压电网故障时, 电流中衰减非周期分量很大, 而电压中几乎无非周期分量; 在本例的故障信号中, 电压中有很大的衰减非周期分量而电流中则没有非周期分量, 若以非周期分量进行电感模型系数识别时, 有 $L = -u / \frac{di}{dt} = \frac{-u}{i'}$ 情况, 所以此时 L 的大小不定, 有

较大的波动。而在时域中计算模型误差时, 其大小取决于模型方程系数的时变效应。从数学上说, 时变的模型系数是由于模型方程的非适定造成的; 从物理上说, 这是因为各频率分量决定的模型系数是不同的, 且各频率分量的衰减快慢不同。所以丰富的周期分量会带来模型系数的快速和大幅变化, 然而非周期分量的能量主要集中在低频, 频谱能量相对集中, 所以不会带来模型系数的快速时变, 这也可从图8 (a) 和图4所示的电感参数识别结果对比看出, 图8 (a) 中非周期分量使得电感模型系数变化幅度很大, 但变化缓慢; 图4中的电感系数虽然变化

幅度不大, 但时变效应明显。可见, 非周期分量会对参数识别方法的实际计算精度有所影响, 但对模型识别的保护原理, 影响很小。



(a) 信号 $S = \sum_{i=0}^3 S_i$ 的识别结果



(b) 信号 $S = \sum_{i=0}^3 S_i$ 与 $S = \sum_{i=1}^3 S_i$ 的结果比较

图8 非周期分量信号的实验结果

Fig.8 Simulation results of signal with nonperiodics

4 结论

本文详细阐述了模型识别保护原理的本质思想, 通过理论分析和仿真实验得到以下结论:

1) 通过对被保护元件的故障特征提取, 分析简化后建立可识别的区内故障模型和区外故障模型, 通过计算模型误差识别出与实测故障信号相匹配的故障模型, 从而区分内外部故障。匹配模型的误差恒为零, 不匹配模型的误差很大且非平稳波动。

2) 不匹配模型的误差源于求解出的模型方程系数具有时变性, 这是由于故障信号中不同频率分量定解出的不匹配模型方程的系数是不同的, 又各分量衰减时间常数不同, 从而识别出的不匹配模型的方程系数是非平稳时变的。

3) 模型识别保护原理利用全频域的故障信号

进行故障判别, 几乎不受故障暂态的影响, 避免了参数识别保护的非线性问题却继承了其优点, 保护可靠、动作快速。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 三版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHU Sheng-shi. Principle and technology of high-voltage power grid protection[M]. Third edition. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [2] 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 Guo-rong. Study of principle of power frequency variation directional relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(1): 28-38.
- [3] 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 超高压长线电容电流对差动保护的影响及补偿对策仿真分析[J]. 继电器, 2001, 29(6): 6-9.
LI Yan, CHEN De-shu, ZHANG Zhe, et al. The emulation analysis for the influence of capacitance current of UHV transmission line on differential current protection and compensation countermeasure[J]. Relay, 2001, 29(6): 6-9.
- [4] 文明浩, 陈德树, 尹相根. 超高压长线相量差动保护的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(20): 37-40.
WEN Ming-hao, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen. Study of current phasor differential protection for long UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 37-40.
- [5] 索南加乐, 刘凯, 粟小华, 等. 输电线路综合阻抗联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 36-41.
SUONAN Jia-le, LIU Kai, SU Xiao-hua, et al. Novel transmission line pilot protection based on integrated impedance[J]. Automation of Electric Power Systems 2008, 32(3): 36-41.
- [6] 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 Ben-teng, JIN Hua-feng, LI Ju. Principle and property research of the energy directional protection[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 166-170.
- [7] 何奔腾, 金华烽, 李菊. 能量方向保护的现场和实验[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 171-174.
HE Ben-teng, JIN Hua-feng, LI Ju. Realization and test of the energy directional protection[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 19(3): 171-174.
- [8] 张保会, 哈恒旭, 吕志来. 利用单端量实现超高压输电线路全线速动保护新原理研究(一)—故障暂态过程分析及实现单端暂态量保护的可行性[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(6): 1-5.
ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu, Lü Zhi-lai. Study of non-unit transient-based whole-line high speed protection for EHV transmission line, part 1: fault transient analysis and the feasibility of non-unit transient protection[J]. Electrical Power Automation Equipment, 2001, 21(6): 1-5.
- [9] 张保会, 哈恒旭, 吕志来. 利用单端量实现超高压输电线路全线速动保护新原理研究(二)—保护判据的研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(7): 1-6.
ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu, Lü Zhi-lai. Study of non-unit transient-based whole-line high speed protection for EHV transmission line, part 2: protection criteria[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(7): 1-6.
- [10] 张保会, 哈恒旭, 吕志来. 利用单端量实现超高压输电线路全线速动保护新原理研究(三)—故障选相和尚需研究的问题[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(8): 1-4.
ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu, Lü Zhi-lai. Study of non-unit transient-based whole-line high speed protection for EHV transmission line, part 3: fault phase selection and problems to be studied[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(8): 1-4.
- [11] 陈平, 牛燕雄, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距系统的研制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 81-85.
CHEN Ping, NIU Yan-xiong, XU Bing-yin, et al. Development of modern travelling wave based fault locating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 81-85.
- [12] 董新洲, 葛耀中, 贺家李, 等. 输电线路行波保护的现状和展望[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 56-60.
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, HE Jia-li, et al. Status quo and prospect of travelling waves protection of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 56-60.
- [13] 康小宁, 索南加乐. 基于参数识别的单端电气量频域法故障测距原理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 22-27.
KANG Xiao-ning, SUONAN Jia-le. Frequency domain method of fault location based on parameter identification-using one terminal data[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 22-27.
- [14] 索南加乐, 齐军, 陈福锋, 等. 基于 R-L 模型参数辨识的输电线路准确故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 119-125.
SUONAN Jia-le, QI Jun, CHEN Fu-feng, et al. An accurate fault location algorithm for transmission lines based on R-L model parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 119-125.
- [15] 索南加乐, 焦在滨, 康小宁, 等. Y/△接线变压器漏感

- 参数的识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 84-90.
- SUONAN Jia-le, JIAO Zai-bin, KANG Xiao-ning, et al. Algorithm to identify leakage inductances of power transformer with Y-delta connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13): 84-90.
- [16] 索南加乐, 康小宁, 宋国兵, 等. 基于参数识别的继电保护原理初探[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (1): 14-20.
- SUONAN Jia-le, KANG Xiao-ning, SONG Guo-bing, et al. Survey on relay protection using parameter identification[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2007, 19 (1): 14-20.
- [17] 索南加乐, 杨铖, 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 Jia-le, YANG Cheng, YANG Zhong-li, et al. New type of transmission line pilot protection based on model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (24): 30-34.
- [18] 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 Jia-le, CHEN Fu-feng, 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.
- [19] 索南加乐, 谈树峰, 何世恩, 等. 基于模型识别的串补线路方向元件[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (14): 66-70.
- SUONAN Jia-le, TAN Shu-feng, HE Shi-en, et al. Directional element for series compensated lines based on model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (14): 66-70.
- [20] 康小宁, 杜岩平, 索南加乐, 等. 基于模型误差的自适应方向元件[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (5): 43-47.
- KANG Xiao-ning, DU Yan-ping, SUONAN Jia-le, et al. Adaptive directional element based on model error[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (5): 43-47.

收稿日期: 2009-12-17; 修回日期: 2010-03-12

作者简介:

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;

杨铖 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统输电线路保护. E-mail: xjtu_cyang@yeah.net

(上接第 22 页 continued from page 22)

- [5] 丁明, 韩平平. 小世界电网的连锁故障传播机理分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (18): 6-10.
- DING Ming, HAN Ping-ping. Study of failure spreading mechanism in the small-world power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (18): 6-10.
- [6] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (12): 1-5.
- CAO Yi-jia, CHEN Xiao-gang, SUN Ke. Identification of vulnerability lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (12): 1-5.
- [7] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (10): 20-25.
- DING Ming, HAN Ping-ping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (10): 20-25.
- [8] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于电网状态和结构的综合脆弱评估模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (8): 11-14.
- WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. A new intergrative vulnerability evaluation model to power grid based on running state and structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (8): 11-14.
- [9] 邱晓燕, 邱红兵. 基于潮流计算的电压稳定性指标的比较研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2002, 34 (6): 95-98.
- QIU Xiao-yan, QIU Hong-bing. Comparative study of voltage stability indices based on load flow calculation[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2002, 34 (6): 95-98.
- [10] 刘丽霞, 曹国云, 陈陈. 基于静态电压稳定性指标的等价性研究[J]. 华东电力, 2005, 33 (12): 1-4.
- LIU Li-xia, CAO Guo-yun, CHEN Chen. Equivalent study based on static voltage stability indices[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (12): 1-4.

收稿日期: 2010-01-04; 修回日期: 2010-03-26

作者简介:

魏震波 (1978-), 男, 博士, 从事电力系统稳定与控制及电力市场研究; E-mail: weizhenbo1978@yahoo.com.cn

刘俊勇 (1963-), 男, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统稳定性分析及电力市场。