

基于电流信号包络线故障熵的 超高压输电系统振荡中再故障识别算法

张华¹, 郑涛², 肖仕武², 刘万顺², 黄少锋², 张达³

(1. 北京市电力公司 变电公司, 北京市 西城区 100031;

2. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

3. 山东电力集团公司 超高压输电分公司, 山东省 济南市 250021)

A Recognition Algorithm for Fault Occurred during Oscillation of UHVAC Power Transmission System Based on Fault Entropy of Current Signal Envelops

ZHANG Hua¹, ZHENG Tao², XIAO Shi-wu², LIU Wan-shun², HUANG Shao-feng², ZHANG Da³

(1. Substation Operation Filiale of Beijing Electric Power Company, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control(North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China;

3. UHV Power Transmission Filiale of Shandong Electric Power Corporation, Jinan 250021, Shandong Province, China)

ABSTRACT: To eliminate the impact of UHVAC power transmission system oscillation on distance protection, an approximate algorithm, which uses instantaneous values of currents at three points that differ one another by electric angle of $2\pi/3$ to extract the envelops of three-phase currents, is proposed. On this basis, by use of variation characteristics of fault entropy difference of current envelop of each phase, the fault that occurs even as UHVAC power transmission system fallen into oscillation can be recognized and then the distance protection blocked by swing block circuit can be unblocked in time while above-mentioned fault occurs. Simulation experiments show that the proposed algorithm can reliably prevent misoperation of protection during pure oscillation process and can recognize various faults occurred during power transmission system oscillation fast and effectively. The proposed algorithm is easy to implement and its calculation burden is light, so it is practicable in engineering.

KEY WORDS: swing blocking; distance protection; envelope of current waveform; fault entropy

摘要: 针对超高压输电系统振荡对距离保护的影响, 提出一种用互差 $2\pi/3$ 电角度的三点电流瞬时值提取三相电流包络线的近似算法, 在此基础上利用各相电流包络线故障熵的差

值变化特征来识别输电系统振荡中的再故障情况, 使得距离保护的振荡闭锁装置能够在系统故障时及时开放保护。仿真实验表明该算法在纯振荡情况下可靠不误动, 并且可以快速有效地识别系统振荡中发生的各种故障。该算法实现方便, 计算量小, 具有工程实用价值。

关键词: 振荡闭锁; 距离保护; 电流波形包络线; 故障熵

0 引言

近年来我国超高压输电系统发展迅速, 但由于基础比较薄弱, 仍存在备用容量小、送电距离长、负荷较重、联系薄弱、稳定储备较低等缺陷, 系统发生振荡的可能性依然较大。距离保护受系统振荡的影响较为突出, 高压线路的距离保护普遍采用了振荡闭锁装置。传统的振荡闭锁原则是根据短路故障时出现的不对称分量在短时间内开放保护, 而后闭锁保护, 直到振荡平息并经一定延时才解除闭锁。这种方法可以有效防止保护在振荡中误动, 但若在振荡闭锁时线路发生故障, 距离保护将拒动^[1-10]。

为解决此问题, 国内外学者做了大量研究, 其中较成熟的是基于对称分量的方法, 该方法利用负序、零序故障分量与正序分量的关系构成判据来识别不对称故障, 但存在以下缺点: 1) 当系统两侧

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50277012)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50277012).

摇摆电势的相角差很大(如区内故障时 $\delta=180^\circ$)时保护将被闭锁,只有当 δ 减小时才重新开放,此时保护将延时动作;2)由于振荡中系统频率偏离额定频率,负序分量元件可能产生很大的计算误差。对于振荡中对称故障的识别,目前应用较多的是估计振荡中心电压的方法,但当振荡过程中振荡中心电压降为零时,线路一侧稳态电气量的关系与发生三相短路时完全相同,该方法无法很好地区分振荡与短路。国外保护振荡闭锁的传统方法是测量2个灵敏度不同的阻抗继电器的动作时间,这种方案在失步时间不长或突发振荡时灵敏度不够高,并且存在振荡闭锁期间发生故障时保护拒动的缺陷,达不到快速开放保护的目的^[14-17]。

近年来还有学者尝试使用小波分析^[2]、神经网络、数学形态学、希尔伯特变换^[5]等算法来识别振荡中的再故障^[8-10],但这些算法或计算较复杂,或对硬件的要求较高,在工程中应用还有一定困难。本文采用电流信号包络线故障熵的相间差值构成启动判据,不存在因故障分量消失而使启动元件无法正确工作的情况。文中将通过仿真实验说明该算法的有效性。

1 基于电流信号包络线的振荡中再故障识别方法

1.1 电流信号包络线的提取方法

文献[4]利用希尔伯特变换可以提取电流波形任意时刻的瞬时包络线,其提取包络线的精度与数据窗的长度成正比。在微机保护中需要一定长度的数据窗进行数据的离散化,这势必影响到保护的動作速度;而且算法在积分上存在截断误差,变换后会造或一定程度的波形失真,计算量也相当大。鉴于此本文提出一种利用互差 $2\pi/3$ 电角度的3点电流瞬时值提取三相包络线的方法。

输电系统发生振荡时线路两侧电源频率不相等,线路中的电流是2个电动势分别作用产生的电流之和,即 $i(t)=i_1(t)+i_2(t)$,其中 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 分别表示为

$$i_1(t) = I_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$i_2(t) = I_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (2)$$

式中: f_1 、 f_2 分别为2系统的频率; φ_1 与 φ_2 分别为两电源的初相角; I_1 、 I_2 分别为两系统的电流幅值。设系统两侧电源电势相等,即 $i_1(t)$ 与 $i_2(t)$ 的幅值相等(设为 I),则有

$$i(t) = I_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + I_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) = I \cos[\pi(f_1 - f_2)t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}] \cdot \sin[2\pi(\frac{f_1 + f_2}{2})t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}] \quad (3)$$

系统振荡时三相电流仍然保持对称性,即

$$\begin{cases} i_a(t) = I \cos[\pi(f_1 - f_2)t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}] \cdot \sin[2\pi(\frac{f_1 + f_2}{2})t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}] \\ i_b(t) = I \cos[\pi(f_1 - f_2)t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}] \cdot \sin[2\pi(\frac{f_1 + f_2}{2})t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} - \frac{2\pi}{3}] \\ i_c(t) = I \cos[\pi(f_1 - f_2)t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}] \cdot \sin[2\pi(\frac{f_1 + f_2}{2})t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{2\pi}{3}] \end{cases} \quad (4)$$

令式(4)中的 $I \cos[\pi(f_1 - f_2)t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}] = I_{m(t)}$,

因三相对称电流含有相同的幅值,则式(4)可以等价

$$\begin{cases} i_a(t) = I_{m(t)} \sin[2\pi(\frac{f_1 + f_2}{2})t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}] = I_{m(t)} \sin(\omega_s t + \varphi) \\ i_b(t) = I_{m(t)} \sin[2\pi(\frac{f_1 + f_2}{2})t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} - \frac{2\pi}{3}] = I_{m(t)} \sin(\omega_s t + \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c(t) = I_{m(t)} \sin[2\pi(\frac{f_1 + f_2}{2})t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{2\pi}{3}] = I_{m(t)} \sin(\omega_s t + \varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (5)$$

假定系统振荡频率 ω_s 偏离工频 ω 不很大(这是符合实际运行情况的^[6]),此时式(5)可以表示为

$$i_{a[n]} = I_{m(t)} \sin(\omega_s T_s n + \varphi) \quad (6)$$

$$i_{b[n]} = I_{m(t)} \sin[\omega_s T_s (n - N/3) + \varphi] \quad (7)$$

$$i_{c[n]} = I_{m(t)} \sin[\omega_s T_s (n + N/3) + \varphi] \quad (8)$$

式中: N 表示一个工频周期的采样点数; T_s 为一个采样间隔步长的时间。

系统非故障运行时,同时刻的三相电流对称,且同时刻的三相电流采样值等同于同一相电流电角度间隔为 $2\pi/3$ 的3个采样值。以A相为例,此三点采样值算法中各相电流瞬时值满足

$$i_{a[n]} = i_a \quad (9)$$

$$i_{a[n-N/3]} = i_b \quad (10)$$

$$i_{a[n+N/3]} = i_c \quad (11)$$

则式(6)~(8)变换为

$$i_{a[n-N/3]} = I_{m(t)} \sin[\omega T_S(n - N/3) + \varphi] \quad (12)$$

$$i_{a(n)} = I_{m(t)} \sin(\omega T_S n + \varphi) \quad (13)$$

$$i_{a[n+N/3]} = I_{m(t)} \sin[\omega T_S(n + N/3) + \varphi] \quad (14)$$

将式(12)(14)相加得

$$i_{a[n-N/3]} + i_{a[n+N/3]} = 2I_{m(t)} \sin(\omega T_S n + \varphi) \cos(\omega N T_S / 3) \quad (15)$$

$$\cos(\omega N T_S / 3) = \frac{i_{a[n-N/3]} + i_{a[n+N/3]}}{2i_{a[n]}} \quad (16)$$

由式(12)~(14)计算得到

$$i_{a[n]}^2 - i_{a[n-N/3]} i_{a[n+N/3]} = I_{m(t)}^2 \sin^2(\omega N T_S / 3) \quad (17)$$

由绝对恒等式 $\sin^2(\omega T_S) + \cos^2(\omega T_S) = 1$ 得到

$$I_{m(t)}^2 = \frac{i_{a[n]}^2 - i_{a[n-N/3]} i_{a[n+N/3]}}{1 - \left(\frac{i_{a[n+N/3]} + i_{a[n-N/3]}}{2i_{a[n]}} \right)^2} = \frac{4}{3} (i_{a[n]}^2 - i_{a[n-N/3]} i_{a[n+N/3]}) \quad (18)$$

对于三相对称正弦电流，根据波形轮换对称性可以得到

$$i_a^2 - i_b \cdot i_c = \frac{3}{4} I_{m(t)}^2 \quad (19)$$

$$i_b^2 - i_c \cdot i_a = \frac{3}{4} I_{m(t)}^2 \quad (20)$$

$$i_c^2 - i_a \cdot i_b = \frac{3}{4} I_{m(t)}^2 \quad (21)$$

由式(19)~(21)可以看出：系统正常运行时，利用同时刻三相电流瞬时值求得的包络线数值等同于由一相电流3个采样值求得的包络线数值。由此本文对每相包络线定义为

$$I_{m(t)\phi} = \sqrt{\frac{4}{3} |i_\phi^2(k - \frac{N}{3}) - i_\phi(k) i_\phi(k - \frac{2N}{3})|} \quad (22)$$

其中： ϕ 表示A、B、C三相中的一相； N 为工频周期采样点数； k 为当前采样值时刻。

1.2 基于故障熵的振荡中再故障识别判据

输电系统正常运行时，保护安装处测得的电流信号只有基波分量，三相正弦电流对称，本文提出的各相包络线 $I_{m(t)}$ 近似为直线；当系统发生振荡时，三相电流信号还是对称变化，利用包络算法求得的 $I_{m(t)}$ 正好是其波形幅值的变化趋势。以上2种情况下相间包络线的差值一般很小。

当系统发生故障时，其故障暂态电流中存在大量的谐波分量和非周期分量，改变了原系统的对称性。在不同的故障情况下，各相包络线有不同程度

的突变，明显区别于正常运行和纯振荡的情形，其相间包络线之差较大，可以用来构成识别故障的判据。为提高灵敏度本文提出一种基于故障熵的振荡中再故障识别算法。

熵的概念最早是由克劳修斯在热力学中提出的，用以描述系统的无序态，后被引入多个领域，出现了玻尔兹曼熵、信息熵、概率测度熵等。其中信息熵常被用于较粗略地度量信息^[12]。电力系统的信号作为信息来源，信息的无序程度越高，则熵越大；信息越有规律，其熵值越小。电力系统发生故障时其故障暂态信号使各相信息呈现不同规律的变化，此时可以利用熵的概念提取故障信号进行识别。本文根据信息熵的定义，将电流包络线故障熵定义为

$$I_{\varphi-\gamma}(k) = |I_\varphi(k) \lg(I_\varphi(k)) - I_\gamma(k) \lg(I_\gamma(k))| \quad (23)$$

式中： $\varphi-\gamma$ 代表A-B、B-C或C-A两相电流包络线之差； k 代表当前采样值时刻。

为有效避免负荷电流对振荡中再故障识别的影响，并减弱由于频率偏移产生的不平衡电流，本文采用每隔1/2个工频周期故障熵的两点差分形成新的突变量判据，即

$$A_{\varphi-\gamma}(k) = |I_{\varphi-\gamma}(k) - I_{\varphi-\gamma}(k - N/2)| > A_{\text{set}} \quad (24)$$

在计算数值包络线前需要对采样数据进行归算，归算公式为

$$i_{\phi-g} = i_\phi \frac{I_{\text{aim}}}{I_{mH}} \quad (25)$$

式中： i_ϕ 为原始采样数据； $i_{\phi-g}$ 为归算后数据； I_{mH} 为系统正常运行时电流的额定有效值；本文取归算基准值 $I_{\text{aim}} = 10 \text{ A}$ 。

基于故障熵的振荡中再故障识别判据的特性曲线如图1所示，图中：1为本文的故障熵算法特性曲线；2是相电流包络线之差的特性曲线； $M=10$ 的点为抑制区与放大区的分界点。由图中可看出：当包络线数值小于 M 时为抑制区，在电流包络线过零点附近的较短时间内，由于系统输送功率发生倒方向^[15]而使计算产生误差，故障熵算法有抑制计算误差的功能；当包络线数值大于 M 时为放大区，此

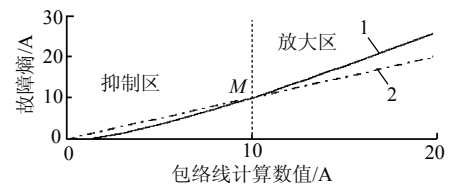


图1 故障熵特性曲线

Fig. 1 The chart of the fault entropy characteristic

区域不存在包络线计算误差,故障熵算法可以提高故障识别的灵敏度。

A_{set} 的整定原则为:当包络线的计算数据大于 $0.75I_{aim}$ 时^[13],判据不受包络线过零附近计算误差的影响,故障熵的放大特性提高故障识别的灵敏度;而当包络线幅值小于 $0.75I_{aim}$ 时,故障熵的抑制特性可靠削弱包络线过零附近产生的误差。门槛值整定为系统不失稳时最大相电流幅值的 0.1~0.2 倍,考虑到暂态过程的计算误差和一定的阈值,乘以系数 k_f 以提高可靠性,则有

$$A_{set} = k_f (0.1 \sim 0.2) I_{aim} \quad (26)$$

为了保证可靠性,如果系统振荡期间判据输出超过整定值并持续一定时间(5 ms),则认为发生了故障,给出保护闭锁解除信号,开放保护一段时间以切除故障。

2 数字仿真分析

2.1 系统模型

以长度为 340 km 的 500 kV 超高压输电线路为例进行数字仿真,线路采用分布参数,系统模型如图 2 所示。保护安装在 M 侧母线出口处,每工频周期采样 36 点,采样频率为 1800 Hz。考虑两侧系统电势角差变化范围 $0^\circ \sim 90^\circ$,接地电阻变化范围 $0 \sim 300 \Omega$,故障类型包括单相接地、两相短路、两相接地、三相接地。系统阻抗为 $Z_{MS}=Z_{NS}=2.374+j187.73 \Omega$,线路分布参数分别为 $R_l=0.027 \Omega/\text{km}$, $X_{lL}=0.2783 \Omega/\text{km}$, $Y_{lC}=3.9 \mu\text{S}/\text{km}$, $R_0=0.195 \Omega/\text{km}$, $X_{0L}=0.6946 \Omega/\text{km}$, $Y_{0C}=2.82 \mu\text{S}/\text{km}$ 。

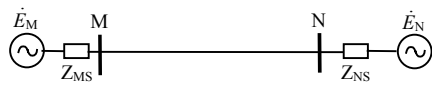


图 2 500 kV 系统仿真模型
Fig. 2 500 kV simulated system

2.2 纯振荡情况

采用文献[5]的模型参数进行了系统起振-加速-减速-趋向平息的全振荡过程仿真,两侧系统功角首次摆开到 180° 的时间为 0.5 s,该最小振荡周期远小于 0.1 s。振荡发生时电流保持三相对称,各相电流包络线基本相同,图 3 给出了该振荡过程的 A、B 相电流波形的包络线及判据结果。可以看出:在振荡过程中,系统振荡电流包络线到过零附近时,新型判别元件的输出值一直很小,没有出现较大突变,判别元件的门槛值按前述整定原则取 $A_{set}=1 \sim 2 \text{ A}$,保证了在振荡闭锁过程中保护不会误启动。

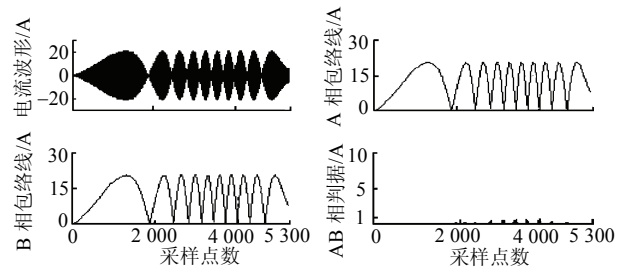


图 3 纯振荡电流波形和故障判据

Fig. 3 Current and starting criteria during system swing

2.3 振荡中再故障的判别

2.3.1 振荡中发生单相接地故障的情况

故障设计在 M、N 之间的线路上, A_{set} 值不变。图 4 给出了 A 相经 300Ω 过渡电阻接地的情况,具体发生在第 1085 采样点时刻,正好位于振荡周期为 0.1 s 的周期内,可以看出 3 个判断量 A_{A-B} 、 A_{B-C} 、 A_{C-A} 的输出值在故障时刻都有明显突变,非故障相 B、C 两相电流包络线之差在故障前后突变不大,判据 A_{A-B} 、 A_{C-A} 的输出明显大于 A_{B-C} 。过渡电阻的存在影响了故障相波形的变化程度,使其与非故障相的差值变小,但从图中可以看出本文算法具有一定的耐过渡电阻能力。

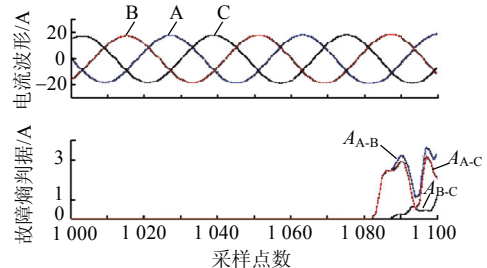


图 4 振荡中 A 相经 300Ω 电阻接地的仿真结果

Fig. 4 Drawing of phase A-to-ground fault with high resistance during system swing

2.3.2 振荡中发生两相接地短路的情况

图 5 给出了 AB 两相发生接地短路故障的波形及各相判据输出,故障发生在第 2920 采样点时刻,两侧系统容量分别为 $S_M=S_N=320 \text{ MVA}$ 。正常运行时,两侧电势相角差取 M 侧超前 N 侧 60° , $A_{set} =$

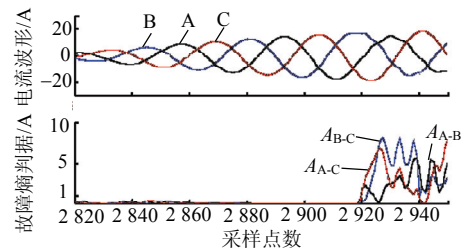


图 5 振荡中 AB 两相接地短路故障的仿真结果

Fig. 5 Drawing of phase AB-to-ground fault during system swing

1~2A。从图中可以看出判断量 A_{A-B} 、 A_{B-C} 、 A_{C-A} 的输出都能达到动作条件，能可靠识别故障。

2.3.3 振荡中发生两相短路的情况

图 6 给出了在相同振荡情况下发生区内 AB 两相短路故障时相应的电流波形及判据输出，故障发生在采样点 3030 处，各相间包络线的差值都很大，判据输出均满足振荡中故障的启动条件，能可靠识别该故障。

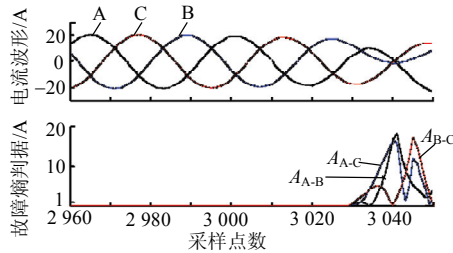


图 6 振荡中 AB 两相短路故障的仿真结果
Fig. 6 Drawing of phase A-B short circuit fault during system swing

2.3.4 振荡中心发生三相短路故障的情况

系统发生振荡时，电流和各点电压幅值的变化速度较慢，而发生短路故障时电流突然增大，电压也突然降低，变化速度很快。振荡情况下，系统电流和各点电压的幅值均呈周期性变化，只有当 $\delta=180^\circ$ 时才出现最严重的现象，并且和正常情况下波形一样(三相完全对称)，包络线近似相同。而在发生短路故障后的瞬间，短路电流和各点电压的值和时间轴不对称，这样造成的包络线奇异跳变严重，很容易用新判据识别，与文献[4]的算法相比灵敏度更高，能可靠识别该故障的特性。

图 7 给出了两侧电源相角摆开 180° 时振荡中心发生三相接地故障的仿真结果，判据门槛值的设定同上。这种故障对电力系统任何判据都是最严重的考验。从图中看出判据在故障处有较大的突变系数输出，能够可靠识别振荡中的特殊故障。

2.4 切机、甩负荷对判据动作行为的影响

振荡功角突变、振荡切机、甩负荷均对振荡波

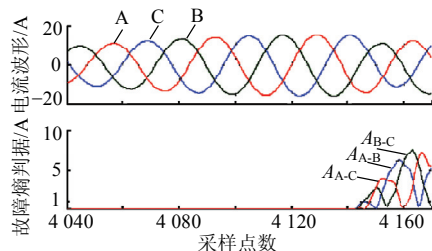


图 7 振荡中心发生三相接地故障的仿真结果
Fig. 7 Drawing of three phase-to-ground fault occurring at swing center

形有一定影响，势必影响到判据的输出结果，文献[7]提到其波形的畸变远小于振荡中再故障对振荡波形带来的奇异性。针对这一问题，工程中往往采用延时 1~2 周期以及合理门设定阈值的方法来保证可靠识别故障，这是符合电力系统实际情况的。

3 结论

本文分析了电力系统振荡与短路故障波形的包络线特点，在此基础上提出一种基于电流信号包络线的振荡中再故障识别方法。该方法比文献[4]所提算法简单，识别能力有所增强，更便于在实际中应用。借助故障熵算法的放大与抑制特性保证了故障识别的可靠性，而且提高了故障识别的灵敏度。

仿真实验结果表明该方案受故障位置、故障初始相角、两侧电源相角差等的影响较小，能可靠识别振荡中心发生三相短路的故障情形，是一种适用于超高压输电系统的新型振荡闭锁启动方案。

参考文献

- [1] 林湘宁, 刘沛, 程时杰. 电力系统振荡中轻微故障识别的小波算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 39-44.
Lin Xiangning, Liu Pei, Cheng Shijie. Research on fault identification during fast power swings with wavelet transform based algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 39-44(in Chinese).
- [2] 熊卫华, 赵光宙. 基于自适应高斯基表示的神经网络在电力系统故障和振荡识别中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 22-26.
Xiong Weihua, Zhao Guangzhou. Application of neural network based on adaptive Gaussian representation in discrimination of fault and oscillation in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 22-26(in Chinese).
- [3] 鲍小鹏, 张举. 应用模糊集理论识别电力系统振荡中不对称故障的新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 25-29.
Bao Xiaopeng, Zhang Ju. A new approach to identify unsymmetrical fault occurred during power system oscillation by use of fuzzy set theory[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 25-29(in Chinese).
- [4] 张艳霞, 刘天绪, 王荣琴. 基于希尔伯特变换的电力系统振荡中再故障的识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 36-41.
Zhang Yanxia, Liu Tianxu, Wang Rongqin. Research on the application of Hilbert transformation in micro-processor based relay protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 36-41(in Chinese).
- [5] 林湘宁, 刘沛, 胡帆. 面向继电保护的全过程系统振荡仿真[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 56-59.
Lin Xiangning, Liu Pei, Hu Fan. Complete power system oscillation for relay protection research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 56-59(in Chinese).
- [6] 章启明, 乐全名, 费铭薇, 等. 超高压电网全过程振荡仿真新模式研究[J]. 继电器, 2006, 34(9): 13-15.
Zhang Qiming, Le Quanming, Fei Mingwei, et al. Research of complete power network oscillation simulation model[J]. Relay, 2006, 34(9): 13-15(in Chinese).
- [7] 邹力, 刘沛, 赵青春. 级联形态梯度变换及其在继电保护中的应

- 用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 113-118.
Zou Li, Liu Pei, Zhao Qingchun. Series multi-resolution morphological gradient and applications in protection relays [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 113-118(in Chinese).
- [8] 董杰, 张举, 王增平, 等. 利用改进递归小波变换区分电力系统振荡与故障[J]. 继电器, 2002, 30(4): 15-18.
Dong Jie, Zhang Ju, Wang Zengping, et al. Distinguish fault from power swing based on improved recursive wavelet transform [J]. Relay, 2002, 30(4): 15-18(in Chinese).
- [9] 余锐, 熊小伏. 互联系统振荡造成保护误动的分析及其对策[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 78-81.
Yu Rui, Xiong Xiaofu. Analysis of maloperation of protective relaying caused by system oscillation and its countermeasure [J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 78-81(in Chinese).
- [10] 焦邵华, 刘万顺, 杨奇逊. 用模糊集理论识别电力系统振荡中短路的研究[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 443-448.
Jiao Shaohua, Liu Wanshun, Yang Qixun. Study on the discrimination between faults and power swings based on fuzzy set[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 443-448(in Chinese).
- [11] 焦邵华, 刘万顺, 张振华. 系统振荡中不对称故障的选相方法[J]. 华北电力大学学报, 1999, 26(2): 6-11.
Jiao Shaohua, Liu Wanshun, Zhang Zhenhua. A new approach to select the fault phase of unbalance fault during power swing [J]. Journal of North China Electric Power University, 1999, 26(2): 6-11(in Chinese).
- [12] 李军, 刘艳, 顾雪平. 基于信息熵的属性离散化算法在暂态稳定评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 36-31.
Li Jun, Liu Yan, Gu Xueping. An entropy-based discretization method applied in transient stability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 36-31(in Chinese).
- [13] 柳焕章, 许庆强. 高性能三相采样值启动元件[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22): 68-73.
Liu Huanzhang, Xu Qingqiang. High performance starting element based on three-phase simultaneous sampling values[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 68-73(in Chinese).
- [14] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 25-75.
- [15] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996: 122-175.
- [16] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 52-175.
- [17] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 64-95.



张华

收稿日期: 2007-11-10.

作者简介:

张华(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微机保护及运动原理、信号处理及其应用等, E-mail: zhanghua411@163.com;

郑涛(1975—), 男, 博士, 讲师, 从事电力系统继电保护、变压器保护与仿真等研究工作;

肖仕武(1974—), 男, 博士, 讲师, 从事电力系统继电保护及电力系统仿真等研究工作;

刘万顺(1941—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 从事微机保护新原理、配电网自动化及电力系统数字仿真等研究工作;

黄少锋(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统微机保护方面的研究工作;

张达(1982—), 男, 本科, 从事超高压设备检修及维护工作。

(编辑 李兰欣)

(上接第61页 continued from page 61)

- [12] Zhang Wen, Liu Yutian, Liu Yuanqi. Optimal var planning in area power system[C]. International Conference on Power System Technology, Kunming, China, 2002.
- [13] Hsiao Y T, Chiang H D. Applying network window schema and a simulated annealing technique to optimal var planning in large-scale power systems[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22(1): 1-8.
- [14] 郑智, 周双喜, 徐飞, 等. 基于多场景和模糊技术的综合无功规划[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 41-45.
Zheng Zhi, Zhou Shuangxi, Xu Fei, et al. Comprehensive reactive power planning based on multi-scenario and fuzzy technique [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 41-45(in Chinese).
- [15] 钟红梅, 任震, 张勇军, 等. 免疫算法及其在电力系统无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 16-19.
Zhong Hongmei, Ren Zhen, Zhang Yongjun, et al. Immune algorithm and its application in power system reactive power optimization [J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 16-19(in Chinese).
- [16] 熊虎岗, 程浩忠, 李宏仲. 基于免疫算的多目标无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 102-108.
Xiong Hugang, Cheng Haozhong, Li Hongzhong. Multi-objective reactive power optimization based on immune algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 102-108(in Chinese).
- [17] Huang Wei, Xu Chunli, Zhang Jianhua, et al. Study of reactive power optimization based on immune genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 6(3): 186-190.
- [18] 张武军, 叶剑锋, 梁伟杰, 等. 基于改进遗传算法的多目标无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 67-71.
Zhang Wujun, Ye Jianfeng, Liang Weijie, et al. Multiple objective reactive power optimization based on improved genetic algorithm [J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 67-71.
- [19] 丁明, 李生虎, 洪梅. 电力系统概率分析中的K均值聚类负荷模型[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 51-54.
Ding Ming, Li Shenghu, Hong Mei. The K-means cluster based load model for power system probabilistic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 51-54(in Chinese).
- [20] 杨秀媛, 董征, 唐宝, 等. 基于模糊聚类分析的无功电压控制分区[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 6-10.
Yang Xiuyuan, Dong Zheng, Tang Bao, et al. Power network partitioning based on fuzzy clustering analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 6-10(in Chinese).



王佳贤

收稿日期: 2007-11-21.

作者简介:

王佳贤(1983—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化规划, E-mail: wangjiaxian1983@126.com;

程浩忠(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统规划、电能质量等教学和科研工作;

胡泽春(1979—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统安全性分析、电压稳定和无功优化。

(编辑 杜宁)