

基于 EEMD 和能量法的谐振接地 配电网故障选线研究*

田书 寿好俊

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 提出一种基于集合经验模态分解(EEMD)的谐振接地配电网暂态量选线新方法。提取故障发生后各线路1/4周期暂态零序电流作为数据窗长度,用EEMD将1/4周期暂态零序电流分解为有限个固有模式函数(IMF)分量和一个剩余分量 r ;将每条线路的IMF分量与原始信号做相关分析,选出与原始信号相关程度最大的前3个IMF分量作为暂态零序电流特征IMF分量,计算特征IMF分量和剩余分量的能量和作为线路的固有模式能量;计算各线路的固有模式能量权重因子,比较能量权重因子的大小选出故障线路。为了判断母线故障,选出能量权重因子最大的前3条线路做进一步比较。该方法利用暂态量,不受消弧线圈影响,可以同时适用于中性点不接地和谐振接地配电网,而且针对故障条件比较苛刻的高阻接地和小角接地故障同样适用。MATLAB仿真验证了方法的正确性。

关键词: 故障选线; EEMD; 固有模式能量; 能量权重因子

中图分类号: TP249 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

Study on fault line selection in resonant earthed distribution network based on EEMD and energy

Tian Shu Shou Haojun

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: A transient line selection method in resonant earthed distribution network based on EEMD is proposed. Extract 1/4 period transient zero sequence current of each line as the data window length, decompose the 1/4 period transient zero sequence current with EEMD into a finite number of intrinsic mode function components IMF and a remaining components r . Do correlation analysis of the IMF component of each line with the original signal, select three IMF component as the characteristic IMF component which their correlation coefficient is the first biggest, calculate characteristic IMF components and residual energy as the inherent mode energy of a line. Calculate intrinsic mode energy weighting coefficient of each line, select the fault line by comparing the size of the energy weighting coefficient. In order to determine the bus fault, choose the first three lines which their energy weighting factor are biggest for further comparison. The method use the transient signal, not influenced by arc suppression coil, applying to the neutral point grounding and resonant grounding distribution network at the same time, can also applying to high resistance grounding fault and small Angle ground fault. MATLAB simulation verify the validity of the method.

Keywords: fault line selection; EEMD; intrinsic mode energy; energy weighting factor

1 引言

我国配电网大部分采用小电流接地方式,包括中性点不接地、经高阻接地和经消弧线圈接地。单相接地故障是发生概率最大的一种故障,由于发生故障时接地点经线路分布电容形成电流流通通路,通路的阻抗很大,因此故障电

流很小,单相接地故障检测比较困难,故障选线问题也是实现配电网自动化的主要障碍,配电网故障选线是一个亟待解决的难题。

目前用于配电网的故障选线方法可以大致分为基于稳态量幅值相角选线和基于小波变换的暂态量选线两大类^[1]。利用零序电流基波分量的幅值相位判据设计的选线

装置,利用稳态零序电流可以连续选线,实际效果很好,但选线装置主要用在中性点不接地系统,对谐振接地系统不适用。然而在发生故障的瞬间有一个短暂的过渡过程,在这一过程中产生的暂态量远远比稳态量故障特征显著,所以利用暂态量进行故障检测可以大大提高灵敏度。谐振系统的消弧线圈是针对基波零序电流设计的,对具有高频振荡衰减特性的暂态零序电流基本没有补偿作用,因此暂态选线不仅适用于中性点不接地配电网,对谐振接地同样适用^[2]。小波变换具有良好的时频分析能力,是暂态量一种理想的分析工具。近年来,很多学者将小波包用于故障特征提取,并取得了良好的效果^[3-8]。但小波变换需要预先选择基函数,分解结果依赖于基函数的选择,而现在基函数的选择没有可靠地理论依据,所以小波变换不是自适应变换,分解结果不一定是最优。

基于以上分析,本文提出一种基于集合经验模态分解(EEMD)的暂态零序电流故障选线方案,既避免了选择小波基函数的问题也避免了利用稳态量的局限性。EEMD 根据暂态零序电流的局部特征,自适应的将暂态信号分解为一系列固有模态函数(IMF)分量和一个剩余分量。通过相关性分析选择 IMF 特征分量,然后计算 IMF 特征分量和剩余分量的能量作为各线路的能量。暂态能量的大小表征了故障线路暂态零序电流是所有非故障线路暂态零序电流和消弧线圈电感电流之和的故障特征,即利用能量的大小判断了故障线路。

2 故障暂态特性

对谐振接地配电网发生单相接地故障后的三相系统进行相模变换,根据故障模网图,可获得单相接地故障的等值电路^[9]如图 1 所示。

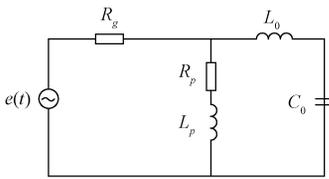


图 1 单相接地故障暂态等值电路

由图 1 可得流过故障点的零序暂态电流 i_0 ^[9]为:

$$i_0 = i_{0L} + i_{0C} = I_{Lm} \cos \varphi e^{-\delta t} +$$

$$I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \cos \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t} \quad (1)$$

式中: i_{0L} 为零序感性暂态电流分量, i_{0C} 为零序容性暂态电流分量, ω_f 、 δ 分别为容性电流的自由振荡角频率和衰减系数, I_{Lm} 、 I_{Cm} 分别为感性、容性电流的幅值, ω 为工频角频率, τ_L 为感性电流的时间常数, φ 为发生故障时的初相角。

振荡角频率 ω_f 为:

$$\omega_f = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0} - \frac{(3R_g + R_0)^2}{4L_0^2}} \quad (2)$$

式中: L_0 、 C_0 、 R_0 分别为线路的零序电感、电容和电阻, R_g 为接地点过渡阻抗。

由式(1)、(2)可知接地点的暂态零序电流为暂态电容电流与暂态电感电流叠加而成,暂态电容电流是振荡衰减的,暂态电感电流是衰减直流分量,由于两者频率相差很大不会相互补偿,衰减直流分量不会影响暂态电容电流的极性,但是会增大暂态电容电流的幅值,两者的含量跟故障初始相角有关。由分析可知在暂态过程中流过故障线路首端的暂态电流是所有非故障线路暂态电容电流和衰减电感直流分量之和,非故障线路暂态电流是本身的暂态电容电流,两者极性相反,消弧线圈不会影响故障暂态特征。

3 集合经验模态分解

1998年,黄锬提出了希尔伯特黄变换(HHT)。HHT的核心就是经验模态分解(EMD),EMD 能将包含不同振荡模式的复杂信号分解成不同频率下的振荡模式,不同的振荡模式也即表征本征的 IMF。为了得到有物理意义的瞬时频率,IMF 必须满足两个条件:1)在 IMF 整个序列中极值点与零点的个数相等或者最多相差一个;2)在任意时刻上下包络线的均值为零。

3.1 EMD

EMD 分解过程如下。

1)求取原始信号 $x(t)$ 的所有极值点,用插值法将所有极大值点和极小值点连接起来,即得到原始信号的上下包络线,并计算上下包络线的均值为 $m(t)$,这里用 3 次样条插值函数拟合。

2)从 $x(t)$ 中减去 $m(t)$,得到:

$$h_1(t) = x(t) - m(t) \quad (3)$$

判断 $h_1(t)$ 是否满足 IMF 的条件,如果不满足,则将 $h_1(t)$ 作为原始信号重复上述步骤,直到 $h_1(t)$ 成为一个 IMF,记为:

$$c_1(t) = h_1(t) \quad (4)$$

3)从 $x(t)$ 中减去第一个 IMF 分量 $c_1(t)$,得到剩余分量 $r_1(t)$,即:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (5)$$

判断 $r_1(t)$ 是否为单调函数或者常数,如果是则分解过程停止,如果不是则将 $r_1(t)$ 作为新的原始信号重复以上步骤,直到剩余分量满足停止准则停止,得到的 n 个 IMF 分量,记为 $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$,剩余分量记为 $r_n(t)$ 。

这样原始信号 $x(t)$ 就分解为有限个 IMF 分量和一个剩余分量的和,即:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (6)$$

3.2 EEMD

为了解决 EMD 的频率混叠缺陷^[10],黄锬等人在 EMD

的基础上提出了集合经验模态分解(EEMD)。EEMD通过在原始信号 $x(t)$ 中添加辅助白噪声来消除 $x(t)$ 序列的间断现象,有效抑制分解过程中的噪声干扰。EEMD分解过程^[11-13]如下:

1)在原始信号 $x(t)$ 中添加随机白噪声 $n_m(t)$ 序列,得到

$$x_m(t) = \overline{x(t)} + n_m(t) \quad (7)$$

2)将 $x_m(t)$ 用EMD分解成 n 个IMF分量 $c_{i,m}(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 和一个剩余分量 $r_{n,m}(t)$ 。

3)重复步骤1)和2),依次得到 M 组IMF分量和剩余分量。

4)计算 M 组IMF分量和剩余分量的均值,得到最后的EEMD分解结果为:

$$c_i(t) = \frac{\sum_{m=1}^M c_{i,m}(t)}{M}$$

$$r_n(t) = \frac{\sum_{m=1}^M r_{n,m}(t)}{M} \quad (8)$$

4 固有模态函数能量

设一个信号 $x(t)$ 经EEMD分解为 m 个IMF分量和一个剩余分量,其本质是根据信号的特征自适应的将信号 $x(t)$ 完整的分解成不同尺度频率分量,根据Parseval定理^[14],分解后各频率分量的能量和跟原始信号 $x(t)$ 在时域上的能量相等。本文提出IMF分量和剩余分量的能量来选线。

假设谐振接地配电网有 N 条出线,则线路 L_i 的暂态零序电流经EEMD分解为 m 个IMF分量和一个剩余分量。则线路 L_i 在 j 尺度下的能量为

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^N c_{ij}^2(k) \quad (9)$$

$$E_{ir} = \sum_{k=1}^N r_i^2(k) \quad (10)$$

则线路 L_i 的总能量为:

$$E_i = \sum_{j=1}^m E_{ij} + E_{ir} \quad (11)$$

配电网 N 条出线的能量总和为:

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \quad (12)$$

线路 L_i 的能量权重因子为:

$$P_i = \frac{E_i}{E} \quad (13)$$

当谐振接地配电网发生单相接地故障时,故障线路的能量权重因子比非故障线路大很多,当母线接地时,各条线路能量权重因子相差不大,根据能量权重因子的大小可以判断故障线路。

5 选线步骤

基于EEMD暂态能量选线步骤如下。

1)读取系统零序电压,判断系统零序电压是否超过20%的系统额定电压,如果超过则系统发生接地故障。

2)如果系统发生单相接地故障,读取各条线路故障后1/4周期的暂态零序电流作为数据窗长度。

3)用EEMD将每条线路的1/4周期的暂态零序电流分解成有限个IMF分量和一个剩余分量,将每个IMF分量分别于原始信号做相关性分析,选择与原始信号相关程度最大的前3个高频IMF分量为特征IMF分量。计算每条线路特征IMF分量和剩余分量的能量和作为每条线路的能量。

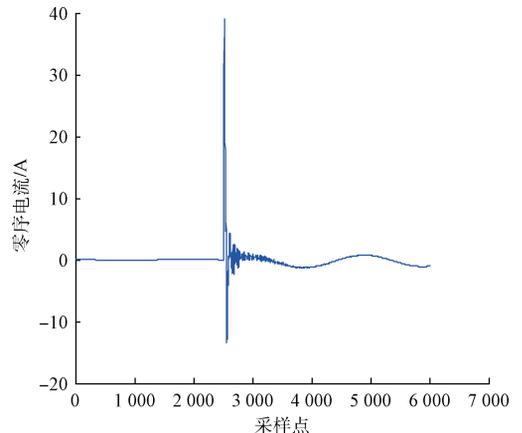
4)计算每条线路的能量权重因子,选择能量权重因子最大的前3条线路 L_a 、 L_b 和 L_c ,对应的能量权重因子为 P_a 、 P_b 和 P_c ,判断 $P_a > P_b + P_c$ 是否成立,如果成立则判断线路 L_a 为故障线路,如果不成立则判断为母线故障。最后发出报警信号,同时显示故障线路编号。

6 仿真分析

本文以谐振接地系统为例,在MATLAB中建立35 kV谐振接地仿真模型。仿真系统带有4条线路,线路长度分别为: $L_1 = 10$ km, $L_2 = 13$ km, $L_3 = 20$ km, $L_4 = 15$ km。线路正序参数为: $R_1 = 0.17$ Ω /km, $L_1 = 1.21$ mH/km, $C_1 = 9.697$ nF/km;线路零序参数为: $R_0 = 0.23$ Ω /km, $L_0 = 5.48$ mH/km, $C_0 = 6$ nF/km。消弧线圈采用8%过补偿方式。

仿真采样频率为 $f_s = 100$ kHz, EEMD分解过程中添加的白噪声的标准差为0.02,添加噪声的循环次数为100。设置线路 L_4 中间位置(距离母线7 km处)经过渡电阻 $R_g = 100$ Ω 发生A相接地故障,故障初相角 $\varphi = 90^\circ$,仿真结果如图2所示。图2(a)是发生单相接地时故障线路 L_4 零序电流波形,图2(b)是故障线路 L_4 1/4周期暂态零序电流波形。

图3是采用EEMD对图2(b)中故障线路1/4周期暂态零序电流分解结果,由图中可以看出故障线路1/4周期暂态零序电流被分解为7个IMF分量和一个剩余分量,可以看出IMF分量的频率依次减小,剩余分量是原始信号的趋势。



(a) L_4 线路故障零序电流

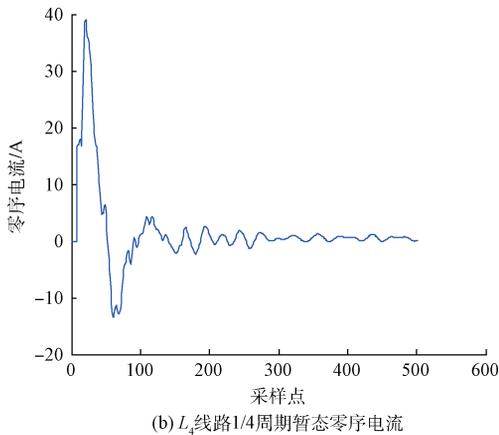


图 2 故障线路暂态零序电流

将分解得到的 7 个 IMF 分量分别与 L_4 线路 1/4 周期暂态零序电流做相关性分析,得到相关程度最大的分量为前 3 个高频分量,计算前 3 个高频分量与剩余分量的能量和,计算各线路的能量权重因子结果如图 4 所示。

图 4 中各线路的能量权重因子分别为: $P_1=0.0461$ 、 $P_2=0.1178$ 、 $P_3=0.2490$ 、 $P_4=0.5871$,由 $P_4 > P_2 + P_3$ 可知,线路 L_4 的能量权重因子远远大于其他线路,可以判断线路 L_4 为故障线路。

由第 1 节中故障暂态特性分析可知,故障发生时电压初相角、接地点过渡电阻和接地点位置对故障暂态信息的影响很大,设置不同的故障条件对系统各条线路的能量权重因子进行仿真分析。

1) 改变故障初相角,仿真分析各线路能量分布。设置

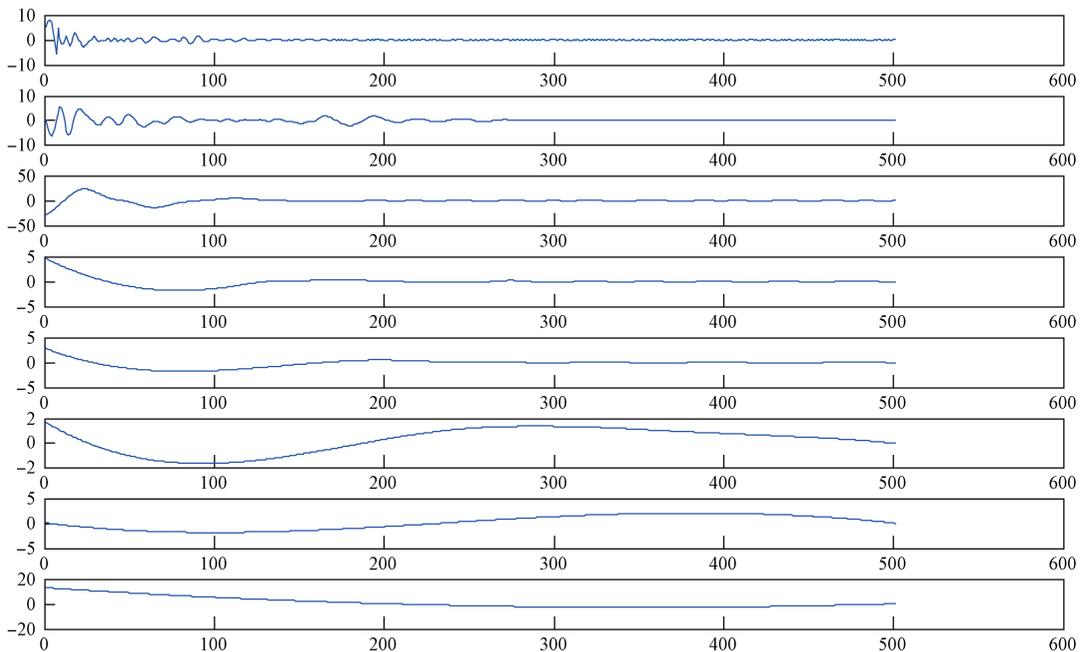
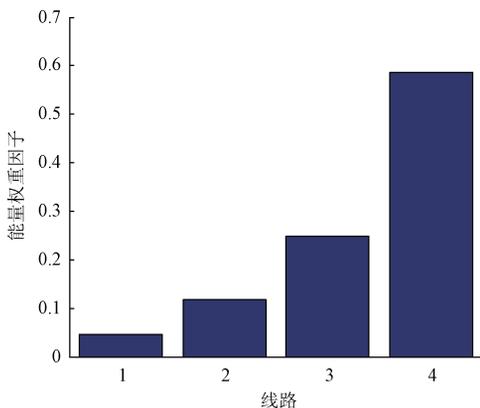
图 3 L_4 线路 1/4 周期暂态零序电流 EEMD 分解结果

图 4 线路能量权重因子

在线路 L_4 中间位置发生单相接地故障,过渡电阻为 100Ω ,设置不同的故障初相角 φ ,分别在 0° 、 30° 、 60° 和 90° 四种情况下进行仿真,各线路能量权重因子仿真结果如表 1 所示。

2) 改变接地点过渡电阻,仿真分析各线路能量分布。设置在线路 L_4 中间位置发生单相接地故障,故障初相角为 90° ,设置不同的过渡电阻 R_g ,分别取 10 、 500 、 $1\ 000$ 和 $5\ 000 \Omega$ 五种情况进行仿真,各线路能量权重因子仿真结果如表 2 所示。

3) 改变故障点位置,仿真分析各线路能量分布。设置线路 L_4 在故障初相角为 90° 时发生单相接地故障,过渡电阻为 100Ω ,设置故障点分别位于线路的起始、中间、末端以及母线不同位置进行仿真,各线路能量权重因子仿真结果如表 3 所示。

表 1 不同故障初相角的选线结果

故障线路	位置	R_g/Ω	$\varphi/(\circ)$	能量权重因子	$P_a > P_b + P_c$ 是否成立	选线结果
L_4	中间	100	0	[0.012 4, 0.020 6, 0.049 4, 0.917 7]	是	正确
			30	[0.020 9, 0.040 6, 0.085 1, 0.847 4]	是	正确
			60	[0.035 5, 0.073 5, 0.207 5, 0.683 6]	是	正确
			90	[0.046 2, 0.117 9, 0.241 9, 0.594 1]	是	正确

表 2 不同过渡电阻的选线结果

故障线路	位置	$\varphi/(\circ)$	R_g/Ω	能量权重因子	$P_a > P_b + P_c$ 是否成立	选线结果
L_4	中间	90	10	[0.041 8, 0.080 8, 0.167 9, 0.709 5]	是	正确
			500	[0.051 5, 0.128 6, 0.241 1, 0.578 7]	是	正确
			1000	[0.069 7, 0.130 0, 0.220 5, 0.579 9]	是	正确
			5000	[0.030 4, 0.108 8, 0.161 0, 0.699 9]	是	正确

表 3 不同故障位置的选线结果

故障线路	$\varphi/(\circ)$	R_g/Ω	位置	能量权重因子	$P_a > P_b + P_c$ 是否成立	选线结果
L_4	90	100	首端	[0.0545, 0.1379, 0.2829, 0.5247]	是	正确
			中间	[0.0455, 0.1197, 0.2483, 0.5864]	是	正确
			末端	[0.0793, 0.1216, 0.2302, 0.6836]	是	正确
母线				[0.1563, 0.2381, 0.3494, 0.2562]	否	正确

表 1~3 中的 P_a 、 P_b 和 P_c 分别是能量权重因子最大的前 3 条线路对应的能量权重因子,如果 $P_a > P_b + P_c$ 成立,则说明有一条线路的能量远大于其他线路,则可以判断 P_a 对应的线路为故障线路,如果 $P_a > P_b + P_c$ 不成立,则说明每条线路的能量都相差不大,则判断为母线故障。如表 3 中母线故障, $P_3 = 0.3494$, $P_2 + P_4 = 0.2381 + 0.2562 = 0.4943$, 则 $P_3 < P_2 + P_4$, 则判断为母线故障,选线正确。如表 1 中线路 L_4 发生 $\varphi=0^\circ$ 的小角故障,表 2 中发生 $R_g=5\ 000\ \Omega$ 的高阻故障,都可以准确选线,而且灵敏度很高。

7 结 语

本文分析了谐振接地配电网发生单相接地故障后的暂态特性,知道在短暂的过渡过程中消弧线圈不仅不能补偿暂态电容电流而且消弧线圈产生的电感直流分量还会增大故障线路暂态电流的幅值,流过故障线路的暂态电流为全系统健全线路的暂态电容电流和消弧线圈暂态电感电流之和,流过健全线路的暂态电流为本身对地电容电流,而且故障初相角、过渡电阻和位置等故障条件对故障暂态信息影响很大。采用 EEMD 自适应的将各线路暂态电流分解为有限个 IMF 分量和一个剩余分量,避免了小波变换选择基函数的缺陷。根据 Parseval 定理,定义了线路的固有模态能量和能量权重因子,根据权重因子的大小选线。仿真表明该方法不受故障时刻、过渡电阻和接地点位置的影响,小角故障和高阻故障也能可靠准确选线。

参 考 文 献

- [1] 张淑清,马跃,李盼,等. 基于改进的广义谐波小波包分解和混沌振子的小电流接地系统故障选线[J]. 电工技术学报,2015,30(3):13-20.
- [2] 刘谋海,方涛,姜运,等. 基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(2):74-79.
- [3] 李明爱,马建勇,杨金福. 基于小波包和熵准则的最优频段提取方法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(8):1721-1728.
- [4] 王玉田,张淑清,董璇,等. 一种改进的广义谐波小波包分解算法及在信号特征提取中的应用[J]. 燕山大学学报,2013,37(4):358-365.
- [5] 张伟刚,张保会,胡海松,等. 应用小波包分析实现配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化,2009,33(23):60-63.
- [6] 刘渝根,王建南,马晋佩,等. 结合小波包变换和 5 次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J]. 高电压技术,2015,41(5):1519-1525.
- [7] 吴道,纪国宜. 基于谐波小波包理论检测微弱信号的研究[J]. 电子测量技术,2010,33(6):1-3.
- [8] 石明江,罗仁泽,付元华. 小波和能量特征提取的旋转机械故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(8):1114-1120.
- [9] 王清亮. 补偿接地电网的暂态量选线保护研究[D].

西安:西安科技大学,2010.

- [10] 茆美琴,龚文剑,张榴晨,等. 基于 EEMD-SVM 方法的光伏电站短期出力预测[J]. 中国电机工程学报, 2013,33(34):17-24.
- [11] 朱宁辉,白晓民,董伟杰. 基于 EEMD 的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):92-98.
- [12] 陈利萍,张建文,张伦健,等. EEMD 在配电网电能质量扰动检测中的应用[J]. 电测与仪表,2013,50(1):32-37.
- [13] 姚林朋. 基于集合经验模态分解的局部放电信号的窄

带干扰抑制[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(22):133-139.

- [14] 王清亮,杜辉,赵艺杰,等. 基于固有模态能量的暂态量选线方法[J]. 工矿自动化,2013,39(9):92-95.

作者简介

田书,1963 年出生,教授,硕士研究生导师,主要研究领域为电力系统运行与控制、微机继电保护。

寿好俊,1989 年出生,硕士研究生,主要研究方向为电力系统故障检测。

(上接第 148 页)

- [7] 曾剑,周剑扬. 基于 LabVIEW 的 SFP 光模块测试平台的设计与实现[J]. 测控技术与仪器仪表,2011(4):67-73.
- [8] 兰羽. 具有温度补偿功能的超声波测距系统设计[J]. 电子测量技术,2013,36(2):85-87.
- [9] 章辉,叶建芳. 基于 MSComm 控件串口通信的实现[J]. 电子测量技术,2011,34(8):126-129.
- [10] 赵凯. PIC 单片机与 PC 机异步串行通信的设计[J]. 武汉理工大学学报信息与管理工程版,2006,28(11):142-145.

- [11] 刘金根. 基于 ARM 的射频光模块监测系统的设计与实现[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

作者简介

于志翔,1988 年出生,助理工程师,电子与通信工程专业,硕士研究生,主要研究方向为气象卫星地面接收系统设计及卫星遥感应用。

E-mail:tomato1118yzx@sina.com

(上接第 175 页)

作者简介

孟祥忠,1964 年出生,博士,教授,智能控制理论与应用、电力系统监控与保护技术。

王振起,1988 年出生,硕士研究生,研究方向为检测技

术与自动化装置。

E-mail:wzqnihao@163.com

林存海,1989 年出生,硕士研究生,研究方向为控制科学与工程。