

基于小波包变换的电机定子故障特征提取方法

邱赤东, 薛征宇, 邵萍波, 任光

(大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对感应电机定子故障的特征频率处在低频段, 小波分解系数易受电机负荷波动影响的问题, 提出一种采用希尔伯特变换对信号进行预处理, 利用小波包分解来实现定子故障特征的提取方法。通过小波包分解, 使相应分解子频段能始终覆盖随电机转差率以及供电电源频率变化的故障特征频率。增加小波时域波形的波峰数, 减少了子频段间的频域混叠及频谱泄漏现象。对原始信号进行希尔伯特变换的预处理, 降低了电机负荷波动对分解系数的影响; 采用子频段节点重构系数的均方根值变化率作为故障特征指标。通过对实测故障数据的应用, 利用上述方法可以有效地识别出电机的定子故障。

关键词: 感应电机; 小波包变换; 希尔伯特变换; 电流特征分析法

A feature extraction method for motor stator fault based on wavelet packets transform

QIU Chi-dong, XUE Zheng-yu, SHAO Ping-bo, REN Guang

(College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Wavelet coefficient is disturbed by motor load fluctuation, because eigenfrequencies of motor stator fault lie in lower frequency bands. A feature extraction method for stator fault is introduced based on Hilbert transform and wavelet packets transform. Selecting the fitting decomposition, the decomposition frequency bands always cover the motor stator fault eigenfrequencies varied along with the slide and power frequency. By increasing crests of wavelet, both wavelet overlap and spectrum leak between the adjacent frequency bands are decreased. Aiming at reducing the side effects of the various decompose coefficient caused by load fluctuation, the process method for current signal based on Hilbert transform is proved to be effective. The motor fault eigenvalues are obtained by the mean-squared root method based on reconstructed node coefficients. Under the laboratory condition, an artificial motor fault experiment is conducted, and the data are recorded. Through applying the proposed method to the recorded data, the motor stator faults can be effectively identified.

Key words: induction motors; wavelet packets transform; Hilbert transform; motor current signature analysis

中图分类号: TM341 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0052-05

0 引言

感应电机是船舶动力及电力系统的重要支撑设备。定子故障是感应电机经常出现的故障类型, 其出现几率占电机总发生故障的 37%^[1], 而且是船舶管理人员唯一没有能力进行现场维修的故障类型, 一般需要到港后由专业厂家修理。由于船舶电网是低压电网 (380 V), 且电机的制造工艺要求高于陆地电机, 所以, 通常在定子故障出现时, 还可以运行一段时间, 在这段潜伏期内, 准确地发现定子故障及其严重程度, 通过及时安排靠港期间的修理,

可以确保船舶航行的安全。

基于电流特征分析 (Motor Current Signature Analysis) 的方法将电机的常见故障与定子电流的频率特征量建立了函数关系。定子电流的频率特征量与匝间短路故障之间的函数关系如式 (1) 所示^[2]:

$$f_n = f_1 [n(1-s)/p \pm k] \quad (1)$$

式中: f_n 为绕组匝间短路的特征频率; f_1 为供电电源频率; $n = 1, 2, 3, \dots$; $k = 1, 3, 5, \dots$; p 为极对数; s 为转差率。

针对定子电流特征频率所携带的故障信息, 目前主要有两类处理方法: 频谱分析^[3]和小波变换^[4]。基于 FFT 的频谱分析技术在频域内相对于小波技术而言具有更高的分辨率。但由式 (1) 可知, 定子故障特征频率会随着转差率 S 以及船舶供电电源频率的

基金项目: 高等学校博士学科点科研基金项目 (20030151005); 辽宁省教育厅科研项目 (2009B033)

变化而发生偏移。

而小波分解子频段的频率分析范围覆盖一定的频率段, 通过选择适当的采样频率和小波包分解的层数, 可使小波子频段的频率分析范围始终覆盖住某个特征频率。另外, 在船舶实际采集的电机定子电流中往往还包含有较强的白噪声信号, 白噪声的小波变换模随尺度的增加而平均减小, 且其平均密度亦随尺度增加而减小^[5], 因此, 小波变换抗白噪声干扰的能力也优于 FFT 方法。

1 电机定子故障特征提取方法

设原始信号的样本点数为 N , 采样频率为 f_s , 按照奈奎斯特采样定律, 信号的最大分析频率 $f = f_s / 2$, 则经小波包分解至第 j 层后, 可产生 2^j 个子频段^[6], 第 j 层的每个小波子频段的频段宽度 $\Delta f = f / 2^j$, 第 j 层的第 i 个子频段的起始频率为 $f_{ji} = (i-1)\Delta f$ 。

如果假设 $S=0$, 由式 (1) 可知, 定子故障的特征频率从 25 Hz 一直到 400 Hz, 且相互之间相隔 25 Hz; 考虑到船舶电机的实际运行情况: 空载时的转差率 S 在 0.005 以下; 满载时的转差率 S 在 0.06 以下。则实际的故障特征频率有几赫兹甚至十几赫兹的负偏差。如果将原始信号以 25 Hz 的子频段宽度展开, 则每个子频段将始终覆盖住一个特征频率点, 并且使得特征频率落在小波包子频段的中间, 从而可以对定子故障的特征频率实现有效的提取。

由于子频段宽度 Δf 取值为 25 Hz, 考虑到电机其他类型故障对应的最大特征频率为 1 425 Hz。如果取采样频率 $f_s=3\ 200$ Hz; 则信号的最大分析频率 $f=1\ 600$ Hz; 分解层数 $j=6$ 。

信号的小波包分解将信号的频带由低到高分成不同的子频段; 文献[7]介绍由于受小波母函数平移系列展开规则的影响, 应用小波包进行分解的过程中, 在第二层开始就出现小波包分解节点编号交错现象, 按照文中提供的方法, 可以推导出在进行 6 层小波包分解时, 频率由低到高的前 16 个子频段的排列顺序为: 0、1、3、2、6、7、5、4、12、13、15、14、10、11、9、8。

1.1 分解子频段间混叠及频谱泄漏的抑制

小波变换中小波函数作为一种恒 Q 滤波器, 由于不能同时满足信号分析中的 Heisenberg 不确定性原理和 Gabor 理论, 从而导致频带重叠现象, 进而发生了小波混叠。由于能量不集中, 某一频带的能量将扩散到另一频带中, 又将产生频谱泄漏现象。文献[8]采用基于频域内插的抗混叠 Shannon 小波包

变换算法来消除谐波检测中的小波混叠现象, 取得了较好的检测效果。文献[9]通过增加 Morlet 小波函数的时域波形波峰数, 减小 Morlet 小波函数的频域带宽, 从而减轻采用 Morlet 小波函数进行连续小波变换时的频域混叠现象。

实际上, 增加小波函数波峰数的方法不仅可以较好地抑制频域混叠现象, 而且对于频谱泄漏也能较好地抑制。本文针对 Daubechies 小波函数, 通过增加小波函数尺度因子的方式, 来增加小波函数时域的波峰数, 从而使其对应的频域带宽变窄。利用该方法对频谱泄漏最严重的第四个小波包基函数的频域特性进行频谱分析及对比, 如图 1 所示。

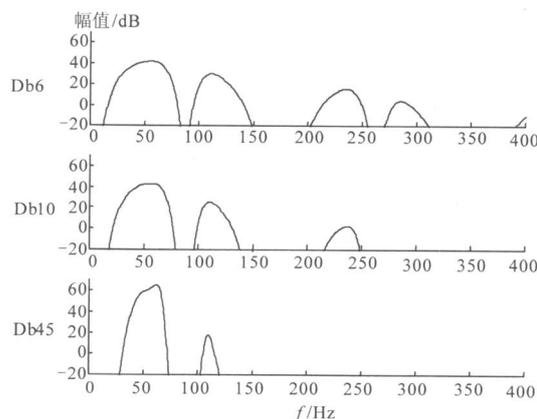


图 1 小波包分解的第四子频段基函数的频域特性对比
Fig.1 Frequency response of base function for the fourth wavelet bandwidth

从图 1 中可以看出, 随着波峰数的增加, 除了小波包基函数的频段带宽明显变窄外, 频谱泄漏现象也得到了较好的抑制。因此, 以下的研究均采用的是 Daubechies 45 小波函数进行仿真及应用研究。

1.2 电机负荷波动对分解系数的影响及抑制

在进行小波包分解时, 首先需要将各个子频段的信息提取出来, 才能确定出故障的状态。由于小波变换过程中的频域混叠和频谱泄漏现象不可能完全消除, 而原始信号中的主要成分是 50 Hz 的基波, 这样会导致 50 Hz 的基波串扰到其他频率段, 从而使得其他频率段的分解系数失真, 影响到故障状态的确定。针对实验室环境下测量到的电机的电流数据进行六层小波包分解, 得到的前 4 个重构的分解系数如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 在 d1 的 25~50 Hz 这一频段, 4 Hz 的霍尔变送器直流泄露频率影响到了这一频段; 在 d3 的 50~75 Hz 这一频段, 50 Hz 的基波频率仍然占据了主要成份, 如果电机定子电流中出现一个 75 Hz 的特征频率, 则特征频率信号很可能被

淹没。根据式(2)可以提取出小波包分解的子频段信号能量^[9]:

$$E_i = E[d_i(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T d_i^2(t) dt \quad (2)$$

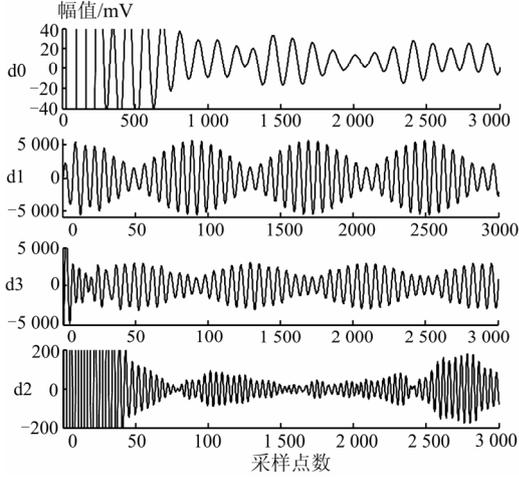


图2 小波包分解的前4个分解系数

Fig.2 The four node coefficients based on wavelet packet decompose

按照式(2),可计算出前8个子频段的信号能量分别为:0-7.8843;1-53.8289;3-31.0043;2-0.6312;6-0.2541;7-0.4222;5-0.8487;4-0.2646。由于信号的能量大量集中在25~75 Hz(1、3子频段)的频率段内,这样一来,当其他频率段出现特征频率时,由于能量低,其变化不容易被察觉。另一方面,当电机负荷发生变化时,因为其他子频段的信号能量低,即使是分解过程中少量的频谱泄漏,仍会导致这些子频段的分解系数发生较大的变化,从而可能被错误地认为是故障特征频率的出现,造成对电机状态的错误诊断。为此,在进行小波包分解之前,必须消去电流当中的基波成分,本文采用了对电流原始信号进行希尔伯特变换取信号包络的预处理方法。

给定一连续的时间信号 $f(t)$, 其希尔伯特变换

$f_h(t)$ 定义为:

$$f_h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(\tau)}{t-\tau} d\tau = f(t) \cdot \frac{1}{\pi t} \quad (3)$$

定义 $z(t)$ 为 $f(t)$ 的解析信号:

$$z(t) = f(t) + jf_h(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (4)$$

式中, $a(t) = \sqrt{f(t)^2 + f_h(t)^2}$ 。

解析信号的幅值函数 $a(t)$ 在物理意义上即表示信号的包络线^[10]。

针对上述测量到的电机电流原始数据,利用公

式(3)、(4),可以得到原始数据复数形式的解析信号,取该解析信号的模,再减去解析信号的均值,最终得到去掉了直流分量的电流原始数据的包络。图3显示的就是电流原始信号(上图)和进行希尔伯特变换预处理之后的信号包络(下图)。

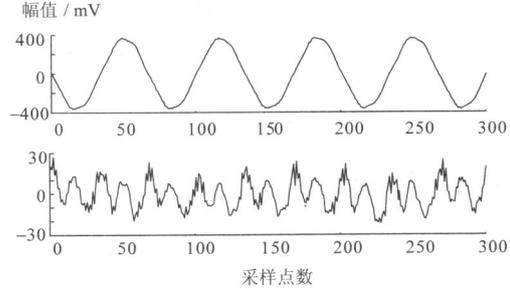


图3 电流原始信号及其包络

Fig.3 The raw current signal and its envelope

针对希尔伯特变换预处理之后的信号包络,进行六层小波包分解,从而得到的前4个重构的分解系数如图4所示。

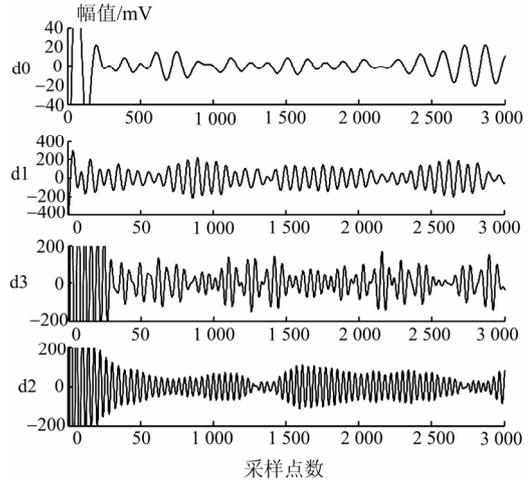


图4 Hilbert 变换处理后的小波包分解的前4个分解系数

Fig.4 The four node coefficients based on wavelet packet decompose after Hilbert transform

从图4可以看出,在d1的25~50 Hz这一频段,4 Hz的霍尔变送器直流泄露频率已经显著减少;在d3的50~75 Hz这一频段,已经可以辨别出75 Hz的特征频率。

同样按照式(2),可计算出经过希尔伯特变换处理后的电流信号小波包分解前8个子频段的信号能量分别为:0-5.3087;1-8.1063;3-6.6865;2-5.3540;6-2.3716;7-2.4068;5-8.6120;4-8.0914。此时,各个子频段信号能量已经处在同一数量级。

1.3 小波包分解系数暂态现象的消除

从图4可以看出,在分解系数的首端和末端存

在暂态现象, 且幅值大, 对后续提取的特征信息有较大的影响。为此, 本文采用数据加窗的方式来消除首末端暂态过程的影响。

选择 $\alpha = 0.08$ 的 Tukey 窗口对分解系数进行加窗处理, 可以得到去除暂态现象的分解系数如图 5 所示。

在图 5 中, 最上面的图形是 Tukey 窗口波形; 依次往下则是: 第 3 子频段分解系数; 加 Tukey 窗后的第 3 子频段分解系数; 加窗后的第 3 子频段分解系数的横轴放大效果。从图 5 中可以看出: 暂态过程已经很好地消除, 信号较好地再现了 75 Hz 的特征频率。

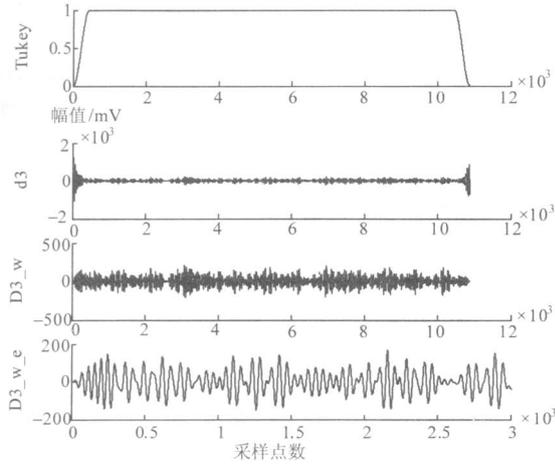


图 5 小波包分解系数的加窗去暂态过程

Fig.5 The wavelet decompose coefficients eliminating transient course by using windows

1.4 小波包分解系数的均方根值处理法

小波包分解子频段节点系数的均方根值 (Root Mean Square, RMS), 主要依赖于特征信号成分的幅度及分布, 反映信号的特征信息, 是目前提取小波分解系数特征频率信息的常用方法^[4,7]。电机在故障情况下的信号与正常信号相比, 在相同的子频段内信号的能量发生了较大的变化, 其相应子频段的小波包分解系数的 RMS 值将会明显改变。因此, 可将子频段的小波包分解系数的 RMS 值作为表征电机故障的特征指标。

小波包分解子频段所对应节点系数的 RMS 值^[7], 可表示为:

$$x_{\text{RMS}}(j, n) = \sqrt{\sum_{k=1,2,\dots,N} d_{j,n}^2(k)} \quad (5)$$

式中: j 为信号分解的层数, 即小波包分解的尺度参数; n 为小波分解的频率参数 (其值为: $n=0, 1, 2, \dots, 2^j-1$); $x_{\text{RMS}}(j, n)$ 为小波包分解系数任一节点的 RMS 值; N 为对应节点序列的数据长度。

由于受小波基函数的影响, 使得节点的小波包分解系数中存在着随基函数变化的规律, 且幅值较大, 另外分解系数的序列短, 直接对节点的小波包分解系数取 RMS 值, 会产生较大的偏差。因此采用针对重构的节点系数取 RMS 值的方法, 可以较好地克服上述问题。

2 实验研究

为验证上述方法, 在实验室条件下设计了电机定子故障的实验。实验用的三相交流感应电机的参数为: 功率 3 kW; 额定电压 380 V; 频率 50 Hz, 额定电流 5.7 A; 额定转速 1 450 r/min; 极对数 2; 设置的定子故障是在电机的定子绕组中设置一相绕组的两匝之间以及四匝之间的短路情况, 由于是空载运行, 转差率很小。对定子绕组匝间短路的 2 个阶段获取的故障数据, 利用上述方法计算出小波包分解子频段节点重构系数的 RMS 值, 如表 1 所示。

表 1 电机在正常及匝间短路情况下的节点分解系数的 RMS 值
Tab.1 The RMS of WP reconstruct coefficients under motor normal and short-circuit interturn

小波子频段	正常 (RMS)	匝间短路 1 (RMS)	匝间短路 2 (RMS)
0	11.397 6	20.420 2	20.454 0
1	90.396 5	39.101 6	36.822 1
3	66.016 3	55.346 2	53.619 4
2	52.091 2	70.402 7	75.374 9
6	50.769 8	68.616 9	73.463 0
7	172.942 4	181.922 7	172.773 3
5	152.782 2	132.560 6	122.353 5
4	144.829 7	147.675 3	130.401 7
12	106.737 9	106.842 1	106.905 5
13	268.405 9	247.338 3	250.096 7
15	52.091 2	70.402 7	75.374 9
14	455.627 4	671.028 7	606.766 8
10	360.703 7	362.014 1	345.554 8
11	383.039 4	478.678 4	515.675 2
9	107.511 9	104.723 4	121.744 3
8	40.546 8	32.206 8	43.948 2

从表 1 中, 可以看出几个与故障相关的子频段 (0、2、6、11) 的 RMS 值增长的幅度较大。为了更好地量化这种幅度的变化, 本文采用了小波包分解系数 RMS 变化率的概念, 让不同状态下的小波包分解系数的 RMS 值与正常状态分解系数的 RMS 值相比较, 从而得到 RMS 变化率, 且定义如下:

$$R_{\text{RMS}_i} = \frac{\text{RMS}_i - \text{RMS}_{\text{ok}}}{\text{RMS}_{\text{ok}}} \quad (6)$$

式中： R_RMS_i 表示第 i 种状态下的与正常状态相比较的 RMS 变化率； RMS_i 表示第 i 种状态下的小波包分解系数的 RMS 值； RMS_{ok} 表示电机正常状态下的小波包分解系数的 RMS 值。

按照式 (6) 的定义，可以得到绕组匝间短路两种情况下的 RMS 变化率，对于小波子频段 RMS 变化率小于 0 的部分不予考虑，同时考虑到 20% 的阈值设置，可以得到如图 6 所示的清晰的特征频率变化趋势。

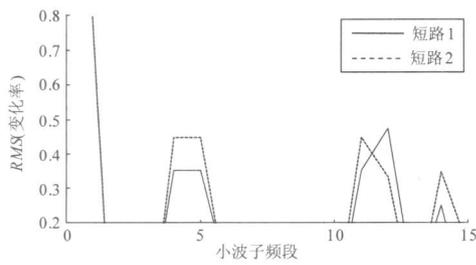


图 6 两种定子故障状态下的节点系数 RMS 变化率趋势
Fig.6 Trend for the rate of RMS of wavelet coefficients under two stator fault

从图 6 中可以看出，当定子绕组短路的匝数增加时，故障特征频率的 RMS 值变化明显。

3 结论

本文通过对采样频率为 3 200 Hz 的原始信号进行 6 层小波包分解的方法，使得每隔 25 Hz 的子频段宽度内始终可以覆盖一个特征频率，从而解决了电机转差率以及供电电源频率的不确定性问题。通过采用对 Daubechies 小波增加波峰数的办法，较好地解决了频域混叠问题及频谱泄漏。对于 50 Hz 的基波串扰以及电机运行时的负荷变化所引起的分解系数变化问题，采用希尔伯特变换对原始信号进行预处理，从而使得 16 个子频段的能量能保持在相近的数量级上，较好地解决了基波串扰及负荷变化问题。对于小波包分解系数的首端和末端存在的暂态现象，采用对分解系数加 Tukey 窗的方式来消除首末端暂态过程的影响。采用小波包分解子频段节点重构系数的 RMS 变化率作为表征电机故障的特征指标。通过实验研究，针对所设置的电机定子绕组匝间短路故障，利用该方法实现了故障特征信息的有效提取。因此，基于小波包变换的定子故障特征频率提取方法，具有较好的有效性及实用性。

参考文献

[1] Siddique A, Yadava G S, Singh B. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (1):

106-114.
 [2] Thomson W T, Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7 (4): 26-34.
 [3] Razik H, Didier G. On the monitoring of the defects of squirrel cage induction motors[C]. // IEEE Power Tech Conference Proceedings. Bologna: 2003: 1-6.
 [4] Zanardelli W G, Strangas E G, Khalil H K, et al. Wavelet-based methods for the prognosis of mechanical and electrical failures in electric motors[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19 (2): 411-426.
 [5] 任震, 胡国胜, 黄雯莹, 等. 基于线调频小波变换的电机故障信号消噪方法[J]. 电工技术学报, 2002, 17 (3): 59-62.
 REN Zhen, HU Guo-sheng, HUANG Wen-ying, et al. Motor fault signals denosing based on chirplet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17 (3): 59-62.
 [6] 桂中华, 韩凤琴. 小波包-最大熵谱估计及其在水轮机故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (2): 62-66.
 GUI Zhong-hua, HAN Feng-qin. Wavelet packet-maximum entropy spectrum estimation and its application in turbine's fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (2): 62-66.
 [7] 侯新国, 吴正国, 夏立, 等. 基于 Park 矢量模信号小波分解的感应电机轴承故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (14): 115-119.
 HOU Xin-guo, WU Zheng-guo, XIA Li, et al. Bearing fault diagnosis method of induction motor via wavelet decomposition of park's vector modulus signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (14): 115-119.
 [8] 杜天军, 陈光祚, 雷勇. 基于混叠补偿小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (3): 54-59.
 DU Tian-jun, CHEN Guang-zu, LEI Yong. A novel method for power system harmonic detection based on wavelet transform with aliasing compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (3): 54-59.
 [9] 张含蕾, 周洁敏, 李刚. 基于小波分析的感应电动机复合故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (8): 159-162.
 ZHANG Han-lei, ZHOU Jie-min, LI Gang. Mixed fault diagnosis based on wavelet analysis in induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (8): 159-162.

(下转第 62 页 continued on page 62)

- Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (10) : 6-9.
- [8] 唐轶, 陈奎, 刘庆, 等. 馈出线测量导纳互差求和法小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (11) : 69-73.
TANG Yi, CHEN Kui, LIU Qing, et al. Study on the earthed fault detection method in indirectly earthed power system using summation of outgoing feeder measurement admittance mutual difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (11) : 69-73.
- [9] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈出线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (4) : 5-10.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (4) : 5-10.
- [10] 林湘宁, 高艳, 刘沛, 等. 基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (10) : 45-49.
LIN Xiang-ning, GAO Yan, LIU Pei, et al. A novel method to identify the single phase-to-earth fault in the neutral un-effectual grounded system using the zero-sequence compensated admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (10) : 45-49.
- [11] 潘露, 吕艳萍, 于芳, 等. 基于相频特性与多频带分析的小电流接地系统故障选线[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (4) : 76-79.
PAN Lu, Lü Yan-ping, YU Fang, et al. Fault line selection in non-solidly earthed network based on phase-frequency characteristic and multi-frequency band analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (4) : 76-79.
- [12] 庞清乐, 孙同景, 孙波, 等. 基于小波包分析的配电网故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4) : 19-22.
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, SUN Bo, et al. Faulty line detection based on wavelet packet analysis for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (4) : 19-22.
- [13] 刑亚辉, 王海军, 吕艳萍. 基于线路零序频率特性的小电流接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (4) : 59-62.
XING Ya-hui, WANG Hai-jun, Lü Yan-ping. Faulty line selection in non-solid earthed network based on zero sequence frequency characteristic of transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (4) : 59-62.
- [14] 任建文, 孙文武, 周明, 等. 基于数学形态学的配电网单相接地故障暂态选线算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (1) : 70-74.
REN Jian-wen, SUN Wen-wu, ZHOU Ming, et al. Transient algorithm for single-line to ground fault selection in distribution networks based on mathematical morphology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (1) : 70-74.
- [15] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (9) : 48-53.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (9) : 48-53.
- [16] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠. 中性点非直接接地配电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38 (2) : 195-199.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin. Analysis of transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38 (2) : 195-199.
- [17] 薛永端. 基于暂态特征信息的配电网单相接地故障检测研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.

收稿日期: 2009-08-25

作者简介:

孙波(1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能配电网故障检测技术、电动汽车优化控制与嵌入式系统; E-mail: sunbo@sdu.edu.cn

孙同景(1948-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机先进控制与智能系统;

薛永端(1970-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为配电网自动化及其暂态故障检测技术。

(上接第 56 页 continued from page 56)

- [10] Jimenez G A, Munoz A O, Duarte-Mermoud M A. Fault detection in induction motors using Hilbert and wavelet transforms[J]. Journal of Electrical Engineering, 2007, 89 (3): 205-220.

作者简介:

邱赤东(1968-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电机故障诊断; E-mail: qiuchidong@sina.com

薛征宇(1972-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为电机故障诊断。

收稿日期: 2009-11-18; 修回日期: 2010-06-08