

小波分析在电力系统不良数据辨识中的应用

李慧, 杨明皓

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 历史负荷受各种因素的共同作用可能造成数据失真, 为了能够给 EMS或 DMS的高级应用软件提供良好的数据基础, 首先必须对历史负荷数据进行处理, 去除其中的错误数据。实际上, 不良数据可以看成是负荷曲线中的奇异点及不规则的突变部分, 而离散二进小波变换系数的模极大值的位置和幅度同信号的局部奇异性密切相关。在此基础上提出了一种基于小波奇异性检测和小波除噪的电力系统不良数据辨识方法。通过对大量实际的负荷数据分析, 证明了所提出方法的正确性和有效性。

关键词: 不良数据; 二进小波变换; 奇异性检测; Lipschitz指数; 小波除噪

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)03-0010-05

0 引言

负荷曲线是电力系统现状分析和未来预测的基础和依据。历史负荷数据一般来源于 SCADA 数据库, 由于我国电力系统主要用微波和电力线载波通道传送数据, 信号在传输过程中不可避免会受到随机干扰, 或传送系统出现偶然故障, 或大干扰引起的过渡过程等问题, 造成 SCADA 数据库中的数据被污染, 从而影响了 EMS或 DMS的高级应用软件的使用。具体地说, 这些不良数据包括: 短时信道错误引起的脉冲状尖刺或斜坡型峰、谷值, 短时间内某个 RTU 传输错误或 SCADA 系统没有及时反映运行方式变换而引起的一段时间内负荷数据阶跃状突然变大或变小, 长时间内某个 RTU 故障导致一段时间内负荷数据丢失。本文把这些不良数据称为传输信号中的大扰动。因此, 我们在将这些负荷数据用到高级应用软件进行状态估计求解系统状态或者进行负荷预测之前, 首先必须对历史负荷数据进行预处理, 去除其中的错误数据。文献 [1] 提出了一种通过检测数据间是否满足预先设定的约束关系判断数据是否异常的方法。但该方法需对负荷数据进行繁琐的统计工作, 而且很难做到确定完备的约束关系。

小波变换是时频分析的一种工具, 被称为数学分析上的“放大镜”和“显微镜”。它在时域和频域同时具有良好的局部化性质, 能将各种交织在一起的不同频率组成的混合信号分解成不同频率的信号块。当前信号突变检测已经成为小波变换应用的一个重要方面^[2-4]。实际上, 历史数据库中的不良数据可以看成是负荷曲线中的奇异点及不规则的突变部分, 而离散二进小波变换系数的模极大值的位置

和幅度同信号的局部奇异性密切相关, 利用这些极大值可以辨识出信号的局部奇异点, 从而辨识出历史负荷中的不良数据, 为电力系统高级应用软件提供良好的数据基础。文献 [5] 利用奇异性检测理论分析电力系统负荷特性, 在负荷状态监视及故障诊断中取得满意的效果。但是, 该方法首先要取得正常情况下的标准信号, 这在实际运行的电力系统中较难办到。文献 [6] 为了保证分析诊断的准确, 利用小波奇异性检测对在线监测数据进行去噪和平滑处理, 但没有确定出上述不良数据的类型及位置。利用小波奇异性检测理论及小波除噪原理, 本文提出了一种根据奇异点的局部奇异性信息来辨识电力系统中不良数据的新方法。

1 离散二进小波变换^[7]

在连续小波变换中, 如果只对尺度参数进行二进离散 ($a = 1/2^j, j \in Z$) 而平移参数保持连续变化 ($x \in R$), 则小波变换取得半离散的形式

$$W_{2^j} f(x) = 2^{j/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(2^j(x-t)) dt = f * \psi_{2^j}(x) \quad (1)$$

取 $\psi_{2^j}(t) = h(-t)$, 其中 $h(t)$ 为基本小波, $h(t)$ 为 $h(t)$ 的共轭, “*” 表示卷积 (下同)。此时, 这种小波变换被称为二进小波变换。对应的小波函数 $\psi(t)$ 被称为二进小波, 它应满足稳定性条件。

对于离散数字信号 $\{f_n^d\}_{n \in Z}$, 其二进小波变换也应是离散的形式。由式 (1), 对连续二进小波变换 $W_{2^j} f$ 取离散值, 并记为 $W_{2^j}^d f$, 称为离散信号 $\{f_n^d\}_{n \in Z}$ 的离散二进小波变换。

若记

$$S_{2j}^d f(n) = f * \phi_{2j}(n)$$

$$W_{2j}^d f(n) = f * \psi_{2j}(n)$$

则有 $S_1^d f = f * \phi(n) = f_n^d$

由此可得到离散二进小波变换的迭代公式

$$\begin{cases} S_{2^j}^d f(n) = \sum_k h_k S_{2^{j-1}}^d f(n - 2^{j-1}k) \\ W_{2^j}^d f(n) = \sum_k g_k S_{2^{j-1}}^d f(n - 2^{j-1}k) \end{cases} \quad (2)$$

其中: h_k 为低频滤波器系数, g_k 为高频滤波器系数。

这样,从原始信号的离散采样值 $f_n^d = S_1^d f$ 出发,反复迭代,即可求出全部离散二进小波变换的值 $\{W_{2^j}^d f\}_{j \geq 0}$ 。但是,在实际计算中,分解是有限步的,通常取得足够大就停止计算。若取 J 为一个适当大的正整数,则称 $\{W_{2^j}^d f\}_{j=1}^J, S_2^d\}$ 为 $\{f_n^d\}_{n \geq 0}$ 的离散二进小波变换。

2 小波变换模极大值及奇异性检测理论^[8]

设函数 $f(x)$ 满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$, 且 $f(x) = O(1/(1+x^2))$, 则称其为光滑函数。若选择小波函数为光滑函数的一阶导数, 即 $\psi(x) = \frac{d}{dx} f(x)$, 同时 $f(x)$ 应满足允许性条件, 那么二进小波变换又可写成

$$Wf(s, x) = f * \psi_s(x) = f * \left(s \frac{d}{dx} f \right) (x) = s \frac{d}{dx} [f * f_s(x)]$$

即二进小波变换 $Wf(s, x)$ 可表示为信号 $f(x)$ 在尺度 s 被 $\psi_s(x)$ 平滑后的一阶导数。这样,小波变换的模极大值点与信号的突变点之间对应起来。

2.1 小波变换模极大值

定义 1 在某一尺度 s_0 下, 如果对于 x_0 的某一领域内的任意点 x , 有

$$|Wf(s_0, x)| < |Wf(s_0, x_0)| \text{ 成立,}$$

则称 (s_0, x_0) 为小波变换的模极大值点。尺度空间 (s, x) 中所有的模极大值点的连线称为极大值线。

2.2 李普西兹 (Lip schitz) 指数

通常用李普西兹指数 a 来描述函数的局部奇异性。

定义 2 设 n 是一个非负整数, $n < a < n+1$, 如果存在 2 个常数 A 和 h_0 , $h_0 > 0$, 及 n 次多项式 $P_n(h)$, 使得对任意的 $h > h_0$, 在 x_0 附近均有

$$|f(x_0 + h) - P_n(x_0 + h)| \leq A|h|^a$$

成立, 则称函数 $f(x)$ 在 x_0 点的李普西兹指数为 a 。

实际上 $P_n(h)$ 就是 $f(x)$ 在 x_0 点作 Taylor 级数展开的前 n 项, 于是有

$$|f(x_0 + h) - P_n(h)| = O(|h|^a), n < a < n+1$$

李普西兹指数刻画了函数在该点的正则性, 其值越大, 函数越光滑。函数在一点连续、可微, 则在该点的李普西兹指数 a 为 1。如果 $f(x)$ 在 x_0 的李普西兹指数小于 1, 则称函数在 x_0 点是奇异的。

根据李普西兹指数的概念, 讨论几种常见突变信号的李普西兹指数量度。对于斜坡形式的函数、折线函数, t_0 是突变点, 显然

$$|f(t_0 + h) - f(t_0)| = O(h^1)$$

此函数在 t_0 处的李普西兹指数为 $a = 1$ 。对于阶梯函数, 在 t_0 处突变, 显然

$$|f(t_0 + h) - f(t_0)| = \text{常数} = O(h^0)$$

它在 t_0 处的李普西兹指数 $a = 0$ 。对于 $0 < a < 1$, 可以理解为, 它在 t_0 处的突变程度介于折线函数和阶梯函数的表现之间。对于冲击函数, 直接利用李普西兹指数的定义不易理解, 但是由于冲击函数是阶梯函数的导数, 其李普西兹指数应为阶梯函数李普西兹指数减 1。于是可知冲击函数的李普西兹指数为 $a = -1$ 。另外, 白噪声是一种几乎处处奇异的随机分布, 具有负的李普西兹指数^[9]。

$$a = -\frac{1}{2}, \quad \forall > 0$$

2.3 局部奇异性检测

在小波变换中, 局部奇异性可定义为:

定义 3 设 $f(x) \in L^2(R)$ (平方可积空间), 若 $f(x)$ 对 $\forall x = x_0$, 小波 $\psi(x)$ 是满足连续可微的紧支集小波, 并具有 n 阶消失矩, 有 $|Wf(s, x)| \leq A s^a$, 则称 a 为 x_0 点的奇异性指数 (即李普西兹指数)。

当采用二进小波变换时, $s = 2^j$, 对上式两边同时以 2 为底数求对数, 得到

$$\log |Wf(2^j, x)| = \log(A) + ja \quad (3)$$

假定在两个连续的二进尺度 j 和 $j+1$ 上, 上式均取等式, 可得

$$a = \log |Wf(2^{j+1}, x_{j+1})| - \log |Wf(2^j, x_j)| \quad (4)$$

由此可知, 在工程应用中, 若某点小波变换的模极大值随着尺度的增加而增大, 则 $0 < a < 1$, 该点即为突变程度介于折线函数与阶跃函数之间的奇异点; 若某点小波变换的模极大值随尺度的增加而减小, 则 $a < 0$, 该点即为噪声点; 若某点小波变换的模极大值不随尺度而改变或者仅有很小的变化, 则

$a = 0$, 该点即为阶跃点;若某点小波变换的模极大值随尺度的增加而以近似二进制速度降低, 则 $a < -1$, 该点即为冲击点。

为检测信号的突变信息, 本文选取具有紧支集的二次样条小波^[10], 它是三次样条平滑函数的一阶导数, 相应的低频和低频滤波器系数分别为 $h_{-1} = 0.125, h_0 = 0.375, h_1 = 0.735, h_2 = 0.125; g_0 = -2, g_1 = 2$ 。

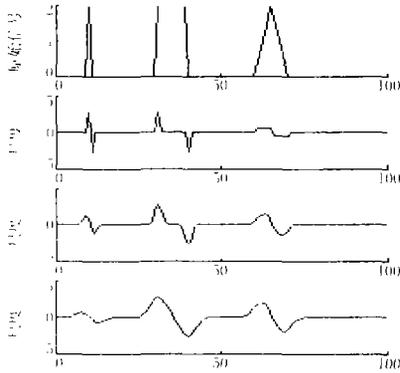


图 1 3种突变边缘的尺度传播特性
Fig 1 Three types of signal and their scale spreading characteristics

图 1 是用 Matlab 显示的冲击信号、阶跃信号以及介于阶跃与斜坡之间的突变信号经过 3 次离散二进小波变换后, 其小波系数在不同尺度上的传播特性。表 1 列出了 2^1 尺度上各模极大值位置及相应的李普西兹指数 a 。从图中可以看出, 通过小波变换波极大值的位置和相应的李普西兹指数可以确定奇异点的位置和性质。

表 1 图 1 中小波变换模极大值位置及李普西兹指数 a

Tab 1 Positions and Lipschitz exponents of wavelet transform module extremes in Fig 1

模极大值位置	2^1 小波系数	a
10	2.6667	-1
30	2.6667	0
40	-2.6667	0
61	1.0510	0.4428
69	-1.0510	0.4428

3 小波除噪原理

不同类型的日、月、年负荷曲线由于存在高峰和低谷以及随机噪声的影响而出现正常波动的现象, 但它们并没有超出各自常规的数值。在信号奇异性检测过程中, 这些正常波动也可能产生小波变换模极大值, 导致奇异点, 其李普西兹指数大于零。为了

避开信号正常波动所引起的奇异性, 减少奇异点的数量, 从而降低辨识坏数据的工作量, 首先应在第一尺度分解过程中设置合理的阈值分离出由不良数据导致的大扰动和正常波动。当信号发生大扰动时, 其 $|Wf(s, x)|$ 会大于正常波动信号的小波变换绝对值, 因此, 可以通过设置阈值来实现正常波动信号与大扰动信号的分离。如果 $|Wf(s, x)| > \lambda$, 则认为是扰动信号分量, 保留; 如果 $|Wf(s, x)| < \lambda$, 则认为是正常波动信号, 不保留。

这里介绍一种小波除噪的阈值选取算法^[11]。令叠加了噪声的信号的小波变换序列为 $\{c_n\}, n = 1, 2, \dots, N$, 给出两个假设

$$H_1: c_1 = c_2 = \dots = c_N$$

$$H_2: c_1 = c_2 = \dots = c_n, c_{n+1} = c_{n+2} = \dots = c_{N-1} = c_N$$

假设 H_1 成立, 则小波变换就表示这是不含有扰动的检测信号, 即只包含有平稳信号或噪声。假设 H_2 成立, 则扰动有可能发生在 $n+1$ 的位置。以下步骤是用来设置某一尺度下的小波变换的阈值。

步骤 1: 验证假设 H_1 。

步骤 2: 如果 H_1 不成立, 剔除绝对值最大的小波变换序列, 令 $N = N - 1$ 重新回到第 1 步。否则, 进行第 3 步。

步骤 3: 如果 H_1 成立, 绝对值最大的小波变换序列就设置为阈值。

步骤 4: 用阈值处理原来的小波变换序列。

为验证假设 H_1 , 首先利用 Brownian 桥式经验公式得到一个序列 $B(n)$, Brownian 桥式经验公式定义为^[12]

$$B(n) = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{i=1}^n (c_i^2 - \overline{c^2}) \quad (5)$$

式中: $n = 1, 2, 3, \dots, N$; $\overline{c^2}$ 为小波变换序列的方差; σ^2 为噪声的标准方差, 可以用 $\sigma^2 = \text{MAD} / 0.6745$ 来代替; MAD 为小波变换序列的绝对值平均值。

把式 (5) 中 $B(n)$ 标准化到 $[0, 1]$ 范围内得到 $B_1(n)$, 同时利用建立两个新的数列 $B(n)$ 和 $d(n)$ 。

$$B(n) = n/N$$

$$d(n) = |B(n) - B_1(n)|$$

如果 $d_{\max} < z = \sqrt{-1/2N \ln(a/2)}$ 时, 假设 H_1 成立。一般地, 取 $a = 0.9$ 。

4 工程应用

4.1 小波变换奇异性检测的步骤

步骤 1: 利用公式 (2) 对信号作多尺度下的离散

二进小波变换,一般取最大尺度为 $J=3$ 或 4。

步骤 2:采用上述阈值选取方法,获得尺度 1 上的阈值,将该尺度上绝对值大于其阈值的小波变换系数保留,小于其阈值的小波系数赋为零,从而得到除去正常波动信号后不良数据产生的模极大值点。

步骤 3:寻找每级尺度上小波变换系数对应的模极大值点。

步骤 4:从第一尺度 2^1 开始,对该尺度上的每一个极大值点 x_0 ,利用即算算法向下搜索对应的极大值线,即寻找 x_0 对应的传播点。并将尺度 $2^j, 1 \leq j \leq J$ 上不在任一极大值线上的极值点去掉。对得到的极大值线,利用公式 (3)、(4) 计算第 2 尺度上各模极大值点的李普西兹指数 a 和平滑系数 A 。

步骤 5:去掉第一尺度 2^1 上的所有模极大值点大小,根据第 4 步计算的 a 和 A 重新计算出第一个尺度的极值点,而其位置则保持不变。

步骤 2 中只计算最小尺度下的阈值,这是因为随着尺度的增加,正常波动所引起的小波变换绝对值逐渐增大,而冲击型的扰动信号所引起的小波变换绝对值却以二进制速度降低,或者阶跃型的扰动信号所引起的小波变换绝对值保持不变,这样前者将远远大于后者;若在其他尺度上采用小波除噪原理的话,这将影响到冲击及阶跃两种扰动信号的小波变换模极大值的传递性。换句话说,在小尺度上,扰动信号奇异点的小波变换时间定位最精确,而且它的模极大值大于正常波动信号的模极大值,通过阈值处理,分离出大扰动信号与正常波动信号的奇异点。这样就可以不考虑正常波动信号在多尺度分析中的传递性,减少奇异点的数量,降低辨识工作的复杂性。步骤 4 中从第二尺度开始计算局部奇异性,是因为第一尺度的小波系数受噪声的影响较大,可能偏离真实值,而由计算出的李普西兹指数 a 和平滑系数 A 推出第一尺度模极大值,可以获得较好的计算精度。

4.2 实例分析

图 2 为贵阳市息烽县 10 kV 线路 180001003 号变压器从 2002 年 6 月 16 日至 6 月 22 日的负荷曲线,共 168 点。曲线波动性较大,并且还存在着由于 RTU 传输错误而导致的空数据段。

图 3 为采用本文提出的奇异性检测方法经过 3 个尺度小波变换所得到的的小波变换系数模极大值,通过计算其局部奇异性,很容易地判断出相应的空数据段发生的开始点和恢复点以及扰动的持续时间。

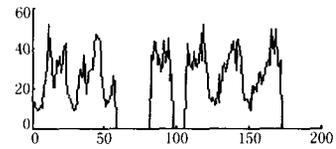


图 2 息烽县 180001003 变压器负荷曲线
Fig 2 Load curve of 180001003# transformer at Xifeng county

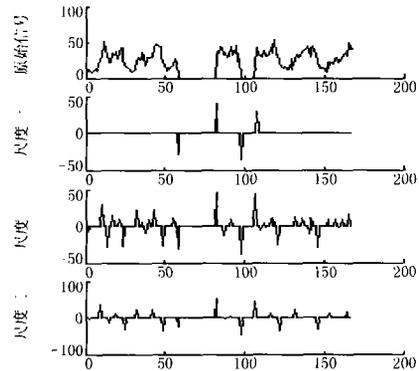


图 3 原始信号及各尺度小波变换系数模极大值
Fig 3 Original signal and wavelet transform module extremes of different scales

根据小波系数模极大值的传递性,从图 3 中尺度 1 可以看出,只存在 4 条小波变换模极大值线,利用公式 (4) 计算出奇异点的李普西兹指数及其位置,如表 2 所示。

表 2 图 3 中小波变换模极大值位置及李普西兹指数 a

Tab 2 Positions and Lipschitz exponents of wavelet transform module extremes in Fig 3

模极大值位置	2^1 尺度小波系数	a
58	- 33.439	- 0.124
82	40.253	0.179
98	- 35.773	0.082
107	46.000	- 0.018

从表 2 可知,李普西兹指数大小均在 0 附近,说明模极大值所在位置的点其突变类型都为阶跃型;而从尺度 1 下小波系数值的正负以及模极大值位置之间的距离可以判断,曲线在 58 点处降至 0,到 82 点处才有上升沿,在 98 点处再次降至 0,而到 107 点处才又升至正常。由此得出结论,第 58~82 之间以及第 98~107 之间为两段错误数据段。若修正这种错误数据段,可以采用负荷预测等方法。

图 4 为贵阳市息烽县 10 kV 线路 180001001 号变压器从 2002 年 6 月 1 日至 6 月 3 日的电压曲线,共 72 点。电压波动不大,但是存在少量的尖峰。

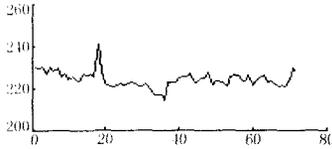


图 4 息烽县 180001001 变压器电压曲线

Fig 4 Voltage curve of 180001001# transformer at Xifeng county

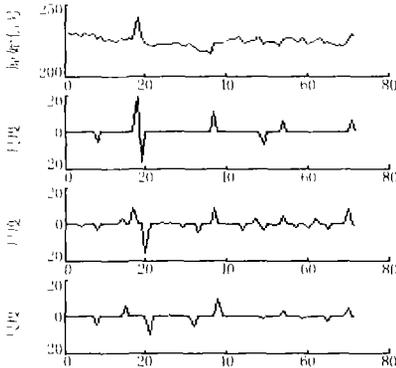


图 5 原始信号及各尺度小波变换系数模极大值

Fig 5 Original signal and wavelet transform module extremes of different scales

图 5 为采用本文提出的奇异性检测方法经过 3 个尺度小波变换所得到的的小波变换系数模极大值,通过计算其局部奇异性,很容易地判断出局部奇异点的位置及类型。

表 3 为图 5 中奇异点的位置及李普西兹指数。由表 3 可知,点 18 的模极大值近似为 -1,对应于原始曲线中的脉冲尖峰,从而判断其为错误数据。而点 19 的指数为 0,说明曲线在该点为阶跃点,由尖峰回到正常值。其余的奇异点指数均为负值,可断定是由白噪声以外的干扰引起的突变点。这些错误数据可以采用负荷预测等方法进行修正。

表 3 图 5 中小波变换模极大值位置及李普西兹指数 α

Tab 3 Positions and Lipschitz exponents of wavelet transform module extremes in Fig 5

模极大值位置	8	18	19	37	49	54	71
α	-0.544	-1.120	0	-0.297	-0.585	-0.864	-0.813

5 结论

本文提出的利用小波奇异性检测理论和小波除噪原理对电力系统负荷曲线中的不良数据进行辨识的方法,可以有效地检测出信号中不良数据导致的奇异点的位置及奇异性程度,避免了对负荷数据繁琐的统计工作,通用性强,为 EMS 或 DMS 中状态估

计及负荷预测等高级应用软件提供了良好的数据基础。本文通过对电力系统中实际的负荷数据进行分析,证明了所提出方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 唐新安,胡铁斌. SCADA 系统中坏数据的自动检测 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22 (10): 81-82
TANG Xin-an, HU Tie-bin Automatic Detection of Bad Data in SCADA System [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22 (10): 81-82
- [2] Poission Q, Rioual P, Meunier M. New Signal Processing Tools Applied to Power Quality Analysis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14 (2): 561-566
- [3] 张兆宁,毛鹏,孙雅明. 电力系统故障暂态信号的小波奇异性检测 [J]. 继电器, 2000, 28 (4): 24-27.
ZHANG Zhao-ning, MAO Peng, SUN Ya-ming Singularity Detection of Fault Transient Signals in Power System with Wavelet Transform [J]. Relay, 2000, 28 (4): 24-27.
- [4] 尚婕,陈卫红,李彦. 小波变换在电能质量暂态信号检测中的应用 [J]. 继电器, 2003, 30 (2): 27-30.
SHANG Jie, CHEN Wei-hong, LI Yan Application of Wavelet Transform to Detection Power Quality Transient Signal [J]. Relay, 2003, 30 (2): 27-30.
- [5] 李天云,胡屏,马景兰. 小波奇异性检测理论在电力系统负荷特性分析中的应用 [J]. 东北电力学院学报, 1998, 18 (4): 14-22
LI Tian-yun, HU Ping, MA Jing-lan Application of Theory of Singularity Detection Based on Wavelet Transformation in Load Characteristic Analysis [J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1998, 18 (4): 14-22
- [6] 王楠,律方成. 基于小波奇异性检测的在线监测数据处理 [J]. 电工技术学报, 2003, 18 (4): 61-64.
WANG Nan, LÜ Fang-cheng On Line Monitoring Data Processing Based on Wavelet Singularity Detection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18 (4): 61-64.
- [7] 秦前清,杨宗凯. 实用小波分析 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994. 25-28
QIN Qian-qing, YANG Zong-kai Utility Wavelet Analysis [M]. Xi an: Xidian University Press, 1994. 25-28
- [8] 徐长发,李国宽. 实用小波方法 [M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2001. 104-114.
XU Chang-fa, LI Guo-kuan Utility Wavelet Method [M]. Wuhan: Huazhang University of Science and Technology Press, 2001. 104-114.

(下转第 20 页 continued on page 20)

- [5] 吴文传,张伯明. 电容器实时优化投切的最优匹配注入流法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 35-39.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming Optimal Matching Injected Flow for Optimal Sizing of Capacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 35-39.
- [6] Mahfoud S W. Genetic Drift in Sharing Methods[A]. Proc IEEE Conf Evolutionary Computation Piscataway (NJ): 1994. 67-72
- [7] Civanlar S, Grainger J J, Yin H, et al Distribution

Feeder Reconfiguration for Loss Reduction [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1223.

收稿日期: 2004-05-24; 修回日期: 2004-07-03

作者简介:

吴文清(1968-),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统无功优化。E-mail: wuwenqing_melody@163.com

A hybrid method based on matching injected flow and genetic algorithms for optimal capacitors placement

WU Wen-qing^{1,2}

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Jinhua Electric Power Bureau, Jinhua 321002, China)

Abstract: The problem of optimal capacitor placement is divided into a master problem and a slave problem in this paper. A hybrid method, which is composed of analytical and soft computing algorithms, is developed. The slave problem is to determine the size and type of capacitors. To solve the slave problem, a novel and fast algorithm named optimal matching injected flow is presented. It can calculate the precise size of capacitors under every load level. The master problem is to optimize capacitors' placing position. To solve the master problem, a revised genetic algorithm is employed. To improve the search ability of the genetic algorithm, some adaptive adjusting methods are suggested. The proposed algorithm is implemented using C++. A numerical result verifies the presented method is efficient.

Key words: optimal capacitors placement; genetic algorithm; optimal matching injected flow

(上接第 14 页 continued from page 14)

- [9] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
YANG Fu-sheng Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [10] Mallat S, Zhong S. Characterization of Signal from Multi-scale Edges[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710-732
- [11] YANG Hong-tzer, LIAO Chiung-chou. A De-noising Scheme for Enhancing Wavelet-based Power Quality Monitoring System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(3):

353-360

- [12] Papoulis Probability & Statistics[M]. NJ: Prentice Hall, 1990.

收稿日期: 2004-05-21; 修回日期: 2004-07-16

作者简介:

李慧(1976-),女,博士研究生,主要研究方向为配电系统状态估计、负荷预测算法研究,小波分析理论及其应用; E-mail: lhbxy21@sina.com

杨明皓(1953-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、配电自动化、电能质量与谐波。

Application of wavelet analysis to bad data identification for power system

LI Hui, YANG Ming-hao

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Historical bad data are so distorted by combined effects of all influential factors that affect the use of the EMS or DMS application software, so they must be detected before used. In nature, false data are regarded as singularity points among load data. Discrete binary wavelet transform can be used to detect locations and characteristics of the local singularity points. A bad data identifying method based on wavelet singularity detection theory and wavelet de-noising method is presented for power system. By analyzing the singularities, false data are found. The validity of the approach is verified by real data analysis.

Key words: bad data; binary wavelet transform; singularity detection; Lipschitz exponent; wavelet de-noising