

电网间谐波分析的包络分解法

王柏林¹, 熊杰锋^{1,2}

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京信息工程大学电子信息工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 从间谐波产生的机理出发, 提出一种分析电网间谐波的新方法——包络分解法。该方法的主要依据是: 含间谐波的工频信号一定是非平稳工频信号, 间谐波信息一定包含在工频信号的包络之中。该方法的关键步骤是: 从工频信号中提取包络, 对包络进行分解, 按特定公式求出各次间谐波的频率、幅值。包络分解法排除了整次谐波频谱泄漏产生的虚假间谐波, 基于 Matlab 的仿真表明, 用于实际电网时它提供的间谐波信息更为真实、精确。

关键词: 谐波分析; 间谐波; 非平稳信号; 包络; 频谱泄漏

Envelope decomposition-based method for interharmonics analysis in power system

WANG Bo-lin¹, XIONG Jie-feng^{1,2}

(1. College of Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the mechanism of interharmonics producing, a new algorithm, named envelope decomposition-based method, for interharmonic analysis of power system is presented. The proposed method is mainly based on the two points that power frequency signal containing interharmonics must be non-stationary; interharmonics parameters must be restored from the envelope of the power frequency signal. The key steps are that extracting the envelope from power frequency signal, then decomposing the envelope and finally calculating frequency and amplitude of each-order's interharmonic based on specific formula. The fake interharmonics caused by the spectral leakage of integral harmonics are avoided. MATLAB simulation verifies that the method is more accurate for interharmonics analysis in the real network.

Key words: harmonic analysis; interharmonic; non-stationary signal; envelope; spectral leakage

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0029-05

0 引言

间谐波是电网谐波分析的难点, 目前还没有在工程上行之有效的方法。迄今, 工程上的间谐波分析方法仍然沿用整次谐波分析方法——DFT 法^[1], 理论上, DFT 只适合于平稳工频信号, 而含间谐波的工频信号一定是非平稳工频信号。即使不管理论上的严谨性, DFT 的频谱泄露和栅栏效应产生虚假间谐波, 它与真实间谐波混迭使间谐波无法测准。

为减轻频谱泄露和栅栏效应的影响提高间谐波检测精度, 学术界提出各种算法: 钱昊等人采用时

域加窗而后频域插值的方法计算间谐波, 可以减小频谱泄露和栅栏效应的影响^[2]。Z. Liu等人提出时域平均和差分滤波器的方法检测间谐波, 该方法需要严格的采样同步^[3]。T. X. Zhu根据信号时域自相关性提出自适应调整采样窗宽, 进而采用DFT求解谐波和间谐波, 实际应用中该方法会出现采样时间过长, 不适合在线分析^[4]。小波变换^[5]和基于现代谱估计理论的Esprit、Music、Prony 等方法也被用于分析电力系统谐波和间谐波, 且取得了不少成果^[6-8]。小波函数在频域存在混频现象, 频率分辨率低。基于现代谱估计理论的方法需要对信号个数准确确定; 运算量太大, 工程实际应用较难。

<IEC61000-4-30: 2003 标准>建议采用“间谐波子群”应对上述困惑, 间谐波子群力图避开整次谐波的主要泄露成分, 但是整次谐波“旁边”的间

基金项目: 江苏省2005年科技攻关计划项目 (BE2005064); 江苏省高校自然科学基金资助项目 (08kj470002); 江苏省2009创新基金“模块的研发” (BC2009241)

谐波无法体现。所以，直接用分析整次谐波的方法去分析间谐波是不太行得通的，间谐波分析需要间谐波“自己”的方法。

1 信号的平稳性

要正确分析间谐波，首先要分析间谐波“产生”的机理，为此先作如下定义。

定义1（平稳周期信号） 平稳周期信号 $y(t)$ 定义为

$$y(t) = y(mT + t), \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中，信号周期 T 为常数。显然，平稳周期信号就是严格的周期信号。

这里加“平稳”2字是为了区别工程上的“准周期信号”。下文中，凡提到“平稳周期信号”均指定义1描述的信号。

定义2（平稳工频信号） 频率为工频的平稳周期信号称为平稳工频信号。具体讲就是： $y(t)$ 是平稳周期信号且其频率 $f=1/T$ ，满足 $0.9f_0 < f < 1.1f_0$ ， f_0 是电网的额定频率。

这里加“工频”2字是强调一个重要事实：平稳性是针对特定频率而言的，在工频上非平稳的信号可能在某个更低的频率上是平稳的。

结论1 平稳工频信号 $y(t)$ 可以展开为基波频率为工频的 Fourier 级数：

$$y(t) = \sum_{m=0}^M A_m \sin(2m\pi ft + \phi_m) \quad (2)$$

式中：常数 A_m 和 ϕ_m 分别为第 m 次谐波的幅值和初相角； f 是基波频率； m 是整数； M 是 $y(t)$ 所含整次谐波的最高次数。

定义3（间谐波） 工频信号中频率不是基波频率整数倍的谐波称为间谐波。

结论2 平稳工频信号一定不含间谐波，含间谐波的工频信号一定不是平稳工频信号。

这个结论可以从结论1和定义3直接得到。

定义4（非平稳工频信号） 非平稳工频信号 $y(t)$ 定义为

$$y(t) = \sum_{m=0}^M A_m(t) \sin[2m\pi f(t)t + \phi_m(t)] \quad (3)$$

其中， $A_m(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\phi_m(t)$ 至少有一个是时变的， $0.9f_0 < f(t) < 1.1f_0$ 。显然，非平稳工频信号只能算准周期信号，实际电网的电压、电流信号都是这类准周期信号。

式(3)中，如果只有 $f(t)$ 变化，按瞬时频率看不会产生新的频率成份，当然也不会出现间谐波。

同样，式(3)中，如果只有 $\phi_m(t)$ 变化或 $\phi_m(t)$ 和 $f(t)$ 同时变化，也不会出现间谐波。但是， $A_m(t)$ 的变化会直接“产生”间谐波，这一点将在下文论述。

对平稳工频信号 $y(t)$ 同步采样 S 个工频周波，设 S 个周波的采样点数为 N ， $y(t)$ 所含整次谐波的最高次数为 M ，则 $y(t)$ 的各次谐波幅值为：

$$A_m = 2\sqrt{[\text{Re}\{X(mS+1)\}]^2 + [\text{Im}\{X(mS+1)\}]^2} \quad m=0, 1, \dots, M \quad (4)$$

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (5)$$

其中 $k=0, 1, \dots, N$ ， $n=0, 1, \dots, N$ 。式(5)就是离散 Fourier 变换 (DFT)，根据采样定理必须 $N \geq 2(MS+1)$ 。

用 DFT 方法还可以求出非整次频点的幅值：

$$A_k = 2\sqrt{[\text{Re}\{X(k)\}]^2 + [\text{Im}\{X(k)\}]^2} \quad (6)$$

其中 $k=0, 1, \dots, MS$ ， $k \neq mS+1$ 。对于平稳工频信号 $y(t)$ ，如果采样是严格同步的，一定有 $A_k=0$ ($k=0, 1, \dots, MS$ ， $k \neq mS+1$)；如果采样不是严格同步的，会出现许多 $A_k \neq 0$ ，这就是频谱泄漏。频谱泄漏出现在间谐波的频点上，但频谱泄漏决不是间谐波——它是 DFT 方法造成的假象，频谱泄漏与真实间谐波混迭使间谐波无法测准。

2 包络与间谐波的关系

根据上文的分析，“产生”间谐波的直接原因是工频信号的幅值不平稳，我们把幅值不平稳的工频信号描述为：

$$y(t) = [1 + d(t)] \sum_{m=1}^M A_m \sin(2m\pi ft + \phi_m) \quad (7)$$

其中： $d(t)$ 是工频信号幅值的波动量，称为包络。 $d(t)$ 可能是：(1) 平稳周期信号，(2) 非平稳周期信号，(3) 非周期信号，本文只研究第1种情况，当然其思路也可用于第2、3两种情况（另文阐述）。当 $d(t)$ 是平稳周期信号时， $d(t)$ 可描述为：

$$d(t) = \sum_{l=1}^L D_l \sin(2\pi \eta t + \theta_l) \quad (8)$$

其中：常数 D_l 和 θ_l 分别为 $d(t)$ 的第 l 次谐波的幅值和初相角； η 为 $d(t)$ 的基波频率； L 是 $d(t)$ 所含整次谐波的最高次数。将式(8)代入式(7)得：

$$\begin{aligned}
y(t) &= \sum_{m=1}^M A_m \sin(2m\pi ft + \phi_m) + \\
&\sum_{l=1}^L D_l \sin(2l\pi \eta t + \theta_l) \sum_{m=1}^M A_m \sin(2m\pi ft + \phi_m) = \\
&\sum_{m=1}^M A_m \sin(2m\pi ft + \phi_m) + \\
&\frac{1}{2} D_1 A_1 [\cos 2\pi(f - \eta)t + \phi_1 - \theta_1] - \\
&\frac{1}{2} D_1 A_1 [\cos 2\pi(f + \eta)t + \phi_1 + \theta_1] + \\
&\dots + \frac{1}{2} D_L A_L [\cos 2\pi(f - L\eta)t + \phi_L - \theta_L] - \\
&\frac{1}{2} D_L A_L [\cos 2\pi(f + 2L\eta)t + \phi_L + \theta_L] + \\
&\dots + \frac{1}{2} D_L A_M [\cos 2\pi(Mf - L\eta)t + \phi_M - \theta_L] - \\
&\frac{1}{2} D_L A_M [\cos 2\pi(Mf + 2L\eta)t + \phi_M + \theta_L]
\end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)不难看出, 如果 η 不是 f 的整数倍, 那么 $(f \pm \eta)$, $(f \pm 2\eta)$, \dots , $(f \pm L\eta)$, $(2f \pm \eta)$, $(2f \pm 2\eta)$, \dots , $(2f \pm L\eta)$, \dots , $(Mf \pm \eta)$, $(Mf \pm 2\eta)$, \dots , $(Mf \pm L\eta)$ 都是间谐波的频率。综上分析, 不难得出:

结论 3 对于式(7)、(8)描述的非平稳工频信号 $y(t)$, 如果 $y(t)$ 的基波频率 f 不是其包络 $d(t)$ 基波频率 η 的整数倍, 则包络 $d(t)$ 不影响工频信号的整次谐波(幅值、相位), 只“产生”间谐波。

注意: 如果 $L\eta < f/2$, 间谐波的计算就变得更为简单: 任一次间谐波只出现在式(9)的一项之中。

3 包络分解法

根据结论 3, 可得到工频信号间谐波分析的包络分解法, 其主要步骤是:

1) 对工频信号 $y(t)$ 连续等间隔采样 S 个周波——得到 N 点采样序列 $y(n)$, 采样应尽量与工频信号“同步”, $y(n)$ 应至少包含包络的一个完整周期。

2) 对 $y(n)$ 执行 DFT 得到整次谐波的频率、幅值和相位, 执行 DFT 之前 $y(n)$ 可加某种“窗”以减少同步误差, 进而可采用插值的方法提高整次谐波参数计算精度, 本文采用 Hanning 窗插值。

3) 从 $y(n)$ 中提取包络 $d(t)$, 提取可以用滤波器、Wavelet、HHT (Hilbert-Huang Transaction) 等有效方法, 本文采用窄带 Hilbert 变换进行包络提

取。

4) 求包络 $d(t)$ 频谱, 当 $d(t)$ 为平稳周期信号时可采用 Hanning 窗插值的方法提高包络频谱的计算精度; 当 $d(t)$ 为非平稳周期信号时可以用 Wavelet、HHT 等方法(另文阐述)。

5) 用公式(9)求出各次间谐波的频率、幅值, 计算出各次谐波和间谐波子群。

4 数字仿真

按国标(或 IEC 标准), 谐波测量仪测试间谐波精度的方法是: 每次只在标准源中加工频基波和某一次间谐波, 只要所加的间谐波不在基波的“附近”, 频谱泄漏对间谐波测量的影响就很小。但是, 这种测试方法与实际电网的情况相差很远——实际电网往往同时存在多个谐波和间谐波。

包络分解法先将间谐波信息(包络)从工频信号中分离, 然后单独对包络进行频率分解, 这就排除了频谱泄漏对间谐波的影响。包络分解法的优势可能在传统精度测试中不十分突出, 但应用于实际电网时它提供的间谐波信息将更为真实。

为验证包络分解法, 本节给出三个仿真实例, 三个例子的采样频率均为 10 kHz。

4.1 简单谐波信号

本例讨论仅有谐波存在时, IEC 标准和包络分解法计算精度问题。仿真信号模型为 $x(t) = 220 \times \sqrt{2} \sin(2\pi ft) + 35 \times \sqrt{2} \sin(6\pi ft)$, 包括基波分量和三次谐波分量。表 1 给出基波频率变化时, 根据 IEC61000-4-30: 2003 标准和包络分解法计算出各次谐波子群和间谐波子群绝对误差值。由表 1 可见当基波频率为 50 Hz(采样同步), 根据 IEC 标准得到的测量值没有误差; 但当电网频率发生波动, 导致采样非同步, IEC 结果出现误差, 同步偏差越大, 测量误差越大。值得注意的是采样不同步时, 由于频谱泄漏, IEC 结果得到“虚假”的间谐波成分 $G_{\text{isg}, 1}$, $G_{\text{isg}, 3}$ 。

采用包络分解法, 则不会得到虚假间谐波成分。为简单起见, 仅给出电网频率为 50.5 Hz 时包络分解法分解过程, 如图 1 所示。从图 1(a)可以看出, 由于信号 $x(t)$ 不含间谐波, 其时域波形和窄带滤波后波形没有幅度调制。滤波后信号的包络基本为定值见图 1(b), 图 1(c)为图 1(b)局部放大。包络频谱见图 1(d), 图中没有低频调制信号, 故可判定此时无间谐波存在。

包络分解法否定了间谐波的存在, 同时插值算法可以精确得到基波和三次谐波幅值, 其计算精度远高于 IEC 标准。

表 1 谐波和间谐波子群绝对误差

Tab.1 Absolute errors in calculating harmonic-subgroup and interharmonic-subgroup

基频/ Hz	$G_{sg,1}/V$		$G_{isg,1}/V$		$G_{sg,3}/V$		$G_{isg,3}/V$	
	真值 220 V	真值 0 V	真值 0 V	真值 35 V	真值 0 V	真值 0 V	真值 0 V	真值 0 V
50.00	IEC	包络法	IEC	包络法	IEC	包络法	IEC	包络法
50.00	0	0	0	0	0	0	0	0
50.05	0.11	0	1.73	0	0.20	0	1.13	0
50.50	2.61	0	17.57	0	2.36	0	9.16	0
49.95	0.06	0	1.71	0	0.15	0	1.13	0
49.5	1.85	0	16.00	0	2.30	0	8.99	0

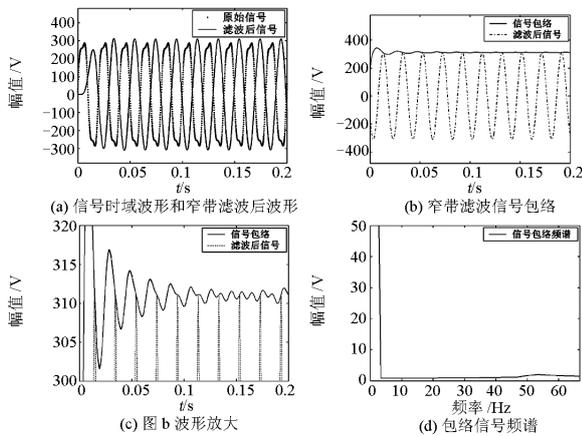


图 1 信号 $x(t)$ 包络分解法过程图

Fig.1 Envelope-decomposition procedure of $x(t)$

4.2 简单谐波和间谐波信号

本例讨论了谐波和间谐波并存时，IEC 标准和包络分解法计算精度问题。仿真信号模型为 $x_1(t) = [1 + 0.1 \times \sin(2\pi \times 8.6 \times t)]x(t)$ ，图 2 给出电网频率为 50.5 Hz 时，包络分解法过程图，信号出现明显幅度调制现象，信号包络频谱中出现将近 10 Hz 低频调制信号，因而可以判定此时存在间谐波。

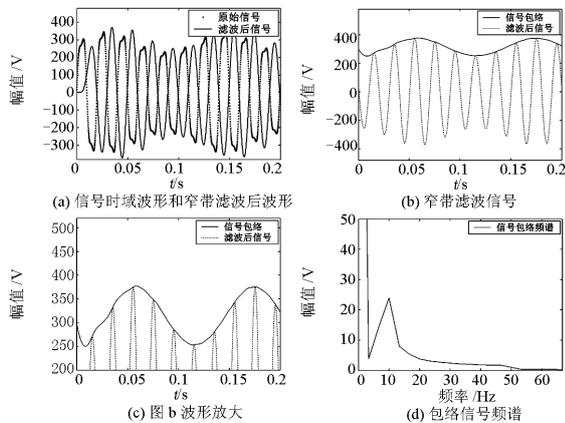


图 2 信号 $x_1(t)$ 包络分解法过程图

Fig.2 Envelope-decomposition procedure of $x_1(t)$

对信号包络采用加窗插值算法得到调制频率为 8.59 Hz (真值为 8.6 Hz)，调制系数为 0.099 6 (真值为 0.1)，根据式 (9) 可得到各次谐波和间谐波频率和幅值，进而按照 IEC 分组得到各个谐波和间谐波子群绝对误差。

表 2 给出根据 IEC 标准和包络分解法计算出各次谐波子群和间谐波子群绝对误差值，包络分解法不仅可以明确判定间谐波的存在，而且计算精度均高于 IEC 标准。

表 2 谐波和间谐波子群绝对误差

Tab.2 Absolute errors in calculating harmonic-subgroup and interharmonic-subgroup

基频/ Hz	$G_{sg,1}/V$		$G_{isg,1}/V$		$G_{sg,3}/V$		$G_{isg,3}/V$	
	真值 220 V	真值 11 V	真值 35 V	真值 1.75 V	真值 35 V	真值 1.75 V	真值 1.75 V	真值 1.75 V
50.00	IEC	包络法	IEC	包络法	IEC	包络法	IEC	包络法
50.00	2.68	-0.18	-1.32	-0.04	0.39	-0.03	-0.08	0.00
50.05	2.51	-0.17	-0.20	-0.04	0.17	-0.02	0.7	0.00
50.50	-0.52	-0.06	12.90	-0.04	-2.25	0.00	7.9	0.00
49.95	0.80	-0.17	-2.27	-0.04	0.56	-0.02	-0.31	0.00
49.5	-0.49	-0.06	0.63	-0.03	-1.62	0.00	6.2	0.00

4.3 复杂谐波和间谐波信号

本例比较了复杂谐波和间谐波模型下加窗插值算法和包络分解法的计算精度和稳定性问题。仿真采用式 (7)、(8) 的模型，参数取： $M=21$ 、 $A_m=1/m$ (m 为奇数)、 $A_m=1/40$ (m 为偶数)、 $f=50.05$ Hz、 $\Phi_m=0$ 、 $L=1$ 、 $D_l=0.1/l$ 、 $\eta=8.6$ Hz、 $\theta_l=0$ 。

对信号采样 0.4 s 和 0.6 s，采用 Hanning 窗插值算法计算出各次谐波和间谐波幅值如图 3 (a) 和图 3 (b) 所示。对比两图可知，信号采样长度影响插值算法的精度和稳定性，采样 0.4 s 时，加窗插值算法无法计算出高次谐波附近的间谐波成分，导致计算结果出现误差。

采样 0.4 s 时，包络分解法得到调制频率为 8.603 6 Hz (真值为 8.6 Hz)，调制系数为 0.099 6 (真值为 0.1)，根据式 (9) 得到各次谐波和间谐波频率和幅值，结果如图 4 所示。图 5 为包络分解法和 Hanning 窗插值算法幅值误差比较图，由图可见包络分解法精度要高于 Hanning 窗插值算法。

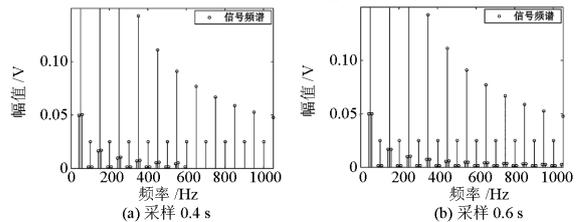


图 3 插值幅频图

Fig.3 Spectrum of windowed interpolation

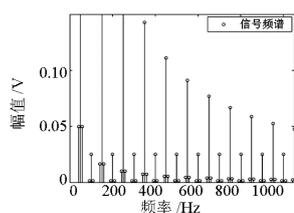


图 4 包络分解法幅频图

Fig.4 Spectrum of envelope decomposition method

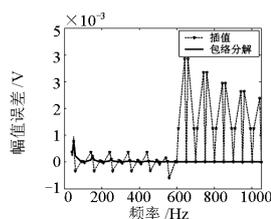


图 5 幅值误差图

Fig.5 Amplitude error of two methods

5 结论

平稳工频信号一定不含间谐波, 含间谐波的工频信号一定不是平稳工频信号, “产生”间谐波的最主要原因是工频信号的幅值非平稳。从这一认识出发, 建立了含间谐波的非平稳工频信号的数学模型, 导出了间谐波与工频信号包络的直接关系——公式(9)。从公式(9)出发, 引出了间谐波分析的新方法——包络分解法。

包络分解法主要包括三个部件: (1) 从工频信号中提取包络, (2) 对包络按频率分解, (3) 从包络分解结果计算间谐波的频率、幅值。包络的分解可以用滤波器、DFT、Wavelet、HHT 等有效方法。包络分解法排除了整次谐波频谱泄漏产生的虚假间谐波, 用于实际电网时它提供的间谐波信息更为真实、精确。

参考文献

- [1] 王柏林. 随机环境下电力系统谐波分析算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3): 22-25.

- WANG Bo-lin. Algorithms for harmonic analysis of power systems under stochastic condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3): 22-25.
- [2] Hao Q, Rongxiang Z, Tong C. Interharmonics analysis based on interpolating windowed FFT algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (2): 1064-1069.
- [3] Liu Z, Himmel J, Bong K W. Improved processing of harmonics and interharmonics by time-domain averaging[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (4): 2370-2380.
- [4] Zhu T X. Exact harmonics/interharmonics calculation using adaptive window width[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (4): 2279-2288.
- [5] Morsi W G, El-Hawary M E, Suitable mother wavelet for harmonics and interharmonics using wavelet packet transform[C]. //IEEE Canadian Conf on Electrical and Computer Engineering, 2007: 748-752.
- [6] 田伟, 王洪希, 白晶. 基于互高阶谱MUSIC法的间谐波检测[J]. 继电器, 2007, 35 (22): 49-52.
- TIAN Wei, WANG Hong-xi, BAI Jing. Inter-harmonics parameter estimation on crosshigh-spectrum based on music method[J]. Relay, 2007, 35 (22): 49-52.
- [7] 牛卢璐. 基于ESPRIT的谐波和间谐波参数估计方法[J]. 继电器, 2007, 35 (9): 37-40.
- LIU Lu-lu. ESPRIT based method for harmonics and interharmonics parameters estimation[J]. Relay, 2007, 35 (9): 37-40.
- [8] 马秉伟, 周莉, 刁均伟. 基于现代谱估计方法的间谐波检测[J]. 继电器, 2005, 33 (3): 25-27.
- MA Bing-wei, ZHOU Li, DIAO Jun-wei. Interharmonics measurement using modern spectral estimation method[J]. Relay, 2005, 33 (3): 25-27.

收稿日期: 2010-04-07; 修回日期: 2010-06-02

作者简介:

王柏林 (1948-), 男, 教授, 研究方向电能质量监测理论与装置、谐波分析方法与谐波测量仪、IEC 电能质量测量标准、PQDIF 等方面;

熊杰锋 (1976-), 男, 博士生, 研究方向为电能质量、谐波分析。E-mail: jiefengxiong@163.com

(上接第 28 页 continued from page 28)

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-05-14

作者简介:

李传健 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向是配电

系统运行、控制及其自动化; E-mail: ewebdak@163.com

刘前进 (1967-), 男, 博士, 副教授, 主要从事继电保护教学及电力系统保护、录波、质量分析等设备开发, 电力系统图模一体化数字化仿真系统的研究。