

基于信息熵评价指标的多小波畸变电能计量

张晓冰¹, 王会龙¹, 姜世超²

(1. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 国电哈尔滨热电有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对畸变信号条件下利用传统小波分解重构算法对非线性负载进行电能计量结果不准确的问题, 提出了一种基于最优小波的多小波畸变电能计量方法. 首先, 建立电网的简化数学模型并给出了功率信号的数学描述与电能计量方法; 然后, 根据信号的能量值与信号本身具有特定关系的特点, 计算信号基波部分与畸变部分的信息熵评价指标, 确定基波部分与畸变部分信号的最优分解小波基; 最后, 根据电能合理计量方法计算冲击性负载与谐波性负载消耗的功率; 仿真结果表明应用信息熵评价指标分别选取信号基波部分与畸变部分的最优小波并对非线性负载进行电能的合理计量其准确度比传统方法更高.

关键词: 电能计量; 多小波; 信息熵; 有功功率

DOI: 10.15938/j.jhust.2016.01.012

中图分类号: TM933.3

文献标志码: A

文章编号: 1007-2683(2016)01-0057-05

ZHANG Xiao-bing¹, WANG Hui-long¹, JIANG Shi-chao²

(1. Institute of Measurement-control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Harbin Thermal Power Co., Ltd of State Grid Corporation of China. Harbin 150080, China)

Abstract: To solve the problems of nonlinear load electrical energy measurement inaccurate using traditional decomposition and reconstruction wavelet algorithm under the condition of distorted signal, the article presents a distortion electrical energy measurement method based on optimal multiwavelet. First, a simplified mathematical model of power grid was established and the mathematical description of power signal and electrical measure method were given. Then, according to the specific relationship of the signal energy value and characteristics, the information entropy evaluation indicators of the fundamental section and distortion section were calculated and to determine the optimal decomposition of wavelet of the fundamental sections and distortion section of the signal. Finally, according to the reasonable electricity measurement method calculate the consumption power of impact and harmonic load. The simulation results show that the electrical measuring accuracy of the nonlinear load is higher than the traditional method, application of the information entropy of evaluation index selection signal of fundamental section and distortion section respectively the optimal wavelet.

Keywords: electrical energy measurement; multi-wavelet transform; information entropy; active power

收稿日期: 2015-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51277043).

作者简介: 王会龙(1990—), 男, 硕士研究生;

姜世超(1989—), 男, 本科.

通讯作者: 张晓冰(1962—), 女, 博士, 教授, E-mail: zhxiaobing@163.com.

0 引言

经典的电能计量理论要求电压与电流信号为同频率的正弦信号,但在当前的电网中非线性负载越来越多,电网信号畸变越来越严重且在负载与电网之间产生复杂的功率交换,使得电能的准确合理计量变得更加困难^[1-4].非线性负载电能用户在消耗电能的同时,还作为畸变功率源向电网注入畸变功率,使公共连接点的电压波形严重畸变,导致电网电压波动,产生瞬时脉冲等各种电能质量干扰,对电网、敏感电气设备的正常运行造成了严重影响^[5-7],科学而合理的电能计量方法应该依据功率潮流检测分析结果的,确定污染源,将注入电网的畸变功率及其电能单独计量,并将其计入到总的电能中去,而目前的电能计量方法及仪表均不能满足这种计量的需要.对不同特性的负载进行电能计量时,目前的计量方法存在着不合理的问题.例如在谐波条件下,按传统的计量方式,线性负载用户不仅要支付基波电能的费用,还要负担对其毫无意义而且有害的、被迫吸收的谐波电能的费用;而非线性负载则相反,它向供电系统注入谐波,污染电网,但却少负担由其注入的谐波电能的费用^[8-10].从效果上看,这种电能计量方式起到了鼓励用户向系统注入谐波的作用,显然对提高电网电能质量极为不利.比较合理的方法是采用基波电能表的技术方案,它已经成功应用到非线性负载的电能计量中,并取得了一定的成果^[11-13].但谐波条件下的电能计量理论、方法和仪表解决不了更具普遍性的畸变信号条件下电能准确合理计量的问题,因为谐波模型并不能真实反映电网信号的实际情况,尤其是冲击性负载等非线性负载产生的非平稳电压、电流信号根本无法用谐波信号的数学模型来描述.

在当前电网信号严重畸变的现状下,如何准确地合理计量功率及电能已经成为电气测量技术及仪器仪表研究领域急需解决的问题.本文应用多小波变换对半导体整流类负载与谐波性电弧炉负载的电能合理计量问题进行了研究,提出了针对不同频带信号采用不同最优小波基的多小波电能计量方法,并通过仿真实验验证了所提方法的正确性和准确性.

1 畸变信号条件下电网简化模型和功率信号的数学描述

1.1 电网简化模型

畸变信号条件下电网的简化模型如图1所示,电网电源电压 $u(t)$ 为正弦电压源, $i(t)$ 为电网电流, Z_l 为线路阻抗, Z 为非线性负载阻抗, a 点为负载电能计量节点.

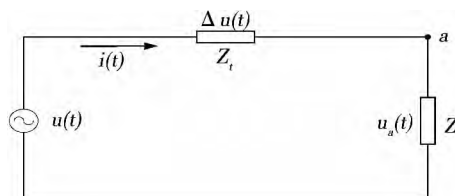


图1 电网的简化模型

非线性负载电压与电流及其分解定义如下.

$$u_a(t) = u_l(t) + u_s(t) \quad (1)$$

$$i(t) = i_l(t) + i_s(t) \quad (2)$$

其中: $u_l(t)$ 、 $i_l(t)$ 为基波分量; $u_s(t)$ 、 $i_s(t)$ 为畸变分量.

1.2 功率信号数学描述

由功率理论可得 a 点的瞬时功率为

$$p_a(t) = u_a(t) i(t) \quad (3)$$

a 点的平均功率为

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{T} \int_0^T p_a(t) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [p_l(t) + p_{ls}(t) + p_{sl}(t) + p_s(t)] dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T p_l(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T p_{ls}(t) dt + \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{sl}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T p_s(t) dt = \\ &= P_l + P_{ls} + P_{sl} + P_s \end{aligned}$$

式中: P_l 、 P_{ls} 、 P_{sl} 与 P_s 分别为非线性负载吸收的基波功率、基波电压与畸变电流产生的功率、畸变电压与基波电流产生的功率及畸变电压与畸变电流产生的功率.在此,称 P_s 为畸变功率.

2 畸变信号条件下电能计量新方法

根据功率潮流理论分析与仿真分析结果可以得到对非线性负载普遍适用的畸变信号条件下电能合

理计量新方法^[4]:

$$P = P_I + P_{Is} + P_{sI}$$

$$P = P_a - P_s$$

其中: P_a 为计量节点 a 处的实测功率; P_s 为 P_a 中的畸变功率。

3 多小波变换

3.1 小波变换

在畸变信号条件下,应用小波分解与重构算法可以求得负载电流与电压的基波分量和畸变分量。

由多分辨率分析理论可知, $u(t)$ 、 $i(t)$ 可分解成不同频率的成分,分别表示为:

$$u(t) = \sum_k c_0(k) \varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{J-1} d_j(k) 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k)$$

$$i(t) = \sum_k c_0'(k) \varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{J-1} d_j'(k) 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k)$$

其中: J 为分解的层数; $c_j(k)$ 、 $c_j'(k)$ 为尺度系数; $d_j(k)$ 、 $d_j'(k)$ 为小波系数初始的尺度系数; $c_j(k)$ 、 $c_j'(k)$ 可分别由信号 $u(t)$ 、 $i(t)$ 直接采样获得。如果信号的采样频率大于 Nyquist 频率,那么 $c_j(k)$ 、 $c_j'(k)$ 就可以很好地逼近信号 $u(t)$ 、 $i(t)$ 。这样,由初始尺度系数逐层分解就可以把电压信号、电流信号分解到不同的频段上。

3.2 多小波变换及其最优小波基的选择

为了克服传统小波变换对畸变信号分解与重构存在较大误差的缺点,文章分别计算畸变信号不同频带部分的信息熵,并据此选择对其分解重构的最优小波基。

Shannon 信息熵是对一定状态下系统信息含量的一种测度,而小波变换可对信号进行多分辨率分析,因此可以结合小波变换与 Shannon 信息熵的特点,针对不同频带的信号分别计算其信息熵,并据此选择相应频带的最优小波基。熵如式(4)所示:

$$H_s(W) = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log_2 p_i \quad (4)$$

其中 p_i 为各频带小波系数的能量分布概率,且

$$p_i = \frac{|W(s, i)|^2}{E_s(W)} \quad (5)$$

其中: $W(s, i)$ 为信号小波系数; $E_s(W)$ 为信号的能量; $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ 。当 $p_i = 0$, $p_i \cdot \log_2 p_i = 0$ 。

式(4)和(5)表示小波系数的熵的取值范围为

$$0 \leq H_s(W) \leq \log_2 N$$

其中,如果有一个小波系数等于零,则 $H_s(W) = 0$;

如果所有的 p_i 都相等,则 $H_s(W) = \log_2 N$ 。

针对不同的信号,其频率成分不同,造成信号在不同频率成份上的能量分布也不同,所以依据信息熵法对不同频率成分选择相应的最优小波并对畸变信号进行分解重构。选择不同的小波会有不同的小波系数熵。熵值越低,能量集中度越高。因此,可以根据需处理的信号的特性,确定一个最优小波搜索集,然后根据各种小波对信号分解重构的结果分别计算其能量分布函数并求得各分量的信息熵,从而获得最优小波函数。

3.3 非线性负载电能计量的多小波变换分析

以半导体整流器件和电弧炉等为代表的谐波性负载为电力系统的主要负载类型,因此本文以这两种非线性负载为例,应用多小波变换对其进行电能的合理准确计量。

首先,利用 Db40 小波对非线性负载电参量信号进行单一小波变换^[4],得到畸变信号在各个频带上的信号。

然后,计算各子频带信号在各种常用小波变换下的信息熵值并比较熵值大小确定最优分解重构小波基。

最后,利用寻得的最优小波基对非线性负载电参量信号进行多小波变换并据此求得非线性负载消耗的功率大小。

4 电能计量仿真实验

本节对电力系统中主要非线性负载的电能计量进行仿真实验,通过寻找电参量基波与畸变部分的最优分解重构小波基,获畸变信号的基波分量与畸变分量,并按照电能合理计量方法进行电能计量并与单纯利用 Db40 小波基的计量结果进行比较。单一小波变换下非线性负载消耗的有功功率值可参见文[4]。本文的仿真实验利用 Matlab8.1.0.604 进行。

4.1 半导体整流器有功功率计量

含有半导体整流器件的电网简化模型中电流幅值 $I = 20$ A, 半导体整流器导通角为 $\pi/4$, 电压幅值为 $U = 220$ V, 仿真的采样频率 $f_s = 12\ 800$ Hz, 采样点数为 $n = 1\ 280$ 点, 对信号进行 6 层小波分解。

图 2 为利用 Db40 小波与信息熵法寻得的最优小波分解得到基波与畸变分量结果。表 1 为 Db40 小波与信息熵法寻得的最优小波分解重构后非线性负载功率计量结果。

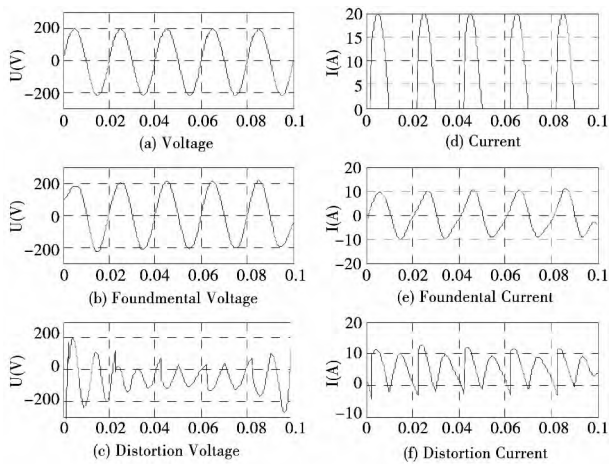


图 2 多小波分解得到的电压电流畸变与基波部分

表 1 多小波分解后功率的计量结果

	P_a	P_I	P_{Is}	P_{sI}	P_s
理论值/W	909.233 8	957.475 8	0	0	-48.242 0
单小波/W	901.791 2	961.017 0	-6.881 7	-2.744 9	-49.599 2
多小波/W	911.256 6	957.157 3	0.130 4	-0.325 5	-45.705 6
单误差	-8.18×10^{-3}	3.70×10^{-3}	—	—	-2.82×10^{-2}
多误差	2.23×10^{-3}	-3.34×10^{-4}	—	—	-5.24×10^{-2}

由上述仿真结果可知:

1) 与文 [4] 得到的结果相比,图 2 分解得出的畸变信号基波分量更接近工频电网信号,因此应用信息熵法对基波与畸变分量分别寻找最优小波并进行分解重构的方法可以实现有针对性的畸变信号处理;

2) 由表 1 可知,基波功率与总功率测量准确度等级都达到了 10^{-3} ,且多小波变换的电能量计结果准确度更高,说明采用多小波的计量方法能提高功率的计量准确度;

3) 由表 1 可知,基于信息熵评价指标的多小波变换条件下的功率计量准确度,相较于单一小波变换更高。

4.2 谐波干扰负载有功功率计量

含有谐波性负载的电网简化模型中电流有基波与三次谐波组成,基波电流幅值 $I = 20\text{ A}$,初始相位为 $-\pi/3$,三次谐波电流幅值为 2.5 A ,初始相位为 $-\pi/6$,电源电压幅值为 $U = 220\text{ V}$,仿真的采样频率 $f_s = 12\,800\text{ Hz}$,采样点数为 $n = 1\,280$ 点,对信号进行 6 层小波分解。

图 3 为利用 Db40 小波与信息熵法寻得的最优小波分解得到基波与畸变分量结果。表 2 为 Db40

小波与信息熵法寻得的最优小波分解重构后非线性负载消功率计量结果。

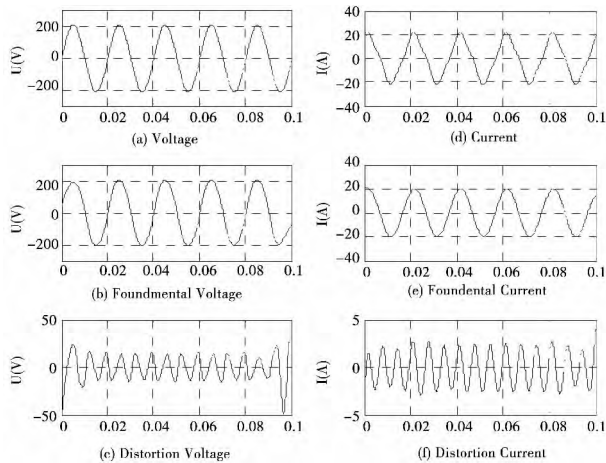


图 3 多小波分解得到的电压、电流畸变与基波部分

表 2 多小波分解后功率的计量结果

	P_a	P_I	P_{Is}	P_{sI}	P_s
理论值/W	896.875 0	900.000 0	0	0	-3.125 0
单小波/W	895.160 4	899.439 2	2.027 7	3.097 0	-9.403 6
多小波/W	895.316 1	901.074 8	-1.253 2	0.971 0	-5.48
单误差	1.92×10^{-3}	-6.22×10^{-4}	—	—	—
多误差	1.74×10^{-3}	1.19×10^{-3}	—	—	—

由上述仿真结果可知:

1) 与文 [4] 得到的结果相比,图 3 分解得出的畸变信号基波分量更接近工频电网信号,因此应用信息熵法对基波与畸变分量分别寻找最优小波并进行分解重构的方法可以实现有针对性的畸变信号处理;

2) 由表 2 可知,功率测量准确度等级都达到了 10^{-3} ,但多小波变换的计量结果更高,说明采用多小波的计量方法能提高功率的计量准确度;

3) 由表 2 可知,基于信息熵评价指标的多小波变换条件下的功率计量准确度,相较于单一小波变换更高。

4.3 仿真误差分析

在非线性负载的电能量计中,多小波变换法是利用信息熵寻得的最优小波基,与单一的小波变换法相比精度得到了提高,但同样还是存在以下影响电能量计精度的因素。

1) 小波分析的边际效应会给小波变换带来一定的误差。

2) 本文中应用信息熵评价指标所求畸变信号分解重构所需的最优小波基只是在已知小波基范围

内的求解结果,因此所求得的最优小波并不是全局的最优解,所以会给仿真结果带来误差。

5 结 论

本文应用基于信息熵评价指标的多小波变换对以电力机车为代表的冲击性负载和以半导体整流器为代表的谐波性负载进行有功功率合理计量研究,通过仿真实验我们得到如下结论:

1) 不同的小波基对不同频谱的信号进行逼近具有不同的准确度。应用信息熵评价指标对畸变信号的基波与畸变分量分别寻得最优小波基的电能计量结果要高于基于 Db40 小波的电能计量准确度。

2) 应用多小波计量总功率的准确度比单一小波计量的准确度高出一个数量级,说明本文提出的针对不同频带信号采用不同小波基的多小波电能计量方法的正确性。

3) 从分解效果来看,多小波分解效果对负载更具针对性,更能准确地把信号不同的频率分量从信号中分解出来。

根据信号基波与畸变部分的特征构造对应的小波基,获得更为准确的电能计量结果是作者今后要进行的主要工作。

参 考 文 献:

- [1] 邢颖,李宝树. 非线性负荷对电网电压和电流的影响 [J]. 电力系统,2007,26(8): 25-28.
- [2] YUAN Haiwen, QIN Ye, ZHAO Cheng, et al. Research on Harmon-

ic Current Distribution of Beijing's Rail Traffic Power Supply System [J]. //9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing, China: The Chinese Institute of Electronics, 2009: 235-238.

- [3] 赵俊华,文福拴,杨爱民,等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题 [J]. 电力系统自动化,2011,35(14): 2-10,29.
- [4] 姚金雄,张涛,林榕,等. 牵引供电系统负序电流和谐波电力系统的影晌及其补偿措施 [J]. 电网技术,2008,32(9): 61-64,88.
- [5] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用 [J]. 中国电机工程学报,2012,32(4): 1-10.
- [6] 凌静,李双齐,叶细锋. 电能质量对医疗设备的影响 [J]. 医疗卫生装备,2014,2014(7): 119-120,126.
- [7] 王石磊. 浅谈电能质量品质对自动化企业生产的影响 [J]. 河南科技,2013,2013(14): 94-95.
- [8] 陈斌. 非线性负载对电能计量的影响 [J]. 华东电力,2003,2003(11): 36-37.
- [9] 高笑,王步云,龙燕,等. 电力谐波及其对电能计量的影响 [J]. 后勤工程学院学报,2004,(2): 53-55,73.
- [10] 严伟佳,蒋平,李峰. 谐波对电能计量影响的研究 [J]. 华东电力,2006,34(2): 40-42.
- [11] 金维宇,刘桂英. 基于有源滤波器的基波电能表及其应用研究 [J]. 长沙电力学院学报: 自然科学版,2003,18(4): 41-44.
- [12] 高云鹏,滕召胜,温和,等. 凯塞窗插值 FFT 的电力谐波分析与应用 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(4): 43-48.
- [13] 彭辉,李自品,朱海超,等. 冲击性负载对电子式电能计量的影响分析及仿真 [J]. 中国农村水利水电,2009(6): 151-153,157.
- [14] 张晓冰. 畸变信号条件下电网功率潮流分析与电能计量新方法研究 [J]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2007: 5-31.

(编辑: 温泽宇)