

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802247

非侵入负荷辨识的谐波特征量提取改进方法研究

吕志宁¹ 赵少东¹ 程竹一¹ 张云翔¹ 冯燕钧²

(1. 南方电网深圳供电局有限公司 深圳 518001; 2. 江苏智臻能源科技有限公司 南京 211100)

摘要: 基于事件分解的负荷匹配方法计算快内存少,工程应用适应性强。首先面向事件分解型负荷辨识方法分析了稳态特征量的提取方法,梳理出典型家用电器辨识特征库,并指出谐波特征量是空调及小功率电器复杂工况下负荷辨识的重要判据。然后分析了工程应用中谐波特征量提取影响因素,基于快速傅里叶变换(FFT)算法频谱泄露原理,研究了电网频率动态变化和电器谐波相角抖动对于谐波特征量提取的影响。提出了针对性解决方法,通过多点均值方法解决电网频率波动导致的非同步采样问题,并提出极值差量方法解决电器谐波相角影响,两种方法结合,可有效将基次谐波误差降到 1% 以下,偶次谐波误差降到 2%~4%。最后通过实验平台和工程实证,验证了谐波改进提取方法的有效性,相对于改进前可有效提升负荷辨识精度 5% 以上。

关键词: 非侵入负荷辨识; 谐波特征量; FFT 算法; 多点均值; 极值差量

中图分类号: TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Improved method research on extracting load harmonic feature for non-intrusive load monitoring

Lv Zhining¹ Zhao Shaodong¹ Rao Zhuyi¹ Zhang Yunxiang¹ Feng Yanjun²

(1. China Southern Power Grid Shenzhen Electric Power Company, Shenzhen 518001, China;

2. Jiangsu Zhi Zhen Energy Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Non-intrusive load monitoring based on event decomposition is widely application for less storage and fast calculation speed. Firstly, methods on extracting load steady state feature were given, typical household appliance identification feature library was concluded. From the library, load harmonic features were important for air conditioner and other small power appliance which have even harmonics. Then, influencing factors of harmonic feature extraction in engineering application were researched. Based on the principle of spectrum leakage of FFT algorithm, the influence of grid frequency dynamics and electrical harmonic phase angle jitter on harmonic feature quantity extraction were studied. A Multi-point mean solution is proposed to solve the problem of non-synchronous sampling caused by grid frequency fluctuations, and the method of extreme value difference is proposed to solve the influence of appliance harmonic phase angle. With the two methods, the base harmonic error can be reduced to less than 1%, and the even harmonic error to 2%~4%. Finally, with the experimental platform and engineering, the effectiveness of the harmonic improvement extraction method is verified, and the load identification accuracy can be effectively improved by more than 5%.

Keywords: non-intrusive load monitoring; harmonic feature; fast fourier transform algorithm; multi-point mean; extreme value difference

0 引言

电力用户用电信息的精细化测量,是需求响应、智能用电、能源综合服务等电力用户双向互动的分析及实现基础。传统基于智能插座等分项计量设备的侵入式负荷监测方法,虽数据准确可靠,但实施成本高、用户接受程度低而推行困难。始于 20 世纪 80 年代的 Hart 教授研究的非侵入

式负荷辨识方法,投入小实用性强,自提出之后,一直受到国内外电力公司和研究机构持续关注^[1-3]。

非入户负荷辨识从整体辨识思路方面主要分为两大类,一类是基于负荷运行概率负荷匹配,该类负荷辨识方法以负荷特征提取为基础,利用先进的机器学习算法进行负荷匹配^[4-9],例如 Fisher 有监督判别方法^[4]、贝叶斯算法^[5]、粒子群算法^[6]等。文献[8]分析了多种家用电器的功率和谐波特征,

并选取低功率电器差异最大的频域谐波幅值作为新的特征，应用聚类算法进行负荷辨识；文献[9]则进一步细分了用户用电模式，在对负荷按工/休日划分之外，进行近邻传播(affinity propagation, AP)聚类分析分析，验证了考虑用电特性情况下对多状态负荷设备识别的可行性。基于运行概率的负荷辨识对先验数据样本需求大硬件要求高，多基于主站服务进行分析，即在智能电表末端接入非侵入式负荷监测终端，采集居民用户总线端实时电流电压数据，并将数据传回到主站进行辨识，海量数据实时通信对通信信道要求极高。

另一类则是基于事件分解的负荷匹配方法^[10-16]，文献[10]基于“三元倍数、稳态功率增量及二次谐波电流”三元特征提取，构建了定频空调的辨识方法；文献[11-12]则进一步分析了负荷多源特征在厨电、家电中的辨识应用；文献[13]利用用户电器启动时间存在时间差，将求解模型建立为单位时间间隔内仅从采集信号中分离两路信号问题，并结合负荷电流信号的频域稀疏性，将欠定方程转化为最优化约束问题进行辨识研究。

目前国内相关研究主要还是以理论研究为主，所以关注点较为集中的还是负荷识别方法，深入挖掘复杂机器学习算法对辨识精度的影响。但在实际工程应用中，软件硬件的技术条件的可行性，基于事件的负荷辨识方法计算速度快、内存消耗少，可基于负荷辨识终端直接进行辨识，并将结果上传主站，通信压力小，是当前工程应用的主要方法^[14-15]。但同时，复杂的电网工况和设备工况给负荷特征准备提取带来了诸多干扰，影响了负荷辨识的准确性。

本文根据深圳公司及合作单位在实际工程应用遇到的问题为切入点，开展负荷特征量提取方法的研究，以解决非侵入式负荷辨识工程应用中的辨识干扰因素^[16-17]。首先基于负荷辨识特征量库基础，分析了谐波特征量在负荷辨识中的关键作用。针对负荷谐波特征量，分析了谐波特征量提取的影响因素，一是电网频率动态变化导致的非同步采样情况下存在谐波特征偏差，二是电器谐波相角不确定性

抖动带来的谐波特征偏差。然后针对各影响因素进行仿真和验证分析并提出改进方法，并通过算例验证谐波特征改进提取方法对负荷辨识准确性的提升。

1 负荷辨识特征量

1.1 事件分解型负荷辨识

基于事件分解型的负荷辨识方法的主要步骤如图 1 所示。

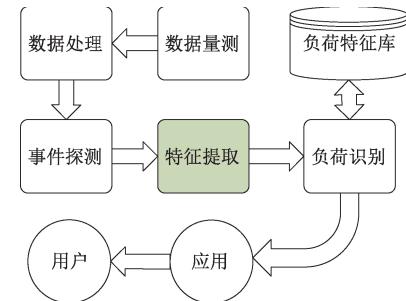


图 1 基于事件型的负荷分解辨识方法

基于事件型的负荷辨识方法的 3 个关键技术为事件探测、特征提取和负荷识别。其中负荷特征提取是负荷识别的基础，负荷识别是算法核心，负荷特征量的准确提取对于负荷辨识至关重要。

负荷辨识特征量是指用以可靠性区别电器类型和运行状态的特征量，常分为稳态、暂态、运行模式 3 类，其中稳态与暂态特征取决于设备内部元器件特征，运行模式特征则由设备的运行控制策略决定^[18]。

1.2 居民负荷辨识特征库

基于暂态特征量需要采集频率极高及大容量数据存储装置，会极大增加成本，当前的居民负荷辨识的工程应用中，主要依据稳态特征量采用基于事件分解的负荷匹配方法，常见居民电器的负荷稳态特征量如表 1 所示。可见，大

表 1 常见家用电器负荷辨识特征量

电器 名称	额定功率/ W	稳态特征量					P、Q 特性
		波峰系数	幅值	均方根	各次谐波幅值	THD/%	
电加热器	1 000~3 000	1.41	6.26	4.45		1.175 3	大功率易辨识
电热水壶	1 000~1 800	1.41	8.01	5.65			大功率易辨识
热水器	1 100~2 000	1.41	12.7	9.08			大功率易辨识
电冰箱	500~900	1.41	1.23	0.87		6.259 6	
台式机	150~200	2.39	1.11	0.47	2、3、5、7 次谐波多	88.760 5	
笔记本	50 左右	1.75	0.23	0.13	2、3、5、7 次谐波多	48.325	
电视机	70~200	3.74	1.3	0.35	3、5、7 次谐波多	170.232 2	
荧光灯		2.87	0.22	0.08	2、3 次谐波多	114.998 5	
微波炉	1 100~1 500	1.61	9.36	5.81	3 次谐波幅值大	42.262 3	3 次谐波 P Q 大
空调	制热	1.29	5.06	3.92	2 次谐波幅值大	14.522 4	3 次谐波 P Q 大
	制冷	1.29	3.92	3.05	2 次谐波幅值大	14.323 5	3 次谐波 P Q 大
洗衣机	洗涤	1.68	1.39	0.83		11.211 7	
	甩干		1.26	0.81		7.684 5	

功率电器可以通过有功、无功的增量变化进行辨识,多数电器均需要谐波特征量的支持,方可进行准确辨识,因此对负荷谐波特征量的准确提取至关重要。

1.3 负荷辨识特征量提取方法

根据居民用电习惯,同时开启或关闭两个电器的设备的概率非常小,即不同负荷设备投切必定存在时间差,因此只要采样频率保证,通过负荷特征量的变化即可获取负荷的有功、无功及谐波特征量^[12]。

1) 有功和无功特征量

按照式(1)~(3),以平均5个周期的时域波形,提取负荷有功及无功特征量。

$$P_k(i) = \frac{1}{5T} \int_0^{5T} p(t) dt = \frac{1}{5T} \sum_{k=0}^{99} i(k) u(k) \frac{1}{f_s} \quad (1)$$

$$S_k(i) = \sqrt{\frac{1}{5T} \int_0^{5T} u^2 dt} \times \sqrt{\frac{1}{5T} \int_0^{5T} i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{5T} \sum_{k=0}^{99} u(k)^2 \frac{1}{f_s}} \times \sqrt{\frac{1}{5T} \sum_{k=0}^{99} i(k)^2 \frac{1}{f_s}} \quad (2)$$

$$Q_k(i) = \sqrt{S_k(i)^2 - P_k(i)^2} \quad (3)$$

其中, $k=1,2,3,\dots,i=0,1,999; T$ 是交流电的周期; f_s 是采样频率; k 是功率窗口; i 是一个窗口中的功率数。

2) 电流谐波特征量

基于快速傅立叶分析变换,根据式(4)计算电流谐波分量 I_k 。

$$I_k = \sum_{n=0}^{N-1} i(n) W_N^{kn} (k = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (4)$$

$$W_N^{kn} = e^{-j(2\pi/N)kn} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) - j\sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right)$$

2 特征量提取影响因素分析

2.1 快速傅里叶变换(FFT)算法的频谱泄露

电网信号是周期性的无限长序列,智能电表每0.1 s截取一次,电网理论周期为50 Hz,理论上截取5个周期波,但实际中电网频率在一定频率范围之间波动,导致非整周期截断。以一个周期截取为例,如图2所示。

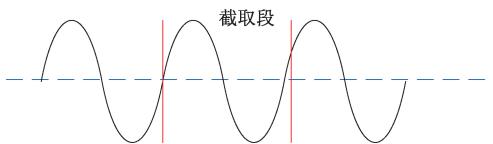


图2 无限长序列截取有限长序列

由于电网频率的波动,傅里叶截取的有限元信号并不是完整的周期,而仍然把信号当成无限长序列,即将截取的信号周期拓扑为无限长的序列,如图3所示。

由图3可知,新的无限长序列信号和原信号不同,分析得到的频谱自然不同,图2是单一频率信号,只有一根谱线,而图3中,除了图2信号包含的这根谱线外,出现了其他频率的谱线,即频谱泄露原理。

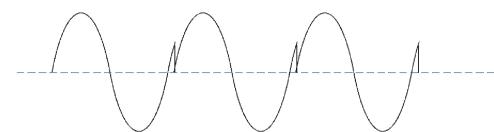


图3 有限长序列经过周期拓扑构建新的无限长序列

2.2 电网频率动态变化影响

根据国网《电能质量电力系统频率偏差》标准规定,我国电网频率偏差为±0.2 Hz,由2.1节的分析可知,负荷非同步采样会导致各次谐波的谐波泄露,如图4所示,基波幅值和相角均不是稳定直线,基波幅值出现规律毛刺,非同步采样误差累积,基波相角在0~2π之间规律变化。

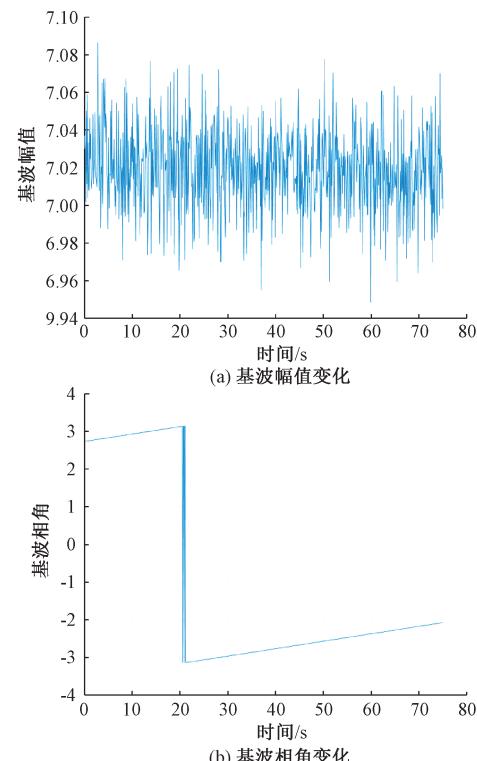


图4 频率49.99 Hz下的基波幅值和相角

利用MATLAB工具,以电网频率波动边界49.8 Hz~50.2 Hz为例分析了电网频率动态变化对采样的影响。其中信号输入为式(5),采样频率为800 Hz,对采样电流值做SFFT算法变换。49.8 Hz下基波和三次谐波的采样幅值及频率如图5及图6所示。

$$i = 5\cos(2\pi f_1 t) + 0.5\cos(2\pi f_3 t) \quad (5)$$

$$f_1 = 49.8, 50.2 \text{ Hz}; f_3 = 3f_1$$

定义谐波波动率为:

$$\sigma = (I_i(\max) - I_i(\min)) / I_i(\text{real}) \quad (6)$$

仿真结果表明,0.1 s级别的电流相位以一定的规律来回波动,多次谐波以倍频的波动率进行波动。单个电器的基波、谐波幅值波动较小,其中49.8 Hz下基波的最

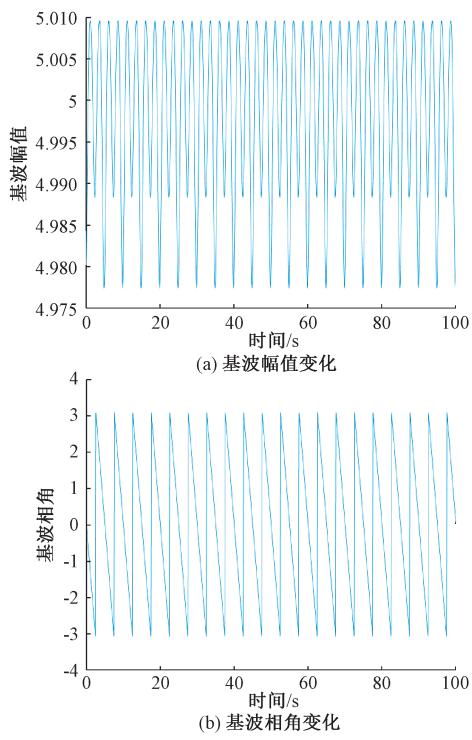


图 5 基波幅值和相角

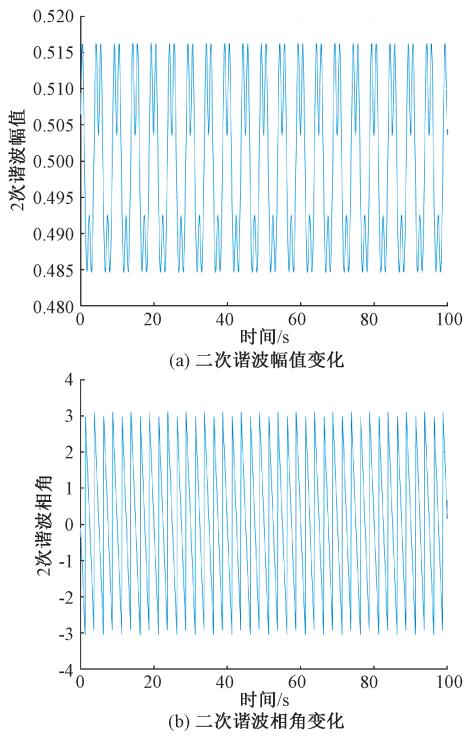


图 6 二次谐波幅值和相角

大波动率为 0.6%，三次谐波的最大波动率为 3%。

2.3 电器谐波相角抖动

家用电器的发展历经百年，品类繁多，特别是随着电力电

子等新技术的发展，电器运行特性更加复杂多样。对于纯阻性/感性的线性电器设备，其设备运行的幅频和相频特性均相对稳定。但对于整流性等非线性电器设备，如变频空调、放电式灯泡、电弧炉、笔记本换流器、微波炉等，其电气外特性不仅与元器件特性相关，还受运行模式的影响，电流、功率等波形会出现扭曲，从印记中提取的稳态、暂态特征或由波形估计的关键参数也会发生相应的改变，电器谐波相角变化也会带来非同步采样，主要出现在偶次谐波。

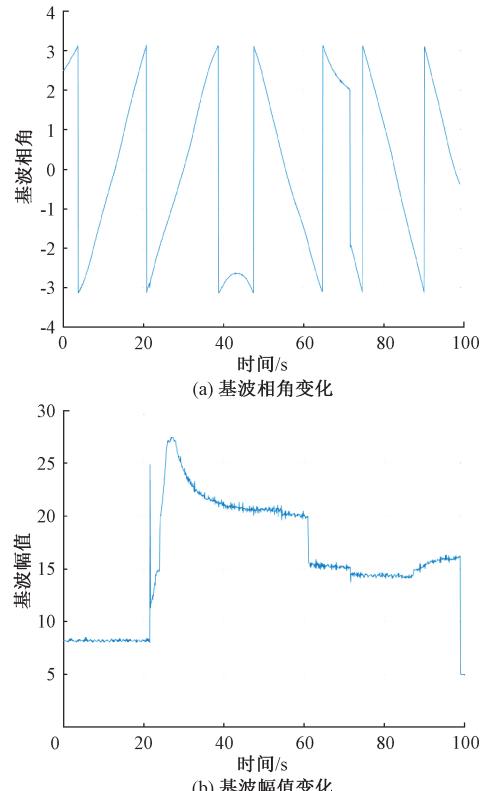
两个空调设备波形叠加与分解如图 7 所示，0~20 s 为卧室空调运行，20 s 时客厅中央空调开启，20 s~100 s 为两个空调同时运行。如图 7(a)和 7(b)所示，两个设备同时运行前后基波的幅值和相角均相对稳定，仅受 2.2 节所述电网频率动态变化的影响，且影响微弱。如图 7(d)所示，两个设备的二次谐波相角本身存在明显的抖动，设备叠加后抖动加剧，0~20 s 内的单个设备运行时幅值相对稳定，但两设备叠加后，二次谐波相角抖动导致幅值波动明显，波动率由 3% 扩大到 25%。

3 非同步采样的改进方法研究

3.1 基于多点均值的改进方法

在工程应用中，针对此电网频率动态波动对电流幅值的影响，通过多点取平均值的方法弱化幅值波动，如式(7)所示，通常 n 取 10，即幅值计算周期为 1 s。

$$I_j = \sum_{k=1}^n I_j(k)/n \quad (7)$$



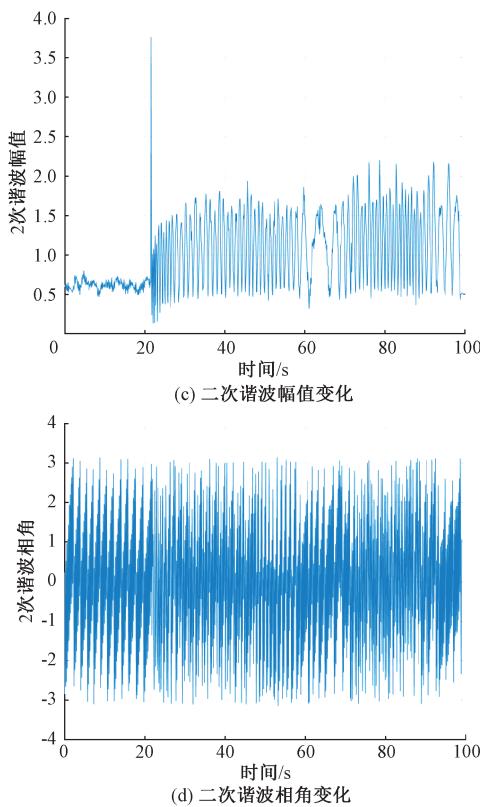


图 7 空调设备复合工况下的幅频和相频特性

式中: j 表示谐波次数; k 表示每个计算周期内的第 k 个点。

与此同时,在辨识算法上将误差边界通常设定在最大波动率之外,这样再次将波动影响减弱。基于多点均值提取方法的微波炉的三次谐波对比如图 8 所示,其中理想波形是平稳的直线,实际运行波形是频繁波动,多点均值方法可以很大程度降低电流波动,多点均值后相对无波动影响的幅值误差只有 0.5%。

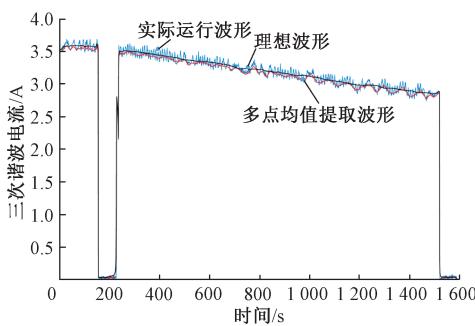


图 8 微波炉三次谐波提取结果比对

3.2 基于极值差量的改进方法

针对 2.3 节所述的电器相角抖动带来的幅值影响,若直接采用多点均值法,将会带来较大的幅值采样偏差,影响辨识精度,因此针对存在相角偏差的谐波,论文提出了基于极值差量的改进方法,针对奇、偶次谐波采用不同的

谐波特征值提取方法如式(8)所示。

$$\begin{aligned} I_j^2(T) &= \sum_{k=1}^n I_j^{all}(k)/n - \sum_{k=1}^n I_j^1(k)/n, j = 1, 3, 5, \dots \\ I_j^2(T) &= \max(I_j^{sum}(1), \dots, I_j^{sum}(n)) - \max(I_j^1(1), \dots, \\ I_j^1(n)), j = 2, 4, 6, \dots \end{aligned} \quad (8)$$

式中:下标 j 表示谐波次数;上标 sum 表示设备叠加电流;1、2 表示第 1 和第 2 个设备; T 表示计算周期; k 表示每个计算周期内的第 k 个点;其中第 1 个设备的谐波均值及最大值的取法为叠加前的最后 10 个周期。式(8)中表示了两个设备叠加运行时的谐波特征量提取方法,对于 3 个及以上设备叠加运行时,提取方法类同。

图 9 所示为空调负荷的二次谐波各类提取方法的结果与实际值的比对,可见基于极值差量的提取方法可明显减少二次谐波的幅值误差。

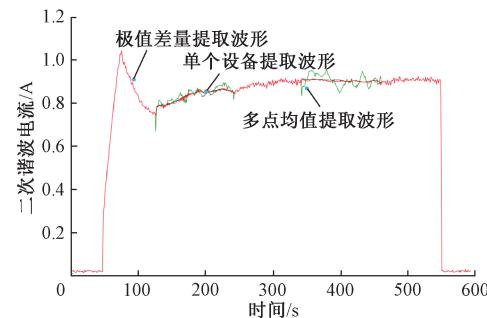


图 9 空调二次谐波提取结果比对

4 算例分析

以实验室辨识精度验证平台进行负荷特征量提取及辨识准确性验证,如图 10 所示。该实验平台装有分项设备计量和分析表计,并配有分析对比主站,可以进行各项特征量及辨识结果的比对。同时,深圳公司已在市区福田局宿舍楼、中航北苑等小区选择 800 户居民进行非侵入负荷辨识试点,其中在中航北苑选择 20 户居民用户做侵入和非侵入双项试点。



图 10 负荷辨识精度验证平台

谐波特征量对于小功率电器辨识精度至关重要,算例中选取谐波特征量含二次谐波的小功率电器设备,及二次谐波含量较大的变频空调进行验证分析。具体分析结果如表 2 所示,谐波幅值误差会有大幅降低,改进前幅值误差均在 10% 以上,改进后基本在 2%~4%,幅值误差依然

还存在主要是文中介绍的多点均值和极值差量方法在尽可能削弱但尚不能完全平抑电网频率波动和电器相角的抖动的影响,但所提方法保证了工程的简便可行性,已将谐波特征量的幅值误差改进到对辨识的干扰影响降低到微乎其微,应用同样逻辑的辨识方法,辨识的准确率也基本能在原辨识精度基础上提升 5%。

表 2 方法改进前后的谐波误差及辨识精度对比

(%)

电器组合	二次谐波特征幅值误差		负荷辨识准确率	
	改进前	改进后	改进前	改进后
空调+空调	13	1.5	89	95
荧光灯+空调	9.5	2.1	90	95
空调+笔记本	11	3.8	78	82
空调+微波炉	14	3	82	88
荧光灯+笔记本	18	4.0	79	85
笔记本+微波炉	16	4.0	79	85

实证验证中,针对空调和小功率电器组合运行方式进行辨识精度对比验证,算法升级后,负荷辨识的整体精度由 82% 提升到 86%。随着工程的持续推进和应用,将会在目前特征量提取准确率情况下,进一步优化匹配算法以提升辨识整体准确度。

5 结 论

非侵入式负荷辨识技术的规模化推广,低成本获取用户精细化负荷数据,对于国家电力体制改革、智慧能源及综合能源服务转型等能源战略至关重要。本文旨在解决非侵入式负荷辨识工程应用中的客观干扰因素对负荷谐波特征量的影响问题。

1) 针对事件分解型负荷辨识方法,分析了有功、无功及谐波稳态特征量的提取方法,梳理出典型家用电器辨识特征库,并指出谐波特征量是空调及小功率电器复杂工况下负荷辨识的重要判据。

2) 分析工程应用中谐波特征量提取影响因素,基于 FFT 算法频谱泄露原理的深入分析,研究了电网频率动态变化带来的非同步采样谐波波动现象,分析了部分家用电器由于自身元器件特性导致的谐波相角抖动现象,设备复合运行工况下可将负荷波动率由 3% 扩大到 25%。

3) 提出了针对性解决方法,通过多点均值方法解决电网频率波动导致的非同步采样问题,多点均值后可将波动率在 3% 以上的谐波,降低到谐波幅值误差小于 1%。提出极值差量方法解决空调、微波炉、笔记本等电器偶次谐波相角抖动的问题,可将偶次谐波误差降到 2%~4%。

4) 最后通过实验验证平台和深圳的工程实证,验证了谐波改进提取方法的有效性,相对改进前可有效提升负荷辨识精度 5% 以上。

参考文献

- [1] 余贻鑫,刘博,栾文鹏.非侵入式居民电力负荷监测与分解技术[J].南方电网技术,2013,7(4):1-5.
- [2] 程祥,李林芝,吴浩,等.非侵入式负荷监测与分解研究综述[J].电网技术,2016,40(10):3108-3117.
- [3] 朱德省,尹建丰,周琨荔.非侵入式电力负荷的辨识和监测[J].电测与仪表,2015,52(S1):133-138.
- [4] 祁兵,程媛,武昕.基于 Fisher 有监督判别的非侵入式居民负荷辨识方法[J].电网技术,2016,40(8):2484-2491.
- [5] 周晨轶,闫娇娇,刘晨阳.基于贝叶斯准则的非侵入式负荷监测方法[J].浙江电力,2018,37(5):7-11.
- [6] 李如意,黄明山,周东国,等.基于粒子群算法搜索的非侵入式电力负荷分解方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(8):30-36.
- [7] 李如意,王晓换,胡美璇,等.RPROP 神经网络在非侵入式负荷分解中的应用[J].电力系统保护与控制,2016,44(7):55-61.
- [8] 孙毅,崔灿,陆俊,等.基于差量特征提取与模糊聚类的非侵入式负荷监测方法[J].电力系统自动化,2017,41(4):86-91.
- [9] 徐青山,娄藕蝶,郑爱霞,等.基于近邻传播聚类和遗传优化的非侵入式负荷分解方法[J].电工技术学报,2018,33(16):3868-3878.
- [10] 徐彤,刘建宇,汤立志,等.基于三元特征量的非侵入式定频空调辨识研究[J].电子测量技术,2018,41(3):69-73.
- [11] 杨东升,孔亮,胡博,等.基于多特征序列融合的负荷辨识方法[J].电力系统自动化,2017,41(22):66-73.
- [12] 谢宏伟,李捷,张良,等.基于多源特征量的非侵入式厨房家电辨识研究[J].国外电子测量技术,2018,37(7):50-55.
- [13] 武昕,韩笑.基于信号稀疏化欠定求解的居民用户非侵入式负荷分解算法[J].电网技术,2017,41(9):3033-3040.
- [14] MARCHIORI A, HAKKARINEN D, HAN Q, et al. Circuit-level load monitoring for household energy management[J]. IEEE Pervasive Computing, 2011, 10(1):40-48.
- [15] 徐彤,李永超,杨宇全,等.非侵入负荷监测装置及其工程应用研究[J].电子测量技术,2018,41(3):93-97.
- [16] 贺七杰.谐波对电能计量的影响分析[J].电子测试,2013(20):49-50.
- [17] 段虎,李益华.小波变换在电力系统谐波检测方面的应用[J].国外电子测量技术,2010,29(12):73-75.
- [18] 周明,宋旭帆,涂京,等.基于非侵入式负荷监测的居民用电行为分析[J].电网技术,2018,42(10):3268-3276.

作者简介

吕志宁,硕士研究生,主要研究方向为综合能源管理与服务、企业信息化等。

赵少东,硕士、工程师,主要研究方向为大数据、用电信息采集高级应用。

冯燕钧,博士、工程师,主要研究方向为非侵入负荷辨识。
E-mail:fengyanjun@intelever.com