

基于VMD-WPT和Prony算法的谐波间谐波检测

施瑶,王雅静,崔京楷,张涵瑞

(山东理工大学 电气与工程学院,山东 淄博 255049)

摘要:针对Prony算法在电能质量参数检测中易受噪声影响的问题,提出变分模态分解(VMD)联合小波包变换(WPT)去噪的方法,并应用到Prony算法的谐波和间谐波检测中,降低噪声影响,提高检测准确性。首先谐波信号通过VMD分解,得到不同频率的固有模态函数,然后将含有噪声的固有模态函数作为独立输入,分别进行小波包去噪,并叠加去噪后的固有模态函数得到谐波和间谐波信号,最后利用Prony算法进行参数辨识。仿真与对比结果表明,所提出的算法能够有效降低噪声对Prony算法的影响,提高谐波间谐波的检测精度。

关键词:电能质量;Prony算法;变分模态分解;小波包变换

中图分类号:TM935 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21852

Harmonic and Inter-harmonic Detection Method Based on VMD-WPT and Prony Algorithm

SHI Yao, WANG Yajing, CUI Jingkai, ZHANG Hanrui

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China)

Abstract: For the noise-sensitive problem of Prony algorithm in the parameter measurement of power quality, a new denoising method combined variational mode decomposition (VMD) with wavelet packet transform (WPT) was proposed and was applied to the detection of harmonic and inter-harmonic to reduce the impact of noise and improve the accuracy of detection. First, the harmonic signal was decomposed by VMD to obtain the natural modal functions of different frequencies, then, the intrinsic mode functions containing noise as independent inputs were denoised by WPT to attain reconstructed intrinsic mode functions, which would be added up to acquire denoised signal to identify the parameters of the harmonic and inter-harmonic signal by Prony algorithm. The simulation and comparison results show that the algorithm can reduce the influence of noise on Prony algorithm and improve the accuracy of harmonic and inter-harmonic detection.

Key words: power quality; Prony algorithm; variational mode decomposition (VMD); wavelet packet transform (WPT)

随着各种新能源分布式电源的并网,电力系统受到的谐波间谐波污染加重,准确测量出谐波间谐波分量并对这些谐波分量进行处理对电力系统的安全可靠地运行具有重要意义^[1-2]。

Prony算法能够快速准确地检测出谐波间谐波,在电力系统参数检测中应用广泛^[3]。但Prony算法在检测中对噪声敏感,导致测量精度降低,需要降低噪声对Prony算法的影响。杜伟静^[4]等人采用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法去除含有噪声的

高频分量,但去除的高频分量中同样含有信号的有效信息,影响Prony测量精度。张煜林^[5]等人采用互补总体经验模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)联合小波包变换(wavelet packet transform, WPT)去噪,通过排列熵选取固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)进行去噪,然而虚假分量的存在增加工作量,且忽略低频分量含有少量噪声的问题,影响Prony测量精度。

变分模态分解(variational mode decomposition,

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2016EEQ20)

作者简介:施瑶(1995—),男,硕士,Email:sy210116@163.com

通讯作者:王雅静(1971—),女,博士,Email:wangyajing@sdu.edu.cn

VMD)算法是一种新的非线性信号处理方法^[6]。VMD算法能够有效地克服EEMD分解过程中产生的虚假分量问题,且VMD算法相比于EEMD算法具有较好的噪声鲁棒性^[7-8]。目前,VMD算法已经成功地运用在变压器局部放电去噪^[9]、地震信号去噪^[10]及轴承振动信号去噪^[11]。本文将VMD运用到电力系统的含噪谐波间谐波检测中,联合小波包变换(WPT)去噪,为降低噪声对Prony算法影响并提高检测精度提供一种新方法。

1 Prony算法原理

Prony算法通过对采样数据 $x(t)$ 进行线性拟合得到一组复指数函数 $\hat{x}(t)$,数学模型为

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中: p 为模型阶数; N 为采样点个数。

b_i 和 z_i 的复数表达式为

$$b_i = A_i e^{j\theta_i} \quad (2)$$

$$z_i = e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t} \quad (3)$$

式中: A_i 为幅值; θ_i 为相位; Δt 为采样间隔; f_i 为频率; α_i 为衰减因子; j 为虚数单位。

利用误差平方和 ε 最小原则保证拟合信号的准确度,表达式如下式所示:

$$\min \varepsilon = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2 \quad (4)$$

利用欧拉公式对式(1)进行求解可得下式:

$$\hat{x}(n) = \sum_n A_i e^{j\theta_i} \cos(2\pi f_i n + \theta_i) \quad (5)$$

定义样本函数数学模型,如下式所示:

$$r(i,j) = \sum_{n=p}^{N-1} [x(n-j)x(n-i)] \quad (6)$$

对式(6)进行构造扩展阶的样本矩阵 R_e ,如下式所示:

$$R_e = \begin{bmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \cdots & r(1,p_n) \\ r(2,0) & r(2,1) & \cdots & r(2,p_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r(p_n,0) & r(p_n,1) & \cdots & r(p_n,p_n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

利用奇异值分解和最小二乘法对式(7)进行求解,确定有效秩 p 和所有的特征方程系数 a ,并带入下式求解 z :

$$\sum_n a_p z^{p-n} = 0 \quad (8)$$

将式(8)得到的结果带入式(1)并改写为下式的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(0) \\ \hat{x}(1) \\ \vdots \\ \hat{x}(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \cdots & z_n^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \cdots & z_n^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

利用最小二乘法确定 b_i ,并计算得到拟合幅值 A_i ,相位 θ_i ,频率 f_i ,衰减因子 α_i 。具体计算公式如下式所示:

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan [\operatorname{Im}(b_i)/\operatorname{Re}(b_i)] \\ f_i = \arctan [\operatorname{Im}(z_i)/\operatorname{Re}(z_i)]/(2\pi\Delta t) \\ \alpha_i = \ln|z_i|/\Delta t \end{cases} \quad (10)$$

2 基于VMD-WPT和Prony算法的谐波间谐波检测

本文针对Prony算法对噪声敏感问题,提出了VMD-WPT联合去噪的算法模型,对含噪的谐波间谐波信号进行预处理,降低噪声对Prony算法检测精度的影响。

2.1 变分模态分解

谐波信号经过VMD处理分解为 K 个IMF分量信号,通过如下的方式估算每个IMF的中心频率和带宽:

- 1) 利用对模态分量 u_m 进行Hilbert变换, $m = \{1, 2, 3, \dots, K\}$,计算得到 $u_m(t)$ 的解析信号;
- 2) 加入指数项 $e^{j\omega_m t}$ 估计每个解析信号的中心频率,并将 $u_m(t)$ 的频谱调制到基频带上;
- 3) 计算解调信号梯度的平方 L^2 范数,估计带宽。

通过上述步骤得到的变分约束模型为

$$\begin{cases} \min_{\{u_m\}, \{\omega_m\}} \{ \sum_m \|\partial_t [(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) \otimes u_m(t)] e^{-j\omega_m t}\|_2^2 \} \\ s.t. \quad \sum_K u_m = f \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\delta(t)$ 为单位脉冲信号; \otimes 为卷积; ∂_t 为对函数求时间 t 的偏导数; ω_m 为各模态分量中心频率。

通过迭代搜索变分模型并引入拉格朗日惩罚算子 $\lambda(t)$ 和二次惩罚因子 α 将信号 f 分解成 K 个有限带宽的模态分量,各模态之和即为输入的信号。具体如下所述:

- 1) 令 $n=0$,并对 $\{\hat{u}_m^1\}, \{\hat{\omega}_m^1\}, \{\hat{\lambda}_m^1\}$ 做初始化处理;
- 2) 令 $n = n + 1$,开始执行整个迭代;
- 3) 令 $m = 1, m < K$ 时,内层开始循环,更新 u_m :

$$u_m^{n+1} = \operatorname{argmin}_{u_m} L(\{u_{i < m}^n\}, \{u_{i \geq m}^n\}, \{\omega_i^n\}, \lambda^n) \quad (12)$$

4) $m < K$ 时,更新 ω_m :

$$\omega_m^{n+1} = \underset{\omega_m}{\operatorname{argmin}} L(\{u_i^{n+1}\}, \{\omega_{i < m}^{n+1}\}, \{\omega_{i \geq m}^n\}, \lambda^n) \quad (13)$$

5)更新 λ :

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \gamma [f(\omega) - \sum_{m=1}^K \hat{u}_m^{n+1}(\omega)] \quad (14)$$

式中: γ 为噪声容限参数,为降低噪声对分解结果影响,取 $\gamma = 0$ 。

6)循环步骤(2)~(5),直至满足下式迭代停止条件,结束循环:

$$\sum_{m=1}^K \frac{\|\hat{u}_m^{n+1} - \hat{u}_m^n\|}{\|\hat{u}_m^n\|^2} < \varepsilon \quad (15)$$

式中: ε 为判别精度,且 $\varepsilon > 0$ 。

通过上述步骤,VMD将信号分解为从低频到高频的 K 个IMF分量,其中噪声主要集中在高频分量上,低频分量中含有少量的噪声。

2.2 小波包降噪

文献[5]中张煜林等人利用小波包降噪方法对谐波信号经CEEMD分解得到的IMF分量进行降噪处理,本文在前人研究基础上采用小波降噪的方法对信号经VMD分解得到的IMF分量进行降噪处理。

小波包去噪的理论依据:含噪信号经过小波包分解后,代表有效信号的小波包分解系数幅值大于噪声的分解系数幅值,选择合适的阈值对有效信号幅值保留,将代表噪声的分解系数幅值设为零,并重构信号,获得去噪后的信号^[12]。

小波包降噪的关键是选取合适的阈值,本文选择广泛运用的默认阈值 μ ,同时选择小波包软阈值去噪函数进行去噪处理,具体计算公式为

$$\omega'_{j,k} = \begin{cases} \operatorname{sgn}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - \mu) & |\omega_{j,k}| \geq \mu \\ 0 & |\omega_{j,k}| \leq \mu \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\mu = \sigma \sqrt{2 \log N}$

式中: $\omega'_{j,k}$ 为小波分解系数; σ 为噪声标准方差。

2.3 算法实现步骤

本文提出基于VMD-WPT的谐波和间谐波的降噪算法,利用Prony算法进行去噪后的信号电力系统参数的检测。通过以下步骤进行算法的参数辨识:

步骤1:对待处理信号进行VMD分解,得到若干个IMF分量。

步骤2:对得到的IMF分量进行小波包软阈值去噪,并重构IMF分量。

步骤3:叠加去噪后的IMF分量,得到去噪处理后的信号,并利用Prony算法分析参数。

通过上述步骤即可实现本文算法的谐波间谐波参数的检测。

3 算法仿真与比较

3.1 算例1

采用与文献[4]相同的谐波间谐波信号模型与参数,信号的模型如下式所示:

$$x(t) = \sum_{m=1}^N A_m \sin(2\pi f_m t + \theta_m) + v(t) \quad (17)$$

式中: $v(t)$ 为噪声。

信号的具体参数如表1所示,且加入 $v(t)$ 后信号的信噪比为20 dB。

表1 模型参数设置

Tab.1 Model parameter setting

m	波形	频率/Hz	幅值/V	相位/rad
1	间谐波	25	8.5	0.50
2	谐波	50	8.0	0.56
3	间谐波	105	9.6	0.46
4	谐波	150	14.2	0.25
5	间谐波	155	0.2	0.70

采样频率4 000 Hz,采样点数为1 000,采样长度为0.25,含有噪声的信号波形如图1所示。

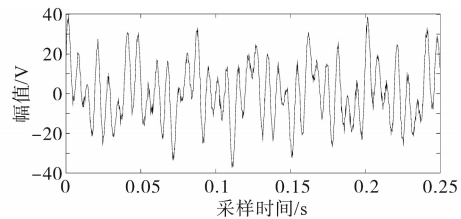


图1 含噪信号波形图

Fig.1 Waveform of noisy signal

利用VMD算法和文献[4]中EEMD算法分别对含噪的信号进行分解,得到的IMF分量波形图,如图2、图3所示。

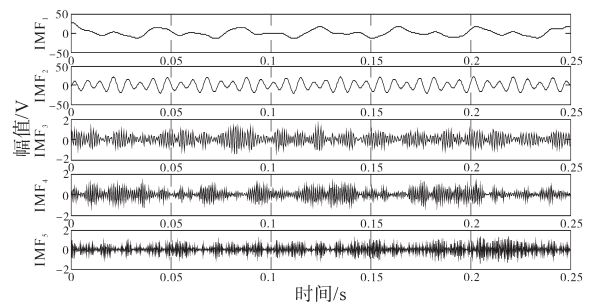


图2 含噪信号VMD分解

Fig.2 Noisy signal decomposition based on VMD

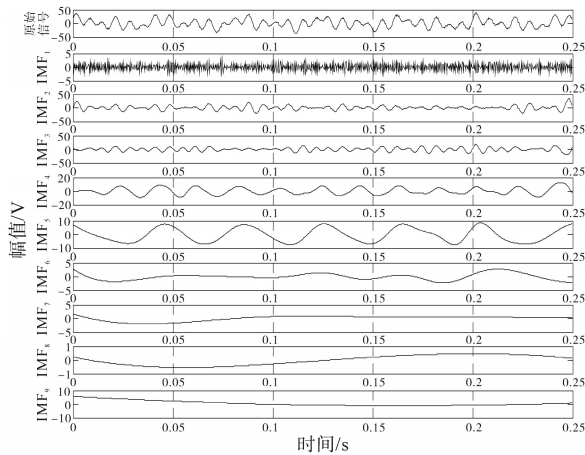


图3 含噪信号EMD分解

Fig.3 Noisy signal decomposition based on EEMD

由图3可知,文献[4]利用EEMD算法进行含噪信号的分解得到的IMF存在虚假分量。通过排列熵的方法进行有效信息分量的筛选,然而排列熵的选取阈值需要通过大量的实验测量才能确定,缺乏理论依据,容易受到人为因素的干扰,不能准确得到含有噪声的有效信息分量,同时也忽略了低频分量同样含有少量噪声,影响后续参数辨识准确度。

比较图2、图3可知,VMD算法有效地避免了虚假分量的产生,降低计算量以及人为因素的干扰。VMD算法虽然具有一定的抗噪性,但是所得到的IMF分量,受到噪声干扰,波形发生了严重的畸变。对得到的IMF分量进行小波包去噪处理,去噪处理后的IMF分量波形如图4所示。

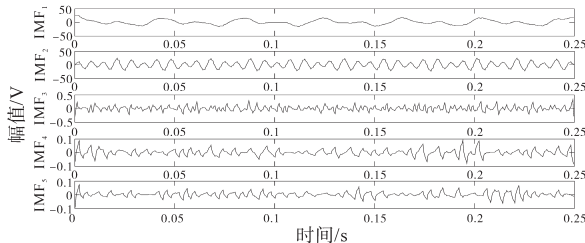


图4 IMF分量小波包降噪

Fig.4 IMF component denoised based on wavelet packet

改变竖轴的尺度便于直观观察IMF分量去噪的效果。叠加去噪后的IMF分量重构信号,得到去噪后的谐波间谐波信号,并与原始信号波形图进行比较,比较结果如图5所示。由图5信号波形图比较可以较为直观地观察谐波和间谐波信号去噪的效果。对去噪算法质量进行评价,主要针对运算速率与去噪效果两个方面。评价算法的运算速率,首先从数据结构方面计算算法整体复杂度,文献[4]的EEMD-RobustICA算法时间复杂度为 $O(n^4)$,空间复杂度为 $O(1)$;文章采用

VMD-WPT算法的时间复杂度为 $O(n^3)$,空间复杂度为 $O(1)$,显然文献[4]算法的时间复杂度大于文章的算法。运行两个算法分别对信号进行降噪处理,文献[4]算法所需时间为4.573 s,而文章算法需要3.043 s,比较可知文章算法计算耗时短,能够实现信号去噪的快速处理。

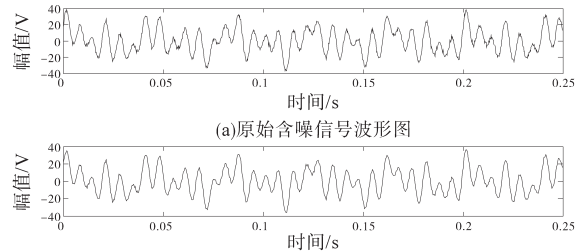


图5 信号波形图比较

Fig.5 Comparison of signal oscillogram

针对算法去噪效果比较,引入均方根误差(RMSE)、信噪比(SNR)、信号相关系数(R)三个指标进行评价^[1]。当信号的RMSE越小、SNR越大时,去噪效果越好。相关系数反映了去噪后的信号与原始信号的相关程度,R越大越接近原始信号。将本文与文献[4]中采用的去噪算法进行比较,比较结果如表2所示。

表2 去噪效果评价

Tab.2 Evaluation of denoising effect

去噪算法	RMSE	SNR	R
文献[4]去噪	0.459 8	21.188 2	0.993 9
本文算法去噪	0.439 1	20.923 9	0.995 6

从表2中可知,本文的SNR略低于文献[4]去噪方法,但是RMSE相较于文献[4]提升了4.5%,信号的相关系数R也有一定的提升,表示信号在去噪过程中更好地保留了有效信息。综合评价,文章去噪算法要优于文献[4]的算法。

含噪的谐波与间谐波信号经过本文算法降噪处理后,利用Prony算法对信号的频率、幅值、相位进行检测,具体检测结果如表3所示。

表3 Prony算法参数辨识结果

Tab.3 Parameter identification results of Prony algorithm

参数设置/ (Hz/V/rad)	检测结果					
	频率估 计值/Hz	误差/ %	幅值估 计值/V	误差/ %	相位估 计值/rad	误差/ %
25/8.5/0.50	25.012	0.048	8.487	0.153	0.499	0.200
50/8.0/0.56	50.026	0.052	7.996	0.050	0.554	1.071
105/9.6/0.46	105.153	0.146	9.635	0.364	0.457	0.652
150/14.2/0.25	149.676	0.216	14.108	0.647	0.249	0.400
155/0.2/0.70	156.078	0.503	0.200	0.000	0.701	0.142

从表3的数据可以看出,利用Prony算法对降噪处理后的谐波和间谐波信号检测的频率、幅值、相位的平均误差为0.193%,0.243%,0.493%。显然通过VMD-WPT算法降噪的Prony算法在含噪的电能质量参数检测中是有效的,且具有良好的检测精度,文章提出的VMD-WPT降噪算法能够有效抑制噪声对Prony算法的影响。

3.2 算例2

采用与文献[5]相同的数学模型与参数设置,加入噪声后信号的信噪比为40 dB,利用本文算法进行谐波间谐波参数检测,与文献[5]中参数检测结果进行对比,通过检测结果直接观察算法的去噪效果。检测结果如表4所示。

表4 文献[5]方法与本文方法参数辨识结果对比
Tab.4 Comparison of parameter identification results between literature [5] method and the proposed method

参数设置/(Hz/V/(°))	检测结果/(Hz/V/(°))	
	文献[5]方法	本文方法
50/220/20	50.00/220.01/20.00	50.01/219.93/20.01
89.2/5.4/0	89.20/5.40/-0.41	89.20/5.40/0.01
250.1/4/0	250.10/4.00/0.01	250.14/3.92/0.14
333.6/2.6/60	333.60/2.60/59.99	333.61/2.60/59.96

从表4的检测结果显示,文献[5]方法与本文方法都能有效地降低噪声对Prony算法影响,频率与幅值的检测结果与原始数据相近。相位检测中,本文算法相较于文献方法在低频分量相位检测结果更加接近原始数据。

对比两种算法计算耗时,文献[5]算法计算所需时间为3.202 s,而本文算法计算所需时间为2.976 s,显然本文算法计算耗时更短,且文献[5]计算耗时是在已经选取合适的排列熵值前提下得到的,在检测过程中,合适的排列熵值需要大量计算并人为选取,实际所耗费时间远大于本文算法,且可能存在主观因素的干扰。

从算法计算耗时与去噪效果两个方面综合评价,本文提出的算法要优于文献[5]的算法。

3.3 算例3

为进一步验证本文算法的有效性与准确性,采用文献[13]的数学模型及参数设置,在信噪比为40 dB的情况下利用本文的算法进行检测,并与文献[13]的检测结果显示对比,结果如表5所示。

表5 文献[13]方法与本文方法参数辨识结果对比

Tab.5 Comparison of parameter identification results between literature [13] method and the proposed method

参数设置/(Hz/V/(°))	检测结果/(Hz/V/(°))	
	文献[13]方法	本文方法
41.5/8.5/30	41.44/8.96/28.79	41.53/8.51/29.95
50/220/20	49.95/220.81/20.16	50.01/219.93/20.01
150/3.6/45	149.77/3.31/46.11	150.00/3.50/46.48
250.1/4/0	250.08/4.03/2.38	250.14/3.92/0.14
451/1.1/0	452.32/1.26/5.04	451.40/0.86/4.52

从表5的数据可以看出,文献[13]采用的Root-MUSIC与Prony检测算法拥有较好的检测精度,但由于噪声的影响,在41.5 Hz与250.1 Hz时,相位出现了较大的误差。本文算法降低了噪声的影响,检测出的结果更接近原始数据,尤其在相位的检测上有着更好参数辨识效果,提升了Prony算法在含噪电能质量检测中的精度。因此,本文提出的VMD-WPT和Prony算法在含噪谐波间谐波的检测方面是有效的,且具有良好的检测效果。

4 结论

VMD算法被广泛地运用在其他领域的去噪中,本文在前人的基础上将VMD算法引入谐波间谐波信号去噪中,并与WPT算法联合,提出了VMD-WPT联合去噪的算法模型,降低了噪声对Prony算法的影响。仿真与比较结果验证了本文算法的有效性,且具有良好的检测精度,为Prony算法在含噪的谐波与间谐波检测中提供一种新思路。

参考文献

- [1] 何晓燕,王一. 柔性直流电源系统电流质量控制方法研究[J]. 电气传动,2019,49(2):28-32,96.
- [2] 郭燕容,王志梁,朱国梁,等. 基于并联电流源光伏逆变器的特定谐波消除法[J]. 电气传动,2019,49(3):43-47.
- [3] 赵庆生,王宇,郭贺宏,等. 扩展Prony算法在电力系统非整次谐波检测中的应用研究[J]. 电测与仪表,2016,53(7):57-60,73.
- [4] 杜伟静,赵峰,高锋阳. 基于EEMD-RobustICA和Prony算法的谐波和间谐波检测方法[J]. 计算机科学,2018,45(11):564-568.
- [5] 张煜林,陈红卫. 基于CEEMD-WPT和Prony算法的谐波间谐波参数辨识[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(12):115-121.
- [6] Pandey Pallavi, Seeja K R. Subject independent emotion recognition from EEG using VMD and deep learning[J]. Journal of King Saud University—Computer and Information Sciences, (2019-11-

(下转第21页)

- 2564-2574.
- [6] 同向前,刘乐,杨树德,等. 基于虚拟电网电阻的并网逆变器稳定性增强控制[J]. 电气传动,2018,48(12):7-10,15.
- [7] 许泽铭,谢少军,肖华锋. LCL滤波器有源阻尼控制机制研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(9):27-33,6.
- [8] Chen C, Xiong J, Wan Z, *et al.* A time delay compensation method based on area equivalence for active damping of an LCL-type converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(1):762-772.
- [9] 尹有为,井敬,杨树德,等. 基于重复PI的LCL并网逆变器控制参数设计[J]. 电气传动,2018,48(9):67-71.
- [10] Pan D, Ruan X, Bao C, *et al.* Capacitor-current-feedback active damping with reduced computation delay for improving robustness of LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(7):3414-3427.
- [11] Bao C, Ruan X, Wang X, *et al.* Step-by-step controller design for LCL-type grid-connected inverter with capacitor-current-feedback active-damping[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(3):1239-1253.
- [12] 潘冬华,阮新波,王学华,等. 提高LCL型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(18):1-10.
- [13] Li X, Wu X, Geng Y, *et al.* Wide damping region for LCL-type grid-connected inverter with an improved capacitor-current-feedback method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(9):5247-5259.
- [14] 谢文浩,刘一琦,王建曠,等. 提高LCL型并网逆变器阻抗重
- 塑控制鲁棒性的延时补偿方法[J]. 电工技术学报,2017,32(1):178-185.
- [15] 鲍陈磊,阮新波,王学华,等. 基于PI调节器和电容电流反馈有源阻尼的LCL型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):133-142.
- [16] 方天治,黄淳,陈乃铭,等. 一种提高弱电网下LCL型并网逆变器鲁棒性的相位超前补偿策略[J]. 电工技术学报,2018,33(20):4813-482.
- [17] 杨苓,罗安,陈燕东,等. LCL型逆变器的鲁棒延时补偿并网控制方法及其稳定性分析[J]. 电网技术,2015,39(11):3102-3108.
- [18] Figueres E, Garcera G, Sandia J, *et al.* Sensitivity study of the dynamics of three-phase photovoltaic inverters with a LCL grid filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(3):706-717.
- [19] 阮新波,王学华,潘冬华,等. LCL型并网逆变器的控制技术[M]. 北京:科学出版社,2015:202-210.
- [20] HE Yuying, WANG Xuehua, RUAN Xinbo, *et al.* Capacitor-current proportional-integral positive feedback active damping for LCL-type grid-connected inverter to achieve high robustness against grid impedance variation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(12):12423-12436.
- [21] 国家电网公司. Q/GDW617—2011. 光伏电站接入电网技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2011.

收稿日期:2020-08-06

修改稿日期:2020-10-11

(上接第7页)

- 14)[2020-04-29]. <http://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.11.003>.
- [7] 陈强伟,蔡文皓,孙磊,等. 基于VMD的谐波检测方法[J]. 电测与仪表,2018,55(2):59-65.
- [8] 李月英,林家泉,李宗帅. 基于频率约束的经验模态分解的谐波检测方法[J]. 电气传动,2015,45(8):72-76.
- [9] 赵磊,朱永利,高艳丰,等. 基于变分模态分解和小波分析的变压器局部放电去噪研究[J]. 电测与仪表,2016,53(11):13-18.
- [10] 方江雄,温志平,顾华奇,等. 基于变分模态分解的地震随机噪声压制方法[J]. 石油地球物理勘探,2019,54(4):757-767,722.
- [11] 马增强,张俊甲,张安,等. 基于VMD-SVD联合降噪和频率切片小波变换的滚动轴承故障特征提取[J]. 振动与冲击,2018,37(17):210-217.
- [12] 王红君,刘冬生,岳有军. 基于小波分析和神经网络的电机故障诊断方法研究[J]. 电气传动,2010,40(3):69-73.
- [13] 李新,程纯东,张淮清. 基于实值Root-MUSIC和Prony算法的间谐波参数估计[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):56-59,71.

收稿日期:2020-04-29

修改稿日期:2020-06-14