

基于改进 VMD 算法的电机局部放电信号去噪方法研究

郑 祥, 田 伟, 管 鹏

(大连交通大学 电气信息工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 针对高压电机局部放电(PD)在线检测中信号被高斯白噪声和窄带周期干扰淹没这一问题, 应用基于改进变分模态分解(VMD)算法进行噪声滤除。为了克服常用的VMD算法可能会造成信号欠分解或过分解的问题, 改用能量损失系数作为标准对分解模态数进行算法优化, 优化分解后利用峭度值剔除无效模态, 重构出PD信号。使用改进算法与现有方法进行了仿真数据对比, 结果表明, 使用改进的VMD算法可以更有效地滤除PD信号噪声。

关键词: 高压电机; 局部放电; 变分模态分解; 能量损失系数

中图分类号: TM 855 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)11-0117-05

doi: 10.12177/emca.2020.123

Denoising Method of Partial Discharge Signal of Motor Based on Improved VMD Algorithm

ZHENG Xiang, TIAN Wei, GUAN Peng

(School of Electrical and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: In order to solve the problem that the signal in the online detection of high-voltage motor partial discharge (PD) is submerged by Gaussian white noise and narrow-band periodic interference, an algorithm based on improved variational mode decomposition (VMD) is used to filter out the noise. The common VMD algorithm may cause signal under-decomposition or over-decomposition. In order to overcome this shortcoming, the energy loss coefficient is used as the criterion to optimize the decomposition mode number. After the optimal decomposition, the kurtosis value is used to eliminate invalid modes and reconstruct the PD signal. The improved algorithm is compared with the existing methods in simulation. The results show that the improved VMD algorithm can filter out PD signal noise more effectively.

Key words: high-voltage motor; partial discharge (PD); variational mode decomposition; energy loss coefficient

0 引言

近年来, 高压电机绝缘预测维护领域逐渐兴起^[1-2], 主要是由于大型变频电机的广泛使用导致电机绝缘故障日益严重, 这可能导致高昂的维修成本和非计划生产停工, 对于现代工业而言是

一个巨大的损失。感应电机可靠性报告^[3]中阐述了电机定子问题占总故障的 28% ~ 36%, 定子绕组绝缘故障占定子问题的 60% ~ 70%。局部放电(PD)活动不仅表明电机绝缘不良, 而且还是绝缘进一步恶化的原因。电机 PD 在线测量是评估电机定子绕组绝缘状态的有效方法^[4-5]。

收稿日期: 2020-07-18; 收到修改稿日期: 2020-08-13

作者简介: 郑 祥(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高压电气与绝缘、电力设备在线监测与故障诊断。

田 伟(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。

在 PD 信号的在线测量中存在多种形式的噪声干扰,白噪声和窄带周期干扰经常淹没 PD 信号使得 PD 信号的提取变得困难,因此对被测量信号的噪声滤除成为了高压电机 PD 在线测量的主要问题^[6]。

国内外众多学者针对白噪声和窄带周期干扰的滤除进行了大量研究,主要滤除方法包括小波变换、经验模态分解(EMD)、集成经验模态分解(EEMD)和数学形态学滤波等。小波分析对于白噪声的滤除具有较好的效果,但存在着母小波和分解层数确定困难等问题^[7-9]。EMD 算法不受海森堡不确定性原理的限制,可以根据信号本身的特性基于递归的分解信号,但这可能会导致积累的错误,且该算法对噪声和采样频率较为敏感。经过改进的 EEMD 虽然可以减轻模态混合,但是对白噪声滤除效果较弱,计算时间较长,影响 PD 实时诊断。形态学滤波作为一种非线性滤波算法,可以较为有效地滤除窄带周期干扰,但存在结构元素确定较为困难的问题^[10-11]。

2014 年, Dragomiretskiy 等^[12] 提出了一种新颖的完全非递归的变分模式分解(VMD)算法。该算法将模态分解转化为变分解问题,最终获得具有带限特征的模态集合。但是,该算法需要预先在分解之前确定总模态数,如果预设的模态不合理,则分解可能导致重要模态丢失或模态信号分量混合。

本文在已有研究成果的基础上^[13-16],提出一种基于优化的 VMD 去噪算法,即基于被分解信号进行频谱分析,确定初始模态数,再根据 VMD 分解后的能量损失系数进行模态数优化,之后计算各模态峭度,进行有效模态重构,最后输出 PD 信号。

1 方法原理

1.1 变分模态分解

VMD 本质上是一组自适应维纳滤波器组。作为一种完全非递归的信号处理算法,可以稳定分离出具有不同中心频率的模态,有效避免不同模态混叠、边界效应等问题,具有相对较好的分解精度和较强的噪声滤除能力。使用 VMD 算法可以很好地保留原始 PD 信号的特征。

VMD 分解后的这些模态具有有限的频带和

不同的中心频率。VMD 算法是在带宽总和最小的约束下,计算这些模态并估计其相应的中心频率。该约束最优化变分问题可表达为

$$\begin{aligned} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} & \left\{ \sum_{k=1}^K P \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} P_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^K u_i(t) = x(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\{u_k\}$ 为模态集合; $\{\omega_k\}$ 为对应模态的中心频率集合; K 为模态分解的预定模态数;约束条件是模态的总和等于原始信号。

该约束问题可以通过引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘法算子 λ ,从而使得式(1)的约束变分问题可以变得不再受约束,并获得扩充的拉格朗日公式非约束形式:

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = & \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \\ & \|f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t)\|_2^2 + \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \end{aligned} \quad (2)$$

可以使用交替方向乘子法(ADMM)来迭代求解式(2)的增广拉格朗日函数的鞍点,最后原始信号会被分解为总数为 K 的模态分量。更详细的算法可以参考文献[16]。

1.2 算法优化

1.2.1 能量损耗系数计算

对有噪 PD 信号进行傅里叶变换,在频域观察明显的极值点的个数作为初始的 K 值,初始的 K 值通常会导致分解不足,在这种状况下,重建信号与原始信号之间可能不会有较大差异。因此,可以使用分解后残差能量与原始信号的能量之比 e 作为衡量重建后信号与原始信号之间差异的指标,称为能量损耗系数法,计算方法为

$$e_{rr} = \|p - \sum u_k\|_2^2 / \|p\|_2^2 \quad (3)$$

式中: p 为原始信号的能量; u_k 为第 k 个模态函数。

1.2.2 峭度判据

峭度是一种用来表征随机变量分布曲线特性的高阶统计量,当 $Kur>3$,定义为分布曲线具有正峭度;当 $Kur=3$,定义为分布曲线具有零峭度;当 $Kur<3$,定义为分布曲线具有负峭度。峭度值的大小表明分布曲线的分散程度的不同,峭度值越

大分布曲线的分散程度越小。峭度计算式为

$$Kur = \frac{E(x_k - \mu)^4}{\sigma^4} = \frac{\sum_{k=1}^N (x_k - \mu)^4}{(N-1)\sigma^4} \quad (4)$$

式中: E 为模态数据的期望值; μ 表示数据的均值; σ 表示数据标准差; N 为采样点数量; x_k 为分解后的第 k 个模态数据序列值。

因为 PD 信号是一种短时非线性脉冲信号, 所以信号数据的分散程度较噪声信号小, 具有正峭度, 从而可以有效地从分解后的各模态中识别出 PD 信号主导模态。

2 仿真计算

2.1 仿真模型建立

本文根据高压电机 PD 实际信号的特性, 选择 4 种典型的 PD 脉冲模型^[17], 分别为单指数衰减模型、单指数衰减振荡模型、双指数衰减模型、双指数衰减振荡模型, 具体为

$$\begin{cases} f_1(t) = Ae^{-t/\tau} \\ f_2(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(2\pi ft) \\ f_3(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \\ f_4(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(2\pi ft) \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)中的 4 种模型分别进行建模, 最后进行 4 种信号的时延叠加成总信号: 仿真信号的采样率 100 MS/s 共采取了 10 000 个数据点。4 种不同模型的具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真 PD 信号参数

PD	A/mV	$\tau/\mu\text{s}$	f/MHz
1	5	1	/
2	5	1	1.3
3	10	1	/
4	10	1	4

为了更好地模拟真实的 PD 信号, 在仿真模型中加入不同的噪声, 在模型中加入 -3 dB 的高斯白噪声和 2 个不同频率窄带周期干扰, 窄带周期干扰如下:

$$S_1(t) = 0.2 \sin(2\pi f_a t) \quad (6)$$

$$S_2(t) = 0.1 \sin(2\pi f_b t) \quad (7)$$

式中: f_a, f_b 为振荡频率, 分别取 300、200 kHz。

根据 4 种信号模型时延叠加信号建立的原始

无噪 PD 信号波形、加噪后信号波形和信号频谱如图 1 所示。图 1(a) 中可以清晰地看出 4 种不同类型的 PD 信号。图 1(b) 中, 在原始无噪声 PD 信号中加入 -3 dB 的高斯白噪声和 2 种不同频率不同幅值的窄带周期干扰后, 4 种原始 PD 信号大部分被加入的噪声所淹没。

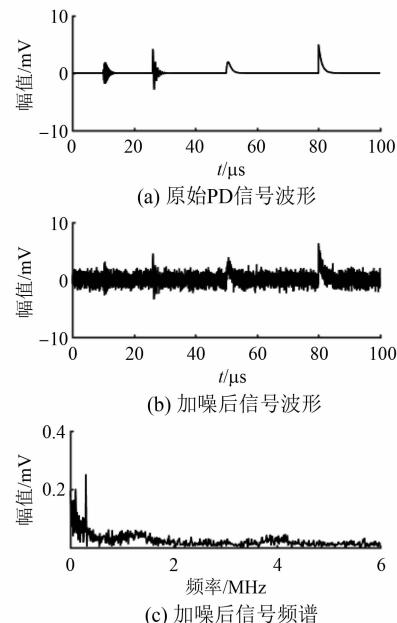


图 1 仿真信号波形和频谱

从图 1(c) 可以看出, 根据频域极值点的观察, 选定初始 K 值为 4。经过分解循环计算能量损耗系数与阈值能量损耗系数的大小比较, 经多次循环后结果 K 值为 7, 再对分解后的 7 个模态进行峭度判断, 峭度分别为 23.58、13.97、2.76、2.91、2.68、2.91、2.83, 根据峭度判据可知峭度大于 3 的为有效模态, 从分解的模态中剔除无效模态, 并重构有效模态, 其中前 2 个模态包含有效 PD 信号, 如图 2 所示。

2.2 去噪效果对比

优化前后的去噪结果如图 3 所示。由图 3 可知, 优化后的 VMD 方法可以从原被高斯白噪声和窄带周期干扰淹没的信号中提取出 4 种类型的 PD 信号, 去噪效果明显鲁棒性强, 基本保持了原 PD 的形态。

为了更好地对比不同算法的去噪效果, 本文选择相关系数(CC)、信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)、峰值信噪比(PSNR)^[18-19] 4 种不同的指

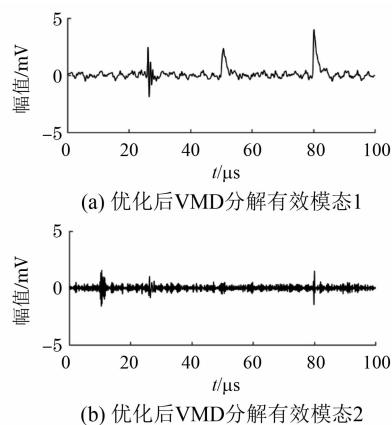


图 2 VMD 分解后有效模态

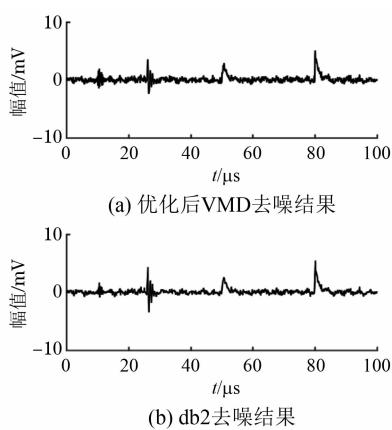


图 3 优化前后去噪结果

标来评价去噪效果,如表 2 所示。

表 2 PD 去噪效果评价指标值

算法	CC	SNR	RMSE	PSNR
VMD	0.85	4.74	0.08	24.77
db2	0.83	4.56	0.07	23.87

由表 2 可知,采用所提优化 VMD 算法比 db2 小波算法在滤除高斯白噪声和窄带周期干扰方面已经有了明显提升,该算法是一种较为有效的去噪算法。

3 结语

本文针对影响 VMD 分解的主要因素预先设定的模态数提出了优化算法,提出根据频域极值数确定模态初值,利用能量损耗系数确定最终模态数,针对有效模态的识别问题利用峭度指标来

判定有效模态。为了该验证算法的有效性,建立了多种 PD 信号模型并进行仿真计算。仿真结果表明,基于优化的 VMD 算法对 PD 信号的去噪效果明显,具有更强的抗噪和抗混叠能力。

【参考文献】

- [1] 罗杨,吴广宁,刘继午,等.局部放电作用对变频电机匝间纳米复合绝缘的损伤机理研究[J].电工技术学报,2014,29(6): 303.
- [2] 黄慧洁.高压变频电机绝缘结构评价技术解析[J].电机与控制应用,2014,41(11): 41.
- [3] MOGHADAM D E, SPECK J, GROBMAN S, et al. Assessing the proposed test sample by IEC/TS 60034-18-42 and introducing a new test sample to evaluate the lifetime of the turn insulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2019,35(3): 24.
- [4] 郑大勇,张品佳.交流电机定子绝缘故障诊断与在线监测技术综述[J].中国电机工程学报,2019,39(2): 395.
- [5] 雷平振,樊洁心,刘冠芳,等.变频牵引电机定子绕组绝缘老化特性研究[J].电机与控制应用,2020,47(6): 33.
- [6] MAUGHAN C. A 100-year history of generator insulation systems [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2018,34(4): 42.
- [7] 王异凡,朱冠霖,王兆强,等.基于改进小波阈值的 GIS 局部放电在线监测白噪声干扰抑制研究[J].高压电器,2019,55(3): 37.
- [8] LI Y, XU M, WEI Y, et al. An improvement EMD method based on the optimized rational Hermite interpolation approach and its application to gear fault diagnosis[J]. Measurement,2015,63: 330.
- [9] CARVALHO A T, LIMA A C, CUNHA C F, et al. Identification of partial discharges immersed in noise in large hydro-generators based on improved wavelet selection methods[J]. Measurement,2015,75: 122.
- [10] 朱永利,王刘旺.并行 EEMD 算法及其在局部放电信号特征提取中的应用[J].电工技术学报,2018,33(11): 2508.
- [11] 袁娜,朱永利,梁涵卿.结合矩形窗的 EEMD 局部放电信号去噪[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(3): 54.
- [12] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2014,62(3): 531.

- [13] 余昌佳, 梅飞, 叶昱媛, 等. 基于优化 VMD 与噪声估计的间隔阈值局部放电去噪方法 [J]. 高压电器, 2020, 56(3): 141.
- [14] 贾亚飞. 变压器放电信号的变分模态分解和 VPMCD 识别方法的研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- [15] 贾亚飞, 朱永利, 王刘旺. 基于 VMD 和 Wigner-Ville 分布的局放信号时频分析 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 569.
- [16] LI Z, CHEN J, ZI Y, et al. Independence-oriented VMD to identify fault feature for wheel set bearing fault diagnosis of high speed locomotive [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 85: 512.
- [17] 孙文星, 李朝晖, 程时杰. 一种发电机故障放电信号特征实时在线自动识别方法及其应用 [J]. 电网技术, 2015, 39(2): 543.
- [18] 唐炬, 高丽, 彭莉, 等. 非平稳振荡局放信号去噪效果评价参数研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 66.
- [19] NAJAFIPOUR A, BABAEE A, SHAHRTASH S M, et al. Comparing the trustworthiness of signal-to-noise ratio and peak signal-to-noise ratio in processing noisy partial discharge signals [J]. IET Science, Measurement and Technology, 2013, 7(2): 112.

期刊简介

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年, 是经国家新闻出版总署批准注册, 由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块, 以中小型电机为基础, 拓展新型的高效节能和特种电机技术, 以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向, 以电机系统节能为目标开拓电机相关应用, 全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月10日出版, 国内外公开发行, 邮发代号4-199。在半个多世纪的岁月中, 本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献, 在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源, 《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新, 在全国科技期刊界拥有广泛的知名度, 是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”, 得到了业内人士的普遍认可, 备受广大读者的推崇和信赖, 多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。

◎广告◎

无锡市明通动力工业有限公司

诚聘英才:

1、电机设计工程师, 任职要求: 工业电机制造行业工程技术岗位5年及以上

2、生产、质量管理工程师各1名, 任职要求: 工业电机或机械制造行业生产、质量管理岗位3年以上

联系电话: 0510-83320680

地址: 无锡惠山经济开发区洛社配套区群胜路7号(邮编: 214187)

企业网站

