

DOI:10.19651/j.cnki.cmt.2107482

基于改进 EMD 的发电机宽频带局放监测方法^{*}

程江洲 李 遥 陈奕睿 温静怡 何 艳

(三峡大学 电气与新能源学院 宜昌 443000)

摘要: 针对传统发电机局部放电监测方法出现的放电脉冲信号衰减失真和易受噪声干扰的问题。为提高其准确性和快速性,采用宽频带检测技术对局放信号进行有效捕捉,并利用模态分解法提取放电脉冲信号的固有模态分量,通过对原始信号与各固有模态分量的关联性分析,根据峭度准则获取包含局部放电脉冲特征信息的有效分量,从而将干扰信号从局放信号中分解分离,准确掌握发电机实时的运行状态。结果表明:该方法信噪比相比于软阈值小波去噪提高了 52.5%,均方差降低了 30.7%,分别为 6.75 和 0.04,且在波形平滑度上表现良好,同时,该方法计算时间仅 8.62 s,很大程度的降低了迭代次数,减少了信号分析时的迭代计算时间。有效提高了对发电机局放信号的去噪效果及采集效率。

关键词: 局部放电;发电机;宽频带;模态分解;信号分析

中图分类号: TP391;TM930.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Monitoring method of generator broadband partial discharge based on improved EMD

Cheng Jiangzhou Li Yao Chen Yirui Wen Jingyi He Yan

(School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: Aiming at the problems of attenuation and distortion of the discharge pulse signal and susceptibility to noise interference in the traditional generator partial discharge(PD) monitoring method. In order to improve its accuracy and rapidity, this article uses broadband detection technology to effectively capture the PD signal, and uses the modal decomposition method to extract the inherent modal components of the discharge pulse signal. Correlation analysis, according to the kurtosis criterion, obtains the effective components containing the characteristic information of the PD pulse, thereby decomposing and separating the interference signal from the PD signal, and accurately grasping the real-time operating status of the generator. The results show that compared with the soft threshold wavelet denoising, the signal-to-noise ratio of this method is improved by 52.5%, and the mean square error is reduced by 30.7%, which are 6.75 and 0.04, respectively. It performs well in the smoothness of the waveform. At the same time, the calculation time of this method is only 8.62 s, which greatly reduces the number of iterations and reduces the iteration calculation time during signal analysis. Effectively improve the denoising effect and collection efficiency of the generator PD signal.

Keywords: partial discharge;generator;broadband;modal decomposition;signal analysis

0 引 言

发电机在电厂的安全运行过程中不断遭受各种物理、化学应力的作用和破坏而产生的局部放电会损害内部元件,降低发电机绝缘性能,甚至造成绝缘击穿,引发系统故障。因此,正确有效地监测局部放电对于保证发电机安全稳定运行有着重要意义^[1-3]。目前,根据局部放电产生的各

种物理、化学现象及其生成物,局部放电检测方法可分为电测法和非电测法两类,主要包括脉冲电流法、介质损耗分析法、光测法和化学检测法等^[4]。然而,局放信号的提取易受电磁干扰、频域和噪声影响。为此,国内外学者针对发电机局部放电在线测量中包含大量干扰信息的问题,提出了包括快速傅里叶变换阈值法、小波去噪^[5]、经验模态分解法^[6-8]和数学形态学滤波等方法。

收稿日期:2021-08-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金面上项目(61876097)、湖北省科技计划项目技术创新重大项目(2016AAA040)资助

目前,围绕发电机局部放电监测方法,国内外学者进行了大量的理论研究及试验分析,如文献[9]利用脉冲电流法进行热老化实验,研究 3 类典型定子模型的局部放电差异;文献[10]研究一种离散谱干扰抑制方法,该方法将数学形态学滤波与频谱校正结合起来提高信号的提取准确率;文献[11]基于模糊综合评价体系,提出一种的机组局部放电状态评估模型来反映水轮发电机组的绝缘劣化程度;文献[12]为避免局放信号时域缺陷对准确性的损害,提出一种拟积分信号采集算法;文献[13]通过研究局放信号的传播模式选择合适的监测点、并通过对不同传播模式的频率特性对比,有效的抑制噪声,提高对波形采集准确性。但上述研究均存在缺陷,如易受现场电磁干扰、所测量的频带过窄导致有效信息量降低、因传播途径或介质造成测量信号失真等一系列问题。

考虑到上述问题,本文以宽频带检测基础设备为基本单元,从局放信号采集方式、局放信号抑噪进行分析,研究

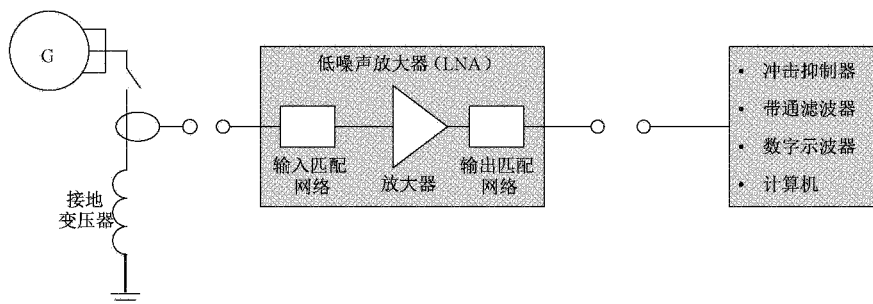


图 1 系统装置结构图

1.1 宽频带电流传感器

发电机在运行过程中,由于其大部分射频信号(包括局放信号)会流经中性点接地线,所以可将宽频带电流传感器置于发电机中性点接地线上,以此获取局放脉冲信号。文中的传感器由罗氏线圈设计而成。

罗氏线圈^[14]为一环形电流测量线圈,将其非铁磁性材料均匀的缠绕在磁芯上,利用电磁感应原理可对局放信号进行测量,它同时具备测量范围大,响应频带宽等特点。因此,文中利用罗氏线圈作为宽频带电流传感器的感应装置。其安装位置图如图 2 所示。

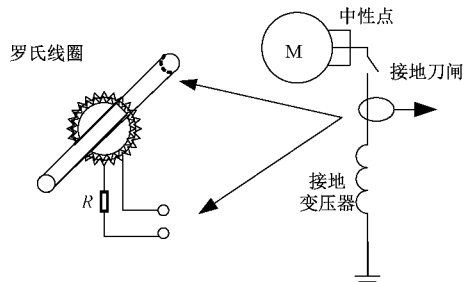


图 2 宽频带电流传感器结构图

1.2 电路结构

装置电路配备浪涌保护功能,防止电网中产生的冲击

一种基于改进经验模态分解法 (empirical mode decomposition, EMD) 的宽频带检测方法。首先利用罗氏线圈作为宽频带电流传感器对发电机局放信号进行采集,然后结合相关系数计算及峭度值分析对经验模态分解法改进后,对所采集的局放信号利用改进 EMD 去噪法获取真实的局放信号。并将其去噪信号与小波去噪信号进行对比验证。该方法可对发电机实现局部放电实时在线监测功能,为判别分析发电机的绝缘特性提供良好帮助。

1 宽频带监测装置

文中所设计的宽频带检测系统由 3 部分组成:信号采集单元、信号调理单元、数据处理存储单元。信号采集单元即宽频带电流传感器,该传感器由罗氏线圈、磁芯、积分电阻等组成。信号调理单元主要包括宽频带信号放大器、带通滤波器和数字示波器。数据处理存储单元由计算机完成。其装置结构图如图 1 所示。

脉冲进入监测系统内,对监测装置造成损坏,提高设备运行的安全稳定性能。同时,由于发电机中性点正常运行时对地电位较低,需在线圈后加置一放大器对信号进行放大处理,以便后续对局放信号的分析,考虑到放大器自身产生的噪声会对采集信号造成干扰,电路中所选用的放大器为一低噪声系数运算放大器,对信号数据进行倍数放大,其动作频带在 50 kHz~300 MHz 内具有平坦的增益和输入输出反射特性,使得输出信号的信噪比进一步提高。

同时,信号调理单元内置了带通滤波器,设置带通频率为 100 kHz~100 MHz。最后,发电机局部放电在线监测最关键的技术难题还在于极易受现场电磁干扰,因此需将所采集的信号数据需传输至数据处理存储单元,对信号进行模态分解,将干扰信号与局放脉冲信号分离,获取必要的采集信号。

2 模态分解法

随着数字信号分析处理技术、局放模式识别技术的发展,本文设计的系统主要采用一种改进的 EMD 方法实现局放信号的提取与干扰的分析分离。

2.1 经验模态分解法

经验模态分解法 (EMD) 作为一种信号分析方法,主要

针对非线性、非平稳信号的处理。EMD可根据数据自身的时间尺度特征将多分量信号分解为单一时间尺度特征的单分量信号,所得到的单分量信号被称为本征模函数(intrinsic mode function, IMF)分量^[15]。一个信号分量被归类为IMF应满足以下两个条件:

1)局部极值点和过零点的差值数必须是0或1;

2)由局部获得的最大值包络和最小值包络的平均值在任意时刻点必须为0。

所以,在理论意义上,EMD可应用于任何类型信号的分解过程,与传统的信号分析方法相比,具有更加直接、可视和高度自适应性的优点。EMD分解步骤如下:

1)计算信号 $x(t)$ 的均值及局部极值点,将信号的均值、局部极大值及局部极小值分别进行3次样条线连接形成相应的均值包络线、上包络线及下包络线。均值记为 m_1 ,令 $x(t) = m_1 + h_1$ 。

2)若 h_1 不满足1)、2)两个条件,则将 h_1 作为新的信号,返回步骤1)。如果满足IMF函数条件(j 为循环次数)停止,令 $imf_1 = h_j$,记信号 $x(t)$ 满足分解条件的第1个模态分量为 imf_1 。

3)将 imf_1 从原始信号 $x(t)$ 中分离,令 $r_1 = x(t) - imf_1$,同时 r_1 作为新的信号循环步骤1)~2),记信号 $x(t)$ 满足分解条件的第2个模态分量为 imf_2 ,进行 n 次循环重复后,如果 r_{n-1} 为一单调函数无法进行分解时停止,令:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n imf_i + r_{n+1} \quad (1)$$

最后,通过相应的分解过程,最终获得有限个信号 $x(t)$ 对应的IMF分量,以此将信号 $x(t)$ 中的有效分量利用其不同的时间尺度特征隔离出来。

其中IMF获取流程如图3所示。

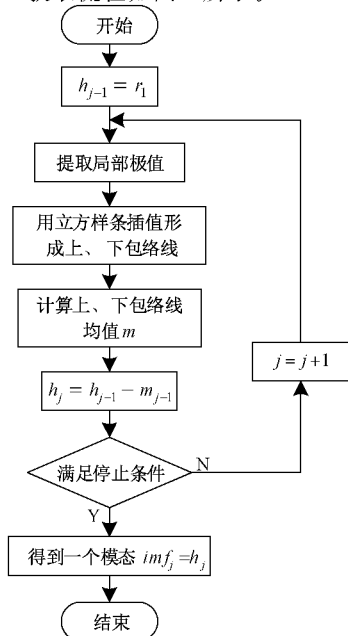


图3 IMF分量获取流程图

2.2 相关系数计算

为了减少EMD自身缺陷所造成的虚假分量,将含噪信号经过EMD分解后,采用相关系数的计算对分解后的IMF分量进行滤波,各IMF分量与原始信号的相关系数记为 ρ ,其计算公式如下:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n)}} \quad (2)$$

式中: ρ_{xy} 为相关系数、 $x(n)$ 为原始信号、 $y(n)$ 为原始信号对应的IMF分量。结合相关实验数据,选取相关系数中的最大值 ρ_{max} ,设定 $Y = \rho_{max}/10$,该阈值下各分量与原始信号的相关性较强。最后,将满足过滤条件 $\rho_{xy} > Y$ 的IMF分量予以保留,并与峭度准则进行结合,对所需的有效分量进行筛选,同时对信号进行重构。

2.3 峭度值分析

为进一步提高IMF分量重构的准确性,降低迭代计算时间,引入了峭度准则结合相关系数计算对各IMF分量进行双重判定。其计算公式如下:

$$K = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (3)$$

式中: K 为信号的峭度值; N 为信号的长度; μ 为信号的均值; σ 为信号的标准差。

峭度值^[16]是一种无量纲常数,其对不同类型的冲击信号敏感度极高,十分利于信号的数理统计。有实验表明峭度与信号的关系为,当 $K \approx 3$ 时,可以确定原始信号中的主要成分为高斯噪声;当 $K > 3$ 时,该脉冲信号 $x(t)$ 具有较高的信噪比。因此,利用峭度准则对IMF分量进行更为准确的判定,为了避免将包含少量有效局部特征的IMF分量过滤掉,通过峭度值分析将峭度值大于3的IMF分量予以保留。

3 仿真实验

为了更好的验证对发电机局放信号的分析结果,利用MATLAB仿真软件,采用双指数振荡衰减模型进行局放信号的仿真分析。所采用的的信号模型如下:

$$x(t) = U(c^{1.3t/\tau} - c^{2.2t/\tau})\sin 2\pi f_c t \quad (4)$$

式中: U 为局放脉冲信号电压幅值; t 为信号持续时间; τ 为信号的衰减系数, f_c 为信号的振荡频率。各系数取值:采样频率为10 MHz; $U=15$ mV;采样点数为1 000。对原始信号进行噪声干扰添加,获得的波形如图4所示。

显然此时的仿真局放信号已无法直观的进行辨认,采用EMD对仿真局放信号进行分解,分解后获取各IMF分量如图5所示。

进行相关系数的计算,同时对峭度值分析,并对所得的IMF分量进行信号重构。为了获取真实有效的IMF分量,对上述染噪信号进行EMD分解,得到了11个IMF分

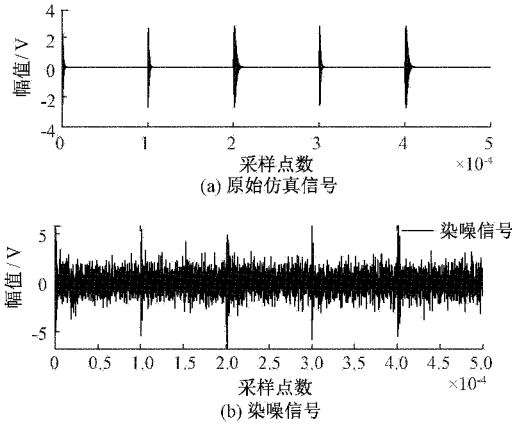


图 4 局放信号染噪图

量和 1 个余量。通过计算分析,得到各个 IMF 分量与原信号的相关系数及其对应的峭度值。根据表 1 可知,该组 IMF 分量中 $\rho_{\max} = 0.864 2$, 故其阈值 $Y = \rho_{\max}/10 = 0.086$, 即 imf_1 、 imf_4 与原信号相关性较好,其中峭度值大于 3 的分量则为 imf_1 、 imf_2 、 imf_4 , 故选取以上 3 个分量作为有效信息分量保留,作为参与后续信号重构的因子。其分析计算结果如表 1 所示。

最终获得处理后的波形。为了验证该方法的去噪效果,同小波去噪后的波形及相关数据进行对比。其局部放去噪效果如图 6 所示。

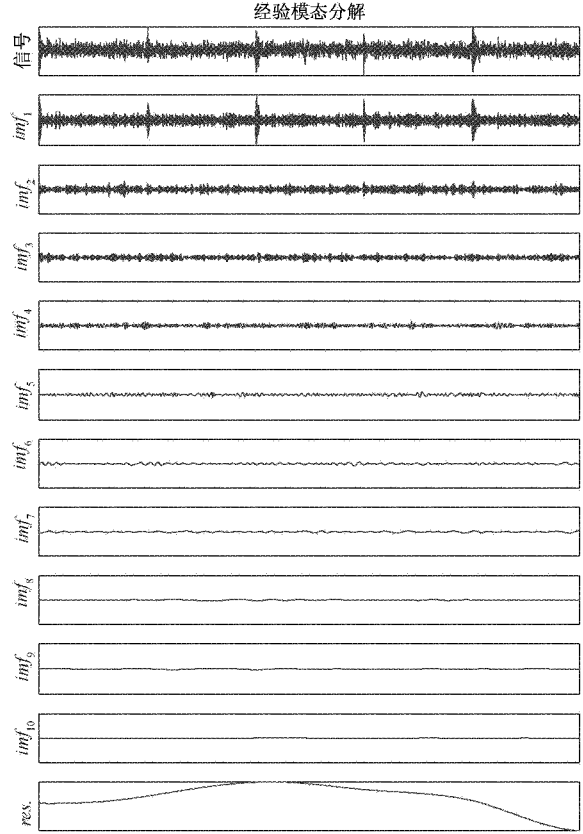


图 5 IMF 分量图

表 1 部分分析计算结果

处理函数	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₅	IMF ₆
相关系数 ρ	0.864 2	0.362 5	0.245 1	0.180 1	0.057 0	0.003 7
峭度值 K	7.726 3	5.593 7	2.870 4	4.433 9	2.365 2	2.064 9
处理函数	IMF ₇	IMF ₈	IMF ₉	IMF ₁₀	IMF ₁₁	
相关系数 ρ	0.000 6	0.000 7	0.000 4	0.000 5	0.000 2	
峭度值 K	1.925 8	1.032 5	0.046 2	0.031 1	0.008 5	

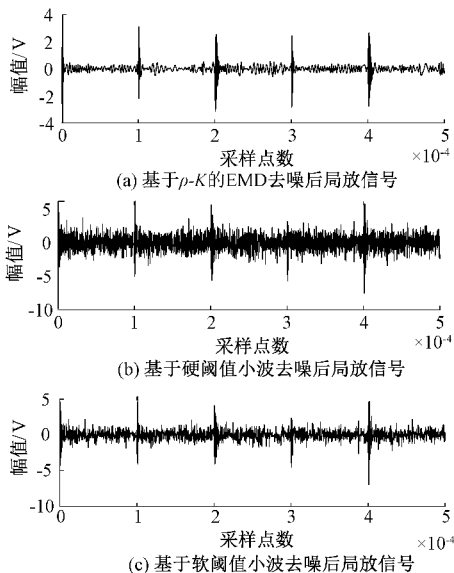


图 6 去噪效果图

同时计算信噪比及波形畸变率对去噪效果进行评估。

1) 信噪比(SNR):

$$SNR = 10 \log \frac{\sum_{n=1}^N [x(n)]^2}{\sum_{m=1}^N [x_m(n) - x(n)]^2} \quad (5)$$

式中: $x(n)$ 为原始信号; $x_m(n)$ 为去噪后的信号。若 SNR 较大,即主要以信号为主,说明去噪效果好,噪声得到了有效的抑制;若 SNR 较小,则说明包含了大量噪声,去噪效果不理想。

2) 均方差(MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - x_m(n)]^2 \quad (6)$$

MSE 与 SNR 成反比。

3) 平滑度指标(γ):

$$\gamma = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N [x_m(n+1) - x_m(n)]^2}}{\sum_{n=1}^N [x_n(n+1) - x_n(n)]^2} \quad (7)$$

平滑度指标越小,说明去噪效果越好。

相关数据分析表明,本文所采用的去噪方法较小波的硬阈值及软阈值去噪信噪比高且平滑度指标低,说明该方法的去噪效果更为理想。同时,通过比较小波去噪和文中所提改进EMD去噪过程的时间,验证了改进EMD去噪方法在分析运算时间方面大大降低,提升了信号采集效率。其实验结果如表2所示。

表2 实验结果

参数	改进EMD 去噪	小波去噪 (硬阈值)	小波去噪 (软阈值)
信噪比(SNR)	6.753 2	3.031 1	4.426 9
均方差(MSE)	0.037 4	0.060 9	0.054 0
平滑度指标(γ)	0.049 1	0.149 3	0.097 5
计算用时(s)	8.62	18.57	17.31

4 试验分析

采用局放检测装置进行电晕放电试验,将220 V工频电压利用调压器和试验用发电机产生局放信号。通过宽频带电流传感器经放大器及滤波电路测得局放脉冲信号,利用Tektronix的数字荧光示波器采集局放脉冲信号,该示波器带宽为30 MHz,采样频率为1 MHz。

所采集的局放脉冲信号如图7(a)所示。信号去噪如图7(b)所示,图7(b)采用相关系数结合峭度值分析处理本征模函数分量。图7(b)表明,该局放脉冲信号的干扰量得

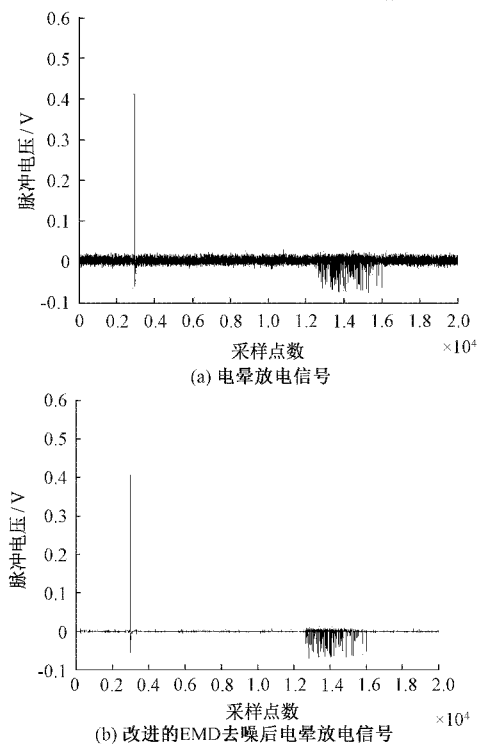


图7 试验分析

到了有效分离,说明本文试验方法对发电机局放脉冲信号的采取分析具有良好效果。

5 结 论

本文提出一种采用宽频带检测方式,结合改进EMD算法,用于发电机的局部放电在线检测及局放信号去噪过程的方法。首先,本文选取发电机中性点接地线处作为局放信号采集点,利用宽频带电流传感器采集发电机原始局放信号,使得信号采集过程更为安全方便。并应用相关系数计算及峭度值分析,使得传统EMD方法对信号分析的精度更高同时达到降低计算时间的目的。具体的,将改进EMD算法与宽频带局部放电检测相结合,局放信号的特征信息表现更佳。改进的EMD算法提高了筛选包含故障信息IMF分量的准确性,并克服筛选过程中进行3次样条取样时信息丢失的问题,有效减少噪声干扰,同时改进后的计算迭代次数大大降低,减少了计算时间。基于本文建立的发电机局部放电仿真模拟信号的测试,实验结果表明,本文所采用的方法较软阈值小波去噪,其信噪比提高了52.5%,均方差降低了30.7%,分别为6.75和0.04,且方法计算时间仅8.62 s。

综上所述,本文提出的方法对发电机局部放电实现在线检测、实时分析具有一定的实际价值,但本文方法主要针对发电机局部放电的实时在线监测部分,对于其后续更加准确有效的实现发电机定子绝缘状况的监测与故障定位需要进行进一步的研究,以确保发电机的稳定运行。

参考文献

- [1] 唐志国,唐铭泽,李金忠,等. 电气设备局部放电模式识别研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2263-2277.
- [2] 李冠良,白鹭,晋涛,等. 不同湿度环境下空冷发电机定子线棒端部表面放电特性[J]. 绝缘材料, 2019, 52(9): 53-57.
- [3] 景皓,庞先海,顾朝敏,等. 一种局部放电系统信号单元电路设计及测试[J]. 电子测量技术, 2019, 42(22): 27-30.
- [4] 倪鹤立,姚维强,傅晨钊,等. 电力设备局部放电技术标准现状述评[J/OL]. 高压电器: 1-16[2021-10-21].
- [5] 李志农,朱明,褚福磊,等. 基于经验小波变换的机械故障诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2423-2432.
- [6] 李孟威,史元浩,杨彦茹,等. 融合EMD和LSTM的受热面积灰预测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 166-172.
- [7] 韩建群,石旭东. 基于EMD航空发电机定子绕组故障检测方法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(10): 34-37, 49.
- [8] 徐锋,刘云飞,宋军. 基于中值滤波-SVD和EMD的

- 声发射信号特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2712-2719.
- [9] 王新, 杨敏, 金泱, 等. 基于热老化的发电机定子线棒局部放电特性研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(4): 58-63.
- [10] 罗远林, 李朝晖, 程时杰, 等. 结合数学形态学滤波与频谱校正的发电机局部放电离散谱干扰抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6403-6412.
- [11] 武桦, 赵佳佳, 冯建军, 等. 基于模糊综合评价的水轮发电机组局部放电状态评估[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(2): 187-192.
- [12] 贾少磊. 基于拟积分算法的发电机局部放电在线监测技术的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 81-86.
- [13] 陈添. 水轮发电机局部放电信号沿定子绕组传播特性的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [14] WALDI E P, WINARTA F P, LESTARI A I, et al. The effect of the core material of the Rogowski coil sensor on the sensitivity of the magnitude of partial discharge [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1041(1): 012011.
- [15] AKASH P, PIYUSH S. Early fault detection based on empirical mode decomposition method[J]. Procedia CIRP, 2020, 88: 31-35.
- [16] 艾廷廷, 方妍, 田晶. 峭度准则 EMD 与空域相关结合的滚动轴承故障特征提取[J]. 机械设计与制造, 2019(12): 213-216.

作者简介

程江洲, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电气设备状态评估及故障诊断技术、智能配网。

E-mail: 13944691399@163.com

李遥, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态在线检测及故障诊断技术、智能电网。

E-mail: 983092326@qq.com

陈奕睿, 硕士研究生, 主要研究方向为虚拟电厂优化调度。

E-mail: 704771657@qq.com

温静怡, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态在线检测及故障诊断技术、高电压技术。

E-mail: 2878324662@qq.com

何艳, 硕士研究生, 主要研究方向为电力负荷聚类算法。

E-mail: 1105721258@qq.com