DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.312 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

频谱优化的离散区间二进制序列宽频带阻抗测量方法

韩少华[1]，姜云龙[2]，葛 萱[1]，喻建瑜[2]，陈励勤[3]，陈燕东[3]
(1.国网江苏省电力有限公司宿迁供电分公司，宿迁 223800；2.国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211103；3.湖南大学电能高效高质转化全国重点实验室，长沙 410082)

摘要：随着大量新能源装备接入直流配电网，光伏发电的随机波动性、负荷的不可预测性等因素均会对系统稳定造成影响。系统在运行时具有以电力电子装备为主导、时变性强的特点，为确保直流配电网高效稳定运行，实时、准确获取配电网中电力电子设备阻抗特性至关重要。于是提出了1种频谱优化的离散区间二进制序列DIBS(discrete interval binary sequence)宽频带阻抗测量方法，利用相位优化公式和Nelder-Mead算法优化DIBS生成信号各频率分量的相位，并对DIBS生成信号和幅值选取方式进行改进，使得信号频谱集中于目标频段，提升测量效率和精度。为验证方法的有效性，对比了多正弦信号与优化的DIBS信号时域波形和频谱，并在MATLAB/Simulink中进行了仿真验证。结果表明，在信号频谱能量相同的情况下，DIBS注入幅值更小，能够精确测量电力电子装备的阻抗特性。最后，在硬件平台上进行了无源负载阻抗测量实验，验证了所提方法的有效性。

关键词：阻抗测量；二进制序列；频谱优化；直流配电网

Method for Wide-band Impedance Measurement Based on Discrete Interval Binary Sequence with Optimized Spectrum

HAN Shaohua[1], JIANG Yunlong[2], GE Xuan[1], YU Jianyu[2], CHEN Liqin[3], CHEN Yandong[3]
(1. Suqian Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suqian 223800, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 3. State Key Laboratory of High-efficiency and High-quality Conversion for Electric Power, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With a large number of renewable energy devices being integrated into DC distribution network, the factors such as the random fluctuation of photovoltaic power generation and unpredictability of loads will have an impact on the system stability. During its operation, the system has characteristics of being dominated by power electronic equipment and time-varying. To ensure the efficient and stable operation of the DC distribution network, it is crucial for obtaining the impedance characteristics of power electronic equipment in the distribution network accurately in real time. A wide-band impedance measurement method based on discrete interval binary sequence (DIBS) with optimized spectrum is proposed, and the phase optimization formula and Nelder-Mead algorithm are used for optimizing the phase of each frequency component of the DIBS generating signal. In addition, the methods of generating signal and amplitude selection are improved, so that the signal spectrum is focused on the target frequency band, and the measurement efficiency and accuracy are improved. To verify the effectiveness of the proposed method, the time-domain waveforms and spectra of the multi-sinusoidal signal and optimized DIBS signal are compared, and simulations are carried out in Matlab/Simulink to verify the method. Results show that the injected voltage amplitude of DIBS is smaller and can accurately measure the impedance characteristics of power electronic equipment with the same signal spectral energy. Finally, passive load impedance measurement experiments were carried out on a hardware platform to verify the effectiveness of the proposed method.

收稿日期：2024-12-05；**修回日期**：2025-01-05；**录用日期**：2025-02-08；**网络首发日期**：2025-04-08
基金项目：国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023045)
This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. under the grant J2023045

Keywords: Impedance measurement; binary sequence; spectrum optimization; DC distribution network

随着新能源技术的飞速发展，越来越多的新能源装备接入到直流配电网中，光伏发电的随机波动性、负荷的不可预测性等因素均会对系统稳定造成影响，这无疑为配电网的稳定运行带来了新的挑战[1-2]。大规模新能源接入系统在独立运行时具有以电力电子装备为主导、时变性强的特征[3]。通过测量系统中电力电子装备的阻抗特性，可以实时反映其运行状态，为系统稳定性的在线优化提供依据[4-5]。因此，准确、快速获取系统中电力电子装备阻抗特性，对于确保系统的安全稳定运行至关重要。

目前，阻抗测量的实现方式主要有无源测量与有源测量 2 种。无源测量方法直接利用系统内在的谐波和噪声信号进行测量，但存在测量精度较低的问题[6]。有源测量方法通过向被测设备注入小信号扰动并利用采集装置同步采集系统的电压与电流信号，经过计算获取阻抗特性[7-8]。相比之下，有源测量方法具有更高的测量精度和频谱设计灵活性。在有源测量方法中，扰动信号的注入有电压注入和电流注入 2 种形式。电压注入采用串联形式，向待测装备注入电压小扰动，得到对应的电流响应，从而计算装备的阻抗特性[9]。电流注入采用并联形式，实现起来相对简便。然而，当电网阻抗远大于待测装备时，注入电流在装备侧的电压响应将很小，导致测量精度较低[10-11]。从确保测量精度的角度考虑，选取电压串联注入的方式更合适。

单正弦信号作为最常见的注入信号类型，通常采用扫频法进行阻抗测量，即逐一注入不同频率的正弦扰动电压信号到系统中[12]。正弦信号注入具有信号易生成、信噪比高、测量结果准确等优点[13]。然而，扫频法需要依次进行多次测量，导致整体测量时间较长，这对于需要实时、在线监测的应用场景来说无疑是一大挑战[14]。为克服单频注入信号测量时间长的缺点，宽频带信号得到了广泛的研究[15]。宽频带信号包含了多个频率分量，能够同时获取多个频率下的响应，从而显著提高检测速度。文献[16]采用多正弦信号作为电压扰动，在线测量了并网逆变器的电网阻抗特性。但多个正弦信号的叠加导致信号幅值较大，对系统的稳定性提出了更高的要求。

有源测量方法作为小信号稳定分析方法，对于注入信号的幅值有着严格的要求。一方面，为了确保被测系统的稳定运行不受干扰，注入的扰动信号峰值不宜过高，以避免系统工作点的偏移[17-18]。另一方面，鉴于系统中存在谐波与噪声干扰，注入扰动信号必须具备一定的幅值，以减小谐波、噪声的干扰，确保测量结果的准确性[19]。为了在确保测量精度的同时还能避免对系统造成过大的扰动，有研究提出了采用离散区间二进制序列 DIBS(discrete interval binary sequence)信号作为扰动注入进行阻抗测量。DIBS 信号具有频谱可设计的特点，并且其幅值可以根据需要进行选择[20]。文献[21-22]利用 DIBS 信号测量了燃料电池的宽频带阻抗特性，提升了阻抗测量的效率，但是以牺牲一定的信噪比为代价的。因此，如何在保证测量速度的同时提升信噪比从而提高测量的精确性，是 DIBS 信号注入技术待解决的问题。

此外，较少有研究将 DIBS 应用于大规模新能源装备接入直流配电网的新能源装备的阻抗测量。因此，针对上述问题，本文基于 DIBS 基本原理提出了 DIBS 频谱优化策略，对 DIBS 的生成信号、相位和幅值的选取方法进行了改进。然后对比了优化的 DIBS 信号和多正弦信号的时域波形和频谱。最后在 MATLAB/Simulink 中进行仿真，并通过实验验证了方案的有效性和准确性。本文所提方案为大规模新能源装备接入直流配电网中装备阻抗特性的准确、快速获取打下了坚实的基础。

1　DIBS 信号注入的阻抗测量方法

1.1　电力电子装备宽频带阻抗测量

直流配电网中的电力电子装备包括光伏发电、储能和恒功率负荷等。以直流配电网中的光伏发电作为测量对象为例，其阻抗测量示意图如图 1 所示。

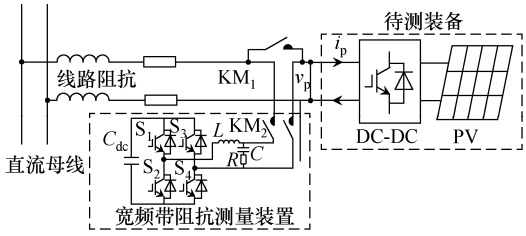


图 1 直流配电网中电力电子装备阻抗测量示意

Fig. 1 Schematic of power electronic equipment impedance measurement in DC distribution network

待测光伏发电装备通过 DC-DC 变换器接入直流母线，宽频带阻抗测量装置串联到待测光伏发电装备与直流母线之间。由 H 桥逆变电路产生小扰动电压信号，向变换器端口注入小扰动电压，待测系统会产生相应的电流响应。检测待测装备端口处的电压和电流响应，分别与未加扰动注入时的电压和电流作差，根据电压差和电流差就可以计算出待测装备的阻抗。待测装备在对应频率下的阻抗为

$$Z(\mathrm{j}\omega_\mathrm{p})=\frac{V_\mathrm{p}(\mathrm{j}\omega_\mathrm{p})-V_0}{I_\mathrm{p}(\mathrm{j}\omega_\mathrm{p})-I_0}=\frac{\Delta V(\mathrm{j}\omega_\mathrm{p})}{\Delta I(\mathrm{j}\omega_\mathrm{p})} \tag{1}$$

式中：$\omega_\mathrm{p}=2\pi f_\mathrm{p}$，$f_\mathrm{p}$为注入扰动电压的频率；$V_0$和$I_0$分别为未加扰动注入时的电压和电流；$V_\mathrm{p}$和$I_\mathrm{p}$分别为有小扰动电压注入时变换器端口处的电压和电流。

图 2 是宽频带阻抗测量流程。在宽频带阻抗测量过程中，首先选择注入的频率生成小扰动电压信号(DIBS 信号)，向系统中注入小扰动电压后，测量待测装备端口的电压电流，通过 A/D 转换装置将电压电流数据传送至上位机，将数字信号由时域变换至频域，再提取选取频率下的电压、电流的幅值，计算选取频率下的阻抗，从而得到待测装备的宽频带阻抗特性曲线。

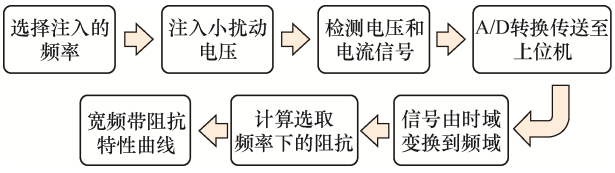


图 2 宽频带阻抗测量流程

Fig. 2 Flow chart of wide-band impedance measurement

1.2 DIBS 信号

在新能源大规模接入直流配电网的场景中，传统的“扫频式”阻抗测量不仅流程复杂、耗时较长，而且难以实时获取宽频带阻抗特性。同时，当前的宽频带扰动注入技术也存在注入幅度过大、信噪比低等问题。因此，需要 1 种能够兼顾测量效率和精确性的扰动信号生成方法以克服这些局限。

DIBS 是 1 种周期性的、宽频带的二进制序列信号，具有较高的信噪比和频谱可设计性，其优势在于能够借助优化算法使得二进制序列频谱向预设频谱逼近[23]。

设 $h(t)$为实的、二进制周期信号，该信号的特征为：①周期性：信号的周期为 T；②非过零点特性：在非过零点处，$|h(t)|=1$；③过零点特性：在过零点处，$h(t)=0$。定义 1 个集合$\{h(t)\}$，该集合包含了所有可能的 $h(t)$信号。在此基础上，DIBS 信号可以用集合中的 1 个序列表示为

$$g(t)=Ah(t) \tag{2}$$

式中：A 为 DIBS 信号幅值，是 1 个与时间 t 无关的实数常量；$h(t)$为单位幅值的 DIBS 信号。

定义 $s(t)$为 DIBS 生成信号，对于任意周期信号 $s(t)$，可以用傅里叶级数表示为

$$s(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}C_{sk}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi k\frac{t}{T}} \tag{3}$$

式中，C_{sk}为预设目标频谱的傅里叶系数。

单位幅值的 DIBS 信号可以表示为

$$h(t)=\mathrm{sgn}[s(t)] \tag{4}$$

式中，sgn 为符号函数。在生成 $h(t)$后，确定 DIBS 幅值 A 即可得到 DIBS 信号 $g(t)$。

2 DIBS 频谱优化策略

2.1 生成信号选取方法

为了方便 DIBS 信号的设计，应对其生成信号进行改进。由式(3)可知，DIBS 生成信号可以看成多个正弦、余弦函数的叠加。但由于傅里叶级数展开式中含有实部和虚部 2 个分量，在实际使用和处理中较为复杂。因此本文改进了生成信号的选取方法，采用多正弦信号或多余弦信号作为 DIBS 的生成信号。

在 DIBS 信号设计时，取式(3)展开式的实部分量即可得到多余弦信号为

$$s(t)=\sum_{i=1}^{K}C_{gi}\cos(2\pi f_i t+\varphi_i) \tag{5}$$

式中：C_{gi}、f_i、φ_i 分别为第 i 个分量的幅值、频率和初始相位角；K 为余弦分量的数量。

取式(3)展开式的虚部分量即可得到多正弦信号为

$$s(t)=\sum_{i=1}^{K}C_{gi}\sin(2\pi f_i t+\varphi_i) \tag{6}$$

多正弦信号、多余弦信号不仅包含丰富的频谱信息，分量的幅值和初始相位角还可以根据实际情况进行设计[24]。因此，采用多正弦信号或多余弦信号作为 DIBS 的生成信号具有较高的可设计性，且在实际应用中更容易实现。

2.2 DIBS 信号相位优化

为了使信号的频谱更加集中于设计的频率点，应对其生成信号的相位进行优化，本文采用相位优化公式和 Nelder-Mead 算法 2 种方法进行相位优化。DIBS 频谱与设计的频谱接近程度可以表示为

$$J=\sum_{k=-\infty}^{\infty}|C_{sk}-C_{gk}|^2 \tag{7}$$

式中，C_{gk} 为 DIBS 信号的傅里叶系数。J 值越小，意味着 DIBS 信号频谱与目标频谱越接近。对式(7)利用帕塞瓦尔定理并离散化处理可以得到

$$J=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}|s_n|^2-\frac{2A}{N}\sum_{n=0}^{N-1}|s_n|+A^2 \tag{8}$$

式中，s_n 为离散化处理后的 $s(t)$。

由式(3)可知，DIBS 生成信号可以看成多个正弦、余弦函数的叠加。从式(8)可以看出当 $s(t)$峰值减小时，J 值也会在一定程度上减小，因此 DIBS 频谱的优化可以通过减小生成信号的峰值因数来实现。在多正弦注入信号的相位优化研究中采用峰值因数作为评价指标，可以得到可减小多正弦信号峰值的相位优化公式[25]为

$$\varphi_k=\varphi_1-2\pi\sum_{i=1}^{k-1}(f_k-f_i)A_i \tag{9}$$

式中：A_i 为第 i 个频率分量的幅值；f_k 为第 k 个分量的频率；φ_k 为第 k 个分量的相位。运用相位优化公式可以减小生成信号 $s(t)$的峰值，在一定程度上使得 J 值减小，从而达到 DIBS 频谱优化的效果。

Nelder-Mead 算法也称作下山单纯形法，是 1 种非梯度的无约束优化算法。该方法只需要确定目标函数及函数自变量空间中的 1 个初始点，便能通过反射、膨胀、收缩等一系列操作迭代优化求解使得目标函数最小化的点[26]。在使用 Nelder-Mead 算法时，最关键的步骤是确定优化目标函数和初始点。由式(8)可知，J 值的大小与生成信号的幅值有关，因此本文提出 1 种优化效果较好的目标函数。定义幅值因数 AF(amplitude factor)，其表达式为

$$\mathrm{AF}=\frac{\max s(t)-\min s(t)}{\dfrac{1}{T_0}\displaystyle\int_0^{T_0}|s(t)|\,\mathrm{d}t} \tag{10}$$

式中，T_0 为信号时长。由于多个频率叠加后的信号周期难以计算，因此选取一定时长 T_0 的信号用于计算 AF。将 AF 作为 Nelder-Mead 算法的优化目标函数，自变量为 φ_i，初始点使用式(9)计算获得，经算法迭代即可求得使 AF 最小化的相位(φ_1,φ_2,…,φ_K)。

2.3 DIBS 信号幅值设计

文献[21]给出的 DIBS 信号幅值计算方式需要先计算出合成信号的周期，而多个不同周期信号合成后的信号周期计算复杂。并且当设计的信号频率分量、幅值不同时，幅值 A 的计算结果也随之变化。在实际应用中，这意味着注入系统的 DIBS 信号幅值可能会因设计条件的不同而出现变化。因此，提出 DIBS 幅值选取方法可以给信号的实际生成与使用提供方便。

在得到单位幅值的 DIBS 信号后，经快速傅里叶变换可以获得单位幅值 DIBS 信号的频谱，记 DIBS 的第 i 个频率下的分量幅值为 M_i，则 A 可由均值幅值公式计算，即

$$A=\sum_{i=1}^{K}C_{gi}/\sum_{i=1}^{K}M_i \tag{11}$$

采用式(11)计算幅值 A 生成的 DIBS 信号，其频谱在幅值上可以最大限度接近设计的频谱。在实

际应用中，对于特定的系统，A 过高会对系统的稳定性造成一定的影响，而 A 过低会对阻抗测量的精度造成影响。因此，幅值 A 存在上限 A_{max} 和下限 A_{min}，A_{max}、A_{min} 由实际情况决定。A_{max} 根据系统稳定性的要求选取，A_{min} 根据实际测量精度要求选取。当式(11)计算得到的结果高于上限时，采用 A_{max} 作为 DIBS 信号的幅值；当式(11)计算得到的结果低于下限时，采用 A_{min} 作为 DIBS 信号的幅值。这样的选取方式不仅可以确保系统的稳定，还可以在一定程度上保证测量的准确性。

2.4 频谱优化效果

本文提出的频谱优化的 DIBS 信号生成步骤如图 3 所示，其具体步骤如下。

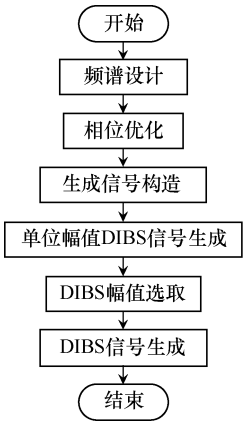


图 3 频谱优化的 DIBS 生成步骤

Fig. 3 Steps of generation of DIBS based on spectrum optimization

(1) 频谱设计：根据实际需求选取 K 个待测频率，确定各频率的目标幅值 C_{gi}。

(2) 相位优化：采用相位优化公式或 Nelder-Mead 算法计算相位初始值。

(3) 生成信号构造：选用多正弦信号或多余弦信号作为 DIBS 生成信号 $s(t)$。

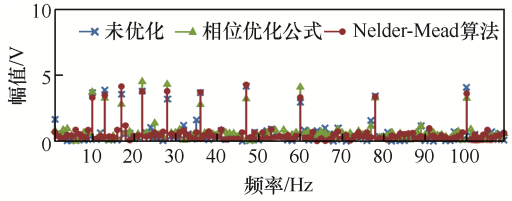
(4) 单位幅值 DIBS 信号生成：利用式(4)求得单位幅值的 DIBS 信号 $h(t)$。

(5) DIBS 幅值选取：根据式(11)计算幅值 A，若 $A>A_{max}$，则选用 A_{max} 作为 DIBS 信号幅值；若 $A<A_{min}$，则选用 A_{min} 作为 DIBS 信号幅值。

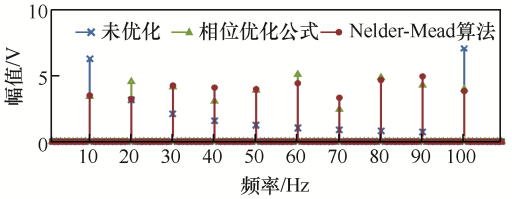
(6) DIBS 信号生成：确定幅值 A 后，结合单位幅值的 DIBS 信号，利用式(2)得到 DIBS 信号 $g(t)$。

为说明优化的效果，按照上述步骤生成几组 DIBS 信号。在 10~100 Hz 频段，分别采用等对数间隔、等间隔和随机间隔 3 种方式选取 10 个频率，每个频率分量的幅值为 1。DIBS 信号幅值为 10，使用各频率分量幅值的均值与方差评价 DIBS 频谱的优化效果。

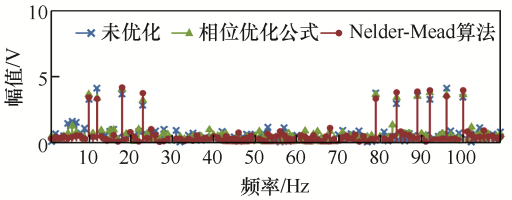
图 4 是 10~100 Hz 的 DIBS 频谱。图 4(a)为频率等对数间隔选取情况下的频谱，选取频率为[10, 13, 17, 22, 28, 36, 47, 60, 78, 100]。可以看出，设计频率按等对数间隔时，未优化、相位优化公式优化和 Nelder-Mead 算法优化的 DIBS 信号频谱在选定频率的幅值相差不大。



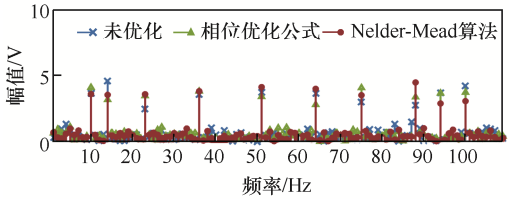
(a) 频率等对数间隔



(b) 频率等间隔



(c) 频率随机间隔一



(d) 频率随机间隔二

图 4 DIBS 频谱(10~100 Hz)

Fig. 4 Spectrum of DIBS (10−100 Hz)

计算频率等对数间隔时各频率点幅值的均值与方差，结果见表 1。从表 1 中可以看出，未优化时的 DIBS 信号频谱幅值均值为 3.647，幅值方差

为 0.139 9；使用 Nelder-Mead 算法优化后幅值的均值为 3.684，幅值方差为 0.111 4，表明优化后单位幅值 DIBS 的频谱幅值更高、更均匀，即频谱更集中于选定频率；而采用相位优化公式处理后，幅值的均值为 3.602，幅值方差为 0.214 8，与未优化的情况相比，均值下降且方差增大。利用式(8)计算可以得到未优化时 J=68.530 2，采用相位优化公式时 J=69.095 2，相位优化公式使得 J 值增加，表明相位优化公式使得频谱更分散，不适用于等对数间隔频谱的情况。另外，文献[25]也指出，相位优化公式对于频率分布均匀的多正弦信号峰值具有较好的优化效果，因此在频率等对数间隔选取时，采用 Nelder-Mead 算法更为合适。

表 1　频率等对数间隔幅值均值和方差

Tab. 1 Mean and variance of amplitude at logarithmic intervals of frequency

参数	未优化	相位优化公式	Nelder-Mead 算法
幅值均值/V	3.647	3.602	3.684
幅值方差	0.139 9	0.214 8	0.111 4

图 4(b)是频率等间隔选取情况下的频谱，选取的频率为[10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100]。可以看出，设计频率等间隔时，采用相位优化公式优化和 Nelder-Mead 算法优化均有较好的效果，与未优化相比，其频谱分布更均匀。表 2 为频率等间隔幅值均值和方差，可以看出未优化时的 DIBS 信号频谱幅值均值为 2.501，幅值方差为 5.389 0；使用相位优化公式优化后，幅值均值为 3.970，幅值方差为 0.657 6，说明单位幅值 DIBS 的频谱幅值更高、更均匀，即频谱更集中于选定频谱；采用 Nelder-Mead 算法优化后，幅值均值为 4.019，幅值方差为 0.322 7，表明 Nelder-Mead 算法优化效果要优于相位优化公式，其频谱分布更均匀且集中。

表 2　频率等间隔幅值均值和方差

Tab. 2 Mean and variance of amplitude at equal intervals of frequency

参数	未优化	相位优化公式	Nelder-Mead 算法
幅值均值/V	2.501	3.970	4.019
幅值方差	5.389 0	0.657 6	0.322 7

为了验证所提的相位优化方法在任意频率选取的情况下均具有适用性，在 10~100 Hz 范围内随机选取了 2 组频率，分别为[10, 12, 18, 23, 79, 84, 89, 92, 96, 100]，[10, 14, 23, 36, 51, 64, 75, 88, 94, 100]。2 组频率下的 DIBS 信号频谱如图 4(c)和(d)所示，经过计算可以得到表 3。

表 3　频率随机间隔幅值均值和方差

Tab. 3 Mean and variance of amplitude at random intervals of frequency

参数	未优化	相位优化公式	Nelder-Mead 算法
幅值均值一/V	3.530	3.550	3.650
幅值方差一	0.399 0	0.160 0	0.221 0
幅值均值二/V	3.470	3.560	3.670
幅值方差二	0.186 0	0.055 0	0.089 0

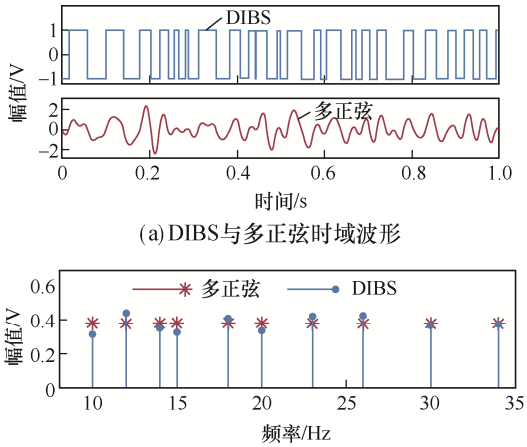
由表 3 可知，采用相位优化公式和 Nelder-Mead 算法优化均能起到优化效果，能够在提高 DIBS 频谱幅值的同时使频谱分布更均匀，而优化效果与选取的频率有关，可结合实际情况选择优化效果更好的方法。

为了说明 DIBS 信号适合作为宽频带阻抗测量扰动注入信号，下面将 DIBS 与多正弦信号进行对比。考虑到谐波数量增加会导致信号信噪比的下降，实际测试表明当多正弦信号的谐波频率数量超过 12 时，叠加后的波形信噪比会大大降低，影响测量精度[27]。因此，在 10~500 Hz 频段，按照等对数间隔选取 30 个频率，分成 3 组进行多正弦信号与优化后的 DIBS 信号的对比。第 1 组频率为[10, 12, 14, 15, 18, 20, 23, 26, 30, 34]，第2组频率为[39, 45, 51, 58, 67, 76, 87, 100, 114, 130]，第3组频率为[149, 170, 195, 223, 255, 292, 334, 382, 437, 500]。

图 5 是第 1 组 DIBS 信号与多正弦时域波形和频谱。为了方便观察比对，仅绘制出了选取频率的频谱。

从图 5 中可以看出，在信号频率分布、频谱密度相同的情况下，多正弦信号在每个频率下的幅值相同，DIBS 信号在不同频率下的幅值存在较小的差异，但与多正弦信号的幅值相差不大。从时域波形看，DIBS 信号幅值为±1 V，而多正弦信号的幅

值达到了±2 V。因此，在频谱能量相同时，DIBS 注入的幅值更小；当时域幅值相同时，DIBS 的频谱幅值要大于多正弦信号，具有更高的信噪比。



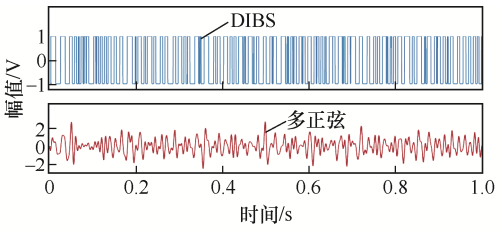
(a) DIBS与多正弦时域波形

(b) DIBS与多正弦频谱

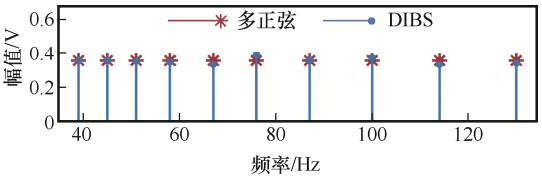
图 5 DIBS 与多正弦信号时域波形与频谱(10~34 Hz)

Fig. 5 Time-domain waveforms and spectra of DIBS and multi-sinusoidal signal (10−34 Hz)

图 6 和图 7 分别是第 2 组和第 3 组频率的 DIBS 与多正弦信号的时域波形和频谱。同样，在这 2 组频率下可以得到相同的结论：对于频谱能量相同的多正弦信号和优化后的 DIBS 信号，二者频谱幅值相差不大，但多正弦信号的时域幅值明显大于 DIBS 信号。因此，在注入相同频谱能量的信号时，采用 DIBS 注入幅值更小，有利于待测系统的稳定运行。



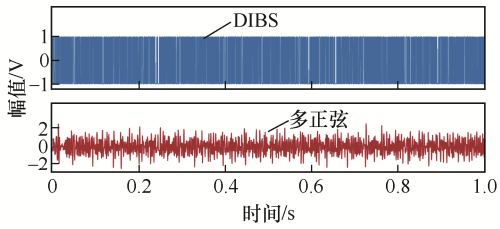
(a) DIBS与多正弦时域波形



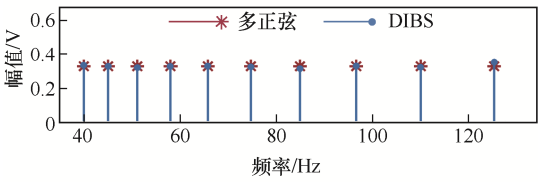
(b) DIBS与多正弦频谱

图 6 DIBS 与多正弦时域波形与频谱(39~130 Hz)

Fig. 6 Time-domain waveforms and spectra of DIBS and multi-sinusoidal signal (39−130 Hz)



(a) DIBS与多正弦时域波形



(b) DIBS与多正弦频谱

图 7 DIBS 与多正弦时域波形与频谱(149~500 Hz)

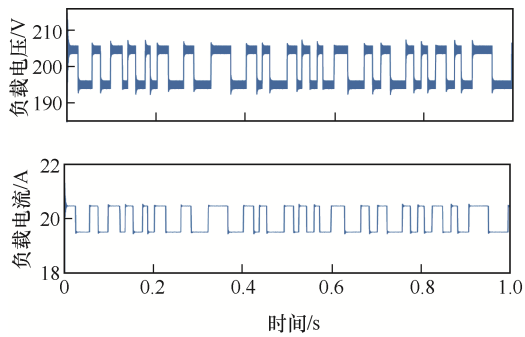
Fig. 7 Time-domain waveforms and spectra of DIBS and multi-sinusoidal signal (149−500 Hz)

3 仿真验证

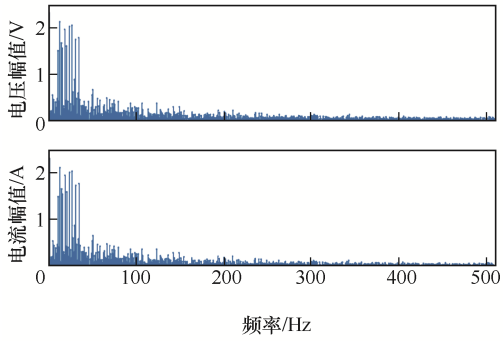
3.1 无源负载阻抗测量仿真

在 MATLAB/Simulink 中进行仿真验证，分别向带有无源负载的直流系统中注入 DIBS 信号、多正弦信号，直流系统电压为 200 V，无源负载为 RL 负载，第 1 组仿真中 R=10 Ω，L=0.5 mH。DIBS 信号幅值为±5 V，多正弦信号峰值在±10 V 左右。测试频率范围为 10~500 Hz，按等对数间隔选取 30 个频率点，分 3 次注入测量无源负载的阻抗。第 1 次注入 DIBS 信号的负载电压电流波形和频谱如图 8 所示。

由图 8 可知，负载电压为系统电压与 DIBS 信号的叠加，DIBS 信号频谱集中于选取的频率。改变 RL 负载的取值，进行多组测量仿真，根据仿真



(a) 负载电压、电流波形

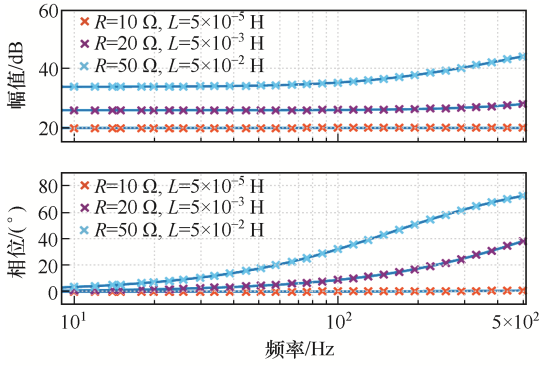


(b) 负载电压、电流频谱

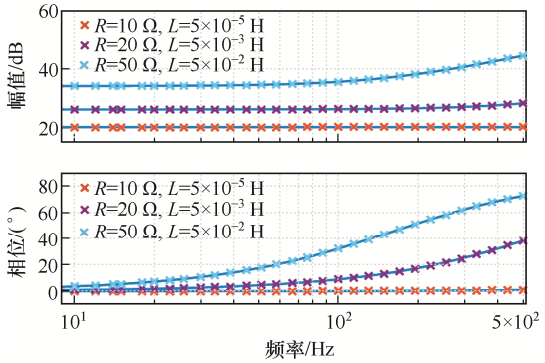
图 8　负载电压、电流波形和频谱(10~500 Hz)

Fig. 8 Waveforms and spectra of load voltage and current (10−500 Hz)

数据可以得到负载的阻抗特性，图 9 为 RL 负载阻抗测量仿真结果。



(a) DIBS信号测量结果



(b) 多正弦信号测量结果

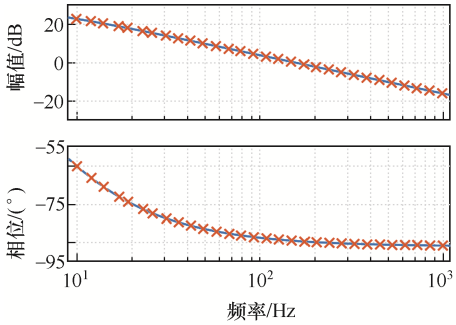
图 9　RL 负载阻抗测量仿真结果

Fig. 9 Simulation results of impedance measurement of RL load

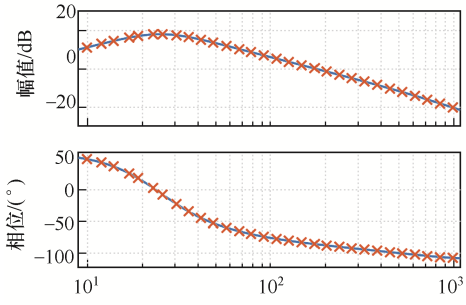
图 9 中实线表示 RL 负载的理论阻抗特性曲线，“×”标记为阻抗测量结果。图 9(a)为 DIBS 信号的阻抗测量结果，图 9(b)为多正弦信号的阻抗测量结果，可以看出，采用 DIBS 信号注入和多正弦信号注入进行阻抗测量结果均比较准确。

3.2　电力电子装备阻抗测量仿真

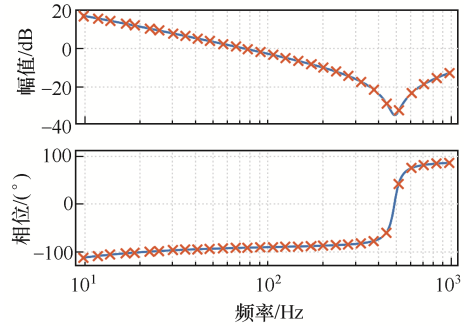
在 MATLAB/Simulink 中建立了光伏发电、储能发电和恒功率负荷 3 类装备的等效模型，在 10~1 000 Hz 范围内等对数间隔选取 30 个点进行阻抗测量。光伏发电由光伏阵列及 Boost 电路等效；储能发电由储能电池和 Buck/Boost 电路等效；恒功率负荷由负载及 Buck 电路等效。分别向带有光伏发电、储能发电和恒功率负荷的直流系统中注入 DIBS 电压信号，直流系统电压为 750 V，DIBS 信号幅值为±20 V。装备端口的电压电流数据经处理计算后得到如图 10 所示的电力电子装备阻抗测量仿真结果。



(a) 光伏发电阻抗测量结果



(b) 储能发电阻抗测量结果



(c) 恒功率负荷阻抗测量结果

图 10　电力电子装备阻抗测量仿真结果

Fig. 10 Simulation results of power electronic equipment impedance measurement

图 10 中实线为装备的理论阻抗特性曲线，“×”标记为阻抗测量结果。可以看出光伏发电、储能发电和恒功率负荷的阻抗测量结果与理论阻抗模型基本吻合，表明采用 DIBS 方法测量直流配电网中的电力电子装备的阻抗是可行的。

4 实验验证

为了验证所提方法的有效性，搭建了如图 11 所示的硬件平台进行 DIBS 信号无源负载阻抗测量。实验平台主要由上位机、阻抗测量装置、采集卡、示波器、无源负载组成。其中，阻抗测量装置的数字信号处理器选用 TI 公司的 DSPTMS320 F28335，采用 2 对 ePWM 模块，共 4 路信号用于实现 PWM 信号的调制，相关参数见表 4。

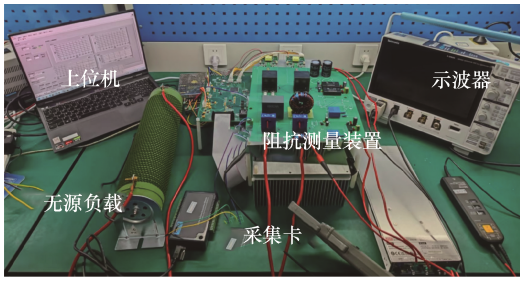


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platform

表 4 实验参数

Tab. 4 Parameters of experiment

装置参数	数值
开关频率/kHz	50
采样频率/kHz	10
滤波电感 L/mH	0.5
滤波电容 C/μF	20
负载电感/mH	0.5
负载电阻/Ω	10、20、50
调制比	0.3
直流电源电压 U_{dc}/V	96

在 10~500 Hz 范围内按等对数间隔选取 30 个频率点。考虑到装置使用的处理器计算能力有限，实验中单次注入的 DIBS 信号只包含 5 个频率，分 6 次注入进行测量无源负载的阻抗。

实验中通过上位机向阻抗测量装置发送频率和相位指令，装置生成对应 DIBS 电压信号后注入 RL 负载中，通过采集卡将电压、电流数据保存至上位机。图 12 是第 1 次 DIBS 注入负载电压电流波形。

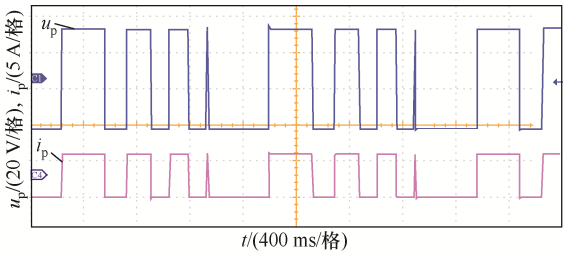


图 12 DIBS 注入负载电压、电流波形

Fig. 12 Voltage and current waveforms of load with DIBS injection

通过 6 次注入，可以得到 30 个频率下的阻抗数据。更换不同阻值的负载进行测量，得到如图 13 所示的 RL 负载阻抗测量结果。图 13 中实线为阻抗特性的理论曲线，“×”标记为测量的阻抗，可以看出，采用 DIBS 信号测量阻抗的结果基本符合理论值，测量结果较为准确。

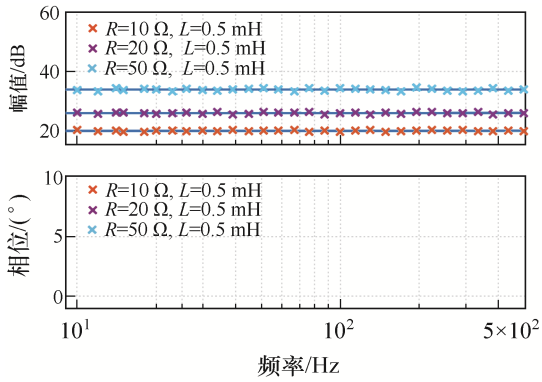


图 13 RL 负载阻抗测量结果

Fig. 13 Impedance measurement results of RL load

5 结论

本文以 DIBS 作为扰动注入信号研究 DIBS 相位优化方法，以实现快速、准确的宽频带阻抗测量，得到相关结论如下。

(1)引入相位优化公式和 Nelder-Mead 算法进行相位优化，可以改善单位幅值 DIBS 信号的频谱，使 DIBS 信号的频谱分布更加集中于选定的

频率范围，不仅提升了预设频率处的幅值，还实现了频谱分布的均匀化，从而提高了信号在目标频段内的信噪比。其中相位优化公式对于分量频率等间隔的幅值优化有显著的效果，Nelder-Mead 算法在任意设计频率情况下都能起到频谱优化的作用。

(2)本文对比分析了具有相同频率分量和频谱能量的 DIBS 信号与多正弦信号之间的差异，在注入信号幅值恒定的情况下，DIBS 信号具有更高的频谱能量。

(3)通过仿真与实验验证 DIBS 注入阻抗测量方法的有效性，仿真和实验结果表明，使用 DIBS 测量阻抗的测量结果较为准确。

通过向系统注入 DIBS 扰动信号可以获得宽频带阻抗特性，在确保测量结果准确的同时提高了阻抗测量的效率，这说明 DIBS 阻抗测量技术具有实践价值，也为后续研究奠定了坚实的基础。

参考文献：

[1] Karbalaye Zadeh M, Gavagsaz-Ghoachani R, Pierfederici S, et al. Stability analysis and dynamic performance evaluation of a power electronics-based DC distribution system with active stabilizer [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(1): 93-102.

[2] Mohamad A M I, Mohamed Y A I. Investigation and enhancement of stability in grid-connected active DC distribution systems with high penetration level of dynamic loads [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 9170-9190.

[3] Zhu Huan, Li Hu, Liu Guojing, et al. Energy storage in high variable renewable energy penetration power systems: Technologies and applications [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(6): 2099-2108.

[4] Alves D K, Ribeiro R L A, Costa F B, et al. Real-time wavelet-based grid impedance estimation method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 8263-8265.

[5] 刘宝谨,李春晨, 林佳鹏, 等. 下垂控制逆变器的序阻抗建模分析及验证[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 151-162.
Liu Baojin, Li Chunchen, Lin Jiapeng, et al. Sequential impedance modeling and verification for droop-controlled inverters [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 151-162. (in Chinese)

[6] Kitzig J P, Szymczyk C, Bumiller G. High resolution harmonic power flow and passive harmonic impedance measurements [C]// 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Orlando, FL, USA, 2023: 1-5.

[7] Sun Qiang, Li Bin, He Jiawei, et al. Measured impedance and threshold value of electrode line impedance supervision based protection in HVDC transmission system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(4): 1294-1304.

[8] 伍文华, 蒲添歌, 陈燕东, 等. 兆瓦级宽频带阻抗测量装置设计及其控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4096-4106.
Wu Wenhua, Pu Tiange, Chen Yandong, et al. Megawatt wide-bandwidth impedance measurement device design and its control method [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4096-4106. (in Chinese)

[9] 赵静波, 周前, 杨文莉, 等. 阻抗测量的扰动电压自适应控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 111-119.
Zhao Jingbo, Zhou Qian, Yang Wenli, et al. Adaptive control strategy of disturbance voltage for impedance measurement [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 111-119. (in Chinese)

[10] 谢志为, 陈燕东, 伍文华, 等. 双模式扰动下新能源发电装备的宽频带序阻抗在线精确测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2903-2914.
Xie Zhiwei, Chen Yandong, Wu Wenhua, et al. A wide-bandwidth sequence-impedance online precise measurement method for renewable energy generation equipment with dual-mode disturbance [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2903-2914. (in Chinese)

[11] 陈司懿, 胡海涛, 肖冬华, 等. 基于多电平滞环电流控制的牵引供电系统可控宽频带阻抗测量技术[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2771-2783.
Chen Siyi, Hu Haitao, Xiao Donghua, et al. Controllable

broadband impedance measurement technology of traction power supply system based on multilevel hysteresis current control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2771-2783. (in Chinese)

[12] Rhode J P, Kelley A W, Baran M E. Complete characterization of utilization-voltage power system impedance using wideband measurement [C]// Proceedings of 1996 IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. New Orleans, LA, USA, 2002: 123-130.

[13] Li Meng, Nian Heng, Hu Bin, et al. Adaptive frequency adjustment method for impedance measurement [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 518-531.

[14] 孙丙香, 王家驹, 苏晓佳, 等. 基于阶梯波的锂离子电池电化学阻抗谱低频段在线辨识方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11): 3064-3072.
Sun Bingxiang, Wang Jiaju, Su Xiaojia, et al. Study on online identification method of low frequency electrochemical impedance spectroscopy for lithium-ion battery based on step wave [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 3064-3072. (in Chinese)

[15] 张闯,杨浩, 刘素贞, 等. 基于阻抗在线测量的锂离子电池过放电诱发内短路识别研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1656-1670.
Zhang Chuang, Yang Hao, Liu Suzhen, et al. Research on overdischarge-induced internal short circuit identification of lithium-ion battery based on impedance online measurement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1656-1670. (in Chinese)

[16] 张禹风, 杨淑英, 谢震, 等. 基于多正弦信号注入的大功率并网逆变器电网阻抗在线测量技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 4026-4037.
Zhang Yufeng, Yang Shuying, Xie Zhen, et al. On-line measurement of grid impedance for large capacity grid-tied inverter based on multiple-sinusoidal signal injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 4026-4037. (in Chinese)

[17] Liu Jingyi, Liu Heng, Lee C K, et al. A magnetic-sensing-based wide-bandwidth grid impedance measurement technique with small perturbation injection [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2): 6200406.

[18] 胡雪凯, 孟良, 殷一林, 等. 基于交流小信号注入的不准确馈线阻抗孤岛微网频率恢复控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 56-66.
Hu Xuekai, Meng Liang, Yin Yilin, et al. Frequency restoration control strategy for islanded microgrid with inaccurate feeder impedance based on small-AC-signal injection [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 56-66. (in Chinese)

[19] Li Meng, Nian Heng, Hu Bin, et al. An improved impedance measurement method based on multi-sine signal considering the suppression of noise interference [J]. IEEE Access, 2021, 9: 34221-34230.

[20] 李伟恒, 黄秋安, 杨维明, 等. 基于伪随机二进制序列的阻抗谱快速重构及其在电化学能源领域的应用[J]. 电化学, 2020(3): 370-388.
Li Weiheng, Huang Qiuan, Yang Weiming, et al. Recent advancement in pseudo-random binary sequence signals-based fast reconstruction of impedance spectrum and its applications in electrochemical energy sources [J]. Journal of Electrochemistry, 2020(3): 370-388. (in Chinese)

[21] 王筱彤, 李奇, 王天宏, 等. 基于离散区间二进制序列激励信号的燃料电池 EIS 测量及故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4526-4537, 4732.
Wang Xiaotong, Li Qi, Wang Tianhong, et al. EIS measurement based on DIBS excitation signal and fault diagnosis method of fuel cell [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4526-4537, 4732. (in Chinese)

[22] 金致含, 苏建徽, 施永, 等. 基于二进制序列的燃料电池宽频带 EIS 测试[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 1-8.
Jin Zhihan, Su Jianhui, Shi Yong, et al. Broadband EIS test of fuel cell based on binary sequences [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(7): 1-8. (in Chinese)

[23] van den Bos A, Krol R G. Synthesis of discrete-interval binary signals with specified Fourier amplitude spectra [J]. International Journal of Control, 1979, 30(5): 871-884.

[24] 年珩, 李萌, 陈亮, 等. 采用多正弦信号注入的宽频带并网逆变器频率耦合特性测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7408-7420.
Nian Heng, Li Meng, Chen Liang, et al. Measurement method for broadband frequency coupling characteristics

of grid-connected inverter using multi-sine signal injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7408-7420. (in Chinese)

[25] Zappen H, Ringbeck F, Sauer D U, et al. Application of time-resolved multi-sine impedance spectroscopy for lithium-ion battery characterization [J]. Batteries, 2018, 4(4): 64.

[26] Viola J, Chen Yangquan. Parallel enabled and stability-aware self optimizing control with globalized constrained nelder-mead optimization algorithm [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2023, 7: 178-181.

[27] 杨丽君, 王松华, 郑含博, 等. 多频正弦电压激励的快速频域介质响应测试及波形参数优化方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 175-184.
Yang Lijun, Wang Songhua, Zheng Hanbo, et al. A fast frequency domain dielectric spectroscopy method under multisine voltage excitation and waveform parameters optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 175-184. (in Chinese)



韩少华

作者简介：

韩少华(1990—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统自动化，交直流混合配电网。E-mail：han shaohua 9044@163.com。

姜云龙(1994—)，男，硕士，工程师。研究方向：阻抗稳定性分析。E-mail：jyl_jsdky@163.com。

葛萱(1994—)，女，本科，工程师。研究方向：交直流混合配电网。E-mail：ryan8077@foxmail.com。

喻建瑜(1994—)，男，硕士，工程师。研究方向：阻抗稳定性分析。E-mail：yujianyu3210@163.com。

陈励勤(2000—)，男，通信作者，博士研究生。研究方向：新能源发电系统稳态稳定性分析与控制策略。E-mail：liqinchen @hnu.edu.cn。

陈燕东(1979—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：新能源发电系统建模与控制，微电网技术，特种电源技术。E-mail：yandong_chen@hnu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)