

不同电压扰动下光储直流微电网接地 抗干扰技术

张劲波, 颜磊, 石建, 黄晓予, 杨迪珊, 严通煜

(国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350012)

摘要:光储直流微电网接地过程中会产生大量的电压波动,其对微电网电力信号稳定性具有恶劣影响。由于当前光储直流微电网接地抗干扰技术的电压扰动信号捕捉能力较差,导致其无法在不同电压扰动下完成信号抗干扰处理,故设计不同电压扰动下光储直流微电网接地抗干扰技术。首先构建光储直流微电网模型,然后确定在接地工作中使用的并网变换器微电网设备,分析接地过程中的电流变化情况。采用粒子群优化算法,设计电压扰动信号检测算法。最后根据信号检测结果,将微电网接地方式设定为混合型接地模式,处理微电网交流回路中的干扰信号。仿真结果表明,所提的不同电压扰动下光储直流微电网接地抗干扰技术在多种电压扰动下,可有效剔除干扰信号,保证了电网信号输出的稳定性。

关键词:电压干扰;抗干扰技术;微电网模型;并网变换器;光储直流微电网;接地信号

中图分类号:TM771 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd23962

Grounding Anti-interference Technology of Optical Storage DC Microgrid Under Different Voltage Disturbances

ZHANG Jinbo, YAN Lei, SHI Jian, HUANG Xiaoyu, YANG Dishan, YAN Tongyu

(Economic and Technological Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd.,
Fuzhou 350012, Fujian, China)

Abstract: A large number of voltage fluctuations will occur in the grounding process of optical storage DC microgrid, which has a bad impact on the stability of microgrid power signal. Due to the poor voltage disturbance signal capture ability of the present optical storage DC microgrid grounding anti-interference technology, it is unable to complete the signal anti-interference processing under different voltage disturbances. Therefore, the optical storage DC microgrid grounding anti-interference technology under different voltage disturbances was designed. Firstly, the optical storage DC microgrid model was constructed, then the grid connected converter microgrid equipment used in grounding was determined, and the current change in the grounding process was analyzed. The particle swarm optimization algorithm was used to design the voltage disturbance signal detection algorithm. Finally, according to the signal detection results, the microgrid grounding mode was set as the hybrid grounding mode to process the interference signal in the microgrid AC circuit. The simulation results show that the proposed grounding anti-interference technology of optical storage DC microgrid under different voltage disturbances can effectively eliminate the interference signals and ensure the stability of power grid signal output under various voltage disturbances.

Key words: voltage interference; anti-interference technology; microgrid model; grid connected converter; optical storage DC microgrid; grounding signal

光储直流微电网是目前应用范围较广、技术较为先进的微电网之一^[1-2],但其内部结构较为复杂,电力系统在运行的过程中伴随着复杂的电磁振荡过程,微电网因为电力系统电压的波动,极

易受到干扰。如何在不同电压扰动下实现光储直流微电网接地抗干扰变得极为重要。为此,如何在不同电压扰动中预防与控制光储直流微电网接地干扰成为当前微电网管理工作需要解决

基金项目:国家电网公司科技项目(52130N19000S)

作者简介:张劲波(1990—),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力工程设计与评审技术,Email:zjbb2021@163.com

的首要问题。

在电力系统集成发展的过程中,电力信号抗干扰技术的研究成为研发人员必须面对的困境。在以往的研究中,由于我国电力系统发展相对较慢,所得研究结果相对不足^[3]。分析当前使用率较高的几种抗干扰技术可知,大部分抗干扰技术无法实现在不同电压环境中完成干扰信号的处理工作。文献[4]中提出了一种基于信干比角度的抗干扰分析方法,此方法在应用过程中取得了一定的抗干扰作用,但在不同电压扰动下使用效果差异性较大。文献[5]提出了一种电网静态安全条件下可使用的抗干扰控制方法,此方法与上述方法具有相同的应用问题。针对此情况,在本次研究中研发一种新型抗干扰技术,在不同电压扰动下控制光储直流微电网接地过程进行,保证微电网的运行效果。为保证此技术具有相应的应用效果,在技术研发完成后,对其进行仿真测试,以保证技术研发成果的有效性。

1 不同电压扰动下光储直流微电网接地抗干扰技术设计

1.1 光储直流微电网模型构建

在本次研究中,为了更好地完成抗干扰技术设计工作,首先构建光储直流微电网模型,为后续的技术提出与应用提供平台。然后确定在接地工作中使用较广的微电网设备为并网变换器^[6-7]。因此,本次研究将主要构建此设备模型。并网变换器基础框架如图1所示。

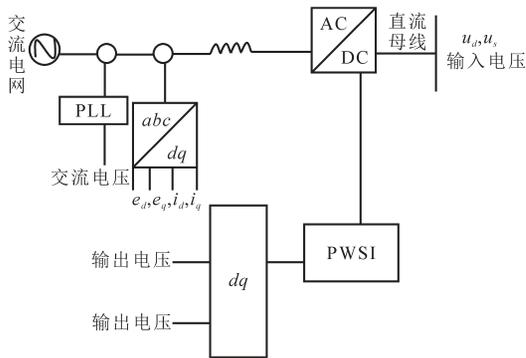


图1 并网变换器基础框架

Fig.1 Basic framework of grid connected converter

图1中, e_d, e_q, i_d, i_q 分别表示微电网中运行、热备用、冷备用和检修的交直轴分量; u_d, u_q 表示整流器输入电压, u_d, u_q 经过并网交换器后可转化为微电网接地控制信号。根据此基础框架,可得到dq整流器输出电压 u'_d, u'_q 为

$$\begin{cases} u'_d = K_d \times R_d + \alpha \\ u'_q = K_q \times R_q + \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_d, K_q 为输出稳态整流器电流分量; R_d, R_q 为整流器电阻序号分量; α 为变压系数。

通过式(1)可知, dq整流器中存在变量相互耦合情况,在实际中对其进行控制较为困难。为此在正常运行时,需要在其中安装电流控制器,则此整流器的电压控制方程可表示为

$$\begin{cases} u'_d = -(l_{is} + \frac{l_{ii}}{s})(i'_d - i_d) + \alpha \\ u'_q = -(l_{is} + \frac{l_{ii}}{s})(i'_q - i_q) + \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中: l_{is} 为电流内环的比例系数; l_{ii} 为控制过程中的积分系数; s 表示模糊识别参数; i'_d, i'_q 为稳态电流。

电压外环与电流内环的双重控制是当前光储直流微电网接地过程中常使用的控制结构^[8]。为分析微电网接地过程中电流变化情况,将三相整流桥的等效增益设定为 G_{pds} , 交流侧电感、电阻的传递函数表示为 $\frac{1}{sK + R}$, 其中 K 表示整流器电流, R 表示整流器电阻序号。 T_{pds} 表示整流器本身的延迟时间, 则微电网电流环传递函数可表示为

$$T_{pds} = \frac{G_{pds} G_{dq} (s + \frac{l_{ii}}{l_{is}})}{sK(G_{pds}s + 1)(s + \frac{R}{K})} \quad (3)$$

式中: G_{dq} 为微电网电流环传递系数。

简化上述公式,并将其整合为微电网接地典型的I型系统,则有:

$$\frac{l_{ii}}{l_{is}} = \frac{R}{K} \quad (4)$$

根据式(4)可得到微电网的闭环传递函数,具体公式为

$$G_{qds} = \frac{1}{s^2 + (\frac{1}{G_{pds}})s + \frac{1}{KG_{pds}}} \quad (5)$$

整理上述公式可得到整流器的电流传递计算公式,将微电网的相关数据代入此公式中,可得到微电网接地过程中的电流传递函数。根据此函数完成微电网模型的构建工作,并为后续的研究提供环境基础。

1.2 设计电压扰动信号检测算法

在微电网接地的过程中,会产生大量的电压

扰动信号影响电网的电力信号输出结果。为此,以上文构建的微电网模型为基础,选用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)^[9-10]作为电压扰动信号检测算法的设计基础。将信号中全部的参数转化为飞鸟的形式,根据适应度函数以及优化函数,得到最优参数。

设定微电网中全部的信号参数粒子为 $a_i \in D$, 每个参数粒子的初速度为 v_i , 则微电网接地过程中信号粒子更新公式可表示为

$$Z_i(t) = Z_i(t-1) + v_i(t) \quad (6)$$

式中: $Z_i(t)$ 为微电网接地过程中信号粒子; $v_i(t)$ 为第 i 个信号粒子的传播速度。

在式(6)中引入惯性权重系数 β 以及加速度系数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 后, 信号传播速度公式可优化为

$$v_i(t) = \beta v_i(t-1) + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) [Z_{id} - Z_{jd}(t-1)] \quad (7)$$

式中: Z_{id} 为信号粒子个体极值的第 d 维; Z_{jd} 为全局信号均值的第 d 维。

根据上述公式可知, 在电压扰动信号捕捉过程中, 加速度系数、惯性权重系数以及信号粒子的传播速度对信号捕捉算法的影响较大^[11]。若信号粒子维度取值为 d 时, 应对微电网中的信号进行大规模取样, 增加算法的可靠性。但当信号粒子采样率较高时, 信号捕捉算法的计算效率会受到影响, 导致计算过程耗时较长。针对此问题, 在本次研究中引入学习因子优化公式, 通过线性函数动态调整惯性权重系数 β 。优化后 β 计算公式可表示为

$$\beta = \beta_{\max} - \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{T_{\max}} t \quad (8)$$

式中: $\beta_{\max}, \beta_{\min}$ 分别为惯性权重系数 β 的最大值与最小值; T_{\max} 为最高次迭代次数; t 为当前计算环节所处的迭代次数。

在光储直流微电网处理过程中, β 的取值结果为 1~1.5。如式(8)的取值结果在预设区间内, 使用此取值结果完成电压扰动信号检测, 确定电压扰动信号类型以及传输范围。

1.3 实现微电网接地抗干扰

在上文中完成了微电网模型的构建以及电压扰动信号的捕捉工作。根据两部分设计结果, 在本环节中完成微电网接地干扰控制方法设计。考虑到微电网接地方面的性能要求, 在微电网接地的过程中增设一根保护接地线, 将其与微电网关键设备连接, 在保证电流流动的情况下, 将原

有的接地模式转换为混合接地^[12-13]的形式, 具体如图2所示。

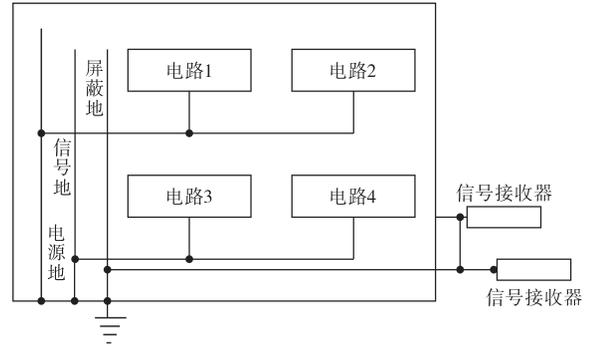


图2 微电网混合接地模式

Fig.2 Microgrid hybrid grounding mode

混合接地模式是一种融合了单点接地与多点接地优点的新型接地方式。根据此接地模式, 将微电网的接地线分为电源地、信号地、屏蔽地3类, 全部的地线都与总地线相连接, 其信号均为总地线输出, 以此模式克服电压扰动信号对微电网输出信号的影响。

在确定接地模式后, 还需要处理其输出信号。针对当前微电网接地抗干扰技术在使用中的不足, 在本次研究中将主要处理微电网交流回路中的干扰信号^[14-15]。设定 U_{h1} 为微电网接地过程中产生的干扰电压, U_{h2} 为变压器耦合得到的干扰电压, 则有:

$$U_{h2} \approx U_{h1} \cdot \frac{X}{z + X} \cdot \frac{U_{20}}{U_{20} + C} \quad (9)$$

式中: z 为微电网接地过程中产生的阻抗; C 为回路中的电容; U_{20} 为回路输出的电压; 根据相关要求, X 为微电网理想接地状态值。

若 $z=0$, 则此时的干扰电压表示为

$$U_{h2} = U_{h1} \cdot \frac{U_{20}}{U_{20} + C} \quad (10)$$

根据式(10)可控制微电网中的电容分布情况, 并以此实现微电网接地干扰的控制工作。对上文中提出内容进行整理与分析, 将其与当前使用的抗干扰技术相结合, 至此, 不同电压扰动下光储直流微电网接地抗干扰技术理论设计部分完成。

2 仿真测试分析

2.1 测试环境搭建

为精准分析光储直流微电网接地抗干扰技术在不同电网扰动下的使用效果, 在 Matlab 软件中搭建光储直流微电网模型, 并通过 Matlab 软件

对新型光储直流微电网接地抗干扰技术进行编写。在光储直流微电网日常工作中,采样频率设定为 3 kHz, 2.5 kHz, 1 kHz, 即电网输出信号的 60, 30, 15 倍, 目前在光储直流微电网的实际应用过程中, 均采用 3 kHz。在本次研究中为提高信号处理环节的精度, 采用 20 kHz 的高采样频率构建了信号处理器, 此处理器具有良好的应用性能。因此, 在本次研究中可将实验中输出的电压设定为多种形式, 完成实验的对比过程。本次仿真测试开始前, 根据上述设定内容模拟输出了无扰动情况下的正常电力信号, 其波形如图 3 所示。

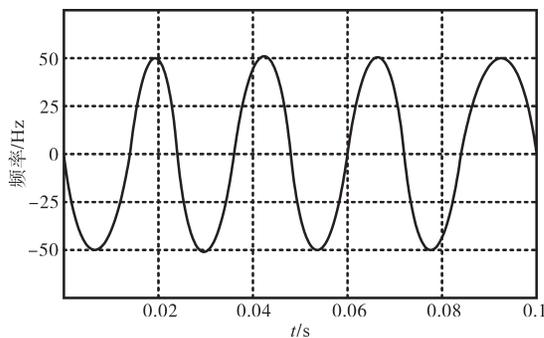


图3 无扰动情况下电力信号波形
Fig.3 Waveform of power signal without disturbance

由图 3 可知, 在无扰动情况下, 微电网电力信号输出波形符合正弦函数的要求, 电力信号较为稳定, 波动较小。在本次测试中, 将此信号波形作为对照组, 为测试结果分析过程提供参照物。选择当前使用率较高的相控阵体制抗干扰技术(记作技术 1)、配电参数抗干扰技术(记作技术 2)与所提技术进行对比。同时, 将实验环境设定为 3 种不同电压输出频率, 分别为: 稳态条件、低频电压以及高频电压。测定在此环境中, 完成对新型抗干扰技术的使用效果分析工作。

2.2 稳态条件下电网接地仿真测试

在本次测试中, 首先获取稳态条件下微电网的信号输出情况, 对微电网接地后的正常信号输出情况进行分析。

设定在工频稳定的情况下, 电流信号幅值为 1 000 A, 初始相位为 60°, 输出理想信号为 20 mV, 相位为 0。按照日常稳态运行采样率采样电网信号, 得到稳态输出信号图, 具体如图 4 所示。由图 4 可知, 在稳态运行的环境下, 3 种技术输出的微电网信号波动较为一致, 与无扰动情况下的信号输出波形较为一致, 说明在稳态的情况下, 3 种技术均可得到较为稳定的微电网信号输出结果, 起

到电压扰动信号控制作用。

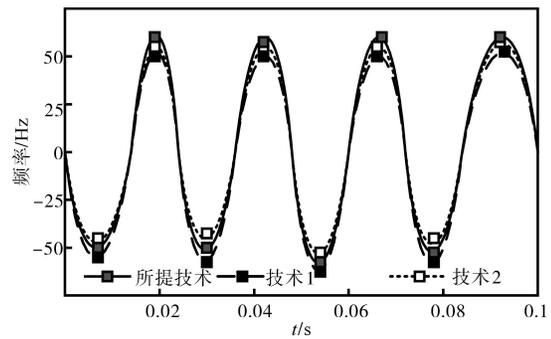


图4 微电网接地稳态信号输出波形

Fig.4 Steady state signal output waveforms of microgrid grounding

2.3 低频电压下电网接地仿真测试

在实际的光储直流微电网工作环境中, 必然会有存在干扰噪声, 尤其微电网处于强电磁环境或是工作状态波动较大时, 干扰强度更高。为更加精确地模拟微电网工作状态中的电压, 将电网电压整体下调 5%。同时, 采用所提技术与技术 1 及技术 2 对此环境下的微电网中的干扰信号进行处理, 输出实际波形如图 5 所示。

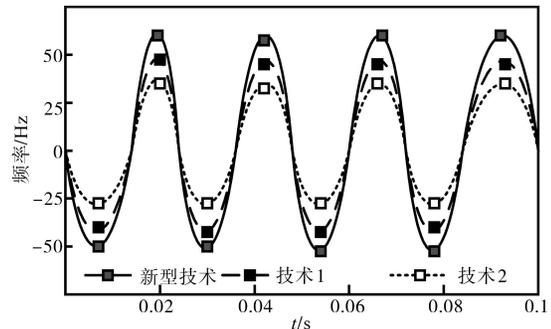


图5 低频电压下微电网接地稳态信号输出波形

Fig.5 Steady state signal output waveforms of microgrid grounding under low frequency voltage

由图 5 可知, 随着采样点的不断增加, 电压干扰对电力信号输出的影响增大。综合图 2、图 4 可知, 所提技术输出的电信号正弦波形与无扰动和稳态条件下的波形基本一致, 技术 2 由于电压下调的影响严重失真, 技术 1 使用后输出的信号波形相对技术 2 更平稳一些, 失真程度较低。综合上述分析结果可知, 在低频电压条件下, 所提技术的使用效果较好。

2.4 高频电压下电网接地仿真测试

在本次测试中, 将电网电压整体上调 15%。并使用所提技术、技术 1、技术 2 处理微电网接地过程中产生的干扰, 处理后信号波形输出结果如图 6 所示。

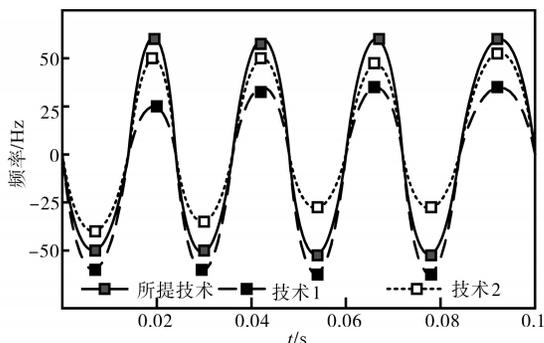


图6 高频电压下微电网接地稳态信号输出波形

Fig. 6 Steady state signal output waveforms of microgrid grounding under high frequency voltage

由图6可知,在高频电压环境中,不同的抗干扰技术使用后微电网输出信号差异较大。所提技术使用后,微电网输出信号与稳态环境下输出信号波形较为一致,并未受到电压变化的扰动。技术1使用后微电网输出信号波形发生大幅度变化,存在大量的干扰信号;技术2在此测试环境中并未起到应有的抗干扰作用。由此,可以确定在此测试环境中,所提技术可起到抗干扰作用。

2.5 电力信号输出校验性能测试

在上述测试中确定了不同电压扰动下3种抗干扰技术的使用效果。为了对上述3种技术在使用中差异性具有更加全面的分析,在本次测试中增设一组电力信号校验性能测试。在实际工作中,不同的电压扰动下会产生奇次谐波导致微电网输出信号发生畸变,为验证3种测试技术可对此部分干扰进行处理,在稳态测试环境的基础上加入基波幅度大小为5%的3次、5次谐波信号,基波大小为15%的7~17次谐波信号,初始相位相同。使用3种抗干扰技术完成此测试过程,使用相同采样率的FFT算法对比不同抗干扰技术的幅值计算比差,具体结果如表1所示。

表1 不同抗干扰技术幅值计算比差汇总

Tab.1 Summary of amplitude calculation ratio difference of different anti-interference technologies

谐波次数	所提技术1/%	技术1/%	技术2/%
1	8.150×10^{-6}	5.160×10^{-6}	1.840×10^{-6}
3	1.850×10^{-6}	0.514	1.750×10^{-2}
5	1.560×10^{-3}	1.300	5.140×10^{-2}
7	2.510	2.540	0.105
9	1.340	4.170	0.178
11	0.687	6.320	0.264
13	0.352	8.850	0.347
15	0.154	11.140	0.510
17	5.14×10^{-2}	16.150	0.624

根据相关规定,2次谐波下的测量误差不得超过1%,多次谐波下不得超过5%。按照此规定分析表1数据可知,所提技术可以较好地满足此规定中的要求,其他两种技术无法满足此规定要求。此外,在对微电网接地过程展开抗干扰处理时,基波的准确度要求相对较高,所提技术可以有效提升基波的分析精度,降低基波误差,保证微电网免受干扰,使用优势更加明显。

2.6 实验结果讨论

在光储直流微电网的应用过程中,如何消除接地过程中的信号干扰一直都是制约微电网发展的主要难题,也是电力工程现场问题中的难点。为此,在本次研究中提出了一种新型微电网接地抗干扰技术。同时,选择了两种当前使用率较高的抗干扰技术与其进行使用性能的对比分析。

在本次测试中,将仿真测试环境设定为3种不同的电压状态,以此验证文中提出的技术具有一定的研究价值。经过多次测试,证实了此技术在不同的电压扰动下可有效完成微电网接地的抗干扰处理,且在多种测试技术中,是使用效果最佳的抗干扰技术。

3 结论

光储直流微电网中回路较多,系统结构较为复杂,其所处工作环境也较为恶劣,电力系统的各种继电器保护装置对电网工作环境的要求逐渐提升,微电网中的电压干扰是影响电力系统正常运行的主要因素。为此,在本次研究中提出了一种针对多种电压扰动的抗干扰技术,并通过仿真测试证实此技术具有一定的科学性,可将其应用到实际工作中。本次研究中提出的方法主要针对电压扰动进行处理,并未处理其他扰动信号,为此,在日后的研究中还需要使用其他核心技术优化与完善文中提出的抗干扰技术。

参考文献

- [1] 张赞,王琛,王毅,等.基于自适应下垂控制的直流微电网多储能SOC动态均衡策略[J].华北电力大学学报(自然科学版),2020,47(5):21-29.
ZHANG Yun, WANG Chen, WANG Yi, et al. SOC dynamic balancing strategy for multi-energy storage based on adaptive droop control in DC microgrid[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2020, 47(5): 21-29.
- [2] 杨旭红,尹聪聪.基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制

- 策略[J]. 电气传动, 2020, 50(5): 75-80.
YANG Xuhong, YIN Congcong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [3] 郭鹤飞, 李华, 陈敏, 等. 基于LabVIEW的光储微电网运行系统设计研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(2): 69-72.
GUO Hefei, LI Hua, CHEN Min, et al. Design of microgrid operation control system based on LabVIEW[J]. Power Electronics, 2020, 54(2): 69-72.
- [4] 青滔, 刘晓东. 一种相控阵体制的抗干扰分析方法[J]. 电讯技术, 2019, 59(10): 1182-1185.
QING Tao, LIU Xiaodong. An analysis method on anti-jamming for phased array system[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(10): 1182-1185.
- [5] 车勇, 孙伟, 张艳, 等. 电网静态安全条件下配电参数抗干扰控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(9): 43-49, 56.
CHE Yong, SUN Wei, ZHANG Yan, et al. Research on anti-interference control method for power distribution parameters under static safety conditions of power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(9): 43-49, 56.
- [6] 郭洪智, 张勤进, 刘彦呈, 等. 基于滑模的直流微电网光伏系统无缝切换策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 13-20.
GUO Hongzhi, ZHANG Qinjin, LIU Yancheng, et al. Seamless switching control strategy for photovoltaic system in DC microgrid based on sliding-mode control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8): 13-20.
- [7] 刘欣博, 高卓. 考虑恒功率负载与储能单元动态特性的直流微电网系统大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 292-299.
LIU Xinbo, GAO Zhuo. Large signal stability analysis of DC microgrid system considering dynamic characteristics of constant power load and energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 292-299.
- [8] 卢熠昌, 于中山. 煤矸光电分选系统及抗干扰技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(1): 144-147.
LU Yichang, YU Zhongshan. Study on a coal gangue photoelectric sorting system and its anti-interference technology[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(1): 144-147.
- [9] 冉雨, 陈大勇, 程郁凡, 等. 基于改进人工蜂群算法的认知抗干扰智能决策技术研究[J]. 信号处理, 2019, 35(2): 240-249.
RAN Yu, CHEN Dayong, CHENG Yufan, et al. Cognitive anti-jamming intelligent decision based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(2): 240-249.
- [10] 乔维德. 粒子群蛙跳模糊神经网络的PMSM转速控制器设计[J]. 微特电机, 2019, 47(3): 66-69.
QIAO Weide. Design for PMSM speed controller based on PSO-SFLA and FNN[J]. Small & Special Electrical Machines, 2019, 47(3): 66-69.
- [11] 王鹏, 冯光, 韦延方, 等. 10 kV配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 178-187.
WANG Peng, FENG Guang, WEI Yanfang, et al. Review of grounding fault testing and design of real experiment field for 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 178-187.
- [12] 郭雨豪, 薛永端, 徐攀, 等. 含同母线环路的配电网单相接地故障特征及选线[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 234-241.
GUO Yuhao, XUE Yongduan, XU Pan, et al. Characteristic and feeder selection of single-phase grounding fault in distribution network with the same bus loop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 234-241.
- [13] 肖俊, 司徒友, 袁炜灯, 等. 基于扰动后暂态量的戴维南等值参数辨识方法[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(6): 113-119.
XIAO Jun, SITU You, YUAN Weideng, et al. Identification method for Thevenin equivalent parameters under transient disturbance data[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 45(6): 113-119.
- [14] 李波, 曹敏, 李仕林, 等. 基于WT和GA-SVM的电能质量扰动识别方法[J]. 电力电子技术, 2020, 54(3): 52-55.
LI Bo, CAO Min, LI Shilin, et al. Power quality disturbance recognition method based on WT and GA-SVM[J]. Power Electronics, 2020, 54(3): 52-55.
- [15] 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.

收稿日期: 2021-09-04

修改稿日期: 2021-09-28