

基于改进的滑模频率偏移的孤岛检测方法

孙皓¹, 王鲁杨², 恽东军³, 李丽⁴, 章婧⁵

(1. 国网山东省电力公司烟台供电公司, 山东 烟台 264000; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 3. 大唐淮北发电厂, 安徽 淮北 235000; 4. 国网上海市电力公司检修公司, 上海 200063; 5. 国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000)

摘要: 孤岛检测是光伏并网发电系统的重要功能。为了减小孤岛检测装置检测盲区及其对电能质量的影响, 在对传统的滑模频率偏移(SMS)研究的基础上, 提出一种改进的SMS算法, 并对该算法的工作原理、检测盲区进行分析, 在数字信号处理(DSP)环境下应用, 并在单逆变器和多逆变器并联运行情况下进行仿真研究。仿真结果表明该方法既能保证检测时间短, 又能减少对电网电能质量的影响, 从而验证了该方法的有效性和实用性。

关键词: 滑模频率偏移; 检测盲区; 孤岛检测; 光伏发电系统

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.019 中图分类号: TM92 文章编号: 1673-9140(2020)04-0141-06

Improved slip mode frequency shift method based islanding detection

SUN Hao¹, WANG Luyang², YUN Dongjun³, LI Li⁴, ZHANG Jing⁵

(1. Yantai Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Yantai 264000, China; 2. Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 3. Datang HuaiBei Power Plant, HuaiBei 235000, China; 4. Maintenance Company, State Grid Shanghai Electric Power Co., Ltd., Shanghai 200063, China; 5. Quanzhou Power Supply Company, State Grid Quanzhou Electric Power Co., Ltd., Quanzhou 362000, China)

Abstract: Island detection is an important function of photovoltaic grid-connected power generation system. In order to reduce the dead zone detection effect of the island detection device and its impact on power quality, this paper proposes an improved SMS algorithm based on the research of traditional sliding mode frequency offset (SMS). Its working principle of the algorithm and detection dead zone are analyzed. Then it is applied in the digital signal processing (DSP) environment. The simulation study is performed in the case of a single inverter and multiple inverters in parallel operation. The simulation results show that the method can not only ensure a short detection time, but also reduce the impact on the power quality of the power grid, thus verifying the effectiveness and practicability of the method.

Key words: sliding mode frequency deviation; detection blind area; islanding detection; photovoltaic power generation system

近年来,随着分布式发电系统迅速发展,光伏并网产生许多的安全隐患,其中孤岛效应不容忽视。

孤岛是指分布式发电系统因故障导致光伏发电系统自给供电的离网状态^[1]。光伏发电系统一旦处于孤

岛状态,会影响分布式发电系统的运行,用电设备受到损害,电力人员的人身安全也受到威胁^[2-3]。因此,及时准确地检测出孤岛状态是分布式发电系统正常运行不可缺少的一部分。

目前,孤岛检测方法可分为两大类^[4],即主动式和被动式。被动式孤岛检测主要是对公共耦合点(point of common coupling, PCC)的电压和相位进行检测,判断是否有孤岛发生,原理较为简单,容易实现,但是其检测盲区过大。被动式孤岛检测包括相位突变法、过压/欠压检测法、电压谐波检测法^[5-8]等。主动式孤岛检测包括主动电流扰动法、正反馈频率偏移法、低频相位扰动法、滑模频率偏移法(slip mode frequency shift, SMS)、模糊控制频移法^[9-11]等。

主动式孤岛检测主要是在控制系统中加入扰动信号,当 PCC 处的电压和相位发生明显变化时,意味着孤岛出现,从而检测出孤岛。主动孤岛检测法减少了检测盲区,不过此方法对逆变器输出电能质量会产生很大的负面影响,降低系统的稳定性^[12]。文献[13]在光伏发电系统中应用滑模频率偏移法分析了 SMS 算法的工作原理,检测盲区得出 SMS 算法的参数配置;文献[14]在文献[13]的基础上进行改进,并在数字信号处理(digital signal processing, DSP)环境下应用;文献[15]对 SMS 算法进行改进,并对反馈系数进行了模糊优化。该文在对 SMS 原理进行分析的基础上,提出一种改进的 SMS 算法。将该算法与 SMS 算法以及其他改进 SMS 算法进行比较,实现在 DSP 环境下的应用,并将该算法扩展到多逆变器并联运行情况下分析其工作特性。

1 滑模频率偏移法的工作原理

如图 1 所示,在光伏并网发电系统中, R_a 、 L_a 分别为滤波装置和线路的电阻、电感,根据 IEEE Standard 929、1547.1 的要求,只有负载谐振频率在电网频率情况下,才可以采用孤岛检测技术进行验证。

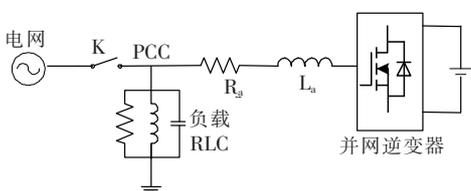


图 1 孤岛运行结构

Figure 1 Islanding operation structure diagram

当开关 K 闭合时,分布式发电系统并网运行,加入滑模频率偏移算法之后,由于电网的钳制作用, PCC 电压不受光伏逆变器输出电流的影响;当开关 K 断开时,分布式发电系统处于孤岛状态, SMS 算法是利用逆变器输出电流电压间的相位差使频率发生偏移。加入滑模频率偏移算法之后,光伏逆变器的输出电流与电网电压相差一个扰动角 θ ,使 PCC 点电压频率发生偏移,从而检测出孤岛。

并网逆变器的输出电流为

$$i_{inv} = \sqrt{2} I \cdot \sin(2\pi ft + \theta_{SMS}) \quad (1)$$

式中 f 为 PCC 的电压频率; θ_{SMS} 为滑模频率偏移算法的相移角。

$$\theta_{SMS} = \theta_m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f - f_g}{f_m - f_g}\right) \quad (2)$$

式中 θ_m 为滑模频率偏移算法的最大相移角; f_m 为产生最大相移角所对应的频率; f_g 为电网频率。

当分布式发电系统孤岛运行时,逆变器输出电流超前 PCC 电压的相角 θ_{load} 表示为

$$\theta_{load} = \arctan\left[R\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\right] = \arctan\left[Q_f\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)\right] \quad (3)$$

式中 R 为并联负载电阻; L 为并联负载电感; C 为并联负载电容; ω 为 PCC 角频率; Q_f 为负载品质因数; f_0 为负载谐振频率。

如图 2 所示,当分布式发电系统并网运行时,系统工作在 O 点。当系统出现波动时, PCC 电压频率高于 50 Hz,此时 $\theta_{SMS} > \theta_{load}$,电压频率进一步变大,直至稳定在 A 点;同理,若 PCC 电压频率低于 50 Hz 时,系统最终将稳定在 B 点。GB/T 19939—2005 规定,光伏系统并网后的频率允许偏差值为 ± 0.5 Hz,当 $49.5 \text{ Hz} < f_B < f_A < 50.5 \text{ Hz}$ 时,系统将无法检测出孤岛状态,形成检测盲区。

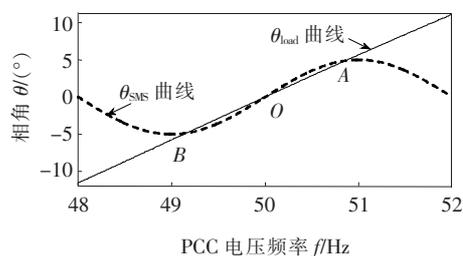


图 2 传统 SMS 算法下负载和相位特性曲线

Figure 2 Load and phase characteristic curves under traditional SMS algorithm

传统的 SMS 算法虽然原理简单、易实现,但仍存在检测速度相对较慢、品质因数高于 2.5 时存在检测盲区等问题^[13]。

2 改进 SMS 算法及其盲区分析

2.1 改进 SMS 算法的提出以及盲区分析

考虑到传统 SMS 算法的优缺点,兼顾改善电能质量和减少检测盲区,该文提出一种新的基于相位偏移的检测方法,利用符号函数代替传统 SMS 法中的正弦函数,可将主动移相角 θ_{SMS} 表示为

$$x = \text{sign}(x)k(e^{\text{sign}(x) \cdot x} - 1) \quad (4)$$

其中

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}, x = f - f_g$$

式中 k 为扰动系数; $\text{sign}(x)$ 为符号函数。

由式(3)、(4)可得,当 $Q_f = 2.5$ 、负载谐振频率 f_0 为 50 Hz 时,2 条相频曲线(负载和相位特性曲线)如图 3 所示,当 $f \in (50, 50.5)$ Hz 时,相位特性曲线增长速度比负载特性曲线增长速度快,2 条曲线没有交点。因此,在改进 SMS 算法下,当 $Q_f \leq 2.5$ 时,系统无检测盲区,满足 IEEE Std. 929—2000 的孤岛检测标准;当 $f \in (49.5, 50)$ Hz 时,同理可得该算法的正确性。

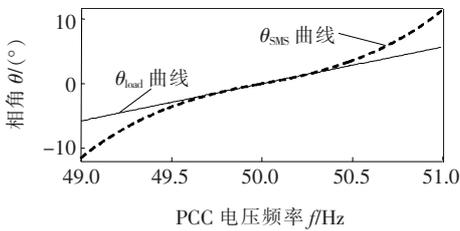


图 3 改进 SMS 算法下负载和相位特性曲线

Figure 3 Load and phase characteristic curves under improved SMS algorithm

为进一步验证该文提出新算法的合理性,绘制不同算法以及不同扰动角条件下基于品质因数 Q_f 的负载谐振频率 f_0 的孤岛检测盲区曲线,如图 4 所示,由曲线 1、2、3 可知,该文所提出的新算法较传统 SMS 算法以及文献[16]提出的基于抛物线型算法孤岛检测盲区更小;由曲线 3、4 可知,不同扰动角对应的检测盲区也不同,扰动系数 k 越大,检测盲区

越小,但对电能质量影响越大。为了兼顾检测盲区和电能质量的影响,该文提出对反馈系数 k 进行模糊优化。

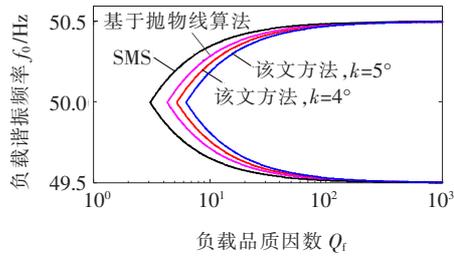


图 4 不同扰动角 θ 下的检测盲区

Figure 4 NDZ under different disturbance angle θ

2.2 扰动系数 k 的取值分析以及模糊优化

为了满足 $Q_f \leq 2.5$ 时无孤岛检测盲区,相位特性曲线的斜率需大于负载特性曲线的斜率(图 3),定量表示为

$$\left. \frac{d\theta}{df} \right|_{f=f_g} > \left. \frac{d\theta_{\text{load}}}{df} \right|_{f=f_0} \quad (5)$$

取品质因数 $Q_f = 2.5$, 谐振频率 $f_0 = 50$ Hz, 电网频率 $f_g = 50$ Hz, 扰动系数 $k > 0.0637$ 。

为了保证 $Q_f \leq 2.5$ 时无孤岛检测盲区, f_0^+ 与 f_0^- 的交点对应的品质因数应大于 2.5(图 4)。因此,当 $Q_f \leq 2.5$ 时,有

$$f_0^+ < f_0^- \quad (6)$$

由式(3)、(4)、(6)可得反馈系数 $k > 2.5909$ 。

当光伏发电系统离网后,由于光伏逆变器的负载特性未知,选取特定的 k 值较为困难,因此该文选取一个二维模糊控制器。如图 5 所示,选取 PCC 电压频率 f_{upcc} 与电网电压频率 f_g 的差值 e 和 e 的微分 ec 作为模糊控制的输入量,反馈系数 k 作为模糊控制的输出量, k_e 、 k_{ec} 、 k_u 作为模糊控制器的量化因子。

由于负载特性未知,频率差值 e 可能为正,也可能为负。因此,选取 $e \in [-0.5, 0.5]$, $ec \in [-50, 50]$, e 、 ec 的模糊论域为 $[-3, 3]$, 其对应的模糊子集为 $E = E_c = \{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$; 反馈系数 k 的论域为 $[3, 6]$, 其对应的模糊子集 U 为 $\{\text{VS}, \text{S}, \text{SS}, \text{M}, \text{BB}, \text{B}, \text{VB}\}$, 量化因子 $k_e = 6$ 、 $k_{ec} = 0.08$ 、 $k_u = 3$ 。反馈系数 k 对应的模糊控制规则如表 1 所示。

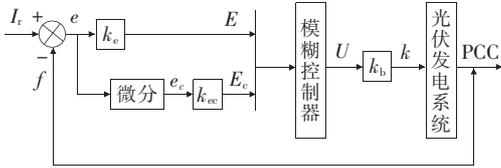


图 5 二维模糊控制框图

Figure 5 Two-dimensional fuzzy control block diagram

表 1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rule

U	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VB	VB	BB	SS	BB	VB	VB
NM	VB	B	M	SS	M	B	VB
NS	VB	B	SS	S	SS	B	VB
ZE	VB	BB	SS	VS	SS	BB	VB
PS	VB	B	SS	S	SS	B	VB
PM	VB	B	M	SS	M	B	VB
PB	VB	VB	BB	SS	BB	VB	VB

根据模糊关系对应输出模糊集合,再由模糊集合得到模糊子集,将模糊子集经加权平均法转化为清晰的输出量,输出量与量化因子 k_u 的乘积即为反馈系数 k 。

3 多逆变器并网的工作特性分析

为了验证该文所提出算法的合理性,将单机系统扩展到多机并联系统进行研究。该文以 2 台逆变器并联为例进行分析,其模型如图 6 所示。

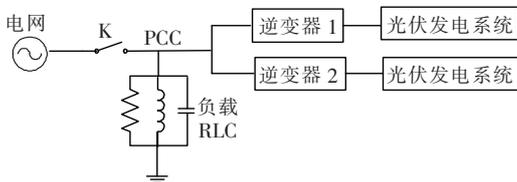


图 6 分布式发电系统并联运行示意

Figure 6 Schematic diagram of parallel operation of distributed power generation system

2 台逆变器输出的总电流 i_{inv} 可表示为

$$i_{inv} = i_{inv1} + i_{inv2} \quad (7)$$

式中 i_{inv1} 、 i_{inv2} 分别为逆变器 1、2 的输出电流。

设逆变器 1、2 的输出电流之比为 $m : (1 - m)$,

可得 i_{inv1} 、 i_{inv2} 的表达式为

$$i_{inv1} = mI \cdot \sin(2\pi ft + \theta_1) \quad (8)$$

$$i_{inv2} = (1 - m)I \cdot \sin(2\pi ft + \theta_2) \quad (9)$$

式中 θ_1 、 θ_2 为逆变器 1、2 所对应的扰动角。

由式(7)~(9)可得,2 台逆变器等效为 1 台逆变器的扰动角 θ 的表达式为

$$\theta = \arctan\left(\frac{m \sin \theta_1 + (1 - m) \sin \theta_2}{m \cos \theta_1 + (1 - m) \cos \theta_2}\right) \quad (10)$$

由式(10)可知:

$$\min(\theta_1, \theta_2) < \theta < \max(\theta_1, \theta_2) \quad (11)$$

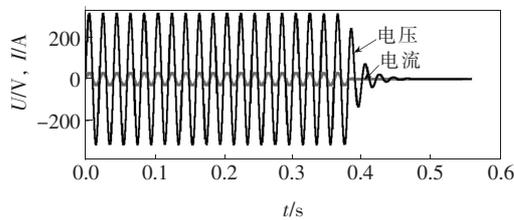
由于多机并联系统的扰动角 θ 介于单机系统的扰动角 θ_1 、 θ_2 之间,若单机系统能够有效地检测出孤岛状态,多机系统必然可以检测出孤岛状态。

4 仿真分析

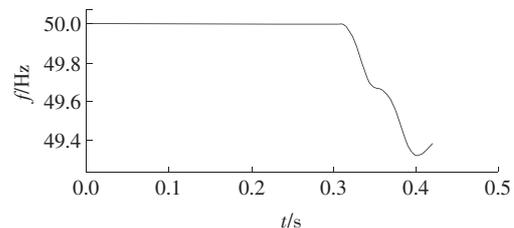
光伏发电系统输出功率与负载消耗功率相匹配、RLC 负载谐振频率与电网频率相同、品质因数 $Q_f = 2.5$ 这 3 种情况是传统孤岛检测最难以实现的。改进滑模频率偏移法由该文提出,为了验证此方法的正确性,根据这 3 种情况对光伏系统进行仿真,在 MATLAB/simulink 中搭建光伏发电系统及孤岛检测算法仿真模型。

4.1 单机系统的孤岛检测

光伏逆变器并网的参数设置如下:光伏发电系统额定功率为 4.36 kW,直流母线电压为 400 V,电网电压幅值为 220 V/50 Hz,逆变器谐振频率为 50 Hz,开关频率为 20 kHz,负载品质因数为 2.5,并联负载 $R = 10.52 \Omega$, $L = 13.4 \text{ mH}$, $C = 756 \mu\text{F}$ 。 $t = 0.3 \text{ s}$ 时断开并网开关 S,光伏发电系统进入孤岛状态。PCC 点电压和逆变器输出电流波形如图 7 所示。



(a)PCC 点电压与逆变器输出电流波形



(b)PCC 点电压频率

图 7 单逆变器系统的孤岛检测仿真结果

Figure 7 Simulation results of islanding detection for single-inverter system

由图 7 可知,该文提出的改进 SMS 算法能够有效地检测出孤岛,检测时间为 0.081 s,满足标准要求(IEEE standard 547—2003 规定的最长检测时间为 2 s)。为了分析该检测方法对系统电能质量的影响,将输出电流进行傅里叶变换分析(FFT),输出电流畸变率为 0.96%,低于 IEEE Std. 929—2000 对并网 THD 限值为 5%的要求。

为了能更清晰地表示出该算法的有效性,将该文所提出的算法与其他改进 SMS 算法的畸变率以及检测时间进行比较,如表 2 所示,比较可知:该文提出的算法既检测时间快,又尽可能减少了对电能质量的影响,相对于传统的 SMS 算法有明显的创新。

该文所提出的改进 SMS 算法采用 DSP2812 芯片,其时钟频率为 150 MHz,每条指令周期为 6.67 ns,仿真效果如图 8 所示。

实验表明:逆变器的输出电流和 PCC 电压同频同相,证明所采用控制策略的合理性。

表 2 不同算法下的性能比较

Table 2 Performance comparison of different algorithms

检测方法	检测时间/s	THD/%
传统 SMS 算法	1.860	2.36
基于抛物线型算法	0.145	1.86
该文所提出的算法	0.081	0.96

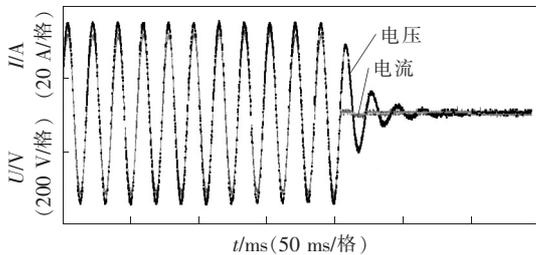
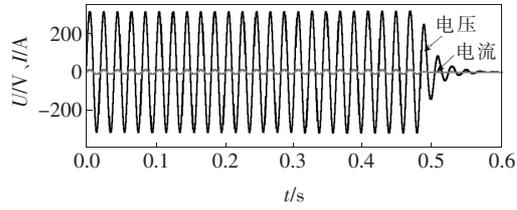


图 8 单逆变器系统的孤岛检测实验结果

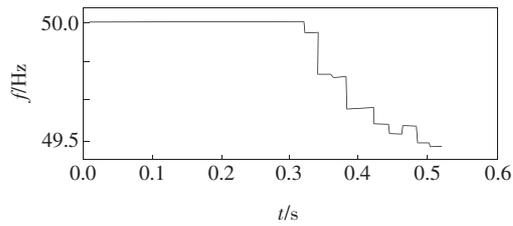
Figure 8 Experimental results of islanding detection for single-inverter system

4.2 多机系统的孤岛检测

当 2 台逆变器并联运行时,每台逆变器的输出功率为总功率的 50%,PCC 点电压和逆变器输出电流波形如图 9 所示,可知该文提出的改进 SMS 算法在多机系统下能够有效地检测出孤岛,检测时间为 0.17 s,输出电流畸变率为 0.96%,均满足 IEEE standard 547—2003 的要求。



(a)PCC 点电压与逆变器输出电流波形



(b)PCC 点电压频率

图 9 双逆变器系统的孤岛检测仿真结果

Figure 9 Simulation results of islanding detection for dual-inverter system

5 结语

基于对传统 SMS 算法研究的基础上,该文提出一种改进 SMS 算法,并对 θ_{SMS} 表达式中的反馈系数 k 进行了模糊优化。仿真结果表明:当系统孤岛运行时,系统能快速离网。该算法较传统 SMS 算法既缩短了检测时间又改善了电能质量,具有一定的实际应用价值。

该文对改进算法的可靠性从单机、多机多方面进行分析,并在 DSP 应用环境下证明了其合理性,相对于传统 SMS 算法有较大的创新,但在多机并联系统产生的稀释效应方面有待进一步研究。

参考文献:

[1] 王增平,杨国生,王志洁,等. 继电保护相关的国内外分布式电源并网标准[J]. 中国电力,2019,52(8):112-119.
WANG Zengping, YANG Guosheng, WANG Zhijie, et al. Relay protection-related domestic and foreign standards for interconnecting distributed resources with electric power systems[J]. Electric Power, 2019, 52(8): 112-119.

[2] 谢东,张兴,曹仁贤. 基于小波变换与神经网络的孤岛检测技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):537-544.
XIE Dong, ZHANG Xing, CAO Renxian. Islanding de-

- tection based on wavelet transform and neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 537-544.
- [3] 颜湘武, 王月茹, 王星海. 微网孤岛运行模式下新型频率控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 11-15.
YAN Xiangwu, WANG Yueru, WANG Xinghai. A novel frequency control method for micro-grid in islanding operating mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 11-15.
- [4] 马聪, 高峰, 李瑞生, 等. 新能源并网发电系统低电压穿越与孤岛同步检测的无功功率扰动算法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1406-1414.
MA Cong, GAO Feng, LI Ruisheng, et al. Reactive power perturbation method for simultaneous low voltage ride-through and islanding detection of grid-tied renewable energy generation systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1406-1414.
- [5] Vieira J C M, Freitas W, Xu W, et al. Efficient coordination of ROCOF and frequency relays for distributed generation protection by using the application region [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1878-1884.
- [6] Jang S I, Kim K H. An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 745-752.
- [7] Redfern M A, Usta O, Fielding G. Protection against loss of utility grid supply for a dispersed storage and generation unit [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 948-954.
- [8] Pai F S, Huang S J. A detection algorithm for islanding-prevention of dispersed consumer-owned storage and generating units [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 21(12): 67-67.
- [9] 张纯江, 郭忠南, 孟慧英, 等. 主动电流扰动法在并网发电系统孤岛检测中的应用 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(7): 176-180.
ZHANG Chunjiang, GUO Zhongnan, MENG Huiying, et al. Active current disturbing method for islanding detection of grid-connected inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7): 176-180.
- [10] 刘方锐, 余蜜, 张宇, 等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 47-51.
LIU Fangrui, YU Mi, ZHANG Yu, et al. Islanding detection evaluation for active frequency drifting methods in multiple photovoltaic grid-connected converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 47-51.
- [11] 张明锐, 王俊凯, 王佳莹, 等. 微网混合式孤岛检测及运行模式切换研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 1-8.
ZHANG Mingrui, WANG Junkai, WANG Jiaying, et al. Study on hybrid islanding detection and operation mode transition of microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 1-8.
- [12] 方如举, 田盈, 李丽. 光伏并网逆变器主动式孤岛检测优化控制方法的研究 [J]. 可再生能源, 2012, 30(10): 26-28.
FANG Ruju, TIAN Ying, LI Li. Research on active islanding protection optimization control method of photovoltaic grid-connected inverter [J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(10): 26-28.
- [13] 朱振飞, 牟晓春, 李阳, 等. 适用于级联阀组背靠背运行状态的控制策略研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(3): 91-96.
ZHU Zhenfei, MU Xiaochun, LI Yang, et al. Research on control strategy for cascade valve group under back-to-back running condition [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(3): 91-96.
- [14] 刘高维, 冯俊淇, 余志文, 等. 充放储一体化电站孤岛运行的离网及维持控制策略 [J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 69-74.
LIU Gaowei, FENG Junqi, YU Zhiwen, et al. Off-grid and maintenance control strategy of integrated power station of integrated power station with charge, discharge and storage [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 69-74.
- [15] 方小妹, 宋树祥, 蒋品群, 等. 基于模糊控制的新型主动移相式孤岛检测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 19-24.
FANG Xiaomei, SONG Shuxiang, JIANG Pinqun, et al. A novel active phase shifting islanding detection method based on fuzzy control [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 19-24.
- [16] 颜京忠, 林江, 王磊, 等. 基于虚拟谐波阻抗的孤岛微电网谐波功率均分控制策略 [J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 31-38.
YAN Jingzhong, LIN Jiang, WANG Lei, et al. Control strategy of harmonic power sharing for islanded micro-grid based on virtual harmonic impedance [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 31-38.