

Sandia 频移法在电子负载孤岛检测中的应用研究及参数优化

侯立健 朱长青 安巧静 严雪飞
(军械工程学院 石家庄 050003)

摘要: 以单相馈能型电子负载为研究对象,详细分析了 Sandia 频移式孤岛检测法(SFS)原理,描述其检测盲区,并对 SFS 算法中的参数进行优化。与此同时,将 SFS 与 Sandia 电压偏移法(SVS)结合,并辅助过/欠频率、过/欠电压保护,形成一种复合型的孤岛检测法。最后在 MATLAB/Simulink 环境下,搭建了仿真模型,仿真结果表明,参数优化后,系统可实现特定负载下的无盲区检测,将 SFS 和 SVS 结合使用明显提高检测效率,能够快速有效地进行孤岛保护,输出电能质量较高,验证了设计方案的可行性和优越性。

关键词: 电子负载;频移式;检测盲区;复合型

中图分类号: TN712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4731

Research and parameter optimization on Sandia frequency shift method in the islanding detection of electronic load

Hou Lijian Zhu Changqing An Qiaojing Yan Xuefei
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The object studied is single-phase feedback type electronic load, the principle of Sandia frequency shift islanding detection(SFS) is analyzed in detail, non-detection zones are evaluated, and optimizing parameters of SFS algorithm. Meanwhile, SFS and Sandia voltage shift method (SVS) are combined to form a complex of islanding detection method with passive methods of over/under frequency and over/under voltage. Finally, the model of simulation are conducted in with the help of MATLAB/Simulink. The simulation results indicate that the system can be conducted without non-detection zones under special loads. The combination with SFS and SVS will significantly improve the detection efficiency, and it can carry islanding protection quickly and efficiently, and power quality is higher, the feasibility and the superiority of the scheme are verified.

Keywords: Electronic load, frequency shift, non-detection zones, complex

1 引言

孤岛效应是并网供电系统中的一种特殊的故障状态,它是指当电网由于人为因素、电气故障或自然因素等原因导致供电中断,并网发电系统未能检测出停电状态并脱离电网,与周边负载组成了一个失控的供电孤岛^[1-3]。孤岛现象会影响电力系统的正常运行,并对设备和人员的安全造成威胁,常用的孤岛检测法为逆变器的被动检测和主动检测^[4-6]。

馈能型电子负载通常采用 AC-DC-AC 的拓扑结构,从电网的角度来看,相当于一个并网发电系统^[7-8],所以孤岛防护是其必备功能。本文从 SFS 检测盲区出发,对其参数

进行优化,并与 SVS 结合,构成 SFS+SVS 复合检测法,仿真结果证明该方案检测性能优异,实现了特定负载的无盲区检测。

2 Sandia 频移法

2.1 工作原理

在研究孤岛检测技术的时候,通常采用 RLC 并联负载,并网逆变器、电网和本地负载的典型连接方式如图 1 所示^[9]。

本文采用以主动检测法 SFS 为核心的复合型检测法对馈能型电子负载进行孤岛保护。SFS 是主动频移法(AFD)的扩展,如图 2 所示,逆变器向电网注入的电流波形

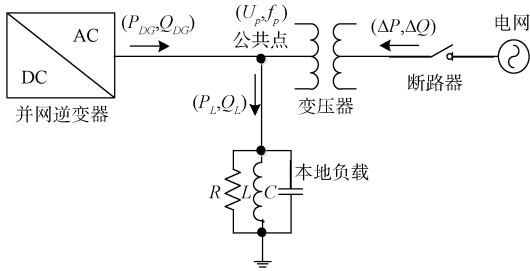


图 1 并网逆变器、电网和本地负载的典型连接方式

有轻微的畸变, 电流频率稍大于电压频率^[10-11], 在电网断开后, 公共点电压频率跟随电流波形迅速达到预定阈值, 从而检测出孤岛。

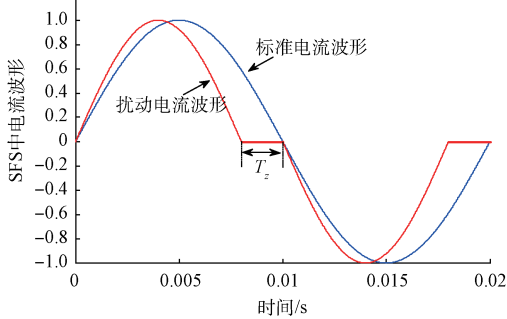


图 2 SFS 中电流波形

为实施正反馈, 主动频移的斩波部分定义为电网频率的误差函数:

$$cf = \frac{t_z}{T/2} = cf_0 + k(f_p - f_n) \quad (1)$$

式中: cf_0 为初始斩波系数, k 是加速增益。

稳态下, Sandia 频移法对应的电流幅值和相位的参考值为:

$$\begin{cases} i^* = \sqrt{2}I \sin[2\pi(f_n + \Delta f_s)t] \\ \theta_{SFS} = \frac{\pi \Delta f}{f_n + \Delta f_s} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_n 是电网额定频率, Δf_s 是稳态下的频率差。

当孤岛发生时, 公共点处电压频率 f_p 会产生波动直至形成一个新的平衡状态, 此时 $Q_L = Q_{DG}$ 。以单位因数能为例, 新的平衡状态下, $Q_L = Q_{DG} = 0$, 输出电流 i_o 和公共点电压 u_p 相角差 $\Delta\theta$ 为零。

在加速增益 k 一定的情况下, 以频率差为负值为例, 公共点电压频率 f_p 减小, 由于锁相环的存在, 输出电流频率 f_i 减小, 根据欧姆定律, f_p 随 f_i 进一步减小, 实现正反馈, 从而 f_p 逐渐减小直至达到预设阈值, 检测出孤岛。但是对于一些负载, 在 f_p 仍在电网正常工作范围内时, $\Delta\theta$ 已经为零, 此时检测失败^[12-13]。

此外, 负载的品质因数 Q 对反孤岛方案的性能有着重要的影响, Q 越大, 公共点电压 u_p 跟踪输出电流 i_o 的速度

越快, 检测出孤岛所需时间越短。但是如果负载谐振频率在电网正常工作范围内, 则 Q 越大, 负载谐振能力越强, 检测盲区越大。

2.2 描述检测盲区

检测盲区的大小是判断孤岛检测方法优劣的重要标准, 采用合适的方法, 可以对相应检测算法的适用范围进行评估, 同时有利于深入查找孤岛检测失败的原因, 进行参数优化, 改善性能^[14]。

常用的孤岛检测盲区描述方法有: 功率失配区间法、负载参数 L/C 描述法、品质因数/谐振频率描述法。由于孤岛检测效果受负载特性的影响很大, 为了清晰地反映检测盲区与负载参数的关系, 同时解耦坐标轴变量, 采用一种负载特性参数描述法^[15], 用 $Q_{f_0} \times C_{norm}$ 坐标平面描述, 横轴 Q_{f_0} , 反映孤岛检测性能受品质因数影响的情况; 纵轴为 C_{norm} , 表示负载电容的标么值, 参数定义为:

$$\begin{cases} Q_{f_0} = \frac{R}{\omega_n L} \\ C_{norm} = \frac{C}{C_{res}} \\ C_{res} = \frac{1}{L\omega_n^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: R, L, C 分别是本地负载电阻值、电感值、电容值; ω_n 为电网额定角频率。 Q_{f_0} 表示电网额定频率下的负载品质因数, 在并网逆变器输出功率一定时, 为负载电感 L 的单值函数。

如上一节所述, 孤岛发生时, 系统会形成一个新的稳定状态, 此时输出电流 i_o 和公共点电压 u_p 相角差 $\Delta\theta$ 为零, 而在整个系统中 $\Delta\theta$ 仅受两部分影响: SFS 算法和负载, 所以稳态时可得:

$$\theta_{SFS} = \theta_L = \tan^{-1}\left[R\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)\right] \quad (4)$$

上式被称为相角判据。

由于公共电压 u_p 的相位取决于 i_o 的基波分量 i_{o1} , 而 i_{o1} 领先 i_o 的时间为 $t_z/2$ ^[16], 在加入 SFS 算法后, u_p 会跟踪 i_{o1} , 则在负载谐振频率处, u_p 领先 i_o 的时间为 $t_z/2$, 即:

$$\theta_{SFS} = \frac{\omega t_z}{2} \quad (5)$$

则稳态时有如下关系:

$$\theta_L = \tan^{-1}\left[R\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\right] = \theta_{SFS} = \frac{\omega t_z}{2} = \frac{\pi}{2} cf \quad (6)$$

在系统调整频率以达到上述稳态条件过程中, 若频率超限预设的阈值, 则孤岛被检出; 若当频率最终稳定在电网正常工作范围内, 则检测失败。下面将通过类负载特性参数法计算得出 SFS 算法检测盲区。

设公共点角频率为 $\omega_p = \omega_n + \Delta\omega$, 负载电容 $C = C_{norm} C_{res} = (1 + \Delta C) C_{res}$ 代入式(6)得:

$$\theta_L = \tan^{-1}\left[\frac{R(\omega_n + \Delta\omega)(1 + \Delta C)C_{res} - \frac{R}{(\omega_n + \Delta\omega)L}}{\omega_n + \Delta\omega}\right] \quad (7)$$

将 Q_{f_0} 和 C_{res} 代入式(7),整理可得:

$$\theta_L = \tan^{-1} \left[Q_{f_0} \omega_n \frac{(\frac{\Delta \omega}{\omega_n})^2 + \frac{2\Delta \omega}{\omega_n} + \Delta C (1 + \frac{\Delta \omega}{\omega_n})^2}{\omega_n + \Delta \omega} \right] \quad (8)$$

根据 GB/T19939-2005 中规定,电网正常工作范围为 49.5~50.5 Hz, $\omega_n = 50$ Hz,因此可取 $(\Delta \omega / \omega_n)^2 \approx 0, 1 + \Delta \omega / \omega_n \approx 1$,从而式(8)可变成

$$\begin{cases} \frac{\tan(\frac{\pi}{2}cf)}{Q_{f_0}} - \frac{2 \times 0.5 \times 2\pi}{\omega_n} < \Delta C < \frac{\tan(\frac{\pi}{2}cf)}{Q_{f_0}} + \frac{2 \times 0.5 \times 2\pi}{\omega_n} \\ \frac{\tan(\frac{\pi}{2}cf)}{Q_{f_0}} - \frac{2 \times 0.5 \times 2\pi}{\omega_n} + 1 < C_{norm} < \frac{\tan(\frac{\pi}{2}cf)}{Q_{f_0}} + \frac{2 \times 0.5 \times 2\pi}{\omega_n} + 1 \end{cases} \quad (11)$$

当本地负载电容在式(11)范围内,则孤岛发生后,系统将最终稳定在电网正常工作频率范围内,检测失败。分别选取 $cf_0 = 0, 0.02, k = 0.02, 0.05, 0.1$ 。利用 MATLAB 软件做出负载特性曲线,如图 3 所示。

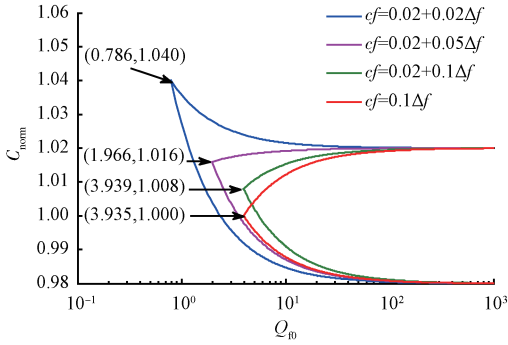


图 3 SFS 的检测盲区

从图 3 中可以看出:1) $C_{norm} = 1$ 附近,检测最容易失败;2)随着加速增益 k 的增大,检测盲区明显减小;3)初始斩波系数 cf_0 的增大基本不能改变检测盲区大小;4)可通过合理设置 SFS 算法参数实现特定负载下的无盲区检测。

3 参数优化

Sandia 频移法是一种高效率的主动检测法,无需额外硬件即可实现,但是算法参数对孤岛检测的性能影响较大。SFS 算法对并网逆变器输出电流频率进行扰动,人为造成无功功率失配,以此来检测出孤岛,将不可避免地增加输出电流的谐波含量,所以参数的设置要兼顾检测性能和电能质量。

3.1 加速增益 k 的选取

由图 3 可知,随着 k 值的增大,检测盲区明显减小,但由文献[16]可知,过大的加速增益将会直接增大输出电流 THD,影响系统稳定性。根据 IEEE 的规定, k 值的选取既要满足输出电流 THD 小于 5%,同时又要实现对品质因数小于 2.5 负载的无检测盲区。

根据式(11),可得负载电容边界值为:

$$\tan \theta_L = \tan\left(\frac{\pi}{2}cf\right) = Q_{f_0} \left(\frac{2\Delta \omega}{\omega_n} + \Delta C\right) \quad (9)$$

则电容变化 ΔC 的表达式为:

$$\Delta C = \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2}cf\right)}{Q_{f_0}} - \frac{2\Delta \omega}{\omega_n} \quad (10)$$

将允许频率波动的上下限代入,得到盲区电容值为:

$$\begin{cases} C_{norm-min} = \frac{\tan\left[\frac{\pi}{2}(cf_0 + k \times 0.5)\right]}{Q_{f_0}} - \frac{2 \times 0.5 \times 2\pi}{\omega_n} + 1 \\ C_{norm-max} = \frac{\tan\left[\frac{\pi}{2}(cf_0 - k \times 0.5)\right]}{Q_{f_0}} + \frac{2 \times 0.5 \times 2\pi}{\omega_n} + 1 \end{cases} \quad (12)$$

若要实现无检测盲区,需满足:

$$C_{norm-max} < C_{norm-min} \quad (13)$$

由于 θ_L 较小,所以 $\theta_L \approx \tan \theta_L$,为计算方便,电容么值的表达式可近似为:

$$C_{norm} = \frac{\pi(cf_0 + k\Delta f)}{2Q_{f_0}} - \frac{2\Delta \omega}{\omega_n} + 1 \quad (14)$$

联立式(12)(13),当无检测盲区时,计算可得 k 的取值范围为: $k > 8Q_{f_0} / \omega_n$ 。当 $Q_{f_0} = 2.5, f_n = 50$ Hz 时, $k > 0.0637$ 。实际应用中,可选择 $k = 0.1$,当 $cf_0 = 0.02$ 时,从图 3 中负载特性曲线最左侧点的坐标可以看出,品质因数小于 3.9 的负载,均可实现无盲区检测。

3.2 初始斩波系数 cf_0 的选取

由图 3 和式(12)可知,改变 cf_0 的大小对检测盲区的大小并没有明显影响,因此改变 cf_0 的取值对提高孤岛检测性能作用不大。然而, cf_0 的大小将会直接影响输出电流的谐波含量,对于大电网来说,电网频率一直处于波动状态,只要能够检测到 Δf ,孤岛检测算法就能正常工作,所以实际应用中, cf_0 的取值应当尽量小,可取 0.01~0.02。

4 SFS+SVS 复合检测法

SFS 主要是针对频率的一种主动检测法,在实际应用时,可选择一种基于电压正反馈的主动检测法作为辅助,以获得更好的检测性能。

可选择 Sandia 电压偏移法(SVS),该方法是将公共点电压幅值作为正反馈输入电流参考值。正常情况下,电网电压相对稳定,对并网逆变器输出电流基本没影响;当电网失电时,假设公共点电压幅值降低,参考电流幅值跟随

减小,根据欧姆定律,电压幅值进一步降低直至触发欠压保护。SVS 算法下电流参考值和电流扰动量为:

$$\begin{cases} i_L = (I + \Delta i) \sin(2\pi f_p t) \\ \Delta i = \Delta i_0 + a(u_p - u_n) \end{cases} \quad (15)$$

式中: Δi_0 为初始扰动量, a 为反馈系数。

SVS 通过正反馈的方式加速电压幅值偏移,并未对负载工作频率增加额外的扰动,并不影响 SFS 的正常工作,采用 SFS+SVS 复合检测法可提高检测效率。

5 仿真分析

为了验证设计方案的可行性及其性能,在 MATLAB/Simulink 环境下,搭建了并网逆变器控制系统仿真模型, SFS 算法通过 S 函数实现,取 $cf=0.02+0.1\Delta f$ 。模型的主要参数: $U_{dc}=400\text{ V}$, $U_c=220\text{ V}$, $f_n=50\text{ Hz}$, 0.2 s 处电网失压。仿真波形中负载电流为实际值乘以 5。

首先模拟本地负载最差的情况,有功功率平衡,负载品质因数取 $Q_f=2.5$,谐振频率为 $f=50\text{ Hz}$ 。仿真结果如图 4~6 所示。

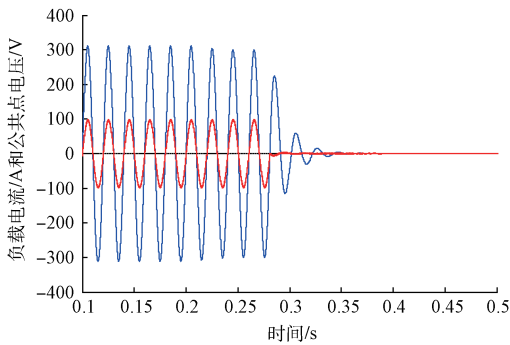


图 4 有功平衡时 SFS 孤岛检测下的负载电流和公共点电压

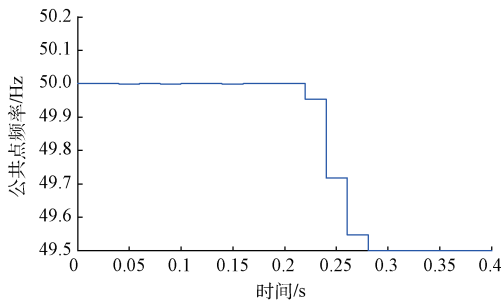


图 5 有功平衡时 SFS 孤岛检测下公共点电压频率

从图 4、图 5 中可以看出,当电网失压后,在 SFS 算法的作用下,公共点电压频率逐渐偏移,在 0.28 s 处触发欠频率保护,顺利检测出孤岛,证明了参数选择的合理性和正确性,充分满足 IEEE 中规定的,品质因数 Q 小于 2.5 时无盲区检测。此外,从图 6 可以看出并网电流 THD 仅为 1.35%,电能质量较高。

为了验证 SFS+SVS 复合检测法的性能,通过改变并

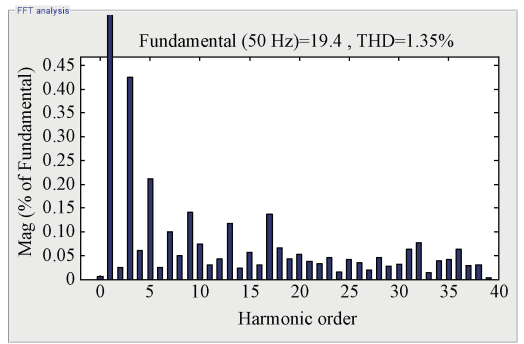


图 6 有功平衡时 SFS 孤岛检测下并网电流谐波分析

网逆变器输出功率,模拟有功功率失配,对 SFS 和 SFS+SVS 进行比较,SVS 算法中取 $\Delta i_0=0.1$, $a=0.02$,仿真结果如图 7~10 所示。

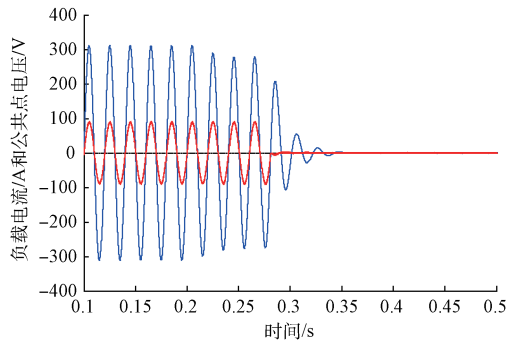


图 7 有功功率失配时 SFS 检测法下负载电流和公共点电压

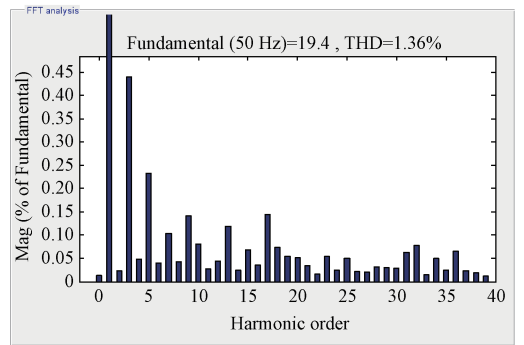


图 8 有功功率失配时 SFS 检测法下并网电流谐波分析

如图 7 所示,有功功率失配下,公共点电压有所下降,但不足以触发欠压保护, SFS 算法在 0.28 s 处检测出孤岛,启动了欠频率保护。而从图 8 中可以看出,当采用 SFS+SVS 复合检测法时,电压正反馈使得公共点电压幅值迅速下降至预设阈值,在 0.24 s 处就检测出孤岛并启动保护,相对于单独使用 SFS 节约了一半时间。从图 8 和图 9 中可以看出,加入 SVS 算法后,并网电流谐波含量只有少量增加。

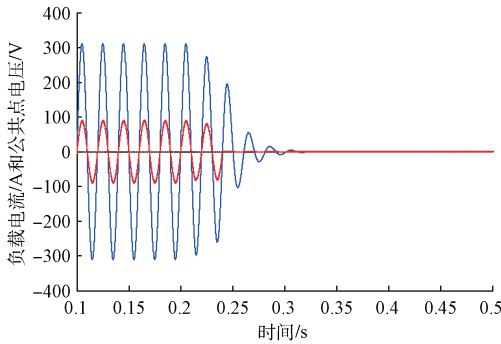


图 9 有功功率失配时复合检测法下负载电流和公共点电压

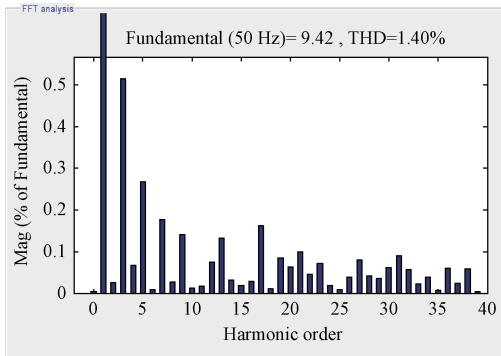


图 10 有功功率失配时复合检测法下谐波分析

6 结 论

本文阐述 SFS 检测法的工作原理,在此基础基于盲区描述,对其参数进行了优化。同时,将 SFS 和 SVS 结合,并辅助过/欠压、过/欠频率保护,形成一种复合检测法。最后在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了仿真模型,仿真结果表明,通过进行参数优化,系统可实现特定负载下无盲区检测,同时 SVS 算法的加入,检测效率明显提高,并网电流质量优良,验证了设计方案的可行性和优越性。

参考文献

- [1] IEEE. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems [M]. IEEE, 2000.
- [2] 王西伟, 陈利利, 熊炜. 基于改进电压/频率正反馈的孤岛检测方法研究[J]. 电子技术应用, 2013, 39(9):66-69.
- [3] 刘静, 陶晓峰. 基于下垂特性的分布式发电系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2011(25):635-641.
- [4] ZEINELDIN H H, KIRTLEY J L. Islanding operation of inverter based distributed generation

with staic load models[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2008, 22(3):1-6.

- [5] 程启明, 王映斐, 程尹曼, 等. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 147-154.
- [6] 杨国华, 肖龙, 杨涌涛, 等. 考虑孤岛划分策略的多源微网孤岛检测技术研究[J]. 电测与仪表, 2014(1):35-39.
- [7] 邱爱中, 邱大为, 郝华辉. LCL 滤波光伏并网逆变器控制策略[J]. 国外电子测量技术, 2013(32):38-40.
- [8] 柯程虎, 张辉. 小功率单相光伏并网逆变器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2866-2873.
- [9] 赵清林, 郭小强, 邬伟扬. 单相逆变器并网控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16):60-64.
- [10] 何军, 赵钢. 改进型主动式频率偏移孤岛检测算法分析[J]. 电测与仪表, 2013(3):41-44.
- [11] 翟登辉, 徐军, 沈定坤, 等. 一种优化的基于频率偏移的孤岛检测新方法[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4):58-60.
- [12] ROPP M E. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3):810-816.
- [13] ROPP M, ROHATGI M. Etermining? the? relative? effectiveness? of islanding detection methods using phase criteria and nondetection zones [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000(15):290-296.
- [14] 刘建, 崔德民, 李晓博, 等. 常见孤岛检测盲区描述方法[J]. 山东电力技术, 2013(6):39-42.
- [15] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭, 等. 一种有效的孤岛检测盲区描述方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 167-172.
- [16] ROOP M. Design issues for grid-connected photovoltaic systems [M]. Georgia Institute of Technology: Atlanta, GA, 1998.

作者简介

侯立健, 1991 年出生, 硕士研究生, 从事装备电力系统理论与技术的研究。

E-mail:houlijian1205@163.com

朱长青, 1963 年出生, 教授, 博士生导师, 从事装备电力系统理论与技术的研究。

安巧静, 1987 年出生, 博士研究生, 从事电力电子控制技术方面研究。

严雪飞, 1990 年出生, 硕士研究生, 从事装备电力系统理论与技术的研究。