

基于模糊控制的快速无盲区的频移式孤岛检测法

郑涛¹, 袁飞¹, 王燕萍¹, 王增平¹, 刘逸辰¹, 黄雯¹, 王小立²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206; 2. 国网宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 孤岛检测对于分布式系统的安全稳定运行极其重要, 但是传统的孤岛检测方法常常难以兼顾电能质量与检测效率。为了解决这一问题, 提出了一种基于模糊控制的快速无盲区频率偏移孤岛检测方法。该方法将模糊控制与带正反馈的主动频率偏移法 (AFDPF) 相结合, 利用模糊控制的原理, 根据 PCC 点的频率变化量和频率变化率自适应选取 AFDPF 的系数。相对于传统的 AFDPF 方法, 新方法在 DG 系统并网运行时对电能质量的影响极小, 在发生孤岛时能够进行快速检测, 并且可以有效地消除检测盲区。在电力系统发生扰动时, 不影响系统频率, 也不会产生误判。

关键词: 分布式系统; 孤岛检测; AFDPF; 模糊控制; 电能质量

A fast frequency drifts islanding-detecting method without non-detecting zone based on fuzzy control

ZHENG Tao¹, YUAN Fei¹, WANG Yan-ping¹, WANG Zeng-ping¹, LIU Yi-chen¹, HUANG Wen¹, WANG Xiao-li²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: The islanding-detection is important for the DG system. But the traditional islanding-detection cannot ensure the good detecting performance and the electric power quality at the same time. In order to solve this problem, a new islanding-detection method is proposed. This method combines fuzzy control with active frequency drifting with positive feedback (AFDPF), which can choose the coefficients of AFDPF based on fuzzy control. Compared with AFDPF, this method can detect the islanding faster with less impact on power quality when the DG system is connected to the grid, and eliminate the non-detecting zone. When the system is disturbed, the new method does not affect the frequency of system and would not judge it as islanding.

Key words: DG system; islanding-detection; AFDPF; fuzzy control; power quality

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0038-06

0 引言

孤岛是指当分布式系统 (DG 系统) 与电网脱离时, 分布式电源仍向本地负载供电的现象。孤岛分为计划性孤岛和非计划性孤岛, 计划性孤岛是指在构建电网时就已预料到可能发生的孤岛, 并且已配备了相应的安全稳定运行措施, 非计划性孤岛是指在电网构建时没有预料到的孤岛, 并未配备任何防护措施。非计划性孤岛一旦发生, 会对电网安全稳定运行以及检修人员的安全造成很大的危害, 因此是不允许出现的。孤岛检测可以获知 DG 系统是否发生孤岛, 对电网的安全稳定运行是很重要的。

目前的孤岛检测方法主要分为开关状态检测法^[1],

被动检测法和主动检测法^[2], 开关状态检测法利用通信方法, 在孤岛发生时向 DG 系统发送信号, 使其停止运行, 这种方法检测效率高, 对正常运行时系统的电能质量没有影响, 但成本过高; 被动法利用孤岛发生时 DG 系统内电气量的变化判断孤岛, 主要有过/欠频和过/欠压法^[3], 相位跳变法^[3]等, 这种方法对正常运行时系统的电能质量没有影响, 但检测盲区较大; 主动法向 DG 系统内注入扰动, 根据并网运行与孤岛运行时扰动产生的影响的差异判断孤岛。主动检测法主要有主动移频法 (AFD)^[4], 带正反馈的主动移频法 (AFDPF)^[5], 滑模频率偏移法 (SMS), 功率扰动法, 阻抗法等, 主动法检测效率较高, 但是对并网运行时的电能质量的影响较大。AFDPF 是一种常用的主动检测法, 它利用输出电流的轻微畸变使电压频率产生变化, 并且通过正

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (宁夏电力公司科技项目 SGNX0000DKJS1300713)

反馈进一步加速频率的变化, 但是这种方法难以兼顾电能质量与检测速度, 本文将模糊控制应用于AFDPF, 提出了一种新型孤岛检测方法, 新方法提高了检测速度, 又大大减小了对DG系统并网运行时电能质量的影响。

1 AFDPF 性能分析

1.1 AFDPF 的基本原理

AFDPF 的基本原理如图 1 所示, 逆变器的输出电流与 PCC 点的电压同相位, 但频率稍大于 PCC 点电压, 在每一个半周电流过零而电压未过零时电流保持为零。设每一个半周的电流置零的时间为 T_z , 电压周期为 T_v , 则定义截断系数 cf 为

$$cf = \frac{2T_z}{T_v} \quad (1)$$

每半个周期置零的角度为

$$\theta_{AFDPF} = \frac{\pi cf}{2} \quad (2)$$

AFDPF 引入每一个周期产生的频率变化形成反馈, 则第 i 个周期的 cf_i 可以表示为

$$cf_i = cf_0 + k(f_i - f_0) \quad (3)$$

式中: f_i 表示第 i 周期 PCC 点的电压频率; k 为反馈系数; f_n 为电网基频电压额定频率。

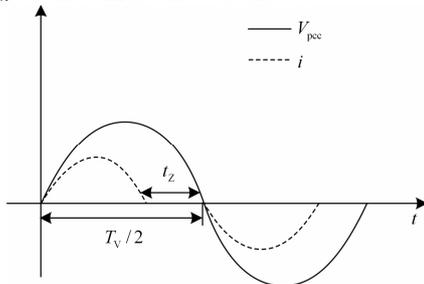


图 1 AFDPF 检测原理图
Fig. 1 Schematics of AFDPF

当 DG 系统并网运行时, 扰动被大电网稀释, PCC 点电压频率保持不变, Δf 为 0, cf_i 保持恒定。当 DG 系统发生孤岛的时候, 由于系统功率不匹配以及算法的扰动, 频率 f 发生变化, 式 (3) 所示的算法使 cf 越来越大, 输出电流的频率也越来越大, 使 PCC 点电压频率越来越大, Δf 也越来越大, 进一步增大 cf , 如此形成正反馈, 持续增大逆变器输出电流的频率, 直到检测出孤岛。

1.2 AFDPF 的缺陷

对于 AFDPF, 当系统发生孤岛时, PCC 点的电压的频率与逆变器输出电流与本地负载有关。

$$\theta_{AFDPF} = \frac{cf_0 + k(f - f_0)}{2} \quad (4)$$

$$\theta_{load} = \arctan \left[R \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right] \quad (5)$$

在检测过程中, 下一周期逆变器测得的 PCC 点电压与本周期逆变器注入的电流基频分量的相位差为 $\theta_{AFDPF} + \theta_{load}$, 根据 $\theta_{AFDPF} + \theta_{load}$ 的不同的值, 逆变器会调整输出电流频率, 以保持电流与电压同相位。当 $\theta_{AFDPF} + \theta_{load} > 0$ 时, 电压相位超前电流, 为保持电压电流同相位, 逆变器将增大输出电流频率, 这样会使输出电流频率持续增大, 直到超出阈值; 当 $\theta_{AFDPF} + \theta_{load} = 0$ 时, 电流与电压同相位, 逆变器不再调整输出电流频率, $\Delta f = 0$, AFDPF 算法无法形成正反馈, PCC 点频率不变, 将会出现检测盲区; 当 $\theta_{AFDPF} + \theta_{load} < 0$ 时, 电压滞后于电流, 逆变器会不断减小输出电流的频率使得电压与电流同相位, 此时 $\Delta f < 0$, cf 逐渐减小, 甚至变为负值, 直到达到频率的下限值, 也可以检测出孤岛, 这种情况下初始扰动方向与频率变化方向相反, 检测速度较慢, 我国 GB/T 19939-2005 标准规定, 光伏逆变器需在孤岛发生后 2 s 内检测出孤岛, 而这种情况下可能出现 2 s 内检测不出孤岛的情况。

cf_0 与 k 的值既决定着检测性能, 又与电能质量有关。当 cf_0 与 k 取值较大时, AFDPF 在发生孤岛时具有良好的检测性能, 但是在 DG 系统并网运行时会影响电网的电能质量, 当 cf_0 与 k 取值较小时, 会减小并网运行时对电能质量的影响, 但是会降低孤岛时的检测性能。

由上述分析可知, 对于 AFDPF, 如果一直固定 cf_0 与 k 不变, 则难以同时保证检测效率与电能质量。针对这一问题, 文献[6]通过改变 cf_0 的扰动方向进行改进, 但是 cf_0 仍为绝对值固定的值, 尽管能够消除盲区, 但不能减小对电能质量的影响。单一地优化 cf_0 并不能显著提高检测性能。文献[7]对 k 进行了优化选择, 但是 cf_0 决定了初始扰动的方向和大小, 只优化 k 无法消除盲区, 也无法改善正常运行时的电能质量。本文利用模糊控制原理, 提出了一种根据频率变化量和频率变化率自适应选取 cf_0 与 k 的方法, 以解决上述问题。

2 基于模糊控制的 AFDPF

2.1 基本原理

在并网运行时, PCC 点的频率偏差和频率偏差变化率很小, 此时为保证电能质量, 利用模糊控制器控制逆变器输出很小的扰动量; 当发生孤岛时, 由于系统本身的功率不匹配和逆变器施加的扰动, 频率偏差和频率偏差变化率会产生较大的变化, 此

时模糊控制器控制逆变器输出相应的较大的扰动步长，并且根据频率偏差和频率偏差变化率正负情况，扰动步长的正负也应相应变化，这样导致频率进一步偏移，直到超出频率的规定阈值。为实现上述功能，设计两个模糊控制器，控制器 cf_0 和控制器 k 。两个控制器均以 PCC 点电压频率 f_{PCC} 与电网基频额定电压 f_0 的偏差 e 和频差变化率 ec 作为输入，控制器 cf_0 输出控制量为初始扰动量 cf_0 ，控制器 k 输出控制量为反馈系数 k 。这两个模糊控制器将实时跟踪 PCC 电压的频率变化量和频率变化率，自适应地寻找最优的输出量 cf_0 和 k ，实现主动检测，兼顾了电能质量与检测效率。

2.2 模糊控制器的设计

根据 GBT 15945-1995 标准对容量较小的系统的频率偏差的要求，令 $e \in [-0.5, 0.5]$ ，根据文献[8]对频率变化率的分析，令 $ec \in [-20, 20]$ ，根据文献[7]对 cf_0 的分析和模糊控制的目的，令 $cf_0 \in [-1, 1]$ 。对 e 、 ec 和 cf_0 的实际值需分别用量化因子 K_e 、 K_{ec} ，比例因子 K_0 进行量化，将它们实际范围映射在相应的模糊论域内。设模糊控制器 cf_0 的输入 e 、 ec 和输出 cf_0 的模糊集为 E 、 EC 和 O ，将其定义为 3 个模糊子集， E 与 EC 的论域为 $[-3, 3]$ ， O 的论域为 $[-2, 2]$ ，将三个子集的论域均分为 5 档，{NB (负大)，Z- (零负)，Z (零)，Z+ (零正)，PB (正大)}。模糊子集的隶属度函数如图 2 所示。

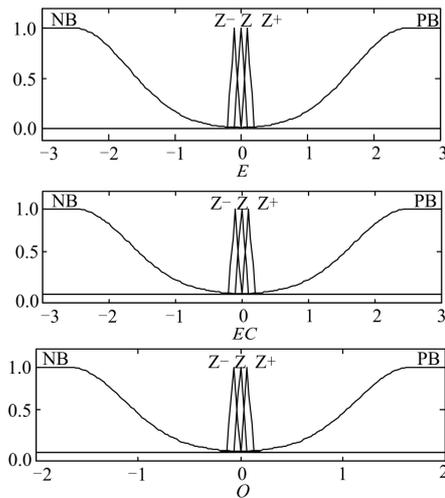


图 2 模糊控制器 cf_0 的隶属度函数曲线

Fig. 2 Membership function of fuzzy controller cf_0

由参数取值范围和论域可以得出控制器的量化因子 $K_e=6$ ， $K_{ec}=0.15$ ，比例因子 $K_0=0.5$ ，模糊控制器采用 T-S 模型作为模糊规则，模糊控制器的控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy inference rule

O	E				
	NB	Z-	Z	Z+	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB
Z-	NB	Z-	Z-	Z-	PB
EC	Z	NB	Z-	Z	Z+
Z+	NB	Z+	Z+	Z+	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB

参照文献[9-12]工程中使用模糊控制选取反馈系数的方式，结合孤岛检测的原理和要求，对模糊控制器 k 进行设计。设模糊子集 E 、 EC 的论域为 $[-3, 3]$ 、 U 的论域为 $[0, 6]$ ，将其分为 7 档， $E=EC=\{NB$ (负大)， NM (负中)， NS (负小)， ZE (零)， PS (正小)， PM (正中)， PB (正大)}， $U=\{ZE$ (零)， SS (较小)， S (小)， M (中)， BB (较大)， B (大)， VB (非常大)}。根据文献[7]对于 k 的取值的分析，选取 $k \in [0, 0.1]$ ，隶属度函数如图 3 所示。

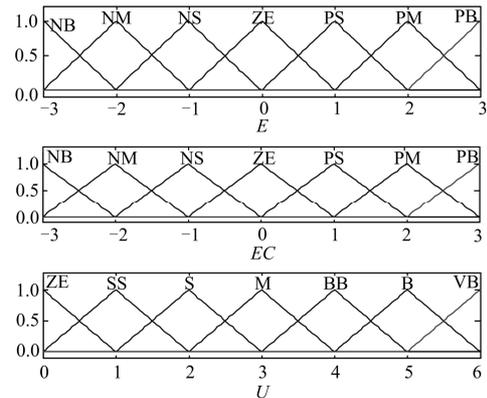


图 3 模糊控制器 k 的隶属度函数曲线

Fig. 3 Membership function of fuzzy controller k

通过参数的取值范围以及量化因子计算出控制器的量化因子 $K_e=6$ ， $K_{ec}=0.15$ ，比例因子 $K_u=1/60$ ，模糊控制器采用 T-S 模型作为模糊规则，模糊控制器的控制规则如表 2 所示。

表 2 模糊控制规则

Table 2 Fuzzy inference rule

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

两个模糊控制器都采用重心法进行解模糊, 得到输出量 o 和 u , 分别乘以各自的比例因子 K_o 和 K_u , 得到系统实际的控制量 cf_0 和 k 。

2.3 算法性能分析

新方法的 cf_0 和 k 都不再是定值, 根据 PCC 电压的频率变化量和频率变化率的数值进行变化。在 DG 系统并网运行时, cf_0 和 k 的数值远小于 AFDPF 算法, 产生的谐波分量很小, 对电能质量的影响较小; 当发生孤岛时, 在阻感性的情况下, cf_0 和 k 将随 Δf 及其变化率的增大而增大, 加快检测速度, 在阻容性的情况下, cf_0 会变为负值, 改变扰动方向, cf_0 的绝对值和 k 也随 Δf 绝对值的增大而增大, 这样不仅消除了盲区, 还提高了检测速度。本方法可以在保证电能质量的条件下极大地提高检测性能。

当系统未发生孤岛但发生小扰动, 导致频率发生小幅变化 (一般不超过 0.2 Hz) 时, 尽管新算法会输出很小的扰动, 但是由于逆变器在此过程中始终与大电网相连, PCC 频率始终受到大电网的钳制, 跟随大电网的频率, 在大电网频率恢复时, PCC 频率也将恢复到正常值。该方法在电网发生小扰动时不会影响电网的频率, 也不会发生误判。

3 仿真验证

本文利用 Matlab/Simulink 搭建光伏场站模型, 光伏逆变器采用 PQ 控制方式。由文献[7]的分析, 仿真中 AFDPF 的参数设置为 $cf_0=0.01$, $k=0.07$, 此时 AFDPF 对电能质量影响较小, 且检测效率较高, 新方法配备本文所提出的模糊控制算法, 调整本地负载为阻感性 ($\theta_{AFDPF}+\theta_{load}>0$), 阻容性 ($\theta_{AFDPF}+\theta_{load}<0$) 和产生检测盲区 ($\theta_{AFDPF}+\theta_{load}$ 近似为 0 时) 三种情况。在这三种情况下发生孤岛时对 AFDPF 和新方法进行仿真, 比较它们在孤岛发生时的孤岛检测性能, 在本地负载为阻感性和阻容性的情况下比较 DG 系统并网运行时两种算法对电能质量的影响。根据 GB/T 15945-1995, 当系统频率变化超过 0.5 Hz 时, 则判定为孤岛; 根据光伏系统并网技术要求 GB/T 19939-2005 的要求, 当孤岛发生时, 应在 2 s 内检测出孤岛, 若 2 s 内无法检测出孤岛, 则视为检测失败, 因此设定孤岛检测时间为 2 s。

3.1 孤岛发生时的检测加速与盲区消除

调整本地负载为阻感性 ($\theta_{AFDPF}+\theta_{load}>0$ 时) 和阻容性 ($\theta_{AFDPF}+\theta_{load}<0$), 分别对 AFDPF 与新方法进行仿真, 仿真结果如图 4、图 5 所示。由仿真可知, 在本地负载为阻容性和阻感性的情况下, AFDPF 和新方法都能在 2 s 内检测出孤岛, 但是新方法较 AFDPF 检测速度明显变快。在负载为阻感性的情况

下, 新方法比 AFDPF 快 0.2 s 左右, 而在阻容性的情况下, 新方法较 AFDPF 快 0.5 s 以上。由上文分析可知, 在负载为阻感性的情况下, AFDPF 能够快速检测出孤岛, 但是新方法较 AFDPF 更快。在负载为阻容性并且 $\theta_{AFDPF}+\theta_{load}<0$ 的情况下, AFDPF 在初始的几个周期内扰动的方向与实际频率变化方向相反, 实际上对系统的频率变化起到了阻碍作用, 而新方法自适应地调整了检测系数, 改变了扰动方向, 具有很强的加速作用, 由图 5 可知, 在本地负载为阻容性的情况下新方法的孤岛检测速度有了极大的提高。

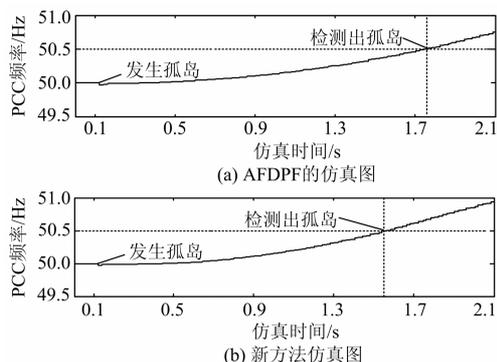


图 4 阻感性情况下仿真结果

Fig. 4 Simulation of the reactive location loads

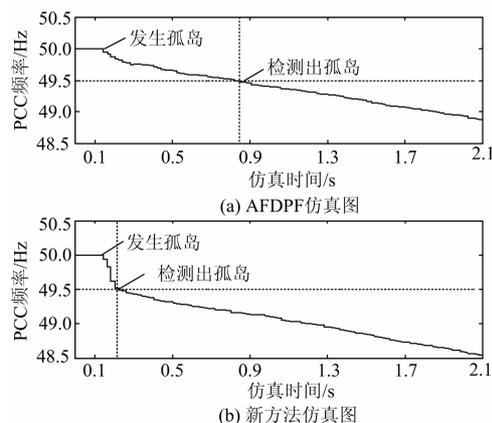


图 5 阻容性情况下仿真结果

Fig. 5 Simulation of the active location loads

图 6 为本地负载为阻容性 ($\theta_{AFDPF}+\theta_{load}$ 近似为 0 的) AFDPF 在 2 s 内无法检测出孤岛的情况下新方法 AFDPF 的对比图。由图 6 可知, 在 AFDPF 失效的情况下, 用新方法能够在 2 s 的时间内检测出孤岛, 有效地消除 AFDPF 的检测盲区。

3.2 在并网运行时对电能质量的影响

由 2.3 节分析可知, cf 的绝对值越大, 在并网运行时逆变器输出的谐波越多, 对电能质量的影响

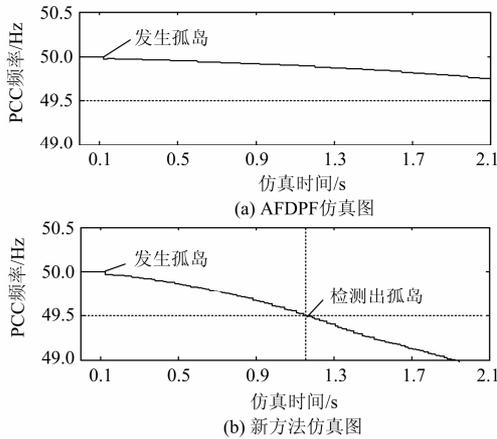


图 6 AFDPF 产生盲区情况下仿真结果
Fig. 6 Simulation of the situation of NDZ

越大。仿真通过比较两种方法的 cf 来比较它们对电能质量的影响。

图 7 为 AFDPF 与新方法在逆变器并网运行时负载为阻感性和阻容性两种情况下 cf 的比较图。在 DG 系统并网运行时，使用新方法所产生的 cf 的绝对值不超过 AFDPF 的 20%，由此可见，相对于 AFDPF，在逆变器并网运行时，使用新方法对电能质量的影响小得多。

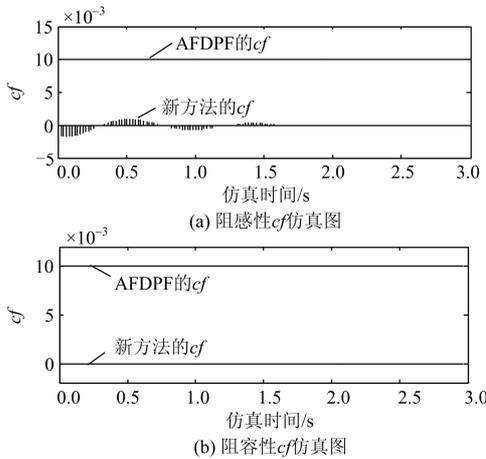


图 7 两种方法的 cf 对比图
Fig. 7 Simulation of cf of both methods

3.3 新方法鲁棒性的检验

在逆变器并网运行的情况下，设置系统在 0.5 s 时突然发生单相接地短路而导致频率出现小幅变化，而在 0.1 s 内故障排除。在逆变器不配备任何主动检测法和配备新方法两种情况下，测量 PCC 的频率，仿真图如图 8 所示。由图 8 可以看出，在系统频率发生小幅变化而未脱网时，PCC 频率受到电网的钳制，将跟随电网的频率，在扰动排除之后将恢复为稳定运行状态。可见新方法在系统受到小扰动

时不影响系统频率，也不会误判。

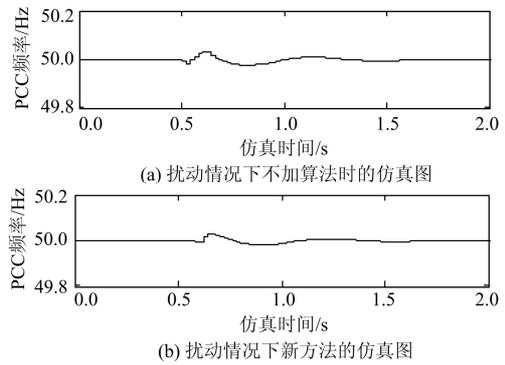


图 8 扰动情况下逆变器不加主动方法与加新方法的仿真对比图

Fig. 8 Simulation of f of the circumstance without any active method and the circumstance with new method

4 结论

为了解决传统的主动式孤岛检测方法在 DG 系统并网运行时对电能质量影响较大和在孤岛时存在检测盲区的问题，本文将模糊控制与 AFDPF 相结合，通过模糊控制自适应地选 cf_0 和 k 。通过仿真可以看出，新方法在 DG 系统并网运行时对电能质量影响大大减小；在 DG 系统断网发生孤岛时，能够快速检测出孤岛，并消除 AFDPF 的检测盲区；另外，当系统发生小扰动时，新方法不会影响系统频率，也不会误判。

参考文献

[1] 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.
CHENG Qi-ming, WANG Ying-fei, CHENG Yin-man, et al. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.

[2] 张琦, 孙向东, 钟彦儒, 等. 用于分布式发电系统孤岛检测的偶次谐波电流扰动法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 112-119.
ZHANG Qi, SUN Xiang-dong, ZHONG Yan-ru, et al. Even harmonic current disturbing method for islanding detection in the distributed power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 112-119.

[3] 丁浩, 何宇, 漆汉宏, 等. 基于抛物线型 SMS 算法的孤岛检测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 233-240.
DING Hao, HE Yu, QI Han-hong, et al. A novel islanding-detection based on parabolic SMS algorithm[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 233-240.
- [4] 殷志峰, 张元敏, 张振波, 等. 一种光伏并网逆变器孤岛检测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 117-121.
YIN Zhi-feng, ZHANG Yuan-min, ZHANG Zhen-bo, et al. A new method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 117-121.
- [5] 张石, 张瑞友, 汪定伟. 光伏并网逆变器的自适应微电网检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 136-140.
ZHANG Shi, ZHANG Rui-you, WANG Ding-wei. Adaptive microgrid detection methods for PV grid-connected converters[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 136-140.
- [6] 刘方锐, 康勇, 张宇, 等. 带正反馈的主动移频孤岛检测法的参数优化[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(3): 22-25.
LIU Fang-rui, KANG Yong, ZHANG Yu, et al. Parameter optimization of active frequency drift with positive feedback islanding detection method[J]. Advanced Thecnology of Electric Engineering and Energy, 2008, 27(3): 22-25.
- [7] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 95-99.
LIU Fu-rong, KANG Yong, DUAN Shan-xu. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 95-99.
- [8] JOES C M, XU W. Efficient coordination of ROCOF and frequency relays for distributed generation protection by using the application region[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(4): 1878-1884.
- [9] 韩忠旭, 吕秀红. 模糊控制与状态反馈控制的内在联系[J]. 控制工程, 2007, 14(4): 383-386.
HAN Zhong-xu, LÜ Xiu-hong. Essential relation between fuzzy controller and state feedback control[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(4): 383-386.
- [10] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
SUN Zeng-qi. Theory and technology of intelligent control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [11] 吴芳德, 张奔奔, 胥芳. 基于正反馈主动移频式孤岛检测算法的模糊优化[J]. 机电工程, 2013, 30(2): 223-227.
WU Fang-de, ZHANG Ben-ben, XU Fang. Fuzzy optimization of islanding detection algorithm based on active frequency drift with positive feedback[J]. Journal of Mechanical and Electric Engineering, 2013, 30(2): 223-227.
- [12] 张坤, 吴建东, 毛承雄, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 235-241.
ZHANG Kun, WU Jian-dong, MAO Cheng-xiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 235-241.

收稿日期: 2014-03-02; 修回日期: 2014-08-25

作者简介:

郑涛(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制;

袁飞(1989-), 男, 硕士, 研究方向为新能源电力系统的保护与控制。E-mail: 656247681@qq.com