

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190240

微网混合式孤岛检测及运行模式切换研究

张明锐, 王俊凯, 王佳莹, 韦莉

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 孤岛运行是微网稳定控制的核心内容, 而非计划孤岛检测是微网在故障解列时转入稳定孤岛运行的前提条件。提出一种基于电压-相角下垂控制的混合式孤岛检测方法。结合被动式的过/欠频、过/欠压检测法和基于正反馈的主动式孤岛检测法, 实时感知非计划孤岛。通过负荷调度, 快速实现网内功率平衡, 保证网内负荷的供电连续性。在 Matlab/Simulink 中搭建微网系统模型, 通过多复杂工况对所提方法进行仿真验证。

关键词: 微网; 下垂控制; 混合式孤岛检测; 功率调节; 模式切换

Study on hybrid islanding detection and operation mode transition of microgrid

ZHANG Mingrui, WANG Junkai, WANG Jiaying, WEI Li

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In microgrid stability control, islanding operation is the core content, and unplanned islanding detection is a precondition for stable islanding operation of the microgrid during fault disassembly. A hybrid islanding detection method based on voltage-phase droop control is proposed in this paper. It combines passive over/under frequency, over/under voltage detection method and active islanding detection method which is based on positive feedback together. The unplanned islanding is perceived in real time. Through load scheduling, the power balance in the microgrid can be realized quickly. In addition, the power supply continuity of the load in the microgrid can be guaranteed. The model of microgrid system is built in Matlab/Simulink, and the proposed method is simulated and verified under multiple complex working conditions.

This work is supported by National Science and Technology Support Project of China (No. 2015BAG19B02) and Shanghai Committee of Science and Technology (No. 13DZ1200403).

Key words: microgrid; droop control; hybrid islanding detection; power regulation; mode transition

0 引言

微网为分布式电源提供了一种理想的应用模式^[1]。微网可运行于并网或孤岛, 应具备在两种模式间平滑切换的能力^[2-3]。在主网检修或发生故障时, 微网由并网切换到孤岛模式, 可增强供电可靠性; 在主网正常运行后, 微网与主网进行同步, 恢复并网运行。微网的并网过渡一般在预先设定时刻进行, 而其解列可分为计划与非计划孤岛^[4], 后者一般发生在故障情况下, 难以预测, 因此非计划孤岛的快速检测是微网模式切换的研究热点与难点。

通过孤岛检测可及早发现非计划孤岛的产生,

进而协调网内功率, 实现微网的稳定运行。孤岛检测方法主要分为两类, 一类是远程检测, 一类是本地检测^[5]。远程检测依赖开关状态检测, 需要系统具备通信条件^[6], 由于增加额外检测设备带来的成本和可靠性问题, 实际应用较少。本地检测则分为被动式检测和主动式检测两类^[7]。被动式检测根据孤岛前后物理量的变化来判定孤岛效应的产生^[8]。这种方式不会对电能质量造成影响, 但检测盲区大, 阈值选择相对困难。主动式检测通过注入小扰动信号, 检测电网电气量的变化, 来判断孤岛是否产生^[9]。该方法的检测盲区较被动式方法缩小许多, 然而会在一定程度上影响电能质量。

针对主动法和被动法的不足, 文献[10]提出一种基于无功电流控制的孤岛检测方法, 通过控制无功电流的频率偏移方向与有功电流的频率偏移方向

保持一致,有效检测孤岛效应,避免了扰动的注入对电能质量的影响。文献[11]利用输出的无功功率进行功率扰动,可在实现孤岛快速检测的同时完成低电压穿越运行。文献[12]采用过/欠频被动法和滑膜频率偏移法结合的混合孤岛检测法,改善了孤岛检测的检测盲区与电能质量问题。文献[13]通过锁相环的输出跟随本地负载谐振频率变化的特性进行孤岛检测,消除了传统主动式孤岛检测方法对电能质量的影响。然而上述孤岛检测方法均不适用于基于下垂控制的对等结构微网。

下垂控制在孤岛产生时,对微网的电压和频率有着良好的控制效果^[14-15],使其稳定于额定值附近,因而孤岛检测难度更大。只有当有功功率或无功功率出现严重失衡时,才会使频率、幅值超出允许范围,从而能够检测到孤岛情况的产生。此时仅仅采用被动式的过/欠频、过/欠压检测,已无法满足孤岛检测的需要,故应采用主动孤岛检测加以辅助。

本文结合下垂控制自身的特点,设计了一种适用于电压-相角下垂控制的孤岛主动检测算法。将其与被动式的过/欠频、过/欠压检测相结合,形成了混合式的孤岛检测方案,在缩小检测盲区和电能质量干扰方面,优势互补。在检测到孤岛之后,将非计划孤岛转化为主动孤岛,使微网顺利转入孤岛稳定运行。最后,采用 FREEDM 微网模型,对照国标中微网故障解列与孤岛检测的技术指标,验证所提微网混合式孤岛检测及模式切换策略的有效性。

1 微网模型

1.1 FREEDM 介绍

微网的种类和形式多样。目前典型的交流微网架构有两类:低压 380 V 母线型和高压 10 kV 环网型,后者起源于美国的 FREEDM(Future Renewable Electric Energy Delivery and Management)微网^[16],其结构如图 1。

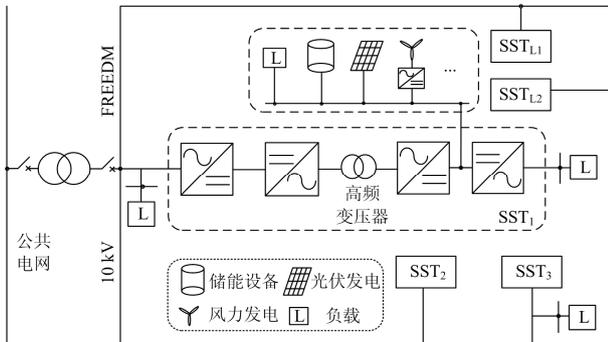


图 1 FREEDM 微网结构图

Fig. 1 Structure of FREEDM microgrid

各分布式电源(Distributed Generator, DG)、分布式储能设备(Distributed Energy Storage Device, DESD)和负载通过固态变压器(Solid State Transformer, SST)接入 FREEDM 环网,实现即插即用^[17-18]。

1.2 并网逆变器控制

SST 作为分布式电源与微网的接口设备,在微网控制策略的研究中,可等效为一个电压源型逆变器,承担着系统稳定运行与高质量供电的重要使命^[19]。

本文采用的三相电压源型逆变器多环控制策略如图 2 所示^[20]。图中, u_o 为逆变器的输出电压, i_L 和 i_o 分别为电感电流和逆变器的输出电流, L_G 为外接电感, Z_L 为线路阻抗, R_f 、 L_f 和 C_f 分别为三相滤波器的等效电阻、等效电感和等效电容。逆变器的多环控制主要由功率计算、电压-相角下垂控制、虚拟阻抗控制以及电压电流双环控制等几个部分组成, i_{Ldq}^* 、 u_{dq}^* 和 u_{dqm}^* 分别为各控制环参考信号。

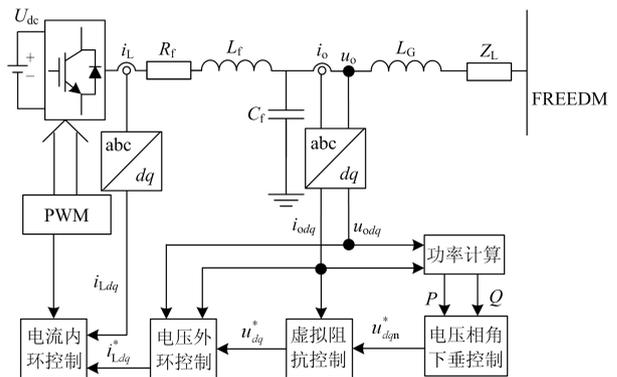


图 2 多环控制策略框图

Fig. 2 Block diagram of multi-loop control strategy

2 运行模式切换

2.1 计划孤岛解列

解列过程中,要使系统平滑过渡到计划孤岛模式,需要满足以下条件:

1) 微网需要具有一定的调压调频能力,使系统在失去主网的支撑之后,能够维持稳定运行。

2) 微网内部的输出功率与负载功率平衡,减小微网脱离主网时的功率冲击,降低主开关的分断负担。

条件 1),可通过基于下垂控制的对等策略实现,该控制方法可同时应用于并网与孤岛,模式切换时无需切换控制方法,对孤岛下的电压频率与幅值有良好的稳定效果。

对于条件 2),可通过功率同步模块实现。由于解列过程中,冲击的根源是分布式电源出力与负荷的不平衡。为避免进入孤岛瞬间,微网遭受过大的

功率冲击, 设计功率同步模块, 降低并网点处交互功率, 使微网内部能量供需平衡。

本文以 10 kV 微网系统为对象, 设计其容量为 1 MW, 备用容量为 20%, 与主网的交互功率上限为 20%。

功率同步模块如图 3 所示。

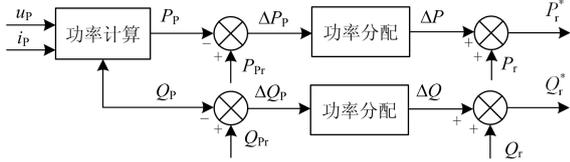


图 3 功率同步模块

Fig. 3 Power synchronization module

图 3 中, u_p 、 i_p 为 PCC 处主网的电压、电流值, 经坐标变换后进行功率计算, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_p = 1.5(u_{pq}i_{pq} + u_{pd}i_{pd}) \\ Q_p = 1.5(u_{pq}i_{pd} - u_{pd}i_{pq}) \end{cases} \quad (1)$$

得到 PCC 处的交互功率 P_p 、 Q_p , 与理想的解列过渡模式 PCC 处功率参考值 P_{pr} 、 Q_{pr} 作差。 P_{pr} 、 Q_{pr} 一般取零, 从而在最大程度上减小解列时的功率冲击。再将总的功率差分配到每个逆变器:

$$\begin{cases} \Delta P = \Delta P_p \cdot (P_{ei} / \sum_{i=1}^N P_{ei}) \\ \Delta Q = \Delta Q_p \cdot (Q_{ei} / \sum_{i=1}^N Q_{ei}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_{ei} 、 Q_{ei} 分别表示第 i 台逆变器的额定有功、无功功率, 共有 N 台逆变器。

所得的功率差值 ΔP 、 ΔQ 用来修正 P_r 、 Q_r , 得到下垂控制的参考值 P_r^* 、 Q_r^* 。

2.2 非计划孤岛解列

非计划孤岛随机性大, 难以预测, 故提升孤岛检测的有效性和快速性, 成为非计划孤岛解列后顺利进入稳定孤岛运行的研究关键。

本文在微网逆变器中加入孤岛检测功能, 及时感知孤岛效应, 随即启动功率调节模块, 使微网进入主动孤岛运行, 其控制流程见图 4。

非计划孤岛运行与非计划孤岛效应是两个概念, 前者指在孤岛效应发生的情况下持续向负荷提供高质量的电力供应, 维持稳定的运行状态。

图 4 中涉及到对孤岛效应的判断, 在具体判别标准的设定上, 参考了相关国标。

根据国标《微电网接入电力系统技术规定》(GB/T 33589-2017)^[21], 当微网并网点处电压超过表

1 中规定的电压范围时, 应在相应的时间内由并网模式切换到孤岛模式, 完成解列过渡运行。

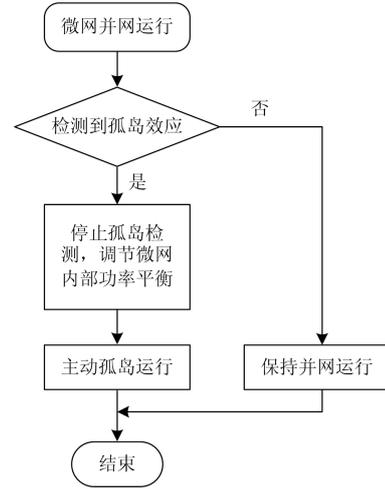


图 4 控制流程图

Fig. 4 Control flow chart

表 1 故障解列标准-电压

Table 1 Criteria of grid disconnecting for fault-voltage

并网点电压	要求
$U < 50\%U_N$	不超过 0.2 s
$50\%U_N \leq U < 90\%U_N$	不超过 2.0 s
$90\%U_N \leq U < 110\%U_N$	连续运行
$110\%U_N \leq U < 135\%U_N$	不超过 2.0 s
$U \geq 135\%U_N$	不超过 0.2 s

注: U_N 为微电网并网点的电网额定电压。

同时, 国标 GB/T 33589-2017 规定, 微电网的正常并网运行频率区间为 49.5~50.2 Hz。

以上是相关国标对于微网并网电压的标准规定, 此外需考虑国标对大电网的供电要求。

《电能质量-供电电压允许偏差》(GB/12325-90) 中规定, 10 kV 及以下的三相供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ 。对于频率, 《全国供用电规则》中提到, 3 000 MW 以上的电网允许频率偏差为 ± 0.2 Hz。

可见, 主网对电能质量的要求要高于微网, 考虑到主网对微网的钳位作用, 不存在微网电能质量下降至允许运行范围之外, 而微网仍旧保持并网状态的情况。

本文设定:

- 1) 电压幅值允许范围: $90\%U_N < U < 110\%U_N$;
- 2) 电压频率允许范围: $49.5 \text{ Hz} < U < 50.2 \text{ Hz}$ 。

对于孤岛检测的允许最大检测时长, 《光伏系统并网技术要求》(GB/T19939-2005)给出了规定, 具体标准如表 2 所示。

表2 孤岛检测时间标准

Table 2 Criteria of islanding detection time

电压波动范围	频率波动范围	允许最大检测时间
$U < 50\%U_N$	f_{norm}	0.1 s
$50\%U_N \leq U < 88\%U_N$	f_{norm}	2.0 s
$88\%U_N \leq U < 110\%U_N$	f_{norm}	2.0 s
$110\%U_N \leq U < 137\%U_N$	f_{norm}	2.0 s
$U \geq 137\%U_N$	f_{norm}	0.05 s
U_{norm}	$f < f_{\text{norm}} - 0.5 \text{ Hz}$	0.2 s
U_{norm}	$f > f_{\text{norm}} + 0.5 \text{ Hz}$	0.2 s

3 孤岛检测

3.1 基于 P/f 下垂控制的主动式孤岛检测

本节结合下垂控制自身的特点,设计了一种适用于 P/f 下垂控制的孤岛主动检测算法。通过在下垂控制中加入扰动量,放大孤岛效应产生时,微网电压频率、幅值的偏差,使得系统能够有效检测到孤岛效应。微网运行于并网状态时,由于主网的钳位作用,扰动量对微网电压影响非常小。

引入正反馈的孤岛检测算法为

$$\omega(k) = \omega_r - k_m(P(k-1) - P_r) + \Delta\omega \quad (3)$$

$$U(k) = U_r - k_n(Q(k-1) - Q_r) + \Delta U \quad (4)$$

其中:

$$\Delta\omega = \omega(k-1) - \omega_r \quad (5)$$

$$\Delta U = U(k-1) - U_r \quad (6)$$

在引入正反馈环节后,若非计划孤岛产生,逆变器的输出电压频率和幅值会在下垂特性和正反馈的影响下向某一方向持续偏移,即认定孤岛现象发生。为避免误判,在算法中加入延时环节,当这种偏移持续一段时间时,判定孤岛发生。

为了加强正反馈作用,缩短孤岛产生后系统的检测时间,改进孤岛检测算法如下:

$$\omega(k) = \omega_r - k_m(P(k-1) - P_r) + k_x \Delta\omega \quad (7)$$

$$U(k) = U_r - k_n(Q(k-1) - Q_r) + k_w \Delta U \quad (8)$$

分析式(5)~式(8),可知系数 $k_i(i=x, w)$ 的选取,决定了孤岛检测的效果,讨论如下:

若 $k_i < 0$, 算法为负反馈,无孤岛检测功能;

若 $k_i = 0$, 算法转变为传统下垂控制;

若 $0 < k_i < 1$, 算法正反馈减弱,检测时间延长;

若 $k_i = 1$, 算法转为普通正反馈孤岛检测算法;

若 $k_i > 1$, 算法正反馈加强,检测时间缩短。

又,根据式(7)得传递函数:

$$\omega(z) = \frac{-k_m(P(z)z^{-1} - P_r) + (1 - k_x)\omega_r}{1 - k_x z^{-1}} \quad (9)$$

当 $k_x = 1$ 时,算法为普通正反馈孤岛检测算法,

可知系统特征方程: $z = k_x$ 。得不稳定条件: $k_x > 1$ 。

类似地,根据式(8)得传递函数:

$$U(z) = \frac{-k_n(Q(z)z^{-1} - Q_r) + (1 - k_w)U_r}{1 - k_w z^{-1}} \quad (10)$$

得到不稳定条件: $k_w > 1$ 。

综上所述,只有当 k_x, k_w 的值满足 $k_i > 1$ 时,才能使系统电压的频率、幅值不稳定,实现孤岛检测的功能。且 k_i 取值越大,孤岛检测时间越短,但 k_i 取值过大,会给正常系统引入较大的电压频率和幅值误差,不利于电网的电能质量和稳定运行。因此需根据具体情况选定 k_i 的数值。

3.2 基于 P/δ 下垂控制的主动式孤岛检测

本文采用 P/δ 下垂控制作为基础控制策略,然而式(7)仅适用于 P/f 下垂控制,为解决这一问题,在 P/δ 下垂控制中引入主动移相环节。

滑膜频率偏移法(Slip-Mode Frequency Shift Method, SMS)是主动移相孤岛检测算法之一^[22]。通过向逆变器输出电流相位中添加扰动,致使电网进入孤岛后的电压频率会产生大幅偏移,使得系统快速检测出孤岛效应^[23]。对于采用下垂控制的逆变器,一般将其等效为电压源,对其进行孤岛检测之时,将在输出电压相位中添加扰动,以代替原本对电流相位的扰动。

SMS 法可表示为

$$\begin{cases} \theta_{\text{SMS}} = k_{\text{SMS}}(f - f_g) \\ \theta = \omega t + \theta_{\text{SMS}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: θ_{SMS} 为所添加的相位扰动; k_{SMS} 为反馈系数; f_g 为额定频率; f 为测量得到的输出电压频率; θ 与 ω 分别为逆变器输出值的相位与角频率。

考虑到频率与相位间存在如下关系:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{dt} \quad (12)$$

将传统 SMS 法与下垂控制相结合,得到适用于 P/δ 下垂控制的主动孤岛检测算法:

$$\begin{aligned} \delta(k) &= \delta_r - k_m(P(k-1) - P_r) + \Delta\delta = \\ &\delta_r - k_m(P(k-1) - P_r) + \\ &k_y(\delta(k) - \delta(k-1) - 2\pi f_g) \end{aligned} \quad (13)$$

对于其中反馈系数 k_y 的取值,分析如下:

若 $k_y < 0$, 算法为负反馈,无孤岛检测功能;

若 $k_y = 0$, 算法转变为传统下垂控制;

若 $k_y > 0$, 算法为正反馈,可检测到孤岛。

类似地,分析式(13)的传递函数,同样得到不稳定条件为 $k_y > 0.5$ 。

根据式(8)与式(13),可得到加入正反馈扰动后

的下垂控制框图如图 5。

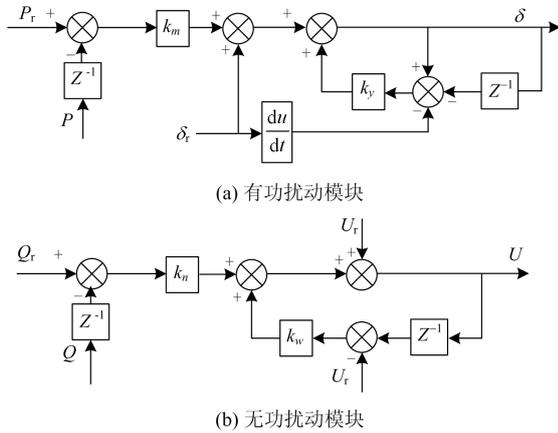


图 5 适用于 P/δ 下垂控制的主动式孤岛检测算法

Fig. 5 Active islanding detection algorithm for P/δ droop control

3.3 混合式孤岛检测

微网中的负载总功率与分布式电源出力匹配程度较高时, 被动式孤岛检测盲区较大, 主动式方法在这一问题上进行了改善, 却对电能质量有一定影响。考虑到两者的互补性, 本节提出了一种混合式孤岛检测策略, 其运行流程图见图 5。

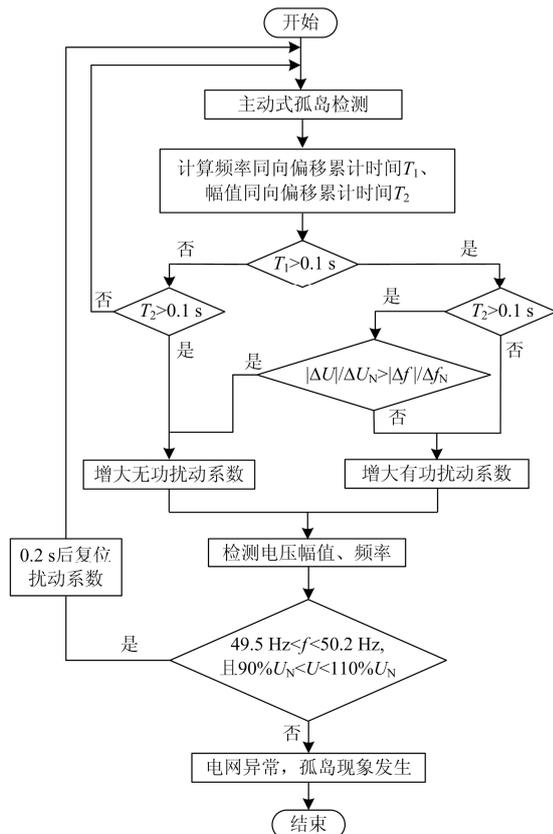


图 6 混合式孤岛检测流程图

Fig. 6 Flow chart of hybrid islanding detection

在微网并网运行时, 加入主动式孤岛检测, 在电压-相角下垂控制中增加扰动, 并检测此时的频率同向偏移时间 T_1 , 幅值同向偏移时间 T_2 。定义同向偏移时间为物理量持续递增或递减的时间, 举例来说, 若频率在前 n 个周期保持递增, 在第 $n+1$ 个周期下降, 即发生了反向偏移, 则将 T_1 清零, 重新开始计数。

若 T_1 、 T_2 均小于 0.1 s, 判定未产生孤岛效应, 程序返回, 继续保持对网络的孤岛检测。

若仅 T_1 大于等于 0.1 s, 则增大扰动系数 k_p , 若仅 T_2 大于等于 0.1 s, 则增大扰动系数 k_w , 若 T_1 与 T_2 同时大于等于 0.1 s, 则对其变化率 $S_i (i=1, 2)$ 进行比较, 当 $S_1 > S_2$, 增大有功扰动系数, 反之, 则增大无功扰动系数。此举能够有针对性地加快孤岛检测速度, 又能一定程度上减小电网正常运行时主动式孤岛检测对电能质量的影响。

其中, 定义变化率 S_i 如下:

$$S_1 = \frac{|\Delta f|}{\Delta f_N} = \frac{|f - f_r|}{f_H - f_L} \quad (14)$$

$$S_2 = \frac{|\Delta U|}{\Delta U_N} = \frac{|U - U_r|}{U_H - U_L} \quad (15)$$

上述两式中, 分子为物理量当前测量值与额定值之差的绝对值, 分母为允许变化区间。

在加强主动扰动后, 检测电压的频率、幅值, 与标准范围进行比较, 若此时不满足条件: $90\%U_N < U < 110\%U_N$, 且 $49.5 \text{ Hz} < f < 50.2 \text{ Hz}$, 则判定孤岛现象发生。反之, 若在之后的 0.2 s 内, 电压的频率、幅值均在允许范围区间内, 则复位扰动系数, 继续保持对网络的主动检测。

4 仿真实验

4.1 仿真模型及参数

在 Matlab/Simulink 平台下搭建如图 1 所示 FREEDM 环网结构。微网的额定电压为 10 kV, 额定频率为 50 Hz。微网整体容量为 1 MVA, 各分布式电源备用容量为 20%, 负荷为阻感性。以 SST₁ 为参考, 各 V-S 模式下的 SST 额定功率之比为 $e_1:e_2:e_3=1:1.5:2.5$ 。

仿真验证孤岛检测算法与微网非计划孤岛下的模式平滑切换的效果。微网系统参数的取值参考文献[20], 孤岛检测模块的系统参数见表 3。

4.2 有功功率差额

工况一: 初始工况, 微网在额定工况下运行于并网模式, 系统所带负荷为 $P=960 \text{ kW}$, $Q=600 \text{ kvar}$ 。

工况二: $t=1.0 \text{ s}$ 时, 微网进入非计划孤岛。

表 3 仿真参数
Table 3 Simulation parameter

参数类别	参数	参数值
孤岛检测参数	k_y	2
	k_w	2
	k'_y	5
	k'_w	5

由图 7(a)、图 7(b)可知，微网并网运行期间，其电压频率和幅值受主网的钳位，稳定于额定值。 $t=1.0$ s 时，微网突然进入孤岛，由于有功功率存在缺额，微网频率在下垂特性与正反馈的作用下，逐渐偏离额定值，频率同向偏移时间大于 0.1 s 后，系统加大有功扰动系数，使频率快速超过允许的范围，系统检测到孤岛现象的产生，随后功率调节模块启动，帮助微网转入主动孤岛运行。由图 7(c)得，孤岛检测用时 0.15 s，小于国标规定的孤岛检测时间 0.2 s。

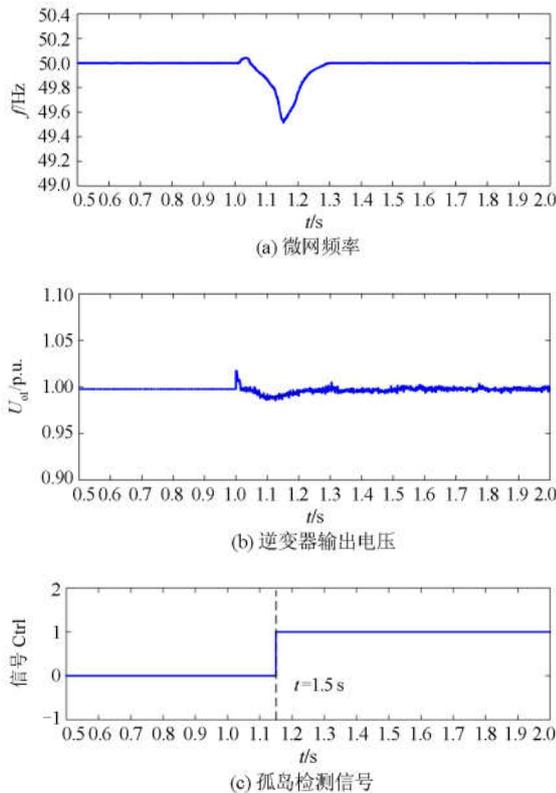


图 7 有功功率存在差额时的非计划孤岛解列

Fig. 7 Microgrid disconnecting of unplanned islanding in case of difference of active power

4.3 无功功率差额

工况一：初始工况，微网在额定工况下运行于并网模式，系统所带负荷为 $P=800$ kW， $Q=720$ kvar；
工况二： $t=1.0$ s 时，微网进入非计划孤岛。

由图 8(a)、图 8(b)可知， $t=1.0$ s 时微网突然进入孤岛，会引起电压频率和幅值的波动，由于工况设定微网非计划解列前后存在无功功率缺额，所以逆变器输出电压幅值在 Q/U 下垂特性与正反馈的作用下逐渐偏离额定值，当幅值同向偏移时间大于 0.1 s 后，增大无功扰动系数，放大偏移量，使系统快速检测到孤岛现象。随即启动功率调节模块，将非计划孤岛转为主动孤岛，帮助系统顺利过渡到孤岛稳定运行状态。由图 8(c)可知，孤岛检测用时 0.16 s，满足孤岛检测时间要求。

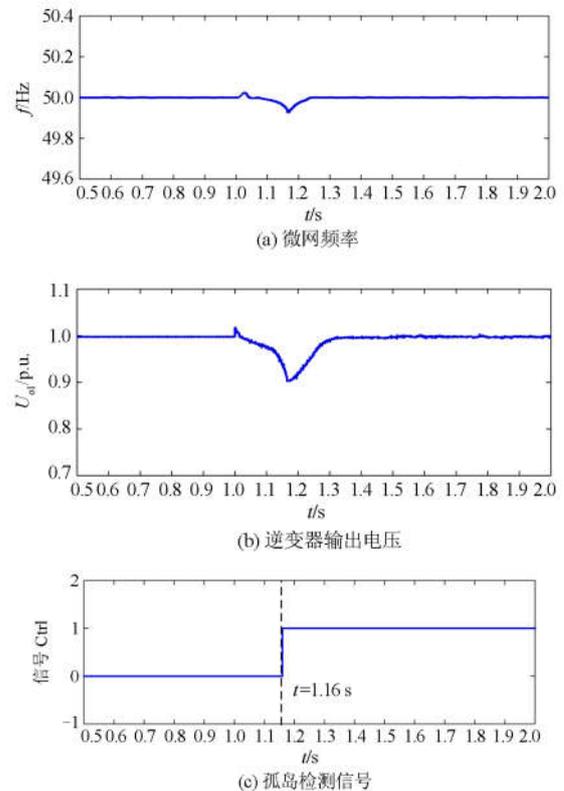


图 8 无功功率存在差额时的非计划孤岛解列

Fig. 8 Microgrid disconnecting of unplanned islanding in case of difference of reactive power

4.4 有功、无功均存在差额

工况一：初始工况，微网在额定工况下运行于并网模式，系统所带负荷为 $P=960$ kW， $Q=720$ kvar；
工况二： $t=1.0$ s 时，微网进入非计划孤岛。
由图 9(a)、图 9(b)可知， $t=1.0$ s 时，微网系统进入非计划孤岛，由于存在有功功率与无功功率缺额，系统电压的频率与幅值两者在下垂特性与正反馈的影响下逐渐偏离额定值。在比较两者的变化率后，频率的变化率更大，故增大有功扰动系数，使频率快速超出允许范围，检测到孤岛现象。随即启动主动孤岛功率调节模块，最终微网稳定运行于孤

岛状态。由图 9(c)可知, 孤岛检测用时 0.19 s, 满足国标规定的孤岛检测标准。

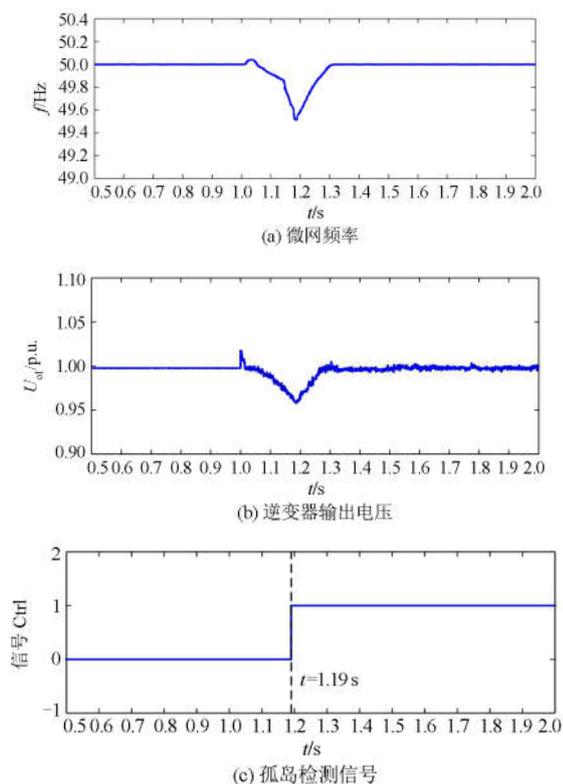


图 9 有功、无功功率存在差额时的非计划孤岛解列

Fig. 9 Microgrid disconnecting of unplanned islanding in case of difference of both active and reactive power

5 结论

本文提出了基于电压-相角下垂控制的混合式孤岛检测方法, 结合了被动式检测与基于正反馈的主动式检测, 具有检测盲区小, 电能质量受影响小的优点。文章采用复杂的 FREEDM 环网工况进行仿真验证, 结果表明本方法与下垂控制具有很好的功率协调能力, 适合对等控制策略的微网应用。本方法通过主动感知微网信息, 在非计划孤岛的脱网过程中, 及时加入功率平衡控制, 为微网的非计划孤岛解列提供了新思路, 后续将对微网非计划孤岛解列的稳定边界进行研究。

参考文献

[1] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 121-127.
DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control,

2018, 46(18): 121-127.
[2] 屈克庆, 李文旗, 赵晋斌, 等. 孤岛微网不平衡负荷下控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 8-14.
QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinbin, et al. Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 8-14.
[3] TANG F, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Distributed active synchronization strategy for microgrid seamless reconnection to the grid under unbalance and harmonic distortion[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(6): 2757-2769.
[4] 钟诚, 魏来, 严干贵, 等. 考虑非计划孤岛的分布式电源无缝切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 129-139.
ZHONG Cheng, WEI Lai, YAN Gangui, et al. A seamless transfer control strategy of distributed generation with considering unintentional islands[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 129-139.
[5] 顾一丰, 邱稳斌, 李艳君, 等. 基于虚拟阻抗和锁相环的孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 78-85.
GU Yifeng, QIU Wenbin, LI Yanjun, et al. An islanding detection based on virtual impedance and phase-locked loop[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 78-85.
[6] KERMANY S D, JOORABIAN M, DEILAMI S, et al. Hybrid islanding detection in microgrid with multiple connection points to smart grids using fuzzy-neural network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2640-2651.
[7] DUTTA S, SADHU P K, REDDY M J B, et al. Shifting of research trends in islanding detection method—a comprehensive survey[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-017-0075-8.
[8] SERBAN E, PONDICHE C, ORDONEZ M. Islanding detection search sequence for distributed power generators under AC grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3106-3121.
[9] POURYEKTA A, RAMACHANDARAMURTHY V K, MITHULANANTHAN N, et al. Islanding detection and enhancement of microgrid performance[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(4): 3131-3141.
[10] 沈虹, 周文飞, 王怀宝, 等. 基于无功电流控制的并网逆变器孤岛检测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 296-300.
SHEN Hong, ZHOU Wenfei, WANG Huaibao, et al.

- Islanding detection for grid-connected inverter based on reactive current control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 296-300.
- [11] 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.
- [12] 余运俊, 袁国瑛, 范瑞祥, 等. 滑膜频率偏移法和过/欠频被动法结合的混合孤岛检测法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 224-229.
- YU Yunjun, ZHONG Guoying, FAN Ruixiang, et al. Mixed islanding detection method based on slide-mode frequency and OFP/UPF islanding detection method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2): 224-229.
- [13] 顾一丰, 邱稳斌, 李艳君, 等. 基于虚拟阻抗和锁相环的孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 84-91.
- GU Yifeng, QIU Wenbin, LI Yanjun, et al. An islanding detection based on virtual impedance and phase-locked loop[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 84-91.
- [14] DENG Yan, TAO Yong, CHEN Guipeng, et al. Enhanced power flow control for grid-connected droop-controlled inverters with improved stability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5919-5929.
- [15] 梁海峰, 郑灿, 高亚静, 等. 微网改进下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4901-4910, 5209.
- LIANG Haifeng, ZHENG Can, GAO Yajing, et al. Research on improved droop control strategy for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4901-4910, 5209.
- [16] HUANG A Q, MARIESA L C, GERALD T H, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [17] SHE Xu, YU Xunwei, WANG Fei, et al. Design and demonstration of a 3.6 kV-120 V-10 kVA solid state transformer for smart grid application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 3982-3996.
- [18] SHAH D, CROW M L. Online Volt-Var control for distribution systems with solid state transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 343-350.
- [19] 张明锐, 杜志超, 黎娜, 等. 高压微网孤岛运行时频率稳定控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 20-26.
- ZHANG Mingrui, DU Zhichao, LI Na, et al. Control strategies of frequency stability for islanding high-voltage microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 20-26.
- [20] 张明锐, 林显琦, 孙华. 孤岛微网中固态变压器间环流抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5563-5570.
- ZHANG Mingrui, LIN Xianqi, SUN Hua. Researches on restraining circulating currents of solid state transformers in islanding mode microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5563-5570.
- [21] 何国庆, 刘纯, 孙文文, 等. GB/T 33589—2017《微电网接入电力系统技术规定》解读[J]. 中国标准化, 2018(1): 103-106, 112.
- HE Guoqing, LIU Chun, SUN Wenwen, et al. An interpretation of GB/T33589—2017 technical requirements for connecting microgrid to power system[J]. China Standardization, 2018(1): 103-106, 112.
- [22] MOHAMMADPOUR B, PAHLEVANINEZHAD M, KAVIRI S M, et al. A new slip mode frequency shift islanding detection method for single phase grid connected inverters[C] // IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2016, Vancouver, Canada.
- [23] BIFARETTI S, LIDOZZI A, SOLERO L, et al. Anti-islanding detector based on a robust PLL[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 398-405.

收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-04-22

作者简介:

张明锐(1971—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电与微网技术、电力系统能量管理与优化运行、轨道交通牵引供电系统; E-mail: zmr@tongji.edu.cn

王俊凯(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与微网技术; E-mail: 1830713@tongji.edu.cn

王佳莹(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与微网技术。E-mail: jennica@tongji.edu.cn

(编辑 周金梅)