

分散式风电孤岛运行特性与孤岛检测试验研究

李少林, 王瑞明, 孙勇, 陈晨

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 分散式风电靠近电网负荷端, 风电机组必须自主实现孤岛状态的辨识。基于风电机组孤岛运行特性及功率扰动对并网点电压、频率影响的灵敏度分析, 提出基于无功功率-频率正反馈与传统过欠压、过欠频相结合的风电机组孤岛检测方法, 并进行了风机变流器无功功率扰动控制环设计。在 Matlab/Simulink 中建立了 2.0 MW 永磁同步风电机组仿真模型, 实现了风电机组孤岛运行与孤岛状态辨识的全过程仿真。利用 RLC 负荷模拟装置, 在 2.0 MW 永磁同步风电机组上进行了孤岛检测现场试验。仿真与现场试验证明了理论分析的正确性与孤岛检测策略的有效性。

关键词: 分散式风电; 风电机组; 灵敏度分析; 正反馈; 孤岛检测

Analysis and experiment research on islanding behaviors and detection strategy for dispersed wind power

LI Shaolin, WANG Ruiming, SUN Yong, CHEN Chen

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: As dispersed wind power is close to the load side of the power system, the wind turbines must be able to distinguish the islanding state by themselves. Based on the investigation of the islanding operating characteristics and the sensitivity analysis of the voltage amplitude and frequency change of the point of common coupling (PCC) to the power disturbances of the dispersed wind turbines. A new composite islanding detection method combining positive feedback of reactive power-frequency and passive islanding detection is proposed. A 2.0 MW permanent magnet synchronous generator (PMSG) wind turbine is modeled in MATLAB/Simulink, and the islanding operation and detecting the state of the islanding of PMSG is emulated by simulation. The islanding detection field test is carried out on the 2.0 MW PMSG wind turbine based a controlled RLC load emulator. The simulation and experimental results supported the theoretical analysis and verified the proposed islanding detection strategy.

Key words: dispersed wind power; wind turbine; sensitivity analysis; positive feedback; islanding detection

中图分类号: TM315; TM614

文章编号: 1674-3415(2015)21-0013-07

0 引言

孤岛效应是指包含负荷和电源的部分电网, 从主网脱离后继续孤立运行的状态。孤岛可分为非计划性孤岛和计划性孤岛。非计划孤岛的供电状态是未知的, 可能将造成一系列的不利影响, 传统的发电系统中的过/欠压、过/欠频保护已经不再满足安全供电的要求, 非计划孤岛运行可能危害系统设备和相关人员, 因此需要发电系统具有防孤岛保护功

能。光伏与分布式发电的防孤岛保护问题一直是学术界研究的热点, 大量光伏发电防孤岛检测方法的文献得以发表^[1-8]。风电也同样存在孤岛问题, 例如我国西北地区某风电场, 当电网发生短路故障断开后, 部分线路的风电机组在大电网断电后孤岛运行数十秒之久。与集中式、大规模风电相比, 分散式风电分散安装于配电网负载端, 通过小规模分布式开发, 就地分布接入低压配电网, 在风电机组满发或限功率运行时, 发生孤岛的概率大, 且分散式风电更加靠近用户, 发生孤岛所造成的危害更大。国家电网企业标准 Q/GDW 1866-2012《分散式风电接入电网技术规定》对分散式风电的防孤岛保护做出了

基金项目: 国家电网公司科技项目“大容量海上风电机组并网性能试验检测技术方案研究”

明确的要求^[9], 分散式风电的孤岛运行与防孤岛保护问题也受到了越来越广泛的关注^[10-11]。

概括起来, 孤岛检测方法主要可分为基于通讯的系统级孤岛检测和基于发电单元的局部孤岛检测。前者主要是利用无线电通讯来检测孤岛效应, 而后者主要是通过监控分布式发电装置的端电压及电流信号来检测孤岛效应。基于发电单元的局部孤岛检测可以进一步分为被动式孤岛检测与主动式孤岛检测, 与被动式孤岛检测相比, 主动式孤岛检测不可检测区域小, 在实际孤岛检测中得到了广泛的应用^[12-14]。文献[12]提出了一种基于电压谐波畸变率正反馈的孤岛检测方法, 但其受电网特征谐波影响大, 电压谐波畸变率阈值不易选取; 文献[13]提出了一种基于新型的扰动方式的改进型AFD孤岛检测方案, 在保证孤岛检测功能的情况下, 减少了主动移频孤岛检测法对系统的谐波污染; 文献[14]提出多分辨率奇异谱熵和支持向量机结合进行孤岛与扰动识别的方法, 通过对公共连接点处电压进行小波变换与分析, 将多分辨分析与熵融合表征电网与孤岛的不同特征, 但其计算复杂, 对具体电力系统参数依赖性高。显然, 基于通讯的系统级孤岛检测需通信支持, 保护算法与配电网拓扑强相关, 由于分散式风电开发的分散性及配电网的复杂性, 该方法不适合分散式风电的防孤岛保护。基于发电单元主动式孤岛检测方法更加适合于分散式风电, 而由于风资源的随机性与湍流特性, 风电机组输出电能质量特性复杂且易受破坏, 通过监测风电机组并网点电压、电流等电能质量信号来检测孤岛的方法容易失效, 风电机组孤岛检测需对并网电能质量影响小、可靠性高、简单易操作。

为此, 本文通过分析风电机组孤岛运行状态, 揭示了风电机组孤岛运行时输出功率变化对孤岛运行电压与频率的影响规律, 并进行了影响灵敏度对比分析; 提出基于无功功率-频率正反馈与传统过欠压、过欠频相结合的方法实现对孤岛运行状态判断的方法, 并进行了风电机组变流器无功功率扰动控制环设计, 最后, 通过仿真与现场试验证明了理论分析的正确性与孤岛检测方法的有效性。

1 风电机组孤岛运行特性分析

永磁同步风电机组因其在能量转换效率、可靠性和电网适应能力等方面的优势, 已成为分散式风电开发的主流机型之一, 分散式接入的永磁同步风电机组孤岛运行示意图如图 1 所示。当开关闭合时, 风电机组并网运行, 风电机组与负荷公共连接点的电压和频率由电网决定, 风电机组通过检测并网点

电压控制并网电流的幅值、相位与频率。而当开关断开时, 若风电机组提供的功率与负载需求匹配, 此时风电机组并网点电压、频率不会发生明显变化, 风电机组与负荷之间形成了一个独立的供电系统, 即风电机组处于孤岛运行状态, 孤岛系统形成后, 风电机组与负荷公共连接点的电压幅值和频率由负荷欧姆定律的负荷响应特性决定。

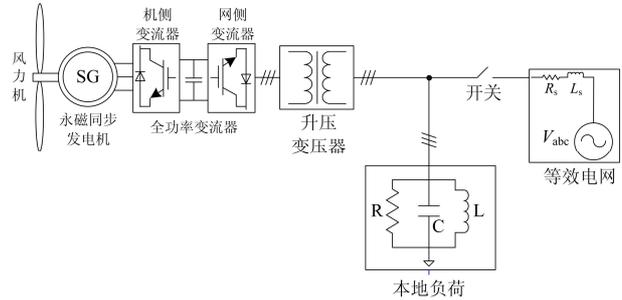


图 1 永磁同步风电机组孤岛运行示意图

Fig. 1 Structure chart of islanding operation for PMSG wind turbine

1.1 孤岛系统功率扰动的响应特性分析

简单起见, 将孤岛运行的风电机组等效为受控电流源, 负荷则用孤岛检测最为不利的 RLC 并联负载代替^[4], 此时风电机组孤岛运行等效电路如图 2 所示。

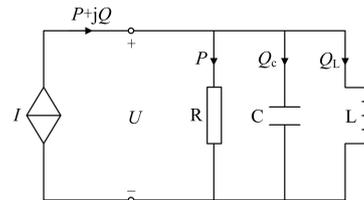


图 2 风电机组孤岛运行等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of islanding operation for wind turbine

图中: U 、 I 分别为风电机组并网点电压与输出电流有效值; P 、 Q 分别为风电机组输出的有功、无功功率; P 、 Q_L 、 Q_C 分别为 RLC 并联负载所消耗的有功功率、感性无功功率与容性无功功率。

系统发生孤岛时, 风电机组输出的有功、无功功率与 RLC 并联负载消耗的有功、无功功率基本匹配, 可得系统孤岛运行时的系统频率解析表达式^[6]:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(\frac{Q}{2Q_f P} + 1 \right) \quad (1)$$

式中, $Q_f = R\sqrt{\frac{C}{L}}$, Q_f 为 RLC 并联负载的品质因素。

系统孤岛运行时的电压幅值解析表达式为

$$U = \sqrt{PR} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知: 风电机组孤岛运行时其系统电压幅值由负荷消耗的有功功率决定; 系统频率则由负荷消耗的有功功率、无功功率、负荷品质因素共同决定。即风电机组孤岛运行时并网点电压幅值与频率和孤岛系统的有功、无功功率匹配度密切相关。

1.2 功率扰动对电压幅值、频率灵敏度分析

为进一步研究功率扰动对并网点电压幅值与频率影响程度, 针对式(1)、式(2)分别对功率求偏导数和倒数可得:

$$\frac{\partial \omega}{\partial Q} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{1}{2Q_f P} = k_1 \frac{1}{P} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial P} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{-Q}{2Q_f P^2} = -k_1 \frac{Q}{P^2} \quad (4)$$

$$\frac{dU}{dP} = \frac{R}{2\sqrt{PR}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R}{P}} \quad (5)$$

式中, $k_1 = \frac{1}{2Q_f \sqrt{LC}} = \frac{1}{2RC} > 0$, 由负荷阻抗特性的阻容部分决定。

考虑风电机组能量输出的单向性($P > 0$), 由式(3)可知, 并网点电压角频率与无功功率成正比例函数关系, 即无功功率变化越大对系统频率的影响越大; 而无功变化对频率影响的灵敏度与风电机组的有功功率成反比例函数关系, 即风电机组输出有功功率越小, 无功功率变化对系统频率的影响越大。由式(4)可知, 并网点电压角频率与有功功率的单调性与无功功率的正负有关。当无功功率为正, 频率与有功功率成反比例函数关系, 当无功功率为负, 频率与有功功率变化成正比例函数关系。另外, 负荷的品质因素越小, 功率扰动对频率影响的灵敏度越大。由式(5)可以看出, 并网点电压幅度与有功功率成正比例函数关系。

由式(3)~式(5)可得孤岛运行时系统有功、无功功率变化对其输出频率变化灵敏度的比值和有功变化对系统频率及电压幅度灵敏度的比值:

$$\frac{\partial \omega}{\partial Q} / \frac{\partial \omega}{\partial P} = \frac{P}{Q} \quad (6)$$

$$\frac{dU}{dP} / \frac{\partial \omega}{\partial P} = \frac{\sqrt{P^3}}{4\sqrt{RCQ}} = k_1 \frac{PU}{2Q} \quad (7)$$

风电机组通常运行在单位功率因素条件下, 考虑孤岛检测最不利的情况, 孤岛运行系统工作在负荷的谐振点, 而谐振频率附近的负荷无功功率近似等于零。因此, 孤岛运行时无功功率扰动对频率变

化的灵敏度远大于有功扰动对频率变化的灵敏度; 而有功扰动对逆变器输出电压变化的灵敏度远大于有功扰动对逆变器输出频率变化的灵敏度。当负荷品质因素一定时($Q_f = 1.5$), 孤岛运行状态下风电机组输出功率变化与系统频率的关系曲线如图 3 所示。

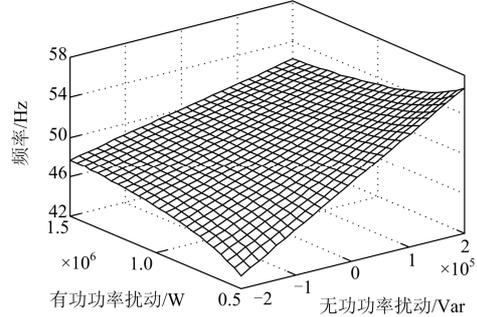


图 3 孤岛状态下功率变化与系统频率关系曲线

Fig. 3 Curve of relationship between system frequency change and the power disturbance under islanding condition

2 无功功率-频率正反馈的孤岛检测法

如前所述, 功率变化可使得孤岛运行电压幅值与频率偏离谐振平衡点, 功率扰动法是主动孤岛检测的有效方法之一, 即使在负荷完全匹配的情况下也不存在不可检测区, 功率扰动孤岛检测法包括有功功率扰动法与无功功率扰动法^[15]。鉴于风资源的波动性、随机性所带来的功率不确定性, 使得有功功率扰动法不适合风电机组孤岛检测; 而与有功功率扰动法相比, 无功功率扰动法不会造成风电机组发电量的降低, 且避免了风电机组变桨系统的频繁动作, 是风电机组孤岛检测切实有效的方法。

无功功率-频率正反馈的孤岛检测法的基本思想是: 在风电机组正常运行时, 风电机组间歇性的输出无功功率扰动, 扰动间隔周期为 1 个周波, 扰动输出周期为 1 个周波, 为尽可能避免对系统造成无功电压影响, 无功功率扰动量值通常选取为 $\Delta Q = 1.5\%P_n$, 同时监测风电机组机端的电压幅值和电压频率。如果风电机组并网运行, 无功功率扰动不会对并网点电压产生明显的影响; 而如果发生孤岛, 即使在负载完全匹配的情况下, 将有一个频率偏移被检测出来, 为了证实这一频率变化确实由孤岛运行造成, 在检测到频率偏移后, 会进一步加大无功功率扰动量, 同时监测系统频率是否进一步偏移, 从而形成一个无功扰动量不断加大, 系统频率不断单方向偏移的正反馈过程, 直到风电机组并网点频率达到过/欠频保护水平, 而风电机组是否孤岛保护则由风电机组的孤岛运行与保护策略决定, 无功功

率-频率正反馈的孤岛状态检测流程图如图 4 所示。

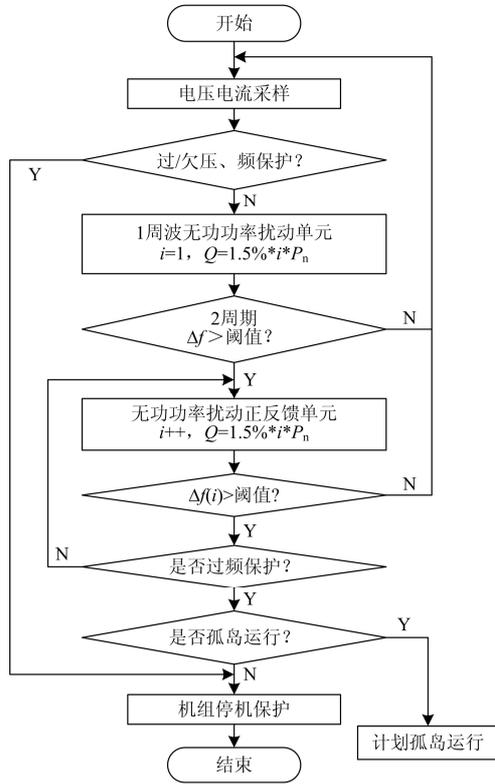


图 4 无功功率-频率正反馈孤岛检测流程图

Fig. 4 Flow chart of positive feedback of reactive power-frequency islanding detection method

根据无功功率-频率正反馈孤岛检测算法, 可得风电机组网侧变流器孤岛状态检测控制原理图, 如图 5 所示。通过检测风电机组并网点三相电压, 经过两相旋转坐标系锁相环(DQ-PLL)提取并网点电压的角频率送入无功功率扰动正反馈单元, 其依据

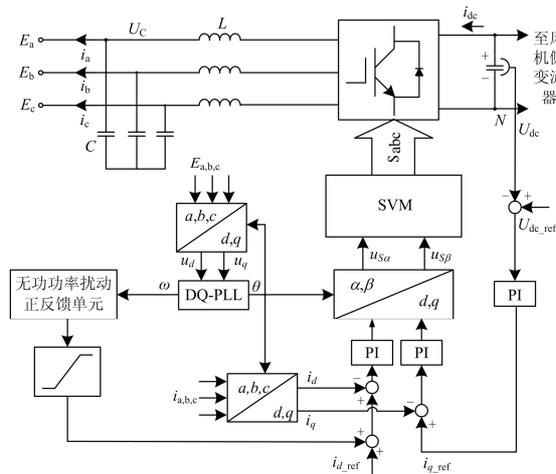


图 5 网侧变流器孤岛检测控制原理图

Fig. 5 Control principle of grid-side converter for islanding detection

系统频率变化控制无功扰动值, 再将输出结果叠加到无功电流控制内环给定指令上, 然后经过无功电流控制内环比例-积分(PI)调节器作用后驱动网侧变流器, 风电机组输出无功功率的计划扰动, 实现无功功率-频率正反馈孤岛状态判断, 准确辨识风电机组运行状态和电网系统状态。

3 系统仿真与分析

为验证理论分析及孤岛检测算法的正确性、有效性, 在 Matlab/Simulink 中建立了 2.0 MW 永磁同步风电机组孤岛电磁暂态仿真模型, 仿真研究风电机组孤岛运行状态及无功功率-频率正反馈孤岛检测的全过程。仿真模型主要由于风速模型、风力机模型、发电机模型、全功率变流器模型、主控系统模型、RLC 负荷和电网模型七大部分组成, 系统仿真结构图如图 6 所示, 仿真用风电机组参数如表 1 所示。为突出风电机组孤岛运行与孤岛辨识全过程, 仿真时暂时屏蔽风电机组过/欠频保护功能。

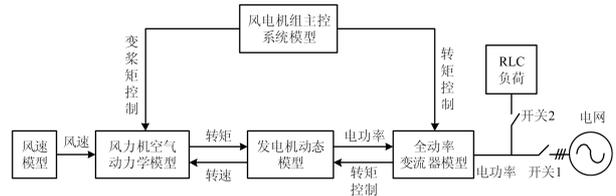


图 6 永磁同步风电机组孤岛仿真结构图

Fig. 6 Simulation diagram of island operation for PMSG wind turbine

表 1 仿真试验用永磁同步风电机组参数

Table 1 Simulation and experimentation parameters of PMSG wind turbine

参数名称	数值
风电机组	
额定功率/kW	2000
额定电压/kV	0.69
PWM 开关频率/kHz	2
直流侧额定电压/kV	1.1
变流器	
滤波器滤波型式	LC
桥臂侧等效滤波电感/H	0.230×10^{-3}
电网侧等效滤波电感/H	0.021
滤波电容/F	0.228×10^{-3}
额定频率/Hz	10.15
极对数	42
发电机	
定子电阻/ Ω	12.510×10^{-3}
d 轴等效电感/H	3.821×10^{-3}
q 轴等效电感/H	3.512×10^{-3}

图7为无功扰动前后风电机组并网点电压频谱分析图,可以看出,无功功率扰动开始前后电压总谐波畸变率均为0.07%,低次谐波电压含量略有变化,且不足以被检测到,高次谐波含量几乎无变化;并网点电压幅值有微小抬升。显然,风电机组并网运行时无功功率扰动不会对并网电能质量产生明显影响。

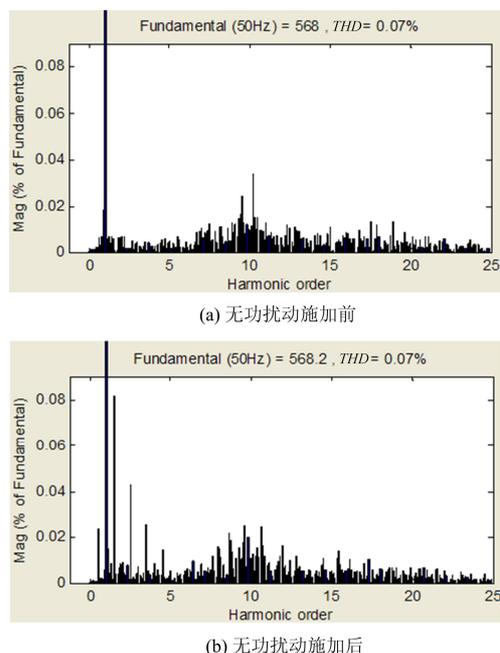


图7 风电机组并网点电压频谱特性图

Fig. 7 Spectrum characteristic diagram of wind turbine terminal voltage

图8为永磁同步风电机组由并网运行到孤岛运行的全过程,图8(a)~(d)分别为风电机组并网点三相电压,并网点频率,风电机组输出有功、无功功率,风机变流器直流侧电压仿真波形图。初始状态开关1闭合,开关2断开,风电机组从0.2s时起并网稳定运行,输出有功功率约1.0 pu,输出无功功率约为0 pu,且并网点电压、电流波形良好。0.26 s时,开关1断开,开关2闭合,外部电网断电,切换瞬间风电机组输出功率和变流器直流侧电压产生了小幅振荡,经5个周波调整趋于稳定,风电机组并网点电压、电流略有畸变。而此时风电机组输出有功无功功率与RLC负荷消耗的有功无功功率基本匹配,风电机组并网点电压并未发生大的变化,不足以触发风电机组过/欠压、过/欠频保护,风电机组进入了稳定的孤岛运行状态。经过两个周期的无功扰动后,0.32 s时确认风电机组并网点频率随着无功变化而变化,风电机组进入了无功-频率正反馈的孤岛状态辨识过程,通过监测并网点频率变化情况,无功扰动值

在得到频率反馈后每个周波等量增加,直到达到风电机组触发欠频保护的频率。仿真仅以风电机组输出无功功率(容性无功功率)为例,风电机组吸收无功功率(感性无功功率),无功功率-频率正反馈的孤岛状态辨识过程与之类似,孤岛运行时并网点频率将不断增大,简单起见,不再赘述。

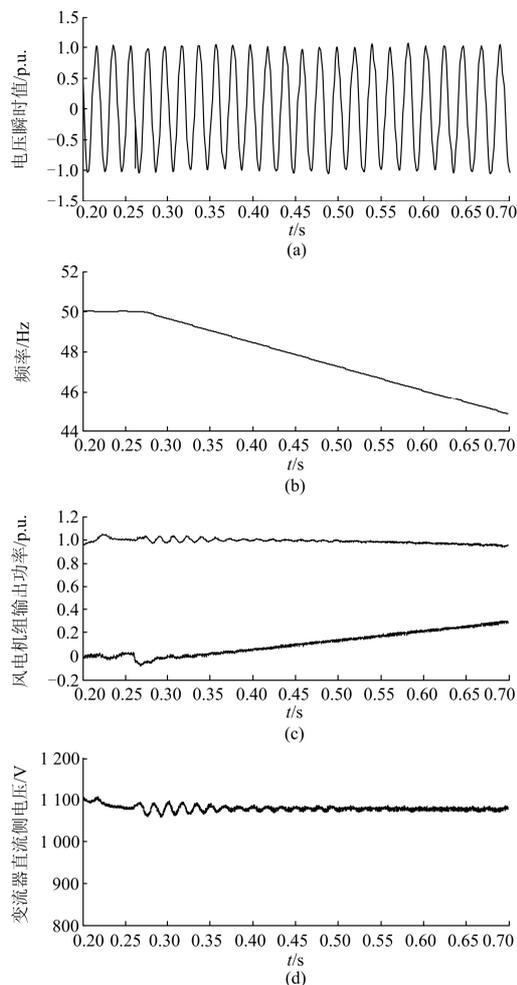


图8 无功功率-频率正反馈的孤岛状态辨识仿真图

Fig. 8 Simulation waveforms of islanding detection process based on positive feedback of reactive power-frequency method

4 现场试验研究

风电机组孤岛试验原理图如图9所示,将RLC可调负荷并联于风电机组升压变压器高压侧,模拟风电机组孤岛运行时的本地负荷。通过调节RLC负荷所消耗的有功与无功功率,可使得风电机组与RLC负荷之间达到孤岛运行的功率与相角匹配,模拟孤岛运行环境,试验用风电机组参数如表1所示。试验风电机组过/欠频保护频率分别为52.5 Hz和47 Hz,为便于观察风电机组孤岛保护过程,试验时屏蔽风电机组过/欠频保护功能。

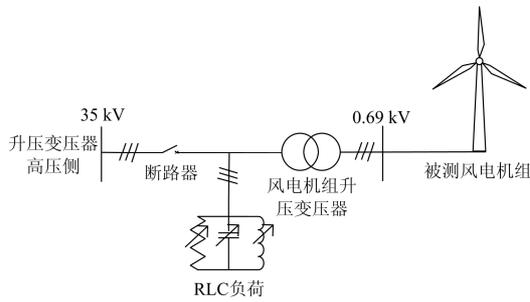


图 9 风电机组孤岛现场试验原理图

Fig. 9 Test schematic diagram for wind turbine island detection testing

图10为永磁同步风电机组孤岛状态辨识试验波

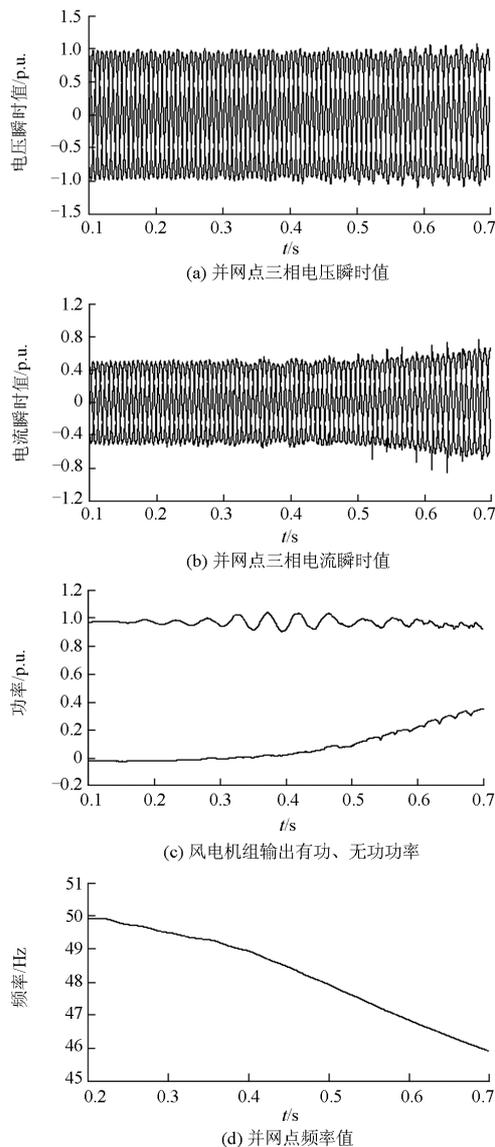


图 10 无功功率-频率正反馈的孤岛状态辨识试验波形图

Fig. 10 Experimental waveforms of islanding detection process based on positive feedback of reactive power-frequency method

形图,图 10(a)~图 10(d)分别为风电机组并网点三相电压瞬时值,三相电流瞬时值,风电机组输出有功、无功功率,并网点频率试验波形图。0.14 s 时断路器断开,风电机组与 RLC 负荷之间形成了稳定的孤岛运行状态,风电机组并网点电压、频率、有功功率、无功功率均无明显变化,风电机组进入了孤岛运行状态。经过两个周期的无功功率扰动,0.2 s 时确认并网点频率随无功功率扰动变化为变化,接着风电机组进入了无功功率扰动-频率正反馈孤岛过程,风电机组无功功率扰动量持续增大,并网点频率持续下降,当风电机组输出无功功率达到 0.2 pu 时,并网点频率已下降到低频保护频率 47 Hz,此时风电机组已成检测到了孤岛运行状态,可依据调度计划自主选择风电机组防孤岛保护或计划孤岛运行。试验结果表明,无功功率-频率正反馈的孤岛检测策略可快速、准确辨识风电机组运行状态,达到风电机组孤岛状态辨识与防孤岛保护的目的。

5 结论

(1) 风电机组存在孤岛运行与防孤岛保护问题,风电机组孤岛运行时其系统电压幅值由负荷消耗的有功功率决定,系统频率则由负荷消耗的有功功率、无功功率、负荷品质因素共同决定,但孤岛运行时无功功率扰动对频率变化的灵敏度远大于有功扰动对频率变化的灵敏度。

(2) 综合考虑经济性与检测性能等因素,基于无功功率-频率正反馈与传统过欠压、过欠频相结合的方法是实现对孤岛运行状态辨识的有效方法,该方法无检测盲区,对并网电能质量影响小、检测速度快、可靠性高、操作性强,具有很好的工程实用价值。

(3) 分散式风电分散安装于配电网负载端,更加靠近用户,发生孤岛的概率与危害增大,须具备主动的孤岛运行状态辨识能力和孤岛运行控制策略,必要时按照计划进行计划孤岛运行。

参考文献

[1] LISERRE M, PIGAZO A, DELL'AQUILA A, et al. An anti-islanding method for single-phase inverters based on a grid voltage sensorless control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1418-1426.

[2] 杨海柱, 金新民. 基于正反馈频率漂移的光伏并网逆变器反孤岛控制[J]. 太阳能学报, 2005, 26(3): 409-412. YANG Haizhu, JIN Xinmin. Anti-islanding control of grid connected photovoltaic inverter based on positive feedback frequency drift[J]. Acta Energaie solaris Sinica, 2005, 26(3): 409-412.

- [3] ESTE BANEZ E J, MORENO V M, PIGAZO A, et al. Performance evaluation of active islanding detection algorithms in distributed-generation photovoltaic systems: two inverters case[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1185-1193.
- [4] 贺眉眉, 李华强, 甘立勇, 等. RLC 负荷模型分布式发电孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 7-11.
HE Meimei, LI Huaqiang, GAN Liyong, et al. Islanding detection scheme evaluation for RLC load distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 7-11.
- [5] VELASCOD, TRUJILLO, GARCERAG, et al. An active anti-islanding method based on phase-PLL perturbation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1056-1066.
- [6] 张俊, 沈国桥, 胡长生, 等. 间歇式双边无功功率扰动孤岛检测策略[J]. 电源学报, 2011, 34(2): 7-11.
ZHANG Jun, SHEN Guoqiao, HU Changsheng, et al. Intermittent bilateral reactive power variation islanding detection strategy[J]. Journal of Power Supply, 2011, 34(2): 7-11.
- [7] 高金辉, 程静, 杨海波. 光伏并网逆变器复合式孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 122-126.
GAO Jinhui, CHENG Jing, YANG Haibo. Composite islanding detection method of photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 122-126.
- [8] 刘洋, 王明渝, 高文祥. 微电网新型孤岛检测技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 146-150.
LIU Yang, WANG Mingyu, GAO Wenxiang. Research on a novel islanding detection for micro-grid connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 146-150.
- [9] Q/GDW 1866-2012 分散式风电接入电网技术规定[S]. 北京: 国家电网公司, 2012.
Q/GDW 1866-2012 technical rule for dispersed wind power connected to power grid[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2012.
- [10] EL-KHATTAM W, SIDHU T S, SEETHAPATHY R. Evaluation of two anti-islanding schemes for a radial distribution system equipped with self-excited induction generator wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(1): 107-117.
- [11] YU Chena, ZHAO Xu, OSTERGAARDA J. Islanding control architecture in future smart grid with both demand and wind turbine control[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 95(3): 214-224.
- [12] 马静, 米超, 王增平. 基于谐波畸变率正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 47-51.
MA Jing, MI Chao, WANG Zengping. A novel islanding detection method based on positive feedback of voltage harmonic distortion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 47-51.
- [13] 张瑞叶, 张少如, 王平军, 等. 一种新的主动孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 74-79.
ZHANG Ruiye, ZHANG Shaoru, WANG Pingjun, et al. A new active island detection method based on a novel disturbance way[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 74-79.
- [14] 朱艳伟, 石新春, 李鹏. 多分辨率奇异谱熵和支持向量机在孤岛与扰动识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 64-70.
ZHU Yanwei, SHI Xinchun, LI Peng. Classification of islanding and grid disturbance based on multi-resolution singular spectrum entropy and SVM[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 64-70.
- [15] NASIRAGHDAM H, GHADIMI N, FARHADI P, et al. Detecting the anti-islanding protection based on combined changes of active and reactive output powers of distributed generations[C] // IEEE 3rd International Conference on Computer Research and Development, March 11-13, 2011, Shanghai, China: 285-289.

收稿日期: 2015-01-23; 修回日期: 2015-04-20

作者简介:

李少林(1984-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为风力发电并网技术、电力电子与电力传动; E-mail: lishaolia@126.com

王瑞明(1976-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电技术、电力系统;

孙勇(1982-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为风力发电技术、电力系统。

(编辑 张爱琴)