

光伏并网孤岛效应产生特性与控制

甘家梁,李志敏,谈怀江

(湖北工程学院计算机与信息科学学院,湖北 孝感 432100)

摘要:基于光伏发电系统并网中产生的孤岛效应问题,从原理上进行了探讨.比较了检测孤岛效应的几种方法,针对孤岛检测方法中的检测盲点,提出了一种基于频率微小变化的功率平衡的孤岛检测方法.在Matlab/Simulink的环境下,对其进行了建模仿真研究,该方法具有检测孤岛无盲区、响应速度快、对光伏并网发电系统有功输出无影响的特点,并验证了采用这种孤岛检测方法的可行性.

关键词:光伏并网;孤岛检测;并网逆变器;仿真

中图分类号:TM761

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2012.04.017

0 引言

随着光伏发电技术的飞速发展,为了使光伏发电系统的能量转换效率达到最高、安全性能达到最佳,人们一直在探索研究光伏发电系统的最大功率点的跟踪、并网逆变器的控制策略的选择、如何预防孤岛现象产生这三个关键问题的最优解决方案.其中如何预防孤岛现象产生,直接关系到电网的安全稳定运行,得到大家的广泛关注和研究.

所谓孤岛效应是指当电网由于电气故障、误操作或者自然因素中断供电时,与公共电网相联的各个分布式的光伏发电系统的控制检测系统不能及时有效地检测出停电现象将自身脱离电网,造成光伏发电系统单独给某个区域内的负载供电,形成电力部门不可控的“孤岛”.该现象的发生会造成电网电压和频率超出允许的范围、降低电网的安全标准,这样会给“孤岛”上的用电设备和检修人员造成较大的安全隐患.所以,研究孤岛检测方法与控制策略,具有十分重要的现实意义^[1-5].

1 孤岛现象产生的机理分析

在实际的系统中,光伏发电系统所带负载可以用RLC并联电路模拟.假设负载接入点(也是公共耦合监测点)的端电压和频率为 U 和 f ,输出的有功和无功功率用 P_{PV} 和 Q_{PV} 表示;负载所吸收的有功和无功功率用 P_L 和 Q_L 表示; ΔP 和 ΔQ 代表光伏系统与负载之间的功率偏差,则光伏发电

系统并网的等效电路^[6]如图1所示

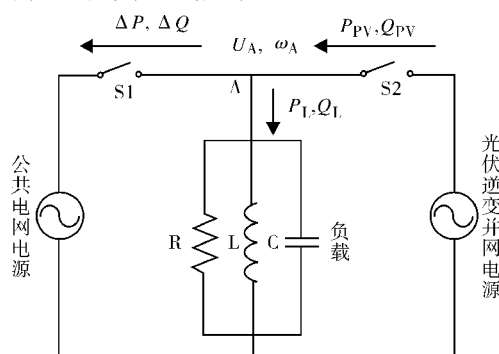


图1 光伏系统并网等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of grid-connected photovoltaics system

根据图1,如果光伏并网系统在断电前和断电后输出的有功和无功功率是不变的,则产生孤岛效应后,孤岛的电压和频率由光伏并网发电系统的输出能量和负载所需能量是否平衡确定.当光伏发电系统并网工作时,即 S_1 和 S_2 闭合,则下列方程式成立:

$$P_{PV} = P_L + \Delta P \quad (1)$$

$$Q_{PV} = Q_L + \Delta Q \quad (2)$$

$$P_L = \frac{U_A^2}{R} \quad (3)$$

$$Q_L = \left(\frac{1}{2\pi fL} - 2\pi fC \right) U_A^2 \quad (4)$$

当电网断电后,形成供电“孤岛”,即 S_1 闭合, S_2 断开,此时有:

$$P_{PV} = P'_L = \frac{U'^2_A}{R} \quad (5)$$

$$Q_{PV} = Q'_L = \left(\frac{1}{2\pi f'L} - 2\pi f'C \right) U'^2_A \quad (6)$$

收稿日期:2012-03-02

作者简介:甘家梁(1966-),男,湖北安陆人,副教授,硕士.研究方向:电力电子技术与自动化控制系统.

式(5)、(6)中, U'_A 、 f' 分别代表电网断电形成孤岛运行后负载电压和频率. 由式(4)和(6)可知并网系统的频率与并网逆变器输出的无功有关, 只要改变输出无功功率就可以改变系统频率, 因此可以选择这种方法作为检测孤岛效应的控制方案.

由式(1)~(6)可以得到:

$$\frac{\Delta P}{P_{PV}} = 1 - \frac{U_A^2}{U'^2_A} \quad (7)$$

$$\frac{f'}{f} \frac{\Delta P}{P_{PV}} - \frac{\Delta Q}{Q_{PV}} = \left[\left(\frac{f'}{f} \right)^2 - 1 \right] \frac{Q_C}{Q_{PV}} + \frac{f'_A}{f} - 1 \quad (8)$$

分析式(7)和(8), 可以得到以下结论: 光伏系统并网正常运行时, 负载端电压是不受光伏发电系统并网逆变器输出电压的影响, 而是受公共电网电压的箝制. 当电网发生异常现象时, 一旦逆变器输出的功率和负载的需求不匹配, 如果引起光伏系统输出到电网的有功和无功功率产生较大的变化, 将导致负载的电压和频率发生变化, 电压幅值和频率超过限定值, 检测系统很容易检测出孤岛产生, 控制系统及时将逆变器与电网脱离, 使光伏系统停止输出电能. 当光伏发电系统输出功率与负载消耗功率平衡时, 同时由 RLC 构成负载的谐振频率与电网频率 f 相同, 此时并网逆变器的并网输出电流为零, 并网逆变器输出功率与负载功率相等, 此时孤岛效应最难检测, 进入检测盲区, 造成光伏发电系统和负载组成的系统进入孤岛运行状态^[7].

2 孤岛效应的检测方法

2.1 孤岛效应的检测方法的分类

光伏发电系统并网的孤岛检测方法综合起来可以分为被动检测法、主动检测法和基于通讯信号检测法三大类^[3,8-10].

被动检测法又称无源检测法, 是从光伏发电系统的角度检测孤岛效应. 通过直接检测并网公共耦合点(PCC)的电压、频率、相位或谐波等是否出现异常, 以判断孤岛是否发生. 若光伏发电系统的供电量与孤岛负载需求相差较大, 必然会引起负载的功率及频率在孤岛发生后产生很大的变化, 检测设备很容易侦测到电网的信号波动, 控制系统会及时将光伏逆变器与电网断开. 该方法简单易行且不会对电网造成不良影响, 但是当负载消耗的功率(有功和无功功率)与光伏系统逆变的输出功率完全匹配时, 被动检测将出现较大的检测盲区, 而且需要比较长的检测时间. 为了解决被动检测法有检测盲区的问题, 主动检测法应运

而生^[6].

主动检测法是一种有源检测法, 该方法是通过给并网逆变器的控制端施加电压、频率或相位等扰动信号, 检测受扰后并网逆变器输出信号的变化来判断是否发生孤岛效应. 此方法能够准确地检测孤岛, 但需要给逆变器输出施加扰动, 这必然会对并网电能质量造成不良影响. 主动检测法包括电压正反馈法、主动相移法、主动频移法等^[6].

第三种检测方法是基于计算机通信技术的检测方法. 该方法是在电网的一侧安装信号发生装置, 在由光伏发电系统组成的局域电网上安装接收器, 一旦公共电网供电发生意外, 接收器根据接收信号的变化来确定发生了孤岛现象, 控制断路器工作. 该方法的特点是孤岛检测效果明显, 在正常的检测范围内没有检测盲区, 对光伏并网逆变器输出的电能质量没有影响, 对公用电网的暂态响应也无影响. 而在某些情况下, 基于电力载波通信的孤岛检测方法还会提高系统的运行特性, 但对发送的信号要求高, 性价比高^[4].

2.2 基于频率微小变化的功率平衡孤岛检测方法

防止光伏发电系统并网产生孤岛现象的基本点和关键点是电网的断电检测. 当负载所需功率与光伏发电系统输出的功率基本相近时, 电网发生故障断电后, 负载的频率和电压变化很小, 被动检测法就会失效, 形成了检测盲区. 因此, 笔者提出了一种基于频率微小变化的功率平衡孤岛检测方法, 通过对光伏并网逆变器的输出进行主动干扰, 扰动破坏逆变器输出功率与负载功率之间的平衡, 造成系统的频率和电压有明显变化而检测出孤岛效应^[8-9].

频率微小变化的功率平衡孤岛检测方法具有很好的检测效果. 该方法的主要思想是当电网正常供电时逆变器与负载的输出功率处于平衡状态, 逆变器输出电流频率为 $f + \Delta f$; 而当电网停电时功率平衡被打破, 检测到的频率为逆变器输出电流频率而非电网电压频率, 因而逆变器 PWM 调制波的控制下输出电流频率每个周期都会在原来基础上增加 Δf , 形成输出功率不平衡, 使最终输出频率超出基准频率上下波动的允许范围, 致使并网逆变器断开, 达到消除孤岛效应的目的. 该方法的优点是多个并网逆变器之间是相互支持的, 当扰动造成一个逆变器输出功率的变化使电网频率上升时, 其它并网逆变器会检测到相同的变化方向, 扰动控制的结果会导致电网频率进一步

上升^[8-9].

在检测光伏并网电源与负载功率匹配型孤岛时,必须使逆变器输出电流的频率有微小的不对称,则构成控制逆变器 PWM 调制波的方程式^[6-9]为:

$$\begin{cases} \sin[2\pi t(f + \Delta f)] & 0 \leq t \leq \frac{1}{2(f + \Delta f)} \\ \sin[2\pi t(1 - \frac{\Delta f}{f + 2\Delta f}) + \frac{2\pi\Delta f}{f + 2\Delta f}] & \frac{1}{2(f + \Delta f)} \leq t \leq \frac{1}{f} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中,当 $f = 50 \text{ Hz}$ 、 $\Delta f = 0$ 时,其波形为一标准的正弦波. 如果将这种微小不对称的信号作为逆变器的控制信号(PWM),则逆变器输出电流波形也将出现同样的微小的不对称^[9]. 设光伏系统并网电压为:

$$V_{pv}(t) = V_m \sin \omega t \quad (10)$$

设逆变器输出的并网电流与并网电压相位前半周期相差为 θ_1 ,后半周期的相位差为 θ_2 ,则经过微小的不对称 PWM 调制后,并网逆变器的输出电流为:

$$i(t) = \begin{cases} I_m \sin(\omega t - \theta_1) & t \geq 0 \\ I_m \sin(\omega t - \theta_2) & t < 0 \end{cases} \quad (11)$$

由式(10)和(11)可以推导出并网逆变器的输出功率为:

$$P(t) = \begin{cases} I_m V_m \cos \theta_1 & i(t) \geq 0 \\ I_m V_m \cos \theta_2 & i(t) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

从式(12)可以得出结论,在连续两个半周期内,由于电流的微小不对称,引起输出的功率有变化. 前半周期的功率变化量为:

$$\Delta P(t) = I_m V_m \cos \theta_1 - I_m V_m \cos \theta_2 \quad (13)$$

后半周期功率变化量为:

$$\Delta P(t) = I_m V_m \cos \theta_2 - I_m V_m \cos \theta_1 \quad (14)$$

归纳(13)和(14)式得到:

$$\Delta P(t) = \begin{cases} I_m V_m (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) & i(t) \geq 0 \\ -I_m V_m (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) & i(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

由(15)式得到结论,在两个连续的前后半周期内,并网逆变器的输出功率变化量产生正负交替规律性变化,这种变化可以用来检测孤岛反应.

假设公用电网系统用 M 表示,光伏发电系统和本地负载用 N 表示,那么 M 和 N 两个子系统则构成一个完整的分布式光伏发电并网系统. 根据电力工程系统频率调整和功率平衡的理论知识可以得出, M 和 N 系统频率偏移量和功率偏移量之间的关系:

$$\Delta f_M = k_M \Delta P_M, \Delta f_N = k_N \Delta P_N$$

式中: ΔP_M 、 ΔP_N 是 M 和 N 两个系统的功率偏移量, Δf_M 、 Δf_N 是 M 和 N 两个系统的频率偏移量, k_M 、 k_N 是功率的静特性系数,并且 $k_M \gg k_N$.

一旦光伏发电系统电能通过逆变器输送至电网时,则其输出频率变化量和功率变化量之间的关系可以写成如下形式:

$$\Delta f = \Delta P \frac{k_M k_N}{k_M + k_N} \quad (16)$$

由于公共电网的容量很大, $k_M \gg k_N$, 功率的变化量很小,所以频率的变化量也很小,约等于 0. 这时逆变器控制端的 PWM 调制波的微小不对称信号,不会导致逆变器输出不对称电流对系统频率产生影响. 由于目前分布式光伏发电系统的容量都不大,而当电网发生断电故障产生孤岛效应后,供电功率发生突变,功率的变化对频率的变化影响较为明显,孤岛系统 N 的频率变化与功率变化就遵从关系式 $\Delta f_N = k_N \Delta P_N$ 进行^[4,9].

3 孤岛效应的系统仿真实验结果与分析

为了对频率微小变化的功率平衡检测法进行验证,采用 Matlab/powerlib 搭建模型进行仿真测试. 在模拟的孤岛测试中,采用并联的 RLC 电路模拟发生孤岛后的负载. 图 2 为孤岛检测仿真模型图. 光伏电池输出的 $U_{pv} = 420 \text{ V}$, 电网电压为 220 V 、频率为 50 Hz , 负载参数 $R = 24 \Omega$ 、 $L = 0.03 \text{ mH}$ 、 $C = 220 \mu\text{F}$. 当系统的频率扰动 $\Delta f = -0.2 \text{ Hz}$, 门限频率 $f_{\min} = 49 \text{ Hz}$ 、 $f_{\max} = 51 \text{ Hz}$, 电网在 0.3 s 时断电, 仿真得到的并网输出电压 V_{pv} 和电流 i_0 与响应时间的波形如图 3 所示, 在 0.375 s 前并网逆变器自动脱离电网, 达到检测孤岛效应目的. 当频率扰动 $\Delta f = -0.1 \text{ Hz}$, 门限频率 $f_{\min} = 49 \text{ Hz}$ 、 $f_{\max} = 51 \text{ Hz}$, 电网在 0.3 s 时断电, 仿真得到的并网输出电压 V_{pv} 和电流 i_0 与响应时间的波形如图 4 所示, 在 0.52 s 前并网逆变器自动脱离电网. 由此可知, 该频率微小变化的功率平衡孤岛检测法能较好达到检测孤岛效应的目的.

研究发现负载的品质因数 Q (模拟并联负载的品质因数 $Q = R \frac{L}{C}$) 的选择对孤岛效应影响很大, 由于 Q 值越大, 负载的谐振能力就越强, 频率偏移的困难越大, 监测系统就不会对产生的孤岛现象做出及时的判断. 因此负载 Q 值选择很重要, 过大或过小都不可取.

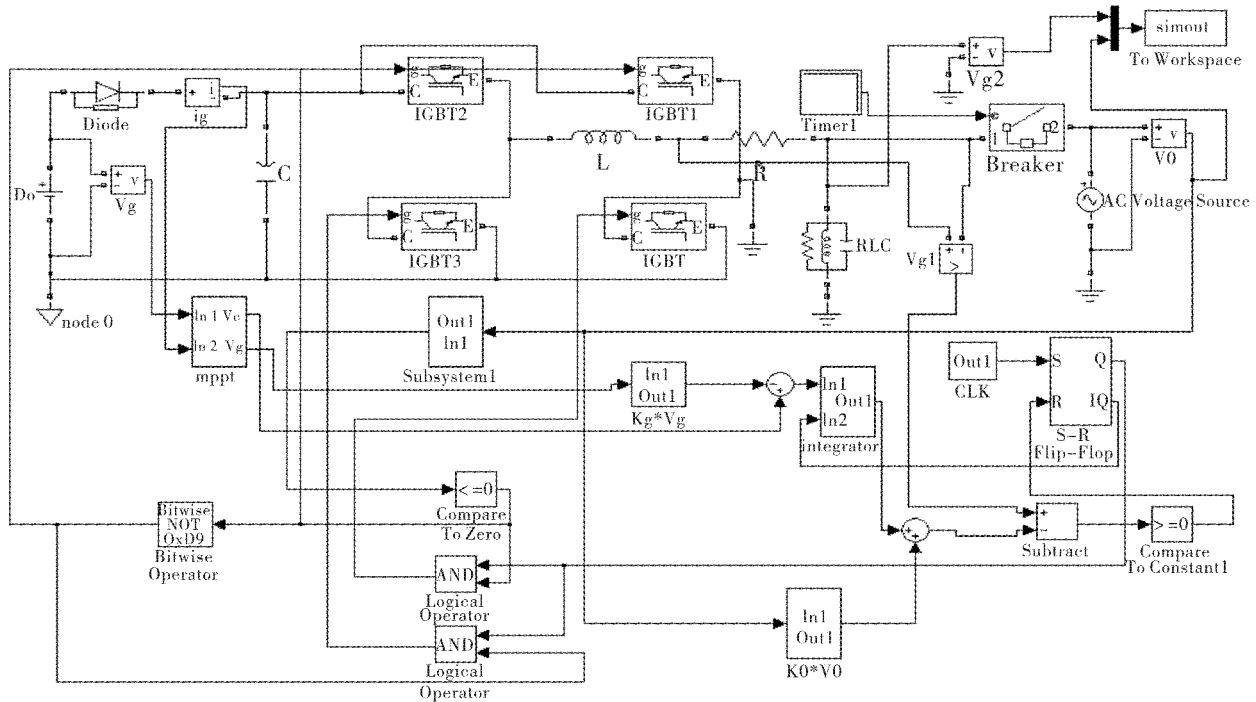


图2 孤岛效应检测仿真模型

Fig.2 Simulation model of island effects detection

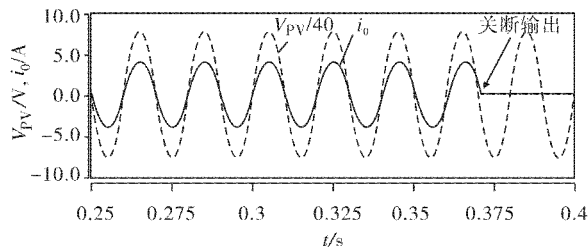
图3 $\Delta f = -0.2$ Hz 时孤岛检测过程电流波形图

Fig.3 Current waveform of islanding detection

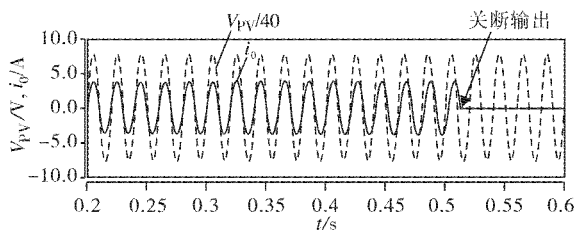
at $\Delta f = -0.2$ Hz图4 $\Delta f = -0.1$ Hz 时孤岛检测过程电流波形图

Fig.4 Current waveform of islanding detection

at $\Delta f = -0.1$ Hz

4 结 语

本文分析了光伏发电系统并网的孤岛效应产生原理,对比分析了常用的各种光伏并网控制检测孤岛效应的特点,采用基于频率微小变化的功率平衡的孤岛检测法来检测孤岛效应,并运用 Matlab/Simulink 仿真工具对该方案进行建模与仿真.仿真结果验证了该孤岛检测方法的可行性,对分布式光伏并网系统检测孤岛效应的应用具有重

要的指导意义.

参考文献:

- [1] 胡双强,刘治田,胡钊,等.塑料太阳能电池研究进展[J].武汉工程大学学报,2011,33(6):6-15.
- [2] 赵飞,梁志瑞,王宁.光伏并网发电系统孤岛检测技术[J].中国电力,2010,43(5):64-68.
- [3] 张恩领.光伏发电系统并网控制与孤岛检测的研究[D].天津:天津大学,2010.
- [4] 毛从清,潘俊民.三相光伏并网发电系统孤岛问题检测方法的研究[J].低压电器,2011(6):34-37.
- [5] 杨帆,彭宏伟,胡为兵.DC-DC转换电路在光伏发电MPPT中的应用[J].武汉工程大学学报,2008,30(3):104-106.
- [6] 金结红,余晓东.光伏并网系统孤岛控制策略研究[J].通信电源技术,2008,25(6):20-22.
- [7] 边孝成.基于ARM-DSP架构的太阳能光伏并网逆变器[D].济南:山东大学,2009.
- [8] 肖巧景.3KW光伏并网逆变器的研制[D].郑州:郑州大学,2007.
- [9] 禹华军,潘俊民.并网发电逆变系统孤岛检测新方法的研究[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(5):55-59.
- [10] 肖巧景,张宇翔,郭敏.一种新的频率偏移技术在光伏并网发电系统孤岛检测中的应用[J].现代电子技术,2011(1):107-108.

(下转第78页)