基于自适应负序电压正反馈的孤岛检测方法

王 雪[1],雷胜华[1],胡文平[2],赵 莹[1]

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003;

2. 国网河北省电力公司电力科学研究院,河北 石家庄 050021)

摘要: 孤岛发生后,在负序电压正反馈环节作用下,并网点产生的负序电压持续增大,通过判断并网点负序电压幅值是否超过阈值进而判断孤岛是否发生。但是,过大的反馈系数会导致逆变器注入负序扰动过大,过小的反馈系数会导致孤岛检测失败。根据负序电压正反馈法的原理提出了基于自适应负序电压正反馈的孤岛检测方法,其具有足够孤岛检测能力的正反馈系数取决于逆变器实时输出功率的大小。改进后的方法在逆变器并网运行时能有效减小注入大电网的负序扰动分量,且孤岛发生后能够在规定时间 2 s 内实现孤岛检测。通过理论分析和仿真研究,验证了所提方法的可靠性。

关键词: 孤岛检测; 负序电压; 自适应反馈系数; 多机并联; 负序扰动

中图分类号: TM 71 **文献标识码:** A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.006

0 引言

光伏发电(PV)装机容量在各区域电网中所占比重越来越大,其并网运行将给电力系统带来巨大挑战。当电网侧由于故障或检修跳闸时,并入大电网的光伏电站与本地负载形成不受大电网控制的供电回路,即孤岛,这会给电力设备以及检修工作人员带来潜在的威胁。最新颁布的 GB/T 19964—2012[1] 和 Q/GDW 618—2011[2]标准规定,并网光伏电站必须具备孤岛检测能力。

近年来,国内外学者对光伏逆变器的孤岛检测方法进行了大量的研究,逆变器的孤岛检测方法根据其检测原理可以大致分为 2 类:被动检测法和主动检测法。常见的被动检测法通过检测并网点电压[3-4]、频率[5]、电压谐波畸变率[6]等电气量,并判断该电气量是否在正常运行范围内,从而判断逆变器是否处于孤岛运行状态。被动检测法虽然不会对并网点的电能质量造成影响,但存在孤岛检测盲区。主动检测法通过在逆变器的控制回路中加入扰动信号或正反馈环节,一旦逆变器处于孤岛运行状态,逆变器并网点的电气量会加速偏离正常运行范围,进而检测出逆变器处于孤岛运行状态,但是以破坏并网点的电能质量为代价[7-13]。随着微电网的建设与发展,希望光伏逆变器在检测出孤岛运行状态后能尽可能地为本地负载提供电压和频率支撑,进而提高供电可靠性。为了避免逆变器在孤岛和并网 2 种运行状态的变换过程中产生较大的冲击电流,要求孤岛检测过程中尽量减小对并网点电能质量的影响,实现非破坏性检测。目前,国内外学者对无盲区非破坏性孤岛检测方法进行了一些研究。其中,负序电流注入法[14-15]在正常运行时会持续向大电网注入负序扰动;负序电压正反馈法[16-18]、负序功率正反馈法[19]本质相同,当大电网存在较小负序分量时这 2 种方法也会向大电网持续注入负序扰动,且相关文献没有对正反馈系数的选取进行理论分析;周期性无功电流扰动法[20-21]会导致逆变器输出功率波动,降低能源利用率;基于负序电压分配因子的孤岛检测方法[22]需要额外的负序电源和电抗设备投入,增加了逆变器并网系统的投资成本;非特征谐波正反馈的孤岛检测方法[23]中非特征谐波的提取原理较复杂,且利用根轨迹法得到的正反馈系数不具有普遍适应性。

本文从理论上推导出负序电压正反馈孤岛检测方法的正反馈系数应该满足的边界条件,并提出了自适应反馈系数的方案,通过理论分析与仿真验证得出:对于具有不同实时输出功率的逆变器,改进方法均具有足够的孤岛检测能力,且在并网运行时能够尽量减小逆变器注入大电网的负序扰动。

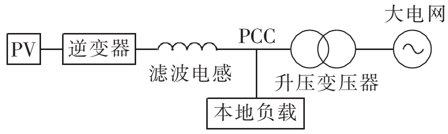
1 自适应负序电压正反馈

逆变器并网系统示意图如图 1(a)所示,其等效电路如图 1(b)所示。并网运行时,逆变器处于电流控制模式,$\boldsymbol{I}_{PV}$ 为并网逆变器等效电流源,R_{PV}、L_{PV} 分别为逆变器出口滤波电感的等效电阻和电感,并联 RLC 支路为等效本地负载[24-25],配电网等效成一个电压源 $\boldsymbol{E}_s$,R_s、L_s 分别为逆变器出口升压变压器和配电网的总等效电阻和电感,断路器 K 闭合、断开分别

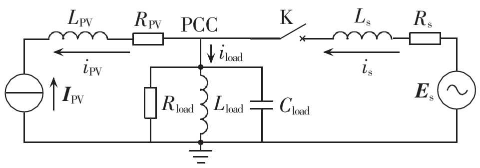
收稿日期:2015-12-09;**修回日期:**2016-08-01

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAA09B01);国网河北省电力公司科技项目(KJ2014-052)

Project supported by National Key Technology Support Program(2015BAA09B01) and the Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Company(KJ2014-052)



(a) 逆变器并网系统示意图



(b) 逆变器并网系统等效电路图

图 1 逆变器并网系统等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of grid-connected inverter system

表示并网运行和孤岛运行。

负序电压正反馈法的基本原理是将提取得到的并网点负序电压 u_{pcc}^n 乘以一个反馈系数 k_f，作为扰动量加入到逆变器控制回路的电流参考值中。孤岛发生后，逆变器输出的负序电流全部注入本地负载，并网点负序电压 u_{pcc}^n 在正反馈的作用下持续增大并超过 4%，即可判断孤岛发生。逆变器出口滤波电感的阻抗 Z_{PV} 远小于本地负载阻抗 Z_{load}，忽略 Z_{PV} 的影响，孤岛状态下负序电压正反馈控制原理图如图 2 所示。

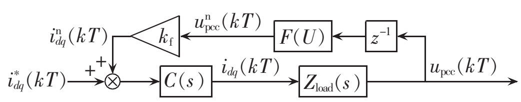


图 2 孤岛运行时负序电压正反馈控制原理图

Fig.2 Schematic diagram of positive feedback control of negative-sequence voltage during islanding operation

图 2 中，kT 表示第 k 个时刻；$i_{dq}^*(kT)$ 为电流给定值；$i_{dq}(kT)$ 为逆变器输出电流值；$u_{pcc}(kT)$ 为并网点电压；$u_{pcc}^n(kT)$ 为并网点负序电压；$F(U)$ 为负序电压提取环节的传递函数；k_f 为负序电压正反馈的系数；$C(s)$ 为电流环的等效传递函数；$Z_{load}(s)$ 为本地负载的复频域阻抗。则有：

$$u_{pcc}^n(z)=\frac{i_{dq}^n(z)}{1/[C(s)Z_{load}(s)]-k_fF(U)z^{-1}} \tag{1}$$

负序电压正反馈系统的特征方程为：

$$1/[C(s)Z_{load}(s)]-k_fF(U)z^{-1}=0 \tag{2}$$

在控制系统中，$C(s)$ 是一个时间常数为毫秒级的欠阻尼二阶系统，其稳态误差为 0；$F(U)$ 一般不作为单独环节进行考虑，可以忽略其计算延时，认为 $C(s)\approx 1$、$F(U)\approx 1$。则孤岛发生后，要使系统失去稳定，并网点负序电压不断增大并最终超过 4%，必须满足 $|z|>1$，即：

$$k_f>1/|Z_{load}(s)| \tag{3}$$

孤岛发生时满足 $Z_{load}(s)=u_{pcc}(z)/i_{dq}(z)$，将其代入式(3)可得：

$$k_f>|i_{dq}(z)/u_{pcc}(z)| \tag{4}$$

其中，$u_{pcc}(z)$ 近似等于并网点处额定电压；$i_{dq}(z)$ 由逆变器实时输出功率决定。所以反馈系数的大小取决于逆变器的实时输出功率。

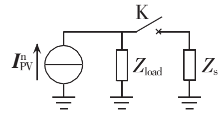


图 3 逆变器并网系统负序网络

Fig.3 Negative-sequence network of grid-connected inverter system

逆变器并网系统的负序网络见图 3，断路器 K 断开、闭合表示 2 种运行状态。2 种运行状态下负序网络的区别是：并网运行时，逆变器输出负序电流注入一个等效阻抗 $Z_s // Z_{load}$；而孤岛发生后，逆变器输出负序电流全部注入本地负载。将式(3)的 $Z_{load}(s)$ 用 $Z_s(s) // Z_{load}(s)$ 替代，可以求出并网运行时保证并网点负序电压不会发生累积的正反馈系数的上限为：

$$k_{fmax}=1/|Z_s(s) // Z_{load}(s)| \tag{5}$$

由于 $Z_s(s)\ll Z_{load}(s)$，则有：

$$\frac{k_{fmax}}{|1/Z_{load}(s)|}=1+|Z_{load}(s)/Z_s(s)|\gg 1 \tag{6}$$

联立式(4)和式(5)可得负序电压正反馈系数的取值范围为：

$$|i_{dq}(z)/u_{pcc}(z)|<k_f\leqslant 1/|Z_s(s) // Z_{load}(s)| \tag{7}$$

只要正反馈系数满足式(7)，就可以保证孤岛发生后能准确检测出孤岛运行状态，且并网运行时并网点负序电压不会发生累积而导致孤岛误判。

为了保证孤岛发生后并网点负序电压在 2 s 内超过规定的阈值，提高逆变器的孤岛检测能力，在临界正反馈系数的基础上乘以一个大于 1 的可靠系数 k_{rel}。

$$k_f=k_{rel}|i_{dq}(z)/u_{pcc}(z)| \tag{8}$$

根据式(8)建立一个自适应系数的负序电压正反馈系统，使逆变器的孤岛检测能力随着逆变器实时输出功率变化而自适应地改变，其控制原理如图 4 所示。同时，为了避免三相负载不对称或并网侧发生不对称故障时注入负序电流扰动过大，k_{rel} 取值不宜过大。

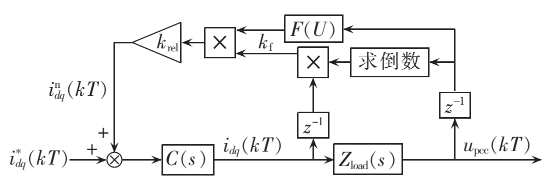


图 4 基于自适应负序电压正反馈孤岛检测原理图

Fig.4 Schematic diagram of islanding detection based on adaptive positive feedback of negative-sequence voltage

2 多机并联运行时的分析

一般在大型光伏电站中，往往采用多台逆变器并联运行、通过公共并网点接入大电网的运行方

式，其等效电路如图5所示。

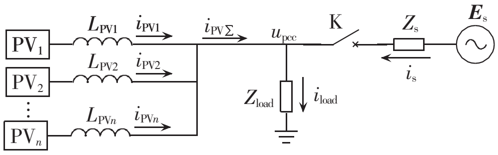


图5 多台逆变器并联运行时的等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit diagram of multiple inverters operating in parallel

每台逆变器的负序扰动分量均从公共并网点获取，假设并联运行的 n 台逆变器具有相同的传递函数 $C(s)$，则：

$$C(s)Z_{\mathrm{load}}(s)\sum_{j=1}^{n}\left[i_{dqj}(z)+k_{\mathrm{f}j}F(U)z^{-1}u_{\mathrm{pcc}}(z)\right]=u_{\mathrm{pcc}}(z) \tag{9}$$

式(9)两边同时乘以 $F(U)$，化简得：

$$u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}(z)=\frac{\sum_{j=1}^{n}i_{dqj}^{\mathrm{n}}(z)}{1/[C(s)Z_{\mathrm{load}}(s)]-F(U)z^{-1}\sum_{j=1}^{n}k_{\mathrm{f}j}} \tag{10}$$

由式(10)得到 n 台逆变器并联运行的边界条件为：

$$\sum_{j=1}^{n}k_{\mathrm{f}j}>\left|\frac{\sum_{j=1}^{n}i_{dqj}(kT)}{C(s)F(U)u_{\mathrm{pcc}}(kT)}\right|=\sum_{j=1}^{n}\left|\frac{i_{dqj}(kT)}{C(s)F(U)u_{\mathrm{pcc}}(kT)}\right| \tag{11}$$

其中，式(11)等号右侧多项式恰好为各台逆变器根据自身实时输出功率确定的正反馈系数。此时，多台逆变器并联运行系统的等效自适应负序电压正反馈系数可取为各台逆变器的自适应负序正反馈系数之和，与各台逆变器实时输出功率之和有关。

由于辐照强度、温度等环境因素的变化，可能导致逆变器的实时输出功率也发生变化，每台逆变器采用自适应负序电压正反馈系数后，各台逆变器的负序电压正反馈系数可以随着其实时输出功率作相应变化，此时各台逆变器输出的负序电流之和为：

$$i_{\mathrm{PV}\Sigma}^{\mathrm{n}}(kT)=\frac{k_{\mathrm{rel}}\sum_{j=1}^{n}i_{dqj}(kT)}{C(s)F(U)u_{\mathrm{pcc}}(kT)}u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}(kT-T) \tag{12}$$

其中，$u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}(kT-T)$ 为上一时刻并网点负序电压。各台逆变器输出负序电流之和由可靠系数 k_{rel}、各台逆变器实时输出功率之和、并网点上一时刻负序电压共同决定。并网运行时，并网点负序电压不会发生累积，$u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}(kT)$ 等于大电网提供的初始负序电压 $u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}(0)$，$k_{\mathrm{rel}}$ 确定后，各台逆变器输出负序电流之和与其实时输出功率之和的百分比为一定值。因此，采用自适应正反馈系数能保证每一时刻注入的负序扰动都是满足孤岛检测条件的最小负序扰动。

若直接根据各台逆变器的额定容量来确定正反馈系数，各台逆变器输出负序电流之和由所有逆变器额定容量之和决定。当外界环境变化导致逆变器总的实时输出功率减小时，各台逆变器输出的负序电流仍保持不变，大于满足孤岛检测条件下的最小负序扰动电流。

3 算法实现

3.1 控制原理及参数选择

基于自适应负序电压正反馈孤岛检测方法的控制原理如图6所示，分布式电源(DG)采用带前馈解耦的电流双环控制策略，通过锁相环(PLL)实时跟踪并网点电压 u_{pcc} 的频率 f 和相位 θ，对逆变器输出电流 i_{PV} 进行Park变换，得到逆变器输出电流的有功分量 i_P 和无功分量 i_Q，将提取得到的并网点电压 u_{pcc} 的负序分量 $u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}$ 变换成与 $u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}$ 幅值对应成比例的有功分量 i_P^{n} 和无功分量 i_Q^{n}。有功分量的给定值 i_P^* 与 i_P、i_P^{n} 分别作差、作和后经过PI环节、前馈环节 u_{pcc}^{d}、解耦环节 $\omega L_{\mathrm{PV}}i_Q$ 得到 d 轴电压的控制分量 u_d。无功分量的给定值 $i_Q^*=0$(逆变器功率因数一般取1)与 i_Q、i_Q^{n} 分别作差、作和后经过PI环节、前馈环节 u_{pcc}^{q}、解耦环节 $\omega L_{\mathrm{PV}}i_P$ 得到 q 轴电压的控制分量 u_q。其中，“变换”环节中的自适应系数根据图4所示原理实现。

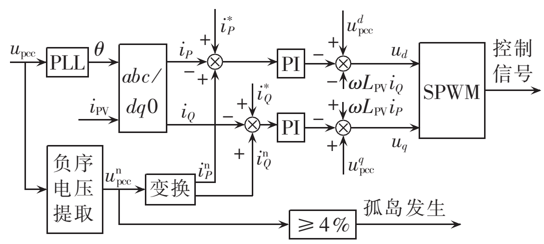


图6 负序电压正反馈检测方法的控制回路

Fig.6 Control loop of islanding detection based on positive feedback of negative-sequence voltage

孤岛发生后，逆变器输出的负序电流全部注入本地负载 Z_{load}，由式(12)可得并网点的负序电压为：

$$u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}(kT)=\frac{k_{\mathrm{rel}}u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}(kT-T)}{C(s)F(U)} \tag{13}$$

不计 $C(s)$ 和 $F(U)$ 对系统稳定性的影响，孤岛发生后并网点负序电压的变化轨迹只取决于可靠系数 k_{rel} 和初始负序电压 $u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}(0)$，而与逆变器实时输出功率无关。分别搭建不同实时输出功率的逆变器并网系统，大电网所含负序电压 $u_{\mathrm{pcc}}^{\mathrm{n}}(0)$ 与正序电压的比值为0.5%，其反馈系数根据式(8)确定，绘制孤岛检测时间 t 随 k_{rel} 的变化曲线，见图7。图7中所有点描述的情况中，当逆变器实时输出功率为9 kW、$k_{\mathrm{rel}}=2.5$ 时，反馈系数最大 $k_{\mathrm{f}}=0.1550$，小于反馈系数上限 $k_{\mathrm{f\,max}}=10$，因此，并网运行时不会导致并网点负序电压发生累积。由图7可知，当 $k_{\mathrm{rel}}\geqslant 1.5$ 时，不同实时输出功率的逆变器的孤岛检测时间之差在2个周期内，孤岛检测时间受 $C(s)$、$F(U)$、锁相环等环节的影响较小，且对每一个确定的 k_{rel}，实时输出功率

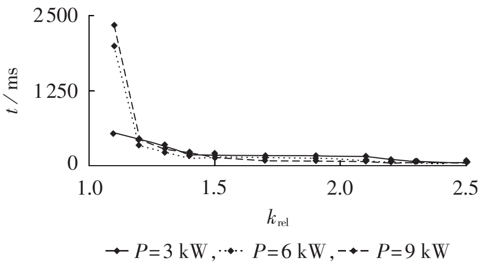


图 7　孤岛检测时间 t 随 k_{rel} 的变化曲线

Fig.7 Curve of islanding detection time vs. k_{rel}

较大的逆变器孤岛检测时间总是略小于实时输出功率小的;当 $k_{rel}\geqslant 2.3$ 时,孤岛检测时间几乎不受 $C(s)$、$F(U)$、锁相环等环节的影响,随着逆变器实时输出功率的增加,孤岛检测时间之差在 10 ms 内。本文取 $k_{rel}=1.5$,在保证逆变器实时输出功率增大而孤岛检测速度变化不大的前提下,尽量减少注入大电网的负序扰动。

3.2　负序电压的提取

并网点电压 $\boldsymbol{u}_{pcc}=[\boldsymbol{u}_A,\boldsymbol{u}_B,\boldsymbol{u}_C]^T$ 包含正序分量和负序分量,根据对称分量法可得负序分量为:

$$\boldsymbol{u}_{pcc}^-=[\boldsymbol{u}_A^-\ \boldsymbol{u}_B^-\ \boldsymbol{u}_C^-]^T=\boldsymbol{T}[\boldsymbol{u}_A\ \boldsymbol{u}_B\ \boldsymbol{u}_C]^T \tag{14}$$

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}1 & a^2 & a\\ a & 1 & a^2\\ a^2 & a & 1\end{bmatrix},\ a=e^{j2\pi/3}$$

$\alpha\beta$ 静止坐标系下的电压可以表示为:

$$[\boldsymbol{u}_\alpha\ \boldsymbol{u}_\beta]^T=\boldsymbol{C}_{32}[\boldsymbol{u}_A\ \boldsymbol{u}_B\ \boldsymbol{u}_C]^T \tag{15}$$

$$\boldsymbol{C}_{32}=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}1 & -1/2 & -1/2\\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2\end{bmatrix}$$

联立式(14)、(15)可以求得 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的负序分量为:

$$\boldsymbol{u}_{\alpha\beta}^-=[\boldsymbol{u}_\alpha^-\ \boldsymbol{u}_\beta^-]^T=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1 & q\\ -q & 1\end{bmatrix}\boldsymbol{u}_{\alpha\beta} \tag{16}$$

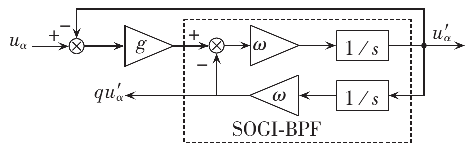
其中,q 表示移相 90°,本文采用基于二阶广义积分器的带通滤波器(SOGI-BPF)的方法实现,其传递函数为:

$$P(s)=\frac{g\omega s}{s^2+g\omega s+\omega^2} \tag{17}$$

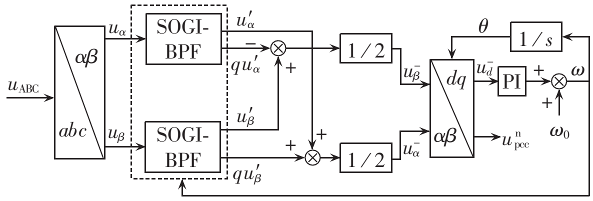
获得 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的负序分量后可以通过锁相环环节获取负序分量的幅值。基于二阶广义积分器的带通滤波器和负序电压提取的原理如图 8 所示。

4　仿真验证

本文基于 MATLAB/Simulink 搭建了并网逆变器的孤岛检测仿真平台。其中,配电网的参数为 380 V/50 Hz(含少量负序分量、5 次谐波电压、7 次谐波电压),升压变压器与大电网等效阻抗(归算到低压侧)为 0.1+j0.0019 Ω。逆变器直流侧母线电压为 800 V,逆变器出口滤波电感为 12 mH。选取孤岛发生后成功检测到孤岛运行状态的时间(即孤岛检测时间)为孤岛检测能力的指标,孤岛检测时间越短表明孤岛检测能力越强,反之越弱。分别设定不同容量的逆变器及与逆变器容量匹配的负载,采用改进前后的正反馈系数分别对其孤岛检测能力进行仿真验证。为了说明改进前的正反馈系数应该随着容量增大而增大,本文取文献[16]中的正反馈系数 $k_f=0.0964$ 固定不变作参照,逆变器容量及与之匹配的负载的参数如表 1 所示,孤岛检测时间随逆变器功率的变化曲线如图 9 所示。



(a) 基于二阶广义积分器的带通滤波器



(b) 负序电压提取原理图

图 8　负序电压提取原理

Fig.8 Schematic diagram of negative-sequence voltage extraction

表 1　逆变器和负载参数

Table 1 Parameters of inverter and loads

P/kW	R_{load}/Ω	L_{load}/mH	C_{load}/μF
3	48.40	62	164
6	24.20	31	328
9	16.13	20.67	492
12	12.10	15.5	656
13	11.17	14.31	710.67

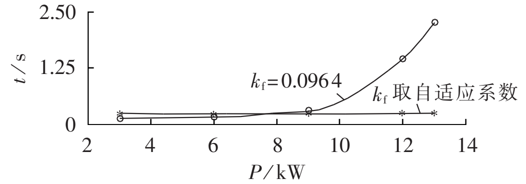


图 9　孤岛检测时间随逆变器功率变化曲线

Fig.9 Curve of islanding detection time vs. inverter power

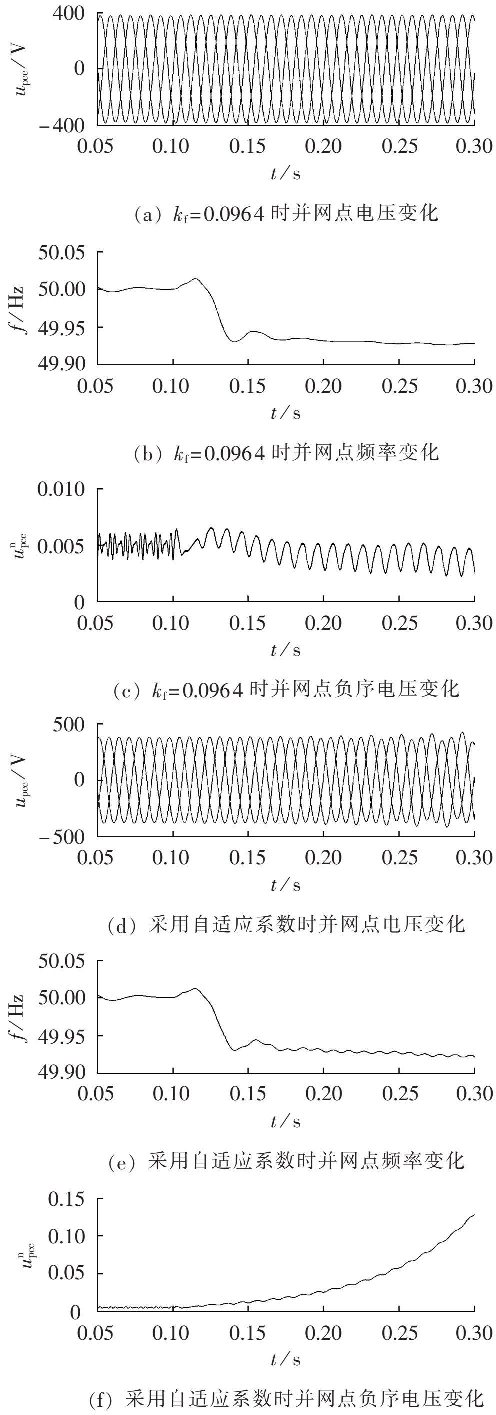
由图 9 可知,正反馈系数 $k_f=0.0964$ 确定后随着逆变器容量增加,其孤岛检测能力逐渐减弱,当逆变器容量为 13 kW 时,虽然能够使并网点负序电压超过阈值,但孤岛检测时间已经超过规定时间 2 s。而采用自适应正反馈系数方法时,随着逆变器容量

变化，孤岛检测时间基本不变，其孤岛检测能力始终保持不变。因此，负序电压正反馈系数应根据逆变器实时输出功率确定，而自适应系数环节可以有效地跟踪逆变器实时输出功率对反馈系数作调整。

为简化多机并联运行情况，假设只有 2 台容量相等的逆变器并联运行，每台逆变器容量为 14.52 kW，并联 RLC 负载的额定功率为 29.4 kW（$R_{load}=5\ \Omega$，$L_{load}=6.35\ mH$，$C_{load}=1\,600\ \mu F$），谐振频率为 50 Hz，仿真时长 0.3 s，在 $t=0.1$ s 时孤岛发生，孤岛发生后并网点电压、频率、负序电压变化情况如图 10 所示（图中 u^n_{pcc} 为标幺值）。其中，图 10(a)—10(c)分别是设定 $k_f=0.096\,4$（略小于临界值）时孤岛检测的仿真图，图 10(d)—10(f)分别是采用自适应负序电压正反馈岛检测的仿真图。由图 10(a)—10(c)可知，并网运行时并网点存在一定负序电压分量，孤岛发生后，由于负序电压的反馈系数设定过小，并网点负序电压一直在一个较小值附近波动而无法累积。由图 10(d)—10(f)可知，当反馈系数改为自适应系数后（此时 2 台逆变器的实时负序电压正反馈系数均为 0.1500），孤岛发生时并网点负序电压能持续增大并超过 4%，且孤岛检测成功时，并网点电压和频率均在正常运行范围内，实现了非破坏性无盲区孤岛检测。

当这 2 台逆变器的实时输出功率在 $t=0.2$ s 时变为 20% 额定容量，各台逆变器正反馈系数分别采用 $k_f=0.150\,0$ 和自适应系数（输出功率减小后 2 台逆变器的实时负序电压正反馈系数均为 0.0300）时，逆变器输出的总负序电流如图 11 所示。由图 11 可知，在 $t=0.2$ s 之前，采用 2 种方案时逆变器注入大电网的负序扰动相同；逆变器实时输出功率减小后，采用自适应反馈系数的逆变器注入大电网的负序扰动较小。在大型光伏电站中，并联运行的逆变器台数较多，采用自适应反馈系数后，能有效减小光伏电站实时输出功率减小时光伏电站注入大电网的负序扰动。

此外，电力系统中含大型电动机的负荷在启动过程中会产生电压跌落的暂态过程。该过程会给并网逆变器的孤岛检测能力带来巨大挑战。当并网点的电压幅值降到额定值的 15% 时，要求逆变器具有持续并网工作 625 ms 的低电压穿越能力。电压跌落后，根据式(8)可以求得此时 2 台逆变器并网系统的等效正反馈系数为 2，仍小于并网系统等效正反馈系数的上限 $k_{fmax}=10$。图 12 为并网点电压幅值降到额定值的 15% 时，基于自适应负序电压正反馈的孤岛检测仿真结果（图中 u^n_{pcc} 为标幺值）。在 $t=0.1$ s 时电压跌落，负序电压经过约 2 个周期变化后迅速减小至 0.04 p.u. 以下，判断为伪孤岛，孤岛保护不会误动。



(a) $k_f=0.0964$ 时并网点电压变化

(b) $k_f=0.0964$ 时并网点频率变化

(c) $k_f=0.0964$ 时并网点负序电压变化

(d) 采用自适应系数时并网点电压变化

(e) 采用自适应系数时并网点频率变化

(f) 采用自适应系数时并网点负序电压变化

图 10 孤岛检测仿真结果

Fig.10 Simulative results of islanding detection

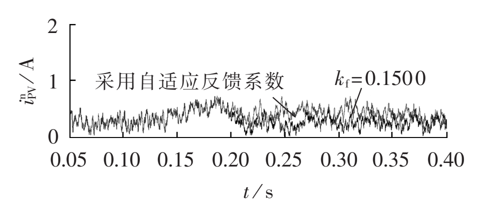
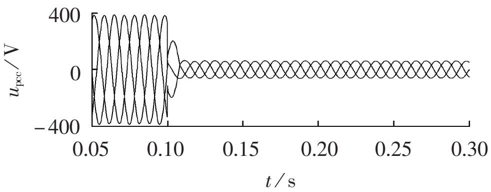
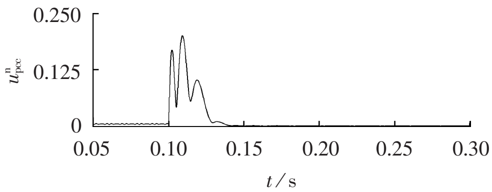


图 11 并网运行时逆变器注入大电网的负序电流

Fig.11 Negative-sequence current injected from grid-connected inverter into grid



(a) 并网点电压变化



(b) 并网点负序电压变化

图 12 电压跌落仿真结果

Fig.12 Simulative waveforms of voltage drop

5 结论

本文推导出负序电压正反馈孤岛检测方法成功检测的边界条件,在负序电压正反馈孤岛检测方法的基础上加入了自适应正反馈系数环节。无论是单台逆变器并网运行,还是多台逆变器并联并网运行,加入自适应正反馈系数后均能有效减小逆变器正常并网运行时注入大电网的负序扰动,孤岛发生后能在规定时间 2 s 内实现孤岛检测。仿真验证的过程中,成功检测到逆变器处于孤岛运行状态时,并网点电压幅值与频率均处于正常运行范围内,实现了无盲区非破坏性检测,能够降低逆变器模式变化过程中的冲击电流,完成无缝变换。

参考文献:

[1] 国家电网公司. 光伏发电站接入电力系统技术规定:GB/T 19964—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2013.

[2] 国家电网公司. 光伏电站接入电网测试规程:Q/GDW 618—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

[3] 赵清林,郭小强,邬伟扬. 光伏发电系统孤岛保护建模与仿真研究[J]. 太阳能学报,2007,28(7):721-726.
ZHAO Qinglin,GUO Xiaoqiang,WU Weiyang. Modeling and simulation for islanding protection of photovoltaic systems[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2007,28(7):721-726.

[4] 刘芙蓉,康勇,段善旭,等. 电压正反馈式孤岛检测方法的边界条件及改进算法[J]. 电工技术学报,2012,27(3):247-251.
LIU Furong,KANG Yong,DUAN Shanxu,et al. Boundary conditions of voltage shift techniques forislanding detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(3):247-251.

[5] LIU F,KANG Y,ZHANG Y,et al. Improved SMS islanding detection method for grid-connected converters[J]. Renewable Power Generation,2010,4(1):36-42.

[6] 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):47-50.
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):47-50.

[7] 刘方锐,余蜜,张宇,等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(12):47-51.
LIU Fangrui,YU Mi,ZHANG Yu,et al. Islanding detection evaluation for active frequency drifting methods in multiple photovoltaic grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(12):47-51.

[8] 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 Fangrui,KANG Yong,ZHANG Yu,et al. Parameter optimization for active frequency drift with positive feedback islanding detection strategy[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2008,27(3):22-25.

[9] 肖龙,杨国华,鲍丽芳,等. 基于改进滑模频率偏移法的光伏孤岛检测研究[J]. 电测与仪表,2012,49(6):52-57.
XIAO Long,YANG Guohua,BAO Lifang,et al. Islanding detection for PV grid-connected system based on improved slip-mode frequency shift[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012,49(6):52-57.

[10] 陈卫民,陈国呈,吴春华,等. 基于分布式并网发电的新型孤岛检测研究[J]. 电工技术学报,2007,22(8):114-118.
CHEN Weimin,CHEN Guocheng,WU Chunhua,et al. Research on a novel islanding detection based on grid-connected distributed generations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(8):114-118.

[11] 刘洋,王明渝,高文祥,等. 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,et al. Research on a novel islanding detection for micro-grid connected inverters [J]. Power System Protection and Control,2012,40(12):146-150.

[12] 凤勇. 基于锁相环的主动移相式微电网孤岛检测技术研究[J]. 华东电力,2014,41(13):2462-2467.
FENG Yong. PLL-based active phase drift method for microgrid islanding detection [J]. East China Electric Power, 2014,41(13):2462-2467.

[13] 丁浩,魏艳君,漆汉宏,等. 基于自适应有功电流扰动的孤岛检测[J]. 电工技术学报,2014,29(8):294-300.
DING Hao,WEI Yanjun,QI Hanhong,et al. A novel islanding detection based on adaptive active current disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(8):294-300.

[14] 陈钢,刘玮,陈苗,等. 负序电流扰动孤岛检测方法在微电网中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(6):154-159.
CHEN Gang,LIU Wei,CHEN Miao,et al. Application of negative-sequence current disturbance based islanding detection method in micro-grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2013, 25(6):154-159.

[15] 崇志强,戴志辉,焦彦军. 基于负序电流注入的光伏并网逆变器孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(24):65-72.
CHONG Zhiqiang,DAI Zhihui,JIAO Yanjun. Islanding detection method based on grid-connected photovoltaic converter and negative sequence current injection [J]. Power System Protection and Control,2014,42(24):65-72.

[16] 郭小强,邬伟扬. 微电网非破坏性无盲区孤岛检测技术[J]. 中国电机工程学报,2009,29(25):7-12

GUO Xiaoqiang,WU Weiyang. Non-devastating islanding detection for micro-grids without non-detection zone[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(25):7-12.

[17] 王晓刚,肖立业. 不平衡情况下基于电压正反馈的孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):104-108.
WANG Xiaogang,XIAO Liye. Islanding detection method based on voltage positive feedback in unbalance condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):104-108.

[18] 孙博,郑建勇,梅军. 基于电压不平衡度正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):121-125.
SUN Bo,ZHENG Jianyong,MEI Jun. Islanding detection based on positive feedback of voltage unbalance factor[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):121-125.

[19] 马静,米超,夏冰阳,等. 基于负序功率正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电工技术学报,2013,28(4):191-195.
MA Jing,MI Chao,XIA Bingyang,et al. A novel islanding detection method based on negative-sequence power positive feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(4):191-195.

[20] 杨滔,王鹿军,张冲,等. 基于无功电流-频率正反馈的孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):193-199.
YANG Tao,WANG Lujun,ZHANG Chong,et al. A novel island detection method based on positive feedback between reactive current and frequency[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(14):193-199.

[21] 钟诚,井天军,杨明皓. 基于周期性无功电流扰动的孤岛检测新方法[J]. 电工技术学报,2014,29(3):270-276.
ZHONG Cheng,JING Tianjun,YANG Minghao. A new islanding detection method with periodic reactive current disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(3):270-276.

[22] 马静,米超,王增平,等. 基于负序电压分配因子的孤岛检测新原理[J]. 电网技术,2012,36(8):239-242
MA Jing,MI Chao,WANG Zengping,et al. A novel islanding detection method based on negative sequence voltage distribution factor[J]. Power System Technology,2012,36(8):239-242.

[23] 梁建钢,金新民,吴学智,等. 基于非特征谐波正反馈的微电网变流器孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(10):24-29.
LIANG Jiangang,JIN Xinmin,WU Xuezhi,et al. An islanding detection method for microgrid converters based on positive feedback of uncharacteristic harmonics[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(10):24-29.

[24] 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.

[25] 朱珂,卢晓惠,于青,等. 基于可控短路技术的系统阻抗测量方法在孤岛检测中的应用[J]. 电力系统自动化,2013,37(2):119-124.
ZHU Ke,LU Xiaohui,YU Qing,et al. A novel method of impedance measurement used in islanding detection based on controllable short-circuit technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(2):119-124.

作者简介:

王 雪

王 雪(1978—),男,河北保定人,讲师,博士,研究方向为电力系统继电保护与控制;

雷胜华(1990—),男,湖北仙桃人,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护与控制(**E-mail**:leishenghua1014@163.com);

胡文平(1968—),男,河北邢台人,高级工程师,博士,主要研究方向为电网分析与计算、电能质量和分布式能源。

Islanding detection based on adaptive positive feedback of negative-sequence voltage

WANG Xue[1],LEI Shenghua[1],HU Wenping[2],ZHAO Ying[1]

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University,Baoding 071003,China;
2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute,Shijiazhuang 050021,China)

Abstract: Due to the positive feedback of negative-sequence voltage,the negative-sequence voltage of PCC (Point of Common Coupling) will increase continuously after the occurrence of islanding,which can be used as a criterion to detect the occurrence of islanding. However,too large feedback coefficient will induce too large injection of negative-sequence disturbance into the inverter while too small feedback coefficient will cause the failure of islanding detection. An improved method of islanding detection based on the adaptive positive feedback of negative-sequence voltage is proposed,which modifies the positive feedback coefficient adaptively according to the real-time output power of inverter. The improved method can effectively reduce the injection of negative-sequence disturbance component into grid when multiple grid-connected inverters are operating in parallel while realize the islanding detection within the prescribed time of 2 s after the occurrence of islanding. Theoretical analysis and simulation results verify its reliability.

Key words: islanding detection; negative-sequence voltage; adaptive feedback coefficient; multiple inverters operating in parallel; negative-sequence disturbance