

基于正切滑模频移法的孤岛检测方法

张凯航^{1,2}, 袁越^{1,2}, 傅质馨^{1,2}, 金鑫^{1,2}, 刘纯³

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098;

3. 中国电力科学研究院 新能源研究所, 北京 100192)

摘要: 在研究传统滑模频移(SMS)孤岛检测法的基础上,使用正切函数代替 SMS 中的正弦函数来设置电流的主动移相角,提出了一种新的正切滑模频移孤岛检测法,并对该方法的参数设定、检测盲区和多机并联运行时的特性进行了量化分析。该方法避免了 SMS 法中稳定状态的发生,显著减小了检测盲区,同时可以减小对电网的负面影响,提高孤岛检测速度,适用于多机并联系统且不受稀释效应影响。仿真结果证明了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 孤岛检测; 相位偏移; 滑模频移法; 滑模控制; 多机并联系统

中图分类号: TM 92

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.011

0 引言

日益增多的分布式发电系统的并网,引起了很多潜在的电网保护问题,难点之一就是孤岛检测问题。孤岛效应是指电网断电时分布式电源仍然向电网传输电能的现象,此时并网逆变器及其本地负载形成一个孤岛。

当电网正常运行时,公共连接点 PCC (Point of Common Coupling) 处的功率为: $P_{\text{load}} = P + \Delta P$, $Q_{\text{load}} = Q + \Delta Q$ 。如果逆变器提供功率与负载的需求功率相匹配,即 $P_{\text{load}} = P$, $Q_{\text{load}} = Q$, 那么当因线路维修或故障而导致网侧断路器跳开时, PCC 电压和频率的变化不大,逆变器将继续向负载供电,形成由光伏并网发电系统和周围负载构成的一个自给供电的孤岛。

现有的孤岛检测方法可以分为被动式与主动式两大类。被动式孤岛检测法主要通过检测 PCC 负载电压的幅值、相位或频率的变化,判断孤岛的发生。被动式检测法主要有过/欠压法^[1]、过/欠频法^[1]、电压谐波检测法^[2]、相位突变法^[3]等,其优点是无需增加任何软硬件资源,不会对电能质量产生影响,但是检测盲区比较大。主动式孤岛检测法通过增加扰动信号来打破原光伏系统与负载之间的功率平衡,将电压或频率推离阈值范围,从而检测出孤岛。该方法可以减小甚至消除检测盲区,但由于添加了扰动信号,所以会对电网电能质量造成一定影响。常用的方法有主动频移法^[4-5]、滑模频移(SMS)法^[6-8]、电流扰动法^[9]、有功/无功功率扰动法等^[10-14]。频移法存在检测盲区,并且给电网引入了谐波。功率(电流)扰动法则由于添加了扰动电流,对光伏系统的

发电效率和输出功率因数产生负面影响。

本文首先分析了传统 SMS 法的原理,在此基础上使用正切函数代替传统 SMS 法中的正弦函数来设置电流的主动移相角,提出了一种新的基于相位偏移的正切 SMS 孤岛检测方法,并对该方法的参数设定、检测盲区和多机并联运行时的特性进行了量化分析。结果表明所提方法较传统 SMS 法显著减小了检测盲区,同时可以减小对电网的负面影响,提高检测速度,适用于多机并联系统且不受稀释效应影响。最后通过建立系统仿真模型,验证了本文方法的有效性和优越性。

1 传统 SMS 法原理分析

SMS 法是一种移相式孤岛检测方法,其机理是通过相位扰动使电压频率发生偏移从而检测出孤岛。下面简单介绍 SMS 法的工作原理。

电网断电后,受负载相位角 ϕ_{load} 影响,逆变器输出电流超前电压的相角 θ_{load} 可表示为^[8]:

$$\theta_{\text{load}} = -\phi_{\text{load}} = \arctan \left[R \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \quad (1)$$

其中, R 为负载电阻, C 为负载电容, L 为负载电感, ω 为 PCC 所测量到的负载电压角频率。

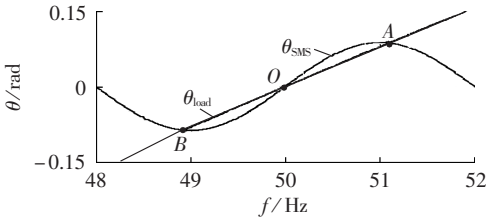
SMS 法将电流的主动移相角 θ_{SMS} 设置为 PCC 负载电压频率 f 的正弦函数:

$$\theta_{\text{SMS}} = \frac{2\pi}{360} \theta_m \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g} \right) \quad (2)$$

其中, θ_m 为最大移相角, f_m 为产生最大移相角时的系统频率, f_g 为电网额定频率。

θ_{load} 和 θ_{SMS} 随频率变化趋势如图 1 所示。

图 1 中,电网刚断电时,系统工作在 O 点。 O 点为不稳定运行点,当系统频率出现微小扰动时,若 $\theta_{\text{SMS}} - \theta_{\text{load}} > 0$, 锁相环检测到的电压频率增大,直至系

图 1 θ_{load} 、 θ_{SMS} 与频率变化曲线Fig.1 Relationship between $\theta_{\text{load}}/\theta_{\text{SMS}}$ and PCC voltage frequency

统到达稳定运行点 A;若 $\theta_{\text{SMS}} - \theta_{\text{load}} < 0$, 锁相环检测到的电压频率减小,直至系统到达稳定运行点 B。由此可以总结 SMS 法成功检测出孤岛的充要条件为^[8]: ①断网后 PCC 频率持续单向变化;②系统重新达到稳定状态时的工作点频率在阈值 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 之外。即:

$$\begin{cases} \theta_{\text{SMS}} - \theta_{\text{load}} > 0 & f_g < f \leq f_{\max} \\ \theta_{\text{SMS}} - \theta_{\text{load}} < 0 & f_{\min} \leq f < f_g \end{cases} \quad (3)$$

SMS 法具有简单易实现、孤岛识别率高等优点,但存在影响电能质量、对高品质因数负载存在检测盲区等缺陷^[8]。

2 正切 SMS 法理论分析

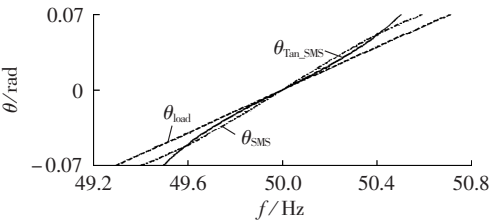
2.1 正切 SMS 法原理

在对传统 SMS 法研究的基础上,本文提出一种新的基于相位偏移的检测方法——正切 SMS 法,即 Tan_SMS 法。利用正切函数替代传统 SMS 法中的正弦函数表达电流的主动移相角 $\theta_{\text{Tan_SMS}}$ 。

$$\theta_{\text{Tan_SMS}} = k \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g}\right) \quad (4)$$

其中, k 为移相增益。

θ_{load} 、 θ_{SMS} 和 $\theta_{\text{Tan_SMS}}$ 随频率变化趋势如图 2 所示。

图 2 θ_{load} 、 θ_{SMS} 和 $\theta_{\text{Tan_SMS}}$ 与频率变化曲线Fig.2 Relationship between $\theta_{\text{load}}/\theta_{\text{SMS}}/\theta_{\text{Tan_SMS}}$ and PCC voltage frequency

由图 2 可以看出,当设定 Tan_SMS 法中的参数 $k = 0.07$, $f_m - f_g = 1$ Hz 时, $\theta_{\text{Tan_SMS}}$ 替代 θ_{SMS} 满足式(3),对品质因数 $Q_f = 2.5$ 的负载可以成功检测出孤岛。对于传统 SMS 法, $\theta_m = 5$ rad, $f_m - f_g = 1$ Hz 是较为常用的一组参数。

Tan_SMS 法与 SMS 法实现孤岛检测的本质是相同的。Tan_SMS 法较 SMS 法具有一定优势是由其曲线特性所决定的。对图 2 中 $\theta_{\text{Tan_SMS}}$ 和 θ_{SMS} 曲线进行比较,可得如下结论。

a. $\theta_{\text{Tan_SMS}}$ 是单调递增函数,与 θ_{load} 只在 $f - f_g = 0$ 时有交点。因此避免了传统 SMS 法中因重新到达稳定状态而导致检测失败的情况。

b. $\theta_{\text{Tan_SMS}}$ 单调递增的速率大于 θ_{load} 。随着频率偏移增大,相角差 $|\theta_{\text{Tan_SMS}} - \theta_{\text{load}}|$ 迅速增大,加速了频率偏移,从而提高了检测速度。

c. 当频率偏移较小时, $\theta_{\text{Tan_SMS}}$ 对应的相位偏移相比 θ_{SMS} 较小。因此当系统正常运行、频率偏移较小时, Tan_SMS 法引起的相位扰动比传统 SMS 法小。当频率偏移较大时,系统可能出现了故障,此时 $\theta_{\text{Tan_SMS}}$ 对应的相位偏移相比 θ_{SMS} 较大,可以更迅速地将频率偏离阈值,快速触发孤岛保护。

2.2 Tan_SMS 法参数设定

根据 IEEE Std929—2000^[15]规定的孤岛运行后并网逆变器与电网断开最大时间限制,结合国家电网 2011 年 5 月颁布的企业标准 Q/GDW617—2011^[16],得到本文采用的孤岛检测电压和频率的指标要求,如表 1 所示。其中, U_N 表示电网额定电压, f_g 表示额定频率。

表 1 孤岛检测时间限制

Tab.1 Time limit of islanding detection

电压范围	频率范围	最大分闸时间
$U \leq 0.5U_N$	$f = f_g$	0.1 s
$0.5U_N < U < 0.88U_N$	$f = f_g$	0.2 s
$0.88U_N \leq U \leq 1.10U_N$	$f = f_g$	正常运行
$1.10U_N < U < 1.37U_N$	$f = f_g$	2.0 s
$U \geq 1.37U_N$	$f = f_g$	0.05 s
$U = U_N$	$f < f_g - 0.7$ Hz	0.1 s
$U = U_N$	$f > f_g + 0.5$ Hz	0.1 s

文献[8]中定义:

$$C_{\text{res}} = 1 / (L\omega_0^2) \quad (5)$$

$$C = C_{\text{norm}} C_{\text{res}} = (1 + \Delta C) C_{\text{res}} \quad (6)$$

$$Q_{f0} = R / (\omega_0 L) \quad (7)$$

其中, C_{res} 为谐振电容; C_{norm} 为负载电容与谐振电容之比; ω_0 为电网额定角频率; Q_{f0} 为文献[8]定义的参数,当 ω_0 等于负载谐振频率时, Q_{f0} 与品质因数 Q_f 相等。

由式(1)、(5)—(7)可得:

$$\theta_{\text{load}} = \arctan\left\{Q_{f0} \left[\frac{2(f - f_g)}{f_g} + \Delta C \right]\right\} \quad (8)$$

结合式(3)、(4)、(8)可知,为了成功检测出孤岛,必须满足条件:

$$\left| \frac{\partial \theta_{\text{Tan_SMS}}}{\partial (f - f_g)} \right|_{f=f_g, \Delta C=0} > \left| \frac{\partial \theta_{\text{load}}}{\partial (f - f_g)} \right|_{f=f_g, \Delta C=0} \quad (9)$$

结合本文提出方法,由式(4)、(8)、(9)经化简得:

$$k \frac{\pi}{2(f_m - f_g)} > \frac{2Q_{f0}}{f_g} \quad (10)$$

与传统 SMS 法中的参数 θ_m 相似, Tan_SMS 法

中 k 越大,检测速度就越快,检测盲区也越小,但同时引入的相位扰动则越大^[4]。因此在能保证孤岛检测成功的前提下, k 应尽量取较小值。结合表 1 中的指标要求, $f_m - f_g$ 可取 1 Hz, $Q_{f0} = 2.5$, $f_g = 50$ Hz。由式(10)可得参数 k 的取值条件为 $k > 0.0636$ 。即当满足 $k > 0.0636$ 时, Tan_SMS 法对任意品质因数小于 2.5 的负载都可以检测出孤岛。

2.3 Tan_SMS 法的盲区分析

式(3)给出的 SMS 法孤岛检测成功的条件对于 Tan_SMS 法同样具有适用性。本文采用 $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$ 坐标系^[8],结合式(3)、(4)、(8)可得 Tan_SMS 法的盲区:

$$\frac{\tan(\theta_{\text{Tan_SMS}}(\Delta f_1))}{Q_{f0}} - \frac{2\Delta f_1}{f_g} + 1 < C_{\text{norm}} < \frac{\tan(-\theta_{\text{Tan_SMS}}(\Delta f_2))}{Q_{f0}} + \frac{2\Delta f_2}{f_g} + 1 \quad (11)$$

其中, $\Delta f_1 = f - f_g \in (0, 0.5]$ Hz, $\Delta f_2 = f - f_g \in [-0.7, 0)$ Hz。

对于任何 Δf_1 、 Δf_2 ,满足式(11)的所有点的集合即构成了 $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$ 坐标系下 Tan_SMS 法的检测盲区。值得注意的是,在绘制 Tan_SMS 法的检测盲区时,由于 C_{norm} 不是频率的单值函数,因此不能像传统 SMS 法一样直接代入 $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ 确定盲区的上下界。可以通过将不同的 Δf_1 、 Δf_2 的组合代入式(11)得到不同频率偏移下 Tan_SMS 法的检测盲区,其盲区边界的包络线即为 Tan_SMS 法盲区边界,如图 3 所示。

图中,1 代表 $\theta_{\text{SMS}} = \frac{2\pi}{360} 5 \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{f-f_g}{1}\right)$, 2 代表 $\theta_{\text{APS}} = 0.14(f-f_g)$, 3 代表 $\theta_{\text{Tan_SMS}} = 0.065 \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f-f_g}{1}\right)$, 4 代表 $\theta_{\text{Tan_SMS}} = 0.09 \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f-f_g}{1}\right)$ 。

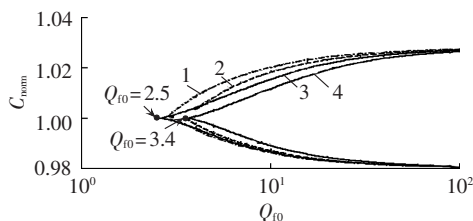


图 3 不同孤岛检测法的检测盲区

Fig.3 Detection dead-zone of different islanding detection methods

由图 3 可以看出,当 $k=0.065$ 时, $Q_f=2.5$ 的负载恰好在曲线 3 所包围的盲区之外。与之前分析所得 $k > 0.0636$ 结论相符合。当 $k=0.09$, Tan_SMS 法与曲线 1、2 所代表的 SMS 法、自动相移(APS)法在频率偏移小于 ± 0.1 Hz 时,对逆变器输出电流的相位扰动大小几乎相同。本文在 3 种移相法对电流扰动程度相同的条件下,对它们的检测盲区大小进行比较。

为了对其盲区大小进行定量比较,本文定义盲区面积 S_{NDZ} :

$$S_{\text{NDZ}} = \int (C_{\text{norm_max}}(Q_{f0}) - C_{\text{norm_min}}(Q_{f0})) dQ_{f0} \quad (12)$$

其中, $C_{\text{norm_max}}(Q_{f0})$ 、 $C_{\text{norm_min}}(Q_{f0})$ 分别表示检测盲区的上、下界关于 Q_{f0} 的函数。

根据式(12)可计算出 SMS 法、APS 法和 Tan_SMS 法的检测盲区面积分别为 4.1639、4.0650 和 3.7819。可以看出,在对电流施加相位扰动程度相同的条件下,单机系统 Tan_SMS 法的检测盲区面积 S_{NDZ} 明显小于 SMS 法,较之减小了 9.8%,证明了 Tan_SMS 法能显著减小检测盲区。由于 Tan_SMS 法避免了稳态状态的发生,只要断网后 PCC 频率持续单向变化就能成功检测出孤岛。对于某些 SMS 法检测失败的负载, Tan_SMS 法依然可以成功检测出孤岛。

3 Tan_SMS 法在多机并联系统中的工作特性分析

3.1 Tan_SMS 法在多机并联系统中的工作特性

为了便于分析,本文选取 2 台光伏逆变器并联的模型进行研究^[7]。总的逆变器输出电流在忽略谐波时可表示为 i :

$$i = i_{\text{Tan_SMS1}} + i_{\text{Tan_SMS2}} \quad (13)$$

设逆变器 1 输出电流幅值为逆变器 2 的 m 倍,将式(4)代入式(13)可得:

$$i = I\sqrt{1+m^2+2m\cos(\theta_{\text{Tan_SMS1}}-\theta_{\text{Tan_SMS2}})} \times \sin(2\pi f + \gamma) \quad (14)$$

$$\gamma = \arctan \frac{m \sin \theta_{\text{Tan_SMS1}} + \sin \theta_{\text{Tan_SMS2}}}{m \cos \theta_{\text{Tan_SMS1}} + \cos \theta_{\text{Tan_SMS2}}} \quad (15)$$

其中, I 为逆变器输出电流。

由式(15)可知:

$$\min(\theta_{\text{Tan_SMS1}}, \theta_{\text{Tan_SMS2}}) < \gamma < \max(\theta_{\text{Tan_SMS1}}, \theta_{\text{Tan_SMS2}}) \quad (16)$$

由式(16)可知,双机并联系统输出电流总移相角介于 2 台逆变器各自移相角之间。因此,只要单台逆变器运行时能有效检测出孤岛,双机并联后也同样可以准确检测出孤岛,且检测效率介于 2 台逆变器各自单独运行的检测效率之间。

3.2 稀释效应对 Tan_SMS 法工作特性的影响

在实际应用中,各逆变器进行频率测量的传感器可能存在误差 Δf_c ,若断网时 2 台逆变器测量误差幅值相同极性相反,且电网实际频率为电网额定频率,即 $f_1 = f_g + \Delta f_c$, $f_2 = f_g - \Delta f_c$,则 2 台逆变器可能产生相反的相位扰动相互抵消,导致孤岛检测失败^[5]。这就是所谓的稀释效应,是孤岛检测较恶劣的情况。下文主要研究当 2 台逆变器在频率检测环节存在误差时, Tan_SMS 法的多机孤岛检测性能。为了简化分析,采用相同型号的 2 台逆变器,输出电流幅值相等。此时逆变器总输出电流等效移相角可表示为:

$$\theta_{eq} = \frac{\theta_{\tan_SMS1} + \theta_{\tan_SMS2}}{2} \tag{17}$$

经变换得:

$$\theta_{eq} = k_{eq} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g}\right) \tag{18}$$

$$k_{eq} = k \frac{1 + \tan^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{\Delta f_e}{f_m - f_g}\right)}{1 - \tan^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g}\right) \tan^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{\Delta f_e}{f_m - f_g}\right)} \tag{19}$$

由式(19)可知, k_{eq} 恒大于 k 。当频率测量误差 Δf_e 较小时, $k_{eq} \approx k$, 相移增益几乎不变, 不改变检测盲区大小, 因此稀释效应不会影响 Tan_SMS 法的性能。若增大频率测量误差 Δf_e , 移相增益 k_{eq} 也随之增大, 而移相增益越大, 则检测盲区越小。Tan_SMS 法对应不同频率检测误差时的盲区变换如图 4 所示。由图 4 可以看出, 当频率误差较小时, 盲区几乎不发生变化。随着频率误差的增大, Tan_SMS 法的检测盲区逐渐减小。

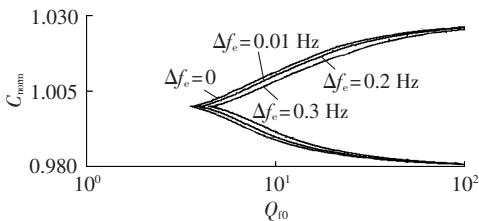


图 4 存在频率检测误差时 Tan_SMS 法 ($k=0.09$, $f_m-f_g=1\text{ Hz}$) 的检测盲区

Fig.4 Detection dead-zone of Tan_SMS method ($k=0.09$, $f_m-f_g=1\text{ Hz}$) when there is frequency measuring error

利用式(12), 同样可以量化地比较传统 SMS 法与 Tan_SMS 法检测盲区大小受频率检测误差的影响情况, 比较结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 在当频率误差较小时, SMS 法的检测盲区同样不受影响。随着频率误差的增大, 其检测盲区逐渐增大, 而 Tan_SMS 法的检测盲区反而有所减小。由此可知, Tan_SMS 在面对存在频率检测误差的多机并系统时孤岛检测性能较传统 SMS 法更佳。在实际应用中, 测量仪器所造成的频率检测误差通常小于 $\pm 0.01\text{ Hz}$ ^[17]。因此可认为, Tan_SMS 法多机运行时的孤岛检

表 2 存在频率检测误差时 Tan_SMS 法 ($k=0.09$, $f_m-f_g=1\text{ Hz}$) 和 SMS 法 ($\theta_m=5\text{ rad}$, $f_m-f_g=1\text{ Hz}$) 的盲区面积

Tab.2 Detection dead-zone of Tan_SMS method ($k=0.09$, $f_m-f_g=1\text{ Hz}$) and SMS method ($\theta_m=5\text{ rad}$, $f_m-f_g=1\text{ Hz}$), when there is frequency measuring error

$\Delta f_e/\text{Hz}$	S_{NEZ}	
	SMS	Tan_SMS
0	4.163 9	3.781 9
0.01	4.163 9	3.781 7
0.20	4.188 2	3.694 7
0.30	4.218 6	3.356 4

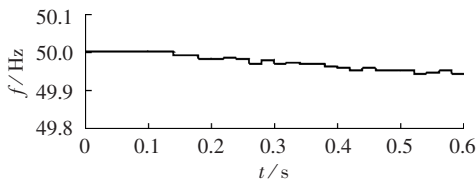
测性能不受频率检测误差影响。

4 仿真验证

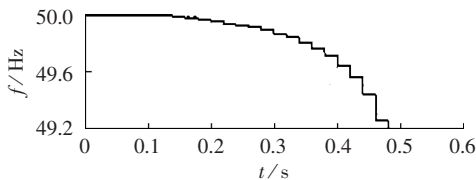
本文在 MATLAB/Simulink 环境下对上述方法进行仿真研究。孤岛检测中较容易失败的情况: ①逆变器输出功率和负载功率匹配; ②RLC 谐振频率和电网频率相等; ③高品质因数, 测试时通常选取品质因数 $Q_f=2.5$ 。

4.1 单机系统的孤岛检测

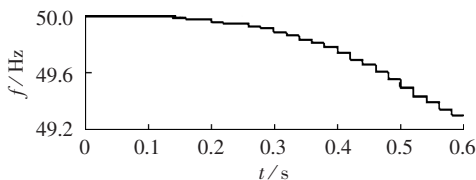
根据最差情况选取电网电压 $220\text{ V}/50\text{ Hz}$; 光伏系统额定输出功率 10 kW ; 逆变器输出有功电流 $I_d=20\text{ A}$; 直流母线电压 $U_{dc}=700\text{ V}$; RLC 负载分别为 $R=15.55\text{ }\Omega$, $L=19.8\text{ mH}$, $C=511.75\text{ }\mu\text{F}$, 负载谐振频率为 50 Hz , 品质因数 $Q_f=2.5$ 。设电网在 $t=0.1\text{ s}$ 时刻发生故障, 断路器断开, 发生孤岛效应, 算法在 PCC 电压过零上升沿更新电压频率 f 。仿真结果如图 5 所示。



(a) Tan_SMS ($k=0.06$, $f_m-f_g=1\text{ Hz}$)



(b) Tan_SMS ($k=0.09$, $f_m-f_g=1\text{ Hz}$)



(c) SMS ($\theta_m=5\text{ rad}$, $f_m-f_g=1\text{ Hz}$)

图 5 $Q_f=2.5$ 时单机系统孤岛检测情况

Fig.5 Islanding detection for single-inverter system with $Q_f=2.5$

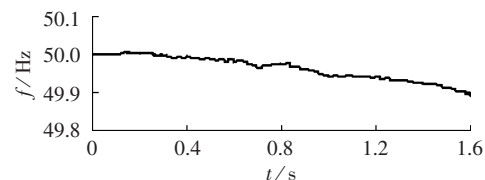
由图 5(a)、(b)可看出, 当 $k=0.06$ 时, 断网后, 系统频率基本不发生偏移, 稳定在 49.95 Hz , 孤岛检测失败。当 $k=0.09$ 时, PCC 频率迅速下降至 49.3 Hz , 成功检测出孤岛。仿真结果验证了之前参数设定中 $k>0.0636$ 的结论。

比较图 5(b)、(c)可以发现, 对于相同的系统, 采用 Tan_SMS 法时, 断网后, PCC 频率的偏移明显呈加速趋势, 这样就避免了传统 SMS 法稳定运行状态的发生, 且频率偏移比采用 SMS 法更快。从发生故

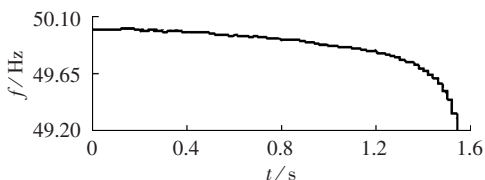
障到成功检测出孤岛,传统 SMS 法需要 0.48 s,而 Tan_SMS 法仅需要 0.36 s,由此可见,Tan_SMS 法较传统 SMS 法明显提高了检测速度。

为了比较 Tan_SMS 法与 SMS 法孤岛检测能力,本文对另一组品质因数较高的 RLC 负载进行了仿真。负载参数 $R=15.55\ \Omega$, $L=14.5\ \text{mH}$, $C=698.28\ \mu\text{F}$, 负载谐振频率为 50 Hz,品质因数 $Q_f=3.4$ 。电网在 $t=0.1\ \text{s}$ 时刻发生故障,断路器断开。仿真结果如图 6 所示。

由图 6(a)、(b)可看出,对于 $Q_f=3.4$ 的负载,采用 SMS 法时,断网后,频率偏移很小,孤岛检测失败。采用 Tan_SMS 法时,经过 1.38 s PCC 频率下降至 49.3 Hz,仍然可以成功检测出孤岛,与图 3 相符。由此可知,在对相位扰动程度相同的情况下,针对品质因数较高的负载,Tan_SMS 法比 SMS 法更有效。



(a) SMS ($\theta_m=5\ \text{rad}$, $f_m-f_g=1\ \text{Hz}$)



(b) Tan_SMS ($k=0.09$, $f_m-f_g=1\ \text{Hz}$)

图 6 $Q_f=3.4$ 时单机系统孤岛检测情况
Fig.6 Islanding detection for single-inverter system with $Q_f=3.4$

4.2 双机系统的孤岛检测

双机并联系统孤岛检测结构如图 7 所示,2 台逆变器均采用 Tan_SMS 法,逆变器 1 参数为 $k=0.07$, $f_m-f_g=1\ \text{Hz}$;逆变器参数为 $k=0.09$, $f_m-f_g=1\ \text{Hz}$ 。依照前文结论,2 台逆变器单独运行时,都可以成功检测出孤岛。

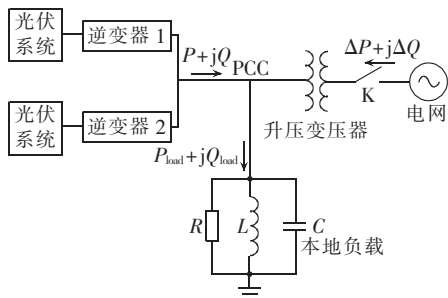


图 7 双机系统孤岛检测结构图
Fig.7 Frame of islanding detection for dual-inverter system

逆变器 1 输出电流占总输出电流之间的百分比 n 分别取 0.9、0.5、0.1。负载参数与图 5 单机系统相同。电网在 $t=0.1\ \text{s}$ 时刻发生故障,仿真结果见图 8。

由图 8 可以看出,当 2 台逆变器单独运行均可成功检测出孤岛时,对于双机并联后也同样可以准确检测出孤岛,且检测效率介于 2 台逆变器各自单独运行的效率之间。由于逆变器 2 采用的算法参数检测效率较高,随着逆变器 2 输出电流占总输出电流比重的增加,系统整体孤岛检测效率也逐渐提高。仿真结果验证了前文所得结论。

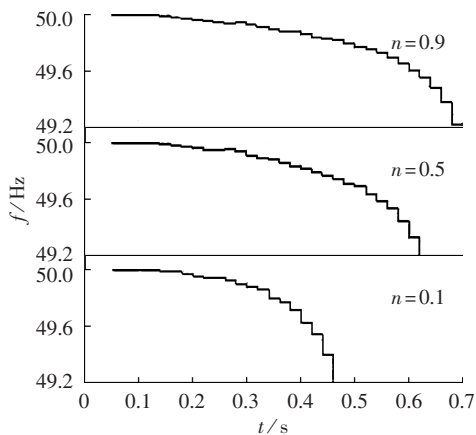


图 8 $Q_f=2.5$ 时双机系统孤岛检测情况
Fig.8 Islanding detection for dual-inverter system with $Q_f=2.5$

为了验证逆变器频率检测误差对 Tan_SMS 法孤岛检测性能的影响,在上述双机系统 2 台逆变器的检测频率分别引入一个微小误差 $\pm 0.01\ \text{Hz}$ 。2 台逆变器输出电流分别占总并网电流的 50%。算法参数采用 $k=0.09$, $f_m-f_g=1\ \text{Hz}$ 。电网在 $t=0.1\ \text{s}$ 时刻发生故障,仿真结果如图 9 所示。

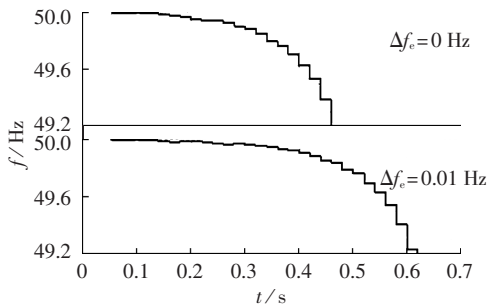


图 9 $Q_f=2.5$ 且存在频率检测误差时双机系统孤岛检测情况

Fig.9 Islanding detection for dual-inverter system with $Q_f=2.5$, when there is frequency measuring error

由图 9 可见,引入误差后,系统同样可以成功检测出孤岛,频率检测误差不会影响孤岛检测能力。证明 Tan_SMS 法不受稀释效应的影响,对双机并联系统有良好的适用性。

5 结论

本文针对传统 SMS 孤岛检测法的缺陷,利用正切函数替代传统 SMS 法的正弦函数表达电流主动移相角,提出了 Tan_SMS 孤岛检测法。该方法利用频率与移相角的关系,使频率偏离额定值后单向偏移,最终偏离阈值触发孤岛保护。在 MATLAB/Simulink 环境下进行了仿真验证。通过理论及对仿真结果的分析得出以下结论:

a. Tan_SMS 法与传统 SMS 法同样具有简单易实现、孤岛识别率高等优点;

b. 与传统 SMS 法相比,Tan_SMS 法避免了 SMS 法中稳定状态的出现,具有对电网相位扰动较小、检测速度较快等优势;

c. 与 SMS 法、APS 法相比,Tan_SMS 法明显减小了检测盲区;

d. 对于双机并联系统,Tan_SMS 法同样具有适用性,并且孤岛检测性能不受频率检测误差影响。

参考文献:

- [1] 郭小强,赵清林,郭伟扬. 光伏并网发电系统孤岛检测技术[J]. 电工技术学报,2007,22(4):157-162.
- [2] 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.
- [3] MAHAT P,ZHE C,BAK-JENSEN B. Review of islanding detection methods for distributed generation[C]//Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing,China:IEEE,2008:2743-2748.
- [4] 袁玲,郑建勇,张先飞. 光伏发电并网系统孤岛检测方法的分析与改进[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):72-75.
- [5] 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.
- [6] 侯梅毅,高厚磊,刘炳旭,等. 基于相位偏移的孤岛检测新方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):22-26.
- [7] 刘方锐,段善旭,康勇,等. 多机光伏并网逆变器的孤岛检测技术[J]. 电工技术学报,2010,25(1):167-171.
- [8] 刘芙蓉. 并网型户用光伏系统的孤岛检测技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
- [9] 任碧莹,孙向东,钟彦儒,等. 用于单相分布式发电系统孤岛检测的新型电流扰动方法[J]. 电工技术学报,2009,24(7):157-163.
- [10] 杨秋霞,赵清林,郭小强. 三相光伏并网逆变器电流扰动孤岛检测建模及分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(4):45-49.
- [11] 任碧莹,钟彦儒,孙向东,等. 基于周期交替电流扰动的孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(19):81-84.
- [12] 张纯江,郭忠南,孟慧英,等. 主动电流扰动法在并网发电系统孤岛检测中的应用[J]. 电工技术学报,2007,22(7):176-180.
- [13] HESARI S A S,HAMZEH M,TOOBAK H. Performance assessment of an impedance based islanding detection method in a distribution network with multiple PV inverters[C]//2011 International Conference on Power and Energy Systems(ICPS). Chennai,India:IEEE,2011:1-6.
- [14] 张俊. 基于间歇性双边无功功率扰动的三相并网逆变器孤岛检测研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [15] IEEE Standards Coordinating Committee. IEEE Std929-2000 IEEE Recommended practice for utility interface of PhotoVoltaic (PV) systems[S]. New York,USA:IEEE,2000.
- [16] 国家电网公司. Q/GDW617—2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [17] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T15945—2008 电能质量——电力系统频率偏差[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [18] 应展锋,陈运运,田亚生,等. 基于抗干扰六占测频法的主动频移孤岛检测[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):72-76.
- [19] 贺眉眉,李华强,陈静,等. 基于离散小波变换的分布式发电孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):103-108.

HE Meimei, LI Huaqiang, CHEN Jing, et al. Islanding detection based on discrete wavelet transform for distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 103-108.

[20] 李军, 黄学良, 陈小虎, 等. 基于双重判据的微电网快速孤岛检测技术[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 38-42, 56.

LI Jun, HUANG Xueliang, CHEN Xiaohu, et al. Detection of islanded microgrid based on double criterions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 38-42, 56.

[21] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T19939—2005 光伏系统并网技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

作者简介:

张凯航(1988-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为并网光伏发电系统(E-mail: triumph_zhang@hotmail.com);

袁 越(1966-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、可再生能源发电系统、智能电网与微网技术(E-mail: yyuan@hhu.edu.cn);

傅质馨(1983-), 女, 江苏徐州人, 讲师, 博士后, 研究方向为智能电网、可再生能源发电技术(E-mail: zhixinfu@hhu.edu.cn)。

Islanding detection based on tangent sliding mode frequency shift method

ZHANG Kaihang^{1,2}, YUAN Yue^{1,2}, FU Zhixin^{1,2}, JIN Xin^{1,2}, LIU Chun³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Renewable Energy Department,

China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Based on the study of SMS(Sliding Mode frequency Shift) islanding detection method, an improved one is proposed, which applies the tangent function instead of the sinusoidal function used in SMS to express the phase-shifted angle of current. Its parameter setting, detection dead-zone and multi-inverter operating performance are analyzed quantitatively. Suitable for grid-connected multi-inverter system and without dilution effect, it avoids the stable state happened in SMS method, reduces the detection dead-zone, decreases the negative impact on grid and increases islanding detection efficiency. Simulative results show its effectiveness and superiority.

Key words: islanding detection; phase shift; sliding mode frequency shift method; sliding mode control; multi-inverter system

(上接第 50 页 continued from page 50)

Generation-side time-of-use price considering forecast error of water-inflow for hydro power

WANG Rui^{1,2}, CHENG Yu¹, ZHANG Lijuan¹, GUO Haifeng²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: The optimization models of TOU(Time-Of-Use) price at generation side are mostly based on the precondition that the annual power generation of each unit is roughly equal to its annual contract, which is hardly satisfied in hydro-thermal power system due to the uncertainty of water-inflow. The relationship between the TOU price and the distribution of hydro power deviation is analyzed and it is concluded that the price difference between hydro power and thermal power is the key factor affecting the distribution of power deviation, according to which and based on the existing TOU optimization models, an improved optimization model suitable for hydro-thermal power system is built to match the maximized social benefits with the maximized social benefits when the actual and predicted water-inflows are different, which takes the minimum energy consumption as its objective and establishes the check conditions to represent the price difference between hydro power and thermal power for different periods. A calculation example is given to verify its validity.

Key words: electric power generation; time-of-use price; hydroelectric power; water-inflow; deviation power; social benefit; optimization; models