

文章编号: 0254-0096(2020)09-0191-07

## 基于 $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$ 坐标系的 AFD 法盲区分析

李志军, 孙 乐, 徐 铎, 王亚楠, 张鸿鹏, 安 平

(河北工业大学控制科学与工程学院, 天津 300130)

**摘 要:** 孤岛检测盲区通常用来评价孤岛检测算法的优劣, 准确合理的描述孤岛检测盲区可有效地反映孤岛检测方法的应用范围。不同的负载需要不同的算法进行相应检测, 然而负载的多样性使得盲区描述变得困难。针对这一问题, 该文首先对孤岛检测方法检测盲区及其特点进行介绍, 在此基础上利用  $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$  坐标系对主动移频式孤岛检测法的盲区进行理论分析, 并进行仿真实验验证。该坐标系以负载品质因数和负载标注化电容为横纵坐标, 适用于主被动孤岛检测, 克服传统孤岛检测盲区图不能直观反映负载与盲区的对应问题。理论分析和仿真结果表明, 该坐标系在实际应用中能够有效地反映出孤岛检测算法的盲区分布范围。

**关键词:** 孤岛检测; 并网光伏系统; 主动移频; 检测盲区;  $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$  坐标系

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

## 0 引 言

孤岛检测是分布式并网发电系统中不可缺少的一环, 它是指在电网因故障突然停止供电后, 分布式并网发电系统能及时检测出电网的断网状态, 并停止向失压的电网供电。孤岛检测的<sup>[1]</sup>有被动式孤岛检测和主动式孤岛检测 2 种方法, 其中被动法主要有过/欠频法、过/欠压法、电压相位突变检测法、电压谐波检测法以及频率变化率检测法等; 主动法主要有频率偏移法、电流复制扰动法以及滑动频率偏移法等。当进行孤岛检测时, 随着负载发生变化可能会出现一些特殊负载组合, 导致检测失败, 这些负载组合区被称为检测盲区<sup>[2]</sup> (non-detection zone, NDZ)。若孤岛不能被及时有效检测出来, 则孤岛效应可能会给电气设备以及维护人员带来巨大的伤害, 因此孤岛检测在用户侧分布式光伏发电系统中是不可缺少的。通过对孤岛检测盲区进行讨论和理论分析, 可清楚地知道孤岛检测算法的适用范围, 发现影响检测性能的因素, 还能对不同检测算法的检测效果进行比较, 改善孤岛检测技术的性能, 提高电网运行安全性和可靠性。

孤岛检测盲区的描述有多种方法。功率失配区间法<sup>[3]</sup> (基于  $\Delta P \times \Delta Q$  坐标系) 简单实用, 但是由于不匹配

功率的大小  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  反映的仅为电网跳闸前后系统中功率流的变化情况, 因此只适用于被动式孤岛检测方法; 负载空间平面法<sup>[4]</sup> (基于  $L \times C_{\text{norm}}$  坐标系) 以具体的负载参数为横纵坐标, 可用于评估主动式孤岛检测方法盲区分布, 但该坐标系下的评估方法忽略有功负载的变化影响, 因此也不能准确地反映盲区分布。基于  $Q_f \times f_{\text{res}}$  坐标系<sup>[5]</sup> 的盲区描述方法其横坐标为负载品质因数, 纵坐标为负载谐振频率, 该坐标系可直观反映主被动盲区的分布情况, 但其横纵坐标存在耦合关系, 不能直观地反映 NDZ 和负载参数的关系。为解决坐标耦合问题, 文献[6-8]分别采用了基于  $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$  坐标系对检测盲区方法进行验证, 但并未对基于  $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$  坐标系方法进行理论分析和讨论。

鉴于主动移频式孤岛检测法 (active frequency drift, AFD)<sup>[9-10]</sup> 是主动式孤岛检测方法中最常用的方法, 本文利用  $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$  坐标系对 AFD 孤岛检测法的盲区进行理论分析, 并采用基于  $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$  坐标系的 NDZ 分析方法对 AFD 进行盲区描述并进行仿真实验验证。

## 1 AFD 法的基本原理

对于并网电流型逆变器光伏发电系统有:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

收稿日期: 2018-04-02

基金项目: 河北省科技支撑计划(15212105D)

通信作者: 李志军(1964—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电能质量、光伏并网及电力系统稳定方面的研究。zhijun\_li@263.net

式中,  $i(t)$  ——逆变器输出电流;  $I_m$  ——输出电流的幅值;  $\omega$  ——输出电流的角频率;  $\phi$  ——输出电流的初始相位。

图 1 为光伏并网发电系统孤岛检测等效模型图, 当断路器  $S_1$  和  $S_2$  都闭合时, 系统处于并网发电状态, 此时并网系统向公共连接点流入的功率为  $P+jQ$ ; 负载得到的功率为  $P_{load}+jQ_{load}$ ; 电网提供的功率为  $\Delta P+\Delta jQ$ , 于是有:

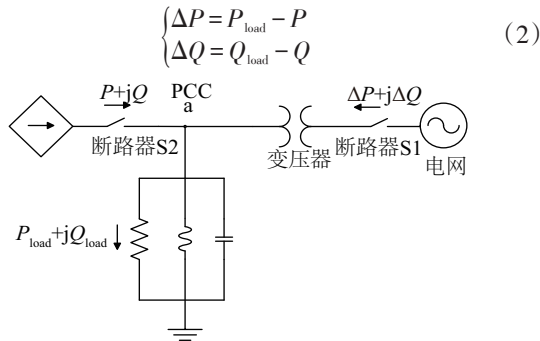


图 1 孤岛检测系统等效模型

Fig. 1 Equivalent model of islanding detection

AFD 法其原理是通过并网光伏系统向电网注入略微有点变形的电流, 使得在断网后逆变器输出电压的频率会形成一个连续增大或减小的趋势。其工作原理如图 2 所示, 锁相环 (PLL) 控制逆变器输出电流  $i_{inv}$  在每个周期的起始时刻与公共连接点 (PCC) 的电压  $u_{pcc}$  同相位, 保持  $i_{inv}$  前半部分波形的频率略微大于  $u_{pcc}$  的频率, 当到达 0 点后, 保持逆变器输出电流为 0, 直到  $u_{pcc}$  到达 0 点。将电流死区时间与 1/2 倍的电网周期的比值定义为截断系数<sup>[13]</sup>, 其公式为:

$$cf = \frac{t_z}{T/2} \quad (3)$$

式中,  $t_z$  ——电流波形保持为零的时间;  $T$  —— $u_{pcc}$  的周期。

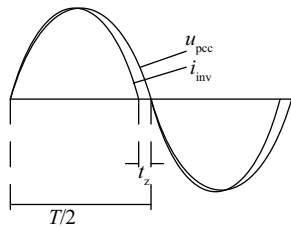


图 2 AFD 法原理图

Fig. 2 Principle of AFD

当并网运行时,  $u_{pcc}$  的频率不会改变, 逆变器的输出电流  $i_{inv}$  的基波分量超前  $u_{pcc}$  波形的相位为:

$$\theta_{AFD} = \frac{t_z/2}{T} \cdot 2\pi = \frac{t_z}{T} \cdot \pi = \frac{cf}{2} \pi \quad (4)$$

式中,  $\theta_{AFD}$  ——频率偏移角。

当孤岛发生后, PCC 电压的频率脱离大电网的钳制, 由  $i_{inv}$  和负载共同决定。假设负载为纯阻性, 在逆变器输出电流的影响下, PCC 电压的波形与  $i_{inv}$  同频同相。给定一个固定的  $cf$  值,  $u_{pcc}$  的频率增大, 过零点提前到来。不断循环使得  $u_{pcc}$  的频率不断增大, 当超出频率保护的阈值时即检测出孤岛发生。

图 3 为 AFD 法功能流程图, 其主要环节有 PLL 和 AFD 这 2 个部分。当孤岛发生后, 逆变器输出电流会不断调整, 当锁相环控制逆变器输出电流  $i_{inv}$  与公共点电压  $u_{pcc}$  同相位时, 此时负载阻抗角  $\phi_{load}$  与频率偏移角  $\theta_{AFD}$  的关系为:

$$\phi_{load} = \arctan \left[ R \left( \frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \right] = -\theta_{AFD} \quad (5)$$

式中,  $\omega$  ——PCC 电压角频率。

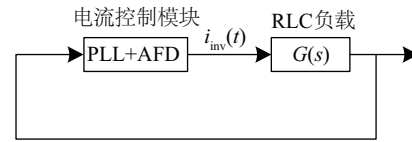


图 3 AFD 法功能流程图

Fig. 3 Equivalent model of PV

根据式 (4) 和式 (5) 可得出 AFD 孤岛检测相位判据:

$$\arctan \left[ R \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] = \frac{\omega t_z}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{T} t_z = \frac{\pi}{2} cf \quad (6)$$

式中,  $R$ 、 $L$ 、 $C$  ——负载电路的等效电阻、电感、电容;  $\omega$  ——PCC 电压角频率。

若满足式 (6), 则控制电路不再调整频率变化, 系统达到稳定状态。若在调整中频率超出设定阈值, 则孤岛被检测出。

## 2 基于 $Q_{f0} \times C_{norm}$ 坐标系的 AFD 盲区分析

AFD 法存在检测盲区, 通过减小盲区可有效提高 AFD 法的检测效率, 因此需要对检测盲区进行描述。

由第 1 节分析可知, AFD 法孤岛效应发生条件必须满足相位平衡关系式 (6), 将式 (6) 进行变化可得到基于  $L \times C_{norm}$  坐标系的 AFD 相位判据:

$$\arctan \left[ \frac{R}{\omega L} \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} C_{norm} \right) \right] = -\frac{\pi \cdot \Delta f}{f} \quad (7)$$

式中,  $\omega_0$  ——电网角频率。

那么基于  $L \times C_{norm}$  坐标系的 AFD 法的孤岛检测

NDZ 边界可表达为:

$$\begin{aligned} C_{\text{norm\_max}} &= \frac{f_g^2}{f_{\text{min}}^2} \left( 1 + \frac{2\pi^2 \cdot L \cdot \delta f}{R} \right) \\ C_{\text{norm\_min}} &= \frac{f_g^2}{f_{\text{max}}^2} \left( 1 + \frac{2\pi^2 \cdot L \cdot \delta f}{R} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $f_g$  —— 电网频率;  $\delta f$  —— 输出电流频率电压频率的差。

由式(8)可知, 当负载  $R$  变化时, 盲区分布的范围也会随之发生改变, 不能准确地反映盲区分布。为克服这一影响, 本文引入负载品质因数和负载谐振频率作为参变量, 对式(6)进行适当的变换, 得到基于  $Q_f \times f_0$  坐标系的 AFD 相位判据:

$$\arctan \left[ Q_f \left( \frac{f_{\text{res}}}{f} - \frac{f}{f_{\text{res}}} \right) \right] + \theta_{\text{AFD}} = 0 \quad (9)$$

那么基于  $Q_f \times f_0$  坐标系中 AFD 法的 NDZ 边界为:

$$\begin{cases} f_{0\_max} = \frac{-\pi \cdot \delta f + \sqrt{(\pi \cdot \delta f)^2 + 4Q_f^2 \cdot f_{\text{max}}^2}}{2Q_f}, f_0 > f_g \\ f_{0\_min} = \frac{-\pi \cdot \delta f + \sqrt{(\pi \cdot \delta f)^2 + 4Q_f^2 \cdot f_{\text{min}}^2}}{2Q_f}, f_0 < f_g \end{cases} \quad (10)$$

图 4 为基于  $Q_f \times f_0$  坐标系对 AFD 法的盲区描述。图中横线实线区域为电网正常工作频率的范围, 弯实线区域为当  $cf=0.02$  时, AFD 法的盲区范围, 虚线区域为当  $cf=0.05$  时, AFD 法的盲区范围。从图 4 可看出虽然基于  $Q_f \times f_0$  坐标系的 AFD 盲区描述方法存在检测盲区, 但是其横纵坐标不能直观反映负载与盲区的关系。

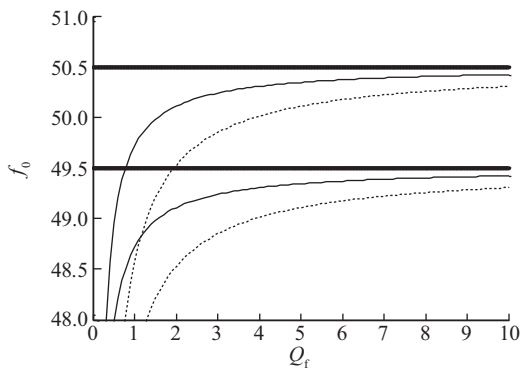


图 4 主动移频式孤岛检测盲区分布图

Fig. 4 NDZ of AFD

由式(10)也可知基于  $Q_f \times f_0$  坐标系的 NDZ, 其横纵坐标都与负载电感  $L$ 、电容  $C$  相关, 彼此参数的耦合将给 NDZ 的有效评估带来不便, 因此, 进一步引入  $Q_{f0}$  和  $C_{\text{norm}}$  参变量, 将  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ ,  $C = C_{\text{norm}} \cdot C_{\text{res}} = (1 + \Delta C)C_{\text{res}}$  代入式(6)得:

$$\arctan \left\{ R \left[ (\omega_0 + \Delta\omega) \cdot (1 + \Delta C) C_{\text{res}} - \frac{1}{(\omega_0 + \Delta\omega)L} \right] \right\} = \frac{\pi}{2} cf \quad (11)$$

将  $Q_{f0} = \frac{R}{\omega_0 L}$ ,  $C_{\text{res}} = \frac{1}{L\omega_0^2}$  代入式(11), 可得:

$$\arctan \left[ Q_{f0} \omega_0 \frac{\left( \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} + \Delta C \left( 1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}{\omega_0 + \Delta\omega} \right] = \frac{\pi}{2} cf \quad (12)$$

因为  $\Delta f$  的范围为  $(-0.5 \sim 0.5)^{[11]}$ , 所以  $\Delta\omega$  的范围也很小, 因此将  $\Delta\omega/\omega + 1 \approx 1$ , 将  $\left( \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 \approx 0$  代入式(12)可得简化的相位判据:

$$\arctan \left[ Q_{f0} \left( \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} + \Delta C \right) \right] = \frac{\pi}{2} cf \quad (13)$$

$Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$  坐标系横纵坐标变量定义如下:

$$Q_{f0} = \frac{R}{\omega_0 L} \quad (14)$$

$$C_{\text{norm}} = \frac{C}{C_{\text{res}}} \quad (15)$$

$$C_{\text{res}} = \frac{1}{L\omega_0^2} \quad (16)$$

式中,  $R$ 、 $L$ 、 $C$  —— 负载的电阻、电感、电容;  $\omega_0$  —— 电网角频率。

$Q_{f0}$  会受电网频率  $\omega_0$ 、负载电阻  $R$ 、负载电感  $L$  的影响, 与负载电容  $C$  无关; 在并网逆变器输出功率和电网频率一定的条件下,  $\omega_0$  和  $R$  的值均为常数, 由式(14)知  $Q_{f0}$  成为负载电感  $L$  的单值函数, 也可说明横坐标  $Q_{f0}$  与纵坐标  $C_{\text{norm}}$  不存在耦合关系。

将  $\Delta C = \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} cf\right)}{Q_{f0}} - \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$  以及频率允许的上下限代入式(13), 可得到 NDZ 范围:

$$\frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} cf\right)}{Q_{f0}} - \frac{2 \times 0.5 \times 2\pi}{\omega_0} < \Delta C < \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} cf\right)}{Q_{f0}} + \frac{2 \times 0.5 \times 2\pi}{\omega_0} \quad (17)$$

$$\frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} cf\right)}{Q_{f0}} - \frac{2\pi}{\omega_0} + 1 < C_{\text{norm}} < \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} cf\right)}{Q_{f0}} + \frac{2\pi}{\omega_0} + 1 \quad (18)$$

若负载电容的值在式(18)所示的盲区范围内, 那么频率偏移没有超出范围, 则孤岛检测失败。由于  $cf$  的正取值范围为  $(0 \sim 0.05)$ , 本文取 0.02 和 0.05 这 2 个值, 并根据式(18)利用 Matlab 可得到图 5 盲区分布图, 曲线之间的区域为孤岛检测盲区的范围。图 5 中虚线部

分为  $cf=0.05$  时盲区分布范围,实线部分为  $cf=0.02$  时盲区分布范围。

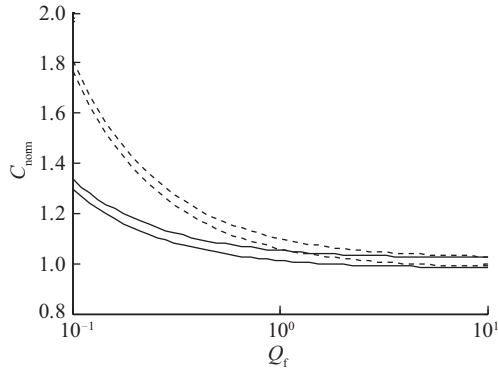


图5 主动移频式孤岛检测盲区分布图

Fig. 5 NDZ of AFD

当负载品质因数的值等于 2.5,此时为孤岛检测最复杂的情况<sup>[12]</sup>,若在该值下检测准确,则也适用于其他值,因此本文取  $Q_0$  为 2.5。截取图 5 的局部图放大(见图 6),当横坐标  $Q_0$  取 2.5 时,对应的纵坐标  $C_{norm}$  所在区域被放大以方便取值。如图 6 所示,  $cf=0.02$  与  $cf=0.05$  所对应的盲区范围不同,但其盲区范围的大小即宽度基本不变;当负载参数  $C$  确定时,  $C_{norm}$  即纵坐标的值也会确定,当负载参数  $L$  和  $R$  确定时,  $Q_0$  即横坐标的值也会确定。因此,当负载参数确定后,即可以在

盲区分布图有对应的点,在进行孤岛检测时可以准确地避开盲区。

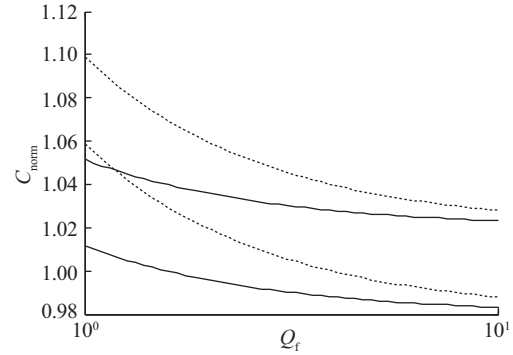


图6 主动移频式孤岛检测盲区分布图局部放大图

Fig. 6 Enlarged one of NDZ of AFD

### 3 仿 真

#### 3.1 仿真模型

本文基于 Matlab/Simulink 仿真软件,建立单相光伏并网发电系统的孤岛检测仿真模型,仿真模型如图 7 所示。仿真电路参数设定公用电网电压为 220 V,频率为  $f=50$  Hz,频率保护动作阈值为  $(50\pm 0.5)$  Hz;逆变器直流侧输入电压为 400 V。本地负载品质因数为 2.5,负载参数分别为  $R=11.6\ \Omega$ ,  $L=14.8\times 10^{-3}$  H。

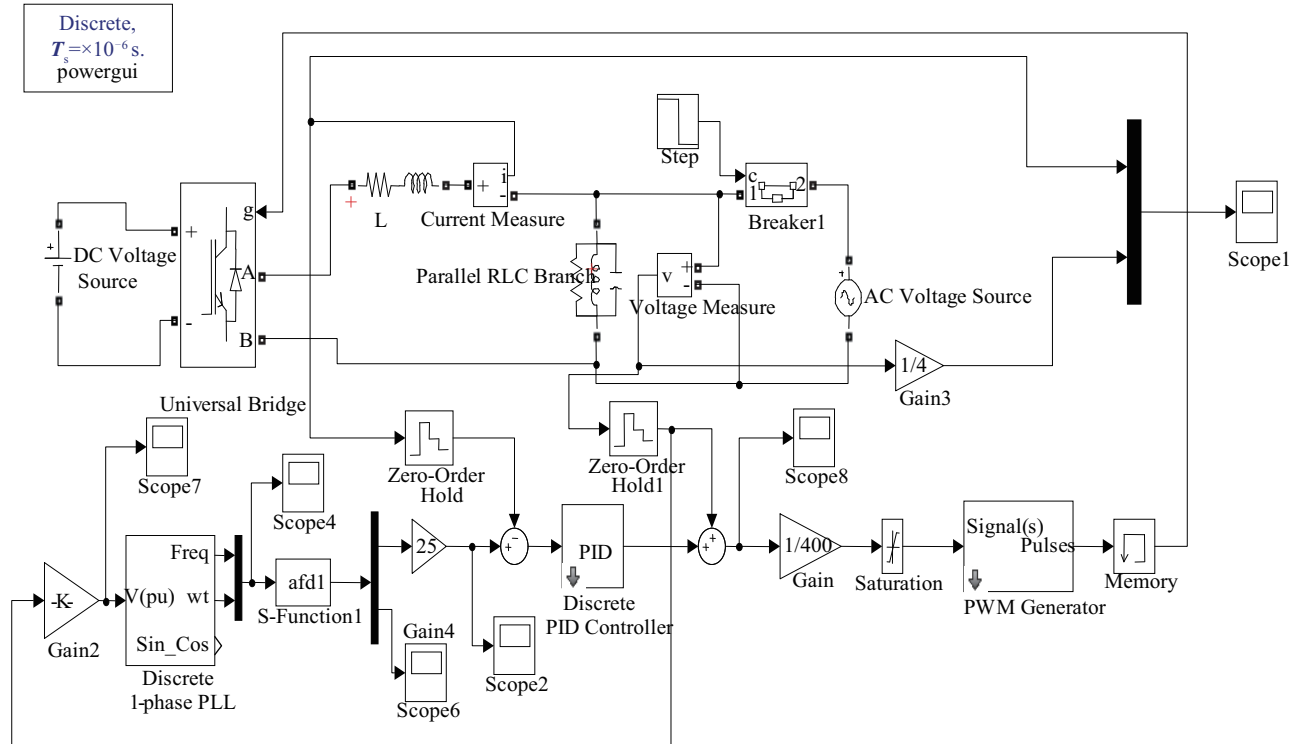


图7 主动移频法仿真模型图

Fig. 7 Simulation model of frequency drift method

### 3.2 理论值计算

为验证基于  $Q_{10} \times C_{\text{norm}}$  坐标系孤岛检测 NDZ 分布的有效性,本文首先根据上文推导的解析公式进行理论计算,其结果将作为后续仿真算法的验证依据。

根据孤岛检测盲区分布图 6,在该图中取 4 个点,根据这 4 个点的纵坐标  $C_{\text{norm}}$  计算所对应的负载参数,根据式(4)以及所选定的截断因子计算频率偏移角,计算结果如表 1 所示。

表1 AFD的NDZ与负载对应关系

Table 1 Corresponding relationship of load and NDZ of AFD

负载		$cf=0.02$	$cf=0.05$
		$\theta_{\text{AFD}}=0.03$	$\theta_{\text{AFD}}=0.079$
$Q_{10}=2.5$ $R=11.6 \Omega$ $L=14.8 \times 10^{-3} \text{ H}$	$C_{\text{norm}}=1.00$	盲区内	盲区外
	$C_{\text{norm}}=1.02$	盲区内	盲区内
	$C_{\text{norm}}=1.04$	盲区外	盲区内
	$C_{\text{norm}}=1.06$	盲区外	盲区外

### 3.3 仿真过程与结果

为便于比对分析,本文基于上述理论计算参数进行仿真实验验证,分别进行截断系数  $cf=0.02$ 、 $cf=0.05$  时不同负载参数的盲区分析仿真实验。

#### 3.3.1 $cf=0.02$ 时不同负载参数的盲区分析仿真实验

在仿真模型 S 函数中设置截断系数  $cf=0.02$ ,并分别输入不同的负载参数电容  $C$ ,设置分布式发电系统离网时间为 0.06 s,仿真结果见图 8。由图 8 可知, $cf=0.02$  时,在 0.06 s 断网后,当  $C_{\text{norm}}$  为 1.00 和 1.02 时,分布式发电系统仍持续发电,说明没有检测出孤岛现象;当  $C_{\text{norm}}$  为 1.04 时,在 0.24 s 处检测出孤岛,分布式发电系统停止发电;当  $C_{\text{norm}}$  为 1.06 时,在 0.16 s 处检测出孤岛。

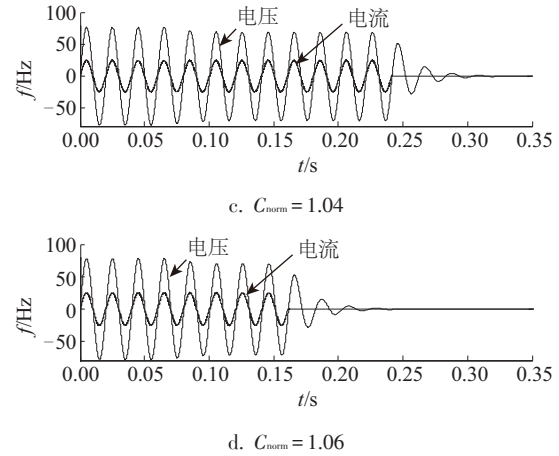
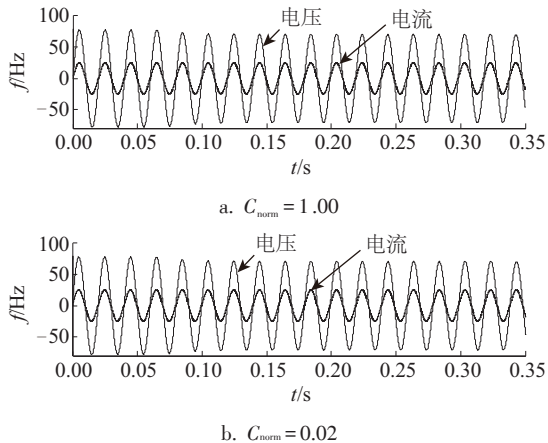
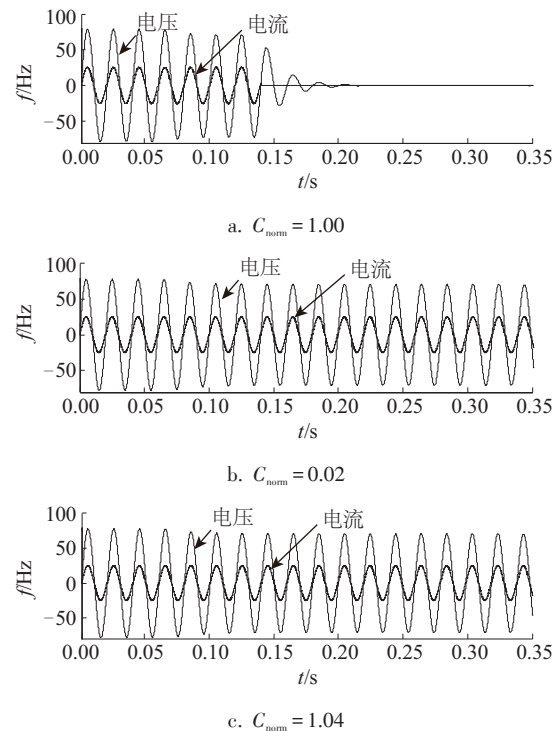


图8  $cf=0.02$  仿真结果图

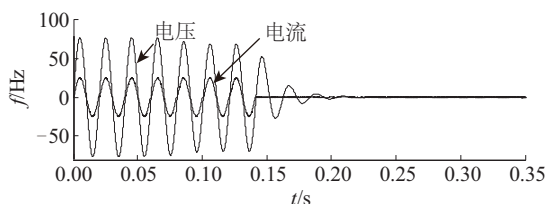
Fig. 8 Simulation when  $cf=0.02$

#### 3.3.2 $cf=0.05$ 时不同负载参数的盲区分析仿真实验

在仿真模型 S 函数中设置截断系数  $cf=0.05$ ,并分别输入不同的负载参数电容  $C$ ,仍设置分布式发电系统离网时间为 0.06 s,仿真结果如见图 9。图 9 中 4 个图对应的  $C_{\text{norm}}$  取值仍为 1.00、1.02、1.04 和 1.06。由图 9 可知,当  $cf=0.05$  时,在 0.06 s 断网后, $C_{\text{norm}}$  为 1.02 和 1.04 时,没有检测出孤岛现象;当  $C_{\text{norm}}$  为 1 时,在 0.14 s 处检测出孤岛,当  $C_{\text{norm}}$  为 1.06 时,在 0.14 s 处检测出孤岛。







d.  $C_{\text{norm}} = 1.06$

图9  $cf=0.05$  仿真结果图

Fig. 9 Simulation when  $cf=0.05$

由上述仿真结果可知,当截断系数  $cf$  一定但负载不同时,孤岛检测的结果可能成功,也可能失败。将图 8 和图 9 的检测结果进行整理得表 2。

表 2 AFD 孤岛检测在不同负载下的检测结果

Table 2 Detected results of AFD under different loads

负载	$cf=0.02$	$cf=0.05$
$C_{\text{norm}} = 1.00$	检测失败	检测成功
$C_{\text{norm}} = 1.02$	检测失败	检测失败
$C_{\text{norm}} = 1.04$	检测成功	检测失败
$C_{\text{norm}} = 1.06$	检测成功	检测成功

根据盲区理论值以及仿真结果可看出表 1 和表 2 的结果一致:当所取负载参数的值落在盲区内时孤岛检测失败,当所取负载参数的值落在盲区外时孤岛检测成功。因此,仿真结果图与盲区分布图是相对应的,从而验证了  $Q_{10} \times C_{\text{norm}}$  坐标系下的孤岛检测 NDZ 分布是准确的。

## 4 结 论

准确合理描述孤岛检测盲区可有效反映出孤岛检测方法的应用范围,对分布式并网发电系统可靠、安全运行具有重要意义。本文针对  $\Delta P \times \Delta Q$ 、 $L \times C$  和  $Q_1 \times f_0$  坐标系对孤岛检测盲区描述上的不足,采用  $Q_{10} \times C_{\text{norm}}$  坐标系对基于 AFD 法的孤岛检测盲区进行理论描述和仿真验证,理论分析和仿真结果表明,采用  $Q_{10} \times C_{\text{norm}}$  坐标系得到的孤岛检测盲区分布图可更有效地反映出负载参数和盲区的对应情况,能够对 AFD 法的孤岛检测盲区进行准确描述。

### [参考文献]

[1] 程启明,王映斐,程尹曼,等. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 147-154.  
CHENG Q M, WANG Y F, CHENG Y M, et al. Overview study on islanding detecting methods for

distributed generation grid-connected system [J]. Power system protection and control, 2011, 39 (6) : 147-154.

[2] 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.

LIU F R. Research on islanding detection methods of single-phase grid connected photovoltaic systems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

[3] SUN H, LOPES L, LUO Z X. Analysis and comparison of islanding detection methods using a new load parameter space [C]//Proc. 30th Annu. Conf. I IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON-04), Seoul, Korea, 2004.

[4] 刘建,崔德民,李晓博,等. 常见孤岛检测盲区描述方法[J]. 山东电力技术, 2013(6): 39-42.

LIU J, CUI D M, LI X B, et al. Review of common methods for islanding non-detection zones [J]. Shandong electric power, 2013(6): 39-42.

[5] 谢东. 分布式发电多逆变器并网孤岛检测技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.

XIE D. Research on islanding detection technology for multi-grid connected inverter based distributed generation [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.

[6] 刘芙蓉,康勇,段善旭,等. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 95-99.

LIU F R, KANG Y, DUAN S X, et al. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 95-99.

[7] 刘芙蓉,康勇,段善旭,等. 一种有效的孤岛检测盲区描述方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 167-172.

LIU F R, KANG Y, DUAN S X, et al. A novel method for mapping non-detection zone [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (10) : 167-172.

[8] 刘芙蓉,王辉,康勇,等. 滑模频率偏移法的孤岛检测盲区分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 178-182.

LIU F R, WANG H, KANG Y, et al. Non-detection zone of slip-mode frequency shift method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 178-182.

- [9] 张学广, 王瑞, 刘鑫龙, 等. 改进的主动频率偏移孤岛检测算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 200-204, 209.  
ZHANG X G, WANG R, LIU X L, et al. Analysis of an inverse pendulum wave power generation system with pressure-maintaining storage based on hydraulic transmission[J]. Automation of electric power systems, 2012, 36(14): 200-204, 209.
- [10] YAFAOUI A, WU B, KOURO S. Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems[J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 27(5): 2367-2375.
- [11] 薛明雨. 光伏并网发电系统之孤岛检测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.  
XUE M Y. Research on islanding detection of grid-connected photovoltaic system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [12] 高蕾. 逆变并网型光伏系统的孤岛检测方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
GAO L. Research on islanding detection for grid-connected inverter based photovoltaic power system [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

## ANALYSIS FOR NON-DETECTION ZONE OF ACTIVE FREQUENCY DRIFT BASED ON $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$ COORDINATE SYSTEM

Li Zhijun, Sun Le, Xu Duo, Wang Ya'nan, Zhang Hongpeng, An Ping  
(College of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** NDZ of islanding detection is usually used to evaluate the advantages and disadvantages of the islanding detection algorithm. Accurate and reasonable description of NDZ can effectively reflect the application scope of the islanding detection method. Different loads require different algorithms for corresponding detection, and the diversity of loads makes the description of NDZ difficult. In order to solve this problem, this paper firstly introduces NDZ of islanding detection and its characteristics. Based on this, the  $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$  coordinate system is used to analyze NDZ of the active islanding detection method, and then to verify the analysis result by simulation experiments. This coordinate system uses the load quality factor and the load labeled capacitance as the horizontal and vertical coordinates, which is suitable for both active and passive island detection and overcomes the problem that the traditional NDZ cannot directly reflect the corresponding problem of loads and NDZ. The theoretical analysis and simulation results show that the coordinate system can effectively reflect the distribution of the NDZ of islanding detection algorithm in practical applications.

**Keywords:** islanding detection; grid-connected PV generation system; active frequency drift; non-detection zone;  $Q_{f0} \times C_{\text{norm}}$  coordinate system