

带整流性负载的分布式发电系统孤岛检测研究

徐云鹏, 叶豪东, 和敬涵, 李智诚, 陈泽龙

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 为了准确评估孤岛检测的实际性能, 在传统的反孤岛测试电路的基础上, 给出一种带整流性负载的反孤岛测试电路。利用公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)处功率流的规律, 得出了功率不匹配度的表达式。在不同的功率不匹配度下, 利用该测试电路与传统的测试电路, 分别对过/欠压、过/欠频以及电压谐波检测方法进行仿真分析与比较。仿真结果表明, 整流性负载的存在会导致过/欠压、过/欠频检测方法的检测盲区(Non-Detection Zone, NDZ)发生偏移, 且偏移程度与整流性负载电阻、滤波电容的大小有关; 同时, 带整流性负载的测试电路是有效和实用的。该测试电路能准确反映孤岛情况下电压谐波的实际响应特性, 且电压谐波的大小与整流性负载电阻的大小有关。

关键词: 分布式发电; 孤岛检测; 整流性负载; 过/欠压; 过/欠频; 电压谐波

Study of islanding detection of distributed generation system with rectifier load

XU Yunkun, Tony Yip, HE Jinghan, LI Zhicheng, CHEN Zelong

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: For accurately evaluating the practical performance of the islanding detection, a circuit with rectifier load for the islanding test is proposed based on the conventional test circuit. According to the law of power flow at the point of common coupling (PCC), the expression of power mismatch is obtained. Under different power mismatch, respectively based on the proposed circuit and the conventional test circuit, the detection methods including over/under voltage, over/under frequency and voltage harmonics are analyzed through simulation and comparison. The simulation results show that the rectifier load has made non-detection zone (NDZ) deviate and the degree of deviation is related to the resistor and the filter capacitor of the rectifier load. The results also show that the proposed circuit is valid and practical. It can accurately reflect the actual response characteristics of voltage harmonics when islanding occurs and the voltage harmonics is related to the resistor of the rectifier load.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277009).

Key words: distributed generation; islanding detection; rectifier load; over/under voltage; over/under frequency; voltage harmonics

中图分类号: TM615

文章编号: 1674-3415(2016)01-0033-07

0 引言

随着越来越多的分布式电源接入到配电网中, 配电系统中也随之出现了许多新的保护问题, 其中之一就是孤岛效应^[1-3]。

孤岛效应是指当电网的供电断开时, 分布式发电系统继续独自向负载供电, 形成一个自给供电的

孤岛发电系统^[4-7]。

孤岛效应的产生可能对配电网的设备和相关人员造成危害。孤岛发生后必须及时有效地检测到孤岛发生。所以, 对孤岛检测的研究, 具有十分重要的意义^[8-11]。

过/欠压、过/欠频检测方法是最常用的孤岛检测方法, 最大的缺点是存在较大的检测盲区^[12-16]。电压谐波检测方法在理论上不存在检测盲区, 但难以确定合适的动作阈值^[17]。

另一方面, 目前的分布式发电系统并网标准规

基金项目: 国家自然科学基金项目(51277009); 国家电网科技项目(5455DD140011)

定的反孤岛测试电路使用并联 RLC 线性负载来代表本地负载。然而实际的电力系统存在一部分非线性负载,只含 RLC 负载的反孤岛测试电路不适用于电压谐波方法的性能分析。电力电子装置是最主要的非线性负载,其中绝大多数为整流性负载,比如直流电源、蓄电池、电镀装置等^[18]。因此,以整流性负载为切入点来研究孤岛检测具有代表意义。

本文以被动检测方法为基础,针对目前反孤岛测试电路普遍采用并联 RLC 负载而不能准确评估孤岛检测实际性能的问题,提出了一种带整流性负载的反孤岛测试电路,研究了整流性负载对过/欠压、过/欠频检测盲区的影响,并对电压谐波检测方法进行了测试。

1 整流性负载

目前在各种整流性负载中,最常见的是三相桥式整流性负载,如图 1 所示。该负载采用三相桥式整流电路经电容 C_{rec} 滤波后提供直流电源,供负载 R_{rec} 使用。对于一个确定的装置来说,滤波电容 C_{rec} 是固定的,只有 R_{rec} 是可变的, R_{rec} 的大小决定了负载的轻重,即决定了整流性负载消耗的有功功率 P_{rec} 。当 $\omega R_{rec} C_{rec} > \sqrt{3}$ 时,直流侧电流断续,此时整流性负载处于轻载工作状态,当 $\omega R_{rec} C_{rec} < \sqrt{3}$ 时,直流侧电流连续,此时整流性负载处于重载工作状态。一般来说,负载越轻,则交流侧谐波越大,基波越小,工作状态越恶劣^[19]。因此,本文以轻载情况下的整流性负载为例进行研究具有代表性。

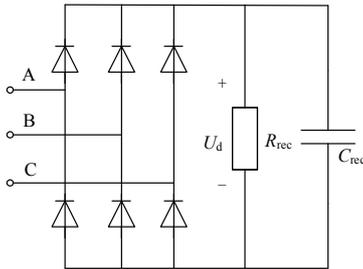


图 1 整流性负载模型

Fig. 1 Model of rectifier load

2 带整流性负载的反孤岛测试

2.1 传统的反孤岛测试电路

图 2 是 IEEE Std.929-2000 中规定的反孤岛测试电路^[8]。本地负载为并联 RLC 负载,并网逆变器一般采用恒功率控制^[20],且工作在单位功率因数状态。

分布式电源并网运行时,PCC 的功率流具有以下规律^[21]:

$$\begin{cases} P + \Delta P = P_{load} \\ Q + \Delta Q = Q_{load} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 和 Q 分别是并网逆变器输出的有功功率和无功功率; ΔP 和 ΔQ 分别是电网提供的有功功率和无功功率; P_{load} 和 Q_{load} 分别是本地负载并网时消耗的有功功率和无功功率。

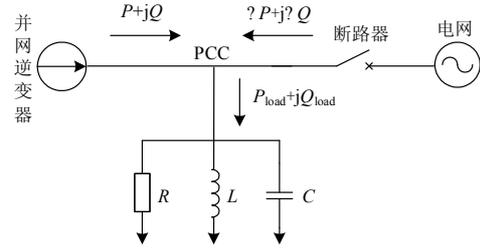


图 2 传统的反孤岛测试电路

Fig. 2 Conventional test circuit of islanding detection

本地负载消耗的功率为

$$\begin{cases} P_{load} = P_R = \frac{U_g^2}{R} \\ Q_{load} = Q_L - Q_C = U_g^2 \left(\frac{1}{2\pi f_g L} - 2\pi f_g C \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_R 是电阻 R 消耗的有功功率; Q_L 和 Q_C 分别是电感 L 和电容 C 的无功功率; U_g 是电网电压的幅值; f_g 是电网电压的频率。

通常将 $\Delta P/P$ 、 $\Delta Q/P$ 分别称为有功功率不匹配度、无功功率不匹配度,由式(1)和式(2),有

$$\begin{cases} \frac{\Delta P}{P} = \frac{U_g^2}{PR} - 1 \\ \frac{\Delta Q}{P} = \frac{U_g^2}{P} \left(\frac{1}{2\pi f_g L} - 2\pi f_g C \right) \end{cases} \quad (3)$$

$\Delta P/P$ 、 $\Delta Q/P$ 的变化范围既是过/欠压、过/欠频检测盲区,也是过/欠压、过/欠频检测方法的性能测试参数。

在进行反孤岛测试时,由式(3)可知,调节电阻 R 和电感 L (或电容 C),可以得到使 P_R 和 $Q_L(Q_C)$ 取不同的值,从而获得各种功率不匹配度($\Delta P/P$ 、 $\Delta Q/P$)。

孤岛发生后,并网逆变器输出功率保持不变,此时,负载消耗的功率等于逆变器发出的功率,如下:

$$\begin{cases} P = \frac{U^2}{R} \\ Q = U^2 \left(\frac{1}{2\pi f L} - 2\pi f C \right) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(2)和式(4)可得孤岛发生后 PCC 的电压和频率分别为

$$\begin{cases} U = \sqrt{\frac{P}{P_{\text{load}}}} U_g \\ f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_g \sqrt{\frac{Q_L}{Q_C}} \end{cases} \quad (5)$$

当 $\Delta P/P$ 接近 0 时, P 等于 P_{load} , 孤岛发生后电压几乎不变, 当 $\Delta Q/P$ 接近 0 时, Q_L 等于 Q_C , 孤岛发生后频率几乎不变。因此, 功率匹配的情况下, 过/欠压、过/欠频检测将失败。

2.2 带整流性负载的反孤岛测试电路

在传统的反孤岛测试电路的基础上, 本地负载中增加整流性负载, 如图 3 所示。

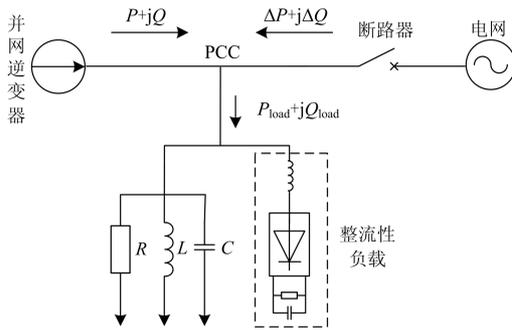


图 3 带整流性负载的反孤岛测试电路

Fig. 3 Circuit with rectifier load for the islanding test

分布式电源并网运行时, PCC 的功率流仍然具有式(1)的规律, 而本地负载消耗的功率如下:

$$\begin{cases} P_{\text{load}} = P_R + P_{\text{rec}} \\ Q_{\text{load}} = Q_L - Q_C + Q_{\text{rec}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, P_{rec} 和 Q_{rec} 分别是整流性负载消耗的有功功率和无功功率。

此时,

$$\begin{cases} \frac{\Delta P}{P} = \frac{U_g^2}{PR} - 1 + \frac{P_{\text{rec}}}{P} \\ \frac{\Delta Q}{P} = \frac{U_g^2}{P} \left(\frac{1}{2\pi f_g L} - 2\pi f_g C \right) + \frac{Q_{\text{rec}}}{P} \end{cases} \quad (7)$$

由于整流性负载的非线性特性, 无法做出类似于式(5)的推导以得到孤岛发生后 PCC 的电压和频率的表达式, 因此, 孤岛发生后电压和频率的变化情况有待进一步分析。

在进行反孤岛测试时, 可以根据实际情况和经验公式选定一个确定的整流性负载, 即确定负载电阻 R_{rec} 和滤波电容 C_{rec} 的大小。当确定了整流性负

载之后, 由式(7)可知, 可以通过调节电阻 R 和电感 L (或电容 C) 来获得各种功率不匹配度。

3 仿真分析

3.1 整流性负载对过欠压、过欠频检测的影响

3.1.1 整流性负载对孤岛后电压、频率的影响

本文采用 PSCAD/EMTDC 进行仿真分析, 整流性负载以额定电压为 380 V、输出功率为 1 kW 的三相桥式整流性负载为例, 在 380 V 低压配电网系统下, 搭建了带整流性负载的反孤岛测试电路和不带整流性负载的反孤岛测试电路^[22], 分别记为系统 I 和系统 II。仿真参数如下:

系统 I: 仿真时长为 1 s, 电网在 0.5 s 时断开, 系统额定电压为 380 V, 频率为 50 Hz; 并网逆变器直流侧电压为 700 V, 输出有功功率 $P=4$ kW, 输出无功功率 $Q=0$; RLC 负载消耗的感性无功功率 $Q_L=4$ kW; 整流性负载工作在轻载状况下, 电阻 $R_{\text{rec}}=275$ Ω , 滤波电容 $C_{\text{rec}}=1\ 000$ μF 。

系统 II: 本地负载不带有整流性负载, 其他数据均与系统 I 相同。

在系统 I 和系统 II 中, 通过调节电阻 R 和电容 C 的大小, 以获得不同的功率不匹配度, 使 $\Delta P/P$ 取值为 -20%、-10%、-5%、0%、5%、10%、20%, $\Delta Q/P$ 取值为 -5%、-2%、0%、2%、5%, 因此, 仿真共包含 35 种情况。

系统 I 和系统 II 在孤岛发生后 PCC 电压(标么值)、频率的新稳定值分别如表 1、表 2 所示。为了更直观地比较结果, 以 $\Delta P/P$ 、 $\Delta Q/P$ 为水平面的横、纵坐标, 分别将表 1 和表 2 中的数据绘制成图 4 和图 5。

表 1 孤岛后的电压 $U(\text{p.u.})$ 的比较

Table 1 Comparison of voltage after islanding

$\Delta Q/P$		$\Delta P/P$						
		-20%	-10%	-5%	0%	5%	10%	20%
5%	I	1.111	1.048	1.020	0.995	0.970	0.949	0.907
	II	1.114	1.051	1.022	1.000	0.972	0.961	0.909
2%	I	1.111	1.048	1.020	0.995	0.970	0.948	0.907
	II	1.114	1.051	1.022	1.000	0.972	0.962	0.909
0%	I	1.112	1.048	1.020	0.995	0.971	0.948	0.907
	II	1.115	1.051	1.023	1.000	0.973	0.965	0.910
-2%	I	1.112	1.049	1.020	0.995	0.970	0.947	0.907
	II	1.115	1.050	1.022	1.000	0.972	0.962	0.909
-5%	I	1.111	1.048	1.019	0.994	0.970	0.948	0.907
	II	1.115	1.051	1.022	1.000	0.972	0.961	0.909

表 2 孤岛后的频率 $f(\text{Hz})$ 的比较

Table 2 Comparison of frequency after islanding

$\Delta Q/P$		$\Delta P/P$						
		-20%	-10%	-5%	0%	5%	10%	20%
5%	I	49.32	49.34	49.36	49.37	49.39	49.40	49.44
	II	51.30	51.30	51.30	51.30	51.30	51.30	51.30
2%	I	48.62	48.64	48.65	48.66	48.68	48.69	48.72
	II	50.50	50.50	50.50	50.50	50.50	50.50	50.50
0%	I	48.18	48.19	48.20	48.21	48.22	48.23	48.27
	II	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
-2%	I	47.73	47.75	47.76	47.77	47.78	47.80	47.82
	II	49.51	49.51	49.51	49.51	49.51	49.51	49.51
-5%	I	47.09	47.11	47.12	47.13	47.14	47.15	47.18
	II	48.79	48.79	48.79	48.79	48.79	48.79	48.79

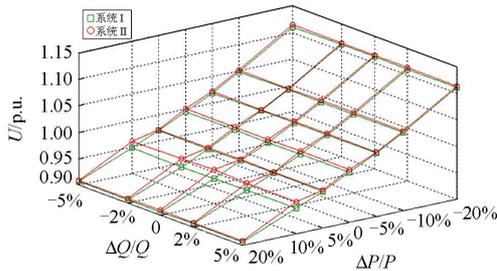


图 4 孤岛后的电压 $U(\text{p.u.})$ 的比较

Fig. 4 Comparison of voltage after islanding

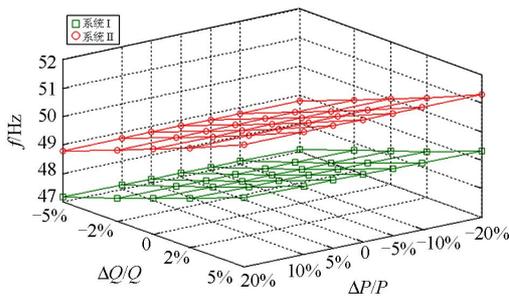


图 5 孤岛后的频率 $f(\text{Hz})$ 的比较

Fig. 5 Comparison of frequency after islanding

从整体上看, 系统 I 孤岛后电压和频率的变化趋势与系统 II 类似, 但是, 在每种情况下, 系统 I 的电压和频率都比系统 II 略低。

在 $\Delta P=0$ 、 $\Delta Q=0$ 的情况下, 逆变器输出的功率与本地负载需要的功率刚好匹配的, 系统 II 的电压仍为 1.000 p.u., 频率仍为 50.00 Hz, 而系统 I 的电压下降为 0.995 p.u., 频率下降为 48.21 Hz。可见, 即使在功率完全匹配的情况下 ($\Delta P=0$ 、 $\Delta Q=0$), 若系统中带有整流性负载, 电压和频率并不会保持不变。

3.1.2 检测盲区的比较

根据相关标准, 过/欠压保护的动作为 0.88 p.u. 和 1.10 p.u., 过/欠频保护的动作为 49.50 Hz 和 50.50 Hz。由于使电压和频率恰好达到保护阈值的功率不匹配程度就是检测盲区的边界, 根据此原则可以在 $\Delta P \times \Delta Q$ 坐标系中绘制检测盲区, 如图 6 所示。

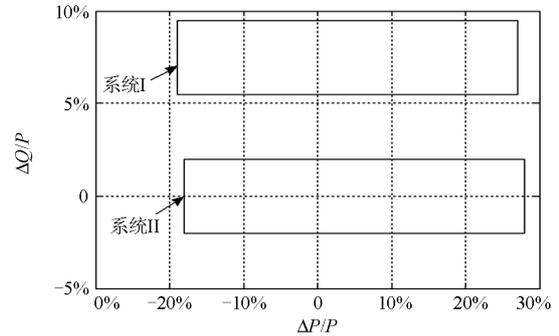


图 6 检测盲区的比较

Fig. 6 Comparison of NDZs

由图 6 可知, 在系统 II 中, 检测盲区为 $-18\% < \Delta P/P < 28\%$, $-2\% < \Delta Q/P < 2\%$; 在系统 I 中, 检测盲区为 $-19\% < \Delta P/P < 27\%$, $5.5\% < \Delta Q/P < 9.5\%$ 。显然, 相比于系统 II, 系统 I 中的检测盲区发生了偏移且不存在重叠部分。

3.1.3 整流性负载电阻 R_{rec} 对检测盲区的影响

考虑到孤岛发生后电压和频率保持不变的点处于检测盲区的中心位置, 故以此点来反映检测盲区的偏移程度。整流性负载电阻 R_{rec} 分别取 100 Ω、275 Ω、500 Ω, 滤波电容 C_{rec} 保持 1 000 μF 不变, 三种情况下电压和频率的不变化点如图 7 所示。

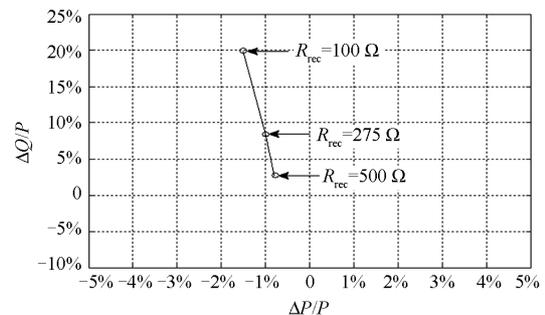


图 7 R_{rec} 取值不同时对应的电压和频率的不变化点

Fig. 7 Points at which voltage and frequency hardly change for different values of R_{rec}

图 7 中各点的仿真结果显示, R_{rec} 越小, 检测盲区偏移程度增大。实际上, 整流性负载的功率 P_{rec} 由 R_{rec} 的大小决定, 因此也可以得到, 随着整流性

负载加重, 检测盲区偏移程度增大。

3.1.4 滤波电容 C_{rec} 对检测盲区的影响

C_{rec} 分别取值为 $500 \mu\text{F}$ 、 $1000 \mu\text{F}$ 、 $1500 \mu\text{F}$, 整流性负载电阻 R_{rec} 保持 275Ω 不变, 三种情况下电压和频率的不变化点如图 8 所示。

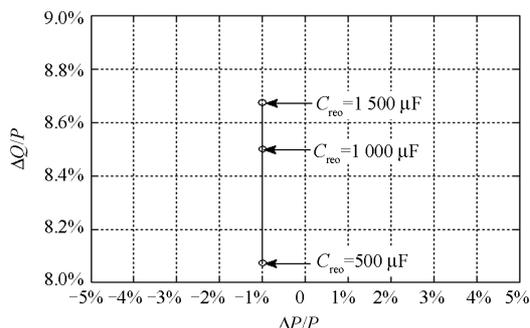


图 8 C_{rec} 取值不同时对应的电压和频率的不变化点

Fig. 8 Points at which voltage and frequency hardly change for different values of C_{rec}

图 8 中各点的仿真结果显示, C_{rec} 越大, 检测盲区偏移程度增大, 但基本只在 $\Delta Q/P$ 轴方向上偏移。由于滤波电容 C_{rec} 的大小对整流性负载消耗有功 P_{rec} 的影响基本可以忽略, 所以孤岛发生后系统内有功功率的变化情况与 C_{rec} 无关。

综上所述, 整流性负载的存在会使检测盲区发生偏移, 且整流性负载电阻 R_{rec} 越小或者滤波电容 C_{rec} 越大, 检测盲区的偏移程度将越大。一般来说, 在功率不匹配度相同的情况下, 孤岛发生后系统 I 的电压和频率都比系统 II 略低, 若整流性负载电阻 R_{rec} 越小, 孤岛发生后系统 I 的电压和频率相比于系统 II 将越低, 若滤波电容 C_{rec} 越大, 孤岛发生后系统 I 的频率相比于系统 II 将越低, 而电压基本不变。

3.2 电压谐波检测方法的性能测试

3.2.1 系统 II 下的电压谐波检测

电压在 t 时刻的谐波畸变率 THD , 定义为

$$THD_t = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_h^2}}{U_1} \quad (8)$$

式中: U_h 是 h 次谐波的有效值; U_1 是基波的有效值。本文中, H 取 15。

系统 II 在 $\Delta P=0$ 、 $\Delta Q=0$ 的情况下 PCC 的电压 THD 响应曲线如图 9 所示。在 0.5 s 孤岛发生后, 电压 THD 并没有发生显著变化。可见, 传统的测试电路由于缺少产生谐波的非线性负载, 不能准确反映电压谐波的实际响应特性, 因而不适合用于电压谐波检测法的测试。

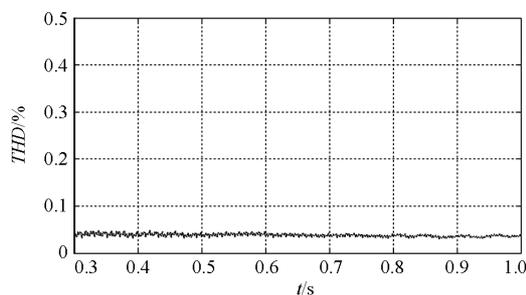


图 9 系统 II 的电压 THD 仿真结果

Fig. 9 Simulation results voltage THD in system II

3.2.2 系统 I 下的电压谐波检测

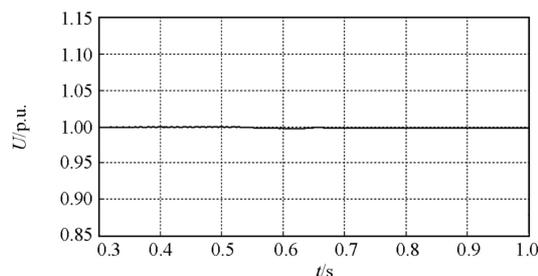
表 3 是系统 I 孤岛发生 0.1 s 后的电压 THD 。可见, 由于有整流性负载的存在, 在每种情况下, 孤岛发生后, 电压 THD 显著增加, 证明了电压谐波检测法基本不受功率匹配程度的影响, 可以成功检测到孤岛发生。

表 3 孤岛发生后的电压 THD

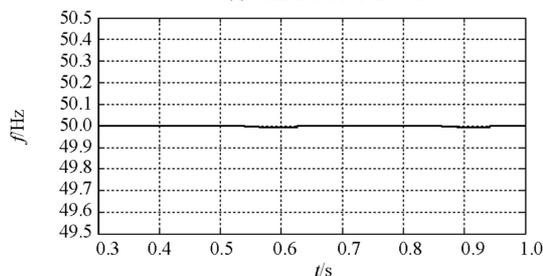
Table 3 Voltage THD after islanding

$\Delta Q/P$	$\Delta P/P$						
	-20%	-10%	-5%	0%	5%	10%	20%
5%	5.78%	5.71%	5.63%	5.54%	5.45%	5.44%	5.32%
2%	6.71%	6.57%	6.48%	6.41%	6.34%	6.34%	6.08%
0%	7.38%	7.33%	7.25%	7.25%	7.20%	7.18%	7.12%
-2%	8.17%	7.92%	7.88%	7.73%	7.66%	7.65%	7.58%
-5%	9.37%	9.35%	9.27%	9.30%	9.35%	9.36%	9.37%

图 10 为系统 I 在 $\Delta P/P=-1\%$ 、 $\Delta Q/P=8.5\%$ 情况下的仿真结果。在 0.5 s 孤岛发生后, 电压和频率在孤岛发生后保持不变, 但是, 电压 THD 增加到 5.23%。



(a) 电压幅值的变化曲线



(b) 频率的变化曲线

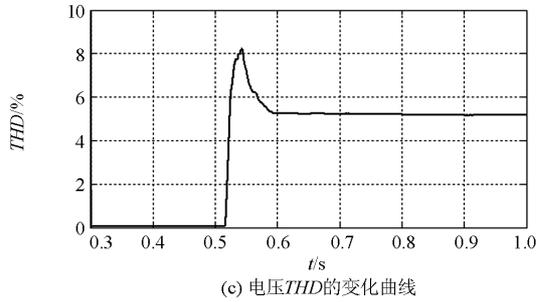


图 10 $\Delta P/P=-1\%$ 、 $\Delta Q/P=8.5\%$ 时的仿真结果

Fig. 10 Simulation results when $\Delta P/P$ is -1% and $\Delta Q/P$ is 8.5%

因此，即使在过/欠压、过/欠频检测法失效的情况下，电压谐波检测法也能成功检测到孤岛发生，不存在检测盲区。

同样地，类似于 3.1.3 和 3.1.4，研究 R_{rec} 和 C_{rec} 的大小对孤岛发生后电压 THD 的影响。分别对图 7 和图 8 中的各种情况进行谐波分析，得到了各种情况下孤岛发生 0.1s 后的电压 THD，如表 4 和表 5 所示。显然，随着 R_{rec} 减小，即整流性负载加重，孤岛发生后电压 THD 越大；而 C_{rec} 的大小对孤岛发生后电压 THD 的影响几乎可以忽略。

表 4 R_{rec} 取值不同时对应的孤岛发生后的电压 THD

整流性负载电阻/ Ω	100	275	500
电压 THD	7.65%	5.23%	3.08%

表 5 C_{rec} 取值不同时对应的孤岛发生后的电压 THD

滤波电容/ Ω	500 μF	1 000 μF	1 500 μF
电压 THD	5.20%	5.23%	5.19%

4 结论

本文在传统的反孤岛测试电路的基础上，提出了一种带整流性负载的反孤岛测试电路，分析了整流性负载对过/欠压、过/欠频检测法的影响，并对电压谐波检测法进行了测试。对于含有较大功率整流装置的分布式发电系统，过/欠压、过/欠频检测盲区将发生偏移；传统的测试电路不适用于电压谐波检测方法的测试，而本文所提的测试电路含有非线性负载，更加符合电力系统的实际情况，能准确反映孤岛情况下电压谐波的实际响应特性，适用于电压谐波检测方法的测试。

参考文献

[1] 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.

[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): 47-51. 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.

[3] 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): 193-200. YANG Tao, WANG Lujun, ZHANG Chong, et al. A novel islanding detection method based on positive feedback between reactive current and frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 193-200.

[4] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33. YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.

[5] 李德泉, 徐建政, 杨硕. 分布式发电效益分析及其量化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 147-151. LI Dequan, XU Jianzheng, YANG Shuo. Benefits analysis of distributed generation and its quantitative models[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 147-151.

[6] 朱时雨, 郑涛, 罗美玲, 等. 基于滤波装置短路的孤岛检测法在分布式发电系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 106-111. ZHU Shiyu, ZHENG Tao, LUO Meiling, et al. Islanding detection method based on short-filtering device for DG system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 106-111.

[7] 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.

[8] IEEE Std 929-2000, IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems[S]. 2000.

[9] 才利存, 常忠廷. 太阳能并网发电系统的 MPPT 及孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 119-124, 138. CAI Licun, CHANG Zhongting. MPPT and anti-islanding of photovoltaic grid-connected system[J]. Power System

- Protection and Control, 2012, 40(4): 119-124, 138.
- [10] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5, 10. ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5, 10.
- [11] 王小立, 温靖华, 袁飞, 等. 基于频率-功率因数角组合判据的新型孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 100-105. WANG Xiaoli, WEN Jinghua, YUAN Fei, et al. A new anti-islanding detecting method based on combined criterion of frequency and power-factor angle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 100-105.
- [12] 张有兵, 穆淼婕, 翁国庆, 等. 分布式发电系统的孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 139-146. ZHANG Youbing, MU Miaojie, WENG Guoqing, et al. Research on islanding detection of distributed power generation systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 139-146.
- [13] 郑涛, 袁飞, 王燕萍, 等. 基于模糊控制的快速无盲区的频移式孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 38-43. ZHENG Tao, YUAN Fei, WANG Yanping, et al. A fast frequency drifts islanding-detecting method without non-detecting zone based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 38-43.
- [14] 钟诚, 井天军, 杨明皓, 等. 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, et al. A new islanding detection method with periodic reactive current disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 270-276.
- [15] 崇志强, 戴志辉, 焦彦军, 等. 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): 65-71. CHONG Zhiqiang, DAI Zhihui, JIAO Yanjun, et al. Islanding detection method based on grid-connected photovoltaic converter and negative sequence current injection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 65-71.
- [16] 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 Qiming, WANG Yingfei, CHENG Yinman, 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.
- [17] 青桃, 汪颖, 江智军, 等. 光伏发电系统并网谐波电压波动特征孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 9-14. QING Tao, WANG Ying, JIANG Zhijun, et al. An islanding detection method for photovoltaic power generation system using fluctuation characteristic of point of common coupling harmonic voltage[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 9-14.
- [18] 陈敏, 姚玮, 邱智勇, 等. 应用整流性负载模型的单相逆变器特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 44-48. CHEN Min, YAO Wei, QIU Zhiyong, et al. Analysis of inverter characteristics with rectifier load using a nonlinear rectifier model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 44-48.
- [19] 姚志垒, 肖岚, 何流, 等. 带整流性负载并网逆变器的控制方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 80-84. YAO Zhilei, XIAO Lan, HE Liu, et al. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 80-84.
- [20] 王成山, 李琰, 彭克, 等. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20. WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke, et al. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(2): 12-20.
- [21] 刘钢, 卢继平, 乔梁, 等. 基于无功-频率下垂特性的无功扰动法在孤岛检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 88-93. LIU Gang, LU Jiping, QIAO Liang, et al. Application of reactive power disturbance based on Q-f droop curves on islanding detection of grid-connected inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 88-93.
- [22] 姚致清, 张茜, 刘喜梅, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81. YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei, et al. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2015-03-25; 修回日期: 2015-07-06

作者简介:

徐云鹏(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网保护与控制; E-mail: 13121488@bjtu.edu.cn

叶豪东(1952-), 男, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为智能电网、电力系统保护与控制;

和敬涵(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电网、电力系统保护与控制、电动汽车与V2G等。

(编辑 张爱琴)