文章编号:1005-0523(2016)06-0124-07

基于三相光伏并网逆变器的新型孤岛检测方法研究

章勇高,蔡少华

(华东交通大学电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:孤岛效应是指一个或多个光伏系统在没有电网支撑的情况下给本地负载供电的现象是光伏发电系统并网过程中的主要问题之一。非计划的孤岛效应必须在最短的时间内被监测出来并采取措施来保证工作人员的安全和设备不被损坏。反孤岛的检测方法主要分为主动式、被动式检测法和通迅检测法,被动检测法具有响应快和对输出电能质量不产生影响的优点,该方法的缺点是具有较大的检测盲区(NDZ),另一方面,主动检测法拥有相对较小的NDZ,并且同样迅速。但是传统的主动孤岛检测方法一般是通过注入扰动分量,这样不利于电网的电能质量。提出一种注入三次谐波的孤岛检测法,不仅能够有效的检测出孤岛发生,还能够在一定程度上改善电网电能质量。并对该方法进行仿真和试验验证。仿真和实验结果证明了该方法的可行性和有效性。

关键词:逆变器;孤岛检测;三次谐波注入

中图分类号:TM46 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.06.018

光伏发电作为一种新型能源,在一次发电系统中占的比例越来越大[1],光伏发电对电网带来的影响也受到越来越多研究者的关注。在三相逆变器的基础上进行研究的原因是大电网的三相是平衡的,光伏系统进行三相发电的优势是能够直接满足三相平衡的需求。三相发电同单相发电一样也面临着孤岛问题。不论是有计划还是非计划的孤岛,作为可能的安全隐患,逆变器都必须具备孤岛检测功能来检测孤岛是否发生。所以,在三相光伏发电系统中对孤岛检测进行研究具有一定的必要性[2]。

现有的孤岛检测方法主要分为三类[3-5],即被动检测,主动检测和通讯监测。被动检测[6]优势在于,不需要增加任何设备,而是基于对幅值,相位,频率等数值大小根据电网的参数限制来设定阈值。但是这种方法的缺点是由于电网所有继电器无法做到一致动作,就有可能导致局部电网完全或者不完全匹配本地负载。导致上边所给参数无法超过检测的阈值,使得光伏发电系统在电网异常的情况下无法及时脱离电网。主动检测[7-8]同样具有不需要增加设备的优点,该类检测法主要是通过对控制算法中输入关于幅值,相位,频率的持续不间断带方向的扰动。使得孤岛运行时其中部分参数能够快速有效的偏移出正常允许范围,从而触发被动检测。但是由于该类方法往往朝电网中持续注入扰动分量,给电网的电能质量带来影响,随着这部分发电在电网中的份额逐步增加,输入扰动信号带来的电能质量问题将会越来越明显,会给电力系统的运行与维护增加成本。基于通讯监测的方法[9-10]是其中最有效,且不存在孤岛检测盲区与电能质量的问题,是一种很重要的发展方向,缺点是要增加额外的检测设备,比较昂贵,而随着设备成本的降低,以及智能电网的发展,这种方法将会起到越来越重要的作用[11]。

快速准确两个指标是个矛盾体,不能单独追求其中某一项而忽略另一项,如何做到快速与准确巧妙的平衡也是一个研究课题。通过在前人提出的方法基础上对其进行改进,通过理论推导,Matlab仿真与现场实验来进行研究。仿真与实验结果表明,该方法不仅能够做到快速与准确的检测出孤岛,而且能够在电网正常运行时,能够部分提高电网的电能质量。

收稿日期:2016-04-25

基金项目:国家自然科学基金(51467006);江西省科技厅项目(20151BBE50118,20161BBH80032)

作者简介:章勇高(1975—),男,副教授,博士,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　注入三次谐波原理分析

1.1　注入三次谐波原理

在分析三次谐波孤岛检测法之前，首先分析注入三次谐波对供电电网的影响，假设对三相逆变器输出电流 i_a，i_b，i_c 中注入幅值 K，角频率为 $3\omega_0$ 的三相对称电流，如

$$\begin{cases} i_a=A\cos\ \omega_0 t+K\cos\ 3\omega_0 t \\ i_b=A\cos(\omega_0 t-\dfrac{2\pi}{3})+K\cos 3(\omega_0 t-\dfrac{2\pi}{3}) \\ i_c=A\cos(\omega_0 t+\dfrac{2\pi}{3})+K\cos 3(\omega_0 t+\dfrac{2\pi}{3}) \end{cases} \tag{1}$$

式中：A 为基波电流幅值；ω_0 为基波角频率。

当孤岛发生时，基波负载的频率响应 $Z_{(1)}$ 为

$$Z_{(1)}=\frac{1}{\dfrac{1}{R}+\dfrac{1}{j\omega L}+j\omega C} \tag{2}$$

式中：R 为负载等效电阻；L 为负载等效电感；C 为负载等效电容。

当三次谐波注入孤岛系统中时，三次谐波负载的频率响应 $Z_{(3)}$ 为

$$Z_{(3)}=\frac{1}{\dfrac{1}{R}+\dfrac{1}{j3\omega L}+j3\omega C} \tag{3}$$

孤岛条件下满足

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{4}$$

$$Q=R\sqrt{\frac{C}{L}}=RC\omega_0=R\frac{1}{L\omega_0} \tag{5}$$

式中：Q 为负载品质因数。经推导 n 次谐波负载 $Z_{(n)}$ 可表示为

$$Z_{(n)}=\frac{R}{\sqrt{1+(\dfrac{n^2-1}{n}Q_f)^2}}\angle-\arctan(\frac{n^2-1}{n}Q) \tag{6}$$

那么，$Z_{(3)}$ 就可表示为

$$Z_{(3)}=\frac{R}{\sqrt{1+(\dfrac{8}{3}Q)^2}}\angle-\arctan(\frac{8}{3}Q) \tag{7}$$

其中：本地负载的阻抗角 $\theta=-\arctan(\dfrac{8}{3}Q)$。所以孤岛发生时的三次谐波电压向量 $\dot{U}_{(3)}$ 为

$$\dot{U}_{(3)}=\dot{I}_{(3)}\cdot Z_{(3)} \tag{8}$$

式中：$\dot{I}_{(3)}$ 为三次谐波电流向量。通过检测 $\dot{U}_{(3)}$ 的幅值和相角的是否发生异常变化，能够判断出孤岛是否发生。

电网正常供电时，假设其中包含三次谐波分量，那么电网电压 $\dot{U}$ 可表示为

$$\dot{U}=\dot{U}_{(1)}+\dot{U}_{(3)} \tag{9}$$

式中：$\dot{U}_{(1)}$ 为基波电压向量。带有三次谐波的三相电网系统电压 $\dot{U}_a$，$\dot{U}_b$，$\dot{U}_c$ 可表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_a=\dot{U}_{a(1)}+\dot{U}_{a(3)} \\ \dot{U}_b=\dot{U}_{b(1)}+\dot{U}_{b(3)} \\ \dot{U}_c=\dot{U}_{c(1)}+\dot{U}_{c(3)} \end{cases} \tag{10}$$

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

假设$\dot{U}_{a(3)}$,$\dot{U}_{b(3)}$,$\dot{U}_{c(3)}$为对称的电压向量,那么就可以通过控制逆变器输出电流形成对应的三次谐波输入$\dot{U}_{(3)}$来降低电网中的谐波量。

1.2 运行模式

三次谐波注入工作在两种模式下,分别为运行模式Ⅰ和运行模式Ⅱ。

1) 运行模式Ⅰ,为孤岛检测模式,该模式的工作原理为:孤岛发生时候,无三次谐波或少量三次谐波,控制逆变器输入三次谐波量,经由正反馈之后,三次谐波越来越大从而设置阈值来判断孤岛发生。

传统的孤岛检测方法在某些特别情况下,可能会因为产生的扰动量被抵消,从而导致孤岛检测的失败。运行模式Ⅰ为了避免特定的取值可能导致的检测失败,采用的是根据三次谐波分量的大小来进行正反馈从而在孤岛情况下能够放大三次谐波分量,最终超出正常范围。

2) 运行模式Ⅱ,为正常并网模式,经过电网三次谐波检测,经由控制器控制注入三次谐波电流,在负载上产生反向三次谐波电压从而部分抵消电网中的三次谐波,改善电网本身的电能质量。

运行模式Ⅱ是基于逆变器输出的三次谐波并不足以影响到整个电网的三次谐波总的分量的情况下,通过采取与与电网三次谐波分量反向的方式来达到部分降低电网三次谐波的目的。

2 三次谐波注入法实现的控制策略

2.1 滤波器原理

准确的检测电压三次谐波是控制注入三次电流的基础。在检测三次谐波的方式上选择算法,该算法可视作一个数字滤波器,传递函数表达式为

$$H_{SG}(z)=\frac{(1-z^{-N})(1-e^{-j2\pi/N}z^{-1})}{1-2\cos(2\pi/N)z^{-1}+z^{-2}} \tag{10}$$

式中:N为输入信号采样点数;m取值为0,1,…,N-1,本文选择的值为注入谐波的次数。假设注入谐波的频率为f_{dist}、采样信号采集的频率为f_{sam}和电网工作频率即工频为f_g,那么N、m要满足

$$\begin{cases} N=f_{sam}/f_g \\ m=Nf_{dist}/f_{sam} \end{cases} \tag{11}$$

传递函数的功能可由图1的框图来实现。其中:v_m为m次谐波电压;v_{PCC}为耦合点处电压。

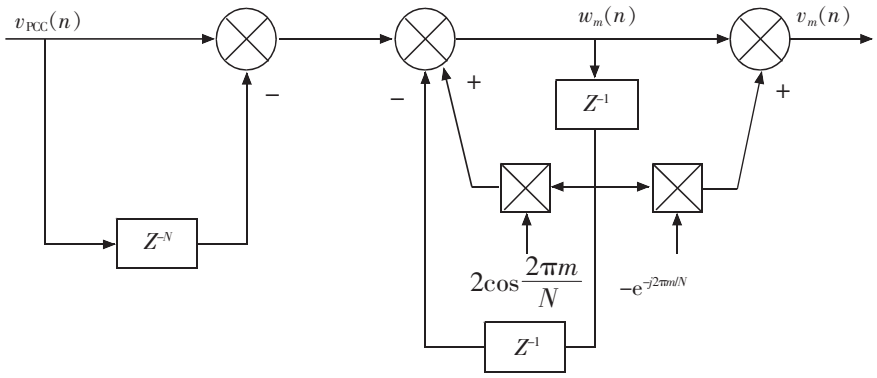


图1 滑动滤波器结构图

Fig.1 Diagram of sliding Goertzel filter

从图1可推出关系式(12),式(13)

$$w_m(n)=2w_m(n-1)\cos\frac{2\pi m}{N}-w_m(n-2)+v_{PCC}(n)-v_{PCC}(n-N) \tag{12}$$

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$w_m(n)=w_m(n)=-w_m(n-1)\mathrm{e}^{-j2\pi l/N} \tag{13}$$

由式(12)，式(13)可得

$$w_m(n)=v_{PCC}(n)-v_{PCC}(n-N)-w_m(n-2)+w_m(n-1)\mathrm{e}^{j2\pi m/N} \tag{14}$$

$w_m(n)$的幅值可以通过式(15)来计算

$$|w_m(n)|=sqrt\left[w_m^2(n)+w_m^2(n-1)-2w_m(n)\times w_m(n-1)\cos\frac{2\pi m}{N}\right] \tag{15}$$

通过式(14)，式(15)能够计算出三次谐波的电压幅值与相位。通过跟踪 $v_{(3)}$能够控制输入三次谐波电流的相位与取值。

2.2　注入三次谐波设计

注入三次谐波的大小可以定义为

$$i_{\mathrm{inv_150\ Hz}}=i_{\mathrm{inv}}\frac{k}{2}\sin 3\theta_g \tag{16}$$

式中：i_{inv} 为逆变器电流；θ_g 为基准相位角。系数 k 不宜过大或过小。过小将无法在逆变侧体现出来 3 次分量；过大容易产生畸变，反而会增大谐波畸变率。那么系数 k 的取值变得很关键，首先定义系数的取值

$$k=\frac{|\dot{U}_{(3)}|}{a|\dot{U}|} \tag{17}$$

工程实践表明当 k 取 0.10 时即在三次谐波分量在电流中所占的百分比达到 4.7%的时候，总的谐波含量(THD)将会达到 5%，电网的规定总谐波谐波畸变率不能超过 5%，所以 0.10 为检测孤岛发生与否的临界值。

式(17)中 a 取接近于 1 的数值，工程实践可根据需求取相应要求的大小，这里选取为 0.99。其中 a 的取值可正可负，当电网电压三次谐波过量，可以控制逆变器输出一部分反向的三次谐波，起到调节电网电能质量的作用，也可以通过控制 k 的取值起到孤岛检测的作用。

2.3　控制实现与功能实现流程

本文所采用的三次谐波注入控制策略的控制结构图如图 2 所示。在图中，逆变器采用的 dq 坐标下直接电流控制策略。耦合点(PCC)处电压 v_{PCC} 经过 dq 变换后，经过锁相环 PLL 得到基准相位角 θ_g，通过采用注入扰动相位的方式来实现三次谐波注入产生新的相位角 θ_{inv}^*，在经由电流电压内外环产生的信号，经过 dq 转 $\alpha\beta$ 变换之后产生 SVPWM 的输入信号，最终通过控制开关管 S_i 来产生注入三次谐波的电流。

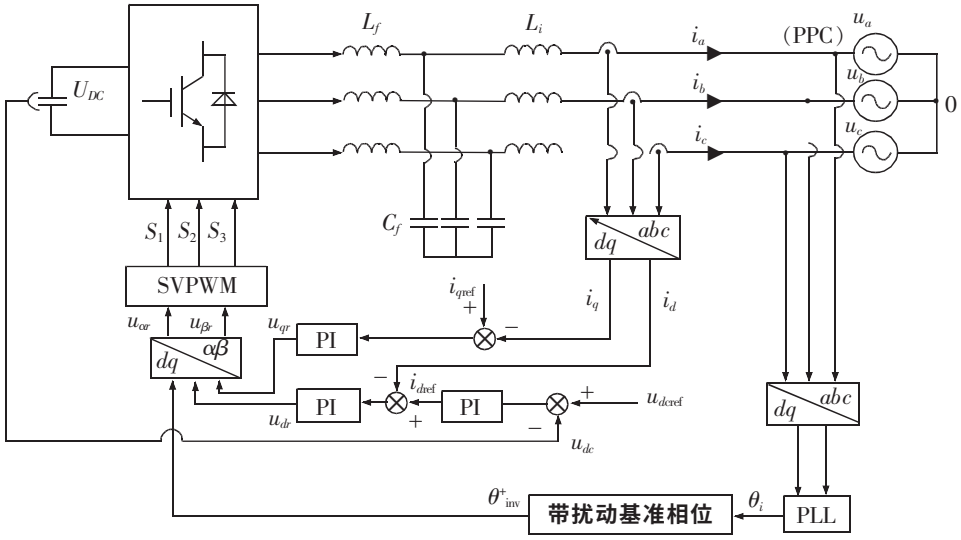


图 2　实现三次谐波注入的控制框图

Fig.2　Control block diagram of the third harmonic injection

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图3为实现孤岛检测算法的软件流程图。如图,注入三次谐波首先要测量PCC点三次谐波电压v_3,首先判断三次谐波量是否正常,如果正常那么三次谐波注入的幅值k取与v_3相反,并输入扰动值。继续测量PCC点的v_3。如果变化不正常,那么继续判断,是否超出允许范围。超出允许范围的情况下则检测出孤岛发生,控制逆变器脱离电网。假如未超出,则控制三次谐波注入的幅值k与v_3同向,加入扰动信号,继续测量PCC点电压v_3。达到实现既能检测孤岛,兼具改善电能质量的目的。

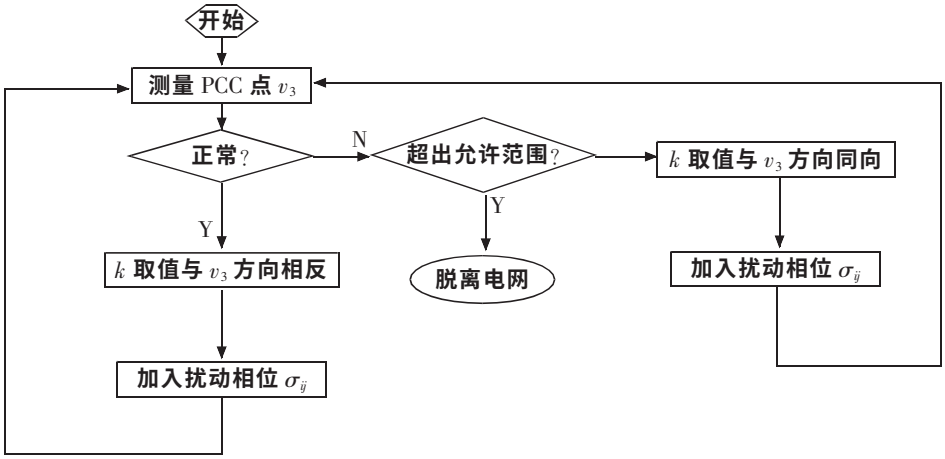


图3 注入三次谐波流程图

Fig.3 Flow chart of the third harmonic injection

3 仿真与实验验证

对孤岛策略的仿真参数如下:母线电容电压设置为800 V,电网电压为220 V,频率50 Hz。电网等效电抗为1.8 mH,LC滤波器中电感取5 mH,电容取47 uF。逆变器开关管开关频率取20 kHz,电压电流采集频率为1 kHz。本地等效RLC谐振负载的谐振频率取50 Hz, 负载品质因数Q取2.5,R=174.8 Ω,L=220 mH,C=45 μF。

仿真结果如图4所示,在图中能够看出,控制等效电网于1.06 s的时候发生故障,逆变器在经过孤岛检测控制,于1.1 s的时候停止加大幅值检测,实际检测时间为0.04 s,由于电网自身并不是理想的电源,为了防止,逆变器在电网正常供电的,但有扰动的情况下,频繁的开关机。控制逆变器输出端电压跌落到一定值时,保持这个大小继续运行一设定时间(根据具体要求给定,本文给定为500 ms),测出电网电压仍然异常的情况下,控制逆变器脱离电网。

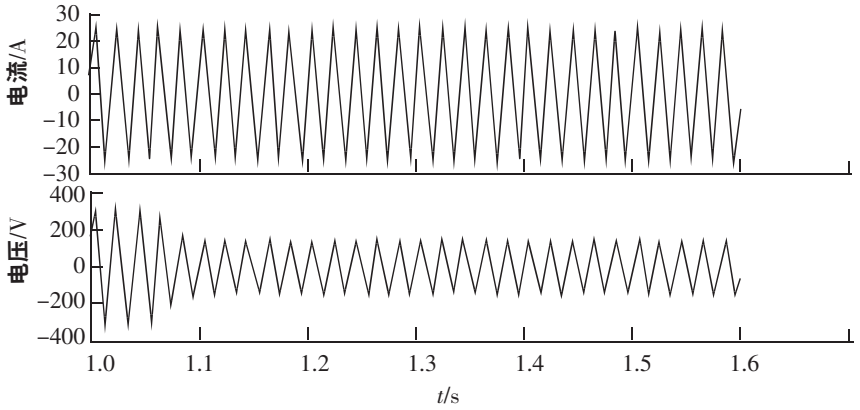


图4 孤岛检测图

Fig.4 Islanding detection

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在 4.8 kW 三相逆变器进行三次谐波注入孤岛检测实验验证。实验参数与仿真参数基本相同。本地负载则有孤岛发生模拟装置代替。图 5 所示波形为注入三次谐波扰动检测实验效果图，从图中可以看出，该方法使用了 27.8 ms检测出孤岛发生。

图 6 所示波形为本文所使用的控制策略的实验效果图，从图中我们能够看出，检测出孤岛发生之后，该控制方法继续控制逆变器运行 500 ms。在此期间内，逆变器并未检测到电网恢复正常范围。检测出孤岛发生，控制逆变器脱离电网。

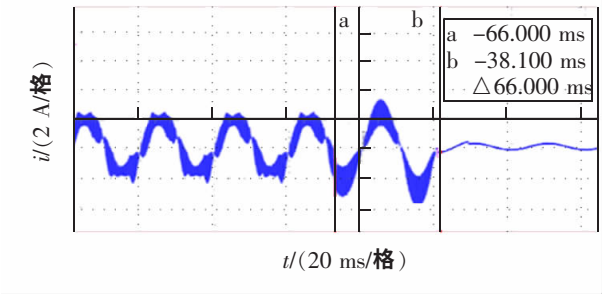


图 5　三次谐波注入检测波形图

Fig.5　Detection waveform of the third harmonic injection

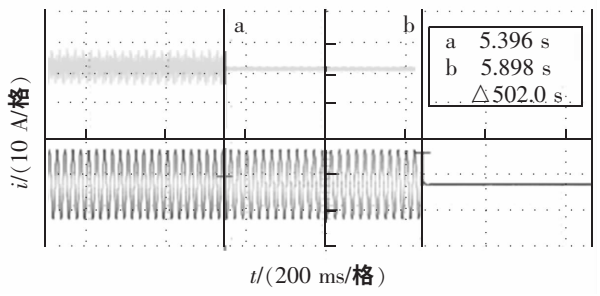


图 6　孤岛实验检测图

Fig.6　Islanding test and detection

图 7 所示的为电网正常运行的情况下，功率分析仪所测得的该孤岛控制策略对电网各次谐波的大小的影响。从图中我们能够看出，三次谐波的含量控制了在 2.724%，总得电流谐波畸变率(THD)为 2.924%符合电网 5%的要求，功率因数能够 λ 能够达到 0.99。我们能够该方法能够很好的实现逆变器高电能质量注入电网中。

change items

PLL	I1
Freq	50.000 Hz
U1	220.824 V
I1	17.0765 A
P1	3.7693kW
S1	3.7694kVA
Q1	-0.0289kvar
λ1	0.99997
φ1 D	0.439 °
Uthd1	0.173 %
Ithd1	2.924 %
Pthd1	0.004 %
Uthf1	---------
Ithf1	---------
Utif1	---------
Itif1	---------

Or.	I1 [A]	hdf[%]	Or.	I1 [A]	hdf[%]	Or.	I1 [A]	hdf[%]	Or.	I1 [A]	hdf[%]
Tot.	17.0765		dc	0.0028	0.016	Tot.	17.0765		dc	0.0028	0.016
1	17.0692	100.000	2	0.0246	0.144	41	0.0077	0.045	42	0.0042	0.025
3	0.4649	2.724	4	0.0300	0.176	43	0.0093	0.054	44	0.0037	0.022
5	0.1119	0.655	6	0.0208	0.122	45	0.0094	0.055	46	0.0037	0.022
7	0.0567	0.332	8	0.0022	0.013	47	0.0079	0.046	48	0.0019	0.011
9	0.0709	0.416	10	0.0114	0.067	49	0.0053	0.031	50	0.0129	0.076
11	0.0609	0.357	12	0.0099	0.058	51	---------	---------	52	---------	---------
13	0.0228	0.134	14	0.0061	0.035	53	---------	---------	54	---------	---------
15	0.0297	0.174	16	0.0072	0.042	55	---------	---------	56	---------	---------
17	0.0377	0.221	18	0.0013	0.008	57	---------	---------	58	---------	---------
19	0.0232	0.136	20	0.0019	0.011	59	---------	---------	60	---------	---------
21	0.0151	0.089	22	0.0051	0.030	61	---------	---------	62	---------	---------
23	0.0220	0.129	24	0.0019	0.011	63	---------	---------	64	---------	---------
25	0.0189	0.110	26	0.0027	0.016	65	---------	---------	66	---------	---------
27	0.0102	0.060	28	0.0047	0.027	67	---------	---------	68	---------	---------
29	0.0170	0.099	30	0.0039	0.023	69	---------	---------	70	---------	---------
31	0.0169	0.099	32	0.0022	0.013	71	---------	---------	72	---------	---------
33	0.0109	0.064	34	0.0019	0.011	73	---------	---------	74	---------	---------
35	0.0116	0.068	36	0.0051	0.030	75	---------	---------	76	---------	---------
37	0.0096	0.056	38	0.0027	0.016	77	---------	---------	78	---------	---------
39	0.0077	0.045	40	0.0030	0.017	79	---------	---------	80	---------	---------

图 7　逆变器正常并网运行的谐波分析

Fig.7　Harmonic analysis on three-phase inverter in normal grid work

4　结论

提出了三相逆变器注入三次谐波孤岛检测方法，分析了注入三次谐波的原理，及该方法的运行模式，提出相应的控制策略。并通过仿真和实验验证该方法的可行性与有效性。该方法具有以下优势：

1）能够做到快速有效的检测出孤岛发生，并且能够做到零盲区。

2）不仅能够做到对电网不产生新的污染，还能够做到改善电网正常供电情况下的电能质量。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 马宁. 太阳能光伏发电概述及发展前景[J]. 智能建筑电气技术，2011，5(2)：25-28.

[2] 丁明，王伟胜，王秀丽，等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报，2014，34(1)：1-14.

[3] 章勇高，李洋，康淦明，等. 一种新型单相三开关光伏并网逆变器研究[J]. 华东交通大学学报，2014，31(4)：114-118.

[4] 章勇高，康淦明，李洋，等. 单相单级升降压逆变器的拓扑分析与比较[J]. 华东交通大学学报，2014，31(1)：77-82.

[5] 宋平岗，罗善江，杨姚，等. MMC 变流器新型滑模控制器设计[J]. 华东交通大学学报，2015，32(4)：85-89.

[6] PATTHAMAKUNCHAI S，KONGHIRUN M，LENWARI W. An anti-islanding for multiple photovoltaic inverters using harmonic current injections[C]// Electrical Engineering/Electronics，Computer，Telecommunications and Information Technology(ECTI-CON)，2012 9th International Conference on IEEE，2012：1-4.

[7] 褚小莉. 光伏并网中的孤岛效应研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2009.

[8] 奚淡基. 逆变器并网孤岛检测技术的研究[D]. 杭州：浙江大学，2006.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 董伟杰，白晓民，朱宁辉，等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究[J]. 电网技术，2013，37(5)：1265-1271.

Research on New Islanding Detection Based on Three-Phase Photovoltaic Grid-Connected Inverter

Zhang Yonggao，Cai Shaohua

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract：Islanding is one of the major problems in photovoltaic(PV) power generation systems. Islanding occurs when one or more PVs supply local loads without connection of grid utility. This unplanned condition must be detected in the shortest possible time and countermeasures should be taken to prevent hazardous effects on staff and equipment. The three main methods of anti-islanding are passive method, active method and communications test method. The passive method is favorable in the speed of detection and power quality, but it has rela tively large non-detection zone(NDZ). On the other hand, the active method has relatively smaller NDZ with quick detection speeds. However, the traditional active islanding detection method is injecting the disturbance component，which affects grid power quality. In this paper, a third harmonic injection islanding detection method is proposed, which can not only effectively detect islanding but also improve power quality to a certain extent. Simulation and experimental verification are carried out, whose results verify the feasibility and effectiveness of the new method.

Key words：inverter; islanding detection; third harmonic injection

（责任编辑　姜红贵）

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net