

# Research on Feasibility of Large-scale New Energy Islanding Detection Scheme Based on Impedance Measurement

**Wang Miao**

Graduate Faculty, China Electric Power Research Institute, Beijing, China

**Email address:**

wangmiaotj@126.com

**To cite this article:**

Wang Miao. Research on Feasibility of Large-scale New Energy Islanding Detection Scheme Based on Impedance Measurement. *Science Discovery*. Vol. 5, No. 1, 2017, pp. 69-76. doi: 10.11648/j.sd.20170501.21

**Received:** March 12, 2017; **Accepted:** April 17, 2017; **Published:** April 20, 2017

**Abstract:** A lot of research has been done on islanding detection of photovoltaic(PV) power system. In these schemes, islanding can be detected by schemes based on convertor control. The range of these research is islanding occurs in a single power station or distributed generation system. However, experiments proof that islanding also occurs in large-scale wind farms. Classical islanding detection schemes such as active frequency drift scheme or reactive power disturbance scheme may not suitable to this situation due to the different parameter when islanding occurs in large-scale new energy power stations. Meanwhile, islanding detection scheme based on system impedance detection is an ideal scheme to detect islanding in large-scale new energy power stations. However, research on islanding detection scheme based on system impedance only compute the impedance of the outlet end of the convertor, in other words, in a single power station and overlook the problems when the scheme is applied to large-scale new energy power stations, such as power quality problem and signal attenuation problem and so on. This article will analyze the feasibility of using system impedance to detect islanding in large-scale new energy power stations.

**Keywords:** Islanding Detection, System Impedance, New Energy Power Station

---

## 大规模新能源孤岛阻抗测量方法适用性研究

**王淼**

研究生部, 中国电力科学研究院, 北京, 中国

**邮箱**

wangmiaotj@126.com

**摘要:** 传统的孤岛检测研究大多关注的是光伏发电系统的孤岛检测, 通过光伏逆变器单机控制来实现, 而且研究针对的范围是单一电站发生孤岛或者分布式电源及负载发生孤岛运行的情况。实验证明, 不仅小型光伏发电系统可能产生孤岛现象, 大规模新能源电站也可能出现孤岛运行情况。此时经典的主动偏移法及功率扰动孤岛检测方法由于不同电站逆变器或者风电机组主动孤岛参数不同可能造成孤岛检测失败。而基于阻抗测量的孤岛检测方法比较容易满足大规模多电站的孤岛检测要求。既有的基于阻抗测量的研究都是对单逆变器出口侧进行阻抗测量, 并未对其在大规模新能源电站应用而产生的电能质量恶化问题和因变压器及输电线路对扰动信号的滤波作用造成扰动信号衰减等问题进行分析。针对上述问题本文将两种经典的系统阻抗测量方法在大规模新能源电站中的适用性进行仿真分析。

**关键词:** 孤岛检测, 系统阻抗, 新能源电站

---

1. 引言

根据中国国家能源局的数据，2016年中国全年新增风电装机1930万千瓦，总并网装机容量达1.49亿千瓦，为总发电装机容量9%，全年风电发电量2410亿千瓦时，为总发电量的4%；同时，2016年光伏新增装机容量3454万千瓦，总装机容量7742万千瓦，为总发电装机容量4.67%，全年光伏发电量662亿千瓦时，为总发电量的1%。中国新能源虽然装机容量大发展速度快，但集中式分布特点明显，80%以上集中在消纳能力有限的东北西北华北地区。近年来，学者对新能源电站大规模接入的研究工作主要集中在对电力系统潮流分布、稳定性、调峰调频的影响等方面，很少关注大规模新能源电站的孤岛问题。

孤岛现象，是指包含负荷和电源的部分电网，从主网脱离后继续孤立运行的状态。既有对孤岛问题的研究多集中在对光伏逆变器控制的研究，即改变光伏逆变器的电流环或功率外环，并对逆变器单体出口侧电压电流值的特性进行分析，以对孤岛进行判别。方法主要分为被动式孤岛检测方法[1-3]（过/欠电压法、过/欠频率法、相位跳变

检测法和电压谐波检测法等）与主动式孤岛检测方法[4-5]（主动偏移法、功率扰动方法等）。研究表明被动式孤岛检测方法存在检测盲区大的缺点，而主动式孤岛检测方法在多机并联运行的情况下具有可能相互干扰导致孤岛检测失败的缺点。文献[6-7]研究在多逆变器并联系统不同孤岛检测方法配合的特性，主要对移频和移相两类主动孤岛检测方法相互联系及影响进行了分析，为在大规模电站中不同电站采用不同的孤岛检测方法时可能造成孤岛检测失败提供了理论依据。同时，实验也证明大规模新能源电站孤岛运行的存在。

2. 多电站的孤岛现象

研究和实际案例表明，大规模新能源电站也会出现孤岛运行现象。2012年中国电力科学研究院开展330kV线路短路试验，在试验过程中发现大量风电场发生孤岛运行现象。实验中发生孤岛风电场如图1所示。

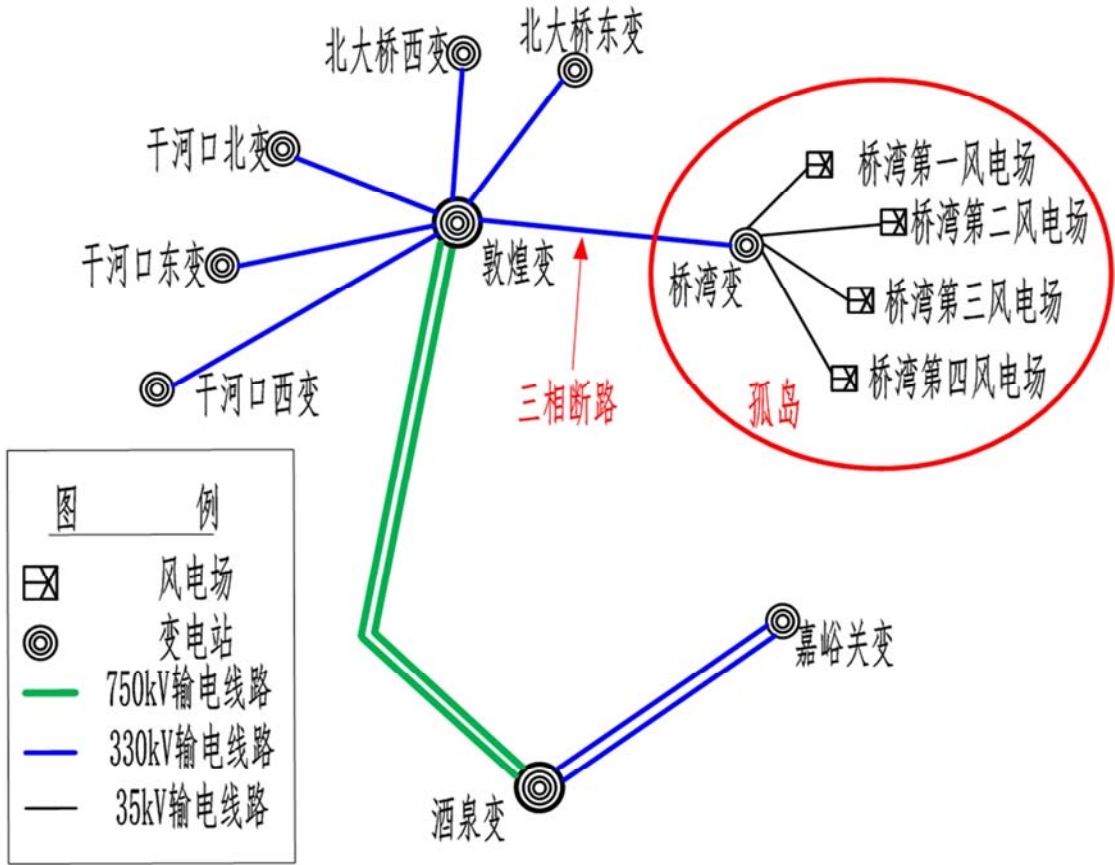


图1 产生孤岛风电场。

实验中，人为在桥湾变330kV出线侧制造C相接地故障，0.7s后330kV断路器重合闸失败，330kV母线电压降为0后，桥湾一至四号风电场35kV母线仍有电压存在。图2为桥湾一至四号风电场35kV母线A相电压波形。孤岛产生后，四座风电场35kV母线都有电压存在，虽略有波动，但在22s

时间内基本保持在1pu。这将对运维人员安全及设备安全造成极大的隐患。

所以研究适用于多风电场或多光伏电站并联运行的孤岛保护方法具有重要意义。而传统依靠移频或移相的孤岛检测方法存在互相干扰而导致检测失败的可能性，基于系统阻抗检测的方法较好的克服了相互干扰的问题。

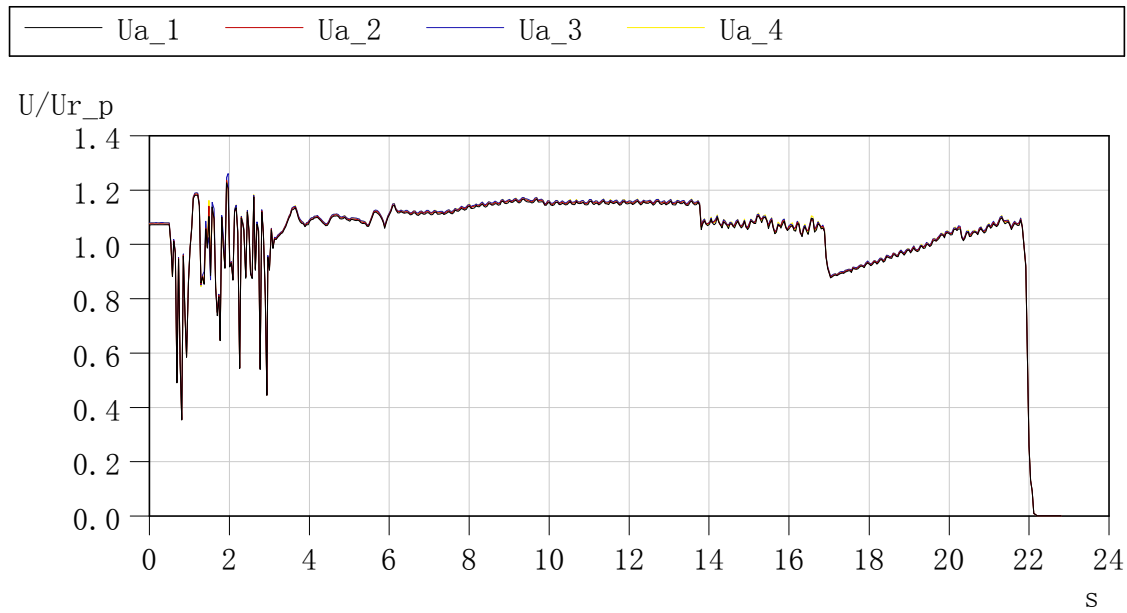


图2 孤岛产生后桥湾一至四号风电场35kV母线电压。

### 3. 基于阻抗测量孤岛检测方法在大规模新能源孤岛中的适用性分析

#### 3.1. 大规模新能源集中并网系统

##### 3.1.1. 等效电路模型

传统针对并网逆变器的电网阻抗测量技术可分为被动测量方式与主动测量方式两种[8]。被动检测方式精度偏低，本文主要研究主动测量方式在大规模新能源并网情况下孤岛检测适用性。

N座新能源电站三相等效电路如图3所示。其中，1至N为电站序号， $Z_p$ 为发电系统等效阻抗， $Z_T$ 为电站升压变等效阻抗， $Z_{line}$ 为电站线路阻抗， $Z_{load}$ 为电站站内负载等效阻抗，S为断路器，电网阻抗等效为电感 $L_{grid}$ 。

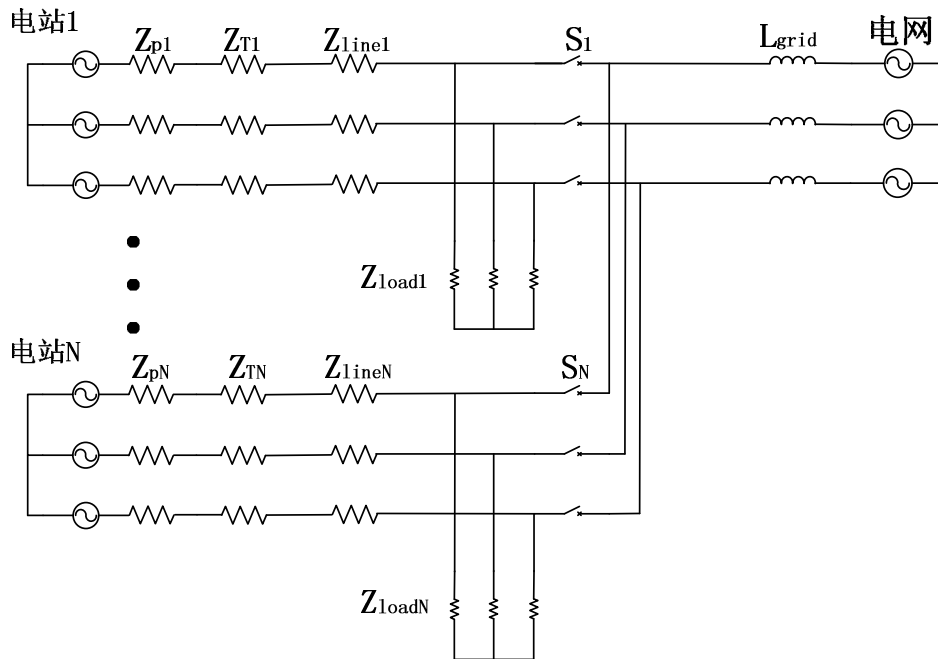


图3 大规模新能源电站电路图。

在三相对称系统中，N个新能源电站并网单相等效电路图如图4所示。

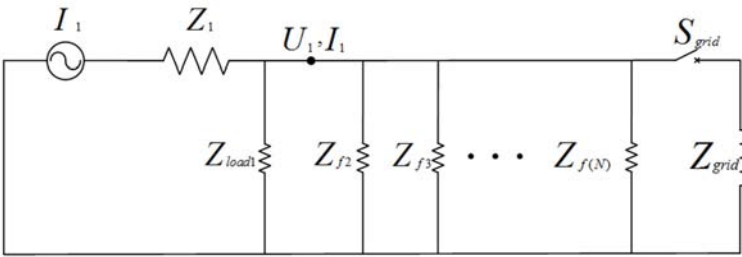


图4 单相等效电路。

将电站1等效为电流源 $I_1$ ，电站1内线路及变压器阻抗等效为 $Z_1$ ，负载等效为 $Z_{load1}$ ，忽略35kV线路阻抗，2至N号电站阻抗等效为 $Z_2、Z_3 \dots Z_{(N)}$ ，电网阻抗等效为 $Z_{grid}$ 。序号为1的电站并网点电压记为 $U_1$ ，电流记为 $I_1$ ，电压电流不同频率下的分量分别记作 $U_{(jn\omega)}、I_{(jn\omega)}$ ，可通过对 $U_1、I_1$ 进行傅里叶分析得到。

$$Z_{(jn\omega)} = \frac{U_{1(jn\omega)}}{I_{1(jn\omega)}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_2(jn\omega)} + \dots + \frac{1}{Z_N(jn\omega)} + \frac{1}{Z_{grid(jn\omega)}}} \quad (1)$$

在序号为1的风电场并网点测量电网侧等效阻抗等于序号2至N的风电场等效阻抗与电网阻抗的并联阻抗。正常情况下电网阻抗值 $Z_{grid}$ 远小于风电场等效阻抗值。孤岛产生后，即 $Z_{grid}$ 支路断开之后，阻抗幅值明显增加，且其相角会由大电网电压决定转变为由孤岛系统阻抗特征决定。

所以可以将阻抗的幅值或相角的变化作为孤岛检测的依据。基于系统阻抗测量的孤岛检测方法原理比较简单，对其研究多集中在阻抗测量的方法上。

3.1.2. 仿真模型

为研究阻抗测量方法在大规模新能源电站孤岛检测中的有效性，首先在MATlab/simulink环境下搭建大规模直驱永磁风机电站模型。电站由1.5MW直驱永磁风机模块、变压器模块、输电线路模块、RLC并联负载模块、电网模块组成。模型主接线图如图5所示。仿真过程中断路器S在1s时刻断开，6座风电场发生孤岛，孤岛持续时间1s，仿真时长2s，在测量点1、2对A相电压电流进行测量。6座电站风电机组容量如表1所示。

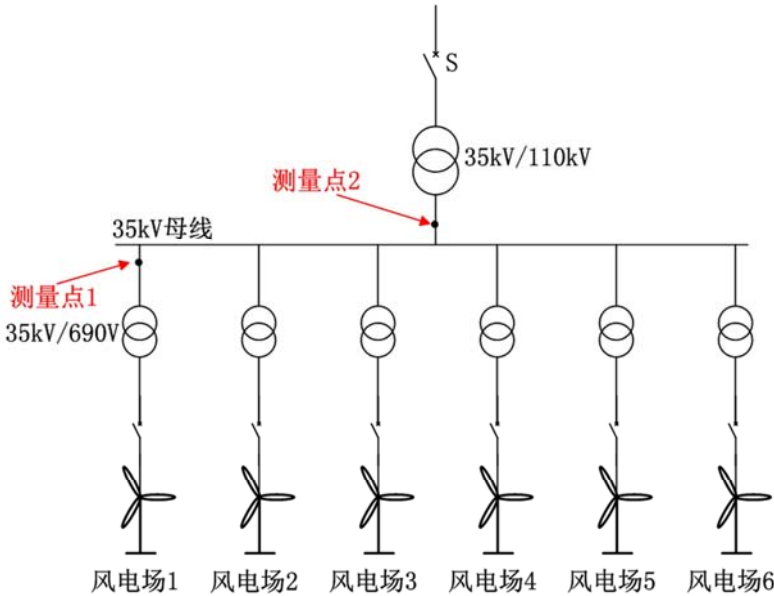


图5 仿真模型主接线图。

表1 仿真模型电站风机容量统计。

风电场序号	风电场模型风机数量及容量统计		
	单机容量(MW)	风机数量	总容量(MW)
1	1.5	24	36
2	1.5	28	42
3	1.5	24	36
4	1.5	28	42
5	1.5	28	42
6	1.5	48	72
7	1.5	58	87

3.2. 阻抗测量方法

主动式阻抗测量方法主要可以分为单次谐波注入（注入非特征谐波）及复合谐波注入两种方式。这两种方法应用于大规模电站的孤岛检测中时可能存在如下问题：1）在大规模新能源电站孤岛检测时需要以电站为单位，即在电站并网点进行电压电流测量并进行快速傅里叶变换并进行阻抗计算，而在逆变器侧进行注入的谐波可能由于变压器和线路的电感电容作用产生衰减，造成电站出口端电

压电流的注入频率分量值较小，造成阻抗计算准确性降低；2）大规模新能源电站内大量逆变器同时注入电流谐波可能造成电网谐波含量升高，造成电网电能质量恶化。针对上述问题及阻抗计算精度的影响因素，本节重点分析单次谐波扰动注入及复合谐波扰动注入两种方式在大规模新能源并网环境下的适用性。

3.2.1. 单次谐波扰动法

利用注入单次谐波测量电网阻抗是比较直观的方法，利用在逆变器电流环注入谐波电流作为激励，测量并网点电压电流在该频率下的分量，并利用 $Z(jn\omega) = \frac{U(jn\omega)}{I(jn\omega)}$ 计算该频率下的系统阻抗值。电流控制框图如图6所示。其中 $G_c(s)$ 为调节器、 $K_{PWM}$ 为逆变器等效增益。

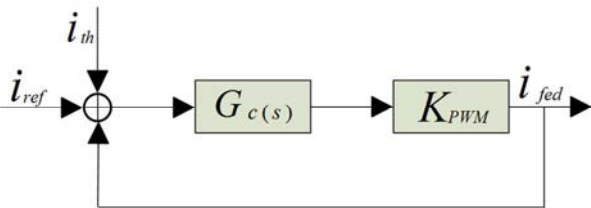


图6 谐波注入电流控制框图。

分别仿真在不同谐波注入幅值和不同谐波注入风机数量条件下35kV母线电流谐波含量。参考单逆变器阻抗测量方法文献[9-13]，选取注入谐波频率分别为75Hz和500Hz。下面分析所有风电机组全部施加谐波扰动，分别注入75Hz及500Hz谐波电流时，注入扰动电流幅值对测量点2处电流总谐波畸变率（THD）的影响。

表2 注入75Hz谐波35kV母线A相电流THD。

$I_{th}/I_{ref}$	35kV母线A相电流THD	
	孤岛前	孤岛后
5%	0.55%	0.97%
7.5%	0.55%	0.97%
10%	0.55%	0.97%

表3 注入500Hz谐波35kV母线A相电流THD。

$I_{th}/I_{ref}$	35kV母线A相电流THD	
	孤岛前	孤岛后
5%	2.51%	2.45%
7.5%	3.71%	3.51%
10%	4.92%	4.59%

表2及表3为全部风电机组注入特征谐波扰动后测量点2处A相电流THD值，在注入同等幅值条件下，注入75Hz谐波引起的35kV母线电流THD远小于注入500Hz谐波。以电能质量作为比较标准，采用注入75Hz谐波优于500Hz谐波。并且当 $\frac{I_{th}}{I_{ref}} = 10\%$ 时，注入500Hz谐波时引起的电流THD值已超过国家标准GB/T19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》中对风机并网电流谐波含量的要求。因为如果电压电流谐波分量过小可能会影响阻抗计算精度，下面分析在 $\frac{I_{th}}{I_{ref}} = 0.05$ 与 $\frac{I_{th}}{I_{ref}} = 0.75$ 条件下测量点1处75Hz与500Hz谐波电压电流分量，如表4、表5所示。

表4 75Hz电压电流谐波分量。

电压电流	$I_{th}/I_{ref}$	
	5%	7.5%
$U_{75Hz}$ （孤岛前）	$5.7 \angle -10.4^\circ$ V	$5.7 \angle -32^\circ$ V
$I_{75Hz}$ （孤岛前）	$2.17 \angle 169.7^\circ$ A	$2.25 \angle 149.5^\circ$ A
$U_{75Hz}$ （孤岛后）	$556.8 \angle 236.6^\circ$ V	$638.4 \angle 238.5^\circ$ V
$I_{75Hz}$ （孤岛后）	$4.7 \angle 53.5^\circ$ A	$5.36 \angle 56^\circ$ A

表5 500Hz电压电流谐波分量。

电压电流	$I_{th}/I_{ref}$	
	5%	7.5%
$U_{500Hz}$ （孤岛前）	$14.25 \angle -34.1^\circ$ V	$22.8 \angle -34.4^\circ$ V
$I_{500Hz}$ （孤岛前）	$5.13 \angle 140^\circ$ A	$7.68 \angle 139.5^\circ$ A
$U_{500Hz}$ （孤岛后）	$508.8 \angle 260.5^\circ$ V	$753.6 \angle 261.2^\circ$ V
$I_{500Hz}$ （孤岛后）	$4.42 \angle 129.9^\circ$ A	$6.67 \angle 130.8^\circ$ A

由表4表5可见，在系统电感电容作用下扰动信号发生衰减，低压侧注入75Hz、500Hz谐波含量占基波含量5%、7.5%，测量点1处75Hz、500Hz谐波含量占基波含量的2%-4%。由此计算得阻抗值如表6所示。

表6 阻抗计算值。

阻抗	$I_{th}/I_{ref}$	
	5% ( $\Omega$ )	7.5% ( $\Omega$ )
$Z_{75Hz}$ （孤岛前）	$2.627 \angle -180.1^\circ$	$2.53 \angle -181.5^\circ$
$Z_{75Hz}$ （孤岛后）	$118.409 \angle 183.1^\circ$	$119.045 \angle 182.5^\circ$
$Z_{500Hz}$ （孤岛前）	$2.777 \angle -174.1^\circ$	$2.970 \angle -173.9^\circ$
$Z_{500Hz}$ （孤岛后）	$115.056 \angle 130.6^\circ$	$113.04 \angle 130.4^\circ$

由表6可见6座电站产生孤岛前后，测量点1处计算得到阻抗幅值及相角均发生突变，虽然扰动信号发生了衰减，但仍有效且快速的检测到孤岛产生。

若部分风机安装谐波注入装置依然能够准确计算系统阻抗，则可以通过该方法减少对电网电能质量的影响。以下对安装谐波注入模块风机不同数量进行对比。注入500Hz谐波扰动，对安装谐波注入模块风机百分比分别为100%、60%进行比较，测量点2处THD及测量点1处 $\frac{I_{500Hz}}{I_{50Hz}}$ 值及阻抗计算值如表7所示。

表7 孤岛发生后谐波含量及阻抗计算。

谐波及阻抗	安装谐波注入模块风机比例	
	60%	100%
THD（孤岛前）	1.56%	2.51%
$\frac{I_{500Hz}}{I_{50Hz}}$ （孤岛前）	1.86%	2.46%
THD（孤岛后）	1.68%	2.45%
$\frac{I_{500Hz}}{I_{50Hz}}$ （孤岛后）	1.74%	2.21%
$Z_{500Hz}$ （孤岛前）	$2.477 \angle -174.1^\circ \Omega$	$2.777 \angle -174.1^\circ \Omega$
$Z_{500Hz}$ （孤岛后）	$100.461 \angle 30.1^\circ \Omega$	$115.056 \angle 130.6^\circ \Omega$



由表7可见减少安装谐波注入模块风机数量可以有效减小THD值，但此方法会导致用以计算阻抗值的电压电流谐波分量减小，造成阻抗计算值准确度下降。

3.2.2. 复合谐波扰动法

单次谐波扰动法对系统在特定频率下的阻抗进行了测量，然而由于电网结构与电力设备的复杂多样性，电网阻抗与频率之间的关系是非线性的。所以有必要对电网在不同频率下的阻抗进行测量。对复合谐波的注入，文献[14-19]提出在发电机低压侧注入脉冲扰动，测量电源出口端线电压从而反映孤岛发生前后系统阻抗的变化，进而对分布式电源的孤岛状态进行判定的方法。相对于脉冲信号，方波信号是一种更可控并且能在较宽频带对系统阻抗进行测量的扰动信号。本节将对注入方波扰动信号对系统阻抗进行测量的方法在大规模电站孤岛检测中的适用性进行分析。仿真中，在风机出口侧注入方波扰动。注入方波信号占空比为0.33，幅值与基波电流幅值之比为0.03。方波信号经快速傅里叶变换(FFT)后各次谐波如表8所示。

表8 方波快速傅里叶变换后谐波分量。

特征频率/基波频率电流	比值
$I_{100\text{Hz}}/I_{50\text{Hz}}$	50.23%
$I_{200\text{Hz}}/I_{50\text{Hz}}$	24.89%
$I_{250\text{Hz}}/I_{50\text{Hz}}$	20.18%
$I_{350\text{Hz}}/I_{50\text{Hz}}$	14.16%
$I_{400\text{Hz}}/I_{50\text{Hz}}$	12.68%

方波扰动中含有大量100Hz、200Hz、250Hz、350Hz及400Hz分量，本文以5次与7次谐波为例对系统阻抗进行计算。施加扰动前后测量点1处35kV母线A相电流THD如表9所示。施加扰动后35kV母线A相电流波形如图7所示。

表9 施加扰动前后A相电流THD。

工况	孤岛前THD
未加扰动	0.07%
注入方波扰动	0.8%

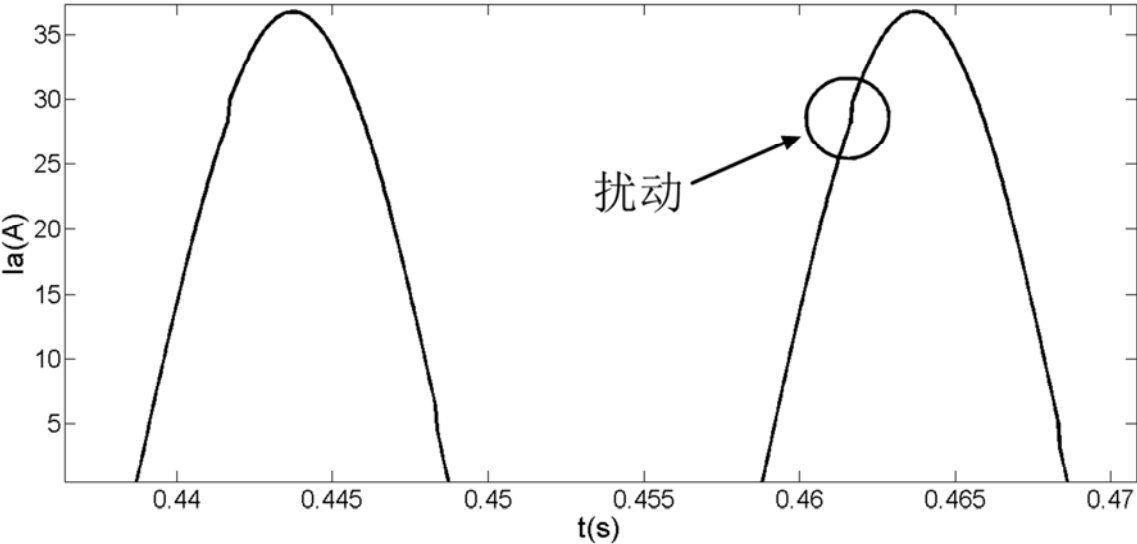


图7 叠加扰动的A相电流波形。

方波扰动信号幅值很小，所以注入扰动后在孤岛产生前，3次、5次及7次谐波电流含量满足GB/T19963-2011对并网风电机组输出电流谐波的要求。

由于风电场站在正常并网运行时存在含量相对较高的奇次谐波，当选取5次与7次谐波对系统阻抗进行测量时，需要考虑系统固有5次和7次背景谐波的影响。首先在不加方波电流扰动时记录测量点1处35kV母线A相电压电流值，并分析A相电压电流250Hz与350Hz谐波含量。然后测量施加方波电流扰动时A相电压电流250Hz与350Hz谐波含量。用施加扰动后的谐波分量减去未加扰动时的谐波分量即为在方波扰动作为激励下的电压电流分别在250Hz与350Hz下的响应，以便对系统在250Hz及350Hz下的阻抗进行测量。表10及表11为注入扰动前后测量点1处A相电压电流250Hz及350Hz分量孤岛前后幅值与相角。表12为由方波扰动产生的A相电压电流变化量，即用以进行阻抗计算的电压电流值。

表10 扰动前35kV母线A相电流250Hz及350Hz谐波分量。

频率	电压电流250Hz、350Hz谐波分量	
	电压 (V)	电流 (A)
250Hz (孤岛前)	$2.85 \angle 12.9^\circ$	$0.29 \angle 11.7^\circ$
250Hz (孤岛后)	$110.22 \angle -57.5^\circ$	$0.14 \angle -77.3^\circ$
350Hz (孤岛前)	$2.85 \angle 10.7^\circ$	$0.2 \angle 9.9^\circ$
350Hz (孤岛后)	$60.97 \angle -47.4^\circ$	$0.07 \angle -72.2^\circ$

表11 扰动后35kV母线A相电流250Hz及350Hz谐波分量。

频率	电压电流250Hz、350Hz谐波分量	
	电压 (V)	电流 (A)
250Hz (孤岛前)	$2.85 \angle 48.1^\circ$	$0.16 \angle 22.2^\circ$
250Hz (孤岛后)	$101.14 \angle -62.5^\circ$	$0.18 \angle 228.6^\circ$
350Hz (孤岛前)	$2.85 \angle 46.9^\circ$	$0.11 \angle 18.9^\circ$
350Hz (孤岛后)	$54.1 \angle -52.3^\circ$	$0.11 \angle 218.8^\circ$

表12 方波扰动产生的250Hz及350Hz电压电流分量。

频率	电压电流250Hz、350Hz谐波分量	
	电压 (V)	电流 (A)
250Hz (孤岛前)	1.724 $\angle$ 120.5°	0.138 $\angle$ 179.7°
250Hz (孤岛后)	12.933 $\angle$ 165.5°	0.144 $\angle$ 180°
350Hz (孤岛前)	1.771 $\angle$ 118.8°	0.099 $\angle$ -179.7°
350Hz (孤岛后)	8.447 $\angle$ 165.8°	0.104 $\angle$ -179.5°

由表12所得电压电流值计算得到孤岛前后测量点1处阻抗计算值如表13所示。

表13 阻抗计算值。

阻抗计算值	
频率	阻抗 ( $\Omega$ )
250Hz (孤岛前)	12.5 $\angle$ -59.2°
250Hz (孤岛后)	90.1 $\angle$ -14.5°
350Hz (孤岛前)	17.9 $\angle$ -61.5°
350Hz (孤岛后)	81.62 $\angle$ -14.7°

由表13可见孤岛产生前后，测量点1处250Hz及350Hz阻抗幅值及相角均发生突变，验证了注入方波电流作为扰动量以对系统阻抗进行计算的可行性。同样其计算精度受注入方波的幅值及占空比影响。

#### 4. 结论

仿真证明，单次谐波扰动注入与复合谐波扰动注入法均能够有效对大规模新能源电站孤岛产生进行检测，而注入谐波的幅值、加入谐波注入模块的发电单元数量、方波扰动信号占空比等因素都会影响电能质量和阻抗计算精度：扰动量越大，阻抗计算精度越高，而对电能质量的影响越大。另外多新能源电站接入电网的不同拓扑结构和新能源接入地电网强弱以及光伏电站及风电场站的并网与解列都会造成系统阻抗值不同或者变化，所以难以确定通用化的孤岛保护阈值，这些因素对基于阻抗测量的孤岛检测方法的影响需要我们进一步的研究。

#### 参考文献

[1] Francesco De M., Marco L., Antonio D.A., et al. "Overview of anti-islanding algorithms for PV systems. Part 1: Passive Methods [C]". 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-EPMC, 2006:1878-1883.

[2] Vieira J.C.M., Freitas W., Wilsun X., et al. "Performance of frequency relays for distributed generation protection [J]". IEEE Transactions on PowerDelivery., vol. 3, pp. 1120-1127, Aug. 1993.

[3] Sung-II J., Kwang-Ho K., "An islanding detection method for distribution generation using voltage unbalance and total harmonic distortion of current [J]". IEEE

Transactions on PowerDelivery., vol. 19, pp. 745-752, 2004.

- [4] Ropp M. E., Begovic M., Rohatgi A. "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention [J]". IEEE Transaction on Energy Conversion., vol. 3, pp. 810-816, 1999.
- [5] Jin Beom J., Hee Jun K, Kang Soon A., et al. "novel method for anti-islanding using reactive power[C]" 27th International Telecommunications Conference, NTELEC' 05, 2005: 101-106.
- [6] 刘方锐, 段善旭, 康勇, 张宇. 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.
- [7] 刘方锐, 余蜜, 张宇, 段善旭, 康勇. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测极力研究。
- [8] 谢少军, 季林, 许津铭. 并网逆变器电网阻抗检测技术综述[J]. 电网技术, 2015, 39(2):320-326.
- [9] 胡国珍, 段善旭, 陈昌松, 等. 弱电网下储能电池能量回馈系统自适应并网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1):84-89.
- [10] Asiminoaei L, Teodorescu R, Blaabjerg F, et al. A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6): 1480-1490.
- [11] Asiminoaei L, Teodorescu R, Blaabjerg F, et al. Implementation and test of an online embedded grid impedance estimation technique for PV inverters [J], IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1136-1144.
- [12] Ciobotaru M, Teodorescu R, Blaabjerg F. On-line grid impedance estimation based on harmonic injection for grid-connected PV inverter [C], 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Vigo, Spain: IEEE, 2007: 2437-2442.
- [13] 汤婷婷, 张兴, 谢东, 等. 基于高频注入阻抗检测的孤岛检测研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(3):70-72.
- [14] 韩耀鹏. 基于可控短路技术的微电网孤岛检测技术研究. [D]. 山东大学, 2011.
- [15] J. Kliber, Wencong Wang, Wilsun Xu. Local Anti-Islanding Protection for Distributed Generators Based on Impedance Measurements. IEEE Electric Power Conference, pp.1-5, Oct. 2008.
- [16] 卢晓惠. 基于系统阻抗测量的有源孤岛保护技术研究. [D]. 山东大学, 2013.
- [17] Roinila T, Vilkkio M, Sun J. Broadband methods for online grid impedance measurement [C]. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO: IEEE, 2013: 3003-3010.

- [18] Martin D, Santi E, Barklay A. Wide bandwidth system identification of AC system impedances by applying pertubations to an existing converter[C]. 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ:IEEE, 2011:2549-2556.
- [19] Roinila T, Vilkkko M, Sun J. Online grid impedance mearsurement using discrete-interval binary sequence injection[C]. 2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Salt Lake City, UT: IEEE, 2013:1-8.