

## 主动配电网谐波预测预警方法的研究

钟清<sup>1</sup>, 张文峰<sup>2</sup>, 余南华<sup>1</sup>, 李兰芳<sup>1</sup>, 王玲<sup>1</sup>

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 广东电网公司, 广东 广州 510080)

**摘要:** 提出了一种用于主动配电网谐波预测预警的方法。基于随机求和原理考虑间歇式能源投入或切出主动配电网后引起的谐波变化, 对间歇式能源并网或脱网后主动配电网的谐波进行预测, 作为主动配电网协调控制新能源的依据。考虑间歇式能源投入主动配电网后引起的谐波变化较大, 采用云模型对谐波电流建模, 利用云模型的熵来衡量正常运行方式时谐波电流的波动范围, 从而确定出间歇式能源并网前后谐波电流的异常阈值。将实测数据与谐波异常阈值比较, 可判断谐波电流是否异常, 从而实现谐波电流预警。仿真和工程算例验证了该方法的实用性和有效性。

**关键词:** 谐波; 主动配电网; 预测; 预警; 云模型

### Research on harmonic forecasting and warning of active distribution network

ZHONG Qing<sup>1</sup>, ZHANG Wen-feng<sup>2</sup>, YU Nan-hua<sup>1</sup>, LI Lan-fang<sup>1</sup>, WANG Ling<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** A method used for harmonic forecasting and warning of active distribution network is put forward. Considering harmonic change caused by intermittent energy based on the principle of random sum, it forecasts the harmonic of active distribution network after intermittent energy inputting or cutting out from the network. So it will be used as the basis of coordinated control of the new energy for active distribution network. Considering the harmonic changes caused by intermittent energy inputting active distribution network is big, it adopts the cloud model to model the harmonic current, and uses the entropy of cloud model to measure the harmonic current fluctuation range of normal operation mode, so as to determine the intermittent energy grid and harmonic current anomaly threshold. The harmonic current abnormal or not is judged by the comparison between measured data and harmonic anomaly threshold, and so the harmonic warning is realized. Simulation and engineering examples verify the practicability and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050212).

**Key words:** harmonic; active distribution network; forecast; early warning; cloud model

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0050-07

## 0 引言

近年来, 随着一次能源形势的日益严峻, 电力需求的持续增长, 世界各国正在积极开发利用可代替的新能源。以风能发电和光伏发电为主的间歇式能源接入配电网<sup>[1]</sup>的问题也越来越受到重视, 已成为国内外的研究热点<sup>[2-5]</sup>。由于传统的配电系统在未进行扩大规模投资的状态下会很快达到极限<sup>[6]</sup>, 不能再接入新的间歇式发电和可再生能源。针对这一现状, 主动配电网技术<sup>[7-10]</sup>应运而生。

主动配电网是指具有灵活结构的可以主动控制和主动管理分布式能源的配电网, 是未来智能配电网的一种发展模式, 其概念和内容于2008年在国际大电网会议(CIGRE)配电与分布式发电机组(C6)的报告中被提出, 近年来C6组对主动配电网的规划和优化方法作了大量研究。欧盟FP6主导的ADINE(active distribution network)示范工程的实例也表明, 通过主动配电网管理技术, 可以使得DG更加容易接入配电网, 优化配电网。

间歇式能源接入主动配电网后的电能质量问题是一个重要问题<sup>[11]</sup>。由于主动配电网具有有功和无功的调节功能, 间歇式能源接入主动配电网后的出

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)  
(2012AA050212)

力的变化也会引起电能质量的变化。间歇式能源接入主动配电网后引起的谐波变化会带来电能质量干扰,与系统背景谐波干扰作用叠加产生有害影响。且间歇式能源在主动配电网电能质量情况比较严重的时候接入,有可能加重谐波影响<sup>[12-14]</sup>。大量仿真证明,以逆变器输出间歇式能源在配电网低压侧三相不平衡度为限值1.25%时接入,其产生的5次谐波电流是平衡时接入的两倍,其产生的谐波电流总谐波畸变率是主动配电网无三相不平衡度时接入的1.5倍。因此,对间歇式能源接入主动配电网后的谐波作出评估是重要的。

本文提出了一种适用于主动配电网谐波预测预警的方法。根据谐波电流随机叠加模型,对间歇式能源投入主动配电网后和切出主动配电网后的谐波进行预测,以便可根据预测值选择最优并网位置;基于云模型<sup>[13]</sup>对正常运行方式下的谐波电流建模,确定正常谐波电流的波动范围和异常阈值。通过将实时数据与谐波异常阈值相比较,可判断运行方式与设备是否异常,从而实现谐波电流的预警。仿真和工程实例验证了本文方法的实用性和有效性。

## 1 间歇式能源并网点选择

间歇式能源在不同位置接入主动配电网,将会影响到配电网的电压分布、电压稳定性、电能质量问题等。合理的安装位置可以有效改善配电网电压、减小系统有功网损、提高电能质量水平。反之,如果配置不合理,将会适得其反。

间歇式能源并网点的优化配置研究<sup>[14-16]</sup>已经取得了不少成就,文献[16]通过最优潮流计算,考虑间歇式能源就地消纳,对间歇式能源的并网点作了优化配置。根据优化配置结果,间歇式能源并入主动配电网时可在多个接入点处并网。

由于间歇式能源接入主动配电网后将引起主动配电网电能质量的变化,因此,在选择间歇式能源并网点时,要对接入点的谐波作预测。如何选择最优的接入点并网,使其满足在与电网电压同频同相的前提下,又能尽量减少并网后的谐波污染,是间歇式能源并网发电运行应解决的问题。

本文提出的主动配电网的谐波预测方法可在间歇式能源并网前对并网后公共连接点处的谐波电流和谐波电压进行预测。再按照公用电网谐波电压限值的规定,可选择出既满足规定要求,又使得接入后公共连接点处谐波污染最轻的并网点。对已经投入运行的间歇式能源,当其运行时导致系统谐波

污染严重时,主动配电网可对间歇式能源接入点进行开关切换,通过预测其他接入点接入间歇式能源后的谐波电流和电压,选择出适合分布式能源并网的接入点。

## 2 谐波预测

含逆变装置的间歇式能源可看作一谐波源,公共连接点处的非线性负荷也是谐波源。考虑运行中的变化,公共连接点处的谐波实际上是所有谐波源的随机叠加的结果。

### 2.1 谐波电流叠加

多谐波源的叠加问题如今已经得到了广泛研究<sup>[17]</sup>。文献[17]根据经验,总结出了通用的谐波电流的求和法则, $h$ 次谐波合成电流可用式(1)表示。

$$I_h = k \sqrt{I_{hi}^\alpha} \quad (1)$$

式中: $I_h$ 是所有谐波源发生的第 $h$ 次谐波电流的合成值; $I_{hi}$ 是指要进行合成的各单个第 $h$ 次谐波电流的值。指数 $\alpha$ 的取值主要取决于两个因素:1)对不超过计算值的实际值所选择的概率值;2)各次谐波电流幅值和相位随机变化的程度。

根据式(1), $N$ 个谐波源相叠加的结果可以看成 $N$ 个谐波源指数求和的结果。根据文献[13]中介绍,对幅值相同的谐波源叠加,考虑不超过95%的概率值,参数 $k$ 和指数 $\alpha$ 的取值有表1的规律。

表1 参数表

Table 1 Parameters table

相位 变化范围	$I_{hi}$ 变化 范围	$N=2$		$N>2$	
		$k$	$\alpha$	$k$	$\alpha$
$0 \sim 2\pi$	0~1	1	2.0	1.0	2.0
	0.5~1	1.3	2.0	1.3	2.0
	1	1.0	1.0	1.7	2.0
$0 \sim 3\pi/2$	0~1	0.9	1.6	0.9	1.6
	0.5~1	1.0	1.4	1.0	1.4
	1	1.0	1.0	1.3	1.4
$0 \sim \pi$	0~1	0.8	1.3	0.8	1.3
	0.5~1	0.9	1.2	0.9	1.2
	1	1.0	1.0	1.2	1.2
$0 \sim \pi/2$	0~1	0.9	1.2	0.9	1.2
	0.5~1	0.9	1.1	0.9	1.1
	1	1.0	1.0	1.0	1.0

在实际中,考虑参数的分散性,根据多次实验结果可知,间歇式能源并网后的谐波电流相位在

0~2π范围内变化,且由于谐波源幅值在0~1范围内变化,可确定出间歇性能源并网后谐波电流合成公式(1)中的参数k为1,指数α为2。

因此,间歇式能源接入后,公共连接点处h次谐波合成电流可通过式(2)计算得到。

$$I_h = \sqrt{\sum_i I_{hi}^2} \quad (2)$$

由于间歇式能源并网后公共连接点处的谐波电流主要是由并网前公共连接点处的谐波电流和间歇式能源产生的谐波电流合成,可由式(3)计算得到。

$$I_{\text{合}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \quad (3)$$

式中: I<sub>1</sub>表示间歇式能源并网前公共连接点处的谐波电流, I<sub>2</sub>表示间歇式能源自身产生的谐波电流; I<sub>合</sub>表示间歇式能源并网后公共连接点处的谐波电流。

### 2.2 间歇式能源自身产生的谐波电流的确定

根据多次实验结果可知,间歇式能源接入主动配电网时,间歇式能源自身产生的谐波电流和谐波电流总畸变率受系统三相不平衡度的影响较大,有图1所示规律。

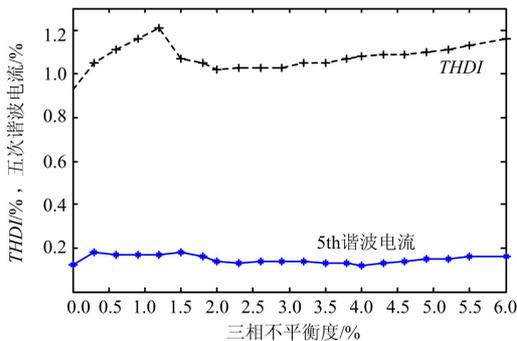


图1 THDI和五次谐波电流随三相不平衡度的变化规律

Fig. 1 Discipline of THDI and 5th harmonic current

在用式(3)计算间歇式能源并网后的公共连接点处的谐波电流时,由于并网前的各连接点处的三相不平衡度已知,结合图2可确定出并网后间歇式能源产生的谐波电流。

### 2.3 并网后公共连接点处谐波电压的确定

根据式(3)计算得到谐波合成电流后,由于系统短路容量不变,可通过式(4)计算得到并网后公共连接点处的谐波电压 U<sub>合</sub>。

$$U_{\text{合}} = \frac{U_1 I_{\text{合}}}{I_1} \quad (4)$$

在间歇式能源并网前,可假设间歇式能源分别接入各个通过文献[12]计算出的可能并网点,通过式(3)、式(4)可对公共连接点处的谐波电压进行预测,再按照公用电网谐波电压限值的规定,可选择出既满足规定要求,又使得接入后公共连接点

处谐波污染最轻的并网点,最后将间歇式能源从此处并网。通过此种方式选择的并网点,可更好地解决分布式能源并入主动配电网产生的电能质量问题。

## 3 谐波电流预警

主动配电网在运行时,由于谐波治理装置故障、仪器采集错误、设备故障等各种原因,谐波电流会发生异常,需对谐波电流进行有效评估。检测到异常谐波电流时系统需及时给出预警,以便专家系统根据预警情况及时发现电网潜在的电能质量问题,工作人员提前采取有效控制措施。谐波电流异常阈值的确定是检测谐波电流是否异常的关键。

### 3.1 异常谐波电流预警模型

基于云模型确定出分布式能源并网前和并网后的谐波电流异常阈值,根据谐波电流异常阈值对主动配电网的谐波电流进行预警,预警模型如图2所示。

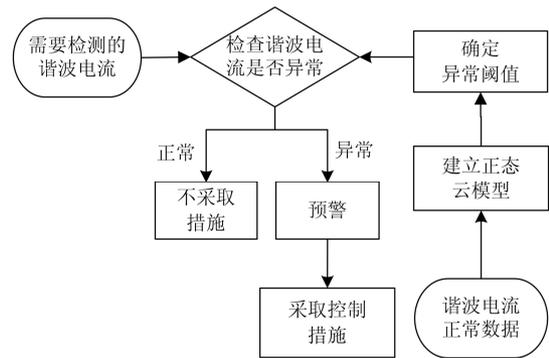


图2 异常谐波电流预警模型

Fig. 2 Early warning model of abnormal harmonic current

### 3.2 基于云模型的谐波电流建模

为了有效地对监测点海量数据进行建模,一般选取监测点各项谐波电流指标(每个相位的各次谐波)的日最大值和日95%概率值为特征量分别进行建模,这符合国标《公用电网谐波(GB/T 14549-2008)》通常考核谐波指标的日95%概率值和日最大值的规定。可分别对间歇式能源未接入主动配电网前和间歇式能源接入主动配电网后的谐波电流建模,确定出间歇式能源接入主动配电网前谐波电流的异常阈值和间歇式能源接入后谐波电流的异常阈值。基于云模型建模确定的异常阈值充分考虑了正常数据的波动范围,确定出的异常阈值比较合理。

针对谐波指标的每个特征量,先根据逆向云发生器<sup>[15]</sup>计算出正态云的期望 Ex、熵 En 和超熵 He 三个数字特征,具体计算步骤见文献[18]。再根据

计算出的云模型数字特征, 结合正向云发生器构造云模型, 正向云发生器根据云的数字特征 ( $Ex$ ,  $En$ ,  $He$ ) 产生所要求的云滴, 将概念从定性映射到定量, 一维正向云发生器的算法步骤见文献[18], 然后再计算出正向云发生器产生的云滴的期望、熵和超熵值。

### 3.3 谐波电流异常阈值的确定

对于正态云模型, 当超熵  $He=0$  时, 云模型呈正态分布。随着超熵  $He$  的逐渐增大, 云滴会开始离散, 最终呈现出如图 3 所示的正态云。当  $En-3He>0$  时, 99.7%的云滴处于内外隶属曲线之间, 外隶属曲线  $\mu_1$  和内隶属曲线  $\mu_2$  的表达式分别如式 (5)、式 (6) 所示<sup>[14]</sup>。

$$\mu_1 = \exp\left(-\frac{(x-Ex)^2}{2(En+3He)^2}\right) \quad (5)$$

$$\mu_2 = \exp\left(-\frac{(x-Ex)^2}{2(En-3He)^2}\right) \quad (6)$$

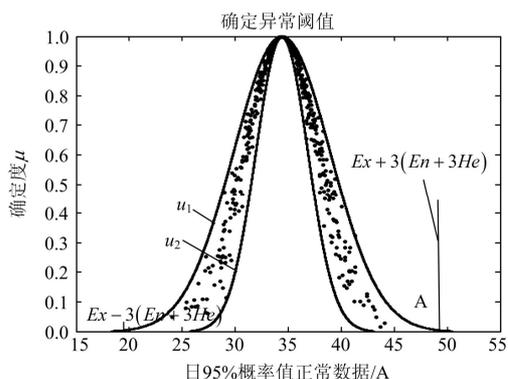


图 3 异常阈值确定方法

Fig. 3 Method of confirming anomaly threshold

依据正态云的  $3E'_n$  原则, 对定性概念有贡献的云滴主要在区间  $[Ex-3E'_n, Ex+3E'_n]$  上。内隶属曲线的  $3E'_n$  区间为  $[Ex-3(En-3He), Ex+3(En-3He)]$ 。外隶属曲线的  $3E'_n$  区间为  $[Ex-3(En+3He), Ex+3(En+3He)]$ 。正态云中, 云滴体现了样本波动产生的变化范围, 在确定异常阈值时, 为了将允许波动范围内的正常谐波电流数据都考虑进去, 根据外隶属曲线的  $3E'_n$  外边界确定异常阈值, 由此确定出的较大的异常阈值为

$$E_n = Ex + 3(En + 3He)$$

当实时检测的谐波电流的日 95% 概率值超过了日 95% 概率值的异常阈值时, 认为谐波电流日 95% 概率值异常; 当有 1 个数据超过日最大值的异常阈

值时, 该谐波电流日最大值异常。当检测到谐波发生异常时, 系统需给出预警, 工作人员应采取相应的控制。

## 4 实际工程应用

### 4.1 算例

算例 1: 以某配电网 1 号电房接入光伏为例, 如图 4 所示。由协调控制器决定光伏出力分配以及并网点, 以实现光伏出力消纳和主动配电网最有潮流分布<sup>[12]</sup>。

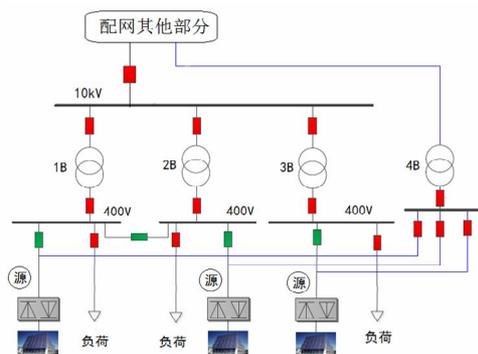


图 4 1 号电房接线图

Fig. 4 Wiring diagram of number one electric room

光伏并网前 1B、2B 和 3B 低压侧的 5 次谐波电流和电压畸变率列于表 2 中。

根据文献[12]中方法的优化配置结果, 光伏发电可以选择在多个节点处上网, 图中节点 5B、6B、7B 处均为可接入并网点, 本文从电能质量角度考虑进一步选择合理的上网节点。假设光伏发电分别在各个并网点接入, 根据当前接入点处的三相不平衡度, 依照 2.2 节所示方法确定出光伏接入系统时光伏产生的谐波电流。结合光伏接入前该公共连接点处的谐波电压和谐波电流, 可根据式 (3)、式 (4) 计算出光伏接入系统后公共连接点处的谐波合成电流和谐波电压。各个接入点的预测结果如表 2 所示。

从表 2 中可看出, 光伏并网后系统谐波电流和谐波电压会增大, 从表 3 可看出, 光伏并网后系统谐波电流总畸变率和谐波电压总畸变率也会增大。由此可看出光伏并网后, 系统谐波污染会加重。从表 3 第 3 行第 5 列可看出, 如果光伏在 6B 处接入, 接入后谐波电压总畸变率较高, 达到 4.571%, 已经比较接近电压总谐波畸变率限值, 所以在 6B 处并网不合适。通过比较光伏在 5B 和 7B 处接入后公共连接点处的电压总谐波畸变率和 5 次谐波电压含有率, 根据表 2 和表 3 最后一列所示结果, 可选择出光伏接入后对系统谐波污染最轻的点 5B 为最终

光伏并网。点。

表 2 1 号电房谐波电压和谐波电流预测

Table 2 Harmonic voltage and current forecast of number one electric room

并 网 点	光伏并网 前五次谐 波电流/A	光伏并网 前五次谐 波电压/%	光伏并网产 生五次谐波 电流/A	光伏并网 后五次谐 波电流/A	光伏并网 后五次谐 波电压/%
1B	20	1.8	26	32.8	2.6
2B	124	4.9	26	126	4.97
3B	60	2.7	26	65	2.9

表 3 1 号电房谐波总畸变率预测

Table 3 Harmonic THD forecast of number one electric room

并 网 点	光伏并网前 谐波电流总 畸变率	光伏并网前 谐波电压总 畸变率	光伏并网后 谐波电流 总畸变率	光伏并网后 谐波电压总 畸变率
5B	4.703	2.747	4.841	2.828
6B	6.261	4.498	6.362	4.571
7B	5.436	2.891	5.546	2.949

由此可见，本文提出的谐波电流电压的预测方法可为如何选择最优的间歇式能源并网点提供依据。

算例2：对某配电网2号电房已经接入的光伏进行分析，发现从某一时刻起并网点1B处的五次谐波电压含有率和谐波电压总畸变率持续超过了《电能质量公用电网谐波》规定的电压限值。主动配电网需对光伏并网点进行开关切换，将光伏从1B处切出，从其他接入点2B或3B处投入并网，以维持系统的稳定运行。因此，需预测光伏从其他接入点并网后的谐波，找寻到最合适的并网点。表3和表4给出了光伏从1B处撤下后1B处的谐波以及光伏从2B、3B处并网后接入点处的谐波。

表 4 光伏切出后切出点谐波预测

Table 4 Harmonic forecast of photovoltaic cut out from system

并 网 点	光伏切出 前五次谐 波电流/A	光伏切出 前五次谐 波电压含 有率/%	光伏切出 前谐波电 压总畸变 率/%	光伏切出 后五次谐 波电流/A	光伏切出 后五次谐 波电压含 有率/%	光伏切出 后谐波电 压总畸变 率/%
1B	144.02	4.130	5.136	140.16	3.572	4.698

从表 4 中可看出，光伏从 1B 处撤下后，1B 处的五次谐波电压含有率和谐波电压总畸变率符合公用电网谐波电压限值。从表 5 中可看出，光伏在 2B 处并网后对系统的谐波污染轻些，在 2B 处接入后产生的五次谐波电流和电压总畸变率都较 3B 处接入后产生的低。光伏在 3B 处接入后，谐波电压总畸变率较高，达到 4.872%，已经比较接近电压总谐

表 5 2 号电房谐波电压和谐波电流预测

Table 5 Harmonic voltage and current forecast of number two electric room

并 网 点	光伏并网 前五次谐 波电流/A	光伏并网 前五次谐 波电压含 有率/%	光伏并网 前谐波电 压总畸变 率/%	光伏并网 后五次谐 波电流/A	光伏并网 后五次谐 波电压含 有率/%	光伏并网 前谐波电 压总畸变 率/%
2B	67.353	1.042	3.136	68.96	1.067	3.328
3B	130.59	1.393	4.583	132.104	1.409	4.872

波畸变率限值，所以在 3B 处并网不合适。因此，主动配电网可选择将光伏从 1B 处撤下后，从 2B 处投入并网。

#### 4.2 异常谐波电流预警

对某配网 3 号电房 10 kV 母线处实测数据进行分析，以 C 相五次谐波电流的日 95% 概率值为例(单位：A)。采集光伏发电投入运行后正常运行情况下的 100 天(2013-3-1 至 2013-6-8)数据用于建模，如表 4 所示。对 2013-6-13 11:40:00 至 2013-6-13 12:00:00 的数据进行实时监测和诊断，时间间隔为 1 min，共 20 个数据。

根据表 6 建模结果可确定出光伏投入运行后五次谐波电流的异常阈值，本文以 3.3 节中介绍的方法确定谐波电流异常阈值。图 5 给出了利用本文方法进行实时监测诊断出的结果。

表 6 光伏投入运行后谐波电流建模结果

Table 6 Result of establishing current model after inputting new energy

期望/A	熵	超熵	样本最大值/A	异常阈值/A
35.443 2	5.57	2.992 8	51.64	49.991 6

从图 5 中显示数据可看出，2013-6-13 11:40:00 至 12:00:00 的五次谐波电流数据均未超过异常阈值，为正常谐波电流数据，系统不会发出预警。

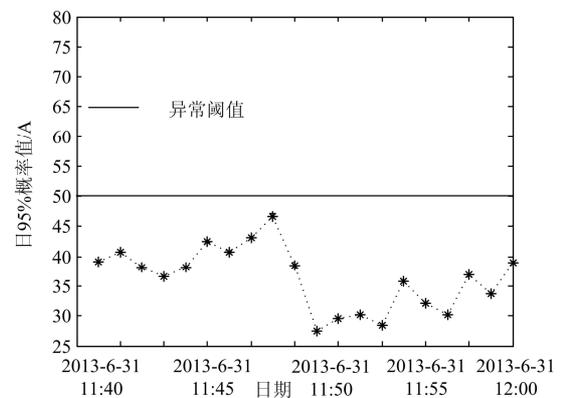


图 5 实时数据监测结果

Fig. 5 Result of monitoring real time data

在对实时数据进行监测时, 如果实时谐波电流超过了谐波电流异常阈值, 系统会对异常谐波电流进行预警。因此本文方法能够准确并实时检测谐波电流的异常变化, 为及时采取控制措施提供依据。

## 5 结论

1) 根据谐波求和模型提出的谐波预测方法可对间歇式能源投入主动配电网后和切出主动配电网后的谐波进行预测, 为选择最优的间歇式能源并网位置提供依据。

2) 通过云模型确定谐波电流异常阈值, 提出的谐波预警模型可实时地检测系统谐波电流的异常变化, 方便工作人员立即采取有效控制措施。

## 参考文献

- [1] 曾博, 刘念, 张玉莹, 等. 促进间歇性分布式电源高效利用的主动配电网双层场景规划方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 155-164.  
ZENG Bo, LIU Nian, ZHANG Yu-ying, et al. Bi-level scenario programming of active distribution network for promoting intermittent distributed generation utilization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 155-164.
- [2] 杨艳芳. 分布式能源并网后配电网调压问题的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.  
YANG Yan-fang. Study on voltage regulation of distribution networks after grid connected of distributed generation[J]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [3] 顾承红. 电力系统分布式发电优化计算[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.  
GU Cheng-hong. Optimal computation of distributed generation in power systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [4] 徐荆州. 分布式发电对配电网可靠性的影响分析[D]. 南京: 东南大学, 2007.  
XU Jing-zhou. The reliability of distributed generation on distribution network impact analysis[D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [5] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.  
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [6] MACDONALD R A, AULTGW, MCDONALDJ R. A novel approach to the optimal planning of flexible active distribution networks[C] // Proceedings of the 44<sup>th</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC'09), Glasgow, UK, September 1-4, 2009: 1-5.
- [7] 周文珊. 主动配电网建模及谐波特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
ZHOU Wen-shan. Modeling and harmonic characteristics research of active distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [8] SAMUELSSON O, REPO S, JESSLER R, et al. Active distribution network — demonstration project ADINE[C] // Proceedings of the 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Gothenburg, Sweden, October 11-13, 2010: 1-8.
- [9] MARTINS V F, BORGES C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.
- [10] HIDALGO R, ABBEY C, JOOS G. Technical and economic assessment of active distribution network technologies[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-6.
- [11] 谢秉鑫, 王宗, 范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 116-120.  
XIE Bing-xin, WANG Zong, FAN Shi-lin. Influence on harmonic characteristics of distributed network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 116-120.
- [12] 黄纯, 朱智军, 曹一家. 一种电网谐波与间谐波分析新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 32-39.  
HUANG Chun, ZHU Zhi-jun, CAO Yi-jia, et al. A novel power system harmonic and interharmonic analysis method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 32-39.
- [13] 赵耀, 赵庚申, 陈曦, 等. 分布式电源中三次谐波扰动孤岛检测方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 54-60.  
ZHAO Yao, ZHAO Geng-shen, CHEN Xi, et al.

- Research on third harmonic disturbance islanding detection method for distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 54-60.
- [14] 张小桃, 邢宝钦, 王爱军, 等. 基于小波变换的谐波电流监测及线损分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 79-83.
- ZHANG Xiao-tao, XING Bao-qin, WANG Ai-jun, et al. Harmonic current monitoring and line loss analysis based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 79-83.
- [15] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
- ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [16] WANG K. The DER revolutions and right-sizing energy resource[C] // Proceeding of the 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, USA, May 21-24, 2006: 245-246.
- [17] BORCGES C L T, MARTIN V F. Multistage expansion planning for active distributio networks under demand and distributed generation uncertainties[J]. Electrical Power Energy Systems, 2012, 36(1): 107-116.
- [18] CRUCQ J M, ROBERT A, LABORELEC B. Statistical approach for harmonics measurements and calculations [C] // 10th International Conference on Electricity Distribution, 1989: 91-96.
- 
- 收稿日期: 2014-02-20; 修回日期: 2014-05-15
- 作者简介:
- 钟清(1965-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、运行; E-mail: gaoyun.scu.88.03@163.com
- 张文峰(1967-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网运行及管理;
- 余南华(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能配电网及配电自动化。