

# 基于无线传感器网络的分布式光伏并网 发电系统监控网络构建

傅质馨<sup>1,2</sup>, 刘振<sup>1,2</sup>, 袁越<sup>1,2</sup>, 赵敏<sup>1,2</sup>, 李乔木<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 对分布式光伏发电进行可靠监控,可保障其安全稳定运行。首先构建了分布式光伏发电系统监控网络,然后采用三角形部署法进行传感器节点部署,该方法简单易行,但在实际运行中会因为感知受限而遗漏部分目标点;为了解决监控遗漏问题,提出概率感知部署法对目标点进行逐个覆盖。对2种方法进行仿真对比,结果表明:概率感知部署法可对三角形部署法遗漏的目标点进行逐个覆盖;当节点感知概率约束值较大时,概率感知部署法所需传感器节点明显少于三角形部署法。

**关键词:** 分布式发电; 光伏; 并网; 监控; 无线传感器网络; 传感器; 三角形部署法; 概率感知部署法

**中图分类号:** TM 732

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.007

## 0 引言

分布式光伏发电具有即发即用、减少环境污染等优点<sup>[1]</sup>,正逐渐受到广泛的关注。近两年,国家能源局、国家电网公司分别出台电量定额补贴政策和低压免费并网政策,旨在推动分布式光伏发电技术的发展。

分布式光伏发电的输出功率易受天气和发电系统性能的影响,具有随机性、间歇性等特点,若将其大规模并网,易对电网产生扰动<sup>[2-3]</sup>。通过建立可靠的分布式光伏发电系统监控网络,实时获得监测数据,并对光伏发电系统进行有效控制,可为其安全稳定运行提供有力的保障<sup>[4]</sup>。目前,很多学者对光伏发电系统无线监控网络进行了研究。文献<sup>[5-7]</sup>提出了光伏发电的无线监控网络架构,运用无线通信技术省去了复杂的布线,增强了监控的灵活性。然而,现有研究仅涉及无线监控网络的总体架构与硬件设计,尚缺少具体有效的监控网络构建方法。本文鉴于无线传感器网络 WSN(Wireless Sensor Network)技术在军事国防、环境监测、生物医疗、智能家居等领域中成熟的应用经验和显著的监控优势<sup>[8-9]</sup>,首次提出基于 WSN 技术的分布式光伏并网发电系统监控网络的具体构建方法。

有效的传感器节点(简称节点)部署方法是基于 WSN 技术对光伏发电系统监控网络进行构建的关键<sup>[10]</sup>。节点部署要保证对光伏面板的全面覆盖,以保证监控信息获取的全面性、准确性<sup>[11]</sup>,而节点感知信号的强弱直接影响了其覆盖范围的大小,进而决

定了监控网络覆盖性能的优劣。分布式光伏发电系统监控网络所处的工作环境,不仅有天气变化的影响,还有落叶等障碍物的影响,这决定了节点部署时需考虑其感知信号变化的问题。现有研究中,节点的感知信号强度常通过二元感知模型和概率感知模型来描述:前者认为节点感知信号在其覆盖范围内没有变化,为理想模型,便于讨论,因此在现有研究中被广泛采用;后者与前者的关键区别在于,考虑了节点实际运行时其感知信号会随节点与目标点距离的增大而衰减的情况<sup>[12]</sup>,即被监控对象距离节点越远,其被节点感知到的可能性越小,这能够比较合理地反映节点工作过程中的实际情况,但极大增加了研究的难度,目前仍较少被采用。文献<sup>[13]</sup>针对网格法中三角形、四边形和六边形部署方法进行了覆盖率的比较,指出三角形部署法覆盖率最高。文献<sup>[14]</sup>提出自适应节点感知半径调整算法,提高了监控网络的覆盖率。但是文献<sup>[13-14]</sup>皆基于二元感知模型进行分析,不能反映节点对光伏面板上目标点进行感知的实际情况。文献<sup>[15]</sup>提出了基于节点概率感知模型的网格扫描法,对监控区域进行覆盖。该方法在对大量被监控对象进行扫描时,具有明显优势。但是,光伏发电系统的被监控对象为光伏面板上随机变化的电压、电流、温度、光照等参数信息,这些随机目标点具有少量性、密集性特点,相对于采用对随机目标点进行逐个感知覆盖的方法,网格扫描法的编程算法计算量较大、耗时较长。

基于以上分析,本文将重点考虑节点感知信号衰减情况下的分布式光伏发电系统监控网络的节点部署方法。为了便于对比,首先采用三角形节点部署法构建监控网络,分析三角形部署法在未考虑节点感知信号衰减情况下造成的随机目标点监控遗漏问题,

收稿日期:2014-01-09;修回日期:2014-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307044)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307044)

进而采用节点概率感知模型来反映节点感知信号的衰减,提出了概率感知节点部署法,对随机目标点进行逐个感知覆盖。通过对 2 种部署方法的仿真分析,说明了概率感知部署法的优越性。

## 1 分布式光伏发电系统监控网络模型

### 1.1 监控目标点模型

针对由 10 块 250 W 天合光伏多晶组件组成的分布式光伏发电系统运行情况,本文建立监控目标点模型,为下文对监控网络运行性能进行研究奠定基础<sup>[16]</sup>。光伏发电系统输出功率具有波动性,在晴天的情况下,功率波动性较小,但电流的变化较大;遇到多云、雨天等情况,发电功率会明显降低。同时,浮云、建筑、树木等造成的遮阴影响会引起热斑效应,有可能损害光伏面板<sup>[17-18]</sup>。上述这些随机变化都会瞬时地体现在光伏发电系统的各种参数上,即光伏发电系统中的某部分或某一点温度、光照、电流、电压和功率等会出现随机变化,这些参数都需监控网络来监控。

针对光伏发电系统监控区域各参数随机瞬时变化的特点,本文将它们视为需要监控的随机目标点,在监控区域中建立服从均匀分布的随机目标点模型,即随机目标点的横、纵坐标服从式(1)所示的函数分布。

$$F(x) = (x-a)/(b-a) \quad x \in [a, b] \quad (1)$$

其中,  $[a, b]$  为节点部署于光伏发电系统中的位置横、纵坐标选取范围。

### 1.2 节点的感知模型

若节点感知信号仅受节点感知半径  $R_s$  约束,则可用式(2)所示的节点二元感知模型来判断节点是否感知到随机目标点<sup>[15]</sup>。

$$T_j^i = \begin{cases} 1 & d_j \leq R_s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $T_j^i$  为节点  $i$  对目标点  $j$  的感知结果;  $d_j$  为节点  $i$  与目标点  $j$  之间的距离。

当  $d_j \leq R_s$  时,  $T_j^i = 1$ , 表示节点能感知到随机目标点; 否则  $T_j^i = 0$ , 表示节点不能感知到随机目标点。

为表示节点感知信号强度随距离增加而衰减, 本文采用节点概率感知模型, 即用概率值表示节点感知情况<sup>[15]</sup>:

$$P_j^i = \begin{cases} e^{-\alpha d_j} & d_j \leq R_s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $P_j^i$  为节点  $i$  对目标点  $j$  的感知概率;  $\alpha$  代表节点的物理特性, 本文研究针对同构节点(同种类型节点), 因此  $\alpha$  取定值 0.04<sup>[19]</sup>。

节点感知信号强度会随距离增加而衰减, 感知概率服从指数衰减分布, 即当  $d_j \leq R_s$  时, 感知概率随距离增大而衰减; 当  $d_j > R_s$  时, 感知概率为 0。

在实际运行时, 部署于光伏发电系统中的节点, 其感知信号强度会随距离增加而衰减, 同时受落叶等障碍物影响也会衰减甚至消失。在下文中这 2 种情况合称为节点感知受限, 则节点感知情况可进一步表示为<sup>[15]</sup>:

$$Q_j^i = \begin{cases} 1 & d_j \leq R_s \text{ 且 } P_j^i \geq \beta \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\beta$  为节点感知概率约束值, 取值范围为  $[0, 1]$ 。

现有研究成果中并没有对  $\beta$  的取值原则进行具体说明。本文针对光伏发电系统的工作环境会因地理位置和天气变化而不同的情况, 结合节点自身的感知信号衰减问题, 对  $\beta$  的取值原则说明如下: 监控人员需要根据光伏面板所处环境中落叶等障碍物情况和节点感知信号衰减程度确定  $\beta$  的具体值,  $\beta$  越大, 表示节点实际运行时感知信号受限越严重。例如, 监控人员分别对风和日丽的 A 城和天气多变的 B 城进行光伏发电系统监控网络节点部署时, B 城的  $\beta$  取值要大于 A 城。

## 2 光伏发电系统监控网络节点部署方法

为解决分布式光伏发电系统监控网络的节点部署问题, 本文提出了三角形传感器节点部署法和概率感知传感器节点部署法。

### 2.1 三角形节点部署法

结合光伏面板通常具有方形形状的特点, 网格部署法简单易行。网格部署法是一种规则的节点部署方法, 包括三角形部署法、正方形部署法和正六边形部署法。三角形部署法即由 3 个节点连线构成正三角形, 基于二元感知模型的三角形部署法原理如图 1 所示。图中,  $R_s$  为节点感知半径; 正三角形边长为  $\sqrt{3} R_s$ ; 节点的感知区域为以  $R_s$  为半径的圆。

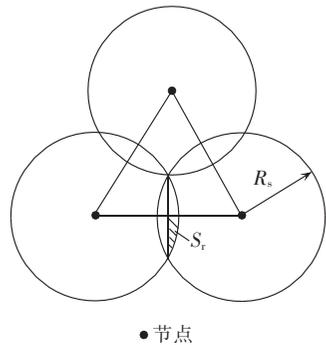


图 1 三角形部署法

Fig.1 Triangle deployment method

图 1 中阴影部分面积为:

$$S_e = \frac{30}{360} \pi R_s^2 - \frac{1}{2} \frac{\sqrt{3} R_s}{2} \frac{R_s}{2} \quad (5)$$

有效覆盖面积  $S_e$  是指所有节点感知区域的并集:

$$S_e = 3\pi R_s^2 - 12S_t \quad (6)$$

节点覆盖效率为有效覆盖面积与节点覆盖总面积的比值:

$$R_e = \frac{S_e}{3\pi R_s^2} \approx 0.94 \quad (7)$$

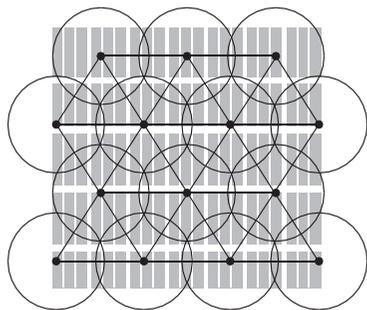
由式(7)可见,三角形部署法的覆盖效率相当高,与表1中其他网格部署法相比,具有较高的节点利用效率。

表 1 传感器节点网格部署法比较

Tab.1 Comparison among different sensor node deployment methods

部署方法	节点覆盖效率
三角形部署法	0.9423
正方形部署法	0.8183
正六边形部署法	0.9011

针对光伏系统中一个  $32\text{ m} \times 32\text{ m}$  的正方形光伏面板,运用基于二元感知模型的三角形部署法为该区域构建的监控网络见图2,由文献[15]等的研究成果, $R_s$ 可取为6 m。由图2可见,14个节点构建的监控网络实现了对  $32\text{ m} \times 32\text{ m}$  区域的全面覆盖。



• 节点

图 2 监控网络

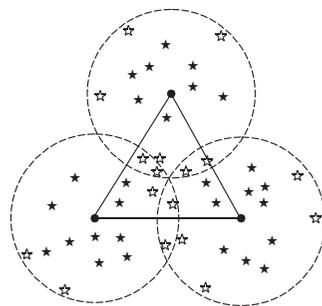
Fig.2 Monitoring network

在光伏发电系统中部署节点时,若不考虑实际中的节点信号衰减问题,采用节点的二元感知模型,三角形部署法能以较少的节点数量实现对监控区域的全面覆盖,降低光伏发电系统监控网络的节点部署成本。然而,根据本文1.2节所述,节点在实际运行过程中均会出现感知受限问题。若采用节点的概率感知模型进行三角形部署,则部分监控网络的监控效果如图3所示。

图3中,位于节点感知范围周边区域的目标点会因节点感知受限而成为监控遗漏目标点,这些监控遗漏随机目标点在监控区域中的分布具有少量性、密集性特点。本文提出的概率感知节点部署法对这些随机目标点进行逐个感知覆盖,旨在解决三角形部署法产生的监控遗漏问题。

## 2.2 概率感知节点部署法

概率感知节点部署法是一种基于节点概率感知



☆ 监控遗漏目标点, ★ 监控到的目标点, • 节点

图 3 考虑节点信号衰减后,三角形部署法的监控效果

Fig.3 Monitoring effect of triangle deployment method considering node signal attenuation

模型的方法,该方法考虑了监控人员根据节点感知受限情况时设定的  $\beta$  值,对随机目标点进行逐个感知覆盖,可增强监控网络的可靠性。该部署法的主要思路是,随机目标点采用式(1)所示模型进行拟合,节点的部署位置要针对光伏发电系统中随机目标点的位置,运用式(4)实现对随机目标点进行逐个覆盖。显然,本文方法可避免文献[15]中方法对整个监控区域进行扫描所造成的计算量大的问题。算法流程图如图4所示,算法步骤简述如下。

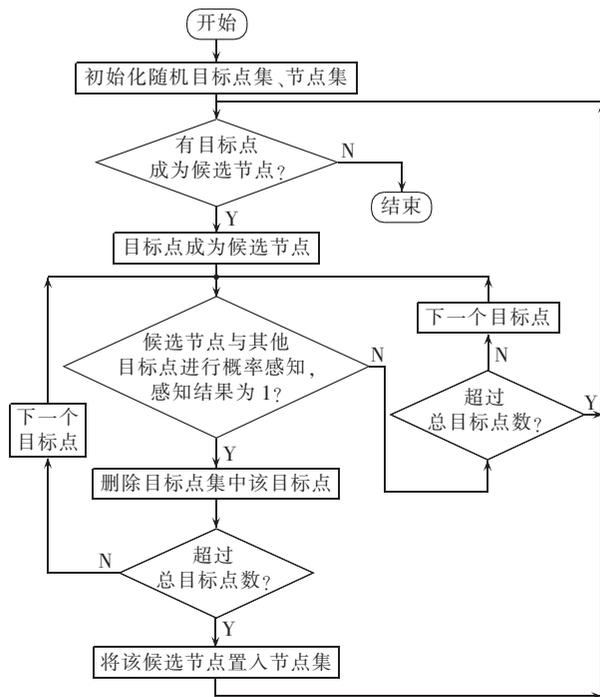


图 4 概率感知部署法流程图

Fig.4 Flowchart of probabilistic perception deployment method

步骤 1:初始化需监控的随机目标点集合  $A$ ;将节点集  $S$  初始化为空集。

步骤 2:在  $A$  中选取目标点作为候选节点,转步骤 3;若无目标点可作为候选节点,则结束流程。

步骤 3:将候选节点与  $A$  中其他目标点分别按照式(4)进行概率感知,一旦有目标点的感知结果为

1,即目标点可以被候选节点感知到,则将该目标点从  $A$  中删除;当候选节点和  $A$  中所有目标点(除候选节点本身外)均进行了概率感知后,将候选节点放入  $S$  中作为需要部署节点,并从  $A$  中删除该候选节点,转步骤 4。

步骤 4:如果  $A$  中已无目标点可以作为候选节点,则结束流程;否则挑选新的候选节点,转步骤 3。

图 5 为概率感知部署法的监控效果。由图 5 可以看出,概率感知部署法所部署的每个节点可以感知多个随机目标点,避免了重复覆盖,减少了节点的部署个数。

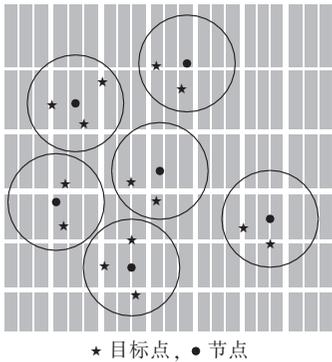


图 5 概率感知部署法的监控效果  
Fig.5 Monitoring effect of probabilistic perception deployment method

### 3 仿真分析

针对一个  $32\text{ m} \times 32\text{ m}$  光伏面板,现对本文所提监控网络构建方法的运行效果进行仿真分析。

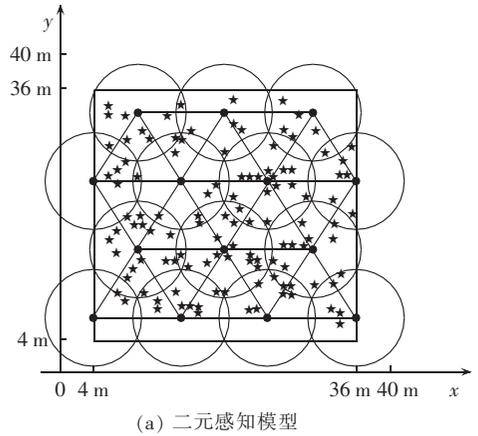
令节点感知半径  $R_s$  为  $6\text{ m}$ ,且每个节点具有相同的感知半径。为表示  $32\text{ m} \times 32\text{ m}$  大小的光伏面板,在 MATLAB 软件平台中构建边长为  $32\text{ m}$  的正方形监控区域,即横、纵坐标范围为  $[4,36]$  的区域。

#### 3.1 三角形部署法

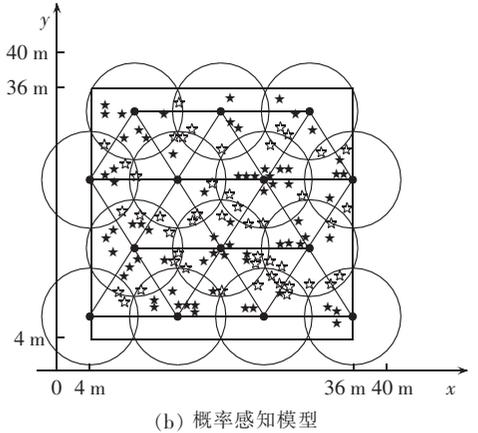
假设光伏发电系统中随机目标点数  $n$  为 120,采用三角形部署法,监控网络中部署有 14 个节点,设节点物理特性值  $\alpha$  为 0.04,节点概率感知约束值  $\beta$  为 0.8521。为便于对比,首先应用节点二元感知模型进行分析,如图 6(a)所示。由图 6(a)可见,监控网络能够对所有随机目标进行全面监控。考虑到节点的实际运行情况,图 6(b)给出了采用节点概率感知模型进行三角形部署时的监控效果。由图 6(b)可以看出,120 个随机目标点中有 51 个目标点未被监控。因此,在考虑节点感知信号衰减即节点感知能力受限的情况下,三角形部署法会产生目标点监控遗漏问题。

分别取  $\beta$  为 0.960 8、0.923 1、0.886 9、0.852 1、0.818 7 以研究三角形部署法的监控效果与节点概率感知约束值  $\beta$  的关系,仿真结果见图 7。

由图 7 可见,随着  $\beta$  值增加,监控遗漏目标点数



(a) 二元感知模型



(b) 概率感知模型

☆ 监控遗漏目标点, ★ 监控到的目标点, ● 节点

图 6 三角形部署法监控效果

Fig.6 Monitoring effect of triangle deployment method

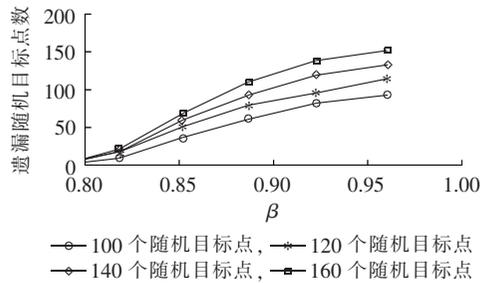


图 7  $\beta$  值不同时,三角形部署法监控效果

Fig.7 Monitoring effect of triangle deployment method for different  $\beta$  values

增多;光伏面板上随机目标点数越多,监控遗漏目标点数越多。显然,节点感知信号受限越严重,监控网络监控效果越差。

设  $\beta$  为 0.8521,分别取 100、120、140、160 个随机目标点,表示光伏发电系统的随机变化程度不同,目标点越多则随机变化程度越大,对可靠的监控网络的需求越紧迫,仿真结果见表 2。随着目标点数的增加,监控遗漏目标点数会增加,监控率会降低。

#### 3.2 概率感知部署法

图 6 中,监控遗漏目标点在监控区域中的分布具有随机性、少量性、密集性的特点。本文提出的概

表 2 不同目标点数的监控效果

Tab.2 Monitoring effect for different number of targets

目标 点数	三角形部署法 节点数	监控遗漏 目标点数	目标点 监控率
100	14	37	0.630
120	14	51	0.575
140	14	60	0.571
160	14	69	0.568

率感知节点部署法可解决该问题,即在采用三角形部署法已构建好的监控网络基础上,通过增加新节点以对监控遗漏目标点进行逐个覆盖监控。

令初始状态下光伏面板上随机目标点数为 120,  $\beta$  为 0.8521, 将随机目标点集合  $A$  初始化为监控遗漏目标点集。算法运行结束后,  $S$  中点即为所要增加部署的节点, 运行结果如图 8 所示, 概率感知法通过增加 17 个新节点, 实现了对监控遗漏目标点的重新覆盖。

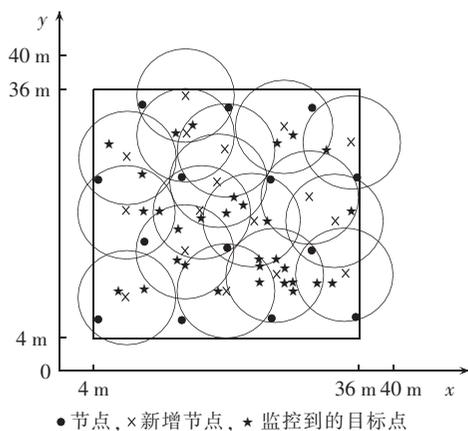


图 8 概率感知部署法监控效果

Fig.8 Monitoring effect of probabilistic perception deployment method

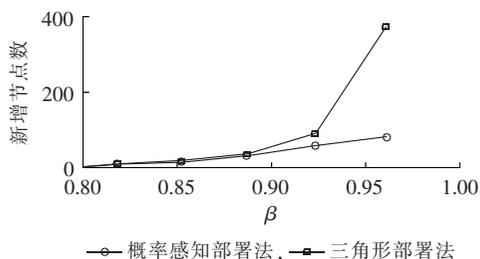
对于不同的  $\beta$  值, 概率感知法所增加的节点数如表 3 所示。表中,  $n_1$  为监控遗漏的目标点数,  $n_2$  为增加的节点数。在  $\beta=0.8521$  时,  $n_1/n_2=3$ , 即平均每个新节点可以覆盖 3 个目标点, 为表 3 中节点利用率最高的情况。其他  $\beta$  值下的  $n_1/n_2$  始终大于 1, 即每个节点可以覆盖不止 1 个目标点, 节点的利用率高。

为进一步说明概率感知部署法的优势, 本文对 2 种节点部署方法的新增节点个数进行对比, 结果如图 9 所示。

表 3 目标点为 120 个时, 概率感知法需要增加的节点数

Tab.3 Sensor nodes added by probabilistic perception deployment method for 120 target points

$\beta$	$n_1$	$n_2$	$n_1/n_2$
0.9608	115	93	1.24
0.9231	96	58	1.66
0.8869	79	34	2.32
0.8521	51	17	3.00
0.8187	19	11	1.73

图 9 随着  $\beta$  的增加, 概率感知部署法与三角形部署法需要增加的节点Fig.9 Additional sensor nodes needed respectively by probabilistic perception deployment method and triangle deployment method for different  $\beta$  values

由图 9 可见, 在  $\beta$  值较小情况下, 2 种部署方法新增节点数相近; 但在  $\beta$  值较大情况下, 三角形部署法所用节点数明显大幅增加, 而概率感知部署法所用节点数明显较少。由此可知, 当  $\beta$  值较大时, 概率感知部署法更具优势。

## 4 结论

本文针对分布式光伏并网发电系统所具有的分散性、随机性、间歇性等特点, 运用 WSN 为其构建灵活可靠的监控网络, 分别提出了三角形节点部署法与概率感知节点部署法。仿真结果表明, 三角形节点部署法简单易行, 但由于未考虑节点实际运行时存在感知信号衰减的情况, 会造成目标点监控遗漏问题; 概率感知部署法考虑了节点实际运行时的感知信号衰减问题, 能有效地解决目标点监控遗漏问题。

本文成果为分布式光伏发电系统监控网络的构建提供了新的思路, 下一步将对监控网络信息交互方式进行研究。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 12-17.  
LI Bin, YUAN Yue. Impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose, and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 12-17.
- [3] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Flexible voltage support control for three distributed generation inverters under grid fault[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1429-1441.
- [4] FATEH B, GOVINDARASU M, AJJARAPU V. Wireless network design for transmission line monitoring in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1076-1086.
- [5] 左云波, 王欢, 徐小力, 等. 太阳能光伏发电无线监控系统[J]. 太阳能, 2011(1): 29-32.

- ZUO Yunbo, WANG Huan, XU Xiaoli, et al. Solar photovoltaic power generation wireless monitoring system[J]. *Solar Energy*, 2011(1): 29-32.
- [6] CIANI L, CRISTALDI L, FAIFER M, et al. Design and implementation of a on-board device for photovoltaic panels monitoring[C]//2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Minneapolis, USA: IEEE, 2013: 1599-1604.
- [7] 寿挺, 张思建. 小型并网光伏电站智能监控系统的研究[J]. *中国电力*, 2012, 45(9): 60-63.  
SHOU Ting, ZHANG Sijian. Development of smart monitoring system for small grid-connected photovoltaic power stations[J]. *Electric Power*, 2012, 45(9): 60-63.
- [8] 司海飞, 杨忠, 王珺. 无线传感器网络研究现状与应用[J]. *机电工程*, 2011, 28(1): 16-20.  
SI Haifei, YANG Zhong, WANG Jun. Review on research status and application of wireless sensor networks[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2011, 28(1): 16-20.
- [9] LUO L, ZHANG Y, ZHU W. E-science application of wireless sensor networks in eco-hydrological monitoring in the Heihe River basin, China[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2012, 6(6): 432-439.
- [10] 傅质馨, 徐志良, 黄成, 等. 无线传感器网络节点部署问题研究[J]. *传感器与微系统*, 2008, 27(3): 116-120.  
FU Zhixin, XU Zhiliang, HUANG Cheng, et al. Survey on sensor deployment problem in wireless sensor networks[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, 27(3): 116-120.
- [11] SHEN Zhong, CHANG Yilin, JIANG Hai, et al. A generic framework for optimal mobile sensor redeployment[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(8): 4043-4057.
- [12] 张云洲, 吴成东, 程龙, 等. 确定性空间的无线传感器网络节点部署策略研究[J]. *控制与决策*, 2010, 25(11): 1625-1629.  
ZHANG Yunzhou, WU Chengdong, CHENG Long, et al. Research of node deployment for wireless sensor network in deterministic space[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(11): 1625-1629.
- [13] 李海华, 范娟, 陈利. 网格法在无线传感器网络部署中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(3): 150-152.  
LI Haihua, FAN Juan, CHEN Li. Application of grid method in deployment of wireless sensor networks[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(3): 150-152.
- [14] 韩志杰, 吴志斌, 王汝传, 等. 新的无线传感器网络覆盖控制算法[J]. *通信学报*, 2011, 32(10): 174-184.
- HAN Zhijie, WU Zhibin, WANG Ruchuan, et al. Novel coverage control algorithm for wireless sensor network[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(10): 174-184.
- [15] 郭秀明, 赵春江, 杨信廷, 等. 基于网格扫描的实现目标点覆盖的确定性传感器节点部署方法[J]. *传感技术学报*, 2012, 25(1): 104-108.  
GUO Xiuming, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. A deterministic sensor node deployment method with target coverage based on grid scan[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(1): 104-108.
- [16] SINGH S, CHAND S, KUMAR R, et al. Optimal sensor deployment for WSNs in grid environment[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(16): 1040-1041.
- [17] 丁明, 陈中. 遮阴影响下的光伏阵列结构研究[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(10): 1-5.  
DING Ming, CHEN Zhong. Reconfiguration of partially shaded photovoltaic array[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(10): 1-5.
- [18] PARASKEVADAKI E V, PAPATHANASSIOU S A. Evaluation of MPP voltage and power of mc-Si PV modules in partial shading conditions[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(3): 923-932.
- [19] ONUR E, ERSOY C, DELIC H. How many sensors for an acceptable breach detection probability?[J]. *Computer Communications*, 2006, 29(2): 173-182.

#### 作者简介:



傅质馨(1983-),女,江苏徐州人,讲师,博士,研究方向为可再生能源发电技术、无线传感器网络(E-mail: zhixinfu@hhu.edu.cn);

刘振(1989-),男,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为可再生能源发电技术、无线传感器网络(E-mail: liuzhenname@163.com);

傅质馨 袁越(1966-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统运行与控制、可再生能源发电系统、智能电网与微网技术(E-mail: yyuan@hhu.edu.cn)。

## Construction of wireless sensor based monitoring network for distributed grid-connected PV system

FU Zhixin<sup>1,2</sup>, LIU Zhen<sup>1,2</sup>, YUAN Yue<sup>1,2</sup>, ZHAO Min<sup>1,2</sup>, LI Qiaomu<sup>1,2</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to reliably monitor the secure and stable operation of distributed PV (PhotoVoltaic) system, the easy way is to establish a monitoring network and then apply the triangle deployment method to dispose the sensor nodes. But some target points may be left out due to the sensing limitation, aiming at which, the probabilistic perception deployment method is proposed to cover the omitted target points one by one. The two methods are compared by simulation and the simulative results show that, the omitted target points are covered one by one; and when the probabilistic constraint of node perception is bigger, the sensor nodes needed by the probabilistic perception deployment method are obviously less than those by the triangle deployment method.

**Key words:** distributed generation; PV; grid connection; monitoring; wireless sensor networks; sensors; triangle deployment method; probabilistic perception deployment method