

风电机组无线监控系统的构建方法

傅质馨¹, 骆 阳¹, 丁国荣², 袁 越¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江西省电力公司上饶供电分公司, 江西 上饶 334000)

摘要: 从节点部署和路由协议 2 个方面对风电机组无线监控系统进行构建。考虑到风电机组典型故障的分布具有一定的空间性, 提出了一种空间正四面体节点部署方案, 以最大限度地减少所需部署的传感器节点数目。所提节点部署方案将正四面体理论运用到监控系统的节点部署中, 着重对机舱的齿轮箱、发电机与传动轴进行监控部署; 在此基础上, 通过对经典 LEACH 路由协议的簇头选取方式进行改进, 提出了适用于风电机组监控系统的路由算法。该算法综合考虑了节点剩余能量和节点之间的几何距离, 最大限度地提高了监控系统的信息传输能力并均衡利用节点能量、延长监控系统的使用寿命。仿真结果表明, 所提空间节点部署方案拓展了监控系统的监控能力, 所提改进路由算法使监控系统的最佳工作时间延长了 31.35%。

关键词: 风电机组; 监控系统; 无线传感器网络; 节点部署; 路由协议

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.004

0 引言

风力发电作为一种发电利用小时数高、清洁环保的发电形式, 得到了政府和发电企业的大力推广。然而, 风电机组大多处于环境恶劣地区, 容易发生故障, 可进入性差、人工维护困难, 这大幅增加了风电机组的运维成本, 降低了经济效益。同时, 风电机组装机容量的迅猛增长也给风电机组的运行维护带来了巨大挑战^[1-5]。因此, 如何对风电机组运行状态进行可靠的实时监控成为了目前的研究热点之一。

基于无线传感器网络 WSN(Wireless Sensor Network)技术的无线监控系统具有实时不间断监控、动态性能强、设施安装简易等优势。因此, WSN 技术在风电机组运行状态的监控中具有良好的应用前景^[6]。基于 WSN 构建风电机组的状态监控系统需要通过合理部署传感器节点构成有效的监控网络来获取并传递风电机组的状态信息, 即保证监控网络的覆盖性和连通性。同时, 考虑到风电机组运行环境较为恶劣、节点更换不便等因素, 在监控系统运行过程中还应能够均衡、充分地利用节点能量, 以延长监控系统的使用寿命。近年来, 基于 WSN 技术的无线监控系统方面的研究成果不断涌现。文献[7]给出了一种 WSN 不等级能级环模型的节点部署方案, 该方案只需要测量被监测部件的物理参数即可构建网络模

型, 但仅在理论上提出如何部署节点, 并未结合具体的应用领域; 文献[8]提出了一种基于网格扫描的传感器节点部署方案, 该方案简单易行, 但仅考虑了二维平面的部署情况; 文献[9]通过在风电机组内部部署振动节点来获取部件的振动状态信息, 并通过增加中继节点来保证监测系统网络的连通性, 但没有考虑节点能量均衡利用的问题; 文献[10]提出了一套风电机组远程监控系统的设计构思, 包括从最初的数据采集到最后返回监控中心, 但未涉及监控节点如何部署的具体方案; 文献[11]设计了大功率风电齿轮箱无线监控系统的软件部分并研发了上位机管理系统, 同样未涉及对节点部署的讨论; 而文献[12]利用 WSN 技术构建了海上风电机组机舱的状态监控系统, 提出了基于覆盖度的能量均衡传感器节点部署方案, 在保证数据传输的前提下, 有效地延长了监控系统的使用寿命, 但是该文献只给出了传感器节点在二维平面中的部署情况, 未考虑风电机组机舱监控的空间性, 在一定程度上会影响监控效果。

基于上述分析, 本文在现有研究成果的基础上尝试将节点部署方案突破二维平面, 提出空间上的三维节点部署方案, 使构建的监控系统更加切合实际风电机组的构造。同时, 通过对 WSN 的经典通信协议——LEACH 协议进行改进^[13-14], 使得所构建的风电机组监控系统具有良好覆盖度的同时其使用寿命也得以最大限度地延长。

1 风电机组无线监控系统

一般地, 基于 WSN 的风电机组无线监控系统由三大部分构成: 状态信息获取系统、信息中转站和中控系统^[15]。

状态信息获取系统通过部署在风电机组各个部

收稿日期: 2017-01-13; 修回日期: 2017-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307044); 江苏省“六大人才高峰”资助项目(2014-XNY-008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016B08514); 国家留学基金资助项目(201706715005)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307044), the Six Talent Peaks Project of Jiangsu Province(2014-XNY-008), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016B08514) and China Scholarship Council Program(201706715005)

位的传感器节点采集实时数据信息,获取机组运行时的各类状态参数,并通过路由传输协议汇总到 sink 节点。所有部署的传感器节点与 sink 节点共同构成一个监控网络;信息中转站作为数据传输的中间站,用于所获取信息的后续拓展传输;中控系统接收到来自中转站的实时数据后,对风电机组运行状态进行判断,包括状态监测、特征提取、状态识别、状态分析、制定策略等^[15-16]。

由于可靠地获取和传递风电机组基本的状态信息是监控系统的根本任务,因此本文所构建的风电机组无线监控系统主要完成信息获取和传递的任务,下文将从节点部署与路由传输 2 个方面对监控系统的构建方法展开讨论。

2 风电机组无线监控系统节点部署方案

2.1 平面模型

对于风电机组无线监控系统的节点部署问题而言,许多文献都局限于对无线监控系统的平面节点部署方案进行相关研究。然而,实际风电机组及其各个部件都是三维立体结构,若传感器节点只部署于二维平面中则会出现以下情况:若只考虑在同一平面中部署传感器节点,则会出现有些风电机组部件因不在所设置的平面内无法进行传感器部署,或者无法将传感器节点部署在部件故障的关键点上;若给不在同一平面的风电机组部件部署传感器时设置多个平面坐标系,不同坐标系之间不易形成统一,不便于传感器节点部署位置的统一设置和全局调整。因此,实际应用中的风电机组监控系统的传感器节点应该呈空间分布,这样才能更好地满足监控可靠性和准确性的要求。因此,本文在平面节点部署模型的基础上提出了监控系统的空间节点部署模型。

正三角形部署是一种最大限度地减少冗余节点的典型部署方案,其利用正三角形自有的特殊结构,使得网络中所有相邻节点之间的距离相等,最大限度地减少所需部署的监控节点数目,节约监控系统构建成本^[17]。以一个 100 m×100 m 的区域为例,采用正三角形节点部署方案,如图 1 所示。

为了分析方便同时又不失一般性,将整个风电机组机舱近似为一个长方体,图 2 为机舱俯视示意图。

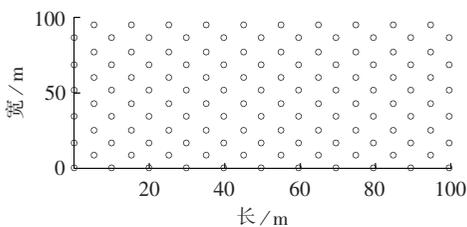


图 1 三角形节点部署方案

Fig.1 Triangle node deployment scheme

结合平面正三角形节点部署结构首先给出节点部署的空间俯视图,图 3 即为节点部署在风电机组机舱的俯视示意图。

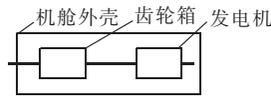


图 2 机舱俯视示意图

Fig.2 Top view of engine room

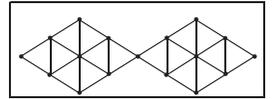


图 3 三角形节点部署方案空间俯视图

Fig.3 Top view of triangle node deployment scheme

2.2 正四面体结构理论基础

将节点部署从平面延拓至空间层面,需要有相关理论的支持。文献[18]给出了平面正三角形节点部署方案的相关结论,节点感知半径与相邻节点距离需满足式(1)所示关系。

$$R \geq \frac{r}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

其中, R 为节点感知半径; r 为相邻节点间距离。

在满足式(1)的情况下,系统不会出现监控盲区,如图 4(a)所示;若不满足式(1),则就会出现图 4(b)所示情况,显而易见,中间将出现一块监控盲区,监控系统覆盖度将有所下降。

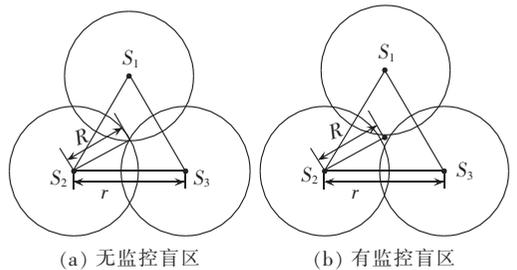


图 4 不同感知半径覆盖对比图

Fig.4 Comparison of coverage with different sensing radius

本文将文献[18]的结论延拓至空间层面,如图 5 所示,节点感知半径与相邻节点距离需满足式(2)所示条件。

$$R \geq \frac{\sqrt{6}}{4} r \quad (2)$$

当满足式(2)所示条件时即可保证监控系统的覆盖度达到 100%,具体证明如下。

命题:在正四面体 $ABCD$ 中,棱长 $AB=r$, AE 为正四面体的一条高,正四面体的中心 O 在高 AE 上,证明 $OA = \sqrt{6}/(4r)$ 是否成立。

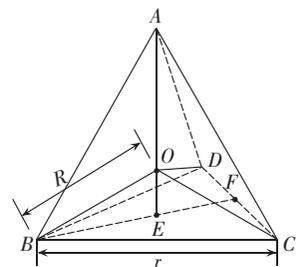


图 5 四面体结构图

Fig.5 Structure diagram of tetrahedron

证明: O 为正四面体 $ABCD$ 的中心,连接 OA 、 OB 、

OC 、 OD , 由于 O 为中心, 所以正四面体 $ABCD$ 被分为 4 个全等的小三棱锥 $O-ABC$ 、 $O-ABD$ 、 $O-ACD$ 、 $O-BCD$, 其中 $OA=OB=OC=OD$, 见图 5。所以有:

$$V_{ABCD}=4 \times V_{O-BCD} \Rightarrow \frac{1}{3} \times S_{\triangle BCD} \times AE = \left(\frac{1}{3} \times S_{\triangle BCD} \times OE \right) \times 4$$

可得 $AE=4OE$ 。其中, $S_{\triangle BCD}$ 为三角形 BCD 的面积; V 为四面体体积。

根据正四面体的性质, 顶点 A 在底面三角形 BCD 上的投影必定是三角形 BCD 的中心。连接 BE 并延长交 CD 于点 F 。由正三角形性质, 可知 $\angle CFB=90^\circ$, F 为线段 CD 中点, 即 $CF=\frac{1}{2}r$, 根据勾股定理得: $BF=\sqrt{BC^2-CF^2}=\sqrt{r^2-\left(\frac{r}{2}\right)^2}=\frac{\sqrt{3}}{2}r$, 依据正三角形性质, $BE=\frac{2}{3}BF$, 即 $BE=\frac{\sqrt{3}}{3}r$ 。在三角形 ABE 中, 依据

$$\text{勾股定理得, } AE=\sqrt{AB^2-BE^2}=\sqrt{r^2-\left(\frac{\sqrt{3}}{3}r\right)^2}=\frac{\sqrt{6}}{3}r, \text{ 结合 } AE=4OE, \text{ 可得 } OA=\frac{3}{4}AE=\frac{\sqrt{6}}{4}r。$$

2.3 空间模型

基于上述理论, 结合风电机组机舱内部构造, 在已经形成的平面正三角形节点部署方案的基础上, 将节点部署方案进一步拓展, 形成空间正四面体节点部署方案。

本文所用的风电机组型号为国电联合动力有限公司产的 UP82-1500 III A 风电机组, 其机舱的长为 10.20 m、宽为 3.80 m、高为 3.80 m。该风电机组运行故障报告记载于文献[19], 报告中详细表明了齿轮箱故障与发电机故障最为突出, 因此需要对这些安装在机舱内的部件进行重点监控。空间正四面体节点部署方案见图 6, 图中根据风电机组机舱尺寸, 共部署了 50 个传感器节点。

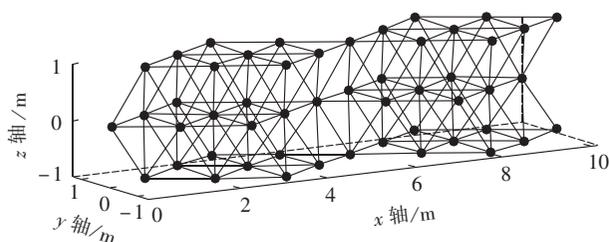


图 6 空间四面体节点部署方案

Fig.6 Spatial tetrahedron node deployment scheme

3 风电机组无线监控系统路由协议

基于第 2 节提出的空间节点部署方案, 本节结合风电机组的实际应用场合, 通过改进现有典型 LEACH 路由协议来实现监控系统信息传输性能的

优化。

3.1 簇头选举方法的改进

现有 LEACH 协议及其改进的协议都只应用于二维平面, 不适用于本文的三维风电机组监控系统。同时, 更为重要的是, 若在风电机组状态监控过程中直接利用现有的 LEACH 协议将会有以下明显的缺点。

a. 现有经典 LEACH 协议中簇头选举的方式过于简单随机化, 所有节点成为簇头节点的概率相同, 由于簇头需要对风电机组的状态信息进行融合及传输, 因此其能耗比普通节点多, 所以当能量较少的节点被选举为簇头时, 会加剧其能耗从而导致其过早失效, 监控系统的性能势必会受到显著的影响。为了使能量较多的节点作为簇头在机舱中承担汇聚数据的作用, 势必需要在簇头选举过程中对节点的能量剩余情况加以考虑。

b. 簇头选举时并未考虑节点到 sink 节点的几何距离, 而簇头向 sink 节点传输数据时, 它们之间的几何距离直接影响簇头节点的能耗。由于风电机组机舱空间较大, 因此考虑簇头与 sink 节点之间的距离则显得尤为重要。

事实上, 现有的文献有很多针对 LEACH 协议簇头选举方法的改进协议^[13-14], 但是都只考虑了缺点 **a**, 即节点剩余能量的问题, 而没有考虑缺点 **b**, 即没有考虑节点之间距离的问题, 且仅限于二维平面。综上, 本文在对风电机组机舱进行监控系统构建时将充分考虑上述 2 点, 提出改进措施, 主要思路包括以下 2 个方面。

a. 就经典 LEACH 协议中簇头选举时未考虑相应节点剩余能量的情况, 尝试将节点的剩余能量这一限制条件添加到选举算法中, 使剩余能量较多的节点成为簇头的概率更大, 能量较少节点成为簇头的概率减小, 从而防止节点能量分布进一步两极分化, 最大限度地延长风电机组监控系统有效工作的时间。

b. 针对 LEACH 协议中簇头选举时未考虑选举节点到 sink 节点几何距离这一问题, 尝试将节点至 sink 节点的几何距离这一条件充分考虑到选举算法中, 使距离 sink 节点较远的节点, 即靠近机舱两端的节点成为簇头的概率更小。

对于上述 2 点, 本文拟从阈值 $T(n)$ 进行相应的改进, 针对上述情况提出了新的 $T(n)$ 计算公式如式 (3) 所示。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \left(r \cdot \text{mod} \frac{1}{p} \right)} \frac{aK_c + bK_d}{2} & \forall n \in G \\ 0 & \forall n \notin G \end{cases} \quad (3)$$

其中, p 为簇头节点数目占总节点数目的百分比值,

称为簇头期望值; G 为最近 $1/p$ 轮中未被选为簇头的节点集合; K_e 为与当前节点剩余能量相关的能量参数; K_d 为与当前节点到 sink 节点的几何距离相关的距离参数; a 、 b 分别为 K_e 和 K_d 的权重系数,并且满足关系 $a+b=1$; mod 为求余运算。

3.2 K_e 和 K_d 的确定

式(3)中的 K_e 是与能量相关的参数。简单而言,当节点剩余能量相对较少时, K_e 值也应较小,使得 $T(n)$ 较小,使此节点当选为簇头的概率更小,避免节点能量过早消耗殆尽,以此避免因能耗不均衡导致不能够充分利用所部署的节点资源的情况出现。

简言之, K_e 的值与节点剩余能量呈正相关。用 E_r 表示节点剩余能量, E_0 表示节点初始能量,首先很容易想到一种方案,令 $K_e=kE_r/E_0$,其中 k 为一个调节比例系数,这样很容易让能量参数 K_e 与节点剩余能量呈正相关。但是,在网络运行过程中节点相继失效,当存活节点剩余能量均不是很充足时, K_e 均会过于偏小,体现在新阈值上就是阈值过于偏小,就会导致选出的簇头节点数目低于预期值,甚至出现一个簇头都选不出的特殊情况。

考虑到所有节点的能量都呈逐渐减少的趋势,故本文提出另一种方案:令 K_e 为剩余能量 E_r 和所有存活节点平均剩余能量 E_{av} 的比值,具体见式(4)。

$$K_e(n) = \frac{E_r}{E_{av}} = \frac{E_r(n)}{\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{alive}}} E_r(i)\right)/N_{\text{alive}}} \quad (4)$$

其中, N_{alive} 为存活节点的数目。

由式(4)可以看出,在任何一轮中,各节点 K_e 分母的值均相同, K_e 与剩余能量直接呈正相关,所以式(4)可以满足所需要的 K_e 变化趋势的要求。

同理,式(3)中的 K_d 是与几何距离相关的参数。用 D_{toBS} 表示各节点到 sink 节点的几何距离,假定 K_d 为所有存活节点至 sink 节点几何距离的平均值 D_{av} 与该节点到 sink 节点几何距离 D_{toBS} 的比值,具体见式(5)。

$$K_d(n) = \frac{D_{av}}{D_{\text{toBS}}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{alive}}} D_{\text{toBS}}(i)\right)/N_{\text{alive}}}{D_{\text{toBS}}(n)} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,在任何一轮中, K_d 分子的值均相同, K_d 与几何距离直接呈负相关,式(5)可以满足所需要的 K_d 变化趋势的要求。

4 仿真分析

4.1 节点模型仿真分析

在 MATLAB 平台上进行仿真分析发现,当满足式(2)时,覆盖度可以达到 100%(本文 $r=1.35$ m,对应感知半径临界值 $R=0.83$ m);当 R 逐渐减少,覆盖度随之下降,如图 7 所示。仿真结果表明了正四面体

理论计算结果的正确性。当 $R=0.83$ m 时,在误差允许的范围,可使得覆盖度达到近乎 100%,所以在后续研究传输协议的工作中,将感知半径设定值大于 0.83 m,即可保证初始覆盖度满足要求,故设定感知半径为 0.9 m。

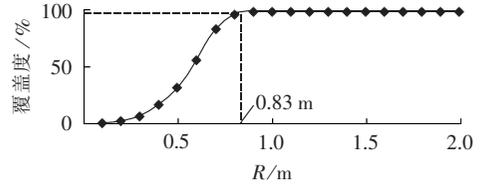


图 7 覆盖度随感知半径的变化曲线

Fig.7 Curve of cover degree vs. sensing radio

4.2 评价指标

为了对所提方法的有效性进行评估,提出以下评价指标。

a. 最佳运行时间,即首次出现失效节点的时间。在没有出现失效节点前,所有节点处于正常监控状态,此段时间是监控系统的最佳运行时间。所以在仿真中将记录不同方案情况下监控系统中首个出现节点失效的轮数进行系统性能的对比分析。

b. 系统稳定工作时长,即能够满足 70%覆盖度的时长。依据文献[20],本文认为当系统覆盖度降到 70%以下时,无法对系统进行全面有效的监控,所以在后续仿真过程中通过记录不同情况下系统覆盖度下降至 70%的轮数来对监控系统的性能进行考察。需要说明的是,覆盖度的百分比值可以根据实际应用情况灵活设定。

4.3 确定权重

首先对权重做一个简要分析:在出现第一个失效节点前,所有节点均正常工作,所以 K_d 对其无任何影响, K_e 成为唯一的影响因素。显然,随着权重 a 值的增加,首个失效节点的出现时刻势必会相对较晚。但是过度考虑能量因素,未必可行,所以可以预测:随着 a 值增加,首个失效节点出现的时刻会先推迟,然后再缓慢提前。

对于权重 a 、 b 的选取,本文通过以下方式得出最优权重解。 a 的取值为 0.1、0.2、...、0.9,基于 $a+b=1$ 的限制条件,对应的 b 取值为 0.9、0.8、...、0.1,将以上 9 组权重取值代入 MATLAB 平台进行仿真,根据首个失效节点出现的时刻及监控系统覆盖度下降至设定的临界百分值的时刻,进一步考察监控系统最佳运行时间和系统稳定工作时长最大时对应的权重值,进而得出最适用于本文节点部署方案的最优权重解。

对以上 9 组权重分别进行仿真,记录各自的首个失效节点出现的轮数与监控系统覆盖度下降至 70%的轮数,如图 8 所示。

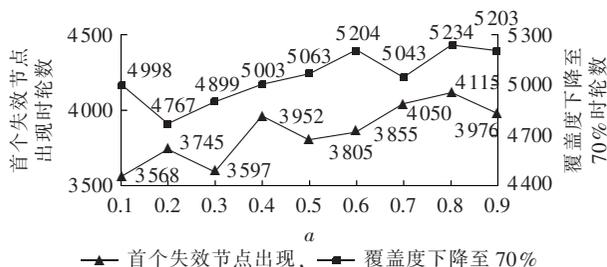


图 8 不同权重组合下的结果

Fig.8 Results under different weight combinations

从图 8 中可明显看出 $a=0.8, b=1-a=0.2$ 时, 系统最佳运行时间最大, 系统稳定工作时长也最大, 因此将此组权重作为本文方案的最优权重。即将式 (3) 中 a, b 的权重设定为 $a=0.8, b=0.2$ 。由图 8 所得折线可以看出, 随着 a 值的增加, 首个失效节点出现的时刻和监控系统覆盖度下降至 70% 的时刻大致呈现先逐渐推迟后缓慢提前的趋势, 与前述预测结论一致。而在整个过程中由于簇首节点选择的随机性, 使得所得折线有所波动。

4.4 仿真结果

本文中 LEACH 协议的各参数均按文献[20]设置, 具体参数如下: 节点初始能量 $E_0=2\text{ J}$, 发射单位报文损耗能量 $E_{\text{tx}}=5\times 10^{-8}\text{ J}$, 接收单位报文损耗能量 $E_{\text{rx}}=5\times 10^{-8}\text{ J}$, 自由空间能量 $E_{\text{fs}}=1\times 10^{-11}\text{ J}$, 衰减空间能量 $E_{\text{mp}}=1.3\times 10^{-15}\text{ J}$, 多路径衰减能量 $E_{\text{ln}}=5\times 10^{-9}\text{ J}$ 。仿真节点数目仍为前文空间模型中部署的节点数 50。

a. 节点剩余总能量。

对 LEACH 协议改进后的系统剩余能量与改进前的系统剩余能量的差值如图 9 所示。由图 9 可以看出, 剩余能量差值呈现先上升后下降的趋势, 表明此改进协议在能量的总体宏观调控方面有显著的效果。当达到 3000 多轮时, 由于未改进协议系统陆续出现失效节点, 处于工作状态的节点减少, 能耗自然减少, 而此时采用改进协议的系统的所有节点都处于工作状态, 能耗大, 所以能量差值呈现下降趋势。通过多次仿真发现, 能量差值总是在 4000 轮左右时过零点, 即表明在 4000 轮左右应用改进前、后协议的监控系统的剩余总能量达到一致。在 3000 轮后, 由于改进的协议考虑了能量均衡因此剩余的工作节点更多, 使得其总能耗更大; 在 4000 轮时, 与未改进协议系统的节点失效情况达到一致, 继续运行, 改进协议系统拥有的工作节点仍旧更多, 必然耗能更快, 能量差值为负值; 最终能量均耗尽, 其差值趋于 0。图 9 主要说明的是相同数目节点工作时, 该改进的 LEACH 协议能很好地宏观调控系统的总能耗, 做到能量的合理利用, 延缓失效节点出现。由图 9 可知失效节点出现的时刻延缓了 962 轮。

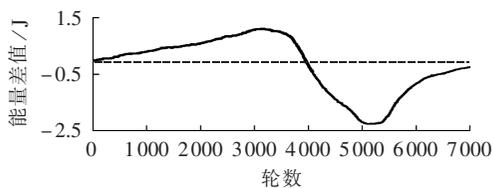


图 9 剩余能量差值

Fig.9 Difference of residual energy

b. 失效节点数目。

利用改进前的路由协议与改进后的路由协议时监控系统失效节点数目的差值如图 10 所示。仿真中重点关注 5500 轮之前的部分, 原因是 5500 轮之后系统覆盖度低于 70%, 不满足初始设定, 不作为参考。由图 10 可以看出, 当覆盖度下降到 70% 之前, 利用改进 LEACH 协议的监控系统, 其失效节点个数比同等情况下未改进协议的监控系统要少, 最多有 9 个之差, 对于由 50 个传感器组成的系统而言, 这就意味着 18% 的性能提升。对于图 10 中曲线的趋势变化, 这里进行简要的解释: 未改进协议的系统较改进协议的系统, 其对单个节点能耗的控制不够精准, 后者对于能量较低的节点有很好的保护效果, 大幅降低了其成为能耗主要来源的概率, 这就使得能量得到有效均衡利用。由于通过上述方式尽量延长了每个节点的工作寿命, 当节点能量接近极限时, 只让其成为普通节点, 降低了监控系统的能耗, 所以, 改进协议系统的节点失效轮数较未改进协议系统更为集中。通过多次仿真发现, 改进协议的系统节点从 4000 轮左右陆续失效。可以明显看出, 图 10 中从 4000 轮开始, 曲线开始下降, 失效节点数目差值减少。改进协议的系统节点失效轮数虽然出现较晚但相对较为集中, 所以此时其节点失效速率较快, 失效节点数目差值呈现明显的下降趋势, 直到某一负值为止, 最终两者失效节点数目必然均为 50, 所以仿真最后阶段又有回升趋势, 最终差值必然为 0。

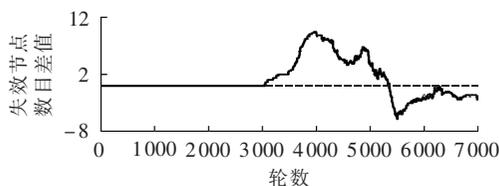


图 10 失效节点个数差值

Fig.10 Difference of account of failure nodes

c. 覆盖度。

利用改进后的路由协议与改进前的路由协议时监控系统覆盖度差值如图 11 所示。仿真中重点关注 5500 轮之前的部分, 原因是 5500 轮往后系统覆盖度低于 70% 不满足初始设定要求。从图 11 中可明显看出, 改进协议的系统其覆盖度比改进前的有所提升, 尤其在 4000~4400 轮期间, 覆盖度的差值均

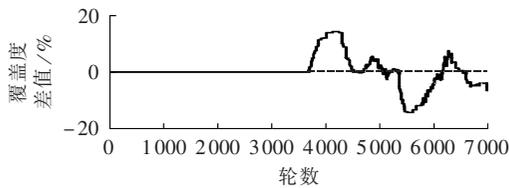


图 11 覆盖度差值

Fig.11 Difference of cover degree

在 10% 以上。可见,利用改进后 LEACH 协议的监控系统有良好的缓冲自愈作用,可以最大化监控系统的可靠性,提高监控系统的性能。对于图 11 中曲线趋势变化情况,这里进行简要解释:曲线变化原因与失效节点数目的变化有很大程度的关联性。图 10 中失效节点数目差值在 4000~5500 轮急速下降,节点失效带来的直接影响便是覆盖度的下降,因此表现在图 11 中,同样地在 4000~5500 轮阶段监控系统覆盖度急速下降。同时,由于监控系统运行后期失效节点过多,所以改进协议前后监控系统的覆盖度差值甚至出现了负值,但是此时改进协议前后系统的覆盖度均低于 70%,该情况不在实际应用范围内,只出现在仿真实验中。

d. 关键阶段。

分别将采用改进前与本文提出的改进路由协议且同时考虑节点剩余能量和节点距离情况下的监控系统在运行过程中的关键阶段记录于表 1 中^[13-14]。同时,为了说明本文所提方法的有效性,将现有文献中仅考虑节点剩余能量情况下的结果一并列出。表中每种情况下的结果均为对应情况下仿真 30 次结果的平均值。

表 1 改进前后关键阶段轮数
Table 1 Round number of key stages
before and after improvement

情况	首个失效节点出现时的轮数	覆盖度降低至 70% 时的轮数
采用改进前协议	3069	5193
仅考虑剩余能量	3735	4770
采用改进协议并同时考虑 剩余能量与节点距离	4031	5238

首先将采用改进前协议与本文所提改进路由协议同时考虑节点剩余能量和节点距离情况下的结果进行比较。由表 1 中数据可知,采用改进前协议的系统首个失效节点出现时轮数与覆盖度下降至 70% 时的轮数分别为 3069、5193;而采用改进协议并同时考虑节点剩余能量和节点距离的监控系统的对应数据分别为 4031、5238。可见,改进协议后系统首个失效节点出现延缓了 962 轮,这就意味着利用本文改进 LEACH 协议的监控系统其最佳运行时间比改进前延长了 31.35%;虽然覆盖度下降至 70% 的轮数仅延迟了 45 轮,稳定工作时长提升不多,但截止至

覆盖度下降至 70% 前的过程,在同等运行时间下,利用改进 LEACH 协议的监控系统与改进前相比,其覆盖度均较高,这意味着系统的监控性能更优越。

然后将现有文献中仅考虑节点剩余能量与采用本文所提改进路由协议同时考虑节点剩余能量和节点距离情况下的结果进行比较。由表 1 中数据可知,采用仅考虑节点剩余能量协议的系统首个失效节点出现时的轮数与覆盖度下降至 70% 时的轮数分别为 3735、4770;而采用改进协议并同时考虑节点剩余能量和节点距离的监控系统首个失效节点的出现延缓了 296 轮,覆盖度下降至 70% 的轮数延迟了 468 轮,稳定工作时长延长了 9.81%。这是由于同时考虑节点剩余能量与节点距离时,尽量避免了节点之间长距离的通信,进一步地节约了节点能量并有利于节点能量的均衡利用。上述结果验证了本文所提方法在延长监控系统使用寿命上的有效性。

5 结论

本文从监控系统构建过程中的节点部署方案与路由协议两方面对风电机组无线监控系统的构建方法进行研究,试图使节点部署的数量最少以节约构建成本,同时使节点的能耗能够最大限度地均衡利用以延长监控系统的使用寿命。本文提出了一种空间正四面体节点部署方案,该方案的思想是将正四面体理论与实际风电机组部件的错落分布情况相结合,以突破二维平面节点部署监控的局限性。在该部署方案的基础上提出改进的 LEACH 路由传输协议。仿真结果表明,本文提出的改进路由协议对均衡监控系统整体能耗、降低系统失效节点数及提高监控系统覆盖度有显著作用,使得系统最佳运行时间增加了 31.35%。本文的研究成果力图为风电机组无线监控系统的构建提供一种新的思路。

参考文献:

- [1] 闵兵,王梦川,傅小荣,等. 海上风电是风电产业未来的发展方向——全球及中国海上风电发展现状与趋势[J]. 国际石油经济,2016,24(4):29-36.
- [2] MIN Bing,WANG Mengchuan,FU Xiaorong,et al. Offshore wind power as the development trend of wind industry—developments of global offshore wind power[J]. International Petroleum Economics,2016,24(4):29-36.
- [3] 黄玲玲,曹家麟,张开华,等. 海上风电机组运行维护现状研究与展望[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):729-738.
- [4] HUANG Lingling,CAO Jialin,ZHANG Kaihua,et al. Status and prospects on operation and maintenance of offshore wind turbines [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(3):729-738.
- [5] 傅质馨,袁越. 海上风电机组状态监控技术研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):121-129.
- [6] FU Zhixin,YUAN Yue. Status and prospects on condition monitoring technologies of offshore wind turbine[J]. Automation

- of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 121-129.
- [4] 梁博森, 林振智, 文福拴, 等. 发电机组并行恢复动态决策的熵权方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 119-125, 159.
LIANG Bomiao, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Dynamic strategy based on entropy weight theory for parallel restoration of generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 119-125, 159.
- [5] 李少林, 秦世耀, 王瑞明, 等. 双馈风电机组孤岛机理与防孤岛保护试验[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 34-40.
LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Research of islanding mechanism and anti-islanding protection for DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 34-40.
- [6] 胡兰馨, 田霞芬, 蔡呈花, 等. 基于无线传感器网络的风力发电系统实时监测[J]. 上海电机学院学报, 2013, 16(1): 39-42.
HU Lanxin, TIAN Xiafen, CAI Chenghua, et al. Real-time monitoring for wind power generation based on wireless sensor network[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2013, 16(1): 39-42.
- [7] 吴晓军, 张力, 马悦. 无线传感器网络不等级能级环模型及数据传输策略[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2012, 42(4): 563-569.
WU Xiaojun, ZHANG Li, MA Yue. Non-uniform ring energy level model and data transmission strategy research for wireless sensor networks[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2012, 42(4): 563-569.
- [8] 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): 104-109.
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): 104-109.
- [9] 王哲敏. 无线传感器网络在风力发电机组状态监测中的应用研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2010.
WANG Zheming. Wireless sensor networks application research in the wind power generators condition monitoring[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2010.
- [10] 邹春明, 刘海维. 基于 ZigBee 的风电机组远程监测系统设计与实现[J]. 电子器件, 2014(3): 542-545.
WU Chunming, LIU Haiwei. The design and realization of remote monitoring system on wind turbine based on ZigBee[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014(3): 542-545.
- [11] 王传坤. 大功率风电齿轮箱的无线监控系统研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010.
WANG Chuankun. A study on wireless monitoring in high power gear box of wind power[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2010.
- [12] 傅质馨, 赵敏, 袁越, 等. 基于无线传感网络的海上风电机组状态监测系统构建方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 23-28.
FU Zhixin, ZHAO Min, YUAN Yue, et al. Construction strategies for offshore wind turbine condition monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 23-28.
- [13] 周智勇, 陈晖, 王海涛, 等. 基于蚁群算法和能耗均衡的改进 LEACH 协议[J]. 通信技术, 2016, 49(4): 446-451.
ZHOU Zhiyong, CHEN Hui, WANG Haitao, et al. Modified LEACH protocol based on ant colony optimization and energy balance[J]. Communications Technology, 2016, 49(4): 446-451.
- [14] 张甫庆, 熊勇, 单联海. 基于簇头间距均匀部署的 LEACH 协议改进算法[J]. 信息技术, 2016(2): 35-38.
ZHANG Fuqing, XIONG Yong, SHAN Lianhai. An improved LEACH algorithm based on uniform distribution cluster-heads distance[J]. Information Technology, 2016(2): 35-38.
- [15] 赵敏, 傅质馨, 袁越, 等. 基于无线传感网络的风电机组状态监测系统可靠性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(3): 35-41.
ZHAO Min, FU Zhixin, YUAN Yue, et al. System reliability analysis for wind turbine condition monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2016, 28(3): 35-41.
- [16] 张猛. 风电机组状态监测及其可视化[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
ZHANG Meng. Wind turbine condition monitoring and visualization[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [17] 金仁成, 朱明, 车志平, 等. WSN 中正三角形剖分的异构节点静态部署算法[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2016, 16(2): 7-9.
JIN Rencheng, ZHU Ming, CHE Zhiping, et al. Heterogeneous nodes static deployment algorithm based on equilateral triangle partition in WSN[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2016, 16(2): 7-9.
- [18] 傅质馨, 吴晓蓓, 黄成, 等. 一类三角形网格无线传感器网络监测性能评价方法[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 1-6.
FU Zhixin, WU Xiaobei, HUANG Cheng, et al. Monitoring performance criterion for triangle grid-based wireless sensor networks[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science), 2009, 33(1): 1-6.
- [19] ALBERT R, BARABASI A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47-97.
- [20] HEINZELMAN W B, CHANDRAKSN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

作者简介:



傅质馨

傅质馨(1983—),女,江苏徐州人,副教授,博士,主要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);

骆阳(1992—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为风电机组状态监测技术(**E-mail**: yaluochn@163.com);

丁国荣(1989—),男,江西上饶人,硕士,主要研究方向为可再生能源发电技术(**E-mail**: dgr940158986@163.com);

袁越(1966—),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析与控制、可再生能源与节能新技术(**E-mail**: yyuan@hhu.edu.cn)。

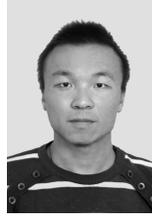
(下转第 51 页 continued on page 51)

2011[S]. 北京:国家电网公司,2011.

作者简介:

常仲学(1991—),男,甘肃定西人,博士研究生,主要研究方向为含分布式电源配电网继电保护(E-mail:changzhx@163.com);

杨忠礼(1973—),男,河南新乡人,工程师,硕士,主要从



常仲学

事继电保护运行与管理工

宋国兵(1972—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:song.gb@163.com);

黄炜(1993—),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:huangweixjtu@163.com)。

Analysis on asymmetric fault current characteristics of inverter interfaced distributed generator under positive-sequence and negative-sequence current respective control strategy

CHANG Zhongxue¹, YANG Zhongli², SONG Guobing¹, HUANG Wei¹, KU Yongheng², SU Gaofeng², WANG Xinming²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Xinxiang Power Supply Company, Xinxiang 453002, China)

Abstract: In order to reveal the fault characteristics and fault mechanism of IIDG(Inverter Interfaced Distributed Generator), the fault current expressions under independent control strategy of positive-sequence and negative-sequence components are deduced based on the thought of power balance and controllable characteristics. Then the influencing factors of fault current are analyzed. The analytical results show: the d -axis and q -axis components of positive-sequence and negative-sequence currents are second order response to voltage dip, and the trend of the three-phase positive-sequence and negative-sequence currents are firstly increasing gradually and then decreasing to a steady value due to the overshoot of second order response; the steady-state value of the positive-sequence and negative-sequence currents are related to the active power output, reactive power output and positive-sequence and negative-sequence voltages, and transient characteristics are closely related to control parameters of converter and current phase at the moment that fault occurs. Simulation on PSCAD and recording data verify the correctness of the theoretical deduction. The proposed analysis method can effectively reflect the fault characteristics of IIDG and provide theoretical reference to fault characteristic analysis of inverter's interfaced components and related relay protection.

Key words: IIDG; grid-side converter; asymmetric fault current; failure analysis; short circuit currents

(上接第 32 页 continued from page 32)

Construction method of wireless monitoring system for wind turbine

FU Zhixin¹, LUO Yang¹, DING Guorong², YUAN Yue¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Company Shangrao Power Supply Company, Shangrao 334000, China)

Abstract: The wireless monitoring system of wind turbine is constructed from two aspects: node deployment and routing protocol. Considering the spatiality of typical fault distribution of wind turbines, a spatial regular tetrahedron node deployment scheme is proposed to decrease the number of deployed sensor nodes to the utmost. The proposed scheme applies the regular tetrahedron theories into the node deployment of the monitoring system and focuses on monitoring the cabin gearbox, generator and transmission shaft. Based on this, a routing algorithm applicable to wireless monitoring system of wind turbine is proposed by improve the cluster head selection method of the classical LEACH routing protocol. Considering the residual energy of nodes and the geometrical distance between nodes synthetically, the algorithm can improve the communication ability of monitoring system, balance the energy consumption of nodes and prolong the lifetime of the wireless monitoring system. Simulative results show that the proposed spatial node deployment scheme expands the monitoring ability of the system and the proposed routing algorithm effectively prolongs the system lifetime by 31.35%.

Key words: wind turbines; monitoring system; wireless sensor networks; node deployment; routing protocol