

变电站物联网系统的无线取电供电方法

彭桂喜, 吴玉龙, 袁思遥, 高梓寒, 丁 芃

(国网天津市电力公司滨海供电分公司, 天津 300450)

摘要:传感器的供电维护阻碍了物联网系统在变电站的应用发展。提出一种基于无线传输的变电站物联网系统供电方法,以实现物联网系统的自持运行。首先,建立能量采集和分配模型,分析信号传输模型,利用 CSMA 协议对时隙共享信道上与电源节点通信进行信号传输,有效降低了多节点无线供电信道竞争问题。其次,对传感器能量演变进行分析,设计出 2 种传感器能量供给方案,其中次优方案给每个节点固定分配功率,以较低的性能换取较简单的实现,另一种方案是动态调整分配的功率,为每个节点提供最大功率,得出最佳能量分配比,旨在提升系统的无线供电效率。最后,建立 10 节点仿真模型,验证所提出方法的有效性。结果表明,文章所提方法可以实现变电站物联网系统的自我维持。

关键词:物联网;无线供电;智能电网

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.022 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2022)03-0181-08

Research on wireless power supply method of internet of things system in substations

PENG Guixi, WU Yulong, YUAN Siyao, GAO Zihan, DING Peng

(Binhai Power Supply Branch, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300450, China)

Abstract: The power supply maintenance of sensors will hinder the application and development of the IoT (internet of things) system in substations. To handle it, this paper proposes a new power supply method for the IoT system in substations based on the wireless transmission to realize itsself-sustaining operations. Firstly, the energy acquisition and distribution model is established, the signal transmission model is analyzed, and the CSMA protocol is used to transmit signals on the time-slot shared channel to communicate with the power supply nodes, which can effectively reduce the multi-node wireless power supply channel competition. Secondly, the evolution of sensor energy is analyzed, and two sensor energy supply schemes are designed. Among them, the sub-optimal scheme assigns power to each node fixedly to achieve simpler implementation rather than performance. The other scheme will dynamically adjust the allocation, to provide the maximum power for each node, and get the best energy distribution ratio which can improve the wireless power supply efficiency of the system. Finally, a 10-node simulation model is established to verify the effectiveness of the proposed method. The results show that the method proposed in this paper can realize the self-sustaining of the substation IoT system.

Key words: internet of things; wireless power supply; smartgrid

变电站各类设备的在线监控是物联网技术在电力系统应用的一个重要场景。然而物联网系统中的许多设备,包括微型监控传感器,无法全部连接到稳定的能源,使用电池其能量最终也会耗尽,因此向所有传感器提供能量是在变电站区域应用物联网系统的重要挑战。目前已经提出了诸如压电转换、光伏等传感器电源设计方法,主要目的是减少传感器电源布线带来的不利影响^[1]。能量无线传输消除了物联网设备布线的问题,使得设备放置不再受限。

感应耦合、磁共振耦合和电磁辐射是基于电磁转换的主要无线供电方法。感应耦合仅在非常短的有效范围内,仅为零点几米^[2],磁共振耦合可以在几米的范围内传输能量^[3],而使用电磁辐射的传输范围高达几十千米^[4]。感应耦合广泛应用于如身份证识别等近场射频识别(radio frequency identification, RFID),其另一个常见用途是对如牙刷、手机和医疗植入物等设备进行短程充电^[5]。磁共振耦合是在2007年提出的,这项技术旨在去除全部供电线,并扩大供电范围,有着广泛的应用,包括消费者设备、发光二极管照明、医疗设备、电动汽车和无线传感器网络^[6-8]。文献[9]于1960年首次展示了利用电磁辐射进行无线能量传输,使用微波发生器将电能转换成射频信号,然后向目标辐射电磁束并通过自由空间传输,最后在接收器上通过整流天线转换回电能^[10]。整流天线使用二极管电路将射频信号转换成直流电压,目前已经提出了多种整流天线设计方案,以适应不同的传输系统和发射频率^[11]。提高整流天线的功率转换效率是利用电磁辐射进行无线供电的主要挑战,功率转换效率取决于信号的频率、输入功率和电路设计等多种因素^[12-13]。文献[14]中,在2.4 GHz频率下,平均可用入射功率为4 dBm,功率转换效率达到64%。利用电磁辐射进行无线供电时,可以在能量接收器体积较小的条件下保持射频信号到直流的转换效率。

本文提出一种基于电磁辐射的变电站物联网系统无线供电方法。由于高压设备周围有强交变电场,在变电站环境中收集能量是一种实用选择。在现有文献中已经广泛研究了从交变电场获取能量的方法,并且提出了不同的设计来改善能量采集器的性能^[15-16]。本文通过将能量采集器放置在高压设备附近,使得采集器采集更多的能量。收集的能量

随后可以通过向更远的传感器辐射射频信号而分配到这些传感器中。目前的研究基本只针对传输模式进行研究^[17-18],未考虑多节点复杂系统的传输特性。本文提出2种功率分配方法来为多节点物联网系统进行无线供能,使用载波侦听多址访问(carrier sense multiple access, CSMA)协议解决多节点信道竞争问题,将传输失败的概率称为中断概率,将其用作衡量系统性能的标准。所提出的方法允许为节点分配次优和最优传输功率,以最小化中断概率,通过仿真分析这些方法的性能。

1 无线取电供电方法

1.1 能量采集和分配模型

在系统模型中,研究基站节点、电源节点和传感器3组节点。基站节点连接到稳定的能源,是传感器传输数据的最终目的地。基站节点可以部署在变电站内的监控室,电源节点靠近高压端子放置,传感器安装在需要执行传感任务的地方。电源节点不断从高压设备周围的交变电场中获取能量。电源节点通过向周围的多个传感器辐射能量射频信号,将部分能量分配给这些传感器,电源节点使用剩余能量将收集的数据传输回基站节点。本文假设传感器没有连接到稳定的能源,传感器所需能量都是从电源节点接收。传感器将数据传输到电源节点,电源节点将数据中转回基站节点。本文将用于传输数据的信号称为数据信号。能量获取和传输模型如图1所示。

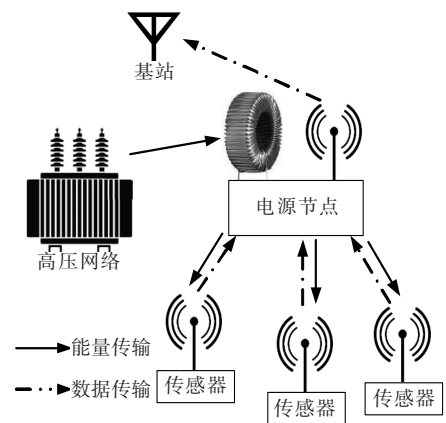


图1 能量获取和传输模型

Figure 1 Energy harvesting and transmission model

r 为能量分配比率, $0 < r < 1$ 。在电源节点上获得的能量的 $1-r$ 部分将用于与基站的通信, r 部分

用于对传感器供电。 r 是优化系统性能的一个关键因素,根据该比率将能量在基站节点数据传输和传感器供电之间进行分配。

本文采用中断概率评估系统性能,即电源或基站节点接收的数据信号小于某个阈值的概率。中断概率为

$$P_{\text{out}} = P\{S_{\text{NRsp}} < \Omega_{\text{sp}} \cup S_{\text{NRpb}} < \Omega_{\text{pb}}\} \quad (1)$$

式中 S_{NRsp} 为当数据信号从传感器发送到电源节点时电源节点的信噪比; S_{NRpb} 为当数据信号从电源节点发送到基站时基站的信噪比; Ω_{sp} 、 Ω_{pb} 为信噪比的可接受阈值。如果某个节点没有足够的能量来启动预定的传输,则视为失败传输,并会增加中断概率。

为了最大限度地降低中断概率,对模型进行优化定义:从传感器到电源节点的数据信号传输功率为

P_{s_i} ($i=1,2,\dots,M$),其中 M 为传感器数量;从电源节点到第 i 个传感器的能量信号传输功率为 P_{ps_i} ;从电源节点到基站的数据信号传输功率为 P_{pb} 。

电源节点为每个传感器分配不同的传输功率,但是可以使用一个单一的传输功率将所有传感器接收的数据传输回基站节点。

1.2 信号传播模型

假设所有的信道都是瑞利分布,具有单位期望值。因此,信道衰减的功率与单位方差成指数关系。用弗里斯方程来模拟电磁波的传播。当数据信号从传感器 s_i 传输到电源节点时,电源节点处的信噪比为

$$S_{\text{NR}_{s_i p}} = \frac{P_{s_i} G_{\text{sp}} h_{s_i p} d_{s_i p}^{-\alpha} (4\pi f/c)^{-\alpha}}{P_N} \quad (2)$$

式中 P_i 为传感器 s_i 的发射功率; G_{sp} 为传感器的发射器的天线增益,所有传感器节点具有相同的天线增益; $h_{s_i p}$ 为信道衰减增益; $d_{s_i p}$ 为传感器 s_i 和电源节点之间的距离; f 为传输频率; c 为光速; α 为传播损耗指数; P_N 为噪声功率。

类似地,当电源节点向基站发送信号时,基站节点的接收信噪比为

$$S_{\text{NR}_{\text{pb}}} = \frac{P_{\text{pb}} G_{\text{pb}} h_{\text{pb}} d_{\text{pb}}^{-\alpha} (4\pi f/c)^{-\alpha}}{P_N} \quad (3)$$

式中 h_{pb} 为电源节点向基站发送信号时信道衰减增益; G_{pb} 为电源节点发射器的天线增益; d_{pb} 为电

源节点与基站之间的距离。

1.3 频道接入方案

本文考虑 M 个主动传感器节点使用 CSMA 协议在时隙共享信道上与电源节点通信,每个节点通过先听信道来开始传输过程。如果传感器发现信道空闲,在下一个时隙开始时,将以概率 p 传输,这意味着在每次传输后,信道将有一个时隙的静默。假设每次传输将占用 N 个时隙, N 为随机整数。如果信道繁忙,传感器节点将继续监听信道,直到空闲后以概率 p 进行传输。假设发生冲突时,数据包丢失,这将增加中断概率。此外,如果一个节点没有足够的能量来传输信号,数据包将被丢弃,并视为传输失败。在本文中假设传感器总是有数据要传输,即当信道空闲并且传感器有足够的能量时,传感器节点总是以概率 p 发起传输。

从电源节点的传感器接收到的数据信号会立即传送到基站。因此,从电源节点到基站的传输周期不是固定的。从电源节点到传感器的能量信号被周期性地传输,假设能量信号每单位时间从电源节点传输一次。为了提高系统的效率,用定向天线瞄准每个传感器,由于电源节点周围有 M 个传感器,传感器接收能量信号的频率将与 $1/M$ 成比例。

1.4 CSMA 协议分析

当传感器完成传输任务时,从下一个时隙的开始直到下一个传输结束是一个重复周期,称这个间隔为复位周期,如图 2 所示。2 次连续传输之间的空闲时间存在 3 种情况:节点侦听信道;节点以 $1-p$ 的概率没有进行传输;节点没有足够的能量进行传输。

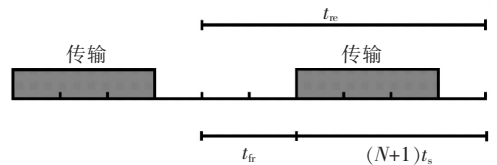


图 2 传感器复位周期

Figure 2 The sensor reset cycle

复位周期 t_{re} 的长度是一个随机变量,即

$$t_{\text{re}} = t_{\text{fr}} + (N+1)t_s \quad (4)$$

式中 t_s 为 CSMA 方案中时隙的持续时间; t_{fr} 为 2 次连续传输之间空闲时间的随机变量; N 为分组长度的固定值。当信道可供传输时,传感器以概率 p

传输。因此,节点在传输前等待的空闲时隙的平均数量为

$$\sum_{i=0}^{\infty} i p (1-p)^i = \frac{1}{p} - 1 \quad (5)$$

从传感器的角度来看,有 $1 - (1-p)^{M-1}$ 的概率,至少一个传感器会进行传输。在至少一个传感器传输的情况下,该信道将在下一个 $N+1$ 时隙被占用。因此,传感器传输的平均等待时间为

$$\bar{t}_{tr} = \left(\frac{1-p}{p} \right) ((N+1)(1-(1-p)^{M-1}) + (1-p)^{M-1}) t_s \quad (6)$$

类似可知:

$$\bar{t}_{re} = \left(\frac{1-p}{p} \right) ((N+1)(1-(1-p)^{M-1}) + (1-p)^{M-1}) t_s + (N+1) t_s \quad (7)$$

此外,当一个节点进行传输时,如果另有节点要在同一时隙内进行传输,就会发生冲突。因此,冲突概率为

$$p_{col} = 1 - (1-p)^{M-1} \quad (8)$$

则该系统的中断概率为

$$p_{out}^s = p_{col} + (p \{S_{NRpb} < \Omega_{pb} \mid S_{NRs_i,p} \geq \Omega_{sp}\} + p \{S_{NRs_i,p} \geq \Omega_{sp}\} + p \{S_{NRs_i,p} < \Omega_{sp}\}) (1 - p_{col}) \quad (9)$$

其中, Ω_{pb} 、 Ω_{sp} 分别为基站节点和电源节点的容许信噪比阈值,发生冲突时的中断概率为 1。

2 关键问题的原理和方法

2.1 传感器能量演变

传输信道假设服从瑞利分布,因此当信号从电源节点传输到传感器 s_i 时,接收功率 λ_{s_i} 可以使用弗里斯方程来确定,即

$$\lambda_{s_i} = P_{ps_i} G_{ps} G_s h_{ps_i} d_{s_i}^{-\alpha} (4\pi f/c)^{-\alpha} \quad (10)$$

式中 h_{ps_i} 为电源节点和传感器 s_i 之间的信道衰减增益; P_{ps_i} 为能量信号传输功率; G_{ps} 为从电源节点到传感器的天线增益; G_s 为传感器的接收器增益。本文中假设不同节点间所有传输的持续时间固定,其值等于 t_d 。对于每个周期 T_{ps} , 电源节点释放能量为 $P_{ps_i} \cdot t_d$ 。因此传感器的平均接收功率为

$$\bar{\lambda}_{s_i} = P_{ps_i} G_{ps} G_s d_{s_i}^{-\alpha} (4\pi f/c)^{-\alpha} \quad (11)$$

如文 2 所述,传感器每间隔 t_{re} 向电源节点传输一次数据。每次传输都是在接收到能量信号后开始的。因此,根据大数定律,在开始传输之前,每个传感器采集的能量可以近似为

$$E_{tr}^s \approx \bar{\lambda}_{s_i} \left[\frac{t_{re}}{T_{ps}} \right] t_d \quad (12)$$

式中 $\bar{\lambda}_{s_i}$ 为传感器 s_i 的平均接收功率; T_{ps} 为电源节点为每个传感器供能的周期; t_d 为从电源节点到传感器的每次传输持续时间; t_{re}/T_{ps} 为在下一次数据传输到电源节点之前,传感器 s_i 接收到多少能量信号。随着 t_{re}/T_{ps} 比值的增加,传感器在开始下一次传输之前会接收到更多的能量信号,近似值变得更加精确。

2.2 功率分配方法

本文提出 2 种方法来为所考虑的 CSMA 中的节点分配功率。这 2 种方法都保证了每当节点需要传输时,已经存储了足够的能量来启动传输。

2.2.1 数据信号功率分配

1) 固定功率分配。

在该方法中,给每个节点分配一个固定的功率。传输功率在开始时设置,之后不能更改。然而如式(12)所示,在该方法下传感器获取的能量从一个复位周期到另一个复位周期是不同的。由于电源节点和传感器的发射器和接收器独立工作,可以假设传感器在至少 $(N+1)t_s$ 时间内收集了能量。因此,可以为传感器考虑以下保守功率分配,即

$$P_{s_i} = \bar{\lambda}_{s_i} \left[\frac{(N+1)t_s}{T_{ps}} \right] \quad (13)$$

通过比较式(12)、(13)可知,由于 $t_{re} \geq (N+1)t_s$, 因此与节点获取的能量相比,给每个传感器提供了非常保守的功率分配。同样,从电源节点到基站的传输周期长度也是一个随机变量。若传感器每隔 $(N+1)t_s$ 传输一次数据,则电源节点向基站节点传输数据的频率会达到最高。因此,考虑到有 M 个传感器,电源节点需每隔 $(N+1)t_s/M$ 将数据回传至基站。如文 2.1 中所述,在电源节点上获得能量的 $1-r$ 部分将用于与基站的通信。因此,可以考虑对电源节点进行以下保守功率分配,即

$$P_{pb} t_d = \lambda_p (N+1)t_s (1-r)/M \quad (14)$$

式中 λ_p 为电源节点获得的功率,其被假定为时不变。为了计算中断概率,考虑式(2)可得:

$$p\{S_{NRs_i,p} < \Omega_{sp}\} = p\left\{\frac{P_{s_i} G_{sp} h_{s_i,p} d_{s_i,p}^{-\alpha} (4\pi f/c)^{-\alpha}}{P_N} < \Omega_{sp}\right\} = 1 - \exp\left(-\frac{P_N \Omega_{sp} d_{s_i,p}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha}}{P_{s_i} G_{sp}}\right) \quad (15)$$

同样,使用式(3),对于从电源节点到基站,可得:

$$p\{S_{NRpb} < \Omega_{pb} \mid S_{NRs_i,p} \geq \Omega_{sp}\} = p\left\{\frac{P_{pb} G_{pb} h_{pb} d_{pb}^{-\alpha} (4\pi f/c)^{-\alpha}}{P_N} < \Omega_{pb}\right\} = 1 - \exp\left(-\frac{P_N \Omega_{pb} d_{pb}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha}}{P_{pb} G_{pb}}\right) \quad (16)$$

最后使用式(9),可得:

$$p_{out}^{s_i} = p_{col} + \left(1 - \exp\left(-\frac{P_N \Omega_{sp} (4\pi f/c)^{\alpha} d_{s_i,p}^{\alpha}}{P_{s_i} G_{sp}}\right)\right) \cdot \exp\left(-\frac{P_N \Omega_{pb} (4\pi f/c)^{\alpha} d_{pb}^{\alpha}}{P_{pb} G_{pb}}\right) \cdot (1 - p_{col}) \quad (17)$$

其中, p_{col} 使用式(8)确定。本文描述的固定功率分配法为节点分配功率的次优法,这是因为无论节点获得多少功率,总是给传输功率分配一个固定值。

2) 动态功率分配。

动态功率分配方法是根据每个节点在过去的复位周期内回收的能量,为每个节点分配最大传输功率。复位周期的持续时间决定了每个周期获得的能量。由于复位周期的持续时间是一个随机变量,在每个周期开始时,传输功率也需要重新调整,因此有:

$$\begin{cases} P_{pb} t_d = \lambda_p T_{pb} (1 - r) \\ P_{s_i} t_d = E_{h_i}^s \end{cases} \quad (18)$$

式中 T_{pb} 为从电源节点到基站的传输周期; λ_p 为电源节点获得的功率; r 为能量分配比; $E_{h_i}^s$ 为传感器 s_i 获得的能量,可以用式(12)近似。为了得到该方法的中断概率,类似于固定功率分配方法,可得:

$$p\{S_{NRs_i,p} < \Omega_{sp}\} = 1 - p\left\{h_{s_i,p} \geq \frac{P_N \Omega_{sp} d_{s_i,p}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha}}{P_{s_i} G_{sp}}\right\} \quad (19)$$

因为假设所有的信道都为瑞利分布,即

$$p\{S_{NRs_i,p} < \Omega_{sp}\} = 1 - E\left(\exp\left(-\frac{P_N \Omega_{sp} d_{s_i,p}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha}}{P_{s_i} G_{sp}}\right)\right) \quad (20)$$

由式(18)和(12)可得:

$$P_{s_i} \approx \bar{\lambda}_{s_i} \left[\frac{t_{re}}{T_{ps}}\right] \quad (21)$$

t_{re} 的概率分布函数不易处理,因为它是包含长度和相邻传感器数量的函数。然而对于随机变量 X 和 Y ,如果 $Y = g(X)$,那么 Y 的期望值可以估计为

$$E(Y) \simeq g(E(X)) + g''(E(X)) \frac{\sigma^2}{2} + \dots + g^{(n)}(E(X)) \frac{\mu_n}{n!} \quad (22)$$

式中 g'' 为二阶导数; $g^{(n)}$ 为函数 $g(\ast)$ 的第 n 阶导数; σ^2 为方差; $\mu_n = E(|X - E(X)|^n)$ 为随机变量 X 的第 n 个中心矩,本文只使用这个估计的第 1 项。通过使用上述 $X = P_{s_i}$ 的近似值和式(20)、(21)可得:

$$p\{S_{NRs_i,p} < \Omega_{sp}\} \approx 1 - \exp\left(-\frac{P_N \Omega_{sp} d_{s_i,p}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha}}{E(P_{s_i}) G_{sp}}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{P_N \Omega_{sp} d_{s_i,p}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha} \left[\frac{t_{re}}{T_{ps}}\right] G_{sp}}{\bar{\lambda}_{s_i}}\right) \quad (23)$$

其中, t_{re} 使用式(7)来确定。由于电源节点总是立即将接收到的信息中继到基站,分配给每个传输的平均传输周期需要除以传感器的数量,因此有:

$$\bar{P}_{pb} t_d = \frac{t_{re}}{M} \lambda_p (1 - r) \quad (24)$$

同理可得:

$$p\{S_{NRpb} < \Omega_{pb} \mid S_{NRs_i,p} \geq \Omega_{sp}\} = 1 - E\left(\exp\left(-\frac{P_N \Omega_{pb} d_{pb}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha}}{P_{pb} G_{pb}}\right)\right) \approx 1 - \exp\left(-\frac{P_N \Omega_{pb} d_{pb}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha}}{\bar{P}_{pb} G_{pb}}\right) \quad (25)$$

最后使用式(9),可得:

$$p_{out}^{s_i} \approx p_{col} + \left(1 - \exp\left(-\frac{P_N \Omega_{sp} d_{s_i,p}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha}}{\bar{P}_{pb} G_{pb}}\right)\right) \cdot \exp\left(-\frac{P_N \Omega_{pb} d_{pb}^{\alpha} (4\pi f/c)^{\alpha}}{\bar{\lambda}_{s_i} \left[\frac{t_{re}}{T_{ps}}\right] G_{sp}}\right) (1 - p_{col}) \quad (26)$$

其中,冲突概率由式(8)确定。在动态功率分配中,所有采集的功率用于传输,同时分配的传输功率从

不超过采集的功率。

2.2.2 能量信号功率分配

从电源节点到传感器的能量信号的传输功率将根据每个传感器相对于电源节点的距离而变化。为了优化传输功率,定义了矢量 $\vec{\mathbf{P}}_{ps} = (P_{ps_1}, P_{ps_2}, \dots, P_{ps_M})$, 其中, P_{ps_i} 为从电源节点到第 i 个传感器的传输功率。将式(21)、(12)代入式(11), 并使用式(15)、(23), 可得:

$$p\{S_{NR_{s_i,p}} < \Omega_{sp}\} \approx 1 - \exp\left(-\frac{Cd_{s_i,p}^{2\alpha}}{P_{ps_i}}\right) \quad (27)$$

其中, 对于固定功率分配方法, $C = P_N \Omega_{sp} (4\pi f/c)^{2\alpha} / N + 1) t_s / T_{ps} G_{ps} G_s G_{sp}$; 对于动态功率分配方法, $C = P_N \Omega_{sp} (4\pi f/c)^{2\alpha} / \bar{t}_{rc} / T_{ps} G_{ps} G_s G_{sp}$ 。

为了优化矢量 $\vec{\mathbf{P}}_{ps}$, 使用以下函数:

$$f(\vec{\mathbf{P}}_{ps}) = \sum_{i=1}^M 1 - \exp\left(-\frac{Cd_{s_i,p}^{2\alpha}}{P_{ps_i}}\right) \quad (28)$$

最小化式(28)将确保到电源节点的所有 M 条链路上, 有最少的中断事件, 矢量 $\vec{\mathbf{P}}_{ps}$ 上所有功率的总和不应超过分配给传感器供能的部分, 因此有

$$\sum_{i=1}^M P_{ps_i} = r\lambda_p \frac{T_{ps}}{t_d} \quad (29)$$

式中 λ_p 为电源节点处的收获功率。能量分配比 r 决定了用于传感器供能的部分。不管能量分配比 r 的值如何, 最小化式(28)将调整应该分配给每个传感器的功率。式(28)可以使用拉格朗日乘法最小化, 应用约束 $g(\vec{\mathbf{P}}_{ps}) = \sum_{i=1}^M P_{ps_i} - r\lambda_p \frac{T_{ps}}{t_d} = 0$, 可得:

$$L(\vec{\mathbf{P}}_{ps}, \mu) = \sum_{i=1}^M 1 - \exp\left(-\frac{Cd_{s_i,p}^{2\alpha}}{P_{ps_i}}\right) - \mu \left(\sum_{i=1}^M P_{ps_i} - r\lambda_p \frac{T_{ps}}{t_d} \right) \quad (30)$$

其中, μ 为拉格朗日乘数, 取式(30)相对于 $\vec{\mathbf{P}}_{ps}, \mu$ 的导数, 得出以下方程, 用于求解最佳 $\vec{\mathbf{P}}_{ps}$, 即

$$\begin{cases} \frac{Cd_{s_1,p}^{2\alpha}}{P_{ps_1}^2} \exp\left(-\frac{Cd_{s_1,p}^{2\alpha}}{P_{ps_1}}\right) - \mu = 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^M P_{ps_i} - r\lambda_p \frac{T_{ps}}{t_d} = 0 \end{cases} \quad (31)$$

假设指数项非常接近于 1, $\vec{\mathbf{P}}_{ps}$ 取最优值, 则可得式(31)的近似解。因为根据式(27), $1 - \exp(-Cd_{s_i,p}^{2\alpha}/P_{ps_i})$ 是从传感器到电源节点的链路的中断概率, 对于较小的中断概率, 指数项非常接近 1。这个假设也可以通过观察 $x > K, \exp(-K/x)$ 很快收敛到 1 来支持。使用这个近似值, 可得:

$$P_{ps_i} \approx \frac{d_{s_i,p}}{\sum_{i=1}^M d_{s_i,p}} r\lambda_p T_{ps} / t_d \quad (32)$$

式(32)表示应该分配更多的功率来为位于更远离电源节点的传感器供能。当所有的传感器与电源节点具有相等的距离时, 每一个都占用 $1/M$ 的采集功率。

2.3 最佳能量分配比

将式(32)代入式(11), 则 $\bar{\lambda}_{s_i}$ 则可以改写为 i 的函数。使用式(12)、(13)、(18), 从传感器到电源节点的传输功率可以被改写为 r 的函数。使用(14)、(18), 从电源节点到基站的传输功率也可以写成 r 的函数。通过式(17)、(26), 中断概率可以写成 r 的函数, r 的最佳值可使中断概率最小化。因此, 通过取中断概率相对于 r 的导数, 可以获得最佳能量分配比。取导数后, 类似于式(31), 假设指数项非常接近 1。那么 r 的最佳值可以近似为

$$r_{opt} \approx \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\Omega_{pb}}{\Omega_{sp}} \cdot \frac{G_{sp} G_{ps} G_s}{G_{pb}} \cdot (4\pi f/c)^{-\alpha} \cdot \frac{M^2 d_{pb}^{2\alpha}}{\left(\sum_{i=1}^M d_{s_i,p}^{2\alpha}\right)^2}}} \quad (33)$$

将 r_{opt} 代入式(13)、(14)、(32)获得最佳传输功率。

3 仿真分析

为了验证所提出系统的性能, 使用 MATLAB 进行仿真分析。仿真中假设所有传感器距离电源节点 4 m。电源节点与基站的距离 d_{pb} 为 10m。假设传感器的功率转换效率为 60%; 接收器可接受的信噪比阈值为 $\Omega_{sp} = \Omega_{pb} = 10$ 。电源节点为传感器供能的传输周期为 $T_{ps} = 1$ s。为了降低传输损耗, 使

用定向天线,所有传输增益设为 $G_{ps}=G_{sp}=G_{pb}=8$,接收器的增益为 $G_s=2$ 。在电源节点获取的功率为 $\lambda_p=0.04\text{ W}$,传感器数量 $M=10$,数据包长度假设 $N=10$,传输频率 $f=915\text{ MHz}$,传输长度 $t_d=1\text{ s}$,CSMA 协议中 $t_s=1\text{ s}$ 。信道衰减的功率由单位方差的指数分布随机产生。当信道空闲时,传感器传输的概率为 p 。如果多个传感器同时传输,则会发生冲突,传输不成功。当没有冲突时,如果从传感器到电源节点以及从电源节点到基站的信噪比不小于设定的阈值,则传输被视为成功,中断概率是成功传输的次数与传输尝试的总次数之比。

在固定和动态功率分配方法下传感器的能量演变如图 3 所示。传输概率假设为 $p=0.1$,由图 3 可知,在固定功率分配方法下,传感器中的平均能量水平将随着时间的增加而增加。这是因为在复位周期内,消耗的能量总是小于或等于收集的能量。但实际上,获取的能量最终将受到传感器电池存储容量的限制。在动态功率分配方法下,在一个复位周期内,消耗的能量总是等于收集的能量。

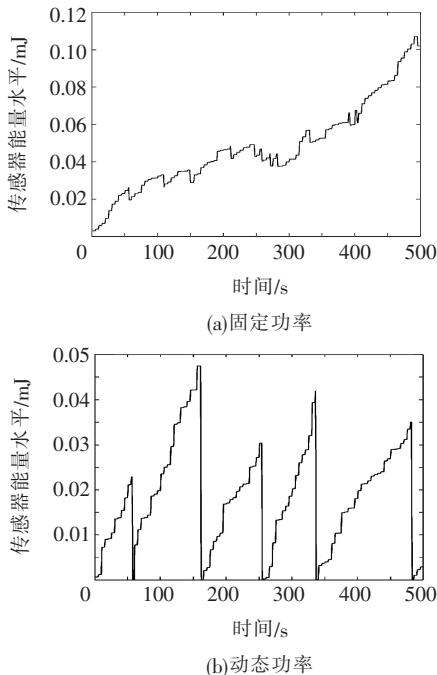


Figure 3 Energy evolution of sensors under fixed and dynamic power distribution method

针对不同噪声功率比较 2 种功率分配方法的性能,如图 4 所示。假设每个节点的传输概率为 $p=$

0.001。根据式(7)、(8),平均复位时间和冲突概率将为 $t_{re}=18\text{ min}$ 和 $p_{col}=0.009$ 。如图 5 所示,与固定功率分配相比,动态功率分配性能更好。然而,对于非常低的噪声功率,即使较低的传输功率也可以提供足够的信噪比,因此 2 种技术提供相同水平的中断概率。对于非常高的噪声功率,不管分配的传输功率如何,都不能实现成功的传输。

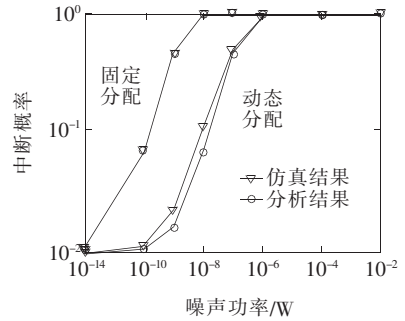


Figure 4 Probability of outage under different methods

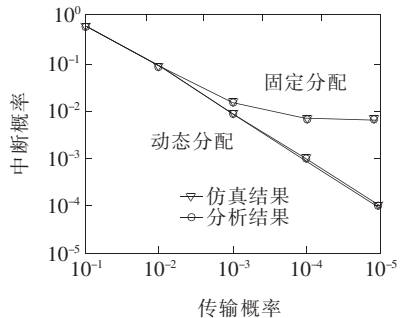


Figure 5 Outage probability of fixed and dynamic power allocation methods under different transmission probabilities

不同传输概率下固定和动态功率分配方法的中断概率如图 5 所示。假设噪声功率 $P_N=10^{-13}\text{ W}$,可以观察到传输概率降低,动态功率分配性能显著超越固定功率分配,这是因为当传输概率减小时,复位时间增加,动态功率分配利用了这一时间,以便向每个节点分配更高的功率值,但固定功率分配将向节点分配相同的功率值。在一个点之后,2 种方法都接近其最佳性能,并且相应的中断概率保持不变,对于非常小的传输概率,冲突概率接近零,并且传输功率已经足以在接收机处提供足够的信噪比,因此降低传输概率不会改变结果。

不同传感器数量的中断概率如图6所示,假设 $p=0.001$, 噪声功率 $P_N=10^{-13}$ W。由图6可知,增加传感器的数量会增加中断概率。然而对于CSMA通道接入,增加传感器的影响是双面的。收集的能量需要在更多的传感器之间分配,增加传感器数量会增加冲突概率,中断概率的主要来源是因为相邻传感器之间的冲突,而不是因为可用能量有限。

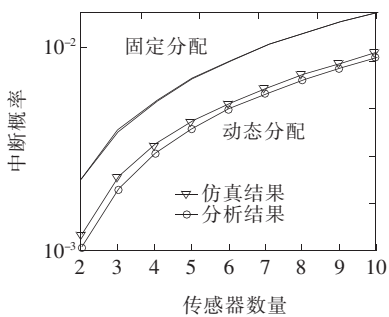


图6 不同传感器数量的的中断概率

Figure 6 Outage probability of different sensor numbers

4 结语

本文首先提出了一种基于电磁辐射的变电站物联网系统无线供电方法,建立了能量采集和分配模型,采用CSMA协议有效地降低了多节点无线供电的信道竞争问题;然后设计了2种传感器能量分配方案,其中次优方案给每个节点固定分配功率,以较低的性能换取较简单的实现;最后是动态调整分配的功率,为每个节点提供最大功率。仿真结果表明,基于所提出的方法,可以实现变电站物联网系统的自我维持。

参考文献:

- [1] 焦宇峰,李锐杰,宋国兵.磁耦合谐振无线传输系统传输特性的研究及优化[J].电力系统保护与控制,2020,48(9):112-120.
JIAO Yufeng, LI Ruijie, SONG Guobing. Research and optimization of transmission characteristics of magnetically coupled resonant wireless transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 112-120.
- [2] 刘铭,刘念,韩晓艺,等.一种基于射频指纹的电力物联

网设备身份识别方法[J].中国电力,2021,54(3):80-88.

LIU Ming, LIU Nian, HAN Xiaoyi, et al. A RF fingerprint based eIoT device identification method[J]. Electric Power, 2021, 54(3):80-88.

- [3] 李长生,曹娟,张合.非铁磁性金属影响下的磁共振耦合电能传输系统建模与分析[J].电力系统自动化,2015,12(23):152-157.

LI Changsheng, CAO Juan, ZHANG He. Modeling and analysis for magnetic resonance coupling wireless power transmission systems under influence of non-ferromagnetic metal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 12(23):152-157.

- [4] 陈迪,苏春强,安海舰,等.淋雨条件下220 kV绝缘子均压环电晕放电特性研究[J].高压电器,2021,57(12):170-176.

CHEN Di, SU Chunqiang, AN Haijian, et al. Research on corona discharge characteristics of grading ring of 220 kV insulator under rainfall condition[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12):170-176.

- [5] 孙直,孟润泉,韩肖清.微电网与配电网串联变压器磁饱和抑制策略研究[J].电网与清洁能源,2021,37(6):29-34.

SUN Zhi, MENG Runquan, HAN Xiaoqing. Research on magnetic saturation suppression strategy of series transformers between microgrid and distribution Network [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6):29-34.

- [6] SHI L, RASOOL N, ZHU H, et al. Design and experiment of a reconfigurable magnetic resonance coupling wireless power transmission system[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(7):705-708.

- [7] CORREADC, RESENDE U C, BICALHO F S. Experiments with a compact wireless power transfer system using strongly coupled magnetic resonance and metamaterials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(8):124-132.

- [8] ZHOU W, SANDEEP S, PENG W. A Wideband strongly coupled magnetic resonance wireless power transfer system and its circuit analysis[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(12):1152-1154.

- [9] BROWN W C. The history of power transmission by radio waves[J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*,1984,32(9):1230-1242.
- [10] CHABALKOM, BESNOFF J, LAIFENFELDM. Resonantly coupled wireless power transfer for non-stationary loads with application in automotive environments [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017,64(1):91-103.
- [11] MATSUNAGA T, NISHIYAMA E, TOYODA I. 5.8 GHz stacked differentialrectenna suitable for large-scale rectenna arrays with DC connection [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2015,63(12):5944-5952.
- [12] PALAZZI V, HESTER J, BITO J, et al. A novel ultralightweight multibandrectenna on paper for RF energy harvesting in the next generation LTE bands [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017,66(1):369-377.
- [13] VISSER H J, KEYROUZ S, SMOLDERS A B. Optimizedrectenna design [J]. *Wireless Power Transfer*, 2015,48(3):44-50.
- [14] IBRAHIM R, D VOYER, ZOGHBI M E, et al. Novel design for arectenna to collect pulse waves at 2.4 GHz [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*,2017,32(3):357-365.
- [15] ZANGL H, BRETTERKLIEBER T, BRASSEUR G. A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2009,58(5):1789-1796.
- [16] ROSCOE N M, JUDD D. Harvesting energy from magnetic fields to power condition monitoring sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*,2013,13(6):2263-2270.
- [17] YUAN S, HUANG Y, ZHOU J, et al. Magnetic field energy harvesting under overhead power lines [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11):6191-6202.
- [18] HAJIKHANI M J, LABEAU F. Deploying autonomous sensors in a substation area using energy harvesting and wireless transfer of energy [C]//2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), Shenzhen, China: IEEE, 2016:357-363.