

6LoWPAN 协议在电力物联系统中的应用研究

徐妍, 单华, 李澄, 李春鹏, 钟巍峰, 蒋峰

(江苏方天电力技术有限公司, 南京 211100)

摘要: 当前电力物联网系统应用 Zigbee 协议, 该协议不能满足 IEE802.15.4 的 MAC 层的 Ipv6 需求, 造成电流传输速率低, 且电压越限开关控制失败; 为此, 采用 6LoWPAN 协议优化了电力物联系统的网关功能; 利用 6LoWPAN 技术原理、应用规范以及相比于其它物联网的优势, 基于 IEE802.15.4 的网络层协议, 提出 Zigbee 和 6LoWPAN 共存, 协议中间层为双协议栈网关的总体设计方案, 实现物联网与 Ipv6 Internet 的互联和信息交互; 设计 6LoWPAN 适配层, 解决 IEE802.15.4 的 MAC 层不能满足 Ipv6 需求问题; 仿真结果显示: 应用 6LoWPAN 协议后电力物联系统连通性能以及 UDP 数据报传输性能均符合实际应用需求; 6LoWPAN 协议应用后可显著提升数据采集节点的续航时间, 降低功耗, 增加电流传输速率, 提升电压越限开关控制成功率; 6LoWPAN 协议的应用可有效提升电网的安全运行水平。

关键词: 6LoWPAN; Ipv6; 协议; 配电网; 物联网; 电力系统

Research on Application of 6LoWPAN Protocol in Power IoT System

Xu Yan, Shan Hua, Li Cheng, Li Chunpeng, Zhong Weifeng, Jiang Feng

(Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: The current power IoT system uses the Zigbee protocol. This agreement cannot meet the IPv6 requirements of the MAC layer of IEE802.15.4, resulting in a low current transmission rate and failure of the voltage over-limit switch control. To this end, the 6LoWPAN protocol is used to optimize the gateway function of the power IoT system. Based on the 6LoWPAN technology principle, application specifications, and advantages compared to other Internet of Things, based on the network layer protocol of IEE802.15.4, Zigbee and 6LoWPAN coexist, and the protocol middle layer is the overall design of the dual protocol stack gateway to realize the Internet of Things and IPv6 Internet interconnection and information exchange. The 6LoWPAN adaptation layer is designed to solve the problem that the MAC layer of IEE802.15.4 cannot meet the requirements of IPv6. The simulation results show that the connectivity performance of the power IoT system and the UDP datagram transmission performance after applying the 6LoWPAN protocol meet the actual application requirements; the application of the 6LoWPAN protocol can significantly improve the battery life of the data collection node, reduce power consumption, increase the current transmission rate, and improve success rate of voltage over-limit switch control. The application of 6LoWPAN protocol can effectively improve the level of safe operation of the power grid.

Keywords: 6LoWPAN; IPv6; protocol; distribution network; Internet of things; power system

0 引言

伴随国民经济不断发展, 用电需求也处于持续增长趋势, 电网规模的不断扩增, 导致电网设备数量如雨后春笋般快速增加^[1-2]。为加强对数量庞大电网设备的监控、管理以及维护, 电网公司研究了一系列管理系统, 主要采用 GPRS、3G 等无线组网技术进行电网数据传输, 但存在成本高、网络覆盖效果差、对运营商依赖程度强等不足之处^[3]。

物联网技术的发展有效改善了这一现状, 物联网可将互联网、传统电信网络等作为信息载体, 可实现独立寻址

的普通物理对象间的互通, 通过构建物物相连的互联网组网技术, 对海量电网设备实施统一入网管理^[4-6]。蓝牙、Zigbee、6LoWPAN、LoRa 均属于低功耗物联网组网技术。其中 6LoWPAN 协议是基于 IPv6 的无线个域网技术, 为短距离通信网络应用 IPv6 技术提供支撑。为此本文以具有自主网关功能的 6LoWPAN 协议为研究对象, 利用其低功耗、低成本、易维护等特点, 在保障电力行业安全规范, 电网稳定运行基础上, 研究其在电力物联系统中的应用^[7]。

1 6LoWPAN 协议在电力物联系统应用

1.1 6LoWPAN 原理

6LoWPAN 技术是一种有效融合了网络技术、传感技术以及嵌入式技术的无线自主网技术^[8]。6LoWPAN 技术与 Zigbee 技术相同之处在于, 物理层和数据链路层均使用 IEE802.15.4 规定的物理层 PHY 和子层 MAC; 6LoWPAN 不同于 Zigbee 技术之处在于, 6LoWPAN 技术采用 IETF 规

收稿日期:2020-03-26; 修回日期:2020-04-21。

作者简介:徐妍(1987-),女,江苏涟水人,博士,工程师,主要从事电力系统继电保护,电力系统泛在物联网等方向的研究。

李澄(1970-),男,江苏无锡人,本科,教授级高级工程师,主要从事电力系统自动化方向的研究。

定的 IPv6 设计网络层。因此 6LoWPAN 是在以 IEE802.15.4 为底层加入 IPv6 的无线域网协议^[9-11]。6LoWPAN 的 PHY 层和 MAC 层是以 IEE802.15.4 为规范,网络层采用 IPv6 协议,结合 IEE802.15.4 的低成本、低功耗、多拓扑特点和 IPv6 庞大的地址空间优势,对规模大、密度高的设备网络布设很有帮助^[12]。

在 802.15.4 协议上完成 IPv6 的支持是 6LoWPAN 协议的核心;通过在 IPv6 网络层和 802.15.4 MAC 层之间加入适配层实现物联网中任意节点均可与 IPv6 网络设备实施数据交互是 6LoWPAN 协议的主要内容^[13]。6LoWPAN 协议组网相比于其它物联网组网优势在于:

- 1) 普及性强。基于 IPv6 协议的 6LoWPAN 协议是通过边界路由与电力专网相连接,完成点对点的数据传输和监控,操作简单,具备较强普及性。
- 2) 庞大地址空间。基于 IPv6 协议的 6LoWPAN 协议通信网络可以提供庞大地址空间,迎合配电网中海量设备组网需求,该优势是其它物联网技术无法相提并论的^[14]。
- 3) 容易开发。目前基于 IPv6 协议的框架技术已然成熟,运用时只需实际应用需求适当调整便可,极大程度缩减开发难度。

1.2 设计方案

由于 IEE802.15.4 目前底层技术的最佳之选,为此依据 IEE802.15.4 特点,提出 Zigbee 和 6LoWPAN 在其上应用规范的最佳实现形式^[15-16],基于 IEE802.15.4 的网络层协议如表 1 所示。

表 1 基于 IEE802.15.4 的网络层协议

Zigbee	6LoWPAN
IEE802.15.4	
IEE802.15.4 868/915MHz(PHY)	IEE802.15.4 2400 MHz(PHY)

由于物联网上的节点数量庞大,且经 Internet 连接后可实现节点间有效互通互联。因此,物联网可利用 IP 协议作为网络层协议,实现自身与其余 IP 设备间的互操作。为便于同网间相连,物联网内部节点也应该采用 IP 协议。而在 IEE802.15.4 的 MAC 层上建立 Ipv6 协议栈,促进物联网与 Ipv6 Internet 平滑相连便是 6LoWPAN 的终极目标^[17]。

为实现物联网与 Ipv6 Internet 互联,提出总体设计方案如图 1 所示。采用双协议栈网关设计该协议中间,一侧为 Ipv6 网络、另一侧为物联网感知节点共同形成的网络,利用网关完成两种网络之间的信息交互。

本方案中的节点包括设备节点和辅助节点两种,其中利用热拔插方式直接安装配网设备上,有设备实施供电的节点被称为设备节点;利用电池供电方式供电,功能与互联网的中继器类似,且布设于两个距离较远的配电网设备间的节点被称之为辅助节点^[8]。6LoWPAN 协议在电力物联网中的应用受节点数目影响,节点数目越多,网络时延越大。为此将电力物联系统的节点数量控制在 1 000 以内,若节点数量超过 1 000,则依据网络实际分布情况适当扩增路

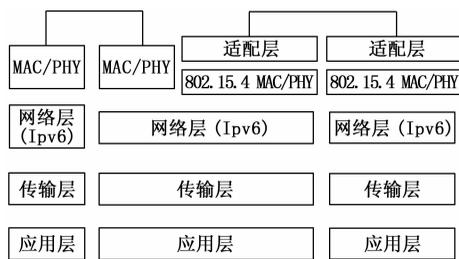
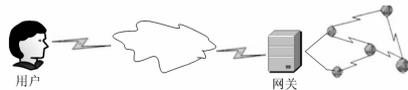


图 1 双协议栈网关图



由器数量,有效保障各个节点与路由器之间的最大跳数不会超过 500。确保跳数未达到 500 时,网络延时控制在 1 秒内,丢包率控制在 1% 内^[18]。

1.3 6LoWPAN 适配层

由于 IEE802.15.4 的 MAC 层的 81 个字节远达不到 Ipv6 协议对 MAC 层的 MTU (最大输出单元) 的 1 280 字节的需求,同时 Ipv6 协议还设定了在达不到这一需求时,需要对 Ipv6 透明的 MAC 层负载实施拆分和重组。为此需要在网络层和 MAC 层之间增设一个网络适配层,完成两个层次间的无缝连接^[19]。以便利用 6LoWPAN 的适配层完成报头压缩、分片与重组以及网络路由状态转发等工作,有效解决 IEE802.15.4 的 MAC 层不能满足 Ipv6 需求这一现状。

由于 IEE802.15.4 的 MAC 层的 81 个字节,去除报头所占的 40 个字节后,仅剩余 41 个字节空间给传输层报文使用,如果传输层采用 UDP 报文则会额外占用 8 个字节,最后留给传输应用层数据的空间仅为 33 个字节,传输效率十分低下,为此,采用包头压缩技术对适配层中的冗余报头压缩十分必要。

6LoWPAN 报头压缩基本思想如下:

- 1) 完全压缩报头连接过程中维持不变的域。
- 2) 压缩报头中预先了解的域和变化中的域。
- 3) 压缩报头中可通过链路层提前获知的域。
- 4) 基于报头中存在有条件或可选域,取出报头中的特定应用。

详细压缩如表 2 所示。

通过将 Ipv6 数据报文压缩至 127 字节以内并且确保一次性传输完毕,解决电力物联系统的网节点密度高、单次传输数据量少问题,有效提升网络延时,降低丢包率。压缩时通过修剪 Ipv6 数据包,去除冗余数据,将数据压缩率控制在 75 字节左右,并且无需进行分片处理,直接利用网状路由实施数据传输,大大提升数据传输效率,以便实现电力物联网各项监控相关指标要求^[20-22]。

1.4 感知节点与 Ipv6 节点信息交互

感知节点与 Ipv6 节点间的信息交互时,Ipv6 会先向感知节点发送数据采集请求数据包,经过网关时,网关会精

表 2 6LoWPAN 对 Ipv6 的报头压缩

字头字段	IPv6 长度 40 字节	6LoWPAN HC1 长 2 字节	说明
版本	4	—	被认定成 IPv6
业务类别	8	0	0 表示压缩;1 表示不压缩
流标签	20	0	0 表示压缩;1 表示不压缩
净负荷长度	15	—	依据 MAC 帧长度或 6LoWPAN 分拆字头大小所获取
下一头部	8	2	使用 TCP/UDP/ICMP6 分组
剩余跳数	8	8	未产生变化
源地址	128	2	基于链路层地址或网络状态选路寻找头导出目的地,源和目的的 IPv6 地址均为本地
目的地址	128	2	

简压缩 Ipv6 的请求数据包,并依据 Ipv6 报文实际需求采用对应的适配层报头将精简过的 Ipv6 报头封装成 IEEE802.15.4 帧,并利用网状路由将数据传输到目标感知节点^[23]。感知节点对 Ipv6 报文的服务请求进行处理后,利用精简完成的 Ipv6 报文头部封装响应数据为 IEEE802.15.4 帧后传输出去;传输完成后,遵循适配层报头信息重组传回的 Ipv6 报文信息,还原压缩的 Ipv6 报头信息。最后将完整的 Ipv6 报文信息封装于 Ipv6 网络应用的链路层帧中,传输至 Ipv6 网上,Ipv6 网络依据 Ipv6 路由方式将该帧传输到源节点,完成一次数据传输。

1.5 低功耗设计

通过使用专用无线低功耗控制器的型号为 CC1310 无线 MCU,在有效确保系统稳定性和灵敏度基础上,实现数据低功耗收发。设备节点在未使用时均处于休眠状态,以便降低功耗,当设备节点收到其余节点输出的数据时,芯片会自动解除休眠状态,被唤醒执行相应数据操作。辅助节点作为配电设备间的数据中继站,无需实施数据传输,所需功耗极低^[24]。为了给设备布设提供便利条件,供电均采用纽扣电池方式,可提供较长供电时间。作为 6LoWPAN 网络与电力专网的通道边界路由,具备较强数据处理能力,并且通常布设于机房周边较宽阔区域,因此为保障边界路由性能,设计时不采取休眠方式。

2 6LoWPAN 协议的应用研究

2.1 实验平台

为验证 6LoWPAN 协议在电力物联系统中应用,搭建如下实验平台。实验硬件平台选择德州仪器最新研发的满足 IEEE802.15.4 标准射频 SoC 核心 CC2583 芯片,各节点为均匀性的 Contiki 操作系统,并加载 uIP、6LoWPAN 和 MAC 层协议栈。实验软件平台为 XinAVR 和 AVRstudio,负责在节点和 USB 网卡中下载相应程序。Ipv6 智能网关上的包含的主要芯片有:SIGe2521A60、BCM6358UKFBG 以及 BCM5325EKQMG。其中 SIGe2521A60 为智能网关提供

2.5~2.6 GHz 区间的无限工作频段,适用于 ISM2.4GHz 的无线解决方案;BCM6358UKFBG 为智能网关提供多用户的以太网功能,含有标准 EJTAG 调试器和具备高度优化功能的 32MIPS CPU;BCM5325EKQMG 通过集成 5 个收发器使智能网关具备 128kB 的数据包缓冲区域,可支持 2K 的 MAC 地址,且具备低功耗的地址自动学习,实现即插即用。

Ipv6 智能无线网关接口布局如图 2 所示。具备局域网口 3 个,广域网口、802.11a/b/gWiFi 无线网络接口、标准 USB 接口、可选串口调试口各 1 个。在含有通用无线路由器功能基础上,还可完成电力物联操作系统和普通 IP 网络之间的 Ipv6 信息交互,同时支持应用软件包开发和复杂程序的应用。

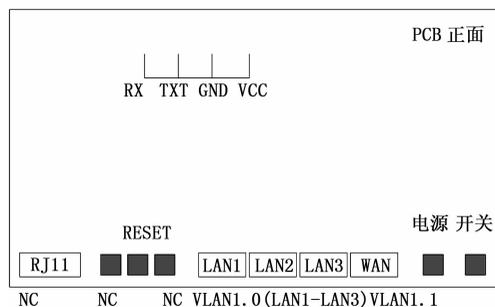


图 2 网关接口布局

2.2 系统性能测试

2.2.1 连通性测试

系统连通性测试流程为:在搭建完成的实验平台上,通过客户端节点发送 ICMPv6 中的 Echo 请求至服务器节点,服务器接收到 Echo 请求后将 Echo 应答传输回客户端节点。测试结果如图 3 所示。

```
Pinging www.a.shifen.com [115.239.210.26 ] with 32 bytes of data:
Reply from 115.239.210.26: bytes=32 time=32ms TTL=53
Reply from 115.239.210.26: bytes=32 time=35ms TTL=53
Reply from 115.239.210.26: bytes=32 time=29ms TTL=53
Reply from 115.239.210.26: bytes=32 time=31ms TTL=53
Request timed out.
Reply from 115.239.210.26: bytes=32 time=26ms TTL=53
```

图 3 连通性测试部分结果示意图

从图 3 可以看出,该测试结果显示两个节点之间连通性能较好,实验结果表明,6LoWPAN 协议在电力物联系统中可提升系统连通性能。

2.2.2 UDP 测试

选择 UDP Server 节点和 UDP Client 节点进行 UDP 测试。测试流程为:通过在两个节点间构建套接字,利用 Client 节点向 Server 节点不间断发送“Morning from the client”UDP 数据报,数据报传输至 Server 节点后,Server 节

点“Morning from the server”的数据报传输回 Client 节点。UDP 测试结果如图 4 所示。

```

Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(12)
Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(13)
Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(14)
Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(15)
Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(16)
Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(17)
Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(18)
Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(19)
Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(20)
Server received: "Morning from the client" from fe80:212:4b00:411:801c
Responding with message :Morning from the server!(21)
    
```

图 4 UDP 测试部分结果示意图

分析图 4 可知，6LoWPAN 与 IP 协议栈的两个节点间可实现 UDP 数据报传输，结果表明 6LoWPAN 协议在电力物联系统中可保障数据报有效传输。

2.2.3 数据采集节点功耗测试

6LoWPAN 协议在电力物联系统中应用的特点之一是低功耗，功耗对于供电数据采集节点是一个考验性能的重要指标，其主要体现在数据采集节点的续航能力上，功耗测试实质是通过测试节点正常工作状态下的工作电流均值，以其为依据计算节点续航时间均值。

将 Zigbee 协议在电力物联系统中应用效果为对比，验证 6LoWPAN 协议在电力系统中应用的低功耗优势。在电力物联系统中选取一个数据采集节点 MoteA，进行 5 次数据测量，分别测试应用 Zigbee 协议和 6LoWPAN 协议的数据采集节点 MoteA 的电流数据，结果如表 3 所示。

分析表 3 数据可知，应用 Zigbee 协议的电力物联系统采集节点电流均值为 235.58 μA ，应用 6LoWPAN 协议的电力物联系统采集节点电流均值为 178.3 μA 。电力物联系统采集节点电源为电压为 3 V、电量大小为 2 700 mAh，换算后可知，应用 Zigbee 协议的采集节点理论运行时间约为 11 624 小时，大约 484 天；应用 6LoWPAN 协议的采集节点理论运行时间约为 15 348 小时，大约 639 天。结果表明，6LoWPAN 协议在电力物联系统中应用后可显著提升数据采集节点的续航时间，降低功耗。

表 3 数据采集节点 MoteA 的电流数据

数据采集节点 MoteA	采集节点电流/ μA	
	应用 Zigbee 协议	应用 6LoWPAN 协议
1	197.9	182.9
2	204.7	183.2
3	208.2	183.7
4	285.9	175.2
5	281.2	166.5
均值	235.58	178.3

2.2.4 传输速率及电压越限开关控制测试

为比较应用 Zigbee 协议和 6LoWPAN 协议的电力物联系统控制的电流传输速率以及数据开关控制成功率，在实

验仿真平台布设一个网关节点和 150 个电流感知节点，为取得显著实验效果，电流传输量的选取为均大于 100 kA。其中平均时延为数据包发送时刻与数据包接收时刻的平均时间间隔，单位时间内电流传输量越大表示其传输速率越高。电流传输速率眼图如图 5 所示。

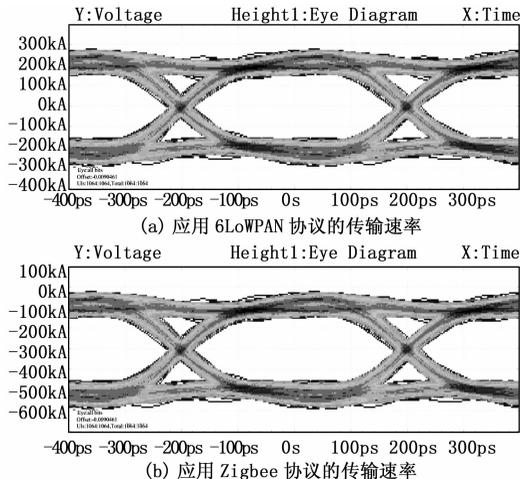


图 5 两种协议的电流传输速率眼图

分析图 5 可知，随着电流传输量增大，应用 6LoWPAN 协议的电流传输速率要大于应用 Zigbee 协议，6LoWPAN 协议的应用提升了电流传输效率，原因在于 6LoWPAN 协议的应用节省了传感器分片处理流程，直接利用网状路由实施电流传输控制，大大提升电流传输效率。

为了防止电网在电能传输过程中，出现节点电压越限的现象，对电压超过 500 V 的物联网节点设置电压越限控制开关，电压越限开关控制结果如图 6 所示



(a) 应用 Zigbee 协议的电压越限开关开启结果



(b) 应用 6LoWPAN 的电压越限开关开启结果

图 6 两种协议的电压越限开关开启结果

分析图 6 内容可知，通过协议控制电力物联网节点电压越限开关，结果表明应用 6LoWPAN 协议控制的电压越限开关已经开启，而采用 Zigbee 协议的电压越限开关开启

失败,由此可见应用 6LoWPAN 协议控制电压越限开关控制成功率较高。

3 结束语

伴随物联网技术飞速发展,物联网技术必然成为今后电网建设的重要技术支撑,可有效提升电网安全运行水平,以及全方位管理水平。6LoWPAN 技术在电力物联系统中的应用可以有效利用自身具备低功耗低、低成本、易维护以及组网安全等特点,提升系统数据包接受率,缩减电流传输速率,增加电压越限开关控制成功率,为电力物联系统提供广阔应用前景。

参考文献:

[1] 岳振宇,刘 岩,高嘉浩. 针对电力系统信息采集终端的 M2M 物联网应用研究 [J]. 电子器件, 2019, 42 (5): 1117-1121.

[2] 田 浩,赵小虎,张 凯,等. 基于 6LoWPAN 的煤矿井下数据传输系统设计 [J]. 工矿自动化, 2019, 45 (8): 6-12.

[3] Lu Huijuan, Liu Yaqing, Xia Haixia, et al. Research and Simulation of RPL Routing Protocol in 6LoWPAN [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 37 (1): 83-87.

[4] 李枝琴,朱勳翔,王慧锋. 基于 6LoWPAN 的教室灯光监控系统设计 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (s1): 210-214.

[5] 耿道渠,朱大鹏,于彦平,等. 6LoWPAN 接入 Internet 中 uN-AT64 机制的研究与实现 [J]. 传感技术学报, 2016, 29 (8): 1284-1289.

[6] 王 毅,陈启鑫,张 宁,等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望 [J]. 电网技术, 2019, 43 (5): 1575-1585.

[7] 葛磊蛟,汪宇信,戚嘉兴,等. 面向城市能源互联网的电力物联网内涵、架构和关键技术 [J]. 电力建设, 2019, 40 (9): 91-98.

[8] 张海龙,刘 宣,任 毅,等. 用电信息采集系统窄带物联网可行性研究 [J]. 电测与仪表, 2019, 56 (6): 82-86.

[9] 孙充勃,成 晟,原 凯,等. 基于节点映射模型的电力信息物理系统实时仿真平台 [J]. 电网技术, 2019, 43 (7): 2368-2377.

[10] Chiara Buratti, Andrea Stajkic, Gordana Gardasevic, et al. Testing Protocols for the Internet of Things on the EuWiN Platform [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 3 (1): 124-133.

[11] 蔡月明,封士永,杜红卫,等. 面向泛在电力物联网的边缘

(上接第 115 页)

[13] 洪 征,田益凡,张洪泽,等. 基于扩展前缀树的协议格式推断方法 [J]. 计算机工程与应用唯一官方网站, 2018, 54 (12): 14-20.

[14] 刘津霖,付光远,李海龙,等. 基于改进投票专家算法的专有协议模糊测试方法 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (12): 93-99.

[15] 马敏耀,陈松良,左 羽. 基于 Goldwasser-Micali 加密系统的隐私交集基数协议研究 [J]. 计算机应用研究, 2018, 35 (9): 194-197.

节点感知自适应数据处理方法 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (6): 1715-1722.

[12] 方 晖,徐文学,李建平. 电力线通信技术在地铁 AFC 系统车站级网络中的应用 [J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22 (6): 156-158.

[13] 江秀臣,罗林根,余钟民,等. 区块链在电力设备泛在物联网应用的关键技术及方案 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (11): 3393-3400.

[14] 彭楚宁,罗冉冉,王晓东. 新一代智能电能表支撑泛在电力物联网技术研究 [J]. 电测与仪表, 2019, 56 (15): 137-142.

[15] Qiu Yue, Ma Maode. A Mutual Authentication and Key Establishment Scheme for M2M Communication in 6LoWPAN Networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016 (99): 1-1.

[16] 廖家齐,钱科军,方华亮,等. 基于泛在电力物联网的电动汽车充电站运维关键技术 [J]. 电力建设, 2019, 40 (9): 20-26.

[17] 张 涛,赵东艳,薛 峰,等. 电力系统智能终端信息安全防护技术研究框架 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (19): 1-8.

[18] 张 博,张 丹,程 磊,等. 基于可信物联网的 RFID 认证协议在中药材溯源中的应用 [J]. 时珍国医国药, 2016, 27 (5): 1206-1208.

[19] 汤 奕,王 琦,倪 明,等. 电力信息物理融合系统中的网络攻击分析 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (6): 148-151.

[20] 付 强,杜文娟,王海风. 小增益闭环系统稳定性分析方法及其在含并网 VSC 电力系统中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (6): 1551-1559.

[21] 蔡永智,陈皓勇,郭曼兰. 采用有限时间平均一致性协议的电力系统分布式状态估计 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33 (8): 1007-1014.

[22] 刘大伟,宋 爽,马 泉. 基于云策略和 MMS 协议的智能变电站继电保护设备自动测试系统 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47 (12): 159-164.

[23] 韩宇奇,郭 嘉,郭创新,等. 考虑软件失效的信息物理融合电力系统智能变电站安全风险评估 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (6): 1500-1508.

[24] 艾精文,党晓婧,吕启深,等. 基于物联网的具有全景功能的全维度设备状态监测系统研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47 (16): 122-128.

[16] 蒋文贤,张振兴,吴晶晶. 基于可逆数字水印认证的无线传感网数据融合协议 [J]. 通信学报, 2018, 39 (3): 118-127.

[17] 梁晓兵,刘书勇,李涛永,等. 面向对象的用电信息系统安全通信协议设计 [J]. 电测与仪表, 2019, 56 (4): 86-93.

[18] 丁 宁,管新荣,杨炜伟. 基于通用软件无线电外设的 OFDM 信道物理密钥量化分析 [J]. 计算机应用, 2019, 39 (6): 1780-1785.

[19] 袁 琪,马春光,姚建盛. 能量平衡的异构传感网跨层密钥管理方案 [J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40 (8): 183-191.