

文章编号、中图分类号、文献标志码及学科分类号:

# 软件定义的能源互联网信息通信技术研究

曹军威<sup>1,2</sup>, 王继业<sup>3</sup>, 明阳阳<sup>1</sup>, 杨明博<sup>1</sup>, 孟坤<sup>4</sup>, 高灵超<sup>3</sup>, 林闯<sup>2,5</sup>

(1. 清华大学信息技术研究院, 北京 海淀区 100084; 2. 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 海淀区 100084; 3. 国家电网公司信息通信部, 北京 100031; 4. 北京信息科技大学计算机学院, 北京 100101; 5. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 海淀区 100084)

## Software-Defined Information and Communication Technology for Energy Internet

CAO Junwei<sup>1,2</sup>, WANG Jiye<sup>3</sup>, MING Yangyang<sup>1</sup>, YANG Mingbo<sup>1</sup>, MENG Kun<sup>4</sup>, GAO Lingchao<sup>3</sup>, LIN Chuang<sup>2,5</sup>

(1. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084; 2. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Haidian District, Beijing 100084; 3. Department of Information and Communication, State Grid Corporation of China, Beijing 100031; 4. Computer School, Beijing Information Science and Technology, Beijing 100101; 5. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084)

**ABSTRACT:** With the increasing distributed renewable energy and emerging source/demand hybrid energy infrastructure, Energy Internet is proposed to be built in a bottom-up way. The essential of Energy Internet is energy exchanging and sharing in an open, peer-to-peer and Internet-inspired way. This work is focused on the information and communication technology for Energy Internet. With software-defined networking, the software-defined approach is applied to meet the integration requirement of cyber-energy infrastructure for information and communication of Energy Internet. In this work, network routers and energy routers are integrated using a software-defined controller with operation and scheduling of Energy Internet. Corresponding implementation is included in details and performance evaluation is carried out. Experimental results show that the proposed software-defined approach is suitable for information and communication control in operation and scheduling of Energy Internet.

**KEY WORDS :** Energy Internet; Software-Defined Networking; Energy Router; Information and

Communication System.

**摘要:** 分布式可再生能源的兴起、源用混合的能源基础设施逐渐形成,使得自底向上形成能源互联网成为可能。能源互联网的本质是以开放为基础的对等互联式的能量交换与分享。本文主要研究能源互联网所需要的信息通信系统技术,借鉴软件定义网络的理念和具体实现,指出软件定义方法更能满足信息能源基础设施一体化意义下的能源互联网信息通信的需求。本文将信息路由和能量路由相对应,网络控制与能源互联网运行调度相结合,给出了一体化的实现方法,并进行了实验验证。实验结果表明,软件定义方法满足能源互联网运行调度信息通信控制方面的需求。

**关键词:** 能源互联网, 软件定义网络, 能量路由器, 信息通信系统。

## 0 引言

能源的可持续发展问题一直是各国关注的基本问题,人类为了摆脱对化石能源的依赖,开始寻求大规模利用可再生能源。我国从能源安全的战略高度提出进行能源生产和消费革命。国际上提出的第三次工业革命<sup>[1]</sup>,更将可再生能源与互联网的结合作为第三次工业革命的重要标志。

能源的转换形式多种多样,电能传输、调控、转换等方面则具有不可比拟的综合优势,因此未来

基金项目: 国家自然科学基金项目(61472200, 61233016); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划) (2013CB228206); 国家电网科技项目。

The National Natural Science Foundation of China (61472200, 61233016); The National Basic Research Program (973 Program) (2013CB228206); State Grid R&D projects.

能源基础设施在传输方面的主体必然还是电网,随着分布式可再生能源发电的发展,未来能源互联网基本上是以互联网式的电网为枢纽构成的能源—信息系统。能源互联网是以互联网思维与理念构建的新型信息—能源融合“广域网”,它以大电网为“主干网”,以微网、分布式能源等能量自治单元为“局域网”,以开放对等的信息—能源一体化架构,真正实现能源的双向按需传输和动态平衡使用,因此可以最大限度地适应新能源的接入<sup>[2]</sup>。

信息通信与能源电力结合发展分为三个阶段。第一个阶段为数字化、信息化阶段,信息通信为能源电力行业提供服务,带来方便、快捷等好处。第二个阶段为智能化阶段,也就是智能电网阶段<sup>[3]</sup>。信息通信成为能源电力基础设施不可或缺的组成部分,以信息流与能量流的结合为特征。第三个阶段为信息物理融合阶段,表现为信息通信基础设施与能源电力基础设施的一体化,也就是信息能源基础设施一体化意义下的能源互联网阶段<sup>[4]</sup>。

能源互联网信息技术相关综述可见文章<sup>[5]</sup>。本文重点借鉴互联网体系架构中软件定义的思想,在信息能源基础设施一体化意义下,提出软件定义的能源互联网信息通信的具体实现方法,并进行了实验验证。

## 1 信息能源基础设施一体化

能源互联网的内涵是以互联网理念和思维变革能源基础设施。如果说智能电网还是现有电网架构上通过信息化和智能化的手段,解决设备利用率,安全可靠、电能质量等基本问题<sup>[6][7]</sup>,能源互联网的根本不同则在于其采用互联网理念、方法和技术实现能源基础设施架构本身的重大变革,使得能量的开放互联与交换分享可以跟互联网信息共享一样便捷。能源互联网区别于传统能源基础设施的本质特征包括如下所述的开放、互联、对等和分享。能源互联网的外延在于信息物理融合,真正实现信息能源基础设施的一体化<sup>[8]</sup>。

借鉴信息网络中路由的思想,能源互联网的一种实现方式是通过能量路由器进而互联实现<sup>[9]</sup>。能量交换与信息的交换有着本质的不同,因此现有网络体系结构不适应能源互联网的需求。本节首先介绍软件定义网络的基本思想,然后阐述为什么软件定义的方法更加适合构建能源互联网的信息通信系统。

### 1.1 软件定义网络

传统网络具有管理困难的特点,其根本原因在于网络控制功能分散于各个路由器节点中,难于达到一致的网络状态,提供完整复杂的控制功能依赖于对所有分散节点的独立管理和调试,浪费大量的人力物力,且存在难于发现和解决的漏洞。

软件定义网络(Software-Defined Networking, 简称 SDN)<sup>[10][13]</sup>的主要理念是控制平面和数据传输平面的分离。控制信道与数据平面的数据传输信道逻辑独立,即控制数据的转发信道不依赖于数据传输信道的建立,在传统通信网中这是不可能的。此模型强调决策逻辑和网络元素交互协议的分离,提出了数据平面简单化基础化的特点,同时提出了路由节点转发表项可以从零开始配置(不必预先的人工配置)。由此 SDN 提出将控制逻辑从分散的路由节点中独立出来,形成逻辑上统一的控制节点,而路由节点仅实现简单的数据转发功能。其具体的转发流程如下:

- 每个路由器将流表用于数据包的转发,可以在流表中预先定义若干表项(主动),也可以使流表从零开始,在运行时自动添加表项(被动)。
- SDN 以流为单位对数据包进行处理。当数据流的第一个报文到达路由器时,首先在流表中查找。如果在流表中没有匹配项,将被转发到控制器进行处理。由控制器计算转发路径并在相关路由器上建立流表项,然后将该报文转发到原路由器进行转发。流表项建立后,后续报文可以实现报文的即时转发,并可以保证匹配报文的转发路径保持不变。

SDN 基本体系结构只有一个逻辑上的集中控制器,具有难以适应大规模网络的特征,这可以通过以下途径改善:

- 提高控制器本身的性能,可以通过多线程和块发送接收实现<sup>[12][14]</sup>。
- 使用控制器组形成逻辑统一物理分散的控制模型<sup>[15]</sup>。
- 使用权威路由器分担控制器的工作任务<sup>[10]</sup>。
- 使用控制器独立控制一个自治域<sup>[16][17]</sup>。

SDN 路由器可以采用 OpenFlow 协议<sup>[18][19]</sup>,控制器可以采用 NOX 控制软件,或使用位于 NOX 之上的相关高层编程语言<sup>[20]</sup>进行控制,如

Frenetic<sup>[21]</sup>。如图 1 是一个 SDN 的具体实现的示意图。

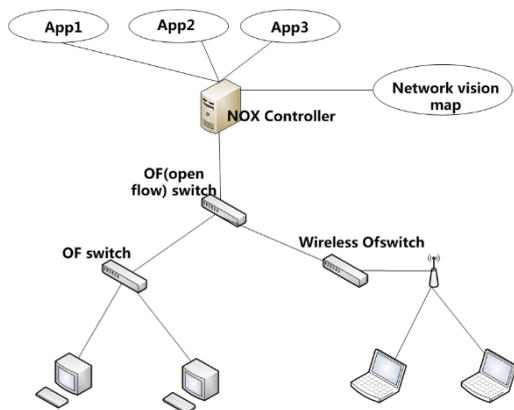


图 1 SDN 实现示意图

Fig. 1 An illustration of SDN implementation

## 1.2 软件定义能源互联网

软件定义网络最终控制的是比特信息流的传输，而软件定义的能源互联网最终目标是控制能量流在能量路由器间的传输。

能量路由的意义主要在于使得能量传输线路间形成动态互为备用关系，减少冗余，提高设备利用率。传统电网里面，要应付源和用的动态性，冗余备用越大越好，这个电网和互联网的道理相通，互联网能做到冗余大的同时利用率又高，核心思想就是分散路由，线路是动态的互备用关系，因此不需要考虑 N-1/N-2 之类的问题。当然信息和能量交换本质上是不同的，如能量的传播是有损耗的，但能量比数据的个性化差异小，能量存储比数据存储要困难的多等等，因此实现可靠传输的方法是不同的，但从网络拓扑的实现角度是可以相互借鉴的。

开放对等式的能量交换方式，以电能为例，互联电网技术已经发展了很多年，本文重点讨论信息通信相关技术，对于能源互联网能量交流方式仅以柔性直流为例加以简单说明。柔直具有以下优点：可向无源网络供电；可以独立控制有功和无功功率，能够实现四象限运行，控制更加灵活；不需要交流侧提供无功功率，且能够起到 STATCOM 的作用，动态补偿无功功率，稳定交流母线电压等等。针对能源互联网，柔直还具有以下优点：

- 便捷高效地联接风能、太阳能等距离偏远、地理分散的可再生能源或绿色能源；
- 提供“优质电力”，电能形式转换的过程中同时可提供全面的电能质量解决方案；
- 可采用挤塑电缆输电，易于向负荷密集区域供电，满足环保需要；

- 换流站设备模块化，安装简单快捷，维护方便，便于“即插即用”的实现。
- 方便构成多端直流系统。当系统潮流翻转时直流电流反向，而直流电压极性保持不变，有利于构成即能方便的控制潮流，又能有较高可靠性的并联多端直流系统。

柔直是能源互联网能量交换的可选技术，但以多端柔直为例<sup>[22]</sup>，系统级控制尚没有开放式的信息通信技术支撑，引入软件定义网络的理念、方法和技术适合能源互联网的场景。主要原因如下讨论：

- 互联网信息的交换采取端到端传输可靠性保证，而在网络层采取尽力而为的方式，即保证了性能又提供了足够好的可靠性，但其前提是终端的智能化程度比较高<sup>[23]</sup>。能量的交换对可靠性的要求更高，因此能源互联网信息通信要求更高，在开放对等互联的前提下，必须增强可控性。SDN 通过控制平面的功能集中化和数据平面路由节点功能的简单化，可以减少信息能源一体化基础设施的费用，方便能源互联网动态调度控制的灵活配置。
- SDN 区别于传统通信网络的一个特点是其可以在规定时间内以很高概率保持路由路径的不变性（拓扑改变可能会引起路径改变，但出现概率不大），这在传统通信网络中很难明确保证。利用该特点，在能源互联网中，控制信息的路由和能量路由可以一体化实现，通过 SDN 实现控制能源互联网能量交换路径的建立和切除。而传统的通信网络由于采用分散控制，难于保证前后路由路径的一致性。

目前所建立的能源互联网还在功能实现阶段，仅使用中小规模节点进行研究，因此对其可扩展性尚不必过多考虑。

## 2 软件定义的能源互联网信息通信

本节结合信息能源基础设施一体化的能源互联网和软件定义网络提出了一个能源互联网中电力传输路由建立和切除的控制方法。

如图 2 所示，能源互联网由能源路由器连接而成，网络路由器和能量路由器对应实现，并对应一个能量自治单元，以微网为例。假设每个微网中至少有一台主机能与路由器连接，由此可以通过对应微网中的主机间的通信建立路由器中的路由，并进

一步建立在能量路由器中的电力传输路径。

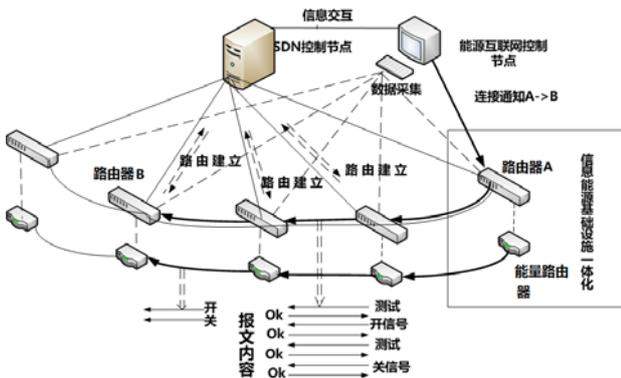


图 2 软件定义的能源互联网信息通信示意图

Fig. 2 An illustration of software-defined information and communication for Energy Internet

一体化实现还体现在控制器方面，控制器包括 SDN 的控制器，用于对 SDN 通信网络进行控制，还包括能源互联网控制器，实现对能源互联网进行运行调度，而具体调度的控制信息是通过 SDN 通信网络来执行的。

以基于柔直的微网互联的能源互联网为研究对象，以 SDN 控制能量交换路径的建立、保持和切除为例，基本流程介绍如下：

- 首先控制器根据采集到的网络状态数据、能量调度相关数据及直流系统状态信息，确定要进行能量传输的源微网和目的微网及具体的电力形式转换策略，具体的调度方法不在本文的讨论范围；
- 控制器主机向源微网中的主机（源主机）发送控制通知报文。考虑到路径建立时延和通信复杂度的影响，这里采用 UDP 报文协议传输。报文内容可以包含目的微网中的一个主机（目的主机）节点 IP 地址，要求源主机向目的主机发送报文，同时还包括直流传输保持时间以及柔直控制的必要信息；
- 源主机首先发送一个测试报文，以测试目的主机的连通性，并在每个交换机建立相关转发路径。根据 SDN 本身的工作流程，流表项可能已经存在，如果不存在则通过控制器决策。由于 SDN 网络的通信流程特点，在一定时间段内，该网络路由路径（同时也是以直流通路为桥接的能量路由路径）可以保持不变。当然也可以设置流表项存在时间（一般大于需要的能量传输时间），便于路径管理；

- 目的主机收到测试报文后，向源主机发送成功响应报文，以后对每个请求报文均应作出响应。这类类似于互联网协议中建立连接的过程，由于能源互联网能量交换对可靠性的要求更高，因此面向连接的方法是可取的。此处所指的面向连接是网络和能量双连接的广义连接；
- 源主机在收到测试报文的响应后，发送“开”报文，由于流表项已经建立，可以实现路由表查表快速转发；
- 当能源互联网调度控制决定的能量传输保持时间到达，源主机首先传输测试报文（与第三步类似），得到响应后，发送“关”报文，同样可以保证传输路径的一致性；
- 在每一个网络路由器上，获取每个报文的内容，如果匹配“开”信号和“关”信号，就通过信息能源一体化基础设施，发送相关信号给能量路由器，实现能量传输路径的通断（“开”对应路径建立，“关”对应路径切除）。

网络连接建立的过程除了考虑网络层协议的完备性，要把能量链路的建立、保持及切除信息附加进来。网络路径的建立及决策的完成只是能量通路建立的必要条件，前者要受控于后者。即使网络进行了完备的信息收集，SDN 路径规划，握手等动作，如果能量在 SDN 规划的路径上不具备建立通路的条件（电力设备状态，区域用电需求，电能质量要求，当前系统状态等等都可能是影响能量链路建立的因素），则 SDN 路径的建立仍处于非有效状态。因此，以上流程还需要配合相应的出错管理：

- 如果在传输过程中出现响应信号超时，需要通过 SDN 控制节点判断路径连接情况。如果是因为拥塞丢包，可以重复发送该路径测试报文；
- 如果开报文和关报文的传输路径不一致，表明路径已经发生改变，原路径的能量传输必然已经断开，由此，当原路径上的节点在一段时间内检测不到能量传输，则该节点自动断开。而对于新路径，由于本身并无能量传输，所以关报文对其不起作用；
- 如果能量路由的控制量、状态信息或电力参数超出阈值，能量路由器向网络路

由器反馈故障信息，并在能量路由器的保护策略下，听从网络路由器对路径及传输策略进行重新规划；

- 对于其它故障引起的能量流断开，同样可以通过检测能量流的方法对每个节点进行操作。

### 3 实验仿真及性能评价

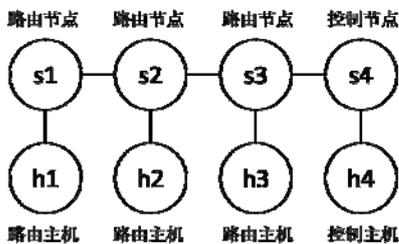
本节给出基于 SDN 的能源互联网信息通信层面的仿真结果，并对具体的工作流程和性能进行初步的性能评价。

#### 3.1 仿真实验配置

本仿真实验使用主机联想 U330p，Windows8 操作系统，4G 内存，500G 硬盘，Intel i5 内核。安装虚拟机 Ubuntu12.0，在 Ubuntu 操作系统上安装 NOX 控制器和 mininet 仿真软件<sup>[24]</sup>。

初步建立线性结构网络，包括 4 个虚拟路由器线性连接，每个路由器连接一个虚拟主机，整个网络由一个虚拟控制器控制，其中 h4 为控制节点对应的主机，其它三个为路由器节点对应的主机。

建立命令为 `mn -topo linear,4 -mac, --switch ovsk -controller remote`，建立过程见下图。



```

*** Creating network
*** Adding controller
*** Adding hosts:
h1 h2 h3 h4
*** Adding switches:
s1 s2 s3 s4
*** Adding links:
(h1, s1) (h2, s2) (h3, s3) (h4, s4) (s1, s2) (s2, s3) (s3, s4)
*** Configuring hosts
h1 h2 h3 h4
*** Starting controller
*** Starting 4 switches
s1 s2 s3 s4

```

图 3 网络仿真线性拓扑建立

Fig. 3 A Linear topology for network simulation

测试连通性 h1 ping h4，结果如下：

```

mininet> h1 ping h4
PING 10.0.0.4 (10.0.0.4) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.0.0.4: icmp_req=1 ttl=64 time=13.8 ms
64 bytes from 10.0.0.4: icmp_req=2 ttl=64 time=2.17 ms
64 bytes from 10.0.0.4: icmp_req=3 ttl=64 time=0.240 ms
64 bytes from 10.0.0.4: icmp_req=4 ttl=64 time=0.064 ms
64 bytes from 10.0.0.4: icmp_req=5 ttl=64 time=0.086 ms

```

图 4 网络仿真连通性测试

Fig. 4 Ping test for network simulation

通过比较返回 RTT 时间值，可以看出 SDN 路由的基本特点，时间的改变是由控制器查询路由引起的。最开始的报文需要由控制器处理并建立路由流表项，而后续的报文仅需要进行流表项查询，可以使用高速物理器件转发，所以第一个 ping 命令的时间明显大于后面几个命令的运行时间。

具体的 python 实现的实验脚本事先在 h1-3 路由主机安装并执行，主要是按照上节的流程实现等待、测试、信号的转发以及确认等功能，结果输出到后台文本文件。而 h4 控制主机前台运行，触发实验过程，并及时显示结果。在每个路由器节点分别随机输入一个值，然后确定由最大值节点向最小值节点建立电力传输路径，然后执行路由建立流程、传输保持时间设为 2.1 秒、最后执行路由切除流程。整个过程重复三次。

#### 3.2 仿真结果

以下为控制主机 h4 和路由主机 h1 的相关执行结果：图 5 中为控制节点 h4 的执行结果。‘y’表示继续下一轮执行，后面的三个数字表示节点 h1, h2 和 h3 的随机输入值，以此决定源节点和目的节点。

```

y
1
2
3
process begin time is 2014-08-20 05:45:55.412271
src is 10.0.0.3
dest is 10.0.0.1
transmit to src node 10.0.0.3 content is dst node 10.0.0.1
control packet ok
control message send successful
y
1
3
2
process begin time is 2014-08-20 05:46:13.164822
src is 10.0.0.2
dest is 10.0.0.1
transmit to src node 10.0.0.2 content is dst node 10.0.0.1
control packet ok
control message send successful
y
3
1
2
process begin time is 2014-08-20 05:46:29.120193
src is 10.0.0.1
dest is 10.0.0.2
transmit to src node 10.0.0.1 content is dst node 10.0.0.2
control packet ok
control message send successful

```

图 5 h4 执行结果

Fig. 5 Experimental results for h4

图 6 中 h1 为接收端，h3 为发送端。ok111 为开/关路径测试响应报文，ok 为开/关路径响应报文或响应控制器的报文。open/close 为开/关信号报文。图 7 中 h1 为接收端，h2 为发送端。图 8 中 h1 为发送端，h2 为接收端。

```

programme begin
transmit to dst_address 10.0.0.3 message is ok111
test open road reply
open received time is 2015-02-17 08:05:41.316185
transmit to dst_address 10.0.0.3 message is ok
node open in line
transmit to dst_address 10.0.0.3 message is ok111
test close road reply
close received time is 2015-02-17 08:05:43.431053
transmit to dst_address 10.0.0.3 message is ok
node close in line

```

图6 h1 执行结果 I

Fig. 6 Experimental result I for h1

```

transmit to dst_address 10.0.0.2 message is ok111
test open road reply
open received time is 2015-02-17 08:05:49.664825
transmit to dst_address 10.0.0.2 message is ok
node open in line
transmit to dst_address 10.0.0.2 message is ok111
test close road reply
close received time is 2015-02-17 08:05:51.779754
transmit to dst_address 10.0.0.2 message is ok
node close in line

```

图7 h1 执行结果 II

Fig. 7 Experimental result II for h1

```

control routing received, time is 2015-02-17 08:05:57.868981
transmit to dst_address 10.0.0.4 message is ok
control data is 10.0.0.2
send packet,destination host is 10.0.0.2
receive reply packet
test road message send/receive successful
open send time is 2015-02-17 08:05:57.875068
transmit to dst_address 10.0.0.2 message is open
open send successful
send packet,destination host is 10.0.0.2
receive reply packet
test close send/receive successful
close send time is 2015-02-17 08:05:59.984832
transmit to dst_address 10.0.0.2 message is close
close send successful
close action reply

```

图8 h1 执行结果 III

Fig. 8 Experimental result III for h1

运行时延结果实例见表格 1 和 2, 在表格中, 列举了以下时间 (以毫秒为单位), Control-delay 为控制包在交换机上收到并准备发送响应报文的时间减去控制包发送时间。Open-delay 为开信号测试包发送与开信号在目的交换机上收到并解包的时间间隔。Close-delay 为关信号测试包发送与关信号在目的交换机上收到并解包的时间间隔。Send-delay 为控制报文发送到开信号报文被目的交换机收到并解包的时间间隔。

表1 运行时延结果 1

Tab.1 Delay measurements 1

Time(ms)	Control-delay	Open-delay	Close-delay	Send-delay
3->1	5.161	4.089	6.978	21.695
2->1	6.001	1.442	6.144	18.028
1->2	7.008	1.083	4.446	14.666

表2 运行时延结果 2

Tab.2 Delay measurements 2

Time(ms)	Control-delay	Open-delay	Close-delay	Send-delay
3->1	7.602	10.804	8.005	35.197

2->1	6.117	1.197	4.298	16.706
1->2	7.008	1.465	7.478	19.096

以上结果表明, SDN 传输延迟均在毫秒级, 本实验旨在验证 SDN 支撑能源互联网能量交换的信息通信的可行性, 采用具体 OpenFlow 的实现方式, 说明路由建立、保持和切除的流程, 给出一个具体的信息能量交换一体化实现的方式, 为后续的仿真和应用奠定基础。

本实验以最为基本的能量路由建立、保持和切除的流程为例, 采用了 SDN 仿真实现, 旨在说明软件定义方法在能源互联网信息通信中应用的可行性。首先, 软件定义虽然提高了系统的可控性, 但同时仍然保持了开放性, 也就是说虽然实验本身只有线性连接的 4 个节点, 但可以拓展至更复杂的网络结构; 其次, 本实验在理想情况下对 SDN 传输延迟进行了量测, 虽然实际情况会有所差距, 但毫秒级的延时结果对于支撑能源互联网能量交换至关重要, 比如电网中暂态事件很多都在毫秒的量级, 支持相应的监测和运行调度也需要至少相应量级的信息通信。因此, 本节的实验结果从最基本的方面验证了 SDN 支撑能源互联网能量交换的信息通信的可行性。

## 4 结论

能源互联网是现有大电网等能源基础设施的补充, 主要在于提高分布式新能源的接入等。能源互联网的实现可以借鉴互联网的理念和技术, 如采取能量路由的方式进行开放对等的能量交换。同时能源互联网的运行调度控制需要信息通信系统的支撑, 要更好的实现可控性和可靠性, 可以借鉴最新的软件定义网络技术, 这也是本文的重点。

软件定义网络在保持开放互联的基本特征的同时, 将数据和控制相分离, 增强了可控性, 更加易于管理, 与能源互联网的需求相适应。本文是一个应用软件定义思想实现能源互联网信息通信支撑运行调度的初步尝试, 相关仿真实验说明了与能量路由器进行一体化实现的可行性。

未来工作在于面向能源互联网的软件定义的信息通信系统的具体实现和应用推广。其中除了可控性外, 软件定义的方法还可以提供更好的安全性和更加灵活的安全策略, 便于动态部署、配置和管理, 这些都有待于进一步深入研究和应用。

## 参考文献

- [1] 杰里米·里夫金著. 第三次工业革命[M]. 张体伟, 孙毅宁, 译. 北京: 中信出版社, 2012: 27-68.
- [2] 韩英铎, 余贻鑫, 黄其励, 彭苏萍, 曹军威, 等. 第13章: 能源互联网, 中国战略性新兴产业发展报告2015[R]. 北京: 中国工程院, 2015.
- [3] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 143-167.
- [4] Cao J W, Yang M B. Energy Internet – towards Smart Grid 2.0[C]. Proc. 4th Int. Conf. on Networking and Distributed Computing, Hongkong, China, 2013: 105-110.
- [5] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J], 计算机研究与发展, 2015, 52(3): 1-18.
- [6] Wang J Y, Meng K, Cao J W, et al. Electricity Services Based Dependability Model of Power Grid Communication Networking[J]. Tsinghua Science and Technology, Special Section on Smart Grid, 2014, 19(2): 121-132.
- [7] Wan Y X, Cao J W, Zhang S, et al. An Integrated Cyber-Physical Simulation Environment for Smart Grid Applications[J]. Tsinghua Science and Technology, Special Section on Smart Grid, 2014, 19(2): 133-143.
- [8] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 1-10.
- [9] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 714 - 727.
- [10] Yu. M L, Rexford J, Freedman M J, et al. Scalable Flow-Based Networking with DIFANE[C]. SIGCOMM, New Delhi, India, 2010.
- [11] Casado M, Freedman M J, Pettit J, et al. Ethane: Taking Control of the Enterprise[C]. SIGCOMM, Kyoto, Japan, 2007.
- [12] Tootoonchian A, Gorbunov S, Ganjali Y, et al. On Controller Performance in Software-Defined Networks[C]. Hot-ICE, San Jose, USA, 2012.
- [13] Gude N, Kooponen T, Pettit J, et al. NOX: Towards an Operating System for Networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(3): 105-110.
- [14] Cai Z, Cox A L, Ng T S E. Maestro: A System for Scalable OpenFlow Control[R]. Houston: Rice University, 2010.
- [15] Yeganeh S H, Ganjali Y. Kandoo: A Framework for Efficient and Scalable Offloading of Control Applications[C]. HotSDN, Helsinki, Finland, 2012.
- [16] Tootoonchian A, Ganjali Y. HyperFlow: A Distributed Control Plane for OpenFlow[C], INM, USENIX, 2010.
- [17] Feamster N, Balakrishnan H, Rexford J, et al. The Case for Separating Routing from Routers[C]. SIGCOMM, Portland, USA, 2004.
- [18] McKeown N, Anderson T, Balakrishnan H, et al. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69-74.
- [19] OpenFlow Switch Specification, version 1.4.0[S]. Open networking foundation, October 15, 2013. www.opennetworking.org.
- [20] Foster N, Freedman M J, Guha A, et al. Languages for Software-Defined Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2):128-134.
- [21] Harrison W R J. Frenetic: A Network Programming Language[M]. USA, New Jersey: Princeton University, 2011.
- [22] 南澳柔性多端直流输电工程控制保护设计规范——系统及换流站级控制系统, 中国南方电网, 2013.
- [23] Kurose J F, Ross K W. 计算机网络: 自顶向下方法[M]. 陈鸣, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [24] Lantz B, Heller B, McKeown N. A Network in a Laptop: Rapid Prototyping for Software-Defined Networks[C]. Hotnets, Monterey, USA, October 20–21, 2010.

收稿日期: 2015-02-28.

作者简介:



曹军威 (1973), 男, 博士, 清华大学信息技术研究院研究员, 主要从事分布式计算与网络、智能电网、能源互联网方面的研究工作, [jcao@tsinghua.edu.cn](mailto:jcao@tsinghua.edu.cn);

王继业, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网信息化方面的工作;

明阳阳, 男, 博士, 主要从事通信和网络体系架构、能源互联网方面的研究工作;

杨明博, 男, 博士, 研究方向包括电能质量治理, 能源互联网, 磁共振无线能量传输;

孟坤, 男, 博士, 讲师, 主要从事网络性能评价、智能电网信息通信、能源互联网方面的研究工作;

高灵超, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网信息安全方面的研究工作;

林闯, 男, 博士, 教授, 主要从事网络性能评价方面的研究工作。

(责任编辑 李小丫)