

DOI: 10.7667/PSPC151895

## 基于社区能源网的电能路由器设计

徐梦超<sup>1</sup>, 邵能灵<sup>1</sup>, 黄文焘<sup>1</sup>, 郑晓冬<sup>1</sup>, 李国栋<sup>2</sup>, 陈培育<sup>2</sup>, 王旭东<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010)

**摘要:** 随着分布式发电及储能设备的广泛应用, 基于新能源和互联网技术的能源互联网建设得到快速发展。连接电网、分布式发电设备、储能设备以及负荷的电能路由器的设计, 可以满足能源互联的需求, 从而实现对负荷用电和分布式电源发电的优化调度管理。提出社区能源网络的基本构成, 电能路由器作为其最小终端, 控制和调度家庭发用电系统。在分析电能路由器设计需求的基础上, 提出基于固态变压器的即插即拔、多输入多输出的电能路由器方案, 实现连接家庭发用电系统的新能源出力、储能设备和负荷并进行统一的控制和调度。

**关键词:** 电能路由器; 户用光伏; 社区能源网络; 能源互联网; 固态变压器

### Energy router design based on community energy network

XU Mengchao<sup>1</sup>, TAI Nengling<sup>1</sup>, HUANG Wentao<sup>1</sup>, ZHENG Xiaodong<sup>1</sup>, LI Guodong<sup>2</sup>, CHEN Peiyu<sup>2</sup>, WANG Xudong<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

**Abstract:** With the wide application of distributed generation and energy storage equipment, energy internet based on energy construction of new energy and internet technology is developing rapidly. Connected with the grid, distributed power generation equipment, energy storage devices, and load power, energy router is designed to meet the needs of the energy internet, which enables the generation optimal dispatch management of distributed power and load. This paper presents the basic structure of community energy networks. Energy router is designed as its smallest terminal, controlling and scheduling home electrical system. Based on the analysis of power router design requirements, the proposed solid state transformer-based energy router features plug-and-play, multiple-input and multiple-output (MIMO), connecting, controlling and scheduling renewable energy resources, energy storage devices and loads of the home electrical system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377104 and No. 51407115), Science Foundation of Ministry of Education of China (No. 113023A), State Grid Corporation Headquarters Projects (No. SGTJDK00DWJS1500098), and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2014M560333).

**Key words:** energy router; PV home system; community energy network; energy internet; solid state transformer

## 0 引言

目前, 能源需求日益增加而一次能源储量却逐渐减少, 由此带来的能源缺口在未来发展中需要可再生能源来补充。光伏和风力发电技术已经日趋完善, 尤其是户用光伏将在各个城市的成千上万户家庭中逐渐普及。同时, 一次能源利用引起的环境污染问题也日趋严重, 国际社会和国内社会对可再生

能源合理开发的呼声也很高。欧盟、美国、中国相继提出到 2050 年可再生能源在能源供给中所占的比例分别达到 100%, 80%和 60%~70%的目标<sup>[1]</sup>。

在未来能源利用中, 以能源互联 (Energy Internet) 为代表的新型能源利用模式将伴随着互联网技术革命发展起来。文献[1, 2-4]描述了能源互联网的基本形态和特征, 使用互联网技术实现能源共享, 电动汽车普及率大幅提高导致交通系统从石油时代转入电气时代, 以及大规模分布式发电和储能设备接入电网。文献[5]提出了电、热、气三种能源互联模式, 通过互联网技术进行合理调度和调控, 达到经济最优或者节能最优的运行模式。户用可再

**基金项目:** 国家自然科学基金(51377104, 51407115); 教育部教育部科学技术研究项目(113023A); 国网公司总部科技项目(SGTJDK00DWJS1500098); 中国博士后基金(2014M560333)

生能源发电设备数量，电池储能能力和交换电能速率正在逐步提高。因此，户用电能路由器的研究和设计是未来电能利用和能源互联的基础。户用电能路由器集能量流、资金流和信息流为一体，实现社区电能交易、电网电能交易、家庭用电方案设计等功能，实现可再生能源发电设备、智能电器和储能电池的调度与控制。户用电能路由器是社区能源网络的基本构成单元。

目前电力电子设备发展迅速，交直流电能之间的转换已经不存在难题，文献[6]提出了固态变压器(Solid State Transformer, SST)的概念，本质是利用电力电子变压器<sup>[7]</sup>进行交直流电能之间的转换。文献[8-11]给出了现有光伏发电的关键技术，如基于天气指数的出力预测，光伏并网技术，户用光伏模型等。随着户用光伏普及率越来越高，研究户用电能路由器有着其现实意义。但户用光伏的能量管理研究主要集中在光伏出力的控制和与蓄电池配合的出力控制。例如文献[12]给出了户用光伏发电系统的能量管理方案，核心是光伏出力与蓄电池充放电的配合。目前，户用光伏能量管理还没有涉及家庭用电层面的整体调度。电能路由器的研究正好弥补这个不足。随着能源利用的多样化，分布式设备有即插即拔的设计需求，电能路由器将家用智能负荷<sup>[13]</sup>、分布式储能设备、分布式发电设备以及电网都作为即插即拔的设备接入，是下一代配电系统的基本构成单元。

本文将从电能路由器的结构设计、功能设计以及电能路由器的应用3个方面对户用电能路由器展开研究。

## 1 电能路由器的技术需求

### 1.1 技术设计需求

电能路由器作为小区能源网络的基本节点，必须满足以下几条设计需求。

#### (1) 可接入社区能源网络的电能

社区能源网络是交直流混合微电网<sup>[14-15]</sup>。电能路由器作为家庭用电系统和社区能源网络之间的节点，接入电能是一项基本功能。其中，电能接入方式也是即插即用模式。电能路由器至少需要两个接口，一个是220 V交流输入口，一个是±200 V直流输入口<sup>[16]</sup>。

#### (2) 双向电能交易

电能路由器需要和社区能源管理平台进行电能交易。当家庭用电系统产生的电能无法满足家庭用电需求，将会向社区买入电能；反之，向社区卖出电能。这样的交易也可以直接发生在两户家庭之间，是电能路由器之间的电能交易。

### (3) 双模式运行

互联模式是指当社区能源网络运行正常，如图1所示，家庭用户通过电能路由器与其相连，进行正常的电能交易和信息交互。不间断电源(Uninterruptible Power Supply, UPS)模式是指当社区能源网络出现故障，导致无法为家庭用户供电时，电能路由器切断与社区能源网络的连接，家庭用电系统自给自足。



图1 电能路由器双模式运行示意图

Fig. 1 Figure of energy router dual mode operation

### (4) 接口标准统一，即插即用与多输入多输出

针对连接在电能路由器上的不同设备，它要进行统一标准的插座设计。针对交直流两种用电方式和电能流动方向将设备分为6种。分别是：直流电源、交流电源、直流负荷、交流负荷、直流储能设备、交流储能设备。其中储能设备在大部分情况下使用直流方式。因此可设计5种接口，分别是直流输入接口、交流输入接口、直流输出接口、交流输出接口和直流双向传输接口。接口的选择可以是普通的开关或者电力电子设备。

### (5) 家庭用电系统能量优化

电能路由器要能够实现家庭用电系统的优化。根据用户习惯，制定电能使用计划，在满足用户用电需求的基础上，实现经济最优。又如可在社区能量池电能充裕，电价较低时买入电能储存在储能设备上，在社区能量池电能紧缺时卖出，实现营收。

### (6) 简易操作系统

电能路由器需要简易的操作系统，能够实现电能路由器与电能路由器之间、电能路由器和社区能源管理平台之间、电能路由器和家庭用电、产电设备之间的通信。能够对即插即用的端口进行管理和状态信息采集。

## 1.2 连接对象

电能路由器将设计成即插即用，多输入多输出模式。如图2所示，以电能路由器作为电能交换的枢纽，家庭产电设备、用电设备和配网侧设备都将使用插座-插头模式与电能路由器相连。其中，连接在电能路由器上的设备有蓄电池等储能设备，有光伏等发电设备，也有电动汽车、智能电器等用电设备。这些设备连接在电能路由器上，以电能路由器为枢纽进行电能交换。



图2 电能路由器的连接对象示意图  
Fig. 2 Connection objects of energy router

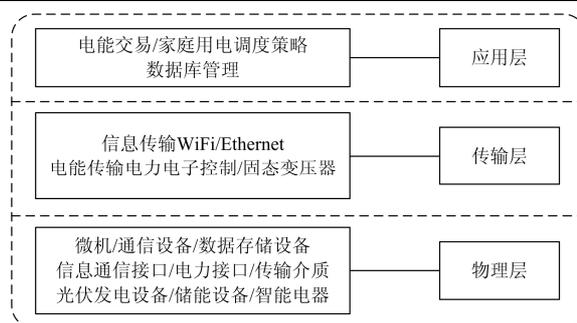


图3 电能路由器传输分层结构  
Fig. 3 Transmission hierarchy of energy router

## 2 电能路由器设计

### 2.1 结构设计

#### 2.2.1 模块结构

利用电能路由器的能量流、信息流传输的层次特点, 可将其分为物理层、传输层和应用层。物理层表示电能路由器的基本物理构成、连接接口和连接对象。传输层表示了能量与信息的传输方式与控制结构。应用层表示了电能路由器的基本功能与人机交互。如图3所示。

电能路由器的软件模块应当以数据库模块为中心, 人机界面模块与数据库进行数据交互, 其他功能模块与数据库进行数据交互, 如图4所示。

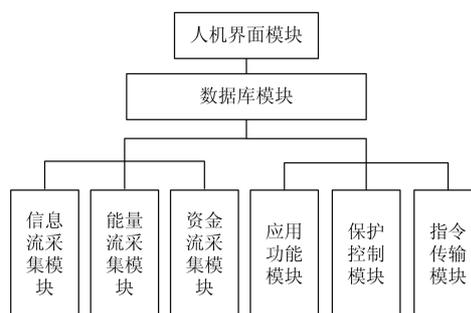


图4 电能路由器的软件模块结构  
Fig. 4 Software module structure of energy router

#### 2.2.2 电气拓扑结构

如图5所示, 200 V 的直流母线是电能路由器的转换中心, 分别与配网侧交流接入插座、配网侧

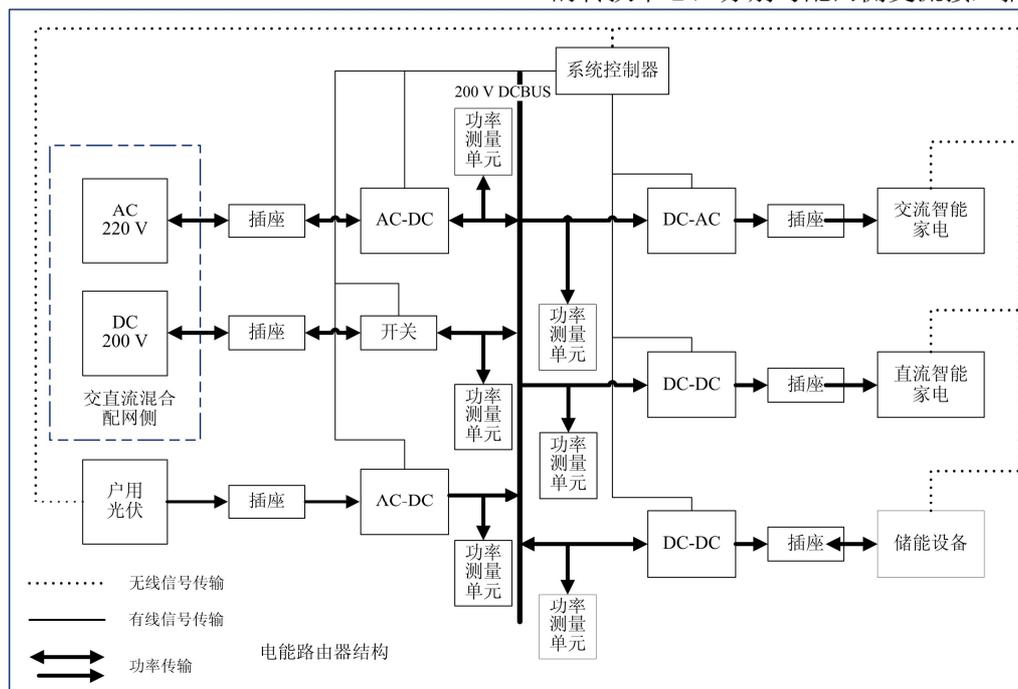


图5 电能路由器拓扑结构图

Fig. 5 Topology of energy router

直流接入插座、光伏接入插座、交流负荷插座、直流负荷插座和储能设备插座相联接。每一个插座都与一个开关相连，系统可以根据需要和相应的规则选择该路的通断。电能进入和离开 DC 母线时都要经过功率测量单元，将实时用电量反馈给系统管理器。

配网侧交流电通过 AC-DC 转换成直流电，连接到直流母线上。AC-DC 的输入电压为 220 V 的交流电，输出电压为 200 V 的直流电。配网侧直流电压无需经过电力电子转换装置直接连接到直流母线上。目前的大部分户用光伏发电设备经过逆变器转换成 220 V 的交流电。因此，电能路由器的光伏接口是 220 V 的交流电，通过 AC-DC 与直流母线相连。未来光伏可以通过升压直接连接在电能路由器上，免去逆变部分。

对于使用交流电的智能家电，母线通过 DC-AC 与之相连，为其提供 220 V 的交流电压。对于使用直流电的智能家电，无需电力电子变换器件，可以直接相连。目前的储能设备以蓄电池为主，使用直流电进行充放电，与直流母线直接相连。

所有的功率测量单元，开关，都可以与系统管理器之间实现通信。所有的智能电器，储能装置和光伏装置都可以与电能路由器实现无线通信，可以使用 wifi、Zigbee 等技术实现家庭用电局域网。系统管理器通过收集各个设备、器件的状态信息，实现对家庭用电设备的统一管理。

此外，电能路由器需要设计简易的操作系统。简易操作系统分为电能管理层、信息支持层和人机界面。其中，人机界面中可以完成登入、权限设定、用电监控、优化目标选定等功能。信息支持层负责用电信息(收集、分析以及用电方案设计)。电能管理层根据用电方案对各个设备进行管理。

## 2.2 功能设计

电能路由器的功能主要有双向计费交易功能和用电方案设计。

### 2.2.1 双向计费交易功能

电能路由器计费交易功能的本质是资金-电能交换。如图 6 所示，以使用电能路由器的家庭为中心，它的交易对象有电网公司和其他家庭用户。其中，家庭用户与电网公司进行交易时采用实时上网电价为交易单价进行交易。与其他家庭用户进行交易时采用社区能量池的竞价模式进行交易。

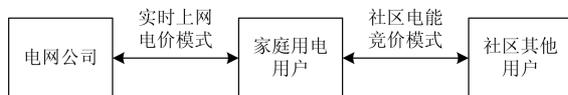


图 6 电能路由器计费交易功能示意图

Fig. 6 Figure of transaction accounting functions of energy router

如图 7 所示，用户通过交互界面可以得到当前电价信息和电费清单以及电能路由器给出的用电方案，用户针对这些信息选定交易策略，电能路由器处理后将用户信息和响应策略给社区能源网络管理平台，完成电能交易，同时收集下一个阶段的电价信息和电费清单。电能路由器根据用户不同的交易策略给出不同的用电方案，并控制家庭用电系统中的各个设备。其中，用户与配电网实现电能交易也是通过电能路由器和社区能源网络管理平台进行的。

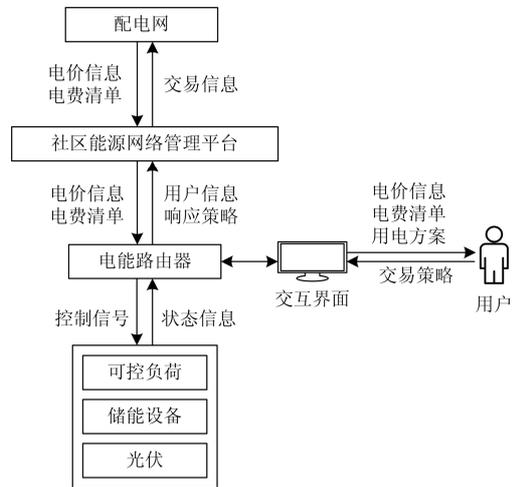


图 7 双向计费模式信息流图

Fig. 7 Two-way billing model information flow diagram

### 2.2.2 用电方案设计

电能路由器的用电方案设计包括家庭负荷预测、可控负荷的用电控制以及发电设备的发电控制。图 8 是用电方案设计的流程。

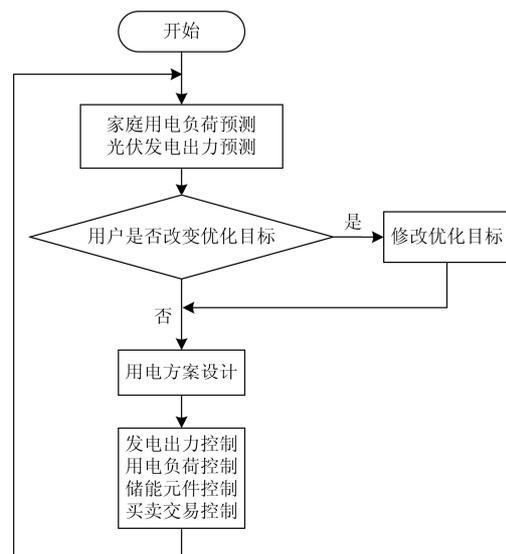


图 8 电能路由器家庭用电方案设计流程图

Fig. 8 Flow chart of home electrical management design

家庭用电方案的设计可以根据不同的优化目标来实现不同的方案。而优化目标可以由用户按照需求设定, 比如经济最优、优先使用可再生能源、优先蓄电池充放电等。家庭负荷预测可以根据前一天的用电情况、上周同时期的用电情况以及其他外部条件计算出当天的用电分析。根据当日天气对家庭发电设备(主要是光伏)进行出力预测。结合上述 3 个数据, 做出今日的用电计划表。其中包括, 光伏出力曲线、用电曲线、买卖电曲线等。

### 2.3 运行模式设计

可采用双模式运行, 包括不间断电源模式和互联模式。

互联模式是指当社区能源网络运行正常, 如图 1, 家庭用户通过电能路由器与其相连, 进行正常的电能交易和信息交互。UPS 模式是指当社区能源网络出现故障, 导致无法为家庭用户供电时, 电能路由器切断与社区能源网络的连接, 家庭用电系统自给自足。

图 9 给出了电能路由器模式切换的流程图, 其中 SOC\_Battery 表示用户储能设备的 SOC(State of Charge); SOC\_EnergyPool 表示社区能量池的 SOC。

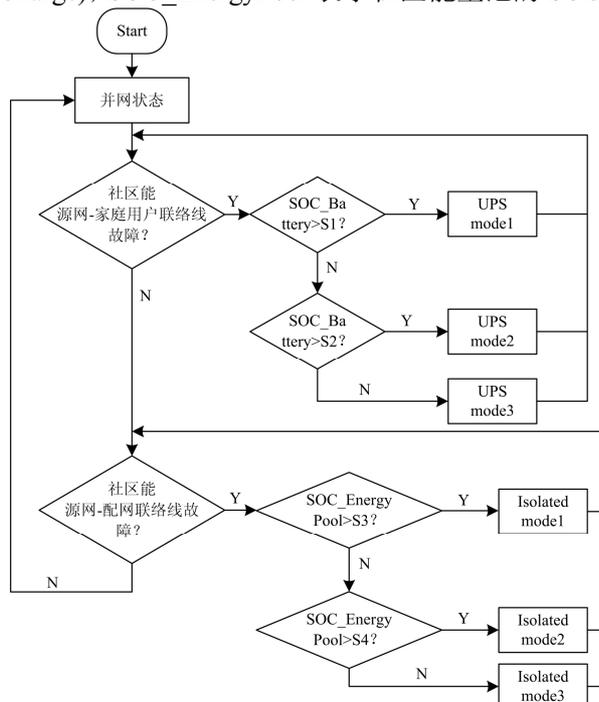


图 9 电能路由器模式切换流程图

Fig. 9 Flow chart of mode switch

其中, 社区能量池作为一种虚拟概念, 指的是社区所有用电用户可卖出电能的总和。它是一种实时的概念。在  $t$  时刻社区电能总和可以用  $Q_t$  表示。

$$Q_t = \sum_{i=0}^n Q_{i,t} \quad (1)$$

其中:  $Q_{i,t}$  表示在  $t$  时刻第  $i$  户家庭可卖出的电能;  $n$  表示该社区的用电用户总数。

当社区所有家庭用电系统电能富余达到最大时, 社区能量池的电能也到达最大, 设为  $Q_{\max}$ 。由此可知:

$$Q_{\max} = \sum_{i=0}^n Q_{i,\max} \quad (2)$$

$$SOC\_EnergyPool = \frac{Q_t}{Q_{\max}} \quad (3)$$

其中,  $SOC\_EnergyPool$  最大为 1, 最小为 0。

当用户与社区能源网联络线故障后, 储能设备 SOC 大于  $S1$ , 此时备用电量充足, 用户负荷正常运行, 为备用电源模式 1, 故障切除后转至并网状态运行; 如果故障持续, 储能设备 SOC 处于  $S1$  和  $S2$  之间, 为保证用户正常的照明等必要需求, 切除大功率电器, 为备用电源模式 2, 故障切除后转至并网状态运行; 如果故障依旧未切除, 储能设备 SOC 处于  $S2$  以下, 切除绝大部分电器, 仅留下夜间照明备用电, 等待电力恢复, 为备用电源模式 3。

当社区能源网与配网联络线故障后, 社区能源网络相当于孤岛运行, 电能自给自足, 出现电力不足情况时, 只能通过甩负荷来实现功率平衡。当社区能量池的 SOC 大于  $S3$  时, 表示社区能源网络的电能储备充足, 社区能源网络运行正常, 用户各负荷正常运行, 买卖电能正常, 为孤岛情况下的备用电源模式 1; 当社区能量池的 SOC 处于  $S3$  到  $S4$  时, 社区电能出现不足, 用户以买入电能为主, 关闭大功率负荷, 为孤岛情况下的备用电源模式 2; 当社区能量池的 SOC 处于  $S4$  以下时, 出现电能储备严重不足, 停止电能交易, 切除大部分负荷, 仅留下夜间照明备用电, 等待电力恢复, 为孤岛情况下的备用电源模式 3。

上述  $S_i(i=1、2、3、4)$  的数值可以根据用户不同的需求在 0 到 1 中进行设定。当  $S_i$  选择较高时, 表示用户希望优先满足用电可靠性, 适当牺牲用电经济性; 反之,  $S_i$  选择较低时, 表示用户希望优先满足用电经济性, 适当牺牲用电可靠性。以  $S3$  与  $S4$  为例,  $S3$  与  $S4$  同时被设定为较低值时, 用户的用电可靠性最佳, 经济性最差;  $S3$  与  $S4$  同时被设定为较高值时, 用户的用电经济性最佳, 可靠性最差;  $S3$  被设定较高而  $S4$  被设定较低时, 用户在电

能较充裕时选择优先满足可靠性，而在电能较缺乏时选择优先满足经济性，此用户的用电负荷较重，在电能较缺乏时已经不可能满足其负荷要求；S3 被设定较低而 S4 被设定较高时，用户在电能较充裕时选择优先满足经济性，而在电能较缺乏时选择优先满足稳定性，此用户用电负荷一般较小且为重要负荷。

### 3 电能路由器的应用

#### 3.1 社区能源网络的构成

社区能源网络通常采用交直流混合的供电模式，交流电压为 380/220 V，而直流电压大部分是  $\pm 200$  V<sup>[16]</sup>。社区能源网络的本质是社区微电网，它作为系统侧配电网和家庭用户之间的电能交换桥梁。

如图 10 所示，社区能源网络分为 3 层，分别为配网层、社区微网层和家庭用户层。其中配网层是交直流混合配电网，交流电压为 220 V，直流电压为  $\pm 200$  V。下面简要介绍社区微网层和家庭用户层。

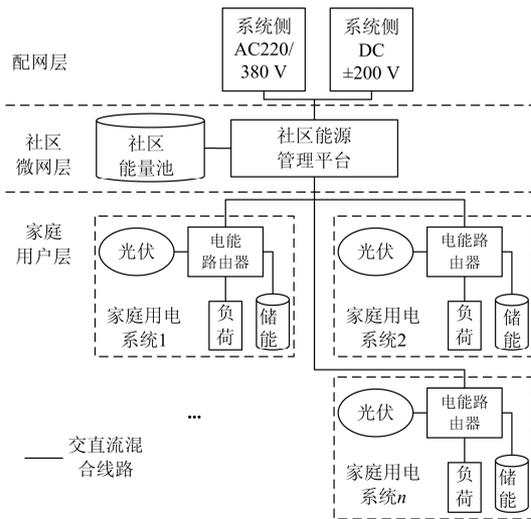


图 10 社区能源网络示意图

Fig. 10 Community energy network

##### 1) 社区微网层

社区微网层主要由社区能源管理平台和社区能量池构成。其中社区能源管理平台负责整个小区的用电产电。尽量做到电能自产自销，减少与配电网的电能交换，减轻城市配电网的运营压力。能源管理平台收集配电网的供电状态和社区家庭用户的用电状态信息，统一处理。社区能量池储存社区剩余电能，它是家庭储能设备、社区储存设备、社区电

动汽车等具有储存电能和电能交换功能的设备剩余电能的总和，相当于社区能源网络的虚拟发电厂。

##### 2) 家庭用户层

在社区能源网络中，家庭用户作为终端用户，是该网络中的最小单元，通过电能路由器与该网络相连。家庭用户既可以从社区能源网络中获取电能也可以向其供给电能。电能路由器连接着家庭用电产电设备，作为社区能源网络中的一个节点。

#### 3.2 电能路由器在社区能源网络中的作用

电能路由器在社区能源网络中充当社区电能管理平台到家用电系统的桥梁，是社区能源网络构成的基本单元。它主要完成的作用如下所述。

##### 1) 可接入配电网电能(AC220 V、DC $\pm 200$ V)。

电能路由器连接着家庭用户和配电网，其中，220 V 交流电通过交流接口连接，200 V 直流电通过直流接口连接。当家庭用户有电能冗余时，可选择性的向其他用户售出电能，也可并网售电；当家庭用户出现电能缺口时，向其他用户或者电网购电以保证家庭正常用电。

##### 2) 作为双向电能传输的节点，实现电能交易，

包括用户向配电网买卖电能和社区能源网络的用户之间买卖电能。社区能源网络中的电能首先实现就地消纳，也就是社区能源网络内部用户之间进行电能交易。其次，剩余电能组成社区能量池，它包括了能源网络中所有的剩余电能总和，交给社区微网层的社区能源管理平台控制和调配。

##### 3) 作为家庭用电状态信息与社区能源管理平台实时通信的路由器。

电能路由器将家庭可再生能源出力情况、家庭负荷运行状态以及家庭储能装置状态收集处理后上传至社区能源管理平台。同时，家庭用户获取社区总体用电状态，比如社区能量池的 SOC，社区实时电价等。

因此，通过电能路由器连接上级配电网的家庭用电系统将不再是单纯的负荷，它的实质是一个完整的微型电网，能够通过信息交互，实现电能的产出、消费和存储。

### 4 结论

本文在分析户用电能路由器设计需求的基础上，提出了电能路由器的设计方案。该方案给出了电能路由器的模块结构，电气拓扑结构；设计电能路由器的双向计费交易功能和用电方案功能；给出了电能路由器在不同情况下的运行模式。实现分布式发电和储能设备通过电能路由器的即插即拔，灵活接入功能。

在以电力系统为核心的未来能源互联网发展

中, 电能路由器的研究是必要的。在实现电能路由器的基础之上, 利用电转气(Power to gas, P2G)技术, 实现能源的双向流动, 进而将供热和供气功能接入能源路由器, 实现电、热、气三者合一的能源互联模式。

### 参考文献

- [1] 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.  
CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy internet and energy routers[J]. Science China: Information Sciences, 2014, 44(6): 714-727.
- [2] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York: Palgrave MacMillan, 2011.
- [3] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 4348-4356.
- [4] ZHAO Zhenxing, PEI Wei, SHEN Ziqi, et al. Design and implementation of energy hub for smart grid[C] // 2013 Fourth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications.
- [5] SCHULZE M, FRIEDRICH L, GAUTSCHI M. Modeling and optimization of renewables applying the energy hub approach[C] // ICSET 2008.
- [6] ZHANG J H, WANG W Y, BHATTACHARYA S. Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffics[C] // Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES.
- [7] 兰征, 涂春鸣, 肖凡, 等. 电力电子变压器对交直流混合微网功率控制的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 50-57.  
LAN Zheng, TU Chunming, XIAO Fan, et al. The power control of power electronic transformer in hybrid AC-DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 50-57.
- [8] RASE C, VINIKOV D, ROMERO-CADAVAL E, et al. Low-power home PV systems with MPPT and PC control modes[J]. Compatibility and Power Electronics, 2013: 58-62.
- [9] 宋小会, 郭志忠, 郭华平, 等. 一种基于森林模型的光伏发电功率预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 13-18.  
SONG Xiaohui, GUO Zhizhong, GUO Huaping, et al. A new forecasting model based on forest for photovoltaic power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 13-18.
- [10] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52.  
LIU Dongran, CHEN Shuyong, MA Min, et al. A review on models for photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 47-52.
- [11] 杨晨, 王焱, 毛玲, 等. 基于电流源半桥变换器的光伏直流模块研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 314-319.  
YANG Chen, WANG Ye, MAO Ling, et al. Study on DC photovoltaic module based on current-fed half bridge converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 314-319.
- [12] 廖志凌, 阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 46-52.  
LIAO Zhiling, RUAN Xinbo. Energy management control strategy for stand-alone photovoltaic power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 46-52.
- [13] 张延宇, 曾鹏, 臧传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 144-154.  
ZHANG Yanyu, ZENG Peng, ZANG Chuazhi. Review of home energy management system in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 144-154.
- [14] 周逢权, 黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62-67.  
ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67.
- [15] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.  
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [16] 王丹, 柳依然, 梁翔, 等. 直流配电网电压等级序列研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 19-25, 47.  
WANG Dan, LIU Yiran, LIANG Xiang, et al. DC distribution network voltage class series[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 19-25, 47.

收稿日期: 2015-10-27; 修回日期: 2016-01-01

作者简介:

徐梦超(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为能源互联网; E-mail: wayfarer@yeah.net

邵能灵(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护, 高压直流输电; E-mail: nltai@sjtu.edu.cn

黄文焘(1988-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护和微网。E-mail: hwt8989@sjtu.edu.cn

(编辑 姜新丽)