

能源互联网路由网络结构与控制机制

杨方¹⁺, 白翠粉¹, 邱忠涛¹, 曹军威², 任光², 明阳阳²

1. 国家电网公司能源研究院, 北京市, 102209

2. 清华大学信息技术研究院, 北京市, 100084

摘要: 针对能源互联网的路由网络组网与控制策略问题, 提出了全网架构下的能源路由系统架构和路由控制实现方法。首先, 考虑能源互联网的广域互联、局域微网和能源终端三层架构, 提出了两级能源路由系统结构和网络模型, 为微网内部和广域互联的能量管理提供了基础。然后, 在路由运行机制上提出了模型预测控制与实时数据驱动结合的熔断策略。它既能保障能源路由指令的快速实时响应, 又可获得较好的控制精度。仿真结果给出了熔断机制下的路由指令分布特征, 说明了微网路由控制可有效地调整指令信息。

关键词: 能源互联网; 能源路由器; 预测控制

文献标志码: A 中图分类号: TP14

The Energy Routing Network Structure and Control Mechanism

Research for the Energy Internet

Abstract: Aiming at the energy routing network and its control implement issues for energy internet, an energy routing systematic structure and a fusing mechanism are proposed for the energy internet. Firstly, considering the three levels architecture of internet, micro grid and energy terminals, an energy routing structure and its systematic model are proposed, and establishes the base for energy internet's power management. And then, a fusing mechanism is proposed for router implementation based on a model predictive control and real-time data-driven, it could both keep a quick response, and obtain good control accuracy. Simulation result show the routing instruction's distribution characteristic, and verify that the micro-grid routing control policy could adjust these instruction effectively.

Key words: Energy internet; Energy router; Predictive control

1 引言

能源互联网的理论与技术正取得快速发展, 能源领域众多科学家和工程师都相继开展了关键技术的研究工作^[1,2]。能源互联网把先进电力电子技术、信息技术和智能管理技术结合起来, 将信息与能源一体化的电力网络、石油网络、天然气网络等互联起来, 以实现能量对等交换与共享利用^[3,4]。国家电网公司刘振亚认为, 未来的能源互联网就是清洁能源、智能电网和特高压组成^[5,6],

清洁绿色能源是能源互联网的重要目标。清华大学研究员曹军威提出, 能源互联网势必发展成未来能源基础平台, 而分布式能源、生产和消费一体的能源主体将成为其主要部分^[7,8]。查亚兵等认为, 能源互联网是发展可再生能源, 并解决大规模能源有效利用的基础平台。能源互联网应具有五大特征, 即: 可再生、分布式、互联性、开放性和智能化^[9]。

能量管理是电力系统的重要研究与工程实践领域^[10,11]。张建华等人为建设微网监

控平台,针对小型微网提出了能量管理系统的构成、任务和 workflows,并研究了经济调度和优化运行的数学建模^[12]。刘东等针对大规模的可再生能源并网具有间歇性的特点,采用主动配电网对其进行主动管理和协调控制,从而达到间歇式能源的有效传输和消纳^[13]。江渝研究了微网系统离网运行时的能量管理。他运用蓄电池和超级电容的互补特点,以经济性和环保性为优化目标,研究给出了一种采用混合储能系统的微网多目标能量管理方法^[14]。在面向能源互联网层面,张涛等在总结了能源互联网及其能量管理系统发展过程,阐明了能源互联网架构下能量管理系统应具备的新功能,研究给出了适合能源互联网能量管理系统的分层递阶式控制架构^[15]。

本文从能源路由网络实现的角度,把能源互联网划分为能源终端网络、能源互联微网和广域能源互联网三个层级,并在此基础上给出了微网路由和广域能源路由两个层级的路由结构。进一步,在路由控制策略上,研究了模型预测控制与实时数据控制结合的熔断机制,形成了能源路由的网络化统一运行机制。

2 能源互联网架构

无论是传统电网,还是信息能源融合下的能源互联网,电力流的输送都需按照区域分布特点,分层分级地输送或交换。既能够实现能源的有效传输和高效利用,又能够保障安全、有序地进行管控。如下图1给出了能源互联网在工程推广中的一种规划架构。

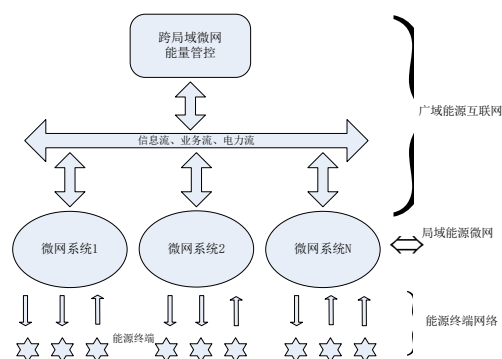


Fig.1 Energy Internet layered architecture

图1能源互联网层次架构

能源互联网的总体架构可以分为三个层级,即能源终端网络、局域能源微网和广域能源互联网。

能源终端网络是能源互联网的最小单元,它可以是任意形态的能源消费组织,比如一栋智能建筑、一所医院或学校、一个酒店、一个工厂和一个家庭等等,也可以是一个单一的大功率负荷装置,如大功率电机。能源终端网络也可以是能源生产端或电源点,向局域能源微网输入能源。能源终端网络应具有能源通道唯一性的特点,即它与局域能源微网只有一个交换接口。

局域能源微网是一种区域性的能源自治组织。它把区域内的能源终端都连接起来,不仅建立电气连接,同时也建立信息与业务连接。通常,局域能源微网包含有各种形式的能源供应体,如光伏电站、风电站、生物质发电、燃气、地热等;也包括各类能源消纳体,如家用电器、电动汽车、工厂负荷等等;还包括数据中心、储能装置和能量管理系统等。局域能源微网需对区域内的所有装置进行统一协调的能量管理,最大限度地实现能源区域自治。从应用空间规模上看,局域能源微网的形式包括工业园区能源系统、城市核心区能源系统等,也可以是整个城市的集成连片能源系统。它需要依据本区域的气候特点、用能特点、区域规模等因素,建立适合能源环境的能源管理体系。由于能源互联网的整体建设具有时间跨度长和区域协调复杂的特点,局域能源微网是现阶段能源互联网的核心。

广域能源互联网主要协调局域能源微网之间的能量不平衡,实现跨局域微网的能源调度,它是能源互联网的高级形态和最终目标。在局域能源微网充分发展的基础上,广域能源互联网需建立大范围的能源监测、控制、调度与传输体系。广域能源信息网络、能源传输管网和广域能源管理是广域能源

互联网建设的重要内容。

3 两级路由系统结构与网络模型

3.1 两级路由结构

电力是能源互联网中的能源主体，其他形式的能源是消费结构中的组成部分。因此，在能源的调度、控制和传输中，可以把所有能源等效转化为电力量度数据来进行分析。

能源路由系统可以实现能源信息的量测采集、能源路由的分析与控制，以及能源的定向传输。对应于图1所示能源互联网三级架构，如下两级能源路由系统可以实现全方位的能量管控。

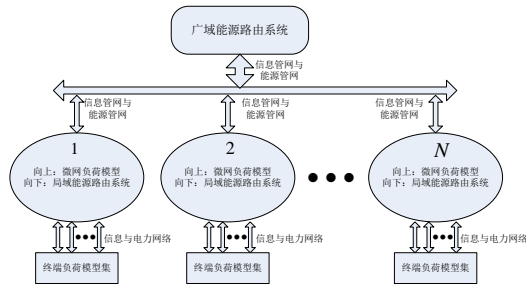


Fig.2 two levels routing system
图 2 两级能源路由系统

3.2 网络模型

两级能源路由系统构成了能源互联网的全网能源控制。由于能源互联网对能源系统的暂态性能要求高，不仅要满足用户的交易需要，同时要对网络中能源的任何关联变化做出及时的反应。微网负荷模型与终端负荷模型集是能源路由控制的基础和对象，他们共同构成了两级能源路由系统的网络模型。这些模型的建立则需依据全网能量测单元提供的实时暂态数据，是一类时变模型。

终端负荷模型集是指局域能源微网内所有功率实体的数学模型集合，它描述了功率实体在微网运行时的实时功率状况。电力是这类模型描述的能源标准形式，其他形式能源都需转化为电力当量来描述。一般地，终端负荷数学模型包括有：发电侧的光伏发电模型、风力发电模型、火力发电模型；储能侧的相变储能模型、化学储能模型；以及

消纳侧的阻抗模型和等效获得的燃气模型、热力模型等等。

微网负荷模型是指单个微网的总负荷特性，它定量地描述该微网功率冗余或不足的变化规律，为广域能源路由控制提供依据。微网负荷模型的建立需依据局域能源路由的实时运行数据，也是一类时变模型。

以光伏发电功率为例，当光伏组件接入局域能源微网时，模型的建立过程如图3所示：

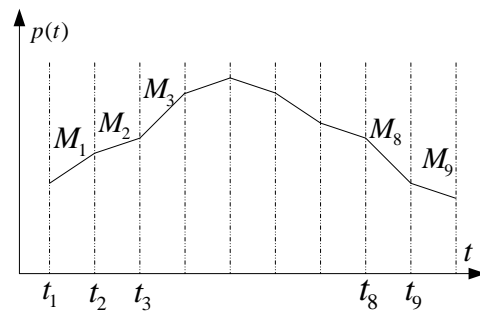


Fig.3 model access procedure
图 3 模型获取过程

在图3中，模型 M_1 的建立依据 t_1 之前的

测量数据。 M_1 是一个线性函数，依据时间轴变量，可以获得相应的功率数据，为路由控制提供参考。如下给出了一个光伏功率模型：

$$p(t) = a(t_i)t + b(t_i) \quad (1)$$

其中， $a(t)$ 和 $b(t)$ 是在确定模型 M 时的辨识量，辨识主要依据量测数据进行。相应地，微网负荷模型和终端负荷模型集都可以参考图3和公式 (1) 的方法来建立。

4 路由运行机制与情景分析

上述模型在应用到路由控制时，在能源网络平稳运行时，可以获得稳定的控制效果，但是对于终端网络急剧变化时，比如结构变化时，则控制量与实际需求会出现大的偏差，给电力网络带来很大压力，甚至故障。

微网路由系统和广域路由系统具有相似的运行机制。

4.1 预测控制与全网熔断实时路由控制方法

以局域微网为例，下图4给出了实时路由控制过程。

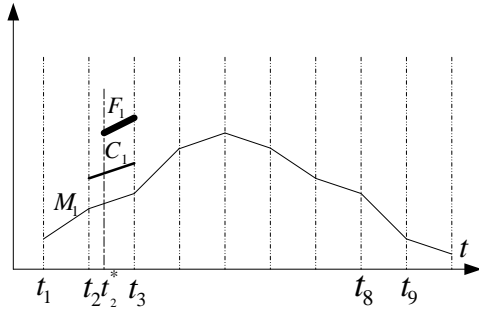


Fig.4 routing control scheme

图 4 路由控制机制

在图4中，横轴 t 表示微网测量装置的测量时间节点； M_1 表示依据测量数据获得的实时功率线性模型； C_1 表示依据模型 M_1 ，采用预测控制方法获得的路由控制执行策略。通常， C_1 开始执行的时间节点在测量装置的采样时间 t_2 处，直到 t_3 时结束。但是，在时间节点 t_2 处，测量数据反馈到路由系统后，基于实时数据驱动的路由控制系统会被实时执行，计算获得符合当前状态下的执行方案，并与预测控制的执行策略进行比较。当比较的结果在一定的裕量范围时，路由系统继续执行预测控制方案；当比较的结果存在很大误差时，会产生熔断行为，即在图4中的 t_2^* 时刻，由路由方案 F_1 取代 C_1 ，直到 t_3 时刻结束。

这种预测控制与数据驱动熔断机制结合的路由策略，既实现了路由系统的无时差连续控制，同时又完成了异常状态的快速自适应，保证了大规模微网的稳定运行。

4.2 情景 1—预测误差小，无熔断

在情景1运行状态中，采用量测数据辨识出线性模型。在较短时间范围内，比如 100ms，这个线性模型基本反映出功率变化的趋势。通过线性估计即可获得下一次运行点的功率数据，运用到局域微网内的所有功率终端设备，便可知道功率出力和消纳的全面信息。

进一步，采用预测控制的方法，在当前量测数据产生的同时，能源路由控制执行策略已经实施，即不等待当前测量数据将产生的路由控制信息。当微网结构稳定，功率处于基本平衡状态时，预测控制的路由控制策略与依据测量数据的完全平衡路由策略差别很小，它能适应全网运行的需求。因此，将不会产生熔断行为。

4.3 情景 2—预测偏差过大，引起熔断

设微网内部有三个电源点，三个负荷，采用终端负荷模型集的统一数学模型，如下：

$$p_i(t) = a_i t + b_i, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (2)$$

公式 (2) 是统一的模型。考虑图4所示运行方法，在 t_2 时刻，预测控制策略采用模型 M_1 获得了路由执行策略 C_1 ，与此同时， t_2 时刻的测量数据上传到路由系统，并计算另一种路由执行策略 F_1 ，一旦完成，即产生熔断请求。设计熔断机制如下：

$$\rho = \begin{cases} 1, & |C_1 - F_1| \geq \xi \\ 0, & |C_1 - F_1| < \xi \end{cases} \quad (3)$$

当路由策略 C_1 与 F_1 相差大于 ξ 时，将会有 F_1 取代 C_1 ；当路由策略 C_1 与 F_1 相差小于 ξ 时，继续执行 C_1 。在常规稳态时，预测

控制的测量较小, 不会发生熔断行为。显然地, 预测控制通过分析过去的运行规律, 提前给出了当前的路由控制策略, 满足了路由控制的实时暂态性要求。而基于测量数据获得的熔断策略则无误差地获得了路由策略, 满足了路由控制的精确性要求, 是否发生熔断行为可参照微网的整体性能要求。

对于公式(2)在图4给出的路由运行方式下, 一旦预测控制的偏差过大, 则会引起熔断行为, 过程的数学描述如下。

采用模型 M_1 获得 t_2 时刻的预测数据为:

$$p(t_2) = [p_1(t_2), p_2(t_2), p_3(t_2), p_4(t_2), p_5(t_2), p_6(t_2)] \quad (4)$$

设计预测控制方法, 获取路由执行方法:

$$p(t_2) \Rightarrow C(t_2) \quad (5)$$

获得的 $C(t_2)$ 在 t_2 时刻开始即被执行, 预计最长执行到 t_3 时刻。在 t_2 时刻, 测量装置实际测量数据为:

$$p^*(t_2) = [p_1^*(t_2), p_2^*(t_2), p_3^*(t_2), p_4^*(t_2), p_5^*(t_2), p_6^*(t_2)] \quad (6)$$

因此, 在 t_2 时刻, 路由系统启动基于实测数据的路由策略计算, 并获得如下路由执行方法:

$$p^*(t_2) \Rightarrow F(t_2) \quad (7)$$

$C(t_2)$ 与 $F(t_2)$ 之间的误差函数为:

$$\begin{cases} e_{p_i} = C_{p_i}(t_2) - F_{p_i}(t_2), i = 1, 2, \dots, 6 \\ E_{p_i} = \sum_{i=1}^6 e_{p_i} \end{cases} \quad (8)$$

熔断发生机制为:

$$\begin{cases} e_{p_i} \geq \xi, i = 1, 2, \dots, 6 \\ E_{p_i} \geq k\xi \end{cases} \quad (9)$$

熔断行为的产生, 说明模型的建立已不适应当前网络变化规律, 需完善模型如下。

$$p_i(t) = \eta a_i t + \lambda b_i \quad (10)$$

其中, η 和 λ 是修复系数。它表明, 原模型只需要小幅度调制即可。

4.4 情景3—微网结构变化, 引起熔断

微网结构的变化通常是功率装置的添加或退出。不论是电源点的增加或减少, 还是负荷的增加或减少, 都会使得微网系统产生较大规模的失衡。因此, 在这种状态下的熔断行为首先要保证微网稳定, 其次才是更精确的路由控制。

对于公式(2)组成的终端网络环境, 在图4给出的路由运行方式下, 熔断行为发生过程的数学描述如下:

设一个负荷突然接入微网, 造成功率需求瞬间增加, 终端网络模型变为:

$$p_i(t) = a_i t + b_i, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (11)$$

采用模型 M_1 获得的预测数据和预测控制仍为(4)和(5)。在 t_2 时刻, 测量装置实际测量数据为:

$$p^*(t_2) = [p_1^*(t_2), p_2^*(t_2), p_3^*(t_2), p_4^*(t_2), p_5^*(t_2), p_6^*(t_2), p_7^*(t_2)] \quad (12)$$

由于 $p_7^*(t_2)$ 的加入, 功率失衡较大。

路由系统首先针对 $p_7^*(t_2)$ 数据单独做出反应, 比如加大储能功率或增加接入储能装置。因此, 熔断行为的响应更为迅速。

$$p^*(t_2) \Rightarrow F^*(t_2) \quad (13)$$

$F^*(t_2)$ 作为实时路由策略,仅包含对储能的操作信息,对 $C(t_2)$ 做补充控制。对于终端网络复杂,接入装置数量多的微网而言, $F^*(t_2)$ 比全面的取代性熔断路由策略 $F(t_2)$ 具有更优的快速响应,保障微网稳定。

熔断行为发生后,终端网络模型将被重建,以适应结构已发生变化的微网。终端网络模型由(11)组成。

5 路由运行情景仿真

以一个10*10千米的微网为例,对网内分布的所有接入功率装置进行能量管理。假设在

区域内共分布有1600个功率装置,包括电源点、储能和负荷等。下图5至7给出了微网在情景2和3状态下的指令变化情况。

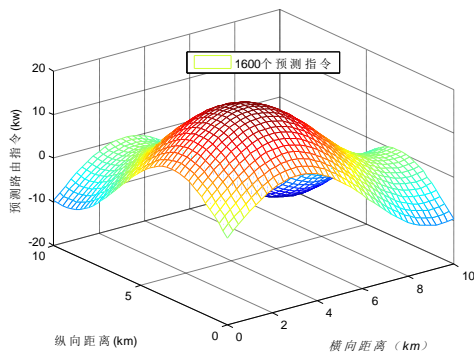


Fig.5 predicted routing instructions
图5 预测控制获得的路由指令分布

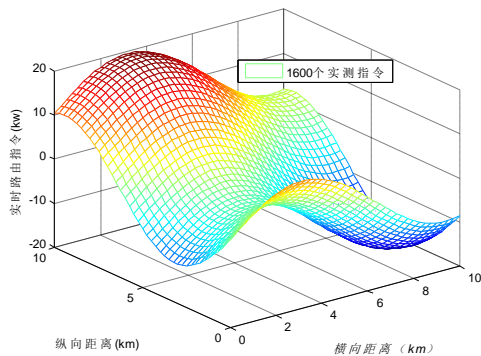


Fig.6 calculated routing instructions

图6 实测数据计算获得的路由指令

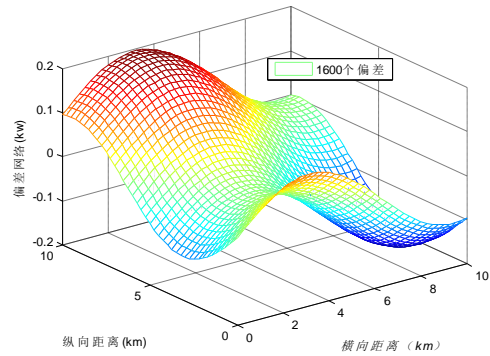


Fig.7 instruction's deviation in state2
图7 情景2状态下指令偏差数据

当图7给出的偏差在熔断机制运行的范围内时,微网将执行图5所示的预测路由指令。一旦超出误差范围,将执行图6所示的实时路由指令。

当微网的结构发生变化时,指令网络也会将发生熔断,图8给出了熔断后的指令网络。

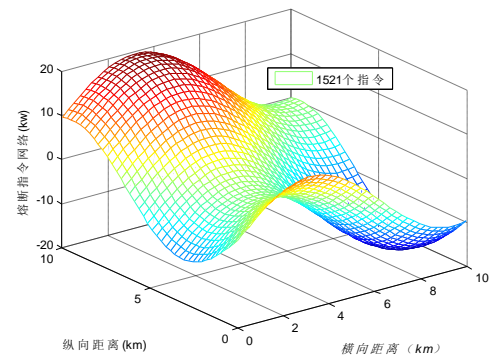


Fig.8 changed instruction network in state 3
图8 情景3状态下结构变化后的熔断指令网络

6 结论

能源路由系统是能源互联网运行的关键部分之一。本研究从全网角度,对能源路由的架构、运行机制及实现途径进行了系统的研究。能源路由两级架构、模型预测控制与实时数据驱动结合的熔断机制是这项研究的主要创新之处。分别地,在能源路由架构部分,划分了能源终端网络、微网和广域能源互联网三个能源网络层级,并提出了微网路由系统和广域能源路由系统的两级路

由结构,建立了网络模型。在熔断机制研究部分,给出了模型预测控制和熔断判断策略,实现了路由控制的实时性和精确性要求。

这项研究着重于能源路由系统的实现方法,所提出的途径仍有一些重要问题需要解决。比如,本研究提出的熔断方法适用于短周期的控制,在一个较短时间内,网络模型的建立、模型预测控制指令、数据驱动控制指令、熔断判断和执行都需要快速完成,这对系统的计算能力和电力电子器件的响应速度等产生了高的要求。又比如,由于安全运行的考虑,两级路由既需要独立运行,物理上隔离;又需要联合响应,控制上统一。加上网络内部接入的设备数量庞大,性能各异,这使得两级路由的统一运行复杂,工程实现任务艰巨。

参考文献

- [1] CI Song, LI Hongjia, CHEN Xin, et al. Crucial Support of Energy Internet: Exploration and Practice of Distributed Energy Storage Technology[J]. Science China Press: Information Science, 2014, 44(6): 762-773.
- [2] YU Yixin, QIN Chao. Expatriation on the Basic Ideas of Smart Grid[J]. Science China Press: Information Science, 2014, 44(6): 694-701.
- [3] Rifkin J. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World[M]. New York: Palgrave Macmillan, 2011.
- [4] CAO J, YANG M. Energy Internet-Towards Smart Grid 2.0[C]. Proc 4th Int Conf on Networking and Distributed Computing, Hongkong, China, 2013.
- [7] CAO Junwei, MENG Kun, WANG JiYe, et al. An energy internet and energy routers. SCIENCE CHINA Information Sciences, 2014, 44(6): 714-727.
- [8] CAO Junwei, YANG Mingbo, ZHANG Dehua, et al. Energy Internet: an Infrastructure for Cyber-Energy Integration. SOUTHERN POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2014, 8(4): 1-10.
- [9] ZHA YaBing, ZHANG Tao, HUANG Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. SCIENCE CHINA Information Sciences 2014, 44(6): 702-713.
- [10] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy

Internet [C]. Proc. the IEEE, 2011, 12, 17, Page: 133-148.

- [11] XU Y, ZHANG J H, WANG W Y, et al. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet [C]. Proc. 2011 IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, 2011: 31-36.
- [12] ZHANG Jianhua, SU Ling, CHEN Yong, et al. Energy Management of Microgrid and its Control Strategy[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 24-28.
- [13] LIU Dong, CHEN Yunhui, HUANG Yuhui, et al. Hierarchical Energy Management and Coordination Control of Active Distribution Network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5500-5506.
- [14] JIANG Yu, HUANG Min, MAO An, et al. Multi-objective Energy Management of Isolated Microgrid [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3519-3527.
- [15] ZHANG Tao, ZHANG Fuxing, ZHANG Ya. Study on Energy Management System of Energy Internet [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 146-155.

附中文参考文献:

- [1] 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(5): 1109-1126.
- [1] 慈松, 李宏佳, 陈鑫, 等. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 762-773.
- [2] 余贻鑫, 秦超. 智能电网基本理念阐释 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 694-701.
- [5] 刘振亚. 构建全球能源互联网走向人类可持续发展新时代 [N]. 国家电网报, 2016-04-01(001).
- [6] 刘振亚. 智能电网与第三次工业革命 [N]. 科技日报, 2012-12-05(1).
- [7] 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.
- [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] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析 [J]. 2014, 44(6): 702-713.
- [12] 张建华, 苏玲, 陈勇, 等. 微网的能量管理及其控制策略 [J]. 电网技术, 2011, 35(7): 24-28.
- [13] 刘东, 陈云辉, 黄玉辉, 等. 主动配电网的分层能

- 量管理与协调控制[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5500-5506.
- [14]江 渝,黄 敏,毛 安,等.孤立微网的多目标能量管理[J].高电压技术,2014,40(11):3519-3527.
- [15]张涛,张福兴,张彦.面向能源互联网的能源管理系统研究[J].电网技术,2016,40(1):146-155.