

基于链式路由网络的能源接入管理策略研究

任 光¹ 杨 刚¹ 华昊辰¹ 杨 方² 白翠粉² 邱忠涛² 曹军威¹

¹(清华大学信息技术研究院 北京 100083)

²(国网能源研究院 北京 102219)

(renguang@tsinghua.edu.cn)

The Energy Access Administration Research Based on a Linkage Routing Network

Ren Guang¹, Yang Gang¹, Hua Haochen¹, Yang Fang², Bai Cuifen², Qiu Zhongtao², and Cao Junwei¹

¹(Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100083)

²(State Grid Energy Research Institute, Beijing 102219)

Abstract Aiming at the application requirement of the energy router in the energy Internet demonstration projects, this paper proposes one type of chain routing network and an edge diffusion way, thus it can solve the energy management issue in the user’s level in the demonstration projects. Firstly, based on introducing a single energy router, a chain routing network which consists of several energy routers is designed, and completes the regional division for the whole demonstration project. Then the edge diffusion strategy is given, in which a single energy router is regarded as a decision center, which can realize the power balance by passing the power’s imbalance to an adjacent energy router, until the external low-voltage grids. Finally, a communication network and an application scenario are respectively illustrated, so the feasibility of the chain routing network in the demonstration projects can be shown preliminarily.

Key words energy Internet; energy router; demonstration project; power management; linkage routing

摘 要 针对能源路由器在能源互联网示范工程中的应用需求,提出了链式路由网络结构以及基于边缘扩散的路由控制实现策略,初步解决了示范工程内部用户级的能量管理问题。1)在介绍单能源路由器的基础上,设计了由多个能源路由器链接组成的链式路由网络,实现了能量的区块化划分;2)给出了边缘扩散策略。以链式网络内的个体路由器为决策中心,把功率不平衡性传递到临近的路由器,最终由链式网络最外缘的低压电网消除功率失衡,从而实现自身的功率平衡;3)对通信支撑网络和应用场景进行了分析,初步说明了链式路由网络在示范工程中的实际可行性。

关键词 能源互联网;能源路由器;示范工程;能量管理;链式路由

中图法分类号 TM711

实现低碳、绿色能源消费是能源领域的目标之一,当前,世界各国特别是发达国家都在开展降低碳排放、提高能效的能源改革,能源互联网被认为是实

现这一目标的有效途径。里夫金在《第三次工业革命》中分析了能源互联网远景,它给人们带来了绿色、低碳、高效与共享的新理念^[1]。

能源路由器与能源互联网密切相关,它是能源互联网架构下的新一代能源管理装置与系统,也被视为能源互联网高级发展阶段的核心部分^[2].很多科学家已经开始了能源路由器的探索研究.美国科学家首先提出了能源路由器的概念,2008年,美国国家科学基金项目“未来可再生电力能源传输与管理系统”(The future renewable electric energy delivery and management system, FREEDM system)^[3-4],研究了一种构建在可再生能源发电和分布式储能装置基础上的新型电网结构,称之为能源互联网.其中,美国科学家效仿信息领域网络技术的核心路由器,提出了能源路由器概念并进行了原型机实现研究^[5].同一年,瑞士联邦理工学院研究团队开发了“Energy Hub”,并称之为能量集线器^[6-9].该集线器是由计算机科学中集线器的概念引申而来,也叫能量控制中心.2013年,日本科学家提出了“电力路由器”的概念.他们研制的数字电网络路由器,可以统筹管理一定范围地区的电力,并可通过电力路由器调度地区电力^[10].美国北卡罗来纳州立大学的科学家针对智能电网中电源侧与需求侧的能量管理,研究了能源路由器的架构建设和通信性能,包含了电力电子、通信和电网智能^[2].

在国内,盛万兴等人研究了一种基于虚拟电机控制的能源路由器^[11].其电路拓扑和运行控制与可再生能源接纳、灵活电力变换息息相关.不同于传统基于固态变压器的能源路由器,他提出一种交直流混合、工频隔离、交直流模块化的能源路由器电路,并在此基础上提出了基于虚拟电机理论的控制策略.林川等人针对在以“能源路由器”为基础、以“微电网”为结构单元的能源互联网中,存在大规模、频繁的能量与信息转移传输现象,即能量信息流的“路由”问题,提出了3种路由策略,分别是基于边权的路由策略、基于网络邻节点负载的路由策略和联合路由策略,解决3种考虑不同因素下的能量信息流路由问题^[12].曹军威等人探讨了以能源路由器为核心交换装置的能源互联网实现模型,全面阐述能源路由器的实现目标、关键技术等^[13].清华大学、中国科学家电工研究所等国内研究机构都设计出不同的能源路由器实验装置^[14-15].

2015年,能源互联网理论在中国科技界和产业界出现了快速推广的局面.众多能源互联网研究机构和产业联盟相继发起成立,如2015年4月14日清华大学能源互联网创新研究院在北京成立、2015年6月16日中国能源互联网产业技术联盟在北京

中关村成立等,这些机构都旨在推动能源互联网在中国的发展.2015年,也是中国能源互联网示范工程的种子年.在全国范围内,相继出现了针对不同应用场景的能源互联微网示范工程大型筹备项目.工程模式包括:热电联产模式、风光储互补模式、光伏直供模式、工业园区自治系统等.中国国家能源局重视能源互联网产业,积极推进微网示范工程,为能源互联网理论与技术在中国的产业化发展提供了机遇.

能源互联网示范工程需要合适的能源路由网络.本文针对示范工程应用需要,对能源路由网络及其能源管理实现方面进行了研究.分别提出了链式路由网络和针对该网络的边缘扩散策略,研究了能源互联网架构下用户级的能量管理实现策略.

1 低压电网中能源路由系统

1.1 单能源路由器结构与功能

图1给出了单个能源路由器单机结构图.其中,380 V交流连接外部电网,本地接入设备包括新能源电站和负载2类;能源路由器母线电压为低压直流,所有本地接入都通过标准接口连接到母线;储能接口连接智能储能装置,主要用于平抑直流母线的电压跌落和闪变.

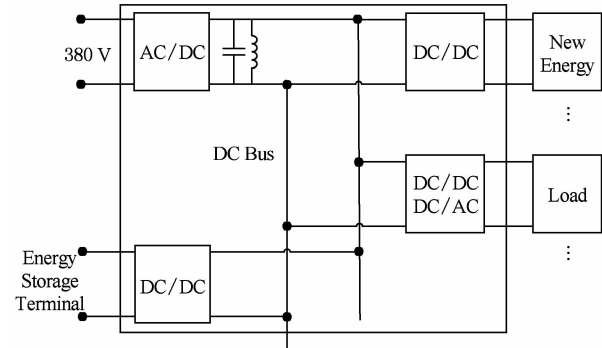


Fig. 1 The structure of a low voltage energy router
图1 低压能源路由器单机结构

1.2 能源路由应用场景的网络化需求

1) 区位场景分析

一般地,能源路由器在能源互联网中的物理分布中,既可以在广域网络层级,也可以在局域微网层级,或者微网内部的一个有限区域即终端网络中.图2给出了能源路由网络的区位图解.

图2中的网络即为以链式结构连接而成的中小规模配电网.其中,每一个能源终端网络在物理上可左右接入2个能源路由器,在运行时只能与一个

能源路由器发生能量传递. 多个终端网络共同形成一个链式能源路由器网络;而这个能源路由器网络

和能源终端网络则构成了微网,即配电网. 而微网通过广域能源路由系统可连接到广域能源互联网.

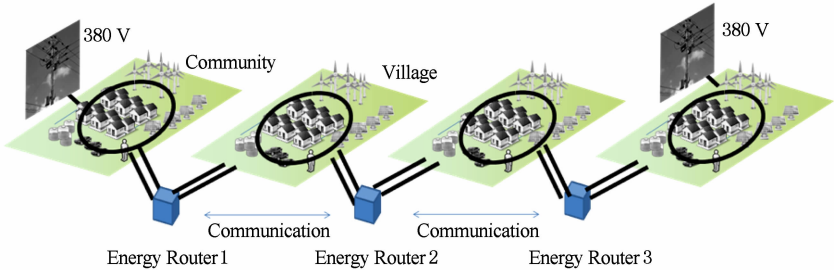


Fig. 2 The linkage scene of energy Internet of microgrid
图2 能源互联微网链式空间情景

- 2) 用户需求侧对配网的要求
- 当分布式新能源被纳入能源互联网示范工程范围时,在能源的生产和消费过程中,具有 4 项需求特点:
- ① 分布式新能源既是生产者,也是消费者,而且应尽量自产自消;
 - ② 尽可能提高新能源的使用比例;
 - ③ 尽可能减少能量远距离传递,降低损耗和能源设施建设投资;
 - ④ 基本的能量交易行为可在人际交往可以达到的范围内进行,且开放自由.

综合上述特点,需要把能源互联网示范工程在空间上进一步区块化,增强分布式新能源的本地消纳能力、提高使用比例、减少输送距离和灵活交易机制.

从控制系统实现能力角度,采用一个能源路由器可以实现在较小距离内的能量管理. 比如一个小区或一个村庄可共用一个能源路由器,实现该区域内部的新能源生产和消纳. 当该区域内无法实现能

量平衡时,临近的小区或村庄可通过能源路由器互联起来形成路由器网络,实现能量在更大范围互联共享. 这样,一张能源路由器互联网络就构成了能源互联网示范工程能量管理的信息物理单元.

1.3 链式能源路由网络

图 3 给出了一种链式能源路由网络结构. 其中,每一个能源路由器把相邻小区或村庄的电源与负荷连接起来,先在路由器内部自产自用,尽量实现平衡. 当有能量剩余或不足时,可从临近的小区或村庄购得电量,其物理实现过程表现为对临近能源路由器的路劲切换管理.

在图 3 中,每一个小区或村庄的电源和负载都可被连接到 2 个路由器,且只能选择一边工作在运行状态. 一共有 3 个小区或村庄被 4 个能源路由器链接起来,所以最多可以实现 3 个区域的能量传递与共享. 网络两边边缘侧的能源路由器接入外部 380 V 配电网和储能设备,作为更进一步的能量调节备用.

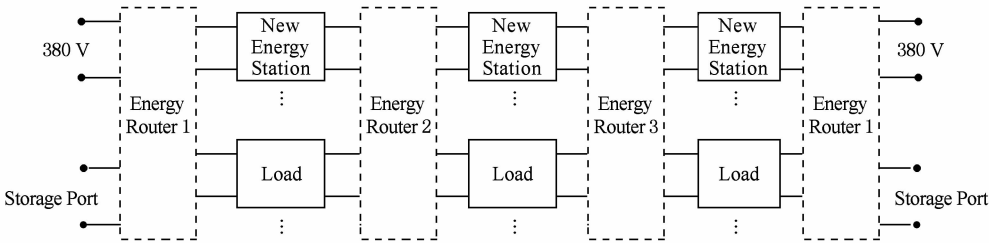


Fig. 3 The linkage energy routing network
图3 链式能源路由网络

2 基于边缘扩散的路由策略

链式能源路由网络规划具有自然约束条件,其能量管理与路由控制策略需紧密结合应用环境的要求,在规划建设时须充分考虑,可从网络规划、路

由策略、信息支持和应用可行性 4 个角度分析路由网络.

2.1 接入规划与梯级分类

以小区或村庄为示例单位,规划一个以能源路由器为中心的能量管理系统. 需要考虑 4 点因素:

- 1) 采用投切为主要调节手段,接入的电源和

负荷在功率等级上需具有差异化,且呈现顺序递增或下降特点.

2) 能源路由器工作在低压状态,接线距离不宜太长,比如 1~2 km 以内.

3) 接入电源和负荷的总数量需在控制系统接入能力和指令通道数量范围之内;也不宜太少,以免成本过高,经济性差.

4) 单个能源路由器完全自动调节,无需人工参与;而能源路由网络则需一个人工干预平台.

我们把所有功率设备按照从小到大的顺序排列,把一个功率设备的功率大小视为一个随机变量.理想模型是若随机变量有 n 个不同数值,每个数值具有相同的出现概率,那么我们可以将其近似看作是一个离散时间的均匀分布(discrete time uniform distribution).其数学模型可以描述如下:

设离散随机变量 x ,其可能变量有 $1,2,\cdots,n$,即 $x=1,2,\cdots,n$,若其概率函数为

$$p(x,n)=\frac{1}{n}, \tag{1}$$

它的期望值为

$$E(X)=\frac{n+1}{2}, \tag{2}$$

方差为

$$Var(X)=\frac{n^2-1}{12}. \tag{3}$$

在能源互联网场景中,根据上述离散均匀分布的梯次规划原则,设它们的额定功率分布是以 1 kW 为间隔,依次从 1~100 kW.功率设备的梯次分布特点,使得能源路由器通过投切操作,可基本实现能量平衡.

2.2 基于功率精度指标的边缘扩散策略

设图 3 中能源路由器 2 应用于某个村庄,共接入 100 路电源和 100 路负荷.其中,有 50 路电源和 50 路负荷同时连接到能源路由器 1、有 50 路电源和 50 路负荷同时连接到能源路由器 2.根据梯次规划原则,它们的额定功率分布以 1 kW 为间隔从 1 kW~100 kW,即能源路由器的最大总功率是 5 050 kW.

首先能源路由器 2 需要对这 200 路功率设备进行即时功率管理.设随机退出能源路由器 2 的负荷是 39 kW,那么能源路由器 2 将主动切断 39 kW 的电源.为了不浪费电能,被切断的 39 kW 电源将被接入临近的能源路由器,假定接入能源路由器 1.由于能源路由器 1 的电源增加,它要么把 39 kW 馈入电网,要么存入储能,或者增加能源路由器的负荷需求.

同理,当一个负荷为 39 kW 的负荷随机接入能源路由器 2 时,由于能量不足,能源路由器将计算最

佳的电源组合,如 2 kW 和 37 kW,可发出信号,强制把已接入其它能源路由器的 2 路电源转接到能源路由器 2.比如从能源路由器 1 强制切换过来,此时,能源路由器 1 需增加自身的电源供应,可以从外部电网获取,也可以来自储能或备用发动机.

上述 2 类情形的共同特点是:以能源路由器的功率精度为主要因素,强制接入或退出功率设备,它的不利影响是增加了切换频率和控制的难度.

当一个负荷数值为 α kW($0<\alpha<100$)的负荷随机接入某能源路由器时,记此能源路由器为 x ,该能源路由器将强制从临近的某一个能源路由器,记为能源路由器 y 端,找到数值接近于 α 的电源组合.该电源组合可能由仅仅 1 个或者 2 个、甚至 3 个或更多的单独电源组合而成.根据 2.1 节描述的关于电源分布的模型,即近似于离散均匀分布模式,所需电源组合将在能源路由器 y 中均匀分布的各个电源中寻找.可以看出,此电源组合的每个元素额定功率数值必定是小于或等于 α .换言之,需要选取的组合元素取值在 $(0,\alpha]$ 的范围内.根据能源路由器 y 中电源端呈近似离线均匀分布的特征,我们假设在 $(0,\alpha]$ 的范围内,存在数值为 $\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n$ 的 n 个电源组合,另外此序列满足条件:

$$0<\alpha_1<\alpha_2<\cdots<\alpha_n<\alpha. \tag{4}$$

理论上,我们需要在 $\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n$ 中选取一种组合,它可以由一个或多个电源叠加而成.根据排列组合原理,理论上我们将有 δ 种组合方式:

$$\delta\triangleq\binom{n}{1}+\binom{n}{2}+\cdots+\binom{n}{n}. \tag{5}$$

对于其中任意一项 $\binom{n}{i}, i\in\{1,2,\cdots,n\}$,我们定义:

$$\binom{n}{i}\triangleq\frac{n!}{(n-i)!i!}. \tag{6}$$

而事实上,需要获取的是一个累计功率值最接近 α 的电源组合.为了更好地描述这样一个高精度的目标,我们提出一个称为精度百分比的定义,即针对任意一个电源组合 $\tau_j, j\in\{1,2,\cdots,\delta\}$,可计算出 $\frac{|\tau_j-\alpha|}{\gamma}$ 的数值,这里 γ 代表额定功率.我们提出目标函数为

$$\min\left\{\frac{|\tau_1-\alpha|}{\gamma},\frac{|\tau_2-\alpha|}{\gamma},\cdots,\frac{|\tau_\delta-\alpha|}{\gamma}\right\}. \tag{7}$$

通过计算得到最优解,记为 $\frac{|\tau_j^*-\alpha|}{\gamma}$,即得到理想最优组合为 τ_j^* .

以上陈述了一个理想的模型,考虑到电气与控制设备的支撑能力,我们所选取的最佳电源组合,其组成数量一般不宜超过 3 个。

实践中,在能源路由器 y 中我们有可能直接找到一个数值与 α 非常接近的单个电源,这个概率可能比较小,那么我们首先寻找在能源路由器 y 中的所有单个电源,计算它们的精度百分比,如果数值小于 2%,则可以认定这个选取的电源适接入。在这种情况下就没有必要再去找由 2 个甚至 3 个电源累计而成的组合。如果接入所有单个电源计算所得精度百分比均无法满足小于 2%,则我们需要进一步考虑选取 2 个电源组合的形势。此时,根据上述理论模型以及运算法则,计算出相应精度百分比。如果其数值小于 2%,则可以认定这个选取的电源组合适接入;否则,我们不得不考虑选取由 3 个电源组合而成的情况,计算方式同上。

上述情景中,能源路由器 Router1 由于接入了负荷导致不平衡,Router1 立刻通过从 Router2 引入电源达到其自身平衡。这样一来,能源路由器 Router2 的电源负荷不再平衡。我们概括地描述这个过程为:Router1 将它自身的不平衡传递给了 Router2。由于 Router2 还与能源路由器 Router3 相连,相似地,Router2 也会将它自身的不平衡传递给了 Router3,其方式类似于上述模型。以此类推,直到终端能源路由器 Router m 。最后,Router m 为了寻求平衡,它将向大电网或主干网寻求电源供应。这个过程表达了能源互联网中链式能源路由器间一次传递不平衡性以求达到自身平衡的特点。

2.3 信息支撑网络

链式能源路由器网络具有鲜明的智能特征,除了需具备先进的控制能力和电力电子器件执行能力外,还需要高效稳定的数据分析和传输能力。匹配于上述路由网络结构,可设计 3 类不同特点的信息支撑网络:

第 1 类是集中式信息网络情形,如图 4(a)所示。这种情形需建设一个独立的数据中心,它同时具有必要的数据分析和学习能力。路由网络的所有路由器都与数据中心产生数据交换,路由器之间不建立直接通信。这样的通信网络对链式路由网络整体管控能力较好,但响应延时较多。

第 2 类是图 4(b)给出的扁平式信息网络情形。相邻的路由器之间可直接通信,使得信息响应速度较快,切换响应快。但是,由于路由器只能获得临近的路由器运行信息,所有信息仅有助于协调本地路由器的能量平衡性,这使得能量失衡可能向周边传

递,加大周边的不平衡性。

第 3 类是图 4(c)给出的协同式信息网络情形。它把集中式和扁平式组合起来,一方面数据中心会做出分析,并给出网络协同建议;另一方面最终的调整策略仍由路由器给出。这样每一个路由器既可以调整自身,又可以兼顾远处的路由器调节能力,优势明显,不足之处是增加了设备建设和运维成本。

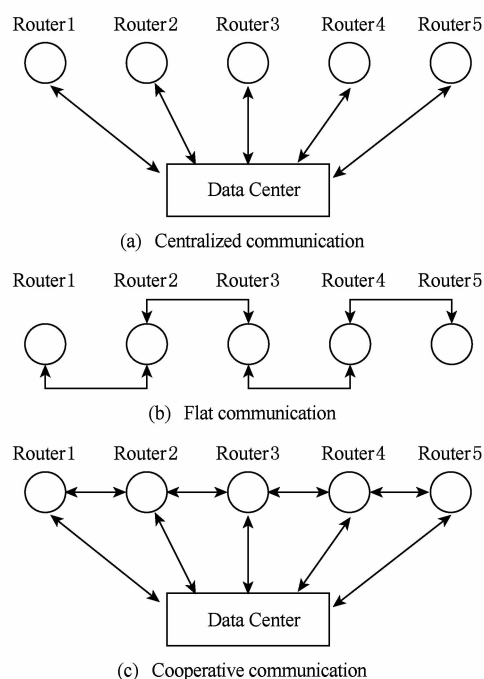


Fig. 4 The information support network of the linkage energy routing network

图 4 匹配于链式能源路由网络的信息支持网络结构

在能源互联网示范工程中,具体采用哪一种通信网络与网络规划有关,特别是路由器的功率设备接入状况。一般地,接入设备的功率分布均匀,可采用扁平式通信;反之,适宜集中式或协同式通信。

2.4 应用分析

以建设能源互联微网示范工程为例,其能源交易需具备如下特点:电源和负荷的接入自由、微网统一交易平台、能量双向流动和本地消纳、新能源比重稳步提高等。从用户角度来说,不论居民还是企业,他们存在如下现实需求:尽量自产自销、可临近交易、价格低廉甚至免费、供电稳定等。为了实现上述需求,可在链式路由网络的基础上规划微网系统。除了微网层级的统一交易和集中调度平台外,还需向下一级建设用户级的低压终端路由网络,并由用户级低压路由电网组合构成微网示范工程。从能源路由结构看,即包括底层的链式能源路由网络和上层微网路由器 2 级。

3 仿真分析

采用3个能源路由器串联的网络来验证链式配电策略的有效性. 其中,能源路由器1只与能源路由器2连接,能源路由器2同时连接能源路由器3,能源路由器3同时连接外部交流电网. 每个能源路由器上接入的负荷和电源指标如表1所示,负荷和电源的功率值在一定范围内随机产生,并保证每个能源路由器总负荷功率与电源功率相同.

对能源路由器的功率平衡管理而言,负载接入与电源退出、负载退出与电源接入效果相同. 故从3个方面进行验证,分别是:

- 1) 有负荷退出时,电源的串联式边缘扩散情形;
- 2) 有负荷接入时,电源的串联式边缘扩散情形;
- 3) 负荷先退出与接入连续动作的情形.

Table 1 Access Devices Setting

表1 接入设备设置

λ	Router1	Router2	Router3
Load Quantity	40	30	30
Power Range/kW	[5,50]	[5,50]	[5,50]
Supply Quantity	10	10	10
Power Range/kW	[20,150]	[20,150]	[20,150]

图5(a)表述了有负荷退出时能源路由器1,2,3上所接入的负荷功率、电源功率的差值. 初始状态

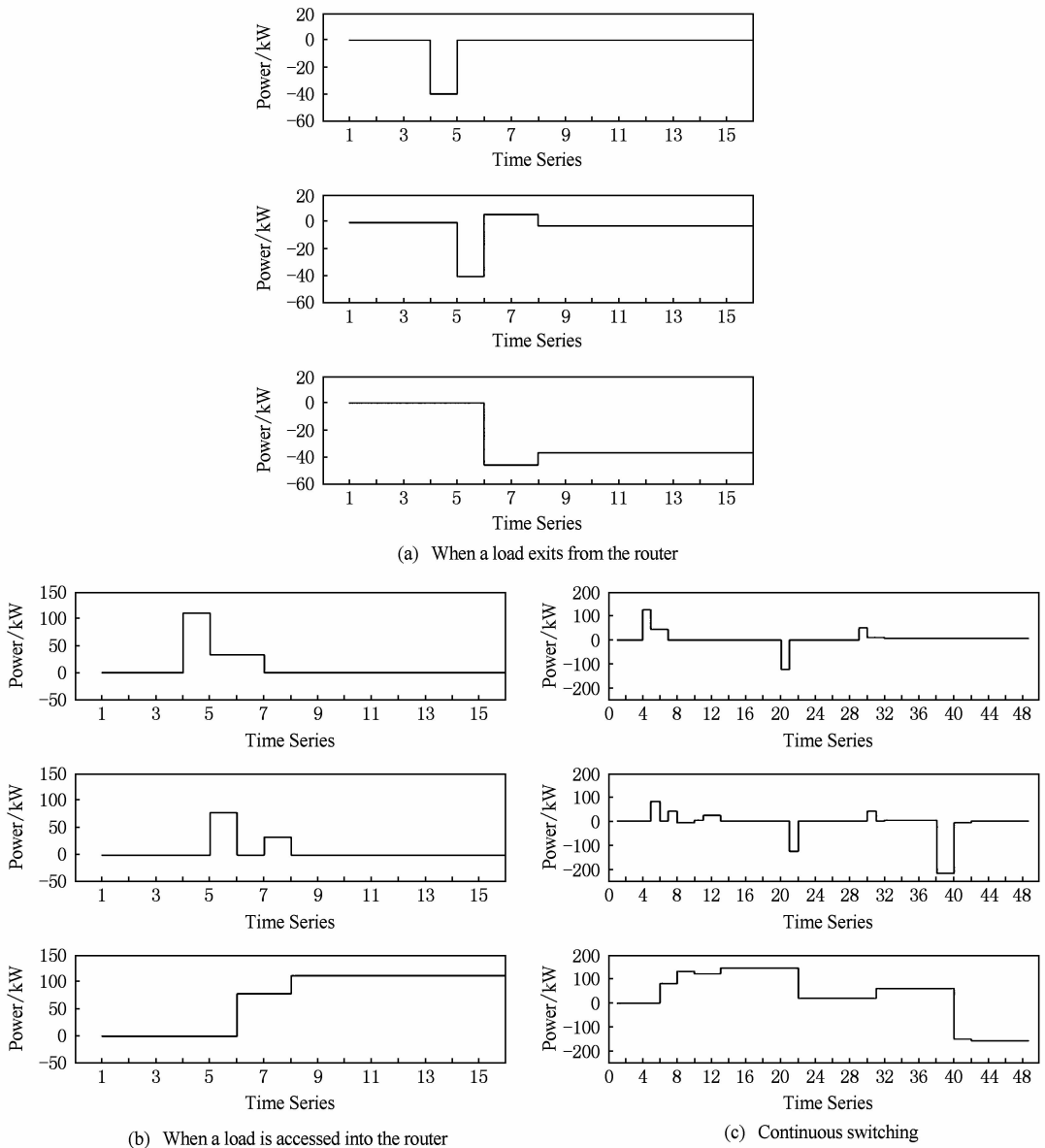


Fig. 5 The spreading course of power's imbalance

图5 功率不平衡扩散过程

下,3个能源路由器的负荷功率与电源功率差为0;时序4时刻能源路由器1上负荷退出导致功率不平衡,这个不平衡性在时序5转移给能源路由器2,并在时序6传递给能源路由器3.能源路由器3的不平衡需要由交流电网来填补.

需要注意的是,能源路由器1,2在新稳态下其接入的负荷功率依然略小于电源功率.不平衡产生的原因是负载功率和电源功率并不是连续分布,在功率扩散过程中无法找到完全匹配的功率组合.此时微小的功率差由储能部件消除.

图5(b)给出了负荷接入时能源路由器1,2,3的功率平衡性变化过程.初始状态下,3个能源路由器负荷功率与电源功率差为0;在时序4时刻,能源路由器1上新负荷接入导致功率不平衡,这个不平衡性在时序5转移给能源路由器2,并在时序6传递给能源路由器3.但此时能源路由器1,2的功率仍是不平衡的,所以在7~10过程中再次进行了调整使得最终达到了功率平衡.经过了2次平衡的原因是挑选调整的负载/电源组合时其组成数量不超过3个,导致经过第1次调整只达到次优解,需要更多次的调整才能达到最优解.

图5(c)针对负荷接入与退出连续发生的情况,进行了多事件仿真,事件类型和发生时间如表2所示:

Table 2 Continuous Switching Events
表2 连续切换事件

Time Series	Incident Type
4	New load is accessed into router1
10	New load is accessed into router2
20	Load exists from router1
29	New load is accessed into rouer1
38	Load exists from router2

连续切换给出了长时间运行、多事件发生的有序切换,结果显示:通过边缘扩散策略,功率不平衡最终都累积到了能源路由器3.

4 总 结

本文针对能源互联网示范工程的配电网组网需求,深入研究了基于能源路由器的链式策略.主要包括2个方面的贡献:1)提出了链式路由网络架构,它把所有能源用户划分为多个区块,通过一定数量的路由器链接起来,从而进行有序的能量管理;2)提出了边缘扩散策略,实现对能源路由器的设备切换管

理.它既有助于本地消纳、自产自消、交易自由,又可减少投资、降低损耗.当上述策略应用于工程时,需依据用能场景具体规划研究,特别地,在数据通信方法、接入380 V电网方式和设备切换技术等方面仍需深入研究.

参 考 文 献

[1] Rifkin J. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World [M]. New York: Palgrave Macmillan, 2011

[2] Bifaretti S, Zanchetta P, Watson A, et al. Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management [J]. IEEE Trans Smart Grid, 2011, 2(2): 231-243

[3] Huang A Q. FREEDM system-A vision for the future grid [C] //Proc of IEEE Power and Energy Society General Meeting. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2010: 1-4

[4] 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]. Proceedings of the IEEE, 2011, 12(17): 133-148

[5] Xu Y, Zhang J H, Wang W Y, et al. Energy router: Architectures and functionalities toward energy Internet [C] //Proc of 2011 IEEE Int Conf on Smart Grid Communications. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2011: 31-36

[6] Perrod P F, Geidl M, Klokl B, et al. A vision of future energy networks [C] //Proc of 2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conf and Exposition in Africa. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2005:13-17

[7] Geidl M, Klokl B, Koeppl G, et al. Energy hubs for the futures [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30

[8] Ghasemi A, Hojiat M, Javidi M H. Introducing a new framework for management of future distribution networks using potentials of energy hubs [C] //Proc of the 2nd Iranian Conf on Smart Grids. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2012: 1-7

[9] Schulze M, Friedrich L, Gautschi M. Modeling and optimization of renewable: Applying the energy hub approach [C] //Proc of 2008 IEEE Int Conf on Sustainable Energy Technologies. New York: IEEE Computer Society, 2008: 83-88

[10] Boyd J. An Internet-inspired electricity grid [J]. IEEE Spectrum, 2013, 50(1):12-14

[11] Sheng Wanxing, Liu Haitao, Zeng Zheng. An energy hub based on virtual-machine control [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3541-3550 (in Chinese)

(盛万兴, 刘海涛, 曾正, 等. 一种基于虚拟电机控制的能源路由器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3541-3550)

[12] Lin Chuan, Zhao Hai, Liu Xiao. Research on routing strategy for inter grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 37-44 (in Chinese) (林川, 赵海, 刘晓, 等. 能源互联路由策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 37-44)

[13] Cao Junwei, Meng Kun, Wang Jiye, et al. An energy Internet and energy routers [J]. SCIENCE CHINA Information Sciences, 2014, 44(6):714-727 (in Chinese) (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)

[14] Liu Yinpeng, Li Bing, Yang Kaixin. One kind of energy router; China, CN201210261558.6 [P]. 2012-11-14 (in Chinese) (刘迎澍, 李冰, 杨凯新. 一种电能路由器: 中国, CN201210261558.6 [P]. 2012-11-14)

[15] Duan Qing, Sheng Wanxing, Meng Xiaoli. A energy router based on the cyber-physical system; China, CN201410236502.4 [P]. 2014-08-06 (in Chinese) (段青, 盛万兴, 孟晓丽, 等. 一种基于信息物理系统融合的能源路由器: 中国, CN201410236502.4 [P]. 2014-08-06)



Ren Guang, born in 1979. PhD, post-doctoral researcher. His main research interests include smart grid, energy Internet and energy router.



Yang Gang, born in 1990. BSc. His main research interests include dc micro-grid, deep learning and reinforcement learning.



Hua Haochen, born in 1988. PhD, post-doctoral researcher. His main research interests include stochastic control, robust control, H-infinity control, time-delay systems, nonlinear systems, multi-dimensional systems, smart grid, and energy Internet.



Yang Fang, born in 1981. PhD, senior engineer. Her main research interests include large power grid security control, smart grid, energy economy, strategic planning.



Bai Cuifen, born in 1986. PhD, engineer. Her main research interests include smart grid strategic planning, energy economy.



Qiu Zhongtao, born in 1975. Senior engineer. Vice president of State Grid Energy Research Institute. His main research interests include energy economic policy, energy strategy analysis, enterprise strategy and operation management.



Cao Junwei, born in 1973. Researcher. Vice dean of Research Institute of Information Technology, Tsinghua University. His main research interests include smart grid, energy Internet and big data technology.