

区域能源互联网信息物理建模及控制策略

陈娟¹, 黄元生¹, 鲁斌²

(1. 华北电力大学 经济管理系, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 计算机系, 河北 保定 071003)

摘要: 大力发展低碳经济是解决能源危机、环境污染、温室效应等问题的有效途径之一。在分析区域分布式能源系统一般结构的基础上, 提出冷热电联供下基于多智能体系统的区域能源互联网架构模型。结合元胞自动机理论, 给出考虑冷热电协同控制的能源路由器设计方案。提出一种集中分散相融合的分布式协调控制策略。仿真算例验证了所提模型和控制策略的有效性。

关键词: 低碳经济; 分布式能源; 能源互联网; 多智能体系统; 元胞自动机

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.001

0 引言

化石能源储量的日趋减少、环境污染、温室效应等问题对节能减排提出了更高的要求, 亟需大力发展低碳经济, 实现社会活动全过程的能源消费低碳化甚至零碳化, 做好低碳区域能源规划工作是解决这些问题的关键。

区域分布式能源系统 RDES (Regional Distributed Energy System) 的构建是能源规划的核心内容, 其以有利于多能互补利用、系统运行时间长、规模化经济效益显著等优势逐渐成为推动低碳经济快速发展的重要手段之一。与传统意义上的区域供冷供热系统相比, RDES 具有供能强度低、供能不稳定、供能效率低、供能品位低、资源分布不均等缺点, 这些都给低碳能源的充分利用带来了不少的障碍。然而, 随着可再生能源与信息技术的快速发展, 能源互联网 (energy internet)^[1-2] 的出现为克服上述不足提供了一种有效措施, 为分布式能源的高效利用与全面推广带来了新的曙光。文献[3]指出, 以能源互联网为核心的第三次工业革命将给人类社会的经济发展模式与生活方式带来深远影响。

由于能源领域的变革对于工业与社会发展具有决定性影响, 一些主要发达国家的政府已开始关注和重点推动能源互联网的发展。德国率先提出了“E-Energy”计划, 力图打造新型能源网络, 在整个能源供应体系中实现数字化互联及计算机控制和监测^[4]。美国国家科学基金会支持建立了 FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management) 研究中心, 目的是研发可以实现分布式

设备即插即用的下一代电力系统, 并以此作为能源互联网的原型^[1]。在广域分布式设备的协调与控制方面, 文献[1]指出能源互联网的关键技术之一就是发展支持分布式发电、储能、可控负荷等设备即插即用的标准接口, 并提出了固态变压器的概念, 利用其可以将低压配网与上游网络分隔开来, 减小上游网络的电压和频率波动对分布式设备的影响, 提高系统的兼容性和灵活性。在电力系统与天然气网络的融合方面, 文献[5]提出了能源中心的概念, 以此作为未来集成电力、天然气及其他能源形式的多能源网络系统的建模工具, 并且初步研究了气电网络的协调运行问题, 建立了能源中心最优调度、多能源网络最优潮流等基本模型。在电力系统与交通系统的融合方面, 文献[6]对充电设施与电力系统协调规划问题做了探索性的研究。文献[7]引入了基于用户平衡的交通配流模型对交通流量进行计算, 并在此基础上以截获的交通流量最大、配电系统网损以及节点电压偏移最小为目标, 建立了电动汽车充电站规划的多目标优化模型。文献[8]在分析比较了智能电网与能源互联网联系和区别的基础上, 给出了能源互联网的基本架构和组成, 指出了能源互联网的研究框架与核心技术。文献[9]则就能源互联网的设计、实现、运行和管理中所面临的新问题, 对实现能源互联网的关键技术进行了分析和探讨。可以看出, 关于能源互联网的研究刚刚兴起, 成果多处于初期探索阶段, 还有诸多问题亟待研究和解决, 尤其是在与供冷供热网络的融合研究方面, 相应成果尚未见报道。

本文在分析了 RDES 一般结构的基础上, 提出了冷热电联供下的基于多智能体系统 MAS (Multi Agent System) 的区域能源互联网架构模型, 为 RDES 的部署构建了系统框架和组织结构; 分析了 Agent 的构造和交互机制, 结合元胞自动机 CA (Cellular Automata) 理论给出了考虑冷热电协同控制的能源路由器的结构功能及元胞实现方案, 为

收稿日期: 2016-03-04; 修回日期: 2016-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71471061); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (13MS111); 河北省软科学研究基地资助 (研究) 项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (71471061), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (13MS111) and the Soft Science Research Bases in Hebei Province

RDES 关键组件的实现提供了设计思路;提出了一种集中分散相融合的分布式协调控制策略,有助于 RDES 实现可靠且最优的运行。这三者有机结合,模型是框架结构,能源路由器是关键组件,控制策略则扮演着框架范围内依托组件实现有效运转的角色,并通过仿真算例验证了其有效性,从而为低碳区域能源规划提供了一种具体方法,是能源互联网技术在这方面的一次具体实践。

1 RDES 的一般结构

RDES 将小规模(几千瓦至数万千瓦)的能源生产系统以分散的方式配置在一定区域内的用户端附近,按照各用户不同的用能特点,定制式地满足用户对冷、热、电的需求,实现了资源的多元化和能源转化利用技术的多元化,以充分利用天然气等清洁能源和当地的各种可再生能源(地热能、太阳能、风能、生物质能、水能等),避免了传统的大机组、大电厂、大电网带来的能源生产和长距离传输损失,在更大范围内以能源联供代替各种分供方式,成为节能减排最有效的途径之一。

RDES 通常由 4 个模块构成,即一次能源供应模块、能源转换模块、储能模块和终端用户模块,其一般结构如图 1 所示。一次能源供应模块包括天然气和各种可再生能源;能源转换模块包括能源站、换热站、集热器、热泵、散热器等,本文仅以冷、热、电这 3 种最为主要的二次能源形式作为转换对象进行讨论;储能模块则包括储冷、储热和储电;终端用户模块则包括多个负荷区。具体应用时应根据当地用户负荷的特点,从可利用的一次能源供应出发,搭建符合实际的系统模型。

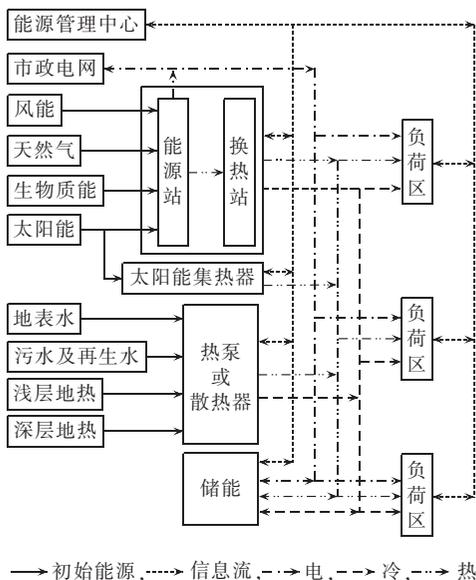


图 1 区域分布式能源系统的一般结构

Fig.1 General structure of RDES

2 区域能源互联网的信息物理建模

能源互联网的提出为解决 RDES 存在的不足指明了方向,它将分布式能源所产生的冷、热、电通过微电网和供冷供热网络实现电力和热力的互联互通,并且支持大规模分布式电源的接入,支持大规模氢储能及其他储能设备的接入,利用互联网技术改造电力系统。

建立能源互联网的最终目的是协调广域内的海量能量生产与消耗设备,信息在各种设备之间有效的双向传递是实现协调的基础。物理系统的各种调度与控制功能对于信息系统的依赖不断加深,对于信息质量的完整性、准确性和及时性提出了更高的要求,即在能源互联网中信息系统与物理系统同样重要。

2.1 基于 MAS 的信息物理融合模型

对能源互联网内信息与物理系统之间的交互研究需要研究信息系统与物理系统的统一建模方法,简称为信息物理建模(cyber physical modeling)。文献[10-12]对电力系统的信息物理建模做了初步探讨,然而在能源互联网领域的信息物理建模研究还较为鲜见。

区域能源互联网模型的提出源于以下思想。

首先,在考虑分布式发电系统的同时,借鉴了文献[13]中的能源总线思想,将来自于可再生能源的热源或热汇水,通过作为基础设施的公共管网输送到用户终端,经换热后回到源头。能源总线系统形式灵活,多源环状管网优势明显,具有可扩展性。总线结构是传统互联网中局域网的典型结构,还具有诸多优点:(1)能够集成应用不同种类的低品位能源,发挥规模效益;(2)为末端机组提供优质的热源和热汇,结合储能措施,提升机组效率;(3)减少输送能耗;(4)减少集中的冷媒热媒总流量;(5)末端机组可以根据需要运行调节,实现分户计量;(6)计费方便等。

其次,RDES 是一个分布式的控制系统,在该系统中存在着状态监测、数据通信、任务计算以及指令执行等过程。为了提高分布式能源供应设备之间、分布式能源供应设备与负荷之间以及 RDES 之间的协调控制能力,这就需要一个强有力的能量管理系统——基于 MAS 的能量管理系统来保证 RDES 运行的可靠性、安全性和有效性。MAS 具有很好的自主性和启发性,可以将大型复杂系统划分成小的彼此相互通信及协调的、易于管理的系统^[14]。在这种模式下,也可以将复杂的任务划分成简单的小任务交给每个 Agent,相对独立又相互协作地完成整个任务。

第三,在分布式能源的冷热电联产系统中,冷热的供求和电力的供求不可能同时满足用户的需要,借助于储能装置可以将富余的冷热电储存起来,按需调配,起到能量的缓冲作用,可以使区域能源互联网时刻处于高效运行状态,以取得区域分布式能源系统节能减排效益的最大值。

基于上述思想,本文提出了冷热电联供下的基于 MAS 的区域能源互联网架构模型(见图 2),这里提到的路由 Agent 是一种称之为能源路由器(energy router)的智能设备,它不仅具有 Agent 的各种特性,而且能够控制冷、热和电能。区域能源互联网的系统架构如图 2 所示。

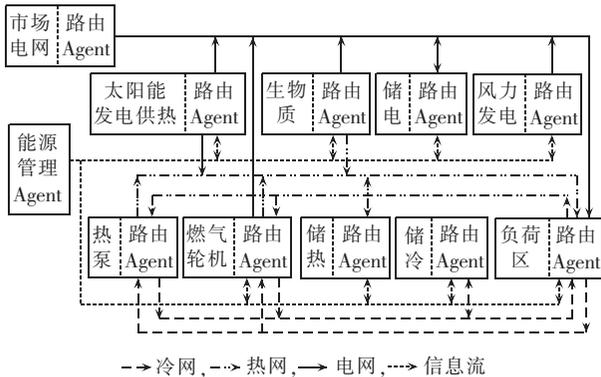


图 2 区域能源互联网的系统架构

Fig.2 Architecture of RDES LAN

2.2 Agent 的构造

在基于 MAS 的区域能源互联网架构模型中,共有 2 类 Agent,分别是能源管理 Agent 和路由 Agent,下面就其构造过程进行说明。

2.2.1 能源管理 Agent

在一个区域能源互联网中,能源管理 Agent 是唯一的,其主要功能是对该区域能源互联网中的路由 Agent 进行监视和全局协调控制,间接管理网络中的各类物理设备。能源管理 Agent 根据来自各路由 Agent 的数据信息,对各节点进行监控和管理,根据控制策略组织和管理路由 Agent,接受能源互联网的命令。它由通信模块、数据采集模块、数据库、知识库和运算/决策模块组成。各模块的功能为:

(1)通信模块实现能源管理 Agent 同各路由 Agent 之间的通信功能,用于交换信息、反馈信息或下达命令等操作;

(2)数据采集模块采集区域能源互联网内部信息,例如微电网母线电压和系统频率、冷热管网压力和流量等,采集内容较为单一;

(3)数据库存有数据采集模块所采集到的信息、全部路由 Agent 的信息以及关于控制策略执行情况的信息等内容;

(4)知识库提供各种数据(如节点电压和频率的

参考整定值等)和相关算法(如控制策略等)给运算/决策模块;

(5)运算/决策模块是核心模块,它根据掌握的信息、数据以及算法规则来判断区域能源互联网的运行情况。

该 Agent 的模型可以表示为:

$EMAgent_i := \langle ERAgent_i, K, ERAgent_m, Policy \rangle$

其中, $ERAgent_i$ 表示能源管理 Agent 管理的路由 Agent 的描述,其模型将在 2.2.2 节中描述; K 表示知识库; $Policy$ 表示能源管理 Agent 采取的策略的描述,用来记录执行调节策略得到的状态-动作对,为后续调节工作做参考,其模型如下:

$Policy := \langle ID, State, Action \rangle$

其中, ID 表示物理设备在区域能源互联网中的身份标识; $State := \langle st, st+1 \rangle$ 表示该设备当前状态以及下一时刻的状态描述; $Action$ 表示执行调节策略的物理设备采用的最优动作。

2.2.2 路由 Agent

路由 Agent 的主要功能是对当地所对应的各类物理设备进行管理,存储相关信息(分布式能源种类、额定功率、负荷需求等),并监测设备的功率输出情况和运行状态,调节设备的运行控制,与能源管理 Agent 及其他路由 Agent 进行通信,接受能源管理 Agent 的命令等。

它由通信模块、执行模块、数据库、数据采集模块和设备节点组成。各模块的功能为:

(1)通信模块实现路由 Agent 与设备单元之间、路由 Agent 之间以及路由 Agent 与能源管理 Agent 之间的通信功能,用于交换信息、下达命令以及反馈信息等操作;

(2)执行模块将来自能源管理 Agent 和自身的控制命令传达至相应设备单元;

(3)数据库用于存储设备的分布式能源种类、额定功率、负荷需求以及其他环境信息等;

(4)与能源管理 Agent 的数据采集目的不同,路由 Agent 的数据采集模块采集内容较为丰富,主要采集设备的相关信息,如有功/无功出力情况、运行状态、控制方式、负荷需求等信息,并将它们存储到数据库中。

路由 Agent 的模型可以表示为:

$ERAgent_i := \langle ID, Device, Role \rangle$

其中, ID 表示 $ERAgent_i$ 在区域能源互联网中的身份标识; $Role$ 表示 $ERAgent_i$ 在区域能源互联网中扮演的角色,包括电网 Agent、供能 Agent、储能 Agent 和负荷 Agent 4 种,从而可以赋予不同的控制策略; $Device$ 表示 $ERAgent_i$ 管理的设备,其模型可以表示为:

$Device := \langle Mode, Ref \rangle$

其中,Mode 表示设备的控制方式,可选,如 P/Q 控制方式和 V/f 控制方式等;Ref 表示设备参数的设定值集合。

2.3 Agent 的交互机制

Agent 之间传递信息而产生的交互是 MAS 的重要组成部分,本文的区域能源互联网分布式协调运行控制系统采用的是基于环境的交互模型 EASI (Environment as Active Support of Interaction)^[15]。下面举例说明如何利用该模型实现区域能源互联网中各 Agent 之间的交互操作。

假设能源管理 Agent 要维护可增发发电量的数据表,可通过供能路由 Agent,查询各供能设备的可增发发电量,后者在收到查询请求后将供能设备的可增发发电量发送给前者。能源管理 Agent 对数据表进行维护,其交互模型如图 3 所示。

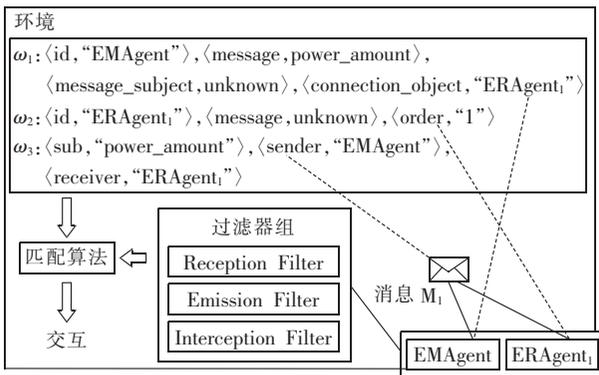


图 3 EASI 交互模型示例

Fig.3 Example of EASI interaction model

在这里, $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$, ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别表示能源管理 Agent (EMAgent)、供能路由 Agent (ERAgent₁) 以及消息 M_1 ; 用 power_amount 表示可增发发电量, EP₁ 表示 ERAgent₁ 管理的供能设备。 ω_i 有 4 个特性: 身份标识、传递内容、内容主体和连接目标, 分别用 id、message、message_subject 和 connection_object 表示, 特性对应实体的值可以根据系统动态变化而实时改变。查询信息时与反馈信息时的环境模型如图 4 所示。

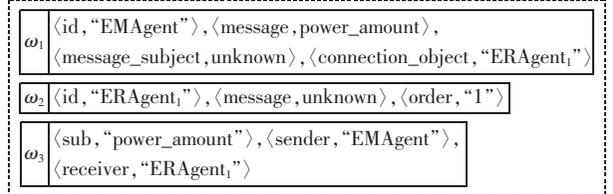
在这里定义 3 类过滤器: Reception、Emission 和 Interception 过滤器。

Reception 过滤器是通过过滤特定特性的值来决定接收者的过滤器。例如, Agent 有个特性 id, 基于这个特性的值可以通过建立互动的过滤器成为 Reception 过滤器。例如, ERAgent₁ 通过设置过滤器可以只接收发送给自己的查询可增发发电量的消息, 其过滤器模型可表示为:

$$f_{\text{reception}}^{\text{env}} = \langle [\text{id}(a) = \text{"ERAgent}_1"], [\text{sub}(\omega_3) = \text{"power_amount"}], \text{"reception"}, 0, \text{environment} \rangle \quad (1)$$

此类过滤器一般由环境放置。

查询信息时的模型:



反馈信息时的模型:

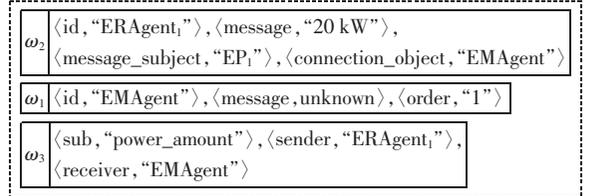


图 4 查询与反馈模型

Fig.4 Inquiry model and response model

Emission 过滤器是将消息和接收者进行匹配的过滤器。例如, EMAgent 查询可增发发电量的消息不仅应该通知 ERAgent₁, 还应该通知 ERAgent₂, 其过滤器模型可表示为:

$$f_{\text{emission}}^{\text{EMAgent}} = \langle [\text{sons}(a) = \text{"ERAgent}_1"] \cap [\text{sons}(a) = \text{"ERAgent}_2"], [\text{sub}(\omega_3) = \text{"power_amount"}], \text{"emission"}, 0, \text{EMAgent} \rangle \quad (2)$$

此类过滤器一般由 EMAgent 放置。

Interception 过滤器是一种特殊的过滤器, 它允许 Agent 能够接收到原本不是发送给它的, 但是却含有其感兴趣的信息的消息。例如, ERAgent₁ 向 EMAgent 上报其管辖的微源的可增发发电量, 而这个消息恰好对 ERAgent₂ 有帮助, 则可以在 ERAgent₂ 处放置一个 Interception 过滤器来“偶然听到”来自 ERAgent₁ 的消息, 其过滤器模型可表示为:

$$f_{\text{interception}}^{\text{ERAgent}_2} = \langle [\text{id}(a) = \text{"ERAgent}_2"], [\text{sub}(\omega_3) = \text{"power_amount"}] \cap [\text{sender}(\omega_3) = \text{"ERAgent}_1"], \text{"interception"}, 0, \text{ERAgent}_2 \rangle \quad (3)$$

此类过滤器一般由“偶然收听”者放置。

3 能源路由器的结构、功能和元胞设计

这里, 能源路由器借鉴了 Internet 网络路由器的概念, 是本文所提出的区域能源互联网架构模型中的路由 Agent 的具体实现形式, 是系统内各种物理设备的协调控制者。

3.1 能源路由器的基本结构和功能组成

能源路由器通常是由固态变压器 SST (Solid State Transformer)、智能能量管理模块 IEMM (Intelligent Energy Management Model) 和网络通信模块组成, 主要目的在于对电能进行控制。例如, 文献[16]给出了能源路由器的架构, 路由器由通信平台、控制器和固态变压器 3 个主要功能模块组成; 文献[17]虽然提出了功能较为全面的能源路由器架构设计方

案,从能源控制、信息保障、定制化需求和网络运行管理 4 个方面阐述了能源路由器的特性,但依然是从电能的角度进行探讨。然而,实现信息-能源一体化协调控制的能源路由器是能源互联网的发展趋势,主要是因为:

(1)固然能源路由器是基于电力传输中所存在的低压网络故障、电能质量、局域能量管理等问题或需求而提出来的,但是冷热的传输同样存在着类似的问题,如网络故障问题(阀门失灵、管道损坏、管道脏堵等)、供能质量问题(水力失调、管网失衡等)、能量管理问题(热源交替、分支阀门开度、分支阻力差距调节等),这些问题的解决同样需要类似能源路由器的设备来完成;

(2)无论是供电还是供冷供热,其故障的解决、质量的保证以及能量的管理都涉及到本地端和区域协调,而多 Agent 系统的引入可以很好地解决上述问题;

(3)区域分布式能源系统采用的是冷热电联供系统,任何一种能量的供给都不是独立的,而是密切联系、相互影响的,即很难做到同时、恰好地满足用户对冷热电的需求,往往是满足了其一而其他能量要么不足要么过剩,因此,若要做到最优控制,就必须一体化协同考虑冷热电的调控;

(4)冷热电等供能通道可整合为一条地下走廊,节约走廊建设成本,提高走廊利用率,并且为冷热电的一体化调度和管理提供了基础条件。

由此可见,构建多能一体化协调控制的能源路由器是必要的和可行的,本文给出了一种新型的能源路由结构(见图 5),以实现全网统一的综合能源控制。

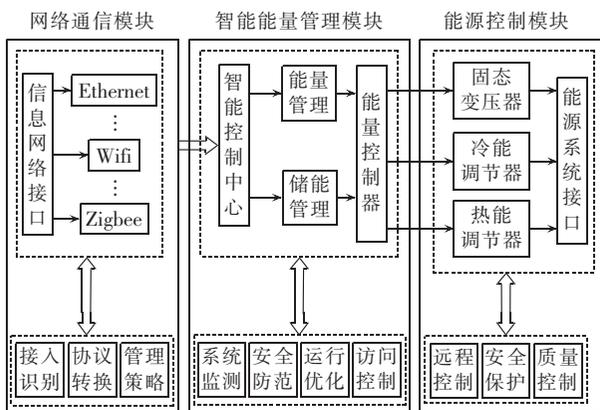


图 5 能源路由器的结构

Fig.5 Structure of energy router

该能源路由器具备充分融合能量流控制和信息流的能力,可以做到利用信息通信接口及时反馈能量流状态,根据信息流反馈及时调整对能源系统的控制。网络通信模块利用信息网络接口具备

Ethernet、Wifi、Zigbee 等多种网络的接入识别能力,通过协议转换与管理策略机制的运用能够实时保持网络的可用性、扩展性、可靠性及安全性;能源控制模块主要负责冷热电的协调与控制,包括远程控制、安全保护以及质量控制等;智能能量管理模块具备智能 Agent 的主要特性,负责监测区域能源互联网中各类设备及负载的状态,进行能量管理和储能管理决策,并将决策指令通过能量控制器分别下发给固态变压器、冷能调节器和热能调节器执行。

3.2 能源路由器中元胞的设计

区域能源互联网中各类设备及负载的运行状态随时可能发生变化,具有随机性和不确定性特征,转换过程是复杂的,因此,恰当的建模方法对于能源路由器的能量管理决策是至关重要的。

CA 是一种时间、空间和状态均离散,在局部范围内进行相互作用的网格动力学模型,能够为复杂的动态系统进行建模,可以更好地模拟现实中的信息处理系统,具有同质性、并行性和局部性等核心特征。CA 应用于区域能源互联网这种复杂系统具有明显的优势,表现如下。

(1)在区域能源互联网的运行过程中,设备单元之间会发生相互作用,即一个设备的变化可能会引起其他设备的变化,因此可将对区域能源互联网的运行过程的研究转化为对 CA 及其规则的研究,更为简单易行。

(2)在 CA 中,对于简单系统,可以用“0”和“1”分别表示元胞的正常运行状态和故障状态;对于复杂系统,还可以用其他的离散值来表示元胞的状态,各个元胞的状态会随时间的变化而改变。在区域能源互联网中,既可以用“0”和“1”的简单方式来表示设备的 2 种运行状态,也可以用离散值来表示当前设备的某个参数值,这些值都是随着时间的变化而改变的。

(3)CA 的邻居模型可以用来描述区域能源互联网中设备之间的连接关系,表现更直观。

(4)区域能源互联网中各设备的运行过程复杂多变,充满了随机性和不确定性,而通过 CA 构造的模型可以被用来研究区域能源互联网运行过程中出现的随机性和不确定性问题。

因此,在能源路由器中引入 CA,便于对能量管理实现辅助决策,实现对设备状态模拟和行为预测,可以通过简单规则描述系统状态变化和输出状态之间的复杂关系,实现故障的传播和演化过程的模拟和预测;由能源路由器的能量管理模块根据模拟和预测的结果采取相应措施,及时消除故障,避免连锁反应或者大规模故障灾难的发生。

在区域能源互联网中,将供能、储能、负荷等设

备节点抽象成元胞,它们的集合构成了一个元胞空间;用数学函数来模拟各设备的运行情况,即规则;给每个元胞赋一定的初值,这样就可以建立起用 CA 来模拟区域能源互联网运行状态的模型,称为“区域能源互联网运行状态模型”。

3.2.1 元胞的定义及状态

区域能源互联网中第 i 个元胞位置可表示为:

$$r_i = (x, y) \quad (4)$$

其中, $x=1, 2, \dots, n; y=1, 2, \dots, n; n$ 为区域能源互联网中的设备节点数。

在区域能源互联网中,一个元胞就代表一个设备,元胞的状态就代表了设备的状态。可将元胞的状态定义为“0”和“1”,“0”表示元胞处于正常运行状态,“1”表示元胞处于故障或失效状态。

3.2.2 元胞的空间、邻居与时间

为了更加准确地反映区域能源互联网的结构,在区域能源互联网的 CA 建模时,采用邻域半径 $r=1$ 的 Moore 邻居模型。

为了确定区域能源互联网运行状态模型中元胞的时间,可以根据历史数据来进行推断,将历史数据与模型的模拟结果相对应。例如,模型运行 360~370 次的结果正好与区域能源互联网实际运行一年监测到的数据对应,那么就可以推断一个元胞时间是现实的一天。但是,就目前而言,元胞时间与现实时间还不能做到完全对应,因而元胞时间的确定仍然是一个难题。

3.2.3 元胞的转换规则

元胞状态的转换主要是根据元胞 r_i 的关键参数值是否超过合理控制范围来判断当前元胞的状态。若超过则该元胞就会出现故障,发生破坏,元胞状态值置为“1”;若在控制范围内,则已经处于正常运行状态或元胞可以经过微调恢复正常状态,此时状态值为“0”。

如表 1 所示,以微电网为例,频率和电压是电气设备设计和制造的基本技术参数,也是衡量电能质量好坏的 2 个基本指标。我国采用的额定频率为 50 Hz,正常运行时频率应当保持在 (50 ± 0.2) Hz 的范围之内;用户供电电压的允许偏移对于 10 kV 及以下电压等级为 $\pm 7\%$,微电网一般由 380 V~10 kV 供电电压组成,假设按 380 V 供电,则电压允许偏差应不超过 20~25 V。将频率范围为 $[-0.05, 0.05]$ Hz、电压范围为 $[-5, 5]$ V 的称为调节死区,该区域内的频率和电压值满足正常运行时的最小偏差要求;将频率范围为 $[-0.15, -0.05]$ Hz 或 $(0.05, 0.15)$ Hz、电压范围为 $[-15, -5]$ V 或 $(5, 15)$ V 的称为正常控制区,该区域内的频率和电压满足正常运行时的偏差要求;将频率范围为 $[-0.2, -0.15]$ Hz 或 $(0.15, 0.2)$ Hz、

电压范围为 $[-26, -15]$ V 或 $(15, 26]$ V 的称为可调控区,该区域内的频率和电压需经过调节可以恢复到正常范围内;将频率范围为 $(-\infty, -0.2)$ Hz 或 $(0.2, +\infty)$ Hz、电压范围为 $(-\infty, -26)$ V 或 $(26, +\infty)$ V 的称为紧急控制区,该区域内的频率和电压值已处于故障范围,有可能会破坏元件,所以需要经过调节才能正常使用,否则需要切除该负荷。

表 1 微电网元胞转换规则

Table 1 Rules of microgrid cellular transform

| 频率范围/Hz | 电压范围/V | 说明 | 动作 | 元胞状态 | |
|--------------------------------------|------------------------------------|-------|-------------|---------|----------------|
| | | | | 转换前 | 转换后 |
| $[-0.05, 0.05]$ | $[-5, 5]$ | 调节死区 | 无 | 0, 无需转换 | |
| $[-0.15, -0.05]$ 或 $(0.05, 0.15]$ | $[-15, -5]$ 或 $(5, 15]$ | 正常控制区 | 无 | 0, 无需转换 | |
| $[-0.2, -0.15)$ 或 $(0.15, 0.2]$ | $[-26, -15)$ 或 $(15, 26]$ | 可调控区 | 需调控 | 0 | 0 |
| $(-\infty, -0.2)$ 或 $(0.2, +\infty)$ | $(-\infty, -26)$ 或 $(26, +\infty)$ | 紧急控制区 | 需调控, 失败则切负荷 | 1 | 0, 成功 1, 失败 |

4 分布式协调控制策略

在区域能源互联网中,冷热电等各类能源的按需有序供给是能源管理中心的基本任务,同时确保微电网和供冷供热网络的平衡和稳定运行,因此,高效、合理的分布式协调控制策略必不可少^[17-18]。鉴于电力能源的核心地位及其在区域能源互联网中的骨干支柱作用,本文将对微电网的协调控制策略进行初步的探讨。

微电网的分布式协调控制过程是一种自趋优的动态过程,具有自主性和自治性,是集中控制与分散控制的统一结合体,包括两方面的内容:

(1)微电网在正常运行情况下,应有自动防范能力及自动诊断能力,并可完成最优化运行;

(2)故障发生之后,微电网应具备自我恢复能力,使自身快速到达新的稳定状态。

相对于并网模式而言,孤岛模式下的微电网其内部所需的负荷全部由自身提供,调控难度大,更具代表性,本文针对孤岛模式提出了一种新的微电网自趋优分布式协调控制策略如图 6 所示。

5 算例仿真

本文构造了含有 3 个子区域 A、B、C 的仿真算例,以验证所提模型与控制策略的可行性和有效性。图 7 给出了该算例的原始系统模型,其中,假定区域 A 的一次能源是天然气和太阳能,区域 B 是天然气和风能,区域 C 则是太阳能和风能,各区域均含有商业、住宅等负荷区,并接入市政电网。3 个子区域即为 3 个子微电网,既可并网运行,也可孤岛运行,且

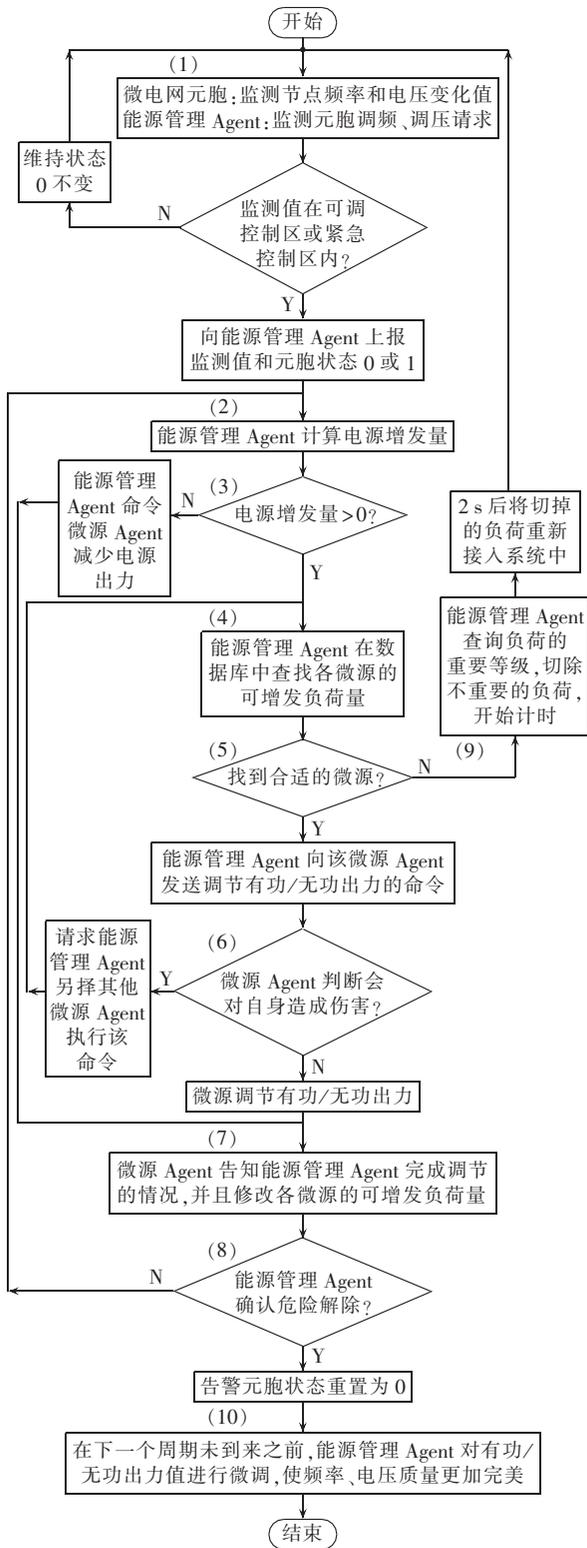


图 6 微电网自趋优分布式协调控制策略

Fig.6 Self-approaching optimal strategy of distributed and coordinated control for microgrid

在孤岛模式下,它们之间存在着相互影响。

按照区域能源互联网的信息物理建模方法,可得如图 8 所示的架构模型,在此基础上进行 PSCAD 仿真实验。

在图 9 仿真实验中,PCC Agent 是路由 Agent,提

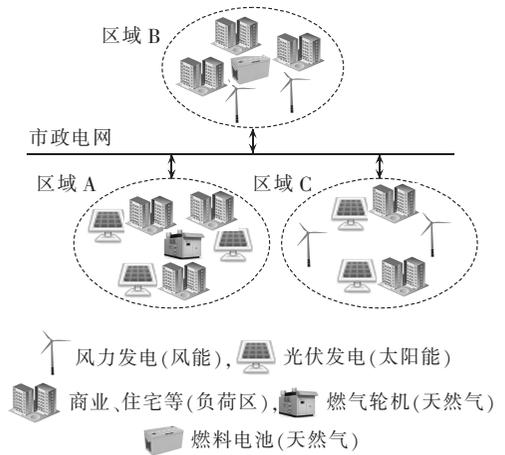


图 7 算例原始系统模型

Fig.7 Original system model for case simulation

供微电网与大电网的接口,实现并网运行和孤岛运行模式之间的切换;LC 本地控制 Agent 也是路由 Agent,负责对当地所对应的各类物理设备进行管理;微电网 Agent 则是能源管理 Agent。子微电网 A 包括微型燃气轮机(MT)和光伏电池组(PV1),子微电网 B 包括燃料电池(FC)和风力发电机组(WD1),子微电网 C 包括光伏电池组(PV2)和风力发电机组(WD2)。

控制策略采用的是图 6 所示分布式协调控制策略,通过各 Agent 之间的交互信息实现多微电网的协调控制。微电网 CA 则由微源元胞和负荷元胞构成,其设计方法见 3.2 节。结合设备元胞监测的电压和频率的变化值,判断系统是否可以正常运行,进行孤岛模式下的无功电压控制仿真实验。主要考虑光照、风速对多微电网之间的影响,仿真时开关 QF₁ 断开,假定仿真时间为 10 s。实验中,元胞不断地为 Agent 提供所需要的基础数据,Agent 则根据这些数据通过交互操作来制定优化控制策略,以维持电压和频率的相对稳定。

5.1 光照强度改变对各微电网的影响

开始时光照强度是 600 W/m²,第 3 s 时增大至 800 W/m²,第 6 s 时光照强度恢复到 600 W/m²,仿真结果如图 10—12 所示,图 11 中母线电压有效值为标么值,后同。

由图 10 可以知道,光伏电池在光照强度为 600 W/m² 时,微型燃气轮机输出的无功功率上升为 20 kvar,燃料电池输出的无功功率上升为 10 kvar,风力发电机无功功率维持在 0 kvar,光伏电池无功功率为 0 kvar;第 3 s 时,光照强度由 600 W/m² 增加至 800 W/m²,光伏电池无功出力稳定在 0 kvar,微型燃气轮机和燃料电池无功出力维持不变;第 6 s 时,光照强度恢复到 600 W/m²,微型燃气轮机和燃料电池的无功功率仍维持不变。

由图 10—12 可知,在光照强度发生变化时,子

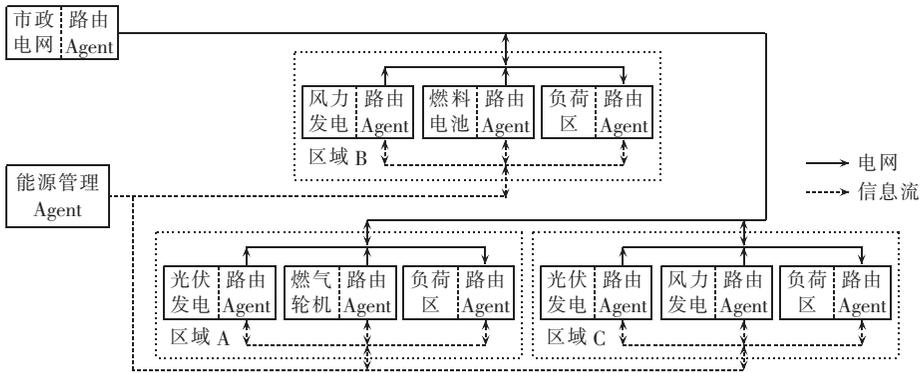


图 8 算例区域能源互联网的架构模型

Fig.8 Architectural model of regional energy internet for case simulation

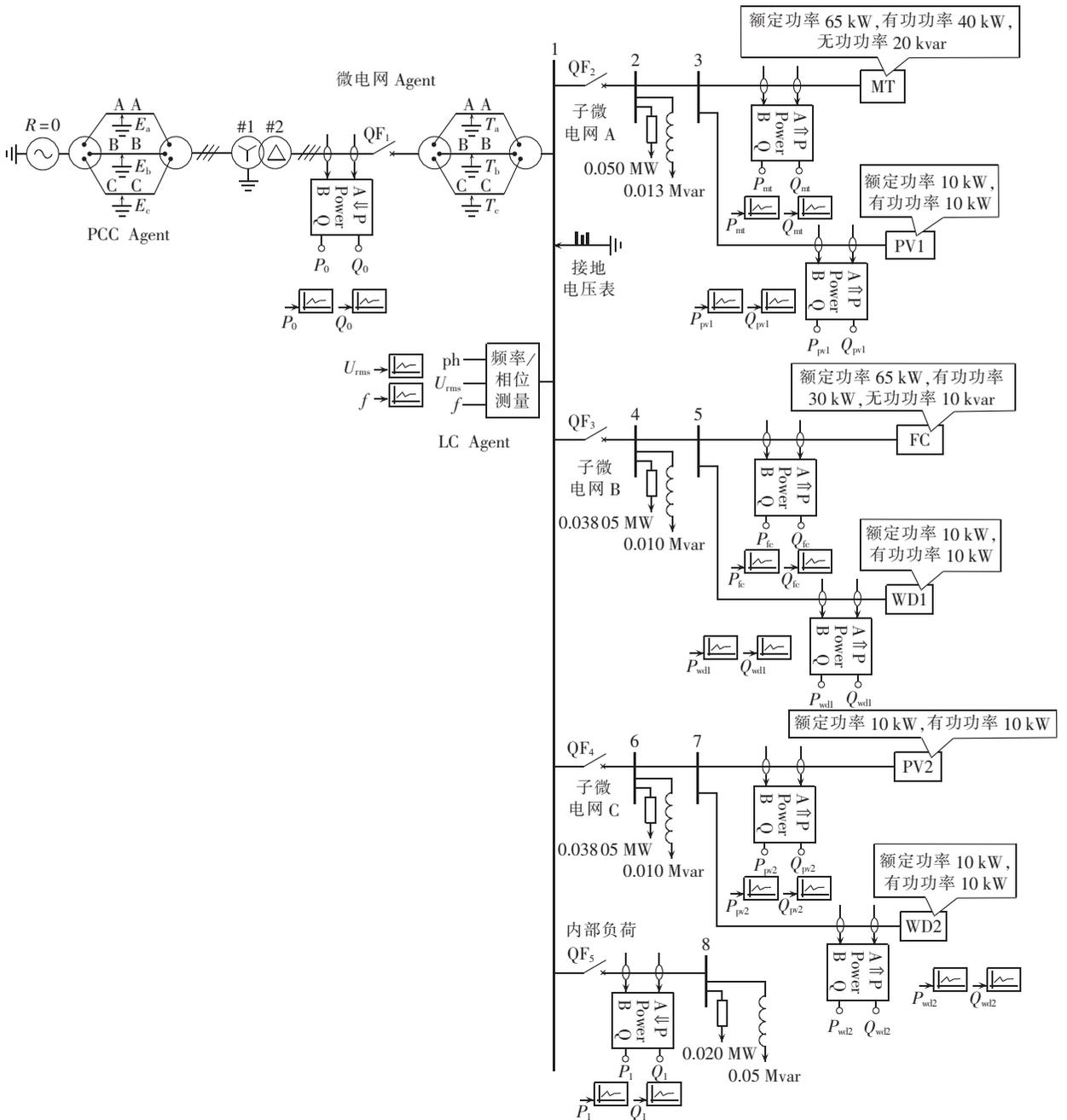


图 9 算例仿真图

Fig.9 Simulative diagram of case simulation

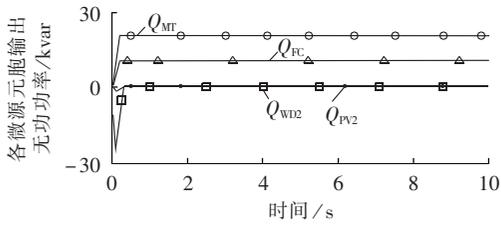


图 10 光照强度改变时各微源元胞输出无功功率
Fig.10 Curve of reactive power output vs. light intensity for different micro-energy cellulae

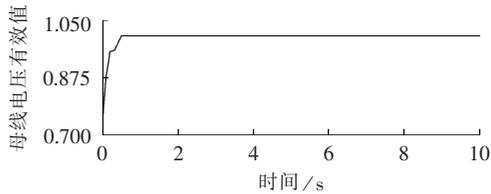


图 11 光照强度改变时母线电压有效值
Fig.11 Curve of bus voltage RMS vs. light intensity

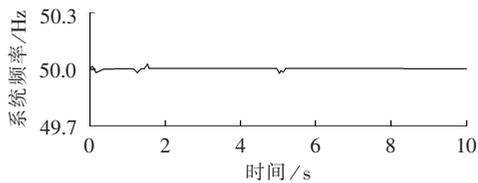


图 12 光照强度改变时系统频率
Fig.12 Curve of system frequency vs. light intensity

微电网 A 在微型燃气轮机的调节下,其母线电压基本维持不变;子微电网 B 在燃料电池的调节下,其母线电压基本维持不变;子微电网 C 中的光伏电池组和风力发电机组的无功功率输出为 0 kvar;系统频率在光照强度发生变化时有微小波动,但频率值仍维持在 (50 ± 0.02) Hz 内,能够满足微电网运行要求。

综上所述,无功功率和母线电压在光照强度发生变化时基本不变,系统频率在允许的范围内有较小的波动,各微源对无功电压的控制取得了较好的效果。因此,子微电网 A 中的微型燃气轮机不仅对自身电压起调节作用,还对子微电网 B 和 C 起到了良好的调节作用,才使得多微电网整体功率相对平稳。

5.2 风速变化对各子微电网的影响

实验采用随机风速,光照强度保持在 800 W/m^2 ,仿真结果如图 13—15 所示。

由图 13—15 可知,风速增大时风力发电机的无

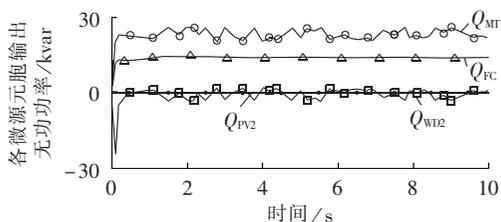


图 13 风速变化时各微源元胞输出无功功率
Fig.13 Curve of reactive power output vs. wind speed for different micro-energy cellulae

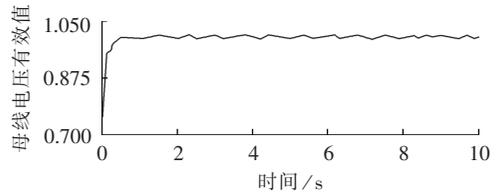


图 14 风速变化时母线电压有效值
Fig.14 Curve of bus voltage RMS vs. wind speed

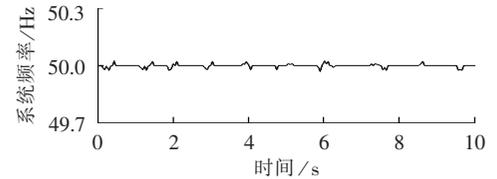


图 15 风速变化时系统频率
Fig.15 Curve of system frequency vs. wind speed

功输出增多,风速减小时风力发电机组的无功输出减少,且其无功输出在 0 kvar 上下波动;微型燃气轮机输出的无功功率在 23 kvar 上下波动;燃料电池输出的无功功率在 15 kvar 上下波动;光伏电池组无功输出恒为 0 kvar。多微电网母线电压在 1.0 p.u. 上下波动,系统频率在 50 Hz 上下小范围波动,满足系统最低要求。

综上所述,孤网模式下,随着风速的变化,为了维持多微电网系统无功出力的平衡,子微电网 A 中微型燃气轮机对调节子微电网 B 和子微电网 C 起到了良好的作用,使多微电网中的各微源无功电压在允许的范围内波动,使母线电压和系统频率相对平衡。

6 结论与展望

我国低碳区域能源规划工作任重而道远,区域分布式能源系统的发展受到我国特定的经济结构、能源结构、城市化水平和资源条件的约束,必然需要探索一条适合我国国情的自主发展道路。区域能源互联网作为分布式可再生能源的一种高级利用形式,既要依托智能电网作为坚强后盾,又要充分利用互联网及其他前沿技术的成功经验和先进技术,从以下几个方面进一步深入研究。

(1)模型与控制策略。本文虽然提出了多能供给模型和协同控制策略的研究思路和框架,并且以微电网为主部分论证了其合理性和可行性,然而这仅仅是阶段性研究成果,其完备性存在着不足。在下一步的研究中,将重点研究精确的能源互联网内部随机负荷模型构建方法以及多能源供给下的复合能源统一控制策略,使系统具有自愈、自治和自组织等功能。将冷热电联产联供作为未来新区建设和旧区改造的统一规划目标和任务,实现能源利用效益的最大化,推动低碳经济平稳、有序地向前发展。

(2)即插即用技术。针对能源互联网中大量的分布式设备的接入问题,以往人工式的规划和设计

方法显然已不现实,因此,研究分布式设备的即插即用技术,包括对标准通信协议的研究和多种通信协议的转换机制的研究,将有助于加强能源互联网的可扩展性、兼容性和分布式设备的“可见”性。

(3)储能技术。研究新型的储能装置,使之更加符合分布式可再生能源供能的稳定性和容量要求,优化储能控制策略,使系统具有更大的市场竞争力,更加符合能源市场经济性的要求。

另外,由电力系统、天然气网络、交通系统、供热供冷网络以及信息系统所组成的能源互联网无疑是一个复杂的多网流系统,计及各类不确定性因素的协调规划和运行等模型和方法都是需要解决的问题,将对各个子系统和整体系统性能的提升产生积极的促进作用。

参考文献:

- [1] HUANG A Q, BALIGA J. FREEDM system: role of power electronics and power semiconductors in developing an energy internet [C] // 21st International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 9-12.
- [2] TSOUKALAS L H, GAO R. From smart grids to an energy internet: assumptions, architectures and requirements [C] // International Conference of DRPT. Nanjing, China: IEEE, 2008: 94-98.
- [3] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world [M]. New York, USA: Palgrave Macmillan, 2011: 73-106.
- [4] Federal Ministry of Economics and Energy of Germany. E-Energy [EB/OL]. [2015-02-17]. <http://www.e-energy.de/en/index.php>.
- [5] KRAUSE T, ANDERSSON G, FROHLICH K, et al. Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 15-27.
- [6] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42.
DU Aihu, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations [J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 35-42.
- [7] YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A multi-objective collaborative planning strategy for integrated power distribution and electric vehicle charging system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1811-1821.
- [8] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [9] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702-713.
ZHA Yabing, ZHANG Tao, HUANG Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies [J]. Scientia Sinica Informations, 2014, 44(6): 702-713.
- [10] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力CPS的架构及其实现技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 1-7.
- [11] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 1-8.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 1-8.
- [12] 刘汉字, 邱贻, 牟龙华. 微电网CPS物理端融合模型设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 27-32.
LIU Hanyu, QIU Yun, MU Longhua. Conjunct model of physical side on microgrid CPS [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 27-32.
- [13] 龙惟定, 白玮, 梁浩, 等. 低碳城市的能源系统[J]. 暖通空调, 2009, 39(8): 79-84.
LONG Weiding, BAI Wei, LIANG Hao, et al. Energy system in low-carbon city [J]. Journal Heating Ventilating and Airconditioning, 2009, 39(8): 79-84.
- [14] 史忠植. 智能主体及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 30-109.
- [15] SAUNIER J, BALBO F, BADEIG F. Environment as active support of interaction [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4389: 87-105.
- [16] XU Y, ZHANG J, WANG W, et al. Energy router: architectures and functionalities toward energy internet [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Brussels, Belgium: IEEE, 2011: 31-36.
- [17] 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]. Scientia Sinica Informations, 2014, 44(6): 714-727.
- [18] 许少伦, 严正, 冯冬涵, 等. 基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 7-13, 21.
XU Shaolun, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Cooperative charging control strategy of electric vehicles based on multi-agent [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 7-13, 21.
- [19] 陈星莺, 史豪杰, 刘健, 等. 基于招投标策略的地区电网无功优化控制 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 1-6.
CHEN Xingying, SHI Haojie, LIU Jian, et al. Optimal reactive power control based on bidding strategy in district power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 1-6.

作者简介:



陈娟

陈娟(1979—),女,宁夏银川人,博士研究生,从事分布式能源系统规划、经济运行及评价方面的研究(E-mail:hdjuanchen@163.com);

黄元生(1958—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,从事技术经济评价与管理方面的研究(E-mail:hys2656@aliyun.com);

鲁斌(1975—),男,宁夏银川人,副教授,博士,从事人工智能基础及应用、分布式能源系统运行与控制方面的研究(E-mail:hdbinlu@163.com)。

(下转第23页 continued on page 23)

Chapter 5-grid connection[S]. Sydney,Australia:AEMC,2012.

- [18] National Energy Regulator of South Africa. Grid connection code for Renewable Power Plants (RPPs) connected to the electricity Transmission System (TS) or the Distribution System (DS) in South Africa[S]. Pretoria,South Africa:NER,2012.
- [19] 叶希,鲁宗相,乔颖,等. 大规模风电机组连锁脱网事故机理分析初探[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):11-17.
YE Xi,LU Zongxiang,QIAO Ying,et al. A primary analysis on mechanism of large scale cascading trip-off of wind turbine generators [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):11-17.
- [20] MOHSENI M,MASOUM M A S,ISLAM S M. Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters [J]. Electric Power Systems Research, 2011,81(7):1456-1465.
- [21] LIU Changjun,HUANG Xiaobo,CHEN Min,et al. Flexible control of DC-link voltage for doubly fed induction generator

during grid voltage swell[C]//Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta,USA:[s.n.],2010:3091-3095.

- [22] International Electrotechnical Commission(IEC). Wind turbines-part 21:measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines:IEC61400-21:2008 [S]. Geneva,Switzerland:IEC Central Office,2008.

作者简介:



艾斯卡尔

艾斯卡尔(1976—),男,新疆乌鲁木齐人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为新能源并网接入技术(E-mail:askarof@sina.com.cn);

朱永利(1963—),男,河北保定人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统安全预防与恢复控制、网络化监控与大数据智能分析。

Development and test of HVRT function for PMSG

Aisikaer^{1,2},ZHU Yongli¹,WANG Hailong²

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Xinjiang Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Urumqi 830026, China)

Abstract: HVRT(High-Voltage Ride-Through) function for wind turbine generator has been recognized as one of the most challenging technologies and has gradually become the discussion and research hotspot in this industry. The necessity of HVRT function for wind turbine generators is researched and a low-cost technical method based on the DC-link Chopper circuit is proposed for the HVRT function of PMSG (Permanent Magnet Synchronous wind turbine Generator) according to its transient characteristics during the sudden increase of grid voltage. The simulative results of software and the actual data of site test show that, the proposed method can improve the HVRT performance of PMSG effectively.

Key words: grid-connection codes for wind farm; high-voltage ride-through; permanent magnet synchronous wind turbine generator; PSCAD; site test

(上接第 10 页 continued from page 10)

Cyber physical modeling and control strategy of regional energy internet

CHEN Juan¹,HUANG Yuansheng¹,LU Bin²

- (1. Department of Economic Management, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Department of Computer Science & Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To widely develop the low-carbon economy is an effective way for solving the problems of energy crisis, environmental pollution, greenhouse effect, etc. The general structure of regional distributed energy system is analyzed and an architectural model of regional energy internet of combined cooling, heating and power is proposed based on the multi Agent system. Combined with the cellular automata theory, a scheme of energy router design considering the cooperative control of cooling, heating and power is given. A strategy of distributed and coordinated control is proposed, which combines the centralized control with the distributed control. Case simulation verifies the effectiveness of the proposed model and strategy.

Key words: low-carbon economy; distributed energy; energy internet; multi Agent systems; cellular automata