

面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式

刘敦楠, 徐尔丰, 许小峰

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

“Source-Network-Load-Storage” Integrated Operation Model for Microgrid in Park

LIU Dunnan, XU Erfeng, XU Xiaofeng

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Microgrid in park is an important landing place for multi-energy complementation, Energy Internet and other new energy formats. However, there are no mature operation models and reasonable return approaches on the investment for microgrid in China now. Base on the background of new power system reform and Energy Internet, this paper firstly analyzes concept and characteristics of microgrid and its location in the evolution of energy system. Then, model framework of diversified investment and integrated operation is put forward. Next, "source-network-load-storage" integrated operation model in micro-gird is put forward, which includes "source-network-load-storage" optimization control, micro balance market trading, internal and external electricity purchase and sale, network to network auxiliary service, internal and external demand response and new reserve capacity. Finally, economy analysis method of microgrid based on traditional operation model and integrated operation model is put forward and verified by example. Integrated operation model will increase source of microgrid income, guarantee reasonable return on microgrid and greatly promote the health and sustainable development of microgrid in park.

KEY WORDS: microgrid; "source-network-load-storage" integrated operation model; micro balance market trading; internal and external electricity purchase and sale; internal and external demand response

摘要: 园区微网是多能互补、能源互联网等能源新业态的重要落地点。但是目前我国微网运营缺乏成熟的运营模式和合理的投资回报途径。立足于我国新一轮电力体制改革和能源互联网的背景,分析微网的概念特征以及在能源系统演化发展趋势中地位,提出微网运营主体一体化和投资主体多元化的模式框架,从“源-网-荷-储”优化控制运行、微平衡市场交易、内外两级购售电、网对网辅助服务、内外两级需求侧响应、新型备用容量机制建立面向园区微网的“源-网-

荷-储”一体化运营模式,提出传统运营模式和一体化运营模式下微网经济性分析方法,通过算例分析验证一体化运营模式能够增加微网收益来源,保障微网合理的投资回报,将极大促进园区微网的健康和可持续发展。

关键词: 微网; “源-网-荷-储”一体化运营模式; 微平衡市场交易; 内外两级购售电; 内外两级需求侧响应

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0285

0 引言

为贯彻落实习近平总书记提出的能源领域“四个革命、一个合作”^[1],国家非常重视能源产业的创新发展,在清洁能源利用、电能替代、智慧能源建设等方面进行了有益探索和实践,电动汽车、多能互补^[2-3]、微电网、能源互联网^[4-5]等一批能源新业态蓬勃兴起。园区微网是上述实践的重要落地点。微网作为和外部电网、用户友好互动的一种技术手段^[6],集成了多种能源生产、传输、存储、消费多个环节,有利于集中开展创新生产消费模式,探索培育发展动能。

目前依托“863计划”、“973计划”和自然科学基金等支持,我国已投资建设大量微网项目。但是当前我国推动能源互联网和各类型园区微网建设过程中,主要存在以下2方面问题:1)对于微网的电能质量、功率控制、继电保护等方面已制定国家标准,但是目前尚无规模化、可推广的建设、运营模式可供借鉴参考。2)为保证电能质量和供电可靠性,微网往往需要投资建设大量储能和控制设备,实用性、经济性不强,亟需寻找较好的收支平衡点。因此,需要创新微网的运营模式,予以投资者合理回报途径。

本文立足于我国新一轮电力体制改革和能源互联网的背景下,在《推进并网型微电网建设试行办法》指导下^[7],分析能源系统演化发展趋势和微网在其

基金项目: 国家自然科学基金(71401055)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(71401055).

中的地位,提出微网运营主体一体化和投资主体多元化的模式框架,从“源-网-荷-储”优化控制运行、微平衡市场交易、内外两级购售电、网对网辅助服务、内外两级需求侧响应、新型备用容量机制建立未来面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式,提出传统运营模式和一体化运营模式下微网经济性分析方法,通过算例分析证实一体化运营模式能够增加微网收益来源,保障微网合理投资回报,将极大促进园区微网的健康和可持续发展。

1 微网的概念特征和在能源系统演化发展中的地位

1.1 微网的概念和特征

微网是一种靠近用户侧的微型综合能源系统,涵盖天然气、太阳能、风能等一次能源及电力二次能源,涉及电、热、气多种能源输配网络和负荷需求、储能、控制和保护设备及信息化平台,以电能为核心,通过多能互联、信息能量耦合及市场经济引导,实现多能“供-需-储”协调优化和自平衡。图1为典型园区微网的示意图,源侧包括分布式光伏、小型风机等电源,燃气三联供系统,热泵等热源,沼气池等气源;储侧包括蓄电池、储热罐、蓄冷空调等储电、储热(冷)和储气设备;网侧包括电、热(冷)、油气等输送网络;荷侧涵盖多样化智能终端;信息层包括大数据云计算平台、微平衡市场交易系统和能量管理系统。微网包含以下4方面特征:

1) 微型。系统规模小,并网电压等级一般不大于35kV,容量一般不大于20MW。

2) 清洁。以可再生能源为主,通过就近消纳促进风光等清洁能源高比例渗透,通过燃气三联供系统实现多种能源综合梯级利用,形成微网内部绿色低碳的能源生产和消费体系。

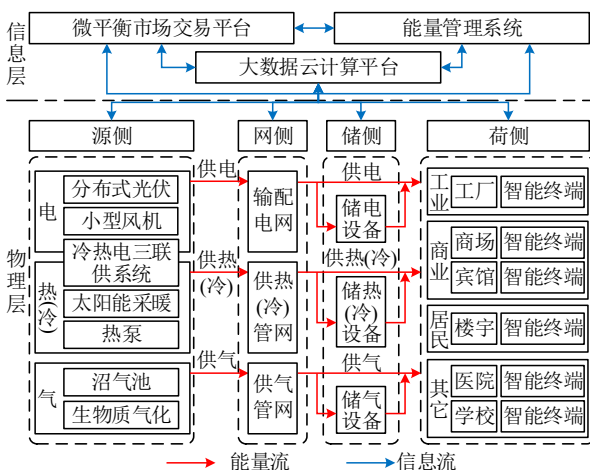


图1 微网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microgrid

3) 自治。可控性是分布式能源(distributed energy resources, DER)和微网的本质区别。通过能源管理系统(energy management system, EMS)对微网内源、网、荷、储进行协调控制,微网具有能源供需自平衡和黑启动能力,可实现自治独立。

4) 友好。微网和外部电网的能量交换在时空上呈现双向灵活可控特性。微网是外部电网的有效补充,提高外部电网的可靠性和弹性;外部电网为微网提供保底供电服务。两者形成网对网的相对独立关系,双向服务,相互支撑。

1.2 能源系统演化发展趋势和微网地位

1.2.1 能源系统演化发展趋势

随着我国能源革命推进,能源领域将发生“链式”变革,未来能源系统演化发展趋势将有以下3方面特征^[8-9]:

1) 横向多能互补,单一能源向综合能源转变。传统能源系统依据能源类型划分,供需各自平衡。通过源侧风光水火储多能互补系统和荷侧终端一体化供能系统,实现多能协同供应和梯级利用,打破各类能源“相对独立,各自为政”壁垒,形成能源集成耦合网络^[10]。

2) 纵向“源-网-荷-储”协调,形成多能“供-需-储”自平衡体。能源生产和消费界限不再清晰,功能角色间可相互替代兼容。能源主体在供需和价格引导下自主决策能源供应、消费和存储,实现多能“供-需-储”垂直一体化^[11]。能源主体由单一能源的生产、传输、存储和消费者,向集多种能源生产、传输、存储和消费为一身的自平衡体转变。

3) 集中与分布式相协调。传统能源系统和主体间是自上而下集中式决策的资源配置模式。自平衡体首先通过“能源就近利用”实现分散化自我平衡,然后通过“能源自远方来”实现不平衡能量交换。能源系统的结构将转变为大系统协调分解的集中与分布式相协调。

1.2.2 微网在能源系统演化发展中的地位

能源系统演化发展的基本单元是多能“供-需-储”自平衡体,对应园区微网^[12],如图2所示。微网通过股权并购打破能源各自运营管控壁垒,利用互联网和信息技术拉近能源生产和消费距离,形成园区内多能“供-需-储”自平衡体。广域范围内自平衡体在信息和经济激励引导下,自主决策扩展,与其他能源主体或自平衡体实现物理网络互联,形成新互连网络、新自平衡体的过程,是能源系统演化发展的过程。能源系统演化发展是基于物理-信息-经济耦合的多个自平衡体交互,自适应分散决

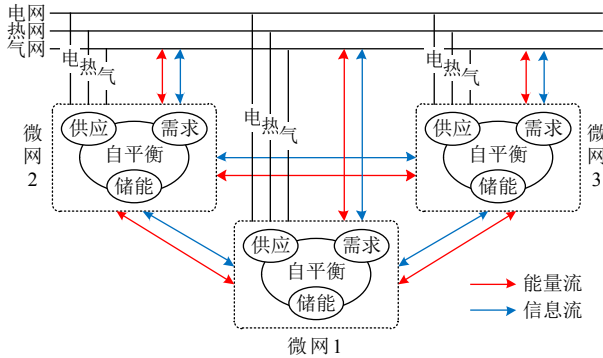


图 2 微网在能源系统演化发展中的地位

Fig. 2 Location of microgrid in the evolution of energy system
策的结果。单个自平衡体与整个能源系统是个体与环境的关系，个体适应环境也造就环境。园区微网是能源系统演化发展的起点和落脚点。

2 微网运营一体化和投资多元化

目前我国已投资建设大量微网项目，其中大部分微网“源-网-荷-储”各环节能源设施由单一主体投资建设运营。但是分布式能源、传输网络、储能等能源设施投资规模大，缺乏合理投资回报模式，微网项目主体将承担较大投资风险。因此，本文提出微网运营一体化和投资多元化的模式框架。

2.1 运营主体一体化

能源的供需实时平衡、规模经济性决定微网运营主体应当唯一。

微网一体化运营主体(简称微网运营主体)可视为特殊目的公司(special purpose vehicle, SPV)，公司股东由微网多元化投资主体和社会资本组成。社会资本可与地方政府开展资本合作(public-private-partnership, PPP)，以特许经营权的方式建设并运营微网项目。微网采取一体化运营，但是风险不再由单一主体承担，微网运营主体的股权多元化将实现风险共担和收益共享。

微网运营主体一体化要求微网运营主体与微网内部“源-网-荷-储”各环节能源设施签订长期统一的委托运营协议，与用户达成长期的用能协议，形成委托-代理关系，保障微网内部的垂直一体化。

2.2 投资主体多元化

微网多元化投资，发电企业、电网企业、供热企业、燃气企业、能源设备制造企业、专业化能源服务企业(energy service company, ESCO)、用户等均可通过市场准入，参与投资建设微网“源-网-荷-储”各环节能源设施。微网内分布式能源可由发电企业、能源设备制造企业等投资，也可由用户自投；配电变电设施所有权依然可属于电网企业；热/气网络、储能设备、智能用能及监测设备等也

可由不同主体投资建设^[13]。

微网投资主体多元化，将有利于实现微网内“源-网-荷-储”各环节能源设施投资建设主体的专业化，降低投资风险；促进微网资本所有权与经营权相分离，形成自负盈亏、自我约束的投资运营机制；突破能源基础设施的行业和市场壁垒，降低准入门槛，激发社会资本活力，开辟微网全新投资空间，营造平等良好的投资环境。

图 3 说明了微网运营主体一体化和投资主体多元化的关系。

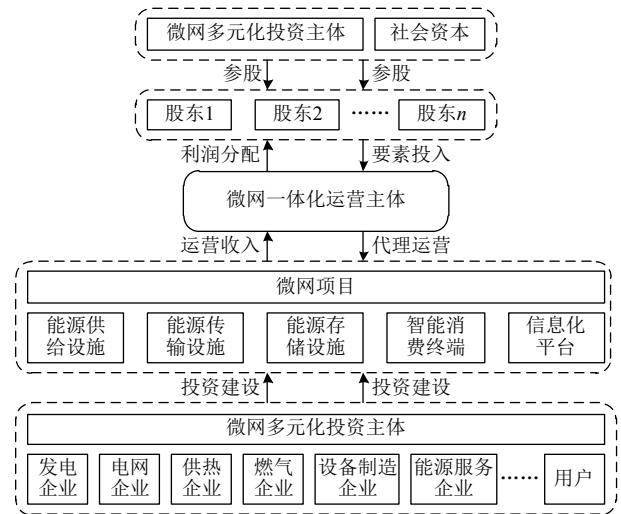


图 3 微网投资主体多元化和运营主体一体化的关系
Fig. 3 Relationship between diversified investment subjects and integrated operation subject in microgrid

2.3 一体化运营主体责任

微网一体化运营本质上是多能“供-需-储”自平衡体的自我集中式管理。以微网的产权分界点为界限，微网一体化主体对内对外扮演不同的角色，承担不同的责任，如图 4 所示。

1) 微网一体化运营主体对内的责任。

微网运营主体在微网内部作用类似于电网企业“调度中心+交易中心+营销部门”。作为微网“调度中心”，以并网点为分界点，负责内部能源供需实时平衡，促进“源-网-荷-储”协调优化控制运行，保障供能可靠性和质量水平；作为微网“交易中心”，负责制定微网内部电、热(冷)、气等多种能源交易规则，组织微网内部微平衡市场交易，公开市场信息，管理市场交易合同，负责交易结算和清算；作为微网“营销部门”，满足微网内部用户基本的用能需求，提供能源计量、运维检修等多样化的能源服务及增值服务。

2) 微网一体化运营主体对外的责任。

微网运营主体与微网内部“源-网-荷-储”各元件的委托-代理关系，决定微网运营主体是微网

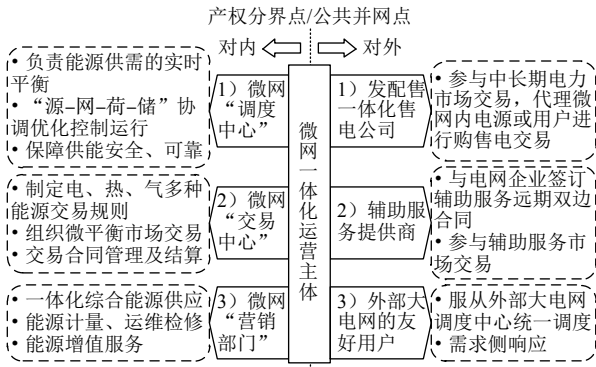


图4 微网一体化运营主体的职责

Fig. 4 Responsibilities of integrated operation subject of microgrid

内外双向互动的独立主体和媒介。微网运营主体负责微网与外部电网、其他微网、发电企业、售电公司等主体之间的能量、信息、价值交换。微网运营主体作为发配售一体化的售电企业，参与外部电力市场，代理微网电源或用户进行购售电交易；作为独立的辅助服务提供商，与电网企业签订远期双边合同或参与辅助服务市场，获得辅助服务补偿；作为外部电网的友好用户，获得公平的电网接入服务，向外部电网调度中心上报必要的运行信息，服从外部电网调度中心的统一调度，同时微网整体对峰谷分时电价等需求侧管理措施进行响应。

3 微网“源-网-荷-储”一体化运营

运营主体一体化保障微网的统一自治；投资主体多元化保障微网的风险共担，收益共享。微网传统运营模式为“自发自用，余量上网”，其收益以能源供给收益为主，缺乏经济性。本文在微网传统运营模式的基础上，提出包括“源-网-荷-储”优化控制运行、微平衡市场交易、内外两级购售电、网对网辅助服务、内外两级需求响应和新型备用容量机制的“源-网-荷-储”一体化运营模式，为微网提供合理的投资回报途径。

3.1 “源-网-荷-储”优化控制运行

微网运营主体保障微网内能源供需实时平衡，通过“源-网-荷-储”优化控制运行，减少弃风弃光率，降低微网运行成本，促进节能减排，实现技术、经济、环境等综合效益最大化，如图5所示。

无论独立运行还是并网运行，微网运营主体应当满足微网内部多种能源的负荷需求，对状态偏离、设备故障等意外事件具有不平衡校正能力，实现微网内部“源-网-荷-储”各元件的自适应主动控制，符合电、热(热)、气多种能源供应的安全可靠性和质量水平要求；实现微网独立/并网运行模式的平滑切换，有效减少微网和外部电网并列/脱离过

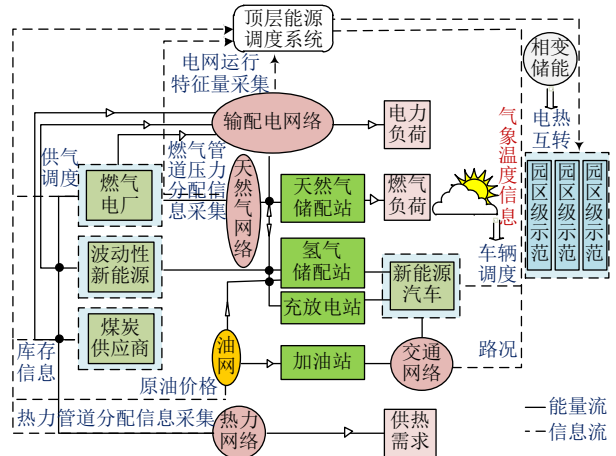


图5 微网“源-网-荷-储”优化控制运行

Fig. 5 “Source-network-load-storage” optimization control in microgrid

程中的暂态振荡。

3.2 微平衡市场交易

微网优势之一是促进分布式能源的就地消纳，目前微网内风光等分布式能源主要采取“自发自用，余量上网”的运营模式，富余或不足部分电量由外部电网接收或提供。

微网运营主体掌握园区微网内能源供需和市场价格信息，通过构建计及电、热、气等多种能源的微平衡市场交易平台，组织园区微网内工业、商业、居民等各类型用户和分布式光伏、分散式风电、燃气三联供系统等分布式能源及储能资源，通过微平衡市场进行局部自主交易^[11]。购售双方通过自主协商，确定交易量、结算价格等信息；分布式能源和用户可委托微网运营主体，代理参与微平衡市场交易，签订转购售能源合同。同时，微网运营主体收取一定微网内部能源输配“过网费”，三方共同签订供用能合同。

相比于“自发自用，余量上网”模式，微平衡市场交易将减少与外部电网之间的不平衡能量交换，尽可能实现在微网内部范围的就近利用。微平衡市场交易下微网的电量安排如图6所示。

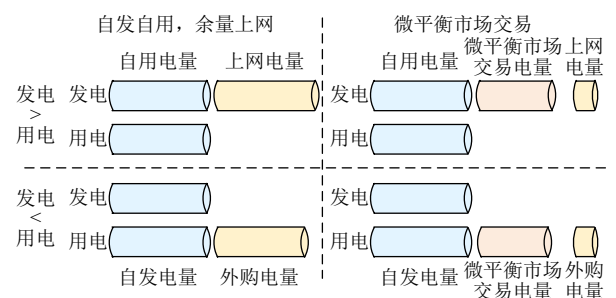


图6 微平衡市场交易下微网的电量安排

Fig. 6 Arrangement of electricity in microgrid under micro balance market trading

3.3 内外两级购售电

未参与电力市场前,微网内部分布式能源上网电量以当地燃煤发电机组标杆上网电价结算,外购电量以目录销售电价(考虑峰谷分时)结算。

随着发用电计划不断放开,以及中长期电力交易开展,微网运营主体通过集成微网范围内富余的发电量和不平衡的用电量,达到市场准入条件,以“售电公司”身份,代理微网内部分布式能源和用户参与外部电力市场购售电交易。在电力市场中,微网运营主体和传统发电企业和用户具有相同市场地位,通过制定合理的交易策略,获得购售电价差额的收益。

3.4 网对网辅助服务

外部电网调度中心根据电力系统运行需要,确定系统调峰、备用等多种辅助服务需求量,微网运营主体以独立辅助服务提供者的市场主体身份,通过远期双边合同或者短期辅助服务市场竞价的方式,为外部电网提供辅助服务,并获得相应的辅助服务补偿。

微网内部拥有多种分布式能源,具有供需自我平衡运行的能力,能够为外部电网提供黑启动(black start, BS)辅助服务;微网运营主体可利用储能设备,为外部电网提供可中断负荷(interruptible load, IL)辅助服务。与燃煤火电机组等传统的辅助服务提供者相比,微网响应速率更快,灵活性更强,更易于负荷匹配^[14]。

微网和外部电网之间的关系,不再是传统“电网-用户”单向服务的关系,将是一种网对网相对独立且平等的关系。外部电网为微网平衡富余或不足电量,提供兜底服务;微网为外部电网提供辅助服务。微网和外部电网之间互为备用,双向服务。

3.5 内外两级需求侧响应

内外两级需求侧响应是指:在微网内部,微网运营主体发布微网内部需求侧管理措施,主动引导用户削峰填谷,优化微网自身的负荷特性;在微网外部,微网作为一个整体参与所在地区的需求侧响应政策。

以峰谷分时电价(time-of-use, TOU)为例,外部电网的峰谷分时电价政策比较粗犷,微网运营主体可根据微网内部用户的负荷曲线及需求侧响应特性,精细化制定微网内部的高峰/低谷电价时段和峰/谷/平电价之比,减少微网与外部电网不平衡电量交换曲线的峰谷差,内外峰谷分时电价的差价即为微网运营主体在微网内部实施需求侧管理措施的投资回报。

内外两级需求侧响应机制能够有效协调微网内外资源,实现大系统从局部到整体的多级最优化目标,从而提升系统整体的能源利用效率。

3.6 新型备用容量机制

传统运营模式下微网并网点变压器按容量申报;微网运营主体通过储能、主动控制等技术或经济手段,在一定范围内自由调节微网和外部电网之间的不平衡电量交换曲线,并与电网企业开展自主协商,变压器容量根据微网自平衡情况按最大需求量进行申报,统一缴纳相应的备用容量费用。

新型备用容量机制是对微网能量精准优化控制技术的考验,微网自平衡能力越强,缴纳的备用容量费用越少。传统微网内储能的收益主要来自于移峰填谷后购电成本的减少。新型备用容量机制将为储能微网中的应用提供崭新的投资回报模式,将极大促进储能设备的发展。

4 微网运营模式经济性分析

传统运营模式成本包括投资建设成本、运维成本、外购电成本以及容量成本,收益包括自发自用收益、上网电量收益、内部售电收益和补贴收益。

一体化运营模式成本包括投资建设成本、运维成本、外购电成本以及自主申报的容量成本,收益包括自发自用收益、外部售电收益、内部售电收益、“过网费”收益、辅助服务补偿收益和补贴收益。

表1为传统运营模式和一体化运营模式的成本收益。

	传统运营模式	一体化运营模式
成本	1) 投资建设成本 2) 运维成本 3) 外购电成本 4) 容量成本	1) 投资建设成本 2) 运维成本 3) 外购电成本 4) 自主申报的容量成本
收益	1) 自发自用收益 2) 上网电量收益 3) 内部售电收益 4) 补贴收益	1) 自发自用收益 2) 外部售电收益 3) 内部售电收益 4) “过网费”收益 5) 辅助服务补偿收益 6) 补贴收益

4.1 传统运营模式成本收益分析

1) 传统运营模式的成本。

①投资建设成本。主要分布式能源、能源输配网络、储能、控制和保护设备的投资建设成本。

$$C_1 = C_U P \quad (1)$$

式中: C_1 为投资建设成本; C_U 为单位容量造价; P 为设备容量。

②运维成本。主要分布式能源、能源输配网络、储能、控制和保护设备的运维成本。

$$C_{OM} = C_1 \lambda \quad (2)$$

式中： C_{OM} 为运维成本； λ 为运维费率。

③外购电成本。微网不足电量向电网企业购买，购电价格为目录销售电价(峰谷分时电价)。

$$C_{OP} = Q_{OP,P} p_S k_{P-S} + Q_{OP,S} p_S + Q_{OP,V} p_S k_{V-S} \quad (3)$$

式中： C_{OP} 为外购电成本； $Q_{OP,P}$ 为外购电量(峰段)； p_S 为外部电网销售电价(平段)； k_{P-S} 为外部电网峰平电价比； $Q_{OP,S}$ 为外购电量(平段)； $Q_{OP,V}$ 为外购电量(谷段)； k_{V-S} 为外部电网谷平电价比。

④容量成本。根据微网并网点变压器容量缴纳容量成本。

$$C_C = P_T p_{CT} \quad (4)$$

式中： C_C 为容量成本； P_T 为并网点变压器容量； p_{CT} 为变压器单位容量价格。

2) 传统运营模式的收益。

①自发自用收益。通过分布式能源自发自用，节约相应用电成本。

$$R_{UP} = Q_{UP} p_{SG} \quad (5)$$

式中： R_{UP} 为自发自用收益； Q_{UP} 为自发自用电量； p_{SG} 为销售电价(折算至发电侧)。

②上网电量收益。微网富余电量上网，由电网企业收购，收购电价为标杆上网电价。

$$R_{OG} = Q_{OG} p_{OG} \quad (6)$$

式中： R_{OG} 为上网电量收益； Q_{OG} 为上网电量； p_{OG} 为上网电价。

③内部售电收益。向电网企业购买不平衡电量，并将外购电量转售给微网用户获得收益。未参与电力市场前，内外购电价基本没有价差，主要通过储能设备移峰填谷获得收益。

$$R_{IS} = Q_{TS,P} p_S k_{P-S} + Q_{TS,S} p_S + Q_{TS,V} p_S k_{V-S} \quad (7)$$

式中： R_{IS} 为内部售电收益； $Q_{TS,P}$ 为转售电量(峰段)； $Q_{TS,S}$ 为转售电量(平段)； $Q_{TS,V}$ 为转售电量(谷段)。

④补贴收益。主要为分布式光伏和分散式风电补贴收益。

$$R_S = Q_{PV} p_{PV,S} + Q_{WT} p_{WT,S} \quad (8)$$

式中： R_S 为网补贴收益； Q_{PV} 为光伏机组发电量； $p_{PV,S}$ 为光伏机组度电补贴； Q_{WT} 为风电机组发电量； $p_{WT,S}$ 为风电机组度电补贴。

4.2 “源-网-荷-储”一体化运营模式成本收益分析

1) 一体化运营模式的成本。

一体化运营模式投资建设成本、运维成本的计

算方法与传统模式相同。除了分布式能源、能源输配网络、储能、控制和保护设备，还包括信息化平台、为外部电网提供辅助服务设备的投资建设成本和运维成本。

①外购电成本。参与外部电力市场购买不足电量，购电价格为市场交易价格。

$$C_{OP} = Q_{OP,P} p_{T,S} k_{P-S} + Q_{OP,S} p_{T,S} + Q_{OP,V} p_{T,S} k_{V-S} \quad (9)$$

式中： $p_{T,S}$ 为外部电力市场购电价格(平段)。

②自主申报的容量成本。微网运营主体根据微网自平衡情况，按最大需求自主申报容量。

$$C_C = P_D p_{CD} \quad (10)$$

式中： P_D 为自主申报容量； p_{CD} 为申报容量价格。

2) 一体化运营模式的收益。

一体化运营模式下，自发自用收益和补贴收益的计算方法与传统模式相同。

①外部售电收益。参与外部电力市场，出售富余电量，售电价格为市场交易价格。

$$R_{OS} = Q_{OG} p_{T,OG} \quad (11)$$

式中： R_{OS} 为外部售电收益； $p_{T,OG}$ 为外部电力市场售电价格。

②内部售电收益。分为微平衡市场交易收益和外购电转售收益两部分。分布式能源通过微平衡市场交易，实现就近消纳，售电价格为微平衡市场交易价格。微网运营主体将外部电力市场购买电量转售给微网用户，售电价格为双方自主协商价格。同时微网运营主体在微网内部自主确定峰/谷/平电价比等电价参数，开展精细化需求侧响应。

$$R_{IS} = R_{MBT} + R_{TS} \quad (12)$$

$$R_{MBT} = Q_{MBT,P} p_{MBT} k_{MG,P-S} + Q_{MBT,S} p_{MBT} + Q_{MBT,V} p_{MBT} k_{MG,V-S} - Q_{MBT} p_{TD} \quad (13)$$

$$R_{TS} = Q_{TS,P} p_{MG,S} k_{MG,P-S} + Q_{TS,S} p_{MG,S} + Q_{TS,V} p_{MG,S} k_{MG,V-S} \quad (14)$$

式中： R_{MBT} 为微平衡市场交易收益； R_{TS} 为外购电转售收益； $Q_{MBT,P}$ 为微平衡市场交易电量(峰段)； p_{MBT} 为微平衡市场交易电价(平段)； $k_{MG,P-S}$ 为微网内峰平电价比； $Q_{MBT,S}$ 为微平衡市场交易电量(平段)； $Q_{MBT,V}$ 为微平衡市场交易电量(谷段)； $k_{MG,V-S}$ 为微网内谷平电价比； Q_{MBT} 为微平衡市场交易电量(峰/平/谷电量之和)； p_{TD} 为“过网费”； $p_{MG,S}$ 为微网内部销售电价。

③“过网费”收益。参与微平衡市场交易用户，需向微网运营主体缴纳“过网费”。

$$R_{TD} = Q_{MBT} p_{TD} \quad (15)$$

式中： R_{TD} 为“过网费”收益。

④辅助服务补偿收益。微网主要作为可中断负荷，为外部电网提供辅助服务。

$$R_{IL} = P_{IL} p_{CIL} + Q_{IL} p_{EIL} \quad (16)$$

式中： R_{IL} 为可中断负荷补偿收益； P_{IL} 为最大可中断容量； p_{CIL} 为可中断负荷单位容量补偿； Q_{IL} 为中断电量； p_{EIL} 为可中断负荷单位电量补偿。

4.3 两种运营模式经济性分析

利用净现值、内部收益率和投资回收期 3 个指标，分析传统运营模式和一体化运营模式下微网项目的经济性。

1) 净现值。净现值(net present value, NPV)是基准折现率下，项目寿命周期内年现金流折现到期初的累加值。净现值最大，项目经济性越好。

$$V = \sum_{t=0}^T F_t (1+i_0)^t \quad (17)$$

式中： V 为净现值； F_t 为第 t 年净现金流； i_0 为基准折现率； T 为项目周期。

2) 内部收益率。内部收益率(internal rate of return, IRR)是净现值为零时的折现率，反映项目投资利用效率。内部收益率越大，项目经济性越好。

$$V(R_0) = 0 \quad (18)$$

式中 R_0 为内部收益率。

3) 投资回收期。投资回收期(payback period, PP)是项目各年的折现净收入将全部投资收回所需的期限。投资回收期越短，项目经济性越好。

$$T_p = T_N - 1 + \frac{|F_{A,T_N-1}|}{F_{T_N}} \quad (19)$$

式中： T_p 为投资回收期； T_N 为项目累积净现金流首次为非负的年份； F_{A,T_N-1} 为第 $T_N - 1$ 年累积净现金流； F_{T_N} 为第 T_N 年净现金流。

5 算例分析

5.1 基本参数

目前涉及电、热、气多种能源的微网项目不多，本文仅以一个电能为主要能源的微网项目为例。

1) 项目概况。

微网分为 3 块区域，均为大工业用户，电压等级为 10kV，最大负荷为 11.13MW。项目寿命周期为 20 年，设备综合造价及相关成本参考当地标准，基准折现率取 7%。传统运营模式下微网项目总投资约 1.62 亿元，其中源侧约 14 500 万元，网侧投约 310 万元，储侧约 900 万元，信息化平台(能量管理系统)约 500 万元；一体化运营模式总投资约 1.68 亿元，其中源网储侧投资变化不大，信息化平台(大数据云计算平台、微平衡市场交易系统、能量管理系

统)约 1100 万元。图 7 为微网接线方案示意图。

2) 设备规模和投资主体。

微网内分布式光伏装机容量为 10MW，分散式风电装机容量为 16MW，储能装机容量为 6MW，并网点 35kV/10kV 变电站容量为 16MW。电源、输配电设备、储能、信息化平台等由不同主体投资。表 2 为微网设备规模和投资主体情况。

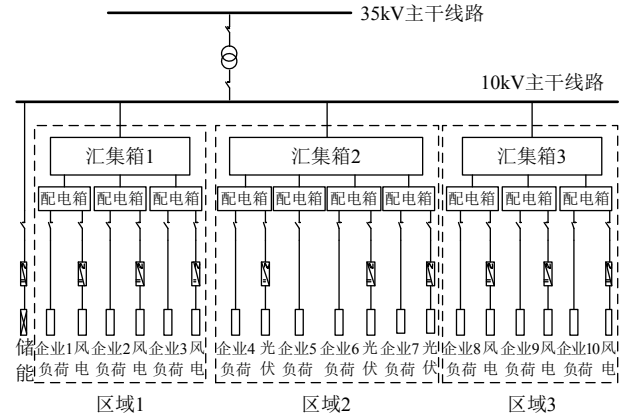


图 7 微网接线方案

Fig. 7 Connection scheme of microgrid

表 2 微网设备规模和投资主体
Tab. 2 Equipment scale and investment subjects of microgrid

类型	区域	规模	投资主体
分散式风电	区域 1 企业 1	4MW	风机制造企业
	区域 1 企业 2	2MW	风机制造企业
	区域 1 企业 3	4MW	风机制造企业
	区域 3 企业 8	2MW	风机制造企业
	区域 3 企业 9	2MW	风机制造企业
	区域 3 企业 10	2MW	风机制造企业
分布式光伏	区域 2 企业 4	3MW	企业 4
	区域 2 企业 6	4MW	企业 6
	区域 2 企业 7	3MW	企业 7
储能	微网	6MW	能源服务企业
输配及保护设备	微网	—	电网企业
信息化平台	—	传统模式：能量管理系统；一体化模式：大数据云计算平台、微平衡市场交易系统、能量管理系统	能源服务企业

3) 负荷及电源出力。

图 8 为四季典型日微网风光出力和负荷曲线。

4) 电价。

由于我国电力体制改革尚在推进过程中，本算例中相关电价参照国外成熟市场数据折算得到。外部电网大工业销售电价高峰时段为 8:00—12:00 和 17:00—20:00，平段时段为 12:00—17:00 和 20:00—24:00，低谷时段为 0:00—8:00，峰/平/谷电价比为 1.67:1:0.49；微网内部销售电价高峰时段为 20:00—24:00 和 0:00—5:00，平段时段为 5:00—10:00 和 16:00—20:00，低谷时段为 10:00—16:00，

峰/平/谷电价比为 1.5:1:0.5。表 3 为电价情况。

5) 微平衡市场交易和可中断负荷。

表 4 为微平衡市场交易情况。表 5 为微网和外部电网签订的可中断负荷合同情况。

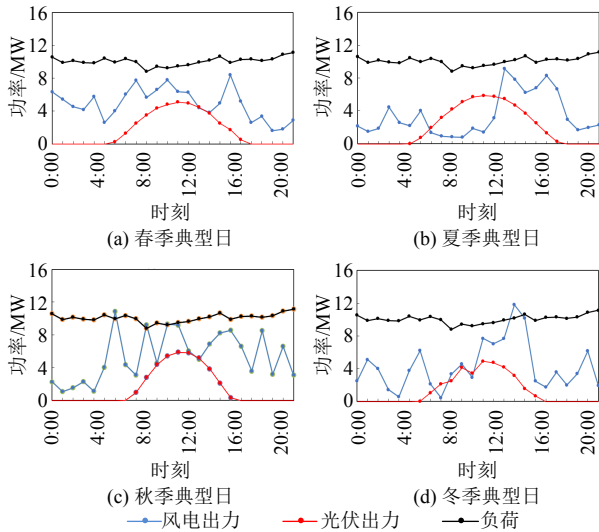


图 8 四季典型日微网风光出力 and 负荷曲线

Fig. 8 Curve of WT output, PV output and load on typical days

表 3 电价
Tab. 3 Electricity price

类型	价格	类型	价格
燃煤发电机组标杆上网电价	0.3910 元/kW·h	分散式风电度电补贴	0.1800 元/kW·h
风电机组标杆上网电价	0.7500 元/kW·h	外部电网销售电价(平段)	0.6418 元/kW·h
光伏机组标杆上网电价	0.5700 元/kW·h	外部电力市场售电价格	0.3519 元/kW·h
容量电价(变压器容量)	30 元/kVA·月	外部电力市场购电价格(平段)	0.5418 元/kW·h
容量电价(最大需量)	40 元/kW·月	微网销售电价(平段)	0.5776 元/kW·h
分布式光伏发电补贴	0.3700 元/kW·h	“过网费”	0.0300 元/kW·h

表 4 微平衡市场交易
Tab. 4 Micro balance market trading

售电方	购电方	年交易电量/(MW·h)	交易电价/(元/kW·h)
企业 1	企业 5	1115	0.5458
企业 2	企业 5	870	0.5382
企业 3	企业 6	886	0.5480
企业 4	企业 5	205	0.5462
企业 6	企业 9	723	0.5386
企业 8	企业 4	336	0.5472
企业 9	企业 5	300	0.5412
企业 10	企业 7	376	0.5425

表 5 可中断负荷合同
Tab. 5 Interruptible load contract

最大可中断容量	可中断时段	容量补偿	电量补偿
1MW	17:00—19:00	0.0150 元/kW/h	0.3500 元/kW·h

5.2 分析结果

图 9 和图 10 为传统运营模式和一体化运营模式下，春、夏、秋、冬四季典型日微网的运行情况(储能出力负值表示充电，内外交换负荷负值表示外

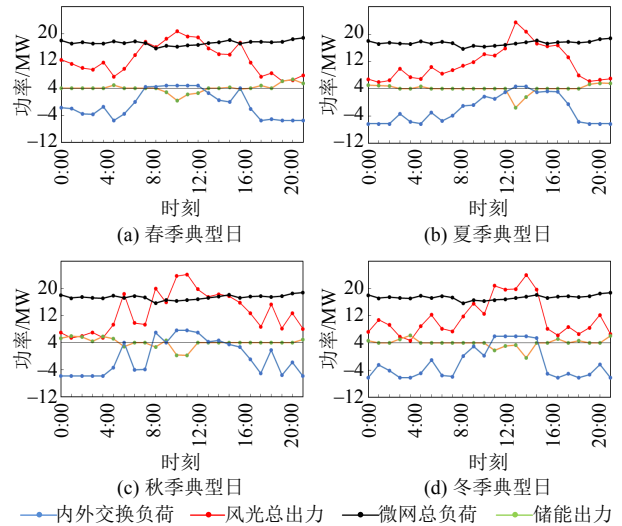


图 9 传统运营模式下微网运行情况

Fig. 9 Condition of microgrid operating under traditional operation model

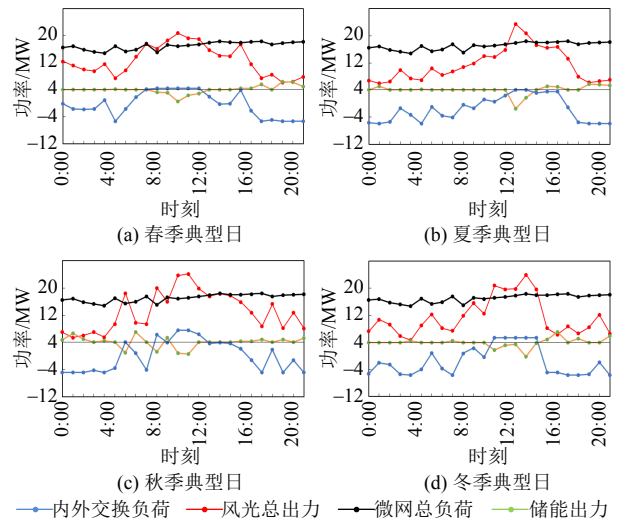


图 10 一体化运营模式下微网运行情况

Fig. 10 Condition of microgrid operating under integrated operation model

部电网供电)。

图 11 和表 6 为传统运营模式和一体化运营模式下，微网的成本/收益年值以及经济性对比情况。

分析可知，一体化运营模式下不平衡电量交换

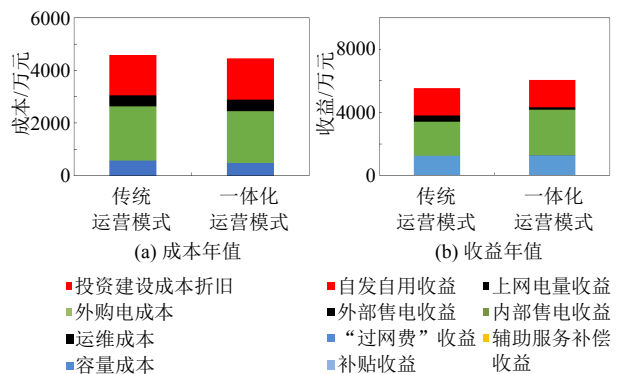


图 11 两种运营模式下微网的成本/收益年值

Fig. 11 Annual cost/profit of microgrid under two operation model

表6 两种运营模式下微网的经济性
Tab. 6 Economic analysis of microgrid under two operation model

运营模式	净现值/万元	内部收益率/%	投资回收期/年
传统运营模式	10 019	14.20	10.06
一体化运营模式	16 990	18.32	7.81

曲线的最大峰谷差为 9.31MW, 传统运营模式下不平衡电量交换曲线的最大峰谷差为 10.14MW, 微网和外部电网之间的电量交换更加友好。2 种运营模式下微网的成本差异不大, 但是一体化运营模式下微网的年收益比传统模式多 536 万元, 净现值、内部收益率和投资回收期等经济指标均好于传统运营模式, 收益来源更加多样化, 其中, 微平衡市场交易和内外两级购售电的收益相对较多。传统运营模式下投资储能、信息化平台等设备, 但是缺少合理的运营模式, 经济效益并不好; 一体化运营模式下, 通过微平衡市场交易、内外两级购售电、网对网辅助服务、内外两级需求侧响应、新型备用容量等机制, 能够实现微网的投资回报及增值。

6 结语

本文立足于我国新一轮电力体制改革和能源互联网的背景, 提出微网运营主体一体化和投资主体多元化的模式框架, 以及包括“源-网-荷-储”优化控制运行、微平衡市场交易、内外两级购售电、网对网辅助服务、内外两级需求侧响应、新型备用容量机制的微网“源-网-荷-储”一体化运营模式, 将减少投资风险, 实现合理投资回报, 为微网提供一条可复制、可推广、可持续的发展路径。

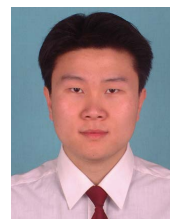
微网“源-网-荷-储”一体化运营及投资回报的核心, 不是从政府补贴中, 而是从电价中赚取, 其关键是分布式能源就近消纳以及微网和外部电网间不平衡电量交换曲线。微平衡市场交易为微网内部分布式能源就近消纳提供全新模式。对内实现微网自平衡, 对外具有一条灵活可控的交换曲线, 是微网增收的根本。微网和外部电网间不平衡电量交换曲线越友好, 微网一体化运营收益越高。

微网“源-网-荷-储”一体化运营模式将为微网内部分布式能源、储能等技术提供了广阔的环境和平台。目前我国正处于电力体制改革和能源互联网的能源领域转型关键时期, 还需要通过建立并完善相关市场机制及政策法规, 支撑并保障微网“源-网-荷-储”一体化运营模式的应用和微网的发展。

参考文献

[1] 习近平. 积极推动我国能源生产和消费革命[EB/OL]. (2014-06-13). http://www.gov.cn/xinwen/2014-06/13/content_2700479.htm.

- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见[EB/OL]. (2016-07-04). http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201607/t20160706_810652.html.
- [3] 国家能源局. 关于公布首批多能互补集成优化示范工程的通知[EB/OL]. (2017-01-25). http://zfxgk.nea.gov.cn/auto82/201702/t20170206_2500.htm.
- [4] 国家能源局. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. (2016-02-24). http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.
- [5] 国家能源局. 关于公布首批“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目的通知[EB/OL]. (2017-06-28). http://zfxgk.nea.gov.cn/auto83/201707/t20170706_2825.htm.
- [6] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107(in Chinese).
- [7] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《推进并网型微电网建设试行办法》的通知[EB/OL]. (2016-07-17). http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201707/t20170724_855213.html.
- [8] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发能源发展“十三五”规划的通知[EB/OL]. (2016-12-26). http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201701/t20170117_835278.html.
- [9] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《能源生产和消费革命战略(2016-2030)》的通知[EB/OL]. (2016-12-29). http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/t20170425_845284.html.
- [10] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
Zeng Ming, Yang Yongqi, Liu Dunnan, et al. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124(in Chinese).
- [11] 刘敦楠, 唐天琦, 杨建华, 等. 面向能源互联网的微平衡调度交易设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 1-8.
Liu Dunnan, Tang Tianqi, Yang Jianhua, et al. Energy internet based micro balance dispatching and trading design[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 1-8(in Chinese).
- [12] 刘敦楠. 能源互联网: 能源-信息-经济下的共享演化[N]. 中国能源报, 2016-06-20(5).
- [13] 国务院. 关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见[EB/OL]. (2014-11-26). http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/26/content_9260.htm.
- [14] 刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3057-3063.
Liu Dunnan, Zeng Ming, Huang Renle, et al. Business models and market mechanisms of energy internet(2)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3057-3063(in Chinese).



刘敦楠

收稿日期: 2018-01-31。

作者简介:

刘敦楠(1979), 男, 副教授, 研究方向为能源互联网、电力市场, E-mail: liudunnan@163.com;
徐尔丰(1993), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为能源互联网, E-mail: 18810905481@163.com;

许小峰(1992), 男, 硕士研究生, 研究方向为能源互联网, E-mail: xxfncpeu@163.com。

(责任编辑 徐梅)