

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.002

区域分布式能源网优化运行与多边交易研究

胡泊¹, 王爽²

(1. 新奥集团股份有限公司, 河北 廊坊 065001; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 基于能源网络的拓扑分析和运筹学方法, 研究提出了包括气、电、热(冷)等能源品种的能源网在两层架构下, 能源交易和流动方案、产能/储能设施运行方案、用能设备的运行方案等系统协同优化的运行逻辑方案。通过构造对应的数学模型和区域分布式能源网研究案例, 验证所提方案的理论有效性。

关键词: 分布式能源; 网络; 运行; 交易; 优化

中图分类号: TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0009-06

Research on Operation Optimization and Multilateral Trade for Regional Distributed Energy Grid

HU Bo¹, WANG Shuang²

(1. ENN Group Co., Ltd., Langfang Hebei 065001, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Based on the topology analysis of energy grid and operational research method, presents the logical scheme of coordinated optimization for the system, incorporated energy trade and flow plan, energy generation and storage plan, operation plan of energy using equipment, etc., the energy grid is divided into two layer architecture in which has gas, electric power, heat(cold). The built math models and study case of regional distributed energy grid proves the academic validity of proposed scheme.

Key Word: distributed energy; grid; operation; trade; optimization

区域分布式能源网连接多个分布式能源和用户, 相对集中式能源网络, 它是多能源品种、能源生产和消费更为高效、多边交易的系统。在德国, “能源公社”大量出现, 其产用能主要依托区域分布式能源网。我国已开始了探索^[1], 预计伴随着配售电、电力交易、电热(冷)定价等方面体制机制的突破, 区域分布式能源网将作为一种革命性的能源生产和消费模式, 将在中国得到长足发展。

然而, 区域分布式能源网的运行和交易管理是相当复杂的。首先, 管理的对象众多。从能源品种看, 包括气、电、热(冷)等。从基础单元看, 包括分布式产用能一体化单元、储能单元、能源网络设施、与集中式能源网的并网接口等。其次, 要充分

挖掘能源价值提升效能。管理平台要能够制定运行控制方案, 一是优化基础单元的能源生产和消费, 二是优化能源网络的能源流动, 大幅度提高能源生产和消费效率。最后, 还要引导多用户间的能源交易。这就要求管理平台还能够制定交易方案, 并且交易和运行方案还要相互兼容, 不能存在物理冲突。用户间的能源交易、网络上的能源流动以及各个基础单元的产用能方案是要相互协调的。

从目前公开发表的文献和有关实践来看, 还未见综合解决区域分布式能源网络的优化运行和交易协同问题的构架性方案, 比较多见的是瞄准某一方面的技术问题提出解决方法, 包括解决新能源和化石能源协调产能问题, 网络可用通道容量的计算, 虚拟调度技术等。本文在区域分布式能源网两层管理架构的基础上, 提出了能源交易和流动方案、产能/储能设施运行方案、用能设备的运行方案等系统协同优化的运行逻辑方案, 并通过构造数学模型和数值算例, 验证了所提方案的理论有效性。

收稿日期: 2015-04-04

作者简介: 胡泊(1979), 男, 湖南衡阳人, 高级工程师, 博士, 现任新奥集团战略规划总监, 主要从事能源战略与规划研究(e-mail) hubod@enn.cn。

1 优化运行和交易协同基本逻辑

1.1 两层管理架构

为实现运行和交易管理功能，面对众多的管理对象，首先需要建立清晰的管理架构。借助信息技术中“云”的概念，区域分布式能源网实际上可以被划分为两个层次。

第一层是基础资源层，主要是众多的分布式产用能一体化单元，即能源“私有云”。比如家庭、建筑、工业等用户，他们利用风、光、地热、天然气等能源的产能设施，也有电、热、冷、热水等各种用能设备，构成了一个个小型的能源系统。

第二层是网络管理层，它将众多的能源“私有云”互通互联，形成能源网，即能源“公有云”。要想实现多个“私有云”之间的互备互调和资源价值的最大化利用，还必须进行系统优化的网络管理。

1.2 运行和交易逻辑

网络管理层是系统优化的主要依托，应该具有三个主要功能，即挖掘能源供需态势、优化网络能源流动方案、实施交易协同，这与基础资源层每个单元的能源生产和消费方案优化一起构成了基本的优化运行逻辑。在每一个调度周期中，都要执行这样的优化，详细介绍如下。

一是挖掘能源供需态势。对采集和存储的海量数据进行挖掘分析，如产用能数据、交易数据、能源网络数据，以及影响可再生能源生产的气象数据等，实时掌握能源供需趋势，及时发现用户间调剂能源余缺的交易机会。

二是优化网络能源流动方案。根据各“私有云”能源供需态势，结合能源网络参数和价格信号，通过网络优化，得到能源物流损耗最小、能源价值最大化的网络能源流动方案，事实上，也就形成了初步的能源交易方案。

三是实施交易协同。将初步形成的方案反馈至各“私有云”，触发每个基础单元开展并行计算，优化产用能方案。然后，将各个私有云的优化结果（即更为接近最优方案的“私有云”能源供需态势），回传给网络管理层，再一次进行网络优化。如此往复迭代直到收敛，得到系统最优的用户产用能方案和交易方案，并实施交易，最终实现协同优化。

需要明确的是，网络管理层所提供的交易方案

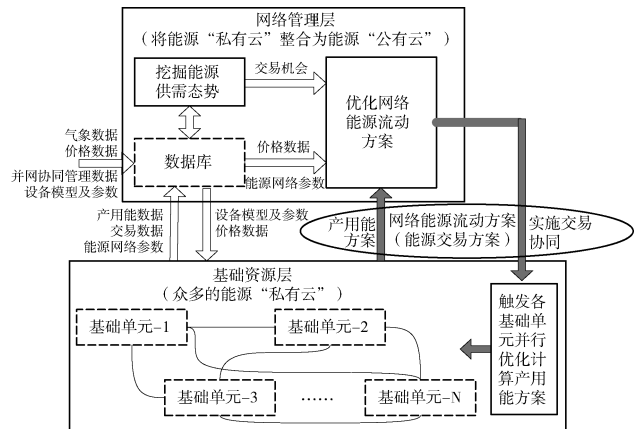


图1 区域能源网两层架构下的运行逻辑框图

Fig. 1 Operational Logical Block Diagram of Regional Distributed Grid Under Two-Layer Structure

对用户来讲是一种推荐方案，用户也可以选择自主决定交易行为，但这一般会受到系统的物理约束（例如，网络的拓扑结构、系统运行状态、管线可用容量等）和专业知识的限制。所以，绝大多数用户将会选择网络管理层的服务，来帮助自己进行能源生产、消费和交易的优化。

2 数学优化模型^[2-7]

2.1 网络管理层

本数学优化模型对应网络管理层优化网络能源流动方案的功能。以下分别就其目标函数、约束条件、输入数据和参数等做简要介绍。

2.1.1 目标函数

目标是实现系统能源价值的最大化，主要考虑两个方面，一是尽量利用余能，实现能源交易增值；二是尽量利用可再生能源，使环境成本最小。其中，除了天然气消耗之外，区域内电、热、冷和热水需求以就地平衡为主，集中式能源供应只作为补充。考虑到电力来源较为多元，集中式电力供应的环境成本参考2014年我国发电能源结构折算确定。目标函数的表达式如下所示。

$$\max J = \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i,j=1}^N (T_{ijk} - C_{eijk}) - C_{eok} \right] \quad (1)$$

式中： N ——网络节点数； M ——能源品种数量； T_{ijk} ——网络能源流动优化中第 k 种能源在节点 j 至节点 i 方向上的交易金额； C_{eijk} ——第 k 种能源在节点 j 至节点 i 方向上的交易所带来的环境成本； C_{eok} ——来自外部集中式能源网供应的第 k 种能源

所带来的环境成本,这里考虑区域分布式能源网不向集中式能源网反送能源。

2.1.2 约束条件

能源网络拓扑方程:描述网络拓扑节点之间是否相互连通的高度稀疏矩阵。

能源流动阻塞管理:保证能源网络上的能源流动和交易在不超出管线可用输送容量的情况下进行。考虑电能以光速传输,其供能系统的响应速度比气、热、冷和热水系统要快得多,同时电线相对于气、热、冷和热水管线,并不具备储能的功能。因此,本文后续模拟计算认为短时间的,例如15分钟的调度管理间隔中,电能之外的能源品种不发生阻塞,也就是说阻塞管理主要考虑了对电能流动的管理。

能源交易平衡:保证能源消费、区域内能源生产与集中式能源网的能源支援之间是平衡的。

优先调度可再生能源模拟:主要通过目标函数里的环境成本项来对优化计算进行影响。同时,为了得到可再生能源的利用率,设置下限为0,上限为可再生能源功率预测值的变量来模拟某一拓扑节点上实际利用的可再生能源。

能源网络节点状态量约束:主要包括电网节点的电压幅值约束、气网节点的压力数值约束等。在前面提到过,本文计算主要考虑了对电能流动的阻塞管理,也就是说,认为气网、热网等的节点参数不会跃限,因此,对于能源网络节点参数的状态量约束也主要考虑电网。

2.1.3 输入数据和参数

网络:拓扑结构、线路管网的技术经济参数、网络节点运行参数的限值等。

生产:可再生能源的发电功率预测数据、基础单元的产能态势预测(初始迭代)、基础单元回传的优化方案中的生产数据。

消费:基础单元的用能态势预测(初始迭代)、基础单元回传的优化方案中的消费数据。

价格:包括电/气/热/冷/热水价格数据。

2.1.4 输出结果

网络能源流动优化方案(交易方案)

2.2 基础资源层

本数学优化模型对应优化基础单元产用能方案的功能。以下分别就其目标函数、约束条件、输入数据和参数等做简要介绍。

2.2.1 目标函数

目标是实现基础单元能源供应的经济性最优,考虑的能源供应成本包括:一是基础单元自产能源的燃料消耗和环境成本,二是交易费用以及由此产生的环境成本,三是集中式能源网供能费用以及由此产生的环境成本。

$$\min J = \sum_{k=1}^M [(F_{ik} + C_{eik}) + \sum_{j=1}^N (\bar{T}_{ijk} + \bar{C}_{eijk}) + (T_{iok} + C_{eio})], \quad 0 < i \leq N \quad (2)$$

式中: N ——最大的网络节点编号; M ——能源品种数量; F_{ik} ——第 k 种能源在基础单元 i 转化为终端能源的消耗量; C_{eik} ——对应的环境成本。 \bar{T}_{ijk} 表示基础单元优化中第 k 种能源在节点 j 至节点 i 方向上的交易金额, \bar{C}_{eijk} 是对应的环境成本。 T_{iok} 表示基础单元 i 来自外部集中式能源网供应的第 k 种能源的交易金额, C_{eio} 是对应的环境成本。这里同样考虑不向集中式能源网反送能源。

2.2.2 约束条件

除了与网络管理层优化数学模型相同的能源供需平衡、优先调度可再生能源模拟之外,还包括以下几类约束方程。

产能设备模拟方程:主要模拟了光伏、风电和燃气多联供,其中,光伏和风电主要根据实测数据散点模拟,而燃气多联供则较为复杂,分别建立了燃机、励磁发电系统、余热锅炉等的数学模型。

产能设备的技术经济限值约束:主要包括设备的容量、效率、调节等性能参数约束。

2.2.3 输入数据和参数

主要包括来自网络管理层的交易方案、产用能设备的技术经济参数、能源价格等数据和参数。

2.2.4 输出结果

基础单元的产用能优化方案。

3 研究案例

3.1 区域分布式能源网案例构造

在标准的IEEE新英格兰39节点系统拓扑结构基础上,相应增加了气网和热网,形成区域能源网,并考虑接入若干基础单元,如图2所示。需要说明的是,考虑到图示的简洁性,拓扑节点之间的线路联系同时代表了电网和气网,而较为邻近的节点之间有热网联系。

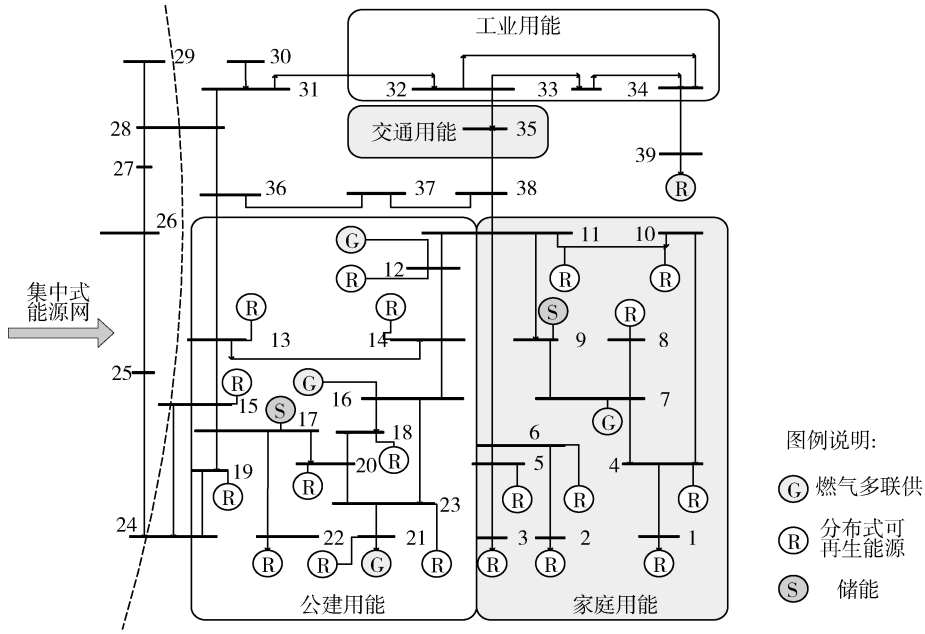


图2 测试用区域分布式能源网图示

Fig. 2 Regional Distributed Energy Grid For Testing

测试网络被划分为家庭用能区，包括6栋别墅、1栋公寓(含36户)；公建用能区，包括1个医院、2个学校、1个政府机构、3栋写字楼、1个购物中心；工业用能区，包括若干稳定的工业负荷；交通用能区，包括1个CNG加气站。由图2可见，对太阳能、风能等可再生能源尽可能做了因地制宜的利用，同时设置了4处燃气多联供系统作为稳定的能源供应来源(对基础单元的进一步介绍详见表1)。

表1 测试系统基础单元设置

Table 1 Settings of Basic Units in The Testing System

编号	名称	产用能情况
1	1#别墅	产能: 4.5kW 屋顶光伏, 发电功率参考实测数据 用能: 电(考虑同时率的最大负荷50kW, 具体取值参考负荷曲线); 热(取暖负荷29.6kW, 由地理式电缆取暖); 热水(160 L/d, 电热水器供应, 按居住5人, 参考北京住户热水用量和用水结构调查数据)
2	2#别墅	同1#别墅
3	3#别墅	同1#别墅
4	4#别墅	产能: 6kW 屋顶光伏 用能: 电(最大负荷14kW, 具体取值参考负荷曲线); 气(19 m ³ /d, 气灶和壁挂炉耗气); 热(取暖负荷42kW, 由两台24kW燃气壁挂炉双机并联供热); 热水(192 L/d, 燃气壁挂炉供应, 按居住6人)

编号	名称	产用能情况
5	5#别墅	同4#别墅
6	6#别墅	同4#别墅
7	1#能源站	1台燃气内燃机发电机组, 额定功率260kW, 余热输出为420kW
8	公寓楼	3个单元; 6层; 一层2户, 80m ² 两居和110m ² 三居; 共36户。 总产能: 20kW 屋顶光伏。 用能(2居): 电(最大负荷5.6kW, 具体取值参考负荷曲线); 气(1 m ³ /d, 气灶耗气); 热(取暖负荷5.6kW, 由1#能源站供应); 热水(96L/d, 居住3人) 用能(3居): 电(最大负荷7.7kW, 具体取值参考负荷曲线); 气(1.5 m ³ /d, 气灶耗气); 热(取暖负荷7.7kW); 热水(160L/d, 居住5人)。 公寓楼电、热、热水主要由1#能源站供应。
9	1#储能站	200kWh 锂电池组
10	1#分布式风电	1.5MW 容量
11	1#分布式光伏	1MW 容量
12	医院	产能: 燃气多联供(3台燃气内燃机发电机组, 单台额定功率835kW, 单台余热输出为988kW); 热负荷由地源热泵空调承担; 500kW 屋顶光伏 用能: 电(最大负荷2200kW); 热(最大热负荷5600kW); 热水(最大热水负荷2570kW); 电、热、热水负荷具体取值参考相应负荷曲线; 主要由医院的产能设备供能

编号	名称	产用能情况
13	中学	产能: 200kW 屋顶光伏 用能: 电(最大负荷 1 120kW, 具体取值参考负荷曲线); 热(取暖负荷 1 400kW); 热水(38 400L/d, 按 2 000 人住校计, 并结合用热水结构调查数据); 主要由 2#能源站供能
14	小学	产能: 200kW 屋顶光伏 用能: 电(最大负荷 1 120kW, 具体取值参考负荷曲线); 热(取暖负荷 1 400kW); 热水(30 720L/d, 按 2 000 人住校计, 并结合用热水结构调查数据); 主要由 2#能源站供能
15	政府机构	产能: 100kW 屋顶光伏 用能: 电(最大负荷 336kW, 具体取值参考负荷曲线); 热(取暖负荷 420kW); 热水(1 600L/d, 500 人); 主要由 2#能源站供能
16	2#能源站	7 台燃气内燃机发电机组, 单台额定功率 835kW, 单台余热输出为 988kW, 1 台制热量为 3 000kW 的燃气热水锅炉
17	2#储能站	600kWh 锂电池组
18	1#写字楼	产能: 100kW 屋顶光伏 用能: 电(最大负荷 560kW, 具体取值参考负荷曲线); 热(取暖负荷 700kW); 热水(3 200L/d, 1 000 人); 主要由 2#能源站供能
19	2#写字楼	同 1#写字楼
20	3#写字楼	产能: 200kW 屋顶光伏 用能: 电(最大负荷 2 240kW, 具体取值参考负荷曲线); 热(取暖负荷 2 800kW); 热水(12 800L/d, 4 000 人); 主要由 2#能源站供能
21	购物中心	产能: 燃气多联供(8 台燃气内燃机发电机组, 单台额定功率 835kW, 单台余热输出为 988kW); 500kW 屋顶光伏 用能: 电(最大负荷 6 000kW, 具体取值参考负荷曲线); 热(取暖负荷 7 000kW); 主要由购物中心的燃气多联供系统供能
22	2#分布式光伏	1MW 容量
23	3#分布式光伏	1MW 容量
24~29	与集中式能源网的并网点	除了天然气消耗之外, 区域内电、热、冷和热水需求以就地平衡为主, 集中式能源供应只作为补充。同时, 本文不考虑向集中式能源网反送能源
30~31	备用节点	节点上暂未接入基础单元
32~34	工业负荷	共计 1.2MW 稳定的工业电力负荷
35	CNG 加气站	常规站, 加气量 1 000 m ³ /h(标准状态气体)
36~38	备用节点	节点上暂未接入基础单元
39	4#分布式光伏	3MW 厂房屋顶光伏

注: 计算针对冬季, 未列出冷负荷。

3.2 仿真数值计算

借助 AMPL^[8] (A Mathematical Programming

Language) 数学建模软件, 并调用 IPOPT^[9-11] (Interior Point Optimizer) 优化求解器, 以分别完成优化模型的搭建和优化方案的计算。利用 PSAT^[12-13] (Power System Analysis Tools) 和 MATLAB (Matrix Laboratory) 软件搭建仿真模型(电与气、热/冷不在一个时间常数尺度上, 因此可以单独仿真), 完成对调度周期内能源网络状态变迁轨迹的计算。

选择冬季的傍晚, 能源需求变化较快的 18:00—19:00 之间的 1 h 作为研究时段, 并假设每 15 min 执行一次运行和交易管理(考虑到优化计算的规模较小, 本研究忽略了优化所需时间以及数据通信的时间, 在后续实践中可以利用模型预测技术在下一优化管理周期到来之前进行优化运算), 以下针对第一个管理周期的优化效果(见表 1), 做一个简要分析。

表 2 中, 可再生能源利用率 = 可再生能源实际利用量/可再生能源理论可供能量; 综合能源效率考虑了区域内能源生产和配送效率; 交易价值指的是由于用户间余缺调剂带来的价值。本周期不优化, 指的是基础单元按照自主调节供能, 不考虑用户间的能源余缺调剂。

通过仿真数值计算, 验证了所提方案的理论可行性。由表 2 的计算结果可以看到, 通过对网络和基础单元的优化管理, 即便面对众多管理对象, 以及较大程度提高能源效率和引导多边交易这样复杂的管理要求, 也仍然能够执行有效的运行和交易管理。相对不进行优化管理的情形, 减少了能源供应和消耗, 提升了可再生能源利用率和综合能源效率, 同时取得了一定的能源交易价值。其中, 可再生能源发电装机主要为光伏发电(可再生能源装机共计 10.43MW, 光伏 8.93MW, 风电 1.5MW), 由于装机规模不大, 同时光伏发电在傍晚的发电功率急剧减小(18:00 时, 出力系数仅 0.001), 因此可再生能源的整体利用率比较高。

表 2 第一个运行和交易管理周期优化效果汇总

Table 2 Summary of the Optimization Results After The First Cycle of Operation and Transaction

分类	能源供应总量 /t 标煤	能源消费总量 /t 标煤	可再生能源利用率/%	能源综合效率/%	交易增值/元
本周期不优化	4.1	2.9	90.3	70.7	0
优化管理后	3.6	2.7	98.5	75.2	959.6
优化价值	0.5	0.2	8.2	4.5	959.6

以第一个优化周期的余能交易情况(仅考虑区域内用户之间的交易)做简要分析介绍,见表3。

表3 第一个运行和交易管理周期余能交易情况

Table 3 Transaction Summary for The First Cycle of Operation and Transaction

	节点	节点	交易量/(kW·h)	交易金额/元
电力	12	13	220	132
	12	14	139	83.4
	21	20	320	192
	小计			407.4
	节点	节点	交易量/m ³	交易金额/元
供热	12	13	20 000	43.4
	12	14	20 000	43.4
	21	20	40 000	86.8
	小计			173.6
	节点	节点	交易量/t	交易金额/元
热水	12	13	19.7	118.2
	12	14	17.9	107.4
	21	20	27	162
	小计			378
合计交易金额/元				959.6

从表3可以发现,一是在用户间的余能交易中,电力占据了主要的份额,这是由于相对热和热水等终端能源产品,电力配送更为灵活便捷、损耗也较小。二是将负荷特性互补(可以是某些时段上)的用户临近布局,更有利于余能调剂和能效提升。例如,随着夜晚的到来,连接在节点12的医院负荷逐步降低,而燃气多联供系统的高效运行要求其工作在负荷较满的位置,这就导致了医院的内部供能能力富裕。此时,优化决策将医院富余的电力、热力和热水以相对较低的价格卖给附近的两所学校,同时将节点16上的燃气多联供能源站部分燃气机组停运。因此,在能源规划阶段,除了将产能设备与用户负荷特性相匹配,也有必要将负荷特性互补的用户临近匹配。

4 结语

通过仿真模拟和优化计算,量化论证了提出的区域分布式能源网优化运行于多边交易方案的理论有效性。该方案具备以下优势:

1) 高效管理分布式能源这样的产能用能一体化

单元。

2) 实现大量分布式用户间的互备互调和优化配置。

3) 以系统能效最优和能源价值最大化为目标,来牵引实现多边交易。

从而为应对区域分布式能源网提出的前瞻性运行技术挑战,提供了解决方案,将成为实现能源生产和消费方式变革的手段之一。

参考文献:

- [1] 刘惠萍. 区域分布式能源的智能微网能源管理[J]. 电力与能源, 2012, 33(5): 414-417.
- [2] 魏海蕊, 董明. 基于双层规划的分布式能源系统供能网络构建模型研究[J]. 中国矿业, 2009, 18(9): 108-115.
- [3] 丁明, 马凯, 毕锐. 基于多代理系统的多微网能量协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 1-8.
- [4] 周念成, 金明, 王强钢, 等. 串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 13-18.
- [5] 刘方, 杨秀, 时珊珊, 等. 考虑不确定因素下含充换储一体化电站的微网能量优化[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 669-676.
- [6] 王澄, 徐延才, 魏庆来, 等. 智能小区商业模式及运营策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 147-154.
- [7] 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 365-373.
- [8] FOURER R, GAY D M, Kernighan B W. AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming [M]. 2nd ed. Belmont, CA: Thomson Brooks Cole, 2003: 1-64.
- [9] WÄCHTER A. An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Optimization with Applications in Process Engineering [D]. Carnegie Mellon University, 2002.
- [10] WÄCHTER A, BIEGLER L T. Line Search Filter Methods for Nonlinear Programming: Motivation and Global Convergence [J]. SIAM Journal on Optimization, 2005, 16(1): 1-31.
- [11] WÄCHTER A, BIEGLER L T. On the Implementation of an Interior-Point Filter Line-Search Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming [J]. Mathematical Programming, 2006, 106(1): 25-57.
- [12] MILANO F, VANFRETTI L, MORATAYA J C. An Open Source Power System Virtual Laboratory: The PSAT Case and Experience [J]. IEEE Transactions on Education, 51(1): 17-23.
- [13] VANFRETTI L, MILANO F. Application of the PSAT, an Open Source Software, for Educational and Research Purposes [C]. IEEE PES General Meeting, Tampa, 2007, 24-28.

(责任编辑 张春文)