

# 基于共享储能的微网园区系统能量协同优化

周步祥<sup>1</sup>, 邹家惠<sup>1</sup>, 董申<sup>2</sup>, 廖敏芳<sup>1</sup>, 张致强<sup>3</sup>

(1. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司建设工程咨询分公司, 四川 成都 610011; 3. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术国家重点实验室, 四川 成都 610011)

**摘要:** 能源互联网是冷、热、电、气高度融合的新兴途径, 实现了能源系统的多目标综合优化。首先将共享储能与源-网-荷-储的微网园区综合能源系统相结合, 提出了包含光伏、风力发电等分布式能源的协同优化模型; 然后通过分析广义能源互联网的运营模式, 综合考虑社区综合能源系统中重要设备及负荷等因素, 构建以经济性为能量协调优化目标函数; 其次, 为实现分布式能源的充分利用, 在微网优化的基础上, 加入电网层的能量优化; 最后, 利用模糊遗传算法对构建模型进行求解, 通过具体算例验证了所提模型的有效性。由于该方案合理利用共享储能, 优化过程将能量优化与经济优化相结合, 表明所提方案有助于降低费用、合理分配电能。

**关键词:** 能源互联网; 协调优化; 源-网-荷-储; 模糊遗传

**中图分类号:** TM72    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21446

## Energy Cooperative Optimization of Micro-grid Campus System Based on Shared Energy Storage

ZHOU Buxiang<sup>1</sup>, ZOU Jiahui<sup>1</sup>, DONG Shen<sup>2</sup>, LIAO Minfang<sup>1</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 2. Construction Engineering Consulting Branch of Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610011, Sichuan, China; 3. State Key Laboratory of Nuclear Reactor System Design Technology, Chengdu 610011, Sichuan, China)

**Abstract:** Energy internet is a new way for the highly integration of cold, heat, electricity, and gas, so as to achieve multi-objective comprehensive optimization of energy systems. Firstly, the shared energy storage was combined with the integrated energy system of the micro-grid park of source-grid-charge-storage, and a collaborative optimization model including distributed energy sources such as photovoltaics and wind power was proposed. Then through the analysis of the broad energy internet operation mode, and comprehensive considering the important equipment and load in the community's integrated energy system, an objective function of energy coordination optimization based on economics was constructed. Secondly, to achieve the full use of distributed energy, based on the optimization of the microgrid, the energy optimization of the grid layer was added. Finally, the fuzzy genetic algorithm was used to solve the construction model, and the effectiveness of the proposed model was verified by a specific example. Since the scheme makes reasonable use of shared energy storage, the optimization process combines energy optimization with economic optimization, indicating that the proposed scheme helps reduce costs and rationally distribute electrical energy.

**Key words:** energy internet; coordination and optimization; source-grid-charge-storage; fuzzy genetic

目前对于能源互联网(energy internet, EI)的研究, 有些国家已经不仅限于理论的研究, 开始步入实践阶段。一种未来可再生电力能源传输和管理(future renewable electrical energy delivery&management, FREEDM)系统, 由美国北卡罗莱纳州立大学提出, 目前已经成为初步具备能源

互联网特征的能量管理系统<sup>[1]</sup>。德国技术创新计划 E-energy 从自动在线测试仪(in circuit tester, ICT)技术与现有整个电力系统融合的角度, 提出了能源互联网的概念, 并在实现系统运行双侧协调方面取得了较为显著的应用效果<sup>[2]</sup>。日本建立的数字电网使电能自身携带的信息进行电力的

调度和优化,从而提升了能源互联网的信息交互技术,引领其步入到一个新的层次。我国对于能源互联网的研究工作已经进入到白热化阶段,尤其是今年国家电网的会议上提出的“泛在电力物联网”的概念,将该技术的研究推进高潮。

“源-网-荷-储”是实现能源互联网的重要途径,共享储能是其中关键技术。文献[3]的研究对象为居民社区,为解决社区综合能源系统多能需求,如冷、热、电,提出了利用混合整数线性规划超结构模型进行问题的解决。为保障园区合理的投资回报,文献[4]从“源-网-荷-储”微平衡市场、网对网辅助服务、优化控制运行、新型备用容量机制、内外两级购售电等方面,提出微网运营主体一体化以及投资主体多元化的模型,对该园区建立一体化运营模式,提出微网经济性分析方法。文献[5]对分布式能源随机建模,采用场景分析法分析,并建立了冷热电联产(combined cooling heating and power, CCHP)系统、新能源以及储能的区域综合能源系统联合调度模型。上述研究都是对于社区以及园区的区域调度模型的分析,对于园区的能量协同优化研究不够深入。

本文研究在能源互联网的环境下,以电力为主要能源,构建园区微网与共享储能结合的优化调度模型。根据微网能量约束条件以及负荷的预测数据,调整分布式能源出力,进而根据成本建立的目标函数进行计算,调整各微源包括共储能的实际出力。采用模糊遗传算法计算得到最优协调出力结果。

## 1 “源-网-荷-储”协调优化运营模式及模型构建

### 1.1 协调优化运营模式

“源-网-荷-储”传统的运营模式是一个包括“电源”、“电网”、“负荷”、“储能”的统一整体解决方案的运营模式,该模式主要为“源-源”互补、“源-网”协调、“网-荷-储”互动。基于能源互联网的“源-网-荷-储”模式,则可应用于整个广泛的能源行业,且信息交互更为多元,主要体现在以下2个方面:

1)多种能源互补。基于能源互联网的“源”包括多种能源,不仅仅指电力,石油、天然气等能源也包括在内,能源之间互不协调,强调各能源之间可相互替代,用户可任意选择能源的不同种

取用方式。

2)“源-网-荷-储”协调。协调内容主要包括能源的开发利用、能量传输网络之间以及资源运输网络之间的协调,还包括能源领域的用能综合管理。其架构如图1所示。

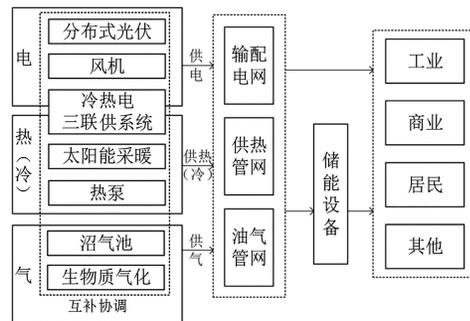


图1 微网园区“源-网-荷-储”示意图

Fig. 1 Schematic diagram of “generation-grid-load-storage” in the micro-grid park

微电网是一个具备自我控制和自我能量管理的自治系统,既可以与外部电网并网运行,也可以孤立运行<sup>[6]</sup>。微电网包括可调度单元、能源存储系统和需求侧管理系统<sup>[7]</sup>。保障微网内能源供需平衡,减少弃风、弃光率,以达到促进节能、降低园区微网运行成本的目的,使经济、技术、环境等综合效益最大化。

### 1.2 园区微网模型构建

文章以分布式电源(distributed generation, DG)为主构建园区微网模型。微网社区能源系统结构模型如图2所示。图2中,由用户、电动汽车、蓄电池等具有的储能装置共同组成一个共享储能系统,与分布式能源一起参与该园区系统的电能调度。社区运营商配有风电、光伏和共享储能,用户安装有小型光伏电源。

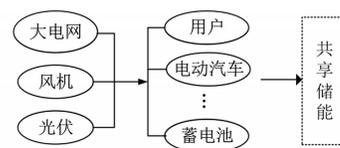


图2 社区能源系统结构模型图

Fig.2 The diagram of community energy system structure model

为了满足用户自身用电需求以及能源合理利用,在用电高峰期,自产电能无法供给大量用电负荷时,需从社区运营商购电,而用户在用电低谷期,则将多余电能输送至运营商。运营商负责调配电能的输送,园区电能之间可以相互利用,当园区电能不够,则从大电网购电以满足用户用电需求。用户需要向运营商支付一定数额

租赁费,运营商需为园区提供合理电能调度优化安排,以及协调与大电网之间的电能交易。图3为用户电量交易模型图。

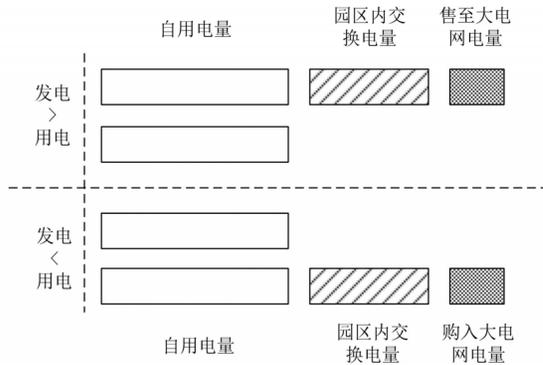


图3 用户电量交易模型

Fig.3 User power transaction model

### 1.2.1 共享储能模型

假设充电、放电效率分别为 $\eta_{in}, \eta_{out}$ , 计及储能能在能量转换中的损失, 且 $0 \leq \eta_{in} \leq 1, 0 \leq \eta_{out} \leq 1$ , 则电能充放电模型为<sup>[8]</sup>

$$S_{OC}(t) = S_{OC}(t-1) + \eta_{in} \sum_{n=1}^N p_{ESS,n,t}^{in} - 1/\eta_{out} \sum_{n=1}^N p_{ESS,n,t}^{out} \quad (1)$$

式中: $S_{OC}(t)$ 为 $t$ 时刻电能的荷电; $p_{ESS,n,t}^{in}, p_{ESS,n,t}^{out}$ 分别为用户 $n$ 在 $t$ 时段内的充、放电功率。

共享储能运营商的调配作用, 致使整个园区微源与微源、储能之间相互配合, 用电低谷时期, DG出力部分作用于负荷, 剩下的供给储能, 以保证用电高峰时期、DG无法满足用电需求时, 储能发电, 以减少从大电网的购电成本, 亦可用在户之间的电力调配。

### 1.2.2 用户电负荷模型

用户电负荷模型, 包括用户家用电以及电动汽车等, 运用检查技术预测出用户负荷需求为<sup>[9]</sup>

$$l_{e,n} = [l_{e,n,1}, \dots, l_{e,n,t}, \dots, l_{e,n,T}] \quad (2)$$

式中: $l_{e,n,t}$ 为用户 $n$ 在 $t$ 时段内的电负荷需求; $T$ 为一整天的所有时间段。

## 2 园区微网目标函数及约束条件

### 2.1 目标函数

文章以园区成本最小为目标函数, 主要包含设备的折旧成本和购售电成本。

目标函数如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} [C_{IN}(t) + C_G(t) + C_{ES}(t) + C_M(t)] \quad (3)$$

式中: $C_{IN}(t)$ 为折旧成本函数; $C_G(t)$ 为购售电成

本; $C_{ES}(t)$ 为储能设备运维成本; $C_M(t)$ 为分布式电源运维成本。

1) 折旧成本。折旧成本属于微电网发电成本的固定成本, 其中风机、光伏板、储能系统的折旧成本都包括在内。在 $t$ 时间段, 微网的折旧成本为<sup>[10]</sup>

$$C_{IN}(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \left[ \frac{r_i(1+r_i)^{n_i}}{(1+r_i)^{n_i} - 1} \right] \left[ \frac{C_{in,i}}{87.6k_i} \right] \quad (4)$$

其中  $k_i = \frac{\text{年供电量}}{8760 \times \text{系统额定功率}}$

式中: $n$ 为微源数量; $P_i(t)$ 为微源在 $t$ 时刻的输出功率; $n_i$ 为第 $i$ 种微源的投资偿还期, 通常为平均设备寿命; $r_i$ 为第 $i$ 种微源的固定年利率; $C_{in,i}$ 为单位容量建设成本; $k_i$ 为年利用系数。

2) 购售电成本<sup>[11]</sup>:

$$C_G(t) = I_{Pgrid}(t) C_P(t) P_{Pgrid}(t) \Delta t - I_{Sgrid}(t) C_S(t) P_{Sgrid}(t) \Delta t \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} I_{Pgrid}(t) = I_{Sgrid}(t) = 0 & \text{既不售电也不购电} \\ I_{Pgrid}(t) = 1, I_{Sgrid}(t) = 0 & \text{购电} \\ I_{Pgrid}(t) = 0, I_{Sgrid}(t) = 1 & \text{售电} \end{cases}$$

式中: $I_{Pgrid}(t), I_{Sgrid}(t)$ 分别为购电和售电状态常数, 根据购售电不同情况取值; $C_P(t)$ 为 $t$ 时段购电价,  $C_S(t)$ 为 $t$ 时段售电价, 售电和购电价格各分为峰、谷、平3个时段; $P_{Pgrid}$ 为 $t$ 时段购电功率; $P_{Sgrid}$ 为 $t$ 时段售电功率。

3) 储能设备运维成本:

$$C_{ES}(t) = c_{es} |P_{ESS,n}(t)| \Delta t \quad (6)$$

式中: $c_{es}$ 为储能设备的运行维护成本系数; $P_{ESS,n}$ 为储能在 $t$ 时段的充放电功率, 其正负号的选取与储能设备的充电、放电状态相关。

4) 分布式电源运维成本:

$$C_M(t) = \sum_{i=1}^n c_{m,i} P_i(t) \quad (7)$$

式中: $c_{m,i}$ 为第 $i$ 种微源单位出力运维成本系数。

### 2.2 约束条件

微电网能量管理优化的约束条件分以下几方面, 包括等式约束和不等式约束。

#### 2.2.1 有功平衡约束

有功平衡约束方程如下:

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{Gi}(t) + P_{ESS,n}(t) + I_{Pgrid}(t) P_{Pgrid}(t) \Delta t - I_{Sgrid}(t) P_{Sgrid}(t) \Delta t = P_l(t) \quad (8)$$

式中: $N_{DG}$ 为DG的数量; $P_{Gi}(t)$ 为第*i*台微源在*t*时刻的出力; $P_l(t)$ 为*t*时段的系统负荷需求功率。

### 2.2.2 联络线功率约束

购售电情况约束主要为:购电和售电只能有一种情况的存在,或者不购电也不售电,购售电约束如下:

$$I_{Pgrid}(t) + I_{Sgrid}(t) \leq 1 \quad (9)$$

购电和售电的功率上下限约束如下:

$$P_{Pgridmin} \leq P_{Pgrid}(t) \leq P_{Pgridmax} \quad (10)$$

$$P_{Sgridmin} \leq P_{Sgrid}(t) \leq P_{Sgridmax} \quad (11)$$

### 2.2.3 储能系统(ESS)运行约束

为了防止过度充放电对储能系统造成损害,储能系统荷电状态(state of charge, SOC)值需在最大、最小的荷电量之间:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (12)$$

式中: $SOC(t)$ 为*t*时刻蓄电池的荷电量; $SOC_{max}$ ,  $SOC_{min}$ 分别为蓄电池荷电量的最大、最小值。

*t*时刻系统中蓄电池剩余储能容量 $E_B(t)$ 需满足不超过其限值,即

$$E_{Bmin} \leq E_B(t) \leq E_{Bmax} \quad (13)$$

且蓄电池的充放电功率要满足:

$$\begin{cases} |P_{ESS,n}(t)| \leq P_{ESS,e} \\ P_{ESS,n}(t) \leq \eta_{dd} P_{dde} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{ESS,e}$ 为蓄电池充放电功率额定值; $\eta_{dd}$ 为双向DC-DC变换器效率; $P_{dde}$ 为双向DC-DC变换器额定功率。

### 2.2.4 潮流约束

辐射性微电网以DistFlow等式表示潮流约束:

$$\begin{cases} Q_{n+1} = \sqrt{|I|^2 (a_n^2 + b_n^2) - P^2} \\ U_n = a_n + j b_n \end{cases} \quad (15)$$

式中: $Q_{n+1}$ 为DG第*n+1*次迭代的无功功率; $a_n$ 和 $b_n$ 为第*n*次迭代电压 $U_n$ 的实部和虚部; $I$ 为恒定的电流向量幅值; $P$ 为恒定的有功功率的值。

## 3 能量优化策略

为了充分利用新能源,除成本优化以外,还应对终端进行优化,即调整微源出力,提高DG利用率。

### 3.1 能量优化

DG开发成本较高,传统的经济优化策略虽然能降低成本,但DG达不到优先调度权,不能充分利用。因此文章提出DG出力优化与成本优化的结合<sup>[12]</sup>。该部分在成本优化之前计算。

为让DG利用率达到最大,构建的数学模型如下所示:

$$C_{lmin} = \min \sum_{t=1}^{24} [P_{L,l}(t) - P_{Gv}(t) - P_{Gw}(t)]^2 \quad (16)$$

式中: $P_{L,l}(t)$ 为一级优化后*t*时刻的等效负荷; $P_{Gv}(t)$ 为*t*时刻的光伏出力; $P_{Gw}(t)$ 为*t*时刻的风机出力。

优化需要依据电网层所提供的用户侧负荷需求预测数据、DG出力的预测数据、DG的实际出力以及储能系统实时储能情况进行调整,提高DG利用率。

得到用户侧需求和DG预测出力数据后,首先通过约束条件确定的范围,对该数据进行合理取值。其次则实现DG出力最大,结合式(16)计算光伏、风机出力与负荷需求差的最小值,得到结果后继续判定,直到DG出力最大。

### 3.2 优化算法

由于遗传算法遗传操作及相关参数(例如交叉率)的选择不合理或不随进化过程自适应地改变会导致收敛速度低、过早收敛等一系列的问题,因此文章采用模糊遗传算法(fuzzy genetic algorithm, FGA)对微电网各微源进行分析计算。模糊遗传算法意思是将模糊逻辑的理论用于遗传算法,例如当部分信息模糊、不明确的时候,就可以用模糊理论来处理这些信息。

模糊遗传算法的大致流程如图4所示。

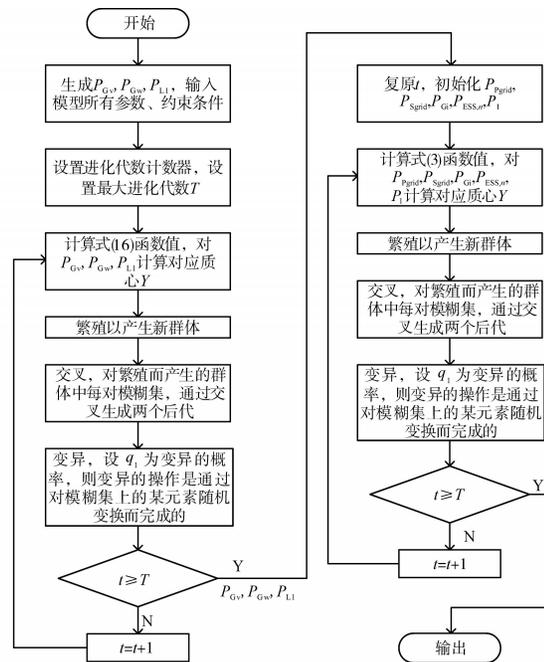


图4 模糊遗传算法流程图

Fig.4 Flow chart of FGA

## 4 仿真验算

### 4.1 基本数据

为验证该方案的有效性,本节以园区微网作为研究对象,进行仿真验算。

分时电价数据如下:峰时段(10:00~15:00, 18:00~22:00)为1.055元/(kW·h);平时段(6:00~10:00, 15:00~18:00)为0.633元/(kW·h);谷时段(22:00~6:00)为0.291元/(kW·h)。

风机上限设置在10 kW,光伏上限为10 kW,储能系统上限为8 kW,下限为-8 kW。

光伏、风机以及储能设备维护成本如表1所示。

表1 各类设备维护成本

设备类型	维护成本/(元·kW <sup>-1</sup> )
光伏	0.009 4
风机	0.029 6
储能设备	0.082 7

风机、光伏出力预测以及用户用电量预测数据如表2所示。

表2 分时段预测数据

时间段	风机出力预测/kW	光伏出力预测/kW	用户用电预测/kW
0:00~1:00	7.678	0.000	8.453
1:00~2:00	7.545	0.000	6.995
2:00~3:00	7.364	0.000	6.278
3:00~4:00	7.424	0.000	5.992
4:00~5:00	7.632	0.000	7.979
5:00~6:00	7.054	0.000	9.591
6:00~7:00	6.334	1.356	9.433
7:00~8:00	5.632	3.843	11.258
8:00~9:00	4.371	5.732	13.984
9:00~10:00	3.283	6.568	15.482
10:00~11:00	2.758	7.248	18.985
11:00~12:00	2.392	7.505	20.923
12:00~13:00	2.558	7.723	20.908
13:00~14:00	2.689	7.743	19.191
14:00~15:00	3.074	7.595	20.437
15:00~16:00	3.892	6.383	21.536
16:00~17:00	4.894	5.494	21.410
17:00~18:00	5.283	4.043	20.703
18:00~19:00	6.070	2.043	18.516
19:00~20:00	7.145	0.375	18.747
20:00~21:00	7.038	0.000	18.356
21:00~22:00	7.594	0.000	14.872
22:00~23:00	7.682	0.000	10.746
23:00~24:00	7.712	0.000	8.062

图5为能量优化后负荷实际值与不进行能量优化的负荷预测值对比图。

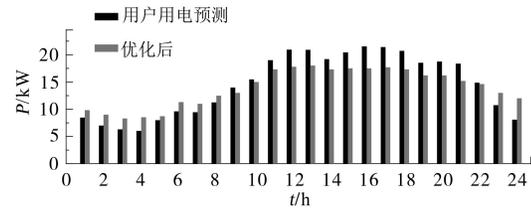


图5 用户用电对比图

Fig.5 User electricity comparison chart

### 4.2 方案对比

为了验证方案的有效性,文章给出了3种不同的对比方案:

方案1:传统储能方式,“自发自用,余量上网”模式;

方案2:共享储能的方式下,“自发自用,余量上网”模式;

方案3:共享储能的方式下,通过运营商合理调度电能模式。

3种方案各指标对比的各方案成本和清洁能源利用率对比如下:

1)各方案优化成本如表3所示。对比表3三种方案经济成本,得到方案3成本最低,因此其经济性最好。

表3 各方案优化成本

方案	折旧运维成本/元	购电成本/元	综合成本/元
1	2 238.1	291.6	2 529.7
2	2 193.6	280.7	2 474.3
3	2 067.9	200.4	2 268.3

2)清洁能源利用率。一级优化要实现清洁能源最大限度的利用,故清洁能源利用率是一个重要的指标,图6为不同方案下,清洁能源的优化出力曲线图。由图6可知,方案3的功率输出最大,方案2其次,方案1最小,因此方案3的清洁能源利用率显然高于方案1的利用率。

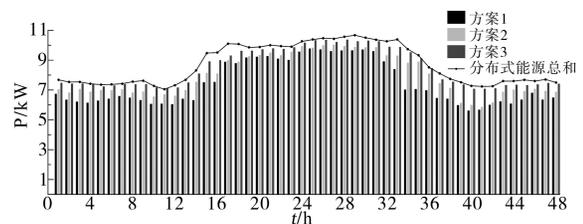


图6 不同方案优化曲线

Fig.6 Optimization curves of different schemes

综合以上2点,可知共享储能的方式下,通过运营商合理调度电能模式的方案3,达到了成本、DG利用率最优,因此提出的模型有效。

## 5 结论

文章在能源互联网背景下,提出将共享储能与园区微网结合的模式框架,主要讨论“源-网-荷-储”的能量优化运行,将减少运营成本,为园区微网的发展以及提高分布式电源的利用率提供了思路。

在模型的构建以及优化的方式、算法上,还存在以下几个问题:

1)涉及到负荷的多样性,文章在这方面构建的模型略简单,考虑到的问题不完善。

2)文章只是在电能一种能源的优化上进行了讨论,对于能源互联网应该是多种能源合理运用,如热(冷)能的运用,这样才能做到能源最大化利用。

电力作为现阶段用户用能的最主要来源,它能够将能源供应侧与需求侧连接起来,而“源-网-荷-储”运营模式则可将能源互联网扩大化,形成泛在物联的新模式。

### 参考文献

- [1] FREEDM Systems Center. Project factsheet: green energy hub [EB/OL]. (2014-04-16) [2015-08-19]. <http://www.freedm.ncsu.edu/index.php?s=3&p=439&i=159>
- [2] E-Energy. Smart grids for Germany, Austria and Switzerland [EB/OL]. (2014-10-11) [2015-08-19]. <http://www.e-energy.de/en/1247.php>

~~~~~  
(上接第69页)

### 参考文献

- [1] 董密,张心露,杨建,等. 孤岛模式下多源直流微电网经济运行的协调优化控制策略[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(5): 51-58.
- [2] 蔡瀛森. 直流配电电压等级影响因素与评价指标研究[D]. 北京:华北电力大学, 2014.
- [3] 许阔,蔡冰倩,朱永强,等. 海岛直流微电网电压等级序列选择的研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(1): 52-58.
- [4] 蔡冰倩,贾利虎,朱永强,等. 直流微电网电压等级序列选择的影响因素研究[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(12): 45-51.
- [5] 杨琪羽. 适应未来发展的直流配电电压等级序列研究[D]. 北京:华北电力大学, 2014.
- [6] 段建东,魏朝阳,周一,等. 未来直流配电网电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3538-3545.

- [3] Mehleri E, Sarimneis H, Markatos N, *et al.* A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighborhood level[J]. Energy, 2012, 44: 96-104.
- [4] 刘敦楠,徐尔丰,许小峰. 面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 681-689.
- [5] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120, 141.
- [6] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
- [7] Reza Aboli, Maryam Ramezani, Hamid Falaghi. Joint optimization of day-ahead and uncertain near real-time operation of microgrids[J]. IEEE, Electrical Power and Energy Systems, 2019, 107: 34-46.
- [8] 甘霖,陈瑜玮,刘育权,等. 含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 275-281.
- [9] 王仕俊,平常,薛国斌. 考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 77-84.
- [10] Massaeli M, Javadian S A M, Khalesi N. Environmental benefits of DGs and comparing their generation costs with thermal power plants considering production pollution on human health [C]//International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Malaga, Spain: IEEE, 2011: 1-6.
- [11] 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.
- [12] 米阳,李战强,吴彦伟,等. 基于两级需求响应的并网微电网双层优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1900-1905.

收稿日期:2020-02-06

修改稿日期:2020-04-21

- [7] 李莎. 直流配电网电压等级序列研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- [8] 刘梦婷. 城市低压直流配电网的架构研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- [9] 江晨. 直流微网中DC/DC变换器并联技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- [10] 黄双萍. 基于级联型电力电子变压器的楼宇微网研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
- [11] 张祖平,刘思革,梁惠施. 电力储能技术在不同电压等级配电网中的应用[J]. 供用电, 2012, 29(1): 1-4.
- [12] 陈艳芳. 20 kV单相配电系统研讨[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [13] 程杰,向铁元,张贺,等. 20 kV电压等级经济性比较论证[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 125-130.

收稿日期:2020-02-28

修改稿日期:2020-04-28