

9-3-2020

Bilevel programming method for optimal sizing of gridconnected DC microgrid system based on economic efficiency of enterprises and customer electricity experience

Xueying YU

Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province , Sichuan University , Chengdu 610065 , China

Huaqiang LI

Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province , Sichuan University , Chengdu 610065 , China

Longjie YANG

Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province , Sichuan University , Chengdu 610065 , China

Qi LI

Department of Maintenance of Yanbian Power Supply Company , State Grid Jilin Electric Power Co , Ltd , Yanji 133000 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

YU, Xueying; LI, Huaqiang; YANG, Longjie; and LI, Qi (2020) "Bilevel programming method for optimal sizing of gridconnected DC microgrid system based on economic efficiency of enterprises and customer electricity experience," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 2, Article 5.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.02.005

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss2/5>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

兼顾企业综合成本与用户用电体验的 微电网双层优化配置

余雪莹¹, 李华强¹, 杨龙杰¹, 李琦²

(1. 四川大学智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 国网吉林省电力有限公司
延边供电公司运维检修部, 吉林 延边 133000)

摘要:并网型直流微电网对于改善电网末端薄弱环节的供电可靠性和电能质量有着重要作用。传统的优化配置方法多关注企业的经济效益, 很少考虑用户的用电体验。在市场环境下, 并网型微电网的建立与推广必须重视用电用户的利益。以典型的“风—光—柴—储”并网型直流微电网为研究对象, 提出一种兼顾供电企业经济效益和用户用电体验的微电网双层优化配置模型。模型考虑微电网全寿命周期内的初装成本、运行维护成本、燃料成本、置换成本以及与配电网的能量交互费用等, 建立以企业综合经济成本最小为目标的上层模型和以用户缺电损失期望最小为目标的下层模型, 引入供电可靠性关联上下层模型, 使用 KKT 条件实现双层模型到单层模型的解耦, 并用遗传—蚁群混合算法对模型进行求解, 算例仿真结果验证了模型和算法的有效性和合理性。

关键词:并网型直流微电网; 双层优化模型; 综合经济成本; 用户缺电损失期望; 遗传—蚁群算法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.005 中图分类号: TM715 文章编号: 1673-9140(2020)02-0038-08

Bi-level programming method for optimal sizing of grid-connected DC microgrid system based on economic efficiency of enterprises and customer electricity experience

YU Xueying¹, LI Huaqiang¹, YANG Longjie¹, LI Qi²

(1. Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Department of Maintenance of Yanbian Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Yanji 133000, China)

Abstract: The grid-connected DC microgrid plays an important role in improving the power supply reliability and power quality in the end of power grid. The traditional optimal method pays more attention to economic of enterprise and little considerations to the utility of the customers. Under the market environment, the development of grid-connected DC microgrid must concern to the interests of users. This paper focuses on a typical grid-connected DC microgrid with wind-PV-diesel-storage and proposes a bi-level optimal model of microgrid configuration, which takes into account economic efficiency of enterprises and customer electricity experience. Considering the initial installation cost, operation and maintenance cost, fuel cost, replacement cost and energy exchange cost of the microgrid, an upper objective model minimizes the comprehensive economic cost, and a lower objective model minimizes the customer power

收稿日期: 2017-05-16; 修回日期: 2017-07-14

基金项目: 四川省科技支撑计划重点研发项目(2017GZ0343)

通信作者: 李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事无功优化控制及电压稳定, 配电网规划等研究; E-mail: lihq1986@hotmail.com

shortage expectations. By constructing the power supply reliability correlation model, a KKT condition is utilized to realize decoupling of bi-level optimal model. The GA-ACO is then employed to solve the model, and the results of the case study demonstrate the validity and rationality of the model and algorithm.

Key words: grid-connected DC microgrid system; bi-level programming model; comprehensive economic cost; customer power shortage expectations; GA-ACO

随着社会经济的高速发展,能源需求大幅增加,能源结构及环境问题日益凸显。国家“十三五”规划提出了“深入推进能源革命,着力推动能源生产利用方式变革”的要求,微电网作为分布式电源接入电网的一种有效手段,是智能电网的重要组成部分,对推进能源结构调整、实现节能减排具有重要意义^[1]。不同类型微电网应用于不同场合,独立型微电网主要用于未与大电网相连的偏远地区或海岛,并网型微电网通过单点接入配电网,用于改善已联网地区的供电可靠性和电能质量,同时可为配电网提供功率支撑与备用辅助服务^[2]。

微电网的优化配置是微电网设计阶段的核心问题,目前,国内外专家已对微电网的优化配置进行了一定研究,文献[3]考虑负荷缺电率,针对独立型微电网建立了综合经济成本最小配置模型。针对并网型微电网,文献[4]考虑不同自平衡度、冗余度、可再生能源利用率,建立了成本最小配置模型。以上研究均基于以交流母线组网形式的微电网。相较于交流微电网,直流微电网结构简单、转换环节少、能源利用率高,同时系统内不存在交流系统内频率稳定、无功功率等问题,可保证系统内负荷的高可靠供电,已被广泛应用于中小容量的分布式发电系统^[5]。

随着电力改革步伐不断加快,电力市场不断完善,供电企业只有真正落实“以用户为中心”,不断提升用户用电体验,才能在电力体制改革中赢得先机。微电网的建立与推广实质上依托于供电企业和用户需求 2 个不同的主体,因此,考虑不同主体间不同利益需求的博弈关系更能让配置结果具有实际指导意义。

针对已联网地区,同时兼顾供电企业与用电用户双方利益,考虑到直流微电网成本低、损耗小、适合中低电压等级等特点;在现有研究基础上,该文分别以供电企业综合经济成本最小、用户缺电损失期望最小为目标,建立并网型直流微电网双层规划模型;利用 KKT 条件解耦,采用遗传—蚁群混合算法

进行求解,算例仿真结果验证了模型和算法的可行性和合理性。

1 并网型直流微电网模型及运行方式

1.1 并网型直流微电网模型

该文研究的并网型直流微电网模型如图 1 所示,包括风力发电机、光伏阵列、柴油发电机、蓄电池等分布式电源(distributed generation, DG)和并网换流器。并网换流器用于直流母线和交流配电网交互能量时的交直流转换。微电网与交流配电网通过公共连接点(point of common coupling, PCC)连接。

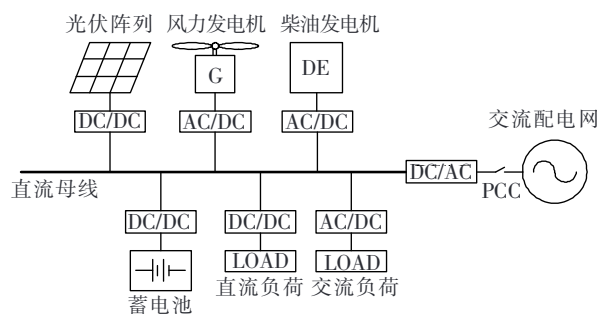


图 1 并网型直流微电网模型

Figure 1 Grid-connected DC microgrid system model

1.2 并网型直流微电网运行模式

并网型微电网可在并网和孤网 2 种模式下运行,具体切换条件如图 2 所示,其遵循“自给自足,就地消纳,余电上网”的原则,即微电网内分布式电源优先给本地负荷供电,无法实现自身能量平衡时与配电网进行能量交互。当配电网出现故障或要求微电网孤网运行时,PCC 点动作,微电网孤网运行。

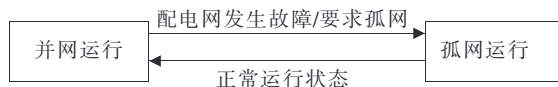


图 2 并网与孤网运行模式切换条件

Figure 2 Switching conditions of grid-connected and island operations

2 并网型直流微电网双层规划模型

随着供电企业逐渐关注用户体验,向“以用户为中心”转变,不断提升供电服务质量成为必然趋势。用户对供电服务的感知通过用户用电满意度体现。微电网作为供电企业推广的新模式,在规划阶段应将用户用电满意度作为重要考虑因素。然而,供电企业的经济效益和用户用电满意度是深度耦合又相互矛盾的2个目标,在实际规划中有明显的主从差异性,传统建模方法也很难解决这类多层次多目标问题^[6]。因此,该文引入双层规划模型构建微电网优化配置模型。

2.1 企业综合经济成本最小模型

该文选取微电网的投资成本和运行过程中产生的运维成本与配电网能量交互费用、置换成本及环境治理成本作为评估供电企业经济效益的综合经济成本,并以综合经济成本最小作为双层规划中上层规划模型的目标,即

$$\text{Min } F = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (1)$$

式中 F 为系统综合经济成本。

1) 全寿命周期内等年值投资成本。

微电网等年值投资成本:

$$\begin{cases} C_1 = C'_1 f_{cr} \\ C'_1 = C_{wt} N_{wt} + C_{pv} N_{pv} + C_{es} N_{es} + C_{de} N_{de} + C_{GCC} \end{cases} \quad (2)$$

式中 C_{wt} 、 C_{pv} 、 C_{es} 、 C_{de} 分别为风力发电机、光伏阵列、蓄电池和柴油发电机单台(组)初始投资成本,包括设备购买费用和安装费用,元; N_{wt} 、 N_{pv} 、 N_{es} 、 N_{de} 分别为风力发电机、光伏阵列、蓄电池和柴油发电机数量,台/组; C_{GCC} 为并网换流器初始投资成本,元; f_{cr} 为折旧系数,其定义为

$$f_{cr} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (3)$$

式中 n 为全寿命周期使用年限, a ; r 为贴现率。

2) 年运行维护成本。

微电网年运行维护成本:

$$\begin{cases} C_2 = \sum_{\Delta t=1}^T C'_2 \\ C'_2 = C_{wt}^{om} P_{wt} + C_{pv}^{om} P_{pv} + C_{es}^{om} P_{es} + C_{de}^{om} P_{de} + C_{GCC}^{om} \end{cases} \quad (4)$$

式中 C_{wt}^{om} 、 C_{pv}^{om} 、 C_{es}^{om} 、 C_{de}^{om} 分别为单位功率内风力发电机、光伏电池、蓄电池和柴油发电机的运行维护成本,元; P_{wt} 、 P_{pv} 、 P_{es} 、 P_{de} 分别为 t 时段内风力发电机、光伏电池、蓄电池、柴油发电机的实际输出功率, kW; C_{GCC}^{om} 为并网换流器的运行维护费用,元; Δt 为给定时间区间, h; T 为系统全寿命周期内每年统计时间总段数。

3) 与配电网能量交互费用。

微电网正常运行时与配电网进行友好互动,产生年能量交互费用:

$$C_3 = \sum_{\Delta t=1}^T (C_{buy} - C_{sold}) \quad (5)$$

式中 C_{sold} 、 C_{buy} 分别为系统向配电网售电和购电的费用,元,售电费用中包括国家补贴费用。

4) 总置换成本。

蓄电池寿命较短,低于全寿命周期,产生年置换成本:

$$C_4 = C_{es}^{sub} \quad (6)$$

式中 C_{es}^{sub} 为全寿命周期内蓄电池的置换成本,元。

5) 年环境治理成本。

柴油发电机运行时将排放温室气体和污染物,产生年环境治理成本:

$$\begin{cases} C_5 = \sum_{t=1}^T C'_5 \\ C'_5 = \sum_{j=1}^m C_{e_j} \sum_{\Delta t=1}^T P_{de} \end{cases} \quad (7)$$

式中 C_{e_j} 为第 j 项污染物单位功率的环境价值,元/kg; m 为污染物和温室气体种类。

微电网内分布式电源配置以及微电网运行时需满足相关约束条件。

分布式电源安装数量约束:

$$\begin{cases} 0 \leq N_{wt} \leq N_{wt, \max} \\ 0 \leq N_{pv} \leq N_{pv, \max} \\ 0 \leq N_{es} \leq N_{es, \max} \\ 0 \leq N_{de} \leq N_{de, \max} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $N_{wt,max}$ 、 $N_{pv,max}$ 、 $N_{es,max}$ 、 $N_{de,max}$ 为由于实际场地等各方面限制的最大安装数量,台/组。

功率约束:

$$P_{DG} + P_{ex} \geq P_{load}(1 + \mu) \quad (9)$$

式中 P_{DG} 为分布式电源输出功率,kW; P_{ex} 为微电网与配电网交换功率,kW; μ 为微电网发电量裕度。

蓄电池电量和充放电功率约束:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (10)$$

式中 SOC_{min} 、 SOC_{max} 分别为蓄电池剩余电量的上、下限,kW·h。

$$\begin{cases} P_{c,max}(t) = \min(P_{maxC}, \Delta P_c) \\ \Delta P_c = \frac{E_c [SOC_{max} - (1 - \delta)SOC(t - 1)]}{\Delta t \eta_c} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{d,max}(t) = \min(P_{maxD}, \Delta P_d) \\ \Delta P_d = \frac{E_c [(1 - \delta)SOC(t - 1) - SOC_{min}] \eta_d}{\Delta t} \end{cases} \quad (12)$$

式中 $P_{c,max}(t)$ 、 $P_{d,max}(t)$ 分别为 t 时刻蓄电池的最大充电和放电功率允许值,kW; P_{maxC} 、 P_{maxD} 分别为蓄电池最大充电和放电持续功率,kW。

柴油发电机输出功率约束:

$$0 \leq P_{de}(t) \leq P_{de-rate} \quad (13)$$

并网换流器交换功率约束:

$$P_{GCC} \leq P_{GCC-rate} \quad (14)$$

式中 $P_{GCC-rate}$ 为并网换流器额定容量,即微电网与配电网的最大交互功率,kW。

2.2 用户缺电损失期望最小模型

用户缺电损失期望是指由于微电网电量供应中断或者不足引起缺电时,用户所造成的损失。因此,该文以用户缺电损失期望来表征用户对微电网供电质量的可接受程度,即用户用电满意度,具体表示为

$$\rho_{LOLP} = \sum_{s \in Z} \frac{m(s)}{M} \quad (15)$$

式中 ρ_{LOLP} 为给定时间内缺电概率; M 为状态抽样总数; $m(s)$ 为抽样中状态 s 出现的次数; Z 为给定时间内缺电状态集。

$$E_{EDNS} = \rho_{LOLP} \cdot P_s \quad (16)$$

式中 E_{EDNS} 为微电网缺电期望; P_s 为微电网状态

s 缺电量。

$$E_{EENS} = E_{EDNS} \cdot I_{EAR} \quad (17)$$

式中 E_{EENS} 为用户缺电损失期望; I_{EAR} 为用户缺电损失评价率,可刻画为

$$I_{EAR} = \begin{cases} 1, & E_{EDNS} \geq E_{EDNS}^2 \\ \frac{E_{EDNS} - E_{EDNS}^1}{E_{EDNS}^2 - E_{EDNS}^1}, & E_{EDNS}^1 < E_{EDNS} \leq E_{EDNS}^2 \\ 0, & E_{EDNS} < E_{EDNS}^1 \end{cases} \quad (18)$$

式中 E_{EDNS}^1 为用户能接受的最小缺电量; E_{EDNS}^2 为用户能接受的最大缺电量。

基于以上分析,建立以用户缺电损失期望最小为目标函数的下层规划模型,即

$$\text{Min } f = \sum_{\Delta t=1}^T E_{EENS} = \sum_{\Delta t=1}^T \rho_{LOLP} \cdot P_s \cdot \Delta t \cdot I_{EAR} \quad (19)$$

根据电力供应企业供电可靠性管理标准要求,需满足:

$$\rho_{LOLP} \leq \rho_{LOLP-max} \quad (20)$$

式中 $\rho_{LOLP-max}$ 为供电企业可靠性管理标准要求的缺电概率最大值。

在双层优化配置模型中,上、下层规划模型存在双向数据传递。当上层微电网投资运营企业给出一个优化配置方案,将影响下层微电网缺电期望,而与之对应的用户缺电损失期望将反馈至上层,上层企业又将根据下层用户缺电损失期望调整配置方案。通过上、下层的相互作用,从而达到全局最优状态,最终使双方达到相对最优。

3 并网型直流微电网双层规划模型求

该文建立的微电网双层规划模型为非线性双层规划模型,其结构相对复杂,因此,首先利用 KK-T 条件将双层规划问题转化为单层规划问题,然后结合蚁群算法^[7]和遗传算法^[8]各自特点,采用遗传—蚁群混合算法(GA-ACO)对优化配置模型进行求解。

3.1 双层规划模型解耦

在上层模型优化变量 $N(N_{wt}, N_{pv}, N_{es}, N_{de})$ 给

定的条件下,下层模型的拉格朗日函数为

$$\begin{cases} L(N) = \sum_{\Delta t=1}^T \rho_{LOLP} \cdot P_s \cdot \Delta t \cdot I_{EAR} - \lambda \rho \\ \rho = \rho_{LOLP} - \rho_{LOLP_max} \end{cases} \quad (21)$$

式中 λ 为不等式约束的拉格朗日算子。

由下层模型的 KK-T 条件可得:

$$\sum_{\Delta t=1}^T P_s \cdot \Delta t \cdot I_{EAR} - \lambda = 0 \quad (22)$$

$$\lambda (\rho_{LOLP} - \rho_{LOLP_max}) = 0 \quad (23)$$

$$\lambda \geq 0 \quad (24)$$

引入下层模型 KK-T 条件,将微电网双层规划模型转化为单层规划模型,实现上、下层模型解耦。其中,目标函数为式(1),上层约束条件为式(8)~(14),下层约束条件等效为式(22)~(24)。

3.2 求解算法

该文结合蚁群算法和遗传算法的特点,采用遗传—蚁群算法(GA-ACO)求解模型。利用蚁群算法为遗传算法提供较优秀的初始解,从而降低算法的迭代次数,减少运算时间,且提高算法收敛性;利用遗传算法交叉和变异策略改善蚁群算法解的多样性,从而对蚁群算法进行优化。

4 算例分析

该文利用 HOMER 软件仿真获取风光资源及负荷的离散数值,并以此作为输入进行仿真分析,具体数据如图 3 所示。系统中各分布式电源设备信息如表 1 所示,其中,风力发电机(单台)、光伏阵列组件(单组)、柴油发电机(单台)额定容量均为 30 kW,蓄电池的单组额定容量为 10 kW·h,系统全寿命周期为 20 a,贴现率为 6%,蓄电池的充放电效率为 85%。

当微电网与配电网进行能量交互时,采用分时电价计费^[9],电价参数如表 2 所示,峰时段为 07:00—11:00、19:00—23:00,平时段为 11:00—19:00,谷时段为 23:00—07:00。当启用柴油发电机时,产生的污染物和温室气体相关参数如表 3 所示^[10]。

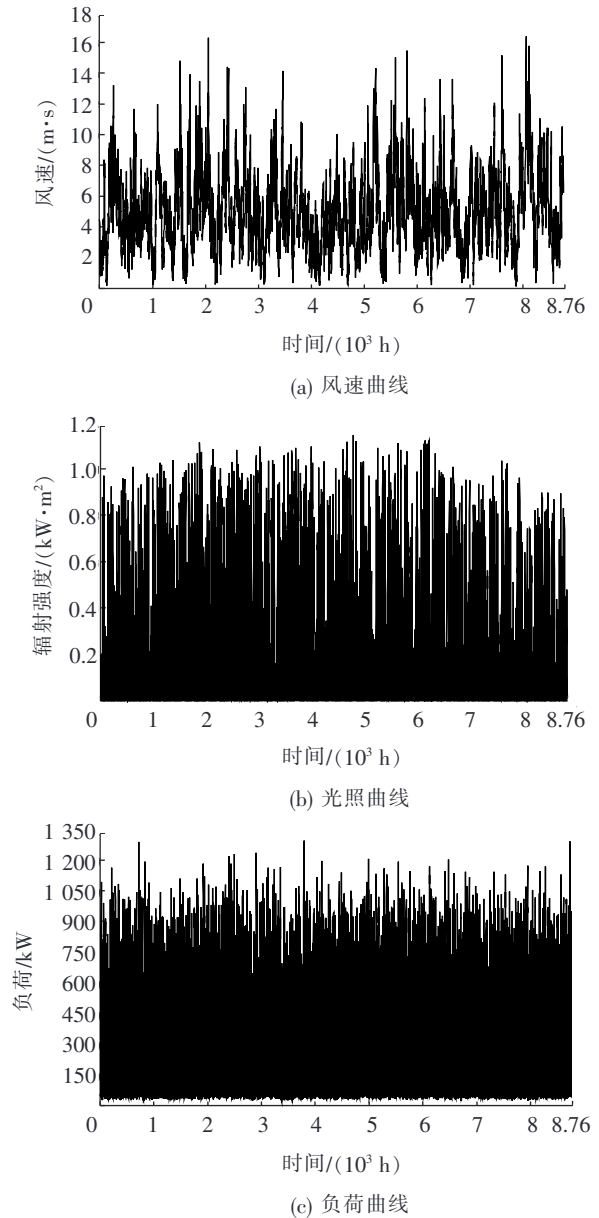


图 3 风速、光照和负荷数据曲线

Figure 3 Data of wind speed, illumination and load

表 1 系统设备信息

Table 1 Technical parameter of the system

项目	初装费用/ (万元/台(组))	运行维护费用/ (元/(kW·h))	使用年 限/a
风机	30	0.029 6	20
光伏阵列	210	0.009 6	20
蓄电池	12	0.009 0	10
柴油发电机	3	0.088 0	20
并网换流器	2.5	0	20

表 2 分时段购售电价格

Table 2 Sub-time purchase electricity and electricity sales price 元/kW·h

项目	价格		
	峰时段	平时段	谷时段
购电	1.05	0.87	0.39
售电	0.72	0.53	0.28

表 3 柴油发电机产生污染物相关参数

Table 3 Pollutant parameters of diesel generators

污染物	排放量/(g/(kW·h))	环境价值/(元/kg)
SO ₂	0.427	6.000
NO _x	3.803	8.000
CO ₂	822.800	0.023
CO	0.124	1.000
灰	52.278	0.120

4.1 优化配置结果分析

为了体现双层规划的博弈机理,该文构建 3 个场景进行比较。

场景 1 以企业的综合经济成本最小作为目标函数,将用户缺电损失期望设为约束条件,不大于 10 000 个单位;

场景 2 以用户缺电损失期望最小作为目标函数,将系统投资运营企业的综合经济成本设为约束条件,不超过 55 万元;

场景 3 采用该文双层规划模型求解。

基于以上参数,采用 GA-ACO 算法求解,得到不同配置结果如表 4 所示,可以看出,场景 1 虽能实现企业的综合经济成本最小(比该文配置结果减少 11.41%),但用户缺电损失期望较大(比该文配置结果高 575.89%),可能导致用户用电体验满意度低,对企业服务满意度低,不利于企业与用户的良好关系发展。场景 2 能保证用户缺电损失期望达到最小(不缺电),但企业的综合经济成本巨大(比该文配置结果增加 37.57%),对企业极为不利。

与该文优化配置结果对比,可以看出,在企业投入的综合经济成本增加幅度相对较小时,用户缺电损失期望明显减小,更有利于用户用电体验满意度和对企业满意度的提升。

表 4 不同场景下并网型直流微电网优化配置结果

Table 4 Optimal sizing results of grid-connected DC microgrid system in different scenarios

场景	光伏阵列/组	风力发电机/台	蓄电池/组	柴油发电机/台	综合经济成本/万元	用户缺电损失期望
1	6	19	14	28	34.392 11	4 008
2	19	20	20	28	53.407 08	0
3	19	8	20	28	38.823 14	593

双层规划模型通过上下层不同决策的耦合作用,既能保证企业的综合经济成本投入,也能兼顾用户缺电损失期望,即企业的供电经济性与用户用电满意度达到相对平衡。对于提高用户用电体验满意度、构建企业与用户良好共荣关系具有重要的指导意义。

4.2 并网型直流微电网优化配置方案的参数特性分析

1) 企业的初装成本对优化配置方案的影响。

初装成本是综合经济成本最重要的组成部分,合理的初装成本投入不仅能实现企业的经济效益最优、保证系统长期稳定运行,同时能使用户缺电损失减小,初装成本变化时系统优化配置方案如表 5 所示,可知初装成本会影响微电网的优化配置结果。初装成本增加,分布式电源配置数量变化,系统的运行维护费用、置换成本、与配电网能量交互费用等都会产生变化,致使企业的综合经济成本发生变化,也会引起用户缺电损失的变化。但是,初装成本的增加不一定会使综合经济成本增加,例如,表 5 中方案 2 的初装成本低于方案 3,但方案 2 的综合经济成本高于方案 3,用户缺电损失期望低于方案 3。因此,关于微电网的配置需从初装成本和运行费用两方面评估综合经济成本。

2) 用户缺电损失评价率对优化配置方案的影响。

用户缺电损失评价率设定方法不同,用户缺电损失期望就不同,微电网优化配置结果也就不同。该文利用隶属度函数计算用户缺电损失评价率,更接近用户损失实际情况。若将用户缺电损失评价率设为定值,得到微电网优化配置结果如表 6 所示,可知用户缺电损失评价率取值不同,得到的优化配置方案不同。用户缺电损失评价率取值越大,用户缺电损失期望越大,双层模型配置过程中下层模型,即用户缺电损失期望对整体配置的影响越大。因此,当用户缺电损失评价率取定值时,取值越大,用户缺电损失期望对配置结果影响越大,最优配置方案中用户缺电损失期望越小,但综合经济成本越高。

为进一步就用户缺电损失评价率设定方法对配置结果的影响进行分析,取用户缺电损失评价率为 0.35,将微电网配置结果与该文采用方法得到的配置结果进行对比,如图 4 所示,可以看出,该文采用

方法相较于将用户缺电损失评价率固定为定值,能更明确地体现用户缺电损失期望与综合经济成本间的相互关系,即能更准确描述企业与用户用电体验满意度间的耦合关系,从而兼顾双方利益,达到微电网优化配置的全局最优。

综上所述,对于企业而言,初装成本是投资的重

要组成部分,但不是唯一评判因素,应以综合经济成本作为供电企业经济效益考量指标;对于用户而言,准确预估用户缺电损失评价率对于评价用户缺电损失期望尤为重要。因此,初装成本、运行维护成本、用户缺电损失评价率等因素对并网型直流微电网优化配置均有影响。

表 5 不同初始投资成本下的微电网优化配置方案

Table 5 Optimize system results under different initial investment cost

方案	初装成本/万元	光伏阵列/组	风力发电机/台	蓄电池/组	柴油发电机/台	综合经济成本/万元	用户缺电损失期望
1	2 000	5	20	10	28	32.432 29	6 285
2	2 400	7	19	18	28	37.326 08	1 845
3	2 800	6	20	15	28	35.262 86	3 331

表 6 不同用户缺电损失评价率下的系统优化配置方案

Table 6 Optimize system results under different different customer power shortage evaluation

方案	用户缺电损失评价率	光伏阵列/组	风力发电机/台	蓄电池/组	柴油发电机/台	综合经济成本/万元	用户缺电损失期望
1	0.2	6	20	18	28	33.287 08	2 606
2	0.5	7	20	19	28	34.683 79	6 227
3	0.8	8	18	20	28	35.816 05	9 779

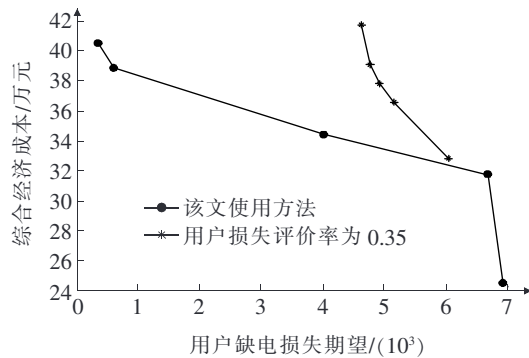


图 4 不同用户缺电损失评价率设定方法下优化配置结果对比

Figure 4 Comparison of optimal system results under different customer power shortage evaluation

5 结语

该文针对已联网但供电可靠性和电能质量较差地区的实际问题,提出了一种并网型直流微电网的优化配置方法。通过分析微电网供电、用电双方特点,建立了企业综合经济成本最小与用户缺电损失期望最小的双层规划模型,得到结论:

1) 考虑上层企业供电经济效益和下层用户用

电体验之间的耦合决策作用,验证了模型在企业与用户两者利益间的协调作用,为实现企业与用户良好发展提供了参考;

2) 分析了初装成本、用户缺电损失评价率对并网型直流微电网优化配置结果的影响,为双层规划模型的准确性提供重要参考。

多微网接入配电网是未来智能电网的发展方向,微电网大量接入配电网将形成多微网互联的配电网系统,如何建立多微网接入配电网的优化配置模型将是该文下一步的研究内容。

参考文献:

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LV Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 李咸善,方婧,郭诗书,等. 基于灵敏度分析的并网型微电网容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(23):8-17.
LI Xianshan, FANG Jing, GUO Shishu, et al. Capacity sizing optimal for grid-connected micro-grid based on

- sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23):8-17.
- [3] 丁明,王波,赵波,等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3):575-581.
DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3):575-581.
- [4] 薛美东,赵波,张雪松,等. 并网型微网的优化配置与评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3):6-13.
XUE Meidong, ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, et al. Integrated plan and evaluation of grid-connected microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3):6-13.
- [5] Boroyevich D, Cvetković I, Dong D, et al. Future electronic power distribution systems-A contemplative view [C]//IEEE 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, Romania, 2010.
- [6] 曾博,欧阳邵杰,张建华,等. 考虑复杂预想场景下光伏高效利用的微电网综合规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25):4259-4269.
ZENG Bo, OUYANG Shaojie, ZHANG Jianhua, et al. Integrated planning of micro-grid for efficient utilization of photovoltaic generation considering complicated operation scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25):4259-4269.
- [7] 师楠,周苏荃,李一丹. 基于多模型组合优化算法的风速预测方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(3):61-65.
SHI Nan, ZHOU Suquan, LI Yidan. Wind speed forecasting method with multi-model optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(3):61-65.
- [8] 李莉,熊炜,赵艺杰,等. 基于模糊遗传算法的输电线路故障混合威布尔分布模型[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1):60-66.
LI Li, XIONG Wei, ZHAO Yijie, et al. Mixed Weibull distribution model of transmission line fault based on fuzzy genetic algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):60-66.
- [9] 汪湘晋,赵波,吴红斌,等. 并网型交直流混合微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13):55-62.
WANG Xiangjin, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal sizing analysis of grid-connected hybrid AC-DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13):55-62.
- [10] 梁惠施,程林,苏剑. 微网的成本效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(Z1):38-44.
LIANG Huishi, CHENG Lin, SU Jian. Cost benefit analysis for microgrid[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(S1):38-44.

(上接第 37 页 Continued from page 37)

- [11] 高凯,刘博文,何晓洋,等. 交直流电力系统潮流计算综述[J]. 电气应用, 2015, 34(17):122-127.
GAO Kai, LIU Bowen, HE Xiao-yang, et al. Overview on power flow calculation of AC/DC power system[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(17):122-127.
- [12] 姜舒婷,齐磊,崔翔,等. 含潮流控制器的直流电网潮流计算方法[J]. 电网技术, 2015, 39(7):1793-1799.
JIANG Shuting, QI Lei, CUI Xiang, et al. Power flow algorithm method for DC grid with power controller[J]. Power System Technology, 2015, 39(7):1793-1799.
- [13] Haileselassie T M, Uhlen K. Power flow analysis of multi-terminal HVDC networks [C]//IEEE Trondheim Power Technology, Trondheim, Norway, 2011.
- [14] Lei J, An T, Du Z, et al. A general unified AC/DC power flow algorithm with MTDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4):2837-2846.
- [15] 柴润泽,窦竞铭,张保会. 含电压源换流器的交直流混合电网潮流统一表达与可行解求取[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5):1260-1268.
CHAI Runze, DOU Jingming, ZHANG Baohui. Unified power flow expressions and algorithm to obtain feasible solution for hybrid AC/DC grids incorporating VSCs[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5):1260-1268.
- [16] 雷婧婷,安婷,杜正春,等. 含直流配电网的交直流潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4):911-918.
LEI Jingting, AN Ting, DU Zhengchun, et al. A unified AC/DC power flow algorithm with DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4):911-918.