

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.016

考虑 EV 负荷的微电网多主体联合容量优化配置方法

侯岚¹, 李玉杰², 贾晓明³, 王林杰³, 钱聪³, 王剑¹

(1. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司, 江苏 南京, 211102)

摘要:随着可再生能源(RE)的快速发展与智能电网的不断进步,现代电力系统的能耗特性设计朝着更灵活、更经济的微电网(MG)快速转变, MG多主体综合能源的高度参与给系统的高效经济运行带来了挑战。针对MG多能交互的复杂容量配置现状,文中提出一种包含光伏(PV),风电(WT),柴油发电机(DG)和电池储能系统(BESS)的独立MG联合容量优化方法。建立PV、WT、DG、BESS和电动汽车(EV)充电负荷模型,考虑了EV充电负荷,以最小化成本、减少温室气体排放、减少弃能为目标进行容量配置,结果表明提出的PV-WT-BESS-DG组合结构不仅经济而且可靠性高,温室气体排放量小。研究结果可为MG容量优化配置提供有力支撑。

关键词:微电网(MG);可再生能源(RE);容量优化;电动汽车(EV);混合动力发电;综合能源

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)04-0127-08

0 引言

微电网(microgrid, MG)是大型公用电网的微型版本,可在孤岛模式下运行^[1]。许多地区和国家利用可再生能源(renewable energy, RE)发电的独立MG为孤立和偏远地区供电^[2-6]。考虑到光伏(photo-voltaic, PV)和风电(wind turbine, WT)的输出可能与负荷需求不匹配,将不同容量的PV和WT进行适当组合,联合储能系统,如电池储能系统(battery energy storage system, BESS)优化运行,以此作为一种功率平衡手段^[7-10]。然而BESS成本高、生命周期有限,仅利用RE和BESS为负荷供电将导致经济性较差。因此,可调度电源,即柴油发电机(diesel generators, DG)也应与RE和BESS一起使用,保证经济有效地供能。

目前针对MG容量优化的研究大多仅讨论了给定MG组合主体的RE与BESS的容量优化,对可变负荷参与下的MG不同主体组合的技术经济性、环保性等对比分析鲜有报道。文献[11]提出了针对并网型水、风、储MG的优化配置方法;文献[12]提出基于谈判博弈的多MG综合能源系统多目标联合优化配置策略;文献[13]提出一种联合PV、WT和BESS的系统容量优化方法。上述研究均在给定MG参与主体下开展最优容量配置,对于可能的最优MG多主体组合类型和电动汽车(electric vehicle, EV)负荷深度参与情况未作进一步对比分析。文献[14-17]进一步考虑了负荷参与的MG优化配置,

但主要是用于容纳更高水平的EV和常规负荷等可控负荷。然而,未来的电力系统规划必须考虑大量EV负荷^[18-23],以确保用户的日常出行。且交通运输一直是温室气体的排放源头之一^[24-25],因此在传统RE容量优化研究的基础上,综合考虑EV负荷的不可控特性并减少温室气体排放有重要的研究意义。

针对可变负荷EV参与下的多主体独立MG最优组合配置,文中提出一种联合容量优化方法。首先推导出PV-WT混合系统、DG、BESS的数学模型,以共同优化容量。其次,建立EV负荷的数学模型,将这种可变负荷引入到MG优化配置过程中。文中提出的MG设计采用BESS和DG,须精确计算BESS循环次数和DG运行小时以确定最佳方案。容量优化问题涉及PV-WT混合系统、BESS、DG和EV负荷引起的约束,以最小化成本、减少温室气体排放和减少能源浪费为目标,得到最优组合容量优化配置结果。

1 MG多主体建模

文中考虑了采用PV、WT、BESS和DG的独立MG系统,该系统主要分为四部分:混合动力发电系统(hybrid power generation system, HPGS)、BESS、DG和EV负荷需求。

1.1 HPGS模型

HPGS由PV和WT组成。单个PV板在 t 时刻产生的功率可使用式(1)计算^[19]。

$$P_{pv} = \eta_{pv} A_{pv} I(t) [1 - 0.005(T_0(t) - 25)] \quad (1)$$

式中: P_{pv} 为PV输出功率; η_{pv} , A_{pv} 分别为PV阵列的

收稿日期:2021-12-23;修回日期:2022-02-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2501600)

效率和面积; T_0 为大气温度; I 为太阳辐射。

GE 1.5XLE 是业内最常用的 WT 模型之一,文中采用此模型计算风电输出,则 WT 输出功率如下:

$$P_{wt}(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ \psi(v) & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_{wt}^r & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{wt} 为 WT 输出功率; v 为风速; P_{wt}^r 为 WT 额定功率; v_{ci}, v_{co}, v_r 分别为切入、切出和额定风速; $\psi(v)$ 为风速处于 $[v_{ci}, v_r)$ 时 WT 输出功率与风速的关系,简称输出特性。

HPGS 的总输出功率为:

$$\begin{cases} P_H(t) = N_{pv} P_{pv}(t) + N_{wt} P_{wt}(t) \\ \text{s.t. } N_{wt}^{\min} \leq N_{wt} \leq N_{wt}^{\max} \\ N_{pv}^{\min} \leq N_{pv} \leq N_{pv}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_H 为 HPGS 的总输出功率; N_{pv} 为 PV 板的数量; N_{wt} 为风电机组的数量; $N_{wt}^{\max}, N_{wt}^{\min}$ 分别为风电机组数量的上、下限; $N_{pv}^{\max}, N_{pv}^{\min}$ 分别为 PV 板数量的上、下限。

1.2 BESS 模型

BESS 的充、放电模型和约束如下:

$$\begin{cases} E_{BESS}(t + \Delta t) = E_{BESS}(t) + \Delta t P_{BESS}^c(t) \eta_c \\ E_{BESS}(t + \Delta t) = E_{BESS}(t) + \Delta t \frac{P_{BESS}^d(t)}{\eta_d} \\ \text{s.t. } 0 \leq P_{BESS}^c(t) \leq P_{BESS}^{c\max} \\ -P_{BESS}^{d\max} \leq P_{BESS}^d(t) \leq 0 \\ E_{BESS}^{\min} \leq E_{BESS}(t) \leq E_{BESS}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_{BESS} 为电池的电量状态; $E_{BESS}^{\max}, E_{BESS}^{\min}$ 分别为电池的最大、最小电量; P_{BESS}^c, P_{BESS}^d 分别为电池的充、放电功率; η_c, η_d 分别为电池的充、放电效率; $P_{BESS}^{c\max}, P_{BESS}^{d\max}$ 分别为电池的最大充、放电功率。

1.3 DG 模型

MG 运行期间可能出现 HPGS 和 BESS 的输出不足以满足负荷需求的情况,此时由 DG 提供额外电能。DG 输出功率可表示如下:

$$P_{DG}(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_{dg}} p_i^{dg}(t) & P_L(t) \geq P_H(t) + P_{BESS}(t) \\ 0 & P_L(t) < P_H(t) + P_{BESS}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{DG} 为 DG 总输出功率; p_i^{dg} 为第 i 台 DG 机组的输出功率; n_{dg} 为 DG 机组的数量; P_{BESS} 为 BESS 的输出功率; P_L 为 MG 负载功率。

1.4 负荷模型

大量 EV 接入电力系统后,负荷需求将急剧增

加,在未来电力系统可靠性运行的设计阶段须考虑 EV 负荷^[26-28]。文中负荷模型采用 EV 负荷模型。在 EV 建模中,电池容量、单位里程消耗、初始荷电状态(state of charge, SOC)、充放电速率和用户行为是关键因素^[20]。虽然可预先获取电池容量、单位里程消耗和充电功率,但无法提前获得用户行为。文中采用 3 种类型 EV 进行分析,其参数信息如表 1 所示。

表 1 EV 参数

Table 1 Parameters of EV

类型	电池容量/ (kW·h)	充放电 功率/kW	续航 里程/km
EV1	70	11	386
EV2	24	6.6	203
EV3	24	6.6	161

系统 EV 总数 N_{ev} 可以由 EV 渗透水平获得,即:

$$N_{ev} = \sum_{c=1}^{c_1} \rho v_c n_h \quad (6)$$

式中: ρ 为渗透率; v_c 为 c 类 EV 的百分比; c_1 为 EV 类型数; n_h 为房屋总数。日里程、出发时间、到达时间和充电时间是用户行为的不同方面,可以由对数正态分布获得。

$$\begin{cases} \chi_{e,c,d} \sim LN(3.375, 0.5) \\ \tau_{e,c,d}^{dp} \sim LN(t_{dp}, \sqrt{3}) \\ \tau_{e,c,d}^{ar} \sim LN(t_{ar}, \sqrt{3}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\chi_{e,c,d}$ 为 c 类 EV 车辆 e 在第 d 天行驶的里程; $\tau_{e,c,d}^{dp}$ 为出发时间; $\tau_{e,c,d}^{ar}$ 为到达时间; t_{dp}, t_{ar} 分别为平均出发时间和到达时间。

得到行驶里程后,可以估算 EV 完全充电所需的能量。

$$\kappa_{e,c,d} = \begin{cases} E_c^{ev} \chi_{e,c,d} \geq \lambda_c \\ E_c^{ev} \chi_{e,c,d} / \lambda_c \quad \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\kappa_{e,c,d}$ 为 EV 所需充电能量; E_c^{ev} 为 c 类 EV 的电池容量; λ_c 为 c 类 EV 充满电能够满足的行驶距离。

EV 充电所需时间为:

$$\tau_{e,c,d}^{chg} = \frac{\kappa_{e,c,d}}{p_{ev,c}} \quad (9)$$

式中: $\tau_{e,c,d}^{chg}$ 为 EV 充电所需时间; $p_{ev,c}$ 为 c 类 EV 的充电功率。假设 EV 到达后立即开始充电, EV 充电负荷建模如下:

$$\xi_{e,c,d}(\tau_{e,c,d} + y) = \begin{cases} p_{ev,c} & y \leq \lfloor \tau_{e,c,d}^{chg} \rfloor \\ p_{ev,c}(\tau_{e,c,d}^{chg} - \lfloor \tau_{e,c,d}^{chg} \rfloor) & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $y = 1, 2, \dots, \lfloor \tau_{e,c,d}^{chg} \rfloor + 1$; ξ 为 EV 每小时充电

负荷。

EV 充电后的充电状态估计如下:

$$\begin{cases} S_{e,c,d}^{ev}(t + \Delta t) = S_{e,c,d}^{ev}(t) + \Delta t \frac{\xi_{e,c,d}(t)}{E_c^{ev}} \\ S_{\min}^{ev} \leq S_{e,c,d}^{ev}(t) \leq S_{\max}^{ev} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $S_{e,c,d}^{ev}(t + \Delta t)$ 为 EV 充电后的 SOC 值; S_{\min}^{ev} , S_{\max}^{ev} 分别为 EV 电池 SOC 的最小、最大值。

EV 作为可控负荷,具有移动性,可表示为:

$$\begin{cases} \xi_{e,c,d}(t + \tau_s) = \xi_{e,c,d}(t) \\ \text{s.t. } \tau_s^{\min} \leq \tau_s \leq \tau_s^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: τ_s 为时移; τ_s^{\min} , τ_s^{\max} 分别为时移的最小、最大值。每日 EV 小时负荷 P_{ev} 可用下式计算:

$$P_{ev,d}(t) = \sum_{c=1}^{c_t} \sum_{e=1}^{n_c^{ev}} \xi_{e,c,d}(t) \quad (13)$$

式中: n_c^{ev} 为 c 类 EV 的总数。

假设 MG 供应 2 000 个用户,每个用户拥有一辆 EV,根据汽车售价选择汽车相应占比, EV1、EV2 和 EV3 的占比分别为 60%、36%、4%。

2 多目标优化模型

RE 已被证明可有效解决温室气体排放,但其成本高,存在可靠性和稳定性问题。因此,为了充分利用资源,必须进行系统设计,以合理的成本降低温室气体排放量。文中系统设计以成本最小化、温室气体排放量减少以及弃能最小化为目标,为负荷需求提供可靠电能。

2.1 MG 成本

MG 总功率包括 HPGS、BESS 和 DG 输出功率。

$$P_{MG}(t) = P_H(t) + P_{BESS}(t) + P_{DG}(t) \quad (14)$$

式中: P_{MG} 为 MG 总功率。

服务能量 E_s 为 MG 系统在运行期间提供的负荷需求之和,定义为:

$$\begin{cases} E_s = \sum_{t=1}^T f_1(t) \\ f_1(t) = \begin{cases} P_L(t) & P_{MG}(t) \geq P_L(t) \\ P_{MG}(t) & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

式中: T 为运行时刻数。

未服务能量 E_{ns} 为 MG 运行期间未提供的负荷需求总和:

$$\begin{cases} E_{ns} = \sum_{t=1}^T f_2(t) \\ f_2(t) = \begin{cases} P_L(t) - P_{MG}(t) & P_L(t) > P_{MG}(t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

服务的净贴现能量 E_s^{ND} 计算如下:

$$E_s^{ND} = \sum_{j=0}^{n_1} \frac{1}{(1 + \vartheta)^j} E_s \quad (17)$$

式中: n_1 为总运行年限; ϑ 为贴现率。

2.1.1 HPGS 成本

HPGS 成本建模如下:

$$C_h = \sum_{k=1}^{n_{sc}} C_k^{sr} P_k^{sr} + \sum_{k=1}^{n_{sc}} \sum_{j=0}^{n_1} \sum_{t=1}^T \frac{F_k P_k(t) + T_k^{om} P_k^{sr}}{(1 + \vartheta)^j} \quad (18)$$

式中: C_h 为 HPGS 混合发电系统的总成本; C_k^{sr} 为第 k 个电源的投资成本; P_k^{sr} 为第 k 个电源的装机容量; n_{sc} 为 HPGS 使用的电源总数; F_k 为第 k 个电源的单位功率燃料成本; P_k 为第 k 个电源的功率输出; T_k^{om} 为第 k 个电源的固定运行维护成本。在式(18)中,第一项为初始投资成本,第二项为运行维护成本的现值。

2.1.2 BESS 成本

储能成本取决于 BESS 的功率和能量容量。

BESS 的成本模型如下:

$$C_b = \sum_{l=1}^{n_{slg}} (C_l^c E_l^{slg} + C_l^p P_l^{slg}) + \sum_{l=1}^{n_{slg}} \sum_{s=\tau_{bat}}^{n_1 - \tau_{bat}} \frac{C_l^c E_l^{slg} + C_l^p P_l^{slg}}{(1 + \vartheta)^s} \quad (19)$$

$$s = \tau_{bat}, 2\tau_{bat}, 3\tau_{bat}, \dots, n_1 - \tau_{bat}$$

式中: C_b 为 BESS 的总成本; C_l^c 为与第 l 个储能单元的容量相关的成本; E_l^{slg} 为第 l 个储能单元的容量; C_l^p 为与第 l 个储能单元的功率相关的成本; P_l^{slg} 为第 l 个储能单元的额定功率; n_{slg} 为储能总数; τ_{bat} 为 BESS 使用寿命。在式(19)中,第一项为 BESS 的初始投资成本,第二项为 BESS 的重置成本现值。

2.1.3 DG 成本

与 DG 相关的成本建模如下:

$$C_d = \sum_{i=1}^{n_{dg}} C_i^{c,dg} P_i^{r,dg} + \sum_{i=1}^{n_{dg}} \sum_{o=\tau_{dg}}^{n_1 - \tau_{dg}} \frac{C_i^{c,dg} P_i^{r,dg}}{(1 + \vartheta)^o} + \sum_{i=1}^{n_{dg}} \sum_{j=0}^{n_1} \sum_{t=1}^T \frac{N_i^{min} M_i^{dg}}{(1 + \vartheta)^j} (\Psi_i P_i^{dg}(t) + \varphi_i P_i^{r,dg}) f_p \quad (20)$$

$$o = \tau_{dg}, 2\tau_{dg}, 3\tau_{dg}, \dots, n_1 - \tau_{dg}$$

式中: C_d 为柴油发电系统的总成本; $C_i^{c,dg}$ 为第 i 台 DG 的投资成本; $P_i^{r,dg}$ 为第 i 台 DG 的额定容量; τ_{dg} 为 DG 的寿命; N_i^{min} 为第 i 台 DG 的总运行时间; M_i^{dg} 为第 i 台 DG 的运行维护成本; f_p 为燃料价格; Ψ_i 为第 i 台 DG 的燃料曲线斜率; φ_i 为第 i 台 DG 的燃料曲线截距系数。在式(20)中,第一项为柴油发电系统的初始投资成本,第二项为更换成本,第三项为与柴油发电系统的运行维护成本和燃料成本相关的成本的现值。

2.2 温室气体排放

化石燃料发电过程中会排放温室气体。为了减轻这些排放物造成的损害,需要一个修正成本,如表 2 所示。用 RE 替代化石燃料来发电,则能够减少修正成本,将减少的成本称为减排效益成本(emission reduction benefit cost, ERBC),模型如式(21)所示。

表 2 温室气体排放数据

气体	排放量/[kg·(MW·h) ⁻¹]	修正成本/(美元·kg ⁻¹)
CO ₂	1 000.7	0.003 7
CO	1.55	0.16
SO ₂	9.993	0.97
NO _x	6.46	1.29

$$C_{\text{erbc}} = \sum_{j=0}^{n_1} \sum_{m=1}^4 \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\vartheta)^j} P_{\text{MG}}(t) E_m E_{m,\text{cc}} \quad (21)$$

式中: C_{erbc} 为总减排效益成本; E_m 为第 m 型温室气体的排放量; $E_{m,\text{cc}}$ 为与第 m 型温室气体相关的修正成本。

2.3 弃能

RE 发电具有随机输出特性,因此在运行过程中,RE 的输出可能会高于负荷需求和 BESS 最大功率。在这种情况下,为了 MG 的稳定运行,应将多余的能量丢弃。弃能成本为:

$$C_{\text{dmp}} = \sum_{i=1}^T \sum_{j=0}^{n_1} \frac{1}{(1+\vartheta)^j} \left(\mu \frac{\alpha}{\alpha+\beta} \gamma(t) + \sigma \frac{\alpha}{\alpha+\beta} \gamma(t) \right) \quad (22)$$

式中: α 为 PV 装机容量; β 为 WT 装机容量; μ 为单位 PV 成本; σ 为单位 WT 成本; γ 为弃能量。进一步简化模型,假设总弃能来自 WT 和 PV。

2.4 目标函数

目标函数如下:

$$\min J = \sqrt{(J_1(X) + J_2(X) - J_3(X))^2} \quad (23)$$

相应约束为:

$$\begin{cases} \text{s.t. } g_l(X) = 0 & l = 1, 2, \dots, m \\ h_\iota(X) \leq 0 & \iota = 1, 2, \dots, q \\ X = \{N_{\text{PV}}, N_{\text{WT}}, E^{\text{sig}}, P^{\text{sig}}, P^{\text{r,dg}}\} \end{cases} \quad (24)$$

目标函数的第一项是 MG 总成本,包括 HPGS、BESS 和 DG 成本;目标函数的第二项为弃能成本;最后一项为用 ERBC 按成本换算温室气体排放量。等式约束用 g 表示,不等式约束用 h 表示。所有系统约束如下。

主网约束(发电量=需求量):

$$P_{\text{H}}(t) + P_{\text{BESS}}(t) + P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{L}}(t) = 0 \quad (25)$$

混合发电系统约束:

$$\begin{cases} N_{\text{PV}}^{\text{min}} \leq N_{\text{PV}} \leq N_{\text{PV}}^{\text{max}} \\ N_{\text{WT}}^{\text{min}} \leq N_{\text{WT}} \leq N_{\text{WT}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (26)$$

BESS 约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{BESS}}^{\text{c}}(t) \leq P_{\text{BESS}}^{\text{cmax}} \\ -P_{\text{BESS}}^{\text{dmax}} \leq P_{\text{BESS}}^{\text{d}} \leq 0 \\ E_{\text{BESS}}^{\text{min}} \leq E_{\text{BESS}}(t) \leq E_{\text{BESS}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (27)$$

DG 约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_{\text{dg}}} P_i^{\text{dg}}(t) = 0 & P_{\text{L}}(t) \leq P_{\text{H}}(t) + P_{\text{BESS}}(t) \\ \sum_{i=1}^{n_{\text{dg}}} P_i^{\text{dg}}(t) = P_{\text{L}}(t) - P_{\text{H}}(t) - P_{\text{BESS}}(t) \\ P_{\text{L}}(t) > P_{\text{H}}(t) + P_{\text{BESS}}(t) \end{cases} \quad (28)$$

EV 负荷约束:

$$\begin{cases} S_{\text{min}}^{\text{ev}} \leq S_{e,c,d}^{\text{ev}}(t) \leq S_{\text{max}}^{\text{ev}} \\ P_{\text{ev}}^{\text{min}} \leq P_{\text{ev}}(t) \leq P_{\text{ev}}^{\text{max}} \\ \tau_s^{\text{min}} \leq \tau_s \leq \tau_s^{\text{max}} \end{cases} \quad (29)$$

3 多场景算例分析

PV、WT 数据跨度为 1 a,采样时间为 1 h。PV 和 WT 的功率输出如图 1、图 2 所示。

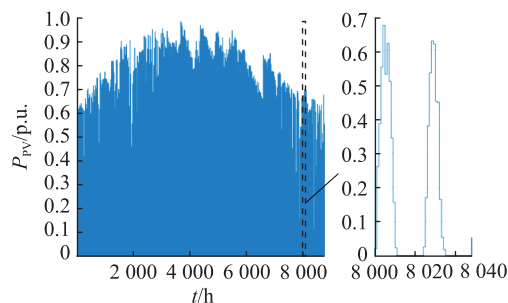


图 1 PV 发电量

Fig.1 Generation capacity of PV

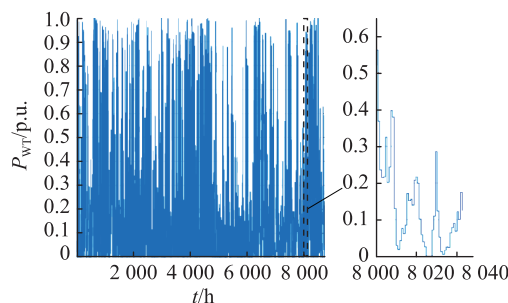


图 2 WT 发电量

Fig.2 Generation capacity of WT

PV 发电只能在白天进行,从早上到中午,发电

量增大,之后呈下降趋势。由 EV 负荷和住宅负荷组成的社区负荷电力需求如图 3 所示。EV 车主预计在下午 6 点左右到家,到家后,EV 开始充电。可以观察到,住宅负荷高峰出现在晚上 8 点左右。由于 PV 不能在夜间发电,因此仅利用 RE 和储能满足负荷需求可能会导致非常高的成本。

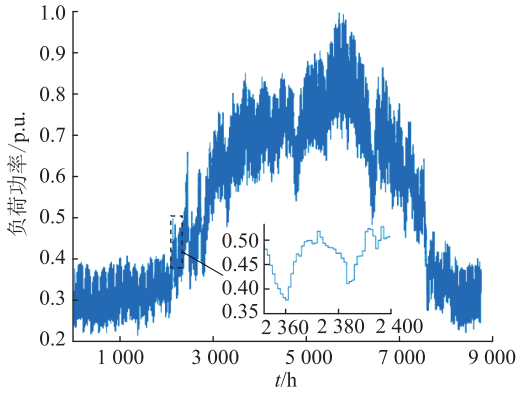


图3 社区负荷需求

Fig.3 Community load demand

表 3 为 MG 系统各主体的相关经济数据,各系统主体的单位容量如下:PV 为 1 kW/p,WT 为 1 kW,DG 为 1 kW,BESS 为 2 V/1 000 A·h。MG 的设计考虑了以下 6 种不同的方案:方案 1 为含 PV-BESS-DG 的 MG;方案 2 为含 WT-BESS-DG 的 MG;方案 3 为含 WT-DG 的 MG;方案 4 为含 PV-DG 的 MG;方案 5 为含 PV-WT-DG 的 MG;方案 6 为含 PV-WT-BESS-DG 的 MG。

表 3 MG 各主体经济性

Table 3 Economy of each main body of multi-agent MG

参数	PV	WT	BESS	DG
投资成本/ (美元·kW ⁻¹)	2 025	2 346	1 000	1 521
运行维护成本/ [美元·(kW·a) ⁻¹]	16	33	10	0.05
替换成本/ (美元·kW ⁻¹)			1 000	1 521
使用寿命	20 a	20 a	2 500 次	15 000 h
φ				0.014
$\Psi/(L \cdot h^{-1})$				0.244

文中模型在 Matlab 平台采用多目标非线性进化算法中的非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II)进行迭代求解。根据 6 种不同方案设定相应的风、光、柴、储配置容量为待解参数,读取 WT、PV 和负荷数据。仿真模型时间跨度为 1 a,最小时间间隔为 1 h,初始种群规模设定 100,迭代次数 100,交叉概率和变异概率分

别取 0.8 和 0.1,迭代结束后分别输出每种组合下最优 Pareto 解。计算机配置为 8 GB 运行内存、Inter i7、2.60 GHz 处理器。

6 种方案下的 MG 容量配置优化结果如表 4 所示。方案 3 和方案 4 的 DG 装机台数较多,由于 PV 和 WT 出力具有随机性且在这 2 种方案中未配置储能,在某些特殊情况下功率缺额将增大,从而需要更多的 DG 以确保系统的功率平衡。与之相对的方案 1、方案 2 和方案 6 均配备了储能,DG 的装机数量显著降低。

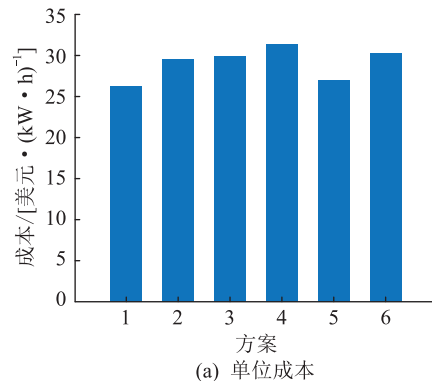
表 4 MG 各主体容量优化配置结果

Table 4 Results of capacity optimization of MG 台

方案	PV	WT	BESS	DG
1	13 010	0	2 847	47
2	0	6 747	1 723	52
3	0	7 120	0	69
4	12 315	0	0	72
5	9 251	4 473	0	56
6	10 122	4 805	3 100	26

图 4 为 6 个 MG 方案的多指标对比,其中图 4(a)为 6 个 MG 方案的单位成本,可以看出,在所有可用资源都被利用的情况下,方案 1 的单位成本最低,而在仅使用 PV 和 DG 的方案 4 中单位成本最高。6 种方案的温室气体排放变化如图 4(b)所示,方案 6 的温室气体排放量最小,RE 和 BESS 的总装机容量最大,在这种情况下,DG 容量最小。方案 4 的温室气体排放量最大,因为只使用 PV,只在白天提供负荷需求,而在夜间完全利用 DG 提供需求,导致了更高的温室气体排放量。图 4(c)和图 4(d)分别为基于 ERBC 和清洁能源(来自 RE 和 BESS 的能量)的 6 种 MG 方案的比较。方案 6 所提供的清洁能源和 ERBC 最大,是由于 RE 和 BESS 的总装机容量最高。方案 4 和方案 3 没有提供储能,所以 RE 渗透率较低,提供的 ERBC 和清洁能源最少。

根据模型计算的单位成本、温室气体排放量、ERBC 和提供的清洁能源发电量进行分析,从可能



(a) 单位成本

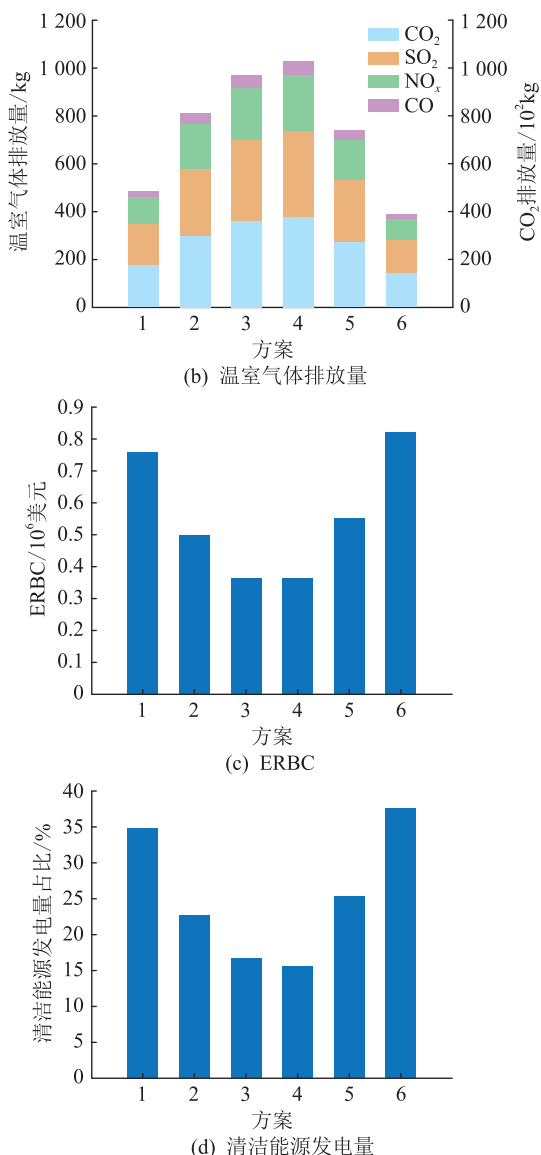


图4 6种MG方案的多指标对比

Fig.4 Multi index comparison results of six MG combinations system

的解决方案中选择最佳组合。在6种MG方案中方案6的温室气体排放量最低,ERBC和清洁能源渗透最高,但其成本较方案1略高。在对比方案1~方案5时,可知方案1的成本较低,温室气体排放量较低,ERBC与清洁能源较高,优于方案2~方案5。因此,方案6是最佳选择,方案1次之。

4 结论

文中提出一种针对分布式RE发电、传统DG与BESS相结合的MG容量优化方法,该优化方法考虑了EV增加导致的负荷需求变化。利用投资成本、弃能成本和温室气体排放量最优,对6种不同的混合RE、传统能源以及储能的MG参与主体进行了容量配置。

通过对ERBC、单位成本和温室气体排放量进行比较,研究发现所提出的PV-WT-BESS-DG组合结构具有温室气体排放量低、清洁能源渗透率高和ERBC高等优点。虽然方案6的单位成本稍高于方案1,但随着储能技术的发展,多主体参与的MG单位成本有望进一步降低。考虑到未来大规模EV接入电网的场景,PV-WT-BESS-DG组合结构对于减少弃能和温室气体排放量有着较大的优势。下一步研究将引入EV用户充放电行为的不确定性、间歇性RE的不确定性等因素,可以使MG容量优化配置结果更符合实际。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019052)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 徐晓宁,周雪松. 微网脱/并网运行模式平滑切换控制策略[J]. 高电压技术,2018,44(8):2754-2760.
 XU Xiaoning,ZHOU Xuesong. Control strategy for smooth transfer between grid-connected and island operation for micro grid[J]. High Voltage Engineering,2018,44(8):2754-2760.

[2] 万千,夏成军,管霖,等. 含高渗透率分布式电源的独立微网的稳定性研究综述[J]. 电网技术,2019,43(2):598-612.
 WAN Qian,XIA Chengjun,GUAN Lin, et al. Review on stability of isolated microgrid with highly penetrated distributed generations[J]. Power System Technology,2019,43(2):598-612.

[3] 韦佐霖,陈民铀,李杰,等. 孤岛微网中分布式储能SOC和效率均衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):169-177.
 WEI Zuolin, CHEN Minyou, LI Jie, et al. Balancing control strategy of SOC and efficiency for distributed energy storage in islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(4):169-177.

[4] KIM Y S,KIM E S,MOON S I. Frequency and voltage control strategy of standalone microgrids with high penetration of intermittent renewable generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(1):718-728.

[5] KUANG Y H,ZHANG Y J,ZHOU B, et al. A review of renewable energy utilization in islands[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,59:504-513.

[6] ABU-RUB H,MALINOWSKI M,AL-HADDAD K. Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.,2014.

[7] HU X S,ZOU C F,ZHANG C P, et al. Technological developments in batteries:a survey of principal roles, types, and management needs[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2017,15(5):20-31.

[8] KHALID M,AHMADI A,SAVKIN A V, et al. Minimizing the energy cost for microgrids integrated with renewable energy resources and conventional generation using controlled battery energy storage[J]. Renewable Energy,2016,97:646-655.

- [9] 谢桦,滕晓斐,张艳杰,等. 风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(6):70-76,115.
XIE Hua, TENG Xiaofei, ZHANG Yanjie, et al. Analysis of economic influence factors in wind-photovoltaic-storage microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 70-76, 115.
- [10] 李滨,李倍存,陈碧云. 含超前控制的风储系统滚动最优控制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(4):25-32.
LI Bin, LI Beicun, CHEN Biyun. Rolling optimal control strategy with lead control for wind power and energy storage systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 25-32.
- [11] 陈永进,吴杰康,翁兴航,等. 水风储微电网电源容量的优化配置[J]. 电力工程技术,2019,38(6):137-146.
CHEN Yongjin, WU Jiekang, WENG Xinghang, et al. Optimal sizing of microgrids with wind-hydropower-energy storage [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 137-146.
- [12] 顾洁,白凯峰,时亚军. 基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J]. 电网技术,2019,43(9):3119-3134.
GU Jie, BAI Kaifeng, SHI Yajun. Optimized operation of regional integrated energy system based on multi-agent master-slave game optimization interaction mechanism [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3119-3134.
- [13] ALSAYED M, CACCIATO M, SCARCELLA G, et al. Multicriteria optimal sizing of photovoltaic-wind turbine grid connected systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(2):370-379.
- [14] OGUNSINA A A, PETINRIN M O, PETINRIN O O, et al. Optimal distributed generation location and sizing for loss minimization and voltage profile optimization using ant colony algorithm [J]. SN Applied Sciences, 2021, 3(2):1-10.
- [15] CHARABI Y, ABDUL-WAHAB S. The optimal sizing and performance assessment of a hybrid renewable energy system for a mini-grid in an exclave territory [J]. AIMS Energy, 2020, 8(4):669-685.
- [16] KALUTHANTHRIGE R, RAJAPAKSE A D, LAMOTHE C, et al. Optimal sizing and performance evaluation of a hybrid renewable energy system for an off-grid power system in northern Canada [J]. Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy, 2019, 4(1):1-16.
- [17] 卫婧菲,刘其辉. 居民小区电动汽车光伏充电站三分段能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):249-255.
WEI Jingfei, LIU Qihui. Tri-period energy management strategy for PV-assisted EV charging station in residential area [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 249-255.
- [18] 苏粟,杨恬恬,李玉璟,等. 考虑实时动态能耗的电动汽车充电路径规划[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):136-143.
SU Su, YANG Tiantian, LI Yujing, et al. Charging route planning for electric vehicles considering real-time dynamic energy consumption [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 136-143.
- [19] 周天沛,孙伟. 基于微网的电动汽车与电网互动技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):98-104,117.
ZHOU Tianpei, SUN Wei. Electric vehicle-to-grid technology based on microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 98-104, 117.
- [20] HOU H, XUE M Y, XU Y, et al. Multi-objective joint economic dispatching of a microgrid with multiple distributed generation [J]. Energies, 2018, 11(12):3264.
- [21] 侯慧,薛梦雅,陈国炎,等. 计及电动汽车充放电的微电网多目标分级经济调度[J]. 电力系统自动化,2019,43(17):55-62.
HOU Hui, XUE Mengya, CHEN Guoyan, et al. Multi-objective hierarchical economic dispatch for microgrid considering charging and discharging of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 55-62.
- [22] 周建力,乌云娜,董昊鑫,等. 计及电动汽车随机充电的风光-氢综合能源系统优化规划[J]. 电力系统自动化,2021,45(24):30-40.
ZHOU Jianli, WU Yunna, DONG Haoxin, et al. Optimal planning of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system considering random charging of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 30-40.
- [23] 王泽森,唐艳梅,门向阳,等. 独立海岛终端一体化系统下电动汽车的投放数量规划研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(7):2005-2016.
WANG Zesen, TANG Yanmei, MEN Xiangyang, et al. Research on the quantity planning of electric vehicle on the isolated island terminal integration system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2005-2016.
- [24] 冯相昭,赵梦雪,王敏,等. 中国交通部门污染物与温室气体协同控制模拟研究[J]. 气候变化研究进展,2021,17(3):279-288.
FENG Xiangzhao, ZHAO Mengxue, WANG Min, et al. Simulation research on co-controlling pollutants and greenhouse gases emission in China's transportation sector [J]. Climate Change Research, 2021, 17(3): 279-288.
- [25] 郑梦柳,杨红磊,彭军还,等. 市域尺度货物运输碳排放时空变化及因素分析[J]. 测绘科学,2019,44(5):76-84.
ZHENG Mengliu, YANG Honglei, PENG Junhuan, et al. Spatiotemporal variations and potential variables of greenhouse gas emissions based on city scale [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(5): 76-84.
- [26] 门向阳,杨蓝文,潘杰,等. 计及电动汽车和冷负荷响应的多楼宇联合优化调度研究[J]. 电力需求侧管理,2021,23(3):25-30,40.
MEN Xiangyang, YANG Lanwen, PAN Jie, et al. Research on multi-building joint optimal scheduling considering electric vehicle and cold load response [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(3): 25-30, 40.
- [27] 杨书强,范文奕,赵阳,等. 基于充电功率场景模型的电动汽车负荷建模[J]. 全球能源互联网,2021,4(6):575-584.

YANG Shuqiang, FAN Wenyi, ZHAO Yang, et al. Electric vehicle load modeling based on charging power scenarios [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 575-584.

[28] 陈盛凯, 杨伟, 徐泽, 等. 考虑电动汽车 V2G 的分布式电源优化配置[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 143-149.

CHEN Shengkai, YANG Wei, XU Ze, et al. Optimal allocation for distributed generation considering V2G of electric vehicle [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 143-149.

作者简介:



侯岚

侯岚(1987),女,学士,工程师,从事能源物联网技术与电网智能运行相关工作(E-mail:houlan@tsinghua-eiri.org);

李玉杰(1991),男,硕士,高级工程师,从事高电压技术、电力设备智能检测技术相关工作;

贾晓明(1967),男,学士,工程师,从事高电压技术、电力设备智能检测技术相关工作。

Optimization of capacity configuration method for multi-agent microgrid considering EV load

HOU Lan¹, LI Yujie², JIA Xiaoming³, WANG Linjie³, QIAN Cong³, WANG Jian¹

(1. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610213, China.

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Extra-high Voltage Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: With the rapid development of renewable energy (RE) and the continuous progress of smart grid, the energy consumption characteristic design of modern power system is developing towards a more flexible and economical microgrid (MG). Meanwhile, the high participation of multi-agent integrated energy in MG brings challenges to the efficient and economic operation of the system. Aiming at the complex capacity configuration of MG with multi-functional interaction, a combined capacity optimization method for a typical independent MG including photovoltaic (PV), wind turbines (WT), diesel generators (DG) and battery energy storage system (BESS) is proposed. On the one hand, the models of PV, WT, DG, BESS and electric vehicle (EV) charging load are established. On the other hand, the EV charging load are considered, and the capacity configuration is optimized to minimize the cost, reduce greenhouse gas emissions and energy waste. The results show that the combination of PV-WT-BESS-DG is not only more reliable but also more economical. This study can provide support for the optimal allocation of MG capacity.

Keywords: microgrid (MG); renewable energy (RE); optimization of capacity; electric vehicles (EV); hybrid power generation; integrated energy

(编辑 方晶)