

考虑电热耦合的交直流微电网多目标优化配置

杨冬锋¹, 姜超¹, 蔡国伟¹, 黄南天¹, 刘晓军¹, 黄征²

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省吉林市 132012;

2. 郑州大学电气工程学院, 河南省郑州市 450001)

摘要: 在当前电热联系日渐紧密以及交直流微电网日益成熟的发展趋势下,以投资成本、CO₂排放量以及换流损耗最小为优化目标,综合考虑微电网电/热功率平衡、自治能力等多种约束,提出了考虑电热耦合的交直流混合微电网电/热源双层优化配置模型。其上层为微电网内的各设备容量配置模型,下层是对微电网内各设备运行策略的确定,通过上下层的联合优化对微电网内各设备容量进行配置研究。对比不同规划场景,分析电热耦合对优化目标的影响,通过全年的设备出力和典型日的功率平衡曲线,说明了含电热耦合的交直流微电网供电/热的可靠性,最终验证了所述模型的合理性和有效性。

关键词: 电热耦合; 交直流微电网; 双层优化; 容量配置

0 引言

随着化石能源危机和环境污染问题日益凸显,实现能源结构低碳化、清洁化转型已成为趋势^[1-2]。微电网是可再生能源的重要承载形式,具有增强配电网对分布式电源的接纳能力、减少负荷中心对外电能的需求的优势^[3]。近年来,为提高能源的利用效率,实现能量的高效梯级利用,多能互补技术得到了广泛的发展^[4-5]。

可再生能源发电(renewable energy generation, REG)是微电网的主要发电形式,其随机性和间歇性对微电网规划和运行提出了挑战。另外,随着微电网系统结构和运行方式逐渐复杂,其供能方式更加灵活,同时也更加复杂^[1]。因此根据负荷侧需求确定微电网设备的容量配置显得尤为重要。国内外学者针对微电网优化配置问题开展了大量研究。文献[6-8]从经济、环保以及可靠性等角度,构建了微电网分布式电源规划模型,确定了最佳安装容量。文献[9-11]综合考虑经济性、自平衡能力对并网型微电网进行优化配置。文献[12]针对交直流耦合微电网,提出了相应的能量管理策略,考虑经济性和节能性优化电源的容量。以上研究多针对传统交流微电网,且均仅考虑电力系统,缺乏对不同能源协调

互补的重视。随着微电网中直流负荷比例逐渐增大,交直流微电网已经成为目前的研究热点^[13-16];另外,多能互补系统能够实现不同能源间的优势互补,具有降低经济成本、提高能源利用效率的优点^[17]。文献[18-20]考虑了微电网的冷热电负荷需求,建立了相应的调度模型。文献[1,4-5,21]考虑了微电网或微能源网中的冷电热负荷需求,以微电网投资经济、运行的环保性为目标,对微电网内的各设备容量进行优化配置。上述关于多能互补的研究均侧重于交流微电网,对交直流微电网的关注则较少。电热耦合系统是指通过电热耦合元件将电力系统和热力系统结合起来,实现电能和热能之间的协调利用和相互转换。热电联产(CHP)的灵活性可以弥补REG的功率波动、提高能源的利用率^[21-23];电热转换(E2H)在提高CHP供能灵活性的同时还可促进可再生能源的消纳^[24]。CHP和E2H分别为电热耦合源-荷两侧的重要表现形式^[25]。

通过以上分析发现,目前关于微电网优化配置的研究在同时考虑交直流微电网和电热耦合协调互补方面相对比较薄弱。针对目前研究的不足,构建了包含风机(WT)、光伏(PV)、电池储能系统(BESS)、燃气锅炉(GB)、微型燃气轮机(MT)、电锅炉(EB)和储热系统(TSS)的电热耦合系统的交直流微电网规划模型,其中GB和EB为实现CHP和E2H的核心元件,并提出了计及投资层和运行层的联合优化方法,对微电网的容量配置开展研究,分析对比不同场景的规划结果,最终说明了所提模型

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2019-08-21。

上网日期: 2020-02-03。

国家自然科学基金资助项目(51307020);吉林省科技发展计划资助项目(20160204004GX)。

的优越性和可靠性。

1 电热耦合交直流混合微电网模型

图1为电热耦合的交直流微电网的能量流动模型。其中绿色边框包含的区域表示的是电能生产-供应流动模型,直流侧PV和BESS发电满足直流负荷,交流侧WT和MT发电满足交流负荷(EB消耗的功率可以看做额外的交流负荷),当直流侧或交流侧功率无法平衡时,可通过换流装置进行功率交互以及面向配电网购/售电平抑功率缺额或过剩;紫色边框包含的区域表示热能生产-供应流动模型,热负荷可通过MT,GB,EB,TSS产热满足;2个部分重合的区域即是电热耦合元件,微电网通过电热耦合过程将电力系统和热力系统紧密联系起来,实现电能和热能的协调互补。微电网中设备数学模型已有大量研究成果,本文主要参考文献建立了MT出力模型^[21]、EB出力模型^[18]、WT出力模型^[6]、PV出力模型^[6]、GB出力模型^[21]以及储能系统出力模型^[18]。为方便研究,本文简化了微电网的结构,不考虑相关的潮流问题。

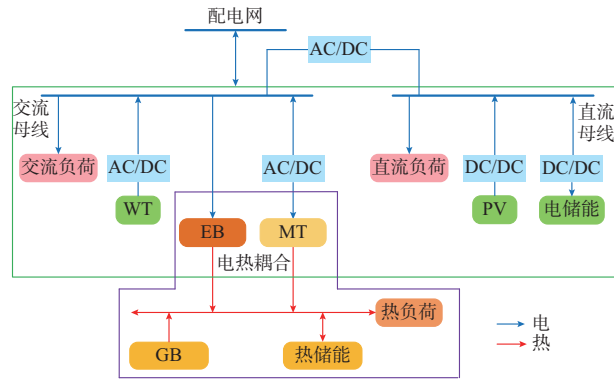


图1 电热耦合交直流混合微电网模型
Fig.1 AC/DC hybrid microgrid model with electricity/heat coupling

2 微电网双层优化模型

2.1 容量优化模型

上层优化模型的优化目标分别为微电网年现值投资成本、CO₂排放量以及交直流母线换流损耗最小。

2.1.1 微电网年投资成本

微电网投资的经济性可通过年投资成本来衡量,就是将微电网寿命周期内产生的总成本折算到一年进行统计,即等年值成本。目标函数如下:

$$\min C_{TAC} = C_{NPC} F \quad (1)$$

$$C_{NPC} = C_{ini} + C_{om} + C_{rep} + C_{PDG} + C_{ngs} - C_{sur} \quad (2)$$

$$F = \frac{i(1+i)^l}{(1+i)^l - 1} \quad (3)$$

式中: C_{NPC} 和 C_{TAC} 分别为微电网寿命周期内产生的总成本和等年值成本; F 为资本回收系数; C_{ini} 为初始设备购买成本; C_{om} 为运行维护成本; C_{rep} 为置换成本; C_{PDG} 为从/向配电网购/售电费用; C_{ngs} 为燃料购买费用; C_{sur} 为设备剩余残值; i 和 l 分别为贴现率和微电网寿命期望值。

2.1.2 微电网CO₂排放

温室效应是全球关注的焦点问题,CO₂是微电网主要的排放气体且成为气候变暖的关键因素。因此,常常选择CO₂的排放量来分析评判地区的生态环境水平。CO₂的排放量越少,对微电网地区的生态环境影响越小,环保性越高。将微电网全年的CO₂排放量最少定为优化目标,可表示为:

$$\min E = \sum_{t=1}^T (E_{t,PDG} + E_{t,GB} + E_{t,MT}) \quad (4)$$

$$E_{t,PDG} = K_{PDG} P_{t,buy} \Delta t \quad (5)$$

$$E_{t,GB} = K_{GB} H_{t,GB} \Delta t \quad (6)$$

$$E_{t,MT} = K_{MT} P_{t,MT} \Delta t \quad (7)$$

式中: E 为微电网全年的CO₂排放量; $E_{t,PDG}$, $E_{t,GB}$, $E_{t,MT}$ 分别为 t 时段配电网、GB和MT产生的CO₂排放; K_{PDG} , K_{GB} , K_{MT} 分别为配电网、GB和MT的CO₂的排放系数; $P_{t,buy}$, $H_{t,GB}$ 和 $P_{t,MT}$ 分别为 t 时段微电网从配电网购电功率、GB发热功率和MT发电功率; Δt 为仿真步长,取1h; T 为仿真总时长; $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ 。

2.1.3 微电网的换流损耗

交直流混合微电网包含交流母线和直流母线,能够连接不同类型负载和电源,且直流母线与交流母线的存在功率交互,在通过双向变流器实现功率平衡的过程中,会产生一定的损耗,同时各个电源与相应的母线连接时同样需要换流器进行调节,也会产生一定的损耗,电能损耗越小,说明微电网的节能性越好。换流损耗计算公式如下:

$$\min P_{t,loss} = (1 - \alpha) \sum_{t=1}^T (|P_{t,tr}| + P_{t,WT} + P_{t,PV} + P_{t,MT}) \quad (8)$$

式中: $P_{t,loss}$ 为换流器 t 时段的换流损耗; $P_{t,tr}$ 为 t 时段的交直流母线换流功率,认为从直流母线流向交流母线为正,反之为负; $P_{t,WT}$ 和 $P_{t,PV}$ 分别为 t 时段WT出力和PV出力; α 为换流器的换流效率。

2.2 运行优化模型

2.2.1 目标函数

微电网中所含设备多,不同形式能源之间相互

耦合,使其供能方式较为灵活的同时也较为复杂,微电网交流母线能够与配电网进行功率交互,交直流母线之间同样能够进行功率交互。对于同样的负荷需求,有不同的供能组合和运行策略。为合理协调各时段微电网内各设备出力以满足电/热负荷,确保微电网电/热能的生产与消费达到实时平衡,提高微电网的售电收益,减少购电以及燃料购买费用,需要对微电网内各设备实时出力值、微电网与配电网交互功率值以及微电网交直流母线交互功率值进行优化。定义全年运营成本为优化目标函数,可表示为:

$$\min O = \sum_{t=1}^T \left[P_{t, \text{buy}} C_{\text{buy}} - P_{t, \text{sel}} C_{\text{sel}} + f_{t, \text{gs}} C_{\text{gs}} + c_{\text{es}} \left(P_{t, \text{ch}} \eta_{\text{ch}} + \frac{P_{t, \text{dch}}}{\eta_{\text{dch}}} \right) \right] \Delta t \quad (9)$$

式中: O 为微电网全年运营成本; $P_{t, \text{buy}}$ 和 $P_{t, \text{sel}}$ 分别为 t 时段微电网从/向配电网购/售电功率; c_{buy} 和 c_{sel} 分别为微电网购/售电单价; $f_{t, \text{gs}}$ 为微电网 t 时段的天然气消耗量; c_{gs} 为天然气的价格; c_{es} 为BESS的运行费用系数; $P_{t, \text{ch}}$ 和 $P_{t, \text{dch}}$ 分别为BESS的充、放电功率; η_{ch} 和 η_{dch} 分别为BESS充、放电效率。

2.2.2 微电网功率平衡约束

根据图1的微电网模型,系统交流侧电功率平衡约束可表示为:

$$P_{t, \text{WT}} + P_{t, \text{buy}} - P_{t, \text{sel}} + P_{t, \text{MT}} + P_{t, \text{tr}} = P_{t, \text{acload}} + P_{t, \text{EB}} \quad (10)$$

式中: $P_{t, \text{acload}}$ 为 t 时段的交流负荷; $P_{t, \text{EB}}$ 为 t 时段EB耗电功率。

系统直流侧电功率平衡约束可表示为:

$$P_{t, \text{PV}} + P_{t, \text{dch}} = P_{t, \text{dload}} + P_{t, \text{tr}} + P_{t, \text{ch}} \quad (11)$$

式中: $P_{t, \text{dload}}$ 为 t 时段的直流负荷。

系统热功率平衡约束可表示为:

$$H_{t, \text{GB}} + H_{t, \text{MT}} + H_{t, \text{EB}} + H_{t, \text{dch}} = H_{t, \text{load}} + H_{t, \text{ch}} \quad (12)$$

式中: $H_{t, \text{GB}}$, $H_{t, \text{MT}}$ 和 $H_{t, \text{EB}}$ 分别为 t 时段GB出力功率、MT发热功率和EB发热功率; $H_{t, \text{load}}$ 为微电网 t 时段的热负荷; $H_{t, \text{dch}}$ 和 $H_{t, \text{ch}}$ 分别为 t 时段TSS的放热和吸热功率。

2.2.3 微电网设备运行约束

微电网各设备出力约束如下:

$$0 \leq P_{t, \text{WT}} \leq C_{\text{ap, WT}} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{t, \text{PV}} \leq C_{\text{ap, PV}} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{t, \text{MT}} \leq \eta_{\text{MT}} C_{\text{ap, MT}} \quad (15)$$

$$0 \leq H_{t, \text{GB}} \leq C_{\text{ap, GB}} \quad (16)$$

$$0 \leq H_{t, \text{EB}} \leq C_{\text{ap, EB}} \quad (17)$$

式中: $C_{\text{ap, WT}}$, $C_{\text{ap, PV}}$, $C_{\text{ap, MT}}$, $C_{\text{ap, GB}}$, $C_{\text{ap, EB}}$ 分别为WT, PV, MT, GB和EB的安装容量; η_{MT} 为MT的发电效率。

BESS功率以及荷电状态约束可表示为:

$$0 \leq P_{t, \text{ch}} \leq \gamma_{\text{ch}} C_{\text{ap, ES}} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{t, \text{dch}} \leq \gamma_{\text{dch}} C_{\text{ap, ES}} \quad (19)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (20)$$

式中: $C_{\text{ap, ES}}$ 为BESS的安装容量; γ_{ch} 和 γ_{dch} 分别为BESS的最大充、放电倍率; S_t , $S_{\max}$, $S_{\min}$ 分别为BESS在 t 时段的荷电状态以及荷电状态的上、下限。TSS相关约束认为和BESS一致。

相关设备的爬坡约束可表示如下^[5]。增、减出力时,分别有:

$$P_{t, j} - P_{t-1, j} \leq P_{\text{up, max, } j} \quad (21)$$

$$P_{t-1, j} - P_{t, j} \leq P_{\text{down, max, } j} \quad (22)$$

$$j \in \{\text{MT, GB}\} \quad (23)$$

式中: $P_{t, j}$ 和 $P_{t-1, j}$ 分别为 t 和 $t-1$ 时段设备 j 的出力值; $P_{\text{up, max, } j}$ 和 $P_{\text{down, max, } j}$ 分别为设备 j 的向上爬坡约束值和向下爬坡约束值。

2.2.4 微电网购售电功率约束

并网型微电网交流侧与配电网直接相连,能够进行购售电,但过大的售电功率倒送会造成反向潮流,影响配电网稳定运行^[12],同时考虑到微电网与配电网连接节点的输电压力,需要对微电网与配电网的交互功率进行约束。

$$0 \leq P_{t, \text{buy}} \leq P_{\text{buy, max}} \quad (24)$$

$$0 \leq P_{t, \text{sel}} \leq P_{\text{sel, max}} \quad (25)$$

式中: $P_{\text{buy, max}}$ 和 $P_{\text{sel, max}}$ 分别为微电网购电和售电的最大功率值。

2.2.5 微电网自治能力约束

为提高微电网对可再生能源的就地消纳能力,防止特殊情况下,微电网以独立模式运行弃风光量过高,需要对微电网向配电网的售电量进行约束^[3]。

$$1 - \frac{\sum_{t=1}^T P_{t, \text{sel}}}{\sum_{t=1}^T P_{t, \text{load}}} \geq \beta \quad (26)$$

式中: $P_{t, \text{load}}$ 为微电网系统的总负荷; β 为可再生能源消纳约束的下限值。

为提高微电网的独立供应负荷能力,降低微电网对配电网的依赖程度,防止故障孤岛运行时切负荷较多,需要对微电网的购电量进行约束^[12]。

$$1 - \frac{\sum_{t=1}^T P_{t, \text{buy}}}{\sum_{t=1}^T P_{t, \text{load}}} \geq \varepsilon \quad (27)$$

式中: ε 为自平衡约束的下限值。

为了保证可再生能源的利用率,防止过多地使用非清洁能源和污染气体的过度排放,需要对REG比例进行约束^[6]。

$$\frac{\sum_{t=1}^T (P_{t, \text{WT}} + P_{t, \text{PV}} - P_{t, \text{sel}})}{\sum_{t=1}^T (P_{t, \text{load}} + P_{t, \text{EB}})} \geq \theta \quad (28)$$

式中: θ 为REG比例约束的下限值。

3 模型求解算法

本文提出的考虑电热耦合的交直流混合微电网优化模型兼顾容量优化与运行优化,采用多目标粒子群优化(MOPSO)算法和混合整数线性规划(MILP)相结合求解优化结果^[3,26]。上层采用MOPSO算法,基于容量优化目标对微电网容量配置方案进行寻优,下层调用CPLEX求解MILP模型,以年运行成本最小为目标,求解在相应配置容量情况下的最优运行方案。下层计算后将最优运行方案返回至上层,上层算法根据容量配置方案及最优运行方案计算目标值,并通过MOPSO算法进行寻优,最终得到最佳配置容量。图2为双层优化模型的流程图。

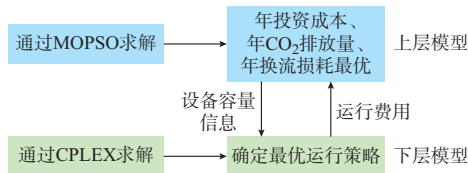


图2 双层优化模型流程图
Fig. 2 Flow chart of bi-level optimization model

3.1 基于MOPSO求解容量优化模型

多目标优化常常被视为寻找与解决不同优化目标之间的最佳方案。由于这些目标可能具有非线性、冲突或不可比较的特点,因此,多目标优化通常通过寻找帕累托(Pareto)最优解集来实现。Pareto最优解集也称为非支配解集,是权衡不同目标之间冲突关系最好的解决方案^[27]。本文采用MOPSO寻找容量优化模型的不同目标的Pareto最优解集。

基于MOPSO算法的容量优化模型解决方法具体步骤如下。

步骤1:读取风速、辐照、温度以及负荷等典型日数据;设置粒子群算法的运行参数;确定各安装设

备相关的经济参数。

步骤2:生成粒子数量为100的初始种群。随机初始化粒子,每个粒子代表1组包括WT、PV储能、EB及GB的安装容量信息。

步骤3:计算各粒子的适应度值,即上层优化模型中投资成本、换流损耗和CO₂排放量3个目标函数值。并将初始容量信息设置为每个个体的历史最佳位置 P_{best} 。

步骤4:将初始种群中代表非支配解的粒子进行存档。

步骤5:从存档中的非支配解粒子中选出目标函数最优的粒子作为领导者 P_{leader} ,并根据以下公式更新粒子的速度和位置。

$$V_n = wV_n + R_1(P_{n, \text{best}} - P_{n, \text{op}}) + R_2(P_{n, \text{leader}} - P_{n, \text{op}}) \quad (29)$$

$$P_{n, \text{op}} = P_{n, \text{op}} + V_n \quad (30)$$

式中: w 为惯性权重,取值为0.5; R_1 和 R_2 均为0~1之间的随机数; $P_{n, \text{best}}$ 为第 n 个粒子的历史最佳位置; $P_{n, \text{op}}$ 和 V_n 分别为第 n 个粒子的位置和速度; $n \in \{1, 2, \dots, 100\}$ 。

步骤6:计算更新后的粒子的各目标函数值,更新每个个体的历史最佳位置 P_{best} 。

步骤7:更新存档中的非支配解集。

步骤8:判断是否达到最大迭代次数,达到则停止迭代,输出Pareto最优解集;未达到则返回步骤4。

在得到Pareto最优解集中的 M 个解之后,本文采用模糊隶属度函数来分别表示每个Pareto解中各个目标函数对应的满意度。通过满意度比较找出最优的折中解。定义模糊隶属度函数为:

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_{i, \min} \\ \frac{f_{i, \max} - f_i}{f_{i, \max} - f_{i, \min}} & f_{i, \min} < f_i < f_{i, \max} \\ 0 & f_i \geq f_{i, \max} \end{cases} \quad (31)$$

式中: f_i 为每个目标中解集的解; $f_{i, \max}$ 和 $f_{i, \min}$ 分别为每个目标的最大解和最小解; $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

当 $\mu_i=0$ 时,表示对某个目标函数值完全不满意;当 $\mu_i=1$ 时,表示对某个目标完全满意。对于Pareto解集中的解,根据以下公式求解其标准化满意度值,满意度最大的解即为最优折中解。

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (32)$$

式中: μ 为标准化满意度值; N 为优化目标函数的个数。

3.2 基于MILP求解运行优化模型

MILP是一类重要的数学规划问题,它与其他规划问题的区别在于其数学模型可以用线性关系表示。一个完整的MILP问题由最大值或最小值的目标函数、联立线性方程组以及优化变量和约束组成。

本文所提MILP问题可描述为:

$$\min f(x, y) \quad (33)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} h_k(x, y) = 0 & k = 1, 2, \dots, m' \\ g_l(x, y) \leq 0 & l = 1, 2, \dots, n' \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ y \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (34)$$

式中: f 为目标函数; h_k 为等式约束; g_l 为不等式约束; x 和 y 分别为连续型变量和整型变量; $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为连续型变量上、下限。

整个模型求解算法的具体流程见附录A图A1。

4 算例分析

4.1 基础数据

选取某具体算例进行分析,基于不同季节,全年可分为4个时段(春季90天,夏季91天,秋季92天,冬季92天),每个季节可用一个典型日代表,因此,年投资成本、年CO₂排放量以及年换流损耗可通过典型日乘以权重计算,例如冬季的权重是92^[21]。微电网不同季节典型日电/热负荷如附录A图A2所示,微电网不同季节典型日太阳辐射度和风速如附录A图A3所示。春夏太阳辐射度较强,秋冬太阳

辐射度较弱。风速冬季较高,夏季较低。电负荷季节特性不明显,基本上在10~12时段和19时段前后达到高峰,热负荷季节特性明显,基本上在8~10时段和19~21时段达到高峰。

微电网购电电价为1.17元/(kW·h),售电电价为0.09元/(kW·h)^[28]。微电网规划寿命为20a,其间需根据设备寿命对设备进行重新购置。相关设备成本参数^[3,18,21]见附录A表A1。本文设定直流负荷和交流负荷分别占总负荷的40%和60%^[3]。

4.2 场景设置

为研究电热耦合系统和储能系统对规划结果的影响,本文设置4种不同规划场景对比分析。

场景1:基础场景,不考虑电热耦合,微电网购电负荷由REG,BESS和从配电网购电满足;热负荷仅由GB满足。

场景2:在场景1的基础上考虑电热耦合系统,计及CHP和E2H联合供电/热。

场景3:在场景1的基础上考虑电热耦合系统,但不考虑BESS供应电负荷。

场景4:在场景1的基础上考虑电热耦合系统,同时考虑TSS供热。

4.3 结果分析

4.3.1 不同场景规划方案分析

通过优化得到不同场景下微电网的Pareto最优规划方案解集。对场景1至场景4进行对比分析,研究不同规划模型下微电网规划方案的影响。

场景1至场景4的Pareto前沿如图3所示。

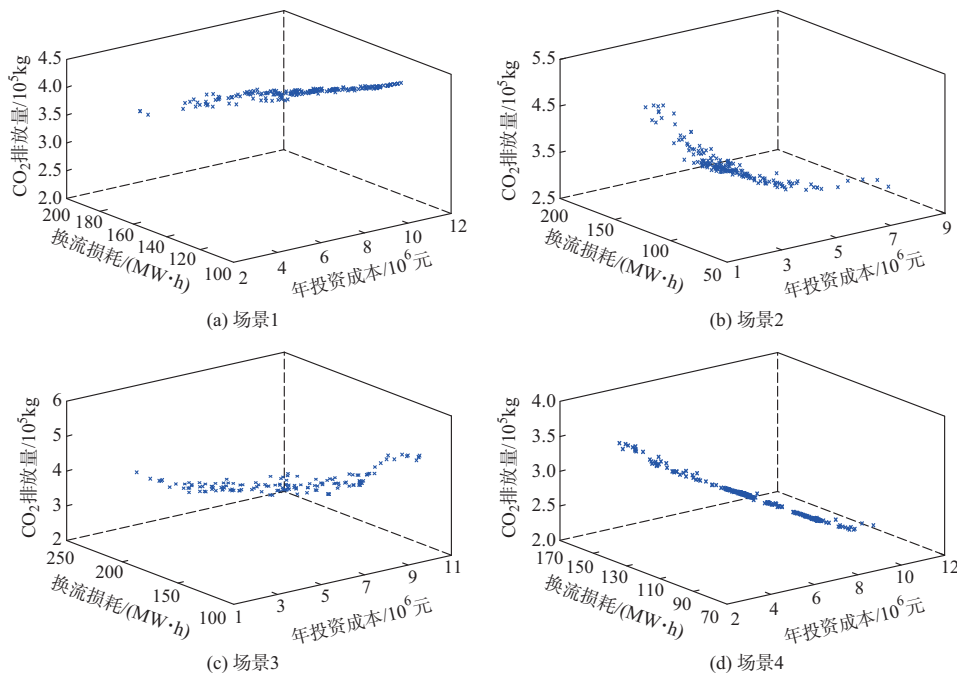


图3 微电网不同场景下规划方案Pareto前沿

Fig. 3 Pareto frontier of planning schemes for microgrid in different scenarios

由图3可知,3个目标函数在一定程度上呈现相互制约、相互矛盾的关系,但不同场景下规划方案的Pareto前沿变化趋势有一定差别,这说明不同场景下3个目标函数的制约关系不尽相同,这是因为不同场景下,微电网的供能方式差别较大。相同场景下,Pareto最优解集中的解全部为非劣解,彼此之间具有不可替代性,某个目标函数的提高或降低,必然伴随着其他目标函数的降低或增高。因此不同场景下,规划方案的Pareto最优解集具有明显的差异性。因此本文结合2种方法对比分析微电网不同规划场景Pareto最优解集的表现:①求取最优解集的折中解,通过折中解研究规划场景对目标函数的影响;②选取不同场景下的Pareto最优解集中某个目标函数值相同的解,对比其他2个目标函数的优劣。例如选取不同场景下Pareto解集中相同年换流损耗的解,对比CO₂排放量和年投资成本的大小。

方法1:表1为不同场景Pareto最优解集的折中解。从表中可以看出,场景1的折中解规划方案较差,年投资成本为4种场景中最高,这主要原因是场景1储能容量的配置最高,同时年运营成本也较高,

但是换流损耗较低。场景2相较于场景1,年CO₂排放量下降了约2.1×10⁴ kg,下降幅度约为6.18%,同时场景2的年CO₂排放量在4种场景中最低,这是因为EB的安装实现了E2H,减少了燃气发热的比例;年投资成本降低了约1.67×10⁶元,下降幅度约为32.62%,其原因主要在于储能配置的减少;年换流损耗下降约900 kW·h,下降幅度为0.54%。场景3相较于场景1,年投资成本降低了约1.56×10⁶元,下降幅度约为30.47%,这主要是由于未安装BESS;年CO₂排放量下降了4.2×10⁴ kg,下降幅度约为12.35%,这是因为EB安装的容量较大,当未安装BESS时,REG的主要消纳途径是E2H;年换流损耗上升了约3.57×10⁴ kW·h,上升幅度约为21.6%,这是因为直流侧未安装BESS,盈余的PV发电均输送到了交流侧。场景4相较于场景1,年投资成本降低了1.81×10⁶元,下降幅度为35.35%;年CO₂排放量降低了3×10⁴ kg,下降幅度为8.82%;年换流损耗下降了9.1×10³ kW·h,下降幅度为5.51%,场景4的3个目标函数在4种场景中均为最好。

表1 不同场景下的Pareto最优解集折中解
Table 1 Compromise solution of Pareto optimal solutions in different scenarios

场景	成本/元		CO ₂ 排放/kg	换流损耗/(MW·h)	额定容量						
	年投资成本	年运营成本			PV/kW	WT/kW	BESS/(kW·h)	MT/kW	GB/kW	EB/kW	TSS/(kW·h)
1	5.12×10 ⁶	3.02×10 ⁵	3.40×10 ⁵	165.3	401	513	4 026	0	402	0	0
2	3.45×10 ⁶	2.84×10 ⁵	3.19×10 ⁵	164.4	399	498	2 234	145	295	152	0
3	3.56×10 ⁶	2.73×10 ⁵	3.18×10 ⁵	201.0	434	544	0	134	196	207	0
4	3.31×10 ⁶	2.89×10 ⁵	3.10×10 ⁵	156.2	394	500	2 208	102	156	176	882

综上所述,电热耦合系统的安装能够提高微电网经济性和降低CO₂排放,这是因为盈余的REG可以通过EB消纳发热,从而使含电热耦合系统的微电网对储能的配置容量要求降低;而BESS的安装可以有效降低换流损耗和REG的安装容量,这是因为直流侧安装BESS会增强对PV发电的消纳能力,从而减少直流侧向交流侧的能量流动,同时BESS可以放电供应直流负荷,减少了交流侧向直流侧的功率流动,且BESS的充放电行为能够达到平抑负荷曲线的效果,从而降低了REG的配置要求;同样TSS的安装能够平抑热负荷曲线,可以有效减低燃气热源的配置容量。为具体对比分析不同场景的优劣,采用方法2分析不同场景的规划结果。

方法2:按年换流损耗相同或近似相同的原则,选取A,B,C,D共4组各场景的规划方案作为代表,如图4所示,不同场景各规划方案目标函数具体值如附录A表A3所示,比较其年投资成本和CO₂排放

量方面的具体表现。

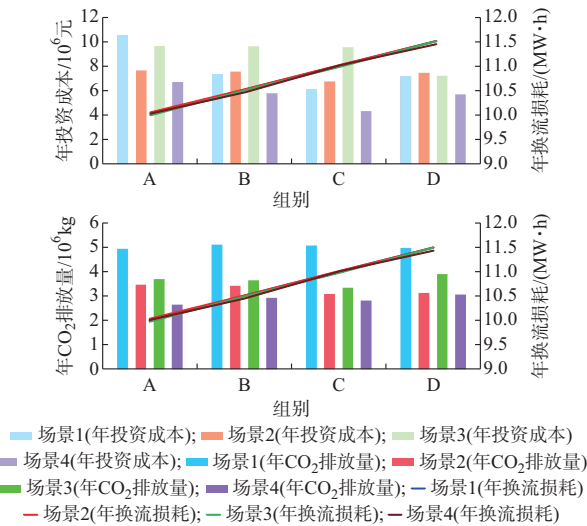


图4 不同场景下所选规划方案比较
Fig. 4 Comparison of planning strategies in different scenarios

从图4可以看出,对于不同场景的规划方案来说,从A组到D组,年投资成本和换流损耗变化趋势均不相同。相对于场景2和场景4,场景1和场景3的4组方案表现较差,场景1的4组方案CO₂排放量均明显高于其他场景。场景3的4组方案年投资成本明显高于其他场景。场景2和场景4的4组方案下CO₂排放量和年投资成本表现则相对稳定,这说明在相同的换流损耗情况下,场景2和场景4能够兼顾微电网的经济性和环保性。对于同一组别的方案,不同场景的变化趋势也不尽相同,这是因为不同场景各设备间耦合关系差异性较强,导致不同场景的供能方式具有显著差异。对于不同组别的年CO₂排放量来说,场景2,3,4均较低,对于不同组别的年投资成本来说,场景2和4均较低。由附录A表A3可知,相比场景1,2,3,场景4中4组方案年投资成本平均减少452 204,340 003,750 967元;CO₂排放量平均减少189 783.5,40 627,50 163.5 kg。综合各个场景的4个组别分析,相同的换流损耗下,场景4的规划方案在经济性和环保性方面均要优于其他场景,优势明显。

为验证交直流微电网在降低换流损耗方面的优势,将表1中不同规划场景的配置方案应用到传统的交流微电网中,优化运行并计算其全年换流损耗,如附录A图A4所示。可以看出,不同规划场景下,交直流的全年换流损耗均要优于传统的交流微电网,相比于交流微电网,不同场景下交直流混合微电网的换流损耗下降约在25%~30%之间,这主要是因为交直流混合微电网避免了直流电源接入交流母线所带来的换流效率低和直流负荷接入交流母线所带来的换流损耗等问题,从而降低了电能在变换时的损耗。

4.3.2 考虑电热耦合的交直流微电网优化运行分析

根据表1不同场景的优化配置结果,分析微电网的运行情况,说明考虑电热耦合的交直流微电网运行的可靠性。附录A表A2为4种场景配置方案下,微电网全年各设备出力值。附录A图A5为场景4冬季典型日电热负荷平衡曲线。

从附录A表A2中可以看出,场景1全年的购电量和售电量均为最高,这说明不考虑电力系统和热力系统耦合的模型对微电网依赖程度较高,需要购/售足够的电能满足负荷需求和消纳可再生能源;场景2和场景4在4个场景中全年的购/售电量均为最小,这说明考虑电热耦合的微电网系统在对配电网的能量支撑要求较低,且因为BESS和EB的存在,盈余的REG主要被就地消纳,从而向配电网的售电

量较低;场景3未考虑BESS的安装,相较于其他场景,缺少了BESS充电吸收电能和放电供应负荷的过程,所以场景3的全年购/售电量均较高。

从附录A图A5中可以看出,微电网的电/热生产和消费均达到实时平衡。冬季典型日下,由于风速条件较好,微电网交流侧负荷可全部由WT出力供应,盈余的电能部分由EB消纳产热,部分传输到直流母线满足直流负荷和ESS充电,充裕的电能避免了CHP的出力,其中9~11时段,为满足EB的用电负荷,部分电能需要从直流母线传输到交流母线侧;热负荷由GB,EB,TSS联合供应,其中在热负荷较低的1,2,5,11,12,13时段,多余的热量被TSS吸收;在热负荷较高的9,14和17~20时段,TSS放热用以满足热功率平衡。

由以上分析可知,考虑电热耦合的交直流微电网系统能够稳定运行,保证电/热负荷供应的可靠性。交直流混合微电网不同母线之间进行功率交互,两侧电能协调互补以满足功率平衡,在独立运行的同时又互为支撑,同时不同类型的热源及储热协调出力实现热功率平衡。

5 结语

本文针对交直流混合微电网的优化配置问题,以微电网投资成本、CO₂排放量和换流损耗为优化目标,综合考虑多种运行约束,提出了计及电热耦合系统的微电网双层优化配置模型,采用具体算例,对不同场景下微电网的多目标规划进行研究,分析了微电网的运行策略。结果表明:①考虑电热耦合系统的交直流微电网规划能够兼顾经济性、环保性和节能性,且对配电网的依赖程度较小,自治能力强;②考虑电热耦合的交直流混合微电网运行可靠,交直流母线间功率交互能够配合电热耦合系统之间的协调互补和能量转换。后续工作中,将进一步考虑风光资源不确定性对微电网规划的影响,合理地解决波动性和间歇性较强的可再生能源在与其他能源耦合的优化运行问题,同时深入考虑潜在增长的直流负荷(主要指电动汽车)对微电网的冲击以及电动汽车接入后的微电网优化配置研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 刘维康,王丹,余晓丹,等.考虑电气转换储能和可再生能源集成的微能源网多目标规划[J].电力系统自动化,2018,42(16): 11-20.

- LIU Weikang, WANG Dan, YU Xiaodan, et al. Multi-objective Planning of micro energy network considering P2G-based storage system and renewable energy integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 11-20.
- [2] 许志恒,张勇军,陈泽兴,等.考虑运行策略和投资主体利益的电转气容量双层优化配置[J].电力系统自动化,2018,42(13): 76-84.
- XU Zhiheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Bi-level optimal capacity configuration for power to gas facilities considering operation strategy and investment subject benefit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 76-84.
- [3] 赵波,汪湘晋,张雪松,等.考虑需求侧响应及不确定性的微电网双层优化配置方法[J].电工技术学报,2018,33(14): 3284-3295.
- ZHAO Bo, WANG Xiangjin, ZHANG Xuesong, et al. Two-layer method of microgrid optimal sizing considering demand-side response and uncertainties [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3284-3295.
- [4] XUE Y. Energy internet or comprehensive energy network? [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(3): 297-301.
- [5] 白凯峰,顾洁,彭虹桥,等.融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J].电力系统自动化,2018,42(15):133-141.
- BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 133-141.
- [6] BORHANAZAD H, MEKHILEF S, GANAPATHY V G, et al. Optimization of micro-grid system using MOPSO [J]. Renewable Energy, 2014, 71(11): 295-306.
- [7] BERNAL-AGUSTIN J L, DUFO-LÓPEZ R, RIVAS-ASCASO D M. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions [J]. Renewable Energy, 2012, 44(14): 215-224.
- [8] NGUYEN-HONG N, NGUYEN-DUC H, NAKANISHI Y. Optimal sizing of energy storage devices in isolated wind-diesel systems considering load growth uncertainty [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3): 1983-1991.
- [9] AKRAM U, KHALID M, SHAFIQ S. Optimal sizing of a wind/solar/battery hybrid grid-connected microgrid system [J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(1): 72-80.
- [10] 陈健,赵波,王成山,等.不同自平衡能力并网型微电网优化配置分析[J].电力系统自动化,2014,38(21):1-6.
- CHEN Jian, ZHAO Bo, WANG Chengshan, et al. Optimal sizing analysis on grid-connected microgrid with different self-balancing capabilities [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 1-6.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李鹏,郑苗苗,陈安伟,等.基于文化基因算法的交直流混合微网优化运行[J].中国电机工程学报,2018,38(11):3226-3234.
- LI Peng, ZHENG Miaomiao, CHEN Anwei, et al. Optimal operation of hybrid AC/DC microgrid based on memetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3226-3234.
- [14] KUROHANE K, SENJYU T, YONA A, et al. A hybrid smart AC/DC power System [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 199-204.
- [15] LOH P C, LI Ding, CHAI Yikang, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.
- [16] LI P, HAN P, HE S, et al. Double-uncertainty optimal operation of hybrid AC/DC microgrids with high proportion of intermittent energy sources [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(6): 838-849.
- [17] 门向阳,曹军,王泽森,等.能源互联微网型多能互补系统的构建与储能模式分析[J].中国电机工程学报,2018,38(19): 5727-5737.
- MEN Xiangyang, CAO Jun, WANG Zesen, et al. The constructing of multi-energy complementary system of energy internet microgrid and energy storage model analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5727-5737.
- [18] 李正茂,张峰,梁军,等.含电热联合系统的微电网运行优化[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3569-3576.
- LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [19] 徐青山,李淋,蔡霖霖,等.考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J].电力系统自动化,2018,42(21):36-44.
- XU Qingshan, LI Lin, CAI Jilin, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP multi-microgrid system considering power interaction among microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 36-44.
- [20] LIU N, WANG J, WANG L. Distributed energy management for interconnected operation of combined heat and power-based microgrids with demand response [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 478-488.
- [21] ZIDAN A, GABBAR H A, ELDESSOUKY A. Optimal planning of combined heat and power systems within microgrids [J]. Energy, 2015, 93: 235-244.
- [22] LUND H, ANDERSEN A N, ØSTERGAARD P A, et al. From electricity smart grids to smart energy systems—a market operation based approach and understanding [J]. Energy, 2012, 42(1): 96-102.
- [23] ANDERSEN A N, LUND H. New CHP partnerships offering balancing of fluctuating renewable electricity productions [J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(3): 288-293.
- [24] HUANG X, XU Z, SUN Y, et al. Heat and power load dispatching considering energy storage of district heating system and electric boilers [J]. Journal of Modern Power Systems and

- Clean Energy, 2018, 6(5): 992-1003.
- [25] 李平,王海霞,王漪,等.利用建筑物与热网热动态特性提高热电联产机组调峰能力[J].电力系统自动化,2017,41(15): 26-33.
LI Ping, WANG Haixia, WANG Yi, et al. Improvement of peak load regulation capacity of combined heat and power units considering dynamic thermal performance of buildings and district heating pipelines network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 26-33.
- [26] 赵峰,张承慧,孙波,等.冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J].中国电机工程学报,2015,35(15):3785-3793.
ZHANG Feng, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Three-stage collaborative global optimization design method of combined cooling heating and power [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3793.
- [27] CHEN B, WEI L, ZHU Y, et al. Pareto optimal allocation of fault current limiter based on immune algorithm considering cost and mitigation effect [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 35(5): 820-829.
- [28] WEBER C, SHAH N. Optimization based design of a district energy system for an eco-town in the United Kingdom [J]. Energy, 2011, 36(2): 1292-1308.
-
- 杨冬锋(1976—),男,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统运行分析、风力发电等。E-mail:ydfnedu@126.com
- 姜超(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向:微电网优化配置与运行。E-mail:2305577980@qq.com
- 蔡国伟(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:含新能源并网的电力系统稳定与控制。E-mail:caigw@mail.nedu.edu.cn

(编辑 孔丽蓓)

Multi-objective Optimal Configuration of AC/DC Microgrid Considering Electricity/Heat Coupling

YANG Dongfeng¹, JIANG Chao¹, CAI Guowei¹, HUANG Nantian¹, LIU Xiaojun¹, HUANG Zheng²

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: With the development trend of the increasingly close electricity-heat connection and the maturity of AC/DC microgrid, a bi-level optimal configuration model considering electricity/heat coupling for AC/DC hybrid microgrid is proposed. This model takes the annual investment cost, annual CO₂ emission and transmission loss as the optimization objectives with consideration of the electric/heat power balance, self-government and other operation constraints as well. The upper layer is the capacity planning model of each device in the microgrid, and the lower layer determines the operation strategy of each device in the microgrid. Through the joint optimization of the upper and lower levels, the capacity configuration of each device in the microgrid is studied. By comparing different planning scenarios, the influence of electricity/heat coupling system on optimization objectives is analyzed. Through annual equipment power output and power balance curve of typical days, the energy supply reliability of AC/DC microgrid with electricity/heat coupling system is illustrated. Finally, the rationality and effectiveness of the model are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307020) and Project of Science and Technology Development Plan of Jilin Province (No. 20160204004GX).

Key words: electricity/heat coupling; AC/DC microgrid; bi-level optimization; capacity configuration



附录 A

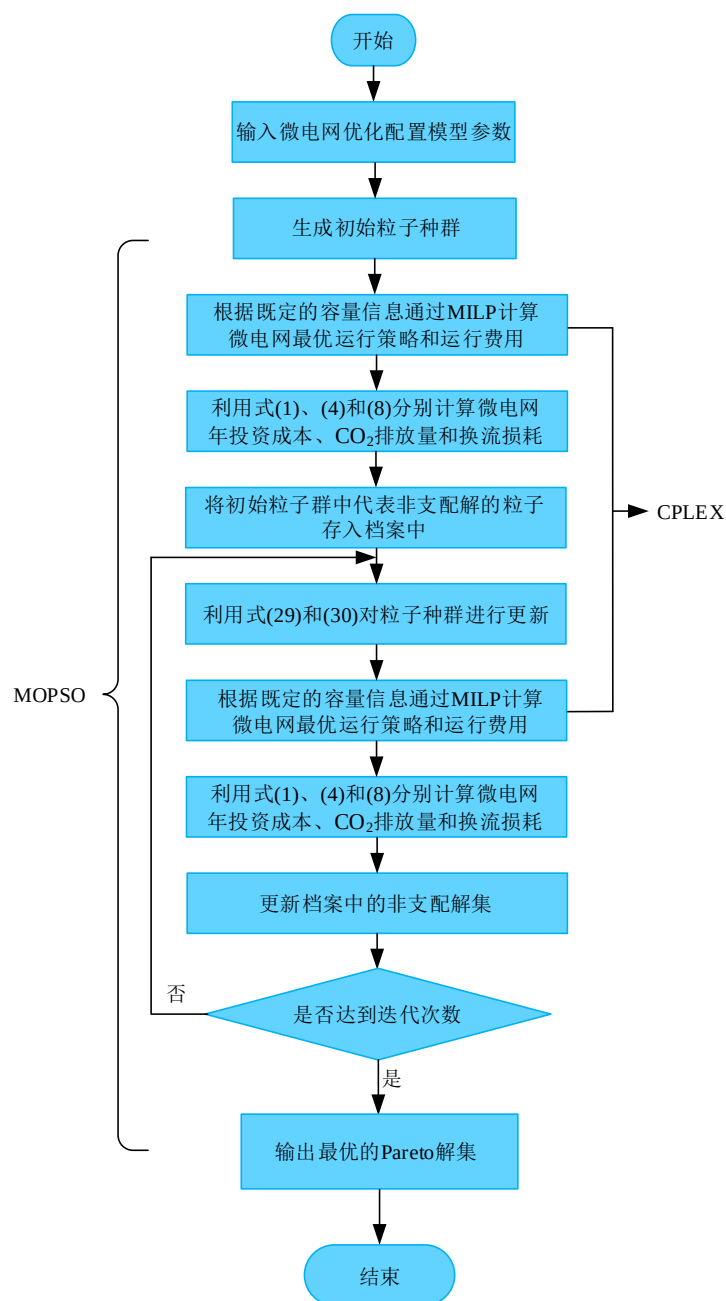


图 A1 微电网双层优化配置算法流程图

Fig.A1 Flow chart of two-stage optimization algorithm for microgrid system

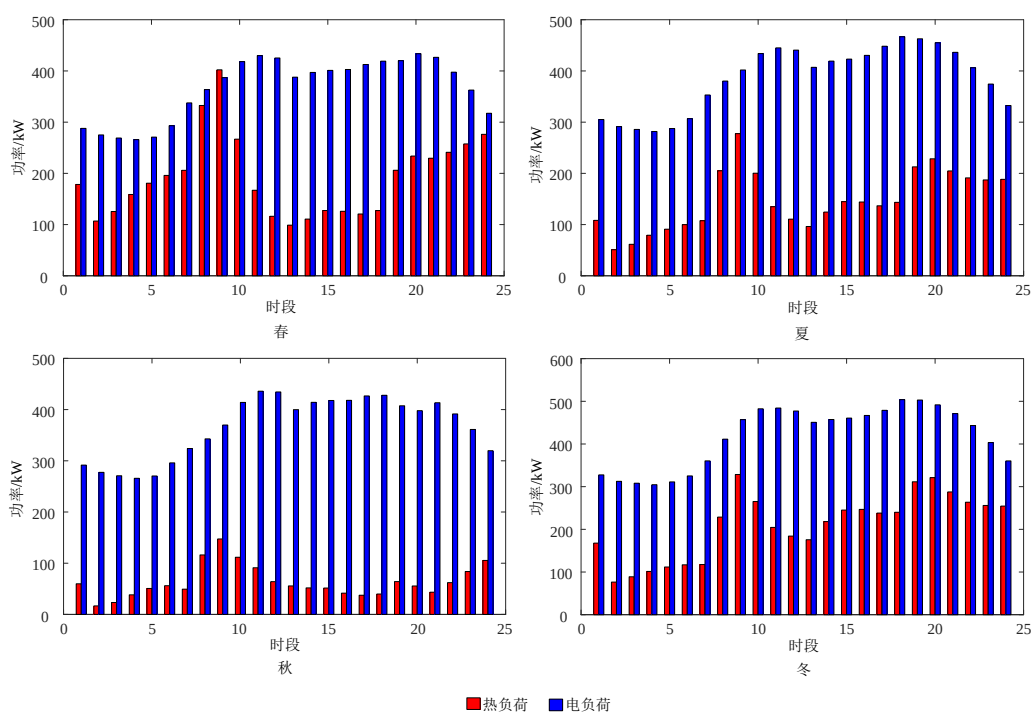


图 A2 微电网四季典型日电/热负荷数据
Fig.A2 Typical daily electricity/heat load data of microgrid for four seasons

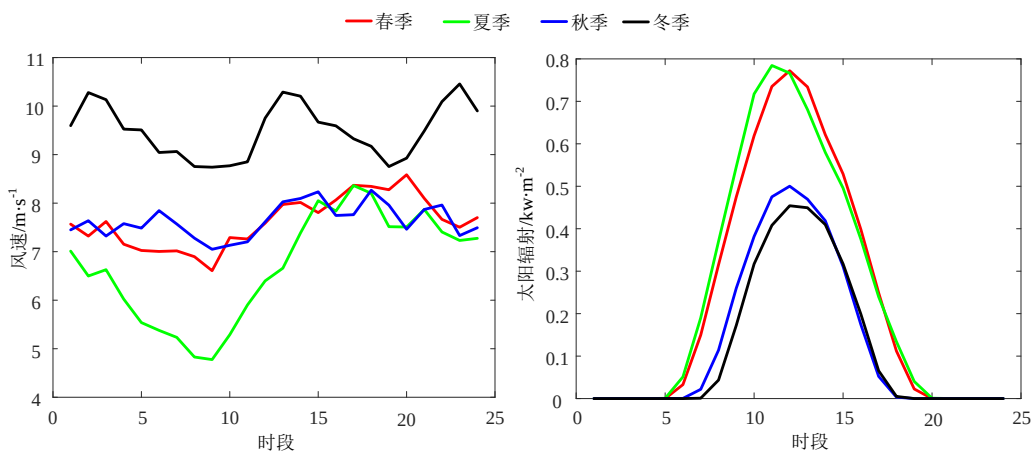


图 A3 微电网四季典型日风速/太阳辐照数据
Fig.A3 Typical daily wind speed/solar radiation data of microgrid for four seasons

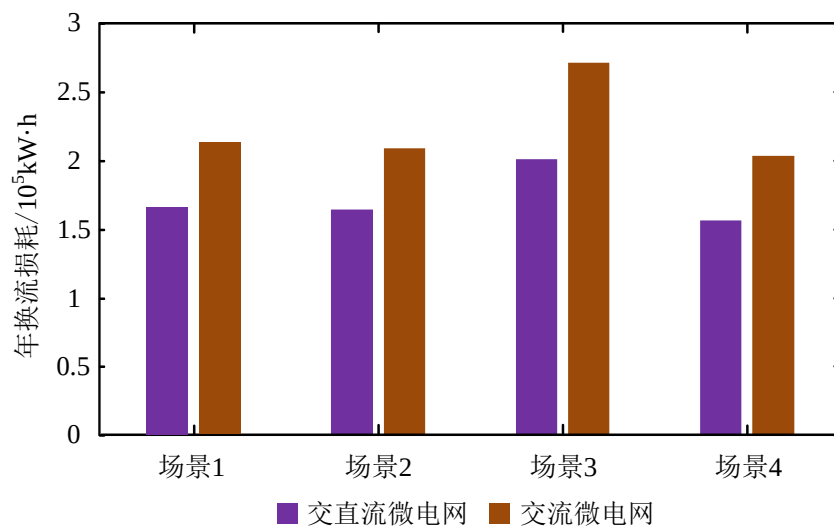


图 A4 不同微电网 4 种规划场景全年换流损耗对比
Fig.A4 Annual energy exchanged loss comparison in four planning scenarios of different microgrids

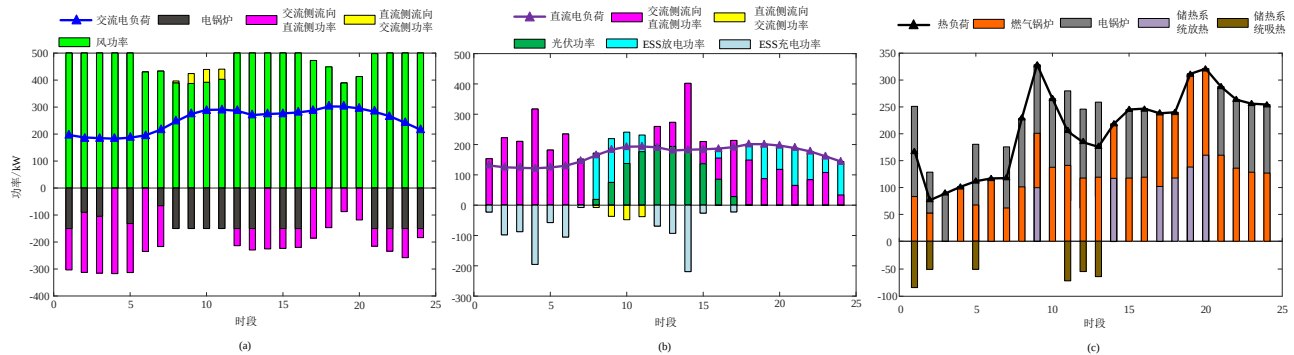


图 A5 场景 4 下微电网冬季典型日电/热功率平衡曲线: (a) 交流母线侧 (b) 直流母线侧 (c) 热母线侧
Fig.A5 Microgrid electricity/heat balance of winter typical day under scenario 4: (a) AC bus (b) DC bus (c) heat bus

表 A1 设备参数
Table A1 Parameters of equipment

设备	安装费用	运行维护成本	寿命/a
风机	10000 元/kW	20 元/kW	20
光伏	10000 元/kW	100 元/kW	20
储能电池	1000 元/(kW·h)	5 元/(kW·h)	5
微燃机	3350 元/kW	10 元/kW	15
燃气锅炉	360 元/kW	5 元/kW	15
电锅炉	200 元/kW	16 元/kW	10
储热	210 元/(kW·h)	0.14 元/(kW·h)	10

表 A2 不同折中解下各设备年出力值

Table A2 Annual output power of equipment under different compromise solutions

场景	各电源出力/(kW·h)				各热源出力/(kW·h)				与配电网交互电量/(kW·h)	
	PV	WT	ESS	MT	GB	EB	MT	TSS	购电量	售电量
1	6.68×10^5	2.58×10^6	5.28×10^5	0	1.32×10^6	0	0	0	4.81×10^4	2.02×10^5
2	6.65×10^5	2.49×10^6	4.14×10^5	2.11×10^5	3.05×10^5	7.5×10^5	2.73×10^5		0	9000
3	7.40×10^5	2.73×10^6	0	1.59×10^5	2.33×10^6	8.87×10^5	2×10^5		1.45×10^5	1.52×10^5
4	6.61×10^5	2.51×10^6	4.26×10^5	2.30×10^5	1.80×10^4	7.44×10^5	2.99×10^5	1.01×10^5	0	9000

表 A3 不同场景下所选方案规划结果

Table A3 Selected planning solutions under different scenarios

场景	组别	年投资成本/元	年 CO2 排放量/kg	换流损耗/(kW·h)
1	A	10559851	494361	100060
	B	7359445	512332	105034
	C	6117304	508212	110004
	D	7144805	498085	115200
2	A	7657560	376289	100165
	B	7561231	371476	105000
	C	6764356	334113	110021
	D	7469927	339123	115045
3	A	9665000	369900	100161
	B	9643000	365000	105372
	C	9576900	334200	110145
	D	7231263	390558	114905
4	A	7276484	288703	100168
	B	6275821	319980	104471
	C	4689901	307500	110231
	D	6178616	334021	115678