

DOI: 10.7667/PSPC161935

基于改进混沌粒子群算法的多源独立微网多目标优化方法

苏适¹, 周立栋², 陆海¹, 陈奇芳², 严玉廷¹, N. A. Engerer³, 王飞^{2,4}

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003; 3. 澳大利亚国立大学环境与社会学院, 澳大利亚堪培拉 2601; 4. 美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校, 美国伊利诺伊州厄巴纳 61802)

摘要: 针对目前独立微网优化运行中微源类型与场景设计较为简单、未充分考虑可控负荷作用等问题, 以可控负荷作为网内功率平衡的辅助手段, 研究多源独立微网的调度优化问题。建立了使发电成本、切负荷补偿成本及微网环境效益最优的多目标优化模型。根据工作日、周末和晴、阴雨天组合设计了四种典型场景, 在满足功率平衡等约束的前提下实现独立微网的经济调度。针对优化变量多、场景复杂的微网优化模型, 提出了改进的混沌粒子群算法(Chaos Particle Swarm Optimization, CPSO)用于优化问题求解, 验证了模型和算法对不同场景微网优化问题的有效性。

关键词: 独立微网; 多目标优化; 混沌粒子群; 经济调度; 多场景

Multi-objective optimization method of multi-source independent microgrid based on modified CPSO

SU Shi¹, ZHOU Lidong², LU Hai¹, CHEN Qifang², YAN Yuting¹, N. A. Engerer³, WANG Fei^{2,4}

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 3. Fenner School of Environment and Society, The Australian National University, Canberra 2601, Australia; 4. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61802, USA)

Abstract: Studies for stand-alone microgrid optimization exist the problems of simple micro-source type, few design scenarios and neglect to controllable load. This paper presents a multi-objective optimization model including power generation cost, load cut compensatory and environmental benefit under the condition where controllable load is treated as power balancing means. Four typical scenarios are designed according to the working day, weekend and sunny, cloudy and rainy days. With the difficulty of multi-variables and complex scenarios, a modified CPSO algorithm is proposed to realize economic dispatch of stand-alone microgrid under the constraints such as power balance. The results in numerical example verify the validity of the presented model and algorithm to multi-scenario microgrid optimization problem.

This work is supported by the Major Key Science and Technology Project in Renewable Energy Area of Yunnan Province (No. 2013ZB005), the Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Co., Ltd (No. YNKJQQ00000280), and the State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (No. LAPS16007 and No. LAPS16015).

Key words: stand-alone microgrid; multi-objective optimization; chaos particle swarm optimization; economic dispatch; multi-scenario

0 引言

在全球能源紧张和环境污染的双重压力下, 分

基金项目: 云南省新能源重大科技专项(2013ZB005); 云南电网有限责任公司科技项目(YNKJQQ00000280); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS16007, LAPS16015)

布式发电由于其能源利用效率高、环保性能好、分布广泛和接入灵活的特点受到越来越多的重视^[1-2], 然而其波动性和不可控性也对所接入的配电网造成了一定的冲击, 随着分布式电源渗透率的提高, 对电网运行的不利影响也日益突出^[3]。微网系统是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统^[4], 能够对各类分布式发电单元进行有效的管理, 既可

以与外部电网并网运行,也可以孤立运行^[5]。

微网的经济运行与优化调度一直是国内外研究的热点,但主要以并网型微网为主。文献[6]提出考虑微源同时提供有功和无功出力并计及制热收益的热电联产型微网多目标经济调度模型。文献[7]将微网视为一个离散时间系统,结合动态规划提出了一种用以求解有限时间段内最优调度策略的动态经济调度方法。文献[8]提出了一种改进自适应萤火虫算法,考虑风光不确定因素,建立微网运行的数学模型。

现阶段,独立微网受到了越来越多的关注。在许多偏远地区和独立海岛上,由于地理条件的限制,建设与大电网相连的常规配电系统比较困难。而这些地区通常具有风、光等可再生能源,将不同类型的分布式发电单元组合起来构成的独立微网系统能够实现多种能源的互补,增强了居民用电的可靠性,是解决海岛和偏远地区供电问题的有效途径。而独立微网与大电网之间不存在联络线,其优化调度模型与并网型微网不同,上述文献中的模型无法应用到独立微网的优化调度中。因此,独立微网的经济运行与优化调度问题逐渐成为研究热点^[9-12]。

文献[9]在孤岛运行模式下,建立了含风电、微汽轮机、燃料电池、柴油机和蓄电池的优化模型,优化网内不同分布式电源和储能系统的功率输出,使系统的总运行成本最小。该模型考虑了多种类型的微源,但缺乏常用的光伏发电系统,且模型采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)进行求解,编码和解码过程较复杂,收敛速度慢。文献[10]围绕独立微网系统的容量配置问题,提出了包含微网全寿命周期内的总成本现值、负荷容量缺失率和污染物排放的多目标优化模型,着重考虑了优化规划,而没有对优化调度进行研究。文献[11]提出了双层模型预测控制策略,对含有光柴储的独立微网进行经济优化,但没有考虑负荷控制,具有一定的局限性。文献[12]建立了微网冷热电联产型的经济环保调度模型,采用协同进化遗传算法进行离并网两种模式下冬季的调度优化,算例场景设计不足,没有考虑算法对其他场景的适用性。

针对上述文献中存在的微源类型单一、场景设计简单和未发挥负荷作用的问题,对包含风力、光伏、蓄电池储能、微燃机、柴油机和燃料电池的多源独立微网,在可再生能源发电及负荷预测的基础上,建立以发电成本和污染物处理成本最小为目标的微网经济调度模型,并考虑微网内部对部分负荷进行控制以提高系统供电可靠性。根据实际的运行情况,设计了晴天-工作日、晴天-周末、阴雨天-工

作日和阴雨天-周末四种不同的场景,对独立微网多目标优化调度问题进行多角度研究。

1 微网优化运行模型

1.1 蓄电池模型

蓄电池(Energy Storage, ES)在 t 时刻的剩余电量与蓄电池在 $t-1$ 时刻的剩余电量、 $t-1$ 时刻到 t 时刻蓄电池的充放电量以及每小时的电量衰减量有关。

$$S_{\text{SOC}}(t) = \begin{cases} S_{\text{SOC}}(t-1) - \frac{P_{\text{SB}}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{\text{SBD}} \cdot Q_{\text{SB}}} - D_{\text{SB}} \\ S_{\text{SOC}}(t-1) + \frac{P_{\text{SB}}(t) \cdot \eta_{\text{SBC}} \cdot \Delta t}{Q_{\text{SB}}} - D_{\text{SB}} \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{\text{SB}}(t) = b_{\text{S}}' \cdot \beta \cdot P_{\text{SB}}(t) + C_{\text{cycle}}(t) \quad (2)$$

式中: $S_{\text{SOC}}(t)$ 、 $S_{\text{SOC}}(t-1)$ 分别为当前调度周期和上一调度周期的电池荷电量,式(1)上下式分别为放、充电过程; $P_{\text{SB}}(t)$ 为两调度周期交替过程中发生的充放电功率; η_{SBC} 、 η_{SBD} 分别为电池充、放电效率; Q_{SB} 、 D_{SB} 分别为电池的容量和自放电率; $C_{\text{SB}}(t)$ 、 b_{S}' 分别为蓄电池在第 t 个调度周期内的运行成本和状态,蓄电池运行时, $b_{\text{S}}'=1$, 否则, $b_{\text{S}}'=0$; β 、 $C_{\text{cycle}}(t)$ 分别为蓄电池的维护系数和寿命损耗成本。

1.2 微燃机模型

微燃机(Micro Turbine, MT)发电效率较低,满负荷运行时效率为 30%,半负荷运行时效率为 10%~15%。本文所用微燃机的燃料成本模型^[13]为

$$C_{\text{MT}} = C_{\text{ng}} \cdot \frac{P_{\text{MT}} \cdot \Delta t}{\eta_{\text{MT}} \cdot Q_{\text{ng}}} \quad (3)$$

式中: C_{MT} 为运行时间内微燃机的燃料成本; C_{ng} 为天然气的市场价格,单位:元/ m^3 ; P_{MT} 为 t 时刻微燃机输出的电功率; Δt 为微燃机的运行时间; η_{MT} 为微燃机的发电效率,本文取 55%; Q_{ng} 为天然气的低热热值,取 9.7kWh/ m^3 。

柴油机(Diesel Engine, DE)模型见文献[14]; 光伏、风机模型见文献[15]; 燃料电池(Fuel Cell, FC)模型与微燃机相似,见文献[16]。

1.3 目标函数

微网的运行优化问题是一个多目标、多约束的非线性优化问题。本文基于 24 h 日前优化调度框架,在保证用户需求的情况下,实现微网运行成本最低。微网的成本主要由系统内微源的燃料成本、运行维护成本、系统切负荷补偿成本和污染物排放处理成本等组成。

微网的燃料成本和运行维护成本可统一用式(4)表示。

$$F_1(t) = \sum_{i=1}^N (C_i(P_i) + K_i \cdot P_i \cdot \Delta t) \quad (4)$$

式中: $C_i(P_i)$ 为微源 i 的发电成本, 由各微源的出力模型确定; K_i 为不同微源的运行维护系数, 不同微源的维护系数不同, 元/kWh; P_i 为微源 i 的输出功率; Δt 为调度时间间隔。燃料成本和维护成本均为输出功率 P_i 的函数。

微燃机、柴油机和燃料电池在发电过程中会产生 NO_x 、 CO_2 、 SO_2 等环境污染物, 不同微源对各类污染物有不同的排放系数, 不同污染物产生的环境影响不同, 具体表现为处理单位污染物的成本不同。根据这一关系, 本文将污染物的排放也折算为成本, 如式(5)。

$$F_2(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_j \cdot E_{ij} \cdot P_i(t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中: $F_2(t)$ 为微网污染物处理成本; α_j 为相应污染物(NO_x 、 CO_2 、 SO_2)的折算系数, 元/kg; E_{ij} 为微源 i 输出单位功率时排放第 j 类污染物的量, kg/kWh。

由于没有大电网的支撑, 为了提高微网的运行可靠性和安全性, 本文考虑控制微网内部分负荷以降低微网运行成本并对功率平衡进行辅助调节。切负荷的补偿成本对应微网运行的可靠性成本, 要严格计算可靠性成本在理论上是相当困难的, 一般采用期望未满足电量(Expected Energy Not Supplied, EENS)和单位停电成本(Unit Interruption Cost, UIC)之积来衡量^[17]。本文中, EENS 为计及微网整体运行经济性和可靠性的切负荷量, 相应的补偿成本计算如式(6)。

$$F_3(t) = p_D(t) \cdot P_{\text{cut}}(t) \quad (6)$$

式中: $p_D(t)$ 为微网单位停电成本, 元/kWh; $P_{\text{cut}}(t)$ 为切负荷功率。

综上所述, 建立多目标优化函数为

$$\min F(t) \Rightarrow \min \{F_1(t), F_2(t), F_3(t)\} \quad (7)$$

本文全部折算为成本, 故有

$$\min f(t) = \min [F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)] \quad (8)$$

运行的目标即使每个时段的 $f(t)$ 最小。

1.4 约束条件

微网的经济运行要在满足安全性、可靠性和供电质量等约束下, 对供能的各微源进行优化调度。

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^K P_i = P_L - P_{\text{cut}} \quad (9)$$

式中: P_i 为电源 i 的有功出力; P_L 、 P_{cut} 分别为负荷需求和切负荷功率。

2) 各微源出力约束

$$P_{i\min} \leq P_i(t) \leq P_{i\max} \quad (10)$$

式中, $P_{i\min}$ 、 $P_{i\max}$ 分别表示第 i 个微源的最小和最大出力。

3) 爬坡率约束

增负荷

$$P_i(t) - P_{i-1}(t) \leq P_{\text{up}} \quad (11)$$

减负荷

$$P_{i-1}(t) - P_i(t) \leq P_{\text{down}} \quad (12)$$

式中, P_{up} 、 P_{down} 分别是第 i 个微源增负荷和减负荷时的出力限值。

4) 蓄电池运行约束

$$S_{\text{SOC},\min} < S_{\text{SOC}} < S_{\text{SOC},\max} \quad (13)$$

$$-K_C Q_B \eta_{\text{SBC}} \leq P_{\text{SB}}(t) \leq K_D Q_B \eta_{\text{SBD}} \quad (14)$$

式中: $S_{\text{SOC},\min}$ 、 $S_{\text{SOC},\max}$ 分别为蓄电池的最小和最大荷电状态; K_C 、 K_D 分别为蓄电池每小时的最大充、放电比例。

2 混沌粒子群算法

对于多目标优化问题, 最好的情况是能够找到问题的绝对最优解, 但是现实中的多目标规划问题其各子目标往往是相互矛盾的, 不存在绝对最优解。考虑到污染物排放和切负荷补偿均表示为成本现值, 因此本文采用间接求解多目标优化问题的方法, 将其转为单目标优化问题, 采用混沌粒子群算法进行求解。

2.1 基本粒子群算法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是基于群体搜索的元启发式智能算法, 在迭代过程中个体根据自身速度并结合个体最优解 p_{best} 和群体最优解 g_{best} 更新自身速度矢量, 不断向最优解逼近以收敛到全局最优解。 $t+1$ 时刻粒子 i 在第 j 维的速度和位置更新如式(15)、式(16)。

$$v_{i,j}(t+1) = w \cdot v_{i,j}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{i,j} - x_{i,j}(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{g,j} - x_{i,j}(t)) \quad (15)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), j=1, 2, \dots, d \quad (16)$$

式中: w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 0~1 的随机数; d 为优化问题的维数; $p_{i,j}$ 、 $p_{g,j}$ 分别为当前迭代次的个体最优解和全局最优解。

PSO 能以较快的速度逼近最优解, 其个体充分

利用自身经验和群体经验调整自身状态是 PSO 具有优异特性的关键。本文在风光柴储、微燃机和燃料电池的基础上考虑负荷控制,模型中不仅有各微源的出力变量,还增加了负荷控制变量,约束中需要考虑负荷控制的上限,且四种不同场景下的风光和负荷数据差异较大,增加了模型的复杂度。采用 PSO 求解该优化问题容易出现早熟、局部寻优能力差和迭代后期收敛速度慢的问题。而微网优化调度不仅需要算法具有较快的运行速度以满足调度时效,还要求算法能够尽可能收敛到全局最优解以满足调度精度。因此必须在 PSO 基础上进行改进才能很好地求解该决策变量多、场景复杂的微网优化模型:混沌的随机性和遍历性能够在局部实现深度搜索,在微网优化问题中能够对较好的出力组合进一步挖掘,搜索该组合附近的解空间,表现出较强的局部寻优能力,防止算法过早收敛;精英保留能够最大限度地发挥优良个体的优势,在微网优化问题中能够避免每次迭代中较优出力组合的丢失,尽快淘汰劣解,避免算法在劣解附近过度迭代。因此引入精英保留的混沌粒子群算法能够很好地解决本文多变量模型在求解中容易过早收敛以及出力组合精度差的问题。

2.2 混沌搜索

利用混沌系统特有的遍历性来实现全局最优,其基本思想是把混沌变量线性映射到优化变量的取值空间中,对于给定的优化目标,通过将搜索过程对应为混沌轨道的遍历过程,使搜索过程避免陷入局部最优。本文所采用的混沌计算步骤如下。

1) 令 $k=0$, 对于解的每一维,将决策变量 $x_j^k (j=1, 2, \dots, d)$ 映射为 $0\sim 1$ 的混沌变量 s_j^k , $x_{\max,j}$ 和 $x_{\min,j}$ 分别为第 j 维变量的搜索上下界。

$$s_j^k = \frac{x_j^k - x_{\min,j}}{x_{\max,j} - x_{\min,j}}, j=1, 2, \dots, d \quad (17)$$

2) 计算下步迭代的混沌变量。

$$s_j^{k+1} = 4 \cdot s_j^k (1 - s_j^k), j=1, 2, \dots, d \quad (18)$$

3) 将混沌变量 s_j^{k+1} 转换为决策变量 x_j^{k+1} 。

$$x_j^{k+1} = x_{\min,j} + s_j^{k+1} (x_{\max,j} - x_{\min,j}), j=1, 2, \dots, d \quad (19)$$

4) 根据决策变量 x_j^{k+1} 对新解进行评价,若新解优于初始解或者混沌搜索已达最大迭代步数,将新解作为混沌搜索的结果,否则,置 $k=k+1$, 转入 2)。

2.3 精英保留策略

精英保留策略是指在优化迭代的过程中,将每代产生的最优个体或部分优良个体进行保存,直接替换下次迭代后相应的最差个体,从而实现迭代过程中最优解的保留,在保证粒子多样性的同时加快算法收敛速度。

本文采用结合混沌优化的精英保留策略:对每次迭代中前 20% 的优良个体进行混沌搜索,进一步挖掘优良个体的适应性,增强局部搜索能力,加快算法收敛;保存每次迭代过程中前 10% 的优良个体,替换生成下一代粒子群中后 10% 的群体,保证相对优良个体在种群中的比例,在不破坏种群多样性的前提下,改善算法性能,在设定迭代次数内得到微网优化问题的最优解。

2.4 算法步骤

本文采用的 CPSO 步骤如下:

- 1) 初始化种群中各微粒的位置和速度;
- 2) 评价每个微粒的适应度,将当前各微粒的位置和适应度值存储在各微粒的 p_{best} 中,将当前种群中最优个体的位置和适应度值存储在 g_{best} 中;
- 3) 更新每个微粒的位置和速度;
- 4) 计算每个微粒的目标函数值,保留群体中适应函数值最好的前 20% 的优良个体;
- 5) 对挑选出的 20% 的微粒进行混沌局部搜索,更新其 p_{best} 和群体 g_{best} ;
- 6) 若满足搜索精度或达到预设迭代次数,则搜索停止,输出结果,否则转入第 7) 步;
- 7) 重新生成其余 80% 的微粒,计算其适应度值,并用第 4) 步中保存的前 10% 的优良个体替换适应度值最差的 10% 的个体,转入第 2) 步。

3 算例分析

3.1 微网系统参数

本文所采用的多源海岛型独立微网如图 1 所示。算例所用参数:蓄电池^[18]自放电率为 0.14%,充电效率为 72%,放电效率为 100%,最小荷电量为 20%。蓄电池容量为 50 kWh,调度初始时段荷电量为 50%,天然气价格取北京商用天然气价格为 3.65 元/m³。柴油机发电效率取 37%,燃料电池效率取 46%。光伏和风力发电的额定功率分别为 250 kW 和 300 kW。其他微源参数见表 1,污染物排放系数见表 2(按美元与人民币汇率 1: 6.8 折算)。

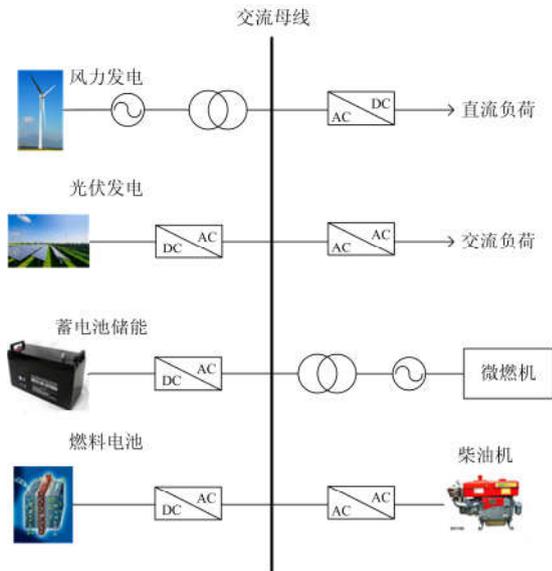


图 1 微网架构图

Fig. 1 Structure chart of microgrid

表 1 各微源参数

Table 1 Parameters of different DGs

类型	额定功率/kW	出力上/下限/kW	爬坡率/(kW/min)	维护系数/(元/kWh)
DE	120	145/10	20	0.085 54
FC	100	125/10	10	0.028 49
MT	100	125/10	10	0.039 92
ES	25	—	—	0.084 39

表 2 污染物排放系数及处理成本^[19-21]

污染物类型	处理成本/(元/lb)	DE/(lb/kWh)	FC/(lb/kWh)	MT/(lb/kWh)
NOx	28.560	2.18×10^{-2}	3×10^{-5}	4.4×10^{-4}
SO ₂	6.732	4.54×10^{-4}	6×10^{-6}	8×10^{-6}
CO ₂	0.095	1.432×10^{-3}	1.078×10^{-3}	1.596×10^{-3}

3.2 优化分析

海岛型微网具有不同的运行场景，不同场景下负荷和风光等可再生能源的出力均有所不同。为了对不同场景下的优化调度问题进行对比分析和求解，本文根据工作日、周末和晴、阴雨天的不同属性设计了海岛微网的四种场景：晴天-工作日，晴天-周末，阴雨天-工作日和阴雨天-周末。工作日和周末属性由于居民的不同生活状态主要影响海岛的负荷需求，而天气属性主要影响风机和光伏的出力。根据不同场景对微网负荷和可再生能源出力进行预测，如图 2 所示。

晴天和阴雨天的可再生能源出力具有较大差异：晴天可再生能源整体出力较大，高峰时段集中在 11:00—15:00。而阴雨天由于缺乏光照，全天可再生能源发电主要为风机输出。负荷的变化情况与人们的作息联系密切，周末与工作日的较大区别在于周末比工作日的负荷有明显增加，同时负荷峰谷差较大，呈现多峰现象。

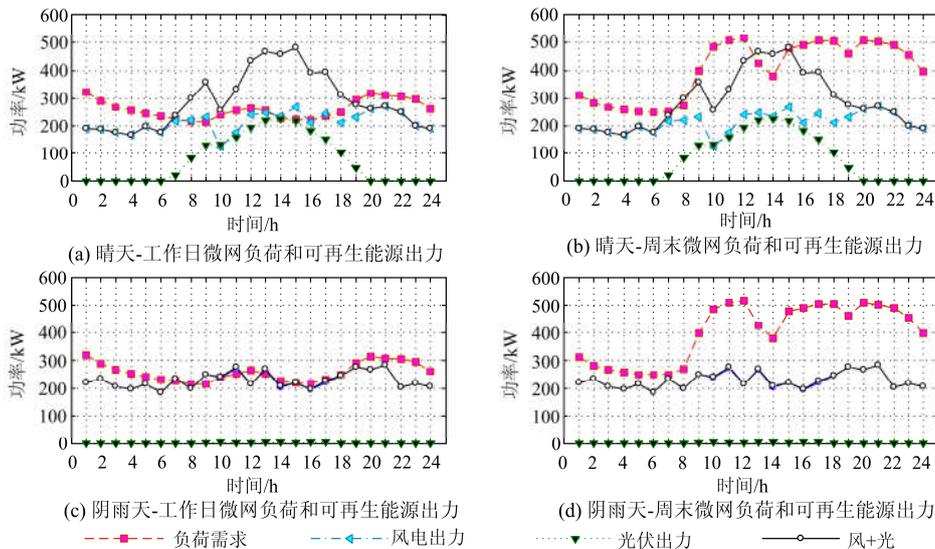


图 2 四种场景下微网负荷和可再生能源出力预测

Fig. 2 Load demand and output prediction of renewable energy in four scenarios for microgrid

根据以上数据，设置 CPSO 的混沌搜索次数为 10，迭代次数为 200，粒子数目为 30，惯性权重为

0.5，学习因子均为 2。光伏出力采用 MPPT 技术，当风光出力大于负荷需求，且蓄电池荷电量达到上

限即微网系统无法消纳全部清洁能源时, 对风机进行调整, 追踪负荷需求, 其余时刻风机也采用 MPPT 技术。根据以上设置对四种不同场景下各时段进行优化调度, 优化后各微源的出力如图 3 所示, 各时段蓄电池的荷电状态如图 4 所示。

本文在独立微网中考虑了负荷控制, 从图 3 可以看出, 晴天-工作日和阴雨天-工作日场景下, 负荷控制集中作用于 1:00—7:00 和 19:00—24:00 两个时段。与图 2 对比可以发现, 切负荷基本发生于风光出力较小的时段, 这是因为对于独立微网而言,

风光清洁能源不足时只能够开启 DE、FC、MT 等微源满足负荷需求, 当切负荷的补偿成本低于微源的发电成本时, 系统在经济性目标的指导下切除一部分不重要的负荷, 维持系统运行的经济性。相比之下, 晴天-周末和阴雨天-周末场景下的负荷控制时段比较广泛, 这是由于周末的负荷需求大增, 可再生微源出力在多数调度时段内无法满足实际负荷需求, 且阴雨天-周末场景下的光伏出力减少, 进一步拉大了负荷需求和可再生微源出力之间的差值, 在经济性目标的指导下进行合理的负荷控制。

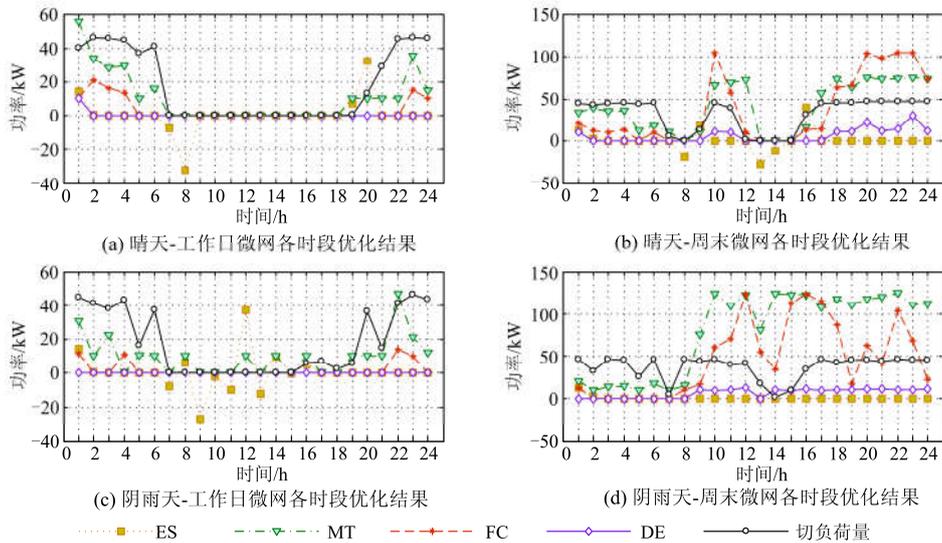


图 3 四种场景下微网各时段调度优化结果

Fig. 3 Dispatch optimization results for microgrid in each period in four scenarios

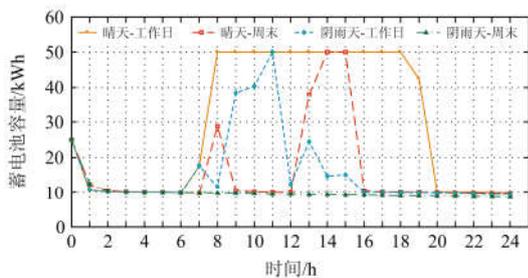


图 4 四种场景下蓄电池各时段容量变化图

Fig. 4 Battery's capacity change curve of each period in four scenarios

储能的容量变化与风光发电系统的总出力和负荷需求的大小相关, 当蓄电池没有剩余电量时无法向系统供给电能, 只有存储了部分电量之后才能进行释放。从蓄电池的容量变化曲线可以看出, 四种场景下的蓄电池在调度初始阶段均得到优先利用, 这是由于蓄电池没有燃料费用, 相对其他微源更加经济。之后一段时间内, 蓄电池能否充电取决于可

再生能源出力之和是否大于负荷需求。从图 2 可以看出, 晴天-工作日、晴天-周末和阴雨天-工作日都存在可再生微源出力之和大于负荷需求的情况, 对应图 3 中蓄电池的出力为负值, 代表蓄电池充电, 图 4 中对应场景的蓄电池容量上升。而阴雨天-周末负荷需求高, 光伏出力少, 负荷需求一直高于可再生微源出力之和, 因此蓄电池从开始放电后一直维持在最低荷电量附近, 且由于存在自放电效应, 容量缓慢下降, 等待下一个充电时刻的到来。当蓄电池充电的时候, 说明可再生微源出力满足负荷需求的同时有盈余, 因此其他微源的出力均为 0, 与实际情况相符合。

按照优化策略运行后得到四种场景下每天不同时刻的运行费用曲线如图 5 所示。

对图 5 与图 2 中相应场景进行分析, 可以看出, 各时段运行费用大致与系统净负荷的变化趋势一致。当风光出力之和大于或与负荷需求比较接近的时候, 运行成本比较低。例如晴天-工作日场景下,

风光出力在 7:00—18:00 都大于负荷需求, 因此该时段起初的运行成本几乎为零。第 8 个时段之后, 蓄电池的容量已达上限且风光出力能够满足负荷需求, 此时的运行费用为 0, 整个系统只有风机和光伏电池在运行, 微网通过调整风机出力来跟踪负荷变化。而当负荷需求大于风光出力之和较多的时候, 成本随之上升。从四个场景来看, 晴天-周末和阴雨天-周末的微网运行费用明显高于工作日, 其根本原因在于周末的负荷需求高。而阴雨天-周末比晴天-周末的运行费用高, 是因为阴雨天的光伏出力小。

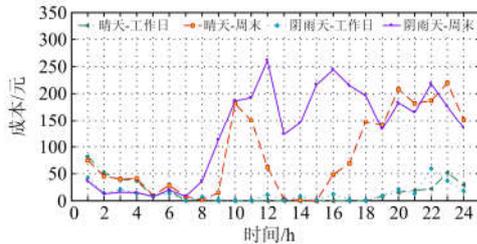


图 5 各场景不同时段运行费用曲线

Fig. 5 Operation cost curve of each period in four scenarios

结合算例可见, 本文提出的 CPSO 能够有效地解决独立微网不同场景的优化调度问题。为了对算法进行直观横向比较, 记录 CPSO 的迭代过程, 并与 GA 和 PSO 算法进行对比, 以晴天-工作日场景下第一个时段的优化为例作出迭代过程如图 6 所示。

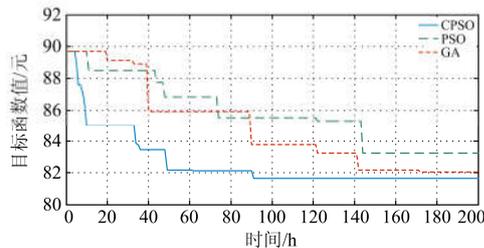


图 6 迭代过程对比

Fig. 6 Iterative process comparison

由图 6 可以看出, 三种求解算法的目标函数值均随着迭代步数的增加逐渐减小, 说明算法均朝着有利的方向进行搜索, 最后趋于一个稳定值。但是, CPSO 算法能够在相对更少的迭代次数内收敛到更优的解, 这是因为 CPSO 算法在迭代中增加了混沌优化并引入了精英保留, 加强了对优势个体进行局部搜索的深度, 在保持种群多样性的前提下充分运用了“适者生存”的原则。

4 结论

本文以包含风力、光伏、蓄电池储能、微燃机、柴油机和燃料电池的多源海岛型独立微网为研究对

象, 设计了晴天-工作日、晴天-周末、阴雨天-工作日和阴雨天-周末四种不同的典型场景, 在新能源发电和负荷预测的基础上, 依据微网运行成本最优的目标和相关约束条件, 确定系统各微源在不同时段的出力情况, 尽可能实现系统的经济性、可靠性和环保性等量化指标的优化。

将 PSO 与混沌优化相结合, 并在迭代过程中采用精英保留策略, 每次迭代取较优解进行混沌局部搜索, 增强了算法的局部搜索能力, 有效地解决了 PSO 在优化变量多、场景复杂的微网优化中容易陷入局部最优和后期收敛效果不明显的问题。算例分析表明, 所提 CPSO 算法对不同场景的微网优化问题均具有较强的适应性。

参考文献

- [1] YU K, AI Q, WANG S J, et al. Analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 695-705.
- [2] 吴昊, 王艳松. 基于智能单粒子算法的微电网经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 43-49.
WU Hao, WANG Yansong. Economic dispatch of microgrid using intelligent single particle optimizer algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 43-49.
- [3] 李鹏, 徐伟娜, 周泽远, 等. 基于改进万有引力搜索算法的微网优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3073-3079.
LI Peng, XU Weina, ZHOU Zeyuan, et al. Optimal operation of microgrid based on improved gravitational search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3073-3079.
- [4] 符杨, 蒋一璠, 李振坤. 基于混合量子遗传算法的微电网电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 50-57.
FU Yang, JIANG Yiliu, LI Zhenkun. Optimal allocation of distributed generation for microgrid based on hybrid quantum genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 50-57.
- [5] 田梁玉, 唐忠, 焦婷, 等. 基于多目标评判法的微电网经济性指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 122-127.
TIAN Liangyu, TANG Zhong, JIAO Ting, et al. Economic indicators research of microgrid based on multi-objective evaluation method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 122-127.
- [6] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57-66, 19.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Microgrid multi-

- objective economic dispatch optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 57-66, 19.
- [7] LIU Xiaoping, DING Ming, HAN Jianghong, et al. Dynamic economic dispatch for microgrids including battery energy storage[C] // The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei, China, 2010: 914-917.
- [8] MOHAMMADI S, MOZAFARI B, SOLIMANI S, et al. An adaptive modified firefly optimization algorithm based on Hong's point estimate method to optimal operation management in a microgrid with consideration of uncertainties[J]. Energy, 2013, 51(1): 339-348.
- [9] 朱博, 陈民铀, 徐瑞林, 等. 孤岛模式下的微网优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 35-40.
ZHU Bo, CHEN Minyou, XU Ruilin, et al. An optimal operation strategy of islanded microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 35-40.
- [10] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 524-536.
GUO Li, LIU Wenjian, JIAO Bingqi, et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 524-536.
- [11] SACHS J, SAWODNY O. A two-stage model predictive control strategy for economic diesel-PV-battery island microgrid operation in rural areas[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 903-913.
- [12] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
SONG Xiaoying, WANG Yansong. Economic and environmental dispatch of microgrid using co-evolutionary genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 85-89.
- [13] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 7-15.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Genetic algorithm based economic operation optimization of a combined heat and power microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 7-15.
- [14] 曾嵘, 彭春华, 王奎, 等. 基于鸟群算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 117-122.
ZENG Ceng, PENG Chunhua, WANG Kui, et al. Multi-objective operation optimization of micro grid based on bird swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 117-122.
- [15] FARZAN F, JAFARI M A, MASIELLO R, et al. Toward optimal day-ahead scheduling and operation control of microgrids under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 499-507.
- [16] 杨秀, 陈洁, 朱兰, 等. 基于经济调度的微网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 53-60.
YANG Xiu, CHEN Jie, ZHU Lan, et al. Optimization allocation of energy storage for microgrid based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 53-60.
- [17] 张富强. 电力市场环境下的无功及电价风险管理问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
ZHANG Fuqiang. Research on reactive power and electricity price risk management in electricity market environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [18] DIAF S, DIAF D, BELHAMEL M, et al. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system[J]. Energy Policy, 2007, 35(11): 5708-5718.
- [19] PIPATTANASOMPORN M, WILLINGHAM M, RAHMAN S. Implications of on-site distributed generation for commercial/industrial facilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 206-212.
- [20] BERNOW S, MARRON D. Valuation of environmental externalities for energy planning and operations[C] // Tellus Institute Report 90-SB01, Boston (MA), May 1990.
- [21] MORGANTOWN W. Emission rates for new DG technologies — the regulatory assistance project[EB/OL]. <http://www.raonline.org/ProjDocs/DREmsRul/Collfile/DGEmissionsMay2001.pdf>.
-
- 收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2017-02-11
- 作者简介:
苏适(1972—), 男, 研究方向为新能源发电与智能电网技术、电力系统分析与控制、功率预测技术; E-mail: sushil@sina.com
周立栋(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微网优化运行与控制; E-mail: zhoulidong_ncepu@sina.com
陈奇芳(1986—), 男, 博士研究生, 研究方向为电动汽车并网技术、微网运行控制。
- (编辑 魏小丽)