大庆地区油田微电网容量优化配置方法研究

王同强，王丽平，景志远，孙春庆，李　航，周家琛

（大庆油田设计院有限公司，黑龙江 大庆 163712）

摘要：大庆地区风光资源十分丰富，如何将风光发电融入油田电网中，实现节能降碳的目标，是大庆油田电网急需解决的难题之一。依据大庆地区风光资源的特点，结合油田电网的运行需求，针对大庆油田微电网的风 / 光 / 燃 / 储容量优化配置技术进行了研究。建立了容量优化配置所需的装置模型，设计了寻优算法，开发出面向一线使用人员的容量优化配置软件。最终通过优化实例，验证了所设计方案的可行性和有效性，为可再生能源发电在油田电网以及其他领域中的应用提供了有效的技术支撑。

关键词：油田微电网；容量优化；寻优算法；软件开发

Capacity optimization of oilfield microgrid in Daqing area

WANG Tongqiang, WANG Liping, Jing Zhiyuan, SUN Chunqing, LI Hang, ZHOU Jiachen

(Daqing Oilfield Design Institute Co., Ltd., Daqing 163712, China)

Abstract: Daqing region has abundant wind and light resources. How to integrate wind and solar power generation equipment into the oil field power grid to achieve energy conservation and emission reduction goals is one of the major problems that Daqing Oilfield power grid urgently needs to solve. Based on the characteristics of wind and light resources in Daqing region and combining with the operational requirements of the oilfield power grid, this paper studied the technology of capacity optimization configuration for wind/light/fuel/storage in Daqing Oilfield microgrid. Equipment models required for capacity optimization configuration were established. An optimization algorithm was designed. A capacity optimization configuration software for front-line users was developed. Finally, through optimization examples, the feasibility and effectiveness of the design scheme in this paper were validated, which provided effective technical support for the application of renewable energy power generation in oilfield power grids and other fields.

Key words: oilfield microgrid; capacity optimization; optimization algorithm; software development

0　引言

石油开采行业作为传统的高能耗产业，在“双碳”目标的要求下，如何利用可再生能源发电技术，在稳定、可靠供电的前提下实现节能降碳成为油田电网当今急需解决的难题之一[1]。

油田电网点多、线长、面广的特点增加了可再生能源发电融入后电网运行管理的难度，但是油田电网在可再生能源发电的开发、利用方面也具有其独特的优势[2]。以大庆油田为例，其地处敖古拉大风口，具有较好的风资源条件；同时大庆油田地区光照充足，属国家太阳能资源二类地区，并且大庆地区年平均温度较低，有利于提

中国石油天然气股份有限公司科技项目《地热资源开发利用关键技术研究》（110021323002）

高光伏组件的转换效率，适合建设各类型光伏电站。

因此，建设以新能源为主体的新型电力系统已成为包括大庆油田电网在内的诸多油田电网发展的必然趋势。在其规划、设计的初期阶段，如何解决风/光/储等发电设备和装置的容量配置问题成为了油田电网建设的迫切需求。

针对微电网中风/光/储等分布式电源的容量优化配置技术目前研究成果较多。文献[3]提出将负荷失电率和能量过剩率引入目标函数，并从能量和功率两个方面对蓄电池进行约束，利用改进的遗传算法对风/光/储发电系统进行容量优化配置。文献[4]针对微电网系统弃风、弃光现象的发生，将蓄电池和氢储能系统相结合，并提出一种改进的麻雀搜索算法，以成本和源荷偏差率最小为目标对微电网容量进行优化。文献[5]结合光伏电池、燃料电池、储氢罐等设备的输出特性，以电功率、热功率平衡为主要约束条件，采用粒子群算法进行优化，并分析了配置结果。

本文以大庆油田地区的风力资源、太阳能资源为依据，结合大庆油田电网发电、输配电和负载用电特征，以油田电网的安全、稳定、绿色和经济运行为具体约束条件，对大庆油田微电网的风/光/燃/储容量匹配优化方法开展了深入研究。

1 大庆油田微电网建模

1.1 大庆油田微电网拓扑设计

大庆油田石油开采设备分布广泛，使油田电网结构极其复杂，为了便于分布式电源融入后的能量管理，本文以110 kV母线作为微电网与大电网的交换母线，在一定的地域内形成发、用电设备相对集中的微电网拓扑，且不同地域内的微电网相对独立。以庆新110 kV母线为例，现有的局域电网拓扑结构如图1所示。

结合该地区的自然资源条件，在其结构中加入风力发电机、光伏电池和储能装置，此外结合油田电网的实际运行需求，还要加入燃气发电机组作为备用机组，因此需要对上述设备进行建模，以便进行容量配置优化分析。

1.2 仿真建模

（1）风力发电机模型

风力发电机的输出功率与风速的大小有关，根据风力发电机的机械特性[6-7]，其功率模型为

$$P_{\mathrm{N}}=\frac{1}{2}\rho\pi R^{2}v^{3}C_{\mathrm{P}} \tag{1}$$

式中，v为外界风速；ρ为空气密度；R为风力发电机叶轮的半径；C_{P}为风能利用系数。

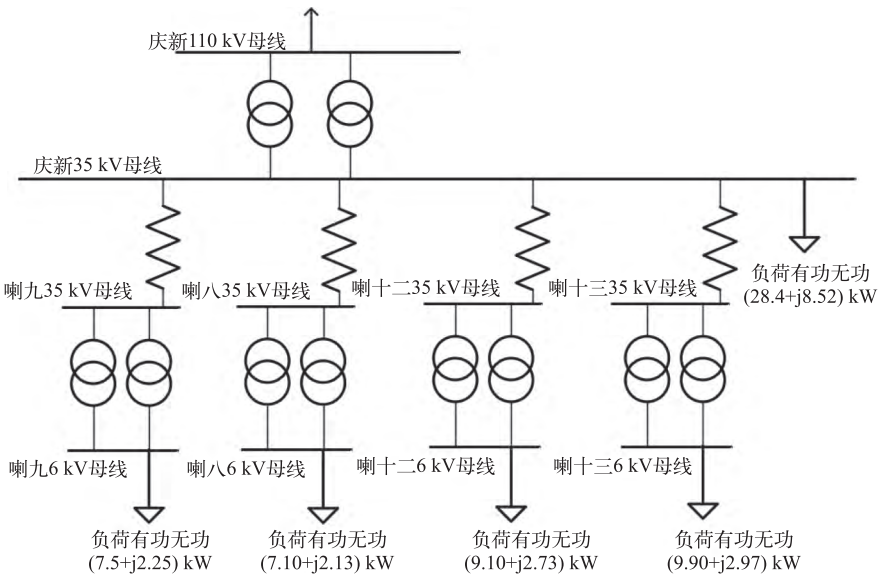

图 1 大庆油田庆新 110 kV 母线电网拓扑

Fig. 1 The 110 kV busbar topology of Qingxin substation in Daqing oilfield

根据实际需要，风力发电机在不同风速下输出的功率关系为

$$P=\begin{cases}0 & v<v_{\text{in}},v>v_{\text{out}}\\ P_{\text{N}}(v-v_{\text{in}})/(v_{\text{N}}-v_{\text{in}}) & v_{\text{in}}\leqslant v\leqslant v_{\text{N}}\\ P_{\text{N}} & v_{\text{N}}<v\leqslant v_{\text{out}}\end{cases} \tag{2}$$

式中，v_{in}、v_{N}和v_{out}为风力发电机的切入风速、额定风速和切出风速。

（2）光伏电池模型

在理想情况下，光伏电池可以等效为一个恒定的光生电流源与一个理想二极管并联组成的电路。其利用光生伏特效应实现太阳能与电能的转换，但其转换的电能只能对外输出[8-9]。依据上述理论，本文建立的光伏电池功率模型为

$$P_{\text{PV}}(t)=P_{\text{STC}}G_{\text{c}}(t)\{1+k[T_{\text{c}}(t)-T_{\text{STC}}]\}/G_{\text{STC}} \tag{3}$$

式中，$P_{\text{PV}}(t)$为t时刻光伏电池的输出功率；P_{STC}为标准测试环境下光伏电池的输出功率；G_{STC}为标准测试环境下的光照强度；T_{STC}为标准测试环境下的环境温度；k为温度系数；$G_{\text{c}}(t)$为t时刻的实际光照强度；$T_{\text{c}}(t)$为t时刻的实际环境温度。

（3）储能模型

根据油田电网的实际需求，选用蓄电池作为储能装置，并参考恒功率模型[10]，在控制周期内保持输出功率不变，建立的荷电模型为

$$\text{SOC}(t)=\text{SOC}(t_0)+[\eta_{\text{ch}}P_{\text{ch}}(t)-\eta_{\text{dis}}P_{\text{dis}}(t)]/S\Delta t \tag{4}$$

式中，$\text{SOC}(t_0)$为t_0时刻的蓄电池容量；η_{ch}为蓄电池的充电效率；η_{dis}为蓄电池的放电效率；$P_{\text{ch}}(t)$为t时刻蓄电池的充电功率；$P_{\text{dis}}(t)$为t时刻蓄电池的放电功率；S为蓄电池的额定容量；Δt为时间步长。

（4）燃气机模型

当风光发电设备与蓄电池出力均不能满足负荷需求时，极端情况下油田负荷需要燃气发电机组提供电能，确保发电系统的安全性与可靠性[11-12]，依据燃气发电机组的特性，建立的功率模型为

$$P_{\text{g}}=v_{\text{bi}}q_{\text{bi}}\eta_{\text{g}} \tag{5}$$

式中，P_{g}为燃气机输出功率；v_{bi}为单位时间甲烷消耗量；η_{g}为燃气机能量转换效率；q_{bi}为单位体积燃气热值。

2 容量配置寻优约束条件设计

2.1 评价条件设计

（1）经济指标

经济成本作为衡量一个微电网系统是否值得投资的重要指标，常被选作目标函数。本文采用等效日投资费用（ACS）作为一项指标来评估一天内微电网的花费，该费用考虑各设备的初始投资成本（安装成本）、运维成本、替换成本和燃气发电机运行的燃料消耗成本，表达式为

$$\text{ACS}=C_{\text{a}}+C_{\text{b}}+C_{\text{c}}+C_{\text{d}}+C_{\text{e}} \tag{6}$$

式中，C_{a}为系统初始投资成本，即分布式电源安装所需费用；C_{b}为设备运行过程中的运营维护所需费用；C_{c}为设备的替换费用；C_{d}为燃气发电机燃料燃烧产生的费用；C_{e}为微电网与大电网交互费用。

$$\begin{cases}C_{\text{a}}=\dfrac{r(1+r)^{l}}{(1+r)^{l}-1}\displaystyle\sum_{i=1}^{4}N_iC_i/365l\\ C_{\text{b}}=\displaystyle\sum_{i=1}^{4}K_iN_iP_i/365l\\ C_{\text{c}}=\dfrac{r}{(1+r)^{l}-1}\displaystyle\sum_{i=1}^{4}R_iN_i/365l\\ C_{\text{d}}=C_{\text{fuel}}F_{\text{fuel}}\\ C_{\text{e}}=\displaystyle\sum_{t=1}^{24}k_{\text{buy}}P_{\text{buy}}(t)-\sum_{t=1}^{24}k_{\text{sell}}P_{\text{sell}}(t)\end{cases} \tag{7}$$

式中，r为设备折旧率；l为系统使用年限；N_i为第i类电源数量；C_i为第i类电源单台价格；P_i为第i类电源的额定容量；K_i为第i类电源的维护成本系数；R_i为第i类电源单台置换费用；C_{fuel}为燃料价格；F_{fuel}为日耗气量；k_{buy}为购电单价；k_{sell}为售电单价；$P_{\text{buy}}(t)$为从电网购电电量；$P_{\text{sell}}(t)$为向电网售电电量。

（2）可靠性指标

在风/光/燃/储混合发电系统可能会出现系统输出功率小于负荷需求功率的情况。在给定时间内，系统不能满足负荷功率需求的比例称为负荷失电率(the Loss of Power Supply Probability，LPSP)[13]。负荷失电率越低，系统越可靠，因此本文设计的负荷失电率评价指标为

$$\mathrm{LPSP}=\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{Loss}}(t)/\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{Fuhe}}(t) \tag{8}$$

式中，$P_{\mathrm{Fuhe}}(t)$为第t小时系统总的负荷功率；$P_{\mathrm{Loss}}(t)$为第t小时负荷失电的功率。

（3）能量过剩率

相比于负荷失电率，当系统输出功率大于负荷需求功率，且储能装置无法再吸收能量时，多余的能量会浪费。因此在给定时间内，系统浪费的电量占全部负荷需求的电量的比称为能量过剩率（Energy Excess Rate，EER）[14]。能量过剩率越低，则系统的能量利用率越高。结合大庆油田电网和自然资源的特点，本文采用的能量过剩评价指标为

$$\mathrm{EER}=\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{ewr}}(t)/\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{Fuhe}}(t) \tag{9}$$

式中，$P_{\mathrm{ewr}}(t)$为第t小时系统过剩的功率。

2.2 约束指标设计

（1）设备安装数量约束

由于场地限制，风/光/燃/储安装的设备数量有限，因此需要对设备安装数量进行约束，即

$$\begin{cases}0\leqslant N_{\mathrm{WG}}\leqslant N_{\mathrm{WGmax}}\\0\leqslant N_{\mathrm{PV}}\leqslant N_{\mathrm{PVmax}}\\0\leqslant N_{\mathrm{DG}}\leqslant N_{\mathrm{DGmax}}\\0\leqslant N_{\mathrm{BAT}}\leqslant N_{\mathrm{BATmax}}\end{cases} \tag{10}$$

式中，N_{WGmax}、N_{PVmax}、N_{DGmax}和N_{BATmax}分别为风机、光伏电池、燃气发电机和蓄电池组件的最大可安装数量。

（2）负荷失电率和能量过剩率约束

本文采用的负荷失电率和能量过剩率约束为

$$\begin{cases}\mathrm{LPSP}\leqslant\mathrm{LPSP}_{\mathrm{set}}\\\mathrm{EER}\leqslant\mathrm{EER}_{\mathrm{set}}\end{cases} \tag{11}$$

式中，$\mathrm{LPSP}_{\mathrm{set}}$、$\mathrm{EER}_{\mathrm{set}}$分别为负荷失电率、能量过剩率上限值，确保系统安全可靠运行。

（3）蓄电池电量约束

为保证蓄电池的正常工作，提高设备使用寿命，需要对其电量与功率进行约束，本文采用的约束条件为

$$\mathrm{SOC}_{\mathrm{min}}\leqslant\mathrm{SOC}\leqslant\mathrm{SOC}_{\mathrm{max}} \tag{12}$$

式中，$\mathrm{SOC}_{\mathrm{max}}$、$\mathrm{SOC}_{\mathrm{min}}$分别为蓄电池荷电状态的上下限，本文取$\mathrm{SOC}_{\mathrm{max}}$为1，取$\mathrm{SOC}_{\mathrm{min}}$为0.2。

（4）与大电网交互约束

微电网可以与大电网进行电能交互，采用合适的购售电功率可以减少系统的负荷失电率和能量过剩率，本文设计的约束为

$$P_{\mathrm{buy}}\leqslant P_{\mathrm{buy_max}} \tag{13}$$

$$P_{\mathrm{sell}}\leqslant P_{\mathrm{sell_max}} \tag{14}$$

式中，P_{buy}、P_{sell}分别为购电和售电功率；$P_{\mathrm{buy_max}}$、$P_{\mathrm{sell_max}}$分别为购电和售电上限。

2.3 目标函数设计

对于风/光/燃/储发电系统，受风速、光照强度和温度等环境因素影响，具有较大的波动性和间接性。因此现有优化配置的目标函数主要考虑系统的可靠性和经济性，在最大利用风光资源的条件下使总投资成本最低。

大庆油田微电网的设计，综合考虑了投资成本、能量过剩率和负荷失电率等多目标函数寻优，因此本文采用通过添加惩罚因子将能量过剩率和负荷失电率计入目标函数中的设计方法，设计出的目标函数为

$$\begin{aligned}F=&\mathrm{ACS}(x)+\sigma_1\left|\mathrm{LPSP}(x)-\mathrm{LPSP}_{\mathrm{set}}\right|+\\&\sigma_2\max\left[0,\mathrm{EER}(x)-\mathrm{EER}_{\mathrm{set}}\right]\end{aligned} \tag{15}$$

式中，ACS(x)为设备年均投资成本；LPSP(x)、EER(x)分别为负荷失电率和能量过剩率的实际值；$\mathrm{LPSP}_{\mathrm{set}}$、$\mathrm{EER}_{\mathrm{set}}$分别为负荷失电率和能量过剩率的上限值；$\sigma_1$、$\sigma_2$为惩罚因子，本文分别取值为2 500和100。

3 优化算法设计

目前适用于容量配置寻优的算法很多，例如遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等，本文考虑到粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法具有收敛速度快、参数少和算法简单易实现的优点，因此以粒子群算法为核心，通过对其改进设计出了适用于大庆油田微电网容量优化配置的寻优算法。

对于标准的粒子群算法，首先每个粒子均单独搜寻结果并得到个体最优解；然后通过对比将

最优的个体解作为全局最优解。本文设计的粒子群粒子的更新过程数学表达式为

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 r_1 \left(p_{\text{best}i}^k - x_i^k \right) + c_2 r_2 \left(g_{\text{best}i}^k - x_i^k \right) \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \end{cases} \tag{16}$$

式中，v_i为第i个粒子的速度；x_i为第i个粒子的当前位置；w为惯性权重；c_1、c_2为学习因子；r_1、r_2为[0，1]之间的任意值；p_{best}为个体最优粒子的位置；g_{best}为全局最优粒子的位置。

惯性权重w发挥着平衡全局寻优能力与局部寻优能力的作用。为了提高标准粒子群算法的寻优速度，解决容易陷入局部最优解的问题，本文在线性递减权重方法的基础上，提出一种三次方拟合曲线递减权重的方法，即

$$w_1 = w_{\max} - \left(w_{\max} - w_{\min} \right) t^3 / t_{\max}^3 \tag{17}$$

式中，$w_{\max}$为惯性权重最大值；$w_{\min}$为惯性权重最小值；t为当前迭代次数；$t_{\max}$为最大迭代次数。按照大多数应用中设置$w_{\max}$=0.9，$w_{\min}$=0.4。

惯性权重会根据迭代次数的改变而动态变化，迭代开始时惯性权重的值大一些，增强全局寻优能力，减小局部寻优能力，以求得更多优质解；随着迭代次数的增加，减小惯性权重，增强局部寻优能力，削弱全局寻优能力，以求得最优解。基于改进后的粒子群算法，本文设计出的寻优流程图如图2所示。

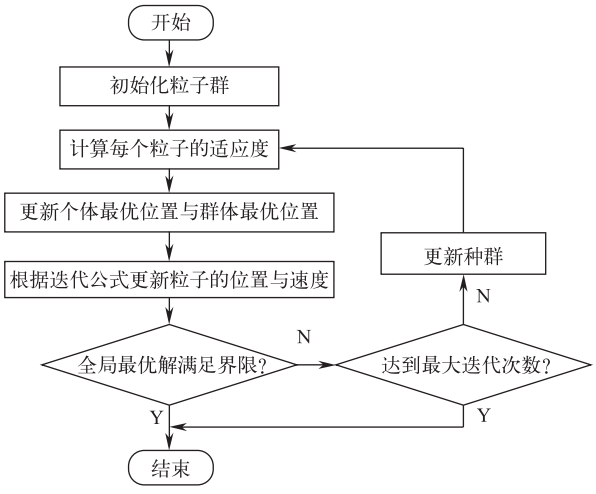

图 2　粒子群寻优算法流程图

Fig. 2 Workflow diagram of the particle swarm optimization algorithm

4　容量优化配置软件开发

为了便于大庆油田电网工作人员的使用，基于上述搭建的模型和设计的寻优算法，文章以Qt平台为框架，开发出拥有完全知识产权的大庆油田微电网容量优化配置计算软件，软件界面如图3所示。

图 3　容量优化配置软件界面

Fig. 3 The capacity optimization configuration software interface

使用人员只需按照界面的提示导入当地的风光资源数据，并设定必要的给定数据和约束条件，软件运行后即可给出容量优化配置结果。

5　实例优化与分析

实例优化中，本文选取了大庆2022年全年8 760 h的风力、光照资源、环境温度以及当地用电负荷数据。所采用的风/光/燃/储设备参数见表1，经济数据见表2。

表 1　设备数据输入

Tab. 1 Equipment data input

风机额定功率 /kW	切入风速 /（m/s）	切出风速 /（m/s）	额定风速 /（m/s）
5 000	2.5	25	8.9m/s
光伏额定功率 /kW	燃气机功率 /kW	燃气机效率 /kW	燃气机热值 /（MJ/m^3）
0.54	600	0.45	40
蓄电池容量 /kW	蓄电池最大荷电量		蓄电池最小荷电量
5	0.9		0.2

表 2　经济数据输入

Tab. 2 Economic data input

	购置费用 /（元 /kW）	运维费用 /（元 /kW）	折旧率	使用年限 / 年
风力机	6 767.43	35.4	0.067	20
光伏电池	4 220	88.7	0.067	25
蓄电池	567	459.27	0.067	2.5
燃气机	969	1 025.7	0.067	10

以此为依据开展了优化设计与验证工作，其中的部分结果如下。

（1）经济性优化

以容量配置的经济性作为优化目标，先后进行三次优化计算，优化结果见表3。表中替代率为新能源设备供电占负荷总耗电量的比值，年交换率为电网供电占负荷总耗电量的比值。

通过对表3中的数据进行分析，可以得出如下结论：

1）由于计算误差的存在，三次优化结果并不完全一致，但数值相差很小。

2）在三次优化中，系统负荷失电率均为0，表明优化算法可有效保障负荷用电的可靠性。

3）在三次优化中，年投资成本优化结果都在1 725万元左右，经济性基本一致。

4）微电网与大电网的电量年交换率小于50%，满足微电网“自治”标准。

5）在三次优化中，能量过剩率均小于7%，表明设计的风光发电容量得到了较为合理利用，有效减小了弃风率和弃光率。

从三次实验结果的对比中，还可以发现：随着配置蓄电池容量的增加，系统与大电网年交换率减少，但会提高系统投资成本。

（2）能量过剩率优化

针对大庆油田微电网的实际需要，选择能量过剩率优化模式，将能量过剩率期望值设为5%，优化结果见表4，可获得以下结论：

1）在三次能量过剩率优化实验中，能量过剩率优化结果均能保持在5%附近，忽略计算误差，达到了能量过剩率设计指标。

2）微电网年交换率均小于50%，满足“自治”设计需求。

3）与经济性优化相比，为了降低能量过剩率，增加了储能装置容量，使年投资成本增加。

上述优化实例的数据获得了大庆油田电网技术人员的认可，与前期的设计数据大体一致，但更为详细，更具备科学性。因此，本文设计的大庆地区油田微电网容量优化配置方案可行，并具备很好的实用价值。

表 3　经济性优化实验结果

Tab. 3 Results of the economic optimization experiment

	风机容量 /MW	光伏容量 /MW	蓄电池容量 /MW	燃气机容量 /MW	能量过剩率（%）	负荷失电率（%）	替代率（%）	年交换率（%）	年投资成本 /（万元 / 年）
1	10	10.26	6	3	6.49	0	69.89	24.94	1722.16
2	10	10.42	6.25	3	6.61	0	74.51	24.87	1 725.36
3	10	10.29	6.5	3	6.44	0	69.98	24.85	1 731.24

表 4　能量过剩率优化实验结果

Tab. 4 Results of the energy surplus rate optimization experiment

	风机容量 /MW	光伏容量 /MW	蓄电池容量 /MW	燃气机容量 /MW	能量过剩率（%）	负荷失电率（%）	替代率（%）	年交换率（%）	年投资成本 /（万元 / 年）
1	10	9.37	9.58	3	5.01	0	69.51	25.26	1 841.45
2	10	9.14	8.37	3	4.99	0	69.15	25.58	1 825.12
3	10	9.10	8.50	3	4.94	0	69.12	25.60	1 829.95

6 结束语

面向可再生能源发电融入大庆油田电网的实际需求，针对大庆油田微电网中风/光/燃/储等装置的容量优化配置方法技术进行了详细深入的研究，取得了以下研究成果：

1）以大庆油田地区的可再生能源资源特点和电网具体需求为依据，搭建了风/光/燃/储等装置的数学模型，为容量优化配置提供了严谨的分析基础。

2）基于提出的改进粒子群算法，设计出能够快速搜索出全局最优结果的寻优算法，确保了容量优化配置结果的科学性和可信性。

3）开发出具有自主知识产权的大庆油田微电网容量优化配置计算软件，为使用人员提供了良好的人机对话界面，极大地简化了优化配置操作。此外，该软件的开发，也为后续可再生能源发电技术在其他领域中的广泛应用提供了强大的技术支撑。

参考文献

[1] 汪艳勇，彭会君，庞志庆，等．大庆油田新能源产业发展对策探讨[J]．油气与新能源，2022，34(2)：82-87．

[2] 吴红伟，张振华，杨志坚，等．油田新能源应用发展探究[J]．石油石化节能，2023，13(7)：99-102．

[3] 刘艳平，贾春娟．基于遗传算法的独立型风光互补发电容量优化[J]．电力系统及其自动化学报，2015，27(10)：69-74．

[4] 张萍，陆霞，孟庆鹤．基于多策略麻雀搜索算法的微电网容量优化配置[J]．电气技术，2023，24(1)：1-9．

[5] 申航宇，樊小朝，史瑞静，等．独立光氢燃料电池热电联供系统容量配置优化[J]．电气传动，2022，52(22)：44-50，65．

[6] 周围，韩礼冬，李钢，等．基于PSCAD/EMTDC的微电网永磁直驱风力发电系统建模与仿真研究[J]．电气技术，2016(2)：52-7，66．

[7] 徐林，阮新波，张步涵，等．风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]．中国电机工程学报，2012，32(25)：88-98．

[8] 王英杰，陈洁，杨蒙．含深冷液化空气储能的离网型CCHP微网容量配置[J]．计算机仿真，2022，39(7)：112-116．

[9] YANG X，SONG J，PENG L，et al．Improving identification ability of adulterants in powdered Panax notoginseng using particle swarm optimization and data fusion [J]．Infrared Physics and Technology，2019，103(C)．

[10] 周成伟，李鹏，俞斌，等．风光储微电网储能系统容量优化配置[J]．综合智慧能源，2022，44(12)：56-61．

[11] 郁建雄．基于改进粒子群算法的风光储柴微网系统运行优化研究[D]．北京：华北电力大学，2020．

[12] 邓佃毅，栗文义，楚冰清，等．基于可靠性约束的风-光-储微网容量优化配置对配电网可靠性影响分析[J]．太阳能学报，2018，39(9)：2439-2445．

[13] 梁宁．新能源发电系统与船舶电力系统优化匹配研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学，2021．

[14] 袁晓玲，程琳伟，鲁丽娟，等．基于万有引力搜索算法的微电网风光储容量优化配置[J]．电力需求侧管理，2017，19(6)：14-19．

[15] 吴国庆，霍伟，茅靖峰，等．基于风光互补的孤岛型微网容量优化配置研究[J]．计算机仿真，2019，36(1)：127-33．

[16] 张瑞云．风光储交直流混合微电网中的微电源优化配置研究[D]．兰州：兰州理工大学，2018．

[17] 刘勤，魏明奎，周全，等．计及电量成本和系统自供电可靠性的西南地区微电网容量优化配置研究[J]．电力系统保护与控制，2020，48(10)：139-145．

作者简介

王同强（1970—），男，硕士，教授级高级工程师，注册电气工程师，从事油田发配电、输变电及新能源发电研究、设计工作。

（收稿日期：2023-11-07）