

文章编号:1671-251X(2019)01-0087-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018070025

# 含煤层气发电的煤矿微电网容量优化配置

曹娜<sup>1</sup>, 郭沛璇<sup>1</sup>, 于群<sup>1</sup>, 郭宝德<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 煤炭工业济南设计研究院有限公司, 山东 济南 250031)

**摘要:**为了提高煤矿微电网系统效益和能源利用率,以煤矿全年综合净效益为目标函数,综合考虑建设煤矿微电网所需成本、产生的收益及多种约束条件,建立了含煤层气发电的煤矿微电网容量优化配置模型。根据全年的风力发电机组发电功率、光伏电池发电功率和负荷数据,采用粒子群算法对容量优化配置模型进行求解,获得分布式电源和储能设备的安装容量。通过算例仿真得到最优配置方案,成本与收益分析表明,微电网与大电网功率交互过程产生了收益;同时分析了可再生能源比例和自发自用率等不同运行指标对配置结果的影响,研究结果可为煤矿微电网的设备容量规划提供参考。

**关键词:**煤矿微电网;煤层气发电;容量优化配置;综合净效益;粒子群算法

中图分类号:TD60 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20181224.1257.001.html>

## Optimal configuration of coal mine microgrid capacity for power generation with coalbed methane

CAO Na<sup>1</sup>, GUO Peixuan<sup>1</sup>, YU Qun<sup>1</sup>, GUO Baode<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Coal Industry Jinan Design and Research Institute Co., Ltd., Jinan 250031, China)

**Abstract:** In order to improve efficiency and energy utilization rate of coal mine microgrid system, optimal configuration model of coal mine microgrid capacity for power generation with coalbed methane was established taking comprehensive net benefit of coal mine as objective function, and taking cost, generated income and various constraints of coal mine microgrid into consideration. According to power generation of wind turbine generator and photovoltaic battery and load data of the whole year, particle swarm optimization algorithm is used to solve the capacity optimization configuration model, and installation capacity of distributed power and energy storage equipment are obtained. The optimal configuration scheme is obtained through example simulation, and cost and benefit analysis show that the power exchange process between microgrid and large grid generates revenue. At the same time, the effects of different operating indicators such as renewable energy ratio and spontaneous use rate on the configuration results were analyzed, and the research results can provide reference for equipment capacity planning of coal mine microgrid.

**Key words:** coal mine microgrid; coalbed methane power generation; capacity optimization configuration; comprehensive net benefits; particle swarm optimization

收稿日期:2018-07-09;修回日期:2018-12-10;责任编辑:胡娟。

基金项目:国家自然科学基金项目(51641702)。

作者简介:曹娜(1971-),女,山东新泰人,副教授,博士,研究方向为电力系统运行与控制技术,E-mail:caona\_2006@163.com。

引用格式:曹娜,郭沛璇,于群,等.含煤层气发电的煤矿微电网容量优化配置[J].工矿自动化,2019,45(1):87-94.

CAO Na, GUO Peixuan, YU Qun, et al. Optimal configuration of coal mine microgrid capacity for power generation with coalbed methane[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 87-94.

## 0 引言

微电网是一种集分布式电源 (Distributed Generation, DG)、储能装置、各类负荷及控制、保护设备于一体的小规模电网系统。借助微电网这一媒介可以充分利用发电资源,促进清洁能源的接入和就地消纳,同时也可减小 DG 直接接入大电网后造成的冲击,具备良好的发展前景。

煤层气发电作为一种新型 DG 受到了普遍关注,利用煤层气发电可以提高经济收益和环境收益,另外,开发煤层气资源对于降低煤矿井下瓦斯浓度和煤矿事故率具有重要意义<sup>[1]</sup>,符合“清洁低碳、安全高效”<sup>[2]</sup>的能源发展总方向。近年来,高浓度瓦斯发电逐渐进入商品化市场,低浓度瓦斯发电技术也趋于成熟<sup>[3]</sup>。截至 2017 年 12 月,我国仍有 5 063 家煤矿,这些煤矿不同程度的存在煤层气资源,其中部分煤矿具备可用空地。因此,将煤层气发电与光伏、风力发电相结合建设煤矿微电网具有充分的条件和明显的优势。燃气内燃机相比其他煤层气发电设备具备更强的浓度适应性和更高的热效率<sup>[8]</sup>,本文主要针对以煤层气内燃机为煤层气发电设备,结合风、光发电的煤矿微电网系统。

容量规划是微电网设计的首要环节,对提高系统效益和能源利用率有重要意义。一些国内外专家学者已经对微电网容量优化配置进行了研究,但鲜见有文献结合煤层气发电设计煤矿微电网并研究该种微电网的电源容量优化配置问题。文献[4-7]以微电网成本最低或收益最大作为目标函数,这 2 种目标函数均只涉及经济性的一个方面,不能全面反映综合效益。因此,本文将微电网的收益减去成本所得到的年综合净效益作为目标函数,建立了容量优化配置模型,并使用原理简单、运行速度较快的粒子群算法对模型进行求解,获得分布式电源和储能设备的安装容量。

## 1 微电网结构

含煤层气发电的煤矿微电网由风力发电机组、光伏电池、煤层气内燃机、蓄电池及煤矿负荷组成,如图 1 所示。微电网采用双回线路经公共连接点 (Point of Common Coupling, PCC) 与配电网相连,以保证供电可靠性,使电能可在微电网与配电网之间双向流动。

直流微电网与交流微电网相比具有以下优点:电流变换器数量相对较少,电流变换过程中电能损耗更小;几乎不含无功功率,功率因数大幅提高,线路损耗较低;只需对直流母线电压进行控制即可维

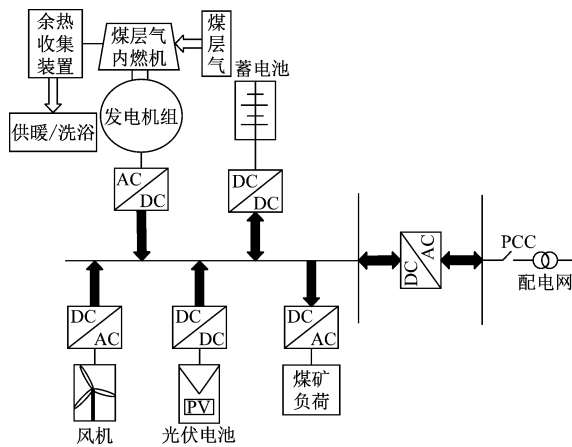


图 1 煤矿微电网结构

Fig. 1 Structure of coal mine microgrid

持微电网功率平衡和平稳运行,控制方式更加简单<sup>[9]</sup>。因此,本文采用直流微电网。

微电网煤层气内燃机在运行中会放出大量高温尾气,产生大量热能。因此,在煤层气发电机组系统上加入余热收集装置,采用热电联供的方式充分利用这部分热量。

## 2 煤矿微电网容量优化配置模型

### 2.1 目标函数

考虑经济性、环保性等,将降低排放产生的环保价值计入效益中,以年综合净效益最大为目标,设立含有成本和收益的目标函数:

$$\max C = C_{sa} + C_{ep} + C_{cog} + C_{sub} - C_{con} - C_{oam} - C_{ch} - C_{ex} \quad (1)$$

式中:  $C$  为年综合净效益;  $C_{sa}$  为安全收益;  $C_{ep}$  为环保收益;  $C_{cog}$  为热电联产收益;  $C_{sub}$  为煤层气开发利用补贴;  $C_{con}$  为年化建设成本;  $C_{oam}$  为运行成本;  $C_{ch}$  为设备更换成本;  $C_{ex}$  为与配电网功率交换费用。

### 2.2 成本数学模型

煤矿微电网的成本包括年化建设成本  $C_{con}$ 、运行成本  $C_{oam}$ 、设备更换成本  $C_{ch}$  和与配电网功率交换费用  $C_{ex}$  等。

(1) 年化建设成本。年化建设成本等于微电网中风力发电机组、光伏电池、蓄电池、煤层气内燃机等设备的初始建设成本乘以资金回收系数<sup>[10]</sup>。考虑到实际工程中煤层气内燃机年运行时间一般为 6 000~8 000 h,本文设内燃机年运行时间为 7 300 h。煤层气内燃机停运时需启用备用机组,因此,内燃机数量要乘以备用系数,根据设置的年运行时间设置备用系数为 7/6。煤层气抽采设备数量与煤层气内燃机数量相关,设微电网每 2 台煤层气内燃机配备 1 台抽采设备进行抽气。微电网年化建设成本为

$$C_{\text{con}} = \frac{r(1+r)^n}{r(1+r)^n - 1} \left( N_{\text{wg}} X_{\text{wg}} C_{\text{wgc}} + N_{\text{pv}} X_{\text{pv}} C_{\text{pvc}} + N_{\text{s}} X_{\text{s}} C_{\text{sc}} + \frac{7N_{\text{gas}} X_{\text{gas}} C_{\text{gasc}}}{6} + \frac{N_{\text{gas}} C_{\text{dra}}}{2} \right) \quad (2)$$

式中: $r$ 为折旧率,设为8%; $n$ 为微电网寿命; $N_{\text{wg}}$ ,  $N_{\text{pv}}$ ,  $N_{\text{s}}$ ,  $N_{\text{gas}}$ 分别为风力发电机组、光伏电池、蓄电池、煤层气内燃机的数量; $X_{\text{wg}}$ ,  $X_{\text{pv}}$ ,  $X_{\text{s}}$ ,  $X_{\text{gas}}$ 分别为风力发电机组、光伏电池、蓄电池、煤层气内燃机的单位容量; $C_{\text{wgc}}$ ,  $C_{\text{pvc}}$ ,  $C_{\text{sc}}$ ,  $C_{\text{gasc}}$ ,  $C_{\text{dra}}$ 分别为风力发电机组、光伏电池、蓄电池、煤层气内燃机、抽采设备的单位建设成本。

(2) 运行成本。微电网中各种 DG 和蓄电池的运行单价不同、数量不同,因此需分别计算运行成本。微电网运行成本主要与 DG 发电量相关,以 1 h 为单个运行区间,全年可分为 8 760 个时段,因此,运行成本计算公式为

$$C_{\text{com}} = \sum_{t=1}^{8760} \sum_{k=1}^K F_{k,\text{om},t} P_{k,t} \quad (3)$$

式中: $K$ 为微电网中设备种类; $t$ 为微电网运行时段; $F_{k,\text{om},t}$ 为第  $k$  种设备在  $t$  时段单位时间运行费用; $P_{k,t}$ 为第  $k$  种设备在  $t$  时段单位时间发电功率。

(3) 设备更换成本。设计微电网工作寿命为 20 a,部分设备寿命小于微电网寿命,因此,需考虑更换设备费用。设备更换成本为

$$C_{\text{ch}} = \frac{r}{(1+r)^n} \sum_{k=1}^K N_{\text{ch},k} X_{\text{ch},k} C_{\text{ch},k} \quad (4)$$

式中: $N_{\text{ch},k}$ ,  $X_{\text{ch},k}$ ,  $C_{\text{ch},k}$ 分别为第  $k$  种需更换设备的数量、单位容量和单位更换费用。

(4) 与配电网功率交换费用。本文设计的微电网为并网型微电网,系统发电功率小于负荷时可从电网购电,发电功率大于负荷时也可向电网售电。功率交换费用计算公式为

$$C_{\text{ex}} = \sum_{t=1}^{8760} (B_{\text{b},t} E_{\text{b},t} - B_{\text{s},t} E_{\text{s},t}) \quad (5)$$

式中: $B_{\text{b},t}$ 和  $B_{\text{s},t}$ 为分别购、售电价; $E_{\text{b},t}$ 和  $E_{\text{s},t}$ 分别为购、售电量。

### 2.3 收益数学模型

煤矿微电网的收益包括利用清洁能源发电带来的环保收益  $C_{\text{ep}}$ 、抽采煤层气带来的安全收益  $C_{\text{sa}}$ 、煤层气内燃机热电联产收益  $C_{\text{cog}}$  及给予煤层气企业的政府补贴  $C_{\text{sub}}$  等。

(1) 环保收益。利用风、光和煤层气等清洁能源发电几乎不产生环境污染,可创造大量环保价值。将风、光、煤层气发电设备发出与大电网等量电能所减少的污染作为其环保收益<sup>[11]</sup>,可表示为

$$C_{\text{ep}} = \sum_{t=1}^{8760} \sum_{m=1}^M (E_{\text{wg},t} + E_{\text{pv},t} + E_{\text{gas},t}) (L_{m,t} C_{m,t}) \quad (6)$$

式中: $M$ 为有害气体种类; $E_{\text{wg},t}$ ,  $E_{\text{pv},t}$ ,  $E_{\text{gas},t}$ 分别为风电、光伏和煤层气内燃机单位时间发电量; $L_{m,t}$ 为生产单位电能产生第  $m$  种有害气体排放量; $C_{m,t}$ 为第  $m$  种单位有害气体的对应的环保成本。

(2) 安全收益。2004 年到 2015 年的煤矿事故统计表明,瓦斯事故属于煤矿主要事故之一,且每起瓦斯事故平均死亡人数远大于其他类型事故<sup>[12]</sup>。主动对瓦斯进行抽采可以大幅降低井下瓦斯浓度,极大地减少瓦斯爆炸与突出概率,产生安全收益。抽采单位煤层气产生的安全收益采用每百万吨煤死亡率和吨煤含煤层气量进行折算:

$$C_{\text{sa}} = \sum_{t=1}^{8760} \frac{DFV_{\text{gas}} N_{\text{gas}}}{S_{\text{gas}}} \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中: $D$ 为百万吨煤死亡率; $F$ 为因煤矿瓦斯事故死亡的单人经济损失; $S_{\text{gas}}$ 为吨煤瓦斯含量; $V_{\text{gas}}$ 为每台煤层气发电机组每小时折纯后耗气量,本文假设其为恒定值。

“安全金字塔”法则指出,在 1 起重大事故背后隐藏着 29 起损失较小的一般事故和 300 起不产生直接经济损失的危险事件及更多对安全产生威胁的行为。可见在直接经济损失背后存在大量未被统计的间接损失,因此,将总安全效益设为直接经济损失的 5 倍<sup>[13]</sup>。

(3) 煤层气内燃机热电联产收益。从燃气内燃机内部排出的尾气携带有大量余热,这些余热可回收,进行二次利用。单台瓦斯发电机组可节约标煤价值为

$$C_{\text{cog}} = \frac{7300(T_2 - T_1)C_{\text{gas}}Q\eta_{\text{re}}P_{\text{coal}}}{V_{\text{coal}}\eta_{\text{coal}}} \quad (8)$$

式中: $T_2$ 为排烟温度; $T_1$ 为经余热回收后的排烟温度; $C_{\text{gas}}$ 为烟道气体在 100~600 °C 的平均定压比热容; $Q$ 为单台发电机组排烟质量; $\eta_{\text{re}}$ 为回收效率; $P_{\text{coal}}$ 为每吨标煤价格; $V_{\text{coal}}$ 为标煤热值; $\eta_{\text{coal}}$ 是标煤热利用效率。

(4) 煤层气开发利用补贴。《关于“十三五”期间煤层气(瓦斯)开发利用补贴标准的通知》中规定,对煤层气开发利用的财政补贴标准从 0.2 元/m<sup>3</sup> 提高到 0.3 元/m<sup>3</sup>,进一步提高了煤层气开发企业积极性。政府补贴计算公式为

$$C_{\text{sub}} = 0.3 \times 8760 V_{\text{gas}} N_{\text{gas}} \quad (9)$$

### 2.4 约束条件

约束条件包括微电网供需功率平衡约束、空间限制下的 DG 数量约束、蓄电池电量上下限与充放电功率约束、微电网与配电网交互约束和可再生能源比例约束等。

(1) 微电网供需功率平衡约束。约束公式为

$$N_{wg}P_{wg} + N_{pv}P_{pv} + N_{gas}P_{gas} + (P_d - P_c) + P_{ex} = P_{load} + P_{out} - P_{cut} \quad (10)$$

式中： $P_{wg}$ 、 $P_{pv}$ 、 $P_{gas}$  分别为风力发电机组、光伏电池和煤层气内燃机实际出力； $P_d$ 、 $P_c$  分别为蓄电池放电功率和充电功率； $P_{ex}$  为微电网与配电网交互功率； $P_{load}$  为微电网负荷； $P_{out}$  为微电网溢出功率； $P_{cut}$  为微电网缺额功率。

(2) DG 数量约束。由于煤矿空间的限制，可再生能源与蓄电池数量存在上限，煤层气内燃机数量受到气源限制，也存在上限，因此数量约束为

$$\begin{cases} N_{wg} \leq N_{wg,max} \\ N_{pv} \leq N_{pv,max} \\ N_{gas} \leq N_{gas,max} \\ N_{sb} \leq N_{sb,max} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $N_{wg,max}$ 、 $N_{pv,max}$ 、 $N_{gas,max}$ 、 $N_{sb,max}$  分别为风力发电机组、光伏电池、煤层气内燃机和蓄电池数量上限。

(3) 蓄电池电量上下限与充放电功率约束。出于延长寿命考虑，蓄电池不能过充过放，否则会导致电池寿命早衰，因此需要设定蓄电池充放电电荷状态上下限。同时蓄电池寿命也受充放电功率影响，每小时充放电率功率不能超过其可用容量的 20%<sup>[14]</sup>，即

$$S_{min} \leq S \leq S_{max} \quad (12)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_c \leq 0.2E_n \\ 0 \leq P_d \leq 0.2E_n \end{cases} \quad (13)$$

式中： $S$  为荷电状态； $S_{max}$ 、 $S_{min}$  分别为蓄电池荷电状态上下限； $E_n$  为蓄电池容量。

(4) 微电网和配电网功率交互约束。微电网与配电网之间功率交互过大会降低配电网的稳定性，同时功率交互也受到微电网与配电网之间联络线传输功率限制，因此，需要对最大交换功率进行约束，功率交换约束可表示为

$$P_{ex} \leq P_{ex,max} \quad (14)$$

式中  $P_{ex,max}$  为微电网与配电网功率交互上限。

(5) 可再生能源比例约束。提高微电网的可再生能源容量占比可以促进可再生能源的充分利用。根据 2017 年发布的《推进并网型微电网建设试行办法》，可再生能源装机容量占微电网总容量比例需大于 50%，则装机容量占比约束可表示为

$$\frac{N_{wg}X_{wg} + N_{pv}X_{pv}}{E_{total}} \geq 0.5 \quad (15)$$

式中  $E_{total}$  为微电网所有 DG 装机容量。

### 3 粒子群算法

微电网容量优化配置是一类较为复杂的动态多元非线性规划问题，常使用智能算法对该类问题进

行求解。粒子群算法是受鸟类捕食行为特征启发的一种智能搜索算法，具有收敛速度快、效率高和控制参数少等优点，已被广泛应用到优化配置问题中。因此，本文使用粒子群算法求解微电网容量优化配置模型的目标函数，流程如图 2 所示。其中，粒子的适应度就是将粒子的位置代入到目标函数中所得到的目标函数值；每个粒子通过个体最优和群体最优 2 个极值不断更新自己的位置和速度，从而产生新一代群体，通过不断迭代找到最优解。

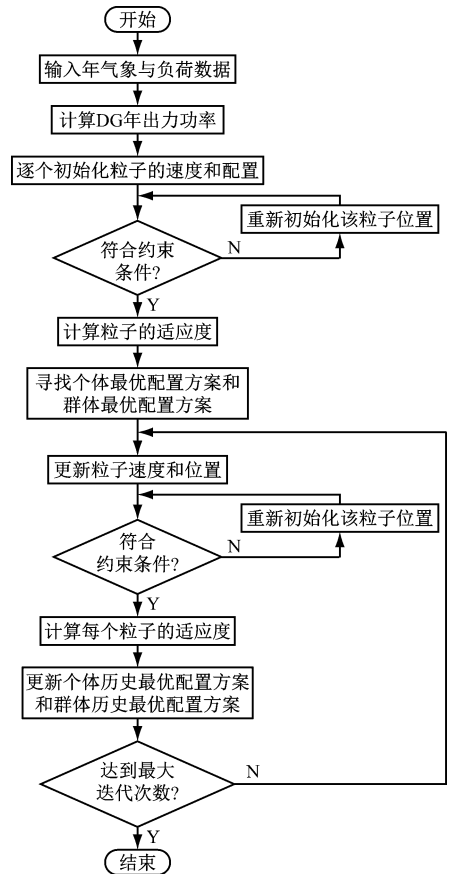


图 2 粒子群算法流程

Fig. 2 Flow of particle swarm optimization algorithm

采用罚函数进行功率交换约束；对于缺电量与功率溢出量，设置较大的惩罚系数，以保证微电网功率平衡；对于可再生能源约束，设置子程序，若在规定次数内跳出循环则满足约束条件，否则将适应度直接设为一极大值，从而淘汰本次结果；对于其他约束，直接规定边界，防止粒子越限。

### 4 算例分析

#### 4.1 参数设置

选取我国北方某煤矿作为算例，负荷为煤矿设备及附属设施，该矿全年总负荷量为 73 635 MW·h，负荷最大值为 15 963.33 kW，年负荷情况如图 3 所示。该矿气源稳定，煤层气储量丰富，并有填矸改造后腾出的原矸石山所占土地、工业广场空地、煤矿建

筑物屋顶及煤矿未使用的发展用地等大量可用空间,具备建设微电网的条件。

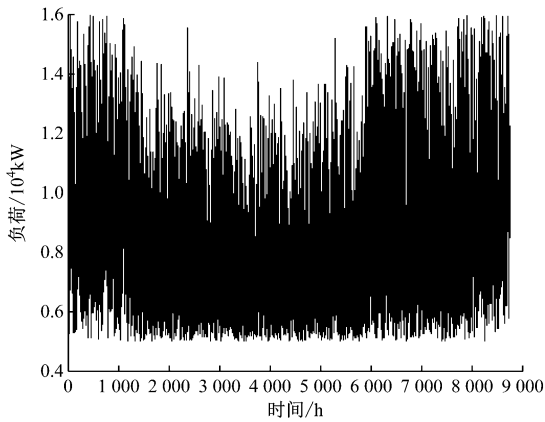


图3 煤矿年负荷数据

Fig. 3 Annual load data of coal mine

该矿负荷呈现白天低、晚上高的特点,同时秋冬两季生产任务重,与春夏两季相比负荷明显增加,且煤层开采难度较大。煤矿设备负荷统计情况见表1。

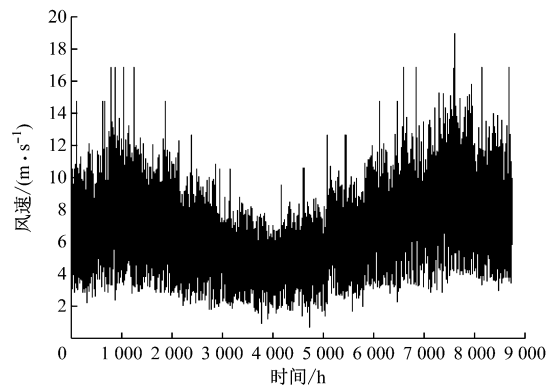
表1 煤矿设备负荷

Table 1 Equipment load of coal mine

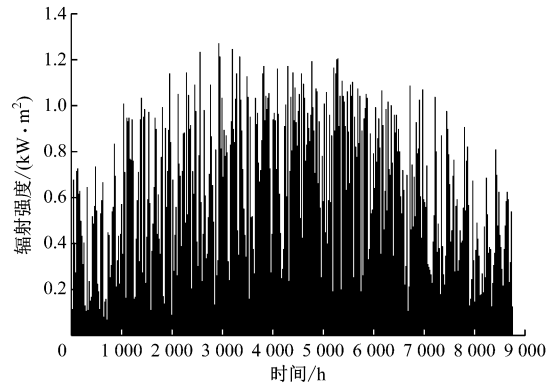
设备名称	电动机额定容量/kW	工作台数	工作容量/kW	视在功率/(kVA)
主井提升机	1 000	1	1 000	1 033.333
副井提升机	800	1	800	880
压风机	380	3	1 140	1 115.217
南风井	800	1	800	842.105
北风井	800	1	800	842.105
主排水泵 (最大涌水量)	750	3	2 250	2 390.625
井下变电所			3 500	5 000
井底车场			450	642.857
机修厂			300	207.692
家属区			300	280
工业广场			900	879.396
排矸系统			800	800
选煤厂			1 050	1 050
总计			14 090	15 963.33

采用 HOMER 软件对该地全年 8 760 h 的气象数据进行仿真,得出全年光照风速数据,如图 4 所示。

按照数学模型,代入年气象数据后得出风力发电机组和光伏电池出力。由于该矿煤层气气源稳定,为充分利用煤层气资源,设煤层气内燃机全年均以额定功率发电。



(a) 风速



(b) 辐射强度

图4 该地年气象数据

Fig. 4 Annual meteorological data of the region

相关参数设置:启动风速为 2.5 m/s,额定风速为 12 m/s,切除风速为 25 m/s;蓄电池充电和放电效率均为 88%,初始蓄电池 SOC 为 0.5,充电时 SOC 上限为 0.9,放电时 SOC 下限为 0.1,更换费用为 1 300 元/(kW·h);煤层气内燃机额定功率为 500 kW,并将煤层气抽采费用计入内燃机运行费用中;微电网与配电网功率交互上限为 8 MW。

大电网污染排放系数和治理费用参数参考文献[6],设备参数见表2。

表2 微电网设备参数

Table 2 Parameters of equipment of microgrid

设备	单机容量	安装成本	运行费用/ (元·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	设备 寿命/a
风机	1 MW	5 400 元/kW	0.029 6	20
光伏电池	1 kW	8 000 元/kW	0.009 6	20
蓄电池	10 kW, 50 kW·h	1 500 元/ (kW·h)	0.009 0	10
内燃机	500 kW	3 320 元/kW	0.400 0	20

煤矿电价按大工业电价执行,算例中使用分时电价。9:00—12:00 和 17:00—22:00 为高峰电价时段,8:00—9:00 和 12:00—17:00 为平时电价时段,其余时间为低谷电价时段。分时电价见表3。

表3 分时电价  
Table 3 Time-sharing electrovalence

时段	买电电价/元	卖电电价/元
高峰电价时段	0.93	0.82
平时电价时段	0.63	0.55
低谷电价时段	0.39	0.35

4.2 最优经济性配置方案分析

经过粒子群算法对目标函数的计算,种群规模设为 50,最大迭代次数设为 100,加速度粒子设为  $C_1 = C_2 = 2$ ,惯性权重<sup>[15]</sup>为

$$W = W_{start} - (W_{start} - W_{end})(q/Y)^2 \quad (15)$$

式中: $W_{start}$ 为惯性权重初始值,取 0.9; $W_{end}$ 为迭代到最大次数时的惯性权重,取 0.5; $q$ 为当前迭代次数; $Y$ 为最大迭代次数。

经仿真得到最优配置方案:风力发电机组 5 台,光伏电池 2 524 块,蓄电池 228 个,煤层气内燃机 14 台,仿真迭代情况如图 5 所示,分析可知微电网产生的年综合效益为 871.7 万元。在此配置方案中,微电网处于“自发自用,余量上网”<sup>[16]</sup>的状态,售电的收入超过购电的费用,微电网与大电网功率交互过程产生了收益。各项成本与收益占比如图 6 所示。

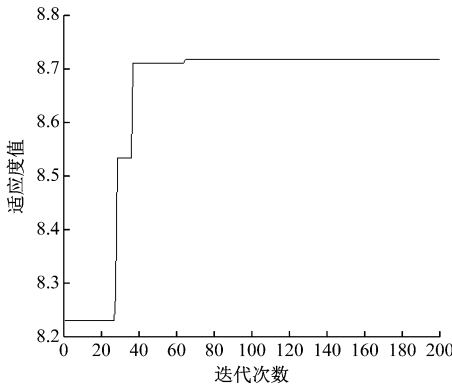


图5 仿真迭代结果

Fig. 5 Result of simulation iterative

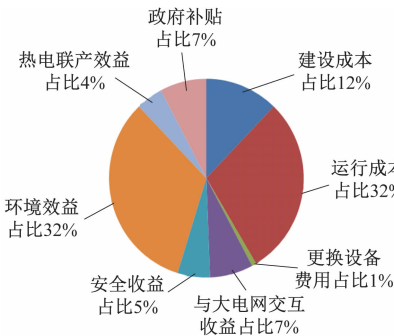


图6 各项成本与效益占比

Fig. 6 Proportion of each cost and benefit

由于风力发电机组、光伏电池和煤层气内燃机发电量较大,所以,使用清洁能源发电带来的环境效

益占效益比重最大。值得注意的是,当去掉这部分环境效益后,微电网将处于亏损状态,因此,可申请 CDM(Clean Development Mechanism, 清洁发展机制)项目以获得环境补贴。与普通柴油机相比,煤层气内燃机产生等量电能的运行费用较高,并且计及了抽采煤层气成本,因此,运行成本在成本中比重最大。

4.3 可再生能源比例对微电网配置方案的影响

由于可再生能源出力不稳定,可再生能源比例与微电网的经济性和可靠性息息相关,并且关系到微电网替代传统化石能源的能力,所以,有必要对可再生能源比例对微电网配置结果的影响进行分析。不同可再生能源比例下,最优配置方案及产生的净效益如图 7 所示,微电网年缺电量与溢出电量如图 8 所示。

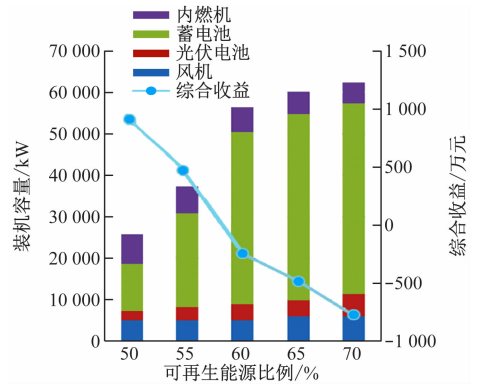


图7 不同可再生能源比例下配置方案

Fig. 7 Configuration scheme under different proportion of renewable energy

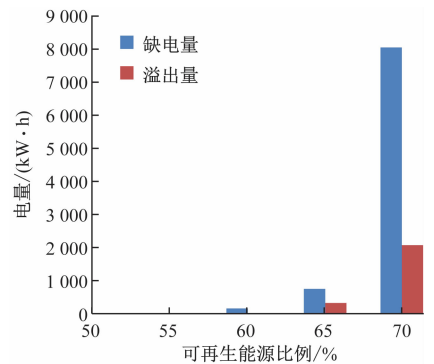


图8 不同可再生能源比例下年缺电量与溢出电量

Fig. 8 Annual power shortage and power spillover under different proportion of renewable energy

从图 7 和图 8 可看出,随着可再生能源比例不断提高,煤层气内燃机装机容量逐渐降低,可再生能源装机容量逐渐增大,综合效益不断降低。同时可以发现,由于该地风力发电相较光伏发电更加契合煤矿昼低夜高的负荷特性,所以,在不同配置方案中风力发电机组装机容量较稳定,均处于较高值。由于可再生能源的波动性与间歇性,随着可再生能源

出力逐渐增加,需要越来越多的蓄电池来维持微电网功率平衡,当可再生能源比例达到0.6时,仅依靠储能装置已经难以保证系统可靠性,并且由于蓄电池的大量增加,系统经济性受到严重影响。

#### 4.4 自发自用率对微电网配置方案的影响

自发自用率决定了微电网发电量用于自身负荷的比例,改变自发自用率会使微电网的供电机制发生变化,也会对微电网经济性产生影响,因此,分析自发自用率对配置结果的影响也有重要意义。研究自发自用率时仍保证可再生能源比例大于50%,不同自发自用率下的最优配置方案及产生的净效益如图9所示,不同自发自用率下微电网年缺电量与溢出电量如图10所示。

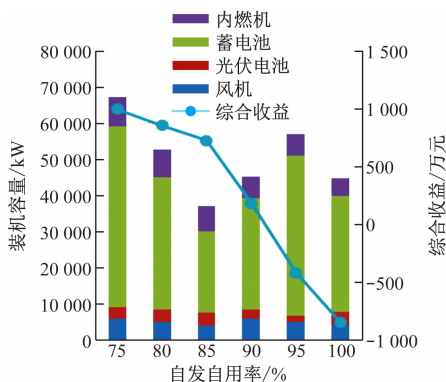


图9 不同自发自用率下配置方案

Fig. 9 Configuration scheme under different proportions of self-production power

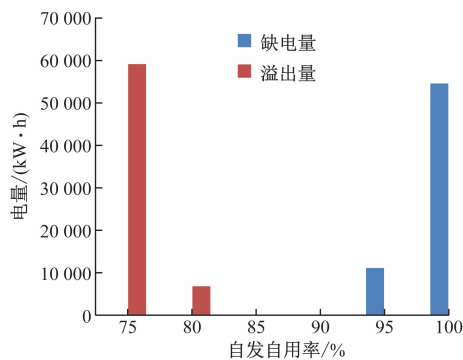


图10 不同自发自用率下年缺电量与溢出电量

Fig. 10 Annual power shortage and power spillover under different proportions of self-production power

从图9和图10可知,当自发自用率为0.85~0.9时,可保证微电网内部功率平衡。自发自用率的降低可以提高微电网综合效益,这说明较低的自发自用率会增加系统的总发电量,大量未被微电网负荷使用的电能被销售给大电网,当自发自用率降低到0.8时,系统出现功率溢出现象。由于可再生能源的波动性,所以当自发自用率较高时微电网无

法满足所有负荷需求,出现缺电现象。

## 5 结论

(1) 给出了煤矿微电网结构,并以煤矿全年综合净效益为目标函数,建立了含煤层气发电的煤矿微电网容量优化配置模型。采用粒子群算法对容量优化配置模型进行求解,获得分布式电源和储能设备的安装容量。

(2) 通过算例仿真得到最优配置方案,在考虑多种收益后,证明建设煤矿微电网可以获得净效益,并且随着微电网技术不断成熟,成本还会进一步下降。

(3) 分析了可再生能源比例和自发自用率对微电网配置结果的影响,结果表明:随着可再生能源比例不断提高,煤层气内燃机装机容量逐渐降低,可再生能源装机容量逐渐增大,综合效益不断降低;较低的自发自用率可以提高微电网综合效益,增加系统的总发电量。

(4) 本文仅基于仍在生产的煤矿研究了微电网配置方案,随着国家过剩产能退出进程的发展,大量落后煤矿被关闭,如何针对这部分已关闭或者废弃的煤矿的特点构建微电网仍有待研究。

### 参考文献(References):

- [1] 胡千庭,孙海涛,杜子健. 煤矿区煤层气(CSM)地面井开发工程实践及利用前景[J]. 煤炭科学技术, 2015,43(9):59-64.  
HU Qianting, SUN Haitao, DU Zijian. Practices and application prospects on development engineering of coal seam methane surface well[J]. Coal Science and Technology, 2015,43(9):59-64.
- [2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7):1893-1904.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(7):1893-1904.
- [3] 刘毅,张禹. 我国煤矿瓦斯防治与抽采利用技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2013,41(增刊2):185-188.  
LIU Yi, ZHANG Yu. Technologies development of coal mine gas control and CBM/CMM utilization[J]. Coal Science and Technology, 2013,41(S2):185-188.
- [4] 王树东,杜巍,林莉,等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(1):129-137.  
WANG Shudong, DU Wei, LIN Li, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage microgrid



- under the demand side response based on cooperative game [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1):129-137.
- [5] 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.
- [6] 荆朝霞,胡荣兴,袁灼新,等.含风/光/抽水蓄能并计及负荷响应的海岛微网优化配置[J].*电力系统自动化*,2017,41(1):65-72.  
JING Zhaoxia, HU Rongxing, YUAN Zhuoxin, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/solar/pumped storage considering demand response [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(1):65-72.
- [7] 张建华,于雷,刘念,等.含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J].*电工技术学报*,2014,29(2):102-112.  
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/storage and seawater desalination load [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2):102-112.
- [8] 樊金璐,吴立新,王春晶,等.中国煤层气发电技术发展和应用现状[J].*洁净煤技术*,2012,18(1):1-4.  
FAN Jinlu, WU Lixin, WANG Chunjing, et al. Development and application status of CBM power generation technologies in China [J]. *Clean Coal Technology*, 2012, 18(1):1-4.
- [9] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].*中国电机工程学报*,2016,36(1):2-17.  
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1):2-17.
- [10] 刘柏良,黄学良,李军.计及可时移负荷的海岛微电网源优化配置[J].*中国电机工程学报*,2014,34(25):4250-4258.  
LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun. Optimal sizing of distributed generation in a typical island microgrid with time-shifting load [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(25):4250-4258.
- [11] 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(增刊1):38-44.  
LIANG Huishi, CHENG Lin, SU Jian. Cost benefit analysis for microgrid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(S1):38-44.
- [12] 孙继平,钱晓红.2004—2015年全国煤矿事故分析[J].*工矿自动化*,2016,42(11):1-5.  
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Analysis of coal mine accidents in China during 2004-2015 [J]. *Industry and Mine Automation*, 2016, 42(11):1-5.
- [13] 李宏军.中国煤矿瓦斯开发利用综合效益评估模型研究[J].*中国煤层气*,2008,5(4):39-42.  
LI Hongjun. Study on evaluation model for comprehensive benefits of CMM development and utilization in China [J]. *China Coalbed Methane*, 2008, 5(4):39-42.
- [14] YANG Hongxing, ZHOU Wei, LU Lin, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm [J]. *Solar Energy*, 2008, 82(4):354-367.
- [15] 郁磊,史峰,王辉,等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析 [M]. 2 版. 北京:北京航空航天大学出版社,2015.
- [16] 窦晓波,袁筒,吴在军,等.并网型风光储微电网容量改进优化配置方法 [J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(3):26-32.  
DOU Xiaobo, YUAN Jian, WU Zaijun, et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(3):26-32.