

# Research on Evaluation Index System of Microgrid Support Capability Based on Importance of Distributed Power

Xiangyu Yang, Xiaofu Xiong, Xin Li

School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing

Email: cqulmm@foxmail.com

Received: Dec. 16<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 31<sup>st</sup>, 2019; published: Jan. 7<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

In recent years, large-scale blackouts in power grid caused by natural disasters such as typhoons and earthquakes have occurred frequently. Considering the controllable source and load in the micro-grid have flexible power control capability, which can support the grid voltage and power. So this paper proposes a new idea: using the micro-grid to support secure power grid by coordinating active and reactive power. Firstly, it studies the active and reactive power characteristics of various controllable source loads and their influence on the system voltage; secondly, establishing the evaluation index of capacity support capability, by considering the power support capability and support time of the micro-grid to the guaranteed power grid; thirdly, proposing the micro-grid planning idea based on active and reactive power coordination, and the micro-grid planning method for improving the micro-grid support capacity; fourthly, establishing the micro-grid optimization model. Considering the constraints of voltage, power flow and power output, realizing the optimal planning of controllable source and load in the micro-grid by using XX algorithm. Finally, a numerical case is given to verify the effectiveness of the proposed micro-grid planning method.

## Keywords

Transformer, Load Characteristics, Health Status, Distribution Network, Short-Term Risk Assessment

# 基于分布式电源重要度的微电网支撑能力评价指标体系研究

杨翔宇, 熊小伏, 李 新

重庆大学电气工程学院, 重庆

## 摘要

近年来,由台风,地震等自然灾害引起的大规模电网停电事故频发。考虑到微电网中的可控源和负荷具有灵活的功率控制能力,可以支持电网电压和功率。因此,本文提出了一个新的想法:使用微电网通过协调有功和无功来支持安全电网。首先,研究了各种可控源负载的有功和无功功率特性及其对系统电压的影响。其次,通过考虑微电网的功率支撑能力和支撑时间,建立容量支撑能力评价指标;第三,提出了基于有功和无功协调的微电网规划思想,提出了提高微电网支撑能力的微电网规划方法。第四,建立微电网优化模型。考虑电压,潮流和功率输出的约束,利用粒子群算法实现微电网可控源和负荷的最优规划。最后,通过数值算例验证了所提出的微电网规划方法的有效性。

## 关键词

保底电网,微电网,分布式电源,优化配置,应急支撑

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国东南沿海地区受气候条件的影响,时常会出现台风、暴雨等极端天气,从而发生大规模的停电事故。为提高该地区的供电可靠性,城市防风抗灾保底电网建设已经成为了一个关注热点。本文中的保底电网是指为防范极端天气对配电网带来的不利影响,以增强城市核心区域的抗风险能力,缩短故障下关键负荷的复电时间为目标,对配电网中的重要负荷、线路、站点进行差异化建设所形成的最小规模网架[1][2]。

针对配电网差异化建设的问题,已经有很多学者进行了研究。文献[3]以重要负荷到保障电源的距离最短和系统内电缆滑比例最高为优化目标,建立了保底电网多目标差异化规划模型;文献[4][5]从可抵抗性,可恢复性和连通性三个方面引入了骨干网架的生存性指标,并以此作为差异化建设的优化目标;文献[6]提出了一种网架中节点和支路重要性的评估方法,并基于此建立了考虑元件重要程度的核心骨干网架搜索模型。

但上述差异化建设中所采用的保障电源主要是同步发电机组,它具有可再生能源利用率低、功率控制能力不灵活等缺点,对重要负荷的支撑能力有限,达不到沿海地区防风抗灾保底电网的建设要求。故本文考虑把风电、光伏、柴油发电机和储能元件等多种电源放在微电网中,对微电网内各种电源的容量进行合理的规划后,用微电网对保底电网进行支撑。

微电网是一种将负荷、分布式电源、储能装置以及监控保护装置整合在一起的现代分布式电力系统。通过与配电网的并网运行,微电网可以实现与配电网之间的功率互换和相互支撑[7]。文献[8][9]中提出了应急微电网的概念,在划分了停电区域后,利用以柴油发电机为代表的应急电源组成应急微电网后为各区域的重要负荷供电,具有一定的启发意义,但是分布式电源的种类还是稍显单一。文献[10]在上文的

基础上加入了储能装置,提出了一种在应急微电网中的柴储协调控制策略,用柴油发电机和储能装置共同支撑配电网的频率和电压,对应急微电网的完善有一定的指导作用。但上述的研究主要是从微电网运行的角度谈对保底电网出现紧急情况下的应急支撑,而极少人有从微电网规划的角度对微电网内电源的容量进行优化配置,从而提升微电网对保底电网的支撑能力。

综上所述,在现有的差异化规划研究中,单一的同步发电机无法达到保底电网对供电可靠性的要求,故在现有的核心骨干网架的基础上,可以并入微电网对保底电网中重要负荷提供应急支撑。此外,为反映微电网对保底电网中重要负荷支撑能力的强弱,引入了保底电网的运营风险指标。基于上述两点,本文在对微电网的容量优化配置问题进行研究时,一方面分析了当保底电网出现故障时,微电网转化为应急电源的可行性;另一方面考虑微电网对重要负荷支撑能力的大小,并以保底电网的运营风险最小为指标,同时考虑到系统的经济性,建立了以微电网对保底电网支撑能力最强的多目标优化模型,对各分布式电源各时段的出力情况进行优化,以此规划出微电网内各分布式电源的容量配置情况。

## 2. 考虑微电网 ESC 的 DG 优化配置模型

### 2.1. 微电网应急支撑能力评价指标体系

#### (1) 经济性指标

在微电网 DG 配置时,应综合考虑微电网全周期成本,即初始投资成本和运行维护成本[11]。在满足保底电网要求的同时,全周期内追求微电网运营收益最高,相应的目标函数为:

$$F_2 = \max \{C_C + C_{OM}\} \quad (1)$$

其中,初期投资成本  $C_C$  考虑了微电网中风电机组、光伏电池、燃气轮机和储能设备的购买和建设成本,其表达式为:

$$C_C = P_{pv} C_{pv}^{in} + P_{wt} C_{wt}^{in} + P_{mt} C_{mt}^{in} + P_{es} C_{es}^{in} \quad (2)$$

其中,  $C_{pv}^{in}, C_{wt}^{in}, C_{mt}^{in}, C_{es}^{in}$  分别是光伏电池、风电机组、燃气轮机和储能设备的初始单位投资成本。

运行维护成本  $C_{OM}$  考虑了风电机组、光伏电池、燃气轮机和储能设备在微电网日常运行的过程中产生的维护费用,其表达式为:

$$C_{OM} = \sum_{n=1}^N [P_{wt} C_{wt}^{op} + P_{pv} C_{pv}^{op} + P_{es} C_{es}^{op} + P_{mt} C_{mt}^{op}] \quad (3)$$

式中,  $C_{pv}^{op}, C_{wt}^{op}, C_{mt}^{op}, C_{es}^{op}$  分别是光伏电池、风电机组、燃气轮机和储能设备的单位运行维护成本。

#### (2) 性能指标

含微电网的保底电网系统的负荷缺电率能够直观地反映微电网应急支撑能力的大小。而微电网等值电源电量、间歇性 DG 可用率、储能持续出力等效时间和微型燃气轮机(或内燃机)的容量占比等指标决定了微电网应急支撑能力的强弱。各指标具体的定义如下:

##### 1) 最大负荷缺电率

保证重要负荷的运行可靠性是保底电网首要目标,因此本文构建了含微电网的保底电网中负荷的最大缺电率来反映微电网对保底电网的应急支撑能力,其定义为 DG 有功出力最大时缺电负荷与评估周期内总负荷的比值。考虑电网保底运行的不可控性,评估周期选择为 1 年,并充分考虑四季 DG 出力特性和负荷需求的不同,选择 4 个季度的典型日代表全年,并将典型日分为 24 个相等的时间段[11] (1 h)。忽略任一时间段内风速,光强,负荷的变化,最大负荷缺电率可以表示如下:

$$f_{ips} = \sum_{s=1}^4 T_s \sum_{t=1}^T \left[ \frac{(\alpha_t P_{wt} + \beta_t P_{pv} + P_{mt} + P_{es} - P_{t,s}^M) + (P_{t,s}^{L,D} - P_{t,s}^L)}{P_{t,s}^L} \right] \quad (5)$$

式中,  $t=1,2,3,\dots,24$ ,  $s=1,2,3,4$ ,  $P_{t,s}^L$  为  $t$  时刻保底电网中的重要负荷,  $P_{t,s}^M$  为  $t$  时刻微电网中的负荷;  $P_{t,s}^{L,D}$  为保底电网中保障电源的发电量,  $P_{wt}, P_{pv}, P_{mt}, P_{es}$  分别是微电网中风电机组, 光伏机组, 燃油发电机和储能的装机容量,  $T$  为一天中时段的个数,  $T_s$  为第  $s$  个季节的天数,  $s$  为季节数,  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  均为(0, 1)之间的系数, 分别表示风电机组和光伏机组在  $t$  时刻的出力情况。

#### 2) 微电网等值电源可靠性

微电网等值电源/负荷年电量[12] (EAE)可反映评价周期  $T$  内微电网与保底电网间电量交换的总体情况, 其指标定义为:

$$\lambda_{EVE} = \int_0^T [P_s(t) - P_L(t)] dt \quad (6)$$

式中:  $P_s(t)$  为微电网内部所有电源有功出力总和的曲线;  $P_L(t)$  为微电网内部总的有功负荷曲线。

可见, 当  $\lambda_{EAE} > 0$  时, 表示  $T$  时间内微电网向主网净输出电量, 反之则为保底电网向微电网净输入电量。因为本项目中微电网的建设目的是给保底电网中重要负荷提供应急支撑, 在微电网规划的过程中, 各微电源在满足微电网自身负荷的前提下会留有足够的功率裕度对保底电网中重要负荷供电, 故只需考虑微电网的等值电源特性而无需考虑其功率特性。

$\lambda_{EVE}$  受到微电网内一次动力分布、DG 的配置、控制策略、功率输出特性和故障停运, 以及负荷特性等因素影响。

#### 3) 微电网间歇性 DG 可靠性

间歇性 DG 可用率(AIDG)指标[13]定义为:

$$\lambda_{AIDG} = \frac{\int_0^T P(t) dt}{P_{DGN} T} \quad (7)$$

式中:  $P(t)$  为 DG 评价周期  $T$  内的出力曲线;  $P_{DGN}$  为 DG 的额定出力。

式(7)的分子表示在  $T$  时间内, 间歇性 DG 在一次能源条件、自身运行和故障特性等因素综合作用下的发电量, 因此, 该指标能直观反映 DG 的发电能力。

间歇性 DG 出力间断率(AIP)指标定义为:

$$\lambda_{AIP} = \Pr\{P_{DG} = 0\} \quad (8)$$

式中:  $P_{DG}$  为 DG 有功出力。

$\lambda_{AIP}$  描述了 DG 出力间断的程度, 反映了孤岛运行时 DG 对微网内负荷可靠供电的能力, 也是影响 SAIFI 和 CAIFI 的重要因素。

可见, 当  $\lambda_{AIDG}$  越大时, 微电网中间歇性 DG 的可用率越强, 即微电网中电源受到一次能源的影响越小, 可以对保底电网中的重要负荷提供更加可靠的支撑。

#### 4) 储能装置持续出力等效时间

储能装置在微网中能补偿间歇性电源的出力波动, 提高微网对负荷供电的可靠性, 而将间歇性 DG 和储能装置组成混合发电系统是一种有效形式[14]。由于不同储能装置的工作机理不同, 为了统一反映储能装置的供电能力, 令其在额定工作电压下的容量为  $E_s$ 。定义储能装置持续出力等效时间(ETTSO)以描述孤岛状态时发电单元维持稳定出力的能力, 其指标定义为:

$$\lambda_{ETSSO} = \frac{E_s}{\sum P_{DGN}} \quad (9)$$

式中:  $\sum P_{DGN}$  为混合发电系统中间歇性 DG 的额定出力之和。

$\lambda_{ETSSO}$  相当于混合发电系统所配置的储能装置按 DG 的额定功率释放电力的等效工作时间, 是影响微网孤岛状态下持续供电能力的重要因素, 也是储能装置优化配置的重要指标。

### 5) 微型燃气轮机(或内燃机)容量占比

微型燃气轮机(或内燃机)具有体积小, 重量轻, 燃料适应性强, 运行稳定可靠, 启动迅速等特点, 适合作为保障电源为负荷提供可靠的供电支撑。故微型燃气轮机(或内燃机)的容量占比可以在一定程度上决定微电网应急支撑能力的强弱, 其指标定义为:

$$\lambda_{mt} = \frac{P_{mt}}{P_{wt} + P_{pv} + P_{mt} + E_s} \quad (10)$$

式中,  $P_{wt}$ ,  $P_{pv}$ ,  $P_{mt}$  和  $E_s$  分别表示风电机组, 光伏电池, 微型燃气轮机(或内燃机)和储能设备的装机容量。

## 2.2. 约束条件

### (1) DG 装机容量约束

考虑用风电机组和太阳能电池板占地面积的限制来约束其最大装机容量。安装风电机组时, 通常需要在盛行风向上机组间相隔 6~10 倍风轮直径, 在垂直于盛行风向上机组间相隔 3~5 倍风轮直径[15]。本文取其平均值, 那么当沿海区域给定面积为  $S$ 、长为  $L$ 、宽为  $W$  时, 其内安装风机的台数应满足:

$$N_{wt} \leq \left[ \frac{L}{8d} + 1 \right] \cdot \left[ \frac{W}{4d} + 1 \right] \quad (11)$$

式中:  $[x]$  为取整,  $d$  为风力发电机的风轮直径。同理, 太阳能电池板的数量应满足:

$$N_{pv} \leq \left[ \frac{S}{S_{pv}} \right] \quad (12)$$

式中,  $S_{pv}$  和  $S_s$  分别为光伏电池和储能设备的占地面积。

### (2) 储能充放电约束

在储能充放电的过程中, 在任意时刻, 储能的剩余容量都必须小于储能的最大容量并大于其最小剩余容量, 故储能应满足如下约束条件:

$$\begin{cases} \frac{G_t^{es, cap} - G_{t-1}^{es, cap} + P_{t,s}^{es-dis}}{\eta} - \eta P_{t,s}^{es-ch} = 0, t > 2 \\ \frac{G_{t=1}^{es, cap} + P_{t,s}^{es-dis}}{\eta} - \eta P_{t=1}^{es-ch} = G_{t=0}^{es, cap} \\ G_{min}^{es, cap} \leq G_t^{es, cap} \leq G_{max}^{es, cap} \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $G_{max}^{es, cap}$  和  $G_{min}^{es, cap}$  分别是储能的最大容量和最小剩余容量;  $G_t^{es, cap}$  为  $t$  时刻储能的剩余容量;  $P_{t,s}^{es-ch}$  和  $P_{t,s}^{es-dis}$  为  $t$  时刻的充放电功率。

### (3) 功率平衡约束

当含微电网的保底电网并网运行时, 微电网中 DG 和保底电网中保障电源输出功率应该等于微电网和保底电网中的重要负荷的总和。功率平衡约束可以表示为:

$$\begin{cases} P_t^M = P_t^{mt} + P_t^{es} + \sum_{r \in N_r} R_t^r + P_t^{L,D} - P_t^{MG-DN} \\ P_h^{MG-DN} > 0 \end{cases} \quad (14)$$

## (4) 微电网与保底电网功率交换约束

微电网和保底电网之间交换的功率  $P_h^{MG-DN}$  应满足:

$$P_h^{MG-DN} \leq P_{h,\max}^{MG-DN} \quad (15)$$

式中  $P_{h,\max}^{MG-DN}$  分别是微电网与保底电网允许交换的最大功率。

## (5) 并网节点电压约束

为了避免微电网注入功率导致保底电网电压波动甚至越限, 微电网接入节点电压应满足:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (16)$$

其中,  $U_{i,\max}$  和  $U_{i,\min}$  分别是微电网并网节点  $i$  电压幅值的上下限。

## 2.3. 求解方法

本文以最大负荷缺电率最小和经济效益指标最大为优化目标。由于上述 2 个目标的量纲不一致, 因此应进行标准化处理[16]。由于装机成本会随着装机容量的增大而增大, 负荷缺电率随着装机容量的增大而减小, 所以按下式进行标准化:

$$f'_{lps} = \frac{\max f_{lps} - f_{lps}}{\max f_{lps} - \min f_{lps}} \quad (17)$$

$$C'_A = \frac{C_A - \min C_A}{\max C_A - \min C_A} \quad (18)$$

进一步, 基于二元对比定权法[17]对两项指标的权重进行计算。首先, 对评价指标成对进行比较, 推出判断矩阵  $U$ :

$$U = (u_{ji})_{n \times n} \quad (19)$$

其中  $u_{ji}$  为评价指标  $s_i$  和  $s_j$  比较得到的数值, 取值为 1~9 之间的奇数, 分别表示为前者指标和后者指标同等重要, 比较重要, 很重要, 非常重要, 绝对重要; 当取值为 1~9 之间的偶数时, 分别表示指标两两相比重要程度在相邻的两奇数之间。则各指标的权重可以通过如下公式计算:

$$W_j = \left( \prod_{i=1}^n u_{ij} \right)^{1/n} \quad (20)$$

根据负荷缺电率指标和成本指标权重的不同, 把它们按各自的比例整合成一个综合指标  $X$ , 然后通过优化算法对该综合指标进行最优化求解, 即可求得最优的微电网电源容量配置结果。

针对考虑保底电网应急支撑的微电网电源容量优化配置的特点, 本文引入基本遗传算法[18]。采用二进制编码来离散自变量, 码长根据离散精度来确定, 交叉方法采用单点交叉, 变异是根据变异概率翻转子代某个位的值。选择策略采用轮盘赌策略, 令  $PP_i = \sum_{j=1}^i p_j$ ,  $PP_0 = 0$ , 其中  $PP_i$  为累计概率,  $p_i$  为个体的选择概率, 其计算公式为:

$$p_i = \frac{fitness(x_i)}{\sum_{i=1}^{NP} fitness(x_i)} \quad (21)$$

式中,  $fitness(x_i)$  为个体的适应度。共轮转  $NP$  次( $NP$  为种群个体数), 每次轮转时, 随机产生 0 到 1 之间的随机数  $r$ , 当  $PP_{i-1} \leq r \leq PP_i$  时选择个体  $i$ 。该方法的搜索从群体出发, 具有潜在的并行性, 可以进行

多个个体的同时比较，保证了计算结果的准确性。

完整的遗传算法的实现步骤：

*Step 1*: 随机产生初始种群，数目为  $N_w$ ，每个个体表示为染色体的基因编码；

*Step 2*: 用轮盘赌策略确定个体的适应度为  $fitness(x_i)$ ，并判断是否符合优化准则；若符合则输出最优解，若不符合，则转向 *Step 3*；

*Step 3*: 依据适应度选择再生个体，适应度高的个体被选中的概率高，适应度低的个体被淘汰；

*Step 4*: 按照单点交叉方法生成新的个体；

*Step 5*: 按照单点变异方法生成新的个体；

*Step 6*: 由交叉和变异产生新一代的种群，回到 *Step 2*。

### 3. 算例分析

下文以 IEEE 标准 33 节点网络验证上述微电网电源优化配置方法的效果，如图 1 所示。其中红色部分的节点、线路和负荷组成了已规划的保底电网网架，节点 15, 23, 25, 27, 29, 31 上装有保障电源，微电网接入节点 20。微电网设计采用风力发电机、光伏电池、燃气轮机和储能蓄电池作为电源，因为资源和安装面积的限制，风电机组和光伏电池的总装机容量不能超过 800 kW。

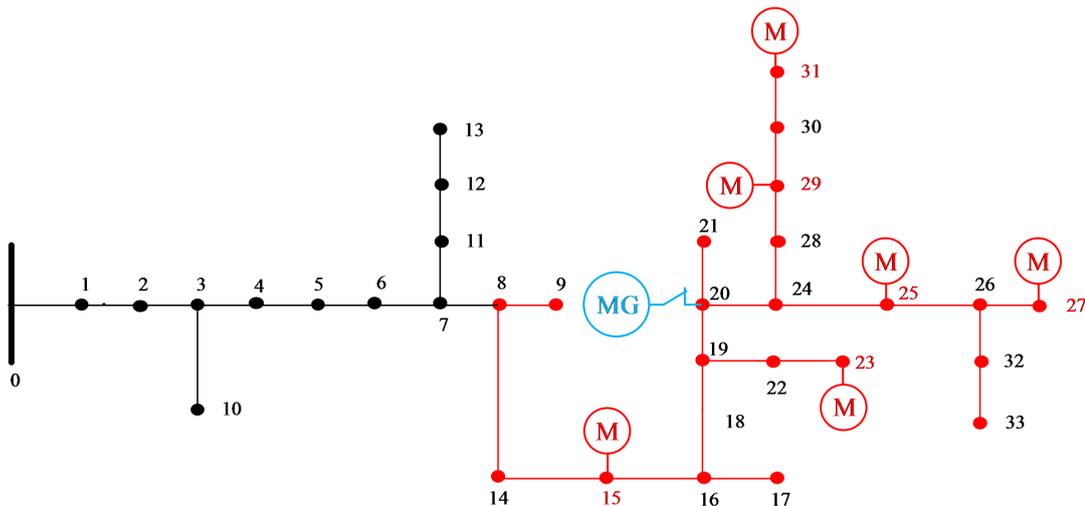


Figure 1. Distribution network 34 node structure diagram

图 1. 配电网 34 节点结构图

保障电源的最大发电量为 1724 kW/h，各个季节典型日每时段的负荷数据如图 2、图 3 所示，所选用的风电、光伏、燃气轮机和储能设备的额定容量、安装费用和运行维护费用如表 1 所示，因为考虑最大负荷缺电率，故  $\alpha$  和  $\beta$  的取值按极端情况处理，即取值为 0。

为了明确微电网电源配置模型的效果，本文从以下 3 种场景进行仿真并分析比较：

场景 1：只考虑系统的经济性，并以经济性最小为目标；

场景 2：只考虑系统的最大负荷缺电率，并以最大负荷缺点率为目标；

场景 3：本文提出的模型，兼顾系统经济性和负荷缺电率。

首先通过上文所述的二元对比定权法分别对经济性指标和可靠性指标进行二元比较重要性定性排序，经过一致性检验判断与调整得到排序一致的二元对比标度矩阵  $E$ ，然后对矩阵  $E$  中的两个参数进行归一化计算，确定的各自的权重如表 2 所示。

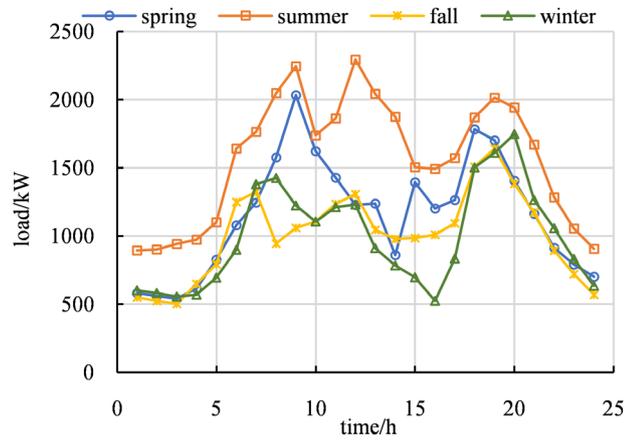


Figure 2. Guaranteed grid load data in a certain area [19]  
 图 2. 某地区保底电网负荷数据[19]

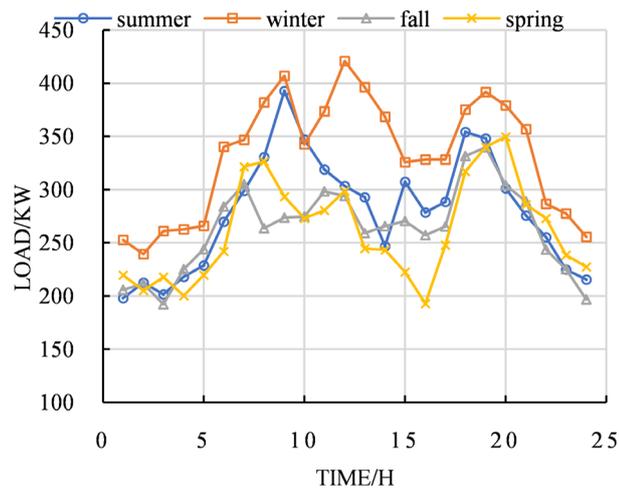


Figure 3. Microgrid load data in a certain area [19]  
 图 3. 某地区微电网负荷数据[19]

Table 1. The parameters of the DG [20]  
 表 1. DG 规格参数[20]

电源种类	额定容量	安装费用	运行维护费用
光伏	200 W	1875 \$/kWh	4 \$/kW/年
风机	35 kW	770 \$/kWh	18 \$/kW/年
燃气轮机	100 kW	812 \$/kWh	12 \$/kW/年
蓄电池	1 kW	84 \$/kWh	1 \$/kWh

Table 2. Weight of each indicator  
 表 2. 各项指标权重值

负荷缺电率 $\omega_1$	经济效益 $\omega_2$
0.63	0.37

在各场景中，按照本文所提的多目标优化模型所得到的最优计算结果如表 3 所示。

**Table 3.** Calculation results for each scene

**表 3.** 各场景的电源优化配置结果

	风电/kW	光伏/kW	燃气轮机/kW	储能/kW
仅考虑经济效益	770	30	600	100
台数/台	22	150	6	100
仅考虑 $f_{ips}$	490	19	300	691
台数/台	14	95	3	691
综合考虑	280	244	800	176
台数/台	8	1220	8	176

从表 3 中可以看出，当仅考虑微电网的成本时，风电和光伏的装机容量达到了其上限值 800 kW，燃气轮机的装机容量也远大于储能设备的装机容量；而当仅考虑含微电网的保底电网系统的负荷缺电率时，燃气轮机和储能设备的总装机容量达到了 991 kW，风电和光伏装机容量的占比明显减小；当综合考虑成本及负荷缺电率时，燃气轮机和储能总的装机容量达到了 976 kW，但相比仅考虑负荷缺电率的情形，燃气轮机装机容量的占比明显增大。此外，风电机组和光伏电池的装机容量较为接近，在微电网正常运行时可以有效地实现风光资源互补，保障保底电网的稳定运行。各方案的成本和性能指标的计算结果如下。

**Table 4.** Calculation results for each scene

**表 4.** 各场景的成本及负荷缺电率

	成本/\$	$f_{ips}$	$\lambda_{EAE} / \text{kW}$	$\lambda_{ETSSO} / \text{h}$	$\lambda_{mi}$	综合指标 $X$
仅考虑成本	$1.941 \times 10^7$	0.127	1500	0.27	0.4	0.957
仅考虑 $f_{ips}$	$2.170 \times 10^7$	0	1500	1.71	0.2	0.899
综合考虑	$2.031 \times 10^7$	0.0065	1500	0.44	0.53	0.845

从表 4 中可以看出，当采用本文优化模型对微电网中 DG 的装机容量进行优化配置后，虽然经济成本比场景中一上升了  $9 \times 10^5$  \$，但是系统的最大负荷缺电率从 12.7% 下降到了 0.65%，保障了含微电网的保底电网系统的运行可靠性。而相比场景中二仅考虑负荷缺电率的情况，微电网的经济成本下降了  $1.39 \times 10^6$  \$，最大负荷缺电率也控制在了保底电网允许的范围内。储能装置持续出力等效时间  $\lambda_{ETSSO}$  在仅考虑经济成本时值很小，而场景 2 和场景 3 中明显增大；燃气轮机容量占比指标  $\lambda_{mi}$  在综合考虑成本和负荷缺电率的情况下也明显大于单独考虑经济成本或负荷缺电率的场景，说明了该模型的有效性。

#### 4. 结论

本文考虑了微电网中的 DG、储能、沿海地区的能源资源和保底电网中重要负荷的复杂匹配关系，在分析各电源功率特性的基础上，采用最大负荷缺电率指标来反映微电网的 ESC，同时考虑了微电网的建设及运营成本，通过对微电网中不同 DG 的装机容量进行优化配置，使得微电网的 ESC 和建设成本达到最优。应用算例表明，经优化后的微电网容量配置方案在保证自身地区的负荷供电之后，能够有效地对保底电网中重要负荷进行有功支撑，保证了它们的供电可靠性，同时节省了经济成本。当前随着微电网中 DG 种类的增加、规模的扩大及电力市场的兴起，通过微电网对自然灾害频发的沿海地区保底电网进行应急支撑的问题，值得进一步研究。

## 参考文献

- [1] 郇嘉嘉, 韦斌, 隋宇, 等. 一种城市防风抗灾保底电网的多目标规划方法[J]. 电网技术, 2018(3): 927-932.
- [2] 董飞飞, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于改进 BBO 优化算法和电网生存性的核心骨干网架构建[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2659-2667.
- [3] Li, J., Ma, X.Y., Liu, C.C., *et al.* (2014) Distribution System Restoration with Microgrids Using Spanning Tree Search. *IEEE Transactions on Power Systems*, **29**, 3021-3029. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2312424>
- [4] 唐忠, 田晨, 资容涛. 多微电网互联系统的储能容量配置[J]. 电测与仪表, 2017, 56(4): 98-111.
- [5] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
- [6] Bahramirad, S., Reder, W. and Khodaei, A. (2012) Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 2056-2062. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2217991>
- [7] 殷桂梁, 李相男, 郭磊, 等. 混合储能系统在风光互补微电网中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 49-53.
- [8] 谭兴国, 王辉, 张黎, 等. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 7-14.
- [9] 杨昆, 周晓健, 夏能弘, 等. 考虑微电网接入下的配电网优化规划[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 58-64 + 75.
- [10] Jiaoyang L, Li G, Shuqiang Y, *et al.* (2018) Optimal Sizing for Multi PV-ESS Microgrids in Distribution Network. *Power System Technology*.
- [11] Zeng, Z., Zhao, R. and Yang, H. (2013) Micro-Sources Design of an Intelligent Building Integrated with Micro-Grid. *Energy and Buildings*, **57**, 261-267. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.018>
- [12] 王蓓蓓, 赵盛楠, 刘小聪, 等. 面向可再生能源消纳的智能用电关键技术分析与思考[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 295-304.
- [13] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网系统容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 16-22.
- [14] Zhou, Y. and Li, H. (2014) Analysis and Suppression of Leakage Current in Cascaded-Multilevel-Inverter-Based PV Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**, 5265-5277. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2289939>
- [15] 刘万琨. 风能与风力发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [16] 焦立新. 评价指标标准化处理方法的探讨[J]. 安徽科技学院学报, 1999, 13(3): 7-10.
- [17] 胡晓通, 刘天琪, 何川, 等. 计及蓄电池损耗特性的微网多目标优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2674-2681.
- [18] 胡林静, 刘凯, 杨明文. 基于粒子群遗传算法的光伏 MPPT 控制研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 23-27.
- [19] 刘娇扬, 郭力, 杨书强, 等. 配电网中多光储微网系统的优化配置方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2806-2815.
- [20] 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.