

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.02.017

考虑源-荷不确定性的水风柴微电网优化配置

张文杰, 吴杰康, 赵俊浩, 叶辉良, 任德江

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:水、风资源和负荷不确定性影响微电网配置方案的经济性和鲁棒性。文中提出一种考虑源-荷不确定性的并网型水/风/柴微电网双层优化规划模型。上层优化为微电网电源容量优化配置模型;下层优化为考虑了小水电、小风电及负荷功率不确定性的微电网优化运行模型,并利用 Seng-Cheol Kang 提出的鲁棒线性优化理论(SCK 型鲁棒线性优化)将不确定性模型转化为确定性模型。然后,结合含精英策略的快速非支配性排序遗传算法(NSGA-II)和混合整数线性规划(MILP)求解微电网的多目标优化配置问题。最后,以韶关地区某实际配电系统为例进行仿真验证,结果表明该模型不仅提高了微电网的鲁棒性,而且保证了配置方案的经济性及供电可靠性。

关键词:水/风/柴微电网;优化配置;鲁棒线性优化;多目标;双层优化

中图分类号:TM727

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)02-0117-10

0 引言

微电网技术是解决大量分布式电源并网的有效方法之一,得到了广泛的应用^[1]。中国的小水电资源丰富,但目前针对含小水电的微电网规划研究甚少,需要加深小水电型微电网的研究。由于小水电和风电功率在年时序上呈互补特性^[2],因此,规划水/风微电网具有较高的可行性。

围绕微电网的优化配置工作,诸多学者开展相关研究,根据运行方式的不同可划分为独立型和并网型2类微电网。目前,对独立型微电网的研究已经取得了许多成果,而对并网型微电网的研究则有待深入。根据目标函数的数量可分为单目标和多目标2种,单目标优化配置方法多以经济成本为目标函数进行电源容量的优化配置^[3-5],如文献[5]提出了2种商业运营模式,考虑了微电网友好并网的条件,通过惩罚系数法将多性能指标结合成1个目标函数进行求解。然而,该方法的惩罚系数难以确定且优化效果一般。相比单目标优化,多目标优化方法更有效且直观地选择多个性能指标^[6-10],如文献[6]建立以微电网经济成本和自供电能力为目标的多目标优化配置模型,并利用含精英策略的快速非支配性排序遗传算法(NSGA-II)求解。

上述文献从不同的角度研究了并网型微电网容量优化配置的方法,但未考虑可再生能源和负荷功率的不确定性。目前,针对微电网不确定性的研究方法主要有随机规划、场景分析法和鲁棒优化理

论。文献[11-13]通过拉丁超立方采样法生成场景,并利用场景缩减技术对微电网容量配置方案进行优化。但场景分析法和随机规划依赖概率密度函数的拟合,可能出现优化模型不准确的问题。文献[14-16]建立了微电网两阶段鲁棒优化配置模型,该方法虽然考虑了可再生能源和负荷的不确定性,并保证了微电网规划与运行的耦合关系,但无法实现多目标优化。

因此,文中提出一种考虑源-荷不确定性的微电网多目标优化配置方法。首先,搭建微电网模型,构建源-荷不确定集来表示可再生源和负荷功率的不确定性。然后,建立微电网双层优化规划模型,其中上层优化为微电网电源容量配置模型,下层优化是计及源-荷不确定性的微电网优化运行模型。随后,通过 Seng-Cheol Kang 提出的鲁棒线性优化方法(SCK 型鲁棒线性优化)将不确定性模型转化为确定性模型,并结合 NSGA-II 和混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)求解出最优配置方案。最后,以韶关地区某配电系统为例进行仿真验证,所提模型能有效提高微电网的鲁棒性,保证微电网的可靠性和经济性。

1 并网型水/风/柴微电网

1.1 微电网结构

微电网是具有灵活控制能力的小型发配电系统,内部具有多种可控微源,通过有效的控制手段实现高比例可再生能源发电、友好并网等功能。在丰水期,小风电处于枯风期;在枯水期,小风电在盛风期,可见小水电与风电在年时空分布上呈互补特性。因此,文中组建水/风微电网来提高可再生能

收稿日期:2019-09-24;修回日期:2019-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51567002);广东省应用型科技研发专项资金项目(2016B020244003)

源利用率,具体结构如图 1 所示。为了降低储能设备频繁充放电造成的损耗,文中将储能系统用于日前的经济调度,而可再生能源发电系统、辅助发电系统和联络线功率为实时可控,用于平抑微电网的功率波动,从而保证微电网具有良好的鲁棒性。

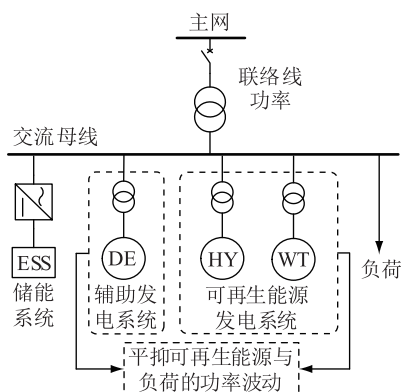


图 1 水/风/柴微电网结构
Fig.1 Structure of microgrid

1.2 微电源模型

1.2.1 小水电出力模型

目前小水电的类型多为径流式水电站,由于电站的水库调节能力弱,发电机组出力主要与每时刻的发电来水量以及水头高度有关^[17]。

$$P_{HY}(t) = \alpha Q_C(t)H(t) \quad (1)$$

式中: $Q_C(t)$ 为 t 时刻的发电来水量(即水流量); $H(t)$ 为 t 时刻的水电站净水头高度; α 为水电站出力系数,其大小根据水电站的规模而定,由文献^[17]可知,对于小水电站该系数取值^[6,8]。

1.2.2 小风电出力模型

风力发电机的输出功率与风速有关,其出力模型可用分段函数来表示。

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v(t) < v_{ci}, v(t) > v_{co} \\ P_{WTN} \frac{v(t)^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} & v_{ci} \leq v(t) < v_r \\ P_{WTN} & v_r \leq v(t) \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{ci} , v_{co} , v_r 分别为小风电机组的切入、切出及额定风速; P_{WTN} 为风电机组的额定功率。

1.2.3 柴油发电机出力模型

柴油发电机的油耗量与输出功率的关系可由一次函数的形式来描述。

$$V(t) = aS_{DE} + bP_{DE}(t) \quad (3)$$

式中: $V(t)$ 为柴油机的耗油量; S_{DE} , $P_{DE}(t)$ 分别为柴油机的额定功率和在 t 时刻的输出功率; a, b 为机组燃料消耗曲线系数。

2 源-荷不确定集构造

由于微电网中小水电、小风电的输出功率具有随机性、间歇性,并且负荷功率具有不确定性,在微电网容量配置中需要充分考虑可再生能源和负荷不确定性的影响,保证微电网能应对不确定性场景。因此,文中通过构造可再生能源和负荷功率不确定集来描述小水电、小风电及负荷功率的不确定性,建立鲁棒线性优化模型。

首先将可再生能源发电功率与负荷功率的差值称为源-荷不平衡功率 P_{unbal} ,表达式如下:

$$P_{unbal}(t) = P_{HY}(t) + P_{WT}(t) - P_L(t) \quad (4)$$

式中: $P_L(t)$ 为负荷功率。由于小水电、小风电和负荷功率均存在最大值、最小值,故根据式(4)可计算得源-荷不平衡功率的上限值和下限值。

$$\begin{cases} P_{unbal}^{max}(t) = P_{HY}^{max}(t) + P_{WT}^{max}(t) - P_L^{min}(t) \\ P_{unbal}^{min}(t) = P_{HY}^{min}(t) + P_{WT}^{min}(t) - P_L^{max}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{HY}^{max}(t)$, $P_{WT}^{max}(t)$, $P_L^{max}(t)$ 分别为在 t 时段内小水电、小风电和负荷功率的最大值; $P_{HY}^{min}(t)$, $P_{WT}^{min}(t)$, $P_L^{min}(t)$ 分别为在 t 时段内小水电、小风电和负荷功率的最小值。

源-荷不平衡功率的计算包含了小风电、小水电以及负荷功率,并且该功率值具有上限和下限,即有区间范围。因此,可以构造出源-荷不平衡功率的不确定集,用以描述微电网中的不确定性因素。将该不确定集称为源-荷不确定集,表达如下:

$$\begin{cases} P_{unbal}(t) = \hat{P}_{unbal}(t) + \Delta P_{unbal}(t) \\ \hat{P}_{unbal}(t) = \hat{P}_{HY}(t) + \hat{P}_{WT}(t) - \hat{P}_L(t) \\ \Delta P_{unbal}(t) \in (P_{unbal}^{min}(t) - \hat{P}_{unbal}(t), \\ P_{unbal}^{max}(t) - \hat{P}_{unbal}(t)) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{P}_{HY}(t)$, $\hat{P}_{WT}(t)$, $\hat{P}_L(t)$, $\hat{P}_{unbal}(t)$ 分别为小水电、小风电、负荷和源-荷不平衡功率的预测值; $\Delta P_{unbal}(t)$ 为源-荷不平衡的波动功率,通过式(5)可计算出该变量的取值范围。

综上可得微电网内不确定性功率的表达,代入基于鲁棒线性优化理论的双层优化规划模型中求解,所得最优配置方案可应对源-荷不确定集内的所有不确定性场景,具有较好的鲁棒性。

3 双层优化规划模型

微电网规划与其运行方式具有耦合关系,两者相互影响、相互作用。因此,文中提出双层优化规划模型,上层为微电网容量优化层,下层为微电网

运行优化层。

3.1 上层微电网容量优化模型

上层优化是以微电网总投资成本、年弃电率及可再生能源年发电量为目标的电源容量配置模型。文中以丰水期和枯水期2个季度的典型日来代表全年,该方法获取数据方便,符合实际情况。

3.1.1 微电网总投资成本函数

微电网总投资成本函数 F_1 主要由年等值设备投资费用 C_{inv} 、年等值置换费用 C_{rep} 、设备年维护费用 C_{om} 以及微电网年运行费用 C_{opt} 组成。

$$\min F_1 = \min(C_{inv} + C_{rep} + C_{om} + C_{opt}) \quad (7)$$

(1) 年等值设备投资费用。

$$C_{inv} = f_{CRF} \left(\sum_{j=1}^3 S_j^{DG} C_{inv,j} + S_{ESS} C_{inv}^{ESS} \right) \quad (8)$$

其中:

$$f_{CRF} = \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \quad (9)$$

式中: S_j^{DG} 为微电网配置第 j 种微源的容量,分别是小水电、小风电和柴油发电机; S_{ESS} 为储能容量; $C_{inv,j}$ 为第 j 种微源单位容量价格; C_{inv}^{ESS} 为蓄电池单位容量价格; f_{CRF} 为资金回收系数; r 为折现率; Y 为项目寿命周期。

(2) 年等值置换费用。微电网中储能使用寿命有限,需要进行周期性替换,置换成本表达式如下:

$$C_{rep} = f_{CRF} \left(\frac{Y}{L_{ESS}} - 1 \right) S_{ESS} C_{inv}^{ESS} \quad (10)$$

式中: L_{ESS} 为储能实际使用寿命,可利用总量吞吐法求得^[18]。

(3) 微电网年运行费用。

$$C_{opt} = \sum_{s=1}^2 (C_{ex,s} + C_{fuel,s} + C_{dump,s} + C_{en,s}) T_s \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} C_{ex,s} = \sum_{t=1}^{24} p_{buy,t} P_{buy,s}(t) - p_{sell,t} P_{sell,s}(t) \\ C_{fuel,s} = c_{fuel} \sum_{t=1}^{24} a P_{DE}^{max} + b P_{DE,s}(t) \\ C_{dump,s} = \sum_{t=1}^{24} \mu P_{dump,s}(t) \\ C_{en,s} = \sum_{k=1}^3 e_k \zeta_k E_{em,s} \end{cases} \quad (12)$$

式中: T_s 为微电网在第 s 季度的典型日天数; $C_{ex,s}$, $C_{fuel,s}$, $C_{dump,s}$, $C_{en,s}$ 分别为微电网第 s 个典型日的电能交换成本、燃料成本、弃电成本和环保成本; $P_{buy,s}(t)$, $P_{sell,s}(t)$ 分别为在第 s 季度的 t 时段微电网购、售电功率; $P_{dump,s}(t)$ 为在第 s 季度的 t 时段内

水、风机组弃电功率; $p_{buy,t}$, $p_{sell,t}$ 分别为 t 时段微电网购、售电价格; c_{fuel} 为单位燃料价格; μ 为机组弃电的惩罚系数; $E_{em,s}$ 为柴油机总发电量; ζ_k , e_k 分别为产生第 k 种污染物的排放系数和治理成本。表1为柴油发电机环保成本数据。

表1 柴油发电机环保成本参数

Table 1 Parameters of environmental protection cost

污染物类型	$\zeta_k / [g \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	$e_k / [元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$
SO ₂	0.206	14.842
NO _x	9.89	62.964
CO ₂	649	0.21

(4) 设备年维护费用。

$$C_{om} = \sum_{j=1}^3 K_{DG,j} S_j^{DG} + K_{ESS} S_{ESS} \quad (13)$$

式中: $K_{DG,j}$, K_{ESS} 分别为第 j 种微源和储能的单位容量维护费用。

3.1.2 年弃电率函数

在微电网规划中,合理配置电源容量可以减少可再生能源的浪费及损失,文中构建年弃电率函数 F_2 来保证可再生能源的利用率。

$$\min F_2 = \min \frac{\sum_{s=1}^2 \left(\sum_{t=1}^{24} P_{dump,s}(t) \right) T_s}{E_{hy} + E_{wt}} \quad (14)$$

式中: E_{hy} , E_{wt} 分别为小水电和小风电的年发电量。

3.1.3 可再生能源年发电量函数

为充分利用水、风发电资源,提高清洁能源的发电比例,以可再生能源年发电量 F_3 为目标函数。

$$\max F_3 = \max \sum_{s=1}^2 \left(\sum_{t=1}^{24} P_{WT,s}(t) + P_{HY,s}(t) \right) T_s \quad (15)$$

3.1.4 上层模型约束条件

(1) 微源容量约束。考虑场地面积及负荷水平的限制,并参考《分布式电源接入电网技术规定》规定^[19],微源安装容量受到限制:

$$0 \leq S_j^{DG} \leq S_{DG,j}^{max} \quad (16)$$

式中: $S_{DG,j}^{max}$ 为第 j 种微源的最大安装容量。

(2) 电压偏移约束。

$$(1 - \delta_{max}) V_N \leq V_i \leq (1 + \delta_{max}) V_N \quad (17)$$

式中: V_i 为节点 i 的电压幅值; V_N 为节点额定电压; δ_{max} 为节点电压最大偏移百分比。

(3) 线路传输功率约束。

$$S_l \leq S_l^{max} \quad l \in [1, N_l] \quad (18)$$

式中: S_l , S_l^{max} 分别为第 l 条支路的功率及其最大传输功率; N_l 为系统的总支路数。

(4) 自供电率约束。微电网是一个高度自治、自给自足的小型发配电系统,不仅可以与主网相连,提供电能支持,而且具有孤网运行的能力。因此,文中以微电网的自供电量占负荷总量的比率来评价供电可靠性。

$$\beta = 1 - \left(\frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{lack}}(t)}{\sum_{t=1}^T P_L(t)} \right) \geq \beta_{\text{min}} \quad (19)$$

式中: $P_{\text{lack}}(t)$ 为微电网缺额功率,并网运行时该值等于购电功率 $P_{\text{buy}}(t)$; β_{min} 为最小允许的自供电系数,取值范围为 $[0, 1]$,当取值接近 1 时,微电网具有较好的自供电能力,在并网或孤网状态下都能为网内负荷提供可靠的电能。

3.2 下层微电网日运行优化模型

3.2.1 微电网日运行成本函数

下层模型是在源-荷不确定性场景下,以微电网日运行成本最小为目标,求解微电网的运行状态。

$$\min(C_{\text{ex}} + C_{\text{fuel}} + C_{\text{dump}} + C_{\text{en}}) \quad (20)$$

3.2.2 下层模型约束条件

(1) 系统功率平衡约束。

$$P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{unbal}}(t) + P_{\text{DE}}(t) + P_{\text{dis}}(t) - P_{\text{ch}}(t) - P_{\text{dump}}(t) \quad (21)$$

其中:

$$\begin{cases} P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{sell}}(t) - P_{\text{buy}}(t) \\ P_{\text{grid}}(t) = \hat{P}_{\text{grid}}(t) + \Delta P_{\text{grid}}(t) \\ P_{\text{DE}}(t) = \hat{P}_{\text{DE}}(t) + \Delta P_{\text{DE}}(t) \\ P_{\text{dump}}(t) = \hat{P}_{\text{dump}}(t) + \Delta P_{\text{dump}}(t) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{\text{grid}}(t)$ 为联络线功率; $\hat{P}_{\text{DE}}(t)$, $\hat{P}_{\text{dump}}(t)$, $\hat{P}_{\text{grid}}(t)$ 分别为日前经济调度计划的柴油机出力、水/风机组弃电功率和联络线功率; $\Delta P_{\text{grid}}(t)$, $\Delta P_{\text{DE}}(t)$, $\Delta P_{\text{dump}}(t)$ 分别为联络线、柴油机和在水/风机组应对实时源-荷不平衡功率的调节量。

(2) 储能运行约束。文中的储能系统以蓄电池为主,为避免蓄电池因大电流充放而缩短使用寿命,需对充放电功率进行限制。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq u_{\text{ESS}}(t) P_{\text{ESS}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq (1 - u_{\text{ESS}}(t)) P_{\text{ESS}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (23)$$

蓄电池的荷电状态与充放电功率的关系为:

$$\begin{cases} S_{\text{soc}}(t) = S_{\text{soc}}(t-1) + \frac{\eta_d P_{\text{dis}}(t)}{S_{\text{ESS}}} - \frac{P_{\text{ch}}(t)}{\eta_c S_{\text{ESS}}} \\ S_{\text{soc_min}} \leq S_{\text{soc}}(t) \leq S_{\text{soc_max}} \\ S_{\text{soc}}(t_0) = S_{\text{soc}}(t_T) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{\text{ch}}(t)$, $P_{\text{dis}}(t)$ 分别为充电功率和放电功率;

$P_{\text{ESS}}^{\text{max}}$ 为最大充放电功率; $S_{\text{soc}}(t)$ 为蓄电池的荷电状态; $S_{\text{soc_max}}$, $S_{\text{soc_min}}$ 分别为荷电状态的上、下限值; η_c , η_d 分别为蓄电池充、放电效率; $u_{\text{ESS}}(t)$ 为 0-1 变量,表示储能运行状态; t_0 , t_T 分别为调度的始末时刻。为保证微电网调度的连续性,要求始末时刻的荷电状态相等。

(3) 联络线功率约束。

$$-P_{\text{buy}}^{\text{lim}}(t) \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{M2G}}^{\text{lim}}(t) \quad (25)$$

式中: $P_{\text{buy}}^{\text{lim}}(t)$ 为 t 时段的微电网最大购电功率; $P_{\text{M2G}}^{\text{lim}}(t)$ 为微电网在 t 时段向主网倒送功率的最大值,文中通过灵敏度法计算^[9]。

(4) 柴油发电机运行约束。

$$0 \leq P_{\text{DE}}(t) \leq u_{\text{DE}}(t) S_{\text{DE}} \quad (26)$$

式中: $u_{\text{DE}}(t)$ 为 0-1 变量,表示柴油机的运行状态。

(5) 水/风机组弃电功率约束。

$$0 \leq P_{\text{dump}}(t) \leq u_{\text{dump}}(t) P_{\text{dump}}^{\text{max}} \quad (27)$$

式中: $P_{\text{dump}}^{\text{max}}$ 为单位时段内最大弃电功率; $u_{\text{dump}}(t)$ 为 0-1 变量,表示机组弃电状态。

(6) 可调变量与随机变量的对应关系。文中引入微电网联络线功率和电源机组出力的调节系数,并按线性分配策略来应对源-荷功率波动^[20],减小对主网的影响,保证了系统稳定运行。

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{grid}}(t) = R(t) \Delta P_{\text{unbal}}(t) \\ \Delta P_{\text{dump}}(t) = D(t) \Delta P_{\text{unbal}}(t) \\ \Delta P_{\text{DE}}(t) = -M(t) \Delta P_{\text{unbal}}(t) \\ R(t), M(t), D(t) \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

此外,有等式约束:

$$R(t) + M(t) + D(t) = 1 \quad (29)$$

式中: $R(t)$, $M(t)$, $D(t)$ 分别为微电网联络线、柴油发电机和水/风机组在 t 时段的功率分配系数。式(28)是保证全部可调变量用以应对可再生能源和负荷的波动功率。

4 模型转换与求解

4.1 模型转换

文中采用 SCK 型鲁棒线性优化方法来解决不确定性问题^[21]。

对于含随机参数的线性优化模型,表示如下:

$$\begin{cases} \min & \mathbf{c}x \\ \text{s.t.} & \mathbf{A}x \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{l} \in \mathbf{R}^n$ 分别为决策变量及其取值的上下限; $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^n$ 是目标函数的系数向量; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$, $\mathbf{b} \in \mathbf{R}^m$ 均为约束条件的系数矩阵。

设随机变量只在约束条件的系数矩阵中出现,

并将 \mathbf{A} 的第 i 行中随机变量的集合记为 J_i , 并以 $|J_i|$ 表示该集合的个数。根据 SCK 的思想, 对第 i 个不等式引入鲁棒性指标 $\Gamma_i (\Gamma_i \leq |J_i|)$ 。记 a_{ik}^U , a_{ik}^L , \bar{a}_{ik} 分别为系数矩阵 \mathbf{A} 中元素 a_{ik} 的上、下限值及均值, 并令 $t_{ik}^B = \bar{a}_{ik} - a_{ik}^L$ 和 $t_{ik}^F = a_{ik}^U - \bar{a}_{ik}$, 则 \mathbf{A} 中第 i 行随机变量矢量 \mathbf{a}_i 与鲁棒性指标 Γ_i 之间的集合关系可表示为:

$$R_i = \{ \mathbf{a}_i \mid \mathbf{a}_i \in [\bar{\mathbf{a}}_i - \beta_{ik} t_{ik}^B, \bar{\mathbf{a}}_i + \beta_{ik} t_{ik}^F] \},$$

$$0 \leq \beta_{ik} \leq 1, \sum_{k \in J_i} \beta_{ik} \leq \Gamma_i \quad (31)$$

式中: β_{ik} 为 a_{ik} 的权重系数。引入对偶变量 z_i 和 p_{ik} , 通过拉格朗日对偶变换将含随机变量的线性优化模型(30)转化为 SCK 鲁棒对等模型:

$$\begin{cases} \min \mathbf{c}\mathbf{x} \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} + \Gamma_i z_i + \sum_{k \in J_i} p_{ik} \leq b_i \quad i = 1, \dots, m \\ & z_i + p_{ik} \geq t_{ik}^F x_k \quad i = 1, \dots, m, \forall k \in J_i \\ & z_i + p_{ik} \geq -t_{ik}^B x_k \quad i = 1, \dots, m, \forall k \in J_i \\ & z_i \geq 0, p_{ik} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m, \forall k \in J_i \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{cases} \quad (32)$$

最终, 含随机变量模型转化为确定性的优化模型, 具体转换过程参见文献[22]。

由于下层优化模型的约束式(25)一式(27)考虑了源-荷不确定性, 故该3式需要转化为确定性模型。下面以式(26)为例说明模型转换。

计及随机变量后, 将式(26)右不等式移项有:

$$\hat{P}_{DE}(t) - u_{DE}(t) P_{DE}^{\max} + \Delta P_{DE}(t) \leq 0 \quad (33)$$

将式(28)的可调变量代入上式, 则变形为:

$$\hat{P}_{DE}(t) - u_{DE}(t) P_{DE}^{\max} - M(t) \Delta P_{unbal}(t) \leq 0 \quad (34)$$

式中: $\Delta P_{unbal}(t)$ 为随机参数, 由第2章可知参数范围为 $[P_{unbal}^{\min}(t) - \hat{P}_{unbal}(t), P_{unbal}^{\max}(t) - \hat{P}_{unbal}(t)]$; $\hat{P}_{DE}(t)$, $u_{DE}(t)$, $M(t)$ 为决策变量, 分别表示柴油机的预输出功率、运行方式以及调节系数。引入微电网运行的鲁棒性指标 Γ_i , 表示微电网在调度周期内每个时段的鲁棒性程度。根据推导式(32), 可将不等式(34)转化为 SCK 型鲁棒对等模型。

$$\begin{cases} \hat{P}_{DE}(t) - u_{DE}(t) P_{DE}^{\max}(t) + \Gamma_i z(t) + p(t) \leq 0 \\ z(t) + p(t) \geq -M(t) (P_{un}^{\max} - \hat{P}_{un}(t)) \\ z(t) + p(t) \geq M(t) (\hat{P}_{un}(t) - P_{un}^{\min}) \\ z(t) \geq 0, p(t) \geq 0 \end{cases} \quad (35)$$

以类似方式可将不等式约束式(25)一式(27)转化为 SCK 型鲁棒对等模型, 结合约束式(21)一式(24)和等式约束式(29)构造线性规划模型。

4.2 模型求解

4.2.1 双层优化规划求解

文中结合 NSGA-II 与 MILP 两类方法求解双层优化规划问题。下层微电网优化运行模型采用 MILP 求解微电网在每个调度周期(24 h)的运行状态, 并将结果反馈至上层, 上层模型整合全局信息。通过 NSGA-II 算法求解最优配置方案, 如此反复迭代。最后, 完成整个微电网容量配置工作, 具体如图2所示。

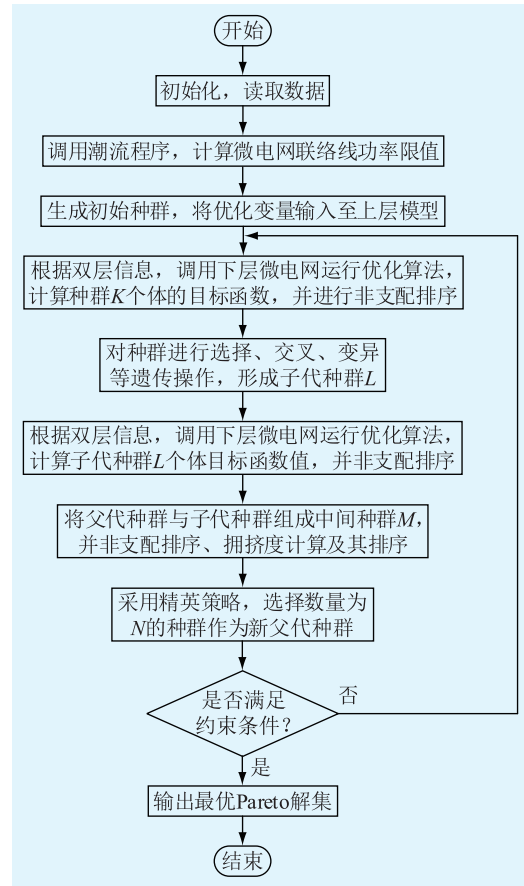


图2 双层优化规划流程

Fig.2 Solution steps

4.2.2 基于 TOPSIS 法的方案选择

文中采用 TOPSIS 法从最优 Pareto 解集中选择满意的配置方案^[23]。挑选出接近最优解同时远离最劣解的方案。具体决策流程如图3所示。

5 算例仿真与分析

5.1 算例概述

文中以广东韶关某实际配电系统作为验证算例, 拓扑结构如图4所示。由于地区小水电资源充

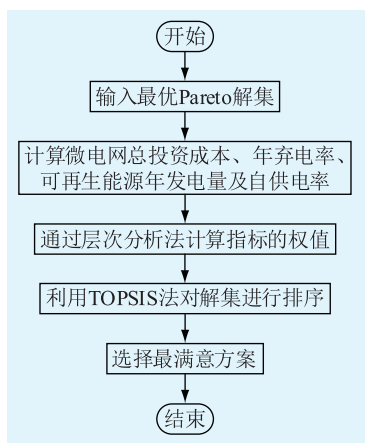


图3 方案选择的流程

Fig.3 Flow chart of scheme selection

裕且负荷需求量大,故在节点6处规划水/风/柴微电网,该节点最大负荷为1.114 MW。算例取丰水期和枯水期的2个典型日进行仿真,其中水流量、风速和负荷具体参数如图5所示,备选电源的成本费用参数见表2,分时电价的数据见表3。配电系统的额定电压为10.5 kV,最大电压偏移量为5%。微电网调度周期为24 h,仿真计算步长为1 h,项目寿命周期为20 a。

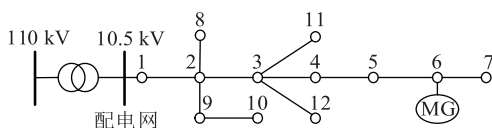


图4 韶关某实际配电系统

Fig.4 Distribution system of Shaoguan

表2 微电网电源参数

Table 2 Parameters of microgrid equipment

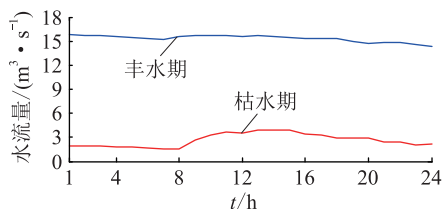
微源类型	投资成本/ (万元·kW ⁻¹)	年运行维护成本/ (元·kW ⁻¹)	置换成本/ [万元· (kW·h) ⁻¹]
小风电	1	100	
小水电	1.2	157	
柴油发电机*	1.6	0.088	
蓄电池*	0.35	0.05	0.35

* 蓄电池投资成本单位为万元/(kW·h);柴油发电机和蓄电池的年运行维护成本单位为元/(kW·h)

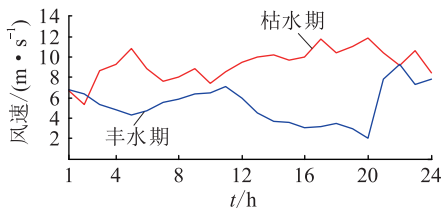
微电网系统仿真参数:蓄电池初始荷电状态为0.6,运行范围为[0.2,0.95];最大弃电功率为水/风机组输出功率的20%,弃电成本为0.5元/(kW·h);最小自供电系数为90%;遗传算法中的种群个数为50,迭代次数为100。

5.2 不同情景下的微电网配置方案分析

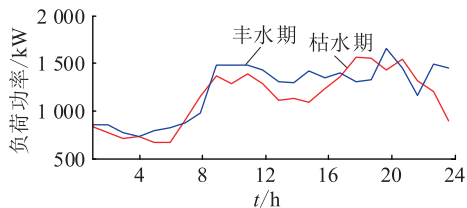
为研究可再生能源与负荷功率不确定性对配置方案的影响,文中分为3个情景进行验证分析,分



(a) 水流量



(b) 风速



(c) 负荷

图5 水流量、风速及负荷典型日曲线

Fig.5 The 24 h typical curves of water, wind and load

表3 分时电价数据

Table 3 Parameters of TOU price

时段	元·(kW·h) ⁻¹	
	购电价格	售电价格
尖峰时段(19:00—21:00)	1.05	0.72
高峰时段(8:00—11:00, 13:00—19:00, 21:00—22:00)	0.87	0.53
低谷时段(11:00—13:00, 22:00—次日8:00)	0.39	0.28

别是情景I:不考虑源-荷不确定性的微电网配置方案;情景II:保留一定灵活性的源-荷不确定性配置方案(即 $\Gamma = 0.5$);情景III:最大保守度的源-荷不确定性配置方案(即 $\Gamma = 1$)。具体配置结果如表4所示。

表4 不同场景的优化配置结果

Table 4 Configuration results of different scenarios

情景	小水电/kW	小风电/kW	柴油机/kW	储能/(kW·h)	成本/万元	年弃电率/%	年发电量/(MW·h)
I	1101	2202	0	1269	224.45	0.710	10590
II	1172	2140	371	1595	282.87	1.864	10899
III	1238	2175	581	1655	317.00	2.672	11247

文中通过双层优化模型求解出2个场景的配置方案,其年自供电率均达到99%以上,故微电网有高的供电可靠性。从发电机组配置可知,情景I由于不考虑源-荷不确定性因素,发电机容量小于情景II、III,可见增大微电网系统容量有利于应对源-荷不平衡功率的波动;小风电装机容量有所降低,小

水电容量增加,这主要是因为风电功率的短期波动更大,而小水电功率较稳定。当考虑了源-荷不确定性后,微电网配置柴油机容量也随之增加,增强了微电网的抗干扰能力,提高鲁棒性。随着源-荷不确定性程度提高,储能系统容量也增加。

在配置方案的性能指标上,考虑源-荷不确定性的微电网配置成本高于未考虑不确定性因素的微电网,而且随着不确定性程度越高,弃电功率也随之增加,这是联络线功率约束及系统运行的鲁棒性要求导致。情景 II 和 III 的年发电量大于情景 I,这与可再生能源发电机容量和配置比例有关。

5.3 微电网运行分析

为了研究可再生能源和负荷功率不确定性对微电网运行的影响,分析各类机组的运行情况。选用 5.2 节情景 I 和情景 III 的配置方案,分别在确定性场景 ($\Gamma = 0$) 和不确定性场景 ($\Gamma = 1$) 下进行仿真,并对比分析。运行结果曲线见图 6 和图 7,图中联络线功率正值表示购电功率,负值表示售电功率;蓄电池正值为充电功率,负值为放电功率。

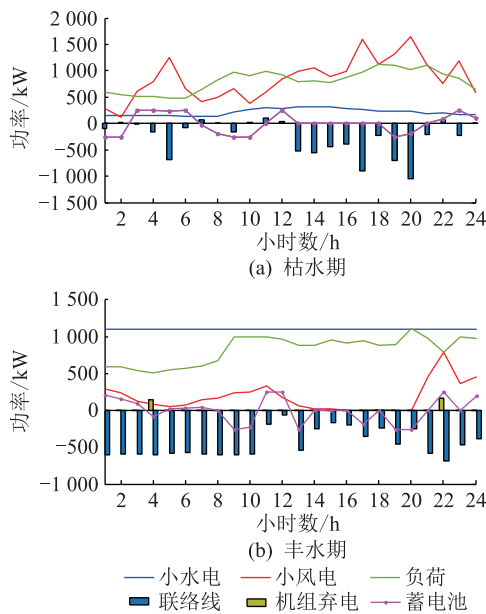


图 6 未考虑不确定性的微电网运行曲线

Fig.6 Curves of microgrid operation without considering uncertainty

由图 6 可知,微电网在枯水期电源功率不足,需要向电网购电来满足负荷需求;在丰水期,由于电源功率过剩,联络线倒送功率限制,可再生能源机组出现弃电的现象。此外,当负荷高峰期,蓄电池进行放电来跟踪负荷功率,而当负荷处于低谷时,蓄电池进行充电来满足系统功率平衡,可见储能系统实现了削峰填谷的功能。

图 7(a)为枯水期各机组运行情况,小水电、小风电的输出功率不足的时候,柴油发电机发电支撑

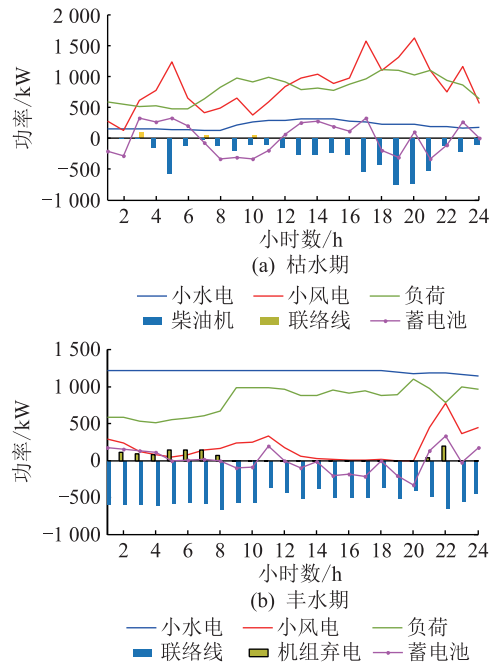


图 7 考虑不确定性的微电网运行曲线

Fig.7 Curves of microgrid operation considering uncertainty

系统,实现自给自足。丰水期时,可再生能源发电功率出现过剩,水/风发电机组需要通过弃电来维持系统功率平衡。另外,弃电功率和联络线传输功率增加,这是因为微电网系统需要留有一定裕度的电源功率调整范围来应对不平衡功率的波动。

综上所述,在考虑源-荷不确定性后,微电网在枯水期需要柴油机出力来维持系统运行。而丰水期间水、风机组弃电功率和联络线传输功率增加,维持微电网系统电能平衡,保证运行的鲁棒性。

5.4 优化模型比较

为了验证文中所提模型在极端场景中的有效性,微电网将在确定性最恶劣场景中仿真校验,选择 2 种方案作对比,方案一为确定性配置模型,方案二为考虑不确定性配置模型。本节主要是分析微电网的供电可靠性、运行经济性、能源利用等方面。

确定性模型即不考虑源-荷不确定性 ($\Gamma = 0$),可直接采用 MILP 求解;考虑源-荷不确定性的配置模型,通过 SCK 型鲁棒线性优化理论转换、求解。文中的最恶劣场景为源荷功率不确定集的边界值,设置小水电边界值为出力的 98% 和 102%,风电边界值为出力的 80% 和 110%,负荷功率边界值为 93% 和 107%,然后,按照式 (5) 求出不平衡功率的上、下限值。模型对比结果如表 5 和表 6 所示。

通过表 5 与表 6 对比可知,在可靠性方面,考虑不确定性的配置方案整体自供电能力较确定性模型更好,在枯水期间供电可靠性更高,自供电率在

表 5 确定性的微电网运行结果

Table 5 Results of microgrid operation without considering uncertainty

		确定性的微电网			
方案一		自供电率/%	运行成本/元	弃电量/(kW·h)	水/风机组发电量/(MW·h)
下限边界	枯水期	91.92	-481.594	0	21.267
	丰水期	99.69	-3 282.5	0	29.405
上限边界	枯水期	99.49	-5 581.3	0	25.948
	丰水期	100	-4 962.1	1 399.6	34.427

表 6 考虑不确定性的微电网运行结果

Table 6 Results of microgrid operation considering uncertainty

		考虑不确定性的微电网			
方案二		自供电率/%	运行成本/元	弃电量/(kW·h)	水/风机组发电量/(MW·h)
下限边界	枯水期	95.90	-318.563	0	21.045
	丰水期	99.99	-4 365.9	200.450	32.002
上限边界	枯水期	99.49	-5 546.2	0	25.665
	丰水期	100	-5 317.3	2 353	34.119

95%以上。在经济性方面,最恶劣场景的考虑源荷不确定性配置模型表现更优,尤其在丰水期微电网收益更大,总体经济性更优。在能源利用率方面,由于方案二的水、风机组容量较大,故其发电量更多。另外,最恶劣场景的下限边界场景中,在枯水期间方案一、二的水风机组弃电量为0,枯水期的微电网可以接纳所有可再生能源发电功率;在丰水期间,方案二较方案一的弃电量更大,这是因为方案二配置模型需要可再生能源机组保留一定裕度的调整范围来应对源-荷不平衡功率的波动,故考虑源-荷不确定性的配置模型能源利用的效果较低。最后,方案二在最恶劣场景下运行结果相比方案一,微电网的经济性、可靠性等方面都相对较优,能更好地应对可再生能源和负荷功率不确定性的影响,鲁棒性更强。

6 结语

小水电、小风电和负荷功率的不确定性将影响微电网配置方案的经济性、可靠性和鲁棒性,文中提出一种考虑源-荷不确定性的并网型水/风/柴微电网双层优化规划模型,并通过实际案例进行仿真分析。

算例结果表明,适当地提高小水电容量,降低风电容量可以减少源-荷不确定性的影响,增加可再生能源发电量。随着不确定性程度提高,微电网需要增加柴油发电机的容量来增强抗干扰能力。在运行分析中可知,蓄电池有利于微电网的经济运

行,实现削峰填谷功能,提高配置方案经济性和供电可靠性。最后,文中通过最恶劣场景仿真,验证了考虑源-荷不确定性配置模型在最恶劣场景中微电网的经济性、可靠性及鲁棒性优于确定性模型,但能源利用率有所降低,弃电量较高。

综上所述,文中所提模型不仅提高了微电网的鲁棒性,也保证了配置方案的经济性及可靠性,对考虑不确定性因素的微电网优化配置工作提供了新思路。

参考文献:

[1] 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.
 YANG Xinfu, SU Jian, LYU Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[2] 尚志娟,周晖,王天华. 带有储能装置的风电与水电互补系统的研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(2):99-105.
 SHANG Zhijuan, ZHOU Hui, WANG Tianhua. Research of complementary system for wind power with energy storage devices and hydro power [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 99-105.

[3] 吕智林,王先齐,谭颖. 采用改进 BBO 算法的并网型微电网电源优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(6):35-44.
 LYU Zhilin, WANG Xianqi, TAN Ying. Optimal allocation of power supply of grid-connected microgrid using improved biogeography-based optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(6): 35-44.

[4] 赵波,包侃侃,徐志成,等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. 中国电机工程学报,2015,35(21):5465-5474.
 ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5465-5474.

[5] 窦晓波,袁简,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. Optimum configuration method for capacity improvement of grid-connected wind and light storage microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 26-32.

[6] 刘峪涵,汪泓,谭阳红. 并网型微电网多目标容量优化配置及减排效益分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(9):70-75.
 LIU Yuhuan, WANG Hong, TAN Yanghong. Multi-objective optimal capacity configuration and emission reduction benefit analysis of grid-connected microgrid [J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2017, 29(9): 70-75.

[7] 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.
- [8] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 124-133.
- LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 124-133.
- [9] 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.
- LIU Jiaoyang, GUO Li, YANG Shuqiang, et al. Optimized configuration method of multi-optical storage microgrid system in distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2806-2815.
- [10] 李咸善, 方婧, 郭诗书, 等. 基于灵敏度分析的并网型微电网容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 8-17.
- LI Xianshan, FANG Jing, GUO Shishu, et al. Capacity sizing optimal for grid-connected micro-grid based on sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 8-17.
- [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] 吴宇, 张彼德, 袁国森, 等. 计及电动汽车和风光资源不确定性的微电网优化配置[J]. 电测与仪表, 2016, 53(16): 39-44.
- WU Yu, ZHANG Bide, YUAN Guosen, et al. Optimal configuration of micro-grid considering uncertainties of electric vehicles and PV/wind sources[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(16): 39-44.
- [13] 资容涛, 唐忠, 田晨, 等. 基于机会约束规划的微电网容量优化配置[J]. 电测与仪表, 2018, 55(7): 130-136.
- ZI Rongtao, TANG Zhong, TIAN Chen, et al. Capacity optimization of micro-grid based on chance constrained programming[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(7): 130-136.
- [14] 刘思夷, 赵波, 汪湘晋, 等. 基于 Benders 分解的独立型微电网鲁棒优化容量配置模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 119-126, 146.
- LIU Siyi, ZHAO Bo, WANG Xiangjin, et al. Capacity configuration model for robust optimization of stand-alone microgrid based on benders decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 119-126, 146.
- [15] WANG Z, CHEN B, WANG J. Robust optimization based optimal DG placement in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2173-2182.
- [16] CUO Z, YAN X, YANG D Z. Probability-weighted robust optimization for distributed generation planning in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018: 1-1.
- [17] 杨清, 袁越, 王敏, 等. 独立型水光储微电网系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 37-44.
- YANG Qing, YUAN Yue, WANG Min, et al. Optimal capacity configuration of standalone hydro-photovoltaic-storage micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 37-44.
- [18] 肖浩, 裴玮, 杨艳红, 等. 计及电池寿命和经济运行的微电网储能容量优化[J]. 高压技术, 2015, 41(10): 3256-3265.
- XIAO Hao, PEI Wei, YANG Yanhong, et al. Energy storage capacity optimization for microgrid considering battery life and economic operation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3256-3265.
- [19] 国家电网公司. 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW-480—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- State Grid Corporation of China. Distributed power supply access grid technical regulations: Q/GDW480—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [20] FAN, MIAO, VITTAL, et al. Probabilistic power flow analysis with generation dispatch including photovoltaic resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1797-1805.
- [21] 韩杏宁, 黎嘉明, 文劲宇, 等. 含多风电场的电力系统储能鲁棒优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2120-2127.
- HAN Xingning, LI Jiaming, WEN Jinyu, et al. Optimization for robust energy storage allocation in power system with multiple wind farms integrated[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2120-2127.
- [22] KANG S C. Robust linear optimization using distributional information[D]. Boston: Boston University, 2008.
- [23] 李丽娜. 集中典型类型的多属性决策方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- LI Lina. Several typical types of methods about multiple attribute decision making[D]. Chengdu, Southwest Jiaotong University, 2013.

作者简介:



张文杰

张文杰(1994),男,硕士在读,研究方向为电力系统运行与控制等(E-mail: 875677742@qq.com);

吴杰康(1965),男,博士,教授,研究方向为电力系统运行与控制等;

赵俊浩(1994),男,硕士在读,研究方向为电力系统运行与控制等。

Optimal capacity configuration of hydro-wind-diesel microgrid considering uncertainty of renewable energy and load

ZHANG Wenjie, WU Jiekang, ZHAO Junhao, YE Huiliang, REN Dejiang

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The uncertainty of hydro, wind resources and load will affect the economics and robustness of microgrid configuration, this paper proposes a bi-level optimal planning and design model for grid-connected hydro-wind-diesel microgrid, considering uncertainty of renewable energy and load. The up-level optimization is a microgrid configuration model. The low-level optimization is a microgrid economic dispatch model considering the uncertainty of hydro-wind power and load. Based on the robust linear optimization theory proposed by Seng-Cheol Kang (SCK-type robust linear optimization), the uncertainty model is transformed into a deterministic model. Then, combined with the fast non-dominated sorting genetic algorithm with elite strategy (NSGA-II) and mixed integer linear programming (MILP), the multi-objective optimal configuration problem of microgrid is solved. Finally, a distribution system in Shaoguan city is taken as a simulation example. The results show that the model not only improves the robustness of the microgrid, but also ensures the economics and reliability of the configuration.

Keywords: hydro-wind-diesel microgrid; optimal capacity configuration; robust linear optimization; multi-objective; bilevel optimization

(编辑 陈静)

(上接第 74 页)

A two-stage stochastic optimization for power system nuclear power plants participating in peak regulation with the consideration of renewable energy uncertainty

NING Yangtian¹, LUO Cuiyun¹, ZHAO Ziqi¹, MIAO Zengqiang¹, ZENG Ziyu², DING Tao²

(1. Guangxi Power Grid Power Dispatching Control Center, Nanning 530023, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: The energy crisis is getting more and more serious around the world. In recent years, renewable energy has developed rapidly as one of the ways to relieve the energy crisis. However, renewable energy has the characteristics of uncertainty. Therefore, high renewable energy penetrated power system will bring new challenge to the optimal dispatching for the power system. In the case of rapid development of renewable energy power generation and nuclear power station, the peak and valley difference of the power system becomes larger, which increase the pressure on the power system peak regulation. In order to increase the peak regulation capacity, a model for flexible participation in peak regulation is proposed in this paper. Meanwhile, a two-stage stochastic optimization for power system nuclear power plants participating in peak regulation with the consideration of the stochastic renewable energy output is given. The first stage of optimization determines the status of the power plants. In the second stage of optimization minimize the expected operation cost of power system based on the decision made in first stage. The model is tested by IEEE 24 bus system and a real power system. The results verify the feasibility and economy of the nuclear plants participating in peak regulation.

Keywords: renewable energy; nuclear power plant; peak regulation; two-stage stochastic optimization

(编辑 陈静)