

DOI: 10.7667/PSPC170714

## 多微电网互联系统能量管理方法研究

陈其森, 汪湘晋, 池伟, 张雪松

(国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 随着微电网技术的快速发展, 一定区域范围内的多个微电网能够互联互通满足区域供电需求, 催生了多微电网系统的发展。多微电网系统是微电网的延伸和深化, 对多微电网系统进行合理有效的管理成为解决微电网规模化运行的关键问题。多微电网存在着较多的分布式电源, 风、光出力的不确定性也将影响到多微电网的运行。建立了多时间尺度能量管理, 基于预测数据确定日前计划, 在此之上, 实时调度中对可再生能源最恶劣的运行条件进行优化。引入了考虑风、光不确定性的微电网能量管理系统鲁棒优化模型。通过列约束生成算法(C&CG)对双层鲁棒优化问题进行求解。通过算例仿真, 验证了所提微电网互联系统能量管理方法的有效性。

**关键词:** 多微电网; 能量管理; 不确定性; 双层优化; 鲁棒优化

### Research on energy management method of multi-microgrids

CHEN Qisen, WANG Xiangjin, CHI Wei, ZHANG Xuesong

(Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** With the rapid development of microgrids, microgrids within an area can meet the regional power supply through interconnection, which leads to the development of multi-microgrid. Multi-microgrid is the continuity and deepening of microgrids, the reasonable and effective management of the multi-microgrid becomes the key problem to solve the large-scale operation of microgrids. The uncertainties of wind turbine and solar output will affect the operation of multi-microgrid due to lots of distributed power in multi-microgrid. A multi-time scale energy management is established, the day-ahead schedule is determined based on forecast data, and then real-time schedule is optimized under the most harsh renewable energy operating conditions. A robust optimization model of microgrid energy management considering wind and solar uncertainty is introduced. The bi-level robust optimization problem is solved by Column and Constraints Generation (C&CG) algorithm. The validity of the proposed multi-microgrid interconnection energy management is verified by the simulation.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5220001600V6).

**Key words:** multi-microgrid; energy management; uncertainty; bi-level optimization; robust optimization

## 0 引言

随着全球范围内的环境污染持续恶化, 能源危机日益严重, 全球各国对可再生能源进行了开发应用<sup>[1]</sup>。作为可再生能源应用的重要形式, 微电网能够协同调度各分布式电源、储能系统以及负荷达到提高能量利用效率、降低运行成本、减少污染气体排放的效果<sup>[2]</sup>。

随着微电网大范围接入电网, 一定区域内的多个微电网互联形成多微电网系统, 如何管理多微电网系统成为当今研究重点。对于多微电网的研究,

国外学者已有一些初步的研究成果。欧盟提出了“More Microgrids”计划, 将多微电网互联系统的能量管理、优化运行和协调控制分为三层实现<sup>[3]</sup>, 文献[4-5]介绍了多微电网系统并研究了其相关控制方法及系统, 并介绍了相关控制策略的实例验证。国内学者对于多微电网的研究起步较晚, 文献[6]研究了临近海岛离网型多微电网的动态调度, 但未涉及到多微电网处在并网模式时的动态调度问题。文献[7]研究了含风光储的多微电网加入配电系统的经济运行方式, 但并未分析风光等可再生能源的发电随机性和间歇性带来的影响。文献[8-9]则探讨了多代理技术在多微电网系统中的模型, 用于实现电力市场的管理以及交互。文献[10-11]则应用了博弈

论的思想,采取合作博弈的手段,各微电网以减少网损为目标形成合作进行能量管理。

为了保障微电网系统安全、高效运行,需要建立合理的微电网能量管理系统进行智能控制与调度。微电网能量管理系统是一套能够进行发电优化调度、负荷管理、实时监控并且实现微电网同步的管理方案<sup>[12]</sup>。

现阶段对能量管理系统的研究,多基于微电网系统的经济性,如通过对储能单元进行优化调度,实现削峰填谷,平抑负荷波动的功能,达到降低微电网经济成本的目标<sup>[13]</sup>。文献[14]则考虑了交互功率和可再生能源功率波动的微电网经济优化。文献[15-16]基于并网型微电网的模型,建立了微电网能量管理方法。文献[17]通过可控负荷实现了微电网的需求侧响应。针对多微电网互联系统,现有工作多集中于实现整个多微电网互联系统的利益最大化,文献[18-19]则采用了领导者与跟随者模式的斯塔克尔伯格博弈,采用了双层分布式优化算法进行了多微电网系统的能量管理研究。上述文献对单个微电网或多微电网系统进行了经济性及其可靠性的研究,但微电网中风机、光伏等可再生能源发电比例较高,风、光资源的不确定性会影响微电网的稳定运行。因此,需要针对微电网能量管理系统的鲁棒性进行研究,以应对极端风、光条件给其带来的影响。

本文针对多微电网互联系统的能量管理问题,考虑传统的多时间尺度,建立了基于预测数据的日前计划模型。在此之上,考虑到可再生能源的间歇性和随机性,引入了考虑风、光不确定性的微电网能量管理系统鲁棒优化模型,实时调度中对最恶劣运行条件下的微电网能量管理系统进行优化,并通过列约束生成对双层鲁棒优化问题进行求解。

## 1 多微电网互联系统的结构

不同于单个微电网的运行控制,多微电网系统中的各微电网既需要考虑自身的功率平衡,也要考虑微电网间的相互联系。因此,多微电网常采用多层级的系统协调控制结构<sup>[20]</sup>,多微电网系统的运行控制可以分为两个层面:单微电网内部控制层,多微电网间协调控制层。多微电网系统主要由以下各单元组成,系统结构图如图1所示。

### 1) 分布式发电单元(DG)

多微电网系统中的分布式电源通常是可再生能源,如:风力发电、光伏发电。在研究过程中需要考虑到其不确定性对系统运行的影响。

### 2) 负荷

负荷在不同的场景中存在着波动变化。在考虑

负荷模型时,需要在基于预测值的基础上,考虑其随机波动。

### 3) 储能系统

在多微电网系统中,储能系统承担着削峰填谷,平抑波动的任务。为了提高储能系统的经济性,需要采用合理有效的能量管理方法,减少储能的寿命损耗。同时,各个微电网间的储能系统应该协同运行,以实现多微电网系统间稳定及经济运行。

### 4) 柴油发电机

多微电网系统处于并网运行模式时,柴油发电机通常作为备用电源,用来提高系统供电可靠性;处于离网状态时,柴油发电机能够稳定供电,以平抑风、光伏发电不确定性带来的影响。

### 5) 联络线路

多微电网系统中各微电网通过互联线路与大电网相连,各微电网之间以及微电网与大电网间通过联络线路进行功率交互,实现互供互济。

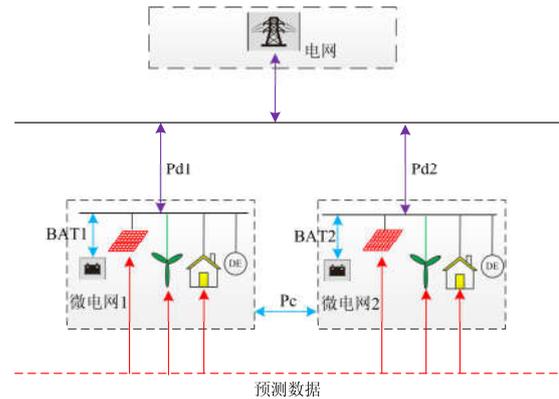


图1 多微电网系统结构图

Fig. 1 Structure chart of multi-microgrid

## 2 多微电网能量管理优化模型

### 2.1 柴油发电机模型

柴油发电机模型如式(1)所示。

$$P_{i-\min} I_{i,t} \leq p_{i,t} \leq P_{i-\max} I_{i,t} \quad (1)$$

式中:  $P_{i-\max}$  和  $P_{i-\min}$  各自代表第  $i$  个微电网中柴油发电机开启时所提供的出力上限、下限; 二元变量  $I_{i,t}$  为第  $i$  个微电网中柴油发电机在  $t$  时刻的运行状态变量, 当  $I_{i,t}$  取值为 0 时, 表示第  $i$  个微电网中柴油发电机在  $t$  时刻处于关停状态, 当  $I_{i,t}$  取值为 1 时, 表示第  $i$  个微电网中柴油发电机在  $t$  时刻处于开启状态。除此以外, 需要考虑柴油发电机的功率爬坡限制, 柴油发电机启停时的功率不得超过最大运行功率, 运行过程中, 功率变化不得超过爬坡限制, 即

$$\begin{aligned} p_{i,t} - p_{i,t-1} &\leq u_{i,t} \cdot P_{i-\max} + (1 - u_{i,t}) \cdot R_{i,p}^{\text{up}} \\ p_{i,t-1} - p_{i,t} &\leq v_{i,t} \cdot P_{i-\max} + (1 - v_{i,t}) \cdot R_{i,p}^{\text{down}} \end{aligned} \quad (2)$$

当  $u_{i,t}$  取值为 1 时, 表明  $t$  时刻第  $i$  个微电网中柴油发电机启动, 此时启动功率不得超过柴油发电机的最大运行功率; 当  $u_{i,t}$  取值为 0 时, 此时柴油发电机处于运行状态, 若功率增大, 则爬坡功率不超过最大爬坡功率限制  $R_{i,p}^{\text{up}}$ 。同理, 当  $v_{i,t}$  取值为 1 时, 表明  $t$  时刻第  $i$  个微电网中柴油发电机关停, 关停前柴油发电机的运行功率不得超过其最大运行功率; 当  $v_{i,t}$  取值为 0 时, 此时柴油发电机处于运行状态, 若功率减少, 则爬坡功率不超过最大爬坡功率限制  $R_{i,p}^{\text{down}}$ 。

柴油发电机运行时的约束还包括最小启停时间限制, 设  $T_i^{\text{on}}$  表示最小运行时间, 最小关停时间为  $T_i^{\text{off}}$ , 柴油发电机最小启停时间表达式如式(3)所示。

$$\begin{cases} I_{i,\tau} \geq u_{i,t}, \forall t, \tau \in [t, \min(T, t + T_i^{\text{on}} - 1)] \\ I_{i,\tau} \leq 1 - v_{i,t}, \forall t, \tau \in [t, \min(T, t + T_i^{\text{off}} - 1)] \end{cases} \quad (3)$$

## 2.2 储能模型

在微电网系统中, 储能主要起着平抑波动、削峰填谷的作用, 对于储能的模型主要考虑其 SOC 变化, 充放电功率约束。对储能充、放电功率的约束如式(4)所示, 表示在  $t$  时刻第  $i$  个微电网中的储能的充、放电功率不超过其最大的充、放电功率限额。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ch},i}^t \leq P_{\text{ch-max}} \\ 0 \leq P_{\text{dch},i}^t \leq P_{\text{dch-max}} \end{cases} \quad (4)$$

储能的容量约束模型式(5), 包括储能容量变化、储能容量上下限约束以及调度周期始末时刻储能容量约束:

$$\begin{cases} E_{\min} \leq E_i^t \leq E_{\max} \\ E_i^t = E_i^{t-1} + P_{\text{ch}}^t \cdot \eta_{\text{ch}} - P_{\text{dch}}^t / \eta_{\text{dch}} \\ E_i^T = E_i^0 \end{cases} \quad (5)$$

## 2.3 可再生能源发电不确定性模型

在微电网中, 可再生能源电源大多为风力发电与光伏发电, 而风速和光照强度具有间歇性和随机性的特点。在分布式电源建模过程中需要考虑风机、光伏功率输出的波动性, 对模型进行鲁棒优化, 采用不确定集来表征可再生能源发电的不确定性, 可得其考虑不确定性的出力模型。

$$\begin{cases} P_{\text{wt}}^t = P_{\text{wtf}}^t - P_{\text{wtl}}^t \cdot \alpha_{1,t} + P_{\text{wtu}}^t \cdot \alpha_{u,t} \\ P_{\text{pv}}^t = P_{\text{pvf}}^t - P_{\text{pvl}}^t \cdot \beta_{1,t} + P_{\text{pvu}}^t \cdot \beta_{u,t} \\ 0 \leq P_{\text{wt}}^t \leq P_{\text{wtmax}} \\ 0 \leq P_{\text{pv}}^t \leq P_{\text{pvmax}} \\ \alpha_{1,t} + \alpha_{u,t} \leq 1 \\ \beta_{1,t} + \beta_{u,t} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{wtf}}^t$ 、 $P_{\text{pvf}}^t$  为  $t$  时刻风机、光伏的预测出力功率;  $P_{\text{wtl}}^t$ 、 $P_{\text{pvl}}^t$  分别为风机、光伏出力功率波动变化下限值;  $P_{\text{wtu}}^t$ 、 $P_{\text{pvu}}^t$  则分别是风机、光伏出力功率波动变化的上限值;  $\alpha_{1,t}$ 、 $\alpha_{u,t}$ 、 $\beta_{1,t}$ 、 $\beta_{u,t}$  分别为 0-1 变量, 其中,  $\alpha_{1,t}$  与  $\alpha_{u,t}$  不能同时取 1,  $\alpha_{1,t}$  取 1 时, 风机出力处于其波动下限,  $\alpha_{u,t}$  取 1 时, 风机出力处于其波动上限;  $\beta_{1,t}$  与  $\beta_{u,t}$  不能同时取 1,  $\beta_{1,t}$  取 1 时, 光伏出力处于其波动下限,  $\beta_{u,t}$  取 1 时, 光伏出力处于其波动上限。对  $\alpha_{1,t}$ 、 $\alpha_{u,t}$ 、 $\beta_{1,t}$ 、 $\beta_{u,t}$  的取值进行约束, 可以控制系统的不确定集, 能够建立系统的不同随机性, 模型如式(7)所示。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T \alpha_{1,t} + \alpha_{u,t} \leq \alpha_w \\ \sum_{t=1}^T \beta_{1,t} + \beta_{u,t} \leq \beta_p \end{cases} \quad (7)$$

当  $\alpha_w$ 、 $\beta_p$  取 0 时, 风机、光伏出力将不会出现随机性, 按照预测值出力;  $T$  为调度周期, 当  $\alpha_w$  取  $T$  时, 风机出力具有最大的随机性, 可认为风机在整个调度周期内都能够达到其出力不确定变化的上限或下限, 故  $\alpha_w$  的取值范围为  $[0, T]$ 。考虑到夜晚不存在光照, 所以光伏出力在夜间出力为 0, 出力不存在变化, 因此  $\beta_p$  的取值上限无法取到  $T$ , 可认为只能取到  $T/2$ , 即  $\beta_p$  的取值范围为  $[0, T/2]$ 。

## 2.4 系统功率平衡模型

多微电网系统不仅能够通过微电网内的发电单元满足负荷需求, 还能够通过微电网间的功率交互达到微电网间的功率互济, 从而降低整个多微电网系统的购电成本, 提高多微电网的可靠性和经济性。包含可切除负荷的多微电网系统的功率平衡模型如式(8)、式(9)所示。

$$p_{i,t} + P_{\text{dch},i}^t - P_{\text{ch},i}^t + P_{\text{wt},i}^t + P_{\text{pv},i}^t = \quad (8)$$

$$Pg_{s,i}^t - Pg_{b,i}^t + P_{i,1}^t + P_{i,C}^t$$

$$0.9P_{i,lf}^t \leq P_{i,1}^t \leq P_{i,lf}^t \quad (9)$$

式中:  $p_{i,t}$  为  $t$  时刻第  $i$  个微电网内的柴油发电机的出力功率;  $P_{\text{dch},i}^t$  为第  $i$  个微电网的储能单元在  $t$  时刻的放电功率;  $P_{\text{ch},i}^t$  为储能的充电功率;  $P_{\text{pv},i}^t$ 、 $P_{\text{wt},i}^t$  则分别表示  $t$  时刻第  $i$  个微电网内的光伏和风机出力功率;  $Pg_{s,i}^t$ 、 $Pg_{b,i}^t$  代表  $t$  时刻的第  $i$  个微电网售电和购电功率;  $P_{i,1}^t$  为第  $i$  个微电网在  $t$  时刻的负荷大小;  $P_{i,C}^t$  表示第  $i$  个微电网在  $t$  时刻与其他微电网通过功率交互获得的功率。其中, 负荷在高峰时刻能够进行切除操作, 式(9)为负荷切除的约束条件, 即在  $t$  时刻负荷的切除量不应该超过其预测值的  $P_{i,lf}^t$  10%。

在进行功率互济过程中需要考虑以下约束，微电网通过电网的交互功率不超过购售电功率约束：

$$\begin{cases} 0 \leq P_{g_s,i} \leq P_{g_s,i}^{\max} \\ 0 \leq P_{g_b,i} \leq P_{g_b,i}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

微电网间交互功率不超过传输线路输送功率约束：

$$0 \leq P_{i,C} \leq P_{i,C}^{\max} \quad (11)$$

### 3 优化目标

通过第 1 节内容可知，多微电网系统具有单微电网控制层和多微电网交互层两个层面。多微电网系统的能量管理是与其系统结构一致的双层协调控制模型。

第一层为单微电网层能量管理优化：单微电网以自身利益最大化进行优化得到日前调度信息，实时运行中考虑天气因素对可再生能源发电的影响，根据实时负荷及 DG 出力信息修正日前调度得到实时调度。单微电网层的优化目标是使得自身微电网能够满足最恶劣运行场景的前提下，降低经济成本。

第二层则为多微电网间的协同优化：微电网控制中心根据各个微电网反馈的信息以整个多微电网系统收益最大为目标，优化各个微电网系统间的功率交互以及各微电网与配电网的功率交互，得到整个多微电网系统最优的能量管理方案。多微电网间的系统优化目标是通过各个微电网的协调运行，降低多微电网系统的购电费用，提高用电可靠性。可得整个二层优化目标函数为

$$\begin{aligned} \min_{x \in \Omega^p} & \sum_{t=1}^T c_i^{\text{du}} u_{i,t} + c_i^{\text{dd}} v_{i,t} + c_i^{\text{on}} I_{i,t} + \\ & \max_{u \in U} \min_{y \in \Omega(x,U)} \sum_{t=1}^T -P_{\text{gs}}^t p_{\text{ds}} + P_{\text{gb}}^t p_{\text{db}} + \sum_{i=1}^M P_{\text{d},i}^t p_{\text{ic}} \quad (12) \\ & \sum_{t=1}^T c_i^{\text{d}} p_{i,t} + c_i^{\text{es}} (P_{\text{ch},i}^t \eta_{\text{ch},i} + P_{\text{dch},i}^t / \eta_{\text{dch},i}) \end{aligned}$$

式中： $P_{\text{gs}}$ 、 $P_{\text{gb}}$  表示多微电网系统的售购电功率； $p_{\text{ds}}$ 、 $p_{\text{db}}$  分别为多微电网系统的售电价格和购电价格； $p_{\text{d},i}$  表示第  $i$  个微电网与其他微电网间的交互功率； $p_{\text{ic}}$  为传输线路的损耗费用； $P_i$  为第  $i$  个微电网的柴油发电机功率； $P_{\text{ch},i}$ 、 $P_{\text{dch},i}$  分别为第  $i$  个微电网的储能充放电功率； $c_i^{\text{du}}$ 、 $c_i^{\text{dd}}$  代表第  $i$  个微电网中柴油发电机的启停费用系数； $c_i^{\text{on}}$  和  $c_i^{\text{d}}$  为第  $i$  个微电网的柴油发电机的运行费用系数； $c_i^{\text{es}}$  则为第  $i$  个微电网中储能单元的运行费用系数； $t$  表示调度步长取 15 min； $T$  是调度周期为 24 h。

优化问题为考虑风、光资源不确定性的双层鲁棒优化。第一层优化为日前调度问题，第二层优化问题中考虑风、光资源不确定性，进行鲁棒优化得

到微电网内柴发、储能出力，微电网间交互功率以及通过电网的购售电功率，从而得到使多微电网系统收益最优的运行功率交互方案。

根据式(12)，可知考虑风光负荷不确定性的双层鲁棒优化模型，其约束对应为式(1)一式(11)，所以整个优化模型可以表示为以下形式。

$$\min c^T x + \max_{w \in W} \min_{y \in \Omega(x,w,p)} d^T y(x,w,p) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } Ax \leq b, x \in \{0,1\} \quad (14)$$

$$\Omega(x,w,p) = \{Hy \leq j\} \quad (15)$$

$$Ly = k \quad (16)$$

$$Ly \leq m - Nx \quad (17)$$

$$Ry = w \quad (18)$$

$$Sy = p \quad (19)$$

式中： $x$  代表第一层主问题决策变量，即日前调度问题决策变量，为柴油机的启停和状态变量； $y$  代表第二层子问题决策变量，即实时调度决策变量，为各个分布式电源：风机，光伏、柴发，储能的出力功率、购售电功率以及各微电网间的交互功率， $\Omega(x,w,p)$  是包含第一层决策变量和风、光不确定性的可调度集合。约束式(14)表示的是柴油发电机的启停约束，即式(3)的约束，约束式(15)为微电网运行约束中的不等式约束，即式(4)一式(5)，式(8)一式(9)中的不等式约束，约束式(16)则为上述公式中的等式约束。约束式(17)中同时含有两层决策变量  $x$ ， $y$ ，即式(1)一式(2)。约束式(18)一式(19)表示可再生能源的不确定性约束，即式(6)一式(7)。

#### 3.1 拉格朗日对偶

根据上节内容可知，微电网考虑风光不确定性的双层鲁棒优化模型中含有最大最小化问题的求解 (max-min 问题)。通过拉格朗日对偶将其转化为 max-max 问题，降低计算复杂度，文献[21]提出了拉格朗日对偶的详细计算方法，根据此方法，可以求得其对偶问题为

$$\begin{aligned} \max_{w,p,\lambda,\mu,\nu,\gamma,\delta} & -\lambda^T \cdot j + \mu^T \cdot k - \nu^T \cdot (m - N \cdot x) + \\ & \gamma^T \cdot w + \delta^T \cdot p \quad (20) \\ \text{s.t. } & d^T + \lambda^T \cdot H - \mu^T \cdot I + \nu^T \cdot L - \gamma^T \cdot R - \delta^T \cdot S = 0 \\ & \lambda \geq 0, \nu \geq 0, w \in W, p \in P \end{aligned}$$

式中， $\lambda$ 、 $\mu$ 、 $\nu$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  分别为式(15)一式(19)的拉格朗日乘子。根据式(6)可知，风机出力  $w$  和光伏出力  $p$  中含有二元变量，而在式(20)中， $w$  和  $p$  分别与整型变量  $\gamma$ 、 $\delta$  相乘，因此可得

$$\begin{aligned} \gamma^T w &= \sum_{t=1}^T P_{\text{wtf}}^t \cdot \gamma^T - P_{\text{wtl}}^t \cdot \alpha_{1,t} \cdot \gamma^T + P_{\text{wtu}}^t \cdot \alpha_{u,t} \cdot \gamma^T \\ \delta^T p &= \sum_{t=1}^T P_{\text{pvt}}^t \cdot \delta^T - P_{\text{pvl}}^t \cdot \beta_{1,t} \cdot \delta^T + P_{\text{pvu}}^t \cdot \beta_{u,t} \cdot \delta^T \end{aligned} \quad (21)$$

采用大 M 法<sup>[22]</sup>引入新的变量  $\pi_t^+$ 、 $\pi_t^-$ 、 $\varepsilon_t^+$ 、 $\varepsilon_t^-$  以及极大值  $M$  将相乘的两个变量线性化, 得到线性化后的目标函数以及新引入变量的相关约束。

$$\begin{aligned} \max_{w, p, \lambda, \mu, v, \gamma, \delta} \quad & -\lambda^T \cdot j + \mu^T \cdot k - v^T \cdot (m - N \cdot x) + \\ & \sum_{t=1}^T P_{\text{wft}}^t \cdot \gamma^T + P_{\text{wvl}}^t \cdot \pi_t^- + P_{\text{wtu}}^t \cdot \pi_t^+ + \\ & \sum_{t=1}^T P_{\text{pvf}}^t \cdot \delta^T + P_{\text{pvl}}^t \cdot \varepsilon_t^- + P_{\text{pvu}}^t \cdot \varepsilon_t^+ \\ \text{s.t.} \quad & d^T + \lambda^T \cdot H - \mu^T \cdot I + v^T \cdot L - \gamma^T \cdot R - \delta^T \cdot S = 0 \\ & \lambda \geq 0, v \geq 0 \\ & \pi_t^+ \leq M \cdot \alpha_{u,t}, \pi_t^- \leq \gamma^T + M \cdot (1 - \alpha_{u,t}), \forall t \\ & \pi_t^- \leq M \cdot \alpha_{l,t}, \pi_t^+ \leq -\gamma^T + M \cdot (1 - \alpha_{l,t}), \forall t \\ & \varepsilon_t^+ \leq M \cdot \beta_{u,t}, \varepsilon_t^- \leq \delta^T + M \cdot (1 - \beta_{u,t}), \forall t \\ & \varepsilon_t^- \leq M \cdot \beta_{l,t}, \varepsilon_t^+ \leq -\delta^T + M \cdot (1 - \beta_{l,t}), \forall t \\ & \sum_{t=1}^T \alpha_{l,t} + \alpha_{u,t} \leq \alpha_w, \sum_{t=1}^T \beta_{l,t} + \beta_{u,t} \leq \beta_p \\ & \alpha_{l,t}, \alpha_{u,t}, \beta_{l,t}, \beta_{u,t} \in \{0, 1\}, \forall t \end{aligned} \quad (22)$$

### 3.2 列约束生成算法

通过拉格朗日变化和大 M 法求得线性化后的 max-min 子问题, 将整个二层鲁棒问题表示为式 (23) 的形式, 将双层鲁棒子问题用  $\theta$  表示。求解此问题需要不断更新优化过程中的两层决策变量  $x$ 、 $y$ , 这将导致整个算法的优化过程计算复杂度较高, 通过列约束生成算法来进行求解, 能够进行两层交替迭代直至收敛, 提高计算效率。列约束生成算法的计算流程如下

$$\begin{aligned} \min_{x, \theta, y_i} \quad & c^T \cdot x + \theta \\ \text{s.t.} \quad & Ax \leq b, x \in \{0, 1\} \\ & \theta \geq d^T \cdot y_i, i = 1, 2, \dots, I \\ & F \cdot y_i \leq g, i = 1, 2, \dots, I \\ & G \cdot y_i = h, i = 1, 2, \dots, I \\ & Q \cdot y_i \leq r - P \cdot x, i = 1, 2, \dots, I \\ & T \cdot y_i = w, i = 1, 2, \dots, I \\ & R \cdot y_i = p, i = 1, 2, \dots, I \end{aligned} \quad (23)$$

步骤 1:  $i=1$ , 收敛上限  $UB=+\infty$ , 收敛下限  $LB=-\infty$ , 初始化第一层决策变量为  $x_0$ , 将  $x_0$  代入子问题式 (22) 中进行计算, 可求得可再生能源出力的最恶劣场景  $w_i$ 、 $p_i$ 。

步骤 2: 将求得的可再生能源出力的最恶劣场景  $w_i$ 、 $p_i$  以及第二层决策变量  $y_i$ , 代入到式 (23) 计算主问题, 可求得主问题此时的最优解为  $c^T \cdot x_i + \theta_i$ , 并更新此时的收敛下限  $LB=c^T \cdot x_i + \theta_i$ 。

步骤 3: 将  $x_i$  代入子问题进行求解, 得到更新后的可再生能源出力的最恶劣场景  $w_{i+1}$ 、 $p_{i+1}$ , 求得更新后的子问题解的值  $\rho$ , 并更新此时的收敛上限  $UB=\min\{UB, c^T \cdot x_i + \rho\}$ 。

步骤 4: 如果收敛上限之差满足收敛判据, 即  $(UB-LB < \varepsilon)$ , 那么求得目标解  $\{x_i, \theta_i\}$ , 若不满足收敛判据, 则另  $i=i+1$ , 并跳至步骤 2, 再次进行计算。

## 4 算例仿真

### 4.1 算例介绍

本文所研究的多微电网算例系统包含两个微电网 M1、M2, 每个微电网中包含光伏、风机、柴油发电机、蓄电池等分布式电源以及负荷。为了更好地实现多微电网系统的能量管理, 本文中调度周期为 1 天, 每 15 min 作为一个时间步长, 一天分为 96 个调度时段。储能 SOC 初始值为 0.6, SOC 范围为 [0.3, 0.9]。购售电功率不超过 40 kW, 储能的功率范围为 [-30 kW, 40 kW], 取负为放电, 取正为充电。

多微电网系统中的微电网 M1、M2 具有不同的可再生能源配置容量以及不同的负荷特性, 能够通过功率互济来提高整个系统的受益, 因此具备有形成多微电网互联系统的条件。各个微电网中的分布式电源配置情况如表 1 所示, 微电网的风机、光伏功率及负荷情况如图 2 所示。多微电网系统运行费用相关参数如表 2 所示。

表 1 多微电网系统相关参数

Table 1 Relevant parameters of multi-microgrid system				
微电网	风机/kW	光伏/kW	储能/kWh	柴发/kW
M1	120	125	300	80
M2	80	90	200	40

表 2 多微电网系统运行费用参数

Table 2 Operation cost parameters of multi-microgrid system	
类型	运行费用系数
储能	0.3
切负荷	5
传输线损耗	0.05
柴发运行	1.4
柴发启停	3
电网购电	0.8
电网售电	0.6

### 4.2 多微电网互联系统能量管理分析

基于微电网能量管理模型,对 M1、M2 微电网进行仿真计算,首先分析各个微电网未组成互联系统运行时的成本费用,如表 3 所示。

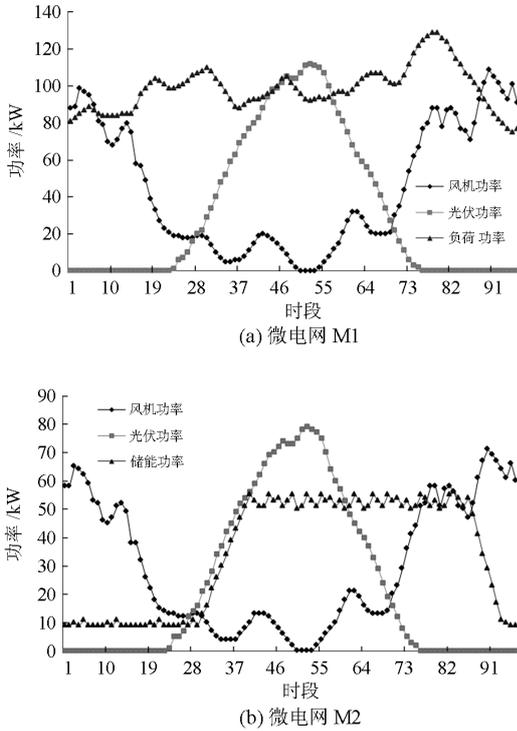


图 2 风速、光照及负荷功率曲线

Fig. 2 Power curves of wind speed, irradiance and load

通过图 2 和表 1 可知:微电网 M1 配置的风机、光伏容量较高,发电量最大,与此同时,M1 微电网作为负荷中心网,也具有最大的负荷量,如图 2 所示。M1 微电网在时段 7 到时段 40,时段 61 到时段 88 内可再生能源发电量小于负荷,总计 56 时段。根据其他发电单元的经济性,微电网将优先开启储能以弥补发电不足,其次,微电网将通过电网购电来弥补功率缺额,但由于微电网需要具有一定的自治性,所以通过电网的购电量需要小于限制值。柴油发电机通常为备用电源,具有最差的经济性,因此最后开启。M2 微电网的具有较小的负荷容量,可再生能源将发电量也只在时段 66 到时段 73,时段 82 到时段 87 小于负荷,发电量最小值为 -11,通过开启储能和购电即能平抑。由于 M2 微电网净发电量较大,因此能够通过售电获得收益,运行费用为负。

根据表 3 的结果可知,微电网 M1 在一些时刻净发电量为负,需要通过购电来弥补不足,而微电网 M2 的净发电量则在大多数时刻为正,并能够通

表 3 微电网运行成本费用

Table 3 Operation cost of microgrids

微电网	柴发/元	储能/元	切负荷/元	购售电/元	传输线/元	总费用/元
M1	153.85	82.05	0	319.2	0	555.1
M2	0	10.05	0	-351.6	0	-341.55
M1M2	153.85	92.1	0	-32.4	0	213.55

过售电获取收益。图 3 为微电网各自的购售电功率曲线图,不难看出,M1 微电网在 80 个调度时间段内,均需要通过电网购电来满足微电网内的可再生能源发电不足量。而 M2 微电网在 78 个调度时间段内通过电网出售微电网可再生能源的过剩电量。根据微电网的净发电量信息可以认为上述两个微电网具备有形成互联系统,进行互供互济的条件。

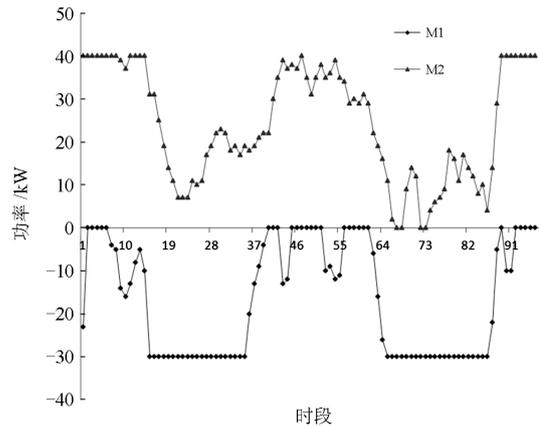


图 3 微电网购售电功率曲线

Fig. 3 Power curves of transactions of microgrids

M1、M2 微电网通过互联互供组成多微电网互联系统,将整个多微电网系统经济收益作为优化目标,对此多微电网互联系统进行运行费用计算,结果如表 4 所示,可得多微电网系统各微电网的购售电功率如图 4 所示。

表 4 微电网互联系统运行成本费用

Table 4 Operation cost of multi-microgrid interconnection system

微电网	柴发/元	储能/元	切负荷/元	购售电/元	传输线/元	总费用/元
M1	153.85	82.05	0	128	11.95	375.85
M2	0	10.05	0	-245.4	0	-235.35
M1M2	153.85	92.1	0	-87.4	11.95	140.5

多微电网互联系统的总体运行费用为 140.5 元,相对于各个微电网独立运行的总运行费用 213.55 元,减少了 34.2%,有效地提高了微电网系统的经济性。对单个微电网进行分析,可以发现,M1 微

电网的购电费用较未采用互联系统时降低了 191.2 元, 通过其他微电网获得功率的微电网需要支付传输功率导致的传输线损耗, M1 微电网的传输线损耗增加, 意味着 M2 微电网给 M1 微电网输送功率以弥补 M1 微电网购电功率的降低。由于微电网间输送功率损耗费用比通过电网购电费用低, 通过微电网间功率交互能够有效降低微电网的购电成本。微电网 M2 因将过剩功率传输给微电网 M1 以实现互供互济, 购售电费用比独立运行时有所上升。

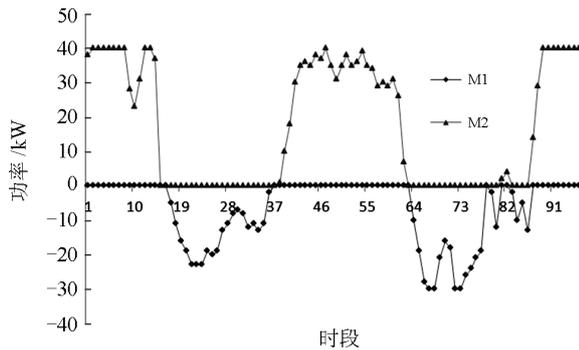


图 4 多微电网系统购售电功率曲线

Fig. 4 Power curves of transactions of multi-microgrid system

通过上述结果, 可以认为, 具有不同分布式电源配置容量以及不同特性、不同容量负荷的微电网具有形成多微电网互联系统的条件。通过多微电网协同能量管理, 能够有效优化微电网间的功率流动, 降低系统的购电费用, 提高经济性和微电网自治性。

#### 4.3 多微电网互联系统能量管理鲁棒性分析

微电网中通常包含有较大容量的风机和光伏, 而风速和光照强度具有波动性和间歇性。在研究中需要考虑风、光资源不确定性给能量管理带来的影响。对微电网进行仿真计算, 得到考虑不确定性为 20% 时的微电网运行费用如表 5 所示。

表 5 考虑 20% 不确定性的微电网运行成本费用

Table 5 Operation cost of microgrids with 20% uncertainties						
微电网	柴发/元	储能/元	切负荷/元	购售电/元	传输线/元	总费用/元
M1	158.1	104.4	7.5	349	0	619
M2	0	10.05	0	-332.25	0	-322.2
M1M2	158.1	114.45	7.5	16.75	0	296.8

考虑风光资源的不确定性后, 风机、光伏的出力将比未考虑不确定性时小, 产生了 16.75 元的购电费用, 表明不确定性的增加, 会导致购电量的上涨以维持系统的功率平衡。同时, 储能的开启也更为频繁, 储能的运行费用达到了 114.45 元, 比未考

虑不确定性时, 上涨了 22.35 元。在考虑不确定性时多个微电网的总运行费用总和为 296.8 元, 比正常情况时, 提高了 38.9%。

微电网 M1、M2 通过互联组成多微电网互联系统, 经济性得到了显著提升, 运行费用总量从 296.8 元降低至表 6 所示的 183.612 5 元。通过功率互济, 不仅能够降低 M1 的购电费用, 同样能够减少负荷切除量, 提高微电网运行可靠性, 提高整个微电网互联系统的经济性。

表 6 考虑 20% 不确定性微电网互联系统运行成本费用

Table 6 Operation cost of multi-microgrid interconnection system with 20% uncertainties

微电网	柴发/元	储能/元	切负荷/元	购售电/元	传输线/元	总费用/元
M1	138.1	104.4	0	128.8	13.762 5	385.062 5
M2	0	10.05	0	-211.5	0	-201.45
M1M2	138.1	114.45	7.5	-82.7	13.762 5	183.612 5

#### 4.4 多微电网互联系统运行情况分析

基于上述分析, 对风光资源不确定性下的微电网运行情况进行进一步分析。

以 M1 微电网为例, 分析风、光不确定性造成的运行费用增加, 图 5 为 M1 微电网在不同不确定性下的可再生能源净发电量(风机、光伏发电量减去负荷量), 可以看出, 随着不确定性的增加, 可再生能源净发电量波动性增大, 净发电量呈现减少的状态。通过上文分析已知, 微电网将优先开启储能以及通过购电来满足功率缺额, 仍不满足时, 将开启柴发。分析净发电量曲线可知, 可再生能源发电净发电量较低, 一度达到 -70 kW, 其值超过储能及电网购电出力范围, 此时需要通过开启柴油发电机来平抑功率缺额。三种不确定情况下的柴油发电机出力如图 6, 该图表明, 在 20% 不确定情况下时, 柴

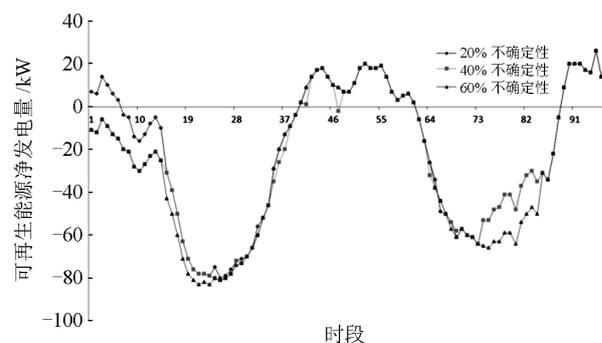


图 5 不同不确定性下 M1 微电网可再生能源净发电量

Fig. 5 Renewable energy net generation power in M1 microgrid with different uncertainties

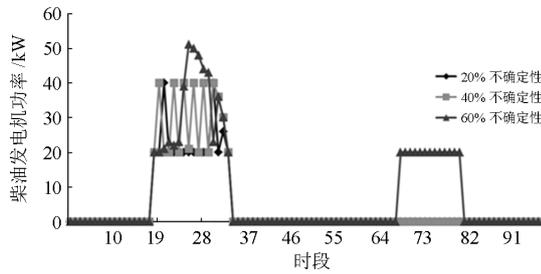


图 6 不同不确定性下 M1 微电网柴油机功率

Fig. 6 Diesel generation power in M1 microgrid with different uncertainties

油发电机在时刻 17 至时刻 34 开启, 并多数工作在 20 kW 出力, 而在 40% 不确定情况下, 柴油发电机则多工作在 40 kW 出力。在 60% 不确定情况下时, 柴油发电机在 17—34 时刻一度工作在 50 kW 出力, 并且在时刻 61—87 开启, 并工作在 20 kW 出力。

## 5 结论

本文提出了基于多微电网互联系统的双层能量管理优化模型, 同时考虑微电网能量管理的日前规划层与实时能量管理调度层的双层鲁棒优化, 兼顾微电网的经济性与鲁棒性。通过优化微电网之间的能量交互, 提高整个微电网的经济性, 使得收益最大化。基于双层能量管理优化模型, 通过列约束生成算法(C&CG)对微电网的双层鲁棒优化进行了求解, 得到微电网间的功率最优交互。通过仿真算例, 验证了多微电网互联系统的可行性和有效性, 并讨论分析了微电网系统中可再生能源发电的不确定性情况。结果表明, 可再生能源出力的不确定性会导致系统的运行费用增加, 而通过多微电网互联, 能够有效降低不确定性给系统带来的影响。

## 参考文献

- [1] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699-3705.  
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.
- [2] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [3] GIL N J, PEAS Lopes J A. Hierarchical frequency

- control scheme for islanded multi-microgrids operation[C] // Power Tech, 2007 IEEE Lausanne: IEEE, 1-5 July, 2007, Lausanne, Switzerland: 473-478.
- [4] NG E J, EL-SHATSHAT R A. Multi-microgrid control systems (MMCS)[C] // Power and Energy Society General Meeting: July 25-29, 2010, Providence, USA: 1-6.
- [5] MENG L, SAVAGHEBI M, ANDRADE F, et al. Microgrid central controller development and hierarchical control implementation in the intelligent microgrid lab of Aalborg University[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 15-19, 2015, Charlotte, USA: 2585-2592.
- [6] 周永智, 吴浩, 李怡宁, 等. 基于 MCS-PSO 算法的邻近海岛多微网动态调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 204-210.  
ZHOU Yongzhi, WU Hao, LI Yining, et al. Dynamic dispatch of multi-microgrid for neighboring islands based on MCS-PSO algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 204-210.
- [7] 龚正宇, 刘继春, 武云霞, 等. 含风光储的多微网接入配网的联合调度策略[J]. 可再生能源, 2014, 32(11): 1665-1670.  
GONG Zhengyu, LIU Jichun, WU Yunxia, et al. Joint dispatching strategy for connecting multiple micro-grids with WT/PV/ST to distribution network[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(11): 1665-1670.
- [8] 蔡高原. 多微网互联系统动态经济调度研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.  
CAI Gaoyuan. Dynamic economic dispatch for multi-microgrid interconnection system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [9] KUMAR NUNNA H S V S, DOOLLA S. Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1678-1687.
- [10] SAAD W, HAN Z, POOR H V. Coalitional game theory for cooperative micro-grid distribution networks[C] // IEEE International Conference on Communications Workshops, June 5-9 2011, Kyoto, Japan: 1-5.
- [11] FADLULLAH Z M, KATO N. Game-theoretic coalition formulation strategy for reducing power loss in micro grids[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2014, 25(9): 2307-2317.
- [12] 吴雄, 王秀丽, 刘世民, 等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 7-14.  
WU Xiong, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system[J].

- Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 7-14.
- [13] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微电网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
- DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S batter storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [14] 杨晓东, 陈宇, 张有兵, 等. 考虑交互功率与可再生能源功率波动的微电网调度优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 30-38.
- YANG Xiaodong, CHEN Yu, ZHANG Youbing, et al. Scheduling optimization model for microgrid considering interactive power and renewable energy output fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 30-38.
- [15] 王先齐, 吕智林, 汤泽琦. 基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 9-18.
- WANG Xianqi, LÜ Zhilin, TANG Zeqi. Multiobjective dynamic optimal dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 9-18.
- [16] 许晓慧, 苏义荣, 施勇, 等. 并网运行模式下微电网能量优化调度算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 117-122.
- XU Xiaohui, SU Yirong, SHI Yong, et al. Real-time energy optimization management algorithm of microgrid in the grid-connected mode[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(8): 117-122.
- [17] 樊玮, 周楠, 刘念, 等. 基于需求响应的用户侧微电网多目标优化运行方法[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(4): 17-23.
- FAN Wei, ZHOU Nan, LIU Nian, et al. Multi-objective optimal operation method for micro-grids on the user side based on demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(4): 17-23.
- [18] ZHOU Z, BAI J, SHENG Z. A Stackelberg game approach for energy management in smart distribution systems with multiple microgrids[C] // IEEE Twelfth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, March 25-27, 2015, Taichung, China: 248-253.
- [19] ASIMAKOPOULOU G E, DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. Leader-follower strategies for energy management of multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1909-1916.
- [20] HATZIARGYRIOU N. Microgrids: architectures and control[M]. Wiley: IEEE, 2014.
- [21] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Beijing: World Book Incorporation, 2013.
- [22] JIANG R, WANG J, GUAN Y. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 800-810.
- 
- 收稿日期: 2017-05-12; 修回日期: 2017-07-18
- 作者简介:
- 陈其森(1965—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析; E-mail: chen\_qisen@zj.sgcc.com.cn
- 汪湘晋(1992—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为微电网优化技术; E-mail: hfwangxj@126.com
- 池伟(1965—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析、继电保护及自动化。
- (编辑 张爱琴)