

DOI: 10.7667/PSPC161217

# 计及发电成本和收益的微电网规模确定方法

李 想, 郭姗姗

(郑州财经学院, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 随着节能减排政策的不断实施, 可再生能源发电不断涌入电网, 使各种形式的微电网越来越多, 从而增加了对含有微电网的大电网分析、调度和管理的困难。为了提高电网调度和管理的效率, 在传统发电成本和收益的基础上, 建立了微电网的成本模型。从电网的整体范围内确定微电网的规模, 并以此可知将电网划分为微电网的数量, 有助于实现电网整体的管理以及微电网内部的管理, 进而可以为简化电网调度提供基础。通过 IEEE118 母线系统的仿真测试, 表明了所提方法的有效性。

**关键词:** 微电网; 规模; 管理; 发电成本; 收益

## Method of confirming micro-grid scales incorporating power generation cost and benefit

LI Xiang, GUO Shanshan

(Zhengzhou Institute of Finance and Economics, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** According to the policy implementation of energy-saving and emission-reduction, and the situation of renewable energy merged into the power grids, the number of micro-grids is getting more and more. But the report about the scale of micro-grid can not be seen. And so the power grid is getting more and more difficult to be analyzed, dispatched and managed, and the development and construct of the smart grid is influenced. According to the problem, based on the traditional generation cost and benefits, the cost model of micro-grid is built and the number that the power grid is divided into how many micro-grids is clear. And it is contributing to the management of power grid and the micro-grids, and then can supply a basis for simplifying power grid dispatch. Taking the IEEE118 buses system as an example, the experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** micro-grid; scale; management; generation cost; benefit

## 0 引言

目前, 随着石化能源的不断耗竭以及气候变化等全球性问题的出现, 各个国家相继颁布了鼓励发展和利用可再生能源的相关政策, 从而促使可再生能源, 如风电、光伏和潮汐能等不断并入电网以逐步取代传统石化能源<sup>[1-3]</sup>。

由于可再生能源具有间歇性和波动性的特点, 从而使电网的安全和能量管理都具有极大的挑战。对此, 国内外专家提出了“虚拟电厂”等概念<sup>[4-5]</sup>, 以及在此概念基础上的能量管理方式<sup>[6-7]</sup>。

虽然利用“虚拟电厂”对可再生能源进行管理的方式很好<sup>[7]</sup>, 但是到目前为止, 尚未看到关于“虚拟电厂”等相关理念中涉及的电厂容量及其范围大小的划分, 从而使电网中的微电网数量不清晰, 电网的总体能量管理以及微电网内部的能量管理无从

下手, 这也正是本研究的出发点和所要解决的问题。

为了解决电网中微电网的范围问题, 本文以微电网内的发电成本和收益之和最大化为目标, 通过优化, 寻找满足目标的微电网范围。

## 1 微电网内部建模

实际上, 微电网就是一个电网, 具有电网的主要特征和功能。本文假设微网中包含风力发电(WT)、光伏发电(PV)、传统火电发电(DE)、储能系统(BT), 并且随着技术的发展旋转备用系统已被储能系统所替代。微网具有与外网智能连接、断开功能, 外网出现故障时可以自动断开, 提高用户的电能质量安全; 外网系统安全稳定时, 微网可以上网自由出售、购买电能。划分最优规模的微网不仅可以削减高峰负荷需求, 而且可以适当储能, 保证分布式电能由于间歇性而导致的负荷需求。本文以满

足微网独立运行时的负荷需求为前提, 并且最大化使用可再生能源的电能(减少温室气体的排放), 考虑此时的微网的模型, 并对此展开分析。该模型综合考虑微网内部的电能生产收益、成本(包括传统发电系统排放温室气体数量), 是一个单目标优化问题(不考虑微网内部系统的优化组合问题), 模型分析介绍如下。

设在一天(24 h)时间断面内, 整个电网可以划分成  $N$  个微网,  $\text{Profit}_n$  表示第  $n$  个微网一天的利润,  $\text{Revenue}_{nt}$  表示第  $n$  个微网第  $t$  小时的收益,  $\text{Cost}_{nt}$  表示第  $n$  个微网第  $t$  小时的成本, 则有:

$$\text{Max} \left\{ \text{Profit}_n = \sum_{t=1}^{24} (\text{Revenue}_{nt} - \text{Cost}_{nt}) \right\} \quad (1)$$

$(n=1, 2, \dots, N)$

当式(1)最大时, 单个微网的利润达到最优, 在不考虑边界重叠竞争情况下, 整个大电网可以表示为  $N$  个微网的组合:

$$\sum_{n=1}^N \text{Profit}_n = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} (\text{Revenue}_{nt} - \text{Cost}_{nt}) \quad (2)$$

下面介绍微网的收益和成本模型, 使其满足在一天时间内收益最大, 成本最小。

设微网的运行模式可以分为两种: 一种与外网互联, 能够正常上网出售、购买电能, 简称并网运行模式; 另一种是外网出现故障或扰动时微网断开与外网的连接, 独立运行, 简称独立运行模式, 下面分别对单个微网这两种模式的收益进行分析。

### 1.1 微网并网运行模型

在并网运行模式中, 微网可以与外网交换电能。当电价较高时, 随着微网容量的增大, 除了满足负荷和储能的需求外, 还可以将富余的电量上网出售, 追求超额利润, 这时是利润与微网容量成正比关系。当电价较低时, 可以根据微网的成本从外网购买一定的电能满足负荷和储能的需求, 这时需要充分考虑微网容量的成本问题。

设  $t$  时刻的收益模型表示如式(3)所示。

$$\text{Revenue}_t = \begin{cases} \text{Revenue}_t^+ & (\pi_{tk} > \pi_t) \\ \text{Revenue}_t^- & (\pi_{tk} \leq \pi_t) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\text{Revenue}_t^+$  表示  $t$  时刻第  $k$  个发电机生产的电能价格  $\pi_{tk}$  高于其边际成本价格  $\pi_t$ , 除了满足负荷需求外还可以将多余电能上网出售, 获得超额收益, 即  $\pi_{tk} > \pi_t$ ;  $\text{Revenue}_t^-$  表示  $t$  时刻第  $k$  个发电机生产的电能价格  $\pi_{tk}$  低于其边际成本价格  $\pi_t$ , 这时为了使发电系统减少开停机损耗成本, 设定发电系统以低于负荷需求的出力运行, 同时以  $\pi_t$  价格上网购买

电能所获得的收益, 即  $\pi_{tk} \leq \pi_t$ 。

#### 1.1.1 上网出售电能收益的计算模型

当发电机生产的电能价格低于外网的电价时, 微网可以将生产的电能满足自身负荷和储能需求外, 将一部分上网出售, 所获得的收益模型为

$$\text{Revenue}_t^+ = \sum_{k=1}^K \pi_{tk} P_{tk} = \sum_{k_1=1}^{K_1} \text{Revenue}_{tk_1}^+ + \sum_{k_2=1}^{K_2} \text{Revenue}_{tk_2}^+ \quad (4)$$

$$\sum_{k_1=1}^{K_1} \text{Revenue}_{tk_1}^+ = \sum_{k_1=1}^{K_1} \pi_{tk_1} P_{tk_1} = \sum_{k_1=1}^{K_1} (\pi_{k_1} + \pi_{tk_1}^{(1)}) \left( P_{tk_1}^{(1)} + P_{tk_1}^{(2)} + \sum_{j=1}^{J_1} P_{tk_1j}^{(3)} \right) \quad (5)$$

$$\sum_{k_2=1}^{K_2} \text{Revenue}_{tk_2}^+ = \sum_{k_2=1}^{K_2} \pi_{tk_2} P_{tk_2} = \sum_{k_2=1}^{K_2} (\pi_{tk_2}) \left( P_{tk_2}^{(1)} + P_{tk_2}^{(2)} + \sum_{j=1}^{J_1} P_{tk_2j}^{(3)} \right) \quad (6)$$

服从以下约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{k_1=1}^{K_1} \left( P_{tk_1}^{(1)} + P_{tk_1}^{(2)} + \sum_{j=1}^{J_1} P_{tk_1j}^{(3)} \right) + \sum_{k_2=1}^{K_2} \left( P_{tk_2}^{(1)} + P_{tk_2}^{(2)} + \sum_{j=1}^{J_2} P_{tk_2j}^{(3)} \right) = SC \\ \sum_{k_1=1}^{K_1} P_{tk_1}^{(2)} + \sum_{k_2=1}^{K_2} P_{tk_2}^{(2)} = P_t^{\text{BT}} \\ \sum_{k_1=1}^{K_1} P_{tk_1}^{(1)} + \sum_{k_2=1}^{K_2} P_{tk_2}^{(1)} = LP_t \\ P_{tk_2}^{(1)} + P_{tk_2}^{(2)} + \sum_{j=1}^{J_2} P_{tk_2j}^{(3)} = P_{tk_2} \\ P_{tk_1}^{(1)} + P_{tk_1}^{(2)} + \sum_{j=1}^{J_1} P_{tk_1j}^{(3)} = P_{tk_1} \\ \pi_{k_1} + \pi_{tk_1}^{(1)} = \pi_{tk_1} \\ K_1 + K_2 = K \\ 0 \leq K_1 \leq K \\ 0 \leq K_2 \leq K \\ 0 \leq N \leq K \\ 0 \leq J_1 \leq J \\ 0 \leq J_2 \leq J \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $J$  为全网中的母线数量;  $K$  表示微网内发电机的数量;  $K_1$  表示分布式发电机数量;  $K_2$  表示传统发电机数量;  $\pi_{k_1}$  表示对第  $k_1$  台分布式发电机所提供的补贴,  $\pi_{tk_1}^{(1)}$  表示  $t$  时刻第  $k_1$  台分布式发电机生产电能的价格; 式(5)表示  $t$  时刻第  $k_1$  台分布式发电机出售  $P_{tk_1}$  电量所获得的收益, 其中包含提供  $P_{tk_1}^{(1)}$  电量

满足本地负荷所得的收益、提供  $P_{ik_1}^{(2)}$  满足储能系统的收益和通过  $J_1$  条母线出售电能  $P_{ik_j}^{(3)}$  所得的收益。同理, 式(6)表示  $t$  时刻第  $k_2$  台分布式发电机出售  $P_{ik_2}$  电量所获得的收益, 其中包含提供  $P_{ik_2}^{(1)}$  电能满足本地负荷所得的收益、提供  $P_{ik_2}^{(2)}$  满足储能系统需要所获得的收益和通过  $J_2$  条母线出售  $P_{ik_j}^{(3)}$  电能所获得的收益。

### 1.1.2 上网购买电能收益的计算模型

当微网内部生产的电能价格低于外网的电价时, 考虑发电机的启动成本较高、避免频繁开停机对设备的损害, 在保持发电机一定出力情况下从外网购买电能满足负荷需求。以微网整体单元为考虑对象, 从外网购买的电能不属于微网的收益, 此时的收益模型表示为

$$\text{Revenue}_t^- = \sum_{k=1}^K \text{Revenue}_{tk}^- - \sum_{j=1}^{J_0} \text{Revenue}_{t,j}^- + \pi_{\text{BT}} P_t^{\text{BT}} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K \text{Revenue}_{tk}^- = \sum_{k_1=1}^{K_1} (\pi_{k_1} + \pi_{tk_1}^{(1)}) P_{tk_1} + \sum_{k_2=1}^{K_2} \pi_{tk_2} P_{tk_2} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{J_0} \text{Revenue}_{t,j}^- = \sum_{j=1}^{J_0} \pi_{t,j} P_{t,j} \quad (10)$$

服从以下约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{k_1=1}^{K_1} P_{tk_1} + \sum_{k_2=1}^{K_2} P_{tk_2} + P_t^{\text{BT}} = SC \\ K_1 + K_2 = K \\ 0 \leq K_1 \leq K \\ 0 \leq K_2 \leq K \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\pi_{\text{BT}} P_t^{\text{BT}}$  表示储能系统提供的电能收益;  $\pi_{\text{BT}}$  表示补贴价格;  $P_t^{\text{BT}}$  表示储能系统提供的电能。式(9)表示微网内发电机的出力收益, 包括传统发电系统和分布式发电系统的收益两部分。 $\pi_{tk_1}^{(1)}$  表示  $t$  时刻第  $k_1$  台分布式发电机的电价,  $\pi_{k_1}$  表示第  $k_1$  台分布式发电机的补偿电价;  $P_{tk_1}$  表示  $t$  时刻第  $k_1$  台分布式发电机出力。 $\pi_{tk_2}$  表示  $t$  时刻第  $k_2$  台传统发电机的电价,  $P_{tk_2}$  表示  $t$  时刻第  $k_2$  台传统发电机的出力。式(10)表示从外网购买的电能,  $J_0$  表示购买电能所通过的总母线数;  $\pi_{t,j}$  表示  $t$  时刻  $j$  母线上的电价;  $P_{t,j}$  表示  $t$  时刻  $j$  母线上购买的电量。式(11)表示此时微网的

容量规模。

### 1.1.3 成本计算模型

如前假设, 微网中包含风电系统、光伏发电系统、传统燃料发电系统、储能系统。通过对文献[7]模型的改进, 在满足系统成本最小时, 同时考虑系统中可再生能源的最大化利用, 减少有能量的温室气体排放。一天(24 h)内的成本模型表示为

$$\text{Cost} = C^{\text{WT}} + C^{\text{PV}} + C^{\text{DE}} + C^{\text{BT}} + G \quad (12)$$

$$C^{\text{WT}} = \sum_{t=1}^{24} C_t^{\text{WT}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{k=1}^{K_{\text{WT}}} P_{tk}^{\text{WT}} \left( (C_{0k}^{\text{WT}} - S_{tk}^{\text{WT}}) + CF_{tk}^{\text{WT}} \cdot O_{tk}^{\text{WT}} \right) \quad (13)$$

$$C^{\text{PV}} = \sum_{t=1}^{24} C_t^{\text{PV}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{k=1}^{K_{\text{PV}}} P_{tk}^{\text{PV}} \left( (C_{0k}^{\text{PV}} - S_{tk}^{\text{PV}}) + CF_{tk}^{\text{PV}} \cdot O_{tk}^{\text{PV}} \right) \quad (14)$$

$$C^{\text{DE}} = \sum_{t=1}^{24} C_t^{\text{DE}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{k=1}^{K_{\text{DE}}} P_{tk}^{\text{DE}} \left( (C_{0k}^{\text{DE}} - S_{tk}^{\text{DE}}) + CF_{tk}^{\text{DE}} \cdot O_{tk}^{\text{DE}} \right) \quad (15)$$

$$C^{\text{BT}} = \sum_{t=1}^{24} C_t^{\text{BT}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{k=1}^{K_{\text{BT}}} P_{tk}^{\text{BT}} \left( (C_{0k}^{\text{BT}} - S_{tk}^{\text{BT}}) + H_{tk} \cdot \frac{1}{D_{tk}} \cdot O_{tk}^{\text{BT}} \right) \quad (16)$$

$$G = \sum_{t=1}^{24} \sum_{k=1}^{K_2} F_k \cdot D_k \cdot P_{tk} \quad (17)$$

满足以下约束:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{24} \left( \sum_{k=1}^{K_{\text{WT}}} P_{tk}^{\text{WT}} + \sum_{k=1}^{K_{\text{PV}}} P_{tk}^{\text{PV}} + \sum_{k=1}^{K_{\text{DE}}} P_{tk}^{\text{DE}} + \sum_{k=1}^{K_{\text{BT}}} P_{tk}^{\text{BT}} \right) = SC \\ K_{\text{DE}} = K_2 \\ K_{\text{WT}} + K_{\text{PV}} = K_1 \end{cases} \quad (18)$$

其中, 折旧计算模型为

$$S = C_0 \cdot \frac{T_L - (T_P - t + 1)}{T_L} \quad (19)$$

式中:  $SC$  表示微网的容量大小;  $P_t^{\text{WT}}$ 、 $P_t^{\text{PV}}$ 、 $P_t^{\text{DE}}$ 、 $P_t^{\text{BT}}$  分别表示  $t$  时刻 WT、PV、DE、BT 的有功功率值;  $C_0^{\text{WT}}$ 、 $C_0^{\text{PV}}$ 、 $C_0^{\text{DE}}$ 、 $C_0^{\text{BT}}$  分别表示 WT、PV、DE、BT 的初始装机成本;  $S_t^{\text{WT}}$ 、 $S_t^{\text{PV}}$ 、 $S_t^{\text{DE}}$ 、 $S_t^{\text{BT}}$  分别表示  $t$  时刻 WT、PV、DE、BT 折旧后的价值;  $CF_t^{\text{WT}}$ 、 $CF_t^{\text{PV}}$ 、 $CF_t^{\text{DE}}$  分别表示  $t$  时刻 WT、PV、DE 的容量利用系数;  $O_t^{\text{WT}}$ 、 $O_t^{\text{PV}}$ 、 $O_t^{\text{DE}}$ 、 $O_t^{\text{BT}}$  分别表示  $t$  时刻 WT、PV、DE、BT 的运行维护成本;  $H_t$

表示  $t$  时刻 BT 的电能释放率;  $D_t$  表示  $t$  时刻 BT 电能释放深度;  $S$  表示设备折旧后的价值;  $T_L$  表示设备的设计使用周期;  $T_p$  为设备实际使用周期;  $G$  表示排放出的温室气体的总重量;  $K_2$  表示传统发电机数量;  $F_k$  表示燃烧 1 kg 的燃料排放的气体重量;  $D_k$  表示第  $k$  台发电机每生产 1 kWh 的电能需要消耗的燃料数量;  $P_{tk}$  表示第  $t$  小时内第  $k$  台发电机的电能出力。

## 1.2 微网独立运行模型

当风能、光伏资源丰富时, 微网内的发电系统除了满足负荷需求外将额外能量储存; 当由于间歇性导致的风能、光伏资源不足时, 储能系统提供电能满足负荷的需求(假设在未来电网中备用系统已完全由储能系统替代)。将微网作为一个整体, 此时不涉及将电能向外网出售盈利问题, 因此重点考虑此时微网成本问题。

此时系统的总收益分为两种, 第一种是 WT、PV、DE 生产的电能满足负荷需求和储能需求; 第二种是 WT、PV、DE 生产的电能和 BT 释放的电能共同满足负荷的需求。

$$\text{Revenue}_t = \begin{cases} \text{Revenue}_t^+ & (P_t > P_t^{\text{load}}) \\ \text{Revenue}_t^- & (P_t \leq P_t^{\text{load}}) \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_t$  表示  $t$  时刻微网生产的电能;  $P_t^{\text{load}}$  表示  $t$  时刻负荷需求的电能量。

当微网内部发电大于负荷需求时, 收益模型为

$$\text{Revenue}_t^+ = \sum_{k=1}^K \pi_{tk} P_{tk} = \sum_{k_1=1}^{K_1} \text{Revenue}_{tk_1}^+ + \sum_{k_2=1}^{K_2} \text{Revenue}_{tk_2}^+ \quad (21)$$

$$\sum_{k_1=1}^{K_1} \text{Revenue}_{tk_1}^+ = \sum_{k_1=1}^{K_1} \pi_{tk_1} P_{tk_1} = \sum_{k_1=1}^{K_1} (\pi_{k_1} + \pi_{tk_1}^{(1)}) \cdot (P_{tk_1}^{(1)} + P_d^{(1)}) \quad (22)$$

$$\sum_{k_2=1}^{K_2} \text{Revenue}_{tk_2}^+ = \sum_{k_2=1}^{K_2} \pi_{tk_2} P_{tk_2} = \sum_{k_2=1}^{K_2} \pi_{tk_2} \cdot (P_{tk_2}^{(1)} + P_c^{(2)}) \quad (23)$$

式中:  $P_d^{(1)}$  表示 WT、PV 提供储能系统的电量;  $P_c^{(2)}$  表示 DE 提供储能系统的电量; 其他标识符同上。

当微网内部发电小于负荷时, 收益计算模型为

$$\text{Revenue}_t^- = \sum_{k=1}^K \text{Revenue}_{tk}^- + \text{Revenue}_{tc}^- \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^K \text{Revenue}_{tk}^- = \sum_{k_1=1}^{K_1} (\pi_{k_1} + \pi_{tk_1}^{(1)}) P_{tk_1} + \sum_{k_2=1}^{K_2} \pi_{tk_2} P_{tk_2} \quad (25)$$

$$\text{Revenue}_{tc}^- = \pi_{tc} P_{tc}^{(2)} \quad (26)$$

式中:  $\text{Revenue}_{tc}^-$  表示储能系统释放的电能所带来的收益;  $\pi_{tc}$  表示  $t$  时刻储能系统电能价格;  $P_{tc}^{(2)}$  表示  $t$  时刻的电能释放量。

此时的成本模型与并网运行时相同, 故按照式(12)计算。

## 2 算法求解流程

考虑到并网运行模式下电价较高时, 可以扩大微网的容量规模, 使上网出售获得的利润最大; 当电价较低或者独立运行时, 无法上网出售电能以获取超额利润, 此时微网中的分布式发电和储能系统需要考虑补贴和成本, 因此不能无限制扩大微网的规模。为了满足以上条件, 需要将微网的容量确定在一定合理范围内, 使利益最大或者成本最低。程序逻辑流程图如图 1 所示。

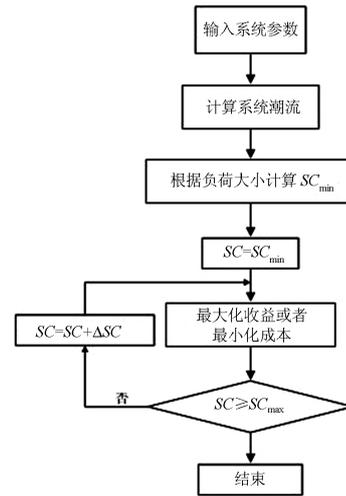


图 1 计算步骤流程

Fig. 1 Calculation procedure

具体步骤如下:

(1) 首先输入初始负荷大小, 根据 WT、PV 的电能计算出最小的微网大小  $SC_{\min}$ 。

(2) 设置初始化微网期望最大值  $SC_{\max}$ 、 $\Delta SC$  和其他系统参数。

(3) 求取微网的大小  $SC$ , 使其满足: 最大化并网运行模式上网出售电能收益或者最小化独立运行模式下微网的成本。

(4) 如果  $SC < SC_{\max}$ , 使其  $SC = SC + \Delta SC$ , 重新计算步骤(3), 直至收敛。

### 3 算例分析

为了验证本文的算法,采用 IEEE118 节点系统进行仿真。IEEE118 节点系统结构参数参考文献[8]。

经过计算,可将 IEEE118 节点系统划分为 3 个微网,如图 2 所示。

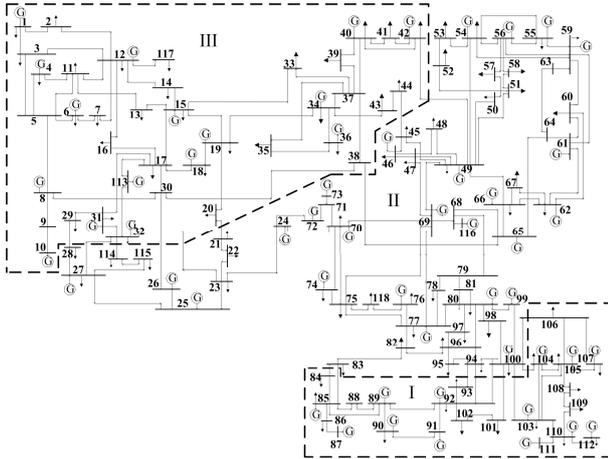


图 2 IEEE118 母线系统分为三个微网示意图

Fig. 2 Schematic of dividing IEEE118 bus system into three microgrids

如图 2 所示,两个虚线框分别代表 2 个不同的微网,其余为 1 个微网。按此划分方式计算得到的 3 个微网的成本与最优潮流方式下计算的结果进行比较,如表 1 所示。

表 1 3 个微网成本与最优潮流方式下的比较(标么值)

Table 1 Comparison of three microgrid costs and the calculation results under optimal power flow mode

微网编号	成本	最优潮流成本	误差/%
微网 1	9.454	9.114	3.7305
微网 2	12.544	11.875	5.6337
微网 3	8.675	8.747	0.8231

表 1 中的误差计算方式是按照式(27)进行计算。

$$error = \frac{|f_{our} - f_{real}|}{|f_{real}|} \times 100\% \quad (27)$$

由表 1 可见,本文方法与真实值的比较误差保持在 6% 以下,精度较高。

### 4 结论

本文提出了一种新的微网规模大小的划分方法,仿真验证表明所提方法的有效性。

当电网规模较大时,尤其在目前省级电网、国家级电网管理模式,可用于将电网划分为若干个小型的微电网,有助于电网清晰、简洁的能量管理、

调度和控制。

### 参考文献

- [1] 夏澍, 顾劲岳, 葛晓琳, 等. 风光联合优化配置的多目标机会约束规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 35-40.  
XIA Shu, GU Jinyue, GE Xiaolin, et al. Multiobjective chance-constrained programming method for wind generations and photovoltaic allocating[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 35-40.
- [2] 胡殿刚, 张雪佼, 陈乃仕, 等. 新能源发电项目多维度后评价方法体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 10-17.  
HU Diangang, ZHANG Xuejiao, CHEN Naishi, et al. Research on multi-dimensional post evaluation methodology of new energy power generation projects[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 10-17.
- [3] 胡飞虎, 李威, 冯轩, 等. 基于不同目标的电网分区调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 22-26.  
HU Feihu, LI Wei, FENG Xuan, et al. Research of sub-regional grid dispatching based on different objectives[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 22-26.
- [4] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.  
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [5] 牛文娟, 李扬, 王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3630-3637.  
NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3630-3637.
- [6] YANG Z G, LIU J, SURESH B, et al. Enabling renewable energy and the future grid-with advanced electricity storage[J]. Minerals, Metals and Materials Society, 2010, 62(9): 14-23.
- [7] HRVOJE P, IGOR K, TOMISLAV C. Virtual power plant mid-term dispatch optimization[J]. Applied Energy, 2013, 1(1): 134-141.
- [8] 吴际舜, 侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 167-177.

收稿日期: 2016-08-04; 修回日期: 2016-09-27

作者简介:

李想(1981—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电力系统电气控制类相关课程的教学和研究; E-mail: lxhnzz@sina.com

郭姗姗(1986—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电力系统安全运行与维护方面的教学和研究。

(编辑 张爱琴)