

# 基于负荷组合与光伏电源匹配算法的微电网配置

伍言<sup>1,2</sup>, 刘俊勇<sup>1,2</sup>, 刘友波<sup>1,2</sup>, 刘继春<sup>1,2</sup>

1. 四川大学 电气信息学院, 成都 610065; 2. 四川大学 智能电网四川省重点实验室, 成都 610065)

**摘要:**微电网中的负荷与可再生能源的输出功率具有不同日分布特性, 为此, 建立了兼顾负荷侧与用电侧的微电网投资效益模型, 提出了基于负荷与光伏电源功率匹配算法的微电网配置方法。通过构造有根树, 对微电网供电可行域内的负荷组合进行遍历, 评价不同组合下负荷叠加曲线对光伏电源发电曲线的适应度。根据适应度评价结果, 划定微电网的最优供电区域。最后在此基础上, 进行全年模拟运行, 确定微电网内各微源和储能设备的容量, 使投资效益达到最优。以 RBTSBus6 系统为例进行计算分析, 验证所述方法的有效性。

**关键词:**微电网; 光伏电源; 负荷组合; 适应度; 投资效益

**作者简介:**伍言 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源和微电网的仿真与规划。

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1001-9529 (2012)01-0051-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50977059); 教育部留学归国人员科研启动基金项目 (教 [2011] 1139 号)

## Microgrid Configuration Based on Matching Algorithm between Load Combination and Photovoltaic DG

WU Yan<sup>1,2</sup>, LIU Jun-yong<sup>1,2</sup>, LIU You-bo<sup>1,2</sup>, LIU Ji-chun<sup>1,2</sup>

1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Smart Grid Key Laboratory, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In microgrid, the load and the renewable power output are different in daily distribution properties. Therefore, this paper establishes microgrid investment benefit model, taking into account both the load side and power side of microgrid, as well as proposes microgrid configuration method based on the matching algorithm between load and photovoltaic DG. Rooted trees are formulated to traverse all the possible load combinations, and accordingly evaluate the closeness degrees between combined load curves and photovoltaic DG output curve. Based on the results, the capacities of DGs and energy storage devices are determined by simulating the whole-year operation, thus optimizing the investment benefit. A calculation example based on RBTS-BUS 6 system verifies the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** microgrid; photovoltaic DG; load combination; closeness degree; investment benefit

**Foundation items:** The National Natural Science Foundation of China (50977059)

将分布式电源以微电网的形式接入大电网, 与大电网互为支撑, 是发挥分布式发电系统效益的有效途径<sup>[1]</sup>。微电网是连接若干用户到若干分布式电源和储能系统的小型配电系统, 包含 DG、储能装置、能量变换装置、相关负荷、监控系统、保护装置等, 既可与大电网并网运行, 亦可在大电网出现故障时断开单独运行<sup>[2]</sup>。

文献 [3] 建立了微电网对于外部大电网的发电及用电特性的数学模型, 该模型适用于对含有微电网的配电网进行包含变电站及网架规划的整体性规划, 并未从局部区域深入分析。

微电网中的电源主要为不可调度的可再生 DG, 其功率输出取决于风速、光照和水流量等自

然条件, 具有随机性和间歇性, 不随负荷需求的变化而改变。虽然通过引入储能技术和智能控制技术能够在一定程度上消除微电网电力供需的不平衡, 但若负荷用电规律与 DG 发电规律差别较大, 仍会造成微电网与大电网能量流向反复变化, 加重 PCC 处的负担, 引起全网电压波动、闪变以及频率偏移等电能质量问题。因此, 在进行微电网配置时, 需考虑负荷用电规律与 DG 发电规律的匹配问题。

本文采用负荷组合匹配算法, 考虑配电网的负荷特性, 根据负荷曲线与光伏 DG 功率输出曲线适应度大小选取负荷组合, 在不改变配电网网架结构的基础上, 划分微电网的供电区域, 并以投

资效益最大化为目标,对区域微网进行模拟优化计算,确定其中电源和储能设备的最优配置容量,以达到充分发挥 DG 效能,实现区域微网经济运行的目的。

## 1 微电网投资效益模型

由于中国大多数城市风力资源相对太阳能资源较为匮乏<sup>[3]</sup>,本文建立的微电网模型以光伏电源为主要能源,以微型燃气轮机为辅助能源,并利用储能电池削峰填谷平衡功率波动。微电网并网运行,以大电网作为稳定的电源支撑。由于微电网接入配电网的原则之一是尽量减少它对配电网的影响,故将微电网与大电网之间的能量交换量限定在负荷的耗电量的 10% 以下,即微电网中的负荷需求 90% 以上由微电源提供。

不同的负荷组合组成不同的供电区域。由于在在在进行配置前,微电网覆盖的负荷组合是不确定的,单纯以发电总成本最低为目标是不合理的,故而建立以单位投资效益即单位发电成本  $\tau$  最低为目标的微电网投资效益模型

$$\min \tau = C/W \quad (1)$$

式中  $C$ ——微电网年均总成本;

$W$ ——微电网中负荷的年耗电总量。

$$C = C_{ins} + C_{OM} + C_{fuel} + C_{penalty} + C_{buy} - C_{sell} \quad (2)$$

式中  $C_{ins}$ ——折合到每一年的平均建设成本;

$C_{OM}$ ——年运行维护费用。

$C$  及  $C_{OM}$  均与微电网中微电源的装机容量  $P_i$  及蓄电池的容量  $E_{st}$  成正比

$$C_{ins} = \sum_{i=1}^N K_i P_i \frac{r(1+r)^{x_i}}{(1+r)^{x_i} - 1} + K_{st} E_{st} \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (3)$$

$$C_{OM} = \sum_{i=1}^N \delta_i P_i + \delta_{st} E_{st} \quad (4)$$

式中  $N$ ——微电网中微电源的总数;

$K_i, K_{st}, \delta_i, \delta_{st}$ ——比例系数;

$r$ ——利率率;

$x_i$ ——第  $i$  台 DG 的使用年限;

$y$ ——蓄电池的使用年限。

微型燃气轮机年燃料成本  $C_{fuel}$ , 与微型燃气轮机输出功率  $P_{MT}$  的关系函数

$$C_{fuel} = a \sum_{t=0}^{8760} \frac{P_{MT}(t)}{\eta(P_{MT}(t))} \quad (5)$$

式中  $a$ ——单位燃料价格;

$\eta(P_{MT}(t))$ ——微型燃气轮机的工作效率,与输出

功率  $P_{MT}(t)$  的大小成正比。

MT 机组在发电过程中会排放温室气体及污染物,降低微电网运作的环境效益,其环境治理亦会增加成本,故在模型里针对会排放有害气体(主要包括  $CO_2$ 、 $SO_2$  和  $NO_x$ ) 的机组增收惩罚费用  $C_{penalty}$ , 惩罚对象主要为 MT 机组,通过成本惩罚限制其接入容量

$$C_{penalty} = j_{CO_2} S_{CO_2} + j_{SO_2} S_{SO_2} + j_{NO_x} S_{NO_x} \quad (6)$$

式中  $S_{CO_2}, S_{SO_2}, S_{NO_x}$ —— $CO_2, SO_2, NO_x$  的年排放总量;

$j_{CO_2}, j_{SO_2}, j_{NO_x}$ ——惩罚系数。

微电网与大电网能量交换时的购电成本  $C_{buy}$  和售电收益  $C_{sell}$  的关系

$$C_{buy} = \mu \sum_{t=0}^{8760} P_b(t) \quad (7)$$

$$C_{sell} = \varepsilon \sum_{t=0}^{8760} P_s(t) \quad (8)$$

式中  $P_b(t), P_s(t)$ ——第  $t$  小时销售和购买的电力;

$\mu, \varepsilon$ ——购电和售电价格。

微电网中负荷的年耗电总量

$$W = \sum_{k \in M} \sum_{t=0}^{8760} P_k(t) \quad (9)$$

式中  $M$ ——微电网中的负荷集合;

$P_k(t)$ —— $t$  时段负荷  $k$  的用电功率。

为了确定微电网的年均总成本,需要对微电网进行全年模拟运行。微电网运行约束条件

$$P_{PV} + P_{MT} + P_{dc} - P_c + P_b - P_s > P_D \quad (10)$$

$$P_{MT, \min} \leq P_{MT} \leq P_{MT, \max} \quad (11)$$

$$P_{dc, \min} \leq P_{dc} \leq P_{dc, \max} \quad (12)$$

$$P_{c, \min} \leq P_c \leq P_{c, \max} \quad (13)$$

$$E_{st, \min} \leq E_{st} \leq E_{st, \max} \quad (14)$$

$$P_b + P_s \leq 0.1 \times P_D \quad (15)$$

式中  $P_{PV}$ ——PV 机组的发电功率;

$P_{dc}, P_c$ ——蓄电池的放电、充电功率,蓄电池充电时  $P_c$  为 0, 放电时  $P_{dc}$  为 0;

$P_{c, \max}, P_{c, \min}, P_{dc, \max}, P_{dc, \min}$ ——蓄电池充电和放电功率的上下限;

$P_{MT, \min}, P_{MT, \max}$ ——MT 机组的最大和最小发电功率;

$P_D$ ——微电网中负荷功率之和。

$P_D$  和  $W$  通过负荷组合匹配算法确定。

## 2 负荷组合匹配算法

### 2.1 供电可行域的寻找

以 DG 接入馈线的负荷点为圆心,沿着网络

拓扑方向,以 DG 的最大配置容量为半径,搜索负荷,该圆内包含的负荷点集合称为功率圆<sup>[4]</sup>。从 DG 所在馈线的负荷点出发,首先访问与负荷点相连的所有支路,然后访问下层支路,在满足式(16)的范围内,遍历功率圆图。通过这种搜索方法可以快速确定复杂配电网的功率圆。

$$\begin{cases} \sum_{i \in D} L_a(\xi) \leq P_{\max} \\ \text{区域 } D \text{ 连通} \\ j \in D \end{cases} \quad (16)$$

式中  $L_a(\xi)$ ——负荷点的负荷值;

$D$ ——配电网所有负荷点组成的区域;

$P_{\max}$ ——DG 的最大配置容量;

$j$ ——DG 所在馈线编号。

## 2.2 负荷组合遍历

对供电可行域内不同负荷叠加曲线与发电曲线的相似性进行分析,需要遍历可行域内所有负荷组合。以 DG 接入馈线所连接的负荷点为根节点,以其他负荷点为分支节点,以断路器为界,根据节点关联信息建立有根树,例如图 1。配电网网络树的每棵有根子树均代表一种负荷组合,即孤岛划分方式。 $S_i$  代表含  $i$  个节点的有根子树构成的集合。以图 1 所示配电网为例,从根节点出发,对  $S_i$  中所有有根子树添加一个节点,把扩张后得到的含  $i+1$  个节点的子树信息存放到  $S_{i+1}$  中。包含 1 个节点的有根子树只有 (LP6) 一棵,所以  $S_1$  为 {(LP6)}。通过添加一个节点对子树 (LP6) 进行扩张,可以得到 3 棵含 2 个节点的有根子树,把它们的信息存入  $S_2$  中得  $S_2$  为 {(LP6, LP3), (LP6, LP5), (LP6, LP7)}。再依次对  $S_2$  中的所有子树添加一个节点,把得到的含三节点的子树信息存入  $S_3$  中, $S_3$  即为 {(LP6, LP3, LP2), (LP6, LP3, LP5), (LP6, LP3, LP7), (LP6, LP5, LP4), (LP6, LP5, LP7)}。以此类推,可以遍历有根子树,找到所有可行的负荷组合方式。将各个组合里的负荷进行叠加,得到等效负荷曲线。

## 2.3 曲线特征指标

由于 DG 发电规律与负荷用电规律主要通过曲线轮廓与形状体现,而与具体功率值大小无关,故按照式(17)对曲线数据进行标准化处理。

$$\overline{P(\xi)} = \frac{24P(\xi)}{\int_0^{24} P(\xi) dt} \approx \frac{24P(\xi)}{\sum_{\xi=0}^{23} P(\xi)} \quad \xi = 0, 1, \dots, 23) \quad (17)$$

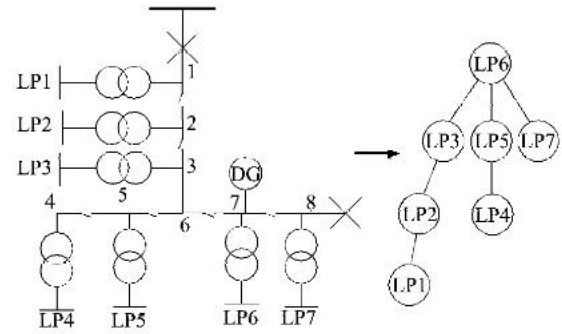


图 1 根据配电网建立有根树

式中  $\overline{P(\xi)}$ ——经过标准化处理后 DG 的输出功率或负荷值在  $\xi$  时刻的大小。

标准化处理后任何功率曲线所代表的负荷日耗电总量或 DG 的日发电总量皆相等。

为表征不同等效负荷曲线与微电源发电曲线的匹配程度,定义了 4 个反映负荷需求与 DG 发电量变化相似性的特征指标,它们一起构成四维相似性特征量数据空间:  $X = [x_1, x_2, x_3, x_4]$ 。其中  $x_1$  为日最大持续过电量,  $x_2$  为日最大持续缺电量,其示意图如 2。

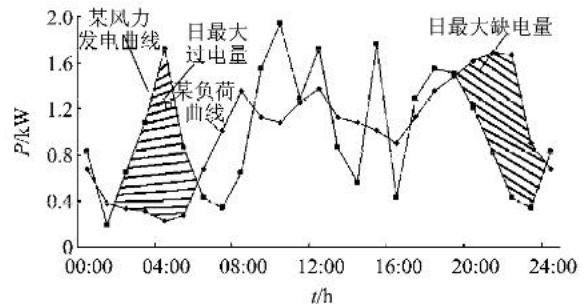


图 2 特征量  $x_1, x_2$  示意图

$x_3$  为日最大供需差,  $x_4$  为负荷曲线与微电源发电曲线的欧式距离,定义

$$x_3 = \max (P_C(\xi) - P_L(\xi)) \quad (18)$$

$$x_4 = \sqrt{\sum_{\xi=0}^{23} (P_C(\xi) - P_L(\xi))^2} \quad (\xi = 0, 1, 2, 3, \dots, 23) \quad (19)$$

## 2.4 负荷组合适应度

对等效负荷曲线的特征值用极差标准法<sup>[5]</sup>进行无量纲化处理。在此基础上,综合考虑不同特征指标对于供需曲线匹配程度的影响,定义适应度指标  $\lambda$

$$\lambda = 0.5 \cdot x_1 + 0.2 \cdot x_2 + 0.2 \cdot x_3 + 0.1 \cdot x_4 \quad (20)$$

$\lambda$  越大,表明负荷曲线与功率输出曲线的差值越小,供电区域内负荷的用电规律对 DG 发电

规律的适应度也就越高。选出适应度最高的负荷组合作为微电网的供电区域,推导出主体模型中式 9) 中的  $W$  和式 (10) 中的  $P_D$ 。

### 3 算例

本文将 RBTSBus6 网络主馈线  $F4$  及其 3 条分支馈线  $F5$ 、 $F6$  和  $F7$  作为研究对象,其系统接线如图 3。以中国南方光照充足的某城市作为光照数据来源,其年平均日功率输出曲线见图 4。负荷分为民用负荷、商业负荷和小工业负荷三类,典型功率曲线如图 5 所示。微电网各主要设备单位成本数据如表 1 所示。其他数据见文献 [6]。

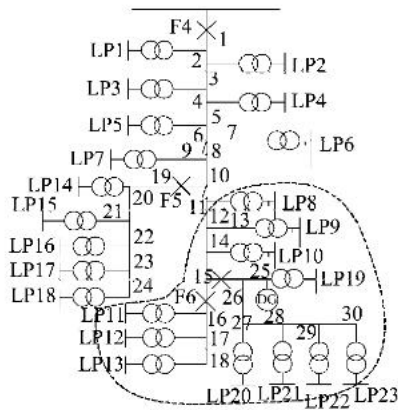


图 3 含 DG 的 RBTSBus6 配网接线图

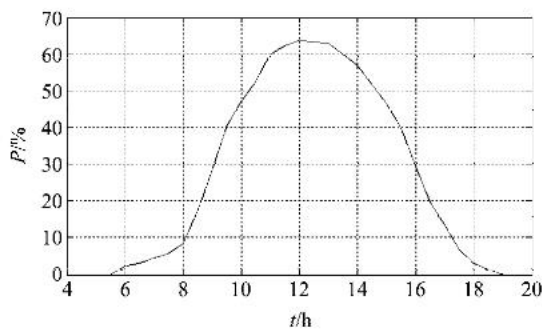


图 4 年平均日光伏电源功率输出曲线

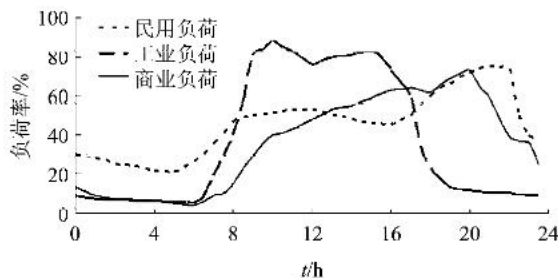


图 5 三类典型日负荷曲线

表 1 元件安装及维护成本 美元/kW

设备	总安装成本	年均维护成本
光伏 DG	11 000	11
微型燃气轮机	1 900	0.5
蓄电池	1 300	13
整流器	900	10

选取的 DG 接入点为节点 25,该节点位于配电网结构最复杂的区域。光伏电源最大配置容量为 2 MW,据此确定微电网的最大供电可行域为图 4 虚线框中的部分,可行域中的负荷数据如表 2 所示。

表 2 微电网供电可行域里的负荷属性

负荷编号	负荷类型	日平均负荷值/kW	负荷编号	负荷类型	日平均负荷值/kW
9	居民	317	19	居民	115
10	居民	175	20	商业	90
11	小工业	120	21	小工业	260
12	商业	212	22	商业	93
13	小工业	80	23	小工业	240

根据负荷原始数据以及节点关联信息,通过负荷遍历算法可得到 60 种可行负荷组合。计算各种组合方式下负荷叠加曲线的适应性指标,选出适应度最高的 6 种组合方式见表 3。适应度最高的负荷组合 1 即为微电网的最优供电区域。

表 3 负荷组合结果及其适应度值

负荷组合编号	组合中包含的负荷	适应度值
1	11, 19, 20, 21, 22, 23	1.000 0
2	19, 20, 21, 22, 23	0.959 8
3	11, 19, 20, 21	0.955 8
4	11, 12, 13, 19, 20, 21, 22, 23	0.945 1
5	11, 12, 19, 20, 21, 22, 23	0.922 1
6	11, 19, 20, 21, 22	0.905 0

从表 3 可以看出,在满足负荷间邻接关系的前提下,负荷组合中工业负荷所占比例越大,则负荷组合适应度越高。这是由于工业负荷与光伏 DG 输出曲线相似度最高,故相比于另外两种负荷,其对适应度值提高的贡献更大。

应用本文所提的微电网投资效益模型,采用 MATLAB M 函数编写的优化平台调用 HOMER<sup>[7]</sup> 对负荷组合 1 下的微电网进行全年模拟计算。模拟过程中不考虑不同季节日照时间的差别,令冬季光伏电源的输出功率为夏季的 60%,春秋季为夏季的 80%。春秋季为负荷用电低谷,居民与商业负荷率较冬夏季平均下降 40%,工业负荷下降 10%。

计算得到微电网中光伏 DG 的配置容量为



4 598 kW,微型燃气轮机的容量为 595 kW,蓄电池容量为 6 018 kW·h,从大电网的年购电量为 1 101.6 kW·h,小于微电网负荷总需求的 10%。最终得到的 RBTS-BUS6 系统微电网的配置结果如图 6 所示。为了验证经过负荷组合匹配算法确定的负荷组合能够得到最优的单位投资效益,将表 3 中 6 种负荷组合方式代入到投资效益模型中,可仿真计算得到各组合方式下的单位发电成本如图 7 所示。

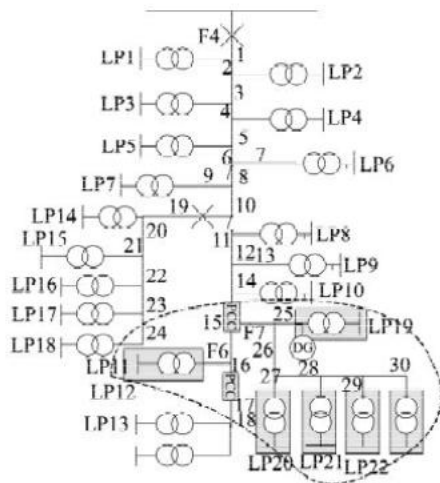


图 6 RBTS-BUS6 系统微电网规划结果

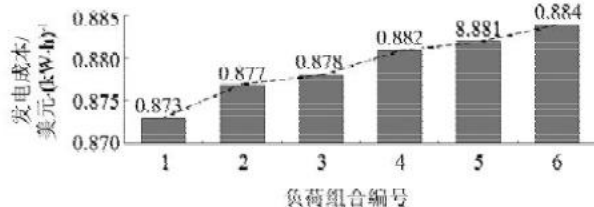


图 7 不同负荷组合下单位发电成本

由图 7 可以看出负荷组合 1 下的单位发电成本为 0.873 美元/(kW·h),明显小于其他负荷组合方式下的单位发电成本。此外,对比适应度值和单位发电成本的计算结果可以看出:微电网供电区域内负荷叠加曲线的适应度与投资微电网的经济性成正相关关系。这是由于 MT 排放的温室气体及大气污染物,在投资效益模型中惩罚系数相应较高,致使成本升高。当负荷用电曲线与 PV 机组发电曲线接近时,可以通过配置较少 MT 机组和储能电池而使得负荷需求得到满足。

#### 4 结语

本文提出的基于负荷组合匹配算法的微电网

规划方法,结合 DG 和负荷特性,在现有配网架构上,根据负荷用电与电源发电最佳匹配关系划分微电网供电区域,再以单位发电成本最低为目标,对微电源容量进行优化配置。通过 RBTS-BUS6 系统算例验证了方法的可行性。

未来可进一步研究天气变化等因素对微电网规划的影响。

#### 参考文献:

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统及其自动化,2007,19(31):100-107.  
LU Zong-xiang, WANG Cai-xia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 19(31): 100-107.
- [2] 王成山,杨占刚,王守相,等.微网实验系统结构特征及控制模式分析[J].电力系统及其自动化,2010,1(34):99-105.  
WANG Cheng-shan, YANG Zhan-gang, WANG Shou-xiang, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 1(34): 99-105.
- [3] 戴上,张焰,祝达康.含有微电网的配电网规划方法[J].电力系统及其自动化,2010,22(34):41-45.  
DAI Shang, ZHANG Yan, ZHU Da-kang. Distribution network planning method containing micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 22(34): 41-45.
- [4] 刘传铨,张焰.计及分布式电源的配电网供电可靠性[J].电力系统及其自动化,2007,22(31):46-49.  
LIU Chuan-quan, ZHANG Yan. Distribution network reliability considering distribution generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 22(31): 46-49.
- [5] 杨纶标,高英仪.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,2006.
- [6] 舒杰,张先勇,沈玉梁,等.可再生能源分布式微电网电源规划方法及应用[J].电力系统及其自动化,2010,5(27):675-680.  
SHU Jie, ZHANG Xian-yong, SHEN Yu-liang, et al. The algorithm and application in power sources planning and designing for micro-grid based on distributed renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 5(27): 675-680.
- [7] SU W, YUAN Z, CHOW M Y. Microgrid planning and operation: solar energy and wind energy[C]// Proceedings of 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July, 25-29, 2010, Minneapolis, Minnesota, USA: 1-7.

收稿日期:2011-10-18

本文编辑:王志胜