

# 基于需求响应的微网经济运行策略及其应用研究

武家胜

(国网苏州供电公司, 江苏 苏州 215000)

**摘 要:** 本文分析了微网的典型结构, 介绍了光伏-燃气三联供联合微网的控制策略和内部各类电源的控制方法, 构建了光伏-燃气三联供联合微网的基本结构和组成。分析了以运行成本最低, 并兼顾节能环保的微网中分布式电源运行策略, 并结合需求响应技术分析夏季典型晴天天气下微网的运行情况, 包括内部电源的出力情况和微网的售购电情况, 给未来微网的运营提出了建议。

**关键词:** 微网; 分布式电源; 运行策略; 需求响应

## 0 引言

随着化石能源持续枯竭, 近年来以新能源发电为主的分布式电源逐渐兴起。分布式电源(Distributed Generation, DG)是指以小规模(发电功率为几kW至几十MW)小型模块式、分散式布置在用户的附近, 用以满足电力系统和用户特定要求的发电系统<sup>[1]</sup>。因多数使用风能、太阳能等新能源, 分布式电源的发展受到各国政府的大力支持。

然而当分布式电源大量接入配电网时, 会对配电网的运行、配置和电能质量带来影响<sup>[2]</sup>。接入分布式电源以后, 配电网由无源网变成有源网, 出现了不可控的发电单元, 配电网潮流变得更加复杂, 甚至有可能出现潮流翻转的情况, 给配电网的运行控制带来不便。另外, 分布式新能源发电一天之内存在较大波动性, 会影响到整个负荷曲线, 甚至增大峰谷差, 影响整个配电网的经济运行。新能源发电的短期波动也会带来电能质量下降的问题。

对于分布式电源带来的新问题, 配电网也相应地发展了需求响应技术和微网技术加以应对。需求响应技术通过对需求侧(负荷侧)通过电价调节、激励等措施, 引导负荷的削减和转移, 达到平抑电

源侧波动的目的, 从而尽可能多地吸纳新能源发电。微网技术通过对分布式电源实现分级控制, 进一步消纳其波动性。本文假设未来电力市场发展较为充分, 在作者之前研究的需求响应技术<sup>[3]</sup>基础上, 通过对微网内部各类分布式电源的出力进行优化控制, 达到微网运行成本最低、环境效益最好的目标。

## 1 微网描述

### 1.1 微网的结构形态

根据美国电力可靠性技术解决方案协会描述的构架, 微网通过一个公共连接点(PCC)与配电网相连, PCC处设置一个变压器, 连接 10kV电压等级(配电网)和 0.4kV电压等级(微网)。微网内部拥有一个或多个母线, 母线上带有若干条馈线, 母线和馈线上均可接入分布式电源和负荷。现有研究和实践已表明, 将分布式电源以微网的形式接入大电网并网运行, 与大电网互为支撑, 是发挥分布式电源效能的最有效方式<sup>[4]</sup>。

表 1 DG 直接接入配电网和通过微网接入配电网对比

指标	DG 直接接入	DG 通过微网接入
电源特性	表现出复杂的电源特性, 不利于配电网分析	可在并网点对公网表现更简单统一的负荷特性或电源特性
潮流分布	直接接入会对配电网潮流造成一定程度的影响, 甚至出现反向潮流	负荷和发电量大致平衡, 新增负荷点建设微网不会造成配电网潮流的大幅变动
系统可靠性	DG 协调不好或间歇式 DG 出力波动不利于系统可靠性	微网统一控制 DG, 配电网故障时可切换孤岛模式供电
规划模型	间歇式 DG 输出随气候天气状况波动, 为规划带来难度	通过储能和控制策略使电源或负荷曲线连续可控, 可简化规划模型, 减少工作量

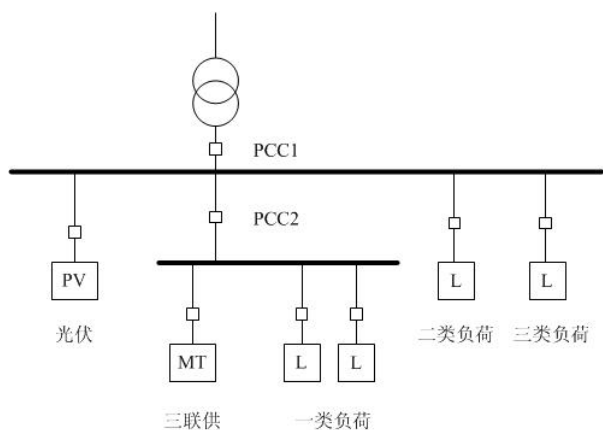


图 1 微网的典型结构

微网的典型拓扑如图 1 所示。该微网内负荷由光伏系统、三联供系统以及配电网进行供电。三联供系统是由微型燃气轮机驱动的，能够对冷、热、电负荷提供联合供给的系统。正常运行时，微网并入配电网运行，二者电能互为补充。当配电网发生故障时，公共连接点 PCC1 断开，微网进入孤岛运行模式。若出现极端故障情况，则可将公共连接点 PCC2 断开，由能够稳定供电的微型燃气轮机保证一类负荷的用电。

## 1.2 微网的控制方法

在光伏-燃气三联供联合微网中，光伏发电受自然光照制约，为不可控发电单元；微型燃气轮机调节性能好，可以对短期光伏出力波动进行补偿，且在输出电功率的同时可以解决相应的冷热负荷。本文中微网采用分层控制模式<sup>[6]</sup>，通过微网的中央控制器控制各分布式电源的出力，以配电网的电压和频率作为参考标准，各分布式电源的逆变器根据微网的运行状态选取相应的控制方法。

其中，光伏发电无论在并网时还是孤岛时均采用恒功率控制模式<sup>[5]</sup>，其参考功率为最大功率跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT)的功率点，这样可以最大程度利用新能源。微型燃气轮机在微网孤岛运行时，需控制其输出电压和频率满足负荷的要求，常采用恒压恒频控制策略<sup>[5]</sup>；在微网并网运行时其输出功率需满足系统要求，常采用 PQ 解耦的双闭环恒功率控制<sup>[7]</sup>，参考功率为微网经济运行状态下对应的微型燃气轮机输出功率，并最终根据配电网调度指令确定出力大小。

## 2 模型建立

### 2.1 微网经济运行策略

微网的经济运行模型，既要保证微网经济上的最优，又要充分发挥分布式电源的高效、环保优势。从经济运行的意义来讲，微网内部分布式电源出力应遵循以下策略：

(1)光伏发电作为可再生能源不直接消耗燃料，无污染气体排放；而且对于已经建好的光伏单元，其发电成本低，应优先利用光伏发电。

(2)对于冷(热)负荷，根据运行成本确定由冷热电联产的微型燃气轮机机组出力，或从由电制冷机(或电热泵)进行供应，后者由光伏发电或配电网供应电力。综合比较二者运行成本，确定选取哪种供电供热方式。

(3)当光伏和微型燃气轮机机组所发电量满足全部电负荷需求且有余力反送时，可向配电网售电；

(4)当光伏和微型燃气轮机所发电量不能满足电能需求时，根据微型燃气轮机综合发电成本经济调度其出力，或从外部电网购电来满足剩余负荷需求。

考虑到购电成本和运行成本的对比，需求响应方法的不同会对微网各分布式电源出力有所影响，主要体现在在选择微型燃气轮机或者从配电网购电的问题上，不同的电价排布会有不同的计算结果。由微网的经济运行可以看出，光伏优先发电，此时若不能满足负荷需求，则微型燃气轮机和从配电网购电二选其一。

### 2.2 微网经济运行模型

微网运行模型中，取微型燃气轮机出力作为决策变量进行计算，计算结果为微型燃气轮机在一个时间段内的输出有功功率参考值<sup>[8]</sup>。在此参考值下，微网的运行状态最优。

基于微型燃气轮机的三联供系统，其数学模型主要计算公式如下<sup>[9]</sup>。

$$Q_{MT}(t) = P_e(t) \cdot \frac{(1 - \eta_c(t) - \eta_l)}{\eta_e(t)} \quad (1)$$

$$Q_{he}(t) = Q_{MT}(t) \cdot K_{he} \quad (2)$$

$$Q_{co}(t) = Q_{MT}(t) \cdot K_{co} \quad (3)$$

$$V_{MT} = \sum \left( \frac{P_e(t) \cdot \Delta t}{\eta_e(t) \cdot L} \right) \quad (4)$$

式中  $Q_{MT}(t)$  为  $t$  时段燃气轮机排气余热； $\eta_e(t)$  为  $t$  时段燃气轮机的发电效率； $\eta_l$  为燃气轮机散热损失系数，取 20%； $P_e(t)$  为  $t$  时段燃气轮机输出的

电功率； $Q_{he}(t)$ 为 $t$ 时段单位时间燃气轮机烟气余热提供的制热量； $Q_{co}(t)$ 为 $t$ 时段单位时间燃气轮机烟气余热提供的制冷量； $K_{he}$ 为溴冷机的制热系数； $K_{co}$ 为溴冷机的制冷系数； $V_{MT}$ 为燃气轮机消耗的天然气量； $\Delta t$ 为燃气轮机的运行时间； $L$ 为天然气低热热值，取  $9.7\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。

微型燃气轮机燃料成本计算公式为

$$C_{MT} = \frac{C_{nl} \cdot \sum (P_e(t) \cdot \Delta t / \eta_e(t))}{L} \quad (5)$$

式中 $C_{nl}$ 为天然气价格，取  $2.5 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

根据 Capstone C65 微型燃气轮机提供的部分负荷情况下发电效率和输出功率关系如图 2 所示。

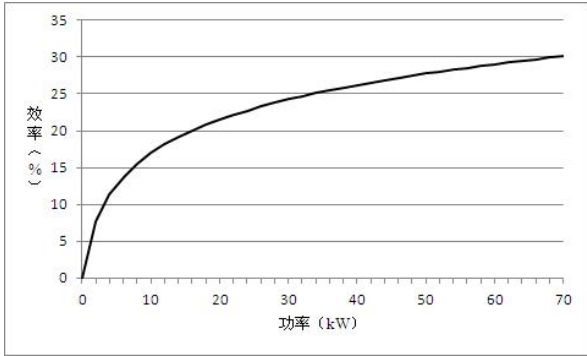


图 2 C65 微型燃气轮机输出功率和发电效率的关系

将各时段微型燃气轮机输出功率 $P_e(t)$ 作为决策变量，考察不同运行模式下微网经济运行所考察的指标。

#### 1) 微网运行成本

微网的运行成本包括微网中各分布式电源的发电成本和维护成本，以及微网内部电源供电不足时的购电成本，和内部电源出力盈余时的售电盈利。

$$\min C_{OM} = \sum_{t=1}^{N_T} C_{OM\_PV} \cdot P_{PV}(t) + C_{OM\_MT} \cdot P_{MT}(t) + p_{buy}(t) \cdot P_{buy}(t) - p_{sell}(t) \cdot P_{sell}(t) \quad (6)$$

式中， $C_{OM}$ 表示整个微网的运行费用，元； $C_{OM\_PV}$ 表示光伏发电费用，元； $P_{PV}(t)$ 表示 $t$ 时段光伏发电平均功率，kW； $C_{OM\_MT}$ 表示微型燃气轮机发电费用，元； $P_{MT}(t)$ 表示 $t$ 时段微型燃气轮机发电平均功率，kW； $p_{buy}(t)$ 表示 $t$ 时段微网从配电网的购电电价，元； $p_{buy}(t)$ 表示 $t$ 时段配电网向微网送电的平均功率，kW； $p_{sell}(t)$ 表示 $t$ 时段微网向配电网的售电电价，元； $P_{sell}(t)$ 表示 $t$ 时段微网向配电网送电的平均功率，kW。

#### 2) 微网排放成本

微网的排放成本包括微网内部各电源发电时 $\text{CO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 气体的排放量。

$$\min C_{GO} = C_{\text{CO}_2} \cdot E_{\text{total\_CO}_2} + C_{\text{SO}_2} \cdot E_{\text{total\_SO}_2} \quad (7)$$

$$E_{\text{total\_CO}_2} = \sum_{t=1}^{N_T} [E_{\text{MT\_CO}_2} \cdot P_{MT}(t) + E_{\text{TG\_CO}_2} \cdot P_{buy}(t) - E_{\text{TG\_CO}_2} \cdot P_{sell}(t)] \quad (8)$$

$$E_{\text{total\_SO}_2} = \sum_{t=1}^{N_T} [E_{\text{MT\_SO}_2} \cdot P_{MT}(t) + E_{\text{TG\_SO}_2} \cdot P_{buy}(t) - E_{\text{TG\_SO}_2} \cdot P_{sell}(t)] \quad (9)$$

式(7)中 $C_{GO}$ 表示整个微网的污染性气体排放成本，元； $C_{\text{CO}_2}$ 和 $C_{\text{SO}_2}$ 分别表示对一天内微网单位排放 $\text{CO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 的惩罚费用，元/kg； $E_{\text{total\_CO}_2}$ 和 $E_{\text{total\_SO}_2}$ 分别表示一天内微网总共排放的 $\text{CO}_2$ 量和 $\text{SO}_2$ 量，kg。式(8)和式(9)中， $E_{\text{MT\_CO}_2}$ 和 $E_{\text{MT\_SO}_2}$ 分别表示微型燃气轮机单位出力下 $\text{CO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 的排放量，kg/kWh； $E_{\text{TG\_CO}_2}$ 和 $E_{\text{TG\_SO}_2}$ 分别表示微网购电即等效为传统发电机组单位出力下 $\text{CO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 的排放量，kg/kWh。

当微网有向配电网输送余电的能力时，其多余电量会被其他负荷吸收，相当于传统发电机少发了等量的电，因此在污染气体排放的计算中需要减去对应的排放量。

### 3 算例分析

本算例选取一个大型商业建筑进行分析，该建筑同时装设若干屋顶光伏系统和冷热电三联供的微型燃气轮机发电，在冷热负荷供应方面同时还设有热泵和制冷机装置，以确保在微型燃气轮机故障或停运的情况下能够继续保证对冷热负荷的供应。

微网在夏季典型日的电负荷、冷负荷和光伏出力如表 2 所示，夏季微网 24h 的热负荷均为 0kW。

本文设天然气低热热值 $L=9.7\text{kWh}/\text{m}^3$ ，天然气价格 $C_{nl}=2.05 \text{ 元}/\text{m}^3$ ，微型燃气轮机散热损失系数 $\eta_1=20\%$ 。则结合式(1)~(5)可以计算出微型燃气轮机输出功率和发电成本。

设溴冷机制热系数 $K_{mt\_he}=1.2$ ，溴冷机制冷系数 $K_{mt\_co}=1.44$ ；微网中配置的电制冷机(或热泵)制热系数 $K_{rb\_he}=3.19$ ，制冷系数 $K_{rb\_co}=2.59$ 。

认为光伏发电为零排放，微型燃气轮机单位出力功率对应的 $\text{CO}_2$ 排放量 $E_{mt\_CO_2}=0.45\text{kg}/\text{kWh}$ ，单位出力功率的 $\text{SO}_2$ 排放量 $E_{mt\_SO_2}=0.008\text{kg}/\text{kWh}$ ；传

统发电厂单位出力功率对应的 CO<sub>2</sub> 排放量  $E_{\text{tg\_CO}_2}=0.78\text{kg/kWh}$ ，单位出力功率的 SO<sub>2</sub> 排放量  $E_{\text{tg\_SO}_2}=0.0085\text{kg/kWh}$ 。CO<sub>2</sub> 排放惩罚费用为  $C_{\text{CO}_2}=0.014$  元/kg，SO<sub>2</sub> 排放惩罚费用为  $C_{\text{SO}_2}=0.99$  元/kg。对于已经装设好的光伏单元，其发电费用  $C_{\text{OM\_PV}}=0.1$  元/kWh。

表 2 微网夏季典型日电负荷、冷负荷和光伏出力

时刻	电负荷(kW)	冷负荷(kW)	光伏(kW)	时刻	电负荷(kW)	冷负荷(kW)	光伏(kW)
00:00	0	0	0	12:00	444.51	631.89	610.21
01:00	0	0	0	13:00	444.51	587.30	623.47
02:00	0	0	0	14:00	444.62	609.77	596.96
03:00	0	0	0	15:00	304.49	604.69	557.14
04:00	1.67	11.66	0	16:00	160.20	536.08	464.32
05:00	116.57	11.25	0	17:00	159.61	492.22	331.67
06:00	347.75	441.06	66.32	18:00	113.40	434.70	198.97
07:00	444.51	354.92	119.39	19:00	113.40	472.10	119.39
08:00	444.51	432.15	265.29	20:00	113.40	464.47	33.19
09:00	442.94	452.85	358.18	21:00	45.34	443.20	0
10:00	261.97	545.13	451.06	22:00	0	0	0
11:00	396.58	580.38	543.89	23:00	0	0	0

表 3 准实时电价及负荷调整结果

时刻	电价(元)	时刻	电价(元)	时刻	电价(元)
00:00	0.32	08:00	0.32	16:00	0.26
01:00	0.32	09:00	0.32	17:00	0.36
02:00	0.32	10:00	0.36	18:00	0.32
03:00	0.36	11:00	0.14	19:00	0.72
04:00	0.40	12:00	0.14	20:00	0.96
05:00	0.36	13:00	0.14	21:00	0.72
06:00	0.36	14:00	0.14	22:00	0.72
07:00	0.36	15:00	0.14	23:00	0.32

根据 2.1 节分析的建模思路，运用 Matlab 软件进行编程计算可得，在文献[3]给出的电价排布下（表 3），在微网经济运行模式下微网中微型燃气轮机出力、微网购电和微网售电的结果如表 4 所示。

表 4 微网经济运行时 MT 出力和微网购售电情况

时刻	MT 出力(kW)	微网购电(kW)	微网售电(kW)	时刻	MT 出力(kW)	微网购电(kW)	微网售电(kW)
00:00	0	0	0	12:00	0	78.27	0
01:00	0	0	0	13:00	0	47.80	0
02:00	0	0	0	14:00	0	83.09	0
03:00	0	0	0	15:00	0	0	19.18
04:00	0	6.19	0	16:00	0	0	97.13
05:00	0	120.92	0	17:00	446.88	0	618.93
06:00	367.55	0	86.11	18:00	0	82.27	0
07:00	250.91	74.21	0	19:00	414.79	0	420.78
08:00	0	346.07	0	20:00	402.92	0	322.71
09:00	0	259.61	0	21:00	370.71	0	325.37
10:00	536.83	0	725.93	22:00	0	0	0
11:00	0	76.77	0	23:00	0	0	0

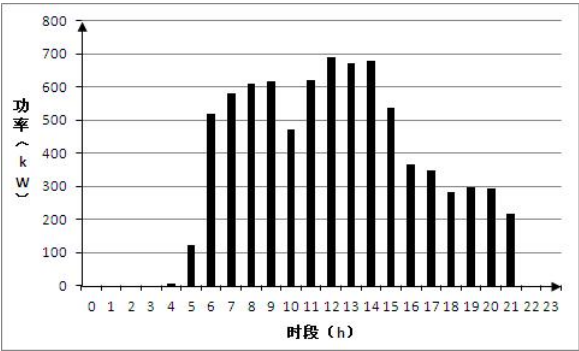


图 3 无 DG 出力时微网的购电情况

图 3 和图 4 分别展示了微网无 DG 出力时和经济运行策略下的售购电情况。对比可得，与无 DG

接入时相比，微网对外显示的负荷特性更加平缓，并且有能力向配电网反送电能，并接受配电网统一调度。

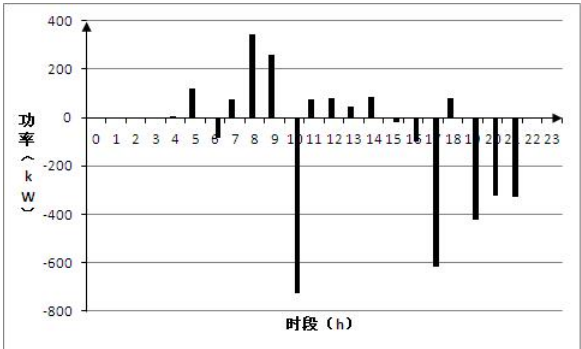


图 4 经济运行时微网的售购电情况

图 5 显示了经济运行策略下微网中光伏、微型燃气轮机出力情况以及微网的售购电情况。可以看出，微网有余力反送的电能，均由光伏或微型燃气轮机供应；微型燃气轮机发电成本昂贵，多数情况下均高于购买市电费用。

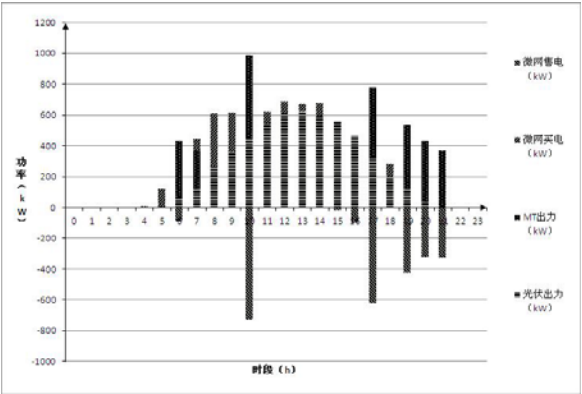


图 5 经济出力时微网的运行状态

在此电价排布下微网的运行成本、有害气体等排放量及气体排放惩罚费用指标如表 5 所示。无分布式电源出力时的微网运行成本，也即微网中所有负荷均由市电供应时微网的购电费用。

表 5 微网经济运行前后各项指标对比情况

指标	微网经济运行时	无 DG 出力时
运行成本(元/天)	867.47	2414.15
CO <sub>2</sub> 排放(kg/天)	131.82	6185.14
SO <sub>2</sub> 排放(kg/天)	10.08	67.40
排放费用(元/天)	11.82	153.32

可以看出，根据本文给出的微网经济运行策略，在满足微网内部各类负荷供应的同时，既能保证新能源发电的最大出力，又能保证微网运行在最经济的状态。在微网经济运行模式下，微网的经济指标和环保指标均明显优于不装设分布式电源的情形，对分布式电源进行合理控制和调度可以获得很好的经济效益和低碳效益。

4 结束语

本文分析了微网的典型结构，介绍了光伏-燃气三联供联合微网的控制策略和内部各类电源的控制方法，构建了光伏-燃气三联供联合微网的基本结构和组成。分析了以运行成本最低，并兼顾节能环保的微网中分布式电源运行策略。微网作为一个自治的发电/负荷单元，当其无电能反送时，将其看作一般的负荷单元；当其有能力向配电网反送电

能时，将其作为发电单元与传统发电单元一起接受配电网的调度。文章给出了微网的经济运行策略，并结合作者之前所研究的需求响应技术分析了夏季典型晴天天气下，微网的 24h 运行情况，包括内部电源的出力情况和微网的售购电情况，给未来典型微网运行策略提出了建议。

参考文献：

[1] Golestani S., Tadayon M.. Distributed generation dispatch optimization by artificial neural network trained by particle swarm optimization algorithm[C]. 2011 8th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2011: 543-548.

[2] 陈靖, 李雨薇, 习朋等. 微网系统经济运行优化[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 167-172.

[3] Wu Jiasheng , Ai Xin , Zhao Yuequn , Wu Dawei. Research on Modeling and Appliance of a New Price Mechanism Demand Response[C]. The 5<sup>th</sup> IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference IEEE-APPEEC 2013 , Hong Kong , 8-11 December 2013.

[4] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4, 31.

[5] 王成山, 李琰, 彭克等. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20.

[6] 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].电力系统自动化, 2010, 34(1): 99-105.

[7] 杨秀, 郭贤, 臧海洋等. 微型燃气轮机发电系统孤岛及并网运行的建模与控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 63-68.

[8] Vinothkumar K., Selvan M. P.. Distributed generation planning: a new approach based on goal programming[J] . Electric Power Components and Systems, 2012, 40(5): 497-512.

[9] 陈洁, 杨秀, 朱兰等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, (19): 57-66.

作者简介：

武家胜（1990-），男，山东人，助理工程师，工学硕士。