

# 采用搜索保护与差动保护的光伏微电网综合保护策略

王志文, 陈来军, 郑天文, 沈 沉

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:** 光伏微电网具有短路电流小、潮流双向流动、运行工况多变等特点, 容易导致继电保护的拒动与误动。提出了基于电压启动、搜索最大电流正序故障分量的检测方法, 并将其与传统差动保护方法相结合, 设计了光伏微电网综合保护策略。该保护策略不依赖短路电流幅值启动, 不需要整定继电保护电流阈值, 适用于微电网并网和离网模式。此外, 该策略在通信故障、主保护拒动等工况下依然有效。在 PSCAD 环境中构建了典型的光伏微电网算例, 通过典型工况全面验证了综合保护策略的有效性。

**关键词:** 光伏微电网; 搜索保护; 差动保护; 综合保护策略

## A comprehensive protection scheme for photovoltaic microgrid using scan protection and differential protection

WANG Zhi-wen, CHEN Lai-jun, ZHENG Tian-wen, SHEN Chen

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Dep of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Limited short-current, bi-directional power flow and variable operating modes in microgrids make for relay's malfunction and false tripping. A fault detection method which starts by voltage dip and scans the largest positive-sequence fault component is explored. A comprehensive scheme using the method and differential protection is proposed for radial microgrid. The scheme is independent of amplitude of short-current, without setting current threshold, working well in both paralleled and islanded modes. Even coming across failure of communication, the scheme is still effective. Simulations in PSCAD verifies the proposed scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51322005) and National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050204).

**Key words:** photovoltaic microgrid; scan protection; differential protection; comprehensive scheme

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0014-06

## 0 引言

光伏发电因具有清洁、来源广泛等优点, 愈来愈受到重视。为实现分布式光伏电源大规模接入配电网, 微电网应运而生<sup>[1-3]</sup>。光伏微电网作为独立供电系统<sup>[4]</sup>, 与传统配电网在电源特性、运行方式等方面存在差异, 传统的继电保护方法难以直接应用到光伏微电网中<sup>[5-7]</sup>。

光伏微电网继电保护的主要难点表现在以下三个方面<sup>[8-10]</sup>: 第一, 电力电子逆变器是光伏微电网中的主要电源接口, 其最大短路电流往往被限制在

两倍额定电流以内, 过小的短路电流使得基于短路电流幅值启动的继电保护失效。第二, 光伏电源的广泛接入和光伏功率的随机波动使得微电网潮流灵活多变, 从而导致继电保护阈值难以整定。第三, 光伏微电网在并网运行和离网运行模式下的短路特性大不相同。

针对微电网中短路电流过小的特点, 文献[8]提出加入大容量储能来提高故障电流, 再将传统电流保护应用到微电网。这种保护设计严重依赖于储能设备的运行与控制, 降低了系统的可靠性。

文献[9]通过将微电网分区, 采用差动电流检测单相接地故障。为了检测相间故障, 在此基础上追加负序分量保护。上述组合策略可以应对微电网小短路电流故障, 但无法检测三相对称故障。

**基金项目:** 国家自然科学基金创新群体项目(51322005); 国家 863 高技术基金项目(2012AA050204)

文献[10]提出根据功率方向可以检测短路故障, 保护开关根据功率方向执行不同的延时依次动作切除故障。但是, 短路故障发生在监测点近端时因监测点电压接近于零而出现“保护死区”。

文献[11]通过分析不同区域电压 q 轴扰动信号来实现故障的检测。这种方法只能将故障定位到某个母线区域, 无法精确定位故障馈线。

鉴于以上不足, 考虑到微电网通信条件良好, 有学者提出差动保护<sup>[12-14]</sup>等方法, 其共同特点是采用通信获取全局或线路两端数据来检测故障。这类方法可以适应光伏微电网短路电流小、潮流双向的特点, 但需要建立覆盖全系统的通信网络。

随着微机保护的发展, 基于故障分量的继电保护方法逐步得到广泛应用。相较于基于全电流(负荷电流与故障电流)的保护方法, 该类方法具有更高的灵敏性, 利用正序故障分量即可检测到四类短路故障。

考虑到基于故障分量保护方法的上述优点, 本文针对现有微电网保护策略的不足, 提出了搜索最大正序故障分量的保护方法(以下简称“搜索保护”)。在此基础上, 将搜索保护和差动保护相结合, 设计了主保护与后备保护, 形成综合保护策略。最后, 在多种典型工况下验证了本文提出的综合保护策略的有效性。

### 1 搜索保护基本原理

以图 1 所示一个单母线结构的微电网来说明搜索保护的基本原理。单母线结构的微电网中含有光伏、储能、负荷。母线处安装微机保护装置监测该母线电压和各条馈线的电流。

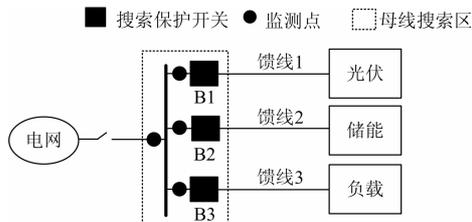


图 1 单母线结构微电网  
Fig. 1 Single bus microgrid

微电网发生任意类型的短路故障后, 相当于在故障处叠加了一组等效电源。其中故障处等效的正序电源产生的电流正序故障分量, 从故障点出发, 沿正序网络传播, 如图 2 所示。各馈线中故障线路的电流正序故障分量最大。关于本结论的详细证明参见文献[15]。因此, 通过比较各馈线中电流正序

故障分量的大小并搜索最大值, 可以实现故障定位。

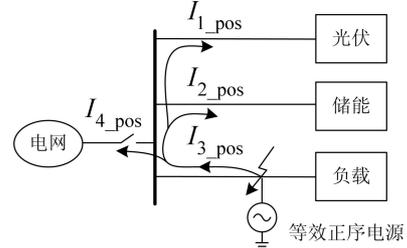


图 2 正序故障分量分布

Fig. 2 Positive-sequence fault component distribution

搜索保护的基本流程如图 3 所示, 说明如下: 微机保护装置监视母线电压, 若母线电压异常, 保护启动。比较各馈线电流正序故障分量, 其中幅值最大所在的馈线即是故障馈线。定位故障后, 切除该故障馈线。搜索表达式为

$$F_{\text{fault}} = F_k \left( I_{k\_pos} = \max(I_{i\_pos}) \right) \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

式中:  $F_{\text{fault}}$  表示被切除的故障馈线;  $F_k$  表示第  $k$  条馈线;  $I_{k\_pos}$  表示第  $k$  条馈线的电流正序故障分量幅值。

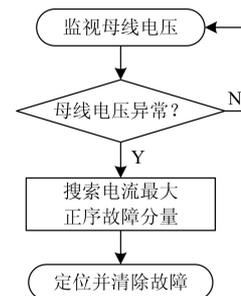


图 3 搜索保护流程图

Fig. 3 Flow diagram of scan protection

在上述策略中, 关键点之一是如何定义“母线电压异常”来启动搜索保护。假如系统发生三相对称故障, 则母线电压从 1.0 (标幺值) 跌落至接近于 0; 假如发生单相接地、两相接地、相间故障, 则母线中出现明显的零序/负序电压。因此, 可以根据母线正序、负序、零序电压幅值来启动保护。理论上, 电压阈值设定只需躲开 1 (对于正序电压) 和 0 (对于零序/负序电压) 即可。在本文中, 选取 0.2 作为启动阈值。综上, 搜索保护的启动逻辑表示如图 4 所示。  $U_{\text{pos}}$ 、 $U_{\text{neg}}$ 、 $U_{\text{zero}}$  分别表示母线正序、负序、零序电压幅值。

从搜索保护的处理逻辑来看, 该方法不依靠短路电流幅值的大小, 这是其有别于传统继电保护方法的特点。

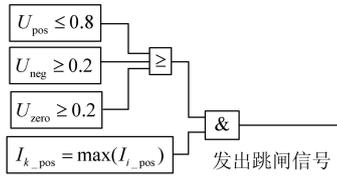


图 4 搜索保护的逻辑

Fig. 4 Relay logic of scan protection

## 2 综合保护策略设计

不失一般性，考虑辐射式拓扑的微电网，如图 5 所示。对于此类微电网，理想的保护策略是主保护能够对典型故障实现清除，并且上游能为下游提供后备保护。

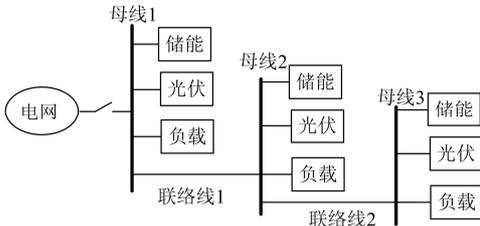


图 5 辐射式微电网拓扑

Fig. 5 Topology of radial microgrid

考虑到辐射式拓扑可以看成由多个单母线结构互联而成，如果在搜索保护中增加延时配合，则其不仅能为本母线的馈线提供主保护，还能为相邻单母线结构提供后备保护。

### 2.1 主保护设计

#### 2.1.1 馈线主保护

对每个单母线结构的馈线采用搜索保护，当满足搜索表达式时无延时动作（以下简称“搜索速断保护”）。搜索速断保护开关安装在馈线处，搜索监测点包括单母线结构的馈线及联络线，如图 6 所示。

在图 6 中，当故障出现在本地母线的某条馈线时，最大正序故障分量出现在该馈线，馈线的搜索速断保护跳闸切除故障。当故障发生在上游或下游时，最大正序故障分量出现在上游联络线或下游联络线，馈线的搜索速断保护不动作。

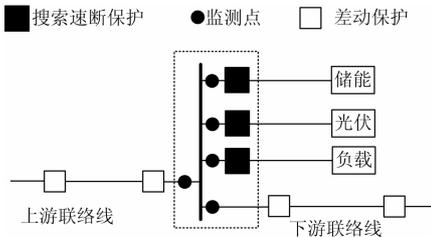


图 6 馈线主保护设计

Fig. 6 Primary protection for feeders

#### 2.1.2 联络线主保护

差动保护不依赖短路电流幅值，对运行模式不敏感，故此选择差动保护作为联络线主保护。当且仅当故障发生在联络线时，差动保护动作。

### 2.2 后备保护设计

若系统发生通信故障或其他原因导致主保护拒动，可在搜索保护的基础上设置延时来实现后备保护（以下简称“搜索延时保护”）。搜索延时保护开关安装在联络线上游侧，如图 7 所示，各级保护开关的延时  $t_d$  按照阶梯原则整定。

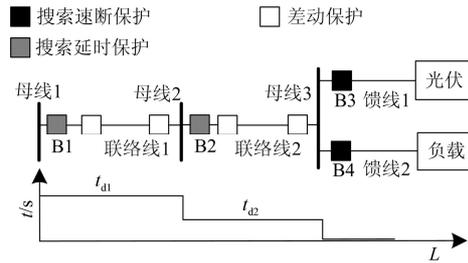


图 7 后备保护及其时序图

Fig. 7 Back-up protection and sequence

以下分析搜索延时保护 B1、B2 的动作情况。假设故障发生在联络线 2 上且差动保护拒动。故障后经过  $t_{d2}$  延时，母线 2 区域内的最大正序故障分量在 B2 处，B2 动作切除故障联络线 2。类似地，当故障发生在下游馈线且主保护拒动时，B2 经过  $t_{d2}$  延时后切除联络线 2，实现下游故障与上游线路的隔离。由于  $t_{d1} > t_{d2}$ ，B1 不动作。

### 2.3 保护配置原则

对于辐射式微电网，每个单母线结构按照表 1 配置，如此便形成了整个微电网的保护策略。

表 1 保护配置

Table 1 Protection configuration

保护方法	安装位置	作用
搜索速断保护	馈线	馈线主保护
差动保护	联络线	联络线主保护
搜索延时保护	联络线上游侧	本联络线及下游后备保护

值得指出的是，采用搜索保护与差动保护结合的综合保护策略，仅需在联络线上为差动保护建通信线路，不同母线之间不需要通信，减少了通信线路的建设。

## 3 仿真测试

### 3.1 测试算例

在 PSCAD 仿真软件中搭建光伏微电网仿真算例，如图 8 所示，含有光伏电源、储能、负载。光

伏电源均采用 PQ 控制。储能单元并网时采用 PQ 控制, 离网时采用 Vf 控制。按照表 1 的原则对该

算例进行保护配置, 各类保护均标注在图 8 中。

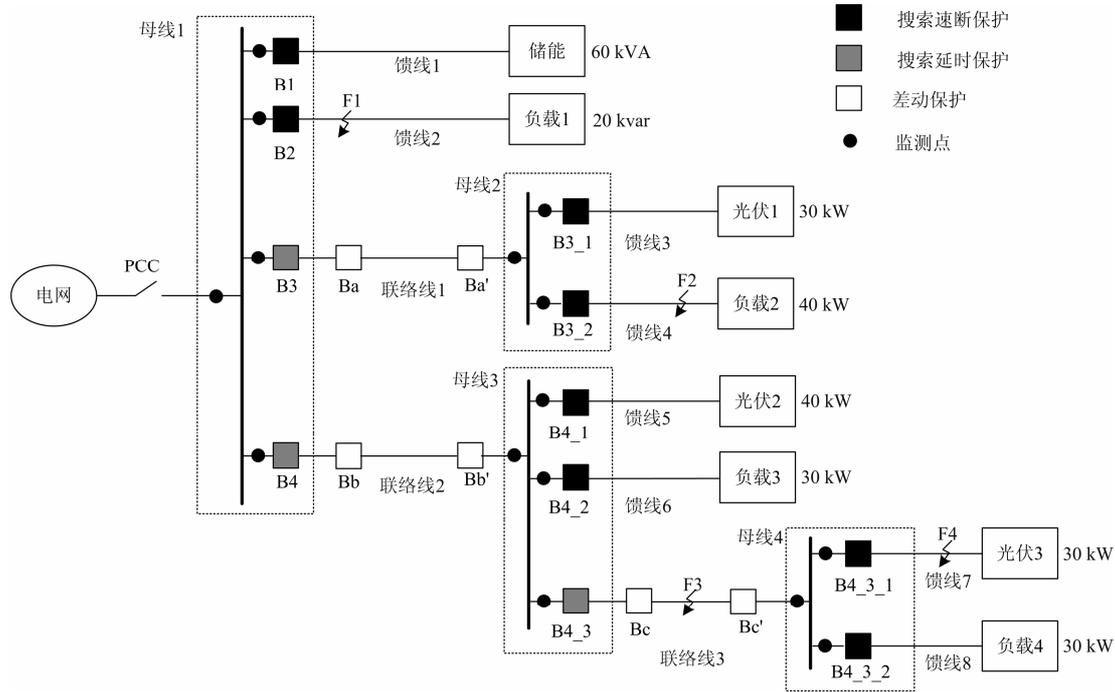


图 8 测试算例

Fig. 8 A test photovoltaic microgrid

### 3.2 测试结果

#### 3.2.1 主保护测试

##### 1) 主保护完全测试

根据前文提及的微电网保护主要难点, 设置工况如表 2 所示, 遍历任意线路的四类故障, 对本策略主保护进行测试。

表 2 主保护完全测试

Table 2 Primary protection complete test

故障位置	故障类型	测试工况	测试目的
任意线路	四类故障	离网运行	小短路电流
		并网运行	大短路电流
		光伏出力波动	潮流变化

下面以故障发生在馈线 2 (F1 处)、三相对称故障、离网运行的工况为例, 介绍测试结果 (其余工况测试结果类似, 不再赘述)。

故障发生后, 在母线 1 处监测的电流正序故障分量中, F1 所在馈线 2 正序故障分量最大, 该馈线搜索速断 B2 动作清除故障 (见表 3 母线 1)。

在其他母线处监测的电流正序故障分量中 (见表 3 母线 2、母线 3、母线 4), 联络线的正序故障分量最大, 因此各馈线的搜索速断保护不动作。搜索延时保护由于延时后故障已清除, 不动作。联络

线差动保护不动作。

测试表明, 主保护在微电网并网运行、离网运行以及潮流变化的工况下, 均能有效清除任意线路的四类短路故障。

表 3 监测点结果

Table 3 Results of monitoring points

母线区域	监测位置	正序故障分量幅值/A	
母线 1	B1	80	
	B2	292(最大)	
	B3	67	
	B4	145	
配网侧		0	
	母线 2	B3_1	46
		B3_2	24
联络线		67(最大)	
母线 3	B4_1	46	
	B4_2	47	
	B4_3	57	
	联络线	145(最大)	
母线 4	B4_3_1	22	
	B4_3_2	5	
	联络线	33(最大)	

2) 主保护对比测试

在三种典型工况下, 将本文方法与传统保护方法进行对比, 结果汇总如表 4 所示。

表 4 不同主保护测试结果

Table 4 Results of different primary protections

测试 工况	故障 位置	故障类型	其他方法	本文方法
1	F1	单相对地	B2 拒动 (注 1)	B2
		两相对地	B2 拒动 (注 1)	B2
		相间短路	B2 拒动 (注 1)	B2
		三相短路	B2 拒动 (注 2、3)	B2
2	F1	单相对地	B2 拒动 (注 1)	B2
		两相对地	B2 拒动 (注 1)	B2
		相间短路	B2 拒动 (注 1)	B2
		三相短路	B2 拒动 (注 2、3)	B2
3	F2	单相对地	B3_2 拒动 (注 4)	B3_2
		两相对地	B3_2 拒动 (注 4)	B3_2
		相间短路	B3_2 拒动 (注 4)	B3_2
		三相短路	B3_2 拒动 (注 2、4)	B3_2

工况 1: 微电网并网运行, F1 在线路首端  
 工况 2: 微电网离网运行, F1 在线路首端。  
 工况 3: 微电网离网运行, F2 在线路末端。  
 注 1: 电压扰动法测试结果。  
 注 2: 序分量法测试结果。  
 注 3: 功率方向法测试结果。  
 注 4: 过流保护测试结果。

从对比测试可以看出, 与传统方法相比, 本文提出的主保护能够检测任意位置的四类故障, 没有死区。

3.2.2 后备保护测试

为考察本策略的后备保护, 设置通信故障导致差动保护拒动及下游搜索速断保护拒动两种工况, 表 5 给出了测试结果。

表 5 后备保护测试

Table 5 Back-up protection test

测试工况	故障位置	故障类型	动作开关	结论
通信故障	F3	四类故障	B4_3	正确
下游保护拒动	F4	四类故障	B4_3	正确

测试结果表明, 本文设计的后备保护在通信故障或保护拒动的情况下仍能有效清除故障。值得说明的是, 当通信故障时, 传统的基于通信的保护方法 (如差动保护、功率方向纵联保护等) 则会失效。

3.3 对比分析

将本文提出的综合保护策略与传统的过流保护、基于序分量法的保护、基于电压扰动法的保护、差动保护等方法进行对比, 结果如表 6 所示。

表 6 不同保护方法的对比

Table 6 Comparison of different protections

	离网 模式	对称 故障	通信 失败
过流保护	×	√	√
序分量法	√	×	√
电压扰动法	√	√	×
差动保护	√	√	×
本文综合保护策略	√	√	√

测试结果表明, 本文提出的综合保护策略可以适应更多的工况。

4 结论与建议

搜索保护采用比较正序故障分量相对大小的方法, 因而不依赖于短路电流幅值, 在微电网并网、离网运行及潮流变化时, 均能有效检测四类短路故障。本文在搜索法的基础上设计了光伏微电网的综合保护策略, 该策略具有如下特点:

- 1) 对运行方式不敏感。在并网、离网模式下, 均可以清除四类短路故障。
- 2) 可应对光伏电源出力波动。
- 3) 通信失败或其他原因导致主保护拒动时, 后备保护能清除故障。

后续工作拟进行保护装置的工程实用化实验, 并试将其推广至多微电网。

参考文献

[1] 李瑞生. 微电网关键技术实践及实验[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 73-78.  
 LI Rui-sheng. Practice and experiment of the key microgrid technologies[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 73-78.

[2] 杨志淳, 乐健, 刘开培, 等. 微电网并网标准研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 66-71.  
 YANG Zhi-chun, LE Jian, LIU Kai-pei, et al. Study on the standard of the grid-connected microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 66-71.

[3] 黄文焘, 邵能灵, 范春菊, 等. 微电网结构特性分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 149-155.  
 HUANG Wen-tao, TAI Neng-ling, FAN Chun-ju, et al.

- Study on structure characteristics and designing of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 149-155.
- [4] 梅生伟, 刘锋, 薛安成. 电力系统暂态分析中的半张量积方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.  
MEI Sheng-wei, LIU Feng, XUE An-cheng. Semi-tensor product method in power system transient analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [5] 张宗包, 袁荣湘, 赵树华, 等. 微电网继电保护方法探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 204-209.  
ZHANG Zong-bao, YUAN Rong-xiang, ZHAO Shu-hua, et al. Research on microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 204-209.
- [6] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5.  
ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Cheng-jun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5.
- [7] 张玉海, 王新超, 许志成, 等. 微网保护分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 55-60.  
ZHANG Yu-hai, WANG Xin-chao, XU Zhi-cheng, et al. Analysis of microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 55-60.
- [8] JAYAWARNA N, BARNES M, JONES C, et al. Operating microgrid energy storage control during network faults[C] // System of Systems Engineering, IEEE International Conference on, 2007: 1-7.
- [9] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Microgrid protection[C] // Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2007: 1-6.
- [10] WANG Xiao-ping, LI Yang, YU Yong-yang. Research on the relay protection system for a small laboratory-scale microgrid system[C] // Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on, 2011: 2712-2716.
- [11] AL-NASSERI H, REDFERN M A, O'GORMAN R. Protecting micro-grid systems containing solid-state converter generation[C] // Future Power Systems, International Conference on, 2005: 5.
- [12] SORTOMME E, VENKATA S S, MITRA J. Microgrid protection using communication-Assisted digital relays[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2789-2796.
- [13] DEWADASA M, GHOSH A, LEDWICH G. Protection of microgrids using differential relays[C] // Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 21st Australasian, 2011: 1-6.
- [14] 苏海滨, 李瑞生, 李献伟, 等. 基于控制网络的逆变器微电网继电保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 134-139.  
SU Hai-bin, LI Rui-sheng, LI Xian-wei, et al. Inverter microgrid protection based on control network and intelligent relays[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 134-139.
- [15] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 50-56.  
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 50-56.

---

收稿日期: 2014-02-20

作者简介:

王志文(1990-), 男, 博士研究生, 研究方向为微电网保护与控制; E-mail: wang\_zw13@mails.tsinghua.edu.cn

陈来军(1984-), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 研究方向为微电网运行控制与保护、电磁暂态并行仿真计算;

郑天文(1987-), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源发电与微电网控制、博弈论。