

## 基于智能负载的微电网精准切负荷控制策略

史军<sup>1</sup>, 王加澍<sup>2</sup>, 熊峰<sup>3</sup>, 程维杰<sup>1</sup>, 宋俊文<sup>1</sup>, 马刚<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210046; 3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**随着分布式发电(DG)的大量接入,微电网的安全稳定运行正面临较大的考验,精准切负荷控制策略的重要性愈发突出。为了最小化过切量,提升负荷控制的经济性,需对微电网精准切负荷的控制策略进行改进。首先,介绍了智能负载原理,通过调节电力弹簧(ES)电压的大小实现智能负载功率的动态变化;然后分析了应用权重法与轮次法的传统精准切负荷控制策略,在此基础上提出了一种基于智能负载的精准切负荷控制策略,通过负荷的动态响应实现最小化过切量,并将其应用于权重法与轮次法;最后,算例分析表明,所述方法可有效降低系统过切量,提升负荷控制的经济性。

**关键词:**微电网;精准切负荷;智能负载;权重法;轮次法

**中图分类号:**TM732

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)02-0103-07

### 0 引言

节能减排和绿色电力共同促进了可再生能源发电的迅速发展<sup>[1-3]</sup>。作为可再生能源发电的主要形式,分布式发电(distributed generation, DG)的输出功率受可再生能源的间歇性特征影响,波动性较强且较难预测<sup>[4-7]</sup>。微网不仅解决了DG散接入的问题,并且为用户带来了多方面的效益,目前已经成为分布式能源的一种最有效利用方式<sup>[8-12]</sup>。

微网可以与主网连接,也可以独立运行,当电网出现故障时,孤岛模式能够提高电力系统的可靠性和弹性<sup>[13-14]</sup>。为了提高电网的安全性与稳定性,微电网精准切负荷控制策略的重要性愈发突出<sup>[15]</sup>。针对微电网的精准切负荷问题,文献[16-19]提出了一种基于植物学的混合优化算法,即信息素标记蚁群算法,为微电网系统中的精准切负荷问题提供了适应性的解决方案。文献[20]提出了一种采用粗调轮与细调轮相配合的微电网减载策略,该方法需要多轮次切负荷配合,切负荷量也不够精确。

已有的切负荷方法存在一定过切、灵活性不足等问题,文中引入电力弹簧(electric spring, ES)的概念来提高微网中切负荷的精准性与灵活性。目前国内外已有众多专家学者针对ES展开研究<sup>[21]</sup>。李凡、汤雯等人将电网的电压暂降特性与ES特点相结合,降低了电网中电压暂降对电网运行设备及产品质量的损害<sup>[22]</sup>。Firdaus、Mishra等人发现ES可

以用于调节系统中关键负载的电压,也可以控制ES抑制低频振荡,在该工作中通过基于更新参考频率的振荡调制ES的电流来实现相同的目的<sup>[23]</sup>。2012年,香港大学许树源研究团队提出了智能负载,其由ES与可承受一定电压波动的非关键负载(non-critical load, NCL)串联组成<sup>[24-25]</sup>。

研究发现,智能负载既可以减小DG并网电压波动对关键负载的影响,也可以控制逆变器微电网中抑制低频振荡,同时还能够调节分布中的电压电网网络中连接许多小规模间歇性可再生电源,降低电网中由于电压暂降而产生的损害<sup>[26-28]</sup>。

文中提出一种基于智能负载的微电网精准切负荷控制策略。首先,介绍了智能负载原理;然后对传统精准切负荷控制策略进行分析,详细阐述基于智能负载的精准切负荷控制策略,并分别将其应用于权重法与轮次法;最后,通过算例验证文中所述方法的有效性。

### 1 智能负载原理

智能负载的基本结构如图1所示<sup>[29-30]</sup>。其中,控制回路根据上级的调度需求,计算得到逆变器的调制信号 $\dot{V}_{ES-order}$ ;电压源型整流器负责将母线电压转换为稳定的直流电压;电压源型逆变器负责根据 $\dot{V}_{ES-order}$ 将直流电压转换为ES输出电压 $\dot{V}_{ES}$ ;  $C_d$ 为ES的直流侧电容;  $L_f, C_f$ 分别为滤波电感和滤波电容;  $i_{ES}$ 为ES输出电流;  $\dot{V}_{NC}$ 为NCL电压。

通过调节ES输出电压 $\dot{V}_{ES}$ 的大小,可有效控制智能负载的整体吸收功率。若控制 $\dot{V}_{ES}$ 与 $i_{ES}$ 同相,

收稿日期:2019-09-08;修回日期:2019-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607093);中国南方电网有限责任公司科技项目(090000KK52170077)

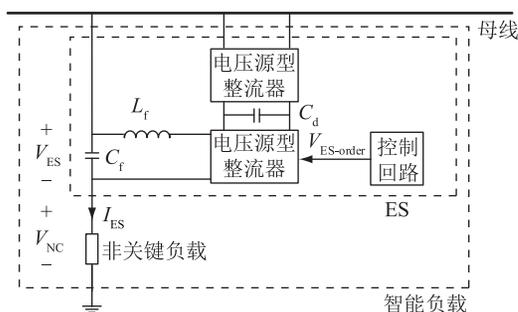


图1 智能负载的基本结构

Fig.1 Basic structure of smart load

则可使ES工作在阻性模式,智能负载的吸收功率降低;若控制 $\dot{V}_{ES}$ 与 $\dot{I}_{ES}$ 反相,则可使ES工作在负阻性模式,智能负载的吸收功率升高。ES工作于阻性模式与ES工作于负阻性模式时的相量关系分别如图2(a)与图2(b)所示,其中虚线相量为智能负载吸收功率不受控时的相量,实线相量为智能负载吸收功率受控时的相量, $\dot{V}_S$ 为母线电压。

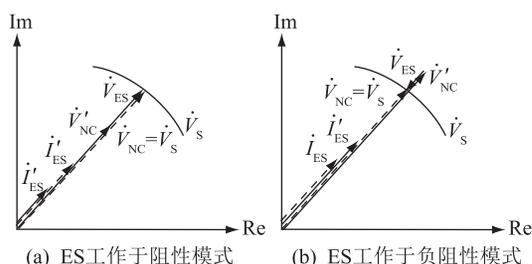


图2 智能负载有功调节相量图

Fig.2 Phasor diagram of active power regulation for smart load

控制回路具体如图3所示。其中, $P_{SL-N}$ 为智能负载的额定有功功率; $P$ 为智能负载的负荷需切量; $k$ 为PI控制器后置增益; $abs$ 为取绝对值函数; $V_{dc}$ 为ES直流侧电压大小; $sign$ 为符号函数;PLL为锁相环,其输出 $I_{ES}$ 的实时相位值。

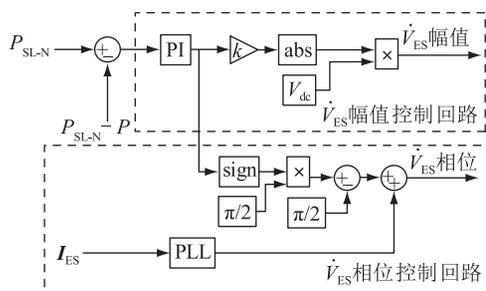


图3 ES控制回路

Fig.3 ES control loop

利用智能负载中ES的阻性工作模式可实现对精准切负荷的有效控制。当ES工作于阻性模式时,智能负载的吸收功率降低。通过改变ES电压

的大小可以实现功率的动态变化,从而实现切负荷的精准控制。

根据图2、图3可知,通过调节ES的输出电压大小,可有效控制智能负载整体功率,从而实现对负荷的控制。例如输入功率降低时,为维持用户侧关键负荷正常运行,通过ES的柔性调节,在不影响非关键负荷正常运行的情况下,适当降低非关键负荷的电压水平,来实现用户侧的稳定。此处非关键负荷,例如空调、照明等用户侧负荷,可承受一定电压波动,且不影响其正常工作。由于微电网本身源荷容量较小,该控制方法则更为控制灵活,且对用户侧来说更为柔性,在微电网由并网向孤岛运行模式切换时影响更小。

## 2 切负荷策略

### 2.1 传统精准切负荷控制策略分析

控制子站根据电网精准切负荷控制策略将需切总量分配至各执行站时,需要遵循尽可能使过切量最小的原则。定义过切量表达式为:

$$\eta = \frac{P_p - P_n}{P_n} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $P_p$ 为区域控制子站下辖各执行站的实切负荷总量; $P_n$ 为区域控制子站需切负荷总量。

若过切量较高,不仅可能造成系统的再次失稳,也将对用户的经济性造成一定影响。为了尽可能降低过切量,权重法和轮次法相继得到了应用。

#### 2.1.1 权重法

权重法根据各执行站的重要程度,为各执行站分别设定一个权重系数,并以此为基础实现切负荷量的合理分配。各执行站的需切负荷量为:

$$P_i = P_n \frac{P_{i,c} K_i}{\sum_{i=1}^n P_{i,c} K_i} \quad (2)$$

式中: $P_{i,c}$ 为*i*号执行站的可选切负荷量; $K_i$ 为*i*号执行站的权重系数; $n$ 为区域控制子站下辖的执行站个数。权重系数由工作人员根据电网实际运行情况进行整定,权重系数较高的执行站将分配得到较高的需切负荷量,而权重系数较低的执行站将分配得到较低的需切负荷量。

各个执行站均会产生一个过切量,因此,控制子站的总过切量将较高。并且,随着电网的扩容,执行站将逐渐变多,控制子站的总过切量将变得更高。

#### 2.1.2 轮次法

为了尽可能地减少过切量,可使用基于轮次法

的精准切负荷策略。首先,将各执行站的优先级进行排序;然后,将各执行站中的可中断负荷进行优先级排序,从而形成负荷轮次表,如表1所示。各执行站根据优先级从高到低的顺序由左向右排列,各执行站中的可中断负荷根据优先级从高到低的顺序由上向下排列。

表1 负荷轮次表  
Table 1 Load round table

轮次	执行站1	...	执行站 <i>i</i>	...	执行站 <i>n</i>	轮次总和
1	$P_{11}$	...	$P_{1i}$	...	$P_{1n}$	$P_1$
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	⋮
<i>j</i>	$P_{j1}$	...	$P_{ji}$	...	$P_{jn}$	$P_j$
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	⋮
<i>m</i>	$P_{m1}$	...	$P_{mi}$	...	$P_{mn}$	$P_m$

该方法的过切量仅由  $P_{ji}$  决定。因此,与权重法相比,轮次法的过切量可大大降低。然而,过切量并不能实现最小化,仍有进一步降低过切量的潜力可供挖掘。

## 2.2 基于智能负载的切负荷策略

根据上述智能负载的基本原理,当ES工作于阻性模式时,可有效降低智能负载的吸收功率。并且,与传统的可中断负荷相比,智能负载的功率降低量可通过改变ES电压的大小实现动态变化,进而可以连续平滑地调节切负荷量。因此,与传统的断开可中断负荷方式相比,利用智能负载中的ES阻性模式进行精准切负荷可进一步降低过切量。

文中提出一种基于智能负载的精准切负荷策略,并分别将其应用于权重法与轮次法,来对微电网平滑精准切负荷进行控制。

### 2.2.1 基于智能负载的权重法切负荷策略

将智能负载应用于权重法,各执行站中分别设定3个智能负载参与切负荷量分配。各执行站的需切负荷量仍为式(2),基于智能负载的权重法切负荷策略具体流程如图4所示。

根据图4,基于智能负载的权重法切负荷策略具体流程可概括为以下步骤:

(1) 执行站对可中断负荷及智能负载进行优先级排序,得出初始排序表。其中,可中断负荷排序在前,智能负载排序在后。

(2) 基于初始排序表,确定切负荷的拟执行元素数  $j$ 。

(3) 基于拟执行元素数  $j$ ,将初始排序表最后三位的智能负载(a, b, c)上移,使b号智能负载成为新排序表的第  $j$  个元素。

(4) 基于新排序表,确定切负荷的拟执行元素

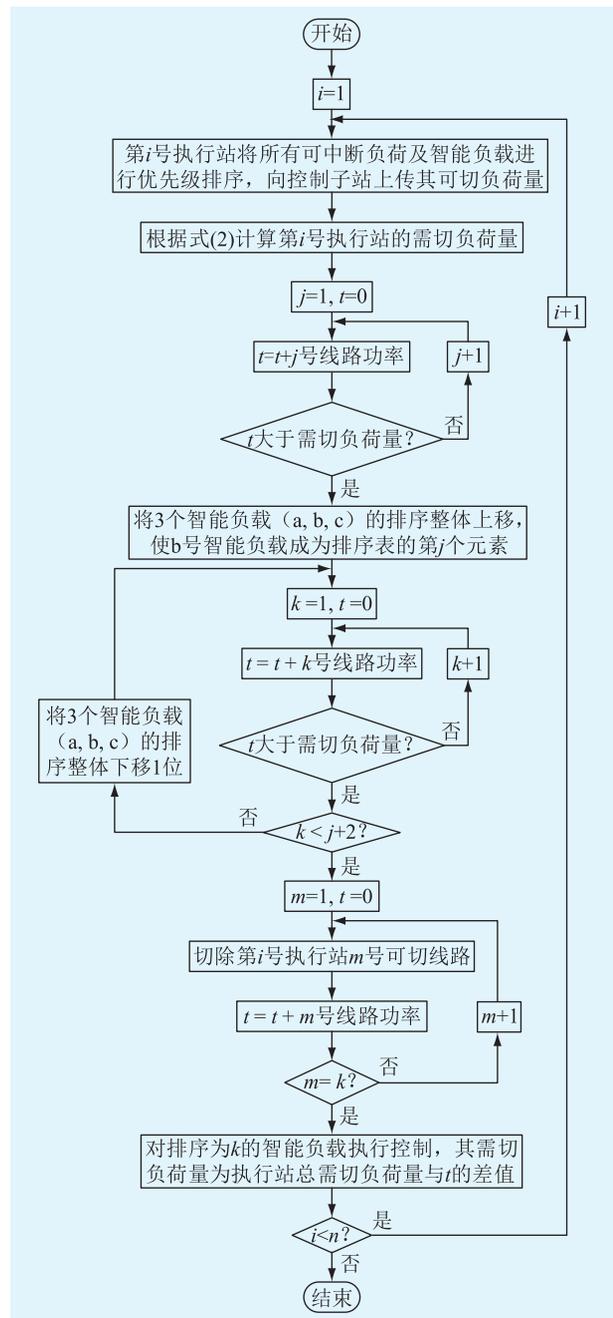


图4 基于智能负载的权重法切负荷策略具体流程

Fig.4 Specific flow of load shedding strategy based on smart load

数  $k$ 。并检验新排序表中的第  $k$  个元素是否为智能负载。若否,则对新排序表进行微调。

(5) 根据新排序表,依次断开前  $k-1$  个元素,并对第  $k$  个元素进行智能负载控制,使总体的实切负荷量等于需切负荷量,实现过切量的最小化。

### 2.2.2 基于智能负载的轮次法切负荷策略

将智能负载应用于轮次法,各执行站中分别设定3个智能负载参与切负荷量分配。

首先,将各执行站的优先级进行排序;然后,将各执行站中的可中断负荷及智能负载进行优先级

排序,可中断负荷排序在前,智能负载排序在后,形成负荷轮次表,如表 2 所示。各执行站根据优先级从高到低的顺序由左向右排列,各执行站中的可中断负荷及智能负载根据优先级从高到低的顺序由上向下排列。由于在优先级排序中,可中断负荷排序在前,智能负载排序在后,因此负荷轮次表中的智能负载位于底部。为了进行区分,智能负载采用粗体标记。

表 2 负荷轮次表  
Table 2 Load round table

轮次	执行站 1	...	执行站 $i$	...	执行站 $n$	轮次总和
1	$P_{11}$	...	$P_{1i}$	...	$P_{1n}$	$P_1$
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	⋮
$j$	$P_{j1}$	...	$P_{ji}$	...	$P_{jn}$	$P_j$
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	⋮
$m-2$ (a 行)	$P_{(m-2)1}$	...	$P_{(m-2)i}$	...	$P_{(m-2)n}$	$P_{(m-2)}$
$m-1$ (b 行)	$P_{(m-1)1}$	...	$P_{(m-1)i}$	...	$P_{(m-1)n}$	$P_{(m-1)}$
$m$ (c 行)	$P_{m1}$	...	$P_{mi}$	...	$P_{mn}$	$P_m$

基于智能负载的轮次法切负荷策略具体流程如图 5 所示。

根据图 5,基于智能负载的轮次法切负荷策略具体流程可概括为以下步骤:

- (1) 基于初始轮次表,确定切负荷的拟执行轮次数  $j$ ;
- (2) 基于拟执行轮次数  $j$ ,将初始轮次表最后三行的智能负载(a 行, b 行, c 行)上移,使 b 行智能负载成为新轮次表中的第  $j$  行;
- (3) 基于新轮次表,确定切负荷的拟执行轮次数  $k$ ,并检验新轮次表中的第  $k$  个轮次是否为智能负载所在行,若否,则对新轮次表进行微调;
- (4) 根据新轮次表,确定第  $k$  轮需要执行切负荷的元素数为  $i$ ;
- (5) 依次断开前  $k-1$  个轮次中的元素,以及第  $k$  轮中的前  $i-1$  个元素,并对第  $k$  轮中的第  $i$  个元素进行智能负载控制,使总体的实切负荷量等于需切负荷量,实现过切量的最小化。

### 3 算例分析

为了证明上述方法的有效性,对其进行算例分析。采用上述的权重法和轮次法策略进行切负荷对比。设定 1 个控制子站并下辖 6 个执行站,其系统结构如图 6 所示。算例中,智能负载的相关参数如表 3 所示。

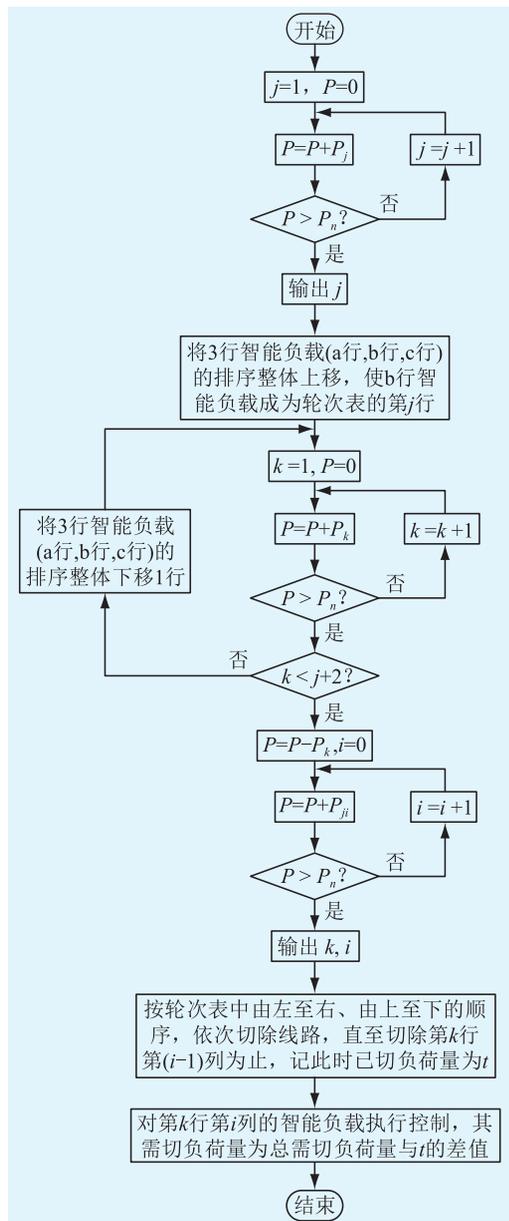


图 5 基于智能负载的轮次法切负荷策略具体流程  
Fig.5 Specific flow of round load shedding strategy based on smart load

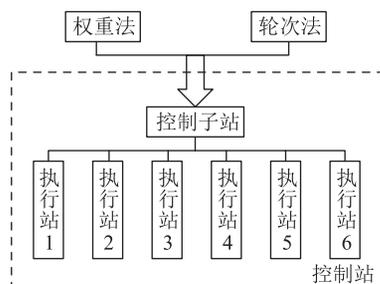


图 6 系统结构  
Fig.6 System diagram

设定控制子站的需切负荷总量为 450 kW,某一时刻各个执行站的各轮次可切负荷量如表 4 所示,其中智能负载使用粗体表示。6 个执行站的权

表3 智能负载相关参数

Table 3 Smart load related parameters

结构参数	数值	控制回路参数	数值
ES 直流侧电压 $V_{dc}/V$	200	PI 参数 $k_p$	50
ES 直流侧电容 $C_d/\mu F$	6 800	PI 参数 $k_i$	200
滤波电感 $L_f/\mu H$	1	PI 后置增益 $k$	1/10 000
滤波电容 $C_f/\mu F$	10		

重均设定为 1,各个执行站的轮次数为 9。分别使用传统权重法和轮次法、基于智能负载的权重法和轮次法进行精准切负荷过切量对比分析,结果见表 5。

表4 各执行站各轮次可切负荷量(初始轮次表)

Table 4 Load shedding capacity for each round of each station (initial round table) kW

轮次	a 站	b 站	c 站	d 站	e 站	f 站	各站总和
第 1 轮	13	21	22	13	24	10	103
第 2 轮	12	33	21	10	15	8	99
第 3 轮	20	11	11	17	7	12	78
第 4 轮	15	13	7	26	9	9	79
第 5 轮	22	23	23	15	12	11	106
第 6 轮	16	12	18	11	18	7	82
第 7 轮	15	17	22	13	21	10	98
第 8 轮	12	22	20	16	13	10	93
第 9 轮	23	18	14	17	8	8	88
各轮总和	148	170	158	138	127	85	826

表5 2种控制策略切负荷结果

Table 5 Load shedding results of two control strategies kW

项目	应切量	传统策略实切量		文中策略实切量	
		权重法	轮次法	权重法	轮次法
a 站	81	82	82	81.1	72.0
b 站	93	101	101	93.0	104.0
c 站	86	102	84	86.0	96.0
d 站	75	81	81	75.0	69.0
e 站	69	85	67	69.0	69.1
f 站	46	50	39	46.2	40.0
总和	450	501	454	450.4	450.1

根据表 5,基于传统的精准切负荷策略,使用权重法时过切量为 51 kW,使用轮次法时过切量为 4 kW。相较于权重法,轮次法的过切量可有效降低。然而,其过切量仍有进一步降低的潜力。使用文中所提出的基于智能负载的精准切负荷控制策略,权重法的过切量降低至 0.4 kW,轮次法的过切量降低至 0.1 kW。与传统的精准切负荷策略相比,过切量显著降低。

此外,在切负荷速度方面,智能负载的功率降低量是通过改变 ES 电压的大小实现实时变化,时

延为 100 ms,可实现毫秒级精准切负荷控制。

## 4 结论

文中主要基于智能负载理论,提出了一种新的精准切负荷控制策略。首先,介绍了智能负载原理;然后分析了传统的精准切负荷控制策略,主要包括权重法与轮次法,以此为基础提出基于智能负载的精准切负荷控制策略,并将其应用于权重法与轮次法;最后,通过算例验证了所述方法的有效性,主要结论为:

(1) 传统的精准切负荷策略会造成较高的过切量,其负荷控制的经济性不高。尽管轮次法相较于权重法可有效降低过切量,然而其过切量仍有进一步降低的潜力可被挖掘。

(2) 使用文中提出的基于智能负载的精准切负荷控制策略,可有效降低权重法以及轮次法的负荷过切量,对提高负荷控制的经济性较为有利。

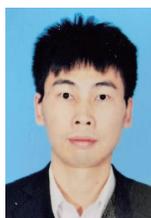
### 参考文献:

- [1] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽,等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):663-674.  
XIAO Yunpeng, WANG Xifang, WANG Xiuli, et al. A review of power market research for high proportion of renewable energy [J]. Proceedings of the CESS, 2018, 38 (3): 663-674.
- [2] 田蓓,顾雨嘉,王峰,等. 可再生能源发电系统虚拟惯量动态控制仿真模型[J]. 可再生能源,2018,36(11):1692-1696.  
TIAN Bei, GU Yujia, WANG Feng, et al. Virtual inertia dynamic control simulation model of renewable energy power generation system [J]. Renewable Energy, 2018, 36 (11): 1692-1696.
- [3] 代贤忠,韩新阳,董益华,等. 能源互联网多源多层次协调优化方法研究[J]. 电力工程技术,2019,38(2):1-9.  
DAI Xianzhong, HAN Xinyang, DONG Yihua, et al. Research on multi-source and multi-level coordination optimization method of energy Internet [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 1-9.
- [4] 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 devices in microgrid with distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (3): 78-84.
- [5] 范志华,苗世洪,刘子文,等. 含多类型分布式电源的交直流混合微电网系统潮流控制策略研究[J]. 供用电,2018,35(7):20-27,48.  
FAN Zhihua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. Research on power flow control strategy of AC/DC hybrid microgrid system with multitype distributed power supply [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(7): 20-27, 48.

- [6] 范士雄,蒲天娇,刘广一,等. 主动配电网中分布式发电系统接入技术及其进展[J]. 电工技术学报,2016,31(2):92-101. FAN Shixiong,PU Tianjiao,LIU Guangyi,et al. Access technology and progress of distributed generation system in active distribution network[J]. Journal of Electrical Technology,2016,31(2):92-101.
- [7] 陈智勇,黄旭程,杨苓,等. 分布式电站宽频域谐振机理分析及阻抗协调构造方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(1):143-154,329. CHEN Zhiyong,HUANG Xucheng,YANG Ling, et al. Broad-band resonance mechanism analysis and impedance coordination construction method for distributed power plants [J]. Proceedings of the CESS,2019,39(1):143-154,329.
- [8] 田星星,李征,李利明. 计及微电网并离网两种工况的储能容量优化配置[J]. 电源学报,2018,16(4):62-70. TIAN Xingxing,LI Zheng,LI Liming. Optimal allocation of energy storage capacity considering microgrid and off-grid conditions[J]. Journal of Power Supply,2018,16(4):62-70.
- [9] 杨龙杰,李华强,余雪莹,等. 计及灵活性的孤岛型微电网多目标日前优化调度方法[J]. 电网技术,2018,42(5):1432-1440. YANG Longjie,LI Huaqiang,YU Xueying, et al. Multi-objective day-ahead optimal dispatching method for isolated microgrid considering flexibility [J]. Power Grid Technology, 2018, 42(5):1432-1440.
- [10] 张杰,管霖,黄振琳. 基于几何分布的微电网孤岛运行可靠性快速概率评估[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):24-33,37. ZHANG Jie,GUAN Lin,HUANG Zhenlin. Fast probability assessment of islanding operation reliability of microgrid based on geometric distribution[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(20):24-33,37.
- [11] 吕干云,蒋小伟,郝思鹏,等. 基于半监督支持向量机的电压暂降源定位[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(18):76-81. LYU Ganyun,JIANG Xiaowei,HAO Sipeng, et al. Location of voltage sag source based on semi-supervised SVM[J]. Power System Protection and Control,2019,47(18):76-81.
- [12] 吕志鹏,陆立民,陆怀谷,等. 一种直流微电网多模式能量管理策略研究[J]. 供用电,2019,36(7):44-51. LYU Zhipeng,LU Limin,LU Huaigu, et al. Research on multi-mode energy management strategy of DC microgrid[J]. Distribution &Utilization,2019,36(7):44-51.
- [13] 肖少华,朱庆龙,杨家豪. 基于时序模拟的孤岛微电网频率及电压质量评估[J]. 浙江电力,2018,37(4):42-46. XIAO Shaohua,ZHU Qinglong,YANG Jiahao. Evaluation of frequency and voltage quality for islanded microgrids based on time series simulation [J]. Zhejiang Electric Power,2018,37(4):42-46.
- [14] 彭寒梅,曹一家,黄小庆,等. 基于时变通用生成函数的孤岛运行模式下微电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2015,39(10):28-35. PENG Hanmei,CAO Yijia,HUANG Xiaoqing, et al. Reliability evaluation of microgrid under islanded operation mode based on time-varying universal generating function [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(10):28-35.
- [15] 彭寒梅,郭颖聪,昌玲,等. 主从控制孤岛运行微电网的短期可靠性评估[J]. 电网技术,2018,42(2):463-472. PENG Hanmei,GUO Yingcong,CHANG Ling, et al. Short-term reliability assessment of microgrid operating on isolated island [J]. Power Grid Technology,2018,42(2):463-472.
- [16] GAO C, CHEN S, LI X, et al. A physarum-inspired optimization algorithm for load-shedding problem [J]. Applied Soft Computing,2017,61.
- [17] 朱翰超,马蕊,孙聪,等. 计及直接负荷控制的商业建筑型微电网优化运行方法[J]. 电力需求侧管理,2019,21(1):32-36. ZHU Hanchao,MA Rui,SUN Cong, et al. Optimal operation method of commercial building microgrid considering direct load control [J]. Power Demand Side Management,2019,21(1):32-36.
- [18] 蔡宏达,夏杨红,杨鹏程,等. 交直流混合微电网多模式协调下垂控制[J]. 供用电,2018,35(1):2-7. CAI Hongda,XIA Yanghong,YANG Pengcheng, et al. Multi-mode coordination droop control for hybrid AC/DC microgrids [J]. Distribution & Utilization,2018,35(1):2-7.
- [19] 彭湃. 基于虚拟阻抗的微电网下垂控制策略研究[J]. 供用电,2018,35(6):60-65. PENG Pai. Research on droop control strategy in micro-grid based on virtual impedance [J]. Distribution & Utilization,2018,35(6):60-65.
- [20] 林湘宁,李正天,薄志谦,等. 适用于微网孤岛运行的低频减载方法[J]. 电网技术,2010,34(3):16-20. LIN Xiangning,LI Zhengtian,BO Zhiqian, et al. Low frequency load shedding method suitable for island operation of microgrid [J]. Power Grid Technology,2010,34(3):16-20.
- [21] 王海燕,同向前,张永辉. 基于储能剩余电量预估的微电网切负荷策略[J]. 太阳能学报,2016,37(6):1431-1438. WANG Haiyan,TONG Xiangqian,ZHANG Yonghui. Load shedding strategy for microgrid based on residual energy storage prediction [J]. Journal of Solar Energy,2016,37(6):1431-1438.
- [22] 李凡,汤雯. 电力弹簧在电压暂降治理中的应用研究[J]. 电子元器件与信息技术,2019(1):93-95,99. LI Fan,TANG Wen. Application of electric spring in voltage sag control [J]. Electronic Components and Information Technology,2019(1):93-95,99.
- [23] FIRDAUS A, MISHRA S, SHARMA D. Stability enhancement of inverter based autonomous microgrid using electric spring [C]//2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Genova,Italy,2019:1-5.
- [24] CHEN X, HOU Y, TAN S, et al. Mitigating voltage and fre-

- quency fluctuation in microgrids using electric springs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 508-515.
- [25] LEE C, HUI S. Reduction of energy storage requirements in future smart grid using electric springs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1282-1288.
- [26] 徐谷超. 基于电力弹簧的有源配电网电压稳定控制研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2018.  
XU Guchao. Research on voltage stability control of active distribution network based on electric spring [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.
- [27] 尹发根, 王淳. 电力弹簧研究进展: 原理、拓扑结构、控制和应用 [J]. 电网技术, 2019, 43(1): 174-184.  
YIN Fagen, WANG Chun. Research progress of electric springs: principle, topology, control and application [J]. Power Grid Technology, 2019, 43(1): 174-184.
- [28] LEE C, BALARKO C, HUI S. Hardware and control Implementation of electric springs for stabilizing future smart grid with intermittent renewable energy sources [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(1): 18-27.
- [29] AKHTAR Z, CHAUDHURI B, HUI S. Smart loads for voltage control in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 937-946.
- [30] YAN S, LEE C, YANG T, et al. Extending the operating range of electric spring using back-to-back converter; hardware implementation and control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5171-5179.

作者简介:



史军

史军(1982),男,硕士,工程师,从事电网调度、规划及智能电网相关研究工作(E-mail: shijun@sz.csg.cn);

王加澍(1996),男,硕士在读,研究方向为新能源发电及入网技术;

熊峰(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统稳定控制方面的研究工作。

### Load-shedding control strategy of microgrid based on smart loads

SHI Jun<sup>1</sup>, WANG Jiashu<sup>2</sup>, XIONG Feng<sup>3</sup>, CHENG Weijie<sup>1</sup>, SONG Junwen<sup>1</sup>, MA Gang<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. NARI School of Electrical Engineering and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** With the larger and larger amounts of distributed generation, the safe and stable operation of microgrid is being greatly tested, the importance of precise load-shedding control strategy is becoming more and more prominent. In order to minimize the overcutting value, and to improve the economy of load control, the control strategy of precise load-shedding in microgrid needs to be improved. At first, the principle of smart load is introduced and the dynamic change of power of intelligent load is realized by adjusting the voltage of electric spring (ES). Then, the traditional precise load-shedding control strategy of applying weight method and round method is analyzed, and a precise load-shedding control strategy based on smart loads is proposed to minimize the overcutting value through the dynamic response of the load, and apply it to the weight method and the round method. At last, the cases analysis indicate that, the proposed strategy can reduce the system overcutting value effectively, and enhance the economy of load control.

**Keywords:** microgrid; precise load-shedding; smart loads; weight method; round method

(编辑 钱悦)