

# 分布式发电系统的自动发电控制研究

将自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC) 引入分布式发电系统, 可以提高分布式电源的利用效率和经济性。在传统自动发电控制理论的基础上, 建立了分布式电源和储能单元的发电总费用模型, 提出了分布式发电系统AGC的功率分配方案。针对功率极限情况下分布式电源的功率输出问题, 设计了相应的闭锁环节, 使得控制区域内发电机的输出功率能够正确跟踪负荷的变化。通过对IEEE33算例系统的求解, 验证了文中所提出算法的正确性和合理性。仿真结果表明, 分布式发电系统的AGC, 既可以提高分布式发电系统的经济性, 又可以降低系统在孤岛运行时平衡节点发电机的压力。

陈俊飞/国网辽宁省电力有限公司检修分公司 徐玮晨/国网江西省电力公司抚州供电分公司 高庆云/国网安徽省电力公司滁州市城郊供电公司 张人杰/张家港沙洲电力有限公司

## 0 引言

自动发电控制<sup>[1]</sup> (Automatic Generation Control, AGC) 是根据系统频率、联络线所带负荷或者它们相互之间关系的变化, 调节指定区域内各发电机有功出力来维持计划的系统频率, 或使其与其他区域的既定交换在预定限值内或二者兼顾。文献[1]和文献[2]介绍了自动发电控制的控制策略和自动发电控制在智能电网中的应用。文献[3]和文献[4]介绍了实际应用于电网系统的自动发电控制实例。

分布式发电系统中分布式电源种类繁多, 在分布式发电系统中应用AGC, 与传统的大电网系统控制方式有所区别<sup>[5-8]</sup>。有别于传统火电、水电等常规能源组成的大电网系统, 在分布式发电系统中, 含有多种分布式电源和储能单元, 而储能单元又具有双向流动的特点, 使得分

布式电源的控制和功率分配变得复杂。系统中分布式电源的装机容量并不是特别大, 因此分布式发电系统中控制区域内发电机总输出可能小于区域内的总负荷量, 将会导致区域发电机出现跟踪失败的情况。所以在分布式发电系统中使用AGC时, 需要根据上述特点对分布式发电系统的AGC进行完善。

本文在传统自动发电控制理论的基础上, 建立了分布式电源和储能单元的发电总费用模型, 提出了分布式发电系统AGC的功率分配方案。针对功率极限情况下分布式电源的功率输出问题, 设计了相应的闭锁环节, 使得控制区域内发电机的输出功率能够正确跟踪负荷的变化。通过对IEEE33算例系统的求解, 验证了文中所提出算法的正确性和合理性。

## 1 分布式发电系统AGC的特点

### 1.1 传统的自动发电控制方法

AGC的基本原理是根据区域间联络线所反映的区域控制误差 (ACE) 进行系统调节<sup>[9]</sup>, 其功率控制方法计算公式为

$$P_{R,i} = G_{I,i} \int_0^t ACE_i dt + G_{P,i} ACE_i \quad (1)$$

文献[10]介绍了北美电力可靠性协会<sup>[11]</sup>对互联电网各控制区AGC的性能评价是采用CPS1、CPS2和DCS标准。CPS1是一个长期的考核指标 (以年为单位), DCS是扰动恢复标准, CPS2是指在1 h内的6个时间段, 控制区内ACE的10 min平均值, 必须控制在特殊的限值内。



陈俊飞/工程师

### 关键词/Keywords

分布式发电 ·  
自动发电控制 ·  
发电总费用 ·

本文主要针对1天24 h来进行自动发电控制,因此在应用过程中,本文主要采用CSP2性能评价标准对分布式发电系统的AGC区域控制进行性能评定。

## 1.2 分布式发电系统自动发电控制的特点

分布式发电系统AGC的基本原理与传统的AGC基本相同,但是分布式电源和储能单元具有可再生能源,并且多安装在用户附近,分布式发电系统的AGC具有如下特点:

1) 在分布式发电系统中,引入了多种分布式电源和储能单元,而储能单元的双向流动的特点,又进一步增加了发电机负荷分配的难度。

2) 控制区域内的分布式电源可能存在功率输出极限问题。当区域内的总负荷比较大时,区域间的联络线所反映的区域控制误差(ACE)可能长时间不满足要求,有可能达不到NERC提供的CPS2考核评价标准。但是分布式发电系统与外电网并网运行时,分布式发电系统仍然可以稳定运行。因此,分布式发电系统可以不考虑CPS2考核评价标准,但是需要针对发生功率输出极限情况下的分布式发电系统提出相应的控制措施,以保证分布式电源能够有效地跟踪控制区域内负荷变化。

3) 当分布式发电系统不与外电网并网时,可以进入孤岛运行状态。因此,在设计分布式发电系统的AGC时,需要同时考虑并网运行和孤岛运行两种状态。

## 2 分布式发电系统AGC的功率分配

### 2.1 分布式发电系统的发电总费用

AGC的功率分配是以经济调度原则<sup>[12]</sup>为基础的。本文考虑的经济调度原则是综合考虑发电费用、运行成本和污染处理费用,以达到系统发电总费用最低的目的。

发电单元的发电总费用 $C$ 计算公式为

$$C = C_{\text{Fuel}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{PT}} \quad (2)$$

式中,  $C_{\text{Fuel}}$ 为燃料成本,元;  $C_{\text{OM}}$ 为运行维护成本,元;  $C_{\text{PT}}$ 为污染处理成本,元。

下面将分析各种分布式电源的发电总费用。

#### 2.1.1 光伏发电或风力发电系统

光伏和风力发电过程属于可再生能源,在生产过程中,不用考虑燃料成本和污染物费用。故光伏发电或风力发电系统的发电总费用,只需考虑运行成本,其计算公式为

$$C_{\text{DG}} = C_{\text{DG\_OM}} \quad (3)$$

式中,  $C_{\text{DG\_OM}}$ 为光伏、风力发电的运行维护成本。

#### 2.1.2 燃料电池发电系统

燃料电池的燃料消耗—功率输出特性<sup>[13]</sup>为

$$C_{\text{f\_FC}}(P_{\text{it}}) = C_{\text{fuel}} \sum_i \frac{P_{\text{it}}}{\eta_{\text{it}}} \quad (4)$$

式中,  $P_{\text{it}}$ 为燃料电池输出功率, kW;  $C_{\text{fuel}}$ 为燃料价格;  $\eta_{\text{it}}$ 为燃料利用率,是输出电能与输入燃料的比值。

所以在考虑运营维护成本和污染处理成本后,燃料电池的发电总费用为

$$C_{\text{f}}(P_{\text{it}}) = C_{\text{fuel}} \sum_i \frac{P_{\text{it}}}{\eta_{\text{it}}} + C_{\text{OM}}(P_{\text{it}}) + P_{\text{it}} \sum_{k=1}^3 \frac{C_k \gamma_{k\_FC}}{1000} \quad (5)$$

式中,  $k$ 为排放的污染物类型( $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 等);  $C_k$ 为处理每千克 $k$ 类污染物的费用,元;  $\gamma_{k\_FC}$ 为燃料电池输出每千瓦电能时第 $k$ 类污染物的排放系数, g/kW。

#### 2.1.3 微型燃气轮机

对于给定型号的微型燃气轮机热电联产<sup>[14]</sup>系统,运行成本计算公式与式(2)相同。

#### 2.1.4 同步发电单元

微电网中还可能包含有柴油发电机组、小型火力发电机组等同步发电单元,它们的能耗—功率输出特性为

$$C_{\text{f\_syn}}(P_{\text{it}}) = a_i P_{\text{it}}^2 + b_i P_{\text{it}} + c_i \quad (6)$$

式中,  $a_i$ 、 $b_i$ 和 $c_i$ 为发电机组的相关参数。

由能耗—功率特性可以得出同步发电单元的发电总费用为

$$C_{\text{f\_syn}}(P_{\text{it}}) = a_i P_{\text{it}}^2 + b_i P_{\text{it}} + c_i + C_{\text{OM}}(P_{\text{it}}) + P_{\text{it}} \sum_{n=1}^3 \frac{C_k \gamma_{k\_syn}}{1000} \quad (7)$$

式中,  $\gamma_{k\_syn}$ 为同步发电单元输出每千瓦电能时第 $k$

类污染物的排放系数, g/kW。

### 2.1.5 蓄电池单元

为平抑可再生能源的随机波动, 改善电能质量, 维护系统的稳定, 微电网系统一般会配备一定数量的储能单元<sup>[15]</sup> (DS)。铅酸蓄电池因为其较为低廉的价格, 能满足DG应用时的功率密度需求, 得到了广泛的使用<sup>[16]</sup>。

由于蓄电池是双向流动环节, 其使用寿命随充放电循环寿命影响, 因此蓄电池的发电总费用需计及运营维护成本<sup>[14, 17]</sup>和充放电循环次数造成的使用寿命损耗决定, 其计算公式为

$$C_{AX} = C_{AX\_OM} + \frac{n_{ax}}{n_{max}} c_{F\_AX} \quad (8)$$

式中,  $C_{AX\_OM}$ 为蓄电池的运行维护成本;  $n_{ax}$ 为充放电循环次数;  $n_{max}$ 为循环寿命;  $c_{F\_AX}$ 为蓄电池费用。

## 2.2 分布式发电系统的功率分配方案

分布式电源的引入提高了电源的多样性, 但是也同时增加了AGC经济负荷分配的复杂程度。而分布式发电系统中蓄电池的引入, 通过其双向流动, 可以降低系统的发电费用。因此, 在含有储能单元参与的分布式发电的AGC中, 对储能单元的控制是十分重要的。

分布式电源的功率分配方案包含两种情况。

### 2.2.1 控制区域内包含风、光和储能单元

根据发电总费用, 考虑可再生能源利用最大化和储能单元的因素, 控制该区域内风能、太阳能发电功率输出最大值, 利用储能单元参与AGC的控制来调节区域内风能、光伏发电的功率平衡。当控制区域内风能、光伏发电机组输出功率无法满足AGC调节要求时, 首先考虑储能单元释放能量, 再考虑使用其他种类的分布式电源进行负荷调节。

针对控制区域内其他类型的分布式电源, 其经济负荷分配方案的目标函数为

$$\min C = \sum (C_{i\_Fuel} + C_{i\_OM} + C_{i\_PT}) \quad (9)$$

根据发电机组的损耗特性, 考虑等微增率准则, 采用拉格朗日乘法求解合适的机组功率分

配方案。通过求解发电总费用的条件极值, 就可以得出满足经济调度原则的负荷分配方案。

### 2.2.2 控制区域内不包含风、光和储能单元

当控制区域内不包含风、光和储能单元时, 仍可以确定式(9)的目标函数, 根据等微增率准则进行机组负荷的分配。

## 3 功率极限输出情况下分布式发电系统的AGC控制方案

由于控制区域内分布式电源可能存在功率输出极限问题, 式(1)中含有ACE的积分项, 如果联络线所反映的ACE长期不符合要求, AGC将会出现错误调节。

因此, 在分布式发电系统的AGC中, 要考虑分布式电源的功率出力极限对AGC增加闭锁环节。在闭锁过程时, 应该考虑AGC中两个量的闭锁: ACE的闭锁和 $P_{R,i}$ 的闭锁。其具体的步骤如下:

1) 当发电机发电功率达到功率输出极限上限时, 并且有增加发电机发电趋势时 (即控制误差 $ACE > 0$ 时), 对ACE的积分项进行闭锁 (即ACE的积分不再变大)。

2) 当发电功率达到发电极限下限 (即0) 时, 并且 $ACE < 0$ , 对ACE的积分项进行闭锁。

3) 当发电机发电功率达到上限时, 并且调节功率 $P_{R,i} > 0$ 时, 舍去此次 $P_{R,i}$ , 并且保持发电机发电功率在发电功率上限值。

4) 当发电机发电功率达到输出下限时, 并且调节功率 $P_{R,i} < 0$ 时, 舍去此次 $P_{R,i}$ , 并且设定区域内发电机的输出功率为发电功率最小值。

通过采取上述闭锁的方式, 可以使得控制区域内发电机的输出功率能够正确跟踪负荷的变化。

## 4 孤岛运行时分布式电源的控制策略

在孤岛运行时, 将分布式发电系统视为一个整体, 根据整个系统的总有功负荷量来确定分布式电源的功率总输出量, 然后以孤岛运行分布式发电系统发电总费用最低作为目标函数, 对系统内的分布式电源进行功率分配。通过比较各种分

布式发电单元的发电总费用，可得出在分布式发电系统孤岛运行时，分布式发电单元的功率分配方案。

分配方案：在分布式发电系统孤岛运行时，优先考虑使用光伏发电和风能发电，若风、光电源所发的电能大于负荷要求，则对蓄电池进行充电；若风、光电源不能满足负荷要求时，则由蓄电池来供电，当蓄电池的容量也不能满足负荷需求时，由系统中其他分布式发电单元按照等微增率准则进行供电，以获得整个系统发电费用最低的目标。若仍不满足负荷需求时，最后通过暂时切除可中断的负荷来满足系统的功率平衡。

5 算例分析

5.1 分布式发电系统的发电总费用

以IEEE 33系统<sup>[18]</sup>为例，在负荷末端分别接入分布式电源后，对系统进行AGC控制。根据系统的地理位置和线路间的强弱关系，对系统进行区域划分，图1为IEEE 33系统的AGC区域划分和分布式电源控制图。

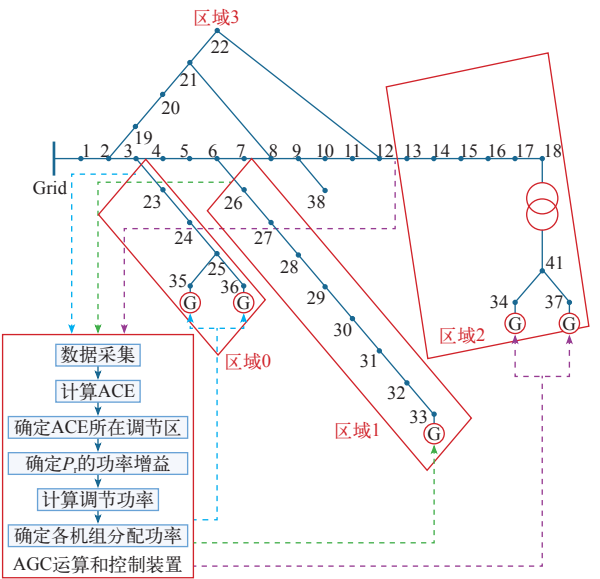


图1 AGC区域划分和分布式电源控制图

在35点接入双馈风力发电机，额定功率 $P_N=1\,000\text{ kW}$ ，输出功率受风速影响，风速随时间变化。节点36和33接入工频热电联产（恒无功调

节）型发电机 $P_0=300\text{ kW}$ ， $Q_0=100\text{ kvar}$ （发电机额定功率为 $P_N=2\,000\text{ kW}$ ， $Q_N=2\,000\text{ kvar}$ ）。34点接入工频热电联产同步发电机（恒功率因数调节） $P_0=400\text{ kW}$ ； $\cos\varphi=0.85$ 。37点接入工频热电联产同步发电机（恒功率因数调节） $P_0=300\text{ kW}$ ； $\cos\varphi=0.9$ 。38节点接入燃料电池 $P_0=500\text{ kW}$ ， $V=12.66\text{ kV}$ 。储能单元接在节点35上，额定容量 $500\text{ A}\cdot\text{h}$ 。在节点38接入孤岛运行用储能单元，并且在孤岛运行前，38节点储能单元荷电状态为100%。在孤岛运行时，38节点作为平衡节点满足系统的功率平衡和频率稳定。

不同种类分布式发电机组的燃料成本与维护成本如表1所示，污染物排放量如表2所示。其中， $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 的处理费用分别为0.21元/kg、14.842元/kg和62.964元/kg。

表1 部分发电成本

| 发电机类型      | 燃料成本元/kW·h | 维护成本元/kW·h |
|------------|------------|------------|
| 太阳能电池      | 0          | 0.009 6    |
| 风机         | 0          | 0.029 6    |
| 燃料电池       | 0.206      | 0.029 3    |
| 热电联产微型燃气轮机 | 0.195 1    | 0.034 06   |

表2 污染物排放系数

| 污染物排放系数 g/kW | $\text{CO}_2$ | $\text{SO}_2$ | $\text{NO}_x$ |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 太阳能电池        | 0             | 0             | 0             |
| 风机           | 0             | 0             | 0             |
| 燃料电池         | 489           | 0.003         | 0.01          |
| 大电网          | 889           | 1.8           | 1.6           |

为了保证蓄电池的充放电效率，蓄电池的放电深度范围为20%~80%，储能单元充放电效率为0.9。由于蓄电池技术的发展，算例系统仿真时间为一天。电池的自放电效应对蓄电池的影响很小，故认为自放电约等于0。

5.2 算例结果及讨论

算例1：分布式发电系统并网运行，研究控制区域内机组的出力情况。图2为24 h内对区域2使用AGC和不使用AGC时的仿真结果。

从算例1可以得出，由于系统并网运行，区域2经过区域3与电网相连，系统的有功功率平衡、频率稳定。当不使用AGC控制区域内发电机时，

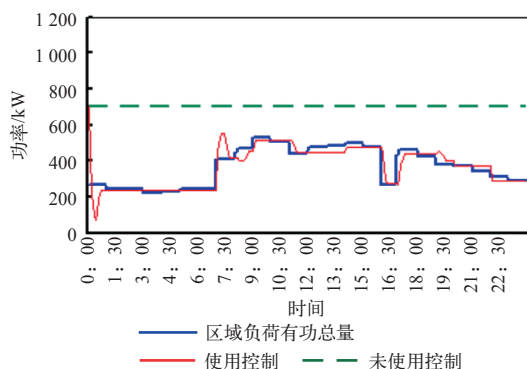


图2 使用AGC与未使用AGC比较

区域内总发电功率为700 kW，从图2可以明显看出，使用AGC比未使用AGC，发电机能够更好地跟踪区域负荷的变化，能够减少分布式发电系统与外电网交换能量。这样不但可以提高分布式发电系统的发电机组输出功率的有效利用率，而且对其孤岛运行时的稳定性有着极大的帮助。

算例 2：当控制区域内总负荷量大于总发电功率时，使用分布式发电系统AGC的作用。图3为区域1在24 h内，采用传统AGC和本文所提出的AGC仿真结果的对比如。

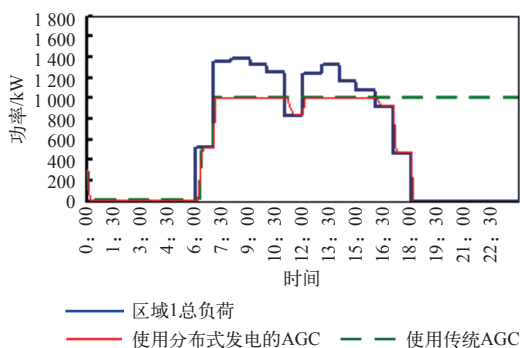


图3 区域内总负荷量大于总发电功率使用分布式发电系统AGC的作用

从图3中可以看出，在7:00~16:00间出现了区域负荷越过区域发电总功率极限1 000 kW，在7:00~10:00甚至达到1 300 kW。由于自动发电控制原理中ACE的积分项作用，当采用传统的AGC时，区域内发电机在16:00~24:00时发出的功率仍然保持在1 000 kW。当采用本文提出的分布式发电系统AGC，并考虑闭锁环节后，系统能够实时跟踪区域内负荷的变化，可以更好地达到自动发电控制的目的。

算例 3：孤岛运行时，采用分布式发电系统AGC与不采用AGC平衡节点的功率对比图。

图4表明孤岛运行时，采用分布式发电系统的AGC和不采用AGC，以保证系统功率平衡和频率稳定为目的，平衡节点需要发出和消耗的有功功率。孤岛运行时系统与外电网断开，设定分布式发电系统中节点38的发电机为孤岛运行时的平衡节点发电机。通过算例3可以看出孤岛运行时，时间7:00~15:55，在没有AGC控制的时候平衡节点平均发电功率为2 333.048 kW，而采用分布式发电系统的AGC后，平衡节点发电功率稳定在1 605.188 kW。这表明平衡节点在采用AGC控制时，系统平衡节点的长期负荷压力相比于未使用AGC的平衡节点压力小，平衡节点压力减少31.20%。而在0:00~6:00时刻，不采用AGC控制，平衡节点为了保证系统功率稳定，将要运行在电动机状态来消耗有功，而使用分布式发电AGC后，几乎不会发生此种现象。这表明使用分布式发电系统AGC不但可以降低平衡节点压力，使系统更容易稳定，也可以提高分布式电源输出功率的有效利用率，提高分布式发电系统的经济性。

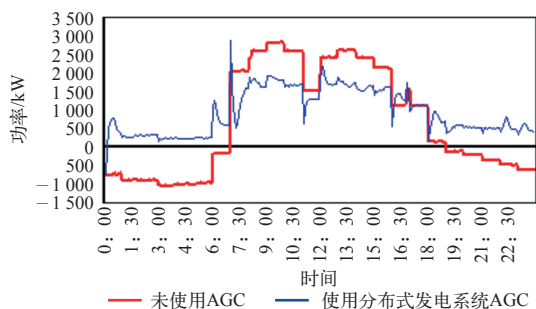


图4 孤岛运行时平衡节点输出功率比较

## 6 结束语

本文在传统自动发电控制理论的基础上，建立了分布式电源和储能单元的发电总费用模型，提出了分布式发电系统AGC的功率分配方案。针对功率极限情况下，分布式电源的功率输出问题，设计了相应的闭锁环节，证明了自动发电控制可以使用在分布式发电系统中。确定了储能单元和分布式电源（特别是风能和光伏）的分布式发电系统AGC控制策略。通过算例，体现了孤岛

运行时, 分布式发电系统AGC可以降低平衡节点压力, 提高分布式电源的有效利用率。同时表明了, 分布式系统AGC对维持分布式发电系统稳定性的帮助。分布式发电系统AGC为分布式发电系统及可再生能源发电系统控制的研究提供了参考。

#### 参考文献

- [1] 颜伟, 赵瑞峰, 赵霞, 等. 自动发电控制中控制策略的研究发展综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (8): 149-153.
- [2] 滕贤亮, 高宗和, 朱斌, 等. 智能电网调度控制系统AGC需求分析及关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (1): 81-87.
- [3] 孙素琴, 滕贤亮, 戴飞, 等. 河南电网AGC水火电联调实验研究 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (6): 99-103.
- [4] 潘敬东, 韩福坤, 李运平, 等. 华北电网多区域自动发电控制与在线经济调度的研究 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (11): 87-89.
- [5] 雷金勇, 谢俊, 甘德强. 分布式发电供电系统能量优化及节能减排效益分析 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (23): 29-36.
- [6] 谷俊和, 刘建平, 江浩. 风电接入对系统频率影响及风电调频技术综述 [J]. 现代电力, 2015, 32 (1): 46-51.
- [7] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中. 大规模风电接入电网的相关问题及措施 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (25): 1-9.
- [8] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (1): 1-14.
- [9] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统 (EMS) [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 电力系统调频与自动发电控制编委会. 电力系统调频与自动发电控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [11] NERC—Interconnected Operations Services Subcommittee. Reference document—interconnected operations services, Version 1.1[EB/OL]. March 2002. <http://www.Nerc.com>.
- [12] 王建, 李兴源, 邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (24): 90-94.
- [13] 丁明, 王敏. 分布式发电技术 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (7): 31-36.
- [14] 包能胜, 朱瑞丹, 倪维斗. 风电与燃气轮机互补发电系统发电成本分析 [J]. 燃气轮机技术, 2006, 19 (4): 1-5.
- [15] Kroposki B, Lasseter R, Ise T, et al. Making microgrids work [J]. IEEE Power and Energy, 2008, 6 (3): 40-53.
- [16] Katiraei F, Iravani R, Atziargyriou N, et al. Microgrids management [J]. IEEE Power and Energy, 2008, 6 (3): 54-65.
- [17] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (24): 78-82.
- [18] 车仁飞, 李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (1): 74-79.

(收稿日期: 2016-02-10) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告