

## 核电参与三次调频控制策略研究

常烨骥, 刘 娆, 王 冲, 张 欣, 李卫东

(大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 三次调频是电网频率调节的重要环节, 火电实行的“上大压小”政策使得三次调频机组容量不足, 风电并网又给电力系统频率稳定带来了一定的负面影响, 尤其给三次调频的工作增加了很大的难度。通过对我国各种能源发电形式特点的分析, 提出将核电引入三次调频, 在阐述核电参与调频具有技术可行性和经济可行性之后, 制定了以“风电分解、机组分群”为核心的三次调频控制策略。通过仿真分析得出结论: 采用该控制策略, 核电参与三次调频能够很好地保证风电并网情况下系统频率的稳定。

**关键词:** 核电; 三次调频; 控制策略; 系统仿真; 频率调节

### Study on the control strategy of the third frequency adjustment with the participation of the nuclear power

CHANG Ye-kui, LIU Rao, WANG Chong, ZHANG Xin, LI Wei-dong

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The third frequency adjustment is the key link of the grid frequency regulation. The “admission of high capacity and rejection of small capacity” policy on thermal power causes the lack of capacity of the third frequency adjustment. Wind power brings a certain impact to the frequency stability of the power system, particularly, increasing the difficulty of the third frequency adjustment. The introduction of nuclear power into the third frequency adjustment is proposed after analyzing the characteristics of the energy generation of different forms. This paper formulates the control strategy with the core of ‘wind power decomposition, generator units grouping’ in the third frequency adjustment, after elaborating the technical feasibility and economic feasibility, and, comes to a conclusion that the participation of the nuclear in the third frequency adjustment would guarantee the stability of the frequency of the power system with this control strategy in the case of the introduction of wind power to the system, by simulation analysis.

**Key words:** nuclear power; third frequency adjustment; control strategy; system simulation; frequency adjustment

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0071-06

## 0 引言

电力系统对频率的调节包括三种方式: 一次调频、二次调频和三次调频<sup>[1]</sup>。一次调频针对变化周期在 10 s 以内, 变化幅度小的负荷波动; 二次调频针对变化周期在 10 s 到几分钟之间的变化幅度稍大的负荷波动; 三次调频针对变化周期在几分钟到小时级之间的持续负荷波动<sup>[2-6]</sup>。三种调频方式互相配合, 共同完成对频率的控制, 三次调频不仅是电网频率调整的重要环节, 也是一次和二次调频的基础。

随着风力发电的大规模发展, 风电给电网运行带来的负面影响不容忽视, 分析风力发电的特点可知, 风电并网会给系统的三次调频带来很大的压力, 因此有必要针对风电接入后的新情况, 研究如何完成电网的三次调频功能<sup>[7-8]</sup>。此外, 国家发改委针对

环境污染和全球气候变化问题提出的火电发展中实施“上大压小”的电源建设政策, 淘汰了一大批容量不大于 100 MW 的机组<sup>[9]</sup>。但却给调节容量需求较大的三次调频带来了一定的困难, 因此, 亟须寻求其他类型的发电机组参与三次调频。

在现阶段非化石能源电源中, 水电中的径流式电站不能参与调频, 有一定调节性能的电站在夏季丰水季为了充分利用水能资源也不能参与调频, 生物能发电和光伏发电大多属于随机性、间歇性电源, 不能适应正常的电力用户的用电需要<sup>[10-12]</sup>。综上, 能够参与系统调频的能源发电形式比较匮乏。因此, 在经济性得到很好保证的前提下, 核电机组承担调频的任务是大势所趋。

本文分析了核电参与调频的技术可行性和经济可行性, 并设计了核电和火电配合调频的相关控制

策略,以充分发挥不同类型机组的特点,高效优质地完成三次调频工作。仿真结果表明,核电机组可以很好地完成三次调频的任务,且本文所设计的核电与火电的协调控制策略能够很好地应对风电日波动特性对功率平衡带来的影响。

## 1 三次调频面临的问题及解决办法

电力系统的三种频率调整方式中,三次调频针对的是变化缓慢的持续波动负荷,这类负荷具有的特点是波动幅度很大,变化周期很长<sup>[3-4]</sup>。因此,三次调频不仅要当前实际负荷变化做出反应,更主要的是要对负荷的变化做出预判,事先安排发电机组的出力<sup>[1,4]</sup>。

### 1.1 三次调频面临的问题

目前完成三次调频的机组大多是具有一定调节能力的火电机组,而对火电机组实行的“上大压小”政策,使得能够参与调频的机组备用容量不足,一旦系统中有周期长、幅度大的冲击性负荷波动,调频工作将面临很大的挑战,系统频率的稳定很难得到保证。

图1展示的是我国某地区的风电场四个季节典型日发电功率曲线<sup>[13]</sup>。

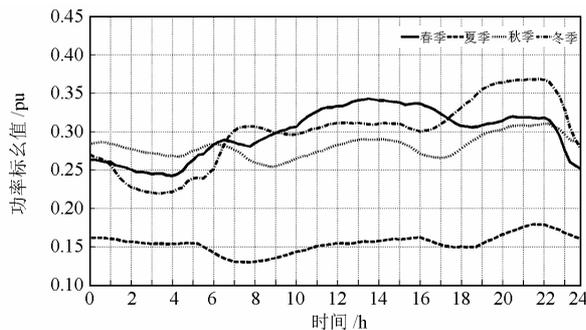


图1 风电功率各季节典型日曲线

Fig. 1 Typical day curve of wind power of all seasons

由风电的日特性可知,风电的引入大大增加了小时级时间尺度的负荷波动性,客观上使得三次调频的压力大大增加<sup>[13]</sup>。所以,在风电并网之后,三次调频数量可观的新增任务是应对风力发电波动引起的等效负荷的变化。

### 1.2 问题的解决办法

风电的接入大大增加了小时级时间尺度的负荷波动性,这对于由于“上大压小”政策已显出容量不足的三次调频而言无异于雪上加霜。因而有必要考虑将其他类型的发电电源引入三次调节,一方面增加系统的调频备用容量,另一方面配合火电完成三次调频的工作。同时,需要了解不同类型发电机

组在调节性能上的差异,结合风电的波动性和负荷的变化规律制定三次调频中的控制策略,协调各种发电电源,以准确高效地完成系统调频工作。

## 2 核电参与三次调频的可行性分析

### 2.1 核电参与调频的技术可行性

首先,核电站的运行模式从“机跟堆”模式发展到了“堆跟机”模式,这一改变要求核电机组在一定范围内能够调节发电功率,以跟踪电力系统负荷变化,促进了核电调峰技术的改进<sup>[14]</sup>。其次,功率控制棒从A模式发展到G模式,这样提高了核电机组改变反应堆功率的速度,使其具有一定的快速跟踪电网负荷变化的能力<sup>[14]</sup>。此外,从机组自身性能上来看,核电机组具有一定的功率自调节性,即,核电反应堆的功率能够跟随汽轮机功率整定值变化<sup>[15]</sup>。综上,核电机组参与调频在技术上是可行的。

中国在建和拟建的核电厂广泛采用AP1000核电机组,其具有在 $15\% \sim 100\%P_N$ 范围内以 $\pm 5\%P_N/\text{min}$ 的平均速率跟踪线性负荷变化和应对 $\pm 10\%P_N$ 阶跃变化负荷的性能<sup>[10,16-17]</sup>。分析核电机组功率调节特性可知:当功率整定值以 $5\%P_N/\text{min}$ 下降时,核电机组反应堆可以在120s内降低 $5\%P_N$ 的功率,在约150s内降低 $10\%P_N$ 的功率,其中最大降负荷速率达 $8\%P_N/\text{min}$ 左右<sup>[16]</sup>。

### 2.2 核电参与调频的经济可行性

核电建设周期长,还贷压力大,承担调峰会造成经济损失,因此,希望核电参与调频,其中的经济可行性是关键问题。而该问题可用改变电价计价方式来解决。文献[18]通过对峰损模型的改进,说明了核电参与调频运行方式下的经济可行性。

发电机组调峰时的经济损失(简称峰损)可用式(1)表示为<sup>[18]</sup>

$$\Delta P = 1 - m^{(1-\tau)} \times \tau \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为负荷比,即机组出力最大值与平均值的比; $m$ 为简称调峰系数。从公式中可以看出峰损 $\Delta P$ 随负荷比的增大而降低,这说明机组发基荷运行时峰损最小,经济性最好。

调整上网电价之后,引入调峰电价系数 $f$ 对峰损模型进行修正,得到的新峰损模型为<sup>[18]</sup>

$$\Delta P' = 1 - m^{(1-\tau)} \times \tau \times f^{(1-\tau \cdot k)} \quad (2)$$

式中, $k$ 为调峰程度系数。

当峰损为零时,对应的调峰电价系数是个临界值,若实际电价系数高于这个临界值,则意味着该机组调峰运行将获得利润<sup>[18]</sup>。因此,只要电价制定部门根据修正后的模型合理地制定核电的调峰电

价, 则能够很好地保证核电加入电网调频后的经济利益。

### 3 三次调频控制策略

#### 3.1 控制思想

如上文所述, 风电波动的不确定性和随机性给电力系统三次调频工作提出了新的要求, 因此, 本文设计的控制策略主要应对风电并网带来的小时级负荷波动。

参与三次调频的核电机组和火电机组的调节性能差异很大, 容量也有所不同, 如果采用一种调控方式, 一方面, 核电机组可能无法较好地跟踪负荷较快速的波动; 另一方面, 火电机组的可快速调节能力易于耗尽。这样不仅削弱了核电引入三次调节的意义, 还达不到希望的控制效果。因此, 需要根据机组调节性能和容量特性制定相应的调控方式, 即, 充分考虑核电机组调节容量大、负荷跟踪能力较差的特点, 同时发挥火电机组调节性能优良的优点。

综上, 本文提出以“风电分解、机组分群”为核心的控制策略, 即将风电等效负荷分解为不同性质的负荷分量, 并将核电机组和火电机组进行分群, 根据机组性能的不同分配各自的调整任务, 以使三次调频完成得准确、高效。

#### 3.2 核电机组与火电机组性能比较

明确核电机组与火电机组性能上的差异是制定合理的三次调频控制策略, 充分高效利用各种类型发电资源的前提。

众所周知, 火电机组的发电功率变化范围大, 调节速度快, 易于改变方向, 爬坡速率能达到  $10\%P_0/\text{min}$  左右, 且其响应速率很高, 指令响应延迟时间小于  $2 \text{ min}$ <sup>[19]</sup>。而核电机组需要调整反应堆内的控制棒和硼酸浓度来调整其发电功率, 所以, 如 2.1 节所述, 其机组输出功率的调节速度大概是火电机组的二分之一。此外, 核电机组频繁改变出力大小和方向会降低其运行经济性, 并损害机组寿命。

#### 3.3 风电等效负荷分解

分析风电小时级波动情况, 对风电进行超短期负荷预测是制定相关控制策略的前提条件。

##### 3.3.1 负荷组成

分析风电日负荷曲线可以发现, 一天中风电波动的最大值和最小值之间的差值非常大, 即, 整体波动幅度很大, 但某些时刻波动比较平缓。由此可以发现风电等效负荷包括两种性质的分量: 平缓趋势分量 (Trend Component—简称 T 分量) 和 高频波动分量 (Fluctuation Component—简称 F 分量)。

##### 3.3.2 负荷分解

对风电进行预测之后得到一些由时间和输出功率组成的离散的时间序列点, 可表示为

$$x = \{x(P_1, T_1), x(P_2, T_2), \dots, x(P_n, T_n)\} \quad (3)$$

再通过最小二乘拟合得到风电等效负荷曲线, 之后采用滚动平均法对 F 分量进行分离, 即, 对每一个负荷幅值前、后一段数值滚动求平均值, 由此求出的原始负荷曲线中的 T 分量可用算式表示为<sup>[20]</sup>

$$P'_t = \text{Average}(P_{t-\tau}, P_{t-\tau+1}, \dots, P_t, P_{t+1}, \dots, P_{t+\tau}) \quad (4)$$

式中:  $P$  是原时刻  $t$  对应的负荷值;  $\tau$  是滚动求平均的负荷幅值个数;  $P'_t$  是经滚动平均法平滑处理后, 时刻  $t$  对应的负荷值, 即 T 分量。

图 2 是某地区风电场冬季典型日有功功率曲线<sup>[13]</sup>。用滚动平均法对其进行等效负荷分解得到的 F 分量和 T 分量如图 3、图 4 所示。

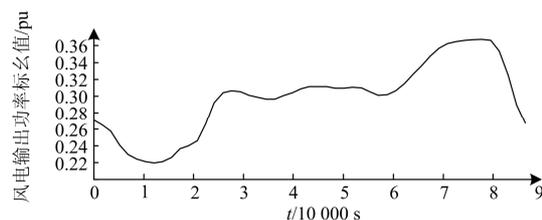


图 2 某地区风电场典型有功功率曲线

Fig. 2 Typical day curve of winter wind power in some area

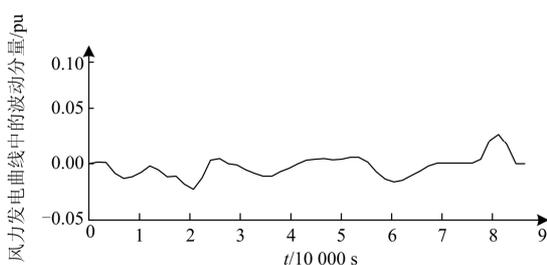


图 3 风电发电曲线中的 F 分量

Fig. 3 Curve of the fluctuation component of the wind power

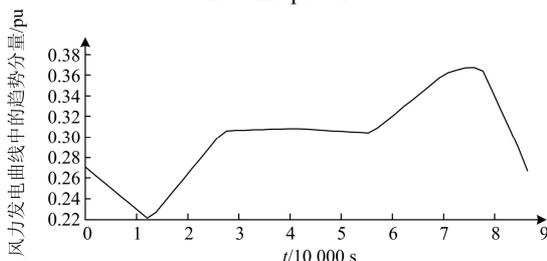


图 4 风电发电曲线中的 T 分量

Fig. 4 Curve of the trend component of the wind power

从曲线中可以看出，T分量体现了原曲线的整体趋向走势，消除了小幅度频繁波动的分量，拐点较少；而F分量则主要体现原曲线中随机变化的分量，这部分分量波动幅值较小，但变化比较频繁，对负责跟踪的调频机组性能要求较高。

### 3.4 机组分群

如 3.3 节所述，风电等效负荷包括 T 分量和 F 分量。其中 T 分量体现整体波动趋势，变化的时间尺度是小时级，而 F 分量代表随机波动部分，变化的时间尺度是几分钟到十几分钟。分析核电和火电的机组特性，发现火电机组调节性能优质，有能力对波动频繁的负荷进行快速的跟踪，适合跟踪 F 分量；核电机组出力爬坡率有限，只能跟踪波动平缓，变化周期长的负荷，适合跟踪 T 分量。

所以，三次调频中机组分群的原则是，在发电容量上占优势的核电跟踪风电等效负荷中的 T 分量，其变动平缓但调整总量较大；在负荷跟踪能力上占优势的火电负责剩下的 F 分量，其变动相对频繁但调整量较小。

### 3.5 控制策略

综上，本文设计的三次调频控制策略的中心思想是“风电分解、机组分群”，即，首先对风电进行超短期负荷预测得到等效负荷曲线，之后将其分解分 T 分量和 F 分量，交给分群之后的核电和火电分别进行跟踪调节。整个系统三次调频的控制策略可用图 5 表示。

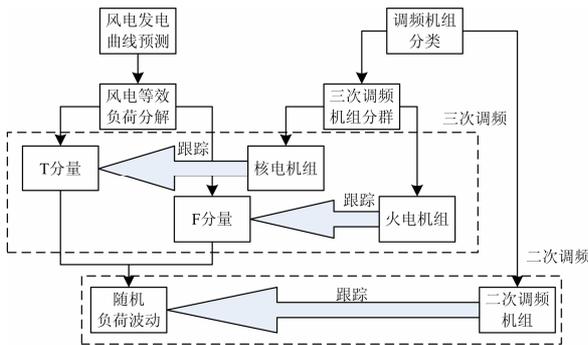


图 5 系统调频控制策略结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of the control strategy of system frequency adjustment

## 4 算例

算例采用标幺值，采用的风电输入曲线是我国某实际地区风电场冬季典型日有功功率曲线，如图 2 所示<sup>[13]</sup>。仿真搭建了一个单区域模型，主要包括一次、二次和三次调频模块。

三次调频模块包括 PID 模块、限幅环节、原动机模块和发电机模块，如图 6 所示。其中 PID 模块

包含比例环节、积分环节<sup>[21-22]</sup>。原动机模块中包括两台火电机组和两台核电机组，由于核电机组和火电机组对调节指令的响应速度不同，在对风电曲线进行超短期负荷预测之后，与火电相比，需要提前更长的时间尺度对核电机组下发调节指令。此外，核电机组的内部结构也比火电机组复杂，核电机组的原动机模块主要包括高压缸、低压缸和汽水分离再热等部分。图 6 为三次调频模块结构框图。

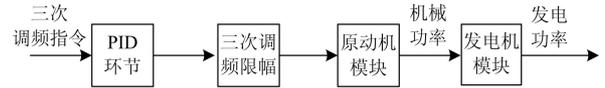


图 6 三次调频模块结构框图

Fig. 6 Structure diagram of the model of the third frequency adjustment

为体现本文设计的控制策略的效果，通过仿真做了两种策略的对比。

策略 1 是核电和火电采用按照机组容量分配发电量的控制策略。

策略 2 是根据核电机组和火电机组不同的特性，安排核电跟踪 T 分量，而火电跟踪 F 分量，即本文所设计的控制策略。

最后，从系统频率和二次调频机组出力情况两方面对仿真结果进行分析。

### 4.1 系统频率质量

两种算例下系统频率偏差情况如表 1 所示。从表 1 可以看出，策略 2 下的系统频率质量好于策略 1 下的频率质量。这是由于策略 1 未考虑机组的特性，只是按照机组容量分配发电量，未使各类机组物尽其用，没有充分发挥核电机组调节容量大、火电机组调节速率快的特点，导致频率调整效果不尽如人意。

表 1 系统频率偏差比较

Table 1 System frequency deviation comparison		
控制策略	机组发电量 分配方式	系统频率偏差 均方根值/Hz
控制策略 1	按机组容量分配	0.088
控制策略 2	按机组性能分配	0.049

根据机组特性制定的控制策略 2 充分发挥了机组各自的优势，即，火电机组跟踪等效负荷的 F 分量、核电机组跟踪等效负荷的 T 分量，这样三次调频能够及时修正补充发电计划，使得较大幅度的有功偏差及时被消除，系统有功平衡及频率稳定得到很好的保证。

## 4.2 二次调频机组出力

图 7、图 8 是两种策略下二次调节机组的出力情况。从图 7 可以看出, 二次调频机组出力的整体幅度很大, 某些时刻甚至满发, 使得系统调频备用容量严重不足, 这是由于在按机组容量分配发电量的控制策略下, 三次调频无法应对某些时刻等效负荷的剧烈波动, 无法很好地补偿风电带来的功率缺额。这种情况下, 调频工作面临很大的压力, 如 4.1 节所述, 系统频率质量也不能得到很好的保证。

对比发现, 图 8 中二次调频机组出力主要集中在  $\pm 0.01$  pu 之间波动, 在可调容量范围之内, 此时, 系统备用调频容量充足。这说明在“风电分解、机组分群”的控制策略下, 三次调频能够很好地跟踪风电并网带来的等效负荷波动, 为二次调频提供了适宜的基点功率, 减轻了二次调频的压力。

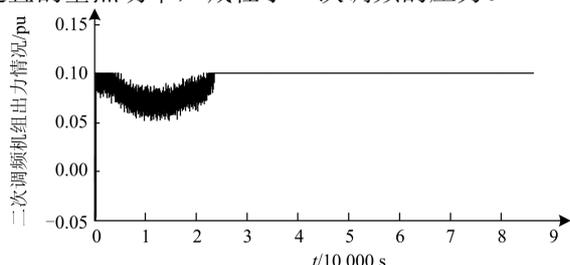


图 7 策略 1 中二次调频机组的出力情况

Fig. 7 Output curve of the second frequency adjustment unit with the first strategy

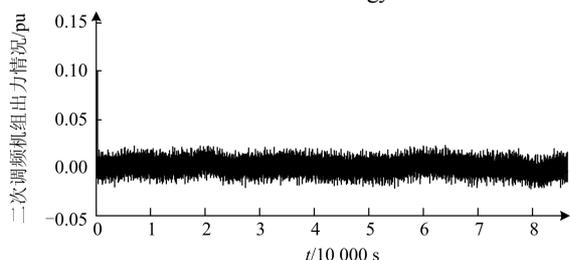


图 8 策略 2 中二次调频机组的出力情况

Fig. 8 Output curve of the second frequency adjustment unit with the second strategy

所以, 充分有效地利用核电参与三次调频, 合理制定控制策略, 可以缓解风电并网带来的大幅度功率缺额, 进而缓解二次调频的调频压力, 使得二次调频机组有充分的备用容量应对小幅度的随机负荷波动, 这样整个系统的调频工作能够顺利高效地进行。

## 5 结语

国家对火电机组实施“上大压小”的电源政策使得电力系统的三次调频工作面临调频机组容量不足的问题, 同时, 风电并网又加剧了三次调频的调

整压力。本文根据核电的发展情况和机组特性, 提出将核电引入三次调频, 并制定了以“风电分解、机组分群”为核心的三次调频控制策略。通过算例分析, 一方面验证了核电参与三次调频的可行性, 另一方面说明了根据机组特性制定核电和火电的控制策略, 能够充分利用各机组资源, 有效地完成三次调频工作, 较好地应对风电接入对三次调频带来的压力, 进而保证系统频率的稳定。

## 参考文献

- [1] 刘继烈. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 28-40.  
LIU Wei-lie. Power system frequency adjustment and automatic generation control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 28-40.
- [2] 陈铭, 刘娆, 吕泉, 等. AGC 机组分群控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(13): 868-869.  
CHEN Ming, LIU Rao, Lü Quan, et al. A grouping control strategy for AGC units[J]. Power System Technology, 2013, 37(13): 868-869.
- [3] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 105-119.  
XIA Dao-zhi. Power system analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 105-119.
- [4] 于永源, 杨绮雯. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 89-95.  
YU Yong-yuan, YANG Wen-qi. Power system analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 89-95.
- [5] 颜伟, 赵瑞锋, 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): 149-155.  
YAN Wei, ZHAO Rui-feng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 149-155.
- [6] 武诚, 徐政, 倪秋龙, 等. 基于响应特性的原动机及调速器建模与参数辨识[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 227-231.  
WU Cheng, XU Zheng, NI Qiu-long, et al. Modeling and parameter identification of turbine-governor based on response characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 227-231.
- [7] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 88-97.  
ZHU Xing-yang, ZHANG Jian-hua, LIU Wen-xia, et al. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 88-97.

- [8] 倪琳娜, 罗吉, 王少荣. 含风电电力系统的频率控制[J]. 电工技术学报, 2013, 26(增刊 1): 235-241.  
NI Lin-na, LUO Ji, WANG Shao-rong. Frequency control of power system with wind power integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 26(S1): 235-241.
- [9] 万卫. “上大压小”中的电网安全及规划问题研究[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊 2): 382-384.  
WAN Wei. Study on safe and planning problems of power grid in "Build Large Shut Down Small"[J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 382-384.
- [10] 朱成章. 我国核电机组调峰的必要性[J]. 大众用电, 2010(7): 3-5.  
ZHU Cheng-zhang. The necessity of the introduction of nuclear power into frequency adjustment in China[J]. Popular Utilization of Electricity, 2010(7): 3-5.
- [11] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 248-254.  
ZHANG Li, SUN Kai, WU Tian-jin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.
- [12] 高英, 谢开贵, 胡博, 等. 考虑光伏出力与负荷相关性的光伏电站容量可信度评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 1-6.  
GAO Ying, XIE Kai-gui, HU Bo, et al. Photovoltaic power capacity credit evaluation model considering the correlation between photovoltaic power generation and system load[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 1-6.
- [13] 陈学成. 面向电力系统运行需求的风电特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.  
CHEN Xue-cheng. Research on wind power characteristics for power system operation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [14] 余文齐, 彭波, 郑秀波. 压水堆核电机组负荷跟踪能力综述[J]. 中国能源, 2011, 33(3): 38-41.  
YU Wen-qi, PENG Bo, ZHENG Xiu-bo. Reviews of the load following ability of PWRs[J]. Energy of China, 2011, 33(3): 38-41.
- [15] 赵洁, 刘涤尘, 熊莉, 等. 基于 PSASP 自定义模型的核电机组动态响应仿真[J]. 核动力工程, 2010, 31(3): 113-117.  
ZHAO Jie, LIU Di-chen, XIONG Li, et al. Simulation of dynamic response of nuclear power plant based on user-defined model in PSASP[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(3): 113-117.
- [16] 施希. 大型压水堆核电站接入电网的理论和技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.  
SHI Xi. Study on theory and technology of connecting PWR to power grids[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.
- [17] 熊莉, 刘涤尘, 赵洁, 等. 大型核电站接入系统运行方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 50-60.  
XIONG Li, LIU Di-chen, ZHAO Jie, et al. Study on program of connecting nuclear power plant to power grids[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 50-60.
- [18] 陈世和, 方彦军, 方源. 分时电价下核电机组调峰的经济性探讨[J]. 广东电力, 2012, 25(4): 1-4.  
CHEN Shi-he, FANG Yan-jun, FANG Yuan. Discussion on economy of peak shaving of nuclear power units in TOU price[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(4): 1-4.
- [19] 宋兆星, 骆意, 李国胜. 发电机组类型对 AGC 运行性能的影响及对策[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 17-21.  
SONG Zhao-xing, LUO Yi, LI Guo-sheng. The influence and counter measure of generating unit's type on AGC operation performance[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 17-21.
- [20] 李雪峰, 李卫东, 刘乐. AGC 容量需求研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 40-43.  
LI Xue-feng, LI Wei-dong, LIU Le. Research of AGC capacity demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 40-43.
- [21] 王媛. 互联网运行与控制仿真系统的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
WANG Yuan. Research on the simulation of interconnection operation and control[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [22] 徐诚, 刘念, 赵泓, 等. 基于电力系统二次调频原理的微电源频率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 14-20.  
XU Cheng, LIU Nian, ZHAO Hong, et al. A novel frequency control strategy of micro-grid based on the secondary frequency regulation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 14-20.

收稿日期: 2013-07-20

作者简介:

常烨曩 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为互联系统运行与控制; E-mail: changyek@163.com

刘 娆 (1967-), 女, 硕士, 副教授, 从事电力系统分析方面的教学与科研工作, 研究方向为互联系统运行控制与评价标准、电力市场理论与应用及电力系统运行状态可视化;

王 冲 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为 AGC 控制策略及电力系统运行状态显示。