

DOI: 10.7667/PSPC151605

# 电力系统频率分布特征及改进一次调频控制策略研究

陶 骞<sup>1</sup>, 贺 颖<sup>2</sup>, 潘 杨<sup>2</sup>, 孙建军<sup>2</sup>

(1. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 电网频率作为描述负荷与发电平衡的重要变量具有随机性。传统的一次调频研究主要关注的是单次一次调频, 缺乏从统计学方面对一次调频进行研究和改进。从统计学的角度, 针对电网频率所存在的非正态分布及其带来的问题, 将传统发电机下垂特性应用于一次调频, 提出了改进的一次调频控制策略。即在通过下垂控制与无死区一次调频控制的切换, 使电网不设置调频死区, 同时又不会因为无死区而引起机组的频繁动作。通过理论分析和仿真, 论证了所提的策略改善了电力系统频率的非正态分布所带来的问题, 有利于提高系统频率稳定性。

**关键词:** 一次调频; 非正态; 分布特征; 改进; 下垂控制

## Characteristics of power system frequency abnormal distribution and improved primary frequency modulation control strategy

TAO Qian<sup>1</sup>, HE Ying<sup>2</sup>, PAN Yang<sup>2</sup>, SUN Jianjun<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430072, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Grid frequency is an important variable which describes load and generation balance. The frequency of grid is random. The traditional primary frequency modulation concentrates more on the single time, lacking of research and improvement from the statistical aspects. The conventional generator droop control is applied to primary frequency modulation to solve the problem of the non normal distribution. The proposed droop control strategy and non-dead zone traditional control strategy will switch according to the frequency of the grid. The generator won't react frequently for there is on dead zone. Through theoretical analysis and simulation, it is demonstrated that the proposed method improves the frequency of power system and the problem of non normal distribution, which is beneficial to improve the system frequency stability.

**Key words:** primary frequency modulation; non-normal; distribution characteristic; improvement; droop control

## 0 引言

频率是电力系统运行中需要重点关注和调整的参数之一, 电网中负荷和发电的随机波动导致了供需不平衡使电网的频率不能维持在 50 Hz, 因此, 电网运行时要求电力系统的频率控制在  $50 \pm 0.1$  Hz 的范围内。相比于二次调频, 一次调频是有差调频, 但是一次调频具有能够快速响应各类负荷扰动的特点, 是电网频率的第一道防线, 对电力系统的频率稳定起着至关重要的作用。

一次调频是电网并联运行机组所应具备的基本功能。系统和区域的一次调频能力对电网的安全运行有重要意义<sup>[1]</sup>。一次调频得到了广泛的研究。近年来, 对发电机组一次调频特性的研究可分为以下

三个方面: 一是对一次调频控制策略的研究<sup>[2-3]</sup>。文献[2-3]研究了DEH、CCS以及DEH和CCS协调这三种调速器控制方式对一次调频能力的影响。二是对一次调频稳定性进行研究<sup>[4-6]</sup>。文献[4]提出了一种考虑孤网运行特性的频率控制策略, 对电网孤网运行保证系统的稳定运行提供指导; 文献[5]结合具体电网, 在保证电力系统一次调频稳定性的条件下优化转速不等率和调速器死区两个参数; 文献[6]提出虚拟惯性与一次调频有机结合的综合控制策略, 解决了大规模风电场集中接入电网将导致系统惯性降低, 调频能力不足的问题。文献[7-8]提出了电动汽车一次调频控制策略, 利用电动汽车辅助传统一次调频抑制电网频率波动, 提高电能质量。文献[9]提出风-火互补发电的区域频率控制, 将风力发电加入

电网频率控制,提高电网频率调节性能。三是对一次调频能力的在线估计<sup>[10-11]</sup>,文献[10]定义结合方差分析得到了电网一次调频能力在静态及动态情况下的数学表达式,给出了可实际应用的计算方法,并讨论了计算过程中的参数误差对结果的影响;文献[11]提出一种可靠的并网运行机组一次调频特性参数在线估计算法,提出了用于衡量机组在电网扰动或事故后快速支援能力的指标及其在线估计方法。

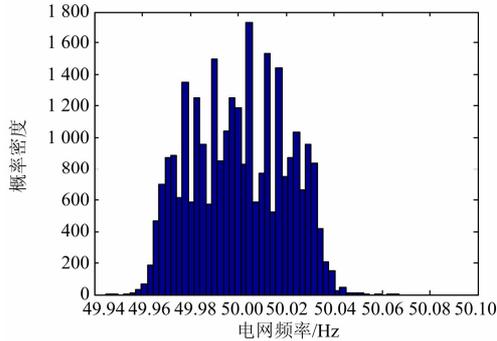


图1 华中某省级电网中心频率2014年概率分布图  
Fig. 1 Frequency probability distribution of a provincial power grid of 2014 in Central China

一次调频的研究主要关注点是一次调频对系统稳定性的影响以及一次调频动作考核用于计算一次调频经济补偿,缺乏一次调频的频率质量相关研究,文献[12]首次提出了利用概率分布来研究一次调频的频率分布,认为负荷随机性分量是正态分布的,电力系统中的死区会使本应与负荷分布特性一致的系统频率偏离正态分布。由于CPS2指标的制定是基于区域控制偏差(Area Control Error, ACE)呈正态分布,而电网频率的概率分布的非正态性必然会影响到ACE的分布特性也为非正态,进而影响对电网的考核。但是后续并没有提出相应的策略来改善电网一次调频频率的概率非正态分布。如图1所示为华中某省级电网2014年中心频率的概率分布图,频率采样的间隔是0.05 s。从图中可以看出,电网的频率分布为非正态分布。

因此,本文提出将频率下垂控制引入一次调频的DEH控制当中,代替传统的发电机组设置死区的方法,在保证电力系统一次调频的稳定性的同时消除由一次调频死区所带来的频率概率非正态分布现象。

### 1 系统频率分析模型

电力系统频率具有统一性和分散性,研究电网频率的长周期行为时,忽略电力系统频率的分散性,认为电网频率是统一的,即采用惯性中心频率<sup>[13]</sup>。一次调频作为并网机组所应具备的基本功能,对电网的安全稳定运行至关重要,得到了广泛的研究,形成了成熟的数学模型。因此,本文引用文献[5]中的模型,如图2、图3所示,分析电网一次调频频率的概率分布。

图2是用于分析电网一次调频的单台同步发电机数学模型,图3是M台同步发电机并联运行模型,图2的模型是由图3的模型等值聚合而成。在图2、图3中,R为二次调频给定值,不考虑二次调频所以取0;  $\alpha_i$ 为电网中第i台机组装机容量/电力系统装机容量;  $\delta_i$ 为电网中第i台机组的不等率;  $G_i(s)$ 为第i台汽轮机或水轮机的传递函数;  $\Delta P_{Ti}$ 是第i台同步发电机的功率偏差值;  $\Delta P_L$ 是负载变化标幺值;  $\beta_\Sigma$ 是电网负荷频率特性系数;  $T_{ai}$ 为第i台汽轮机的转子时间常数; 电网中每台汽轮机转子时间常数的加权平均即为电网的惯性时间常数<sup>[14]</sup>  $T_{a\Sigma}$ ,即

$$T_{a\Sigma} = \sum_i^M \alpha_i T_{ai} \quad (1)$$

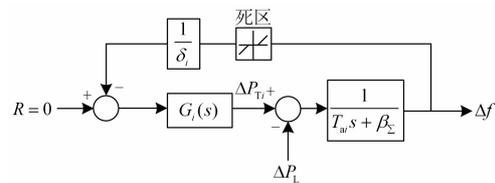


图2 分析电网一次调频单台同步发电机数学模型  
Fig. 2 Mathematical model of single synchronous used to analysis the grid primary frequency modulation

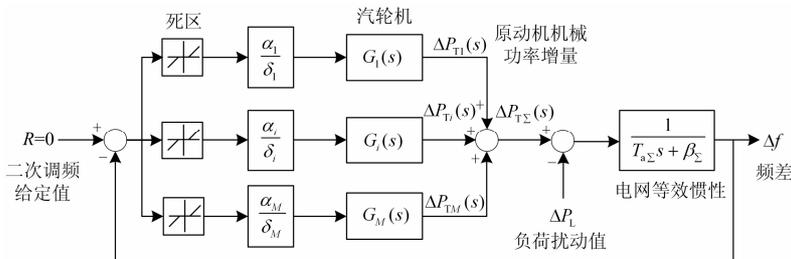


图3 分析电网一次调频频率的概率分布的M台同步发电机并列运行的数学模型  
Fig. 3 Mathematical model of M synchronous generators used to analyze the character of power system primary frequency modulation probability distribution

$G_i(s)$  代表汽轮机或水轮机的传递函数, 本文只讨论火电机组, 因此对于凝汽式汽轮机, 其传递函数<sup>[14-15]</sup>为式(2); 对再热式汽轮机<sup>[15-16]</sup>, 其传递函数为式(3)。其中  $T_{si}$  为调速器油动机时间常数,  $T_{VHr}$  为原动机容积时间常数;  $T_{RHr}$  为再热容积时间常数;  $\alpha_H$  为高压缸功率占整个汽轮机功率的份额量。

$$G_{i1}(s) = \frac{1}{T_{si}s+1} \cdot \frac{1}{T_{VHr}s+1} \quad (2)$$

$$G_{i2}(s) = \frac{1}{T_{si}s+1} \cdot \frac{1}{T_{VHr}s+1} \cdot \frac{\alpha_H T_{RHr}s+1}{T_{RHr}s+1} \quad (3)$$

当一次调频存在死区时, 由图 2 可推出电网的频率变化为

$$\Delta f(s) = \begin{cases} -\frac{\Delta P_L(s)}{T_a s + \beta}, & \Delta f < d \\ d \cdot \frac{\text{sgn}(-\Delta f) + \Delta P_L(s)}{\delta}, & \Delta f \geq d \\ \frac{d \cdot \text{sgn}(-\Delta f) + \Delta P_L(s)}{T_a s + \beta + \frac{1}{\delta} G_1(s)}, & \Delta f \geq d \end{cases} \quad (4)$$

当  $s \rightarrow 0$ , 就得到静态范畴中相应的公式为

$$\Delta f = \begin{cases} -\frac{\Delta P_L}{\beta}, & \Delta f < d \\ \frac{d \cdot k \cdot \text{sgn}(-\Delta f) + \Delta P_L}{\beta + k}, & \Delta f \geq d \end{cases} \quad (5)$$

而当一次调频不存在死区时

$$\Delta f(s) = -\frac{\Delta P_L(s)}{T_a s + \beta + \frac{1}{\delta} G_1(s)} \quad (6)$$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L}{\beta + k} \quad (7)$$

从静态的角度进行分析, 从式(5)可以看出, 当负荷扰动造成的频率偏差在死区范围内时, 发电机一次调频不动作, 由负荷频率调节效应的作用阻止频率的变化; 当频率变化超过死区时, 备用机组就会按照各自的转速不等率, 调整汽门位置, 调整原动机输出的有功功率; 当发电功率与负荷需求再一次平衡时, 频率又将达到一个新暂态平衡点, 此即一次调频的过程<sup>[17]</sup>。这时的频率稳定值, 由负荷扰动大小、负荷频率调节效应、发电机转速不等率以及发电机的死区决定, 一次调频静态频率偏差表征了一次调频的能力。当机组设置调频死区后频率的静态值较低。即特定电网及备用容量充裕的条件下, 调频死区的引入, 削弱了电力系统的一次调频能力。

国家电网公司 Q/GDW669-2011《火力发电机组一次调频试验导则》中给出了调频死区的设置范围

推荐值, 火电机组不大于  $\pm 0.033$  Hz 或者  $\pm 2$  r/min。在工程实际中, 发电机组的调频死区基本均设为 2 r/min。调频死区的存在会削弱一次调频的能力, 同时带来频率概率分布双驼峰现象, 有必要寻求一种新的一次调频控制策略, 在提高一次调频能力的同时, 改善频率的概率分布非正态现象。

## 2 死区内基于频率下垂的改进一次调频控制方法

现代发电厂控制普遍应用了协调控制系统 (CCS), 如图 4 所示。一方面接收电网调度的 AGC 指令, 一方面将 AGC 治理指令利用内置的逻辑算法转变为汽门开度指令以及锅炉燃烧和水位指令, 实时调节发电机的出力。一次调频普遍采用数字式电液调节系统 (DEH), 根据实时测量的电网频率, 将实时电网频率与设定频率 50 Hz 之间的差值利用一次调频的控制逻辑转换为汽门开度指令直接控制汽门开度。AGC 指令和一次调频指令都控制汽门开度。因此, 发电机的汽门处于实时的动作状态。因为发电机都具备一定的蒸汽储能, 对于发电机来讲损害较大的不是汽门的实时开动, 而是频繁的大扰动给锅炉燃烧控制和水位控制带来的困难。因此, 本文提出一种基于频率下垂的一次调频控制方法, 利用此方法可以使发电机组不设置死区, 但是又使发电机动作不至于太大而影响系统的稳定性。由于死区设为零值, 可以改善由死区非线性环节所引起的一次调频频率的概率分布双驼峰现象。

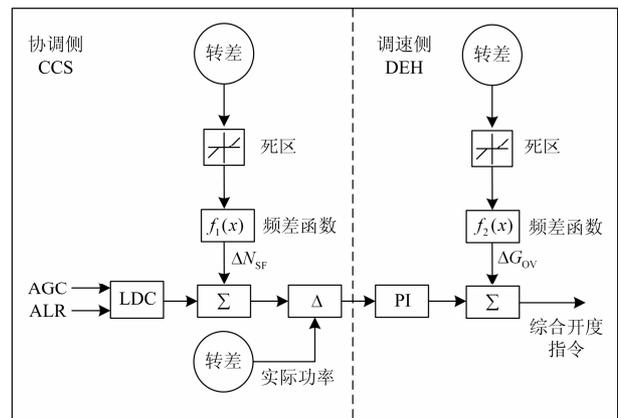


图 4 一次调频功能实现总体原理图

Fig. 4 Overall Schematic of primary frequency modulation

参照发电机的静态特性, 定义下垂控制的下垂系数为  $m$ , 采用标幺值, 如图 5 所示。

$$f_1 = f_0 - m(P_1 - P_0) \quad (8)$$

一次调频控制策略如下: 当频率扰动在死区范

围内时,下垂系数为  $m$ , 此时调速器的频率给定值由原来的  $f_0$  变为  $f_1$ , 即由原来在调频死区范围内采用频率下垂控制, 一次调频微动, 抑制频率的下降。当频率扰动范围超过死区时, 一次调频切换出频率下垂控制, 此时为发电机组不设置死区的一次调频控制, 通过加大发电机汽门开度, 以快速稳定电网频率。

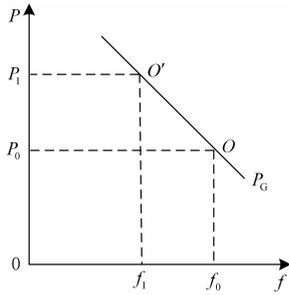


图 5 下垂控制原理

Fig. 5 Principle of droop control

图 5 和式(8)中:  $P_0$  为系统稳定运行时的发电机电磁功率;  $P_1$  为系统发生扰动后的发电机电磁功率;  $f_0$  为 50 Hz, 是一次调频频率设定值;  $f_1$  为对应负荷功率为  $P_1$  时的一次调频频率设定值;  $m$  为下垂系数。

### 3 频率下垂控制下垂系数的确定

从一次调频静态特性角度来分析频率下垂控制的下垂系数的确定。发电机运行时, 发电机既不能过载运行, 又必须要满足负载的电能质量指标要求, 下垂系数  $m$  可以按照式(9)求得<sup>[18]</sup>。

$$m = \frac{f_0 - f_{\min}}{P_{\max} - P_0} \quad (9)$$

在死区范围内采用下垂控制时, 一次调频效果不能比含死区下垂控制的效果差, 最优的效果是刚好补偿到死区为零的下垂控制, 根据一次调频的静态特性, 则

$$0 < m \leq \delta \quad (10)$$

图 6 是具有下垂控制一次调频作用的单机系统传递函数框图, 选取凝汽式汽轮机, 取典型仿真参数:  $\delta=5\%$ ,  $T_a=8\text{ s}$ ,  $\beta=2.89$ ,  $G_1(s)$  的两个参数分别为:  $T_{si}=0.2\text{ s}$ ,  $T_{vHi}=0.2\text{ s}$ 。仿真结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出, 在死区范围内引入频率下垂控制后, 会影响频率的动态过程, 一次调频在死区范围内的动作量介于有死区和无死区的范围之

内, 达到一次调频微动的效果, 有利于提高系统一次调频的稳定性。

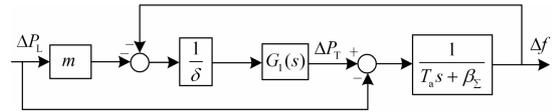


图 6 具有下垂控制一次调频作用的单机系统传递函数框图

Fig. 6 Transfer function block diagram of primary frequency modulation for droop control

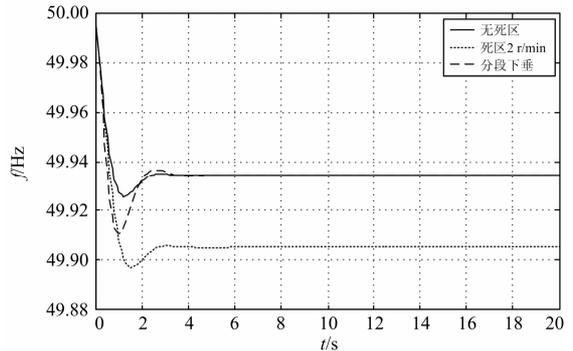


图 7 不同控制策略情况下频率特性曲线

Fig. 7 Frequency characteristic under different control strategies circumstances

### 4 频率下垂控制的一次调频频率概率分布分析

采用图 3 所示的模型对频率的分布特征进行仿真分析。在图 3 所示的模型中, 取典型的仿真参数:  $\delta=5\%$ ,  $T_a=8\text{ s}$ ,  $\beta=2.89$ ,  $T_{si}=0.2\text{ s}$ ,  $T_{vHi}=0.2\text{ s}$ ,  $T_{RH}=9\text{ s}$ ,  $\alpha_H=1/3$ , 其中凝汽式机组占 40%, 再热式机组占 60%, 仿真时间为 150 000 s, 参考 SCADA 频率采样每隔 1 s 采一次频率, 进行仿真。

由图 8 仿真所得的调频死区与电网负荷方差大致在相同范围时的仿真结果, 即各机组调频死区设为  $\pm 2\text{ r/min}$ , 此时不考虑机组限荷影响。可以看到电网频率的概率分布在调频死区存在时已不再是正态分布, 而是出现了中间低两头突起的驼峰现象, 统计的频率方差为 0.023 1 Hz。

仍然采用图 3 所示的仿真模型, 引入频率下垂控制, 在相同的仿真条件下, 得到的频率概率分布直方图如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 电网的频率概率分布双驼峰现象得到了改善, 统计的频率方差为 0.011 1 Hz。

采用下垂控制后, 频率的方差会变小, 说明系统的频率稳定性越好, 而且频率双驼峰分布的现象

也得到了改善。

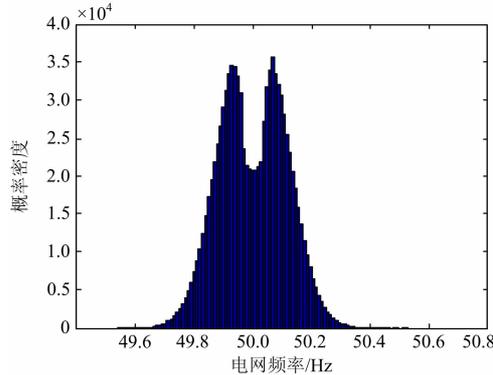


图 8 一次调频死区情况下的频率概率分布

Fig. 8 Influence of dead-band on power system frequency probability distribution

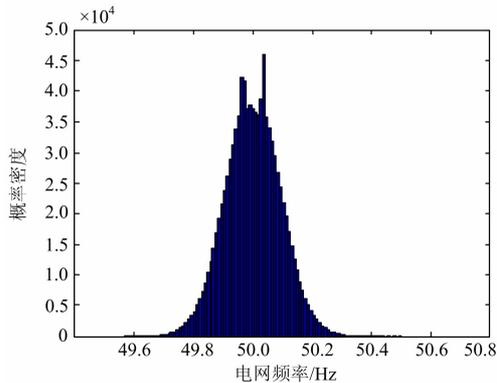


图 9 采用频率下垂的一次调频频率概率分布

Fig. 9 Influence of droop control on power system frequency probability distribution

## 5 结论

概率分布的观点在有关电力市场的定价和交易、电力系统的可靠性、发电预测等方面得到了广泛的应用。系统频率本身就具有统计意义,研究一次调频频率分布表征了电网一次调频的水平 and 能力,反映了一次调频动态过程。本文针对由于死区所带来的电网频率非正态分布现象以及对CPS指标的影响,基于发电机的频率静态特性提出了频率下垂的一次调频控制方法,既能消除死区的影响,又能防止一次调频频繁动作。参考微电网中下垂系数设置方法设置下垂系数,通过仿真验证得出了频率下垂一次调频控制方法在相同的扰动下,能够使频率稳定在较高的值,改善频率概率分布双驼峰现象,有利于提高系统一次调频能力。

## 参考文献

[1] 刘乐, 刘娆, 李卫东. 互联电网中区域调频责任及其分配方式[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 20-23.

- LIU Le, LIU Rao, LI Weidong. A new scheme for fault phase selection and transmission line protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 20-23.
- [2] 王蕊, 刘肇旭, 宋新立, 等. 基于 Matlab 的大型火电机组一次调频特性仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 42-46.
- WANG Rui, LIU Zhaoxu, SONG Xinli, et al. Matlab-based simulations of primary frequency control for large thermal generating unit[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 42-46.
- [3] 翟永杰, 王舒, 陈晓霞. 1000MW 超超临界机组一次调频应用策略的研究与优化[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(12): 34-38.
- ZHAI Yongjie, WANG Shu, CHEN Xiaoxia. Study and optimization of the strategies of primary frequency modulation strategy for 1000MW ultra supercritical unit[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(12): 34-38.
- [4] 叶健忠, 邹俊雄, 龙霏, 等. 地区电网火电机组孤网运行频率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 123-128.
- YE Jianzhong, ZOU Junxiang, LONG Fei, et al. Research on frequency control strategy for isolated grid operation of thermal power unit in regional power network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 123-128.
- [5] 金娜, 刘文颖, 曹银利, 等. 大容量机组一次调频参数对电网频率特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 91-95.
- JIN Na, LIU Wenyong, CAO Yinli, et al. Effect of primary frequency modulation parameters on the frequency characteristics of the large capacity generators[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 91-95.
- [6] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716.
- FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716.
- [7] 刘辉, 魏岩岩, 汪旒, 等. 电动汽车入网一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 90-95.
- LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 90-95.
- [8] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容

- 量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 134-140.  
HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.
- [9] 姚亮, 陈峦, 郑彬, 等. 风-火互补发电系统区域频率控制的策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 46-52.  
YAO Liang, CHEN Luan, ZHENG Bin, et al. Research on area frequency control strategy of wind-fire hybrid power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 46-52.
- [10] 于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 72-76.  
YU Daren, GUO Yufeng. The online estimate of primary frequency control ability in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 72-76.
- [11] 高林, 戴义平, 王江峰, 等. 机组一次调频参数指标在线估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 62-69.  
GAO Lin, DAI Yiping, WANG Jiangfeng, et al. An online estimation method of primary frequency regulation parameters of generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 62-69.
- [12] 郭钰锋, 于达仁, 赵婷, 等. 电网频率的非正态概率分布特性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 26-31.  
GUO Yufeng, YU Daren, ZHAO Ting, et al. Characteristics of power system frequency abnormal distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 26-31.
- [13] 刘克天, 王晓茹, 薄其滨. 基于广域量测的电力系统扰动后最低频率预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2188-2195.  
LIU Ketian, WANG Xiaoyun, BO Qibin. Minimum frequency prediction of power system after disturbance based on the WAMS data[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2188-2195.
- [14] 李政, 李兴源, 王渝红, 等. 转子角动量分析及其在一次调频中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 39-43.  
LI Zheng, LI Xingyuan, WANG Yuhong, et al. Analysis of the rotor angular momentum and its application in primary frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 39-43.
- [15] GUO Yufeng, YU Daren. The influence of interconnection of electric power systems on load characteristic and frequency regulation[J]. Electric Power System Research, 2004, 70(1): 23-29.
- [16] 沈祖谔. 水轮机调节[M]. 2 版. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [17] 郑涛, 高伏英. 基于 PMU 的机组一次调频特性参数在线监测[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 57-61.  
ZHENG Tao, GAO Fuying. Online monitoring of primary frequency modulation characteristic parameters based on PMU[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 57-61.
- [18] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 6-11.  
ZHENG Yongwei, CHEN Minyou, LI Chuang, et al. Microgrid control strategy of adaptive adjustment droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 6-11.

收稿日期: 2015-09-09; 修回日期: 2015-10-25

作者简介:

陶 骞(1973-), 男, 工学博士, 高级工程师, 从事电能质量、AC/DC 变换技术研究; E-mail: 12558865@qq.com

贺 颖(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 从事一次调频研究; E-mail: 2010302540221@whu.edu.cn

潘 杨(1979-), 男, 工学硕士, 从事发电厂自动控制理论研究及参数整定。E-mail: 9283790@qq.com

(编辑 魏小丽)