

DOI: 10.7667/PSPC151783

考虑调频死区的电网一次调频能力评价指标

贺颖¹, 潘杨¹, 陶骞², 刘悦遐¹, 孙建军¹, 查晓明¹

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

摘要: 现有的在线估计一次调频能力的指标没有考虑调频死区对电网一次调频能力的影响。为了表征调频死区对电网一次调频能力的影响, 提出利用均方差定义电网一次调频能力(Primary Frequency Modulation Ability, PFMA)指标。根据一次调频模型给出了其静态和动态表达式。最后通过计算仿真, 对比了不考虑死区和不同死区大小情况下的评价指标曲线。结果表明, 所提的指标同时兼顾了一次调频能力的动态特性和死区, 实现了一次调频能力的在线全面评估。

关键词: 一次调频能力; 评价; 均方差; 动态特性; 死区

Evaluation index of power grid primary frequency modulation considering dead zone

HE Ying¹, PAN Yang¹, TAO Qian², LIU Yuexia¹, SUN Jianjun¹, ZHA Xiaoming¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430072, China)

Abstract: The existing online estimation of primary frequency modulation ability does not consider the effect of the dead zone on the primary frequency modulation of power grid. In order to characterize the effect of frequency modulation dead zone on the primary frequency modulation, the power grid primary frequency modulation capability (Primary Frequency Modulation Ability, PFMA) index is proposed by the means of square deviation. The static state and dynamic state expressions are given according to the primary frequency modulation model. Finally, the evaluation index curves without dead zone and under different dead zones are calculated by simulation. The results show that the dynamic characteristic and dead zone of primary frequency modulation capability are considered, and a comprehensive evaluation of primary frequency modulation capability is realized.

Key words: primary frequency modulation ability; evaluation; mean square deviation; dynamic characteristics; dead zone

0 引言

频率是电力系统运行时重点关注的参数之一, 频率波动不仅会影响电能质量, 影响电力用户的正常使用, 还会对电力系统无功平衡和电压调节带来困难, 对电力系统的运行带来危害。因此, 频率稳定是电力系统稳定的一个重要部分。造成电力系统频率波动的原因是发电功率和负荷功率不匹配。电力系统的负荷可分为可预测的确定性分量和不可预测的随机性分量, 一次调频具有能够快速响应随机性负荷扰动的特点, 对提高电能质量及电网频率

控制水平, 迅速平息电网频率波动起到了重要作用^[1]。

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^[2]。风电等新能源的接入, 给电网的一次调频稳定带来了新的挑战^[3-5]。电动汽车的推广和接入电网, 也给电网一次调频带来了新的要求^[6-7]。分布式电源和负荷的接入给电网的一次调频能力评价带来了新的要求。

影响机组一次调频性能的关键参数有调频死区、转速不等率、迟缓率、负荷调整最大幅值限制、响应行为时间要求等, 其中最重要的参数是调频死区和转速不等率。全面地评价一次调频能力需要兼

顾一次调频的静态特性和动态特性,同时能够反映影响一次调频特性的重要参数。

传统的一次调频特性从静态的角度,体现为原动机功率与其转速间的关系曲线,因此用转速不等率 δ 来描述一次调频能力^[4]。这种方式只考虑了一次调频的静态特性,同时也没有考虑死区环节;NERC1997公布CPS1和CPS2标准,用于衡量电网总体运行性能的标准^[5]。但是CPS指标是对AGC控制效果进行评价,没有一个单独的指标对电网一次调频能力进行评价^[6];文献[7-8]是对一次调频的动作次数,动作积分量以及经济补偿为指标进行考核,评价指标仅基于静态频率;文献[9]定义一次调频能力指标,利用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,用于一次调频能力的在线估计,但是没有考虑一次调频死区的影响。

调频死区是一次调频的最重要的参数之一。一方面,调频死区设置的大小关系着一次调频的响应速度以及出力。死区设置过小,即使轻微的频率偏差也可能引起调速器动作,从而导致发电机阀门的频繁调节,影响机组的使用寿命和系统的稳定性;死区设置过大,当系统发生较大功率缺额时调速器不动作,不利于一次调频快速动作提升频率到规定的范围之内,影响系统一次调频能力,更严重可能导致发生重大的事故;另一方面,调频死区的存在会影响频率的概率分布特性。文献[10-11]表明,一次调频死区等非线性因素的存在会使电网频率概率分布出现非正态的双驼峰分布。

图1为华中某省级电网2014年中心频率概率分布图,频率采样的间隔0.05s。从图中可以看出,该电网的一次调频能力比较对称,表明当电网出现功率缺额的时候,系统容量充足,频率调节能力较强。电网频率分布不符合正态分布,与文献[10-11]所得出的电网实际运行中存在死区等非线性因素使电网频率分布变成非正态分布的结论一致。

文献[9]没有考虑调频死区的影响,认为负荷扰动是符合正态分布的均值为0的量,通过计算功率谱得到了定义的用于评估电网一次调频能力的指标。图1以及文献[10-11]表明,全面地评价一次调频能力,在考虑调频死区的情况下,文献[9]基于功率谱推导出的一次调频能力评价指标并不适用。因此,本文进一步研究了含调频死区的一次调频能力指标,定义了一次调频能力评价指标PFMA,使一

次调频能力评价指标能够更加全面地反应电网的一次调频能力。

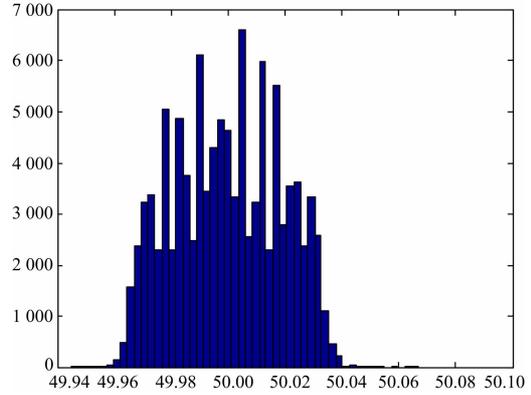


图1 华中某省级电网频率概率分布图

Fig. 1 Frequency probability distribution of a provincial power grid in Central China

1 用于评估电网一次调频能力指标PFMA的定义及分析模型

电网的一次调频能力是指电网频率变化之后,由一次调频独立动作后频率稳态值与标准频率50Hz之间的差值,即不依赖二次调频机组所增加或者减少的功率。由于死区的影响,与呈现正态分布的随机负荷扰动不同,频率偏差的分布为非正态分布^[10-11]。因此,本文直接采用了频率偏差的均方差对一次调频能力指标进行定义。

定义:PFMA(Primary Frequency Modulation Ability)为电网仅有一次调频作用情况下,某段时间内频率均方差,可表示为

$$V_{PFMA} = \text{电网频率变化的均方差(某段时间内)}$$

为了得到电网一次调频能力指标的表达式,首先进行建模分析。图2分析电网一次调频的 M 台同步发电机并列运行的数学模型^[12-13],在图2中, R 为二次调频给定值; α_i 为电网中第 i 台机组装机容量/电力系统装机容量; δ_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; β_Σ 是电网负荷频率特性系数; ΔP_L 为电网负荷变化的标么值; Δf 为频率变化的标么值; 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^[14] $T_{a\Sigma}$ 。

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

$G_i(s)$ 代表汽轮机或水轮机的传递函数,本文

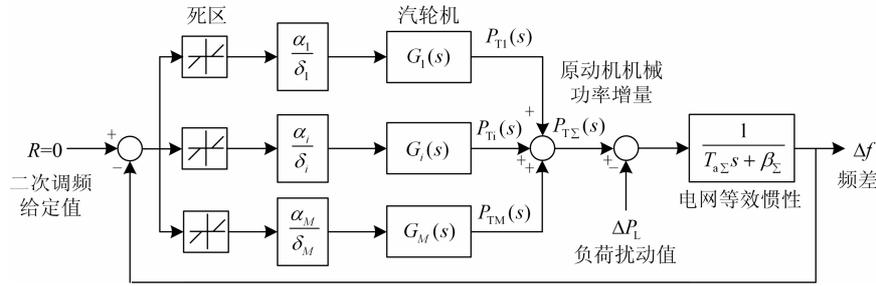


图2 分析电网一次调频的M台同步发电机并列运行的数学模型

Fig. 2 Mathematical model of M synchronous generators used to analyze the character of power system primary frequency modulation probability distribution

只讨论火电机组, 因此对于凝汽式汽轮机, 其传递函数^[11-12]为式(2); 对再热式汽轮机^[15-16], 其传递函数为式(3)。其中 T_{si} 为调速器油动机时间常数, T_{VHi} 为原动机容积时间常数; T_{RH_i} 为再热容积时间常数; α_H 为高压缸功率占整个汽轮机功率的份额量。

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

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

2 PFMA 的静态表达式

由图2推出电网频率偏差变化的公式。当负荷扰动很小, 频率偏差始终在死区范围内时, 频率偏差如式(4)所示; 当负荷扰动很大, 频率偏差超过死区范围时, 频率偏差如式(5)所示。

$$\Delta f(s) = -\frac{\Delta P_L(s)}{T_{a\Sigma}s + \beta_\Sigma} \quad \Delta f \leq d \quad (4)$$

$$\Delta f(s) = -\frac{\sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\delta_i} \cdot G_i(s) \cdot d + \Delta P_L(s)}{T_{a\Sigma}s + \beta_\Sigma + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\delta_i} \cdot G_i(s)} \quad \Delta f > d \quad (5)$$

$s \rightarrow 0$, 在静态范畴直接用频率偏差表征一次调频能力, 得到式(4)、式(5)对应的静态范畴的一次调频能力表达式如式(6)、式(7)所示。

$$V_{PFMA} = -\frac{\Delta P_L}{\beta_\Sigma} \quad \Delta f \leq d \quad (6)$$

$$V_{PFMA} = \Delta f = -\frac{K \cdot d + \Delta P_L}{\beta_\Sigma + K} \quad \Delta f > d \quad (7)$$

其中, $K = \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\delta_i}$ 为电网的等效转速不等率。

式(6)、式(7)为静态情况下电网一次调频能力的表达式。表明了负荷的静态一次调频能力由负荷调

节效应系数、电网的等效转速不等率、调频死区以及负荷扰动来表征, 与传统给的利用转速不等率来表征一次调频能力结果是一致的。

3 PFMA 动态表达式

电力系统的日负荷按照变化规律可以大致分为两种: 可预测的确定性分量和不可预测的随机性分量。可预测的确定性分量是由电网调度部门预先根据负荷曲线, 按照最优化的原则在各发电厂之间进行分配, 现代主要是利用 AGC 实现。一次调频主要是对负荷中的随机性分量进行响应, 具有随机性, 同时也表现出了动态特性。因此本文利用 V_{PFMA} 的动态表达式来评价一次调频能力。

由于死区的存在, 使得本应该和负荷扰动同为正态分布的频率偏差的分布特性变成了非正态分布。因此, 考虑在动态情况下, PFMA 的表达式为由如下过程推导。

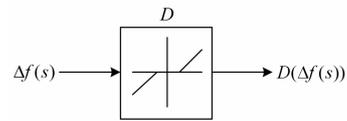


图3 调频死区作用

Fig. 3 Effect of dead band

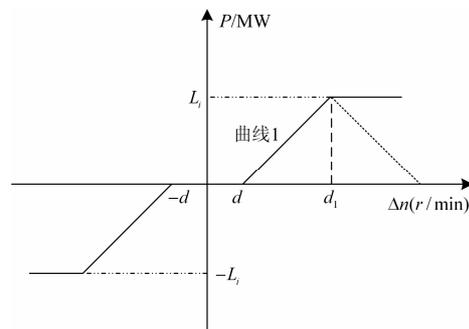


图4 调频死区特性示意

Fig. 4 Dead band characteristic

当考虑调频死区时,如图3所示,设输入信号为 $\Delta f(s)$,通过死区作用后,输出为 $D(\Delta f(s))$ 。调频死区特性如图4所示, d 为调频死区(取标么值), L_i 为发电机一次调频最大调频负荷限幅(容量500MW以上的机组,取 $\pm 6\%$,容量330~350MW的机组,取 $\pm 8\%$,容量300MW的机组取 $\pm 8\%$)^[17],图4中曲线1的斜率即发电机组的转速不等率的倒数,则得出 $D(\Delta f(s))$ 如式(8)。

$$D(\Delta f(s)) = \frac{1}{\delta_i} [\Delta f(s) - d] \varepsilon(d) - \frac{1}{\delta_i} [\Delta f(s) - (d + 2\delta_i L_i)] \varepsilon(d + \delta_i L_i) \quad (8)$$

根据图2得到如式(9)所示的传递函数表达式。

$$V_{\text{PFMA}} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\delta_i^2} \cdot G_i(j\omega) \cdot [(d + 2\delta_i L_i) \varepsilon(d + \delta_i L_i) - d \varepsilon(d)] + P_L(j\omega)}{T_{a\Sigma} j\omega + \beta_\Sigma + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\delta_i^2} \cdot G_i(j\omega) \cdot [\varepsilon(d) - \varepsilon(d + \delta_i L_i)]} \right|^2 d\omega} \quad (11)$$

式(11)通过电网的调频死区 d 、电网惯性时间常数 $T_{a\Sigma}$ 、转速不等率 δ 以及一次调频过程中的动态延迟 $G_i(s)$ 来描述了电网的一次调频动态特性。分别表现为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;在一次调频初期的惯性调节阶段,利用储存在转子和负荷电磁场中的能量来阻止频率变化;在一次调频过程中由于原动机容积时间效应和调速器的油动机时间效应造成的延时。全面反映了燃煤机组原动机及调速器的一次调频响应特性及过程^[18]。因此,本文所提出的PFMA指标能够全面地表征一次调频的动态过程。

4 仿真分析

对于一个确定的电网,式(11)中的电网的惯性时间常数 $T_{a\Sigma}$ 、各台机组所占的比例 α_i 、转速不等率 δ_i 和调频死区 d 是已知的;电网中第 i 台机组的传递函数 $G_i(s)$ 为负荷频率特性和电网负荷频率特性系数可以分别通过参数辨识和负荷建模得到。参考文献[9]所给出的机组仿真参数和负荷频率特性参数。

$$\delta = 5\%, T_a = 8\text{s}, \beta = 2.89, T_{si} = 0.2\text{s}, T_{VHI} = 0.2\text{s}, T_{RHI} = 9\text{s}, \alpha_H = 1/3$$

其中凝汽式机组占40%,再热式机组占60%。 k 取60s到120s变化。可以得到如图5所示的电网频率均方差随负荷频率特性变化的图,data1、data2、data3、data4所对应的曲线为从下到上。图中data1所对应的实线为采用文献[9]所示的方法得到的结果,即不考虑调频死区;date2、data3、data4所对

$$-\sum_{i=1}^N D_i(\Delta f(s)) \cdot \frac{\alpha_i}{\delta_i} G_i(s) - P_L(s) = (T_{a\Sigma} s + \beta_\Sigma) \Delta f(s) \quad (9)$$

将式(8)代入式(9),可以得到如式(10)所表示的频率差的表达式。

$$\Delta f(s) = -\frac{\sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\delta_i^2} \cdot G_i(s) \cdot [(d + 2\delta_i L_i) \varepsilon(d + \delta_i L_i) - d \varepsilon(d)] + P_L(s)}{T_{a\Sigma} s + \beta_\Sigma + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\delta_i^2} \cdot G_i(s) \cdot [\varepsilon(d) - \varepsilon(d + \delta_i L_i)]} \quad (10)$$

则根据定义,考虑在动态情况下,PFMA的表达式如式(11)所示。

应的曲线为本文所提出的引入调频死区的情况下所得到的结果,分别对应死区1 r/min、2 r/min、3 r/min。

由图5可见:不考虑调频死区时,一次调频能力指标随负荷特性的变化如data1所对应的曲线所示,与考虑死区的一次调频能力指标所得出的结果相比,频率变化的均方差较小。即不考虑调频死区所计算得出的一次调频能力指标值由于没有考虑死区的作用,得出的值偏小;当负荷中的低频成分越来越多时,电网的频率均方差变化越来越小,同时未考虑死区的一次调频能力指标曲线data1和考虑死区的一次调频能力指标曲线data2、data3、data4之间的间隔越来越大。这是由于电网中低频成分的负荷扰动变化慢,幅值相对于高频成分较大,因此,考虑死区与不考虑死区所得出一次调频评价指标值之间的差值较大;而电网中的高频成分的负荷扰动

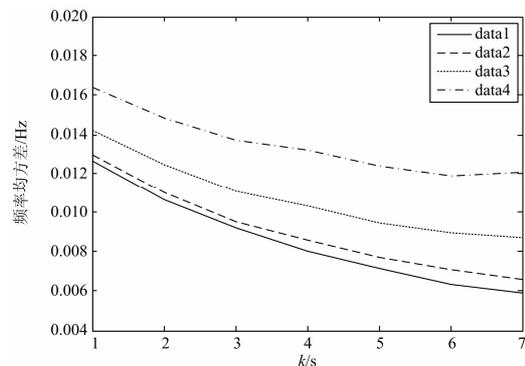


图5 电网频率均方差随负荷频率特性变化图

Fig. 5 Figure of grid frequency variance change with the load frequency characteristic

变化较快,幅值较小,所造成的频率偏差小于死区的概率较大,因此考虑死区与不考虑死区所得出的一次调频指标之间的差值较小。

因此,在利用 PFMA 进行一次调频能力在线估计时,如果不考虑调频死区的影响,电网实际的频率均方差大于在线估计所得出的频率均方差。这样的偏差会导致实际电网一次调频能力偏低,不利于提高大电网应付负荷突变的能力以及系统的频率稳定性。因此,在定义一次调频能力评价指标时,考虑调频死区对一次调频能力的影响,才能更加全面以及准确地表征一次调频能力。

5 结论

电网一次调频功能越来越得到重视,系统中的各台机组均必须根据国家电网公司 Q/GDW669-2011《火力发电机组一次调频试验导则》设定调频死区。同时新能源并网发电渗透率逐步提高,并网大规模风电的机组出力的随机性也给一次调频带来新的挑战。传统的采用静态不等率来表示一次调频特性的方法,以及不考虑调频死区的一次调频评价指标,都将难以全面地表征一次调频的特性,会影响电网的一次调频能力估计,不利于电网协调稳定运行。因此,全面地评价一次调频能力,并据此来提高电网的负荷突变的能力,对提高电网接纳新能源并网发电能力具有重要的意义。

本文考虑了包括死区在内的影响一次调频的因素,利用均方差定义了考虑调频死区的一次调频能力评价指标 PFMA。考虑死区带来非线性问题的情况下,给出相应的静态和动态表达式,能够更加全面的评价一次调频能力,对指导提高电网一次调频能力,应对新能源接入所带来的挑战具有积极的意义。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 朱晓星,盛锴,刘陆军. 基于综合算法的汽轮机及其调节系统参数智能辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 138-143.
ZHU Xiaoxing, SHENG Kai, LIU Lujun. An intelligent parameter identification of steam turbine and its governing systems based on multi-algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 138-143.
- [3] 包宇庆,李扬,王春宁,等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32-37.
BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chunqing, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.
- [4] 孟建辉,王毅,石新春,等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 1-10.
MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverter based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.
- [5] 米增强,刘力卿,余洋,等. 限电弃风工况下双馈风电机组有功及调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 81-88.
MI Zengqiang, LIU Liqing, YU Yang, et al. The control strategy of active power and frequency regulation of DFIG under wind abandon condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 81-88.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 张艳军,高凯,曲祖义. 基于发电机组出力曲线特征的一次调频性能评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 99-103.
ZHANG Yanjun, GAO Kai, QU Zuyi. An evaluation method of primary frequency modulation performance based on characteristics of unit output power curves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 99-103.
- [9] JALEELI N. NERC's new control performance standards[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1092-1099.

- [10] 余涛, 张水平. 在策略 SARSA 算法在互联电网 CPS 最优控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 211-216.
YU Tao, ZHANG Shuiping. Optimal CPS control for interconnected power systems based on SARSA on-policy learning algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 211-216.
- [11] 李端超, 陈实, 陈中元, 等. 发电机组一次调频调节效能实时测定及补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 70-72.
LI Duanchao, CHEN Shi, CHEN Zhongyuan, et al. Real-time measurement and reward method of the efficiency of generator unit primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 70-72.
- [12] 杨建华. 华中电网一次调频考核系统的研究与开发[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 96-99.
YANG Jianhua. Research and development of assessment system of primary frequency regulation in Central China Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 96-99.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 陈磊, 胡伟, 徐飞, 等. 互联电网联络线随机功率波动统计特性与评价标准分析[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3137-3143.
CHEN Lei, HU Wei, XU Fei, et al. Analysis on statistic characteristic and evaluation criteria of tie-line stochastic power fluctuation in interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3137-3143.
- [16] 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 Wenying, 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.
- [17] 李常刚, 刘玉田, 张恒旭, 等. 基于直流潮流的电力系统频率响应分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 36-41.
LI Changgang, LIU Yutian, ZHANG Hengxu, et al. Power system frequency response analysis based on the direct current load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 36-41.
- [18] 何永秀, 戴爱英, 罗涛, 等. 智能电网条件下的两阶段电力需求预测模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 167-172.
HE Yongxiu, DAI Aiyang, LUO Tao, et al. A two-stage electricity demand forecasting model in the smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 167-172.
- [19] 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.
- [20] 于达仁, 郭钰锋. 一次调频的随机过程分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 38-41.
YU Daren, GUO Yufeng. Analysis on random process of the primary frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 38-41.
- [21] 杨军统, 吴泽刚. 超超临界机组一次调频控制策略的优化[J]. 热力发电, 2013, 42(5): 83-85, 89.
YANG Juntong, WU Zegang. Control strategy optimization of primary frequency regulation for ultra supercritical units[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(5): 83-85, 89.
- [22] 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): 226-231.
WU Cheng, XU Zheng, NI Qiulong, et al. Modeling and parameter identification of turbine-governor based on response characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 226-231.

收稿日期: 2015-10-09; 修回日期: 2015-11-25

作者简介:

贺颖(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析; E-mail: 2010302540221@whu.edu.cn

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

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

(编辑 张爱琴)