

DOI: 10.7667/PSPC160897

考虑多种影响因素的电网频率概率分布研究

程含渺^{1,2,3}, 李红斌³, 邵周策³, 陈刚¹, 田正其¹

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 国家电网公司电能计量重点实验室, 江苏 南京 211103; 3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 搭建了电网频率测量平台, 分别在湖北和贵州两地测得电网频率数据。实测结果表明, 这两地的电网频率分布形状相近, 与现有研究得出的结论有一定差异。这种电网频率分布的成因主要是负荷波动带宽受限和AGC控制非线性。综合考虑了以上因素, 通过仿真得出了与实测结果相符合的电网频率分布。最后讨论了CPS应用条件, 得出大样本抽样是CPS2应用条件的结论, 即计算CPS2的时间应足够长。

关键词: 电网频率; 概率分布; AGC; 负荷波动; CPS; 抽样分布

Research on distribution of power frequency considering on multiple influence factors

CHENG Hanmiao^{1,2,3}, LI Hongbin³, SHAO Zhouce³, CHEN Gang¹, TIAN Zhengqi¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. State Grid Key Laboratory of Electrical Power Metering, Nanjing 211103, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The frequency measurement platforms are constructed to measure and obtain the power frequency in Hubei province and Guizhou province respectively. The results show that the frequency distribution characteristics of the two places are similar, which have certain differences with the existing conclusions. The main causes of such frequency distribution are automatic generation control (AGC) non-linear strategy and the load fluctuation characteristics of limited bandwidth. The same frequency distribution with the practical measurement results is presented through simulation considering the above causes. The applying conditions of control performance standard (CPS) is discussed, and the conclusion that the applying condition of CPS2 is large sampling is drawn, that is the CPS2 calculation interval should be long enough.

Key words: power frequency; probability distribution; AGC; load fluctuation; CPS; sampling distribution

0 引言

电网频率是电力系统稳定运行的要素之一, 也是一项重要的电能质量指标^[1-2]。电网稳态运行时, 系统发电出力与负荷平衡, 电网频率保持恒定且全网统一。实际负荷会时刻波动, 使得电网频率偏离系统额定频率, 但在调频作用下电网频率仍然会保持相对稳定, 并形成一个概率分布。

目前对电网频率的研究主要侧重于系统调频及评价指标, 关于电网频率分布的研究较少^[3-5]。然而研究电网频率分布特性可以帮助研究系统调频策略和调频性能, 具有十分重要的意义^[6-9]。文献[6]研究了电网频率的时空分布对低频减载的影响, 文

献[7]对川渝电网的频率分布进行了研究, 以此评价川渝电网的调频性能, 文献[8]在研究电网频率分布特征的基础上研究了一次调频控制策略, 文献[9]通过研究南方电网的频率波动特性制定调频策略并达到了预期调频效果, 这说明研究频率分布特性可以帮助研究系统频率控制策略。文献[10]采用随机信号分析方法研究电网频率的概率分布, 考虑了调频死区、调频不对称等因素, 从理论和仿真上得出电网频率在不同条件下的分布, 具有较高的方法指导意义。但该文考虑因素有限, 所以得出的结论与电网频率的实际分布特征有一定差异。此外, 文献[10]还指出, 当电网频率偏离正态分布时, CPS2标准存在适应性问题。

本文以文献[10]为基础, 完成了3项工作: (1) 通过实测湖北和贵州两地的电网频率, 得到电网频率分布样本, 分析表明这两地的电网频率的分布边

基金项目: 国家电网公司科技项目“面向电能贸易结算的电子式互感器计量运行态势多维度分析及风险评估研究”

缘陡峭，左边高于右边，与文献[10]的结论差异较大；(2)考虑了 AGC 控制策略和负荷波动特性，分析了这种分布的成因，根据分析建立了电网调频 Simulink 仿真模型，通过设置仿真参数得到了与实测分布更接近的结果；(3)讨论了 CPS2 应用条件，得出满足大样本随机抽样是 CPS2 应用条件的结论，否定了 CPS2 标准不适用于电网频率偏离正态分布的结论。本文所做工作主要由文献[10]引出，对一些结论进行了进一步讨论，是文献[10]所做工作的深入。

1 实测电网频率分布及其成因分析

1.1 实测电网频率分布

电网频率测量平台分别布置在处于湖北的实验室、贵州 110 kV 三江变电站，能反映不同地域和不同电压等级的电网频率。实验室的频率测量平台框图如图 1，变电站的频率测量平台框图如图 2。

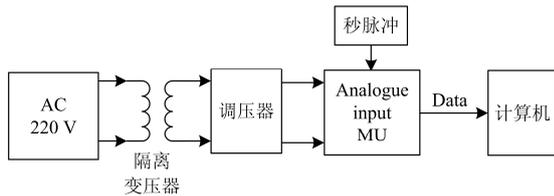


图 1 实验室的频率测量框图

Fig. 1 Frequency measurement schematic in laboratory

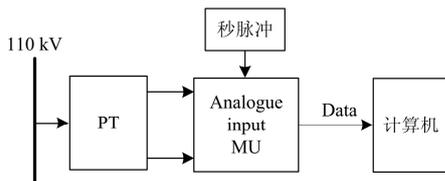


图 2 变电站的频率测量框图

Fig. 2 Frequency measurement schematic in substation

图 1 中，220 V 为实验室普通照明用电出线端口，合并单元为国电南自 PMU602 型模拟量输入合并单元，中间增加了隔离变压器。合并单元在秒脉冲同步下对输入的模拟信号进行采样，采样值以 IEC61850 9-2 帧格式输出到上位机。图 2 中的合并单元直接采集站内传统电磁式电压互感器输出的模拟信号。计算机每秒计算一次频率，测得两地的电网频率分布如图 3 和图 4 所示。

实验室的数据样本为 48 000，变电站的数据样本为 5000。由图 3 和图 4 可以看出，湖北和贵州两地的频率变化范围基本相同，分布形态非常近似，分布边缘陡峭且左边高于右边，这与文献[10]所得的结论存在很大的差异。

1.2 实测电网频率分布的成因分析

文献[10]用随机信号分析方法从理论上解释了

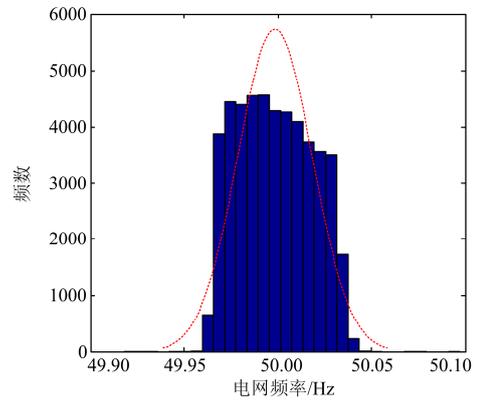


图 3 湖北电网频率分布图

Fig. 3 Power frequency distribution of Hubei

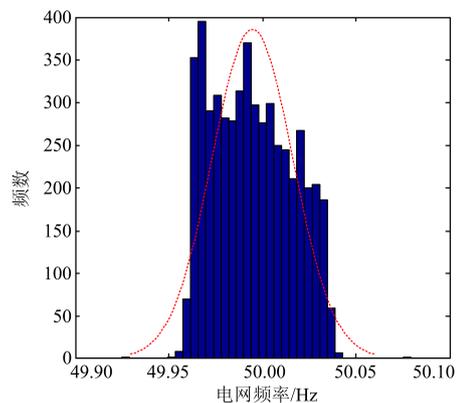


图 4 贵州电网频率分布图

Fig. 4 Power frequency distribution of Guizhou

东北电网频率呈偏态分布的原因：1) 调频死区较小；2) AGC 机组不对称调频。但没有考虑负荷波动特性和 AGC 非线性控制策略的影响，因此得出的结论与实际情况有一些差异。本文进一步考虑负荷波动特性和 AGC 控制非线性。

AGC 主要调节大幅度长周期的负荷波动，小幅度的负荷波动由机组一次调频完成调节。文献[11]用示意图描述了电网频率在 AGC 调节作用下的波动过程，如图 5 所示。

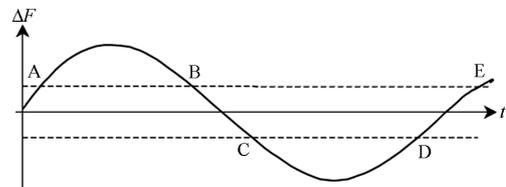


图 5 电网频率波动示意图

Fig. 5 Simulation schematic of single area frequency

图 5 中虚线以内表示调频死区。在不考虑非线性控制策略时，超出调频死区的频率在 AGC 调频作用下被折叠到死区附近，形成双峰分布。但是实际中 AGC 控制策略是非线性的，非线性产生的效

果是当 ACE 偏差较大时具有相对较大的反馈量以便迅速减小 ACE。这种非线性控制策略对图 5 中频率超出调频死区的部分不仅仅是折叠到死区附近, 而是迅速调节至死区以内, 近似将超出调频死区的概率部分进行反褶。基于上述描述, 对文献[10]中的频率双峰分布函数作如下修正:

$$p(y) = \begin{cases} p_{4|y>2\Delta}(-y-2\Delta), y \leq -\Delta \\ p_2(y) + p_1(-y+2\Delta) + p_4(-y-2\Delta), -\Delta < y \leq 0 \\ p_3(y) + p_1(-y+2\Delta) + p_4(-y-2\Delta), 0 < y \leq \Delta \\ p_{1|y<-2\Delta}(-y+2\Delta), y > \Delta \end{cases} \quad (1)$$

式中, $p_1(y)$ 、 $p_2(y)$ 、 $p_3(y)$ 和 $p_4(y)$ 分别为

$$p_1(y) = \frac{(1+K)}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{[(1+K)y+K\Delta]^2}{2\sigma^2}} \quad y < -\Delta \quad (2)$$

$$p_2(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-y^2/(2\sigma^2)} \quad -\Delta \leq y \leq 0 \quad (3)$$

$$p_3(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-y^2/(2\sigma^2)} \quad 0 \leq y < \Delta \quad (4)$$

$$p_4(y) = \frac{(1+K)}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{[(1+K)y-K\Delta]^2}{2\sigma^2}} \quad y \geq \Delta \quad (5)$$

式(1)的示意图如图 6。

图 6(a)是不考虑 AGC 非线性时, 调频死区设置相对较大, 电网频率呈双峰分布; 图 6(b)是在 AGC 的非线性调节对超出调频死区的部分进行反褶, 反褶程度与 AGC 超调量有关; 图 6(c)是最终电网频率的分布, 在没考虑调频不对称的情况下, 与实测频率分布接近。对于图 5 而言, AGC 非线性调节作用等效为延长 BC 和 DE 段, 而缩短 AB 和 CD 段, 从而将双峰分布的两峰削平变为图 6(c)所示的分布形状。

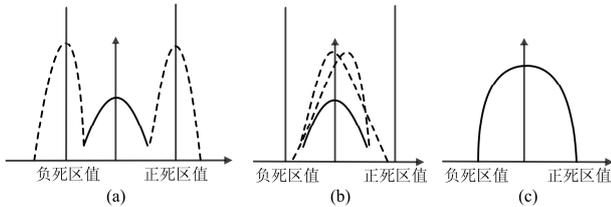


图 6 电网频率概率分布成因示意图

Fig. 6 Forming cause schematic of the power frequency distribution

2 电网频率统计分布仿真验证

为了验证上述分析, 得到与实测结果相符合的电网频率分布, 采用 Simulink 进行了仿真。

2.1 电网调频仿真模型

对电网调频仿真模型的研究较多, 本文参考文献[12-16]搭建单区域调频增量仿真模型, 仿真模型

原理框图如图 7 所示。

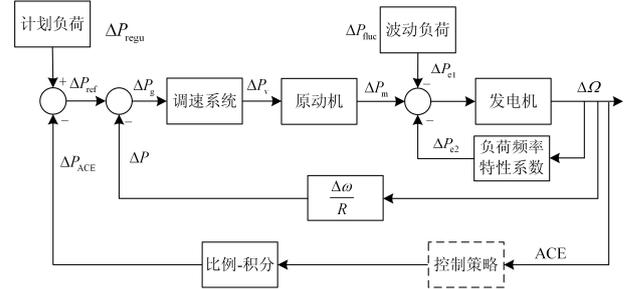


图 7 电网调频仿真模型

Fig. 7 Frequency regulation simulation model of power grid

1) 调速器系统模型

调速系统的主要功能是根据当前电网频率偏差调整发电机组的转速, 实现发电机组的一次调频。根据调速器的工作特性, 调速器的输出 ΔP_g 与系统频率 ω 的关系为

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{\omega - \omega_0}{R} \quad (6)$$

式中: R 为调速器的调差系数; ΔP_{ref} 为调速器设定功率变化, 只考虑一次调频时 $\Delta P_{ref} = 0$ 。式(6)的拉普拉斯变换为

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta \Omega(s) \quad (7)$$

ΔP_g 经过液压放大传递给阀门开度位置指令 ΔP_v , 假设放大执行结构(主要是油动机)的时间常数为 τ_g , 结合式(7)得到发电机组调速系统的传递函数为

$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1 + \tau_g s} [\Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta \Omega(s)] \quad (8)$$

2) 原动机模型

原动机为发电机提供机械功率, 可以是水轮机、汽轮机或燃气轮机等。本文的原动机仿真模型采用一阶惯性环节等效, 其控制模型的输入为阀门开度 P_v , 输出为机械功率 P_m , 时间常数为 τ_T 。输入和输出变化量, 其工作点的传递函数为

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1 + \tau_T s} \quad (9)$$

式中: ΔP_m 为输出机械功率变化量; ΔP_v 为输入阀门开度变化量。

3) 发电机模型

根据同步发电机转子运动方程可得

$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (10)$$

式中, H 为发电机惯性常数。式(10)的拉普拉斯变换为

$$\Delta\Omega(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \quad (11)$$

4) 负荷频率特性

一次调频除了调速器以外，还包括负荷自身的频率特性。当频率变化时，频率敏感型负荷消耗的功率也随之变化。实际电网的负荷的功率-频率特性可以近似表示为

$$\Delta P_e = \Delta P_L + \delta\Delta\omega \quad (12)$$

式中： ΔP_e 表示总的负荷功率变化； ΔP_L 为非频率敏感型负荷的功率变化； $\delta\Delta\omega$ 为频率敏感型负荷的功率变化； δ 表示负荷变化百分数与频率变化百分数之比。式(12)的拉普拉斯变换为

$$\Delta P_e(s) = \Delta P_L(s) + \delta\Delta\Omega(s) \quad (13)$$

5) 二次调频模型

一次调频为有差调频，为了消除频差和控制发电，需要采用二次调频，由 AGC 系统完成。AGC 首先计算区域控制偏差(ACE)，再对 ACE 进行比例-积分运算，根据运算结果通过调整同步器而改变发电机组出力。二次调频实际是改变 ΔP_{ref} ，从而达到调频目的。积分增益为 K_T 、比例系数为 K_p 的 ACE 计算模块的传递函数为

$$G_{ACE}(s) = K_p + \frac{K_T}{s} \quad (14)$$

此外，AGC 调频一般还会引入非线性环节，如

将 ACE 乘以非线性因子，使得当 ACE 较大时，反馈量更大，有利于快速减小 ACE；而当 ACE 较小时，反馈量较小，有利于避免过调节。

6) 负荷波动模型

文献[17]对负荷波动进行了建模并仿真，主要考虑负荷波动是带宽受限的，文献[15]等采用了该负荷波动模型，本文也采用文献[17]所提出的负荷波动模型。负荷波动由两部分组成：(1) 波动较大且波动周期较长的随机负荷；(2) 波动较小且波动周期较小的随机负荷。选取负荷负带宽限为 5~15 min，荷波动仿真模型如图 8 所示。

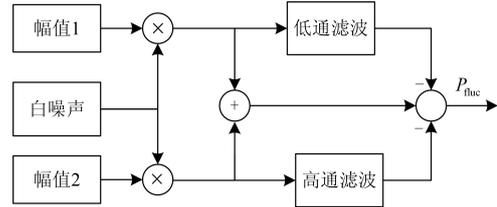


图 8 负荷波动模型

Fig. 8 Load fluctuation simulation model

2.2 仿真及结果分析

根据上述各部分的仿真模型，建立单区域调频 Simulink 仿真图如图 9 所示。由于多机组调频仿真需要的参数多，模型复杂，也考虑到多机组可以等效为一台机组的参数，故本文采用单机组调频模型以简化仿真。

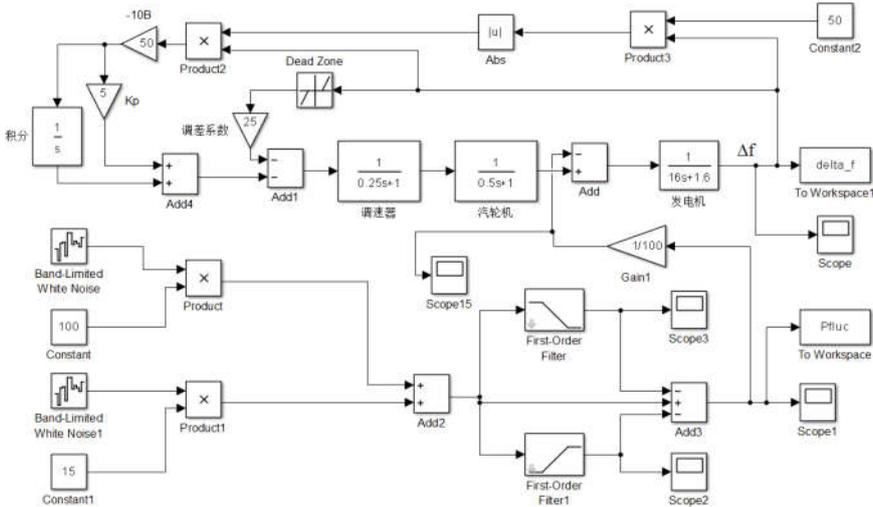


图 9 单区域调频 Simulink 仿真图

Fig. 9 Simulation schematic of single area frequency regulation

仿真参数的选取按照如下原则：(1) 与电力系统有关的固定部分如调速器、汽轮机、发电机等的参数依据文献[14]选取；(2) 可设置部分如调频死区、ACE 计算模块、AGC 非线性模块的参数可调，以便比较不同仿真参数对电网频率分布的影响。调

速器的时间常数 $\tau_g = 0.25\text{ s}$ ，原动机的时间常数 $\tau_T = 0.5\text{ s}$ ，发电机惯性常数 $H = 8\text{ s}$ ，调差系数 $R = 25$ ，负荷频率响应系数 $\delta = 1.6$ ，积分增益 $K_T = 1$ ，比例系数 $K_p = 5$ 。

由于不同地区的 AGC 调节控制策略不同, 故非线性环节也不相同, 本文仿真模型采用简单非线性控制策略, 可表示为

$$ACE = PI[\Delta f \cdot (K_f |\Delta f|)] \quad (15)$$

式中: PI 表示比例-积分运算; K_f 的作用是将 Δf 的绝对值转化为大于 1 的常数, 使得当 Δf 较大时, 反馈量更大, 而当 Δf 较小时, 反馈量相对较小。

1) 不考虑负荷波动特性和 AGC 非线性

设置调频死区为 0.01 Hz, 按照文献[14]的仿真条件, 得到电网频率统计分布如图 10 所示。

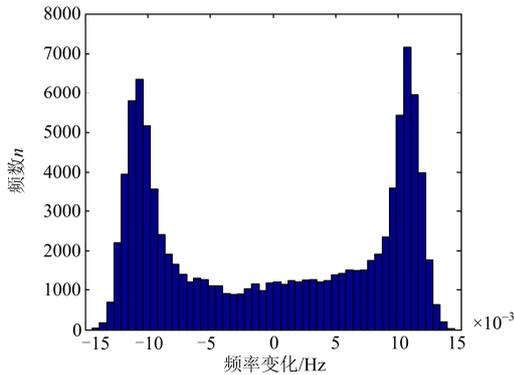


图 10 不考虑负荷波动带宽受限且 AGC 非线性控制时的电网频率概率分布

Fig. 10 Frequency probability distribution with considering the limited bandwidth and non-line AGC control strategy

2) 考虑负荷波动特性和 AGC 非线性

限制负荷波动带宽, 加入 AGC 非线性控制策略, 其他仿真参数相同, 得到电网频率统计分布如图 11 所示。

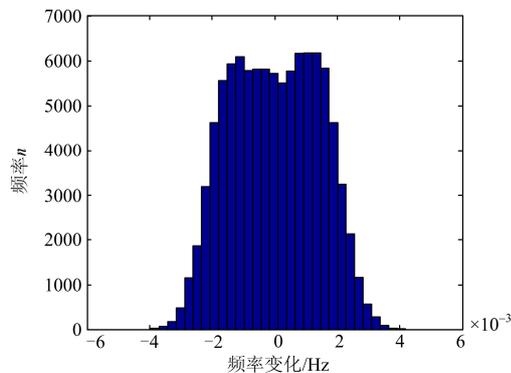


图 11 考虑负荷波动带宽受限且 AGC 非线性控制时的电网频率概率分布

Fig. 11 Frequency probability distribution with considering the limited bandwidth and non-line AGC control strategy

比较图 10 和图 11 可以看出, 当考虑负荷波动带宽受限和 AGC 非线性控制策略时, 电网频率分

布发生较大变化, 与文献[10]的结论有较大差异。文献[18]从联络线功率波动的角度研究了互联电网的频率偏差, 并给出了频率偏差的概率分布图形, 也与本文的仿真结果相符合。文献[10]已经对电网频率不对称分布的原因作了分析, 所以系统的不对称调频特性会使图 11 的左边高于右边, 本文不再赘述。

3 CPS 应用条件讨论

美国电力科学研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)在 1997 年发布了控制性能标准和互联操作规程 (Control Performance Standard and Procedures for Interconnected Operation)^[19]。其中, 控制性能标准 (Control Performance Standard, CPS) 包括 CPS1 和 CPS2, 该标准基于大量的实际测量数据提出了针对互联电网控制性能评价标准, 应用于 AGC 控制性能评价取得了良好的效果^[20]。在 CPS 标准中, CPS2 要求区域控制偏差 (Area Control Error, ACE) 的 10 min 滚动平均值 $AVG(ACE_{10})$ 必须在规定范围 L_{10} 内, 该值定义为

$$L_{10} = 1.65 \varepsilon_{10} \sqrt{(10B_i) \cdot (10B_s)} \quad (16)$$

式中: ε_{10} 为互联电网 1 年内的 10 min 频率平均偏差的均方根值; B_i 为控制区域 i 的频率偏差系数; B_s 为互联电力系统总频率偏差系数。式(16)中的系数 1.65 即假定 $AVG(ACE_{10})$ 服从正态分布, 则 $AVG(ACE_{10})$ 落在 $\pm L_{10}$ 范围的概率为 90%。因此, CPS2 是否适用取决于 $AVG(ACE_{10})$ 是否服从正态分布。正因为如此, 文献[10]得出结论: 由于频率分布非正态, CPS2 标准的适应性存在问题。

为了便于说明, 本文不考虑交换功率偏差考核, 则 CPS2 的考核内容实际上是电网频率偏差的滚动均值。根据中心极限定理, 当样本容量足够大, 抽样均值的分布将近似服从正态分布, 一般当样本容量 $n \geq 30$ 时为认为足够大^[21]。因此, 若上述数据是采取多次测量取平均值的方式获得, 则并不能反映电网频率的真实概率分布。例如, 对图 3 所对应的电网频率样本, 按照 10 min 求滚动平均的计算方法得到电网频率的概率分布如图 12 所示。

从图 12 可以看出, 非正态分布的电网频率按照 CPS2 规定的计算 10 min 滚动平均值, 得到了近似正态分布的统计分布。事实上, CPS2 并非基于电网频率为正态分布, 而是基于电网频率为随机变量^[22]。若计算区域控制偏差滚动平均值的时间窗口足够长, CPS2 考核对象基本满足正态分布, CPS2 仍然适用。因此, 文献[10]提出的 CPS2 标准在频率

非正态分布情况下不适用的结论是不恰当的。

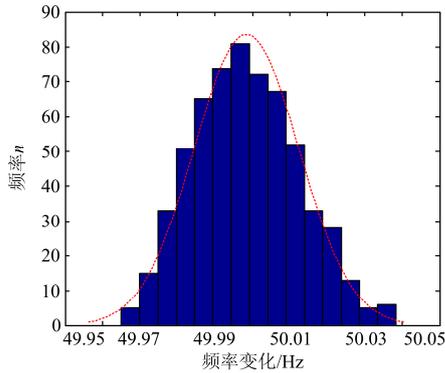


图 12 电网频率 10 min 滚动平均值概率分布
Fig. 12 Rolling-average value of power frequency probability distribution

4 结论

1) 由实测结果可以看出, 电网频率波动并非正态分布或者偏态分布, 而是呈现边缘陡峭、左边高于右边的带状分布。

2) 电网频率呈上述分布的主要原因有两点: 一是 AGC 控制策略的非线性; 二是负荷功率波动是带宽受限的, 并非存在于整个频谱。

3) 文献[10]认为 CPS2 标准在电网频率偏离正态分布时不再适用的结论是不恰当的, CPS2 标准的应用条件应该是电网频率为随机变量且计算区域控制偏差滚动平均值的时间窗口足够长。

4) 众所周知, 新能源接入后 CPS 考核指标会下降, 其根本原因是电网频率分布和系统调频特性发生了改变, 因此研究适应新变化的 CPS 标准, 应从新能源接入之后的电网频率分布特性入手。

参考文献

[1] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 43(2): 138-147.
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 43(2): 138-147.

[2] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5073-5079.
LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5073-5079.

[3] 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.

- [4] 刘萌, 褚晓东, 张文, 等. 计及网络约束的源-荷协同频率控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 195-205.
LIU Meng, CHU Xiaodong, ZHANG Wen, et al. Cooperative generation-load frequency control strategy accounting for power network constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 195-205.
- [5] 鲍谚, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.
BAO Yan, JIA Limin, JIANG Jiuchun, et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126.
- [6] 樊艳芳, 钟显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.
FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55-60.
- [7] 刘凯, 刘克天, 王晓茹, 等. 基于 FNET 实测数据分析川渝电网频率动态特性[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 134-140.
LIU Kai, LIU Ketian, WANG Xiaoru, et al. Frequency dynamics analysis of Sichuan-Chongqing Power Grid based on the FNET data[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 134-140.
- [8] 陶骞, 贺颖, 潘杨, 等. 电力系统频率分布特征及改进一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 133-138.
TAO Qian, HE Ying, PAN Yang, et al. Characteristics of power system frequency abnormal distribution and improved primary frequency modulation control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 133-138.
- [9] 熊卫斌, 李鹏, 张昆, 等. 南方电网频率演变机制与改善分钟级波动的探索[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 244-249.
XIONG Weibin, LI Peng, ZHANG Kun, et al. Mechanism of frequency evolution of china southern power grid and exploration on improving minute level fluctuation[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 244-249.
- [10] 郭钰锋, 于达仁, 赵婷. 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. Characteristics of

- power system frequency abnormal distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 26-31.
- [11] 唐跃中, 张王俊, 张健, 等. 基于 CPS 的 AGC 控制策略研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 75-79.
TANG Yuezhong, ZHANG Wangjun, ZHANG Jian, et al. Research on control performance standard based control strategy for AGC[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 75-79.
- [12] 唐贞鹏, 陈世和, 伍宇忠, 等. 压水堆核电机组一次调频动态仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3199-3201.
TANG Zhenpeng, CHEN Shihe, WU Yuzhong, et al. Dynamic simulations of primary frequency regulation for pressurized water reactor nuclear power generation units[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3199-3201.
- [13] 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.
- [14] 王葵, 孙莹. 电力系统自动化[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [15] 任广宇. CPS 标准下动态调整频率偏差系数的自动发电控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [16] 翁毅选, 邓长虹, 黄文涛, 等. 基于统计理论的含风电互联电网 CPS 研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 79-84.
WENG Yixuan, DENG Changhong, HUANG Wentao, et al. Research of CPS based on statistical theory for interconnected power grid with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 79-84.
- [17] TSUTOMU M, TAKAHO O. Construction of dynamic fluctuation load model and simulation with AFC-control of BTB interconnection[J]. The Transactions of the Institute of Electrical Engineering of Japan, 2001, 120(7): 957-961.
- [18] 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): 3137-3243.
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): 3137-3243.
- [19] Electric Power Research Institute. Control performance standard and procedures for interconnected operation[R]. Dublin: United State of America, 1997.
- [20] North American Electric Reliability Council. Reference Document Interconnected Operations Services[R]. Princeton: United State of America, 2002.
- [21] 贾俊平. 统计学基础[M]. 2 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.
- [22] NASSER J, LOUIS S V. NERC's new control performance standards[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 229-233.
-
- 收稿日期: 2016-06-17; 修回日期: 2016-09-13
- 作者简介:
- 程含渺(1988—), 男, 工学博士, 主要从事电力设备在线监测及状态评估、智能电网等方面的研究; E-mail: chenghanmiao@whu.edu.cn
- 李红斌(1967—), 女, 工学博士, 教授, 博士生导师, 从事智能电网、电子式互感器方面的研究工作; E-mail: lihongbin@hust.edu.cn
- 邵周策(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事新能源接入、电力系统仿真等方面的研究。E-mail: 542698046@qq.com
- (编辑 周金梅)