

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201654

考虑新能源渗透的电网频率概率分布研究

王中¹, 黎丽丽¹, 李振华^{1,2}, 程紫熠¹, 姚为方³, 刘瑞生⁴

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601; 4. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 随着我国能源绿色低碳转型的发展, 新能源在电力系统发电结构的比重逐年提升, 导致电网动态频率特性出现新的变化。为深入研究电网频率的总体演变规律及概率分布特性, 从理论上阐述了考虑新能源渗透的电网频率变化趋势, 给出计及新能源渗透率的电力系统调频简化模型及其稳定性分析。使用 Simulink 搭建电网频率仿真模型, 并通过实验室高精度 PCI-4474 采集卡及基于 LabVIEW 编写的人机交互界面采集电网频率, 得出的仿真和实测结果验证了理论分析所得出的结论。最后以应用的角度总结了电力系统频率概率图对智能电网安全稳定运行及电能计量装置在线评估的重要性。

关键词: 新能源; 电网频率; 演变规律; 稳态误差; 概率分布

The evolution characteristics of power grid frequency probability distribution

WANG Zhong¹, LI Lili¹, LI Zhenhua^{1,2}, CHENG Ziyi¹, YAO Weifang³, LIU Ruisheng⁴

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China; 4. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: With the development of China's green energy and low-carbon transformation, the proportion of new energy in the power system generation structure is increasing year by year, leading to changes in the dynamic frequency characteristics of the power grid. This paper researches on the grid frequency distribution characteristics of the general evolution law and, and sets out the thinking on the new energy power grid frequency variation trend of infiltration. It also looks at new energy and permeability of the simplified model of power system frequency modulation as well as stability analysis. It uses Simulink to build a power grid frequency simulation model. Through a laboratory high precision acquisition card PCI - 4474 and man-machine interactive interface based on the LabVIEW write collection power grid frequency, it concludes that the simulation and experimental results validate the theoretical analysis. Finally, the importance of a power system frequency probability graph to smart grid safe and stable operation and power metering device on-line evaluation is summarized.

This work is supported by the Key Project of Hubei Provincial Department of Education (No. D20201203), the Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University (No. 2021SSPY071), and the Technical Innovation Special Key Project of Hubei Science and Technology Program (No. 2016AAA040).

Key words: new energy; power grid frequency; evolution law; steady state error; probability distribution

0 引言

近年来, 为促进电力绿色发展水平, 我国新能

源消纳水平不断创新高, 新能源发电量及其占比持续“双升”。其中, 光伏、风电装机容量已跃居世界第一^[1-5]。随着我国能源绿色低碳转型的发展, 我国新能源装机容量将成为第一大电源^[6]。高渗透型新能源并网规模逐年攀升, 大幅降低电网的系统惯量水平, 加重了常规发电机组的调频负担, 致使电网频率稳定性日益突出, 给电力系统的安全带来重大

基金项目: 湖北省教育厅重点项目资助(D20201203); 三峡大学学位论文培优基金项目资助(2021SSPY071); 湖北省科技计划项目技术创新专项重大项目资助(2016AAA040)

影响^[7-8]。例如,大量接入新能源及电力电子装备,导致英国电网抗干扰及调频能力不足,频率大幅降低而引发的英国“8.9”大停电事故^[9]。澳大利亚南部地区电网的新能源发电占比达48.36%,而燃煤燃气机组又在减少,导致南澳电网系统惯量处于历史最低,系统受扰后电网频率的调节能力低于系统总功率缺额,从而引发澳大利亚“9.28”大停电事故^[10]。为保证新能源渗透率逐年增加的电力系统频率稳定,提高电力系统的抗干扰能力,对电网频率及其分布特性进行监测与统计研究显得尤为重要。

目前对高可再生新能源发电水平的电力系统研究主要侧重于新能源发电的频率控制技术,但对其频率概率分布特性的研究很少^[11-13]。而研究电力系统的频率分布特性对电网调频策略具有重要指导意义^[14]。文献[15]通过研究川渝电网频率质量及分布特性,对川渝电网的调频性能进行了评价。文献[16]构建考虑动态频率约束的SCUC优化模型来提高大规模风电渗透的电力系统频率稳定性,并达到预期效果。文献[17]通过研究电网分布特征,以此改进了系统一次调频的控制策略。文献[18]在研究南方电网频率曲线的演变趋势及频率波动特性基础上,制定调频策略使频率分钟级频繁波动明显改善。文献[19]运用随机信号分析方法,且考虑诸多非线性因素的影响,从理论分析和仿真结果得到不同情况下的频率分布,具有很高的指导意义。但随着电网中新能源渗透率越来越大,致使其对应的惯性时间常数越小,频率偏差值越大,频率恢复的速度越慢,实际电网频率的分布特性必将出现新的发展趋势^[20-21]。

随着我国能源绿色低碳转型的发展,新能源装机容量在电力系统发电结构的比重逐年提升,导致电网频率特性出现新的变化。为深入研究电网频率特性的总体变化规律及概率分布特性,本文从理论上研究了考虑新能源渗透的电网频率变化趋势,并给出计及新能源渗透率的电力系统频率简化模型及相关传递函数,从频域对系统频率的稳态误差进行分析,并以仿真和实验的方式验证理论分析所得出的结论。最后以应用的角度分析了电力系统频率概率图对智能电网安全稳定运行及电能计量装置在线评估的重要性,为改善电网环境提供科学依据。

1 电网频率概率分布的演变趋势

1.1 电网频率分布的新趋势

电网频率是一个重要的电能质量评价指标,也是电力系统安全稳定运行的重要因素之一。电网频率的概率分布特性蕴含大量信息,在评估智能电网调频能力、监视电能计量装置性能等方面有相当大

的应用空间。当实际负荷波动,且常规的调频措施无法使电网频率完全保持稳定时,就会使得电网频率偏离系统额定频率,并形成具有某种分布规律的概率分布。随着我国能源向绿色低碳的转型,新能源装机容量在电力系统发电结构的比重逐年提升,特别是光伏、风力发电量的随机性及负荷波动的不确定性,增加了对电网动态行为的干扰,因此实际电网频率分布也会出现新的且具有某种特定规律的概率分布^[22-23]。

1.2 电网频率分布的总体演变过程

通常情况下,研究随机变量即考察其概率分布,根据中心极限定理,电网频率被近似认为是正态分布的。但随机信号通过非线性系统输出后,其概率分布是与系统参数及特性相关联的,所以随着系统结构的变化也有可能不是正态分布的。已有不少研究指出,实际的电网频率不是正态分布的,而是呈现出偏态分布。这种不对称的偏态分布结果是系统不对称的调频能力导致的,而不对称的调频能力主要是光伏、风电等新能源装机容量不断扩大,且参与调频控制及调频策略较少导致的^[24-25]。而文献[19]用理论和仿真论证了电网频率随着电力系统结构的变化将出现边缘陡峭的带状分布及明显的双峰分布,例如调频死区的大小、负荷的波动及加减机组出力速率等,这些非线性因素都是影响电网频率偏离正态分布形成偏态及双峰分布的主要原因^[26]。因此,实际电网频率分布正在形成一个新的概率分布。

2 考虑新能源的电网频率简化模型

电力系统在接近其稳定极限的情况下波动较为频繁,加上不可预测的可再生能源及随机负荷的波动,造成系统发用电功率不平衡,从而使电网频率发生波动。本文的研究内容是电力系统的总体频率分布特性,因此忽略具体的非线性环节和功角稳定性问题等。

2.1 传统电力系统频率简化模型

参考电力系统研究领域的相关经典文献,电力系统频率模型主要包括原动机及其调速器、发电机和负荷,不管原动机是水轮机或燃气轮机等,都可以将电力系统调频仿真模型简化为如图1所示的闭环频率模型^[27-28]。

(1) 调速器模型

调速器是电力系统有功功率和频率调节系统的基本组成部分,主要功能就是实现电力系统机组的一次调频。调速器的构成形式各种各样,但是其主要部件的方程式型式是相同的。调速器的输出 ΔP_T

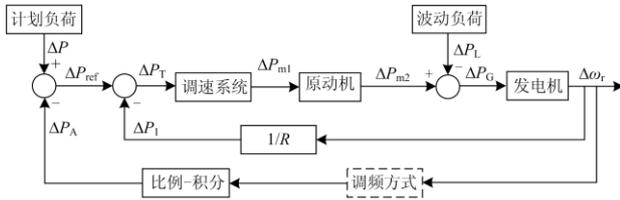


图1 传统电力系统频率简化模型

Fig. 1 Simplified model of traditional power system frequency
与调速器设定功率变化 ΔP_{ref} 、系统频率变化 $\Delta\omega_r$ 之间的关系为

$$\Delta P_T = \Delta P_{\text{ref}} - \frac{\Delta\omega_r}{R} \quad (1)$$

其拉氏变换为

$$\Delta P_T(s) = \Delta P_{\text{ref}}(s) - \frac{\Delta\omega_r(s)}{R} \quad (2)$$

式中, R 为调速器的调差系数。调速器的执行环节即根据液压放大原理来控制导水叶或者气门的开度, 假设机组调速系统的时间常数为 τ_G , 联合式(2)可得到发电机组调速系统的传递函数:

$$\Delta P_{m1}(s) = \frac{1}{1 + \tau_G s} \left[\Delta P_{\text{ref}}(s) - \frac{\Delta\omega_r(s)}{R} \right] \quad (3)$$

(2) 原动机模型

原动机是机组的重要驱动部分, 为发电机提供机械功率及各种损耗等。原动机“经典”传递函数的输入和输出均取变化量, 如式(4)。

$$T(s) = \frac{\Delta P_{m2}(s)}{\Delta P_{m1}(s)} = \frac{1 + b\tau_T s}{1 + a\tau_T s} \quad (4)$$

式中: ΔP_{m1} 为控制输入阀门开度的变化量; ΔP_{m2} 为输出机械功率的变化量; a 、 b 为常数; τ_T 为时间常数。

(3) 发电机模型

考虑负荷频率特性和发电机的阻尼系数后, 等值发电机的传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{\Delta W_r(s)}{\Delta P_G(s)} = \frac{1}{T_J s + D_n} \quad (5)$$

式中: D_n 为负荷-频率调节系数和发电机阻尼系数之和; T_J 为发电机的惯性时间常数。

(4) 调频模型

各机组调节系统参与的一次调频为有差调节, 需利用AGC系统进行无差调节的二次调频。AGC系统运算主要分为两步: 首先是区域控制偏差(ACE)的计算; 然后再对ACE进行比例-积分(PI)运算, 从而通过运算结果改变发电机组出力达到调频要求。AGC计算模块的具体传递函数为

$$H_{\text{ACE}}(s) = \frac{K_i}{s} + K_b \quad (6)$$

式中, K_i 、 K_b 分别为积分增益和比例系数。微分控制对于孤立运行的系统有较高的响应速度, 考虑电网与发电机组的联系性很强, 容易引起过度的振荡, 所以本文将微分增益设置为零。

(5) 波动负荷模型

文献[29]在Matlab中通过静态和动态计算建立了动态波动负荷模型, 并得到广泛认可。故本文也采用文献[29]的负荷波动模型, 动态负荷计算模型如图2所示。

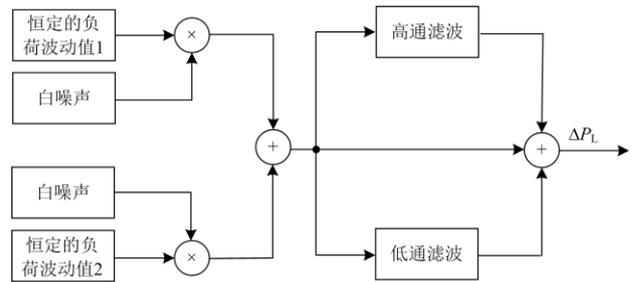


图2 动态负荷计算模型图

Fig. 2 Dynamic load calculation model diagram

2.2 考虑新能源的电网频率波动模型

新能源并网是通过变流器和主网连接的, 由于变流器控制方式的影响, 新能源与电网频率几乎完全解耦, 基本无法响应系统频率的变化。以光伏、风力发电系统为例, 光伏发电系统的光伏逆变器自身没有任何的旋转电机部件, 即有效转动惯量为零; 风机的典型代表: 永磁直驱风机和双馈异步风机, 其转子都有转动惯量, 故风机存在机械转动惯量, 但风机与电网被换流器部分或全部隔离, 且这两类变速风机的运行控制模式为最大风能捕获, 即转子的“变速”随着风速变化, 而非随着电网频率变化。因此, 从新能源并网之后的系统角度上来看, 新能源并网后的系统有效转动惯量基本为零, 难以响应电力系统的频率扰动。

为了简化系统分析, 假设新能源发电量及其占比“双升”引起调频能力的下降是通过减少常规水、火等发电机组容量实现的。因此, 本文在传统电力系统频率简化模型的基础上增加了表征新能源并网渗透率的变量 $N(0 < N < 1)$, N 表示常规水、火等发电机组的发电系数:

$$N = \frac{\text{常规水、火等发电机组(MW)}}{\text{系统的负荷功率(MW)}} \quad (7)$$

因此, 当新能源装机容量在电力系统发电结构的比重不断提高时, 常规水、火等发电机组系数 N

将不断减小。图3所示即为本文给出的考虑新能源渗透及波动负荷的电网频率简化模型。

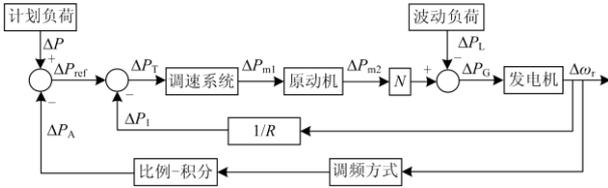


图3 计及新能源的电力系统频率简化模型

Fig. 3 Simplified model of power system frequency considering new energy

由式(7)可知,给出的计及新能源渗透的波动负荷电网频率简化模型是以系统的负荷功率作为基准值的,而图1所示的传统电力系统频率简化模型是以发电机的容量为基准进行运算的,因此发电机组的发电容量及惯性时间常数应乘以系数 N ,所以计及新能源渗透的波动负荷电网频率简化模型的发电机传递函数为

$$G'(s) = \frac{\Delta W_r(s)}{\Delta P_G(s)} = \frac{1}{NT_j s + D_n} \quad (8)$$

随着光伏、风电等新能源装机容量不断扩大(即常规水、火等发电机组发电系数减小),电网的整体稳定性及频率分布特性必然会受到影响并随之变化。本文根据图3给出的计及新能源渗透的波动负荷电网频率简化模型来分析系统的闭环稳定性及闭环特征方程系数应该满足的条件。系统的开环传递函数为

$$H(s) = \frac{b}{aRT_j} \frac{s + \frac{1}{b\tau_T}}{s^2 + \left(\frac{1}{a\tau_T} + \frac{D_n}{NT_j}\right)s + \frac{D_n}{aNT_j\tau_T}} \quad (9)$$

因此,对应的闭环特征方程为

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (10)$$

式中:

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{D_n}{aNT_j\tau_T} + \frac{1}{aRT_j\tau_T} \\ \xi = \frac{1}{2\omega_n} \left(\frac{1}{a\tau_T} + \frac{D_n}{NT_j} + \frac{b}{aRT_j} \right) \end{cases} \quad (11)$$

为判断系统的稳定性,本文根据劳斯稳定判据得出闭环特征方程的系数应该满足的条件为

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{D_n}{aNT_j\tau_T} + \frac{1}{aRT_j\tau_T} > 0 \\ 2\xi\omega_n = \frac{1}{a\tau_T} + \frac{D_n}{NT_j} + \frac{b}{aRT_j} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

2.3 频率简化模型的稳定性分析

为了得到新能源加入电力系统对电网频率特性的具体影响,本文从频域对系统频率的稳态误差进行理论分析。根据文献[14]给出的闭环控制系统误差传递函数,可以相应地推导出参考给定计划负荷及波动负荷扰动下的误差传递函数,然后运用终值定理求得考虑新能源的频率简化模型的稳态误差和扰动稳态误差。

1) 参考给定计划负荷的误差传递函数:

$$E_1(s) = \frac{1}{1+H(s)} = \frac{1}{aN\tau_T} \frac{(NT_j s + D_n)(a\tau_T s + 1)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (13)$$

由拉氏变换的终值定理可得,计划负荷阶跃响应的稳态误差为

$$e_{ss1} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E_1(s) \cdot X(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{aN\tau_T} \frac{(NT_j s + D_n)(a\tau_T s + 1)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{s} = \frac{RD_n}{RD_n + N} \quad (14)$$

2) 波动负荷扰动下的误差传递函数为

$$E_2(s) = -\frac{G'(s)}{1+H(s)} = \frac{-1}{aN\tau_T} \frac{a\tau_T s + 1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (15)$$

同理可知,波动负荷扰动下阶跃响应的稳态误差为

$$e_{ss2} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E_2(s) \cdot X(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{-1}{aN\tau_T} \frac{a\tau_T s + 1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{s} = -\frac{R}{RD_n + N} \quad (16)$$

由式(15)、式(16)可知,常规水、火等发电机组的发电系数(即表征新能源渗透率的变量 N)越小系统的稳态误差越大,即系统频率的稳定性越差、抗干扰能力越弱,系统的频率响应能力也就越低。同时,电网频率的概率分布特性也会出现改变,实际电网频率分布将出现新的发展趋势。如果并入电网的新能源没有提供足够的调频能力,那么系统频率的抗扰动能力与动态特性都会随着新能源的渗透率增加而下降。

3 仿真

本节使用Simulink对电力系统频率简化模型进行仿真分析,验证电网频率概率分布的演变趋势。考虑计及新能源的多机组电力系统频率仿真模型非常复杂且参数较多,所以本文根据图3搭建单机组及

考虑可再生新能源的系统频率模型以简化仿真。

系统频率仿真模型的固定参数部分,如调速器、原动机、发电机等的参数选取均与系统频率的分布特性密切相关,因此本文依照经典文献[13-15]进行系统固有参数的选取:调速系统的时间常数 $\tau_s = 0.34\text{ s}$,调差系数 $R = 30$,原动机的时间常数 $\tau_T = 0.62\text{ s}$,调频死区 $d = 2.5 \times 10^{-5}\text{ Hz}$,发电机的惯性时间常数 $T_j = 9\text{ s}$,积分增益 $K_i = 1$,比例系数 $K_p = 10$ 。动态负荷波动模型分为振幅较大的慢基分量和振幅较小的快条纹分量,具体仿真参数如表1所示。

表 1 动态负荷模型的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of dynamic load model

负载波动分量	负荷波动	白噪声参数设置	
		噪声功率	采样数
基分量	110	168	30 000
条纹分量	5	168	20 000
滤波器截止频率		LPF 0.002 47 rad/s	
		HPF 0.021 rad/s	

1) 考虑系统非线性及负荷波动特性

按照文献[15]的仿真环境,考虑系统内机组的惯性时间常数、调差系数、调频死区等的影响,得到电网频率的概率分布如图4所示。

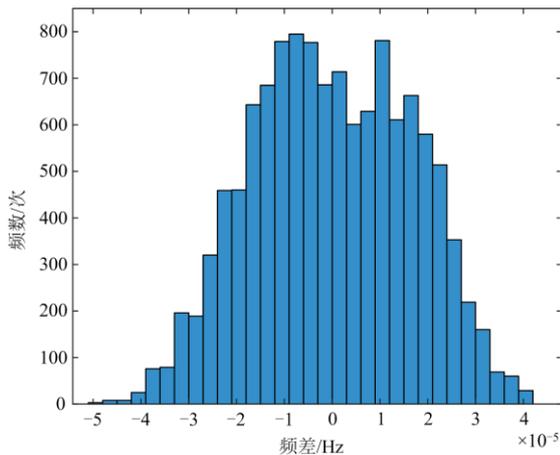


图 4 考虑系统非线性及负荷波动特性的电网频率概率分布图

Fig. 4 Probability distribution diagram of grid frequency considering system nonlinearity and load fluctuation characteristics

由图4可知,考虑系统非线性及负荷波动特性的电网频率分布并不是从直觉出发认为的正态分布,而且呈现偏态分布且有轻微左高右低的双峰分布。

2) 新能源并网对系统频率的影响

以风力(永磁直驱风机)、光伏发电系统与220V电力系统并网为例,仿真新能源对系统转动惯量的影响。220V有限大容量微电网参数的选取:有限大电网容量为6kW,系统频率为50Hz,内阻为 $10^{-6}\Omega$,电抗为 10^{-6} H 。分三种情况进行仿真:1)仅容量为6kW的风力发电系统与系统并网;2)仅容量为6kW的光伏发电系统与系统并网;3)容量各自为3kW的光伏、风力发电系统同时与系统并网。调节控制参数最优化,得到的仿真结果如图5所示。

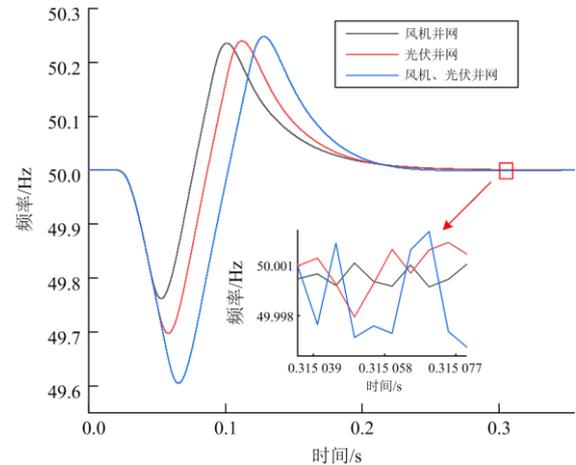


图 5 新能源并网的频率仿真图

Fig. 5 Frequency simulation diagram of new energy grid connection

由图5可知,不同新能源并网对电网频率的动态特性及稳态性能均有不同程度的影响,且光伏发电系统并网下频率波动的范围相比风机并网更大,恢复速度更慢,新的稳态频率波动更大,即光伏系统并网后的系统惯量会更低。当光伏、风力发电系统同时并网后,电力系统的惯量效应会变得更弱,严重时会引起系统中的调速系统频繁动作或系统频率失稳,给电网频率稳定性控制带来新的挑战。

3) 考虑新能源渗透的频率概率分布

本文通过引入表征新能源渗透率的变量 N 来仿真可再生能源发电的渗透水平,并将与之相关联的发电机组的发电容量及惯性时间常数乘以系数 N ,其余仿真参数保持不变。当 $N = 0.8$ 、 $N = 0.6$ 、 $N = 0.4$ 时的电网概率分布图分别如图6—图8所示。

由图6—图8可知,新能源接入电网的比例逐渐攀升时,系统频率概率分布呈现左高右低的双峰分布的趋势愈加明显。如表2所示,为进一步量化分析不同新能源渗透量对系统频率分布造成的影响,对 $N = 0.8$ 、 $N = 0.6$ 、 $N = 0.4$ 时的电网频差进行了统计分析。

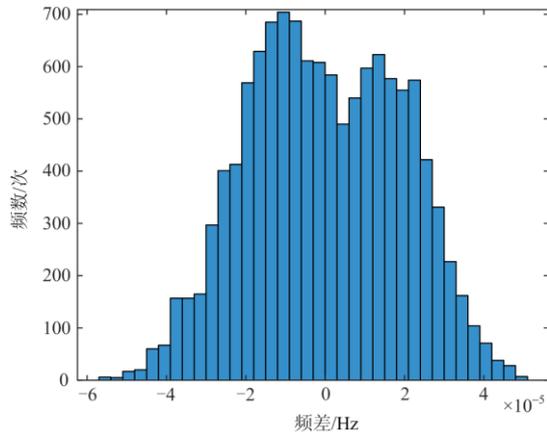


图 6 当 $N = 0.8$ 时的电网频率概率分布图
Fig. 6 Probability distribution diagram of grid frequency when $N = 0.8$

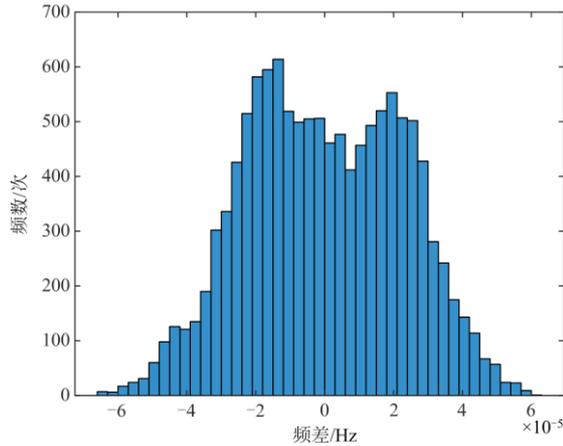


图 7 当 $N = 0.6$ 时的电网频率概率分布图
Fig. 7 Probability distribution diagram of grid frequency when $N = 0.6$

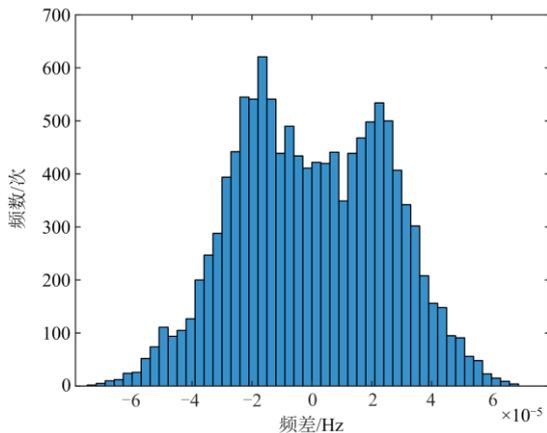


图 8 当 $N = 0.4$ 时的电网频率概率分布图
Fig. 8 Probability distribution diagram of grid frequency when $N = 0.4$

表 2 不同新能源渗透量下的频差统计分析

Table 2 Statistical analysis of frequency difference under different new energy penetration

渗透系数 N	最小值/Hz	中值/Hz	最大值/Hz	方差/(Hz ²)
0.8	-5.60×10^{-5}	-6.88×10^{-7}	4.99×10^{-5}	3.76×10^{-10}
0.6	-6.30×10^{-5}	-8.49×10^{-7}	6.16×10^{-5}	4.46×10^{-10}
0.4	-7.13×10^{-5}	-9.96×10^{-7}	6.96×10^{-5}	5.28×10^{-10}

从表 2 中可以看出, 当表征新能源并网渗透率的变量 N 发生变化时, 电网的频率分布特性会受到其影响。通过比较表 2 中的最值、中值及方差可以发现, 随着可再生新能源渗透量的增加, 频率频数分布逐步向左移动, 频率波动范围也越大, 即系统频率概率分布呈现左高右低的双峰分布趋势愈加明显, 且愈发向死区边缘附近集中, 导致系统一次调频动作愈发频繁, 对系统稳定性造成不可预测的影响。

4 实验

为进一步验证新能源并网对电力系统频率分布的影响, 将由隔离变压器、PCI-4474 采集卡和基于 Labview 编写的人机交互界面搭建的频率测量系统置于湖北的实验室, 如图 9 所示。设置的采样间隔为 4 s, 每天随机选取三个不同时间段进行测量, 每次采集一个小时。实验共计采集频率样本 142 411 个, 实测频率动态图如图 10 所示。

由图 10 的数据可得出频率均值为 49.997 7 Hz, 频率分布指标为 ± 0.03 Hz 的合格率达到 99.896 1%。由此可见, 频率在分布指标合格率和均值指标上都较为良好。为进一步分析频率的分布统计指标, 绘制了如图 11 所示的频率概率分布图。

基于实验室大量的实测频率概率分布结果表明, 大量频率堆积到频差为 ± 0.025 的附近, 且频差超过 ± 0.02 的比例达 41.086 7%, 逐渐发展成较为明显的双峰分布, 验证了可再生新能源渗透的电网频



图 9 频率测量系统图

Fig. 9 Frequency measurement system diagram

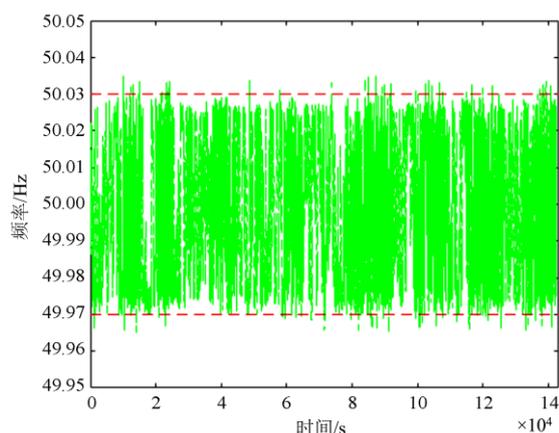


图 10 实测频率动态图

Fig. 10 Dynamic diagram of measured frequency

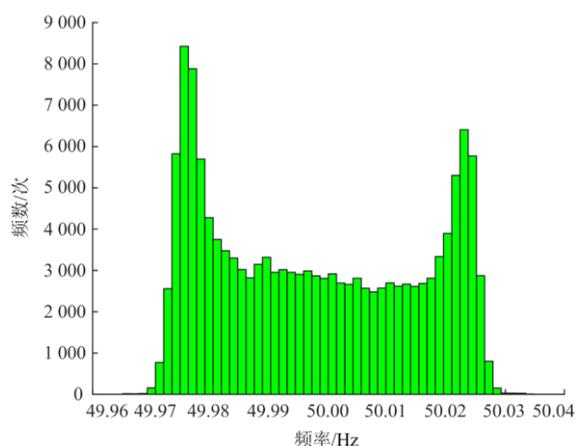


图 11 实测频率的概率分布图

Fig. 11 Probability distribution diagram of measured frequency

率分布特征的总体演变趋势。同时,实际测量的频率概率分布也将为未来改善电网频率控制策略及频率分布统计指标提供参考。

5 结论

本文基于仿真结果及实验平台的实测数据,对电网频率概率分布及其分布特征进行了分析,主要结论如下:

1) 普遍认为,电网频率分布呈现正态分布或偏态分布,但随着电力系统联网结构不断多元化及频率控制策略的非线性,电网频率分布已出现新的发展趋势:边缘陡峭的带状分布或不均衡的双峰分布。

2) 为了保证供电需求与发电平衡,就必须对频率进行控制,若仅依靠传统频率控制系统进行调频,可能无法抑制电力系统频率分布特性向新的分布趋势发展。所以开发新能源发电的调频控制技术及其储能能力就显得尤为重要^[30]。

综上,实际电网频率分布已经演变成边缘带状的概率分布,且电力系统频率的概率分布图可以当作一种监控电网的有力手段来衡量整个电网的调频能力。若以应用的角度进一步研究,电网频率的概率分布特性可对电力测量设备实现高精度的在线评估及智能电网安全稳定的运行提供科学依据。

参考文献

- [1] 吴明,莫晓丹,陈昌伟. 发展清洁能源促进低碳经济的途径探讨[J]. 陕西电力, 2010, 38(4): 78-81.
WU Ming, MO Xiaodan, CHEN Changwei. Discussion on the way to develop clean energy and promote low carbon economy[J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(4): 78-81.
- [2] 孙华东,王宝财,李文锋,等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response of high-proportion power electronic power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [3] 潘旭东,黄豫,唐金锐,等. 新能源发电发展的影响因素分析及前景展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 41-47.
PAN Xudong, HUANG Yu, TANG Jinrui, et al. Factors and prospects for development of renewable energy power generation[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 41-47.
- [4] 钱振宇,王泉,魏建民,等. 考虑削减方法和最大化接纳能力的新能源准入容量柔性优化模型[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 35-39, 60.
QIAN Zhenyu, WANG Quan, WEI Jianmin, et al. Flexible optimization model for new energy access capacity considering the method of electricity reduction and maximum acceptance[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 35-39, 60.
- [5] HUANG Q. Insights for global energy interconnection from China renewable energy development[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 2-12.
- [6] 牡丹. 新能源发电与电网协调发展综合评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
DU Dan. Comprehensive evaluation research on coordinated development of new energy power generation and power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [7] SAM D, NWANKPA C, NIEBUR D. Decision fusion of voltage stability indicators for small sized power systems[C] // IEEE Power Engineering Society Summer

- Meeting, July 15-19, 2001, Vancouver, Canada: 1658-1663.
- [8] 陈晓彬, 孙玉彤, 谢惠藩, 等. 一起新能源接入条件下线路保护与备自投装置误动的原因分析与改进措施[J]. 广东电力, 2015, 28(12): 80-84, 93.
CHEN Xiaobin, SUN Yutong, XIE Huifan, et al. Cause analysis and improvement measures for misoperation of line protection and standby automatic switching device under the condition of new energy connection[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(12): 80 -84, 93.
- [9] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis of the "August 9" blackout in the UK and its enlightenment to China's power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.
- [10] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of Australia's "September 28" blackout and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [11] DU Ming, NIU Yuguang, HU Bo, et al. Frequency regulation analysis of modern power systems using start-stop peak shaving and deep peak shaving under different wind power penetrations[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 125.
- [12] 陈德海, 朱正坤, 王超. 基于模糊神经网络PID的水轮机频率控制[J]. 现代电子技术, 2020, 43(23): 99-102.
CHEN Dehai, ZHU Zhengkun, WANG Chao. Frequency control of hydraulic turbine unit based on fuzzy neural network PID[J]. Modern Electronic Technology, 2020, 43(23): 99-102.
- [13] HU Zhengyang, GAO Bingtuan, CHEN Ning, et al. Modified virtual synchronous generator based-primary frequency regulation for renewable generation integrated into power system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(20).
- [14] 徐正清, 王春明, 郑焕坤, 等. 考虑频率约束的含储能低惯量电网机组组合和经济调度[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(11): 25-32.
XU Zhengqing, WANG Chunming, ZHENG Huankun, et al. Unit combination and economic dispatch of low inertia power grid with energy storage considering frequency constraints[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(11): 25-32.
- [15] 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 Keyian, WANG Xiaoru, et al. Analysis of frequency dynamic characteristics of Sichuan-Chongqing power grid based on FNET measured data[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 134-140.
- [16] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 大规模风电并网条件下考虑动态频率约束的机组组合[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2513-2519.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Unit commitment considering dynamic frequency constraints under large-scale wind power grid connection[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2513-2519.
- [17] 贾天下, 陈磊, 闵勇, 等. 快速响应储能参与一次调频的控制策略[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2021, 61(5): 429-436.
JIA Tianxia, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Control strategy of fast response energy storage participating in primary frequency modulation[J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2021, 61(5): 429-436.
- [18] 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. The frequency evolution mechanism of China Southern Power Grid and the exploration of improving minute-level fluctuations[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 244-249.
- [19] 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. Non-normal probability distribution characteristics of power grid frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 26-31.
- [20] 马喜平, 沈渭程, 杨臣, 等. 高比例新能源微电网参与电网调峰能力评估[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(8): 62-68, 75.
MA Xiping, SHEN Weicheng, YANG Chen, et al. High proportion new energy microgrid participates in grid peak shaving capacity evaluation[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(8): 62-68, 75.
- [21] 谢光旭. 基于数据挖掘技术的广域电网频率分布特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
XIE Guangxu. Research on frequency distribution characteristics of wide area power grid based on data

- mining technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [22] 邵泰衡, 麻常辉, 马欢, 等. 基于改进飞蛾优化算法的水火互联电网负荷频率控制[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 197-201.
SHAO Taiheng, MA Changhui, MA Huan, et al. Load frequency control of water-heat interconnected power grid based on improved moth optimization algorithm[J]. Hydropower Energy Science, 2020, 38(8): 197-201.
- [23] 李振华, 胡廷和, 杜亚伟, 等. 基于窗函数和谱线插值理论的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 78-88.
LI Zhenhua, HU Tinghe, DU Yawei, et al. Harmonic detection method based on window function and spectral line interpolation theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 78-88.
- [24] 杨蕾, 李胜男, 黄伟, 等. 考虑风光新能源参与二次调频的多源最优协同控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 43-49.
YANG Lei, LI Shengnan, HUANG Wei, et al. Multi-source optimal coordinated control considering the participation of wind and new energy in secondary frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 43-49.
- [25] ANIL A M, SRIKANTH N D. Robust frequency control in a renewable penetrated power system: an adaptive fractional order-fuzzy approach[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 181-195. DOI: 10.1186/s41601-019-0130-8.
- [26] 王凡, 李海峰, 胥国毅, 等. 调频关键参数对电网频率特性的影响及其灵敏度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 1-8.
WANG Fan, LI Haifeng, XU Guoyi, et al. The influence of key frequency modulation parameters on power grid frequency characteristics and sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 1-8.
- [27] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [28] 王葵, 孙莹. 电力系统自动化[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [29] MICHIGAMI T, OISHI T. 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.
- [30] 陈罗. 含规模化新能源的区域网频率稳定性分析及控制优化策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
CHEN Luo. Frequency stability analysis and control optimization strategy research of regional network with large-scale new energy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-06-07

作者简介:

王中(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能计量装置在线监测及状态评估; E-mail: 1172657190@qq.com

黎丽丽(1987—), 女, 通信作者, 硕士, 助教, 研究方向为电力设备状态监测、新能源电力系统; E-mail: lily87714@foxmail.com

李振华(1986—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电子式互感器及其状态监测、电磁兼容。E-mail: lizhenhua1993@163.com

(编辑 魏小丽)