

基于多源数据的电网一次调频能力平行计算研究

张江丰^{1,2} 王飞跃^{2,3} 苏焯^{1,2} 陈波^{2,4} 汪自翔^{1,2}
孙坚栋^{2,4} 尹峰^{1,2}

摘要 为解决电网一次调频性能难以估计的问题, 本文提出了基于多源数据的电网一次调频性能平行计算平台. 通过采集整合 OMS (Operations management system)、WAMS (Wide area measurement system)、SCADA (Supervisory control and data acquisition) 等系统的各类型一次调频数据, 以极大似然估计、数值拟合等方法构建机组一次调频性能功频图谱. 采用均方差分析建立电网一次调频性能数学模型, 基于并网运行机组的一次调频性能功频图谱, 估算出当前电网的实际一次调频性能. 算例计算表明, 本文所提出的计算方法能够有效兼顾机组类型的静态特性和运行工况的动态特性, 并以平行执行方式完成人工估算系统与实际电力系统的滚动优化, 实现了电网一次调频性能的在线全面估计, 为电网频率管理与控制提供数据决策支持.

关键词 多源数据, 平行系统, 电网调频能力, 一次调频, 在线估计

引用格式 张江丰, 王飞跃, 苏焯, 陈波, 汪自翔, 孙坚栋, 尹峰. 基于多源数据的电网一次调频能力平行计算研究. 自动化学报, 2022, 48(6): 1493–1503

DOI 10.16383/j.aas.c190512

Research on Power Grid Primary Frequency Control Ability Parallel Computing Based on Multi-source Data

ZHANG Jiang-Feng^{1,2} WANG Fei-Yue^{2,3} SU Ye^{1,2} CHEN Bo^{2,4} WANG Zi-Xiang^{1,2}
SUN Jian-Dong^{2,4} YIN Feng^{1,2}

Abstract In order to solve the problem that the primary frequency control performance of the power grid is difficult to estimate, this paper proposes a parallel computing platform for primary frequency control performance of power grid based on multi-source data. By collecting and integrating the primary frequency data of various systems such as OMS (operations management system), WAMS (wide area measurement system), and SCADA (supervisory control and data acquisition), the power frequency spectrum of the primary frequency control performance of the unit is constructed by means of maximum likelihood estimation and numerical fitting. The mean square error analysis is used to establish the mathematical model of the primary frequency control performance of the grid. Based on the primary frequency performance spectrum of the grid-connected operation unit, the actual primary frequency performance of the current grid is estimated. The example calculation shows that the calculation method proposed in this paper can effectively consider the static characteristics of the unit type and the dynamic characteristics of the operating conditions, complete the rolling optimization of the manual estimation system and the actual power system in parallel execution mode, and realize the on-line comprehensive estimation of the primary frequency control performance of the power grid, which provides data decision support for grid frequency management and control.

Key words Multi-source data, parallel system, power grid frequency adjustment, primary frequency control, online estimation

Citation Zhang Jiang-Feng, Wang Fei-Yue, Su Ye, Chen Bo, Wang Zi-Xiang, Sun Jian-Dong, Yin Feng. Research on power grid primary frequency control ability parallel computing based on multi-source data. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(6): 1493–1503

收稿日期 2019-07-03 录用日期 2019-09-02
Manuscript received July 3, 2019; accepted September 2, 2019
本文责任编辑 魏庆来

Recommended by Associate Editor WEI Qing-Lai

1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院 杭州 310014 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院智慧能源控制研究室 杭州 310051 3. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190 4. 杭州意能电力技术有限公司 杭州 310014

1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014 2. Smart Energy Control Research Laboratory,

电网频率是电力系统运行中最重要的关键参数之一, 系统频率的异常波动不仅影响电网的电能质量, 制约电力设备的正常使用, 严重的频率失衡甚

State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310051 3. State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 4. Hanzhou E. Energy Electric Power Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014

至将导致并网设备脱网及系统崩溃,对电力系统的稳定运行带来严重危害^[1-2].因此,系统频率的稳定控制是电力系统稳定不可或缺的重要组成.电力系统频率的异常波动是由并网机组发电功率和用电负荷功率不平衡引起的,因而,电力系统能够根据系统频率的变化主动快速进行发用电控制以维持频率稳定就显得尤为重要^[3].电力系统的一次调频就是当系统频率发生异常波动时,自动迅速地作出响应,改变并网机组的实时出力,将系统频率稳定在一个合理安全的水平线上.这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^[4-5].

电力系统是一个非线性时变强耦合的复杂系统,其一次调频特性与每台并网运行的发电机调速器特性息息相关,是每台并网运行机组调速器特性在当前电网工况下的综合特性^[6].对于单台发电机组而言,其一次调频特性与调速器自身的特性显著相关^[7].而当机组并入电力系统时,电力系统的一次调频特性不仅与机组自身的调速器特性有关,也和所有并列运行的其他发电机组特性相关,甚至还与机组所处的实时工况和机组间的相互作用有关^[8].另一方面,电网中各机组的发电类型、容量、设备结构(例如,凝汽式机组的负荷响应速度明显高于背压式机组),以及机组运行工况(例如,滑压或定压、不同季节乃至一天内不同时间段的负荷率高低)等各类因素共同作用影响着电网的一次调频性能^[9].所以,在不同的电网运行工况下,非常有必要对电网的一次调频性能进行在线估计,使电网面对不断变化的负荷调节需求均能够具备足够的一次调频性能.

目前,国内外对一次调频能力的研究偏向单台机组侧较多,对电网一次调频性能的研究和计算比较分散,整体性考虑电网一次调性能各个因素的综合性研究较少,也未见实际的工程化应用.此外,由于很难、甚至无法对电网一次调频特性进行精确建模,以至于无法有效估计电网真实的一次调频性能.

本文基于平行控制理论框架下由人工社会(Artificial societies, A)、计算实验(Computational experiments, C)和平行执行(Parallel execution, P)构成的ACP理论体系,构建了多源数据的电网一次调频性能平行计算平台.本文提出的计算方法能够有效兼顾机组类型的静态特性和运行工况的动态特性,并以平行执行方式完成人工估算系统与实际电力系统的滚动优化,实现了电网一次调频性能的在线全面估计,从而有效弥补其无法进行精确建模的不足,有助于提高电网主动应对负荷突变的能力,也是对电网一次调频性能管控的一种全新

的可行性方式.

1 平台整体框架设计

所谓平行系统,是指由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统^[10].平行系统主要包括实际系统和人工系统,其基本框架如图1所示^[10].

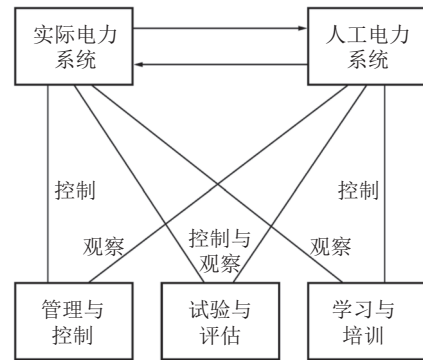


图1 平行系统运行的基本框架

Fig.1 Basic framework of parallel systems

设计平行系统的最主要目的是通过人工系统与实际系统的相互连接,对二者之间的行为进行比对和分析,完成对各自未来状况的“借鉴”和“预估”,相应地调节各自的管理与控制方式,达到实施有效解决方案以及学习和培训的目的^[10-11].

人工系统试图尽可能地模拟实际系统,对其行为进行预估,从而为寻找对实际系统有效的解决方案或对当前方案进行改进提供依据^[12].进一步,通过观察实际系统与人工系统评估的状态之间的不同,生成误差反馈信号,对人工系统的评估方式或参数进行修正,并重复进行新一轮的优化和评估^[12].

目前,平行系统理论已经在自动化码头^[13]、智能交通^[14]等领域中开展了应用研究,但尚未用于现代电力系统.现代电力系统是一个巨大的参数海量、广域分布、模型复杂的非线性复杂系统.现阶段,绝大多数电力仿真系统是基于物理模型进行的,并没有深入地考虑人的行为、自然因素以及社会环境的影响,这些因素限制了对复杂现代电力系统运行影响的评估,尤其是无法定性、定量地对电力系统应对突发事件的能力问题进行分析评估^[15].

为了克服采用传统仿真方法导致的上述局限,本文将平行系统理论应用到电力系统的实际工程中,改变传统的被动、离线的电力系统仿真方法,建立人工电力平行计算平台,进而实现管理与控制、实验与评估、学习与优化及故障诊断等功能.以现代电网的海量数据为驱动,电力平行计算平台为载

体,该平台可对正在运行的电力系统进行滚动式在线改进与不间断优化,实现电网一次调频性能估算达到最优解,为电力系统和复杂电网的能力优化与管理开辟一条新的途径^[16].

基于上述平行系统理念,本文设计了电网调频能力计算平台,其整体框架如图 2 所示,主要包括实际系统和人工平行系统两部分.实际电力系统的频率控制本质上是一个以电力调控中心为中枢,实现电源与负荷的电力供需平衡的闭环控制系统.电力调控中心不仅需要满足区域内机组发电及负荷消纳的控制要求,也肩负着电力系统实际运行产生的海量数据信息采集的重担.人工平行系统中,基于 D5000 电网调度系统的一次调频在线测试系统不仅能够在正常运行工况下测试控制区内的机组调频性能,保证机组一次调频性能的测试结果更具真实性,同时将历次测试数据存储、分析及评价,实现机组一次调频的静态参数、动态性能的数据积累和量化管理.将电力调控中心的海量数据和一次调频测试系统的特性数据应用于电网一次调频能力在线估计模型中,通过实际电力系统和人工平行系统的彼此作用、相互修正,既可以实现对实际电力系统的管理与控制,也能够完成对电网能力、行为与决策的评估与实验.

2 发电机组一次调频数据采集体系

当前,电力系统已经发展成一个具有多源信息

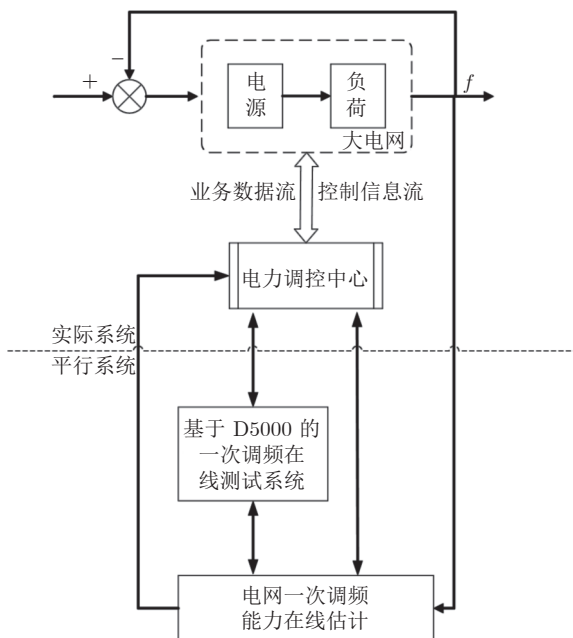


图 2 基于平行系统的计算平台整体框架

Fig.2 Overall framework of computing platform based on parallel systems

融合的综合性电力控制系统.根据现有的 SCADA (Supervisory control and data acquisition)、WAMS (Wide area measurement system)、OMS (Operations management system) 等系统,建立机组一次调频数据采集体系,如图 3 所示. SCADA 的一次调频在线测试系统能够在一次调频在线测试期间自动记录测试机组的有功 PMU (Phasor measurement unit) 数据,整编录入历史库存储^[17]. WAMS 的机组性能考核系统能够不间断采集机组实际运行的一次调频动作、响应等广域量测数据,实现机组转速不等率、积分电量、响应时间等一次调频性能指标的在线计算^[18]. 基于 OMS 的网源协调信息管理系统,通过设置统一的一次调频试验台账,维护和存储机组的历次原始试验数据和参数,统一存储于数据库中.

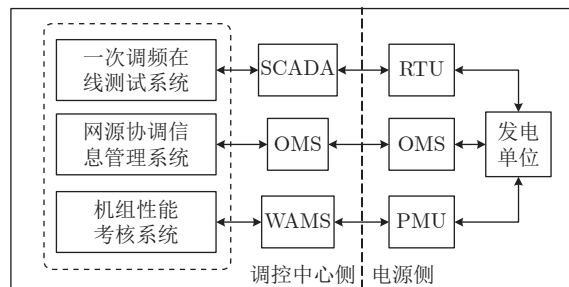


图 3 发电机组一次调频数据采集体系

Fig.3 Primary frequency control data acquisition system of generator sets

2.1 机组一次调频在线测试系统

如图 4 所示,在 D5000 系统中部署试验触发、结果展示、参数维护及统计分析功能.试验触发功能可实现选定机组进行试验,试验开始时将测试机组投入一次调频扰动测试模式,调控中心向电厂侧下发调频测试开始信号和频率偏差信号,机组根据接收的信号进行一次调频动作响应,具体控制信息

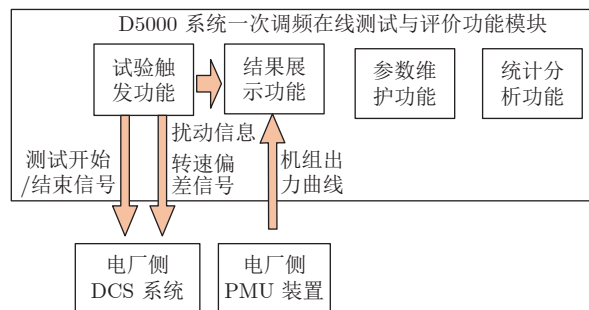


图 4 机组一次调频在线测试与评价功能结构图

Fig.4 Functional structure diagram of unit primary frequency control online test and evaluation

流程见图 5 所示。

在一次调频在线测试期间,系统自动记录测试机组的有功 PMU 数据,整编录入 D5000 历史库,永久保存,供后期调频指标分析与数据展示使用^[17]。在结果展示功能中,将频率扰动信号及电厂侧 PMU 装置上传的有功出力信号进行展示,并根据有功出力曲线自动计算一次调频动作性能指标。在浙江某厂 #2 机组进行一次调频在线测试系统联调试验时,调控中心主站侧的操作及结果展示如图 6 所示,发电厂机组一次调频动作响应曲线如图 7 所示。

通过 PMU 实时采集高频度的功率、相位、相角等机组数据,并利用 PMU 的 GPS 对时优势,计算机组在一次调频在线测试中不同时刻、不同工况下的性能指标,反向推算出机组实际的调频特性参数,以此形成海量的机组一次调频特征数据,实现机组一次调频静态参数、动态性能等特征数据的分析及管理^[19]。

2.2 网源协调信息管理系统

基于 OMS 的网源协调信息管理系统(如图 8 所示)能够实现设备台账、电气参数、涉网试验报告等技术资料的及时更新及有效管理,打通厂网之间的涉网信息共享交互渠道,更加科学、系统、高效地开展网源协调管理工作。以各机组台账信息为基础,实现对网内各并网机组数据信息的实时统计汇总;以并网机组各类信息关键字为基础,实现对特定类型、特定机组相关信息的快速查询和准确统计,该系统所部署的功能模块如图 9 所示。同时,建立网源协调数据中心,这是网源协调信息管理平台的核心理念,可实现参数模型库、文档资料库、督办信息库及信息变更库的数据获取与整合、数据质量校核、合格率督办和数据查询等服务。

在网源协调信息管理系统中,通过设置统一的一次调频试验台账模板,采集机组的历次试验数据,以维护和存储机组的原始试验数据。图 10 为浙江某百万千瓦机组 A 修后一次调频试验的数据台账。

根据设置统一的数据台账,可以追溯机组每一次试验工况,分析不同工况下机组一次调频试验时的真实性能。

2.3 发电机组一次调频性能考核系统

发电机组一次调频性能考核系统是基于 WAMS 部署于 D5000 上的一次调频数据量化及评价系统^[18]。该系统通过 PMU 将现场采集的机组出力数据送至电网调控中心 EMS (Energy management system) 系统中,并由 EMS 采集电网中的频率值及时间,打包形成一个数据包存储于该系统,以便进行量化处理。

机组一次调频贡献电量是机组一次调频多项指标的综合,它反映机组对电网频率的实际贡献大小,这一参数的引入使量化机组一次调频功能的动作力度和快速性成为可能。

在系统设计中,机组对象被抽象封装成一个类,每个机组都是该类的实例化。类中数据为机组的实时信息,包括机组基本参数(代号、装机容量、积分间隔、频率超前时间等)和积分电量以及其他计算辅助变量;类中对数据的操作包含积分电量的计算和对数据库的读写操作等。其中最为核心的函数为贡献电量积分函数,用来计算和累积贡献电量,以反映机组在实际运行时的一次调频动作性能。

一次调频性能考核系统通过采集各机组一次调频投退信号、有功功率和频率信息等广域量测信息,实现机组转速不等率、积分电量、响应时间等一次调频性能指标的在线计算,使系统能够考核机组是

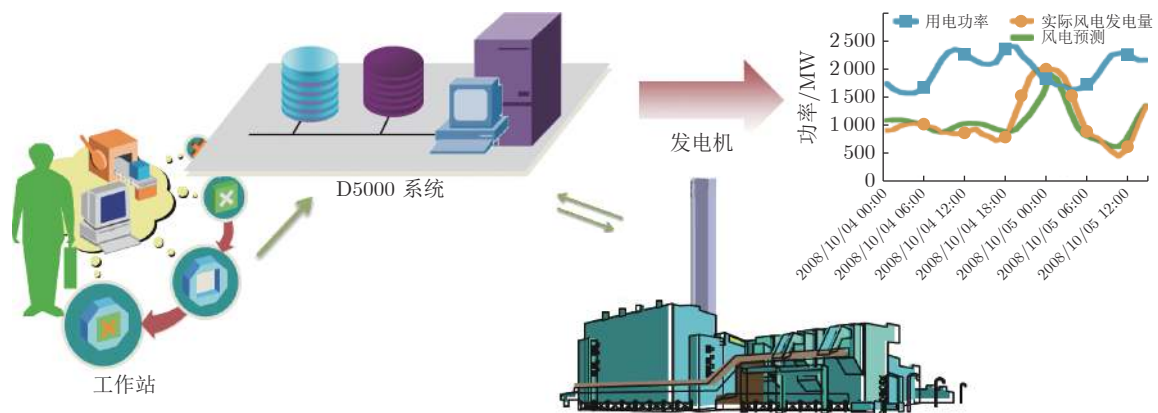


图 5 机组一次调频在线测试系统图

Fig. 5 System diagram of unit primary frequency control online test

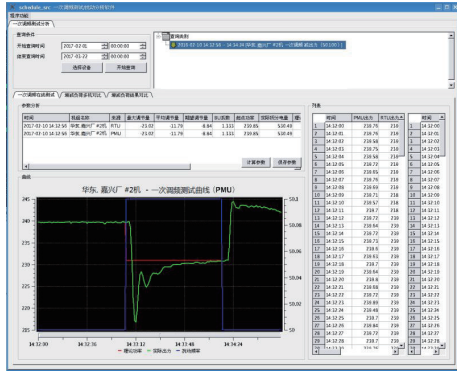


图 6 机组一次调频在线测试主站侧界面图

Fig.6 Interface diagram of main station side of unit primary frequency control online test

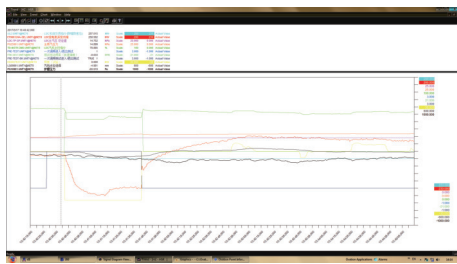


图 7 浙江某厂#2 机组一次调频在线测试动作曲线 (75% 负荷点 + 11 r/min 转速偏差)

Fig.7 Action curves of primary frequency control online test of unit 2 of a power plant in Zhejiang (+11 r/min speed deviation at 75% load point)



图 8 基于 OMS 的网源协调信息管理系统主界面

Fig.8 Main interface of grid power coordination information management system based on OMS

否贡献了满足要求的一次调频服务。

该系统依托于调度 D5000 系统, 能够不间断实时获取所有并网机组的一次调频动作性能。据系统统计, 每个月一台机组的一次调频动作次数可达到近 5 000 次 (如表 1 所示), 大量原始数据的累积奠定了电网一次调频性能计算的数据基础。

3 电网一次调频能力数据建模

目前, 国内外各类指标都是针对机组调频能力,

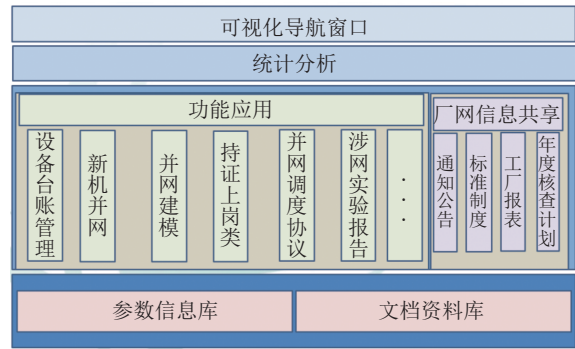


图 9 网源协调信息管理系统的功能模块

Fig.9 Functional modules of grid power coordination information management system

比如控制性能标准 (Control performance standard, CPS)、投运率、贡献电量、调频效果等^[20]。现有的评价指标本质为事后评价, 不能预测电网总的调频裕度。本文构建的数据平行驱动体系 (如图 11 所示), 依靠电网运行的大数据, 通过不断演算、迭代优化, 形成调频能力的概率区间来衡量电网调频性能, 解决了电网一次调频能力的在线估计问题, 从而使电网的运行状态具有更高的可控性及透明度, 提高大电网应对负荷突变的能力。

3.1 同步电网一次调频能力建模

定义 1. PFCA (Primary frequency control ability) 表示仅在一次调频作用情况下 (即没有二次调频作用时), 某时间段内负荷变化与电网频率变化的比值^[8], 可表示为

$$R_{PFCA} = \frac{|\text{电网负荷的变化}|}{|\text{电网频率的变化}|} \quad (1)$$

同步发电机并列运行的电网调频能力模型如图 12 所示。在图 12 中, R_i 为二次调频的给定值; δ_i 为电网中第 i 台机组的不等率; α_i 为电网中第 i 台机组装机容量/电力系统装机容量; $G_i(s)$ 为第 i 台汽轮机的传递函数; $P_{NL}(s)$ 为负载的标么值; $\varphi_s(s)$ 为电网转速变化的标么值。 $T_{\alpha\Sigma} = \sum_{i=1}^M \alpha_i T_{\alpha i}$ 为电网的惯性时间常数; $T_{\alpha i}$ 为第 i 台汽轮机的转子时间常数; β_Σ 为电网负载频率特性系数。

由图 12 可推出电网的周波变化为^[8]

$$\varphi_s(s) = -\frac{1}{T_{\alpha\Sigma}s + \beta_\Sigma + G(s)} P_{NL}(s) \quad (2)$$

其中,

$$G(s) = \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i}{\delta_i} G_i(s) \quad (3)$$

各变量前加 Δ 作为静态标记, 静态下电网周波

		-4	4	-6	6	-11	11	备注
50% P_0	实际不等率					5.3		470 MW, 14.12 MPa
	响应时间					2		顺序阀方式
	15 s 响应幅度					88.8		汽机主控 83.58%
	稳定时间					38		
	积分电量					0.82		
60% P_0	实际不等率	3.9	4.2	3.7	4.2			600 MW, 17.96 MPa
	响应时间	2	2	2	2			顺序阀方式
	15 s 响应幅度	89.3	85.8	115.5	94.75			汽机主控 81.5%
	稳定时间	26	28	23	27			
	积分电量	1.01	1.01	1.22	1.02			
75% P_0	实际不等率	4.1	4.4	4.4	4.8	5.7	5.7	750 MW, 18.49 MPa
	响应时间	2	2	2	2	2	2	顺序阀方式
	15 s 响应幅度	79.3	69.2	92.6	85.6	57.1	65.1	汽机主控 92.7%
	稳定时间	40	38	26	25	36	25	
	积分电量	0.98	0.91	1.01	0.96	0.72	0.73	
90% P_0	实际不等率	4.3	4.7	4.9	5.03			900 MW, 22.57 MPa
	响应时间	2	2	2	2			顺序阀方式
	15 s 响应幅度	96.2	92.5	81.9	77.9			汽机主控 91.85%
	稳定时间	35	30	41	33			
	积分电量	1.1	0.95	0.89	0.87			

图 10 浙江某厂 #1 机组 A 修后一次调频试验台账

Fig. 10 Ledger of primary frequency control test after class a maintenance of unit 1 of a power plant in Zhejiang

表 1 机组一次调频月动作统计

Table 1 Monthly action statistics of unit primary frequency control

月份	强蛟厂 #3 机组		镇燃厂 #11 机组	
	动作总次数	正确动作数	动作总次数	正确动作数
8	2 491	2 389	408	381
9	4 085	3 948	1 464	1 369
10	4 965	4 760	2 956	2 822

变化可表示为

$$\Delta\varphi = -\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{T_{\alpha\Sigma}s + \beta_{\Sigma} + G(s)} \Delta P_{NL} \frac{1}{s} \quad (4)$$

由于汽轮机传递函数可以表示为

$$G_i(s) = \frac{\prod_{i=1}^m (T_i s + 1)}{\prod_{i=1}^n (T_i s + 1)} \quad (5)$$

故

$$\Delta\varphi = -\frac{\Delta P_{NL}}{\sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i}{\delta_i} + \beta_{\Sigma}} \quad (6)$$

由此得到, 在静态情况下电网的一次调频能力可表示为

$$R_{PFCA}(static) = R_G + R_L \quad (7)$$

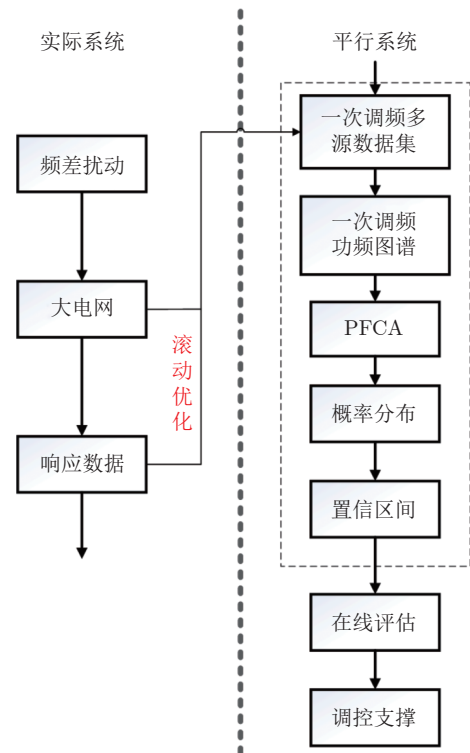


图 11 电网一次调频能力估算技术路线图

Fig. 11 Technical roadmap of grid primary frequency control capacity estimation

$$R_{PFCA}(static) = \frac{|\Delta P_{NL}|}{|\Delta\varphi|} = \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i}{\delta_i} + \beta_{\Sigma} \quad (8)$$

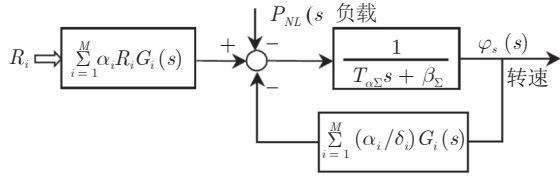


图 12 M 台同步发电机并列运行的电网调频能力模型图

Fig.12 Model diagram of power grid frequency regulation capacity of M synchronous generators operating in parallel

$R_G = \sum_{i=1}^M (\alpha_i/\delta_i)$ 定义为电网的等值调差率, 等效为所有挂网同步发电机组一次调频出力总和的最大值. $R_L = \beta_{\Sigma}$ 为电网负载频率特性系数, 等效为电网负荷对频率变化的贡献能力.

对于某台额定功率 P_{ei} , 不等率 δ_i 的机组而言, 其在 Δf 频率扰动下的一次调频能力的实际贡献为

$$k_i = \frac{\Delta P_{\text{real}}^*}{\Delta f^*} = \frac{\eta_i}{\delta_i} \quad (9)$$

$$\eta_i = \frac{\Delta P_{\text{real}}}{\Delta P_{\text{expect}}} = \frac{\Delta P_{\text{real}}}{\frac{\Delta f \times P_{ei}}{f_e \times \delta_i}} = \frac{\Delta P_{\text{real}}}{\Delta f^*} \times \delta_i \quad (10)$$

显然, 在 Δf 频率扰动下的同步电网中所有挂网运行机组的一次调频实际出力总和为

$$R_{\text{PFCA}}(\text{real}) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \frac{\eta_i}{\delta_i} = \sum_{i=1}^M \alpha_i k_i \leq R_G = \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i}{\delta_i} \quad (11)$$

3.2 机组一次调频能力数据模型

从式 (11) 中可以发现电网一次调频能力主要取决于各挂网运行机组的转速不等率.

机组在不同功频下的转速不等率不尽相同, 将每台机组的转速不等率设定为常数势必难以准确描述机组的一次调频能力. 调度 D5000 系统具有各类丰富的一次调频数据 (如图 13 所示), 其中, 机组性能考核系统实时采集的机组一次调频动作数据量最大, 每月达几千次. 而网源协调信息管理系统中存储的一次调频参数及试验数据, 则表征机组一次调频性能的理论出力和实际能力上下限值. 一次调频在线测试系统可以探测机组在不同工况下的大频差真实能力, 完善整个机组的一次调频数据集. 本文将采用极大似然估计及数值拟合等算法对调度 D5000 系统中的多源一次调频数据进行有效整合, 以获取机组真实的一次调频性能功频特性图谱.

可以从 D5000 系统中获取不同时刻机组一次调频能力的的数据, 从而构造出机组转速不等率的样本空间. 我们用随机变量 δ_i 表示单台机组在第 i 个时间段内的转速不等率. 利用 D5000 系统中不同

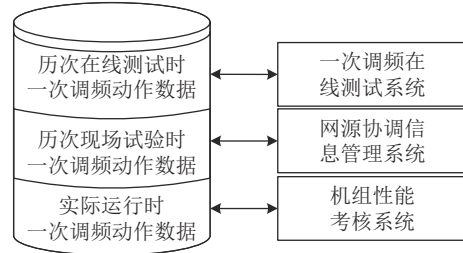


图 13 发电机组一次调频动作历史数据库

Fig.13 Historical database of primary frequency control actions of generator sets

间的转速不等率数据, 可以构造用于描述转速不等率的随机变量 $\delta_1, \dots, \delta_n$. 由于机组的短期特性通常不会发生变化, 可以认为 $\delta_1, \dots, \delta_n$ 独立同分布. 按照中心极限定理, 随机变量 $\delta_1, \dots, \delta_n$ 独立同分布, 当 n 很大时, $(\sum_{i=1}^n \delta_i - n\mu)/(\sqrt{n}\sigma)$ 近似服从标准正态分布 $N(0, 1)$. 设 $X = \sum_{i=1}^n \delta_i$, 则 X 服从正态分布 $N(n\mu, n\sigma^2)$.

本文通过极大似然估计来估计 μ 和 σ^2 , 似然函数可以表示为

$$L(n\mu, n\sigma^2) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(X_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{N}{2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2} \quad (12)$$

那么, 似然函数的对数为

$$\begin{aligned} \lg L(n\mu, n\sigma^2) &= -\frac{N}{2} \lg(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2 = \\ &= -\frac{N}{2} \lg(2\pi) - \frac{N}{2} \lg(\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

则似然方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial \lg L(n\mu, n\sigma^2)}{\partial \mu} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu) = 0 & (14a) \\ \frac{\partial \lg L(n\mu, n\sigma^2)}{\partial \sigma^2} = -\frac{N}{2\sigma^2} + \frac{1}{2\sigma^4} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2 = 0 & (14b) \end{cases}$$

求解 (14a), 得

$$n\hat{\mu} = \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (15)$$

代入 (14b), 得

$$n\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (16)$$

那么, μ 和 σ^2 的最大似然估计为

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \bar{X}, \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (17)$$

本文用大写字母表示所有涉及的样本, 因为最大似然估计 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}^2$ 均为统计量, 脱离具体的试验或观测, 它们都是随机的. 依据 3 套系统得到 3 个维度的真实观测数据, 采用上述的估计算法, 即可得到机组功频坐标下的一次调频性能估计值, 记为 K , 显然 $K = \hat{\mu}$, 从而得到功频坐标下的机组一次调频性能网格如表 2 所示, 对浙江某 660 万千瓦级超临界机组进行原始数据采集和数值迭代模拟, 可得到该机组的一次调频性能三维分布, 如图 14 所示, 其中, 横轴 f 和 P 分别为电网频率和机组实际出力值, 纵轴 K 表示为机组一次调频性能值.

表 2 发电机组一次调频性能网格表
Table 2 Grid table of primary frequency control performance of generator sets

频率功率	f_1	f_2	Λ	f_{N-1}	f_N
P_1	K_{11}	K_{12}	$K_{1\Lambda}$	$K_{1(N-1)}$	K_{1N}
P_2	K_{21}	K_{22}	$K_{2\Lambda}$	$K_{2(N-1)}$	K_{2N}
Λ	$K_{\Lambda 1}$	$K_{\Lambda 2}$	$K_{\Lambda \Lambda}$	$K_{\Lambda(N-1)}$	$K_{\Lambda N}$
P_{N-1}	$K_{(N-1)1}$	$K_{(N-1)2}$	$K_{(N-1)\Lambda}$	$K_{(N-1)(N-1)}$	$K_{(N-1)N}$
P_N	K_{N1}	K_{N2}	$K_{N\Lambda}$	$K_{N(N-1)}$	K_{NN}

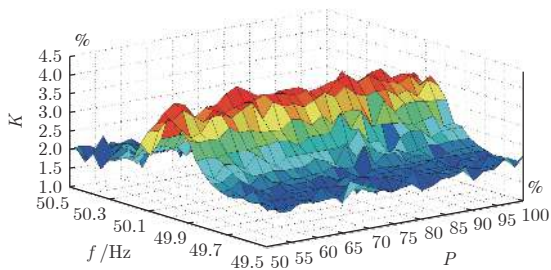


图 14 发电机组一次调频性能功频图谱
Fig. 14 Power frequency spectrum of primary frequency control performance of generator sets

4 电网一次调频性能数据分析及估计

4.1 浙江电网一次调频性能分析

2018 年 10 月 22 日 10:36 时, 浙江省全社会口径用电负荷 39753.02 MW, 受电 17849.91 MW (占全省用电负荷的 52.9%), 发电 21903.11 MW (占全省用电负荷的 47.1%). 其中, 浙江省调统调机组共并网 45 台 (不含新能源), 其中纯凝汽燃煤机组 39 台, 背压供热燃煤机组 2 台, 燃气机组 4 台, 并网机组平均负荷率约为 58.25%, 总发电负荷 16221.59 MW, 占当时全省用电负荷的 40.8%.

据此, 按照式 (11) 进行计算, 得到浙江 2018 年 10 月 22 日 10:36 时省调统调并网机组的实际调频能力为 12.2327, 根据当时的用电负荷进行折算后约为 6 762.23 MW/Hz, 略高于浙江电网 ACE 系统中自然频率特性系数 5 979 MW/Hz^[21]. 推此及彼, 采用本文的方法可以得到浙江统调机组每天任意时刻的实际调频能力值, 如图 15 所示.

显然, 由图 15 可以明显得知, 电网的实际调频性能与并网机组台数、并网机组类型、机组平均负荷率等因素息息相关, 是一项电网拓扑结构的综合表征.

4.2 大频差时浙江电网一次调频容量分析

电网频率是描述电力系统发电与用电平衡关系的一个重要变量. 电网中用电负荷的随机特性使电网频率也成为随机变量. 电力负荷的随机变化部分是相互独立、不相关的^[22]. 由中心极限定理可知, 连续的独立随机变量叠加后是正态分布的, 因此, 电力系统中负荷的随机性分量也是正态分布的. 在通常情况下, 电网频率的概率分布也就可近似认为是正态分布^[23], 因此, 假设发生直流闭锁时的浙江电网系统最低频率近似正态分布, 并结合近三年的历次直流闭锁数据分析, 可得表 3 数据.

根据表 3, 可知电网频率的最大变化差值为

$$\Delta f = 50 - 49.841 = 0.159 \text{ Hz}$$

最大概率功率缺额为

$$P_{\text{Loss}} = \beta_{\text{ACE}} \times \frac{\Delta f}{f_N} = 5\,979 \times 0.159 = 950.66 \text{ MW}$$

按浙江历次直流闭锁数据, 可知在不少于 63 台同步发电机组, 总装机不低于 34 658.58 MW 的条件下, 浙江统调机组一次调频能力为 9.5856 (95% 以上), 折算后为 6 644.46 MW/Hz, 在最大概率频差 0.159 Hz 下, 浙江电网可提供一次调频最大能力至少约为 1 056.47 MW (3.1% MCR (Maximum continuous rating)), 能够满足功率缺额 950.66 MW 的要求, 也就是说, 浙江统调机组一次调频能力可以保证电网在直流闭锁等大频差工况下系统频率不低于 49.841 Hz.

5 结束语

机组的转速不等率与电网频率往往呈非线性关系, 采用固定的转速不等率来计算机组的一次调频能力误差较大. 本文基于数据平行驱动体系, 依靠电网运行的大数据, 建立了更为准确的电网一次调频模型, 对提升电网频率控制水平具有非常重要的意义.

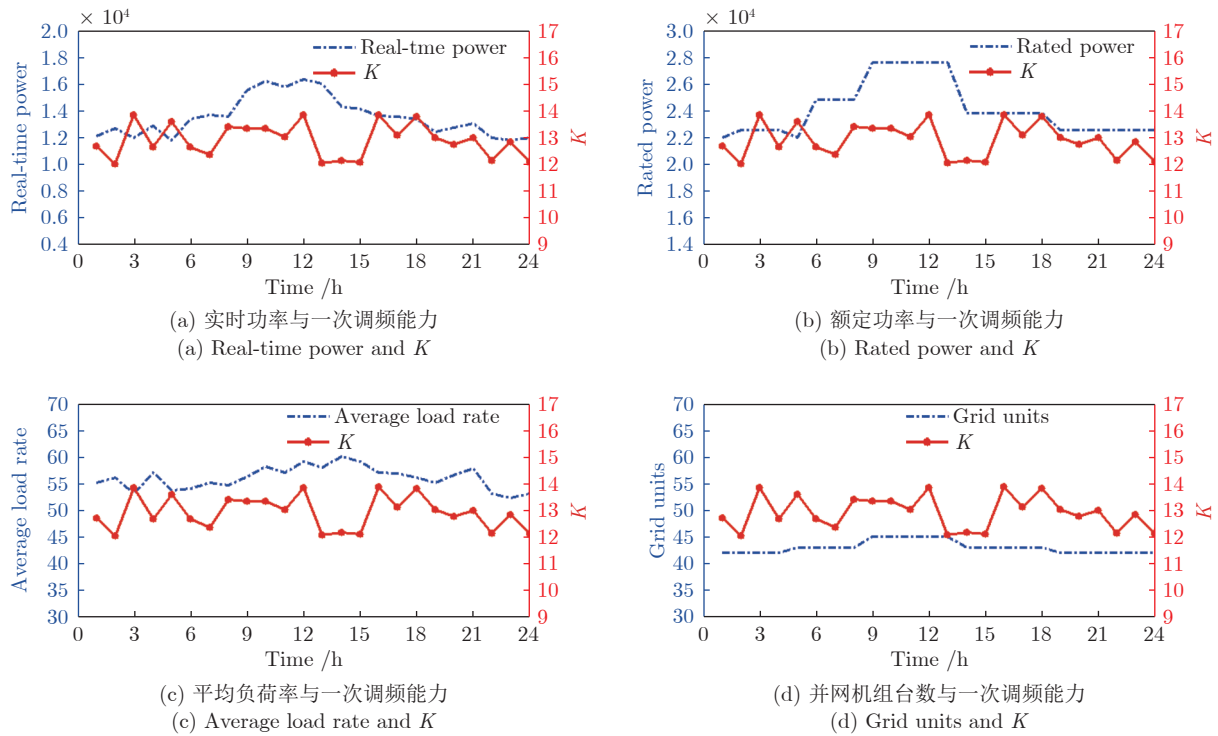


图 15 2018 年 10 月 22 日浙江统调机组实际调频能力时刻图

Fig. 15 Time map of actual primary frequency control performance of Zhejiang dispatching unit on October 22, 2018

表 3 大频差时浙江电网一次调频数据分析
Table 3 Data analysis of primary frequency control data of Zhejiang power grid in large frequency difference situations

指标	均值	标准差	95% 置信区间
最低频率 (Hz)	49.877	0.1022	[49.841, 49.914]
实际出力 (标幺值)	11.9216	6.5165	[9.5856, 14.2575]
出力限值 (%Pe)	3.94	0.90	[3.61, 4.27]
装机容量 (MW)	36 633.71	5 509.92	[34 658.58, 8 608.85]
装机总数 (台数)	68	12	[63, 72]

References

- Li Guo-Dong, Pi Jun-Bo, Zheng Li, Chen Long-Xiang, Dong Yu, Ge Rui. Simulation analysis on case of bipolar blocking in ± 500 kV EHVDC power transmission line from Tuanlin to Fengjing. *Power System Technology*, 2014, **38**(4): 877-881 (李国栋, 皮俊波, 郑力, 陈龙翔, 董昱, 葛睿. ± 500 kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析. 电网技术, 2014, **38**(4): 877-881)
- Xuan Xiao-Hua, Yin Feng, Zhang Yong-Jun, Zhang Bao, Lu Min, Chen Li-Yue. Analysis on primary frequency regulation performance of the units under DC blocking fault in UHV receiving end power grid. *Electric Power*, 2016, **49**(11): 140-144 (宣晓华, 尹峰, 张永军, 张宝, 卢敏, 陈利跃. 特高压受端电网直流闭锁故障下机组一次调频性能分析. 中国电力, 2016, **49**(11): 140-144)
- Kundur P, Paserba J, Ajarapu V, Andersson G, Bose A, Canizares C, et al. Definition and classification of power system stability: IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, **19**(3): 1387-1401
- Zhao Ting, Dai Yi-Ping, Gao Lin. Influence of primary frequency control ability distribution on power system security and stability. *Electric Power*, 2006, **39**(5): 18-22 (赵婷, 戴义平, 高林. 多区域电网一次调频能力分布对电网安全稳定运行的影响. 中国电力, 2006, **39**(5): 18-22)
- Tao Qian, He Ying, Pan Yang, Sun Jian-Jun. Characteristics of power system frequency abnormal distribution and improved primary frequency modulation control strategy. *Power System Protection and Control*, 2016, **44**(17): 133-138 (陶骞, 贺颖, 潘杨, 孙建军. 电力系统频率分布特征及改进一次调频控制策略研究. 电力系统保护与控制, 2016, **44**(17): 133-138)
- Jin Na, Liu Wen-Ying, Cao Yin-Li, Xing Zhou, Cui Gang. Influence on the grid frequency characteristic by the parameters of primary frequency modulation of large capacity generator units. *Power System Protection and Control*, 2012, **40**(1): 91-95, 100 (金娜, 刘文颖, 曹银利, 行舟, 崔岗. 大容量机组一次调频参数对电网频率特性的影响. 电力系统保护与控制, 2012, **40**(1): 91-95, 100)
- Lang Cheng-Yu, Shi Yu, Liao Da-Peng. Influence and countermeasures for primary frequency caused by different unit operating mode. *Power System Engineering*, 2012, **28**(2): 63-64, 66 (郎澄宇, 史昱, 廖大鹏. 机组运行方式对一次调频的影响与对策. 电站系统工程, 2012, **28**(2): 63-64, 66)
- Yu Da-Ren, Guo Yu-Feng. The online estimate of primary frequency control ability in electric power system. *Proceedings of the CSEE*, 2004, **24**(3): 72-76 (于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计. 中国电机工程学报, 2004, **24**(3): 72-76)
- He Ying, Pan Yang, Tao Qian, Liu Yue-Xia, Sun Jian-Jun, Zha Xiao-Ming. Evaluation index of power grid primary frequency modulation considering dead zone. *Power System Protection and Control*, 2016, **44**(19): 85-90 (贺颖, 潘杨, 陶骞, 刘悦遐, 孙建军, 查晓明. 考虑调频死区的电网

- 一次调频能力评价指标. 电力系统保护与控制, 2016, **44**(19): 85-90)
- 10 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485-489, 514
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, **19**(5): 485-489, 514)
- 11 Wang Fei-Yue, Yang Jian, Han Shuang-Shuang, Yang Liu-Qing, Cheng Xiang. The framework of parallel network based on the parallel system theory. *Journal of Command and Control*, 2016, **2**(1): 71-77
(王飞跃, 杨坚, 韩双双, 杨柳青, 程翔. 基于平行系统理论的平行网络架构. 指挥与控制学报, 2016, **2**(1): 71-77)
- 12 Wang Fei-Yue, Liu De-Rong, Xiong Gang, Cheng Chang-Jian, Zhao Dong-Bin. Parallel control theory of complex systems and applications. *Complex Systems and Complexity Science*, 2012, **9**(3): 1-12
(王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 程长建, 赵冬斌. 复杂系统的平行控制理论及应用. 复杂系统与复杂性科学, 2012, **9**(3): 1-12)
- 13 Zheng Song, Wu Xiao-Lin, Wang Fei-Yue, Lin Dong-Dong, Zheng Rong, Ke Wei-Lin, et al. Applying the parallel systems approach to automatic container terminal. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(3): 490-504
(郑松, 吴晓林, 王飞跃, 林东东, 郑蓉, 柯伟林, 等. 平行系统方法在自动化集装箱码头中的应用研究. 自动化学报, 2019, **45**(3): 490-504)
- 14 Zhang Hui, Yu Quan, Liu Jin-Guang, Rong Jian. Application of parallel systems theory in traffic engineering. *Journal of Transport Information and Safety*, 2009, **27**(S1): 32-35
(张会, 于泉, 刘金广, 荣建. 平行系统理论在交通工程中的应用浅探. 交通信息与安全, 2009, **27**(S1): 32-35)
- 15 Wang Fei-Yue, Zhao Jie, Lun Shu-Xian. Artificial power systems for the operation and management of comolex power grids. *Southern Power System technology*, 2008, **2**(3): 1-6
(王飞跃, 赵杰, 伦淑娴. 人工电力系统与复杂大电网的运营和管理. 南方电网技术, 2008, **2**(3): 1-6)
- 16 Wang Fei-Yue. Parallel control: A method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293-302
(王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(4): 293-302)
- 17 Xu Chun-Lei, Xu Rui, Qiu Chen-Guang, Zhang Xiao-Bai, Qian Yu-Mei, Liu Jun-Wei. Evaluation system design of online test of primary frequency regulation and AGC performance for generator unit. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, **36**(3): 1-6
(徐春雷, 徐瑞, 仇晨光, 张小白, 钱玉妹, 刘俊伟. 发电机组一次调频在线测试与AGC性能考核系统设计. 电力工程技术, 2017, **36**(3): 1-6)
- 18 Liu Yang, Zhang Dao-Nong, Sun Ming-Ze, Yu Jun, Jin Yuan, Zhan Qing-Cai, et al. Design of on-line monitoring and assessment system for generator unit primary frequency regulation based on WAMS. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, **31**(3): 14-21
(刘洋, 张道农, 孙铭泽, 于骏, 金元, 詹庆才, 等. 基于WAMS的发电机组一次调频在线监测与考核系统设计. 电力科学与技术学报, 2016, **31**(3): 14-21)
- 19 Zheng Tao, Gao Fu-Ying. On-line monitoring and computing of unit PFR characteristic parameter based on PMU. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, **33**(11): 57-61, 71
(郑涛, 高伏英. 基于PMU的机组一次调频特性参数在线监测. 电力系统自动化, 2009, **33**(11): 57-61, 71)
- 20 Gao Lin, Dai Yi-Ping, Wang Jiang-Feng, Zhao Pan, Zhao Ting. An online estimation method of primary frequency regulation parameters of generation units. *Proceedings of the CSEE*, 2012, **32**(16): 62-69
(高林, 戴义平, 王江峰, 赵攀, 赵婷. 机组一次调频参数指标在线估计方法. 中国电机工程学报, 2012, **32**(16): 62-69)
- 21 Wang Mao-Hai, Xu Zheng-Shan, Xie Kai, Lv Shao-Kun. Calcula-

tion of frequency characteristic coefficients for an interconnected power system based on WAMS. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, **31**(3): 15-18, 46

(王茂海, 徐正山, 谢开, 吕少坤. 基于WAMS的系统自然频率特性系数确定方法. 电力系统自动化, 2007, **31**(3): 15-18, 46)

- 22 Liu Ke-Tian, Wang Xiao-Ru, Bo Qi-Bin. Minimum frequency prediction of power system after disturbance based on the WAMS data. *Proceedings of the CSEE*, 2014, **34**(13): 2188-2195
(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. 中国电机工程学报, 2014, **34**(13): 2188-2195)

- 23 Shao Shuai. Research on the Space-time Distribution Characteristics of Frequency Dynamics Based on the WAMS [Master thesis], Northeast Electric Power University, China, 2016. 19-25
(邵帅. 基于WAMS的电力系统频率动态时空分布特性分析 [硕士学位论文], 东北电力大学, 中国, 2016. 19-25)



张江丰 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院高级工程师. 2013年获浙江大学硕士学位. 主要研究方向为模式识别, 电力系统网源协调控制技术. 本文通信作者.

E-mail: zhangjiangfeng0725@163.com
(ZHANG Jiang-Feng Senior engineer

at the State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute. He received his master degree from Zhejiang University in 2013. His research interest covers pattern recognition and power system grid source coordinated control technology. Corresponding author of this paper.)



王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模, 分析与控制.

E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(WANG Fei-Yue Professor at the State Key Laboratory for Management

and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems.)



苏 焯 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院高级工程师. 2005年获华北电力大学硕士学位. 主要研究方向为控制理论与控制工程.

E-mail: suye79@163.com

(SU Ye Senior engineer at the State Grid Zhejiang Electric Power

Research Institute. He received his master degree from North China Electric Power University in 2005. His research interest covers control theory and control engineering.)



陈波 杭州意能电力技术有限公司高级工程师. 2005 年获武汉大学硕士学位. 主要研究方向为控制理论与控制工程.

E-mail: 13867423403@139.com

(CHEN Bo Senior engineer at Hanzhou E. Energy Electric Power

Technology Co., Ltd.. He received his master degree from Wuhan University in 2005. His research interest covers control theory and control engineering.)

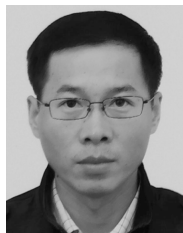


汪自翔 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院高级工程师. 2015 年获浙江大学博士学位. 主要研究方向为信息融合, 非线性控制.

E-mail: wangzixiang@zj.sgcc.com.cn

(WANG Zi-Xiang Senior engineer at the State Grid Zhejiang Electric

Power Research Institute. He received his Ph.D. degree from Zhejiang University in 2015. His research interest covers information fusion and nonlinear control.)



孙坚栋 杭州意能电力技术有限公司高级工程师. 2012 年获浙江大学博士学位. 主要研究方向为网络控制系统, 先进控制, 软测量技术.

E-mail: dog@zju.edu.cn

(SUN Jian-Dong Senior engineer at Hanzhou E. Energy Electric

Power Technology Co., Ltd.. He received his Ph.D. degree from Zhejiang University in 2012. His research interest covers networked control systems, advanced control, and soft sensor technology.)



尹峰 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院教授级高级工程师. 2016 年获浙江大学博士学位. 主要研究方向为发电自动化, 网源协调控制, 控制系统故障诊断与信息安全.

E-mail: yin_feng@zj.sgcc.com.cn

(YIN Feng Professor-level senior

engineer at the State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute. He received his Ph.D. degree from Zhejiang University in 2016. His research interest covers power generation automation, grid source coordinated control, and fault diagnosis of control system and information security.)