

电力系统实时调频仿真与教学实验设计

李常刚,陈浩然,张慧*,张文,张恒旭

(电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学),山东 济南 250061)

摘要:为提高电力系统分析课程的教学质量,加深学生对频率动态过程的系统性理解,基于电力系统仿真工具包(simulation toolkit for electrical power systems, STEPS)开发实时仿真功能,可视化展示系统中各电气量的动态响应曲线。结合频率教学相关内容,模拟实际电网的自动发电控制策略,构建电力系统实时调频仿真实验案例,分别模拟电力系统一次调频和二次调频过程。该仿真系统和实验为学生提供交互式模拟频率动态过程的机会,加深学生对所学知识的理解,引导学生参与实验设计并自主优化调频策略,提高学生的基本科研素质。

关键词:电力系统分析;实时仿真;一次调频;二次调频;教学实验

中图分类号:TM743;G642

文献标志码:A

引用格式:李常刚,陈浩然,张慧,等. 电力系统实时调频仿真与教学实验设计[J]. 山东大学学报(工学版),2024,54(3):122-131.

LI Changgang, CHEN Haoran, ZHANG Hui, et al. Power system real-time frequency regulation simulation and teaching experiments design[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(3):122-131.

Power system real-time frequency regulation simulation and teaching experiments design

LI Changgang, CHEN Haoran, ZHANG Hui*, ZHANG Wen, ZHANG Hengxu

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of the Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: To enhance the teaching quality of the power system analysis course and deepen students' systematic understanding of frequency dynamic process, the real-time simulation function was developed based on simulation toolkit for electrical power systems (STEPS). This function enabled the visualization of dynamic response curves for various electrical quantities in the power system. Combining relevant teaching content, the automatic generation control strategies for simulating actual power grid were established, creating real-time frequency regulation simulation experiments for primary and secondary frequency regulation process in power system. This simulation system and experiments provided students with the opportunities to interactively simulate the frequency dynamic process, deepen their understanding of the learned knowledge. Meanwhile, the system and the experiments could also guide students to participate in the experiment design and optimize the frequency regulation strategies independently, thereby improving students' fundamental research abilities.

Keywords: power system analysis; real-time simulation; primary frequency regulation; secondary frequency regulation; teaching experiment

0 引言

在电气工程及其自动化专业培养方案中,电力

系统分析是一门核心主干课程^[1-2],对于提高学生专业素质、培养学生系统性思维具有重要作用^[3]。频率调整与控制是电力系统分析课程中的关键内容,主要涉及全网层面的有功功率平衡与频率动

收稿日期:2023-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177096);山东大学教育教学改革研究资助项目(2022Y166,2022Y169)

第一作者简介:李常刚(1984—),男,山东日照人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制。

E-mail:lichgang@sdu.edu.cn

*通信作者简介:张慧(1984—),女,山东济南人,实验师,硕士,主要研究方向为电力系统运行与控制。E-mail:zhanghui2018@sdu.edu.cn

态特性,教学目标是使学生掌握频率的概念,了解频率调整的原理和方法,理解电力系统的频率动态变化过程^[4]。目前,电力系统频率教学的主流授课方式是教学板书结合课件展示,这种教学方式注重概念讲解和公式推导,但缺乏对电力系统频率动态过程的直观展示,因此学生在学习过程中常感到知识抽象难懂、不易理解。利用仿真软件对电力系统频率调整过程进行模拟,将抽象的物理过程可视化展示,可以有效加深学生对频率动态过程的理解。

利用仿真软件辅助教学已在电力系统分析教学中广泛应用^[5-6]。文献[7]在电力系统分析课程中应用 PSASP、MATLAB 等仿真工具,形象地为学生模拟电力系统各种控制与扰动操作,如线路短路与重合闸、负荷波动与频率调整等,有效提高了教学质量;文献[8]基于仿真平台设计了电力系统一次调频虚拟仿真实验,主要研究电力系统有功功率平衡问题,通过该实验可加深学生对电力系统频率动态变化过程的理解,同时锻炼学生使用仿真工具解决电力系统实际问题的能力;文献[9]基于电力系统仿真工具包(simulation toolkit of electrical power systems, STEPS)开发了一款电力系统分析仿真教学软件,通过设置相应的监视通道和电力系统的扰动,可以模拟电力系统的频率调整过程,展示各电气量的变化曲线,帮助学生理解电力系统的频率调整过程。

以上研究将仿真软件用于电力系统频率教学取得了一定的成果。但是,所使用的仿真软件均为非实时仿真软件,在仿真过程中不能实时设置电力系统扰动并观察系统的动态行为变化。此外,由于教学中所用案例规模一般较小,仿真均可做到超实时,但这种高速计算使交互式地模拟电网动态过程非常困难,学生无法在仿真过程中施加扰动和相关控制措施并实时观察系统的动态行为变化。因此,有必要对仿真过程基于实时运行进行优化,实现仿真速度与实际电力系统的动态过程保持一致^[10],满足课堂中交互式教学的需求。

实现电力系统实时频率仿真需要满足以下2个条件:第一,仿真软件必须能做到超实时。电力系统仿真模拟的实质是按一定步长对微分代数方程(differential-algebraic equations, DAE)进行逐步求解,只有耗费一个步长以内的时间完成对 DAE 的求解,才能满足实时仿真开发的理论要求,这对仿真软件的计算速度提出了很高的要求。第二,为满足频率教学需要,实时仿真应支持在任意时刻设置扰

动,并能够实时观察系统的动态行为。这要求仿真软件必须做到逐步仿真,并可以在任意时刻暂停,且有丰富的接口用于设置电力系统的各种扰动操作。

目前广泛用于电力系统分析课程教学的仿真软件主要有 PSS/E^[11]、PSASP^[12]、BPA^[13]等。PSASP、BPA 计算速度快,可靠性高,但仿真过程封闭,可调用的接口少,且不具备逐步仿真功能,不满足实时仿真的开发要求;PSS/E 支持逐步仿真,能灵活设置各种扰动,具有较快的计算速度,满足实时仿真功能的开发要求,但昂贵的产权费用阻碍了其在教学实践中的广泛应用。STEPS 是本研究开发并开源的一款电力系统仿真软件包^[14],可以实现快速、准确的电力系统仿真。该软件包具备逐步仿真功能,支持在任意时刻暂停仿真和设置扰动,并提供相关接口用于监视扰动设置后系统的动态行为变化。因此可以基于 STEPS 进行实时仿真功能的开发,程序源代码托管于 Github^[15]。

本研究介绍基于 STEPS 的实时仿真功能开发,并进行仿真实时性的讨论。基于实时仿真功能,模拟电网自动发电控制(automatic generation control, AGC)手段,设计基于定频率控制的实时 AGC 仿真策略,构建电力系统实时调频仿真实验案例。通过模拟一次调频和二次调频过程,实时展示系统中各电气量的动态变化,加深学生对频率动态过程的系统性理解。在理解所学内容的基础上,学生可参与到实验设计中,通过选定调频机组,设置相关参数,自主制定合理的调频策略。通过实验,可锻炼学生的实验设计能力,提高学生的基本科研素质^[16]。

1 实时仿真功能开发

1.1 总体框架

实时仿真和传统离线仿真的主要区别在于仿真模型响应速度和实际系统响应速度是否相同。离线仿真在仿真计算时没有基于实时运行进行优化,导致时间确定性较差,而实时仿真借助运算能力强大的软件内核,通过对仿真计算过程进行优化,可以实现仿真与实际时间同步。通过对 Python 内置的 time 模块以及 STEPS 中相关接口的调用,实现仿真速度与电力系统实际动态过程保持一致,同时支持在仿真过程中的任意时刻设置扰动并实时更新系统各电气量的动态响应曲线,实时仿真的总体框架如图 1 所示, t_r 为程序实际耗费时间, t_s 为仿真时间, h 为仿真步长。

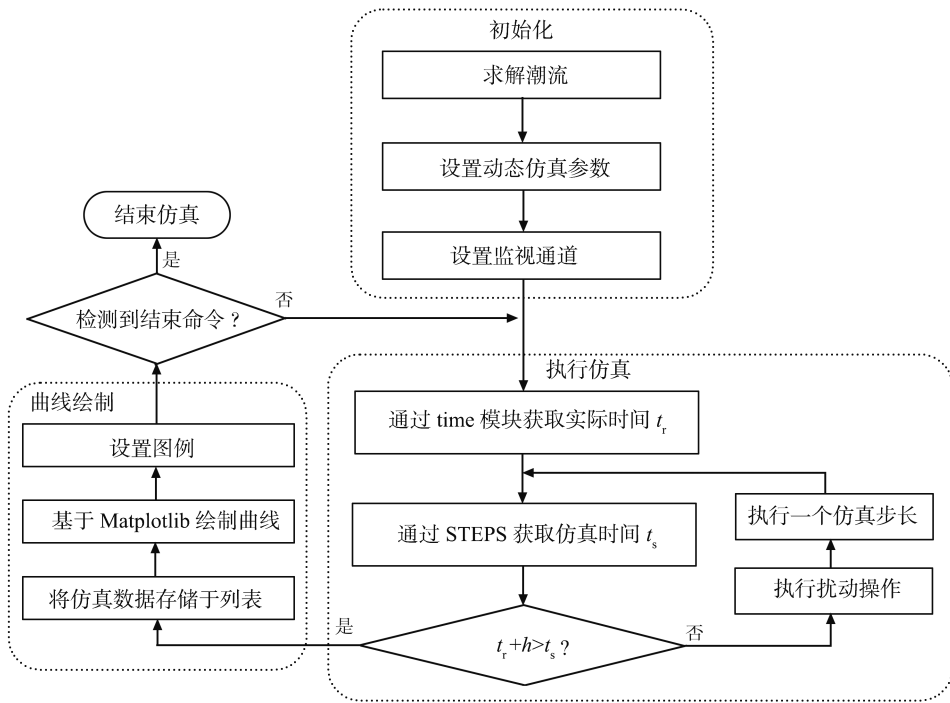


图1 实时仿真框架

Fig.1 Framework of real-time simulation

实时仿真的实现依赖于内外两层循环的嵌套。初始化仿真求解潮流并设置相关动态仿真参数和变量监视通道,逐步执行仿真,直到满足判断框中条件,即仿真时间与实际时间同步。与此同时,跳出内层循环完成动态响应曲线的绘制。绘制完成后,再次返回内层循环并重复执行上述过程。只要未检测到结束命令,仿真就会周而复始一直执行下去。

应当指出,这里提出的实时仿真并不是严格意义上的实时,而是一种准实时仿真。就软件用途和教学需求而言,这种仿真的实时性能水平是足够的,能够满足学生与电力系统动态过程进行实时交互的要求。关于仿真实时性能将在 1.2 节中详细展开讨论。

1.2 仿真实时性能讨论

航天、军工、汽车制造等特殊行业需要严格的实时仿真能力,仿真开发需要基于实时操作系统(real-time operating system, RTOS)^[17-18]。然而,教学领域对仿真实时性能的要求并不那么严格,因此可以采用分时操作系统(time-sharing operating system, TSOS)作为 RTOS 的替代。本研究提出的实时仿真功能是在 Windows 操作系统下开发的。

图 1 已经指出,实时仿真框架由初始化、执行仿真和曲线绘制 3 个部分构成。仿真内核的高效性使执行仿真耗费的时间非常短,通常在毫秒量级,仿真大部分时间都用于曲线绘制。因此,可以用每次绘制曲线耗费的时间表征实时仿真的性能,绘制时

间越短,界面的刷新率越高,越接近实时的仿真模拟。

曲线的绘制需要横纵坐标数据的支撑,这些数据存储于仿真生成的 csv 文件中。在每次绘制曲线前,都要对 csv 文件进行整体性的全量读取操作(即单线程读取)。然而,随着仿真的进行, csv 文件中存储的数据逐渐增加,文件体积增大使数据读取速度下降,尤其是仿真很长一段时间后,曲线绘制间隔时明显增加,仿真实时性能显著降低。为了解决这个问题,STEPS 内核提供了一个接口用于仿真数据的增量读取,即仅读取当前时刻下的仿真数据,如图 2(a)所示,增量读取方式不涉及读取整个文件等耗时操作,因此在长时间运行过程中仿真的实时性能始终保持较高的水平。除以上 2 种方式外,本研究还采用多线程方式读取 csv 文件,即利用 Python 标准库 threading 创建多个线程,并将 csv 文件进行分区,每个线程负责读取其中一部分数据。由图 2(a)可见,虽然仿真长时间运行后实时性能仍有降低的趋势,但由于多个线程可以同时访问硬盘进行数据读取,较短时间尺度下仿真的实时性能明显优于其他 2 种数据读取方式。

程序运行过程中可能伴有大量数据处理,导致操作系统所带负载激增,影响仿真的实时性能。因此,本研究在不同负载下进行操作系统的实时性能测试,对于 Windows 操作系统,负载率用中央处理器(central processing unit, CPU)和随机存取存储器

(random access memory, RAM) 占用率表征。如图 2(b) 所示,当系统轻载时,仿真程序可调配的系统资源充足,实时性能无显著降低;当系统重载时,较高的 CPU 和 RAM 占用率导致系统响应速度显著降低,造成实时性能下降。此缺陷是 TSOS 固有的,

若要进一步提升仿真的实时性能,可以考虑基于 RTOS 进行实时仿真的开发。此类操作系统的响应速度仅取决于优先级设计,与任务或负载的数量无关,即使系统处于满负荷状态,也会在设定的时间范围内立即响应高优先级事件。

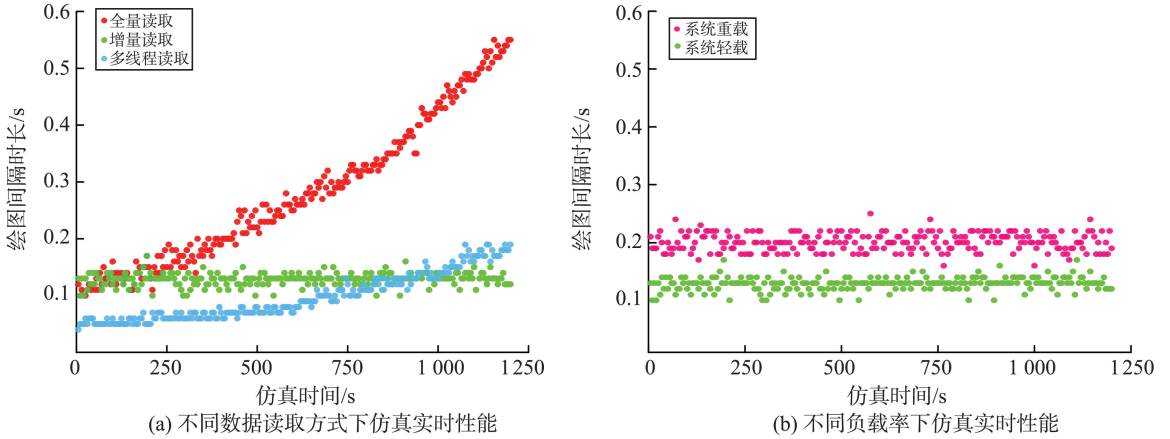


图 2 仿真实时性能评估
Fig.2 Assessment of real-time performance

1.3 图形用户界面开发

为方便学生使用和教学演示,基于 PyQt5 开发了图形用户界面 (graphical user interface, GUI) [19], 如图 3 所示。GUI 主要由信息展示区、主窗口绘图区、小窗口绘图区、操作设置区构成,各个小窗口均

可于主窗口放大显示。通过将按钮类控件的触发信号与 STEPS 中的相关函数进行链接,实现通过点击按键设置与频率相关的扰动和控制措施,如负荷调整、发电机切除、直流闭锁、改变发电机机械功率参考点等。

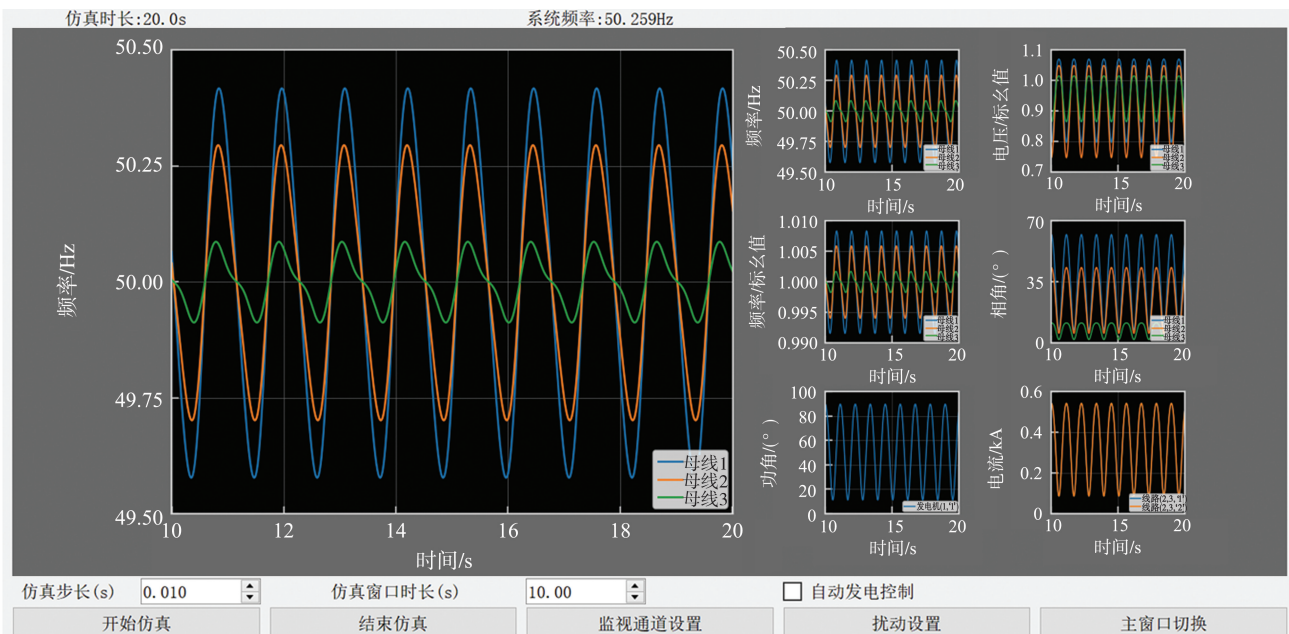


图 3 实时仿真 GUI
Fig.3 GUI of real-time simulation

2 实时调频模拟

电力系统正常运行时,发电机的总有功出力等于总负荷需求,若二者不平衡,会反映为系统频率

的变化[20]。系统频率在变化过程中会经历以下 2 个过程:发电机组的一次调频[21],区域 AGC 的二次调频[22]。由于 STEPS 内核已经支持对频率的一次调整过程进行模拟,因此本章主要讨论区域 AGC 的二次调频实时模拟。

2.1 自动发电控制原理

AGC是电力系统频率控制的重要手段,根据系统频率出现的偏差调节AGC机组的有功功率,平衡电力系统的负荷变化,将因频率偏差引起的区域控制误差 E_{AC} 控制到规定范围内,使频率偏差控制为0^[23]。 E_{AC} 是根据电力系统当前发电、负荷功率、频率等因素形成的偏差^[24],反映了区域内发电与负荷的平衡情况,由联络线交换功率与计划的偏差、系统频率与目标的偏差组成,计算公式为:

$$E_{AC} = (P - P_0) - 10B(f - f_0), \quad (1)$$

式中, P 、 P_0 分别为联络线的实际功率和预定功率, B 为频率偏差系数, f 、 f_0 分别为系统的实际频率与额定频率。

AGC进行频率控制的方式主要有定频率控制(flat frequency control, FFC)、定联络线功率控制(flat tie-line control, FTC)及联络线功率频率偏差控制(tie-line bias control, TBC)3种^[25]。其中,FFC主要应用于独立运行的电力系统, E_{AC} 仅取决于系统频率的偏差,式(1)将改写为:

$$E_{AC} = -10B(f - f_0)。$$

FTC和TBC主要应用于互联系统, E_{AC} 由系统频率偏差和联络线交换功率共同决定。下面将以FFC为例具体讨论AGC实时仿真策略的实现。

2.2 基于FFC的AGC实时仿真策略

AGC实时频率控制过程如图4所示,主要步骤如下。

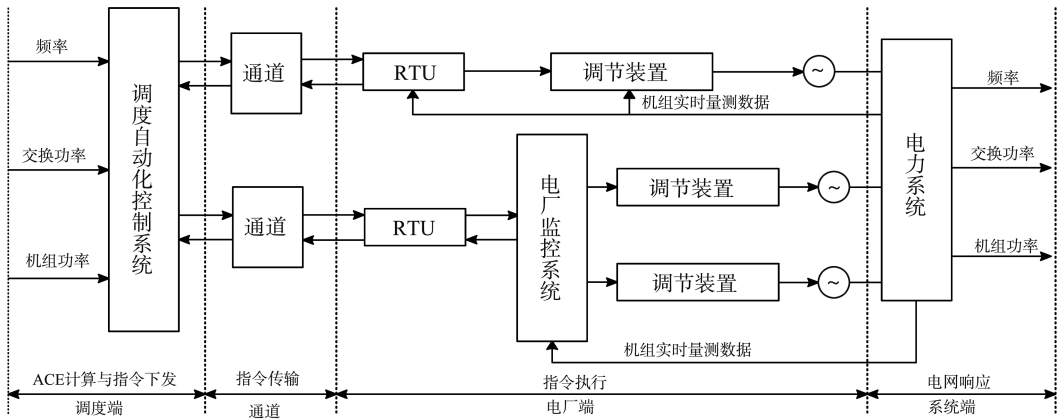


图4 AGC实时频率控制过程
Fig.4 AGC real-time frequency control process

(1) E_{AC} 计算与指令下发。调度中心实时获取系统频率,计算 E_{AC} 并对其进行滤波,剔除一些与实际偏差较大的数据,以避免机组无谓的调节。计算消除 E_{AC} 需要的总调节功率,确定各个电厂的功率调节量,并将指令下发至相应的电厂。

(2) 指令传输。调度中心发出的指令经传输通道和远程终端单元(remote terminal unit, RTU)送到相应的电厂。

(3) 指令执行。电厂接到功率调节量信息后,考虑各种限幅约束,校正机组的期望功率,并以脉冲控制方式输出控制信号,传送给机组的调节装置。机组随即响应,根据控制信号调节功率输出。

(4) 电网响应。机组调节发电功率引起电网响应,包括频率、潮流等相应变化,这些变化信息反馈进入调度自动化控制系统,构成电力系统调频和自动发电的闭环控制。

需要指出的是,AGC实时频率控制的关键在于合理地分配调节功率。目前常用的分配策略有各机组平均分配、按各机组备用容量分配、按各机组调差系数分配。下面将具体介绍几种分配策略的实现。

(1) 各机组平均分配。假设系统中有 n 台发电机组,系统总调节功率为 ΔP_g ,可得每台调频机组承担的有功功率增量

$$\Delta P_{gi} = \frac{\Delta P_g}{n}。 \quad (2)$$

(2) 按各机组备用容量分配。各机组的备用容量分别为 ΔP_{s1} 、 ΔP_{s2} 、 \dots 、 ΔP_{si} 、 \dots 、 ΔP_{sn} ,可得每台调频机组承担的有功功率增量

$$\Delta P_{gi} = \frac{\Delta P_{si}}{\Delta P_s} \Delta P_g, \quad (3)$$

式中, ΔP_s 为机组的总备用容量, $\Delta P_s = \Delta P_{s1} + \dots + \Delta P_{si} + \dots + \Delta P_{sn}$ 。

(3) 按各机组调差系数分配。全系统的有功功率调节方程

$$\begin{cases} \Delta f + K_{g1} \Delta P_{g1} = 0 \\ \Delta f + K_{g2} \Delta P_{g2} = 0 \\ \vdots \\ \Delta f + K_{gi} \Delta P_{gi} = 0 \\ \vdots \\ \Delta f + K_{gn} \Delta P_{gn} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: Δf 为系统频率的偏差量, K_{gi} 为第*i*台调频机组的调差系数。

计及机组总调节功率

$$\Delta P_g = \Delta P_{g1} + \dots + \Delta P_{gi} + \dots + \Delta P_{gn} \quad (5)$$

联立式(4)(5)可得每台调频机组承担的有功功率增量

$$\Delta P_{gi} = \frac{K_{gs}}{K_{gi}} \Delta P_g \quad (6)$$

式中: K_{gs} 为系统的等值调差系数,

$$K_{gs} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{g1}} + \dots + \frac{1}{K_{gi}} + \dots + \frac{1}{K_{gn}} \right)}$$

3 实验案例构建

基于山东电网简化算例,结合电力系统分析课程频率教学的相关内容,构建电力系统实时调频仿

真实验案例,旨在让学生直观地观察电力系统频率随时间的变化,深入理解频率调整的过程,同时引导学生自主进行实验设计和数据分析,提高基本科研素养。

3.1 一次调频实验

山东电网简化算例的网络结构如图5所示,共包含132个节点,其中有39个发电机节点和65个负荷节点,负荷有功功率为58 GW。为展示电力系统一次调频对应的频率动态变化全过程,加深学生对相关理论概念的理解,在现有负荷水平的基础上模拟负荷波动。假设全网负荷每30 s发生一次随机波动,波动大小在1‰~5‰,统计不同大小波动下系统频率的变化和一次调频所用的时间,数据如表1所示。随着负荷变化增大,系统频率的变化和一次调频所用的时间均有所增加,这是因为负荷变化越大,发电机组需要越多的时间调整自身输出功率以及与负荷功率之间的平衡。

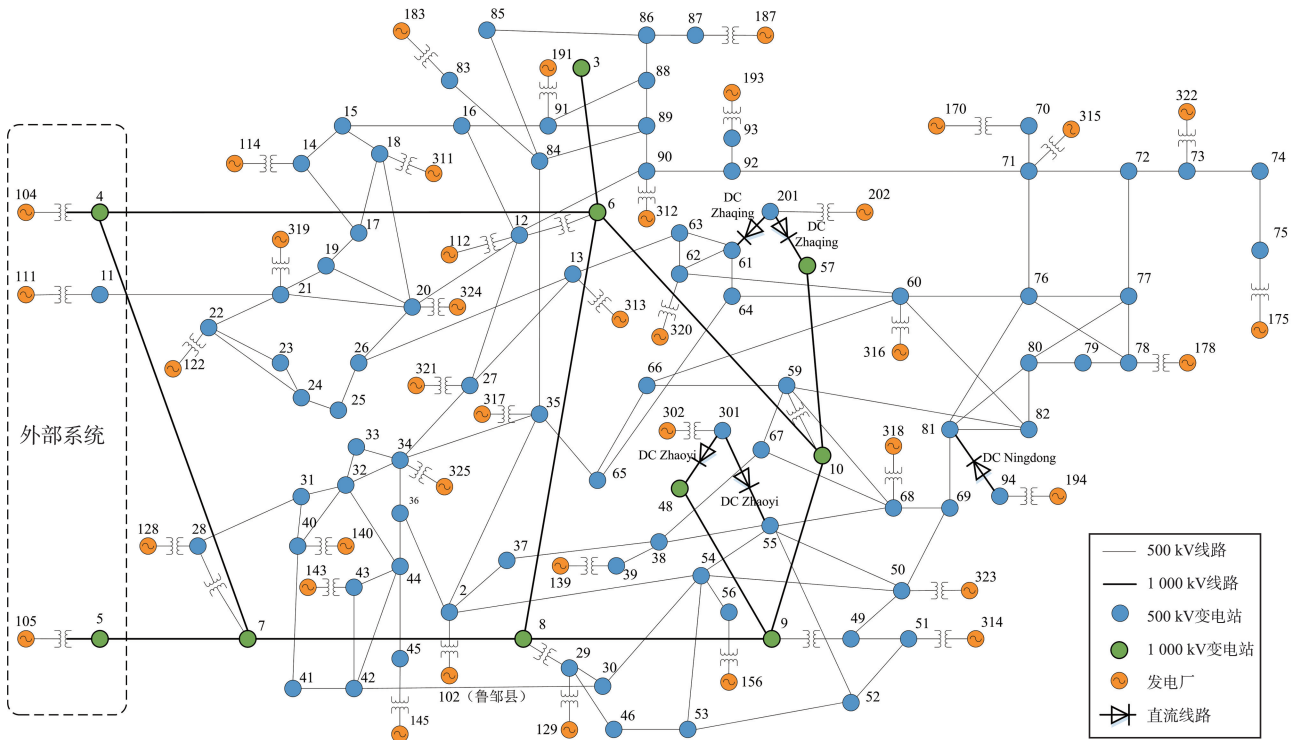


图5 山东电网简化算例网络结构图

Fig.5 Network structure of simplified Shandong power grid

表1 一次调频相关数据

Table 1 Data of primary frequency regulation

负荷变化/%	最大频率变化/Hz	最终频率变化/Hz	一次调频时间/s
1	0.005	0.002	11.8
2	0.010	0.005	12.1
3	0.014	0.007	12.5
4	0.019	0.009	12.8
5	0.024	0.011	13.3

负荷功率波动5‰对应的一次调频过程如图6所示,当整个电力系统的负荷发生5‰的波动时,系统频率将会突减。这个频率变化是由负荷和发电机组之间的功率不平衡引起的。发电机的负频率特性与负荷的正频率特性决定了发电机组有功输出将增加,负荷有功功率将减少,最终二者达到新的平衡状态,此过程称为系统的一次调频过程。

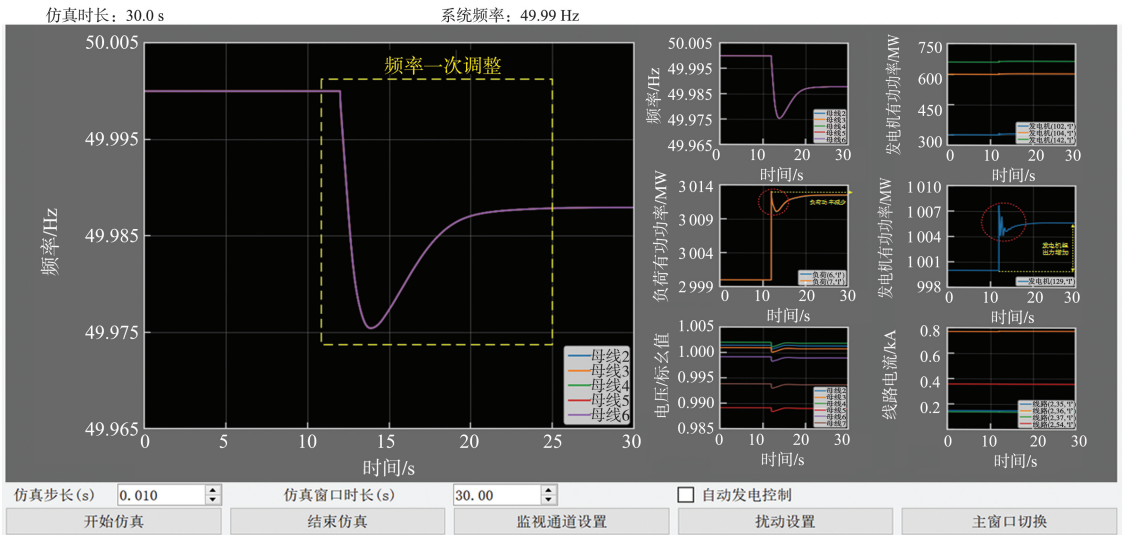


图6 负荷功率波动5‰对应的一次调频过程

Fig.6 Primary frequency regulation process with a 5‰ fluctuation in loads active power

3.2 二次调频实验

对于正常的负荷波动,通过一次调频往往就可以将频率控制在允许范围内,但是对于由大功率负荷投切、发电机组故障切除等原因导致的扰动,通过一次调频往往不能将系统频率控制在允许范围内,这时必须进行二次调频,通过调节 AGC 机组的有功功率平

衡有功差额,将频率偏差控制在允许范围内。

结合 2.2 节中基于 FFC 的 AGC 实时仿真策略,模拟大功率负荷投入系统后的二次调频过程。设定额定系统频率为 50 Hz,二次调频响应的条件为一次调频后系统频率偏差大于 0.1 Hz。不同调节功率分配方式下系统的二次调频相关数据如表 2 所示。

表 2 二次调频相关数据

Table 2 Data of secondary frequency regulation

扰动类型	有功缺额/MW	调频机组	调节功率分配方式	一次调频后频率/Hz	二次调频后频率/Hz	二次调频时间/s
负荷投入	3 000	全网机组	各机组平均分配	49.887	50.0	104
负荷投入	3 000	全网机组	按备用容量分配	49.887	50.0	99
负荷投入	3 000	全网机组	按调差系数分配	49.887	50.0	92

图 7~9 给出了 3 000 MW 负荷投入系统时,不同调节功率分配方式下的二次调频仿真过程。当负荷投入系统时,频率将迅速降低,经一次调频后稳定在 49.887 Hz。由于频率低于允许值 49.9 Hz,

二次调频将在一段时间后响应(此处设为 20 s),以 10 s 为调频周期控制机组增发有功功率,使频率逐渐回升,最终稳定在 50.0 Hz。

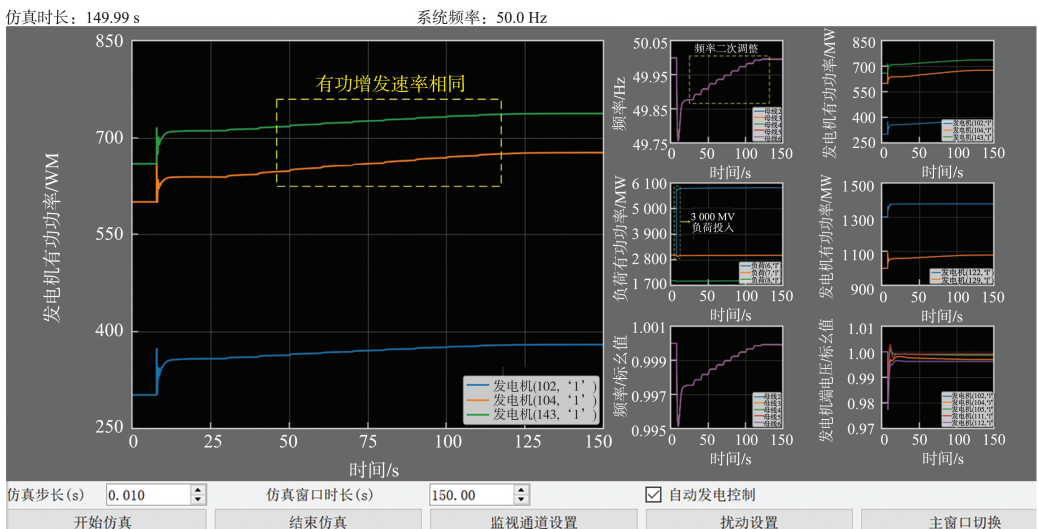


图7 各机组平均分配调节功率

Fig.7 Equal allocation of regulating power among each unit

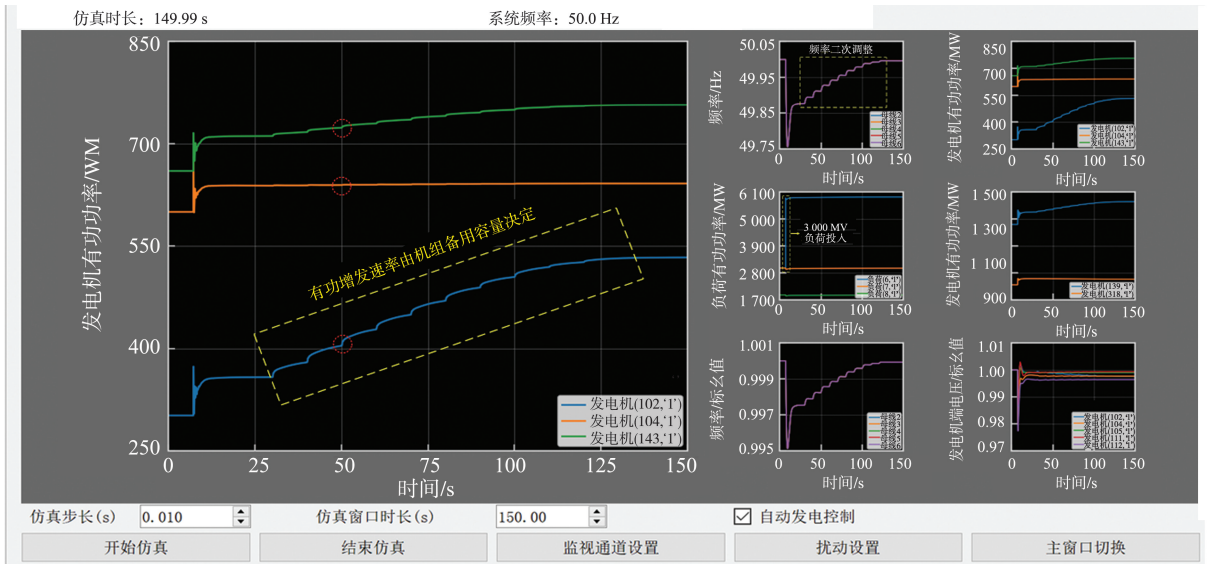


图8 按各机组备用容量分配调节功率

Fig.8 Allocation of regulating power according to the spare capacity of each unit

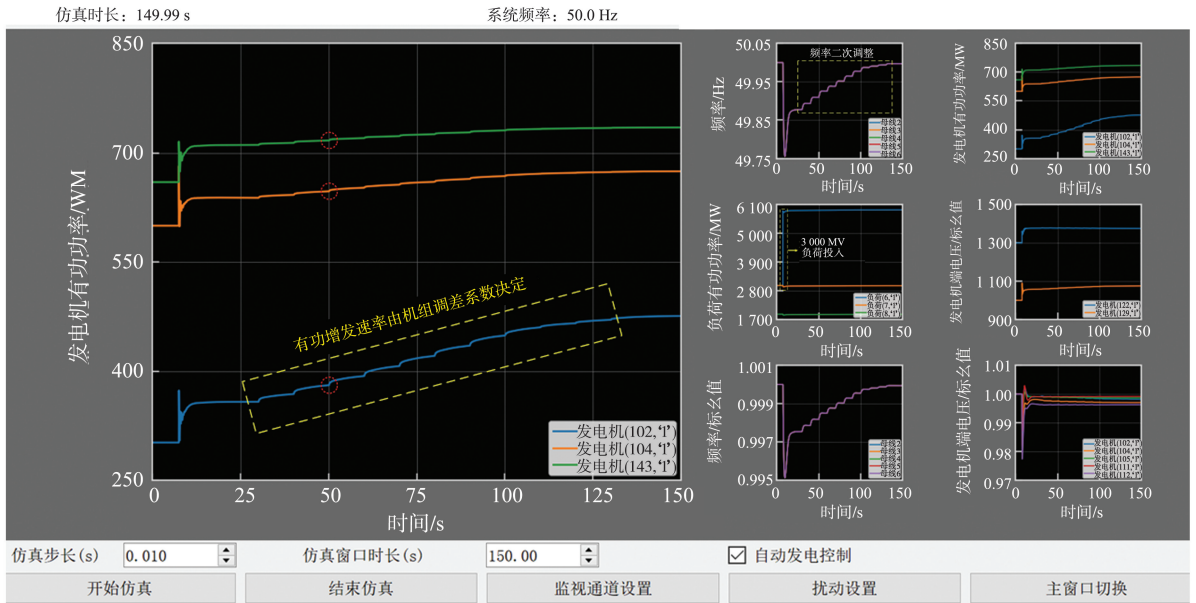


图9 按各机组调差系数分配调节功率

Fig.9 Allocation of regulating power according to the deviation coefficient of each unit

如图7所示,在平均分配调节功率的方式中,发电功率会均匀地分配给所有机组,各机组在频率调整过程中有功增发速率相同。这种功率分配方式简单直观,容易实施,但没能充分发挥部分机组的备用容量和调整速率优势,因此模拟所得的二次调频时间较长。

如图8所示,在按备用容量分配调节功率的方式中,102号发电机组的有功增发速率明显大于其他机组,这是由于该机组位于邹县发电厂(图5),备用容量充足。因此,根据备用容量分配调节功率能够充分发挥该机组的备用容量优势。

按各机组调差系数分配调节功率的二次调频过程如图9所示。102号、104号、143号机组的调速器模型均为 IEEESGO,模型中表征机组调节速率

的参数为 K_1 。3台机组对应的 K_1 分别为 60、20、20,即 102号机组的调差系数是其他机组的 1/3。由图9可见,104号、143号机组调节能力相当,而102号机组调节能力较强。由此可得,机组调差系数越小,即单位调节功率越大,机组的调节能力越强。在此种调节功率分配方式下,部分低调差系数机组能够充分发挥其调节速率的优势,因此模拟所得的二次调频时间相较于其他方式更短。

综合而言,各机组平均分配调节功率的方式简单直观,容易实施,但不能充分发挥部分机组的备用容量和调整速率优势,不能保证频率调整的快速性;按备用容量分配调节功率的方式充分考虑了机组的备用容量差异,确保了在负荷突然增加时有足够的备用容量可供调度;按调差系数分配调节功率

的方式更好地考虑了各机组的实际性能和调节能力差异,使各机组能够充分发挥其调节速率的优势。

3.3 实验小结

通过一次调频实验,学生可以模拟不同大小的负荷波动,观察频率的变化,以深入理解发电机和负荷的频率特性。通过实验,学生还能认识到一次调频的局限性,即一次调频是有差调节,当系统频率超出允许范围时,二次调频就要启动,将频率控制至允许范围内。

通过二次调频实验,学生可以模拟发电机组故障停机、不同规模负荷的突增或突减等扰动。学生需要事先制定合理的调频策略,结合实际情况进行调整和优化,以实现频率的稳定、快速控制。在3.2节中,根据各机组的调差系数分配调节功率的方式可以实现频率调整时间的最小化。然而,对于不同的电力系统,或是同一系统中不同机组参与调频的情况,以频率调整时间为目标的最优调节功率分配方式并不相同。为了更好地模拟实际情况,提供更多的实验选择,设计了发电机独立调控单元,使学生能够根据需要灵活选定参与调频的机组,从而针对不同的调频场景进行实验和优化。譬如学生可以研究并比较不同机组参与调频时的频率调整时间,以探索如何在最短时间内使系统频率恢复稳定。这样的探究有助于学生深入理解调频策略对系统响应的影响,提高他们的问题解决能力和实验设计能力。除此之外,学生还可以考虑从经济最优的角度制定调节功率分配策略,使各个机组的煤耗量最少。这涉及对机组的运行成本、燃料价格及负荷等因素的综合分析和权衡,学生需要建立经济模型,使用优化算法确定最佳功率分配策略,以最大程度地降低整个系统的运行成本。这种开放性的实验设计不仅能够帮助学生理解所学知识 with 概念,更能提升他们的实验能力和创新思维,同时为其他工程学科的教学研究提供新的思路和方法。

4 结束语

针对传统教学模式中缺乏交互的问题,开发了电力系统实时仿真功能,模拟实际电网的AGC控制策略设计了一套实时调频仿真实验案例。通过实施该实验案例,学生能够充分参与频率调整的过程,将理论知识应用于实际情境,探究课程各知识点的联系和影响。实验加深了学生对频率动态过程和关键知识概念的系统性理解,提高了学生的实验设计能力和基本科研素养。

未来的研究方向是进一步将该研究的思路拓

展到其他教学课程中。譬如,在继电保护相关课程方面,可以设计仿真实验模拟各种故障下的保护实时动作过程,帮助学生理解保护设备的工作原理和保护策略的选择。此种交互式的教学模式将为学生提供充分的课堂参与机会,促进学生实践和创新能力的发展。

参考文献:

- [1] 孙秋野, 黄雨佳, 高嘉文. 工科专业课课程思政建设方案:以《电力系统分析》课程为例[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 475-486.
SUN Qiuye, HUANG Yujia, GAO Jiawen. The curriculum ideology and politics construction plan of engineering professional course: taking the course of power system analysis as an example[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 475-486.
- [2] 张靠社, 张欣伟, 宁联辉, 等.《电力系统分析》课程的教学改革和实践[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 85(2): 126-128.
ZHANG Kaoshe, ZHANG Xinwei, NING Lianhui, et al. Reform and practice to the teaching of power system analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 85(2): 126-128.
- [3] 张晓花, 朱陈松, 朱昌平, 等. 电力系统分析课程的实践创新培养模式探索[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(1): 118-121.
ZHANG Xiaohua, ZHU Chensong, ZHU Changping, et al. Innovation and practice mode in power system analysis [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013, 32(1): 118-121.
- [4] 韩学山, 张文. 电力系统工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 孙文杰. 仿真技术在电气工程及其自动化专业教学改革中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(12): 104-107.
SUN Wenjie. Exploration of simulation technology in teaching reform for electrical engineering and automation specialty [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2016, 35(12): 104-107.
- [6] VANFRETTI L, MILANO F. Facilitating constructive alignment in power systems engineering education using free and open-source software[J]. IEEE Transactions on Education, 2012, 55(3): 309-318.
- [7] 张晓花, 马正华, 朱昌平, 等. 从实践教学谈“电力系统自动化”课程的改革[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(7): 355-357.
ZHANG Xiaohua, MA Zhenghua, ZHU Changping, et al. Teaching reform of automation of electric power systems [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2012, 31(7): 355-357.
- [8] 孙正龙, 罗远翔, 杨德友, 等. 电力系统频率一次调整仿真实验项目建设[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(10): 204-210.

- SUN Zhenglong, LUO Yuanxiang, YANG Deyou, et al. Construction of simulation experiment project for power system primary frequency control[J]. *Experimental Technology and Management*, 2021, 38(10): 204-210.
- [9] 李常刚, 尚扬, 张慧, 等. 基于 STEPS 的电力系统分析仿真教学软件开发与实验案例设计[J]. *实验技术与管理*, 2022(7): 170-175.
- LI Changgang, SHANG Yang, ZHANG Hui, et al. Software development and experiments design for teaching of power system analysis based on STEPS[J]. *Experimental Technology and Management*, 2022(7): 170-175.
- [10] ZHANG B D, JIN X L, TU S J, et al. A new FPGA-based real-time digital solver for power system simulation [J]. *Energies*, 2019, 12(24): 4666.
- [11] PALMER E. The use of siemens PTI PSS/E in undergraduate teaching at central Queensland university [C]//2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Brisbane, QLD, Australia; IEEE, 2016: 16485204.
- [12] WU Z X, ZHOU X X. Power system analysis software package (PSASP): an integrated power system analysis tool[C]// Proceedings of the 1998 International Conference on Power System Technology. Beijing, China; IEEE, 1998: 7-11.
- [13] 张宝珍, 张尧. 基于 BPA 的“电力工程基础”课程教学方法[J]. *电气电子教学学报*, 2013, 35(1): 112-114.
- ZHANG Baozhen, ZHANG Yao. Teaching electric engineering fundament course based on BPA software [J]. *Journal of EEE*, 2013, 35(1): 112-114.
- [14] LI C G, WU Y, ZHANG H X, et al. STEPS: a portable dynamic simulation toolkit for electrical power system studies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(4): 3216-3226.
- [15] 李常刚. STEPS [EB/OL]. (2022-04-13) [2023-05-17]. <https://github.com/changgang/steps>.
- [16] 梅林, 孙玲玲, 钟嘉庆, 等. 新工科背景下电力系统综合实验教学改革[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(8): 145-149.
- MEI Lin, SUN Lingling, ZHONG Jiaqing, et al. Reform of electrical power system comprehensive experiments under the background of new engineering [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2021, 40(8): 145-149.
- [17] 舒立鹏, 朱柏飞, 吴晔, 等. 弹炮结合武器一体化火控实时仿真平台的设计与实现[J]. *火炮发射与控制学报*, 2022, 43(6): 32-36.
- SHU Lipeng, ZHU Bofei, WU Ye, et al. Design and implementation of an integrated fire control real-time simulation platform for gun/missile weapons[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2022, 43(6): 32-36.
- [18] ZHU X, ZHANG M, GUO J, et al. Toward a unified executable formal automobile OS kernel and its applications[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2019, 68(3): 1117-1133.
- [19] 刘志刚, 谢志林, 江晖, 等. 基于 Qt 的 LAMOST 光纤定位软件界面设计及开发[J]. *中国科学技术大学学报*, 2011, 41(1): 50-55.
- LIU Zhigang, XIE Zhilin, JIANG Hui, et al. Design and development of LAMOST fiber positioning software interface based on Qt[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2011, 41(1): 50-55.
- [20] 张恒旭, 曹永吉, 张怡, 等. 电力系统频率动态行为行变与分析方法需求综述[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2021, 51(5): 42-52.
- ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, et al. Review of frequency dynamic behavior evolution and analysis method requirements of power system[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(5): 42-52.
- [21] 李兆伟, 张恒旭, 曹永吉, 等. 计及锅炉热动态影响的机组一次调频能力评估方法[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2022, 52(5): 35-43.
- LI Zhaowei, ZHANG Hengxu, CAO Yongji, et al. Assessment scheme for primary frequency regulation capability considering boiler thermal dynamic[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2022, 52(5): 35-43.
- [22] REBELLO E, WASTON D, RODGERS M. Performance analysis of a 10 MW wind farm in providing secondary frequency regulation: experimental aspects [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4): 3090-3097.
- [23] 宋新立, 王成山, 仲悟之, 等. 电力系统全过程动态仿真中的自动发电控制模型[J]. *电网技术*, 2013, 37(12): 3439-3444.
- SONG Xinli, WANG Chengshan, ZHONG Wuzhi, et al. Modeling of automatic generation control for power system transient, medium-term and long-term stabilities simulations [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(12): 3439-3444.
- [24] 周毅, 钱学东. 华东电网动态区域控制误差应用分析[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(8): 106-110.
- ZHOU Yi, QIAN Xuedong. Applications analysis of dynamic ACE in east China power grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(8): 106-110.
- [25] 颜伟, 赵瑞锋, 赵霞, 等. 自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(8): 149-155.
- YAN Wei, ZHAO Ruifeng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control [J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(8): 149-155.