

中国地质大学（武汉）自动化学院 大学生创新训练计划项目结题报告

基于粒子群算法的工业负荷调频 协调控制策略设计

项目负责人： 董佳颖

项目所在学院： 自动化学院

第一指导老师： 张传科

二〇二五年五月

一、项目概述

1.1 项目简介

本项目旨在研究和设计基于工业负荷的电力系统频率调控策略，以应对可再生能源渗透率增加和用户用电需求增长带来的挑战。项目构建电解铝和电热锅炉两种高耗能工业负荷参与电网一次调频模型，模拟系统频率调控过程，设计最优经济效益的协同调控策略。并在上述基础上开展二次调频控制策略研究，利用粒子群算法优化控制器参数以提升系统调频性能，促进能源消费结构优化，推动电力系统智能化和可持续发展。

1.2 项目研究背景与意义

电力系统的频率稳定性是保证电网可靠运行的关键因素之一，特别是在面对可再生能源不断提高的渗透率以及社会日益增长的用电需求时。随着太阳能、风电等新能源在电力领域的大规模应用，电力系统的间歇性和随机性显著增强，传统发电机组因爬坡速率较慢，在快速响应负荷变化方面渐显乏力，难以满足日益增长的电力系统调频需求。与此同时，储能系统虽能缓解可再生能源波动，但投资和运营成本高昂、可调容量有限等问题，限制了其大规模应用。

在这样的背景下，需求响应技术应运而生，工业负荷因其具备可调容量大、便于控制和良好的通信条件等优势，成为优化电力系统频率调节的重要资源^[1]。其在电力系统调频中的主动参与对于提升系统整体稳定性及应对供需变化具有至关重要的作用。首先，工业负荷的有效管理和调整能显著平衡电网的波动，从而减少频率偏差，增强电力系统的频率稳定性；其次，工业负荷的调频反应能够针对性地调整电力系统的负荷峰值，有效执行削峰填谷的策略，减轻在电力高需求时段对系统的压力^[2]；此外，随着风能、太阳能等可再生能源在电力系统中占比逐渐增加，其固有的间歇性和不确定性对系统稳定性构成挑战。工业负荷的灵活调整不仅有助于提升电力系统对这类能源波动的适应能力，还能促进清洁能源的更广泛应用，推动能源消费结构的优化。

为了充分发挥工业负荷在电力系统中的潜力，基于需求响应的工业负荷协调频率控制策略的设计和实施成为了当前研究的热点。这种策略通过调整终端用户的用电行为，提高电力系统的灵活性和韧性，实现供需之间的有效协调。这不仅有助于电力系统应对面临的挑战，也为未来电力系统的智能化和可持续发展提供了新的解决思路。通过这些措施，可以增强电力系统的抗干扰能力，提升能源资源的使用效率，推动电力系统的经济效益与环境效益达到双赢，从而支持电力系统的长远发展与现代化转型。

1.3 研究内容

针对不同类型的高耗能工艺流程，建立电解铝、电热锅炉两种工业负荷的动态响应模型，考虑电热锅炉频率响应策略及电解铝动态响应模型，设计调频协调控制器。利用 MATLAB/Simulink 建立负荷频率控制(Load Frequency Control, LFC)模型、LFC 与两种工业负荷协调控制模型，证明协调控制策略的优越性。具体研究内容如下：

(1) 电解铝、电热锅炉两种不同类型高耗能负荷的可控特性建模

考虑不同类型高耗能负荷的生产工艺流程与运行特性，建立电解铝及电热锅炉两种典型工业负荷物理模型。设计高耗能电解铝负荷的负荷控制器以及电热锅炉负荷的集群控制策略，构建电解铝动态响应模型及电热锅炉频率响应模型，共同参与电力系统一次调频。

(2) 工业负荷参与电网互动的综合评级方法与一次调频协同控制策略设计

针对两种工业负荷协同参与电力系统调频，同时考虑调频的经济成本、控制成本及可调容量，提出工业负荷参与电网互动的综合评级方法；设计调频协调控制器，仿真验证协调控制策略的优越性。

(3) 基于粒子群算法的负荷频率控制参数优化设计

基于上述工业负荷参与电网一次调频的协调控制策略，为了消除一次调频造成不可避免的稳态误差，构建工业负荷参与电网二次调频模型。利用粒子群优化算法，以 ITAE 指标作为适应度函数，整定 PI 控制器增益，通过对比体现协调控制策略下二次调频调频性能的优越性。

(4) 工业负荷参与调频仿真实验与分析

在 Simulink 中设计需求响应下的两种工业负荷参与调频模型，搭建电解铝、电热锅炉以及 LFC 模型并仿真，给定合适参数，分别分析 LFC、LFC 与电解铝、LFC 与电热锅炉以及 LFC 与两种工业负荷协调控制四种不同模型的调频效果。

二、国内外研究现状与述评

目前，基于需求响应的负荷参与电力系统调频的研究已经有了相对比较成熟的研究成果。国内外学者对基于需求响应的负荷参与电力系统调频控制器以及控制策略设计问题进行了大量的研究工作，尤其集中于商业、居民负荷在电力系统频率调节中的应用。同时，二者参与调频的研究经验也对工业负荷参与电力系统一次调频研究具有重要意义。具体实例有供暖、空调（HVAC）系统、电动汽车、热泵等。

文献[3]研究了开发负荷控制策略以提供负荷跟踪和调节的理论前提和可能性，展示了通过调节温控负荷的温度设定来控制的有效性。文献[4]和文献[5]

通过现场测试展示了商业建筑中的 HVAC 负荷在协助系统频率调节方面的潜力。文献[6]建立了硬件在环仿真平台，用于评估可调速电热泵在频率调节中的有效性。文献[7]提出了利用电动汽车的集体储能特性来稳定电网线路功率波动的策略。文献[8]提出了一种分布式直接负荷控制方法，实现了大规模住宅商业负荷的聚合。基于需求响应的电力系统调频控制策略研究，包括可中断负荷调节、频率阈值控制和温控负荷动态关系。文献[9]中，刘文许等人参照发电机组的调频方式，根据调差系数求得可中断负荷调整量，采用与传统发电机组一次调频和 AGC 调节相似的控制策略，使电负荷参与到系统频率调节中。文献[10]中，Xu 等人提出需求响应对电力系统调频备用的提升作用，设计了一种通过检测系统频率是否低于一定频率阈值来控制参与需求响应的电器设备的开关状态的新方法。文献[11]中，Biegel 等人提出一种针对开关型需求侧电器设备参与一次调频的控制策略。需求侧电器设备能够自动测量电力系统的频率，并根据测得的频率改变其开关状态。文献[12]中，董丹丹研究了基于热力学特性方程，通过建立频率与电热水器温度修正量之间的动态关系，控制电热水器参与电力系统频率稳定控制。

工业负荷参与电力系统调频已经逐渐成为电力系统领域研究热点之一。高耗能工业负荷具有装机容量大、易于集中控制等优点，经过低成本改造后具有巨大的调节潜力，因此对于工业负荷参与电力系统调频的问题值得更加深入的研究。与商业或住宅负荷不同，具有热储能特性的高能耗工业负荷（如电解铝负荷和电热锅炉负荷）为电力系统频率控制提供了独特的机会。

文献[13]研究了通过手动控制电压控制变压器比率在分钟时间尺度上调节 ASLs 的频率控制。文献[14]和文献[15]表明通过操纵发电机的励磁电压或 ASL 的饱和反应器，可以稳定高风电渗透的孤立电力系统的运行。文献[16]提出了关于分布式热储能电锅炉的峰值负荷调节和频率调节的深度学习控制策略，以帮助调节峰值负荷和频率。文献[17]中 Pourmousavi 等人提出了一种基于模糊控制的快速频率调节方案，EHBLs 参与电网频率响应。

三、负荷频率控制模型与工业负荷模型建模

3.1 负荷频率控制模型构建

电力系统频率是电力系统稳定的重要指标之一，频率调控能够实现频率稳定以确保电力系统的稳定运行。系统频率跟电网的有功功率平衡情况密切相关：当电网的某处出现有功功率需求的变化，有功功率的不平衡部分将由发电机组转子的动能进行补偿，从而系统的频率就会马上做出反应，可能会偏离并超出系统规定的允许变化范围，此时就需要投入控制作用，使频率恢复到允许的范围内。LFC 是其中重要的控制手段，它利用检测到的电网频率变化和设计的控制器产

生控制信号，并发送到电厂的指定发电机组，调节其发电输出功率以满足负荷变化的需求，从而使频率恢复到规定值^[18]。简化的基于 LFC 的电网频率调节系统如图 3.1 所示。

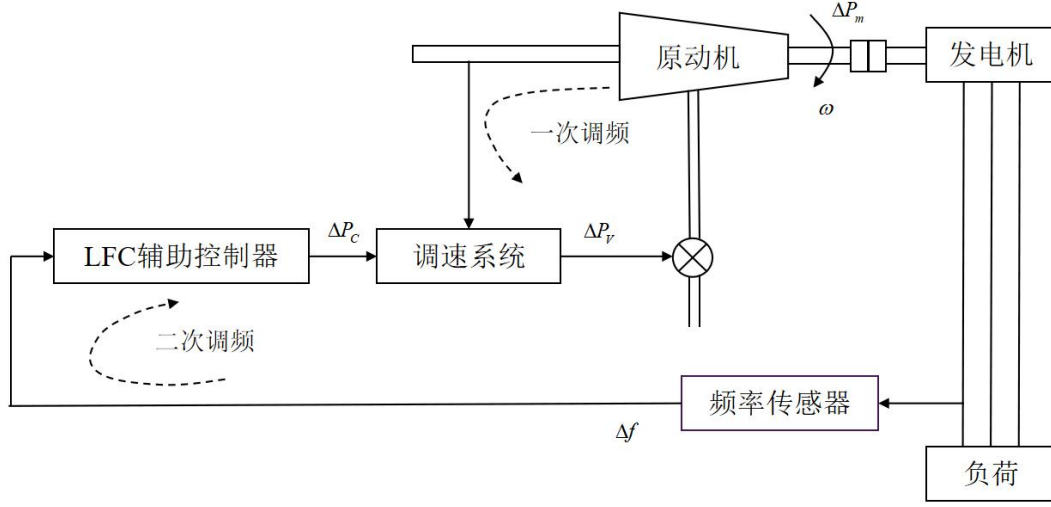


图 3.1 基于 LFC 的电网频率调节系统

要研究系统的频率调控过程，首先要了解各部分的工作原理，理解系统中各种组件之间的动态交互关系，用简化模型表示出各部分与频率相关的主要特性，建立单区域 LFC 模型，用于后续对 LFC 的分析与控制。由图 3.1 可知，LFC 模型主要包括发电机-负荷、原动机、调速系统、LFC 辅助控制器等，各部分的简化传递函数模型如下。

（1）发电机-负荷模型：该部分主要描述发电机输入端的机械功率变化、电网负荷变化以及相应频率偏差量三者的关系：

$$\Delta P_m(s) - \Delta P_d(s) = Ms\Delta f(s) + D\Delta f(s) \quad (3-1)$$

其中， ΔP_m 是机械功率变化量， ΔP_d 是电网负荷变化量， Δf 为系统频率变化量， M 和 D 分别为发电机的转动惯量和阻尼系数。

（2）原动机模型：原动机用于产生机械功率进而带动发电机组发电，针对常用的非再热式汽轮机，其传递函数为：

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{T_T s + 1} \quad (3-2)$$

其中， T_T 为汽轮机的惯性时间常数， ΔP_v 为汽门的控制阀开度变化量。

（3）调速系统模型：调速器具有负荷增加时速度下降的特性，用于改变原动机进汽量，可实现频率的一次调节。其频域关系式可表示为：

$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1 + T_G s} \Delta P_c(s) - \frac{1}{1 + T_G s} \cdot \frac{1}{R} \Delta f(s) \quad (3-3)$$

其中， T_G 为调速器的惯性时间常数， ΔP_c 为系统的控制信号，即负荷参考设定值， R 为调速器的速度跌落系数。

(4) 辅助 LFC 控制器模型：仅利用调速器的速度下降特性进行频率的一次调节仅能使频率达到新的稳态，而无法消除偏差，为此需增加辅助控制器进行二次调频，即 LFC。实际电网的 LFC 大多采用 PI / PID 型控制器，以 PI 控制器为例，其传递函数模型为：

$$G_k(s) = \frac{\Delta P_c(s)}{ACE(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (3-4)$$

其中， K_p ， K_I 分别为控制器的比例增益和积分增益， ΔP_c 作为控制器输出， ACE 为区域控制误差(AreaControlError, ACE)，对于单区域 LFC，它可定义为：

$$ACE(s) = \beta \Delta f(s) \quad (3-5)$$

其中， β 为频率偏差因子，由如下公式计算：

$$\beta = \frac{1}{R} + D \quad (3-6)$$

结合图 3.1 的示意图和式(3-1)~式(3-6)的相关传递函数可得，简化的单区域 LFC 控制结构框图如图 3.2 所示^[18]：

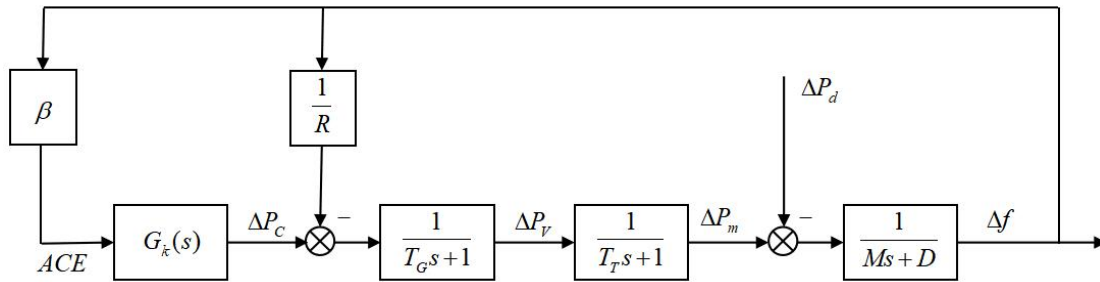


图 3.2 单区域 LFC 控制结构图

3.2 高耗能电解铝负荷动态响应特性建模

3.2.1 电解铝负荷动态响应模型

电解铝槽串联放置，并由大直流电加热。铝冶炼负荷（ASL）相当于反电动势 E 和电阻 R 的串联，其等效电路如图 3.3 所示。

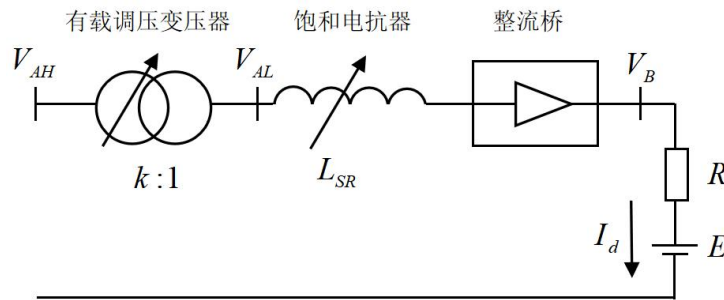


图 3.3 电解铝负荷等效电路

在图 3.3 中, V_{AH} 为电解铝负荷交流侧母线电压; V_B 为直流侧母线电压; I_d 为直流电流。 P_{ASL} 为负荷的有功功率, 它是 V_B 的函数, 表达式为:

$$P_{ASL} = V_B I_d = \frac{V_B (V_B - E)}{R} \quad (3-7)$$

电解铝负荷的直流侧母线电压 V_B 可以通过其交流侧母线电压 V_{AH} 进行调节。同时, V_{AH} 可以通过火发电机组的端电压 V_G 进行调整。基于这一特性, 发电机端电压变化量 ΔV_G 与相应的负荷需求变化量 ΔP_{ASL} 之间的相关性可量化如下:

$$\Delta P_{ASL} = K_{ASL} \Delta V_G \quad (3-8)$$

其中, K_{ASL} 是电解铝负荷的综合比率系数。

对发电机端电压施加阶跃信号以量化电解铝负荷的动态响应, 可将电解铝负荷建模为一阶方程, 其参数可通过最小二乘拟合法进行估计。将该方程改写为传递函数的形式, 可得:

$$\Delta P_{ASL}(s) = \frac{K_{ASL}}{1 + T_{ASL}s} \Delta f(s) \quad (3-9)$$

其中, T_{ASL} 为电解铝负荷的时间常数^[19]。

3.2.2 电解铝负荷控制器及参数设计

高耗能电解铝负荷长期频繁参与系统频率调节将对高耗能电解铝负荷生产效率产生一定影响, 因此, 根据电解铝负荷与火发电机组的功率分配关系, 设计了电解铝负荷控制器对其控制范围进行限制。如图 3.4 所示, 包括比例放大环节、隔直环节以及死区和限幅环节。

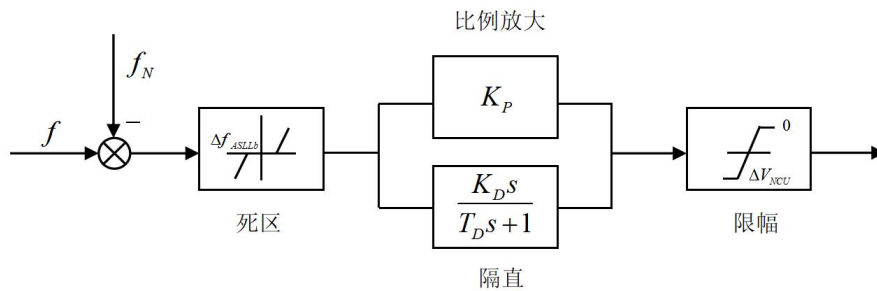


图 3.4 高耗能电解铝负荷控制器结构图

(1) 比例放大环节

比例放大环节的功能类似于火电机组一次调频系数, 依据频率偏差快速响应, 与火电机组一次调频共同用于稳态频率控制。通过负荷控制器, 可以提高系统一次调频备用容量。

火电机组一次调频功率调节量与电力系统频率的变化量满足如下关系:

$$\Delta f_{reg} = f_{nom} - f_{reg} = R_G \Delta P_{G_{reg}} \cdot \frac{f_N}{P_{GN}} \quad (3-10)$$

其中, f_N 为额定频率, f_{reg} 为一次调频后系统频率稳态值, P_{GN} 为发电机组额定功率, R_G 为火电机组调差系数。

电解铝负荷功率调节量与系统频率变化量的关系满足下式:

$$f_{nom} - \Delta f_{ASLLb} - f_{reg} = R_{ASL} \Delta P_{ASLreg} \cdot \frac{f_N}{P_{ASLN}} \quad (3-11)$$

其中, Δf_{ASLLb} 为负荷控制器死区范围, P_{ASLN} 为电解铝负荷额定功率, R_{ASL} 为电解铝负荷等效调差系数。

系统产生的功率扰动量 ΔP_L 由负荷调节 ΔP_{ASLreg} 和火电机组一次调频调节量 ΔP_{GREG} 共同承担:

$$\Delta P_L = \Delta P_{ASLreg} + \Delta P_{GREG} \quad (3-12)$$

由式(3-10)至式(3-12)求解得电解铝负荷的等效调差系数为:

$$R_{ASL} = \frac{P_{ASLN} R_G \Delta P_{GREG} f_N - P_{ASLN} \Delta f_{ASLLb} P_{GN}}{\Delta P_L P_{ASLN} P_{GN} - \Delta P_{GREG} P_{GN} f_N} \quad (3-13)$$

系统频率偏差与发电机端电压变化量的关系可表示为:

$$\Delta f_{reg} - \Delta f_{ASLLb} = \frac{V_G}{K_p} = R_{ASL} \Delta P_{ASLreg} \cdot \frac{f_N}{P_{ASLN}} \quad (3-14)$$

由式(3-8)、式(3-13)和式(3-14)可得比例放大系数:

$$K_p = \frac{P_{ASLN}}{R_{ASL} f_N K_{ASL}} \quad (3-15)$$

(2) 隔直环节

当系统出现紧急情况导致频率剧烈变化时,隔直环节的积分特性可累积频率偏差信息,使 ASL 迅速响应。它能加快系统频率的恢复速度,减少频率波动幅度与最大频率偏移量。同时,隔直环节呈现高通滤波特性,在系统频率骤降时可使 ASL 快速增加功率输出,弥补功率缺额,防止系统频率过度下降。

隔直环节的参数 T_D 代表高通滤波作用,由工程实践经验通常选择在 6 至 7 秒之间。 K_D 为隔直环节的比例常数,为使得系统最大频率偏移量维持在规定的范围内,通常取值 1-2。

(3) 死区和限幅环节

孤立型工业电网可容许的频率偏差在 $\pm 0.2\text{Hz}$ 的范围内,因此将该值设置为电解铝负荷控制器的死区范围。死区环节实现对负荷控制器的闭锁,当系统处于正常运行情况下时,系统频率偏差较小,死区环节闭锁负荷控制器仅由火电机组一次调频进行调节。限幅环节限制负荷控制器的输出大小,由于整流桥容量限制,不考虑电解铝负荷的上调能力,因此限幅环节向上最大输出为零^[19]。

高耗能电解铝负荷参与电网一次调频的系统结构图如图 3.5 所示。

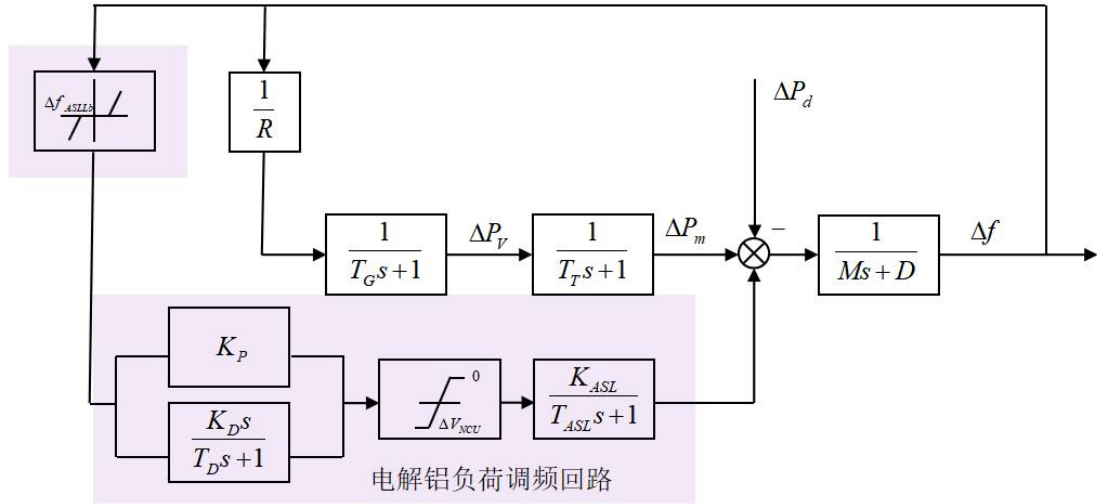


图 3.5 电解铝负荷参与电网一次调频结构图

3.3 电热锅炉负荷模型构建

3.3.1 电热锅炉负荷数学模型

电热锅炉是一种高功率的调节设备,可通过调节电阻式电热管的开关或电极的深度来控制加热功率。加热系统所消耗的加热功率主要分为三个关键能量转化方向:一是改变锅体内部水温的能量输入;二是满足供暖需求的能量输出;三是蓄热罐储存热量以备后用的能量。电热锅炉的热平衡微分方程为:

$$aPdt = cmdT + m_{th}dTh + W_{heat}dt \quad (3-16)$$

其中, a 表示电热锅炉的加热效率系数; P 表示锅炉加热功率; t 表示时间; c 表示卡到焦耳的单位转换系数; m 表示加热环节水体质量; T 表示水体水温平均值; m_{th} 表示蓄热罐的水质量; Th 表示蓄热罐的水焓; W_{heat} 表示供暖负荷。

热水温度是电热锅炉运行的主要控制参数。电热锅炉的出水温度和回水温度保持在正常范围内是电热锅炉能够稳定运行的前提。室外温度会改变出水温度,出水温度的正常范围可由下面的经验公式确定:

$$T_{high} = \begin{cases} 95^{\circ}C & T_w \leq -10^{\circ}C \\ 85^{\circ}C - T_w & -10^{\circ}C \leq T_w \leq -15^{\circ}C \end{cases} \quad (3-17)$$

$$T_{low} = \begin{cases} 75^{\circ}C & T_w \leq -10^{\circ}C \\ 65^{\circ}C - T_w & -10^{\circ}C \leq T_w \leq -15^{\circ}C \end{cases}$$

其中, T_w 表示室外气温, T_{high} 表示出水最高温度, T_{low} 表示出水最低温度。

供暖所需的能量和储存的热能的总量取决于加热环节中锅炉出水温度与回水温度之间的差异:

$$m_{th}dTh + W_{heat}dt = cu(T_{out} - T_{in})dt \quad (3-18)$$

其中, T_{out} 表示出水温度, T_{in} 表示回水温度。

锅炉水体温度也影响着加热系统的加热功率。电热锅炉加热环节的水温热平衡方程式如下所示：

$$cm \frac{dT}{dt} = \alpha P - cu(T_{out} - T_{in}) \quad (3-18)$$

$$T = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \quad (3-19)$$

水温方程的增量方程为：

$$\begin{cases} cm \frac{d(T_{out0} + \Delta T_{out} + T_{in})/2}{dt} = \alpha(P_0 + \Delta P) - cu(T_{out0} + \Delta T_{out} - T_{in}) \\ cm \frac{d(T_{out0} + \Delta T_{out} + T_{in} + \Delta T_{in})/2}{dt} = \alpha P_0 - cu(T_{out0} + \Delta T_{out} - (T_{in} + \Delta T_{in})) \end{cases} \quad (3-20)$$

其中， ΔT_{out} 表示出水温度增量变化； ΔT_{in} 表示回水温度增量变化； P_0 表示初始状态的加热功率； T_{out0} 表示初始状态的锅炉加热环节出水温度； ΔP 表示加热功率增量变化^[20]。

3.3.2 面向一次调频的电热锅炉集群控制策略

对于调度中心而言，准确掌握电热锅炉负荷的可调容量与响应潜力，对优化电网调控策略意义重大。电热锅炉正常运行的关键在于其出水温度和回水温度维持在合理范围，其中出水温度是基本运行模式的关键参数，过高或过低都会影响供暖效果。考虑到在较短的调频时间尺度内，回水温度变化相对缓慢，可近似忽略其影响。同时，当系统频率发生扰动时，为防止电热锅炉负荷一次性过度投切对系统造成二次伤害，引入频率阈值与优化排序概念，对电热锅炉的响应潜力进行排序，为调度系统提供决策参考。

将热平衡方程转化为状态空间方程，并运用梯形公式求解，最终推导出电热锅炉上调容量和下调容量的计算公式：

$$\begin{cases} \Delta P_{\max,down} = \frac{cm \frac{T_{\min} - T_0}{t_0} + cu(T_{\min} + T_0 - 2T_{in})}{2a} - \frac{cu(T_0 - T_{in})}{a} \\ \Delta P_{\max,up} = \frac{cu(T_0 - T_{in})}{a} - \frac{cm \frac{T_{\max} - T_0}{t_0} + cu(T_{\max} + T - 2T_{in})}{2a} \end{cases} \quad (3-21)$$

其中， $\Delta P_{\max,down}$ 表示最大下调容量， $\Delta P_{\max,up}$ 表示最大上调容量， T_0 为稳态运行时锅炉水体温度初始值， t_0 为响应时间。

在给定的响应时间内，不同电热锅炉的响应潜力与当前水体温度和出水上下限的差值紧密相关。基于此，分别定义上调阈 $D_{i,up}$ 和下调阈 $D_{i,down}$ ：

$$D_{i,up} = T_{\max,i} - T_i \quad (3-22)$$

$$D_{i,down} = T_i - T_{\min,i} \quad (3-23)$$

上调阈和下调阈反映了电热锅炉 i 的可调度潜力。由于区域内各电热锅炉的初始水体温度、出水温度上下限存在差异,不同电锅炉的可调度潜力也各不相同。

设计频率阈值作为判断电热锅炉负荷是否参与调频的准则,根据电热锅炉的上下调阈定义不同的频率阈值:

$$\begin{aligned} f_{set_i,up} &= 50 + (1 - \frac{D_{i,up}}{T_{max,i} - T_{min,i}}) \Delta f > df_\varepsilon \\ f_{set_i,down} &= 50 + (1 - \frac{D_{i,down}}{T_{max,i} - T_{min,i}}) \Delta f < -df_\varepsilon \end{aligned} \quad (3-24)$$

其中, df_ε 代表频率死区。

当系统频率超出阈值 $f_{set_i,up}$ 时,锅炉加热功率在一段时间内以最大上调功率值 $P_{max,up}$ 运行;当系统频率低于阈值 $f_{set_i,down}$ 时,锅炉加热功率在一段时间内以最大下调功率值 $P_{max,down}$ 运行^[20]。

电热锅炉负荷参与电网一次调频的系统结构图如图 3.6。

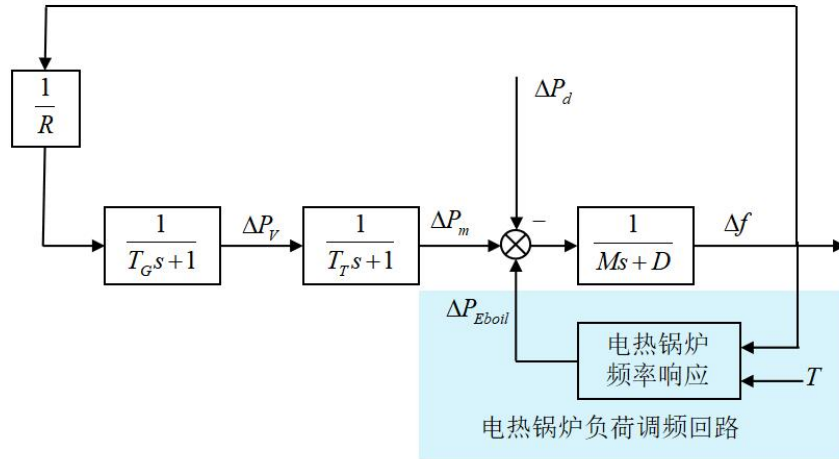


图 3.6 电热锅炉负荷参与电网一次调频结构图

四、工业负荷参与电网互动的综合评级方法与一次调频协同控制策略设计

4.1 工业负荷协同参与电网调频的评价指标体系

为使高耗能电解铝负荷与电热锅炉能够高效的协同参与电网调频,需要设计需求响应下多工业负荷协同参与电网协调控制评价指标,并构建协调控制器来实现这两种工业负荷互补作用后参与电网实现频率调控。

鉴于高耗能工业负荷参与电网互动响应带来的资源优化配置与经济效益,可划分评估体系为潜力评估和经济性能评价两个关键部分。通过开展潜力评估,电

网能够预先判断各类可调节工业负荷的响应能力，在下达控制指令时，能够更合理地分配调节容量。经济性能评价可描绘出工业负荷参与调控过程中的成本与收益状况，为相关企业和电网运营方提供经济层面的参考依据。具体的指标体系如图 4.1 所示。

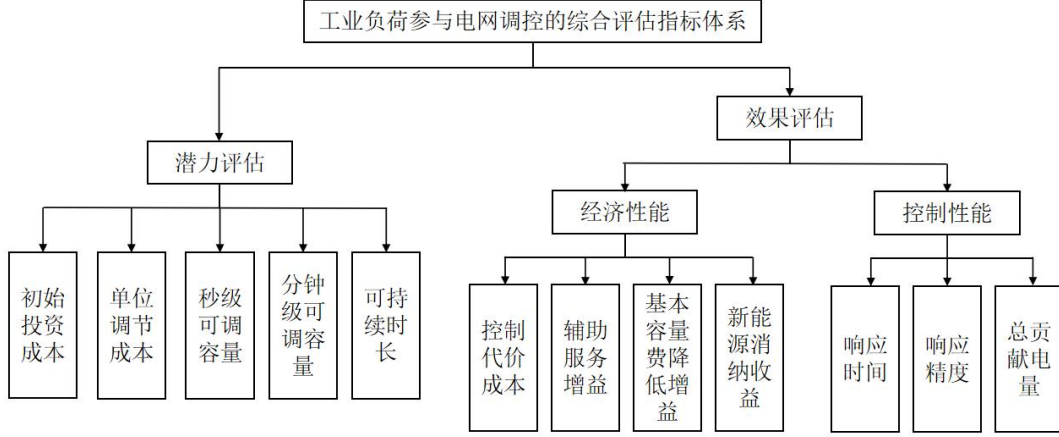


图 4.1 综合评价指标体系

(1) 初始投资成本

工业负荷实现与电网实时互动是途径是依靠在主要用电设备上加装附加控制终端来进行辅助控制。为使工业负荷拥有快速响应电网指令的能力，需要对这些附加控制终端进行投资。其投资成本表示为：

$$C_{1, invest} = F_{ncu,1} N_{ncu,1} + F_{line,1} D_{line,1} \quad (4-1)$$

其中， $F_{ncu,1}$ 为单个控制终端设备投资成本； $N_{ncu,1}$ 为安装设备个数； $F_{line,1}$ 为每千米通信电缆铺设成本； $D_{line,1}$ 为设备距离控制子站距离。

(2) 单位调节成本

单位调节成本用于衡量部署控制终端后，每兆瓦可调节容量所需的投资成本指标。该指标数值越低，表明对应的工业企业在参与电网互动响应的投资方面具有更高的性价比与潜在价值。其计算公式为：

$$C = \frac{C_{1,invest}}{\Delta P_{1,ncu}} \quad (4-2)$$

其中， $\Delta P_{1,ncu}$ 表示在开发终端设备后，工业企业所拥有的可调节容量。

(3) 秒级可调节容量

该指标表征工业企业安装控制终端后，在秒级时间尺度内能够响应电网调频需求的可调节功率容量。如下式所示：

$$P_{sec} = K_{ncu,sec} P_{invest} \quad (4-3)$$

其中， $K_{ncu,sec}$ 表示控制终端设置的可调节系数； P_{invest} 表示由控制终端所控制的用电功率。

(4) 分钟级可调节容量

用于衡量在分钟时间尺度内，安装了控制终端的主要生产用电设备，以及其他可启停设备，能够响应电网调频需求的功率调节总量。其计算公式如下所示：

$$P_{\min} = K_{ncu,\min} P_{invest} + \sum P_{others} \quad (4-4)$$

其中， $K_{ncu,\min}$ 表示工业负荷参与电网调频时控制终端设置的可调节系数，考虑到蓄热型负荷在一段时间运行后会产生消极影响（如电解槽凝槽），通常 $K_{ncu,\min}$ 会小于 $K_{ncu,\sec}$ ； $\sum P_{others}$ 表示工业企业中参与时可启停设备的容量总和。

（5）控制代价成本

控制代价可分为向上调节代价与向下调节代价。向下调节时，主要的经济损失源于生产量的降低；向上调节时，经济损失则是由生产效率下降所导致。具体的计算公式如下：

$$C_{control} = |C_1 \Delta P_1 \Delta t| \quad (4-5)$$

$$C_1 = \begin{cases} (F_p - F_c) / F & \Delta P_1 < 0 \\ \{F_p - [F \times (1 - a) + F \times a / \eta]\} / (C_E / \eta) & \Delta P_1 > 0 \\ 0 & \Delta P_1 = 0 \end{cases} \quad (4-6)$$

其中， $C_{control}$ 为控制代价成本； ΔP_1 为调节功率； Δt 为调节持续时间； C_1 为单位控制代价系数； F_p 表示单位负荷售价； F_c 表示单位负荷生产成本； C_E 为单位产量耗电量； a 为耗电成本在工业企业生产成本中所占的百分比； η 为电能生产效率^[1]。

4.2 协调控制策略设计

4.2.1 指标归一化化处理

由于工业负荷参与电网调控的综合性能评价体系中各个指标数据大小差异较大，因此需要对相同指标中的数据进行归一化处理。同时，根据指标性质的不同，划分为正指标量化与逆指标量化。其中正指标越大表示性能越好，逆指标越小性能越好。

$$X_{ij}^+ = \frac{X_{ij} - \min_i X_{ij}}{\max_i X_{ij} - \min_i X_{ij}} \quad (4-7)$$

$$X_{ij}^- = \frac{\max_i X_{ij} - X_{ij}}{\max_i X_{ij} - \min_i X_{ij}} \quad (4-8)$$

式中， X_{ij}^+ 、 X_{ij}^- 分别表示量化后的正指标与逆指标； X_{ij} 表示第 i 个指标中第 j 个评价对象的指标数据； $\min_i X_{ij}$ 表示第 i 个指标中指标数据的最小值； $\max_i X_{ij}$ 表示第 i 个指标中指标数据的最大值^[1]。

4.2.2 综合评价流程

对经归一化处理的评价指标数据赋权并计算得到工业负荷的总得分。通过调整权值，可实现对不同指标在各异场景下重要程度的调控。依据总得分高低，可评估该工业负荷参与电网调频的效果优劣及经济成本高低。具体评估得分计算公式如下：

$$Y_{score,i} = -C_{l, invest} \cdot \beta_1 - C \cdot \beta_2 + P_{sec} \cdot \beta_3 + P_{min} \cdot \beta_4 - C_{control} \cdot \beta_5 \quad (4-9)$$

其中， $Y_{score,i}$ 代表第 i 个工业负荷的经济效益指标， β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 和 β_5 分别表示各性能评价指标的权重。据此设计协调控制策略如图 4.2 所示。

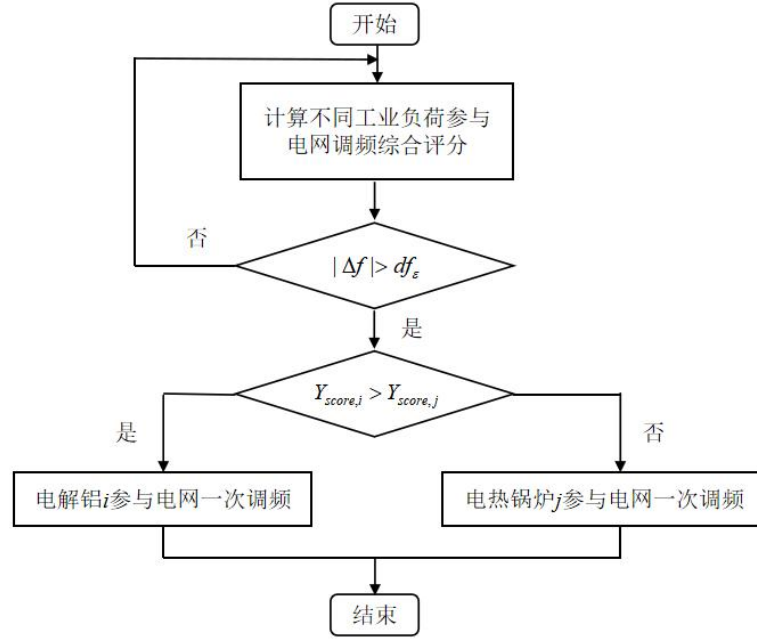


图 4.2 工业负荷参与电网调频协调控制策略

4.3 算例分析

针对上述构建的工业负荷参与的 LFC 系统，结合设计的协调控制策略，在 Simulink 中分别搭建仿真模型，并假定该电力系统的总负载为 3630MW，其中 900MW 用于铝工业，726MW 用于电加热锅炉的供暖负载^[20]。分别测试传统负荷频率控制模型、单负荷参与电力系统调频模型与多负荷协同参与调频模型在电网遭受负荷上调、下调波动和随机风电扰动时的调频效果，验证协调控制策略的优越性。

4.3.1 仿真验证

(1) 系统负荷上调扰动

当系统负荷产生 10%或 6%上调扰动时，系统频率变化如图 4.3 和 4.4 所示，由于负荷上调时高耗能电解铝负荷不参与调频，因此协同控制策略只有电热锅炉负荷参与调频。

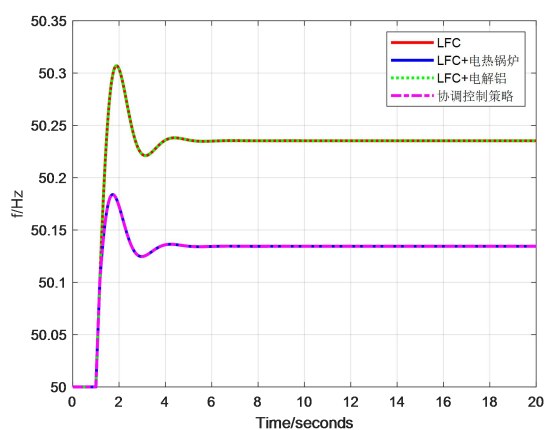


图 4.3 10%负荷上调调频效果

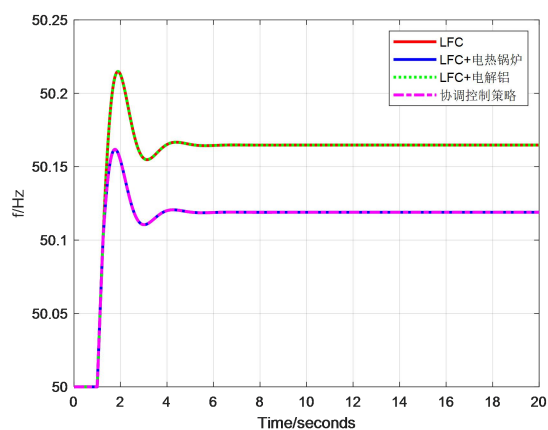


图 4.4 6%负荷上调调频效果

(2) 系统负荷下调扰动

当系统负荷产生 10%或 6%下调扰动时，系统频率变化如图 4.5 和 4.6 所示。

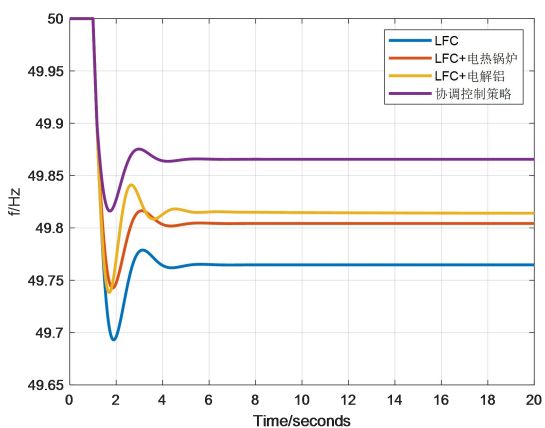


图 4.5 10%负荷下调调频效果

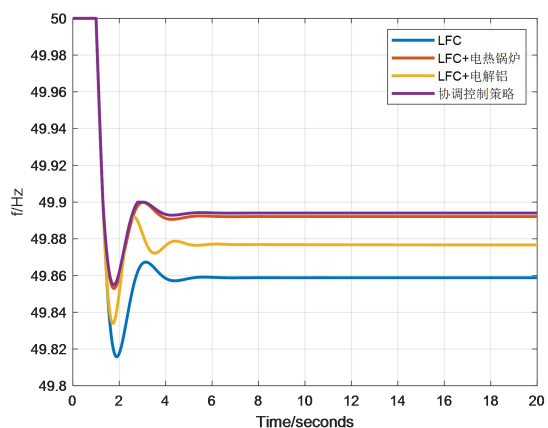


图 4.6 6%负荷下调调频效果

此时电热锅炉功率变化情况如图 4.7 所示。

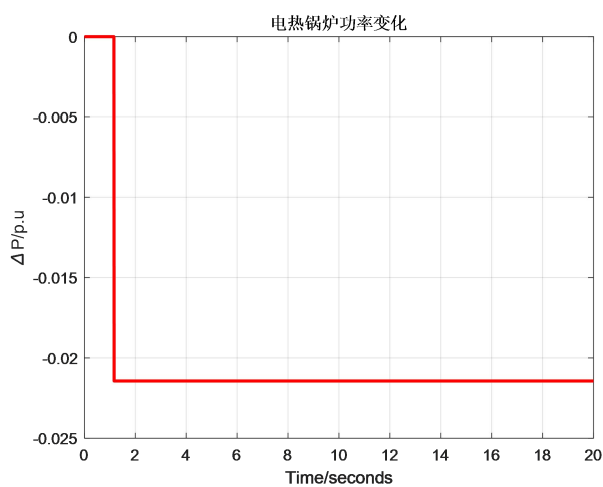


图 4.7 负荷下调时电热锅炉功率变化

(3) 随机风电扰动

当系统产生随机风电扰动时，系统频率变化如图 4.7 所示，由三种负荷扰动仿真实验可观察出，协调控制策略下工业负荷参与能够实现更好的调频效果。

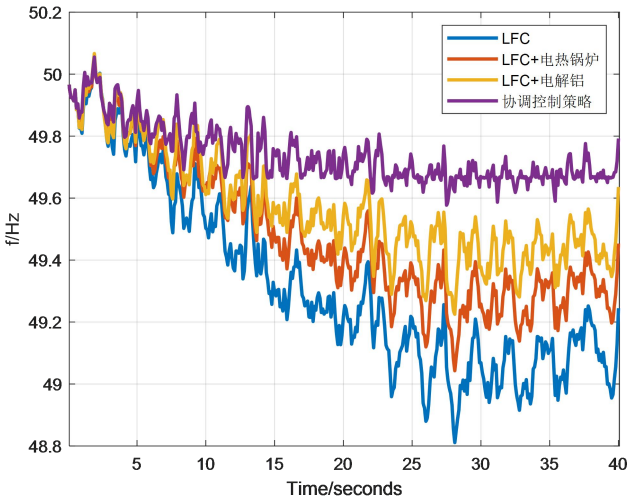


图 4.7 随机风电扰动下系统频率变化

4.3.2 性能评价

引入四种频率调控性能评价指标以进一步观察不同控制策略下的调频性能差异，分别为平方误差积分(Integral of Squared Error, ISE)、绝对误差积分(Integral of Absolute Error, IAE)、时间乘方误差积分(Integral of Time multiplied Squared Error, ITSE)、时间乘绝对误差积分(Integral of Time multiplied Absolute Error, ITAE)，各指标计算公式如下：

$$ISE = \int_0^{\tilde{T}} (\Delta f)^2 dt \quad (4-10)$$

$$IAE = \int_0^{\tilde{T}} |\Delta f| dt \quad (4-11)$$

$$ITSE = \int_0^{\tilde{T}} t \cdot (\Delta f)^2 dt \quad (4-12)$$

$$ITAE = \int_0^{\tilde{T}} t \cdot |\Delta f| dt \quad (4-13)$$

其中， \tilde{T} 表示观测时间。

经测试，不同扰动类型下各调频方案性能评价指标数值如表 4.1 所示。

表 4.1 不同扰动下各方案评价指标

扰动类型	系统类型	ISE	IAE	ITSE	ITAE
负荷上调 波动 10%	LFC	1.056	4.456	10.991	46.383
	LFC+电热锅炉	0.348	2.563	3.592	26.527
	LFC+电解铝	1.056	4.456	10.991	46.383
	协调控制策略	0.348	2.563	3.592	26.527
负荷上调	LFC	0.518	3.119	5.386	32.472

波动 6%	LFC+电热锅炉	0.272	2.264	2.811	23.465
	LFC+电解铝	0.518	3.119	5.386	32.472
	协调控制策略	0.272	2.264	2.811	23.465
负荷下调	LFC	1.056	4.456	10.991	46.383
	LFC+电热锅炉	0.348	2.563	3.592	26.527
	LFC+电解铝	0.295	2.343	3.173	24.766
波动 10%	协调控制策略	0.249	1.764	2.869	18.256
	LFC	0.518	3.119	5.386	32.472
	LFC+电热锅炉	0.272	2.264	2.811	23.465
波动 6%	LFC+电解铝	0.355	2.584	3.697	26.903
	协调控制策略	0.212	2.137	2.334	21.558
	LFC	6.072	10.243	95.852	130.154
随机风电	LFC+电热锅炉	3.797	7.715	54.371	97.712
	LFC+电解铝	3.285	7.202	45.877	89.716
	协调控制策略	1.121	4.274	14.690	51.058

由表 4.1 的结果可观察出，本项目所提出的高耗能电解铝和电热锅炉负荷协同参与电网一次调频的调控策略，与单独使用一种工业负荷参与调频的方案相比，具有更小的频率稳态误差及更快的响应速度，具有更好的调频特性，且相较于二者共同参与调频成本更低。

4.3.3 RT-LAB 仿真

RT-LAB 实时仿真平台凭借其强大的实时处理能力和丰富的接口资源，能够较为真实地模拟电力系统实际工况，为验证工业负荷调频协调控制策略提供了高度逼真的测试环境。



图 4.8 RT-LAB 半实物仿真实验平台

给定 4.3.1 节中相同条件，仿真实验结果如图 4.9-4.11 所示。

(1) 系统负荷上调扰动

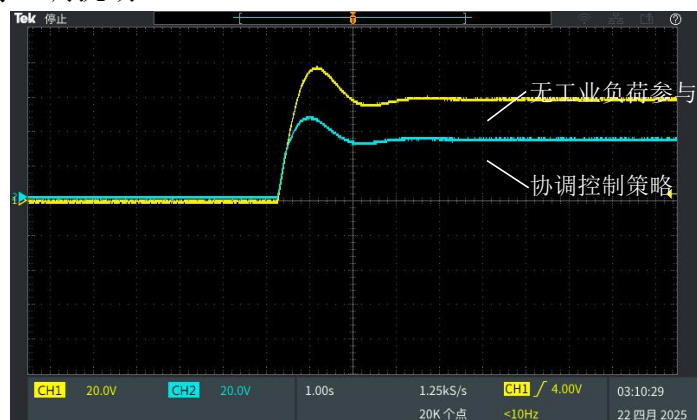


图 4.9 10%负荷上调扰动 RT-LAB 实时仿真结果

(2) 系统负荷下调扰动

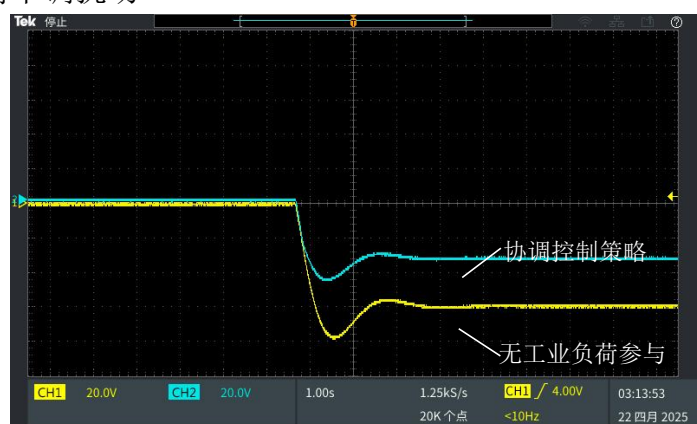


图 4.10 10%负荷下调扰动 RT-LAB 实时仿真结果

(3) 随机风电扰动

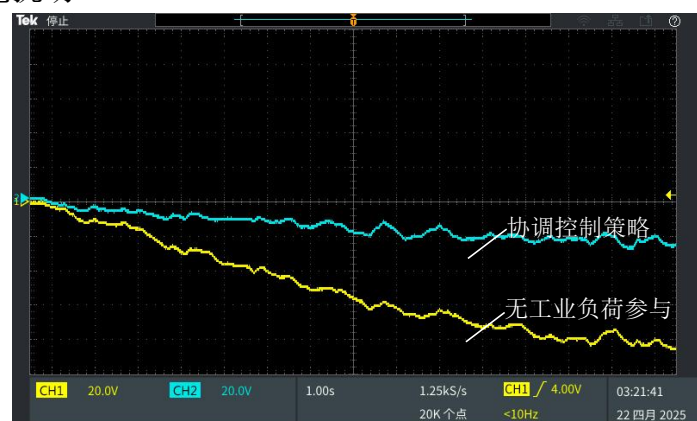


图 4.11 随机风电扰动 RT-LAB 实时仿真结果

通过对比 RT-LAB 与 Simulink 的仿真结果，发现二者之间的一致性较高，表明该协调控制策略在模拟实际工况的电网一次调频中依旧保持着较好的调频效果。

五、基于粒子群算法的负荷频率控制参数优化设计

5.1 工业负荷参与电网二次调频模型

基于前述的协调控制模型，引入电网二次调频控制回路。一次调频和二次调频是电力系统维持频率稳定的核心调控机制。一次调频通过发电机组自带的调速器快速响应频率波动，在秒级时间内自动调整出力，快速抑制因负荷突变或机组故障导致的短期频率偏差，但无法消除稳态误差。二次调频则由中央调度系统主导，通过全局协调多台机组出力，在分钟级时间内消除一次调频后的剩余频率偏差，恢复电网额定频率^[18]。

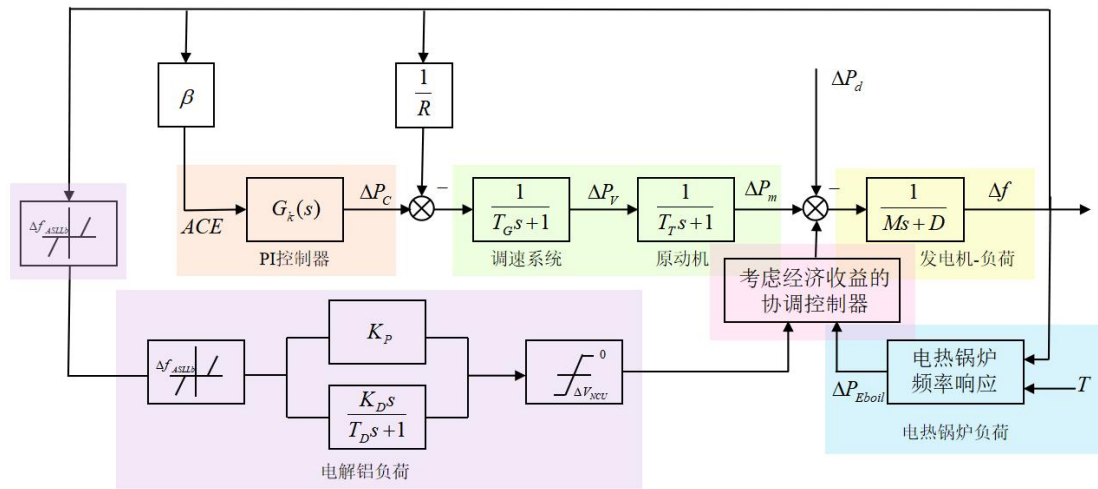


图 5.1 工业负荷协同参与电网二次调频模型结构框图

5.2 粒子群算法基本原理与应用

粒子群优化算法（PSO）是一种基于群体智能的仿生优化算法，灵感源于鸟群或鱼群在觅食过程中的协同搜索行为。其核心机制是通过个体间的信息共享与群体协作，引导粒子群在解空间中动态调整飞行方向和速度，逐步逼近全局最优解。该算法以位置-速度更新模型为驱动，结合个体历史最优与群体全局最优的双重引导，兼具全局探索与局部开发能力，尤其擅长处理高维、非线性、多极值的复杂优化问题。其优势在于结构简洁，需要调节的参数较少，收敛速度快，且对初始条件不敏感，已广泛应用于工程参数优化、机器学习调参、电力系统控制等领域。

PSO 首先随机初始化一群均匀分布在给定的寻优空间中的粒子，然后所有的粒子根据个体极值和群体极值来更新自身的速度和位置。所有的粒子按照如下更新方式在搜索空间中飞行可以找到最优解：

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (x_{pbest}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (x_{gbest}^k - x_i^k) \quad (5-1)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (5-2)$$

其中， x_i^k 、 v_i^k 为粒子的位置和速度， x_{pbest}^k 、 x_{gbest}^k 表示个体最优解和全局最优解， ω 为惯性权重系数， c_1 、 c_2 为加速因子， r_1 、 r_2 为[0,1]之间的随机数。

算法的具体流程可以描述如下：

Step1: 设置种群规模、惯性权重、学习因子、最大迭代次数等参数和解空间范围；

Step2: 随机的初始化一群均匀分布在给定寻优空间中的粒子，其中包含速度和位置信息；

Step3: 基于当前粒子位置的对应参数组合，运行负荷频率控制模型，计算每个粒子的适应度值；初始化个体、全局最佳位置和适应度；

Step4: 根据公式(5-1)、(5-2)更新每个粒子的速度和位置；更新个体、全局最佳位置和适应度；

Step5: 判断是否达到最大迭代次数，若满足终止条件，停止搜索，输出最优参数组合；否则，返回 Step3 继续搜索^[21]。

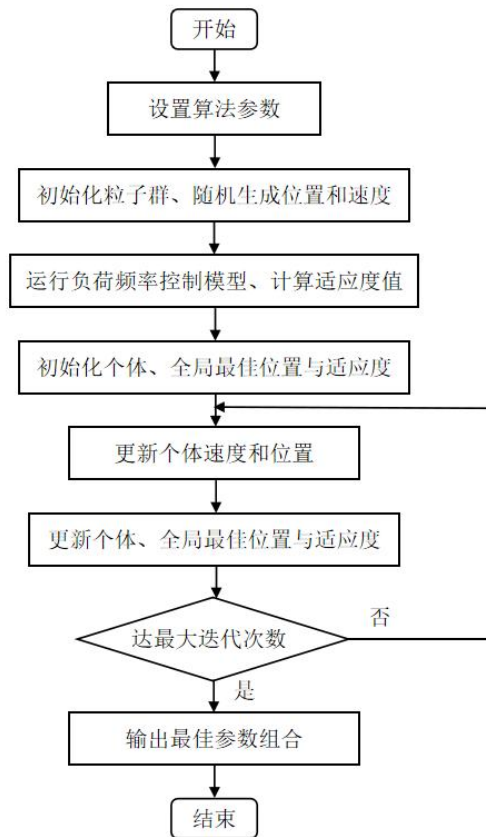


图 5.2 PSO 流程图

在频率调控性能评价指标中，ITAE 指标能有效衡量控制系统的动态响应速度和稳态精度，直接反映系统时域性能，具有良好的工程适用性。因此将其作为粒子群算法的适应度函数以反映调频性能。

5.3 仿真分析

5.3.1 Simulink 仿真

在一次调频模型基础上建立两种工业负荷协同参与电力系统二次调频的模型，并采用粒子群算法对 PI 控制器的 K_P 、 K_I 两个增益进行参数优化整定，其中，算法选取的参数如表 5.1 所示。

表 5.1 PSO 算法参数表

参数	取值
种群规模	15
迭代次数	30
惯性权重	0.7
学习因子 1	0.8
学习因子 2	0.8
解空间范围	0.1-2.5

部分迭代结果如图 5.3 所示。

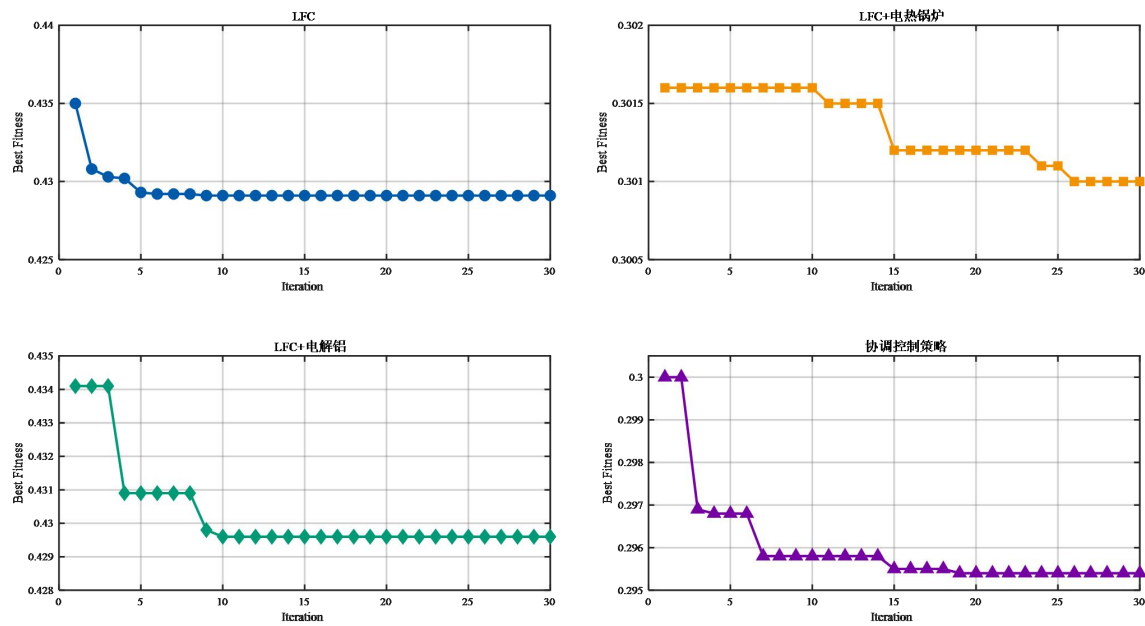


图 5.3 负荷上调 10%时算法收敛迭代图

表 5.2 中给出了每种方案下的 ITAE 值，以及利用粒子群算法得到的最佳控制器增益值。

表 5.2 PSO 算法参数表

扰动类型	系统类型	K_P	K_I	ITAE
负荷上调波	LFC	0.9450	1.1822	0.4291

动 10%	LFC+电热锅炉	0.8786	1.4278	0.3010
	LFC+电解铝	0.9472	1.1810	0.4296
	协调控制策略	0.8783	1.4247	0.2954
负荷下调波 动 10%	LFC	0.9399	1.1802	0.4291
	LFC+电热锅炉	0.8911	1.4269	0.3012
	LFC+电解铝	0.8245	1.6358	0.3847
	协调控制策略	0.6733	1.9526	0.1811
随机风电扰 动	LFC	1.2889	0.1827	2.7626
	LFC+电热锅炉	1.8771	0.2034	2.3158
	LFC+电解铝	0.7114	0.2000	2.6557
	协调控制策略	1.3518	0.1629	2.1649

（1）负荷上调扰动

当系统负荷产生 10%的上调扰动时，系统频率变化如图 5.4 所示。

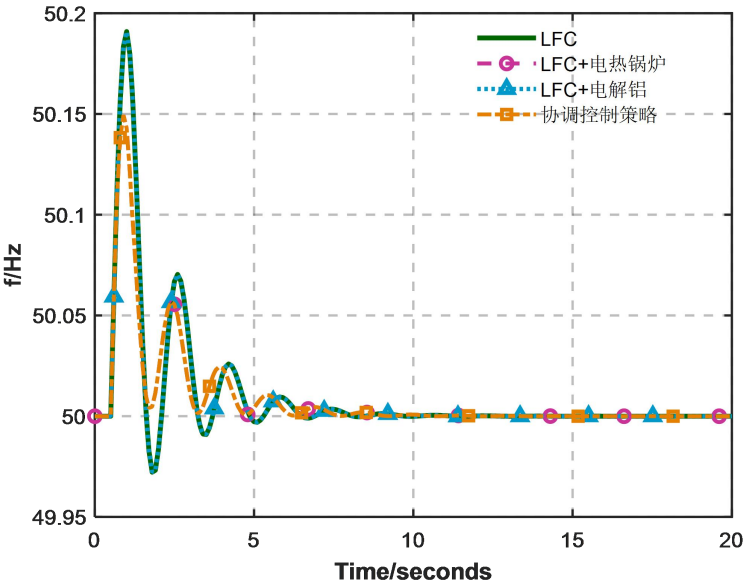


图 5.4 10%负荷上调调频效果

(2) 负荷下调扰动

当系统负荷产生 10%的下调扰动时，系统频率变化如图 5.5 所示。

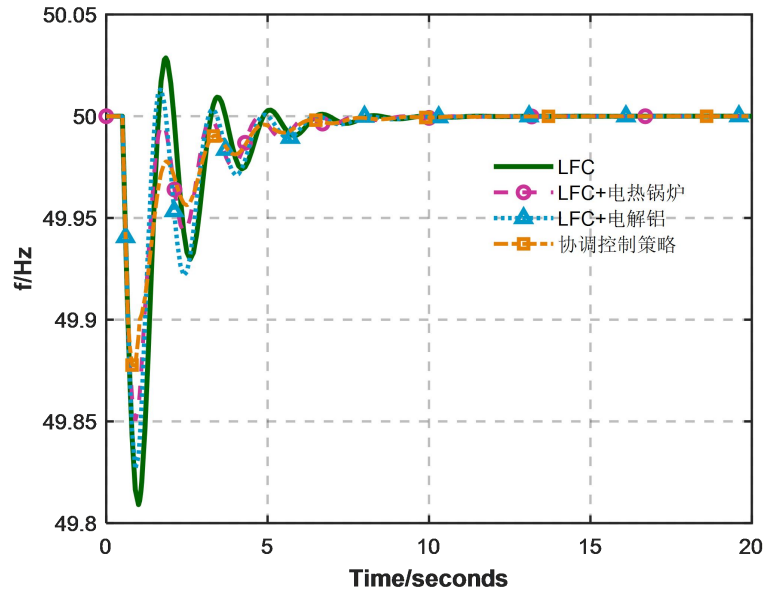


图 5.5 10%负荷下调调频效果

由图 5.5 可观察出，协调控制策略下频率波动小，收敛速度快，调频效果明显优于其他三种方案。

(3) 负荷随机扰动

当系统负荷产生 10%的随机扰动时，系统频率变化如图 5.6 所示。

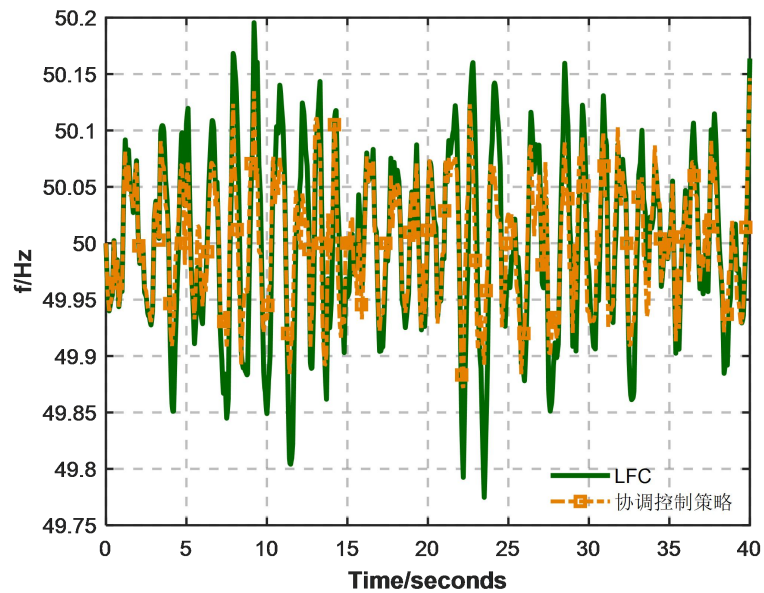


图 5.6 负荷随机扰动下调调频效果

5.3.2 RT-LAB 仿真

同样采用 RT-LAB 半实物仿真平台进行验证，仿真实验结果如图 5.7 - 5.9 所示。

(1) 负荷上调扰动

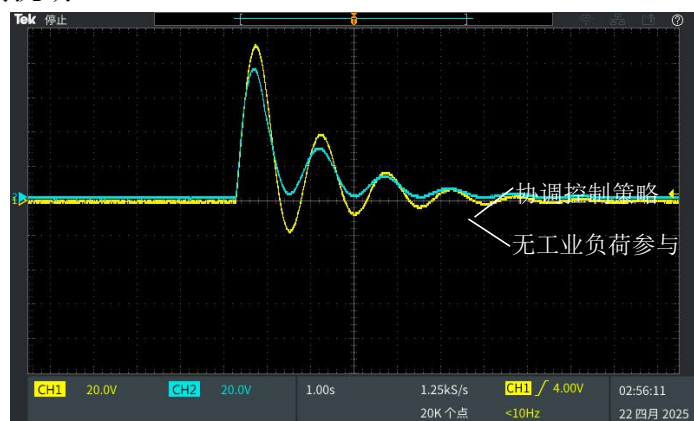


图 5.7 10%负荷上调调频效果

(2) 负荷下调扰动



图 5.8 10%负荷下调调频效果

(3) 负荷随机扰动

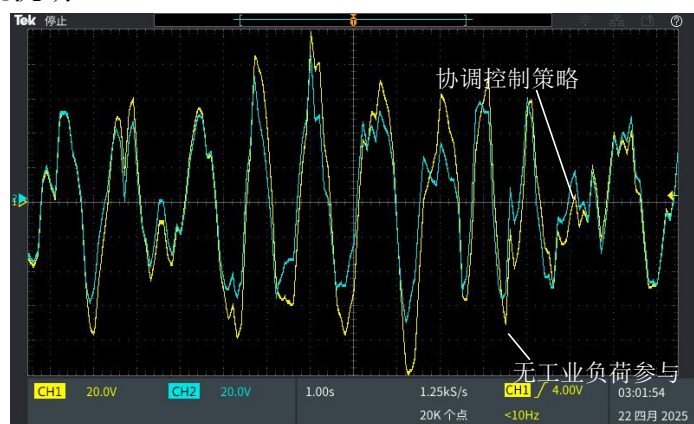


图 5.9 负荷随机风电扰动下调频效果

六、总结与体会

本项目围绕工业负荷参与电力系统调频问题,构建了电解铝与电热锅炉负荷的动态响应模型,并提出基于粒子群算法的协调控制策略。通过 MATLAB/Simulink 仿真验证,发现与传统负荷频率控制(LFC)相比,协同控制策略能显著提升系统调频性能。粒子群算法优化后的二次调频 PI 控制器进一步消除稳态误差,提升频率稳定性。研究证实工业负荷的可调潜力与经济性,为高比例可再生能源电网提供了低成本、高响应的调频解决方案。

研究过程中,团队深入理解了工业负荷与电网的互动机制,并认识到多类型负荷协同优化的必要性。挑战在于平衡调频性能与工业生产成本,需通过综合评价体系量化经济指标。未来将进一步探索实际场景中的负荷集群控制与人工智能技术,推动成果在新型电力系统中的工程应用。

参考文献

- [1] 刘汗清,沈阳武,廖思阳,等. 工业负荷参与电网互动的调控性能综合评价方法[J].湖南电力, 2023, 43(01): 35-40.
- [2] S. Nolan, M. O'Malley. Challenges and barriers to demand response deployment and evaluation[J]. Applied Energy, 2015, 152: 1-10.
- [3] D.S. Callaway and I. A. Hiskens, Achieving controllability of electric loads, Proc. IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 184-199, Jan. 2011.
- [4] I. Beil, I. Hiskens and S. Backhaus, Frequency regulation from commercial building HVAC demand response, Proc. IEEE, vol. 104, no. 4, pp. 745-757, Mar. 2017.
- [5] T. Jiang, P. Ju, C. Wang, H. Li, and J. Liu, Coordinated control of airconditioning loads for system frequency regulation, IEEE Trans. SmartGrid, vol. 12, no. 1, pp.548-560, Jan. 2021.
- [6] Y. J. Kim, E. Fuentes and L. K. Norford, (2020). Experimental study of grid frequency regulation strategies for integrated energy systems [J]. Journal of Power Systems Research, 185, 106 - 109.
- [7] H. Han, Q. Li, Z. Lv, and X. Yang, Energy storage frequency response control considering battery aging of electric vehicle, in Proc. IEEE Int.Conf. Energy Internet (ICEI), Apr. 2017, pp. 72-76.
- [8] C. Chen, J. Wang, and S. Kishore, A distributed direct load control approach for large-scale residential demand response, IEEE Transactions on Power System, 2014, 29(5): 2219 - 222
- [9] 刘文许,林礼清,温步瀛.可中断负荷参与系统频率调节的研究[J].福建电力与电工,2008(03):17-20+23.

- [10] Z. Xu, J. Ostergaard, M. Togeby. Demand as frequency controlled reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1062-1071.
- [11] B. Biegel, L. H. Hansen, Andersen, J. Stoustrup. Primary control by ON/OFF demand-side devices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2061-2071.
- [12] 董丹丹. 基于电热水器类温控负荷的电力系统频率稳定与控制研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- [13] D. Todd, M. Caufield, B. Helms, M. R. Starke, B. J. Kirby, and J. Kueck, Providing reliability services through demand response: A preliminary evaluation of the demand response capabilities of Alcoa Inc., Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, TN, USA, vol. 233, Jan. 2008.
- [14] Bao Y, Xu J, Liao S, et al., Field Verification of Frequency Control by Energy-Intensive Loads for Isolated Power Systems With High Penetration of Wind Power, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 6, pp. 6098-6108, Nov. 2018.
- [15] Y. Cai, X. Xu, J. Liu, X. Yu and H. Jia, Coordinative Control of Hydropower Plant and Industrial Thermostatically Controlled Loads for Frequency Response, 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Orlando, FL, USA, 2023, pp. 1-5.
- [16] J. Li, Q. Zhao, H. Wang, W. Wang, Y. Yang and C. Yan, Analysis of Deep Learning Control Strategy about Peak Load Regulation and Frequency Regulation with Distribution Thermal Storage Electric Boiler, 2018 5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS), Nanjing, China, 2018, pp. 461-464.
- [17] Shi T, Chen Z, Guo S, and Li D, Fast-Frequency-Response Control Method for Electrode Boilers Supporting New Energy Accommodation, Processes, 2023, 11(11): 3098.
- [18] 张传科. 时滞电力系统的小扰动稳定分析与负荷频率控制[D]. 中南大学, 2013.
- [19] Y. Bao, J. Xu, S. Liao, et al., Field verification of frequency control by energy-intensive loads for isolated power systems with high penetration of wind power, IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6098–6108.
- [20] 王文. 需求响应调频特性分析及协调控制研究[D]. 东南大学, 2019.
- [21] 赵乃刚, 邓景顺. 粒子群优化算法综述[J]. 科技创新导报, 2015, 12(9b): 216-217.