

# 一种电力系统自动化负荷控制方法研究

孙金余<sup>1</sup>, 朱丹<sup>2</sup>, 陆拥军<sup>1</sup>, 施文捷<sup>1</sup>, 金毅<sup>1</sup>

(1. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 201306;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 210006)

**摘要:** 针对负荷频率控制中存在的随机时延、丢包和负载波动等不确定因素影响下的性能问题, 提出了一种基于数据驱动的LFC系统; 通过建立分散控制结构, 优化反馈变量, 并提出选择性事件触发控制器, 从而降低了通信资源消耗, 提升了系统的运行效能; 仿真结果表明, 相较于 $H_{\infty}$ 控制和PSO-PI控制策略, SETC控制不仅将PTFD缩短了76.7%和23.2%, 还分别将FRST减少了64.5%和17.2%; SETC的设计不仅平衡了通信减少与系统性能之间的关系, 还展现了出色的恢复能力与鲁棒性, 对于提升电力系统的灵活性和可靠性具有重要意义。

**关键词:** 电力系统; 数据驱动; 负荷频率控制; 事件驱动控制; 反馈控制

## Research on a Load Control Method for Power System Automation

SUN Jinyu<sup>1</sup>, ZHU Dan<sup>2</sup>, LU Yongjun<sup>1</sup>, SHI Wenjie<sup>1</sup>, JIN Yi<sup>1</sup>

(1. Shanghai International Port Group, Shanghai 201306, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210006, China)

**Abstract:** A data-driven LFC system is proposed to address the performance issues caused by uncertain factors such as random delay, packet loss, and load fluctuations in load frequency control. By establishing a decentralized control structure, optimizing feedback variables, and proposing a selective event triggered controller, communication resource consumption has been reduced and the operational efficiency of the system has been improved. The simulation results show that compared with  $H_{\infty}$  control and PSO-PI control strategies, SETC control not only shortens PTFD by 76.7% and 23.2%, but also reduces FRST by 64.5% and 17.2%, respectively. The design of SETC not only balances the relationship between reduced communication and system performance, but also demonstrates excellent recovery capability and robustness, which is of great significance for improving the flexibility and reliability of power systems.

**Keywords:** power system; data driven; load frequency control; event driven control; feedback control

## 0 引言

在现代互联电力系统中, 负荷频率控制<sup>[1-3]</sup> (LFC, load frequency control) 作为一种关键技术, 对于维持系统频率稳定及联络线功率平衡至预设水平发挥着至关重要的作用。该技术通过精确调节发电机有功功率输出, 与实时变化的负荷需求保持动态平衡, 确保电力供应的稳定性和可靠性。然而, 随着电力系统规模的不断扩大与市场化改革的深入, 电力系统的运行管理日益依赖于开放且复杂的通信网络。这一转变虽提升了系统的灵活性与透明度, 但同时也引入了新的挑战, 特别是通信过程中的随机时延与丢包问题<sup>[4]</sup>。这些不确定性因素, 作为通信网络固有的特性, 无法简单地视为系统参数的小幅波动, 而是对闭环网络化LFC系统的动态行为产生了深远影响。具体而言, 随机延迟的不可预测性可能导致控制信号的滞后, 影响调节的及时性与准确性; 而丢包现象则可能直接造成控制信息的缺失, 进一步加剧系统的不稳定风险, 甚至在某些极端

情况下可能引发系统振荡或失稳<sup>[5]</sup>。因此, 在设计和实施网络化LFC系统时, 必须充分考虑并有效应对这些通信不确定性<sup>[6]</sup>。

针对上述问题, 研究界已提出多种控制策略以增强LFC系统对通信不确定性的抵抗能力, 确保其在复杂多变的运行环境中仍能维持良好的控制性能与稳定性。文献[7]构建了包含PID参数的时滞LFC系统数学模型, 针对该系统, 引入了时滞乘积型Lyapunov-Krasovskii泛函作为分析工具。该方法的优点是提供了一种新的时滞相关鲁棒稳定性判据, 并通过数值实例分析了系统在不同时滞类型的情况下, PI控制增益与系统时滞稳定裕度之间的关系。然而, 该方法的缺点是其分析基于单区域电力系统, 可能不适用于多区域互联电力系统。文献[8]结合多智能体一致算法与动态面控制, 提出分布式负荷频率控制策略。该策略定义了控制模型与系统框架, 设计了分散式观测器与考虑通信时滞的控制器, 可以减轻系统的通信负担。然而,

收稿日期: 2024-08-30; 修回日期: 2024-10-11。

作者简介: 孙金余(1976-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 孙金余, 朱丹, 陆拥军, 等. 一种电力系统自动化负荷控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 159-165, 171.

该策略的缺点是可能需要较高的计算资源来实现多智能体一致算法与动态面控制方案。文献 [9] 提出了一种针对分数阶 PID 控制器参数的优化方法, 该方法基于改进的协同量子粒子群算法, 旨在提升多微网互联系统在网络化通信时滞环境下的控制性能。该方法的优点是具有较强的鲁棒性, 能够应对电力系统参数和通信网络的不确定性、负荷扰动。然而该方法需要较高的计算资源来实现变周期采样。尽管上述文献探讨了网络化 LFC 系统时延裕度的分析方法, 但前提条件是控制器参数预设, 这在随机时延和丢包环境中难以保证优异控制性能。此外, 部分网络化 LFC 系统存在控制器参数预设导致对随机时延和丢包适应性差、建模时将时变时延简化为固定值以致无法全面捕捉系统动态特性、以及传统鲁棒方法虽保障稳定性但动态响应速度不足, 难以满足电力系统对快速频率恢复需求的问题。

为改善上述问题, 本研究提出了一种基于数据驱动策略的网络化 LFC 系统, 该系统采用分散式控制结构, 旨在优化跨区域的电力平衡与频率稳定性。为应对存在的随机时延、数据丢失及负载变动等不确定因素, 提出了一种选择性事件触发控制器 (SETC, selective event triggered controller) 技术, 该技术通过智能识别系统状态的实质性变化来触发调速器动作, 有效降低了通信资源的浪费, 并显著提升了 LFC 系统整体的运行效能与跨区域电力调度的灵活性。

## 1 LFC 系统建模

### 1.1 基础 LFC 系统

网络化 LFC 系统的原理如图 1 所示。系统中每个区域的控制输入仅依赖于本地操作状态, 无需集中式通信或控制。此外, 汽轮机带动同步发电机产生电力, 供用户使用。当电力供应与负荷需求失衡时, 电网频率会发生变化, 即同步发电机的转速发生波动。控制中心监测系统运行状态, 通过调节调速器阀门的开度来控制进入汽轮机的蒸汽流量, 以此维持频率的稳定, 并确保与相邻区域在调度值下的功率交换, 进而调整机械功率和相应的电功率输出, 最终在额定频率下重新平衡电源与负载消耗。

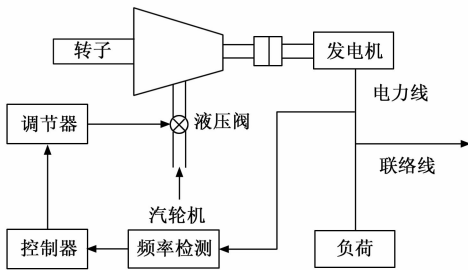


图 1 网络化 LFC 系统的原理图

值得注意的是, 尽管线性调频系统本质上是非线性的, 但在本文中, 考虑到负荷变化范围较小, 采用了在平衡点处线性化的简化模型。这种模型可以有效地近似实际系统

的动态行为, 同时简化了控制策略的设计和分析过程。通过这种简化, 可以更清晰地理解 LFC 系统的工作机制, 并为实际工程应用提供理论支持和指导。

在电力系统中, 同步发电机的惯性特性对于维持电网的实时有功平衡至关重要。当电力系统的有功负荷功率出现增加或减少时, 同步发电机通过改变其转动动能来实现功率的反向调整, 即减少或增加动能以平衡负荷的变化。这一过程导致系统频率相应地降低或升高, 以反映整个电网的供需状态。这种动态过程可以通过一阶微分方程进行数学描述, 该方程捕捉了频率变化与同步发电机转速之间的关系<sup>[10-11]</sup>。

$$\frac{df_i}{dt} = -\frac{D_i}{M_i}\Delta f_i + \frac{1}{M_i}\left(\sum_{n=1}^N \Delta P_m^n - \Delta P_i^d - \Delta P_i^{\text{tie}}\right) \quad (1)$$

式中,  $\Delta f_i$  为第  $i$  个区域的区频率偏差, 且有  $i = 1, 2, \dots, M_i$ ,  $M_i$  为区域  $i$  的邻域的总数;  $D_i$  和  $M_i$  分别为第  $i$  个区域的等效阻尼系数和惯量;  $\Delta P_m^n$  为第  $i$  个区域的第  $n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 台汽轮机的机械功率偏差,  $N$  为参与 LFC 的发电机总数;  $\Delta P_i^d$  为负荷计算偏差;  $\Delta P_i^{\text{tie}}$  为第  $i$  个区域与其他相邻区域之间的输电线路功率偏差。

由于汽轮机的惯性特性, 其机械功率的输出会存在一定的滞后, 这是对调速器开度变化的响应<sup>[12-13]</sup>。这种滞后现象是汽轮机动态行为的一个自然结果, 源于其转子和叶片等组件在接收到调节信号后需要时间来改变其物理状态。汽轮机的动态特性可以通过以下数学模型计算:

$$\frac{\Delta P_m^n}{dt} = \frac{\Delta P_m^s - \Delta P_m^n}{T_m^n} \quad (2)$$

式中,  $T_m^n$  为第  $i$  个区域的第  $n$  台汽轮机的时间常数;  $\Delta P_m^s$  为第  $i$  个区域的第  $n$  台汽轮机的阀门开度。

接着, 区域和区域之间的线路功率偏差可计算如下:

$$\frac{\Delta P_i^{\text{tie}}}{dt} = \sum_{j=1, j \neq i}^M 2\pi L_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (3)$$

式中,  $L_{ij}$  为线路同步系数;  $\Delta f_i$  和  $\Delta f_j$  为第  $i$  个和第  $j$  个区域的区频率偏差。

值得注意的是, 区域控制误差 (ACE, area control error) 作为评估系统控制性能的关键指标, 在 LFC 的实施过程中起到了至关重要的作用<sup>[14-15]</sup>。ACE 综合了频率偏差与联络线功率偏差的信息, 通过特定的计算方式, 为 LFC 系统提供了明确的调整方向和目标。基于 ACE 的反馈控制, LFC 能够更加精准地识别并解决系统中的不平衡问题, 实现频率与联络线功率的双重稳定。

$$f_i^{\text{ACE}} = \beta_i \Delta f_i + \Delta P_i^{\text{tie}} \quad (4)$$

式中,  $f_i^{\text{ACE}}$  为  $i$  个区域的 ACE;  $\beta_i$  为第  $i$  个区域的区频率偏差因素。

为了消除第  $i$  个 ACE 的稳态误差, 本研究引入了一个可积变量  $\eta$ , 因此  $i$  个区域的 ACE 可更新如下:

$$\frac{d\eta_i}{dt} = f_i^{\text{ACE}} \quad (5)$$

$$\text{令 } \mathbf{X}_i(t) = [\Delta f_i, \Delta P_i^{\text{tie}}, \Delta P_{i_1}^m, \dots, \Delta P_{i_{N_i}}^m, \Delta P_{i_1}^s, \dots, \Delta P_{i_{N_i}}^s,$$

$\eta_i]^T$  为系统状态变量,  $\mathbf{W}_i(t) = [\Delta P_{di}, \sum_{j=1, j \neq i}^{M_i} L_{ij} \Delta f_j]^T$  为扰动变量。受控 LFC 系统的连续时间状态空间模型定义如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\mathbf{X}_i(t)}{dt} &= \mathbf{A}_i \mathbf{X}_i(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{U}_i(t) + \mathbf{H}_i \mathbf{W}_i(t) \\ \mathbf{A}_i &= \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{M_i} & -\frac{1}{M_i} & A_{1i} & 0 & 0 \\ \sum_{j=1, j \neq i}^{M_i} 2\pi L_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{2i} & -A_{2i} & 0 \\ A_{3i} & 0 & A_{2i} & -A_{4i} & 0 \\ \beta_i & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_i &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_{1i} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}_i &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_i} & 0 \\ 0 & -2\pi \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{1i} &= \left[ \frac{1}{M_i}, \frac{1}{M_i}, \dots, \frac{1}{M_i} \right] \\ \mathbf{A}_{2i} &= \text{diag} \left[ -\frac{1}{T_{1i}^g}, -\frac{1}{T_{2i}^g}, \dots, -\frac{1}{T_{Ni}^g} \right] \\ \mathbf{A}_{3i} &= \left[ -\frac{1}{T_{1i}^g R_{1i}}, -\frac{1}{T_{2i}^g R_{2i}}, \dots, -\frac{1}{T_{Ni}^g R_{Ni}} \right]^T \\ \mathbf{A}_{4i} &= \text{diag} \left[ -\frac{1}{T_{1i}^g}, -\frac{1}{T_{2i}^g}, \dots, -\frac{1}{T_{Ni}^g} \right] \\ \mathbf{B}_{1i} &= \left[ \frac{\alpha_{1i}}{T_{1i}^g}, \frac{\alpha_{2i}}{T_{2i}^g}, \dots, \frac{\alpha_{Ni}}{T_{Ni}^g} \right]^T \end{aligned} \right. \quad (6)$$

在电力系统的 LFC 中, 采用离散时间模型来描述网络 LFC 系统的动力学特性是更为准确的选择。这种模型基于采样状态信息和零阶保持控制输入, 适用于典型的计算机控制系统。具体而言, 假设在连续的时间区间  $(kT_s, (k+1)T_s]$  内, 控制输入  $U_i(t)$  与可能的扰动或外部信号  $W_i(t)$  均维持恒定不变, 这一设定体现了计算机控制系统中常见的信号处理方式。基于这一前提, 对 LFC 系统从时间点  $kT_s$  至  $(k+1)T$  的过渡过程进行动力学分析:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{X}_i(k+1) &= \Phi_i \mathbf{X}_i(t) + \Gamma_i \mathbf{U}_i(k) + \mathbf{H}_i \mathbf{W}_i(t) \\ \Phi_i &= e^{A_i T_s} \\ \Gamma_i &= \int_0^{T_s} e^{A_i t} dt \mathbf{B}_i \\ \mathbf{H}_i &= \int_0^{T_s} e^{A_i t} dt \mathbf{H}_i \end{aligned} \right. \quad (7)$$

## 1.2 控制器设计

部署在关键电力基础设施如发电厂和变电站的相量测

量单元 (PMU, phasor measurement unit) 能够提供对电力系统动态行为的实时监测<sup>[16-17]</sup>。这些设备的应用, 相较于传统的输出反馈控制器, 例如比例-积分<sup>[18-19]</sup> (PI, proportional-integral) 控制器, 状态反馈控制器因其直接利用系统状态信息, 能够实现更优的控制性能。因此, 在控制中心, 基于经过充分测试的数据包, 生成了一种无记忆的状态反馈形式的控制输入, 以期达到更高效的电力系统调节效果。

$$\mathbf{U}_i(k) = \mathbf{K}_i \mathbf{X}_i^{\text{lat}} \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{K}_i$  为需要优化的反馈变量;  $\mathbf{X}_i^{\text{lat}}$  为控制中心收到的数据包携带的最新状态变量。

在电力通信系统中, 传感器控制器与控制器执行器网络均不可避免地面临时间延迟与数据包丢失的问题。控制输出的生成依赖于系统运行状态的网络传输, 而执行器则仅对通过通信渠道成功接收的控制输入作出响应。这两个过程中的时间延迟与数据包丢失现象, 与传感器向控制中心反馈系统行为时的情况相类似, 均对系统性能构成挑战。为分析此问题, 设定电力通信系统的最大传输延迟为有限, 这一假设确保了延迟的界限可预测。当电力系统状态信息以数据包形式从底层传感器节点 (如 PMU) 向控制中心传输时, 数据包可划分为两类: 有效数据包, 即那些传输延迟保持在最大界限以内的数据包; 以及丢弃的数据包, 这类数据包因网络拥塞、路由错误等未知因素未能在规定时间内抵达控制中心。

在 LFC 系统中, 生成无记忆状态反馈形式的控制输入是一个关键步骤, 其涉及到如何涉及传感器控制器接收的数据包来形成控制命令。无记忆状态反馈意味着控制输入仅依赖于当前时刻的状态, 而不需要依赖于系统过去的状态信息。这一过程具体步骤详细阐述如下:

1) 数据包的接收与处理: 首先, 控制中心需要通过电力通信网络接收来自各个传感器控制器的数据包。这些数据包包含了系统的实时状态信息, 如发电机的输出功率、频率偏差、负荷需求等。由于网络可能存在延迟和丢包, 控制中心必须设计有效的机制来处理这些不确定性, 确保接收到的数据是最新和最准确的。

2) 状态估计: 在接收到数据包后, 控制中心需要对系统状态进行估计。这通常涉及到运行涉及测器或估计器, 它们可以基于接收到的数据包和系统的数学模型来预测系统当前的状态。状态估计的准确性对于控制效果至关重要, 因此需要采用鲁棒的估计方法来减少网络不确定性的影响。

3) 控制律的设计: 一旦系统状态被准确估计, 控制中心将根据预设计的控制律生成控制输入。在无记忆状态反馈控制中, 控制输入通常采用线性或非线性状态反馈的形式。控制律的设计需要考虑到系统的动态特性和稳定性要求, 同时要考虑到通信网络的约束。

4) 控制输入的实施: 生成的控制输入需要通过网络发送到执行器, 如调速器或负载控制器。执行器根据接收到

的控制命令调整其操作,如改变发电机的输出功率或调整负载需求。为了保证控制命令的及时性和准确性,需要设计高效的通信协议和调度策略来最小化传输延迟和丢包的影响。

5) 性能监测与调整:在控制输入实施后,控制中心需要持续监测系统的响应和性能。如果系统性能未达到预期目标,控制中心可能需要调整控制律或反馈增益,以改善控制效果。这种调整可以是基于规则的,也可以是基于模型预测控制或自适应控制策略的。

通过上述步骤,网络化 LFC 系统能够利用数据包生成无记忆状态反馈形式的控制输入,以实现电力系统频率和功率的精确控制,同时考虑到通信网络的不确定性和动态特性。

## 2 优化反馈控制

闭环网络 LFC 系统的动力学特性依赖于关键的反馈变量,因此在设计 LFC 系统时,重点在于优化反馈变量  $K_i$ 。传统方法主要关注系统的鲁棒性,确保在随机时延、丢包和负载波动等不确定因素下系统的可靠性,但这可能会牺牲一些动态性能。对于实际的网络 LFC 系统,目标是在有限时间内,尽可能快速且准确地纠正有功功率失衡所引起的频率偏差,同时确保偏差幅度尽可能小。基于闭环网络 LFC 系统的稳定性分析,可以推导出改善系统动态性能的最佳反馈变量,从而实现对频率偏差的快速且精确的调节。

### 2.1 目标函数

基于前述分析,该研究构建了一个旨在优化 LFC 系统性能的目标函数,该函数的优化重点在于通过调整反馈变量的组成元素,以具体改善几个关键性能指标:减少频率偏差的幅度、缩短峰值时间以及设置时间。具体地,LFC 目标函数定义如下:

$$\begin{cases} f_{\text{tal}} = \sigma_{1i}J_{1i} + \sigma_{2i}J_{2i} + \sigma_{3i}J_{3i} \\ J_{1i} = \begin{cases} 0 & |\Delta f_i|_{\max} < |\Delta f_i| \\ \frac{|\Delta f_i|_{\max} - |\Delta f_i|}{|\Delta f_i|_{\max}} & \text{其他} \end{cases} \\ J_{2i} = \begin{cases} 0 & t_i^{\text{pk}} < t_i^{\text{peak}} \\ \frac{t_i^{\text{pk}} - t_i^{\text{kn}}}{t_i^{\text{kn}}} & \text{其他} \end{cases} \\ J_{3i} = \begin{cases} 0 & t_i^{\text{st}} < t_i^{\text{stn}} \\ \frac{t_i^{\text{st}} - t_i^{\text{stn}}}{t_i^{\text{stn}}} & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $f_{\text{tal}}$  为 LFC 目标函数,该函数综合考量了系统性能的优化需求;  $\sigma_{1i}$ 、 $\sigma_{2i}$  和  $\sigma_{3i}$  分别对应于频率偏差幅度、峰值时间及设置时间等性能指标的加权系数,这些加权系数的设计确保了各项性能指标在优化过程中的相对重要性得以平衡。同时,为了满足权重分配的合理性,这些加权系数满足条件  $\sigma_{1i} + \sigma_{2i} + \sigma_{3i} = 1$ ,即所有加权系统的总和和被归一化,确保了目标函数在评估系统性能时的公正性和准确性。

### 2.2 稳定性分析

在优化闭环 LFC 的反馈变量时,考虑到系统面临的随机时延、丢包以及负载波动等挑战,确保系统的渐近稳定性成为至关重要的核心要素。鉴于负载波动幅度被限制在额定负载的 5% 以内,这一条件为稳定性约束的放宽提供了一定的基础。具体而言,通过调整反馈变量  $K_i$  的参数,可以有效应对负载的小幅波动,从而在不牺牲系统性能稳定性的前提下,放宽对稳定性的严格要求。这种策略旨在利用负载波动的有限性,优化控制策略,使得系统即便在存在随机时延和丢包的情况下,也能维持其渐近稳定性。

考虑时延和丢包随机变量情况下,闭环 LFC 系统状态方程建模如下:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = A_i x(k) + B_i K_i C_i x_i(k-d(k)) \\ y_i(k+1) = C_i x(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $x_i(k+1)$  为  $k+1$  时系统的状态变量;  $y_i(k+1)$  为  $k+1$  步时系统的输出信号;  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $K_i$ 、 $C_i$  分别为状态方程的决策系数; 随机变量  $d(k)$  为第  $k$  步时连续分组丢失的长度,也可以视为随机延迟。由于控制器应始终使用最新数据,延迟  $d(k)$  在每一步中最多增加 1。

LFC 控制过程中,第  $k$  步控制器信号可能取决于历史输出信号  $y_i(k-d)$ (即在第  $k$  步之前有 1 个连续的丢包),该过程使得闭环 LFC 系统成为一个非马尔可夫随机过程。因此,考虑时延和丢包随机变量情况下,闭环 LFC 系统状态方程可进一步更新为:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k) + F_i w(k) \\ y_i(k+1) = C_i x(k) \\ w(k) = w(kh + \tau), \tau \in [0, h] \\ F_i w(k) = \int_0^h e^{A_i(h-\tau)} F_i w(\tau) d\tau \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $w(k)$  为第  $k$  步时一个未知的连续信号;  $F_i$  为一个非恒定矩阵的算子。当采样间隔小于零时,算子可以近似于常数矩阵。

根据以上分析,结合式 (10) (11) 构建控制率  $u(k) = K_i C_i x_i(k-d(k))$ 。对于任意标量  $\zeta$ ,当存在正定算子  $G_d$  满足以下条件时,闭环 LFC 系统为渐进稳定的。

$$\begin{bmatrix} -G_d & & & \\ 0 & -\zeta^2 I & & \\ \tilde{G}\Phi_d & \tilde{G}C_d & -\tilde{G} & \\ \Gamma_d & 0 & 0 & I \end{bmatrix} < 0, \quad (12)$$

式中,  $\tilde{G}$  为所有步长下状态的均值;  $\Phi_d$  为状态转移系数;  $\Gamma_d$  为非马尔可夫随机过程与非恒定矩阵相关的算子;  $C_d$  为与状态方程的决策系数相关的算子;  $I$  为单位系数矩阵。

在考虑时延和丢包作为随机变量的情况下,所建立的闭环 LFC 系统状态方程不仅反映了系统状态随时间的演变,还包含了随机延迟和数据包丢失对系统动态行为的影响。通过引入非恒定矩阵算子,该方程能够更准确地描述系统

在非马尔可夫随机过程中的行为特征。进一步的分析指出, 当采样间隔足够小时, 非恒定矩阵算子可以近似为常数矩阵, 这简化了系统的分析和设计过程。同时, 由于控制器始终采用最新数据进行运算, 并且延迟在每一步中最多增加 1, 因此系统能够保持一定的实时性和响应速度。

综上所述, 通过对闭环 LFC 系统的反馈变量进行优化调整, 并考虑随机时延和数据包丢失的影响, 可以确保系统在面临多重挑战时仍能保持渐近稳定性。这一结论为设计和优化具有鲁棒性的 LFC 系统提供了有力的理论支持和实践指导。

### 3 选择性事件触发控制器设计

本节设计了一个 SETC 以实现闭环 LFC 系统精确控制。SETC 结构如图 2 所示。该系统的设计旨在通过智能电力远程终端单元 (RTU, remote terminal unit) 采集的输出信号来重建系统的估计状态, 进而生成控制信号, 并通过事件触发机制将反馈信号发送至调速器, 以实现控制过程。

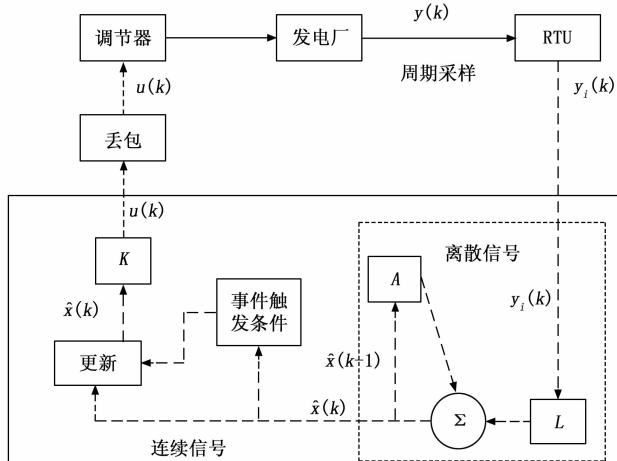


图 2 SETC 结构图

具体而言, SETC 中系统的估计状态  $\hat{x}(k)$  由智能电力远程终端单元 (RTU, remote terminal unit) 采集的输出信号  $y_i(k)$  重建。然后, 使用系统的估计状态  $\hat{x}(k)$  生成控制信号  $u(k)$ 。因此, 可以通过反馈  $u(k)$  发送到具有事件触发机制的调速器实现控制过程。SETC 中, 观察者对系统的估计状态  $\hat{x}(k)$  可建模如下:

$$\hat{x}_i(k+1) = A_i \hat{x}(k) + B_i \hat{u}(k) - L_i (C_i \hat{x}(k) - y_i(k)) \quad (13)$$

式中,  $\hat{x}(k)$  为该区域第  $k$  步时的状态估计;  $\hat{u}(k)$  为控制器估计输出;  $L_i$  为待确定观测器的增益因子。

在优化调速器调节性能的过程中, 本文引入了一种基于事件触发<sup>[20]</sup>的 LFC 方案补充控制信号的前馈机制。此机制旨在通过减少不必要的系统资源消耗, 如网络带宽占用、计算资源及控制器成本, 从而提升整体系统的效率与经济性。具体而言, 该机制区别于传统的周期性 LFC 执行方式, 通过仅在系统状态发生显著变化时触发调速器动作, 避免

了不必要的频繁调节。事件触发机制的核心在于其智能检测功能, 能够实时监控系统状态, 并基于预设的触发条件判断是否需要执行调速操作。这一条件通常依据系统状态自上次执行以来的变化量与当前状态的差异来定义。当此差异超过预设阈值时, 即视为发生“足够剧烈”的事件, 触发调速器响应。SETC 中事件触发的条件可形式化定义如下:

$$\bar{r} = \min\{r \mid [\hat{x}(k_i+r) - \hat{x}(k_i)]^T \Psi [\hat{x}(k_i+r) - \hat{x}(k_i)] > \mu \hat{x}(k_i+r)^T \Psi \hat{x}(k_i+r)\} \quad (14)$$

式中,  $\bar{r}$  为任意步长后满足触发条件的事件;  $\hat{x}(k_i)$  为第  $k_i$  步时的系统估计状态;  $\Psi$  为根据系统参数和反馈增益确定的正定权重;  $r$  为任意一小段步长;  $\hat{x}(k_i+r)$  为第  $k_i+r$  步时的系统估计状态; 右上角标记  $T$  表示转置操作符。

事件触发机制下, 调速器的调节动作仅在系统状态变化率超出预设比率时执行, 实现了对通信频率与系统性能之间的灵活调控。通过调整该比率 (介于 0~1 之间), 控制器能够在通信减少与系统性能保持之间找到最佳平衡点。值得注意的是, 当比率设定为 0 时, 该机制退化为传统的时间触发方式, 而比率增加则进一步促进通信资源的节约, 但可能伴随系统性能的适度降低。

### 4 仿真与分析

为了验证基于 SETC 的 LFC 设计方法能够使系统对前馈信道上的丢包具有良好的恢复能力, 本节设置了一个包含两个区域的 LFC 仿真场景, 并对其进行了详尽的仿真分析。该场景包括区域 1 和区域 2, 并与现有的 LFC 控制器进行了比较研究。

#### 4.1 仿真设置

两区域 LFC 仿真场景下, 假设负荷突然剧烈变化, 即 LFC 系统在 5 s 和 15 s 时承受两区域负荷需求降低的阶跃变化 (0.01 p. u.), 在 30 s 和 40 s 时承受两区域负荷需求增加的阶跃变化 (0.02 p. u.)。仿真时设置 PMU 的采样频率为 100 Hz, 仿真中的采样时间设置为 10 ms。两区域 (区域 1 和区域 2) 模拟参数设置如下: 汽轮机时间常数为 0.28 s 和 0.31 s。这些值反映了汽轮机对蒸汽流量变化响应的速度。时间常数较小, 表示汽轮机能够较快地响应负荷变化, 而较大的时间常数则意味着响应速度较慢; 调速器时间常数为 0.06 s 和 0.068 s。这些参数描述了调速器对系统频率偏差反应的快慢。调速器时间常数较小, 意味着调速器能够迅速调整阀门开度, 以响应系统频率的变化; 速度下降系数为 2.35 和 2.65, 这些系数与同步发电机的惯性和功率输出有关, 反映了在有功功率不平衡时系统频率下降的速率。不同的速度下降系数考虑了不同发电机组可能具有的不同惯性和输出能力; 同步发电机的惯性系数为 0.165 和 0.219, 这些参数与发电机的物理特性有关, 它们影响系统对负荷变化的响应时间和稳定性。惯性系数较大的发电机在面对负荷波动时能够更好地维持系统的动态平衡。此外,

系统动态性能指标设置如下： $|\Delta f_i|_{\max}^n$  为 0.2 Hz， $t_i^{\text{peak}}$  为 0.11 s， $t_i^{\text{in}}$  为 1 s。设置这些指标时，需要考虑电力系统对频率稳定性的要求，以及在实际运行中可接受的偏差范围。在基准测试中，加权系数设定为  $\sigma_{i_1} = \sigma_{i_2} = \sigma_{i_3} = \frac{1}{3}$ ，以确保测试的公正性和准确性。

在仿真实验的设计中，采用了一系列的参数设置来模拟实际电力系统中可能遇到的各种负荷变化情况。通过在特定时间点引入负荷需求的阶跃变化，可以模拟出系统在面对突发负荷变化时的响应能力。PMU 的高采样频率和短采样时间的设置，旨在提高仿真数据的精确度，从而更真实地反映系统动态。通过对汽轮机、调速器、速度下降系数和同步发电机惯性系数等关键参数的精确设定，仿真实验能够准确地模拟出不同区域在面对负荷变化时的动态特性。

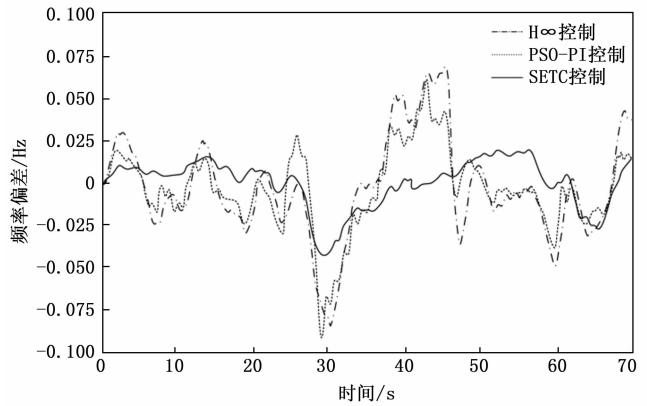
### 4.2 结果与分析

本节将所提 SETC 控制方法与主流的  $H^\infty$  控制以及 PSO-PI 控制进行对比，从而验证不同控制方法性能。 $H^\infty$  控制是一种鲁棒控制理论中的方法，旨在设计一个控制器，使得系统在面对外部扰动时，其性能指标（如超调、稳态误差等）不超过一个预设的界限。在仿真设计中， $H^\infty$  控制策略通常涉及状态反馈或输出反馈控制器的设计，这些控制器可以通过解决一系列的线性矩阵不等式来获得。PSO-PI 是一种结合了粒子群优化（PSO）算法和比例-积分（PI）控制策略的方法。PSO 是一种基于群体智能的优化算法，用于寻找 PI 控制器参数（比例增益和积分增益）的最优值，以最小化系统的性能指标，如超调和稳态误差。

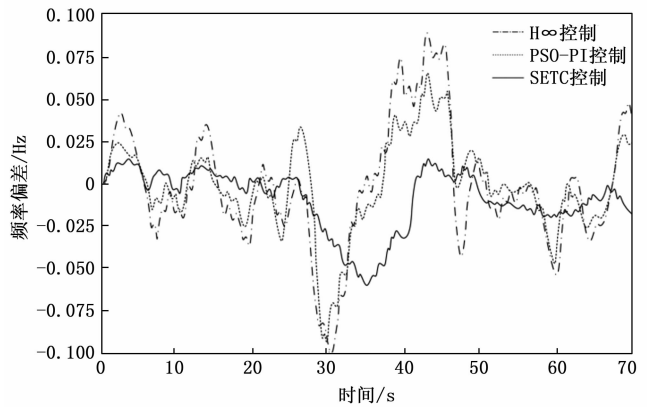
通过对比实验，SETC 控制方法在维持系统供需平衡方面展现出了优越的性能。两区域频率偏差动态变化过程如图 3 所示。具体而言，在模拟的负荷突变情况下，SETC 控制能够迅速且稳定地调整系统频率，有效减少了频率偏差的波动范围。相比之下，采用 PSO-PI 策略优化的 LFC 系统，在面对连续数据包丢失的模拟场景中，其控制性能明显下滑，表现为频率偏差的增大和恢复时间的延长。这一结果直接反映了 PSO-PI 在应对通信不稳定性方面的局限性。同时， $H^\infty$  控制方法虽然也具有一定的鲁棒性，但在本实验条件下，其控制效果仍不及 SETC 控制。SETC 控制通过其特有的设计策略，有效提升了系统对丢包事件的恢复能力，确保了电力系统在复杂环境下的稳定运行。

综上所述，实验结果表明，基于 SETC 的 LFC 设计方法在应对前馈信道丢包方面表现出了显著的优势，验证了其在提升电力系统稳定性和可靠性方面的有效性。这一发现对于未来智能电网的设计和优化具有重要的参考价值。

接着，为评估闭环网络 LFC 在阶跃负载变化下的性能，本节采用以下 3 个核心性能指标：频率响应峰值偏差（FRPD, frequency response peak deviation）：该指标量化了阶跃负载变化所引发的最大频率偏差幅度；频率偏差峰值时



(a) 区域1频率偏差动态变化



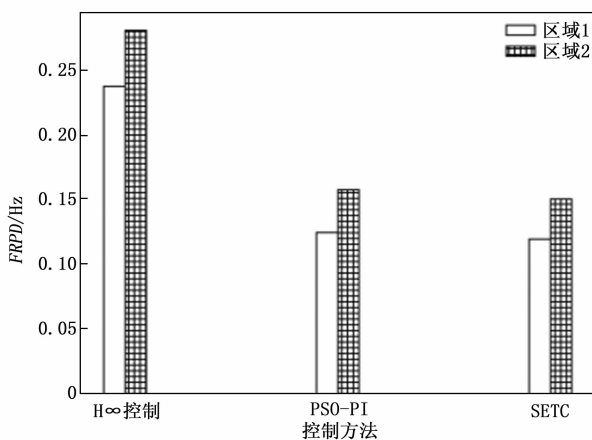
(b) 区域2频率偏差动态变化

图 3 两区域频率偏差动态变化过程

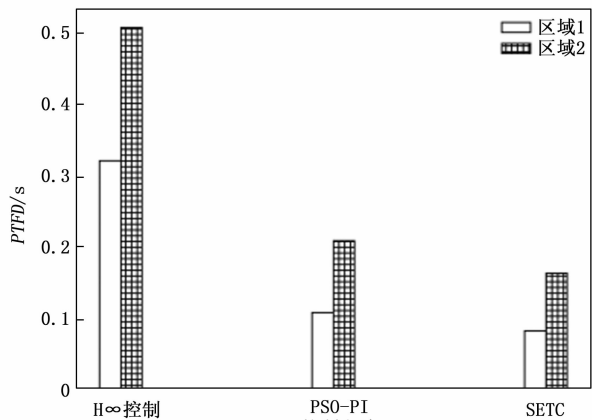
间（PTFD, peak time of frequency deviation）：此时间参数对应于达到最大频率偏差的时刻；频率响应设置时间（FRST, frequency response setting time）：指从负载变化开始至频率偏差首次稳定并持续保持在最大偏差的 2% 以内所需的时间。

不同控制策略动态性能指标如图 4 所示。可以看出，各控制算法在 FRPD 方面的表现虽有所差异（0.2 Hz 范围内），但并未呈现出显著的区分度。然而，在衡量系统响应速度的关键指标 PTFD 和 FRST 上，SETC 控制展现出了明显的优势。具体而言，相较于  $H^\infty$  控制和 PSO-PI 控制策略，SETC 控制不仅将 PTFD 缩短了 76.7% 和 23.2%，还分别将 FRST 减少了 64.5% 和 17.2%。这一改进归因于 SETC 控制对时变传输延迟的精确识别与分类，以及基于该识别结果设计的事件触发控制策略。该策略能够动态调整反馈矩阵，确保在维持 LFC 系统渐近稳定的同时，优化其动态性能，从而实现更快速的响应和更短的恢复时间。

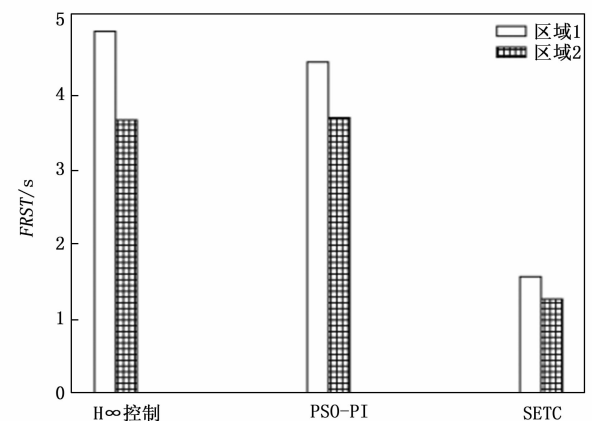
综上所述，SETC 控制策略通过其独特的事件触发控制机制和对时变延迟的精准处理，有效提升了 LFC 系统在应对负荷突变等动态事件时的性能表现，为电力系统的稳定运行提供了更为可靠的保障。通过这种控制策略，电力系统能够更有效地维持其操作参数在期望的范围内，即使在面对突发的负载变化时也能保持稳定。



(a) FRPD指标对比结果



(b) PTFD指标对比结果



(c) FRST指标对比结果

图 4 不同控制策略动态性能指标

## 5 结束语

随着智能电网技术的发展,电力系统的控制策略正逐渐从集中式向分布式转变。这种转变带来了新的挑战,尤其是在通信网络的稳定性和实时性方面。传统的 LFC 系统在面对通信延迟和数据包丢失时,其性能往往会受到显著影响。因此,研究如何在网络化环境下提高 LFC 系统的鲁棒性和效率,成为电力系统研究中的一个热点问题。在当

前电力系统的运行与控制中,LFC 扮演着至关重要的角色,尤其是在面对负荷波动和通信不确定性时。本文针对网络化 LFC 系统,提出了一种基于 SETC 的设计方法,旨在提高系统在面对前馈信道丢包等通信问题时的稳定性和可靠性。

本文的整体工作围绕网络化 LFC 系统的建模、优化和控制策略展开。首先,建立了一个线性化的 LFC 系统模型,该模型在平衡点附近对实际系统的动态行为进行了有效的近似。接着,考虑了时延和丢包对闭环 LFC 系统的影响,并在此基础上设计了 SETC 控制策略。此外,本文还构建了一个目标函数,用于优化 LFC 系统的性能,并通过稳定性分析确保了系统在面对随机时延和丢包时的渐近稳定性。本文创新点在于提出了 SETC 控制策略,该策略通过事件触发机制减少了不必要的控制信号传输,从而降低了网络带宽的占用和计算资源的消耗。与传统的周期性控制策略相比,SETC 能够更灵活地响应系统状态的变化,提高了系统的响应速度和稳定性。此外,SETC 还考虑了时变传输延迟的影响,通过动态调整反馈矩阵,优化了系统的动态性能。

尽管本文的研究取得了一定的成果,但仍存在一些不足之处。例如,SETC 控制策略在设计时主要考虑了前馈信道的丢包问题,而对于反馈信道的丢包和时延问题的处理可能不够充分。此外,本文的模型和控制策略主要基于线性化的假设,对于非线性特性更为显著的电力系统,其适用性和效果可能需要进一步的验证和改进。

未来的工作可以围绕以下几个方面展开:一是对 SETC 控制策略在更广泛的网络化环境下的适用性进行研究,包括不同规模的电力系统和更复杂的通信网络模型;二是探索 SETC 在处理反馈信道丢包和时延问题时的策略和效果;三是考虑电力系统的非线性特性,对 SETC 控制策略进行改进和优化,以提高其在实际电力系统中的应用价值。通过这些工作,可以进一步推动智能电网技术的发展,提高电力系统的运行效率和可靠性。

### 参考文献:

- [1] 王玉雯, 曾红兵, 付国龙. 考虑传输时滞的电力负荷频率采样控制系统稳定性分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38 (5): 26-32.
- [2] 白雅琴. 虚假数据注入攻击下负荷频率控制系统的弹性控制 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2024.
- [3] 刘星月, 田永强, 施开波, 等. 计及 DoS 攻击和通信时滞的电力系统负荷频率控制 [J]. 工程科学与技术, 2024, 56 (3): 249-258.
- [4] 牛松梅. 电力系统的网络化负荷频率控制研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
- [5] 张亚健. 信息-物理耦合的新能源电力系统负荷频率控制关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.

(下转第 171 页)