

DOI:10.11784/tdxbz202412029

# 考虑延时网络攻击的源网互动有源配电系统 安全频率控制方法

张 磐<sup>1,2</sup>, 杨 挺<sup>1</sup>, 岳 洋<sup>3</sup>, 秦 磊<sup>1</sup>, 吴 磊<sup>2</sup>

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;  
2. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 3. 国网天津市电力公司, 天津 300143)

**摘要:** 延时网络攻击通过抢占有限的通信带宽造成正常数据包传输延时的显著增大或连续丢包, 进而导致调频控制性能下降, 甚至诱发系统频率振荡或稳定性丧失。针对有源配电系统二次控制过程中延时网络攻击产生的影响, 提出一种基于自适应延时补偿器与鲁棒线性二次调节器(LQR)的最优频率控制方法。首先, 建立虚拟同步机控制下的电池储能和风电机组主动频率控制小信号模型, 分析网络延时对风储协同调频系统动态特性的影响机理。其次, 设计了一种鲁棒 LQR 控制器抑制光伏发电的不确定性与负荷扰动对频率造成的影响, 提高系统对复杂运行条件的适应能力。在此基础上, 结合自适应延时补偿机制, 实时识别并动态调整由网络攻击引起的延时参数进一步改善系统的调频性能。为验证所提策略的稳定性, 采用 Lyapunov-Krasovskii 方法进行了严格的理论推导, 并结合线性矩阵不等式进行控制器参数优化。最后, 在 MATLAB/Simulink 环境下构建了仿真模型, 采用不同负荷扰动和延时攻击场景, 对比分析本文方法与传统控制方法的动态调节性能。结果表明, 所提出的方法在不同程度的网络攻击下均能显著降低频率偏差, 提高系统动态响应速度, 并确保系统的渐近稳定性, 相比于传统方法表现出更强的抗干扰能力和适应性, 为解决复杂网络攻击环境下的调频问题提供了理论依据与技术支持。

**关键词:** 频率控制; 鲁棒线性二次调节器; 电池储能; 延时网络攻击

中图分类号: TK89

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)11-1155-09

## Security Frequency Control Method for Source-Grid Interactive Active Distribution Systems Under Time-Delay Cyber Attacks

Zhang Pan<sup>1,2</sup>, Yang Ting<sup>1</sup>, Yue Yang<sup>3</sup>, Qin Lei<sup>1</sup>, Wu Lei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China;  
3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300143, China)

**Abstract:** Time-delay cyber attacks degrade the frequency regulation performance of power systems by maliciously occupying constrained communication bandwidth, thereby inducing substantial increases in data packet transmission delays or consecutive packet losses. This phenomenon can ultimately lead to system frequency oscillations and stability deterioration of closed-loop control systems in a power grid. To address the impact of delayed network attacks in the secondary control process of active distribution systems, an optimal frequency control method based on an adaptive time-delay compensator and a robust linear quadratic regulator (LQR) is proposed. First, a small signal model for the active frequency control of battery energy storage and wind power generators under virtual synchronous machine control is established to analyze the influence mechanism of network time-delays on the dynamic characteristics of a wind-storage collaborative frequency modulation system. Second, a robust LQR controller is designed to suppress the influence of the uncertainty of photovoltaic power generation and load disturbances on the frequency, enhancing the adaptability of the system to complex operating conditions. By combining this controller with an adaptive time-delay

收稿日期: 2024-12-26; 修回日期: 2025-03-06.

作者简介: 张 磐 (1983—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, pan.zhang@tj.sgcc.com.cn.

通信作者: 杨 挺, yangting@tju.edu.cn.

基金项目: 国网天津市电力公司科技资助项目(电科-研发 2023-41).

Supported by the Science and Technology Project of State Grid Tianjin Electric Power Company (No. Electric Science-R&D 2023-41).

compensation mechanism, the time-delay parameters caused by network attacks can be identified in real time and adjusted dynamically to improve the frequency modulation of the system. For stability verification, a rigorous theoretical validation is conducted using the Lyapunov-Krasovskii functional method, complemented by controller parameter optimization via linear matrix inequalities. Finally, a comprehensive simulation model is established in MATLAB/Simulink to evaluate the dynamic regulation performance of the system under diverse load disturbance scenarios and time-delay attack conditions. Comparative results demonstrate that the proposed strategy achieves substantial reductions in frequency deviations, accelerates the dynamic response, and guarantees asymptotic stability under varying attack intensities. Compared with conventional approaches, the proposed control strategy is more robust to disturbances and has dynamic adaptability, providing theoretical foundations and technical substantiation for frequency modulation in power grids under sophisticated cyber attacks.

**Keywords:** frequency control; robust linear quadratic regulator (LQR); battery energy storage; time-delay cyber attack

为解决能源短缺和温室气体排放问题,可再生能源的普及率在世界范围内稳步提高<sup>[1-2]</sup>。由于电力系统的规模和复杂性不断增加、传统发电的运营成本高昂以及可再生能源的不确定性,频率控制变得越来越重要<sup>[3]</sup>。然而,这些资源的间歇性、随机性和低惯量特性对电力系统的稳定性和频率控制构成了严峻挑战。随着“双碳”目标的推进,未来配用电系统内分布式光伏和分布式风电的占比将不断增加,这将显著强化分布式电源与负荷之间的电气耦合特性<sup>[4]</sup>。探索潜在的调控资源以支持频率控制,通过构建分布式电源与负荷之间的互动机制,可以为系统频率调节提供新的解决方案。

近年来,风力发电与电网的融合越来越受到研究人员的关注,并得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。一些学者研究了风力发电主动参与频率控制的问题。在带有风电机组的频率控制中应用的一种常见控制策略是比例-积分-微分控制<sup>[6]</sup>。此外,文献中还采用了许多其他控制方法,包括鲁棒控制<sup>[7]</sup>、模糊控制<sup>[8]</sup>、滑模控制<sup>[9]</sup>和模型预测控制<sup>[10-11]</sup>。传统的二次频率控制策略通常基于一个理想化的假设,即通信网络始终完好无损且未受到任何针对数据真实性与时效性的恶意攻击。然而,随着通信网络的开放性增强,其面临网络攻击的潜在风险已不可忽视<sup>[12]</sup>。

其中,延时输入攻击<sup>[13-14]</sup>作为一类常见的网络攻击方式已经进行了大量研究。目前,大多数研究通过优化控制器增益来确保闭环系统在正常和攻击情况下的稳定性。文献[15]针对延时网络攻击下的频率控制问题,提出了一种基于事件触发机制的  $H_\infty$  频率控制方案确保系统性能,设计了新的切换系统模型,并运用 Lyapunov 稳定性理论推导出确保系统以预定  $H_\infty$  性能呈指数均方稳定的充分条件。仅依赖于静态的阈值决定发送信号,在面对一些不确定性和网络延迟时,可能无法保证最优系统性能。文献[16]提出了一种弹性控制策略解决延迟网络攻击下的频率控制问题,通过增强遥测控制命令与本地生成的反馈控制

律相结合,实现了对网络延迟和攻击引起的不稳定因素的抵御。然而,其未能完全实现对遥测系统测量的独立性,在面对严重的网络攻击场景时,控制性能仍有待提高。

为解决可再生能源发电参与调频过程中受到固有随机波动特性的影响,电池储能系统 (battery energy storage system, BESS) 有望通过在频率出现偏差时充电或放电来应对与可再生能源相关的不确定性,这引起了广泛关注<sup>[17]</sup>。虚拟同步发电机 (virtual synchronous generator, VSG) 控制技术作为一种先进的变流器控制策略,已成为电力系统频率调节领域的重要研究方向<sup>[18]</sup>。该技术通过对同步发电机的摆动方程和励磁方程进行数学建模,使其能够仿真同步发电机的动态特性,进而主动参与系统的频率调控过程。但目前对 VSG 控制的研究大多只集中于实现一次频率或电压调节,即 VSG 实时调节自身输出,为独立发电机的频率或电压调节提供功率支持<sup>[19-20]</sup>。探索 VSG 控制方法实现二次频率控制是十分值得的。

综上所述,本文针对延时网络攻击下风储主动参与配电网二次频率控制的协同控制问题,提出了一种基于 VSG 控制技术的电池储能和风电机组主动参与的鲁棒控制策略,结合鲁棒 LQR 与延时补偿器优化了系统在延时和负荷扰动条件下的调频性能。本文设计了一种鲁棒 LQR 控制器,提高了风储协同系统对扰动的适应能力;在此基础上引入延时补偿机制,有效减弱了网络延时对系统动态特性的不利影响;基于严格的理论推导分析了控制策略的稳定性,为复杂运行条件下风储协同参与二次频率控制提供了新的技术思路和方法。

## 1 可再生能源主动参与频率响应系统模型

### 1.1 频率控制系统模型

为了减少对化石燃料的依赖,采用可再生能源主动参与配电网频率控制是绿色发电未来发展趋

势. 本节将基于双馈风力发电机的风力发电机纳入有源配电网频率二次控制. 为了更好地保持系统的稳定性和在负荷扰动下快速调节频率, 采用虚拟同步机控制策略下的电池储能系统协同调节频率偏差. 图 1 显示了在延时攻击下具有风力发电机和储能主动参与频率控制的有源配电网鲁棒 LQR 最优控制框架.

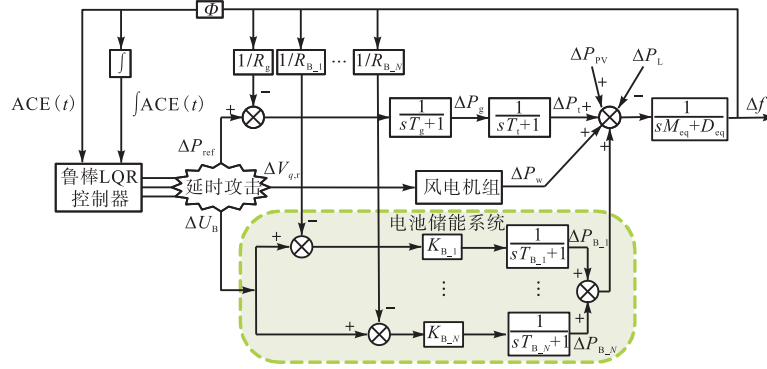


图 1 有源配电网二次频率控制系统

Fig.1 Secondary frequency control system for active distribution networks

### 1.1.1 风电机组频率响应模型

以双馈异步风力发电机 (doubly-fed induction generator, DFIG) 为例, 其简化模型如图 2 所示.

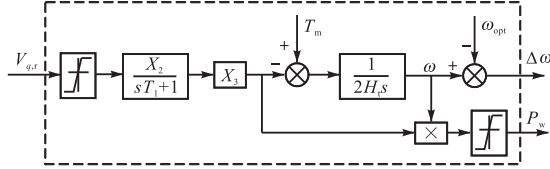


图 2 简化的 DFIG 模型

Fig.2 Simplified DFIG model

简化 DFIG 模型的主要参数 ( $X_2$ 、 $X_3$  和  $T_1$ )<sup>[21]</sup>为

$$\begin{cases} X_2 = \frac{1}{R_r} \\ X_3 = \frac{L_m}{L_{ss}} \\ T_1 = \frac{L_0}{\omega_s R_s} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $L_{ss} = L_s + L_m$ ,  $L_0 = L_{rr} + L_m^2 / L_{ss}$ ,  $L_{rr} = L_{rs} + L_m$ ;  $L_m$  为磁化电感;  $R_r$ 、 $R_s$  分别为转子电阻、定子电阻;  $L_r$ 、 $L_s$  分别为转子漏感、定子漏感;  $L_{rr}$ 、 $L_{ss}$  分别为转子自感、定子自感;  $\omega_s$  为同步转速.

DFIG 子系统的动态模型可以简化<sup>[22]</sup>为

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{X_3}{2H_t} \Delta i_{q,r} + \frac{1}{2H_t} \Delta T_m \quad (2)$$

$$\Delta i_{q,r} = -\frac{1}{T_1} \Delta i_{q,r} + \frac{X_2}{T_1} \Delta V_{q,r} \quad (3)$$

需要特别强调的是, 光伏发电的有功出力偏差对系统频率的影响呈现出特定的方向性特征: 负荷增加时系统功率出现缺额, 频率下降; 而光伏发电作为源侧设备出力增加时, 系统频率上升; 反之亦然. 为了简化分析, 在后续的研究中将光伏发电出力作为一类特殊负荷考虑.

式中:  $T_m$  为机械转矩;  $i_{q,r}$  为转子电流  $q$  轴分量;  $V_{q,r}$  为转子电压  $q$  轴分量;  $H_t$  为等效惯性常数. 结合式 (2) 和 (3), 为了使公式线性化, 令  $\omega = \omega_{opt}$ , 即基于 DFIG 的风力涡轮机工作点的转速. 因此, 控制系统中的风电机组输出功率可以线性化为

$$\Delta P_w = X_3 \omega_{opt} \Delta i_{q,r} \quad (4)$$

### 1.1.2 电池储能频率响应模型

电池储能系统和电网之间交换功率的动态过程可以在频域中用以下一阶传递函数表示<sup>[23]</sup>, 即

$$\Delta P_{B,i}(s) = \frac{K_{B,i}}{sT_{B,i}+1} U_B(s) \quad (5)$$

式中:  $P_{B,i}$  为储能输出功率;  $K_{B,i}$  和  $T_{B,i}$  分别表示充/放电系数和时间常数;  $U_B$  表示从 BESS 控制中心收到的控制信号. 动态模型在时域中描述为

$$\Delta \dot{P}_{B,i} = \frac{-1}{T_{B,i}} \Delta P_{B,i} + \frac{K_{B,i}}{T_{B,i}} U_B \quad (6)$$

为了实现 BESS 参与二次频率控制, 采用 VSG 控制策略<sup>[24]</sup>. 在系统稳态时, VSG 的小信号模型可以写成

$$\begin{cases} H_{B,i} \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta P_{B,i} - \Delta P_d - D_{B,i} \Delta f \\ \Delta P_{B,i} = \Delta P_{B,i}^{ref} - \frac{1}{R_{B,i}} \Delta f \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $H_{B,i}$  为虚拟惯量;  $D_{B,i}$  为阻尼系数;  $P_d$  为电网的功率负荷;  $P_{B,i}^{ref}$  为有功功率参考值;  $R_{B,i}$  为储能系统下垂系数.

1.1.3 传统同步机组频率响应模型

传统同步发电机由调速器、原动机和同步发电机组成,实现二次调频功能.对于传统同步发电机,采用简化的一阶微分方程描述动态模型,即

$$\begin{cases} \frac{d\Delta P_g}{dt} = -\frac{\Delta P_g}{T_g} + \frac{\Delta P^{ref}}{T_g} - \frac{1}{T_g R_g} \Delta f \\ \frac{d\Delta P_t}{dt} = -\frac{\Delta P_t}{T_t} + \frac{\Delta P_g}{T_t} \\ \frac{d\Delta f}{dt} = -\frac{D_g}{M_g} \Delta f - \frac{1}{M_g} \Delta P_d + \frac{1}{M_g} \Delta P_t \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\Delta P_g$  为调速器阀位;  $\Delta P^{ref}$  为调速器指令功率;  $P_t$  为原动机输出功率;  $R_g$  为同步机下垂系数;  $T_g$ 、 $T_t$  分别为调速器和汽轮机的时间常数;  $\Delta f$  为电机频率;  $M_g$ 、 $D_g$  分别为传统同步发电机的惯量和阻尼.

1.2 网络延时建模

有源配电网二次控制需要利用开放式通信网络传输相关信息,攻击者通过伪造身份或发送大量无效数据包,使网络带宽和处理资源被异常占用,从而阻碍合法数据的及时传递.这种攻击不仅削弱了网络服务的质量,还可能对时延敏感的应用产生严重影响,进一步加剧系统的不稳定性.延时攻击的核心特征在于异常数据流和数据包在短时间内大规模聚集,引发系统响应的显著延迟.此时网络中出现的时滞现象无法采用一般控制策略进行处理.

攻击引入的延时  $\tau(t)$  是时间的函数,满足约束

$$0 \leq \tau(t) \leq \tau_{max} \quad (9)$$

式中  $\tau_{max}$  为延时的上界.

可再生能源主动参与配电网二次频率控制系统本质为一个线性时不变系统,状态反馈下控制输入

$u(t)$  基于当前系统状态  $x(t)$  得到

$$u(t) = -Kx(t) \quad (10)$$

式中  $K$  为控制增益.

此时,时延主要分布于测量信号的反馈回路与控制信号的前向传输通道.为了便于系统分析,通常将这些时延的综合效应简化为一个等效的单一时滞模型,置于前向通道中,以有效描述其对整体动态行为的影响.在延时网络攻击下,控制输入被延迟后传输给系统,即

$$u(t - \tau) = -Kx(t - \tau) \quad (11)$$

根据图 1 有源配电网频率控制系统模型,状态向量定义为

$$x = [\Delta f \quad \Delta P_g \quad \Delta P_t \quad \Delta I_{q,r} \quad \Delta P_{B_i}]^T \quad (12)$$

在实际应用中,  $E_{AC}$  表示为计划发电量与实际发电量之间的差值.对于单个微电网控制系统,  $E_{AC}$  表示为

$$E_{AC}(t) = \Phi_f \Delta f + \Delta P_{tie} \quad (13)$$

式中:  $\Phi_f$  为频率偏差系数;  $\Delta P_{tie} = 0$ .

为消除负荷扰动带来的稳态误差,引入  $E_{AC}(t)$  的积分量即  $\int E_{AC}(t)$ . 进一步选择状态变量为  $x(t) = [\Delta f \quad \Delta P_g \quad \Delta P_t \quad \Delta I_{q,r} \quad \int E_{AC} \quad \Delta P_{B_i}]^T$ , 控制输入向量为  $u(t) = [\Delta P_{ref} \quad \Delta V_{q,r} \quad \Delta U_B]^T$ , 系统输出为  $y(t) = E_{AC}(t)$ , 扰动量为  $\omega(t) = \Delta P_d(t)$ . 因此,可再生能源接入下的系统模型可以状态空间的形式表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - \tau) + F\omega(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{D_{eq}}{M_{eq}} + \frac{1}{M_{eq}} \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{B_i}}\right) & 0 & \frac{1}{M_{eq}} & \frac{1}{M_{eq}} \omega_{opt} X_3 & 0 & \frac{1}{M_{eq}} & \dots & \frac{1}{M_{eq}} \\ -\frac{1}{T_g R_g} & -\frac{1}{T_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_t} & -\frac{1}{T_t} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{X_1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \Phi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{B_1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{T_{B_N}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{X_2}{X_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{B\_1}}{T_{B\_1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \frac{K_{B\_N}}{T_{B\_N}} \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_{eq}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} \Phi_f^T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

式中:  $M_{eq} = M_g + \sum_{i=1}^N H_{B\_i}$  为电力系统等效惯量;  $D_{eq} = D_g + \sum_{i=1}^N D_{B\_i}$  为电力系统等效阻尼。

## 2 基于鲁棒 LQR 的最优控制策略

### 2.1 鲁棒 LQR 控制器

在风电机组、储能和同步机共同参与的二次频率控制系统中, 由于多种动态变量(如频率偏差、功率变化、电流等)的耦合作用, 系统表现出复杂的动态行为。同时, 外部扰动可能导致控制性能的下降。因此, 引入鲁棒 LQR 控制器, 通过最优状态反馈机制, 不仅可以提高系统的动态响应速度, 还能抑制因扰动或建模不精确引起的偏差。此外, LQR 控制器为延时系统设计提供了基础框架, 为后续的延时补偿器设计奠定理论基础。

考虑输入延时  $\tau > 0$ , 此时的系统模型如式(14)所示, 为了优化系统性能, 求取最优控制律  $u(t)$ , 使由状态变量及控制量确定的二次型性能指标  $J$  取最小值, 设计一个最小化的性能指标的控制器, 即

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R_L(t)] dt \quad (15)$$

式中权矩阵  $Q^T = Q \geq 0$ ,  $R_L^T = R_L > 0$ 。

在无延时情况下, 经典 LQR 控制律为:  $u(t) = -Kx(t)$ 。基于线性二次型最优控制理论, 可通过状态反馈控制策略计算反馈矩阵  $K$ , 从而实现对系统动态性能优化设计。

$$K = R_L^{-1} B^T P \quad (16)$$

矩阵  $P$  为正定对称矩阵, 通过代数黎卡提方程求解, 保证闭环系统的稳定性和性能指标最优。

$$A^T P + PA - PBR_L^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (17)$$

在实际系统中, 考虑负荷扰动  $\Delta P_d(t)$  和时延

$x(t-\tau)$ , 鲁棒 LQR 控制律修正为

$$u(t-\tau) = -Kx(t-\tau) + C(t) \quad (18)$$

式中  $C(t)$  为补偿时延和扰动的补偿器项。

### 2.2 自适应补偿器

在二次频率控制中由于信息传输和处理的延迟不可避免, 延时网络攻击会加剧动态响应的波动并影响频率的稳定性。传统的控制器难以实时应对时延和扰动的复杂性, 因此设计一个自适应补偿器显得尤为重要。自适应补偿器的核心思想是在线估计和补偿时延导致的状态偏差, 从而提高系统的实时性和鲁棒性。与固定增益补偿器不同, 自适应补偿器可以根据系统状态的变化实时调整补偿增益, 以应对不可预测的时延网络攻击和负荷扰动。

根据式(14)和(18), 得到含延时网络攻击的系统状态方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(-Kx(t-\tau)) + F\omega(t) \quad (19)$$

补偿器的目标是设计补偿输入, 使系统能够实时抵消带来的影响, 从而提高系统稳定性。补偿器结构定义为

$$C(t) = -\hat{B}x(t-\tau) \quad (20)$$

式中  $\hat{B}$  为补偿器增益矩阵, 通过自适应律实时调整。

设计自适应律为

$$\dot{\hat{B}} = -\gamma x(t-\tau)x(t-\tau)^T \quad (21)$$

式中  $\gamma > 0$  为自适应增益参数, 控制补偿器的调整速率。

于是有

$$\dot{x}(t) = \tilde{A}x(t) - \tilde{B}(t-\tau) + F\omega(t) \quad (22)$$

式中:  $\tilde{A} = A$ ;  $\tilde{B} = BK + B\hat{B}$ 。

通过上述设计, 鲁棒 LQR 控制器基于系统状态反馈, 提供了对系统性能与稳定性的基本保障, 而自适应补偿器通过实时调节补偿增益矩阵  $\hat{B}$ , 有效应对网络延时攻击带来的不确定性影响。最终控制输入  $u(t)$  结合鲁棒控制律与补偿器增益实现闭环控制, 确保系统在存在网络延时与负荷扰动的情况下仍能保持稳定运行。

### 2.3 基于线性矩阵不等式的控制器参数求解

在鲁棒控制和延时系统分析中, 线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)的求解过程步骤如下。

**步骤 1** 确定目标矩阵不等式  $\mathcal{M}$ 。

**步骤 2** 选择决策变量: 定义需要优化的变量, 即增益矩阵相关参数。

**步骤 3** 矩阵参数化: 构造的 LMI 中所有参数均为优化变量的线性函数。

**步骤 4 求解器设置:**采用 LMI Toolbox 将问题转化为半定规划问题.

**步骤 5 数值优化:**若 LMI 求解成功,则系统稳定性和控制律设计的有效性得到验证.

**步骤 6 结果验证:**将求解结果代回系统模型,检查实际动态性能和稳定性裕度.

### 3 延时攻击下渐近稳定性分析

为保证有源配电网二次频率控制在延时网络攻击与负荷扰动共同作用下的系统稳定性,本文基于 Lyapunov 稳定性理论构造了能量泛函.结合补偿器设计后的系统动态方程,给出了系统鲁棒稳定性判据,并理论证明.通过 LMI 的形式表述,稳定性判据为控制器与补偿器增益的协同优化设计提供了理论依据.以下给出稳定性判据定理,并在其后提供详细证明.

**定理:**若存在正定矩阵  $P_1 > 0$ ,  $Q_1 > 0$ ,使得以下 LMI 不等式成立.

$$\mathcal{M} = \begin{bmatrix} \tilde{A}^T P_1 + P_1 \tilde{A} + Q_1 + 2\delta^2 P_1^T P_1 & -P_1 \tilde{B} \\ -\tilde{B}^T P_1 & -Q_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

则在网络延时攻击下,设计的鲁棒控制器和自适应补偿器保证闭环系统渐近稳定.

证明:

构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函为

$$V(t) = x^T(t)P_1x(t) + \int_{t-\tau}^t x^T(s)Q_1x(s)ds \quad (24)$$

其中权重矩阵  $P_1$  和  $Q_1$  为正定矩阵,即  $P_1 > 0$ ,  $Q_1 > 0$ .

对  $V(t)$  关于时间  $t$  求导,利用 Leibniz 积分法,则有

$$\dot{V}(t) = 2x^T(t)P_1\dot{x}(t) + x^T(t)Q_1x(t) - x^T(t-\tau)Q_1x(t-\tau) \quad (25)$$

系统动态方程  $\dot{x}(t) = \tilde{A}x(t) - \tilde{B}(t-\tau) + \Delta F_\omega(t)$ , 其中  $\Delta F_\omega(t) = F\omega(t)$  代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & x(t)^T (\tilde{A}^T P_1 + P_1 \tilde{A} + Q_1) x(t) - 2x(t)^T \cdot \\ & P_1 \tilde{B} x(t-\tau) - x(t-\tau)^T Q_1 x(t-\tau) + \\ & 2x^T(t)P_1\Delta F_\omega(t) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\dot{V}(t) = z^T(t)\Phi_M z(t) + 2x^T(t)P_1\Delta F_\omega(t) \quad (27)$$

其中

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (28)$$

矩阵  $\Phi_M$  为

$$\Phi_M = \begin{bmatrix} \tilde{A}^T P_1 + P_1 \tilde{A} + Q_1 & -P_1 \tilde{B} \\ -\tilde{B}^T P_1 & -Q_1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

对于扰动项  $2x^T(t)P_1\Delta F_\omega(t)$ , 利用 Cauchy-Schwarz 不等式

$$2x^T(t)P_1\Delta F_\omega(t) \leq 2\delta^2 x^T(t)P_1^T P_1 x(t) \quad (30)$$

其中,假设  $\|\Delta(t)\| \leq \delta$ . 因此有

$$\dot{V}(t) \leq z^T(t)\Phi_M z(t) + 2\delta^2 x^T(t)P_1^T P_1 x(t) \quad (31)$$

因此,若闭环系统是稳定的,显然能量随着时间的增长而逐渐趋向于零,即  $\dot{V}(t) \leq 0$ . 而满足这一要求的充分条件为

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}^T P_1 + P_1 \tilde{A} + Q_1 + 2\delta^2 P_1^T P_1 & -P_1 \tilde{B} \\ -\tilde{B}^T P_1 & -Q_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (32)$$

证毕.

通过上述的线性矩阵不等式的形式表述,能量泛函的构建及系统鲁棒稳定性判据的给出和证明,理论上保证了所设计的控制器与补偿器增益的严格稳定及协同优化性能.

## 4 仿真分析

### 4.1 算例参数设置

为验证本文所提方法的可行性与鲁棒性,以采用风电机组和储能联合参与的频率控制系统为例.仿真参数如表 1~3 所示.控制器优化设计算法与有源配电网二次频率控制仿真在 MATLAB/Simulink 环境下进行.

为了证明基于鲁棒 LQR 和延时补偿的控制方法,进行了 2 个案例研究.第 1 个案例验证所提方法的在不同负荷扰动下的可行性,设置运行场景为延时上界  $\tau_{max} = 300$  ms,不同负荷扰动时系统频率特性.第 2 个案例与已有控制算法进行对比,验证本文所提控制算法的有效性.策略 1 为本文所提基于延时补偿器的鲁棒 LQR 最优控制方法;策略 2 为传统鲁棒 LQR 最优控制方法;策略 3 为  $H_\infty$ -PID 控制方法.

表 1 同步发电机参数

Tab.1 Parameters of synchronous generator

调速器时间常数 $T_g/s$	发电机时间常数 $T/s$	同步下垂系数 $R_g/(Hz/p.u.)$	转动惯量 $M_g/(p.u. \cdot s)$	阻尼系数 $D_g/(p.u./Hz)$	偏差系数 $\Phi_f(p.u.)$
0.08	0.4	3	0.166 7	0.015	0.938 3

表 2 风电机组参数

Tab.2 Parameters of wind turbine generator system

同步转速 $\omega_s$ (p.u.)	转子电阻 $R_r$ (p.u.)	定子电阻 $R_s$ (p.u.)	转子漏感 $L_r$ (p.u.)	定子漏感 $L_s$ (p.u.)	磁化电感 $L_m$ (p.u.)	惯性常数 $H/s$
1.17	0.005 52	0.004 91	0.1	0.092 73	3.965 45	4.5

表 3 VSG-BESS 参数

Tab.3 Parameters of VSG-BESS

充电/放电系数 $K_{B_i}$	储能系统时间常数 $T_B/s$	虚拟惯量 $H_{B_i}/(p.u. \cdot s)$	虚拟阻尼系数 $D_{B_i}/(p.u./Hz)$	储能系统下垂系数 $R_{B_i}/(Hz/p.u.)$	储能系统电池组数 $N$
5	0.5	0.2	0.19	0.25	10

## 4.2 算例验证

### 4.2.1 可行性验证

为评估所提出的控制算法在稳定可再生能源和负荷波动方面的性能,令  $\Delta P_{eq} = \Delta P_d - \Delta P_{PV}$  表示光伏和负荷的等效功率波动值,  $\Delta P_{eq}$  在短时间间隔  $[0, 120]$  s 内的波动曲线如图 3 所示. 根据图中本文所提二次频率控制算法对应的频率响应,带有延时补偿器的鲁棒 LQR 控制下最大频率偏差分别为 0.136 Hz 和 -0.275 Hz. 不同负荷扰动下达到稳定状态的最长时间分别为 13.70 s 和 8.01 s. 可以看出,在延时攻击下所提出的控制方法取得了稳定的控制效果.

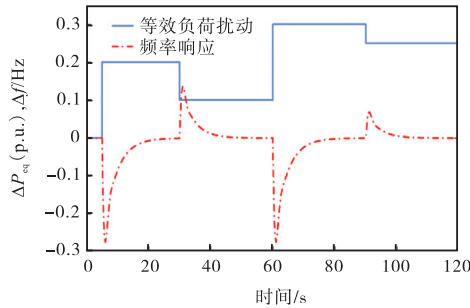


图 3 等效负荷阶跃扰动与频率动态响应

Fig.3 Equivalent load step disturbance and frequency dynamic response

### 4.2.2 对比验证

本节在验证了所提控制策略应对延时网络攻击的基础上,通过增加网络延时进一步确认所提方法的有效性,同时对比传统鲁棒 LQR 控制策略与  $H_\infty$ -PID 控制策略在负荷  $\Delta P_{eq}$  出现 0.1 p.u.的功率波动时系统频率调节效果. 图 4 展示了当延时上界  $\tau_{max} = 700$  ms 时阶跃负载扰动下系统频率偏差响应的对比结果. 可以看出,所提方法与  $H_\infty$ -PID 控制策略可以将负荷扰动引起的频率偏差保持在安全范围内,其中  $H_\infty$ -PID 控制策略最大频率偏差为 0.107 Hz 优于所提控制策略最大频率偏差为 0.138 Hz,这是因为本文所提策略设计了延时补偿环节,具有一定的保守性,然而此时  $H_\infty$ -PID 控制处于渐近稳定状态最终在 47.34 s 时恢复稳定,相同条件下所提策略仅需

18.65 s 恢复稳定,保持较好的控制效果. 传统鲁棒 LQR 控制在扰动注入后 5.60 s 迅速偏离稳定,系统失稳. 仿真结果证明了所提方法在频率控制中的有效性.

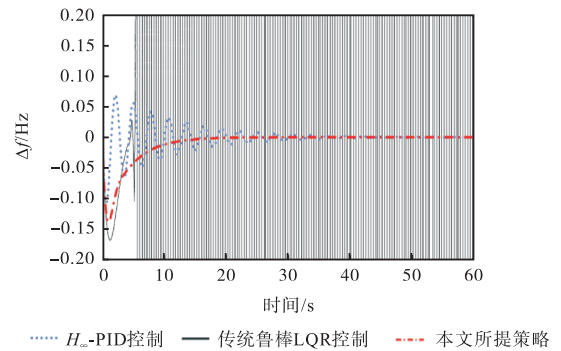


图 4 阶跃扰动下频率动态响应

Fig.4 Frequency dynamic response under step disturbance

为了进一步研究不同控制策略下电源设备输出功率的区别,笔者深入探讨并对比了在二次频率控制中同步发电机、风电机组、电池储能的等效输出功率. 如图 5 所示本文提出的控制策略同步机和储能能在初始阶段迅速响应,功率变化量快速上升至 1.75 s 到达峰值后分别在 13.68 s 和 11.76 s 逐渐稳定. 相对而言,  $H_\infty$ -PID 控制策略在初始阶段虽然也展现出了较快的响应,但伴随而来的是较为明显的振荡现象. 其中,风电机组等效输出功率最大振荡幅度达到 0.104 p.u.,这种振荡会对系统的稳定性和可靠性造成一定影响,尤其是在对响应速度和稳定性要求较高的应用场景中. 随着时间的推移,振荡逐渐衰减系统在 47.34 s 时最终趋于稳定,但在整个过程中,其稳定性和阻尼特性相较于所提方法略显不足.

在长期运行中,2 种策略下的功率等效输出均显示出渐进稳定的趋势,相同场景下所提策略在 18.65 s 时最终稳定,有效减少因长时间运行而可能出现的稳定性问题. 综合考虑响应速度、稳定性和长期性能,本研究所提出的方法在频率控制中表现出更优的性能.

综上所述,所提策略不仅为可再生能源参与频率

控制提供了新的视角,而且有望在有源配电网系统中得到广泛应用,从而提高系统的稳定性和可靠性。

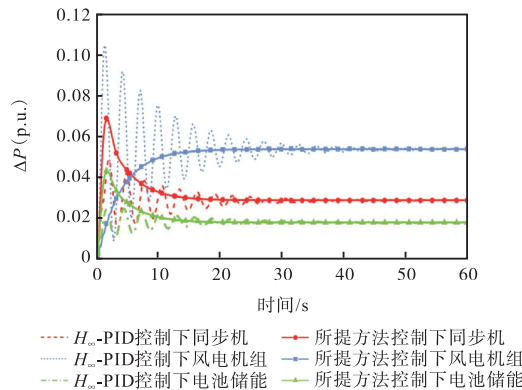


图 5 等效功率输出对比

Fig.5 Comparison of equivalent power output

## 5 结 语

针对延时网络攻击场景下风储主动参与有源配电网频率控制问题,本文提出了一种结合鲁棒 LQR 与自适应延时补偿器的协调控制策略.通过鲁棒 LQR 控制器的设计,使系统具备了良好的抗扰动能力和鲁棒性,能够有效应对外界扰动对调频性能的影响;同时,引入延时补偿器,显著缓解了网络延时对系统动态响应和频率稳定性的削弱作用.在此基础上,充分发挥风电和储能的协同优势,利用储能的快速响应能力与风电的持续调节特性,实现了频率调节过程中输出功率的优化,提升了系统整体的动态性能和调频质量.本文还采用 Lyapunov-Krasovskii 方法进行了严格的理论推导,保证所设计的控制器与补偿器增益的严格稳定.仿真结果验证了该策略的有效性和优越性,为解决复杂运行条件下的风储协同二次频率控制问题提供了理论支撑和技术参考。

### 参考文献:

- [1] 钱 伟, 孙晓彤, 费树岷. 可再生能源高渗透下时滞孤岛微电网的负荷频率控制[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 630-640.  
Qian Wei, Sun Xiaotong, Fei Shumin. Load frequency control of islanded microgrids with time-delay under high penetration of RESs[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 630-640 (in Chinese).
- [2] 刘亚闯, 杨 挺, 李 浩. 计及储备惯量和通信时延的交流微网事件触发频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 79-88.  
Liu Yachuang, Yang Ting, Li Hao. Event-triggered frequency control strategy for AC microgrids considering

reserved inertia and communication delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 79-88 (in Chinese).

- [3] 李 红, 任永峰. 含可再生能源的多微网系统负荷频率控制策略[J]. 可再生能源, 2023, 41(5): 699-704.  
Li Hong, Ren Yongfeng. Load frequency control strategy of multi-microgrid systems containing renewable energy[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(5): 699-704 (in Chinese).
- [4] 黄 堃, 刘 澄, 吕 潇, 等. 计及本地负荷的分布式光伏并网电压协同控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 127-133.  
Huang Kun, Liu Cheng, Lü Xiao, et al. Distributed photovoltaic grid-connected voltage coordination control strategy considering local load[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 127-133 (in Chinese).
- [5] Shanmugam L, Joo Y H. Stability and stabilization for T-S fuzzy large-scale interconnected power system with wind farm via sampled data control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(4): 2134-2144.
- [6] Buduma P, Vulisi N K, Panda G. Robust control and Kalman MPPT for grid-assimilated wind energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(2): 1274-1284.
- [7] Magnus D M, Scharlau C C, Pfitscher L L, et al. A novel approach for robust control design of hidden synthetic inertia for variable speed wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196: 107267.
- [8] Golkhandan R K, Torkaman H, Aghaebrahimi M R, et al. Load frequency control of smart isolated power grids with high wind farm penetrations[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(7): 1228-1238.
- [9] Deng Z W, Xu C. Frequency regulation of power systems with a wind farm by sliding-mode-based design[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(11): 1980-1989.
- [10] 马苗苗, 崔 婧, 李钰梅, 等. 风电介入下的多区域互联电力系统分布式经济模型预测负荷频率控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1557-1565.  
Ma Miaomiao, Cui Jing, Li Yumei, et al. Distributed economic model predictive load frequency control for the multi-area interconnected power system with wind power integration[J]. Control and Decision, 2024, 39(5): 1557-1565 (in Chinese).
- [11] 杨冬锋, 朱军豪, 姜 超, 等. 基于分布式模型预测的高比例风电系统多源协同负荷频率控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2804-2814.

- Yang Dongfeng, Zhu Junhao, Jiang Chao, et al. Highly-proportional wind power system multi-source collaborate load frequency control strategy based on distributed model prediction[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(7): 2804-2814 (in Chinese).
- [12] 陈 沛, 吕 腾, 王美刚. 切换网络攻击下异构多区域电力系统的负荷频率控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(12): 140-148.  
Chen Pei, Lü Teng, Wang Meigang. Load frequency control of heterogeneous multi-area power systems under switching cyber attacks[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(12): 140-148 (in Chinese).
- [13] Shafique M, Iqbal N. Load frequency resilient control of power system against delayed input cyber attack[C]//2015 Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering (RAEE). Islamabad, Islamic Republic of Pakistan, 2015: 1-6.
- [14] 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.  
Liu Xingyue, Tian Yongqiang, Shi Kaibo, et al. Load frequency control in power systems accounting for DoS attacks and communication delays[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(3): 249-258 (in Chinese).
- [15] Liu J L, Gu Y Y, Zha L J, et al. Event-triggered  $H_\infty$  load frequency control for multiarea power systems under hybrid cyber attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(8): 1665-1678.
- [16] Shahkar S, Khorasani K. A resilient control against time-delay switch and denial of service cyber attacks on load frequency control of distributed power systems[C]//2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). Montreal, Canada, 2020: 718-725.
- [17] Peng C, Li J C, Fei M R. Resilient event-triggering  $H_\infty$  load frequency control for multi-area power systems with energy-limited DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 4110-4118.
- [18] 赵熙临, 龚楚峰, 付 波. 一种风电场经 VSC-HVDC 并网的 VSG 变参数负荷频率控制策略[J]. *高电压技术*, 2024, 50(1): 117-126.  
Zhao Xilin, Gong Chufeng, Fu Bo. A VSG variable parameter load frequency control strategy for wind farms connected to the grid by VSC-HVDC[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(1): 117-126 (in Chinese).
- [19] 赵旭阳, 郭昆丽, 吕家君, 等. 孤岛模式下基于线性自抗扰 VSG 控制的频率支撑技术[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(7): 17-26.  
Zhao Xuyang, Guo Kunli, Lü Jiajun, et al. The frequency support technology based on linear active disturbance rejection VSG control in the islanding mode[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(7): 17-26 (in Chinese).
- [20] 刘鹏辉, 郑克影, 朱 军, 等. 考虑负荷动态变化的孤岛微电网二次频率控制[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(6): 213-224.  
Liu Penghui, Zheng Keying, Zhu Jun, et al. Secondary frequency control of isolated microgrid with consideration of dynamic varying loads[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(6): 213-224 (in Chinese).
- [21] Morel J, Bevrani H, Ishii T, et al. A robust control approach for primary frequency regulation through variable speed wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Power and Energy*, 2010, 130(11): 1002-1009.
- [22] Mohamed T H, Morel J, Bevrani H, et al. Model predictive based load frequency control design concerning wind turbines[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 43(1): 859-867.
- [23] Xing L T, Mishra Y, Tian Y-C, et al. Dual-consensus-based distributed frequency control for multiple energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6396-6403.
- [24] 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.  
Zhang Yajian. Research on Key Techniques for Load Frequency Control in Renewable Energy Power Systems with Coupling Cyber-Physical Effects[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021 (in Chinese).

(责任编辑: 孙立华)