

控制与决策

Control and Decision

FDI攻击下有源配电网储能系统安全控制

邓超, 唐旗, 郭方洪, 王宇, 范莎

引用本文:

邓超, 唐旗, 郭方洪, 王宇, 范莎. FDI攻击下有源配电网储能系统安全控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2346–2354.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0357>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

分布式最小二乘估计中隐匿FDI攻击策略的设计

Hidden FDI attack strategy for distributed least square estimation

控制与决策. 2021, 36(8): 1963–1969 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1688>

多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft

控制与决策. 2021, 36(5): 1049–1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制

Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid

控制与决策. 2021, 36(8): 2034–2041 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0012>

参数未知的离散系统Q-学习优化状态估计与控制

Q-learning optimal state estimation and control for discrete systems with unknown parameters

控制与决策. 2020, 35(12): 2889–2897 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0180>

FDI攻击下有源配电网储能系统安全控制

邓超¹, 唐旗², 郭方洪^{3†}, 王宇⁴, 范莎²

(1. 南京邮电大学 碳中和先进技术研究院, 南京 210042; 2. 南京邮电大学
自动化学院、人工智能学院, 南京 210042; 3. 浙江工业大学 信息工程学院,
杭州 310034; 4. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对一类二次控制输入受到虚假数据注入 (false data injection, FDI) 攻击时有源配电网频率恢复和储能系统 (energy storage systems, ESSs) 荷电状态 (state-of-charge, SoC) 平衡问题, 提出一种基于观测器与动态事件触发机制的安全控制策略, 以实现频率恢复和 SoC 平衡. 首先, 对 FDI 攻击下有源配电网频率恢复和 ESSs 的 SoC 平衡问题进行建模; 其次, 在二次控制侧设计状态观测器与攻击估计器, 并通过 Lyapunov 稳定性理论证明观测器与估计器的收敛性; 为了降低 ESSs 间的通信频率, 进一步引入动态事件触发机制, 并借助辅助观测变量动态估计事件触发期间的相邻系统状态, 给出确保系统稳定并避免 Zeno 行为的参数选定方法; 最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真, 验证所提出控制策略的有效性.

关键词: 有源配电网; 分布式储能系统; 虚假数据注入攻击; 攻击估计器

中图分类号: TP18 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0357

引用格式: 邓超, 唐旗, 郭方洪, 等. FDI 攻击下有源配电网储能系统安全控制 [J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2346-2354.

Security control for energy storage systems in active distribution network under FDI attacks

DENG Chao¹, TANG Qi², GUO Fang-hong^{3†}, WANG Yu⁴, FAN Sha²

(1. Institute of Advanced Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210042, China; 2. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210042, China; 3. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310034, China; 4. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In this paper, an observer based fault tolerant secondary control method is proposed to solve the problems of frequency restoration for active distribution network and state-of-charge (SoC) balance for energy storage systems (ESSs) under false data injection (FDI) attacks. Firstly, the secondary control model for frequency restoration and SoC balance of the active distribution network with ESSs under FDI attacks is formulated. Then, a state reconfiguration mechanism and an attack estimation observer are designed in the secondary control layer, and the exponential convergence of the observer is proved using the Lyapunov theory. To reduce the communication frequency between ESSs, a dynamic event triggered mechanism is introduced, and auxiliary observable variables are also introduced to update the states of neighbouring ESSs dynamically during triggering, and a parameter selection strategy is proposed to guarantee the system stability and exclude Zeno behavior. Finally, the effectiveness of proposed control strategy is verified by test in Matlab/Simulink.

Keywords: active distribution network; distributed energy storage system; false data injection attack; attack estimator

0 引言

有源配电网是一种分布式电源高度渗透、功率双向流动的配电网络, 近年来广泛应用于住宅区、工业区及军事基地等电力系统和关键基础设施

领域^[1-2]. 有源配电网通常由物理层中的电气元件和网络层中的通信元件组成, 属于一种信息物理系统^[3], 在近些年取得了深入进展: 物理层方面, 储能系统 (energy storage systems, ESSs) 的广泛应用极大缓

收稿日期: 2023-03-27; 录用日期: 2023-05-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62203233, 62233010); 国家重大项目 (62293504); 江苏省自然科学基金项目 (BK20220393); 南京邮电大学科研启动基金项目 (NY222111); 浙江省属高校基本科研业务费专项资金项目 (RF-A2022001).

责任编辑: 董久祥.

†通讯作者. E-mail: fhguo@zjut.edu.cn.

解了可再生能源不确定性所带来的功率波动^[4-5];网络层方面,通信设备的引入实现了各种功能的协同控制^[6].

有源配电网通常采用分层控制结构,其中通过下垂控制来实现功率的自动分配与系统自主运行^[7].然而,下垂控制会导致稳态频率和电压偏差.随着二次控制的引入,有源配电网系统实现了功率的精确分配和电压/频率的准确恢复^[8].二次控制方法主要分为集中式和分布式,其中分布式控制方法因其更好的灵活性和可扩展性受到广泛关注^[9].陈刚等^[10]提出了一种分布式固定时间二次协调控制策略以实现系统频率和电压的恢复控制.Zuo等^[11]提出了一种直流有源配电网的安全二次控制方法,实现了母线电压恢复.

在ESSs中引入分布式二次控制算法,虽然能够极大地提高有源配电网的效率和灵活性^[12],但同时也产生了一系列安全问题.虚假数据注入(false data injection, FDI)攻击作为有源配电网中一种典型的攻击方式,通过破坏信息物理系统中数据的完整/真实性使控制目标发生偏离,进而达到危及系统安全的目的.一种典型的FDI攻击是向二次控制器注入偏置信号.Kontouras等^[13]讨论了偏置注入信号的影响,并提到此类攻击方式会破坏传输到控制中心的频率测量值,并最终导致频率偏差.为了有效消除FDI攻击的影响,自适应控制由于其鲁棒性和容错性的优点受到广泛关注.Deng等^[14]讨论了具有二次控制器增益和偏置变化的攻击,提出了一种基于自适应控制技术的分布式网络弹性控制方法,用以消除对二次控制器的攻击,但这种方法会降低系统的暂态响应性能.考虑到FDI攻击的瞬时注入会改变节点的瞬时状态,所以需要引入具有更好动态性能的观测器控制方法^[15].

在实际应用中,由于通讯网络带宽和个体能量有限,连续频繁的通信会导致高能量消耗.为了减少网络通信频率,研究者们提出了事件触发控制方法.事件触发机制主要分为静态事件触发和动态事件触发.Xing等^[16]针对直流微电网分布式二次控制问题提出了一种静态事件触发控制方法,实现了电流分配和母线电压调节.不同于静态事件触发,动态事件触发机制通过引入一个时变且导数可调动态变量,使得事件触发条件动态变化,因此能够减小事件触发的次数^[17].Yang等^[18]针对孤岛交流微电网提出了一种动态事件触发控制方法实现频率恢复.

根据现有的研究结果,事件触发控制虽然广泛

应用于减少网络通信负担,但在含ESSs有源配电网安全控制方面采用动态事件触发安全控制的研究较少.有源配电网ESSs作为需要频繁通信的系统,在确保安全的前提下减少占用通信具有重要意义.因此,本文考虑孤岛运行模式下含ESSs的储能系统应对FDI攻击的分布式事件触发二次控制问题,设计安全控制方案.主要工作如下:

1) 提出一种基于观测器的攻击估计策略,用于解决FDI攻击下含ESSs的有源配电网安全控制问题.所设计的攻击估计器能够准确估计FDI攻击的状态,基于攻击估计器设计的攻击补偿控制器能够有效限制FDI攻击的影响.

2) 基于提出的攻击估计策略,首次引入一种新的动态事件触发机制,设计一种二次安全控制器,在节省通信与控制资源的前提下,实现了有源配电网频率恢复和ESSs荷电平衡.

3) 通过Lyapunov理论证明攻击估计指数收敛,结合输入-状态稳定理论验证所提动态事件触发控制算法的稳定性,通过理论排除了Zeno行为.

1 问题描述

1.1 图论

通信拓扑图可以描述为无向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$.其中: $\mathcal{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 代表节点的集合; $\mathcal{E} \subset \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 代表边的集合; $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 代表邻接矩阵,矩阵 \mathcal{A} 中的元素由边 (v_j, v_i) 的权重系数组成.当 $(v_j, v_i) \in \mathcal{E}$ 时, $a_{ij} = 1$,否则 $a_{ij} = 0$.不考虑自循环的图,即 $a_{ii} = 0, \forall i \in \mathcal{N}$,其中 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$.节点 i 的所有邻居节点组成一个集合,该集合表示为 $N_i = \{j | (v_j, v_i) \in \mathcal{E}\}$.度矩阵定义为 $\mathcal{D} = \text{diag}\{d_i\} \in \mathbf{R}^{N \times N}$,其中 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$.接着拉普拉斯矩阵可以通过 $\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A}$ 得到.显然 $\mathcal{L}\mathbf{1}_N = 0$.矩阵 $\mathcal{G} = \text{diag}\{g_i\} (\forall i = 1, \dots, N)$ 表示了参考信号与ESSs之间的通信连接关系,如果第 i 个ESS能获取参考信号,则 $g_i = 1$,否则 $g_i = 0$.

1.2 下垂控制

在含ESSs的有源配电网系统中,下垂控制得到广泛应用,使其以给定的比例分配功率和频率/电压.典型的下垂控制方法^[7-8]如下:

$$\omega_i = \omega_i^* - K_i^P P_i, \quad (1)$$

$$V_i = V_i^* - K_i^Q Q_i. \quad (2)$$

其中: P_i 和 Q_i 分别为有功功率和无功功率; ω_i^* 和 V_i^* 分别为频率设定点和电压设定点; K_i^P 和 K_i^Q 为下垂系数,可由 $K_i^P = \Delta\omega/P_i^{\max}$ 和 $K_i^Q = \Delta V/Q_i^{\max}$ 确

定, $\Delta\omega$ 和 ΔV 分别为频率和电压的变化量.

1.3 储能系统

根据文献[19-21],第*i*个ESS的有功功率 $P_i(t)$ 可以表示为

$$P_i(t) = p_i(t) \cdot P_i^{\max}. \quad (3)$$

其中: P_i^{\max} 为第*i*个ESS的电压等级, $p_i(t) \in [-1, 1]$ 为每个ESS的电源状态. 考虑到ESS的功率限制,其SoC可以表示为

$$\text{SoC}_i(t) = \text{SoC}_i(0) - \int_{t=0}^t \frac{\chi_i P_i(\tau)}{3600 \times C_i} d\tau. \quad (4)$$

其中: C_i 为电容(MWh), $\text{SoC}_i(0)$ 为初始荷电状态, χ_i 为充放电效率.

定义 $E_i(t)$ 为第*i*个ESS的荷电状态,基于式(3)和(4), $E_i(t)$ 对时间*t*求导可得

$$\dot{E}_i(t) = -\frac{\chi_i P_i^{\max} p_i(t)}{3600 \times C_i} = K_i p_i(t), \quad (5)$$

其中 $K_i = -\chi_i P_i^{\max} / (3600 \times C_i)$. 假设最大功率输出 P_i^{\max} 与 C_i 成正比,即 $C_j / C_i = P_j^{\max} / P_i^{\max}$.

式(5)表明了 p_i 与 E_i 之间的转换关系,由此可得ESSs的动态方程为

$$\begin{cases} \dot{E}_i(t) = K_i p_i(t), \\ \dot{p}_i(t) = u_i^E(t). \end{cases} \quad (6)$$

其中: $E_i(t)$ 和 $p_i(t)$ 为能量和功率状态, $u_i^E(t)$ 为第*i*个ESS的控制输入, $i = 1, 2, \dots, N$. 令 $x_{i1}(t) = E_i(t)$, $x_{i2}(t) = K_i p_i(t)$, 则系统(6)可以映射到如下新的状态空间:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1}(t) = x_{i2}(t), \\ \dot{x}_{i2}(t) = u_i^E(t). \end{cases} \quad (7)$$

其中: $u_i^E(t) = u_i^P(t) / K_i$ 表示实现SoC平衡和功率分配的控制输入, $i = 1, 2, \dots, N$.

1.4 二次控制

下垂控制虽然可以实现自主功率分配,但会导致频率和电压偏离参考值,这将严重影响电能质量,因此需要引入二次控制将频率和输出电压校正到参考值. 为了设计频率恢复的二次控制,将下垂方程(1)对时间*t*求导可得

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_i^* - K_i^P \dot{P}_i. \quad (8)$$

Bidram等^[22]指出系统的频率和电压可以在二次侧调节,即控制输入为 $\dot{\omega}_i = u_i^\omega$,每个ESS的实际功率输出可以通过 $K_i \dot{P}_i = u_i^e$ 进行调节. 将上述的调节输入代入式(8),取时间积分可得

$$\omega_i^* = \int (K_i^P \dot{P}_i + u_i^\omega) dt =$$

$$\int (K_i^P / K_i u_i^e + u_i^\omega) dt, \quad (9)$$

其中 u_i^ω 和 u_i^e 是待设计的二次控制输入.

1.5 FDI攻击

有源配电网系统中的二次控制向ESSs分配通信和计算任务,因此在控制指令下发的过程中可能会受到网络攻击的影响. 本文考虑攻击者对控制器输入发起FDI攻击的情形. 这种攻击通常会使得母线电压偏离正常值,同时也会影响功率配比. 在FDI攻击下,ESSs的输入为 $u_i^e(t) + f_i(t)$,结合式(7)则有

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + B(u_i^e(t) + f_i(t)). \quad (10)$$

其中: $x_i(t) = [x_{i1}(t) \ x_{i2}(t)]^T$, $A = [0 \ 1; 0 \ 0]$, $B = [0 \ 1]^T$; $f_i(t) \in \mathbf{R}$ 为第*i*个ESS的攻击信号.

假设1 攻击信号 $f_i(t)$ 和 $\dot{f}_i(t)$ 有界,即存在两个正常数 α 和 β ,使得 $\|f_i(t)\| \leq \alpha$ 以及 $\|\dot{f}_i(t)\| \leq \beta$.

与ESSs类似,FDI攻击影响下系统频率 $\omega_i(t)$ 对应的二次控制模型如下:

$$\dot{\omega}_i(t) = u_i(t)^\omega + f_i^\omega(t), \quad \forall i = 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

其中 $f_i^\omega(t) \in \mathbf{R}$ 表示第*i*个ESS中频率控制器遭受到的FDI攻击信号,且满足假设1.

1.6 控制目标

本文的控制目标是在FDI攻击的影响下,为每个ESS设计分布式安全控制器 $u_i^e(t)$ 和 $u_i^\omega(t)$,使得:

1) ESS荷电平衡,有功功率按比例分配,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (E_i(t) - E_j(t)) = 0, \quad (12)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (K_i p_i(t) - K_j p_j(t)) = 0, \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, N; \quad (13)$$

2) 有源配电网的频率恢复,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\omega_i(t) - \omega^{\text{ref}}) = 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N, \quad (14)$$

其中 ω^{ref} 为电网参考频率.

注1 注意到电压恢复和无功功率分配与频率恢复和有功功率分配类似,限于篇幅,本文省略了电压和无功功率分配控制.

2 主要结果

本节首先提出针对ESSs系统(10)的攻击估计器设计方法,随后借助Lyapunov方法证明该攻击估计器的稳定性,进而引入分布式动态触发机制,通过理论分析排除了Zeno行为.

2.1 攻击估计器设计

为了方便得到FDI攻击的估计值,对式(10)同时设计如下形式的状态重构机制和攻击估计器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i(t) = A\hat{x}_i(t) + Bu_i(t) + B\hat{f}_i(t) + Le_{x_i}(t), \\ \dot{\hat{f}}_i(t) = -\Gamma\dot{e}_{x_i}(t) + Me_{x_i}(t). \end{cases} \quad (15)$$

其中: $\hat{f}_i(t) \in \mathbf{R}$ 为第 i 个 ESS 攻击信号的估计值, $\hat{x}_i(t) \in \mathbf{R}^n$ 为 $x_i(t)$ 的状态重构值, $e_{x_i}(t) = \hat{x}_i(t) - x_i(t)$, L, Γ 及 M 为待设计的观测器增益矩阵.

定理1 考虑系统(10), 攻击信号 $f_i(t)$ 满足假设1, 若存在观测器增益 L, Γ 及 M , 满足 $M - \Gamma(A + L) = 0$ 和 $\Gamma B > 0$, 且同时存在正定矩阵 P_0 和 R_0 , 满足代数 Riccati 方程

$$P_0(A + L) + (A + L)^T P_0 - P_0 B R_0^{-1} B^T P_0 = -Q, \quad (16)$$

则系统(15)可确保 (e_{x_i}, \hat{f}_i) 指数收敛于集合 S , 且指数收敛率至少为 c_0 . 集合 S 定义如下:

$$S = \left\{ (e_{x_i}, \hat{f}_i) \mid \lambda_{\min}(P_0) \|e_{x_i}\|^2 + \lambda_{\min}(R_0) \|\hat{f}_i\|^2 \leq \lambda_{\min}(R_0) \alpha^2 + \frac{\beta^2}{c_0} \right\}. \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{\min(c_1, c_2)}{\max(\lambda_{\max}(P_0), \lambda_{\max}(R_0))}, \\ c_1 &= \lambda_{\min}(Q) > 0, \\ c_2 &= 2\lambda_{\min}(B^T \Gamma^T R_0) + \lambda_{\min}(R_0) - 1 > 0. \end{aligned}$$

证明 定义 $e_{f_i}(t) = \hat{f}_i(t) - f_i(t)$, 可得如下误差动态方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_{x_i}(t) = (A + L)e_{x_i}(t) + Be_{f_i}(t), \\ \dot{e}_{f_i}(t) = -\Gamma Be_{f_i}(t) - \dot{f}_i(t). \end{cases} \quad (18)$$

选取如下 Lyapunov 函数:

$$V(t) = e_{x_i}^T(t) P_0 e_{x_i}(t) + e_{f_i}^T(t) R_0 e_{f_i}(t). \quad (19)$$

根据式(10)和(15), 将 $V(t)$ 对时间 t 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= e_{x_i}^T(t) ((A + L)^T P_0 + P_0(A + L)) e_{x_i}(t) + 2e_{f_i}^T(t) B^T P_0 e_{x_i}(t) - 2e_{f_i}^T(t) R_0 \dot{f}_i(t) - 2e_{f_i}^T(t) B^T \Gamma^T R_0 e_{f_i}(t). \end{aligned} \quad (20)$$

根据 Young 不等式和矩阵二次型性质可得如下关系:

$$\begin{aligned} 2e_{x_i}^T B^T P_0 e_{x_i} &\leq e_{x_i}^T e_{x_i} + e_{x_i}^T P_0 B B^T P_0 e_{x_i} - 2e_{x_i}^T B^T \Gamma^T R_0 e_{x_i} \leq \\ &- 2\lambda_{\min}(B^T \Gamma^T R_0) \|e_{x_i}\|^2 - e_{x_i}^T R_0 \dot{f}_i \leq \\ &- \lambda_{\min}(R_0) (\|e_{x_i}\|^2 + \beta^2). \end{aligned} \quad (21)$$

将式(21)代入(20)可得

$$\dot{V}(t) \leq -c_1 \|e_{x_i}(t)\|^2 - c_2 \|e_{x_i}(t)\|^2 + \beta^2, \quad (22)$$

其中 c_1, c_2 由定理1给出. 由式(19)可得如下不等式:

$$\begin{aligned} V(t) &\leq \lambda_{\max}(P_0) \|e_{x_i}(t)\|^2 + \lambda_{\max}(R_0) \|e_{x_i}(t)\|^2 \leq \\ &\max(\lambda_{\max}(P_0), \lambda_{\max}(R_0)) (\|e_{x_i}(t)\|^2 + \|e_{x_i}(t)\|^2). \end{aligned} \quad (23)$$

结合式(22)和(23)可得

$$\dot{V}(t) \leq -c_0 V(t) + \beta^2. \quad (24)$$

令 \bar{S} 为集合 S 的补集, 当 $(e_{x_i}, \hat{f}_i) \in \bar{S}$ 时, 有

$$\begin{aligned} V(t) &\geq \lambda_{\min}(P_0) \|e_{x_i}(t)\|^2 + \lambda_{\min}(R_0) \|\hat{f}_i(t)\|^2 \geq \\ &\lambda_{\min}(P_0) \|e_{x_i}(t)\|^2 + \lambda_{\min}(R_0) (\|\hat{f}_i(t)\|^2 - \alpha^2) \geq \\ &\frac{\beta^2}{c_0}. \end{aligned} \quad (25)$$

由此可得, 当 $(e_{x_i}, \hat{f}_i) \in \bar{S}$ 时, $\dot{V}(t) \leq 0$.

根据 Lyapunov 理论, 这意味着 (e_{x_i}, \hat{f}_i) 在 \bar{S} 内的状态轨迹收敛于集合 S , 所以 (e_{x_i}, \hat{f}_i) 一致有界并且指数收敛于集合 S , 指数收敛率至少为 c_0 . \square

注2 需要指出的是, 式(15)中取 $A = 0, B = 1$, 可以实现频率二次控制输入攻击估计器的设计. 证明过程与 ESSs 二次控制输入攻击估计器设计类似, 限于篇幅, 证明略.

2.2 动态事件触发控制器设计

为了实现控制目标(12)和(13), 将 ESSs 控制输入 $u_i^e(t)$ 设计为如下形式:

$$u_i^e(t) = cB^T P \xi_i(t) - \hat{f}_i(t), \quad (26)$$

其中: $\xi_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j(t) - x_i(t))$, $c = \frac{1}{\lambda_2}$, λ_2 为矩阵 \mathcal{L} 的最小非零特征值. P 由以下 Riccati 方程给出:

$$PA + A^T P - 2PB B^T P = -Q. \quad (27)$$

为了进一步减少邻居节点间不必要的通信, 实现渐近同步, 本文设计一种动态事件触发协议来确定相邻 ESSs 之间传输信息的时间序列 $\{t_k^i\}$, 并排除 Zeno 行为.

假设网络是通过通信网络连接, 并且有源配电网中的每个 ESS 只能在特定的事件触发时刻访问相邻 ESSs 的状态信息. 为此设计如下形式的控制输入:

$$u_i^e(t) = cB^T P q_i(t) - \hat{f}_i(t). \quad (28)$$

其中

$$q_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\tilde{x}_j^i(t) - \tilde{x}_i^i(t)),$$

$\tilde{x}_j^i(t) (j \in N_i)$ 为第 i 个 ESS 对第 j 个 ESS 的状态观测值. 观测器设计如下:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_j^i(t) &= A\tilde{x}_j^i(t), j \in N_i, t \in [t_k^j, t_{k+1}^j); \\ \tilde{x}_j^i(t^+) &= x_j(t), t = t_k^j. \end{aligned} \quad (29)$$

其中: $\tilde{x}_j^i(t)$ 表示第 i 个 ESS 对第 j 个 ESS 的状态估计值; t_k^j 表示节点 j 的触发时刻, 假设所有节点在初始时刻 t_0 被触发, 即 $t_0^j = t_0$.

假设第 i 个估计器的值在触发时刻 t_k^i 将以 $x_i(t_k^i)$ 初始化, 即 $\tilde{x}_i^j(t_k^i) = x_i(t_k^i)$, 这表明在不同 ESSs 引入的估计器对同一 ESS 的估计值有相同的动态变化. 为便于表示, 将 $\tilde{x}_j^i(t)$ 和 $\tilde{x}_i^i(t)$ 分别写为 $\tilde{x}_j(t)$ 和 $\tilde{x}_i(t)$, 则 $q_i(t)$ 可重新表示为

$$q_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\tilde{x}_j(t) - \tilde{x}_i(t)). \quad (30)$$

定义估计误差变量 $\tilde{e}_i(t) = \tilde{x}_i(t) - x_i(t)$, 其动态方程为

$$\dot{\tilde{e}}_i(t) = A\tilde{e}_i(t) + cBB^T q_i(t) + Be_{f_i}(t). \quad (31)$$

令 $x(t) = [x_1^T(t), x_2^T(t), \dots, x_N^T(t)]^T$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \\ (I_N \otimes A)x(t) &- (c\mathcal{L} \otimes BB^T P)\tilde{x}(t) - (I_N \otimes B)e_f(t). \end{aligned} \quad (32)$$

定义一致性误差 $\bar{x}(t) = (\mathcal{N} \otimes I_N)x(t)$, 其中 $\mathcal{N} = I_N - \frac{1}{N}\mathbf{1}_N\mathbf{1}_N^T$, 注意到 $\mathcal{L}\mathcal{N} = \mathcal{N}\mathcal{L} = \mathcal{L}$, 可得以下动态方程:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= (I_N \otimes A - c\mathcal{L} \otimes BB^T P)\bar{x}(t) - \\ &(c\mathcal{L} \otimes BB^T P)\tilde{e}(t) - (\mathcal{N} \otimes B)e_f(t). \end{aligned} \quad (33)$$

其中: $e_f(t) = [e_{f_1}^T(t), e_{f_2}^T(t), \dots, e_{f_N}^T(t)]^T$, $\tilde{e}(t) = [\tilde{e}_1^T(t), \tilde{e}_2^T(t), \dots, \tilde{e}_N^T(t)]^T$.

下面提出本文设计的动态事件触发协议. 首先, 对每个 ESS 引入一个辅助变量, 辅助变量动态方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_i(t) &= \\ -\alpha_0\eta_i(t) &+ \bar{\sigma}_i \|q_i(t)\|^2 - \gamma_0 \|\tilde{e}_i(t)\|^2 + \beta_0 e^{-\alpha_1 t}. \end{aligned} \quad (34)$$

其中: $\bar{\sigma}_i = -\delta_2/\sigma_i\kappa$, $\gamma_0 = (2c\lambda_{\max}(\mathcal{L}) + \kappa)\delta_2$, $\kappa > 0$, $\sigma_i \in (0, 1)$, $\delta_2 = \|\mathcal{L} \otimes PBB^T P\|$, $\beta_0 > 0$.

第 i 个 ESS 的事件触发间隔由以下协议确定:

$$\begin{aligned} t_{k+1}^i &= \inf \{t > t_j^i | \eta_i(t) + \lambda_i(\bar{\sigma}_i \|q_i(t)\|^2 - \\ &\gamma_0 \|\tilde{e}_i(t)\|^2 + \beta_0 e^{-\alpha_1 t}) \leq 0\}. \end{aligned} \quad (35)$$

注3 需要注意的是, 当 $\eta_i(t) \equiv 0$ 时, 动态事件触发机制(35)退化为如下静态事件触发的形式:

$$\begin{aligned} t_{k+1}^i &= \\ \inf \{t > t_j^i | \bar{\sigma}_i \|q_i(t)\|^2 - \gamma_0 \|\tilde{e}_i(t)\|^2 + \beta_0 e^{-\alpha_1 t} \leq 0\}. \end{aligned} \quad (36)$$

定理2 若针对 ESSs (10) 二次控制输入的 FDI 攻击满足假设1, 则 ESSs 通过使用基于分布式动态事件触发机制(35)的安全控制策略(28), 可以实现控制目标(12)和(13), 且所设计的动态事件触发机制无 Zeno 行为.

证明 定理2的证明分为两部分, 第1部分为稳定性证明, 第2部分为避免 Zeno 行为的证明.

1) 稳定性证明. 由于 $q(t) = -(\mathcal{L} \otimes I_n)\tilde{x}(t)$, $\tilde{e}(t) = \tilde{x}(t) - x(t)$, 可得

$$q(t) = -(\mathcal{L} \otimes I_n)(\tilde{e}(t) + x(t)). \quad (37)$$

又因为 $(\mathcal{L} \otimes I_n)x(t) = (\mathcal{L} \otimes I_n)\bar{x}(t)$, 可得 $q(t)$ 、 $\bar{x}(t)$ 和 $\tilde{e}(t)$ 之间的关系为

$$q(t) = -(\mathcal{L} \otimes I_n)(\tilde{e}(t) + \bar{x}(t)). \quad (38)$$

下面考虑如下 Lyapunov 函数:

$$V(t) = \bar{x}^T(\mathcal{L} \otimes P)\bar{x}. \quad (39)$$

为了简化表示, 以下计算省略对时间 t 的表示. 对式(39)求时间导数可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \\ \bar{x}^T(\mathcal{L} \otimes (A^T P + PA) - 2c(\mathcal{L}^2 \otimes PBB^T P))\bar{x} - \\ 2c\tilde{e}^T(\mathcal{L}^2 \otimes PBB^T P)\bar{x} - 2\bar{x}^T(\mathcal{N} \otimes PB)e_f. \end{aligned} \quad (40)$$

将式(38)代入(40)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \\ \bar{x}^T(\mathcal{L} \otimes (A^T P + PA) - 2c(\mathcal{L}^2 \otimes PBB^T P))\bar{x} + \\ 2c\tilde{e}^T(\mathcal{L} \otimes PBB^T P)q - 2\bar{x}^T(\mathcal{N} \otimes PB)e_f + \\ 2c\tilde{e}^T(\mathcal{L}^2 \otimes PBB^T P)\tilde{e}. \end{aligned} \quad (41)$$

根据 Young 不等式可得

$$\begin{aligned} 2\tilde{e}^T(\mathcal{L} \otimes PBB^T P)q &\leq \\ \kappa\tilde{e}^T(\mathcal{L} \otimes PBB^T P)\tilde{e} + \frac{1}{\kappa}q^T(\mathcal{L} \otimes PBB^T P)q, \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} -2\bar{x}^T(\mathcal{L} \otimes PB)(\mathcal{N} \otimes I_n)e_f &\leq \\ \gamma\bar{x}^T(\mathcal{L}^2 \otimes PBB^T P)\bar{x} + \frac{1}{\gamma}\|(\mathcal{N} \otimes I_n)e_f\|^2, \end{aligned} \quad (43)$$

其中 $\kappa > 0$. 取 $\gamma = 2c - \frac{2}{\lambda_2} > 0$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \\ -\bar{x}^T(\mathcal{L} \otimes Q)\bar{x} + 2c\tilde{e}^T(\mathcal{L}^2 \otimes PBB^T P)\tilde{e} + \\ \kappa\tilde{e}^T(\mathcal{L} \otimes PBB^T P)\tilde{e} + \frac{1}{\gamma}\|(\mathcal{N} \otimes I_n)e_f\|^2 + \\ \frac{1}{\kappa}q^T(\mathcal{L} \otimes PBB^T P)q &\leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\delta_1 \lambda_2 \bar{x}^T \bar{x} + \theta \delta_2 \|\tilde{e}\|^2 + \frac{1}{\kappa} \delta_2 \|q\|^2 + \phi(t) = \\
 & -\delta_1 \lambda_2 \bar{x}^T \bar{x} + \sum_{i=1}^N \left(\theta \delta_2 \|\tilde{e}_i\|^2 + \frac{1}{\kappa} \delta_2 \|q_i\|^2 \right) + \phi(t).
 \end{aligned} \tag{44}$$

其中

$$\begin{aligned}
 \delta_1 &= \lambda_{\min}(Q), \delta_2 = \|\mathcal{L} \otimes PBB^T P\|, \\
 \theta &= 2c\lambda_{\max}(\mathcal{L}) + \kappa, \\
 \phi(t) &= \frac{1}{\gamma} \|\mathcal{N}^2 \otimes I_n\| \|e_f(t)\|^2.
 \end{aligned}$$

接下来针对增广系统(33)和(34)选取如下形式 Lyapunov 函数:

$$W(t) = V(t) + \sum_{i=1}^N \eta_i(t). \tag{45}$$

$W(t)$ 对时间 t 求导数可得

$$\begin{aligned}
 \dot{W}(t) &\leq \\
 & -\delta_1 \lambda_2 \bar{x}^T(t) \bar{x}(t) + \sum_{i=1}^N \left(\theta \delta_2 \|\tilde{e}_i(t)\|^2 + \right. \\
 & \left. \frac{1}{\kappa} \delta_2 \|q_i(t)\|^2 \right) + \sum_{i=1}^N \left(-\alpha_0 \eta_i(t) + \bar{\sigma}_i \|q_i(t)\|^2 - \right. \\
 & \left. \gamma_0 \|\tilde{e}_i(t)\|^2 + \beta_0 e^{-\alpha_1 t} \right) + \phi(t) = \\
 & -\delta_1 \lambda_2 \bar{x}(t)^T \bar{x}(t) - \alpha_0 \sum_{i=1}^N \eta_i(t) + N\beta_0 e^{-\alpha_1 t} - \\
 & \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sigma_i} - 1 \right) \frac{\delta_2}{\kappa} \|q_i(t)\|^2 + \phi(t) \leq \\
 & -\alpha_0 \sum_{i=1}^N \eta_i(t) - \delta_1 \lambda_2 \bar{x}^T(t) \bar{x}(t) + N\beta_0 e^{-\alpha_1 t} + \phi(t).
 \end{aligned} \tag{46}$$

令 $\alpha_2 = \min\{\alpha_0, \delta_1 \lambda_2 / \lambda_{\max}(\mathcal{L} \otimes P)\}$, 可得

$$\dot{W}(t) \leq -\alpha_2 W(t) + N\beta_0 e^{-\alpha_1 t} + \phi(t). \tag{47}$$

由上式可得

$$\begin{aligned}
 W(t) &\leq \\
 & e^{-\alpha_2 t} W(0) + N \int_0^t e^{-\alpha_2(t-\tau)} \beta_0 e^{-\alpha_1 \tau} d\tau + \phi(t) = \\
 & e^{-\alpha_2 t} W(0) + \frac{N\beta_0}{\alpha_2 - \alpha_1} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) + \phi(t) \leq \\
 & e^{-\alpha_1 t} W_0 + \phi(t),
 \end{aligned} \tag{48}$$

其中 $W_0 = W(0) + (N\beta_0 / (\alpha_2 - \alpha_1))$. 根据式(48)和 $\|e_f(t)\|$ 指数收敛, 由输入-状态稳定理论^[23]可知 $\bar{x}(t)$ 和 $\eta_i(t)$ 指数收敛.

2) 避免 Zeno 行为证明. 根据文献 [24] 和文献 [25], 可求解式(33)得

$$\bar{x}(t) =$$

$$\begin{aligned}
 & e^{A_0 t} \bar{x}(0) - \int_0^t e^{A_0(t-s)} (c\mathcal{L} \otimes BB^T P) \tilde{e}(s) ds - \\
 & (\mathcal{N} \otimes B) \int_0^t e_f(s) ds,
 \end{aligned} \tag{49}$$

其中 $A_0 = I_N \otimes A - c\mathcal{L} \otimes BB^T P$. 所以有

$$\begin{aligned}
 & \|\bar{x}(t)\| \leq \\
 & k_0 e^{-b_0 t} \|\bar{x}(0)\| + k_0 d_0 (e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t} - \\
 & e^{-b_0 t}) + k_1 d_1 e^{-c_0 t} \leq \\
 & k_0 e^{-b_0 t} \|\bar{x}(0)\| + k_0 d_0 e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t} + k_1 d_1 e^{-c_0 t} \leq \\
 & k_2 e^{-b_1 t}.
 \end{aligned} \tag{50}$$

其中: $d_0 = 2\|c\mathcal{L} \otimes BB^T P\| / (2b_0 - \alpha_1) \sqrt{N\beta_0 / \gamma_0}$, $d_1 = \|\mathcal{N} \otimes B\|$, $k_2 = 3 \max\{k_0, k_0 d_0, k_1\}$, $b_1 = \min\{\alpha_1, b_0, c_0\}$, k_0, k_1, b_0, α_1 为正数.

根据误差动态方程(31), 可得如下不等式:

$$\begin{aligned}
 & \|\dot{\tilde{e}}_i(t)\| \leq \\
 & \|A\| \|\tilde{e}_i(t)\| + \|cBB^T P\| \|q_i(t)\| + \|B\| \|e_{f_i}(t)\| \leq \\
 & \|A\| \|\tilde{e}_i(t)\| + \|cBB^T P\| \|q(t)\| + \|B\| \|e_{f_i}(t)\|.
 \end{aligned} \tag{51}$$

根据式(38), 可得

$$\|q(t)\| \leq \|\mathcal{L} \otimes I_n\| (\|\tilde{e}(t)\| + \|\bar{x}(t)\|). \tag{52}$$

结合式(51)和(52)可得

$$\|\dot{\tilde{e}}_i(t)\| \leq k_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t} + k_4 e^{-b_1 t} \leq k_5 e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t}. \tag{53}$$

其中

$$\begin{aligned}
 k_3 &= (\|A\| + \sqrt{N} \|BK\| \|H \otimes I_n\|) \sqrt{\beta / \gamma_4}, \\
 k_4 &= k_2 \|BK\| \|H \otimes I_n\|, \\
 k_5 &= 2 \max\{k_3, k_4\}, \\
 & 1/2\alpha_1 < b_1.
 \end{aligned}$$

因为 $\tilde{e}_i(t_k^{i+}) = 0$, 所以当 $t \in [t_k^i, t_{k+1}^i)$ 时, 有如下关系:

$$\begin{aligned}
 & \|\tilde{e}_i(t_{k+1}^{i-})\| = \|\tilde{e}_i(t_{k+1}^{i-})\| - \|\tilde{e}_i(t_k^{i+})\| \leq \\
 & k_5 \int_{t_k^i}^{t_{k+1}^{i-}} e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t} dt = \\
 & k_5 \frac{2}{\alpha_1} (e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t_k^i} - e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t_{k+1}^{i-}}).
 \end{aligned} \tag{54}$$

因此根据事件触发协议(35)可得

$$\sqrt{\frac{\beta_0}{\gamma_0}} e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t_k^{i+1}} \leq k_5 \frac{2}{\alpha_1} (e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t_k^i} - e^{-\frac{1}{2}\alpha_1 t_{k+1}^{i+1}}), \tag{55}$$

这表明

$$t_k^{i+1} - t_k^i \geq \frac{2}{\alpha_1} \ln \left(\frac{\alpha_1 \sqrt{\beta_0}}{2k_5 \sqrt{\gamma_0}} + 1 \right). \tag{56}$$

因此, 事件触发协议(35)能够避免 Zeno 行为.

综合上述证明, 本文提出的定理2能够实现 ESSs 的 SoC 荷电平衡和有源配电网频率恢复目标. \square

注4 对于频率控制输入 $u_i^\omega(t)$ 的设计,由于系统矩阵 $A = 0$,设计的邻居状态事件触发更新规则为 $\dot{\omega}_j^i(t) = 0, j \in N_i, t \in [t_k^j, t_{k+1}^j]$,这使得本文提出的事件触发机制退化为传统的动态事件触发机制.因此,可直接应用文献[25]中的动态事件触发机制,限于篇幅证明过程略.

3 仿真分析

下面通过实验验证本文所提安全控制方法可以保证有源配电网在受到FDI攻击时的稳定性.

考虑由4个ESSs构成的有源配电网系统,在Matlab/Simulink上搭建含逆变器的有源配电网系统进行仿真.系统物理连接和通信连接如图1所示.有源配电网初始参数和控制器参数选取如表1和表2所示.利用所设计的控制器(28),仿真得到有源配电网频率以及4个ESS荷电状态变化曲线.其中,针对第1个ESS攻击信号设计如下:

$$f_1(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t \leq 10; \\ 5, & 10 < t \leq 20; \\ 10 \sin(10t), & t > 20. \end{cases} \quad (57)$$

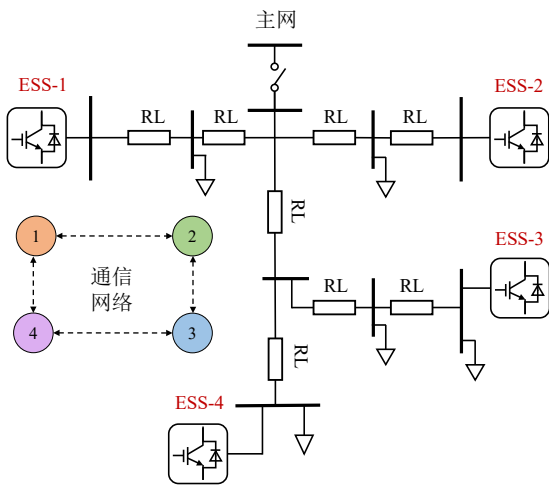


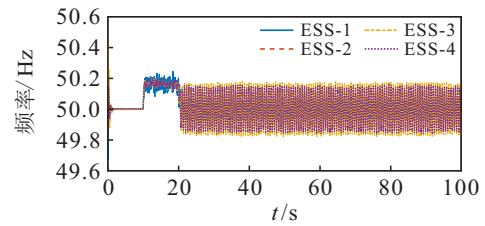
图1 有源配电网系统物理和通信连接图

表1 ESS参数

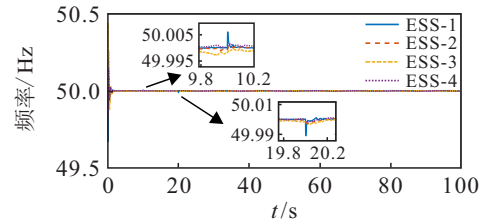
ESS序号	1	2	3	4
$K_i^P / (\text{rad/W})$	2e-5	2e-5	1e-5	1e-5
$K_i^Q / (\text{V/Var})$	4e-4	4e-4	2e-4	2e-4
$P_i^{\text{max}} / \text{kW}$	20	20	40	40
C_i / kWh	4e+3	4e+3	8e+3	8e+3
负载序号	1	2	3	4
R_{load} / Ω	0.8	0.4	0.7	0.7
$L_{\text{load}} / \text{mH}$	3.6	1.8	1.9	1.9
线路阻抗RL	$R_{\text{line}} = 0.03 / \Omega$		$L_{\text{line}} = 0.1 / \text{mH}$	
参考值	$\omega^{\text{ref}} = 100\pi / (\text{rad/s})$		$V^{\text{ref}} = 230\sqrt{2} / \text{V}$	

表2 估计器与控制器参数

参数	数值	参数	数值
Γ	[3 400]	M	[255 -1 023]
L	$\begin{bmatrix} -35 & 18 \\ 9 & -27 \end{bmatrix}$	Q	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
P_0	$\begin{bmatrix} 0.589 & 4.132 \\ 4.132 & 29.663 \end{bmatrix}$	P	$\begin{bmatrix} 1.554 & 0.707 \\ 0.707 & 1.554 \end{bmatrix}$
R_0	0.5	R	0.5
c	1	α_0	0.1
γ_0	310.5	$\bar{\sigma}_i$	6.77
β	0.4	α_1	0.04
λ_i	0.005		



(a) 无攻击补偿



(b) 有攻击补偿

图2 频率变化曲线

图2给出了ESSs的频率变化曲线,通过对比可以发现,在0~10s无攻击信号时,ESSs二次控制输入无/有攻击补偿都能够实现系统频率恢复;10~20s时,在FDI攻击 $f_1(t) = 5$ 的影响下,不引入攻击补偿会使频率偏离参考值,引入攻击信号补偿后,系统实现了频率恢复的目标;20s之后,在更复杂的攻击信号影响下,原系统频率产生较大震荡.在引入攻击补偿后,系统实现了频率恢复的控制目标.同时,在10s和20s引入攻击信号时刻,系统响应更快且超调较小.因此,本文所提出的基于观测器安全控制方法对FDI攻击有着良好的抵御能力.

图3和图4分别给出了每个ESS有功功率和SoC变化曲线,可以看出,本文设计的分布式动态事件触发控制方法在抵御攻击的前提下,能使ESSs实现功率按比例分配和SoC平衡.表3给出了采用静态(36)和动态(35)触发机制下0~10s的事件触发次数,可以看出动态事件触发次数明显小于静态事件触发,在保证系统稳定的前提下能够进一步节约通信资源.仿真结果表明,所提出的动态事件触发安全控制策略能够实现ESSs荷电平衡和有源配电网频率恢复.

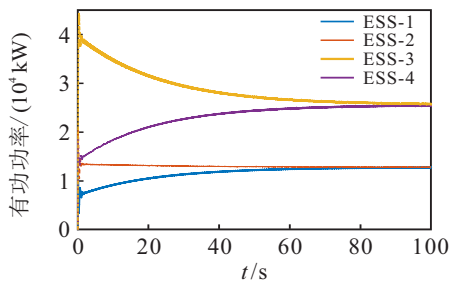


图3 有功功率变化曲线

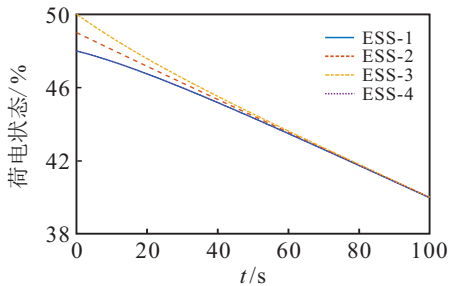


图4 每个ESS的荷电状态SoC变化曲线

表3 0~10s静态和动态事件触发次数

ESS- <i>i</i>	1	2	3	4
静态事件触发次数	533	1 082	780	948
动态事件触发次数	293	392	375	380

4 结论

本文针对一类有源配电网ESSs在二次控制输入侧受到FDI攻击的问题,提出一种基于观测器的动态事件触发安全控制策略.在确保系统容错性能的前提下有效减少网络通信.通过Lyapunov理论证明了在所提出动态事件触发条件下,避免了Zeno行为.最后,通过有源配电网仿真实验验证了本文所设计的安全控制策略可以实现配电网的频率恢复和功率分配,且可以有效消除FDI攻击的影响.然而,本文所考虑的攻击信号为有界值,对其他攻击信号(无界或不同攻击方式,如DoS攻击)及混合攻击的形式还有待进一步研究,这也是值得研究的工作.

参考文献(References)

[1] Olivares D E, Mehrizi-Sani A, Etemadi A H, et al. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1905-1919.

[2] Mengelkamp E, Gärttner J, Rock K, et al. Designing microgrid energy markets[J]. Applied Energy, 2018, 210: 870-880.

[3] Wang Y, Nguyen T L, Xu Y, et al. Cyber-physical design and implementation of distributed event-triggered secondary control in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5631-5642.

[4] Xu Y L, Zhang W, Hug G, et al. Cooperative control

of distributed energy storage systems in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 238-248.

[5] Morstyn T, Hredzak B, Agelidis V G. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3652-3666.

[6] Wang Y, Nguyen T L, Syed M H, et al. A distributed control scheme of microgrids in energy internet paradigm and its multisite implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1141-1153.

[7] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids — A General approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.

[8] Shafiee Q, Vasquez J C, Guerrero J M. Distributed secondary control for islanded microgrids — A networked control systems approach[C]. IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, 2012: 5637-5642.

[9] Wang Y, Deng C, Liu Y, et al. A cyber-resilient control approach for islanded microgrids under hybrid attacks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 147: 108889.

[10] 陈刚, 李志勇, 韦梦立. 孤岛微电网的分布式固定时间二次协调控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(1): 205-212. (Chen G, Li Z Y, Wei M L. Distributed fixed-time secondary coordination control of islanded microgrids[J]. Control and Decision, 2019, 34(1): 205-212.)

[11] Zuo S, Altun T, Lewis F L, et al. Distributed resilient secondary control of DC microgrids against unbounded attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3850-3859.

[12] Singh N, Elamvazuthi I, Nallagownden P, et al. Routing based multi-agent system for network reliability in the smart microgrid[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2992.

[13] Kontouras E, Tzes A, Dritsas L. Impact analysis of a bias injection cyber-attack on a power plant[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 11094-11099.

[14] Deng C, Wang Y, Wen C Y, et al. Distributed resilient control for energy storage systems in cyber-physical microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1331-1341.

[15] 吴劲松, 邱爱兵, 顾菊平, 等. 基于诊断观测器的最优事件触发故障检测[J]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0775. (Wu J S, Qiu A B, Gu J P, et al. Optimal event-triggered fault detection based on diagnostic observer[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0775.)

[16] Xing L T, Xu Q W, Guo F H, et al. Distributed secondary control for DC microgrid with event-triggered signal transmissions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1801-1810.

[17] 孙梦薇, 任璐, 刘剑, 等. 切换拓扑下动态事件触发多智能体系统固定时间一致性[J]. 自动化学报, 2022,

- 48(4): 1-11.
(Sun M W, Ren L, Liu J, et al. Dynamic event-triggered fixed-time average consensus control of multi-agent systems under switching topologies[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(4): 1-11.)
- [18] Yang C, Yao W, Fang J K, et al. Dynamic event-triggered robust secondary frequency control for islanded AC microgrid[J]. Applied Energy, 2019, 242: 821-836.
- [19] Lin P F, Deng C, Yang Y H, et al. Resilience-oriented control for cyber-physical hybrid energy storage systems using a semiconsensus scheme: Design and practice[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2508-2519.
- [20] Khazaei J, Miao Z X. Consensus control for energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3009-3017.
- [21] Wang Y, Xu Y, Tang Y, et al. Aggregated energy storage for power system frequency control: A finite-time consensus approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3675-3686.
- [22] Bidram A, Davoudi A, Lewis F L, et al. Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(8): 822-831.
- [23] Tabuada P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(9): 1680-1685.
- [24] Guinaldo M, Dimarogonas D V, Lehmann D, et al. Distributed event-based control for interconnected linear systems[C]. Asynchronous Control for Networked Systems. Cham: Springer, 2015: 149-179.
- [25] Du S L, Liu T, Ho D W C. Dynamic event-triggered control for leader-following consensus of multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(9): 3243-3251.

作者简介

邓超(1988—), 男, 教授, 博士生导师, 从事信息物理系统的安全控制、智能电网二次控制等研究, E-mail: dengchao_neu@126.com;

唐旗(1999—), 男, 硕士生, 从事微电网安全控制、智能电网二次控制等研究, E-mail: tangqi_njupt@163.com;

郭方洪(1987—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事微电网智能控制、分布式优化等研究, E-mail: fhguo@zjut.edu.cn;

王宇(1988—), 男, 教授, 博士, 从事微电网与分布式能源、电力系统稳定与控制等研究, E-mail: yu_wang@cqu.edu.cn;

范莎(1989—), 女, 博士, 从事智能电网安全控制、分布式状态估计等研究, E-mail: shafan90@163.com.



特邀专家 邓超, 2013年9月至2018年1月就读于东北大学信息科学与工程学院控制科学与工程专业。于2018年1月获工学博士学位。2018年5月至2021年4月在新加坡南洋理工大学电气电子工程学院从事博士后研究工作。教授/博士生导师, 入选国家级青年人才计划, IEEE Senior Member。获2022年IEEE SMC学会最佳期刊论文奖(2022 Andrew P. Sage Best Transactions Paper Award), 担任国际杂志Journal of Control and Decision的编委。在Automatica和IEEE Trans系列期刊发表论文30余篇。研究方向包括分布式优化控制与优化、信息物理系统安全控制与智能电网安全控制等。

专家寄语 世纪铸名校, 百年育英才。身作为一名东大昔日的学生, 如今的校友, 伴着“自强不息, 知行合一”的校训一路走来, 我为母校感到深深自豪。桃李不言满庭芳, 弦歌百年今又始, 值此谨贺母校百年华诞, 再展宏图, 再谱华章!