

# 虚假数据注入攻击下直流微电网分布式弹性控制

邵源政, 孟范伟, 张煜

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 针对直流微电网在虚假数据注入攻击下出现电压偏差和电流分配失衡的问题,以多分布式电源的孤岛直流微电网为研究对象,提出一种分布式弹性协同控制方法.该方法能有效消除虚假数据注入攻击的影响,在正常情况下也不会干扰到系统的运行.通过Lyapunov稳定理论证明了直流微电网在受到任意常值虚假数据注入攻击时均能保证正常稳定运行,实现电压调控和电流分配2个控制目标.利用MATLAB/Simulink搭建了仿真模型,验证了该控制方法的有效性.

**关键词:** 直流微电网;虚假数据注入攻击;分布式二次控制;弹性控制方法;电压调控;电流分配

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2026)01-0067-09

## Distributed Resilient Control of DC Microgrid Under False Data Injection Attack

TAI Yuan-zheng, MENG Fan-wei, ZHANG Yu

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: MENG Fan-wei, E-mail: mengfanwei@neuq.edu.cn)

**Abstract:** In order to solve the problem of voltage deviation and current distribution imbalance in direct current (DC) microgrid under false data injection attack, a distributed resilient cooperative control method was proposed by taking the islanded DC microgrid with multiple distributed generators as the research object. This method could effectively eliminate the impact of false data injection attacks and will not interfere with the operation of the system under normal circumstances. The Lyapunov stability theory was used to prove that the DC microgrid can operate stably when it is attacked by any constant false data injection, achieving the two control objectives of voltage regulation and current distribution. The simulation model was built by MATLAB/Simulink, and the validity of the control method was verified.

**Key words:** DC microgrid; false data injection attack; distributed secondary control; resilient control method; voltage regulation; current distribution

微电网作为电力系统中的重要组成部分,能在很大程度上缓解现有电力系统的压力,并推进电网智能化,提高新能源的调控能力<sup>[1-2]</sup>.微电网主要分为直流和交流两种<sup>[3]</sup>.直流微电网具有更好的稳定性、更优的电能质量等优点,可将风能、光伏等分布式电源(distributed generators, DGs)直接组成直流微电网,故其是研究热点<sup>[4]</sup>.下垂控制无法同时实现直流微电网电压调节和电流分配2个控制目标,需引入二次控制来解决该问题<sup>[5]</sup>.

在二次控制中可引入集中式和分布式控制.集中式控制需要中央控制器处理全局信息,会造成较高成本,易发生单点故障,无法实现即插即用.分布式控制无需中央处理器, DGs 仅需与邻域 DGs 交换信息,不易发生单点故障且可实现即插即用,更适合处理数量庞大的可再生能源<sup>[6]</sup>.因此,分布式控制被大量应用在微电网中来弥补下垂控制的不足.

与集中式控制相比,分布式控制更容易受到网络攻击的影响,使微电网不能正常运行<sup>[7-8]</sup>.因

收稿日期: 2024-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12162007).

作者简介: 邵源政(2000—),男,辽宁营口人,东北大学硕士研究生.

通信作者: 孟范伟, E-mail: mengfanwei@neuq.edu.cn.

此,抵御网络攻击具有重要意义.目前,网络攻击主要分为拒绝服务(denial-of-service, DoS)攻击和虚假数据注入(false data injection, FDI)攻击<sup>[9]</sup>. FDI攻击通过将恶意数据注入通信链路中,造成真实数据被掩盖,影响稳定运行.相较于DoS攻击,FDI攻击简单高效且具有迷惑性,不容易被检测,故消除FDI攻击影响是一个重要课题<sup>[10]</sup>.消除FDI攻击的方法有检测与隔离和弹性控制<sup>[11]</sup>.检测与隔离通过观测微电网的状态来检测FDI攻击,若发现攻击即刻隔离相关信息,但也会隔离部分有效信息<sup>[12]</sup>.因此,检测与隔离难以完全消除网络攻击影响.弹性控制是指当系统受到网络攻击后能恢复正常或性能稍有退化工作状态的方法.弹性控制会尽量削弱网络攻击影响,使微电网短时间恢复正常.近年来,弹性控制受到了众多学者的关注<sup>[13]</sup>.目前,大多数弹性控制首先要进行状态观测,设计弹性控制器来消除网络攻击的影响.但观测状态需输入较多信号,带来巨大的工作量.如文献[14]提出一种间歇式控制方法来检测是否存在恶意网络攻击,虽然该方法可有效地消除网络攻击带来的影响,但控制器需要过多的输入信号,控制方法过于复杂,带来了极大的工作量.

鉴于此,本文提出一种不依赖状态观测器的弹性控制,使得微电网在面对FDI攻击时电压调节和电流分配2个控制目标不受影响,可完全消除

任意常值FDI攻击对微电网造成的影响,并且在没有FDI攻击时也不会干扰微电网的正常运行.

## 1 预备知识

### 1.1 图 论

含  $N$  个 DG 的微电网看作连通无向图  $G = \{E, V, A\}$ , DG 看作节点,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  为节点集;  $E \subset V \times V$  为边集,  $(v_i, v_j)$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的通信链路;  $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$  表示邻接矩阵,  $a_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的连接权重.  $(v_i, v_j) \in E$ , 则  $a_{ij} = a_{ji} = 1$ , 否则  $a_{ij} = a_{ji} = 0$ ,  $a_{ii}$  为 0. 定义  $N_i = \{v_j \in V | (v_i, v_j) \in E\}$  表示第  $i$  个节点的邻域集合. 定义  $L = D - A$  为拉普拉斯矩阵, 其中  $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$  表示度矩阵,  $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$ .

### 1.2 直流微电网分层协调控制

直流微电网一次控制如图 1 所示,  $I^{\text{ref}}$  表示由电压环产生的基准电流, 在下垂控制、电压电流双闭环控制和 PWM(脉冲宽度调制)的作用下, 第  $i$  个 DG(DG <sub>$i$</sub> ) 的输出参考电压  $V_{\text{ref}i}$  可表示为

$$V_{\text{ref}i} = V^{\text{ref}} - k_i I_i. \quad (1)$$

式中:  $V^{\text{ref}}$  表示标称电压;  $k_i$  和  $I_i$  分别表示 DG <sub>$i$</sub>  的下垂增益和输出电流.

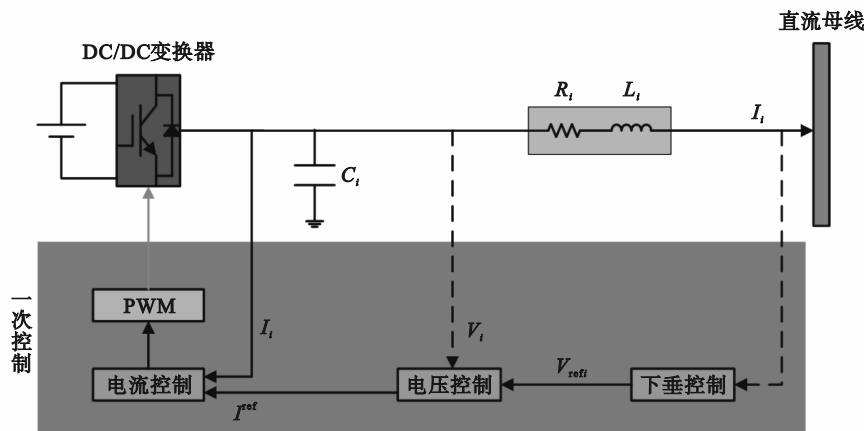


图 1 直流微电网一次控制

Fig. 1 Primary control of DC microgrid

若电压电流双闭环设计良好,则 DG <sub>$i$</sub>  的输出电压  $V_i$  可快速追踪至其参考电压  $V_{\text{ref}i}$ <sup>[15]</sup>:

$$V_i = V_{\text{ref}i}. \quad (2)$$

结合式(1)和式(2)可得

$$V_i = V^{\text{ref}} - k_i I_i. \quad (3)$$

故在下垂控制的作用下,输出电压与标称电压存在差值  $k_i I_i$ , 且  $k_i$  越大,差值越大.本文以多母线直

流微电网为研究对象,其物理架构如图 2 所示.

多母线直流微电网的控制目标可表示为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i \in G} V_i = V^{\text{ref}}, \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{I_i}{I_j} = \frac{k_j}{k_i}. \quad (5)$$

式中,  $t$  表示时间.

显然一次控制无法实现直流微电网的 2 个 一个标准的分布式二次控制策略如图 3 所示<sup>[16]</sup>. 控制目标, 因此引入二次控制来解决这一问题,

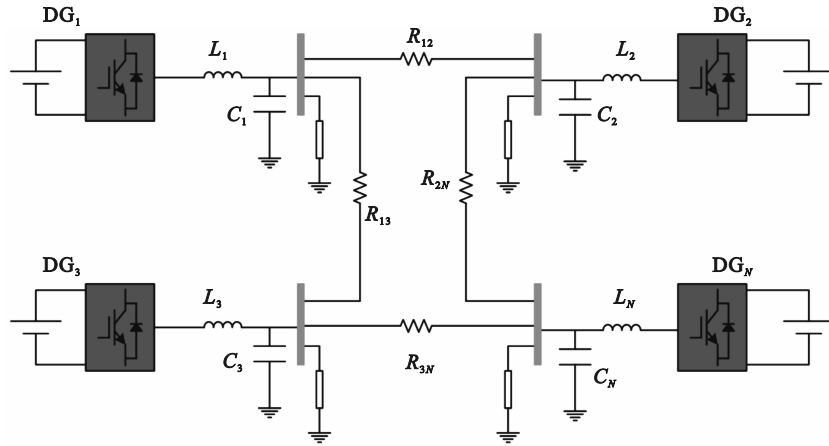


图 2 多母线直流微电网

Fig. 2 Multi-bus DC microgrid

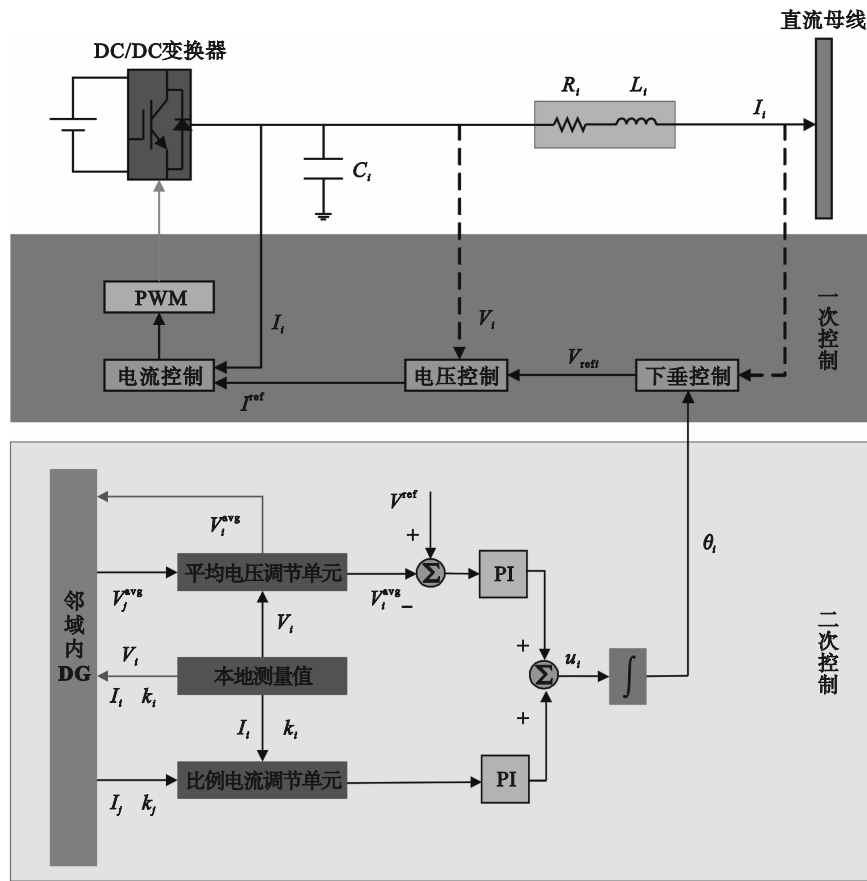


图 3 直流微电网分布式二次控制策略

Fig. 3 Distributed secondary control strategy of DC microgrid

图 3 中, PI(proportional integral)表示比例积分控制, 平均电压调节单元和比例电流调节单元的输出  $V_i^{avg}$  和  $I_{vi}$  分别定义为

$$V_i^{avg} = V_i + c_i \int \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_j^{avg} - V_i^{avg}) \right) dt, \quad (6)$$

$$I_{vi} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (k_j I_j - k_i I_i). \quad (7)$$

式中:  $c_i$  表示控制增益;  $V_i^{avg}$  和  $V_j^{avg}$  分别表示  $DG_i$  和  $DG_j$  的平均电压.

在二次控制的作用下, 微电网的控制目标均可达成.  $V_i^{avg}$  可用来替代  $DG_i$  输出电压的平均值, 证明过程见文献 [17]. 图 4 中  $c_i > 0$  表示控制增益,  $\rho_i$  表示牵制增益, 取值为 1 或 0,  $\rho_i$  取值为 1 时表示该  $DG$  能收到标称电压, 否则不能, 需保证至

少有 1 个 DG 能收到标称电压.

将二次控制的控制输出  $\theta_i$  送入一次控制中, DG<sub>*i*</sub> 的输出电压  $V_i$  可表示为

$$V_i = V_i^{\text{ref}} - k_i I_i + \theta_i. \quad (8)$$

对式(8)求导可得

$$\dot{V}_i + k_i \dot{I}_i = \dot{\theta}_i. \quad (9)$$

由图 3 可知,  $\dot{\theta}_i = u_i$ ,  $u_i$  为二次控制输入, 可表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_i^{\text{avg}} + k_i \dot{I}_i = & c_i \left( \rho_i (V_i^{\text{ref}} - V_i^{\text{avg}}) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (k_j I_j - k_i I_i) \right) + c_i \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_j^{\text{avg}} - V_i^{\text{avg}}) = \\ & c_i \left( \rho_i ((V_i^{\text{ref}} + k_i I_i) - (V_i^{\text{avg}} + k_i I_i)) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} ((V_j^{\text{avg}} + k_j I_j) - (V_i^{\text{avg}} + k_i I_i)) \right). \end{aligned} \quad (13)$$

在二次控制的作用下, 微电网稳定后,  $k_i I_i$  会趋向于固定值  $kI^s$ <sup>[16]</sup>, 故式(13)可重新写为

$$\dot{V}_i^{\text{avg}} + k_i \dot{I}_i = c_i \left( \rho_i ((V_i^{\text{ref}} + kI^s) - (V_i^{\text{avg}} + k_i I_i)) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} ((V_j^{\text{avg}} + k_j I_j) - (V_i^{\text{avg}} + k_i I_i)) \right). \quad (14)$$

为方便表达, 定义 2 个新变量:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= V_i^{\text{avg}} + k_i I_i, \\ \sigma^{\text{ref}} &= V_i^{\text{ref}} + kI^s. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中:  $kI^s$  表示微电网运行稳定后  $k_i I_i$  的值;  $\sigma_i$  表示 DG<sub>*i*</sub> 的平均电压与下垂增益和输出电流之积的和;  $\sigma^{\text{ref}}$  表示微电网稳定后, 标称电压与下垂增益和输出电流之积的和.

因此, 式(14)可重新写为

$$\dot{\sigma}_i = c_i \left( \rho_i (\sigma^{\text{ref}} - \sigma_i) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\sigma_j - \sigma_i) \right). \quad (16)$$

当微电网稳定时, 控制目标式(4)与式(5)可转化为  $\sigma_i = \sigma_j = \sigma^{\text{ref}}$ . 故在图 3 所示的分布式二次控制的作用下, 可实现  $\sigma_i = \sigma_j = \sigma^{\text{ref}}$  这一控制目标.

## 2 直流微电网分布式弹性协同控制

### 2.1 FDI 攻击的影响

定义  $u_i^a$  为在网络攻击下的二次控制输入, 可表示为

$$u_i^a = u_i + \zeta_i = c_i \left( \rho_i (V_i^{\text{ref}} - V_i^{\text{avg}}) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (k_j I_j - k_i I_i) \right) + \zeta_i. \quad (17)$$

式中:  $\zeta_i$  表示 DG<sub>*i*</sub> 受到的 FDI 攻击信号.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \exp(-\mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})(t - \tau)) \boldsymbol{\zeta} d\tau =$$

$$\left( \mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}) \right)^{-1} \boldsymbol{\zeta} \lim_{t \rightarrow \infty} \exp(-\mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})t) \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \exp(\mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})t) - \exp(\mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})t_0) \right) = \left( \mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}) \right)^{-1} \boldsymbol{\zeta}. \quad (23)$$

由式(23)可知, 若  $\boldsymbol{\zeta}$  不为 0 就会造成  $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) \neq \mathbf{0}$ , 即  $\lim_{t \rightarrow \infty} (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}^{\text{ref}}) \neq \mathbf{0}$ , 故 FDI 攻击会影

$$u_i = c_i \left( \rho_i (V_i^{\text{ref}} - V_i^{\text{avg}}) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (k_j I_j - k_i I_i) \right). \quad (10)$$

结合式(9)与式(10)可得

$$\dot{V}_i + k_i \dot{I}_i = c_i \left( \rho_i (V_i^{\text{ref}} - V_i^{\text{avg}}) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (k_j I_j - k_i I_i) \right). \quad (11)$$

对式(6)求导可得

$$\dot{V}_i^{\text{avg}} = \dot{V}_i + c_i \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_j^{\text{avg}} - V_i^{\text{avg}}). \quad (12)$$

结合式(11)与式(12)可得

假设 1 分布式电源受到的 FDI 攻击信号  $\zeta_i$  为任意常值.

在 FDI 攻击的作用下, 式(16)可写为

$$\dot{\sigma}_i = c_i \left( \rho_i (\sigma^{\text{ref}} - \sigma_i) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\sigma_j - \sigma_i) \right) + \zeta_i. \quad (18)$$

定义  $e_i = \sigma_i - \sigma^{\text{ref}}$ , 则式(18)可写为

$$\dot{e}_i = -c_i \left( \sum_{j \in N_i} a_{ij} (e_i - e_j) + \rho_i e_i \right) + \zeta_i. \quad (19)$$

定义  $\mathbf{e} = [e_1, e_2, \dots, e_N]^T$ , 其中根据式(19)可得

$$\dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})\mathbf{e} + \boldsymbol{\zeta}. \quad (20)$$

式中:  $\mathbf{L}$  表示微电网的拉普拉斯矩阵;  $\mathbf{c}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\zeta}$  分别定义为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{c} &= \text{diag}(c_i), \\ \boldsymbol{\rho} &= \text{diag}(\rho_i), \\ \boldsymbol{\zeta} &= [\zeta_1, \dots, \zeta_N]^T. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

根据式(20),  $\mathbf{e}(t)$  可表示为

$$\mathbf{e}(t) = \exp(-\mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})(t - t_0)) \mathbf{e}(t_0) + \int_{t_0}^t \exp(-\mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})(t - \tau)) \boldsymbol{\zeta} d\tau. \quad (22)$$

由于  $\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}$  是一个对称且正定的矩阵, 则  $\exp(-\mathbf{c}(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})(t - t_0)) \mathbf{e}(t_0)$  可趋向于 0, 因此,

响到微电网的稳定性. 因此可引入弹性控制来消除 FDI 攻击的影响, 保证微电网稳定运行.

## 2.2 分布式弹性控制策略

的基础上设计弹性控制, 如图 4 所示.

为消除 FDI 攻击的影响, 在分布式二次控制

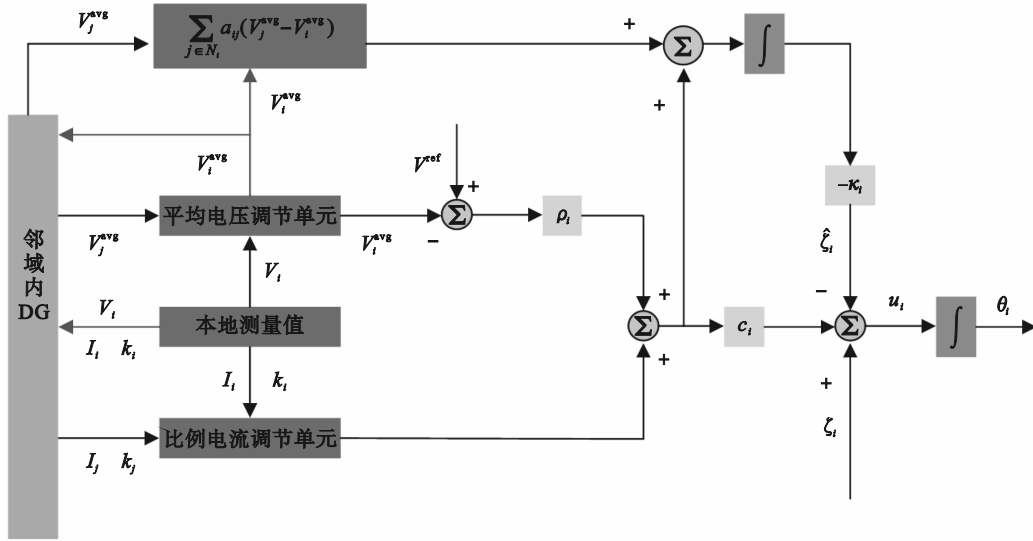


图 4 直流微电网分布式弹性控制策略

Fig. 4 Distributed resilient control strategy of DC microgrid

为消除 FDI 攻击带来的影响, 设计补偿项  $\hat{\zeta}_i$  为

$$\hat{\zeta}_i = -\kappa_i \int \left( \rho_i (V^{ref} - V_i^{avg}) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (k_j I_j - k_i I_i) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_j^{avg} - V_i^{avg}) \right) dt = -\kappa_i \int \left( \rho_i (\sigma^{ref} - \sigma_i) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\sigma_j - \sigma_i) \right) dt. \quad (24)$$

式中,  $\kappa_i$  表示正常数.

**定理 1** 式(24)补偿项能消除常值 FDI 攻击的影响, 实现式(4)和式(5)的控制目标.

**证明** 令  $z_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\sigma_j - \sigma_i) + \rho_i (\sigma^{ref} - \sigma_i)$ , 则  $\hat{\zeta}_i$  可表示为

$$\hat{\zeta}_i = -\kappa_i \int z_i dt. \quad (25)$$

在补偿项  $\hat{\zeta}_i$  和 FDI 攻击信号  $\zeta_i$  的作用下, 二次控制输入  $u_i$  可表示为

$$u_i = c_i \left( \rho_i (V^{ref} - V_i^{avg}) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (k_j I_j - k_i I_i) \right) - \hat{\zeta}_i + \zeta_i. \quad (26)$$

故式(16)可重新写为

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_i &= c_i \left( \rho_i (\sigma^{ref} - \sigma_i) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\sigma_j - \sigma_i) \right) - \hat{\zeta}_i + \zeta_i = \\ & c_i z_i - \hat{\zeta}_i + \zeta_i. \end{aligned} \quad (27)$$

选取 Lyapunov 函数 ( $V$ ) 为

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{Z}^T \mathbf{Z} + \frac{1}{2} \tilde{\zeta}^T \frac{(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})}{\boldsymbol{\kappa}} \tilde{\zeta}. \quad (28)$$

式中  $\mathbf{Z}, \boldsymbol{\kappa}, \tilde{\zeta}$  分别定义为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Z} &= [z_1, z_2, \dots, z_N], \\ \boldsymbol{\kappa} &= \text{diag}(\kappa_i), \\ \tilde{\zeta} &= [\tilde{\zeta}_1, \tilde{\zeta}_2, \dots, \tilde{\zeta}_N]^T. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

其中,  $\tilde{\zeta}_i = \hat{\zeta}_i - \zeta_i$ .

对式(28)求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{Z}^T \dot{\mathbf{Z}} + \tilde{\zeta}^T \frac{(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})}{\boldsymbol{\kappa}} \dot{\tilde{\zeta}} = -\mathbf{Z}^T (\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}) \dot{\sigma} + \tilde{\zeta}^T \frac{(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})}{\boldsymbol{\kappa}} \dot{\tilde{\zeta}} = \\ & -\mathbf{Z}^T (\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}) (\mathbf{CZ} - \hat{\zeta} + \zeta) + \tilde{\zeta}^T \frac{(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})}{\boldsymbol{\kappa}} \dot{\tilde{\zeta}} = \\ & -\mathbf{CZ}^T (\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}) \mathbf{Z} + \mathbf{Z}^T (\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}) \tilde{\zeta} + \tilde{\zeta}^T \frac{(\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho})}{\boldsymbol{\kappa}} \dot{\tilde{\zeta}} \leq \\ & -c \lambda_{\min} \|\mathbf{Z}\|^2 + \tilde{\zeta}^T (\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}) \left( \mathbf{Z} + \frac{1}{\boldsymbol{\kappa}} \dot{\tilde{\zeta}} \right). \end{aligned} \quad (30)$$

式中:  $\lambda_{\min}$  表示  $\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}$  的最小特征值, 由于  $\mathbf{L} + \boldsymbol{\rho}$  正定, 故  $\lambda_{\min} > 0$ . 结合式(25)与式(30)可得

$$\dot{V} \leq -c \lambda_{\min} \|\mathbf{Z}\|^2 \leq 0. \quad (31)$$

由 Lyapunov 稳定理论可知,  $V$  全局渐进稳定, 在弹性控制的作用下, FDI 攻击的影响可被消除, DGs 能实现  $\sigma_i = \sigma_j = \sigma^{ref}$  这一目标, 保证式(4)和式(5)在 FDI 攻击的作用下仍然成立.

## 3 仿真分析

本文通过 MATLAB/Simulink 来验证弹性控制, 搭建包含 4 个分布式电源 (DG<sub>1</sub>, DG<sub>2</sub>, DG<sub>3</sub>, DG<sub>4</sub>) 的直流微电网, 4 个 DG 之间的通信图如图 5 所示, 微电网参数如表 1 所示, 下垂增益设置为  $k_1=6, k_2=3, k_3=k_4=2$ , 除下垂增益外其余参数一致. 设置 DG<sub>1</sub>

为能接收到标称电压的分布式电源.

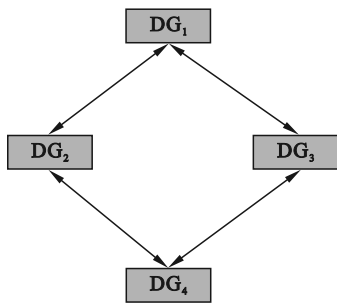


图5 分布式电源间的通信图

Fig. 5 Communication diagram among distributed generators

本文将从不存在FDI攻击、单个DG受到FDI攻击和所有DGs受到FDI攻击3种工况下来验证控制方法的有效性. 首先来验证不存在FDI攻击

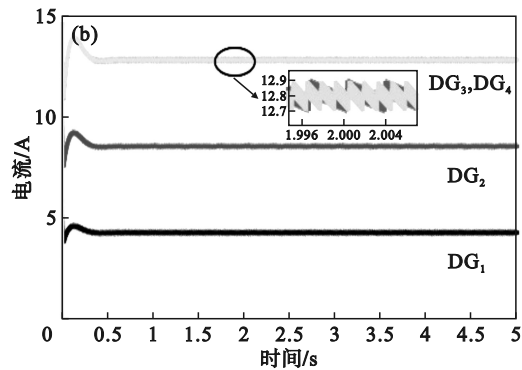
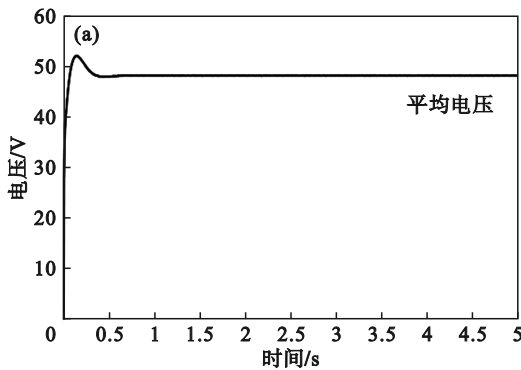


图6 分布式电源的平均电压和输出电流

Fig. 6 Average voltage and output current of distributed generators

(a)—平均电压; (b)—输出电流.

接下来验证当单个DG受到FDI攻击时控制方法的有效性. 图7表示没有弹性控制时DGs的平均电压和输出电流, 仿真时间共持续10s,  $t=0$ s时, 启动二次控制;  $t=4$ s时, 向DG<sub>1</sub>注入定值为100的FDI攻击;  $t=8$ s时, 向DG<sub>1</sub>注入-150的FDI攻击. 如图7所示, 仅有二次控制时, FDI攻击会影响DGs的平均电压和输出电流. 图8表示弹性

控制下DGs的平均电压和输出电流, 仿真时间10s,  $t=0$ s时, 启动二次控制和弹性控制;  $t=4$ s和 $t=8$ s时, 向DG<sub>1</sub>注入与没有弹性控制相同的FDI攻击. 如图8所示,  $t=4$ s和 $t=8$ s向DG<sub>1</sub>注入FDI攻击, DGs的平均电压和输出电流在一个小波动后迅速恢复正常. 图8说明, 在单个DG受到FDI攻击时, 本文所提出的弹性控制方法能有效地抵御

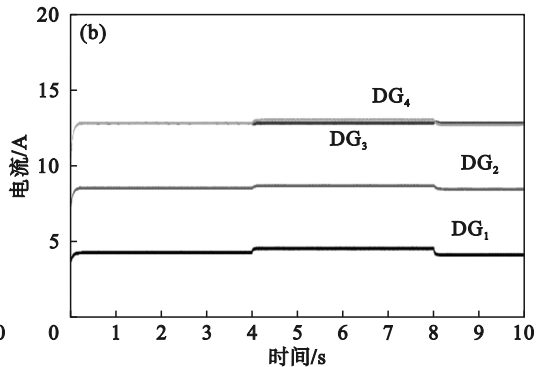
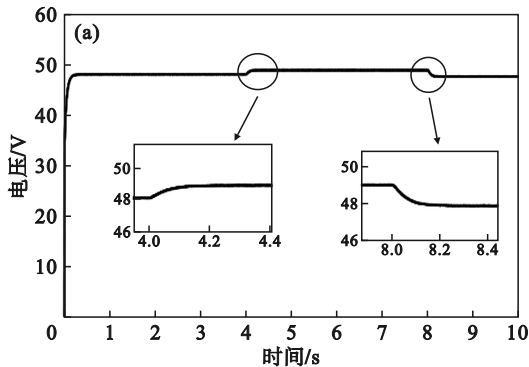


图7 单个分布式电源的平均电压和输出电流

Fig. 7 Average voltage and output current of single distributed generator

(a)—平均电压; (b)—输出电流.

时, 控制方法不会影响到微电网的正常运行. 在 $t=0$ s时, 同时启动分布式二次控制和弹性控制, 图6表示DGs的平均电压和输出电流. 如图6所示, 在弹性控制的作用下, DGs的平均电压达到标称电压且输出电流与下垂增益成反比, 故该控制方法不会影响到微电网的正常运行.

表1 微电网仿真参数

Table 1 Microgrid simulation parameters

参数	数值	用途
输入电压/V	100	提供降压转换的基础电压
输入标称电压/V	48	保证电气性能的稳定
开关频率/kHz	1.25	影响开关管的开断
滤波电容/ $\mu$ F	2 200	滤除高频噪声
滤波电感/mH	10	平滑电流, 储能
电流环PI参数	4/800	检测和调节电流的大小
电压环PI参数	5/110	确保输出电压的稳定和精确
输出线路阻抗/ $\Omega$	0.01	保护电路

FDI 攻击, 保证微电网系统的正常运行, 维持直流

微电网的 2 个控制目标不受影响.

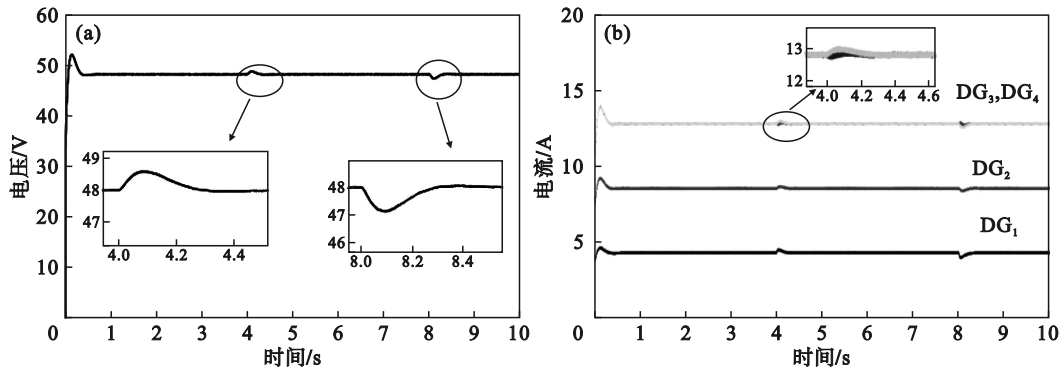


图 8 弹性控制下分布式电源的平均电压和输出电流

Fig. 8 Average voltage and output current of distributed generators under resilient control

(a)—平均电压; (b)—输出电流.

图 9 表示在存在弹性控制方法时的 DG<sub>1</sub> 受到的攻击信号之和与攻击消除情况. 如图 9 所示, 在弹性控制的作用下, 攻击信号被有效消除.

DGs 受到 FDI 攻击时平均电压会偏离标称电压且电流分配也受影响. 图 11 表示弹性控制下 DGs 的平均电压和输出电流, 仿真时长为 10 s,  $t=0$  s 时启动二次控制和弹性控制;  $t=4$  s 和 8 s 时向 DGs 注入与不存在弹性控制时相同的 FDI 攻击. 如图 11 所示, 当  $t=4$  s 和 8 s 时, DGs 的平均电压和输出电流均保持正常. 因此, 所有 DGs 受到 FDI 攻击时, 弹性控制能保证微电网的正常运行, 使 2 个控制目标不受影响.

最后验证所有 DGs 受到 FDI 攻击时弹性控制的有效性. 图 10 表示没有弹性控制 DGs 的平均电压和输出电流, 仿真时长为 10 s,  $t=0$  s 启动二次控制;  $t=4$  s 向 DGs 分别注入定值为 100, 150, 100, -100 的 FDI 攻击;  $t=8$  s 向 DGs 分别注入定值为 -150, -200, -100, 150 的攻击. 如图 10 所示,

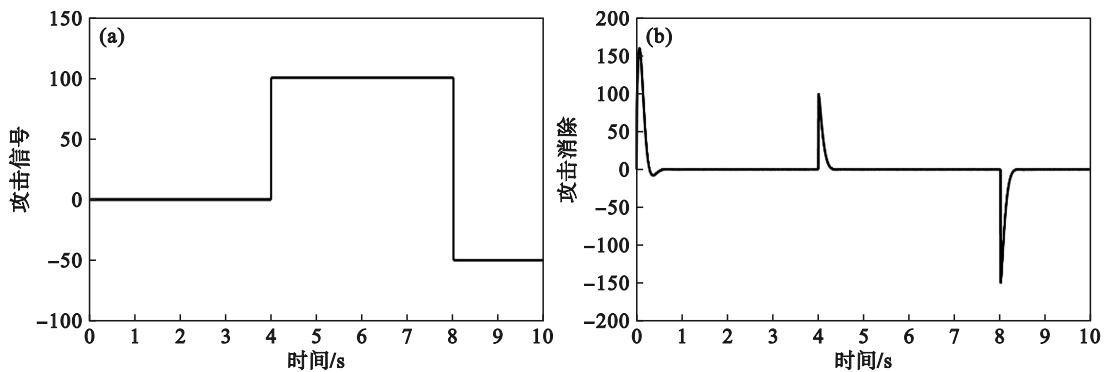


图 9 DG<sub>1</sub> 的攻击信号与攻击消除

Fig. 9 Attack signal and tttack elimination of DG<sub>1</sub>

(a)—攻击信号; (b)—攻击消除.

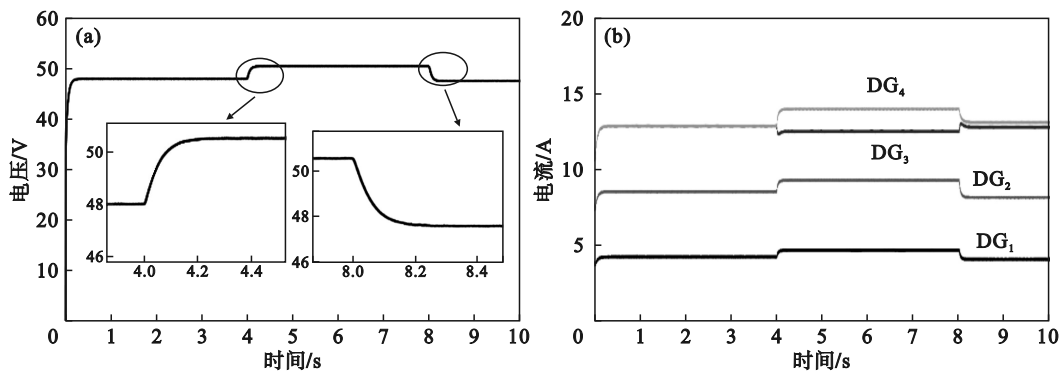


图 10 不存在弹性控制时分布式电源的平均电压和输出电流

Fig. 10 Average voltage and output current of distributed generators in the absence of flexible control

(a)—平均电压; (b)—输出电流.

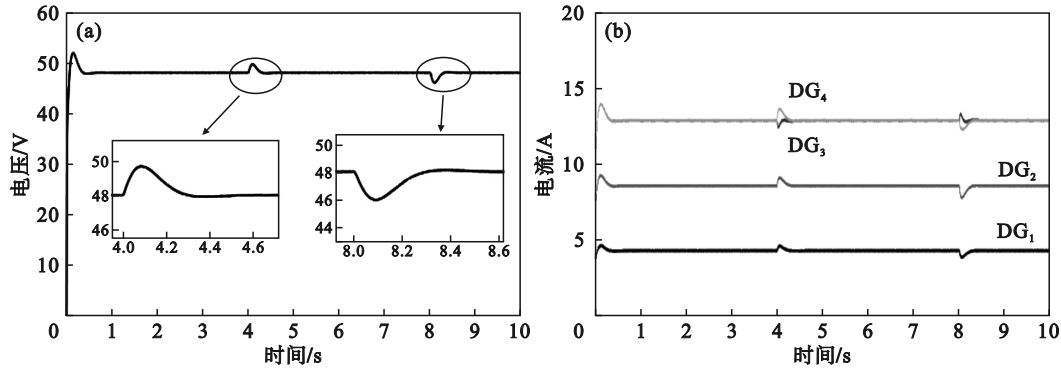


图 11 弹性控制下分布式电源的平均电压和输出电流

Fig. 11 Average voltage and output current of distributed generators under resilient control

(a)—平均电压; (b)—输出电流.

图 12 表示在弹性控制下 DGs 受到的攻击信号和攻击消除. 如图 12 所示, 在弹性控制的作用

下, 攻击信号被有效消除.

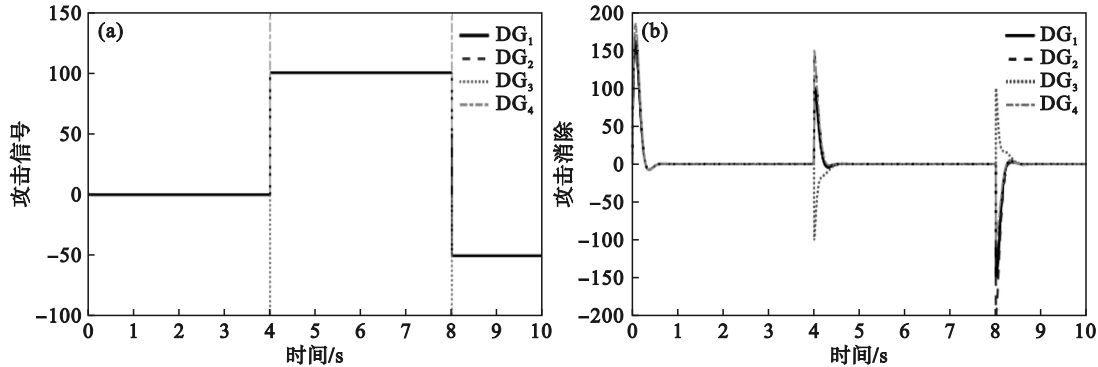


图 12 攻击信号与攻击消除

Fig. 12 Attack signal and attack elimination

(a)—攻击信号; (b)—攻击消除.

## 4 结 语

本文以直流微电网为研究对象, 提出一种抵御虚假数据注入攻击的弹性控制. 在分布式二次控制的基础上引入弹性控制, 消除了任意常值 FDI 攻击对微电网的影响. 本文通过 Lyapunov 稳定理论证明了弹性控制的可行性, 并利用 MATLAB/Simulink 验证可行性. 仿真结果表明, 所提出的弹性控制在没有 FDI 攻击时不会影响到微电网的正常运行, 在单个 DG 和所有 DGs 受到 FDI 攻击时均能保证微电网系统不受影响, DGs 的平均电压不会偏离标称电压, 输出电流比例保持不变.

### 参考文献:

- [1] Khazaei J, Nguyen D H. Multi-agent consensus design for heterogeneous energy storage devices with droop control in smart grids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 1395-1404.
- [2] Zhang Q W, Li F X. Financial resilience and financial reliability for systemic risk assessment of electricity markets

with high-penetration renewables[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(3): 2312-2321.

- [3] 解相朋, 杨馥伊, 魏聪, 等. 混合攻击下直流微电网的 FDI 估计与模糊控制联合设计[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2335-2345.  
(Xie Xiang-peng, Yang Fu-yi, Wei Cong, et al. Joint design of FDI estimation and fuzzy control for DC microgrid under hybrid attacks[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(8): 2335-2345.)
- [4] Wang X Y, Dong X, Niu X T, et al. Toward balancing dynamic performance and system stability for DC microgrids: a new decentralized adaptive control strategy[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(5): 3439-3451.
- [5] Zhou D, Zhang Q, Guo F H, et al. Distributed resilient secondary control for islanded DC microgrids considering unbounded FDI attacks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(1): 160-170.
- [6] Khayat Y, Shafiee Q, Heydari R, et al. On the secondary control architectures of AC microgrids: an overview[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(6): 6482-6500.
- [7] Lu J H, Jiang H Y, Hou X C, et al. Distributed edge-based event-triggered control for voltage restoration and current sharing in DC microgrids under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(8): 8053-8063.

(下转第 81 页)