

# 基于固定时间滑模的直流微电网系统电压控制

卢艳杰, 刘永慧

(上海电机学院电气学院, 上海 201306)

**摘要:** 针对含有恒功率负载的直流微电网系统, 为了抑制恒功率负载的负阻抗性造成的系统直流母线电压振荡现象, 采用固定时间滑模控制方法研究直流母线电压的控制问题。首先, 建立含恒功率负载和储能单元的直流微电网系统的数学模型; 其次, 结合固定时间稳定性理论, 设计积分型滑模面, 在此基础上构造固定时间滑模控制器, 通过对系统状态进行可达性分析, 给出系统收敛时间上界的估计值; 然后, 通过对滑动模态进行稳定性分析, 结合线性矩阵不等式求解得到控制器增益; 最后, 以含有 2 个恒功率负载和 1 个储能单元的直流微电网系统为例进行仿真实验, 仿真结果表明, 所设计控制器能够有效抑制恒功率负载扰动对直流母线电压带来的不良影响。

**关键词:** 直流微电网系统; 恒功率负载; 积分滑模面; 固定时间滑模控制; 线性矩阵不等式

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.017 中图分类号: TM711 文章编号: 1673-9140(2023)06-0159-08

## Voltage control of direct-current microgrid system based on fixed-time sliding mode

LU Yanjie, LIU Yonghui

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** For the direct-current (dc) microgrid system with constant power load, in order to suppress the dc bus voltage oscillation caused by constant power load disturbance, the fixed-time sliding mode control method is used to deal with the issue of the dc bus voltage control. Firstly, the mathematical model of a dc microgrid system with constant power loads and an energy storage unit is established. Secondly, based on the fixed-time stability theory, an integral sliding surface and a fixed-time sliding mode controller are constructed. By analyzing the accessibility of the system states, the value of upper bound on convergence time of the system is estimated. Then, through the stability analysis of the sliding mode, the controller gain is obtained with the combination of the linear matrix inequality method. Finally, a dc microgrid system with two constant power loads and one energy storage unit is taken as an example for simulation verification. It is shown that the fixed-time sliding-mode controller can effectively resist the negative influence of constant power load disturbance on the dc bus voltage.

**Key words:** direct-current microgrid system; constant power load; integral sliding surface; fixed-time sliding mode control; linear matrix inequality

随着可再生能源和分布式发电的发展, 微电网系统因其供电电源的多样性、运行方式的复杂性以

及供电方式的可靠性得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。相较于交流微电网系统, 直流微电网系统具有易控制、更

收稿日期: 2022-11-26; 修回日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61803253)

通信作者: 刘永慧(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统智能控制和切换系统等研究; E-mail: liuyh@sdju.edu.cn.

高效、灵活性和经济性等特征,而且直流微电网系统不存在相位和无功功率等问题,因此不需要考虑各个系统之间的同步问题,更易于实现协同运行<sup>[2]</sup>。在直流微电网系统中,大部分负载通过电力电子变换器并联于直流母线上,电力电子变换器的输入功率不随母线电压的变化而改变,通常被视为恒功率负载(constant power load, CPL),它具有负阻抗特性。当系统受到扰动时,直流母线电压产生振荡,而恒功率负载的负阻抗特性会导致电压的波动范围更大,因此,抑制直流微电网系统中直流母线电压的波动,保证系统稳定是亟待解决的问题<sup>[3-4]</sup>。

目前学者们对直流微电网系统母线电压的稳定性进行了大量的研究<sup>[5-9]</sup>。文献[5]提出了一种反馈线性化方法,采用非线性反馈控制抑制CPL的非线性影响;为简化分析方法,文献[6]提出了基于半定规划的方法,并设计了基于半定规划技术的鲁棒控制器,实现了对直流母线电压的控制;文献[7]同时考虑了恒功率负载的负阻抗特性和储能单元的动态特性对直流微电网系统的影响,基于混合势函数理论,提出了大信号稳定性判据,即在大扰动情况下,满足该判据的直流微电网系统能够实现稳定;文献[8]则提出了一种虚拟电阻稳定性控制策略,通过补偿下垂系数来抑制CPL大量接入引起的直流母线电压振荡失稳现象,维持直流母线电压的稳定;文献[9]针对受到服务攻击的直流微电网系统,提出了基于状态观测器的事件触发控制器设计方法,实现了直流微电网系统状态的估计和控制。

滑模控制具有强鲁棒性、快速响应以及易实现等特点,被广泛应用于非线性系统<sup>[10-11]</sup>。文献[12]设计了一种两相幂次趋近律,并将其与滑模控制相结合,该方法有效提高了系统的收敛速度,但是在扰动的影响下,该方法只能保证系统收敛到平衡点的邻域内;基于有限时间稳定理论,文献[13]提出了终端滑模控制方法,设计了新型的积分滑模控制器,提高了系统的跟踪性能;为提高系统的收敛速度,文献[14]提出了一种快速终端滑模控制方法,使系统的状态在有限时间内快速收敛;在此基础上,文献[15]提出了非奇异终端滑模控制方法,保证系统状态于有限时间内收敛的同时也解决了滑模面存在的奇异问题。近年来,学者们逐渐将滑模

控制应用到直流微电网系统的电压控制中<sup>[16]</sup>。文献[17]针对存在CPL的直流微电网系统,将终端滑模控制应用于负载侧补偿,减缓了CPL突变对系统稳定性造成的影响;文献[18]提出了一种脉冲宽度调制型滑模控制方法,选取指数趋近率设计滑模控制器,减轻了直流微电网系统中恒功率负载造成的不稳定性;考虑到系统可能存在奇点,文献[19]提出了非奇异终端滑模控制方法,有效抑制了扰动引起的直流母线电压振荡现象,并实现了系统在有限时间内快速收敛。

值得注意的是,以上成果均在有限时间内保证系统的稳定。为进一步提高系统的性能,基于有限时间控制,学者们提出了固定时间控制<sup>[20-22]</sup>。文献[23]提出了一种固定时间终端滑模模型参考控制策略,使系统状态在固定时间内跟踪参考模型;文献[24]设计了一种自适应固定时间积分滑模控制器,使系统在固定时间内收敛,并在线估计了控制器调节时间的上界。可见,固定时间滑模控制不仅加快了系统的收敛速度,而且收敛时间仅由控制器参数所决定,然而直流微电网系统的固定时间滑模控制还未被研究,因此有必要进一步研究。

基于以上讨论,本文提出固定时间积分滑模控制方法。首先,设计积分型滑模面,在此基础上设计固定时间滑模控制器,使系统在固定时间内收敛;然后,使用Lyapunov方法分析系统的稳定性,并对系统的收敛时间进行估计;最后,将该方法用于直流微电网系统控制中进行仿真验证,并与有限时间滑模控制方法进行对比,验证本文设计方法的有效性。

## 1 系统模型描述

直流微电网系统包含大量分布式可再生发电电源、储能元件和负载,其电路如图1所示。可再生能源受环境因素影响较大,其发电具有随机性、间歇性特点,无法直接为负载供应稳定的电压。储能单元起着平衡功率和稳定电压的作用,在用电低谷期存储多余的电能,用电高峰期释放电能,以稳定母线电压<sup>[25]</sup>。由于直流微电网系统中电力电子变换器的输入功率不随电压的变化而改变,负载和变

换器可视为一个整体,将其等效为恒功率负载。因此,直流微电网系统可解耦成 $n+1$ 个子系统,包括 $n$ 个恒功率负载和1个储能单元。

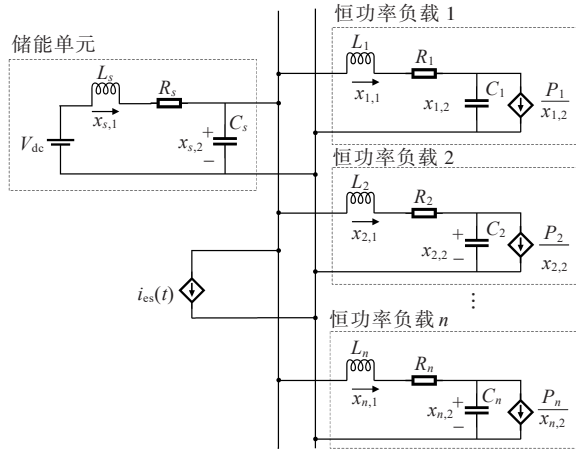


图1 直流微电网系统电路

Figure 1 Circuit diagram of direct-current microgrid system

根据基尔霍夫定律,可得第 $j$ 个( $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ )恒功率负载的回路电压和节点电流方程为

$$\begin{cases} L_j \dot{x}_{j,1}(t) + R_j x_{j,1}(t) + x_{j,2}(t) - x_{s,2}(t) = 0 \\ C_j \dot{x}_{j,2}(t) + \frac{P_j}{x_{j,2}(t)} - x_{j,1}(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $L_j, R_j, C_j$ 分别为第 $j$ 个恒功率负载中的电感、电阻、电容;状态变量 $x_{j,1}(t), x_{j,2}(t)$ 分别为第 $j$ 个恒功率负载中的电感电流、电容电压; $P_j$ 为第 $j$ 个恒功率负载的功率; $x_{s,2}(t)$ 为储能单元中的电容电压, $s = n + 1$ 。

对式(1)进一步化简,得到第 $j$ 个恒功率负载的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_j(t) = A_j x_j(t) + d_j h_j(x_j(t)) + A_{j_s} x_s(t) \\ y_j(t) = G_j x_j(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$x_j(t) = [x_{j,1}(t), x_{j,2}(t)]^T, A_j = \begin{bmatrix} -\frac{R_j}{L_j} & -\frac{1}{L_j} \\ \frac{1}{C_j} & 0 \end{bmatrix}$$

$$d_j = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_j} \end{bmatrix}, A_{j_s} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_j} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, G_j = [0 \quad 1]$$

式(2)中非线性函数 $h_j(x_j(t)) = -P_j/x_{j,2}(t)$ ,表示第 $j$ 个CPL电流波动引起的电压扰动。

根据基尔霍夫定律,可得储能单元的回路电压

和节点电流方程为

$$\begin{cases} L_s \dot{x}_{s,1}(t) + R_s x_{s,1}(t) + x_{s,2}(t) - V_{dc} = 0 \\ C_s \dot{x}_{s,2}(t) - x_{s,1}(t) + i_{es}(t) + \sum_{j=1}^n x_{j,1}(t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $L_s, R_s, C_s$ 分别为储能单元的电感、电阻、电容;状态变量 $x_{s,1}(t), x_{s,2}(t)$ 分别为储能单元中的电感电流和电容电压; $V_{dc}$ 为直流母线电压; $i_{es}(t)$ 为储能电流。

对式(3)进一步化简,得到储能单元状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + b_s V_{dc} + b_{es} i_{es}(t) + \sum_{j=1}^n A_{cn} x_j(t) \\ y_s(t) = G_s x_s(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$x_s(t) = [x_{s,1}(t), x_{s,2}(t)]^T, A_s = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_s = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix}, b_{es} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_s} \end{bmatrix}, A_{cn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix}$$

$$G_s = [0 \quad 1]$$

结合式(2)、(4),直流微电网系统模型表示为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bi_{es}(t) + DH(x(t)) + B_s V_{dc} \\ y(t) = Gx(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中,

$$x(t) = [x_1^T(t), x_2^T(t), \dots, x_j^T(t), \dots, x_n^T(t), x_s^T(t)]^T$$

$$x_j(t) = [x_{j,1}(t), x_{j,2}(t)]^T, x_s(t) = [x_{s,1}(t), x_{s,2}(t)]^T$$

$$y(t) = [y_1^T(t), y_2^T(t), \dots, y_n^T(t), y_s^T(t)]^T$$

$$H(x(t)) =$$

$$[h_1^T(x_1(t)), h_2^T(x_2(t)), \dots, h_n^T(x_n(t))]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & A_{1s} \\ 0 & A_2 & \dots & A_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{cn} & A_{cn} & \dots & A_s \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b_{es} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_n \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b_s \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} G_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & G_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & G_s \end{bmatrix}$$

引入坐标变换  $\tilde{x}(t) = x(t) - x_0$ , 其中  $x_0$  为系统方程(5)的平衡点,  $\tilde{x}(t)$  表示新坐标下系统的状态。将系统方程(5)的平衡点平移至原点, 以  $i_{es}(t)$  为控制输入, 得到系统方程为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + Bu(t) + D\tilde{H}(\tilde{x}(t)) \\ \tilde{y}(t) = G\tilde{x}(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中, 状态  $\tilde{x}(t) = [\tilde{x}_1^T(t), \tilde{x}_2^T(t), \dots, \tilde{x}_n^T(t), \tilde{x}_s^T(t)]^T$ , 非线性项  $\tilde{H}(\tilde{x}(t)) = [\tilde{h}_1^T(\tilde{x}_1(t)), \tilde{h}_2^T(\tilde{x}_2(t)), \dots, \tilde{h}_n^T(\tilde{x}_n(t))]^T$ , 且满足

$$\tilde{h}_j(\tilde{x}_j(t)) = -\frac{P_j \tilde{x}_{j,2}(t)}{x_{j20}(\tilde{x}_{j,2}(t) + x_{j20})} \quad (7)$$

其中,  $x_{j20}$  表示原系统方程(5)的状态变量  $x_{j,2}(t)$  的平衡点,  $\tilde{x}_{j,2}(t) = x_{j,2}(t) - x_{j20}$  表示新坐标下恒功率负载中的电容电压,  $\tilde{h}_j(\tilde{x}_j(t))$  仅与状态变量  $\tilde{x}_{j,2}(t)$  有关。

非线性项  $\tilde{H}(\tilde{x}(t))$  [26] 满足

$$\tilde{H}^T(\tilde{x}(t))\tilde{H}(\tilde{x}(t)) \leq \mu^2 \tilde{x}^T(t)F^T F\tilde{x}(t) \quad (8)$$

其中,  $\mu > 0$  是一个常数,  $F$  为对角矩阵, 表示为  $F =$

$$\begin{bmatrix} F_1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & F_n & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, i \in \{1, 2, \dots, n\}.$$

## 2 控制器设计

本文对系统方程(6)设计固定时间滑模控制器, 首先采用固定时间收敛理论分析滑模面的可达性, 然后根据 Lyapunov 稳定性理论分析系统的稳定性。

### 2.1 固定时间滑模控制器设计

本文设计的积分型滑模面为

$$S(t) = M\tilde{x}(t) - M \int_0^t (A - BK)\tilde{x}(\tau) d\tau \quad (9)$$

式中,  $M$  为选取的常量矩阵, 并且  $MB \neq 0$ ;  $K$  为待设计的控制参数。

当系统方程(6)的运动状态到达该滑模面上时, 有

$$\dot{S}(t) = 0 \quad (10)$$

由式(9)可得:

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= M\dot{\tilde{x}}(t) - M(A - BK)\tilde{x}(t) = \\ & MBK\tilde{x}(t) + MBu(t) + MD\tilde{H}(\tilde{x}(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

令  $\dot{S}(t) = 0$ , 得到系统的等效控制为

$$u_{eq}(t) = (MB)^{-1}(-MBK\tilde{x}(t) - MD\tilde{H}(\tilde{x}(t))) \quad (12)$$

为使系统方程(6)在固定时间内收敛到滑模面, 根据固定时间稳定理论 [22], 设计滑模控制律为

$$u(t) = (MB)^{-1}(-MBK\tilde{x}(t) - \alpha(S(t))^p - \beta(S(t))^q - (\gamma + MDL\tilde{x}(t)) \operatorname{sgn}(S(t))) \quad (13)$$

式中,  $L = \begin{bmatrix} 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mu > 0$ , 且满足  $\|MD\tilde{H}(\tilde{x}(t))\| < MDL\tilde{x}(t)$ ; 控制参数  $\alpha, \beta, \gamma, p, q$  均为大于零的常数, 且满足  $p < 1, q > 1$ 。

### 2.2 可达性分析

选取 Lyapunov 函数  $V(t) = S^2(t)$ , 对其求导得到:

$$\dot{V}(t) = 2S(t)\dot{S}(t) \quad (14)$$

将式(13)代入式(9), 并对其求导得到:

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= -\alpha(S(t))^p - \beta(S(t))^q + MD\tilde{H}(\tilde{x}(t)) - \\ & (\gamma + MDL\tilde{x}(t)) \operatorname{sgn}(S(t)) \end{aligned} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \\ 2S(t) &(-\alpha(S(t))^p - \beta(S(t))^q - \gamma \operatorname{sgn}(S(t)) + \\ & MD\tilde{H}(\tilde{x}(t)) - MDL\tilde{x}(t) \operatorname{sgn}(S(t))) \leq \\ & -2\alpha(V(t))^{\frac{p+1}{2}} - 2\beta(V(t))^{\frac{q+1}{2}} - 2\gamma|S(t)| + \\ & 2MD\tilde{H}(\tilde{x}(t))|S(t)| - 2MDL\tilde{x}(t)|S(t)| \leq \\ & -2\alpha(V(t))^{\frac{p+1}{2}} - 2\beta(V(t))^{\frac{q+1}{2}} < 0 \end{aligned} \quad (16)$$

其中,  $\alpha > 0, \beta > 0, 0 < (p+1)/2 < 1, (q+1)/2 > 1$ , 满足固定时间收敛的条件。因此, 在式(13)的作用下, 系统方程(6)将在固定时间内到达滑模面, 而且系统的收敛时间为

$$\begin{aligned} T < T_{\max} &= \\ & \frac{1}{2\alpha(1 - \frac{p+1}{2})} + \frac{1}{2\beta(\frac{q+1}{2} - 1)} = \\ & \frac{1}{\alpha(1-p)} + \frac{1}{\beta(q-1)} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可知, 系统的收敛时间上界  $T_{\max}$  仅与滑模控制器中的参数  $\alpha, \beta, p$  和  $q$  有关。  $\alpha, \beta$  和  $q$  的取

值越大  $p$  的取值越小,系统的收敛速度越快。但是  $\alpha$  和  $\beta$  的取值越大,系统的超调量会越大。因此,控制参数  $\alpha, \beta, p$  和  $q$  的取值应根据系统性能来权衡决定。

**2.3 稳定性分析**

当系统方程(6)的运动状态到达滑模面上时,由式(6)、(12)可得系统的滑动模态方程:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (A - BK)\tilde{x}(t) \quad (18)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论可知,对于式(18),若存在  $P > 0$  且  $P$  为对称矩阵,满足:

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) < 0 \quad (19)$$

则系统方程(6)渐近稳定。

令  $X = P^{-1}$ ,将式(19)两边同乘  $X$ ,得到:

$$AX + XA^T - BY - Y^T B^T < 0$$

其中,  $Y = KX$ ,即若存在正定矩阵  $X$ ,使得约束条件成立,即

$$AX + XA^T - BY - Y^T B^T < 0 \quad (20)$$

则式(18)渐近稳定。

利用 Matlab 中的线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)工具箱对式(20)求解。根据系统方程(6)中的  $A, B$ ,利用 LMI 可求出满足式(20)的控制增益  $K$ 。

**3 仿真实验**

以含有 2 个恒功率负载和 1 个储能单元的直流微电网系统为例进行仿真,并与传统滑模控制方法和有限时间滑模控制方法进行比较。系统参数如表 1 所示,仿真参数  $\mu = 0.01$ ,系统方程(6)的初始状态设置为  $\tilde{x}(0) = [1.0 \ 6 \ -1 \ 8 \ 1.5 \ 8]^T$ ,系统方程(5)的平衡点为  $x_{120} = 200 \text{ V}, x_{220} = 200 \text{ V}$ 。

**表 1** 直流微电网系统的参数

**Table 1** Parameters of direct-current microgrid system

$R_s/\Omega$	$L_s/\text{mH}$	$C_s/\mu\text{F}$	$V_{dc}/\text{V}$	$R_1/\Omega$	$L_1/\text{mH}$
1	17	550	220	1.1	39.5
$C_1/\mu\text{F}$	$P_1/\text{W}$	$R_2/\Omega$	$L_2/\text{mH}$	$C_2/\mu\text{F}$	$P_2/\text{W}$
500	300	0.5	19.5	550	400

**3.1 固定时间滑模控制仿真**

为了验证所设计控制方法的有效性,选取 3 组控制参数进行对比。3 组控制参数及其对应的固定时间的上界  $T_{\max}$  如表 2 所示。

**表 2** 3 组控制参数下固定时间的上界

**Table 2** Upper bounds of the fixed-time under three kinds of control parameters

$\alpha$	$p$	$\beta$	$q$	$T_{\max}/\text{s}$
2	0.6	2	1.4	2.5
10	0.9	10	1.1	2.0
1	0.7	1	1.3	6.7

根据条件  $MB \neq 0$  选取滑模面参数矩阵  $M = [0.01 \ 0.05 \ 0.01 \ 0.05 \ 0.01 \ 0.05]$ ,并且通过求解式(20),得到  $K = [0.178 \ 2 \ 0.020 \ 9 \ 0.376 \ 4 \ 0.012 \ 6 \ -0.836 \ 8 \ 0.036 \ 6]$ 。因此,3 组控制参数下的固定时间滑模控制器分别为

$$u_1(t) =$$

$$\begin{aligned} & -0.178 \ 2\tilde{x}_{11}(t) - 0.020 \ 9\tilde{x}_{12}(t) - 0.376 \ 4\tilde{x}_{21}(t) - \\ & 0.012 \ 6\tilde{x}_{22}(t) + 0.836 \ 8\tilde{x}_{s1}(t) - 0.036 \ 6\tilde{x}_{s2}(t) + \\ & 0.022 \ 0(S(t))^{0.6} + 0.022 \ 0(S(t))^{1.4} + 0.011 \ 0 \cdot \\ & (0.100 \ 0 + \tilde{x}_{12}(t) + 0.909 \ 1\tilde{x}_{22}(t)) \text{sgn}(S(t)) \end{aligned}$$

$$u_2(t) =$$

$$\begin{aligned} & -0.178 \ 2\tilde{x}_{11}(t) - 0.020 \ 9\tilde{x}_{12}(t) - 0.376 \ 4\tilde{x}_{21}(t) - \\ & 0.012 \ 6\tilde{x}_{22}(t) + 0.836 \ 8\tilde{x}_{s1}(t) - 0.036 \ 6\tilde{x}_{s2}(t) + \\ & 0.110 \ 0(S(t))^{0.9} + 0.110 \ 0(S(t))^{1.1} + 0.011 \ 0 \cdot \\ & (0.100 \ 0 + \tilde{x}_{12}(t) + 0.909 \ 1\tilde{x}_{22}(t)) \text{sgn}(S(t)) \end{aligned}$$

$$u_3(t) =$$

$$\begin{aligned} & -0.178 \ 2\tilde{x}_{11}(t) - 0.020 \ 9\tilde{x}_{12}(t) - 0.376 \ 4\tilde{x}_{21}(t) - \\ & 0.012 \ 6\tilde{x}_{22}(t) + 0.836 \ 8\tilde{x}_{s1}(t) - 0.036 \ 6\tilde{x}_{s2}(t) + \\ & 0.011 \ 0(S(t))^{0.7} + 0.011 \ 0(S(t))^{1.3} + 0.011 \ 0 \cdot \\ & (0.100 \ 0 + \tilde{x}_{12}(t) + 0.909 \ 1\tilde{x}_{22}(t)) \text{sgn}(S(t)) \end{aligned}$$

3 种控制参数下的系统状态轨迹如图 2 所示,滑模面、控制信号如图 3 所示。由图 2 可知,第 1 组控制参数下系统在  $t=1.0 \text{ s}$  时实现稳定;第 2 组控制参数下系统在  $t=0.8 \text{ s}$  时实现稳定;第 3 组控制参数下系统在  $t=1.2 \text{ s}$  时实现稳定。结合表 2 可知,3 组控制参数下系统均能在固定时间  $T_{\max}$  内达到稳定值。由图 3 可知,3 种控制参数下系统状态分别在  $t=1.0, 0.8, 1.2 \text{ s}$  时收敛到滑模面;3 种控制器  $u(t)$  均收敛到零。结合图 1~3,验证了本文所设计的固定时间滑模控制器能够实现直流微电网系统的电压控制,并且能够通过改变控制器参数来调节系统收敛时间。



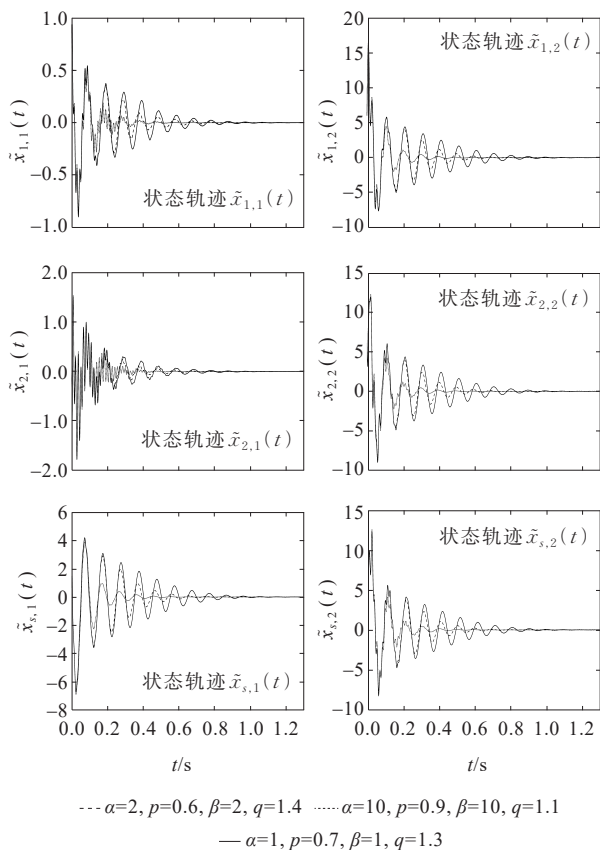


图2 3组控制参数下的系统状态轨迹

Figure 2 State trajectory of the system under three kinds of control parameters

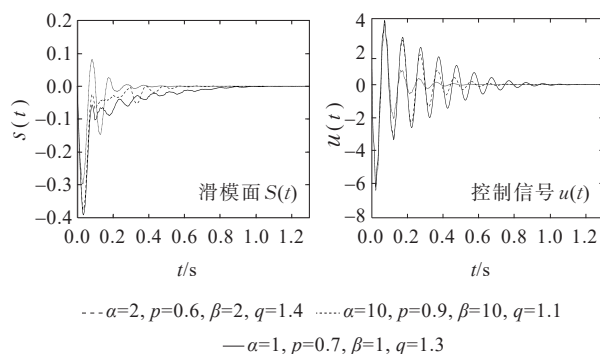


图3 3组控制参数下的滑模面 $S(t)$ 、控制信号 $u(t)$

Figure 3 Sliding surface  $S(t)$  and control signal  $u(t)$  under three kinds of control parameters

### 3.2 对比传统滑模控制和有限时间滑模控制

为进一步验证所设计控制方法的有效性,本文将与传统滑模控制、有限时间滑模控制方法进行仿真对比。选取文3.1中第3组控制参数设计固定时间滑模控制器 $u(t)$ 。根据有限时间稳定理论<sup>[23]</sup>设计有限时间滑模控制器:

$$u(t) = (SB)^{-1}(-SBK\tilde{x}(t) - \rho(S(t))^\lambda - (\nu + MDL\tilde{x}(t))\text{sgn}(S(t)))$$

其中, $\rho > 0, \nu > 0, \lambda \in \{0, 1\}$ 。选取滑模面参数矩阵 $M = [0.01 \ 0.02 \ 0.01 \ 0.02 \ 0.01 \ 0.01]$ ,控制器参数 $\rho = 1.2, \nu = 0.1, \lambda = 0.6$ ,得到系统方程(6)的有限时间滑模控制器:

$$u(t) = -0.178 2\tilde{x}_{11}(t) - 0.020 9\tilde{x}_{12}(t) - 0.376 4\tilde{x}_{21}(t) - 0.012 6\tilde{x}_{22}(t) + 0.836 8\tilde{x}_{s1}(t) - 0.036 6\tilde{x}_{s2}(t) + 0.066 0(S(t))^{0.6} + 0.055 0(0.100 0 + 0.400 0 \cdot \tilde{x}_{12}(t) + 0.363 6\tilde{x}_{22}(t))\text{sgn}(S(t))$$

选择趋近率 $\dot{s} = -\epsilon \text{sgn}(S(t)) - kS(t)$ ,构造传统滑模控制器:

$$u(t) = (MB)^{-1}(-MBK\tilde{x}(t) - kS(t) - (\epsilon + MDL\tilde{x}(t))\text{sgn}(S(t)))$$

其中, $\epsilon > 0, k > 0$ 。选取参数矩阵 $M = [0.01 \ 0.02 \ 0.01 \ 0.02 \ 0.01 \ 0.01]$ ,控制器参数 $\epsilon = 0.1, k = 5.3$ ,得到传统滑模控制器:

$$u(t) = -0.178 2\tilde{x}_{11}(t) - 0.020 9\tilde{x}_{12}(t) - 0.376 4\tilde{x}_{21}(t) - 0.012 6\tilde{x}_{22}(t) + 0.836 8\tilde{x}_{s1}(t) - 0.036 6\tilde{x}_{s2}(t) + 0.291 5S(t) + 0.055 0(0.100 0 + 0.400 0 \cdot \tilde{x}_{12}(t) + 0.363 6\tilde{x}_{22}(t))\text{sgn}(S(t))$$

3种控制器作用下的系统状态轨迹如图4所示,滑模面、控制信号如图5所示。由图4可知,在传统滑模控制器和有限时间滑模控制器的作用下,系统状态分别在 $t=1.7, 1.4$  s时实现稳定。相较于这2种控制器,固定时间滑模控制器的调节时间更短且状态轨迹的收敛效果更好。由图5可知,在固定时间滑模控制器的作用下,滑模面函数 $S(t)$ 在 $t=1.2$  s时趋近到零,表明系统状态此时到达滑模面并且将一直保持在滑模面上;一般滑模控制器在 $t=1.7$  s时收敛到零,有限时间滑模控制器在 $t=1.4$  s时收敛到零,而本文所设计控制器在 $t=1.2$  s时收敛到零。结合图4、5可见,本文所设计的固定时间滑模控制器能够有效抑制恒功率负载扰动引起的直流微电网系统电压和电流的波动,并且该控制器的调节时间更短,系统收敛速度更快,有效提高了系统的控制性能。

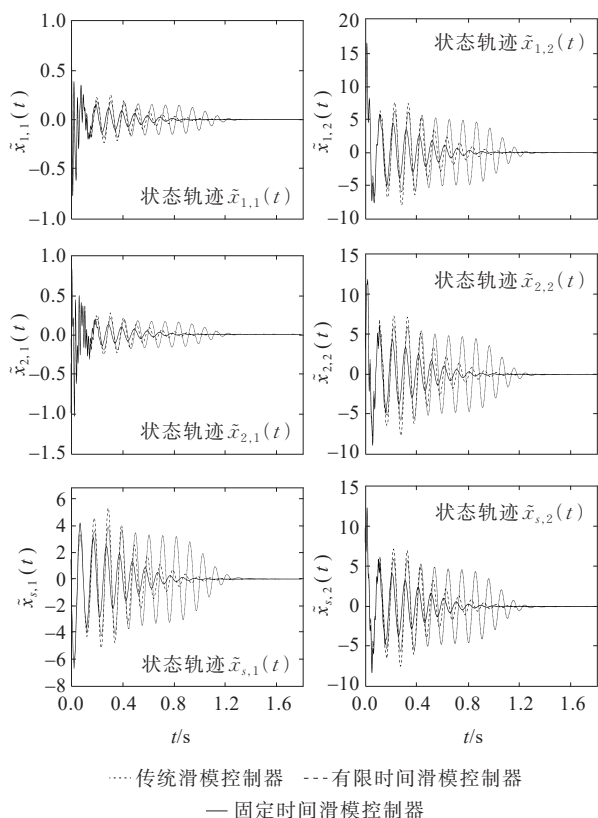


图 4 3组控制器下的系统状态轨迹

Figure 4 State trajectory of the system under three kinds of controller

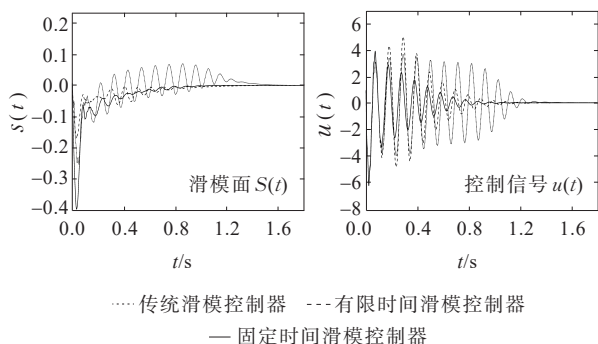


图 5 3组控制器下的滑模面 $S(t)$ 、控制信号 $u(t)$

Figure 5 Sliding surface  $S(t)$  and control signal  $u(t)$  under three kinds of controllers

## 4 结语

本文以含恒功率负载的直流微电网系统为研究对象,针对系统中由于恒功率负载的非线性扰动而导致的系统直流母线电压振荡问题,提出了一种固定时间滑模控制方法。在建立直流微电网系统

数学模型的基础上,通过构造积分型滑模面,设计了固定时间滑模控制器,抑制了恒功率负载扰动对母线电压造成的波动影响,使系统在固定时间内达到稳定,实现了镇定系统直流母线电压的目的。仿真结果表明,本文所设计的滑模控制器具有更好的控制性能,能够有效抑制恒功率负载扰动对系统稳定性的影响。

## 参考文献:

[1] 李俊洁,刘毅力,沈志雨,等.一种适用于直流微网的电流差动保护[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):55-63.  
LI Jiaojie, LIU Yili, SHEN Zhiyu, et al. Research on a current differential protection suitable for DC microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1):55-63.

[2] 李冰,李岚,王浩,等.一种改善直流微电网负荷电流分配的下垂控制[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):48-54.  
LI Bing, LI Lan, WANG Hao, et al. An improved droop control of load current sharing in DC microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1):48-54.

[3] 张祥宇,王玉珂,付媛.直流微电网的多端虚拟储能协调控制技术[J].电网与清洁能源,2022,38(5):109-119.  
ZHANG Xiangyu, WANG Yuke, FU Yuan. Multi-terminal virtual energy storage coordinated control technology for DC microgrids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5):109-119.

[2] 吕金历,冯智慧,孙亚璐,等.直流微电网中风电机组的双向扩展惯性控制方法[J].电网与清洁能源,2022,38(6):89-97.  
LÜ Jinli, FENG Zhihui, SUN Yalu, et al. Bidirectional expansion inertial control method for wind turbines in DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6):89-97.

[5] 杨忠林,查晓明,孙建军,等.基于反馈线性化的直流微电网全局稳定方法[J].电力自动化设备,2015,35(10):10-14.  
YANG Zhonglin, ZHA Xiaoming, SUN Jianjun, et al. Global stabilization based on feedback linearization for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):10-14.

[6] HERRERA L, ZHANG W, WANG J. Stability analysis and

- controller design of DC microgrids with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 881-888.
- [7] 刘欣博,高卓.考虑恒功率负载与储能单元动态特性的直流微电网系统大信号稳定性分析[J].电工技术学报, 2019,34(S1):292-299.  
LIU Xinbo, GAO Zhuo. Large signal stability analysis of DC microgrid system considering dynamic characteristics of constant power load and energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1):292-299.
- [8] 朱晓荣,孟欣欣.直流微电网的稳定性分析及有源阻尼控制研究[J].高电压技术,2020,46(5):1675-1686.  
ZHU Xiaorong, MENG Xinxin. Stability analysis and research of active damping control method for DC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1675-1686.
- [9] 马永胜,车伟伟,邓超.拒绝服务攻击下直流微电网的事件触发控制(英文)[J].控制理论与应用,2022,39(10): 1907-1914.  
MA Yongsheng, CHE Weiwei, DENG Chao. Event-triggered control of DC microgrids with DoS attacks[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(10):1907-1914.
- [10] 陈强,曹雅倩,吴春.基于变速趋近律的机电伺服系统自适应滑模控制[J].控制与决策,2022,37(4):1067-1073.  
CHEN Qiang, CAO Yaqian, WU Chun. Adaptive sliding mode control of electromechanical servo system based on variable rate reaching law[J]. Control and Decision, 2022, 37(4):1067-1073.
- [11] 陈志梅,田柳青,王贞艳.一类不确定中立时变时滞系统的自适应全局滑模控制[J].控制与决策,2020,35(4): 909-915.  
CHEN Zhimei, TIAN Liuqing, WANG Zhenyan. Adaptive global sliding mode control for a class of uncertain neutral systems with time-varying-delay[J]. Control and Decision, 2020, 35(4):909-915.
- [12] 陈强,朱健宏,陶玫玲.基于两相幂次趋近律的航天器姿态控制[J].控制与决策,2022,37(5):1145-1152.  
CHEN Qiang, ZHU Jianhong, TAO Meiling. Two-phase power reaching law-based spacecraft attitude control[J]. Control and Decision, 2022, 37(5):1145-1152.
- [13] 王雪闯,王会明,赵振华.基于改进型积分终端滑模控制方法的移动机器人轨迹跟踪设计与实验[J].控制与决策, 2023, 38(10):2881-2887.  
WANG Xuechuang, WANG Huiming, ZHAO Zhenhua. Trajectory tracking design and experiment of mobile robot based on an improved integral terminal sliding mode control approach[J]. Control and Decision, 2023, 38(10): 2881-2887.
- [14] 宋晓娟,王宏伟,吕书锋.输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制[J].控制与决策, 2021, 36(5): 1078-1086.  
SONG Xiaojuan, WANG Hongwei, LÜ Shufeng. Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation[J]. Control and Decision, 2021, 36(5):1078-1086.
- [15] 徐驰,赵希梅.永磁直线同步电动机智能递归非奇异终端滑模控制[J].控制理论与应用,2022,39(7):1242-1250.  
XU Chi, ZHAO Ximei. Intelligent recursive nonsingular terminal sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(7):1242-1250.
- [16] 楼琦凯,陈蓓,丁勤,等.虚假数据注入攻击下直流微电网的滑模控制[J].控制与决策,2022,37(12):3207-3214.  
LOU Qikai, CHEN Bei, DING Meng, et al. Sliding mode control of DC microgrid under false data injection attack [J]. Control and Decision, 2022, 37(12):3207-3214.
- [17] EKLAS H, RON P, SANJEEVIKUMAR P, et al. Investigation on the development of a sliding mode controller for constant power loads in microgrids[J]. Energies, 2017, 10(8):1086.
- [18] 朱龙,唐梦雪,魏久林,等.基于滑模的直流微电网电压稳定方法[J].电工技术,2018(11):9-11+15.  
ZHU Long, TANG Mengxue, WEI Jiulin, et al. Method of DC microgrid voltage stability based on sliding mode[J]. Electric Engineering, 2018(11):9-11+15.
- [19] RIZI M T, ELIASI H. Nonsingular terminal sliding mode controller for voltage and current control of an islanded microgrid[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 185(4):106354.
- [20] 王焕清,陈明,刘晓平.一类非线性系统模糊自适应固定时间量化反馈控制[J].自动化学报,2021,47(12):2823-2830.  
WANG Huanqing, CHEN Ming, LIU Xiaoping. Fuzzy adaptive fixed-time quantized feedback control for a class of nonlinear systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(12):2823-2830.



- [16] CSISZAR I. Information-type measures of difference of probability distributions and indirect observations[J]. *Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica*, 1967, 2: 299-3180.
- [17] 王志祥. 基于 Hellinger 距离的两个正态总体的同质性检验[J]. *统计与决策*, 2016(16):13-16.  
WANG Zhixiang. Homogeneity test of two normal populations based on Hellinger distance[J]. *Statistics & Decision*, 2016(16):13-16.
- [18] ZHU C S, XIAO F Y. A belief Hellinger distance for D-S evidence theory and its application in pattern recognition [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, 106:104452.
- [19] 赵亮, 刘建辉, 王星. 基于 Hellinger 距离的混合数据集中分类变量相似度分析[J]. *计算机科学*, 2016, 43(6): 280-282.  
ZHAO Liang, LIU Jianhui, WANG Xing. Hellinger distance based similarity analysis for categorical variables in mixture dataset[J]. *Computer Science*, 2016, 43(6):280-282.
- [20] 陈金富, 朱乔木, 石东源, 等. 利用时空相关性的多位置多步风速预测模型[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(7): 2093-2106.  
CHEN Jinfu, ZHU Qiaomu, SHI Dongyuan, et al. A multi-step wind speed prediction model for multiple sites leveraging spatio-temporal correlation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(7):2093-2106.
- [21] 叶林, 李智, 孙铂皓, 等. 基于随机预测控制理论和功率波动相关性的风电集群优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(11):3172-3183.  
YE Lin, LI Zhi, SUN Bohao, et al. Optimal dispatch of system integrated wind farm clusters based on stochastic model predictive control considering temporal correlation of wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(11): 3172-3183.
- [22] 周荫清. 随机过程理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013:214-216.  
ZHOU Yinqing. *Stochastic process theory*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2013:214-216.

(上接第 166 页 = Continued from page 166)

- [21] ZHANG J, YU S, WU D, et al. Nonsingular fixed-time terminal sliding mode trajectory tracking control for marine surface vessels with anti-disturbances[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217(8):108158.
- [22] 刘宜成, 熊宇航, 杨海鑫. 基于 RBF 神经网络的多关节机器人固定时间滑模控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(11): 2790-2798.  
LIU Yicheng, XIONG Yuhang, YANG Haixin. Fixed-time sliding mode control of multi-joint robot based on RBF neural network[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(11): 2790-2798.
- [23] 张骁骏, 袁夏明, 王向阳, 等. 一种固定时间收敛模型参考终端滑模控制方法[J]. *自动化学报*, 2022, 48(3): 712-723.  
ZHANG Xiaojun, YUAN Xiaming, WANG Xiangyang, et al. A model reference terminal sliding mode control method with fixed-time convergence[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(3):712-723.
- [24] 苏博, 王洪斌, 王跃灵, 等. 基于固定时间滑模干扰观测器的 AUVs 事件触发编队控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5):1116-1126.  
SU Bo, WANG Hongbin, WANG Yueling, et al. Event-triggered formation control for AUVs with fixed-time sliding mode disturbance observer[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5):1116-1126.
- [25] 王本斐, 张荣辉, 冯国栋, 等. 基于事件触发的直流微电网无差拍预测控制[J/OL]. *自动化学报*: 1-12[2021-12-23]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c210585>.  
WANG Benfei, ZHANG Ronghui, FENG Guodong, et al. Event-triggered deadbeat predictive control for DC microgrid[J/OL]. *Acta Automatica Sinica*: 1-12 [2021-12-23]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c210585>.
- [26] HU S, YUAN P, YUE D, et al. Attack-resilient event-triggered controller design of DC microgrids under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(2):699-710.