

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2401052

## 基于自适应滑模的直流微网光伏发电控制策略

潘雷, 殷畅, 张静梅, 庞毅  
(天津城建大学 控制与机械工程学院, 天津 300384)

**摘要:** 针对双光伏直流微电网运行时存在光伏发电端光照不均、负载端突变导致的微电网系统运行不稳定问题, 提出了一种双光伏直流微网有限时间非奇异自适应滑模控制方法, 并利用李雅普诺夫稳定性理论证明了该方法的稳定性。该方法根据两个光伏发电单元输出电压与电流的变化来构建控制器中的状态变量, 结合有限时间非奇异滑模控制策略, 使两个光伏发电单元输出电压快速相等并达到设定值, 进而减小由于负载突变或光照不均引起的母线电压波动。仿真结果表明, 该方法可有效地解决光照不均、负载突变带来的母线电压波动问题, 具有良好的抗干扰能力。

**关键词:** 直流微电网; 滑模控制; 自适应; 有限时间

**中图分类号:** TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-719X(2024)01-0052-08

### Control Strategy of DC Micro-Grid Photovoltaic Power Generation Based on Adaptive Sliding Mode

PAN Lei, YIN Chang, ZHANG Jingmei, PANG Yi

(School of Control and Mechanical Engineering, TCU, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of uneven illumination of PV power generation end and the uneven operation of the micro grid system caused by the mutations during the running process of the dual photovoltaic dc micro grid, this paper proposes a dual photovoltaic dc micro mesh finite time nonsingular adaptive sliding mode control method, and by using lyapunov stability theory, the stability of the method is proved. The method is based on two photovoltaic power generation units output voltage and current changes to build a controller of state variables. Combining with the finite time nonsingular sliding mode control strategy, two photovoltaic power generation units output voltage are equaled quickly and reached the set value, thus reducing the load mutation or busbar voltage fluctuation caused by uneven illumination. The simulation results show that this method can effectively solve the problem of bus voltage fluctuation caused by uneven illumination and sudden load, and is of sound anti-interference ability.

**Key words:** dc microgrid; sliding mode control; self-adaptation; limited time

化石能源过度使用, 使得环境问题越来越严峻。光伏发电以其无污染、安全可靠等优点, 成为发展新能源的热门选择<sup>[1-2]</sup>。直流微电网以其优良的可控性、经济性等特点, 成为光伏发电的重要应用之一<sup>[3-4]</sup>。由于地形等因素的影响, 双光伏并联发电结构是不错的选择。但两个光伏发电单元的光照不同会导致各部分向母线输出的电压不同, 从而影响母线电压的稳定; 不稳定的母线电压会影响用电侧以及储能单元的正常运行<sup>[5]</sup>。对此, 通常需要对变换器进行控制, 来达到稳定母线电压的目的。在变换器的控制方法中, PID控

制算法简单、适应性好, 如文献[6]建立了两级式光储并网发电系统的数学模型, 采用PID控制实现了直流母线电压以及输出功率的稳定; 文献[7]采用基于PID的下垂控制实现了直流微网中多个光伏发电单元的协调控制。但是, PID线性控制很难兼顾控制器在所有工作点处的工作性能。

滑模控制响应速度快, 对非线性负载与时变负载具备很好的控制性能<sup>[8-9]</sup>。文献[10]运用双积分滑模控制提高了变换器不同工作模式之间的切换效率, 并具备很好的抗干扰能力, 但该方法不能根据系统电气参

收稿日期: 2022-03-17; 修订日期: 2022-05-06

基金项目: 河北省重点研发计划项目(20314501D, 19214501D); 天津市教委科研项目(2019KJ104); 天津市研究生科研创新项目(2020YJSS011)

作者简介: 潘雷(1981—), 男, 辽宁沈阳人, 天津城建大学副教授, 博士。

数的变化来自适应调节控制器参数. 文献[11]针对单个 Buck 变换器提出了一种自适应滑模控制策略, 但该方法所用滑模面存在奇异值, 需根据状态变量的范围来进行切换.

为此, 本文针对双光伏发电单元, 提出了一种改进的有限时间非线性自适应滑模控制策略, 使系统能在有限时间内达到稳定状态; 当负载端发生突变时, 能使母线电压快速回到设定值附近. 同时, 通过采集两个光伏发电单元各自输出电容电压与电容电流的变化量, 结合有限时间非线性自适应滑模控制策略, 使两个光伏发电单元输出电容电压快速相等并到达设定值附近邻域, 以此来增强系统在光伏发电端出现光照不均时的调节能力, 保证母线电压平衡.

## 1 系统描述与模型基础

双光伏直流微网的一般拓扑结构如图 1 所示. 它由光伏发电单元、蓄电池、负载和 DC-DC 变换器组成. 两个光伏发电单元和蓄电池模块分别并联到直流母线, 为负载提供电力. 光伏发电单元输出功率随着光照强度和温度的变化而变化, 当光伏发电单元输出功率高于负载功率需求时, 母线电压升高; 反之母线电压降低.

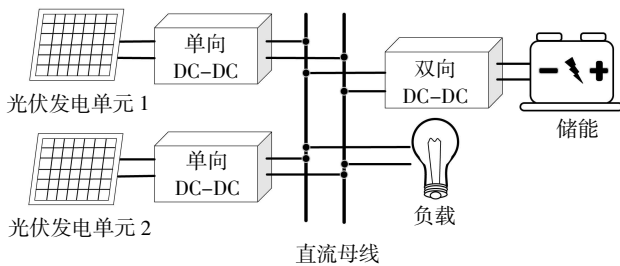


图 1 直流微网结构

光伏发电单元将光能转化成电能, 分别经过单向 DC-DC 变换器并入直流微网母线. 通过对两个光伏 DC-DC 变换器与储能变换器的协调控制, 进而实现对母线电压的控制.

### 1.1 Buck 型 DC-DC 变换器数学模型

光伏发电单元产生的电压不稳定, 要通过变换器稳压后供给直流母线. 本研究中采用的是 Buck 变换器, 如图 2 所示.

首先, 建立 Buck 变换器的小信号数学模型<sup>[12]</sup>. 如图 2 所示, 选取变换器输出端电容电压  $V_C$  及电容电流  $i_C$  为状态变量. 设  $v$  为开关器件的控制信号,  $U$  为变换器的输入电压,  $i_L$  为电感输出电流,  $V_0$  为负载两端

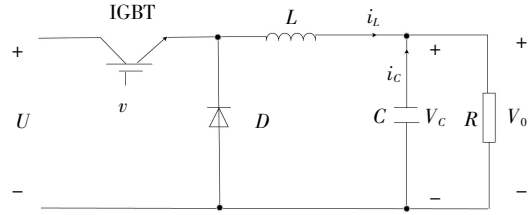


图 2 Buck 变换器基本框图

的电压.

当开关器件关断时, 其输入输出关系式如下

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{i_C}{C}, \quad \frac{di_C}{dt} = -\frac{V_C}{L} - \frac{dV_C}{Rdt} \quad (1)$$

当开关器件导通时, 其输入输出关系如下

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{i_C}{C}, \quad \frac{di_C}{dt} = -\frac{U - V_C}{L} - \frac{dV_C}{Rdt} \quad (2)$$

引入中间变量  $v = \{0, 1\}$

$$v = \begin{cases} 0, & \text{开关器件关断} \\ 1, & \text{开关器件导通} \end{cases}$$

由式(1)、(2)可得

$$\begin{cases} \frac{dV_C}{dt} = \frac{i_C}{C} \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{vU - V_C}{L} - \frac{dV_C}{Rdt} \end{cases} \quad (3)$$

在上述数学模型的基础上, 本文设计了一种有限时间非奇异自适应滑模控制器. 该控制器可实现当两个光伏发电单元输出电压不相等, 即 Buck 变换器的输入电压不相等时, 使 Buck 变换器的输出电压能快速到达设定值; 负载切换时, 使母线电压快速回到稳定状态, 维持系统的稳定.

### 1.2 PWM 信号

PWM(pulse width modulation)控制——脉冲宽度调制技术, 是利用面积等效原理, 将基波信号与载波信号做对比, 得到基波信号的等效矩形波, 以此实现对于变换器的有效控制<sup>[13]</sup>.

Buck 变换器主要依靠开关器件 IGBT 来实现降低输出电压的功能. 即系统中控制器等单元经过 PWM 信号产生器, 向开关器件 IGBT 输入 PWM 控制信号, 以此来达到变换器工作状态的控制在<sup>[14]</sup>. PWM 信号原理如图 3 所示.

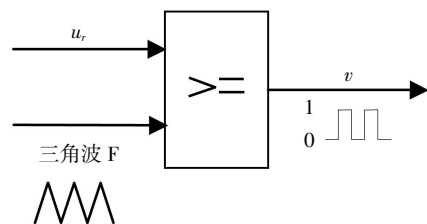


图 3 PWM 信号原理

式(3)中: $v$ 为Buck变换器中IGBT的控制信号.如图3所示: $v$ 是控制器输出信号; $u$ 为与三角波做比较得到的“0-1”方波信号,用以对开关器件IGBT进行开关控制.

### 1.3 预备知识

引理 1<sup>[15]</sup>:有如下系统

$$\dot{\varphi} = -a|\varphi|^b \text{sign}(\varphi) \quad (4)$$

其中, $a>0, 1/2<b<1$ ,则该系统可在有限时间收敛到平衡点,收敛时间 $t$ 满足

$$t < T(x) = \frac{1}{a(1-b)} |x|^{1-b} \quad (5)$$

引理 2<sup>[16]</sup>:若 $\sigma_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, n)$ ,同时存在参数 $\alpha, \beta (0<\alpha<1, 1<\beta<+\infty)$ ,则有下式成立,即

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_i^\alpha \geq (\sum_{i=1}^n \sigma_i)^\alpha \\ \sum_{i=1}^n \sigma_i^\beta \geq n^{1-\beta} (\sum_{i=1}^n \sigma_i)^\beta \end{cases} \quad (6)$$

引理 3<sup>[17]</sup>:若存在正实数 $\zeta > 1$ ,同时存在正数 $\Psi, \lambda$ 满足 $0 < \Psi < 1, 1 < \lambda < +\infty$ ,则有下式成立,即

$$-2^{\zeta-1} \Psi^\zeta + \lambda^\zeta \leq -|\Psi + \lambda|^\zeta \quad (7)$$

引理 4<sup>[18]</sup>:对于系统(4),若存在李雅普诺夫函数 $V(x)$ ,且满足如下关系

$$\dot{V}(x) \leq -\eta_1 V^{\gamma_1}(x) - \eta_2 V^{\gamma_2}(x) + \varepsilon \quad (8)$$

其中, $\eta_1, \eta_2, \varepsilon > 0, 0 < \gamma_1 < 1, \gamma_2 > 1$ ,则系统为全局固定时间稳定,且 $V(x)$ 最终收敛到的平衡点邻域 $D$ ,其表达式为

$$D = \{ \lim_{t \rightarrow T} x | V(x) \leq \min\{\eta_1^{-1/\gamma_1} (\frac{\xi}{1-\theta})^{-1/\gamma_1}, \eta_2^{-1/\gamma_2} (\frac{\xi}{1-\theta})^{-1/\gamma_2}\} \} \quad (9)$$

式中: $\theta$ 为常量, $0 < \theta < 1$ ,同时系统状态变量收敛到该邻域的时间满足如下关系式,即

$$T \leq \frac{1}{\theta \eta_1} \cdot \frac{1}{(1-\gamma_1)} + \frac{1}{\theta \eta_2} \cdot \frac{1}{(\gamma_2-1)} \quad (10)$$

## 2 控制策略

2.1 有限时间非奇异自适应滑模控制器设计  
系统控制结构如图4所示.

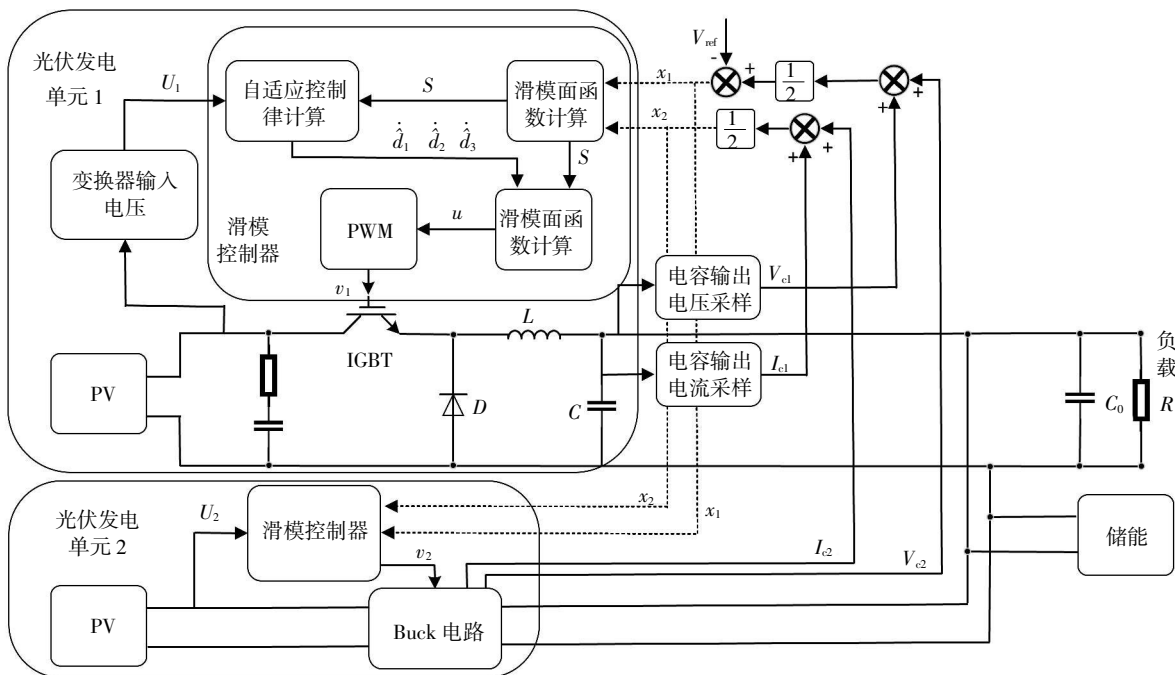


图4 系统控制结构

针对上述所提到的双光伏发电直流微网,在构造控制器时,要同时兼顾两个光伏发电单元的变化量:即结合光伏发电单元1输出电容电压 $V_{C1}$ 与设定值 $V_{ref}$ 的差值、光伏发电单元2输出电容电压 $V_{C2}$ 与设定值 $V_{ref}$ 的差值形成的状态变量 $x_1$ ;光伏发电单元1输出电容电流 $I_{C1}$ 与光伏发电单元2输出电容电流 $I_{C2}$ 形

成的状态变量 $x_2$ ,且

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{2} \{ (V_{C1} - V_{ref}) + (V_{C2} - V_{ref}) \} \\ x_2 = \frac{1}{2} (I_{C1} + I_{C2}) \end{cases} \quad (11)$$

结合式(1)、式(2)、式(3)与式(11)可以得到如下的二阶非线性系统,即

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{x_2}{C} \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{vU - x_1 - V_{ref}}{L} - \frac{x_2}{RC} \end{cases} \quad (12)$$

根据引理 1, 提出有限时间滑模面, 即

$$s = k_1 |x_1|^{p/q} \text{sign} x_1 + x_2 \quad (13)$$

其中:  $k_1$  为正常数;  $p$ 、 $q$  为正奇数, 且  $q > p$ 。

由滑模面  $s$  对时间  $t$  求导得

$$\dot{s} = \frac{1}{C} k_1 (p/q) |x_1|^{p/q-1} x_2 - \frac{x_1}{L} - \frac{x_2}{RC} + \frac{U}{L} u \quad (14)$$

控制器  $u$  构建如下, 即

$$\begin{cases} u = -\frac{L}{U} \left[ \frac{x_1}{L} + \frac{x_2}{RC} - \frac{1}{C} k_1 (p/q) |x_1|^{p/q-1} (x_2 + \frac{y}{k_2}) \right] - l_1 |s|^{l_1} \text{sign} s - l_2 |s|^{l_2} \text{sign} s \\ y = \frac{1}{k_2} (\text{sign}(x_2 + k_1 |x_1|^{p/q}) \text{sign} x_1)^{k_3} + \frac{k_1 (p/q)}{2k_3 - 1} (\text{sign}(x_2 + k_1 |x_1|^{p/q}) \text{sign} x_1) \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $k_2, k_3, l_1, l_2, t_1, t_2$  均为正常数。

当然, 也需考虑所构建滑模面及控制器中控制变量的奇异值问题。由于式(14)中存在  $|x_1|^{p/q-1} x_2$  项, 若  $p/q - 1 < 0$  且  $x_1 = 0$ , 该项将趋于无穷大, 这将导致系统的状态在某个时间点不能回到滑模面, 进而导致系统的不稳定。

为解决以上问题, 结合式(13), 令  $s = 0$ , 得到  $x_2 = -k_1 |x_1|^{p/q}$ , 带入  $|x_1|^{p/q-1} x_2$  项, 得到  $-k_1 |x_1|^{2p/q-1}$ 。令  $2p/q - 1 < 0$ , 即可使系统在全域都满足当  $x_1 = 0$  时,  $x_2 = 0$ , 即所有状态点最终都能回归到滑模面。

滑模控制另一个需要考虑的问题为抖振问题。通常情况下, 设计一个状态观测器加入到滑模面以及控制律的设计中, 可以起到减弱抖振的作用。对于自适应控制来说, 通过设计参数自适应律, 能及时掌握系统状态的变化情况, 起到状态观测的作用, 从而达到减弱抖振的功能。

基于式(15), 定义待估计参数  $d_1, d_2, d_3$ , 即

$$\begin{cases} d_1 = \frac{1}{U} \\ d_2 = \frac{1}{URC} \\ d_3 = \frac{L}{UC} \end{cases} \quad (16)$$

本文所设计的有限时间非奇异自适应滑模控制器如下

$$u = \hat{d}_1 x_1 + \hat{d}_2 x_2 - \hat{d}_3 k_1 (p/q) |x_1|^{p/q-1} (x_2 + \frac{y}{k_2}) - l_1 |s|^{l_1} \text{sign} s - l_2 |s|^{l_2} \text{sign} s \quad (17)$$

其中:  $y$  由式(15)给出;  $\hat{d}_i$  为  $d_i$  的估计值 ( $i = 1, 2, 3$ )。参数自适应律设计如下

$$\begin{cases} \dot{\hat{d}}_1 = -\rho_1 s x_1 \\ \dot{\hat{d}}_2 = -\rho_2 s x_2 \\ \dot{\hat{d}}_3 = \rho_3 s k_1 (p/q) |x_1|^{p/q-1} (x_2 + \frac{y}{k_2}) \end{cases} \quad (18)$$

其中:  $\rho_i > 0$  ( $i = 1, 2, 3$ )

## 2.2 稳定性证明

结论: 针对系统(12)、滑模面(13)、控制器(17)、自适应参数更新律(18), Buck变换器输出的电容电压  $V_c$  在有限时间收敛到设定值附近邻域 (即  $V_c$  与直流母线电压设定值的差值  $x_1$  有限时间内收敛到平衡态 0 附近), 且收敛时间  $T$  满足下式

$$T \leq \frac{2^{\frac{t_1+1}{2}}}{\theta l_1 (1-t_1)} + \frac{2 \times 6^{\frac{t_2+1}{2}}}{\theta l_2 (1-t_2)} \quad (19)$$

证明: 设李雅普诺夫函数如下

$$V = \frac{L}{2U} s^2 + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\rho_i} \tilde{d}_i^2 \quad (20)$$

由李雅普诺夫函数  $V$  对时间  $t$  求导可得

$$\dot{V} = \frac{L}{U} s \dot{s} - \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\rho_i} \tilde{d}_i \dot{\hat{d}}_i \quad (21)$$

其中:  $\tilde{d}_i$  为  $d_i$  的估计误差,  $\tilde{d}_i = d_i - \hat{d}_i$ 。将式(13)、式(14)代入式(21)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -d_1 x_1 s - d_2 x_2 s - d_3 s k_1 (p/q) |x_1|^{p/q-1} x_2 + s u - \\ & \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\rho_i} \tilde{d}_i \dot{\hat{d}}_i \end{aligned} \quad (22)$$

将式(17)带入式(22)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\tilde{d}_1 (x_1 s - \frac{1}{\rho_1} \dot{\hat{d}}_1) - \tilde{d}_2 (x_2 s - \frac{1}{\rho_2} \dot{\hat{d}}_2) + \\ & \tilde{d}_3 (s k_1 (p/q) |x_1|^{p/q-1} x_2 - \frac{1}{\rho_3} \dot{\hat{d}}_3) - \\ & \hat{d}_3 (p/q) |x_1|^{p/q-1} y - s (l_1 |s|^{l_1} \text{sign} s + l_2 |s|^{l_2} \text{sign} s) \end{aligned} \quad (23)$$

化简式(23)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -(\hat{d}_3 - \tilde{d}_3) (p/q) |x_1|^{p/q-1} y - \\ & s (l_1 |s|^{l_1} \text{sign} s + l_2 |s|^{l_2} \text{sign} s) \end{aligned} \quad (24)$$

且令

$$\begin{aligned} M = & -(\hat{d}_3 - \tilde{d}_3) (p/q) |x_1|^{p/q-1} y \\ N = & -s (l_1 |s|^{l_1} \text{sign} s + l_2 |s|^{l_2} \text{sign} s) \end{aligned} \quad (25)$$

对于函数  $N$ , 有

$$\begin{aligned} N = & -s (l_1 |s|^{l_1} \text{sign} s + l_2 |s|^{l_2} \text{sign} s) \leq \\ & -l_1 |s|^{l_1+1} - l_2 |s|^{l_2+1} \leq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

对于函数  $M$ , 由于辅助函数

$$y = \frac{1}{k_2} (\text{sign}(x_2 + k_1|x_1|^{p/q}\text{sign}x_1))^{k_3} + \frac{k_1(p/q)}{2k_3 - 1} (\text{sign}(x_2 + k_1|x_1|^{p/q}\text{sign}x_1)) \quad (27)$$

且令

$$\Theta = x_2 + k_1|x_1|^{p/q}\text{sign}x_1 \quad (\Theta \neq 0) \quad (28)$$

结合式(13)、式(17)可得

$$|\Theta| \geq (\frac{1}{k_2})^{k_3/(k_3-1)} \quad (29)$$

由于  $k_2, k_3$  均为正常数, 且  $k_3 > 1$ , 结合式(27)至式(29)可得辅助函数  $y > 0$ , 故  $M < 0$ ; 结合式(24)至式(26), 可得  $\dot{V} < 0$ . 由此可得, 滑模面以及自适应参数控制律有界.

由式(24)可得

$$\dot{V} = -l_1|s|^{\theta_1}\text{sign}s - l_2|s|^{\theta_2}\text{sign}s + \delta = -l_1|s|^{\theta_1+1} - l_2|s|^{\theta_2+1} + \delta \quad (30)$$

其中:  $\delta = -(\hat{d}_3 - \tilde{d}_3)(p/q)|x_1|^{p/q-1}y$ . 对式(30)进一步整理可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -l_1' \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} - l_2' \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} - \\ & \sum_{i=1}^3 (\sigma_i \tilde{d}_i^2)^{\frac{t+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 (\sigma_i \tilde{d}_i^2)^{\frac{t+1}{2}} - \\ & \sum_{i=1}^3 (\sigma_i \tilde{d}_i^2)^{\frac{t+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 (\sigma_i \tilde{d}_i^2)^{\frac{t+1}{2}} + \delta \end{aligned} \quad (31)$$

其中:  $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$  为正常数;  $l_1', l_2'$  为

$$l_1' = \frac{l_1}{\left(\frac{L}{2U}\right)^{\frac{t+1}{2}}}, l_2' = \frac{l_2}{\left(\frac{L}{2U}\right)^{\frac{t+1}{2}}}$$

且令

$$\phi = \sum_{i=1}^3 (\sigma_i \tilde{d}_i^2)^{\frac{t+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 (\sigma_i \tilde{d}_i^2)^{\frac{t+1}{2}} + \delta \quad (32)$$

同时使

$$\rho_i \geq \max\left(\frac{(l_1')^{\frac{2}{\theta_1+1}}}{2\sigma_i}, \frac{(l_2')^{\frac{2}{\theta_2+1}}}{2\sigma_i}\right) \quad (33)$$

结合式(31)至式(33)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -l_1' \left( \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} - \sum_{i=1}^3 \left( \frac{1}{2\rho_i} \tilde{d}_i^2 \right)^{\frac{t+1}{2}} - \right. \\ & \left. l_2' \left( \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 \left( \frac{1}{2\rho_i} \tilde{d}_i^2 \right)^{\frac{t+1}{2}} + \phi \right) \right) \end{aligned} \quad (34)$$

根据引理 2 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -l_1' \left( \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} + \left( \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\rho_i} \tilde{d}_i^2 \right)^{\frac{t+1}{2}} - \right. \\ & \left. l_2' \left( \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} + 3^{\frac{1-t_2}{2}} \left( \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\rho_i} \tilde{d}_i^2 \right)^{\frac{t+1}{2}} \right) \right) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -l_1' \left( \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} + \left( \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\rho_i} \tilde{d}_i^2 \right)^{\frac{t+1}{2}} - \right. \\ & \left. 3^{\frac{1-t_2}{2}} l_2' \left( \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} + \left( \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\rho_i} \tilde{d}_i^2 \right)^{\frac{t+1}{2}} \right) \right) \end{aligned} \quad (36)$$

根据引理 3 可得

$$\dot{V} \leq -2^{\frac{1-t_1}{2}} l_1'(V(x)) \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} - 6^{\frac{1-t_2}{2}} l_2'(V(x)) \left| \frac{L}{2U} s^2 \right|^{\frac{t+1}{2}} + \phi \quad (37)$$

根据引理 4 可得, 系统可以在固定时间内收敛到平衡点附近的邻域  $D$  内, 即

$$\begin{aligned} D = & \{ \lim_{t \rightarrow T} x | V(x) \leq \\ & \min\left\{ \left( 2^{\frac{1-t_1}{2}} l_1' \right)^{-\frac{2}{\theta_1+1}} \left( \frac{\phi}{1-\theta} \right)^{\frac{2}{\theta_1+1}}, \right. \\ & \left. \left( 6^{\frac{1-t_2}{2}} l_2' \right)^{-\frac{2}{\theta_2+1}} \left( \frac{\phi}{1-\theta} \right)^{\frac{2}{\theta_2+1}} \right\} \end{aligned} \quad (38)$$

收敛时间  $T$  满足

$$T \leq \frac{2^{\frac{t+1}{2}}}{\theta l_1'(1-t_1)} + \frac{2 \times 6^{\frac{t+1}{2}}}{\theta l_2'(1-t_1)} \quad (39)$$

综上, 系统(12)在滑模面(13)、有限时间非奇异自适应滑模控制器(17)、自适应参数更新律(18)的作用下, 两个光伏发电单元的输出电容电压误差可在有限时间  $T$  内收敛到给定值, 保证了直流母线电压的稳定性.

### 3 仿真分析

本文用 matlab 平台进行仿真验证.

情形 1: 基于 Buck 变换器的有限时间非奇异自适应滑模控制策略, 所采取的滑模面为

$$s = k_1|x_1|^{p/q}\text{sign}x_1 + x_2 \quad (40)$$

对应的有限时间非奇异自适应滑模控制器为

$$\begin{aligned} u = & \hat{d}_1x_1 + \hat{d}_2x_2 - \hat{d}_3k_1(p/q)|x_1|^{p/q-1}(x_2 + \frac{y}{k_2}) - \\ & l_1|s|^{\theta_1}\text{sign}s - l_2|s|^{\theta_2}\text{sign}s \end{aligned} \quad (41)$$

其中

$$\begin{aligned} y = & \frac{1}{k_2} (\text{sign}(x_2 + k_1|x_1|^{p/q}\text{sign}x_1))^{k_3} + \\ & \frac{k_1(p/q)}{2k_3 - 1} (\text{sign}(x_2 + k_1|x_1|^{p/q}\text{sign}x_1)) \end{aligned} \quad (42)$$

自适应参数更新律为

$$\begin{cases} \dot{d}_1 = -\rho_1 s x_1 \\ \dot{d}_2 = -\rho_2 s x_2 \\ \dot{d}_3 = \rho_3 s k_1 (p/q) |x_1|^{p/q-1} (x_2 + \frac{y}{k_2}) \end{cases} \quad (43)$$

情形 2: 基于双光伏发电结构的 Buck 变换器有限时间非奇异滑模控制策略, 采用的滑模面与情形 1 相同, 对应的控制器为

$$u = -\frac{L}{U} \left[ \frac{x_1}{L} + \frac{x_2}{RC} - \frac{1}{C} k_1 (p/q) |x_1|^{p/q-1} (x_2 + \frac{y}{k_2}) \right] - l_1 |s|^l \text{sign}s - l_2 |s|^l \text{sign}s \quad (44)$$

其中

$$y = \frac{1}{k_2} (\text{sign}(x_2 + k_1 |x_1|^{p/q}) \text{sign} x_1)^{k_3} + \frac{k_1 (p/q)}{2k_3 - 1} (\text{sign}(x_2 + k_1 |x_1|^{p/q}) \text{sign} x_1)$$

参数设置如表 1、表 2 所示。

表 1 系统基本参数

参数	数值	单位
$L$	$6.65e-3$	H
$C$	$5e-3$	F
$C_0$	$5e-5$	F
$R$	$40(20)$	$\Omega$

表 2 滑模面及控制器参数

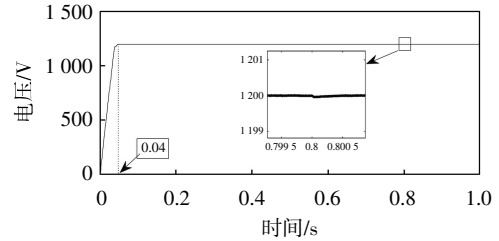
参数	数值	参数	数值
$k_1$	10	$l_1$	1
$k_2$	10	$l_2$	1
$k_3$	2	$p$	7
$t_1$	0.9	$q$	9
$t_2$	2		

为了验证本文所提出控制策略的性能, 与有限时间非自适应滑模控制器进行了对比分析, 具体如下。

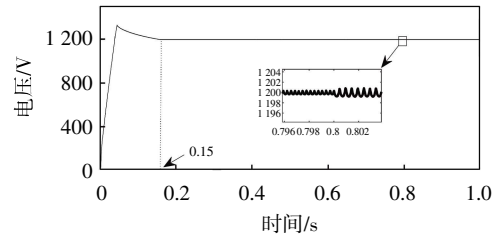
为了体现系统对于光照强度变化的适应性, 两个光伏发电单元初始光照强度同为  $1\ 000(50)$  Lux, 温度为  $25\ ^\circ\text{C}$ 。在  $0.2\ \text{s}$  时, 使光伏发电单元 1 所受光照强度变为  $800(50)$  Lux, 光伏发电单元 2 维持  $1\ 000(50)$  Lux; 在  $0.5\ \text{s}$  时使光伏发电单元 2 的光照强度恢复到  $1\ 000(50)$  Lux。同时, 为了体现系统对于负载端变化的应对能力, 在  $0.8\ \text{s}$  时使负载端由  $40\ \Omega$  切换为  $20\ \Omega$ 。

系统母线电压与  $0.8\ \text{s}$  PWM 信号如图 5 所示。当两个光伏发电单元光照、温度条件相同时, 由图 5a 可得: 在本文所提出的有限时间非奇异自适应滑模控制策略的作用下, 母线电压经过  $0.04\ \text{s}$  到达设定值附近, 其波动值低于  $0.1\%$ ; 在  $0.8\ \text{s}$  当负载端切换时, 系

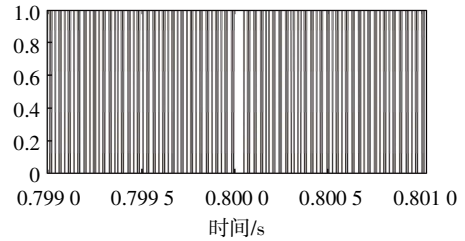
统经过  $0.1\sim 0.15\ \text{ms}$  恢复到稳定状态。由图 5b 可得: 在情形 1 的同等条件下, 情形 2 中的母线电压从零初始状态下经过  $0.15\ \text{s}$  到达设定值附近, 母线电压的波动在  $0.2\%\sim 0.3\%$ ; 当系统在  $0.8\ \text{s}$  时进行负载端切换, 结合图 5b、图 5d 可得, 系统母线电压虽然依旧在设定值附近邻域内波动, 但是误差变大, 调节能力降低。



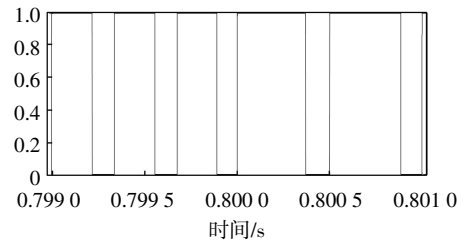
(a) 自适应滑模控制系统母线电压



(b) 非自适应滑模控制系统母线电压



(c) 自适应滑模控制  $0.8\ \text{s}$  PWM 信号



(d) 非自适应滑模控制

图 5 系统母线电压与  $0.8\ \text{s}$  PWM 信号

光伏发电单元输出电容电压如图 6 所示。由图 6a 可得: 在有限时间非奇异自适应滑模控制策略的作用下, 即使在  $0.2\ \text{s}$  光伏发电单元 1 所受光照强度降低了, 系统的母线电压整体略有降低, 但还在设定值附近邻域内波动, 保持着稳定运行的状态, 其波动范围在  $1\ 199.97\sim 1\ 200.02\ \text{V}$  之间; 当  $0.5\ \text{s}$  光伏发电单元所受光照强度恢复的时候, 母线电压恢复到  $0.2\ \text{s}$  之前的状态。从图 6b 可以看出: 当采用非自适应控制策略,

系统的母线电压波动范围本就偏大,波动范围在 1 199.9~1 200.5 V;当在 0.2 s 降低光伏发电单元 1 所受光照强度以及当在 0.5 s 恢复光伏发电单元 1 所受光照强度的时候,母线电压的波动范围较光照强度改变之前略微增加。

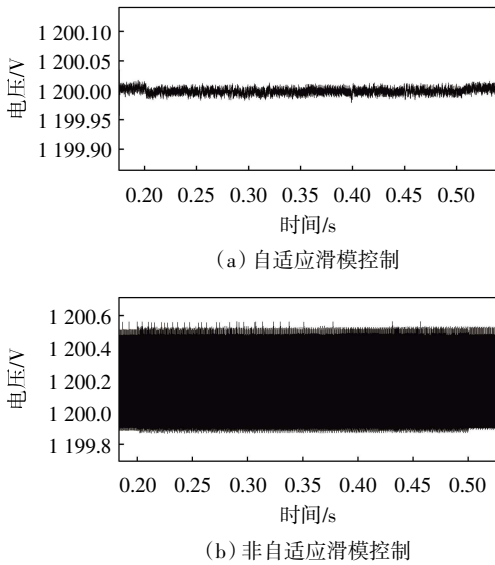


图 6 光伏发电单元输出电容电压

变换器输出电感电流如图 7 所示.由图 7b 可得,系统在应用非自适应控制策略时,系统输出的电感电流波动范围为 70 A 左右,当 0.8 s 负载端突变之后,波动范围增加到 120 A 左右;由图 7a 可得,在采用有限时间非奇异自适应滑模控制策略时,无论是光伏发电单元光照强度的改变还是负载端的切换,在各阶段变换器向系统输出的电感电流波动范围为 12~13 A,波动范围缩小了 80%。

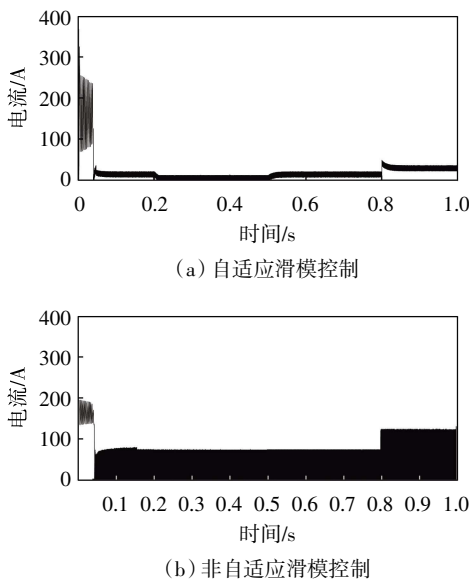


图 7 变换器输出电感电流

光伏发电单元输出电容电压如图 8 所示.由图 8 可得,有限时间非奇异非自适应滑模控制策略作用下,两个光伏发电单元输出电容电压到达设定值附近邻域的时间为 0.14 s.在有限时间非奇异自适应滑模控制策略作用下,无论是光伏发电单元 1 还是光伏发电单元 2,输出电容电压到达设定值附近邻域的时间均为 0.038 s,较非自适应滑模控制策略时间减少了约 72.8%。

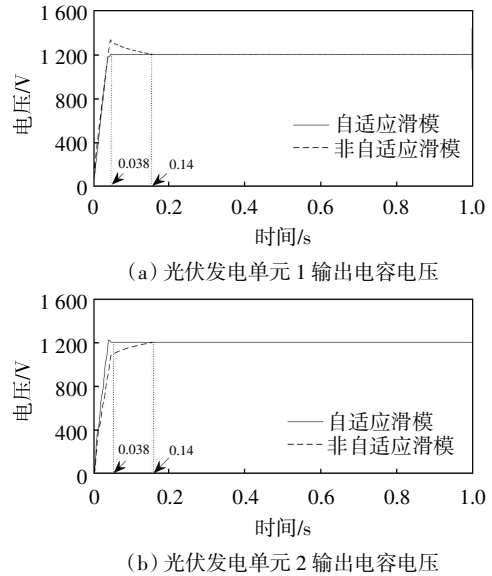


图 8 光伏发电单元输出电容电压

### 4 结 语

本文针对双光伏直流微网中两个光伏发电单元光照不均以及负载突变等情况,提出了一种有限时间非奇异自适应滑模控制策略,使系统能在有限时间内从零初始状态快速到达设定值附近邻域,对于负载端的突变有很好的适应能力.通过李雅普诺夫稳定性理论证明了闭环系统的稳定性.仿真结果表明,在本文提出的控制策略作用下,母线电压能快速从零初始状态到达设定值附近邻域波动;同时对光伏发电单元所受光照强度的波动以及负载端的突变有很好的适应能力。

### 参考文献:

[1] 崔朋玉,孙孝峰,沈虹,等.适用于光伏并网系统的传输电缆线性化模型研究[J].太阳能学报,2021,42(1):21-29.  
 [2] 郝晓光,吕游,李剑锋.基于光伏逆变器调相的网源协调调控运行技术研究[J].可再生能源,2021,39(7):976-981.  
 [3] 程启明,孙伟莎,程尹曼,等.直流微网中 PV 发电系统的改进型恒压控制策略[J].太阳能学报,2019,40(11):3071-

- 3077.
- [4] 李 妍,王 展,黄 迅,等. 计及光储荷特性的直流微网低压穿越控制策略[J]. 中国电力,2019,52(7):47-54.
- [5] 曹善康,马 啸,汪光远,等. 网侧故障下系统友好型直流微网协调控制策略[J]. 中国电机工程学报,2021,23(41):7950-7962.
- [6] 张 涛,唐爱博,赵冰洁,等. 光储并网发电系统低电压穿越控制策略[J]. 信息与控制,2020,49(4):444-454.
- [7] XIA Y H, MIAO Y, YANG P C, et al. Generation-storage coordination for Islanded DC microgrids dominated by PV generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019,34(1):37-46.
- [8] 康家玉,柴 洋,曹 举,等. 基于改进型滑模控制的光伏并网控制策略研究[J]. 可再生能源,2019,37(1):59-64.
- [9] PANDEY S K, PATIL S L, PHADKE S B. Regulation of nonminimum phase DC-DC converters using integral sliding mode control combined with disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs,2017,99:1-4.
- [10] ZHANG Q J, ZHUANG X Z, LIU Y C, et al. A novel control strategy for mode seamless switching of PV converter in DC microgrid based on double integral sliding mode control[J]. ISA Transactions,2020,100:1-29.
- [11] 陈 强,钱 宁,南余荣. Buck型变流器固定时间自适应控制[J].控制与决策,2020,35(5):1183-1190.
- [12] TAN S C, LAI Y M, TSE C K, et al. A fixed-frequency pulse-width modulation based quasi-sliding-mode controller for buck converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2005,20(6):1379-1392.
- [13] 郑 征,马方军,韦延方. 单相 PWM 整流器分数阶建模与仿真分析[J]. 系统仿真学报,2017,29(4):784-790.
- [14] 钱胤嘉,高丙团. PWM 整流器的无源滑模非线性控制[J]. 信息与控制,2012,41(2):238-243.
- [15] YU S, DU J, YU X, et al. A novel recursive terminal sliding mode with finite-time convergence[C]// The International Federation of Automatic Control -Proceeding of the 17th World Congress. Helan:Elsevier Ltd.,2008:5945-5949.
- [16] ZUO Z. Nonsingular fixed-time consensus tracking for second-order multi-agent networks[M]. Pregamon:Pergamon Press, 2015.
- [17] JI L, QIAN C, FRYE M T. A dual observer design for global output feedback stabilization of nonlinear systems with low-order and high-order nonlinearities [C]// Wiley Inter Science-New Orleans:IEEE Conference on Decision and Control. San Antonio:Wiley,2015:3351-3356.
- [18] JIANG B, HU Q, FRISWELL M I. Fixed-time attitude control for rigid spacecraft with actuator saturation and faults[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2016,24(5):1892-1898.