

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415645

# 基于ADRC的微电网传输变换器 带宽自整定控制研究\*

杨旭红 徐 坤 张苏捷 尹聪聪 钱峰伟

(上海电力大学自动化工程学院 上海 200090)

**摘要:** 直流微网作为新能源综合利用的重要形式,在分布式发电的有效利用中发挥着重要作用。针对直流微网在实时扰动的影响下出现的电能传输变换器电能质量恶化的问题,设计了一种基于深度确定性策略的级联自抗扰控制稳压控制策略。在原始状态观测器中引入新观测器与其级联,形成级联自抗扰,提高初始观测器对扰动的抵抗能力,并建立线性反馈律对观测后的扰动进行抵消,增强了系统对实时扰动的抑制能力。为抑制由系统控制器参数不确定性特征引起的不利影响,引入了深度确定性梯度算法,实现了对控制器参数的自适应整定,保证了系统的参数实时最优性,进一步提升了系统对实时扰动的抑制能力。最后,通过对观测器的跟踪性能、抗扰性能等方面进行了理论分析,并通过仿真对比了在各种工况下的不同控制策略的性能差异,验证了所提控制策略的正确性和优异性。

**关键词:** 直流微网;深度确定性梯度算法;线性自抗扰控制;抗扰性;电能质量

**中图分类号:** TN470 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

## Research on bandwidth self-tuning control of microgrid transmission converters based on ADRC

Yang Xuhong Xu Kun Zhang Sujie Yin Congcong Qian Fengwei

(School of Automation Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** DC microgrid, as an important form of comprehensive utilization of new energy, plays an important role in the effective utilization of distributed power generation. A cascaded active disturbance rejection control strategy based on deep deterministic strategy is designed to address the problem of deteriorating power quality of interface converters in DC microgrids under real-time disturbances. Introducing a new observer into the original state observer and cascading it to form a cascaded self disturbance rejection, improving the initial observer's resistance to disturbances, and establishing a linear feedback law to counteract the observed disturbances, enhancing the system's ability to suppress real-time disturbances. To suppress the adverse effects caused by the uncertainty characteristics of the system controller parameters, a deep deterministic gradient algorithm is introduced to achieve adaptive tuning of the controller parameters, ensuring the real-time optimality of the system parameters and further enhancing the system's ability to suppress real-time disturbances. Finally, theoretical analysis was conducted on the tracking performance and disturbance rejection performance of the observer, and the performance differences of different control strategies under various operating conditions were compared through simulation, verifying the correctness and superiority of the proposed control strategy.

**Keywords:** DC microgrid; deep deterministic gradient algorithm; linear self disturbance rejection control; immunity; power quality

## 0 引 言

近年来,随着新能源技术的发展和應用,直流微网作为

一种新兴的能源利用形式,已经逐渐成为分布式发电有效利用的重要手段。在微电网中,变换器主要包括真流到直流(DCDC)变换器、直流到交流(DCAC)变换器以及交流到

收稿日期:2024-03-17

\* 基金项目:国家自然科学基金(51777120)、上海市2021年度“科技创新行动计划”(21DZ1207502)项目资助

直流(ACDC)变换器,根据当下的研究表明,在比例积分控制、滑模控制以及自抗扰控制等传统控制算法的作用下,传统的 DCAC 变换器和 ACDC 变换器达到了良好的控制效果,满足实际的需要。而由于随着用电需要的扩大,传统的双向 DCDC 变换器已不能满足发电容量的需要,因此引入了基于三相结构的多路并联变换器。然而,在实际运行过程中,直流微电网面临着来自实时扰动的挑战,这些扰动会对电能传输变换器的电能质量造成恶化的影响,进而影响整个系统的稳定性和可靠性。因此,对直流微电网电能传输处的多路并联变换器施加具有强鲁棒性和强抗扰性稳压控制策略尤为重要<sup>[1-3]</sup>。

由于微网 DCDC 变换器具有非线性、强耦合、时变等复杂特性,导致电能传输变换器的模型存在不精确性。为提高传统 PI 控制的抗扰性,实现对电能传输变换器的优异控制,在电能传输变换器的控制策略研究中,文献[4]提出了使用自抗扰控制器(active disturbance rejection control, ADRC)代替传统的 PI 控制器,以提高微网系统对实时扰动的抗扰能力。然而,ADRC 中的收敛函数通常为非线性函数,使控制器参数的调整变得较为复杂。文献[5]则运用线性化的理念,将 ADRC 转化为线性自抗扰控制器(linear active disturbance rejection control, LADRC),并通过带宽法减少了控制器参数的数量,虽在一定程度上简化了参数调整过程,但未能实现自适应调节。因此,此类方法均依赖于算法设计人员的经验进行手动参数整定,从而使得控制策略在复杂微网系统中的适应性不足。为解决此问题,文献[6-8]引入了粒子群算法、灰狼算法等智能优化算法来对 LADRC 的控制参数进行整定。然而,此类智能算法往往只能找到局部最优解,并且对初值具有较高的敏感性,对控制效果产生了负面影响,因此在实际工程应用中存在一定的局限性。

针对上述,本文首先对扩张线性观测器(linear extend state observe, LESO)进行级联处理,引入新 LESO 与原 LESO 进行级联,对系统中具有不确定性的内扰和外界扰动分别进行观测,提高对总扰动的观测能力,从而提高系统的抗扰性,并通过跟踪性分析和抗扰性分析说明了控制参数对系统性能的影响,指出了级联线性自抗扰(cascaded linear active disturbance rejection controller, CLADRC)提升抗扰性的机理。其次,将深度确定性梯度算法(deterministic gradient algorithm, DGA)与 LADRC 相结合形成深度级联线性自抗扰控制(deterministic cascaded linear active disturbance rejection controller, DCLADRC),通过 DGA 与环境的交互学习对 LADRC 的控制参数进行整定,从而实现参数的自适应整定,并充分利用 DGA 的自学习能力,再次提高系统的抗扰性。最后,设计多种扰动工况,对本文所设计的基于观测器级联结构和深度确定性策略参数自适应优化相融合的新型控制策略进行了实验验证,并对比传统自抗扰策略,证明了本文所设计的控制策略

的有效性和优越性。

## 1 被控对象数学模型建立与级联线性自抗扰控制策略设计

### 1.1 直流微网结构与被控对象模型建立

基于新能源发电的直流微网架构如图 1 所示,直流微网由光伏发电和风力发电、储能单元、负载端以及中间电能传输变换器组成。为提升电能传输效果,提高能量利用率,本文主要对新能源发电部分与直流母线之间的电能传输变换器进行研究。

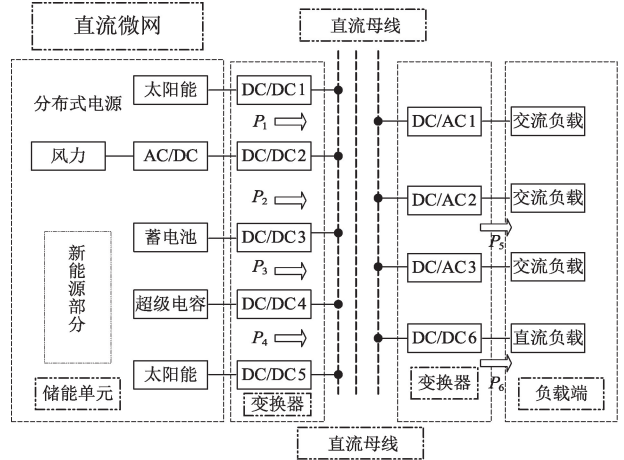


图 1 基于新能源发电的直流微网架构图

Fig. 1 Composition of DC microgrid based on new energy power generation

其中,  $P_1$  为太阳能发电功率;  $P_2$  为风力发电功率;  $P_3$  为蓄电池的功率;  $P_4$  为超级电容的功率;  $P_5$  为交流负载消耗的功率;  $P_6$  为直流负载消耗的功率。

直流微网为发电部分,将其他形式能量转为电能,然后经直流母线传输给交流微网,在交流微网直流母线处满足能量关系为:

$$\sum_{i=1}^4 P_i = \sum_{j=5}^6 P_j \quad (1)$$

### 1.2 电能传输变换器拓扑和数学模型建立

电能传输变换器的架构如图 2 所示。

其中,  $S_1, S_2, S_3$  为 MOSFET;  $VD_1$  为二极管;  $i_{L1}$  为输出电感电流;  $i_2$  为输出电容电流;  $u_2$  为输出电压;  $L_1$  为滤波电感;  $C_2$  为稳压电容;  $R_2$  为负载;  $u_1$  为输入母线电压;  $u_2$  为输出电压;  $i_L$  为流过电感的电流。

由图 2 可知,电能传输变换器属于对称结构,因此仅对一相进行分析,根据图 2 可得,一相电能传输变换器在小信号模型下的数学模型分为 2 种状态。

工作状态 1:  $S$  导通,  $D_1$  和  $D_2$  截止,可得:

$$\begin{cases} \frac{du_2}{dt} + \frac{1}{RC}u - \frac{1}{C}i_L = 0 \\ \frac{di_L}{dt} - \frac{1}{L}u_1 + \frac{1}{L}u_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

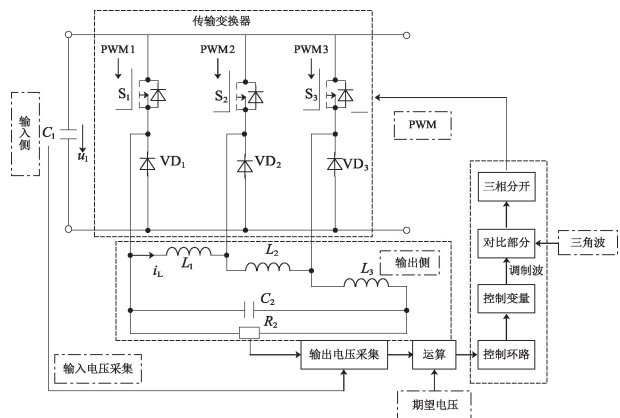


图 2 电能传输变换器的架构图

Fig. 2 Architecture diagram of power transmission converter

工作状态 2: S 关断,  $D_1$  截止,  $D_2$  导通, 可得:

$$\begin{cases} \frac{du_2}{dt} + \frac{1}{RC}u_1 - \frac{1}{C} = 0 \\ \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{L}u_1 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)和(3)的小信号模型, 可得变换器的传递函数为:

$$\begin{cases} \hat{i}_L(s) = \hat{d}(s) \frac{RCs + 1}{RLCs^2 + Ls + R} \\ \hat{u}_2(s) = \hat{d}(s) \frac{R}{RLCs^2 + Ls + R} \\ \hat{u}_2(s) = \frac{R}{RCs + 1} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\hat{u}_2$  为  $u_2$  的小信号模型;  $\hat{u}_1$  为  $u_1$  的小信号模型;  $\hat{d}(s)$  为  $d(t)$  的小信号模型。

## 2 DCLADRC 控制

### 2.1 LADRC 设计

含扰动的高阶系统的形式如式(5)所示。

$$\frac{d^{(n)}y}{dt^n} = g\left(y, \frac{dy}{dt}, \frac{d^2y}{dt^2}, \dots, \frac{d^{(n-1)}y}{dt^{n-1}}, n, t\right) + bu \quad (5)$$

式中:  $u$  为系统控制变量;  $y$  为系统输出量;  $d^{(n)}y/dt^n$  为输出量的各阶微分;  $n$  为外部干扰;  $g()$  为状态变量之间的耦合关系;  $b$  为控制增益。

由于  $b$  的精确值不易获取, 因此将  $b$  等效为未知部分和已知部分  $b_0$ 。传统的双积分器串联结构, 高于二阶的部分视为系统的总扰动, 进而可定义总扰动为除控制量之外的全部成分, 即系统中的非理想部分, 总扰动包括外部扰动和系统内部确定成分构成的综合, 总扰动可表示为<sup>[9-10]</sup>:

$$f(t) = g\left(y, \frac{dy}{dt}, \frac{d^2y}{dt^2}, \dots, \frac{d^{(n-1)}y}{dt^{n-1}}, n, t\right) + (b - b_0)u +$$

$$\frac{dy}{dt} \quad (6)$$

式中:  $f$  为总扰动。

将式(6)代入式(5)可将原高阶系统简化为二阶形式为:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = f + b_0u \quad (7)$$

根据 LESO 理论, 对上述被控对象的状态进行重构, 并取得  $y = x_1, f = x_2$  可得对应的扰动观测器数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}_1}{dt} - \beta_1x_1 = -\beta_1\hat{x}_1 + b_0u + \hat{x}_2 \\ \frac{d\hat{x}_2}{dt} - \beta_2x_1 = -\beta_2\hat{x}_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\hat{x}_1$  为  $x_1$  的估计值;  $\hat{x}_2$  为  $x_2$  的估计值;  $\alpha_1, \alpha_2$  为扰动观测器的调节参数。

根据式(8), 可写出扰动观测器的特征方程为:

$$M(s) = s^2 + \beta_1s + \beta_2 \quad (9)$$

式中:  $s$  为拉式算子;  $M(s)$  为扰动观测器特征方程。

特征方程的数值根是决定系统是否稳定运行的关键, 因此为保证系统在一定时间后趋于稳定, 将 LESO 闭环特征方程的数值根分配在根平面的左半平面, 并根据多项式系数相等原则, 可得扰动观测器的调节参数的表达式为:

$$\begin{cases} \beta_1 = 2\omega_0 \\ \beta_2 = \omega_0^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\omega_0$  为扰动观测器的带宽。

结合式(8), 可得扰动观测器的扰动估计传递函数为:

$$\frac{\hat{x}_2}{f} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2}s^2 + \frac{2}{\omega_0}s + 1} \quad (11)$$

在式(11)的基础上, 若扰动输入取为非阶跃函数时, 可得  $\hat{x}_2$  的时域表达式为:

$$\hat{x}_2 = f_2(t) + \frac{f_1(t)}{e^{\omega_0 t}} + qt \quad (12)$$

式中:  $f_1(t)$  为扰动衰减函数;  $f_2(t)$  为扰动固定函数。

根据式(12), 可得总扰动  $f$  与  $\hat{x}_2$  之间的时域误差为:

$$E = \hat{x}_2 - f = f_2(t) \quad (13)$$

式中:  $E$  为总扰动  $f$  与  $\hat{x}_2$  之间的时域误差。

### 2.2 CLADRC 设计

由式(13)可知, 在扰动输入的作用下, 总扰动与扰动估计值之间存在着不为 0 的误差, 且时域误差将一直存在, 极大降低了扰动观测器对扰动的估计能力<sup>[11-13]</sup>。因此, 为消除时域误差, 在初始 LESO 的基础上, 引入新 LESO, 使原 LESO 与新 LESO 构成级联扰动观测器, 从而观测器对扰动的估计能力, 因此可得级联扰动观测器的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}_3}{dt} + \beta_3\hat{x}_3 = \hat{x}_4 + \beta_3x_1 + \hat{x}_2 + b_0u \\ \frac{d\hat{x}_4}{dt} - \beta_4x_1 = -\beta_4\hat{x}_3 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\hat{x}_3$  为  $x_1$  的估计值;  $\hat{x}_4$  为  $\hat{x}_2$  的估计值;  $\beta_3, \beta_4$  为新

LESO 的调节参数。

根据式(14),可写出级联扰动观测器的扰动传递函数为:

$$G_2 = \frac{2(s^2 + 2\omega_0 s) + \omega_0^2}{\left(\frac{1}{\omega_0} s^2 + \frac{2}{\omega_0} s + \omega_0\right)^2} \quad (15)$$

式中: $G_2$  为级联扰动观测器的扰动传递函数。

在式(15)的基础上,初始观测器输出的扰动估计量被重新输入到级联扰动观测器中进行再次估计,两次估计后,则可得  $\hat{x}_2 + \hat{x}_4$  的时域表达式为:

$$\hat{x}_2 + \hat{x}_4 = \frac{f_3(t)}{e^{\omega_0 t}} e^{-\omega_0 t} + qt \quad (16)$$

式中: $f_3(t)$  级联扰动观测器的扰动衰减函数。

由式(16)可知,在稳态的情况下,总扰动的时域模型和估计值的时域模型具备一致性,即消除了估计误差。

为保证理论的准确性,根据式(11)和(15),可得原 LESO 和级联扰动观测器的频率特性曲线,如图 3 所示。

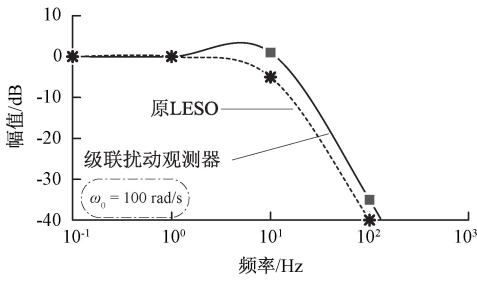


图 3 原 LESO 与级联扰动观测器的频率特性对比

Fig. 3 Original LESO and cascade disturbance observer frequency characteristic comparison

由图 3 可知,当  $\omega_0$  取 100 rad/s,级联扰动观测器的带宽大于原 LESO 的带宽,提升了对总扰动的估计能力。当频率为 10 Hz 时,级联扰动观测器的幅值响应大于原 LESO 的幅值响应 8 dB,提高了观测器对系统扰动的观测能力,减小了观测误差,使观测器获得了更优的动态特性<sup>[14-16]</sup>。

当级联扰动观测器输出系统扰动估计值与系统输出信号估计值后,设计 LSEF 对扰动估计值和输出信号估计值进行实时抵消,保证系统输出最终收敛。设计扰动反馈抵消环路的数学模型为:

$$b_0 u + (-\beta v + \beta \hat{x}_1 + \hat{x}_2) = 0 \quad (17)$$

式中: $\beta$  为扰动反馈抵消环路的调节参数; $v$  为输出信号的期望变量。

级联扰动观测器和扰动反馈抵消环路构成了 CLADRC,根据式(8)、(14)和(18),可得 CLADRC 的控制结构图,如图 4 所示。

### 2.3 频域分析

由图 4 可得出 CLADRC 的闭环传递函数为:

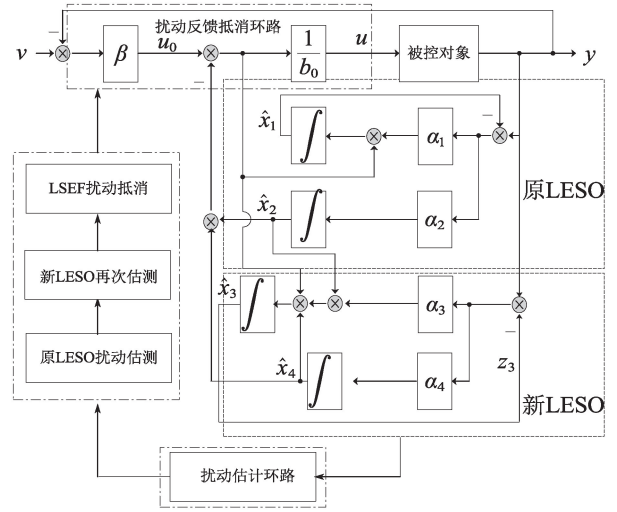


图 4 CLADRC 的控制结构图

Fig. 4 Control structure diagram of CLADRC

$$G_s = \frac{\left(\frac{1}{\omega_0^2} s^3 + 3\omega_0 s^2 + 3s + \frac{1}{\omega_0}\right) (\beta\omega_0)^2}{m_0 s^6 + m_1 s^5 + m_2 s^4 + m_3 s^3 + m_4 s^2 + m_5 s + m_6} \quad (18)$$

式中: $m_i$  为 CLADRC 闭环传递函数分母系数, $i=0\sim 6$ 。

为分析 LESO 和 LSEF 的调节参数对系统性能的影响,根据式(19)可得出 CLADRC 的闭环幅频特性曲线。分别改变观测带宽数值和控制带宽数值,观测带宽数值变动对系统性能的影响。

观测带宽数值变动时的系统闭环幅频特性曲线如图 5 所示。

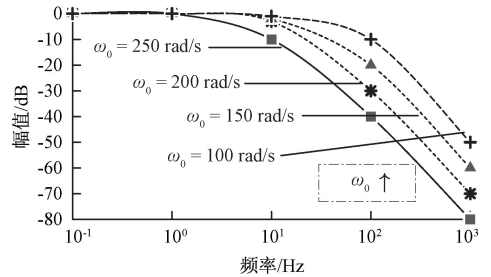


图 5 观测带宽数值变动时的系统闭环幅频特性曲线

Fig. 5 The amplitude-frequency characteristic curve of the closed-loop system when the observed bandwidth value changes

由图 5 可知,当  $\omega_0$  由 100 rad/s 增加至 250 rad/s 的过程中,闭环系统的频率特性曲线逐渐下降,提高了对系统总扰动的抑制能力,而且当  $\omega_0$  到 250 rad/s 时,带宽也得到了减小,因此为了保证在带宽减小不多的情况下,增大抗扰性,  $\omega_0$  取 150 rad/s,此时系统同时具备强抗扰性和合适带宽,既保证了较好的跟踪特性,也保证了较强的抗扰特性。

控制带宽数值变动时的系统闭环幅频特性曲线如图 6 所示。



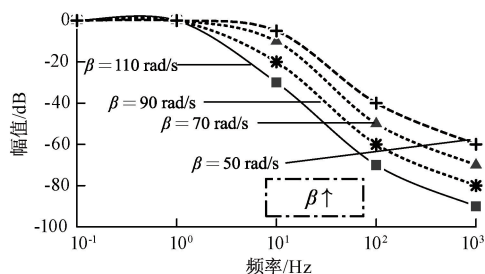


图 6 控制带宽数值变动时的系统闭环幅频特性曲线

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic curve of closed-loop system when the control bandwidth value changes

由图 6 可知,当  $\beta$  由 50 rad/s 增加至 110 rad/s 的过程中,幅频特性曲线逐渐下降,提升了系统对扰动的抵抗能力,且在  $\beta$  为 70 rad/s 时,既提高了系统的抗扰性,又保证带宽并未发生明显减小,因此  $\beta$  取 70 rad/s 为最优参数。

### 3 DCLADRC 设计

由第 2 节可知,虽然 CLADRC 通过频率特性曲线获得了 LESO 和 LSEF 的最优调节参数,但当系统中出现额外扰动时,调节参数并不能保证系统仍然能处于稳定状态,因此为了保证系统在暂态和稳态情况下都具有最优参数,使系统能够以较短时间渡过暂态,重新回归稳态,引入强化学习算法对调节参数进行实时整定。强化学习中的智能体在设定的环境中进行学习,并根据环境智能动作。CLADRC 与强化学习相结合形成 DCLADRC, DCLADRC 的原理图如图 7 所示<sup>[17-18]</sup>。

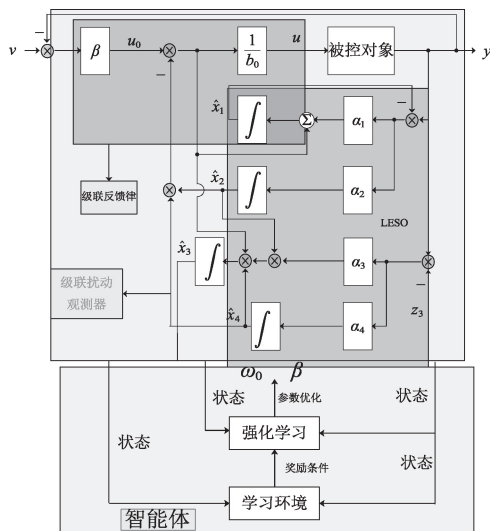


图 7 DCLADRC 的原理图

Fig. 7 Schematic diagram of DCLADRC

由图 7 可知,将 CLADRC 的系统状态作为智能体的输入,并设定特殊的学习环境对调节参数进行训练,当满足一定的奖励条件后,被送入强化学习算法模型中进行学习,经过数次迭代后输出最优的调节参数。其中智能体的控制逻辑

过程图如图 8 所示。

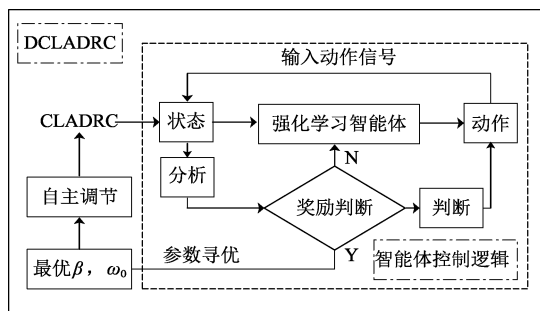


图 8 智能体的控制逻辑过程图

Fig. 8 Control logic process diagram of the agent

在图 8 中,系统状态包括系统输出  $y$  与输出估计值  $\hat{x}_1$  之间误差  $e_1$ ,总扰动  $f$  和扰动估计值  $\hat{x}_2$  之间的误差  $e_2$  以及系统输出  $y$  与期望输出  $v$  之间的误差  $e_3$ 。

根据误差的变化判断调节参数的最优数值,根据  $e_3$  设计奖励函数为:

$$Q = \begin{cases} 150, & e_3 < 0.1 \\ 15, & 0.1 \leq e_3 < 2 \\ -8, & 2 \leq e_3 < 5 \\ -270, & e_3 \geq 10 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $Q$  为奖励函数。

设  $t$  时刻的状态到动作的映射为:

$$n_t = Q(x_t) \quad (20)$$

式中: $n_t$  为动作映射; $Q(x_t)$  为动作映射函数; $x_t$  为  $t$  时刻的状态。

根据式 (21) 的动作映射模型,可得累计奖励的表达式为:

$$G_t = \sum_{i=1}^{\infty} \delta^i R^t \quad (21)$$

式中: $G_t$  为累计奖励; $R$  为奖励值; $\delta$  为奖励因子。

CLADRC 的状态经过奖励判断后,被送入动作环节,动作价值函数为:

$$V(x) = E_{\pi} \left[ \sum_{k=0}^{\infty} G_t \mid x = x_{t-1} \right] = E_{\pi} [R_{t-1} + \delta V(x_{t-1}) \mid x = x_t] \quad (22)$$

式中: $E_{\pi}$  为收敛数值因子; $V$  为动作价值函数。

在以上设计的基础上,若 CLADRC 的状态满足式 (23) 时,智能体输出最优调节参数。

$$n_t = \operatorname{argmax} Q(x) \quad (23)$$

根据以上设计,DDPG 调节 CLADRC 的参数误差如表 1 所示。

由表 1 可知,随着迭代次数的增加,观测误差和控制误差不断减小,当迭代次数为 60 次时,观测误差为 2.1%,控制误差为 1.7%,均小于 3%,满足误差要求,此时 DDPG 参数自整定成功,输出参数最优值。

综上所述,DCLADRC 的设计流程图如图 9 所示。

表 1 DDPG 调节 CLADRC 的参数误差

Table 1 Parameter error of CLADRC adjusted by DDPG

迭代次数/次	误差/%	
	观测误差	控制误差
10	36.2	41.3
20	21.8	29.6
30	13.2	17.6
40	6.7	6.5
50	2.3	1.9
60	2.1	1.7

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

实验参数	数值
电感/ $\mu\text{H}$	3.6
输入侧电容/ $\mu\text{F}$	25
输出侧电容/ $\mu\text{F}$	48
负载/ $\Omega$	10
迭代次数/次	50
系统频率/Hz	50
开关频率/kHz	1.3
直流母线电压/V	100
观测带宽/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	150
控制带宽/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	70
学习率	0.1

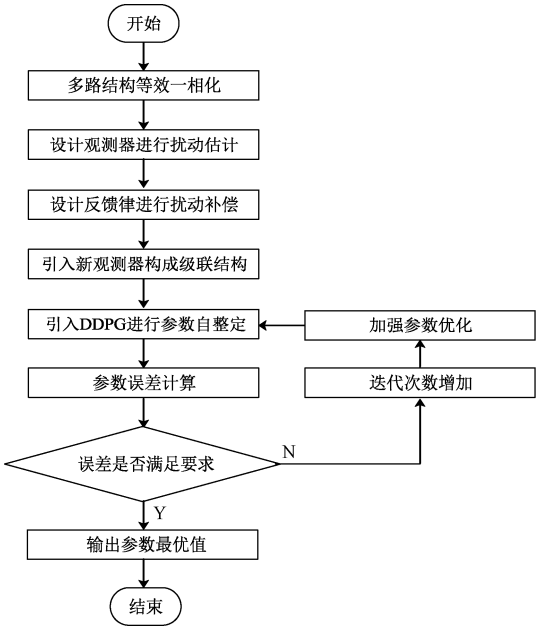


图 9 DCLADRC 的设计流程图

Fig. 9 Design flow chart of DCLADRC

4 仿真实验

为验证本文设计的 DCLADRC 控制策略的正确性和优异性,在 MATLAB/Simulink 数字仿真实验平台中搭建微网负载端 DCDC 变换器的数字仿真模型,并设计对比工况进行验证,实验参数如表 2 所示。

4.1 工况验证

实验对比 1:负载突然降低 50%

根据图 10 和 11 显示,直流微网系统末端接入的负载突然减少一半时,在 LADRC 和 DCLADRC 控制下,电能传输变换器的输出电压均有所降低,但 DCLADRC 控制下的电压下降幅度较小。两种控制方法下,电压均在一定时间后恢复至稳定状态,但 DCLADRC 控制下的恢复时间显著短于 LADRC 控制,表明 DCLADRC 可有效提升系统对扰动的抵抗能力,减少了调节时间和电压波动,从而显著增强了系统的稳定性。通过比较电压下降程度和调节时间,

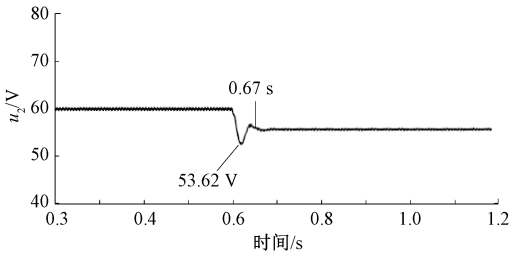


图 10 负载突然降低 50%时的 LADRC 输出电压暂态响应曲线

Fig. 10 LADRC output voltage transient when the load suddenly drops by 50%

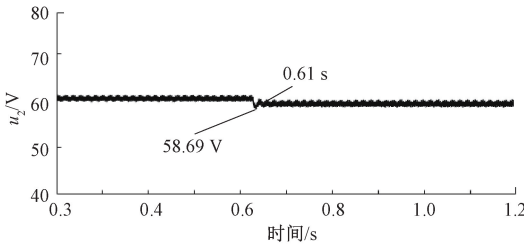


图 11 负载突然降低 50%时的 DCLADRC 输出电压暂态响应曲线

Fig. 11 Transient response curve of DCLADRC output voltage when the load suddenly decreases by 50%

可以得出 DCLADRC 策略在扰动抵抗性能方面表现更优,对系统的稳定性提升效果显著。

实验对比 2:负载突然增加 100%

根据图 12 和 13 显示,直流微网接入的负载突然增加一倍时,在 LADRC 和 DCLADRC 控制下,变换器输出电压均出现增加,但 DCLADRC 控制下的增加幅度明显小于 LADRC 控制。此外,DCLADRC 控制下电压的恢复时间也短于 LADRC 控制。由电压和调节时间对比可知,DCLADRC 策略在面对负载增加时显著提升了系统的扰动

抵抗能力,有助于系统更快地恢复至稳定状态,从而增强系统的稳定性。通过减少电压波动和调节时间,DCLADRC有效保障了系统运行的稳定性。

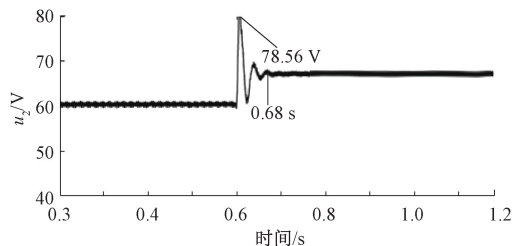


图 12 负载突然增加 100% 时的 LADRC 输出电压暂态响应曲线

Fig. 12 Transient response curve of LADRC output voltage when the load suddenly increases by 100%

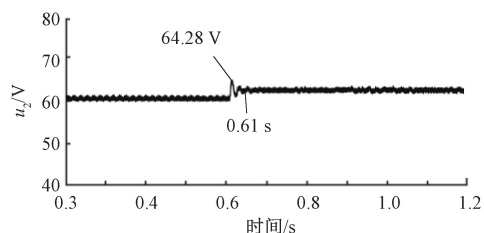


图 13 负载突然增加 100% 时的 DCLADRC 输出电压暂态响应曲线

Fig. 13 Transient response curve of DCLADRC output voltage when the load suddenly increases by 100%

实验对比 3: 直流母线电压数值突然增加 50%

直流母线作为电能传输变换器输入与输出之间的连接桥梁,在电能传输和能量转换中起着关键作用。根据图 14 和图 15 显示,当直流母线电压突然增加 50% 时,无论是 LADRC 还是 DCLADRC 控制下,变换器输出电压都显示出电压波动和电压突增现象。然而,相比之下,DCLADRC 控制下的电压波动和最大跃变值明显低于 LADRC 控制。DCLADRC 控制策略可更有效抑制此类扰动,因此 DCLADRC 在保障电能传输和能量转换稳定性方面具有明显优势。通过减少电压波动和快速恢复至稳定状态,DCLADRC 显著增强了系统的稳定性,从而提升了直流微网的整体性能和可靠性。

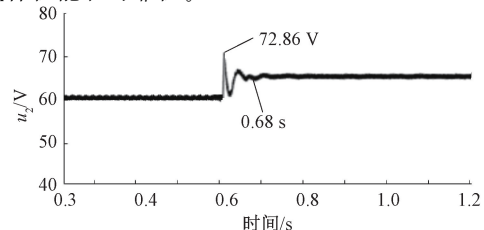


图 14 直流母线电压数值突然增加 50% 时的 LADRC 暂态响应曲线

Fig. 14 LADRC transient response curve when the DC bus voltage value suddenly increases by 50%

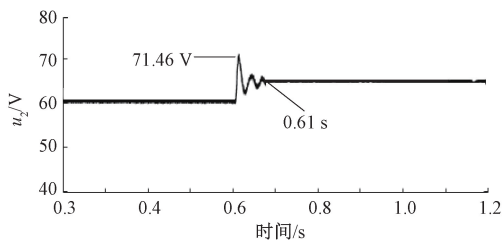


图 15 直流母线电压数值突然增加 50% 时的 DCLADRC 暂态响应曲线

Fig. 15 DCLADRC transient response curve when the DC bus voltage value suddenly increases by 50%

## 4.2 鲁棒性分析及误差分析

保持控制器参数不变,并将交错并联变换器的电容和电感在  $\pm 15\%$  内进行随机波动,对 LADRC 和 DCLADRC 分别进行 15 次重复实验。选取平方误差积分以及平方误差积分的分布作为校验鲁棒性的指标。其中,平方误差积分的分布表示每个平方误差与该阻平方误差平均值之间的误差值。若性能指标点分布越靠近远点,则表明系统具有更优的跟踪特性和抗扰特性;分布越密集表明系统具有更优的鲁棒性。系统的鲁棒性校验散点图如图 16 所示。

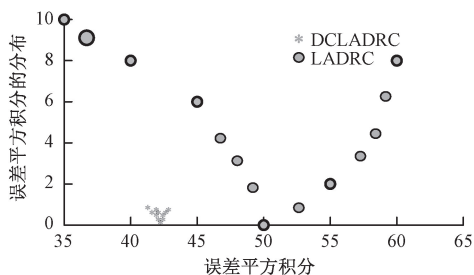


图 16 系统的鲁棒性校验散点图

Fig. 16 Scatter diagram of robustness verification of the system

由图 16 可知,在系统内部结构参数偏离标称值的情况下,DCLADRC 的误差平方积分的分布更靠近远点,而 LADRC 的分布离原点较远,而且 DCLADRC 的性能指标点的分布更加集中,说明 DCLADRC 的鲁棒性明显优于 LADRC。

为反应系统的综合性能,引入绝对误差积分和平方误差积分两个指标对 LADRC 和 DCLADRC 分别进行对比分析。绝对误差积分为:

$$\begin{cases} T_1 = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \\ T_2 = \int_0^{\infty} |e(t)|^2 dt \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $T_1$  为绝对误差积分;  $T_2$  为平方误差积分。

根据式(24)可得不同工况下的绝对误差积分和平方误差积分,如图 17 和 18 所示。

由图 17 和 18 可知,在无扰动下两种误差最小,当直流母线电压和负载的数值突变时,两种误差均会增大,但

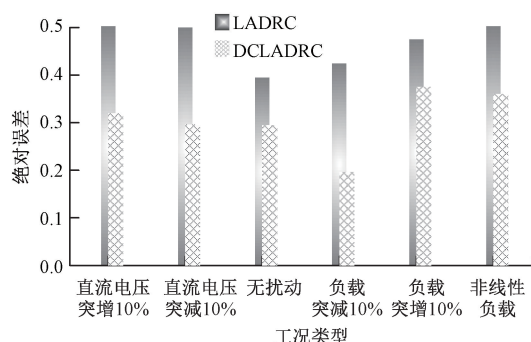


图17 不同工况下的绝对误差积分

Fig. 17 Absolute error integral under different working conditions

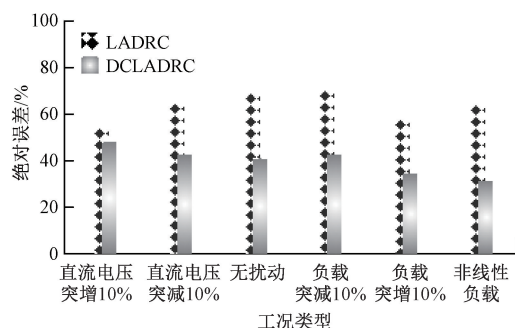


图18 不同工况下的平方误差积分

Fig. 18 Square error integral under different working conditions

DCLADRC的误差均小于LADRC,因此DCLADRC的综合性能优于LADRC。

## 5 结 论

针对直流微网电能传输变换器电能质量恶化问题,提出了一种DCLADRC控制策略,并与传统LADRC进行比较。DCLADRC引入新扰动观测器构成级联扰动观测器,提高系统总扰动的估计能力,增强系统的抗扰性。同时,DCLADRC还引入深度学习算法,在级联LADRC的基础上实时调整观测器和控制器参数,确保系统在扰动下保持最优状态,提高了系统的抗扰性和鲁棒性。本文仅从对理论设计进行了频域分析和数字仿真验证,并没有搭建实际物理模型进行物理实验的验证,而且对于LESO的观测精度,可对扰动传函做进一步改进,提高对实际扰动的抑制能力。

## 参考文献

- [1] 顾欣,王琦,胡云龙,等. 基于纳什议价的多微网综合能源系统分布式低碳优化运行策略[J]. 电网技术, 2022,46(4):1464-1482.  
GU X, WANG Q, HU Y L, et al. Distributed low-carbon optimal operation strategy of multi-microgrid integrated energy system based on Nash bargaining[J]. Power Grid Technology, 2022, 46(4): 1464-1482.
- [2] 范培藩,柯松,杨军,等. 基于改进多智能体深度确定

性策略梯度的多微网负荷频率协同控制策略[J]. 电网技术, 2022,46(9):3504-3515.

FAN P X, KE S, YANG J, et al. Multi-microgrid load frequency cooperative control strategy based on improved multi-agent depth deterministic strategy gradient[J]. Power Grid Technology, 2022, 46(9): 3504-3515.

- [3] 李萍,王久和. 基于无源与自抗扰的Vienna整流器控制策略研究[J]. 电网技术, 2022,46(4):1575-1586.  
LI P, WANG J H. Research on vienna rectifier control strategy based on passive and active disturbance rejection[J]. Power Grid Technology, 2022, 46(4): 1575-1586.
- [4] 夏晨阳,李晓丽,韩潇左,等. IPT系统线性自抗扰恒压输出和最大效率跟踪复合控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(16):6042-6052.  
XIA CH Y, LI X L, HAN X Z, et al. Linear active disturbance rejection constant voltage output and maximum efficiency tracking compound control method for IPT system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6042-6052.
- [5] 陈哲,张序轩,刘春强,等. 基于比例谐振型自抗扰控制的永磁同步电机电流解耦及谐波抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(24):9062-9072.  
CHEN ZH, ZHANG X X, LIU CH Q, et al. Research on current decoupling and harmonic suppression strategy of permanent magnet synchronous motor based on proportional resonance active disturbance rejection control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(24): 9062-9072.
- [6] 谢震,崔建,李喆,等. 基于改进自抗扰的电压控制型双馈风电机组故障穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2022,46(21):160-169.  
XIE ZH, CUI J, LI ZH, et al. Fault crossing strategy for voltage controlled doubly-fed wind turbines based on improved active disturbance rejection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(21): 160-169.
- [7] 杨挺,唐子慧. 太阳能联产系统自抗扰功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2022,46(6):92-101.  
YANG T, TANG Z H. Active disturbance rejection power coordination control of solar cogeneration system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(6): 92-101.
- [8] HASHEMPOUR M M, YANG M Y, LEE T L. An adaptive control of DPWM for clamped-three-level photovoltaic inverters with unbalanced neutral-point voltage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6133-6148.



- [9] 祝可可,阮琳. 永磁直驱风力发电机自抗扰技术及其无位置传感器控制策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10):266-274.  
ZHU K K, RUAN L. Active disturbance rejection technology and sensorless control strategy for permanent magnet direct drive wind turbine [J]. Journal of Solar Energy, 2022, 43(10): 266-274.
- [10] SHEN Y F, SHILLABER L, ZHAO H, et al. Desynchronizing paralleled GaN HEMTs to reduce light-load switching loss [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9):9151-9170.
- [11] LI K, WEI M, XIE CH, et al. Triangle carrier-based DPWM for three-level NPC inverters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 1966-1978.
- [12] 段茜月,陈燕东,徐元臻,等. 一种改进线性扩张状态观测器的自抗扰控制宽频带振荡抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13):12-24.  
DUAN X Y, CHEN Y D, XU Y C, et al. A wide-band oscillation suppression method for auto-disturbance rejection control with improved linear extended state observer[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 12-24.
- [13] 张世欣,皇金锋,杨艺. 基于平坦理论的直流微电网双向 DC-DC 变换器改进滑模自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5):107-116.  
ZHANG SH X, HUANG J F, YANG Y. Improved sliding mode active disturbance rejection control for bidirectional DC-DC converter in DC microgrid based on flat theory [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 107-116.
- [14] CHEN F, QIAO W, WANG H M, et al. A simple zero-sequence voltage injection method for carrier-based pulse-width modulation of the three-level NPC inverter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4687-4699.
- [15] 张纯江,暴云飞,孟宪慧,等. 直流微网储能 DC/DC 变换器的自适应虚拟直流电机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1):12-20.  
ZHANG CH J, BAO Y F, MENG X H, et al. Adaptive virtual DC motor control of DC microgrid energy storage DC/DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 12-20.
- [16] 曾国辉,廖鸿飞,赵晋斌,等. 直流微网双向 DC/DC 变换器虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6):65-73.  
ZENG G H, LIAO H F, ZHAO J B, et al. Adaptive control strategy for virtual inertia and damping coefficient of DC microgrid bidirectional DC/DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 65-73.
- [17] 李苹一,韩莹,李奇,等. 计及效率特性的电-氢混合储能直流微网经济下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7):69-80.  
LI L Y, HAN Y, LI Q, et al. Economic sag control strategy of hybrid electric-hydrogen energy storage DC microgrid considering efficiency characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 69-80.
- [18] 李圣清,邓娜,颜石,等. 基于改进蚁群动态规划的光储微网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 468-476.  
LI SH Q, DENG N, YAN SH, et al. Capacity optimization of optical storage microgrid based on improved ant colony dynamic programming[J]. Acta Solar Energy Sinica, 2023, 44(2): 468-476.

## 作者简介

杨旭红,博士,教授,主要研究方向为智能电网控制技术、新能源发电及储能技术等。

E-mail: Yangxuhong. sh@163. com

徐坤(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为微电网变换器自抗扰控制等。

E-mail: 550365216@qq. com

张苏捷,硕士研究生,工程师,主要研究方向为变电设备运行维护及设备运行维护及设备状态监测评估工作。

E-mail: zsjsgcc@163. com