

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231376

# 基于动态级联自抗扰的交流微网直流母线稳压控制

王超, 侯凯翔, 吴铁洲, 张强祥, 张晓星

(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 为解决交流微网 DC-AC 变换器受到外界扰动影响而导致控制效果不佳以及直流母线电压振荡现象的问题, 设计了一种动态级联自抗扰稳压控制策略。首先, 在初始状态观测器的基础上引入了新的观测器, 形成级联观测器线性自抗扰控制结构, 并且设计动态调节因子对观测器增益参数进行在线优化调节。其次, 在扰动观测器的基础上给出动态因子的优化整定范围, 并根据跟踪性能和抗扰性能的频率特性曲线对系统的抗扰性和稳定性进行了理论分析, 说明了观测参数与控制参数对系统综合性能的影响, 并得到最优参数的整定范围。最后, 在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建交流微网的数字仿真实验模型, 并设计多种仿真工况, 将所提控制策略与其他控制策略进行对比验证。证明了所设计的控制策略的正确性和优越性, 说明了所提控制策略具备较好的电压振荡抑制能力, 提高了电压稳定性。

**关键词:** 自抗扰控制; 交流微网; 直流母线; 动态因子; 稳压控制

## Dynamic cascade active disturbance rejection-based DC bus stabilizing control for an AC microgrid

WANG Chao, HOU Kaixiang, WU Tiezhou, ZHANG Qiangxiang, ZHANG Xiaoxing

(Hubei Key Laboratory of Efficient Utilization of Solar Energy and Control of Energy Storage Operation,  
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** To address the problem of poor control effect and DC bus voltage oscillation phenomenon caused by the influence of external disturbances on the DC-AC converter of AC microgrids, a dynamic cascaded self-disturbance rejection voltage stabilization control strategy is designed. First, a new observer is introduced based on the initial state observer to form a cascaded observer linear self-disturbance rejection control structure, and a dynamic adjustment factor is designed to optimize and adjust the observer gain parameters online. Secondly, based on the disturbance observer, an optimized setting range for dynamic factors is provided, and theoretical analysis of the system's anti-interference and stability is conducted based on the frequency characteristic curves of tracking performance and anti-interference performance. The influence of observation and control parameters on the overall performance of the system is explained, and the optimal parameter setting range is obtained. Finally, a digital simulation experimental model of the AC microgrid is built on the Matlab/Simulink simulation platform, and multiple simulation conditions are designed to compare and verify other control strategies with the proposed control strategy. The correctness and superiority of the designed control strategy are proved, and it is demonstrated that the proposed control strategy has good voltage oscillation suppression ability and improves voltage stability.

This work is supported by the Hubei Natural Science Foundation Innovation Group "Key Technologies of New Energy and Power Grid Equipment Safety" (No. 2021CFA025).

**Key words:** self-disturbance rejection control; AC microgrid; DC bus; dynamic factor; stable voltage control

## 0 引言

随着双碳目标的提出, 能源需求呈现出不断增

**基金项目:** 湖北省自然科学基金创新群体“新能源及电网装备安全关键技术”(2021CFA025); 国家自然科学基金项目资助(51677058)

加的趋势, 对环境保护也提出了更高的要求。作为一种新型的供电架构, 微网将可再生能源、分布式发电和传统电网进行了有机结合, 形成了一种小型电力系统, 可实现可靠、高效的能源管理和供应。在微网中, 交流微网和直流微网是两种常见的结构<sup>[1]</sup>。

交流微网主要由交流电源和交流负载组成, 它与传统电网之间通过电网连接器连接。交流微网具

有较高的稳定性和兼容性，但在高比例可再生能源的接入下，电能转换效率并不高。交流微网系统中包含的可再生能源的波动性和负载的变化性现象，这导致直流母线电压会出现较大的波动，给系统的稳定性和可靠性带来挑战<sup>[2]</sup>。尤其当系统出现实时扰动时，直流母线上的功率传输将出现不平衡状态，从而影响直流母线电压的稳定性，出现直流母线电压振荡现象<sup>[3]</sup>。为抑制直流母线电压的振荡现象，文献[4]设计了一种基于改进虚拟惯量的自适应调节策略，虽然改善了扰动下系统的动态特性，但仅适用于单个逆变单元，且电压振荡效果不显著；文献[5]在传统 PI 控制的基础上引入模型预测控制算法，利用上步迭代对下步迭代进行预测，虽达到了较好的控制效果，但模型预测策略具有强模型依赖性，而交流微网属于复杂系统，并不能精确建模，所以并不适用；文献[6]在电压控制算法中设计了滑模控制，选取了收敛函数，但滑模控制自身具有的抖振现象会进一步加剧电压振荡。上述方法均存在电压振荡抑制效果不明显的问题，因此文献[7]引入了线性自抗扰控制 (linear active disturbance rejection control, LADRC)，利用线性扩张状态观测器 (linear extend state observe, LESO) 对系统中的各种扰动进行观测，并利用线性误差反馈律 (linear error state feedback, LSEF) 进行扰动补偿，对直流母线电压的低频振荡进行抑制，但控制器参数整定较为复杂；文献[8]利用“带宽法”的思想，将控制器极点统一配置在根平面的左半平面，降低了参数整定的难度，但在一定程度上影响了 LESO 在暂态中的灵活性，而且带宽增大会放大高频噪声，对系统抗扰性的要求也会提高。

针对上述问题，研究人员先后引入了模糊控制算法<sup>[9]</sup>、BP 神经网络<sup>[10]</sup>、灰狼优化算法<sup>[11]</sup>等对 LADRC 中带宽参数进行实时整定和在线优化，但人工智能算法具有初值敏感性，需要将离线训练与在线训练相结合，整定复杂，且缺少理论依据。除此之外，有研究人员利用解耦原理，对扰动传函中的带宽参数进行解耦处理，虽然提高了对扰动的估计能力，但解耦后的观测器抗扰性能并不佳<sup>[12-14]</sup>。

本文对交流微网的自抗扰控制策略展开设计与分析，将 LESO 级联、动态因子与原始 LESO 进行有机结合，对级联 LESO 进行频域对比分析，并引入带宽参数动态调节因子对带宽参数进行实时补偿，提升扰动抑制能力，同时降低高频噪声带来的不利影响。通过扰动传函频域分析、抗扰性分析、抗噪声分析和动态因子抗扰性影响分析，指出了动

态级联线性扩张观测器 (dynamic cascade linear extend state observe, DY-CLESO) 较传统 LESO 能够提升抗扰性的机理。在仿真对比实验中，通过对比分析 3 种控制策略对同参数交流微网直流母线电压的控制效果，验证了本文所提动态级联线性自抗扰控制 (dynamic cascade linear active disturbance rejection control, DY-CLADRC) 的优越性。最终说明，本文提出的 DY-CLADRC 算法在保证稳定性的前提下，能够提升闭环控制系统的抗扰特性，较好地抑制直流母线电压的振荡现象。

## 1 系统结构与模型建立

### 1.1 系统结构

微网主要由分布式发电单元、储能单元、电力电子变换器以及负载组成，微网结构图如图 1 所示。

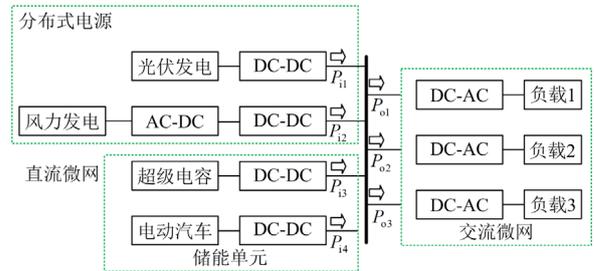


图 1 微网结构图

Fig. 1 Microgrid structure diagram

图 1 中： $P_{11}$  为光伏发电输出功率； $P_{12}$  为风力发电输出功率； $P_{13}$  为超级电容输出功率； $P_{14}$  为电动汽车输出功率； $P_{01}$ 、 $P_{02}$ 、 $P_{03}$  均为直流母线向负载的输出功率。

由图 1 可知，微网由直流微网和交流微网组成，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，如式(1)所示。

$$P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14} = P_{01} + P_{02} + P_{03} \quad (1)$$

### 1.2 交流微网数学模型建立

建立交流微网的电路拓扑如图 2 所示。

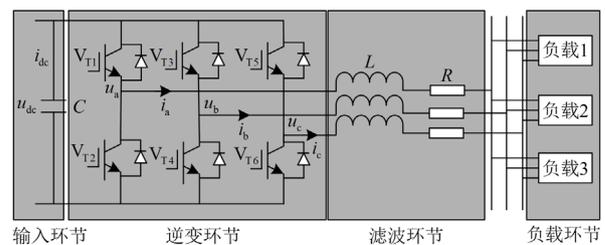


图 2 交流微网的电路拓扑

Fig. 2 Circuit topology of AC microgrids

图2中:  $u_{dc}$  为直流母线两端电压;  $i_{dc}$  为直流母线电流;  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为固态变压器逆变级输出电压;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为固态变压器逆变级输出电流;  $L$  为滤波电感;  $R$  为滤波电阻;  $V_{Ti}$  ( $i=1\sim6$ ) 为 IGBT;  $C$  为直流母线电容。

由图2可知, 交流微电网由4部分组成, 分别为直流输入环节、逆变环节、滤波环节、负载环节。交流微网输入侧的直流母线上存在直流母线电容, 可求得母线电容的瞬时功率  $P_c$  表达式为

$$P_c = Cu_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} \quad (2)$$

由式(2)可知, 直流母线电容的瞬时功率表达式由直流母线电压和直流母线电压的微分组成, 因此当直流母线电压为常数时, 直流母线电压的微分项将为0, 即此时电容上的瞬时功率表达式为0。但是当直流母线电压不稳定时, 电压微分项将不再为0, 即瞬时功率不再为0, 电容上将出现功率直流现象, 若忽略开关器件的开关损耗, 交流微网的输出能量将不再等于输入能量, 即能量利用率降低。因此, 为了使瞬时功率在暂态情况下保持不变, 抑制直流母线电压的波动现象, 需要采用合适的控制方法对交流微网进行控制<sup>[15-17]</sup>。

直流母线电压的小信号模型  $\dot{u}_{dc}$  为

$$\dot{u}_{dc} = -\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_s} u_{dc} - \frac{1}{R_s} u_s + \frac{3}{2} S_d i_d + \frac{3}{2} S_q i_q \right) \quad (3)$$

式中:  $S_d$ 、 $S_q$  分别为开关函数  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  在  $d$ 、 $q$  轴下的分量;  $R_s$  为 DCDC 侧等效电阻;  $u_s$  为 DCDC 侧等效电源;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为并网电流在  $d$ 、 $q$  轴下的分量。

## 2 动态级联线性自抗扰控制设计

### 2.1 线性自抗扰控制(LADRC)设计

在 LADRC 中, LESO 用于实时估计系统的状态, 提供准确的状态信息, 而 LSEF 则根据状态估计和参考输入计算控制信号, 通过调节系统以减小估计误差, 实现对系统的精确控制和抗扰性能的提升。两者相互配合, 共同作用于线性自抗扰控制系统, 从而提升系统的稳定性和鲁棒性。

根据 LADRC 要求的形式, 将式(3)改写为

$$\dot{u}_{dc} = bi_d + f_d \quad (4)$$

式中:  $b$  为控制增益;  $f_d$  为系统总扰动。

式(4)中  $f_d$  和  $b$  的表达式为

$$\begin{cases} f_d = \frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_s} u_{dc} + \frac{1}{R_s} u_s - \frac{3}{2} S_q i_q \right) \\ b = -\frac{3}{2C} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 根据交流微电网直流侧的数学模型可知, 直流侧扰动由直流侧电压、开关函数部分以及直流电源电压组成, 而交流侧扰动主要由负载突变、线性负载变为非线性负载等组成。在以上扰动的作用下, 直流母线的电压将呈现出不稳定状态, 严重影响系统的正常运行, 且影响功率的传输平衡。

根据 LESO 理论, 可得 LESO 的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \beta_1(u_{dc} - z_1) + z_2 + bi_d \\ \dot{z}_2 = \beta_2(u_{dc} - z_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\dot{z}_1$ 、 $\dot{z}_2$  分别为  $z_1$ 、 $z_2$  的微分信号;  $z_1$ 、 $z_2$  分别为  $u_{dc}$ 、 $f_d$  经 LESO 观测后的估计值;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为观测器增益。

利用带宽法, 将两个观测器参数用一个带宽参数表示为

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\omega_0 \\ \omega_0^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $\omega_0$  为 LESO 带宽。

为抵消系统扰动误差, 设计 LSEF 对 LESO 输出的各级状态变量估计值进行补偿, LSEF 为

$$i_d = \frac{k(u_{dc}^* - z_1) - z_2}{b} \quad (8)$$

式中:  $u_{dc}^*$  为指令电压;  $k$  为 LSEF 增益。

同观测器增益一致, 利用带宽法, 可得控制器增益表示为

$$k = \omega_c \quad (9)$$

式中,  $\omega_c$  为控制带宽。

根据式(6)和式(8), 可得 LADRC 的控制结构图如图3所示。

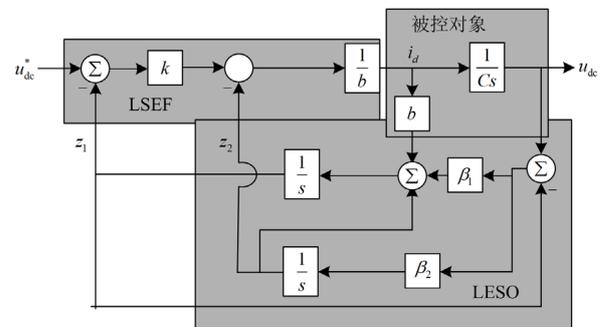


图3 LADRC 的控制结构图

Fig. 3 Control structure diagram of LADRC

### 2.2 级联线性自抗扰控制(CLADRC)设计

根据图3,系统总扰动 $f_d$ 经LESO观测后的估计值 $z_2$ 与 $f_d$ 之间的传递函数为

$$\frac{z_2}{f_d} = \frac{\omega_0^2}{(s + \omega_0)^2} \quad (10)$$

若 $f_d$ 选择为斜坡函数,可以得到 $z_2$ 的时域表达式为

$$z_2 = n \left[ t + \left( t + \frac{2}{\omega_0} \right) e^{-\omega_0 t} \right] \quad (11)$$

式中, $n$ 为斜坡函数的斜率系数。

由式(11)可知, $z_2$ 的时域表达式与 $f_d$ 的时域表达式相比, $z_2$ 并不能完全跟踪 $f_d$ ,存在稳态误差如式(12)所示。

$$e_1 = -2n\omega_0^{-1} \quad (12)$$

式中, $e_1$ 为LESO下的稳态误差。

为了消除LESO在斜坡函数下的稳态误差,从而提高直流电压的稳定性,引入新的LESO,使初始LESO与新LESO构成级联观测器形式。具体如下:将LESO1输出的 $z_2$ 和 $u_d$ 与 $u_d^*$ 之间的误差作为LESO2的输入,构造LESO2的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{z}_3 = z_4 + \beta_3(z_3 - i_d) + z_2 + b_0 i_d \\ \dot{z}_4 = \beta_4(z_3 - i_d) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\dot{z}_3$ 、 $\dot{z}_4$ 分别是 $z_3$ 、 $z_4$ 的微分信号, $z_3$ 为 $i_d$ 的观测值, $z_4$ 为 $z_2$ 的观测值; $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 为LESO2的观测增益。

选择 $f_d$ 为斜坡函数,则根据式(13),可得到级联观测器的扰动传递函数 $G_c(s)$ 为

$$G_c(s) = \frac{\omega_0^2(2s^2 + \omega_0(4s + \omega_0))}{(s^2 + 2\omega_0s + \omega_0^2)^2} \quad (14)$$

同初始LESO一致,若系统的总扰动选择为斜坡函数,则可得级联LESO的扰动估计值的时域表达式 $g_1(t)$ 为

$$g_1(t) = nt - nte^{-\omega_0 t} \left( 1 + \omega_0 t \left( 1 + \frac{\omega_0 t}{6} \right) \right) \quad (15)$$

由式(15)可知,扰动观测值的时域表达式由两部分组成,斜坡函数与衰减函数之和,当时间 $t \rightarrow \infty$ ,可得

$$z_2 + z_4 = nt \quad (16)$$

即扰动观测值与扰动量之间的误差为

$$e_2 = 0 \quad (17)$$

式中, $e_2$ 为CLESO下的稳态误差。

由式(17)可知,在LESO1和LESO2串联观测

器的作用下,扰动观测值与扰动量的表达式一致,此时的误差为0,即级联LESO具有更强的扰动观测能力和观测精度。用LESO1和LESO2级联代替原来的LESO,提高了对扰动的观测精度。为了达到简化系统的目的,利用扰动的观测值 $z_2$ 和 $z_2$ 的观测值 $z_4$ 之和进行扰动补偿,设计扰动补偿环节为

$$u_d = \frac{u_{d0} - z_2 - z_4}{b_0} \quad (18)$$

式中: $u_d$ 为并网输出电压在 $dq$ 轴下的 $d$ 轴分量; $u_{d0}$ 为 $u_d$ 的等效控制输入。

根据式(13)和式(18),可绘制出CLADRC的控制结构图,如图4所示。

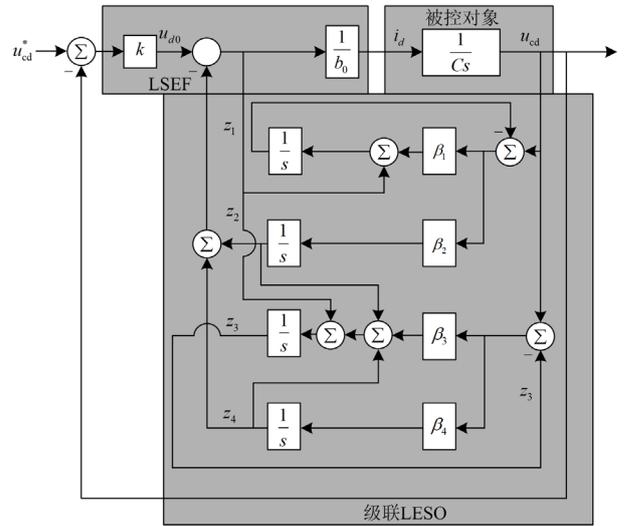


图4 CLADRC的控制结构图

Fig. 4 Control structure diagram of CLADRC

### 2.3 动态级联线性自抗扰控制(DY-CLADRC)设计

DY-CLESO将专家规则与LESO有机结合,引入动态因子 $a_i(i=1\sim6)$ 对控制器带宽和观测器带宽进行在线动态调节,改善CLESO对于动态干扰的跟踪性能,进一步优化控制策略的抗扰能力<sup>[18-20]</sup>。

设当前第 $i$ 次采样,设定一个偏差的极大值为 $M_{\max}$ ;设定一个偏差的中间值为 $M_{\text{mid}}$ ,设定一个偏差的极小值为 $M_{\min}$ ,且 $M_{\max} > M_{\text{mid}} > M_{\min} > 0$ 。依据观测绝对误差的大小,引入动态因子 $a_1$ 、 $a_2$ 对带宽参数进行实时整定,初值可设定为100。专家规则采用“IF-THEN”语句设计。

设期望带宽参数与实际带宽参数之间的误差为 $e_w$ 。

1) 绝对误差很大

若 $e_w$ 取值范围为

$$|e_w| \geq M_{\max} \quad (19)$$

可得 LESO 带宽、控制带宽的期望值  $\omega_0^*$ 、 $\omega_c^*$  为

$$\begin{cases} \omega_0^* = a_1 \omega_0(0) \\ \omega_c^* = a_2 \omega_c(0) \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $\omega_0(0)$ 、 $\omega_c(0)$  为带宽初值。

当误差的绝对值很大时, 系统受到大扰动,  $a_1$  增大,  $a_2$  减小, 通过增强控制作用来迅速校正偏差, 提高了系统的稳定性。

2) 绝对误差较大

若  $e_w$  取值范围为

$$M_{\max} > |e_w| \geq M_{\text{mid}} \quad (21)$$

可得两种带宽的期望值为

$$\begin{cases} \omega_0^* = a_3 \omega_0(0) \\ \omega_c^* = a_4 \omega_c(0) \end{cases} \quad (22)$$

当误差的绝对值较大时, 若系统发生小扰动, 则  $a_4$  增大,  $a_3$  稍微减小, 此时控制器的控制效果将提升。

3) 绝对误差较小

若  $e_w$  取值范围为

$$|e_w| < M_{\min} \quad (23)$$

可得两种带宽的期望值为

$$\begin{cases} \omega_0^* = a_5 \omega_0(0) \\ \omega_c^* = a_6 \omega_c(0) \end{cases} \quad (24)$$

当误差的绝对值很小时, 此时认为观测器的估计过程结束, 动态因子重新回到初值状态, 系统重新回到无扰动状态。

由以上设计可知, 动态调节因子的大小可以反映 DY-CLADRC 中 CLESO 和 LSEF 的带宽参数对系统的影响能力。根据专家规则, 设各个动态调节因子的大小关系为

$$a_2 > a_4 > a_6 > 100 > a_5 > a_3 > a_1 > 0 \quad (25)$$

基于以上设计, 可得 DY-CLADRC 的扰动传递函数  $G_s(s)$  为

$$G_s(s) = \frac{2\omega_0^2 s^2 + 4a_2 \omega_0^3 s + a_3 \omega_0^4}{s^4 + 4a_1 \omega_0 s^3 + 2a_4 \omega_0^2 s^2 + (2a_1 a_6 \omega_0 s + a_5 \omega_0^2)^2} \quad (26)$$

根据式(26), 对系统传递函数进行降阶处理, 可得系统 DY-CLADRC 扰动传递函数的阻尼比  $\xi$  为

$$\xi = \frac{2a_2 \omega_0}{\sqrt{a_6 \omega_0^2}} \quad (27)$$

由式(27)可知, 根据动态调节因子的大小和二阶系统的特性, 可使系统获得欠阻尼和过阻尼的状态, 因此在动态调节因子的作用下, 系统仍然能够

稳定, 可实现对观测器中各个状态变量的快速零误差跟踪。

根据以上分析可得 DY-CLADRC 的设计流程图, 如图 5 所示。

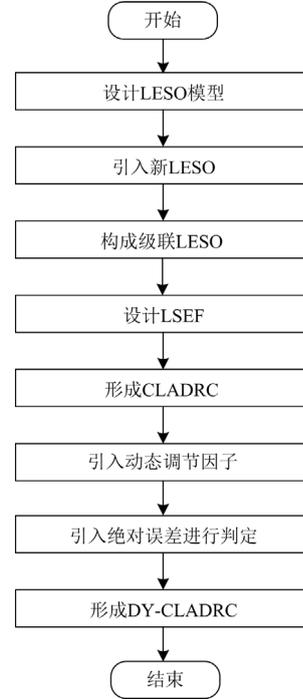


图 5 DY-CLADRC 的设计流程图

Fig. 5 Design flowchart of DY-CLADRC

由图 5 可知, 为提高系统直流母线的电压稳定性, 引入了 LADRC 控制策略, 首先设计 LADRC 的核心部件 LESO 对扰动进行观测, 同时为消除 LESO 在斜坡函数下的扰动稳态误差, 引入新 LESO 对初始 LESO 的输出变量进行再次估计, 形成级联 LESO, 提高对系统扰动的观测能力; 其次, 设计 LSEF, 与级联 LESO 共同组成 CLADRC, 同时为了使系统获得实时的带宽参数优化能力, 引入动态调节因子, 并利用专家规则对控制带宽和观测带宽进行在线动态调节, 从而形成 DY-CLADRC。

### 3 DY-CLADRC 性能分析

#### 3.1 观测器对比

为比较 LESO 和 LESO1 与 LESO2 串联后的性能, 选取  $\omega_0$  为 1320 rad/s, 绘制 LESO 和 CLESO 的频率特性曲线, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 当观测器带宽取 1320 rad/s 时, CLESO 的带宽明显大于 LESO 的带宽, 且在 1000~10 000 rad/s 的高频段, CLESO 的频率特性曲线虽然位于 LESO 频率特性曲线的上方, 但是幅值相差并

不大。若观测器带宽取 100 rad/s, CLESO 的幅值响应为-16 dB, LESO 的幅值响应为-18 dB, 两者相差 2 dB, 因此相比 LESO, CLESO 对高频噪声的抵抗能力并未减弱<sup>[21-22]</sup>。

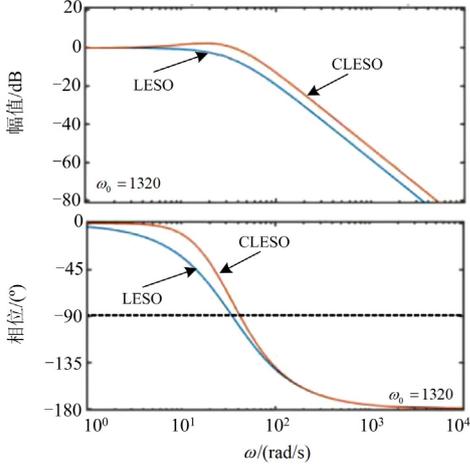


图 6 LESO 和 CLESO 的频率特性曲线

Fig. 6 Frequency characteristic curves of LESO and CLESO

### 3.2 稳定性证明

设观测器中状态量与观测值之间的误差为

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d - z_1 \\ f_d - z_2 \\ i_d - z_3 \\ z_2 - z_4 \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中,  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$  为观测器误差。

根据式(28)和终值定理, 可得

$$\lim_{s \rightarrow 0} sE_i = 0, i = 1, 2, 3, 4 \quad (29)$$

由式(29)可知, 当  $s \rightarrow 0$  时, 观测器误差为 0, 即观测器具有优异的稳定性。

根据图 5 可得到系统的闭环传递函数为

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{s^2 + (2\omega_0 + \omega_c)s}{(s + 2\omega_0)(s^2 + (\omega_0^2 + \omega_c)s + \omega_0^2\omega_c)} \\ G_2(s) = \omega_c(s + \omega_c)^{-1} \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $G_1(s)$  为系统的闭环跟踪传递函数;  $G_2(s)$  为系统的闭环抗扰传递函数。

根据式(30), 若跟踪输入和抗扰输入均取阶跃函数, 则可得系统的输出  $u_{cd}$  为

$$u_{cd} = l_1 e^{-\omega_0 t} + l_2 e^{-\omega_0^2 t} + l_3 e^{-\omega_c t} \quad (31)$$

式中,  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  均为阶跃函数的系数。

### 3.3 频域分析

为验证系统的带宽参数和控制参数对系统的影响, 根据式(30)和控制变量法, 对系统的跟踪频率

特性曲线和抗扰频率特性曲线进行绘制。

1)  $\omega_c$  取 650 rad/s,  $\omega_0$  分别取 1250 rad/s、2250 rad/s、3250 rad/s、4250 rad/s。跟踪特性如图 7 所示, 抗扰特性如图 8 所示。

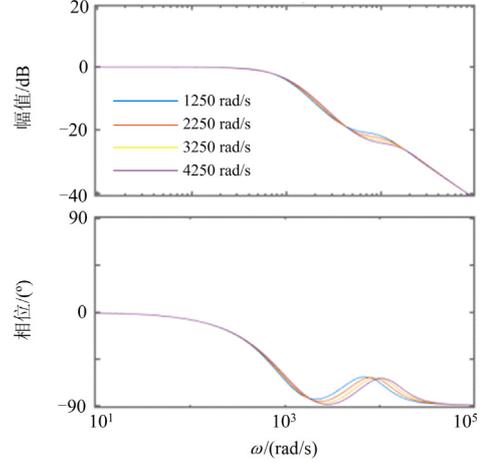


图 7 情形一跟踪特性

Fig. 7 Tracking characteristics of scenario 1

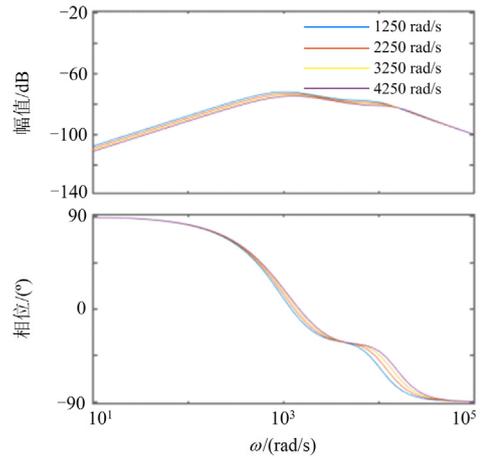


图 8 情形一抗扰特性

Fig. 8 Immunity characteristics of scenario 1

由图 7 可知, 当观测带宽由 1250 rad/s 增加至 4250 rad/s 的过程中, 低频段的幅频曲线位置并未发生变化, 而在高频段 1000 rad/s 与 10 000 rad/s 之间, 幅频曲线不断下降, 因此提高了系统对高频噪声的抵抗能力。由图 8 可知, 观测带宽由 1250 rad/s 增加至 4250 rad/s 的过程中, 幅频特性曲线不断下降, 提高了对外界扰动的抵抗能力, 而高频段的幅频特性曲线并未发生明显改变。因此, 为了在不影响系统抗扰性的前提下, 提高系统对扰动的观测能力, 观测带宽可选择 3250 rad/s 和 4250 rad/s 之间的数值。

2)  $\omega_0$  取 800 rad/s,  $\omega_c$  分别取 650 rad/s、

750 rad/s、850 rad/s、950 rad/s。跟踪特性如图 9 所示, 抗扰特性如图 10 所示。

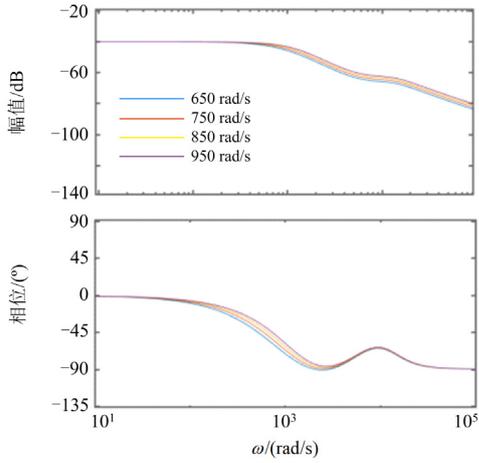


图 9 情形二跟踪特性

Fig. 9 Tracking characteristics of scenario 2

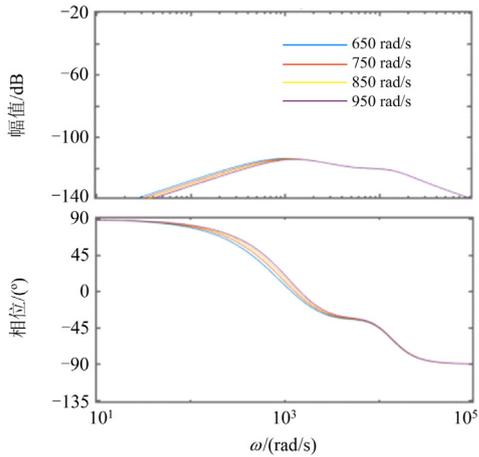


图 10 情形二抗扰特性

Fig. 10 Immunity characteristics of scenario 2

由图 9 所知, 当控制带宽由 650 rad/s 增加至 950 rad/s 的过程中, 系统的闭环跟踪带宽得到一定程度的增加, 但对高频噪声的抵抗能力并不大。由图 10 所示, 当控制带宽由 650 rad/s 增加至 950 rad/s 的过程中, 幅频特性低频段曲线逐渐下降, 提高了系统对扰动的抵抗能力, 中高频段曲线并无明显改变。基于以上分析, 控制带宽选择在 850 rad/s 和 950 rad/s 之间即可。

#### 4 仿真对比

为验证本文所设计的闭环控制策略的正确性和优越性, 在 Matlab/Simulink 中搭建交流微网的数字仿真模型, 并设计 3 种工况对其进行验证。仿真参

数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 Simulation parameters	
参数名称	数值
并网频率/Hz	50
开关频率/kHz	14.2
直流母线电压/V	400
电感/ $\mu$ H	578
电阻/ $\Omega$	35/15
控制带宽/(rad/s)	1560
观测带宽/(rad/s)	4372

工况 1: 负载由 35  $\Omega$  突变至 15  $\Omega$ 。

图 11—图 13 为在 0.5 s 时突然改变负载数值时直流母线的电压变化情况。在 0.5 s 时, PI 控制的直流母线电压由 400 V 增加至 694.3 V, 与稳态值相差 294.3 V; LADRC 控制下的直流母线电压由 400 V 增加至 582.6 V, 与稳态值相差 182.6 V; DY-CLADRC 控制下的直流母线电压由 400 V 增加至 473.5 V, 与稳态值相差 73.5 V。由以上数据对比可知, 在 DY-

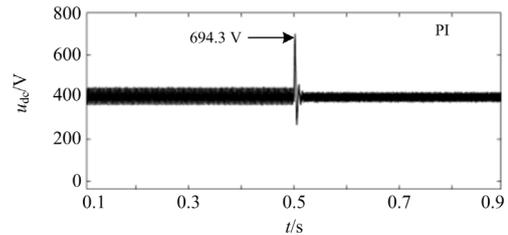


图 11 PI 下的初始动态响应

Fig. 11 Initial dynamic response under PI

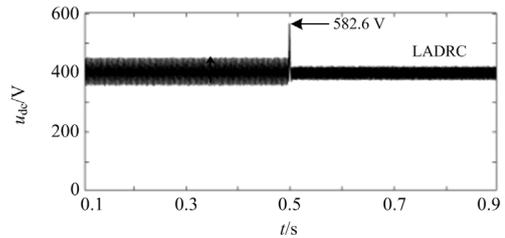


图 12 LADRC 下的初始动态响应

Fig. 12 Initial dynamic response under LADRC

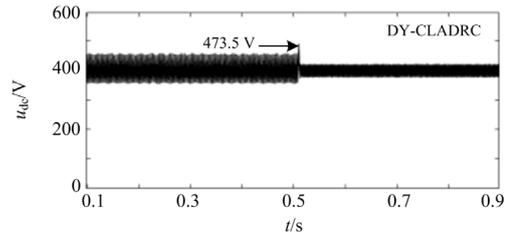


图 13 DY-CLADRC 下的初始动态响应

Fig. 13 Initial dynamic response under DY-CLADRC

CLADRC 控制下的直流母线电压幅值增加幅度最小, 小于 100 V, 因此 DY-CLADRC 控制下的系统拥有更好的交流侧扰动抑制能力, 提高了直流母线电压的稳定性。

工况 2: 并网电压由 850 V 降低至 550 V。

图 14—图 16 为 1 s 时并网电压由 850 V 降低至 550 V 时的暂态响应。在暂态运行过程中, PI 控制下的直流母线电压最大数值为 519.8 V, 与稳态值相差 119.8 V, 最小数值为 316.5 V, 与稳态值相差 83.5 V, 而进入稳态后, 波形振荡程度明显增大, 电压最大幅值为 454 V, 与稳态值相差 54 V, 电压最小幅值为 349.7 V, 与稳态值相差 50.3 V; LADRC 控制下的直流母线电压最大数值为 453.8 V, 与稳态值相差 53.8 V, 稳态下电压振荡最大幅值为 418.5 V, 振荡最小幅值为 387.6 V, 电压振荡差值为 30.9 V; DY-CLADRC 控制下的电压最大数值为 433.7 V, 与稳态值相差 34.8 V, 稳态下电压振荡最大幅值为 414.7 V, 最小振荡幅值为 389.4 V, 振荡差值为 25.3 V。由上述 3 种控制策略的暂态数据对比可知,

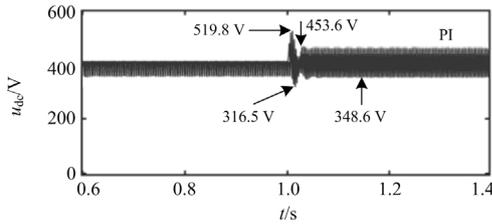


图 14 PI 下的暂态 1

Fig. 14 Transient 1 under PI

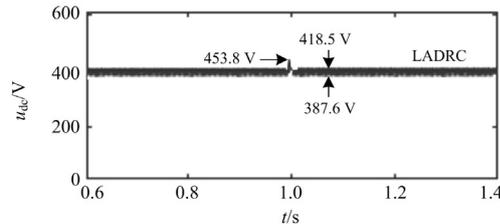


图 15 LADRC 下的暂态 1

Fig. 15 Transient 1 under LADRC

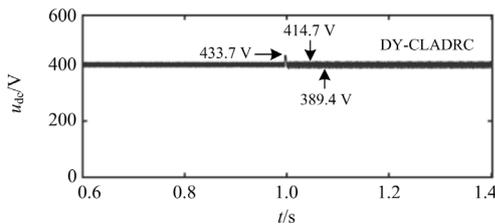


图 16 DY-CLADRC 下的暂态 1

Fig. 16 Transient 1 under DY-CLADRC

DY-CLADRC 控制的暂态中直流母线电压幅值最小, 进入稳态后振荡程度最小, 即 DY-CLADRC 具有优异的扰动抵抗能力, 即 DY-CLADRC 下的系统具有更好的抗扰性。

工况 3: 1 s 时加入非线性负载。

图 17—图 19 为网侧电压在 1 s 时突然加入非线性负载时的直流母线电压波形。PI 控制下的直流母线电压由 400 V 增加至 427.6 V, 增大了 27.6 V, 稳态下电压振荡最大幅值为 406.4 V, 电压振荡最小幅值为 396.3 V, 电压振荡幅值相差 10.1 V; LADRC 控制下由 400 V 降低至 344.3 V, 降低了 55.7 V, 稳态下电压振荡最大幅值为 403.5 V, 电压振荡最小幅值为 398.4 V, 振荡幅值相差 5.1 V; DY-CLADRC 控制下由 400 V 降低至 334.6 V, 降低了 65.4 V, 稳态下电压振荡最大幅值为 402.5 V, 电压振荡最小幅值为 399.4 V, 振荡幅值相差 3.1 V。PI 控制下的直流母线电压增加, 而 LADRC 和 DY-CLADRC 并没有增加, 而是降低, 因此相比较于 PI, LADRC 和 DY-CLADRC 拥有更优的暂态穿越能力, 所以 DY-CLADRC 抗扰性最优<sup>[23]</sup>。

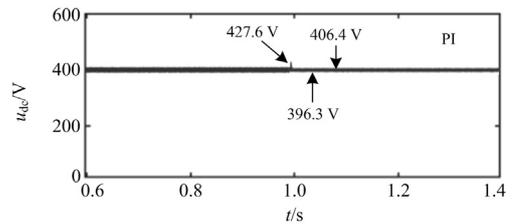


图 17 PI 下的暂态 2

Fig. 17 Transient 2 under PI

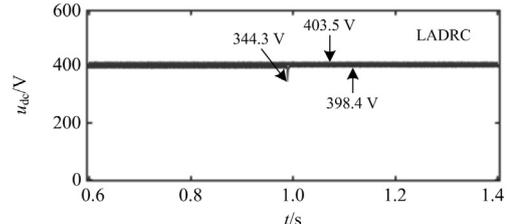


图 18 LADRC 下的暂态 2

Fig. 18 Transient 2 under LADRC

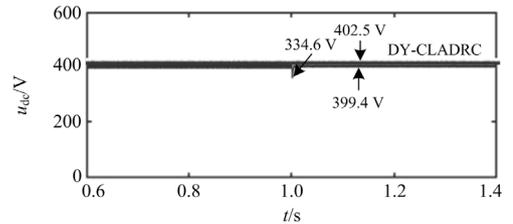


图 19 DY-CLADRC 下的暂态 2

Fig. 19 Transient 2 under DY-CLADRC

## 5 结论

针对交流微网在外界扰动影响下出现的直流母线电压振荡现象, 设计了一种 CLESO 与动态调节因子相结合的 DY-CLADRC 控制策略, 通过与 PI、LADRC 进行数字实验仿真对比, 可得如下结论:

1) 与 LESO 相比, CLESO 引入了新 LESO, 在不影响系统抗扰性的前提下提高了系统的带宽, 从而提高了观测器对外界扰动的观测能力;

2) 与 PI、LADRC 相比, 交流微网直流母线电压振荡幅值在 DY-CLADRC 下最小, 具有更好的直流母线电压振荡抑制能力;

3) 引入动态调节因子对自抗扰中的控制带宽和观测带宽进行实时整定, 不仅保证了系统的稳定性, 而且提高了系统的暂态过渡能力。

## 参考文献

- [1] 程启明, 张昕, 赖宇生, 等. 电网不平衡工况下三电平直接矩阵变换器反步滑模控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 73-85.  
CHENG Qiming, ZHANG Xin, LAI Yusheng, et al. Backstepping sliding-mode control strategy for a three-level direct matrix converter in unbalanced grid conditions[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 73-85.
- [2] 刘联涛, 刘飞, 吉平, 等. 储能参与新能源消纳的优化控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 137-143.  
LIU Liantao, LIU Fei, JI Ping, et al. Research on optimal control strategy of energy storage for improving new energy consumption[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 137-143.
- [3] 陶海军, 张金生, 肖群星, 等. 三电平混合全桥 DC-DC 变换器全局电流应力优化与回流功率优化对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 126-137.  
TAO Haijun, ZHANG Jinsheng, XIAO Qunxing, et al. Comparative analysis of global current stress optimization and return power optimization of a three-level hybrid full-bridge DC-DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 126-137.
- [4] 高崇禧, 颜景斌, 李学东, 等. 脉冲负载下 PWM 整流器自适应线性自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(1): 55-64.  
GAO Chongxi, YAN Jingbin, LI Xuedong, et al. Adaptive linear active disturbance rejection control method of PWM rectifier under pulse load[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(1): 55-64.
- [5] 周雪松, 周泳良, 马幼捷. 基于降阶线性扩张状态观测器的风电并网逆变器线性自抗扰控制[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 157-163.  
ZHOU Xuesong, ZHOU Yongliang, MA Youjie. Linear active disturbance rejection control of wind power grid-connected inverter based on reduced order linear extended state observer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 157-163.
- [6] 袁铁江, 杨洋, 李瑞, 等. 考虑源荷不确定性的氢能微网容量优化配置[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 21-32.  
YUAN Tiejia, YANG Yang, LI Rui, et al. Optimized configuration of hydrogen-energy microgrid capacity considering source charge uncertainties[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 21-32.
- [7] 朱良红, 张国强, 李宇欣, 等. 基于级联扩张观测器的永磁电机无传感器自抗扰控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4614-4624.  
ZHU Lianghong, ZHANG Guoqiang, LI Yuxin, et al. Active disturbance rejection control for position sensorless permanent magnet synchronous motor drives based on cascade extended state observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4614-4624.
- [8] 周汉斌, 杨建, 陈晓娇, 等. 考虑死区电压矢量的三电平变换器模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5290-5301.  
ZHOU Hanbin, YANG Jian, CHEN Xiaojiao, et al. Model predictive control of three-level converter considering dead-zone voltage vector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20): 5290-5301.
- [9] 段茜月, 陈燕东, 徐元璨, 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 Xiyue, CHEN Yandong, XU Yuancan, et al. A wideband oscillation suppression method for active disturbance rejection control with an enhanced linear expansion state observer[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 12-24.
- [10] 薛花, 田广平, 扈曾辉, 等. 电网不平衡下模块化多电平变换器无源一致性控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 85-95.  
XUE Hua, TIAN Guangping, HU Zenghui, et al. Passivity-consensus based control method for modular multilevel converter in unbalanced power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 85-95.
- [11] 白志红, 李奕飞, 马皓. 基于简化 SVM 的模块化多电平变换器多子模块故障容错运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7104-7117.  
BAI Zhihong, LI Yifei, MA Hao. Fault-tolerant operation strategy of modular multilevel converter with multiple faulty switches based on a simplified SVM[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7104-7117.
- [12] 陶海军, 张金生, 肖群星, 等. 三电平混合全桥 DC-DC 变换器全局电流应力优化与回流功率优化对比分

- 析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 126-137.
- TAO Haijun, ZHANG Jinsheng, XIAO Qunxing, et al. Comparative analysis of global current stress optimization and return power optimization of a three-level hybrid full-bridge DC-DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 126-137.
- [13] 朱磊磊, 杨帆, 聂江霖, 等. 基于电力电子变压器的优化级联多电平变换器矢量均压算法[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3257-3267.
- ZHU Leilei, YANG Fan, NIE Jianglin, et al. Optimized vector and voltage balancing algorithm for cascaded multilevel converter based on power electronics transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3257-3267.
- [14] 朱进权, 葛琼璇, 王晓新, 等. 基于自抗扰和负载功率前馈的高速磁悬浮系统 PWM 整流器控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(2): 320-329.
- ZHU Jinquan, GE Qiongxuan, WANG Xiaoxin, et al. PWM rectifier control strategy for high speed maglev system based on autodisturbance rejection and load power feedforward[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(2): 320-329.
- [15] 石振江, 岳云力, 岳昊, 等. 计及可再生能源时序出力重构的电力系统时序生产模拟[J]. 供用电, 2023, 40(12): 87-96.
- SHI Zhenjiang, YUE Yunli, YUE Hao, et al. Time series production simulation of power system with renewable energy time series output reconstruction[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 87-96.
- [16] 王裕, 程志, 陈星志, 等. 基于线性自抗扰控制的无线电能传输装置设计[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2401-2409.
- WANG Yu, CHENG Zhi, CHEN Xingzhi, et al. Design of wireless power transmission device based on linear active disturbance rejection control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2401-2409.
- [17] 李志华, 曾江, 黄骏翹, 等. 基于线性自抗扰控制的微网逆变器时频电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 145-154.
- LI Zhihua, ZENG Jiang, HUANG Junchi, et al. Time-frequency voltage control strategy of microgrid inverter based on linear active disturbance rejection control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 145-154.
- [18] 杨一凡, 项雷军, 郭新华, 等. 含抽水蓄能电站的互联电网负荷频率自抗扰优化控制研究[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 276-283.
- YANG Yifan, XIANG Leijun, GUO Xinhua, et al. Active disturbance rejection controller optimization of load frequency in interconnected power grid with pumped storage power station[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 276-283.
- [19] 伍文俊, 蔡雨希, 兰雪梅. 三电平中点钳位型变换器线性自抗扰离散建模与稳定控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 1): 37-48.
- WU Wenjun, CAI Yuxi, LAN Xuemei. Discrete modeling and stability control of linear active disturbance rejection control for three-level neutral point clamped converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 37-48.
- [20] 杨林, 曾江, 黄仲龙. 线性自抗扰技术在 LCL 逆变器并网电流控制及有源阻尼中的应用[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1378-1386.
- YANG Lin, ZENG Jiang, HUANG Zhonglong. Application of linear active disturbance rejection technique in grid-connected current control and active damping of LCL type inverter[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1378-1386.
- [21] HE L, LI Y, GUERRERO J. A comprehensive inertial control strategy for hybrid AC/DC microgrid with distributed generations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 737-1747.
- [22] SHANGGUAN X, HE Y, ZHANG C, et al. Adjustable event-triggered load frequency control of power systems using control-performance-standard-based fuzzy logic[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(8): 297-3311.
- [23] QIN M, YANG Y, ZHAO X, et al. Low-carbon economic multi-objective dispatch of integrated energy system considering the price fluctuation of natural gas and carbon emission accounting[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1013-1030.

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2023-12-27

作者简介:

王超(1978—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力储能应用技术; E-mail: 719708824@qq.com

侯凯翔(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微电网和光伏逆变器; E-mail: 1635111925@qq.com

吴铁洲(1966—), 男, 博士, 教授, 研究方向为光伏发电技术与储能相关技术. E-mail: wtz315@163.com

(编辑 许威)