

中低压直流配电网母线电压稳定控制

刘沛津¹, 石梦涛¹, 何林², 贺宁¹, 陈武³

(1. 西安建筑科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055; 3. 未动用储量开发公司, 辽宁 盘锦 124000)

摘要:为了抑制直流配电网内间歇性电源输出功率以及负荷扰动对直流母线电压的冲击,设计一种基于降阶扩张状态观测器的线性自抗扰控制方法,实现直流母线电压的稳定控制。在不增加负荷电流传感器的情况下,实现直流电压控制单元对扰动的快速响应与跟踪,有效提高控制系统的抗扰动性和稳定性。在理论和仿真分析的基础上,将所提控制算法嵌入自主开发的AC/DC变换器的数字信号处理模块,设计模拟直流母线电压负荷大扰动工况实验,并进行了对比分析。结果表明所设计的控制器对于直流母线电压控制的鲁棒性、稳定性及实时性显著优于传统双PI控制器。

关键词:直流配电网;AC/DC变换器;直流负荷扰动;扩张状态观测器;母线电压稳定控制

中图分类号:TM 461

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202112001

0 引言

随着国民经济的发展和电力电子技术的进步,越来越多的分布式能源(如风能、太阳能)接入电网,越来越多的直流家用产品(如电动汽车)被普及以及工业变频技术(如抽油机、船舶、起重机)被广泛应用,交流配电网面临着分布式能源接入、负荷多样化、网架结构庞杂以及电能供应稳定性、高效性等带来的巨大的挑战^[1-3]。与交流配电网相比,直流配电网无需考虑无功功率以及对电网的电压和频率的跟踪问题,减少了大量的电能变换环节,提高了系统的可靠性和效率,可充分协调分布式电源、多样性负荷与电网之间的矛盾,发挥分布式能源的优势^[4-5]。直流配电网内负荷突变、间歇性电源输出功率和直流配电网间联络线功率受到扰动等都会对直流母线电压产生冲击,致使其无法在正常范围内运行。如果直流母线电压失稳则将会威胁负荷的稳定运行,甚至导致保护系统动作,严重情况下还会造成系统崩溃影响大电网的运行^[6]。因此,直流母线电压的稳定控制对系统的稳定运行具有十分重要的意义。抑制直流配电网电压波动是提升直流配电网稳定性的关键控制技术之一。

系统中直流控制单元对直流母线电压进行控制时,双PI控制器无法在提高系统动态响应的同时有效抑制直流母线电压发生较大的波动和冲击等所带来的干扰。因此,需要研究有效的控制方法,提高系统的动态响应,并有效抑制电压的波动。目前主要

方法有扰动电流或功率前馈控制方法^[7]。文献[8]设计了基于鲁棒扰动观测器的直流微电网电压动态补偿控制增强了系统的鲁棒性。文献[9]将线性自抗扰控制器LADRC(Linear Active Disturbance Rejection Controller)应用于微电网的控制运行中,文献[10]引入输出电压导数项提高观测器性能,文献[11]针对系统电容参数变化提出了相应的模型算法,均不同程度地提高了系统的响应速度及抗扰动性能。

1998年,文献[12]提出了自抗扰控制器ADRC(Active Disturbance Rejection Controller),该控制器由跟踪微分器、非线性状态误差控制器以及扩张状态观测器组成,其主要特点是针对不确定系统,利用扩张状态观测器对扰动进行估计与补偿,利用跟踪微分器合理处理过渡过程,利用非线性状态误差控制律获得控制对象的最终输入。该控制器在不依赖模型精度的情况下能够对系统的内扰和外扰进行有效的抑制,这对于含有扰动的非线性系统具有良好的控制能力。但是由于ADRC的非线性特性,当控制对象为高阶模型时,参数调节困难。文献[13]提出线性化自抗扰控制器,大幅减少了参数调节工作。可以发现,在上述各前馈控制方法中,扩张状态观测器均是核心组成,其突出特征是能将作用于被控对象的所有内部模型与外部扰动等不确定因素都归结为总扰动进行估计,并根据观测器的实时估计,在反馈控制中对扰动进行补偿,可有效克服观测器设计对模型精确性的依赖,这对于复杂的非线性不确定对象有很好的控制效果,因此适用于直流配电网电压波动的抑制。但对于系统阶次而言,相对阶次越高,带来的相位滞后越大,会给系统动态性能带来不利影响。

综上所述,为了提高动态响应速度,简化参数整

收稿日期:2021-02-28; **修回日期:**2021-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61903291);陕西省教育厅产业化项目(18JC018)

Project supported by the National Nature Science Foundation of China(61903291) and the Industrial Cultivation Project of Shaanxi Education Department(18JC018)

定,降低技术应用成本,本文针对直流配电网不确定性新能源出力和负荷扰动对直流电压冲击的扰动特点及控制目标,设计并开发了基于降阶扩张状态观测器的LADRC。通过模拟直流母线电压受到较大负荷扰动的工况进行仿真和实验验证。结果表明该控制器参数易整定,易实现,且负荷鲁棒性、稳定性及实时性明显优于传统双PI控制器。本文所设计实现的控制器的主要优点在于通过采用降阶扩张状态观测器,能有效降低观测器的阶次,使得在相同带宽下,控制系统鲁棒性更强,跟踪性能更好^[14-15]。抗扰动性能、实时性和控制的易实施性也是本文控制方法的主要特点,因此更适合推广应用于实际直流配电网的就地控制层,从而有效抑制直流配电网的电压波动。

1 AC/DC变换器模型

小功率中低压配电网中AC/DC变换器的拓扑结构如图1所示。图中, e_a, e_b, e_c 为电网侧电压; i_a, i_b, i_c 为电网侧电流; L 为滤波电感; R 为开关损耗电阻与电感电阻之和; v_a, v_b, v_c 为输入相电压; u_{dc} 为直流电压; i_{dc} 为直流侧电流; i_L 为负荷电流; R_L 为负荷等效电阻; C 为直流母线滤波电容。定义开关函数 $S_k(k=a, b, c)$, $S_k=1$ 表示 k 相的上桥臂导通、下桥臂关断, $S_k=0$ 表示 k 相的上桥臂关断、下桥臂导通,即:

$$S_k = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad k=a, b, c \quad (1)$$

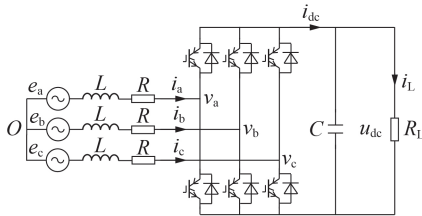


图1 三相电压型AC/DC变换器拓扑

Fig.1 Topology of three-phase voltage-type AC/DC converter

传统的AC/DC变换器采用电压电流双闭环控制策略,实现网侧电流和直流电压的零误差跟踪。但是直轴电流 i_d 和交轴电流 i_q 仍然存在耦合关系,无法单独控制。根据典型II型系统,将电流内环的PI控制近似等效成惯性环节 $W_{ci}(s)$ 。电压外环的开环传递函数如式(2)所示。

$$G(s) = \frac{\sqrt{3} m R_L / 2}{1 + R_L C s} \quad (2)$$

式中: $m = \sqrt{3} U_m / U_{dc} \leq 1$, U_m 为相电压峰值, U_{dc} 为直流电压有效值。

由式(2)可以看出,电网电压、负荷、直流电压的变化都会影响电压外环的控制效果,对系统的动态

性能造成不利影响,同时固定的PI参数不利于跟踪系统的变化。

2 基于降阶扩张状态观测器的LADRC设计

直流配电网内负荷突变、间歇性电源输出功率以及直流配电网间联络线功率受到扰动等都会影响直流母线电压的稳定。针对直流母线电压的扰动,将LADRC引入AC/DC变换器,从而提高系统抗负荷扰动的能力。

2.1 扩张状态观测器设计

根据式(2),变换器状态空间表达式可以表示为式(3)。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{R_L C} x_1 + \frac{\sqrt{3} (m-1)}{2C} u + b_0 u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u = i_d$; $y = u_{dc}$; b_0 为控制输入增益,为保证系统在未知扰动下的稳定性, b_0 计算公式如式(4)所示。

$$b_0 = \frac{\sqrt{3}}{2C} \quad (4)$$

将 R_L 和 m 视为LADRC扰动项,定义:

$$a = -\frac{1}{R_L C}, \quad b = \frac{\sqrt{3} (m-1)}{2C} \quad (5)$$

将扰动项 f 扩张为新的状态变量 x_2 ,可表示为:

$$x_2 = f = ax + bu \quad (6)$$

则系统可表示为一个二阶系统,如式(7)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_0 u \\ \dot{x}_2 = h \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_1 和 x_2 为状态变量; h 为扰动量 f 的微分项。

根据文献[16]可设计如式(8)所示的降阶扩张状态观测器。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -\omega_o z_1 - \omega_o^2 y - \omega_o b_0 u \\ \dot{z}_2 = z_1 + \omega_o y \end{cases} \quad (8)$$

式中: z_1 为扩张状态观测器的状态变量; z_2 为观测值; ω_o 为状态观测器的带宽。

2.2 LADRC设计

由于状态变量 x_1 可以直接测量,因此可以设计如图2所示的LADRC。

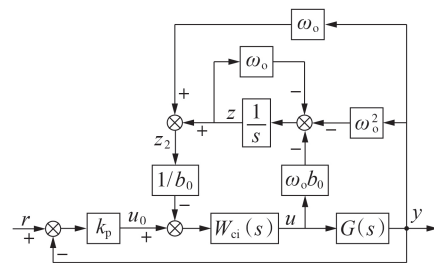


图2 LADRC的控制框图

Fig.2 Control block diagram of LADRC

使用扩张状态观测器可以实现对扰动量 x_2 的估计:

$$z_2 = \frac{\omega_o}{s + \omega_o} (sy - b_0 u) \rightarrow x_2 \quad (9)$$

考虑内环电流 PI 控制的影响, 控制律可以表示为式(10)。

$$u = \left(u_0 - \frac{1}{b_0} z_2 \right) W_{ci}(s) \quad (10)$$

式中: $W_{ci}(s) \approx \omega_i / (s + \omega_i)$, ω_i 为电流内环的带宽。

取 u_0 为比例控制器的传递函数:

$$u_0 = k_p (r - y) \quad (11)$$

式中: r 为参考量; k_p 为比例系数。

将式(9)、(11)代入式(10)可以得到:

$$u = \frac{k_p (s + \omega_o) \omega_i}{s(s + \omega_o + \omega_i)} (r - y) - \frac{\omega_o \omega_i}{b_0 (s + \omega_o + \omega_i)} y \quad (12)$$

因此, 闭环传递函数的误差如式(13)所示。

$$E(s) = \frac{s[(s-a)(s + \omega_o + \omega_i) + m\omega_o \omega_i]}{s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0} \quad (13)$$

$$\begin{cases} n_2 = -a + \omega_o + \omega_i \\ n_1 = -a(\omega_o + \omega_i) + m\omega_o \omega_i + k_p b_0 m \omega_i \\ n_0 = k_p b_0 m \omega_o \omega_i \end{cases}$$

若扰动为阶跃信号, 则系统的稳态误差可以表示为:

$$e_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \frac{1}{s} = 0 \quad (14)$$

从式(14)可以看出, 直流电压外环可以使用一个简单的比例控制器实现零误差跟踪, 图2中比例控制器参数如式(15)所示。

$$k_p = \frac{1}{b_0} \omega_c \quad (15)$$

式中: ω_c 为控制器带宽。

为保证扩张状态观测器的观测性能, 取 $\omega_o < \omega_i$, 电流内环的带宽为 $\omega_i \approx 1/(3T_s)$, 其中 T_s 为开关周期。

3 稳定性分析

3.1 观测器误差分析

根据式(9)可以得到 z_2 对扰动量 f 的传递函数为:

$$z_2 = \frac{\omega_o}{s + \omega_o} (sy - b_0 u) = \frac{\omega_o}{s + \omega_o} f \quad (16)$$

设误差 $e_2 = z_2 - f$ 可得:

$$e_2 = \frac{-s^2}{s + \omega_o} y + \frac{s}{s + \omega_o} b_0 u \quad (17)$$

考虑系统的抗扰性, 将 y 和 u 近似为阶跃信号, 则扩张状态观测器的稳态误差为:

$$e_{2\infty} = \lim_{s \rightarrow 0} s e_2 \approx 0 \quad (18)$$

由式(16)和式(18)可知, 若 $\omega_o > 0$ 则系统是稳定的。扩张状态观测器对扰动项 f 估计无静态误差, 其

对误差的跟踪速度随着观测器的带宽 ω_o 增加而变快, 但是当 ω_o 增加时, 引入的噪声和谐波也会增加。

3.2 控制器稳定性分析

根据式(6)、(7)、(16)和图2可以得到 u_0 到 y 的控制流程框图如图3所示。定义 $k_b = b/b_0$, 可以得到 u 到 u_1 的传递函数如下:

$$B(s) = \frac{u}{u_1} = \frac{1}{b_0} \frac{W_{ci}(s)}{1 + k_b \frac{\omega_o}{s + \omega_o} W_{ci}(s)} \quad (19)$$

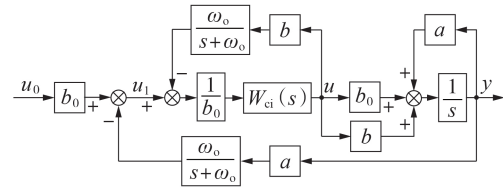


图3 引入降阶线性扩张状态观测器后的广义被控对象框图

Fig.3 Block diagram of generalized controlled object after reduced-order linear extended state observer is introduced

故而可以得到系统的等效控制框图如图4所示。

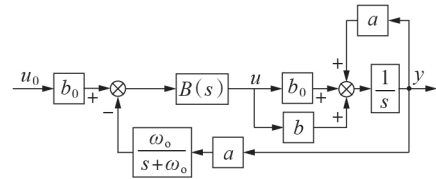


图4 系统的等效控制框图

Fig.4 Equivalent control block diagram of system

u_0 到 y 的闭环传递函数为:

$$A(s) = \frac{y}{u_0} = \frac{b_0 (b_0 + b) B(s) \frac{1}{s-a}}{1 + (b_0 + b) B(s) \frac{a}{a-s} \frac{\omega_o}{s + \omega_o}} = \frac{(b_0 + b) W_{ci}(s)}{\left(1 + k_b \frac{\omega_o}{s + \omega_o} W_{ci}(s)\right) s - \left(1 - \frac{\omega_o}{s + \omega_o} W_{ci}(s)\right) a} \quad (20)$$

因此, 基于 LADRC 的 AC / DC 变换器的闭环传递函数为:

$$G_u(s) = \frac{k_p A(s)}{1 + k_p A(s)} \quad (21)$$

将式(15)、(20)代入式(21)可得:

$$G_u(s) = \frac{(1 + k_b) \omega_c \omega_i (s + \omega_o)}{n_3 s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0} \quad (22)$$

$$\begin{cases} n_3 = 1 \\ n_2 = \omega_o - a + \omega_i \\ n_1 = (1 + k_b) \omega_o \omega_i - a(\omega_o + \omega_i) + (1 + k_b) \omega_c \omega_i \\ n_0 = (1 + k_b) \omega_c \omega_o \omega_i \end{cases} \quad (23)$$

根据劳斯判据,控制器稳定的充分必要条件为:

$$\begin{cases} n_i > 0 & i=0, 1, 2, 3 \\ n_2 n_1 - n_3 n_0 > 0 \end{cases} \quad (24)$$

因为 $a < 0, k_b \in (-1, 0]$ 且 $\omega_e > 0, \omega_o > 0, \omega_i > 0$, 所以 $n_i > 0$ 。当 $n_2 n_1 - n_3 n_0 > 0$ 时, 因为:

$$\begin{cases} 1 + k_b > 0 \\ -a(\omega_o + \omega_i) > 0 \\ \omega_o + \omega_i - a > 0 \\ \omega_i - a > 0 \end{cases} \quad (25)$$

所以可以得到:

$$\begin{aligned} n_2 n_1 - n_3 n_0 &= [(1 + k_b)\omega_o \omega_i - a(\omega_o + \omega_i)](\omega_o + \omega_i - a) + \\ &\quad (1 + k_b)(\omega_i - a)\omega_e \omega_i > 0 \end{aligned} \quad (26)$$

因此,对于满足上述条件的任何参数,式(26)都是成立的,即满足系统的稳定性条件。可以看出,系统参数稳定范围较大,参数整定相对容易,降低了工程应用难度。

3.3 跟踪性能分析

为了进一步说明 LADRC 应对负载扰动问题的有效性,在此以近似的标准设计了基于 LADRC 和双 PI 控制器的 AC/DC 变换器系统,并绘制了直流电压闭环传递函数的波特图,如图 5 所示。

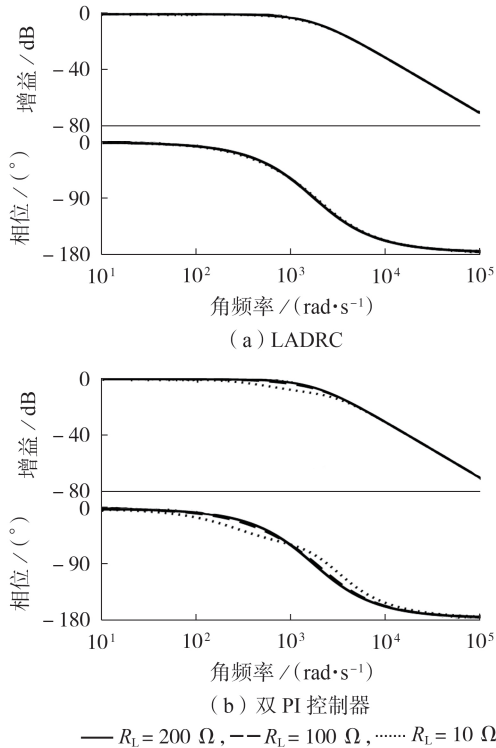


图5 波特图对比

Fig.5 Comparison of Bode diagrams

由图 5 可得:采用自抗扰控制策略时,负载发生变化的情况下,系统能在保证一定稳定裕度的同时确保良好的跟踪性能;而采用 PI 控制策略时,系统

受到负载变化的影响较大。以上分析说明自抗扰控制策略应对负载变化控制效果更好。

4 仿真分析

在中低压直流配电网中,直流配电网内负荷突变、间歇性电源输出功率及直流配电网间联络线功率受到扰动等导致直流母线大范围波动都是系统实际运行中的典型工况。基于 MATLAB/Simulink 软件对第 2 节提出的 LADRC 设计了仿真实验,实验采用电阻投切的方式模拟系统即插即用典型工况来验证本文所提出的基于降阶线性扩张状态观测器的 LADRC 的抗扰性能,仿真参数如附录 A 表 A1 所示。在 0.1 s 时令负荷由 11 Ω 变为 22 Ω,在 0.3 s 时令负荷变回 11 Ω,仿真结果如图 6 所示,图中依次展示了负荷扰动下用传统双 PI 控制器和 LADRC 的 AC/DC 变换器直流母线电压、相电流、有功功率、无功功率的波形。

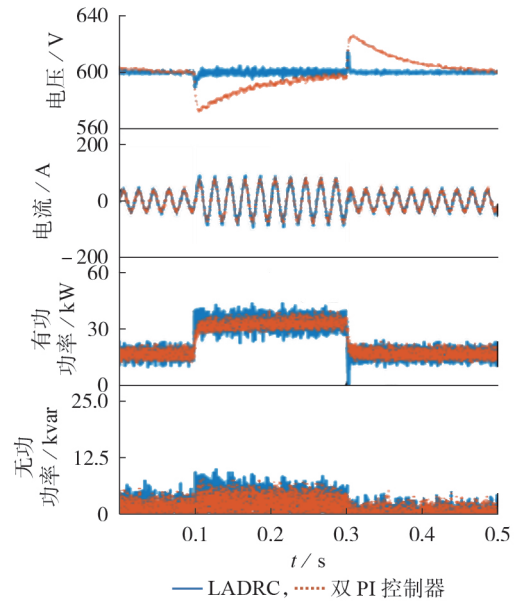


图6 抗负荷扰动性能

Fig.6 Performances against load disturbance

由图 6 可知,负荷扰动的情况下采用传统双 PI 控制器和 LADRC 的相电流依然能够保持同相位,电流波形正弦性好,且其有功功率变化明显,无功功率维持在 0 附近。仿真结果显示了在负荷扰动的情况下,采用 2 种控制器的 AC/DC 变换器都能保证高功率因数运行,维持了良好的性能指标。而在直流母线电压的鲁棒性方面,采用传统双 PI 控制器和 LADRC 的控制效果产生了具有差异性的表现。在负荷突增的情况下,采用 LADRC 的 AC/DC 变换器直流侧电压跌落幅度最大为 13.2 V,经过 11 ms 恢复稳定;在负荷突减的情况下,直流侧电压上升幅度最大为 13.4 V,经过 12 ms 恢复稳定。在负荷突增的情况下,采用传统的双 PI 控制器的 AC/DC 变换器直

流侧电压跌落幅度最大为29.6 V,96 ms后恢复稳定;在负荷突减的情况下,直流侧电压上升最大幅度为29.5 V,85 ms后恢复稳定。

面对同样的负荷扰动,采用LADRC的AC/DC变换器直流母线电压最大变化幅度只有传统双PI控制器的45%左右,并且其恢复稳定的速度是传统双PI控制器的8倍左右。综上,仿真结果显示了本文所优化设计的AC/DC变换器抗负荷扰动性能具有显著优越性。

5 实验验证

为了进一步验证本文提出的优化控制算法的实际可行性,在理论分析与仿真实验的基础上,基于TMS320F28335进行了控制算法的C语言实现和移植,对所开发的AC/DC变换器进行了性能测试。硬件实验系统结构及实物图分别如附录A图A1和图A2所示。

为了分析直流母线负荷大范围波动情况下AC/DC变换器直流侧电压的波动情况,以电阻投切的方式模拟直流配电网即插即用引起的典型载荷波动工况。图7、8分别为负荷突增和突减情况下,利用示波器观察到的AC/DC变换器直流母线电压波形。

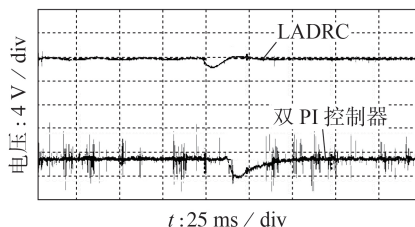


图7 负荷突增工况模拟

Fig.7 Simulation of load sudden increasing

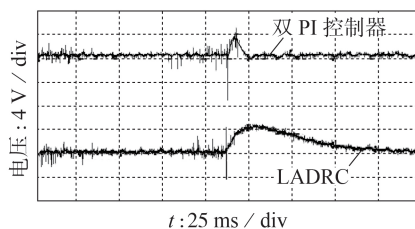


图8 负荷突减工况模拟

Fig.8 Simulation of load sudden decreasing

由图7可知:在负荷突增的情况下,采用LADRC的AC/DC变换器直流母线电压跌落最大幅度约为0.8 V,约26 ms后恢复到稳定状态;采用传统双PI控制器的AC/DC变换器直流母线电压跌落最大幅度约为3.2 V,约75 ms后恢复稳定。由图8可知:在负荷突减的情况下,采用LADRC的AC/DC变换器的电压上升最大幅度为2.8 V左右,约在22 ms后恢复稳定;采用传统双PI控制器的AC/DC变换器的电

压上升幅度约为4.8 V,约在130 ms后恢复稳定。

由实验结果可以看出,在负荷突变的情况下,相比于采用双PI控制器,采用LADRC的AC/DC变换器直流母线电压变化更小,恢复稳定速度更快,对于提高系统稳定性有显著效果。

6 结论

针对中低压直流配电网母线电压易受负荷突变、间歇性电源输出功率以及直流配电网间联络线功率扰动等影响的问题,本文提出了一种在电压外环引入基于降阶扩张状态观测器的线性自抗扰控制策略,并设计了控制器。经理论仿真分析及实验验证,结果表明该控制器能在负荷波动较大的情况下,维持直流母线电压的稳定。相比于采用传统双PI控制器的AC/DC变换器,采用本文所提控制器时直流母线电压波动更小,恢复更快,鲁棒性更好,且其不依赖系统参数,设计过程简单,易于实现,有较高的应用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李霞林,郭力,黄迪,等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术,2019,45(10):3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Review on key technologies of DC distribution network operation control[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(10): 3039-3049.
- [2] 李鹏飞,李霞林,王成山,等. 中低压柔性直流配电系统稳定性分析模型与机理研究综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(5): 3-21.
LI Pengfei, LI Xialin, WANG Chengshan, et al. Review on stability analysis model and mechanism of medium and low voltage flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 3-21.
- [3] 姜淞瀚,彭克,徐丙垠,等. 直流配电系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):219-231.
JIANG Songhan, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Present situation and prospect of DC distribution system demonstration project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 219-231.
- [4] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.
- [5] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. Review of intelligent DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [6] 杨子千,马锐,程时杰,等. 电力电子化电力系统稳定的问题及挑战:以暂态稳定比较为例[J]. 物理学报,2020,69(8):103-116.
YANG Ziqian, MA Rui, CHENG Shijie, et al. Problems and challenges of power electronic power system stability: taking transient stability comparison as an example[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(8): 103-116.

- [7] WANG C, LI X, GUO L, et al. A nonlinear-disturbance-observer-based DC-bus voltage control for a hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6162-6177.
- [8] 胡长斌,王海鹏,罗珊珊,等. 基于鲁棒扰动观测器的直流微电网电压动态补偿控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 207-214.
HU Changbin, WANG Haipeng, LUO Shanna, et al. Voltage dynamic compensation control of DC microgrid based on robust disturbance observer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 207-214.
- [9] 袁晓冬,楼冠男,陈亮,等. 基于线性自抗扰的微电网平滑切换控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3824-3831.
YUAN Xiaodong, LOU Guannan, CHEN Liang, et al. Smooth switching control strategy for microgrid based on linear active disturbance rejection [J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3824-3831.
- [10] 杨林,曾江,马文杰,等. 基于改进二阶线性自抗扰技术的微网逆变器电压控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 146-153.
YANG Lin, ZENG Jiang, MA Wenjie, et al. Voltage control of microgrid inverter based on improved second order linear active disturbance rejection technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 146-153.
- [11] LU J, GOLESTAN S, SAVAGHEBI M, et al. An enhanced state observer for DC-link voltage control of three-phase AC/DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 936-942.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998(1): 19-23.
HAN Jingqing. Active disturbance rejection controller and its application [J]. Control and Decision, 1998(1): 19-23.
- [13] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // Proceedings of the American Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2006: 4989-4996.
- [14] 刘玉燕,刘吉臻,周世梁. 基于降阶状态观测器的压水堆功率自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6666-6674.
LIU Yuyan, LIU Jizhen, ZHOU Shiliang. Active disturbance rejection control of PWR power based on reduced order state observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6666-6674.
- [15] 王传榜,王永,梁青. 降阶自抗扰控制器对时滞系统控制研究[J]. 控制工程, 2016, 23(10): 1602-1606.
WANG Chuanbang, WANG Yong, LIANG Qing. Research on reduced order active disturbance rejection controller for time-delay systems [J]. Control Engineering, 2016, 23(10): 1602-1606.
- [16] YANG R, SUN M, CHEN Z. Active disturbance rejection control on first-order plant [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(1): 95-102.

作者简介:



刘沛津

刘沛津(1971—),女,陕西西安人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子与电气传动(E-mail: liuxpj@163.com);

石梦涛(1995—),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电气传动(E-mail: 695562826@qq.com)。

(编辑 李玮)

Stability control of bus voltage for medium- and low-voltage DC distribution network

LIU Peijin¹, SHI Mengtao¹, HE Lin², HE Ning¹, CHEN Wu³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Untapped Reserves Development Company, Panjin 124000, China)

Abstract: In order to suppress the impacts of intermittent power output and load disturbance on DC bus voltage in DC distribution network, a linear active disturbance rejection control method based on reduced-order extended state observer is proposed to realize stable control of DC bus voltage. In the case of not increasing load current sensor, the DC voltage control unit can quickly respond and track the disturbance, and effectively improve the anti-disturbance and stability of the control system. On the basis of theoretical and simulation analysis, the proposed control algorithm is embedded into the self-developed digital signal processing module of AC/DC converter, and the experiment is designed to simulate DC bus voltage load under the large-disturbance condition, and the comparative analysis is conducted. The results show that the designed controller has better robustness, stability and real-time performance for DC bus voltage control than the traditional dual-PI controller.

Key words: DC distribution network; AC/DC converter; DC load disturbance; extended state observer; stability control of bus voltage

附录 A

表 A1 仿真参数

Table A1 Simulation parameters

参数	数值
电感 L	3 mH
电容 C	2350 μ F
主电路参数	
负荷电阻 R_L	22 Ω /11 Ω
相电压有效值 U_{ac}	220 V
直流电压给定值 U_{ref}	600 V
开关周期 T_s	10 kHz
控制器参数	
电流内环带宽 ω_i	3333 rad/s
RLEOS 带宽 ω_o	2500 rad/s
比例控制器参数 k_p	0.12

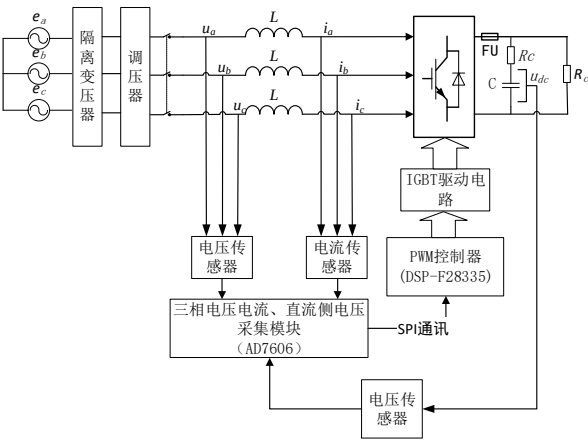


图 A1 硬件结构图

Fig.A1 Hardware structure diagram

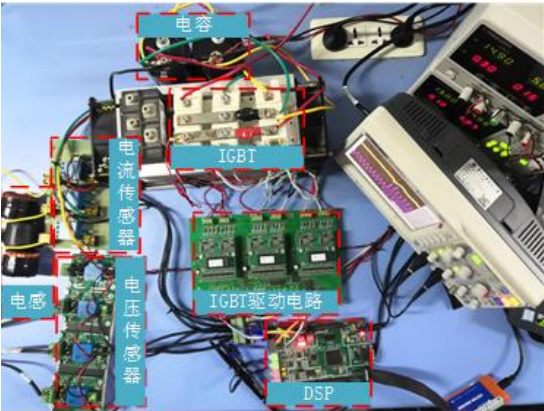


图 A2 AC/DC 变换器实验测试系统

Fig.A2 Experiment test system of AC/DC converter