

基于无源性PI控制的直流微电网双向变换器电压控制

欧阳鹏,赵世伟

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510006)

摘要:在直流微电网中,双向 Buck/Boost 变换器可以通过直流母线与储能单元的能量交互维持直流母线电压的稳定。基于该变换器的 Boost 工作模式进行电流内环无源性控制器以及电压外环 PI 控制器的设计。通过 Simulink 仿真平台搭建简化的光伏直流微电网模型,对所提控制算法进行仿真分析,并搭建一台 500 W 的实验样机对所提控制算法进行实验验证。仿真和实验结果表明:与传统 PI 控制相比,所提出的无源性 PI 控制策略具有设计过程简单和动态响应快的优点,可以较好地平衡直流母线电压,验证了该控制算法在双向 Buck/Boost 变换器上应用的有效性。

关键词:直流微电网;双向 Buck/Boost 变换器;Boost 工作模式;无源性控制;PI 控制

中图分类号:TM46 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0205-05

Voltage Control of DC Microgrid Bi-directional Converter Based on Passivity PI Control

OUYANG Peng,ZHAO Shiwei

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract:In DC microgrid, bi-directional Buck/Boost converter can be used to maintain the stability of DC bus voltage. Designs PBC-PI voltage controller based on Boost operating mode. A simplified DC microgrid model is built through Simulink simulation platform, simulations are performed under the proposed control scheme and a 500 W prototype is built to verify the proposed control scheme. Simulation and experimental results show that the proposed control scheme has the advantages of simple design, fast dynamic response and good busbar voltage balance, which verifies its effectiveness in the application of bi-directional Buck/Boost converter.

Keywords:DC microgrid; bi-directional Buck/Boost converter; Boost operating mode; PBC; PI control

0 引言

一般来说,分布式能源均具有随机性和间歇性的特点^[1-2],直流微网的负载也具有不确定性,因此直流微网的母线电压容易受到扰动,从而影响直流微网的正常运行。而双向 DC-DC 变换器具有能量双向流动的特性,通过其对储能单元进行合理的充放电控制可以保证母线电压的稳定。

双向 Buck/Boost 变换器具有拓扑简单、工作可靠、效率高^[3]等优点,因此近年来该变换器在直流微电网应用中的控制问题受到了国内外学者和工程师的关注。文献[4-5]提出电压外环和电流内环的双闭环 PI 控制策略,实现了变换器输出电压稳定。PI 控制算法具有适用性广的优点,能满足大多数工程应用的基本需求,但是其控制器的参数不易整定且控制性能经常受到工作点变化的影响。文献[6]提出自抗扰控制的控制策略,有效抑制了暂态直流母线的电压波动和冲击,但是这种控制策略下需要整定的参数过多。文献[7]通过导出精确反馈线性化模型设计了一种反馈滑模控制器,解决了变换器非最小相位特性和变结构特性,提高了系统鲁棒性和稳定性,但控制器设计对建模精度要求较高。

本文基于双环控制方案将无源性控制(passivity-

based control,PBC)与PI控制相结合对双向 Buck/Boost 变换器的电压控制进行了算法设计。电流内环基于大信号模型设计了 PBC 控制器保证变换器具有较大的稳定范围^[8]和较快的电流响应,电压外环采用 PI 控制来保证母线电压稳定追踪到参考指令值。最后,结合通信基站供电需求,搭建了一个直流微电网仿真实验平台,通过仿真和实验对所提出的控制算法进行了验证,结果表明了该控制算法在双向 Buck/Boost 变换器上应用的有效性。

1 工作原理和数学模型

图 1 所示为双向 Buck/Boost 变换器。其中: v_L 、 v_H 分别表示低压侧和高压侧的电压; C 表示高压端的输出滤波电容; L 为储能电感; r_L 为其两端等效串联电阻; i_L 表示流过其上的电流; Q_H 和 Q_L 为上管和下管,两管工作时互补导通,两管的触发脉冲间隔一定的死区时间; R 为等效虚拟电阻,表征高压端电压 v_H 和高压端输出电流 i_o 的关系。

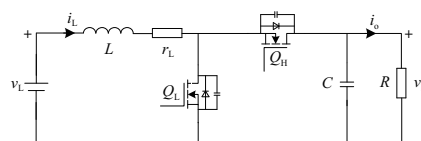


图 1 双向 Buck/Boost 变换器

基金项目:广东省自然科学基金项目(2018A0303130221)

第一作者简介:欧阳鹏(1996—),男,江西宜春人,硕士研究生,研究方向为直流微电网装置及其应用,376171753@qq.com。

当双向 Buck/Boost 变换器用作平衡母线电压平衡器时,其处于 Boost 工作模式,因此本文以变换器的 Boost 工作模式进行控制器的设计。为了简化分析,作如下假设:

1) 忽略开关管寄生参数、开关导通关断所需的时间、上、下管互补导通的死区时间,设下管 Q_L 在一个开关周期内的导通时间占比为 d ;

2) 认为低压侧电压在暂态过程中保持恒定;

3) 除 r_L 以外,忽略电路中其他元件的寄生参数对变换器建模的影响。

由图 1 所示电路分析可知。

① 在一个开关周期时间 T 内,在 $0 \sim dT$ 时间段,下管 Q_L 导通,上管 Q_H 关断,此时电感上的电流通过下管续流,电感与低压侧电源进行能量交换,输出端电容与负载进行能量交换。电路工作情况如图 2 所示,此时由 KVL、KCL 定理可得如下关系:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -r_L i_L + v_L \\ C \frac{dv_H}{dt} = -\frac{v_H}{R} \end{cases} \quad (1)$$

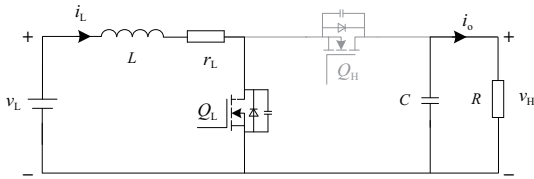


图 2 工作模式 1

② 在一个开关周期的 $dT \sim T$ 时间段,下管 Q_L 关断,上管 Q_H 导通,此时电感上的电流通过上管续流,能量在电感与低压侧电源和负载与输出电容间进行传递。电路工作情况如图 3 所示,同样由 KVL、KCL 定理可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -r_L i_L - v_H + v_L \\ C \frac{dv_H}{dt} = i_L - \frac{v_H}{R} \end{cases} \quad (2)$$

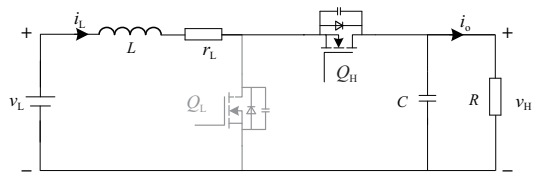


图 3 工作模式 2

结合式(1)、式(2)可得双向 Buck/Boost 变换器在 Boost 模式下的动态数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -r_L i_L - (1-u)v_H + v_L \\ C \frac{dv_H}{dt} = (1-u)i_L - \frac{v_H}{R} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u 为开关函数,当 $u=1$ 时表示 Q_L 导通, $u=0$ 时表示 Q_L 关断。分别选取电感电流 i_L 和电容电压 v_H 为该系统的状态变量。并分别记 i_L 和 v_H 在一个开关周期 T 内的平均值为

$$\begin{cases} x_1(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_L(s) ds \\ x_2(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_H(s) ds \end{cases} \quad (4)$$

同理记开关函数 u 在一个开关周期内的平均值为

$$d(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(s) ds \quad (5)$$

可得变换器的平均数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{dx_1}{dt} = -r_L x_1 - (1-d)x_2 + v_L \\ C \frac{dx_2}{dt} = (1-d)x_1 - \frac{x_2}{R} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $0 \leq d \leq 1$ 。

2 PBC-PI 控制器设计

2.1 电流内环 PBC 控制器设计

电流内环控制器设计的目的是使得变换器的电感电流能够快速追踪到给定参考值,本文电流内环采用 PBC 控制器来实现对电感电流的快速追踪。可将前文所得的双向 Buck/Boost 变换器平均数学模型中的电流模型写成如下形式:

$$L \dot{x}_1 + r_L x_1 = x_2 d + v_L - x_2 \quad (7)$$

假设变换器的期望电感电流为 x_{1ref} ,那么可以定义电流误差状态变量 e_1 如下:

$$e_1 = x_{1ref} - x_1 \quad (8)$$

将误差状态变量代入式(7)可得:

$$L(\dot{x}_{1ref} - \dot{e}_1) + r_L(x_{1ref} - e_1) = x_2 d + v_L - x_2 \quad (9)$$

对式(9)进行移相,可得变换器的误差动态方程为

$$L \dot{e}_1 + r_L e_1 = L \dot{x}_{1ref} + r_L x_{1ref} - x_2 d - v_L + x_2 \quad (10)$$

取电感电流的误差能量函数为

$$H(e_1) = \frac{1}{2} L (x_{1ref} - x_1)^2 \quad (11)$$

由式(11)可知,电感电流误差能量函数是一个非负函数,当且仅当 $e_1 = 0$ 时为 0。因此只需要保证误差能量函数的导数在平衡点之外小于 0,且在平衡点处为 0,则系统的状态向量最终将收敛到设定的期望值。根据式(11)可知误差能量函数的导数:

$$\dot{H}(e_1) = L(x_{1ref} - x_1)(\dot{x}_{1ref} - \dot{x}_1) = L e_1 \dot{e}_1 \quad (12)$$

结合式(10)、式(11)可知:

$$\dot{H}(e_1) = L e_1 \dot{e}_1 = -r_L e_1^2 + e_1 (L \dot{x}_{1ref} + r_L x_{1ref} - x_2 d - v_L + x_2) \quad (13)$$

式(13)中,等式右边第一项小于 0。所以,如果存在一个正实系数 k 满足关系式:

$$(L \dot{x}_{1ref} + r_L x_{1ref} - x_2 d - v_L + x_2) = -k e_1 \quad (14)$$

那么有如下关系成立:

$$\dot{H}(e_1) = -r_L e_1^2 - k e_1^2 \leq 0, \quad \dot{H}(0) = 0 \quad (15)$$

从式(15)可以看出,此时系统在除平衡点以外的任意状态下,其误差能量函数都是递减的,并且只有在平衡

点处其导数才为0。所以此时无论系统处在何种状态下,能量最终都将耗散至平衡点处,稳定收敛于期望值。于是根据式(14)可得:

$$d = 1 + \frac{L \dot{x}_1 + r_L x_1 - v_L + k e_1}{x_2} \quad (16)$$

上式即为PBC电流内环的控制器表达式。

2.2 电压外环PI控制器设计

电压外环控制器设计的目的是实现对母线电压的控制,因此需要设计一个电压外环控制器来保证变换器输出稳定追踪到电压的参考指令值。本文外环采用PI控制器来实现电压的跟踪。假设PBC内环电流环的响应足够快,并且远快于电压外环的调节时间,那么可以认为,在外环调节电压的过程中,电感电流已经追踪到其参考值。此时根据变换器的平均数学模型可知:

$$\begin{cases} x_1 = x_{1ref} \\ C \frac{dx_2}{dt} = \frac{v_L}{x_2} x_{1ref} - \frac{x_2}{R} \end{cases} \quad (17)$$

对式(17)中的微分方程作拉普拉斯变换,可知输出电压的平方与电感电流参考值之间呈线性关系^[9]:

$$G_{v_i}(s) = \frac{v_{i1}^2}{i_{ref}} = \frac{R v_L}{sRC + 1} \quad (18)$$

于是,变换器的电压外环控制框图如图4所示。

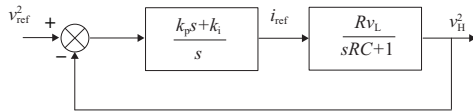


图4 PI电压外环控制框图

图4中, v_{ref} 为母线电压参考值, k_p 与 k_i 分别为PI控制器的比例和积分常数,由于电容电压与其平方之间有一一对应的关系,当输出电容电压的平方稳定到参考指令值时,电容电压也将稳定到参考值。

3 仿真与结果分析

在Simulink仿真平台上搭建了一含光伏模块的简化直流微电网模型如图5所示,光伏模块输出处于最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制下。考虑到通信基站的设计指标,直流微电网母线电压选定为48V的通信标准用电等级,仿真相关参数选定如表1所示。在此模型上,将前文所得的PBC-PI的控制器与传统PI控制器的控制效果进行对比。

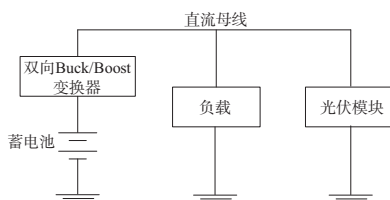


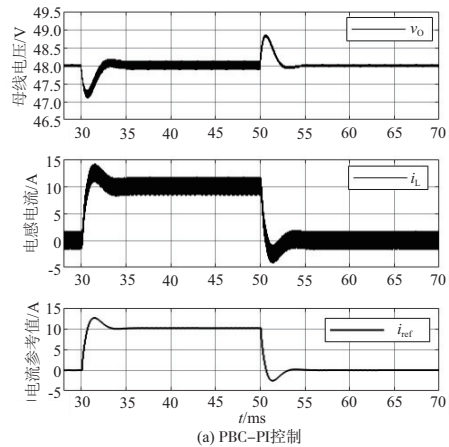
图5 直流微电网模型

表1 仿真参数

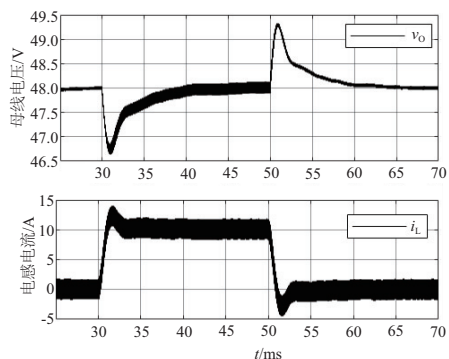
参数	数值
蓄电池电压 v_L/V	24
电感 $L/\mu H$	44
电感串联电阻 r_L/Ω	0.1
输出电容 $C/\mu F$	2 000
开关频率 f/kHz	80
控制频率 f_c/kHz	10
期望母线电压 v_{ref}/V	48
PBC内环系数 k	0.3
PI外环比例系数 k_p	0.08
PI外环积分系数 k_i	0.01

3.1 负载切换仿真

在不加光伏模块输出的情况下,母线进行负载切换操作,对比两种控制器作用下的母线电压动态波形。在仿真中设置从0ms开始启动变换器,母线上不带负载,待母线电压稳定后,在30ms时母线接入10Ω负载,在50ms时母线将10Ω负载切除。在两种控制方案下的仿真波形如图6所示。



(a) PBC-PI控制



(b) 传统PI控制

图6 负载切换仿真波形

图6(a)为采用本文所设计的PBC-PI控制器时母线电压 v_o 、电感电流 i_L 和电感电流参考值 i_{ref} 的仿真波形图。从图中可以看出,整个过程电感电流能快速追踪其参考值,母线电压的暂态过渡过程在5ms以内,电压的跌落和抬升不超过参考值的2%。图6(b)为采用传统PI控制时的母线电压和电感电流波形,暂态过渡时间为15ms左右,负载切换引起的电压跌落和抬升接近参考值的3%。

3.2 电流穿越仿真

在直流微电网中,太阳能电板把吸收的光能转化为电能,再将得到的电能注入直流母线。在直流微电网实际运行状态下,光伏发电功率具有间歇性和随机性,当光伏输出功率变化幅度较大时,有可能会引起双向 Buck/Boost 变换器的电流穿越。为考察控制器在此情况下的性能,设置仿真从 0 ms 开始,母线上带 20 Ω 负载、光伏模块输出功率为 50 W,在 30 ms 时光伏模块输出功率提高为 250 W,在 50 ms 时光伏模块输出功率再降低为 50 W。利用仿真示波器测得两种控制方案下的各物理量波形如图 7 所示。

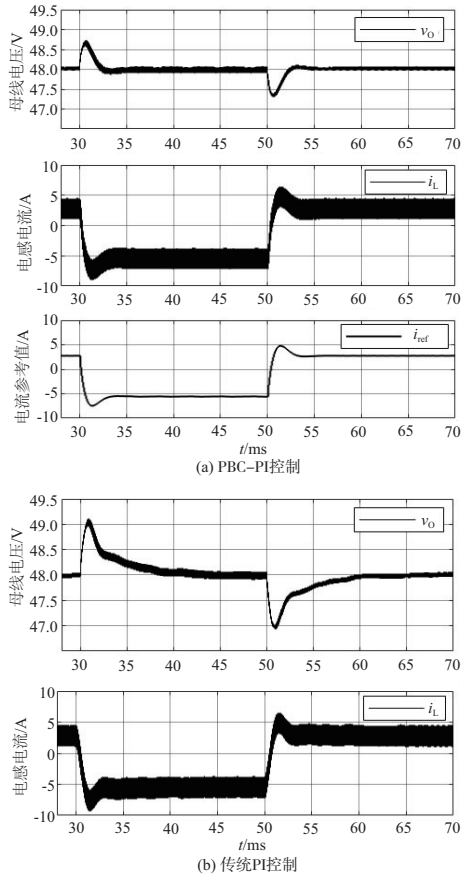


图 7 电流穿越仿真波形

从图 7 可以看出,在光伏输出功率突变时,两种控制策略下都能稳定母线电压,平衡母线的功率流动。对比图 7(a)和图 7(b)的两控制器仿真波形,可以发现 PBC-PI 控制下母线电压的波动不超过稳态值的 1.5%,电压的暂态调节过程在 5 ms 以内。而在传统 PI 控制下,母线电压波动超过稳态值的 2.5%,并且电压调节时间超过 15 ms。

4 实验与结果分析

实验平台由 500 W 双向 Buck/Boost 变换器、可编程电源、IT8841 直流电子负载、蓄电池和示波器组成,如图 8 所示。其中,可编程电源模拟光伏电池模块,直流电子负载工作在恒阻值模式下,其正极性端口接在 48 V 直流母线上,负极性端口接公共地,用以模拟变化的微网负荷。变换器的主要参数与仿真设置参数相同。实验平台原理图如图 9 所示,其中: P_{bat} 表示蓄电池输出或输入功率; P_{pv} 表示光伏输出功率; P_{load} 表示电子负载吸收的功率。

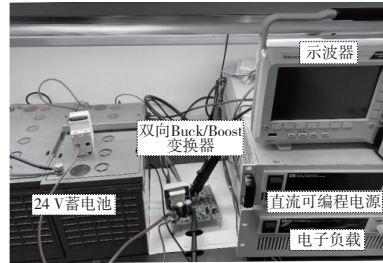


图 8 实验平台

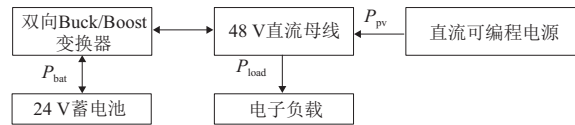


图 9 实验平台原理图

图 10(a)和图 11(a)为采用本文所提 PBC-PI 控制策略下的实验波形图,图 10(b)和图 11(b)为传统 PI 控制下的实验波形图。负载切换实验为母线负荷在空载与 10 Ω 负载间来回切换;电流穿越实验为母线带载 20 Ω 条件下,光伏输出功率在 50 W 与 250 W 间来回切换。

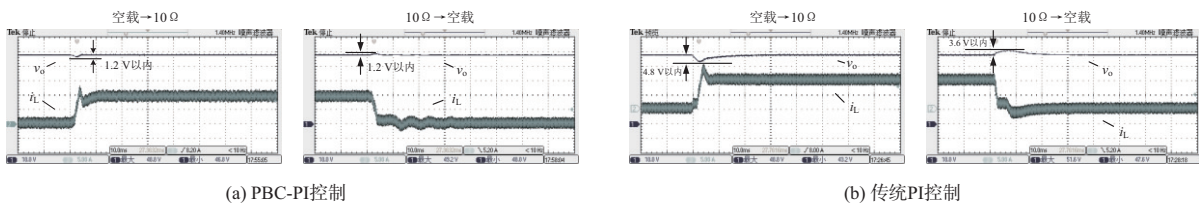


图 10 负载切换实验波形

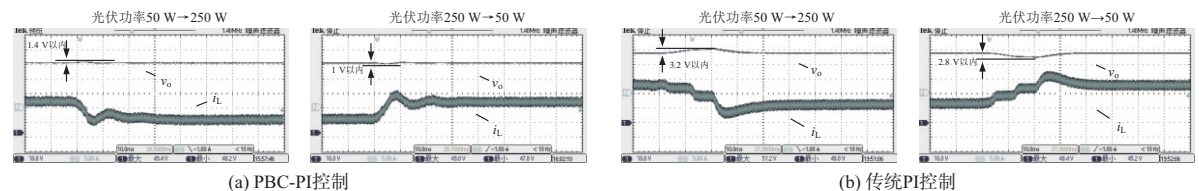


图 11 电流穿越实验波形

从图 10 可以看出,在 PBC-PI 控制下的母线电压波动不会超过 1.2 V、暂态过渡时间在 10 ms 以内,而在传统 PI 控制下的母线电压波动在 4.8 V 以内、暂态过渡时间在 20 ms 左右。从图 11 可以看出,在 PBC-PI 控制下的母线电压的波动在 1.4 V 以内、电压调节的暂态过程在 10 ms 以内,在传统 PI 控制下的母线电压波动在 3.2 V 以内、电压调节的暂态过程在 30 ms 以内。

实验波形表明 PBC-PI 控制器和传统 PI 控制器都能稳定母线电压、实现母线上的功率平衡,但是本文所设计的 PBC-PI 控制器使得母线电压具有更短的调节时间和更小的波动幅值。

5 结语

本文建立了双向 Buck/Boost 变换器的平均数学模型,基于双环控制方案将 PBC 与 PI 控制相结合设计了双向 Buck/Boost 变换器的电压控制算法。该方案将变换器的二阶非线性模型转换为两个一阶模型分别设计控制算法,从而简化了控制器的设计过程。通过仿真和实验对所提控制方案进行了验证,仿真和实验结果与理论分析一致,表明了本文所设计的 PBC-PI 控制器可以实现母线电压的稳定且具有动态响应好的优点。

参考文献:

- [1] 王超洋,张蓝宇,刘铮,等. 基于特征挖掘的 indRNN 光伏发电功率预测[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(4):17-22.
- [2] 桂林,李强军. 混联式混合动力汽车电液复合控制系统研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):228-231,238.
- [3] 陈仲,章修齐,汪柯文,等. 双向 Buck/Boost 变换器的教学探析[J]. 电气电子教学学报,2021,43(4):132-135.
- [4] 吴少龙,蔡骏,向程,等. Buck/Boost 双向 DC/DC 变换器的数字控制研究[J]. 电器与能效管理技术,2018(20):86-92.
- [5] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报,2014,29(4):334-340.
- [6] 卢昕,陈众励,李辉. 基于自抗扰控制的直流微电网双向 Buck-Boost 变换器控制策略研究[J]. 发电技术,2021,42(2):193-200.
- [7] 王宝华,蒋力. 基于精确反馈线性化的直流微电网双向直流变换器反步滑模控制[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(2):43-49.
- [8] ZHANG M, BORJA P, ORTEGA R, et al. PID passivity-based control of port-Hamiltonian systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2018,63(4):1032-1044.
- [9] 肖阔,段善旭,程华,等. 一种宽工作范围 Boost 电路的滑模变结构控制策略研究[J]. 电源学报,2017,15(5):108-115.

收稿日期:2022-03-04

(上接第 204 页)

并进行仿真,得到相应的特性曲线。如图 9 所示。

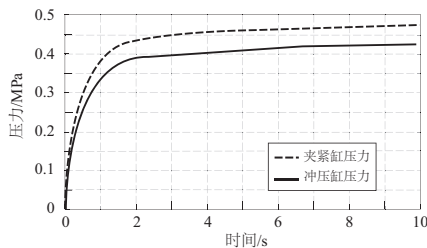


图 9 智能补偿系统的特性曲线

依据 4.1 与 4.2 中的运行结果,分别对一般系统与智能补偿系统进行了仿真实验,并对结果进行比较分析。由图 8、图 9 发现,当采用智能补偿系统时,冲压装置的冲压缸与夹紧缸能够快速达到所需压力,同时冲压缸与夹紧缸之间的压力偏差明显降低,通过分析证明智能补偿系统起到了较好的压力补偿效果。

5 结语

本文首先分析了冲压装置的基本结构与液压系统,并介绍了其工作原理,并利用 FLuidSIM 构建了仿真模型。通过仿真发现冲压装置在工作过程中,易受外部负载变化的影响,其冲压缸与夹紧缸的液压系统存在一定的压力偏差,造成了一定的系统压力损失。其次,针对压力损失这一问题,文中以比例换向阀、传感器为硬件核心设计了一种具有比例反馈环节的智能补偿回路,通过补偿回路向工作系统成比例进行压力输入,进而达到压力补偿的作用。

最后,利用 AMESim 搭建了一般系统与智能补偿系统的仿真模型并进行了仿真。通过仿真结果的对比,表明智能补偿系统对冲压装置所造成的压力损失进行了有效补偿,保持了冲压装置液压系统所需压力的持续稳定供给,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 张东民,穆天驰,周伟民,等. 基于 AMESim 的冲压装置控制系统优化分析[J]. 制造技术与机床,2021(3):77-80.
- [2] 李林骏. 基于 PLC 的冲压机下料装置控制系统设计[J]. 信息记录材料,2020,21(10):196-197.
- [3] 董效维. 基于 FluidSIM 的半自动铣床液压系统的设计及仿真[J]. 内燃机与配件,2021(8):87-89.
- [4] 叶素娣,徐敬华. 基于 FLUIDSIM 的专用铣床机电液一体化的设计与仿真[J]. 西安文理学院学报(自然科学版),2021,24(2):48-53.
- [5] 李赫,江海雷,李晶. 基于 FluidSIM 的剪板机气动回路仿真分析[J]. 机械工业标准化与质量,2020(10):43-45.
- [6] 吴海青. 基于 FluidSIM 的压力机液压控制系统设计与仿真[J]. 机械工程与自动化,2020(3):71-72.
- [7] 黎秀郁. 基于 MATLAB 的一种全自动注塑机同步带传动的设计方法[J]. 橡塑技术与装备,2022,48(2):66-69.
- [8] 黄建民,仲君,夏德琛. 基于 MATLAB 的多连杆压力机杆系设计系统研究[J]. 锻压装备与制造技术,2021,56(6):13-18.
- [9] 汪涛,黄崇莉,于洋,等. 桥式起重机模糊自适应 PID 防摆控制研究[J]. 自动化与仪表,2022,37(1):30-35.
- [10] 李资,张海丽. 基于 AMESim-Matlab 的伺服电机速度-压力回路仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):135-137.

收稿日期:2022-03-29