

基于模糊 PI 控制的光伏直流变换器控制策略研究

廖 勇¹, 陈继斌¹, 过李娇¹, 王 崇¹, 卢秀琼²

(1. 郑州轻工业大学 建筑环境工程学院, 郑州 450001;

2. 攀枝花学院 智能制造学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 以光伏发电系统模型为基础, 把直流变换器中的 Boost 电路作为研究对象, 先分别采用占空比恒定的定脉宽调制和占空比可调的传统 PI 控制作为控制方法, 利用 Matlab/Simulink 仿真工具搭建仿真模型, 分别根据不同的控制方法对 Boost 电路进行仿真分析; 由仿真可知, 定脉宽调制控制和传统 PI 控制的参数设置均无法适应实际运行工况的变化; 基于此, 提出一种模糊 PI 控制算法, 通过对传统 PI 控制的参数设定进行实时调整, 改善 Boost 电路的输出电压, 使系统能更好地应对实际运行工况的变化; 仿真分析可得, 基于模糊 PI 控制的光伏直流变换器鲁棒性增强, Boost 电路输出电压的最大超调降低, 输出电压的稳定时间缩短, Boost 电路抗干扰能力增强。

关键词: 直流变换器; 光伏发电系统; Boost 电路; PI 控制; 模糊控制

Study on Control Strategy of Photovoltaic DC Converter Based on Fuzzy PI Control

Liao Yong¹, Chen Jibin¹, Guo Liqiao¹, Wang Chong¹, Hu Xiuqiong²

(1. School of Building Environment Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. College of Intelligent Manufacturing, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China)

Abstract: Based on photovoltaic power generation system model, the Boost of the DC converter circuit as the research object, first duty ratio were used respectively to a constant pulse width modulation and adjustable duty ratio as the traditional PI control algorithm, using Matlab/Simulink simulation tool to build simulation model, according to the different control method to Boost circuit simulation analysis. It can be seen from the simulation that both the constant pulse width modulation control and the traditional PI control parameter settings are unable to adapt to the changes of the actual operating conditions. Based on this, a fuzzy PI control algorithm is proposed to improve the output voltage of Boost circuit by adjusting the parameters of traditional PI control in real time, so that the system can better cope with the changes of actual operating conditions. Simulation analysis shows that the photovoltaic DC converter based on fuzzy PI control is more robust, the maximum overmodulation of Boost circuit output voltage is reduced, the stability time of output voltage is shortened, and the anti-interference ability of Boost circuit is enhanced.

Keywords: DC converter; photovoltaic power system; Boost circuit; PI control; fuzzy control

0 引言

当前, 人类面临的化石能源危机和环境问题越发尖锐, 为了能够缓解和改善这些问题, 新能源发电技术得到广泛关注^[1]。太阳能作为一种无污染、可再生、易获取的清洁能源, 逐渐成为新能源发电的首要选择^[2]。一般由光伏阵列、直流变换器和逆变器等组成两级式光伏并网发电系统, 其中直流变换器是利用半导体开关装置控制器件的开通、关断时间, 并与电感、电容或高频变流器结合, 不断改变输出直流电压的变流器电路^[3]。在光伏并网发电系统中, 光伏阵列的工作

电压可由光伏直流变换器进行实时调节, 使得光伏阵列能够完成最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT), 它是光伏发电系统的关键构成部分^[4]。直流变换器的能量转换效率对光伏发电系统整体的能量转换效率有很大的影响, 而且直流变换器控制方法的高效性与稳定性, 又是提高太阳能转化为电能效率的关键^[5]。

常用的直流变换器控制方法主要有两种, 分别是脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 和以现代控制理论为基础的传统 PI 控制^[6]。其中, PWM 控制实际上是开环控制, 随着实际工况的变化, 其输出无法有效跟踪给定输入, 因此在实际应用中很少采用此控制方式。而传统 PI 控制凭借其控制器设计简单的特点, 在实际工程中应用广泛, 但传统 PI 控制要求被控系统具有精确的数学模型, 将此控制方法应用于直流变换器的控制时, 由于直流变换器模型的时变性与非线性以及运行工况多样性等特点, 导致传统 PI 控制器的参数设置无法自适应直流变换器各种不同运行工况的变化, 得到很差的控制效果。

收稿日期: 2019-09-17; **修回日期:** 2019-10-12。

基金项目: 四川省教育厅科研项目 (15ZB0427); 攀枝花学院重点培育项目 (2015BY13); 大学生创新创业训练计划项目 (201611360009)。

作者简介: 廖 勇 (1995-), 男, 四川邛崃市人, 研究生, 主要从事新能源发电方向的研究。

通讯作者: 陈继斌 (1961-), 男, 河南潢川县人, 工学硕士, 教授, 主要从事建筑智能化技术方向的研究。

而模糊控制是一种对系统模型无需精确化数学模型的智能控制, 鲁棒性强, 智能化程度高。针对运行工况实时变化的复杂系统, 模糊控制可以实时调整 PI 控制器的运行参数, 使得被控系统具备良好的相对稳定性, 以改善传统 PI 控制的不足之处, 得到良好的控制效果^[7]。本文提出采用模糊 PI 控制算法作为光伏直流变换器的控制方法, 目的是改善光伏直流变换器控制系统的性能。

1 光伏直流变换器的控制策略

升压 (Boost) 变换器的变换环节少、效率高, 驱动电路设计简洁并高效^[8]。因此, 与降压 (Buck) 变换器、升降压 (Buck-Boost) 变换器等相对比之后, 光伏发电系统的直流变换器更适合选用 Boost 变换器^[9]。

1.1 定脉宽调制算法分析

定脉宽调制在调节电压时, 输出的是占空比, 需要根据输出的电压来设置占空比的大小。在外部环境受到干扰导致光伏电池阵列输出电压波动时, 定脉宽调制因为无法实时更改占空比, 会导致输出电压随环境变化而变化, 并且电压不恢复到初始值, 不能自适应实际工况的变化。

1.2 传统 PI 控制算法分析

在设计直流变换器的控制系统时, 根据输出电压与输入电压对比产生的偏差信号, 通过传统 PI 控制算法, 把输出信号转换为占空比, 控制 Boost 电路重新得到电压输出, 使偏差信号的值为零。在系统运行时, PI 控制的主要作用是更快、更准确地使反馈信号作用于系统。传统 PI 控制的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{K_p(1 + T_i s)}{T_s} \quad (1)$$

式 (1) 中, K_p 为比例控制系数; T_i 为积分时间常数, 二者均为可调参数。

传统 PI 控制能够快速反应, 提高了系统的响应速度, 而造成的有差调节可由积分控制部分消除。所以, 传统 PI 控制可以提升系统的稳态性能, 而且控制效果优于单独使用的比例控制和积分控制。

1.3 MPPT 控制算法分析

光伏发电系统在运行时, 不仅光伏电池内部特性会影响光伏阵列的输出, 而且外接负载情况、环境温度和光照强度等使用环境因素都会使光伏阵列的输出受到影响^[10]。所以在实际的光伏发电系统中, 光伏阵列应该始终处于最优工作模式下, 也就是能够使太阳光能最大限度地转变为电能, 光伏发电系统通常采用 MPPT 算法提高对太阳光能的利用率。工程上常用的光伏发电系统为多级式系统, 而多级式系统中一般以两级式系统为主, 如图 1 所示。两级式光伏发电系统的前级直流变换器所包含的 Boost 电路及其控制方法承担着直流升压和最大功率点跟踪的功能, 也是后级逆变器模块正常并网的重要保障^[11]。

本文采用恒定电压法 (constant voltage tracking, CVT) 作为 MPPT 算法, 其稳定的输出能力优于传统的 PWM 脉宽调制法。CVT 算法是在 Boost 电路的基础上, 将

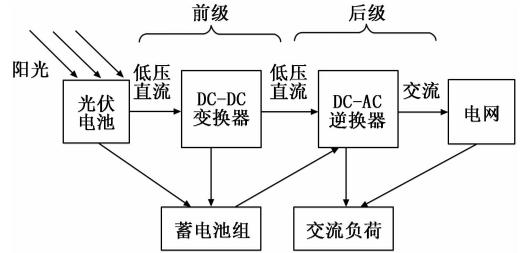


图 1 两级式光伏发电控制系统结构

触发信号从 PWM 发生器改变为可以自动调节 PWM 占空比的触发装置, 其主要原理是把给定输入电压与实时输出电压的偏差信号作为负反馈, 经过 PI 控制, 转化为占空比, 重新调节反馈电压以达到输出恒定电压的效果^[12]。当采用 CVT 算法, 外部产生波动时, 占空比会随波动的变化而变化, 通过反馈自动改变输出的占空比, 让输出电压自动恢复到初始值。并且 CVT 算法能够通过直接通过反馈, 自动调节占空比, 使电压直接输出到需要的值^[13]。

2 不同控制方式下 Boost 电路的建模与仿真

2.1 Boost 电路的工作模型与仿真分析

光伏发电系统中 Boost 电路是由光伏电源 E 、电感 L 、全控型器件 IGBT、二极管 VD、电容 C 以及负载 R 组成, IGBT 的导通与关断由 PI 控制反馈产生的触发脉冲来进行控制^[13]。Boost 电路拓扑结构如图 2 所示。

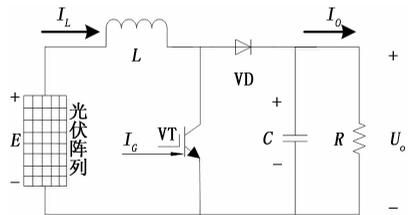


图 2 Boost 电路拓扑结构

假设 Boost 电路中的电感 L 和电容 C 的值均为无穷大。起始时刻 IGBT 处于导通状态, 光伏阵列向电感 L 充电蓄能, 由于电感值无穷大, 充电时的电流基本恒定为 I_L ; 同时, 电容由于电路变化, 开始向负载 R 放电, 由于电容 C 的值为无穷大, 放电时输出电压 U_o 的值基本能保持恒定不变。设 IGBT 导通的时长为 t_{on} , 通态时电感 L 存储的能量为 $G_1 = EI_L t_{on}$; 当 IGBT 关断时, 电容 C 由光伏阵列和电感 L 共同充电, 而且负载 R 的能量消耗也由二者共同提供。设 IGBT 关断时长为 t_{off} , 电感 L 在断态时间内释放的能量为 $G_2 = (U_o - E) I_L t_{off}$ 。当电路达到稳态时, 在一个运行周期 T_{run} 内, 满足 $G_1 = G_2$, 即:

$$EI_L t_{on} = (U_o - E) I_L t_{off} \quad (2)$$

化简得到:

$$U_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{T_{run}}{t_{off}} E \quad (3)$$

式 (3) 中, 由于 $T_{run}/t_{off} \geq 1$, 即输出电压大于给定电压, 故称为直流升压斩波电路。 T_{run}/t_{off} 称为升压比, 调节其大小可改变输出电压 U_o 的值。

根据 Boost 电路拓扑结构, 搭建 Simulink 仿真模型, 如图 3 所示。

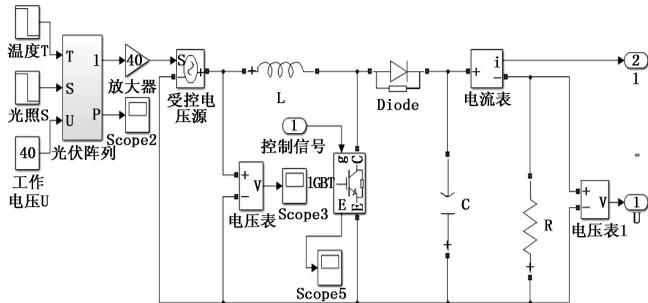


图 3 Boost 电路的仿真设计

2.2 定脉宽调制控制时 Boost 电路仿真

当输入控制信号为定脉宽调制系统的输出时, 该信号输入端子由脉冲发生器控制, 直接输出占空比不变的矩形波信号, 通过信号作用到 Boost 电路来得到输出电压。脉冲周期为 0.02 s, 通过公式 (2) 计算得到 $t_{off} = 0.0121$ s, 即占空比为 39.5%。其输出的波形图如图 4 所示。

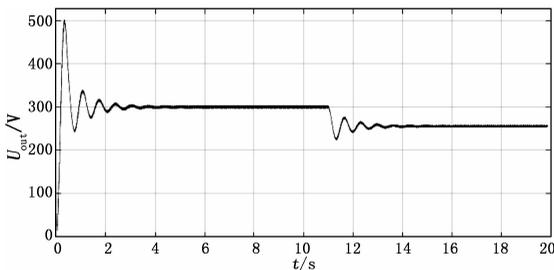


图 4 定脉宽调制系统作用下 Boost 电路输出电压

电路在定脉宽调制系统的作用下, 输出电压逐渐稳定在 280 V 左右, 在外界环境波动导致输入电压降低时, 输出会有一个扰动的过程, 扰动稳定后的输出电压低于需求的输出电压, 控制的准确性不足。当系统输入电压不稳定时, 一般不采用此控制方式。

2.3 传统 PI 控制时 Boost 电路仿真

当输入信号是外部的 PI 控制模块的输出时, 将此控制信号接入 IGBT 的触发接口, 实现对 IGBT 的控制, 达到控制电路的作用。控制部分的设计如图 5 所示。

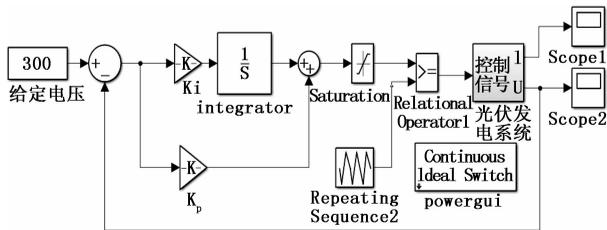


图 5 传统 PI 控制系统仿真设计

仿真系统开始运行时, 直接给定输入电压值为 300 V。起始时刻系统并没有输出, 反馈信号为 0, 输出到 PI 控制模块的值为 300, 通过 PI 控制后, 输出的信号值为 0.8。随着输出电压的不断升高, 反馈信号不断增强, 给定信号与

反馈信号间的差值不断减小, 最后差值达到 0。最后时刻 PI 控制模块的输入为零, 由于积分环节可以保持输出状态, 所以 PI 控制模块输出的信号为前一个时刻的输出, 矩形脉冲占空比随 PI 控制信号大小的变化而变化。当控制信号稳定时, 矩形脉冲占空比不变, 电路的输出不变, 电路进入稳定状态。实际运行时, 由于积分环节有延时的效果, 当第一次差值为 0 时, 由于延时带来的惯性, PI 控制模块的输出会继续变化, 系统不会马上进入稳态或进入减幅振荡环节, 而是当系统经过一定时长的负反馈控制后, 系统最终趋于稳态。经过仿真, 无外界环境干扰下即温度为标准测试温度 300 K, 光照强度为标准测试光照强度 1000 W/m^2 时, 传统 PI 控制的 Boost 电路输出的电压波形如图 6 所示, 有外界环境干扰下即光照和温度均随时间变化而变化时, 传统 PI 控制的 Boost 电路输出的电压波形如图 7 所示。

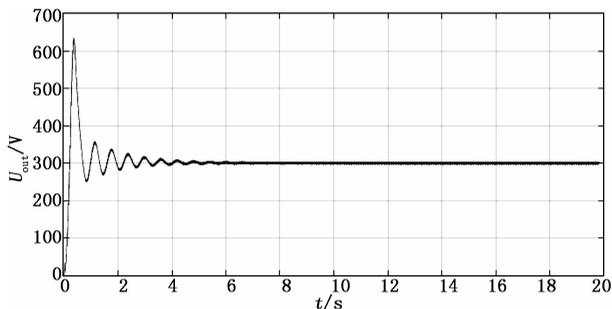


图 6 无外界环境干扰下传统 PI 控制的 Boost 电路输出电压

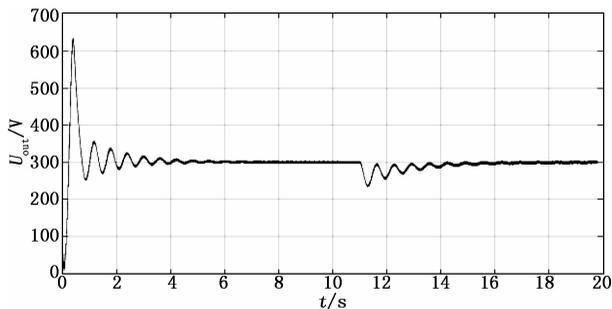


图 7 有外界环境干扰下传统 PI 控制的 Boost 电路输出电压

图 6 中, 输出电压 U_{out} 在起始时刻先增大, 超过 300 V 后继续增加, 惯性环节结束后, 电压开始减小, 进入减幅振荡环节, 输出电压慢慢稳定到 300 V。图 7 中, 在 11 s 时, 外界环境干扰导致输入电压减小, 其输出电压受到输入影响, 输出电压开始时会减小, 后面在 PI 控制的作用下, 慢慢恢复到 300 V。传统 PI 控制可以实现当外界环境干扰使输入电压发生变化后, 输出电压不会改变, 但输出电压超调较大, 系统稳定时间过长。

3 模糊 PI 控制算法的设计

光伏直流变换器的电路本质上是一个时变的、高阶非线性的、离散多模态的动态系统, 要对其进行精确建模极

其不易^[15]。因此, 常规线性理论与传统控制方法已不能适应这种光伏发电系统模型的实际工况变化, 本文提出基于模糊 PI 控制来实现对光伏直流变换器的控制。

3.1 模糊 PI 控制原理

传统 PI 控制可以实现无静差的调节输出, 但在小扰动时, 由于 PI 控制中的比例环节和积分环节的参数已经选定, 无法在扰动发生时调节, 导致在扰动下恢复原有状态的时间很长。基于模糊控制无需建立精确数学模型以及鲁棒性强的特点, 可以在传统 PI 控制基础上引入模糊控制, 通过采集给定电压与输出电压差值的变化和变化量, 通过规则变换, 得到一个 ΔK_i 和 ΔK_p , 将这两个信号重新加入 PI 控制环节中, 达到在小扰动干扰时, 比例环节和积分环节的参数跟随实际需求的变化而变化, 提高电路性能^[16]。

图 8 为基于模糊 PI 控制的直流变换器控制系统拓扑结构。通过模糊 PI 控制, 系统可以根据实时工况的变化, 快速自适应调节 PI 控制器的运行参数, 达到准确和稳定的控制效果。

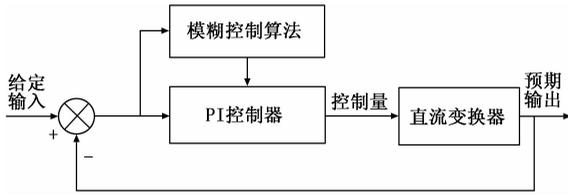


图 8 基于模糊 PI 控制的直流变换器控制系统

3.2 隶属度函数与模糊控制规则

隶属度函数的设置与模糊规则的制定是模糊控制的关键。首先, 利用 Matlab 的模糊控制工具箱对模糊控制器的隶属度函数进行设置, 光伏发电系统的输入、输出变量分别按照设计目标对隶属函数的类型、数量进行定义, 将误差 e , 误差变化 de , 比例系数 K_p 以及积分系数 K_i 分别定义 7 个模糊子集, 如图 9 所示。其中 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB 分别代表了负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大模糊概念, 而误差 e 的论域是 $[-400, 300]$, 误差变化 de 的论域是 $[-550, 150]$, 积分系数 K_i 和比例系数 K_p 的论域都是 $[-10, 10]$ 。

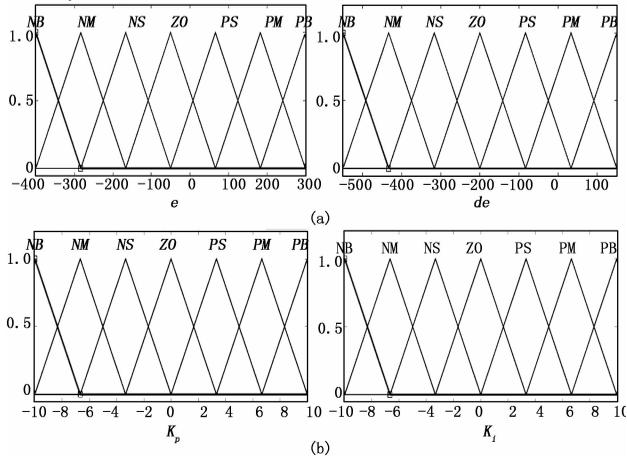


图 9 输入、输出隶属度函数

所制定的 K_p 和 K_i 模糊规则如表 1 和表 2 所示, 依次将关于 e 、 de 、 K_p 、 K_i 的模糊规则, 根据编辑器的提示, 将控制规则逐条录入, 生成的表面视图, 如图 10 所示。

表 1 K_p 的模糊规则表

| | | | | | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $e \backslash de$ | | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| ΔK_p | NB | PB | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO |
| | NM | PB | PB | PM | PS | PS | ZO | NS |
| | NS | PM | PM | PM | PS | ZO | NS | NS |
| | ZO | PM | PM | PS | ZO | NS | NM | NM |
| | PS | PS | PS | ZO | NS | NS | NM | NM |
| | PM | PS | ZO | NS | NM | NM | NM | NB |
| | PB | ZO | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

表 2 K_i 的模糊规则表

| | | | | | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $e \backslash de$ | | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| ΔK_i | NB | NB | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| | NM | NB | NB | NM | NS | NS | ZO | ZO |
| | NS | NB | NM | NS | NS | ZO | PS | PS |
| | ZO | NM | NM | NS | ZO | PS | PM | PM |
| | PS | NM | NS | ZO | PS | PS | PM | PB |
| | PM | ZO | ZO | PS | PS | PM | PB | PB |
| | PB | ZO | ZO | PS | PM | PM | PB | PB |

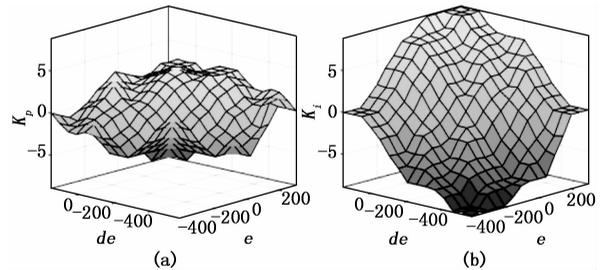


图 10 模糊规则生成的表面视图

3.3 模糊 PI 控制时 Boost 电路仿真分析

通过模糊控制得到的是比例控制和积分控制中控制量的变化, 需要将其反馈到 PI 控制器中, 而把变化量单独作为一个 PI 控制部分, 得到的结果分别与原有的 PI 控制模块输出叠加在一起, 再传送到比较器进行处理。模糊 PI 控制系统的仿真电路如图 11 所示。仿真电路在原有 PI 控制的基础上, 引入模糊控制来改善传统 PI 控制的不足, 即改变比例环节和积分部分中的 K_p 、 K_i 的值。在控制系统作用时, 控制量随差值大小的变化而变化, 对电路的输出特性进行极大的优化。

根据图 11 的仿真电路, 在仿真软件 Matlab 主界面输入控制指令, 选中编译好的 fis 规则文件, 在仿真电路中打开 fuzzy 模块, 在指令栏输入规则名称, 直接进行仿真分析。仿真结果如图 12 所示。

仿真波形中, 模糊 PI 控制下 Boost 电路输出电压的最大超调量由原来传统 PI 控制时的 680 V 下降到 600 V, 稳

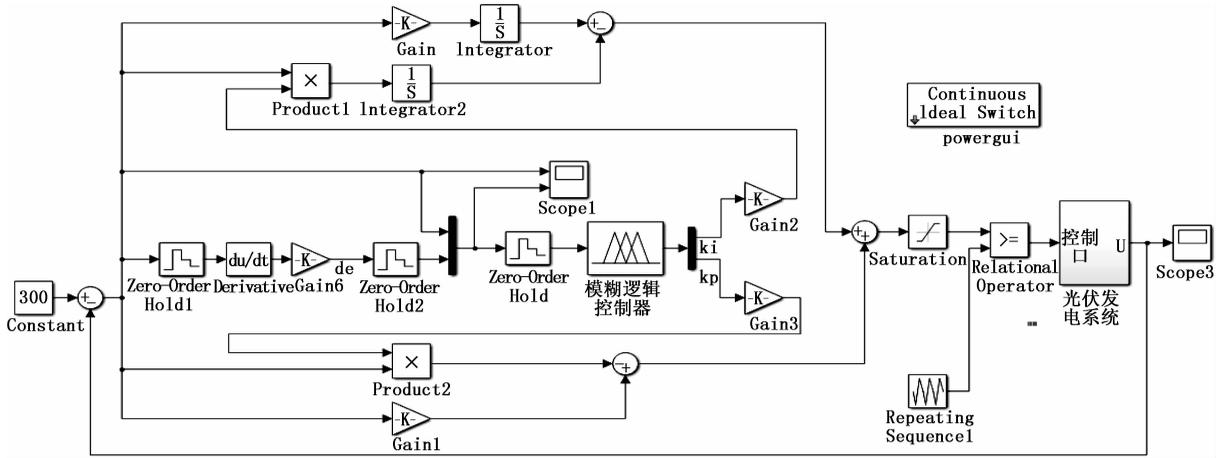


图 11 模糊 PI 控制系统的仿真电路

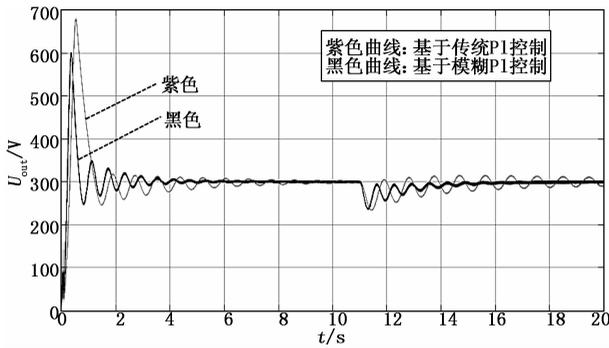


图 12 模糊控制下 Boost 电路输出电压

定时间缩短，并且在受到外界环境干扰时，模糊 PI 控制能够实时调整运行参数，使得应对扰动的处理时间相较于传统 PI 控制有所减少，输出电压波动幅度更小，Boost 电路抗干扰能力更强。

4 结论

针对定脉宽调制控制和传统 PI 控制的不足，并考虑到光伏直流变换器模型具有非线性、时变性、建模复杂等特点，本文设计的基于模糊 PI 控制的 Boost 电路在采用传统 PI 控制的基础上，引入模糊控制理论，通过制定模糊规则和隶属度函数实时改变传统 PI 控制的参数，使 Boost 电路能够自适应实际运行工况的变化。由仿真分析可得，模糊 PI 控制相较于定脉宽调制控制和传统 PI 控制鲁棒性增强，而且还减小了电压输出的最大超调量，缩短了输出电压的稳定时间，提高了 Boost 电路抗干扰能力。本文在研究过程中，理想化地忽略 Boost 电路中电感、电容对仿真结果产生的影响，Boost 仿真电路设计时未引入功率参数。

参考文献:

[1] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99 (1): 133-148.

[2] 曹太强. 光伏发电系统及其控制技术研究 [D]. 成都: 西南

交通大学, 2010.

[3] 郭润睿. 光伏发电系统直流变换器的研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2008.

[4] 刘 灿, 王 萍. 基于扩展描述函数法的直流变换器小信号建模与仿真 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13 (33): 9960-9965.

[5] 陈 庚. 光伏系统中直流升压变换器及其控制方法的研究 [D]. 成都: 西华大学, 2018.

[6] Revathi B S, Mahalingam P, Francisco G L. Interleaved high gain DC-DC converter for integrating solar PV source to DC bus [J]. Solar Energy, 2019, 188 (6): 924-934.

[7] Yilmaz U, Kircay A, Borekci S. PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81 (8): 994-1001.

[8] 李燕燕. 基于模糊控制 Boost 变换器的光伏发电研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.

[9] Gkizas G, Giaouris D, Pickert V. A new method on the limit cycle stability analysis of digitally controlled interleaved DC-DC converters [J]. Control Engineering Practice, 2019, 90 (6): 111-122.

[10] 张 晔, 顾 勇, 杜春晖, 等. 基于 Matlab 的光伏电池最大功率跟踪建模与仿真 [J]. 科学技术创新, 2018 (15): 39-40.

[11] 于卫卫. 基于 PSASP 的光伏发电系统建模与并网分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.

[12] Soreng B, Behera P, Pradhan R. Design of a grid integrated PV system with MPPT control and voltage oriented controller using Matlab/PLECES [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 225 (1): 012249.

[13] 王志兵. 基于恒压法结合变步长电导增量法的最大功率点跟踪 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (19): 4638-4642.

[14] 杨晓雨. 基于 Boost 电路的 MPPT 控制系统的设计 [J]. 工业控制计算机, 2019, 32 (3): 157-158.

[15] 户秀琼, 袁适成, 陈 敏, 等. 基于模糊推理和 Matlab 的直流变换器控制与仿真 [J]. 科技与创新, 2019 (9): 27-28, 31.

[16] Imam A, et al. Smart solar tracking system based on fuzzy-PI controller for maximizing the power of PV (Conference Paper) [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2088 (1): 020022-1-020022-11.