

基于光储系统的三端口变换器研究

孙 薪, 吴云亚, 姜玉霞

盐城工学院电气工程学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2023年7月11日; 录用日期: 2023年9月5日; 发布日期: 2023年9月12日

摘 要

研究了一种可应用于光储系统中的非隔离型三端口变换器, 通过调节3个开关管来实现不同工作模式的平滑切换, 分析了不同工作模式运行的能量流动状态, 改变传统PI调节固定参数调节的思路, 提出了一种非固定的PI参数调节方法, 通过对比实验, 实现了超调量的减小和调节速度的加快。通过分析拓扑结构在不同工作模式下的运行状态, 研究其功率流动管理的控制策略, 并结合仿真实验, 验证其理论的可行性和有效性。

关键词

光伏系统, 能量管理, 三端口变换器, PI调节

Research on Three-Port Converter Based on Optical Storage System

Xin Sun, Yunya Wu, Yuxia Jiang

School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Jul. 11th, 2023; accepted: Sep. 5th, 2023; published: Sep. 12th, 2023

Abstract

A non-isolated three-port converter that can be applied to the optical storage system was studied, which realized the smooth switching of different working modes by adjusting three switch tubes, analyzed the energy flow state of operation in different working modes, changed the idea of traditional PI adjustment fixed parameter adjustment, proposed a non-fixed PI parameter adjustment method, and realized the reduction of overshoot and the acceleration of adjustment speed through comparative experiments. By analyzing the operating status of the topology in different working modes, the control strategy of power flow management is studied, and the feasibility and effectiveness of the theory are verified by combining simulation experiments.

Keywords

Photovoltaic System, Energy Management, Three-Port Converter, PI Regulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球变暖和极端天气对社会的影响,当前国家的能源结构应加快实现向以清洁能源为主的新型能源结构转型[1][2]。光伏发电是实现“双碳”目标的重要措施,逐渐成为国家新型能源结构中的重要组成部分[3]。由于易受阴影遮挡、晚间光照低等因素的影响,光伏发电的过程存在间断性、不稳定性等问题,因此一般会将蓄电池加入发电系统中,用以提高系统发电的稳定性能[4][5]。这种含有储能环节的光伏发电系统通常被称为光储系统。

在光储系统中,由于涉及不同类型的能源与负载,一般变换器在空间使用率、材料价格、功率流动控制等多方面不能完全满足实际使用需求,因此可集中化地对光伏阵列、蓄电池及负载进行综合能量管理的三端口变换器应运而生[6]。出于安全性的考虑,一般会将各端口之间进行电气隔离,按照各端口的隔离状态分类,可将主流三端口变换器分为隔离型三端口变换器、部分隔离型三端口变换器和非隔离型三端口变换器[7][8][9][10]。隔离型三端口变换器由双向桥式拓扑电路和多绕组高频变压器组成,通过调节原副边匝数比值,实现输入输出间的高比例增益变换;储能环节的双向能量流动则由双向桥式拓扑电路实现,但其功率密度低,且变压器体积大结构冗杂,一般应用于对安全性能要求较高的场所[11][12][13][14]。非隔离型三端口变换器因为其具有功率密度高、体积小、结构简单等优点成为近年来主要研究热点。

刘硕[15]提出的一种非隔离型三端口变换器拓扑结构,通过控制3个开关管的开通与关断,使各端口之间具有升降压增益特点,具有结构简单、体积小的优势。王辉[16]提出的一种高增益非隔离型三端口变换器,通过对电容 C_1 充放电,并将 C_1 电压叠加至变换器输出侧,提高了变换器的增益。Davalos [17]基于二次型变换器提出了高增益三端口变换器,变换器增益与占空比平方呈正比,有效提高了变换器增益。以上学者所提出的三端口变换器系统虽都能实现各自的目标,但控制策略均采用传统的固定PI参数调节,因此超调量和达到稳态的速度均无优化。

本文研究了一种非隔离型三端口变换器,通过控制3个开关管的开通与关断,能够实现各端口之间的能量流动,且通过非固定PI调节参数的整定方法,系统可以平滑地切换于不同工作模式之间,并通过仿真验证了其可行性。

2. 系统拓扑电路分析

2.1. 三端口变换器拓扑结构

本文所研究的拓扑结构如图1所示,该拓扑包含1个光伏阵列(PV)、1个储能环节(Battery)、1个输出负载(R_o)、3个MOSFET开关管($S_1\sim S_3$)、3个二极管(VD_{in} 、 VD_b 和 VD_o)、1个储能电感 L_f 及3个滤波电容(C_{in} 、 C_b 和 C_o)。相比于一般储能环节后级的功率变换器,该拓扑的特点是元器件数量少、变换器体积小、拓扑结构简单的优点,通过控制拓扑中的3个开关管可使不同端口间具有Boost特性。

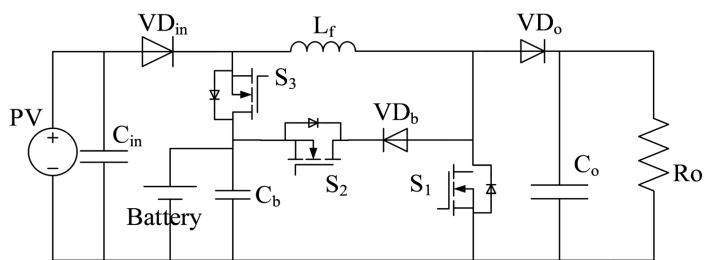


Figure 1. Three-port converter topology diagram
图 1. 三端口变换器拓扑结构图

假定 1 表示为开关管导通，0 表示为开关管关断，则以开关管 S_1 和 S_3 导通， S_2 关断为例，拓扑结构中三个开关管的导通状态按顺序可表示为 101，依此类推。

2.2. SIDO 模式

光照充足时，光伏阵列工作在最大功率点处，此时同时向储能环节和输出负载供电，其工作模式为单输入双输出模式(SIDO)，如图 2 所示；

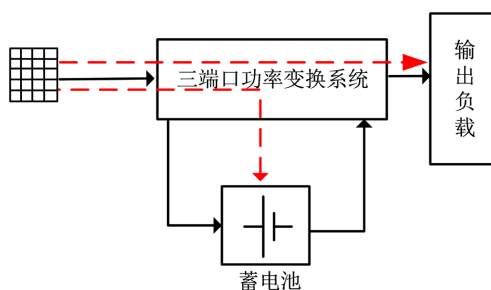


Figure 2. SIDO mode
图 2. SIDO 模式

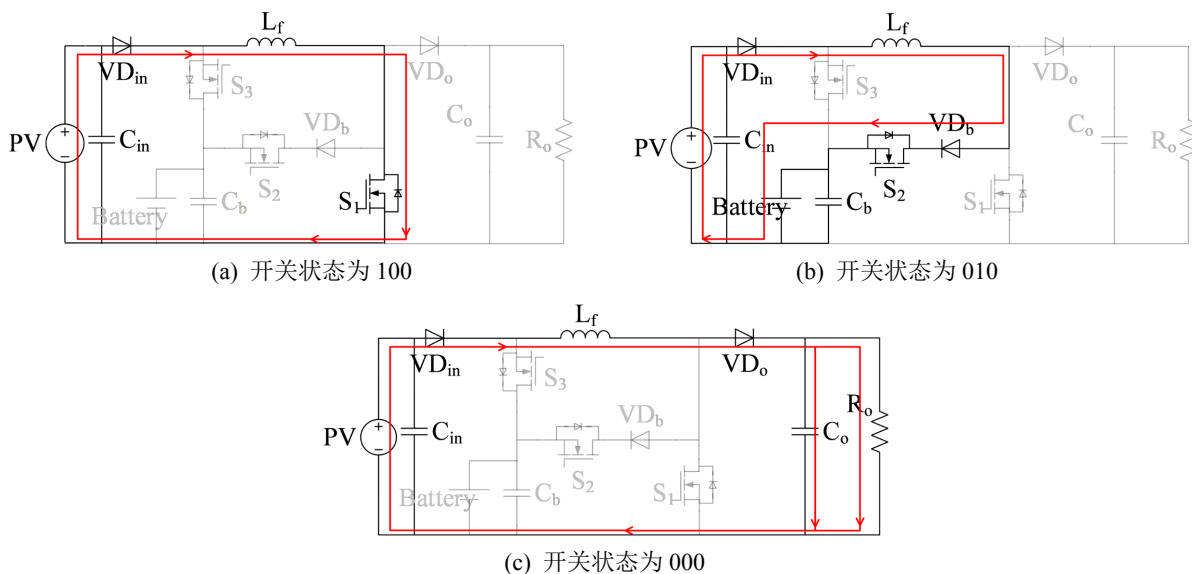


Figure 3. The working status of SIDO
图 3. SIDO 的工作状态

在 SIDO 模式下, 一个开关周期内的工作状态由 100→010→000 组成一个循环, 此时开关管 S_3 保持关断, 通过控制开关管 S_1 和 S_2 的周期性导通实现输出负载侧的恒压输出, 并将多余的能量储存至储能环节, 示意图如图 3 所示。

对应的电感电压、电感电流以及开关管 1 和开关管 2 的通断状态如图 4 所示。

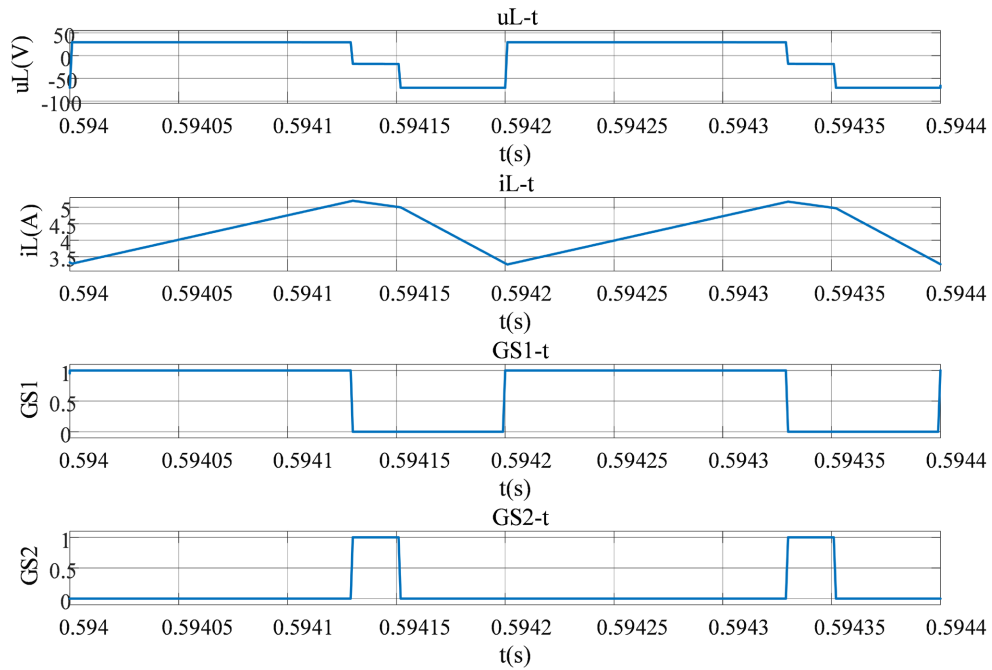


Figure 4. Inductor voltage, inductor current, and three switches on (single input dual output mode)
图 4. 电感电压、电感电流、三个开关管的导通情况(单输入双输出模式)

2.3. DISO 模式

当光照减弱时, 光伏阵列输出的功率不足以支撑输出负载所需功率, 此时储能环节出力, 与光伏阵列共同向输出负载供能, 对应的是双输入单输出模式(DISO), 如图 5 所示:

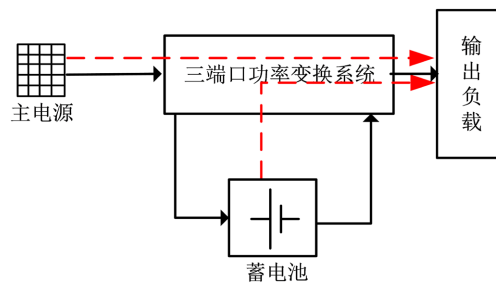


Figure 5. DISO mode
图 5. DISO 模式

在 DISO 模式下, 一个开关周期内的工作状态分为两种, 一种是 101→100→000, 另一种是 101→001→000, 此时开关管 S_2 保持关断, 当光伏阵列的输出大于负载侧所需功率的一半时, 此时一个开关周期内的工作状态由 101→100→000 组成一个循环, 光伏阵列为主要供能端, 储能环节补偿输出负载侧所需

的剩余能量；当光伏阵列的输出小于负载侧所需功率的一半时，此时一个开关周期内的工作状态由 101 → 001 → 000 组成一个循环，储能环节为主要供能端，光伏阵列补偿输出负载侧所需的剩余能量。示意图如图 6 所示。

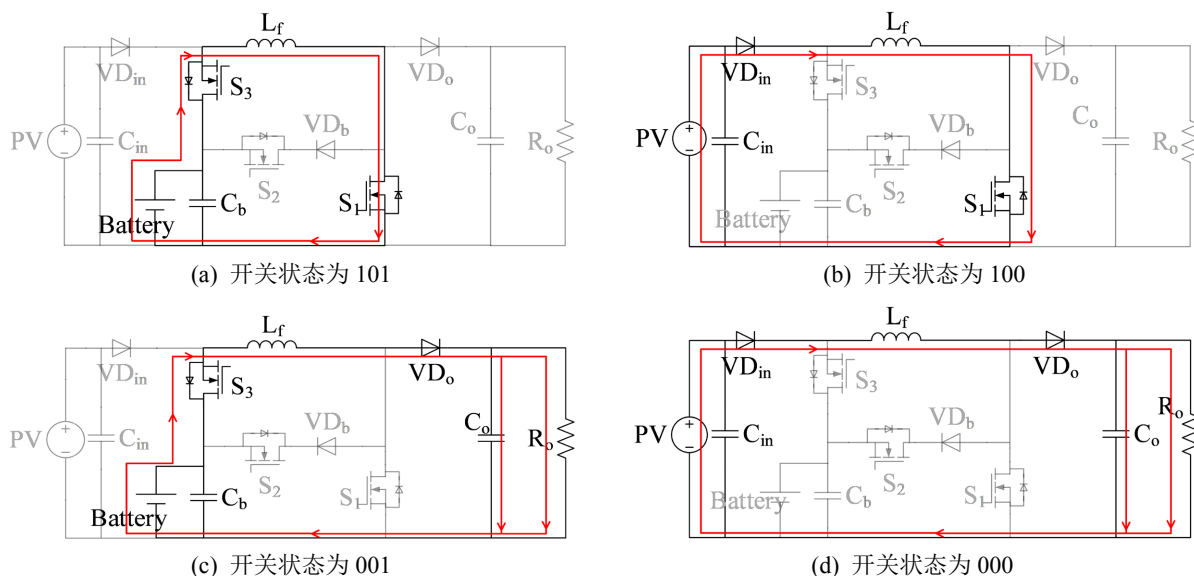


Figure 6. Working status of DISO

图 6. DISO 的工作状态

其中，图 7 所示为 $D_1 > D_3$ 的双输入单输出模式下，电感电压、电感电流以及开关管 1 和开关管 3 的通断状态，图 8 所示为 $D_1 < D_3$ 的双输入单输出模式下，电感电压、电感电流以及开关管 1 和开关管 3 的通断状态。

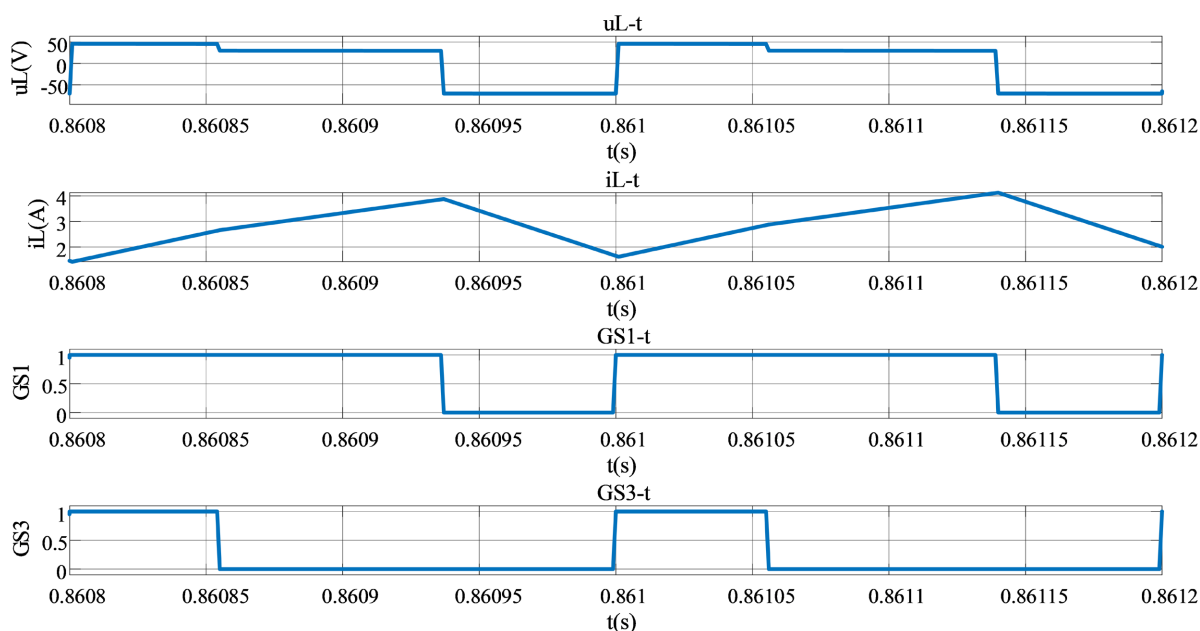


Figure 7. Inductor voltage, inductor current, and turn-on of three switches (dual-input single-output mode ($D_1 > D_3$))

图 7. 电感电压、电感电流、三个开关管的导通情况(双输入单输出模式($D_1 > D_3$))

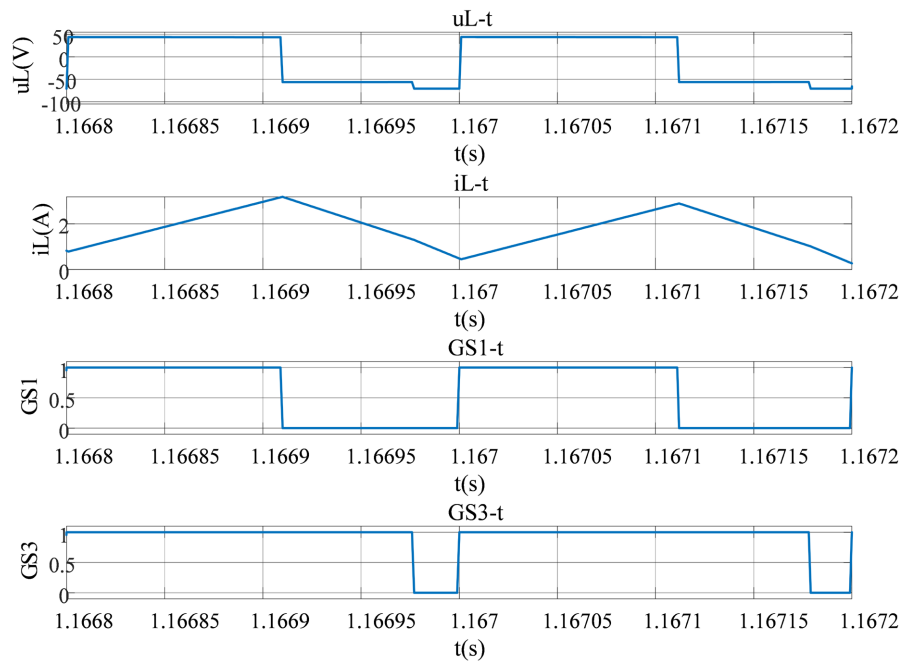


Figure 8. Inductor voltage, inductor current, and turn-on of three switches (dual-input single-output mode ($D_1 < D_3$))
图 8. 电感电压、电感电流、三个开关管的导通情况(双输入单输出模式($D_1 < D_3$))

2.4. SISO 模式

当输出负载断开时, 光伏阵列单独向储能环节供电, 当光照为 0 时, 储能环节单独向输出负载供电, 当储能环节无法供电时, 光伏阵列单独向输出负载供电, 此三种工作模式为单输入单输出模式, 如图 9(a)~(c)所示。

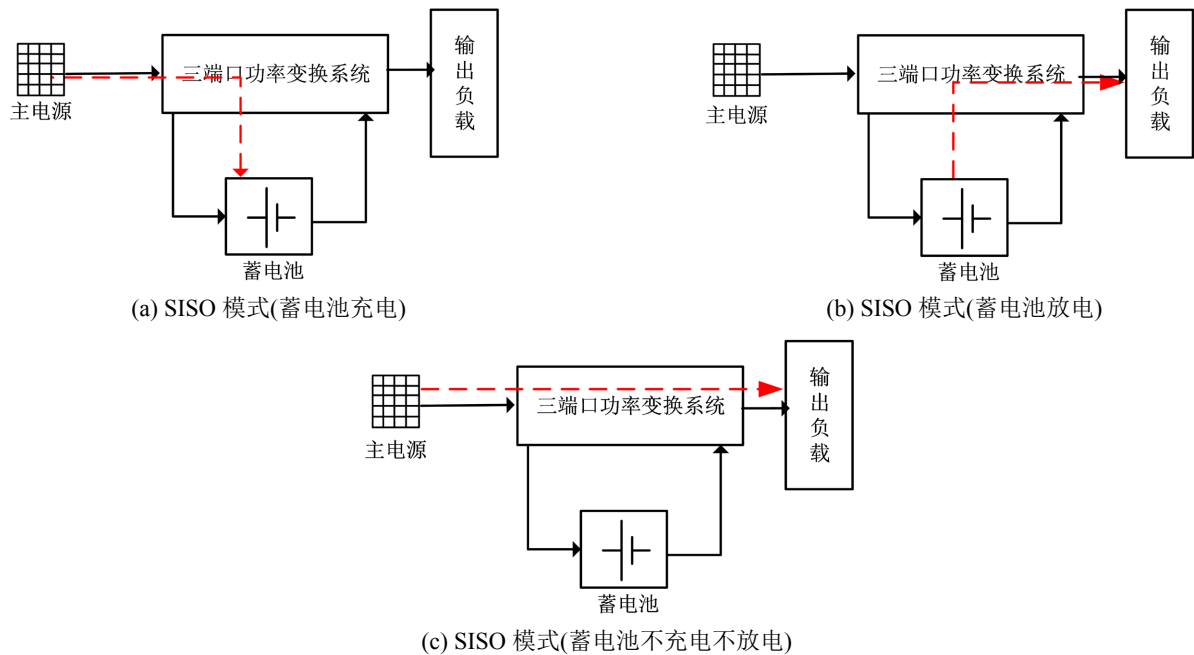


Figure 9. SISO mode
图 9. SISO 模式

SISO 模式即为基本的 Boost 升压电路, 以光伏阵列向负载供电为例, 其工作状态为(100→000), 示意图如图 10 所示。

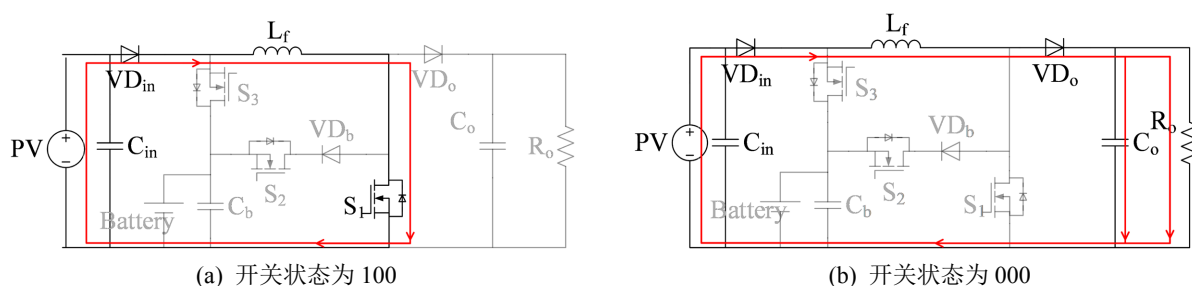


Figure 10. SISO operating state (PV array → load)

图 10. SISO 的工作状态(光伏阵列→负载)

如图 11 所示为单输入单输出模式(光伏阵列向负载供电)下电感电压、电感电流以及开关管 1 和开关管 3 的通断状态。

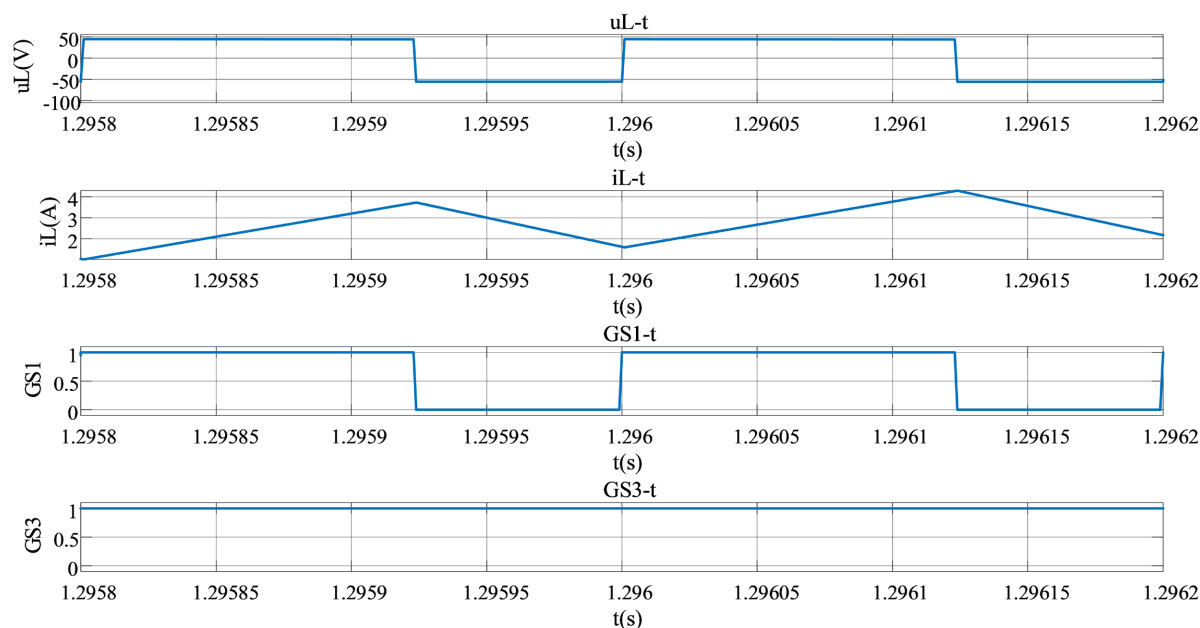


Figure 11. Inductor voltage, inductor current, three switches on (single input single output mode)

图 11. 电感电压、电感电流、三个开关管的导通情况(单输入单输出模式)

3. 控制策略

光储系统的功率控制框图如图 12 所示。图中的 IVR (Input Voltage Regulator)、BCR (Battery Current Regulator)及 BVR (Battery Voltage Regulator)通过非固定 PI 调节参数的整定方法, 共同实现光伏阵列和储能环节的控制, 其中 IVR、BCR 和 BVR 分别实现 U_{in} 、 I_b 及 U_b 的控制, IVR 的电压基准由 MPPT 控制器产生, OVR (Output Voltage Regulator)实现控制负载端 U_o 的调节。工作模式选择器根据各个调节器的输出值判定系统所处的工作模式, 从各个调节器的输出值中选择合适的控制值作为 PWM 调制器的输入, 图 13 为搭建的具体仿真控制模型。

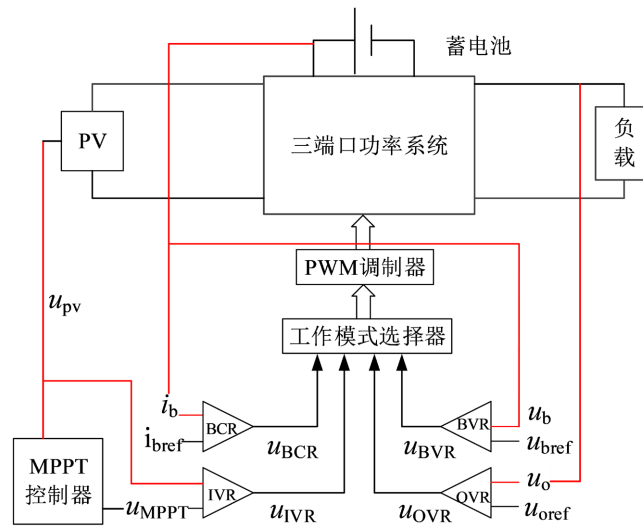


Figure 12. Block diagram of the power control of the optical storage system

图 12. 光储系统功率控制框图

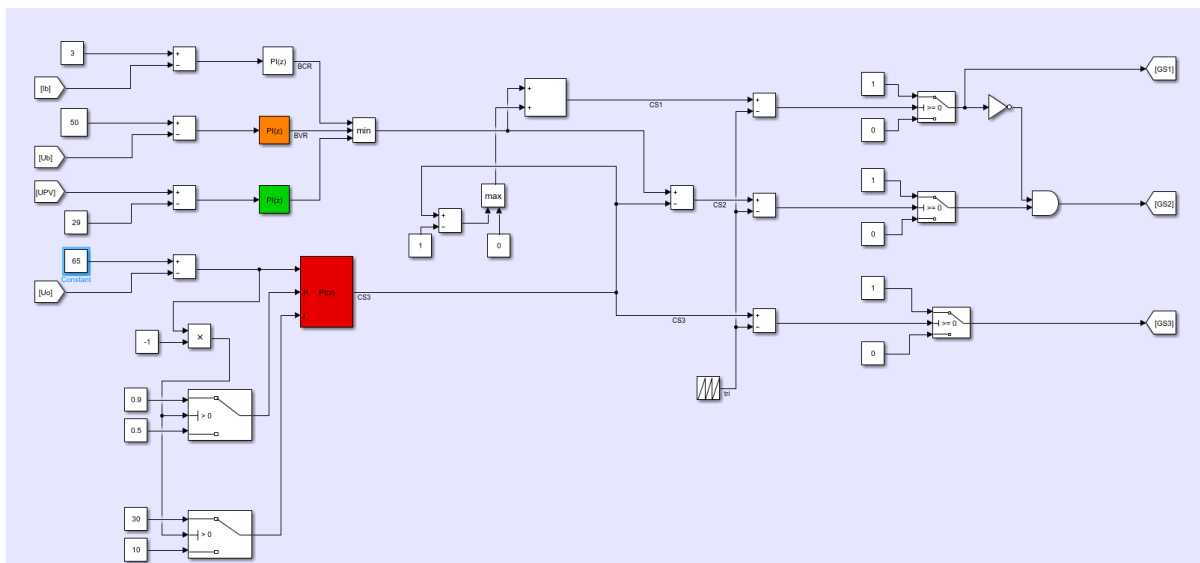


Figure 13. Control simulation model

图 13. 控制仿真模型

3.1. 工作模式选择器

工作模式选择器采用竞争机制，用最小值选择器自动选择 u_{BVR} 、 u_{BCR} 和 u_{IVR} 中的最小值作为 PWM 调制器的输入，使得变换器能够在 MPPT 模式下与蓄电池限流(或限压)充电模式之间自动平滑地切换。本拓扑共有 3 个开关管需要控制，因此工作模式选择器需要输出三个对应的控制电压 u_{CS1} 、 u_{CS2} 和 u_{CS3} 分别用于产生 S_1 、 S_2 和 S_3 的驱动信号，控制流程框图如图 14 所示，其中 U_T 为锯齿载波的峰值。

当系统工作在单输入双输出模式时，光伏阵列向负载侧供电，同时又蓄电池吸收多余功率，因此 $u_{OVR} < 0$ ，所以 $u_{CS3} < 0$ ，因此 $\max\{u_{OVR}-U_T\} < 0$ ，又因为此工作模式下，蓄电池电流和电压都没有达到设定的最大值，而此时 IVR 的输出是 BCR、BVR 和 IVR 中的最小值，所以使得 $u_{CS1} = u_{IVR}$ ， $u_{CS2} = u_{IVR}-u_{OVR}$ 。

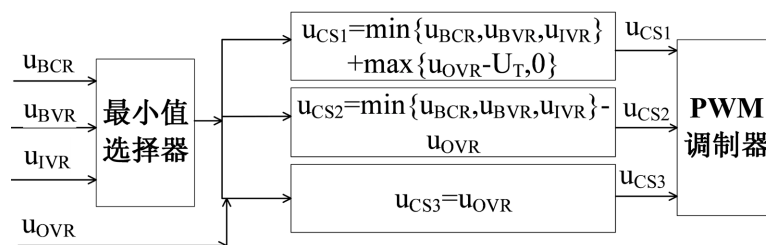


Figure 14. Operating mode selector control block diagram

图 14. 工作模式选择器控制框图

当系统工作在双输入单输出模式时，光伏阵列和蓄电池同时向负载侧供电，根据光伏出力较蓄电池出力大小又可将此工作模式分为光伏主供和蓄电池主供。当光伏主供时，光伏阵列仍为最小值选择器的输出，即 $\min\{u_{BCR}, u_{BVR}, u_{IVR}\} = u_{IVR}$ ，因为蓄电池需要向负载侧供能，因此 $u_{CS2} = 0$ ， $u_{CS3} > 0$ ，因此 $u_{OVR} > 0$ 。当蓄电池主供时， $\min\{u_{BCR}, u_{BVR}, u_{IVR}\} = \min\{u_{BCR}, u_{BVR}\}$ ，蓄电池进入恒流或恒压放电状态，电路通过开关管 1 和开关管 3 的控制实现负载侧的恒压控制。

当系统工作在单输入单输出模式时，以蓄电池单独向负载侧供能为例，此时光伏阵列输出为零，因此 $\min\{u_{BCR}, u_{BVR}, u_{IVR}\} = \min\{u_{BCR}, u_{BVR}\}$ ，关断开关管 2，导通开关管 3，通过控制开关管 1 的周期性导通实现负载侧的恒压控制和蓄电池侧的恒压或恒流放电控制。

3.2. PWM 调制器

PWM 调制器即为生成的 u_{CS1} 、 u_{CS2} 和 u_{CS3} 与锯齿载波相比较，大于 0 输出高电压，小于 0 输出低电压，对应输出的三个控制信号 u_{GS1} 、 u_{GS2} 和 u_{GS3} 分别控制开关管 S_1 、 S_2 和 S_3 ，锯齿波生成 PWM 波的示意图如图 15 所示，仿真模型中的 PWM 生成模块如图 16 所示。

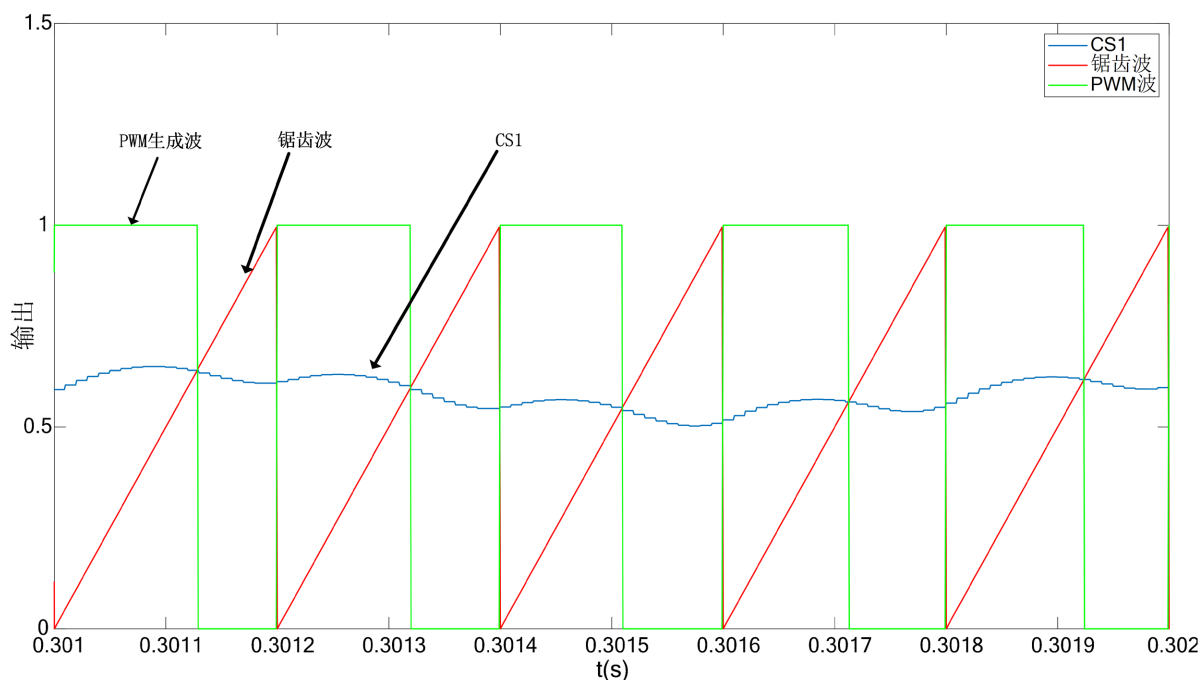


Figure 15. Schematic diagram of saw tooth wave generation PWM wave

图 15. 锯齿波生成 PWM 波示意图

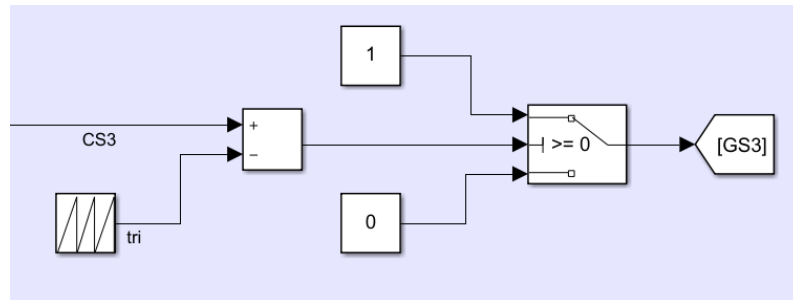


Figure 16. PWM wave generation simulation model
图 16. PWM 波生成仿真模型

4. 参数对系统稳定性影响

由于 PI 控制对系统的控制效果显著，操作简单，因此绝大多数学者都选用的是 PI 控制器控制系统的稳态运行，但由于 P 和 I 的参数选择对控制效果起着举足轻重的影响，所以本章针对光储系统的三端口变换器仿真模型中的 PI 参数进行研究，在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型，观察 PI 参数对控制效果的影响。

4.1. P 参数对调节的控制效果

首先控制 I 参数不变($I = 24$)，通过多组 PI 参数进行仿真实验，观察其控制效果，如图 17 所示，以 $P = 0.9$ 为基数，上下间隔 10%选取 5 组数据进行观察，可看出 P 值对控制效果的影响：随着 P 值的增大，调节速度先增大后减小，存在某一 P 值使得调节速度最快；随着 P 值的增大，超调量也越大，当 P 值超过一定值时，调节失控。

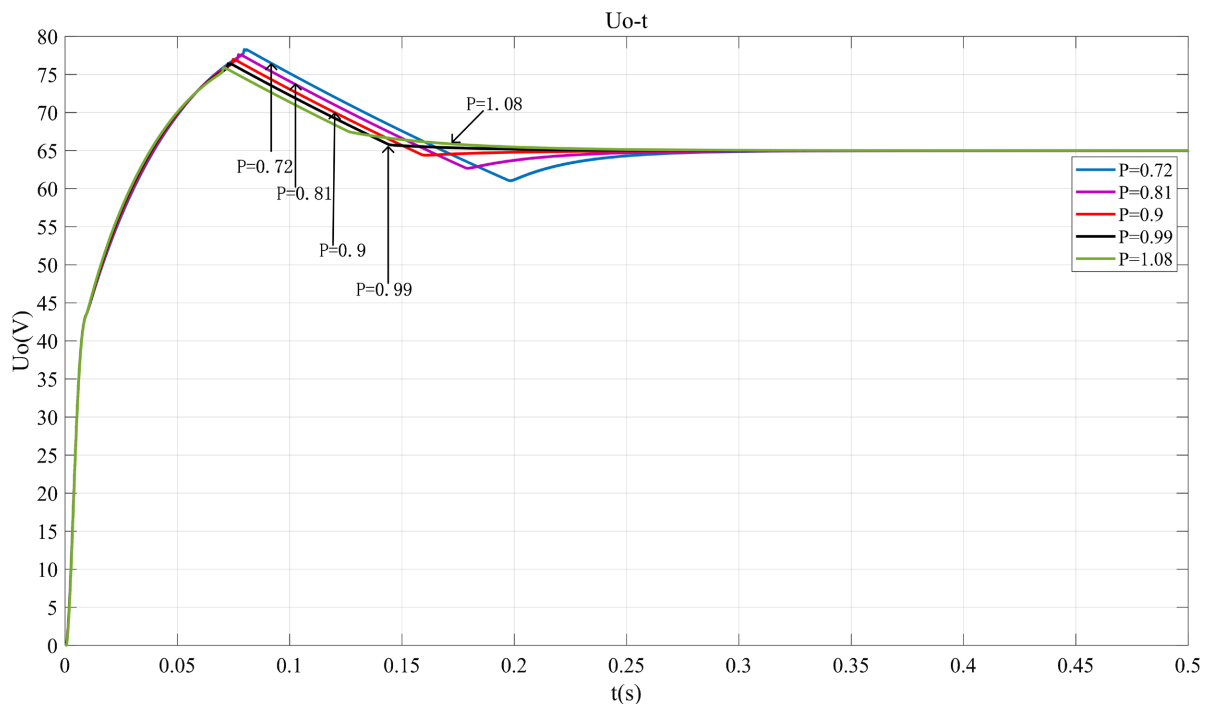


Figure 17. Influence of P parameters on adjustment effect
图 17. P 参数对调节效果的影响

4.2. I 参数对调节的控制效果

然后控制 P 参数不变($P = 0.9$), 通过多组 PI 参数的仿真实验, 观察其控制效果, 如图 18 所示, 以 $I = 24$ 为基数, 上下间隔 10% 选取五组参数进行观察, 可看出 I 值对控制效果的影响: 随着 I 值的增大, 超调量也随之增大, 但是系统达到稳态值的速度逐渐增大到某一 I 值后, 系统达到稳态的速度逐渐减小, 因此存在着某一 I 值使得调节速度最快。

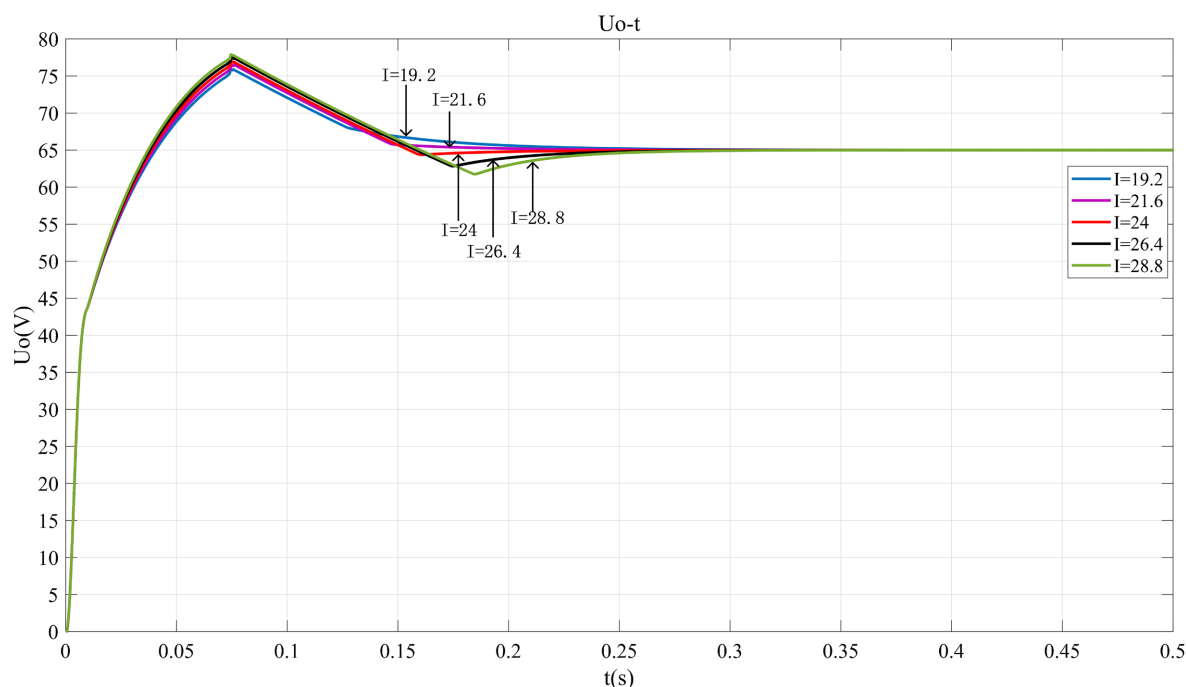


Figure 18. Influence of I parameters on adjustment effect

图 18. I 参数对调节效果的影响

4.3. 非固定 PI 参数的整定方法

常规 PI、模糊 PI 和神经网络 PI 是三种常见的 PI 控制器变种, 它们在控制算法和性能方面有所不同。常规 PI 控制器是最常用的 PI 控制器, 易于实现和调试, 但是在非线性、时变或多变量系统中可能会出现性能不佳的问题。模糊 PI 控制器优点是可以处理非线性、时变或多变量系统, 并且可以通过调整模糊集合和模糊推理来优化控制器的性能。缺点是需要较大的计算量和复杂度。神经网络 PI 控制器是一种基于神经网络的 PI 控制器, 优点是可以自适应地学习系统的动态模型和控制器的参数, 并且可以处理非线性、时变或多变量系统。缺点是需要大量的训练数据和计算量。

基于传统 PI 控制, 因此提出了一种优化后的非固定 PI 调节参数的整定方法, 在调节开始阶段重点放在调节速度上, 使其快速响应达到稳态值, 当实际值与参考值误差在一定范围内时, 选择另一套 PI 调节参数, 调节重点放在超调量的控制上, 使其调节效果较于传统固定 PI 参数调节, 能够减小超调量, 提高达到稳态值的速度。控制模型如图 19 所示。

为了验证仿真模型的动态响应, 在输出给定参考值加入一阶跃, 在 0.6 秒处将输出给定值由 65 V 阶跃至 75 V, 通过仿真实验对比非固定 PI 参数调节和传统 PI 调节的控制效果, 如图 20 所示。

由效果图可看出非固定 PI 参数调节的控制效果与传统 PI 调节相比较, 调节速度增加, 超调量减小, 因此成功验证了非固定 PI 参数调节方法的可行性。

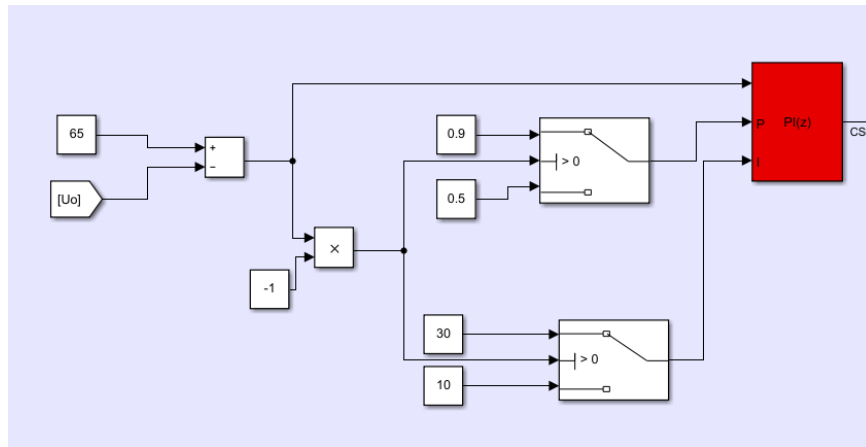


Figure 19. Non-fixed PI regulation control model
 图 19. 非固定 PI 调节控制模型

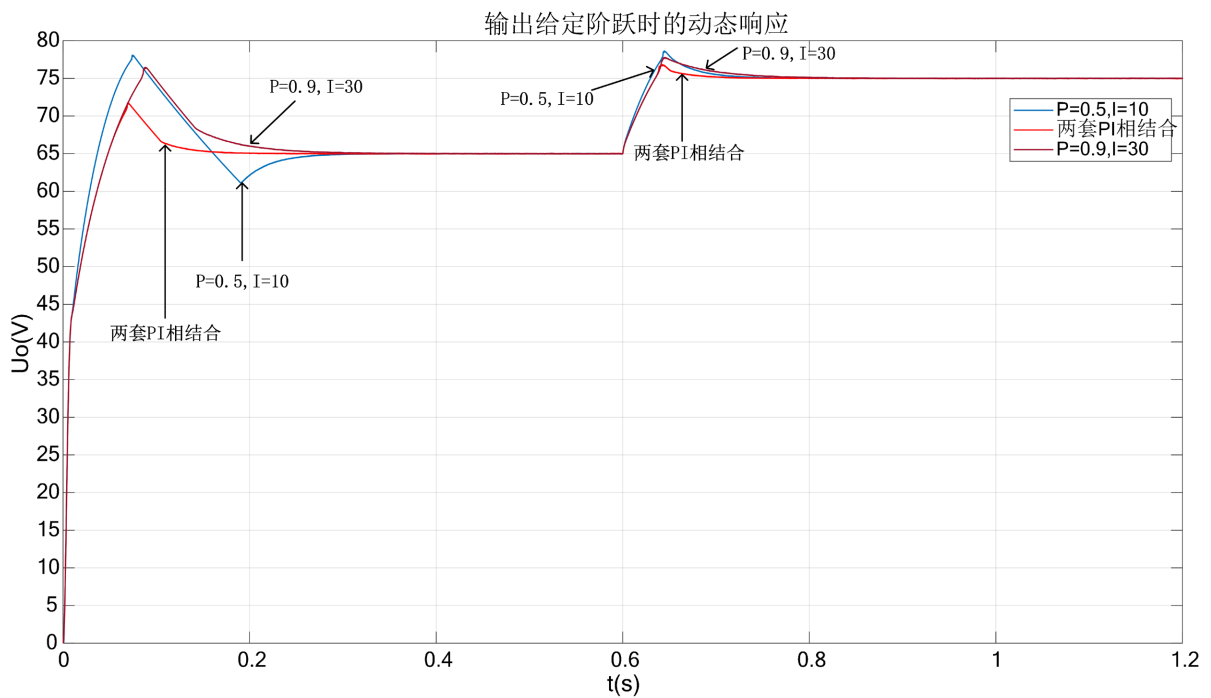


Figure 20. Comparison of adjustment effects of non-fixed PI and fixed PI (output given step)
 图 20. 非固定 PI 和固定 PI 的调节效果比较(输出给定阶跃)

5. 结论

本文研究了一种高度集成的非隔离型三端口变换器，变换器具有开关升压网络特性，该拓扑结构仅使用一个电感，降低了成本及体积。此外，本文通过非固定调节 PI 参数的方法，实现了系统输出端超调量的减小和达到稳态速度的加快，并对系统功率流动完成理论推导和实验分析验证。

参考文献

[1] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.

- [2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [3] 栗峰, 丁杰, 周才期, 等. 新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J/OL]. 电网技术, 2023: 1-16. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0771>
- [4] 杨裕生. 电化学储能研究 22 年回顾[J]. 电化学, 2020, 26(4): 443-463.
- [5] 杨夯, 郭宜果, 李哲. 计及光伏工况的集中式发电场景下储能优化配置[J/OL]. 电源学报, 2023: 1-17. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230607.1553.002.html>
- [6] 王杉杉, 高明, 石健将. 一种应用于航天器分布式供电系统的 ZVS 三端口 DC-DC 变换器[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 384-392.
- [7] Bassa De Los Mozos, A., Chandra, M.G.R. and Bauer, P. (2019) Evaluation of Topologies for a Solar Powered Bidirectional Electric Vehicle Charger. *IET Power Electronics*, **12**, 3675-3687. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5165>
- [8] Bhattacharjee, A.K., Kutkut, N. and Batarseh, I. (2019) Review of Multiport Converters for Solar and Energy Storage Integration. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **34**, 1431-1445. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2830788>
- [9] Swaminathan, N. and Cao, Y. (2020) An Overview of High-Conversion High-Voltage DC-DC Converters for Electrified Aviation Power Distribution System. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **6**, 1740-1754. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3009152>
- [10] 王荣闯. 基于光-储发电系统的三端口 DC-DC 变换器研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [11] Zhu, H.Y., Zhang, D.L., Athab, H.S., *et al.* (2015) PV Isolated Three-Port Converter and Energy-Balancing Control Method for PV-Battery Power Supply Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **62**, 3595-3605.
- [12] Ari, A.M., Li, L.X. and Wasynczuk, O. (2016) Control and Ptimization of N-Port DC-DC Converters. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **24**, 1521-1528. <https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2495236>
- [13] Irfan, M.S., Ahmed, A. and Park, J.H. (2018) Power-Decoupling of a Multiport Isolated Converter for an Electrolytic Capacitorless Multilevel Inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **33**, 6656-6671. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2763168>
- [14] Tomas-Manez, K., Zhang, Z. and Ouyang, Z.W. (2017) Multi-Port Isolated LLC Resonant Converter for Distributed Energy Generation with Energy Storage. 2017 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Cincinnati, 1-5 October 2017, 2219-2226. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8096434>
- [15] 刘硕, 高莹, 辛迪熙, 杨立永. 非隔离储能型三端口开关升压变换器在光伏系统中应用的研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 139-145. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2019-0266>
- [16] 王辉, 陈耀, 曾庆典, 等. 一种多工况高增益多端口 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2155-2166.
- [17] Davalos, H.F., Samanbakhsh, R., Mohammadi, P., *et al.* (2021) A Dual-Input High-Gain Bidirectional DC/DC Converter for Hybrid Energy Storage Systems in DC Grid Applications. *IEEE Access*, **9**, 164006-164016. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3132896>