

12-12-2019

Design of Multi -port Converter for DC Micro-grid System with Wind-Photovoltaic Storage

Liu Hui

Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Tinglong Pan

Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design of Multi -port Converter for DC Micro-grid System with Wind-Photovoltaic Storage

Abstract

Abstract: In order to coordinate energy, load and storage in DC micro-grid system and make efficient utilization of new energy, a multi-port converter for DC micro-grid hybrid energy storage is proposed. *According to the composition rule of multi-port converter, by inserting the Buck-boost converter and bidirectional Buck-boost converter into the bootstrap converter of Luo-converter, the DC converter topology which can be used for complementation of wind-photovoltaic storage is produced. Two-way transmission of energy is realized. The analysis of all kinds of working conditions shows that each port of the converter is able to work independently and cooperatively.* Different work conditions have been simulated in Matlab to validate the feasibility.

Keywords

dc micro-grid, multi-port converter, luo-converter, buck-boost converter, circuit topology

Recommended Citation

Liu Hui, Pan Tinglong. Design of Multi -port Converter for DC Micro-grid System with Wind-Photovoltaic Storage[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1916-1924.

面向风光储直流微网系统的多端口变换器设计

刘慧, 潘庭龙*

(江南大学 电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

摘要: 为解决直流微网系统中分布式能源、负载、储能的协调控制问题, 高效利用新能源, 提出了一种适用于直流微网混合储能的多端口变换器。根据多端口输入变换器的合成法则, 通过将 Buck-Boost 变换器、双向 Buck-Boost 变换器嵌入罗氏变换器的自举电路中, 生成可用于风光储互补的直流变换器拓扑, 实现了能量的双向传递。对电路的各种工作状态进行分析, 说明了变换器各端口可以独立、协同工作。运用 Matlab 软件对变换器的不同工作状态进行仿真分析, 验证了本文提出的多端口变换器的可行性。

关键词: 直流微网; 多端口变换器; 罗氏变换器; Buck-Boost 变换器; 电路拓扑

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 09-1916-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0321

Design of Multi -port Converter for DC Micro-grid System with Wind-Photovoltaic Storage

Liu Hui, Pan Tinglong*

(Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to coordinate energy, load and storage in DC micro-grid system and make efficient utilization of new energy, a multi-port converter for DC micro-grid hybrid energy storage is proposed. According to the composition rule of multi-port converter, by inserting the Buck-boost converter and bidirectional Buck-boost converter into the bootstrap converter of Luo-converter, the DC converter topology which can be used for complementation of wind-photovoltaic storage is produced. Two-way transmission of energy is realized. The analysis of all kinds of working conditions shows that each port of the converter is able to work independently and cooperatively. Different work conditions have been simulated in Matlab to validate the feasibility.

Keywords: dc micro-grid; multi-port converter; Luo-converter; buck-boost converter; circuit topology

引言

化石燃料的大量燃烧, 带来工业经济进步的同时也带来了一系列的环境恶化问题, 新能源因其清洁无污染、可循环再生等优点近几年备受关注, 赢

得了越来越多人的认可^[1-4]。多端口变换器在直流微网中的应用^[5]为新能源的开发利用提供了良好的解决方案, 其中三多端口变换器的研发利用具有重要的现实意义。

近年来关于多端口变换器的研究和应用趋热, 专家学者提出了多种多端口直流变换器的结构和相应的控制方法。文献[6-7]中提出的多端口变换器能量传导的特点是多对一单向传导, 此类多端口变换器称为多输入直流变换器, 变换器的结构很简



收稿日期: 2017-07-04 修回日期: 2017-09-29;
基金项目: 国家自然科学基金(61672266);
作者简介: 刘慧(1992-), 女, 吉林延边, 硕士生, 研究方向为新能源发电及节能技术; 潘庭龙(通讯作者 1976-), 男, 江苏建湖, 博士, 教授, 研究方向为新能源发电控制技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 1916 •

单, 但端口间能量传递方向单一; 文献[8]提出的是一种端口容易扩展、结构简单的非隔离三端口 DC/DC 变换器的电路结构, 文献[9]通过在双输入变换器中构造从主输入源到储能装置端口的功率可控路径, 在双输出变换器中构造从储能装置端口到负载端口的可控支路, 提出了一种能够实现新能源发电系统三级结构之间单级功率变换的三端口 DC/DC 变换器, 但是这两种类型的变换器各个端口之间没有电气隔离, 并且需要同一等级的输入电压; 文献[10]通过 Boost-DIC 生成一种三端口变换器, 此类变换器通过控制开关管的通断使电路工作在不同状态, 对原有拓扑功率流和控制路径进行重新组合, 以此优化拓扑结构。此外, 目前已有学者提出了具有良好连续性和稳定性的适用于波浪能发电系统的三端口变换器, 该变换器的储能端和输入端均采用两级式结构, 储能端的前级变换器采用双向半桥电路对储能元件进行充放电, 输入端前级变换器通过双管升降压型变换器实现升降压变换^[11]。

新能源发电具有间歇性, 且直流微网中各微源的电压等级不一样, 升降压的情况也不同^[12-15], 所以上述多端口变换器并不适用于直流微网系统。本文面向风光储直流微网系统提出的多端口拓扑, 是基于现有的多端口生成方法, 将 PWM 变换器嵌入罗氏自举电路中, 由于它的电压举升功能, 可实现不同电压等级的输入电源在同一个变换器中进行转换利用^[16-17], 此变换器体积较小, 便于控制。本文把罗氏变换器作为基础电路, 基于嵌入型多端口变换器合成规则, 在罗氏变换器的电压、电流缓冲单元或输出端口处嵌入相对应的 PWM 变换器, 生成所需要的多端口直流变换器; 对合成的变换器各个输入端口在单独工作、共同工作时的输入输出特性进行了理论分析; 利用仿真软件平台, 通过建立多端口拓扑的仿真模型, 调试选择合适的拓扑结构各元器件参数, 仿真得到多端口变换器的输出电压波形, 根据仿真结果分析电路在不同输入电压, 不同的期望输出电压, 以及不同工作状态下的响应特

性, 验证理论分析的正确性。

1 多端口变换器拓扑结构设计

罗氏变换器是由罗方林提出的一种 DC/DC 升压变换器, 被广泛应用于高电压输出的工业生产中, 具有纹波小, 输出电压高的特点。罗氏变换器基础电路如图 1(a)所示, 由基础电路逐渐发展生自举、复举、多举电路如图 1 所示^[18]。

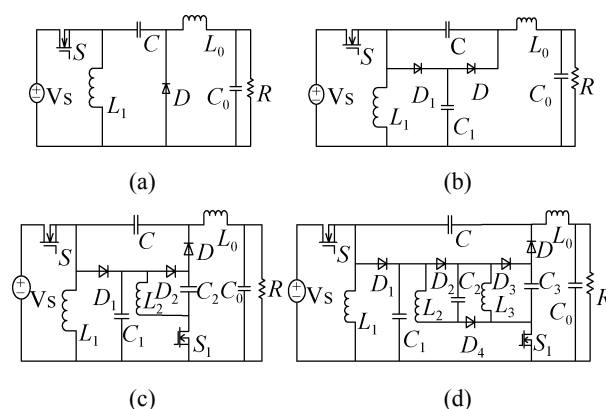


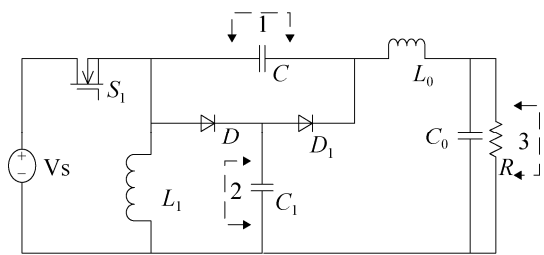
图 1 罗氏变换器基本电路结构

Fig. 1 Basic circuit structure of Luo-converter

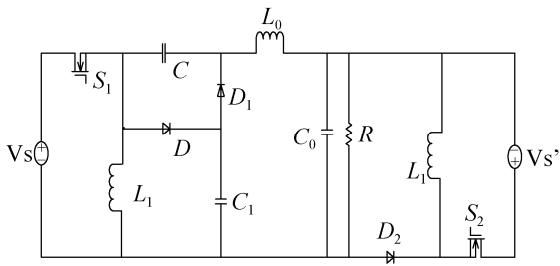
罗氏变换器不仅能克服寄生参数的影响, 而且利用电压举升技术大大提高了变换器的输出电压, 因其输出电压电流脉动近于零, 具有理想的转换效率和功率密度的优点, 在直流变换器的电路结构设计中被广泛应用。因此本文选用罗氏变换器作为变换器的基础电路, 根据脉冲电流源单元合成多端口输入变换器的法则^[16], 将 Buck-Boost 变换器、双向 Buck-Boost 变换器^[19-20]按合成法则嵌入其中, 脉冲电流源(PCSC)嵌入到罗氏电路的自举电路中有 3 个嵌入点, 如图 2(a)所示, 其中只有从罗氏变换器嵌入点 3 嵌入 PCSC 符合合成规则。

在 3 点嵌入 Buck-Boost 型脉冲电流源单元, 如图 2(b)所示, 拓扑结构中 Buck-Boost 变换器和输出端口组成的回路中不包含罗氏电路的电感、电容元器件, 所以 Buck-Boost 变换器和输出端口构成的回路是独立回路。并且当罗氏变换器单独工作时, 因二极管 D_2 承受反向电压截止, 相当于 Buck-Boost 变换器处于断开状态, 所以 Buck-Boost

变换器不影响罗氏电路的正常运行;当 Buck-Boost 变换器单独工作时,二极管 D_1 处于截止状态,没有改变 Buck-Boost 变换器的电路特性,所以 Buck-Boost 变换器可以单独给负载供电;两个变换器都工作时,相当于一个电压源并联一个电流源给电路负载提供电能,经理论分析,两个端口是可以同时工作的。综上所述,所合成的三端口变换器各端口之间相互不影响,既可以单独工作,又可以协同工作。



(a) 自举电路的 3 个 PCSC 嵌入点



(b) 在嵌入点 3 嵌入 Buck-Boost 型脉冲电流源单元

图 2 自举电路嵌入 PCSC 拓扑结构

Fig. 2 Bootstrap circuit embedded in PCSC topology

光伏和风电天然互补,日间光强风小,夜间光弱风大,因此将光能和风能有效结合起来利用便可以使输电系统的可靠性得到提高。本文提出的多端口变换器拓扑结构如图 3 所示,Buck-Boost 型脉冲电流源单元嵌入到罗氏电路自举电路中,合成多端口变换器,其中罗氏电路是用来提升电压的,输入端电源 V_{S1} 可接低压电源光伏输出; Buck-Boost 变换器是升降压型变换器,本文利用其降压特性将此端口用于风力发电,输入电源 V_{S2} 接风机输出;双向 Buck-Boost 变换器能实现能量的双向传递,所以输入电源 V_{S3} 接入蓄电池,在电能富余时对蓄电池充电,在光伏和风电发电不稳定时,蓄电池处

于放电状态,为直流母线供电,实现了混合储能发电,解决了新能源发电供能随机性大的问题^[21],该变换器能够使能源合理高效的利用,可实现电压宽范围输入。

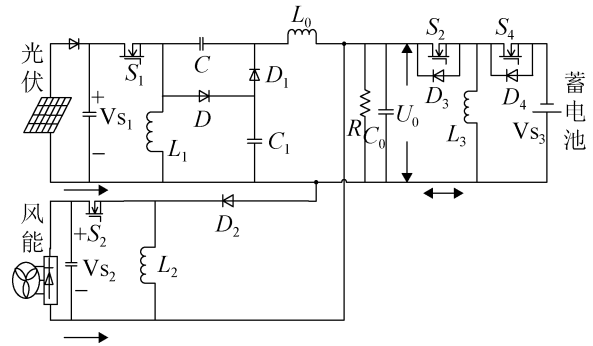


图 3 直流微网多端口变换器拓扑结构

Fig. 3 Topology of multi-port converter of DC micro-grid

2 多端口变换器工作模式分析

多端口变换器工作模式分为独立工作模式和协同工作模式,通过控制开关管 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 即可以切换工作模式。多端口变换器工作时,可以依据实际情况确定蓄电池的工作状态,蓄电池处于放电状态时,各端口都可以给直流母线供电,输出电压可以根据需要进行相应的调节。当风电输出和光伏输出不稳定时,由蓄电池向直流母线供给稳定的电能。

2.1 独立工作模式

2.1.1 V_{S1} 电源单独工作

当只有 V_{S1} 电源输入端工作时,开关管 S_1 正常工作,开关管 S_2 、 S_3 、 S_4 不工作,二极管 D_2 两端承受反向电压,处于反向截止,电路等效为罗氏电路的自举电路,等效电路为如图 4(a)所示。当开关管 S_1 导通, D_1 承受反向电压截止, V_{S1} 给 C 、 L_1 、 L_0 供能,此状态下电路等效为图 4(b)所示电路,图示电流 i_{L1} 、 i_{C1} 、 i_{L0} 都在增大;当开关管 S_1 关断, D 承受反向电压截止,续流二极管 D_1 处于导通状态, L_1 通过 C_1 和 D_1 给 C 充电,同时向 C_0 和负载提供能量,电路电流开始逐渐下降,开关管 S_1 关

断时电路等效为下图 4(c)所示电路。

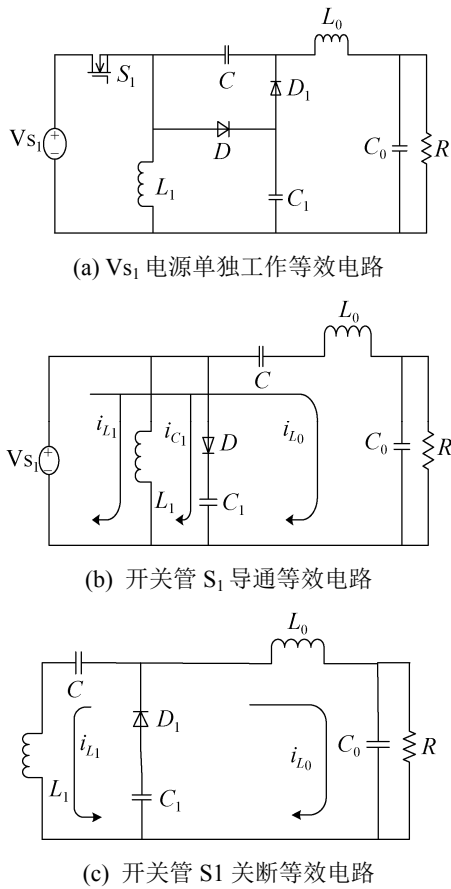


图 4 V_{S1} 电源单独工作等效电路
Fig. 4 Equivalent circuit of V_{S1} alone

2.1.2 V_{S2} 电源单独工作

当只有升降压型变换器输入端工作时, 开关管 S_2 正常工作, 开关管 S_1 、 S_3 、 S_4 不工作, 电路等效为图 5(a)所示电路。D 和 D_1 承受反向电压而截止, 此时电路等效为 Buck-Boost 变换器, 如图 5(b)所示。 S_2 导通时, V_{S2} 向 L_2 供电, 使其储存能量, D_2 承受反向电压而截止, 同时 C_0 维持输出电压的基本恒定, 并给蓄电池充电, 图 5(c)为其等效的电路; 当开关管 S_2 关断时, L_2 向蓄电池供电, 负载极性和 V_{S2} 相反, D_2 导通, 图 5(d)为该状态下的等效电路。

2.1.3 V_{S3} 电源单独工作

此时 S_1 、 S_2 都不工作, 电路等效为双向 Buck-Boost 变换器, 等效电路如图 6 所示。 S_3 正常

工作, S_4 不工作时, 蓄电池工作在充电状态, 所以 V_{S3} 电源单独向负载供电时, 开关管状态应为 S_3 不工作, S_4 正常工作, 工作过程及原理和 V_{S2} 电源单独工作时相同, 当新能源输入源端都无法向直流母线供电时, 变换器工作在该模式下。

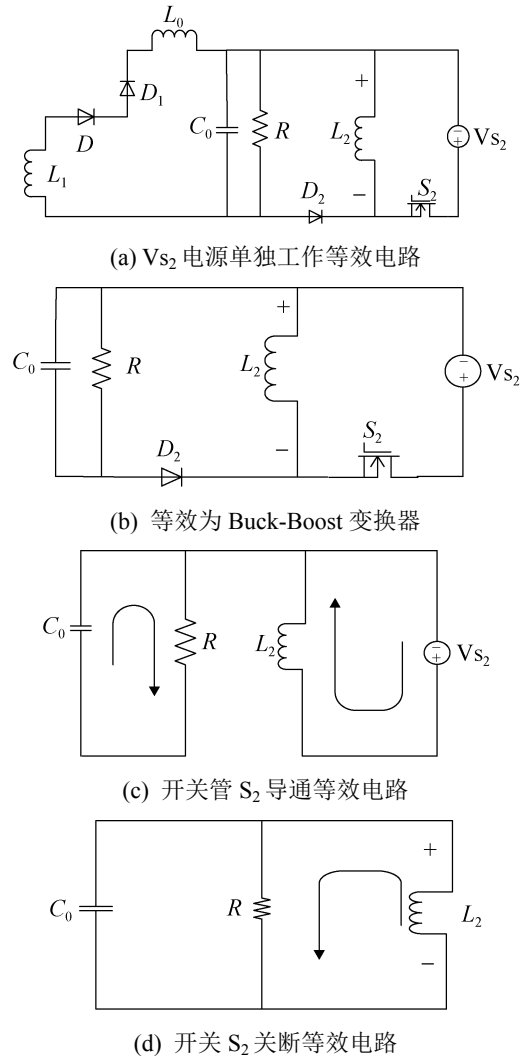


图 5 V_{S2} 电源单独工作等效电路
Fig. 5 Equivalent circuit of V_{S2} alone

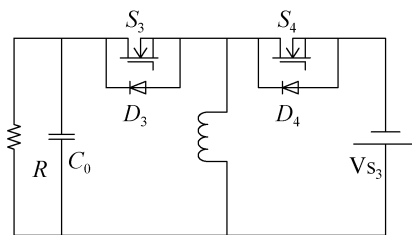


图 6 等效为双向 Buck-Boost 变换器
Fig. 6 Equivalent to bidirectional Buck-Boost converter

2.2 协同工作模式

各个输入端同时工作时,为充分利用风能和光能,将 V_{S1} 和 V_{S2} 做为主电源, V_{S3} 做为辅电源。

(1) 当风、光发电充足,对直流母线供电时, V_{S1} 和 V_{S2} 协同工作,为蓄电池和直流母线供电,图 3 所示的电路中 S_3 正常工作, S_4 不工作。蓄电池达到充电的上限阈值,停止向蓄电池充电,此时相当于一个电压源和电流源并联协同工作,共同为直流母线提供一个稳定的功率,根据 S_1, S_2 两个开关管导通关断的状态不同,电路可工作在以下四种状态下:

状态 I: S_1 导通, S_2 关断; 开关管 S_1 导通时,二极管 D_1 因承受反向电压而截止, V_{S1} 电源通过给 L_1 和 C_1 供能来存储能量,并且通过电容 C 给蓄电池充电; S_2 关断,则二极管 D_2 导通,此时 Buck-Boost 端口由电感 L_2 给蓄电池充电储存能量,同时电感 L_2 给电容 C 充电储能,此工作状态下电路等效为图 7(a)所示电路。

状态 II: S_1 关断, S_2 导通; 开关管 S_1 关断时, V_{S1} 停止对电路供能, L_1 通过 D_1 和 C_1 给 C 充电, D 处于截止状态。 S_2 导通,则 D_2 承受反向电压而处于反向截止状态, V_{S2} 给 L_2 充电, C_0 给输出端提供基本稳定的输出电压,此工作状态下电路等效为图 7(b)所示结构。

状态 III: S_1 导通, S_2 导通; S_1 和 S_2 同时导通, D_1 和 D_2 承受反向电压而截止, D 为导通, V_{S1} 电源给 L_1 和 C_1 供能来存储能量, V_{S2} 给 L_2 充电, V_{S1} 和 C_0 给输出端提供基本稳定的输出电压,此工作状态下等效电路如图 7(c)所示。

状态 IV: S_1 关断, S_2 关断; S_1 和 S_2 同时处于断开的状态, V_{S1} 不给电路供电,此时由 L_1 通过 D_1 和 C_1 给 C 充电, D 截止。电感 L_0 通过二极管续流放电, C 和负载由电感 L_2 给供电,此工作状态下电路等效为如图 7(d)所示的电路。

(2) 当风光供电不足时,蓄电池开始向直流母线供电,图 3 所示电路中 S_3 不工作, S_4 正常工作,

蓄电池利用储存的能量给直流母线以及其他负载供电。

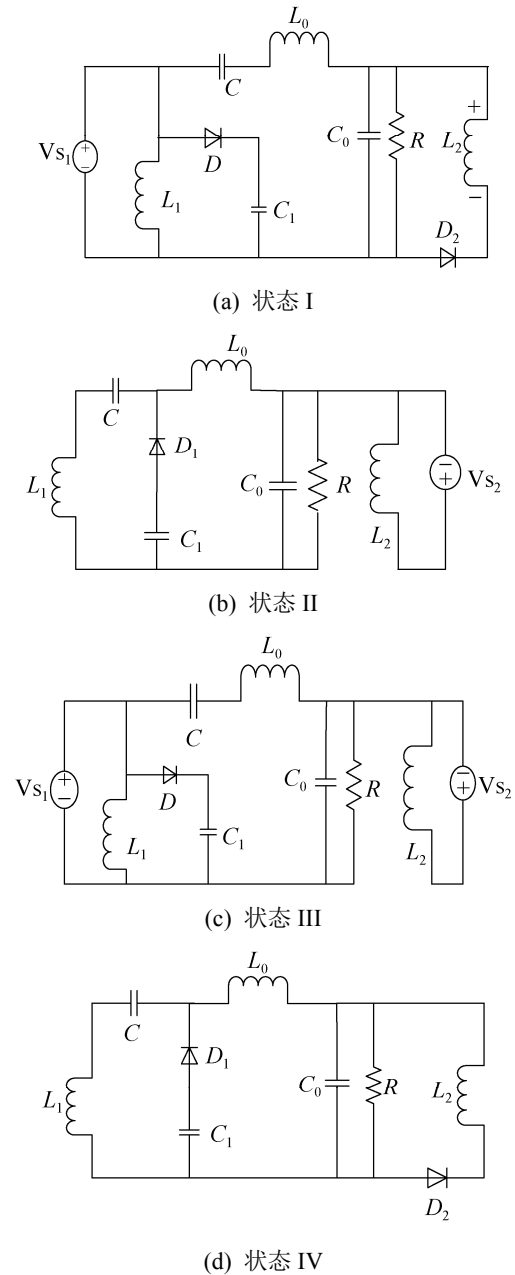


图 7 各端口同时工作时电路结构图
Fig. 7 Circuit structure of each port working at the same time

经分析,本文设计的直流微网混合储能三端口各端口之间相互不影响,可单独工作,可同时工作,共同为直流母线提供了稳定的电压。

3 仿真及结果分析

在 Matlab 软件环境下搭建系统仿真模型进行仿真分析, 系统仿真模型如图 8 所示, 仿真过程中

通过控制 S_3 、 S_4 来改变双向 Buck-Boost 变换器的工作状态, 模拟蓄电池的充放电过程, 其中主电路的各参数如表 1 所示。

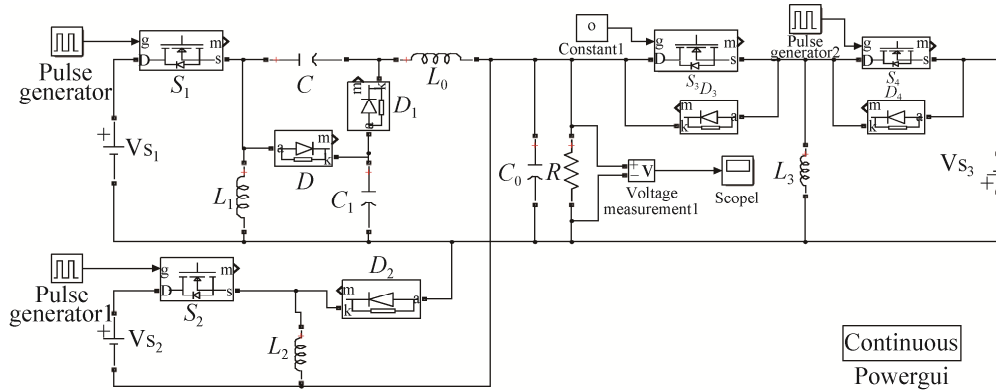


图 8 Matlab 软件环境下系统仿真模型

Fig. 8 System simulation model in Matlab software environment

表 1 元器件参数

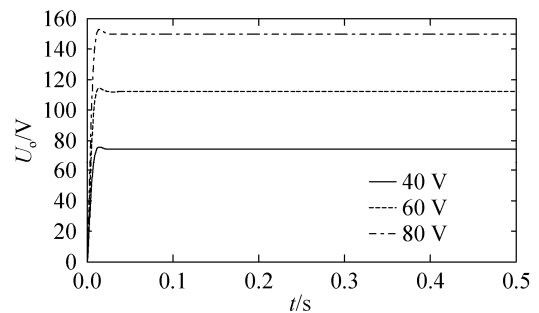
Tab. 1 Component parameters

元器件	参数
f	50 kHz
C	47 μ F
C ₀	200 μ F
C ₁	47 μ F
L ₀	100 mH
L ₁	1 mH
L ₂	20 mH
L ₃	10 mH
R	20 Ω

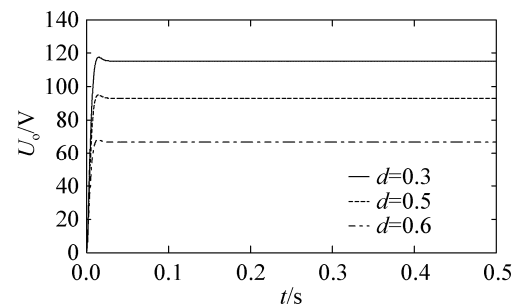
当只有 V_{S1} 工作, 取占空比 $d=0.5$, 改变输入电压, 观察多端口变换器电路拓扑结构的输出特性, 得到仿真波形如图 9(a); 取 $V_{S1}=50$ V, 期望输出电压分别为 71 V, 100 V, 125 V, 理论上对应的占空比为 0.3, 0.5, 0.6, 调节占空比可以得到期望的输出电压值, 输出波形如图 9(b)所示的, 表 2 给出了输出电压的期望值与实际输出值的误差分析, 分析仿真波形和表 2 数据可知实际输出电压略低于期望输出电压值, 但基本满足:

$$V_0 = \frac{1}{d} V_{S1}$$

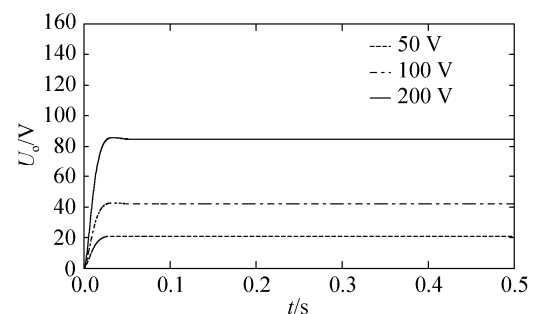
验证了只有 V_{S1} 工作时, 变换器等效为罗氏变换器的自举电路。由仿真结果可以证实输入端 V_{S1} 可以单独工作, 并且响应速度较快。



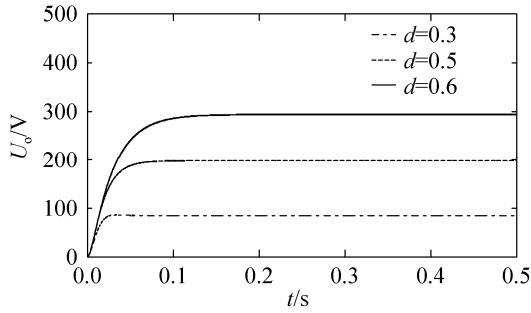
(a) V_{S1} 单独工作, $d=0.5$, 不同输入时的电压输出波形图



(b) V_{S1} 单独工作, $V_{S1}=100$ V, 不同占空比输出波形图



(c) V_{S2} 单独工作, $d=0.3$, 不同输入时的电压输出波形图



(d) VS₂ 单独工作, VS₂=200 V, 不同占空比输出波形图

图 9 各端口单独工作仿真结果

Fig. 9 Simulation results of each port working independently

表 2 VS₁ 单独工作时输出电压误差分析

Tab. 2 Analysis of output voltage errors of VS₁ alone

期望输出电压值	理论 d 值	实际输出电压值	误差/%
71	0.3	66.75	5.99
100	0.5	93.09	6.91
125	0.6	115.30	7.76

当只有 VS₂ 工作, 取占空比 d=0.3, 改变输入电压, 观察三端口变换器电路拓扑结构的输出特性, 得到仿真波形如图 9(c); 取 VS₂=200 V, 期望输出电压分别为 86 V, 200 V, 300 V, 理论上对应的占空比为 0.3, 0.5, 0.6, 调节占空比得到期望的输出电压值, 实际输出电压波形如图 9(d)所示, 表 3 给出了输出电压的期望值与实际输出值的误差分析, 分析图表可知输出电压基本满足:

$$V_0 = \frac{d}{1-d} V_{S2}$$

验证了只有 VS₂ 工作时, 变换器等效为 Buck-Boost 变换器。由仿真结果可以得到输入端 VS₂ 单独工作时, 随着占空比的增大, 响应速度变慢, 验证了此端口也可以单独工作, 双向 Buck-Boost 变换器工作原理与 Buck-Boost 变换器相似, 所以实际应用时, 风机端和充电状态下的蓄电池端占空比应小于 0.5, 蓄电池工作早放电状态时, 应调节占空比大于 0.5。

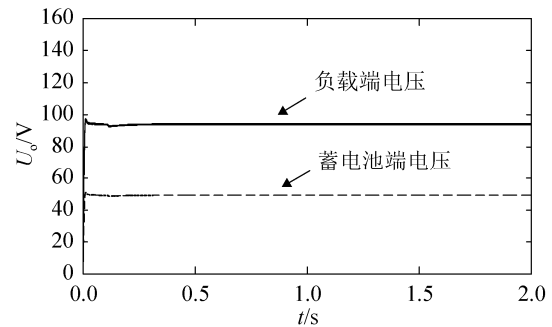
当各端口协同工作时, 其中 VS₁=50 V, VS₂=200 V, VS₃=50 V, 取期望输出电压为 100 V。控制开关管, 使 S₃ 正常工作, S₄ 不工作, 此时 VS₁、VS₂ 共同为负载供电, 并向蓄电池充电, 仿

真结果如图 10(a)所示, 由仿真波形可以得到, 负载端和蓄电池端最终可以得到稳定的输出电压, 输出端电压稳定在 94.3 V, 误差为 5.70%; 控制开关管, 使 S₄ 正常工作, S₃ 不工作, 此时所有输入源共同为负载供电, 仿真结果如图 10(b)所示, 输出端电压稳定在 97.9 V, 误差为 2.10%; 结果表明本文提出的多端口变换器各端口可以同时工作, 通过母线电容来实现功率解耦, 防止各回路相互影响。

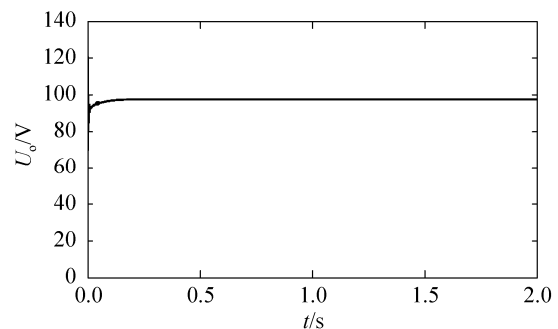
表 3 VS₂ 单独工作时输出电压误差分析

Tab. 3 Analysis of output voltage errors of VS₂ alone

期望输出电压值	理论 d 值	实际输出电压值	误差/%
86	0.3	84.69	1.52
200	0.5	197.40	1.30
300	0.6	294.00	2.00



(a) 各输入端协同工作, 蓄电池充电



(b) 各输入端协同工作, 蓄电池放电

图 10 各端口协同工作仿真结果

Fig. 10 Simulation results of each port working collaboratively

综上所述, 仿真结果验证了本文提出的多端口变换器既能单独工作, 也可以协同工作, 各端口输入电

压和占空比的改变均能影响输出电压, 实际应用中可以通过调空比来得到期望的输出电压。

4 结论

本文将 Buck-Boost 变换器和双向 Buck-Boost 变换器嵌入基变换器罗氏电路中, 生成的变换器可用于直流微网混合发电。此多端口变换器可以在一个变换器中转换不同电压等级的输入源, 是一种集结构简单、控制简单、易于扩充端口数量等优点于一身的非隔离型多端口变换器, 大大节约了成本, 解决了新能源发电具有间歇性的问题, 利用一些新能源之间具有的天然互补性, 将多端口变换器用于混合发电, 得到稳定的输出功率, 为新能源的发展提供路了新思路。搭建多端口变换器的拓扑模型进行仿真, 并对输出波形进行对比分析, 证明了本文的理论研究是正确的。目前, 还需要进一步的深入研究: 为使其应用在不同类型的混合动力系统中, 应对各个端口设计不同类型能量管理策略, 优化控制算法, 进一步提高直流微网混合储能多端口变换器的性能。

参考文献:

- [1] 高泽, 杨建华, 冯语晴, 等. 新能源发电现状概述与分析[J]. 中外能源, 2014, 19(10): 31-36.
Gao Ze, Yang Jianhua, Feng Yuqing, et al. New Energy-based Power Generation Today and Analysis[J]. Sino-global Energy, 2014, 19(10): 31-36.
- [2] 张伟波, 潘宇超, 崔志强, 等. 我国新能源发电发展思路探析[J]. 中国能源, 2012, 34(4): 26-28.
Zhang Weibo, Pan Yuchao, Cui Zhiqiang, et al. Analysis of the development of new energy power generation in China[J]. Energy of China, 2012, 34(4): 26-28.
- [3] 娄素华, 卢斯煜, 吴耀武, 等. 低碳电力系统规划与运行优化研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1483-1490.
Lou Suhua, Lu Siyu, Wu Yaowu, et al. An Overview on Low-Carbon Power System Planning and Operation Optimization[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1483-1490
- [4] Tan N M L, Abe T, Akagi H. Design and Performance of a Bidirectional Isolated DC-DC Converter for a Battery Energy Storage System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2012, 27(3): 1237-1248.
- [5] Wang Z, Li H. An Integrated Three-Port Bidirectional DC-DC Converter for PV Application on a DC Distribution System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2013, 28(10): 4612-4624.
- [6] Li Y, Ruan X, Yang D, et al. Synthesis of Multiple-Input DC/DC Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2010, 25(9): 2372-2385.
- [7] 李艳. 多输入直流变换器电路拓扑及控制策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
Li Yan. Research on Circuit Topology and Control Strategy of Multi Input DC Converter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [8] 阮洁. 多端口直流变换器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
Yuan Jie. Research on Multi-port DC Converter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [9] Wu H, Sun K, Ding S, et al. Topology Derivation of Nonisolated Three-Port DC-DC Converters From DIC and DOC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2013, 28(7): 3297-3307.
- [10] Liu Y C, Chen Y M. A Systematic Approach to Synthesizing Multi-Input DC-DC Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2009, 24(1):116-127.
- [11] 陈美伊, 王维俊, 温亚东, 等. 一种适用于波浪能发电系统的三端口 DC/DC 变换器[J]. 电源学报, 2016, 14(2): 91-96.
Chen Meiyi, Wang Weijun, Wen Yadong, et al. A Novel Three-port DC/DC Converter for Wave Power Generation System[J]. Journal of power supply, 2016, 14(2): 91-96.
- [12] Zeng J, Qiao W, Qu L, et al. An Isolated Multiport DC-DC Converter for Simultaneous Power Management of Multiple Different Renewable Energy Sources[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics (S2168-6777), 2014, 2(1): 70-78.
- [13] Chen W, Huang A Q, Li C, et al. Analysis and Comparison of Medium Voltage High Power DC/DC Converters for Offshore Wind Energy Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2013, 28(4): 2014-2023.
- [14] Falcones S, Ayyanar R, Mao X. A DC-DC Multiport-Converter-Based Solid-State Transformer Integrating Distributed Generation and Storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2013,

- 28(5): 2192-2203.
- [15] Zhu H, Zhang D, Zhang B, et al. A Nonisolated Three-Port DC-DC Converter and Three-Domain Control Method for PV-Battery Power Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2015, 62(8): 4937-4947.
- [16] 杨才俊, 潘庭龙, 黄晓徐. 混合发电用多端口 DC-DC 变换器[J]. 自动化表, 2013, 34(9): 48-51.
Yang Caijun, Pan Tinglong, Huang Xiaoxu. Multi-port Input DC-DC Converter for Hybrid Power Generation [J]. Process Automation Instrumentation, 2013, 34(9): 48-51.
- [17] 潘庭龙, 杨才俊, 纪志成. 基于单周期控制的三端口变换器研究与仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(12): 3064-3068.
Pan Tinglong, Yang Caijun, Ji Zhicheng. Research and Simulation Analysis of One-cycle Controlled Tree-port DC/DC Converter[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(12): 3064-3068.
- [18] 罗方林. 正输出罗氏变换器——先进的电压举升技术[J]. 电气传动, 1999(2): 47-54.
Luo Fanglin. Positive output Luo-converter—advanced voltage lifting technology[J]. Electric Drive, 1999(2): 47-54.
- [19] Liu Y C, Chen Y M. A Systematic Approach to Synthesizing Multi-Input DC/DC Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2009, 24(1): 127.
- [20] Venkit S M, Athira P C. Solar powered ZCS bidirectional buck-boost converter used in battery energy storage systems[C]. International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies. ICCPCT: IEEE, 2016: 1-5.
- [21] Thumma R, Bhajana V V S K, Drabek P. A novel ZCS bidirectional buck-boost DC-DC converter for energy storage applications[C]. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. SPEEDAM: IEEE, 2016: 872-877.