

# 低压直流配电系统综合实验设计与仿真分析

张文豪<sup>1</sup>, 张英豪<sup>2</sup>, 穆小强<sup>1</sup>, 肖 雄<sup>1</sup>, 朱琴跃<sup>1</sup>

(1. 同济大学 电气工程系, 上海 200092; 2. 西门子(中国)有限公司, 上海 201108)

**摘 要:** 直流配电系统由于技术和经济上的优势受到了广泛关注。为了使学生对专业核心课程有更全面的掌握, 对低压直流配电系统综合设计实验进行了研究。通过对直流配电系统的运行机理进行分析, 对其主要结构和功能模块进行了设计, 基于 MATLAB/Simulink 仿真软件建立了各关键部件及系统的仿真模型, 利用仿真形象直观地帮助学生理解各类电力电子变流器, 并对不同运行工况下的电力系统运行特性进行分析, 帮助学生更好地理解、巩固和拓展相关课程关键知识点, 为激发他们的学习兴趣和创新思维打下良好的基础。

**关键词:** 直流配电系统; AC/DC 换流器; DC/DC 换流器; 电能质量

中图分类号: TM46; TN713+.8 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1672-4305.2021.06.007



## Comprehensive experiment design and simulation analysis of low voltage DC distribution system

ZHANG Wenhao<sup>1</sup>, ZHANG Yinghao<sup>2</sup>, MU Xiaoqiang<sup>1</sup>, XIAO Xiong<sup>1</sup>, ZHU Qinyue<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Siemens (China) Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

**Abstract:** DC distribution system has been widely concerned because of its technical and economic advantages. A design project of low-voltage DC distribution system was introduced to enable students to have a more comprehensive understanding of power electronic technology, power system analysis and other related knowledge, based on the analysis of operating principle of the DC distribution system, the system configuration and main modules are designed. Simulation models for all modules and the whole system are built based on the MATLAB/Simulink software. The simulation procedure and results are used to help students understand various types of power convertors and the operating characteristics of the power system under different operating conditions. The project would help students better understand, consolidate and expand the key knowledge of relevant courses, and lay a good foundation for stimulating their interest in learning and innovative thinking.

**Key words:** DC distribution system; AC/DC converter; DC/DC converter; power quality

收稿日期: 2020-05-13 修改日期: 2020-07-28

**作者简介:** 张文豪, 博士, 讲师, 电气工程系教研室主任, 主要研究方向为电力系统保护与控制, 微能源网运行与优化调度等。E-mail: xiwen@tongji.edu.cn

**基金项目:** 上海市一流研究生教育计划项目(项目编号: ZD19040102); 同济大学研究生教学改革项目(项目编号: 0800106050); 同济大学电子与信息工程学院教改项目(项目编号: 0800104500)。

“自动控制原理”、“系统建模与仿真”、“电力电子技术”、“电力系统分析”等均为电气工程及其自动化专业学生的必修课程, 也是教育部工程教育认证对本专业课程体系设置相关的补充标准当中的工程基础类和专业基础类课程<sup>[1]</sup>。在学生掌握相关课程基本知识的基础上, 如何能够注重知识点的

相互联系,综合构思并设计与工程实践相关的综合实验,引导学生进行理论分析并能够借助现代仿真工具加以建模分析,对提升学生解决本专业领域复杂工程问题的能力培养将有较大的帮助<sup>[2]</sup>。

通过对多门课程的知识点进行分析,选定了电力系统领域研究热点之一的“低压直流配电系统”作为综合设计实验的对象,要求学生设计一个简单的包含交流电源、光伏发电、电池储能等模块的辐射性直流配电网<sup>[3]</sup>。学生需要对电力电子技术中的换流器设计、自动控制原理中的 PID 控制、电力系统分析中的运行特性分析、信号与系统中的信号处理以及仿真工具的使用等相关知识综合运用,用以解决系统结构设计、参数配置和性能分析,实现专业知识与能力的综合提升。

## 1 设计要求

低压直流配电系统主体架构如图 1 所示,主要由交流电源、电压源型 AC/DC 换流器模块、光伏 PV 模块、单向 DC/DC 换流器和双向 DC/DC 换流器模块以及负荷模块组成<sup>[4]</sup>。

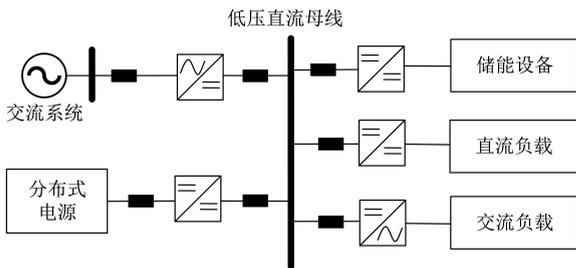


图 1 直流配电网的拓扑结构

实验要求实现的功能有:利用 AC/DC 换流器实

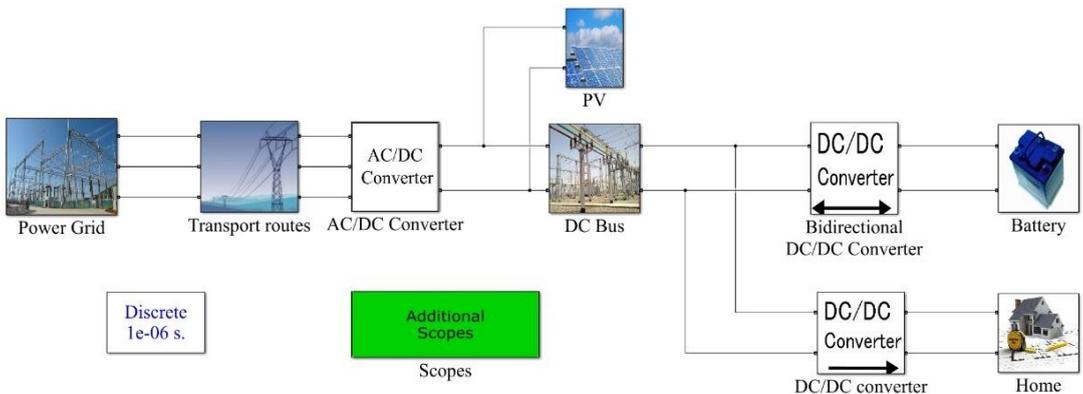


图 2 直流配电网模型图

整流后连接至公共直流母线(DC Bus),母线电压为  $DC \pm 600V$ ;光伏发电模块通过 DC/DC 换流器与直流母线连接;蓄电池通过经过双向 DC/DC 换流器与

现交流电源与直流母线的连接;利用 DC/DC 换流器实现光伏发电系统与直流母线的连接;利用单向 DC/DC 换流器实现直流母线与直流负荷的连接;利用双向 DC/DC 换流器实现蓄电池与直流母线间的充放电。实验过程中 4 名学生一组,完成原理分析、结构设计、参数配置、性能测试等工作。要求根据文献和国标相关规定,针对所设计的低压直流配电系统,合理选择电压等级<sup>[5-6]</sup>。要求所设计系统的直流电压偏差以及直流调制谐波满足国标要求,并对不同运行工况下的运行特性进行分析<sup>[7-8]</sup>。本实验建议的参数配置见表 1。

## 2 系统建模

学生可以根据实验设计要求,从分立模块开始进行建模,最后集成为图 2 所示低压直流配电系统仿真模型<sup>[9]</sup>。交流电压源(Power Grid)为 380V/30MVA,系统稳定后,经过电压源型换流器

表 1 系统参数

名称	参数
交流电压源(Vs)	380V(L-L), 50Hz
直流母线电压	600V
直流负荷电压	220V
蓄电池电压	220V
直流电压偏差	-20%~5%
直流调制谐波	1.5%

直流母线连接;经直流降压后,直流负荷的电压为 220V。本系统中有三组纯电阻直流负荷,初始值均为 20kW。为了保证仿真得准确性,仿真步长  $5\mu s$ ,

仿真时长为 1.0s。对系统主要模块结构及功能说明如下。

图 3 是电压源型换流器的仿真模型,通过该模块将交流电网(380V, 50Hz)和直流母线(600V)互联。其中,DC Regulator 为 PWM 控制模块。

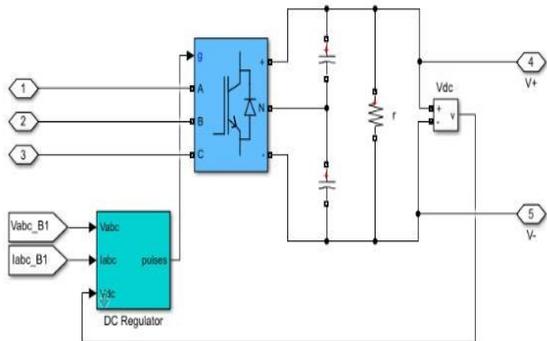


图 3 电压源型 AC/DC 换流器模块仿真模型

图 4 所示是一个典型的单向直流变直流 BUCK 电路结构,采用 PID 闭环调节占空比,使其电压稳定在 220V。

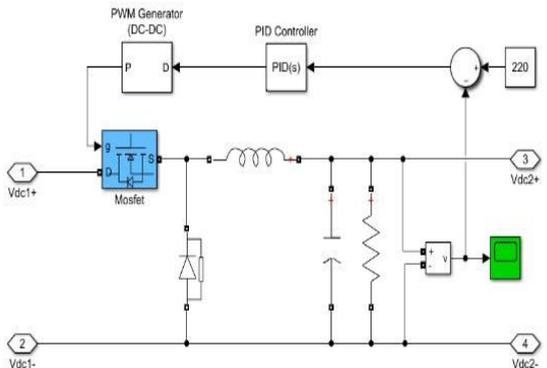


图 4 含 PID 控制的单向 DC/DC 换流器仿真模型

含 PID 控制的双向 DC/DC 换流器有多种结构,本实验中采用了图 5 所示的基于电流闭环 PID 控制的双向 BUCK-BOOST 结构<sup>[10]</sup>。

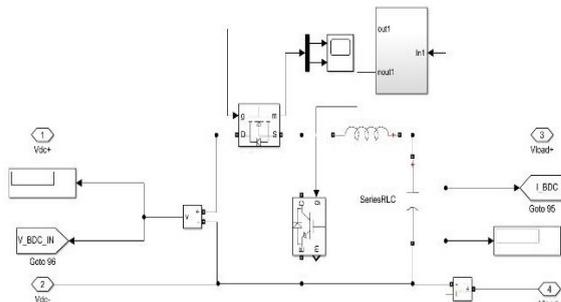


图 5 含 PID 控制的双向 DC/DC 换流器仿真模型

光伏发电模块(PV Array)如图 6 所示,采用了最大功率跟踪控制,输入包括温度 Temp 和光照

强度  $I_r$ ,二者共同决定等效电路中的光生电流  $I_{ph}$ 。

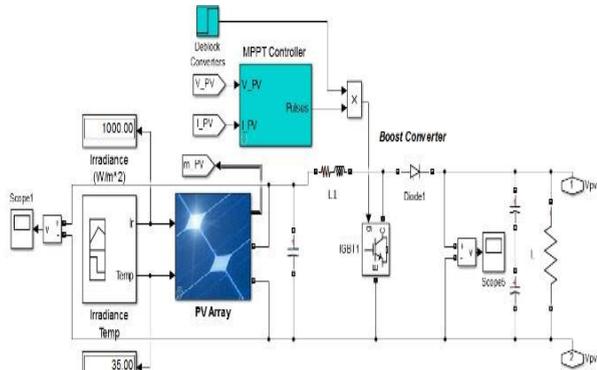


图 6 光伏发电模块仿真模型

### 3 仿真分析

直流配电系统典型的电能质量现象主要有直流电压暂降与暂升、电压偏差、电压波动、直流调制谐波等<sup>[10]</sup>。值得注意的是,直流母线的电压偏差并不直接影响负荷的供电质量,允许的波动较大,本实验中设定为±20%,直流负荷侧(220V)电压设定为±5%。学生可根据设计要求从多个方面检验所设计直流配电系统的性能。本文选择了 4 种运行工况进行说明。

#### 3.1 正常情况,光伏发电模块恒定

正常情况下,选取光伏发电模块的输入变量温度保持 35℃,光照辐射强度为 1000W/m<sup>2</sup> 不变,负荷也保持恒定,公共直流母线与负荷电压的波形图如图 7 所示。直流公共母线电压预设为 600V,仿真开始时系统存在振荡,经过 0.3s 左右,电压稳定在 600V 左右。由于采用了 PID 控制策略,直流母线电压波动时直流负荷电压也基本恒定在 220V。

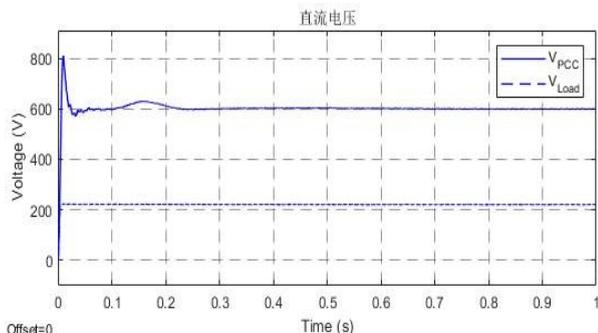
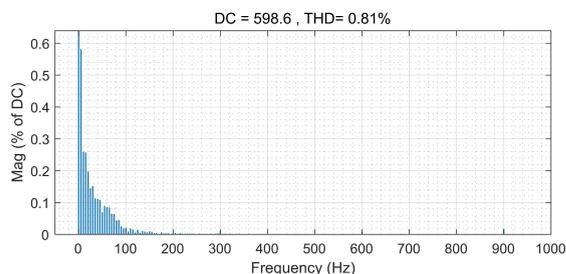
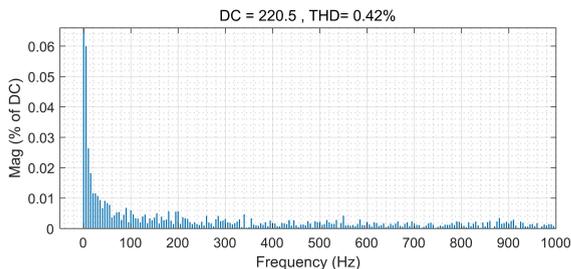


图 7 直流母线和负荷电压波形

对稳定后的直流母线电压和负荷电压进行谐波分析,可以判别所设计的系统的直流电压偏差及调制谐波含量是否符合表 1 的设计要求。图 8 中取 0.5~0.6s 波形进行分析,二者均满足设计要求。



(a) 直流母线电压



(b) 直流负荷侧电压

图 8 直流母线和负荷电压的电压值及调制谐波含量

### 3.2 光伏发电模块波动

保持负荷不变,光伏发电模块中温度和光照辐射强度的变化如图 9 所示。

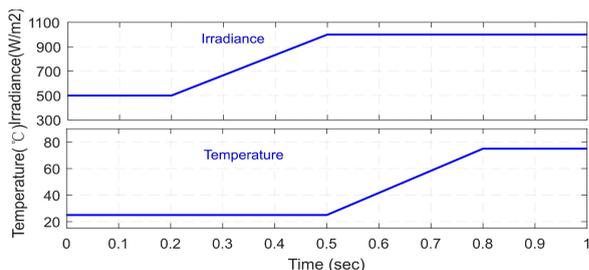


图 9 光伏电池温度和光照变化曲线

从 0 到 0.2s,光照辐射强度  $500\text{W}/\text{m}^2$ ,温度为  $25^\circ\text{C}$ ;0.2s 到 0.5s,温度保持不变,光照辐射强度逐渐上升为  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ;0.5s 到 0.8s 光照辐射强度保持不变,温度逐渐上升到  $75^\circ\text{C}$ 。光伏发电模块的输入虽然发生变化,经过电压源换流器闭环控制后,对直流公共母线电压造成的影响很小,电压值紧紧围绕在  $600\text{V}$  左右,负荷侧电压由于 PID 控制,基本保持恒定,如图 10 所示。对公共直流母线电压进行电压稳定性和谐波分析,取 0.5~0.6s 波形进行分析,直流母线平均电压为  $601.8\text{V}$ ,THD 为 0.24%,满足设计参数要求。

### 3.3 负荷波动

光伏发电模块中保持光照辐射强度  $500\text{W}/\text{m}^2$ ,温度为  $25^\circ\text{C}$ ,在 0.6s 时负荷 1 突增  $20\text{kW}$ 。从图 11 可以看到,负荷突变前后直流母线电压发生了一定的

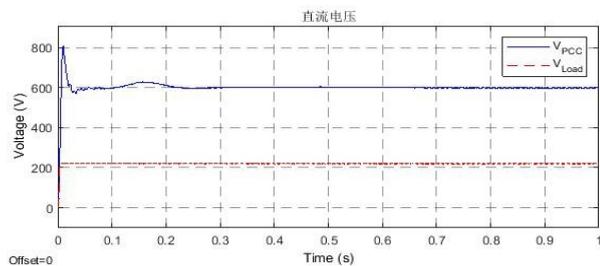


图 10 公共直流母线和负荷侧电压

偏移,负荷侧电压瞬时波动后基本保持恒定。取负荷波动前后 0.1s 的信息进一步量化分析,直流母线电压从  $603.0\text{V}$  下降为  $599.9\text{V}$ ,THD 均为 0.17%。负荷侧电压波动前稳态值为  $220.4\text{V}$ ,THD 为 0.41%,负荷突变时电压发生瞬时波动(最大值  $226.9$ ,最小值  $210.5$ ),之后迅速恢复到稳定值  $220.1\text{V}$ ,THD = 0.26%。可以看到各类指标仍满足设计要求。

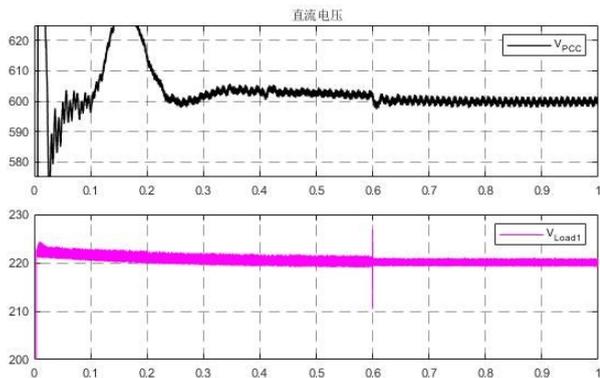


图 11 负荷突增时公共直流母线和负荷侧电压

### 3.4 故障分析

0.6s 时在直流负荷 1 末端发生接地故障。图 12 中,发生故障的负荷 1 侧电压突降为 0,之后缓慢

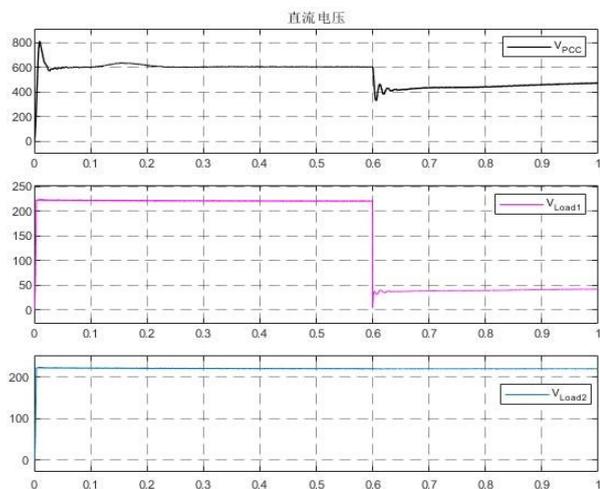


图 12 某负荷侧短路时公共直流母线和负荷侧电压

```
[SW1]ping -a 192.168.2.254 202.1.1.2
Ping 202.1.1.2 (202.1.1.2) from 192.168.
Request time out
```

图 12 VLAN 20 的 IP 地址  
不可以 NAT 访问互联网结果

整个可靠性组网综合实验完成之后,SW1 和 SW2 上的堆叠组能够正确形成,两台设备虚拟化成一台设备;SW1 和 SW2 连接 SW3 的接口配置成功链路聚合;SW1、SW2 和 Firewall 能够通过 OSPF 实现互通;SW1 上的 VLAN 10 的 192.168.1.0/24 网段可以通过 NAT 访问互联网,而 SW1 上的 VLAN 20 不能通过 NAT 访问互联网。

#### 4 结语

整个实验教学实践以企业网实际的工程项目实践为背景,利用新华三的 HCL 模拟软件,设计实现基于企业网的可靠性组网综合实验,通过教学实践使学生既能够深入理解抽象的网络技术原理,又能够学习到网络行业中的工程项目案例,从而提升工

(上接第 28 页)

回升到 50V 以下,直流母线电压同样发生了突变,降到 400V 左右时开始缓慢回升,而无故障的负荷 2 电压未受到明显影响。可以发现闭环 PID 控制策略在保证电压稳定性方面发挥了重要作用。

学生还可以对系统结构或性能开展更加多样化测试,如交流负载波动、储能模块配置、交流侧故障等,还可以分析系统的可靠性以及系统能耗等,对电力系统中的复杂问题开展深入研究。

#### 4 结语

本文针对低压直流配电系统的结构和功能进行了设计,并利用 MATLAB/Simulink 进行建模,对所设计系统的性能进行了分析。该综合实验涵盖了电气工程及其自动化专业的多门必修课程的重要知识点,设计过程由单一到系统能够体现知识结构之间的关联性,有助于激发学生开拓思维,调动学生的探索积极性;系统特性分析由浅入深,能够帮助学生加深对复杂电气工程问题的理解,从而取得更好的教学效果。

程实践能力和解决复杂工程问题能力,真正提高实验教学的实效。

#### 参考文献 (References):

- [1] 商泽进,邓庆田,李新波,等.基于“新工科”理念的理工基础学科实验教学改革创新设计[J].实验技术与管理,2019,36(9):149-150,168.
- [2] 冯亚青,杨光.理工融合:新工科教育改革的新探索[J].中国大学教学,2017(9):16-20.
- [3] 王亚良,潘柏松,董晨晨,等.新工科背景下的机械类创新设计性实验项目群设置与实施[J].实验室研究与探索,2019,39(6):162-167,175.
- [4] 张倩,李明,王军,等.“新工科”培养模式下自动化专业综合实验构建[J].实验技术与管理,2020,37(1):163-166.
- [5] 温贺平,曹文梁,刘庆.一种模拟校园网的综合组网实验设计[J].实验室研究与探索,2017,36(2):141-144.
- [6] 李鹏,温武,赵海,等. IRF 综合性实验的设计与仿真实现[J].现代计算机,2018(33):52-55.
- [7] 王霞俊.基于 H3C HCL 的 IPSec VPN 实验设计与仿真[J].实验室研究与探索,2018,37(3):118-121.
- [8] 申玉华,唐绅.基于 IRF2 网络虚拟化技术在湖南烟草商业企业的应用[J].电脑知识与技术,2017(30):246-248.
- [9] 新华三大学.路由交换技术详解与实践:第一卷(下册)[M].北京:清华大学出版社,2017.
- [10] 陈康,王继锋.网络工程案例教程[M].北京:机械工业出版社,2016.

#### 参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国教育部.工程教育专业认证标准[S].北京:中华人民共和国教育部,2017:45-51.
- [2] 林健.如何理解和解决复杂工程问题——基于《华盛顿协议》的界定和要求[J].高等工程教育研究,2016(5):17-26,38.
- [3] 段双明,郭阳,任俊,等.含分布式电源的低压直流配电网研究综述[J].东北电力大学学报,2015,35(6):1-7.
- [4] 刘连光,蒋智化,刘自发,等.直流配电网拓扑结构与接纳分布式能源能力研究[J].电气应用,2015,34(S1):53-58.
- [5] 杨琪羽.适应未来发展的直流配电电压等级序列研究[D].北京:华北电力大学,2014.
- [6] 段建东,魏朝阳,周一,等.未来直流配电网电压等级序列研究[J].中国电机工程学报,2018,38(12):1-7.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局.中低压直流配电电压导则:GB/T35727-2017[S].北京:国家质量监督检验检疫总局,2017:1-3.
- [8] 廖建权,周念成,王强钢,等.直流配电网电能质量指标定义及关联性分析[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6847-6860,7119.
- [9] 杜翼,朱克平,尹瑞,等.基于分布式电源的直流配电网建模与仿真[J].电力建设,2014,35(7):13-19.
- [10] 陈亚爱,梁新宇,周京华.双向 DC-DC 变换器拓扑结构综述[J].电气自动化,2017,39(6):1-6.