

[文章编号] 1003-4684(2019)02-0018-04

微网储能系统三电平 DC/DC 变换器的研究

靳卓凡¹, 冯楚游龙¹, 丁稳房²

(1 湖北省电力装备有限公司, 湖北 武汉 430068; 2 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 新型光伏三电平 DC/DC 变换器可以满足大功率快速充放电的要求, 并且可以通过多机并联, 以实现超大功率的充放电需求。在介绍光伏三电平 DC/DC 变换器拓扑结构及运行原理的基础上, 针对三电平中点电压偏移的问题, 提出了一种双闭环控制策略, 最后通过 MATLAB 仿真软件进行验证, 其结果证明, 该控制方法可以有效地抑制其在充放电过程中中心点电压的偏移问题, 并且该变换器能够实现能量的双向流动。

[关键词] 储能系统; 三电平 DC/DC 变换器; 中心点电压抑制

[中图分类号] TN710.1

[文献标识码] A

光伏微网系统由于其能源清洁、低污染等优点受到了广泛的关注。该系统一般是由光伏发电部分、储能部分与逆变部分构成。储能系统的核心部件为 DC/DC 变换器, 是直流电能汇聚与传输的关键部件, 它保证了能量双向流动的稳定性^[1]。相比于传统的两电平 DC/DC 变换器, 三电平拓扑结构的 DC/DC 变换器具有输出量更大, 输出电压更高, 运行更加稳定、响应更迅速等优点。但是三电平的拓扑结构也必须重视中心点电压平衡的问题。现结合实际微网项目, 采用一种新型的三电平 DC/DC 变换器拓扑结构, 这种结构可用于大功率充电站, 也满足本项目中对储能系统大容量的要求。为了解决三电平变换器的中点电压偏移以及能量双向流动的问题, 在本文中提出一种双环控制策略, 结合 PWM 调制, 快速准确解决该问题。最后使用 MATLAB 进行仿真, 通过仿真和实验结果验证控制方法的有效性, 该光伏变换器可以快速实现能量的双向流动^[3]。

1 光伏微网系统简介

光伏微网系统分为三个部分: 微网发电、微网储能以及微网逆变(图 1)。

储能部分的工作是: 1) 存储微网发电系统的多余能源, 调节系统能量平衡; 2) 为负载供能; 3) 对系统进行能量管理。

1.1 三电平 DC/DC 拓扑结构与工作原理

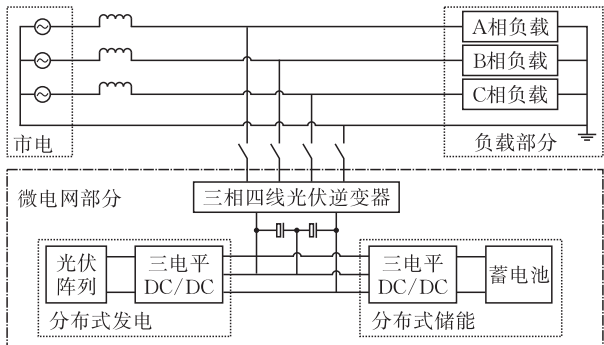


图 1 微网系统图

图 2 为该光伏三电平 DC/DC 的拓扑结构, V_{dc} 是直流母线电压, V_0 是蓄电池侧的电压, $S_1 \sim S_4$ 是三电平 DC/DC 变换器的开关管, 通过控制这四个开关管的闭合与导通来调节占空比。

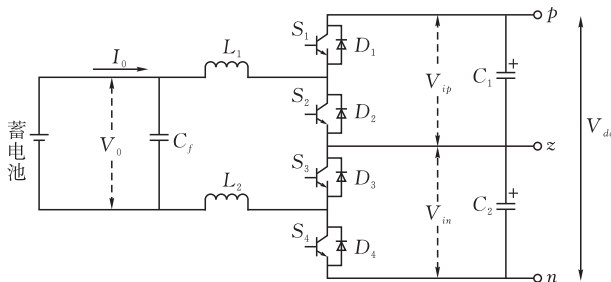


图 2 DC/DC 变换器拓扑结构

1.2 三电平 DC/DC 变换器的工作原理与调制

光伏三电平 DC/DC 变换器在正常工作时, 需保证中心点电压不发生偏移, 即: $V_{ip} = V_{in} = \frac{1}{2} V_{dc}$ 。

[收稿日期] 2018-12-11

[第一作者] 靳卓凡(1992-), 男, 湖北枣阳人, 工学硕士, 湖北省电力装备有限公司助理工程师, 研究方向为电气工程

[通信作者] 丁稳房(1966-), 男, 湖北麻城人, 湖北工业大学副教授, 研究方向为电气技术

由于该拓扑结构特性,相邻两开关管互补。即 S_1 、 S_2 互补, S_3 、 S_4 互补。通过调节 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 四个 IGBT 开关管来调节光伏三电平 DC/DC 变换器运行模式^[2](图 3)。

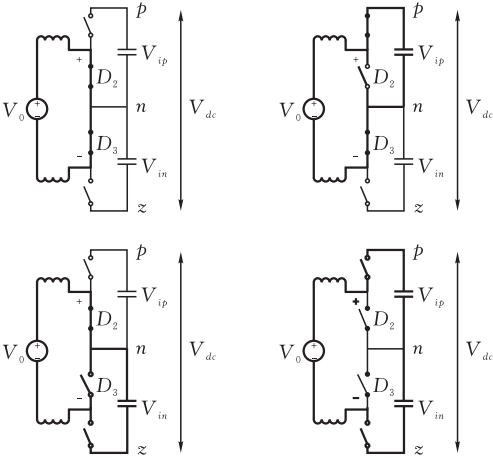


图 3 三电平光伏变换器工作模式

模式 1:当 S_2 、 S_3 闭合, S_1 、 S_4 打开,为内部工作状态,蓄电池组不与外部形成连接,而单独组成回路。在这种状态下不与母线发生能量交换。

模式 2:当 S_1 、 S_3 闭合, S_2 、 S_4 打开,蓄电池 V_0 会与 V_{ip} 构成回路, V_{in} 为开合状态,蓄电池可以为 V_{ip} 端充能,即 $V_0 = \frac{1}{2} V_{dc}$ ^[3]。

模式 3:当 S_2 、 S_4 闭合, S_1 、 S_3 打开,蓄电池 V_0 会对直流母线电压 V_{dc} 的其中一端 V_{in} 进行充电补偿,而 V_{ip} 此时为断开状态, $V_0 = \frac{1}{2} V_{dc}$ 。

模式 4:当 S_1 、 S_4 闭合, S_2 、 S_3 打开,蓄电池 V_0 会对 V_{ip} 、 V_{in} 同时充电,此时蓄电池 V_0 的放电全部作用于直流母线电压 V_{dc} , $V_0 = V_{dc}$ ^[3]。

将上述四种工作模式简化为:(23、13、24、14),数字表明哪些开关管是导通的,当中心点电压 n 未发生偏移的时候,保持 14 操作级,此时蓄电池为直流母线正常供电^[2]。当中心点电压 n 发生偏移的时候,如果 V_{ip} 上的电压高于 V_{in} 时,则应该采用 24 操作级,即延长 S_2 、 S_4 闭合的时间,使蓄电池 V_0 为 V_{in} 充电,直到 V_{in} 上的电压与 V_{ip} 上的电压保持一致,才能使中心点电压 n 保持平衡;同理,当 V_{in} 上的电压高于 V_{ip} 时,应采用 13 操作级,即延长 S_1 、 S_3 的闭合时间,使蓄电池 V_0 为 V_{ip} 充电,直到中心点电压 n 不发生偏移为止^[3]。

2 调制原理

光伏三电平 DC/DC 变换器采用 PWM 的调制方法来抑制中点电压的偏移现象。d 是主控占空比, d_1 和 d_4 分别表示由控制器生成的占空比值。

通过与两个相互交织 180° 的三角载波信号 C_1 、 C_2 进行对比而产生外部调制的门信号 S_1 、 S_2 。在中心点电压平衡的情况下,主控管的占空比 $d = d_1 = d_4$ ^[2],会控制开关管,蓄电池电压 V_0 在 V_i 与 $2V_i$ 之间调控(图 4)。

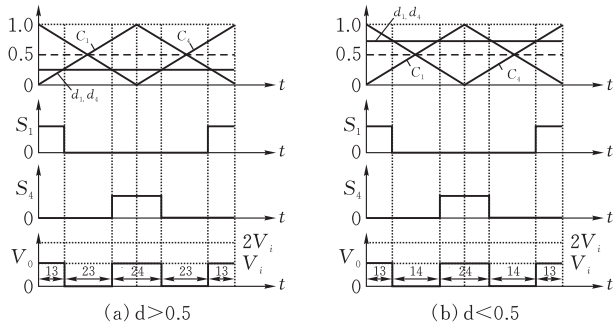


图 4 电压平衡时的调制方法

当中心点电压不平衡的时候,需要考虑调制占空比的开合时间,经拓扑结构分析可以知道,23 与 14 操作级对于母线电压的平衡没有影响,调节不平衡主要采用 13 和 24 操作级。这里考虑 $d_1 > d_4$ 时, $d > 0.5$ 与 $d < 0.5$ 两种情况(在 $d_1 < d_4$ 时该方法也同样适用)^[3]。如图 5 所示,把电压不平衡的条件下占空比与电压平衡条件下的占空比进行对比,才可以产生相应的调制信号,如图 5a 所示,与电压平衡(黑线所示)相对比,当 $V_{ip} < V_{in}$ 时,如阴影区域所表示的那样,需要减少 24 操作级的停留时间,而增加 13 操作级的停留时间才能达到电压的平衡。相反的,如图 5b 所示,当 $V_{ip} > V_{in}$ 时,则需要增加 24 操作级停留时间,而减少 13 操作级的停留时间才能达到电压的平衡。

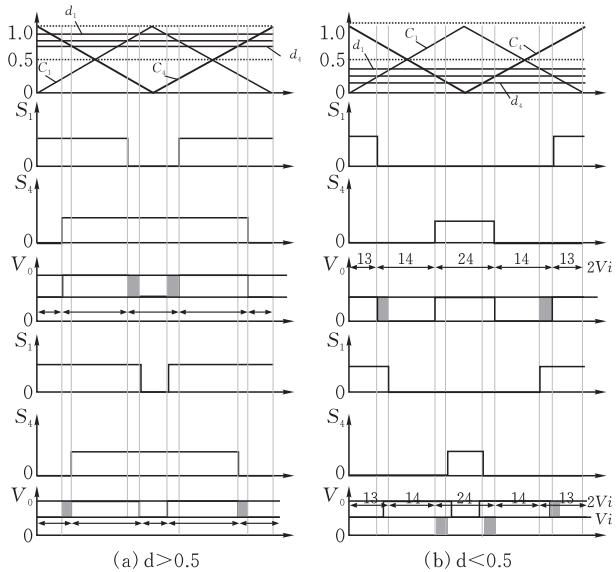


图 5 $d_1 > d_4$ 时调制方法

3 三电平 DC/DC 变换器中点电压抑制的控制方法

根据三电平 DC/DC 变换器的实际情况,本项目采取双闭环控制的方法,电压为外环,电流为内环。电流环采用蓄电池端电流 I_0 ,通过电流内环控制可以实现对流经蓄电池电流的实时控制,保证系统的响应速度。电压外环采取母线电压 V_{dc} ,电压外环的作用是与预设值 V_{dc}^* 对比以产生偏差信号。最下面的环的作用是采集母线偏差电压,采集其中一侧的电压 V_{ip} 与母线电压的一半(即 $V_{dc}/2$)做对比,产生偏差信号^[3]。依照上面的调制方法,本次设计的控制框图见图 6。

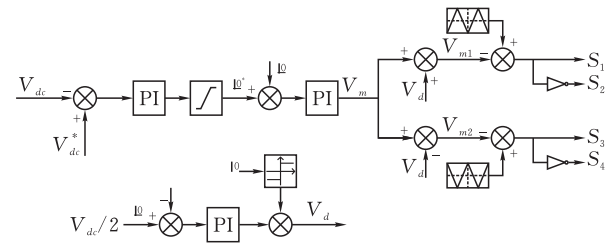


图 6 三电平光伏变换器双闭环控制框图

4 实验及结果分析

根据上述控制框图,使用 MATLAB/ Simulink 建模,并对其控制方法进行仿真验证。本次仿真设计蓄电池电压 $V_0 = 800\text{ V}$,直流母线电压 $V_{dc} = 1200\text{ V}$, $L_1 = L_2 = 1 \times 10^{-4}\text{ H}$,系统频率为 $1 \times 10^{-6}\text{ s}$,负载电阻为 $200\text{ }\Omega$,直流母线电容 $C_1 = C_2 = 5.6 \times 10^{-3}\text{ F}$ 。

4.1 直流母线电压不平衡抑制

当母线端负载不平衡时,中心点电压产生偏移,在 0.1 个周期时加入双闭环的控制策略,其仿真图形见图 7。

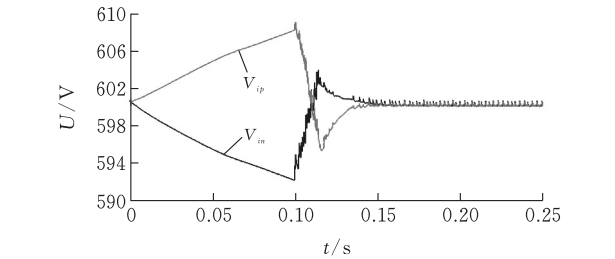


图 7 在 0.1T 时使用控制策略抑制中点电压偏移仿真图

由图 7 可以看出,中心点电压发生偏移时, V_{ip} 与 V_{in} 会从起始值随时间偏移越来越大,在这种状态下三电平 DC/DC 变换器不能够正常工作。而在 0.1 个周期加入了双闭环控制,则 V_{ip} 与 V_{in} 的电压偏移立即被抑制,在经过的极小波动之后马上恢复

到 600 V,证明此 PWM 控制策略能够准确且高效的抑制中心点电压的波动。

4.2 能量双向流动的仿真

为了验证光伏三相 DC/DC 变换器能够满足能量双向流动的系统要求,该仿真改变直流母线负载端的功率来检验变换器能否满足能量双向流动要求。此时,负载端电阻 $R_1 = R_2 = 60\text{ }\Omega$,初始母线电流 $I_{dc} = 9\text{ A}$ 。经过 0.1 周期后,改变母线功率模拟太阳光功率增大的情况,其电池端功率,直流母线功率以及负载消耗功率见图 8。

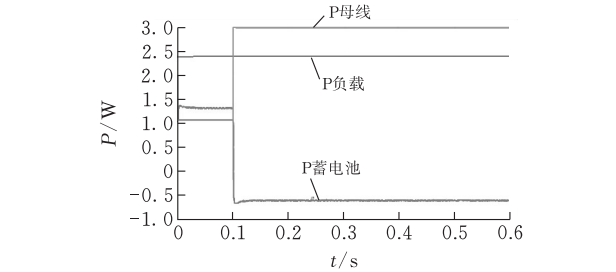


图 8 在 0.1T 改变电源功率实现能量双向流动仿真图

可以看出,在 0.1 周期前, $P_{\text{负载}} > P_{\text{蓄电池}}$,此时,由母线电源与蓄电池共同为负载供能,即 $P_{\text{负载}} = P_{\text{蓄电池}} + P_{\text{母线}}$,蓄电池为放电状态,功率正向流动;在 0.1 周期后, $P_{\text{负载}} < P_{\text{蓄电池}}$,此时直流母线可以满足负载需求并为蓄电池充能,即 $P_{\text{母线}} = P_{\text{蓄电池}} + P_{\text{负载}}$,功率反向流动。该仿真可以证明光伏三电平 DC/DC 变换器能够满足实际需求。

5 结论

本文使用了一种新型的拓扑结构的三电平变换器,这种新型的光伏三电平 DC/DC 变换器可以应用在大功率的、快速充电微网系统当中。本文在介绍其拓扑结构和运行原理的基础上,分析了中点电压偏离的原因以及调制方法,提出一种双闭环控制策略,运用这种方法来抑制中点电压偏移的问题。最后,在 MATLAB/Simulink 中构建仿真模型,其结果证明:1)本项目中的 PWM 脉冲调制模式,与三电平 DC/DC 双闭环控制方法,能够有效抑制光伏三电平 DC/DC 变换器中点电压的偏移问题;2)本拓扑结构的光伏三电平 DC/DC 变换器能够快速实现能量的双向流动。对于多机并联的环流抑制问题,还有待研究。

[参 考 文 献]

[1] 董晓文,何维国,蒋心泽,等.电力电池储能系统应用与展望[J].供用电技术.2011(2): 514.

[2] Christen D, Tschannen S, Biela J, “Highly efficient and compact DC-DC converter for ultra-fast charging of electric vehicles,” in Proc[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013, 29(5):34-42.

[3] 靳卓凡,微网储能系统三电平 DC/DC 变换器的研究 [D].武汉:湖北工业大学,2018.

[4] 刘霞.含多种分布式电源和储能的微电网控制技术 [D].杭州:浙江大学,2012:6-11.

[5] Pavlovsky M, Guidi G, Kawamura A. Assessment of coupled and independent phase designs of interleaved multiphase buck/boost DCDC converter for EV power train[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2014, 29(6): 2693-2704.

Threelevel DC/DC Converter for Micronet Energy Storage System

JIN Zhuofan¹, FENG Chuyoulong¹, DING Wenfang²

(1 Hubei Electric Power Equipment Co., Ltd. Wuhan 430000 China ;

2 School of Electrical and Electronic Engineering , Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430000,China)

Abstract: A new type of photovoltaic threelevel DC / DC converter is used in conjunction with the photovol-
taic microgrid project. This converter can meet the requirements for highpower and fast charging and dis-
charging. It can also apply to multimachine parallel in order to satisfy high power charging and discharging.
Based on the introduction of the threelevel DC / DC converter topology and operating principle, a double
closedloop control strategy is proposed for the threelevel midpoint voltage offset problem. The control
method can effectively suppress the voltage offset in the center of the charging and discharging process. Fi-
nally, the simulation results show that the control method can effectively suppress the offset of the center
voltage, and the converter can realize the bidirectional flow of energy.

Keywords: energy storage system; threelevel DC / DC converter; center point voltage suppression

[责任编辑：张岩芳]

(上接第 9 页)

Research and Application of Multi Classification

Model for Fault Analysis of Transmission Lines

ZHANG Wei¹, CHEN Jianxia¹, LI Chao¹, HUANG Yujun¹, XU Xinyu²

(1 School of Computer Science ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan430068, China ;

2 School of Engineering , University of Tokyo , Tokyo , Japan)

Abstract: This paper proposes a novel MCDLRBT model (Multi-Classification of Density logistic regres-
sion based on binary tree, for short, MCDLRBT) in order to solve the problem of asymmetric fault analy-
sis of transmission lines. The MCDLRBT model firstly maps the training data to a specific feature space
based on the Nadaraya-Watson density estimation. Then, according to the structure characteristics of the
two forked tree, MCDLRBT combines the multiple DLR (Density Estimation Logistic Regression, DLR)
model into a two fork tree with multiple classification abilities and optimizes it in the end. The experimen-
tal results show that the classification results based on MCDLRBT are superior to the existing traditional
multiple classification algorithms in the respects of accuracy and classification time.

Keywords: DLR; kernel density estimation; two fork tree; transmission line; fault analysis

[责任编辑：张岩芳]