

浅析三端口 DC-DC 变换器控制策略

Analysis of Control Strategy of Three-port DC-DC Converter

张荣庆

Rongqing Zhang

重庆市巴蜀中学校现代教育技术中心 中国·重庆 401121

Chongqing Bashu Middle School Modern Education Technology Center, Chongqing, 401121, China

摘要: 本课题设计了一个光伏电池系统的非隔离三端口 DC-DC 变换器, 以最大功率点跟踪、输出电压控制、蓄电池控制作为 TPC 的控制策略, 并通过数字 PID 实现蓄电池端口的电压电流双闭环控制。两级 DC-DC 电路分别采用半桥 Boost 拓扑电路和 Buck/Boost 双向变换器电路来构成电路主拓扑, 以实现三端口变换器的能量管理, 达到稳定输出电压, 并且对光伏电池进行最大功率点跟踪的目的。最后通过实验验证, 制作了样机, 且测试结果基本达到设计要求。

Abstract: This project designs a non-isolated three-port DC-DC converter of photovoltaic cell system is designed, the maximum power point tracking, output voltage control and battery control are used as the control strategy of TPC, and the battery port voltage and current double closed-loop control is realized through digital PID. The two-stage DC-DC circuit adopts the half-bridge Boost topology circuit and the Buck/Boost bi-directional converter circuit to form the main topology of the circuit, so as to achieve the energy management of the three-port converter, stabilize the output voltage, and track the maximum power point of the photovoltaic cell. Finally, the prototype is made through experimental verification, and the test results basically meet the design requirements.

关键词: 三端口 DC-DC 变换器; 最大功率点跟踪; 数字 PID; 光伏电池

Keywords: three-port DC-DC converter; maximum power point tracking; digital PID; photovoltaic cell

DOI: 10.12346/peti.v4i2.6617

1 引言

中国太阳能资源较丰富的地区占中国国土面积的三分之二以上, 其年太阳辐射量居世界第二。在 21 世纪中叶至 22 世纪初期, 预计中国将会有 15 亿人口的能源需求^[1]。届时, 太阳能光伏发电将会在能源需求方面发挥关键作用, 应用前景无可估量。尽管光伏能源在过去的几十年中受到了广泛的关注, 但光伏系统的高安装成本和光伏组件的低转换效率是使用这种替代能源的主要障碍。因此, 为了获得光伏阵列工作时的最大功率, 最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, 简称 MPPT) 的实现是由光伏单元与负载单元或储能单元之间的 DC-DC 变换器即三端口变换器 (Three-port

Converter, 简称 TPC) 来完成^[2]。

2 硬件电路设计

2.1 主电路原理图设计

光伏电池单元端口到直流母线需要升压, 而蓄电池单元端口到直流母线既需要升压也需要降压即双向变换的功能, 基于此设计了主电路如图 1 所示^[3]。主电路由两个半桥组成, 考虑到光伏电池单元的能量流动方向是单向流动, 并且始终是负载能量来源的主要电源, 不会出现电流的倒灌, 所以前级 Boost 电路部分采用了两个开关管组成同步整流 Boost 电路, 后级 Buck/Boost 双向变换器电路则采用了与前级电路相同的拓扑结构。

【作者简介】张荣庆 (1975-), 男, 中国重庆人, 本科, 正高级教师, 从事电子技术应用研究。

2.2 测量电路设计

光伏电池单元的电压和母线电压均采用电阻分压的方式来检测，由于单片机的 ADC 输入范围为 0~3.3V，且考虑到母线电压的稳定值为 30V。因此，设计分压比为 10 : 1。因为我们知道电阻值越大分压比越精确，所以选择电阻值分别为 90K、90K、20K，如图 2 左侧所示。

光伏电池单元的电流和蓄电池单元的电流检测采用芯片 INA282^[4]。该芯片可提供 50 倍的电压增益，因此我们采用 0.02 的精密电阻可使得芯片输出值即为实时电流值，原理图如图 3 右侧所示。

3 控制策略

3.1 整体控制策略

本次设计的整体控制框图如图 3 所示，光伏电池端口通过采样光伏电池单元的电压和电流来进行最大功率点跟踪，同时将其输出值再与光伏电池单元的电压进行比较，其得到的差值经过 PI 运算后将信号给到单片机的 PWM 生成器，最终将产生的 PWM 信号输入到三端口 DC-DC 变换器，实现了对光伏电池单元的最大功率跟踪^[5]。

3.2 Boost 电路控制策略

由第二章对电路拓扑的分析可知，则 Boost 电路在工作时的动态模型为：

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_{pv}}{dt} = V_{pv} - (1 - d_1)V_o \\ C_H \frac{dV_o}{dt} = (1 - d_1)I_{pv} - I_o \end{cases} \quad (1)$$

其中， V_{pv} 、 V_o 、 I_{pv} 和 I_o 分别为光伏电池单元电压，负载单元电压，光伏电池单元电流和负载电流， d_1 为开关管 Q_1 的导通占空比，稳态时为 $D1$ ^[6]。

3.3 蓄电池的电池管理控制策略与 Buck 电路控制策略

3.3.1 蓄电池的电池管理控制策略

根据本设计的要求可知负载单元电压即母线电压的稳定值为 30V，并将其作为母线电压采样值的参考值，在与母线电压实时采样值相减后，输出的差值经过电压 PI 控制器，电压 PI 控制器的输出值为蓄电池电流参考值，又考虑对蓄电池充放电电流进行一定的限制，因此在之后加入一个限幅器，以限制其充放电点电流，再将其与蓄电池充放电电流实时采样值相减，最后再经过电流 PI 控制器以输出双向变换器的占空比 $D2$ ^[7]。

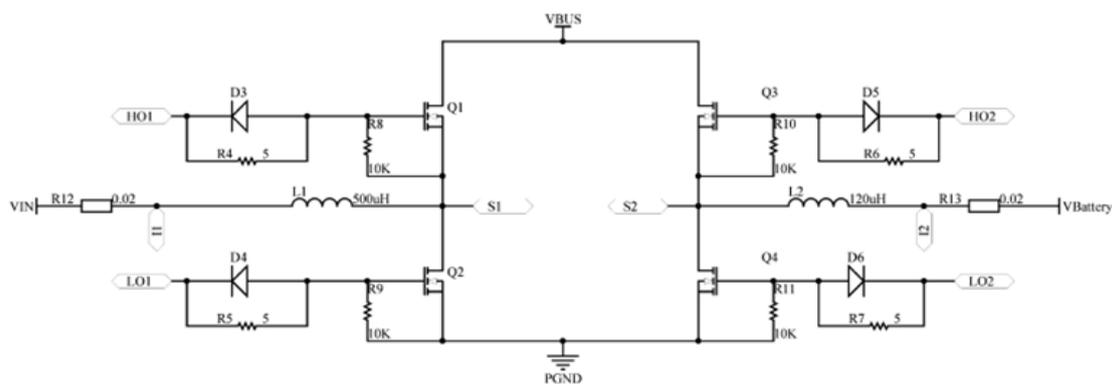


图 1 主电路原理图

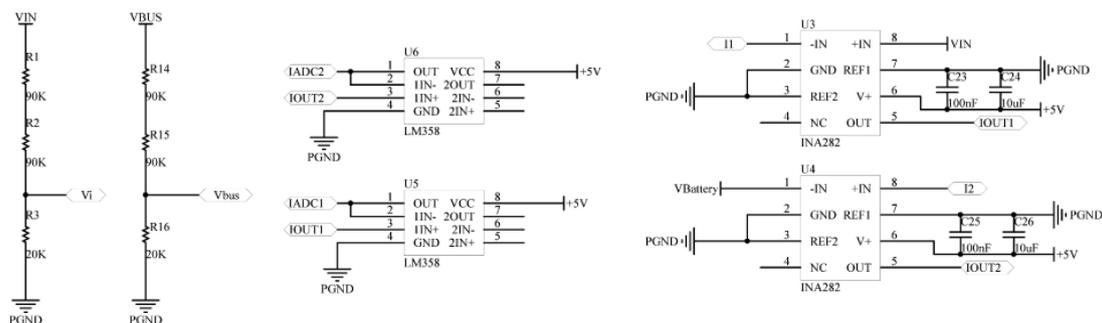


图 2 测量电路原理图

3.3.2 Buck 电路控制策略

由第二章对电路拓扑的分析可知，则 Buck 电路工作时的动态模型为：

$$\begin{cases} L_2 \frac{dI_o}{dt} = dV_o - V_B \\ C_B \frac{dV_B}{dt} = I_o - I_B \end{cases} \quad (2)$$

其中， V_o 、 V_B 、 I_o 、 I_B 分别为负载单元电压，蓄电池单元电压，负载单元电流和蓄电池单元电流， d 为开关管的导通占空比，稳态时为 D_2 。

4 测试结果

本次设计对每个模式均进行了多次测试，取三次平均值，数据记录如表 1 和表 2 所示。

由数据可得基本达到设计要求，且效率较为可观，达到 90% 以上。

5 结语

本设计以光伏电池为基础的非隔离三端口 DC-DC 变换器装置，其中三个端口分别为光伏电池端口，负载端口和蓄电池端口。在光伏电池端口与负载端口之间设计了 Boost 升压电路作为连接，在蓄电池端口与负载端口之间设计了 Buck/Boost 双向同步整流电路作为连接，而两个电路拓扑的公共端则为直流母线。本次设计的控制策略为：boost 升压电路采用以扰动观察法为基础的 MPPT 算法和 PI 控制算法结合的控制策略，主要功能为使光伏电池的输出功率始终在最大值；Buck/Boost 双向变换器电路采用了负载电压和蓄电池电流双闭环的 PI 控制算法的控制策略，主要功能为平衡光伏电池功率与负载功率之间的差值，以此来稳定母线电压。最后通过仿真验证及样机测试，均满足设计要求。

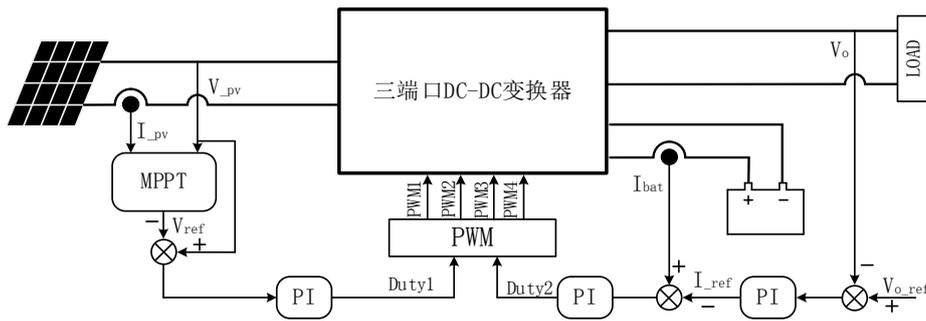


图 3 三端口 DC-DC 变换器控制框图

表 1 模式 1 测试数据

V_{pv}	V_B	V_o	I_{pv}	I_B	I_o
17.93	14.991	29.98	3.097	0.996	1.199
18.06	15.002	29.93	3.126	1.024	1.194
18.02	14.996	30.06	3.112	0.999	1.202

表 2 模式 2 测试数据

V_{pv}	V_B	V_o	I_{pv}	I_B	I_o
18.54	15.264	30.03	2.953	-1.079	2.297
18.41	15.245	29.98	2.998	-1.068	2.288
18.47	15.248	29.96	2.986	-1.074	2.273

参考文献

[1] 刘福鑫,阮洁,阮新波.一种多端口直流变换器的系统生成方法——采用单极性脉冲电源单元[J].中国电机工程学报,2012,32(6):72-80.

[2] 魏业文,聂俊波,姜恒,等.一种非隔离的高增益三端口直流变换器[J].电子测量技术,2021,44(14):43-50.

[3] W Xiao, W G Dunford, P R Palmer, et al. "Application of centered differentiation and steepest descent to maximum power point tracking[J]. IEEE Trans. Ind. Electron.,2007(10):2539-2549.

[4] 张盈曦,李广地,邓焰,等.一种隔离型三端口双向DC/DC变换器[J].电工技术,2020(5):27-31.

[5] 吴红飞,张君君,陈润若,等.同步整流式三端口半桥变换器[J].中国电机工程学报,2011,31(33):37-43.

[6] 吴红飞.三端口直流变换器[M].北京:机械工业出版社,2020.

[7] E V Solodovnik, S Liu, R A Dougal. Power controller design for maximum power tracking in solar installations[J]. IEEE Trans. Power Electron,2004(9):1295-1304.