



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103312168 A

(43) 申请公布日 2013. 09. 18

(21) 申请号 201310167183. 1

H02J 7/35(2006. 01)

(22) 申请日 2013. 05. 09

(71) 申请人 燕山大学

地址 066004 河北省秦皇岛市海港区河北大街西段 438 号

(72) 发明人 孙孝峰 李昕 李伟松 刘飞龙 周悦

(74) 专利代理机构 石家庄一诚知识产权事务所 13116

代理人 李合印

(51) Int. Cl.

H02M 3/156(2006. 01)

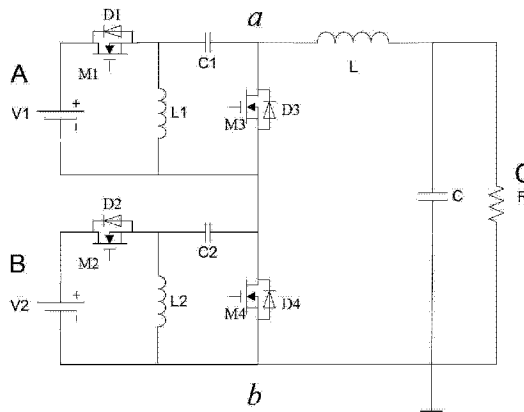
权利要求书1页 说明书5页 附图9页

(54) 发明名称

双向双输入 ZETA 直流变换器及其功率分配方法

(57) 摘要

本发明公开了一种双向双输入 ZETA 直流变换器及其功率分配方法,双向双输入 ZETA 直流变换器包括第一 ZETA 脉冲电压源单元、第二 ZETA 脉冲电压源单元和输出滤波电路;所述的第一 ZETA 脉冲电压源单元包括第一输入直流电压源 A、第一功率开关管 M1、第二功率开关管 M3、第一电感 L1 和第一电容 C1;所述的第二 ZETA 脉冲电压源单元包括第二输入直流电压源 B、第三功率开关管 M2、第四功率开关管 M4、第二电感 L2 和第二电容 C2;所述的输出滤波电路包括输出滤波电感 L 和输出滤波电容 C。其功率分配方法包括对两个输入直流电压源进行功率分配和负载回馈功率控制。本发明具有:电路结构较复杂、能实现升降压、输出电压调节范围大、能实现能量回馈、损耗小、电路的效率、输出电压波形中的纹波小、不需要隔离变压器等特点。



1. 一种双向双输入 ZETA 直流变换器,其特征在于:包括第一 ZETA 脉冲电压源单元、第二 ZETA 脉冲电压源单元和输出滤波电路;

所述的第一 ZETA 脉冲电压源单元包括第一输入直流电压源 A、第一功率开关管  $M_1$ 、第二功率开关管  $M_3$ 、第一电感  $L_1$  和第一电容  $C_1$ ,第一输入直流电压源 A 的正极与第一功率开关管  $M_1$  的漏极连接,第一功率开关管  $M_1$  的源极与第一电感  $L_1$  的一端、第一电容  $C_1$  的一端连接,第一电容  $C_1$  的另一端与第二功率开关管  $M_3$  的漏极连接,第一电感  $L_1$  的另一端与第一输入直流电压源 A 的负极、第二功率开关管  $M_3$  的源极连接;

所述的第二 ZETA 脉冲电压源单元包括第二输入直流电压源 B、第三功率开关管  $M_2$ 、第四功率开关管  $M_4$ 、第二电感  $L_2$  和第二电容  $C_2$ ,第二输入直流电压源 B 的正极与第三功率开关管  $M_2$  的漏极连接,第三功率开关管  $M_2$  的源极与第二电感  $L_2$  的一端、第二电容  $C_2$  的一端连接,第二电容  $C_2$  的另一端与第四功率开关管  $M_4$  的漏极连接,第二电感  $L_2$  的另一端与第二输入直流电压源 B 的负极、第四功率开关管  $M_4$  的源极连接;

所述第一 ZETA 脉冲电压源单元中的第二功率开关管  $M_3$  与所述第二 ZETA 脉冲电压源单元中的第四功率开关管  $M_4$  相串联;

所述的输出滤波电路包括输出滤波电感 L 和输出滤波电容 C,其中输出滤波电感 L 的一端分别连接第一 ZETA 脉冲电压源单元中的第二功率开关管  $M_3$  的漏极和第一电容  $C_1$  的一端,滤波电感 L 的另一端分别连接输出滤波电容 C 的一端、负载 R 的一端,输出滤波电容 C 的另一端分别与第二 ZETA 脉冲电压源单元中的第四功率开关管  $M_4$  的源极、第二电感  $L_2$  的一端以及第二输入直流电压源 B 的负极和负载 R 的另一端连接。

2. 一种双向双输入 ZETA 直流变换器的功率分配方法,其特征在于:

它包括如下内容:

第一输入直流电压源 A 为光伏电池,第二输入直流电压源 B 为蓄电池,对两个输入直流电压源进行功率分配和负载回馈功率控制。第一输入直流电压源 A 以最大功率输入,并通过最大功率跟踪算法保持最大功率输入,第二输入直流电压源 B 作为功率缓冲单元,并通过一个带反向输出的调节器进行能量自动分配:当负载需求功率大于第一输入直流电压源 A 提供的功率时,第二输入直流电压源 B 放电;当负载需求功率小于第一输入直流电压源 A 提供的功率时,第二输入直流电压源 B 充电;当负载需求功率大于第一输入直流电压源 A 输入功率时,调节器输出为正值,转化为第三功率开关管  $M_2$  的占空比,控制第二输入直流电压源 B 的放电功率;当负载需求功率小于第一输入直流电压源 A 输入功率时,负载电压升高,调节器输出为负值,转化为第二功率开关管  $M_3$  和第四功率开关管  $M_4$  的占空比,控制第二输入直流电压源 B 的充电功率,维持负载电压稳定。

## 双向双输入 ZETA 直流变换器及其功率分配方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电力电子变换器领域,尤其涉及一种双向双输入 ZETA 直流变换器及其功率分配方法。

### 背景技术

[0002] 随着环境保护问题的日益突出,人们越来越重视可再生能源的开发利用。可再生能源具有廉价、可靠、清洁无污染、能源丰富等特点,因此可再生能源发电展现了良好的市场前景。目前,应用较多的可再生能源发电形式有光伏发电,燃料电池供电、风力发电、水力发电、地热发电等等,但这些发电形式均存在电力供应不稳定、不连续、随气候条件变化等特点,因此需要采用多种能源联合供电的分布式供电系统。

[0003] 在传统的新能源联合供电系统中,每种能源形式通常需要一个 DC/DC 变换器,将各种能源变成直流输出,并联在公共的直流母线上,供给直流负载,但其结构较复杂,且成本较高。为了简化电路结构,降低系统成本,可以用一个多输入直流变换器(Multiple-Input Converter, MIC)代替多个单输入直流变换器。MIC 允许多种能源输入,而且输入源的性质、幅值和特性可以相同,也可以差别很大,多输入源可以分别或同时向负载供电,因此提高了系统的稳定性和灵活性,实现能源的优化利用,并且降低系统成本。

### 发明内容

[0004] 为了克服现有技术中存在的上述问题,本发明的目的在于提供一种拓扑结构和控制方法均较简单,且能实现能量的自动分配利用的拓扑结构。

[0005] 为了解决上述存在的技术问题,本发明是通过以下技术方案实现的:

[0006] 一种双向双输入 ZETA 直流变换器,包括第一 ZETA 脉冲电压源单元、第二 ZETA 脉冲电压源单元和输出滤波电路;

[0007] 所述的第一 ZETA 脉冲电压源单元包括第一输入直流电压源 A、第一功率开关管  $M_1$ 、第二功率开关管  $M_3$ 、第一电感  $L_1$  和第一电容  $C_1$ ,第一输入直流电压源 A 的正极与第一功率开关管  $M_1$  的漏极连接,第一功率开关管  $M_1$  的源极与第一电感  $L_1$  的一端、第一电容  $C_1$  的一端连接,第一电容  $C_1$  的另一端与第二功率开关管  $M_3$  的漏极连接,第一电感  $L_1$  的另一端与第一输入直流电压源 A 的负极、第二功率开关管  $M_3$  的源极连接;

[0008] 所述的第二 ZETA 脉冲电压源单元包括第二输入直流电压源 B、第三功率开关管  $M_2$ 、第四功率开关管  $M_4$ 、第二电感  $L_2$  和第二电容  $C_2$ ,第二输入直流电压源 B 的正极与第三功率开关管  $M_2$  的漏极连接,第三功率开关管  $M_2$  的源极与第二电感  $L_2$  的一端、第二电容  $C_2$  的一端连接,第二电容  $C_2$  的另一端与第四功率开关管  $M_4$  的漏极连接,第二电感  $L_2$  的另一端与第二输入直流电压源 B 的负极、第四功率开关管  $M_4$  的源极连接;

[0009] 所述第一 ZETA 脉冲电压源单元中的第二功率开关管  $M_3$  与所述第二 ZETA 脉冲电压源单元中的第四功率开关管  $M_4$  相串联;

[0010] 所述的输出滤波电路包括输出滤波电感 L 和输出滤波电容 C,其中输出滤波电感 L

的一端分别连接第一 ZETA 脉冲电压源单元中的第二功率开关管  $M_3$  的漏极和第一电容  $C_1$  的一端,滤波电感  $L$  的另一端分别连接输出滤波电容  $C$  的一端、负载  $R$  的一端,输出滤波电容  $C$  的另一端分别与第二 ZETA 脉冲电压源单元中的第四功率开关管  $M_4$  的源极、第二电感  $L_2$  的一端以及第二输入直流电压源  $B$  的负极和负载  $R$  的另一端连接。

[0011] 本发明的目的还在于提供了一种双向双输入 ZETA 直流变换器功率分配方法,它包括如下内容:

[0012] 第一输入直流电压源  $A$  为光伏电池,第二输入直流电压源  $B$  为蓄电池,对两个输入直流电压源进行功率分配和负载回馈功率控制。第一输入直流电压源  $A$  以最大功率输入,并通过最大功率跟踪算法保持最大功率输入,第二输入直流电压源  $B$  作为功率缓冲单元,并通过一个带反向输出的调节器进行能量自动分配:当负载需求功率大于第一输入直流电压源  $A$  提供的功率时,第二输入直流电压源  $B$  放电;当负载需求功率小于第一输入直流电压源  $A$  提供的功率时,第二输入直流电压源  $B$  充电;当负载需求功率大于第一输入直流电压源  $A$  输入功率时,调节器输出为正值,转化为第三功率开关管  $M_2$  的占空比,控制第二输入直流电压源  $B$  的放电功率;当负载需求功率小于第一输入直流电压源  $A$  输入功率时,负载电压升高,调节器输出为负值,转化为第二功率开关管  $M_3$  和第四功率开关管  $M_4$  的占空比,控制第二输入直流电压源  $B$  的充电功率,维持负载电压稳定。

[0013] 由于采用上述技术方案,与现有技术相比,本发明提供的双向双输入 ZETA 直流变换器及其功率分配方法具有这样的有益效果:

[0014] 本发明虽电路结构较复杂,但具有如下特点:能实现升降压、输出电压调节范围大、能实现能量回馈、损耗小、电路的效率高、输出电压波形中的纹波小、不需要隔离变压器等特点;本发明采用两路能量输入,可充分利用新能源,并能双向传递能量,实现能量优化利用;易实现模块化,易扩展应用。

[0015] 本发明与双输入 ZETA 电路相比,能实现能量回馈。由于在原来的双输入基础上增加了双向的功能,当负载需要的功率较多时,两个输入源同时给负载供电,与传统的双输入 ZETA 电路相同,当负载需要的功率较少时,新能源发出的电能大于负载需要的能量,通过适当的控制,实现能量反向流动,将多余的能量储存在蓄电池中,当新能源发出的电能不足时,蓄电池再放电,以维持输出电压的稳定,进而实现能量的优化分配。

## 附图说明

[0016] 图 1 为本发明的双向双输入 ZETA 直流变换器电气原理图;

[0017] 图 2 为本发明的控制系统结构框图;

[0018] 图 3 至图 10 是本发明的双向双输入 ZETA 直流变换器在不同开关模态的等效电路;

[0019] 图 11 为本发明中  $A$ 、 $B$  同时供电的原理波形图;

[0020] 图 12 为本发明中  $A$  独立供电的原理波形图;

[0021] 图 13 为本发明中  $B$  独立供电的原理波形图;

[0022] 图 14 为本发明中  $A$  供电,  $B$  储能,  $C$  耗能的原理波形图;

[0023] 图 15 为本发明中  $A$  供电,  $B$  储能,  $C$  反馈能量的原理波形图;

[0024] 图 16 为本发明的仿真波形;

[0025] 图 17 为本发明在太阳能汽车电机系统中的电气原理图。

[0026] 上述附图中的符号意义： $V_1$ 、 $V_2$  分别是第一输入直流电压源 A、第二输入直流电压源 B 的输入电压； $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$  分别为第一、第三、第二、第四功率开关管； $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  分别为第一、第三、第二、第四功率开关管体二极管； $L_1$ 、 $L_2$  分别为第一、第二电感； $C_1$ 、 $C_2$  分别为第一、第二电容； $L$  为输出滤波电感； $C$  为输出滤波电容； $R$  是负载； $V_{M1}$ 、 $V_{M2}$ 、 $V_{M3}$ 、 $V_{M4}$  分别为第一、第三、第二、第四功率开关管的驱动电压； $V_{ab}$  为 a 与 b 两点间电压； $i_L$  为滤波电感电流， $I_L$  为滤波电感电流平均值， $i_2$  为第二输入直流电压源 B 的输入电流； $V_o$  为输出电压； $t$ 、 $t_0 \sim t_4$  为时间。

### 具体实施方式

[0027] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述：

[0028] 如图 1 所示，一种双向双输入 ZETA 直流变换器，包括第一 ZETA 脉冲电压源单元、第二 ZETA 脉冲电压源单元和输出滤波电路；

[0029] 所述的第一 ZETA 脉冲电压源单元包括第一输入直流电压源 A（以下简称电源 A）、第一功率开关管  $M_1$ 、第二功率开关管  $M_3$ 、第一电感  $L_1$  和第一电容  $C_1$ ，电源 A 的正极与第一功率开关管  $M_1$  的漏极连接，第一功率开关管  $M_1$  的源极与第一电感  $L_1$  的一端、第一电容  $C_1$  的一端连接，第一电容  $C_1$  的另一端与第二功率开关管  $M_3$  的漏极连接，第一电感  $L_1$  的另一端与电源 A 的负极、第二功率开关管  $M_3$  的源极连接；

[0030] 所述的第二 ZETA 脉冲电压源单元包括第二输入直流电压源 B（以下简称电源 B）、第三功率开关管  $M_2$ 、第四功率开关管  $M_4$ 、第二电感  $L_2$  和第二电容  $C_2$ ，电源 B 的正极与第三功率开关管  $M_2$  的漏极连接，第三功率开关管  $M_2$  的源极与第二电感  $L_2$  的一端、第二电容  $C_2$  的一端连接，第二电容  $C_2$  的另一端与第四功率开关管  $M_4$  的漏极连接，第二电感  $L_2$  的另一端与电源 B 的负极、第四功率开关管  $M_4$  的源极连接；

[0031] 所述第一 ZETA 脉冲电压源单元中的第二功率开关管  $M_3$  与第二 ZETA 脉冲电压源单元中的第四功率开关管  $M_4$  相串联；

[0032] 所述的输出滤波电路包括输出滤波电感  $L$  和输出滤波电容  $C$ ，其中输出滤波电感  $L$  的一端分别连接第一 ZETA 脉冲电压源单元中的第二功率开关管  $M_3$  的漏极和第一电容  $C_1$  的一端，滤波电感  $L$  的另一端分别连接输出滤波电容  $C$  的一端、负载  $R$  的一端，输出滤波电容  $C$  的另一端分别与第二 ZETA 脉冲电压源单元中的第四功率开关管  $M_4$  的源极、第二电感  $L_2$  的一端以及电源 B 的负极和负载  $R$  的另一端连接。

[0033] 如图 2 所示，根据本发明的控制系统结构框图，在双向双输入 ZETA 直流变换器中，选择主从控制方式分配两路输入直流电压源输入功率，电源 A 选用太阳能电池作为主供电设备，电源 B 选用蓄电池为后备能源供电设备，符合可再生能源供电系统对能源的优先利用的要求。同时调节电源 A 输入电流参考值以实现太阳能电池的最大功率输出，即实现最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT)。电源 B 通过一个带反向输出的调节器（例如 PI 调节器）进行能量自动分配：当负载需求功率大于电源 A 输入功率时，调节器输出为正值，转化为第三功率开关管  $M_2$  的占空比，控制电源 B 的放电功率；当负载需求功率小于电源 A 输入功率时，负载电压升高，调节器输出为负值，转化为第二功率开关管  $M_3$  和第四功率开关管  $M_4$  的占空比，控制电源 B 的充电功率，维持负载电压稳定。

[0034] 下面结合图 3 ~ 图 10 对本发明变换器的工作原理进行具体分析。在分析之前,先作如下假设:①所有开关管均为理想器件,不考虑开关时间、导通压降;②所有电感和电容均为理想器件。

[0035] 根据功率开关管  $M_1 \sim M_4$  的开关状态,可将变换器分为以下八种工作模式:

[0036] 1. 开关模式 I:

[0037] 如图 3 所示, $M_1$ 、 $M_2$  开通, $M_3$ 、 $M_4$  关断,滤波电感  $i_L$  增大,A 与 B 串联同时与电容器  $C_1$ 、 $C_2$  向 C 供电,ab 两点间电压  $V_{ab}=V_1+V_{C1}+V_2+V_{C2}$ ,电流通路为  $V_2-M_2-C_2-V_1-M_1-C_1-L-C$ ;同时, $L_1$  和  $L_2$  分别从输入电源  $V_1$  和  $V_2$  汲取能量,建立电感电流,电流通路分别为  $V_1-M_1-L_1$  和  $V_2-M_2-L_2$ 。

[0038] 2. 开关模式 II:

[0039] 如图 4 所示, $M_1$  开通, $M_2$ 、 $M_3$  和  $M_4$  关断, $D_4$  导通,滤波电感电流  $i_L$  增加,A 与电容器  $C_1$  向 C 供电,ab 两点间电压  $V_{ab}=V_1+V_{C1}$ ,电流通路为  $V_1-M_1-C_1-L-C-D_4$ ;同时,电感  $L_1$  从输入电源  $V_1$  汲取能量,建立电感电流,电流通路为  $V_1-M_1-L_1$ 。

[0040] 3. 开关模式 III:

[0041] 如图 5 所示, $M_2$  开通, $M_1$ 、 $M_3$  和  $M_4$  关断, $D_3$  导通,滤波电感电流  $i_L$  增加,B 与电容器  $C_2$  向 C 供电,ab 两点间电压  $V_{ab}=V_2+V_{C2}$ ,电流通路为  $V_2-M_2-C_2-D_3-L-C$ ;同时,电感  $L_2$  从输入电源  $V_2$  汲取能量,建立电感电流,电流通路为  $V_2-M_2-L_2$ 。

[0042] 4. 开关模式 IV:

[0043] 如图 6 所示, $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  和  $M_4$  关断, $D_3$  和  $D_4$  导通,电感 L 通过  $D_3$ 、 $D_4$  续流,向 C 供电,滤波电感电流  $i_L$  减小,ab 两点间电压  $V_{ab}=0$ ,电流通路为  $D_4-D_3-L-C$ ;同时电感  $L_1$ 、 $L_2$  分别通过  $D_3$ 、 $D_4$  向电容  $C_1$ 、 $C_2$  充电完成续流,电流通路分别为  $L_1-D_3-C_1$  和  $L_2-D_4-C_2$ 。

[0044] 5. 开关模式 V:

[0045] 如图 7 所示, $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  和  $M_4$  关断, $D_3$  和  $D_4$  导通,电感 L 通过  $D_3$ 、 $D_4$  续流,向 C 供电,滤波电感电流  $i_L$  减小,ab 两点间电压  $V_{ab}=0$ ,电流通路为  $D_4-D_3-L-C$ ;同时电感  $L_1$  通过  $D_3$  向电容  $C_1$  充电完成续流,电流通路为  $L_1-D_3-C_1$ 。

[0046] 6. 开关模式 VI:

[0047] 如图 8 所示, $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  和  $M_4$  关断, $D_3$  和  $D_4$  导通,电感 L 通过  $D_3$ 、 $D_4$  续流,向 C 供电,滤波电感电流  $i_L$  减小,ab 两点间电压  $V_{ab}=0$ ,电流通路为  $D_4-D_3-L-C$ ;同时电感  $L_2$  通过  $D_4$  向电容  $C_2$  充电完成续流,电流通路为  $L_2-D_4-C_2$ 。

[0048] 7. 开关模式 VII:

[0049] 如图 9 所示, $M_3$ 、 $M_4$  开通, $M_1$ 、 $M_2$  关断,滤波电感电流  $i_L$  反向增加,L 储能,电流通路为  $C-L-M_3-M_4$ 。

[0050] 8. 开关模式 VIII:

[0051] 如图 10 所示, $M_3$  开通, $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_4$  关断, $D_2$  导通,滤波电感电流  $i_L$  反向减小,负载单元通过电容  $C_2$  和二极管  $D_2$  给 B 储能,电流通路为  $C-L-M_3-C_2-D_2-V_2$ 。

[0052] 由上述分析可知,以电源 A(太阳能电池)和电源 B(蓄电池)作为两个输入电压源,根据电路中能量的传递,双向双输入 ZETA 直流变换器存在 5 种工作模式:

[0053] 一、电源 A、电源 B 同时供电,电路工作时序为 I、IV 模式,变换器原理波形如图 11 所示,滤波电感电流  $i_L$  恒大于零;

[0054] 二、电源 A 单独供电,电路工作时序为 II、V 模式,变换器原理波形如图 12 所示,滤

波电感电流  $i_L$  恒大于零；

[0055] 三、电源 B 单独供电，电路工作时序为 III、VI 模态，变换器原理波形如图 13 所示，滤波电感电流  $i_L$  恒大于零；

[0056] 四、电源 A 供电，电源 B 储能，C 耗能，电路工作时序为 II、V、VII、VIII 模态，变换器原理波形如图 14 所示，滤波电感电流  $i_L$  过零，但平均值  $I_L$  大于零；

[0057] 五、电源 A 供电，电源 B 储能，C 反馈，电路工作时序为 II、V、VII、VIII 模态，变换器原理波形如图 15 所示，滤波电感电流  $i_L$  过零，但平均值  $I_L$  小于零。

[0058] 如图 16 所示：其中 (a) 为负载切换信号，(b) 为输出电压  $V_o$  波形，(c) 为电源 B 输入电流  $i_2$  波形。首先，两输入电源同时供电，稳定后，切除部分负载，使电源 A 输入功率大于负载功率，自动切换到能量回馈工作模态。按照其工作模态不同可以分为两个工作阶段：

[0059] 阶段 1：两个输入电源同时给负载供电，其中对电源 A 进行最大功率跟踪，使电源 A 以最大功率输入。通过电压调节器控制电源 B 输入的功率，使其提供不足的功率。从 (b) 中可以看出输出电压稳定在 50V，从 (c) 中可以看出电源 B 输入电流  $i_2$  恒大于零。

[0060] 阶段 2：切除部分负载，导致瞬态功率不平衡，电源 A 通过最大功率跟踪算法，工作在最大功率点，并保持恒定，由于输出电压大于给定值，使电压环调节器输出减小，变为负值，B 源切换到储能工作模态，使输入功率和负载消耗功率平衡。从 (b) 中可以看出输出电压通过调节又稳定在 50V，从 (c) 中可以看出电源 B 输入电流  $i_2$  恒小于零，说明可以进行能量回馈，自动实现能量分配。

[0061] 在以上工作过程中，也包含了两输入电源单独给负载供电和负载侧回馈能量的工作模态，这里不在详细说明。通过仿真证明本发明所提出拓扑和功率分配方法的可行性和正确性。

[0062] 下面以该拓扑在太阳能汽车中的应用为例进行说明：

[0063] 图 17 为该发明在太阳能汽车电机系统中的电气原理图，其具体实施步骤如下：

[0064] 1、太阳能电池和蓄电池同时给电机系统供电，当汽车启动或者重载时，需求功率较大，按照本发明所提出的功率分配方法，对太阳能电池进行最大功率跟踪，控制  $M_1$  通断，使太阳能电池以最大功率给电机系统供电，再控制  $M_2$  通断，使蓄电池提供不足的功率，这样可以充分利用太阳能，相对于单电源供电，可以提高瞬时功率。

[0065] 2、太阳能电池单独供电，当蓄电池故障或者太阳能电池正好满足电机系统需求时，太阳能电池单独供电。此时，通过控制  $M_1$  通断，保持功率平衡，确保电机系统运转正常。

[0066] 3、蓄电池单独供电。在阴天或者太阳能电池故障时，蓄电池单独供电。通过电压调节器控制  $M_2$  的通断，稳定输出电压，满足电机系统需求。

[0067] 4、太阳能电池供电，蓄电池储能，电机系统耗能。当光照较强烈，太阳能电池发出的功率大于电机系统需求的功率时，控制  $M_3$ ， $M_4$  的通断，将太阳能多余的功率储存到蓄电池中，避免能量浪费，光能得以充分利用。

[0068] 5、太阳能电池供电，蓄电池储能，电机系统回馈能量。当汽车在制动或者下坡时，电机系统工作在再生制动状态，将机械能转化为电能回馈到输入侧，在这种情况下，太阳能电池发出的能量和电机系统回馈的能量都要储存到蓄电池中，通过最大功率跟踪，控制  $M_1$  通断，使太阳能电池以最大功率输出，控制  $M_3$ ， $M_4$  通断，将能量储存到蓄电池中，避免能量浪费。

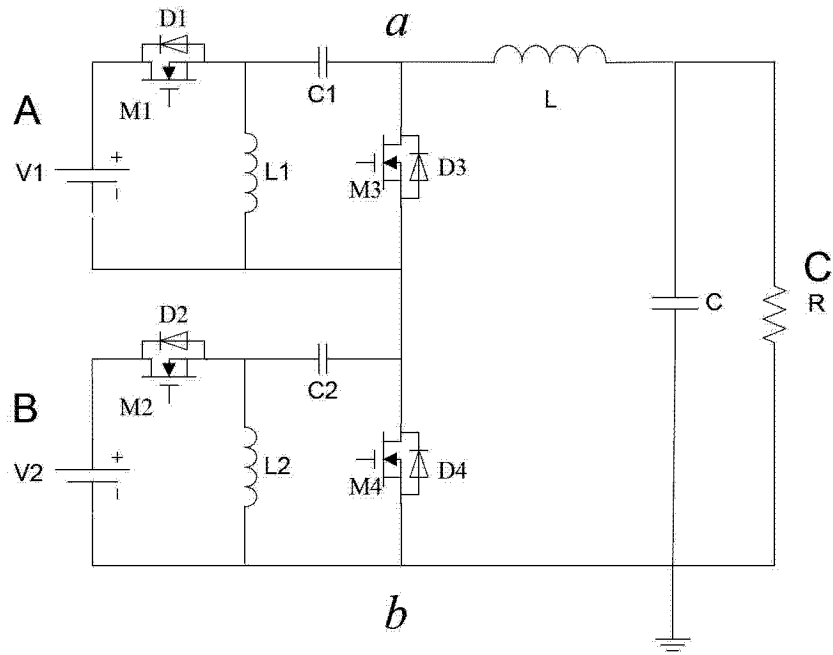


图 1

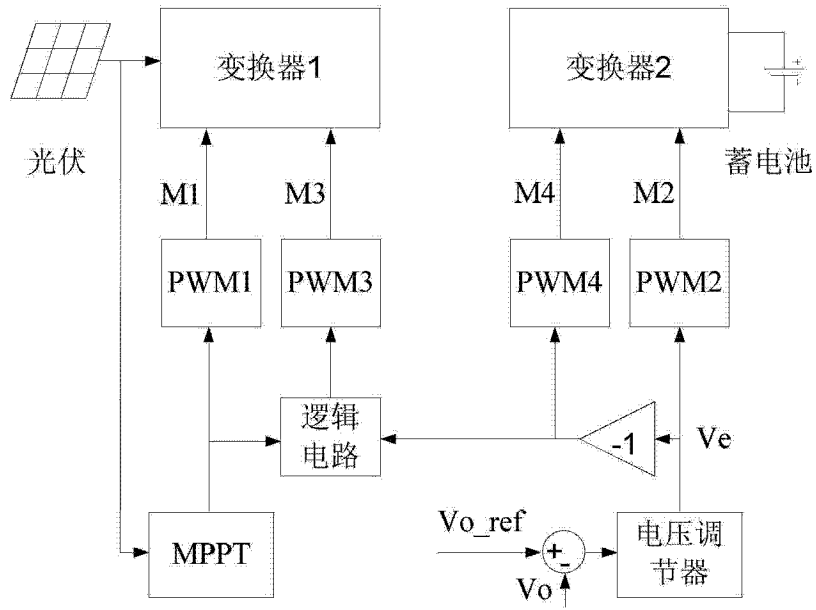


图 2



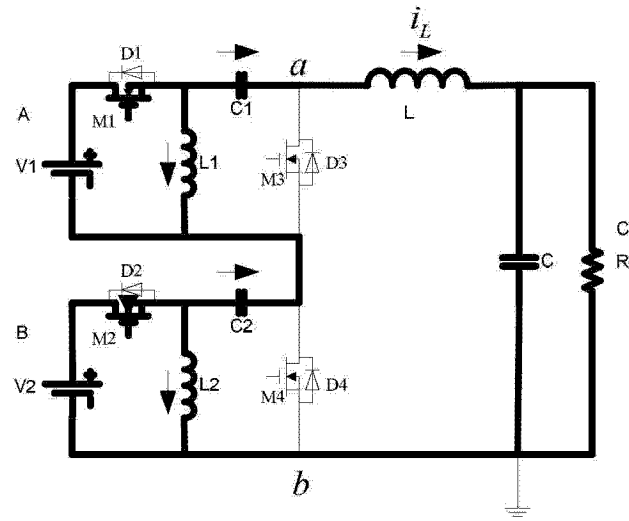


图 3

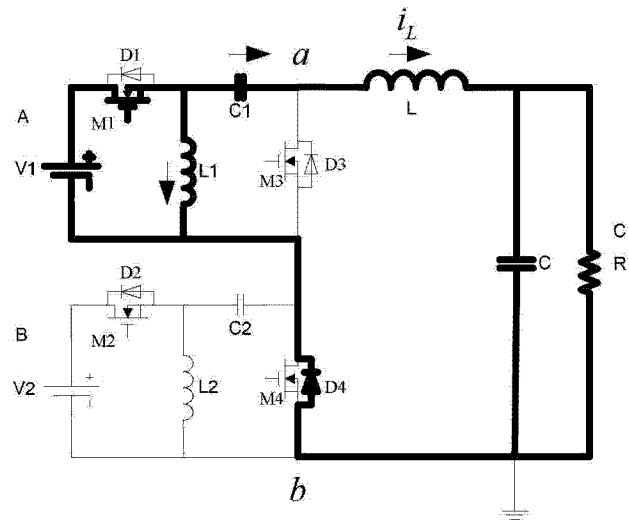


图 4

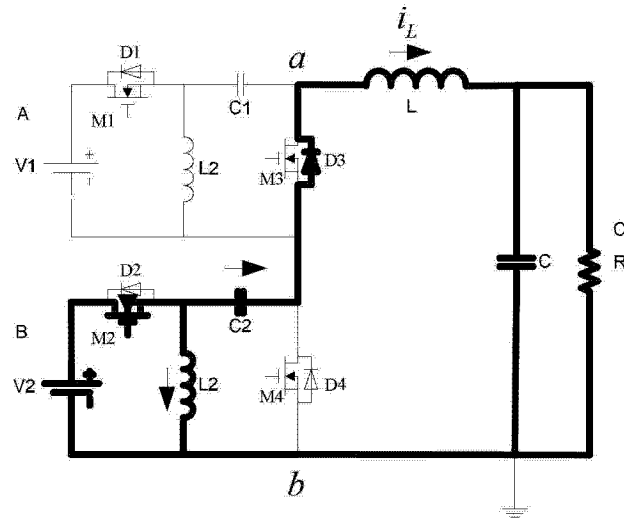


图 5

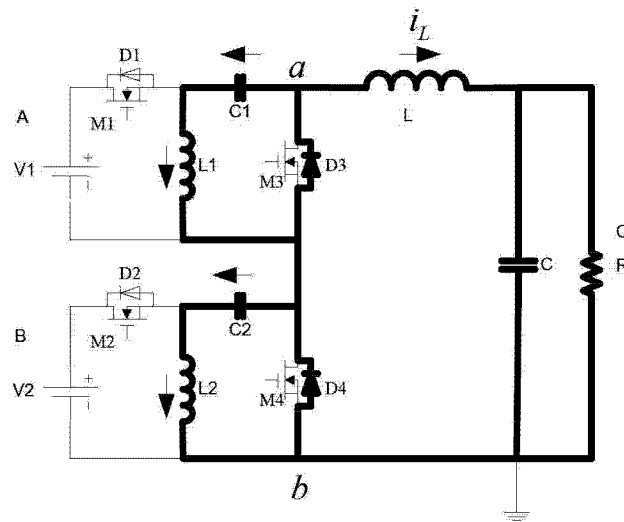


图 6

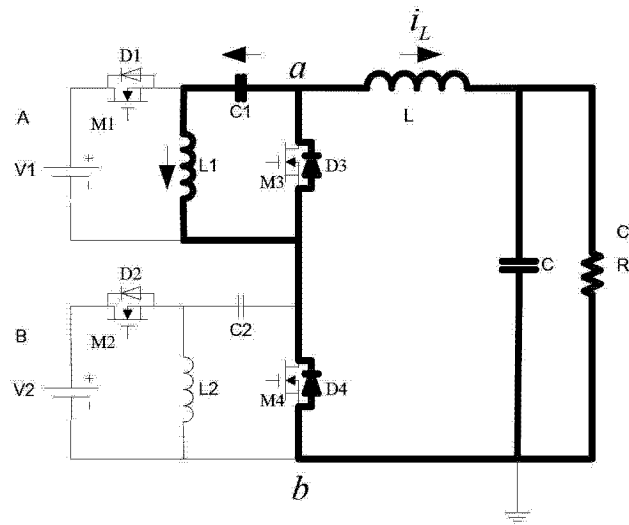


图 7

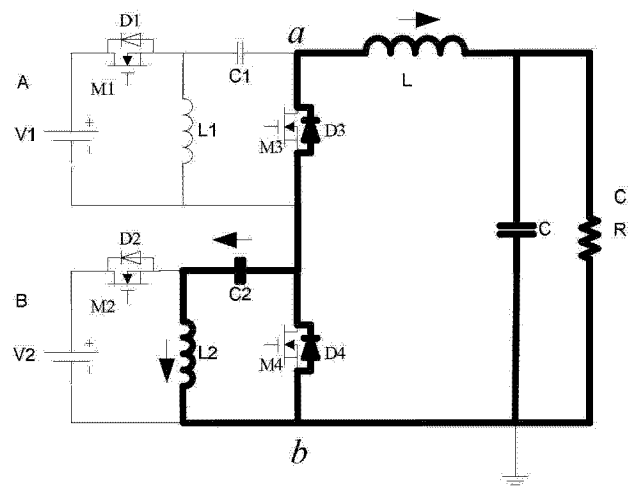


图 8

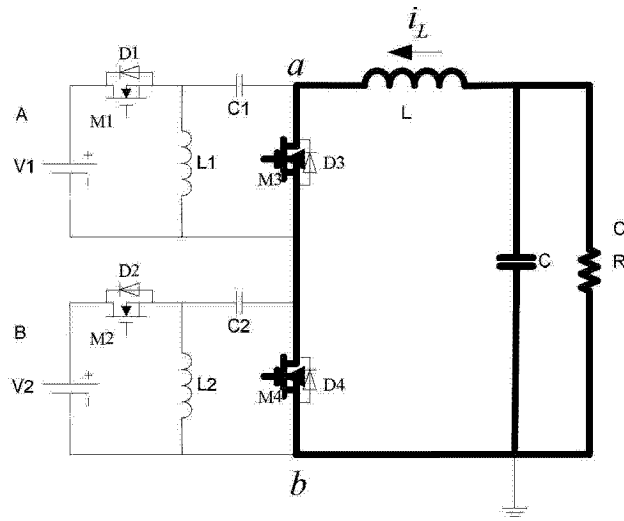


图 9

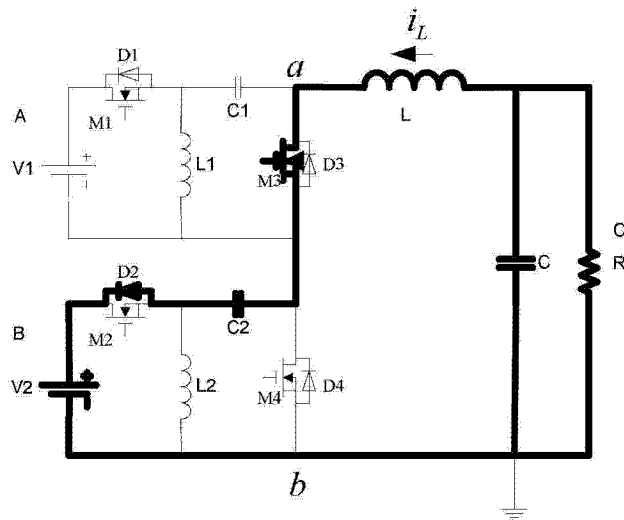


图 10

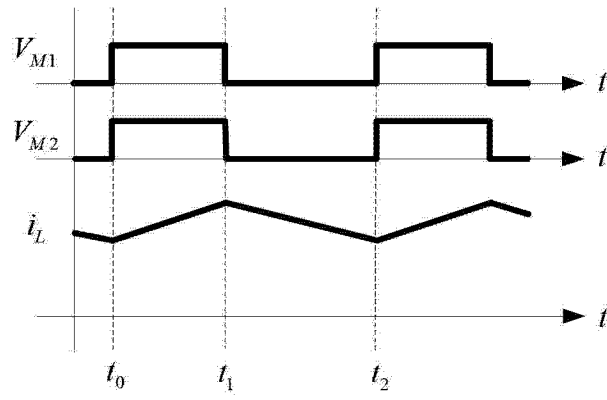


图 11

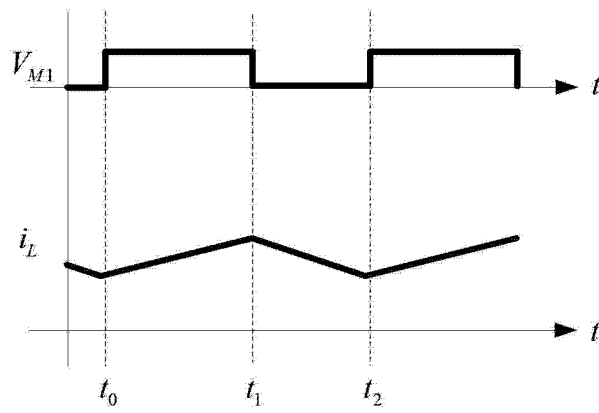


图 12

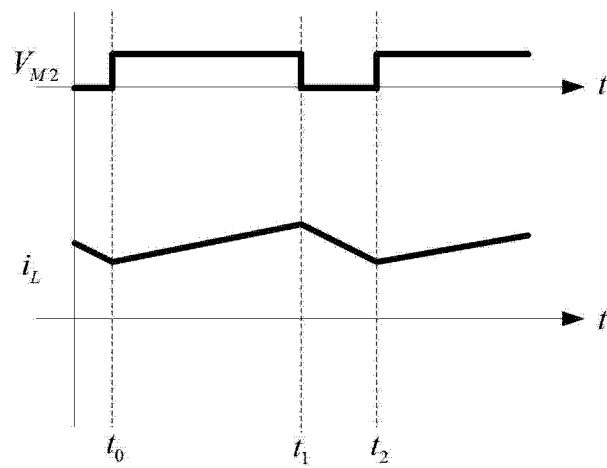


图 13

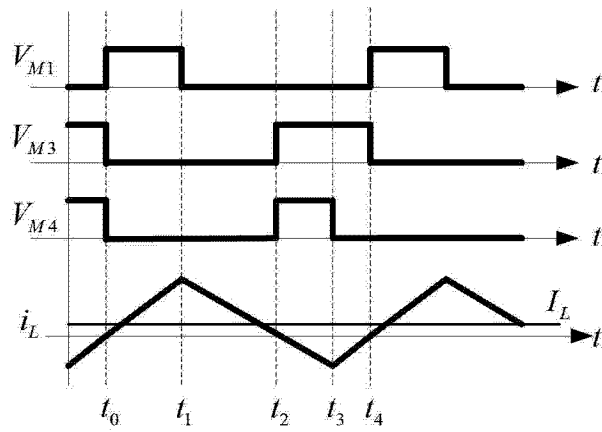


图 14

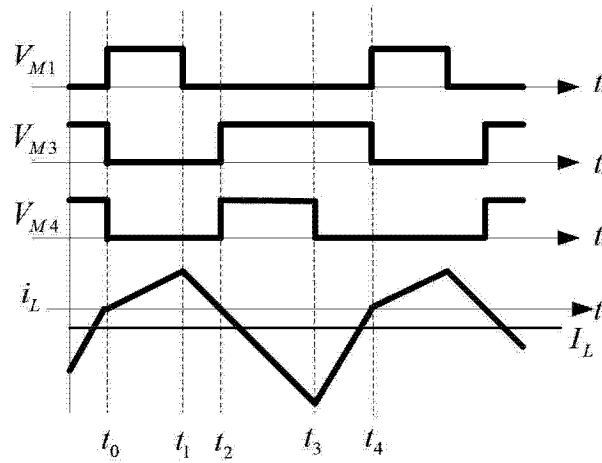
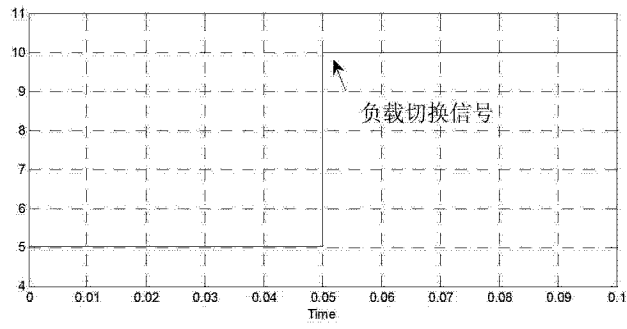
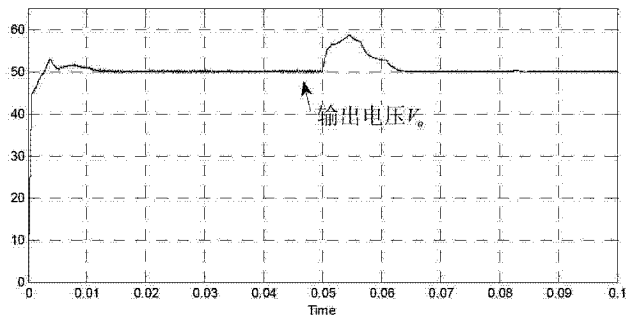


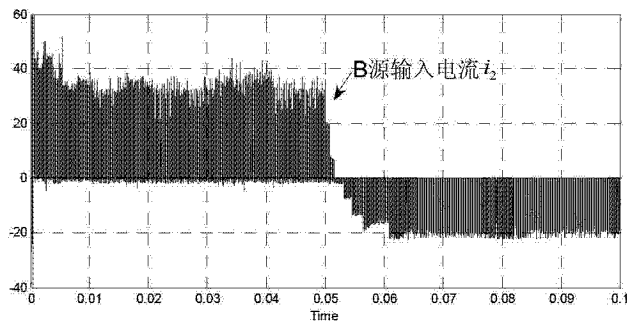
图 15



(a)



(b)



(c)

图 16

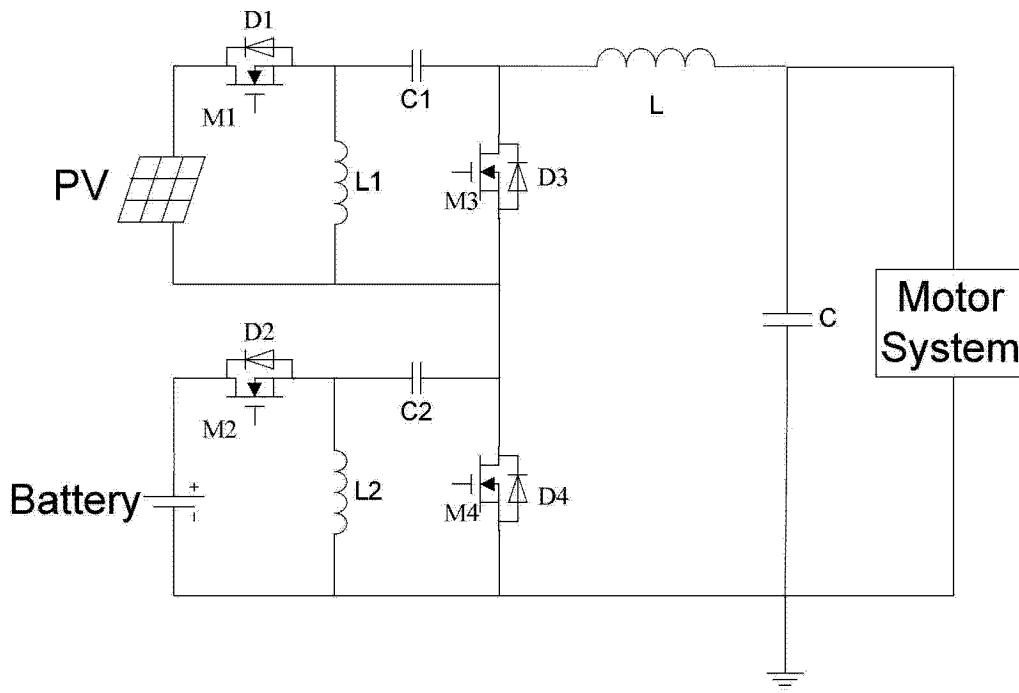


图 17