

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H02J 7/00 (2006.01)



[12] 实用新型专利说明书

专利号 ZL 200820179643.7

[45] 授权公告日 2009 年 12 月 23 日

[11] 授权公告号 CN 201369576Y

[22] 申请日 2008.12.4

[21] 申请号 200820179643.7

[73] 专利权人 新疆新能源股份有限公司

地址 830011 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市
高新区长春南路 399 号

[72] 发明人 赵丹

[74] 专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理有限公司

代理人 罗建民 张天舒

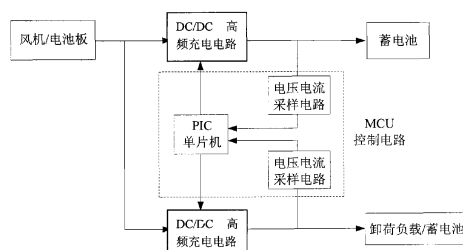
权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 3 页

[54] 实用新型名称

风力/光伏两用充电控制器

[57] 摘要

本实用新型公开了一种风力/光伏两用充电控制器，其包括风力发电机/太阳能电池板、蓄电池、卸荷负载、连接在风力发电机/太阳能电池板和蓄电池之间的充电电路，连接在风力发电机和卸荷负载之间的卸荷电路，还包括有 MCU 控制电路，通过 MCU 控制电路控制风力发电机/太阳能电池板对蓄电池进行充电。MCU 控制电路可控制充电电路实现充电时的最大功率跟踪，多组充电电路并联使用时可使各组电路达到均流。



1. 一种风力/光伏两用充电控制器，包括风力发电机/太阳能电池板、蓄电池、卸荷负载、连接在风力发电机/太阳能电池板和蓄电池之间的充电电路，连接在风力发电机和卸荷负载之间的卸荷电路，其特征在于还包括有 MCU 控制电路，所述 MCU 控制电路包括电压电流采样电路和 PIC 单片机，电压电流采样电路的一端与 PIC 单片机相连，其另一端分别与所述充电电路连接，通过 MCU 控制电路控制风力发电机/太阳能电池板对蓄电池进行充电。

2. 根据权利要求 1 所述的风力/光伏两用充电控制器，其特征在于所述 MCU 控制电路采用 PWM 方式控制充电电路按最大功率跟踪方式进行充电。

3. 根据权利要求 2 所述的风力/光伏两用充电控制器，其特征在于所述 MCU 控制电路通过 PIC 单片机控制充电电路按最大功率跟踪方式进行充电，所述 PIC 单片机包括有最大功率跟踪模块，所述最大功率跟踪模块包括依次连接的乘法器、比较器、调节器和恒电压跟踪器 CVT。

4. 根据权利要求 3 所述的风力/光伏两用充电控制器，其特征在于当蓄电池采用多个时，风力发电机/太阳能电池板与蓄电池之间的充电电路为并联的多个，每个充电电路与其中一个蓄电池连接。

5. 根据权利要求 4 所述的风力/光伏两用充电控制器，其特征在于当充电电路为并联的多个时，所述 MCU 控制电路包括有多组电压电流采样电路，每个电压电流采样电路与其中一个充电电路相连，PIC 控制各并联的多个充电电路充电。

6. 根据权利要求 1—5 之一所述的风力/光伏两用充电控制器，

其特征在于所述充电电路采用 DC/DC 高频充电电路，所述 DC/DC 高频充电电路采用 BUCK 电路结构，其包括第一开关管 (VT1)，第二二极管 (D2)、第二电容 (C2) 以及第一电感 (L1)，所述第一开关管 (VT1) 后串接第一电感 (L1)，第一开关管 (VT1) 的源极对地之间接第二二极管 (D2)，所述第二二极管 (D2) 的负极与所述第一开关管 (VT1) 的源极连接，在第一电感 (L1) 与地之间接第二电容 (C2)。

7. 根据权利要求 6 所述的风力/光伏两用充电控制器，其特征在于在所述风光发电机/太阳能电池板的输出端与所述 DC/DC 高频充电电路的输入端之间接入第一二极管 (D1) 和第一电容 (C1)，所述第一二极管 (D1) 的负极与所述第一开关管 (VT1) 的漏极相连，所述第一电容 (C1) 一端与所述第一二极管 (D1) 的负极相连，另一端与地相连。

8. 根据权利要求 1-5 之一所述的风力/光伏两用充电控制器，其特征在于通过 MCU 控制电路控制卸荷电路进行卸荷，所述 MCU 控制电路中的一组电压电流采样电路，其一端与所述卸荷电路相连，另一端与 PIC 单片机相连，所述卸荷电路采用 BUCK 电路结构，其包括第四开关管 (VT4)，第八二极管 (D8)、第八电容 (C8) 以及第四电感 (L4)，所述第四开关管 (VT4) 后串接第四电感 (L4)，第四开关管 (VT4) 的源极对地之间接第八二极管 (D8)，所述第八二极管 (D8) 的负极与所述第四开关管 (VT4) 的源极连接，在第四电感 (L4) 与地之间接第八电容 (C8)。

9. 根据权利要求 8 所述的风力/光伏两用充电控制器，其特征在于在所述风光发电机的输出端与卸荷电路的输入端之间接入第七二极管 (D7) 和第七电容 (C7)，所述第七二极管 (D7) 的负极与所述第四开关管 (VT4) 的漏极相连，所述第七电容 (C7) 一端与所述第七二极管 (D7) 的负极相连，另一端与地相连。

风力/光伏两用充电控制器

技术领域

本实用新型涉及一种通过风力发电机/太阳能电池板对蓄电池进行充电的装置，具体是一种风力/光伏两用充电控制器。

背景技术

以节能、环保的理念，新能源的开发利用成为主要方向。由于风力资源和阳光资源在时间和地域上具有一定的互补性，若同时利用风能和光能发电，可弥补采用单一能源可能造成的电力供应不足或不平衡的问题。因风力发电投资较低，而光伏发电系统维护量低，所以采用风光互补系统，性价比会大大提高。在风光互补系统中，如何最大限度的提高风力发电机和太阳能电池板的转换效率，如何延长蓄电池的使用寿命，如何使系统运行更稳定，是目前风光互补系统研究的重点。

目前风光互补系统存在以下缺点：其一，现有的风光互补系统多采用两个系统各自独立配备充电控制器，且所配备的充电控制器都是专用的，只能用于该系统中，也就是说，风力发电系统中的充电控制器是风力发电系统专用的，光伏发电系统中的充电控制器是光伏供电系统专用的，两系统的充电控制器不能通用，这样就造成整个风光互补系统装配复杂，投资较大；其二，普通充电控制器的卸荷控制方式是将整个卸荷负载全部接在卸荷电路的输出端，通过调节卸荷负载的大小来改变卸荷能量大小，此时蓄电池一般还没有充满，但能量却全部被耗在卸荷上，从而造成了能量的浪费。有的则采用分阶段接上卸荷负载，虽阶段越多，控制效果越好，但一般只能做到五六级左右，所以效果仍不够理想；其三，普通充电控制器在给蓄电池充电时只使用一组充电电路进行充电，因此，充电速度较慢，

电路中的损耗较大。

实用新型内容

本实用新型所要解决的技术问题是针对现有技术存在的上述不足，提供一种可通用于风力发电系统和光伏发电系统中进行充电的充电风力/光伏两用充电控制器。

本实用新型采用的技术方案是该风力/光伏两用充电控制器包括风力发电机/太阳能电池板、蓄电池、卸荷负载、连接在风力发电机/太阳能电池板和蓄电池之间的充电电路，连接在风力发电机和卸荷负载之间的卸荷电路，还包括有 MCU 控制电路，所述 MCU 控制电路包括电压电流采样电路和 PIC 单片机，电压电流采样电路的一端与 PIC 单片机相连，其另一端分别与所述充电电路连接，通过 MCU 控制电路控制风力发电机/太阳能电池板对蓄电池进行充电。

所述 MCU 控制电路采用 PWM 方式通过控制所述充电电路按最大功率跟踪方式进行充电。所述最大功率跟踪方式是通过电压电流采样电路对风力发电机或太阳电池板的输出电压、电流进行实时采样，根据采样值得到当前的输出功率，再将它与前一刻的记忆功率相比较，根据比较结果对充电电流进行加减调节，最终找到输出最大功率点。此过程实际是一个功率寻优的过程，寻优过程中不断地调整参考电流，从而使发电机/电池板始终工作在最大功率输出点。充电时通过对充电过程进行最大功率跟踪，大大提高了充电效率。

所述 MCU 控制电路通过 PIC 单片机控制所述充电电路按最大功率跟踪方式进行充电，PIC 单片机包括有最大功率跟踪模块，所述最大功率跟踪模块包括依次连接的乘法器、比较器、调节器和恒电压跟踪器 CVT，由电压电流采样电路对当前风力发电机/太阳能电池板的输出电压 V 和输出电流 I 进行实时检测，并将其传送给最大功率跟踪模块中的乘法器，乘法器通过运算获得当前功率值 $P_n = U_n \times I_n$ ，并将之送入比较器与上一功率值 P_{n-1}

进行比较,得到 $\Delta P_n = P_n - P_{n-1}$,比较器将 ΔP_n 送入调节器,由调节器进行调节:若 $\Delta P_n > 0$,则增加参考电流值,使 $I_{ref} = I_{ref} + \Delta I$;若 $\Delta P_n < 0$,则减小参考电流值,使 $I_{ref} = I_{ref} - \Delta I$;若 $\Delta P_n = 0$ 时,无需调整参考电流值, $I_{ref} = I_{ref}$,再通过恒电压跟踪器 CVT (因为输出的最大功率是一个定值,当输出电压恒定时,输出电流也是恒定的,恒压跟踪也相当于恒流跟踪)将充电电路的电流值保持为所确定的参考电流值 I_{ref} 的大小,从而使充电电路始终能以最大功率进行充电。这样可加快充电速度,不会造成能量的浪费,有效降低电路中的损耗。

优选的是,蓄电池可采用多个。当蓄电池采用多个时,风力发电机/太阳能电池板与蓄电池之间的充电电路为并联的多个,每个充电电路与其中一个蓄电池连接。当充电电路为并联的多个时,所述 MCU 控制电路包括有多组电压电流采样电路,每个电压电流采样电路与其中一个充电电路相连,PIC 单片机根据最大功率跟踪模块所确定的充电电流值以及所并联的多个充电电路的总数,进行运算后得到一个综合电流值,并将各并联充电电路的电流值控制为该综合电流值的大小,从而使各并联的多个充电电路达到均流。这样,整个电路中的损耗减小,从而加快了充电速度。

所述充电电路可采用 DC/DC 高频充电电路,所述 DC/DC 高频充电电路采用 BUCK 电路,其包括第一开关管 VT1,第二二极管 D2、第二电容 C2 以及第一电感 L1,所述第一开关管 VT1 后串接第一电感 L1,第一开关管 VT1 的源极对地之间接第二二极管 D2,所述第二二极管 D2 的负极与所述第一开关管 VT1 的源极连接,在第一电感 L1 与地之间接第二电容 C2。由于 BUCK 电路为降压变换电路结构,风力发电机/太阳能电池板输出的电压通过 BUCK 电路后电压将减小,在功率一定的情况下,电路中的电压减小,则电流会相应的增加,所以经 BUCK 电路后输出电流会增加,此电流即为给蓄电池充电的电流,充电电流增大,可以提高蓄电池的充电速度,这样就提高了充电的工作效率。

在所述风力发电机/太阳能电池板的输出端与所述 DC/DC 高频充电电路的输入端之间还可接入第一二极管 D1 和第一电容 C1 用于对风力发电机/太阳能电池板的输出进行整流和滤波, 所述第一二极管 D1 的负极与所述第一开关管 VT1 的漏极相连, 所述第一电容 C1 一端与所述第一二极管 D1 的负极相连, 另一端与地相连。

所述 MCU 控制电路与所述卸荷电路连接, 所述 MCU 控制电路中的一组电压电流采样电路, 其一端与所述卸荷电路相连, 另一端与 PIC 单片机相连。

所述卸荷电路也采用 BUCK 电路结构, 其包括第四开关管 VT4, 第八二极管 D8、第八电容 C8 以及第四电感 L4, 所述第四开关管 VT4 后串接第四电感 L4, 第四开关管 VT4 的源极对地之间接第八二极管 D8, 所述第八二极管 D8 的负极与所述第四开关管 VT4 的源极连接, 在第四电感 L4 与地之间接第八电容 C8。卸荷电路采用 BUCK 电路结构, 一是为了在卸荷时可以使电流从小向大慢慢进行调节, 另外当整个充电系统进行充电时, 可以在该卸荷电路的输出端将卸荷负载换接成蓄电池当充电电路使用, 这样就可最大限度的利用已有的电路, 不会因为不使用而闲置。

在所述风光发电机的输出端与所述卸荷电路的输入端之间还可接入第七二极管 D7 和第七电容 C7, 所述第七二极管 D7 的负极与所述第四开关管 VT4 的漏极相连, 所述第七电容 C7 一端与所述第七二极管 D7 的负极相连, 另一端与地相连。

MCU 控制电路通过控制卸荷电路中第四开关管 VT4 的导通时间来实现卸荷: 由电压电流采样电路采集卸荷电路中某一固定点的电压值, 将此电压值送入 PIC 单片机与其内部设定的基准电压进行比较, 如果采样电压值小于基准电压值, 则表明卸荷电流偏小, PIC 单片机控制增大卸荷电路上的电流值; 如果采样电压值大于基准电压值, 则表明卸荷电流偏大, PIC 单片机控制减小卸荷电路上的电流值。卸荷电路的卸荷过程为无级卸荷

过程。所述无级卸荷是通过 MCU 控制电路中的 PIC 单片机对电压电流采样电路所获取的采样值进行处理后发出脉宽调制信号（PWM 信号）控制卸荷电路中开关管的导通时间来实现的。这样就可以保证蓄电池的最佳充电特性，使电能得到充分利用，保证了蓄电池的使用寿命。

本实用新型风力/光伏两用充电控制器通过 MCU 控制电路对充电电路进行控制就可以将之通用于风力发电机和太阳能电池板的充电，而无需在两个不同的充电系统中各自配备充电控制器，因而有效降低了风光互补发电系统的制造成本。

由于所述充电电路可多组并联使用，并通过电压电流采样电路采集蓄电池充电电流值，将采样值送入 PIC 单片机，由 PIC 单片机对采样值进行运算处理，然后发出控制信号来调节各并联充电电路中的充电电流，最终使各并联电路的电流达到均流，从而使整个电路中的损耗减小，充电速度加快。

并且，由于现有的卸荷电路是通过调节卸荷负载的大小而不是通过调节卸荷电流来改变卸荷能量的，而卸荷负载最多只能进行分段调节，而不能线性调节，这样就会造成能量的浪费。而本实用新型中的卸荷电路为无级卸荷电路，可以保证蓄电池的最佳充电特性，使电能得到充分利用，延长了蓄电池的使用寿命。

本实用新型具有投资小，充电效率高、电路中的损耗小等优点。

附图说明

图 1 为本实用新型风力/光伏两用充电控制器的结构框图

图 2 为本实用新型风力/光伏两用充电控制器的电路原理图

图 3 为本实用新型风力/光伏两用充电控制器的电路原理图（当蓄电池采用两个时）

图 4 为本实用新型风力/光伏两用充电控制器的 P-I 特性

曲线图

图 5 为本实用新型 PIC 单片机中最大功率跟踪模块(MPPT)的控制原理框图

图 6 为本实用新型 PIC 单片机中最大功率跟踪模块(MPPT)的程序流程图

具体实施方式

以下结合实施例和附图，对本实用新型作进一步详细描述。

下面实施例为本实用新型的非限定性实施例。

如图 1 所示，本实用新型风力/光伏两用充电控制器包括太阳能电池板、风力发电机、蓄电池、卸荷负载、分别连接在所述风力发电机/太阳能电池板和蓄电池之间的充电电路、连接在风力发电机和卸荷负载之间的卸荷电路、以及 MCU 控制电路。该风力/光伏两用充电控制器通过充电电路对蓄电池进行充电，通过卸荷电路将多余的能量释放掉。

如图 2 所示，所述充电电路为 DC/DC 高频充电电路，所述 DC/DC 高频充电电路采用 BUCK 电路结构，其包括第一开关管 VT1，第二二极管 D2、第二电容 C2 以及第一电感 L1，所述第一开关管 VT1 后串接第一电感 L1，用于储能，第一开关管 VT1 的源极对地之间接第二二极管 D2，所述第二二极管 D2 的负极与所述第一开关管 VT1 的源极连接，在第一开关管 VT1 关断时，第二二极管 D2 给电路提供一个续流回路，当第一开关管 VT1 关断时，可通过此续流回路将第一电感 L1 中的能量传递给负载，以使电路可以连续向负载供电。在第一电感 L1 的另一端与地之间接第二电容 C2，用于滤波。

在所述风机/太阳能电池板的输出端与所述 DC/DC 高频充电电路的输入端之间还可接入第一二极管 D1 和第一电容 C1，第一开关管 VT1 的漏极与第一二极管 D1 的负极相连，第一二极管 D1 的负极和第一开关管 VT1 的漏极间对地接第一电容 C1，第一二极管 D1 和第一电容 C1 用于输入端的整流和滤波。第一二极

管 D1、第一电容 C1、第二二极管 D2、第二电容 C2、第一开关管 VT1、第一电感 L1 构成一组完整的充电电路。

这样，风力发电机/太阳能电池板的输出电压经第一二极管 D1 和第一电容 C1 后，经过 BUCK 电路对蓄电池充电。

当然，蓄电池可采用多个，这样，风力发电机/太阳能电池板与多个蓄电池之间的充电电路也为多个。也就是说，可以有多个充电电路并联起来对蓄电池充电。图 3 中示出的是采用两个蓄电池的情况，两蓄电池和太阳能电池板之间的充电电路也为两组。

由于风力发电机的发电量较大，为防止飞车现象的发生，需要加入卸荷负载将多余能量释放掉。卸荷负载可选取纯阻性负载。

图 2 所示，本实施例中，卸荷电路也采用 BUCK 电路结构，其包括第四开关管 VT4，第八二极管 D8、第八电容 C8 以及第四电感 L4，所述第四开关管 VT4 后串接第四电感 L4，第四开关管 VT4 的源极对地之间接第八二极管 D8，所述第八二极管 D8 的负极与所述第四开关管 VT4 的源极连接，在第四电感 L4 与地之间接第八电容 C8。

另外，在所述风光发电机的输出端与所述卸荷电路的输入端之间接入第七二极管 D7 和第七电容 C7，所述第七二极管 D7 的负极与所述第四开关管 VT4 的漏极相连，所述第七电容 C7 一端与所述第七二极管 D7 的负极相连，另一端与地相连。

卸荷负载和蓄电池可根据整个充电系统的功能需要随时接到系统的输出端，即当系统在充电时，卸荷电路可作为充电电路使用，即将卸荷电路的输出端接在蓄电池上，与其它充电电路并联使用；当系统需要卸荷时，该电路中的输出端接卸荷负载，这时作卸荷电路使用。

MCU 控制电路包括电压电流采样电路和 PIC 单片机。PIC 单片机可采用市面上可售的单片机，如 PIC16F917。本实施例中，如图 2 所示，所述电压电流采样电路包括两组（当然也可以为

多组，根据需要确定)，一组电压电流采样电路的一端与 PIC 单片机相连，另一端与充电电路相连，另一组电压电流采样电路的一端与 PIC 单片机相连，另一端与卸荷电路连接。

由于风机和太阳能电池板的输出功率并不随输出电流的增大而增大，而是在输出电流为某一值时，输出功率最大。图 4 示出了采用最大功率跟踪（MPPT）方式过程中风力发电机/太阳能电池板的输出电流与输出功率的特性曲线图，该图的横坐标为电流轴，单位为安培（A），纵坐标为功率轴，单位为瓦（W），在图 4 中，输出功率值 P_n 所对应的电流值点就是使输出功率达到最大的点，MCU 控制电路需要做的就是将充电电路的电流值调节为使输出功率达到最大的点所对应的电流值的大小。

MCU 控制电路通过控制充电电路按最大功率跟踪方式调节充电电流，完成风能和太阳能的存储。MCU 控制电路是通过产生 PWM 调制信号来控制 DC/DC 高频充电电路，采用 PWM 方式调节 DC/DC 高频充电电路的输出电压和电流。

在 MCU 控制电路中，通过电压电流采样电路实时采集蓄电池的电压和充电电流值，并将该采样值送入 PIC 单片机，由 PIC 单片机进行运算处理后发出控制信号，来控制充电电路中的开关管的开启或关闭，以调节充电电路的电流值，从而实现充电时的最大功率跟踪。

如图 5 所示，PIC 单片机包括最大功率跟踪模块（MPPT），所述最大功率跟踪模块包括依次连接的乘法器、比较器、调节器和恒电压跟踪器 CVT。

图 6 为最大功率跟踪模块（MPPT）的程序流程图。首先，由电压电流采样电路对当前风力发电机/太阳能电池板的输出电压 V 和输出电流 I 进行实时检测，并将其传送给最大功率跟踪模块中的乘法器，乘法器通过运算获得当前的功率值 $P_n = U_n \times I_n$ ，并将之送入比较器与上一功率值 P_{n-1} （记忆功率）进行比较，得到 $\Delta P_n = P_n - P_{n-1}$ ，比较器将 ΔP_n 送入调节器，由调节器对充电电流值进行加减调节：若 $\Delta P_n > 0$ ，则增加参考电流值，使 I_{ref}

$= I_{ref} + \Delta I$ ；若 $\Delta P < 0$ ，则减小参考电流值，使 $I_{ref} = I_{ref} - \Delta I$ ；若 $\Delta P_n = 0$ 时，无需调整参考电流值， $I_{ref} = I_{ref}$ ，这样，直到找到输出最大功率点，将充电电路的电流值控制为该最大功率点对应的参考电流值 I_{ref} 的大小，恒电压跟踪器 CVT 的作用是将风力发电机/太阳能电池板的工作电压作为反馈，达到稳定蓄电池输出电压的目的，即当找到输出最大功率点时，使风力发电机/太阳能电池板的输出电压成为一个定值。对参考电流值进行加减调节后等待 ΔT 时间，然后再重复进行上述步骤，就这样不断的循环下去，不断的寻找最大功率点，最终实现风力发电机和太阳能电池板的最大功率跟踪。这样就使充电电路始终能以最大功率进行充电。

如图 3 中示出了太阳能电池板与两个蓄电池之间的两组并联的充电电路，用于分别对两个蓄电池充电。第三二极管 D3、第四二极管 D4、第三电容 C3、第四电容 C4、第二开关管 VT2 以及第二电感 L2 以跟第一组充电电路相同的连接方式组成另一组充电电路。充电时，PIC 单片机首先通过最大功率跟踪模块对风力发电机/太阳能电池板的最大输出功率进行跟踪，确定出充电电流值，然后 PIC 单片机根据最大功率跟踪模块所确定的充电电流值以及所并联充电电路的数量，进行运算后得到一个综合电流值，并由 PIC 单片机发出 PWM 调制信号来控制各并联充电电路中的第一开关管 VT1 和第二开关管 VT2 的导通时间，从而改变电路中的充电电流，并将各并联充电电路的电流值控制为该综合电流值的大小，最终使各并联电路的电流达到均流，以使整个电路中的损耗减小，并加快充电速度。

在充电过程中，当电压电流采样电路检测到蓄电池的电压达到额定充电电压时，将此信号反馈给 PIC 单片机，PIC 单片机就会发出电池已充满的指令：关闭第一开关管 VT1，同时打开第四开关管 VT4，进行卸荷。卸荷时，通过电压电流采样电路对当前的卸荷电流值进行检测，然后将卸荷电流值传送给 PIC 单片机，由 PIC 单片机运算处理后发出 PWM 调制信号来控制第四开

关管 VT4 的导通时间，从而实现电路的无级卸荷。具体的调节方法是，首先电压电流采样电路可通过采样电阻采集卸荷电路中某一固定点的电压值，将此电压值被送入 PIC 单片机与其内部设定的基准电压进行比较，如果采样电压值小于基准电压值，则表明卸荷电流偏小，需要将卸荷电路上的电流值调大，如果采样电压值大于基准电压值，则表明卸荷电流偏大，需要将卸荷电路上的电流值调小。

风力发电机与蓄电池之间可并联多个充电电路对蓄电池进行充电，但只需一个卸荷电路就可以实现电路的卸荷。因为卸荷电路中所能够释放的能量主要是由卸荷电流的大小决定，电流越大，消耗在卸荷负载上的能量越多，而卸荷电流是线性可调的，所以当需要释放的能量较大时，可以通过 MCU 控制电路将卸荷电流调大，从而将多余的能量释放掉。

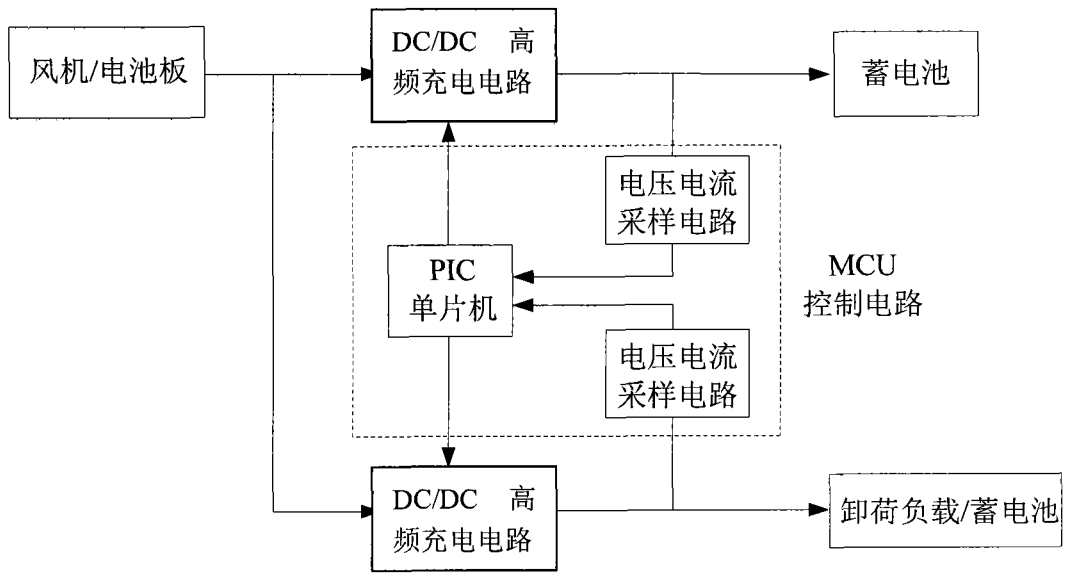


图 1

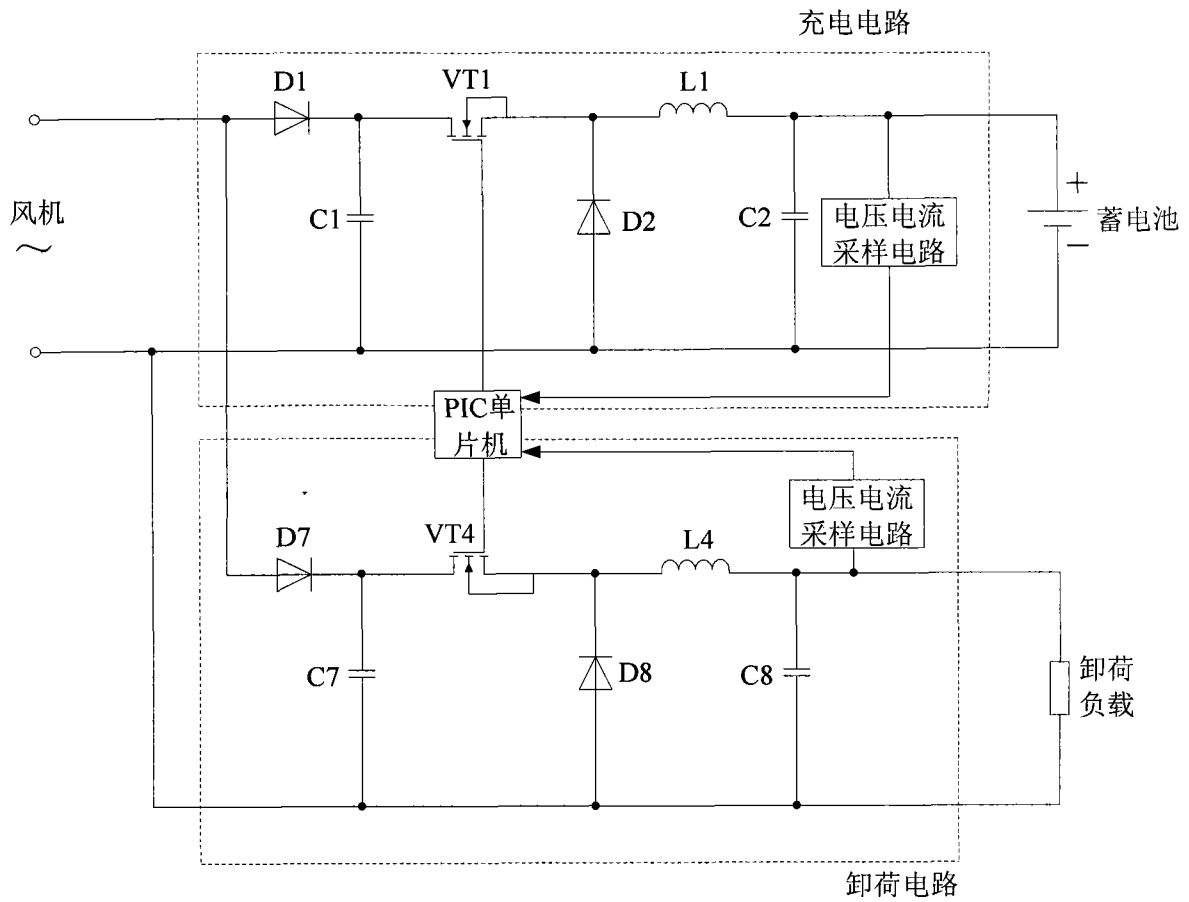


图 2

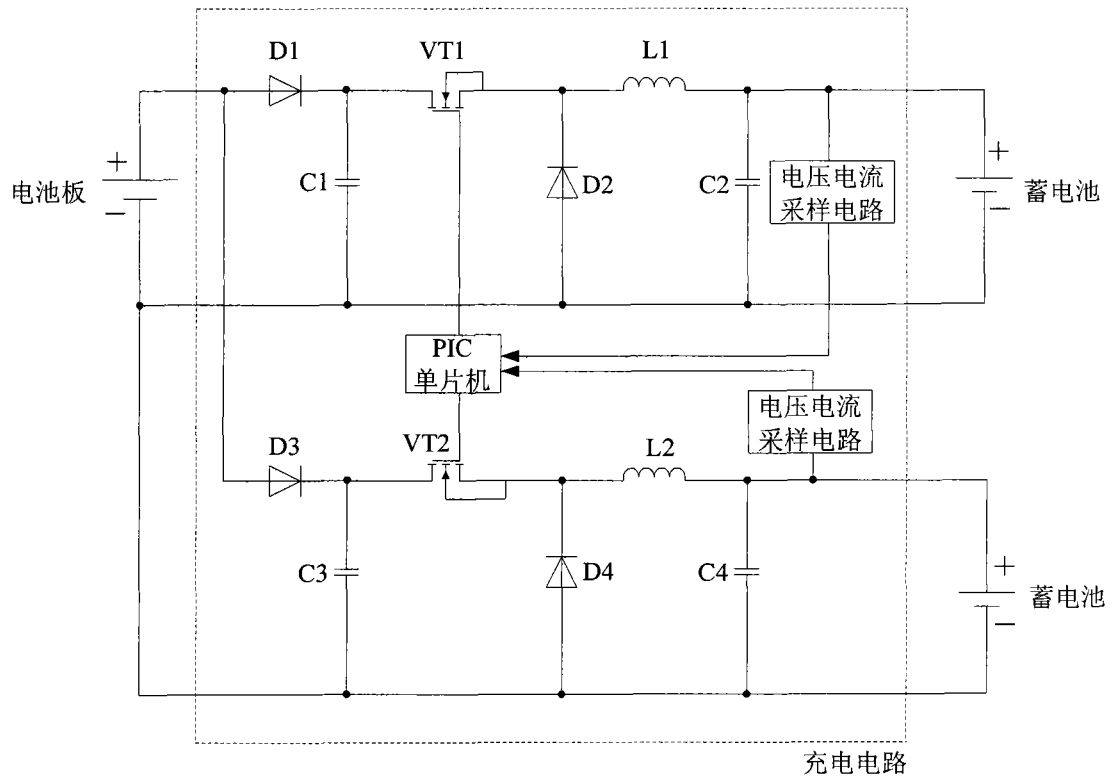


图 3

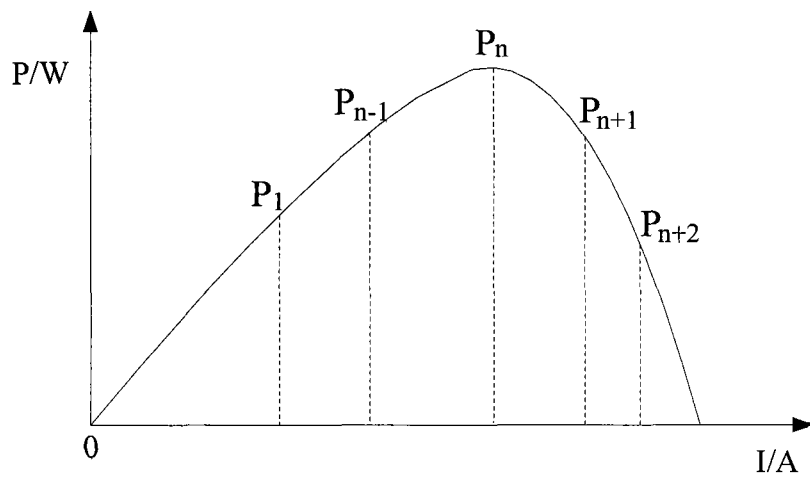


图 4

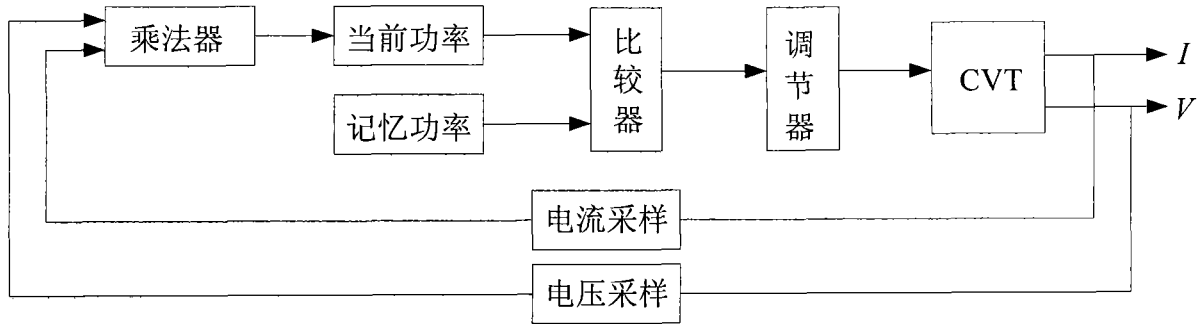
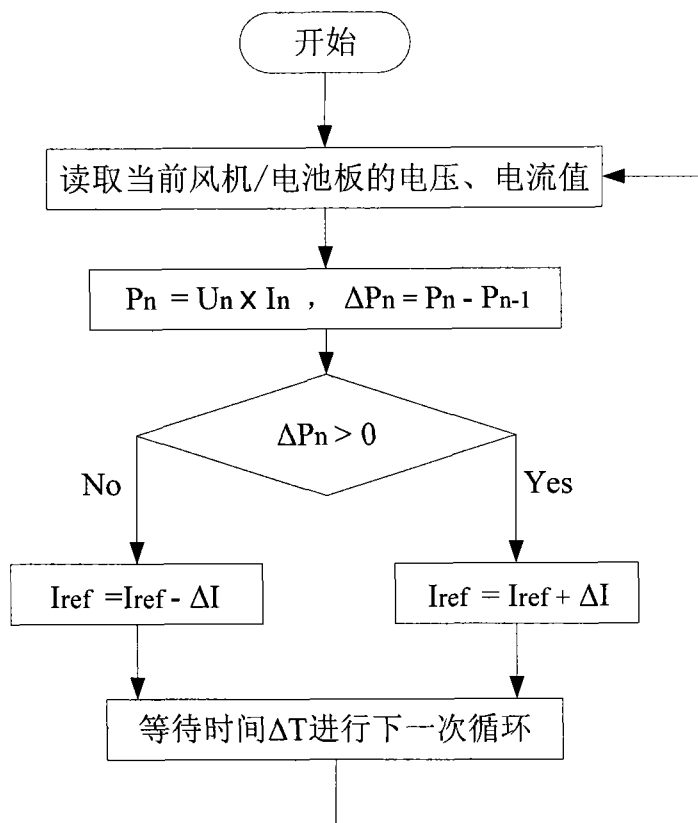


图 5



注: I_{ref} 给定电流
 ΔI 调节步长

图 6