

光能与生物质能互补的林区微电网控制策略

赵立博，曹秋涵，孙曦冉，苦呷鲁

（北京林业大学，北京市100083）

摘要：针对林区供电难及独立光储系统供电稳定性差的问题，提出一种为林区瞭望塔交流微电网供电的生物质能与太阳能互补的协调控制系统。系统中包括光伏电池、蓄电池和生物质发电3种分布式电源。光储系统承担大部分时间的供电，生物质发电机组作为后备电源，用来补充光储系统供电不足时的电力需求。系统通过控制3种电源协调工作，确保太阳能资源利用最大化，供电系统稳定合理运行以及快速动态响应。通过PSCAD仿真平台进行仿真模拟验证了系统协调控制的有效性。

0引言

林区一般位置偏远，难以采用大电网供电，独立微电网在这方面有得天独厚的优势。微电网是由分布式电源、储能系统、能量转换装置、监控和保护装置、负荷等汇集而成的小型发电、配电、用电系统，传统方式采用光伏—蓄电池系统进行供电，对于光照有很强的依赖性[1-3]。林区瞭望塔用电负荷的主要特点是随机性强，用电需求分布在一天不同时段以及一年不同季节，采用传统微电网不仅成本高、转换率低，而且受天气及季节性影响，导致运行不稳定，极易出现供电不足的情况。我国森林覆盖面积广，便于获取生物质能的原材料，利用太阳能与生物质能互补供电系统进行发电，可以优势互补，能有效降低经济成本，提高供电的稳定性和可靠性[4-6]。

光伏发电采用光伏电池与蓄电池结合的光储系统，文献[7]、文献[8]对几种控制方法进行了详细的比较与说明。本文中采用了电导增量法实现最大功率点跟踪。蓄电池作为储能单元，平抑太阳能功率的波动，采用双向DC/DC变换器来实现直流母线电压的稳定。文献[9]介绍了一种双向变换器的控制策略，可以对蓄电池的充放电进行有效控制、保护蓄电池不受损坏、延长蓄电池的使用寿命。文献[10]介绍了光储系统的微电网控制技术，但该系统的稳定运行主要依靠储能元件的调节作用，对于容量的合理配置有较高要求。

生物质能发电目前一般采用微型燃气轮机与永磁同步发电机作为发电机组，采用双PWM换流器将从发电机得到的电能输入微电网。文献[11]介绍了一种双PWM换流器，其能够减小变换器间直流电压波动以及对直流电容的容量需求，大大提高了整个微型燃气轮机发电系统承受负荷冲击的能力。文献[12]、文献[13]介绍了微型燃气轮机的数学模型。文献[14]介绍了一种微电网控制系统，考虑到了多种分布式电源，但其没有给出一套系统的运行策略，而且其系统主要基于微燃机发电系统，太阳能没有得到最大化利用。本文将这两种系统进行优势互补，通过对各电源功率的控制，为负载提供可靠电能。

1林区微电网主电路结构及数学模型建立

1.1主电路构成

如图1所示，本文给出了一种太阳能与生物质能互补发电系统，该系统包含光伏—蓄电池发电系统和生物质燃料发电系统。光伏电池在有光照条件下输出电能，为负载供电，蓄电池作为储能装置来储存和调节光伏电池所发出的电能。而生物质发电机组作为后备能源，在光照不足或负载过大的条件下补充微电网中不足的功率。

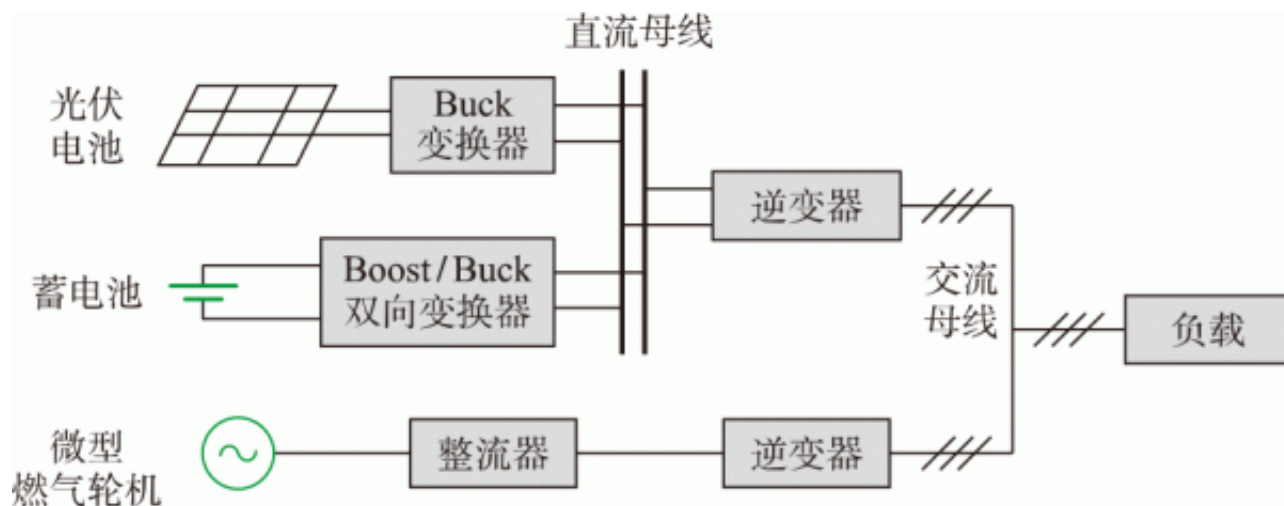


图 1 系统拓扑图

Fig. 1 System topology

1.2 数学模型建立

1.2.1 光伏电池数学模型

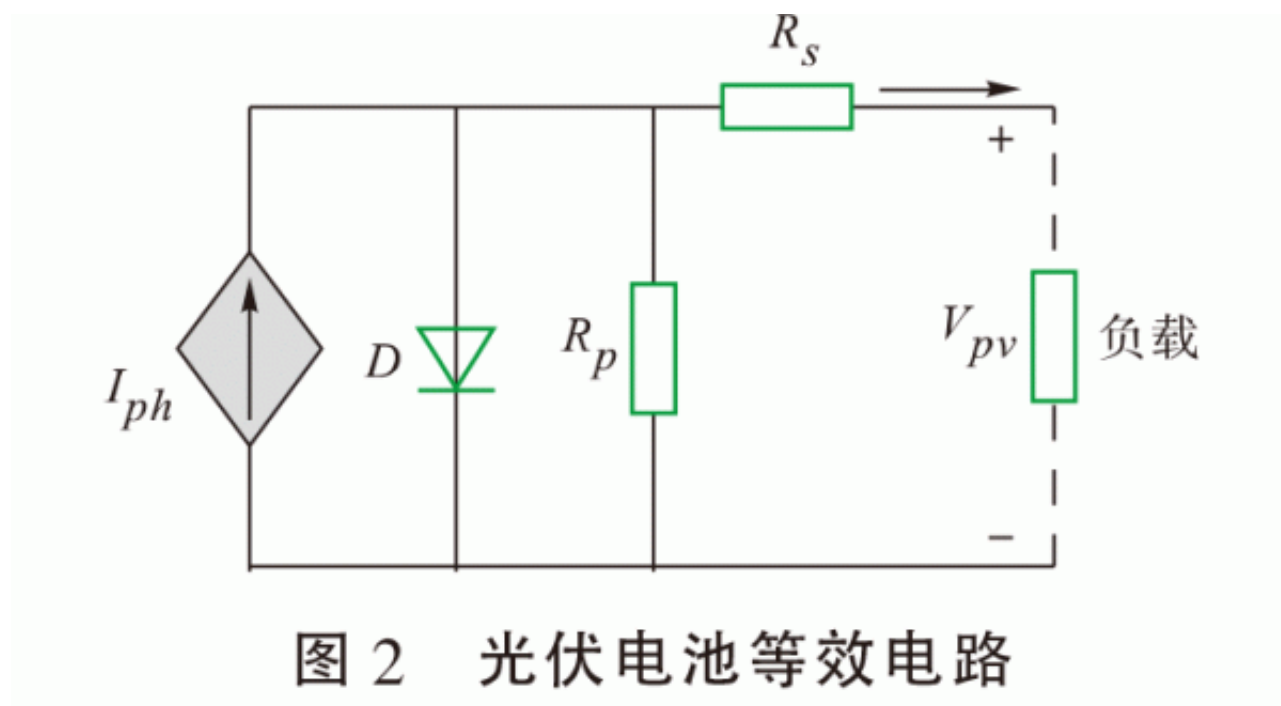


图 2 光伏电池等效电路

Fig. 2 Photovoltaic battery equivalent circuit

根据图2所示的光伏电池等效电路，可以得到光伏电池的函数方程为：

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \frac{q(V_{pv} + IR_s)}{AKT} - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

式中： I_{ph} ——光电流，A；
 I_0 ——反向饱和电流，A；
 R_p ——光伏电池并联电阻， Ω ；
 R_s ——光伏电池串联电阻， Ω ；
 q ——电子电荷， $q = 1.6 \times 10^{19}$ C；
 A ——二极管因子；
 K ——玻尔兹曼常数， $K = 1.38 \times 10^{-23}$ J / K；
 T ——绝对温度，K。

1.2.2 蓄电池模型

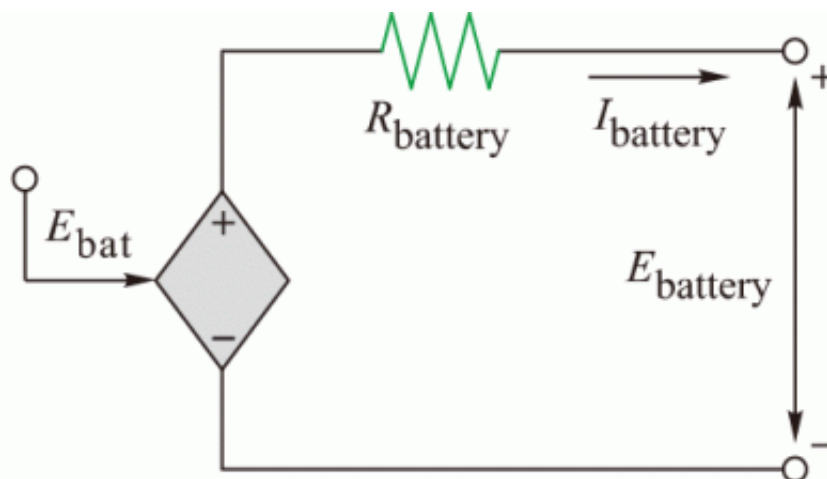


图 3 通用蓄电池等效电路

Fig. 3 General storage battery equivalent circuit

蓄电池作为分布式发电中的储能设备，其作用不言而喻，但是蓄电池内部参数之间的关系较为复杂，而且相互之间呈高度非线性关系，这成为蓄电池建模的难点。常用的蓄电池模型有谢菲尔德模型、戴维南模型以及通用模型。本文所采用的蓄电池模型为通用模型，其物理模型如图3所示，由受控电压源和一个定值电阻串联组成，其中 E_{bat} 由式（2）确定：

$$E_{bat} = E_0 - E_K \left(\frac{Q}{Q - \int I_{battery} dt} \right) + A \exp \left(-B \int I_{battery} dt \right) \quad (2)$$

式中： E_{bat} —— 蓄电池空载时的电压，V；

E_0 —— 蓄电池额定电压，V；

E_K —— 极化电压，V；

Q —— 蓄电池容量，Ah；

$\int I_{battery} dt$ —— 实际充放电电量，Ah；

A —— 指数域电压降落值，V；

B —— 指数域时间常数倒数， Ah^{-1} ；

$E_{battery}$ —— 蓄电池实际端电压，V；

$R_{battery}$ —— 终端电阻， Ω ；

$I_{battery}$ —— 蓄电池充放电电流，A。

1.2.3 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机模型如图4所示，其中，排气温度函数 $f1$ 、涡轮转矩输出函数 $f2$ 分别为：

$$f_1 = T_{\text{ref}} - 700 (1 - \omega_{f_1}) + 500 (1 - \omega) \quad (3)$$

$$f_2 = 1.3 (\omega_{f_2} - 0.23) + 0.5 (1 - \omega) \quad (4)$$

式中： T_{ref} ——排气温度基准，取 $T_{\text{ref}} = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；

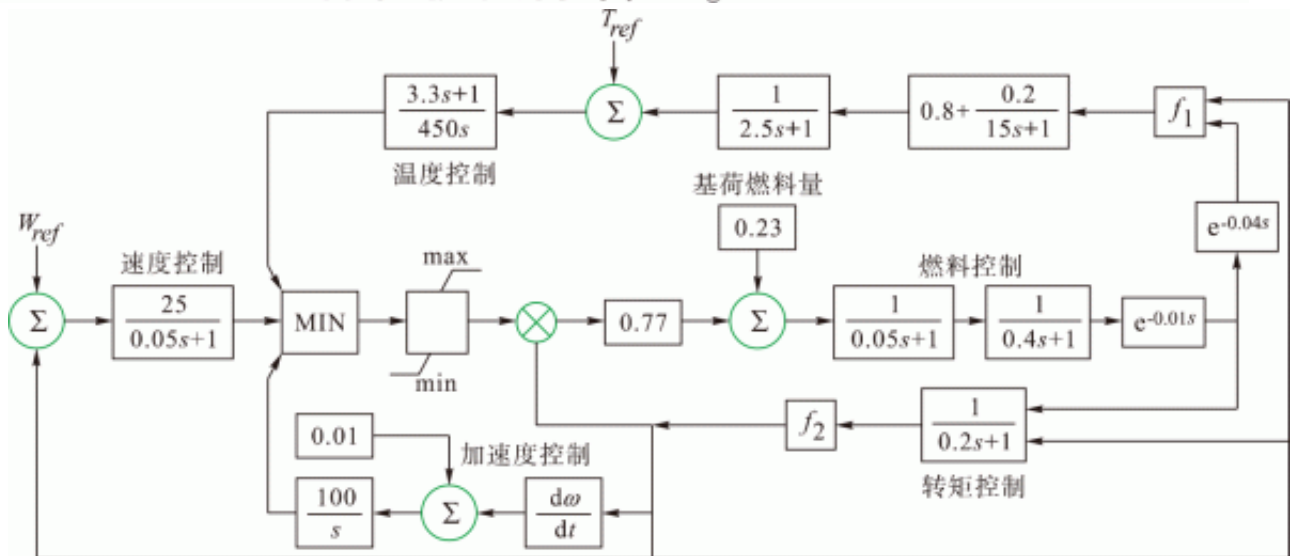
 ω_{f1} 、 ω_{f2} ——燃料流量信号； ω —— 涡轮机实际转速。

图 4 微燃机模型

Fig. 4 Microturbine model

从图4可以看出,微型燃气轮机模型包括转速与加速度控制、温度控制、燃料供给和燃烧室以及压缩机-涡轮系统等部分。在非满载时,微型燃气轮机主要速度控制方式为斜率控制,即以转子速度与预先设定参考值间的差值作为输入信号,以速度偏差比例值作为输出信号;加速度控制目的是限制转速的变化率过大,防止转子超出允许范围;温度控制通过限制燃料输入量来保护系统温度不超过限定值。为了维持正常运行需要燃料量占了额定燃料量很大的比重,取0.23的额定燃料量作为微型燃气轮机的基荷,因此微型燃气轮机要尽量避免运行在低负荷状态以提高经济效益。

2太阳能与生物质能互补的微电网协调控制策略

系统将3种分布式电源分成两个子系统,即光伏—蓄电池系统和生物质发电系统。这样可以在微电网中同时存在交流和直流供电网络,便于同时满足直流负载和交流负载需求,同时又可避免因直流母线产生故障而严重影响交流负载供电。本文中只研究交流负载。

当太阳能电池输出功率大于负载功率时，即 $P_{pv} > P_{load}$ ，多余的能量通过双向变换器给蓄电池充电，蓄电池存储能量，双向变换器工作在Buck模式，生物质发电不工作。

当太阳能电池输出功率小于负载功率时, 即 $P_{pv} < P_{load}$, 负载所需能量不够的部分由蓄电池放电或生物质发电补充。当在阴雨天或晚上太阳能电池输出功率很小或为零时, 即 $P_{pv} = 0$, 负载所需能量全部由蓄电池放电或生物质燃料发电来补充, 双向变换器工作在Boost模式。本文中蓄电池最大允许放电电流大于电网所需电流, 故不考虑蓄电池放电功率限制。

当光伏电池独立给蓄电池充电时，采用MPPT限流的充电方式；当光照过大且蓄电池充满电时，光伏模块通过稳定直流母线电压来平衡系统功率，蓄电池退出运行。光储系统能够提供系统运行所需电能时，生物质发电机组不工作，仅当光储发出的电能不足时，才由生物质发电系统放电补充。

另外，如果蓄电池放电至低于过放电压，或者蓄电池充电至超过过充电电压时，双向变换器将被强行控制关断，以保护蓄电池不被损坏，延长蓄电池的使用寿命。

2.1 光储系统控制

光伏—蓄电池系统（以下简称“光储系统”）包含两个DC/DC变换器和一个DC/AC逆变器。其中Boost变换器为单向DC/DC变换器，将光伏电池组件的宽范围直流输出电压变换为逆变器所需要的直流母线电压。蓄电池通过双向Buck-BoostDC/DC变换器与高压侧的直流母线并联，双向DC/DC变换器承担了双向传递能量的任务，同时可以控制蓄电池充放电电流，以此来保护蓄电池。由于双向DC/DC变换器低压端接蓄电池，因此不需要隔离。本系统采用Buck-Boost双向变换器，它将传统的Buck变换器的续流二极管换成双向开关管而得到。该变换器具有结构简单、易于控制、可靠性强和效率高等特点，也是目前采用最多的双向变换器。该系统通过DC/AC逆变器接入微电网，将直流电转换为交流电提供给负载。

2.1.1 最大功率点跟踪

为了使太阳能资源得到最大化利用，采用电导增量法实现最大功率跟踪。电导增量法的基本出发点是由于 $P = IV$ ，则在最大功率点处有 $\frac{dP}{dV} = 0$ ，可将其改写为：

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0$$

整理后得到：

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

上式中： dI 表示扰动前后测量到的电流差值， dV 表示扰动前后测量到的电压差值。因此可以通过对光伏电池交流电导 $\frac{dI}{dV}$ 和直流电导 $\frac{I}{V}$ 的比较决定下一次变化的方向，当二者满足上式要求时，表示已经达到最大功率点，不再进行下次扰动。

2.1.2 单向DC/DC变换器控制电路

单向变换器控制光伏电池工作，在MPPT、恒压与关断模式间切换，如图5所示。控制信号为Buck_sd、Buck_con，其中Buck_sd控制变换器的关断，在光伏电池不能工作的情况下切除光伏电源，控制变换器工作在MPPT或恒压模式。

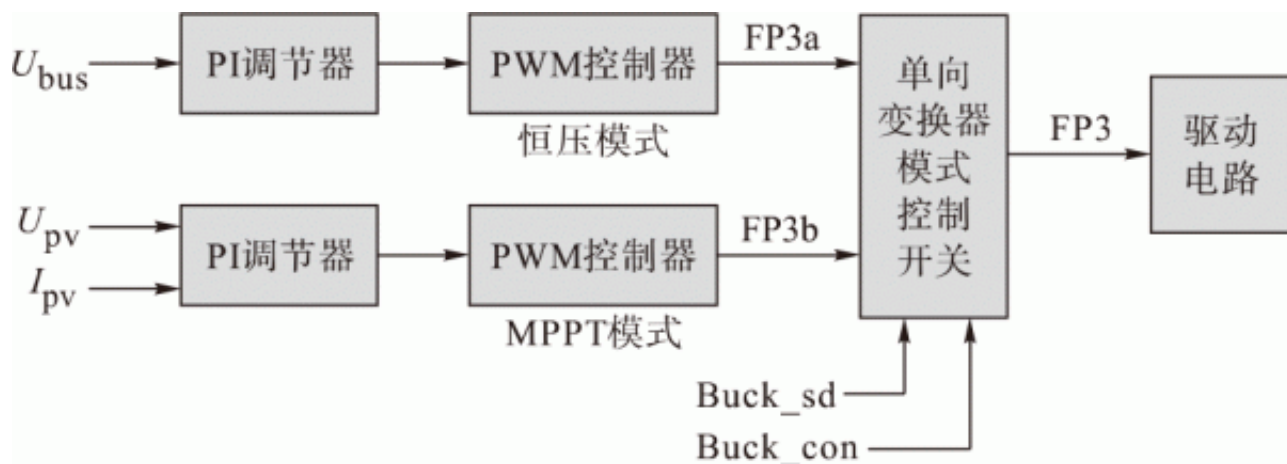


图 5 单向 DC / DC 变换器控制电路框图

Fig. 5 Unidirectional DC / DC converter control circuit diagram

2.1.3 双向 DC / DC 变换器控制电路

双向变换器控制蓄电池充放电，将采集到的电池电压（ U_{bat} ）、电流（ I_{bat} ）输入 PI 调节器产生调节信号，通过脉冲宽度调制（PWM）产生触发脉冲，如图 6 所示。模式控制信号为 Bi_sd 、 Bi_con ，其中 Bi_sd 控制变换器的关断，在电池达到过放或过充电电压时保护电池，控制变换器工作在 Buck 或 Boost 模式。

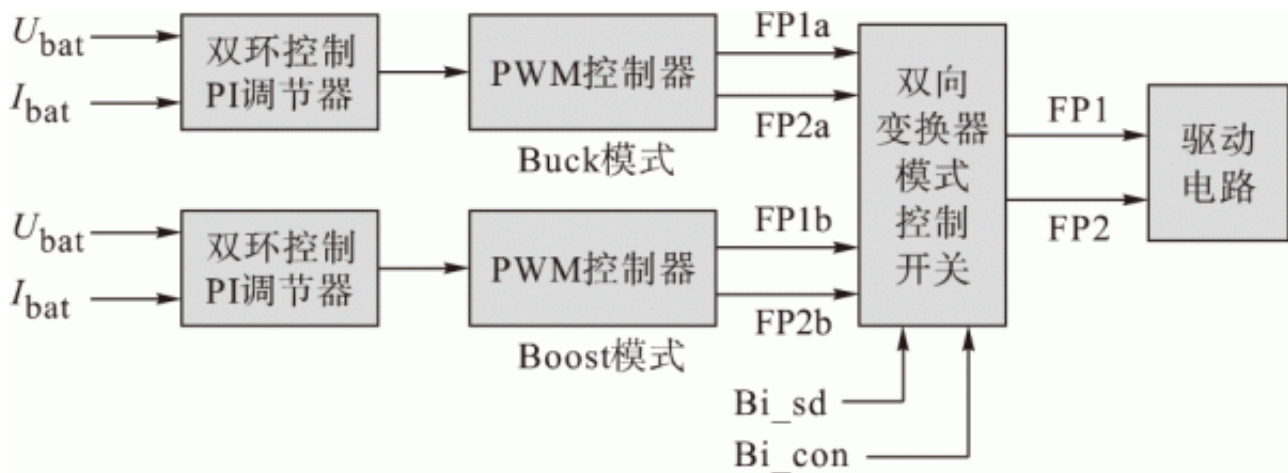


图 6 双向 DC / DC 变换器控制电路框图

Fig. 6 Bidirectional DC / DC converter control circuit diagram

2.1.4 逆变器控制电路

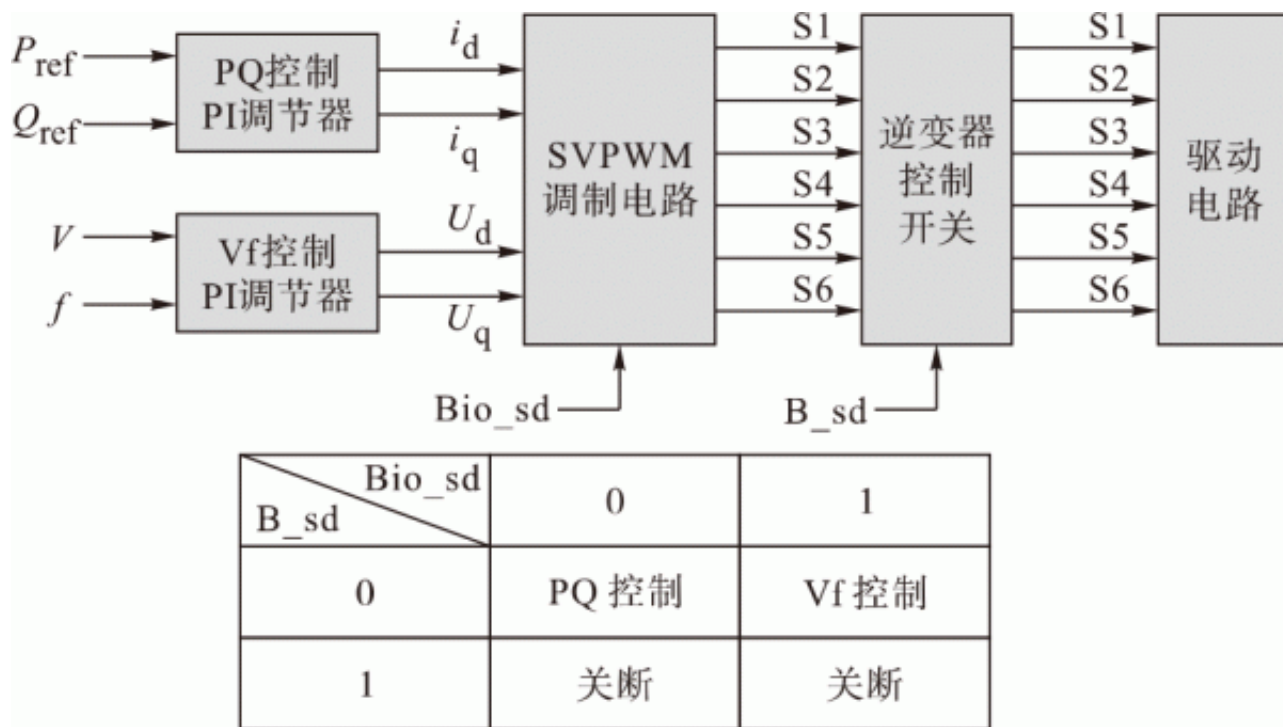


图 7 逆变器控制电路框图

Fig. 7 Inverter control circuit diagram

图7为逆变器控制电路框图，当光储系统单独供电时，逆变器采用Vf控制，而当光储系统与生物质系统协调供电时，由于光伏发电受光照、温度等环境影响较大，难以保持稳定的输出，所以逆变器控制采用PQ控制，作为一个恒定功率源，维持输出功率的稳定。B_sd与Bio_sd信号一起控制逆变器工作方式，控制关系满足真值表。

2.2 生物质能发电控制

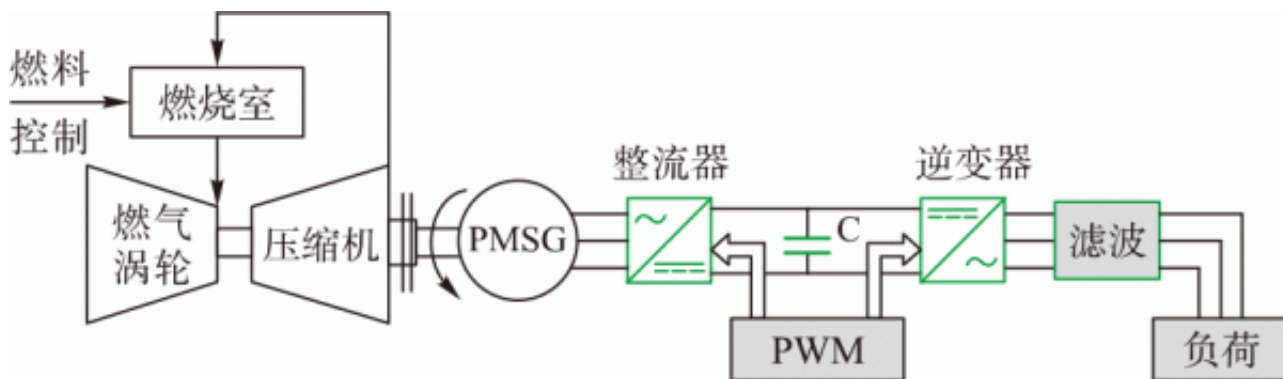


图 8 生物质发电系统

Fig. 8 Biomass power generating system

生物质发电系统如图8所示。它是由微型燃气轮机、永磁同步发电机（PMSG）、背靠背双PWM变流器、滤波器和负载等组成。从压气机出来的高压空气预热后与燃料混合、燃烧，高热燃气在涡轮处做功，带动高速发电机产生高频交流电，高频的交流电流经整流、逆变和滤波后，输送到负载进行供电。

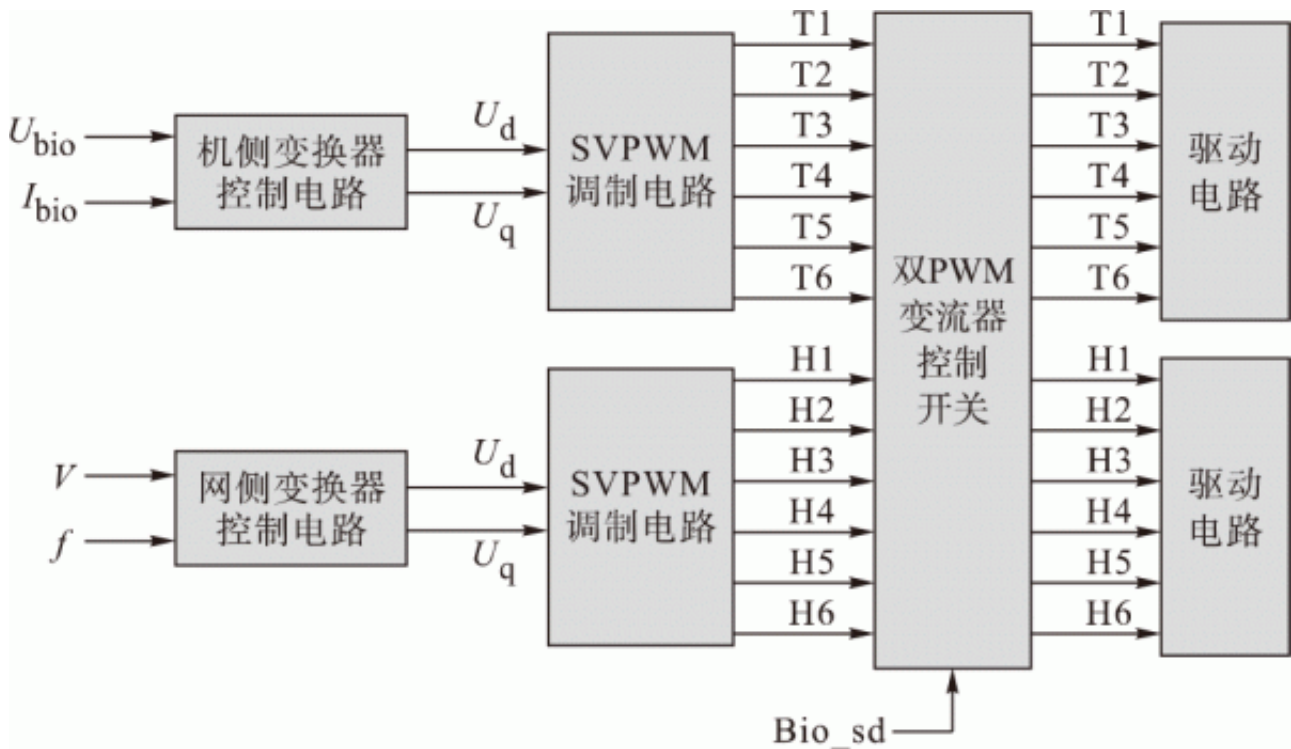


图9 双PWM变流器控制电路框图

Fig. 9 Dual PWM converter control circuit diagram

图9为双PWM变流器控制电路框图，生物质发电机组产生的电能通过双PWM变流器汇入电网，网侧变流器采用Vf控制，用于在电网不稳定或光储功率不足时给电网提供基准电压与频率，补充电网所缺功率。Bio_sd信号控制变流器关断，实现生物质电源的投入与切除。

3系统控制策略的实现与仿真结果的分析

系统通过检测微电网中的光伏输出电压并与光伏最小工作电压相比较，判断光伏电池是否工作，若输出电压大于最小工作电压，则认为光伏电池输出电能，反之则不工作。检测光伏电池输出的功率，并与负载所需功率进行比较，判断光伏输出的功率是否满足负载所需；检测蓄电池输出电压，判断蓄电池是否处于过充或过放。根据对光伏电池和蓄电池的工作状态的判断结果来决定系统运行状态，进行模式选择。最终通过控制电路控制系统中的各变流器工作模式，来控制系统中电能的流动，实现各电源电能的协调控制，为负载提供稳定的电能。

为了验证所设计的生物质能与太阳能互补的林区微电网能量管理控制策略的可行性和有效性，在光伏阵列的光照条件随时间发生变化、蓄电池的端电压随系统运行发生变化、生物质随系统运行情况而切除或投入时，使用PSCAD进行仿真，系统主要参数如表1所示。

表 1 系统主要仿真参数

Tab. 1 Main analogue parameters of the system

物理量		参数
光伏阵列最小工作电压		220 V
蓄电池组	额定电压	48 V
	过放电压	44 V
	过充电压	56 V
直流母线电压		100 V
微燃机转速		72 000 r / min
永磁同步发电机输出电压		480 V
交流母线	电压	220 V
	频率	50 Hz

图10为仿真结果。仿真一开始由蓄电池供电，蓄电池达到过放状态后关断，由生物质发电系统提供电能，然后随着光照增强，光伏电池逐渐开始输出电能，与生物质发电系统协调供电，随着光伏发电量满足负载要求，生物质发电系统退出电网，同时蓄电池储存光伏电池多余的电量。从图中可以看出：当光伏电池不足以提供负载所需电能时，系统可以迅速正确地进行模式切换；当光伏电池发电量超出负载所需时，系统可以把多余的电量储存起来，从而合理控制能量分配以维持系统稳定。

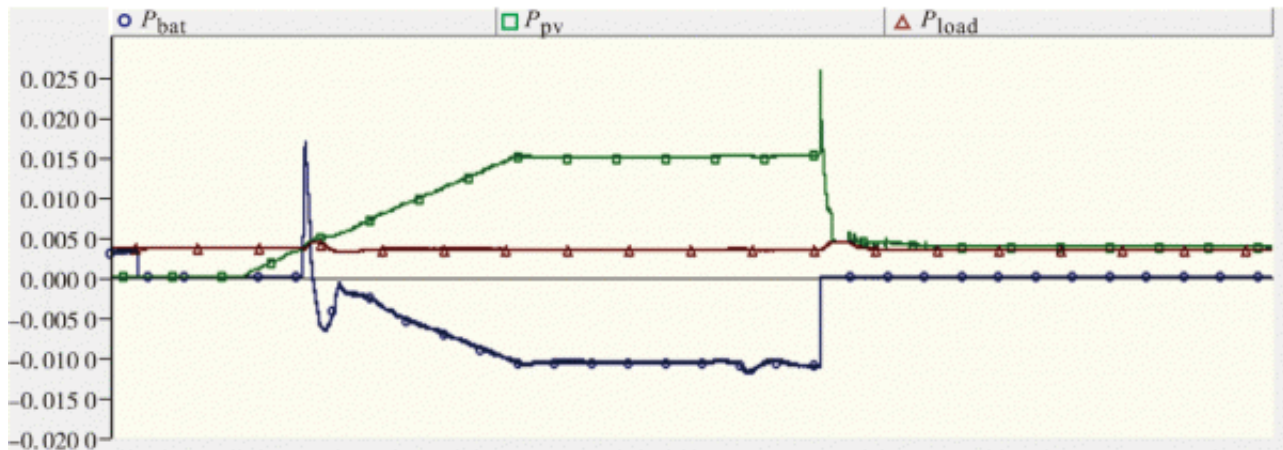


图 10 功率仿真波形

Fig. 10 Power analogue waveform

4结语

本文提出的生物质能与太阳能互补的林区分微电网能量管理控制策略，与传统微电网供电的供电情况相比较，有效地克服了普通电网供电受天气以及季节性影响的缺陷。仿真过程中，充分利用蓄电池部分的调节能力、生物质发电的灵活性以及我国林区生物质燃料充足的特点，实现了对太阳能最大限度的利用，也充分发挥了生物质能电源的作用，保证了系统对林区分微电网的供电可靠性。通过比较负载与供电部分的功率，使得系统处于不同运行模式，从而使得负载部分始终处于正常工作状态。

- [1]王成山，等.微电网关键技术研究[J].电工技术学报，2014，29（2）：1-12.
- [2]杨新法，等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报，2014，34（1）：57-70.
- [3]廖志凌，等.独立光伏发电系统能量管理控制策略[J].中国电机工程学报，2008，29（21）：46-52.
- [4]官巧燕，等.国内外生物质能发展综述[J].农机化研究，2007（11）：20-24.
- [5]陈俊.太阳能风能生物质能联合发电控制系统[D].北京：华北电力大学，2009.
- [6]周鹏.太阳能与生物质能互补的能源系统研究[D].北京：中国科学院大学，2014.
- [7]唐彬伟，等.基于PSCAD的光伏发电建模与仿真[J].低压电器，2012（21）：31-35.
- [8]胡龙龙.微电网建模及其负荷优化分配方案研究[D].成都：西南交通大学，2014.
- [9]廖志凌.一种独立光伏发电系统双向变换器的控制策略[J].电工技术学报，2008，23（1）：97-103.
- [10]徐四勤.独立光伏发电直流网能量管理控制策略[J].现代电力，2013，30（4）：1-6.
- [11]王成山，等.基于双PWM换流器的微型燃气轮机系统仿真[J].电力系统自动化，2008，32（1）：56-60.
- [12]邓浩，李春艳.微型燃气轮机发电系统建模与特性分析[J].四川电力技术，2012，35（2）：70-72.
- [13]余涛，童家鹏.微型燃气轮机发电系统的建模与仿真[J].电力系统保护与控制，2009，37（3）：27-31.
- [14]吴子平.基于微型燃气轮机发电系统的微网控制与分析[D].北京：华北电力大学，2009.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/177625.html>