

微网光伏储能发电并网系统特性研究

刘艳敏, 王建军, 丁雷青, 吴季浩, 高敬贝, 周毓颖

(国网上海市电力公司培训中心, 上海 200438)

摘要:针对分布式电源存在的若干问题,提出了具有储能双向变流功能的光伏并网系统拓扑结构,并对光伏电池组数学模型和 Bi Buck-Boost 双向变流器工作原理进行理论推导和分析,借助 Matlab/Simulink 工具,进行系统控制算法的仿真。通过控制储能双向变流器电感电流值的大小与方向,实现了蓄电池定功率的充放电,完成了并网功率的吸收与释放,减小分布式电源其对大电网的冲击。最后在 2 kW 的光伏储能并网系统实验平台上进行了最大功率跟踪算法的试验验证,实现了 95% 转换效率和单位功率因数并网运行。

关键词:微电网;光伏—储能发电;双向 Bi Buck-Boost 电路;最大功率追踪

作者简介:刘艳敏 (1983),女,硕士,工程师,主要从事电力系统检修专业相关研究和培训工作。

中图分类号:TM61 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-9529 (2014)10-2043-04

Characteristics of Grid-Connected Microgrid PV Energy Storage Power System

LIU Yan-min, WANG Jian-jun, DING Lei-qing, WU Ji-hao, GAO Jing-bei, ZHOU Yu-ying

(Training Center, SMEPC, Shanghai 200438, China)

Abstract:In view of the problems in distributed generation, this paper proposes the photovoltaic grid-connected system topology with the function of the energy storage bidirectional converter, and analyzes the working principle of the mathematical model for photovoltaic battery and Bi Buck-Boost two-way theoretical derivation. With the Matlab and Simulink tools, we conduct system control algorithm simulation. By controlling the size and the direction of the energy storage bidirectional converter's inductance values and current values, we achieve the rated power of the battery charge and discharge, complete the grid power's absorption and release, and reduce the impact of the distributed power on grid. Finally the maximum power point tracking algorithm was tested on the experimental platform for 2 kW photovoltaic energy storage grid-connected system, realizing the 95% conversion efficiency and unit power factor parallel operation.

Key words:microgrid; PV power generation; Bi Buck-Boost two-way circuit; maximum power point tracking

随着电网规模的不断扩大,电网运行的可靠性下降,且局部扰动可对整个电网运行造成极大冲击,严重时会使系统崩溃,为此发展了分布式发电技术。分布式电源位置灵活、分散的特点极好地适应了分散电力需求和资源分布,其与大电网互为备用改善了供电可靠性。但分布式电源对于大电网是不可控源,为减小其对大电网的冲击,人们提出由分布式电源、分布式储能和能量管理模块构成负荷的微电网系统,以完全解决大电网与分布式电源间的矛盾。

光伏发电资源普遍,系统结构比较简单,体积小且轻,运行维护简单,清洁安全、无噪声、剪靠性高、寿命长,经济性有比较优势,它是微网建设的重要组成部分。本文阐释了在传统并网光伏系统的直流母线上添加储能双向变流器和蓄电池,即

构成了带储能系统的并网光伏系统。通过控制储能双向变流器电感电流值的大小与流动方向,实现了蓄电池定功率的充放电,从而完成了并网功率的吸收与释放,减小分布式电源其对大电网的冲击,在电力系统中能起电力调峰、提高系统运行稳定性和提高电能质量的作用。

1 光伏储能并网系统拓扑结构

并网光伏储能发电系统主要由光伏电池组、最大功率跟踪变流器、并网变流器、储能双向变流器、和蓄电池等五大部分组成。

1.1 光伏电池模型和电气特性分析

在光照与温度稳定的条件下,根据电子学理论,光伏电池单体可以看做是一个受到光照、温度和光伏电池输出电压控制的受控电流源,效电

路如图 1 所示,主要由理想电流源 I_{ph} 、串联电阻 R_s 、旁漏电阻 R_{sh} 和二极管 D 构成。

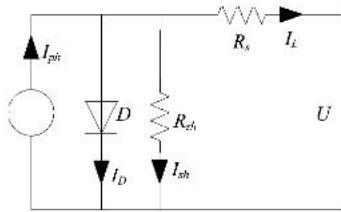


图 1 光伏电池等效电路

根据光伏电池等效电路模型可以得到光伏电池的 $I-V$ 特性曲线方程^[1]为

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qU_D}{AKT}} - 1 \right) - \frac{U_D}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中 I_L ——光电流, A; I_0 ——反向饱和电流, A; q ——电子电荷 ($1.6 \times 10^{19}C$); K ——玻耳兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23}J/K$); T ——绝对温度, K; A ——二极管因子; R_s ——串联电阻, Ω ; R_{sh} ——并联电阻, Ω 。

由于表达式中的 5 个参数,包括式中 I_L 、 I_0 、 R_{sh} 、 R_s 和 A , 它们不仅与电池温度和日射强度有关,而且确定十分困难,在实际工程应用中单体光伏电池表达式^[1]为

$$\begin{cases} I_L = I_{sh} - M_1 I_{sh} \left(e^{\frac{U}{M_2 U_{oc}}} - 1 \right) \\ M_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{-\frac{U_m}{M_2 U_{oc}}} \\ M_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_L ——光电流, A; I_{sc} ——短路电流, A; I_m ——最大工作电流; U_m ——最大工作电压; U_{oc} ——开路工作电压。

在任意环境条件下, I_{sc} 、 U_{oc} 、 I_m 、 U_m 会随着光照 S 和电池温度 T 一定规律发生变化,通过引入相应的补偿系数,近似推算出任意光照 S 和电池温度 T 下四个技术参数。表 1 为某型号太阳能电池组件在标准测试条件下的技术参数,电池组件的功率峰值 250 W,开路电压 37.3 V。根据式 (2) 和表 1 得到光伏电池的数学模型。

表 1 标准测试条件下光伏组件技术参数
($T=25^\circ C$ $AM=1.5$ $E=1\ 000\ W/m^2$)

峰值功率 P_m/W	250 ± 3%
开路电压 U_{oc}/V	37.3
短路电流 I_{sc}/A	8.78
最大工作点电压 U_m/V	30.1
最大工作点电流 I_m/A	8.31
尺寸 (长 × 宽 × 高)	640 × 990 × 50 mm

1.2 双向 Bi Buck-Boost 电路工作分析

储能双向变流器的拓扑结构是由基本 DC/DC 拓扑构成的,实现能量的双向传输主要分为两类,一类是直接将两个单相直流变换器并联而成,另一类变换器的拓扑结构是共用主电路的。相比只能工作在某一单向能量流动状态的第一类拓扑结构,后者可以任意平滑的实现两种能量流向的切换。文中采用双向 Buck-Boost 变换器,简称 Bi Buck-Boost 电路。其主电路拓扑结构见图 2 (a)。

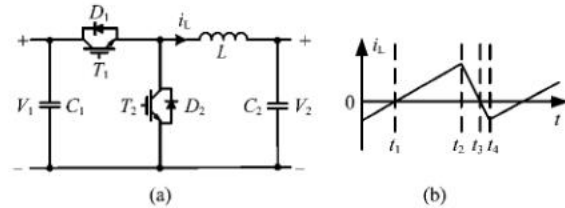


图 2 储能双向变流器主电路图和电感电流

该变换器有两个开关管 Q_1 、 Q_2 , 两个二极管 D_1 、 D_2 和两个滤波电容 C_1 、 C_2 构成。为了实现能量双向连续平滑的流动, Q_1 、 Q_2 采用互补 PWM 工作方式。当能量从 V_1 流向 V_2 时,此时 Bi Buck-Boost 电路等效于一个 Buck 电路,当能量从 V_2 流向 V_1 时,此时 Bi Buck-Boost 电路等效于一个 Boost 电路。

Bi Buck-Boost 输入与输出的电压方程为:

$$V_2 = D_{Buck} V_1 \text{ 或 } V_1 = V_2 / (1 - D_{Boost}) \quad (3)$$

D_{Buck} 为上管 T_1 的占空比, D_{Boost} 为下管 T_2 的占空比,其中 $D_{Boost} = 1 - D_{Buck}$,所以当占空比不变时,如果 $V_2 < V_1$,则能量从 V_1 流向 V_2 , V_2 处的电源处于充电状态;反之,能量从 V_2 流向 V_1 , V_2 处于放电状态。该种工作模式也会使电感电流在一个开关周期内会交替出现正负值,分别代表着能量的流动方向,如图 2 (b) 所示。

图 3 为 Bi Buck-Boost 电路一个周期内回的开关的状态。

① $0 \sim t_1$ 时段: T_1 导通, T_2 关断, D_1 续流。电感放电,电感电流反向减小到 0,电感电流流向如图 3 (a) 所示。电感电流上升率为 $di_L/dt = (V_1 - V_2)/L$;

② $t_1 \sim t_2$ 时段: T_1 导通, T_2 关断。电感充电,电感电流从 0 开始线性正向增大,电感电流流向如图 3 (b) 所示。电感电流上升率为 $di_L/dt = (V_1 - V_2)/L$;

③ $t_2 \sim t_3$ 时段: T_1 关断, T_2 导通, D_2 续流。电感放电,电感电流正向减小到 0,电感电流流向

见图 3 (c)。电感电流下降率为 $di_L/dt = V_2/L$;

4) $t_3 \sim t_4$ 时段: T_1 关断, T_2 导通。电感充电, 电感电流开始反向增长, 电感电流流向如图 3 (d) 所示。电感电流反向增长率为 $di_L/dt = V_2/L$ 。

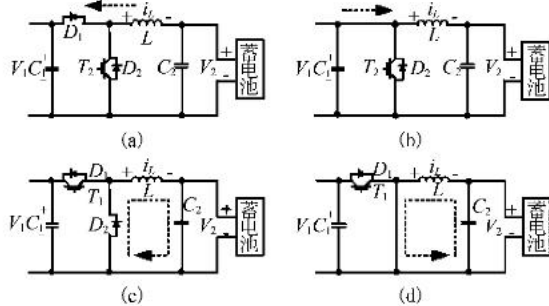


图 3 Bi Buck-Boost 电路一个周期内四种开关状态图

2 光伏储能并网系统控制及仿真

2.1 控制算法

光伏电池的输出功率受到光照与温度的影响很大, 如何在确定温度和光照的条件下, 调整光伏电池输出电压使其有最大功率输出是光伏控制系统里的一项重要环节。在一定的光照和温度下, 光伏电池内阻恒定, Bi Buck-Boost 电路将负载阻抗转换到电池侧, 新的阻抗值为原阻抗值的 $(1-D)^2$ 倍。通过调整占空比 D , 使得转换后的阻抗值与光伏电池内阻匹配, 依据最大功率传输定理, 当两者动态匹配时, 完成最大功率跟踪 (Maximum Power Point Track, 简称 MPPT)。

光伏发电系统中普遍采用扰动观察法又被称为爬山法, 它实际上是一个动态寻优的过程。算法通过预设一个最大功率跟踪电路占空比值和一个占空比改变步长, 检测当前光伏电池输出电压与输出电流, 计算出当前电池功率, 再与上一次存储的光伏电池输出电压和输出功率进行比较, 舍小存大, 根据步长值增大或减小该占空比值, 再检测, 再比较, 如此周而复始, 可以使得光伏阵列动态工作在最大功率点处。

按照扰动算法并结合光伏电池 $P-V$ 曲线, 定义扰动观察法的四种工作状态为左爬山、左偏移右爬山和右偏移, 如图 4 所示。最大功率跟踪是从光伏电池开路电压处开始爬升的。在确定的温度和光照条件下, 算法通过“右爬山”达到最大功率点, 通过“左偏移”和“右偏移”动态调整最大功率点。此时占空比 D 逐渐增大并最后在某一值

附近振荡。

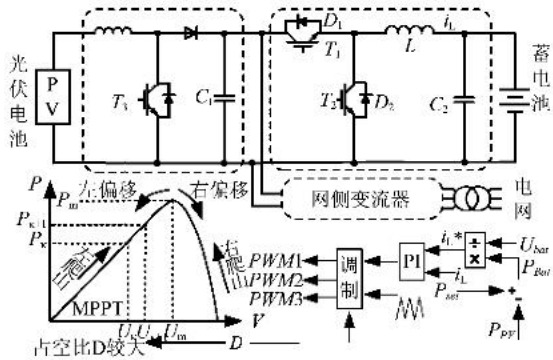


图 4 最大跟踪爬山法和双向储能控制算法框图

当储能变流器是用于保证光伏并网点功率稳定, 以满足电网调度需求时, 储能双向变流器的控制目标是控制电感电流的大小和方向, 完成定功率值功率的释放与吸收。控制方式是单环控制, 即只通过一个电流环来控制电感电流, 控制算法框图如图 5 所示, 其中 $P_{bat} = P_{set} - P_{PV}$ 是储能电池给定参考功率值, 将其除以蓄电池端电压值得到电感电流参考值 i_L^* , 把 i_L^* 与实际采样电感电流 i_L 比较得到的误差信号通过 PI 调节器后输出得到 PWM 载波, 最后与调制波进行比较得到上下桥臂 PWM 脉冲信号。

2.2 仿真结果

本文利用 Matlab/Simulink 中建立 2 kW 光伏电池仿真模型, 其中光伏电池的内阻为 6.4Ω, 光照强度 1 000 W/m², 温度 25℃。在 100Ω 和 50Ω 两种负载下。仿真结果显示在不同负载线光伏输出最终都稳定在 1.6 kW, 如图 5, 占空比分别为 $D_{100} = 0.74, D_{50} = 0.64$, 折算对于的等效内阻分别为 $R_{100} = 6.67Ω$ 和 $R_{50} = 6.48Ω$, 满足了最大功率传输定理, 验证了仿真结果的正确性。

为了进行光伏储能并网系统仿真, 模拟电网功率调度需求光伏储能系统并网功率 2 000 W, 温度保持在 25℃, 初始光照 1 000 W/m²。在 $t = 0.2 s, t = 0.4 s$ 和 $t = 0.6 s$ 的时候光照分别突变到 500 W/m², 1 000 W/m², 1 500 W/m²。虽然光照的变化使得光伏电池输出功率波动较大, 但储能系统的作用使得并网功率始终维持在 2 kW 的功率等级, 即光伏电池输出功率 P_{PV} 、蓄电池输出功率 P_{bat} 和系统并网功率 P_{grid} 满足 $P_{grid} = P_{bat} + P_{PV}$ 这一功率平衡关系 (见图 6)。另外储能双向变流器可以较快的改变电流方向完成功率的吸收

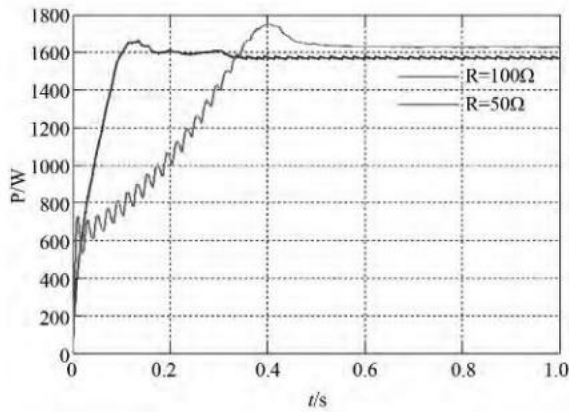


图5 不同负载下光伏输出最大功率追踪结果

与释放,满足了电网调度需求,维持了光伏并网功率恒定。

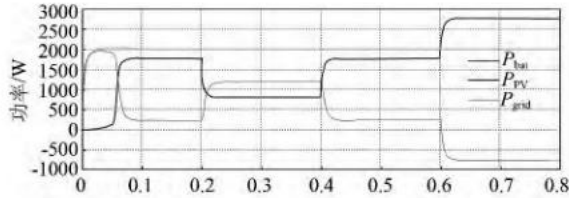


图6 光伏储能系统功率关系

3 实验及分析

为了验证上述理论分析和仿真的正确性,本文在光伏储能并网变流器试验台上进行了实验。考虑到受日光影响较大,试验采用光伏电池模拟设备,其功率为2 kW,等效内阻为20Ω,最大功率跟踪变流器电感为3.6 mH,直流支撑电容1 500 uF,双向储能变流器电感为6 mH。根据光伏电池输出特性曲线,系统最大功率为1 000 W时,光伏电池模拟设备输出电压应为DC141V,母线电压为DC300V,占空比 $D=0.53$ 。图7为光伏电池输出电压和中间支撑电容母线电压,分别为146.2 V和301.8 V,计算占空比 $D=1-146.2\text{ V}/301.8\text{ V}=0.512$,基本与理论数据基本吻合。为了验证系统并网效果和光伏系统效率,试验测量了并网变流器线电压 U_{ab} 和A相电流 I_a 的波形,如图8,从图分析可知 U_{ab} 与相电流 I_a 反向180°,说明系统在向电网输送能量,其中 I_a 为3.151 A, U_{ab} 为150 V,计算得到系统输出功率为818.4 W,系统效率为82%。

按照同样的试验方法进行最大功率为1.8 kW的实验,并同1 kW的试验数据一起整理(见表2)。

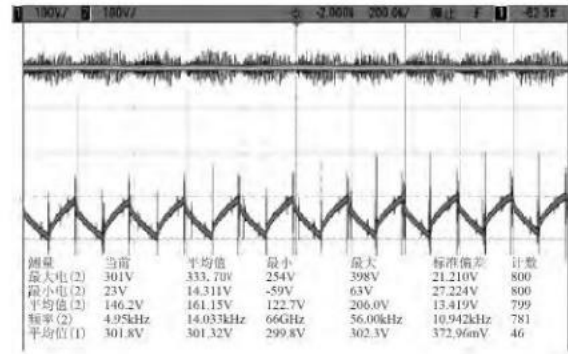


图7 光伏电池输出电压和中间母线电压波形

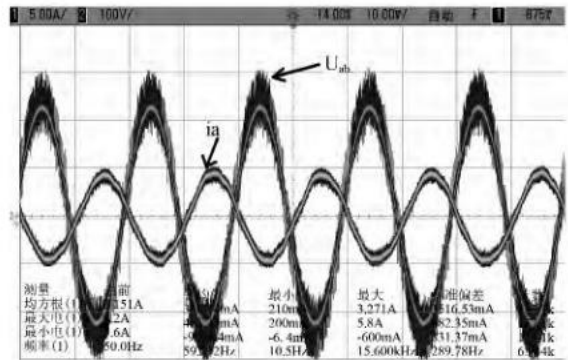


图8 并网电压和电流波形

表2 光伏储能并网变流器实验数据对比表

最大功率点	光伏电池输出电压/V		占空比		输出功率/W	效率
	理论值	实验值	理论值	实验值		
1 kW	141	146.2	0.53	0.512	818	82%
1.8 kW	190	193.4	0.36	0.37	1741	97%

从以上实验分析得知,该光伏并网系统较好的实现了单位功率因数并网运行,系统运行稳定且网侧并网电流谐波畸变率小,较好地实现了最大功率跟踪。

4 结语

试验数据表明系统较好地完成了最大功率跟踪,并实现了95%转换效率和单位功率因数并网运行,减小分布式电源其对大电网的冲击,在电力调峰、系统运行稳定和电能质量等方面具有重要意义。

参考文献:

[1] 苏建徽,余世杰,赵为,等,硅太阳能电池工程用数学模型[J].太阳能学报,2001(22):409-412.
 SU Jian-hui, YU Shi-jie, ZHAO Wei, et al. Silicon solar cell engineering model [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001(22):409-412.

收稿日期:2014-07-28

本文编辑:杨林青