

基于 RTDS 太阳能电池建模及最大功率点跟踪控制

任立平¹,董兴绿²,于跃海¹,胡云¹

(1.国网电力科学研究院,江苏南京 210003;2.国电南京自动化股份有限公司,江苏南京 210003)

摘要:采用实时数字仿真系统(RTDS)对太阳能电池建模并进行实时仿真研究,测试其 $I-V$ 及 $P-V$ 特性。参考占空比扰动观察法,采用 PI 环节对太阳能电池输出电压偏差信号进行调节,控制逆变器调制信号相位,进而利用正弦脉冲宽度调制(SPWM)占空比来实现其最大功率点跟踪(MPPT)控制,使太阳能电池尽可能工作在最大功率点附近,提高太阳能利用效率。

关键词:太阳能电池;实时数据仿真系统;最大功率点

中图分类号: TP331

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2011)05-0017-03

作为可再生能源的一部分,太阳能发电广泛应用在分布式发电系统中,利用太阳能发电既可降低传统能源的消耗,又可减少环境污染。我国“十二五”规划中,利用太阳能发电是建设坚强智能电网的重要组成部分。太阳能作为一种最好的可再生能源,必将迎来发展契机。目前,太阳能电池供电电源利用效率低,建设成本高,因此,提高太阳能利用效率及降低应用成本是当前研究的重点。利用传统仿真软件对太阳能电池工作特性的研究较多,但传统仿真软件仅能做到仿真,不能外接测控、保护等装置,而实时数据仿真系统(RTDS)既可做到精确实时仿真,还可为外接二次设备提供测试环境。现在智能电网已进入建设阶段,与清洁能源尤其是太阳能相关的设备应运而生,在 RTDS 上对太阳能电池进行研究与仿真更具有实际应用价值。加拿大 RTDS 公司已开发出了太阳能电池模型,这为实际应用研究提供了更好的工具。文中主要是对 SPG 1786T-02E 提供的精确太阳能组件参数进行建模,研究太阳能电池的工作特性,并对最大功率点进行控制。

1 太阳能电池数学模型及工作特性

SPG1786T-02E 是一种基于肖特基二极管的精确太阳能电池组件,该模型以暂态辐射与外界温度作为输入变量,单个太阳能电池组件等效电路如图 1 所示。

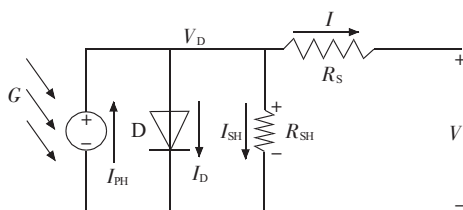


图 1 太阳能电池组件等效电路

单个太阳能组件并联电阻 R_{SH} 在 $200 \sim 300 \Omega$ 之间,而串联电阻 R_S 约为 0.008Ω , R_{SH} 支路电流很小,此支路可以忽略不计。由图 1 可知,支路电流 I 可以表示为:

$$I = I_{PH} - I_D \quad (1)$$

而

$$I_{PH} = [1 + \alpha \times (T_c - T_{c1}) / I_{SC}(T_{c1, nom})] \times I_{SC}(T_{c1, nom}) \times \frac{G_a}{G_{a(nom)}} \quad (2)$$

$$I_D = \frac{I_{SC}(T_{c1})}{\left\{ \frac{qV_{oc}(T_{c1})/N_s}{nkT_{c1}} - 1 \right\}} \times \left(\frac{T_c}{T_{c1}} \right)^{\frac{3}{n}} \times e^{\frac{qV_g}{nk} \times \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{c1}} \right)} \times \left[e^{\frac{q(V+R_S)}{nkT_c N_s}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中: T_c 为太阳能电池组件温度, K; T_{c1} 为标准测试条件下的太阳能电池组件温度, $T_{c1} = 298.15 \text{ K}$; $I_{SC}(T_{c1, nom})$ 为标准测试条件下的太阳能电池组件短路电流, $I_{SC}(T_{c1, nom}) = 8.15 \text{ A}$; G_a 为外界环境辐射强度, W/m^2 ; $G_{a(nom)}$ 为标准测试条件下环境辐射强度, $G_{a(nom)} = 1000 \text{ W/m}^2$; α 为短路电流的温度系数, $\alpha = 0.0033$; q 为电荷量, $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$; $V_{oc}(T_{c1})$ 为标准测试条件下太阳能电池组件开路电压, $V_{oc}(T_{c1}) = 29.4 \text{ V}$; N_s 为单个太阳能电池组件中串联的电池数, $N_s = 48$; n 为二极管理想因数, $n = 1.3$; k 为波尔兹曼常数, $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; V_g 为太阳能电池材料带隙基准电压, $V_g = 1.12 \text{ V}$; V 为太阳能电池组件端电压, V; I 为太阳能电池组件端电流, A。

把式(2)和式(3)代入(1)即可得到太阳能电池 $I(V)$ 数学函数关系,在 RTDS 中建立数学模型,并可对其进行实时仿真,研究其 $I-V$ 与 $P-V$ 曲线,进而可以了解太阳能电池组件的工作特性,并提供了对其最大功率点跟踪(MPPT)控制的依据。

根据上述 $I(V)$ 关系,并参考 SPG1786T-02E 提

供的参数,在 RTDS 中建立数学模型如图 2 所示。

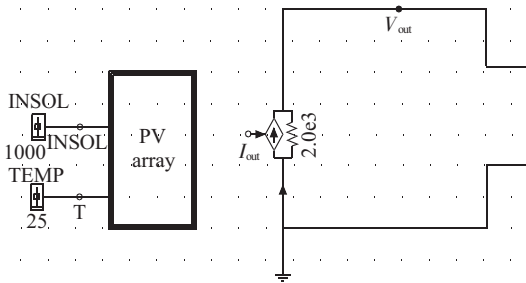


图 2 RTDS 中搭建的太阳能电池模型

辐射强度与外界温度为影响太阳能电池的 2 个输入变量,文中仿真测试均为标准测试条件下进行。 I_{out} 、 V_{out} 分别为太阳能电池组件的输出电流与电压, I_{out} 采用受控电流源输出。在标准测试条件下,测得单个太阳能电池组件的 $I-V$ 与 $P-V$ 波形如图 3 和图 4 所示。由图 3 可以看出,此太阳能电池组件开路电压约为 $V_{oc}=26.58\text{ V}$, 短路电流约为 8.249 A ,在 $0\sim 0.7V_{oc}$ 区间, 太阳能电池可以等效为一个恒流源。由图 4 可知,功率有个最大点,这就是最大功率点,比较图形可以看出,最大功率点不会工作在恒流源区间, 所以寻找最大功率点可在恒流源区间外跟踪,经反复测试,得出最大功率点一般处于 $0.81V_{oc}$ 附近。这一结论非常重要,文中采用恒定电压跟踪法进行 MPPT 控制, 电压参考数值可以取为 $0.81V_{oc}$, 这样可以提高最大功率点的跟踪速率。

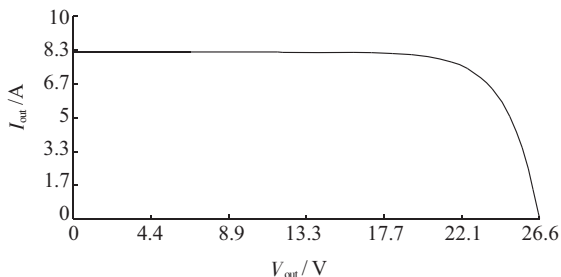


图 3 标准测试条件下太阳能电池组件 $I-V$ 特性曲线

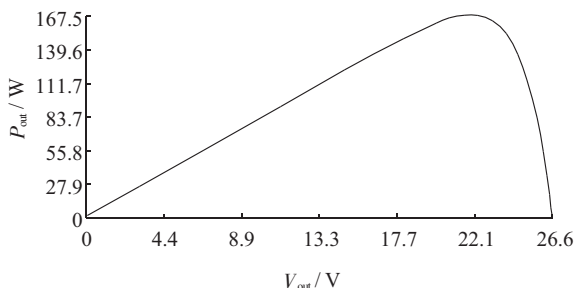


图 4 标准测试条件下太阳能电池组件 $P-V$ 特性曲线

另外, $I-V$ 曲线还表明太阳能电池即非恒压源, 也非恒流源, 它是一种非线性直流电源。在不同辐射强度与温度下, 光伏电池输出特性是不同的, 从而最大功率点也不同, 其中环境温度对太阳能电池的开路电压影响较大, 而光照强度主要影响太阳能电池的短路电流^[1]。

2 多个太阳能电池组件串并联后最大功率点的估算

由于单个太阳能电池组件(module)输出的功率非常有限,实际仿真与应用中,需将多个 module 进行串并联,组成太阳能电池阵列(array),提高接口电压与电流。太阳能阵列结构如图 5 所示。

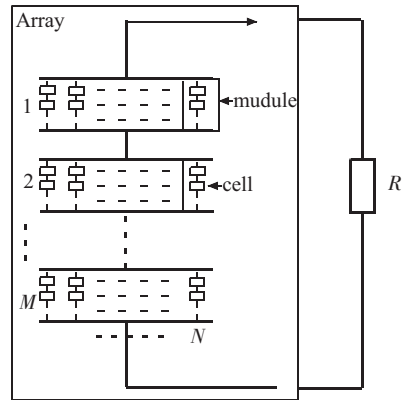


图 5 太阳能阵列结构

经测试表明,设单个 module 开路电压为 U_{oc} , 短路电流为 I_{sc} , N 个 module 并联连接, 组成一个小阵列, 其短路电流为:

$$I_{SC-N} = N \times I_{sc} \quad (4)$$

当 M 个上述小阵列进行串联连接后, 组成一个太阳能阵列, 其开路电压变为:

$$U_{OC-M} = M \times U_{oc} \quad (5)$$

根据实际需要的电压与电流值, 可以估算出太阳能阵列中的 M 与 N 值。

太阳能电池阵列设计好后, 一般外接逆变器使其并网运行, 有些情况下, 先经过 DC-DC 变换电路, 使其电压升高后再接逆变器变换, 外接电路可以等效成一个电阻, 当太阳能电池工作在最大功率点时, 外接电路可以等效成电阻 R 。经测试表明, R 值也是可以估算的, 这对电路设计有一定的参考价值。

设单个 module 最大功率点处的工作电压为 V_{max} , 电流为 I_{max} , 最大功率点处外接等效电阻为:

$$R_1 = V_{max} / I_{max} \quad (6)$$

图 5 中多个 module 组成 array 后, 外接电路最大功率点处等效电阻为:

$$R \approx M \times V_{max} / N \times I_{max} = M \times R_1 / N \quad (7)$$

另外, 由 V_{max} 和 I_{max} 可以估算最大功率 P_{max} 。 P_{max} 值可以用在 MPPT 控制中, 因此, 功率估算值对控制器的设计非常重要。

3 MPPT 控制

太阳能电池通常经过逆变器变换后, 向交流负

载供电,在满足功率要求的情况下,总可以使太阳能电池工作于最大功率点,最大限度地提高太阳能利用效率。在标准测试条件下,太阳能电池经逆变器接负载拓扑结构如图 6 所示。

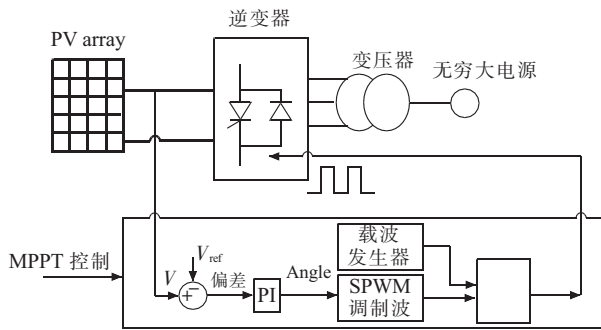


图 6 太阳能电池接负载及 MPPT 控制结构

常用的太阳能电池 MPPT 控制技术有扰动观察法、恒定电压法、最优梯度法和增量电导法,其中增量电导法应用较多,跟踪速度快,效果比较好^[2]。

MPPT 控制器的设计原理如下:给定直流电压参考值,此值可以根据上述提供的最大功率点估算思想得出,误差一般可控制在 3% 以内,然后与太阳能电池阵列即时电压进行比较,偏差值经过 PI 调节器处理,得出正弦脉冲宽度调制 (SPWM) 的调制波相位控制信号 Angle,调节输出脉冲占空比 D ,使其工作在合适的状态,进而可以调节太阳能电池阵列的输出电压及电流,形成闭环控制,很快可以使输出电压稳定在估算出的最大功率点附近,达到 MPPT 控制的目的。事实上,太阳能电池阵列外接电路可以等效成一个电阻 R ,MPPT 控制实际上就是寻找一个最优电阻^[3],利用相位控制 SPWM 调制波,调节开关管的动作情况,实现其等效电阻的调节,当满足外接电路等效电路电阻值 R 附近值时,太阳能电池阵列即工作在最大功率点附近。

4 实验结果

现以开路电压为 1 085 V,短路电流为 67 A 的太阳能电池阵列为背景,给定估算值 $V_{ref}=0.8 \times 1\ 085=868$ V,载波频率为 3.3 kHz,调制波频率为 50 Hz。

PI 调节器积分方程为:

$$u(t)=K_p[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt] \quad (8)$$

此处 $K_p=1; T_i=0.2$ 。

在 RTDS 中进行仿真,仿真波形如图 7、图 8 和图 9 所示。

由图 7 可知,经过 6 s 左右的仿真,太阳能电池的输出电压基本稳定在设定值 V_{ref} 附近, $V_{pv}=0.862$ kV; $I_{pv}=0.06$ kA; $P_{pv}=V_{pv} \times I_{pv}=52.4$ kW; 成功实现了此太阳能电池阵列在标准测试条件下 MPPT 控制。

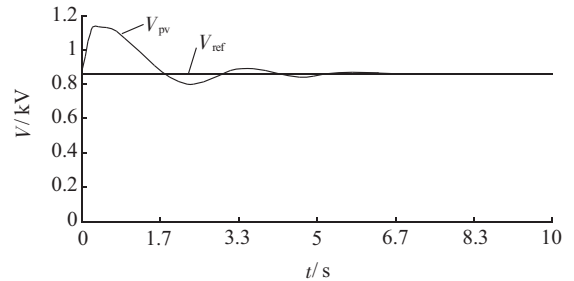


图 7 太阳能电池阵列实时电压与参考电压仿真波形

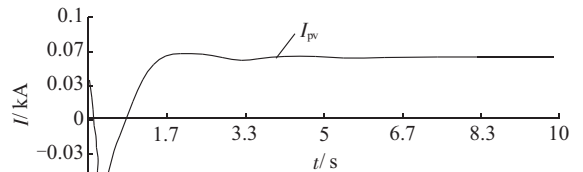


图 8 太阳能电池阵列实时电流仿真波形

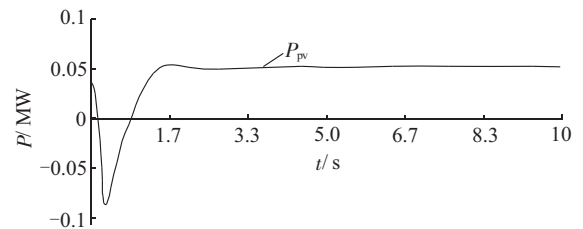


图 9 太阳能电池阵列实时输出功率波

5 结束语

鉴于太阳能电池功率输出的单峰特性,要提高太阳能电池的输出效率,必须使太阳能电池工作于最大功率点附近。采用给定电压参考值,与实际输出电压比较,经 PI 调节后控制逆变器调制波相位的方法,取得了较好的效果,成功实现了 MPPT 的控制。其最大优点是跟踪速度快,电压波动范围小。在外界辐射强度及温度为定值的条件下,可以方便实现 MPPT 控制。缺点是由于电压参考值是通过估算得出的,难免会产生误差,在精度要求高的场合,要先对太阳能阵列单独测试,确定最大功率点处的电压值,然后作为该方法的电压参考值输入。另外,该方法对 MPPT 控制是在标准测试条件下进行仿真研究的,如在实际应用及环境变化的情况下仿真,该方法还有待改进。

参考文献:

- [1] 司传涛,周林,张有玉,等.光伏阵列输出特性与 MPPT 控制仿真研究[J].华东电力,2010,38(2):0285-0288.
- [2] 杨帆,彭宏伟,胡为兵,等.太阳能电池最大功率点跟踪技术探讨[J].电子器件,2008,31(4):1081-1084.
- [3] 李安定.太阳能光伏发电系统工程[M].北京:北京工业大学出版社,2001.

流进变电站,这样回路电流可大幅减小。但如连接的终端塔过多,则须注意过流零序保护问题^[10]。

4 结束语

短路电流在架空地线和杆塔接地体间的分布,如精确计算,需求解由线路各档构成的大规模网络,计算烦琐。本文提出的工程计算方法,简化了计算过程,满足工程计算精度要求。计算出的已建线路常用架空地线的热稳容量值,可以作为地线是否需要开展短路热稳增容改造的评判依据。已建线路架空地线不满足热稳容量要求时,可采用更换地线、降低杆塔接地电阻、保证地线与塔身的可靠连接、建设地下分流线、多回路地线并联等措施。

参考文献:

[1] 赵胜利.对避雷线热稳定校验的探讨[J]. 电力建设,1996,17(4):22-25.
 [2] 袁建生,马信山,邹 军,等.关于 OPGW 设计选型中的最大短路电流计算[J]. 电力建设,2001,22(10):51-54.

[3] 杜天苍,张 尧,夏文波.利用短路电力热效应的 OPGW 分流地线选型[J]. 高电压技术,2007,33(9):110-114,119.
 [4] 刑树清.3 根架空地线的等值电路及分流计算[J]. 电力建设,1996,17(3):33-36.
 [5] DL/T 621—1997,交流电气装置的接地[S].
 [6] DL/T 5222—2005,导体和电器选择设计技术规定[S].
 [7] DL/T 5092—1999,110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
 [8] 赵全江,孟恒信.500 kV 线路地线热稳定校验时的故障时间的取值问题[J]. 电力建设,2004,25(1):20-21.
 [9] 水利电力部西北电力设计院.电力工程电气设计手册(第一册)[M].北京:中国电力出版社,1989.
 [10] 臧剑欣.光纤复合架空地线(OPGW)热稳定计算分析[J]. 电力系统通信,2004,25(5):12-14,42.

作者简介:

窦 飞(1979-),男,江苏江都人,工程师,从事线路工程设计研究、电网规划及项目前期工作;
 乔黎伟(1973-),男,江苏泰州人,高级工程师,从事线路工程设计研究、电网规划及项目前期工作。

Verification and Calculation on Short-circuit Thermal Stability Capacity of Ground Wire in Existing

DOU Fei, QIAO Li-wei

(Grid Planning and Research Center of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the analysis about calculation model of the single-phase short-circuit current distribution among the ground wires, the simplified engineering calculation method of the distributed current was presented in the paper. And the calculation method about short-circuit thermal stability capacity of ground wire were analyzed. The short-circuit thermal stability capacity value of the common ground wires in common use was also given, which can be used to judge whether need to upgrade or not in the end. At last, some reconstruction schemes on short-circuit thermal stability capacity upgrading were proposed.

Key words: transmission line; ground wire; short-circuit current; thermal stability; calculation

(上接第 19 页)

作者简介:

任立平(1985-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,电网稳定运行研究工作;
 董兴绿(1979-),男,江苏南京人,助理工程师,从事电力系统继

电保护工作;

于跃海(1972-),男,江苏泰州人,研究员,从事电力系统动模与数字仿真工作;
 胡 云(1983-),男,广西马山人,助理工程师,从事电力系统动模与数字仿真工作。

Solar Cell Modeling and Maximum Power Point Tracking Control Based on RTDS

REN Li-ping¹, DONG Xing-lü², YU Yue-hai¹, HU Yun¹

(1.State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co.Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: In this paper, the solar cell is modeled in the software of RTDS (real time digital simulation) and simulations were carried on to test its IV and PV characteristics. Referring to the duty cycle perturbation and observation method, the PI regulator was applied to adjust the error signal of the solar cell voltage and control the phase modeling signal of the inverter. Then, the maximum power point tracking could be achieved by SPWM duty cycle, making the solar cell work in the vicinity of the maximum power point as much as possible to improve the efficiency of solar energy utilization.

Key words: solar cell; RTDS; maximum power point