

基于集散式逆变的光伏并网系统的仿真与研究

刘喜梅 杨明卿 万洪宇

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院 青岛 266042)

摘要: 本文对光伏并网发电系统做了详细的介绍,其中包括对光伏电池的 SIMULINK 仿真以及对其输出特性的分析。然后提出一种以 1 MW 光伏并网发电系统为基础,应用集散式逆变系统来取代传统的集中式逆变系统和组串式逆变系统的方案。在靠近光伏组件端直接采用多路 MPPT 先进行最大功率点跟踪,并且将直流电升压到 800 V 之后,再集中在逆变器室中进行逆变成 520 V 交流电,然后并入电网系统中,减少了交直流传输过程中的线损和逆变器自身损耗,并且提升了整个系统的发电效率。

关键词: 光伏发电;集散式逆变;MPPT;MATLAB

中图分类号: TM46;TN36 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Simulation and study of photovoltaic power system based on collecting and distributing type inverter

Liu Ximei Yang Mingqing Wan Hongyu

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: In this paper, the photovoltaic grid power generation system is introduced in detail firstly, including the MATLAB-SIMULINK simulation of photovoltaic cells, and the analysis of its output characteristics. And then a scheme which is based on 1 MW photovoltaic grid power generation system, applies the collecting and distributing type inverter system to replace the traditional centralized inverter system and the set of string type inverter system is put forward. Multi-channel MPPTs are adopting directly to track the maximum power point near the photovoltaic modules. And after direct current is boosted to 800 V, then is inverted centralized into 520 V AC in the inverter rooms, and it is connected to the state grid finally. This system reduces the line loss during the DC/AC transmission and the inverters' loss, and improves the efficiency of the whole system.

Keywords: photovoltaic power generation; collecting and distributing type inverter; MPPT; MATLAB

0 引言

目前,随着世界人口的急剧增加,社会经济的大力发展,煤炭、天然气等化石能源消耗越来越多,能源问题的解决方案也提上了议程。在此背景下,太阳能作为世界上巨大的可再生能源,吸引了各国研究者的注意,各国政府也在稳步推进太阳能光伏发电产业的新发展^[1]。光伏发电技术是太阳能光伏发电技术中的一项重要技术,它不仅具有零污染、安全可靠、无噪声等环保效果^[2],而且有助于减排节能,节约土地资源,减少环境的污染,改善生态环境,缓解目前的用电压力^[3]。因此,光伏发电技术在世界范围内得到了广泛的应用。

光伏发电技术又分为光伏离网发电技术和光伏并网发

电技术。其中,光伏离网发电技术适用没有并网或并网电力不稳定的地区,他们产生的直流电源可直接储存在蓄电池组中,用于在夜间或在多云或下雨的日子提供电力;而光伏并网技术多应用于家庭发电、商业发电等小规模发电场所以及大型的光伏电站等,主要特点是将所发电能直接输送到电网,由电网统一调配向用户供电。

但是无论是并网发电还是离网发电,是组串式发电还是集中式发电,都存在效率略低的现状,而这也正是各国研究学者亟待解决的问题。

1 光伏电池的特性

1.1 光伏电池工作等效电路

光伏电池工作等效电路如图 1 所示^[4-5]。

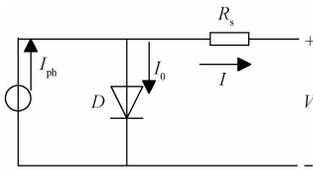


图1 光伏电池等效电路

由图1可得:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{AV_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中:

$$V_T = m(kT/q) \quad (2)$$

$$I_{ph} = I_{sc} \frac{G}{G_{ref}} [1 + \alpha_T(T - T_{ref})] \quad (3)$$

$$I_0 = I_{RS} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left[qE_g\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)/kA\right] \quad (4)$$

$$I_{RS} = I_{sc} / \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{AV_T}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

上述各公式中, I_{sc} 是标测条件(温度 $T_{ref} = 25\text{ }^\circ\text{C}$, 光照强度 $G_{ref} = 1\ 000\ \text{W/m}^2$)下的短路电流; V_{oc} 是标测条件下的开路电压; I 是电池组件的输出电流; V 是电池组件的终端电压; I_{ph} 是给定光强下的短路电流; I_0 是二极管的饱和电流; G 是光照强度; V_T 是光伏组件的热势能, m 是光伏组件中串联的光伏电池个数, k 是玻尔兹曼常数, 其值是 $1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$, 库伦常数 $q = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$; α_T 是短路电流温度系数; E_g 是禁带宽度; A 是二极管理想常数; R_s 是固有电阻, 可以由式(1)进行计算求得。

不同数量的光伏组件串并联连接, 形成不同规模的光伏阵列, 通过增加整个光伏系统的电压和电流, 来增加系统的功率。由 N_B 套光伏组件并联, N_A 套光伏组件串联, 组成的光伏阵列, 整个阵列的输出电流可由下式来表述:

$$I = N_B I_{ph} - N_B I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{AN_A V_T}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

$$P = IV \quad (7)$$

从式(6)、(7)中可以看出, 光伏阵列输出电流 I 和功率 P 随光伏阵列输出电压 V 的变化而改变。

1.2 光伏电池输出特性分析

光伏电池的输出特性直接影响到太阳能转化为电能的效率。光伏电池的输出特性主要是指电流-电压(I - V)特性和功率-电压(P - V)特性, 光伏电池的电流-电压特性的变化可以反映环境对光伏电池输出电压的变化的影响^[6]。

图2是光伏电池输出特性的仿真分析, 因为光伏电池产生的电流不是恒定电流, 受环境影响, 电压和电流的关系、电压和功率的关系都是呈非线性变化的。如图2(a)所示, 当电压很小时, 电流可以看作是恒定值, 在最大功率点(MPP)过后, 由图2(a)、(b)可看出, 电流很快减小, 功率也减小。

1.2.1 温度对输出特性的影响

当辐照度为标测值 $G = 1\ 000\ \text{W/m}^2$ 时, 光伏电池的

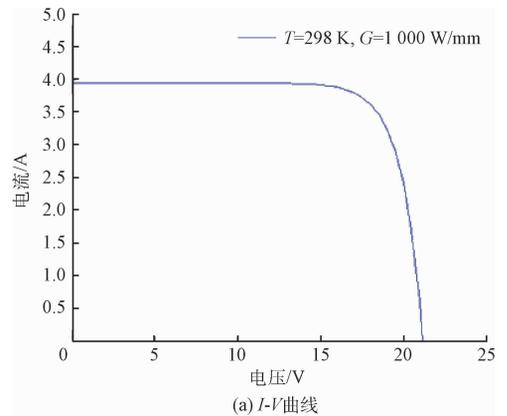
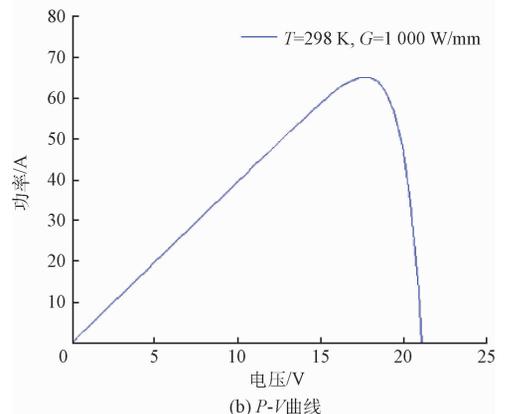
(a) I - V 曲线(b) P - V 曲线

图2 光伏电池的输出特性

流-电压、功率-电压输出特性曲线如图3(a)、(b)所示, 随着温度的升高, 由 $T = 275\ \text{K}$ 逐渐升到 $T = 298\ \text{K}$, 最后到 $T = 310\ \text{K}$ 时, 光电转换能力降低, 光伏电池输出电压逐渐减小, 最大功率逐渐减小。

1.2.2 辐照度对输出特性的影响

当电池温度在标测条件(standard test condition, STC)下, 即 $T = 298\ \text{K}$ 时, 光伏电池的电流-电压、功率-电压输出特性曲线如图4(a)、(b)所示。当电压达到最大值 V_m 时, 输出的最大功率 P_m 随着辐照度 G 的增大而增大。

如图5所示, 根据光伏电池等效电路的数学模型, 搭建出的基于 MATLAB 的仿真模型^[7]。

2 光伏电池的最大功率点跟踪

扰动观察法^[8-9](perturbation and observation method, P&O)是目前实现最大功率点跟踪的常用方法之一。它的工作原理以式(8)为计算基础。

$$P_{PV} = u_{dc} i_{PV} \quad (8)$$

对光伏电池的输出电流(或电压)施加1个扰动值, 继而分别计算一下施加扰动值前后的光伏阵列的输出功率, 然后对扰动前后的输出功率进行比较^[10-11]。如果施加扰动值之后光伏阵列的输出功率变大, 那么就说明施加的该扰动值能够使得光伏阵列的输出功率变大, 下一次可以往相

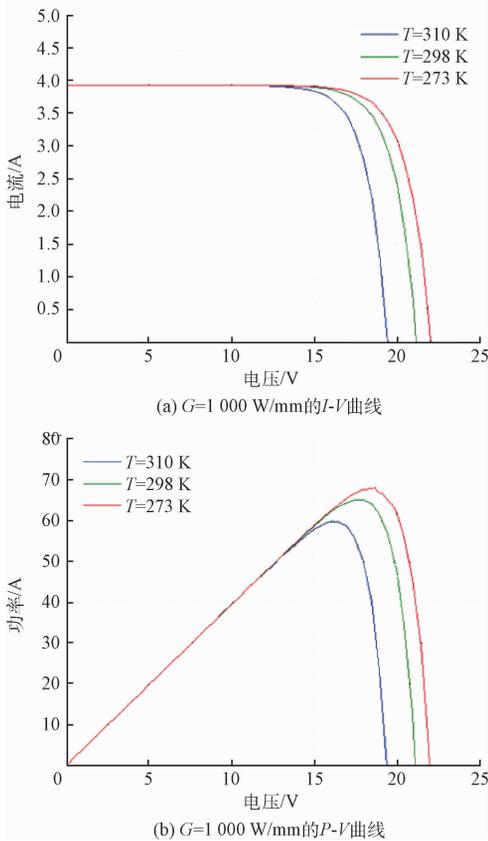


图 3 温度对光伏电池输出特性的影响

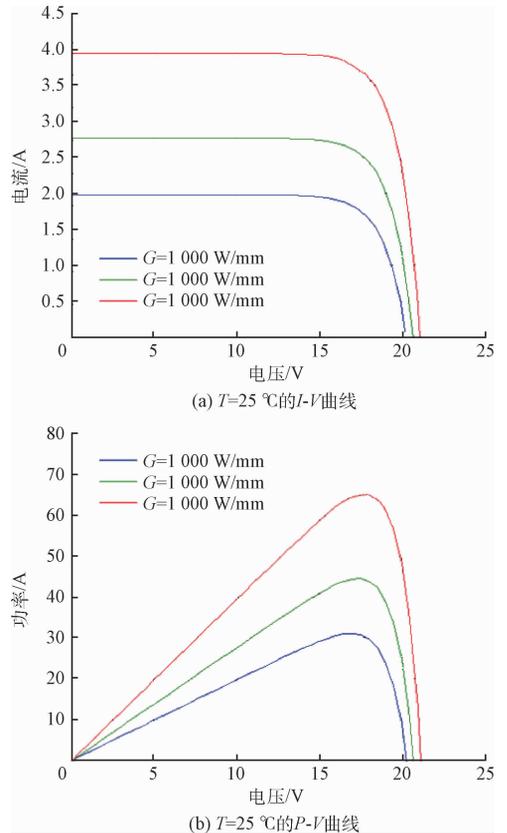


图 4 辐照度对光伏电池输出特性的影响

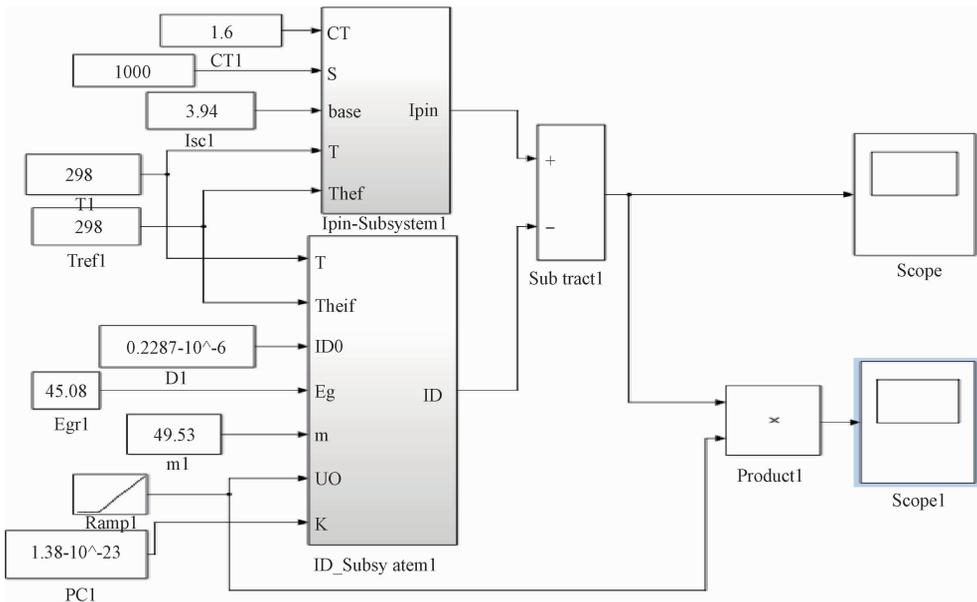


图 5 光伏电池的仿真模型

同的方向对光伏阵列的输出电流(或电压)施加相应的扰动。

本文采用对电流施加扰动值的控制方法,其控制流程为 U 、 I 是未施加扰动值之前检测到的光伏电池的电压值、

电流值,其对应的输出功率是 P 、 U_1 、 I_1 是施加扰动值之后检测到的光伏电池的电压值、电流值,其对应的输出功率是 P_1 、 I_{ref} 是参考电流, ΔI 是电流调整步长。对输出电流反复地施加扰动值,使光伏电流输出功率因输出电流的变化

而朝大的方向改变,直到接近最大功率点(MPP)。

3 逆变器和常用的逆变系统

3.1 光伏并网逆变器的介绍

光伏并网逆变器是将太阳能电池所产生的直流电能转换成交流电能的逆变装置。逆变后的电压、频率与市电的交流电的电压、频率相一致,以此来满足为各种交流用电装置、设备供电及并网发电的需求^[12-14]。

目前的光伏并网逆变器的控制方式一般是采用电压源输入、电流源输出^[15]。

3.2 集中式和组串式逆变系统的介绍

集中式光伏逆变系统是将所有的光伏组件串联后,再接入汇流箱(一般有8路、12路或者16路)进行汇流,每8~16路汇流后输入到直流柜和逆变器进行集中逆变,然后并网。

跟集中式逆变系统相比较,组串式逆变系统采用大量的小型组串式逆变器,直接将逆变器安装在光伏组件附近,就近把光伏组件产生的直流电转换成交流电,然后汇流到交流配电箱,最后输出到箱变端,免去了逆变房的使用。由于采用组串式逆变器,1路MPPT由2~4串光伏组件组成,也避免了组件失配问题。为了减少组串式逆变器输出到箱变处的传输损耗,逆变器一般采用先DC/DC升压再DC/AC逆变的两级设计结构^[16-17]。

4 集散式逆变系统方案

集散式逆变系统方案的主要特征是:集中逆变、分散MPPT跟踪。该系统就是通过前置多个MPPT控制器,实现多路MPPT共同寻优功能,汇流后使用集中式逆变器进行逆变,来进行高效率的光伏发电。该方案有效地结合了传统集中式逆变系统与组串式逆变系统两种方案的优势,使系统硬件单元和软件单元的效率都有所提升,达到了“应用集中式逆变器的低成本,来实现组串式逆变器的高发电量”。

以1MW光伏并网发电系统为例,配以集散式逆变系统,进行简单的设计分析。图6为基于集散式逆变的1MW光伏发电系统的示意图。



图6 1 MW光伏发电系统

4.1 分散MPPT跟踪

首先,假定使用额定功率为255W的光伏板,每16块

光伏板串并联组成1串光伏组件,令每2串组件对应1路MPPT,且共组成128路,则所需光伏板为:

$$16 \times 2 \times 128 = 4096 (\text{Pieces}) \quad (9)$$

总的额定发电功率为:

$$255 \text{W} \times 4096 \approx 1.05 (\text{MW}) \quad (10)$$

该方案中每个智能MPPT控制器中有4个或者8个MPPT控制模块,每个MPPT控制模块接入4路光伏组件,则最多需要智能MPPT控制器为

$$128 \div 4 \div 4 = 8 (\text{Pieces}) \quad (11)$$

这样,该方案中每2串组件(也就是32块光伏板)对应一路MPPT控制,大大的增加了MPPT控制单元的数量。

与集中式逆变系统方案中接近100路组件接入1个MPPT控制器相比,集散式逆变系统方案中的MPPT数量更多,当其中有个别的光伏板突发故障或者被树荫、云影遮挡时,不会对整个系统的发电效率产生很大的影响。简言之,集散式逆变系统方案会很大程度上减少因为光伏组件过于分散、方阵被遮挡、支架倾角不一致等多种因素所导致的失配损失。通过分散MPPT控制方案,系统平均发电的利润理论上能提升1.5%以上。

4.2 集中逆变

另外,集散式逆变系统方案降低了电流的线路传输损耗。集中式逆变器的汇流箱中所附智能MPPT模块具备提升电压的功能,将从汇流箱到逆变房的远距离直流输电电压提升到800VDC左右,与集中式逆变器的600VDC左右的直流输入和组串逆变器的480VDC交流输出相比较,集散式逆变系统方案的线路传输损耗被大大的降低。

集散式逆变系统方案交流输出电压也被相应地提升到500VAC左右,跟集中式逆变系统的315VAC相比,交流线路传输损耗也有所降低。

采用集散式逆变系统方案,跟另外两种系统相比较,理论上系统的线路传输损耗有差不多0.5%的降低。

4.3 集散式逆变系统方案的特点

1) 多路MPPT

集散式逆变系统方案把MPPT的功能分散到与光伏组件对应项链的集散式汇流箱中,且每2串光伏组件对应1路MPPT。如图7所示,对于1MW的光伏方阵单元则具有128路MPPT,远多于传统的集中式光伏电站配置,最大发挥组件利用率,很大程度上减少因为光伏组件过于分散、方阵被遮挡、支架倾角不一致等多种因素所导致的失配损失。

2) 低传输损耗

集散式逆变方案通过提升逆变器交直流侧电压来降低线损及逆变器自身损耗,理论上硬件系统效率可提升1%以上。



图 7 多路 MPPT 优势图

3) 独立性强

由于多个分系统的存在,系统的冗余度很高,不会因为逆变器的故障造成整个系统的崩溃;周边故障的修复也不会影响系统的大部分运行。

5 孤岛效应

孤岛效应是当检修或突发故障电源停止供电,太阳能发电系统无法检测到电源状态、切断孤立电网,从而形成了光伏并网发电系统向周边负载供电,和电力公司无法掌握的自给供电现象。

如果没有防止孤岛效应的有效的保护设施,当电网停止供电时,维修人员进行线路的检查或者维修时,可能会出现触电的情况,危及维修人员的安全,也会危害到用电设备的安全运行。当电网恢复供电时,还有可能导致系统与供电电网之间出现相位上的偏差,也会对电网的电能质量产生一定的影响。

防孤岛保护装置是光伏发电系统的重要设备,检测光伏发电系统输出的电压和频率,通过电压、频率保护即可达到保护的效果^[18]。

6 结 论

本文详细介绍了太阳能光伏并网发电系统,其中包括对光伏电池的 MATLAB-SIMULINK 仿真以及对其输出特性的分析,简介了最大功率点跟踪的过程。并且将组串式逆变方案和集中式逆变方案进行了详细的比较与分析,得出了各自的优点以及不足。

其次着重介绍了集散式逆变系统方案,并将其嵌入到 1 MW 光伏并网发电系统中进行简略的分析,而且与集中式逆变系统和组串式逆变系统作了对比。可知,应用该方

案会提升整个发电系统的效率,整体优势是明显的。当然也存在实例与数据略少等不足之处,后续会做以深入研究来完善。

参考文献

- [1] 杨金孝,朱琳. 基于 MATLAB-Simulink 光伏电池模型的研究[J]. 现代电子技术, 2011,34(24) 192-194.
- [2] DURGADEVI A, ARULSELVI S, NATARAJAN S P. Study and implementation of maximum power point tracking (MPPT) algorithm for photovoltaic systems[C]. Proceedings of IEEE 2011 International Conference on Electric Energy Systems (ICEES), IEEE, 2011: 240-245.
- [3] 李思岑,杜威,严忠亮. 1MW_p 屋顶光伏并网系统设计与分析[J]. 山西电力, 2013(4):4-8.
- [4] 赵春江,洪崇恩,刘永生. 家庭太阳能光伏发电系统的研究[J]. 节能技术与产品, 2013(4):38-41.
- [5] 姚致清,刘喜梅. 基于 PSCAD-EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010(9):38-17.
- [6] 姚静. 30 MW_p 光伏并网发电系统的设计[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [7] 温宗周,李辰. 高效光伏充电控制器的设计[J]. 电子测量技术, 2014,37(10):29-32.
- [8] 刘利红,陈启正. 基于 BOOST 电路光伏电池的 MPPT 仿真研究[J]. 电气技术, 2011(9):10-13.
- [9] T NOGUCHI, S TOGASHI, R NAKANOTO. Short-current pulse based adaptive maximum-power-point

- tracking for photovoltaic power generation system[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 139(1): 78-83.
- [10] 荆红丽, 赵鹏. 基于模糊控制的光伏发电系统 MPPT 设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1): 80-83.
- [11] 汪石农, 陈其工, 高文根. 基于直线近似和扰动观察的 MPPT 算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6): 945-950.
- [12] 卓静. 1MW_p 并网光伏发电系统优化设计[J]. 新疆有色金属, 2011, 34(4): 66-67.
- [13] 赵杰, 胡学龙. 微型光伏并网逆变器的研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(7): 1-8.
- [14] 党克, 郑玉浩, 严干贵. 电网电压不平衡下光伏并网逆变器的同步技术[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 87-94.
- [15] 王东娇. 太阳能光伏发电控制技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.
- [16] 王艳国. 浅谈组串式逆变器的历史及认识的误区[J]. 太阳能, 2014(8): 13-16.
- [17] 高立国, 范宪国. 集中式与组串式逆变器方案在大型并网光伏电站中的投资成本分析[J]. 太阳能, 2015(4): 19-21.
- [18] KOBAYASHI H, TAKIGAWA K, HASHIMOTO E, et al. Method for preventing islanding phenomenon on utility grid with a number of small scale PV system[C]. Proceeding of 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE, 2010: 695-700.

作者简介

刘喜梅, 1961 年出生, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力电子智能控制, 复杂系统的建模及优化控制。

杨明卿, 1990 年出生, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术。

E-mail: ymq19900811@163.com

万洪宇, 1988 年出生, 硕士研究生, 研究方向为电力电子实时仿真。