

The Simulation Modeling of the Impact of Distributed Photovoltaic Power Grid Connection on Grid Voltage

Peng Peng

The Technical and Economic Center of the Ministry of Construction, Shenzhen Power Supply Bureau Co., LTD., Shenzhen Guangdong

Email: 824074768@qq.com

Received: Sep. 10th, 2015; accepted: Sep. 23rd, 2015; published: Sep. 29th, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Distributed photovoltaic power generation is an important developing direction of photovoltaic power generation. But the output characteristic of photovoltaic (pv) power has certain influence on the voltage of the distribution network. Firstly, this paper introduces the photovoltaic energy's role in the future, and briefly introduces the principle of photovoltaic power generation system and power generation. Secondly, the centralized grid connection photovoltaic power generation system and distributed grid connection photovoltaic power generation system which are current research focuses of photovoltaic power generation system are discussed. Then the equivalent simulation model of photovoltaic power source is analyzed. Thirdly, the matlab simulation model is built based on the general IEEE 34 nodes distribution network model and parameters. Finally, this paper analyzes the influence on power grid voltage under the condition of different interconnected locations and various capacities of photovoltaic power.

Keywords

Photovoltaic Power, Distributed Energy, Grid Connection, Matlab Simulation

分布式光伏电源并网对电网电压影响的仿真建模

彭 澎

文章引用: 彭澎. 分布式光伏电源并网对电网电压影响的仿真建模[J]. 智能电网, 2015, 5(5): 213-219.

<http://dx.doi.org/10.12677/sg.2015.55026>

深圳供电局有限公司基建部技术经济中心, 广东 深圳
Email: 824074768@qq.com

收稿日期: 2015年9月10日; 录用日期: 2015年9月23日; 发布日期: 2015年9月29日

摘要

分布式光伏发电是光伏发电的重要发展方向, 但光伏电源的输出特性使得其并网会对配电网的电压产生一定影响。本文从分布式光伏电源的原理和发展出发, 介绍了光伏发电在未来能源利用方面的重要地位, 简要叙述了光伏发电系统及发电原理, 就光伏发电系统的分类、组成做出了归类, 并对当前光伏发电系统研究热门的两大方向, 即集中式并网光伏发电系统和分布式并网光伏发电系统的特点进行了说明。然后重点分析了光伏电源的等效模型, 研究了光伏电源并网对配电网电压影响的仿真模型的建立, 并搭建了基于通用的IEEE 34节点配电网模型及其参数的Matlab/Simulink光伏并网仿真平台, 为探究光伏电源并网对配电网电压影响规律建立了模型基础。

关键词

光伏发电, 分布式电源, 并网, Matlab仿真

1. 引言

由亚行开发银行与清华大学完成的《中华人民共和国环境分析》报告已于近日发布, 报告指出, 全球十大空气污染城市中国占据七席, 全国 500 个大中型城市中, 只有不到 1% 达到世界卫生组织空气质量标准; 另有专家指出, 国内空气污染异常严重的主要原因系化石燃料过度排放造成。中国 2014 年一次能源消费数据显示, 煤炭、石油和天然气等化石能源在我国一次能源消费中占比超过 90%。由此可见, 加强空气治理, 改善当前中国的工业、能源结构已成为当务之急[1]。

鉴于环保、传统能源紧缺等原因, 发展清洁可再生的新能源是全世界的重要问题。光伏发电具有“原料”充足、环境友好、设备使用寿命长、易于维护等优势, 被认为是最有发展潜力的同时也是世界各国大力发展的新能源发电方式。《2010-2015 年中国太阳能光伏发电产业投资分析及前景预测报告》指出, 美国提出“太阳能先导计划”意在降低太阳能光伏发电的成本, 使其 2015 年达到商业化竞争的水平; 日本也提出了在 2020 年达到 28 GW 的光伏发电总量; 欧洲光伏协会提出了“setfor2020”规划, 规划在 2020 年让光伏发电做到商业化竞争。在发展低碳经济的大背景下, 各国政府对光伏发电的认可度逐渐提高[2]。

但光伏发电及其控制技术仍然在发展之中, 存在者许多亟待解决的问题。除成本较高外, 由于太阳能光伏电源的实际输出功率会随日光照射强度、天气等因素的变化而变化, 从而可能引起配电网的潮流变化, 进而影响电网的稳定性。

文献[3]指出, 并网后影响系统电压的因素主要有, 光伏发电系统的接入位置、光伏并网的电压调节水平以及容量大小。一般情况下配电网中除了通过投切电容调节电压外, 很少具有其他的动态无功调节设备, 如果光伏发电量所占比例较大, 其具有的易变性将使配电线路上的负荷潮流也极易波动且变化较大, 从而加大了电网正常运行时的电压调整难度, 可能会出现电压超标情况。故本文将分析分布式光伏电源等效模型, 进而研究分布式光伏电源的并网仿真模型的建立, 从而为分析分布式光伏电源并网对配电网的影响规律建立模型基础。

2. 光伏发电原理

光伏发电，其基本原理即“光生伏打效应(Photovoltaic Effect)”，当太阳光(或其他光)照射到金属上时，它的能量可以被金属中某个电子全部吸收，电子吸收的能量足够大，能克服金属内部引力做功(逸出功)，离开金属表面逃逸出来，成为光电子。光照使不均匀半导体或半导体与金属结合的不同部位之间产生电位差的现象。它首先是由光子(光波)转化为电子、光能量转化为电能的过程；其次，是形成电压过程[4] [5]。

图 1 为太阳能电池(Solar Cell)示意图，硅原子有 4 个电子，如果在纯硅中掺入带有 5 个电子的原子(如磷原子)，就成为带负电的 N 型半导体；若在纯硅中掺入带有 3 个电子的原子(如硼原子)，就形成带正电的 P 型半导体。当 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，接触面就会形成电势差，成为太阳能电池。当太阳光照射到 P-N 结后，空穴由 N 极区往 P 极区移动，电子由 P 极区向 N 极区移动，形成电流。

综合以上，可把太阳能电池将光能转换成电能的工作原理概括为以下三个过程：

- 1) 太阳能电池吸收一定能量的光子后，半导体内产生电子 - 空穴对，成为“光生载流子”，两者电性相反，电子带负电，空穴带正电；
- 2) 电性相反的光生载流子被半导体 $p-n$ 结所产生的静电场分离开；
- 3) 光生载流子电子和空穴分别被太阳能电池的正、负极所收集，并在外电路中产生电流，从而获得电能。

3. 光伏发电系统

光伏发电系统主要分为并网发电系统和离网发电系统，由于如今市场和研究的主要方向为并网光伏发电系统，故在此对于离网系统不作过多阐释。

并网光伏发电系统又可以分为集中式和分布式，这两种都是如今光伏产业的重要发展方向。集中式光伏发电系统即大型光伏电站，大型光伏电站一般都是国家级电站，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。但这种电站投资大、建设周期长、占地面积大，收回成本时间长。而分散式小型并网光伏，特别是光伏建筑一体化光伏发电，由于投资小、建设快、占地面积小、政策支持力度大等优点，近年来发展迅速。

光伏发电系统是由太阳能电池方阵，蓄电池组，充放电控制器，逆变器，以及配电柜和太阳能跟踪控制系统等设备组成(图 2)，其中主要设备的作用是：

- 1) 太阳能电池方阵(PV)阵列：在有光照(太阳光或是其他光源发出的光)的条件下，电池吸收光能，利用半导体硅电池方阵的“光生伏打效应”，使电池两端产生电动势，将光能转换成电能，是能量转换器件。
- 2) 蓄电池组：蓄电池组的作用是贮存太阳能电池方阵受光照时发出的电能并可随时向负载供电。
- 3) 充放电控制器：是能自动防止蓄电池过充电和过放电的设备。
- 4) 逆变器：是将直流电转换成交流电的设备。由于太阳能电池和蓄电池是直流电源，而负载是交流负载时，逆变器是必不可少的。逆变器按运行方式，可分为独立运行逆变器和并网逆变器。独立运行逆变器用于独立运行的太阳能电池发电系统，为独立负载供电。并网逆变器用于并网运行的太阳能电池发电系统。

并网逆变器的拓扑结构是逆变器的关键不问是，它关系着逆变器的效率和成本，其对后文的建模和研究具有重要帮助。一般情况下，其拓扑结构可以大致分单级并网模式和两级并网模式两种。其主要作用如下：

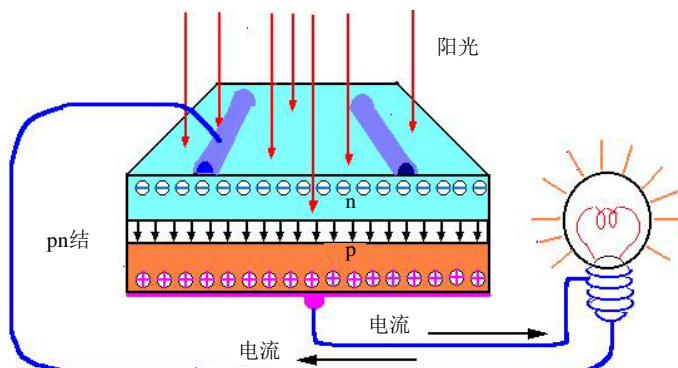


Figure 1. The solar cell diagram

图 1. 太阳能电池示意图

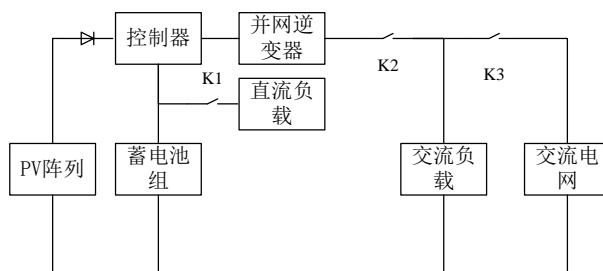


Figure 2. The composition of grid photovoltaic power generation system

图 2. 并网光伏发电系统的组成

1) 最大功率点跟踪(MPPT)控制: 对跟随太阳能电池方阵表面温度变化和太阳辐照度变化而产生出的输出电压与电流的变化进行跟踪控制, 使方阵经常保持在最大输出的工作状态, 以获得最大的功率输出。

2) 防止单独运行: 系统所在地发生停电, 当负荷电力与逆变器输出电力相同时, 逆变器的输出电压不会发生变化, 难以察觉停电, 因而有通过系统所在地供电的可能, 这种情况叫单独运转, 又称为孤岛效应。

3) 异常情况排查与停止运行: 当系统所在地电网或逆变器发生故障时, 及时查出异常, 安全加以排解, 并控制逆变器停止运转。

4. 仿真模型研究

为了开展太阳能光伏发电并网系统对配电网电压的影响研究, 本文首先对光伏电源系统进行分析, 推导大容量太阳能光伏发电的数学模型并建立光伏电源的等效仿真模型, 然后再建立分布式光伏发电的并网系统仿真模型, 为后续的研究建立模型基础。

4.1. 太阳能光伏电池阵列

由于光伏发电系统输出功率具有随机性和间歇性, 不同天气条件下, 光伏发电系统出力不同。光伏电池阵列是光伏并网发电系统核心部分, 目前建立光伏阵列模型一般有三种方法: 第一种将光伏电池阵列直接等效为直流电压源, 该方法简单, 为大多数学者所用, 但该方法不能实时跟踪太阳辐射强度、环境温度和光伏阵列参数变化, 无法反映光伏阵列特性; 第二种基于光伏电池阵列特性, 对其固有特性, 如开路电压、短路电流等进行修正, 使模型特性与实际光伏阵列特性类似, 但该模型输入温度、光照强度设定较为困难; 第三种依据物理特性建立光伏阵列数学模型, 描述光伏阵列内部特性模拟外界环境变

化，但无法进行实时仿真。目前使用最多的是根据外特性等效的方法建立大容量分布式光伏电源系统，其等效电路图如图3。

光伏电池实验时，因光伏电池输出电流随光照强度变化而变化，而光照强度则取决于天气情况，每一时刻光照强度都有可能发生变化，故通常需考虑光照强度等因素，光伏阵列的模型的电流-电压特性方程如下[6]：

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中， A 为二极管的理想因子；波尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，为电子的电荷量； T 为温度； R_s 和 R_{sh} 为并联和串联电阻； I_{sat} 为二极管的逆向饱和电流。

4.2. 光伏电源仿真模型

本文采用外特性等效的方法建立大容量光伏电源，其原理是确保光伏电源的外特性等效和技术指标相同[7] [8]。搭建光伏电源仿真模型的目标是只需要输入实际光伏电源的主要技术参数：最大功率点电流 I_m ，短路电流 I_{sc} ，最大功率点电压 U_m ，开路电压 U_{oc} ，温度 T 和光照强度 S 。对图3和公式(1)进行分析就可以得到光伏电源的数学模型[9] [10]。本文在满足工程精度的前提下，将式(1)进行简化为(2)式：

$$I = I_{sc} - I_{sat} \left\{ \exp \left[\frac{IR_s}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

令 $C_1 = I_{sat}/I_{sc}$ ， $C_2 = ART/q$ ，将上式化简为：

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{U}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

在开路状态下， $I = 0$ ， $U = U_{oc}$ ；在最大功率点， $U = U_m$ ， $I = I_m$ ，利用此边界条件即可求出 C_1 和 C_2 ，即：

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left(-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}} \right) \quad (4)$$

$$C_2 = \left(\frac{U_m}{I_{sc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

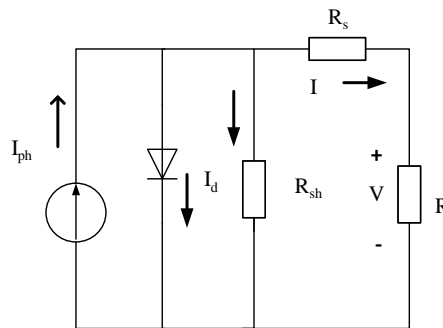


Figure 3. The equivalent circuit diagram of photovoltaic battery generating experiment
图3. 光伏电池发电实验等效电路图

将温度的变化量 $\Delta T = T - T_{ref}$ 和光照强度的变化量 $\Delta S = S/S_{ref} - 1$ 引入可得:

$$I'_{sc} = I_{sc}(1 + \Delta S)(1 + a \times \Delta) \quad (6)$$

$$U'_{oc} = U_{oc}(1 - c \times \Delta T) \ln(e + b \times \Delta S) \quad (7)$$

$$I'_m = I_m(1 + \Delta S)(1 + a \times \Delta) \quad (8)$$

$$U'_m = U_m(1 - c \times \Delta T) \ln(e + b \times \Delta S) \quad (9)$$

式中, 标准环境温度 T_{ref} 取常温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 标准环境光照强度 $S_{ref} = 10000\text{ W/m}^2$; $b = 0.5$; $c = 0.0025\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为标准条件下的电流温度系数。

通过(2)~(9)式即可在MATLAB仿真模块中建立起光伏电源的仿真模型, 如图4。

4.3. 基于 IEEE 34 节点光伏并网仿真模型

IEEE 34 节点是用于配电网测试的系统, 本文将其与光伏电源模型进行连接, 从而构成用于研究分布式光伏电源并网对配网电压影响的仿真模型。图 5 为基于 IEEE 34 节点光伏并网系统模型, 其中 800 号节点为母线节点, 832 号与 888 号节点之间为变压器, 其变比为 $24.9/4.16\text{ kV}$ 。本文中采用了典型的线路、变压器和调压器参数。

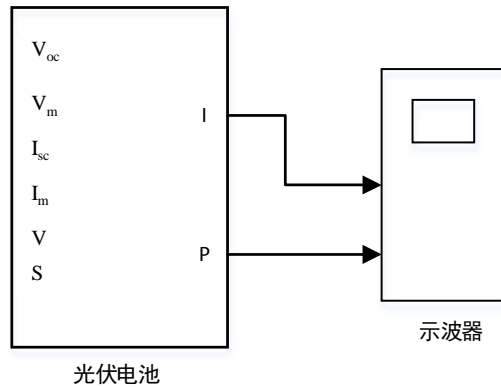


Figure 4. Simulation model of photovoltaic power source under standard environment
图 4. 标准环境下的光伏电源仿真模型

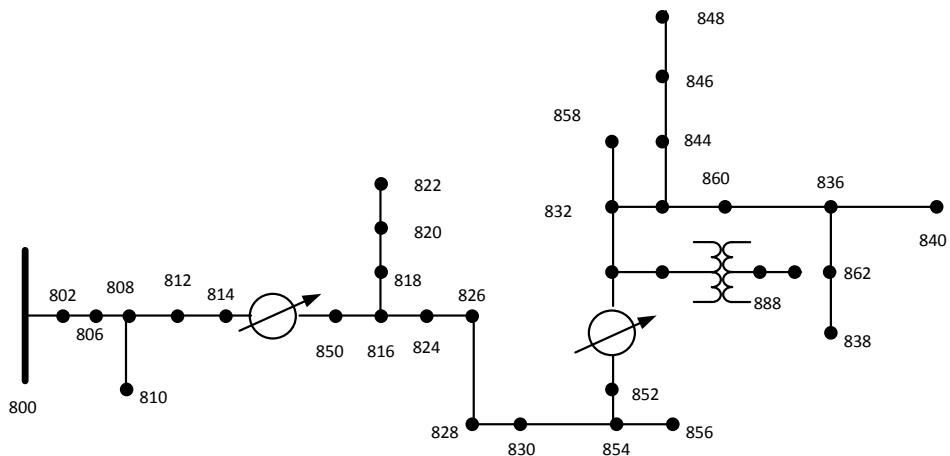


Figure 5. Photovoltaic connection grid model based on IEEE 34 nodes
图 5. 基于 IEEE 34 节点光伏并网系统模型

接下来即可在 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型, 进行仿真。接下来重点分析以下两个问题: 1) 在不同节点处加入分布式光伏电源, 观察电网中各节点的电压, 判断在不同位置处加入分布式光伏电源对电网电压的影响; 2) 在同一位置添加分布式光伏电源, 改变光伏电源的容量, 观察电网中各节点的电压, 判断在电网中分布式光伏电源容量对电网电压的影响。

5. 结论

光伏发电因太阳能电池方阵的输出电压和输出功率会随光照、天气等因素的变化而变化, 故光伏电源并网对于配电网会有一定的影响。本文从分布式光伏电源的基本原理、光伏发电的系统和结构出发, 分析和推导了光伏电源的仿真模型, 建立了适合工程分析的光伏电源模型。然后基于 IEEE 34 节点的配电网测试模型建立了研究分布式光伏电源并网对配电网电压影响的仿真模型, 为后续的分析建立了模型基础。

参考文献 (References)

- [1] 王长贵, 王斯成 (2009) 太阳能光伏发电实用技术. 化学工业出版社, 北京.
- [2] Chiras, D., Aram, R. and Nelson, K. (2011) 太阳能光伏发电系统. 机械工业出版社, 北京
- [3] 陈成 (2011) 光伏并网对配电网电压分布的影响分析. 硕士论文, 华北电力大学, 北京.
- [4] 雷一, 赵争鸣 (2010) 大容量光伏发电关键技术与并网影响综述. *电力电子*, **3**, 16-22.
- [5] 王长贵, 王斯成 (2009) 太阳能光伏发电实用技术. 化学工业出版社, 北京, 14-20.
- [6] 张伯明 (2007) 高等电力网络分析. 清华大学出版社, 北京.
- [7] 张剑, 孙元章 (2011) 三相单级光伏并网系统对配电网侧负荷建模的影响. *电力系统自动化*, **2**, 73-77.
- [8] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等 (2011) 大容量并网光伏电站技术综述. *电力系统自动化*, **12**, 101-107.
- [9] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等 (2008) 并网光伏电站动态建模及仿真分析. *电力系统自动化*, **24**, 83-87.
- [10] 赵杰 (2012) 光伏发电并网系统的相关技术研究. 硕士论文, 天津大学, 天津.