

光伏发电并网与微网运行控制仿真分析

马尚行 沈英达 戴永军

浙江嘉科新能源科技有限公司, 浙江 嘉兴 314300

[摘要] 作为前景良好的分布式发电技术, 光伏发电在并网过程中容易带来各种不良影响。为建立有效并网和微网运行控制策略, 还要加强光伏发电系统动态仿真分析。基于此, 文章对光伏发电并网控制策略展开了分析, 并对光伏发电、并网控制、微网运行各个阶段进行了控制仿真, 为关注这一话题的人们提供参考。

[关键词] 光伏发电; 并网控制策略; 微网运行控制仿真

DOI: 10.33142/sca.v3i4.2181

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Simulation Analysis of Photovoltaic Power Generation Grid Connection and Microgrid Operation Control

MA Shangxing, SHEN Yingda, DAI Yongjun

Zhejiang Jiake New Energy Technology Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang, 314300, China

Abstract: As a promising distributed generation technology, photovoltaic power generation is prone to bring various adverse effects in the process of grid connection. In order to establish effective grid connection and Microgrid operation control strategy, it is necessary to strengthen the dynamic simulation analysis of photovoltaic power generation system. Based on this, this paper analyzes the grid connected control strategy of photovoltaic power generation, and carries out control simulation for each stage of photovoltaic power generation, grid connected control and Microgrid operation, so as to provide reference for people who pay attention to this topic.

Keywords: photovoltaic power generation; grid-connected control strategy; Microgrid operation control simulation

引言

光伏发电带有不确定性和随机性, 会受到光照、地理环境等各种因素影响, 并网时将给微网运行带来过多干扰。但随着能源紧缺问题日渐凸显, 包含多个可再生发电单元的微网结构已经形成, 因此还应加强光伏发电并网与微网运行控制仿真分析, 以便提出科学、有效的控制策略。

1 光伏发电并网控制策略

光伏发电系统由光伏电池列阵、变换器、储能装置和控制测量设备构成, 实施两级控制。在系统并网时, 需要利用 DC/DC 升压, 通过直接扰动法实现最大功率跟踪 MPPT 控制, 以解决电池发电功率不稳的问题。利用 DC/AC 逆变, 能够利用平衡功率使直流侧持续输出电压, 得到的交流电压经过光电隔离、滤波后能够进入电网。

采用 MPPT 控制策略, 能够利用电导增量法、扰动观测法等不同方法实现初级控制。采用 boost 升压电路, 需要配合采用电导增量法进行并网控制。利用变换器对输出电压进行调节, 使其比输入电压值大, 一般采用单管非隔离装置, 通过调节开关管实现电压调控^[1]。在导电状态和非导电状态下, 电压增益有所不同。实现 MPPT 自寻优控制, 在电源输出与负载输出相交点右侧, 存在最大功率点。经过控制, 交点位置将提升, 直至最大功率点由右侧挪至左侧, 交点位置有所降低。对电池列阵瞬间导抗值进行比较, 利用变量变化确认最大功率跟踪特性, 能够得到对应点位斜率为 0。在输出电导变化值等于输出电导负值时, 说明处于最大功率点位。在光照强度、温度发生改变后, 电压输出将随着调整出现小幅度摆动。检测得到的电压和电流值分别为 U_n 和 I_n , 在上一周期采样得到的输出电压、电流值分别为 U_b 和 I_b , 产生的扰动为 D 。如图 1 所示, 对电压变化展开分析, 在为 0 时说明阻抗相同, 无需调节电流。在电流有所减小的情况下, 需要减小变化幅值, 反之则需要增大。在输出恒定电压时, 需要将 D 减小, 否则应增大。

在逆变并网阶段, 需要利用 PWM 技术确保电流与电网同频同向。利用面积等效理论, 利用相同窄脉冲对惯性环节施加作用。采用标准正弦波作为调制波, 能够实现 SPWM 脉冲宽调制。在调制信号与三角波信号间, 可以利用载波比系数进行幅值比值的反映。在比值增加的情况下, 调制也将加深, 使输出电压发生基波幅值变化。因此通过调整信号, 能够对输出电压频率和幅值进行调节。比值达到 1 时, 基波幅值最大, 超出 1 说明出现过调制问题, 将导致输出电压中有谐波

产生^[2]。利用 PWM 逆变电路，能够将载波周期当成是基础，经过傅里叶变换处理后，能够得到输出电压谐波分量。在载波比增加的情况下，得到的最低频谐波与基波间存在较大差异，从而满足滤波需求，使输出电压质量得到改善。

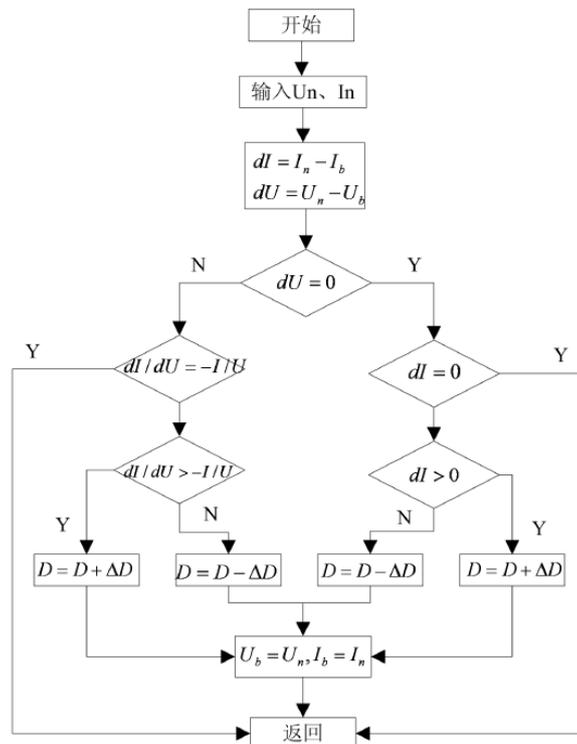


图 1 最大功率点跟踪示意图

2 光伏发电并网后微网运行控制仿真

2.1 光伏发电仿真

根据光伏发电原理，可以建立等效分析模型，经过简化后可以得到电源输出电流 I 的表达式：

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \exp \left[\frac{V - \Delta V}{(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \exp(\frac{V_m}{C_2 V_{oc}})} - 1 \right] \right\} + \Delta I \quad (1)$$

式中， I_{sc} 指的是短路电流， V 为电源输出电压， I_m 为最大功率点电流， V_m 为对应电压值， C_1 和 C_2 为电路系数， V_{oc} 指的是开路电压， ΔI 则是输出电流变化。电源输出电流变化与太阳辐射强度 G 有关，可以得到：

$$\Delta I = \alpha \times \frac{G}{G_{ref}} \times (T_c - T_{ref}) + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (2)$$

式中， G_{ref} 指的是辐射， T_{ref} 为对应电池温度参考值， T_c 则是实际温度值， α 为短路电流对应的温度变化系数。根据输出阻抗 R_s ，可以对电源输出电压变化值 ΔV 进行求取，得到：

$$\Delta V = -\beta \times (T_c - T_{ref}) + R_s \times \Delta I \quad (3)$$

式中， β 为开路电压对应的温度变化系数。利用 MATLAB 软件进行仿真分析，在光照辐射达到 $1000W/m^2$ ，温度达到 $25^\circ C$ ，外部纯阻性负载在 0 到 40Ω 间变化过程中，根据得到的电压与电流、功率的关系波形，能够发现在 8Ω 时电源功率值能够达到最大。此时，在最大功率点位置，电压与电流比值接近 8 ，说明输出功率能够与负载匹配。

2.2 并网控制仿真

结合光伏发电并网控制原理，能够得到图 2，实施并网控制仿真分析。在对 MPPT 特性进行实现时，需要对列阵输出 $C1$ 电压和 U_{pv} 展开比较，利用载波比调节后进行判断。得到的比值比 0 大，则对 S 进行开通，否则需要关断。在输

出电压与 U_{pv} 相等时，可以得到占空比为 0.5，开通 S。占空比超出 0.5 后，输出电压值较小，将 S 关断。在逆变控制过程中，需要实现并网状态电流调节，使注入电网的功率随之改变，达到对直流侧电压进行有效调节的目标。在仿真分析过程中，不考虑电压稳定给并网带来的影响，可以将产生的电能全部注入。在电容 C1 和 C2 分别为 40 和 2200 μF 时，滤波电感与 L_B 相同，均为 35mH，有功和无功功率分别为 P 和 Q，载波频率达到 10KHz。在 $2.5 \times 10^{-5}\text{s}$ 步长下进行仿真，在扰动电压为 8V 时，经过 0.04s 后光照从 1000 下降至 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，温度经过 0.07s 后开始下降。

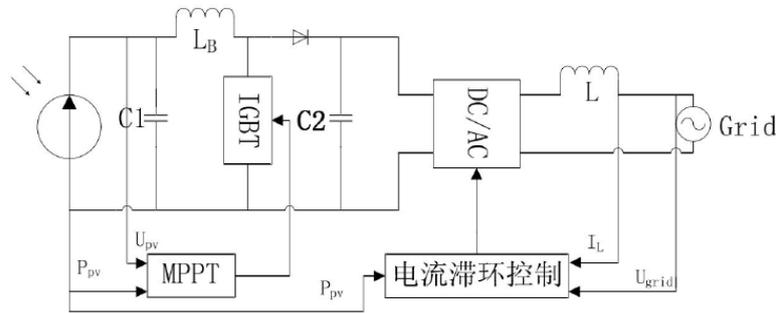


图 2 光伏发电并网控制原理图

经过仿真分析，能够发现并网点位置受谐波电流影响，出现了较大电压幅值畸变。从测量结果来看，在并网容量为 100MW 时，将并网距离从 0.1 调整至 0.4km，谐波畸变率从 2.9% 逐步下降至 2.8%，电流幅值从 28.30A 降低至 28.25A，电压从 326.6V 提升至 326.8V，畸变率从 1.42% 提升至 6.05%。在并网距离为 0.1km 时，将并网容量从 100MW 调整至 10MW，期间电流谐波畸变率先上升后下降，电压畸变率先下降后上升。从具体数值来看，在并网容量达到 80MW 时谐波畸变率最大，达到 3%，对应电流幅值为 28.24A，并网电压为 326.6V，电压畸变率为 1.41%。在并网容量下降至 10MW 时，谐波畸变率为 2.75%，对应电流幅值为 28.27A，并网电压为 326.5V，电压畸变率为 1.87%。

2.3 微网运行仿真

2.3.1 运行控制

微网中发电机组、蓄电池、光伏太阳能板等都可以看成是电源，与负荷、控制设备和储能设备共同构成小型配电系统^[3]。将光伏电池当成是主要能源，想要保证微网稳定运行，还应对并网运行和孤岛运行两种状态下需要采取的运行控制策略进行仿真分析。在光伏发电并网过程中，将产生较大电力谐波和直流分量，给电压和电网频率带来波动，给继电保护装置运行带来干扰。一旦并网时发生故障且无法断开故障点，将导致微网出现孤岛状态，承担过大容量负载。采用 PQ 控制策略，结合发电系统运行特点注入有功或无功功率，可以根据大电网确定微网电压和频率，保证功率变化不受影响。在孤岛状态下，需要采用下垂控制策略，由大电网为微网提供一定功率补偿，实现输出电压和频率调节。实际在微网运行过程中，需要利用模块对微网与配电网连接情况进行检测，发现断开后立即转变控制策略，从 PQ 自动转化改为主从控制，利用下垂特性电源 VSI 实现输出负荷功率值调整，达到控制母线电压的目标。在输出功率发生改变时，电源输出电压频率也将随之改变。在光伏电源与 VSI 电源频率相同时，并网内部环流将得到消除。经过逆变处理，能够得到输出电压和电流值，完成输出功率解耦。在微网负荷有所改变时，主控源将根据变化进行输出电力调整，保证功率达到要求。根据功率变化，对从属系统数值进行调节，能够保证主控源容量充足，可以根据负荷变化进行输出调节。在备用容量不足时，需要实现输出有功和无功调节，继而为电网稳定运行提供保障。

2.3.2 仿真分析

在微网运行仿真分析阶段，利用 MATLAB 工具建立仿真模型，如图 3 所示，包含并网控制、全桥逆变、LC 滤波、相位检测、功率控制等仿真模块。同时采取电流闭环和电压闭环控制方式，能够对有关参数进行调节，实现恒定功率输出控制。在系统直流电压 DC 为 650V 时，滤波电感为 0.0008H，DC 内阻为 0.01 Ω ，C 为 1KVar，线阻 0.07 Ω 。线路负载无功和有功功率分别达到 5KVar 和 50KW。利用 PI 控制器实现参数调节，在 K_p 达到 50， K_i 达到 1800 时进行有功调节；在 K_p 达到 200， K_i 达到 1800 时进行无功调节。仿真分析采样间隔为 2×10^{-6} ，反馈增益则为 1×10^{-6} 。

从仿真结果来看，首个通道为 DR 输出，得到的电压幅值能够达到 650V，之后通道依次为 ab 相的 SPWM 波形、逆变三相交流电压和逆变三相交流电流。在有功功率期望输出达到 8KW 时，无功则为 460Var。在微网调节过程中，波形并

未发生超调问题，并且可以在 0.3s 内完成输出电压调节，达到期望值，因此能够满足微网运行控制要求。

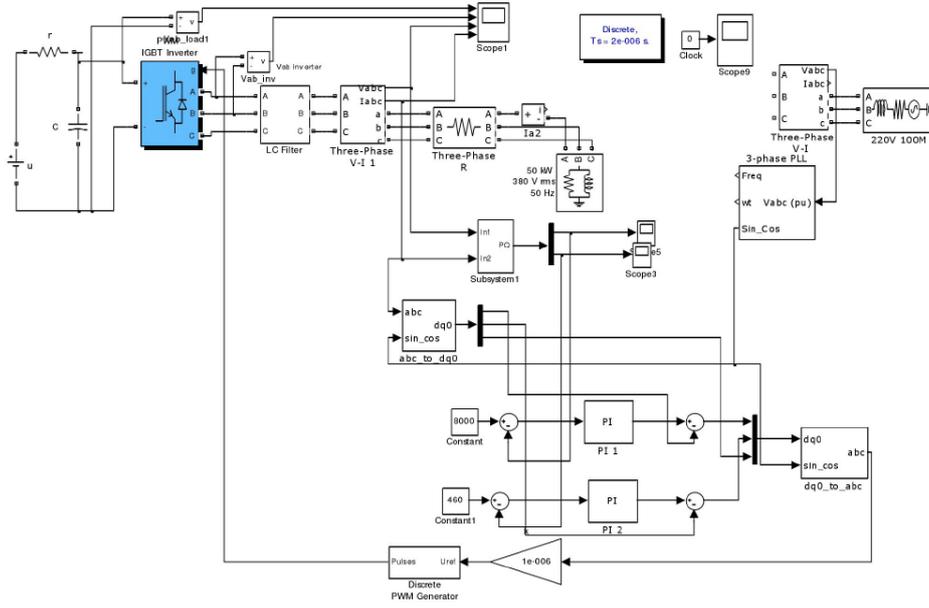


图 3 微网运行控制仿真模型图

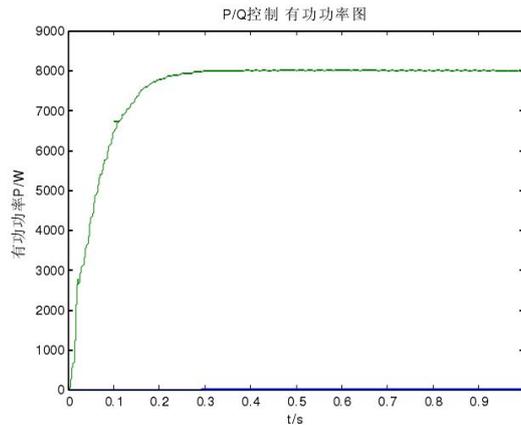


图 4 微网运行控制仿真波形图

结论

综上所述，在光伏发电并网过程中需要加强输出调节，满足输出滤波要求，以免给微网运行带来过多干扰。实际在并网运行控制过程中，利用降压升压装置进行输出电压调节，并利用最大功率跟踪算法进行功率调节，能够使功率与负载匹配。在微网运行控制方面，还要利用双闭环实现母线电压控制，保证输出电压幅值与电网电压频率等保持一致，能够对负载变化进行动态响应，继而使电网的运行安全得到保证。

[参考文献]

[1] 宋宪可, 樊艳芳, 刘群杰, 等. 基于功率信号判别的光-储-燃直流微网协调控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(03): 197-204.
 [2] 张小雷, 杜强, 郭强. 基于风力与光伏混合发电的微网建模和仿真技术研究[J]. 智能城市, 2020, 6(11): 55-56.
 [3] 祝宇翔, 程初俐, 史军, 等. 计及光伏并网的微网运行优化[J]. 电工技术, 2020(04): 58-59.
 作者简介: 马尚行 (1979.8-), 所从事专业: 电子信息及智能控制, 高级工程师。沈英达 (1984.8-), 所从事专业: 智能控制, 高级工程师。戴永军 (1968.2-), 所从事专业: 应用电子技术, 高级工程师 (研究员级)。