

基于预测电流控制的光伏并网系统 最大功率点跟踪算法^{*}

刘江涛¹, 黄明¹, 王海云², 李保全¹, 刘新伟¹

(1. 国网重庆市电力公司 武隆县供电分公司, 重庆 408500;

2. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

摘要: 针对光伏发电的突变性及昼发夜停特性提出一种新型的基于预测电流控制的光伏并网系统最大功率点跟踪(MPPT)算法。根据实际情况考虑光伏阵列的非线性特性,最大功率点周围光伏电压的振荡及逆变器、滤波器的设计等。为了确保系统采用控制算法的稳定性,MPPT的设计应运而生,在此基础上通过改进算法从光伏系统的电压与电流预测基准电流进而控制光伏并网系统。通过传统的波动相关控制方法对比给出了仿真结果。仿真结果表明:在光照发生突变时,与传统的波动相关控制法相比,提出的改进算法的跟踪速度较之提升9.3%,并能够准确跟踪光伏并网系统最大功率点,且性能稳定可靠。

关键词: 光伏; 并网; 最大功率点跟踪; 预测电流控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0098-04

Computed Current Control Method for Maximum Power Point Tracking of Grid-Connected Photovoltaic System^{*}

LIU Jiangtao¹, HUANG Ming¹, WANG Haiyun², LI Baoquan¹, LIU Xinwei¹

(1. Wulong Power Supply Branch, STATE GRID Chongqing Electric Power Company,

Chongqing 408500, China;

2. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

Abstract: A new maximum power point tracking (MPPT) topology for a grid-connected PV system considering the sudden changes in environment was proposed. Considering the non-linear characteristics of photovoltaic array according to actual condition, maximum power point of PV voltage oscillation around as well as the design of the inverter and filter and so on. In order to ensure the stability of the system adopts the control algorithm, the design of the maximum power point tracking arised at the historic moment, through the improved algorithm from photovoltaic system reference current and voltage and current predictive control photovoltaic (PV) grid-connected system. Based on compared with the ripple correlation control (RCC) method of the traditional and the simulation results were given. The simulation results showed that: Compared with the ripple correlation control (RCC) method when the solar radiation generate the sudden changes, the proposed improved algorithm of tracking speed increased 9.3%, the new algorithm not only could accurately track the maximum power point of photovoltaic (PV) grid-connected system, but also had the stable and reliable performance.

Key words: photovoltaic (PV); grid-connected; maximum power point tracking (MPPT); computed current control

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51267017);教育部创新团队项目(IRT1285)

作者简介: 刘江涛(1985—),男,硕士研究生,研究方向为清洁能源及其并网技术。

黄明(1969—),男,工程师,研究方向为电力系统综合自动化和并网发电系统稳定性等方面的研究。

0 引言

近年,光伏发电作为清洁能源迎来发展的黄金时期,但光伏发电的不稳定性,大面积“弃光停发”的尴尬局面长期存在,如何行之有效的利用光伏能源一直困扰着广大专家学者。由于光伏发电的突变性以及昼夜停发特性,传统的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)算法的光伏并网系统的性能时常受到速度与准确度的双重困扰^[1]。为了稳定可靠的获取太阳能并使光伏系统产生最大功率,提出一种高效、简单可靠的 MPPT 算法迫在眉睫。众所周知,光伏阵列的非线性特性一直是阻碍 MPPT 算法发展的瓶颈。光伏阵列的非线性特性主要取决于温度、光照幅度、运行电压以及最大功率点周围光伏电压的振荡。

国内外众多专家学者针对光伏阵列的 MPPT 算法这一热点问题展开了一系列深入研究。但目前的研究大多为非真正意义上的 MPPT,且与实际应用相差甚远。文献[1-2]采用简单实用电路结构的开路电压比例系数法。文献[3-5]针对光伏发电的突变性采用高效简单的波动相关控制法,但其具有需要变流器持续工作的弊端。文献[6]研究了不同光照环境下采用滑模控制法的 MPPT 对光伏并网运行状态及其出力的影响,虽然显著提高了光伏系统 MPPT 速度,但变量 Δu 的引入会影响系统跟踪的稳定性与可靠性。

综上所述,至今针对真正意义上的光伏发电系统 MPPT,并与实际应用结合紧密的简单稳定可靠的控制方法鲜有研究。考虑到光伏阵列的非线性特性,本文采用尽可能接近实际情况的数学模型进行建模,通过对光伏系统电压与电流的跟踪,进而预测出基准电流,对不同边界条件、不同场景下光伏的电压、电流及其出力进行实时预测,达到对光伏并网系统稳定可靠控制的效果。

1 建立光伏系统模型

传统的基于波动相关控制的光伏并网系统 MPPT 算法主要依赖直流侧电压控制器跟踪最大功率点,并通过维持直流侧电压稳定产生基准电流到控制器得以实现。图 1 给出了传统的光伏并网系统。

本文将通过向电网中注入阻性电流获取线路

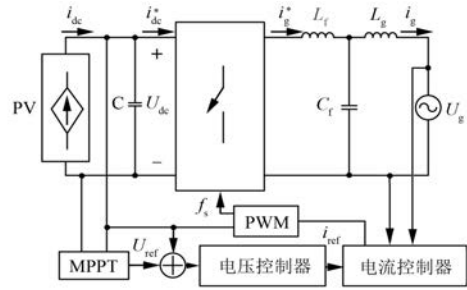


图 1 传统的光伏并网系统 MPPT 结构图

频率,并控制逆变器获得统一功率因数。综合考虑诸多因素,本文采用兼具经济与实用性的电流控制器;同时为了消除静态误差与电网谐波对试验的干扰,还选用了比例谐振控制器^[7-8]。

光伏阵列由串联光伏电池组成,通过分析 $I-U$ 特性曲线得出光伏出力的数学模型:

$$p = \alpha_0 + \alpha_2 + (u_{dc}^2 + u_0^2) + \alpha_4 (u_{dc}^2 + u_0^2)^2 \quad (1)$$

式中: u_0 、 α_0 、 α_2 、 α_4 ——光伏瞬时功率近似系数。

由于给定运行条件下上述系数保持恒定,故此种情况下辐射及温度变化可忽略不计。考虑稳态时光伏系统输送到电网的最大功率并对式(2)求导得出:

$$-\frac{C}{4\alpha_4} \frac{d}{dt} \left(\frac{dp}{du_{dc}^2} \right) + \frac{1}{4\alpha_4} \left(\frac{dp}{du_{dc}^2} \right)^2 = \frac{L}{2} \frac{di_g^2}{dt} + \frac{U_g}{2I_0} i_g^2 + \frac{U_g I_0}{4} \cos 2\omega t - \frac{U_g I_0}{4} \quad (2)$$

鉴于传统的电压控制器线性化周围的最大功率点易产生小信号干扰;一般来说,对于直流电压附近最大功率点产生较大波动的系统模型应采用式(3)中的数学模型,而不是高度非线性化的数学模型。

光伏模型产生最大功率 P_{MPP} 时光伏出力可等效为

$$p = P_{MPP} + \alpha_4 (u_{dc}^2 - U_{MPP}^2)^2 \quad (3)$$

u_0 、 α_0 、 α_2 、 α_4 的值取决于光伏阵列的工艺以及环境条件。对于一个由 N_s 个模块串联以及 N_p 个模块并联的光伏系统, u_0 、 α_0 、 α_2 、 α_4 可以通过式(4)近似得到:

$$\begin{cases} \alpha_0 = N_s N_p N_c P_{MPP} + \alpha_2^2 / 4\alpha_4, \\ \alpha_2 = \frac{0.1 N_p (P_1 - P_{MPP})}{0.036 4 N_s N_c U_{MPP}^4}, \\ \alpha_4 = \frac{N_s N_p N_c (P_1 - P_{MPP})}{0.036 1 (N_s N_c U_{MPP})^4}, \\ u_0 = U_{MPP} \end{cases} \quad (4)$$

式中： P_1 ——单一光伏电池的功率。

但由于 $(dp/du_{dc}^2)^2$ 因子的存在,该模型仍为非线性的。同时结合式(1)~式(3)可知,欲成功设计控制器并获取 u_0 、 α_0 、 α_2 、 α_4 的值,温度与光照辐射度测量尤为关键。但是,考虑到测量环节颇为繁琐,代价较高,因此本文采用式(3)中的数学模型,并选择 $(dp/du_{dc}^2)^2=0$ 设计MPPT控制器。

图2给出了不同算法下的 P - U 曲线对比。采用本文提出的方法较之前算法的收敛速度整体提升了9%,因此更加实用于MPPT。

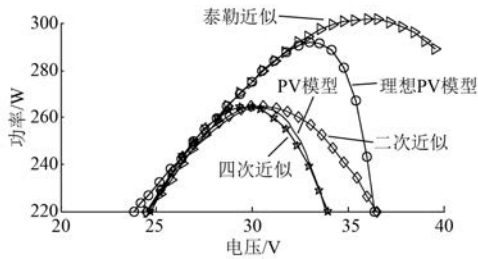


图2 采用不同算法的近似 P - U 曲线

2 控制器设计

传统的光伏模型工作在最大功率点时其电压便可相应收敛到 U_{MPP} ,但前提条件是 $dp/du_{dc}=0$ ^[9]。本文在传统光伏模型的基础上对算法进行改进,创造性的提出 $dp/du_{dc}^2=0$ 这一条件来控制光伏并网系统。为验证该条件下MPPT的有效性,由图3给出STP265光伏模块在两种不同条件下的 P - U 特性曲线对比图。由图3可得两种条件在点 U_{MPP} 两侧电压下的偏差较大,但新条件下光伏电压的收敛速度明显比传统条件下快。

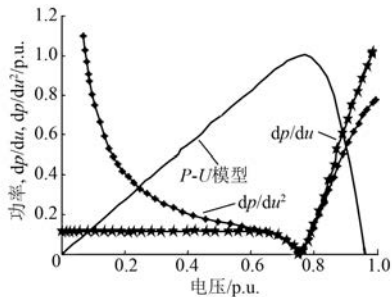


图3 两种条件下 P - U 特性曲线对比

本文提出基于式(3)中数学模型作为光伏模型的非线性控制器。其控制系统结构如图4所示。

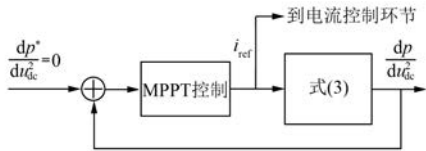


图4 基于式(3)中非线性模型的控制系统框图

非线性控制器由基于预测电流的MPPT控制策略与电流控制器组成。本文提出的光伏并网系统MPPT结构图如图5所示。

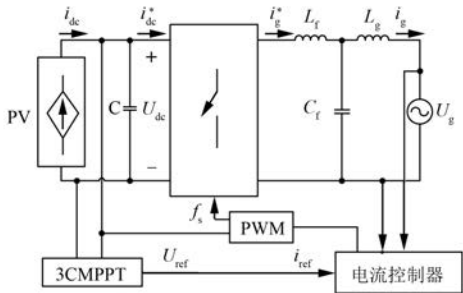


图5 本文提出的光伏系统 MPPT 结构图

3 基于预测电流控制的 MPPT 算法

考虑到光伏发电昼发夜停的现象以及光伏阵列的非线性特性,本文提出一种新型的基于预测电流控制的光伏并网系统MPPT算法。此算法改进的关键是实现预测电流的控制。采用改进后算法不仅跟踪收敛速度大幅提升而且使光伏并网系统性能更加稳定。

本文将针对影响预测电流控制的电网电流波动以及控制变量的静态误差,进行逐一改进。基于预测电流控制的MPPT算法与传统的基于相关波动控制算法原理较为相似,均采用电流控制器控制光伏并网系统输入输出电流保持平衡达到跟踪最大功率点的目的。不同之处在于传统算法主要采用直流侧电压控制器跟踪最大功率点;而本文采用的算法略去电压控制器,主要依靠预测电流控制算法,并结合电流控制器对光伏系统最大功率点进行跟踪。

考虑到控制的精度,采用基准输出电流 I_r 作为控制变量,当状态变量 $dp/du_{dc}^2=0$ 时,光伏并网系统动态性能在合理误差范围内收敛到稳定状态。但由于电网电流波动的影响,此种情况下光伏系统产生的功率并不是最大功率。为了兼顾光

伏最大功率并保持功率平衡^[10-11], 针对变量 u 的控制至关重要, 而变量 u 主要受光伏瞬时功率近似系数 α_4 的影响。

通过以上环节的设定, 本文提出的预测电流控制算法不仅能够消除状态变量 dp/du_{dc}^2 稳定状态误差, 而且直流电压的最大功率也可通过 α_4 以最快速度收敛。

4 仿真结果

采用新算法设置仿真参数并对光伏并网系统进行仿真。在光电时域局限下对 2 MW 小型光伏电站进行研究, 并在图 6 给出了光照强度在 2 s 时间内从 1 000 W/m² 下降到 700 W/m², 相同条件下针对传统算法与新算法进行仿真的波形。

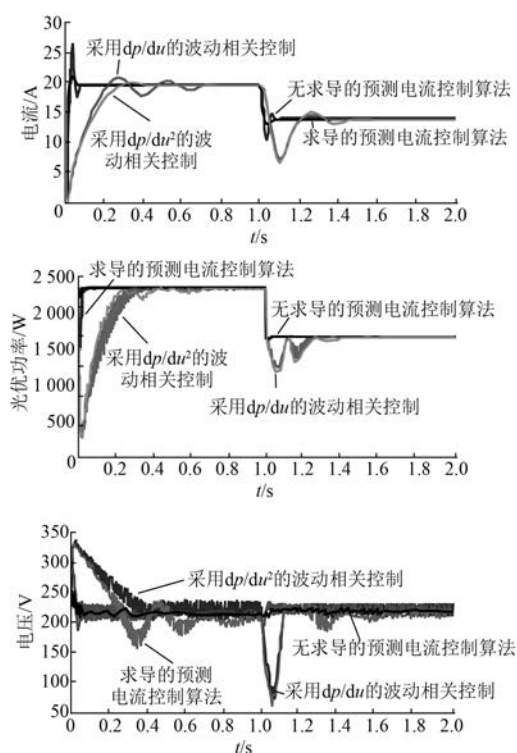


图6 本文提出的预测电流控制 MPPT 算法与传统波动相关控制 MPPT 算法在不同条件下光伏出力、光伏电压以及电网电流的仿真结果

由图 6 分析可知, 传统的波动相关控制 MPPT 算法尽管在 dp/du_{dc} 与 dp/du_{dc}^2 两种条件下对光伏系统进行了仿真, 但对最大功率点的跟踪效果差强人意。采用新算法后, 试验过程中同样对两种条件下的 MPPT 效果进行比对, 结果表明:

采用新算法的 MPPT 效果明显优于采用波动相关控制 MPPT 算法, 且采用 dp/du_{dc}^2 条件的新算法又优于不采用新条件的新算法。仿真结果表明: 采用 dp/du_{dc}^2 条件的新算法不仅在电网电流、光伏电压、光伏出力等方面比传统算法的收敛速度普遍提升 9.3%, 而且比传统算法更加趋于稳定, 且跟踪准确、效果良好。

5 结 语

算例采用接近真正意义上 MPPT 算法, 在实际应用中具有普遍性, 另外研究传统算法在同条件下的性能发现本文提出的解决方案具有一定的实用性。根据仿真结果分析该算法不仅能有效跟踪负荷, 而且能对光伏并网系统实行稳定可靠的控制。

本文对不同边界条件、不同场景下光伏的电压、电流及其出力在采用传统算法与采用新算法的最大功率跟踪点进行实时跟踪预测, 分析两种算法下光伏系统负荷跟踪度和出力性能。综上所述:

(1) 采用新算法的 MPPT 效果明显优于采用波动相关控制 MPPT 算法, 且采用 dp/du_{dc}^2 条件的新算法又优于不采用新条件的新算法。

(2) 采用 dp/du_{dc}^2 条件的新算法不仅在电网电流、光伏电压、光伏出力等方面比传统算法的收敛速度普遍提升 9.3%, 而且比传统算法更加趋于稳定, 且跟踪准确、效果良好。

【参考文献】

- [1] BRITO M D, GALOTTO L, SAMPAIO L, et al. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2013, 60(3): 1156-1167.
- [2] MEZA C, NEGRONI J, BIEL D, et al. Energy-balance modeling and discrete control for single-phase grid-connected PV central inverters [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2008, 55(7): 2734-2743.
- [3] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 单级式光伏并网逆变器系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 73-77.
- [4] 周林, 武剑, 栗秋华, 等. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008(6): 1145-1154.

(下转第 127 页)