

DOI: 10.7667/PSPC151310

光伏 MPPT 系统电压控制器的优化设计

邢珊珊, 田素立, 王振华, 周俊华

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 分析了光伏MPPT系统构成及工作原理。使用基于变步长电压扰动法作为功率/电压寻优控制器。为实现快速稳定的光伏MPPT响应, 重点对光伏输出电压控制器的电压环进行优化设计。设计了一种光伏MPPT电压复合控制器, 采用电压顺馈+PI调节器的方法实现。通过对光伏输出电压控制器进行数学建模得到电压闭环传递函数。确定了最佳PI调节器参数以得到快速稳定的MPPT控制。仿真分析结果以及试验结果表明, 此电压复合控制器能够快速、稳定地实现光伏MPPT响应。

关键词: 光伏 MPPT; 电压控制器; 数学模型; 电压顺馈; PI 调节器; 优化设计

Optimized design of the voltage controller of PV MPPT system

XING Shanshan, TIAN Suli, WANG Zhenhua, ZHOU Junhua

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The photovoltaic MPPT system structure and working principle are analyzed. Variable step voltage perturbation method is used as the power/voltage optimization controller. In order to achieve fast and stable PV MPPT response, this paper focuses on the optimized design of the voltage-loop of PV output voltage controller. The voltage feed-forward compensation plus PI regulator method is used to design a composite voltage controller of PV MPPT. Voltage closed-loop transfer function is obtained through the establishment of the PV output voltage controller mathematical model. To get fast and stable MPPT control, the best PI controller parameters are calculated. The simulation results and experimental results indicate that this compound controller of voltage can quickly achieve a stable photovoltaic MPPT response.

Key words: photovoltaic MPPT; voltage controller; mathematical model; voltage feed-forward; PI regulator; optimized design

0 引言

光伏电池输出功率随光照、温度等外部条件而时刻变化。为了提高能源利用率, 实现光伏系统输出功率最大, 需要对光伏电池的最大功率点进行跟踪。目前最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)方法较多, 主要有恒定电压法、恒定电流法、扰动观察法、电导增量法。

常见光伏MPPT系统按照能量传递方向大致可以分为三部分。第一部分是最大功率点寻优控制, 通过寻优算法找到最大功率点输出时对应的光伏输出电压或者电流值。第二部分是能量辅助传递控制, 通过DC/DC变换电路进行能量传递。第三部分是能量转化控制, 通过离网或者并网型设备进行稳压控制, 实现能量存储或并入电网。

针对最大功率点寻优控制, 文献[1]提出了一种基于变步长的改进型电压扰动观察法。文献[2]提出了一种基于恒电压(CVT)启动的变步长扰动观察法。文献[3]提出了一种梯度式变步长扰动观察法。文献[4]提出使用粒子群优化算法。

针对能量辅助传递控制, 文献[5-6]论证了利用BOOST电路实现光伏MPPT的合理性, 提出了一种以BOOST电路为核心的MPPT能量辅助传递控制器。文献[7]将软开关技术引入两级式拓扑结构的DC/DC变换器中, 采用改进型恒定电压跟踪控制算法提高了系统效率。

针对能量转化控制, 文献[8]提出了一种单极式光伏逆变器柔性并网方法, 通过直流电压中环和电流内环实现能量并网。文献[9]引入了阈值电流和微变步长扰动法的开路电压和短路电流相结合的

MPPT算法, 提高能量转换效率。

文献[10]通过建立环路传递函数, 考虑了直流母线电压对控制效果的影响, 提出了一种环路动态PI参数计算方法。为实现控制器PI参数设计提供了一种新思路。

为了实现快速稳定的光伏MPPT控制, 本文参考了以上文章对光伏MPPT的寻优控制方法, 使用基于变步长电压扰动法作为功率/电压寻优控制器。分析了光伏MPPT系统构成和工作原理。重点对光伏输出电压控制器的电压环进行优化设计。设计了一种光伏MPPT电压环复合控制器, 采用电压顺馈+PI调节器的方法实现。通过对光伏输出电压控制器进行数学建模得到电压闭环传递函数。确定了最佳PI调节器参数以得到快速稳定的MPPT控制。仿真分析结果以及试验结果表明, 此电压环复合控制器能够快速、稳定地实现光伏MPPT响应。

1 光伏 MPPT 系统构成及工作原理

基于电压扰动法的光伏MPPT控制器一般由功率/电压自动寻优控制器、光伏输出电压控制器两部分构成。光伏输出电压控制器由电压误差比较器、电压环控制器、DC/DC变换器、负载、电压采样电路构成, 结构框图如图1所示。

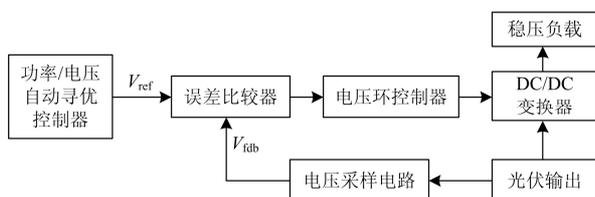


图1 基于电压扰动法的光伏MPPT控制器结构图

Fig. 1 Structure diagram of the PV MPPT based on the voltage perturbation method

功率/电压自动寻优控制器用于根据电压扰动条件下的功率变化来确定电压扰动的方向至寻找到最大功率点对应的光伏输出电压。

光伏输出电压控制器用于实现光伏输出电压控制, 并保证实际电压量快速、稳定地跟踪电压给定量。

DC/DC变换器输入为光伏电池电压, 输出连接稳压负载。起到电压转换的作用, 使得光伏输出电压在一定范围内可调整, 并包含光伏最大功率输出时对应的电压值。最常用的为BUCK电路和BOOST电路。基于光伏电池输出电流连续性的考虑, 本文选取BOOST电路作为DC/DC变换器。

稳压负载有离网型和并网型, 一般都有相应设备进行输出电压稳定控制。在电感电流连续工作状

态时, DC/DC变换器与稳压负载一起构成了光伏输出电压稳定装置, 假设变换器输出电压为 V_{out} , 输入电压为 V_{in} , BOOST电路调制度为 D , 有

$$V_{in} = V_{out}(1 - D) \quad (1)$$

由式(1)可知, 通过调整调制度 D 即可实现对光伏电池输出电压的控制。

2 光伏 MPPT 系统电压环控制器的优化设计

功率/电压自动寻优控制器能够保证快速锁定最大功率点对应的光伏输出电压。光伏输出电压控制器能够保证快速响应功率/电压自动寻优控制器的输出电压命令。本文优化设计了光伏输出电压控制器。

2.1 光伏 MPPT 控制器的优化设计

DC/DC变换器为光伏输出电压控制器的执行机构, 其控制量输入 $(1-D)$ 为电压环控制器的输出。传统的电压环控制器一般使用比例积分器(PI)、比例积分微分器(PID)两种。合理地设计比例、积分、微分参数能够优化电压控制效果, 鉴于光伏MPPT控制对象以及电路拓扑非常明确, 本文使用PI调节器作为电压环控制器。

由式(1)可知, 在变换器接稳压负载情况下, BOOST电路控制量输入 $(1-D)$ 与光伏输出电压 V_{in} 的关系为

$$1 - D = V_{in} / V_{out} \quad (2)$$

因此设计了一款具有光伏输出电压顺馈调节功能的控制器。顺馈调节量为 $k \cdot V_{ref} / V_{out}$ ($0 < k < 1$), k 为顺馈调节系数。在相同的PI调节器控制下, 顺馈调节能够通过直接调节调制度的直接调节加快电压环响应, 调节系数根据实际情况选取。原则上 k 越接近1, 电压顺馈调节效果越明显, 顺馈造成的短时不可控性也越明显。光伏输出电压控制器框图见图2。

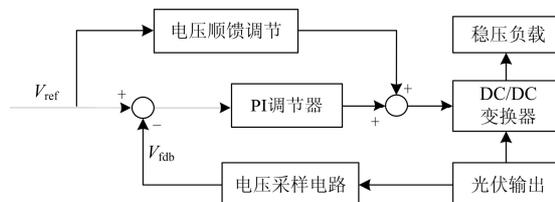


图2 光伏输出电压控制器框图

Fig. 2 Block diagram of the PV output voltage controller

2.2 光伏输出电压控制器的数学建模及参数设计

PI调节器比例系数为 k_p , 积分系数为 k_i , 其传递函数为

$$Hs1 = \frac{sk_p + k_i}{s} \quad (3)$$

DC/DC 变换器相当于一个电压放大环节,其输入为 PI 调节器的输出及电压顺馈调节输出之和。数值上为 $1-D$, 在光伏输出电压为定值情况下, 可以将电压顺馈调节器输出当作是扰动单元来分析控制器电压环。

可以将 DC/DC 变换器简化成光伏输出电压放大倍数为 V_{out} 的放大器。考虑到电压采样和 DC/DC 变换器输出之间相差一个采样周期, 因此可以将 DC/DC 变换器以及光伏输出电压等效成具有时间常数 T_f (T_f 为电压环控制周期) 的一阶惯性环节, 传递函数 $Hs2$ 为

$$Hs2 = \frac{V_{out}}{sT_f + 1} \quad (4)$$

电压采样电路一般由电压传感器、信号调理电路构成, 且一般采用低通滤波处理来滤除信号中的高频干扰成分。因此可以将电压采样电路看成具有时间常数 T_{if} (电压采样回路时间常数, 具体值视实际电路来定) 的一阶惯性环节, 其传递函数 $Hs3$ 为

$$Hs3 = \frac{1}{sT_{if} + 1} \quad (5)$$

通过对光伏输出电压控制器各组成部分进行数学建模, 可以得到其基于传递函数的控制框图如图 3 所示。

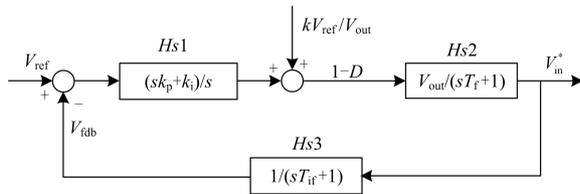


图 3 光伏输出电压控制器传递函数框图

Fig. 3 Block diagram of the transfer function of PV output voltage controller

由图 3, 考虑到扰动项对电压环输出的影响在稳态时为 0, 其作用能加快系统稳定。首先考虑光伏输出电压控制器电压闭环动态响应情况, 其传递函数 Hs 为

$$Hs = \frac{Hs1 \cdot Hs2}{1 + Hs1 \cdot Hs2 \cdot Hs3} \quad (6)$$

代入各部分传递函数的具体表达式得到整体传递函数表达式为

$$Hs = \frac{(sk_p + k_i)(sT_{if} + 1)V_{out}}{(sk_p + k_i)V_{out} + s(sT_f + 1)(sT_{if} + 1)} \quad (7)$$

对于式(7)分母多项式中第二项, 一阶系统时间常数 T_f 、 T_{if} 比较小, 可以使用它们的和作为一个时间常数的一阶惯性环节来等效替换, 有

$$s(sT_f + 1)(sT_{if} + 1) \doteq s(s(T_f + T_{if}) + 1) \quad (8)$$

将式(7)代入式(6), 得到简化后的传递函数为

$$Hs = \frac{(sk_p + k_i)(sT_{if} + 1)V_{out}}{s^2 + s\left(\frac{V_{out}k_p}{T_f + T_{if}} + 1\right) + \frac{V_{out}k_i}{T_f + T_{if}}} \quad (9)$$

由于零点不影响单位阶跃响应的形式, 只影响各瞬态分量系数的大小。这里仅考虑式(9)中极点对传递函数阶跃响应的影响。为了获得良好的控制效果及确定 PI 调节器参数, 将此传递函数与典型二阶系统表达式比较有

$$\begin{cases} \frac{k_p V_{out}}{T_f + T_{if}} + 1 = 2\xi\omega_n \\ \frac{k_i V_{out}}{T_f + T_{if}} = \omega_n^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: ξ 为二阶系统阻尼系数; ω_n 为系统无阻尼振荡圆频率。

由式(10)得到 PI 调节器的参数为

$$\begin{cases} k_p = (2\xi\omega_n - 1)(T_f + T_{if})/V_{out} \\ k_i = \omega_n^2(T_f + T_{if})/V_{out} \end{cases} \quad (11)$$

3 光伏 MPPT 控制器的仿真分析

3.1 仿真电路设计及控制参数确定

功率/电压自动寻优控制器使用“基于电压扰动寻优控制策略”来确定最大功率点对应的光伏输出电压参考值。

光伏电池组件使用输出功率最大为 1 000 W 的戴维南等效电路替代。DC/DC 变换器输出接电池储能系统进行电压稳定, 稳定输出电压为 $V_{out}=400$ V。依据电流纹波控制量设计电抗器电感量, 使用电感值为 5 mH。

确定电压环 PI 调节器参数。电压环控制周期 $T_f=0.000 125$ s, 电压采样处理电路时间常数 $T_{if}=0.000 075$ s; 电压环无阻尼振荡圆频率取 $\omega_n=2 000$ rad/s; 为了使输出电压响应快速、稳定, 系统阻尼系数取 $\zeta=1$ 。代入式(11)得到电压环控制器 PI 调节器参数 $k_p=0.002$, $k_i=2$ 。

3.2 最大功率跟踪效果仿真分析

使用 Matlab 软件进行仿真模型搭建以及仿真分析。模型搭建好后进行光伏 MPPT 控制仿真, 选择最佳 PI 调节器参数, 在没有使用光伏输出电压顺馈调节功能时光伏电池输出功率曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, 使用最佳 PI 调节器参数使得光伏输出功率经过 0.14 s 达到最大值。整个过程稳定基本无超调。

使用光伏输出电压顺馈调节功能, 并取调节参数 $k=0.5$ 时, 光伏电池输出功率曲线如图 5 所示。

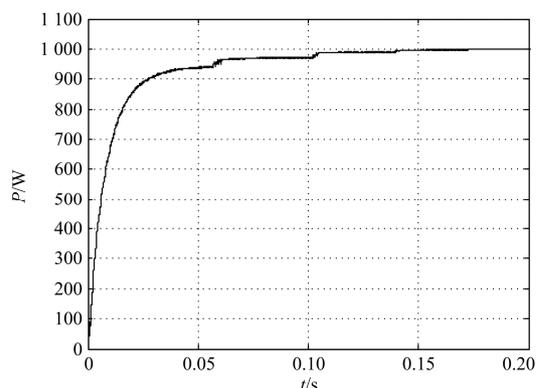


图 4 使用最佳 PI 参数时功率输出曲线

Fig. 4 Power output curve using the best PI parameters

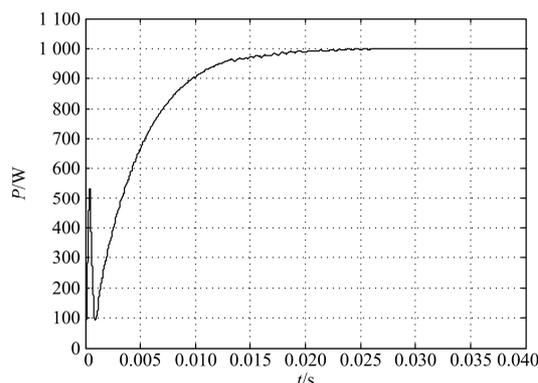


图 5 使用电压顺馈调节时功率输出曲线

Fig. 5 Power output curve using the voltage feed-forward controller

由图 5 可知, 使用光伏输出电压顺馈调节功能, 并取调节参数 $k=0.5$ 时, 光伏电池输出功率经过 0.025 s 达到最大值。相比于没有添加电压顺馈调节时, 大大缩短了 MPPT 跟踪时间。整个过程快速、稳定、无超调。

4 实验验证

搭建实验平台, 使用的光伏电池组件由 10 只单体串联构成(单体最大功率输出为 100 W, 开路电压为 20 V)。DC/DC 变换器采用 BOOST 变换器, 输出通过 BUCK-BOOST 电路接电池储能系统进行母线电压稳定, 稳定输出电压 $V_{out}=400$ V。依据电流纹波控制量设计电抗器电感量, 使用电感值 5 mH。选择电压顺馈+PI 调节器的方案实现光伏 MPPT 电压环控制, 顺馈调节参数 $k=0.5$, 据式(11)取得最佳 PI 参数 $k_p=0.002$, $k_i=2$ 。

通过遮挡组件其中一块光伏电池单体进行组件

输出功率跟踪实验来验证。使用上位机软件实时录波去遮挡前后功率输出响应波形如图 6 所示。

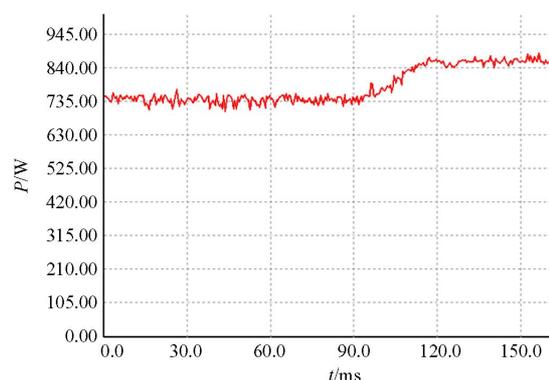


图 6 光伏组件功率输出响应

Fig. 6 Power output response of PV module

由图可见在去遮挡前, 光伏输出功率为 735 W。去遮挡时刻为 0.092 s, 去遮挡后, 光伏输出功率经过约 0.028 s 后输出功率达到此时的最大值 860 W。功率响应快速、稳定、基本无超调, 符合预期设计。

多云天气条件下, 云层遮挡太阳前后使用上位机软件实时录波光伏组件输出功率波形如图 7 所示。

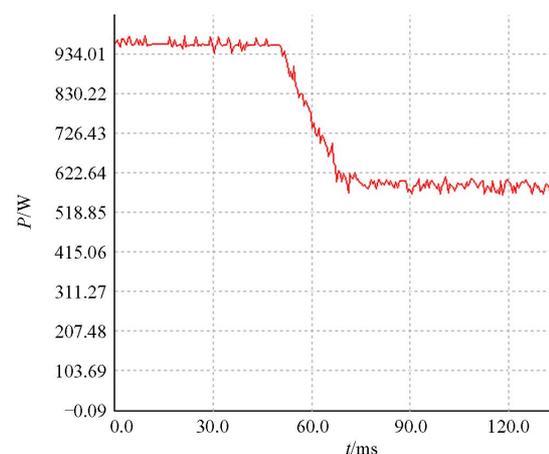


图 7 云层遮挡前后光伏组件功率输出

Fig. 7 Power output of PV module when covered by cloud

由图 7 可见, 在云层遮挡住太阳之前, 光伏组件输出功率为 960 W。云层遮挡发生时刻为 0.049 s, 云层遮挡后, 光伏输出功率经过约 0.026 s 后输出功率达到稳定值 590 W。功率响应快速、稳定、基本无超调, 与仿真结果基本一致, 符合预期设计。

5 结论

光伏 MPPT 系统电压环控制器的优化设计, 通过以下方案实现:

1) 通过对基于电压扰动法的光伏MPPT系统分析, 设计了一种光伏MPPT电压环复合控制器。

2) 电压环复合控制器采用电压顺馈+PI调节器的方法实现。

3) 基于优化控制器响应目的, 确定了最佳电压顺馈系数和PI调节器参数。

仿真分析结果以及试验结果表明, 此电压环复合控制器能够快速、稳定地实现光伏MPPT响应。

参考文献

[1] 杭凤海, 杨伟, 朱文艳. 光伏系统 MPPT 的扰动观测法分析与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 110-114.
HANG Fenghai, YANG Wei, ZHU Wenyan. Analysis and improvement of MPPT disturbance observer method for PV system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 110-114.

[2] 才利存, 常忠廷. 太阳能并网发电系统的 MPPT 及孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 119-124, 138.
CAI Licun, CHANG Zhongting. MPPT and anti-islanding of photovoltaic grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 119-124, 138.

[3] 陈亚爱, 周京华, 李津, 等. 梯度式变步长 MPPT 算法在光伏系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3156-3161.
CHEN Yaai, ZHOU Jinghua, LI Jin, et al. Application of gradient variable step size MPPT algorithm in photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3156-3161.

[4] 朱艳伟, 石新春, 但扬清, 等. 粒子群优化算法在光伏阵列多峰最大功率点跟踪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 42-48.
ZHU Yanwei, SHI Xinchun, DAN Yangqing, et al. Application of PSO algorithm in global MPPT for PV array[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 42-48.

[5] 张厚升, 赵艳雷. 单相双级式光伏并网逆变器[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 95-99.
ZHANG Housheng, ZHAO Yanlei. Single-phase double-stage photovoltaic grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 95-99.

[6] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 48-54.

SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 48-54.

[7] 方波, 白政民, 张元敏. 基于 FB-PS-PWM 软开关技术的光伏发电 MPPT 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 71-75, 79.
FANG Bo, BAI Zhengmin, ZHANG Yuanmin. Research of MPPT in PV system based on FB-PS-PWM ZVS soft-switching technology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 71-75, 79.

[8] 邢浩江, 张东来, 李铁才, 等. 考虑电网电压基波锁相环控制的单级式光伏逆变器柔性并网方法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 6-10.
XING Haojiang, ZHANG Donglai, LI Tiecai, et al. Flexible grid-connection method for single-stage photovoltaic inverter based on phase-locked loop control for grid fundamental frequency voltage[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 6-10.

[9] 高金辉, 李国成. 一种开路电压和短路电流相结合的 MPPT 算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 96-100.
GAO Jinhui, LI Guocheng. Research on MPPT algorithm in combination with open circuit voltage and short circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 96-100.

[10] 赵瑞杰, 田素立, 代兴华, 等. 一种利于 DSP 实现的改进型电网电压软锁相环的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 135-141.
ZHAO Ruijie, TIAN Suli, DAI Xinghua, et al. Research of an improved soft phase-locked loop for grid phase-locked witch is easier to implement on the DSP[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 135-141.

收稿日期: 2015-07-29; 修回日期: 2015-12-25

作者简介:

邢珊珊(1986-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为分布式发电技术; E-mail: accordance2008@163.com

田素立(1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为功率电子变换技术, 光伏系统控制;

王振华(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护装置设计及研发。

(编辑 魏小丽)