

单相单级光伏并网系统的改进控制策略研究

张 旺, 郭旭东, 陈 莎, 粟 梅
(中南大学, 湖南 长沙 410083)

摘要:以极值搜索算法为基础,提出了基于二次纹波的变积分增益的最大功率点跟踪(MPPT)极值搜索控制(ESC)方法。在不同的光伏阵列工作点采用不同积分增益,提高了功率跟踪的动稳态性能。针对直流侧电压存在二次纹波的特点,通过分别控制直流侧电压中的直流分量和纹波分量,降低了并网电流幅值参考值的谐波含量,提高了并网电流质量。仿真和实验结果验证了改进控制方法的有效性。

关键词:并网系统;最大功率点跟踪;极值搜索控制;积分增益

中图分类号:TM615 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-100X(2013)06-0033-03

Research on Improved Control Strategy of Single-phase Single-stage Grid-connected PV System

ZHANG Wang, GUO Xu-dong, CHEN Sha, SU Mei
(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract:Based on extreme search algorithm,a maximum power point tracking(MPPT) extremum search control(ESC) method with alterable integral gain based on the inherent ripple is proposed.By varying integral gain in diverse PV array operating point,the dynamic and steady performance of power tracking is improved.To control DC and ripple component in DC voltage respectively,the harmonic content of the reference value of the grid current amplitude is reduced and the grid current quality is improved.Simulation and experimental results confirm the effectiveness of the control method.

Keywords:grid-connected system; maximum power point tracking; extremum search control; integral gain

Foundation Project:Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61104047)

1 引 言

针对光伏系统中传统 MPPT 控制方法的不足,文献[1]提出模糊 MPPT 控制方法,控制器的设计变得灵活可靠,但其对模型的精确性要求较高。文献[2]提出 ESC 理论,对于模型精确性低的系统,通过加入正弦激励信号以获取最优值,但该方法的积分增益对系统参数较敏感,一旦外界条件变化就需重新调整积分增益。对此,这里提出一种变积分增益极值搜索控制方法。

由于直流侧电压含有二次谐波,传统控制方法会导致并网电流 THD 较大,动态响应慢且稳态误差较大。此处提出的方法分别对直流侧电压中的直流分量和谐波分量进行控制,有效克服了传统方法的不足。最后,基于 Matlab/Simulink 软件和硬件平台对改进控制策略进行了验证。

2 单相单级光伏并网系统原理

2.1 系统结构

图 1 示出单相单级式光伏并网系统拓扑结构。该并网系统由光伏阵列、直流滤波电容 C、单相电压型逆变桥、滤波电感 L 和隔离变压器 T 组成。

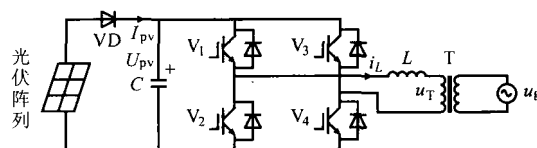


图 1 单相单级式光伏并网系统拓扑结构

Fig. 1 Single-phase single-stage PV grid-connected system topology

2.2 MPPT 极值搜索原理

图 2 示出极值搜索原理, \hat{u} 为 PV 最佳电压 U_m 的估计值, U 为光伏阵列输出电压, $P(U)$ 为光伏阵列的 $P-U$ 函数,且在 U_m 处有极大值 P_m 。将 $P(U)$ 在 U_m 处进行泰勒级数展开,得:

$$P(U) = P(U_m) + (U - U_m)^2 P''(U_m) / 2 \quad (1)$$

式中: P'' 为 $P(U)$ 的二阶导数。

$\tilde{d}_1 = \sin(\omega_p t)$ 和 $\tilde{d}_2 = a \sin(\omega_d t)$ 分别为激励信号和扰动信号, a 为扰动信号幅值, ω_d 为扰动信号角频

基金项目:国家自然科学基金(61104047)

定稿日期:2012-11-14

作者简介:张 旺(1986-),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为光伏并网发电及微网控制技术。

率。假设 $\tilde{u} = U_m - \hat{u}$ 为估计误差,代入式(1)可得:

$$P(U) = P(\hat{u} + \tilde{d}_2) \approx P(U_m) + (\hat{u} + \tilde{d}_2 - U_m)^2 P'(U_m) / 2 \quad (2)$$

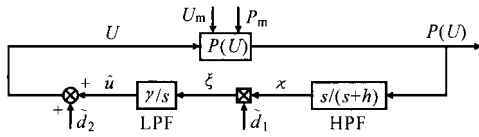


图 2 ESC 原理图

Fig. 2 Principle diagram of ESC

通过高通滤波器 (HPF) 后, 得:

$$\chi = P' \tilde{u}^2 / 2 - a P' \tilde{u} \sin(\omega_m t) - a^2 P' \cos(2\omega_m t) / 4 \quad (3)$$

乘以 \tilde{d}_1 , 并经过低通滤波器 (LPF) 后, 得:

$$\dot{\hat{u}} \approx -\gamma a P' \tilde{u} / 2 \quad (4)$$

由于 $\tilde{u} = U_m - \hat{u}$, 则 $\dot{\hat{u}} = -\dot{\tilde{u}}$, 代入式(4)得:

$$\dot{\tilde{u}} \approx \gamma a P' \tilde{u} / 2 \quad (5)$$

由于 $P(U)$ 存在极大值, 则 $P' < 0$, 又 $\gamma a > 0$, 故 \tilde{u} 趋于零, 最终得到 $\hat{u} = U_m$ 。

2.3 MPPT 极值搜索的改进控制

搜索时间与搜索结果的精确性由积分系数 γ 决定^[3]。 γ 越小, 搜索时间越长; 而系统稳定运行后, γ 越小, 搜索结果精确度越高。图 3 示出特性曲线, 可见, 当 U 远离最大工作点时, $k = |\partial P / \partial U|$ 较大, γ 应很大; 当 U 接近最大工作点时, k 较小, γ 应很小。因此, 选取 $\gamma = \mu(k + \Delta)$, $0 < \mu < 1$, Δ 为较小常量, 改进极值搜索算法, 实现变增益控制。

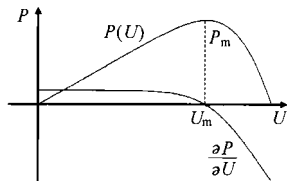


图 3 光伏阵列 $P-U$ 及功率微分特性曲线

Fig. 3 PV array $P-U$ and power differential characteristic curves

设光伏阵列输出功率 P 的二次纹波分量为 $\tilde{P}(t)$, 由图 3 得 $\tilde{P}(t) = (\partial P / \partial U) \tilde{u}(t)$, 为避免额外干扰影响 $\tilde{P}(t)$ 和 $\tilde{u}(t)$ 的计算, 处理得:

$$\int_{t-T}^t \tilde{P}(t) \tilde{u}(t) dt \approx \frac{\partial P}{\partial U} \int_{t-T}^t \tilde{u}^2(t) dt \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial U} \approx \frac{\int_{t-T}^t \tilde{P}(t) \tilde{u}(t) dt}{\int_{t-T}^t \tilde{u}^2(t) dt} \quad (7)$$

式中 $\tilde{P}(t)$ 和 $\tilde{u}(t)$ 可由 HPF 对功率和电压信号滤波得到, 式(7)可由 LPF 得到, 如图 4a 所示。

MPPT 变增益极值搜索控制框图如图 4b 所示, $\mu(k + \Delta)$ 取代图 2 中的 γ , 在最大工作点搜索过程中, $\mu(k + \Delta)$ 不断减小, 并最终稳定在 $\mu\Delta$ 处, 实现变增益极值搜索控制。

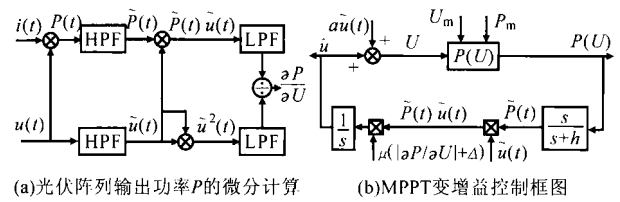


图 4 P 的微分计算和 MPPT 变增益控制框图

Fig. 4 Estimation of the P and MPPT gain varying ESC control structure

2.4 单相单级式并网控制器的改进控制

光伏系统并网控制框图如图 5 所示, \hat{u} 与直流侧电压 U_{pv} 作差, 经 PI 控制后得到并网电流幅值参考值 I^* , 结合单相锁相环和 PR 控制器实现并网电流控制。由于 U_{pv} 含有二次谐波分量, 而 PI 控制器无法消除纹波信号的稳态误差, I^* 中含二次谐波分量, 导致并网电流中含三次谐波, 降低了并网电流质量。

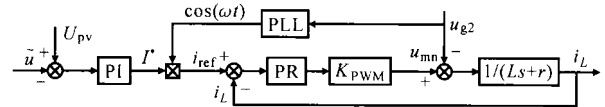


图 5 并网控制器控制框图

Fig. 5 Grid-connected controller control diagram

针对上述方法的不足, 这里采用图 6 所示的直流分量和二次谐波分量分别控制的策略。 Δu 为直流侧电压误差信号, $\Delta \tilde{u}$ 和 $\tilde{\Delta u}$ 分别为 Δu 的直流和二次纹波分量。用 PI 控制器对 $\Delta \tilde{u}$ 进行控制, 利用 PR 控制器对 $\tilde{\Delta u}$ 进行控制, 两控制器输出之和作为 I^* 。改进方法较传统方法能大大降低 I^* 的纹波分量, 提高并网电流质量。

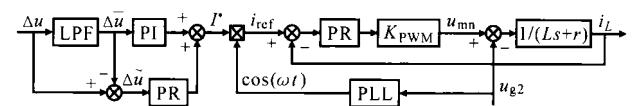


图 6 并网控制器改进控制框图

Fig. 6 The improved control diagram of grid-connected controller

3 系统控制方法的仿真分析

采用 Matlab/Simulink 软件搭建了系统仿真模型, 仿真波形如图 7 所示。主电路相关参数: 隔离变压器 T 为 220:18, 并网电感 $L = 1.5$ mH, 直流侧电容 $C = 6800$ μ F, 开关频率 $f = 20$ kHz; PV 参数: 开路电压 $U_{oc} = 43$ V, 短路电流 $I_{sc} = 6.12$ A, 最佳电压 $U_m = 35$ V, 最佳电流 $I_m = 5.71$ A。外界条件变化时, MPPT 控制过程平稳, 并在 0.3 s 内达到稳定。直流侧电压保持在 34 V 左右, 直流电压二次纹波分量被控制在 3% 以内。 I^* 的纹波分量得到很大程度的降低, 且在扰动情况下, I^* 在 0.3 s 内趋于稳定, 具有

良好的动稳态性能,有利于并网电流控制。基于改进控制方法的并网电流 THD 为 0.74% ,相对于一般方法的 3.97% 有了很大的降低,满足并网电流低谐波的要求。

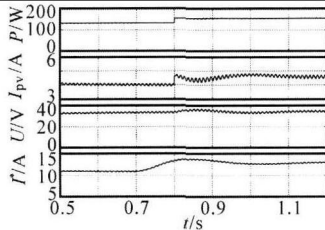


图7 仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms

4 系统控制方法的实验分析

图 8a,b 示出两种方法下并网电流稳态运行波形。可见,并网电流与电网电压同步。图 8c 示出光强增大时采用改进方法的并网电流波形。可见,电流变化过程平稳,具有较快响应速度。

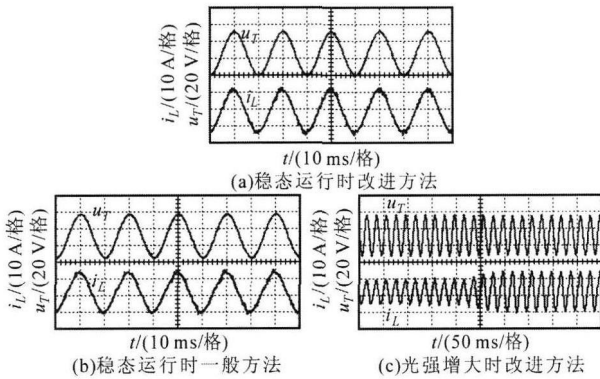


图8 并网电流实验波形对比

Fig. 8 Experimental waveforms comparison of grid current

(上接第6页)

5 结论

结合逆变器控制系统的实际情况,指出传统 RC 在频率比值为非整数时,存在无法准确跟踪的问题;提出了基于分数延迟思想的分数阶 RC 的解决方案。以 RC 和 PID 的逆变器复合控制策略为研究背景,从理论分析、参数设计及实验验证,总结出以下结论:①传统 RC,基于 z^{-N} 整数阶次的限制,当频率比值为非整数时,存在无法精确跟踪的问题;②以 RC 和 PID 瞬时控制的逆变器复合控制策略为例,分数阶 RC 比传统 RC 效果好,尤其在非线性负载下,波形质量的优势明显;③分数阶 RC 和 PID 瞬时控制相结合的逆变器复合控制策略,输出稳态误差小,响应速度快,有较强的带载能力和抗负载突变能力。

对并网电流谐波进行对比分析,结果表明,改进方法的并网电流 $THD=4.91\%$,一般方法的并网电流 $THD=6.02\%$,改进方法有效抑制了三次谐波,满足并网标准。

5 结论

根据极值搜索算法积分增益对系统参数敏感的特点,提出了变积分增益的 MPPT 极值搜索算法,提高了 MPPT 极值搜索控制的动稳态性能。基于直流侧电压含有二次谐波的特点,分别控制直流侧电压中的直流和交流分量,有效地抑制了并网电流中的三次谐波,满足了并网电流单位功率因数和降低谐波的要求。

参考文献

- [1] 吴大中,王晓伟.一种光伏 MPPT 模糊控制算法研究[J].太阳能学报,2011,32(6):808-812.
- [2] ARIYUR KB, KRSTI M. Real-time Optimisation by Extremum Seeking Control[M]. New Jersey: Wiley Interscience, 2003.
- [3] Casadei D, Grandi G, Rossi C. Single-phase Single-stage Photovoltaic Generation System Based on a Ripple Correlation Control Maximum Power Point Tracking[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2006, 21(2): 562-568.
- [4] 栗秋华,周林,刘强,等.光伏并网发电系统最大功率点跟踪新算法及其仿真[J].电力自动化设备,2008,28(7):21-24.
- [5] 吴理博,赵争鸣,刘建政,等.单级式光伏并网逆变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.

参考文献

- [1] 陈坚.电力电子学——电力电子变换和控制技术[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [2] 王归新,康永,陈坚.基于状态空间平均法的单相逆变器控制建模[J].电力电子技术,2004,38(5):9-12.
- [3] 彭力.基于状态空间理论的 PWM 逆变电源控制技术[D].武汉:华中科技大学,2004.
- [4] 孙朝晖,吴浩伟,方斌,等.采用 PID 和重复控制的逆变器波形控制策略[J].船电技术,2010,30(2):14-17.
- [5] G Oetken. A New Approach for the Design of Digital Interpolating Filters[J]. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing, 1979, 27(6): 637-643.
- [6] Y Ye, K Zhou, B Zhang, et al. High Performance Repetitive Control of PWM DC/AC Converters With Real-time Phase-lead FIR Filter[J]. IEEE Trans. Circuits and Systems II, 2006, 53(9): 768-772.