

基于改进 MPPT 算法的光伏并网系统控制策略

焦 阳, 宋 强, 刘文华

(清华大学 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 研究并改进了单相两级光伏并网发电系统的控制策略。以 2 种基本最大功率点跟踪(MPPT)技术为基础提出了一种结合固定电压法与增量电导法的占空比扰动 MPPT 算法。在不同的光伏电池运行点采用不同的跟踪方法,通过直接控制直流斩波器开关占空比以达到快速准确的功率跟踪效果。针对该算法的运行条件改进了光伏并网系统整体控制策略。通过直流电压外环的功率平衡控制及比例积分校正,配合内环并网电流反馈控制,使并网逆变器在保持并网电流质量的同时更好地控制直流电压。通过 PSCAD/EMTDC 软件搭建的光伏并网系统仿真模型验证了改进 MPPT 算法及逆变器控制策略的有效性。

关键词: 光伏发电系统; 最大功率点跟踪; 固定电压法; 增量电导法; 占空比扰动; 变流器控制; PSCAD 仿真

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0092-05

0 引言

随着当今世界能源危机和环境污染的日益严重,太阳能发电的重要性也日益显现。光伏并网发电系统使太阳能的大规模利用成为可能,也因此成为研究的热点^[1-8]。其中最大功率点跟踪(MPPT)控制以及并网逆变器控制是光伏发电系统的关键控制技术。

光伏发电系统成本普遍较高,因此需要充分利用光伏电池最大发电效能。这就使得 MPPT 技术成为光伏发电控制系统中不可缺少的控制策略。目前的 MPPT 控制方法主要有固定电压(CV)法、扰动观察(PO)法、增量电导(IC)法^[1-3]。这 3 种方法单独使用都有一定缺陷,目前的趋势是将几种方法综合使用,文献[2]研究了结合 CV 法和 PO 法的控制方式,但是本文提出的结合 CV 法和 IC 法的方式目前研究不多。

并网逆变器的控制效果不仅决定了送至电网的电能质量,同时也会影响 MPPT 的控制效果。因此逆变器控制目标是实现 MPPT 与并网逆变的结合。目前单相并网逆变器多采用双环控制,外环通过 PI 闭环控制或者功率平衡开环控制实现直流电压稳定。开环控制的动态响应及稳态误差较大,而闭环控制提供的参考电流幅值纹波较大。本文提出的控制方法综合了参考电流的开环计算与闭环校正,可以消除以上 2 种方法单独控制的缺陷。

现以单相两级光伏并网系统为对象,提出了一种直接扰动占空比的改进型 MPPT 方法,以及一种改进直流电压控制效果的逆变器控制方法。在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中进行的仿真验证了

MPPT 算法及逆变器控制策略的控制效果。

1 改进型 MPPT 控制方法

1.1 MPPT 基本方法

CV、PO 和 IC 3 种方法都基于不同环境下光伏电池输出特性。CV 法基于光伏电池最大工作点电压在不同光强下基本不变的特点,控制电池电压保持恒定。该方法简单易行,但控制效果差,在温度变化时难以准确跟踪最大功率。PO 法与 IC 法都基于最大功率点处 $U-P$ 曲线斜率为 0 的关系对电池电压进行扰动。PO 法以式(1)为判据确定最大功率点,算法简单;但是工作点始终在最大功率点附近振荡,且该方法所用的判据在光照变化较快的情况下会导致跟踪失败。IC 法在式(1)的基础上推导出如式(2)所示的判据,可以更好地适应快速变化的环境条件,避免跟踪失败,准确性更高;但是算法较复杂,跟踪效果依赖于精密的测量结果,对测量电路要求高^[9]。

$$\frac{dP}{dU} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (2)$$

主要 MPPT 方法都是通过扰动电池工作点使其接近最大功率点。扰动对象根据系统结构的不同可以是直流电压、电流参考值、并网电流参考值或占空比等。单级式结构只能扰动并网电流,会降低并网电能质量。带直流斩波环节的两级系统可以采用 PI 控制的方法调节电池输出电压或电流,通过对控制环的电压、电流参考值进行扰动实现功率跟踪。此外也可以直接扰动直流斩波器开关的占空比实现 MPPT。

1.2 改进型 MPPT 方法控制原理

针对 IC 法跟踪效果好、能够适应光强快速变化

的特点,同时考虑到 CV 法控制简单、跟踪速度快,文中提出了结合这 2 种方法的改进型 MPPT 控制方法。该方法在工作点远离最大功率点时采用 CV 法控制,使电池电压迅速达到最大功率点附近;之后采用 IC 法对工作点进行小步长扰动,使之逐渐达到最大功率点。CV 法保证了工作点快速接近最大功率点,IC 法保证了环境或负载突变情况下的追踪可靠性。由于在接近最大功率点时才使用 IC 法跟踪,因此可以采用小步长扰动,既确保了跟踪的精度与速度,又减少了扰动产生的振荡。

两级光伏系统一般采用直流斩波器进行 MPPT 控制。通过改变 PI 控制器电压参考值可以对电池工作点进行扰动。但参考值扰动与电池输出电压之间存在积分环节,MPPT 的速度与效果会受到 PI 控制器的影响,还会出现超调等动态过程。为此采用直接扰动占空比的方法实现 MPPT 控制。以 Boost 斩波器为例,光伏电池电压与直流母线电压关系如式(3)所示。将 MPPT 控制器给出的占空比参考值 D_{ref} 与三角载波比较就得到开关管触发脉冲,并由此扰动输出电压。根据参考值与三角波之间的几何关系可以推导出式(4)所示的 D_{ref} 与实际占空比之间的关系,将其代入式(3)后得到式(5)所示的光伏电池电压与占空比参考值之间的关系。在 U_{DC} 稳定的条件下,调节 D_{ref} 就可实现对光伏电压的扰动。

$$U_{PV} = (1-D)U_{DC} \quad (3)$$

$$D = \frac{D_{on}}{T} = \frac{1+D_{ref}}{2} \quad (4)$$

$$U_{PV} = \frac{1-D_{ref}}{2} U_{DC} \quad (5)$$

图 1 是上述改进 MPPT 算法的流程图,当工作点电压 U_k 与最大电压 U_m 之间距离大于给定电压误差 ΔU 时,将 D_{ref} 设置为与 U_m 对应的参考值 D_m 。当工作点接近最大功率点时,先通过判断电压、电流变化量 dU 与 dI 是否为 0 来判断环境条件是否发生变化。如果环境变化则根据相应变化趋势改变占空比参考值,否则以式(2)为判据对占空比进行扰

动,最终使工作点稳定在最大功率点附近。

1.3 改进型 MPPT 方法控制效果

采用改进型 MPPT 控制方法通过 PSCAD 软件对一种实际的光伏电池模型进行仿真,验证了该方法的控制效果。根据电池参数的环境修正建模方法^[10-11]建立 STP260-24/Vd 型光伏电池模型。光伏电池通过 Boost 斩波电路接逆变器或为负载供电。仿真电路结构如图 2 所示。

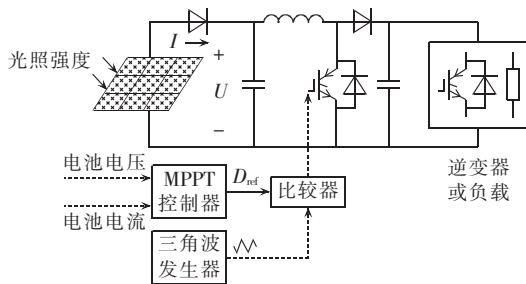


图 2 改进 MPPT 方法仿真电路

Fig.2 Simulation circuit of modified MPPT algorithm

在温度保持 25°C 时,将光强由 $1\text{ kW}/\text{m}^2$ 变为 $1.8\text{ kW}/\text{m}^2$,得到如图 3 所示的仿真结果。光强变化前为标准环境条件,可根据实际电池技术手册^[12]提供的的数据得到最大功率电压 34.8 V ,最大功率电流 7.47 A ,最大功率 260 W 。光照变化后通过电池仿真模型计算得到的最大功率电压为 36.8 V ,最大功率电流为 13.45 A ,最大功率 495 W 。图 3 给出了光照变化时电池输出电压 u 、电流 i 、功率 p 的暂态变化以及整个功率追踪过程中 MPPT 控制给出的占空比参考值 D_{ref} 。斩波器开关状态变化使得输出电压存在纹波,稳态时工作点会在最大功率点附近小幅振荡。通过合理调节扰动步长及扰动频率可以进一步抑制扰动带来的振荡。占空比参考值在接近最大功率点附近后由恒定值变为扰动振荡形式,由此可以体现改进 MPPT 方法的追踪模式。

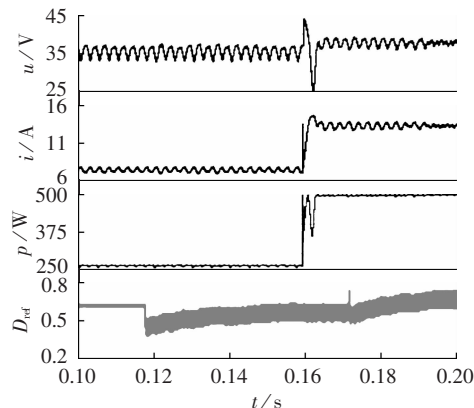


图 3 改进 MPPT 方法仿真波形

Fig.3 Simulative results of modified MPPT algorithm

2 光伏并网系统控制策略改进

2.1 单相两级光伏并网逆变器基本控制方法

两级光伏并网系统采用分级控制,直流斩波器

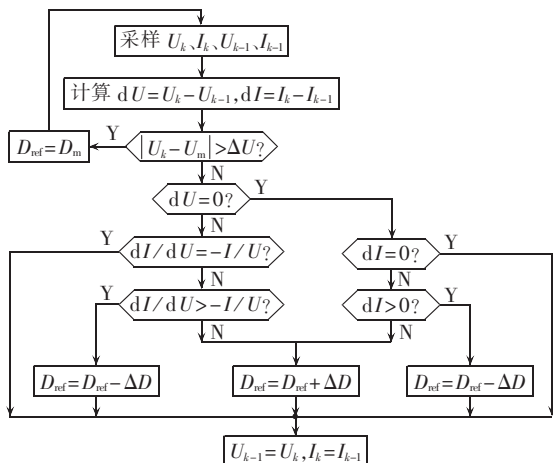


图 1 改进 MPPT 算法流程图

Fig.1 Flowchart of modified MPPT algorithm

负责 MPPT, 并网逆变器控制并网电流及直流电压。单相逆变器控制方法较简单, 常用方法主要有滞环比较控制与 PWM 控制^[13]。滞环比较控制的开关频率不固定, 会增大并网电流谐波。而电流反馈 PWM 控制通过生成与电网电压同频、同相的电流参考波控制并网电流追踪电网电压, 在降低电流谐波的基础上实现单位功率因数输出。

电流反馈式 PWM 逆变器一般采用双环控制^[14], 电流内环通过 PI 调节获得 PWM 参考波; 外环控制直流电压并提供电流参考波的幅值。常用外环控制方法为直流电压反馈控制或功率平衡控制等。单相逆变器交流输出的波动会在直流母线上产生纹波, 直流电压反馈控制会将该纹波引入并网电流的幅值参考值, 使得并网电流谐波增大。而功率平衡控制采用开环计算, 动态响应慢且稳态误差大, 光伏电池输出功率发生波动时难以保持直流电压稳定。

2.2 改进直流电压控制效果的并网逆变器控制

两级光伏逆变系统中的直流母线电压是连接前、后级变换器的关键。前面提出的改进型 MPPT 算法需要稳定的直流电压才能有效控制光伏电池输入电压; 而并网逆变器也需要稳定的直流母线电压才能保证并网电能质量。针对前面提出的常用直流电压控制方法的不足, 本文提出一种结合电压反馈 PI 控制和功率平衡控制的逆变器控制策略。

图 4 给出了这种控制策略的系统框图, 电流内环用同步锁相环获得的正弦参考波和外环提供的电流幅值合成并网电流参考信号, 通过 PI 调节后与载波比较得到逆变器触发脉冲。电压外环用于生成并网电流参考值的幅值。直流环节电压保持稳定的前提是光伏电池功率与并网功率的平衡, 因此用光伏电池功率除以电网电压就得到开环计算出的并网电流基本参考值, 再通过直流电压 PI 调节对该参考值进行校正, 可以在保证直流电压控制效果的同时减小并网电流幅值的波动, 降低并网电流谐波。

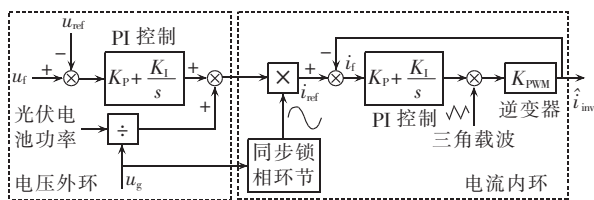


图 4 改进型逆变器控制框图

Fig.4 Modified converter control system

3 改进控制方法的光伏系统仿真

3.1 光伏并网系统仿真模型

为了验证文中提出的改进型 MPPT 控制和逆变器控制的实际效果, 通过 PSCAD/EMTDC 软件搭建单相两级光伏并网系统仿真模型, 电路结构如图 5 所示。在控制中将 2 种方法综合应用进行仿真。

根据 STP260-24/Vd 电池的仿真模型采用 7 串

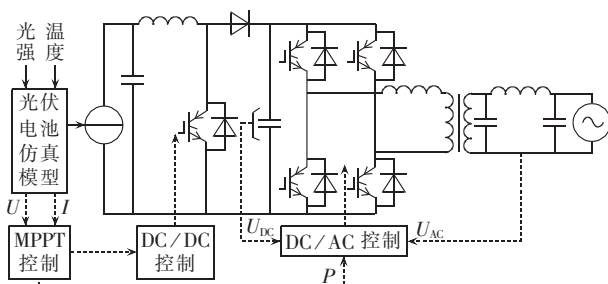


图 5 光伏并网系统仿真电路

Fig.5 Simulation circuit of PV generation system

3 并的模式组成光伏阵列。逆变器输出通过连接电抗与工频隔离变压器接至 220 V 交流电网。直流电压控制在 450 V, 斩波器与逆变器开关频率均为 12.8 kHz。MPPT 算法占空比扰动步长为 0.5 %, 扰动间隔为 7 μ s。

3.2 功率及直流电压控制效果

不同光强下光伏电池功率及并网功率的变化情况可以反映 MPPT 控制效果, 光强变化时直流电压的动态响应可以反映逆变器对直流电压的控制作用。观察温度为 25 $^{\circ}$ C 情况下光强由 1 kW/m^2 变化至 1.5 kW/m^2 时的功率 p 和 q 、直流母线电压 U_{DC} 以及并网电流幅值参考值 I_{ref} 的变化情况, 结果如图 6 所示。

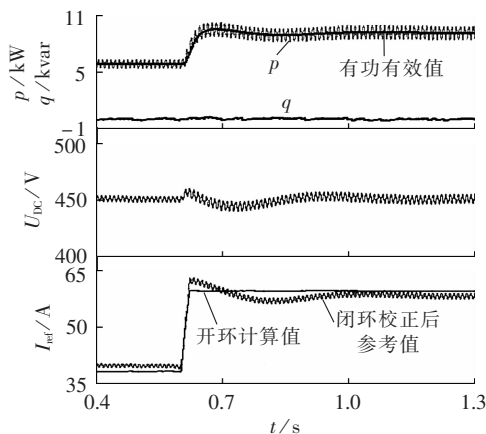


图 6 功率及直流电压波形

Fig.6 Simulative results of power flow and DC voltage

从图中可以看到无功功率接近 0, 因此逆变器具有高功率因数。并网有功功率有效值在光强变化前后与实际光伏电池相应条件下最大功率的误差不超过 1 %, 直流电压波形基本保持在给定值 450 V, 同时存在 2 倍工频的波动。但是通过改进的逆变器控制方法, 直流母线电压纹波小于 0.5 %, 且动态响应速度较快, 超调量也较小。并网电流幅值参考值的开环计算值不存在纹波以及动态过程, 但是对其进行闭环校正能够得到更好的动态响应及稳态误差特性。采用这种开环计算加闭环校正的方法得到的并网电流幅值参考值可以为改进型 MPPT 提供更好的控制条件, 因此也会提高功率跟踪效果。

3.3 并网电流控制效果

光伏并网发电系统在电网侧的控制目标是接近

单位功率因数的功率输出以及谐波含量尽可能降低的并网电流。图 7 给出了标准温度下光强从 1 kW/m^2 变化至 2 kW/m^2 时并网电压 u 和电流 i 的波形以及逆变器参考电流有效值 I_{ref} 的波形。从电压、电流瞬时值波形可以看出二者相位和频率保持一致。并网电流随光强增加而增大。参考电流幅值的响应速度与超调都保持合理水平。进一步分析得到并网电压与电流的相位差在稳态时不超过 0.5° , 并网功率因数近似为 1。考虑 31 次以内的谐波分量时, 总谐波畸变率在稳态时不超过 2%, 说明并网逆变器控制效果能够达到单位功率因数以及低谐波畸变率的要求。

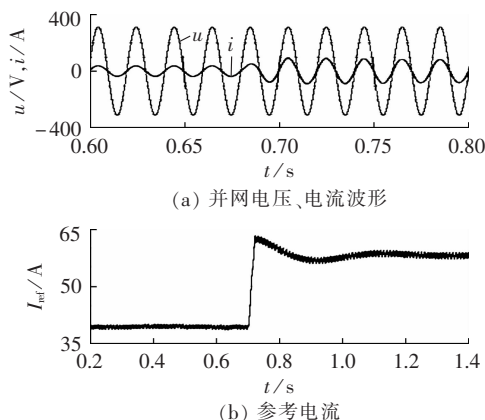


图 7 并网电压、电流及参考电流幅值波形

Fig.7 Simulative results of grid current, voltage and reference current

3.4 电流控制效果比较

本文提出的控制方法结合了开环计算与闭环校正得到电流参考值。通常的控制方法只采用其中一种, 因此稳态误差较大或者谐波较大。采用不同控制方法对上述光伏并网系统模型进行仿真可以看出本文提出的电流控制方法的优越性。图 8 给出了不同控制方法得到的逆变器输出电流 i_{inv} 。上图采用文中提出的改进方法, 下图只采用闭环控制。采用改进方法得到的电流波形谐波更小, 并且在波峰、波谷处畸变更小。通过定量分析得到改进方法的电流 THD 为 2%, 而普通方法的 THD 为 5%。说明改进型控制方法可以更好地抑制输出电流谐波。

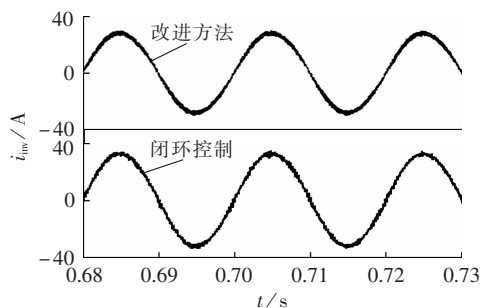


图 8 不同电流控制方法控制效果比较

Fig.8 Comparison of control effect between different current control methods

4 结论

根据 CV 法及 IC 法的不同控制特点, 本文提出

了结合这 2 种方法的改进型 MPPT 算法。该算法首先用 CV 法将工作点快速控制在最大功率点附近, 然后采用 IC 法进行小步长扰动以获得准确的跟踪效果。基于占空比与输出功率的唯一对应关系, 采用占空比参考值扰动法实现上述 MPPT 算法。仿真结果证明该方法在提高功率追踪速度、降低功率扰动的基础上能够保证追踪准确性。为满足该算法所需直流电压稳定的条件, 文中改进了单相两级光伏并网系统逆变器的控制策略。通过光伏输出功率与并网功率平衡的原理开环计算出并网电流幅值, 再通过直流电压反馈 PI 控制对该幅值进行校正, 最后得到电流反馈 PI 控制器的电流参考值。将改进型 MPPT 控制以及逆变器控制方法在光伏并网系统仿真模型中进行验证, 结果证明文中提出的控制方法可有效跟踪光伏最大功率并实现高质量的并网功率输出。

参考文献:

- [1] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 109-111.
- [2] 熊远生, 俞立, 徐建明. 固定电压法结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 85-88.
- [3] XIONG Yuansheng, YU Li, XU Jianming. MPPT control of photovoltaic generation system combining constant voltage method with perturb-observe method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 85-88.
- [4] 栗秋华, 周林, 刘强, 等. 光伏并网发电系统最大功率跟踪新算法及其仿真[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 21-24.
- [5] LI Qiuhua, ZHOU Lin, LIU Qiang, et al. Simulative research of MPPT for photovoltaic power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 21-24.
- [6] 温嘉斌, 刘密富. 光伏系统最大功率点跟踪方法的改进[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 81-84.
- [7] WEN Jiabin, LIU Mifu. Improvement of maximum power point tracking for photovoltaic system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 81-84.
- [8] 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.
- [9] ZHANG Housheng, ZHAO Yanlei. Single-phase double-stage photovoltaic grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 95-99.
- [10] 邹晓, 易灵芝, 张明和, 等. 光伏并网逆变器的定频滞环电流控制新方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 58-61.
- [11] ZOU Xiao, YI Lingzhi, ZHANG Minghe, et al. Constant-frequency hysteresis current control of PV grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 58-61.
- [12] 戴训江, 晁勤. 一种新颖的并网逆变器自适应电流滞环控制策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 85-89.
- [13] DAI Xunjiang, CHAO Qin. Adaptive current hysteresis control of grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 85-89.
- [14] 乔兴宏, 吴必军, 邓赞高, 等. 模糊/PID 双模控制在光伏发电 MPPT 中应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 92-95.
- [15] QIAO Xinghong, WU Bijun, DENG Zangao, et al. MPPT of photovoltaic generation system using fuzzy/PID control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 92-95.
- [16] 刘邦银, 段善旭, 刘飞, 等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 91-94.

- LIU Bangyin, DUAN Shanxu, LIU Fei, et al. Photovoltaic array maximum power point tracking based on improved perturbation and observation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 91-94.
- [10] 廖志凌, 阮新波. 任意光强和温度下的硅太阳电池非线性工程简化数学模型[J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 430-435.
- LIAO Zhiling, RUAN Xinbo. Non-linear engineering simplification model of silicon solar cells in arbitrary solar radiation and temperature[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2009, 30(4): 430-435.
- [11] 苏建徽, 余世杰. 硅太阳电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- SU Jianhui, YU Shijie. Model of silicon solar cells[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412.
- [12] 尚德太阳能电力有限公司. STP260-24/Vd 数据手册[EB/OL]. [2009-12-10]. http://www.suntech-power.com/images/stories/datasheets/Multilanguages/English/STP270_24Vd%20N01.02%20Mar10%202009.pdf.
- [13] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 97-102.
- DONG Mi, LUO An. Design and control strategies of inverters for a grid-connected photovoltaic power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 97-102.
- [14] 程军照, 吴夕科, 李澍森, 等. 采用 Boost 的两级式光伏发电并网逆变系统[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2048-2052.
- CHENG Junzhao, WU Xike, LI Shusen, et al. Boost based two-level grid-connected photovoltaic inverter system[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 2048-2052.
- [15] 时智勇, 贺明智, 郝瑞祥, 等. 基于同步 PI 控制的光伏并网发电系统研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 39-41.
- SHI Zhiyong, HE Mingzhi, HAO Ruixiang, et al. Research of PV systems based on synchronous PI control[J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 39-41.

(编辑: 李育燕)

作者简介:

焦 阳(1985-), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性交流输配电系统(E-mail: sukhoyi27@yahoo.com.cn);

宋 强(1975-), 男, 吉林吉林人, 副教授, 博士, 主要研究方向为柔性交流输配电系统及高频变换电源;

刘文华(1968-), 男, 湖南长沙人, 研究员, 博士, 主要研究方向为柔性交流输配电系统及高频变换电源。

Control strategy of grid-connected photovoltaic generation system based on modified MPPT method

JIAO Yang, SONG Qiang, LIU Wenhua

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The control strategy of single-phase two-stage grid-connected PV(PhotoVoltaic) generation system is studied and improved. A duty cycle perturbation MPPT(Maximum Power Point Tracking) algorithm is proposed based on two basic MPPT methods, which integrates CV(Constant Voltage) tracking and IC(Increment Conductance) tracking. Different tracking approaches are applied at different operating points and the duty cycle of DC chopper is directly controlled to achieve the optimum control results. The control strategy of PV generation system is improved to meet the requirements of the proposed algorithm. A DC voltage outer loop control for power balance and PI correction and an AC current inner loop control for feedback are designed to ensure the current quality and stabilize the DC voltage. A simulation system is built with PSCAD/EMTDC to verify the validity of the modified MPPT algorithm and the converter control strategy.

Key words: PV generation system; MPPT; constant voltage tracking; increment conductance tracking; duty cycle perturbation; converter control; PSCAD simulation