直流微电网周期波动对光伏系统输出功率的影响及其抑制

吴凤江[1],孙醒涛[2],江　彦[1]

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程系,黑龙江 哈尔滨 150001;2. 天津工业大学 电气工程系,天津 300387)

摘要:分析了单相交流逆变负载对直流母线电压的影响及波动电压的表达式。进一步分析了直流母线电压波动对直流微电网中光伏发电系统输出功率的影响并推导了光伏电池输出电压、电流及输出功率的表达式,进而揭示出了由于直流母线电压的波动影响造成光伏电池无法持续处于最大功率输出点,间接降低了光伏发电系统的发电效率。提出了基于直流母线电压波动前馈的光伏发电系统电流闭环控制策略,有效抑制了直流母线电压波动对光伏电池输出功率的影响。仿真和实验结果验证了理论分析结果与所提方法的正确性和可行性。

关键词:直流微电网;光伏电池;发电;直流母线电压波动;前馈控制;效率优化

中图分类号:TM 615　　**文献标识码**:A　　DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.006

0　引言

直流微电网是近几年提出的一种基于直流母线互联的分布式发电源集成形式,特别适合光伏发电系统等具有直流输出特性的分布式发电源的规模化集成发电,显示出了巨大的发展潜力和广阔的应用前景[1-6]。

在光伏发电直流微电网中,由于光伏电池的输出功率受到外界环境变化的影响而不断发生变化,为了使其输出电能形式和所连接的直流微电网相适应,通常外接 Boost 升压电路。另外,为使其运行于最大功率点,通常采用最大功率点跟踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)控制技术。MPPT 技术可以分为如下几类:定电压法、扰动观测法、电导增量法、基于阻抗匹配的 MPPT 方法以及基于现代控制理论和智能控制等[7-11]。另外,还有文献研究了用于直流微电网的光伏发电系统的 MPPT 控制技术,利用直流母线保持不变的特点,能够获得输出功率与直流变换电路中占空比的线性关系,从而只需检测光伏电池的输出电压或者电流就能够对其输出功率进行控制,因此省去了一部分传感器[8-14]。当光伏发电直流微电网连接单相直流-交流逆变电源等负载时,会产生直流母线电压的周期性波动。现有文献中,均以基于 DC-DC 变换电路的最大功率输出为研究重点,并未对这种直流母线电压的周期波动对光伏电池输出功率的影响给出定量分析和相应的解决办法。

收稿日期:2013-06-26;**修回日期**:2014-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51107018);高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)资助项目(20102302120013);黑龙江省博士后科研启动金资助项目(LBH-Q11109)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51107018),the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20102302120013) and the Assisted Project by Heilongjiang Postdoctoral Funds for Scientific Research Initiation(LBH-Q11109)

在 Boost 电路的闭环控制方面,近些年涌现了大量的研究成果。其中有比例-积分控制、滑模变结构控制、反馈线性化方法、无源性控制、自适应控制、内模控制、模糊控制以及神经网络控制等[15-19]。上述研究成果均以直流输出电压恒定为目标,不能直接用于光伏发电系统中来消除直流母线电压波动对光伏电池输出功率的影响。

本文以光伏发电直流微电网为研究背景,对包含光伏电池和储能系统的直流微电网带动单相逆变负载时直流母线电压的周期性波动对光伏电池输出功率的影响进行了深入研究,进而提出了基于直流母线电压波动前馈的控制策略,以抑制直流母线电压周期性波动对光伏电池输出功率的影响,从而提高系统的运行效率。

1　典型光伏发电直流微电网简介

本文拟研究的直流微电网结构如图 1 所示,包括光伏发电系统和储能系统,带单相逆变负载。对于图 1 所示的直流微电网,通常的方案是储能系统负责直流母线电压的稳定控制,光伏发电系统采用 MPPT 控制[2]。

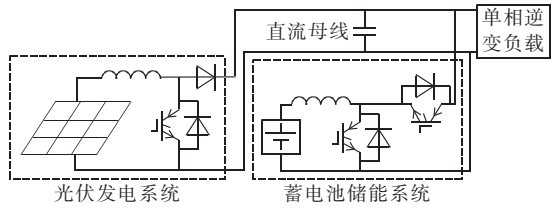


图 1　光伏发电直流微电网简化结构图

Fig.1 Simplified structure of DC microgrid with photovoltaic generation

下面分别从单相逆变负载对直流母线电压的影响以及对光伏发电系统输出功率的影响两方面进行分析。

2　单相逆变负载对直流母线电压的影响

首先分析单相逆变负载对直流母线电压的影响。由前述分析可知，直流母线电压由储能系统进行闭环控制，为简化分析，认为此时蓄电池处于输出功率状态，即变换器工作于升压模式。现有文献中，储能系统大多采用电感电流内环和直流母线电压外环的双闭环控制结构，其中电压、电流环均采用比例-积分控制[3]。从而得到考虑扰动的储能系统双闭环控制框图如图 2 所示。

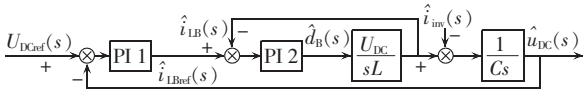


图 2　储能系统控制框图

Fig.2 Block diagram of energy storage system control

由此得到电流环的传递函数为：

$$\frac{\hat{i}_{LB}(s)}{\hat{i}_{LBref}(s)}=\frac{U_{DC}(K_{P2}s+K_{I2})}{L_B s^2+U_{DC}K_{P2}s+U_{DC}K_{I2}} \tag{1}$$

其中，K_{P2} 和 K_{I2} 分别为储能系统电感电流环的比例和积分系数；U_{DC} 为直流母线电压；L_B 为滤波电感；$\hat{i}_{LBref}$、$\hat{i}_{LB}$ 分别为储能系统电感电流的给定值和实际值。

下面分析单相逆变负载的直流侧输入电流的表达式。为简化分析，假定逆变系统带线性负载。直流侧和交流侧的功率平衡方程为：

$$U_{DC}i_{inv}=U_m\sin(\omega t)I_m\sin(\omega t+\phi) \tag{2}$$

其中，U_m、I_m、ω 分别为交流电压和电流的幅值以及频率；ϕ 为交流负载阻抗角；i_{inv} 为逆变负载的直流输入电流。由于直流侧电容的存在，直流母线电压的变化远小于直流输入电流的变化，则 i_{inv} 为：

$$i_{inv}=\frac{U_mI_m}{U_{DC}}\frac{\cos(2\omega t+\phi)-\cos\phi}{2} \tag{3}$$

则 i_{inv} 的周期波动分量为：

$$\hat{i}_{inv}(t)=\frac{U_mI_m}{U_{DC}}\frac{\cos(2\omega t+\phi)}{2} \tag{4}$$

由上式可知，逆变负载的直流输入电流包含 2 倍频的交流波动。进一步获得直流母线电压在 $\hat{i}_{inv}$ 的扰动作用下的扰动分量传递函数为：

$$\begin{aligned}\Phi_{UI}(s)=\frac{\hat{u}_{DC}(s)}{\hat{i}_{inv}(s)}=&-(L_Bs^3+U_{DC}K_{P2}s^2+U_{DC}K_{I2}s)\div\\&[Cs^2(L_Bs^2+U_{DC}K_{P2}s+U_{DC}K_{I2})+\\&(K_{PI}s+K_{II})(K_{P2}s+K_{I2})U_{DC}]\end{aligned} \tag{5}$$

其中，K_{PI} 和 K_{II} 分别为储能系统直流母线电压环的比例和积分系数；C 为直流母线的缓冲电容。

下面分析在直流输入电流扰动下的直流母线电压稳态误差，即稳态电压波动。由于电流扰动为余弦值，其极点处于 S 平面的虚轴上，不解析，经典终值定理无法直接应用，这里采用级数求解法来获得其稳态误差。由自动控制理论可知，扰动稳态误差的级数表达式为：

$$e_{sn}(t)=B_0n_s(t)+B_1\dot{n}_s(t)+\frac{B_2}{2!}\ddot{n}_s(t)+\cdots \tag{6}$$

$$B_k=\lim_{s\to 0}\frac{d^k}{ds^k}\Phi_k(s) \tag{7}$$

其中，$n_s(t)$ 为扰动的稳态时域表达式；$B_k(k=0,1,\cdots)$ 为扰动误差系数；$\Phi_k(s)$ 为扰动传递函数。

对于储能系统，$\Phi_k(s)$ 为式(6)。由此求得直流母线电压的稳态误差（只求取前三项）为：

$$\begin{aligned}\hat{u}_{DC}(t)\approx&B_{B1}\dot{\hat{i}}_{inv}(t)+B_{B2}\ddot{\hat{i}}_{inv}(t)\approx\\&-\frac{4K_{P2}\omega^2}{U_{DC}^2K_{I1}^2K_{I2}^2}\cos(2\omega t+\phi)-\frac{2U_mI_m\omega}{U_{DC}K_{I1}}\sin(2\omega t+\phi)\approx\\&-\frac{2\omega\hat{U}_{DCm}}{U_{DC}K_{I1}}\sin(2\omega t+\phi+\delta)\end{aligned} \tag{8}$$

其中，B_{B1} 和 B_{B2} 为由式(7)获得的扰动误差系数；$\hat{U}_{DCm}=\sqrt{\left(\frac{2K_{P2}\omega}{U_{DC}K_{I1}K_{I2}^2}\right)^2+(U_mI_m)^2}$；$\delta=\arctan\frac{2K_{P2}\omega}{U_{DC}K_{I1}K_{I2}^2U_mI_m}$。

由上式可知，直流母线电压的稳态误差为正弦周期波动，对整个微电网的供电质量产生不利影响。

3　考虑直流母线电压波动的光伏电池输出功率分析

下面分析直流母线电压周期波动对光伏电池输出功率的影响。假定光伏电池中采用输出电流单闭环控制，其给定由 MPPT 算法给出，电流环采用比例-积分控制。

只考虑直流母线电压扰动的光伏发电系统的小信号模型为[20]：

$$L_{PV}\frac{d\hat{i}_{PV}}{dt}=U_{DC}\hat{d}_{PV}-(1-D_{PV})\hat{u}_{DC} \tag{9}$$

其中，D_{PV} 和 $\hat{d}_{PV}$ 分别为光伏发电系统的稳态占空比及其小信号增量；L_{PV} 为光伏发电系统的滤波电感；$\hat{i}_{PV}$ 为光伏电池输出电流的小信号增量。从而得到采用比例-积分调节的电流单闭环的光伏发电系统控制框图如图 3 所示。

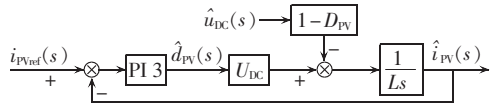


图 3　光伏发电系统控制框图

Fig.3 Block diagram of photovoltaic generation system control

由此得到光伏电池输出电流在 $\hat{u}_{DC}$ 作用下的扰动分量的传递函数为：

$$\Phi_{PVIU}(s)=\frac{\hat{i}_{PV}(s)}{\hat{u}_{DC}(s)}=-\frac{(1-D_{PV})s}{L_{PV}s^2+U_{DC}K_{P3}s+U_{DC}K_{I3}} \tag{10}$$

其中，K_{P3} 和 K_{I3} 分别为光伏电池输出电流环的比例和积分系数。

下面分析在直流母线电压扰动下的光伏电池输出电流的稳态误差。同样由于直流母线电压扰动为正弦量，其极点处于 S 平面的虚轴上，不解析，需采用级数求解法获得其稳态误差。根据式(6)—(8)，求得光伏电池输出电流的稳态误差表达式，同样只求取前三项。第一项为：

$$B_{PV0}=\lim_{s\to 0}\Phi_{PVIU}(s)=0 \tag{11}$$

第二项为：

$$B_{PV1}=\lim_{s\to 0}\frac{\mathrm{d}\Phi_{PVIU}(s)}{\mathrm{d}s}=-\frac{1-D_{PV}}{K_{I3}U_{DC}} \tag{12}$$

第三项为：

$$B_{PV2}=\lim_{s\to 0}\frac{\mathrm{d}^2\Phi_{PVIU}(s)}{\mathrm{d}s^2}=\frac{2(1-D_{PV})K_{P3}}{K_{I3}^2} \tag{13}$$

由此得到光伏电池输出电流的稳态误差为：

$$\begin{aligned}\hat{i}_{PV}(t)\approx & B_{PV1}\dot{\hat{u}}_{DC}(t)+B_{PV2}\ddot{\hat{u}}_{DC}(t)\approx \\ & -\frac{2(1-D_{PV})\omega\hat{U}_{DCm}}{U_{DC}K_{I3}}\cos(2\omega t+\phi+\delta)- \\ & \frac{4(1-D_{PV})\omega^2\hat{U}_{DCm}}{K_{I3}^2}\sin(2\omega t+\phi+\delta)\approx \\ & -\frac{2(1-D_{PV})\omega\hat{U}_{DCm}}{K_{I3}}\hat{I}_{PVm}\sin(2\omega t+\phi+\delta+\gamma)\end{aligned} \tag{14}$$

其中，$\hat{I}_{PVm}=\sqrt{\left(\frac{1}{U_{DC}}\right)^2+\left(\frac{2\omega}{K_{I3}}\right)^2}$，$\gamma=\arctan\frac{2\omega U_{DC}}{K_{I3}}$。

由上式可知，直流母线电压存在周期波动的情况下，光伏电池输出电流存在周期波动。下面分析光伏电池的输出功率。由文献[21]可知，光伏电池输出电压和电流的简化关系为：

$$u_{PV}=\frac{1}{\lambda}\ln\frac{I_{ph}-I_{sat}-i_{pv}}{I_{sat}} \tag{15}$$

其中，λ 为与温度有关的光伏电池系数；I_{ph} 为与光强成正比的光生电流；I_{sat} 为光伏电池寄生反并联二极管的饱和电流。

由此获得光伏电池输出功率为：

$$\begin{aligned}p_{pv}=&i_{PV}u_{PV}= \\ &(I_{PV}+\hat{i}_{PV}(t))\frac{1}{\lambda}\ln\frac{I_{ph}-I_{sat}-I_{PV}-\hat{i}_{PV}(t)}{I_{sat}}\end{aligned} \tag{16}$$

其中，I_{PV} 为光伏电池输出电流的直流分量。将式(14)代入上式得：

$$\begin{aligned}p_{PV}=&\left[I_{PV}-\frac{2(1-D_{PV})\omega\hat{U}_{DCm}}{K_{I3}}\hat{I}_{PVm}\sin(2\omega t+\phi+\delta+\gamma)\right]\times \\ &\frac{1}{\lambda}\ln\left\{\left[I_{ph}-I_{sat}-I_{PV}+\frac{2(1-D_{PV})\omega\hat{U}_{DCm}}{K_{I3}}\times\right.\right. \\ &\left.\left.\hat{I}_{PVm}\sin(2\omega t+\phi+\delta+\gamma)\right]/I_{sat}\right\}\end{aligned} \tag{17}$$

式(14)—(17)给出了光伏电池输出电流、电压和功率与直流母线电压波动幅值之间的关系。由上述分析可知，在直流母线电压存在周期性波动时，光伏电池输出电流、电压和功率均存在周期波动，光伏电池输出电流的波动幅值近似与直流母线电压波动幅值成正比。为进一步分析上述变量和直流母线电压波动幅值之间的定量关系，根据式(14)—(17)分别绘制在直流电压存在正弦周期波动时(波动率为20%)的光伏电池输出电流、电压和功率(均为标幺值)的时域分布曲线，如图4所示。由图可知，光伏电池输出电流、电压和功率均存在相同频率的周期波动(波动率分别约为17%、10%和9.9%)，使光伏电池无法持续处于最大功率点，从而降低了其工作效率。

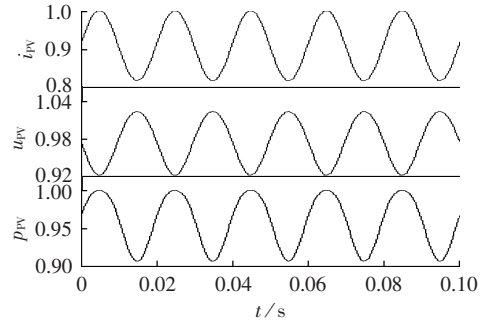


图4 光伏电池输出特性曲线

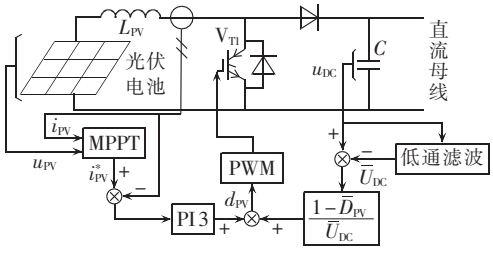
Fig.4 Characteristic curves of photovoltaic cell output

4 所提出的光伏发电系统控制策略

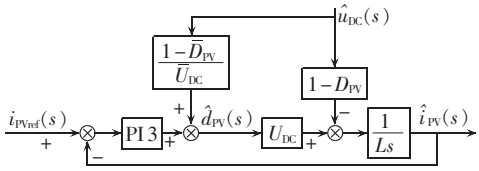
如果能够消除光伏电池输出电流的稳态误差，使其不存在周期波动，则能够保证其工作在最大功率点。一种简单的办法是增加直流滤波电容，但是这种方案属于被动抑制手段，需要增加大量的电容，造成系统的体积和成本均显著上升。为此，本文提出基于内模原理的带有直流母线电压波动前馈的光伏电池输出电流闭环控制策略，来消除直流母线电压波动的影响，而无需增加额外的硬件设备，其控制原理图如图5(a)所示，其控制框图如图5(b)所示。其中，直流母线电压波动的前馈系数根据内模原理由式(10)得到。为了获得直流母线电压的波动值，首先对直流母线电压进行低通滤波，获得其稳态平均值 $\overline{U}_{DC}$，再与实际值相减，获得直流母线电压的波动。$\overline{D}_{PV}$ 为占空比的低通滤波值。从而得到其输出电流扰动的传递函数为：

$$\Phi'_{PVIU}(s)=\frac{\hat{i}_{PV}(s)}{\hat{u}_{DC}(s)}=-\frac{s\left[\frac{1-\overline{D}_{PV}}{\overline{U}_{DC}}U_{DC}-(1-D_{PV})\right]}{L_{PV}s^2+U_{DC}K_{P3}s+U_{DC}K_{I3}}=0 \tag{18}$$

由上式可知，光伏电池输出电流理论上将不受直流母线电压波动的影响。



(a) 控制原理图



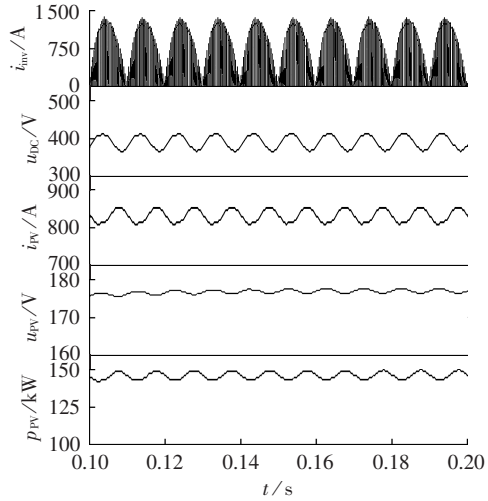
(b) 控制框图

图 5 所提出的光伏发电系统及其控制框图

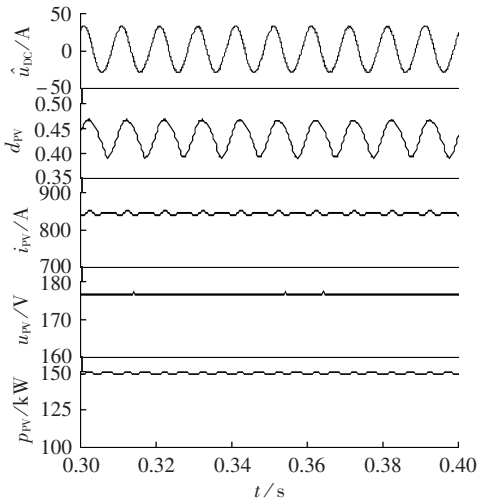
Fig.5 Proposed photovoltaic generation system and block diagram of its control

5 仿真和实验结果及分析

搭建了基于 Simulink 的仿真平台,对上述分析进行仿真验证。仿真参数为:直流母线电压为 400 V,带 200 kW 单相交流逆变负载,频率为 50 Hz,光伏电池理想最大输出电压为 177 V,理想最大输出电流为 847 A,理想最大输出功率为 150 kW,剩余能量由储能系统补充。控制器参数为:比例系数为 0.005,积分系数为 0.001,直流电压波动前馈系数为 0.001。图 6(a)和(b)分别给出了采用比例-积分控制的光伏发电系统加入直流母线电压波动前馈前后的仿真结果。由图 6(a)可知,在未加入直流母线电压波动前馈时,确实存在直流母线电压的波动,进而造成光伏电池输出电流、电压和功率均产生原理性波动,使其无法处于最大功率点,功率波动达到 5%,严重影响了其工作效率。由图 6(b)可知,在将直流母线电压波动前馈加入到光伏电池输出电流的闭环回路后,占空比波形中存在正弦波动,用以抵消直流母线



(a) 比例-积分控制



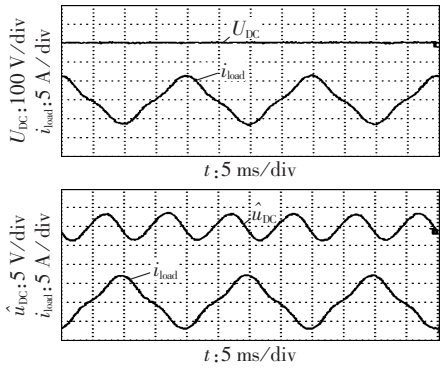
(b) 加入直流母线电压波动前馈控制

图 6 仿真波形

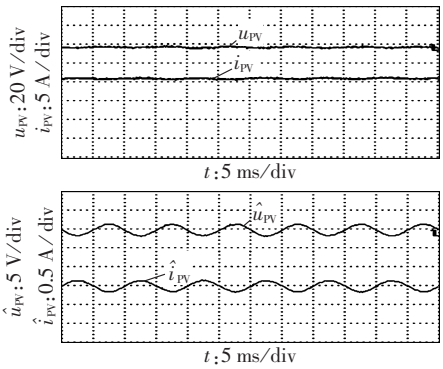
Fig.6 Simulative waveforms

电压对光伏电池输出电流的影响,很好地消除了直流母线电压波动对光伏电池输出功率的影响,输出功率的波动小于 1%,显著提高了其工作效率。

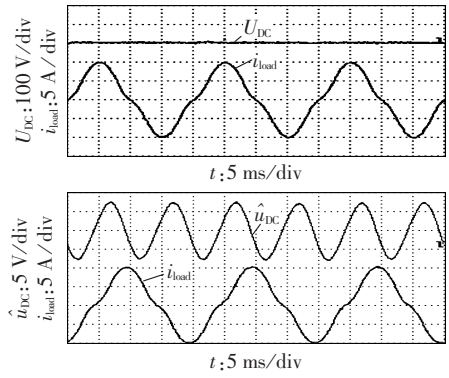
在实验室搭建的小功率直流微电网实验平台上对所提出的方法进行了实验验证,实验参数为:直流母线电压为 400 V,光伏电池最大输出功率为 1 kW。图 7 和图 8 分别给出了带 1 kW 和 1.5 kW 单相交流逆变负载时,采用比例-积分控制和所提出方法的实验结果。由图 7 可知,直流母线电压确实存在明显周期波动,在负载增加时,波动分量随之上升,在采用



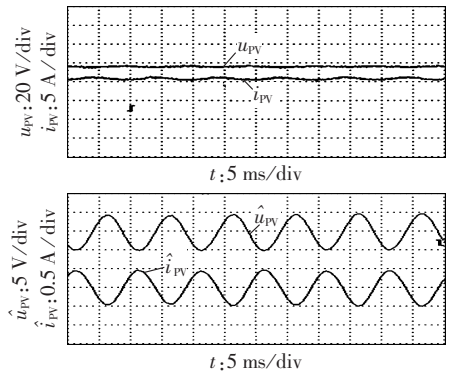
(a) 1 kW 负载的直流母线电压及其波动分量与交流负载电流



(b) 1 kW 负载的光伏电池输出电压、电流及其波动分量



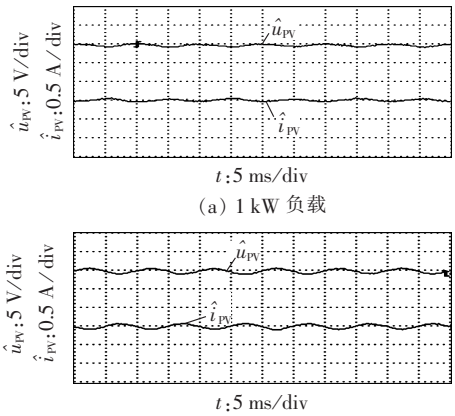
(c) 1.5 kW 负载的直流母线电压及其波动分量与交流负载电流



(d) 1.5 kW 负载的光伏电池输出电压、电流及其波动分量

图 7 采用 PI 控制的实验波形

Fig.7 Experimental waveforms of PI control



(a) 1 kW 负载

(d) 1.5 kW 负载

图 8 基于所提方法的光伏电池输出电压、电流波动实验波形

Fig.8 Experimental waveforms of output voltage and current ripple of photovoltaic cell controlled by proposed strategy

比例-积分控制时,光伏输出电压、电流均存在明显周期波动,波动率同样达到近 5%。通过引入所提出的方法,如图 8 所示,在直流母线电压存在周期波动的情况下,光伏电池的输出电压、电流保持平稳,波动分量明显降低,输出功率的波动小于 1%。实验波形获得了和仿真相近的结果,从而从实验的角度进一步证明了前述理论分析和所提出方法的正确性和可行性。

6 结论

本文给出了带单相逆变负载的直流微电网的直流母线电压稳态误差表达式以及光伏电池输出电流的稳态误差表达式,并进一步提出了基于直流母线电压周期波动前馈的光伏输出电流闭环控制方法。理论分析、仿真与实验结果表明,所提出的控制方法在直流母线电压存在较大周期性波动时仍然能使光伏电池输出功率保持平稳,从而提高了光伏电池的工作效率。

参考文献:

[1] CHEN D,XU L. Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(4):1897-1905.

[2] XU L,CHEN D. Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2512-2522.

[3] 郝雨辰,吴在军,窦晓波,等. 多代理系统在直流微网稳定控制中的应用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):27-35.
HAO Yuchen,WU Zaijun,DOU Xiaobo,et al. Application of multi-agent systems to the DC microgrid stability control[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):27-35.

[4] 王成山,孙充勃,彭克,等. 微电网交直流混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):8-15.
WANG Chengshan,SUN Chongbo,PENG Ke,et al. Study on AC-DC hybrid power flow algorithm for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):8-15.

[5] 薛贵挺,张焰,祝达康. 孤立直流微电网运行控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):112-117.
XUE Guiting,ZHANG Yan,ZHU Dakang. Operational control strategy of stand-alone DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):112-117.

[6] 王晶,李瑞环,束洪春. 基于智能多代理的能量协调控制在直流微网中的应用[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):132-138.
WANG Jing,LI Ruihuan,SHU Hongchun. Energy coordination control based on intelligent MAS for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):132-138.

[7] 唐磊,曾成碧,徐伟,等. 一种新颖的光伏自适应变步长最大功率点跟踪算法[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):128-133.
TANG Lei,ZENG Chengbi,XU Wei,et al. Variable-step adaptive MPPT algorithm for photovoltaic system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):128-133.

[8] 尤鋆,郑建勇. 基于模糊 PI 调节 Boost 电路的光伏系统最大功率点跟踪控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):94-98.
YOU Jun,ZHENG Jianyong. MPPT of photovoltaic system with Boost circuit based on fuzzy PI control[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):94-98.

[9] MASOUM M A S,DEHBONEI H,FUCHS E F. Theoretical and experimental analysis of photovoltaic systems with voltage and current based maximum power-point tracking[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2002,17(4):514-522.

[10] LIU F,DUAN S,LIU F,et al. A variable step size INC MPPT method for PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(7):2622-2628.

[11] FEMIA N,PETRONE G,SPAGNUOLO G,et al. A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(11):4473-4482.

[12] CHEN L,TSAI C,LIN Y,et al. A biological swarm chasing algorithm for tracking the PV maximum power point[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(2):484-493.

[13] 郑颖楠,王俊平,张霞. 基于动态等效阻抗匹配的光伏发电最大功率点跟踪控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(2):111-118.
ZHENG Yingnan,WANG Junping,ZHANG Xia. Maximum power point tracking control in the photovoltaic power generation based on dynamic equivalent impedance matching theory[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(2):111-118.

[14] KJAER S B. Evaluation of the hill climbing and the incremental conductance maximum power point trackers for photovoltaic power[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2012,27(4):922-929.

[15] 钱霞,袁建华,高厚磊,等. 直流微电网光伏发电最大功率点追踪方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):90-93.
QIAN Xia,YUAN Jianhua,GAO Houlei,et al. MPPT of photovoltaic generation for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):90-93.

[16] 刘锦波,明文龙. 一种基于输入/输出反馈线性化的 Boost 型 DC/DC 变换器非线性控制方案[J]. 中国电机工程学报,2010,30(27):55-61.
LIU Jinbo,MING Wenlong. A novel scheme of nonlinear control strategy based on input-output linearization for boost type DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(27):55-61.

[17] 邓卫华,张波,丘东元,等. 电流连续型 Boost 变换器状态反馈精确线性化与非线性 PID 控制研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8):46-50.
DENG Weihua,ZHANG Bo,QIU Dongyuan,et al. The research of state variable feedback linearization method on the CCM Boost converter and nonlinear PID control law[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(8):45-50.

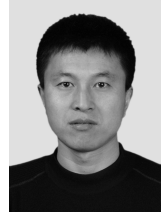
[18] 帅定新,谢运祥,王晓刚,等. Boost 变换器非线性电流控制方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(15):15-21.
SHUAI Dingxin,XIE Yunxiang,WANG Xiaogang,et al. Nonlinear current control method for Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(15):15-21.

[19] 乐江源,谢运祥,洪庆祖,等. Boost 变换器精确反馈线性化滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(30):16-23.
LE Jiangyuan,XIE Yunxiang,HONG Qingzu,et al. Sliding mode control of Boost converter based on exact feedback linearization[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(30):16-23.

[20] KREIN P T,BENTSMAN J,BASS R M,et al. On the use of averaging for the analysis of power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1990,5(2):182-190.

[21] 田琦,赵争鸣,邓夷,等. 光伏电池反向模型仿真分析及实验研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(23):121-128.
TIAN Qi,ZHAO Zhengming,DENG Yi,et al. Simulation and experimental study about reverse model of photovoltaic cells[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(23):121-128.

作者简介:



吴凤江(1980-),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士后,研究方向为可再生能源发电及先进电能变换技术(**E-mail**:wfjhit@163.com)。

Effect of DC microgrid periodical ripple on output power of photovoltaic system and its elimination

WU Fengjiang[1],SUN Xingtao[2],JIANG Yan[1]

(1. Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China;
2. Tianjin Polytechnic University,Tianjin 300387,China)

Abstract: The effect of single-phase DC-AC load on DC-link bus voltage and the expression of DC-link voltage ripple are analyzed. The effect of DC-link voltage ripple on the output power of photovoltaic system in DC microgrid is analyzed and the expressions of photovoltaic cell output voltage,current and power are derived,which reveals that the maximum output power point of photovoltaic cell can hardly kept due to the DC-link voltage ripple and the efficiency of photovoltaic system is indirectly reduced. A strategy of close-loop control based on the feedforward of DC-link voltage ripple is thus proposed to effectively eliminate the effect. Simulative and experimental results validate the accuracy of theoretical analysis and the feasibility of the proposed control strategy.

Key words: DC microgrid; photovoltaic cells; electric power generation; DC-link voltage ripple; feedforward control; efficiency improvement