

光伏发电系统多模式接入直流微电网及控制方法

熊远生^{1,2}, 俞立¹, 徐建明¹

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310032; 2. 嘉兴学院机电工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: 对接入直流微电网的光伏发电系统提出三种工作模式, 即最大功率点跟踪控制模式、恒压模式和恒功率模式。在最大功率点跟踪控制模式时, 采用一种变步长的扰动观察法实现最大功率点跟踪。在恒压模式时, 采用PI控制实现恒压控制。在恒功率模式时, 采用PI控制实现恒功率控制。当判断出不能实现恒压或恒功率控制时, 切换到最大功率点跟踪控制模式, 并通知能量管理器, 能量管理器通过储能装置调度或负荷调度来镇定直流母线电压。从而使光伏发电系统对能量管理器来说是一个受限的可控源, 有助于直流微电网的稳定运行。对所提出的多种工作模式及控制方法进行了仿真, 结果表明, 所提方法能使光伏发电系统运行于多种工作模式, 并能实现相应的控制目标及模式切换, 使光伏发电系统变为一个受限的可控源。
关键词: 光伏阵列; 最大功率点跟踪; 直流微电网; 恒压模式; 恒功率模式

Multimode of photovoltaic generation system connected to DC microgrid and control methods

XIONG Yuan-sheng^{1,2}, YU Li¹, XU Jian-ming¹

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;
2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China)

Abstract: Three operating modes are presented for photovoltaic (PV) generation systems connected to DC microgrid, including the maximum power point tracking (MPPT) control mode, constant voltage mode and constant power mode. A variable step size perturbation and observation method is used to achieve maximum power tracking in the MPPT control mode. The constant voltage control is achieved by the PI control method in the constant voltage mode. The constant power control is achieved by the PI control method in the constant power mode. When the constant voltage or constant power can not be realized, the operating mode is switched to the MPPT control mode and the energy manager is notified. The DC bus voltage is stabilized by the energy storage device dispatch or the load dispatch. So that the PV generation system is a controllable source of limited to the energy manager and is contributed to the stable operation of the DC microgrid. The multimode and control methods are simulated, and the results show that the PV generation system can operate in multimode, and the control objectives and mode switching can be achieved. Therefore, the PV generation system is changed into a controllable source of limited.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61374103).

Key words: photovoltaic array; MPPT; DC microgrid; constant voltage mode; constant power mode

中图分类号: TM72

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)12-0037-07

0 引言

近年来, 在能源紧缺与环境污染的双重压力下, 光伏并网发电系统应用越来越多。然而, 光伏并网发电系统的输出功率随天气的变化而变化, 对大电网来说是一个不可控电源, 在大规模并网时会影响电力系统运行的稳定性和可靠性^[1]。将光伏等

新能源以微电网的形式接入大电网并网运行, 与大电网相互支撑, 是发挥光伏发电系统效益的有效途径^[2]。

目前, 交流微电网仍然是微电网的主要形式。然而, 针对光伏发电系统来说, 一方面, 从光伏发电出来的电能一般要经过多级电力变换才能接入交流微电网, 光伏通常经过DC/DC/AC变换后接入交流微电网, 并且在接入交流微电网时要同时实现并网电流幅值、相位、正弦度和谐波等方面的控制, 控制复杂; 另一方面, 在用电时, 不经过变换直接使

基金项目: 浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ12F03008); 国家自然科学基金项目(61374103)

用交流电的情况越来越少，直流负载一般采用AC/DC/DC的结构，交流负载一般采用AC/DC/AC的结构。多级变换带来了诸多不利后果，例如能源利用效率的下降、可靠性降低等。为了克服这些问题，在有些场合提出采用直流微电网来代替交流微电网^[3-6]。

在直流微电网的运行模式划分上，通常划分为联网模式和孤岛模式。为保持直流母线电压的稳定，需要实现功率的平衡，常见的控制方法有两种，集中控制^[7]和分散控制^[8]。集中控制时，各变换器实时接收能量管理器的控制命令并执行，显然，这种控制依赖通信，但通过能量管理器，能对系统进行优化。分散控制时，无需通信，通过检测电压而实现环流的抑制。缺点是很难对系统进行全局优化。

目前，对光伏发电系统主要采用的是最大功率点跟踪控制，但是考虑实际约束条件后，如储能装置容量有限，变换器功率有限等，在某些运行模式下，更希望对光伏发电系统采取非最大功率点跟踪控制，从而实现直流微电网的稳定运行。

本文在对直流微电网考虑实际约束后，针对光伏发电系统提出三种工作模式，即最大功率点跟踪控制模式、恒压模式和恒功率模式。光伏发电系统接收能量管理器的命令，在三种模式之间切换，在不能实现恒压或恒功率时，返回到最大功率点跟踪控制模式，并通知能量管理器。这样，光伏发电系统对整个直流微电网的能量管理器来说是一个受限可控源，有助于直流微电网的稳定运行。

1 光伏发电直流微电网

本文考虑的直流微电网结构如图1所示，系统设有控制网络，各变换器连接到控制网络上，并可和能量管理器通信。光伏阵列通过DC/DC变换器接入直流母线，储能装置通过双向DC/DC变换器和直流母线相连，大电网通过双向AC/DC变换器和直流母线相连，能量管理器一方面可通过控制网络和各变换器通信，另一方面可通过通信网络和大电网电力调度中心通信。除固定的交直流负载外，系统配置有可调的交直流负载。

连接光伏阵列和直流母线之间的DC/DC变换器，根据实际需要，可是Boost变换器或Buck变换器等。为保证在弱光等情况下仍能电能输入到直流母线上，一般可采用Boost变换器。文献[9]通过分析表明，光伏阵列端电压和占空比之间具有简单函数关系。因此，可通过控制占空比来改变光伏阵列的工作点。

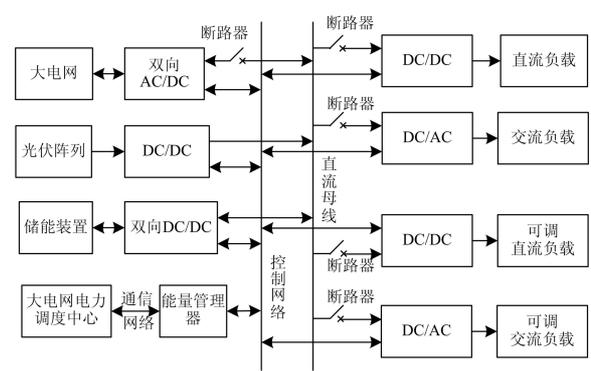


图1 基于光伏发电的直流微电网

Fig. 1 DC microgrid based on PV generation

2 光伏发电系统接入直流微电网的模式

2.1 最大功率点跟踪控制模式

目前，已有多种最大功率点跟踪控制算法^[10-14]，其中扰动观察法是一种比较成熟的最大功率点跟踪控制方法，在固定步长的扰动观察法中，快速性和稳定性是一对矛盾。步长大时跟踪速度快，但稳态振荡大；步长小时跟踪速度慢，但稳态振荡小。在固定步长的电导增量法中同样存在这样的问题，为此，本文采取一种变步长的扰动观察法，其算法流程图如图2所示。定义系统在 K 时刻光伏阵列的输出电压及输出电流分别为 $V(K)$ 和 $I(K)$ ，计算当前光伏阵列的输出功率 $P(K)$ ，求出相对上一时刻的增

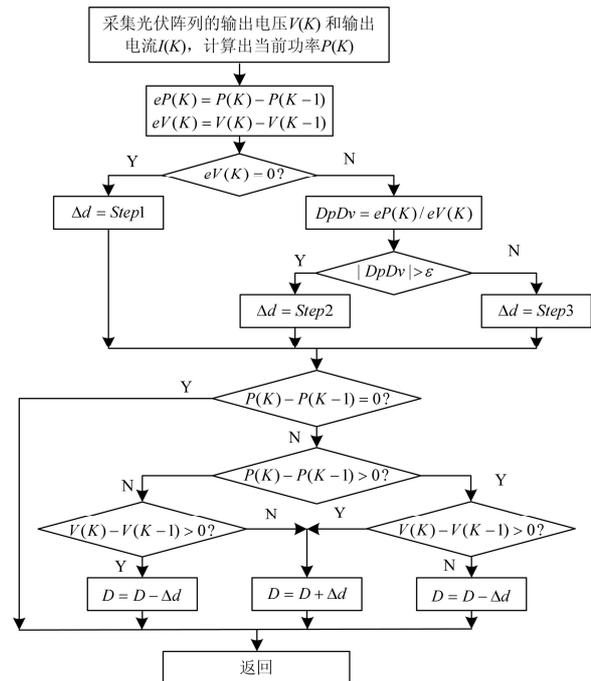


图2 MPPT控制模式控制算法流程图

Fig. 2 Flowchart of MPPT control mode control algorithm

量 $eP(K)$ 和 $eV(K)$ 。依据在最大功率点处, 功率对电压的倒数为0, 当 $eV(K)=0$ 时, 取扰动步长为 $Step1$, 这种情况一般较少出现, 可以选择较小的步长, 否则计算 $DpDv = eP(K)/eV(K)$ 的值, 当 $|DpDv| > \varepsilon$ 时, 表明光伏的工作点离最大功率点较远, 可以采取较大的扰动步长 $Step2$, 否则, 表明工作点较靠近最大功率点, 选取较小的扰动步长 $Step3$ 。当然, 可以对 $DpDv$ 的值进一步进行细分, 选择相应的扰动步长。确定扰动步长后, 执行扰动观察法。

2.2 恒压模式

在直流微电网的有些运行模式下, 如孤岛模式下, 储能装置已满, 光伏阵列的最大输出功率大于负载需求时, 可用光伏阵列控制直流母线电压, 工作于恒压模式。其算法流程图如图3所示, 定义系统在 K 时刻光伏阵列的输出电压及输出电流分别为 $V(K)$ 和 $I(K)$, 计算当前光伏阵列的输出功率 $P(K)$, 直流母线电压采样值为 $V_{DC}(K)$; 求出直流母线电压参考值 $V_{ref}(K)$ 和直流母线电压采样值 $V_{DC}(K)$ 的差值 $eV(K)$; 采用PI控制计算出占空比增量 Δd ; 比较 K 时刻光伏阵列的输出功率 $P(K)$ 和 $K-1$ 时刻光伏阵列的输出功率 $P(K-1)$, 如果 $P(K)$ 大, 表明光伏阵列仍有镇定直流母线电压的能力, 输出经过PI控制计算的占空比; 反之, 当判断出 $eV(K)$ 和 $eV(K-1)$ 均大于阈值 ε 时, 修改模式变量为1, 光伏发电系统返回到最大功率点跟踪模式运行, 同时通过控制网络通知能量管理器。

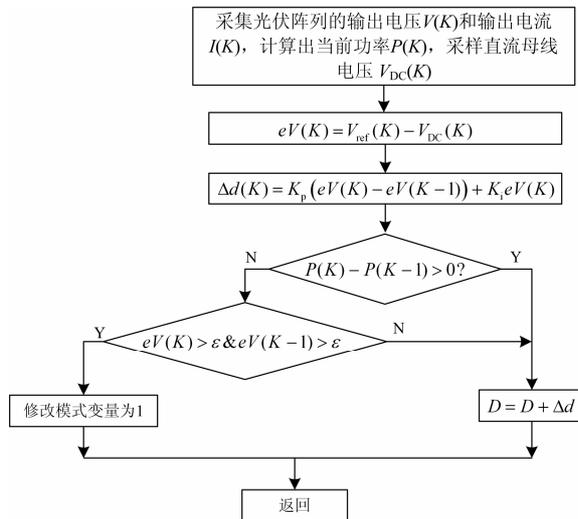


图3 恒压模式控制算法流程图

Fig. 3 Flowchart of constant voltage mode control algorithm

2.3 恒功率模式

在直流微电网中, 如采用功率平衡调度, 有些模式下可能需要光伏输出一个小于其最大输出功率的定功率。此时, 光伏阵列输出一个恒定的功率, 工作于恒功率模式。其算法流程图如图4所示, 定义系统在 K 时刻光伏阵列的输出电压及输出电流分别为 $V(K)$ 和 $I(K)$, 计算当前光伏阵列的输出功率 $P(K)$; 因通过变换器并入直流母线时, 存在功率的断续, 可通过低通滤波器滤除高频部分, 采样经低通滤波后并入直流母线的功率 $P_{DC}(K)$, 求出光伏发电系统并入直流母线功率期望值 $P_{ref}(K)$ 和实际并入功率采样值 $P_{DC}(K)$ 的差值 $eP(K)$; 采用PI控制计算出占空比增量 Δd ; 比较 K 时刻光伏阵列的输出功率 $P(K)$ 和 $K-1$ 时刻光伏阵列的输出功率 $P(K-1)$, 如果 $P(K)$ 大, 表明光伏阵列仍有输出功率期望值的能力, 输出经过PI控制计算的占空比; 反之, 当判断出 $eP(K)$ 和 $eP(K-1)$ 均大于阈值 ε 时, 修改模式变量为1, 光伏发电系统返回到最大功率点跟踪模式运行, 同时通过控制网络通知能量管理器。稳态时, 因为光伏阵列的输出功率与并入直流母线的实际功率之间存在一个效率的问题, 也可以直接以光伏阵列的输出功率为控制目标。

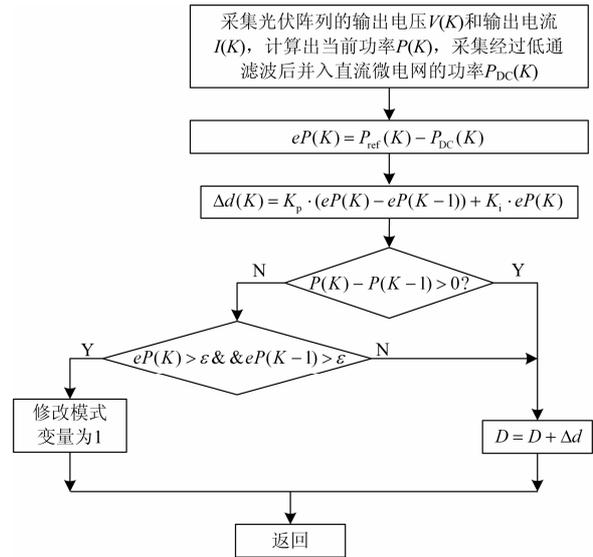


图4 恒功率模式控制算法流程图

Fig. 4 Flowchart of constant power mode control algorithm

3 仿真研究

为了验证所提出方法的有效性, 在PSIM软件中对该方法进行了仿真。光伏阵列采用PSIM自带的物理模型, 60块光伏阵列进行串并联, 在标准测试条件下, 串并联的光伏阵列最大输出功率为3.6 kW, 最大功率点输出电压为200 V, 最大功率点输出电流

为18 A。直流母线电压期望值为400 V，光伏阵列和直流母线之间采用Boost变换器连接。

在进行MPPT模式仿真时，采用 $400 + 10\sin\omega t$ 的电压源模拟直流母线上的电压，因为对直流微电网上的交流负载供电，经过逆变后在直流侧会产生2倍频的波动^[15]，故 ω 可选为 628 rad/s。光强在0.4 s时从1 000 W/m²跃变到700 W/m²，在0.7 s时从700 W/m²变回到1 000 W/m²。最大功率点跟踪模式的仿真结果如图5所示。

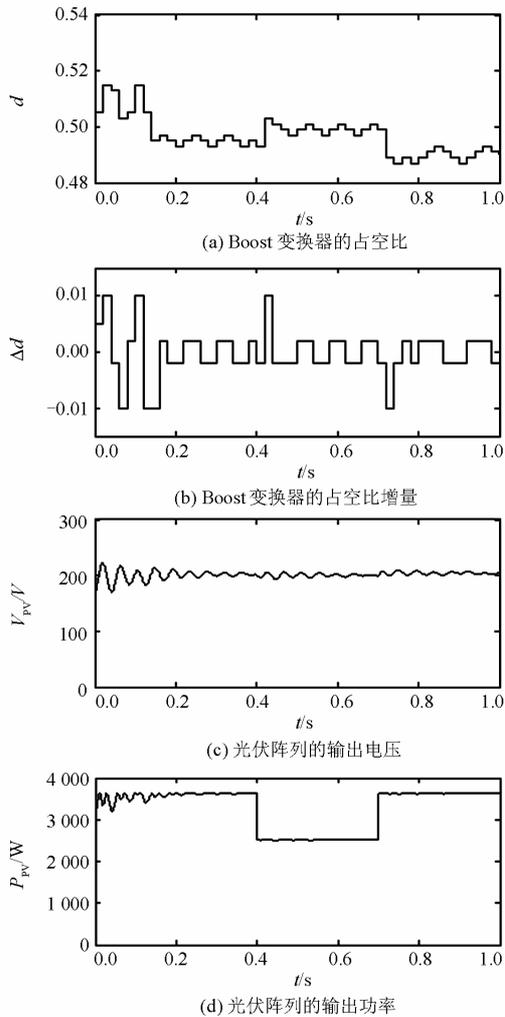


图5 MPPT控制模式仿真波形

Fig. 5 Simulative waveform of MPPT control mode

从图5(a)和图5(b)可以看出，占空比在启动段和光强变化时变化较大，正常时执行小步长的扰动，图5(c)中光伏阵列的工作点电压都在200 V左右，表明系统工作点一直在最大功率点附近。图5(d)中光伏的输出功率也可以看出这一点。

在恒压模式下，因为直流母线上的电压由光伏发电系统控制，采用阻性负载模拟直流微电网上的

负载，直流母线电压为额定值时，消耗的功率为2 500 W。光强在0.5 s时从1 000 W/m²跃变到800 W/m²，在1 s时从800 W/m²变回到1 000 W/m²。能镇定直流母线电压的恒压模式仿真结果如图6所示。

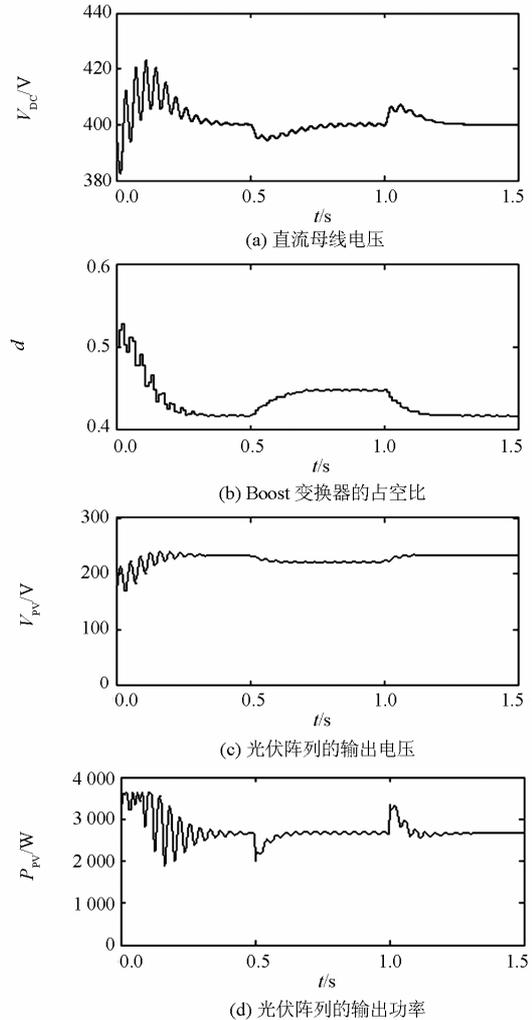


图6 能保持直流母线电压稳定的恒压模式仿真波形

Fig. 6 Simulative waveform of constant voltage mode when the DC bus voltage can be stabilized

从图6(a)可以看出，经过0.3 s启动后，在光强变动较小的情况下，光强减小后其输出的最大功率仍然大于负载需求，直流母线电压一直稳定在400 V左右。图6(b)中变换器的占空比在启动和光强变化时变化较大。图6(c)中光伏阵列的输出电压始终大于200 V，在光强降低后，光伏阵列的工作点发生变化，进一步靠近200 V的最大功率点。图6(d)中光伏阵列的输出功率稳态时维持在2 500 W左右。

在恒压模式下，直流母线电压为额定值时，消耗的功率为2 500 W/m²。光强在1 s时从1 000 W/m²跃变到500 W/m²，在2 s时从500 W/m²变回到1 000 W/m²。不能镇定直流母线电压的恒压模式仿真结果

如图7所示。

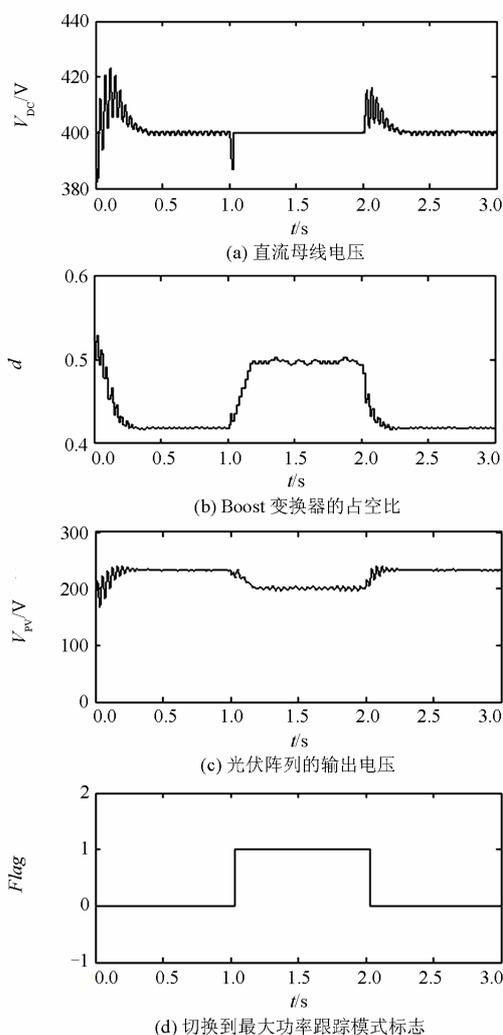


图7 不能保持直流母线电压稳定的恒压模式仿真波形

Fig. 7 Simulative waveform of constant voltage mode when the DC bus voltage can not be stabilized

从图7(a)可以看出, 经过启动后, 直流母线电压稳定在400 V, 在1 s时光强变小后, 虽然在PI控制下调整图7(b)中的占空比试图稳定直流母线电压, 图7(c)中的光伏阵列输出电压不断降低, 但由于负载需求已大于光伏发电系统的最大输出功率, 导致直流母线电压不断跌落, 低于规定阈值后, 将图7(d)中的 F_{lag} 标志置1, 通知能量管理器, 将光伏发电系统切换到最大功率跟踪模式, 此时能量管理器通过储能装置调度或负荷调度镇定直流母线电压。若此时别的部分没有启动, 其直流母线电压变化如图7(a)所示, 光伏发电系统的工作点调整到200 V左右, 实现最大功率点跟踪。在2 s时光强变大后, 可以重回恒压模式。

在恒功率模式下, 采用电阻负载来模拟并入直

流微电网的情况, 直流母线电压为额定值时, 消耗的功率为2 500 W。光强在1 s时从1 000 W/m^2 跃变到800 W/m^2 , 在2 s时从800 W/m^2 变回到1 000 W/m^2 。能保持输出功率稳定的恒功率模式仿真结果如图8所示。

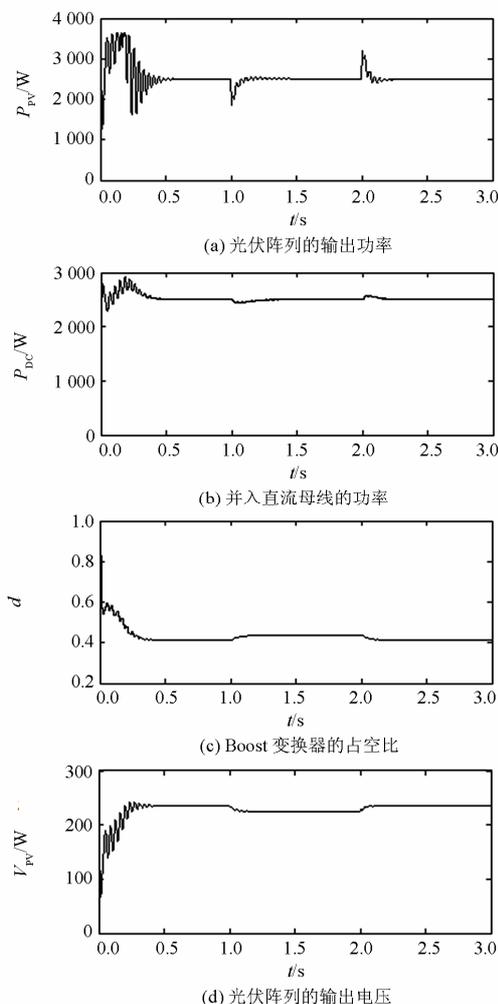


图8 能保持输出功率稳定的恒功率模式仿真波形

Fig. 8 Simulative waveform of constant power mode when the output power can be stabilized

从图8(a)和图8(b)可以看出, 经过0.5 s启动后, 在光强变动较小的情况下, 光强减小后其输出的最大功率仍然大于输出期望值, 并入直流母线的功率一直稳定在2 500 W左右, 图8(c)中, 在光强降低后, 占空比增加, 光伏阵列的工作点发生变化, 图8(d)中光伏阵列的输出电压进一步靠近200 V的最大功率点。

在恒功率模式下, 采用电阻负载来模拟并入直

500 W/m², 在2 s时从500 W/m²变回到1 000 W/m²。不能保持输出功率稳定情况下的恒功率模式仿真结果如图9所示。

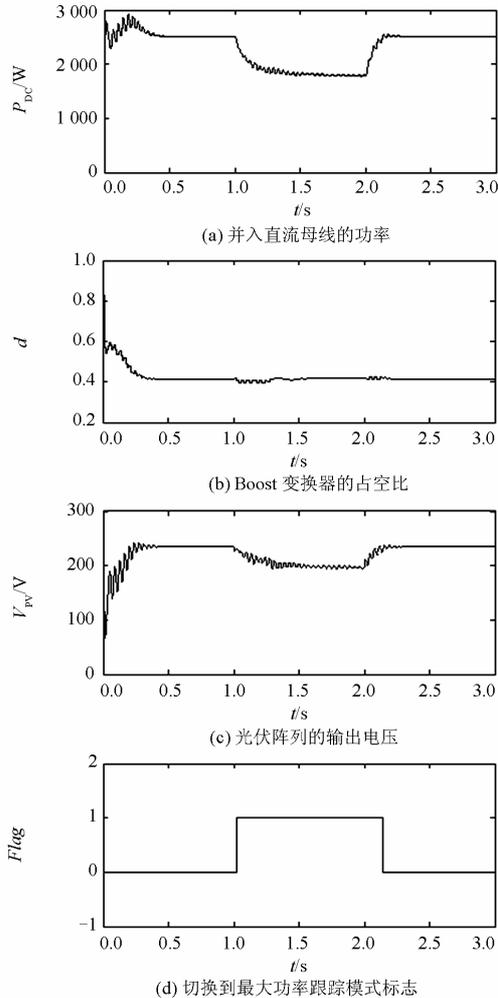


图9 不能保持输出功率稳定的恒功率模式仿真波形

Fig. 9 Simulative waveform of constant power mode when the output power can not be stabilized

从图9(a)可以看出, 经过启动后, 并入直流母线的功率稳定在2 500 W, 在1 s时光强变小后, 虽然在PI控制下调整图9(b)中的占空比试图稳定输出功率, 图9(c)中的光伏阵列输出电压不断降低, 但由于输出功率期望值已大于光伏发电系统的最大输出功率, 导致输出功率不断跌落, 低于规定阈值后, 将图9(d)中的Flag标志置1, 通知能量管理器, 将光伏发电系统切换到最大功率跟踪模式, 光伏发电系统的工作点调整到200 V左右, 实现最大功率点跟踪。在2 s时光强变大后, 可以重回恒功率模式。

4 结论

本文提出了光伏发电系统多模式接入直流微

电网及其控制方法, 采用变步长的扰动观察法实现最大功率点跟踪控制, 采用PI控制实现恒压控制或恒功率控制, 光伏发电系统接收能量管理器的命令, 在三种模式之间切换, 在不能实现恒压或恒功率时, 返回到最大功率点跟踪控制模式, 并通知能量管理器, 由能量管理器对直流微电网的其他部分进行调度来镇定直流母线电压。从而使光伏发电系统对整个直流微电网的能量管理器来说是一个受限可控源, 有助于直流微电网的稳定运行。

参考文献

- [1] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6.
DING Ming, LIN Gen-de, CHEN Zi-nian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.
- [2] 王成山, 杨占刚, 王守相, 等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 99-105.
WANG Cheng-shan, YANG Zhan-gang, WANG Shou-xiang, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 99-105.
- [3] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC micro-grid for super high quality distribution[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [4] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 248-254.
ZHANG Li, SUN Kai, WU Tian-jin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.
- [5] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106.
WU Wei-min, HE Yuan-bin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.
- [6] CHANG Y C, LIAW C M. Establishment of a switched-reluctance generator-based common DC microgrid system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(9): 2512-2527.
- [7] ZHOU T, FRANCOIS B. Energy management and power

- control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 95-104.
- [8] SALOMONSSON D, SODER L, SANNINO A. An adaptive control system for a DC microgrid for data centers[J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 2008, 44(6): 1910-1917.
- [9] 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 Jian-hua, GAO Hou-lei, et al. MPPT of photovoltaic generation for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 90-93.
- [10] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于扰动观察和二次插值的光伏发电最大功率跟踪控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 62-67.
QIU Pei-chun, GE Bao-ming, BI Da-qiang. MPPT control for PV power generation system based on P&O algorithms and quadratic interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 62-67.
- [11] 何人望, 邱万英, 吴迅, 等. 基于 PSIM 的新型扰动观察法的 MPPT 仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 56-59.
HE Ren-wang, QIU Wan-ying, WU Xun, et al. Simulation study of new perturbation and observation method in MPPT based on PSIM[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 56-59.
- [12] 胡义华, 陈昊, 徐瑞东, 等. 一种两阶段变步长最大功率点控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 161-166.
HU Yi-hua, CHEN Hao, XU Rui-dong, et al. A two stage variable step-size maximum power point tracking control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 161-166.
- [13] 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.
XIONG Yuan-sheng, YU Li, XU Jian-ming. MPPT control of photovoltaic generation system combining constant voltage method with perturb-observe method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 85-88.
- [14] 高志强, 王建曠, 纪延超, 等. 一种快速的光伏最大功率点跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 105-109.
GAO Zhi-qiang, WANG Jian-ze, JI Yan-chao, et al. A fast method of maximum power point tracking for PV[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 105-109.
- [15] 刘邦银, 段善旭, 康勇. 单相单级并网光伏发电系统中二次功率扰动的分析与抑制[J]. 太阳能学报, 2008, 29(4): 407-411.
LIU Bang-yin, DUAN Shan-xu, KANG Yong. Analysis and suppression of the second power disturbance in single-phase single-stage photovoltaic grid-connected generation system[J]. Acta Energetica Sinica, 2008, 29(4): 407-411.

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2013-10-21

作者简介:

熊远生(1979-), 男, 博士后, 副教授, 主要研究方向为风光发电及控制; E-mail: xiongyuansheng@163.com

俞立(1961-), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为鲁棒控制、网络控制等;

徐建明(1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向鲁棒控制、PID控制等。