

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416870

统一并离网模式的串联光伏直流微网控制策略^{*}

程易楠 罗朝旭 禹康 曹云洲

(湖南工业大学电气与信息工程学院 株洲 412007)

摘要: 针对传统控制策略下的并离网模式切换时会出现电压波动大和切换时间长,并联型结构接入中高压电网时需要升压等问题,提出一种统一并离网模式的串联光伏直流微网控制策略。首先建立了串联光伏系统的并离网结构模型。其次利用下垂控制和PI控制对直流母线电压进行调控,通过参考功率以及最大输出功率的差值来进行并离网模式的统一,实现切换过程中母线电压稳定和最大功率跟踪。最后利用小信号法分析证明了系统的稳定性,并通过实验结果验证了所提控制策略的可行性和稳定性。

关键词: 直流微电网;串联;最大功率点跟踪;母线电压稳定;分布式控制

中图分类号: TN464 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Distributed control strategy for photovoltaic DC microgrid in unified on-grid and off-grid mode

Cheng Yinan Luo Zhaoxu Yu Kang Cao Yunzhou

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: In order to solve the problems of large voltage fluctuation and long switching time when switching between grid-connected and off-grid modes under the traditional control strategy, and the need to boost the voltage when the parallel structure is connected to the medium and high voltage power grid, a series photovoltaic DC microgrid control strategy with unified grid-connected mode was proposed. Firstly, the on-grid and off-grid structure model of the tandem photovoltaic system is established. Secondly, the DC bus voltage is regulated by droop control and PI control, and the on-grid and off-grid mode is unified through the difference between the reference power and the maximum output power, so as to realize the bus voltage stability and maximum power tracking during the switching process. Finally, the stability of the system is proved by the small signal method, and the feasibility and stability of the proposed control strategy are verified by experimental results.

Keywords: dc microgrid; in series; maximum power point tracking; bus voltage stability; distributed control

0 引言

随着国家双碳政策的提出和能源紧张问题,以清洁能源为主的分布式电源有了广阔的前景。而微电网作为一种能够有效结合分布式电源、负载和变换器的小型系统,由于它的灵活性和多样性得到了规模化的应用^[1-3]。直流微电网与交流微电网比较来说,具有成本低、实施性广、系统较简单等优势,因此它的研究和发展受到了学术界的广泛关注^[4-5]。如今串联微电网作为一种逐渐兴起的微电网方式,对于并离网模式的控制运行也有了一定的研究。但是早期主要采用的是集中式控制架构,非常依赖高带宽通信和集中控制器,当通信网络发生故障时,系统将无法正常的运行

下去,降低了系统的可靠性和扩展性^[6-7]。

针对光伏直流微网系统的多工作模式控制,国内外学者们展开了研究。文献[8]利用无储能光伏逆变器多模态控制策略,在失去电网信号后从电流型控制转至离网的电压型控制。文献[9]将光伏和储能组成一个混合单元,在不依赖通信的情况下完成模式的切换,但是直流母线电压仍由储能进行维持稳定。文献[10]提出基于滑模控制的直流微网切换策略,但是伴随着工作模式的硬切换仍会导致母线电压的波动。文献[11]提出一种统一并离网模式的光伏系统控制策略,将光伏曲线的导数值 dp/dv (p 为光伏的输出功率, v 为光伏的输出电压)作为控制量来统一两种工作模式,但是计算方法过于复杂。文献[12]提出了一种光伏

收稿日期:2024-09-11

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52207205)、湖南省教育厅优秀青年项目(22B0563)资助

最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式和电压控制模式的切换算法,但是只考虑了单个光伏逆变器,具有局限性。后来有些学者对串联式光伏直流微网进行了研究,文献[13]提出一种统一并离网模式的串联型双层分布式控制,虽然可以实现并离网模式的平滑切换,但是需要分层进行,增加了系统的复杂性。文献[14]利用串联型 MPPT 分布式架构进行不同模式的平滑切换,提高了光伏输出功率且不依赖通信,但是没有考虑系统切换工况时的延迟带来的影响。

本文针对以上的问题提出一种统一型并离网模式的串联型光伏直流微网控制策略,首先建立了串联型光伏的并离网等效模型,并设计了控制系统达到对直流母线电压的控制和调节。然后提出了功率跟踪函数,通过比较参考功率和光伏输出功率的大小来进行工作模式的统一,避免了模式切换带来的电压冲击,同时不依赖通信作用。最后仿真和实验结果验证了所提控制策略的正确性和有效性。

1 串联型光伏直流微电网的并离网模式结构与控制策略

1.1 串联型光伏直流微电网的结构

如图1所示为串联直流微网的等效模型示意图。由多台直流光伏电源,直流-直流(direct current, DC/DC)变换器,负载串联组成, U_n 为输出电容电压, U_g 为电网电压,将静态开关闭合与关断,进行并离网模式的运行。

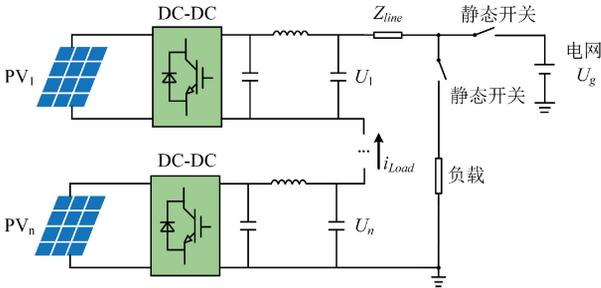


图1 串联型直流微电网的等效模型

Fig. 1 Equivalent model of a series DC microgrid

1.2 统一型并离网模式控制策略

本文采用的直流光伏电源变换器的结构图和控制策略如图2所示。光伏电源连接DC/DC变换器,采用升压(Boost)电路输入到直流母线中。 v_{pv} 、 i_{pv} 为光伏电源两端的电压和输出电流, v_{dc} 、 i_{Load} 为直流母线电压和母线上的电流, Z_{line} 为端线阻抗, d 为占空比, Q_2 为开关。通过下垂控制环、母线电压调节控制环以及功率追踪环实现MPPT以及直流母线电压下垂控制。

母线电压下垂控制环节。传统的电压-电流控制器采取引入虚拟阻抗的方式来修正线路阻抗,提高各光伏电源的均流效果。下垂方程可以表示为:

$$v_{dc}^{ref} = v_{dc}^* - m_n i_{Load} \quad (1)$$

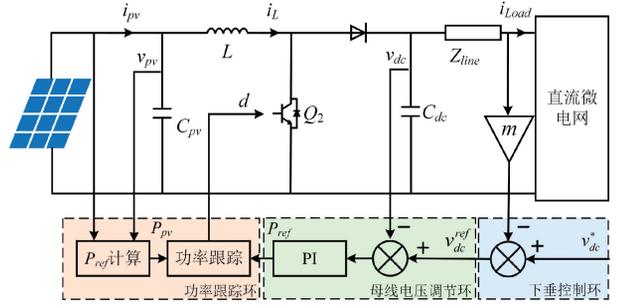


图2 光伏电源变换器的结构和控制策略示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure and control strategy of the photovoltaic power converter

式中: v_{dc}^{ref} 是Boost变换器输出的参考电压, v_{dc}^* 是母线电压额定值, m_n 为第 n 台光伏电源的下垂系数, i_{Load} 为母线电流。

母线电压调节控制环。下垂控制环输出的电压 v_{dc}^{ref} 通过比例积分控制器(proportional integral, PI),控制器的目的是稳定母线电压使得此时的电压等于参考电压,且控制器输出的为光伏电源的参考功率 P_{ref} ,参考功率的范围为 $0 \leq P_{ref} \leq P_{max}$ 。

功率跟踪环节。因为传统扰动观察法响应速度慢,功率波容易振荡等问题,本文在基于扰动法的占空比寻优跟踪方法,具体为通过寻优调节Boost电路输出的占空比使得实际阻抗与光伏阵列的阻抗相匹配,实现最大功率跟踪^[15],根据固定占空比的功率-占空比特性曲线,通过调节占空比 d 进行最优寻迹,提出跟踪函数为:

$$\Delta P = |P_{pv} - P_{ref}| \quad (2)$$

参考功率 $P_{ref} \geq P_{MPPT}$ 时, $\Delta P = P_{ref} - P_{MPPT}$,此时 $P_{pv} = P_{MPPT}$,系统工作在MPPT模式;当 $P_{ref} < P_{MPPT}$ 时, $P_{pv} = P_{ref}$,系统工作在母线电压控制模式;控制器采用一个控制结构完成了两种模式的统一。

占空比寻优跟踪方法的流程图如图3所示, K 为迭代次数。

2 系统的小信号建模

根据图2所示的电路结构,为了滤除电感电容的高频谐波突出低频谐波,采用在一个周期内的平均代替实际值进行建模,公式为:

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{pv} - (1-d)v_{dc} \quad (3)$$

$$C_{pv} \frac{dv_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_{Load} \quad (4)$$

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = i_L(1-d) - i_{Load} \quad (5)$$

式中: L 是电感, i_L 是电感电流, d 是占空比, v_{dc} 是输出电压; C_{pv} 、 C_{dc} 为变换器的输入电容和输出电容。

Boost变换器的小信号模型的建立是基于工作在稳定

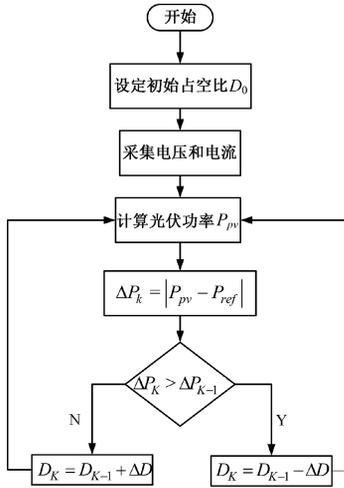


图 3 基于占空比寻优的功率跟踪流程图

Fig. 3 Power tracking flow chart based on duty cycle optimization

工作点时引入小信号扰动且用 \hat{a} 表示扰动,公式为:

$$L \frac{d\hat{i}_L}{dt} = \hat{v}_{pv} - (1-D)\hat{v}_{dc} + V_{dc}\hat{d} \quad (6)$$

$$C_{pv} \frac{d\hat{v}_{pv}}{dt} = \hat{i}_{pv} - \hat{i}_{Load} \quad (7)$$

$$C_{dc} \frac{d\hat{v}_{dc}}{dt} = \hat{i}_L(1-D) - I_L\hat{d} - \hat{i}_{Load} \quad (8)$$

式中: V_{dc} 和 I_L 为直流母线电压以及电感电流的稳态值。

在光伏阵列的电流-电压曲线的切线处使用小信号分析法可以得到电流 i_{pv} 的扰动式可表达成:

$$\hat{i}_{pv} = K_{pv}\hat{v}_{pv} \quad (9)$$

其中,根据文献[16]提出的建模设计得:

$$i_{pv} = N_p I_{sc,n} \left[1 - \exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s a V_t} - \frac{V_{oc,n}}{a V_t}\right) \right] \quad (10)$$

$$K_{pv} = \frac{N_p I_{sc,n}}{\left[\exp(V_{oc,n}/aV_t) - 1 \right] a N_s V_t} \exp\left(\frac{V_{pv}}{a N_s V_t}\right) \quad (11)$$

式中: N_p 和 N_s 为光伏阵列按串并联数量要求的光伏板数量, $I_{sc,n}$ 和 $V_{oc,n}$ 为正常运行状态下的短路电流和开路电压, a 为等效二极管的理想参数, V_t 为光伏板的热电压以及 K_{pv} 是运行时曲线上的某点的斜率。

对式(6)~(9)进行拉普拉斯变换,可以得到:

$$sL I_L(s) = V_{pv}(s) - (1-D)V_{dc}(s) + V_{dc}d(s) \quad (12)$$

$$sC_{pv} V_{pv}(s) = I_{pv}(s) - I_{Load}(s) \quad (13)$$

$$sC_{dc} V_{dc}(s) = (1-D)I_L(s) - I_L d(s) - I_{Load}(s) \quad (14)$$

$$I_{pv}(s) = K_{pv} V_{pv}(s) \quad (15)$$

首先将式(15)代入式(13)中,可以得到:

$$sC_{pv} V_{pv}(s) = K_{pv} V_{pv}(s) - I_{Load}(s) \quad (16)$$

在功率跟踪环节过程中, v_{dc} 保持恒定(因为外环带宽远小于内环),则可得到:

$$I_{Load}(s) = (1-D)I_L(s) - I_L d(s) \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)中得到

$$sC_{pv} V_{pv}(s) = K_{pv} V_{pv}(s) - (1-D)I_L(s) + I_L d(s) \quad (18)$$

将式(18)两边乘以 sL 再将式(12)代入,可推出占空比 d 到光伏阵列电压 v_{pv} 的传递函数 $G(s)$ 为:

$$G(s) = \frac{\hat{v}_{pv}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{LsI_L - V_{dc}}{LC_{pv}gs^2 - K_{pv}Ls + 1 - D} \quad (19)$$

3 系统运行模式分析

在并网运行模式中,为了使光伏电源能够工作在 MPPT 模式,由式(1)可知下垂控制环节中的母线电压的最小值可以表示成:

$$v_{dc_min}^{ref} = v_{dc}^* - m_n i_{Load_max} \quad (20)$$

假定光伏电压的最大输出电流 i_{Load_max} 和每台下垂控制器的控制系数已知,若将 $v_{ref_dc_min}$ 设计成比直流母线电压高一点的值,那么运行中测得的母线电压就小于参考电压 v_{ref_dc} ,使得 PI 控制器输出的参考功率 P_{ref} 取得最大值,使得光伏系统工作在 MPPT 模式。

孤岛模式下,当负载的功率和光伏发出的功率不在平衡状态下,会出现以下 2 种工作情况:

如果负载功率小于光伏发出的功率,那么此时直流母线电压的稳定得不到维持,母线电压会升高超过参考值,此时通过控制器降低光伏输出功率达到平衡功率的目的来维持电压的稳定性;如果负载功率大于光伏发出的功率,那么此时母线电压会降低且可能会低于参考值故此时需要光伏电源工作在 MPPT 模式来达到功率平衡从而使电压升高直至稳定。

本文提出的控制策略在两种模式切换时不存在控制器结构的切换,两种模式的工作状态的统一切换是由功率跟踪环节中参考功率和光伏功率的差值决定的。

4 控制系统的稳定性分析

系统的控制框图如图 4 所示。对其进行小信号分析:

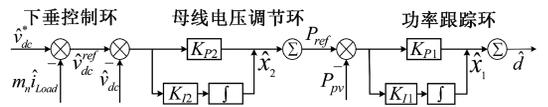


图 4 系统控制框图

Fig. 4 System control block diagram

下垂控制环节的小信号模型为:

$$\hat{v}_{dc}^{ref} = \hat{v}_{dc}^* - m_n \hat{i}_{Load} \quad (21)$$

功率跟踪环节的小信号模型为:

$$\hat{d} = (P_{ref} - P_{pv})K_{p1} + \hat{x}_1 \quad (22)$$

式中: K_{p1} 为外环 PI 控制器的比例增益, \hat{x}_1 为积分控制器输出的扰动增量。

\hat{x}_1 可以表示成:

$$\frac{d\hat{X}_1}{dt} = (P_{ref} - P_{pv})K_{I1} \quad (23)$$

其中, K_{I1} 为功率跟踪环节的积分增益。

母线电压调节控制环节的小信号模型可以表示为:

$$P_{ref} = (\hat{v}_{dc}^{ref} - \hat{v}_{dc})K_{P2} + \hat{X}_2 \quad (24)$$

式中: K_{P2} 为调压控制环节的增益, \hat{x}_2 为外环控制器输出的扰动惯量。

\hat{x}_2 可以表示成:

$$\frac{d\hat{X}_2}{dt} = (\hat{v}_{dc}^{ref} - \hat{v}_{dc})K_{I2} \quad (25)$$

其中, K_{I2} 为调压环节的积分增益。

结合式(6)、(7)、(8)、(17)、(19)和(20),并对他们应用拉普拉斯变换,可以得到整个系统的状态方程:

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$X = [\hat{X}_1, \hat{X}_2, \hat{V}_{dc}, \hat{i}_L, \hat{i}_{pv}]^T$$

$$U = [\hat{V}_{dc}^*, \hat{i}_{Load}]^T \quad (26)$$

式中: A 为系统矩阵, B 为输入矩阵。系统矩阵 A 具体为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & K_{I1} & -K_{I1}K_{P2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{I2} & 0 & 0 \\ \frac{V_{dc}}{L} & \frac{K_{P1}V_{dc}}{L} & \frac{-K_{P1}K_{P2}V_{dc} + D - 1}{L} & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{PV}}{C_{PV}} \\ -\frac{I_L}{C_{dc}} & -\frac{K_{P1} - I_L}{C_{dc}} & \frac{K_{P1}K_{P2}I_L}{C_{dc}} & \frac{1-D}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix}$$

本文采用的控制系统参数如表1所示。

表1 控制系统参数

Table 1 Control system parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
K_{P1}	0.001	K_{I1}	0.12
K_{P2}	10	K_{I2}	200
I_L	5 A	L	3 mH
V_{dc}	200 V	D	0.67

通过计算得到系统矩阵的特征值如表2所示。

表2 系统特征值

Table 2 System characteristic values

特征根	特征值
λ_1	$-6.0371 \times 10^{-17} + j5.8523 \times 10^{-9}$
λ_2	$-6.0371 \times 10^{-17} - j5.8523 \times 10^{-9}$
λ_3	-38.4158
λ_4	-108.6533
λ_5	-6.000

由表2可以看出,系统的全部特征值的实部为负数,则系统的全部特征值分布在复平面的左侧,由此可以判断系统在小信号扰动下可以稳定运行。

本系统采用了比例积分控制器,其控制参数在变化时可能会影响系统的特征值,甚至变化太大可能会导致特征值的实部为正数,使得系统失去稳定性。接下来分析其他参数不变的情况下,改变某一个控制参数对于系统稳定性的影响。

如图5所示,可以发现对于改变调压控制环节的参数,即改变 K_{P2} 和 K_{I2} 对于系统的稳定性几乎不会造成影响。将 K_{P2} 从初值10变化到40和80时, K_{I2} 从初值200变化到300和500时,系统的特征值仍分布在左侧,系统仍然稳定。

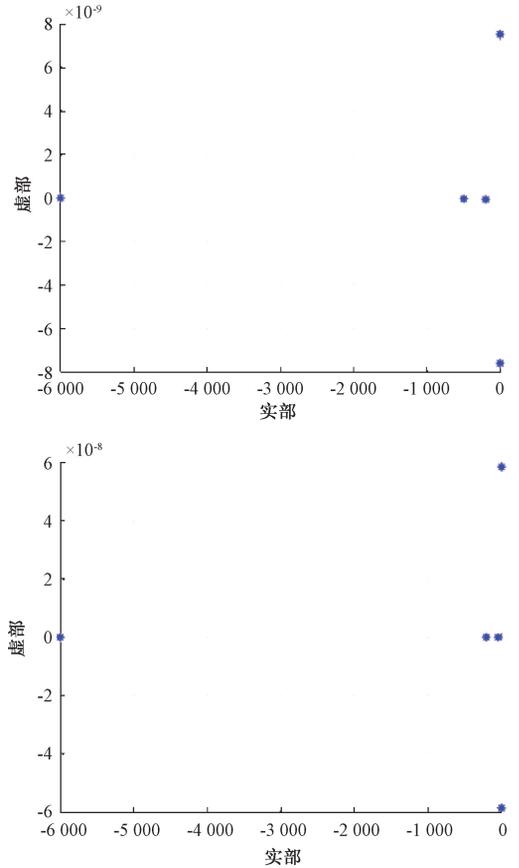


图5 变化 K_{P2} 和 K_{I2} 的特征值分布图

Fig. 5 Distribution of eigenvalues of K_{P2} and K_{I2}

如图6所示,可知 K_{P1} 从0.001变化到0.1和10,以及将 K_{I1} 从0.12变化到1.2和12时的特征值轨迹图,红色箭头代表特征值的变化趋势,可以看出改变功率跟踪环节的控制参数引起了特征值的变化非常明显,但是仍处于复平面的左侧,所以可以得出系统仍处于稳定运行状态。

5 系统的仿真与实验验证

5.1 仿真结果验证

为了验证本文所提出的控制策略的正确性和有效性在

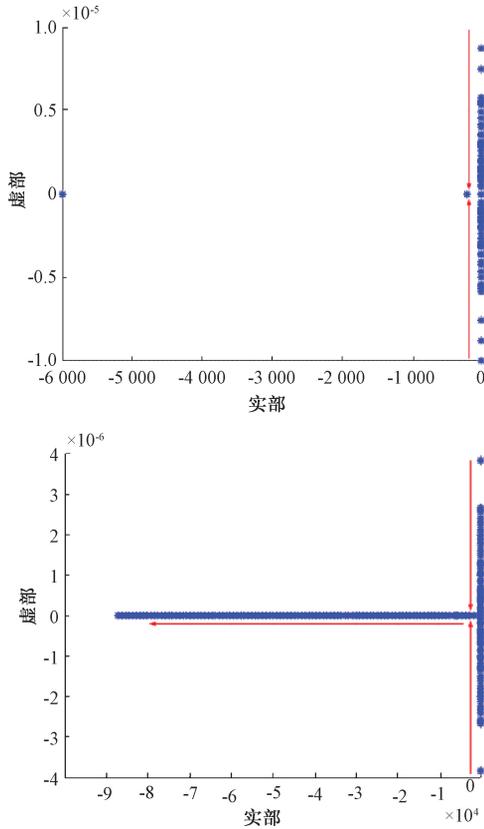


图 6 变化 K_{p1} 和 K_{I1} 的特征根轨迹图

Fig. 6 Characteristic root locus plot of K_{p1} and K_{I1}

MATLAB/SIMULINK 中基于图 1 的直流微电网结构搭建 3 个光伏单元进行仿真实验,相应的系统参数如表 3 所示。

表 3 系统仿真参数

Table 3 System simulation parameters

参数	数值	参数	数值
电感	3 mH	下垂参考电压	210 V
电容 C_{dc}	66 μ F	直流母线电压	200 V
电容 C_{pv}	40 μ F		0.24
线路阻抗	0.08 Ω	下垂系数 m	0.38
开关频率	6 kHz		0.40

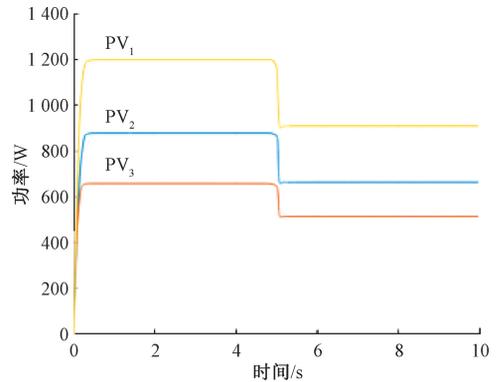
仿真采用的光伏组件电池是根据商业光伏电池 Canadian Solar CS5P-220M 建模,其在标准测试条件下(辐照度 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,环境温度 $25\ ^\circ\text{C}$)的参数表如表 4 所示。

如图 7 所示为并网模式切换至孤岛模式的光伏输出功率和母线电压波形图。仿真分为两个阶段:第 1 阶段 $0\sim 5\ \text{s}$,系统运行于并网状态;第 2 阶段 $5\sim 10\ \text{s}$,系统运行于离网状态。第 1 阶段微电网运行于并网模式,光伏电源工作在最大功率跟踪模式输出最大功率分别为 $1\ 200\ \text{W}$ 、 $880\ \text{W}$ 和 $660\ \text{W}$,母线电压为 $200\ \text{V}$ 。在第 2 阶段,系统进入孤岛

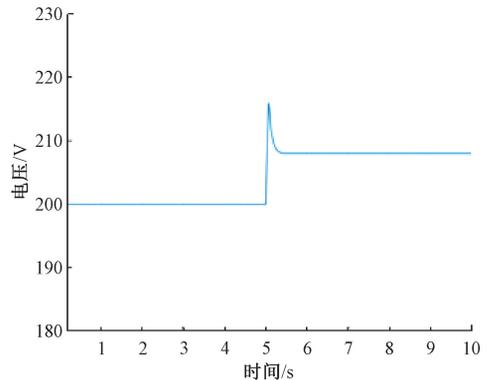
表 4 光伏面板参数

Table 4 Parameters of photovoltaic panel

参数	数值	参数	数值
	$1\ 200\ \text{W}$		$1/4$
P_{max}	$880\ \text{W}$	N_s/N_p	$1/3$
	$660\ \text{W}$		$2/3$
I_{sc}	$5.09\ \text{A}$	I_{mp}	$4.55\ \text{A}$
V_{mp}	$48.6\ \text{V}$	V_{oc}	$59.4\ \text{V}$



(a) 并网切换至离网的光伏输出功率
(a) pV output power from on-grid to off-grid



(b) 并网切换至离网的直流母线电压
(b) Switch from grid to off-grid DC bus voltage

图 7 并网模式切换至孤岛模式运行图

Fig. 7 Grid-connected mode switching to islanded mode operation diagram

运行状态,负载 $1\ 500\ \text{W}$,母线电压 $207\ \text{V}$,切换过程变化量仅为 3.5% ,调整时间仅为 $0.3\ \text{s}$ 。

如图 8 所示为孤岛模式切换至并网模式的光伏输出功率和母线电压波形图。将仿真分为两个阶段:第 1 阶段 $0\sim 5\ \text{s}$,系统运行于离网状态;第 2 阶段 $5\sim 10\ \text{s}$,系统运行于并网状态。在第 1 阶段,负载为 $1\ 500\ \text{W}$,而最大可用光伏功率为 $2\ 740\ \text{W}$,所以光伏电池需要减小出力以维持母线电压的稳定。在第 2 阶段,微电网从离网模式切换到了并网模式,此时系统运行于 MPPT 模式下。

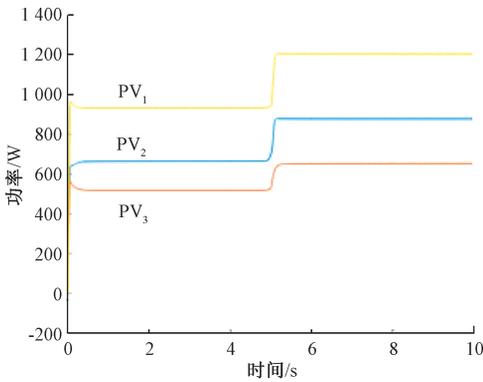
5.2 实验结果验证

为进一步验证本文所提出的控制策略的正确性和有效

表5 实验主要参数

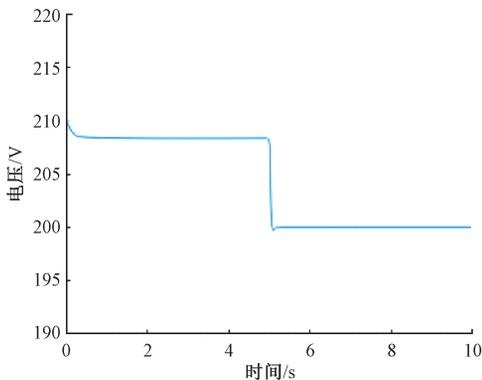
Table 5 The main parameters of the experiment

参数	数值	参数	数值
电感	5 mH	下垂参考电压	210 V
电容 C_{dc}	88 μ F	直流母线电压	200 V
电容 C_{pv}	56 μ F		0.25
线路阻抗	0.05 Ω	下垂系数 m	0.36
开关频率	10 kHz		0.41



(a) 离网切换至并网的光伏输出功率

(a) PV output power switched off-grid to on-grid



(b) 离网切换至并网的直流母线电压

(b) Off-grid switching to on-grid DC bus voltage

图8 孤岛模式切换至并网模式运行图

Fig. 8 Operating diagram of switching from islanding mode to grid-connected mode

性,在半实物仿真实验平台上进行硬件在环实验如图9所示,由主控计算机,示波器,驱动组成。



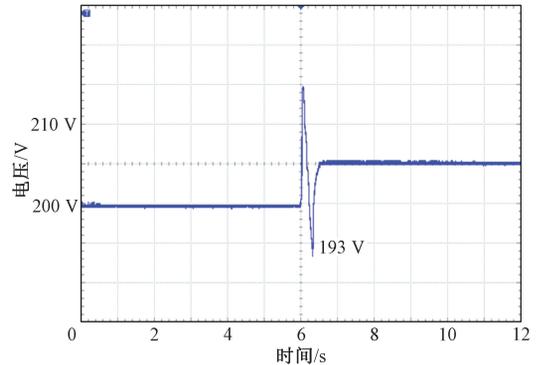
图9 控制策略实验平台

Fig. 9 Control strategy experimental platform

系统的实验参数如表5所示。

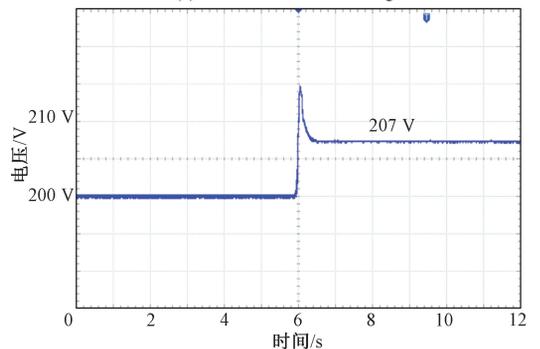
1) 与传统并网切换控制方法对比

系统运行过程中会出现并网模式的切换,此时会导致直流母线电压的波动。将传统的并网模式切换法与本文所提的方法进行对比,得到的结果如图10所示。



(a) 传统控制策略

(a) Traditional control strategies



(b) 所提控制策略

(b) The proposed control strategy

图10 不同控制方法下的直流母线电压

Fig. 10 DC bus voltage under different control methods

不难看出,传统的控制方法在切换过程中出现母线电压波动量为5.9%,以及调整时间为0.5 s;而提出的统一型并网模式的控制策略因为无需模式控制器的切换避免了在模式切换时产生的电压振荡,减少了调整的时间,且在模式改变过程中变化量仅为3.5%,调整时间仅为0.3 s。

2) 并网运行模式

如图11所示为并网运行下光伏输出功率图。运行过程中温度保持在25 $^{\circ}$ C,仅变化光伏电源所受到的光照强度。整个过程分为3个阶段,光照强度也变化3次:第1阶段,3个光伏的光照强度均处于300 W/m^2 。第2阶段:3个光伏单元的光照强度增长到500 W/m^2 。第3阶段:3个光伏单元的光照强度增长到1000 W/m^2 。

并网运行时,母线电压由后级逆变器维持,系统运行于MPPT模式下。第1阶段,光照强度为300 W/m^2 时3个

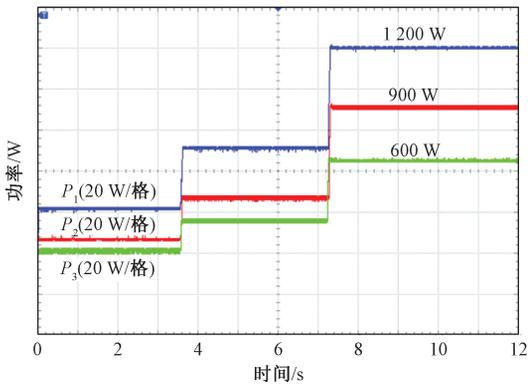


图 11 并网光伏输出功率图

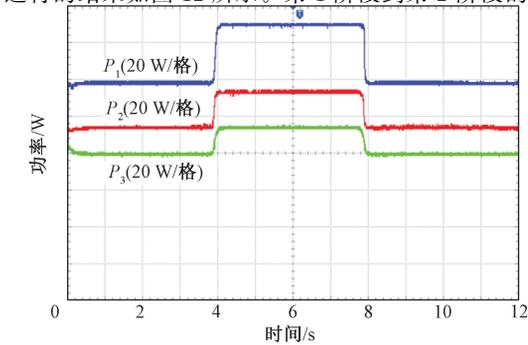
Fig. 11 Grid-connected PV output power diagram

光伏单元输出的功率分别为 414、278 和 215 W。第 2 阶段光照强度增长到 500 W/m^2 时,输出功率也升高至 761、489 和 369 W。第 3 阶段,光照强度增长到 1000 W/m^2 ,最终各单元稳定在 1 200、900、660 W。

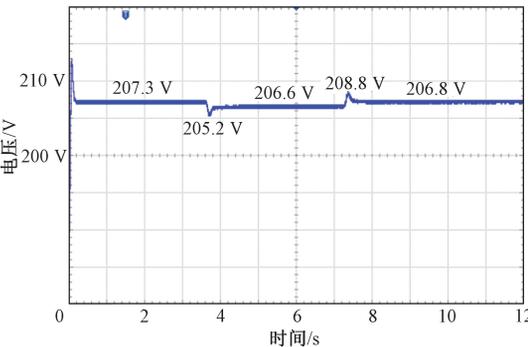
3) 孤岛运行模式

系统孤岛运行时,为了维持母线电压的稳定,则光伏电源作用且与负载匹配。整个实验过程分为 3 个阶段,具体过程如下:第 1 阶段:系统初始负载为 1 100 W。第 2 阶段负载升高至 1 600 W。第 3 阶段负载恢复 1 100 W。

运行的结果如图 12 所示。第 1 阶段到第 2 阶段的变化



(a) 孤岛模式下的光伏输出功率
(a) PV output power in islanding mode



(b) 孤岛模式下的直流母线电压
(b) DC bus voltage in islanding mode

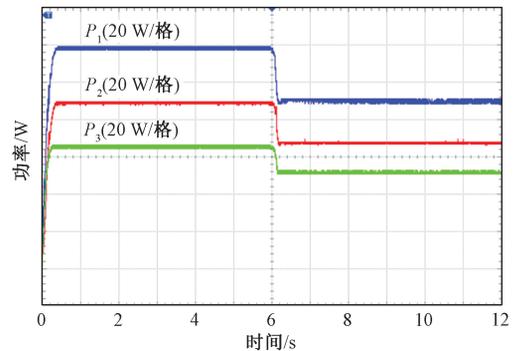
图 12 孤岛模式运行图

Fig. 12 Islanded operation diagram

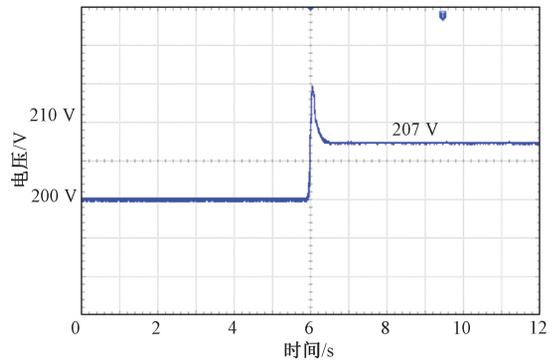
过程中,负载从 1 100 W 升高至 1 600 W,电压从 207.3 V 下降至 205.2 V,下降率为 1.01% 以及所需时间为 0.2 s 左右。第 3 阶段时,负载回到 1 100 W,在此变化过程中电压从 206.6 V 升高至 208.8 V,升高率为 1.06%,所需时间 0.2 s 左右。

4) 从并网模式切换至离网模式

如图 13 所示为并网切至离网的功率和电压波形。将实验分为两个阶段:第 1 阶段,微电网运行于并网模式,光伏电源工作在最大功率跟踪模式输出功率分别为 1 200、900 和 660 W,母线电压为 200 V。在第 2 阶段,系统进入孤岛模式运行,此时负载功率为 1 600 W,稳定母线电压为 207 V。通过统一并网离网控制,使得切换过程中电压波动较小以及用时时间较短,实现了并网切换至离网。



(a) 并网切换至离网的光伏输出功率
(a) PV output power from on-grid to off-grid



(b) 并网切换至离网的直流母线电压
(b) Switch from grid to off-grid DC bus voltage

图 13 并网模式切换至孤岛模式实验图

Fig. 13 Experimental diagram of switching from grid-connected mode to island-connected mode

5) 从离网模式切换至并网模式

将实验分为两个阶段:第 1 阶段,系统运行于离网状态;第 2 阶段,系统运行于并网状态。如图 14 所示为光伏输出功率和母线电压的实验波形。在第一阶段,负载为 1 600 W,而最大可用光伏功率为 2 760 W,所以需要降低光伏的输出功率,维持母线电压的稳定性。当离网切换至并网时,电压稳定至 200 V,光伏输出功率达到最大输出功率,此时运行在 MPPT 模式下,与仿真的运行结果吻合。

综上所述,实验与仿真结果与本文前面分析的吻合,验证了所提出的控制策略的正确性和有效性。

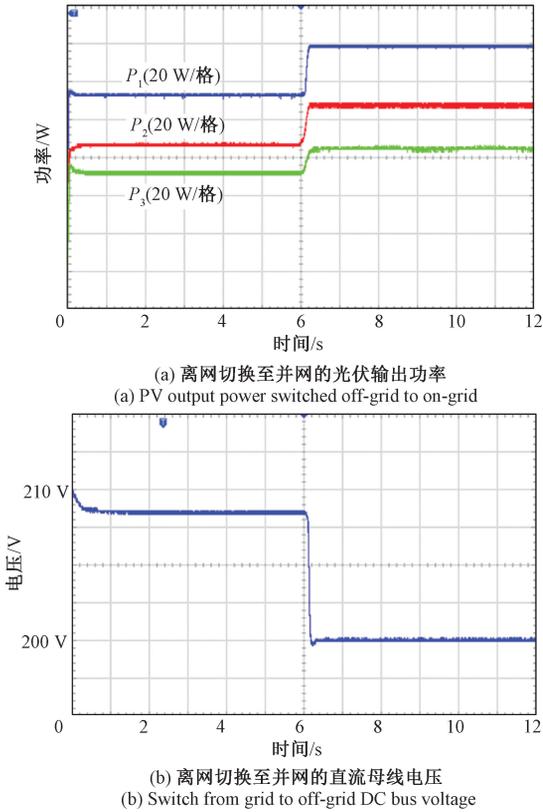


图14 孤岛模式切换至并网模式实验图

Fig. 14 Experimental diagram of switching from island mode to grid-connected mode

6 结 论

针对传统并离网控制策略的不足之处,本文提出了一种统一并离网模式的串联光伏直流微网的控制策略。具体为将下垂控制和PI控制结合对直流母线电压进行控制,根据比较参考功率和输出功率的大小进行并网与离网模式的切换。并网时实现每个单元独立实现最大功率跟踪,离网时可以稳定输出的母线电压,同时在并网模式切换时,减少了模式切换的时间,使得电压的超调量较低。

最后为了证明统一并离网的串联分布式控制的有效性,分别进行了仿真和半实物实验,尤其在实验中从并网、离网、并网切换至离网、离网切换至并网4个工作状态下进行验证。

参考文献

[1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG X F, SU J, LYU ZH P, et al. Survey of microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[2] 卢自宝,龚莉,赵传超,等.直流微电网中DC-DC变换器的切换控制方法研究[J].仪器仪表学报,2021,41(8):202-209.
LU Z B, GONG L, ZHAO CH CH, et al. Research on switching control method of DC-DC converter in DC microgrid [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 202-209.

[3] 肖先勇,郑子萱.“双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统:关键、技术与挑战[J].工程科学与技术,2022,54(1):47-59.
XIAO X Y, ZHENG Z X. New power system with new energy as the main body under the "dual carbon" goal: Contributions, key technologies and challenges [J]. Engineering Science and Technology, 2022, 54(1): 47-59.

[4] 朱晓荣,李铮,孟凡奇.基于不同网架结构的直流微电网稳定性分析[J].电工技术学报,2021,36(1):166-178.
ZHU X R, LI ZH, MENG F Q. Stability analysis of DC microgrid based on different grid structures [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 166-178.

[5] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
LI X L, GUO L, WANG CH SH, et al. A review of key technologies of DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.

[6] MORTEZAEI A, SIMÕES M G, BUBSHAIT A S, et al. Multifunctional control strategy for asymmetrical cascaded H-bridge inverter in microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 53(2): 1538-1551.

[7] YU Y, KONSTANTINOU G, HREDZAK B, et al. Power balance of cascaded H-bridge multilevel converters for large-scale photovoltaic integration [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(1): 292-303.

[8] 梁积峰,臧谦,姜玉洁,等.无储能光伏逆变器多模式运行与并离网切换策略研究[J].电工电能新技术,2023,42(7):39-47.
LIANG J F, ZANG Q, JIANG Y J, et al. Research on multi-modal operation and on-grid and off-grid switching strategy of non-energy storage photovoltaic inverter [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(7): 39-47.

[9] MAHMOOD H, MICHAELSON D, JIANG J. Decentralized power management of a PV/battery hybrid unit in a droop-controlled islanded microgrid [J]. IEEE

- Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (12): 7215-7229.
- [10] 郭洪智,张勤进,刘彦呈,等.基于滑模的直流微电网光伏系统无缝切换策略[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(8):13-20.
- GUO H ZH, ZHANG Q J, LIU Y CH, et al. Seamless switching strategy of DC microgrid PV system based on sliding mode[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2019, 31(8): 13-20.
- [11] CAI H, XIANG J, WEI W. Decentralized coordination control of multiple photovoltaic sources for DC bus voltage regulating and power sharing [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(7): 5601-5610.
- [12] PIEES V F, CORDEIRO A, FOITO D, et al. Control transition mode from voltage control to MPPT for PV generators in isolated DC microgrids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 137: 107876.
- [13] 李铁成,胡雪凯,侯小超,等.一种统一并网模式的串联型光伏微网分层分布式控制策略[J].电工电能新技术,2023,42(6):1-12.
- LI T CH, HU X K, HOU X CH, et al. A hierarchical distributed control strategy for tandem photovoltaic microgrid with unified on-grid and off-grid mode[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(6): 1-12.
- [14] 王红艳,周国华,徐顺刚,等.基于串联型分布式 MPPT 架构的直流微网系统无缝切换控制策略[J].电力自动化设备,2019,39(2):188-195,203.
- WANG H Y, ZHOU G H, XU SH G, et al. Seamless switching control strategy of DC microgrid system based on tandem distributed MPPT architecture[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 188-195,203.
- [15] 马刚,白凡,蒋林洳,等.基于自寻优先空比的光伏系统最大功率跟踪算法[J].可再生能源,2015,33(5):719-724.
- MA G, BAI F, JIANG L R, et al. Maximum power tracking algorithm for photovoltaic system based on self-seeking optimal duty cycle[J]. Renewable Energy, 2015, 33(5): 719-724.
- [16] 秦建衡,罗朝旭,刘洋.一种具有 MPPT 功能的光伏逆变器下垂控制方法[J].电源技术,2023,47(3):398-402.
- QIN J H, LUO ZH X, LIU Y. A photovoltaic inverter droop control method with MPPT function[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(3): 398-402.

作者简介

程易楠, 硕士研究生, 主要研究方向为直流微电网控制技术。

E-mail: 1292208861@qq.com

罗朝旭(通信作者), 博士, 副教授, 研究生导师, 主要研究方向为电力电子变换器建模与控制 and 先进电能质量控制。

E-mail: 14011@hut.edu.cn

禹康, 硕士研究生, 主要研究方向为光储直流微电网的稳定控制。

E-mail: 1187774554@qq.com

曹云洲, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网的电能质量优化。

E-mail: 1415856241@qq.com