

基于分散PV-BES协调架构的孤岛 直流微网电压控制

马红明¹, 耿泉峰¹, 霍雨佳¹, 王朔²

(1. 国网河北省电力有限公司营销服务中心, 河北 石家庄 050000;

2. 浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:提出了一种用于即插即用微网的分散光伏-电池储能(PV-BES)协调控制方法。当电池储能单元因荷电状态(SOC)限制或充放电功率限制而达到饱和状态时,光伏发电单元可以在直流母线电压控制下运行。模式转换和功率共享基于一种无通信的方式。通过绕过通信,微网(MG)系统可以变得更加灵活可靠。所设计的控制系统分别包含光伏变换器和BES变换器的控制器。PV变换器控制器可以实现最大功率点跟踪控制和下垂控制之间的无缝模式转换。BES变换器控制器具有高通滤波器路径解耦的特性,在发电主导模式下可改善MG动态性能。BES高通滤波补偿克服了PV主导模式下动态性能差的问题,使系统对PV参数变化具有更强的抵抗能力。最后,仿真和实验结果验证了这一方法的有效性。

关键词:直流微电网;模块化微电网;分散控制;下垂控制

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22932

Isolated DC Microgrid Voltage Control Based on Decentralized PV-BES Coordination Architecture

MA Hongming¹, GENG Quanfeng¹, HUO Yujia¹, WANG Shuo²

(1. State Grid Hebei Marketing Service Center, Shijiazhuang 050000, Hebei, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: A decentralized photovoltaic-battery energy storage (PV-BES) coordination control method for plug-n-play DC microgrid was proposed. With proposed control method, PV units can operate under DC bus voltage control when BES units are saturated due to SOC limit or charging/discharging power limit. The mode transition and power sharing are based on a communication-less manner. By bypassing communication, the microgrid (MG) system can become more flexible and reliable. The proposed control system contains controllers for PV converter and BES converter, respectively. The PV converter controller can achieve seamless mode transition between MPPT control and droop control. BES converter controller has a decoupled feature that a high-pass-filter (HPF) path could improve MG dynamic performance under generation-dominating mode. The BES HPF compensation overcomes the issue of poor dynamic performance under PV-dominating mode and makes the system more resistive to PV parameter variation. Simulation and experimental results have been provided to verify the concept and analytical study.

Key words: DC microgrid; modular microgrid; decentralized control; droop control

近年来,光伏发电(photovoltaic, PV)已成为主流分布式能源。PV具有分布广、零排放的优点,是边远地区很有前景的能源解决方案^[1-3]。与传统集中发电相比,PV具有分布式特性,它依靠微电网(microgrid, MG),是利用太阳能的有效途径^[4-7]。MG集发电、负荷、储能于一体,可以持

续稳定地提供电能,支持多种负荷,同时保持低前期成本和较短前置时间。除了传统MG外,可扩展插拔式(plug-n-play, PnP)MG已经成为学术界和工业界研究的热点^[8-10]。PnP MG可以进一步降低设计和安装成本,并允许用户在需求增长时有机地增加电网的支撑能力。直流MG

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807118)

作者简介:马红明(1982—),男,硕士,高级工程师,zyr@hbnrtech.com

因其可靠性、效率高,控制简单等优点而倍受关注,有利于孤岛PnP MG的应用^[11]。目前,PnP MG已经成为解决农村地区能源贫困问题的一个有效解决方案。为了实现PnP MG的高模块化和可扩展性,设计的关键因素与传统MG有较大不同^[12],除了高度模块化的硬件结构外,还需要开发完全独立于通信的分散控制系统,其中,下垂控制是最常用的分散控制方法,可实现MG的电压调节和功率分配。与并网MG系统不同的是,在孤岛MG系统中,没有主电网支撑能量和稳定电压,功率平衡需要由MG自身调节来维持。通常采用下垂控制系统来平衡发电与负载之间的功率不平衡。然而,由于电池储能(battery energy storage, BES)系统的荷电状态(SOC)限制和充放电功率限制,BES系统的调节能力有限。因此,当BES饱和时,需要用PV发电作为母线调压器。PV除了最大功率点跟踪(MPPT)模式外,光伏变流器还应能够在下垂控制模式下运行,以提高系统的直流母线调压能力^[13]。为了在无通信的情况下同时实现PnP MG的功率分配和模式转换,文献[14]提出了一种带直流母线信号的分散模式自适应控制技术,以实现无通信的下垂控制协调。文献[15]将分散控制方法应用于PnP微电网系统的远程电气化。这种分散控制方法比增加一个中央控制器和一个通信线路具有更高的可靠性、灵活性和可扩展性。除了模式自适应,光伏发电需要能够在母线电压控制模式下运行,而目前大多数光伏产品只考虑最大功率跟踪控制。此外,BES系统通常采用传统的下垂控制^[16-17]。应用于光伏发电时,其性能会变差。在母线控制模式下,特别是在轻载情况下,母线电压调节很弱。由于气候条件的不同,光伏参数变化很大,这也增加了控制系统的设计难度。因此,可能会有非常大的超调量,从而损坏系统或导致安全问题。因此,对于PV来说,在其运行过程中需改进下垂控制,使其既具有鲁棒性,也有一定经济性^[18-19]。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于PV-BES协调架构的PnP MG电压控制方法,该方法可在PV发电主导模式下,利用BES系统补偿暂态能量,在不增加任何附加元件的情况下,也能保持系统电压在可接受的范围内。此外,该方法属于一种分散式无通信控制,能够无缝模式转换,具有更强的鲁棒性,非常适用于PnP MG。

1 分散PV-BES协调控制设计

图1所示为PnP MG的结构图。

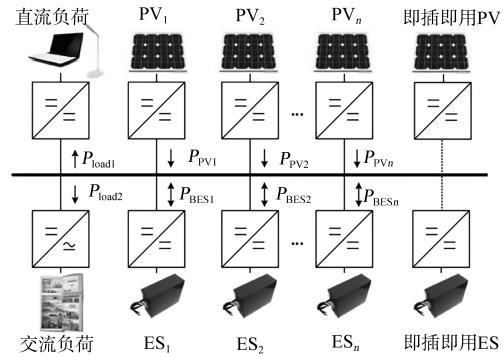


图1 可扩展PnP MG的结构图

Fig.1 Scalable Plug-n-Play microgrid

为了在直流微电网中实现PV和BES的PnP特性,本文提出了一种完全非通信的分散控制系统。控制系统分别包含BES变换器和PV变换器的独立控制器。采用所提出的控制方法,当新的光伏组件或BES组件安装到MG中时,现有变流器的控制参数不需要进行任何调整。在存储控制和发电控制两种模式下,均能保持直流环节电压调节的鲁棒性和快速响应。图2为直流母线电压信号的通用下垂协调。

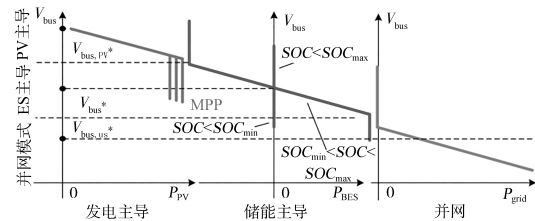


图2 基于直流母线信号的分散模式自适应

Fig.2 Decentralized mode adaptive using DC bus signaling

1.1 PV变流器的控制方法

图3为所提模式自适应PV控制图。该控制方法含内环控制PV输出电流、中间环控制PV端

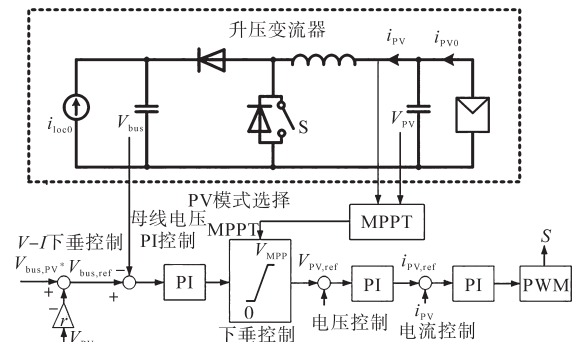


图3 所提模式自适应PV控制图

Fig.3 Diagram of PV converter controller with seamless mode selection

电压和外环为V-I下垂控制环。外部环路的输出 V_{bus} 经过一个饱和器,其上限设置为MPPT电压 V_{MPP0} 。通过设置PV下垂控制的额定母线电压,使 $V_{bus,PV}^*$ 高于BES变换器的额定母线电压,只要BES变换器调节母线电压,PI控制器的输出 V_{bus} 将始终饱和到 V_{MPP0} 。当BESs过度充电时, V_{bus} 将比 $V_{PV,ref}$ 上升得更快, $V_{PV,ref}$ 将减小到低于 V_{MPP0} 。因此,降低光伏组件的输出功率,可实现光伏组件的无缝模式转换。值得注意的是 $V_{PV,ref}$ 的饱和特性要求在下垂控制中增加积分器,这就解释了为什么PV变流器控制采用V-I下垂控制,而不是I-V下垂控制。与典型的V-I下垂控制系统不同,该PV控制器有三个控制回路。它需要两个回路(v_{PV} 回路和 i_{PV} 回路)来稳定PV输出功率,而不是BES应用中简单的电流回路。并且由于MPPT控制的带宽比PV电压环慢得多,在稳态下, $i_{PV}=i_{PV0}$ 。因此,可以使用 i_{PV} 作为最大功率跟踪控制器的参考值,以减少电流传感器的数量,而不是使用 i_{PV0} 。此外,该方法为V-P下垂控制,利用PV测量的功率代替直流母线侧测量的电流,进一步减少电流传感器的数量。对于提出的PV控制系统,总共只需要一个电流传感器。最大的内部控制环带宽是由开关频率限制的,每个控制环与其相近控制环通常有5~10倍带宽差。因此,增加控制回路的数量会使外回路的动态性能变差。本文提出的BES变流器控制器将提供动态补偿,以帮助在PV主导模式下实现电压调节,以解决上述问题。

1.2 BES变流器的控制方法

如上所述,PV下垂控制在母线电压调节方面的动态性能相对较差。此外,PV变换器的功率流是单向的。因此,在零负载情况下,如果BESs不能进一步吸收能量,由于能量不能消耗,母线电压将保持在峰值过调值。因此,即使在发电控制模式下,也必须保持BES变换器的动态调节能力。与PV变换器不同,BES变换器不需要复杂的模式转换。可使用I-V下垂控制。在I-V下垂控制中,只有一个电流环被使用。带宽可以比V-I下垂控制高很多。随着BES辅助PV下垂控制,在储能主导和发电主导模式下,均能保持高性能的动态响应。

传统I-V下垂控制通过一个低通滤波器(LPF)和一个高通滤波器(HPF)解耦成两条路径。LPF路径能够提供稳定状态下的功率分配和功率均衡能力。采用HPF路径作为动态补偿路径来补

偿暂态能量。当LPF和HPF的时间常数相同时,二者的组合性能与传统的I-V下垂控制相似。上述解耦设计具有以下优点:1)不同的电流限制可以放在两个路径上。主功率流由LPF路径决定。HPF路径对能量交换影响不大,对BES的SOC水平影响不大。因此,即使LPF路径饱和,BES动态补偿路径也能保持主动。2)两种路径可采用不同的下垂系数。LPF路径可以有一个较大的值 m_1 来缩小母线电压稳态误差。HPF路径可以有一个相对较小的 m_2 值,以避免噪声的影响。对于稳态分析,可以忽略HPF路径的影响。

本文在BES的I-V下垂控制中增加了SOC项,实现了SOC的自收敛。与现有改进下垂控制不同,该方法在下垂线路上增加了一个离线控制,以更好地适应直流母线电压信号。此外,传统I-V下垂控制的输出电流与电压误差成正比,它包含一个SOC斜坡项。具有附加项时,当BES的SOC水平高于 SOC^* 时,输出电流略有增加;当SOC低于 SOC^* 时,输出电流略有减小。因此,多个BES之间的SOC可以达到收敛。

2 系统稳定性分析

除了下垂控制器外,PV控制器还有一个三重环结构(包括PV电流环、PV电压环和直流母线电压环)。因此,控制参数必须仔细选择,以避免控制回路之间的相互作用。伯德图可以清晰地显示各控制回路的分频,指导各控制回路的设计。对于包括V-I下垂控制器在内的整个系统,由传递函数模型推导出状态空间模型,更便于评价系统的整体性能。

2.1 传递函数模型

图4为带BES HPF补偿的控制方框图。

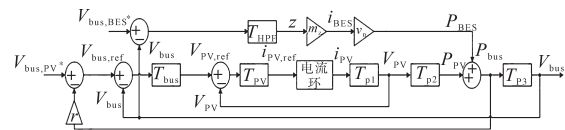


图4 发电主导模式下 V_{bus} 下垂控制控制框图

Fig. 4 Control block diagrams of V_{bus} droop control under generation-dominating mode

由图4可得,BES HPF补偿可以给系统增加一个前馈控制路径。光伏变流器的电流控制器可以采用高控制带宽的迟滞控制器或PI控制器来实现。PV电流环的响应速度比外环快得多。为简化研究,PV电流环的闭环传递函数可记为1。PV阵列具有非线性I-V特性。通常线性化的表

达式可以写成:

$$\tilde{i}_{PV0} = K_{PV} \tilde{v}_{PV} \quad (1)$$

式中: \tilde{i}_{PV0} , \tilde{v}_{PV} 分别为扰动下的光伏电流和电压; K_{PV} 为PV的模型参数,且总为负值。

K_{PV} 总是负的,通过在光伏电压 V_{PV} 微分方程中加入扰动:

$$C_{PV} \frac{d(V_{PV} + \tilde{v}_{PV})}{dt} = I_{PV0} + \tilde{i}_{PV0} - I_{PV} - \tilde{i}_{PV} \quad (2)$$

式中: C_{PV} 为光伏电容; I_{PV0} 为光伏电流初始值。

将式(1)代入式(2),时间 T_{p1} 可表示为

$$T_{p1} = \frac{\tilde{v}_{PV}(s)}{\tilde{i}_{PV}(s)} = \frac{I}{-C_{PV} \cdot s + K_{PV}} \quad (3)$$

通过在光伏有功功率 P_{PV} 计算中加入扰动:

$$P_{PV} + \tilde{p}_{PV} = (V_{PV} + \tilde{v}_{PV}) \cdot (I_{PV} + \tilde{i}_{PV}) \quad (4)$$

将式(1)代入式(4),时间 T_{p2} 可表示为

$$T_{p2} = \frac{\tilde{p}_{PV}(s)}{\tilde{v}_{PV}(s)} = K_{PV} V_{PV} + I_{PV} = K' \quad (5)$$

式中: K' 为增益,是一个常数,取决于PV的运行点。

由式(5)可知,MPPT稳态运行时:

$$\frac{d\tilde{p}_{PV}}{d\tilde{v}_{PV}} = K' = 0 \quad (6)$$

V_{bus} 回路和 V_{PV} 回路PI控制器的传递函数可表示为

$$T_{PI, bus} = \frac{\tilde{v}_{PV, ref}(s)}{\tilde{v}_{err}(s)} = \frac{k_{p, bus} s + k_{i, bus}}{s} \quad (7)$$

$$T_{PI, PV} = \frac{\tilde{i}_{PV, ref}(s)}{\tilde{v}_{PV}(s)} = -\frac{k_{p, PV} s + k_{i, PV}}{s} \quad (8)$$

式中: $\tilde{v}_{PV, ref}(s)$ 为扰动下光伏电压函数; $\tilde{v}_{err}(s)$ 为扰动下电压偏差。

在BES动态补偿回路中HPF传递函数可表示为

$$T_{HPF} = \frac{t_{HPF} \cdot s}{t_{HPF} \cdot s + 1} \quad (9)$$

式中: T_{HPF} 为HPF传递函数; t_{HPF} 为HPF时间常数。

2.2 PV电压控制环

由式(8)和式(3),可以得到 V_{PV} 回路开环传递函数 $T_{OL, VPV}$:

$$T_{OL, VPV} = \frac{k_{p, PV} \cdot s + k_{i, PV}}{-C_{PV} \cdot s^2 + K_{PV} \cdot s} \quad (10)$$

假设PV电流环频在4kHz左右(开关频率为20kHz), V_{PV} 回路的分频至少要是其1/5,也就是800Hz左右。图5为 V_{PV} 开环传递函数的伯德图。由图5可知,当 K_{PV} 在-0.01~-0.1范围内变化时,交叉频率保持在717Hz附近,相位裕度在88.5°~94.2°范围内,其中,三条曲线分别

是 K_{PV} 为-0.01, -0.1和-0.05时的PV电压开环传递函数曲线,故PV电压环对PV参数变化具有鲁棒性。

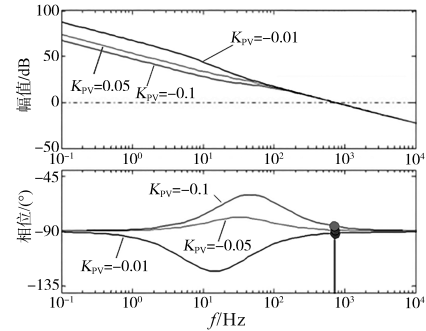


图5 光伏电压回路的伯德图

Fig.5 Bode diagrams of PV voltage loop

2.3 直流母线电压控制环

通过使用现有的BESs来实现补偿。虽然在发电主导模式下BES是饱和的,但它仍然可以提供动态补偿,不会造成大量的能量流。控制图见图4, V_{bus} 开环传递函数为

$$T_{OL, Vbus2} = (T_{PI, bus} \cdot T_{CL, VPV} \cdot T_{p2} + T_{HPF} \cdot m_2 \cdot V_{bat}) \cdot T_{p3} \quad (11)$$

式中: $T_{CL, VPV}$, V_{bat} , T_{p3} 分别为PV电压的闭环传递函数、电池电压和时间常数。

图6为BES HDF补偿的母线电压回路伯德图,其中,增益 K' 是一个常数,取决于PV工作点。图6中,三条曲线分别是 K' 为1.8, 0.02和0.2时的直流母线电压开环传递函数曲线。由图6可知,交叉频率始终保持在1200Hz左右,相位裕度 K' 变化90°左右。尽管PV电压环内部存在限制,但交叉频率仍能保持在较高的值。因此,BES补偿回路作为独立于PV参数的前馈回路,可以使系统对PV参数变化具有更强的电阻性,提高系统的动态性能。因此,采用BES补偿,即使在发电控制模式下,直流母线电压调节也能

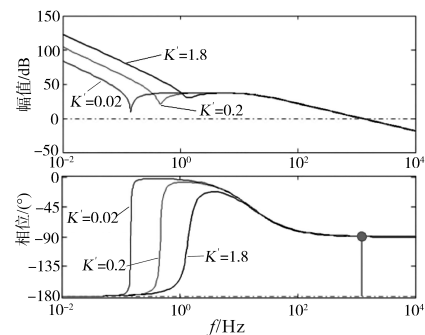


图6 BES HPF补偿的母线电压回路伯德图

Fig.6 Bode diagram of bus voltage loop with BES HPF compensation

保持鲁棒性,并具有良好的动态性能。

2.4 基于状态空间模型的系统稳定分析

为了评估包含V-I下垂控制的整个系统的性能,由于下垂控制器与内环输出 P_{bus} 之间存在交互作用,传递函数方法将变得过于复杂。因此,利用状态空间模型对系统进行稳定性评估。系统的闭环状态方程可表示为

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (12)$$

式中: X, A, B, U 为状态方程系数。

对于图1所示的系统,可以选择状态向量为

$$X_1 = [\tilde{v}_{bus} \quad \tilde{v}_{PV} \quad \tilde{v}_{PV,ref} \quad \tilde{i}_{PV}]^T \quad (13)$$

对传递函数进行拉普拉斯逆变换,得到各状态变量的微分方程,最后可得系统矩阵A:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K'}{C_{bus}V_{bus}} & 0 & 0 & \frac{mV_{bat}}{C_{bus}V_{bus}} \\ 0 & \frac{K_{PV}}{C_{PV}} & 0 & -\frac{1}{C_{PV}} & 0 \\ -k_{i,bus} & a_{32} & 0 & -\frac{rK'k_{p,bus}}{C_{PV}} & 0 \\ k_{p,PV}k_{i,bus} & a_{42} & -k_{i,PV} & a_{44} & 0 \\ 0 & -\frac{K'}{C_{bus}V_{bus}} & 0 & 0 & -\frac{1}{t_{HPF}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$a_{32} = -\frac{rK'k_{p,bus}k_{p,PV}}{C_{PV}} + rK'k_{i,bus} - \frac{k_{p,bus}K'}{C_{bus}V_{bus}}$$

$$a_{42} = -k_{p,PV} \cdot a_{32} + \frac{k_{p,PV}K_{PV}}{C_{PV}} + k_{i,PV}$$

$$a_{44} = \frac{k_{p,PV}(1 - rK'k_{p,bus})}{C_{PV}}$$

在状态矩阵由式(14)给出的情况下,图7为主导特征值随PV工作点变化情况。

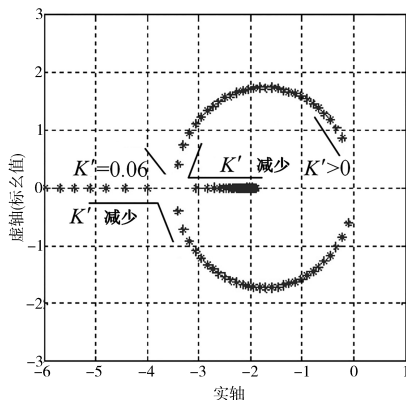


图7 含BES补偿的系统特征值

Fig.7 Dominant eigenvalues of overall system

当 $K' > 0$ 时,系统是稳定的。当 $K' < 0.06$ 时,主特征值变为一对虚部小的共轭特征值($\omega < 1.7 \text{ rad/s}$)。只有当 $K' < 0.06$ (几乎在MPP点上)时,主特征值才会共轭;振荡频率非常低, $\omega < 1.7 \text{ rad/s}$ 。但是由于谱仪补偿的引入,谱仪的高频HPF的作用,使得主特征值更接近虚轴,动态响应不可避免地会变慢。

3 仿真分析与实验验证

为验证本文所提方法的可行性与有效性,本文对不同负荷状态下PV变流器控制模式由MPPT控制转变为下垂控制进行仿真和实验研究。仿真系统相关参数如下:储能系统电压 $V_{bus,BES}^* = 48 \text{ V}$,母线电容 $C_{bus} = 660 \mu\text{F}$,控制器参数 $k_{p,bus} = 3.5, k_{i,bus} = 100, k_{p,PV} = 10, k_{i,PV} = 2$,内阻 $r = 1/100$,光伏电压 $V_{bus,PV}^* = 53 \text{ V}$,光伏电容 $C_{PV} = 200 \mu\text{F}$,控制器参数 $m_1 = 1, m_2 = 1$,时间常数 $t_{LPF} = 0.01$,时间常数 $t_{HPF} = 0.01$,储能电压 $V_{BES} = 48 \text{ V}$ 。

图8为无BES HPF补偿的PV-BES下垂控制协调仿真结果。

由图8可以看出,负载为25 W时,PV暂态时刻母线电压有14%的超调。切换到下垂控制。在负载较轻的情况下,超调量增加到20%,远远超出了可接受的电压波动范围。随着光伏发电额定值的提高或负载的减少,电压峰值甚至可能进一步增加。

采用BES HPF补偿的PV-BES协调控制仿真结果如图9所示。在图9a中,负载为25 W时,PV控制模式切换到下垂控制的暂态母线电压只有4.8%的超调。图9b中2.5 W负载时,超调量仍保持在4.7%左右。虽然母线电压需要较长的时间才能稳定下来,但始终保持在一个非常小的波动范围内,这对MG系统的影响可以忽略不计。采用BES高频滤波器补偿后,BES的功率在暂态时不会立即变化到零,而是缓慢地达到零,从而阻止母线电压的上升。

本文还通过实验验证了所提方法的有效性和优越性,实验装置如图10所示。PV模拟器用于模拟PV输出。转换器由TI F28379d DSP控制。参数设置同上述仿真系统相关参数。图11为不同BES HPF时间常数下PV-BES协调控制暂态实验结果。图11a中,BES HPF未激活或 $t_{HPF} = 0$,PV切换到下垂控制的暂态过程中,直流母线电压有较大的过冲,与图8a的仿真结果一致。图

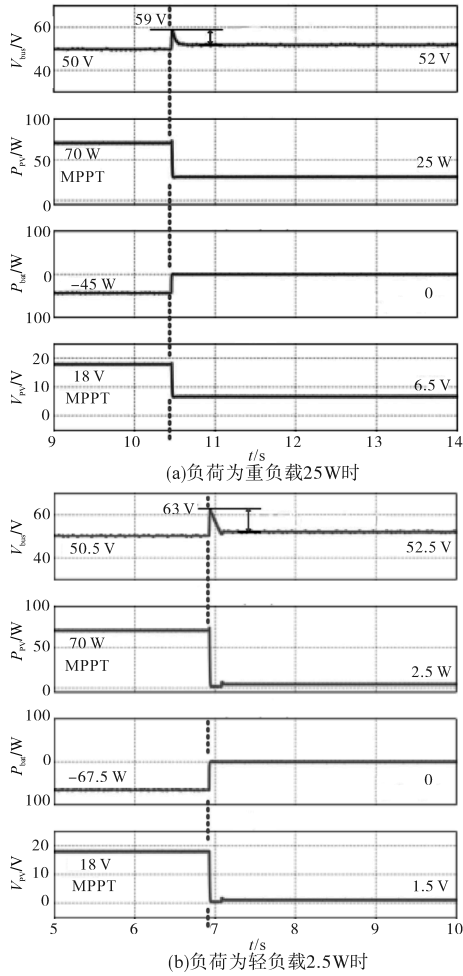


图8 无BES大功率滤波器补偿时PV-BES协调控制仿真结果

Fig.8 Simulation results of PV-BES droop control coordination without BES HPF compensation

11b中 t_{HPF} 增大到 0.01, 在 BES HPF 补偿的帮助下,瞬态过程在 3 V 超调的情况下变得更加平滑。图 11c 中 t_{HPF} 进一步增大到 0.05, 瞬态超调量进一步阻尼到 2 V 左右。由此可见,本文所提方法的电压调节性能良好。

图 12 为 2.5 W 负载下 PV 控制模式由 MPPT 变为下垂控制的实验结果。超调量保持在 2 V 左右,波形与仿真结果如图 9b 所示吻合较好。

从所有的结果可以看出,瞬态过程分为三个阶段(由于稳定时间较长,在图 12 中更加明显)。在第 1 阶段, BES 完全充电,母线电压升高,由于 HPF 防止母线电压过冲, BES 充电电流缓慢下降;在第 2 阶段,光伏输出功率降低到低于负载,母线电压降低。HPF 通路将始终阻碍母线电压的变化。因此,在此阶段 BES 将会放电;第 3 阶段,母线电压降至下垂控制器设定的值, BES 高频滤波器的输出趋于零,达

到新的稳态。

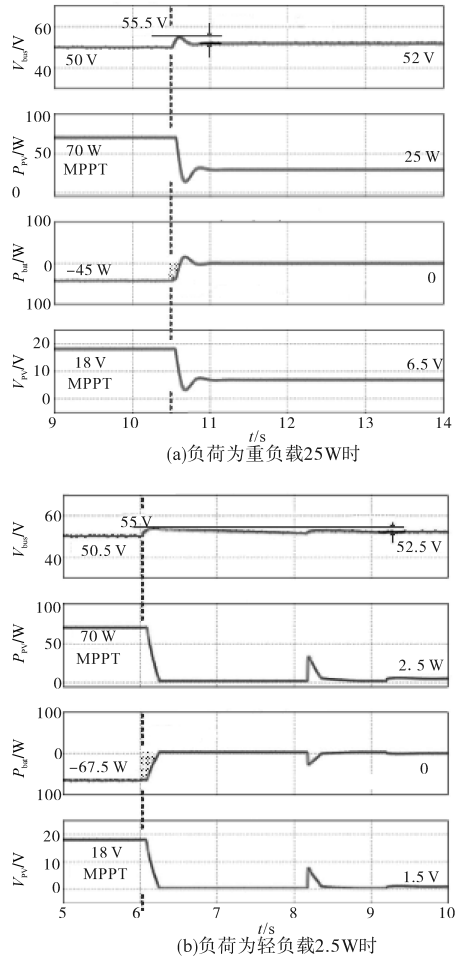
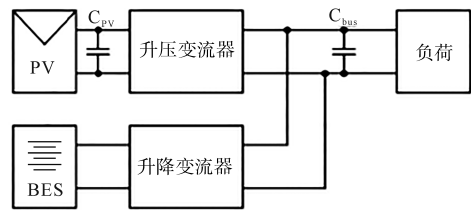
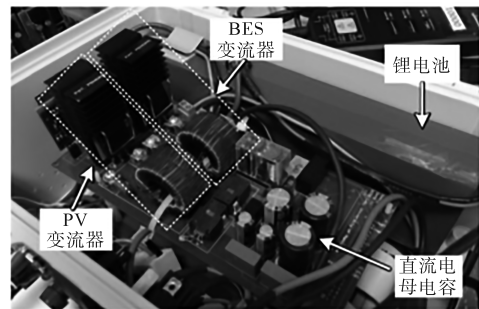


图9 含BES大功率滤波器补偿的PV-BES协调控制仿真结果

Fig.9 Simulation results of PV-BES droop control coordination with BES HPF compensation



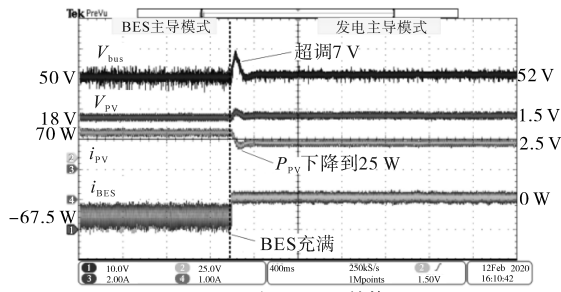
(a)实验系统结构图



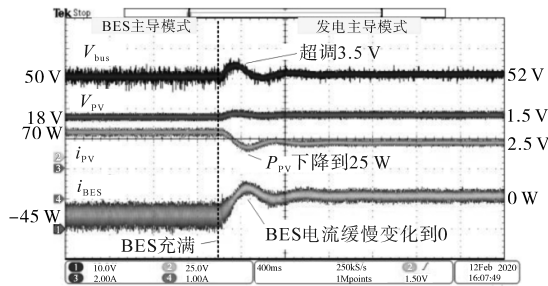
(b)实物图

图10 实验系统图

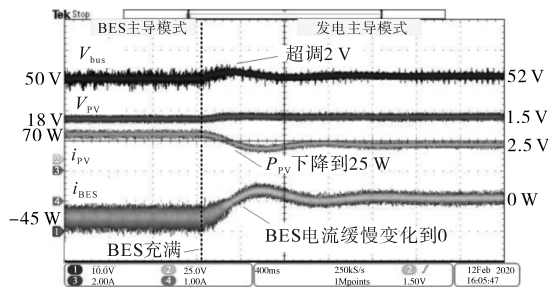
Fig.10 Experimental system diagram



(a)无BES HPF 补偿



(b)含BES HPF 补偿且 $t_{HPF}=0.01$



(c)含BES HPF 补偿且 $t_{HPF}=0.05$

图 11 PV-BES 协调控制实验结果(负荷为 25W)

Fig.11 Experimental results of PV-BES coordination control (load is 25W)

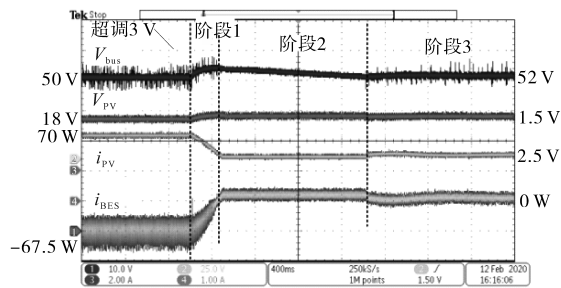


图 12 PV-BES 协调控制实验结果(负荷为 2.5W)

Fig. 12 Experimental result of PV-BES coordination control (load is 2.5W)

4 结论

本文提出了一种 PV-BES 协调控制方法,克服了 PV 发电控制模式下母线电压调节的控制问题。整个控制方案保持了分散的、少通信的方式,可用于即插即用微电网(PnPMG)。所提出的方法利用了现有的 BES 系统,通过解耦控制回路,即使在发电控制模式下,BESs 仍能提供动态补偿。最

后,通过仿真和实验对本文所提方法进行了验证。

参考文献

- [1] Nasir M, Khan H A, Zaffar N A, *et al.* Scalable solar DC microgrids: on the path to revolutionizing the electrification architecture of developing communities[J]. IEEE Electrification Magazine, 2018, 6(4):63-72.
- [2] Li D, Ho C N M, Siu K K M, *et al.* A method for solving current unbalance problem of paralleled single-phase grid-connected unipolar-PWM inverters with common DC bus[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6):7595-7603.
- [3] Yan K, Du Y, Ren Z. MPPT perturbation optimization of photovoltaic power systems based on solar irradiance data classification[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2):514-521.
- [4] Dragičević T, Lu X, Vasquez J C, *et al.* DC microgrids—part I: a review of control strategies and stabilization techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7):4876-4891.
- [5] Kakigano H, Miura Y, Ise T. Distribution voltage control for DC microgrids using fuzzy control and gain-scheduling technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5):2246-2258.
- [6] Tahim A P N, Pagano D J, Lenz E, *et al.* Modeling and stability analysis of islanded DC microgrids under droop control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8):4597-4607.
- [7] Werth A, Kitamura N, Tanaka K. Conceptual study for open energy systems: distributed energy network using interconnected DC nanogrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4):1621-1630.
- [8] Meng L, Shafiee Q, Trecate G F, *et al.* Review on control of DC microgrids and multiple microgrid clusters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3):928-948.
- [9] Madduri P A, Poon J, Rosa J, *et al.* Scalable DC microgrids for rural electrification in emerging regions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4):1195-1205.
- [10] Liptak S, Miranbeigi M, Kulkarni S, *et al.* Self-organizing nanogrid (SONG) [C]//2019 IEEE Decentralized Energy Access Solutions Workshop (DEAS), Atlanta, GA, USA:IEEE, 2019: 206-212.
- [11] Nasir M, Jin Z, Khan H A, *et al.* A decentralized control architecture applied to DC nanogrid clusters for rural electrification in developing regions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2):1773-1785.
- [12] Nasirian V, Moayedi S, Davoudi A, *et al.* Distributed cooperative control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4):2288-2303.

(下转第58页)

渡更为平缓。

4 结论

本文通过分析传统下垂控制策略,说明了该方法的不足之处,提出改进下垂电压控制策略,详细分析了其工作原理,设计了改进下垂电压控制器,并对参数的选取做出说明,该策略保留了传统下垂控制优越的动态响应能力,同时弥补了该控制方式的不足,通过仿真实验分析可知:

1)系统受到小功率扰动后,改进下垂控制能保留传统下垂控制良好的动态响应能力,同样可以快速达到新的稳定状态;

2)系统受到大功率扰动后,在改进下垂控制下,下垂系数将进行自我修正,增强换流站电压调控能力,使系统电压稳定在一定范围内,减小系统电压偏差。

参考文献

[1] 宋强,赵彪,刘文华,等.智能直流配电网研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
 [2] 马骏超,江全元,余鹏,等.直流配电网能量优化控制技术综述[J].电力系统自动化,2013,37(24):89-96.
 [3] 杜翼,江道灼,尹瑞,等.直流配电网拓扑结构及控制策略[J].电力自动化设备,2015,35(1):139-145.
 [4] 杨旭红,尹聪聪.基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J].电气传动,2020,50(5):75-80.
 [5] Ji Y, Yuan Z, Zhao J, et al. Overall control scheme for VSC-based medium-voltage DC power distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(6):1438-1445.
 [6] Li Y, He L, Liu F, et al. Flexible voltage control strategy considering distributed energy storages for DC distribution network

[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019, 10(1):163-172.
 [7] 李霞林,郭力,黄迪,等.直流配电网运行控制关键技术研究综述[J].高电压技术,2019,45(10):3039-3049.
 [8] 曾杰,张弛,袁志昌,等.实现分区均衡的直流配电系统控制方法研究[J].电气传动,2019,49(9):46-51.
 [9] 王渝红,陈勇,曾琦,等.适用于VSC-MTDC的改进下垂控制[J].高电压技术,2018,44(10):3190-3196.
 [10] 吴金龙,刘欣和,王先为,等.多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J].电网技术,2015,39(6):1593-1599.
 [11] Rouzbehi K, Miranian A, Luna A, et al. DC voltage control and power sharing in multiterminal DC grids based on optimal DC power flow and voltage-droop strategy[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4):1171-1180.
 [12] 马秀达,康小宁,李少华,等.直流配电网的电压协调控制策略[J].电力系统自动化,2016,40(17):169-176.
 [13] 季一润,袁志昌,赵剑锋,等.一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J].中国电机工程学报,2016,36(2):335-341.
 [14] 贺悝,李勇,曹一家,等.考虑分布式储能参与的直流配电网电压柔性控制策略[J].电工技术学报,2017,32(10):101-110.
 [15] 成龙,金国彬,王利猛,等.考虑功率裕度和电压偏差的多端直流配电网自组织下垂控制[J].电力系统自动化,2019,43(23):81-93.
 [16] Chen A, Xie D, Yu S, et al. Comprehensive evaluation index based on droop control for DC distribution system dispatching[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 106:528-537.
 [17] 江道灼,郑欢.直流配电网研究现状与展望[J].电力系统自动化,2012,36(8):98-104.
 [18] 蒋智化,刘连光,刘自发,等.直流配电网功率控制策略与电压波动研究[J].中国电机工程学报,2016,36(4):919-926,1175.

收稿日期:2020-08-05

修改稿日期:2020-08-17

(上接第52页)

[13] Shadmam M B, Balog R S, Abu-Rub H. Model predictive control of PV sources in a smart DC distribution system: maximum power point tracking and droop control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019,29(4):913-921.
 [14] Gu Y, Xiang X, Li W, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9):5072-5080.
 [15] Li D, Ho C N M. A module-based plug-n-play DC microgrid with fully decentralized control for IEEE empower a billion lives competition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(2):1764-1776.
 [16] Lu X, Sun K, Guerrero J M, et al. Double quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy stor-

age systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015,6(1):147-157.
 [17] Elrayyah A, Sozer Y, Elbuluk M E. Modeling and control design of microgrid-connected PV-based sources[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4):907-919.
 [18] 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, 2018,65(7):5601-5610.
 [19] 王伟,徐燕芬.适用于功率突变的MTDC系统改进下垂控制[J].电气传动,2020,50(8),59-64.

收稿日期:2021-01-08

修改稿日期:2021-02-03