

光伏-蓄电池系统的多模式控制方案研究

胡若云¹, 金良峰¹, 沈然¹, 吕诗宁¹, 彭双武², 黄荣国¹

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江华云信息科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 智能电网技术在负载端并入可再生能源, 实现了其与电网之间的双向电能交换。该过程中的主要挑战是以光伏(PV)为代表的可再生能源的间歇性。为解决这一难题, 提出光伏-蓄电池系统多模式控制方案, 提供间歇性平滑、无功补偿以及谐波补偿功能, 并在供电中断期间为负荷供电。该光伏-蓄电池系统由升压变换器、双向DC-DC转换器和并网电压源变换器(VSC)组成。其中, 升压变换器在最大功率点运行光伏阵列, 双向变换器提供电池充电并保持恒定的直流电压, VSC采用一种多模式控制器, 该控制器具有用于并网模式的电流控制器、用于单机模式的电压控制器以及基于电网可用性的模式转换功能。仿真和测试结果验证了所提控制运行方案在实现既定目标方面的有效性。

关键词: 智能电网; 分布式光伏; 蓄电池; 多模式控制; 电能质量

中图分类号: TM61 文献标识码: A DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqed20602

Research on the Multimode Operation of PV-BES System

HU Ruoyun¹, JIN Liangfeng¹, SHEN Ran¹, LÜ Shining¹, PENG Shuangwu², HUANG Rongguo¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Corporation,

Hangzhou 310014, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Huayun Information Technology Company, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: Smart grid technology has enabled the bidirectional power exchange between utility and consumers by owning renewable power sources. The major challenge to this feature is the intermittent nature of renewable sources such as photovoltaic (PV). Aiming to address this challenge, a multifunctional PV-BES system was proposed to provide intermittency smoothing along with reactive power and harmonics compensation in grid-connected mode and an interrupted power supply mode to loads during the grid outage. The PV-BES system was comprised of a boost converter, bidirectional DC-DC converter and a grid-connected voltage-source converter (VSC). The boost converter operates the PV array at the maximum power point. The bidirectional converter provides the battery charging and maintains constant DC-link voltage. The VSC uses a multimode controller, which has a current controller for grid-connected mode, voltage controller for standalone mode, a voltage and rate of change of power-based islanding detection and resynchronisation. Simulation and test results validate the effectiveness of the proposed control in achieving the set objectives.

Key words: smart grid; distributed photovoltaic system; battery energy storage; multimode operation; power supply quality

智能电网通过加强系统基础设施, 将通信系统、可再生资源、电力电子技术、智能电能表和存储系统以智能方式集成在一起, 有望解决现有电网的不足^[1-2]。光伏并入智能电网面临的主要技术和经济问题如下: 1) 光伏的输出取决于气候条件, 局部遮光等事件会大幅降低功率输出。因此

消费者无法确定他们可以与电网交换的电量^[3-4]。2) 光伏并网会带来谐波、馈线功率因数变化等电能质量问题。

电池储能(battery energy storage, BES)由于其能量密度较高, 与其他储能方式相比成本较低, 一直被认为是该工作的备选方案之一^[5-6]。某些

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5400-201925177A-0-0-00)

作者简介: 胡若云(1972—), 女, 本科, 高级工程师, Email: unixrootzz@163.com

研究采用BES来为光伏提供诸如移峰、功率平滑等功能,并在不考虑天气条件的情况下产生固定的输出功率。然而,这些研究并没有解决光伏并网带来的电能质量问题。从经济角度来看,与文献[7-9]相比,本文PV-BES系统可以在多种模式下工作,从而使电池得到最佳的利用。在电能质量方面,可以通过控制VSC,为敏感负荷提供连续、优质、低失真THD的电能^[10-11]。

通过将PV-BES集成到VSC的直流线路中,系统既可以在并网模式下工作,也可以在离网的情况下独立工作。通过使用无变压器配置,成本可降低30%以上,其效率比基于变压器的系统高出10%左右^[12]。总体而言,现阶段针对光储系统多模式切换所做的研究虽然已有存在,但其中能够实现平滑、高效的切换通常带有一定的局限性^[13],所以本文以此为切入点进行深入的探讨与研究。

本文基于PV-BES系统提出了一种由电流控制器、电压控制器、孤岛检测和模式转换机制组成的新型多模式控制器。MAF-PLL还能监视供电网络的可用性^[14]。为了检验电网的可用性,提出了一种基于功率变化率(rate of change of power, ROCOP)方法和MAF-PLL的混合检测方法^[15],提高了检测速度,减小了非检测区域(non-

detection zone, NDZ)。所提控制器的主要特点在于其控制逻辑及其在多模式控制的实现。对于并网模式,多模式系统通常采用预测控制^[16-17]、非周期性控制等控制方式进行控制。所提控制采用间接电流控制(indirect current control, ICC),与直接电流控制(direct current control, DCC)相比,其能进一步改善电能质量、拥有更好的动态响应、所需传感器延迟更小等^[18]。而且,在模式转换过程中,ICC通常比DCC具有更好的瞬态响应^[19-20]。

综上所述,本文提出一个新型多模式控制器,其内部各单元通过协同作用,提高PV-BES系统的控制、响应效率以及电能质量,且使得电池性能达到最佳的利用,并对两种模式进行了平滑、高效的过渡。文章最终通过实验测试验证了所提控制器的有效性。

1 系统结构

图1为PV-BES结构与原理分析图。

PV-BES系统结构如图1a所示。它包括双向转换器和VSC。由变换器开关产生的谐波由纹波滤波器进行滤波。由于采用了双向转换器,因而在此选择额定电压比DC-link电压小得多的蓄电池。

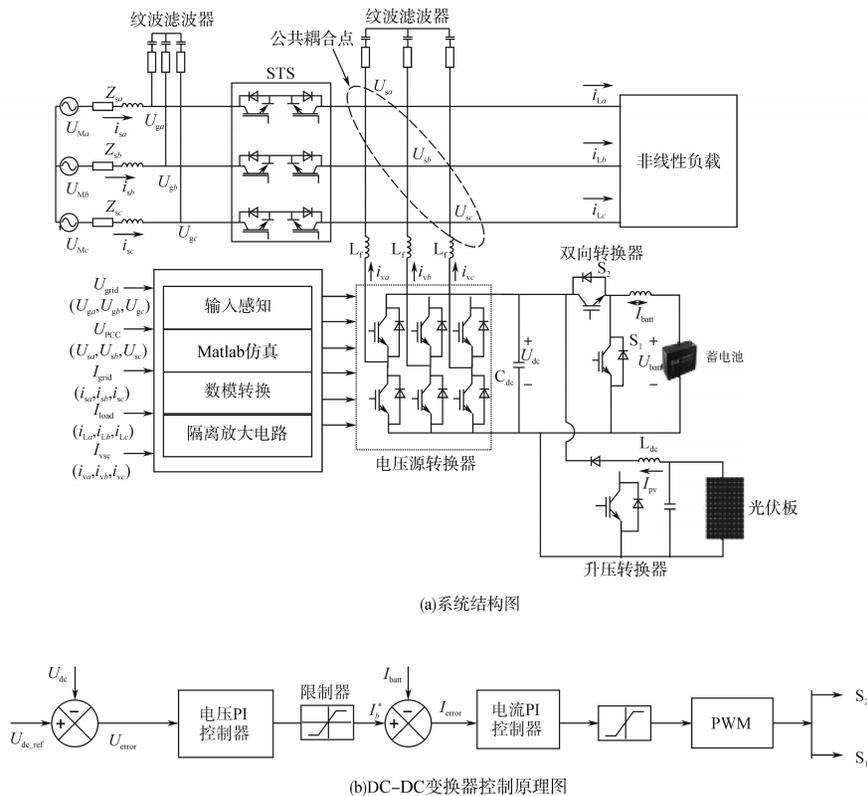


图1 PV-BES结构与原理分析图

Fig.1 Structure and principle analysis of PV-BES

2 控制算法

2.1 升压转换器

本系统采用两级配置方法将PV系统连接到电网。即利用升压变换器实现最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)以及利用VSC将光伏阵列和升压变换器连接到电网。最近提出的欧洲标准PREN50530强制要求高效率地运行光伏阵列^[21],而光伏阵列的非线性特性要求采用MPPT算法进行应对^[22]。在MPPT算法中,电导增量法(incremental conductance, I&C)因具有更高的效率以及跟踪速度^[23],而受到广泛关注。因此,本文采用I&C法。具体数学表述如下式:

$$\frac{dP_{pv}}{dU_{pv}} = \frac{d(U_{pv} I_{pv})}{dU_{pv}} = I_{pv} + U_{pv} \frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} = 0 \quad (1)$$

将式(1)重新排列后如下式:

$$\frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{U_{pv}} \quad \left(\frac{dP_{pv}}{dU_{pv}} = 0 \right) \quad (2)$$

当工作点远离MPP时,可以从式(2)得到一组不等式:

$$\frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{U_{pv}} \quad \frac{dP_{pv}}{dU_{pv}} > 0 \quad (3)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{U_{pv}} \quad \frac{dP_{pv}}{dU_{pv}} < 0 \quad (4)$$

式(3)、式(4)可用于确定将操作点移向MPP的方法。重复此操作,直到式(2)满足为止。

2.2 降-升压转换器

通过双向转换器调节潮流的方法涉及2个反馈回路,如图1b所示。为了保持恒定的直流电压,需要通过转换器不断地给电池充电或放电。开关 S_1 和 S_2 以互补的方式运行,采用了基于级联 $U-I$ 回路的比例积分(proportional-integral, PI)控制结构^[24]。电池参考电流(I_{batt})则是通过PI控制器传递 U_{dc} 误差($e = U_{dc,ref} - U_{dc}$)生成的。

2.3 VSC控制

在PV-BES系统中,VSC必须检测网络的可用性,并进行相应的操作。为此,VSC控件需有如下3种功能:1)在并网运行模式下,电流控制器提供光伏间歇性平滑、无功补偿和谐波补偿功能。2)电压控制器在独立运行模式下能维持跨负荷电压。3)孤岛探测和重合闸机制。利用模式转换开关(mode transition switch, MTS)探测电网的可用性,并根据电网情况决定STS的位置和PV-BES系统的运行模式。

2.3.1 并网模式

光伏并网面临的主要挑战是其输出功率的随机波动。因此将BES用于出力的平滑,最终使得综合系统能够输出稳定功率。本文在并网模式下通过控制VSC来平滑光伏的出力以及提供无功补偿和谐波补偿,并将基于ICC的贝塞尔滤波器SRF控制与MAF-PLL进行了改进,使其能够平滑光伏出力。与此同时,为了补偿负载电流,贝塞尔滤波器利用SRF理论提取有源基波分量。检测负载电流(i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc})和公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压(u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}),利用Park变换将三相负载电流在 $d-q-0$ 坐标系中变换如下:

$$\begin{bmatrix} i_{Lq} \\ i_{Ld} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

同步方面,为了对相位和频率进行精确估计,使用数字化实现简单、计算量小、效率高的MAF-PLL。

$$\text{MAF}(s) = \frac{1 - e^{-T_w s}}{T_w s} \quad (6)$$

式中: T_w 为移动平均滤波器的窗口长度。

所提取的直流分量是由基波分量和谐波分量组成的 d, q 轴电流。

$$i_{Ld} = i_{d,dc} = i_{dac} \quad (7)$$

$$i_{Lq} = i_{q,dc} = i_{qac} \quad (8)$$

对提取的 $i_{d,dc}$ 和电池充电电流(I_{batt})进行求和,生成直轴参考电流 i_d^* 。计算基准网格电流,分别取 i_q^*, i_0^* 为零。

此外,通过在 i_d^* 中加入 P_{set}/U_t 项,实现PV的出力平滑,从而实现在不同天气条件下,PV-BES系统能输出固定的功率。

$$\begin{bmatrix} i_{sa}^* \\ i_{sb}^* \\ i_{sc}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \\ i_0^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

在间接电流控制器中,将检测到的电流(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})与参考电流($i_{sa}^*, i_{sb}^*, i_{sc}^*$)进行比较。

2.3.2 独立运行模式

当电网停止供电时,多模式控制器切换到独立模式。此时VSC充当电压控制器以维持负载

所需。电压控制器采用类似于电流控制器的SRF变换设计,将转换后的PCC电压的 d - q 分量与参考值进行比较,并采用PI控制器消除差异。在此将表示电压大小的 d 分量设为 U_d (所需负载电压),将表示相移的 q 分量设为0。负载电压的独立相位角 θ_{sd} 为

$$\theta_{sd} = \int 2\pi f_{set} dt + \theta_{pre-fault} \quad (10)$$

式中: $f_{set} = 50 \text{ Hz}$; $\theta_{pre-fault}$ 为电网故障前电压的相位角。

2.3.3 孤岛检测和模式转换

孤岛检测和模式转换对于检测网格可用性和决定PV-BES系统运行模式至关重要:

1) 孤岛检测。孤岛检测用于监测电网电压和频率。PCC电压和频率应分别介于0.88(标么值)至1.1(标么值)和49.5~50.5 Hz之间。通过使用过电压/欠电压检测方法,使用电压量检测电网断电情况。MAF-PLL可通过过滤电压计算的输入,避免因负载变化而引起的干扰跳闸。对电力需求的变化进行监控,并在指定的采样周期内进行整合^[25]。

2) 模式转换。模式转换是PV-BES系统安全、可靠和多模式运行最关键的部分。根据孤岛检测机制的输出,决定输出操作MTS。并网模式到单机模式:当PCC电压或频率出现异常时,或当电压和频率超出限制或ROCOF检测到停电时,执行此转换。单机模式到并网模式:首先,将模式从独立运行模式改为同步模式,然后控制器移动到并网模式,关闭STS。根据修订后的IEEE 1547—2018标准,通过比较STS两侧的参数实现同步PV-BES。

3 实验测试

本文利用光伏阵列模拟器和实验室电池组,开发了PV-BES系统进行测试。

实验参数如下:VSC电容器 $C_{dc} = 2\ 250 \mu\text{F}$;三相电网电压220 V, 50 Hz;接口电感4 mH;电网阻抗 0.02Ω , 0.4 mH;开关频率10 kHz;双向电感5 mH;PV电压400 V;电储能系统电压和电流240 V和7 A;纹波滤波器:5 Ω , 10 μF ;非线性负荷2.13 kW;电压PI控制器增益0.2, 0.01;电流PI控制器增益0.1, 0.001。

3.1 PV-BES的稳态行为

图2~图4分别为负载侧、电网侧、储能侧的PV-BES系统稳态响应图。其中,图2a中215.1 V为电压有效值,50.0 Hz为频率值,2.409 A为电流有效值;图2b中862 W为有功功率,862 V·A为视在功率,11 var为无功功率;图2c中27.8%为总谐波失真率,2.407 A为总谐波电流有效值,49.9 Hz为基波频率,2.312 A为基波折算电流,96%为谐波百分比。图3及图4a、图4b、图4d中对应位置的数据含义与图2中相同。另,图4c中244.7 V, 0.346 A分别为电压、电流有效值,10 kHz为BES频率。图2~图4中的DPF为基波功率因数,PF为总功率因数。

由图2~图4可见,尽管存在产生谐波的非线性负载,电网电流THD值仍在IEEE—519标准规定的范围内。图2a为负载所产生的非线性电流,图3a为VSC产生的补偿电流所产生的正弦电网电流。图2b~图4b为电网、负荷、BES和UPF运行之间的功率交换情况。

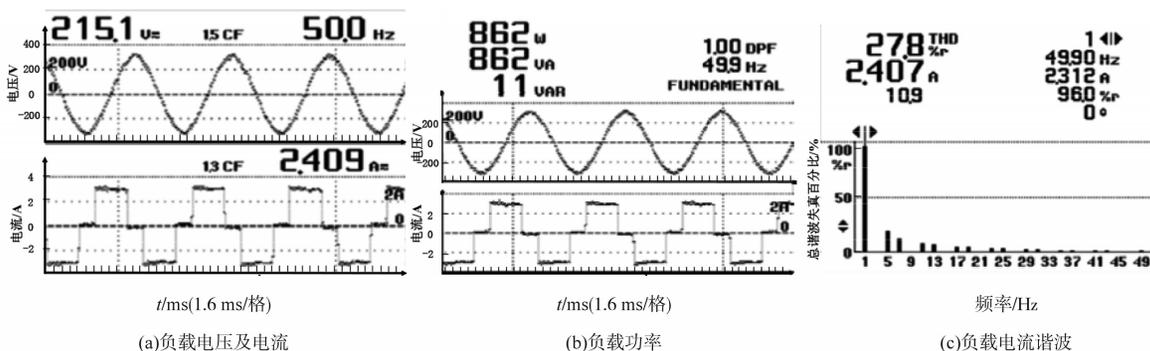


图2 PV-BES系统稳态响应(负载侧)

Fig.2 Experimental response of the PV-BES system in steady state (Load)

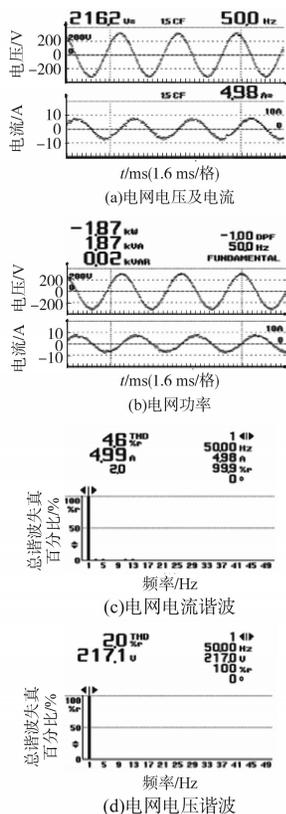


图3 PV-BES系统稳态响应(电网侧)

Fig.3 Experimental response of the PV-BES system in steady state (Grid)

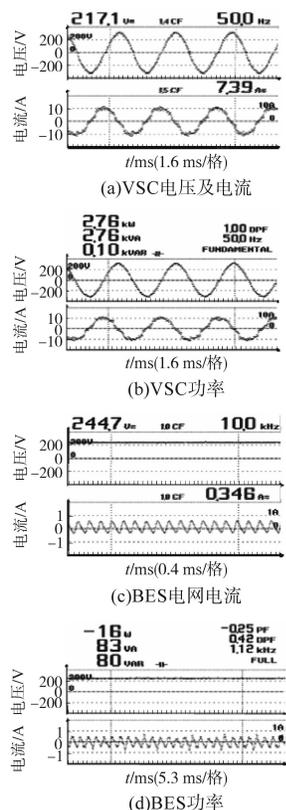


图4 PV-BES系统稳态响应(储能侧)

Fig.4 Experimental response of the PV-BES system in steady state (Battery)

3.2 电网断电时PV-BES的动态性能

图5为PV-BES在停电时的响应图。

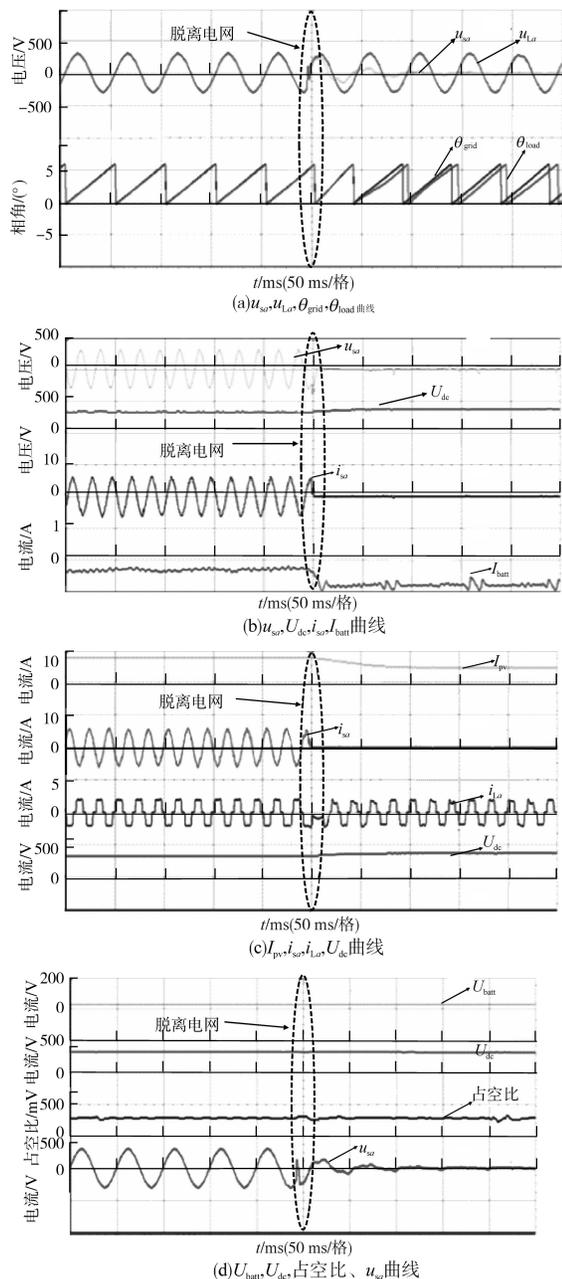


图5 PV-BES在停电时的响应

Fig.5 Experimental response of the PV-BES on grid outage

图5a为当电网断开时系统 θ_{grid} 和 θ_{load} 的动态响应。可以观察到电压角是如何失去同步的。图5b显示了DC线路电压保持恒定并且BES从充电变为放电过程。图5c、图5d显示了PV阵列和BES参数的变化以及DC-DC转换器的性能。

3.3 重连过程中PV-BES的动态性能

图6为系统与电网连接时, θ_{grid} 和 θ_{load} 同步的动态响应图。

由图6b可见,DC-link电压保持不变,BES由

放电变为充电。图6c,图6d显示了光伏和BES参数的变化以及DC-DC变换器的性能。

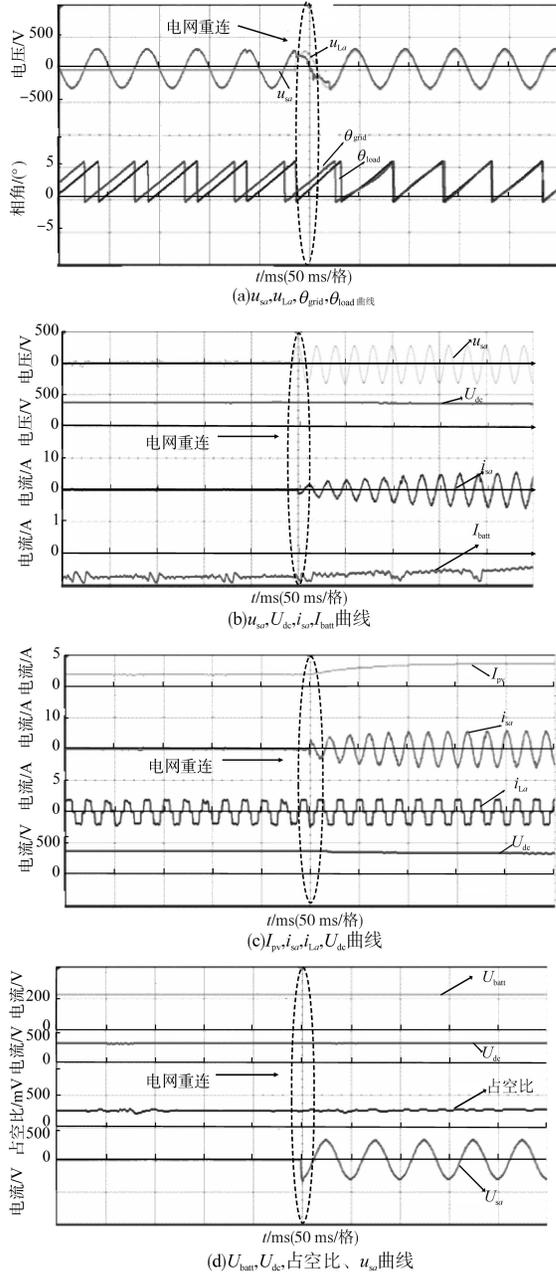


图6 PV-BES在重连时的响应

Fig.6 Experimental response of the PV-BES on grid reconnection

3.4 负载扰动下PV-BES的动态性能

图7a和图7b为MAF-PLL的参考出力。由多模控制器在负载扰动下产生的参考电流如图7c、图7d所示。可见,在负载扰动下,谐波增加。然而从参考电流中可以看出,尽管存在负载扰动现象,多模控制器仍能保证电网电流平衡。

3.5 方案对比

为了突出所提方法的优越性,在此进一步采用Matlab/Simulink软件对多功能PV-BES系统进行

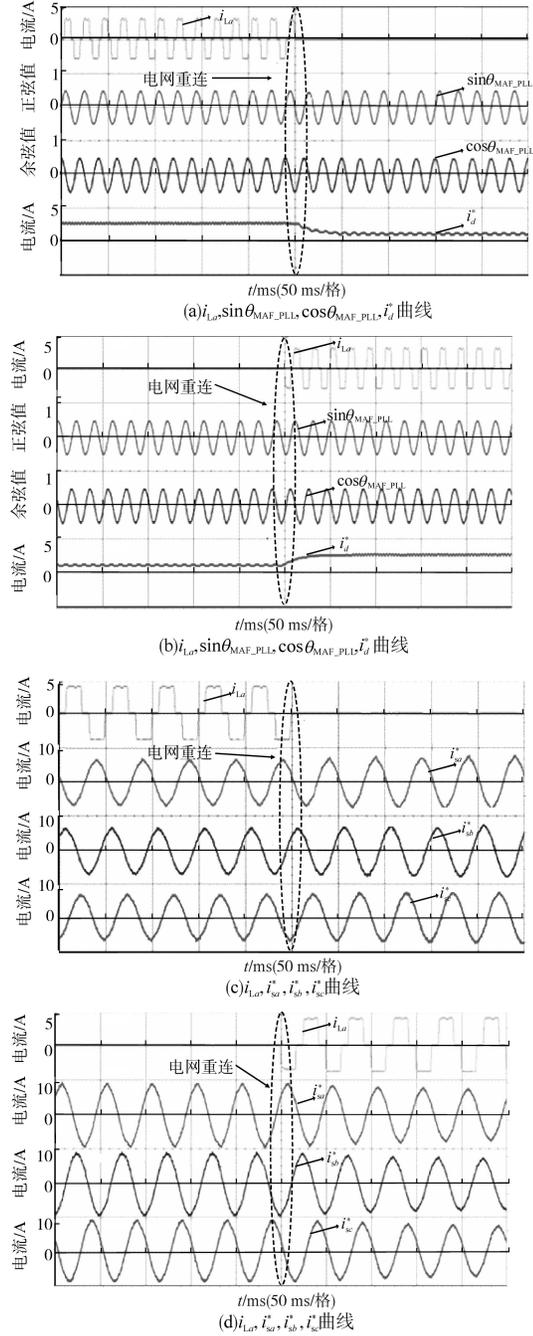


图7 PV-BES在负载扰动下的响应

Fig.7 Experimental response of the PV-BES on load disturbance

建模,将所提方法与常规方法进行对比。

具体仿真参数如下:1)电网、负载。交流电压:415 V,50 Hz;线路阻抗: $R_s=0.02 \Omega, L_s=0.4 \text{ mH}$;非线性三相桥式整流器: $R=40 \Omega, L=180 \text{ mH}$;纹波滤波器: $R_f=10 \Omega, C_f=10 \mu\text{F}$ 。2)VSC。直流总线电压:700 V,电容2 200 μF ;交流电感器:1 mH;蓄电池:400 V,20 A·H,双向电感4 mH;级联U-I控制:外电压回路: $K_{vp}=0.1, K_{vi}=0.01$;内电流回路: $K_{cp}=0.1, K_{ci}=0.001$;脉宽调制开关频率:10 kHz;PV阵列: $U_{oc}=400 \text{ V}, I_{sc}=15 \text{ A}, L_b=5 \text{ mH}, F_{sw}=10 \text{ kHz}$ 。

图8为所提方案与常规过频/欠频(OF/UF)方法在异常电网条件下的性能对比图。正常电网频率变化允许在49.5和50.5 Hz之间变化。在这种情况下,电网在0.3 s时出现异常情况,开关从1变为

0,电网频率超过50.5 Hz。基于OF/UF的检测方法需等到电网频率超过50.5 Hz时才改变输出,其中纵坐标表示两种方法的输出信号,输出为高电平时为1,低电平为0,而所提方法检测异常更快。

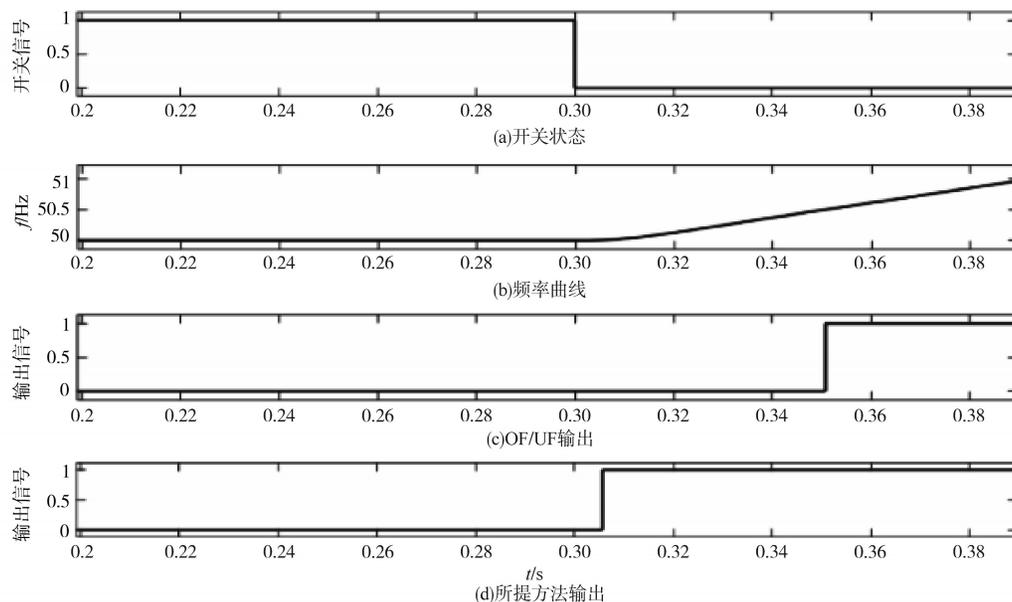


图8 方案性能对比

Fig.8 Performance comparison of schemes

4 结论

本文提出了一种多模式PV-BES系统的设计与控制方法。多模式控制器在选定的操作模式下能提供所需的功能。孤岛检测和模式转换可以监控网络并提供模式之间转换功能。进一步,将所提的系统在各种情况下进行了测试,系统运行结果良好,不同的测试结果也证明了PV-BES能够实现既定的控制要求。其能在模式间进行平稳的切换,而且具备更快的响应速度。由此可见,所提的PV-BES系统可以成为在工业和商业部分应用中实现间歇性平滑、提供无功补偿和谐波补偿以及实现不间断供电较好的替代方案。

参考文献

[1] 张东霞,姚良忠,马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):1-15.
 [2] 辛培哲,蔡声霞,邹国辉,等. 未来智能电网发展模式与技术路线初探[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(2):89-94.
 [3] 彭政. 考虑储能和需求侧响应的微网光伏消纳能力研究[D]. 武汉:武汉大学,2018.
 [4] Zhao Bo, Wang C, Zhang, X. Grid-integrated and Standalone Photovoltaic Distributed Generation Systems: Analysis, Design, and Control[M]. Wiley Publishers, Singapore, 2017.

[5] Burke A. Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel cell Vehicles[J]. Proc. IEEE, 2007, 95(4):806-820.
 [6] Chakraborty S, Simões M. Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems[M]. Springer Publications, London, UK, 2013.
 [7] 孙秀娟,张鹏飞,卞晓雪. 计及多类型需求响应的光伏微网储能容量优化配置[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9):108-114.
 [8] Oriti G, Julian A L, Peck N J. Power Electronics Based Energy Management System with Storage[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2016, 31(1):452-460
 [9] 廖志凌,阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21):46-52.
 [10] Wang G, Konstantinou G, Townsend C D, et al. A Review of Power Electronics for Grid Connection of Utility-scale Battery Energy Storage Systems[J]. IEEE Trans. Sustain. Energy, 2016, 7, (4):1778-1790
 [11] 黄凯. 基于VSC的三相智能电压质量控制装置研制[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
 [12] Dubaikel F, Aramco S. Comparison Between Transformer-based vs. Transformer-less UPS Systems[C]//IEEE Symp. Industrial Electronics and Applications, Langkawi, 2011:167-172.
 [13] 张尚腾. 双模式光储互补发电系统能量转换与控制技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
 [14] Golestan S, Ramezani M, Guerrero J M, et al. Moving Average Filter Based Phase-locked Loops: Performance Analysis and Design Guidelines[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2014, 29, (6):2750-2763.

[15] Ahmad K N E K, Selvaraj, J Rahim N A. A Review of the Is-landing Detection Methods in Grid-connected PV Inverters[J]. Energy Rev.,2013,21:756-766.

[16] 戴瑞海,林雁,林启待,等. 基于模型预测控制平抑光伏输出功率波动的储能充放电策略[J]. 智慧电力,2019,47(4): 8-15,52.

[17] 孟洪民,刘迪,李强,等. 考虑蓄电池健康的微电网群模型预测控制能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(6): 88-95.

[18] 陈建宇,安琪,史经丛,等. 一种新型有源电力滤波器电流控制策略研究[J]. 工矿自动化,2015,41(1):92-96.

[19] 黄雯. 基于逆变器的光伏系统孤岛检测方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.

[20] Kumar S, Singh B. Harmonics Detection Based Control of Solar-BES Microgrid With Grid Synchronization[C]//Seventh Int. Conf. Power Systems(ICPS), Pune,2017:684-690.

[21] BrÜNdlinger R, Henze N, Häberlin H, *et al.* Pren 50530——The New European Standard For Performance Characterisation Of PV Inverters[C]//24th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Hamburg, Germany, 2009:21-25.

[22] 肖文波,余晓鹏. 光伏系统功率跟踪算法的仿真平台设计及其实现[J]. 现代电子技术,2019,42(12):104-107.

[23] 邱革非,张春刚,仲泽坤,等. 基于扰动观察法和电导增量法的光伏发电系统MPPT算法研究综述[J]. 中国电力,2017,50(3):154-160.

[24] Deepu Vijay M, Singh B, Bhuvanewari G. Standalone And Grid Connected Operations Of A Synrg Based WECS With BES[C]//2018 IEEMA Engineer Infinite Conf. (Etechnxt), New Delhi, 2018:1-6.

[25] Kumar S, Singh B. A Frequency Observer Based Control For Solar Energy Conversion System[C]//43rd Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, 2017: 2321-2325.

收稿日期:2019-07-23

修改稿日期:2019-08-31

作者告知书

本刊自2019年8月起,加入OSID(英文全称open science identity,简称OSID)开放科学计划。OSID开放科学计划是由国家新闻出版署出版融合发展(武汉)重点实验室发起的,面向学术期刊行业的一项开放科学公益性计划。

每篇论文将拥有专属的OSID码,作者可在码内对论文作者、研究背景、学术价值等问题进行语音阐述,也可上传论文的补充性数据与材料(图片或视频),使论文成果更加立体化展现,增强论文质量,提升论文的阅读量和下载量和引用率,扩大论文和作者的影响力。此项计划能帮助作者提升论文影响力,拓展学术人脉与资源。

《电气传动》编辑部