

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313569

# 多端口能量互补设备多工况协调控制\*

陈 权<sup>1,2</sup> 田 鑫<sup>1,2</sup> 王群京<sup>1,2</sup> 朱刘柱<sup>3</sup> 张 辉<sup>3</sup>(1. 安徽大学 合肥 230601; 2. 工业节电与电能质量控制安徽省级协同创新中心(安徽大学) 合肥 230601;  
3. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院 合肥 230022)

**摘 要:** 多端口能量互补设备在多工况下的稳定运行以及工况间的平滑切换是保证电网平滑运行的重要支撑。针对设备内分布式发电的波动性,基于分层控制策略,文中先提出了一种并离网模式下多工况划分方法,通过本地控制层与中央管理层两层间端口参数和控制指令的协调配合来维持设备在所提多个工况下的功率平衡。其次,又提出了一种改进的并离网平滑切换方法,并在此基础上加入电压监测来避免电压正常波动所引起的工况频繁切换。最后,在MATLAB中搭建3种典型运行场景的仿真模型以验证其可行性。仿真结果表明,直流母线电压在典型场景的工况切换过程中能够迅速恢复到稳定状态,且波动在0.5%以内;同时改进的并离网平滑切换方法能够在30 ms内实现预同步,能够满足稳定、快速的运行要求。

**关键词:** 多端口;多工况;协调控制;平滑切换

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Coordination control of multi-condition for multi-port energy complementary equipment

Chen Quan<sup>1,2</sup> Tian Xin<sup>1,2</sup> Wang Qunjing<sup>1,2</sup> Zhu Liuzhu<sup>3</sup> Zhang Hui<sup>3</sup>

(1. Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Collaborative Innovation Center of Industrial Energy-Saving and Power Quality Control, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Economic and Technological Research Institute, Hefei 230022, China)

**Abstract:** The stable operation of multi-port energy complementary equipment under multiple operating conditions and the smooth switching between operating conditions are important supports to ensure the smooth operation of the power grid. To address the volatility of distributed generation within the device, based on the hierarchical control strategy, the paper firstly proposes a method for dividing the multiple operating conditions in the grid-connected and off-grid modes, which maintains the power balance of the device in the proposed multiple operating conditions through the coordination of the port parameters and control commands between the local control layer and the central management layer. Secondly, a smooth switching method is proposed to improve the parallel and off-grid mode, based on which voltage monitoring is added to avoid frequent switching of operating conditions caused by normal voltage fluctuations. Finally, simulation models of three typical operation scenarios are constructed in MATLAB to verify their feasibility. The simulation results show that the DC bus voltage can be quickly restored to a stable state in the switching process of the typical scenarios, and the fluctuation is within 0.5%; meanwhile, the improved phase-locked-loop-less smooth switching method can realize the pre-synchronization within 30ms, which can meet the requirements of stable and fast operation.

**Keywords:** multi-port; multi-condition; coordination control; smooth switching

## 0 引 言

传统的中心式电力系统多存在着能源浪费、污染排放

等问题,而分布式电源和多端口能量互补设备则具有能源分散、环保、低成本等优势,因此成了未来电力系统的主要发展方向之一<sup>[1]</sup>。多端口能量互补设备是一种新型的分布

收稿日期:2023-05-08

\* 基金项目:国家电网公司总部科技项目(5400-202220146A-1-1-ZN)资助

式电源系统,其主要特点是通过多个电源端口和负载端口实现能量的分配和管理<sup>[2-3]</sup>。

其中能量管理是多端口能量互补设备的重要问题之一,其能够优化能量互补设备能源的分配和利用,从而提高能源的利用效率。为此,文献[4-5]对直流母线电压划分了 5 个区域,并在不同的电压区域采用不同的控制策略,但未详细给出各端口工作的控制策略。文献[6]采用底层分区、上层优化的方式来防止储能电池过充或过放,但其可靠性还需进一步论证。文献[7]对于设备不同运行工况,采用结合储能电池荷电状态(state of charge, SOC)影响因子  $K_S$ 、开关因子  $K_R$  以及功率回路控制的控制方法来精准地控制储能输出功率,但其控制过程比较复杂。文献[8]根据接入设备的端口参数来划分运行工况并进行工况切换,但其电网端口采用 PQ 控制,不适用于离网模式。文献[9]对多端口能量互补设备的运行工况作了详细的工况划分,但仅考虑了离网模式,并未考虑并网模式。文献[10]研究并网模式下的多工况运行,但其工况划分过于复杂,很容易受到端口参数的波动影响而造成设备的运行不稳定。

设备从离网模式平滑地切换到并网模式,不产生剧烈的冲击和波动才能保证系统的稳定运行。文献[11-12]通过传统的锁相环来获取三相 AC/DC 变换器交流侧和电网侧的电压幅值、相位,但传统的锁相环结构复杂、响应慢,使得设备的稳定性有所下降。文献[13]通过控制虚拟阻抗的无功功率为 0 来实现两侧电压相位同步,无需通过锁相环,但未考虑两侧电压幅值的不同。而文献[14]采用虚拟电流来间接反映两侧电压相量差,亦无需通过锁相环,但未考虑交流侧电压幅值与相位之间的耦合关系。

由上可知,上述控制方法无法简单全面的划分设备运行工况或者工况之间不能平滑切换,为解决这一问题,文中通过划分合适的多种运行工况,并在运行工况发生变化时通过协调控制策略实现工况平滑切换,从而保证设备长期稳定运行。最后,搭建相应的仿真模型,通过设置多种典型运行场景对所提策略控制下多端口能量互补设备的稳定性和工况切换电压波动进行分析。

## 1 设备结构及端口控制策略

多端口能量互补设备的结构图如图 1 所示,其包含风电、光伏、储能、电网、交流负载和直流负载六个端口。设备的六个端口共用一个直流母线,并为各个端口提供标准化接口。

1) 风电端口:通过单向 Boost 升压变换器将风电机组与直流母线相连,把风能转换成可靠的电能。风电端口采用叶尖速比法的最大功率点跟踪控制(maximum power point tracking, MPPT)和母线恒压控制(constant voltage control, CVC)两种控制方式。

2) 光伏端口:通过单向 Boost 升压变换器将光伏电池与直流母线相连,把光能转换成可靠的电能。光伏端口采

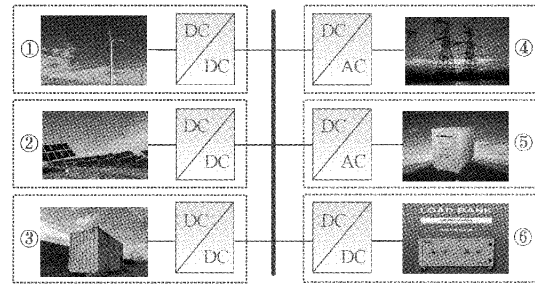


图 1 多端口能量互补设备结构图

用 MPPT 和 CVC 两种控制方式。

3) 储能端口:通过双向 Buck/Boost 变换器将储能电池与直流母线相连,当储能电池 SOC 在允许范围内进行充放电维持设备内功率平衡;储能端口通过储能电池的自主充放电实现能量双向流动实现,从而维持设备内功率平衡,其采用双闭环控制,使得在储能工作时无论其他端口处于何种控制方法都能够维持直流母线电压稳定。为了保证其长期正常工作,应避免过充或过放。当储能电池 SOC 达到充电上限 80% 时只允许放电;当储能电池 SOC 达到放电下限 20% 时只允许充电。

4) 电网端口:通过三相 AC/DC 变换器将电网与直流母线相连,既可以根据功率平衡需要选择多余发电功率并网,也可以根据设备的工作需求断开电网端口,实现离网运行。但由于传统的 V/F 控制限于离网模式,P/Q 控制限于并网模式,而下垂控制既可以用于并网模式,也可以用于离网模式,所以电网端口采用下垂控制作为功率外环控制,内环采用电压电流双闭环控制。其中为了更好地达到闭环控制效果,文中采用追踪较好的 PR 控制器。

## 2 多工况协调控制

在多端口能量互补设备的功率流动过程中,不平衡功率被直流母线电容器吸收导致电压波动,如式(1)所示,可以通过直流母线电压的稳定来反映设备内功率是否平衡:

$$\begin{cases} P_{\text{wind}} + P_{\text{pv}} = P_{\text{z}} \\ P_{\text{AC\_load}} + P_{\text{DC\_load}} = P_{\text{load}} \\ (P_{\text{z}} + P_{\text{grid}} + P_{\text{bat}} + P_{\text{load}}) \Delta t = \frac{1}{2} C (u_{c2}^2 - u_{c1}^2) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{wind}}$  为风电端口输入设备的功率,  $P_{\text{pv}}$  为光伏端口输入设备的功率,  $P_{\text{z}}$  为分布式发电单元输入设备的功率,  $P_{\text{AC\_load}}$  为交流负载端口消耗的功率,  $P_{\text{grid}}$  为由电网端口输入设备的功率,  $P_{\text{bat}}$  为储能端口输入设备的功率,  $P_{\text{DC\_load}}$  为直流负载端口消耗的功率,  $P_{\text{load}}$  为负载功率,  $C$  为直流母线等效电容值。

文中采用的多工况协调控制策略方法如图 2 所示,将控制系统分为本地控制层和中央管理层。以母线电压为反馈量,主要分为端口参数采集、多工况端口控制、多工况平滑切换 3 个部分。

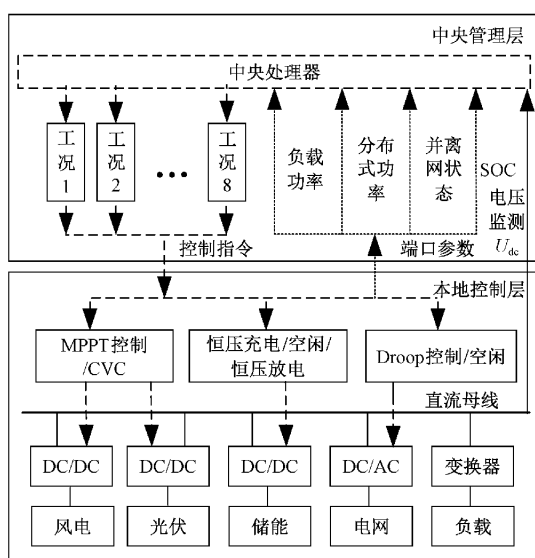


图 2 协调控制策略示意图

### 2.1 端口参数采集

中央处理器首先采集本地控制层的端口参数： $P_z$ 、 $P_{load}$ 、设备并网状态以及储能电池 SOC 等，上传至中央控制层的中央处理器进行处理。由于设备在正常运行过程中容易受到外界环境因素影响导致端口参数发生变化，故需设备每隔一段固定时间  $T_s$  自动采集端口参数上传。

### 2.2 多工况端口控制

中央处理器根据端口参数做出工况划分：首先比较  $P_z$  和  $P_{load}$  的大小来判断分布式电源的出力情况，然后通过设备的并网状态来判断是电网端口是否参与出力，接着由储能电池 SOC 判断当前所处运行工况，最后根据不同的运行工况选择合适的端口控制策略，使得设备能够在所处工况下稳定运行，具体如下：

工况 1： $P_z \geq P_{load}$  且设备工作在并网模式，若此时储能电池  $SOC \geq 0.8$ ，则设定光伏及风电端口处于 MPPT 控制，储能端口处于空闲状态，负载正常工作，通过电网端口控制母线电压稳定，分布式单元多余输出功率通过下垂功率控制流向电网；

工况 2： $P_z \geq P_{load}$  且设备工作在并网模式，若此时储能电池  $SOC < 0.8$ ，则设定光伏及风电端口处于 MPPT 控制，储能端口处于充电状态，负载正常工作，通过储能端口控制母线电压稳定，分布式单元多余输出功率被储能电池吸收；

工况 3： $P_z \geq P_{load}$  且设备工作在离网模式，若此时储能电池  $SOC \geq 0.8$ ，则设定光伏及风电端口为恒压控制，储能端口处于空闲状态，负载正常工作，通过光伏及风电端口控制母线电压稳定，分布式单元多余输出功率被舍弃；

工况 4： $P_z \geq P_{load}$  且设备工作在离网模式，若此时储能电池  $SOC < 0.8$ ，则设定光伏及风电端口处于 MPPT 控制，储能端口处于充电状态，负载正常工作，通过储能端口控制

母线电压稳定，分布式单元多余输出功率被储能电池吸收；

工况 5： $P_z < P_{load}$  且设备工作在并网模式，若此时储能电池  $SOC > 0.2$ ，则设定光伏及风电端口处于 MPPT 控制，储能端口处于放电状态，负载正常工作，通过储能端口控制母线电压稳定，负载功率缺额由储能电池提供；

工况 6： $P_z < P_{load}$  且设备工作在并网模式，若此时储能电池  $SOC \leq 0.2$ ，则设定光伏及风电端口处于 MPPT 控制，储能端口处于充电状态，负载正常工作，通过储能端口和电网端口控制母线电压稳定，负载功率缺额由电网提供，并且电网给储能电池提供充电功率；

工况 7： $P_z < P_{load}$  且设备工作在离网模式，若此时储能电池  $SOC > 0.2$ ，则设定光伏及风电端口处于 MPPT 控制，储能端口处于放电状态，负载正常工作，通过储能端口控制母线电压稳定，负载功率缺额由储能电池提供；

工况 8： $P_z < P_{load}$  且设备工作在离网状态，若此时储能电池  $SOC \leq 0.2$ ，则设定光伏及风电端口处于 MPPT 控制，储能端口处于空闲状态，通过切除非重要负载来控制母线电压稳定，功率缺额通过切载来解决，当母线电压降低到不满足要求的水平时对设备进行停机处理。

### 2.3 多工况平滑切换

在工况切换中，由于离网运行模式下的三相 AC/DC 变换器的交流侧电压的频率  $f_{ac}$ 、相位  $\theta_{ac}$  与幅值  $U_{ac}$  可能无法满足并网条件，如果此时直接并网可能会产生冲击电流，从而影响运行稳定性<sup>[15-17]</sup>。所以，文中在并网前加入预同步控制以使三相 AC/DC 变换器的交流侧电压的  $f_{ac}$ 、 $\theta_{ac}$  与  $U_{ac}$  与电网相同，此时并网不会产生冲击电流，实现并网与离网模式的平滑切换。为了实现变换器交流侧电压  $U_{ac} \angle \theta_{ac}$  和主电网  $U_g \angle \theta_g$  的电压同步，故文中在两者之间加入一个虚拟阻抗  $Z_v = R_v + iL_v$  如图 3 所示。

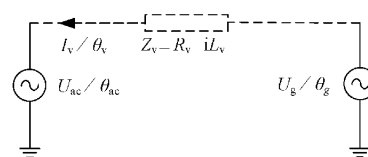


图 3 变换器交流侧与电网侧等效电路

图 3 中虚拟电流  $\dot{I}_v$ ：

$$\dot{I}_v = \frac{\dot{U}_g - \dot{U}_{ac}}{Z_v} \quad (2)$$

则虚拟三相电流分别为：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{va} \\ \dot{i}_{vb} \\ \dot{i}_{vc} \end{bmatrix} = \dot{I}_v \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \\ \cos\left(\theta_1 - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \cos\left(\theta_1 + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $\theta_1$  为虚拟电流 a 相的相角。

当三相 AC/DC 变换器的交流侧电压与电网侧同步时，虚拟电流  $\dot{I}_v = 0$ 。由于  $\dot{I}_v$  是虚拟量，虚拟阻抗  $Z_v$  的选

择范围很大,  $Z_v$  较小时将导致  $\dot{I}_v$  较大, 在调节过程中会加快预同步响应, 但  $Z_v$  太小又会导致设备频率振荡。所以需要选取合适的  $Z_v$  得到  $\dot{I}_v$  来反映  $\dot{U}_{ac}$  和  $\dot{U}_g$  的电压同步情况。

图 4 为预同步控制的电压、电流相量图, 其中  $\alpha\beta$  为两相静止坐标系,  $dq$  为旋转坐标系,  $\gamma$  轴与  $\dot{U}_{ac}$  垂直。  $\dot{U}_g - \dot{U}_{ac}$  为两侧电压相量差, 通过选择合适的虚拟阻抗可以使得  $\dot{I}_v$  垂直于相量  $\dot{U}_{ac} + \dot{U}_g$ , 取此时  $\dot{I}_v$  的正方向作为  $q$  轴正方向。

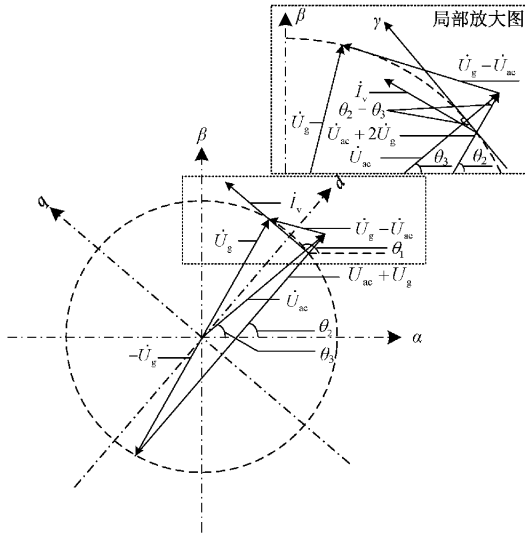


图 4 预同步控制的电压、电流相量图

则三相虚拟电流经过 Clark 变换得到两相静止坐标系下虚拟电流:

$$\begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{v\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

再经过 Park 变换得到旋转坐标系下虚拟电流:

$$\begin{bmatrix} i_{vd} \\ i_{vq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{v\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

可得:

$$\begin{bmatrix} i_{vd} \\ i_{vq} \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix} = I_v \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ \sin(\theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} = I_v \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

相位同步通过  $i_v$  的  $q$  轴分量  $i_{vq}$  来反映变换器交流侧电压与电网电压相位的超前、滞后关系: 当  $i_{vq} > 0$  时则说明  $\dot{U}_g$  超前于  $\dot{U}_{ac}$ , 当  $i_{vq} < 0$  时则说明  $\dot{U}_g$  滞后于  $\dot{U}_{ac}$ ; 用 PI 控制调节  $i_{vq}$  为 0 即可控制两侧电压幅值差为 0。幅值同步通过  $d$  轴与  $\alpha$  的夹角  $\theta_2$  与下垂控制的参考角  $\theta_3$  的差值  $\Delta\theta$  来判断两侧电压的幅值关系: 只有当  $\theta_2 = \theta_3$  时, 两侧电压的幅值才相等, 用 PI 控制调节  $\Delta\theta$  为 0 即可控制两侧电压幅值差为 0。待同步后再退出预同步控制, 此时设备并网即可实现平滑并网。

为了避免电压在允许范围内正常波动导致设备各端口控制频繁切换从而影响设备运行的稳定性, 加入电压监测环节, 使得只有母线电压波动超过  $\pm 5\%$  时才下发各端口所处运行工况的控制指令, 实现设备在各工况之间的平滑稳定切换, 工况切换流程图如图 5 所示。

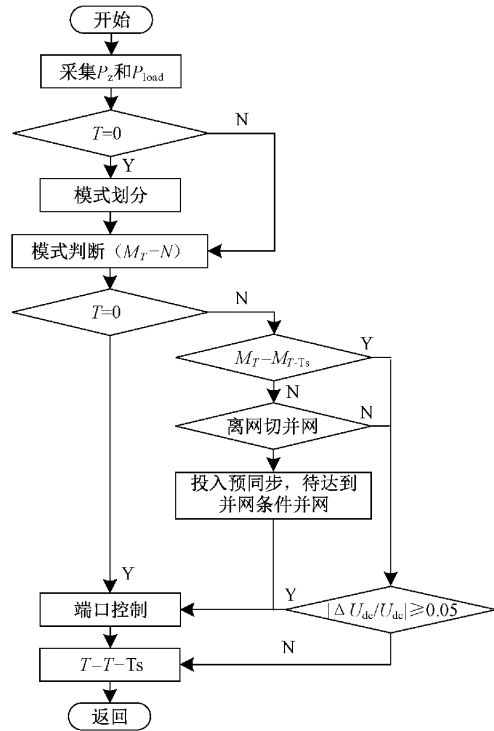


图 5 工况切换流程图

### 3 经典运行工况仿真分析

为了验证文中提出的多端口能量互补设备多工况协调控制策略的有效性, 按照图 1 所示结构图在 MATLAB/Simulink 中搭建多端口能量互补设备模型。通过仿真模型验证在“并网运行”、“离网运行”与“并离网切换”3 种典型运行场景工况切换的情况下, 直流母线电压是否能够按照既定的控制策略稳定在一定的范围内。具体的仿真参数如表 1 所示。

#### 3.1 涉及并网运行场景的仿真分析

设备处于并网模式, 仿真运行如图 6 所示。

初始  $t = 0$  s 时, 风速为 9 m/s, 光照强度为 800 W/m<sup>2</sup>, 直流负载为 15 kW, 交流负载为 15 kW, 储能电池 SOC 为 70%。在  $t = 0 \sim 1$  s 间, 风力发电功率稳定在 10.5 kW, 光伏发电功率稳定在 15.1 kW, 直流负载功率为 15 kW, 交流负载功率为 15 kW, 此时  $P_z < P_{load}$ , 储能电池 SOC 允许放电, 4.4 kW 功率缺额由储能补偿, 设备工作在工况 5。

在  $t = 1$  s 时光照强度增加为 1 000 W/m<sup>2</sup>, 光伏发电功率上升到 20.1 kW, 在  $t = 1 \sim 1.5$  s 间设备功率基本保持平衡, 储能既不充电也不放电, 设备工作在工况 5。

在  $t = 1.5$  s 时风速增加为 11 m/s, 风力发电功率上升

表 1 各端口仿真参数

名称	参数	名称	参数
光伏阵列开路电压 $U_{oc}$	750 V	Buck/Boost 电感 $L_3$	10 mF
光伏阵列短路电流 $I_{sc}$	41.6 A	Buck/Boost 电容 $C_5, C_6$	1 mF
光伏 Boost 电感 $L_1$	3 mH	AC/DC 变换器电感 $L_4$	3.2 mH
Boost 光伏阵列侧电容 $C_1$	33 $\mu$ F	AC/DC 变换器电容 $C_7$	20 $\mu$ F
Boost 直流母线侧电容 $C_2$	1 mF	电网相电压有效值 $U_p$	220 V
风电 Boost 电感 $L_2$	20 mH	电网频率 $f_g$	50 Hz
风电 Boost 电容 $C_3, C_4$	1 mF	母线电压设定值 $U_{dc\_ref}$	750 V
储能电池额定电压 $U_{bat}$	400 V	交流负载功率 $U_{AC\_load}$	15 kW
储能电池额定容量 $S_{bat}$	30 Ah	直流负载功率 $U_{DC\_load}$	15 kW

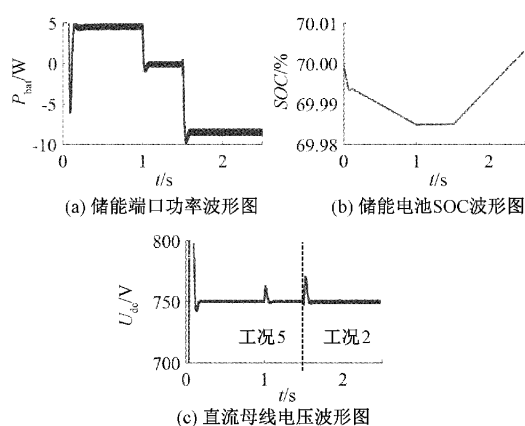


图 6 并网运行场景仿真波形

为 18.9 kW, 在  $t=1.5\sim 2.5$  s 间, 此时  $P_z > P_{load}$ , 储能电池 SOC 允许充电, 9 kW 分布式单元多余输出功率由储能吸收, 设备工作在工况 2。

在该仿真过程中直流母线电压如图 6(c) 所示,  $t=1$  s 和 1.5 s 时, 光伏和风电输出功率增加导致母线电压上升, 并在  $t=1.5$  s 时设备从工况 5 切换到工况 2。与文献[8]相比, 由于储能电池的充放电使得设备内功率平衡, 故使得电压波动在整个工况切换过程中能够维持在 0.5% 以内, 证明系统在该运行场景下有较好的控制稳定性。

### 3.2 涉及离网运行场景的仿真分析

由于离网场景设备的电网端口长时间断开, 可能会出现储能电池过充或过放的情况, 此时可通过协调控制策略对储能电池进行切除, 即在储能电池 SOC  $> 80\%$  或小于 20% 时切换至空闲模式, 保护储能电池, 所以接下来将分为两个场景进行仿真分析。

#### 1) 离网运行场景 1

设备处于离网场景, 仿真运行如图 7 所示。

初始  $t=0$  s 时, 风速为 10 m/s, 光照强度为 1 000  $W/m^2$ , 直流负载为 15 kW, 交流负载为 15 kW, 储能电池 SOC 为 79.99%。在  $t=0\sim 1.8$  s 间, 风力发电功率稳定在 14.6 kW, 光伏发电功率稳定在 20.1 kW, 直流负载功率为 15 kW, 交流负载功率为 15 kW, 此时  $P_z > P_{load}$ , 储能电池

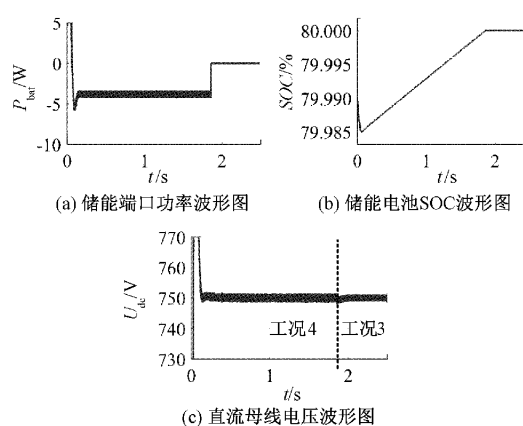


图 7 离网运行场景 1 仿真波形

SOC 允许充电, 4.7 kW 分布式单元多余输出功率由储能吸收, 设备工作在工况 4。

在  $t=1.8$  s 时, 储能电池 SOC 达到上限, 切换至空闲状态, 此时光伏端口由 MPPT 控制切换至 CVC 控制, 在  $t=1.8\sim 2.5$  s 间, 光伏发电功率下降到 16.2 kW, 由于光伏端口的控制切换降低了发电功率, 使得内部功率基本保持平衡, 设备工作在工况 3。

在该仿真过程中直流母线电压如图 7(c) 所示, 在  $t=1.8$  s 时, 由于储能电池 SOC 达到上限使得设备从工况 4 切换到工况 3。与文献[9]相比, 由于分布式端口的控制切换, 故使得直流母线电压波动在整个工况切换过程中能够维持在 0.5% 以内, 证明系统在该运行场景下有较好的控制稳定性。

#### 2) 离网运行场景 2

设备处于离网模式, 仿真运行如图 8 所示。

初始  $t=0$  s 时, 风速为 10 m/s, 光照强度为 500  $W/m^2$ , 直流负载为 15 kW, 交流负载为 15 kW, 储能电池 SOC = 20.03%。在  $t=0\sim 1.3$  s 间, 风力发电功率稳定在 14.6 kW, 光伏发电功率稳定在 8.4 kW, 直流负载功率为 15 kW, 交流负载功率为 15 kW, 此时  $P_z < P_{load}$ , 储能电池 SOC 允许放电, 7 kW 功率缺额由储能补偿, 设备工作在工况 7。

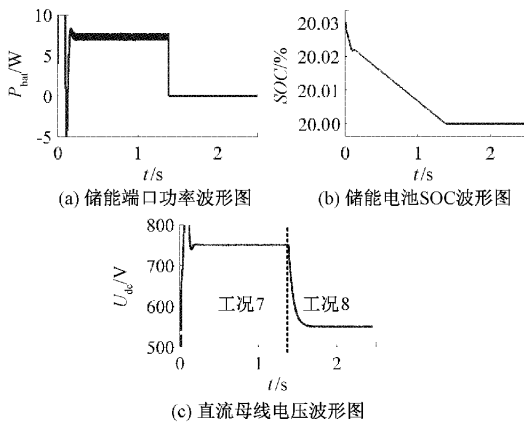


图 8 离网运行场景 2 仿真波形

在  $t=1.3$  s 时,储能电池 SOC 达到下限,切换至空闲状态,此时切除不重要的直流负载,在  $t=1.3\sim 2.5$  s 间由于切除负载使得内部功率基本保持平衡,设备工作在工况 8。

在该仿真过程中直流母线电压如图 8(c)所示,在  $t=1.8$  s 时,由于储能电池 SOC 达到下限使得设备从工况 7 切换到工况 8。与文献[9]相比,由于直流负载端口控制切换,故使得母线电压降低到 550V 并稳定下来,证明系统在该运行场景下有较好的控制稳定性。

### 3.3 涉及并离网切换运行场景的仿真分析

设备处于并离网切换场景,仿真运行如图 9 所示。

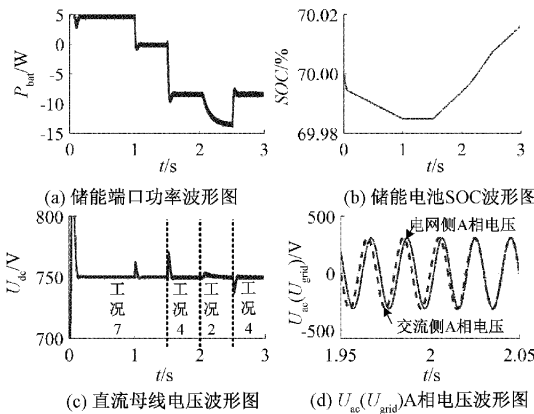


图 9 并离网切换运行场景仿真波形

初始  $t=0$  s 时,设备处于离网模式,风速为 9 m/s,光照强度为  $800\text{ W/m}^2$ ,直流负载为 15 kW,交流负载为 15 kW,储能电池 SOC 为 70%。在  $t=0\sim 1$  s 间,风力发电功率稳定在 10.5 kW,光伏发电功率稳定在 15.1 kW,直流负载功率为 15 kW,交流负载功率为 15 kW,此时  $P_z < P_{load}$ ,储能电池 SOC 允许放电,4.4 kW 功率缺额由储能补偿,设备工作在工况 7。

在  $t=1$  s 时光照强度增加为  $1000\text{ W/m}^2$ ,光伏发电功率上升到 20.1 kW,在  $t=1\sim 1.5$  s 间设备功率基本保持平衡,储能既不充电也不放电,设备工作在工况 7。

在  $t=1.5$  s 时,风速增加为 11 m/s,风力发电功率上升为 18.9 kW,在  $t=1.5\sim 2$  s 间,此时  $P_z > P_{load}$ ,储能电池 SOC 允许充电,9 kW 分布式单元多余输出功率由储能吸收,设备工作在工况 4。

在  $t=2$  s 时,设备切换至并网场景,如图 9(h)所示,设备投入预同步控制,使得并网开关两侧电压幅值、频率、相角迅速调节一致,在  $t=2\sim 2.5$  s 间,并使得 AC/DC 变换器功率稳定在下垂功率控制设定的 10 kW,其中电网提供 5 kW 给交流负载,此时  $P_z > P_{load}$ ,储能电池 SOC 允许充电,14 kW 分布式单元多余输出功率由储能吸收,设备工作在工况 2。

在  $t=2.5$  s 时,设备切换至离网场景,在  $t=2.5\sim 3$  s 间,此时  $P_z > P_{load}$ ,储能电池 SOC 允许充电,9 kW 分布式单元多余输出功率由储能吸收,设备工作在工况 4。

在该仿真过程中直流母线电压如图 9(c)所示, $t=1$  s 和 1.5 s 时,光伏和风电输出功率增加导致母线电压上升,并使得设备从工况 7 切换到工况 4, $t=2$  s 时,由于设备从离网至并网场景的切换导致母线电压上升,并使得设备从工况 4 切换到工况 2, $t=2.5$  s 时,由于设备从并网至离网场景的切换导致母线电压下降,并使得设备从工况 2 切换到工况 4。与文献[8-9]相比,由于在文中所提协调控制下,故使得直流母线电压波动在整个工况切换过程中维持在 0.5% 以内,并且如图 9(d)所示,与文献[11-14]相比,采用改进的无并离网控制方法能够在 30 ms 内实现预同步,使得并离网切换的快速性得到提升,证明系统在该运行场景下有较好的控制稳定性。

## 4 结 论

通过理论分析和仿真验证对文中提出的多工况协调控制策略可以得到以下结论:

设备可以在所提策略划分的不同运行工况中,通过下发给端口不同的控制策略来维持功率的平衡,进而保证母线电压稳定,从而维持设备稳定运行。

所提改进的并离网预同步控制方法可实现设备在各工况之间快速平滑切换,确保设备在所设计的多工况稳定运行,并且最大限度地利用了分布式输出功率,提高了系统设备运行的经济性。

需要指出的是,文中研究侧重能量互补设备的稳定运行,对于储能电池采用恒压充放电控制,尚未考虑充放电速率对其寿命的影响,有待后续进一步拓展研究。

### 参考文献

[1] 张文煜,李明,任巍曦,等.基于光储控制的微电网改进预同步控制及离并网切换策略研究[J].电子测量技术,2022,45(16):8-14.  
 [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.

- [3] 李瑜,张占强,孟克其劳,等.基于改进深度确定性策略梯度算法的微电网能量优化调度[J].电子测量技术,2023,46(2):73-80.
- [4] RAHIMPOUR S, HUSEV O, VINNIKOV D. Design and analysis of a DC Solid-State circuit breaker for residential energy router application[J]. Energies, 2022, 15(24).
- [5] 刘瑞,王鹤,艾凤明.基于能量路由器的光伏储能系统控制策略研究[J].节能技术,2022,40(2):169-174.
- [6] 刘凯,陈才学,文军,等.基于能量分层协调控制的能量路由器[J].太阳能学报,2018,39(5):1388-1395.
- [7] CHEN R, YANG Y, JIN T. A hierarchical coordinated control strategy based on multi-port energy router of urban rail transit[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 1-12.
- [8] 袁兴宇,苏适,李耀华,等.一种四端口能量路由器的协同控制策略研究[J].太阳能学报,2022,43(5):82-89.
- [9] 庞松楠.基于虚拟同步机的能量路由器控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [10] 张超.多端口能量路由器协调控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [11] 孙利,陈武,蒋晓剑,等.能源互联网框架下多端口能量路由器的多工况协调控制[J].电力系统自动化,2020,44(3):32-39.
- [12] 刘梦超,王生铁,温素芳.光储微电网并网平滑切换控制策略研究[J].可再生能源,2020,38(12):1633-1639.
- [13] 高永军,孙向东,周兆吉.基于虚拟阻抗功率的无锁相环并网预同步控制[J].电力电子技术,2021,55(4):99-102.
- [14] 黎荣伟,范元亮,许家浩,等.一种无锁相环的微电网逆变器预同步控制策略[J].广东电力,2021,34(8):43-49.
- [15] 曹坤,艾永乐,李港星.基于内模控制的逆变器并网无缝切换策略研究[J].电子测量技术,2022,45(23):19-24.
- [16] 万晓凤,詹子录,廖志鹏,等.虚拟同步发电机并网无缝切换策略研究[J].电子测量与仪器学报,2018,32(5):33-40.
- [17] 曹坤,艾永乐,李港星.基于内模控制的逆变器并网无缝切换策略研究[J].电子测量技术,2022,45(23):19-24. DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209923.

### 作者简介

陈权,博士,副教授,主要研究方向为电能高效利用及电力电子装置可靠性研究等。

E-mail: chquan@126.com

田鑫(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为多端口能量互补设备协调控制。

E-mail: tianxin21815@163.com

王群京,博士,二级教授,主要研究方向为电新能源汽车电机及其控制等。

E-mail: wangqunjing@ahu.edu.cn

朱刘柱,硕士,高级工程师,主要研究方向为配电网规划、新能源接入等。

E-mail: 754903252@qq.com

张辉,硕士,工程师,主要研究方向为直流配电网,新能源并网,电力电子技术等。

E-mail: zh1991hui@163.com