

## 分散自律架构下微电网功率管理与协调控制

赵 贺<sup>1</sup>, 井天军<sup>2</sup>, 熊 雄<sup>3</sup>

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075;

2. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083;

3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:**以包含光储单元的微电网为研究对象,首先总结分析了微电网在并网和孤岛模式下光储系统中光伏与储能的逆变器控制策略;然后提出了微电网在并网及孤岛模式下的功率管理策略,在并网模式下通过调节储能来维持公共连接点(PCC)处交换功率的恒定,在孤岛模式下通过分析微电网的多分段  $P/f$  特性曲线,针对不同运行场景基于本地信息对网内功率实施分散自律管理及控制。针对储能充电的场景,提出一种基于储能充电功率修正的管理控制策略,该策略通过改变光伏 DC 端口的参考电压使其偏离最大功率运行点,从而达到减发电的目的以满足储能荷电状态及最大充电功率的限制。最后基于仿真和实验对所提控制策略进行验证。

**关键词:**微电网;分散自律;功率管理;协调控制;光储系统;多分段  $P/f$  特性曲线

**中图分类号:**TM 727

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.012

### 0 引言

“十三五”末,我国分布式光伏发电的装机规模达 70 000 MW,大量分散的、具有间歇性的分布式电源 DG (Distributed Generation) 接入电网,极大地增加了电网的复杂性和管控难度,对电网的安全、可靠、经济运行产生了重大的影响。在一些解决方案中,将间歇性光伏联合其他具备调频/调压能力的 DG 单元(如储能、微型燃气轮机),以微电网的形式接入大电网,是目前抑制其功率波动并提高系统动态性能的有效途径<sup>[1-2]</sup>。

在微电网并网运行模式下,尤其是在孤岛模式及模式转换过程中,网内各 DG 间的能量管理及协调控制策略是微电网的关键技术。文献[3]以光储微电网为研究对象,提出并设计了一种并网运行模式和孤岛模式下基于储能控制策略切换的微电网母线电压的管理控制策略,该管理策略能维持微电网母线电压在额定电压的  $\pm 10\%$  的范围内波动。文献[4]在风储荷互补微电网拓扑结构的基础上,提出了一种并网微电网能量协调优化方法,以完成能量分配的协调控制并提高微电网运行的经济利益。文献[5]基于不同的时间尺度,提出了一种同步电压源的分层控制方法,该方案在微电网并网同期过程中能够维持各微源的功率均分关系,在并网运行时实现微电网与主网之间联络线功率控制,并使各微源按比例均分负荷和联络线功率。文献[6]提出了一种交直流微电网集中和分散控制相结合的分层控

制策略,该策略能够方便地对微电网内的多微源进行统一调度和管理,并满足多机组网模式中微源就地响应的要求。文献[7]针对独立微电网中所含多 DG 间的复杂协调控制问题,提出了一种基于多主控电源的对等控制和微电网中央控制器相结合的混合控制策略,该方法能够同时兼顾孤岛微电网的经济稳定与灵活高效运行。上述大多文献的研究中均基于了一种可监控的功率管理策略,并基于中央能量管理系统 EMS (Energy Management System) 得以实现,EMS 需要基于通信对各 DG 及负荷进行遥测以获得微电网的实时运行状态进行决策,通信的缺失或延时都将影响 EMS 做出最佳决策,因此依赖于通信的功率管理策略将在一定程度上降低控制策略的可靠性<sup>[8]</sup>。

为了避免繁琐的状态判断及对通信的依赖,文献[9]提出了微源综合并网控制模型和基于本地信息的自我决策模型,该模型可实现响应速度快但容量较小的储能与容量大但响应速度较慢的其他微源间不依赖通信的多源协调控制。但是,该文献着重对储能进行了研究,对其他微源进行了一定程度的简化。文献[10]提出了一种光储联合运行单元的协调控制策略,该策略通过控制 DC 侧电压以维持联合运行单元内部的功率平衡,通过控制逆变器出口电压及频率来控制联合单元与电网的交换功率,该策略无需通信,仅依据本地信息进行自主控制,但其在孤岛模式时仅由储能调节电压及频率,因此无法将其应用到含多 DG 的微电网中。文献[11]设计了一种基于虚拟输出阻抗的微电网逆变器下垂协调控制策略,该策略同样仅依赖本地负荷信息进行自主控制,但仅设计了具备下垂特性的 DG。

基于上述研究,本文提出一种包含光伏/储能联

收稿日期:2018-10-31;修回日期:2019-03-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900503)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900503)

合发电系统的微电网多 DG 功率分散管理策略以及协调控制策略。当并网运行时,通过调节储能充放电来抑制网内负荷及光伏的功率波动,以维持微电网与外电网交换功率的恒定,使微电网能够“友好”并网;当孤岛运行时,通过分析光储联合系统及其他 DG 的  $P/f$  特性曲线,进而得到整个微电网的多分段  $P/f$  特性曲线,微电网在不同运行场景下根据该  $P/f$  特性曲线进行自主管理及协调控制,这是一种分散自律的控制架构,孤岛模式下的功率管理策略基于弱通信连接,不依赖复杂的编程算法或繁琐的状态判断。上述功率管理策略将通过逆变器层面的控制来实现。最后通过搭建仿真模型和实验系统对所提策略的正确性和有效性进行了验证。

### 1 微电网拓扑结构及光储系统变流器建模

#### 1.1 微电网系统拓扑结构

包含光储系统微电网的拓扑结构图如图 1 所示。图中,  $v_{da}$ 、 $i_{da}$  分别为光伏源端输出电压和电流;  $v_{dc}$ 、 $P_{pv}$  分别为直流端电容电压和输出功率;  $P_B$  为储能的充放电功率;  $R$ 、 $L$  分别为并网线路的电阻和电感;  $P_H$ 、 $P_D$  分别为光储联合单元的输出功率和下垂单元的输出功率;  $P_{L1}$ 、 $P_{L2}$ 、 $P_{L3}$ 、 $P_{L4}$  为本地负荷,通过支路开关控制各支路负荷的投切。光伏选择 Boost 型 DC/DC 变换器实现升压、稳定电压以及最大功率点跟踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)功能,最后通过 DC/AC 逆变器连接到公共连接点(PCC)处的交流母线<sup>[12]</sup>。储能系统则由电池单体通过串并联将功率、容量及电压升到一定量级,经变流器连接到 PCC,储能将根据联合单元的运行工况在 PQ 和  $V/f$  控制策略之间进行切换,当微电网孤岛运行时采用  $V/f$  控制策略,当微电网并网运行时采用 PQ 控制策略<sup>[13]</sup>。考虑到微电网中 DG 多元化的特点,其中除了包含采用 MPPT 控制的光伏以及基于 PQ 或  $V/f$  控制的储能外,还接入了采用下垂控制的 DG,因此需对微电网中不同类型的单元进行混合协调控制。如图 1 所示,当开关 K 闭合时,微电网并网运行,当开关 K 断开时,微电网孤岛运行。本文的研

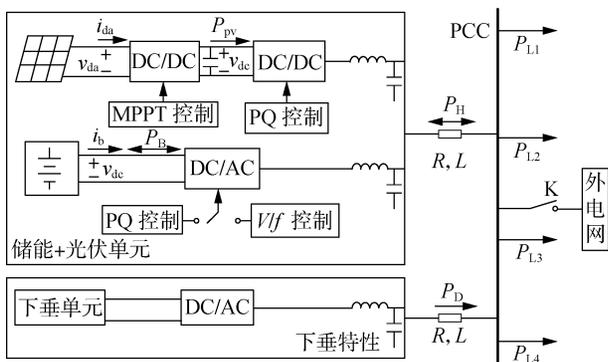


图 1 微电网的拓扑结构

Fig.1 Topology structure of microgrid

究重点是各微电源之间的协调控制策略,负荷的分级管理不是本文的研究内容,且在仿真和实验中仅模拟负荷的突增、突减运行工况。

#### 1.2 逆变器拓扑结构及控制策略

目前逆变器的输出调节主要有电压控制和电流控制<sup>[14]</sup>,分别用于调节逆变器的输出电压与输出电流,其中采用电流控制的逆变器还需要锁相环 PLL(Phase-Locked Loop)以保证频率的稳定,两者从输出端看进去分别相当于受控电压源和受控电流源。2 种控制策略如图 2 所示。图中,  $i$ 、 $v$  分别为电流型逆变器输出的电流和电压型逆变器输出的电压。

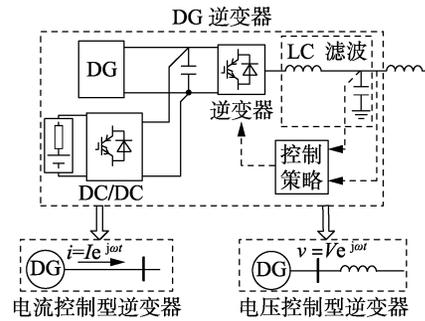


图 2 逆变器的电压和电流控制策略

Fig.2 Voltage and current control strategy of inverter

在光储联合系统中,光伏由于具有间歇性,其调频/调压的能力较弱,应保证其按最大功率运行以提高能源利用效率,即  $PQ = k \cdot MPPT$ ,其中  $0 \leq k \leq 1$ ,  $k=1$  表示按最大功率输出,  $k < 1$  表示减功率发电。由于 PQ 控制的实质是将有功和无功功率解耦后对电流进行控制,采用 PQ 控制的 DG 从接口逆变器看进去是一个受控电流源,因此相较于采用电压控制型逆变器,光伏逆变器采用电流控制型逆变器在结构上比较简单,且输出电能质量性能较好。而储能具备调压/调频的能力,可运行在  $V/f$  控制策略下,其在孤岛运行时提供稳定的电压、频率参考,因此采用电压控制型逆变器可方便调节端口输出电压。光伏逆变器的拓扑及其 PQ 控制策略如附录中的图 A1 所示,储能逆变器的拓扑及其 PQ、 $V/f$  控制策略如附录中的图 A2 所示,下垂单元逆变器的拓扑及其下垂控制策略如附录中的图 A3 所示。

#### 1.3 光伏 DC/DC 变换器的拓扑结构及其基于储能充放电限制的 MPPT 修正控制策略

光伏 DC/DC 变换器的拓扑结构及其 MPPT 修正控制策略如图 3 所示。图中,  $P_B$ 、 $P_{B-max}$  分别为储能的充放电功率和最大充放电功率,本文假设最大充电功率等于最大放电功率;  $C_{pv}$ 、 $L_{pv}$  分别为光伏源端电容、电感;  $C_{dc}$  为并网端电容;  $v_{da-ref}$ 、 $i_{da-ref}$  分别为光伏输出的参考电压、电流值。当  $P_B < P_{B-max}$  时,  $P_{I1}$  的输出为 0,即  $\Delta v = 0$ ,光伏按最大功率运行;当  $P_B > P_{B-max}$  时,  $P_{I1}$  输出一个为负的电压修正量  $\Delta v$  来修正

$v_{mppt}$  使光伏偏离最大功率运行点,从而达到减功率输出,满足储能最大充电功率的限制,而储能的最大充电功率  $P_{B\text{-charge}}$  与其荷电状态(SOC)相关,两者的特性曲线示意图如图 4 所示,  $P_{B\text{-charge}}/SOC$  曲线可定义如式(1)所示<sup>[15]</sup>。

$$P_{B\text{-charge}} = -P_{B\text{-max}} + P_{B\text{-max}} \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{SOC - SOC_2 + \delta SOC}{\delta SOC / k_\delta}\right) \right] \quad (1)$$

其中,  $k_\delta$  为当 SOC 接近  $SOC_2$  时,  $P_{B\text{-charge}}$  降为 0 的速率;  $\delta SOC = (SOC_{\text{max}} - SOC_2) \ll SOC_2$ 。

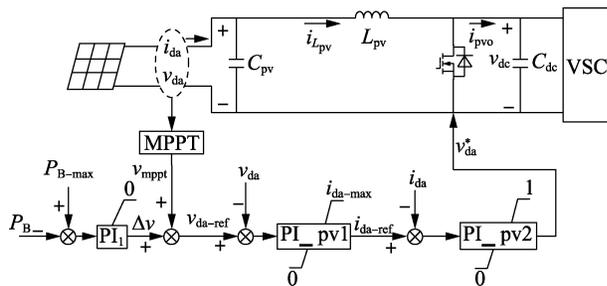


图 3 光伏 DC/DC 变换器的拓扑结构及其 MPPT 修正控制策略

Fig.3 Topology structure of DC/DC converter in PV and its MPPT modified control strategy

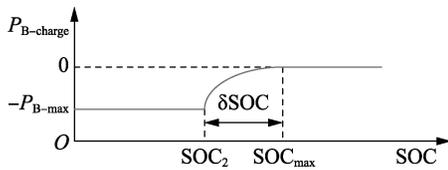


图 4  $P_{B\text{-charge}}/SOC$  特性曲线

Fig.4 Characteristic curve of  $P_{B\text{-charge}}/SOC$

## 2 不同模式下微电网系统的功率管理策略

### 2.1 并网模式下的功率管理策略

如图 1 所示,当开关 K 合并时,微电网运行在并网模式下,在该模式下下垂单元不输出功率,仅由光储单元联合外电网为网内负荷供电,光伏、储能均运行在 PQ 控制策略下,外电网提供稳定的频率及电压支撑。在并网模式下,网内 DG 通过协调控制策略维持 PCC 处交换功率的恒定,以使微电网能够“友好”并网,因此储能需根据网内负荷或光伏的突变做出响应以抑制功率变动。

### 2.2 并网转孤岛模式下的功率管理策略

如图 1 所示,当外电网发生故障后 PCC 处的母线电压达到所配置过电压/低电压限制后,开关 K 断开,在微电网由并网模式转孤岛模式的瞬间,下垂单元开始投入运行,储能由 PQ 控制策略转为  $V/f$  控制策略以维持并网转孤岛模式切换中的稳定运行。

### 2.3 孤岛模式下的功率管理策略

如图 1 所示,当开关 K 断开后,微电网转为孤岛

运行,光储系统、下垂单元的特性曲线如图 5 所示。图中,  $P_{pv\text{-mppt}}$ 、 $P_{D\text{-max}}$  分别为光伏、下垂单元的最大输出功率;  $m$  为下垂单元的下垂系数。

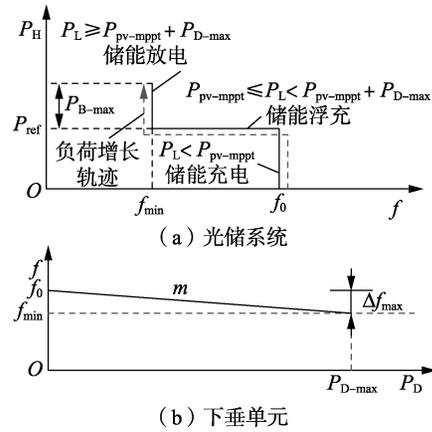


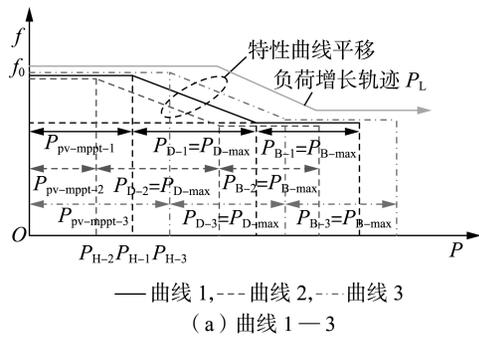
图 5 光储系统和下垂单元的特性曲线

Fig.5 Characteristic curves of PV-energy storage system and droop unit

图 5(a) 为光储系统的特性曲线,可将其分为 3 段:

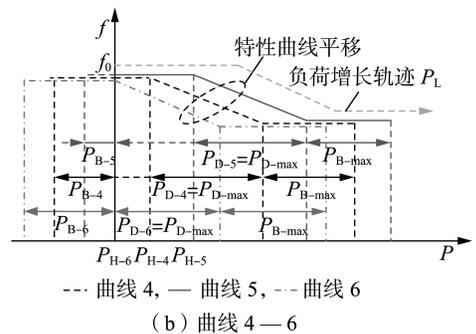
- a. 当  $P_L < P_{pv\text{-mppt}}$ , 即负荷小于光伏当前最大跟踪功率时,由储能充电,当充电功率大于储能最大充电功率或储能 SOC 偏大时,通过改变光伏的运行电压使其偏离最大功率点,达到减功率输出的目的从而使网内功率平衡;
- b. 当  $P_{pv\text{-mppt}} \leq P_L < P_{pv\text{-mppt}} + P_{D\text{-max}}$  时,储能浮充;
- c. 当  $P_L \geq P_{pv\text{-mppt}} + P_{D\text{-max}}$  时,储能放电。

合并图 5(a) 与图 5(b) 得到孤岛模式下整个微电网系统的  $P/f$  特性曲线,如图 6 所示。



— 曲线 1, --- 曲线 2, - - - 曲线 3

(a) 曲线 1—3



--- 曲线 4, — 曲线 5, - - - 曲线 6

(b) 曲线 4—6

图 6 孤岛模式下系统的  $P/f$  特性曲线

Fig.6  $P/f$  characteristic curves of system under islanding mode



$P_{D-\max} = 0.03 \text{ MW}$ ,因此在  $t_3$  时刻负荷继续增加时,储能开始放电并维持孤岛频率在  $49.8 \text{ Hz}$ 。在  $t_4$  时刻负荷开始减少,储能首先减放电到 0,随后  $P_D$  开始减少,孤岛频率相应地逐渐升高。

由图 11 可看出,场景 **d** 下负荷功率维持在  $P_L = 0.045 \text{ MW}$  不变,光伏输出功率分别在  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$  时刻增加或减少,  $P_D$  在  $t_1, t_2$  时刻跟随  $P_{pv}$  的增加而减少,孤岛频率逐渐升高。  $P_D$  在  $t_2$  时刻减小到 0,因此在  $t_3$  时刻  $P_{pv}$  继续增加时,储能开始充电并维持孤岛频率在  $50 \text{ Hz}$ 。在  $t_4$  时刻  $P_{pv}$  开始减少时,储能首先减充电到 0,随后  $P_D$  开始增加,孤岛频率相应地逐渐降低。

由图 12 可以看出,场景 **e** 下储能 SOC 低于

$\text{SOC}_1$ , 优先对储能进行充电。  $P_{pv}$  始终按最大功率输出  $0.045 \text{ MW}$ , 负荷  $P_L$  分别在  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$  时刻增加或减少, 当  $t < t_1$  时,  $P_L = P_{pv}$ ,  $P_D = P_{\text{ch-max}} = 0.02 \text{ MW}$ , 即储能按照最大充电功率进行充电; 当  $t = t_1$  时, 增加的负荷由下垂单元增加输出功率来平衡, 孤岛频率按照特性曲线下降; 当  $t = t_2$  时,  $P_D = P_{D-\max} = 0.03 \text{ MW}$ , 为了保持发载平衡, 储能开始减功率充电  $P_{\text{ESS}} = -0.01 \text{ MW}$ , 孤岛频率按照特性曲线下降; 当  $t = t_3$  时, 储能进一步减功率充电到 0, 孤岛频率按照特性曲线进一步下降; 当  $t = t_4$  时, 储能开始放电以维持功率平衡并且维持孤岛频率在  $49.8 \text{ Hz}$ ; 当  $t = t_4, t = t_5$  时, 随着负荷的逐渐减小, 储能减放电功率到 0 并且反向充电,  $P_D$  维持最大功率输出, 孤岛频率维持在

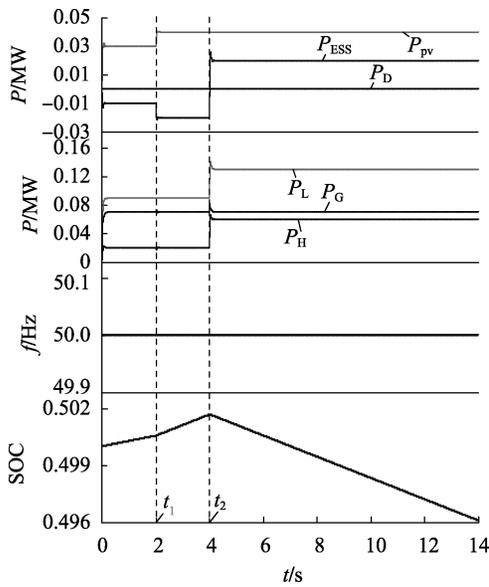


图 8 场景 a 的仿真结果

Fig.8 Simulative results of Scenario a

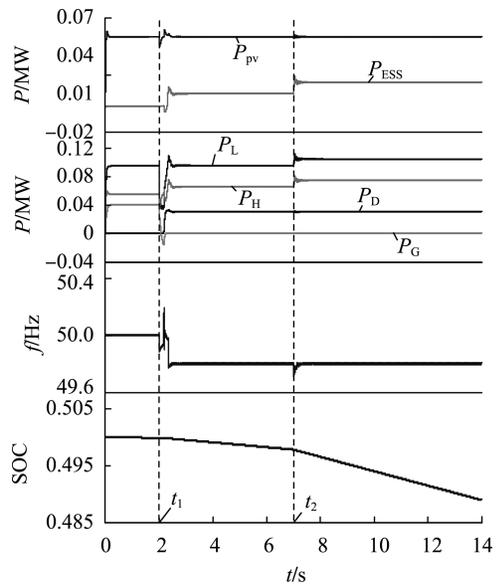


图 9 场景 b 的仿真结果

Fig.9 Simulative results of Scenario b

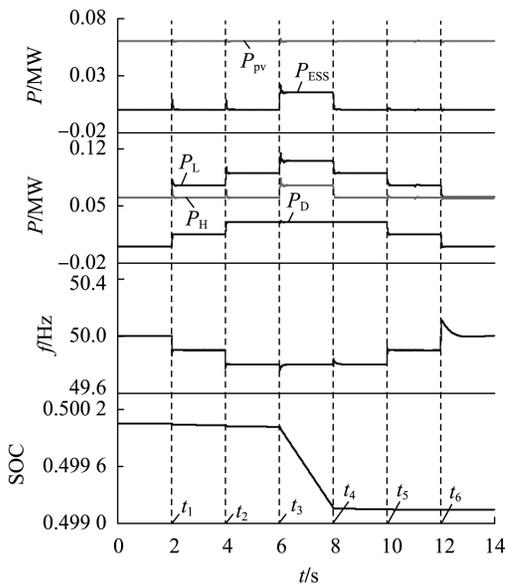


图 10 场景 c 的仿真结果

Fig.10 Simulative results of Scenario c

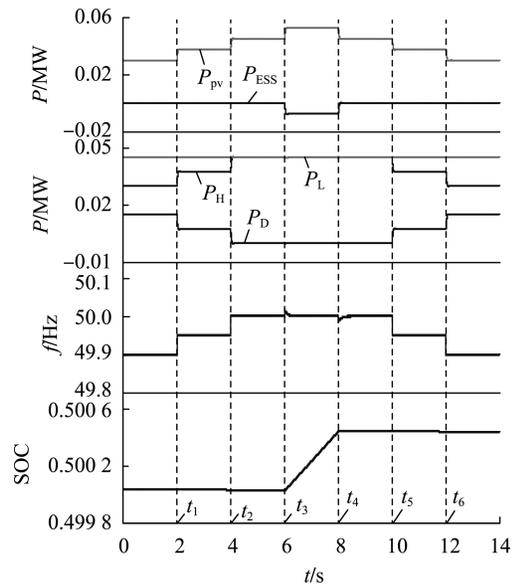


图 11 场景 d 的仿真结果

Fig.11 Simulative results of Scenario d

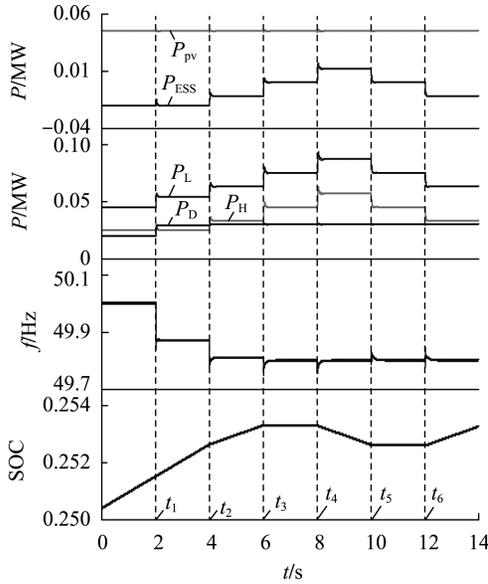


图 12 场景 e 的仿真结果

Fig.12 Simulative results of Scenario e

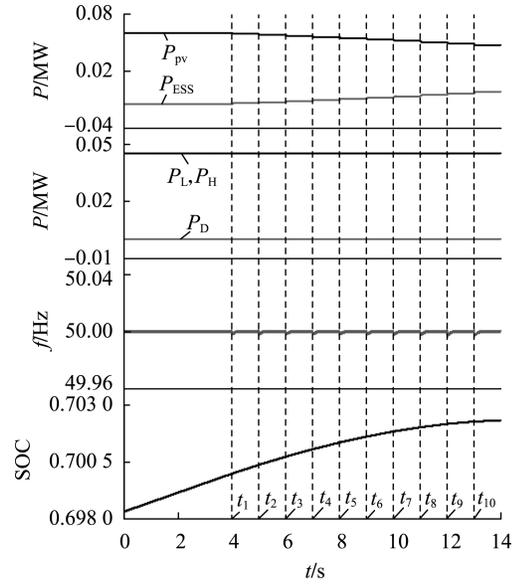


图 13 场景 f 的仿真结果

Fig.13 Simulative results of Scenario f

49.8 Hz。

由图 13 可知,场景 f 下  $P_L < P_{pv}$ , 储能在  $t < t_1$  时按照  $P_{pv} - P_L$  进行充电; 当  $t = t_1$  时, 储能 SOC 达到  $SOC_2$ , 启动光伏减功率管理策略, 在  $t_1 - t_{10}$  时段, 通过不断改变光伏直流侧参考电压修正值, 使其不断偏离最大功率跟踪电压  $V_{mpp}$ , 从而达到减功率发电的目的, 储能的充电功率对应地逐渐减小, 其 SOC 曲线的斜率逐渐减小。

#### 4 实验验证

基于仿真研究, 进一步搭建微电网实验系统以验证所提策略, 微电网实验系统如附录中的图 A4 所示, 其配置与仿真系统一致。

限于篇幅, 本节只挑选 2 种运行场景进行实验验证: 孤岛运行场景 a,  $SOC_1 < SOC < SOC_2$ , 光伏输出不变, 模拟负荷突变; 孤岛运行场景 b,  $SOC_1 < SOC < SOC_2$ , 负荷不变, 模拟光伏输出突变。2 种运行场景的实验结果分别如图 14、图 15 所示。由图 14 可看出, 随着负荷先增加后减小, 基于本文所提功率分散

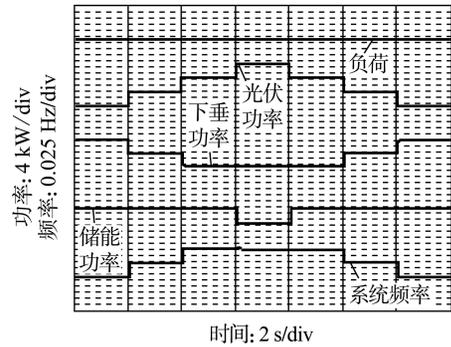


图 15 孤岛运行场景 b 的实验结果

Fig.15 Experimental results of islanding operation Scenario b

管理策略, 各单元基于多分段特性曲线来跟踪负荷功率的变动, 系统频率先减小后升高。由图 15 可看出, 随着光伏的变动, 系统同样基于多分段特性曲线进行功率分散管理及协调控制, 共同维持系统频率在合理的范围内, 频率值先升高后降低。2 种运行场景的实验结果与仿真结果一致, 进一步验证了所提策略的正确性与有效性。

#### 5 结论

本文提出一种包含光伏/储能联合发电系统的微电网多 DG 功率分散管理策略以及协调控制策略。尤其在孤岛运行时提出一种基于微电网多分段  $P/f$  特性曲线的分散自律协调控制策略, 该策略基于弱通信连接, 不依赖复杂的编程算法或是繁琐的状态判断。所得具体的结论如下:

- a. 当微电网并网运行时, 通过调节储能充放电能够很好地抑制微电网内负荷以及光伏的波动, 维持 PCC 处的交换功率恒定, 使得微电网能够“友好”并网;

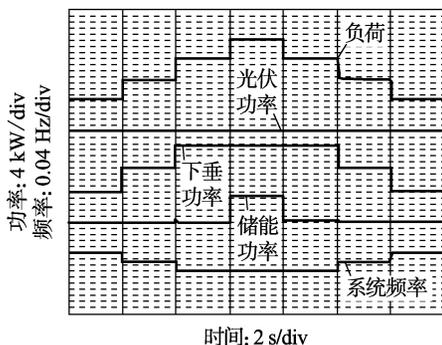


图 14 孤岛运行场景 a 的实验结果

Fig.14 Experimental results of islanding operation Scenario a

b. 在并网转孤岛的过程中,储能控制策略的切换能够保证模式切换后稳定运行;

c. 当微电网孤岛运行时,微电网在各种运行场景下均能够根据多分段  $P/f$  特性曲线进行自主稳定控制;

d. 当储能 SOC 达到  $SOC_2$  时,通过设计的减功率发电控制环可有效地通过改变光伏直流侧的参考电压使其不断偏离最大功率运行点,达到减光伏发电的目的,进而减小储能的充电功率以减缓储能 SOC 的增长速率。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 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 Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.  
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [3] 徐少华, 李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 25-33.  
XU Shaohua, LI Jianlin. Grid-connected/island operation control strategy for Photovoltaic/Battery micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 25-33.
- [4] 熊雄, 井天军, 孙可, 等. 主动配电网下多微电网间功率协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 15-21.  
XIONG Xiong, JING Tianjun, SUN Ke, et al. Power coordinated optimization among multi-microgrid in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 15-21.
- [5] 米阳, 吴彦伟, 纪宏彭, 等. 基于多组储能动态调节的独立直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 170-176.  
MI Yang, WU Yanwei, JI Hongpeng, et al. Coordinative control based on dynamic load allocation among multiple energy storages for islanded DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 170-176.
- [6] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [7] 马艺玮, 杨苹, 吴捷. 含多分布式电源独立微电网的混合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 103-109.  
MA Yiwei, YANG Ping, WU Jie. Hybrid control strategy of islanded microgrid with numerous distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 103-109.
- [8] RUA D, MOURA PEREIRA L F, GIL N, et al. Impact of multi-microgrid communication systems in islanded operation[C]//2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Manchester, UK: IEEE, 2011: 1-6.
- [9] 吴栋伟, 窦晓波, 吴在军, 等. 孤岛模式下基于快速储能投退机制的微电网多源协调控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 174-179, 190.  
WU Dongwei, DOU Xiaobo, WU Zaijun, et al. A multi-source cooperative control strategy based on switching on and off information of active storage for microgrid in island mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 174-179, 190.
- [10] SERBAN E, SERBAN H. A control strategy for a distributed power generation microgrid application with voltage- and current-controlled source converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 2981-2992.
- [11] KIM J, GUERRERO J M, RODRIGUEZ P, et al. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 689-701.
- [12] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.  
WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [13] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-106.  
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-106.
- [14] AJ-AHMED M A, ILLINDALA M S. The influence of inverter-based DGs and their controllers on distribution network protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2928-2937.
- [15] THOUNTHONG P, RAEL S, DAVAT B. Control algorithm of fuel cell and batteries for distributed generation system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 148-155.
- [16] 李学生. PSCAD 建模与仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 72.

### 作者简介:



赵贺

赵贺(1985—),女,北京人,高级工程师,硕士,研究方向为微电网运行控制、电能质量及配电自动化(E-mail: zhaoh@bj.sgcc.com);

井天军(1980—),男,北京人,副教授,博士,主要研究方向为微电网技术(E-mail: jingtianjun@162.com);

熊雄(1988—),男,湖北恩施人,工程师,博士,研究方向为微电网技术。

(下转第95页 continued on page 95)

- [21] CAGIGAL M C. PV self-consumption optimization with storage adaptive DSM for the residential sector[J]. Solar Energy, 2011, 85(9):2338-2348.
- [22] WANICH A S, YANG Y, BLAABJERG F. High performance constant power generation in grid-connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3):1822-1825.
- [23] 欧阳森, 马文杰. 考虑电压故障类型的光伏逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9):21-26.  
OUYANG Sen, MA Wenjie. Low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter considering voltage fault type[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9):21-26.

## 作者简介:



孟洪民

孟洪民(1989—),男,山东临沂人,博士,主要研究方向为综合能源系统控制优化、新能源电力系统以及电力人工智能等(E-mail:lymhm310@gmail.com);

刘迪(1982—),男,黑龙江鸡西人,高级工程师,硕士,研究方向为综合能源系统、企业信息化建设、大数据、人工智能等

(E-mail:liudi@sgitg.sgcc.com.cn)。

## Energy management strategy based on model predictive control of microgrid cluster considering battery health

MENG Hongmin<sup>1</sup>, LIU Di<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, QIU Zhen<sup>1</sup>, HUANG Xiaoguang<sup>1</sup>, XING Xiaowen<sup>2</sup>

(1. State Grid Information and Telecommunication Group Co., Ltd., Beijing 102211, China;

2. Department of Electrical Engineering, North Western Polytechnical University, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to improve the new energy accommodation ability and reduce the operation cost of microgrid cluster, an energy management strategy based on MPC (Model Predictive Control) of microgrid cluster is proposed with the consideration of battery health. Two charging modes of battery are simulated, and the mathematic model of microgrid cluster and constraint formulation are expressed as MILP (Mixed Integer Linear Programming) optimization problem, and combined with MPC framework, the optimization problem is solved online with the satisfaction of constraints. Since the energy management of microgrid is mainly based on day-ahead scheduling, a varying time-domain MPC optimization strategy is proposed to further reduce the extra calculation amount. The proposed strategy is verified based on the hardware-in-the-loop experimental platform, and results show that the proposed strategy can maximize the use of new energy, reduce the power purchase cost of microgrid cluster, and has good real-time performance. Constant voltage charging mode can effectively protect the battery health.

**Key words:** microgrid cluster; energy management; mixed integer linear programming; varying time-domain model predictive control; hardware-in-the-loop; battery health

(上接第 87 页 continued from page 87)

## Power management and coordinated control of microgrid under decentralized and autonomous architecture

ZHAO He<sup>1</sup>, JING Tianjun<sup>2</sup>, XIONG Xiong<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The microgrid with photovoltaic-energy storage units is taken as the research object. Firstly, the control strategies of photovoltaic inverter and energy storage inverter in the photovoltaic-energy storage system are summarized and analyzed, when the microgrid operates in the grid-connected and islanding modes. Then, the power management strategies of microgrid under the grid-connected and islanding modes are proposed. When the microgrid operates in the grid-connected mode, the exchange power at the PCC (Point of Common Coupling) is maintained constant by regulating the energy storage; when the microgrid operates in the islanding mode, the multi-segment  $P/f$  characteristic curves of microgrid are analyzed, and the decentralized and autonomous power management and control are implemented for different operation scenarios based on local information. Aiming at the charging scenario of energy storage, a management control strategy based on charging power correction of energy storage is proposed, which reduces the power generation to meet the limitation of SOC (State of Charge) and maximum charging power of energy storage by changing the reference voltage of the photovoltaic DC port to make it deviate from the maximum power operating point. Finally, the proposed control strategy is verified by simulation and experiment.

**Key words:** microgrid; decentralized and autonomous; power management; coordinated control; PV-energy storage system; multi-segment  $P/f$  characteristic curves

## 附录

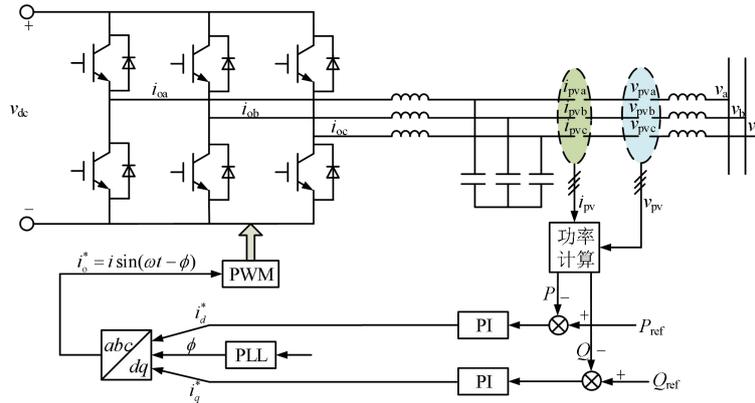
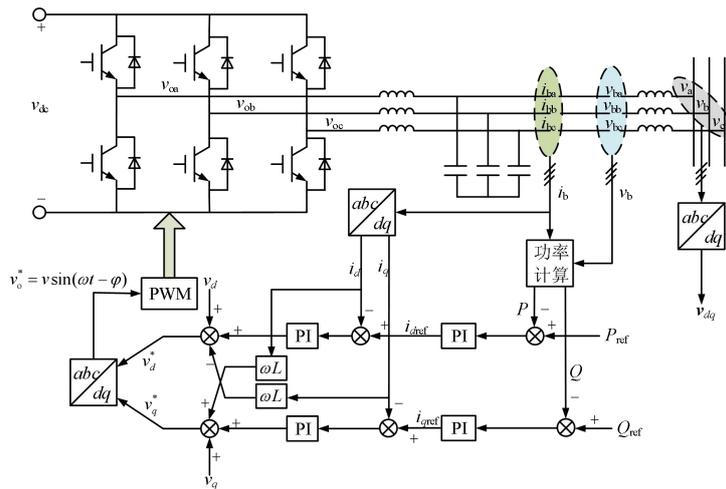


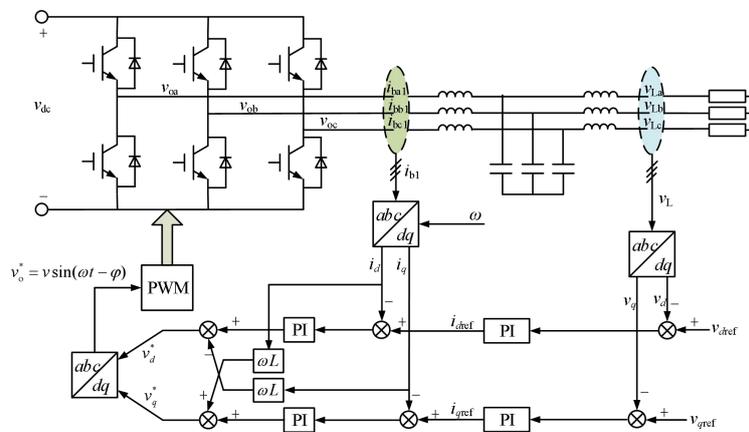
图 A1 光伏逆变器及其 PQ 控制策略

Fig.A1 PV inverter and its PQ control strategy

图 A1 中,  $v_{dc}$  为逆变器直流侧电压, 与光伏 DC/DC 变换器接口相连;  $i_{oa}$ 、 $i_{ob}$ 、 $i_{oc}$  为逆变器端口的输出电流;  $i_{pva}$ 、 $i_{pvb}$ 、 $i_{pvc}$  为并网线路电流;  $v_{pva}$ 、 $v_{pvb}$ 、 $v_{pvc}$  为 LC 滤波器出口电压;  $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$  为 PCC 处的电压;  $i_{pv}$ 、 $v_{pv}$  分别为光伏端输出电流及电压;  $\phi$  为通过对储能或者外电网提供的参考电压锁相得到的相角, 锁相环通常由鉴相器、滤波器、压控振荡器构成前向通道, 由分频器组成频率相位的反馈通路, 其控制回路设计众多文献已有介绍, 本文不再赘述。



(a) PQ 控制策略



(b) V/f 控制

图 A2 储能逆变器及其控制策略

Fig.A2 Energy storage inverter and its control strategies

图 A2 中, PQ 控制采用功率外环和电压电流双内环,  $v_{oa}$ 、 $v_{ob}$ 、 $v_{oc}$  为逆变器端口输出电压,  $i_{ba1}$ 、 $i_{bb1}$ 、 $i_{bc1}$  为逆变器端口输出电流;  $V/f$  控制采用电压、电流双环,  $v_{La}$ 、 $v_{Lb}$ 、 $v_{Lc}$  为检测到的负荷侧电压。

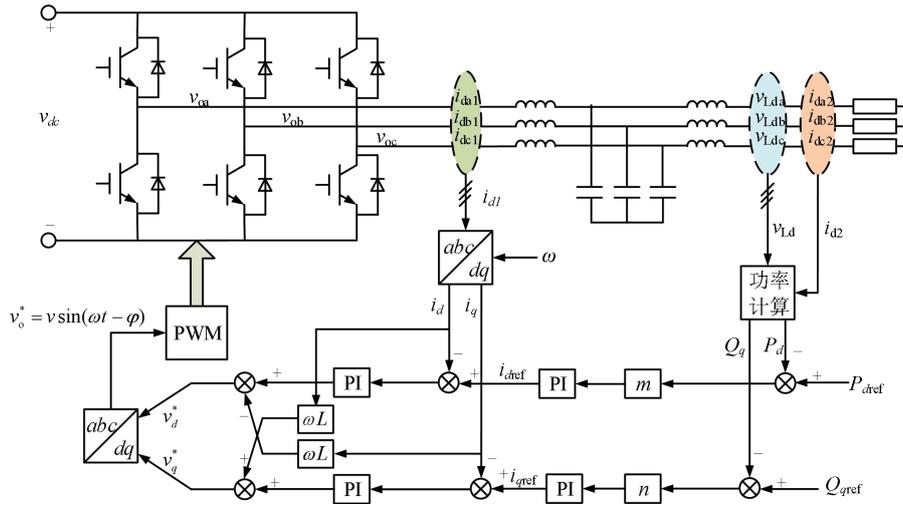


图 A3 下垂控制策略

Fig.A3 Droop control strategy

图 A3 中的逆变器输出功率与给定功率作差后, 先后经过下垂和 PI 环节生成内环输入电流参考信号, 内环经过 PI 环节和前馈解耦环节得到内环电压输出参考信号。



图 A4 实验系统示意图

Fig.A4 Schematic diagram of experimental system

图 A4 所示实验系统主要包括 A、B、C、D、E 这 5 个模块, 其中模块 A 为高精度可编程大功率回馈式双向直流电源 TopCon TC.GSS.32.500.4WR.S 系列, 单个模块的最大输出功率为 32kW, 500V 可调, 实验室中共有 8 个电源模块, 选取其中的 3 个分别模拟本文的光伏、储能及下垂单元。模块 B 为微电网三相交流母线, 与微电网相连。模块 C 为 TMS320F28335 floating-point 微型可编程控制器, 用于编写本文所提功率管理及混合控制策略以控制各变流器。模块 D1、D2、D3 分别为光伏、储能与下垂单元的并网接口。模块 E1、E2 为两路可编程负荷组, 本文只用到 E1 这一路负荷, 以模拟负荷突变的运行工况。

表 A1 系统参数

Table A1 Parameters of system

参数	数值
滤波电感/mH	1.2
滤波电容/ $\mu$ F	1000
光伏输入电感/mH	0.55
光伏输入电容/ $\mu$ F	1500
光伏输出电容/ $\mu$ F	1200
光伏 DC/DC 控制外环 $k_p, k_i$	0.5, 250
光伏 DC/DC 控制内环 $k_p, k_i$	0.01, 50
光伏 PQ 控制环 $k_p, k_i$	1.0, 100
储能 PQ 控制外环 $k_p, k_i$	0.75, 50
储能 PQ 控制内环 $k_p, k_i$	5.5, 10
储能 $V/f$ 控制外环 $k_p, k_i$	0.5, 5.0
储能 $V/f$ 控制内环 $k_p, k_i$	1.0, 200
MPPT 修正控制的功率环 $k_p, k_i$	0, 25
下垂控制外环 $k_p, k_i$	0.25, 2.5
下垂控制内环 $k_p, k_i$	0.5, 100