

# 基于混合静止能量的虚拟转动惯量控制技术

张祥宇<sup>1</sup>, 李凌斐<sup>1</sup>, 边子轩<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 国网河北省电力有限公司 沧州供电分公司, 河北 沧州 061000)

**摘要:**首先在频率动态变化过程中,建立蓄电池的电池储能、超级电容器的电容储能与同步发电机的机械动能间的能量转换关系,阐述源于2种静止能量的混合储能系统的虚拟转动惯量的定义。其次,根据蓄电池和超级电容器的充放电特性,利用2种储能单元间的功率协同调节,提出含电池储能与电容储能的虚拟转动惯量的控制策略。该控制策略通过监测系统频率波动,根据2类储能元件的功率调节特性及荷电状态,协同调用2种静止能量,以模拟同步发电机组的惯性响应。最后,通过搭建含混合储能的光伏微电网仿真系统,验证了所提控制策略能够充分利用混合储能设备中存储的静止能量快速虚拟出惯性响应,显著改善系统频率的稳定性。

**关键词:**光伏发电;混合储能;虚拟惯量;频率响应;蓄电池;超级电容器

**中图分类号:**TM 727;TM 912

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201911003

## 0 引言

将风电、光伏作为主力电源的分布式微电网成为新能源消纳倍受关注的组网方式之一<sup>[1]</sup>。为了维持系统的安全稳定运行,装配储能设备也已经成为孤立微电网平抑新能源和注入随机、间歇性发电功率的可行方案,极具应用前景<sup>[2]</sup>。然而,仅具备平抑功率波动的储能单元虽然具有改善频率稳定的功能,却无法形成合理有效的频率调节效应,因此孤立微电网的频率稳定问题仍然无法得到保障。

新能源发电系统均配备电力电子换流器,因而其具备独立、快速的功率调节能力。理论上,风电、光伏及储能设备均能够在频率变化初期,快速调节功率为系统提供有效的频率支持。因此,适于新能源的虚拟惯量开发技术近年来取得了快速进展。文献[3]定义了变速风电机组的虚拟转动惯量,研究结果表明虚拟惯性控制可以减小风电并网削弱系统惯性的不利影响。文献[4-5]采用微分控制环节和有功频率下垂控制环节,叠加在变速风电机组的最大功率跟踪控制中,为频率变化提供附加惯性支持。光伏发电系统则可以在并网侧逆变器的功率控制环节中,引入虚拟同步机控制技术<sup>[6-8]</sup>,借鉴同步发电机的动态模型建立传递函数,模拟常规发电机组的动态特性及调频措施<sup>[9-10]</sup>。由于光伏组件无能量存储能力,虚拟同步机控制启动后,获得预期的功率响应仍然需要增配储能设备提供能量来源,但尚未见

深入探讨的文献。此外,与旋转发电机不同,光伏组件与储能设备均属静止电源,自身无旋转动能<sup>[11-12]</sup>,获得虚拟转动惯量需要建立静止储能与机械动能之间的能量转化关系,但理论分析目前仍显不足。显然,非旋转静止发电设备必须依赖储能装置作为能量来源,才能具备虚拟转动惯量的控制能力。目前,电力系统中普遍应用蓄电池和超级电容器作为储能设备。其中,高能量密度的蓄电池会受到充放电速度及次数的限制,但可通过配备高功率密度的超级电容器,应对快速充放电和多次循环充放电的使用需求,从而构成混合2种静止能量的储能设备<sup>[13]</sup>。综上,仅用于平抑功率波动的储能设备无法保障微电网的频率稳定性,若要进一步开发储能设备的惯性频率支持能力,需深入探讨从电池储能和电容储能的混合静止能量储备中获得虚拟惯量的控制方法。

在系统频率变化过程中,为获得以混合静止能量为能量来源的虚拟转动惯量,本文分别建立了蓄电池储能、电容器储能与发电机旋转机械动能间的能量转化关系,理论推导基于混合储能系统 HESS (Hybrid Energy Storage System) 的虚拟转动惯量的定义。在现有 HESS 功率控制策略的基础上,针对蓄电池与超级电容器各自的调节特性及所处荷电状态,提出基于混合静止能量的虚拟转动惯量控制技术。为验证所提控制策略的有效性,本文搭建了光伏装机比重约为30%的微电网仿真系统,对不同负荷波动的情况下,HESS对电网惯性支持的动态过程进行了仿真研究。

## 1 HESS的能量分配

本文建立了以光伏为主力电源的分布式孤立微电网,系统拓扑结构如图1所示。该系统包括光伏

收稿日期:2019-03-09;修回日期:2019-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507065);河北省自然科学基金资助项目(E2018502108)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507065) and National Natural Science Foundation of Hebei Province(E2018502108)

电源、储能系统、日常负荷及柴油发电机组。储能系统由蓄电池组和超级电容器构成 HESS 设备。图中,  $P_{pv}$  为光伏输出的功率参考指令;  $P_B$  为蓄电池的功率参考指令;  $P_C$  为超级电容器的功率参考指令;  $P_G$  为柴油发电机输出的功率参考指令;  $P_L$  为负荷功率。

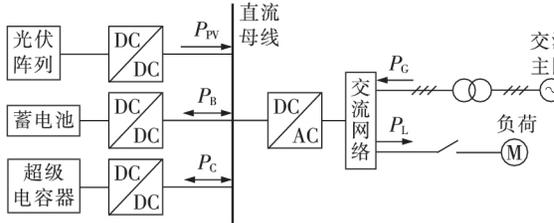


图1 微电网系统拓扑结构图

Fig.1 Topological structure diagram of microgrid system

本文选择目前微电网中应用技术最为成熟的柴油发电机组维持系统在孤岛状态下的安全运行。由于光伏发电具有很强的波动性,孤立微电网系统配备了 HESS 设备以平抑光伏功率的波动,并用于避免新能源注入系统功率大幅度突变时频繁投切负荷带来的经济与设备损耗问题。HESS 元件的功率输出变化量可表示为:

$$\Delta P_H = \Delta P_L - \Delta P_G - \Delta P_{PV} \quad (1)$$

其中,  $\Delta P_H$  为 HESS 元件的功率变化量;  $\Delta P_G$  为柴油发电机输出功率变化量;  $\Delta P_{PV}$  为光伏输出功率变化量;  $\Delta P_L$  为负荷功率变化量。

由于蓄电池不适合频繁充放电,如果由超级电容器提供功率的突变部分,即高频分量,则蓄电池只需提供低频分量即可。

高频功率指令可以将功率指令经单极点高通滤波器滤波之后得到,即超级电容器的功率指令为:

$$P_{SC} = P_H \frac{sT_s}{1+sT_s} \quad (2)$$

其中,  $P_{SC}$  为超级电容器的功率参考指令;  $T_s$  为高通滤波器的时间常数;  $P_H$  为 HESS 元件的功率指令。

经高通滤波后,蓄电池组仅承担低频功率波动,其有功功率输出可表示为:

$$P_B = P_H \frac{1}{1+sT_s} \quad (3)$$

为了过滤负荷突变时的高频分量,本文将  $T_s$  设置为 20。功率扰动信号中的高频分量首先送入超级电容器,而经高通滤波后的低频分量则分配给蓄电池,不仅有效降低了负荷突变或发电功率突变对蓄电池的冲击,而且充分利用了 2 种储能元件的充放电特性,完成功率平抑功能。

图 2 为 HESS 控制策略图。图中,  $u_B$  为蓄电池电压;  $u_C$  为超级电容器电压。HESS 设备可用于平抑光伏及发电机的输出功率波动,并且通过 2 种储能单

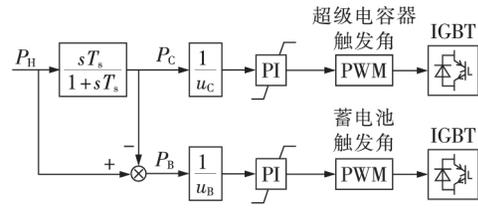


图2 HESS控制策略图

Fig.2 Control strategy diagram of HESS

元的相互配合,有效延长设备使用寿命。HESS 接收到功率补偿指令后经过高通滤波器将功率传递给超级电容器,优先调用超级电容器储能。当超级电容器储能可以满足能量需求时,蓄电池不介入工作。若超级电容器无法满足需求,则由蓄电池负责功率补偿。

## 2 基于混合静止能量的虚拟惯量

### 2.1 基于电容储能的虚拟惯量

电力系统的固有机械惯量源于同步发电机的旋转动能。转子转速与系统频率直接耦合的同步发电机,在频率动态变化过程中,转速随之改变,自然释放或吸收转子动能,可以利用自身的固有惯性阻止频率大幅波动。在孤立微电网中,系统的惯性时间常数  $H_s$  通常定义为:

$$H_s = \frac{E_{k\Sigma}}{S_{N\Sigma}} = \frac{\sum_{i=1}^n J_{s,i} \omega^2 / (2p_{n,i}^2)}{S_{N\Sigma}} \quad (4)$$

其中,  $S_{N\Sigma}$  为系统内同步发电机总容量;  $E_{k\Sigma}$  为同步发电机转子动能之和;  $J_{s,i}$  为各发电机转动惯量;  $p_{n,i}$  为极对数;  $\omega$  为同步发电机角速度;  $n$  为发电机总数。

由式(4)可知,系统惯性时间常数取决于并网同步发电机组储存的旋转动能。在图 1 所示的分布式孤立微电网中,柴油发电机组作为唯一的旋转发电机组,系统惯量即为柴油发电机组的固有机械惯量。因此,孤岛运行时,在新能源高渗透的微电网中,系统频率显然无法得到足够的惯性支持维持稳定。在失去交流主网的动态支持后,孤立微电网需要拓展惯量的能量来源,而开发利用 HESS 设备的存储能量则极具可行性。

由于储能设备中混合了电池储能与电容储能 2 种静止能量,在频率调整过程中,利用 2 种混合能量提供虚拟惯性响应,也应遵循 2 种储能设备的充放电特性,合理调用混合静止能量,作为有效抑制频率突变的能量储备。

超级电容器在放电过程中的荷电状态  $\rho_{soc}$  可以表示为:

$$\rho_{soc} = \frac{Q_N - \int C du_c}{Q_N} = \frac{Q_w}{Q_N} \quad (5)$$

其中,  $Q_N$  为超级电容器额定电量;  $Q_w$  为超级电容器

剩余电量; $\rho_{\text{soc}}$ 为超级电容器荷电状态; $C$ 为超级电容器电容。

结合式(5),超级电容器的能量存储 $E_c$ 可表示为:

$$E_c = \int C u_c du_c = \int u_c Q_c d(1 - \rho_{\text{soc}}) \quad (6)$$

其中, $Q_c$ 为超级电容器电荷量。

系统频率变化过程中,超级电容器通过有功功率快速调节,可以调用自身存储的静止能量,若电容器调用能量与同步发电机具有的旋转动能 $E_{k_s}$ 的大小相等,即 $E_c = E_{k_s}$ ,则可将超级电容器视为具有机械惯量 $J_c$ 的同步发电机组。电容器静止能量与发电机旋转动能间的能量转化关系可表示为:

$$\int J_c \omega_s d\omega_s = \int u_c Q_c d(1 - \rho_{\text{soc}}) = \int \frac{u_c Q_c d(1 - \rho_{\text{soc}})}{\omega_s d\omega_s} \omega_s d\omega_s \quad (7)$$

其中, $\omega_s$ 为等效同步发电机角速度; $J_c$ 为超级电容器的虚拟转动惯量。

将超级电容器储能与同步发电机转子储能类比,将超级电容器储存的能量视为虚拟转子储存的动能,则超级电容器的虚拟转动惯量可以表示为:

$$J_c = \frac{u_c Q_c d(1 - \rho_{\text{soc}})}{\omega_s d\omega_s} = -J_s \frac{(W_c d\rho_{\text{soc}})/\rho_{\text{soc},0}}{(2E_k d\omega_s)/\omega_s} \approx -J_s \frac{W_c k_c}{2E_k} \quad (8)$$

其中, $J_s$ 为发电机固有惯量; $\rho_{\text{soc},0}$ 为超级电容器的起始荷电状态; $k_c = (\Delta\rho_{\text{soc}}/\rho_{\text{soc},0})/(\Delta\omega_s/\omega_0)$ 为超级电容器荷电状态变化率与发电机转速变化率的比值, $\Delta\omega_s$ 为角速度变化量, $\omega_0$ 为初始角速度, $\Delta\rho_{\text{soc}}$ 为超级电容器荷电状态变化量; $W_c$ 为超级电容器储存的能量; $E_k$ 为发电机转子动能。

由式(8)可知,系统频率、超级电容器SOC及电压等多种因素会影响超级电容器的虚拟转动惯量大小。由于超级电容器具有高功率密度,可以应对快速充放电和多次循环充放电的使用需求,因此更适于应对小幅频繁变化的负荷波动。在控制过程中,可以优先调用电容储能,将其作为虚拟惯量的首选能量来源。

## 2.2 基于电池储能的虚拟惯量

为减小蓄电池充放电次数,蓄电池储能应适用于补偿电容储能的补偿能量。与超级电容器类似,在放电过程中蓄电池的荷电状态 $\gamma_{\text{soc}}$ 可以表示为:

$$\gamma_{\text{soc}} = \left( Q_N - \int i_b dt \right) / Q_N = Q_{\text{nb}} / Q_N \quad (9)$$

其中, $i_b$ 为蓄电池电流; $Q_N$ 为蓄电池额定电量; $Q_{\text{nb}}$ 为蓄电池剩余电量。

结合式(9),蓄电池存储的能量 $E_b$ 可以表示为:

$$E_b = \int U_b i_b dt = \int U_b Q_b d(1 - \gamma_{\text{soc}}) \quad (10)$$

其中, $U_b$ 为蓄电池电压幅值; $Q_b$ 为蓄电池电量。

系统频率变化过程中,蓄电池通过有功功率快速调节,也可调用自身存储的静止能量。蓄电池静止能量与发电机旋转动能间的能量转化关系可表示为:

$$\int J_b \omega_s d\omega_s = \int U_b Q_b d(1 - \gamma_{\text{soc}}) = \int \frac{U_b Q_b d(1 - \gamma_{\text{soc}})}{\omega_s d\omega_s} \omega_s d\omega_s \quad (11)$$

其中, $J_b$ 为蓄电池的虚拟转动惯量。

由式(11)可知,基于电池储能的虚拟转动惯量为:

$$J_b = \frac{U_b Q_b d(1 - \gamma_{\text{soc}})}{\omega_s d\omega_s} = -J_s \frac{(W_b d\gamma_{\text{soc}})/\gamma_{\text{soc},0}}{(2E_k d\omega_s)/\omega_s} \approx -J_s \frac{W_b k_b}{2E_k} \quad (12)$$

其中, $\gamma_{\text{soc},0}$ 为蓄电池的起始荷电状态; $k_b = (\Delta\gamma_{\text{soc}}/\gamma_{\text{soc},0})/(\Delta\omega_s/\omega_0)$ 为蓄电池荷电状态变化率与发电机转速变化率的比值, $\Delta\gamma_{\text{soc}}$ 为蓄电池荷电状态变化量; $W_b$ 为蓄电池储存的能量。

根据式(12)可知,与超级电容器相似,系统频率、蓄电池SOC及电压等多种因素同样会影响蓄电池的虚拟转动惯量大小。蓄电池具有高能量密度,可以应对大幅负荷波动,在惯量控制中将其作为电容储能的补偿能量,可以为虚拟惯量提供更充足可靠的能量储备。

## 2.3 HESS元件的虚拟惯量

针对蓄电池与超级电容器的充放电特性,在小幅负荷波动时,优先调用超级电容器储能,而对于系统遭受较大扰动时,超级电容器自身存储的能量难以满足惯性需求时,则调用由电容储能和电池储能构成的混合能量,模拟同步旋转电机的动能变化,为系统提供惯性支持。显然,HESS的能量 $E_H$ 包含电容器和蓄电池2个部分静止能量,且满足 $E_H = E_c + E_b$ 。因此,HESS元件的虚拟转动惯量 $J_H$ 应为蓄电池与超级电容器的虚拟转动惯量之和,即:

$$J_H = J_b + J_c = -J_s \frac{W_b k_b + W_c k_c}{2E_k} \quad (13)$$

HESS具备虚拟转动惯量后,孤立微电网的惯性时间常数为:

$$H_s = \frac{E_{k\Sigma} + E_H}{S_{N\Sigma}} = \frac{\sum_{i=1}^n J_{s,i} \omega^2 / 2 p_{n,i}^2 + \sum_{j=1}^m J_{H,j} \omega_s^2 / 2}{S_{N\Sigma}} \quad (14)$$

其中, $J_{H,j}$ 为HESS元件虚拟转动惯量; $m$ 为HESS元件总数。

由式(14)可知,HESS因具备了虚拟转动惯量,在系统动态过程中,具有与发电机调节转子旋转动能相似的能量调节能力,通过调用2种混合能量,也可以参与系统能量转化,为系统提供惯性支持。与式(4)相比,微电网因获得了更多的能量来源,系统

的惯性时间常数能够得到增加,孤立运行时频率稳定性得以改善。

### 3 HESS 的虚拟转动惯量控制策略

由于蓄电池与超级电容器均具有过充过放区,为避免储能元件的过充过放应实时监测其荷电状态,并根据不同荷电状态,动态调整控制器参数  $k_B$  与  $k_C$ ,避免其工作于过充过放区。因此,本文提出了 HESS 荷电状态检测流程图,如图 3 所示。

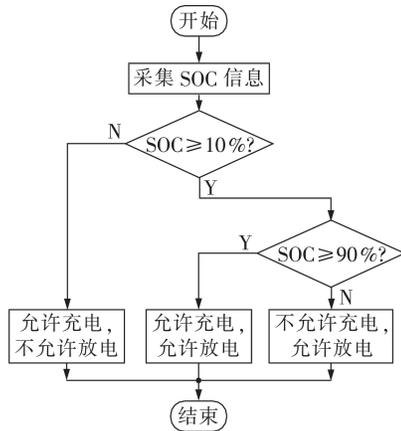


图 3 HESS 荷电状态检测流程图

Fig.3 Flowchart of HESS SOC detection

HESS 元件在附加虚拟转动惯量控制后,将具备 2 种友好并网功能,不仅可以平抑新能源发电功率的波动,而且能够为系统提供惯性支持,参与系统频率调整。本文在 HESS 传统功率控制的基础上,根据式(14)定义的基于混合静止能量的虚拟转动惯量,提出适于协同调用电容储能和电池储能 2 种能量储备的虚拟转动惯量控制策略,如图 4 所示。图中,  $f$  为系统频率;  $f_0$  为额定频率;  $i_{SC,ref}$  为超级电容器电流参考值;  $i_{B,ref}$  为蓄电池电流参考值;  $P_{B,ref}$  为蓄电池功率参考值。

该控制策略将频率信号引入 HESS 的功率控制系统之中,当出现频率波动时,如负荷突然增加导致频率跌落,  $\Delta f < 0$ , 将频率偏差信号引入。

在各自接收到需要补偿的频率信号后,对蓄电池以及超级电容器均附加虚拟惯性控制,调节  $k_B$  与  $k_C$  的大小,控制各自的充放电电流。蓄电池及超级电容器的虚拟惯性系数  $k_B$  与  $k_C$  计算依据于附录 A 中进行说明。

经虚拟惯量控制模块计算出 HESS 元件能够提供的惯性功率支持  $P_{vir}$ ,并结合平抑发电功率波动的功率  $\Delta P_H$ ,给出 HESS 元件的功率响应指令  $P_{HESS}$ 。将其引入功率分配模块中,该功率指令首先送入超级电容器,在获得电容器实际功率响应后得到  $P_{SC}$ ,通过与功率指令  $P_{HESS}$  做差比较,将电容器未满足的功率缺额送入蓄电池,完成预期惯量控制目标。

该控制策略不仅实现了惯量控制,同时根据 2 种储能元件的充放电特性,协调惯量控制时的能量分配,迅速完成静止混合能量的调用,具备优先调用超级电容器储能的功能,当超级电容器不足以提供足够的能量支持时,进一步调用蓄电池储能,从而减小蓄电池充放电电流,延长其使用寿命,提高储能对系统惯性支持的可靠性。

### 4 仿真实证

#### 4.1 仿真系统简介

为了验证所提控制策略的有效性,利用 MATLAB / Simulink 搭建了如图 5 所示的 220 kV 电力系统仿真模型。该模型包含了 1 个光伏组件,2 个同步柴油发电机组  $G_1$ 、 $G_2$ ,以及蓄电池和超级电容器的 HESS 元件。在仿真过程中,设定光伏以最大功率点追踪控制模式运行。仿真系统各参数在附录 B 中给出。

#### 4.2 仿真算例分析

##### 4.2.1 较大负荷变化后的系统惯性响应

仿真过程设定恒定的  $1000 \text{ W/m}^2$  的光照强度,负荷  $L_1$  在 10 s 时突增 60 kW,引起频率大幅跌落。蓄电池起始荷电状态为 77.52%,超级电容器起始荷电状态为 68.5%,均处于安全充放电区。仿真结果如图 6 所示。图中,  $P_{G1}$  为发电机  $G_1$  的功率。储能元

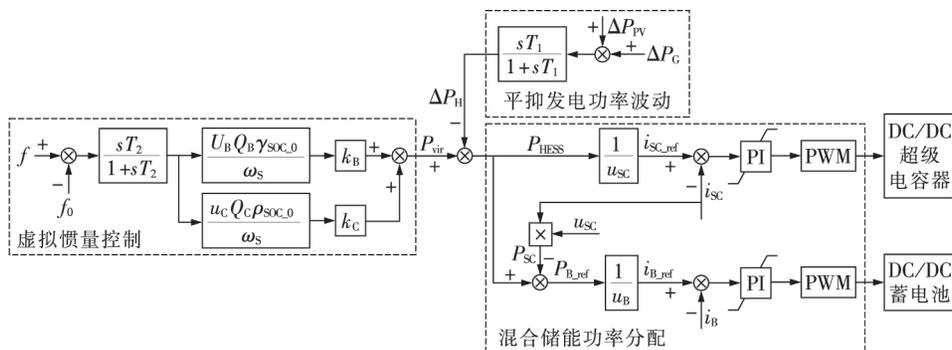


图 4 HESS 虚拟惯量控制拓扑图

Fig.4 Flowchart of virtual inertia control strategy based on HESS

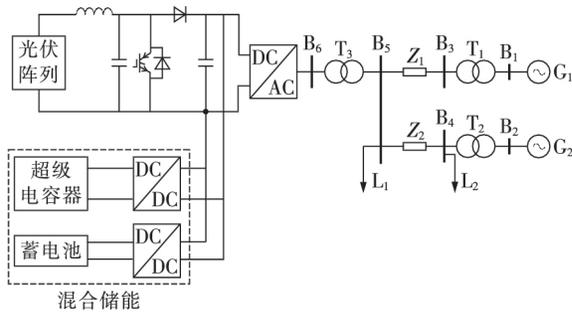


图5 微电网系统仿真结构图

Fig.5 Diagram of microgrid simulation system

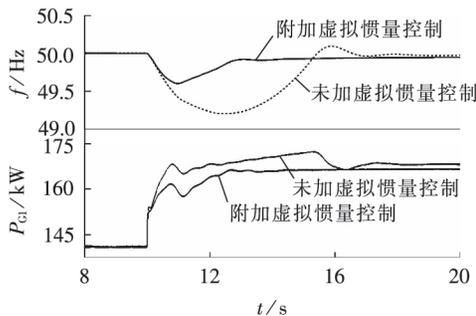
图6 微网系统频率及 $G_1$ 有功功率响应波形图

Fig.6 Simulative diagram of microgrid system

frequency response and active power response of  $G_1$

件功率响应及荷电状态变化见附录C。

由图6可知,10 s时负荷突增导致系统频率大幅下跌。与未加虚拟惯量控制对比可以看出,由于HESS元件的存在,为系统提供了较大的惯性支持,系统频率跌落幅度减少,最小值由49.34 Hz升至49.56 Hz,减小了33%。同时,频率恢复也更加快速。在负荷突增时,HESS对系统提供惯性支持后,发电机 $G_1$ 电磁功率有了显著的下降。由附录C中各储能元件功率响应及荷电状态变化曲线可以看出,在频率突变的初期,超级电容器比蓄电池更加快速地调用自身的能量。当超级电容无法满足能量需求时,进一步调用蓄电池的能量。

仿真过程设定恒定的 $1000 \text{ W/m}^2$ 的光照强度,负荷 $L_1$ 在10 s时突减50 kW,引起频率大幅上升。蓄电池起始荷电状态为79.8%,超级电容器起始荷电状态为49.9%,均处于安全充放电区。仿真结果如图7所示。由上至下依次为系统频率,发电机 $G_1$ 的功率的波形图。储能元件功率响应及荷电状态变化见附录D。

由图7可知,10 s时负荷突减导致系统频率大幅上升。与未加虚拟惯量控制对比可以看出,由于HESS元件的存在,为系统提供了较大的惯性支持,系统频率上升幅度减少,最小值由50.35 Hz降至50.25 Hz,减小了28%。同时,频率恢复也更加快速。在负荷突减时,HESS对系统提供惯性支持后,发电机 $G_1$ 电磁功率有了显著的上升。由附录D中各

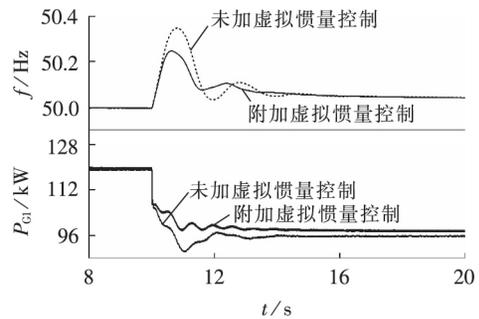
图7 微电网系统频率及 $G_1$ 有功功率响应波形图

Fig.7 Simulative diagram of microgrid system

frequency response and active power response of  $G_1$

储能元件功率响应可以看到,在频率突变的初期,仅调用超级电容器储能便可满足系统能量需求,所以并未调用蓄电池储能。

#### 4.2.2 较小负荷变化后的惯性响应

仿真过程设定恒定的 $1000 \text{ W/m}^2$ 的光照强度,负荷在10 s时开始进行2.5 s一次的20 kW负荷变化,频率小幅波动。蓄电池起始荷电状态为75.99%,超级电容器起始荷电状态为25.5%,均处于安全充放电区。仿真结果如图8所示。由上至下依次为系统频率,发电机 $G_1$ 的电磁功率的波形图。储能元件功率响应及荷电状态变化情况见附录E。

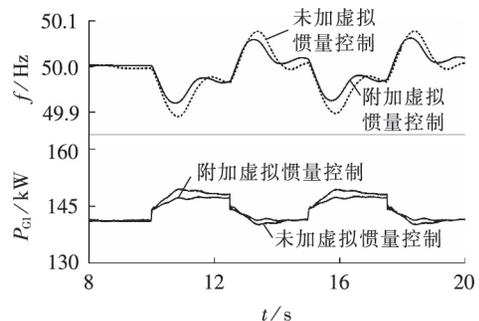
图8 微网系统频率及 $G_1$ 有功功率响应波形图

Fig.8 Simulative diagram of microgrid system

frequency response and active power response of  $G_1$

由图8可知,10 s时负荷波动引起系统频率小幅波动。由于HESS元件的作用,储能元件在负荷小幅度波动时为系统提供了惯性支持。当负荷小幅度上升时,加入虚拟惯量控制前、后,频率分别降低至49.89 Hz、49.93 Hz;当负荷小幅度下降时,加入虚拟惯量控制前、后,频率分别升高至49.91 Hz、49.94 Hz,波动的程度平均降低了34%,发电机 $G_1$ 的电磁功率波动也显著的变少。由附录E中各储能元件功率响应可以看出,在负荷波动较小时,仅仅调用超级电容器储能就足以以为系统提供足够的惯性支持,由于超级电容器对频率波动的快速响应,利用自身的储能对系统提供惯性支持,避免了蓄电池频繁的充放电。在16.6 s时,超级电容器SOC降低至10%,达

到过放警戒区,超级电容器停止放电,为了给系统提供足够的能量支持,HESS调用电池储能进行放电。而当负荷降低时,达到过放警戒区的超级电容器又可以进行充电吸收多余的功率。

#### 4.2.3 光伏出力波动后的功率响应

仿真过程设定负荷 $L_1$ 与 $L_2$ 不变,光照强度在10 s时由恒定 $1000\text{ W/m}^2$ 的光照强度变为随机光照强度。光伏发电功率波动时,系统频率的仿真结果如图9所示。储能元件功率响应见附录F。

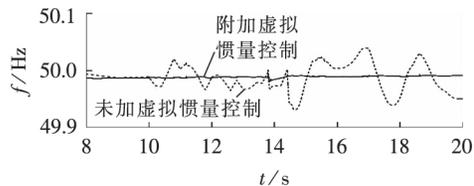


图9 微电网系统频率响应

Fig.9 Frequency response of microgrid system

由图9可以看出,当系统因发电功率波动而出现小幅随机频率波动时,由于光伏发电功率的随机性甚至可能出现加重系统频率振荡的严重后果,若无HESS设备为系统提供快速的功率支持,系统频率稳定性会极大下降,对HESS设备附加虚拟惯性控制,可以为系统提供惯性支持,大幅度抑制系统频率波动。附录F中图F1为随机光照强度下光伏发电功率,其具有随机波动性的特点。由附录F中各储能元件功率响应可以看出,HESS利用超级电容器的快速充放电可以实现对光伏发电功率波动的良好平抑作用。由附录F中图F3和图F4对比可以看出,由于仿真过程中,光伏发电功率波动较小,仅仅调用超级电容器储能便可可为系统提供足够的能量支持,因而蓄电池并未参与功率调节。

## 5 结论

本文研究混合了电池储能和电容储能的2种静止能量的虚拟转动惯量控制技术,利用混合静止能量,为分布式孤立微电网提供惯性支持。通过对提出的控制策略进行理论分析和仿真验证,得出以下结论。

(1)与常规发电机组源于旋转动能的固有机械转动惯量不同,储能设备需要主动调用其存储的静止能量,模拟在频率动态时旋转动能的转化过程,作为虚拟惯性的能量储备。储能设备引入附加惯量控制后,通过快速的惯量调节,可以有效提高新能源高渗透分布式微电网孤岛运行时的频率动态稳定性。

(2)通过建立蓄电池的电池储能、超级电容器的电容储能与同步发电机的机械动能间的能量转换关系,可以估算源于2种静止能量的虚拟转动惯量的大小,进而评估HESS系统的惯性控制潜力,为HESS

的虚拟惯量控制器设计及参数设置提供参考依据。

(3)适于HESS设备的虚拟惯量控制策略,应综合考虑蓄电池与超级电容器的功率调节特性及荷电状态,优先调用电容储能,而电池储能则通过协同配合,用于平抑系统大幅频率波动。在模拟惯性响应的过程中,通过监测系统频率变化以及储能设备荷电状态,实现了2种静止能量的动态分配,防止储能设备的过充过放运行,不仅可以实现混合能量的充分利用,还能够有效避免蓄电池频繁充放电,提高储能设备的使用寿命。

HESS设备的虚拟惯量控制需要在储能容量占比较高的区域电网中才能体现出混合能量调用对系统动态频率稳定的支持作用。随着新能源高渗透系统惯性和阻尼问题的日益突出,HESS设备虚拟惯量控制的动模实验验证甚至工程实验验证将是论文下一步研究工作的重点内容。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 魏政,于冰清. 我国光伏产业发展现状与对策探讨[J]. 中外能源,2013,18(6):15-25.  
WEI Zheng, YU Bingqing. China's photovoltaic industry today and recommended countermeasures to problems faced[J]. Sino-Global Energy,2013,18(6):15-25.
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.  
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):1-14.
- [3] 张祥宇,付媛,王毅,等. 含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合PSS控制器[J]. 电工技术学报,2015,30(1):159-169.  
ZHANG Xiangyu, FU Yuan, WANG Yi, et al. Integrated PSS controller of variable speed wind turbines with virtual inertia and damping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(1):159-169.
- [4] 付媛,王毅,张祥宇,等. 基于VSC-HVDC的海上风电系统虚拟惯性控制技术[J]. 电测与仪表,2014,51(1):43-48.  
FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Virtual inertia control of offshore wind farms with VSC-HVDC for grid-connection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2014,51(1):43-48.
- [5] 张祥宇,陈玉伟,付媛,等. 含可控惯量风电场的发电系统功率振荡特性分析与综合控制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4564-4572.  
ZHANG Xiangyu, CHEN Yuwei, FU Yuan, et al. Oscillation characteristic of power generation system with controlled inertia wind farm and integrated control[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(17):4564-4572.
- [6] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):349-360.  
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(2):349-360.
- [7] 张祥宇,杨黎,朱晓荣,等. 光储发电系统的虚拟转动惯量控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):1-6.  
ZHANG Xiangyu, YANG Li, ZHU Xiaorong, et al. Virtual rota-

- tional inertia control of PV generation system with energy storage devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9):1-6.
- [8] IM W S, WANG C, LIU W X, et al. Distributed virtual inertia based control of multiple photovoltaic systems in autonomous microgrid[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(3):512-519.
- [9] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19):82-89. CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19):82-89.
- [10] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):336-349. ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):336-349.
- [11] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16):2591-2603. LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2591-2603.
- [12] ALIPOOR J, MIURAY, ISE T. Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adoptive virtual inertia[C]//2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, USA:IEEE, 2013:4546-4552.
- [13] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34):91-97. HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):91-97.

#### 作者简介:



张祥宇

张祥宇(1984—), 河南商丘人, 男, 副教授, 博士, 研究方向为新能源发电与智能电网和电力电子技术及其应用(E-mail: zh.xy.sq@163.com);

李凌斐(1997—), 山东德州人, 女, 硕士研究生, 研究方向为光伏-储能发电并网控制技术(E-mail: lilinglei97@163.com);

边子轩(1996—), 河北保定人, 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏-储能发电并网控制技术(E-mail: zixuanbian@yahoo.com)。

## Virtual moment inertia control based on hybrid static energy storage

ZHANG Xiangyu<sup>1</sup>, LI Lingfei<sup>1</sup>, BIAN Zixuan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Cangzhou Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Cangzhou 061000, China)

**Abstract:** Firstly, the energy conversion relationship between battery energy storage, capacitor energy storage of super-capacitors and mechanical kinetic energy of synchronous generator is established in the process of frequency dynamic fluctuation, and the definition of virtual inertia of HESS (Hybrid Energy Storage System) derived from two kinds of static energy is defined. Secondly, based on the charging and discharging characteristics of batteries and super-capacitors, a HESS cooperative control strategy is proposed by using power co-regulation between two energy storage units. By monitoring the frequency fluctuation of the system, the control strategy transfers energy of battery and super-capacitors to imitate inertial response of synchronous generator in consideration of characteristic of power control and SOC (State Of Charging) by monitoring frequency fluctuation. Finally, a photovoltaic micro-grid containing HESS is set up to validate the effectiveness of the control strategy. The simulative results show that the strategy can make full use of the static energy stored in HESS to rapidly virtualize the inertial response and significantly improve the frequency stability of system.

**Key words:** photovoltaic power generation; hybrid energy storage system; virtual inertia; frequency response; battery; super-capacitor

### 附录 A

在控制器参数设计时，预设置蓄电池和超级电容器的虚拟惯量为同容量同步电机惯量  $J_S$  的  $n$ 、 $m$  倍，即  $J_B=nJ_S$ 、 $J_C=mJ_S$ 。采取与同容量同步电机惯量  $J_S$  进行比较，便于评估蓄电池和超级电容器的虚拟惯量调节能力，也可以更直观的反映出虚拟惯量的灵活可控与传统同步发电机的机械惯性固有不变的不同特性。如蓄电池和超级电容器预期提供与同容量同步发电机相似的惯性响应，在控制器参数计算时可将参数  $m$ 、 $n$  设置为  $m=1$ ， $n=1$ 。

由式 (8)、(12) 可得， $k_B$  与  $k_C$  可利用式 (A1)、(A2) 分别计算：

$$k_B = -\frac{2E_k J_B}{W_B J_S} = -n \frac{2E_k}{W_B} \quad (A1)$$

$$k_C = -\frac{2E_k J_C}{W_C J_S} = -m \frac{2E_k}{W_C} \quad (A2)$$

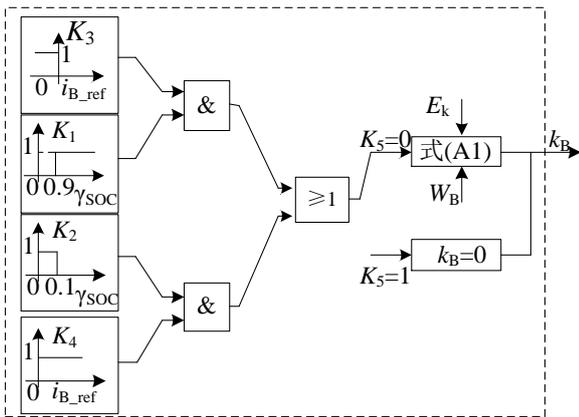


图 A1 蓄电池虚拟惯量控制的荷电状态检测

Fig.A1 Flowchart of virtual inertia control strategy based on battery SOC detection

混合储能处于正常充放电区域时， $S_1=S_2=K_1=K_2=0$ ，无论  $K_3$ 、 $K_4$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  为何种状态，最后  $K_5$ 、 $S_5$  均输出为 0，根据式 (A1) 式 (A2) 设置  $k_B$ 、 $k_C$  实现惯性响应。

如图 A2 所示，当超级电容器荷电状态处于过充警戒区 ( $\rho_{SOC} \geq 90\%$ ) 时， $S_1=1$ ， $S_2=0$ ，如果  $i_{SC\_ref} \leq 0$ ， $S_3=1$ ， $S_4=0$ ， $S_1$ 、 $S_3$  和  $S_2$ 、 $S_4$  分别经过与门之后再通过异或门， $S_5$  输出为 1，此时则将虚拟惯性控制系数  $k_C$  设置为 0，停止充电，多余能量由蓄电池负责吸收；如果  $i_{SC\_ref} \geq 0$ ， $S_3=0$ ， $S_4=1$ ， $S_1$ 、 $S_3$  和  $S_2$ 、 $S_4$  分别经过与门之后再通过异或门， $S_5$  输出为 0，此时则根据式 (A2) 设置  $k_C$ ，允许放电以实现惯性响应。

当超级电容器荷电状态处于过放警戒区 ( $\rho_{SOC} \leq 10\%$ ) 时， $S_1=0$ ， $S_2=1$  如果  $i_{SC\_ref} \geq 0$ ， $S_3=0$ ， $S_4=1$ ， $S_1$ 、 $S_3$  和  $S_2$ 、 $S_4$  分别经过与门之后再通过异或门， $S_5$  输出为 1，此时则将虚拟惯性控制系数  $k_C$  设置为 0，停止放电，不足的能量由蓄电池负责提供；如果  $i_{SC\_ref} \leq 0$ ， $S_3=1$ ， $S_4=0$ ， $S_1$ 、 $S_3$  和  $S_2$ 、 $S_4$  分别经过与门之后再通过异或门， $S_5$  输出为 0，此时则根据式 (A2) 设置  $k_C$ ，允许充电以实现惯性响应。

当蓄电池荷电状态处于过充警戒区 ( $\gamma_{SOC} \geq 90\%$ ) 时， $K_1=1$ ， $K_2=0$ ，如果  $i_{B\_ref} \leq 0$ ， $K_3=1$ ， $K_4=0$ ， $K_1$ 、 $K_3$  和  $K_2$ 、 $K_4$  分别经过与门之后再通过异或门， $K_5$  输出为 1，此时则将虚拟惯性控制系数  $k_B$  设置为 0，停止充电；如果  $i_{B\_ref} \geq 0$ ， $K_3=0$ ， $K_4=1$ ， $K_1$ 、 $K_3$  和  $K_2$ 、 $K_4$  分别经过与门之后再通过异或门， $K_5$  输出为 0，此时则根据式 (A1) 设置  $k_B$ ，允许放电以实现惯性响应。

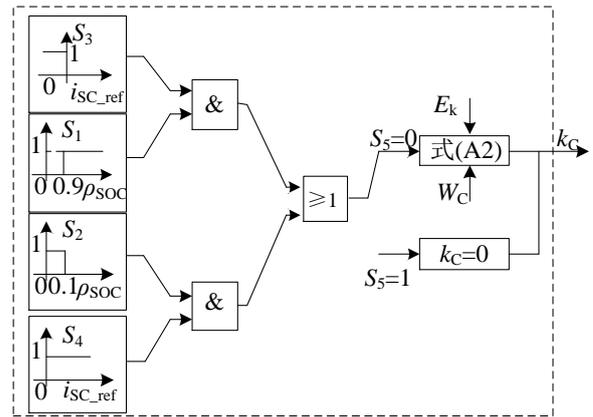


图 A2 超级电容器虚拟惯量控制的荷电状态检测

Fig.A2 Flowchart of virtual inertia control strategy based on super-capacitor SOC detection

当蓄电池电状态处于过放警戒区 ( $\gamma_{SOC} \leq 10\%$ ) 时， $K_1=0$ ， $K_2=1$ ，如果  $i_{B\_ref} \geq 0$ ， $K_3=0$ ， $K_4=1$ ， $K_1$ 、 $K_3$  和  $K_2$ 、 $K_4$  分别经过与门之后再通过异或门， $K_5$  输出为 1，此时则将虚拟惯性控制系数  $k_B$  设置为 0，停止放电；如果  $i_{B\_ref} \leq 0$ ， $K_3=1$ ， $K_4=0$ ， $K_1$ 、 $K_3$  和  $K_2$ 、 $K_4$  分别经过与门之后再通过异或门， $K_5$  输出为 0，此时则根据式 (A1) 设置  $k_B$ ，允许充电以实现惯性响应。

附录 B

表 B1 系统仿真参数表

Table B1 Parameter of simulation system

| 参数名称       | 参数值   |
|------------|---|
| 母线电压       | B <sub>1</sub> 、B <sub>2</sub> : 22 kV<br>B <sub>3</sub> 、B <sub>4</sub> 、B <sub>5</sub> : 220 kV<br>B <sub>6</sub> : 260 V |
| 同步发电机容量    | G <sub>1</sub> : 160 kV·A<br>G <sub>2</sub> : 80 kV·A   |
| 光伏发电容量     | 100 kW  |
| 储能元件电压     | 120 V   |
| 储能元件       | 蓄电池组 (每组 10 个): 30A·h<br>超级电容器: 15 F  |
| 储能元件虚拟惯性系数 | 蓄电池虚拟惯性系数 $k_B$ : -0.8<br>超级电容器虚拟惯性系数 $k_C$ : -5  |
| 负荷         | L <sub>1</sub> : 180 kW<br>L <sub>2</sub> : 45 kW   |
| 换流器 PI 参数  | $K_p=0.01$<br>$K_i=0.1$   |

附录 C

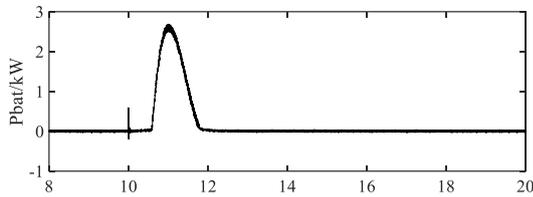


图 C1 蓄电池功率响应  
Fig.C1 Power response of battery

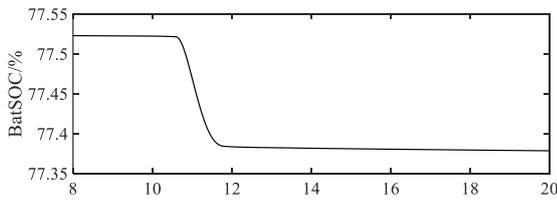


图 C2 蓄电池 SOC 响应  
Fig.C2 SOC response of battery

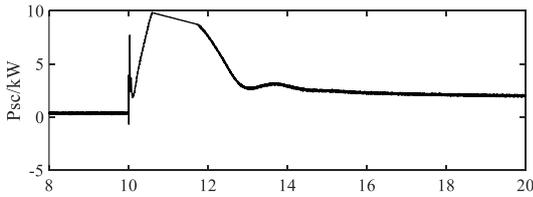


图 C3 超级电容器功率响应  
Fig.C3 Power response of super-capacitor

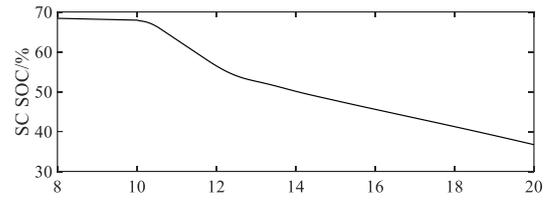


图 C4 超级电容器 SOC 响应  
Fig.C4 SOC response of super-capacitor

附录 D

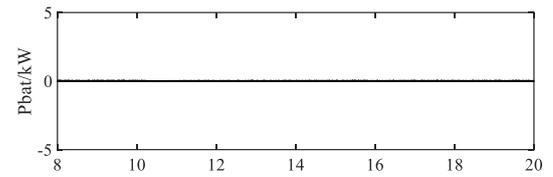


图 D1 蓄电池功率响应  
Fig.D1 Power response of battery

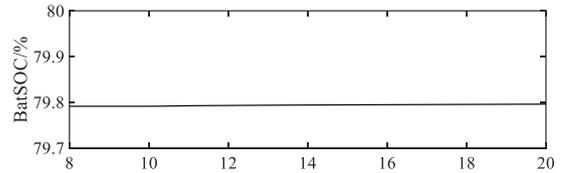


图 D2 蓄电池 SOC 响应  
Fig.D2 SOC response of battery

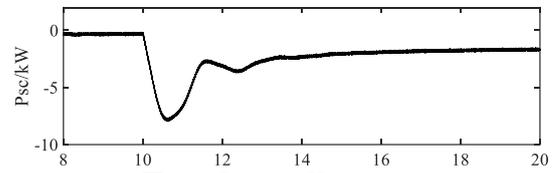


图 D3 超级电容器功率响应  
Fig.D3 Power response of super-capacitor

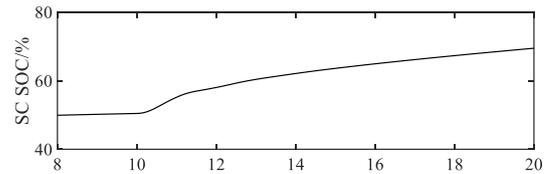


图 D4 超级电容器 SOC 响应  
Fig.D4 SOC response of super-capacitor

附录 E

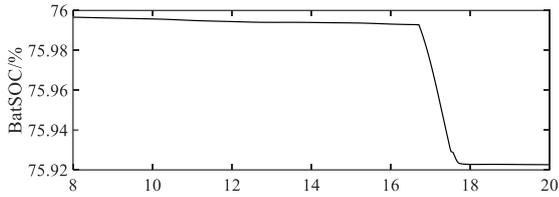


图 E1 蓄电池 SOC 响应  
Fig.E1 SOC response of battery

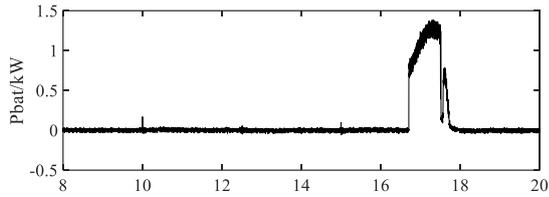


图 E2 蓄电池功率响应  
Fig.E2 Power response of battery

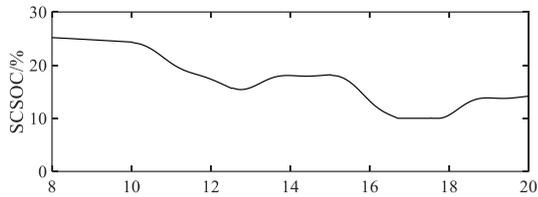


图 E3 超级电容器 SOC 响应  
Fig.E3 SOC response of super-capacitor

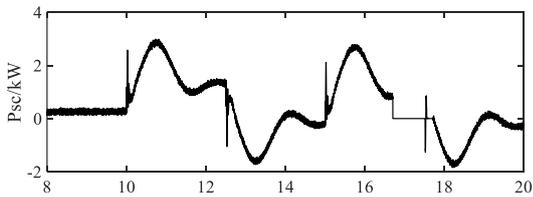


图 E4 超级电容器功率响应  
Fig.E4 Power response of super-capacitor

附录 F

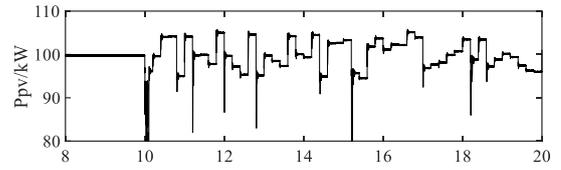


图 F1 光伏发电功率波动

Fig.F1 Power fluctuation of photovoltaic

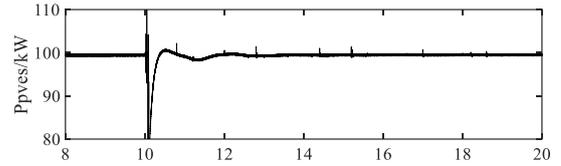


图 F2 光储发电功率响应

Fig.F2 Power response of photovoltaic and HESS

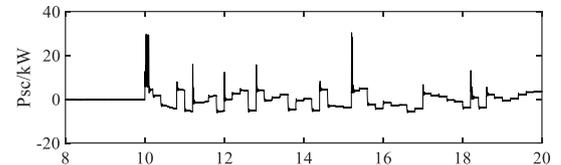


图 F3 超级电容器功率响应

Fig.F3 Power response of super-capacitor

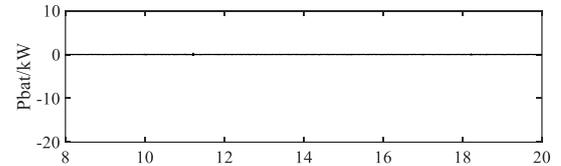


图 F4 蓄电池功率响应

Fig.F4 Power response of battery