

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.020

# 柴发主电源型孤岛微电网频率优化控制方法

洪灏灏<sup>1</sup>, 王晨<sup>1</sup>, 徐光福<sup>1</sup>, 侯炜<sup>1</sup>, 楼冠男<sup>2</sup>, 吴仁泽<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**以柴油发电机(diesel generator, DG)为主电源的孤岛微电网存在负荷扰动下频率波动大、动态响应慢等问题,对此,文中提出一种改进辅助调频方法以改善系统的动态响应过程。首先,建立DG系统模型,分析DG主要参数包括转动惯量、响应延时对DG动态过程的影响。其次,提出储能在下垂控制的基础上增加惯量调频的方法进行辅助调频,并给出适用于工程应用的储能辅助调频参数设计以及储能功率裕度设计方法,建立柴储并列的小信号模型分析该系统的稳定性。最后,搭建柴储微电网的动模试验平台,试验结果表明,针对微电网内的静止负荷或者电动机类负荷,文中所提控制策略均可以有效减小DG系统在动态过程中的频率波动。

**关键词:**孤岛微电网;柴油发电机(DG);下垂控制;惯量调频;频率响应;稳定性分析

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)06-0189-08

## 0 引言

随着国家能源战略转型以及“双碳”目标的提出<sup>[1-3]</sup>,新能源发电技术发展迅速,微电网作为新能源消纳的手段之一,得到越来越多的关注<sup>[4-6]</sup>。微电网内的新能源一般具有波动性、间歇性等特点<sup>[7]</sup>,需要配置储能平抑功率波动,而储能系统的容量有限、建设成本高、运维难度大,无法时刻保证具备充足的容量裕度<sup>[8-10]</sup>,因此,可以配置柴油发电机(下文简称“柴发”)作为补充电源。另外,在电网所不及的偏远地区,仍多以小型发电机组如柴发为主电源独立运行。而柴发系统动态响应慢,爬坡能力较差,在新能源接入之后,系统电源侧以及负荷侧均表现出波动性,柴发主电源系统的频率稳定性会进一步恶化。因此,针对这类小规模孤岛型微电网,可以引入储能,构建以柴储为核心电源的微电网系统<sup>[11-14]</sup>。建立合适的柴储并列运行模型,研究柴发主电源型微电网运行方式以及柴储协调运行控制策略,是解决此类微电网安全稳定问题的关键。

文献[15-16]详细介绍了柴发的结构,并给出多台柴发并联运行的优化控制方法。柴发机组以同步电机为接口接入微电网,而储能系统一般通过逆变器接入微电网,不同的微电源呈现异构特性,动态性能差异较大<sup>[17]</sup>。文献[18]研究微电网中同步机型电源和逆变器型电源之间功率振荡问题,并分析各参数对功率振荡以及功率分配的影响。文献[19]给出一种柴发与虚拟同步机并列运行的协调控制方法,引入虚拟阻抗并采用阻尼控制,可以减

小动态过程中的功率振荡,但是控制结构复杂。文献[20]提出一种虚拟柴发控制,可以改善柴储并列运行的功率均分问题,但该控制策略的关键参数内涵不明确,建模困难。文献[21]针对柴发主电源型微电网,提出储能综合下垂控制以及功率辅助判据,以减小柴发的功率冲击,但是该方法需要快速采集柴发输出功率。综上,储能采用虚拟同步机及其改进算法与柴发并列运行的策略得到大量研究,但是,多个特性异构的电压源会导致控制系统复杂、参数设计困难<sup>[22]</sup>,难以实现工程应用推广。文献[23-24]提出微电源可以采用惯量调频来抑制频率快速变化,在提高系统惯量水平的同时可以保留电流源特性,以避免系统内多个电压源运行造成的功率振荡问题。

文中所研究的柴储并列型微电网系统主要包括柴发、储能、可再生能源(以光伏为例)以及负荷。一般情况下,柴发作为电压源,稳定微电网系统电压频率;储能工作在电流源模式,仅在稳态时分担柴发功率以提高可再生能源消纳比例,动态过程中主要依靠柴发进行自动调节,系统应对扰动时的频率波动较大<sup>[25-27]</sup>。为充分发挥储能系统的动态支撑能力,在不改变储能系统电流源模式的前提下,文中提出增加储能辅助调频功能,以优化系统负荷波动下的动态过程;通过小信号建模,分析该控制策略下柴储并列型微电网的稳定性;搭建柴储微电网动模试验平台,验证所提策略的有效性。

## 1 柴发控制系统建模及分析

柴发在微电网中作为主电源运行时,主要通过

收稿日期:2023-05-30;修回日期:2023-07-23

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20200404)

基于转速反馈的调速系统控制输出有功功率,以维持微电网内的有功功率稳定,具体控制流程如图 1 所示。由于柴发控制系统机械延时较大,配套的同步发电机容量较小,因此一般对外表现出有功动态响应慢、爬坡能力差的特性。

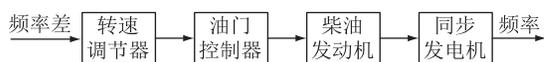


图 1 柴发调速系统

Fig.1 Speed control system of diesel generator

为简化分析,可以将柴发调速系统各个环节的延时整体等效为一阶惯性环节,而柴发一般运行在无差调节模式,稳态时频率稳定在工频 50 Hz 左右,因此,可以得到图 2 所示简化后的柴发调速系统等效示意图。其中, $T_{dg}$ 为柴发系统整体的等效延时; $s$ 为拉普拉斯算子; $J_{dg}$ 为柴发系统的惯量; $K_{dg}$ 为柴发调速系统的比例控制系数; $K_{dg,i}$ 为柴发调速系统的积分控制系数; $P_{0g}$ 为柴发的额定机械功率; $P_e$ 为负荷功率; $\omega_0$ 为额定角频率, $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$ ; $\omega$ 为柴发实际输出角频率。

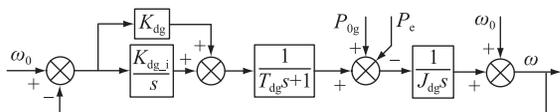


图 2 柴发调速系统等效原理

Fig.2 Equivalent principle of diesel generator speed control system

结合图 2,可以得到  $P_e$  变化导致  $\omega$  变化的小信号传递函数,如式(1)所示。

$$G_1(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta P_e} = - \frac{T_{dg}s^2 + s}{J_{dg}T_{dg}\omega_0s^3 + J_{dg}\omega_0s^2 + K_{dg}s + K_{dg,i}} \quad (1)$$

利用终值定理,可以得到  $P_e$  波动后,稳定状态下的柴发实际输出角频率变化量  $\Delta\omega$  为 0,可以实现频率无差调节。

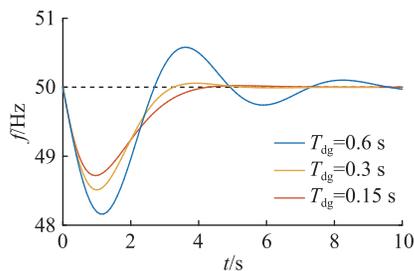
$$\lim_{t \rightarrow \infty} G_1(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_1(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta P_e} = 0 \quad (2)$$

以表 1 所示参数为基准,结合式(1),得到负荷有功功率变化 50 kW 时柴发实际输出角频率的变化特性。通过改变各个参数,得到柴发控制系统的主要参数对柴发特性的影响,如图 3 所示。

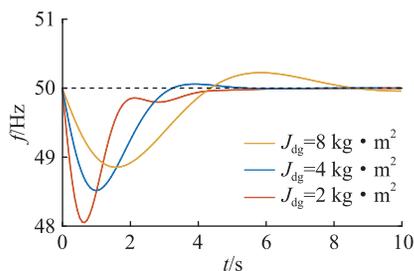
表 1 柴发系统的主要参数

Table 1 Main parameters of diesel generator system

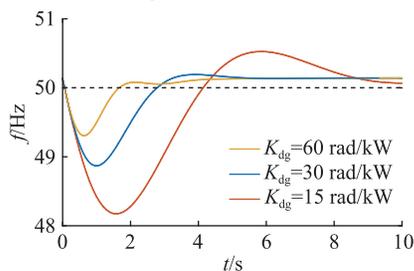
参数	数值	参数	数值
$J_{dg}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	4	$K_{dg,i}/(\text{rad}\cdot\text{kW}^{-1})$	20
$K_{dg}/(\text{rad}\cdot\text{kW}^{-1})$	30	$T_{dg}/\text{s}$	0.3



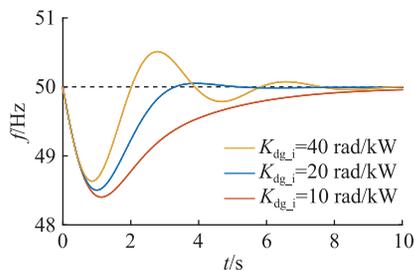
(a)  $T_{dg}$  变化下动态响应曲线簇



(b)  $J_{dg}$  变化下动态响应曲线簇



(c)  $K_{dg}$  变化下动态响应曲线簇



(d)  $K_{dg,i}$  变化下动态响应曲线簇

图 3 柴发有功功率输出响应

Fig.3 Active power output response of diesel generator

主要结论如下:

(1) 柴发控制环节的整体延时  $T_{dg}$  减小时,频率响应波形的超调减小,同时调节时间也减小,系统更加稳定。然而,延时是柴发控制系统多环节共同作用下的固有特性,无法完全消除,只能通过不断优化减小延时,改善系统性能;

(2) 柴发系统的同步电机惯量  $J_{dg}$  减小时,频率响应波形的超调增大,但是调节时间减小,因此需要综合考虑系统的稳定裕度以及响应速度,折衷选择适宜惯量的同步机组;

(3) 柴发系统的调差比例系数  $K_{dg}$  减小时,频率响应波形的超调增大,同时调节时间增大。然而, $K_{dg}$  与柴发系统的容量相关, $K_{dg}$  过大会影响输出功率的合理分配,改变柴发的输出特性,严重时会影响

响系统稳定性;

(4) 柴发系统的调差积分系数  $K_{dg_i}$  减小时, 频率响应波形的超调减小, 但是调节时间增大, 针对系统稳定性考虑,  $K_{dg_i}$  设计值不宜过大, 一般不大于  $K_{dg}$ 。

## 2 储能辅助调频控制及参数设计

### 2.1 储能辅助调频系统建模

由上文分析可知, 由于柴发功率响应慢、爬坡能力差, 有功负荷波动会导致柴发输出频率及有功功率振荡。以有功负荷突增为例, 柴发输出频率会在短时间内下降, 而柴发调速系统检测到频率差到同步电机增发输出功率间存在延时, 这段时间内, 系统电能质量恶化, 影响设备运行, 严重时会导致柴发低频保护, 导致微电网系统失电。

值得注意的是, 频率剧烈波动的动态过程只会出现在有较大负荷有功功率波动之后的秒级时间窗口内, 当负荷有功功率波动较小, 或者在时间窗之外, 系统将维持稳态运行。因此, 考虑到储能的快速性和灵活性, 在微电网系统频率波动较大时, 协调储能提供动态支撑, 直至柴发调速器动作, 柴发输出功率响应到位, 储能随即释放动态支撑功率, 系统恢复稳态运行。

因此, 可以将系统频率偏差大小作为储能开启动态调节的条件。当检测到微电网频率偏差较大时, 储能根据频率偏差动态调节功率输出, 即采用下垂控制模式。同时, 综合考虑频率检测以及功率响应的延时, 储能动态支撑功率响应的时域表达式如式(3)所示。

$$P_{\text{ess}}(t) = P_0 + K_{\text{ess}} \left[ \omega_0 - \omega \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{ess}}}} \right) \right] \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{ess}}(t)$  为  $t$  时刻储能实发有功功率;  $P_0$  为储能额定有功功率;  $K_{\text{ess}}$  为储能比例调频系数;  $T_{\text{ess}}$  为功率响应过程的延时。

为进一步提高储能系统的动态响应速度, 在下垂控制的基础上进行优化, 增加惯量调频环节, 即文中所提储能辅助调频控制方法。在式(3)的基础上叠加和频率变化率相关的有功参考信号, 得到优化后储能调频的小信号传递函数, 如式(4)所示。

$$G_2(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta P_{\text{ess}}} = -\frac{T_{\text{ess}}s + 1}{K_d s + K_{\text{ess}}} \quad (4)$$

式中:  $K_d$  为惯量调频系数。

### 2.2 储能辅助调频参数设计

由上文分析可知, 由于柴发调速系统的响应延时, 动态过程初期机械功率基本不变, 频率将在短时间内变化到最大/最小值。由图3可知, 动态过程

初期的频率波动和惯量成反比, 和负荷功率波动大小成正比。对于实际工程应用, 可以先测试纯柴发系统带负荷变化时的频率变化率  $K^*$ , 并设置储能比例调频系数  $K_{\text{ess}} < K^*$ , 否则会导致储能过调节, 加剧频率波动。

储能参与调频的功率响应延时  $T_{\text{ess}}$  主要由频率检测延时引入, 为了准确可靠, 频率检测一般需要1~2个周波, 因此实际工程可设置调频启动时间为2个周波, 即功率响应延时  $T_{\text{ess}}$  可设置为40 ms。

引入惯量调频是为了提高动态响应速度, 由式(4)可知, 当  $K_d$  满足式(5)时, 可以基本抵消延时  $T_{\text{ess}}$  的影响, 在提高动态响应速度的同时实现控制模型降阶, 增强系统的稳定性。

$$K_d = K_{\text{ess}} T_{\text{ess}} \quad (5)$$

### 2.3 储能辅助调频功率裕度设计

储能辅助调频可以优化系统的动态响应过程, 但是储能建造成本高, 需要合理设计储能调频的功率以及容量裕度, 从而达到较高的经济效益<sup>[28-32]</sup>。实际上, 储能参与辅助调频的动态过程时间较短, 所需的容量裕度较小, 因此, 文中主要讨论储能调频的功率裕度设计方法。

由上文的分析可知, 系统动态过程初期的频率波动和负荷功率波动大小成正比。因此, 实际工程应用中, 应参考系统正常运行中的最大负荷波动  $\Delta P_{e_{\text{max}}}$  以及导致的最大频率偏差  $\Delta f_{\text{max}}$ 。另外, 储能辅助调频功率裕度设计和系统期望的最小频率偏差相关, 当期望的频率偏差越小时, 应预留的调频功率裕度越大。由于储能系统的响应速度与柴发系统相比更加迅速, 储能辅助调频功率输出等效于负荷波动功率减少, 为简化分析, 可以参考式(6)设计储能系统辅助调频功率裕度。

$$\frac{\Delta f_{\text{max}}}{\Delta P_{e_{\text{max}}}} = \frac{\Delta f_p}{\Delta P_{e_{\text{max}}} - 0.8 P_{N_{\text{ess}}}} \quad (6)$$

式中:  $\Delta f_p$  为规定允许的频率偏差;  $P_{N_{\text{ess}}}$  为需要设计预留的储能辅助调频功率, 文中考虑为20%的裕度。

## 3 柴储并列系统稳定性分析

### 3.1 柴储并列系统小信号模型

对于微电网系统, 动态过程较短, 系统内的其他功率源包括光伏、风机等出力基本维持不变。因此, 针对柴发主电源配合储能辅助调频的系统, 主要考虑柴发及储能的协调运行控制。文中建立柴发及储能并列的小信号模型, 分析系统的稳定性。

考虑线路阻抗为感性时, 可以得到分布式电源

输出功率的简化表达式如下:

$$P = \frac{UE}{X_1} \delta \quad (7)$$

式中:  $U$ 、 $E$  分别为电源端电压和母线端电压;  $X_1$  为线路电抗;  $\delta$  为电源端电压和母线端电压的相位差。对式(7)两边求导即可得到小信号模型, 如式(8)所示。

$$\Delta P = K_1 \Delta \delta = K_1 \frac{\Delta \omega - \Delta \omega_g}{s} \quad (8)$$

式中:  $\Delta \omega_g$  为母线角频率变化量;  $K_1 = UE/X_1$ , 为有功功率系数。结合式(1)、式(8), 可以得到由于母线角频率  $\omega_g$  变化而导致柴发功率波动的小信号传递函数, 如式(9)所示。其中,  $K_{1,dg}$  为柴发支路的有功功率系数。

$$G_3(s) = \frac{\Delta P_{dg}}{\Delta \omega_g} = - (J_{dg} T_{dg} K_{1,dg} \omega_0 s^3 + J_{dg} K_{1,dg} \omega_0 s^2 + K_{dg} K_{1,dg} s + K_{dg,i} K_{1,dg}) / [J_{dg} T_{dg} \omega_0 s^4 + J_{dg} \omega_0 s^3 + (K_{dg} + T_{dg} K_{1,dg}) s^2 + (K_{dg,i} + K_{1,dg}) s] \quad (9)$$

结合式(4)、式(8), 参数满足式(5)时, 可以得到由于  $\omega_g$  变化, 导致储能功率波动的小信号传递函数, 如式(10)所示。其中,  $K_{1,ess}$  为储能支路的有功功率系数。

$$G_4(s) = \frac{\Delta P_{ess}}{\Delta \omega_g} = - \frac{K_d K_{1,ess} s + K_{ess} K_{1,ess}}{K_d s^2 + (K_{ess} + K_{1,ess} T_{ess}) s + K_{1,ess}} = - \frac{K_{ess} K_{1,ess}}{K_{ess} s + K_{1,ess}} \quad (10)$$

### 3.2 稳定性分析

结合式(1)、式(8)一式(10), 可以得到系统负荷波动导致柴发输出频率变化的闭环传递函数, 如式(11)所示。

$$G_5(s) = \frac{\Delta \omega_{dg}}{\Delta P_{load}} = \frac{G_3(s) G_1(s)}{G_3(s) + G_4(s)} \quad (11)$$

式中:  $\Delta \omega_{dg}$  为柴发输出角频率变化量;  $\Delta P_{load}$  为系统负荷功率变化量。

进而得到系统的特征方程以及随  $K_{ess}$  变化的闭环根轨迹, 如图4所示。图4中, 所有闭环特征根均位于虚轴左侧, 因此, 以柴发为主电源的微电网系统, 引入储能辅助调频的控制策略不会导致系统失稳。值得注意的是, 系统闭环特征根一共4个, 有2个特征根位于实轴上: 1个特征根距离虚轴较远, 对系统动态性能影响较小; 1个特征根随着  $K_{ess}$  增大, 逐渐靠近虚轴, 会导致系统的稳定裕度降低。另外, 还存在一对共轭复数根, 当  $K_{ess}$  较小时, 随着  $K_{ess}$  增大逐渐远离虚轴且阻尼比基本不变, 稳定裕度较高; 当  $K_{ess}$  较大时, 随着  $K_{ess}$  增大逐渐靠近虚轴且阻

尼比减小, 导致系统的稳定裕度降低。综上,  $K_{ess}$  设置过大会降低系统的稳定裕度, 和前文分析结论相近, 即实际工程应用中, 为了达到最优的稳定性以及动态性能, 可设置储能参与调频的下垂调节系数  $K_{ess} < K^*$ 。

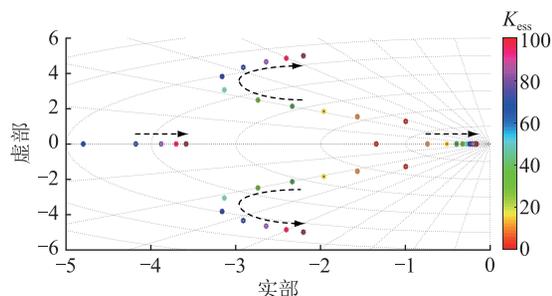


图4 柴储控制系统闭环根轨迹

Fig.4 Closed-loop root locus of diesel generator-energy storage system

## 4 试验验证

为了研究微电网运行稳定性, 同时验证所提控制策略的有效性, 文中搭建光伏、柴发、储能带负荷运行的孤岛微电网系统, 结构如图5所示。其中, 柴发作为主电源; 储能具备辅助调频功能; 光伏发出恒定有功功率 20 kW;  $Z_{1,dg}$ 、 $Z_{1,ess}$ 、 $Z_{1,pv}$ 、 $Z_{1,load1}$ 、 $Z_{1,load2}$  分别为柴发、储能、光伏、电动机和普通负荷的线路阻抗。柴发系统主要参数如表1所示, 微电网试验系统的线路参数如表2所示。文中所提柴储协调运行的控制策略由嵌入式开发装置微电网控制器实现, 微电网控制器通过电压/电流互感器测量微电网母线电压以及柴发输出电流, 通过通信的方式获得储能以及光伏的有功、无功等信息。

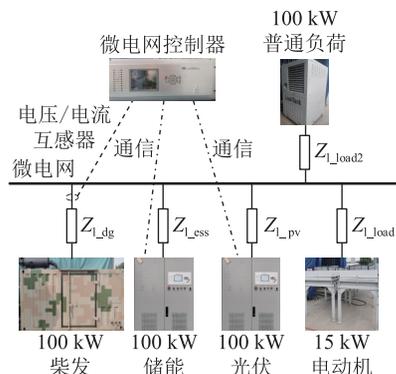


图5 试验系统结构

Fig.5 Structure of experimental system

### 4.1 单柴发带载试验

首先测试了柴发单独带载运行, 负载功率波动时的响应情况。有功负荷从 20 kW 突增至 70 kW, 功率波动情况如图6所示, 系统电压频率跌落 1.56

表 2 微电网系统主要参数

Table 2 Main parameters of microgrid system

		p.u.	
参数	数值	参数	数值
$Z_{L\_dg}$	0.08+j0.21	$Z_{L\_pv}$	0.08+j0.21
$Z_{L\_ess}$	0.08+j0.21	$Z_{L\_load1}$	0.16+j0.25

Hz, 频率波动较大。试验得到的频率响应波形和理论推导的频率响应波形基本保持一致, 验证了柴发系统建模的合理性。

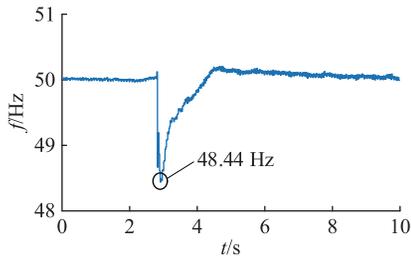


图 6 单柴发带载频率响应

Fig.6 Frequency response of load fluctuation under diesel generator control

#### 4.2 柴储微电网带载试验

由柴发单独带载频率响应试验结果, 可以得到柴发在负荷变化下的频率变化率  $K^*$  为 5.3 kW/rad。由上文的分析, 可以设置储能比例调频系数  $K_{ess}$  为 5 kW/rad, 同时设置储能功率响应延时  $T_{ess}$  为 40 ms, 根据式(5)可以设置储能惯量调频系数  $K_d$  为 0.2 (kW·s)/rad。根据以上设计的控制器参数, 可测试储能参与辅助调频的效果。

首先进行普通静止负荷的投切试验, 试验结果如图 7 所示。有功负荷从 20 kW 突增至 70 kW, 储能采用 PQ 控制时, 仅柴发响应负荷波动, 频率变化和单柴发带载的情况基本一致, 频率跌落 1.56 Hz; 储能采用下垂控制时, 能够参与到系统的调频过程, 输出功率最大 14 kW, 但是由于延时的存在, 功率输出滞后, 优化效果不明显, 频率跌落 1.33 Hz; 储能投入辅助调频功能时, 由于增加了惯量调频环节, 储能调频响应速度变快, 参与调频的输出功率变大, 最大达到 22 kW, 频率跌落仅为 0.88 Hz, 系统频率波动减小。值得注意的是, 按照式(6)所示的储能辅助调频功率裕度设计方法, 将频率跌落控制到 0.88 Hz 以内需要预留 27 kW 的功率裕度, 和试验中储能的真实出力相近, 验证了储能辅助调频功率裕度设计方法的有效性。同时, 储能参与辅助调频的动态过程在 2 s 内结束, 所需要的储能容量裕度较小。

针对电动机负荷进行投切试验, 测试结果如图

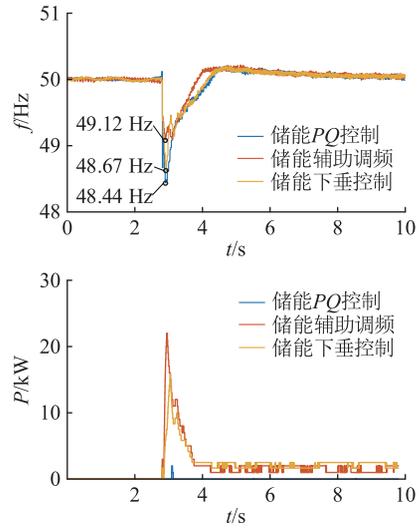


图 7 柴储带静止负荷响应

Fig.7 Response of static load fluctuation under diesel generator-energy storage system control

8 所示。突增 15 kW 电动机负荷的情况下, 储能采用 PQ 控制时, 功率基本没有变化, 仅柴发响应负荷波动, 频率跌落 0.89 Hz; 储能采用下垂控制时, 储能调频输出功率最大 6 kW, 频率跌落 0.75 Hz; 储能投入辅助调频功能时, 储能调频功率响应变快, 输出功率最大达到 8 kW, 频率跌落仅为 0.53 Hz, 系统频率波动减小。同样, 按照式(6)所示储能辅助调频功率裕度设计方法, 将频率跌落控制到 0.53 Hz 以内需要预留 7.6 kW 的功率裕度, 和试验中储能的真实出力相近。

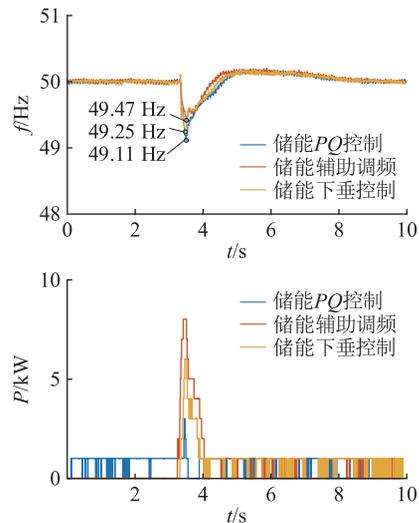


图 8 柴储带电机负荷响应

Fig.8 Response of motor load fluctuation under diesel generator-energy storage system control

因此, 应对静止负荷、电动机负荷的波动, 文中所提控制策略均可以提高系统频率稳定性, 减小动态过程下的频率波动, 提高系统频率支撑水平, 改

善系统电能质量。

## 5 结语

文中研究柴储微电网的协调控制策略,针对柴发机械延时大、动态响应慢、爬坡能力差等特性,应对负荷变化导致系统频率波动剧烈的问题,提出一种协调储能进行辅助调频的控制策略。

文中建立柴发运行简化模型,研究负荷变化导致柴发输出频率波动的特性,分析柴发控制系统各参数对频率波动的影响;提出一种储能进行辅助调频的控制策略,协同柴发应对系统的频率波动,并考虑引入惯量调频,改善了下垂控制的延时响应问题,给出适用于工程应用的参数设计以及调频功率裕度设计方法,同时建立柴储并列运行的小信号模型,分析所提控制策略的稳定性;搭建柴储微电网的动模试验平台进行试验验证,试验结果表明,在文中所提控制策略下,负荷变化导致的微电网频率波动减小,频率支撑水平得到提高,电能质量得到优化,系统稳定性明显增强。

### 参考文献:

- [1] 秦海岩. 加快发展新能源,支撑落实“双碳”目标[J]. 可持续发展经济导刊,2021(S2):23-25.  
QIN Haiyan. Accelerate the development of new energy sources and support the implementation of the goal of "double carbon" [J]. China Sustainability Tribune,2021(S2):23-25.
- [2] 高骞,杨俊义,洪宇,等. 新型电力系统背景下电网发展业务数字化转型架构及路径研究[J]. 发电技术,2022,43(6):851-859.  
GAO Qian,YANG Junyi,HONG Yu, et al. Research on digital transformation architecture and path of power grid development planning business under new power system blueprint[J]. Power Generation Technology,2022,43(6):851-859.
- [3] 朱凯,张艳红. “双碳”形势下电力行业氢能应用研究[J]. 发电技术,2022,43(1):65-72.  
ZHU Kai,ZHANG Yanhong. Research on application of hydrogen in power industry under "double carbon" circumstance[J]. Power Generation Technology,2022,43(1):65-72.
- [4] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):7-14.  
WU Xiong,WANG Xiuli,LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):7-14.
- [5] 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 microgrid technology [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):57-70.
- [6] 沈霞,帅智康,沈超,等. 大扰动时交流微电网的运行与控制研究综述[J]. 电力系统自动化,2021,45(24):174-188.  
SHEN Xia,SHUAI Zhikang,SHEN Chao, et al. Review on operation and control of AC microgrid under large disturbance [J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(24):174-188.
- [7] 吕清泉,张珍珍,马彦宏,等. 区域光伏发电出力特性分析研究[J]. 发电技术,2022,43(3):413-420.  
LÜ Qingquan,ZHANG Zhenzhen,MA Yanhong, et al. Analysis and research on output characteristics of regional photovoltaic power generation [J]. Power Generation Technology,2022,43(3):413-420.
- [8] 熊雄,杨仁刚,叶林,等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估[J]. 电工技术学报,2013,28(9):224-230.  
XIONG Xiong,YANG Rengang, YE Lin, et al. Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(9):224-230.
- [9] 陈晓光,杨秀媛,卜思齐,等. 考虑经济功能性的风电场储能系统容量配置[J]. 发电技术,2022,43(2):341-352.  
CHEN Xiaoguang,YANG Xiuyuan,BU Siqi, et al. Capacity allocation of wind farm energy storage system considering economic function [J]. Power Generation Technology,2022,43(2):341-352.
- [10] 陈晓光,杨秀媛,王镇林,等. 考虑多目标优化模型的风电场储能容量配置方案[J]. 发电技术,2022,43(5):718-730.  
CHEN Xiaoguang,YANG Xiuyuan,WANG Zhenlin, et al. Energy storage capacity allocation scheme of wind farm considering multi-objective optimization model [J]. Power Generation Technology,2022,43(5):718-730.
- [11] 赵梓含,郭力,李霞林,等. 柴储微电网虚拟惯量和阻尼系数可行域分析方法[J/OL]. 中国电机工程学报:1-16 [2023-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220713.1410.006.html>.  
ZHAO Zihan,GUO Li,LI Xialin, et al. Feasible region analysis method of virtual inertia and damping of DGS-ESS microgrid [J/OL]. Proceedings of the CSEE;1-16 [2023-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220713.1410.006.html>.
- [12] 郑益,朱俊澎,袁越. 基于条件风险价值的风柴储孤岛微网经济风险评估[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):57-63.  
ZHENG Yi,ZHU Junpeng,YUAN Yue. Economic risk assessment of wind-diesel-storage islanded microgrid based on conditional value at risk [J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(11):57-63.
- [13] 张文杰,吴杰康,赵俊浩,等. 考虑源-荷不确定性的水风柴微电网优化配置[J]. 电力工程技术,2020,39(2):117-126.  
ZHANG Wenjie,WU Jiekang,ZHAO Junhao, et al. Optimal capacity configuration of hydro-wind-diesel microgrid considering uncertainty of renewable energy and load [J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(2):117-126.
- [14] TANG X S,DENG W,QI Z P. Investigation of the dynamic stability of microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(2):698-706.
- [15] REN X Y,LIN G Y,ZHANG X Y, et al. A fuzzy logical three-

- shold strategy for optimal fuel efficiency of diesel engine based series heterogeneous multi-energy drive system [C]//MA W M, RONG M Z, YANG F, et al. The Proceedings of the 9th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering. Singapore: Springer, 2021: 257-266.
- [16] 李翼翔, 田震, 唐英杰, 等. 考虑构网型与跟网型逆变器交互的孤岛微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 11-18.  
LI Yixiang, TIAN Zhen, TANG Yingjie, et al. Small-signal stability analysis of island microgrid considering interaction between grid-forming converter and grid-following converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 11-18.
- [17] 彭也伦, 黄文, 帅智康. 含异构微源孤岛微电网的瞬时有功功率分配问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5167-5179.  
PENG Yelun, HUANG Wen, SHUAI Zhikang. Research on transient load sharing in islanded microgrids with heterogeneous DGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5167-5179.
- [18] CHENG H J, SHUAI Z K, SHEN C, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [19] 黄家豪, 王谱宇, 王金全, 等. 微网逆变器虚拟柴油发电机组暂态功率均分控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2876-2883.  
HUANG Jiahao, WANG Puyu, WANG Jinquan, et al. Transient power equalization control method of virtual diesel generator set for microgrid inverter[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2876-2883.
- [20] 郭力, 富晓鹏, 李霞林, 等. 独立交流微网中电池储能与柴油发电机的协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 70-78, 12.  
GUO Li, FU Xiaopeng, LI Xialin, et al. Coordinated control of battery storage and diesel generators in isolated AC microgrid systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 70-78, 12.
- [21] HAN H, HOU X C, YANG J, et al. Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 200-215.
- [22] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1672-1694.  
WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1672-1694.
- [23] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 29-34, 95.  
DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Active rotor speed protection strategy for DFIG-based wind turbines with inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 29-34, 95.
- [24] 刘梦璇, 郭力, 王成山, 等. 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 19-24.  
LIU Mengxuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power, photovoltaic system, diesel generator, and battery storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 19-24.
- [25] 张倩, 丁津津, 刘童, 等. 基于满意度原理的光柴储微网系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 88-95.  
ZHANG Qian, DING Jinjin, LIU Tong, et al. Optimal operation of PV-diesel-battery microgrid based on satisfying degree[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 88-95.
- [26] 鲁宗相, 姜继恒, 乔颖, 等. 新型电力系统广义惯量分析与优化研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1754-1776.  
LU Zongxiang, JIANG Jiheng, QIAO Ying, et al. A review on generalized inertia analysis and optimization of new power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1754-1776.
- [27] 张振宇, 张小奇, 段乃欣, 等. 基于“等面积原理”的储能与新能源协同优化配置方法[J]. 电网技术, 47(10): 4131-4142.  
ZHANG Zhenyu, ZHANG Xiaoqi, DUAN Naixin, et al. The synergistic and optimal configuration of energy storage and renewable energy based on the equal area principle[J]. Power System Technology, 47(10): 4131-4142.
- [28] 赵晶晶, 徐传琳, 吕雪, 等. 微电网一次调频备用容量与储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4324-4332, 4572.  
ZHAO Jingjing, XU Chuanlin, LÜ Xue, et al. Optimization of micro-grid primary frequency regulation reserve capacity and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4324-4332, 4572.
- [29] 程昱明, 孟高军, 贾鹏, 等. 用于平抑风电功率波动的混合储能容量优化配置方法[J/OL]. 电源学报: 1-13[2023-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230106.1644.003.html>.
- CHENG Yuming, MENG Gaojun, JIA Peng, et al. Optimal capacity configuration of hybrid energy storage system for mitigating fluctuations of wind power outputs [J/OL]. Journal of Power Supply: 1-13[2023-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230106.1644.003.html>.
- [30] 张长云, 黄景光, 李振兴, 等. 极地环境含风氢储混合微电网容量优化配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 108-116.  
ZHANG Changyun, HUANG Jingguang, LI Zhengxing, et al. Optimal configuration of wind-hydrogen-storage hybrid micro-grid capacity in polar environment [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 108-116.
- [31] 叶季蕾, 李斌, 张宇, 等. 基于全球能源互联网典型特征的

储能需求及配置分析[J]. 发电技术, 2021, 42(1):20-30.

YE Jilei, LI Bin, ZHANG Yu, et al. Energy storage requirements and configuration analysis based on typical characteristics of global energy Internet[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1):20-30.

[32] 刘新萌, 时荣超, 吕风波, 等. 面向多站融合的储能容量优化配置模型及方法[J]. 供用电, 2022, 39(4):93-99.

LIU Xinmeng, SHI Rongchao, LÜ Fengbo, et al. Model and method of optimal allocation of energy storage capacity for multi-station integration [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(4):93-99.

作者简介:



洪灏灏

洪灏灏(1994),男,硕士,工程师,从事微电网保护控制相关工作 (E-mail: Honghh@nrec.com);

王晨(1988),男,硕士,工程师,从事有源配电网保护控制相关工作;

徐光福(1982),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统自动化保护及控制相关工作。

## Optimal control method of frequency in diesel generator based islanded microgrid

HONG Haohao<sup>1</sup>, WANG Chen<sup>1</sup>, XU Guangfu<sup>1</sup>, HOU Wei<sup>1</sup>, LOU Guannan<sup>2</sup>, WU Renze<sup>1</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to solve the problems such as significant frequency fluctuation and slow dynamic response under load disturbance in islanded microgrid which has a diesel generator (DG) as the primary source, an auxiliary frequency regulation method is proposed to improve the dynamic response process of the system. Firstly, the model of diesel generator system is established to analyze the impact on transient state due to main parameters, including inertia and response delay. Secondly, the energy storage system (ESS) with auxiliary frequency regulation based on droop control is proposed, and the engineering parameter and ESS's power margin design method are given. In addition, a small signal model of the DG-ESS system is established to prove the stability of the system. Finally, the experimental platform of DG-ESS microgrid is built, and the results verify that the proposed control strategy effectively reduces the transient frequency fluctuation under the change of static or motor load.

**Keywords:** islanded microgrid; diesel generator (DG); droop control; inertial control; frequency response; stability analysis

(编辑 方晶)