

含柴油发电机和蓄电池储能的独立微电网频率分层控制

马艺玮^{1,2,3†}, 杨 苹^{1,2,3}, 陈思哲⁴, 赵卓立^{1,2,3}, 王月武^{1,2,3}

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 511458;

3. 华南理工大学 风电控制与并网技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 511458; 4. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对由间歇性可再生能源、柴油发电机组和蓄电池储能系统构成的独立微电网, 提出一种新型的频率分层控制方案, 建立适合蓄电池储能系统和柴油发电机组不同控制特性的分层控制结构及其协调控制策略, 提高了独立微电网频率控制的稳定性和灵活性. 在一级控制中, 采用改进型下垂控制的蓄电池储能系统, 来处理较小变化幅度和较短变化周期的随机净负荷波动, 提高独立微电网系统的瞬态频率响应特性和频率质量. 在二级控制中, 采用改进的柴油发电机PID调速控制, 应对较大变化幅度和较长变化周期的系统净负荷波动, 实现系统频率的无差控制. 最后, 通过对东澳岛风柴蓄混合能源独立微电网系统在不同运行条件下的频率控制仿真结果, 验证了所提方法的可行性和有效性.

关键词: 频率分层控制; 独立微电网; 柴油发电机组; 蓄电池储能系统; 下垂控制

中图分类号: TM76 文献标识码: A

Frequency hierarchical control for islanded micro-grid consisting of diesel generator and battery energy storage system

MA Yi-wei^{1,2,3†}, YANG Ping^{1,2,3}, CHEN Si-zhe⁴, ZHAO Zhuo-li^{1,2,3}, WANG Yue-wu^{1,2,3}

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology,

South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 511458, China;

3. National-Local Joint Engineering Laboratory for Wind Power Control and Integration Technology,

South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 511458, China;

4. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: For islanded micro-grid consisting of the intermittent renewable energy sources with Diesel generator (DE) and battery energy storage system (BS), a novel frequency hierarchical control scheme is presented with the frequency hierarchical control structure and the coordinated control strategy, which are suitable for different characteristics of DE and BS for improving the frequency stability and flexibility of islanded micro-grid. In the frequency primary control, a modified droop frequency control of BS is given to improve the transient frequency response and reduce frequency deviation by rejecting the fast, small and random net-load fluctuations. In the frequency secondary control, a modified PID control of DE governor is proposed to deal with the slow and big net-load fluctuations to achieve the zero steady-state error frequency control of islanded micro-grid. Finally, the performance of the proposed method is validated in the practical application to Dong'ao islanded wind-diesel-battery hybrid energy micro-grid operated under various conditions.

Key words: frequency hierarchical control; islanded microgrid; diesel generator; battery energy storage system; droop control

1 引言(Introduction)

独立微电网是指与外部大电网隔离、独立自主运行的小型电力系统, 它主要有两种不同形式: 1) 不与外部大电网相连接的孤岛式的微电网^[1-2]; 2) 因某种

原因通过公共连接点(point of common coupling, PCC)的静态开关断开与大电网的连接而转入独立运行模式的微电网^[3-5]. 现有研究和实践表明, 含多种分布式电源的独立微电网能够有效提高系统的供电可

收稿日期: 2014-12-11; 录用日期: 2015-05-04.

†通信作者. E-mail: ma.yiwei@mail.scut.edu.cn.

国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2014AA052001), 广东省科技计划项目(2012B040303005), 南沙区科技计划项目(2013P005)资助.

Supported by National High Technology Research and Development Program (‘863’ Program)(2014AA052001), National Natural Science Foundation, Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2012B040303005) and Technologies Planning Program of Nansha District (2013P005).

靠性和电能质量、降低成本, 不仅是解决和改善海岛等偏远地区分散电力需求的一种有效途径, 还是提高配电网供电可靠性的一种有效方法^[6-8]。然而, 高渗透率间歇性可再生能源如风力发电和光伏发电的随机性出力和负荷的不可预测性和多变性, 都使得独立微电网系统频率控制具有一定的挑战性^[9-10]。

近些年来, 围绕独立微电网的频率控制研究引起广泛的关注, 并取得了一定的成果^[11-18]。文献[13]研究微电网系统内逆变器、同步发电机和异步发电机不同接口型微电源的调频特性, 比较分析了具有无调频特性、有差调频和无差调频的不同微电源对微电网独立运行时的频率特性影响。文献[14]采用了一种改进的自调节下垂系数控制法, 研究微电网逆变器并联控制技术, 有效减小在负荷突变等情况下的系统频率波动。文献[15]提出一种基于虚拟同步发电机的独立微电网频率控制方法, 详细给出了微电网独立运行时逆变电源控制的一次、二次调频策略。相对于目前大多数文献主要集中于逆变器接口微电网的运行控制, 文献[16]针对独立微电网内柴油发电机和蓄电池储能系统的不同控制特性, 提出了柴油发电机为主控电源时的蓄电池储能系统辅助功率控制, 以及柴油发电机和储能系统之间的双主电源无缝切换控制策略, 保证系统运行的稳定性, 但它没有给出具体的二次频率控制方法。实际上, 围绕含多种混合能源独立微电网的研究和实践已指出, 微电网频率波动问题主要是由于高渗透率的间歇性电源如风电和光伏的随机性功率输出、大功率电力负荷的投切而引起的有功功率供需不平衡问题而导致的^[17-18], 而为了有效解决此种问题, 配置一定容量的蓄电池储能装置和/或柴油发电机组构成的不间断供电微电源组合是保证独立微电网系统频率稳定的关键^[16, 19]。

因此, 在充分考虑独立微电网系统的净负荷波动特性, 可控型微电源—柴油发电机组和电池储能系统的不同控制特性及其交互协调关系的基础上, 本文提出了一种新型独立微电网的频率分层控制结构及其分层协调控制策略, 提高了独立微电网频率控制的稳定性和灵活性。在1级频率控制中, 利用具有快速响应特性的蓄电池储能系统通过改进的下垂控制参数, 有效应对较小变化幅度和较短变化周期的随机净负荷波动, 改善独立微电网系统的瞬态频率响应特性和频率质量; 而在2级频率控制中, 采用柴油发电机的PID调速控制应对较大变化幅度和较长变化周期的系统净负荷波动, 对超出1级控制范围的系统频率偏差进行恢复控制来保证系统频率稳定。最后, 利用PSCAD软件对东澳岛的风柴蓄独立微电网在不同运行状况下的运行控制进行仿真分析, 结果验证了所提方法的有效性。

2 独立微电网的频率分层控制结构(Frequency hierarchical control structure of islanded microgrid)

独立微电网系统内风电、光伏等间歇性分布式电源的随机性功率输出以及各种阻感性负荷的频繁投切都会引起系统有功功率供需不平衡, 进而导致系统频率波动问题^[20], 因此, 根据独立微电网系统的频率动态特性, 对频率稳定区域按照一定级别划分为一定区域, 如图1所示为频率稳定区域划分的A、B和C三类区域^[21-22], 其中, A区域代表频率偏差在电能质量允许范围($49.5 \text{ Hz} \leq f \leq 50.5 \text{ Hz}$)内, B区域代表稍微超出额定频率允许波动范围($48 \text{ Hz} \leq f < 49.5 \text{ Hz}$ 或 $50.5 \text{ Hz} < f \leq 51 \text{ Hz}$), C区域代表严重超出频率允许波动范围($47.5 \text{ Hz} \leq f < 48 \text{ Hz}$ 或 $51 \text{ Hz} < f \leq 51.5 \text{ Hz}$)。

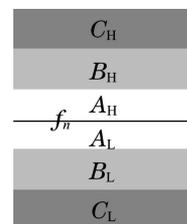


图 1 频率稳定区域划分

Fig. 1 Division of frequency stability zone

借鉴传统电力系统的分层控制经验, 以及综合考虑柴油发电机和蓄电池储能系统的不同动态调节特性(时间响应特性和功率调节特性等)^[23]的基础上, 提出了基于不同时间尺度的独立微电网频率分层控制结构, 如图2所示。其中: 第1层为蓄电池储能系统的频率下垂控制, 第2层为柴油发电机组的频率无差控制, 第3层为基于微电网中央控制中心(microgrid control center, MGCC)的经济运行。第1层和第2层为单元级控制层, 而第3层为系统级控制层。每1级控制层都有各自的不同控制目标和控制功能, 从而使整个独立微电网系统在面对不同程度的频率扰动问题时都能够根据各级频率控制策略, 提高系统频率稳定性。

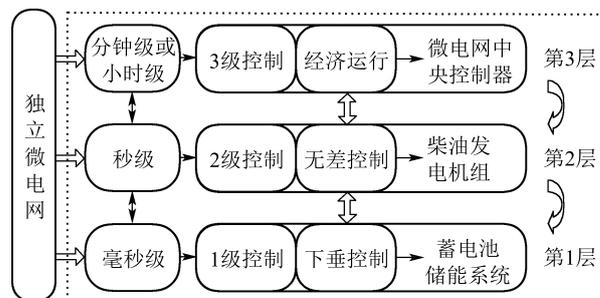


图 2 频率分层控制结构

Fig. 2 Frequency hierarchical control structure

由图2可知, 根据不同的时间尺度, 本文所提出的独立微电网频率分层控制结构主要包括:

1) 第1层为采用下垂控制的蓄电池储能系统的1级控制, 主要针对变化幅度小、周期短的随机性净负荷波动分量, 即图1所示的B区域. 这充分利用了蓄电池储能系统的快速瞬时响应性和较好功率补偿性等优点, 能够在毫秒级时间尺度内有效补偿负荷功率缺额, 快速抑制了系统频率波动, 提高系统运行的稳定性.

2) 第2层为采用PID调速控制的柴油发电机的2级控制, 主要针对变化幅度大、周期长的冲击性净负荷分量, 即图1所示的C区域. 相对蓄电池储能系统的逆变控制特性, 柴油发电机的动态响应速度较慢, 很难满足系统负荷和间歇性能源瞬息变化的需要, 但是它作为一种技术成熟的不间断可控电源, 具有容量大、持续时间长等优点, 能够较好实现微电网系统的频率无差控制, 使较大偏离的频率偏差恢复到额定值.

3) 第3层为基于系统级集中控制的微网中央控制中心(MGCC)的3级控制或经济运行, 主要针对较长时间周期内变化缓慢的周期性负荷分量. 由于3级控制主要针对一天内变化缓慢的负荷需求和发电计划, 故本文不做详细探讨.

在以上各级控制中, 独立微电网的第3层控制属于系统级的经济调度范畴, 本文不予讨论. 下面分别对频率分层控制策略中的1级和2级控制进行介绍.

3 独立微电网的频率分层协调控制(Frequency hierarchical coordination control of islanded microgrid)

3.1 基于电池储能的1级频率控制(Primary frequency control of BS)

在独立微电网系统中, 储能逆变器是用于连接蓄电池储能装置与微电网之间的双向逆变器, 既可以把储能装置的电能放电注入到微电网系统中, 也可以把微电网中的电能充电到储能装置, 实现电能的双向流动. 图3为本文采用的蓄电池储能逆变器控制结构.

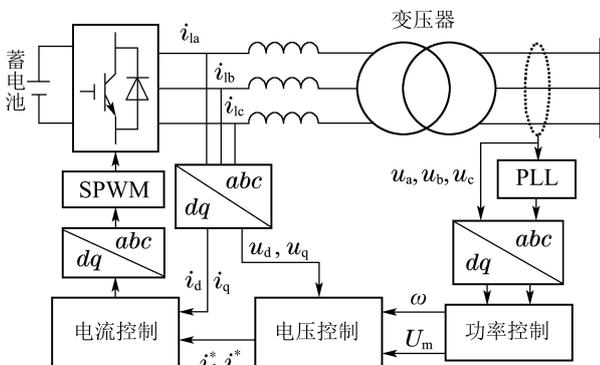


图3 蓄电池储能逆变器控制结构

Fig. 3 Battery inverter control structure diagram

蓄电池储能系统的下垂控制方法通常被用于1级频率控制中, 提高瞬态频率响应特性^[24]. 蓄电池储能

系统根据其下垂控制特性响应系统频率偏移, 其逆变控制器的下垂控制原理框图如图4所示. 其中: f_0 为微电网系统额定频率, f_m 为微电网系统的实测频率, K_p 为下垂控制系数, P_0 为有功功率初始值, P_m 有功功率测量值.

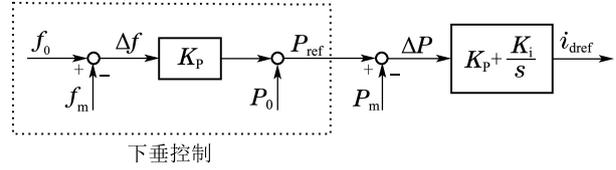


图4 下垂控制原理框图

Fig. 4 Droop control diagram

蓄电池储能逆变器可以通过控制d轴电流分量快速响应外环的频差(Δf)信号, 直接调节蓄电池储能的输出有功功率参考值(P_{ref}). 为了防止由于蓄电池储能的频繁充放电, 将图1中频率稳定区域A设定为其下垂控制的调节死区, 允许系统频率在该死区范围内波动, 储能不参与调节. 结合图1和图2可得出蓄电池储能系统的有功-频率(P/f)下垂控制特性, 如图5所示. 因此, 蓄电池储能系统的频率下垂控制区域只是 B_L 区和 B_H 区.

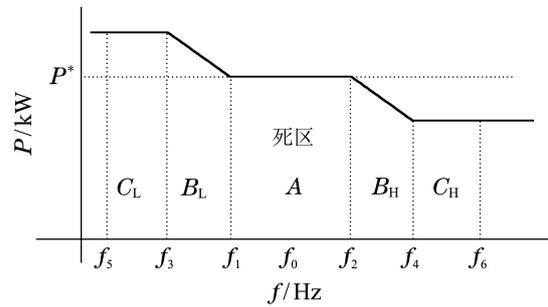


图5 蓄电池储能系统的下垂控制特性

Fig. 5 Droop control characteristics of BS

由此, 蓄电池储能系统的改进有功-频率下垂控制特性函数如式(1)所示, 而其下垂控制系数由式(2)求得.

$$\begin{cases} P_{ref} = P_0 + K_p(f_0 - f_m), \\ f_m \in [f_3 \ f_1] \text{ 或者 } [f_2 \ f_4], \end{cases} \quad (1)$$

$$K_p = (P_{max} - P_0)/(f_0 - f_{min}), \quad (2)$$

式中: P_{ref} 为蓄电池储能系统的有功功率输出参考值, P_{max} 为蓄电池储能系统的最大输出有功功率, P_{min} 为蓄电池储能系统的最小输出有功功率.

3.2 基于柴油发电机组的2级频率控制(Secondary frequency control of DE)

为了实现一定的经济效益, 独立微电网系统中的柴油发电机通常不再是单台大容量机组, 而是选择多台相对小容量的机组^[16], 根据负荷实际需求, 开启一

台或者多台柴油发电机组跟随微电网净负荷波动, 维持系统稳定运行. 柴油发电机的频率调整及并联运行机组的有功功率分配一般是由原动机的调速器和自动调频调载装置来实现. 目前, 柴油发电机调速技术通常采用PID控制方法, 它具有结构简单、鲁棒性强、能够实现无稳态偏差控制等优点^[25-26]. 在控制过程中, 采用“基于前馈控制的PID调速控制”即是利用原动机调速器的原设定转速和实际转速间的偏差, 作为PID控制的反馈信号, 将偏差值进行比例、积分和微分运算后, 再通过线性组合构成控制量, 对柴油机油门进行控制, 达到对柴油发电机组转速和输出频率控制的目的. PID的控制规律如式(3)所示, 其中: K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数.

$$u_t = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (3)$$

由此, 若当前运行的单台柴油发电机组采用PID控制器来跟随独立微电网系统净负荷波动时, 其有功功率—频率调节特性函数如式(4)所示, 实现具有无差特性的2级频率调节.

$$\Delta P = \Delta f \cdot (K_p + K_i + K_d) = \Delta f \cdot K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (4)$$

式中: ΔP 为有功功率偏差, Δf 为频率偏差, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数.

多台并联运行柴油发电机组的有功功率分配一般是由机组的自动调频调载装置来实现的, 目前主要采用在机组控制柜中的自动同步并机控制器(automatic synchronization controller, ASC), 就可以实现自动并联运行, 自动同步并机控制器的转速调节原理如图6所示.

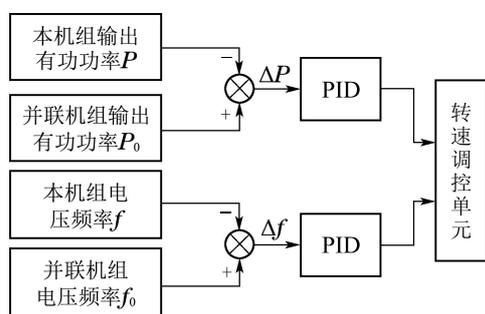


图6 自动同步并机控制器的控制原理

Fig. 6 Control principle of ASC

在控制过程中, 在参与并联的每一台发电机上都装设按“频率差”和“功率差”进行调整的控制器, 进而求得系统“频率差”和“功率差”的综合信号 V_{sri} , 如式(5)所示. 各调整器按接受的 V_{sri} 进行调整, 直到满足各调整器输入的“频差”与“功差”信

号均为零时, 调整才完成.

$$V_{sri} = K_s \Delta f + K_p \Delta P_i = K_s \Delta f + K_p (P_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^n P_i), \quad (5)$$

式中: K_s 和 K_p 分别为频差和功差的调节比例系数, i 为柴油发电机组编号, P_i 为柴油发电机 i 的输出有功功率, α_i 为柴油发电机组分担系统有功功率的比例系数, n 为柴油发电机组的总台数.

由此, 独立微电网系统内的有功功率供需平衡则满足式(6), 其中 K_f 为柴油发电机的调差系数.

$$\Delta f + K_f (P_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^n P_i) = 0. \quad (6)$$

因此, 将所有并联运行各柴油发电机组的调频方程式整理并相加后可得

$$\Delta f \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_f} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \right). \quad (7)$$

由于 $\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_f} \neq 0$, 所以 $\Delta f = 0$. 这说明基于多台并联运行的柴油发电机组在跟随独立微电网净负荷波动变化的调节过程结束后频率是无差的.

3.3 1, 2级频率协调控制策略(Coordination strategy of primary and secondary frequency regulations)

由以上分析可知, 一次调频是通过蓄电池逆变器控制来实现的, 能够快速响应周期短、波动小的扰动分量, 但一次调频是有差调节. 而在二次调频中, “基于前馈控制的PID控制”柴油发电机的频率调整及并联运行机组的有功功率分配都有效实现了二次频率无差调节, 其相对较慢的调频响应速度适合应对较大变化幅度和较长变化周期的系统净负荷波动, 并对超出1级控制范围的系统频率偏差进行恢复控制来保证系统频率稳定. 总之, 基于蓄电池储能系统的一次调频和基于柴油发电机组的二次调频在时间尺度上通过相互协作, 共同维持和保障系统频率稳定.

由图7所示的独立微电网的频率1级和2级协调控制策略可知, 蓄电池储能系统和柴油发电机组的控制器实时监测微电网系统频率, 并判断其处于图1所示的分区状态. 若系统净负荷变化不大, 系统频率在正常范围内即A区域, 则蓄电池储能系统和柴油发电机组不参与调节, 但蓄电池储能系统处于待机状态, 而柴油发电机组维持恒定的有功功率输出满足系统净负荷需求. 若系统内净负荷减少而导致频率抬升并处于图1中的 B_H 区时, 负责1级控制的蓄电池储能系统则凭借其瞬时响应特性, 率先通过充电来吸收多余的功率, 抑制和降低频率波动幅度并处入稳定区域A中. 如果净负荷减少幅度大而导致系统频率攀升至 C_H 区时, 处于2级控制的柴油发电机则降低功率输出而实

现系统功率平衡,而负责1级控制的蓄电池储能系统停止充电而处于待机状态.同理,系统内净负荷增加会引起系统频率跌落,如果处于图1中的 B_L 区域时,负责1级控制的蓄电池储能系统率先通过放电进行功率补偿,满足系统功率平衡;如果系统频率跌落至 C_L 区时,负责2级控制的柴油发电机则增加功率输出来满足系统功率平衡(注:3级控制的MGCC负责蓄电池储能荷电状态(SOC)的优化管理,从而保证其在最佳荷电状态,满足蓄电池储能的一次控制,此处不做详细介绍).

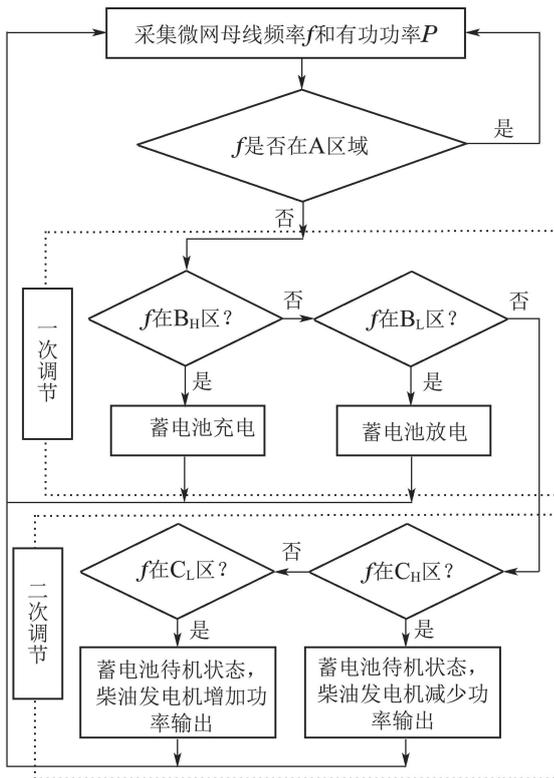


图7 1, 2级频率协调控制策略

Fig. 7 Primary and secondary frequency coordinated control strategy

4 仿真分析(Simulation)

本文以广东东澳岛独立微电网的一期工程为例,在PSCAD中搭建如图8所示的风柴蓄独立微电网系统仿真模型,验证本文提出的分层控制策略的有效性.该微电网系统一期工程包含有2台柴油发电机组、2台风力发电机组和1套蓄电池储能系统共5个微电源以及5个负荷,各分布式单元都接入系统10kV母线,再通过降压变压器供给各个负荷.电源及负荷参数如表1所示.

情形 1 当系统有负荷功率发生变化时,分别用蓄电池储能系统和柴油发电机组完成系统的一次控制. ① 在10 s时,系统净负荷突然增加200 kW (负荷增加100 kW, 风电减少100 kW), 蓄电池储能系统和柴油发电机组的有功输出和系统的频率响应如图9所示;

② 在10 s时,系统净负荷突然减少200 kW(负荷减少100 kW, 风电增加100 kW), 蓄电池储能系统和柴油发电机组的有功输出和系统的频率响应如图10所示.

图9(b)和图10(b)分别显示了蓄电池储能系统和柴油发电机均采用下垂控制完成系统的一次控制时,系统的频率响应曲线.仿真结果说明,蓄电池储能系统的频率响应速度比柴油发电机组快,且BS调节比DE调节的频率波动小.

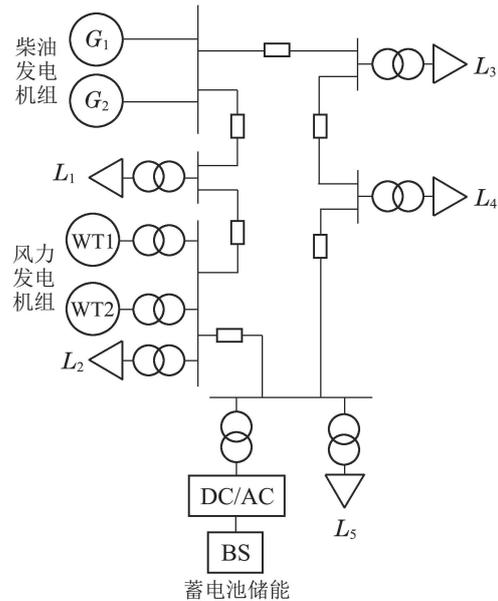


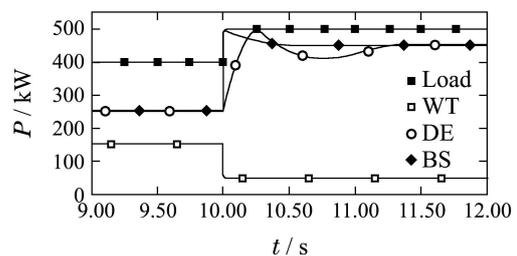
图8 独立微电网系统结构

Fig. 8 Structure of islanded microgrid

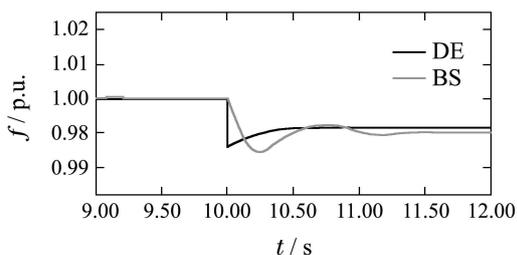
表1 分布式电源及负荷参数

Table 1 Parameters of DGs and load

类型	容量
柴油发电机组	2×1275 kVA
风力发电机组	2×750 kW
蓄电池储能系统	500 kW×6 h
L1	1460 kW
L2	642 kW
L3	258 kW
L4	320 kW
L5	320 kW



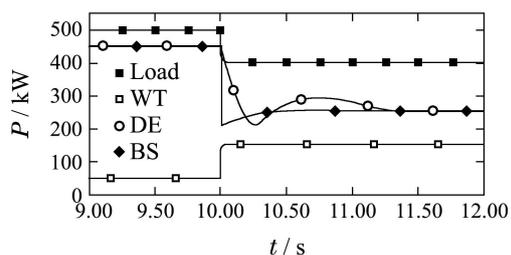
(a) 负荷需求及DG输出



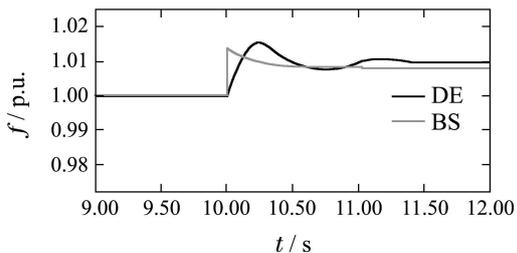
(b) 一次控制频率响应

图 9 净负荷增加时的频率响应

Fig. 9 Frequency response for increasing net load



(a) 负荷需求及DG输出



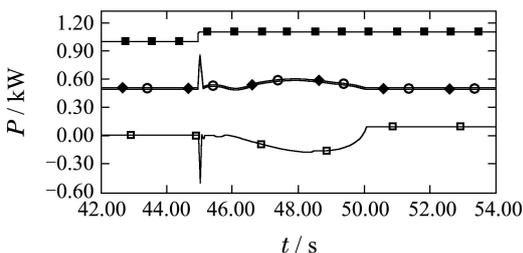
(b) 一次控制频率响应

图 10 净负荷减少时的频率响应

Fig. 10 Frequency response for reducing net load

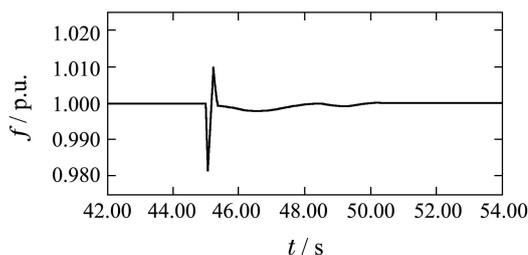
情形 2 初始阶段, 系统运行两台柴油发电机组 (DE01, DE02), 系统供需功率平衡、稳定运行, 在第 45 s 时, WT01 接入系统, 启动二次控制, 各电源输出的有功功率和系统频率变化如图 11 所示。

由图 11 可知, 风力发电机组启动需要吸收大量有功功率, 系统频率下降, 此时超过蓄电池储能系统的调节范围, 启动二次控制后, 柴油发电机组跟随系统内净负荷的变化, DE01 和 DE02 均分系统有功功率, 系统频率在 WT01 启动完成后恢复至额定值。



■ Load □ WT01 ○ DE01 ◆ BS02

(a) 电源有功功率输出曲线

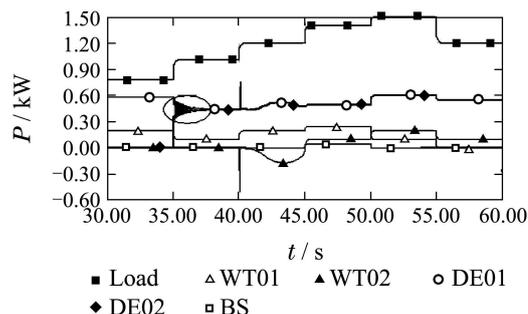


(b) 系统频率变化

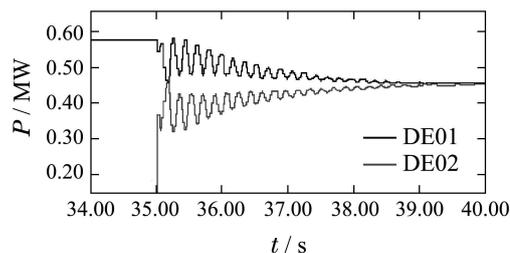
图 11 二次控制仿真结果

Fig. 11 Simulation results of secondary control

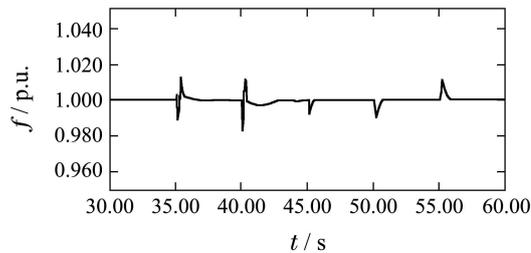
情形 3 为了验证本文提出的独立微电网频率分层控制方法, 此算例中对微电网多种不同运行条件进行仿真, 体现出蓄电池储能系统和柴油发电机在系统频率控制中的作用. 系统的仿真过程为 30~60 s, 初始阶段, 系统运行 DE01 和 WT01, 35 s 时, 有功负荷增加至 1 MW, DE02 并入系统; 40 s 时, WT02 启动; 系统内负荷变化及各电源输出与系统频率的变化如图 12 所示。



(a) 分布式电源输出



(b) 柴油发电机组并联发电



(c) 系统频率

图 12 情形 3 仿真结果

Fig. 12 Simulation results of Case 3

由图 12(a) 中有功负荷需求及各电源有功功率输出曲线可知: ① 35 s 时 DE02 接入系统, 待 DE02 转速稳

定后, DE01和DE02均分系统有功功率, DE02并入系统的暂态过程如图12(b)所示; ② 40 s时, WT02启动, 吸收系统大量有功功率, 系统频率下降, 此时, 频率偏差超过蓄电池储能系统的调节范围, 柴油发电机组增加有功功率输出, 跟随系统净负荷的变化, 系统频率经过短暂波动后恢复; ③ 45 s时, 系统净负荷增加引起系统频率下降, 频率偏差在BS调节范围内, BS输出功率完成系统的频率调节. 由图12(c)可见, 系统净负荷的变化引起系统频率波动, 在本文设计的频率分层控制作用下, 频率偏差在电能质量国家标准(GB/T 15945-2008《电能质量电力系统频率偏差》)规定的允许范围内.

5 结论(Conclusion)

针对含柴油发电机和蓄电池储能系统的独立微电网系统, 本文提出了一种适应电池储能和柴油发电机控制特性的微电网频率分层控制策略, 提高了独立微电网频率控制的稳定性和灵活性. 根据蓄电池储能系统的快速调节特性以及柴油发电机相对缓慢的有功功率调节特性, 建立了基于不同时间尺度的独立微电网频率分层控制结构及其频率稳定分区划分, 在1级控制中, 采用基于改进下垂控制的蓄电池储能系统来处理较小变化幅度和较短变化周期的随机净负荷波动, 提高独立微电网系统的瞬态频率响应特性和频率质量; 而基于PID控制的柴油发电机主要应对较大变化幅度和较长变化周期的系统净负荷波动, 实现2级控制的频率无差调节, 保证系统频率稳定. 仿真结果验证了所提方法能够有效提高独立微电网的频率稳定性, 改善了系统电能质量.

参考文献(References):

- [1] 白园飞, 程启明, 吴凯, 等. 独立交流微电网中储能电池与微型燃气轮机的协调控制 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 65 – 70.
(BAI Yuanfei, CHENG Qiming, WU kai, et al. Coordinated control of storage battery and microturbine in islanded AC microgrid [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(3): 65 – 70.)
- [2] YANG H, ZHOU W, LU L, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm [J]. *Solar Energy*, 2008(4), 82(4): 354 – 367.
- [3] KIM H M, KINOSHITA T, SHIN M C. A multiagent system for autonomous operation of islanded microgrids based on a power market environment [J]. *Energies*, 2010, 3(12): 1972 – 1990.
- [4] 李福东, 吴敏. 微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 18 – 25.
(LI Fudong, WU Min. An improved control strategy of load distribution in an autonomous microgrid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(13): 18 – 25.)
- [5] 朱博, 陈民铀, 徐瑞林, 等. 孤岛模式下的微网优化运行策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 35 – 40.
(ZHU Bo, CHEN Minyou, XU Ruilin, et al. An optimal operation strategy of islanded microgrid [J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(17): 35 – 40.)
- [6] SAHEB-KOUSSA D, HADDADI M, BELHAMEL M. Economic and technical study of a hybrid system (wind-photovoltaic-diesel) for rural electrification in Algeria [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7/8): 1024 – 1030.
- [7] 马艺玮, 杨苹, 郭红霞, 等. 风-光-沼可再生分布式发电系统电源规划 [J]. 电网技术, 2012, 36(9): 9 – 14.
(MA Yiwei, YANG Ping, GUO Hongxia, et al. Power source planning of wind-PV-biogas renewable energy distributed generation system [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(9): 9 – 14.)
- [8] 舒杰, 张先勇, 沈玉梁, 等. 可再生能源分布式微电网电源规划方法及应用 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 675 – 680.
(SHU Jie, ZHANG Xianyong, SHEN Yuliang, et al. The algorithm and application in power sources planning and designing for micro-grid based on distributed renewable energy [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(5): 675 – 680.)
- [9] 余洋, 陈盈今, 刘立卿, 等. 大规模风电接入对电网电压稳定性影响的研究 [J]. 电力科学与工程, 2010, 26(4): 1 – 4.
(YU Yang, CHEN Yingjin, LIU Liqing, et al. Study on effect of voltage stability about large scale interconnected wind farm [J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2010, 26(4): 1 – 4.)
- [10] FAKHAM H, DI L, FRANCOIS B. Power control design of a battery charger in a hybrid active PV generator for load-following applications [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 85 – 94.
- [11] 李涵, 王毅, 张丽荣, 等. 孤岛模式下的微电网频率的协调控制研究 [J]. 电力科学与工程, 2012, 28(12): 56 – 62.
(LI Han, WANG Yi, ZHANG Lirong, et al. Frequency coordination control strategy for microgrid in islanded operation [J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2012, 28(12): 56 – 62.)
- [12] 吴志, 顾伟. 孤岛方式下基于多代理系统的微电网有功-频率控制 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 57 – 61.
(WU Zhi, GU Wei. Active power and frequency control of islanded microgrid based on multi-agent technology [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(11): 57 – 61.)
- [13] 时珊珊, 鲁宗相, 闵勇, 等. 微电网孤岛运行时的频率特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 36 – 41.
(SHI Shanshan, LU Zongxiang, MIN Yong, et al. Analysis on frequency characteristics of islanded microgrid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(9): 36 – 41.)
- [14] 姚玮, 陈敏, 牟善科, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 77 – 94.
(YAO Wei, CHEN Min, MOU Shanke, et al. Paralleling control technique of microgrid Inverters based on improved droop method [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(6): 77 – 94.)
- [15] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略 [J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164 – 168.
(YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation [J]. *Power System Technology*, 2010, 34(1): 164 – 168.)
- [16] 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.
(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.)
- [17] SEBASTIÁN R, QUESADA J. Distributed control system for frequency control in a isolated wind system [J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(3): 285 – 305.
- [18] 刘维烈. 电力系统调频与自动发电控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
(LIU Weilie. *Frequency Adjustment and Automatic Generation Control in Power System* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.)
- [19] PALAMAR A, PETTAI E, BELDJAJEV V. Control system for a diesel generator and UPS based microgrid [J]. *Scientific Journal of Riga Technical University Power and Electrical Engineering*, 2010, 26(1): 48 – 53.

- [20] 魏承志, 陈晶, 涂春鸣, 等. 基于储能装置与静止无功发生器协同控制策略的微电网电压波动抑制方法 [J]. 电网技术, 2012, 36(11): 18 – 24.
(WEI Chengzhi, CHEN Jing, TU Chunming, et al. An approach to suppress voltage fluctuation in microgrid by cooperative control by energy storage device and static var generator [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(11): 18 – 24.)
- [21] 李富胜, 李瑞生, 周逢权. 微电网技术及工程应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
(LI Fusheng, LI Ruisheng, ZHOU Fengquan. *Microgrid and Its Engineering Application* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.)
- [22] MA Y, YANG P, WANG Y, et al. Frequency control of islanded microgrid based on wind-PV-diesel-battery hybrid energy sources [C] // *The 17th International Conference on Electrical Machines and Systems. Hangzhou, China: IEEE*, 2014: 290 – 294.
- [23] DELILLE G, FRANCOIS B, MALARANGE G. Dynamic frequency control support: A virtual inertia provided by distributed energy storage to isolated power systems [C] // *2010 IEEE PES in Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Gothenburg, Sweden: IEEE*, 2010: 1 – 8.
- [24] MONGKOLTANATAS J, RIU D, LEPIVERT X. Energy storage design for primary frequency control for islanding micro grid [C] // *The 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montréal, Canada: IEEE*, 2012: 5643 – 5649.
- [25] 罗子华, 黄大明, 韦志康, 等. 柴油机调速器概述 [J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(2): 12 – 13.
(LUO Zihua, HUANG Daming, WEI Zhikang, et al. A brief introduction of governors for diesel engines [J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2007, 34(2): 12 – 13.)
- [26] 毛龙波, 王维俊. PID在柴油发电机组输出稳定性控制中的应用研究 [J]. 后勤工程学院学报, 2009, 25(3): 79 – 82.
(MAO Longbo, WANG Weijun. The research on diesel generator stability control with PID controller [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2009, 25(3): 79 – 82.)

作者简介:

马艺玮 (1980–), 女, 博士研究生, 研究方向为可再生能源分布式发电技术与微电网智能控制技术, E-mail: ma.yiwei@mail.scut.edu.cn;

杨 苹 (1976–), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子电路的建模与控制、微电网智能控制及其应用, E-mail: eppyang@scut.edu.cn;

陈思哲 (1981–), 男, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源发电控制技术, E-mail: cszscut@126.com;

赵卓立 (1988–), 男, 博士研究生, 研究方向为可再生能源分布式发电技术及微电网控制技术, zhuoliscut@gmail.com;

王月武 (1982–), 男, 博士研究生, 研究方向为可再生能源分布式发电技术及微电网控制技术, E-mail: mythpluto@gmail.com.