基于伪分层架构的孤岛交流微网可调度下垂控制

杨新爱[1]，李冰然[2]

（1.山西工程职业学院 机电工程系，山西 太原 030009；
2.华北电力大学 高压与电磁兼容北京重点实验室，北京 102206）

摘要：提出了一种适用于孤岛交流微网的可调度下垂控制方法。该方法利用一阶惯量实现伪分层控制架构，可实现微网内分布式电源在较小的时间尺度上自动分配功率，并在较大的时间尺度上服从调度指令。该方法不仅包含有功功率调节和频率恢复控制，还含有无功调节控制和电压控制。即使给定的功率控制参考值不可行，所提方法仍然适用。最后，通过Matlab/Simulink的仿真验证了该方法的有效性。

关键词：功率调整；下垂控制；频率恢复；伪分层

中图分类号：TM28 **文献标识码**：A **DOI**：10.19457/j.1001-2095.dqcd22774

A Dispatchable Droop Control for Islanded AC Microgrids Based on Pseudo Hierarchical Framework

YANG Xinai[1]，LI Bingran[1]

（1.*Department of Mechanical and Electrical Engineering*，*Shanxi Engineering Vocational College*，*Taiyuan* 030009，*Shanxi*，*China*；2. *Beijing Key Laboratory of High Voltage Electromagnetic*，*North Electric Power University*，*Beijing* 102206，*China*）

Abstract: A dispatchable droop control method for multiple distributed generators which can be applied in islanded AC microgrids was proposed. In the proposed method, the first-order inertia elements was utilized to achieve pseudo hierarchical control so that the distributed generator (DG) could share the load automatically on a smaller time scale and obey the dispatch order on a larger time scale. On one hand, the proposed method contains active power regulation and frequency restoration control simultaneously. On the other hand, it has either the reactive power regulation control and the voltage control for different situations. The proposed method is still applicable even when the given power control references are infeasible. The effectiveness of the proposed method was verified by the corresponding simulation based on Matlab/Simulink.

Key words:power regulation; droop control; frequency restoration; pseudo hierarchical

以微网形式连接可再生能源形成的分布式电源（distributed generator，DG）在现代电力系统中得到了广泛的应用[1]。传统的DG控制方法是建立在可再生能源完全消耗的假设上，但随着DGs渗透率不断增加，这种假设已不再适用，高渗透率可再生能源的间歇输出功率过大，增加了电力系统控制与调度的难度。微网作为电网与分布式电源之间的桥梁，可以采用并网或孤岛的方式运行。为了减少间歇性分布式电源对电力系统的影响，微网采用了多种减载方法[2]，如文献[3]中提出的控制方法旨在使分布式电源的输出保持恒定。这些方法可以将发电机的输出功率调节在最大输出功率范围内，达到特定的最优控制目标。但它们都是直接的功率控制方法，通常采用并网方式。当微电网运行在孤岛模式下时，下垂控制方法更适合于DGs的控制。下垂控制有很多优点。它不需要通讯和支持即插即用[4]。但仍存在一些不足，如不能实现功率调节，不能实

基金项目：山西省软科学项目（2017041016-1）

作者简介：杨新爱（1963—），女，副教授，Email：yang_xinai@sina.com

现频率恢复或电压调节[5]。对下垂控制方法进行改进和如何实现特定的控制目标已经引起了研究者的极大兴趣。修改下垂控制的实质是改变下垂曲线,以满足特定的控制要求。

目前,国内外学者开展了一定研究:如文献[6]利用DG的成本函数对下垂系数进行修正,使改进的下垂控制方法具有经济调度能力。文献[7]中提出的控制方法通过在传统下垂方案中加入一个微分项来提高系统的功率共享性能。文献[8]提出了一种相角下垂、频率下垂和电压下垂的三次下垂控制方法,以提高有功功率共享系统的动态性能,增强系统的稳定性。然而,这些改进的下垂控制方法都不能实现DGs的功率调节和频率恢复。针对这些问题,文献[9]采用比例积分(proportional integral,PI)控制对下垂控制方案进行修改,使之能够恢复系统的频率。文献[10]提出了一种基于二次下垂的频率电压恢复方法,该方法是完全自主的、不依赖于通信网络。它可以帮助微网在不影响电源共享功率性能的情况下,将其频率和电压恢复到标称值。文献[11]提出了一种虚拟下垂控制方法。与传统的下垂控制技术相比,它可以实现电源管理和频率调节。但需要通过通信实现功率共享,需要不时对虚拟下垂曲线进行修正以获得功率参考值。文献[12]和文献[13]提出了一种控制方法,将所有电压幅值调节到一个共同的参考值,但无功功率调节实现。文献[14]中,一个中央控制器收集所有DGs的功率输出,以产生所有DGs的无功功率参考。然后无功参考被发送到主下垂控制层,其中一个基于PI的控制器被用来跟踪参考。然而,电压控制不被考虑。文献[15]中,电压控制电压源逆变器(voltage control voltage source inverter, VCVSI)通过分布控制恢复其电压频率和幅值,而电流控制电压源逆变器(current control voltage source inverter, CCVSI)与分布控制共享功率。上述文献没有综合考虑有功功率(频率)和无功功率(电压)控制。文献[16]和文献[17]已经考虑了功率、频率和电压控制一起在一个层次结构。虽然分级控制也有频率/电压恢复和功率调节控制,但功率调节控制只是在微网运行时进行的发电模式。因此,DGs不能在孤岛模式下分配。

基于此,本文提出了一种适用于孤岛微网的伪分层可调度下垂控制方法。该方法在不同的时间尺度上为DGs提供了两个不同的运行模式。DGs采用下垂控制模式,在较小的时间尺度上功率分配,以避免过载问题;而在较大的时间尺度上,DGs由调度指令所主导,遵循一定的调度算法。

1 孤岛交流微网的可调度下垂控制

1.1 可调度机制

图1为通过解耦输出阻抗将DG逆变器连接到公共交流母线的等效电路图。

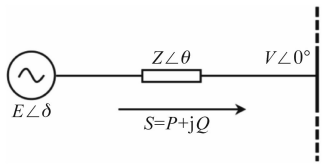


图1　分布式电源并网等效电路图

Fig. 1　Equivalent circuit of DG inverter connected to a bus

由图1可知,E和V分别为逆变器输出电压和交流公共母线电压幅值,Z为阻抗幅值,δ为逆变器输出电压相角,θ为输出阻抗相角,0°为交流公共母线电压相角零度。DG注入母线的有功、无功功率可表示为

$$P=\left(\frac{EV}{Z}\cos\delta-\frac{V^2}{Z}\right)\cos\theta+\frac{EV}{Z}\sin\delta\sin\theta \quad (1)$$

$$Q=\left(\frac{EV}{Z}\cos\delta-\frac{V^2}{Z}\right)\sin\theta-\frac{EV}{Z}\sin\delta\cos\theta \quad (2)$$

传统上逆变器的输出阻抗通常被认为是电感的,因为线路阻抗的电感分量很高,电感滤波器较大。因此,本文所考虑的下垂控制形式为

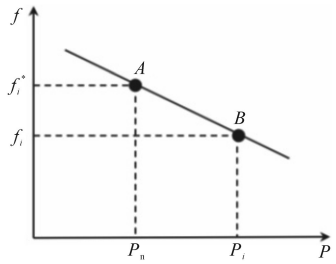
$$f=f^*-m(P-P_n) \quad (3)$$

$$V=V^*-n(Q-Q_n) \quad (4)$$

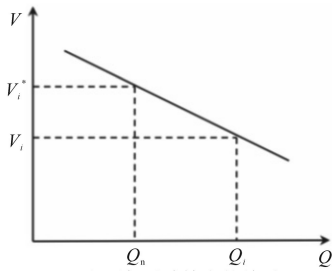
式中:m,n为下垂系数;f,V分别为频率和输出电压;f^*和V^*分别为频率和输出电压的标称值;P和Q为逆变器有功、无功输出功率;P_n和Q_n为逆变器有功、无功输出的额定值。

式(3)和式(4)可由图2表示,其中下标i表示第i个DG。

由图2可知,可以对下垂控制方法进行修改,以满足不同的控制要求。主要方法有:改变下垂系数、频率参考值和有功功率参考值。这三种方法的实质是通过改变传统下垂控制中的一个参数来移动下垂曲线,从而改变DG的工作点来实现特定的控制目标。因此,DGs可调度的问题可以转化为下垂控制方案中频率(电压)和功率参考值修改的问题。



(a)频率与有功输出的关系



(b)电压与无功输出的关系

图2　传统下垂控制方法示意图

Fig. 2　Schematic of the traditional droop control method

1.2　可调度下垂控制方法

针对上述可调度机制,本文提出伪分层控制结构,如图3所示。

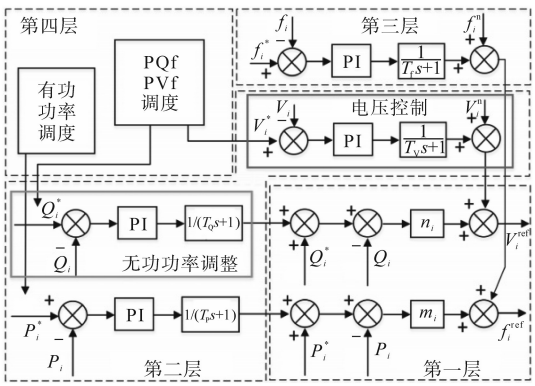


图3　改进下垂控制器的控制结构

Fig.3　Control structure of the modified droop controller

由图3可知,在首层控制,该方法与传统下垂控制方法相同;第二层负责功率调节和电压控制。频率恢复由第三控制层实现。第四层负责通过分派算法生成控制参考值。

1)第一层控制。第一层控制层采用传统下垂控制方法。其控制方法为

$$f_i^{\mathrm{ref}} = \tilde{f}_i^* - m_i(P_i - \tilde{P}_i^*) \tag{5}$$

$$V_i^{\mathrm{ref}} = \tilde{V}_i^* - n_i(Q_i - \tilde{Q}_i^*) \tag{6}$$

式中:$\tilde{P}_i^*$,$\tilde{Q}_i^*$和$\tilde{V}_i^*$分别为二次控制层产生的有功功率、无功功率和电压的参考值;$\tilde{f}_i^*$为三次控制层生成的修正频率参考值。f_i^{ref}和V_i^{ref}分别为第i个DG的参考频率和参考电压;为保证各DG在负荷变化时均能实现功率分配,式(5)和式(6)中下垂控制系数m和n满足:

$$\begin{cases} \dfrac{m_i}{m_j} = \dfrac{\bar{P}_j}{\bar{P}_i} \\ \dfrac{n_i}{n_j} = \dfrac{\bar{Q}_j}{\bar{Q}_i} \end{cases} \tag{7}$$

式中:m_i,m_j为DG i和j的f—P下垂系数;n_i,n_j为DG i和DG j的V—Q下垂系数;$\bar{P}_i$和$\bar{P}_j$分别为DG i和DG j的有功功率输出容量;$\bar{Q}_i$和$\bar{Q}_j$为无功功率输出容量。

2)第二层控制。第二次层的功能是实现功率调节和电压控制。P_i^*,Q_i^*和V_i^*分别为有功、无功功率和电压的参考值。校正功率和电压参考值$\tilde{P}_i^*$,$\tilde{Q}_i^*$和$\tilde{V}_i^*$的目的是使DG的输出功率和输出电压跟踪功率和电压参考值P_i^*,Q_i^*和V_i^*,它们被称为虚拟有功、无功功率和电压的参考值。由于比例积分(proportional integral,PI)控制很简单,可以消除稳态误差,所以PI控制器用于生成$\tilde{P}_i^*$,$\tilde{Q}_i^*$和$\tilde{V}_i^*$:

$$\tilde{G}_i^* = K_{\mathrm{p}\text{-}G}(G_i^* - G_i) + K_{\mathrm{i}\text{-}G}\int_{-\infty}^{t}(G_i^* - G_i)\mathrm{d}\tau + G_i^* \tag{8}$$

其中　　$G \in \{P,Q,V\}$

式中:$K_{\mathrm{p}\text{-}G}$为比例控制参数;$K_{\mathrm{i}\text{-}G}$为积分控制参数;t为积分时间;τ为时间变量。

所有DGs都包含有功功率调节,而DGs既包含无功功率调节,也包含电压控制。综上所述,利用功率调节和电压控制输出对第一次层下垂控制的功率和电压参考值进行修正,实现功率调节和电压控制。

3)第三层控制。利用PI控制校正频率参考值,实现第三层的频率恢复:

$$\tilde{f}_i^* = K_{\mathrm{p}\text{-}T}(f_i^* - f_i) + K_{\mathrm{i}\text{-}T}\int_{-\infty}^{t}(f_i^* - f_i)\mathrm{d}\tau + f_i^* \tag{9}$$

式中:$K_{\mathrm{p}\text{-}T}$和$K_{\mathrm{i}\text{-}T}$为比例控制参数和积分控制参数。

同样,频率恢复控制的输出应用于校正第一层下垂控制的频率参考值来实现频率恢复控制。

4)第四层控制。第四层通过集中或分布式调度算法生成调度参考值。

DG逆变器的控制结构如图4所示。

图4中,R_a,L_a和C_a分别为LC滤波器的电阻、感抗和容抗;R_{line}和L_{line}为线阻抗、线感抗;斜杠表示信号的数量;$v_{o(a,b,c)}$为逆变器的输出电压,经过dq变换后,其变成$v_{o(d,q)}$;PI为比例积分控制器。

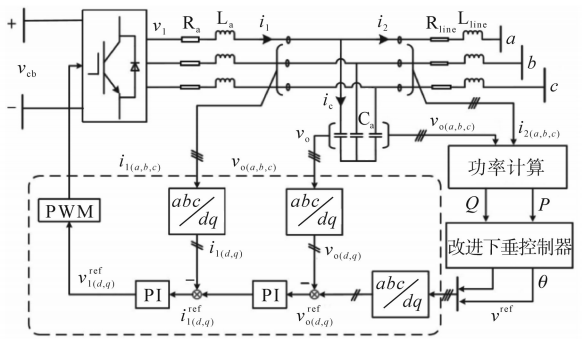


图4　DG逆变器的控制结构图

Fig.4　Control structure of DG′s inverter

通过在不同的控制层中插入一阶惯量,可以改变控制层的时间尺度。这样可以分离不同控制层的控制效果,保持不同控制层的特性。本文所提可调度下垂控制方法中,层级越高,响应速度越慢。故公式(5)和公式(6)中$\tilde{f}_i^*$,$\tilde{P}_i^*$,$\tilde{Q}_i^*$和$\tilde{V}_i^*$需满足下式:

$$\tilde{G}_i^* = [K_{p-G}(G_i^* - G_i) + K_{i-G}\int_{-\infty}^{t}(G_i^* - G_i)\mathrm{d}\tau]\times\frac{1}{T_G}\mathrm{e}^{-\frac{t}{T_G}} + G_i^* \tag{10}$$

其中　$G\in\{f,P,Q,V\}$　$T_P = T_Q = T_V$　$T_P \ll T_f$

式中:T_P,T_Q,T_V,T_f分别为二级和三级控制层控制惯量的时间常数。

2　稳定性分析

为了分析该方法的稳定性,我们简化了潮流方程。由于在感性微电网中,逆变器的输出阻抗总是被认为是感应的,也就是说,$Z\angle\theta = X\angle 90^\circ$。式(1)和式(2)可表示为

$$P = \frac{EV}{X}\sin\delta \tag{11}$$

$$Q = \frac{EV\cos\delta - V^2}{X} \tag{12}$$

其中　$X = 2\pi fL$

式中:X为逆变器的输出阻抗;f为逆变器频率;L为逆变器电感。

将式(11)代入式(5),可得式(11)、式(5)、式(12)、式(6)的小信号模型为

$$\hat{p} = \frac{V}{X}(\sin\delta_0\times\hat{e} + E_0\cos\delta_0\times\hat{\delta}) \tag{13}$$

$$\hat{q} = \frac{V}{X}(\cos\delta_0\times\hat{e} - E_0\sin\delta_0\times\hat{\delta}) \tag{14}$$

$$\frac{s}{2\pi}\hat{\delta} = \frac{-m[1+(K_{p-P}+\frac{K_{i-P}}{s})(\frac{1}{T_P s+1})]}{1+(K_{p-f}+\frac{K_{i-Q}}{s})(\frac{1}{T_f s+1})}\hat{p} \tag{15}$$

$$\hat{e} = -n[1+(K_{p-Q}+\frac{K_{i-Q}}{s})(\frac{1}{T_Q s+1})]\hat{q} \tag{16}$$

式中:δ_0为初始相角;E_0为逆变器初始输出电压;$\hat{p}$,$\hat{q}$,$\hat{e}$和$\hat{\delta}$均为扰动变量;s为拉普拉斯算子。

根据式(13)~式(16)可以得到特征方程:

$$\boldsymbol{A}s^6\hat{\delta} + \boldsymbol{B}s^5\hat{\delta} + \boldsymbol{C}s^4\hat{\delta} + \boldsymbol{D}s^3\hat{\delta} + \boldsymbol{F}s^2\hat{\delta} + \boldsymbol{G}s\hat{\delta} + \boldsymbol{H}\hat{\delta} = 0 \tag{17}$$

式中:$\boldsymbol{A}$,$\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$,$\boldsymbol{D}$, $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{G}$,$\boldsymbol{H}$分别为系数矩阵。

稳定性分析的相关参数设置如下:输出阻抗L = 800 μH,额定参考电压V^*=311 V,额定参考频率f^*= 50 Hz,初始相角δ_0 = 0.1 rad,K_{p-P}=4,K_{i-P}=0.3,K_{p-Q}=150,K_{i-Q}=5 000,K_{p-V}=5,K_{i-V}=50,K_{p-f}=4,K_{i-f}=0.3,T_P=T_Q=T_V=0.5 s,T_f=1 s,m=3×10^{-5},n=1×10^{-4}。

分析式(17)的根轨迹。图5为系统稳定分析的根轨迹图。

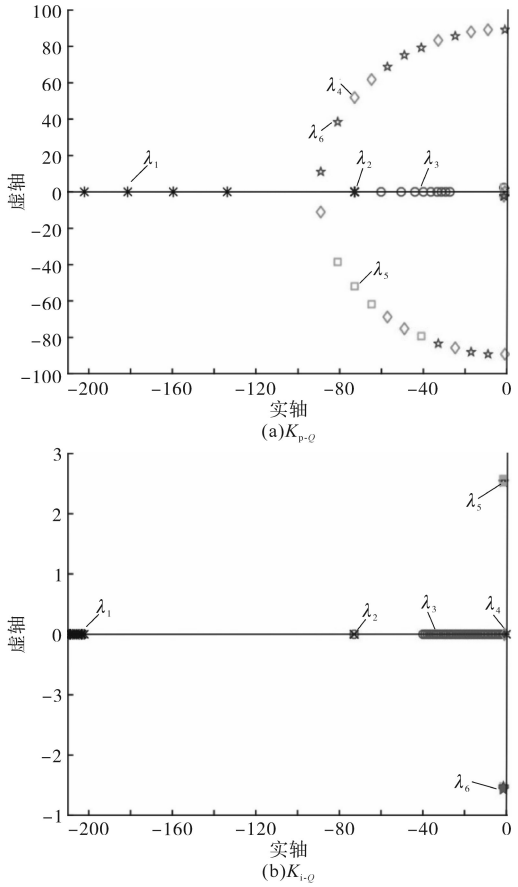


图5　根轨迹图

Fig.5　Root locus

图5中,λ为特征根,由图5所示的根位点表明,当有功功率控制参考值与实际负载需求不匹配时,系统仍然是稳定的。根轨迹上原点所对应的根为参数值为0时特征方程的特征值。当第四元控制层给出的有功功率控制参考值不可行时,

二次控制层无法实现功率调节控制,与此同时,本文提出的可调度下垂控制方法仍然有效,保证了系统的稳定性。然而,无法实现频率恢复。可调度下垂控制方法的完整f—P下垂方案如下:

$$f=[K_{\mathrm{p}\text{-}f}(f^*-f)+K_{i\text{-}f}\int_{-\infty}^{t}(f^*-f)\mathrm{d}\tau\,]\cdot\frac{1}{T_f}\mathrm{e}^{-\frac{1}{T_f}}+m[K_{\mathrm{p}\text{-}P}(P^*-P)+K_{\mathrm{i}\text{-}P}\int_{-\infty}^{t}(P^*-P)\mathrm{d}\tau\,]\cdot\frac{1}{T_P}\mathrm{e}^{-\frac{1}{T_P}}+f^*-mP+mP^* \tag{18}$$

当有功功率控制参考值与实际负载需求不匹配时,有功功率偏差可表示为$(P^*-P)=\Delta$。为简单起见,假设Δ为常数。经过拉普拉斯变换和运用终值定理,可得:

$$\lim_{t\to\infty}f=\lim_{s\to 0}sf(s)=\frac{mK_{\mathrm{i}\text{-}P}\Delta}{K_{\mathrm{i}\text{-}f}}+f^* \tag{19}$$

由于PI控制器的累加,其输出总是会增加或减少。为了解决这个问题,本文引入了饱和机制。为了不改变系统的稳态,两层PI控制器的饱和应相互配合。在极端情况下式(18)的稳态是通过消除两个PI控制器的输出来实现的,即

$$[K_{\mathrm{i}\text{-}f}\int_{-\infty}^{t}(f^*-f)\mathrm{d}\tau\,]+m[K_{\mathrm{i}\text{-}P}\int_{-\infty}^{t}(P^*-P)\mathrm{d}\tau\,]=0 \tag{20}$$

3　仿真分析

图6为仿真系统结构图。

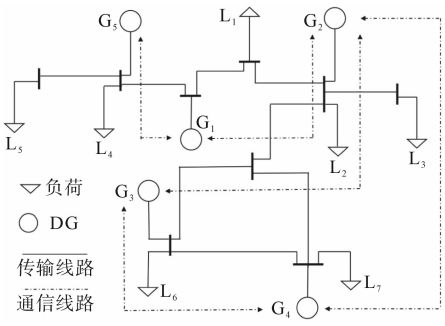


图6　仿真系统结构图

Fig.6　Topology of the test system

图6中,L_1~L_7的初始功率设定为P_{L1}=300 W,P_{L2}=300 W,P_{L3}=200 W,P_{L4}=300 W,P_{L5}=100 W,P_{L6}=0 W,P_{L7}=300 W。控制器参数与第2节参数设置相同。本文通过二个案例来验证本文所提方法的优越性,案例1用于验证了所提控制方法的有效性;案例2比较了可调度下垂控制和传统的分层控制。

3.1　案例1

本案例中,第四控制层采用的电力调度算法为分布式经济调度算法,其目标是使总体最小,考虑不同DGs的发电成本。电力调度信号每2秒更新一次。DGs的成本函数可以建模为

$$C(P)=aP^2+bP+c \tag{21}$$

式中:a, b, c为成本函数的常系数。

本文考虑三种不同类型的DG,故,其系数分别为A类DG(0.00142, 7.2和510)—DG_1和DG_2;B类DG(0.00194, 7.85和310)—DG_3和DG_5;C类DG(0.00482, 7.97和78)—DG_4。

本案例主要是为了验证第二级和三级的控制有效性及第三层的频率恢复控制在开始时为被激活状态。系统在5 s时,有一个300 W负载接在母线L_6上,并在15 s时断开。第三层的频率恢复控制在25 s时启用。另外,在35 s后对传统的下垂控制进行了仿真,以说明下垂控制的特点。传统下垂控制与可调度下垂控制的第一层控制设置相同,其功率参考设置均为300 W。图7~图9为仿真结果图。

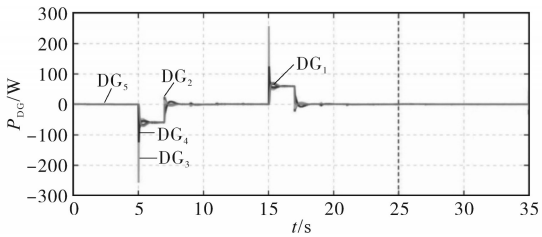


图7　有功功率输出调节偏差(案例1)

Fig.7　Deviations of active power output regulation(case1)

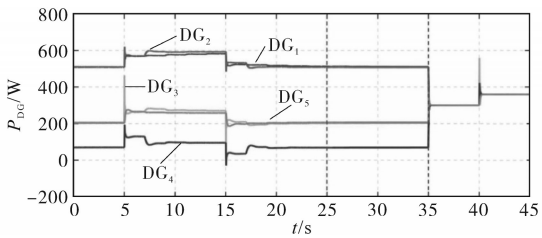


图8　DGs输出的有功功率(案例1)

Fig.8　Active power outputs of DGs(case1)

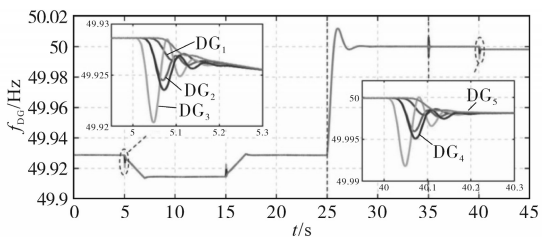


图9　DGs的输出频率(案例1)

Fig.9　Output frequencies of DGs(case1)

由图7可得,在负载变化后,所有DGs的有功

功率不匹配逐渐变为零。仿真结果表明，在第四控制层中，DGs能够跟踪经济调度算法产生的有功功率输出控制参考值。DGs在可调度下垂控制情况下以可调度方式分配负载，而传统下垂控制情况下以平均方式分担负载。如图9所示，在25 s时频率恢复控制启动后，DG输出频率恢复到标称值50 Hz。对比图9中放大后的两幅图，负载变化后0.15 s内的频率波形基本相同。这也表明，该方法首先是根据下垂特性实现功率共享的。后来，更高级别的可调度下垂控制方法占主导地位，导致电力跟踪取代了电力分配。

3.2 案例2

本案例中，将所提方法的控制性能与传统的分层控制进行了比较。在仿真中，传统分层控制设置与所提方法相同。图10~图12为仿真结果图，其中，上子图为本文所提方法；下子图为分层控制法。仿真分为两个阶段。两种控制方法在8 s前均采用经济调度算法。8 s后，经济调度算法失效，DG_1~DG_5的功率控制参考值为460 W，480 W，160 W，100 W，150 W。

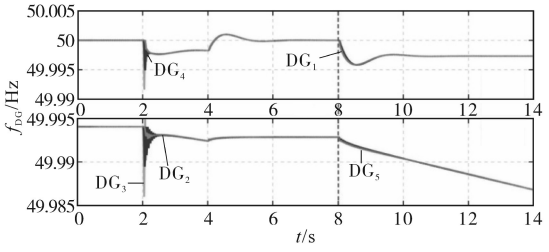


图10 DGs的输出频率（案例2）

Fig.10 output frequencies of DGs(case2)

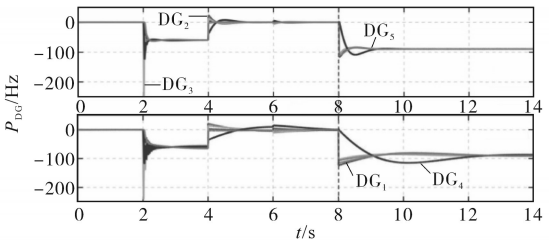


图11 有功功率输出调节偏差（案例2）

Fig.11 Deviations of active power output regulation(case2)

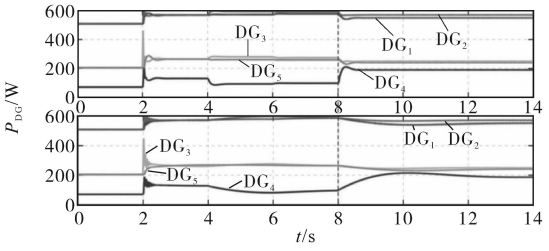


图12 DGs输出的有功功率（案例2）

Fig.12 Active power outputs of DGs(case2)

从图10可得，可调度下垂控制下，DGs频率稳定在标称值50 Hz，而在2 s内，DGs频率稳定在与传统分层控制标称值不同的位置。在2 s负荷变化后，在可调度下垂控制情况下，DGs的频率可以恢复到50 Hz。然而，在传统分层控制下，DGs的频率在另一个值是稳定的。这一现象说明了可调度下垂控制的优势。两种情况下都可以实现功率调节，如图11所示。但是，对比图10和图12的仿真结果可以看出，在可调度下垂控制中，DGs的功率调节速度更快，而在传统分层控制中，DGs的频率稳定速度更快。这与第二层比第三层快的设计是一致的。该方法的首要目标是使DG可调度，因此功率调节被置于该方法的第二层。

改变DGs的有功功率参考值后，系统的有功功率消耗之和（1 800 W）远大于有功功率控制之和参考值（1 350 W），有功功率调节无法实现。根据式（10），当$(P^* - P)<0$时，随着PI控制器得控制效果，P_i^*将递减。同时，如图10所示，$f_i<50$ Hz。根据式（10），若$(f_i - f)>0$，这样f_i^*就会增加。在式（10）中，$\tilde{P}_i^*$和$\tilde{f}_i^*$的变化效果相互抵消，使系统稳定。计算出的频率偏差理论计算值为2.7×10^{-3}，与仿真数据相符合。而在传统分级控制中，由于有功功率不匹配，DGs的频率逐渐下降。如果有功功率不匹配不能消除，DGs的频率将超出允许范围。

4 结论

本文提出了一种适用于孤岛交流微电网的可调度下垂控制方法。该方法利用一阶惯量实现了伪分层控制，使调度系统在较小的时间尺度上自动分配负载，并在较大的时间尺度上服从调度命令。该方法具有有功-无功-频率（PQf）调度和有功-电压-频率（PVf）调度两种模态。两种模式包括有功功率调节和频率恢复控制。此外，在给定的功率控制基准不满足功率平衡约束的极端情况下，所提出的控制方法仍然可以应用并保持系统的稳定性。未来的研究方向将涉及先进的控制方法，如电压调节和频率恢复控制的分布式控制。

参考文献

[1] 米芝昌，任春光，韩肖清，等. 直流微电网跳崖系统设计[J]，电测与仪表，2018，55(4)：10-18.
Mi Zhichang, Ren Chunguang, Han Xiaoqing. Design of se-

condary voltage regulation system of DC microgrid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(4):10-18.

[2] Sangwongwanich A, Yang Y, Blaabjerg F. High-performance constant power generation in grid-connected power systems [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2016, 31(3): 1822-1825.

[3] Tafti H D, Maswood A I, Konstantinou G. A general constant power generation algorithm for photovoltaic systems [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2018, 33(5):4088-4101.

[4] Dehkordi N M, Sadati N. Distributed robust finitetime secondary voltage and frequency control of islanded microgrids[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2017, 32, (5):3648-3659.

[5] Nutkani I U, Loh P C. Decentralized economic dispatch scheme with online power reserve for microgrids [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2017, 8(1):139-148.

[6] Xia Y, Peng Y, Wei W. Triple droop control method for AC microgrids [J]. IET Power Electron., 2017, 10(13): 1705-1713.

[7] John B, Ghosh A, Zare F. Load sharing in medium voltage islanded microgrids with advanced angle droop control [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2018, 9(6):6461-6469.

[8] Nutkani I U, Peng W. Secondary droop for frequency and voltage restoration in microgrids[C]//European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE, 2015:1-7.

[9] Guo F, Wen C, Mao J, *et al*. Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids[J].IEEE Trans. Ind. Electron., 2015, 62(7): 4355-4364.

[10] Bouzid A M, Sicard P. Secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter based microgrids[C]// IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE), 2017:1-6.

[11] Solanki A, Nasiri A. A new framework for microgrid management: virtual droop control [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2016, 7(2):554-566.

[12] Zhang H, Kim S. Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4):1749-1761.

[13] Schiffer J, Seel T. Voltage stability and reactive power sharing in inverter-based microgrids with consensus-based distributed voltage control[J].IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1):96-109.

[14] Yang Z, Xiang J, Li Y. Distributed consensus-based supply demand balance algorithm for economic dispatch problem in a smart grid with switching graph[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2017, 64(2):1600-1610.

[15] 王伟,徐燕芬.适用于功率突变的MTDC系统改进下垂控制[J].电气传动,2020,50(8):59-64.
Wang Wei,Xu Yanfen. Improved droop control strategy for MTDC system suitable for changed active power[J].Electric Drive, 2020,50(8):59-64.

[16] 杨旭红,尹聪.基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J].电气传动,2020,50(5): 75-80.
Yang Xuhong, Yin Cong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode [J]. Electric Drive, 2020,50(5): 75-80.

[17] Anand S, Fernandes B G. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low voltage DC microgrids[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2017,28(4):1900-1913.

收稿日期:2020-12-06
修改稿日期:2021-01-18

(上接第60页)

off-grid starting mode of multi-parallel of power converter system [J]. Electrotechnical Application,2016,35(10):79-82.

[4] 甘江华,陈世峰,曹智慧,等.微电网双模式可并联储能变流器主回路参数优化设计[J].电器与能效管理技术,2017,(18):84-88.
Gan Jianghua, Chen Shifeng, Cao Zhihui, *et al*. Design of main circuit parameters for dual mode parallel energy storage converter in micro-grid system [J]. Electrical & Energy Management Technology,2017,(18):84-88.

[5] 杨苹,许志荣,郑群儒,等.微电网平滑切换中变流器的控制策略仿真研究[J].可再生资源,2015,33(11):1625-1631.
Yang Ping,Xu Zhirong,Zheng Qunru,*et al*.Simulation research on control strategy of converter in microgrid smooth switching [J]. Renewable Energy Resources,2015,33(11):1625-1631.

收稿日期:2021-06-17
修改稿日期:2021-09-06