



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104410085 B

(45)授权公告日 2017.05.24

(21)申请号 201410707553.0

(22)申请日 2014.11.27

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104410085 A

(43)申请公布日 2015.03.11

(66)本国优先权数据
201410502906.3 2014.09.26 CN

(73)专利权人 广东电网有限责任公司电力科学
研究院
地址 510080 广东省广州市越秀区东风东
路水均岗8号

(72)发明人 马明 盛超 徐柏瑜 李坦
李兰芳 李玎 王玲 邓志
刘正富 杨洪耕

(74)专利代理机构 广州知友专利商标代理有限
公司 44104
代理人 周克佑

(51)Int.Cl.

H02J 3/24(2006.01)

(56)对比文件

CN 103825279 A, 2014.05.28,

徐诚等. 基于电力系统二次调频原理的微电
源频率控制策略.《电力系统保护与控制》.2013,
第41卷(第3期),第14-20页.

吴蓓蓓等. 用于微电网孤岛运行的逆变电源
控制方法.《电力系统及其自动化学报》.2011,第
23卷(第1期),第1-5页.

Jia Liu等. Dynamic Characteristics and
Stability Comparisons between Virtual
Synchronous Generator and Droop Control
in Inverter-Based Distributed Generators.
《Power Electronics Conference(IPEC-
Hiroshima 2014-ECCE-ASIA)》.2014,第1536-
1543页.

审查员 秦媛倩

权利要求书2页 说明书6页 附图5页

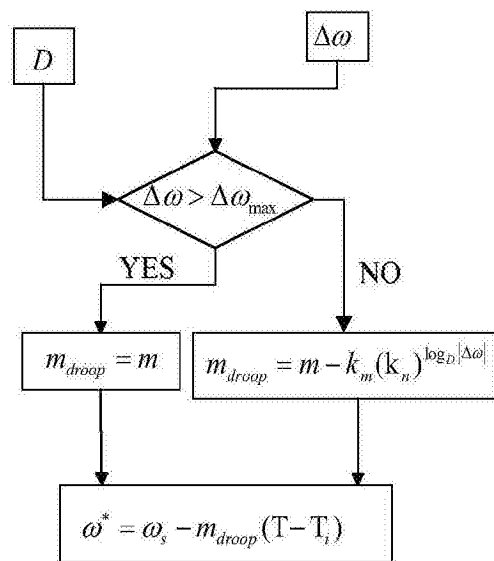
(54)发明名称

一种提高低压微电网频率瞬时稳定性的调
控方法

(57)摘要

一种提高低压微电网频率瞬时稳定性的调
控方法:针对低压微电网受到负荷突变等扰动后
引起频率快速变化进而对系统造成瞬时冲击的
问题,本发明提出了一种改善频率瞬时响应的控
制策略.在虚拟同步发电机模型的基础上,将电
角速度偏差 $\Delta \omega$ 和虚拟阻尼系数D作为低压微电
网孤岛运行状态下P/ ω 下垂控制的调节指标,使
低压微电网在不同频率偏差情况下采用不同下
垂系数,减小扰动后逆变器瞬态响应对系统造成
的冲击,延缓频率变化速率.同时设计了Q- ω 和
Q/T协调控制的二次调频模块,既能实现频率无
差调节,又能提供逆变器控制参考电压,抑制功
率振荡.本发明适用于低压微电网受到负荷突变
和状态转换等扰动的情况,可在电网受到扰动情

况下减小频率因快速变化对系统造成的影响,有
利于低压微电网的稳定运行。



1. 一种提高低压微电网频率瞬时稳定性的调控方法,其特征是包括以下步骤:

S1,将含有储能单元的低压微电网虚拟成同步发电机(VSG)模型

设:所述的低压微电网中有n台DG,DG接口为电力电子型逆变器接口,经过开关 S_k 接入大电网,当开关 S_k 断开时低压微电网处在孤岛运行状态, P_e 为电磁功率, T 和 T_i 分别为虚拟同步发电机模型的机械转矩和电磁转矩,单位为N.m,其中 $T=P/\omega$, J 为转子的转动惯量,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, ω 为微电网实际电角速度, ω^* 为参考电角速度, ω_s 为实际电角速度, D 为虚拟阻尼系数, e 为感应电动势, M_f 为励磁绕组和磁场绕组之间的最大互感, i_e 为励磁电流, δ 为电角度, P 为微电网中DG输出有功功率, Q 为微电网DG输出无功功率;

虚拟同步发电机(VSG)的数学模型为:

$$J\omega_s\dot{\omega} = (T-T_i) - D(\omega^* - \omega_s) \quad (1);$$

$$T_i = \frac{P_e}{\omega_s} = \frac{3}{2}M_f i_e \cos\delta \quad (2);$$

$$e = \omega_s M_f i_e \sin\delta \quad (3);$$

$$Q = \frac{3}{2}M_f i_e \sin\delta \quad (4);$$

由公式(1)得低压微电网孤岛状态下实现有功功率分配的 T/ω 下垂函数即参考电角速度表示为:

$$\omega^* = \omega_s - m(T-T_i) \quad (5);$$

S2,在低压微电网不同频率偏差情况下采用不同的下垂系数调频:

$$m_{droop} = \begin{cases} m - k_m (k_n)^{\log_D |\Delta\omega|} & \text{if } \Delta\omega > |\Delta\omega_{\max}| \\ m & \text{if } \Delta\omega \leq |\Delta\omega_{\max}| \end{cases} \quad (6);$$

其中: m_{droop} 为低压微电网总体下垂控制, k_m 和 k_n 为低压微电网受到扰动时 T/ω 下垂增益;

只考虑阻尼系数 $D>0$ 的情况,进行调频,调控方法如下式所示:

$$\text{令: } \omega^* = \omega_s - (m - k_m (k_n)^{\log_D |\Delta\omega|})(T - T_i) \quad (7);$$

其中 $\Delta\omega = \omega_s - \omega^*$;

虚拟阻尼系数 D 由系统最大电磁转矩 T_{\max} 、 ω_s 和 ω^* 求得, k_m 由系统最大电磁转矩偏差 ΔT_{\max} 、系统最大频率偏差 $\Delta\omega_{\max}$ 、 D 和 k_n 求得:

$$D = \frac{T_{\max}}{\omega_s - \omega^*} \quad (8);$$

$$k_m = \frac{\Delta T_{\max}}{(k_n)^{\log_D |\Delta\omega_{\max}|}} \quad (9);$$

参数 $\Delta\omega_{\max}$ 设计取值应满足国际标准IEEE1547中的规定;

S3,进行 P/ω 和 P/T 下垂控制协调二次调频

传统二次调频方程为:

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_{load} - \Delta P_G}{K} \quad (10);$$

由公式(2)、(3)、(4)和(10)推导得:

$$\Delta P = \Delta e i_e = \frac{3}{2} [\Delta Q - (k_p + \frac{k_i}{s}) \Delta \omega_1 - k_T \Delta T] \quad (11);$$

所述方法的二次调频方程为：

$$\Delta \omega_2 = \Delta \omega_1 - \frac{\Delta P}{1 + k_p + \frac{k_i}{s} + k_T} \quad (12);$$

$\Delta \omega_1$ 和 $\Delta \omega_2$ 分别为一次调频和二次调频后的电角速度。

2. 根据权利要求1所述的提高低压微电网频率瞬时稳定性的调控方法,其特征是:所述的步骤S3中在系统一次调频之后进行二次调频时,首先进行P/ ω 二次初始调频,并自动检测二次初始调频后电角速度 $\Delta \omega_T$,启动P/T调节;其次在一次调频和二次初始调频基础上逐步提高逆变器的VSG模型的机械转矩,最终增大有功输出,实现频率无差调节。

一种提高低压微电网频率瞬时稳定性的调控方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种低压微电网频率的调控方法,尤其是涉及一种适用于低压微电网孤岛运行方式下提高低压微电网频率瞬时稳定性的调控方法。

背景技术

[0002] 近年来随着分布式电源(Distributed Generation, DG)的发展,在能源耗费与环境问题日益严峻的情况下,含DG的低压微电网受到越来越多的关注。如何在含大量DG的情况下实现高效、稳定的频率控制成为未来低压微电网研究的重要方向之一。DG在微电网中的大规模渗透,使得传统电力系统的调频控制策略难以适应低压微电网受到扰动后的频率调节。现有技术中,针对孤岛运行状态下的低压微电网一般是通过P/f下垂控制方法实现频率调节,该方法模拟了传统电力系统中的一次调频特性且能实现并列运行的电源在无需通信环境下的功率分配。对同步发电机而言,同步发电机的下垂特性和大转动惯量特性有利于发电机机组的稳定运行。由于转子具有惯性,功率缺额时同步发电机通过调节转子转速并在调速器的作用下达到新的平衡。不同于传统电力系统,低压微电网大部分DG都是电力电子逆变型接口,缺少传统电网中同步发电机旋转特性,惯性较差。低压微电网受到扰动后频率快速瞬时变化会影响低压微电网的稳定性,因此如果将含有储能单元的低压微电网等效成同步发电机模型可以适当增大低压微电网的惯性,降低低压微电网与传统电力系统的差异。

[0003] 然而配电网运行时国标中规定的频率变化范围较小,从而限制了频率下垂增益函数的范围,导致负载变化时频率振荡,给低压微电网稳定运行造成隐患。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题,就是提供一种提高低压微电网频率瞬时稳定性的调控方法,使其在受到状态转换和负荷突变扰动等冲击时,能有效减小因频率瞬时变化对低压微电网的影响。

[0005] 解决上述技术问题,本发明采用的技术方案如下:

[0006] 一种提高低压微电网频率瞬时稳定性的调控方法,其特征是包括以下步骤:

[0007] S1,将含有储能单元的低压微电网虚拟成同步发电机(VSG)模型

[0008] 设:所述的低压微电网中有n台DG, DG接口为电力电子型逆变器接口,经过开关 S_k 接入大电网,当开关 S_k 断开时低压微电网处在孤岛运行状态, P_e 为电磁功率, T 和 T_i 分别为虚拟同步发电机模型的机械转矩和电磁转矩,单位为N.m,其中 $T=P/\omega$, J 为转子的转动惯量,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, ω^* 为参考电角速度, ω_s 为实际电角速度, D 为定常阻尼系数, e 为感应电动势, M_f 为励磁绕组和磁场绕组之间的最大互感, i_e 为励磁电流, δ 为电角度, P 为微电网中DG输出有功功率, Q 为微电网DG输出无功功率;

[0009] 本发明在传统虚拟同步发电机数学模型的基础上,进行了改进。

[0010] 在传统虚拟同步发电机(VSG)的数学模型为:

[0011] $J \omega_s s = (T - T_i) - D(\omega^* - \omega_s)$ (1);

[0012] $T_i = \frac{P_e}{\omega_s} = \frac{3}{2} M_f i_e i \cos \delta$ (2);

[0013] $e = \omega_s M_f i_e \sin \delta$ (3);

[0014] $Q = \frac{3}{2} M_f i_e i \sin \delta$ (4);

[0015] 由公式(1)得低压微电网孤岛状态下实现有功功率分配的T/ω下垂函数即参考电角速度可表示为:

[0016] $\omega^* = \omega_s - m(T - T_i)$ (5);

[0017] S2,在低压微电网不同频率偏差情况下采用不同的下垂系数调频:下面有参数没定义

[0018]
$$m_{droop} = \begin{cases} m - k_m (k_n)^{\log_D |\Delta \omega|} & \text{if } \Delta \omega > |\Delta \omega_{\max}| \\ m & \text{if } \Delta \omega \leq |\Delta \omega_{\max}| \end{cases}$$
 (6)

[0019] 其中:m_{droop}为低压微电网总体下垂控制,k_m和k_n为低压微电网受到扰动时T-ω下垂增益;

[0020] 只考虑阻尼系数D>0的情况,进行调频,调控方法如下式所示:

[0021] 令: $\omega^* = \omega_s - (m - k_m (k_n)^{\log_D |\Delta \omega|})(T - T_i)$ (7);

[0022] 其中 $\Delta \omega = \omega_s - \omega$,k_m和k_n为低压微电网受到扰动时T-ω下垂增益;

[0023] 虚拟阻尼系数D由系统最大电磁转矩 ΔT_{\max} 和系统最大频率偏差 $\Delta \omega_{\max}$ 求得:

[0024] $D = \frac{T_{\max}}{\omega_s - \omega^*}$ (8);

[0025] $k_m = \frac{\Delta T_{\max}}{(k_n)^{\log_D |\Delta \omega_{\max}|}}$ (9);

[0026] 参数 $\Delta \omega_{\max}$ 设计取值应满足国际标准IEEE1547中的规定;

[0027] S3,进行Q-ω和Q/T下垂控制协调二次调频

[0028] 传统二次调频方程为:

[0029] $\Delta f = -\frac{\Delta P_{load} - \Delta P_G}{K}$ (6);

[0030] 本方法二次调频方程由公式(2)、(3)、(4)和(10)推导得:

[0031] $\Delta P = \Delta e i_e = \frac{3}{2} [\Delta Q - (k_p + \frac{k_i}{s}) \Delta \omega_1 - k_T \Delta T]$ (7);

[0032] 本发明的二次调频方程为:

[0033] $\Delta \omega_2 = \Delta \omega_1 - \frac{\Delta P}{1 + k_p + \frac{k_i}{s} + k_T}$ (8);

[0034] 其中:u为逆变器参考电压,k为无功控制增益系数;公式(12)中 $\Delta \omega_1$ 和 $\Delta \omega_2$ 分别为一次调频和二次调频后的电角速度。

[0035] 所述的步骤S3中在系统一次调频之后进行二次调频时,首先进行Q-ω二次初始调

频,并自动检测二次初始调频后电角速度 $\Delta \omega_T$,启动Q/T调节;其次在一次调频和二次初始调频基础上逐步提高逆变器的VSG模型的机械转矩,最终增大有功输出,实现频率无差调节。

[0036] 与现有技术相比,本发明具有的有益效果是:

[0037] 1) 在VSG模型的基础上,将电角速度偏差 $\Delta \omega$ 和虚拟阻尼系数D作为一次调频控制参数,减小了瞬时调频对低压微电网产生的冲击,延缓了频率变化过程,在实现功率快速合理分配的同时保证了低压微电网频率稳定,使低压微电网在不同频率偏差情况下采用不同偏差系数,避免为了实现功率的快速平衡,下垂控制需要选择较大的下垂系数,而导致频率较大偏移。

[0038] 2) 针对一次调频不能实现无差调节的问题,设计了Q- ω 和Q/T协调进行频率二次调频控制模块,加入了转矩控制阶段,将二次调频分为两个阶段,并对其原理进行了分析。且此模块代替了传统P/f控制中的电压电流内环控制环节,简化了控制模块。

[0039] 3) 搭建了仿真模型和硬件实验平台验证了本文所提调控方法,验证了该方法的有效性和可行性。

[0040] 其他有助于审查员理解本技术的资料

[0041] [1] 王成山,高菲,李鹏等.低压微网控制策略研究[J].中国电机工程学报,2012,32(25):2-8.

[0042] [2] 高春风,杨仁刚,王江波等.基于虚拟频率的低压微电网下垂控制策略设计[J].电网技术,2013,37(12):3331-3335.

[0043] [3] 孙孝峰,吕庆秋.低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]电工技术学报,2012,27(8):77-84.

附图说明

[0044] 图1是本发明的控制框图;

[0045] 图2是本发明的控制流程图;

[0046] 图3是某低压微电网的仿真系统结构图;

[0047] 图4是低压微电网联网状态切换到孤岛稳定运行状态的频率调节图;

[0048] 图5是低压微电网联网状态切换到孤岛稳定运行状态式DG有功功率输出图;

[0049] 图6是低压微电网孤岛状态下的负荷变化时的频率调节图;

[0050] 图7是低压微电网孤岛状态下的负荷变化时的DG有功功率输出图;

[0051] 图8是低压微电网二次调频仿真比较图;

[0052] 图9是低压微电网二次调频过程示意图。

具体实施方式

[0053] 下面结合附图和实例对本发明做进一步的描述。

[0054] 本发明的对于低压微电网分布式电源运行控制方法,它的步骤为:

[0055] S1,将含有储能单元的低压微电网虚拟成同步发电机(VSG)模型

[0056] 设:所述的低压微电网中有n台DG,DG接口为电力电子型逆变器接口,经过开关 S_k 接入大电网,当开关 S_k 断开时低压微电网处在孤岛运行状态, P_e 为电磁功率,T和 T_i 分别为虚

拟同步发电机模型的机械转矩和电磁转矩,单位为N.m,其中 $T=P/\omega$, J 为转子的转动惯量,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, ω^* 为参考电角速度, ω_s 为实际电角速度, D 为定常阻尼系数, e 为感应电动势, M_f 为励磁绕组和磁场绕组之间的最大互感, i_e 为励磁电流, δ 为电角度, P 为微电网中DG输出有功功率, Q 为微电网DG输出无功功率, ω 为微电网实际电角速度;

[0057] 本发明在传统虚拟同步发电机数学模型的基础上,进行了改进。

[0058] 在传统虚拟同步发电机(VSG)的数学模型为:

$$[0059] \quad J\omega_s s = (T - T_i) - D(\omega^* - \omega_s) \quad (9);$$

$$[0060] \quad T_i = \frac{P_e}{\omega_s} = \frac{3}{2} M_f i_e i \cos \delta \quad (10);$$

$$[0061] \quad e = \omega_s M_f i_e \sin \delta \quad (11);$$

$$[0062] \quad Q = \frac{3}{2} M_f i_e i \sin \delta \quad (12);$$

[0063] 由公式(1)得低压微电网孤岛状态下实现有功功率分配的 T/ω 下垂函数即参考电角速度可表示为:

$$[0064] \quad \omega^* = \omega_s - m(T - T_i) \quad (13);$$

[0065] S2,在低压微电网不同频率偏差情况下采用不同的下垂系数调频:

$$[0066] \quad m_{\text{droop}} = \begin{cases} m - k_m (k_n)^{\log_D |\Delta\omega|} & \text{if } \Delta\omega > |\Delta\omega_{\max}| \\ m & \text{if } \Delta\omega \leq |\Delta\omega_{\max}| \end{cases} \quad (6)$$

[0067] 其中: m_{droop} 为低压微电网总体下垂控制, k_m 和 k_n 为低压微电网受到扰动时 $T-\omega$ 下垂增益;

[0068] 只考虑阻尼系数 $D>0$ 的情况,进行调频,调控方法如下式所示:

$$[0069] \quad \text{令: } \omega^* = \omega_s - (m - k_m (k_n)^{\log_D |\Delta\omega|})(T - T_i) \quad (7);$$

[0070] 其中 $\Delta\omega = \omega_s - \omega$, k_m 和 k_n 为低压微电网受到扰动时 $T-\omega$ 下垂增益;

[0071] 虚拟阻尼系数 D 由系统最大电磁转矩 ΔT_{\max} 和系统最大频率偏差 $\Delta\omega_{\max}$ 求得:

$$[0072] \quad D = \frac{T_{\max}}{\omega_s - \omega^*} \quad (8);$$

$$[0073] \quad k_m = \frac{\Delta T_{\max}}{(k_n)^{\log_D |\Delta\omega_{\max}|}} \quad (9);$$

[0074] 参数 $\Delta\omega_{\max}$ 设计取值应满足国际标准IEEE1547中的规定;

[0075] S3,进行 $Q-\omega$ 和 Q/T 下垂控制协调二次调频

[0076] 传统二次调频方程为:

$$[0077] \quad \Delta f = -\frac{\Delta P_{\text{load}} - \Delta P_G}{K} \quad (14);$$

[0078] 本方法二次调频方程由公式(2)、(3)、(4)和(10)推导得:

$$[0079] \quad \Delta P = \Delta e i_e = \frac{3}{2} [\Delta Q - (k_p + \frac{k_i}{s}) \Delta\omega - k_T \Delta T] \quad (15);$$

[0080] 本发明的二次调频方程为:

$$[0081] \quad \Delta\omega_2 = \Delta\omega_1 - \frac{\Delta P}{1+k_p + \frac{k_i}{s} + k_T} \quad (16);$$

[0082] 其中： u 为逆变器参考电压， k 为无功控制增益系数；公式(12)中 $\Delta\omega_1$ 和 $\Delta\omega_2$ 分别为一次调频和二次调频后的电角速度。

[0083] 在一次调频后系统进入二次调频阶段，二次调频过程如图9示为：初始时刻，假设DG一次调频后频率与目标频率之间的偏差为 Δf_1 ，DG1和DG2分别运行在 A_1 和 B_1 两点；假设二次调频后的参考频率与目标频率之间的偏差为 Δf_2 ，则一次调频与二次调频后的频率偏差为 $(\Delta f_1 - \Delta f_2)$ ；在进行二次调频时，在系统一次调频之后先进行Q- ω 二次初始调频，并自动检测二次初始调频后电角速度 $\Delta\omega_T$ ，启动Q/T调节，在一次调频和二次初始调频基础上逐步提高逆变器的VSG模型的机械转矩，相当于将DG1和DG2的功频特性曲线均向上平移 $(\Delta f_1 - \Delta f_2)$ ，最终使DG1和DG2运行在 A_2 和 B_2 点，增大有功输出，真正实现频率无差调节。

[0084] 此外本环节代替了传统下垂控制中为了快速有效生成逆变器调制信号而采用的电压电流内环控制，将转矩偏差 ΔT ，低压微电网电角速度偏移量 $\Delta\omega$ 作为输入，生成逆变器参考电压，简化了控制参数的选择。

[0085] 根据本发明的方法，对图3所示的低压微电网进行仿真分析。

[0086] 仿真模型包含两台DG、三个负荷，系统结构如图3示。模型中的相关参数设置如下：DG直流侧电压： $U_{dc1} = U_{dc2} = 800V$ ；两DG的额定容量参数为： $P_{DG1} = 50kVA$ ， $P_{DG2} = 25kVA$ ；滤波电感、电容值为： $L_1 = 0.6mH$ ， $C_1 = 1500\mu F$ ， $L_2 = 1.2mH$ ， $C_2 = 800\mu F$ ；DG1一次调频参数为： $D_1 = 5500$ ， $k_{m1} = 1.35 \times 10^{-5}$ ， $k_{n1} = 0.5$ ， $J = 700$ ，二次调频参数为： $k_1 = 12$ ， $k_{T1} = 30$ ， $k_1 = 0.5$ ， $k_2 = 20$ ；DG2一次调频参数为： $D_2 = 3750$ ， $k_{m2} = 0.625 \times 10^{-5}$ ， $k_{n2} = 0.85$ ， $J = 400$ ，二次调频参数为： $k_2 = 8.5$ ， $k_{T1} = 19$ ， $k_1 = 0.25$ ， $k_2 = 15$ ；负荷参数为： $P_1 = 20kW$ ， $Q_1 = 15kvar$ ， $P_2 = 10kW$ ， $Q_2 = 7.5kvar$ ， $P_3 = 20kW$ ， $Q_3 = 15kvar$ ；配电网运行频率50Hz，运行电压幅值310V。

[0087] 分为两种算例情况来验证本发明方法的有效性：

[0088] 算例1：低压微电网联网状态切换到孤岛稳定运行状态时的频率调节。设DG1和DG2在低压微电网并网运行阶段有功输出分别为30kW和20kW给电网，负荷1,2接入低压微电网运行，在1s后进入孤岛运行状态，为了满足低压微电网孤岛状态的稳定运行，DG会减少输出有功功率，仿真中两台DG的有功功率参考值分别为各DG有功额定容量，额定功率为50Hz。

[0089] 算例2：负荷变化时频率响应调节。低压微电网孤岛运行状态下，设定DG1输出有功功率20kW，DG2输出有功功率10kW。两DG参考值相同，1s前只有负荷1和负荷2运行，1s后负荷3投入。

[0090] 算例3：为了更明显的体现本文所提出的二次调频控制过程，算例3中1s前负荷1，负荷2和负荷3都接入系统，1s时切除负荷3，二次调频阶段分别采用本文方法和传统二次调频方法

[0091] 下面将分别对图3所示的低压微电网频率瞬时调节进行仿真分析。

[0092] 由图4-5可看出：图4可以看出，采用本文方法当低压微电网负荷增加时，2台DG按照各自 T/ω 下垂增益系数调节输出功率，使频率缓慢降低到正常运行范围，频率由50.45Hz恢复到50Hz左右，频率调节时间为7.8s；传统 P/f 下垂控制频率瞬时变为50.54Hz然后快速降低到49.6Hz，稳定运行时恢复到49.98Hz，响应时间为4.5s。由图5(a)，(b)可以看出，孤岛

运行状态下DG1,DG2有功功率输出分别为25kW和12.5kW,可以按照容量进行合理功率输出分配。比较可得传统P/f下垂控制在状态转换瞬间比本文方法降低更多的有功功率,对低压微电网造成的大的冲击。可以看出:本方法在低压微电网状态切换暂态过程中对频率造成的瞬时冲击较小,提高了低压微电网抵御状态切换冲击的能力,且频率调节动态过程更加平滑,提高了系统暂态过程中电能质量。

[0093] 由图6-7可看出:采用本文方法当低压微电网负荷增加时,2台DG按照各自 T/ω 下垂增益系数调节输出功率,使频率缓慢降低到正常运行范围,频率由50.45Hz恢复到50Hz左右,频率调节时间为7.8s;传统P/f下垂控制频率瞬时变为50.54Hz然后快速降低到49.6Hz,稳定运行时恢复到49.98Hz,响应时间为4.5s。可以看出:本方法延缓了频率衰减,减小因负荷变动造成的频率偏差,且抑制了调频过程中的功率振荡。此外DG在进行低压微电网调频过程同时将有功功率按照额定容量即2:1分配,当系统负荷突变时,采用本文方法时DG的瞬时功率和瞬时频率变化小于传统P/f下垂控制方法,实现频率无差调节,维持了系统稳定,提高了逆变器的抗冲击能力。

[0094] 图7为二次调频频率变化图可以看出:本发明在1s-3s左右进行频率一次调节,3s后进行二次调频。本文方法二次调频分成两个阶段,响应时间2.5s,稳定状态频率为50Hz;采用传统二次调频方法使稳定状态频率为49.7Hz。本文基于VSG二次调频利用 Q/ω 和 Q/T 协调进行无差调节,频率瞬时降低后,通过一次调频使频率稳定在46.69Hz,二次调频逐步调节增加DG输出功率并叠加到一次调频输出功率上。图中可以看出:本发明方法二次调频 Q/ω 和 Q/T 协调进行频率控制,使频率调节过程分五个响应阶段即一次调频阶段的三段调节, Q/ω 下垂控制的二次调频初始阶段和 $\Delta\omega_T$ 检测后启动 Q/T 下垂控制阶段。比较可得:本文所提二次调控方法使低压微电网频率调节趋于平缓,增大了低压微电网惯性,提高了频率的抗扰动能力,真正实现无差调节。

[0095] 仿真结果说明:本发明的方法在低压微电网受到状态切换扰动和负荷突变情况下的调节过程更加趋于平缓,系统受到的冲击小,频率基本实现无差调节,有利于低压微电网的稳定运行。

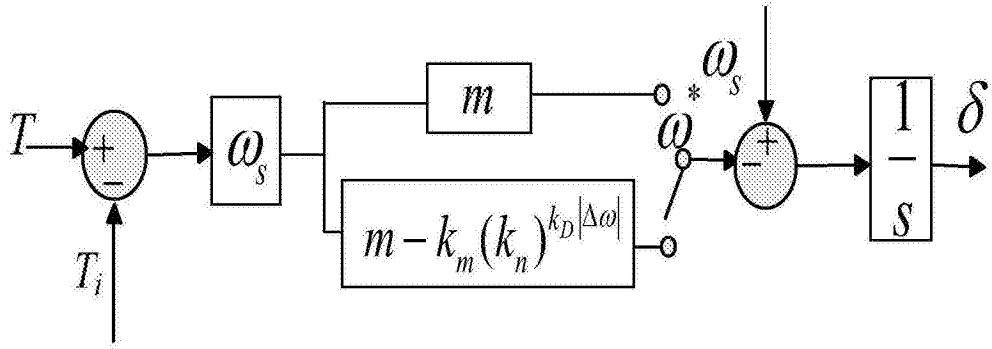


图1

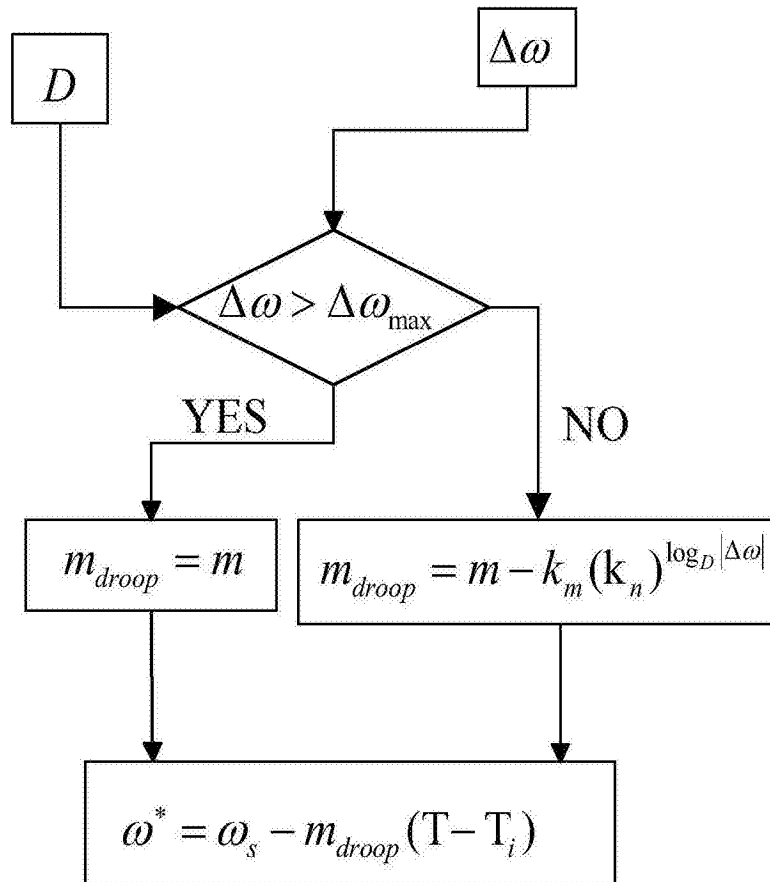


图2

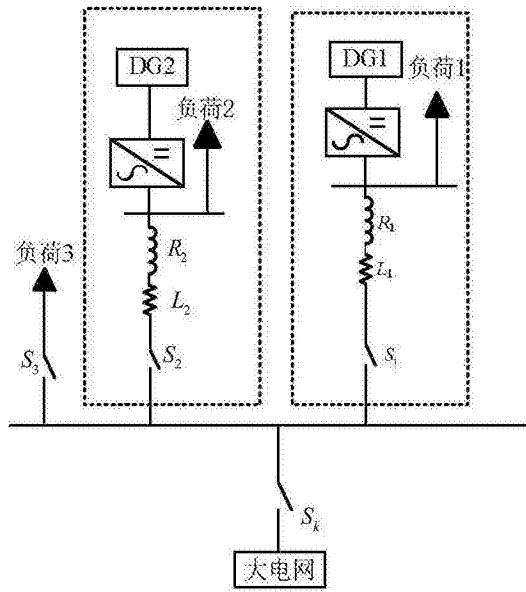


图3

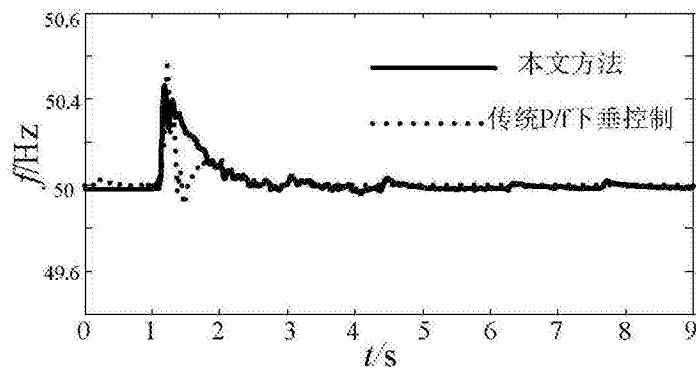


图4

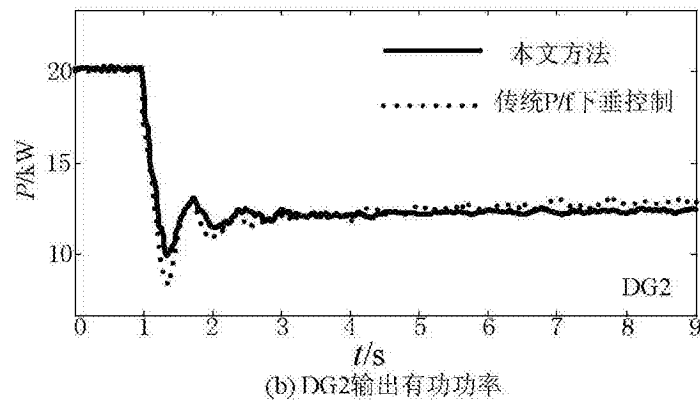
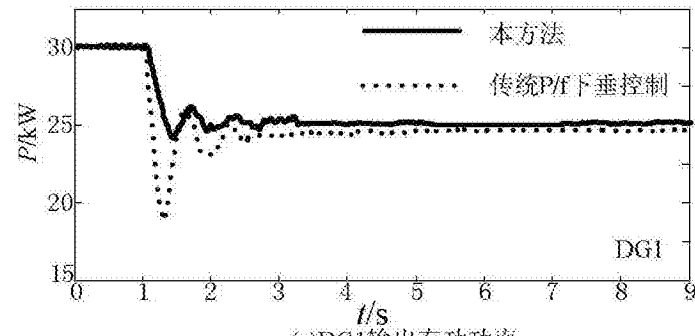
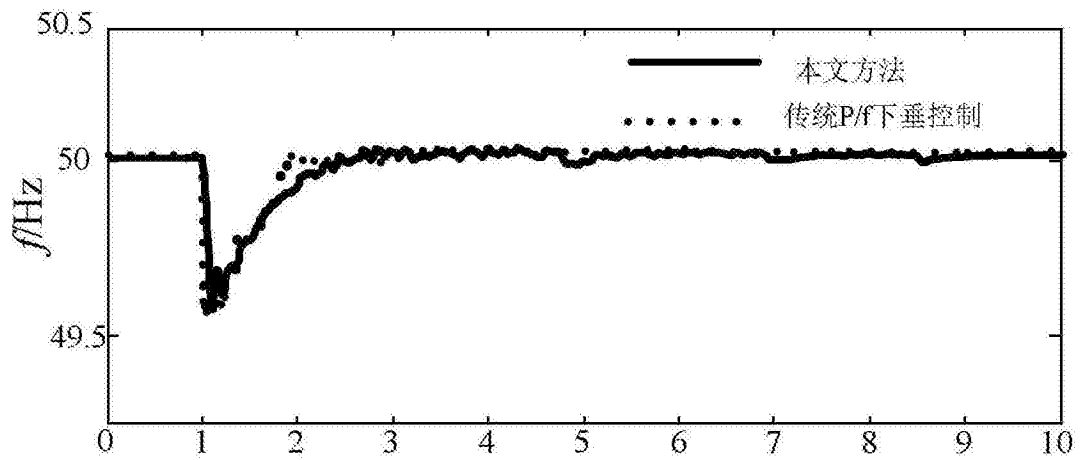
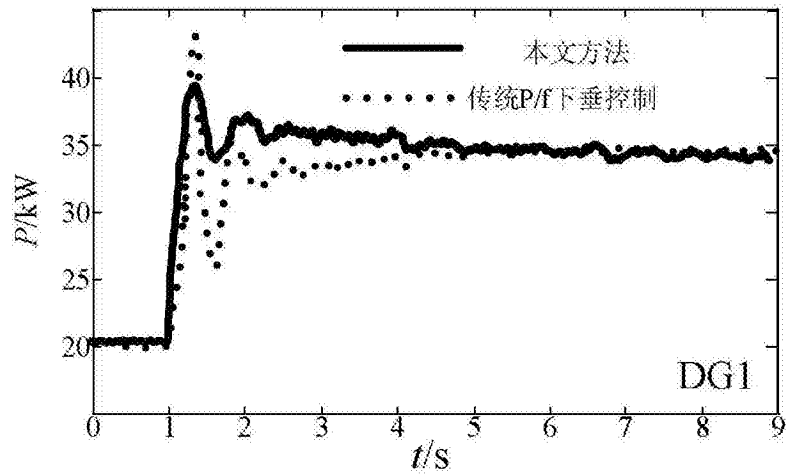
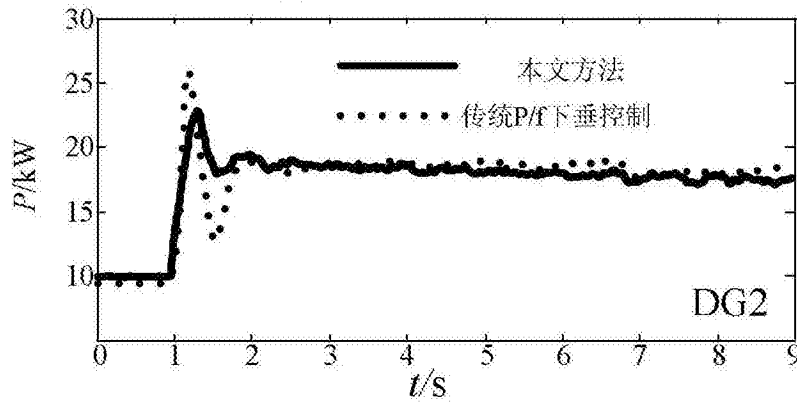


图5





(a) DG1输出有功功率



(b) DG2输出有功功率

图7

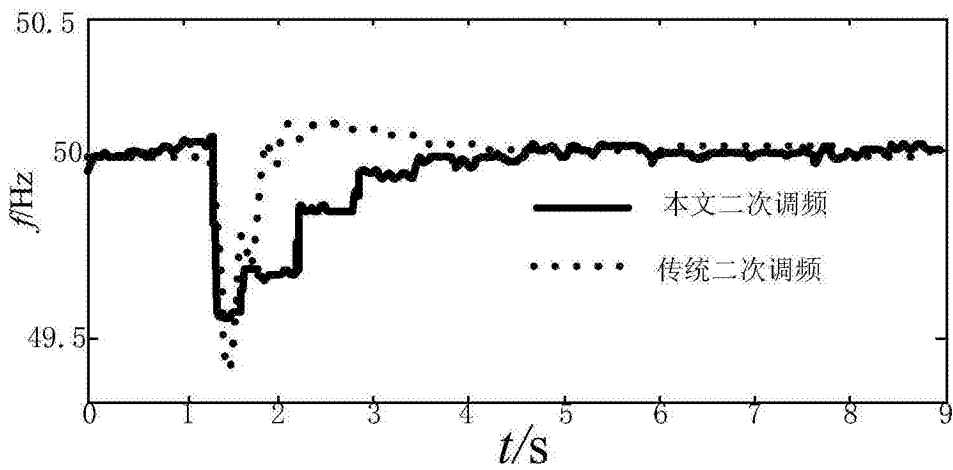


图8

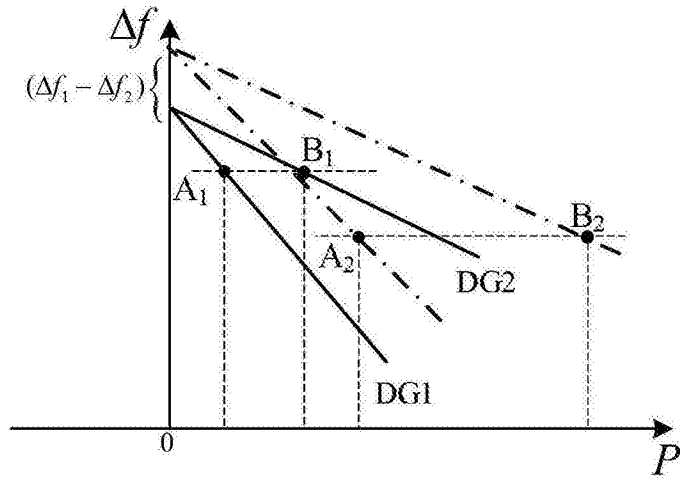


图9