



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105811400 A

(43)申请公布日 2016.07.27

(21)申请号 201610157109.5

(22)申请日 2016.03.18

(71)申请人 国网上海市电力公司

地址 200002 上海市黄浦区南京东路181号

申请人 华东电力试验研究院有限公司

(72)发明人 陈甜甜 张鹏 罗稜

(74)专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

代理人 宣慧兰

(51) Int. Cl.

H02J 3/00(2006.01)

H02J 3/38(2006.01)

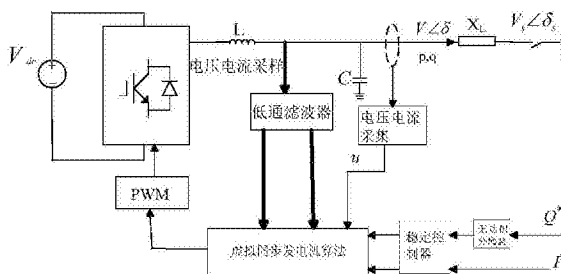
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种低压微电网模式的自适应控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种低压微电网模式的自适应控制方法,包括以下步骤:1)获取低压微电网的电力运行参数,构建基于虚拟同步发电机的低压微电网下垂控制模型;2)在基于虚拟同步发电机的低压微电网下垂控制模型中,虚拟同步发电机控制环节与滤波电感间增加低通滤波器,进行滤波电感电压电流采样;3)在虚拟同步发电机控制环节与无功功率和有功功率参考值信号间增加稳定控制器,同时在稳定控制器与无功功率参考值信号间增加无功积分增益环节,得到改进后的低压微电网下垂控制模型;4)根据改进后的低压微电网下垂控制模型对低压微电网进行模式切换。与现有技术相比,本发明具有消除扰动、平稳切换、稳定性高、实用性强等优点。



1. 一种低压微电网模式的自适应控制方法,用以实现低压微电网进行并网运行和孤岛运行两种运行模式之间安全平稳的切换,消除切换时的暂态电流和电压冲击,其特征在于,包括以下步骤:

1) 获取低压微电网的电力运行参数,构建基于虚拟同步发电机的低压微电网下垂控制模型;

2) 在基于虚拟同步发电机的低压微电网下垂控制模型中,虚拟同步发电机控制环节与滤波电感间增加低通滤波器,进行滤波电感电压电流采样;

3) 在虚拟同步发电机控制环节与无功功率和有功功率参考值信号间增加稳定控制器,同时在稳定控制器与无功功率参考值信号间增加无功积分增益环节,得到改进后的低压微电网下垂控制模型;

4) 根据改进后的低压微电网下垂控制模型对低压微电网进行模式切换,消除暂态电流和电压冲击。

2. 根据权利要求1所述的一种低压微电网模式的自适应控制方法,其特征在于,所述的虚拟同步发电机控制环节运行原理为:

$$\begin{cases} e = \omega_e M_f i_e \sin \theta \\ J \omega s = \frac{P_r - P_e}{\omega^*} + D(\omega^* - \omega) \\ Q = \frac{3}{2} M_f i_e^2 \sin \theta \end{cases}$$

其中, $P_r$ 为机械功率, $P_e$ 为电磁功率, $J$ 为转子的转动惯量, $\omega^*$ 为参考电角速度, $D$ 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电感, $i_e$ 为励磁电流, $\theta$ 为发电机电角度, $\omega_e$ 为感应电流角频率, $\omega$ 为参考角频率, $i$ 为参考电流, $Q$ 为逆变器输出无功, $s$ 为微分系数。

3. 根据权利要求1所述的一种低压微电网模式的自适应控制方法,其特征在于,所述的步骤3)中在稳定控制器与无功功率参考值信号间增加无功积分增益环节后的控制过程为:

$$V = V^* - m[Q^* - (n_1 Q_n + \frac{n_2}{s} Q_g)]$$

其中, $V$ 为电压幅值参考值, $Q_n$ 为无功功率参考值, $m$ 为下垂系数, $V^*$ 为由功率控制器计算得到的电压幅值, $n_1$ 和 $n_2$ 分别为并网运行时微电网输出无功和电网检测计算得到的无功增益系数, $Q_n$ 为逆变器输出无功功率, $Q_g$ 为电网提供给逆变器的无功功率。

4. 根据权利要求1所述的一种低压微电网模式的自适应控制方法,其特征在于,所述的步骤3)中的稳定控制器的数学模型为:

$$\begin{cases} \Delta f = \Delta f' + (K_{3\theta} + \frac{K_{3\theta}}{s})(\omega_g - \omega_m) \\ \Delta U = \Delta U' + k_\delta (K_{4\theta} + \frac{K_{4\theta}}{s})(\delta_g - \delta_m) + k_p (K_{4\theta} + \frac{K_{4\theta}}{s})(P_g - P_m) \end{cases}$$

其中,其中, $\Delta f$ 为叠加后的电压频率, $\Delta f'$ 为原电压频率, $K_{3\theta}$ 和 $K_{4\theta}$ 为增益, $\omega_g$ 为配电网电角速度, $\omega_m$ 为微电网电角速度, $\Delta U$ 为叠加后的幅值偏差, $\Delta U'$ 为原幅值偏差, $k_\delta$ 和 $k_p$ 分别

为为 $U/\delta$ 和 $U/P$ 增益系数, $\delta_g$ 为配电网输出功率的功角, $\delta_m$ 为微电网输出功率的功角, $P_g$ 为配电网输出功率, $P_m$ 为微电网输出功率。

5.根据权利要求1所述的一种低压微电网模式的自适应控制方法,其特征在于,所述的步骤4)中微电网并网运行时采用PQ下垂控制,孤岛运行时采用V/f下垂控制。

6.根据权利要求5所述的一种低压微电网模式的自适应控制方法,其特征在于,所述的改进后的低压微电网下垂控制模型并网模式下的有功功率和无功功率计算方程为:

$$\begin{cases} p_g = \frac{EU_{pcc}}{Z} \cos(\theta_{pcc} - \theta) - \frac{U_{pcc}^2}{Z} \cos \theta_{pcc} \\ q_g = \frac{EU_{pcc}}{Z} \sin(\theta_{pcc} - \theta) - \frac{U_{pcc}^2}{Z} \sin \theta_{pcc} \end{cases}$$

其中, $p_g$ 和 $q_g$ 为低压微电网并网状态时分布式电源的有功和无功功率设定值, $Z$ 为低压微电网线路阻抗, $\theta_{pcc}$ 为PCC点电压相角, $\theta$ 为逆变器输出电压相角, $E$ 为逆变器输出电压幅值, $U_{pcc}$ 为PCC点电压幅值。

## 一种低压微电网模式的自适应控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及微电网运行控制策略波分析领域,尤其是涉及一种低压微电网模式的自适应控制方法。

### 背景技术

[0002] 近年来随着分布式电源的发展,在能源耗费,能源安全与环境问题日益严峻的情况下,含分布式电源(Distributed Generation, DG)的微电网受到越来越多的关注。随着大量DG的接入,微电网的规模也越来越大,使得传统电力系统的运行控制方式不再适用于微电网。微电网是由多个DG、储能装置、负荷和控制系统集合而成的低压配电网络,既可并网运行又可工作在孤岛模式,这就要求控制系统保证微电网两种运行模式平滑切换。如何在含大量DG的情况下实现高效、稳定的控制成为未来研究微电网研究的重要方向之一。

[0003] 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, DG负责微电网频率调节、电压调整、功率因数校正等环节,微电网两种运行状态要求DG负责的环节不同。并网运行时,配电网为其提供频率和电压支撑,采用PQ下垂控制,输出功率由设定值决定;孤岛运行时,必需有足够数量的DG为微电网提供功率支撑保证微电网频率和电压在标准范围内运行,实现负荷容量在DG之间的合理分配,使用V/f下垂控制,采用下垂控制方法的逆变器等同于高压电力系统中同步发电机的频率和端电压与输出的有功功率和无功功率之间的下垂特性。

[0004] 针对这一新问题,现有的低压微电网模式转换控制方法对微电网2种运行模式分别设计了不同的控制方法,即运行模式转换时控制策略也要相应转换,这样容易造成控制模式转换延迟且控制方法切换过程中会产生较大的冲击,甚至造成运行模式转换失败。再者为了实现微电网模式转换控制策略的统一现有控制方法在微电网模式转换时无需进行控制方式切换,但是并没有考虑模式转换暂态过程中微电网频率和电压调节问题,因此找到一种能有效实现微电网模式转换的控制方法很有必要。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种消除扰动、平稳切换、稳定性高、实用性强的低压微电网模式的自适应控制方法。

[0006] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0007] 一种低压微电网模式的自适应控制方法,用以实现低压微电网进行并网运行和孤岛运行两种运行模式之间安全平稳的切换,消除切换时的暂态电流和电压冲击,包括以下步骤:

[0008] 1)获取低压微电网的电力运行参数,构建基于虚拟同步发电机的低压微电网下垂控制模型;

[0009] 2)在基于虚拟同步发电机的低压微电网下垂控制模型中,虚拟同步发电机控制环节与滤波电感间增加低通滤波器,进行滤波电感电压电流采样;

[0010] 3)在虚拟同步发电机控制环节与无功功率和有功功率参考值信号间增加稳定控制器,同时在稳定控制器与无功功率参考值信号间增加无功积分增益环节,得到改进后的低压微电网下垂控制模型;

[0011] 4)根据改进后的低压微电网下垂控制模型对低压微电网进行模式切换,消除暂态电流和电压冲击。

[0012] 所述的虚拟同步发电机控制环节运行原理为:

$$[0013] \begin{cases} e = \omega_e M_f i_e \sin \theta \\ J \omega s = \frac{P_T - P_e}{\omega^*} + D(\omega^* - \omega) \\ Q = \frac{3}{2} M_f i_e i \sin \theta \end{cases}$$

[0014] 其中, $P_T$ 为机械功率, $P_e$ 为电磁功率, $J$ 为转子的转动惯量, $\omega^*$ 为参考电角速度, $D$ 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电感, $i_e$ 为励磁电流, $\theta$ 为发电机电角度, $\omega_e$ 为感应电流角频率, $\omega$ 为参考角频率, $i$ 为参考电流, $Q$ 为逆变器输出无功, $s$ 为微分系数。

[0015] 所述的步骤3)中在稳定控制器与无功功率参考值信号间增加无功积分增益环节后的控制过程为:

$$[0016] V = V^* - m[Q^* - (n_1 Q_n + \frac{n_2}{s} Q_g)]$$

[0017] 其中, $V$ 为电压幅值参考值, $Q_n$ 为无功功率参考值, $m$ 为下垂系数, $V^*$ 为由功率控制器计算得到的电压幅值, $n_1$ 和 $n_2$ 分别为并网运行时微电网输出无功和电网检测计算得到的无功增益系数, $Q_n$ 为逆变器输出无功功率, $Q_g$ 为电网提供给逆变器的无功功率。

[0018] 所述的步骤3)中的稳定控制器的数学模型为:

$$[0019] \begin{cases} \Delta f = \Delta f' + (K_{3\theta} + \frac{K_{3\theta}}{s})(\omega_g - \omega_m) \\ \Delta U = \Delta U' + k_\delta (K_{4\theta} + \frac{K_{4\theta}}{s})(\delta_g - \delta_m) + k_p (K_{4\theta} + \frac{K_{4\theta}}{s})(P_g - P_m) \end{cases}$$

[0020] 其中,其中, $\Delta f$ 为叠加后的电压频率, $\Delta f'$ 为原电压频率, $K_{3\theta}$ 和 $K_{4\theta}$ 为增益, $\omega_g$ 为配电网电角速度, $\omega_m$ 为微电网电角速度, $\Delta U$ 为叠加后的幅值偏差, $\Delta U'$ 为原幅值偏差, $k_\delta$ 和 $k_p$ 分别为为 $U/\delta$ 和 $U/P$ 增益系数, $\delta_g$ 为配电网输出功率的功角, $\delta_m$ 为微电网输出功率的功角, $P_g$ 为配电网输出功率, $P_m$ 为微电网输出功率。

[0021] 所述的步骤4)中微电网并网运行时采用PQ下垂控制,孤岛运行时采用V/f下垂控制。

[0022] 所述的改进后的低压微电网下垂控制模型并网模式下的有功功率和无功功率计算方程为:

$$[0023] \begin{cases} p_g = \frac{EU_{pcc}}{Z} \cos(\theta_{pcc} - \theta) - \frac{U_{pcc}^2}{Z} \cos \theta_{pcc} \\ q_g = \frac{EU_{pcc}}{Z} \sin(\theta_{pcc} - \theta) - \frac{U_{pcc}^2}{Z} \sin \theta_{pcc} \end{cases}$$

[0024] 其中,  $p_g$ 和 $q_g$ 为低压微电网并网状态时分布式电源的有功和无功功率设定值,  $Z$ 为低压微电网线路阻抗,  $\theta_{pcc}$ 为PCC点电压相角,  $\theta$ 为逆变器输出电压相角,  $E$ 为逆变器输出电压幅值,  $U_{pcc}$ 为PCC点电压幅值。

[0025] 与现有技术相比, 本发明具有以下优点:

[0026] 一、消除扰动、平稳切换: 本技术方案针对微电网模式运行转换过程, 提出了一种低压微电网模式自适应控制方法, 通过引入虚拟转矩和阻尼系数提高缺少惯性的逆变器的暂态特性, 结合虚拟同步发电机法并增加了模拟低通滤波器模块和无功积分控制模块来满足两种运行模式对DG的不同运行要求, 相比于传统微电网模式自适应控制策略, 本技术方案提高了微电网的运行惯性, 避免运行模式变化时控制方法切换造成的微电网扰动;

[0027] 二、稳定性高: 本技术方案设计了稳定控制器提高了系统控制响应速率, 同时, 保证了微电网在受到负荷突变和状态转换扰动后的稳定性。

[0028] 三、实用性强: 本技术方案原理简单, 实现容易, 具有一定的工程使用价值。

### 附图说明

[0029] 图1为改进后的低压微电网下垂控制框图。

[0030] 图2为改进后的低压微电网下垂控制的控制原理图。

[0031] 图(3a)是微电网两种运行模式转换过程中DG1和DG2输出有功功率图。

[0032] 图(3b)是微电网两种运行模式转换过程中DG1和DG2输出无功功率图。

[0033] 图(3c)是微电网两种运行模式转换过程中PCC点电压变化图。

[0034] 图(3d)是微电网两种运行模式转换过程中PCC点频率变化图。

[0035] 图4是微电网孤岛运行模式下受到负荷波动时的PCC点频率调节图。

### 具体实施方式

[0036] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0037] 实施例:

[0038] 如图1所示, 图为改进后的低压微电网下垂控制框图。

[0039] 如图2所示, 图为改进后的低压微电网下垂控制的控制原理图, 设 $P_r$ 为机械功率,  $P_e$ 为电磁功率,  $J$ 为转子的转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ),  $\omega^*$ 为参考电角速度,  $D$ 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电感,  $i_e$ 为励磁电流,  $\theta$ 为发电机电角度。

[0040] 本发明包括下列步骤:

[0041] A、根据同步发电机运行原理, 虚拟同步发电机(VSG)的数学模型如下式:

$$[0042] \begin{cases} e = \omega_e M_f i_e \sin \theta \\ J \omega s = \frac{P_r - P_e}{\omega^*} + D(\omega^* - \omega) \\ Q = \frac{3}{2} M_f i_e \sin \theta \end{cases}$$

[0043] B、设 $V_n$ 和 $Q_n$ 分别电压幅值和无功功率参考值;  $m$ 为下垂系数;  $V^*$ 为由功率控制器计算得到的电压幅值。传统下垂控制方程如下所示:

$$[0044] \quad V^* = V_n - m(Q - Q_n)$$

[0045] C、统计针对状态转换的控制中在微电网孤岛运行状态时需要去除并网运行时外无功功率控制环节。本文不仅增加了模拟低通滤波器模块还增加了无功积分增益。在调节过程中低通滤波器类似于同步发电机的能量衰减方程,无功功率变化通过PI控制进行调节,提高了电压频率追踪效率,无功控制方程为:

$$[0046] \quad V = V^* - m[Q^* - (n_1 Q_n + \frac{n_2}{s} Q_g)]$$

[0047] 其中 $n_1$ 和 $n_2$ 分别为并网运行时微电网输出无功和电网检测计算得到的无功增益系数, $\tau$ 为模拟低通滤波器时间常数。

[0048]  $Q_n$ 和 $P_n$ 为逆变器输出有功功率和无功功率, $Q_g$ 为电网提供给逆变器的无功功率,下面分析本发明所提控制策略的控制过程:

[0049] 1、并网状态下 $Q_g$ 不为零并由设定值决定,DG的输出不受系统电压和频率影响。并网模式下引入的模拟低通滤波器模块可以看成传统电力系统中同步发电机的转子能量衰减方程。并网状态时下垂控制不能控制调节注入的无功功率,并网状态下系统根据DG无功功率容量分配无功功率,所以在并网运行阶段需要增加无功功率控制环节,本文所提方法中,并网状态下有功功率和无功功率计算方程为:

$$[0050] \quad \begin{cases} p_g = \frac{EU_{PCC}}{Z} \cos(\theta_{PCC} - \theta) - \frac{U_{PCC}^2}{Z} \cos \theta_{PCC} \\ q_g = \frac{EU_{PCC}}{Z} \sin(\theta_{PCC} - \theta) - \frac{U_{PCC}^2}{Z} \sin \theta_{PCC} \end{cases}$$

[0051] 式中 $p_g$ 和 $q_g$ 为并网状态时DG有功和无功设定值, $Z=R+jX$ 为微电网线路阻抗, $\theta_{PCC}$ 为PCC点电压相角, $\theta$ 为逆变器输出电压相角, $E$ 为逆变器输出电压幅值, $U_{PCC}$ 为PCC点电压幅值。

[0052] 2、孤岛运行状态时需要去除电网对逆变器输出的无功功率控制环,即孤岛运行状态时传统下垂控制时大电网提供给逆变器的无功功率为0,即设定 $Q_g=0$ ,自动去除了外环无功控制环节。传统下垂控制的下垂系数固定只能进行比例调节,微电网孤岛状态下控制调节动态性能受下垂系数影响,本文方法的无功积分增益的引入使参数可以随情况变化,提高了微电网惯性,缓解了微电网受到负荷扰动的瞬时冲击,有利于微电网孤岛运行状态稳定,动态响应速度快。微电网并网过程中,应使DG输出功率平滑过渡到功率参考值,为了减小了因快速功率变化引起的系统冲击,提高微电网受到负荷突变的抗扰动能力,本专利还设计了稳定控制器。

[0053] 3、微电网受到的扰动一般包括负荷突变和状态切换等,而状态切换是微电网受到的最大扰动,本文采集微电网功角,电角速度和有功功率偏差通过PI控制设计了稳定控制器,微电网保持稳定运行的前提就是电压和频率的稳定运行。式中: $\Delta f'$ 、 $\Delta U'$ 分别为原电频率和幅值偏差; $\Delta f$ 、 $\Delta U$ 分别为叠加后的电压频率和幅值偏差; $\omega$ 、 $U$ 、 $\delta$ 分别为电角速度,电压幅值和微网输出功率的功角, $k_\delta$ 和 $k_p$ 分别为 $U/\delta$ 和 $U/P$ 增益系数,下标 $g$ 和 $m$ 分别表示配电网和微电网,其中功角 $\delta$ 通过有功功率和无功功率设定值得:

$$[0054] \quad \begin{cases} \Delta f = \Delta f' + (K_{3\theta} + \frac{K_{3\theta}}{s})(\omega_g - \omega_m) \\ \Delta U = \Delta U' + k_{\delta}(K_{4\theta} + \frac{K_{4\theta}}{s})(\delta_g - \delta_m) + \\ \quad + k_p(K_{4p} + \frac{K_{4p}}{s})(P_g - P_m) \end{cases}$$

[0055] 稳定控制器的控制过程如下：

[0056] 在系统负荷扰动情况下，系统频率  $\omega$  和  $\delta$  会出现偏移，出现的偏差通过稳定控制器，得到微电网电压和频率与外部电网存在的误差。当进行并网操作时利用微电网电压和频率偏差进行PI调节，作为正反馈进入VSG模型，随着系统下垂特性曲线的整体移动最终消除微电网与外部电网的频率和电压偏差，即实现系统频率电压稳定运行。

[0057] 该控制模块中省略了传统控制中的电压检测模块，功角、电角速度和有功功率偏差通过PI控制叠加得到新的电压频率和幅值，加入虚拟同步发电机模型中完成同步稳定控制，此稳定控制模块在并网运行状态下无功控制环节由功角参考量完成消除了配电网和微电网的电压幅值偏差，达到并网要求的目的。

[0058] 可见，本发明针对低压微电网模式转换，考虑到微电网不同运行模式下控制目标的不同，引入虚拟转矩和阻尼系数提高缺少惯性的逆变器的暂态特性，结合VSG法并增加了模拟低通滤波器模块和无功积分控制模块来满足两种运行模式对DG的不同运行要求。

[0059] 在系统负荷扰动情况下，系统频率  $\omega$  和  $\delta$  会出现偏移，出现的偏差通过稳定控制器，得到微电网电压和频率与外部电网存在的误差。当进行并网操作时利用微电网电压和频率偏差进行PI调节，作为正反馈进入VSG模型，随着系统下垂特性曲线的整体移动最终消除微电网与外部电网的频率和电压偏差，即实现系统频率电压稳定运行。

[0060] 该控制模块中省略了传统控制中的电压检测模块，功角、电角速度和有功功率偏差通过PI控制叠加得到新的电压频率和幅值，加入虚拟同步发电机模型中完成同步稳定控制，此稳定控制模块在并网运行状态下无功控制环节由功角参考量完成消除了配电网和微电网的电压幅值偏差，达到并网要求的目的。

[0061] 微电网孤岛运行状态时需要去除电网对逆变器输出的无功功率控制环，即孤岛运行状态时传统下垂控制时大电网提供给逆变器的无功功率为0，即设定  $Q_g = 0$ ，自动去除了外环无功控制环节。传统下垂控制的下垂系数固定只能进行比例调节，微电网孤岛状态下控制调节动态性能受下垂系数影响，本方法的无功积分增益的引入使参数可以随情况变化，提高了微电网惯性，缓解了微电网受到负荷扰动的瞬时冲击，有利于微电网孤岛运行状态稳定，动态响应速度快。

[0062] 在系统负荷扰动情况下，系统频率  $\omega$  和  $\delta$  会出现偏移，出现的偏差通过稳定控制器，得到微电网电压和频率与外部电网存在的误差。当进行并网操作时利用微电网电压和频率偏差进行PI调节，作为正反馈进入VSG模型，随着系统下垂特性曲线的整体移动最终消除微电网与外部电网的频率和电压偏差，即实现系统频率电压稳定运行。

[0063] 本发明为了验证所提控制策略的有效性，搭建了含两台DG的微电网仿真模型，系统结构。仿真系统参数和控制参数如表1-4所示，本文中取无功功率低通滤波器时间常数为0.04，开关频率取15kHz，DG功率因数分别取为0.3, 0.2。两DG电压频率为50Hz，电压幅值为



310V。

[0064] 表1 DG主要参数

| 参数               | DG1 | DG2 |
|------------------|-----|-----|
| 容量 (kvar)        | 50  | 25  |
| 直流侧电压(V)         | 800 | 800 |
| 滤波器电感L(mh)       | 2   | 4   |
| 滤波器电容C( $\mu$ F) | 600 | 300 |

[0066] 表2 负荷参数

| 负荷  | P/kW | Q/kvar |
|-----|------|--------|
| 负荷1 | 30   | 22.5   |
| 负荷2 | 20   | 15     |

[0068] 表3 线路参数

| 线路电阻R/ $\Omega$ | 电路电抗 $x/\Omega$ |
|-----------------|-----------------|
| 0.2             | 0.305           |
| 0.2             | 0.305           |

[0070] 表4 控制参数

| 参数            | DG1                | DG2                |
|---------------|--------------------|--------------------|
| $D$           | 4000               | 2000               |
| $J$           | 100                | 200                |
| $m$ (Hz/kvar) | $3 \times 10^{-3}$ | $6 \times 10^{-3}$ |

[0072] 下面将分别对低压微电网两种运行模式的转换以及微电网孤岛状态下受负荷扰动情况下进行仿真验证。

[0073] 具体的,从通过图3a和图3b可以看出1s时微电网发生计划性孤岛,1s前两台DG满足恒功率控制,转为孤岛运行时DG输出有功功率和无功功率分别为 $34 + j25$ kVA、 $17 + j12.5$ kVA,实现了孤岛状态下按容量进行合理功率分配。从图3c和图3d可以看出,3.2s时微电网进行同步并网控制,有功功率和无功功率过渡到并网运行时的功率参考值,PCC点电压和频率逐渐与电网端口重合,4s时微电网重新进行并网。可以看出PCC点电压有效值并网和脱网过程中电压最大偏差为7V,频率最大偏移小于0.2Hz,满足分布式电源并网标准要求。

[0074] 从图4可以看出:下垂控制在相同仿真条件下PCC点频率偏差的对比结果,负荷2投入和切除过程中采用传统下垂控制时负荷突变瞬间产生+0.21Hz,-0.38Hz的频率偏差,本文控制方法下频率偏差在负荷突变瞬间分别产生+0.15Hz,-0.2Hz的频率偏差。通过比较可以得:本文提出的控制方法负荷突变情况下能更有效的调节微电网频率,稳定运行状态时产生频率偏差更小,有利于系统运行稳定。

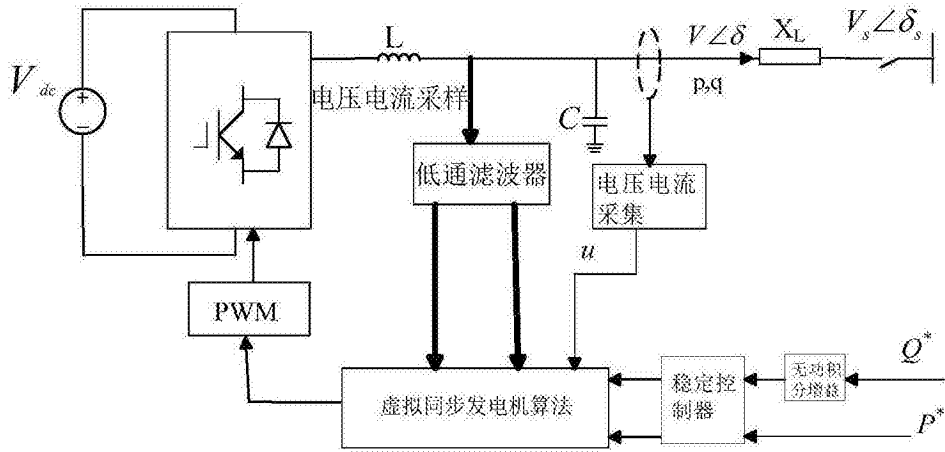


图1

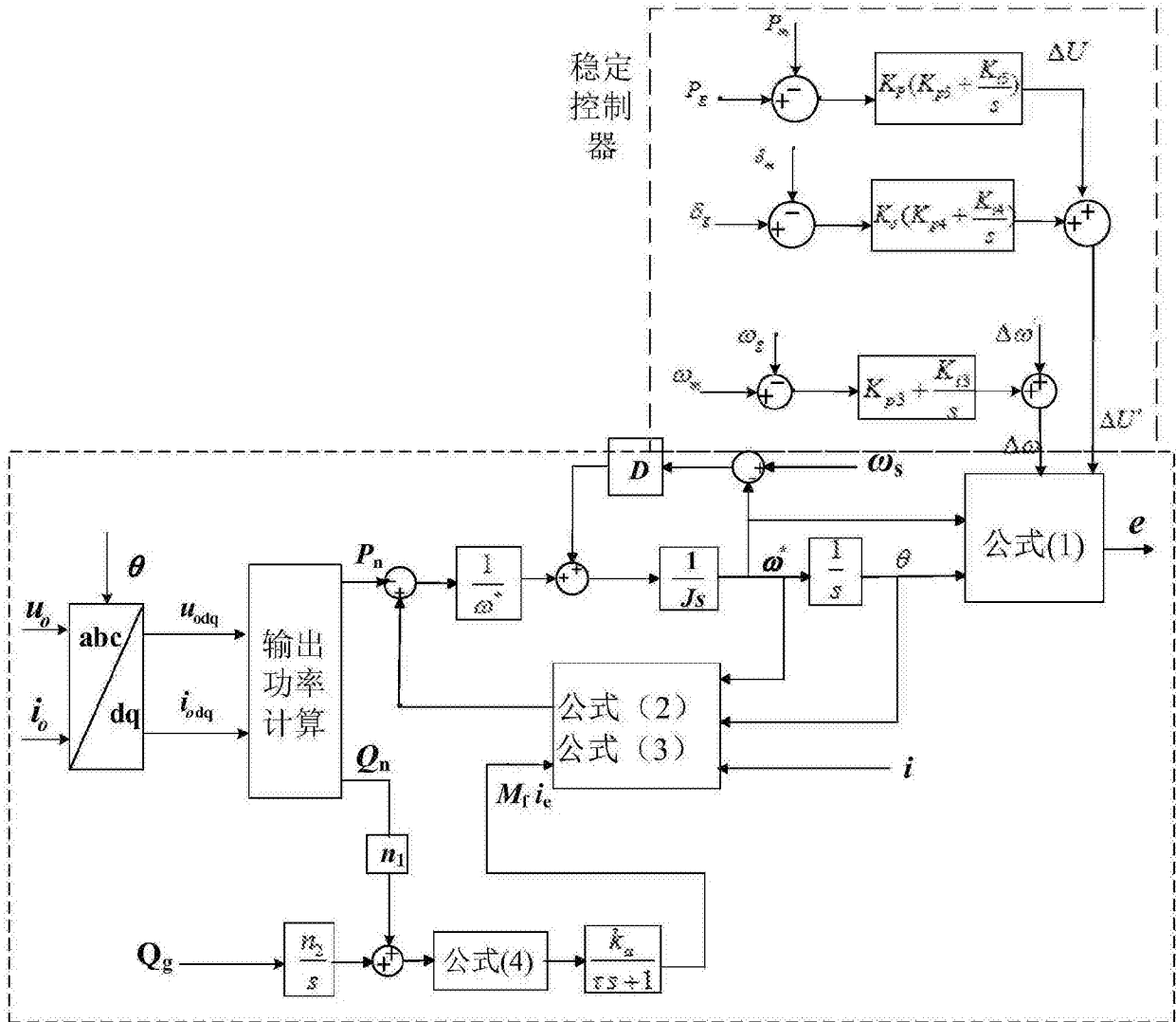


图2

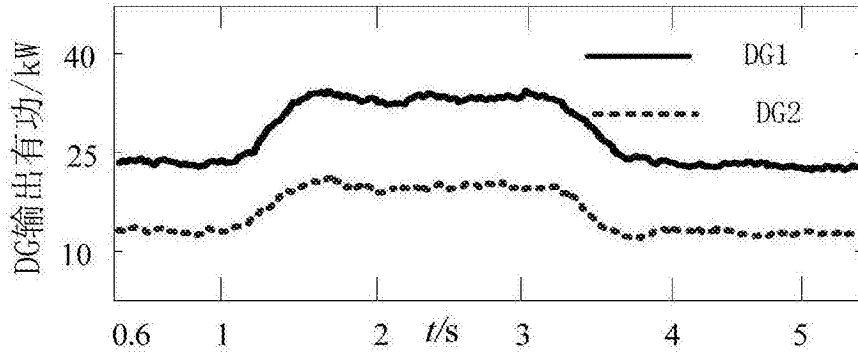


图 (3a)

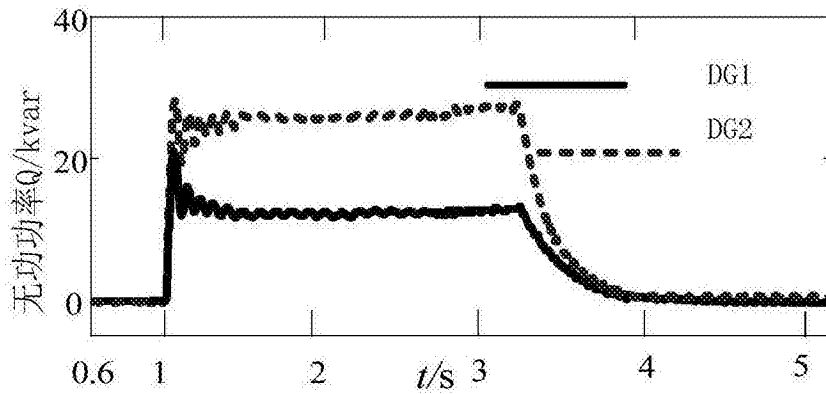


图 (3b)

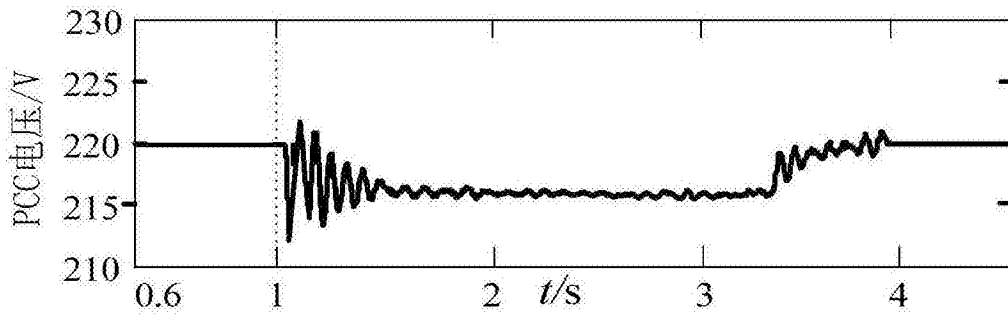


图 (3c)

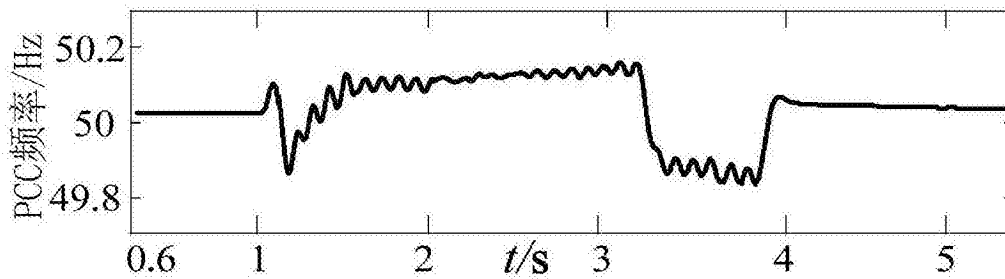


图 (3d)

图3

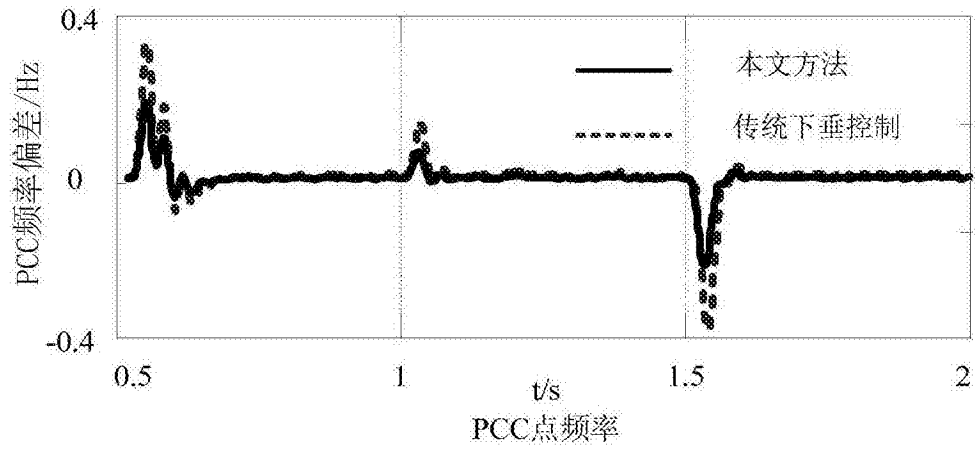


图4