



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106410849 B

(45)授权公告日 2019.01.15

(21)申请号 201610992364.1

(22)申请日 2016.11.10

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106410849 A

(43)申请公布日 2017.02.15

(73)专利权人 合肥工业大学
地址 230009 安徽省合肥市屯溪路193号

(72)发明人 刘芳 王梦 张兴 徐海珍 夏军
谢震 张杰 胡超

(74)专利代理机构 合肥和瑞知识产权代理事务
所(普通合伙) 34118

代理人 王挺

(51)Int.Cl.

H02J 3/38(2006.01)

H02J 3/24(2006.01)

(56)对比文件

CN 103066876 A,2013.04.24,

CN 104242717 A,2014.12.24,

CN 104638679 A,2015.05.20,

CN 105006834 A,2015.10.28,

CN 105811438 A,2016.07.27,

朱德斌等.微电网双运行模式下分布式逆
变器的控制策略.《电力电子技术》.2012,第46卷
(第10期),9-10,16.

郝木凯等.微网系统中储能装置控制策略
研究.《电力电子技术》.2012,第46卷(第4期),
45-47.

审查员 王笑寒

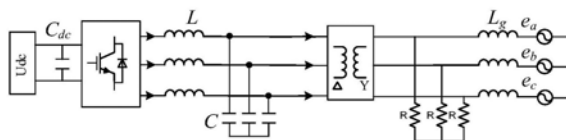
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54)发明名称

基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控
制方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于虚拟同步发电机的
微网逆变器均衡控制方法,包括:根据一种通用
的微分离散化方程估算电容电流,通过合理配置
参数使得其微分离散化特性较传统方法具有更
好的幅频特性;采用微网逆变器输出频率与电
网频率的组合反馈控制方法,使得功角控制下
垂系数与虚拟阻尼系数独立调节,达到了解耦
控制的目的;给出了具有回差特性的电网频率
逻辑判断环节来切换功率外环调节器,实现电
网频率调节与限功率运行之间的模式切换;采
用微网逆变器并采用基于电感电流与电容电流
的加权控制方法来均衡微网逆变器输出电压
动态响应和孤岛并联均流特性之间的矛盾问
题,提高了微网逆变器的整体性能。



1. 一种基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法,其特征在于,主要步骤如下:
步骤1,采样及坐标变换;

所述采样包括采集以下数据:微网逆变器滤波电容电压 u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} ,微网逆变器桥臂侧电感电流 i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} ,微网逆变器并网点电网电压 e_a, e_b, e_c ;

所述坐标变换包括对以下数据进行坐标变换:对微网逆变器滤波电容电压 u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 和桥臂侧电感电流 i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 分别进行单同步旋转坐标变换得到滤波电容电压的dq分量 U_{cd}, U_{cq} 和桥臂侧电感电流的dq分量 I_{Ld}, I_{Lq} ;

步骤2,根据步骤1中得到的滤波电容电压的dq分量 U_{cd}, U_{cq} ,通过通用的微分离散化方程计算滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ;根据步骤1得到的桥臂侧电感电流的dq分量 I_{Ld}, I_{Lq} 和滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ,经过输出电流计算方程得到输出电流的dq分量 I_{od}, I_{oq} ;经过有功功率计算方程和无功功率计算方程得到平均有功功率 P 和平均无功功率 Q ;对微网逆变器并网点电网电压 e_a, e_b, e_c 经过锁相环环节得到电网角频率 ω_g ;

步骤3,根据步骤2中得到的平均有功功率 P 、电网角频率 ω_g 和微网逆变器给定的有功功率指令 P_0 、微网逆变器给定有功功率指令 P_0 时的额定角频率 ω_0 ,经过功角控制方程及电网频率逻辑判断环节得到虚拟同步发电机的角频率 ω ,对 ω 积分得到虚拟同步发电机的矢量角 θ ;

步骤4,根据步骤2中得到的平均无功功率 Q 和微网逆变器给定的无功功率指令 Q_0 、电压指令 U_0 ,经过无功控制方程得到虚拟同步发电机的端电压 U^* ;

步骤5,先根据步骤4中得到的端电压 U^* 和步骤1中得到的滤波电容电压dq的分量 U_{cd}, U_{cq} ,通过电压控制方程得到电流指令信号 I_d^*, I_q^* ;再根据电流指令信号 I_d^*, I_q^* 、步骤1中的桥臂侧电感电流的dq分量 I_{Ld}, I_{Lq} 和步骤2得到的滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ,通过加权电流控制方程得到控制信号 U_d, U_q ;

步骤6,将步骤5中得到的控制信号 U_d, U_q 经过单同步旋转坐标反变换得到三相桥臂电压控制信号 U_a, U_b, U_c ,再根据 U_a, U_b, U_c 生成开关管的PWM控制信号。

2. 根据权利要求1所述的基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法,其特征在于,步骤3中所述功角控制方程为:

$$\omega = \frac{mJ\omega_0s+1}{mJ\omega_0s+1-mD_1}\omega_0 + \frac{mD_2}{mJ\omega_0s+1-mD_1}\omega_g + \frac{m}{mJ\omega_0s+1-mD_1}(P_0-P)$$

其中, ω_0 为微网逆变器给定有功功率指令 P_0 时的额定角频率, m 为功角控制下垂系数, J 为模拟同步发电机机组的虚拟转动惯量, s 为拉普拉斯算子, D_1 为微网逆变器频率反馈系数, D_2 为电网频率反馈系数;

采用具有回差特性的电网频率逻辑判断环节为:

当 $\omega_g \geq \omega_{g1}$ 时,令 $D_1 = -D_2 < 0$,即:

$$\omega = \frac{mJ\omega_0s+1}{mJ\omega_0s+1-mD_1}\omega_0 - \frac{mD_1}{mJ\omega_0s+1-mD_1}\omega_g + \frac{m}{mJ\omega_0s+1-mD_1}(P_0-P)$$

当 $\omega_g < \omega_{g2}$ 时,令 $\omega_0 = \omega_g, D_1 = -D_2 < 0$,即:

$$\omega = \omega_g + \frac{m}{mJ\omega_0s+1-mD_1}(P_0-P)$$

其中, ω_{g1} 为电网频率低阈值, ω_{g2} 为电网频率高返回值, $\omega_{g1} < \omega_{g2}$ 。

3. 根据权利要求1所述的基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法, 其特征在于, 步骤4中所述无功控制方程为:

$$U^* = U_0 + n_q (Q_0 - Q)$$

其中, U_0 为微网逆变器给定无功功率指令 Q_0 时的额定输出电容电压、 n_q 为无功-电压下垂系数。

4. 根据权利要求1所述的基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法, 其特征在于, 步骤5中所述电压控制方程为:

$$I_d^* = (K_p + K_i/s + \sum_h \frac{K_r s}{s^2 + Q_u \omega_h s + (\omega_h)^2})(U^* - U_{cd})$$

$$I_q^* = (K_p + K_i/s + \sum_h \frac{K_r s}{s^2 + Q_u \omega_h s + (\omega_h)^2})(0 - U_{cq})$$

其中, K_p 为电压环比例控制系数、 K_i 为电压环积分控制系数、 K_r 为电压环谐振控制器比例系数, Q_u 为电压环准谐振调节器品质因数, ω_h 为陷波器需要滤除的谐波角频率, s 为拉普拉斯算子, h 为待抑制的谐波次数。

5. 根据权利要求1所述的基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法, 其特征在于, 步骤5中所述电流控制方程为:

$$U_d = (K_{pi} + \frac{K_{ri} s}{s^2 + 2Q_i \omega_0 s + (2\omega_0)^2})(I_d^* - (w_1 I_{Ld} + w_2 I_{cd})) + U_0 K_f$$

$$U_q = (K_{pi} + \frac{K_{ri} s}{s^2 + 2Q_i \omega_0 s + (2\omega_0)^2})(I_q^* - (w_1 I_{Lq} + w_2 I_{cq}))$$

其中, K_{pi} 为电流环比例控制系数, K_{ri} 为电流环谐振控制器比例系数, w_1 为电感电流的权重系数, w_2 为电容电流的权重系数, K_f 为电压前馈系数, Q_i 为电流环准谐振调节器品质因数, s 为拉普拉斯算子。

基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种微网控制方法,尤其是一种基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法。

背景技术

[0002] 近年来,随着新能源发电单元在电力系统的渗透率不断提升,与此同时传统集中式一次能源逐渐减少,系统的转动惯量逐渐减小,频率波动变大,且一次能源的间歇性特性更加剧了电网的频率波动,使得系统的频率稳定性问题日趋严峻。且随着分布式电源电网渗透率的提高,其在电网中的角色将发生变化,分布式电源将不再只是向电网提供电能,还应具备一定的电网电压和频率支撑能力,以稳定电网运行。然而目前基于电流源并网控制方式的分布式电源并不具备电压支撑能力,且并入不同电网结构时其稳定性和动稳态性能有较大差异,电网适应性较差。

[0003] 传统电力系统中,同步发电机组(Generator Set-Genset)的下垂特性以及转动惯量大等因素,在维持系统的电压和频率稳定方面起着关键作用。Genset平稳和调节系统频率的过程可以分为三个阶段:第一阶段为Genset的惯性稳频,即依靠Genset自身转动惯量抑制系统的快速频率波动;第二阶段为一次调频,即当频率波动量超出一定值通过改变原动机功率输入来调节频率;第三阶段为二次调频,即而当系统功率恢复平衡后,调整一次调频指令将频率控制在额定频率值,从而实现频率的无差控制。显然,分布式发电系统中以电力电子装置实现的分布式发电单元(以下简称DGU)若能模拟或者部分模拟Genset的上述特性,使其像Genset一样参与频率和电压的调节过程,就可以降低分布式电源对电网的不利影响,解决分布式电源大规模并网应用中的相关技术瓶颈问题。而能模拟或者部分模拟Genset频率电压控制特性的电力电子电源装置就被称为虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator,VSG)。VSG需要运行在两种模式下,并网和孤岛并联运行。

[0004] VSG并网运行时,需要对电网的电压和频率稳定性进行一定的支撑,并在电网频率异常的情况下做出限功率运行,孤岛并联运行时,需要向负载提供较高的电能质量。另外VSG需要运行在并网和孤岛两种模式下,当发生模式转换时,VSG应具有无缝切换能力。

[0005] 针对上述问题,国内外的专家学者们提出了一些方法,主要有:

[0006] 题为“具有转动惯量和阻尼自趋优的超越虚拟同步发电机方法”的中国发明专利申请说明书(CN105186554A)给出了一种根据转动惯量和阻尼自我调节来对电网频率差进行补偿控制,然而阻尼系数对稳态状态下的下垂特性有影响,控制上存在耦合,不利于参数设计。

[0007] 题为“应用于虚拟同步发电机的离并网控制方法及系统”的中国发明专利申请说明书(CN105207261A)公开的技术方案中,采用快速终端滑模控制策略对离/并网状态进行切换,可以使得电网电压与负载电压的误差值快速平稳趋近于零,但是没有给出电网电压和负载电压之间的频率和相位差控制问题。

[0008] 题为“一种基于虚拟同步发电机的解耦控制方法及装置”的中国发明专利申请说

说明书(CN105915140A)给出了一种电压电流的dq解耦控制方法,可以实现解耦,但是解耦特性依赖于状态变量的估计特性,且控制方法复杂。

[0009] 总之,现有VSG技术并网模式下阻尼特性与下垂特性不能实现解耦控制,离网并联模式下很难同时兼顾动态响应与稳态均流之间的关系,并离网切换存在过渡过程。

发明内容

[0010] 本发明要解决的技术问题为克服上述各种技术方案的局限性,针对VSG技术并网模式下的解耦控制与离网模式下的均衡控制,以及并离网模式切换下的过渡过程等问题,提供一种基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法。

[0011] 本发明的目的是这样实现的。本发明提供了一种基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法,主要步骤如下:

[0012] 步骤1,采样及坐标变换;

[0013] 所述采样包括采集以下数据:微网逆变器滤波电容电压 u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} ,微网逆变器桥臂侧电感电流 i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} ,微网逆变器并网点电网电压 e_a, e_b, e_c ;

[0014] 所述坐标变换包括对以下数据进行坐标变换:对微网逆变器滤波电容电压 u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 和桥臂侧电感电流 i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 分别进行单同步旋转坐标变换得到滤波电容电压的dq分量 U_{cd}, U_{cq} 和桥臂侧电感电流的dq分量 I_{Ld}, I_{Lq} ;

[0015] 步骤2,根据步骤1中得到的滤波电容电压的dq分量 U_{cd}, U_{cq} ,通过通用的微分离散化方程计算滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ;根据步骤1得到的桥臂侧电感电流的dq分量 I_{Ld}, I_{Lq} 和滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ,经过输出电流计算方程得到输出电流的dq分量 I_{od}, I_{oq} ;经过有功功率计算方程和无功功率计算方程得到平均有功功率P和平均无功功率Q;对微网逆变器并网点电网电压 e_a, e_b, e_c 经过锁相环环节得到电网角频率 ω_g ;

[0016] 步骤3,根据步骤2中得到的平均有功功率P、电网角频率 ω_g 和微网逆变器给定的有功功率指令 P_0 、微网逆变器给定有功功率指令 P_0 时的额定角频率 ω_0 ,经过功角控制方程及电网频率逻辑判断环节得到虚拟同步发电机的角频率 ω ,对 ω 积分得到虚拟同步发电机的矢量角 θ ;

[0017] 步骤4,根据步骤2中得到的平均无功功率Q和微网逆变器给定的无功功率指令 Q_0 、电压指令 U_0 ,经过无功控制方程得到虚拟同步发电机的端电压 U^* ;

[0018] 步骤5,先根据步骤4中得到的端电压 U^* 和步骤1中得到的滤波电容电压dq的分量 U_{cd}, U_{cq} ,通过电压控制方程得到电流指令信号 I_d^*, I_q^* ;再根据电流指令信号 I_d^*, I_q^* 、步骤1中的桥臂侧电感电流的dq分量 I_{Ld}, I_{Lq} 和步骤2得到的滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ,通过加权电流控制方程得到控制信号 U_d, U_q ;

[0019] 步骤6,将步骤5中得到的控制信号 U_d, U_q 经过单同步旋转坐标反变换得到三相桥臂电压控制信号 U_a, U_b, U_c ,再根据 U_a, U_b, U_c 生成开关管的PWM控制信号。

[0020] 优选地,步骤2中所述平均有功功率P和平均无功功率Q的计算步骤包括:

[0021] 步骤2.1,计算滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ;

[0022] 令滤波电容电压 U_{cd}, U_{cq} 的离散序列为 $U_{cd}(n), U_{cq}(n)$,滤波电容电流dq分量 I_{cd}, I_{cq} 的离散序列为 $I_{cd}(n), I_{cq}(n)$,则计算滤波电容电流的通用的微分离散化方程为:

$$[0023] \quad I_{cd}(n) = I_{cd}(n-1) + \frac{CT_s}{N} \sum_{k=0}^K k_{n-k} U_{cd}(n-k)$$

$$[0024] \quad I_{cq}(n) = I_{cq}(n-1) + \frac{CT_s}{N} \sum_{k=0}^K k_{n-k} U_{cq}(n-k)$$

[0025] 其中, $N = \sum_{k=0}^K k_{n-k}$, C 为滤波电容, T_s 为微网逆变器采样频率, K 为离散序列点数, n, k 为自然数, 即 $n=0, 1, 2, 3, 4, \dots, k=0, 1, 2, 3, 4, \dots$;

[0026] 根据上述方程可以求得滤波电容电流 I_{cd}, I_{cq} 的离散序列为 $I_{cd}(n), I_{cq}(n)$, 从而可得滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ;

[0027] 步骤2.2, 计算输出电流的dq分量 I_{od}, I_{oq} ;

[0028] 根据步骤2.1得到的滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} , 经过输出电流计算方程得到输出电流的dq分量 I_{od}, I_{oq} , 所述的输出电流计算方程为:

$$[0029] \quad I_{od} = I_{Ld} - I_{cd}$$

$$[0030] \quad I_{oq} = I_{Lq} - I_{cq}$$

[0031] 步骤2.3, 根据有功功率计算方程和无功功率计算方程计算平均有功功率 P 和平均无功功率 Q ;

[0032] 有功功率计算方程为:

$$[0033] \quad P = \left(\prod_h \frac{s^2 + \omega_h^2}{s^2 + 2Q_{pq}\omega_h s + \omega_h^2} \right) \cdot \frac{1.5}{\tau s + 1} \cdot (U_{cq} I_{oq} + U_{cd} I_{od})$$

[0034] 无功功率计算方程为:

$$[0035] \quad Q = \left(\prod_h \frac{s^2 + \omega_h^2}{s^2 + 2Q_{pq}\omega_h s + \omega_h^2} \right) \cdot \frac{1.5}{\tau s + 1} \cdot (U_{cd} I_{oq} - U_{cq} I_{od})$$

[0036] 其中, Q_{pq} 为功率计算方程品质因数, ω_h 为陷波器需要滤除的谐波角频率, s 为拉普拉斯算子, τ 为一阶低通滤波器的时间常数, h 为待抑制的谐波次数。

[0037] 优选地, 步骤3中所述功角控制方程为:

$$[0038] \quad \omega = \frac{mJ\omega_0 s + 1}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} \omega_0 + \frac{mD_2}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} \omega_g + \frac{m}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} (P_0 - P)$$

[0039] 其中, ω_0 为微网逆变器给定有功功率指令 P_0 时的额定角频率, m 为功角控制下垂系数, J 为模拟同步发电机组的虚拟转动惯量, s 为拉普拉斯算子, D_1 为微网逆变器频率反馈系数, D_2 为电网频率反馈系数;

[0040] 采用具有回差特性的电网频率逻辑判断环节为:

[0041] 当 $\omega_g \geq \omega_{g1}$ 时, 令 $D_1 = -D_2 < 0$, 即:

$$[0042] \quad \omega = \frac{mJ\omega_0 s + 1}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} \omega_0 - \frac{mD_1}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} \omega_g + \frac{m}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} (P_0 - P)$$

[0043] 当 $\omega_g < \omega_{g2}$ 时, 令 $\omega_0 = \omega_g, D_1 = -D_2 < 0$, 即:

$$[0044] \quad \omega = \omega_g + \frac{m}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} (P_0 - P)$$

[0045] 其中, ω_{g1} 为电网频率低阈值, ω_{g2} 为电网频率高返回值, $\omega_{g1} < \omega_{g2}$ 。

[0046] 优选地,步骤4中所述无功控制方程为:

$$[0047] \quad U^* = U_0 + n_q (Q_0 - Q)$$

[0048] 其中, U_0 为微网逆变器给定无功功率指令 Q_0 时的额定输出电容电压、 n_q 为无功-电压下垂系数。

[0049] 优选地,步骤5中所述电压控制方程为:

$$[0050] \quad I_d^* = (K_p + K_i/s + \sum_h \frac{K_r s}{s^2 + Q_u \omega_h s + (\omega_h)^2})(U^* - U_{cd})$$

$$[0051] \quad I_q^* = (K_p + K_i/s + \sum_h \frac{K_r s}{s^2 + Q_u \omega_h s + (\omega_h)^2})(0 - U_{cq})$$

[0052] 其中, K_p 为电压环比例控制系数、 K_i 为电压环积分控制系数、 K_r 为电压环谐振控制器比例系数、 Q_u 为电压环准谐振调节器品质因数、 ω_h 为陷波器需要滤除的谐波角频率、 s 为拉普拉斯算子、 h 为待抑制的谐波次数。

[0053] 优选地,步骤5中所述电流控制方程为:

$$[0054] \quad U_d = (K_{pi} + \frac{K_{ri} s}{s^2 + 2Q_i \omega_0 s + (2\omega_0)^2})(I_d^* - (w_1 I_{Ld} + w_2 I_{cd})) + U_0 K_f$$

$$[0055] \quad U_q = (K_{pi} + \frac{K_{ri} s}{s^2 + 2Q_i \omega_0 s + (2\omega_0)^2})(I_q^* - (w_1 I_{Lq} + w_2 I_{cq}))$$

[0056] 其中, K_{pi} 为电流环比例控制系数、 K_{ri} 为电流环谐振控制器比例系数、 w_1 为电感电流的权重系数、 w_2 为电容电流的权重系数、 K_f 为电压前馈系数、 Q_i 为电流环准谐振调节器品质因数、 s 为拉普拉斯算子。

[0057] 采用本发明后,对于采用虚拟同步发电机技术的微网逆变器,具备了如下优点:

[0058] 1、电网频率低的异常情况下可以实现限功率运行,且只需要改变外环功率指令给定方式,而需要改变电压双环控制器,减小了过渡过程的冲击;模式切换运行时只需改变外环功率指令给定方式,不需要改变电压双环控制器,减小了过渡过程的冲击,减小了无缝切换时间。

[0059] 2、虚拟阻尼不影响稳态下垂均分特性,与下垂特性分离控制与设计,相互解耦,提高了系统性能

[0060] 3、采用基于电容电流与桥臂侧电感电流加权控制方案,在输出电压动态性能与输出阻抗之间取得均衡,有利于总体性能的提高。

[0061] 4、抑制直流分量,且并网运行模式下具有较低的电流谐波畸变率。

[0062] 5、给出了一种通用微分离散化函数,可以根据不同的系统特性设计微分离散化函数,有利于提高微分离散化稳定性及灵活设计幅相特性。

附图说明

[0063] 图1是本发明的基于虚拟同步发电机的微网逆变器拓扑结构。

[0064] 图2是本发明的虚拟同步发电机的功率外环控制框图。

[0065] 图3是本发明的虚拟同步发电机的电压电流双环控制框图。

[0066] 图4是本发明的基于虚拟同步发电机的微网逆变器等效数学模型。

具体实施方式

[0067] 图1是本发明的实施例中基于虚拟同步发电机的微网逆变器拓扑结构。包括直流源U_{dc}、直流侧滤波电容C_{dc}、三相半桥逆变电路、LC滤波器，直流侧滤波电容C_{dc}并联在所述直流源U_{dc}的两端，直流源U_{dc}的两个电源输出端分别与三相全桥逆变电路的两个输入端相连，三相全桥逆变电路的三相输出端与LC滤波器的三相输入端一一对应相连，LC滤波器的三相输出端分别与Dyn11型变压器的三角型侧相连接，变压器星型侧与三相电网E_a、E_b、E_c相连，电网相电压有效值为E，L_g为三相电网感抗对应的电感，LC滤波器由桥臂侧电感L和滤波电容C组成。

[0068] 下面结合附图对本发明的优选方式作进一步详细的描述。

[0069] 具体的，本实施例中的参数如下：直流母线电压U_{dc}为550V，输出交流线电压有效值为380V/50Hz，额定容量为100kW，微网逆变器桥臂侧电感为L=0.5mH，微网逆变器滤波电容为C=200μF。变压器为100kVA270/400V Dyn11型变压器，微网逆变器采样频率f_s为10kHz，因而T_s=100μs。

[0070] 参见图1、2、3和4，本发明提供的一种基于虚拟同步发电机的微网逆变器均衡控制方法，主要步骤如下：

[0071] 步骤1，采样及坐标变换；

[0072] 所述采样包括采集以下数据：微网逆变器滤波电容电压u_{ca}，u_{cb}，u_{cc}，微网逆变器桥臂侧电感电流i_{La}，i_{Lb}，i_{Lc}，微网逆变器并网点电网电压e_a，e_b，e_c。

[0073] 所述坐标变换包括对以下数据进行坐标变换：对微网逆变器滤波电容电压u_{ca}，u_{cb}，u_{cc}和桥臂侧电感电流i_{La}，i_{Lb}，i_{Lc}，分别进行单同步旋转坐标变换得到滤波电容电压dq的分量U_{cd}，U_{cq}和桥臂侧电感电流dq的分量I_{Ld}，I_{Lq}。

[0074] 步骤2，根据步骤1中得到的滤波电容电压的dq分量U_{cd}，U_{cq}，通过通用的微分离散化方程计算滤波电容电流的dq分量I_{cd}，I_{cq}；根据步骤1得到的桥臂侧电感电流的dq分量I_{Ld}，I_{Lq}和滤波电容电流的dq分量I_{cd}，I_{cq}，经过输出电流计算方程得到输出电流的dq分量I_{od}，I_{oq}；经过有功功率计算方程和无功功率计算方程得到平均有功功率P和平均无功功率Q；对微网逆变器并网点电网电压e_a，e_b，e_c经过锁相环环节得到电网角频率ω_g。

[0075] 步骤2.1，计算滤波电容电流的dq分量I_{cd}，I_{cq}；

[0076] 令滤波电容电压U_{cd}，U_{cq}的离散序列为U_{cd}(n)，U_{cq}(n)，滤波电容电流I_{cd}，I_{cq}的离散序列为I_{cd}(n)，I_{cq}(n)，则计算滤波电容电流的通用的微分离散化方程为：

$$[0077] \quad I_{cd}(n) = I_{cd}(n-1) + \frac{CT_s}{N} \sum_{k=0}^K k_{n-k} U_{cd}(n-k)$$

$$[0078] \quad I_{cq}(n) = I_{cq}(n-1) + \frac{CT_s}{N} \sum_{k=0}^K k_{n-k} U_{cq}(n-k)$$

[0079] 其中， $N = \sum_{k=0}^K k_{n-k}$ ，C为滤波电容，T_s为微网逆变器采样频率，K为离散序列点数，n，k

为自然数，即n=0,1,2,3,4,……,k=0,1,2,3,4,……。

[0080] 根据上述方程可以求得滤波电容电流I_{cd}，I_{cq}的离散序列为I_{cd}(n)，I_{cq}(n)，从而可得滤波电容电流I_{cd}，I_{cq}。

[0081] 通用离散化方程的参数选择综合考虑差分方程稳定性条件,微分的频率响应以及DSP计算量。在本实施例中,取 $N=7, K=2, k_n=4, k_{n-1}=2, k_{n-2}=1, \circ$

[0082] 步骤2.2,计算输出电流的dq分量 I_{od}, I_{oq} ;

[0083] 根据步骤2.1得到的滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ,经过输出电流计算方程得到输出电流的dq分量 I_{od}, I_{oq} ,所述的输出电流计算方程为:

$$[0084] \quad I_{od} = I_{Ld} - I_{cd}$$

$$[0085] \quad I_{oq} = I_{Lq} - I_{cq}$$

[0086] 步骤2.3,根据有功功率计算方程和无功功率计算方程计算平均有功功率 P 和平均无功功率 Q ;

[0087] 有功功率计算方程为:

$$[0088] \quad P = \left(\prod_h \frac{s^2 + \omega_h^2}{s^2 + 2Q_{pq}\omega_h s + \omega_h^2} \right) \cdot \frac{1.5}{\tau s + 1} \cdot (U_{cq}I_{oq} + U_{cd}I_{od})$$

[0089] 无功功率计算方程为:

$$[0090] \quad Q = \left(\prod_h \frac{s^2 + \omega_h^2}{s^2 + 2Q_{pq}\omega_h s + \omega_h^2} \right) \cdot \frac{1.5}{\tau s + 1} \cdot (U_{cd}I_{oq} - U_{cq}I_{od})$$

[0091] 其中, Q_{pq} 为功率计算方程品质因数、 ω_h 为陷波器需要滤除的谐波角频率、 s 为拉普拉斯算子、 τ 为一阶低通滤波器的时间常数, h 为待抑制的谐波次数。

[0092] 在本实施例中,考虑主要滤除的谐波次数为2次和3次谐波,因此选取 $h=2, 3$,此时 $\omega_h=628.3186\text{rad/s}, 942.4779\text{rad/s}$ 。一阶低通滤波器主要考虑滤除高次谐波,且不影响动态响应,一般取 $\tau \leq 2e^{-3}\text{s}$,本例取值 $\tau=1.5e^{-4}\text{s}$;品质因数 Q_{pq} 主要考虑陷波器的滤波效果,在本例中,选取 $Q_{pq}=0.5$ 。

[0093] 步骤3,根据步骤2中得到的平均有功功率 P 、电网角频率 ω_g 和微网逆变器给定的有功功率指令 P_0 、微网逆变器给定有功功率指令 P_0 时的额定角频率 ω_0 ,经过功角控制方程及电网频率逻辑判断环节得到虚拟同步发电机的角频率 ω ,对 ω 积分得到虚拟同步发电机的矢量角 θ 。

[0094] 其中,功角控制方程为:

$$[0095] \quad \omega = \frac{mJ\omega_0 s + 1}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} \omega_0 + \frac{mD_2}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} \omega_g + \frac{m}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} (P_0 - P)$$

[0096] 其中, ω_0 为微网逆变器给定有功功率指令 P_0 时的额定角频率, m 为功角控制下垂系数, J 为模拟同步发电机组的虚拟转动惯量, s 为拉普拉斯算子, D_1 为微网逆变器频率反馈系数, D_2 为电网频率反馈系数。

[0097] 采用具有回差特性的电网频率逻辑判断环节为:

[0098] 当 $\omega_g \geq \omega_{g1}$ 时,令 $D_1 = -D_2 < 0$,即:

$$[0099] \quad \omega = \frac{mJ\omega_0 s + 1}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} \omega_0 - \frac{mD_1}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} \omega_g + \frac{m}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} (P_0 - P)$$

[0100] 当 $\omega_g < \omega_{g2}$ 时,令 $\omega_0 = \omega_g, D_1 = -D_2 < 0$,即:

$$[0101] \quad \omega = \omega_g + \frac{m}{mJ\omega_0 s + 1 - mD_1} (P_0 - P)$$

[0102] 其中, ω_{g1} 为电网频率低阈值, ω_{g2} 为电网频率高返回值, $\omega_{g1} < \omega_{g2}$ 。

[0103] 功角控制方程表明了微网逆变器有功功率下垂曲线关系、虚拟惯量大小和阻尼大小。其中, 虚拟惯量标明了系统频率的变化率, 为了保证系统频率变化平稳, 需要有较大的虚拟惯量; 然而虚拟惯量相当于在系统中加入了一阶惯性环节, 太大的虚拟惯量有可能导致系统的不稳定。因而参数选择需要折中处理。为保证系统稳定性, 在本实施例中, 惯性时间常数范围在 $\tau_{\text{virtual}} = J \omega_0 m \leq 2e^{-3}s$; 功角控制方程中的有功功率下垂曲线关系包括三个系数, 功角控制下垂系数 m 表示下垂曲线的斜率, 取值原则为100%的有功功率变化时, 频率变化0.5Hz以内; 给定有功功率指令 P_0 和相对应的额定角频率 ω_0 表示下垂曲线的位置关系, 主要考虑微网逆变器输出有功功率为 P_0 时, 其输出频率大小。

[0104] 在本实施例中, 功角控制下垂系数取值为 $m = \frac{0.4 \cdot 2\pi}{100} \text{rad/kW} = 0.025 \text{rad/kW}$, 根据惯性时间常数取值原则取 $\tau_{\text{virtual}} = J \omega_0 m = 1.5e^{-3}s$, 可得 $J = 0.2 \text{kg} \cdot \text{m}^2$, 为保证控制运行时能量不流向直流侧, 给定有功功率指令取值为 $P_0 = 1 \text{kW}$, 此时对应的额定角频率取值为 $\omega_0 = 314.1593 \text{rad/s}$ 。

[0105] 具有回差特性的电网频率逻辑判断环节表明了功率外环调节器频率补偿特性与限功率运行特性的切换逻辑关系。当电网频率大于一定值时, 微网逆变器调节功率输出来稳定电网频率波动, 当电网频率低于一定值超出微网逆变器功率调节范围时, 微网逆变器应该限功率运行。根据运行的电网频率波动范围以及微网逆变器功率调节范围以及下垂系数选取原则来选取电网频率逻辑判断的逻辑值。在本实施例中, 选择 $\omega_{g1} = 49.2 \text{Hz}$, $\omega_{g2} = 49.5 \text{Hz}$ 。 D_1, D_2 表明了外环功率环的阻尼特性, 根据上述方程基于虚拟同步发电机的微网逆变器数学模型如图4所示, 进而可得有功功率传递函数为:

$$P = \frac{mK_s}{mJ\omega_0 s^2 + (1 - mD_1)s + mK_s} P_0 + \frac{K_s(mJ\omega_0 s + 1)}{mJ\omega_0 s^2 + (1 - mD_1)s + mK_s} \omega_0 - \frac{K_s(mJ\omega_0 ms + 1)}{J\omega_0 s^2 + (1 - mD_1)s + mK_s} \omega_g$$

其中, $K_s = \frac{3E^2}{X}$ 为功角传递函数, E 为电网相电压有效值, X 为微网逆变器每相等效输出阻抗。在本实施例中, 微网逆变器的等效输出阻抗为额定阻抗的5%, 因而 K_s 等效为 $K_s \approx 20 \times 100 \text{kW}$ 。

[0106] 根据控制系统二阶振荡方程可得系统的阻尼为 $\zeta = \frac{(\frac{1}{m} - D_1)}{2\sqrt{J\omega_0 K_s}}$, 其中 $\zeta > 0$, 将 m, J, ω_0, K_s 带入可得 D_1 的取值范围为 $D_1 < 40$, 在本实施例中, 取 $\zeta = 0.7$, 则 $D_1 = -15640, D_2 = 15640$ 。

[0107] 步骤4, 根据步骤2中得到的平均无功功率 Q 和微网逆变器给定的无功功率指令 Q_0 、电压指令 U_0 , 经过无功控制方程得到虚拟同步发电机的端电压 U^* 。

[0108] 无功控制方程为:

$$[0109] \quad U^* = U_0 + n_q (Q_0 - Q)$$

[0110] 其中, U_0 为微网逆变器给定无功功率指令 Q_0 时的额定输出电容电压、 n_q 为无功-电压下垂系数。

[0111] 无功-电压下垂系数 n_q 取值原则为100%的无功功率变化时, 电压幅值变化在2%之内; 给定无功功率指令 Q_0 和相对应的额定输出电容电压 U_0 表示下垂曲线的位置关系, 主要

考虑微网逆变器输出无功功率为 Q_0 时,其输出电压大小。

[0112] 在本实施例中,无功-电压下垂系数取值为 $n_q = \frac{2\% \cdot 380}{100} \text{V/kW} = 0.076 \text{V/kW}$,给定无功功率指令 Q_0 考虑系统输出无功功率为 $Q_0 = 0$,此时对应的额定输出电容电压 $U_0 = 380 \text{V}$ 。

[0113] 步骤5,先根据步骤4中得到的端电压 U^* 和步骤1中得到的滤波电容电压dq的分量 U_{cd}, U_{cq} ,通过电压控制方程得到电流指令信号 I_d^*, I_q^* ;再根据电流指令信号 I_d^*, I_q^* 、步骤1中的桥臂侧电感电流的dq分量 I_{Ld}, I_{Lq} 和步骤2得到的滤波电容电流的dq分量 I_{cd}, I_{cq} ,通过加权电流控制方程得到控制信号 U_d, U_q 。其中,电压控制方程为:

$$[0114] \quad I_d^* = (K_p + K_i/s + \sum_h \frac{K_r s}{s^2 + Q_u \omega_h s + (\omega_h)^2})(U^* - U_{cd})$$

$$[0115] \quad I_q^* = (K_p + K_i/s + \sum_h \frac{K_r s}{s^2 + Q_u \omega_h s + (\omega_h)^2})(0 - U_{cq})$$

[0116] 其中, K_p 为电压环比例控制系数、 K_i 为电压环积分控制系数、 K_r 为电压环谐振控制器比例系数, Q_u 为电压环准谐振调节器品质因数, ω_h 为陷波器需要滤除的谐波角频率, s 为拉普拉斯算子, h 为待抑制的谐波次数。

[0117] 电压控制方程中的参数主要考虑控制系统的稳定性和动稳态性能;在本实施例中,取 $K_p = 0.03, K_i = 0.8$,准谐振调节器主要考虑消除系统中的奇次谐波,取 $h = 3, 5, 7, 9, 11$,因而角频率分别等于 $\omega_h = 942.5 \text{rad/s}, 1570.8 \text{rad/s}, 2199.1 \text{rad/s}, 2827.4 \text{rad/s}, 3455.8 \text{rad/s}$ 。

[0118] 品质因数 Q_u 主要考虑谐振调节器的增益和稳定性,在本例中,选取 $Q_u = 0.7$;准谐振控制器比例系数综合考虑电压环的动稳态控制性能和系统稳定性,在本例中,选取 $K_r = 100$ 。

[0119] 电流控制方程为:

$$[0120] \quad U_d = (K_{pi} + \frac{K_{ri} s}{s^2 + 2Q_i \omega_0 s + (2\omega_0)^2})(I_d^* - (w_1 I_{Ld} + w_2 I_{cd})) + U_0 K_f$$

$$[0121] \quad U_q = (K_{pi} + \frac{K_{ri} s}{s^2 + 2Q_i \omega_0 s + (2\omega_0)^2})(I_q^* - (w_1 I_{Lq} + w_2 I_{cq}))$$

[0122] 其中, K_{pi} 为电流环比例控制系数, K_{ri} 为电流环谐振控制器比例系数, w_1 为电感电流的权重系数, w_2 为电容电流的权重系数, K_f 为电压前馈系数, Q_i 为电流环准谐振调节器品质因数, s 为拉普拉斯算子。

[0123] 电流控制方程中的参数主要考虑控制系统的阻尼特性和直流分量抑制能力;在本实施例中,取 $K_{pi} = 0.05$,准谐振调节器主要考虑消除系统中的直流分量,取 $h = 1$,因而角频率等于 $\omega_h = 314.15 \text{rad/s}$ 。

[0124] 品质因数 Q_i 主要考虑谐振调节器的增益和稳定性,在本例中,选取 $Q_i = 0.7$;准谐振控制器比例系数综合考虑电流环的直流分量抑制能力和系统稳定性,在本例中,选取 $K_{ri} = 50$ 。

[0125] 电感电流与电容电流加权反馈控制环节主要考虑微网逆变器孤岛运行输出电压的动态响应与并联均流之间的均衡。在本实施例中,取 $w_1 = 0.3, w_2 = 0.7$ 。

[0126] 步骤6,将步骤5中得到的控制信号 U_d, U_q 经过单同步旋转坐标反变换得到三相桥臂电压控制信号 U_a, U_b, U_c ,再根据 U_a, U_b, U_c 生成开关管的PWM控制信号。

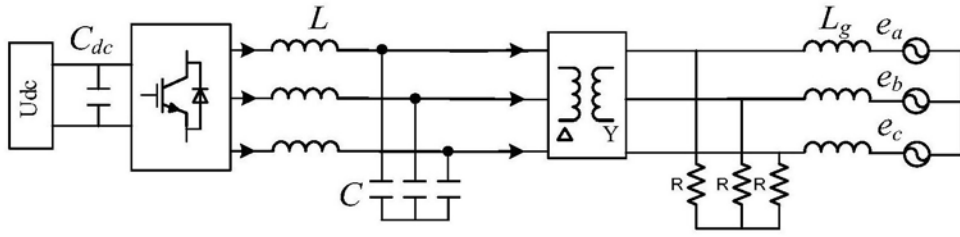


图1

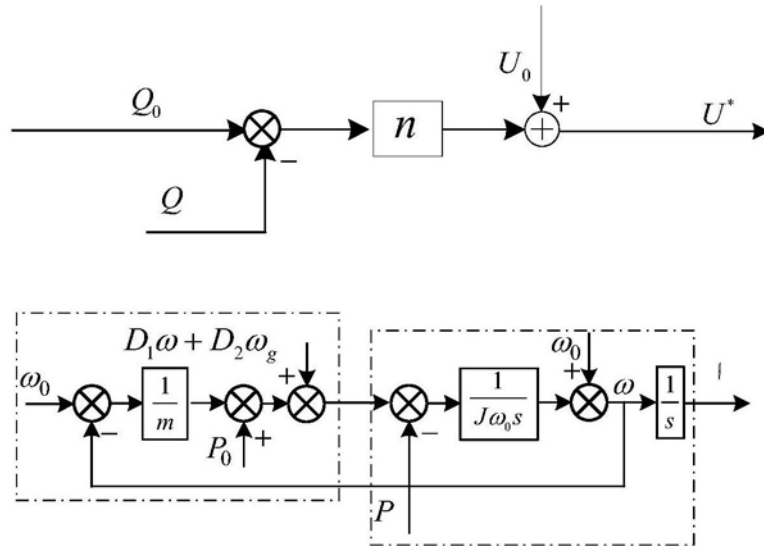


图2

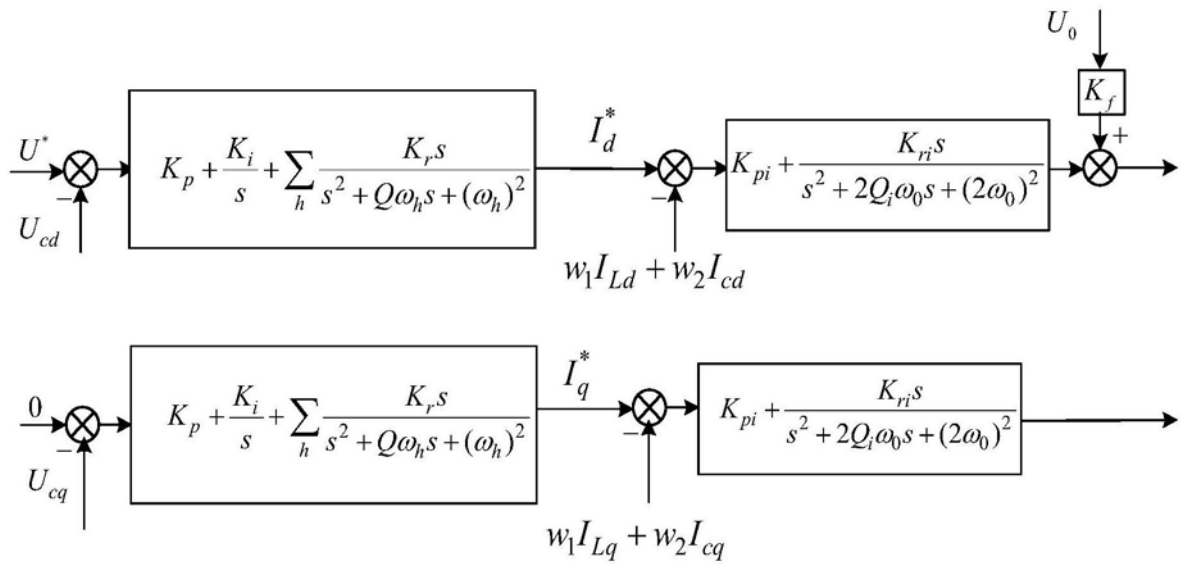


图3

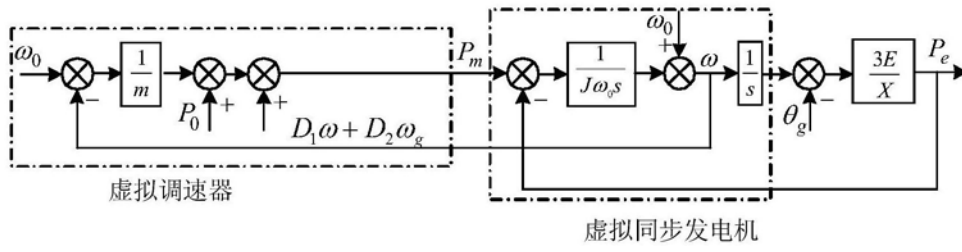


图4