



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105914778 B

(45)授权公告日 2019.02.05

(21)申请号 201610244425.6

(22)申请日 2016.04.19

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 105914778 A

(43)申请公布日 2016.08.31

(73)专利权人 东南大学  
地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼2号

(72)发明人 王建华 顾彬仕 季振东

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所  
(普通合伙) 32204

代理人 窦贤宇

(51)Int.Cl.  
H02J 3/38(2006.01)  
H02J 3/48(2006.01)

(56)对比文件

CN 105006834 A,2015.10.28,

CN 105006834 A,2015.10.28,

CN 105207261 A,2015.12.30,

吴恒等.虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计.《中国电机工程学报》.2015,第35卷(第24期),

郑志曜等.组合式三相逆变器同步控制方法.《农业工程学报》.2015,第31卷(第5期),

Salvatore D Arco等.Control system tuning and stability analysis of Virtual Synchronous Machines.《Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE》.2013,

审查员 方蕾

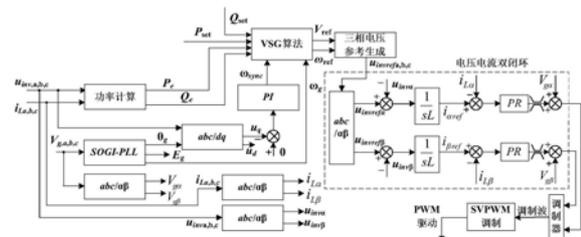
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54)发明名称

基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法

(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多环路控制方法,包括功率控制外环和电压电流控制内环,所述功率控制外环包括如下步骤:测量逆变器输出侧的三相电压和电流,根据瞬时功率理论计算有功功率和无功功率,再通过同步电机的有功-频率方程、无功频率方程、转矩惯性方程和电磁暂态方程进行计算调节,得到输出电压的幅值和相角给定值,然后通过电压电流双环进行调制。本发明能够很好地实现电压大小和频率的无静差控制,输出有功和无功功率能够人为精确控制,兼具V/F和PQ控制的特性;当电网发生故障时,本发明控制方法可以模拟同步发电机的一次调频、一次调压和惯性特性,参与电网调节,提供频率和电压支撑,有助于电网的稳定。



1. 一种基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法,其特征在于,包括功率控制外环和电压电流控制内环,所述功率控制外环包括如下步骤:测量逆变器输出侧的三相电压和电流,根据瞬时功率理论计算有功功率和无功功率,再通过同步电机的有功-频率方程、无功电压方程、转矩惯性方程和电磁暂态方程进行计算调节,得到输出电压的幅值和相角给定值,然后通过电压电流双环进行调制;

所述电压电流控制内环包括如下步骤:功率控制外环得出的电压的幅值和相角指令值合成三相参考电压经过三相静止坐标系转换到两相静止坐标系后作为输入电压外环的给定值与检测的电压做比较,随后作为电流环给定值与电流检测值进行比较,再通过PR调节,最后与转换到两相静止坐标系下的电网电压值进行比较后输出调制波信号产生PWM开关信号控制逆变器输出指定电压信号;

测量电网电压,通过基于二阶广义积分的锁相环得到电压幅值、相角及角频率,相角用于逆变器输出电压从三相静止坐标系到两相旋转坐标系的转换计算,转换得到的q轴电压分量 $u_q$ 和0比较后误差经过PI调节器进行调节可以得到角频率的修正量 $\omega_{sync}$ ,用于并网时的电压同步过程,角频率输入VSG算法进行计算。

2. 如权利要求1所述的基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法,其特征在于,在并网时,改变功率指定值,以实现和电网的功率交换,在电网电压频率和大小变化时,功率控制环可自主调节输出功率大小给予电网一定的频率和电压支撑。

3. 如权利要求2所述的基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法,其特征在于,根据负载情况的不同,自动调节输出电压的幅值和频率,模拟同步发电机的调压调频功能,在并网时能参与电网调节,给予电网一定的有功和无功支撑。

4. 如权利要求3所述的基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法,其特征在于,所述有功-频率方程、无功电压方程分别为:

$$P_n = P_m + k_p (\omega_m - \omega_n), Q_n = Q_m + k_q (U_m - U_n)$$

式中, $\omega_m$ 、 $P_m$ 为工作点m处的角频率和有功功率, $\omega_n$ 、 $P_n$ 为工作点n处的角频率和有功功率, $Q_n$ 、 $U_n$ 为工作点n处的无功功率和电压, $Q_m$ 、 $U_m$ 为工作点m处的无功功率和电压, $k_q$ 、 $k_p$ 为系数。

5. 如权利要求4所述的基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法,其特征在于,所述同步电机的转矩惯性方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0)$$

其中,J为同步发电机的转动惯量; $\omega$ 为电气角速度; $\omega_0$ 为电网同步角速度; $T_m$ 、 $T_e$ 和 $T_d$ 分别为同步发电机的机械、电磁和阻尼转矩;D为阻尼系数。

## 基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及微网逆变器的控制技术,尤其是一种基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法。

### 背景技术

[0002] 随着新能源的普及,传统发电机发电在能源中所占的比例在逐步降低。目前的电力系统系基于同步发电机电压源并联组网,采用集中调度管理运行;而目前几乎主流的新能源商用并网变流器均视电网为主机,本身为从机,控制自身为电流源方式并网。

[0003] 由于这种基于变流器的并网发电设备随机性接入,种类数目繁多,尤其是分布式发电场合缺乏类似常规机组的调度手段,其无法主动向系统提供支撑,在电网发生故障时所受影响比较大。

[0004] 因此,在新能源高渗透率场合,系统频率稳定、无功倒送等潜在问题已经引起业界关注。

### 发明内容

[0005] 有鉴于此,提供一种基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法,以解决现有技术存在的上述问题。

[0006] 为解决上述技术问题,提供的技术方案为:一种基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法,包括功率控制外环和电压电流控制内环,所述功率控制外环包括如下步骤:测量逆变器输出侧的三相电压和电流,根据瞬时功率理论计算有功功率和无功功率,再通过同步电机的有功-频率方程、无功电压方程、转矩惯性方程和电磁暂态方程进行计算调节,得到输出电压的幅值和相角给定值,然后通过电压电流双环进行调制。

[0007] 优选的,所述电压电流控制内环包括如下步骤:功率控制外环得出的电压的幅值和相角指令值合成三相参考电压经过三相静止坐标系转换到两相静止坐标系后作为输入电压外环的给定值与检测的电压做比较,随后作为电流环给定值与电流检测值进行比较,再通过PR调节,最后与转换到两相静止坐标系下的电网电压值进行比较后输出调制波信号产生PWM开关信号控制逆变器输出指定电压信号。

[0008] 优选的,在并网时,改变功率指定值,以实现和电网的功率交换,在电网电压频率和大小变化时,功率控制环可自主调节输出功率大小给予电网一定的频率和电压支撑。

[0009] 优选的,根据负载情况的不同,自动调节输出电压的幅值和频率,模拟同步发电机的调压调频功能,在并网时能参与电网调节,给予电网一定的有功和无功支撑。

[0010] 优选的,所述有功-频率方程、无功电压方程分别为:

$$[0011] \quad P_n = P_m + k_p (\omega_m - \omega_n), Q_n = Q_m + k_q (U_m - U_n)$$

[0012] 式中,  $\omega_m$ 、 $P_m$  为工作点m处的角频率和有功功率,  $\omega_n$ 、 $P_n$  为工作点n处的角频率和有功功率,  $Q_n$ 、 $U_n$  为工作点n处的无功功率和电压,  $Q_m$ 、 $U_m$  为工作点m处的无功功率和电压,  $k_q$ 、 $k_p$  为系数。

[0013] 优选的,所述同步电机的转矩惯性方程为:

$$[0014] \quad J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0)$$

[0015] 其中,J为同步发电机的转动惯量; $\omega$ 为电气角速度; $\omega_0$ 为电网同步角速度; $T_m$ 、 $T_e$ 和 $T_d$ 分别为同步发电机的机械、电磁和阻尼转矩;D为阻尼系数。

[0016] 优选的,还包括:测量电网电压,通过基于二阶广义积分的锁相环可以得到电压幅值、相角及角频率,相角用于逆变器输出电压从三相静止坐标系到两相旋转坐标系的转换计算,转换得到的q轴电压分量 $u_q$ 和0比较后误差经过PI调节器进行调节可以得到角频率的修正量 $\omega_{sync}$ ,用于并网时的电压同步过程,角频率输入VSG算法进行计算。

[0017] 实施本发明,可获得的有益效果是:本发明能够很好地实现电压大小和频率的无静差控制,输出有功和无功功率能够人为精确控制,兼具V/F和PQ控制的特性;当电网发生故障时,本发明控制方法可以模拟同步发电机的一次调频、一次调压和惯性特性,参与电网调节,提供频率和电压支撑,有助于电网的稳定;通用电压电流双环的采用有助于电压波形的改善,提高功率因数,提供良好的电能质量;电压电流双环控制方法在 $\alpha\beta$ 坐标系下实现,有利于电网电压不平衡下的控制且控制器实现方便,此外在 $\alpha\beta$ 坐标系下可以同时控制正序和负序,无需序分量检测,简化了控制系统。

## 附图说明

[0018] 图1a和图1b分别是同步电机的有功-频率关系图和无功电压函数关系图。

[0019] 图2是三项逆变器的拓扑图。

[0020] 图3是总体控制结构框图。

[0021] 图4a和图4b分别是有功环和无功环的结构框图。

## 具体实施方式

[0022] 如图2所示,该图为三相逆变器拓扑结构。其中, $V_{in}$ 为输入侧直流电压; $Q_1 \sim Q_6$ 为开关管; $e_a, e_b, e_c$ 为三相桥臂输出电压; $i_a, i_b, i_c$ 为三相电感电流; $L_1$ 、C和 $L_2$ 为输出LCL滤波器; $V_{Ca}, V_{Cb}, V_{Cc}$ 为三相电容电压; $V_{ga}, V_{gb}, V_{gc}$ 为电网电压。

[0023] 转到图3,描述总体控制框图,其主要包括功率计算模块、锁相环模块、坐标转换模块、PI调节器、VSG算法模块,电压电流双闭环模块和PWM调制模块。

[0024] 首先由电压和电流传感器检测输出侧三相电容电压和电感上的电流 $u_{inv,a,b,c}$ ,  $i_{La,b,c}$ 。检测出的输出侧电压和电流量用于两个模块,一个是功率计算模块,一个是电压电流双闭环控制模块。

[0025] 其中,功率计算模块采用瞬时功率理论进行计算,得出逆变器输出的有功功率 $P_e$ 和无功功率 $Q_e$ 。这两个功率等效为同步发电机中的电磁功率。 $P_{set}$ 和 $Q_{set}$ 为有功功率和无功功率的设定值,等效为同步发电机中的额定功率值,人为可变。计算得出的逆变器输出侧功率值和人为可设定的功率指令值一起输入VSG算法模块进行计算。VSG算法模块根据前述同步发电机一次调频、一次调压和惯性特性公式进行计算,得出输出电压的幅值和角频率两个指令值。

[0026] 电网电压 $V_{ga,b,c}$ 由电压霍尔测量得到。通过基于二阶广义积分的锁相环可以得到

电压幅值 $E_g$ 、相角 $\theta_g$ 及角频率 $\omega_g$ 。相角用于逆变器输出电压从三相静止坐标系到两相旋转坐标系的转换计算。转换得到的q轴电压分量 $u_q$ 和0比较后误差经过PI调节器进行调节可以得到角频率的修正量 $\omega_{sync}$ ，用于并网时的电压同步过程。角频率输入VSG算法进行计算。

[0027] VSG算法利用功率设定值、逆变器输出侧功率计算值以及电网电压角频率和修正角频率计算得出逆变器输出电压的幅值 $V_{ref}$ 和角频率指令值 $\omega_{ref}$ 。两个指令值和检测到的输出电压和电流值一起通过常用电压电流双闭环模块计算产生调制波信号，再通过SVPWM环节产生PWM驱动信号控制开关管的通断，控制逆变器输出指定电压信号。

[0028] 图4a和图4b所示为具体功率控制环的调节控制框图。基于有功-频率，无功-电压的关系分为有功环和无功环两个部分。有功环调节产生相角值指定信号，无功环调节产生电压幅值信号。

[0029] 其中，有功环的输入为功率设定值 $P_{set}$ 、输出侧计算的有功 $P_e$ 和额定角频率值 $\omega_n$ 。所有的计算都依据前述转矩方程和一次调频方程。有功设定值和输出功率计算值与额定角频率的商为转矩值， $D_p$ 为下垂系数，相当于前述一次线性方程中的 $k_p$ ； $J$ 为转动惯量。通过计算得到角频率指令值 $\omega$ ，积分过后得到相角指令值 $\theta$ 。

[0030] 无功环的计算类比于有功环。输入为无功设定值 $Q_{set}$ 、计算的输出侧无功 $Q_e$ 和额定电压有效值 $U_n$ 。所有计算依据前述一次调压方程和类比转矩方程。 $D_q$ 为下垂系数，相当于前述一次线性方程中的 $k_q$ ； $K$ 为电磁特性系数，类比于转动惯量 $J$ 。通过计算得到输出电压的指令值 $E_m$ 。

[0031] 当需要并网时，有功环的角频率输入值切换为加入修正量后的新值，无功环的电压输入命令值变为电网电压幅值，以此来完成同步并网的过程。

[0032] 图3中虚线框中的部分为通用电压电流双闭环控制框图。电压 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴指令值分别与测量值进行比较，输出作为电流内环 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴分量的给定值。电流内环给定值与实际测量值比较后，经过PR调节器，最后与转换到两相静止坐标系下的电网电压值进行比较输出最后的调制信号，经过SVPWM环节产生驱动信号。

[0033]  $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴电压的指令值来自于功率控制环的输出电压指令，功率控制环的输出相角指令值用于电压电流双闭环中坐标变换时的计算。

[0034] 本发明由功率控制环和电压电流双闭环组成了基于虚拟同步发电机的微网逆变器多环路控制方法，可以模拟同步发电机的一次调频调压、惯性和电磁暂态特性，和实际同步发电机的运行特性相近，可以参与电网的调节，给予电网一定的电压和频率支撑。在电网电压幅值和频率有干扰波动时，通过功率控制环能够自主调节逆变器的输出有功和无功，支撑电网，模拟传统发电机的外特性，内部控制参数灵活可变，可以适应不同需求场合。

[0035] 同时，功率控制环中与传统同步发电机相对应的转动惯量、输出阻抗等参数在程序中是人为可变的，相较于传统发电机的参数受实际机械结构限制固定，本发明所述模拟同步电机的参数设置灵活可变，可以满足不同场合不同负载的需求。功率环所输出的电压幅值和相角指令不是直接用于产生开关信号，而是经过电压电流双环进一步调制后生成开关信号，有助于改善电压电流波形，提高功率因数，提供较好的电能质量。

[0036] 电压电流双闭环是在两相静止坐标系下进行控制的，有利于电网电压不平衡情况下的控制。在两相静止坐标系下，可以同时控制正序和负序，无需序分量检测，简化了控制系统，控制器的实现更为方便，便于系统的设计，增加了灵活性，可以运用到更多场合。

[0037] 通过虚拟同步发电机 (Virtual Synchronous Generator, VSG) 技术, 即基于电力电子变流器的分布式电源从外特性上模拟或部分模拟同步发电机的频率及电压控制特性, 从而改善分布式系统的稳定性并主动参与电网频率电压调节, 非常契合新能源接入主动配电网的需求。不仅如此, 虚拟同步发电机理论上在底层不需要通信网络即可完成通信交互, 即利用电压频率及幅值信息, 基于自同步机理完成装置同步、功率分配及平衡。从而主动配电网得到大大简化, 并可以专注于高级应用。

[0038] 以上详细描述了本发明的优选实施方式, 但是, 本发明并不限于上述实施方式中的具体细节, 在本发明的技术构思范围内, 可以对本发明的技术方案进行多种等同变换, 这些等同变换均属于本发明的保护范围。

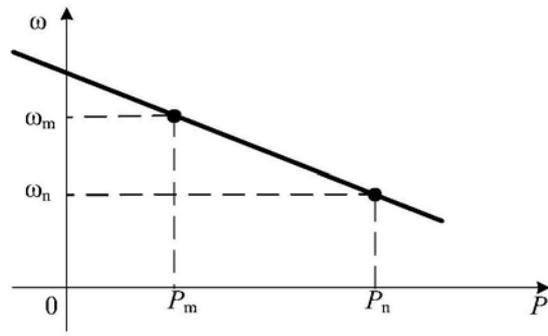


图1a

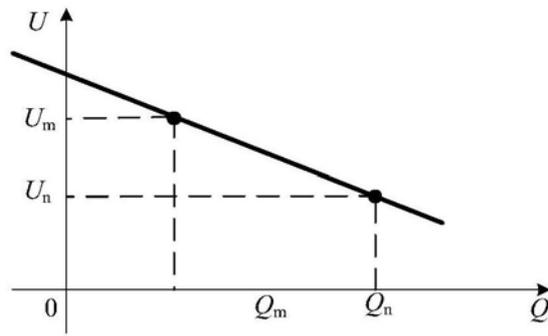


图1b

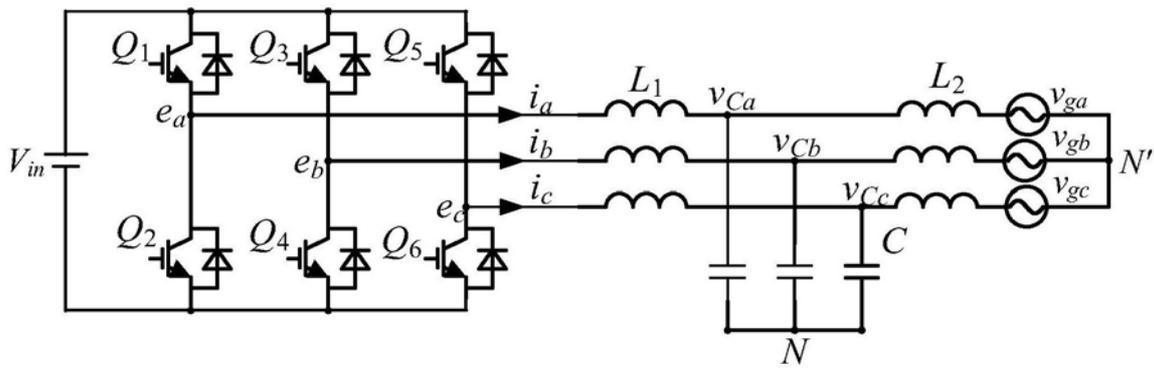


图2

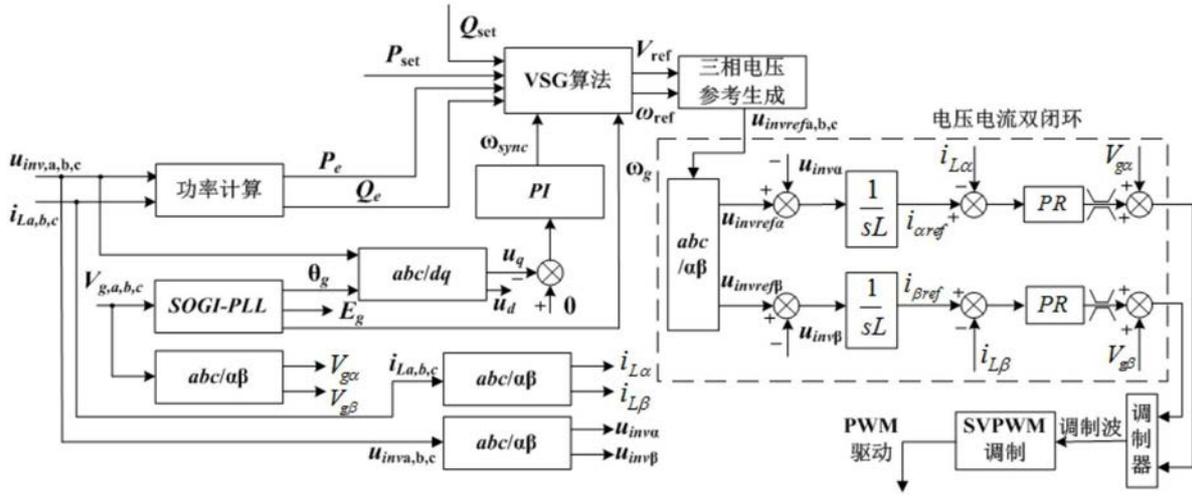


图3

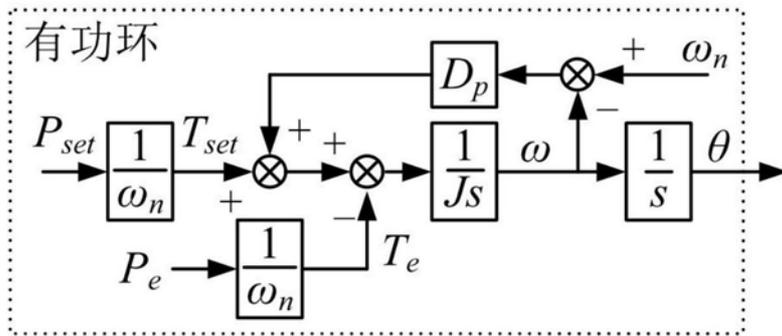


图4a

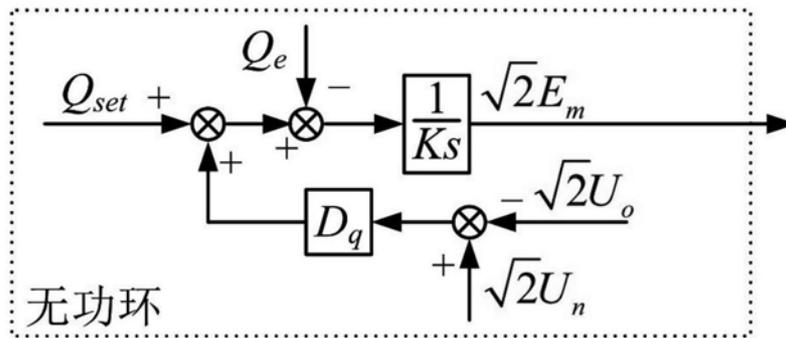


图4b