



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113991755 B

(45) 授权公告日 2023. 06. 13

(21) 申请号 202111223621.2

(22) 申请日 2021.10.20

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113991755 A

(43) 申请公布日 2022.01.28

(73) 专利权人 国网湖北省电力有限公司电力科  
学研究院

地址 430077 湖北省武汉市洪山区徐东大  
街227号

专利权人 国网湖北省电力有限公司

(72) 发明人 柳丹 冀肖彤 梅欣 邓万婷  
王伟 陈孝明 江克证 熊平  
康逸群 叶畅 胡畔 肖繁 曹侃

(74) 专利代理机构 武汉楚天专利事务所 42113  
专利代理师 孔敏

(51) Int.Cl.

H02J 3/48 (2006.01)

H02J 3/50 (2006.01)

H02J 3/24 (2006.01)

H02J 3/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CA 3018726 A1, 2019.03.26

CN 106410849 A, 2017.02.15

CN 106849186 A, 2017.06.13

GB 201015911 D0, 2010.10.27

吴军凯; 张志; 朱祖宏; 刘畅; 唐校; 张兆云.  
虚拟同步发电机技术综述. 东莞理工学院学报  
.2020, (第05期), 全文.

审查员 郭桢

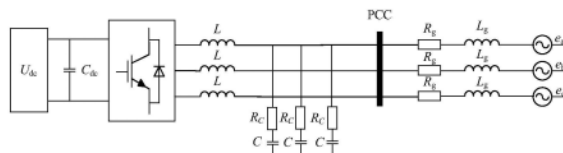
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种新能源发电单元自同步电压源控制方法

(57) 摘要

本发明提供一种新能源发电单元自同步电压源控制方法, 包括: 新能源发电单元根据系统有功和无功功率给出具有自同步特性的频率和电压主动支撑控制方法; 然后采用阻抗适配算法, 来调节具有自同步特性的内电势与并网点电压之间的阻抗特性, 并给出自同步电压源的电流指令算法, 最后在三相坐标系中给出电流闭环控制算法, 使得新能源发电单元在控制电压的同时兼顾了并网电流性能的提高, 提高了新能源发电单元的整体性能。



1. 一种新能源发电单元自同步电压源控制方法,其中基于自同步电压源的新能源并网逆变器的拓扑包括直流源 $U_{dc}$ 、直流侧滤波电容 $C_{dc}$ 、三相全桥逆变电路、滤波电感 $L$ 、滤波电容 $C$ 、并网等效电阻 $R_g$ 、并网等效电感 $L_g$ 、三相电网 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ ,直流侧滤波电容 $C_{dc}$ 并接在直流源 $U_{dc}$ 和三相全桥逆变电路之间,三相全桥逆变电路串接在直流侧电源 $U_{dc}$ 和滤波电感 $L$ 之间,滤波电容 $C$ 先串联无源阻尼电阻 $R_c$ ,再并接在滤波电感 $L$ 和并网等效电阻 $R_g$ 之间,并网等效电感 $L_g$ 串接在并网等效电阻 $R_g$ 和三相电网 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 之间;

其特征在于,所述方法包括如下步骤:

步骤1,采样及坐标变换;

所述采样包括采集以下数据:新能源并网逆变器滤波电容电压 $u_{ca}$ 、 $u_{cb}$ 、 $u_{cc}$ ,新能源并网逆变器桥臂侧电感电流 $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$ ,新能源并网逆变器并网点电压 $u_{oa}$ 、 $u_{ob}$ 、 $u_{oc}$ ,新能源并网逆变器并网点电流 $i_{oa}$ 、 $i_{ob}$ 、 $i_{oc}$ ;

所述坐标变换包括对以下数据进行坐标变换:对新能源并网逆变器滤波电容电压 $u_{ca}$ 、 $u_{cb}$ 、 $u_{cc}$ 和并网点电流 $i_{oa}$ 、 $i_{ob}$ 、 $i_{oc}$ 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 $U_{cd}$ 、 $U_{cq}$ 和并网点电流的dq分量 $I_{od}$ 、 $I_{oq}$ ;

步骤2,根据步骤1中得到的滤波电容电压的dq分量 $U_{cd}$ 、 $U_{cq}$ 和并网点电流的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 $Q$ ;

步骤3,根据步骤2中得到的平均有功功率 $P$ 和新能源并网逆变器给定的有功功率指令 $P_0$ 、新能源并网逆变器给定有功功率指令 $P_0$ 时的额定角频率 $\omega_0$ ,经过功角控制方程得到自同步电压源的角频率 $\omega$ ,对 $\omega$ 积分得到自同步电压源的矢量角 $\theta$ ;

步骤4,根据步骤2中得到的平均无功功率 $Q$ 和新能源并网逆变器给定的无功功率指令 $Q_0$ 、新能源并网逆变器给定无功功率指令 $Q_0$ 时的额定电压 $U_0$ ,经过无功控制方程得到自同步电压源的端电压幅值指令 $E^*$ ,根据步骤3中得到的自同步电压源的矢量角 $\theta$ 和端电压幅值指令 $E^*$ 通过指令合成方程得到自同步电压源的三相端电压指令 $e_a^*$ 、 $e_b^*$ 、 $e_c^*$ ;

步骤5,先根据步骤4中得到的三相端电压指令 $e_a^*$ 、 $e_b^*$ 、 $e_c^*$ 和步骤1中得到的并网点电网电压 $u_{oa}$ 、 $u_{ob}$ 、 $u_{oc}$ ,通过虚拟阻抗控制方程得到电流指令信号 $i_{aref}^*$ 、 $i_{bref}^*$ 、 $i_{cref}^*$ ;再根据电流指令信号 $i_{aref}^*$ 、 $i_{bref}^*$ 、 $i_{cref}^*$ 、步骤1中的桥臂侧电感电流 $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$ ,通过电流控制方程得到控制信号 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ ,再根据 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 生成开关管的PWM控制信号;

步骤4中所述三相端电压指令合成方程为:

$$e_a^* = E^* \sin(\theta)$$

$$e_b^* = E^* \sin(\theta - 120^\circ)$$

$$e_c^* = E^* \sin(\theta + 120^\circ);$$

步骤5中所述虚拟阻抗控制方程为:

$$i_{aref}^* = \frac{e_a^* - u_{oa}}{sL_v + R_v}$$

$$i_{bref}^* = \frac{e_b^* - u_{ob}}{sL_v + R_v}$$

$$i_{cref}^* = \frac{e_c^* - u_{oc}}{sL_v + R_v}$$

其中,  $R_v$  为虚拟电阻,  $L_v$  为虚拟电感;

步骤5中所述电流控制方程为:

$$u_a = (K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{ri}s}{s^2 + Q_i\omega_0s + \omega_0^2})(i_{aref}^* - i_{La})$$

$$u_b = (K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{ri}s}{s^2 + Q_i\omega_0s + \omega_0^2})(i_{bref}^* - i_{Lb})$$

$$u_c = (K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{ri}s}{s^2 + Q_i\omega_0s + \omega_0^2})(i_{cref}^* - i_{Lc})$$

其中,  $K_p$  为电流环比例控制系数,  $K_i$  为电流环积分控制器比例系数,  $K_{ri}$  为电流环谐振控制器比例系数,  $Q_i$  为电流环准谐振调节器品质因数。

2. 根据权利要求1所述的新能源发电单元自同步电压源控制方法, 其特征在于, 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:

所述平均有功功率  $P$  的计算方程为:

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

平均无功功率  $Q$  的计算方程为:

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

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

3. 根据权利要求1所述的新能源发电单元自同步电压源控制方法, 其特征在于, 步骤3中所述功角控制方程为:

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

其中,  $m$  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。

4. 根据权利要求1所述的新能源发电单元自同步电压源控制方法, 其特征在于, 步骤4中所述无功控制方程为:

$$E^* = U_0 + n(Q_0 - Q)$$

其中,  $n$  为无功-电压下垂系数。

## 一种新能源发电单元自同步电压源控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及新能源并网逆变器控制领域,具体是一种新能源发电单元自同步电压源控制方法。

### 背景技术

[0002] 双碳背景下,能源结构的转型必将带来电网结构的重大改变,传统电网将逐渐呈现出高度电力电子化及高比例新能源接入的双高特征,未来电力系统将呈现以新能源为主题的新型电力系统特性。然而,大规模新能源发电天然具有随机性、弱支撑性和低抗扰性,削弱了节点电压的主动支撑能力与频率调节能力,增加了电网安全稳定运行的风险。同时,新能源大量接入使得电力电子设备与电网之间、各变换器之间、子网之间的交互耦合,严重影响新能源的可靠消纳及系统的稳定运行。因此,深入研究新能源高比例渗透下的主动支撑技术与系统稳定运行控制方法,对于新能源电力系统具有重要意义。

[0003] 近年来,国内外专家学者从不同的角度探讨新能源高比例接入电网的控制问题,同时新的并网标准也对新能源发电单元的支撑能力提出了更高要求,有功/无功下垂控制、自同步电压源控制等技术不断得到应用。自同步电压源并网运行时,需要对电网的电压和频率稳定性进行一定的支撑,并保证新能源大规模并网的波形质量。

[0004] 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:

[0005] 题为“一种提升自同步控制风电机组惯性响应效果的方法”的中国发明专利申请说明书(CN112350365A)给出了一种根据阻尼功率获得内电势频率参考值从而调节系统频率的主动支撑技术,然而这种方法无法调节电网与新能源发电单元之间的阻抗特性,也无法控制并网电流性能,给新能源大规模并网应用带来一定困难。

[0006] 题为“一种基于转动惯量的自同步电压源自适应控制方法及系统”的中国发明专利申请说明书(CN113346522A)公开的技术方案中给出了一种转动惯量自适应控制函数确定自适应控制策略,在不同电网状态下可以提升其转动惯量特性,并根据自同步电压源的容量比将转动惯量的调节量分配至每台自同步电压源。这种方法可以自适应的改变转动惯量,但是控制方法复杂,且无法保证并网电流质量。

[0007] 题为“一种同步发电机支撑电网运行的自同步电压源风电机组”的中国发明专利申请说明书(CN112821460A)给出了一种动态补偿算法使得风能利用效率和惯量响应效果达到最佳,同时给出了一种一致性算法控制并离网切换过程的电压稳定,控制方法复杂,且无法兼顾电流控制性能。

[0008] 总之,现有VSG技术并网模式下难以同时兼顾电压源控制与电流性能的控制能力,不利于复杂电网条件下的自同步电压源并网电流性能的提高。

### 发明内容

[0009] 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技术并网模式下的自同步电压源主动支撑与并网电流性能的提升等问题,提供一种新能源发电单元

自同步电压源控制方法。

[0010] 本发明的目的是这样实现的,本发明提供了一种新能源发电单元自同步电压源控制方法,包括如下步骤:

[0011] 步骤1,采样及坐标变换;

[0012] 所述采样包括采集以下数据:新能源并网逆变器滤波电容电压  $u_{ca}, u_{cb}, u_{cc}$ , 新能源并网逆变器桥臂侧电感电流  $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ , 新能源并网逆变器并网点电压  $u_{oa}, u_{ob}, u_{oc}$ , 新能源并网逆变器并网点电流  $i_{oa}, i_{ob}, i_{oc}$ ;

[0013] 所述坐标变换包括对以下数据进行坐标变换:对新能源并网逆变器滤波电容电压  $u_{ca}, u_{cb}, u_{cc}$  和并网点电流  $i_{oa}, i_{ob}, i_{oc}$  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  $U_{cd}, U_{cq}$  和并网点电流的dq分量  $I_{od}, I_{oq}$ ;

[0014] 步骤2,根据步骤1中得到的滤波电容电压的dq分量  $U_{cd}, U_{cq}$  和并网点电流的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;

[0015] 步骤3,根据步骤2中得到的平均有功功率P和新能源并网逆变器给定的有功功率指令  $P_0$ 、新能源并网逆变器给定有功功率指令  $P_0$  时的额定角频率  $\omega_0$ , 经过功角控制方程得到自同步电压源的角频率  $\omega$ , 对  $\omega$  积分得到自同步电压源的矢量角  $\theta$ ;

[0016] 步骤4,根据步骤2中得到的平均无功功率Q和新能源并网逆变器给定的无功功率指令  $Q_0$ 、新能源并网逆变器给定无功功率指令  $Q_0$  时的额定电压  $U_0$ , 经过无功控制方程得到自同步电压源的端电压幅值指令  $E^*$ , 根据步骤3中得到的自同步电压源的矢量角  $\theta$  和端电压幅值指令  $E^*$  通过指令合成方程得到自同步电压源的三相端电压指令  $e_a^*, e_b^*, e_c^*$ ;

[0017] 步骤5,先根据步骤4中得到的三相端电压指令  $e_a^*, e_b^*, e_c^*$  和步骤1 中得到的并网点电网电压  $u_{oa}, u_{ob}, u_{oc}$ , 通过虚拟阻抗控制方程得到电流指令信号  $i_{aref}^*, i_{bref}^*, i_{cref}^*$ ; 再根据电流指令信号  $i_{aref}^*, i_{bref}^*, i_{cref}^*$ 、步骤1 中的桥臂侧电感电流  $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ , 通过电流控制方程得到控制信号  $u_a, u_b, u_c$ , 再根据  $u_a, u_b, u_c$  生成开关管的PWM控制信号。

[0018] 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:

[0019] 所述平均有功功率P的计算方程为:

$$[0020] \quad P = \left( \prod_h \frac{s^2 + \omega_h^2}{s^2 + 2Q_{pq}\omega_h s + \omega_h^2} \right) \cdot \frac{1.5}{\tau s + 1} \cdot (U_{cq} I_{oq} + U_{cd} I_{od})$$

[0021] 所述平均无功功率Q的计算方程为:

$$[0022] \quad Q = \left( \prod_h \frac{s^2 + \omega_h^2}{s^2 + 2Q_{pq}\omega_h s + \omega_h^2} \right) \cdot \frac{1.5}{\tau s + 1} \cdot (U_{cd} I_{oq} - U_{cq} I_{od})$$

[0023] 其中,  $Q_{pq}$  为功率计算方程品质因数,  $\omega_h$  为陷波器需要滤除的谐波角频率,  $s$  为拉普拉斯算子,  $\tau$  为一阶低通滤波器的时间常数,  $h$  为待滤除的谐波次数。

[0024] 优选地,步骤3中所述功角控制方程为:

$$[0025] \quad \omega = \omega_0 + \frac{m}{mJ\omega_0 s + 1} (P_0 - P)$$

[0026] 其中,  $m$  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。

[0027] 优选地,步骤4中所述无功控制方程为:

$$[0028] \quad E^* = U_0 + n(Q_0 - Q)$$

[0029] 其中,  $n$  为无功-电压下垂系数。

[0030] 优选地,步骤4中所述三相端电压指令合成方程为:

$$[0031] \quad e_a^* = E^* \sin(\theta)$$

$$[0032] \quad e_b^* = E^* \sin(\theta - 120^\circ)$$

$$[0033] \quad e_c^* = E^* \sin(\theta + 120^\circ)$$

[0034] 优选地,步骤5中所述虚拟阻抗控制方程为:

$$[0035] \quad i_{aref}^* = \frac{e_a^* - u_{oa}}{sL_v + R_v}$$

$$[0036] \quad i_{bref}^* = \frac{e_b^* - u_{ob}}{sL_v + R_v}$$

$$[0037] \quad i_{cref}^* = \frac{e_c^* - u_{oc}}{sL_v + R_v}$$

[0038] 其中,  $R_v$  为虚拟电阻,  $L_v$  为虚拟电感。

[0039] 优选地,步骤5中所述电流控制方程为:

$$[0040] \quad u_a = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{ri}s}{s^2 + Q_i\omega_0s + \omega_0^2} \right) (i_{aref}^* - i_{La})$$

$$[0041] \quad u_b = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{ri}s}{s^2 + Q_i\omega_0s + \omega_0^2} \right) (i_{bref}^* - i_{Lb})$$

$$[0042] \quad u_c = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{ri}s}{s^2 + Q_i\omega_0s + \omega_0^2} \right) (i_{cref}^* - i_{Lc})$$

[0043] 其中,  $K_p$  为电流环比例控制系数,  $K_i$  为电流环积分控制器比例系数,  $K_{ri}$  为电流环谐振控制器比例系数,  $Q_i$  为电流环准谐振调节器品质因数。

[0044] 采用本发明后,对于采用自同步电压源技术的新能源并网逆变器,具备如下优点:

[0045] 1、可以实现新能源发电单元与大电网之间的阻抗适配;

[0046] 2、在实现新能源发电单元自同步电压源支撑技术的同时兼顾了并网电流性能的提升。

## 附图说明

[0047] 图1是本发明的基于自同步电压源的新能源并网逆变器拓扑结构;

[0048] 图2是本发明的新能源发电单元自同步电压源的控制框图;

[0049] 图3是本发明实施案例中有功功率仿真波形图;

[0050] 图4是本发明实施案例中并网点电压仿真波形图;

[0051] 图5是本发明实施案例中并网点电流仿真波形图。

## 具体实施方式

[0052] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本发明的一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0053] 图1是本发明的实施例中基于自同步电压源的新能源并网逆变器拓扑结构。所述新能源并网逆变器的拓扑包括直流源 $U_{dc}$ 、直流侧滤波电容 $C_{dc}$ 、三相全桥逆变电路、滤波电感 $L$ 、滤波电容 $C$ 、并网等效电阻 $R_g$ 、并网等效电感 $L_g$ 、三相电网 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ ，直流侧滤波电容 $C_{dc}$ 并接在直流源 $U_{dc}$ 和三相全桥逆变电路之间，三相全桥逆变电路串接在直流侧电源 $U_{dc}$ 和滤波电感 $L$ 之间，滤波电容 $C$ 先串联无源阻尼电阻 $R_c$ ，再并接在滤波电感 $L$ 和并网等效电阻 $R_g$ 之间，并网等效电感 $L_g$ 串接在并网等效电阻 $R_g$ 和三相电网 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 之间。

[0054] 具体的，本实施例中的参数如下：直流母线电压 $U_{dc}$ 为650V，输出交流线电压有效值为380V/50Hz，额定容量为100kW，新能源并网逆变器滤波电感 $L=0.3\text{mH}$ ，新能源并网逆变器滤波电容为 $C=200\mu\text{F}$ ，新能源并网逆变器采样频率 $f_s$ 为10kHz，因而 $T_s=100\mu\text{s}$ 。

[0055] 参见图1、2，本发明实施例提供一种新能源发电单元自同步电压源控制方法，包括如下步骤：

[0056] 步骤1，采样及坐标变换；

[0057] 所述采样包括采集以下数据：新能源并网逆变器滤波电容电压  $u_{ca}, u_{cb}, u_{cc}$ ，新能源并网逆变器桥臂侧电感电流  $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ ，新能源并网逆变器并网点电压  $u_{oa}, u_{ob}, u_{oc}$ ，新能源并网逆变器并网点电流  $i_{oa}, i_{ob}, i_{oc}$ 。

[0058] 所述坐标变换包括对以下数据进行坐标变换：对新能源并网逆变器滤波电容电压  $u_{ca}, u_{cb}, u_{cc}$  和并网点电流  $i_{oa}, i_{ob}, i_{oc}$  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  $U_{cd}, U_{cq}$  桥臂侧电感电流的dq分量  $I_{Ld}, I_{Lq}$  和并网点电流的dq分量  $I_{od}, I_{oq}$ 。

[0059] 步骤2，根据步骤1中得到的滤波电容电压的dq分量  $U_{cd}, U_{cq}$  和并网点电流的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 $Q$ 。

[0060] 所述有功功率计算方程为：

$$[0061] \quad P = \left( \prod_h \frac{s^2 + \omega_h^2}{s^2 + 2Q_{pq}\omega_h s + \omega_h^2} \right) \cdot \frac{1.5}{\tau s + 1} \cdot (U_{cq}I_{oq} + U_{cd}I_{od})$$

[0062] 所述无功功率计算方程为：

$$[0063] \quad Q = \left( \prod_h \frac{s^2 + \omega_h^2}{s^2 + 2Q_{pq}\omega_h s + \omega_h^2} \right) \cdot \frac{1.5}{\tau s + 1} \cdot (U_{cd}I_{oq} - U_{cq}I_{od})$$

[0064] 其中， $Q_{pq}$  为功率计算方程品质因数、 $\omega_h$  为陷波器需要滤除的谐波角频率、 $s$  为拉普拉斯算子、 $\tau$  为一阶低通滤波器的时间常数， $h$  为待滤除的谐波次数。

[0065] 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 $Q_{pq}=0.5$ 。

[0066] 步骤3，根据步骤2中得到的平均有功功率 $P$ 和新能源并网逆变器给定的有功功率

指令 $P_0$ 、新能源并网逆变器给定有功功率指令 $P_0$ 时的额定角频率 $\omega_0$ ,经过功角控制方程得到自同步电压源的角频率 $\omega$ ,对 $\omega$ 积分得到自同步电压源的矢量角 $\theta$ 。

[0067] 所述功角控制方程为:

$$[0068] \quad \omega = \omega_0 + \frac{m}{mJ\omega_0 s + 1} (P_0 - P)$$

[0069] 其中, $m$ 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。

[0070] 功角控制方程表明了新能源并网逆变器有功功率下垂曲线关系、虚拟惯量大小。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,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 $\omega_0$ 表示下垂曲线的位置关系,主要考虑新能源并网逆变器输出有功功率为 $P_0$ 时,其输出频率大小。

[0071] 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 $P_0 = 100 \text{kW}$ ,此时对应的额定角频率取值为 $\omega_0 = 314.1593 \text{rad/s}$ 。

[0072] 步骤4,根据步骤2中得到的平均无功功率 $Q$ 和新能源并网逆变器给定的无功功率指令 $Q_0$ 、新能源并网逆变器给定无功功率指令 $Q_0$ 时的额定电压 $U_0$ ,经过无功控制方程得到自同步电压源的端电压幅值指令 $E^*$ ,根据步骤3中得到的自同步电压源的矢量角 $\theta$ 和端电压幅值指令 $E^*$ 通过指令合成方程得到自同步电压源的三相端电压指令 $e_a^*, e_b^*, e_c^*$ 。

[0073] 所述无功控制方程为:

$$[0074] \quad U^* = U_0 + n(Q_0 - Q)$$

[0075] 其中, $U_0$ 为新能源并网逆变器给定无功功率指令 $Q_0$ 时的额定输出电容电压、 $n$ 为无功-电压下垂系数。

[0076] 所述三相端电压指令合成方程为:

$$[0077] \quad e_a^* = E^* \sin(\theta)$$

$$[0078] \quad e_b^* = E^* \sin(\theta - 120^\circ)$$

$$[0079] \quad e_c^* = E^* \sin(\theta + 120^\circ)$$

[0080] 无功-电压下垂系数 $n$ 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,主要考虑新能源并网逆变器输出无功功率为 $Q_0$ 时,其输出电压大小。

[0081] 在本实施例中,无功-电压下垂系数取值为 $n = \frac{2\% \cdot 380}{100} \text{V/kW} = 0.076 \text{V/kW}$ ;给定无



功率指令为 $Q_0=0$ ,此时对应的额定输出电容电压 $U_0=380V$ 。

[0082] 步骤5,先根据步骤4中得到的三相端电压指令 $e_a^*, e_b^*, e_c^*$ 和步骤1中得到的并网点电网电压 $u_{oa}, u_{ob}, u_{oc}$ ,通过虚拟阻抗控制方程得到电流指令信号 $i_{aref}^*, i_{bref}^*, i_{cref}^*$ ;再根据电流指令信号 $i_{aref}^*, i_{bref}^*, i_{cref}^*$ 、步骤1中的桥臂侧电感电流 $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ ,通过电流控制方程得到控制信号 $u_a, u_b, u_c$ ,再根据 $u_a, u_b, u_c$ 生成开关管的PWM控制信号。

[0083] 所述虚拟阻抗控制方程为:

$$[0084] \quad i_{aref}^* = \frac{e_a^* - u_{oa}}{sL_v + R_v}$$

$$[0085] \quad i_{bref}^* = \frac{e_b^* - u_{ob}}{sL_v + R_v}$$

$$[0086] \quad i_{cref}^* = \frac{e_c^* - u_{oc}}{sL_v + R_v}$$

[0087] 其中, $R_v$ 为虚拟电阻, $L_v$ 为虚拟电感。

[0088] 所述电流控制方程为:

$$[0089] \quad u_a = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{ri}s}{s^2 + Q_i\omega_0s + \omega_0^2} \right) (i_{aref}^* - i_{La})$$

$$[0090] \quad u_b = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{ri}s}{s^2 + Q_i\omega_0s + \omega_0^2} \right) (i_{bref}^* - i_{Lb})$$

$$[0091] \quad u_c = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{ri}s}{s^2 + Q_i\omega_0s + \omega_0^2} \right) (i_{cref}^* - i_{Lc})$$

[0092] 其中, $K_p$ 为电流环比例控制系数, $K_i$ 为电流环积分控制器比例系数, $K_{ri}$ 为电流环谐振控制器比例系数, $Q_i$ 为电流环准谐振调节器品质因数。

[0093] 在本实施例中,虚拟电阻取值为 $R_v=0.01\Omega$ ,虚拟电感取值为 $L_v=0.22mH$ ,电流环比例控制系数取值为 $K_p=1$ ,电流环积分控制器比例系数取值为 $K_i=10$ 。准谐振调节器主要考虑消除系统中的直流分量,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 $K_{ri}=50$ 。

[0094] 为了佐证发明的技术效果,对发明实施例进行了仿真。

[0095] 图3、图4、图5分别是新能源发电单元在弱网(短路比SCR=1.5)情况下有功功率波形、并网点电压波形、并网点电流波形。由图3可以看出,本发明提供的新能源发电单元自同步电压源控制方法,有功功率P能够快速正确地跟踪上有功功率指令 $P_0$ ,系统能够发出额定有功功率100kW;由图4和图5可以看出,本发明提供的新能源发电单元自同步电压源控制方法能够保证并网点电压、并网点电流稳定且三相对称,系统稳定运行。

[0096] 以上所述,仅为本发明的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何属于本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

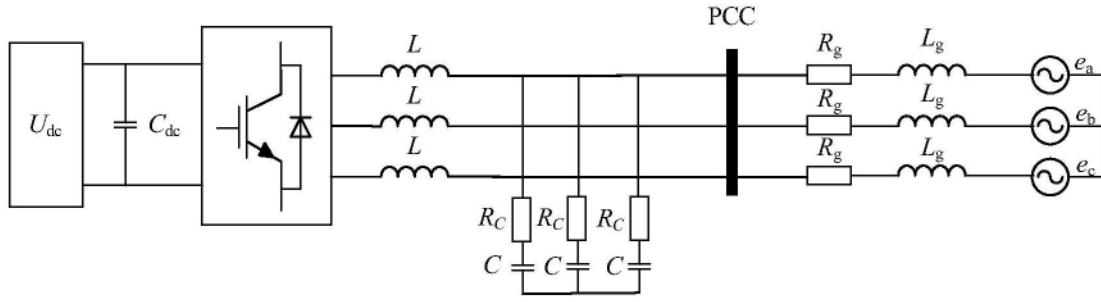


图1

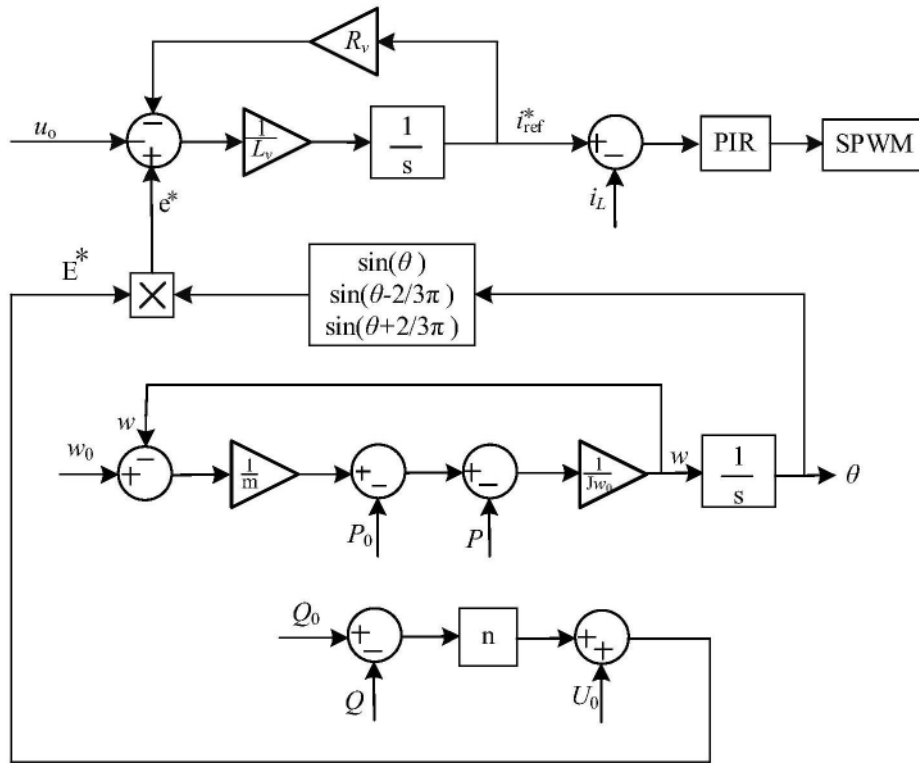


图2

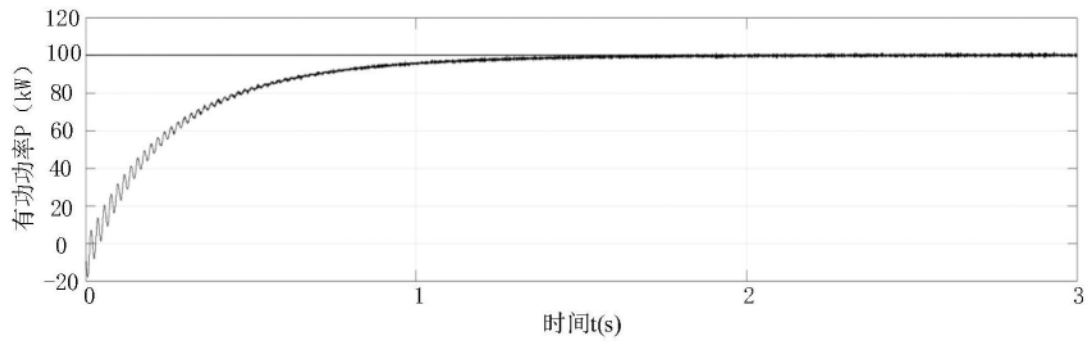


图3

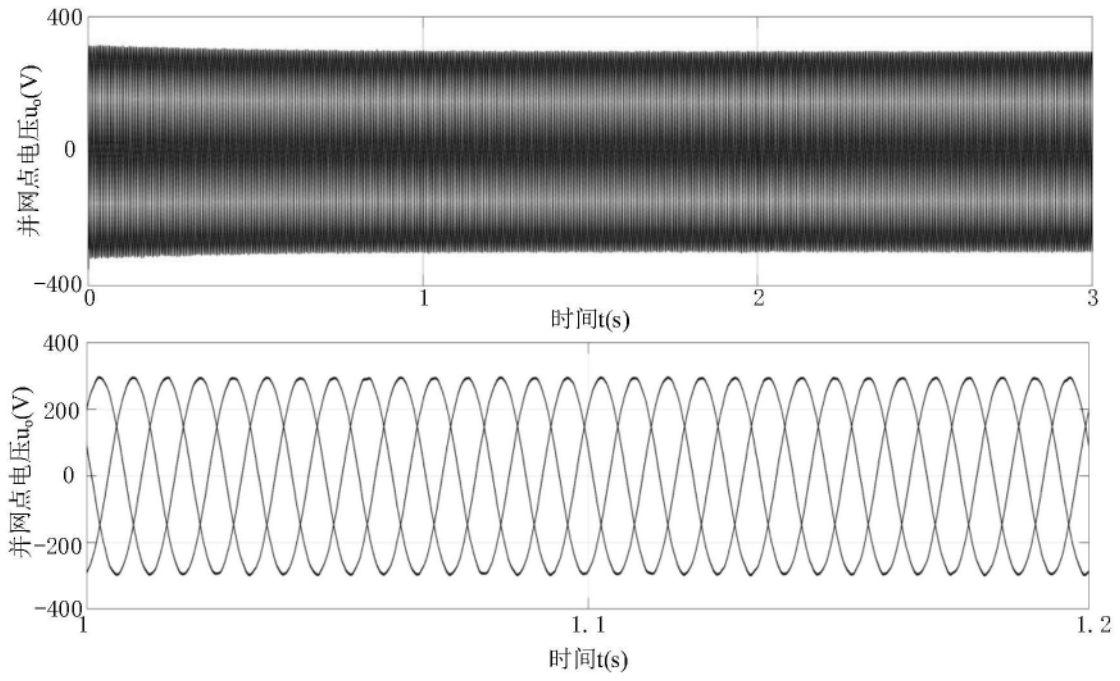


图4

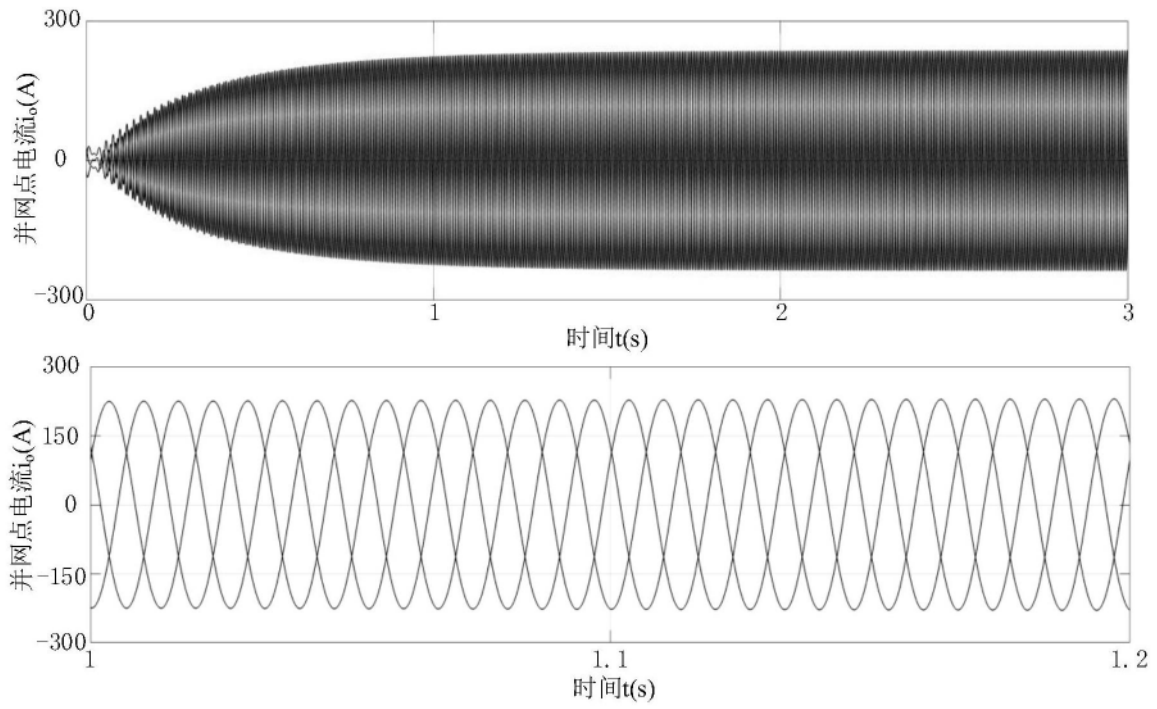


图5