



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106340905 A

(43)申请公布日 2017. 01. 18

(21)申请号 201610915113.3

(22)申请日 2016.10.20

(71)申请人 湖南大学

地址 410082 湖南省长沙市岳麓区湖南大学南校区工程楼525

(72)发明人 荣飞 黄韬 龚喜长 黄守道
尹章涛 李文君

(51) Int. Cl.

H02J 3/46(2006.01)

H02J 3/48(2006.01)

H02J 3/50(2006.01)

H02J 3/18(2006.01)

权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种基于虚拟同步控制的并网逆变器功率分配方法

(57)摘要

本发明主要针对经典下垂控制策略在电网电压和频率波动较大,逆变器容量不足时,无法有效的改善系统的稳定性问题,提出了一种基于虚拟同步控制的并网逆变器功率分配方法。综合考虑电网的频率失稳和电压失稳,采用了一种等速调节方式,使频率和电压趋向失稳的速度保持一致,既避免发生逆变器有功补偿过大导致电压失稳速度过快的情况,又避免发生无功补偿过大导致频率失稳速度过快的情况,延长电网失稳的相对时长。与经典的控制方法相比,本发明所提出的控制方法可以有效的改善电网的稳定性,有利于电网的安全稳定运行。

$$\begin{matrix} \Delta f \\ \Delta U \end{matrix} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{0.15U_N}{0.09f_N} * (10\%f_N - \Delta f_1 + \frac{P_s}{K_f}) = 25\%U_N - \Delta U_1 + \frac{Q_s}{K_v} \\ P_s^2 + Q_s^2 = S^2 \end{array} \right. \rightarrow \begin{matrix} P_s \\ Q_s \end{matrix}$$

1. 一种基于虚拟同步控制的并网逆变器功率分配方法,所述的虚拟同步控制计算公式如下所示:

$$\begin{cases} P = P_0 + (f_N - f)K_f \\ Q = Q_0 + (U_N - U)K_u \end{cases};$$

式中, P_0 为有功调度指令,表示负载的额定有功, Q_0 为无功调度指令,表示负载的额定无功; f_N 为额定频率; U_N 为并网逆变器接入点的额定电压, K_f 为有功-频率下垂系数, K_u 为无功-电压下垂系数, f 为实测并网逆变器接入点电压的频率; U 为实测并网逆变器接入点电压的有效值;

其特征在于,并网逆变器功率分配方法如下:

(1) 根据虚拟同步控制计算公式算出有功参考信号 P 和无功参考信号 Q :通过铭牌数据获得并网逆变器的额定容量 S ;

(2) 当 $P^2 + Q^2 \leq S^2$ 时,对并网逆变器的输出功率进行分配:有功功率分配 P ,无功功率分配 Q ;

(3) 当 $P^2 + Q^2 > S^2$ 时,采用新的下垂控制方程:

$$\begin{cases} P = (\Delta f - 1\% f_N)K_f \\ Q = (\Delta U - 10\% U_N)K_u \end{cases};$$

上式中, $\Delta f = f_N - f$, $\Delta U = (U_N - U)$;

检测逆变器接入点的电网频率,然后减去电网的额定频率获得频率偏差 Δf_1 ,为了将频率调回频率允许偏差范围之内,则需要并网逆变器输出的有功功率为:

$$P_3 = K_f (\Delta f_1 - 1\% f_N)$$

检测逆变器接入点的电网电压有效值,然后减去电网的额定电压有效值获得电压偏差为 ΔU_1 ,为了将电压调回电压允许偏差范围之内,则需要并网逆变器输出的无功功率为:

$$Q_3 = K_u (\Delta U_1 - 10\% U_N);$$

用变量 P_* 、 Q_* 分别表示逆变器只能输出的有功功率和无功功率,要将频率和电压调整到系统允许偏差范围内,尚缺少的有功功率为 $\Delta P = P_3 - P_*$,尚缺少的无功功率为 $\Delta Q = Q_3 - Q_*$;

电网频率偏移额定频率的10%时,电网频率会崩溃;定义 L_1 表示并网逆变器提供 P_* 的有功功率后系统频率崩溃的程度:

$$L_1 = 10\% f_N - \Delta f_1 + \frac{P_*}{K_f};$$

电网电压偏移额定电压的25%时,电网电压会崩溃;定义 L_2 表示并网逆变器提供 Q_* 的无功功率后系统电压崩溃的程度:

$$L_2 = 25\% U_N - \Delta U_1 + \frac{Q_*}{K_u};$$

采用等速调节策略,使频率与电压的失稳程度保持一致,则应满足下式:

$$\frac{25\% U_N - 10\% U_N}{10\% f_N - 1\% f_N} = \frac{L_2}{L_1};$$

考虑到并网逆变器的容量限制,功率分配方法用下式表示为:

$$\begin{cases} \frac{0.15U_N}{0.09f_N} * (10\%f_N - \Delta f_1 + \frac{P^*}{K_f}) = 25\%U_N - \Delta U_1 + \frac{Q^*}{K_u}; \\ P^{*2} + Q^{*2} = S^2 \end{cases}$$

求解上式得到P*和Q*,然后对并网逆变器的输出功率进行分配:有功功率分配P*,无功功率分配Q*。

2. 根据权利要求1所述的等速调节策略,其特征在于,K_f取值0.081,K_u取值0.002。

一种基于虚拟同步控制的并网逆变器功率分配方法

技术领域

[0001] 本发明专利属于柔性直流输电领域,特别涉及基于虚拟同步控制的并网逆变器功率分配的方法。

背景技术

[0002] 柔性直流输电技术是构建灵活、坚强、高效电网和充分利用可再生能源的有效途径,代表着直流输电的未来发展方向,已成为新一代智能电网的关键技术之一。

[0003] 并网逆变器最主要的外环控制有:功率控制、恒电压-频率控制和虚拟同步控制;不同的外环控制方式对应不同的并网逆变器功率分配方式。功率控制方法虽然能够实现输出功率对预设功率的跟踪,但是没有考虑电网存在电压和频率偏移时,如何优化并网逆变器有功和无功输出问题。虚拟同步控制采用了模拟同步发电机静态下垂特性的虚拟同步控制方法,根据并网逆变器接入点实测的电压的有效值和频率进行下垂控制,可以使处于并联运行状态的并网逆变器通过下垂控制策略,根据自身容量成比例的分配功率。但是这种功率分配方式的实现依赖于并网逆变器足够大的容量。并网逆变器容量不足时,无法实现功率的比例分配,而且会导致系统的性能恶化。在下垂控制的基础上进一步模拟同步电机特性的虚拟同步发电机技术虽然可以使得并网逆变电源的暂态过程变得较为缓慢,可以有效改善系统的稳定性,但是同样受到并网逆变器容量的限制。基于上述问题,本发明提出了基于虚拟同步控制的并网逆变器功率分配方法,当电网电压和频率偏移较大,并网逆变器容量不足时,综合考虑电网的频率失稳和电压失稳,采用等速调节方式,使频率和电压趋向失稳的速度保持一致。

发明内容

[0004] 本发明所解决的技术问题是,针对现有技术的不足,提出了一种基于虚拟同步控制的并网逆变器功率分配方法,综合考虑电网的频率失稳和电压失稳,采用等速调节方式,可以改善电网的稳定性,有利于电网的安全稳定运行。

[0005] 为实现上述目的,本发明所采取的技术方案如下:

[0006] (1) 根据虚拟同步算法计算出有功参考信号P和无功参考信号Q:

$$\begin{cases} P = P_0 + (f_N - f)K_f \\ Q = Q_0 + (U_N - U)K_u \end{cases}$$

[0007] 式中, P_0 为有功调度指令,表示负载的额定有功, Q_0 为无功调度指令,表示负载的额定无功, f_N 为额定频率, U_N 为并网逆变器接入点的额定电压, K_f 为有功-频率下垂系数, K_u 为无功-电压下垂系数, f 为实测并网逆变器接入点电压的频率, U 为实测并网逆变器接入点电压的有效值。

[0008] (2) 假设并网逆变器的额定容量为S,则:

[0009] 当 $P^2 + Q^2 \leq S^2$ 时,并网逆变器输出有功功率为P,无功功率为Q。

[0010] 当 $P^2 + Q^2 > S^2$ 时,考虑到电力系统的频率允许偏差1%,电压允许偏差10%,此时的下

垂控制方程为：

$$\begin{cases} P = (\Delta f - 1\% f_N) K_f \\ Q = (\Delta U - 10\% U_N) K_u \end{cases}$$

[0011] 式中， $\Delta f = f_N - f$ ， $\Delta U = (U_N - U)$ 。

[0012] 当电网的初始频率偏差为 Δf_1 ，如果要将频率调回频率允许偏差范围之内，则需要并网逆变器输出的有功功率为：

$$P_3 = K_f (\Delta f_1 - 1\% f_N)$$

[0013] 当电网的初始电压偏差为 ΔU_1 ，如果要将电压调回电压允许偏差范围之内，则需要并网逆变器输出的无功功率为：

$$Q_3 = K_u (\Delta U_1 - 10\% U_N)$$

[0014] (3) 假设并网逆变器只能输出的有功功率和无功功率分别为 P_* 、 Q_* ，要将频率和电压调整到系统允许偏差范围内，尚缺少的有功功率为 $\Delta P = P_3 - P_*$ ，尚缺少的无功功率为 $\Delta Q = Q_3 - Q_*$ 。

[0015] ΔP 和 ΔQ 值的大小反应了电网失稳的特性，值越大表示失稳的概率越大。

[0016] 假设电网频率偏移额定频率的 10% 时，电网频率会崩溃；则定义 L_1 表示并网逆变器提供 P_* 的有功功率后系统频率崩溃的程度。

$$L_1 = 10\% f_N - \Delta f_1 + \frac{P_*}{K_f}$$

[0017] 假设电网电压偏移额定电压的 25% 时，电网电压会崩溃；则定义 L_2 表示并网逆变器提供 Q_* 的无功功率后系统电压崩溃的程度。

$$L_2 = 25\% U_N - \Delta U_1 + \frac{Q_*}{K_u}$$

[0018] (4) 采用等速调节策略，使频率与电压的失稳程度保持一致，则应满足下式：

$$\frac{25\% U_N - 10\% U_N}{10\% f_N - 1\% f_N} = \frac{L_2}{L_1}$$

考虑到并网逆变器的容量限制，功率分配方法用下式表示为：

$$\begin{cases} \frac{0.15U_N}{0.09f_N} * \left(10\% f_N - \Delta f_1 + \frac{P_*}{K_f} \right) = 25\% U_N - \Delta U_1 + \frac{Q_*}{K_u} \\ P_*^2 + Q_*^2 = S^2 \end{cases}$$

求解可得：

$$\begin{cases} Q_* = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ P_* = \sqrt{S^2 - Q_*^2} \end{cases}$$

上式中，

$$a = \frac{9f_N^2 K_f^2 + 25U_N^2 K_u^2}{25U_N^2 K_u^2}$$

$$b = \left[\frac{0.75f_N K_f}{5} - \frac{3f_N K_f \Delta U_1}{5U_N} + K_f * (\Delta f_1 - 0.1f_N) \right] * \frac{6f_N K_f}{5U_N K_u}$$

$$c = \left[\frac{0.75f_N K_f}{5} - \frac{3f_N K_f \Delta U_1}{5U_N} + K_f * (\Delta f_1 - 0.1f_N) \right]^2 - S^2$$

[0019] 并网逆变器输出有功功率为P*,无功功率为Q*。K_f取值0.081,K_u取值0.002。并网逆变器的各种功率分配方式适用于不同的场合和状况,在工农业生产中得到了广泛应用。

[0020] 本发明的有益效果是:1)完善了并网逆变器的功率分配控制方法;2)有效的改善了电网的稳定性。

附图说明

[0021] 图1为负荷模型图

[0022] 图2为等速调节策略原理图;(图a为有功-频率下垂控制原理图;图b为无功-电压下垂控制原理图)

[0023] 图3为等速调节控制系统框图

[0024] 图4为接入点频率波形图

[0025] 图5为接入点电压波形图

[0026] 图6为并网逆变器输出有功功率波形图

[0027] 图7为并网逆变器输出无功功率波形图

具体实施方式

[0028] 为了使本发明所解决的技术问题、技术方案及有益效果更加清楚明白,以下结合附图,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0029] 图1负荷模型图,发电机接入节点1,主要负荷接入节点2,其余负荷接入节点3,并网逆变器接入节点2,并网逆变器容量为0.6MVA,发电机容量为10MVA,短路容量为100MVA,发电机端口线电压为380V,并网逆变器接入节点3,节点3的负荷为0.816MW+j0.0816MVar,节点1与节点3之间的传输线阻抗为0.00125+j0.0079。

[0030] 图2为等速调节策略原理图;(图a为有功-频率下垂控制原理图;图b为无功-电压下垂控制原理图)。

[0031] (1)假设并网逆变器的额定容量为S:

[0032] 当 $P^2+Q^2 \leq S^2$ 时,并网逆变器输出有功功率为P,无功功率为Q。

[0033] 当 $P^2+Q^2 > S^2$ 时,考虑到电力系统的频率允许偏差1%,电压允许偏差10%,此时的下垂控制方程为:

$$\begin{cases} P = (\Delta f - 1\% f_N) K_f \\ Q = (\Delta U - 10\% U_N) K_u \end{cases}$$

[0034] 式中, $\Delta f = f_N - f$, $\Delta U = (U_N - U)$;

[0035] 当电网的初始频率偏差为 Δf_1 ,如果要将频率调回频率允许偏差范围之内,则需要并网逆变器输出的有功功率为:

$$P_3 = K_f (\Delta f_1 - 1\% f_N)$$

[0036] 当电网的初始电压偏差为 ΔU_1 , 如果要将电压调回电压允许偏差范围之内, 则需要并网逆变器输出的无功功率为:

$$Q_3 = K_u (\Delta U_1 - 10\% U_N)$$

[0037] (2) 假设并网逆变器只能输出的有功功率和无功功率分别为 P_* 、 Q_* , 要将频率和电压调整到系统允许偏差范围内, 尚缺少的有功功率为 $\Delta P = P_3 - P_*$, 尚缺少的无功功率为 $\Delta Q = Q_3 - Q_*$ 。

[0038] ΔP 和 ΔQ 值的大小反应了电网失稳的特性, 值越大表示失稳的概率越大。

[0039] 假设电网频率偏移额定频率的 10% 时, 电网频率会崩溃; 则定义 L_1 表示并网逆变器提供 P_* 的有功功率后, 系统频率崩溃的程度。

$$L_1 = 10\% f_N - \Delta f_1 + \frac{P_*}{K_f}$$

[0040] 假设电网电压偏移额定电压的 25% 时, 电网电压会崩溃; 则定义 L_2 表示并网逆变器提供 Q_* 的无功功率后, 系统电压崩溃的程度。

$$L_2 = 25\% U_N - \Delta U_1 + \frac{Q_*}{K_u}$$

[0041] (3) 如图 3 所示, 采用等速调节策略, 使频率与电压的失稳程度保持一致, 则应满足下式:

$$\frac{25\% U_N - 10\% U_N}{10\% f_N - 1\% f_N} = \frac{L_2}{L_1}$$

考虑到并网逆变器的容量限制, 功率分配方法用下式表示为:

$$\begin{cases} \frac{0.15U_N}{0.09f_N} * \left(10\% f_N - \Delta f_1 + \frac{P_*}{K_f} \right) = 25\% U_N - \Delta U_1 + \frac{Q_*}{K_u} \\ P_*^2 + Q_*^2 = S^2 \end{cases}$$

求解可得:

$$\begin{cases} Q_* = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ P_* = \sqrt{S^2 - Q_*^2} \end{cases}$$

上式中,

$$a = \frac{9f_N^2 K_f^2 + 25U_N^2 K_u^2}{25U_N^2 K_u^2}$$

$$b = \left[\frac{0.75f_N K_f}{5} - \frac{3f_N K_f \Delta U_1}{5U_N} + K_f * (\Delta f_1 - 0.1f_N) \right] * \frac{6f_N K_f}{5U_N K_u}$$

$$c = \left[\frac{0.75f_N K_f}{5} - \frac{3f_N K_f \Delta U_1}{5U_N} + K_f * (\Delta f_1 - 0.1f_N) \right]^2 - S^2$$

[0042] 控制中, 并网逆变器输出有功功率为 P_* , 无功功率为 Q_* 。 f_N 为额定频率, 取 50Hz; U_N 为并网逆变器接入点的额定电压, 取 220V; K_f 为有功-频率下垂系数, $K_f = 0.081$; K_u 为无功-

电压下垂系数, $K_u=0.002$; f 为实测并网逆变器接入点电压的频率; U 为实测并网逆变器接入点电压的有效值; Δf_1 为实测并网逆变器接入点频率偏差; ΔU_1 为实测并网逆变器接入点电压的有效值偏差。

[0043] 图4是接入点频率波形, 负荷突变时频率从50HZ降到46.245HZ, 并网逆变器进行有功功率补偿后升高到46.974HZ。

[0044] 图5是接入点电压波形, 负荷突变时电压从210.0V降到178.4V, 并网逆变器进行无功功率补偿后升高到179.4V。从图4和图5可知, 调整后, 接入点频率离失稳点的距离 $L_1=1.974$, 接入点电压离失稳点的距离 $L_2=14.4$, $0.15U_N*L_1/0.09f_N=14.476$, 14.476与14.4的偏差很小, 接入点电压和频率趋向失稳的速度具有良好的一致性。

[0045] 图6是并网逆变器输出有功功率波形图, 系统稳定后, 并网逆变器输出有功功率0.59965MW。

[0046] 图7是并网逆变器输出无功功率波形图, 系统稳定后, 并网逆变器输出无功功率0.02049MVar。满足工程要求, 证明本发明提出的控制策略的有效性。

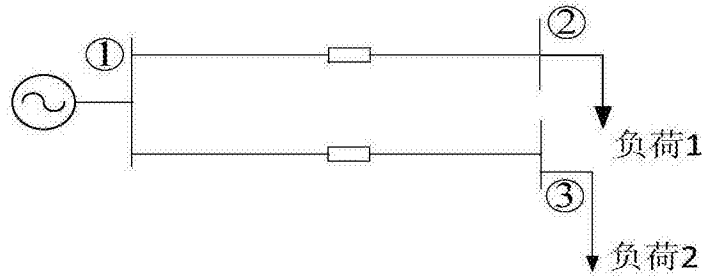
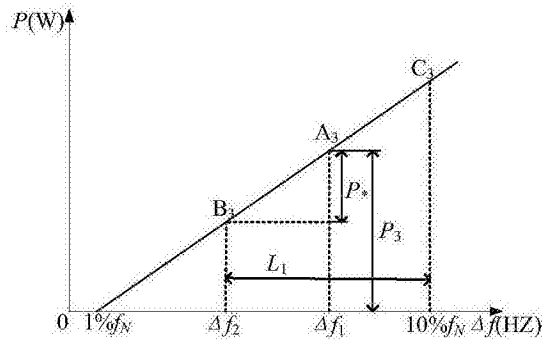
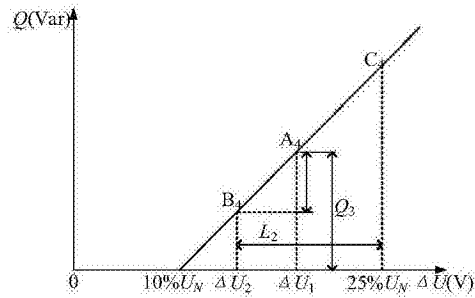


图1



(a)



(b)

图2

$$\begin{array}{l}
 \xrightarrow{\Delta f} \\
 \xrightarrow{\Delta U}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \frac{0.15U_N}{0.09f_N} * (10\%f_N - \Delta f_1 + \frac{P_*}{K_f}) = 25\%U_N - \Delta U_1 + \frac{Q_*}{K_u} \\
 P_*^2 + Q_*^2 = S^2
 \end{array} \right.
 \begin{array}{l}
 \xrightarrow{P_*} \\
 \xrightarrow{Q_*}
 \end{array}$$

图3

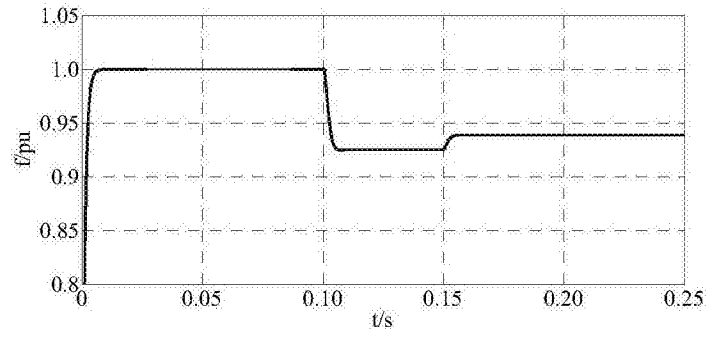


图4

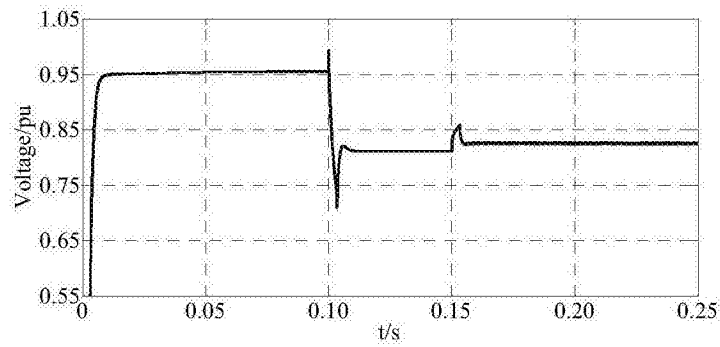


图5

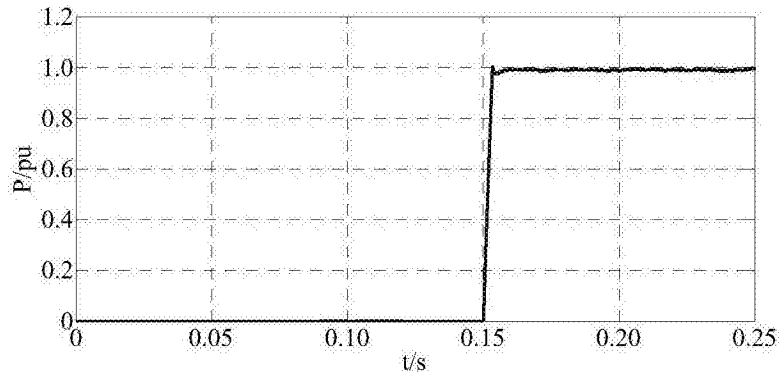


图6

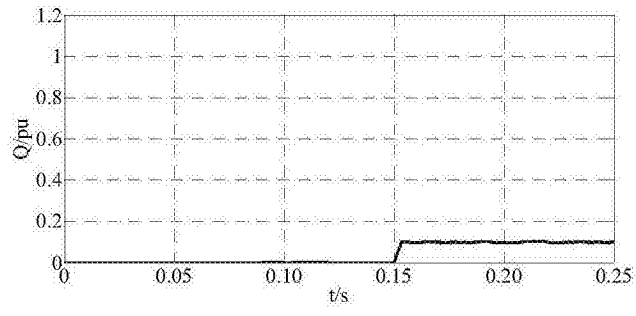


图7