

孤岛微电网系统及其交互振荡抑制方法、系统

交叉引用

本申请要求 2021 年 11 月 11 日提交的中国专利申请号 202111332841.9 的权益，所述申请以引用的方式整体并入本申请。

5 技术领域

本发明涉及电网低频振荡抑制技术，特别是一种孤岛微电网系统及其交互振荡抑制方法、系统。

背景技术

近年来，随着能源短缺和环境污染问题的日益突出，由光伏系统、风力发电、储能和电压源换流器（VSC）组成的分布式微电网得到了广泛的应用。然而，随着电力电子变换器普及率的逐渐提高，系统的低惯性和可再生能源的随机发电威胁着孤岛微电网的稳定性。

为了解决这一问题，虚拟同步机（VSM）应运而生，它模拟同步电机的动态特性，为电力系统提供虚拟惯性和阻尼。虚拟同步机可分为两类：虚拟同步发电机（VSG）和负载侧虚拟同步机（LVSM）。目前，VSG 已经得到了广泛的研究，包括实现、参数设计、应用、小信号阻抗建模。除了供电侧，连接到孤岛微电网的电力电子负载也逐渐被要求提供惯性和阻尼。因此，可以在没有锁相环的情况下将运行的 LVSM 引入到 PWM 整流器中。根据现有的研究，VSG 或 LVSM 即使在弱电网中也能稳定运行，但不能保证由 VSG 给 LVSM 供电的系统仍然是稳定的。此外，由于 LVSM 在低频范围内的 q-q 通道负电阻行为，这意味着 VSG 和 LVSM 之间的相互作用动力学可能会导致不稳定性，因此限制了它们在孤岛微电网中的大规模应用。因此，有必要研究 VSG 与 LVSM 之间的交互动态。

一般来说，对孤岛微电网中交互振荡的抑制方法大致分为两类。一种类型由外部设备实现，另一种类型由改进的控制器实现。与附加设备相比，通过改进控制器来抑制振荡更为经济。已有文献提出通过虚拟阻抗增强 VSG 在弱电网中的稳定性，并设计了谐波虚拟阻抗来抑制 VSG 的谐波。然而，应用虚拟阻抗控制会导致 VSG 产生电压降落。此外，对于类似的孤岛微电网，已有文献提出了参数优化的方法来缓解 VSI 和 VSR 之间的相互作用。此外，还提出了有源补偿技术，以保持由多个 VSI 和 VSR 组成的整个系统的稳定性。然而，由于 LVSM 的阻抗与 VSR 不同，现有技术并未对 VSG 与 LVSM 交互振荡的抑制方法进行研究。

发明内容

本发明所要解决的技术问题是，针对现有技术不足，提供一种孤岛微电网系统及其交互振荡抑制方法、系统，有效抑制 VSG 与 LVSM 的交互振荡。

为解决上述技术问题，本发明所采用的技术方案是：一种孤岛微电网系统的交互振荡抑制方法，孤岛微电网系统包括多个供电单元；每个供电单元均包括一源侧虚拟同步发电机和一负荷侧虚拟同步发电机；所述源侧虚拟同步发电机和负荷侧虚拟同步发电机串联；所述负荷侧虚拟同步发电机接负载；该方法包括以下步骤：

S1、根据源侧虚拟同步发电机三相输出电压的 d 轴分量 u_d ，源侧虚拟同步发电机的瞬时无功 Q 及其指令值 Q_{set} ，得到源侧虚拟同步发电机的输出电压幅值 E_m ，其计算公式为：

$$E_m = (D_q(U_n - u_d) + Q_{set} - Q) / (Ks);$$

其中， D_q 表示给定的无功-电压下垂系数； U_n 表示源侧虚拟同步发电机的端电压幅值额定值； K 为给定的励磁调节系数； s 为拉普拉斯算子；

S2、根据源侧虚拟同步机的有功功率 P 及其指令值 P^* ，得到源侧虚拟同步发电机的相角 θ ，其计算公式为：

$$\theta = \frac{P^* - P + D_p \omega_n^2}{(Js + D_p)s\omega_n};$$

其中， D_p 表示阻尼系数； ω_n 表示孤岛微电网系统同步角速度； J 为 VSG 的转子惯量；

S3、将源侧虚拟同步发电机的电压幅值 E_m 通过减去源侧虚拟同步机的电流与阻抗的乘积，构建虚拟阻抗，得到 dq 轴电压的指令值 u_d^* ， u_q^* ，其计算方式如下：

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_m \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_v s + R_v & -\omega_n L_v \\ L_v & L_v s + R_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix};$$

其中， i_d 、 i_q 为源侧虚拟同步机三相电流的 dq 分量； R_v 、 L_v 分别为给定的虚拟阻抗的阻值与感值；

S4、将源侧虚拟同步发电机的 dq 轴电压的指令值 u_d^* ， u_q^* 与其三相电压的 dq 分量作差，其差值通过 PI 控制，得到电流的指令值 i_{d0}^* ， i_q^* ；

S6、利用下式计算源侧虚拟同步发电机三相输出电流 d 轴电流分量的指令值 i_d^* ：

$$i_d^* = i_{d0}^* - i_{d1}^* + i_{d2}^*;$$

S7、将源侧虚拟同步发电机的 dq 轴电流指令值指令 i_d^* 、 i_q^* 分别与其三相电流的 dq 分量 i_d 、 i_q 作差，并作为 PI 控制器的输入，得到 dq 轴的占空比值 d_d 和 d_q ；

S8、根据 dq 轴的占空比 d_d 、 d_q 和源侧虚拟同步发电机的相角 θ ，得到三相静止坐标系下的占空比 d_a 、 d_b 和 d_c ，控制所述源侧虚拟同步发电机开关管的通断。

$$5 \quad \begin{cases} d_a = d_d \cos(\theta) - d_q \sin(\theta) \\ d_b = d_d \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - d_q \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\ d_c = d_d \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) - d_q \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

本发明通过 d 轴电感电流前馈控制和 d 轴电压反馈结合控制的方法来重塑 VSG 的阻抗，以减小 VSG 的阻抗幅值。因此，VSG 和 LVSM 之间的低频交互作用可以得到缓解，进而抑制了 VSG 与 LVSM 的交互振荡，保证了孤岛微电网系统的稳定性。

步骤 S6 中， i_{d1}^* 、 i_{d2}^* 分别为 d 轴的电压反馈分量和 d 轴的电流前馈分量，其计算方式如下：

$$i_{d1}^* = \left(\frac{C_f s}{T_c s + 1} + \frac{L_f C_f s^2}{G_m G_i (T_c s + 1)} \right) u_d;$$

$$i_{d2}^* = \frac{1}{T_c s + 1} + \frac{L_f s}{G_m G_i (T_c s + 1)^2} i_d;$$

其中， L_f 、 C_f 为 VSG 的 LC 滤波器的感值与容值； T_c 是低通滤波器的时间常数 $G_m = U_{dc}/2$ ；

$G_i = k_{pi} + k_{ii}/s$ ， k_{pi} 和 k_{ii} 为电流 PI 控制器的比例和积分增益。

15 本发明还提供了一种孤岛微电网系统的交互振荡抑制系统，其包括计算机设备；所述计算机设备被配置或编程为用于执行本发明交互振荡抑制方法的步骤。

本发明还提供了一种孤岛微电网系统，包括多个供电单元；每个供电单元均包括一源侧虚拟同步发电机和一负荷侧虚拟同步发电机；所述源侧虚拟同步发电机和负荷侧虚拟同步发电机串联；所述负荷侧虚拟同步发电机接负载；所述源侧虚拟同步发电机与处理器

20 连接；所述处理器被配置或编程为用于执行本发明交互振荡抑制方法的步骤。

由于 VSG 和 LVSM 都能自主参与系统电压和频率的调节，且不需要依赖额外的通信网络来实现两级控制，因此本发明的孤岛微电网系统可以避免潜在的网络攻击。同时，本发明的孤岛微电网系统避免了低频交互振荡，提高了孤岛微电网系统的稳定性，使得孤岛微电网系统能够应用于工程中。

25 为了便于获取相应数据，本发明的处理器通过电流采样电路采样所述源侧虚拟同步发电

机的三相输出电流；所述处理器通过电压采样电路采样所述源侧虚拟同步发电机的三相输出电压；所述处理器输出占空比信号至所述源侧虚拟同步发电机的开关管。

与现有技术相比，本发明所具有的有益效果为：

- 1、本发明的方法可以抑制 VSG 与 LVSM 的交互振荡，保证了孤岛微电网系统的稳定性；
- 2、本发明的方法保持了孤岛微电网系统的动态性能，控制简单、经济；
- 3、本发明的孤岛微电网系统可以从源荷两侧支撑电压和频率稳定，同时可以省略二次通信，避免潜在的网络攻击，使用安全可靠。

附图说明

- 10 图 1 是本发明实施例 1 由源荷虚拟同步机构成的孤岛微电网系统；
- 图 2 是本发明实施例 2 阻抗重塑后的虚拟同步机的主电路及其控制方式图；
- 图 3 是本发明实施例 1 阻抗重塑前后系统接口电压的仿真波形。

具体实施方式

- 本发明实施例 1 提供了一种含源-荷虚拟同步机的孤岛微电网系统，如图 1 所示，
- 15 实施例 1 的孤岛微电网系统将 VSG 与 LVSM 结合使用，该孤岛微电网系统包括多个供电单元，每个供电单元包括一 VSG 和一 LVSM，LVSM 接负载。VSG 与 LVSM 的连接点称为公共耦合点。

本发明实施例 1 中共有 n 个供电单元，因此一共有 n 个 VSG (VSG1、VSG2、……、VSG n) 和 n 个 LVSM (LVSM1、LVSM2、……、LVSM n)。

- 20 本发明实施例 2 提供了实施例 1 孤岛微电网系统的交互振荡抑制方法，如图 2 所示，本发明实施例的交互振荡抑制方法是从源侧虚拟同步发电机进行控制的。源侧虚拟同步发电机包括 LC 滤波器、三相逆变电路、采样电路、直流侧储能电容、控制器和驱动保护电路；LC 滤波器与三相逆变电路输出侧连接；三相逆变电路的桥臂与直流侧储能电容并联；采样电路的输入端与 LC 滤波器连接；采样电路的输出端与控制器输入端连接；
- 25 控制器与驱动保护电路输入端连接；所述驱动保护电路输出端用于驱动三相逆变电路。其中采样电路包括电压采样电路和电流采样电路，电流采样电路接 LC 滤波器输入侧，电流采样电路用于采样 LC 滤波器的三相电流 i_a 、 i_b 和 i_c ，电压采样电路接 LC 滤波器输出侧，电压采样电路用于采样 LC 滤波器的线电压 u_{ab} 、 u_{bc} 。

本发明实施例 2 的交互振荡抑制方法包括如下步骤：

- 30 1) 采样 LC 滤波器的三相输出电流 i_a 、 i_b 和 i_c 、LC 滤波器的线电压 u_{ab} 、 u_{bc} ；

- 2) 由三相线电压 u_{ab} 、 u_{bc} 计算三相相电压 u_a 、 u_b 和 u_c ;
- 3) 由 LC 滤波器的三相输出电流 i_a 、 i_b 和 i_c ，网侧三相相电压 u_a 、 u_b 和 u_c ，分别计算三相电压的 dq 分量 u_d 、 u_q 和三相电流的 dq 分量 i_d 、 i_q ;
- 4) 根据三相电压的 dq 分量 u_d 、 u_q 和三相电流的 dq 分量 i_d 、 i_q ，计算瞬时有功功率 P 和无功功率 Q ;

5) 由瞬时有功功率 P 计算虚拟同步发电机的电磁转矩 T_e ， $T_e=P/\omega_n$ ，其中， ω_n 表示电网同步角速度;

6) 由 T_{set} 计算虚拟同步发电机的相角 $\theta = \frac{T_{set} - T_e + D_p \omega_n}{(Js + D_p)s}$ ，其中， D_p 表示阻尼系数;

T_{set} 表示虚拟同步机的机械转矩;

- 7) 由网侧电压的 d 轴分量 u_d 和无功功率 Q 计算出虚拟同步发电机的输出电压幅值， $E_m = (D_q(U_n - u_d) + Q_{set} - Q)/(Ks)$ ；其中， E_m 表示虚拟同步发电机的输出电压幅值； D_q 表示无功-电压下垂系数； U_n 表示虚拟同步机的端电压幅值额定值； K 为励磁调节系数； Q_{set} 表示虚拟同步机的无功指令值;

- 8) 将源侧虚拟同步发电机的 dq 轴电压的指令值 u_d^* 、 u_q^* 与其三相电压的 dq 分量作差，差值通过 PI 控制，得到电流的指令值 i_{d0}^* 、 i_q^* ;

9) 通过 PI 控制器的输出及 d 轴的电压反馈分量 i_{d1}^* 和 d 轴的电流前馈分量 i_{d2}^* ，得到三相电流的 d 轴电流分量的指令值 i_d^* ；其计算公式为： $i_d^* = i_{d0}^* - i_{d1}^* + i_{d2}^*$ 。其中，d 轴的电压反馈分量 i_{d1}^* 和 d 轴的电流前馈分量 i_{d2}^* 的计算方式为：

$$i_{d1}^* = \overbrace{\left(\frac{C_f s}{T_c s + 1} + \frac{L_f C_f s^2}{G_m G_i (T_c s + 1)} \right)}^{T_{fb}} u_d;$$

$$i_{d2}^* = \overbrace{\left(\frac{1}{T_c s + 1} + \frac{L_f s}{G_m G_i (T_c s + 1)^2} \right)}^{T_{ff}} i_d;$$

其中， T_c 是低通滤波器的时间常数， $G_m = U_{dc0}/2$ ； $G_i = k_{pi} + k_{ii}/s$ ； k_{pi} 为电流 PI 控制器的比例增益； k_{ii} 为电流 PI 控制器的积分增益。

10) 将源侧虚拟同步发电机的 dq 轴电流指令值指令 i_d^* 、 i_q^* 分别与其三相电流的 dq 分量 i_d 、 i_q 作差，差值分别作为 PI 控制器的输入，得到 dq 轴的占空比值 d_d 和 d_q 。

11) 根据 dq 轴的占空比和相位 θ , 得到三相静止坐标系下的占空比 d_a , d_b 和 d_c 。

12) 根据占空比 d_a , d_b 和 d_c , 控制电力电子装置开关管的开断。

图 3 提供了本发明实施例 1 的孤岛微电网系统的接口电压 d 轴分量的仿真波形, 在不添加本发明实施例的控制过程时, 系统接口电压的 d 轴分量诱发低频振荡, 在采用本
5 发明实施例的振荡抑制方法后, 系统接口电压的 d 轴分量是渐渐稳定的, 系统能稳定运行。

权利要求

1、一种孤岛微电网系统的交互振荡抑制方法，其特征在于，孤岛微电网系统包括多个供电单元；每个供电单元均包括一源侧虚拟同步发电机和一负荷侧虚拟同步发电机；所述源侧虚拟同步发电机和负荷侧虚拟同步发电机串联；所述负荷侧虚拟同步发电机接负载；该方法包括以下步骤：

S1、根据源侧虚拟同步发电机三相输出电压的 d 轴分量 u_d 、源侧虚拟同步发电机的瞬时无功功率 Q 及瞬时无功功率 Q 的指令值 Q_{set} ，得到源侧虚拟同步发电机的输出电压幅值 E_m ， E_m 计算公式为：

$$E_m = (D_q(U_n - u_d) + Q_{set} - Q) / (Ks);$$

其中， D_q 表示给定的无功-电压下垂系数； U_n 表示源侧虚拟同步发电机的端电压幅值额定值； K 为给定的励磁调节系数； s 为拉普拉斯算子；

S2、根据源侧虚拟同步机的有功功率 P 及有功功率 P 的指令值 P^* ，得到源侧虚拟同步发电机的相角 θ ，其计算公式为：

$$\theta = \frac{P^* - P + D_p \omega_n^2}{(Js + D_p)s\omega_n};$$

其中， D_p 表示阻尼系数； ω_n 表示孤岛微电网系统同步角速度； J 为源侧虚拟同步发电机的转子惯量；

S3、根据源侧虚拟同步发电机的电压幅值 E_m 得到 dq 轴电压的指令值 u_d^* ， u_q^* ，其计算方式如下：

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_m \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_v s + R_v & -\omega_n L_v \\ L_v & L_v s + R_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix};$$

其中， i_d 、 i_q 为源侧虚拟同步机三相电流的 dq 分量； R_v 、 L_v 分别为给定的虚拟阻抗的阻值与感值；

S4、将源侧虚拟同步发电机的 dq 轴电压的指令值 u_d^* ， u_q^* 与源侧虚拟同步发电机三相电压的 dq 分量作差，差值通过 PI 控制，得到电流的指令值 i_{d0}^* ， i_q^* ；

S6、利用下式计算源侧虚拟同步发电机三相输出电流 d 轴电流分量的指令值 i_d^* ：
 $i_d^* = i_{d0}^* - i_{d1}^* + i_{d2}^*$ ；

S7、将源侧虚拟同步发电机的 dq 轴电流指令值指令 i_d^* ， i_q^* 分别与源侧虚拟同步发电机三相电流的 dq 分量 i_d 、 i_q 作差，差值分别作为 PI 控制器的输入，得

到 dq 轴的占空比值 d_d 和 d_q ;

S8、根据 dq 轴的占空比 d_d 、 d_q 和源侧虚拟同步发电机的相角 θ , 得到三相静止坐标系下的占空比 d_a , d_b 和 d_c , 控制所述源侧虚拟同步发电机开关管的通断;

$$\begin{cases} d_a = d_d \cos(\theta) - d_q \sin(\theta) \\ d_b = d_d \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - d_q \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ d_c = d_d \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) - d_q \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

- 2、根据权利要求 1 所述的孤岛微电网系统的交互振荡抑制方法, 其特征在于, 步骤 S6 中, i_{d1}^* 、 i_{d2}^* 分别为 d 轴的电压反馈分量和 d 轴的电流前馈分量, 其计算公式如下:

$$i_{d1}^* = \left(\frac{C_f s}{T_c s + 1} + \frac{L_f C_f s^2}{G_m G_i (T_c s + 1)} \right) u_d;$$

$$i_{d2}^* = \frac{1}{T_c s + 1} + \frac{L_f s}{G_m G_i (T_c s + 1)^2} i_d;$$

其中 L_f, C_f 为源侧虚拟同步发电机的 LC 滤波器的感值与容值; T_c 是低通滤波器的时间常数; $G_m = U_{dc}/2$; $G_i = k_{pi} + k_{ii}/s$, k_{pi} 和 k_{ii} 为电流 PI 控制器的比例和积分增益。

- 3、一种孤岛微电网系统的交互振荡抑制系统, 其特征在于, 包括计算机设备; 所述计算机设备包括处理器和存储器; 所述处理器用于执行所述存储器中存储的计算机程序; 所述计算机程序被配置为用于执行权利要求 1 或 2 所述方法的步骤。
- 4、一种孤岛微电网系统, 其特征在于, 包括多个供电单元; 每个供电单元均包括一源侧虚拟同步发电机和一负荷侧虚拟同步发电机; 所述源侧虚拟同步发电机和负荷侧虚拟同步发电机串联; 所述负荷侧虚拟同步发电机接负载; 所述源侧虚拟同步发电机与处理器连接; 所述处理器被配置或编程为用于执行权利要求 1 或 2 所述方法的步骤。
- 5、根据权利要求 4 所述的孤岛微电网系统, 其特征在于, 所述处理器通过电流采样电路采样所述源侧虚拟同步发电机的三相输出电流; 所述处理器通过电压采样电路采样所述源侧虚拟同步发电机中 LC 滤波器的线电压; 所述处理器输出占空比信号至所述源侧虚拟同步发电机的开关管。