

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2015 年 5 月 21 日 (21.05.2015)



(10) 国际公布号
WO 2015/070602 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2014/079930
- (22) 国际申请日: 2014 年 6 月 16 日 (16.06.2014)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201310559711.8 2013 年 11 月 12 日 (12.11.2013) CN
- (71) 申请人: 国家电网公司 (STATE GRID CORPORATION OF CHINA) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街 86 号, Beijing 100031 (CN)。 国网山东省电力公司电力科学研究院 (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE OF STATE GRID SHANDONG ELECTRIC POWER COMPANY) [CN/CN]; 中国山东省济南市市中区望岳路 2000 号, Shandong 250002 (CN)。
- (72) 发明人: 李广磊 (LI, Guanglei); 中国山东省济南市市中区望岳路 2000 号, Shandong 250101 (CN)。 孙

树敏 (SUN, Shumin); 中国山东省济南市市中区望岳路 2000 号, Shandong 250002 (CN)。 李红梅 (LI, Hongmei); 中国山东省济南市市中区望岳路 2000 号, Shandong 250002 (CN)。 石鑫 (SHI, Xin); 中国山东省济南市市中区望岳路 2000 号, Shandong 250002 (CN)。 李笋 (LI, Sun); 中国山东省济南市市中区望岳路 2000 号, Shandong 250002 (CN)。 程艳 (CHENG, Yan); 中国山东省济南市市中区望岳路 2000 号, Shandong 250002 (CN)。

(74) 代理人: 济南圣达知识产权代理有限公司 (JINAN SHENGDA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO.,LTD); 中国山东省济南市历下区经十路 17703 号华特广场 B208, Shandong 250061 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,

[见续页]

(54) Title: MICROGRID INVERTER SAGGING AUTOMATIC CONTROL METHOD BASED ON SMALL-SIGNAL STABILITY ANALYSIS

(54) 发明名称: 基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法

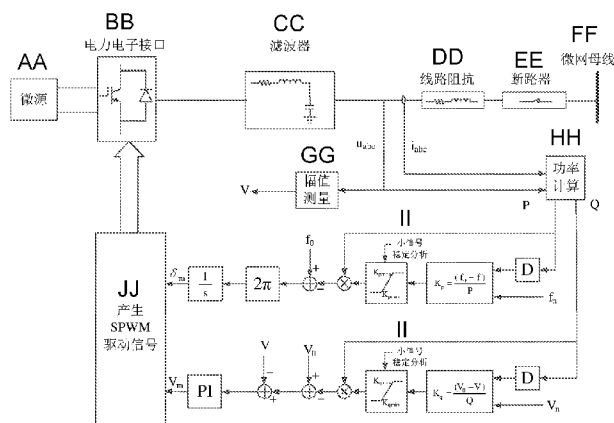


图 8 / Fig. 8

- AA Microsource
BB Power electronic interface
CC Filter
DD Line impedance
EE Circuit breaker
FF Micronetwork bus
GG Amplitude measurement
HH Power calculation
II Small-signal stability analysis
JJ Generation of SPWM driving signal

(57) Abstract: Disclosed is a microgrid inverter sagging automatic control method based on small-signal stability analysis. According to the control method, on the basis that the slope of a P-f sagging curve and the slope of the Q-V sagging curve are actively regulated, small-signal stability analysis is introduced, the feasibility of the slopes after the active regulation is verified, and no-deviating regulation of voltages and frequencies is implemented on the premise that the stability of a system is ensured. According to the present invention, for distributed generation under sagging control in an islanding state, the requirement of load changes is met by automatically regulating the slopes of the sagging curves and changing a reference active power value corresponding to a rated frequency in the sagging curves and a reference reactive power value corresponding to a rated voltage, and no-deviating frequency regulation and voltage regulation are implemented; the range of the slopes of the sagging curves allowed for stable operation of the system is obtained through the small-signal stability analysis, and when the sagging slopes are automatically regulated, the range needs to be met, and instability of the system caused by an operation of purely implementing the no-deviating frequency regulation and voltage regulation is avoided.

(57) 摘要:

[见续页]



QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG,
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD,
TG)。

- (84) **指定国** (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

本发明公开了一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法, 该控制方法在主动调整 $P-f$ 、 $Q-V$ 下垂曲线斜率的基础上, 引入小信号稳定分析, 验证主动调整后的斜率的可行性, 在保证系统稳定性的前提下, 实现电压、频率的无差调节。本发明对孤岛状态下采用下垂控制的分布式电源, 通过自动调整下垂曲线斜率, 改变下垂曲线中额定频率所对应的参考有功功率值、额定电压所对应的参考无功功率值, 以满足负荷变化的需要, 实现无差调频调压; 通过小信号稳定分析得到系统稳定运行所允许的下垂曲线斜率范围, 在上述自动调整下垂斜率时, 需满足此范围, 防止单方面为实现无差调频调压而导致的系统不稳定。

基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法

技术领域

本发明涉及微电网控制领域，尤其涉及一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法。

背景技术

随着能源危机的出现和节能减排的发展要求，大量使用可再生能源的微电网发展迅速。微电网中的分布式电源通过电力电子器件与电网相连，当大电网故障，微电网与大电网解裂进入孤岛运行状态时，需由其内部的分布式电源为微电网系统提供电压、频率支撑，广泛采用模拟同步发电机特性的下垂控制实现此目标，如 P - f 、 Q - V 下垂控制， P - V 、 Q - f 下垂控制等。但是对于确定的下垂曲线，当负荷变化时，运行点相应变化，无法实现电压和频率的无差调节。

已有的方法是当负荷变化导致电压频率变化时，主动调整下垂曲线的斜率，即改变 P - f 下垂曲线中额定频率 50Hz 对应的额定功率 P_n 的值、 Q - V 下垂曲线中的空载电压值，使系统电压、频率恢复至额定运行点，实现无差调节。但此方法未考虑下垂斜率受系统稳定运行的约束条件限制，自动调整后的稳态运行点，可能导致系统运行的不稳定。

发明专利（申请号 201210107053.4）公开了一种基于旋转坐标虚拟阻抗的孤岛电网控制及优化方法，针对实际微电网中的复杂阻抗特性，采用坐标旋转正交变换设计坐标旋转虚拟阻抗，改善微电网的阻抗特性，但是，该专利主要针对微电网稳态运行的计算分析与优化运行，没有考虑微电网系统新能源、负荷的短时间内实时波动的暂态调节过程，无法实现孤岛运行的微电网系统电压、频率无差调节。

发明内容

本发明的目的就是为了解决上述问题，提出一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法，该控制方法在主动调整 P - f 、 Q - V 下垂曲线斜率的基础上，引入小信号稳定分析，验证主动调整后的斜率的可行性，在保证系统稳定性的前提下，实现电压、频率的无差调节。

为了实现上述目的，本发明采用如下技术方案：

一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法，包括以下步骤：

- (1) 分布式电源提供电压频率支撑：孤岛运行下的微电网，由采用下垂控制的分布式电源提供电压频率支撑，所述逆变器采用 P - f 、 Q - V 下垂控制，即有功功率调节逆变器输出电压的频率，无功功率调节逆变器输出电压的幅值，逆变器输出特性满足有功功率-频率下垂特性曲线和无功功率-电压下垂特性曲线；
- (2) 调整下垂曲线：当负荷变化引起电压频率偏离额定值时，调节器自动调整下垂曲线的斜率；
- (3) 分析检验：利用小信号稳定分析得到下垂曲线的斜率的上下限，比较器检验计算调整后的斜率是否在允许范围内；
- (4) 执行操作：如果调整后的斜率在上下限之间，满足允许范围，调节器将逆变器的稳定运行点恢复至额定电压，如果调整后的斜率超过上下限值其中一个，则按照最靠近调整后的斜率的限值进行整定下垂曲线。

所述步骤 (1) 中，有功功率-频率下垂特性曲线即 P - f 下垂曲线，方程为 $f = f_0 - K_p P$ ，其中 P 为逆变器输出的有功功率， f 为逆变器实际输出电压频率， f_0 为空载时系统的频率， K_p 为 P - f 曲线的下垂斜率；此外， f_n 为系统的额定频率 50Hz，对应 P - f 下垂曲线中的参考有功功率 P_n 。

所述步骤 (1) 中，无功功率-电压下垂特性曲线即 Q - V 下垂曲线，方程为 $V = V_0 - K_q Q$ ，其中 Q 为逆变器输出的无功功率， V 为逆变器实际输出电压的幅值， V_0 为空载时系统的电压， K_q 为 Q - V 曲线的下垂斜率。

所述步骤 (2) 中， P - f 曲线的斜率 K_p 由曲线方程推导得出： $K_p = (f_0 - f) / P$ ，工作中，将 K_p 改为根据系统运行参数实时生成的系数 K_{pi} ：

$$K_{pi} = \frac{f_0 - f_n}{P_{t-\Delta t}}$$

其中 $P_{t-\Delta t}$ 为 $(t-\Delta t)$ 时刻逆变器输出有功功率；

当负荷有功功率不变时，系统频率为 $f=f_n$ ；当负荷有功功率在 t 时刻增大时，为满足系统功率平衡，逆变器输出有功功率将增大；但 K_{pi} 为使用前 Δt 时刻的有功 $P_{t-\Delta t}$ 计算所得，故保持不变，系统频率降低；经过延迟时间 Δt 后， K_p 开始减小，直至 $P=P_n$ ；即通过自动减小下垂斜率 K_p ，增大了 P - f 下垂曲线中额定频率 f_n 所对应的有功功率参考值 P_n ，从而逆变器发出更多的有功功率 P 时，输出电压的频率依然为 f_n ；但逆变器输出有功功率 P 不能超过其正常运

行允许的最大值 $P_{\max}$ 。

所述步骤（2）中， Q - V 曲线的斜率 K_q 由曲线方程推导得出： $K_q = (V_0 - V)/Q$ ，当负荷无功功率不变时，电压在系统允许范围 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 内；当负荷无功功率增大时，为满足系统功率平衡，逆变器输出无功功率 Q 将增大，若出口电压幅值 V 超出 $[V_{\min}, V_{\max}]$ ，将 K_q 改为根据系统运行参数实时生成的系数 K_{qi} ：

$$K_{qi} = \frac{V_0 - V_n}{Q_{t-\Delta t}}$$

经过延迟时间 Δt 后， K_q 开始减小，直至 $Q=Q_n$ ；即通过自动减小下垂斜率 K_q ，增大了 Q - V 下垂曲线中额定电压 V_n 所对应的无功功率参考值 Q_n ，从而使逆变器输出更多的无功功率时，输出电压的幅值依然保持在 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 范围内；但逆变器输出无功功率 Q 不能超过其正常运行允许的最大值 $Q_{\max}$ 。

所述步骤（3）中，自动调整后的下垂曲线斜率 K_p 、 K_q ，满足小信号稳定分析所得下垂曲线斜率范围 $[K_{p\min}, K_{p\max}]$ 、 $[K_{q\min}, K_{q\max}]$ ；由分布式电源及负荷构成的微电网系统由 n 个一阶非线性常微分代数方程描述： $\dot{y} = f(x, u, t)$ ，对自治系统： $\dot{y} = f(x, u)$ ；对系统施加小扰动并将方程线性化得：

$$\dot{y} = Ax + Bu, x(t_0) = x_0$$

$$y = Cx + Du$$

其中， A 、 B 、 C 、 D 为系数矩阵；由自动控制理论，当矩阵 A 的特征根 $\lambda = \sigma + j\omega$ 具有负实部时，系统有阻尼振荡而恢复稳定；在系统其他变量确定时， λ 是下垂系数 K_p 、 K_q 的函数： $\lambda = f(K_p, K_q)$ ；令 λ 的实部 $\sigma < 0$ ，得到下垂曲线斜率 K_p 、 K_q 的范围 $[K_{p\min}, K_{p\max}]$ 、 $[K_{q\min}, K_{q\max}]$ 。

本发明的有益效果为：

对孤岛状态下采用下垂控制的分布式电源，通过自动调整下垂曲线斜率，改变下垂曲线中额定频率所对应的参考有功功率值、额定电压所对应的参考无功功率值，以满足负荷变化的需要，实现无差调频调压；通过小信号稳定分析得到系统稳定运行所允许的下垂曲线斜率范围，在上述自动调整下垂斜率时，需满足此范围，防止单方面为实现无差调频调压而导致的系统不稳定。

附图说明

图 1 为微电网系统结构图；

图 2 为两台逆变器并联的戴维南等效电路；

图 3 为 $P-f$ 下垂曲线示意图；

图 4 为 $Q-V$ 下垂曲线示意图；

图 5 为调整 K_p 时的 $P-f$ 下垂曲线示意图；

图 6 为调整 K_q 时的 $Q-V$ 下垂曲线示意图；

图 7 为小信号稳定分析所用微电网实例结构图；

图 8 为本控制方法的控制框图；

图 9 为基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件的结果图。

其中，a、微电网分布式电源所发有功功率；b、分布式电源所发无功功率；c、微电网母线电压；d、微电网系统频率。

具体实施方式：

下面结合附图与实施例对本发明作进一步说明。

一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法，包括以下步骤：

步骤（1）：孤岛运行的微电网由采用下垂控制的分布式电源提供电压频率支撑；具体操作如图 1 所示，微电网的一般结构，分布式电源 DG1 采用下垂控制，DG2、DG3 采用 PQ 控制；微电网并网运行时，DG1 处于下垂控制的并网恒功率状态；当配电网故障或其他原因导致微电网与配电网解裂处于孤岛运行状态时，由 DG1 采用下垂控制为微电网系统提供电压频率支撑。

如图 2 所示，两台逆变器并联的戴维南等效电路，可推导得出线路上输送的功率与阻抗的关系：

$$P_i = \frac{V_{0i}U_0}{Z_i} \cos(\theta_i - \delta_i) - \frac{U_0^2}{Z_i} \cos \theta_i \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{V_{0i}U_0}{Z_i} \sin(\theta_i - \delta_i) - \frac{U_0^2}{Z_i} \sin \theta_i \quad (2)$$

线路阻抗角很小，可近似认为 $\sin \delta \approx \delta$ ， $\cos \delta \approx 1$ 。若将逆变器输出阻抗控制为电感性，使逆变器输出阻抗与线路阻抗之和仍为电感性，即 $X = R$ ，即 $Z \approx jX$ ，可得：

$$P_i = V_{0i}U_0\delta_i / X_i \quad (3)$$

$$Q_i = (V_{0i}U_0 - U_0^2) / X_i \quad (4)$$

进一步得到频率和电压的下垂特性：

$$f_i = f_0 - K_p P_i \quad (5)$$

$$V_i = V_0 - K_q Q_i \quad (6)$$

即逆变器端口的电压频率与有功近似呈线性关系，电压幅值与无功近似呈线性关系；从而设计 P - f 、 Q - V 下垂特性，调整逆变器输出有功功率来调整频率，调整逆变器输出无功功率来调整电压幅值。

如图 3 所示，其中， f_0 为空载频率； f_n 为系统的额定频率 50Hz，对应 P - f 下垂曲线中的参考有功功率 P_n ； f 为逆变器实际输出电压的频率，对应逆变器实际输出的有功功率 P ； K_p 为 P - f 曲线的下垂斜率：

$$K_p = \frac{(f_0 - f)}{P} \quad (7)$$

如图 4 所示，其中 V_0 为空载电压； $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$ 分别为逆变器输出最大无功功率、吸收最大无功功率时对应的最小、最大电压； V 为逆变器实际输出电压的幅值，对应逆变器实际输出的无功功率 Q ； K_q 为 Q - V 曲线的下垂斜率：

$$K_q = \frac{(V_0 - V)}{Q} \quad (8)$$

步骤 (2)：负荷变化时，通过调整下垂曲线斜率，实现无差调频调压；

当微电网的有功负荷增大，DG1 输出的有功功率 P 将增多以满足功率平衡。

从图 3 中可看出，DG1 输出有功功率增大时，输出电压的频率 f 将减小。若适当调整下垂斜率，则可使 DG1 的工作点平移回额定频率 f_n ，即如附图 5 所示，初始时 DG1 按照下垂曲线 1 工作于 A 点；输出有功功率增大后，频率下降至 f ，工作于 B 点；调整下垂曲线斜率 K_p ，使 DG1 按照下垂曲线 2 工作，工作点变为 C，输出频率恢复至 f_n 。

当微电网的无功负荷增大，DG1 输出的无功功率 Q 将增多以满足功率平衡。

从图 4 中可看出，DG1 输出电压幅值将减小，易超出系统允许的 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 的限制范围。若适当调整下垂斜率，如图 6 所示，初始时 DG1 按照下垂曲线 1 工作，其发出最大无功功率时对应的最小电压值为 $V_{\min 1}$ ，吸收最大无功功率时对应的最大电压值为 $V_{\max 1}$ ；输出无功功率增大后，出口电压幅值减小，超出系统允许范围，调整下垂斜率 K_q ，使发出最大无功功率时对应的最小电压增大，则回到允许范围内。

步骤 (3)：采用小信号稳定分析，对上述自动后的斜率进行检验：

以附图 7 所示微电网为例，建立系统的状态方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{INV} \\ i_{lineDQ} \\ i_{loadDQ} \end{bmatrix} = A_{mg} \begin{bmatrix} x_{INV} \\ i_{lineDQ} \\ i_{loadDQ} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中：

$$A_{mg} = \begin{bmatrix} A_{INV} + B_{INV} R_N M_{INV} C_{INVc} & B_{INV} R_N M_{NET} & B_{INV} R_N M_{load} \\ B_{INET} R_N M_{INV} C_{INVc} + B_{2NET} C_{INV\omega} & A_{NET} + B_{INET} R_N M_{NET} & B_{INET} R_N M_{load} \\ B_{ILOAD} R_N M_{INV} C_{INVc} + B_{2LOAD} C_{INV\omega} & B_{ILOAD} R_N M_{NET} & A_{load} + B_{ILOAD} R_N M_{load} \end{bmatrix}$$

A_{mg} 为是系统的特征矩阵。

求解 A_{mg} 的特征根，并令实部为负，解得此微电网系统的下垂系数稳定范围为：

$$1.57 \times 10^{-5} < K_p < 1.90 \times 10^{-4}$$

$$3.17 \times 10^{-4} < K_q < 4.79 \times 10^{-3}$$

步骤（4）：判断、调节整定：若斜率在允许范围内，则可实现无差调频调压，否则按照小信号稳定分析所得允许最大或最小斜率整定下垂曲线：

如图 8 所示：微源经过逆变器、LC 滤波器、线路与微电网母线相连，测量滤波器出口电压、电流以得到输出有功功率、无功功率及电压幅值、频率，D 为延时环节，延时 t 时间间隔。 K_p 、 K_q 求解框为实现孤岛微电网无差调频调压的自动求解过程，然后经过小信号稳定分析进行限幅。 V 为 LC 滤波器出口电压幅值，PI 为比例积分控制器，以提高电压幅值动态响应特性。 V_m 、 δ_m 分别为 SPWM 调制所需的三相输出相电压合成空间矢量幅值、相角参考值。

工作中测量逆变器输出的有功功率、无功功率，延时 Δt 时间后，计算得到可自动调节的下垂系数 K_p 、 K_q 。通过小信号稳定性分析对系统进行建模，计算得到可使系统稳定的下垂曲线斜率范围 $[K_{p \min}, K_{p \max}]$ 、 $[K_{q \min}, K_{q \max}]$ ，对前述计算得到的 K_p 、 K_q 进行限幅。根据方程（5）、（6）计算得到逆变器参考电压、频率值，进一步生成控制脉冲。由于参考电压、频率生成控制脉冲为现有技术，在此不再赘述。

对如图 7 所示的微电网进行 PSCAD 建模，其中，DG1 为储能系统，采用本专利的考虑小信号稳定分析的逆变器自动下垂控制方法；DG2 为光伏发电系统，在仿真的 12 秒时间内，假设光照不变，可采用恒功率控制；DG3 为风力发电系统，在仿真的 12 秒时间内，假设风速不变，可采用恒功率控制。

在 4 秒时施加 10kW 的阶跃负荷，三个分布式电源输出有功功率、无功功率、母线电压、系统频率如附图 9 所示。

由图 9 可见，基于小信号稳定分析的微电网逆变器自动下垂控制方法具有良好的调整性能；本发明对孤岛状态下采用下垂控制的分布式电源，通过自动调整下垂曲线斜率，改变下垂曲线中额定频率所对应的参考有功功率值、额定电压所对应的参考无功功率值，以满足负荷变化的需要，实现无差调频调压；通过小信号稳定分析得到系统稳定运行所允许的下垂曲线斜率范围，在上述自动调整下垂斜率时，需满足此范围，防止单方面为实现无差调频调压而导致的系统不稳定。

上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述，但并非对本发明保护范围的限制，所属领域技术人员应该明白，在本发明的技术方案的基础上，本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

权利要求书

1、一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法，其特征为：包括以下步骤：

- (1) 分布式电源提供电压频率支撑：孤岛运行下的微电网，由采用下垂控制的分布式电源提供电压频率支撑，所述逆变器采用 P - f 、 Q - V 下垂控制，即有功功率调节逆变器输出电压的频率，无功功率调节逆变器输出电压的幅值，逆变器输出特性满足有功功率-频率下垂特性曲线和无功功率-电压下垂特性曲线；
- (2) 调整下垂曲线：当负荷变化引起电压频率偏离额定值时，调节器自动调整下垂曲线的斜率；
- (3) 分析检验：利用小信号稳定分析得到下垂曲线的斜率的上下限，比较器检验计算调整后的斜率是否在允许范围内；
- (4) 执行操作：如果调整后的斜率在上下限之间，满足允许范围，调节器将逆变器的稳定运行点恢复至额定电压，如果调整后的斜率超过上下限值其中一个，则按照最靠近调整后的斜率的限值进行整定下垂曲线。

2、如权利要求 1 所述的一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法，其特征为：所述步骤(1)中，有功功率-频率下垂特性曲线即 P - f 下垂曲线，方程为 $f = f_0 - K_p P$ ，其中 P 为逆变器输出的有功功率， f 为逆变器实际输出电压频率， f_0 为空载时系统的频率， K_p 为 P - f 曲线的下垂斜率；此外， f_n 为系统的额定频率 50Hz，对应 P - f 下垂曲线中的参考有功功率 P_n 。

3、如权利要求 1 所述的一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法，其特征为：所述步骤(1)中，无功功率-电压下垂特性曲线即 Q - V 下垂曲线，方程为 $V = V_0 - K_q Q$ ，其中 Q 为逆变器输出的无功功率， V 为逆变器实际输出电压的幅值， V_0 为空载时系统的电压， K_q 为 Q - V 曲线的下垂斜率。

4、如权利要求 1 所述的一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法，其特征为：所述步骤(2)中， P - f 曲线的斜率 K_p 由曲线方程推导得出： $K_p = (f_0 - f)/P$ ，工作中，将 K_p 改为根据系统运行参数实时生成的系数 K_{pi} ：

$$K_{pi} = \frac{f_0 - f_n}{P_{t-\Delta t}}$$

其中 $P_{t-\Delta t}$ 为 $(t-\Delta t)$ 时刻逆变器输出有功功率；

当负荷有功功率不变时，系统频率为 $f=f_n$ ；当负荷有功功率在 t 时刻增大时，为满足系统功率平衡，逆变器输出有功功率将增大；但 K_{pi} 为使用前 Δt 时刻的有功 $P_{t-\Delta t}$ 计算所得，故保持不变，系统频率降低；经过延迟时间 Δt 后， K_p 开始减小，直至 $P=P_n$ ；即通过自动减小下垂斜率 K_p ，增大了 $P-f$ 下垂曲线中额定频率 f_n 所对应的有功功率参考值 P_n ，从而逆变器发出更多的有功功率 P 时，输出电压的频率依然为 f_n ；但逆变器输出有功功率 P 不能超过其正常运行允许的最大值 P_{max} 。

5、如权利要求 1 所述的一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法，其特征为：所述步骤（2）中， $Q-V$ 曲线的斜率 K_q 由曲线方程推导得出： $K_q = (V_0 - V)/Q$ ；当负荷无功功率不变时，电压在系统允许范围 $[V_{min}, V_{max}]$ 内；当负荷无功功率增大时，为满足系统功率平衡，逆变器输出无功功率 Q 将增大，若出口电压幅值 V 超出 $[V_{min}, V_{max}]$ ，将 K_q 改为根据系统运行参数实时生成的系数 K_{qi} ：

$$K_{qi} = \frac{V_0 - V_n}{Q_{t-\Delta t}}$$

经过延迟时间 Δt 后， K_q 开始减小，直至 $Q=Q_n$ ；即通过自动减小下垂斜率 K_q ，增大了 $Q-V$ 下垂曲线中额定电压 V_n 所对应的无功功率参考值 Q_n ，从而使逆变器输出更多的无功功率时，输出电压的幅值依然保持在 $[V_{min}, V_{max}]$ 范围内；但逆变器输出无功功率 Q 不能超过其正常运行允许的最大值 Q_{max} 。

6、如权利要求 1 所述的一种基于小信号稳定分析的微电网逆变器下垂自动控制方法，其特征为：所述步骤（3）中，自动调整后的下垂曲线斜率 K_p 、 K_q ，满足小信号稳定分析所得下垂曲线斜率范围 $[K_{p\ min}, K_{p\ max}]$ 、 $[K_{q\ min}, K_{q\ max}]$ ；由分布式电源及负荷构成的微电网系统由 n 个一阶非线性常微分代数方程描述： $\dot{y} = f(x, u, t)$ ，对自治系统： $\dot{y} = f(x, u)$ ；对系统施加小扰动并将方程线性化得：

$$\dot{y} = Ax + Bu, x(t_0) = x_0$$

$$y=Cx+Du$$

其中， A 、 B 、 C 、 D 为系数矩阵；由自动控制理论，当矩阵 A 的特征根 $\lambda=\sigma+j\omega$ 具有负实部时，系统有阻尼振荡而恢复稳定；在系统其他变量确定时， λ 是下垂系数 K_p 、 K_q 的函数：

$\lambda=f(K_p, K_q)$ ；令 λ 的实部 $\sigma < 0$ ，得到下垂曲线斜率 K_p 、 K_q 的范围 $[K_{p\ min}, K_{p\ max}]$ 、 $[K_{q\ min}, K_{q\ max}]$ 。

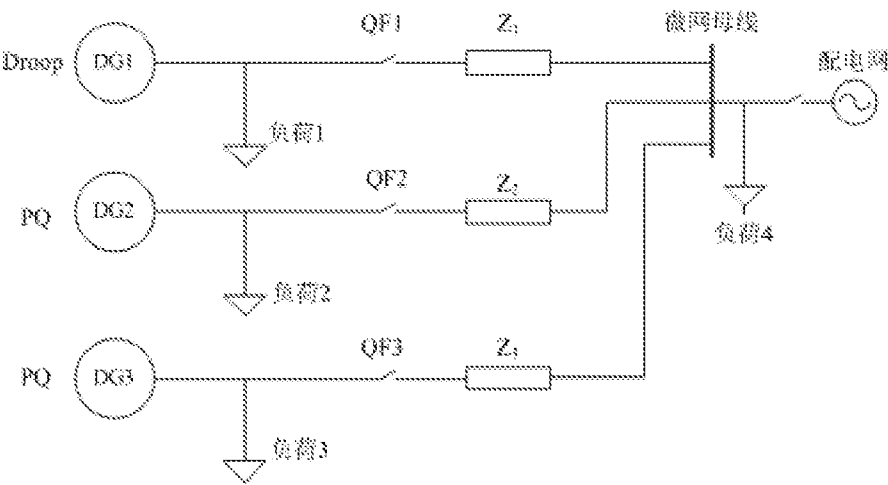


图 1

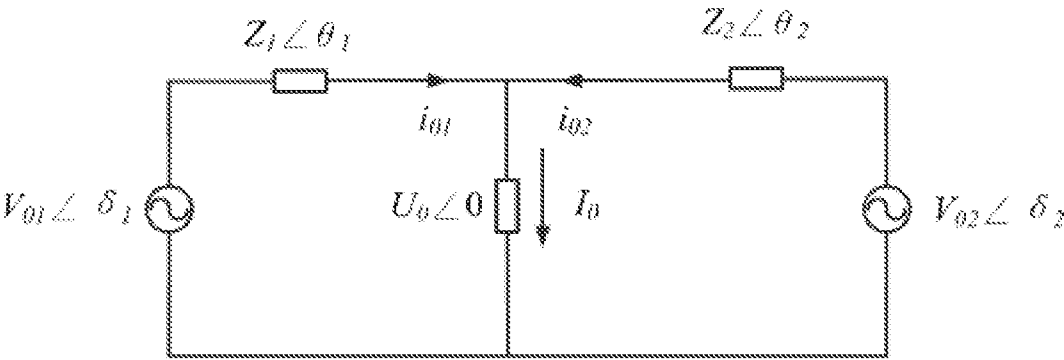


图 2

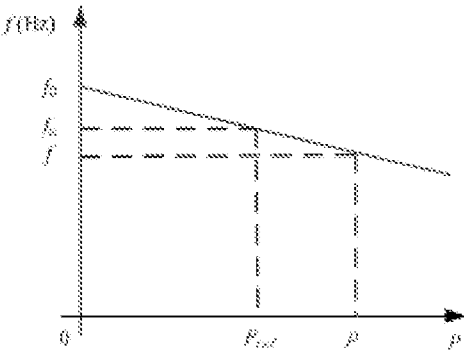


图 3

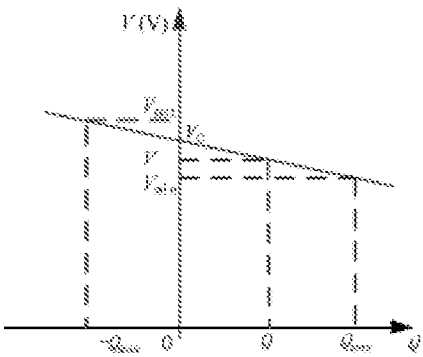


图 4

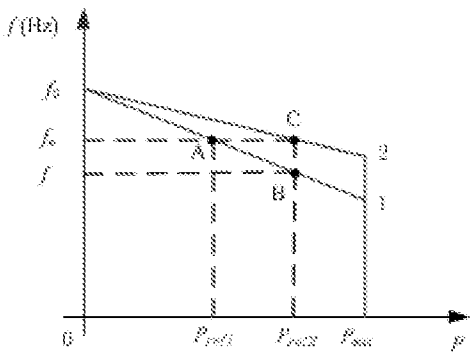


图 5

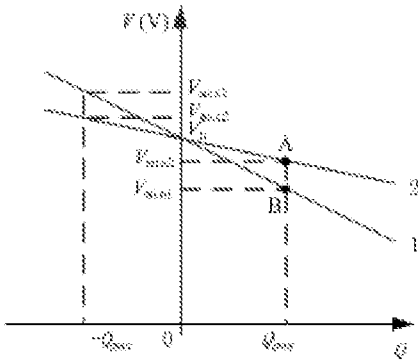


图 6

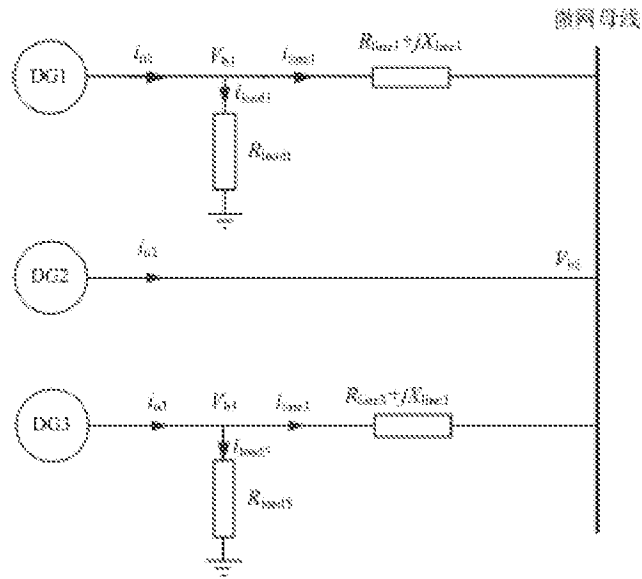


图 7

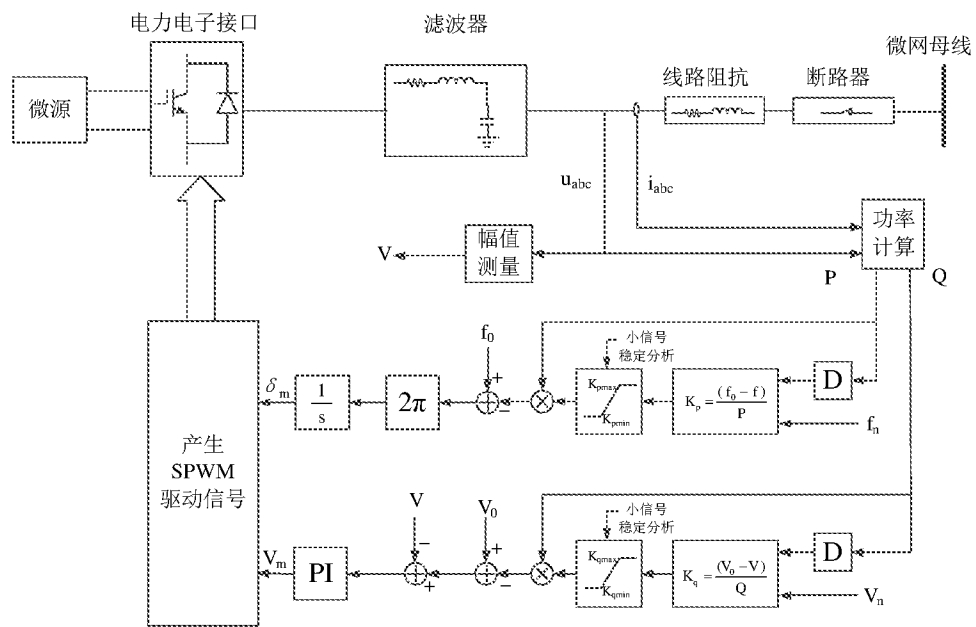


图 8

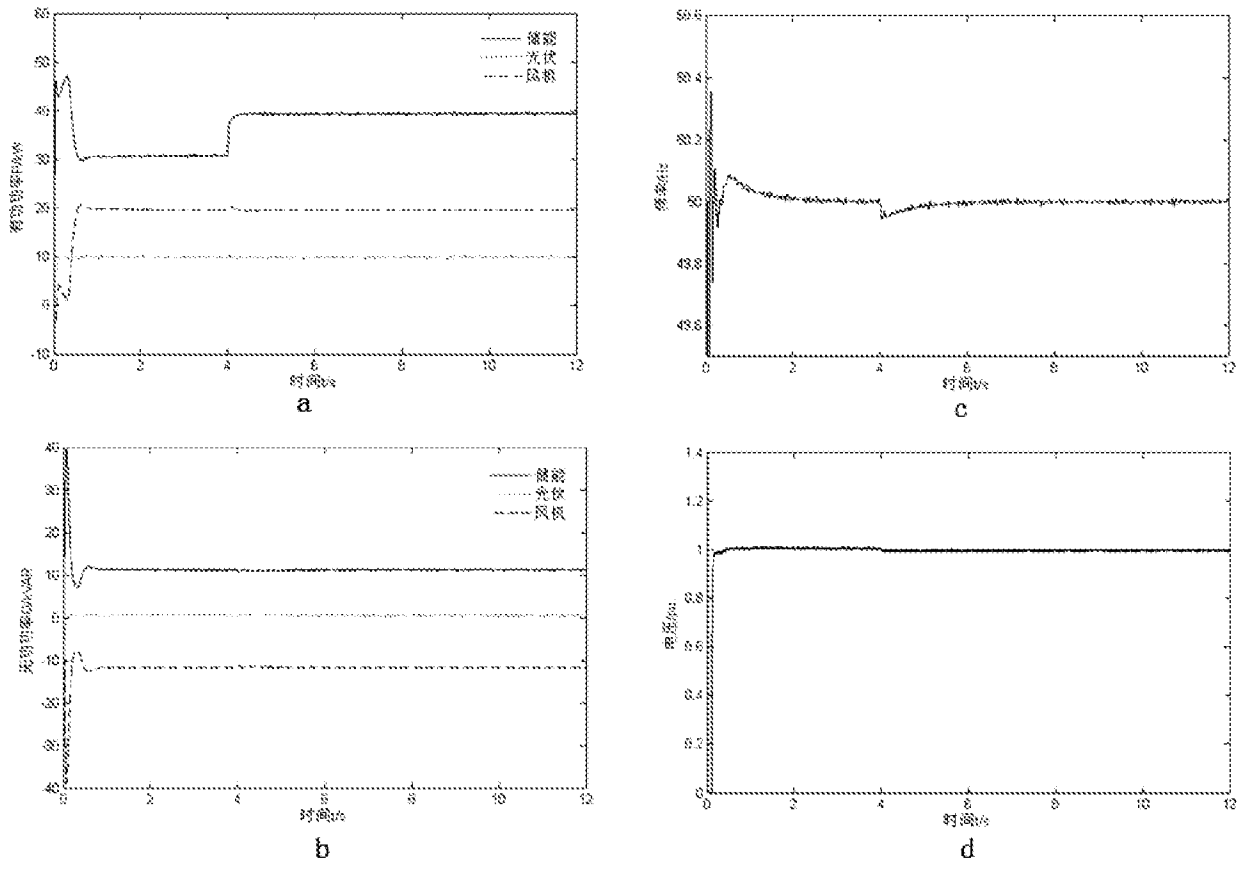


图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2014/079930

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/00 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: H02J; H02M; H03L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, GOOGLE, CNKI: microgrid, micro grid, small signal, stability, droop control, slope, upper limit, lower limit, isolated island

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	MIAO, Weishi. "Analysis of Small Signal Stability of Microgrid Based on Droop Control". CMFD Engineering Technology Series II. vol. S1, 2011. 15 December 2011 (15.12.2011) chapters 2 to 4	1-6
A	CN 102354974 A (SHANGDONG UNIVERSTIY) 15 February 2012 (15.02.2012) the whole document	1-6
A	CN 102623992 A (SHANGDONG UNIVERSTIY) 01 August 2012 (01.08.2012) the whole document	1-6
A	US 2012259477 A1 (KING FAHD UNIVERSTIY OF PETROLEUM AND MINERALS) 11 October 2012 (11.10.2012) the whole document	1-6
PX	CN 103545810 A (STATE GRID CORP. CHINA et al.) 29 January 2014 (29.01.2014) the whole document	1-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 05 September 2014	Date of mailing of the international search report 19 September 2014
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer LAI, Yi Telephone No. (86-10) 62413077

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2014/079930

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102354974 A	15 February 2012	None	
CN 102623992 A	01 August 2012	None	
US 2012259477 A1	11 October 2012	US 8606424 B2	10 December 2013
CN 103545810 A	29 January 2014	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2014/079930

A. 主题的分类

H02J 3/00(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H02J, H02M, H03L

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, WPI, EPODOC, GOOGLE, CNKI, IEEE:微网, 微电网, 小信号, 稳定, 下垂控制, 斜率, 上限, 下限, 孤岛, microgrid, micro grid, small signal, stability, droop control, slope, upper limit, lower limit

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	苗唯时. “基于下垂控制的微电网小信号稳定性分析” 中国优秀硕士学位论文全文数据库工程科技II辑, 第2011年第S1期卷, 2011年 12月 15日 (2011 - 12 - 15), 第2-4章	1-6
A	CN 102354974 A (山东大学) 2012年 2月 15日 (2012 - 02 - 15) 全文	1-6
A	CN 102623992 A (山东大学) 2012年 8月 01日 (2012 - 08 - 01) 全文	1-6
A	US 2012259477 A1 (KING FAHD UNIVERSITY OF PETROLEUM AND MINERALS) 2012年 10月 11日 (2012 - 10 - 11) 全文	1-6
PX	CN 103545810 A (国家电网公司等) 2014年 1月 29日 (2014 - 01 - 29) 全文	1-6

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2014年 9月 05日

国际检索报告邮寄日期

2014年 9月 19日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
北京市海淀区蓟门桥西土城路6号
100088 中国

授权官员

赖异

传真号 (86-10)62019451

电话号码 (86-10)62413077

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2014/079930

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	102354974	A	2012年 2月 15日	无	
CN	102623992	A	2012年 8月 01日	无	
US	2012259477	A1	2012年 10月 11日	US 8606424 B2	2013年 12月 10日
CN	103545810	A	2014年 1月 29日	无	

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)