

(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
2018 年 4 月 5 日 (05.04.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/058804 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/06 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/110479
- (22) 国际申请日: 2016 年 12 月 16 日 (16.12.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201610856013.8 2016年9月27日 (27.09.2016) CN
- (71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。
- (72) 发明人: 顾伟(GU, Wei); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。 曹戈(CAO, Ge); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号,

Jiangsu 210096 (CN)。 柳伟(LIU, Wei); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。 楼冠男(LOU, Guannan); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。 陈明(CHEN, Ming); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。

(74) 代理人: 南京经纬专利商标代理有限公司 (NANJING JINGWEI PATENT & TRADEMARK AGENCY CO., LTD); 中国江苏省南京市鼓楼区中山路179号12楼B座, Jiangsu 210005 (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, DJ, 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, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR,

(54) **Title:** UNIVERSAL MICROGRID CLUSTER DISTRIBUTED CONTROL METHOD COMPRISING CONSTANT POWER AND DROOP CONTROL

(54) 发明名称: 通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法

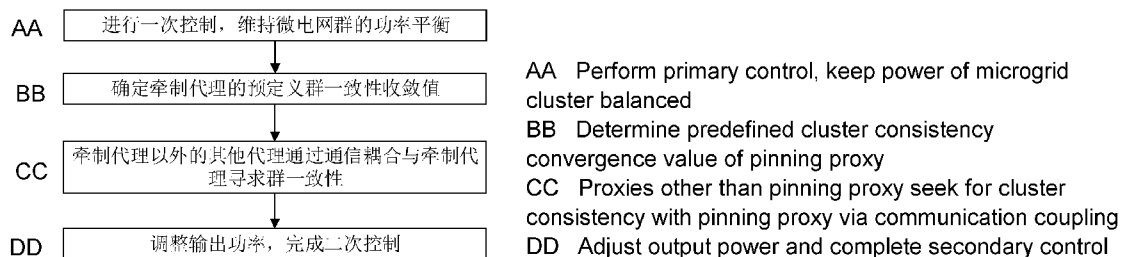


图 1

(57) **Abstract:** A universal microgrid cluster distributed control method comprising constant power and droop control, comprising the following steps: step 10) performing primary control, keeping the power of a microgrid cluster balanced; step 20) determining a predefined cluster consistency convergence value of a pinning proxy; step 30) proxies other than the pinning proxy seek for cluster consistency with the pinning proxy via communication coupling; and step 40) adjusting output power and completing secondary control. The control method employs stratified control and, based on pinning control, a distributed power cluster comprising two control schemes, namely constant power control and droop control, and is a distributed control method. The method obviates the need for a central controller and a complex communication topology, reduces the number of controllers, is adaptable to communication topology changes in a microgrid cluster, and satisfies the demand for plug-and-play distributed power supply.

LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY,
MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
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。

(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, ST, 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,
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)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法, 包括以下步骤: 步骤10)进行一次控制, 维持微电网群的功率平衡; 步骤20)确定牵制代理的预定义群一致性收敛值; 步骤30)牵制代理以外的其他代理通过通信耦合与牵制代理寻求群一致性; 步骤40)调整输出功率, 完成二次控制。该控制方法采用分层控制, 以牵制控制为基础, 包含了恒功率控制和下垂控制两种控制方式的分布式电源集群, 是一种分布式的控制方法。该方法消除了对中央控制器和复杂通信拓扑的需求, 减少了控制器的数量, 能够适应微电网群中通信拓扑变化, 满足分布式电源即插即用的需求。

通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法

技术领域

本发明属于微电网运行控制领域，具体来说，涉及一种通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法。

背景技术

随着环境问题和能源问题的日益严峻，使用可再生能源的分布式发电技术在电力系统中得到了广泛的应用。微电网是包含有分布式发电装置、储能装置和本地负荷，并具有一定的自我调节和控制能力的能源系统。而微电网群是一种解决由分布式电源的高密度接入所引起有关问题的有效方式，将在未来的智能配电网中起到重要的作用。

微电网群的稳定和优化控制，近来得到了特别的关注。基于多代理系统的控制策略被认识到能够在维持微电网稳定方面发挥重要作用，其控制方式包括集中式和分布式控制。其中，集中式控制存在一个中央控制器，用来处理大量的数据，容易发生故障。分布式控制的优点包括抗不确定干扰和分布式信息更新能力，从而使信息有效共享，最终使得决策制定和实施更加迅速。牵制控制是一种多代理系统有效的分布式控制方式，通过牵制部分节点，牵制控制可以减少大型复杂控制系统的控制器数量，通常这种系统通过给所有节点添加控制器是难以实现的。

发明内容

技术问题：本发明所要解决的技术问题是：提供一种通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法，该控制方法包含了下垂控制和恒功率控制两种方式的分布式电源，在微电网群产生扰动时，消除传统下垂控制所产生的频率和电压误差，实现分布式电源集群的功率分配；同时该方法消除了对中央控制器的需求和复杂的通信拓扑，仅需控制一部分牵制代理，其余代理通过通信耦合与牵制代理跟踪同步，进而减少了控制器的数量。

技术方案：为解决上述技术问题，本发明采用如下的技术方案：

一种通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法，所述微电网群包含 m 个下垂控制的分布式电源集群和 n 个恒功率控制的分布式电源集群；微电网群中分布式电源的控制及相互间的信息交互由多代理体系统负责，每个分布式电源对应一个代理，分布

式电源的编号和与该分布式电源对应的代理的编号相同；其中，一部分代理是被控制的牵制代理，其余代理通过与牵制代理的通信耦合，以分布的方式跟踪同步；所述控制方法包括以下步骤：

步骤 10) 进行一次控制，维持微电网群的功率平衡；

步骤 20) 确定牵制代理的预定义群一致性收敛值；

步骤 30) 牵制代理以外的其他代理通过通信耦合与牵制代理寻求群一致性；

步骤 40) 调整输出功率，完成二次控制。

作为优选例，所述的步骤 10) 具体包括：在孤岛模式下，当微电网群发生扰动时，下垂控制的分布式电源集群自动进行如式 (1) 所示的一次控制，下垂控制的分布式电源运行在对等控制模式，维持微电网群的功率平衡：

$$\begin{aligned} f_i &= f_{n,i} - m_{P,i}(P_i - P_{0,i}) \\ U_i &= U_{n,i} - n_{Q,i}(Q_i - Q_{0,i}) \end{aligned} \quad \text{式 (1)}$$

式中， f_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的频率， $f_{n,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源频率初始值， $m_{P,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的有功下垂系数， P_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源输出的有功功率， $P_{0,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的有功功率初始值， U_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的电压， $U_{n,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源电压的参考值， $n_{Q,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的无功下垂系数， Q_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源输出的无功功率， $Q_{0,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的无功功率初始值。

作为优选例，所述的步骤 20) 具体包括：在不确定通信拓扑下，确定牵制代理的预定义群一致性收敛值，包括基于下垂控制的牵制代理预定义群一致性值以及基于恒功率控制的牵制代理预定义群一致性值；

根据式 (2) 确定下垂控制分布式电源集群的分配系数：

$$\lambda_{k,D}^P = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^P}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^P + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^P}, \quad \lambda_{k,D}^Q = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^Q}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^Q + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^Q} \quad \text{式 (2)}$$

其中， $\lambda_{k,D}^P$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群的有功分配系数； $\omega_{k,D,i}$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的参与因子，如果与代理 i 对应的分布式电源参与二次控制，则 $\omega_{k,D,i}=1$ ，否则 $\omega_{k,D,i}=0$ ； $\sigma_{k,D,i}^P$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的有功容量， $\omega_{k,PQ,i}$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的参与因子，如果与代理 i 对应的的分布式电源参与二次控制，则 $\omega_{k,PQ,i}=1$ ，否则 $\omega_{k,PQ,i}=0$ ； $\sigma_{k,PQ,i}^P$ 表示第 k 个恒功

率控制分布式电源集群中代理 i 的有功容量, $\lambda_{k,D}^Q$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群的无功分配系数, $\sigma_{k,D,i}^Q$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的无功容量, $\sigma_{k,PQ,i}^Q$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的无功容量;

根据式 (3) 确定恒功率控制分布式电源集群的分配系数:

$$\lambda_{k,PQ}^P = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^P}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^P + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^P}, \quad \lambda_{k,PQ}^Q = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^Q}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^Q + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^Q} \quad \text{式 (3)}$$

其中, $\lambda_{k,PQ}^P$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的有功分配系数; $\omega_{k,PQ,i}$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的参与因子, 如果该分布式电源参与二次控制, 则 $\omega_{k,PQ,i}=1$, 否则 $\omega_{k,PQ,i}=0$; $\sigma_{k,PQ,i}^P$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的有功容量, $\lambda_{k,PQ}^Q$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的无功分配系数, $\sigma_{k,PQ,i}^Q$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的无功容量;

根据式 (4) 确定基于下垂控制的牵制代理预定义的群一致性值:

$$\begin{aligned} \Delta P_{k,D}^* &= \frac{\lambda_{k,D}^P \Delta P_{MG}^*}{\eta_{k,D}} & \Delta Q_{k,D}^* &= \frac{\lambda_{k,D}^Q \Delta Q_{MG}^*}{\eta_{k,D}} \\ \Delta f_k^* &= m_{P,i} \Delta P_{k,D}^* & \Delta U_k^* &= n_{Q,i} \Delta Q_{k,D}^* \end{aligned} \quad \text{式 (4)}$$

式中, $\Delta P_{k,D}^*$ 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的有功预设群一致性值, ΔP_{MG}^* 表示整个微电网群中有功缺额, $\eta_{k,D}$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中非零参与因子的总数, $\Delta Q_{k,D}^*$ 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的无功预设群一致性值, ΔQ_{MG}^* 表示整个微电网群中无功缺额, Δf_k^* 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的频率预设群一致性值, ΔU_k^* 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的电压预设群一致性值, $m_{P,i}$ 表示有功下垂系数, $n_{Q,i}$ 表示无功下垂系数;

根据式 (5) 确定基于恒功率控制的牵制代理预定义的群一致性值:

$$\Delta P_{k,PQ}^* = \frac{\lambda_{k,PQ}^P \Delta P_{MG}^*}{\eta_{k,PQ}}, \quad \Delta Q_{k,PQ}^* = \frac{\lambda_{k,PQ}^Q \Delta Q_{MG}^*}{\eta_{k,PQ}} \quad \text{式 (5)}$$

式中, $\Delta P_{k,PQ}^*$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的有功预设群一致性值, ΔP_{MG}^* 表示整个微电网群中有功缺额, $\eta_{k,PQ}$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中非零参与因子的总数; $\Delta Q_{k,PQ}^*$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的无功预设群一致性值, ΔQ_{MG}^* 表示整个微电网群中无功缺额。

作为优选例, 所述的步骤 30) 具体包括: 通过牵制控制, 使分布式电源集群内与集群

间的其他代理同牵制代理跟踪同步，寻求达到预定义的群一致性；

按照式（6）确定下垂控制分布式电源代理 i 的控制误差 $e_{fUk,i}$ ：

$$e_{fUk,i} = \begin{bmatrix} e_{fk,i} \\ e_{Uk,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_{n,i} - \Delta f_k^* \\ \Delta U_{n,i} - \Delta U_k^* \end{bmatrix} \quad \text{式（6）}$$

式中， $e_{fk,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 的频率控制误差， $e_{Uk,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 的电压控制误差， $\Delta f_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中频率的修正量， $\Delta U_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中电压的修正量；

按照式（7）确定恒功率控制分布式电源代理 i 的控制误差 $e_{PQk,i}$ ：

$$e_{PQk,i} = \begin{bmatrix} e_{Pk,i} \\ e_{Qk,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{ref,i} - \Delta P_{k,PQ}^* \\ \Delta Q_{ref,i} - \Delta Q_{k,PQ}^* \end{bmatrix} \quad \text{式（7）}$$

其中， $e_{Pk,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 的有功功率控制误差， $e_{Qk,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 的无功功率控制误差， $\Delta P_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中有功功率的修正量， $\Delta Q_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中无功功率的修正量；

通过式（8）进行第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的牵制控制：

$$\dot{e}_{fUk,i} = \begin{cases} \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{fk,j} - e_{fk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{fk,j} - e_{fk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{fk,i} \\ \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Uk,j} - e_{Uk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Uk,j} - e_{Uk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{Uk,i} \end{cases} \quad \text{式（8）}$$

式中， $\dot{e}_{fUk,i}$ 表示对 $e_{fUk,i}$ 进行求导， $N_{k,i,\Theta_m(t)}$ 表示 t_m 时刻第 k 个分布式电源集群中与代理 i 相邻的代理的集合， $\alpha_{i,j,\Theta_m(t)}$ 表示在 t_m 时刻代理 i 和该集群内的其他代理之间的通信耦合系数，若存在通信线路连接， $\alpha_{i,j,\Theta_m(t)} \neq 0$ ，否则， $\alpha_{i,j,\Theta_m(t)} = 0$ ； $e_{fk,j}$ 表示下垂控制分布式电源代理 j 的频率控制误差， $N_{l,i,\Theta_m(t)}$ 表示 t_m 时刻第 l 个分布式电源集群中与代理 i 相邻的代理的集合； $\beta_{i,j,\Theta_m(t)}$ 表示在 t_m 时刻代理 i 和其他集群中的代理之间的通信耦合系数，若存在通信线路连接， $\beta_{i,j,\Theta_m(t)} \neq 0$ ，否则， $\beta_{i,j,\Theta_m(t)} = 0$ ； $d_{i,\Theta_m(t)}$ 表示在 t_m 时刻代理 i 的牵制控制增益， $d_{i,\Theta_m(t)} \geq 0$ ； $d_{i,\Theta_m(t)} = 0$ 表示没有针对代理 i 的牵制控制； $e_{Uk,j}$ 表示下垂控制分布式电源代理 j 的电压控制误差；

通过式（9）进行第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的牵制控制：

$$\dot{e}_{PQk,i} = \begin{cases} \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Pk,j} - e_{Pk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Pk,j} - e_{Pk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{Pk,i} \\ \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Qk,j} - e_{Qk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Qk,j} - e_{Qk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{Qk,i} \end{cases} \quad \text{式 (9)}$$

式中, $\dot{e}_{PQk,i}$ 表示对 $e_{PQk,i}$ 进行求导, $e_{Pk,j}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 j 的有功功率控制误差, $e_{Qk,j}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 j 的无功功率控制误差。

作为优选例, 所述的步骤 40) 具体包括: 各分布式电源代理根据达到的预定义群一致性值, 基于恒功率控制的分布式电源调整输出功率, 基于下垂控制的分布式电源恢复系统频率和电压, 共同完成微电网群的二次控制;

按照式 (10) 进行下垂控制分布式电源代理 i 的二次控制:

$$\begin{aligned} f_{n,i}^S &= f_{n,i} + \Delta f_{n,i} \\ U_{n,i}^S &= U_{n,i} + \Delta U_{n,i} \end{aligned} \quad \text{式 (10)}$$

式中, $f_{n,i}^S$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的频率的参考值, $f_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在一次控制中频率的参考值, $\Delta f_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中频率的修正量, $U_{n,i}^S$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的电压的参考值, $U_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在一次控制中电压的参考值, $\Delta U_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中电压的修正量;

按照式 (11) 进行恒功率控制分布式电源代理 i 的二次控制:

$$\begin{aligned} P_{ref,i}^S &= P_{ref,i} + \Delta P_{ref,i} \\ Q_{ref,i}^S &= Q_{ref,i} + \Delta Q_{ref,i} \end{aligned} \quad \text{式 (11)}$$

式中, $P_{ref,i}^S$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的有功的参考值, $P_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 初始的有功的参考值, $\Delta P_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中有功功率的修正量, $Q_{ref,i}^S$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的无功的参考值, $Q_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 初始的无功的参考值, $\Delta Q_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中无功功率的修正量。

有益效果: 与现有技术相比, 本发明具有以下有益效果: 本发明的通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法, 面向微电网群和分布式电源集群, 能够在系统出现扰动时进行控制, 恢复系统频率和电压, 维持系统稳定。本发明实施例以一次控制和二次控制的分层控制为基础, 采用集群的概念来实施基于多代理系统的牵制控制, 是一种分

布式的控制方法，消除了中央控制器的需求和复杂的通信拓扑，减少了控制器的数量，满足分布式电源即插即用的需求。本发明所提的控制方法通过分布式电源集群内和集群间进行基于牵制的群一致性过程，下垂控制分布式电源集群协同恢复系统的频率和电压，恒功率控制分布式电源集群协同分担功率缺额，能够实现分布式电源集群的全局协调和本地自治，改善了微电网群的可靠性和适应性。本发明的方法能够实现微电网群和分布式电源集群的全局协调控制和本地自治控制，并包含恒功率控制和下垂控制两种控制方式，是一种通用型的方法。

附图说明

图 1 是本发明的流程框图；

图 2 是本发明实施例中微电网群仿真系统的结构示意图；

图 3 是本发明实施例中微电网群通信拓扑示意图；

图 4 是本发明实施例中仿真场景一的控制效果图；

图 5 是本发明实施例中仿真场景二的控制效果图；

图 6 是本发明实施例中仿真场景三的控制效果图。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施案例对本发明进行深入地详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施案例仅仅用以解释本发明，并不用于限定发明。

本发明实施例中，所述微电网群包含 m 个下垂控制的分布式电源集群和 n 个恒功率控制的分布式电源集群；微电网群中分布式电源的控制及相互间的信息交互由多代理体系统负责，每个分布式电源对应一个代理，分布式电源的编号和与该分布式电源对应的代理的编号相同；其中，一部分代理是被控制的牵制代理，其余代理通过与牵制代理的通信耦合，以分布的方式跟踪同步。

如图 1 所示，本发明实施例的通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法，所述控制方法包括以下步骤：

步骤 10) 进行一次控制，维持微电网群的功率平衡。

所述的步骤 10) 具体包括：在孤岛模式下，当微电网群发生扰动时，下垂控制的分布

式电源集群自动进行如式 (1) 所示的一次控制, 下垂控制的分布式电源运行在对等控制模式, 维持微电网群的功率平衡:

$$\begin{aligned} f_i &= f_{n,i} - m_{P,i}(P_i - P_{0,i}) \\ U_i &= U_{n,i} - n_{Q,i}(Q_i - Q_{0,i}) \end{aligned} \quad \text{式 (1)}$$

式中, f_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的频率, $f_{n,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源频率初始值, $m_{P,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的有功下垂系数, P_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源输出的有功功率, $P_{0,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的有功功率初始值, U_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的电压; $U_{n,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源电压的参考值; $n_{Q,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的无功下垂系数; Q_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源输出的无功功率; $Q_{0,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的无功功率初始值。

步骤 20) 确定牵制代理的预定义群一致性收敛值。

所述的步骤 20) 具体包括: 在不确定通信拓扑下, 确定牵制代理的预定义群一致性收敛值, 包括基于下垂控制的牵制代理预定义群一致性值以及基于恒功率控制的牵制代理预定义群一致性值;

根据式 (2) 确定下垂控制分布式电源集群的分配系数:

$$\lambda_{k,D}^P = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^P}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^P + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^P}, \quad \lambda_{k,D}^Q = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^Q}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^Q + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^Q} \quad \text{式 (2)}$$

其中, $\lambda_{k,D}^P$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群的有功分配系数; $\omega_{k,D,i}$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的参与因子, 如果与代理 i 对应的分布式电源参与二次控制, 则 $\omega_{k,D,i}=1$, 否则 $\omega_{k,D,i}=0$; $\sigma_{k,D,i}^P$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的有功容量, $\omega_{k,PQ,i}$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的参与因子, 如果与代理 i 对应的分布式电源参与二次控制, 则 $\omega_{k,PQ,i}=1$, 否则 $\omega_{k,PQ,i}=0$; $\sigma_{k,PQ,i}^P$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的有功容量, $\lambda_{k,D}^Q$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群的无功分配系数, $\sigma_{k,D,i}^Q$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的无功容量, $\sigma_{k,PQ,i}^Q$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的无功容量;

根据式 (3) 确定恒功率控制分布式电源集群的分配系数:

$$\lambda_{k,PQ}^P = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^P}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^P + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^P}, \quad \lambda_{k,PQ}^Q = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^Q}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^Q + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^Q} \quad \text{式 (3)}$$

其中, $\lambda_{k,PQ}^P$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的有功分配系数; $\omega_{k,PQ,i}$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的参与因子, 如果该分布式电源参与二次控制, 则 $\omega_{k,PQ,i}=1$, 否则 $\omega_{k,PQ,i}=0$; $\sigma_{k,PQ,i}^P$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的有功容量, $\lambda_{k,PQ}^Q$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的无功分配系数, $\sigma_{k,PQ,i}^Q$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的无功容量;

根据式 (4) 确定基于下垂控制的牵制代理预定义的群一致性值:

$$\begin{aligned}\Delta P_{k,D}^* &= \frac{\lambda_{k,D}^P \Delta P_{MG}^*}{\eta_{k,D}} & \Delta Q_{k,D}^* &= \frac{\lambda_{k,D}^Q \Delta Q_{MG}^*}{\eta_{k,D}} \\ \Delta f_k^* &= m_{P,i} \Delta P_{k,D}^* & \Delta U_k^* &= n_{Q,i} \Delta Q_{k,D}^*\end{aligned}\quad \text{式 (4)}$$

式中, $\Delta P_{k,D}^*$ 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的有功预设群一致性值, ΔP_{MG}^* 表示整个微电网群中有功缺额, $\eta_{k,D}$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中非零参与因子的总数, $\Delta Q_{k,D}^*$ 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的无功预设群一致性值, ΔQ_{MG}^* 表示整个微电网群中无功缺额, Δf_k^* 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的频率预设群一致性值, ΔU_k^* 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的电压预设群一致性值, $m_{P,i}$ 表示有功下垂系数, $n_{Q,i}$ 表示无功下垂系数;

根据式 (5) 确定基于恒功率控制的牵制代理预定义的群一致性值:

$$\Delta P_{k,PQ}^* = \frac{\lambda_{k,PQ}^P \Delta P_{MG}^*}{\eta_{k,PQ}}, \quad \Delta Q_{k,PQ}^* = \frac{\lambda_{k,PQ}^Q \Delta Q_{MG}^*}{\eta_{k,PQ}} \quad \text{式 (5)}$$

式中, $\Delta P_{k,PQ}^*$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的有功预设群一致性值, ΔP_{MG}^* 整个微电网群中有功缺额, $\eta_{k,PQ}$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中非零参与因子的总数; $\Delta Q_{k,PQ}^*$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的无功预设群一致性值, ΔQ_{MG}^* 表示整个微电网群中无功缺额。

步骤 30) 牵制代理以外的其他代理通过通信耦合与牵制代理寻求群一致性。

所述的步骤 30) 具体包括: 通过牵制控制, 使分布式电源集群内与集群间的其他代理同牵制代理跟踪同步, 寻求达到预定义的群一致性;

按照式 (6) 确定下垂控制分布式电源代理 i 的控制误差 $e_{fUk,i}$:

$$e_{fUk,i} = \begin{bmatrix} e_{fk,i} \\ e_{Uk,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_{n,i} - \Delta f_k^* \\ \Delta U_{n,i} - \Delta U_k^* \end{bmatrix} \quad \text{式 (6)}$$

式中, $e_{fk,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 的频率控制误差, $e_{Uk,i}$ 表示下垂控制分布式

电源代理 i 的电压控制误差, $\Delta f_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中频率的修正量, $\Delta U_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中电压的修正量;

按照式 (7) 确定恒功率控制分布式电源代理 i 的控制误差 $e_{PQk,i}$:

$$e_{PQk,i} = \begin{bmatrix} e_{Pk,i} \\ e_{Qk,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{ref,i} - \Delta P_{k,PQ}^* \\ \Delta Q_{ref,i} - \Delta Q_{k,PQ}^* \end{bmatrix} \quad \text{式 (7)}$$

其中, $e_{Pk,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 的有功功率控制误差, $e_{Qk,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 的无功功率控制误差, $\Delta P_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中有功功率的修正量, $\Delta Q_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中无功功率的修正量;

通过式 (8) 进行第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的牵制控制:

$$\dot{e}_{fUk,i} = \begin{cases} \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{fk,j} - e_{fk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{fk,j} - e_{fk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{fk,i} \\ \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Uk,j} - e_{Uk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Uk,j} - e_{Uk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{Uk,i} \end{cases} \quad \text{式 (8)}$$

式中, $\dot{e}_{fUk,i}$ 表示对 $e_{fUk,i}$ 进行求导, $N_{k,i,\Theta_m(t)}$ 表示 t_m 时刻第 k 个分布式电源集群中与代理 i 相邻的代理的集合, $\alpha_{i,j,\Theta_m(t)}$ 表示在 t_m 时刻代理 i 和该集群内的其他代理之间的通信耦合系数, 若存在通信线路连接, $\alpha_{i,j,\Theta_m(t)} \neq 0$, 否则, $\alpha_{i,j,\Theta_m(t)} = 0$; $e_{fk,j}$ 表示下垂控制分布式电源代理 j 的频率控制误差, $N_{l,i,\Theta_m(t)}$ 表示 t_m 时刻第 l 个分布式电源集群中与代理 i 相邻的代理的集合; $\beta_{i,j,\Theta_m(t)}$ 表示在 t_m 时刻代理 i 和其他集群中的代理之间的通信耦合系数, 若存在通信线路连接, $\beta_{i,j,\Theta_m(t)} \neq 0$, 否则, $\beta_{i,j,\Theta_m(t)} = 0$; $d_{i,\Theta_m(t)}$ 表示在 t_m 时刻代理 i 的牵制控制增益, $d_{i,\Theta_m(t)} \geq 0$; $d_{i,\Theta_m(t)} = 0$ 表示没有针对代理 i 的牵制控制; $e_{Uk,j}$ 表示下垂控制分布式电源代理 j 的电压控制误差;

通过式 (9) 进行第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的牵制控制:

$$\dot{e}_{PQk,i} = \begin{cases} \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Pk,j} - e_{Pk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Pk,j} - e_{Pk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{Pk,i} \\ \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Qk,j} - e_{Qk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Qk,j} - e_{Qk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{Qk,i} \end{cases} \quad \text{式 (9)}$$

式中, $\dot{e}_{PQk,i}$ 表示对 $e_{PQk,i}$ 进行求导, $e_{Pk,j}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 j 的有功功率控制误差, $e_{Qk,j}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 j 的无功功率控制误差。

步骤 40) 调整输出功率, 完成二次控制。

所述的步骤 40) 具体包括: 各分布式电源代理根据达到的预定义群一致性值, 基于恒

功率控制的分布式电源调整输出功率，基于下垂控制的分布式电源恢复系统频率和电压，共同完成微电网群的二次控制；

按照式（10）进行下垂控制分布式电源代理 i 的二次控制：

$$\begin{aligned} f_{n,i}^S &= f_{n,i} + \Delta f_{n,i} \\ U_{n,i}^S &= U_{n,i} + \Delta U_{n,i} \end{aligned} \quad \text{式（10）}$$

式中， $f_{n,i}^S$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的频率的参考值， $f_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在一次控制中频率的参考值， $\Delta f_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中频率的修正量， $U_{n,i}^S$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的电压的参考值， $U_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在一次控制中电压的参考值， $\Delta U_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中电压的修正量；

按照式（11）进行恒功率控制分布式电源代理 i 的二次控制：

$$\begin{aligned} P_{ref,i}^S &= P_{ref,i} + \Delta P_{ref,i} \\ Q_{ref,i}^S &= Q_{ref,i} + \Delta Q_{ref,i} \end{aligned} \quad \text{式（11）}$$

式中， $P_{ref,i}^S$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的有功的参考值， $P_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 初始的有功的参考值， $\Delta P_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中有功功率的修正量， $Q_{ref,i}^S$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的无功的参考值， $Q_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 初始的无功的参考值， $\Delta Q_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中无功功率的修正量。

本发明的控制方法面向微电网群和分布式电源集群，以一次控制和二次控制的分层控制为基础，采用集群的概念来实施基于多代理系统的牵制控制。通过分布式电源集群内和集群间进行基于牵制的群一致性过程，下垂控制分布式电源集群协同恢复系统的频率和电压，恒功率控制分布式电源集群协同分担功率缺额，能够实现分布式电源集群的全局协调和本地自治，减少了控制器的数量和复杂的通信拓扑，改善了微电网群的可靠性和适应性。

下面例举一个实施例。

图 2 为本实施例采用的微电网群仿真结构图。该仿真模型由 10 个分布式电源（简称 DG）和 5 个负荷单元（Load1、Load2、Load3、Load4、Load5）组成，各分布式电源由电力电子元件接入 0.4kV 低压配电网。系统有 2 个恒功率控制分布式电源集群和 1 个下垂控制分布式电源集群，分别对应微电网 1，微电网 2 和微电网 3。共有 10 个分布式电源代理（Agent），分别用 A1，A2，A3，A4，A5，A6，A7，A8，A9，A10 表示，其中 A4 为恒

功率控制集群 1 的牵制代理, A5 为恒功率控制集群 2 的牵制代理, A8 为下垂控制集群 3 的牵制代理。一个代理只能与其在通信拓扑上直接相邻的代理进行通信。基于电力系统计算机辅助设计/含直流电磁暂态仿真(英文简称: PSCAD/EMTDC)平台搭建仿真微电网模型, 在矩阵实验室(英文简称 MATLAB)中模拟多代理系统, 建立多代理系统基于牵制群的微电网群分布式控制算法程序, 利用 PSACD 中的用户自定义接口(英文简称 UDI)模型将 MATLAB 中的算法与电力系统计算机辅助设计(英文简称 PSCAD)模型联合运行, 从而利用联合仿真技术实现本发明的控制方法的仿真验证。

针对孤岛模式的微电网群发生扰动的情况进行仿真, 验证本发明方法的控制效果。在仿真系统中, A1 到 A7 工作在恒功率控制(PQ control)模式, A8 到 A10 工作在下垂控制(Droop control)模式。本实施例设定三个仿真场景:

场景一是微电网群从并网模式转为孤岛模式。仿真开始时, 微电网群运行在并网模式, 在 $t=1s$ 时微电网群与主网断开。每个微电网均独立运行, 下垂控制的分布式电源通过一次控制维持微电网的功率平衡。在二次控制中, 首先通过分布式电源集群牵制控制的全局协调, 将微电网群的功率缺额转化为分布式电源集群的牵制预定义一致性值; 然后各分布式电源集群中的代理寻求与牵制代理跟踪同步, 达到预定义群一致性值; 最后分布式电源集群根据预定义群一致性值调整输出功率。仿真结果如图 4 所示。图 4(a)表示微电网 1 中各分布式电源有功功率变化, 图 4(b)表示微电网 1 中各分布式电源无功功率变化, 图 4(c)表示微电网 1 中各分布式电源电压变化, 图 4(d)表示微电网 1 的频率变化。从图 4(a)到图 4(d)可以看出, 恒功率控制微电网 1 在孤岛模式下能够维持功率平衡, 基本恢复分布式电源电压和系统频率。图 4(e)表示微电网 2 中各分布式电源有功功率变化, 图 4(f)表示微电网 2 中各分布式电源无功功率变化, 图 4(g)表示微电网 2 中各分布式电源电压变化, 图 4(h)表示微电网 2 的频率变化。从图 4(e)到图 4(h)可以看出, 恒功率控制微电网 2 在孤岛模式下能够维持功率平衡, 基本恢复分布式电源电压和系统频率。图 4(i)表示微电网 3 中各分布式电源有功功率变化, 图 4(j)表示微电网 3 中各分布式电源无功功率变化, 图 4(k)表示微电网 3 中各分布式电源电压变化, 图 4(l)表示微电网 3 的频率变化。从图 4(i)到图 4(l)可以看出, 下垂控制微电网 3 在孤岛模式下能够维持功率平衡, 基本恢复分布式电源电压和系统频率。

场景二是针对本地自治控制, 消除本地扰动。仿真开始时, 微电网群运行在孤岛模式, 在 $t=1s$ 时, 孤岛微电网 1 发生负荷突然减少, A1, A2 和 A3 通过跟踪同步牵制代理 A4,

改变相应的输出功率，而微电网 2 和微电网 3 均保持不变，仿真结果如图 5 所示。图 5 (a) 表示孤岛微电网 1 中各分布式电源的有功功率变化，图 5 (b) 表示孤岛微电网 1 中各分布式电源的无功功率变化，图 5 (c) 表示孤岛微电网 1 中各分布式电源的电压变化，图 5 (d) 表示孤岛微电网 1 的频率变化。从图 5 中可以看出，微电网 1 在负荷突然减少时，各分布式电源能够协同调整输出功率，保持系统频率基本不变。

场景三是针对不确定通信拓扑变化。仿真开始时，微电网群运行在孤岛模式，在 $t=1s$ 时，孤岛微电网 1 中 DG3 由于故障而被切除，相应的通信拓扑发生改变，如图 2 所示，微电网 1 的预定义群一致性值改变，A1 和 A2 以分布的方式跟踪同步牵制代理 A4，增加输出功率以维持功率平衡，恢复系统电压和频率，仿真结果如图 6 所示。图 6 (a) 表示孤岛微电网 1 中各分布式电源的有功功率变化，图 6 (b) 表示孤岛微电网 1 中各分布式电源的无功功率变化，图 6 (c) 表示孤岛微电网 1 中各分布式电源的电压变化，图 6 (d) 表示孤岛微电网 1 的频率变化。从图 6 中可以看出，微电网 1 中 DG3 切除后，其余分布式电源能够协同承担由 DG3 切除而减少的功率，使系统频率保持不变。

从本实施例可以看出，采用本发明的控制方法后，微电网群可以进行有效的分布式协同控制，各分布式电源集群通过一次控制和二次控制，维持系统的功率平衡，恢复系统频率和电压，说明本发明提出的方法有很好地控制效果。

权利要求书

1. 一种通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法，其特征在于，所述微电网群包含 m 个下垂控制的分布式电源集群和 n 个恒功率控制的分布式电源集群；微电网群中分布式电源的控制及相互间的信息交互由多代理系统负责，每个分布式电源对应一个代理，分布式电源的编号和与该分布式电源对应的代理的编号相同；其中，一部分代理是被控制的牵制代理，其余代理通过与牵制代理的通信耦合，以分布的方式跟踪同步；所述控制方法包括以下步骤：

步骤 10) 进行一次控制，维持微电网群的功率平衡；

步骤 20) 确定牵制代理的预定义群一致性收敛值；

步骤 30) 牵制代理以外的其他代理通过通信耦合与牵制代理寻求群一致性；

步骤 40) 调整输出功率，完成二次控制。

2. 按照权利要求 1 所述的通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法，其特征在于，所述的步骤 10) 具体包括：在孤岛模式下，当微电网群发生扰动时，下垂控制的分布式电源集群自动进行如式 (1) 所示的一次控制，下垂控制的分布式电源运行在平等控制模式，维持微电网群的功率平衡：

$$\begin{aligned} f_i &= f_{n,i} - m_{p,i}(P_i - P_{0,i}) \\ U_i &= U_{n,i} - n_{Q,i}(Q_i - Q_{0,i}) \end{aligned} \quad \text{式 (1)}$$

式中， f_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的频率， $f_{n,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源频率初始值， $m_{p,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的有功下垂系数， P_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源输出的有功功率， $P_{0,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的有功功率初始值， U_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的电压； $U_{n,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源电压的参考值； $n_{Q,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的无功下垂系数； Q_i 表示第 i 个下垂控制的分布式电源输出的无功功率； $Q_{0,i}$ 表示第 i 个下垂控制的分布式电源的无功功率初始值。

3. 按照权利要求 1 所述的通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法，其特征在于，所述的步骤 20) 具体包括：在不确定通信拓扑下，确定牵制代理的预定义群一致性收敛值，包括基于下垂控制的牵制代理预定义群一致性值以及基于恒功率控制的牵制代理预定义群一致性值；

根据式 (2) 确定下垂控制分布式电源集群的分配系数：

$$\lambda_{k,D}^P = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^P}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^P + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^P}, \quad \lambda_{k,D}^Q = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^Q}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^Q + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^Q} \quad \text{式 (2)}$$

其中, $\lambda_{k,D}^P$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群的有功分配系数; $\omega_{k,D,i}$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的参与因子, 如果与代理 i 对应的分布式电源参与二次控制, 则 $\omega_{k,D,i}=1$, 否则 $\omega_{k,D,i}=0$; $\sigma_{k,D,i}^P$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的有功容量, $\omega_{k,PQ,i}$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的参与因子, 如果与代理 i 对应的分布式电源参与二次控制, 则 $\omega_{k,PQ,i}=1$, 否则 $\omega_{k,PQ,i}=0$; $\sigma_{k,PQ,i}^P$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的有功容量, $\lambda_{k,D}^Q$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群的无功分配系数, $\sigma_{k,D,i}^Q$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的无功容量, $\sigma_{k,PQ,i}^Q$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的无功容量;

根据式 (3) 确定恒功率控制分布式电源集群的分配系数:

$$\lambda_{k,PQ}^P = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^P}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^P + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^P}, \quad \lambda_{k,PQ}^Q = \frac{\sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^Q}{\sum_{k,D} \sum_{k,i} \omega_{k,D,i} \sigma_{k,D,i}^Q + \sum_{k,PQ} \sum_{k,i} \omega_{k,PQ,i} \sigma_{k,PQ,i}^Q} \quad \text{式 (3)}$$

其中, $\lambda_{k,PQ}^P$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的有功分配系数; $\omega_{k,PQ,i}$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的参与因子, 如果该分布式电源参与二次控制, 则 $\omega_{k,PQ,i}=1$, 否则 $\omega_{k,PQ,i}=0$; $\sigma_{k,PQ,i}^P$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的有功容量, $\lambda_{k,PQ}^Q$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的无功分配系数, $\sigma_{k,PQ,i}^Q$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的无功容量;

根据式 (4) 确定基于下垂控制的牵制代理预定义的群一致性值:

$$\Delta P_{k,D}^* = \frac{\lambda_{k,D}^P \Delta P_{MG}^*}{\eta_{k,D}}, \quad \Delta Q_{k,D}^* = \frac{\lambda_{k,D}^Q \Delta Q_{MG}^*}{\eta_{k,D}} \quad \text{式 (4)}$$

$$\Delta f_k^* = m_{P,i} \Delta P_{k,D}^*, \quad \Delta U_k^* = n_{Q,i} \Delta Q_{k,D}^*$$

式中, $\Delta P_{k,D}^*$ 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的有功预设群一致性值, ΔP_{MG}^* 表示整个微电网群中有功缺额, $\eta_{k,D}$ 表示第 k 个下垂控制分布式电源集群中非零参与因子的总数, $\Delta Q_{k,D}^*$ 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的无功预设群一致性值, ΔQ_{MG}^* 表示整个微电网群中无功缺额, Δf_k^* 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的频率预设群一致性值, ΔU_k^* 表示第 k 个基于下垂控制分布式电源集群的电压预设群一致性值, $m_{P,i}$ 表示有功下垂系数, $n_{Q,i}$ 表示无功下垂系数;

根据式 (5) 确定基于恒功率控制的牵制代理预定义的群一致性值:

$$\Delta P_{k,PQ}^* = \frac{\lambda_{k,PQ}^P \Delta P_{MG}^*}{\eta_{k,PQ}}, \quad \Delta Q_{k,PQ}^* = \frac{\lambda_{k,PQ}^Q \Delta Q_{MG}^*}{\eta_{k,PQ}} \quad \text{式 (5)}$$

式中, $\Delta P_{k,PQ}^*$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的有功预设群一致性值, ΔP_{MG}^* 整个微电网群中有功缺额, $\eta_{k,PQ}$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群中非零参与因子的总数; $\Delta Q_{k,PQ}^*$ 表示第 k 个恒功率控制分布式电源集群的无功预设群一致性值, ΔQ_{MG}^* 表示整个微电网群中无功缺额。

4. 按照权利要求 1 所述的通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法, 其特征在于, 所述的步骤 30) 具体包括: 通过牵制控制, 使分布式电源集群内与集群间的其他代理同牵制代理跟踪同步, 寻求达到预定义的群一致性;

按照式 (6) 确定下垂控制分布式电源代理 i 的控制误差 $e_{fUk,i}$:

$$e_{fUk,i} = \begin{bmatrix} e_{fk,i} \\ e_{Uk,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_{n,i} - \Delta f_k^* \\ \Delta U_{n,i} - \Delta U_k^* \end{bmatrix} \quad \text{式 (6)}$$

式中, $e_{fk,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 的频率控制误差, $e_{Uk,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 的电压控制误差, $\Delta f_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中频率的修正量, $\Delta U_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中电压的修正量;

按照式 (7) 确定恒功率控制分布式电源代理 i 的控制误差 $e_{PQk,i}$:

$$e_{PQk,i} = \begin{bmatrix} e_{Pk,i} \\ e_{Qk,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{ref,i} - \Delta P_{k,PQ}^* \\ \Delta Q_{ref,i} - \Delta Q_{k,PQ}^* \end{bmatrix} \quad \text{式 (7)}$$

其中, $e_{Pk,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 的有功功率控制误差, $e_{Qk,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 的无功功率控制误差, $\Delta P_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中有功功率的修正量, $\Delta Q_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中无功功率的修正量;

通过式 (8) 进行第 k 个下垂控制分布式电源集群中代理 i 的牵制控制:

$$\dot{e}_{fUk,i} = \begin{cases} \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{fk,j} - e_{fk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{fk,j} - e_{fk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{fk,i} \\ \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Uk,j} - e_{Uk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Uk,j} - e_{Uk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{Uk,i} \end{cases} \quad \text{式 (8)}$$

式中, $\dot{e}_{fUk,i}$ 表示对 $e_{fUk,i}$ 进行求导, $N_{k,i,\Theta_m(t)}$ 表示 t_m 时刻第 k 个分布式电源集群中与代理 i 相邻的代理的集合, $\alpha_{i,j,\Theta_m(t)}$ 表示在 t_m 时刻代理 i 和该集群内的其他代理之间的通信耦合系数, 若存在通信线路连接, $\alpha_{i,j,\Theta_m(t)} \neq 0$, 否则, $\alpha_{i,j,\Theta_m(t)} = 0$; $e_{fk,j}$ 表示下垂控制分布式电源代理 j 的频率控制误差, $N_{l,i,\Theta_m(t)}$ 表示 t_m 时刻第 l 个分布式电源集群中与代理 i 相邻的代理的集合; $\beta_{i,j,\Theta_m(t)}$ 表示在 t_m 时刻代理 i 和其他集群中的代理之间的通信耦合系数, 若存在通信

线路连接, $\beta_{i,j,\Theta_m(t)} \neq 0$, 否则, $\beta_{i,j,\Theta_m(t)} = 0$; $d_{i,\Theta_m(t)}$ 表示在 t_m 时刻代理 i 的牵制控制增益, $d_{i,\Theta_m(t)} \geq 0$; $d_{i,\Theta_m(t)} = 0$ 表示没有针对代理 i 的牵制控制; $e_{Uk,j}$ 表示下垂控制分布式电源代理 j 的电压控制误差;

通过式 (9) 进行第 k 个恒功率控制分布式电源集群中代理 i 的牵制控制:

$$\dot{e}_{PQk,i} = \begin{cases} \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Pk,j} - e_{Pk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Pk,j} - e_{Pk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{Pk,i} \\ \sum_{j \in N_{k,i,\Theta_m(t)}} \alpha_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Qk,j} - e_{Qk,i}) + \sum_{l \neq k} \sum_{j \in N_{l,i,\Theta_m(t)}} \beta_{i,j,\Theta_m(t)} (e_{Qk,j} - e_{Qk,i}) - d_{i,\Theta_m(t)} e_{Qk,i} \end{cases} \quad \text{式 (9)}$$

式中, $\dot{e}_{PQk,i}$ 表示对 $e_{PQk,i}$ 进行求导, $e_{Pk,j}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 j 的有功功率控制误差, $e_{Qk,j}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 j 的无功功率控制误差。

5. 按照权利要求 1 所述的通用型包含恒功率和下垂控制的微电网群分布式控制方法, 其特征在于, 所述的步骤 40) 具体包括: 各分布式电源代理根据达到的预定义群一致性值, 基于恒功率控制的分布式电源调整输出功率, 基于下垂控制的分布式电源恢复系统频率和电压, 共同完成微电网群的二次控制;

按照式 (10) 进行下垂控制分布式电源代理 i 的二次控制:

$$\begin{aligned} f_{n,i}^S &= f_{n,i} + \Delta f_{n,i} \\ U_{n,i}^S &= U_{n,i} + \Delta U_{n,i} \end{aligned} \quad \text{式 (10)}$$

式中, $f_{n,i}^S$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的频率的参考值, $f_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在一次控制中频率的参考值, $\Delta f_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中频率的修正量, $U_{n,i}^S$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的电压的参考值, $U_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在一次控制中电压的参考值, $\Delta U_{n,i}$ 表示下垂控制分布式电源代理 i 在二次控制中电压的修正量;

按照式 (11) 进行恒功率控制分布式电源代理 i 的二次控制:

$$\begin{aligned} P_{ref,i}^S &= P_{ref,i} + \Delta P_{ref,i} \\ Q_{ref,i}^S &= Q_{ref,i} + \Delta Q_{ref,i} \end{aligned} \quad \text{式 (11)}$$

式中, $P_{ref,i}^S$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的有功的参考值, $P_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 初始的有功的参考值, $\Delta P_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中有功功率的修正量, $Q_{ref,i}^S$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 通过二次控制调整的无功的参考值, $Q_{ref,i}$ 表示恒功率控制分布式电源代理 i 初始的无功的参考值, $\Delta Q_{ref,i}$

表示恒功率控制分布式电源代理 i 在二次控制中无功功率的修正量。

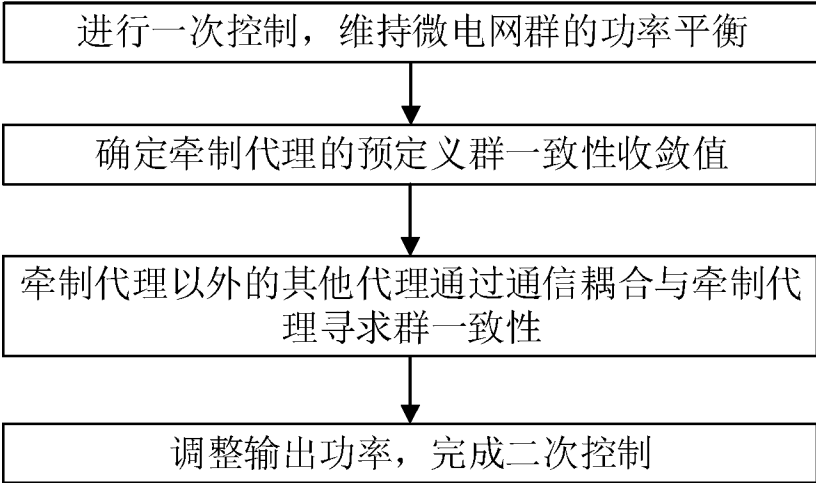


图 1

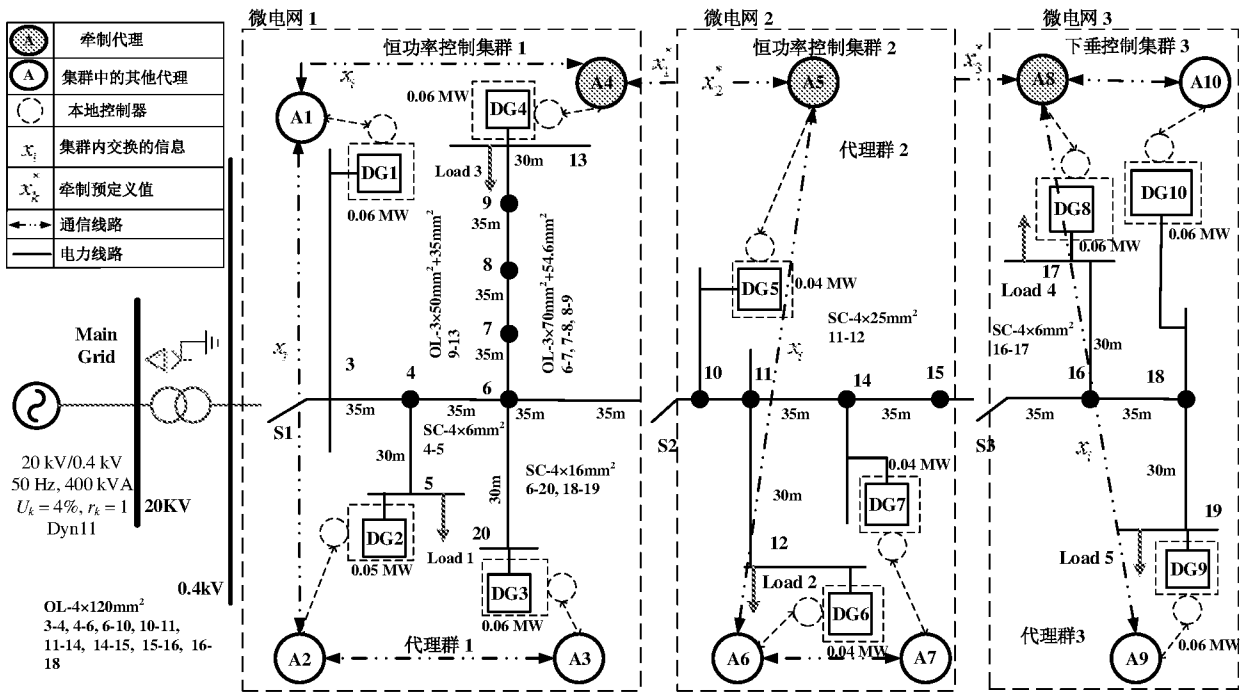


图 2

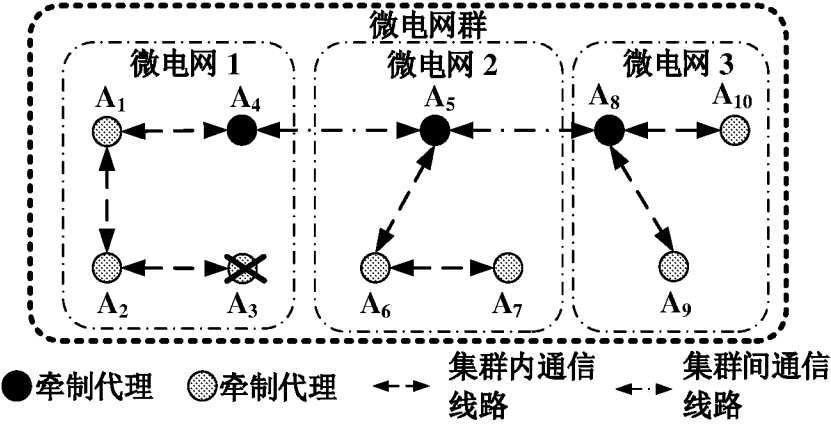


图 3

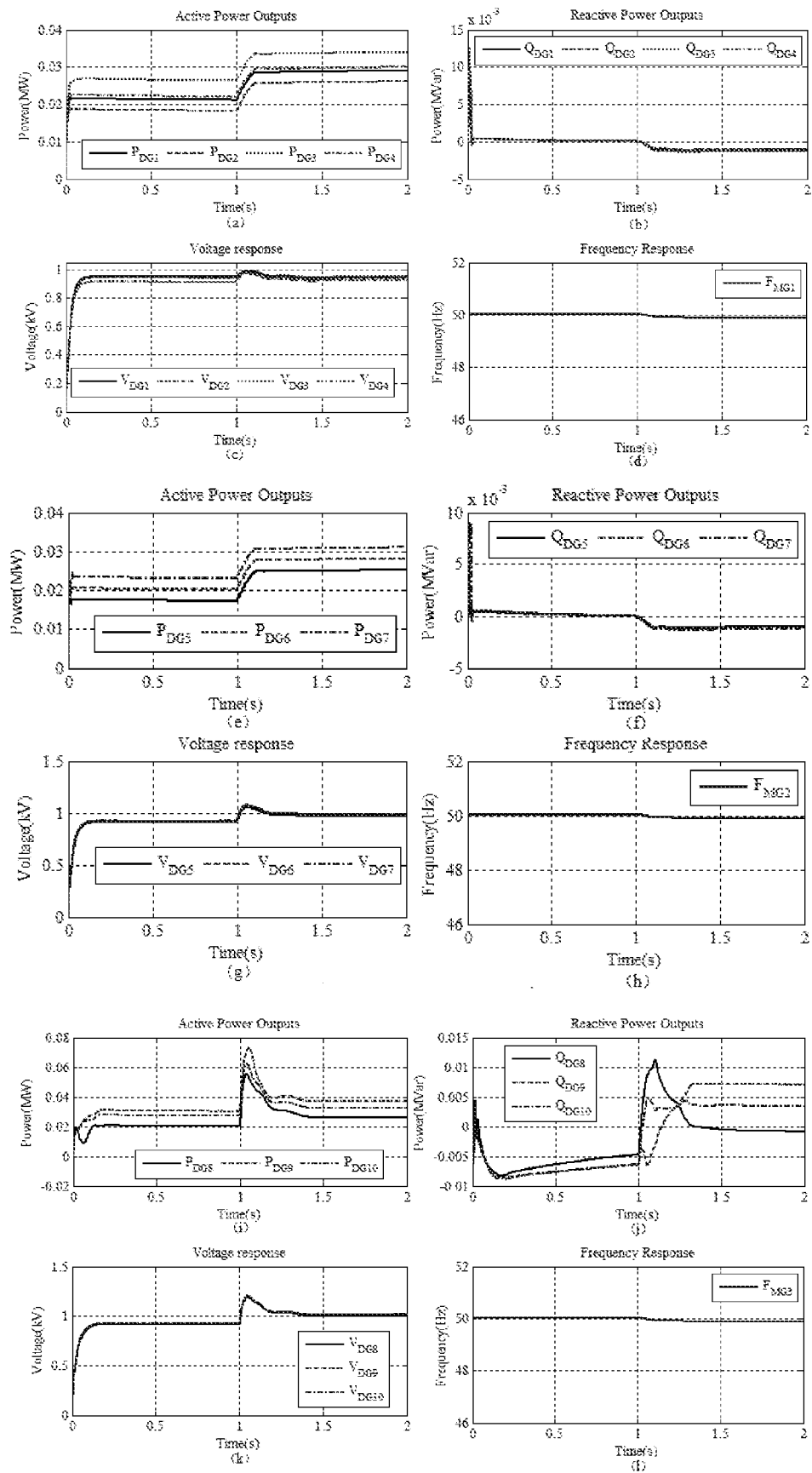


图 4

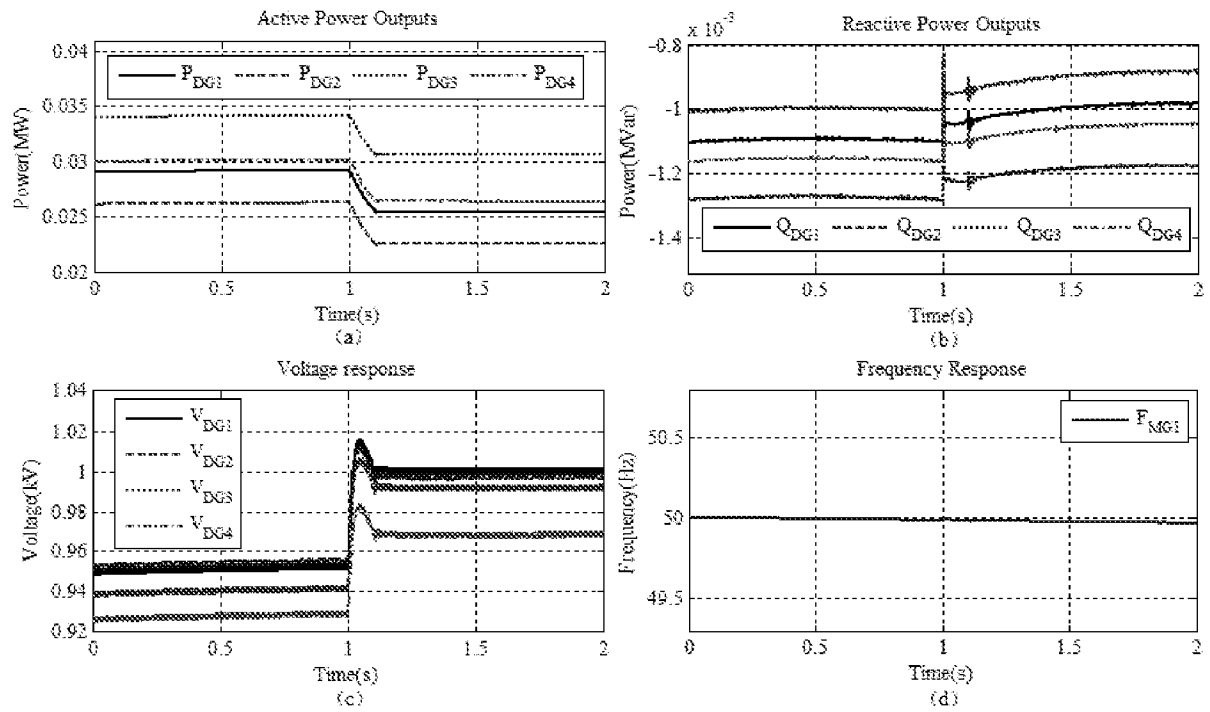


图 5

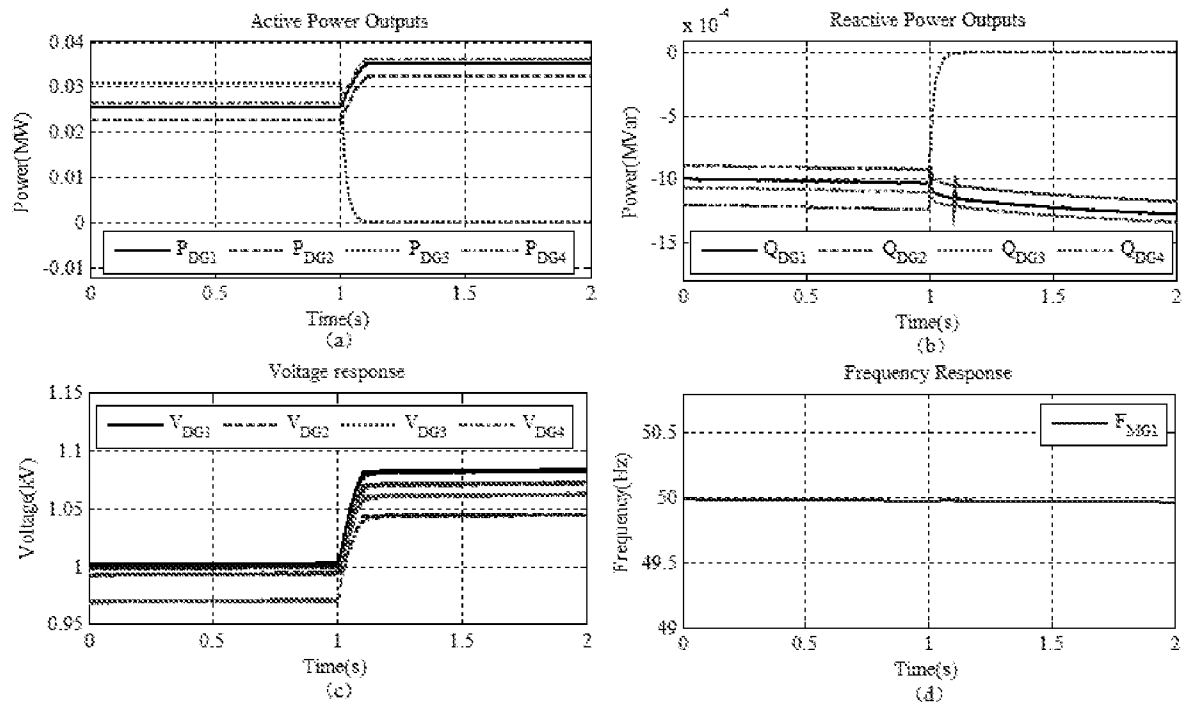


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2016/110479

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/06 (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)

H02J

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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: 分布式, 微网, 微电网, 下垂, 恒功率, PQ, 多代理, 牵制代理, 一次控制, 二次控制, distributed, micro, grid, microgrid, constant, power, droop, primary, control, secondary, agent

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 104659810 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 27 May 2015 (27.05.2015), description, paragraphs [0006]-[0010]	1-5
A	CN 105391094 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 09 March 2016 (09.03.2016), entire document	1-5
A	CN 104659811 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 27 May 2015 (27.05.2015), entire document	1-5
A	CN 104578179 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 29 April 2015 (29.04.2015), entire document	1-5
A	CN 105119283 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 02 December 2015 (02.12.2015), entire document	1-5

☒ 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 21 June 2017	Date of mailing of the international search report 30 June 2017
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 FANG, Lei Telephone No. (86-10) 61648120

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2016/110479

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2009081942 A (YANMAR DIESEL ENGINE CO.) 16 April 2009 (16.04.2009), entire document	1-5
A	US 2013073109 A1 (CHENG, PO-TAI et al.) 21 March 2013 (21.03.2013), entire document	1-5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2016/110479

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104659810 A	27 May 2015	None	
CN 105391094 A	09 March 2016	None	
CN 104659811 A	27 May 2015	CN 104659811 B	24 August 2016
CN 104578179 A	29 April 2015	CN 104578179 B	17 August 2016
CN 105119283 A	02 December 2015	None	
JP 2009081942 A	16 April 2009	JP 4869198 B2	08 February 2012
US 2013073109 A1	21 March 2013	TW I415359 B	11 November 2013
		TW 201315083 A	01 April 2013

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2016/110479

A. 主题的分类

H02J 3/06(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

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))

WPI, EPDOC, CNPAT, CNKI:分布式, 微网, 微电网, 下垂, 恒功率, PQ, 多代理, 牵制代理, 一次控制, 二次控制, distributed, micro, grid, microgrid, constant, power, droop, primary, control, secondary, agent

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	CN 104659810 A (东南大学) 2015年 5月 27日 (2015 - 05 - 27) 说明书第[0006]-[0010]段	1-5
A	CN 105391094 A (东南大学) 2016年 3月 9日 (2016 - 03 - 09) 全文	1-5
A	CN 104659811 A (东南大学) 2015年 5月 27日 (2015 - 05 - 27) 全文	1-5
A	CN 104578179 A (浙江大学) 2015年 4月 29日 (2015 - 04 - 29) 全文	1-5
A	CN 105119283 A (东南大学) 2015年 12月 2日 (2015 - 12 - 02) 全文	1-5
A	JP 2009081942 A (YANMAR DIESEL ENGINE CO.) 2009年 4月 16日 (2009 - 04 - 16) 全文	1-5
A	US 2013073109 A1 (CHENG, PO-TAI 等) 2013年 3月 21日 (2013 - 03 - 21) 全文	1-5

☐ 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

2017年 6月 21日

国际检索报告邮寄日期

2017年 6月 30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)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

方蕾

电话号码 (86-10)61648120

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/110479

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	104659810	A	2015年 5月 27日	无			
CN	105391094	A	2016年 3月 9日	无			
CN	104659811	A	2015年 5月 27日	CN	104659811	B	2016年 8月 24日
CN	104578179	A	2015年 4月 29日	CN	104578179	B	2016年 8月 17日
CN	105119283	A	2015年 12月 2日	无			
JP	2009081942	A	2009年 4月 16日	JP	4869198	B2	2012年 2月 8日
US	2013073109	A1	2013年 3月 21日	TW	I415359	B	2013年 11月 11日
				TW	201315083	A	2013年 4月 1日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)