

基于多智能体一致性的孤岛微网协调二次控制

万晓凤¹,涂慧朋¹,丁小华¹,曾繁鹏²

(1.南昌大学 信息工程学院,江西 南昌 330031;

2.江苏林洋能源股份有限公司,江苏 启东 226200)

摘要:针对孤岛型微电网二次电压和频率控制,提出一种基于多智能体一致性协议的控制策略以使其满足电能质量的要求,保证系统的安全稳定运行。首先,设计分布式微电网控制结构,将各分布式电源看成系统中的智能体,采用一定的有向通信网络拓扑实现智能体之间的相互协调。其次,应用二阶一致性算法于微电网二次控制器中,实现了系统电压和频率恢复至额定值,并进行了稳定性及收敛速度分析。最后,在PSCAD/EMTDC中对孤岛微电网系统建模仿真,其结果验证了所提控制策略的有效性。

关键词:微电网;孤岛模式;多智能体;一致性协议;二次控制

中图分类号:TP18 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19696

Cooperative Secondary Control in an Islanded Microgrid Based on Multi-agent Consistency Protocol

WAN Xiaofeng¹, TU Huipeng¹, DING Xiaohua¹, ZENG Fanpeng²

(1. College of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China;

2. Jiangsu Linyang Energy Co., Ltd., Qidong 226200, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the secondary voltage and frequency control of island-type microgrid, a control strategy based on multi-agent consistency protocol was proposed to meet the requirements of power quality and ensure the safe and stable operation of the system. The distributed microgrid control structure was designed firstly. Each distributed generation was regarded as an intelligent body in the system, and a certain directed communication network topology was used to realize the mutual coordination between the intelligent bodies. Then the second-order consistency algorithm was applied to the secondary controller of the microgrid to restore both voltage and frequency to their reference values, and the stability and convergence speed were analyzed. At last, PSCAD/EMTDC was used for modeling and simulation on the island microgrid system and corresponding results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: micro-grid; islanded mode; multi-agent; consistency protocol; secondary control

随着分布式新能源渗透率的提升,新一代电力系统提出了向智能化发展的要求。微网能有效地整合分布式电源与本地负荷,提高系统稳定性与经济性,作为大电网的受控单元,从而有效弱化了新能源并网造成的不利影响^[1-5]。微网在并网时,其动态特性主要由主网决定。孤岛时由于缺乏主网支撑,各DG(distributed generations)运行环境较复杂,且新能源出力与负荷需求均有波动性,使孤岛微电网控制策略的研究成为难点^[6-8]。

为了消除或减小常规下垂控制所造成的电压、频率等偏差,保证微电网的安全稳定运行,需

要对其进行二次调节控制。传统解决方式主要采用集中式控制结构,利用中央控制器可以有效地实现对微网二次控制,但辐射式的结构也导致了它只能准确调节单一母线电压,无法实现全局状态一致。并且中央控制器与其他设备之间的通信要求较高,降低了系统的可靠性^[9-10]。因此,文献[11-15]提出了分布式控制策略实现微网稳定运行,其中文献[11]提出的分布式电压控制策略无通信系统,但需进行系统预测方程建立,当系统结构变化时需重新计算,且节点数较多使方程的求解变得困难。由于多代理技术与分布式

基金项目:国家国际科技合作专项(2014DFG72240);江西科技落地计划项目(KJD14006)

作者简介:万晓凤(1964—),女,硕士,教授,Email:xfwan_jx@163.com

控制方式之间的契合度较高,近年来引起了较多学者的关注。文献[16]利用基于多代理系统的内模设计原理设计了分布式二次控制器,实现了电压、频率恢复为初始设定值,同时保证了DG按设计下垂特性分配有功功率。文献[17-18]在分布式分层控制的基础上,均采用多智能体一致性算法对系统的电压和频率进行优化,系统可靠性得到很大提高。

基于此,本文利用MAS(multi-agent system)一致性协议对微电网进行了协调二次控制设计。各代理节点除在接收本地信息外,可与相邻节点进行信息交换,少数节点可接收领导节点信息,进一步提升系统的可靠性。在二阶一致性算法的作用下,系统电压和频率能快速趋于一致值,即可得到与运行设定值的偏差量。通过发送至一次控制进行补偿,实现了下垂控制曲线的平移,保证了各DG的电压和频率与设定值同步一致。

1 基于MAS分布式算法

1.1 分布式微网控制结构

本文中孤岛微电网主要由各分布式电源、负荷和控制器等组成,将各DG均视为智能体,在满足分布式通信的条件下,应用图论知识对该系统进行描述。图1为孤岛微网仿真测试结构图。各DG均通过各变流器及输出端LC滤波电路并入交流母线; R_c 为线路电阻与滤波电感等效电阻之和, L_c 和 C_f 分别为滤波电感和滤波电容。

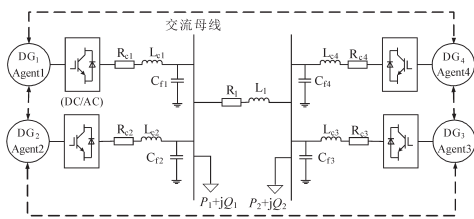


图1 孤岛微电网系统框图

Fig.1 The block diagram of islanded microgrid system

图1中,虚线为该系统的通信拓扑图G,图G可用 $G=(V_G, E_G, W_G)$ 来表示,其中 $V_G = \{v_1, v_2, v_3\}$ 为节点集合, E_G 为边集合, $W_G = (\omega_{ij}) \in R^{N \times N}$ 为图G中边的权重。在微电网结构中,将每个智能体作为图G的节点,图G的边为智能体之间的通信,边的权重为智能体之间的相互影响程度。设 ω_{ij} 为边 (v_j, v_i) 的权重, $\omega_{ij} > 0$ 为智能体 i 与智能体 j 为“邻居”时的节点,并且 v_j 为 v_i 的父节点,否则 $\omega_{ij} = 0$ 。在图1中,考虑信息的交互一般用Laplace矩阵

L 对其进行描述。定义拉普拉斯矩阵为 $L=D-A$,其中 D 为该图的入度矩阵; A 为邻接矩阵。节点 v_j 的入度和出度可以用下式表示:

$$\begin{cases} d_{in}(v_j) = \sum_{i=1}^n \omega_{ji} \\ d_{out}(v_j) = \sum_{i=1}^n \omega_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

则拉普拉斯矩阵 L 元素 $(l_{ij})_{N \times N} \in R$ 可以描述为

$$l_{ij} = \begin{cases} -a_{ij} & i \neq j \\ d_{ij} & i = j \end{cases} \quad (2)$$

式中: a_{ij} 为邻接矩阵对应元素; d_{ij} 为入度矩阵对应元素。

1.2 二阶一致性算法

在微网MAS中,考虑到网络拓扑图结构与孤岛微网系统动态特性均为系统目标值一致性的重要因素,本文采用二阶一致性算法对微电网系统进行二次调频调压控制。

考虑二阶积分器模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x_i(t), v_i(t), u_i(t)$ 分别为第 i 个智能体在时刻 t 的位置、速度状态和控制协议输入。

系统中存在2个状态变量,其实现一致性是指: $\lim_{t \rightarrow \infty} [x_i(t) - x_j(t)] = 0$ 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} [v_i(t) - v_j(t)] = 0$ ($i, j=1, 2, \dots, n$)。

在固定拓扑的情况下,文献[19]对系统提出了如下的控制协议:

$$u_i(t) = \sum_{j \in N_i} \omega_{ij} \{ [x_j(t) - x_i(t)] + \gamma [v_j(t) - v_i(t)] \} \quad (4)$$

式中: γ 为一个有界的放缩参数, $\gamma > 0$ 。

将控制协议式(4)与模型式(3)结合可以得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n \\ -\mathbf{L} & -\gamma \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]$

$v(t) = [v_1(t) \ v_2(t) \ \dots \ v_n(t)]$

式中: L 为通讯拓扑的拉普拉斯矩阵。

由式(5)可以看出,该控制协议式(4)使系统实现一致性的条件不仅与通信拓扑结构有关还与参数 γ 有关。

令矩阵

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n \\ -\mathbf{L} & -\gamma \mathbf{L} \end{bmatrix}$$

则矩阵 Γ 的特征多项式为

$$\begin{aligned} \det[\lambda I_{2n} - \Gamma] &= \det\left(\begin{bmatrix} \lambda I_n & \mathbf{0}_n \\ \mathbf{0}_n & \lambda I_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n \\ -L & -\gamma L \end{bmatrix}\right) \\ &= \det[\lambda^2 I_n + (1 + \gamma\lambda)L] \\ &= \prod_{i=1}^n [\lambda^2 + (1 + \gamma\lambda)\lambda_i] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: λ_i 为 L 的特征根。

令式(6)等于0,得到矩阵 Γ 的特征根:

$$\lambda_{i1,2} = \frac{-\gamma\lambda_i \pm \sqrt{\gamma^2\lambda_i^2 - 4\lambda_i}}{2} \quad (7)$$

文献[19]控制协议式(4)实现一致的充分条件是系统作用拓扑包含一棵生成树且放缩参数 γ 满足

$$\gamma > \max_{\lambda_i \neq 0} \sqrt{\frac{2}{|\lambda_i(-L)| \cos\left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{-\text{Re}[\lambda_i(-L)]}{\text{Im}[\lambda_i(-L)]}\right]}} \quad (8)$$

分布式算法在保持系统一致值趋于初始状态平均量的前提下,避免了集中式计算的复杂性,同时增强了系统的鲁棒性,大大节约了通信成本。

2 分布式孤岛微网二次控制策略

2.1 二次控制器设计

二次控制的实现主要由各 agent 之间进行相互协作来完成。定义 DG_1 为领导体,部分 agent 除了接收相邻 agent 的信息之外,还接收该领导体的信息,通过采用合适的分布式控制算法,DG 之间经过不断的信息交换能与领导节点的信息达成一致。

图2为微网分布式控制结构图。本文所提出的基于多智能体一致性算法的分布式控制策略在下垂控制策略的基础上进行了二次调整。在分布式电源出力及负荷波动的情况下,通过该控制策略各 DG 均能维持电压、频率同步稳定。

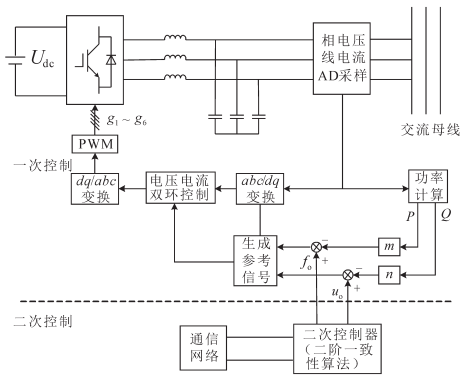


图2 微网分布式控制结构图

Fig.2 Diagram of microgrid distributed control structure

微网的初级控制层采用的是下垂控制,主要为了合理分配各逆变器的输出功率。其有功和无功功率由节点输出频率和电压决定,如下式所示:

$$\begin{cases} f_i = f_{oi} - m_i P_i \\ U_{di} = U_{oi} - n_i Q_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: f_i 为下垂控制生成的系统输出频率; U_{di} 为第 i 台逆变器输出电压在 d 轴上的分量, q 轴分量参考值为0; f_{oi}, U_{oi} 分别为第 i 台逆变器额定输出频率和电压,由二次控制器给定; m_i, n_i 为下垂系数; P_i, Q_i 分别为有功和无功功率。

基于上述,结合二阶一致性算法可得到二次控制模型为

$$\begin{cases} \dot{f}_i = \dot{f}_{oi} - m_i \dot{P}_i = x_i \\ \dot{x}_i = v_{fi} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{di} = \dot{U}_{oi} - n_i \dot{Q}_i = y_i \\ \dot{y}_i = v_{ui} \end{cases} \quad (11)$$

式中: v_{fi} 和 v_{ui} 分别为二次频率和电压控制输入。下面仅以孤岛微电网二次频率恢复为例进行说明,二次电压控制可类比分析。类似于式(3),易得二阶模型的控制律如下式:

$$v_{fi} = \sum_{j \in N_i} \omega_{ij} \{ [f_j(t) - f_i(t)] + \gamma [x_j(t) - x_i(t)] \} \quad (12)$$

式中: N_i 为 n 个智能体的范围。

由式(12)与1.2节的分析可知,微电网系统在该控制协议下的二次频率恢复的控制目标是各分布式电源的频率都趋于系统参考值并且其导数最终都等于0。由于该算法下最终的收敛结果为相应初始状态的平均值,而下垂控制会产生频率偏差,因此需要对其进行偏差量补偿。为了避免计算复杂度及各逆变器因补偿量差异而无法协调控制,本文对各台逆变器频率补偿量取各逆变器频率偏差量和的平均值。其值为

$$\Delta f = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (f_i - f_{req}) \right] \quad (13)$$

式中: f_{req} 为系统频率,设定值50 Hz。

由图1可知,本文孤岛微电网系统测试框图的拓扑结构满足含有一颗生成树的条件并且具有强连通的特性,即任意两节点之间均有一条及以上的有向生成路径。所以系统能够趋于一致稳定还需考虑参数 γ 的影响。本文所测试的孤岛微电网结构的Laplace矩阵如下式所示:

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(8)可知,系统稳定的另一个充分条件是必须满足参数 $\gamma > 1$ 。

上述部分为系统正常状态下二次控制策略的流程。为了提高系统的可靠性,仍需考虑在故障状态下的运行条件。在系统中发生某一DG故障或者单一通信线路故障时,能够通过调节参数满足系统达到渐近一致稳定的2个条件。

在发生某种故障时,拉普拉斯矩阵 L 也产生相应的变化。进一步设计参数 γ ,经过测试直至系统频率和电压值稳定在设定参考值附近。但由于通信线路的减少,相应的通信速率会略有降低。相应的具体过程流程图如图3所示。

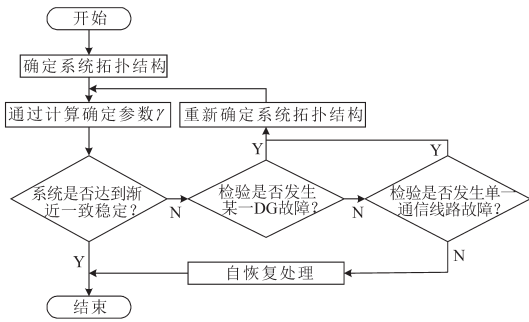


图3 系统测试流程图

Fig.3 Flow chart of system test

2.2 一致性收敛速度

孤岛微电网中二次控制目标达成一致的速度主要取决于其特征方程根的大小。从式(7)可知,该矩阵的特征根均具有负实部,满足Lyapunov稳定判据的条件,系统在平衡状态时 x_c 是渐近稳定的。在选定参数 γ 的条件下, L 特征值越小,其收敛速度越快,同时也越快到达实轴,因此该系统一致性收敛速度主要取决于 $\lambda_2(L)$ 值的大小。

假定 $\lambda_l > \lambda_k > 0$,则有:

$$\gamma < \frac{2}{\sqrt{\lambda_l}} < \frac{2}{\sqrt{\lambda_k}} \quad (15)$$

其中, $\lambda_{kl}(\gamma)$ 和 $\lambda_{ll}(\gamma)$ 为第 k 和 l 个特征值的复数形式,并且 $\text{Re}\lambda_{ll}(\gamma) < \text{Re}\lambda_{kl}(\gamma)$,同理存在有

$$\hat{\gamma} = \frac{2}{\sqrt{\lambda_k}} > \frac{2}{\sqrt{\lambda_l}} \quad (16)$$

其中 $\lambda_{kl}(\hat{\gamma})$ 和 $\lambda_{ll}(\hat{\gamma})$ 均为实数,并且 $\lambda_{ll}(\hat{\gamma}) > \lambda_{kl}(\hat{\gamma})$ 。

证明:从式(15)中,可以得出:

$$\gamma^2 \lambda_l^2 - 4\lambda_l < \frac{4}{\lambda_l} \lambda_l^2 - 4\lambda_l = 0 \quad (17)$$

结合矩阵 L 的特征根,很容易得出:当 $i = l, k$ 时, $\lambda_{kl}(\gamma)$ 和 $\lambda_{ll}(\gamma)$ 均为复数。

$$\text{Re}\lambda_{ll}(\gamma) = -\gamma\lambda_l/2 < -\gamma\lambda_k/2 = \text{Re}\lambda_{kl}(\gamma) \quad (18)$$

显然,由式(16)可得 $\lambda_{kl}(\hat{\gamma})$ 和 $\lambda_{ll}(\hat{\gamma})$ 均为实数。

$$\begin{aligned} \lambda_{ll}(\hat{\gamma}) - \lambda_{kl}(\hat{\gamma}) &= \frac{-\hat{\gamma}\lambda_l + \sqrt{\hat{\gamma}^2 \lambda_l^2 - 4\lambda_l}}{2} + \frac{\hat{\gamma}\lambda_k}{2} \\ &= \frac{\hat{\gamma}}{2} \left[\lambda_k - \lambda_l + \sqrt{\lambda_l^2 - \frac{4\lambda_l}{\hat{\gamma}^2}} \right] \\ &= \frac{\hat{\gamma}}{2} \left[\sqrt{\lambda_l^2 - \lambda_l \lambda_k} - (\lambda_l - \lambda_k) \right] \\ &= \frac{\hat{\gamma}}{2} \frac{\lambda_k(\lambda_l - \lambda_k)}{\sqrt{\lambda_l^2 - \lambda_l \lambda_k} + (\lambda_l - \lambda_k)} > 0 \end{aligned} \quad (19)$$

由上述可知,微电网系统的通信结构决定了其拉普拉斯矩阵特征值的大小,进而影响其二次控制对象迭代至目标值的收敛速度。

文献[20]在此基础上,对一般条件下的二阶控制协议参数 γ_1 和 γ_2 进行了理论推导并给出详细证明。在本文控制协议下,达到最大收敛速度的参数 γ 满足下式:

$$\gamma = \frac{2\sqrt{\lambda_n(L)}}{\sqrt{\lambda_2(L)}[2\lambda_n(L) - \lambda_2(L)]} \quad (20)$$

式中: $\lambda_n(L)$ 为第 n 个特征值的大小。

3 仿真结果与分析

为了测试本文所提控制协议在孤岛微电网系统二次调节控制目标中的有效性,在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建了如图1所示的孤岛微电网仿真模型并进行验证。

测试模型主电路参数如下: $R_{c1}=0.13 \Omega$, $L_{c1}=1.7 \text{ mH}$, $C_{f1}=50 \mu\text{F}$, $R_{c2}=0.13 \Omega$, $L_{c2}=1.7 \text{ mH}$, $C_{f2}=50 \mu\text{F}$, $R_1=0.25 \Omega$, $P_1=10 \text{ kW}$, $Q_1=6 \text{ kvar}$, $R_{c3}=0.13 \Omega$, $L_{c3}=1.7 \text{ mH}$, $C_{f3}=50 \mu\text{F}$, $R_{c4}=0.13 \Omega$, $L_{c4}=1.7 \text{ mH}$, $C_{f4}=50 \mu\text{F}$, $L_1=1.85 \text{ mH}$, $P_2=15 \text{ kW}$, $Q_2=9 \text{ kvar}$ 。控制电路参数为: $D_{p1,2}=1\text{e-}4$, $D_{q1,2}=1.3\text{e-}3$, $k_{pv1,2}=0.1$, $k_{iv1,2}=380$, $k_{pi1,2}=12$, $K_{ii1,2}=1.8\text{e}4$, $K_{pf}=0.01$, $K_{if}=2$, $E_o=311 \text{ V}$, $D_{p3,4}=1.3\text{e-}4$, $D_{q3,4}=1.5\text{e-}3$, $k_{pv3,4}=0.08$, $k_{iv3,4}=350$, $k_{pi3,4}=10$, $K_{ii3,4}=1.6\text{e}4$, $K_{pE}=0.01$, $K_{iE}=0.4$, $f_o=50 \text{ Hz}$ 。

图4为算法性能测试结果图。

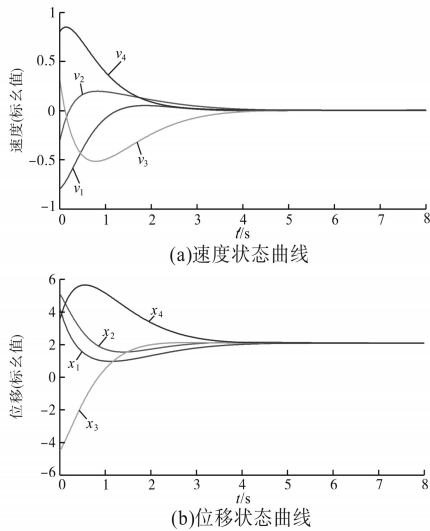


图4 算法性能测试结果

Fig.4 Test results of algorithm performance

在 Matlab 中进行了算法的性能测试。根据式(20)取得 γ 的最优参数为 1.155,同时选取多智能体的初始状态 $\mathbf{v}(0)=[-0.8 \ -0.3 \ 0.3 \ 0.8]^T$, $\mathbf{x}(0)$ 为 $[-6, 6]$ 之间的随机数。由于 L 连通度较高,各智能体的状态量均能收敛至一致值。从图 4 可以看出,该值为其初始状态量的平均值。

图 5 为系统频率和电压响应仿真结果图。

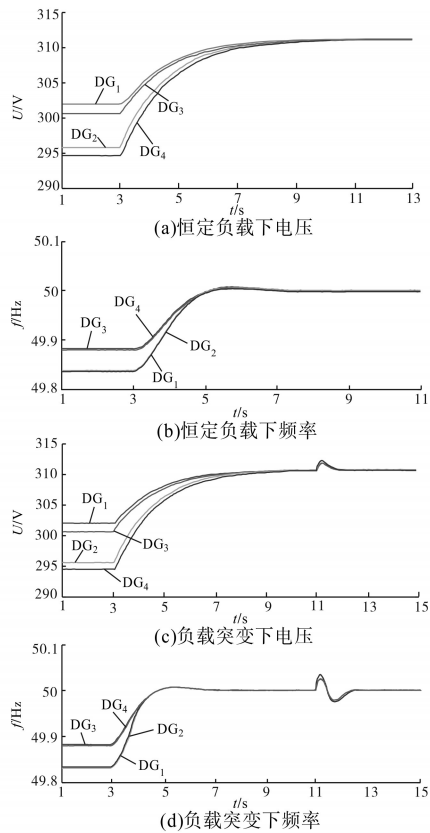


图5 系统电压、频率

Fig.5 The voltage and frequency waveforms of the system

图 5a、图 5b 分别为恒定负载下系统的电压和频率响应波形。在系统带负载启动后,经过下垂控制调节,各 DG 输出电压、频率值均明显偏离系统参考值并进入稳态。3 s 时投入二次控制器,系统电压幅值和频率偏差均得到了消除。图 5c、图 5d 在 11 s 时突加了 5 kW 的负载,从图 5 中可以看出,电压、频率经过短暂调整时间均稳定在参考设定值附近,仿真结果进一步证明了所提控制策略的有效性。

4 结论

本文在孤岛微电网基于下垂控制的分布式分层控制策略基础上,将多智能体的二阶一致性算法应用于频率和电压调节,通过相邻节点之间少量数据交换得到各状态量的平均值,计算得到相应的偏差补偿量发送到一次控制端进行二次调整,消除了微电网电压幅值偏差与频率偏差。同时系统无需集中式控制中心,可以实现即插即用,提高了微电网的控制可靠性。最后仿真测试结果说明了所提控制策略的有效性。

本文仅考虑了单故障情况下的处理,但并未进行故障状态下的模拟。对多 DG 故障或多通信线路故障等情况亟待考虑,同时微电网系统实时稳定运行仍有待进一步研究。

参考文献

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
- [2] 胡健,马皓. 基于多智能体的微网功率经济分配方法[J]. 电网技术,2017,41(8):2657-2663.
- [3] 张晓辉,闫鹏达,钟嘉庆,等. 可再生能源激励制度下的低碳经济电源规划[J]. 电网技术,2015,39(3):655-662.
- [4] 程林,刘琛,朱守真,等. 基于多能协同策略的能源互联微网研究[J]. 电网技术,2016,40(1):132-138.
- [5] 熊雄,王江波,杨仁刚,等. 微电网中混合储能模糊自适应控制策略[J]. 电网技术,2015,39(3):677-681.
- [6] 肖湘宁,王鹏,陈萌. 基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略[J]. 电工技术学报,2018,33(8):1894-1902.
- [7] 康文发,李强,陈民铀,等. 孤岛微电网多 Agent 分布式双层控制方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):770-781.
- [8] Balaguer I J, Lei Q, Yang S, et al. Control for Grid-connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1):147-157.
- [9] Tan K T, Peng X Y, So P L, et al. Centralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters in Mi-

crogrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1977-1987.

[10] Yazdani M, Mehrizi-Sani A. Distributed Control Techniques in Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2901-2909.

[11] Wang Y, Chen Z, Wang X, *et al.* An Estimator-based Distributed Voltage-predictive Control Strategy for AC Islanded Microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3934-3951.

[12] 窦春霞, 李娜, 徐晓龙. 基于多智能体系统的微电网分散协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 125-134.

[13] Li Q, Chen F, Chen M, *et al.* Agent-based Decentralized Control Method for Islanded Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 637-649.

[14] 孙孝峰, 郝彦丛, 王宝诚, 等. 微电网分布式储能单元荷电状态平衡和电压恢复[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4047-4054.

[15] 谢俊, 陈凯旋, 岳东, 等. 基于多智能体系统一致性算法的电

力系统分布式经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 112-117.

[16] 陈萌, 肖湘宁. 基于分布式内模设计的微电网协调二次控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 145-153.

[17] 余志文, 艾芊, 熊文. 基于多智能体一致性协议的微电网分层分布实时优化策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 25-31.

[18] 周焯, 汪可友, 李国杰, 等. 基于多智能体一致性算法的微电网分布式分层控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 142-149.

[19] Ren W, Atkins E. Distributed Multi-vehicle Coordinated Control via Local Information Exchange[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2010, 17(10/11): 1002-1033.

[20] Zhu J. On Consensus Speed of Multi-agent Systems with Double-integrator Dynamics[J]. Linear Algebra & Its Applications, 2011, 434(1): 294-306.

收稿日期: 2018-11-14

修改稿日期: 2019-03-01

(上接第 78 页)

即为分析阶段的 U_{cr} 。可见电流和电压波形和理论设计以及仿真保持一致。启动迅速且无超调。

3 结论

结合瞬时功率理论对负载的特性进行预测, 并根据预测结果设计启动时给定电流曲线, 重点介绍了曲线中 2 个重要的参数的确定方法。通过仿真和实验证明了本软启动方法的正确性和实际可行性。实验证明基于该方法的三相 VSR 在启动过程中, 电压和电流上升曲线快速、平滑、无超调, 对产品的升级优化有积极意义。

参考文献

[1] 田洋天, 肖岚, 郑昕昕, 等. 三相 PWM 整流器启动冲击的抑制[J]. 电力电子技术, 2013, 47(5): 1-3.

[2] Thanyaphirak Veera, Kinnaree Vijit, Kunakorn Anantawat, *et*

al. Soft starting Control Scheme for Three-phase Induction Motor Fed by PWM AC Chopper[C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014: 92-95.

[3] 李龙, 刘聪. 三相 PWM 整流器的自适应 PI 控制研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4): 93-95.

[4] 许胜. PWM 整流器启动瞬时电流过冲抑制策略[J]. 电源技术, 2015, 39(1): 158-160, 1.

[5] Juinne-Ching L, Sheng-Nian Y. A Novel Instantaneous Power Control Strategy and Analytic Model for Integrated Rectifier/ Inverter Systems[J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2000, 15(6): 996-1006.

[6] 邓文浪, 胡毕华, 郭有贵, 等. 三相电压型 PWM 整流器的分段启动控制[J]. 电力电子技术, 2014, 48(1): 30-32.

[7] 杨怀仁. 基于瞬时无功功率理论的三相谐波电流检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

收稿日期: 2019-01-31

修改稿日期: 2019-03-13