

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200004

逆变器串并联型微电网的一种本地主从协调控制策略

郑若楠¹, 韩华², 李国杰¹, 葛小海²

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240;

2. 中南大学自动化学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 逆变器串并联型微电网吸收了传统并联型和串联型系统的优点, 但其结构的复杂性给系统的控制策略设计带来了新的挑战。针对逆变器并联型和串联型微电网功率均分策略之间的矛盾, 提出了一种基于虚拟阻抗技术的本地主从协调控制策略。该控制策略将每个微源串中靠近公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)的微源设置为主控单元, 其采用无通信的改进下垂控制实现微源串之间的同步和功率一致, 其余串联微源在本地跟随主控单元运行, 最终实现了全局的功率均分。全局无通信的设计提高了系统的可靠性和灵活性, 降低了运行成本。仿真结果验证了所提方案的可行性和有效性。

关键词: 微电网; 串并联逆变器系统; 主从协调控制; 虚拟阻抗; 功率均分

A local master-slave coordinated control strategy for series-parallel inverter microgrids

ZHENG Ruonan¹, HAN Hua², LI Guojie¹, GE Xiaohai²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University,

Shanghai 200240, China; 2. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Hybrid microgrids with series-connected and parallel-connected inverters incorporate the advantages of series inverter and parallel inverter systems, but their complex structures bring new challenges to the control strategy design of the systems. A local master-slave coordinated control scheme based on virtual impedance is proposed to solve the contradiction between parallel and series microgrid control strategies. The inverters near a PCC in each string are set as master control units, which adopt improved droop control without communication to realize synchronization and power equalization, and the other series inverters run with the master control units locally, finally achieving global power sharing. The global non-communication design improves the reliability and flexibility of the system and reduces the operating cost. Simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61573384).

Key words: microgrid; series-parallel inverter system; master-slave coordinated control; virtual impedance; power sharing

0 引言

微电网作为新能源的一种有效利用形式^[1-4], 一直受到人们的广泛关注。现有的微电网以交流微电网为主^[5], 随着分布式电源渗透率的增大^[6], 交流微电网中不可避免地会发生一些结构变化^[7]。根据接口逆变器的连接类型, 微电网通常分为并联型和串联型^[8-9]。由于逆变器串联技术具有输出电压波形好、微源额定电压较低、对功率器件要求较低等诸多优点^[10], 可将微源逆变器串联构成子系统, 再将

串联子系统并联构成串并联混合型微电网, 以提高系统的冗余度和可靠性。相比于并联型和串联型微电网, 串并联混合结构微电网适用范围更广, 系统电压等级可调, 但结构更复杂, 对其功率均分^[11]和控制策略研究尚少。因此, 对串并联混合交流微电网的稳定化协调控制方法展开研究, 对探索和推动该结构的微电网的工程化具有重要意义。

文献[12]率先提出了级联与并联合的逆变器系统结构, 并提出了主从模式下电压多电流双闭环与载波相移技术相结合的控制策略。这一控制策略抑制环流和功率均分效果好, 但其全局集中式控制方式对通信依赖性强, 可靠性差。文献[13]设计

了一种基于 PCC 点电压和微源逆变器电压同时控制的分级功率调节方法。该控制策略相对于全局集中控制策略降低了通信成本,提高了可靠性。然而其引入多个中央控制器,控制结构复杂,对通信依赖程度较高,且一般情况下 PCC 点距离各微源较远,数据难获取^[14]。为降低集中式控制对通信的依赖,学者们提出了分布式控制策略^[15-16]。文献[17]由于不使用中央控制器,进一步提高了可靠性,但其采用全局通信致使通信网络复杂,控制速度较慢,灵活性较差。

可见,目前对串并联型微电网的控制策略一般都依赖于复杂的通信网络。本文提出了一种基于多主从控制思想的局部集中式控制策略。串间采用改进的下垂控制,串内采用主从控制,无需采集 PCC 点的数据,仅通过采集主电源的本地信息进行控制。本文提出的控制方案解决了功率控制的内在矛盾^[18],实现了全局频率自同步;控制结构相对简单,加快了控制速度,降低了通信成本;提高了可靠性和灵活性;改进下垂控制为复杂微电网提供了借鉴,进一步优化了系统的性能。

1 孤岛交流微电网的典型结构与控制策略

1.1 逆变器并联型孤岛微电网

图 1 为单相并联型微电网的结构图。图中共有 N 台逆变器并联, $Z_n = R_n + jX_n$ 为第 $n(n=1,2,\dots,N)$ 台微源逆变器输出阻抗和连接线路阻抗之和, $Z_{load} = R_l + jX_l$ 为负载; $V_p \angle \delta_p$ 为交流母线电压, $V_n \angle \delta_n$ 为第 n 台微源逆变器的输出电压,假设 $\delta_p = 0^\circ$ 。

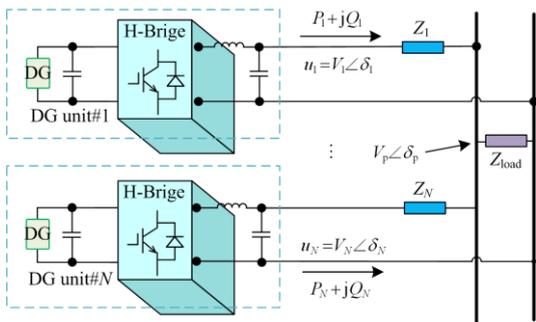


图 1 单相逆变器并联型微电网结构图

Fig. 1 Structure of single-phase parallel micro grid

由图 1 可知,设第 n 台逆变器输出电流为 i_n , 则有

$$i_n = \frac{\dot{V}_n - \dot{V}_p}{Z_n} = \frac{V_n(\cos \delta_n + j \sin \delta_n) - V_p}{R_n + jX_n} \quad (1)$$

则第 n 台逆变器输出复功率为

$$\tilde{S}_n = P_n + jQ_n = \dot{V}_n i_n^* = \dot{V}_n \left[\frac{V_n \cos \delta_n + j V_n \sin \delta_n - V_p}{R_n + jX_n} \right]^* \quad (2)$$

当 Z_n 呈高感性时,即 $R_n \ll X_n$ 时

$$\tilde{S}_n = \frac{V_p V_n \sin \delta_n}{X_n} + j \left[\frac{V_n^2 - V_p V_n \cos \delta_n}{X_n} \right] \quad (3)$$

各微源逆变器输出的有功和无功功率分别为

$$P_n = \frac{V_p V_n \sin \delta_n}{X_n} \quad (4)$$

$$Q_n = \frac{V_n^2 - V_p V_n \cos \delta_n}{X_n} \quad (5)$$

一般情况下 Z_n 相比于 Z_{load} 非常小, $Z_n \ll Z_{load}$, 所以,逆变器输出电压与交流母线电压的相位差 δ_n 很小,可以近似认为 $\sin \delta_n \approx \delta_n$, $\cos \delta_n \approx 1$ 。则式(4)和式(5)可简化为

$$P_n = \frac{V_p V_n \delta_n}{X_n} \quad (6)$$

$$Q_n = \frac{V_n^2 - V_p V_n}{X_n} \quad (7)$$

由上式可知,在等效支路阻抗呈感性时,逆变器输出有功功率与无功功率可实现近似解耦控制^[19-21]。有功功率主要与功角有关,即和频率有关,取频率的微小变化量 $\Delta \omega_n$, 则有功功率变化量 $\Delta P_n \propto \Delta \delta_n \propto \Delta \omega_n$; 无功功率主要与输出电压幅值差有关,考虑到母线电压通常变化不大,取输出电压的微小变化量 ΔV_n , 有 $\Delta Q_n \propto \Delta V_n$ 。

并联型微电网常常采用下垂控制策略^[22]以模拟传统电网中同步发电机的一次调频特性。为使系统稳定,控制策略设计为负反馈。即感性下垂方程中有功功率和频率、无功功率和电压都呈线性负相关,如图 2 所示。下垂方程如式(8)和式(9)。

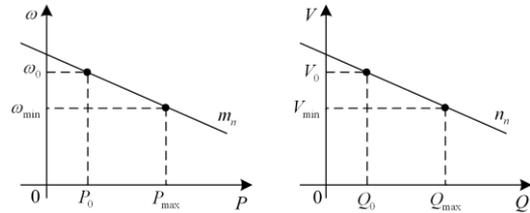


图 2 下垂特性曲线

Fig. 2 Droop characteristic curve

$$\omega_n = \omega_0 - m_n (P_n - P_0) \quad (8)$$

$$V_n = V_0 - n_n (Q_n - Q_0) \quad (9)$$

式中: ω_n 为第 n 台逆变器的输出角频率给定值; V_n 为第 n 台逆变器的输出电压幅值参考值; ω_0 是电网

额定角频率; V_0 为输出额定电压幅值; P_n 和 Q_n 为检测出的第 n 台逆变器的输出有功功率和无功功率; P_0 和 Q_0 为在额定情况下输出的有功和无功功率; m_n 和 n_n 为第 n 台逆变器的有功下垂系数和无功下垂系数。

系统达到稳态时, 由于频率是全局变量, 即各逆变器频率相等, 根据式(8)可知当下垂系数相同、各逆变器容量相等时可以达到有功功率均分^[23], 当微源容量不同时可以根据容量按比例均分; 而电压是局部变量, 即使各逆变器和控制器参数都相同, 由于线路阻抗不匹配而导致各逆变器输出电压不相等, 根据式(9)无功功率只能实现近似均分^[24]。

1.2 逆变器串联型孤岛微电网

图3为单相串联型微电网的结构图。图中共有 N 台逆变器串联, $Z_{\text{load}} = |Z_{\text{load}}| \angle \phi_L$ 为负载, $V_p \angle \delta_p$ 为系统交流母线电压, $V_n \angle \delta_n$ 为第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 台逆变器的输出电压。

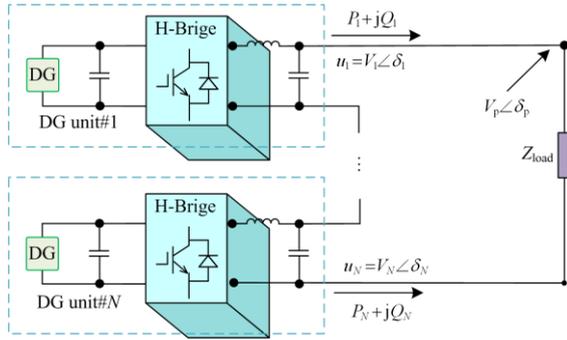


图3 单相逆变器串联型微电网结构图

Fig. 3 Structure of single-phase series micro grid

由图3可知, 各逆变器输出电流相同, 设为 \dot{I}_n , 则有

$$\dot{I}_n = |Y_{\text{load}}| \cdot \sum_{i=1}^N V_i \angle (\delta_i - \phi_L) \quad (10)$$

第 n 台逆变器的输出复功率为

$$\tilde{S}_n = V_n |Y_{\text{load}}| \sum_{i=1}^N [V_i \cos(\delta_n + \phi_L - \delta_i) + j V_i \sin(\delta_n + \phi_L - \delta_i)] \quad (11)$$

则第 n 台逆变器的输出有功功率和无功功率分别为

$$P_n = V_n |Y_{\text{load}}| \sum_{i=1}^N V_i \cos(\delta_n + \phi_L - \delta_i) \quad (12)$$

$$Q_n = V_n |Y_{\text{load}}| \sum_{i=1}^N V_i \sin(\delta_n + \phi_L - \delta_i) \quad (13)$$

实际情况中, 各串联逆变器输出电压之间的相位差相对于负载阻抗角来说非常小, 即 $\delta_n - \delta_i \ll \phi_L$,

取相位的微小变化量 $\Delta \delta_n$, 则有功率变化量 $\Delta P_n = -V_n |Y_{\text{load}}| \sin \phi_L \sum_{i=1}^N V_i \cdot \Delta \delta_n$ 。由此可见, 逆变器输出有功功率受负载性质的影响, 当负载为感性负载时, $\Delta P_n \propto (-\Delta \delta_n) \propto (-\Delta \omega_n)$; 当负载为容性负载时, $\Delta P_n \propto \Delta \delta_n \propto \Delta \omega_n$ 。

针对串联型微网功率传输特性受负载性质影响的问题, 有学者提出了一种统一下垂控制方法^[25], 实现了阻感和阻容负载下的系统的功率均分。

$$\begin{cases} \omega_n = \omega^* + m P_n / Q_n \\ V_n = V^* \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中 P_n/Q_n 项起自动识别负载类型的作用, 从而实现了阻感性负载和阻容性负载下的有功和无功均分的统一控制。

1.3 逆变器串并联混合型微电网

图4是逆变器串并联型微电网的结构图。图中共有 N 个逆变器串相互并联, 第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 串共有 N_n 台逆变器串联。 $V_{ij} \angle \delta_{ij}$ 为第 i 串第 j 台逆变器输出电压; $V_p \angle \delta_p$ 为系统 PCC 处电压; $Y_i = |Y_i| \angle \phi_i$ 为第 i 串支路导纳; $Z_{\text{load}} = |Z_{\text{load}}| \angle \phi_L$ 为负载。

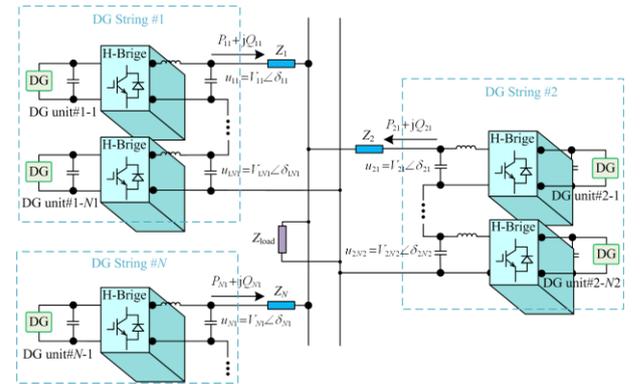


图4 逆变器串并联型微电网结构图

Fig. 4 Structure of series-parallel micro grid

由图4可知, 第 i 串各逆变器输出电流相同, 设为 \dot{I}_i , 则

$$\dot{I}_i = \left(\sum_{n=1}^{N_i} V_{in} \angle \delta_{in} - V_p \angle \delta_p \right) |Y_i| \angle \phi_i \quad (15)$$

第 i 串第 j 台逆变器输出复功率为

$$\tilde{S}_{ij} = V_{ij} \angle \delta_{ij} \left(\left(\sum_{n=1}^{N_i} V_{in} \angle \delta_{in} - V_p \angle \delta_p \right) |Y_i| \angle \phi_i \right)^* \quad (16)$$

由叠加定理可得

$$V_p \angle \delta_p = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^{N_m} \frac{Y_m V_{mn} \angle \delta_{mn}}{Y_{\text{load}} + \sum_{i=1}^N Y_i} \quad (17)$$

定义

$$\tilde{Y}_m = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^{N_m} \frac{Y_m}{Y_{load} + \sum_{i=1}^N Y_i} = |\tilde{Y}_m| \angle \tilde{\varphi}_m \quad (18)$$

则 PCC 处电压可表示为

$$V_p \angle \delta_p = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^{N_m} |\tilde{Y}_m| V_{mn} \angle (\delta_{mn} + \tilde{\varphi}_m) \quad (19)$$

式(16)可写为

$$\tilde{S}_{ij} = V_{ij} \angle \delta_{ij} \left(\sum_{n=1}^{N_i} V_n \angle \delta_n - \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^{N_m} |\tilde{Y}_m| V_{mn} \angle (\delta_{mn} + \tilde{\varphi}_m) \right) |Y_i| \angle \varphi_i^* \quad (20)$$

中高压微电网线路阻抗呈高感性, 即 $\varphi_i = -90^\circ$, 则第 i 串第 j 台逆变器输出有功功率和无功功率分别为

$$P_{ij} = |Y_i| V_{ij} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^{N_m} |\tilde{Y}_m| V_{mn} \sin(\delta_{ij} - \delta_{mn} - \tilde{\varphi}_m) - |Y_i| V_{ij} \sum_{n=1}^{N_i} V_n \sin(\delta_{ij} - \delta_{in}) \quad (21)$$

$$Q_{ij} = |Y_i| V_{ij} \sum_{n=1}^{N_i} V_n \cos(\delta_{ij} - \delta_{in}) - |Y_i| V_{ij} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^{N_m} |\tilde{Y}_m| V_{mn} \cos(\delta_{ij} - \delta_{mn} - \tilde{\varphi}_m) \quad (22)$$

实际上, 串并联型微电网具有更广泛、通用的结构, 串联系统与并联系统是其特殊的子系统。它兼具串联和并联系统优点, 同时也继承了它们的有功控制特性。从式(8)和式(14)可以看出, 串联微电网的逆下垂控制(阻感负载时)与并联微电网的下垂控制之间存在矛盾, 这也造成了串并联混合微电网有功控制的内在不兼容性。传统意义上的并联和串联微网对逆变器的控制策略不能简单地应用到该系统来, 为保证系统的控制性能, 目前的控制策略一般都依赖于复杂的通信网络。

2 改进型主从协调控制策略

微网系统控制策略设计基于系统的物理模型和传输特性。由于并联型和串联型的控制策略并不统一, 为保证混合结构系统的可靠稳定运行, 需要基于以上控制策略构造新型控制策略。

本文提出了一种基于本地主从协调思想的控制策略。相对于传统的全局集中式控制方式, 所提方案并联支路之间无需通信, 采用分散的下垂控制方案, 使系统具有即插即用的功能, 提高了系统的可扩展性, 降低了通信成本, 避免了中央控制器故障导致的系统崩溃问题, 提高了系统的可靠性。相对于局部集中式控制方式^[13], 微源串内采用主从控制, 主微源控制器同时承担中央控制器职能, 无需额外设立串内中央控制器, 简化了控制结构。此外, 主控制器仅依赖本地信息产生控制信号, 无需采集 PCC 点的数据, 进一步降低了对通信线路的要求, 降低了系统的成本。

2.1 主从控制框架

提出的逆变器串并联微电网系统控制框架如图 5 所示。系统中, M 台分布式电源在本地串联形成电压等级较高的微源串, N 个这样的微源串再以并联形式向 PCC 点供电。DG# i - j 表示第 i 串第 j 个微源 ($i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M$)。为了便于分析, 假设各微源容量相等, 直流侧电压相同。最靠近 PCC 处的 DG 单元(DG# i -1, $i=1, 2, \dots, N$)设为主微源, 串内其他微源为从微源。主微源采集本地电压、电流信息, 通过引入功率微分量和虚拟阻抗的改进下垂控制生成输出电压参考值 u_{ref}^* , 并将其传送给串内其他逆变器。当微源容量不同时, 可根据容量按比例分配系数乘以电压参考值。

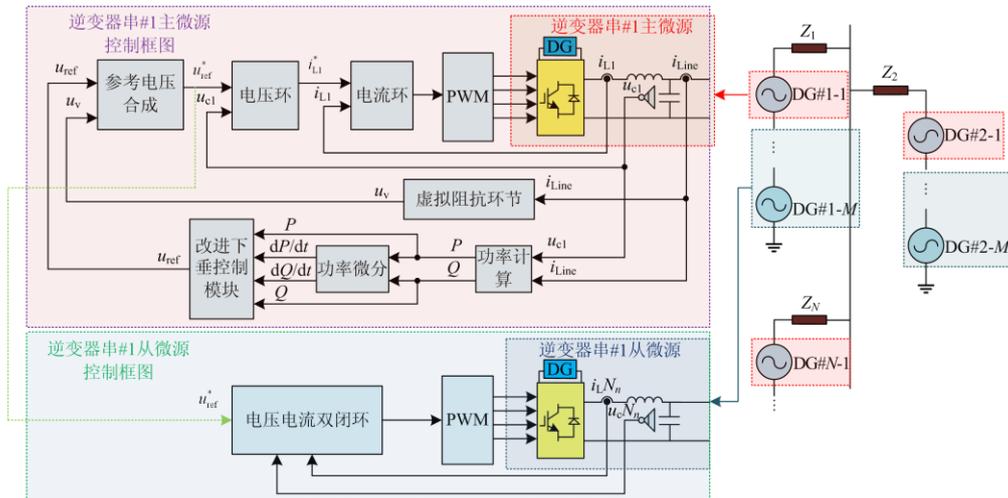


图 5 基于本地主从协调控制的孤岛混合交流微网

Fig. 5 An islanded hybrid AC microgrid based on local master-slave coordinated control

系统呈现多时间尺度特性, 所以, 本文将系统内所有的主微源都设计为功率-电压-电流三环控制, 负责微源串间的功率分配以及为串内其余微源提供电压参考值; 从微源都采用电压-电流双闭环控制, 电压紧紧跟随主微源。这样, 系统每个微源串内的从逆变器与主逆变器完全同步, 可看作一个仅仅提升了出口电压而各逆变器输出特性完全相同的子系统, 通过主控单元的下垂调节实现各并联子系统的功率均分和自动控制。此外, 由于电压参考信号是由主微源采集本地信息而生成的, 克服了 PCC 处电压不好采集的缺点, 降低了通信成本。

2.2 改进下垂控制

传统下垂控制过程中容易出现功率波形振荡和发散^[26-27]。分析得到以下原因:

- (1) 下垂系数选取过大导致系统不稳定。
- (2) 功率滤波环节截止频率参数选取过大。

(3) 微电网由电力电子设备构成, 缺少传统电力系统的旋转元件, 受到扰动时微电网系统中的硬件设备无法提供传统意义上的惯性, 容易发生振荡失稳^[28]。

本文采用在传统下垂方程中增加功率微分项^[29]来抑制受扰振荡的方法。引入功率微分项的下垂方程为

$$\begin{cases} \omega_n = \omega_0 - m(P_n - P_0) - m_d \frac{dP_n}{dt} \\ V_n = V_0 - n(Q_n - Q_0) - n_d \frac{dQ_n}{dt} \end{cases} \quad (23)$$

低压微网环境下支路阻抗呈阻感性^[30], 逆变器输出有功和无功相互耦合, 感性下垂方程不再适用。为在低压环境下也能适用感性下垂方程, 应对有功和无功实现解耦控制^[31], 本文引入串联虚拟阻抗。

主微源采用的带有串联虚拟阻抗的改进下垂控制如图 6 所示。图中: u_{C1} 为主微源输出电压; i_{L1} 为主微源输出电流; i_{Line} 为串联支路电流; P 、 Q 分别为计算出的主电源输出有功功率和无功功率; u_{ref}

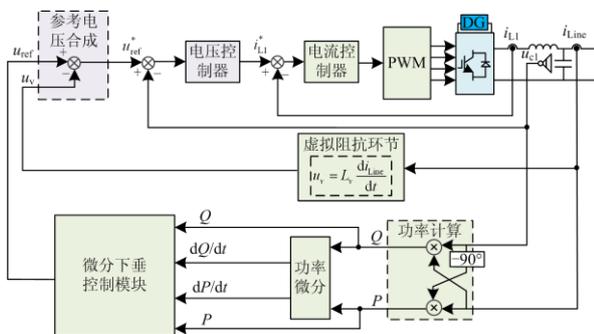


图 6 带有串联虚拟阻抗的改进下垂控制原理框图

Fig. 6 Schematic diagram of improved droop control with series virtual impedance

为微分下垂环节产生的电压幅值参考; u_{ref}^* 为引入虚拟电感后新的参考电压。

这样相当于在输出线路中串联了一个较大的虚拟电感 L_v , 若取的虚拟电抗 $X_v = \omega L_v \gg |Z_{line}|$, 则大大优化了线路的阻感比, 线路被矫正为高感性, 使得传统下垂方程可以适用于低压微网的场合, 并能够一定程度上抑制环流, 改善功率均分精度。

2.3 稳态效果分析

稳态时, 全网频率一致。即图 5 微网内所有主微源满足

$$\omega_{11} = \omega_{21} = \dots = \omega_{N1} \quad (24)$$

由式(23)可知, 稳态时功率微分项为 0, 当下垂系数相同、微源容量相等时, 所有主微源输出有功功率相等, 即

$$P_{11} = P_{21} = \dots = P_{N1} \quad (25)$$

不同支路的线路阻抗不相等, 导致各主微源输出电压不相等。引入串联虚拟阻抗后, 线路阻抗的匹配度大大改善, 各支路等效阻抗可近似看作相等。根据式(23), 主微源无功功率近似均分, 即

$$Q_{11} \approx Q_{21} \approx \dots \approx Q_{N1} \quad (26)$$

同一微源串内, 从微源采用主微源的电压参考值。因此, 同一串内各微源输出电压相等, 即第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 串各微源的电压满足

$$\dot{V}_{i1} = \dot{V}_{i2} = \dots = \dot{V}_{iM} = \dot{V}_i \quad (27)$$

由于串联电路电流相等, 即

$$\dot{I}_{i1} = \dot{I}_{i2} = \dots = \dot{I}_{iM} = \dot{I}_i \quad (28)$$

故第 i 串各微源的输出功率满足

$$\begin{cases} P_{i1} = P_{i2} = \dots = P_{iM} = \text{Re}(\dot{V}_i \cdot \dot{I}_i^*) \\ Q_{i1} = Q_{i2} = \dots = Q_{iM} = \text{Im}(\dot{V}_i \cdot \dot{I}_i^*) \end{cases} \quad (29)$$

结合式(25)和式(29)可得, 当下垂系数相同且微源容量相等时, 所提控制策略可以保证所有微源有功功率准确均分、无功功率近似均分。即

$$\begin{cases} P_{11} = \dots = P_{ij} = \dots = P_{NM} \\ Q_{11} = Q_{12} = \dots = Q_{1M} \approx Q_{i1} = Q_{i2} = \dots \end{cases} \quad (30)$$

其中: $i=1, 2, \dots, N$; $j=1, 2, \dots, M$ 。

3 算例分析

基于图 5 的结构, 在 Matlab/Simulink 软件环境下搭建了孤岛模式下两个逆变器串(每串由三个逆变器串联)并联的低压单相交流微电网系统仿真模型。交流母线电压为 220 V, 频率 50 Hz。低压线路阻抗参数为 $r=0.641 \Omega/\text{km}$, $X=0.101 \Omega/\text{km}$ 。取逆变器串#1 线路长 1 km, 取逆变器串#2 线路长 1.2 km。

参数设置如表 1。负载初始值设置为有功负载 4 kW, 无功负载 2 kvar。在 1 s 时, 有功负载突增 2 kW,

无功负载突增 1 kvar。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	设置值
支路阻抗	$Z_1 = (0.641 + j0.101) \Omega, Z_2 = (0.768 + j0.121) \Omega$
U_{dc}	200 V
u_{ref}	$V_{ref} = 105 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}$
LC 滤波	$L = 0.2 \text{ mH}, C = 200 \mu\text{F}, r = 0.1 \Omega$
下垂系数	$k_{ip} = 3.4543, k_{qp} = 0.5614, k_{vi} = 1755.0661$

本节对功率振荡的多种影响因素进行了仿真对比分析，并对阻性支路阻抗的低压微网工况下主微源传统下垂控制和引入虚拟阻抗的下垂控制进行了仿真对比分析。仿真结果表明，提出的改进型本地主从协调控制策略具有良好的稳定性和快速性，实现了微源串之间的同步和功率一致，从微源在本地跟随主微源运行，进而实现了全局的功率均分。

3.1 功率振荡分析

在下垂控制中添加功率微分项对微电网小信号稳定性的改善作用是借鉴于传统电力系统稳定器 (Power System Stabilizer, PSS) 的原理^[26]。采用带功率微分环节的下垂控制(不加虚拟阻抗)，功率滤波器的截止频率设置为 $\omega=50 \text{ rad/s}$ ，两逆变器串输出有功功率和无功功率分别如图 7(a)、图 7 (b)所示。

观察图 7 可知，功率波形具有较好的稳定性和快速性，调节时间在 0.05 s 左右，仅有轻微的超调。

(1) 下垂系数的影响

由式(23)知，下垂系数过大时，轻微的扰动就会引起电压和频率大幅变化，影响系统的稳定性，导致功率振荡。将下垂系数改为 $m=1.047 \times 10^{-3}$ ， $n=5.183 \times 10^{-3}$ ，其他参数不变，功率仿真结果如图 8(a)、图 8 (b)所示。

显然，放大下垂系数之后功率波形出现严重的振荡发散。

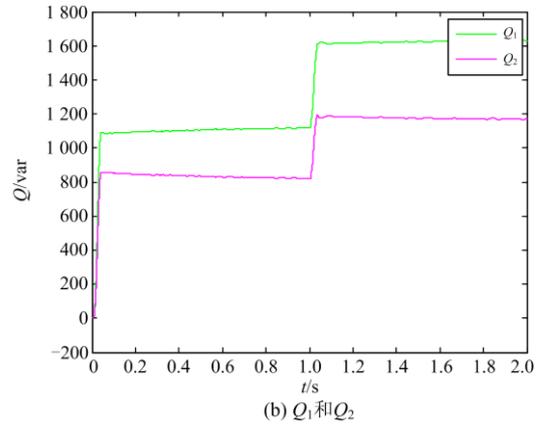
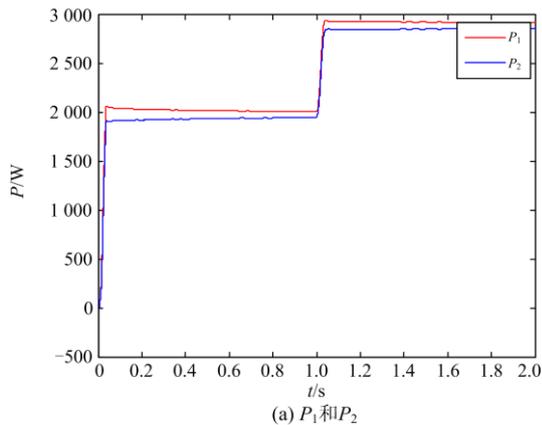


图 7 逆变器串#1 和串#2 输出的有功功率和无功功率
Fig. 7 Output active and reactive power of inverter string #1 and #2

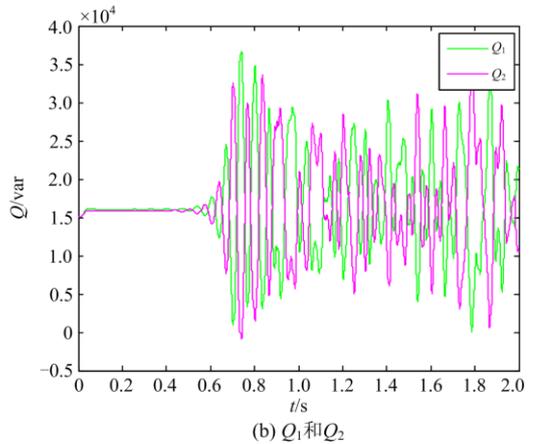
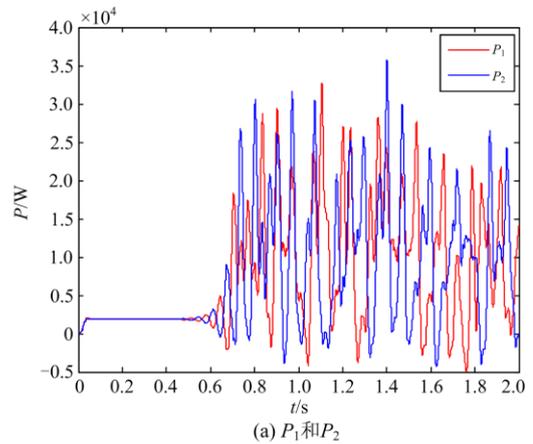


图 8 更改下垂系数后逆变器串#1 和串#2 输出的有功功率和无功功率
Fig. 8 Output active and reactive power of inverter string #1 and #2 after changing the droop coefficient

(2) 功率滤波参数的影响

功率滤波器参数也会影响系统稳定性，若截止

频率选取过大, 则容易使高频噪声通过。将功率滤波器的截止频率改为 $\omega=200 \text{ rad/s}$, 其他参数不变, 功率仿真结果如图 9 (a)、图 9 (b)所示。

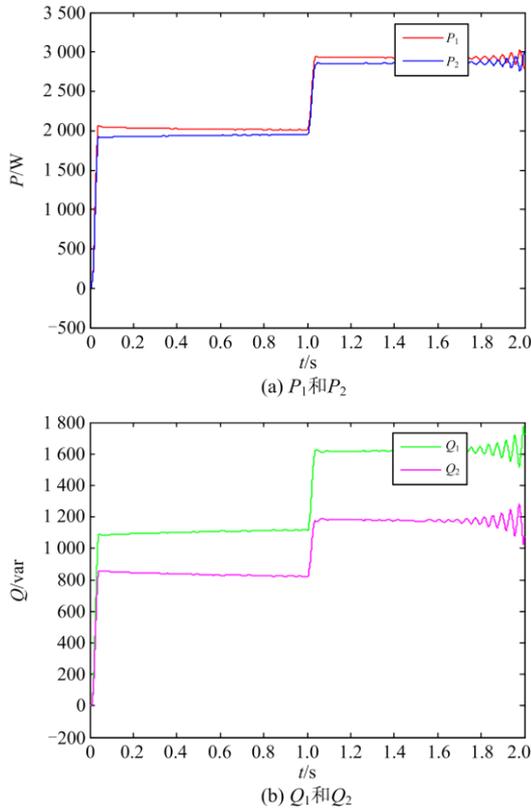


图 9 功率滤波 $\omega=200 \text{ rad/s}$ 时逆变器串#1 和串#2 输出的有功功率和无功功率

Fig. 9 Output active and reactive power of inverter string #1 and #2 after changing the filtering parameter

观察图 9 可知, 功率滤波器截止频率过大引起功率波形在 1.5 s 后振荡发散。

(3) 微分下垂环节的影响

将功率微分下垂环节舍去, 功率仿真结果如图 10(a)、图 10 (b)所示。

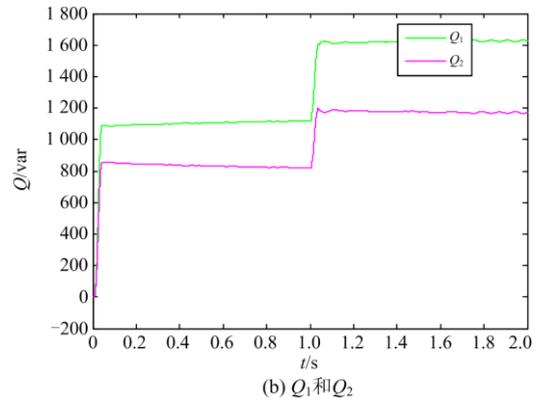
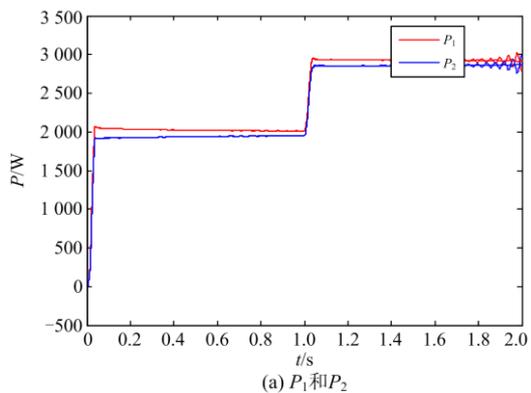


图 10 不加功率微分下垂环节时逆变器串#1 和串#2 输出的有功功率和无功功率

Fig. 10 Output active and reactive power of inverter string #1 and #2 without power derivative element

在不加功率微分的下垂控制下逆变器串的输出功率波形在 1.7 s 后开始出现轻微振荡。对比加入功率微分项的功率波形(图 7), 可看出添加功率微分项的改进下垂控制有抑制功率振荡的作用。

3.2 功率均分效果分析

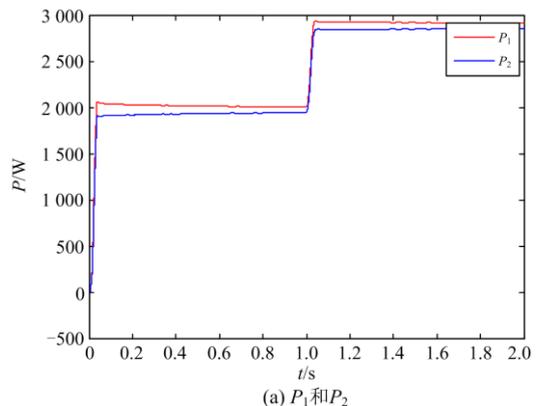
(1) 不加虚拟阻抗的下垂控制

将虚拟阻抗环节舍去, 两逆变器串输出有功功率和无功功率分别如图 11(a)、图 11 (b)所示。

对于线路阻抗呈阻感性的低压微电网, 支路阻抗不匹配的条件下, 不加虚拟阻抗环节的感性下垂控制下逆变器串#1 和串#2 输出有功功率和无功功率都不均分。由图 11, 时, 有功功率相差 70 W 左右, 无功功率相差 290 var 左右。

(2) 引入串联虚拟阻抗的下垂控制

引入虚拟阻抗环节相当于将线路矫正为高感性, 使得式(23)的控制规律也适用于低压微电网环境。由于加入虚拟阻抗改善了等效输出阻抗(输出阻抗与线路阻抗之和)的匹配度, 功率均分精度提高。引入虚拟阻抗后两逆变器串输出有功功率和无功功率分别如图 12(a)、图 12 (b)所示。



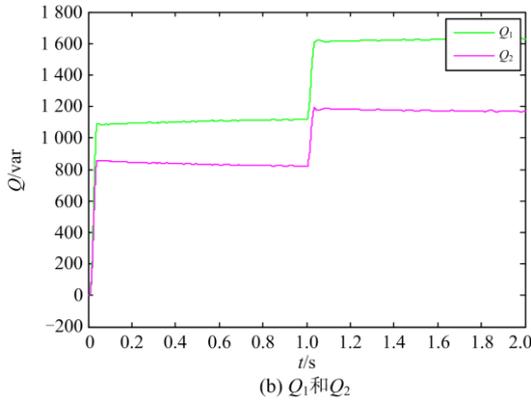


图 11 不加虚拟阻抗环节时逆变器串#1 和串#2 输出的有功功率和无功功率

Fig. 11 Output active and reactive power of inverter string #1 and #2 without virtual impedance

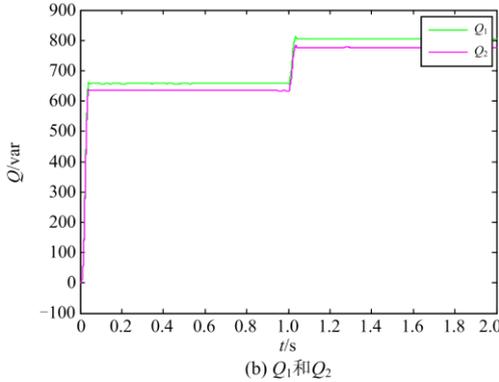
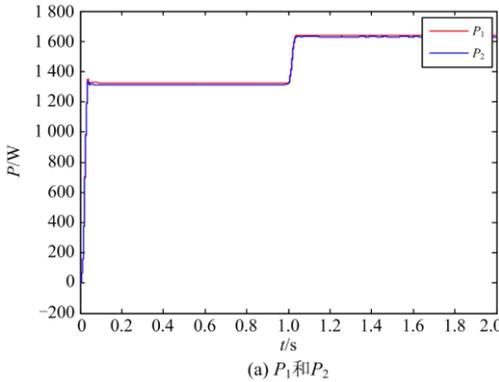


图 12 引入虚拟阻抗环节时逆变器串#1 和串#2 输出的有功功率和无功功率
Fig. 12 Output active and reactive power of inverter string #1 and #2 with virtual impedance

观察对比图 11 和图 12 可知，引入虚拟电感后的感性下垂控制下逆变器串#1 和串#2 输出有功功率和无功功率均分情况都得到大大改善， $t=0.7s$ 时，有功功率相差 12 W 左右，无功功率相差 23 var 左右。

由图 13 可知，在主从协调控制策略下，串联微源在本地跟随主微源运行，同一串内各微源输出功率相等，全局的功率均分效果较好。

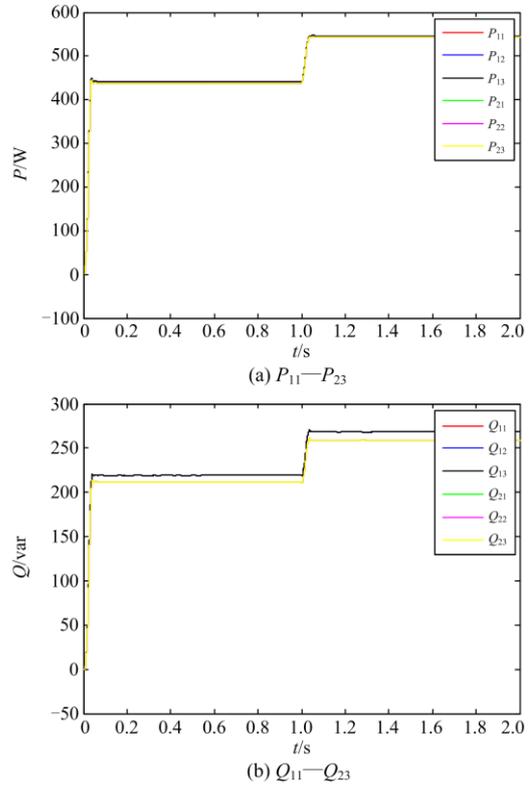


图 13 本地主从协调控制策略下各微源输出的有功功率和无功功率

Fig. 13 Output active and reactive power of each inverter under the local master-slave coordinated control strategy

4 结论

多个微源串联构成串联子系统，再由多个串联子系统相互并联连接而成的串并联复杂结构微电网具有很好的应用前景和研究价值。针对该复杂结构微电网功率振荡、功率均分等问题，提出一种改进的本地主从协调控制方案，解决了系统容易出现的功率振荡问题，提高了系统的功率均分精度，基本实现了各微源间功率均分。此外，串间无通信和串内无需与 PCC 点通信大大降低了对通信网络的要求，提高了系统的可靠性和灵活性。

然而，本文给出的算例是针对低压微电网环境的，线路阻抗呈阻感性。提出的控制策略不采集 PCC 点电压数据，虽然缩短了通信线路，但由于线路阻抗的影响，会造成 PCC 端电压跌落。此外虚拟阻抗的存在也不可避免地造成电压跌落问题，应进一步考虑二次调压措施^[32-33]。

参考文献

- [1] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [2] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 57-70.
- [3] 孙大松, 郁正纲, 伏祥运, 等. 多通信方式联合组网下的海岛微电网控制方法[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(2): 10-17.
SUN Dasong, YU Zhenggang, FU Xiangyun, et al. Control method based on multi-communications in island microgrid[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(2): 10-17.
- [4] 于海, 孙亮, 岳凯凯, 等. 基于微型燃气轮机的多微源直流微网主从协调控制[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(6): 107-114.
YU Hai, SUN Liang, YUE Yunkai, et al. Master-slave coordinated control of multi-micro-source DC microgrid based on micro turbine[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(6): 107-114.
- [5] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(1): 2-16.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 2-16.
- [6] HAN Hua, HOU Xiaochao, YANG Jian, et al. Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(1): 200-215.
- [7] PAN Yiwei, ZHANG Chenghui, YUAN Shuai, et al. A decentralized control method for series connected PV battery hybrid microgrid[C] // 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), August 7-10, 2017, Harbin, China: 1467-1472.
- [8] HOU Xiaochao, SUN Yao, HAN Hua, et al. A fully decentralized control of grid-connected cascaded inverters[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(1): 315-317.
- [9] 刘正英, 徐昊亮, 杨昌海, 等. 含串联组合型微源的微电网模式平滑切换控制方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(23): 151-155.
LIU Zhengying, XU Haoliang, YANG Changhai, et al. Research on the smooth switching control method of micro-grid with series combination of micro-source[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(23): 151-155.
- [10] 王兴贵, 杨维满. 一种微源逆变器串联连接型微网特性研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(21): 129-135.
WANG Xinggui, YANG Weiman. Study on characteristics of a microgrid with micro source inverters connected in series[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(21): 129-135.
- [11] HAN Hua, HOU Xiaochao, YANG Jian, et al. Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(1): 200-215.
- [12] 林王清, 赵荣祥. 级联与并联相结合逆变器特性分析与控制策略[J]. *电气自动化*, 2010, 32(4): 17-19, 74.
LIN Wangqing, ZHAO Rongxiang. Characteristics analysis and control strategy of inverter combined with cascading and paralleling[J]. *Electrical Automation*, 2010, 32(4): 17-19, 74.
- [13] HE Jinwei, LI Yunwei, WANG Chengshan, et al. Hybrid microgrid with parallel- and series-connected micro-converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 33(6): 4817-4831.
- [14] 周奇勋, 张红, 曹世宏, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(8): 25-31.
ZHOU Qixun, ZHANG Hong, CAO Shihong, et al. Parallel control technology for microgrid inverters based on improved droop method[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(8): 25-31.
- [15] NASIRIAN V, MOAYEDI S, DAVOUDI A, et al. Distributed cooperative control of DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(4): 2288-2303.
- [16] WANG Yanbo, WANG Xiongfei, BLAABJERG F, et al. Harmonic instability assessment using state-space modeling and participation analysis in inverter-fed power systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(1): 806-816.
- [17] GE Xiaohai, HAN Hua, YUAN Wenbin, et al. An integrated series-parallel microgrid structure and its unified distributed control[C] // 2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC), December 10-13, 2018, Singapore, Singapore: 1-6.
- [18] GE Xiaohai, HAN Hua, XIONG Wenjing, et al. Locally-distributed and globally-decentralized control for hybrid series-parallel microgrids[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 116.

- [19] HAIDER S, LI Guojie, WANG Keyou. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 111-118. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.
- [20] 柏管, 陈卓, 刘飞. 基于自调节下垂控制的分布式电源并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 120-126.
- BAI Guan, CHEN Zhuo, LIU Fei. Parallel operation technology of distributed generation based on self-regulation droop control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 120-126.
- [21] 董杰, 李领南, 张纯江, 等. 微电网中的有功功率和无功功率均分控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 90-96.
- DONG Jie, LI Lingnan, ZHANG Chunjiang, et al. Sharing control of active power and reactive power in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 90-96.
- [22] SUN Yao, HOU Xiaochao, YANG Jian, et al. New perspectives on droop control in AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5741-5745.
- [23] 王建. 微电网中多逆变器并联控制的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- WANG Jian. Research on parallel control for multi-inverter in micro-grid[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [24] ANDREASSON M, DIMAROGONAS D V, SANDBERG H, et al. Distributed control of networked dynamical systems: static feedback, integral action and consensus[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(7): 1750-1764.
- [25] HE Jinwei, LI Yunwei, LIANG Beihua, et al. Inverse power factor droop control for decentralized power sharing in series-connected-microconverters-based islanding microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7444-7454.
- [26] 陈昕, 张昌华, 黄琦. 引入功率微分项下垂控制的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 46-53, 116.
- CHEN Xin, ZHANG Changhua, HUANG Qi. Small signal stability analysis of micro grid with power differential droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 46-53, 116.
- [27] 李昊, 王杰. 基于虚拟同步发电机技术的改进微网下垂控制[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 11-19.
- LI Hao, WANG Jie. Modified droop control based on virtual synchronous generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 11-19.
- [28] 张建华, 苏玲, 刘若溪, 等. 逆变型分布式电源微网并网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 76-80.
- ZHANG Jianhua, SU Ling, LIU Ruoxi, et al. Small-signal stability analysis of grid-connected microgrid with inverter-interfaced distributed resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 76-80.
- [29] EL-SAADANY E F, MOHAMED Y A I. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2806-2816.
- [30] 麦倩屏, 陈铭. 用于多微源低压微电网的虚拟阻抗反下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 96-102.
- MAI Qianping, CHEN Ming. P-V/Q-f droop control strategy with virtual impedance for low-voltage microgrid with multiple micro sources[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 96-102.
- [31] SAO C K, LENHN P W. Intentional islanded operation of converter fed micro-grids[C] // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, January 2006, Montreal, Canada.
- [32] 颜湘武, 王月茹, 王星海. 微网孤岛运行模式下新型频率控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 11-15.
- YAN Xiangwu, WANG Yueru, WANG Xinghai. A novel frequency control method for micro-grid in islanding operating mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 11-15.
- [33] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.
- YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168.

收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-06-30

作者简介:

郑若楠(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网控制、深度学习与光伏预测; E-mail: 651199305@qq.com

韩华(1969—), 女, 通信作者, 博士生导师, 研究方向为分布式发电系统的建模、控制与稳定。E-mail: hua_han@126.com

(编辑 葛艳娜)