

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200394

分布式微电网自同步电压源并列运行策略

武文平¹, 崔扬², 颜湘武³

(1. 保定电力职业技术学院, 河北 保定 071051; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;
3. 分布式储能与微网河北省重点实验室(华北电力大学)电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 分布式能源的高渗透率使集中式微电网的弊端逐渐显现, 因此分布式微电网受到广泛关注。针对目前分布式微电网中鲜有关注的微源与交流母线连接线路末端的功率耦合及下垂系数不可控问题, 基于控制量本地性原则, 提出考虑下垂系数精确控制的改进 VSG 控制策略, 实现线路末端功率解耦及期望的下垂特性。然后, 结合虚拟转子特性匹配方法, 在无需附加改进无功控制的前提下, 从静态与动态两个角度实现各并联逆变器功率的合理分配。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台验证该方法的有效性与可行性。所提控制策略与匹配原则使逆变器具备自同步特性, 形成自同步电压源, 赋予分布式微电网较高的自稳性、自主性以及鲁棒性, 保证微电网的稳定运行。

关键词: 分布式微电网; 虚拟同步发电机; 自同步电压源; 功率耦合; 并联运行

Operation strategy of parallel self-synchronizing voltage sources in a distributed microgrid

WU Wenping¹, CUI Yang², YAN Xiangwu³

(1. Baoding Electric Power Vocational and Technical College, Baoding 071051, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-Grid in Hebei Province, (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: A centralized control mode is no longer applicable for microgrid operation because of the high penetration rate of distributed energy. This fact is responsible for the widespread interest in the use of a distributed microgrid. This paper examines the issues, rarely considered, of power coupling and uncontrollable droop coefficient at the terminal of the connection line between micro-source and AC bus. An improved VSG control strategy is proposed based on local data considering precise control of droop coefficient, realizing the power decoupling and the expected droop characteristics. Then, combined with a virtual rotor characteristic matching method, the reasonable active and reactive power sharing of the parallel microgrid inverters are realized in terms of static and dynamic performance without additional improvement of reactive power control. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed method are verified on the Matlab/Simulink simulation platform. The combination of the proven strategy and matching principle endows inverters with self-synchronization characteristics, forming the self-synchronizing voltage sources. This all gives the distributed microgrid a higher self-stability, autonomy and robustness to ensure stable operation of the microgrid.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E20185021134) and Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/18-JS-206).

Key words: distributed microgrid; virtual synchronous generator (VSG); self-synchronizing voltage source; power coupling; parallel operation

0 引言

为了缓解分布式电源大量接入对电网产生的影响, 微电网的概念被提出^[1-3]。微电网由分布式电源(Distributed Generation, DG)、储能、负荷以及控制

与保护设备集合而成, 能够直接与用户端相连, 有助于改善用户侧供电质量, 提高供电可靠性^[4-5]。

微电网存在孤岛与并网两种工作模式。传统集中式微电网孤岛运行时采用主从控制模式^[6], 即仅允许一台 V/f 控制的电压源型逆变器处于工作状态(称为组网逆变器), 其余逆变器采用 PQ 控制, 另需配置一台电压源型逆变器作为备用。主从控制模式虽可保证微电网在离网运行时的电压频率和幅值恒

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助(E20185021134);
国家电网总部科技项目资助(SGTYHT/18-JS-206)

定,但存在以下问题:(1)电压频率和幅值仅由一台控制器提供支撑,微电网的运行稳定性过度依赖主控制器^[7],易引起系统崩溃;备用逆变器仅可在组网逆变器停止工作时投入使用,可靠性低。(2)微电网规模日益扩大使组网逆变器面临容量配置问题,诸如如何确定适应当前规模微电网的逆变器容量,如何对现有逆变器进行替换,以及不断增大单机容量在实际制造和运行中的可行性等。(3)微电网在进行离并网切换时需改变控制策略^[5],可靠性与成功率较低;切换过程中易形成暂态冲击,严重时对设备造成损坏^[8]。(4)备用逆变器需配置与组网逆变器相同的储能资源,经济成本会相应加倍。因此,为适应当今电网发展趋势,发挥微电网优势,基于对等控制方式的分布式微电网应运而生。

在分布式微电网中,各逆变发电单元采用下垂控制实现并列运行,保证电力电子器件与传统同步发电机(Synchronous Generator, SG)的静态特性一致。当微电网发生功率扰动时,传统同步机能够凭借自身转子具备的机械特性提供无缝的功率支撑,从而在一次调节动作前实现早期频率支持,再依靠二次调频策略维持稳态频率恒定^[9]。考虑到转子特性具备的天然优势及逆变器与传统同步机之间的协调运行,提出在下垂控制的基础上添加虚拟转子惯量与阻尼特性,即形成了虚拟同步机控制策略^[10-11]。分布式微电网的发电环节由多 VSG 并联构成,形成 $N+1$ 冗余模式,从结构模式上提高了微电网的冗余度与可靠性,改进了集中式微电网的不足。

目前基于 VSG 技术的并联逆变器稳态运行控制研究主要集中在两方面:(1)单机输出功率解耦^[12-19]:受低压微电网阻感性连接线路的影响,逆变器输出功率呈耦合状态,不具备传统下垂控制的应用条件,故需通过控制方法实现功率解耦,如虚拟阻抗及其改进方法^[12-15]、虚拟功率法^[16]和前馈解耦法^[17-19]等。(2)多机并联功率分配:下垂控制仅可保证并联逆变器有功功率的合理分配,无功分配精度受连接线路压降影响,故还需对无功控制进行改进^[20-24];若采用反下垂控制则需对有功控制进行改进^[25]。研究解耦策略的文献在验证效果时,大多研究微源与交流母线连接线路首端的功率解耦效果,鲜有对连接线路末端(即用户侧)功率解耦效果进行验证。事实上,线路末端作为用电方,其受控效果更应得到关注。此外,实际运行时的下垂系数是否满足期望值这一解耦指标也少有文献提及。

综上所述,本文从连接线路末端的功率解耦与下垂效果入手,提出考虑下垂系数精确控制的改进 VSG 控制策略,在保证控制量本地性的前提下实现

用户侧有功与无功功率的解耦及期望的下垂特性。所提方法无需附加改进无功控制即可保证并联逆变器功率的合理分配。然后,结合虚拟转子特性匹配原则,从静态与动态两方面实现分布式微电网各逆变器之间的并列协调运行,使并联逆变器具备自主同步协调运行的能力,形成自同步电压源。最后,基于 Matlab/Simulink 仿真平台验证所提控制策略与匹配原则的有效性与可行性。

1 考虑下垂系数精确控制的自同步电压源改进 VSG 控制策略

1.1 基于 VSG 技术的微电网逆变器建模

基于传统 VSG 技术的微电网逆变器整体控制框图如图 1 所示。其中, U_{dc} 为直流侧电压, i_f 为滤波电感电流, R_f 、 L_f 和 C_f 分别为滤波电阻、滤波电感及滤波电容, u_o 和 i_o 分别为逆变器的输出电压和电流, $Z_L = R_L + jX_L$ 为连接线路阻抗。

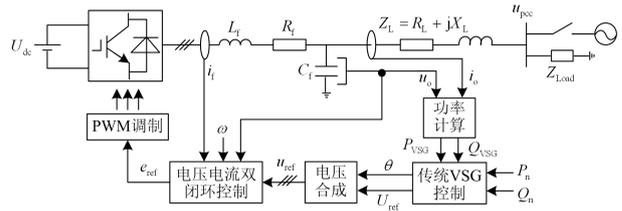


图 1 VSG 逆变器整体控制

Fig. 1 Integral control diagram of VSG

传统 VSG 控制器采用同步发电机的经典二阶模型,如图 2 所示。

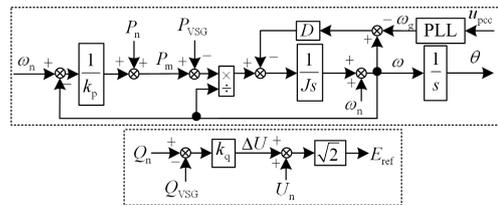


图 2 传统 VSG 控制框图

Fig. 2 Control diagram of traditional VSG

图 2 中 u_{pcc} 为交流母线电压,由图 2 可得转子运动方程和下垂控制方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} J \frac{d(\omega - \omega_n)}{dt} = \frac{P_m - P_{VSG}}{\omega} - D(\omega - \omega_g) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \omega - \omega_n = k_p (P_n - P_m) \\ U - U_n = k_q (Q_n - Q_{VSG}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 、 ω_n 及 ω_g 分别为同步发电机角频率、同步发电机额定角频率以及电网角频率; θ 为相位角; U_n 为额定电压; P_m 和 P_{VSG} 分别为逆变器输入及输出有功功率; Q_{VSG} 为输出无功功率; P_n 和 Q_n 分别为有功和无功功率参考值; J 为转动惯量; D 为阻尼系数; k_p 和 k_q 分别为有功-频率和无功-电压下垂系数。值得说明的是, P_{VSG} 与 Q_{VSG} 是输出电压 u_o 和输出电流 i_o 经功率计算环节得到的, 即传统 VSG 直接采用连接线路首端收集到的电压电流数据进行控制。

1.2 考虑下垂系数的虚拟阻抗法解耦效果

低压微电网逆变器实现并联运行的前提是单台逆变器的输出功率及下垂特性不受连接线路影响。以应用虚拟负电阻法为例, 对连接线路末端的解耦效果进行讨论。等效电路如图 3 所示, A 点对应逆变器出口, B 点代表连接线路首端, C 点代表连接线路末端, R_v 为虚拟负电阻。

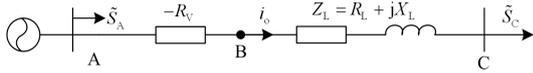


图 3 虚拟阻抗法等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of virtual impedance method

已知 A 点功率解耦^[11]。假设加入的虚拟负电阻的阻值较大, 与连接线路的电阻值较大程度抵消, 则等效连接线路可看成纯感性, 由文献[11]思路可知连接线路末端(C 点)也为解耦状态。

基于 C 点功率解耦这一结论, 假设在 A 点及 C 点分别采用有功、无功下垂系数为 k_p 、 k_q 和 k'_p 、 k'_q 的下垂控制, 控制方程分别如式(2)、式(3)所示。通过验证 k_p 与 k'_p 是否相等、 k_q 与 k'_q 是否相等来衡量考虑下垂系数的虚拟阻抗法解耦效果。

$$\begin{cases} \omega - \omega_n = k_p (P_n - P_A) \\ U_A - U_{ref} = k_q (Q_n - Q_A) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \omega' - \omega'_n = k'_p (P'_n - P_C) \\ U_C - U'_{ref} = k'_q (Q'_n - Q_C) \end{cases} \quad (3)$$

空载状态下认为 $P'_n = P_n = 0$, $Q'_n = Q_n = 0$, $U'_{ref} = U_{ref}$ 。由于 ω 为全局变量, $\omega' = \omega$, $\omega'_n = \omega_n$ 。假设潮流由源至荷单向流动, 将线路及虚拟阻抗有功损耗记为 ΔP , 改写线路首端有功下垂方程并与末端方程联立可得

$$k_p (P_C + \Delta P) = k'_p P_C \quad (4)$$

故

$$k'_p = \left(1 + \frac{\Delta P}{P_C}\right) k_p > k_p \quad (5)$$

将连接线路及虚拟阻抗导致的压降记为 ΔU , 无功损耗记为 ΔQ , 改写首端无功下垂方程可得

$$(U_C + \Delta U) - U_{ref} = -k_q (Q_C + \Delta Q) \quad (6)$$

即

$$\frac{U'_{ref} - U_C}{Q_C} = k_q \left(1 + \frac{\Delta Q}{Q_C}\right) + \frac{\Delta U}{Q_C} = k_q + \frac{k_q \Delta Q + \Delta U}{Q_C} \quad (7)$$

因此

$$k'_q = k_q + \frac{k_q \Delta Q + \Delta U}{Q_C} > k_q \quad (8)$$

由式(5)和式(8)可以看出, 由于有功和无功下垂策略均采用首端测量数据进行控制, 连接线路引起的功率损耗以及线路阻抗带来的压降会影响用户侧下垂系数, 使其下垂曲线的下降程度高于首端。不同位置的下垂系数与连接线路参数密切相关。因此, 若使用户侧下垂系数等于给定值从而保证其可控性, 需进行线路补偿。

1.3 考虑下垂系数精确控制的改进 VSG 控制策略

本文提出的改进下垂控制思路如下: 将下垂方程中的有功和无功功率由连接线路首端值延伸至连接线路末端值, 即将下垂控制点延伸至线路末端。控制点延伸后, 由于稳态频率为全局变量, 故有功-频率下垂方程中频率的含义不变; 无功-电压下垂方程中的电压值需相应地由首端量改变为末端量; 下垂系数及参考值均无需改变。为保证微电网控制量的本地性, 所需连接线路末端数据均通过对直接采集到的线路首端数据进行线路损耗补偿获得。综上, 改进 VSG 控制框图如图 4 所示。

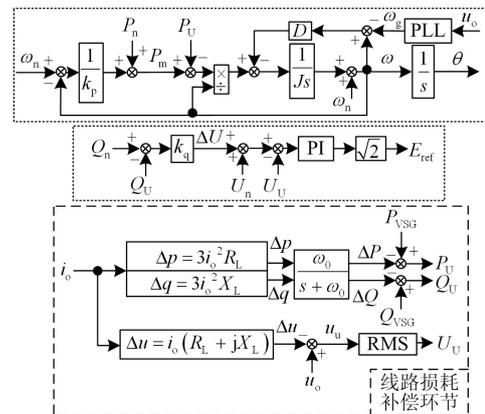


图 4 改进 VSG 控制框图

Fig. 4 Control diagram of improved VSG

其中, P_U 和 Q_U 分别为经线路损耗补偿后的连接线路末端有功与无功功率, u_U 为经线路损耗补偿后的连接线路末端电压, U_U 为末端电压有效值。输出电流 i_o 为连接线路首端可采集信号, 利用该电流进行线路功率损耗计算与线路压降计算, 计算得到的连接线路末端功率和电压值再反馈至 VSG 控制中, 完成后续控制。

改进 VSG 控制策略将连接线路阻抗考虑进逆变器控制中, 使用户侧功率直接受控。此时自同步电压源的输出功率仅与用户侧需求建立起一一对应的关系, 不受连接线路影响。故基于此控制思想, 线路末端处的有功、无功功率之间不存在耦合关系; 且由于不存在线路导致的异地性, 末端的下垂系数能够保证与给定值相等。此外, 该改进策略使负荷侧电压处于可控状态, 避免连接线路与虚拟阻抗压降导致负荷侧电压大幅跌落现象的发生。

可见, 所提改进控制策略利用首端数据间接实现了对末端状态的直接控制, 该思路仅依靠本地信息, 无需通信, 保证了控制的本地鲁棒性。而连接线路末端下垂特性的可控性则有效实现了微源稳定的“即插即用”功能。

2 多自同步电压源的并列协调运行

分布式微电网的优势在于允许多个电压源同时处于并联工作状态。研究单自同步电压源控制方法的根本目的是使其服务于多机并列运行控制中, 保证微电网的稳定运行。双自同步电压源并联系统等效图如图 5 所示。

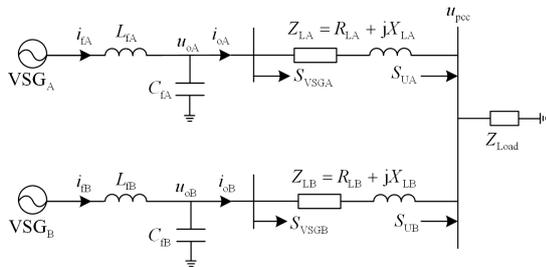


图 5 双自同步电压源并联系统等效图

Fig. 5 Equivalent diagram of parallel system of double self-synchronizing voltage sources

多自同步电压源之间的并列协调控制旨在对需求侧功率进行合理分配, 电压源根据容量大小按比例承担负荷有功与无功功率。结合前一节所述, 下垂环节控制自同步电压源的稳态输出功率, 因此静态下多电压源的功率精确分配同样依靠下垂控制实现。然而, 不仅是静态分配, 动态过程中的功率分

配同样值得关注。当微电网受到扰动时, 供需两侧功率之间出现差值。在达到新稳定工作点前的动态过程中, 并联电压源同样需对该功率差值进行合理分配。基于以上思想, 本节分别从静态和动态两个角度, 通过控制方法, 实现多自同步电压源的并列协调运行。

2.1 多电压源静态并列协调运行控制

本文所提的改进 VSG 控制策略能够实现连接线路末端的功率解耦及期望下垂特性。除解耦问题外, 并联系统还需解决功率分配问题。由图 4 可得改进下垂控制方程如式(9)所示。

$$\begin{cases} \omega_i - \omega_n = k_{pi} (P_{ni} - P_{Ui}) \\ U_{Ui} - U_n = k_{qi} (Q_{ni} - Q_{Ui}) \end{cases} \quad (9)$$

已知下垂系数设定值与电压源容量成反比。稳态时, 系统各处的频率均相等, 因此 $\omega_A = \omega_B$, 故整理有功下垂方程可得

$$k_{pA} P_{UA} = k_{pB} P_{UB} \quad (10)$$

即连接线路末端有功功率能够实现按照电压源容量比进行分配。

对于无功分配而言, 因各自同步电压源在连接线路末端处实现并联, 线路末端电压即为 PCC 点电压, 因此 $U_{UA} = U_{UB}$ 。经线路损耗补偿后的 PCC 点电压有效值反馈采用 PI 控制器。由于比例积分环节的存在, 稳态运行时 PI 控制器输入为零, 故可保证 $U_{UA} = U_{UB} = U_U = U_{pcc}$ 成立。整理无功下垂方程可得

$$k_{qA} Q_{UA} = k_{qB} Q_{UB} \quad (11)$$

即连接线路末端无功功率能够实现按照电压源容量比进行分配。综上, 改进 VSG 控制方法能够实现多自同步电压源连接线路末端静态有功和无功功率的合理分配。

2.2 多电压源动态并列协调运行控制

VSG 技术赋予了电力电子器件惯量特性, 虚拟惯量带来的过渡过程有效缓解了逆变器受扰时频率与功率的快速波动。单自同步电压源供电时, 其过渡时间可根据实际需求进行设置。当多自同步电压源并列运行时, 各机组过渡时间若存在差异, 除了影响各电压源的同期性, 还会对多机的动态协调运行造成影响。如发生负荷突增时, 若小容量发电单元的响应速度快, 则会抢发功率, 该现象有悖于并联多电压源之间合理分配功率的控制思想。

为了结合容量大小研究多自同步电压源过渡过程一致性问题, 以惯性时间常数改写转子方程。考虑角频率为全局变量, 忽略电压源与系统角频率之差导致的机械功率变化量。故简化转子运动方程如

式(12)所示。

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (12)$$

式中, $T_J = J\omega_n^2 / (p^2 S_n)$, 其中 p 和 S_n 分别为自同步电压源的极对数与额定容量, 极对数取 1。

设定如下工作点: 初始时, 自同步电压源稳定工作于 M 点; 受扰后, 工作点变化至 N 点。扰动前后转子方程分别如式(13)、式(14)所示。

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_{mM} - P_{eM} \quad (13)$$

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_{mN} - P_{eN} \quad (14)$$

由初始稳定工作点可得

$$P_{mM} = P_{eM} \quad (15)$$

当系统受到 ΔP 的负荷扰动后, 电压源输出功率会立刻由 P_{eM} 变化至 P_{eN} , 但机械功率尚未进行相应动作。此时扰动前后的输出功率满足 $P_{eN} = P_{eM} + \Delta P$, 结合式(15)可得

$$P_{eN} = P_{mM} + \Delta P \quad (16)$$

根据有功-频率下垂控制方程可知有功功率变化量 ΔP 与角频率变化量 $\Delta\omega$ 的关系为

$$\Delta\omega = -k_p \Delta P \quad (17)$$

为便于直观对过渡时间进行分析, 令 $d\omega / (dt) \approx \Delta\omega / (\Delta t)$, 结合上述各式可得

$$T_J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = P_{mM} - P_{eN} = P_{mM} - (P_{mM} + \Delta P) = -\Delta P = \frac{\Delta\omega}{k_p} \quad (18)$$

因此

$$\Delta t = T_J k_p = K \frac{k_p}{S_n} J \quad (19)$$

其中, 系数 $K = (\omega_n / p)^2$ 。由式(19)可知, 若想保证并联自同步电压源具有相等的过渡时间, 其虚拟惯量应按照有功下垂系数与额定容量比值的反比进行设置, 即

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{k_{p2} S_{n1}}{S_{n2} k_{p1}} \quad (20)$$

阻尼系数与下垂特性相关。为保证并列运行电压源之间合理的功率分配, 一般阻尼系数按照电压源有功容量的正比进行设置^[26]。

综上, 根据虚拟惯量及阻尼的匹配原则合理设置各电压源的惯量与阻尼系数能够保证过渡时间的一致性, 实现多自同步电压源动态并列协调运行。具体原则如下: 自同步电压源容量相同时, 设置相等的虚拟惯量与阻尼系数; 自同步电压源容量不同

时, 虚拟惯量根据有功下垂系数与额定容量比值的反比设置, 阻尼系数根据有功容量的反比设置。

由上述内容可以看出, 当微网内的负荷或分布式电源出力突变以及电网中出现扰动时, 结合本文所提改进 VSG 控制策略及虚拟转子特性匹配原则的各电压源能够在扰动发生至结束的过程中共同参与扰动功率的分配与调节, 使受扰后的微电网达到新的稳定状态, 保证微电网具有自我稳定机制, 即自稳性。

3 仿真实验

为验证本文提出的考虑下垂系数精确控制的改进 VSG 控制策略及并联储态匹配原则的有效性, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建自同步电压源微电网模型。仿真验证包括单机运行特性、双机并联运行特性以及分布式微电网离并网切换三方面。部分仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

参数	数值	
直流侧参数	直流侧电压, U_{dc}	800 V
滤波器参数	滤波器电感, L_f	10.25 mH
	滤波器电容, C_f	350 μ F
系统参数	额定频率, f_n	50 Hz
	额定相电压(有效值), U_n	220 V
	逆变器开关频率, f_s	5 000 Hz
控制参数	电压环 PI 控制器比例系数, k_{up}	3
	电压环 PI 控制器积分系数, k_{ui}	0.008
	电流环 PI 控制器比例系数, k_{ip}	60

3.1 自同步电压源单机运行特性

搭建由单自同步电压源供电、孤岛模式下带负荷运行的微电网系统。分别改变连接线路阻感比与长度, 以连接线路末端功率实际解耦效果和由最小二乘法拟合得到的实际下垂系数为指标, 对比分析未采用解耦控制时、采用虚拟阻抗法解耦时及采用本文所提改进 VSG 控制方法解耦时的功率耦合情况及下垂特性, 验证改进方案的有效性。单自同步电压源仿真参数如表 2 所示。

3.1.1 连接线路末端功率解耦效果

工况设置: 初始微电网孤岛带 10 kW 有功及 2 kvar 无功负荷; $t=1$ s 时, 接入 2 kW 有功负荷; $t=2$ s 时, 恢复初始状态。

(1) 不同阻感比连接线路

连接线路分别设置为: 阻感性线路, $Z_L = (0.1+j0.1) \Omega$; 高阻性线路, $Z_L = (1+j0.1) \Omega$ 。以不影

响系统稳定运行为前提，虚拟负电阻分别设置为：阻感性线路， $R_v=-0.09 \Omega$ ；高阻性线路， $R_v=-0.99 \Omega$ 。连接线路阻感比不同时的线路末端有功和无功功率波形如图 6 所示。

表 2 单自同步电压源仿真参数

Table 2 Simulation parameters of single self-synchronizing voltage source

参数	数值
有功-频率下垂系数, k_p	0.05e-3
无功-电压下垂系数, k_q	0.5e-3
虚拟惯量, J	0.1
虚拟阻尼, D	20
改进 VSG 控制策略中附加 PI 控制器比例系数, k_p	0.1
改进 VSG 控制策略中附加 PI 控制器积分系数, k_i	25

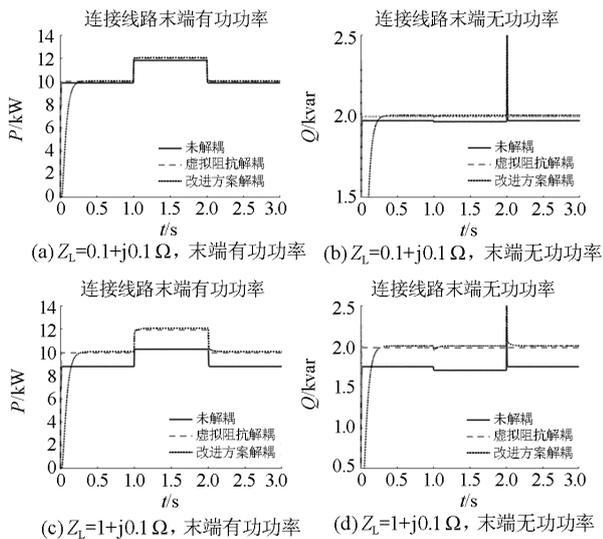


图 6 不同阻感比连接线路下末端功率

Fig. 6 Terminal active and reactive power of connection lines with different R/X ratios

由图 6(a)、图 6(b)可知：未解耦时，有功发生突变导致无功因耦合而随之改变；连接线路末端的有功和无功功率均与负荷需求存在差距。采用虚拟阻抗法解耦时，虚拟负电阻阻值较大保证等效线路环境呈感性，因此末端无功功率基本不受有功阶跃的影响，功率之间耦合程度降低，并且末端功率与解耦前相比能够较好地满足负荷需求；但考虑到系统稳定性问题，虚拟负电阻无法完全抵消线路电阻，故末端有功功率仍会因线路有功损耗而稍低于需求值。采用改进控制方案进行解耦时，无功功率在有功变化时可基本保持不变，且末端有功和无功功率

均能够满足用户侧要求，实现稳态解耦。由于此时线路阻感比较小，由耦合带来的影响也相对较小，故改进方案的补偿与解耦效果不够明显。

由图 6(c)、图 6(d)可以看出：当线路阻感比较高时，与图 6(b)相比，无功功率受耦合影响更为显著；末端有功和无功功率已明显低于负荷功率值，无法满足用户侧需求。虚拟阻抗法在基本实现功率解耦的同时仍不可避免地存在损耗问题。而改进控制方案依然能够实现稳态解耦，且较为准确地满足负荷端功率要求。因此认为在合理范围内，连接线路阻感比越高，所提改进方案的优势越明显。

(2) 不同长度连接线路

取每公里连接线路阻抗值为 $Z_{line}=(0.6+j0.1) \Omega$ ，分别设置 1 km、3 km 和 5 km 的连接线路长度，虚拟负电阻相应为 -0.5Ω 、 -1.7Ω 以及 -2.9Ω 。线路末端有功和无功功率波形如图 7 所示。

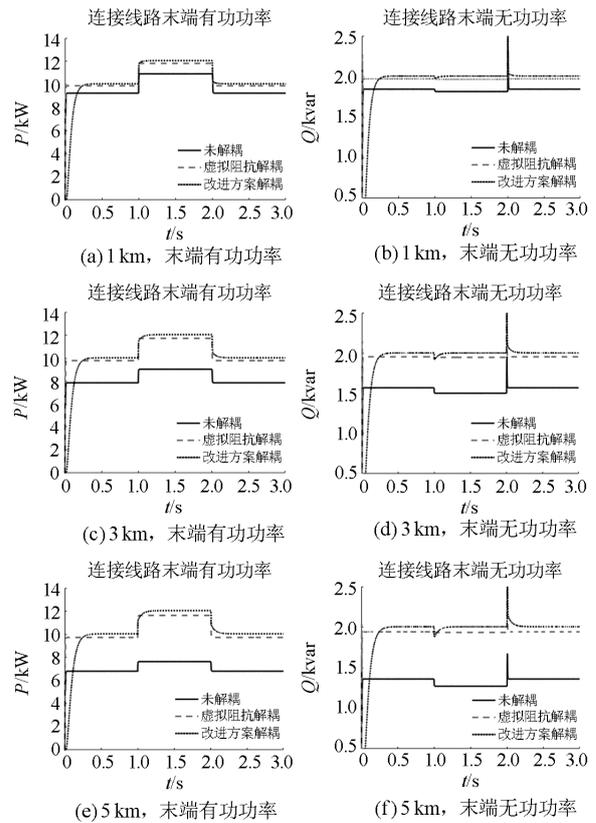


图 7 不同长度连接线路下末端功率

Fig. 7 Terminal active and reactive power of connection lines with different lengths

由图 7 可知，未进行线路解耦前，末端功率互相耦合，随着连接线路长度的增长，线路上的功率损耗也增大，能够输送至用户侧的功率越来越少，满足其需求的难度越来越大。采用虚拟阻抗法进行

解耦后, 功率耦合程度明显下降, 但线路末端实际输出功率与负荷需求功率之间存在差值。通过改进控制方法进行解耦时, 连接线路末端功率基本不受线路长度变化的影响, 有功和无功功率之间呈稳态解耦, 出力能够较为精确地达到用户侧所需功率。因此认为在合理范围内, 连接线路的长度越长, 所提改进方案的优势越明显。

3.1.2 连接线路末端下垂系数

工况设置: 初始微电网孤岛带 10 kW 有功及 2 kvar 无功负荷; $t=1$ s 时, 接入 2 kW 有功负荷及 2 kvar 无功负荷; $t=2$ s 时, 再接入 2 kW 有功负荷及 1 kvar 无功负荷。

(1) 不同阻感比连接线路

连接线路及虚拟阻抗设置同前。线路末端有功-频率及无功-电压拟合下垂曲线如图 8 所示。

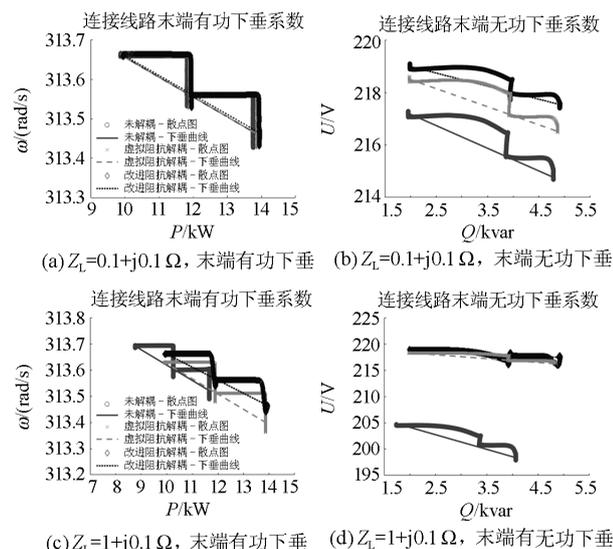


图 8 不同阻感比连接线路下末端下垂曲线

Fig. 8 Terminal droop curve of connection lines with different R/X ratios

通过拟合得到的下垂系数如表 3 所示。

表 3 不同阻感比连接线路下末端下垂系数

Table 3 Terminal droop coefficient of connection line

with different R/X ratios

	线路阻抗/ Ω	未解耦	虚拟阻抗	改进方案
有功下垂系数	0.1+j0.1	-0.050 4	-0.050 4	-0.049 5
	1+j0.1	-0.058 6	-0.058 0	-0.049 6
无功下垂系数	0.1+j0.1	-0.867 8	-0.691 6	-0.501 6
	1+j0.1	-2.795 5	-0.737 4	-0.501 5

(2) 不同长度连接线路

连接线路及虚拟阻抗设置同前。线路末端有功-频率及无功-电压拟合下垂曲线如图 9 所示。

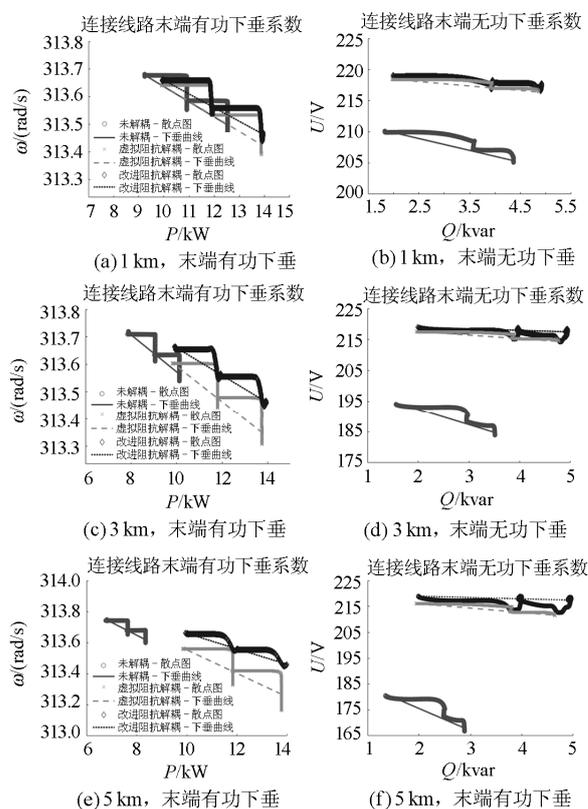


图 9 不同长度连接线路下末端下垂曲线

Fig. 9 Terminal droop curve of connection lines with different lengths

通过拟合得到的下垂系数如表 4 所示。

表 4 不同长度连接线路下末端下垂系数

Table 4 Terminal droop coefficient of connection line

with different lengths

	线路长度	未解耦	虚拟阻抗	改进方案
有功下垂系数	1 km	-0.054 9	-0.054 7	-0.049 6
	3 km	-0.067 0	-0.065 0	-0.049 7
	5 km	-0.082 2	-0.075 7	-0.050 0
无功下垂系数	1 km	-1.911 0	-0.715 8	-0.501 1
	3 km	-5.046 7	-1.148 0	-0.501 2
	5 km	-8.553 1	-1.697 7	-0.500 8

由以上仿真结果可知: 未解耦及采用虚拟阻抗进行解耦时, 系统均利用线路首端功率进行下垂控制。基于所设线路情况, 未解耦时的末端下垂系数受两方面影响。一方面, 阻抗比增大使耦合程度增强; 另一方面, 线路阻抗增大使线路功率损耗及压降增大, 二者将会不同程度地导致下垂系数偏离。连接线路长度越长, 线路阻抗值越大, 下垂系数偏离越明显。采用虚拟阻抗进行解耦时, 偏离程度较未解耦时有所改善, 但仍会受线路阻抗影响, 与前

述分析一致。而采用改进方案进行补偿后，末端下垂系数基本不会随阻抗值的变化而变化，使用户侧下垂系数可控。

由另一角度分析无功下垂曲线可得，较大阻值的线路阻抗使连接线路末端电压大幅跌落，对负荷侧电压造成恶劣影响。而改进方案则可保证末端电压不因连接线路阻抗改变，有效维持用户侧电压的正常水平。

3.2 自同步电压源单机运行特性

搭建自同步电压源双机并列运行向负荷供电的孤岛微电网系统，如图 5 所示。对比分析未采用解耦控制时、采用虚拟阻抗法时及采用本文所提改进 VSG 控制方法结合惯量阻尼匹配时的连接线路末端功率分配情况，验证改进方案的有效性。设置 A、B 两台自同步电压源容量比为 2:1，连接线路为 $Z_{LA}=Z_{LB}=(0.7+j0.1)\Omega$ ，虚拟负电阻设置为 -0.67Ω 。具体仿真参数如表 5 所示。

表 5 并联自同步电压源仿真参数

Table 5 Simulation parameter of multi-parallel self-synchronizing voltage sources

参数	数值
有功-频率下垂系数, k_{pA}	0.05e-3
有功-频率下垂系数, k_{pB}	0.1e-3
无功-电压下垂系数, k_{qA}	0.5e-3
无功-电压下垂系数, k_{qB}	1e-3
虚拟惯量, J_A	0.4
虚拟惯量, J_B	0.1
虚拟阻尼, D_A	40
虚拟阻尼, D_B	20
改进 VSG 控制策略中附加 PI 控制器比例系数, k_p	5
改进 VSG 控制策略中附加 PI 控制器积分系数, k_i	70

工况设置：初始微电网孤岛带 30 kW 有功及 3 kvar 无功负荷； $t=2\text{ s}$ 时，接入 3 kW 有功负荷及 3 kvar 无功负荷； $t=3.5\text{ s}$ 时，恢复初始状态。并联系统有功和无功功率分配情况如图 10 所示。

由图 10(a)、图 10(b)仿真结果可知，高阻性连接线路使有功和无功功率之间呈耦合状态，有功功率显然没有按照 2:1 进行分配，且相加后与负荷需求值不等。由于线路电阻较大， VSG_B 发出无功， VSG_A 吸收无功，该现象在发生功率阶跃后变得更加恶劣^[10]。图 10(c)、图 10(d)为采用虚拟阻抗进行解耦后的功率分配波形，与未解耦时相比，有功功率分配接近既定 2:1 比例；而从无功功率来看，虽然两台机组均为发出无功，但呈现了一种小容量机组反而承担大负荷现象。即有功功率分配得到改善，

但无功分配仍旧存在问题。图 10(e)、图 10(f)采用了改进控制方案结合惯量阻尼匹配方法，可以看出，在负荷切换前后，有功和无功功率均可精确按照 2:1 分配，且两台自同步电压源的过渡过程保持同步，实现分布式微电网中多电压源的自主同步运行。但无功功率突变后的暂态时间较长，其原因需进一步分析。

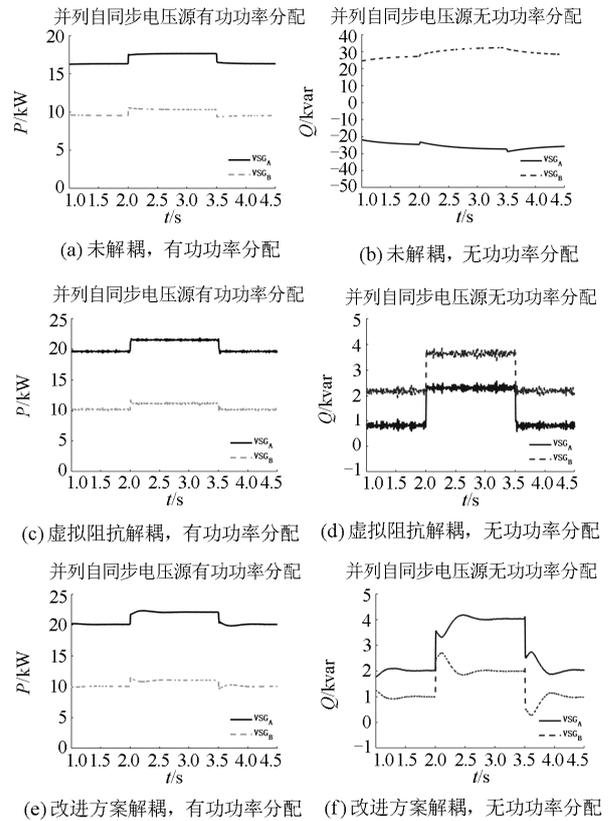


图 10 自同步电压源并联系统功率分配

Fig. 10 Power sharing of multi-parallel self-synchronizing voltage sources

3.3 自同步电压源单机运行特性

为验证基于本文所提改进控制策略的自同步电压源在进行离并网切换时的自同步性与稳定性，采用由 380 V、50 Hz 三相理想电压源等效的无穷大电网进行仿真。设置自同步电压源功率参考值 $P^* = 0$ 以及连接线路 $Z_L = 3 \times (0.6 + j0.1)\Omega$ ，其他仿真参数同上。工况设置如下：初始状态，自同步电压源带 10 kW 有功负荷形成孤岛微电网； $t=1\text{ s}$ 时，微电网并入无穷大电网； $t=2\text{ s}$ 时，微电网退网，恢复初始运行状态。自同步电压源连接线路末端有功功率及系统频率分别如图 11、图 12 所示。

根据仿真结果： $t=1\text{ s}$ 前，单自同步电压源连接线路末端输出 10 kW 有功功率，精确满足负荷所需。

根据有功-频率下垂方程计算可得,此时系统频率应为 49.92 Hz。频率仿真值与理论值相等。 $t=1$ s 时,微网并入无穷大电网,并网期间自动适应大电网 50 Hz 运行频率,功率相应变化为有功参考值。 $t=2$ s 时断开与大电网连接后,微电网恢复自主运行状态,与并网前功率、频率状态一致。可见,仿真结果验证了自同步电压源无需改变控制方式即可进行离并网稳定切换的可行性,使微电网具备自主性。

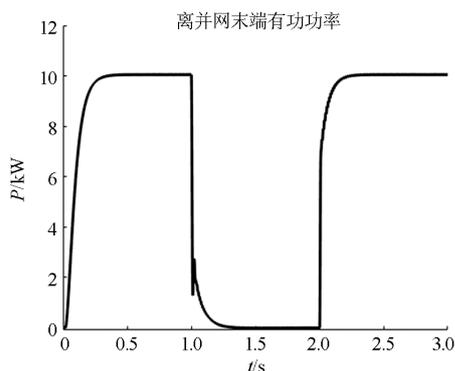


图 11 自同步电压源离并网有功功率波形

Fig. 11 Active power waveform of self-synchronizing voltage source when grid-connection switching

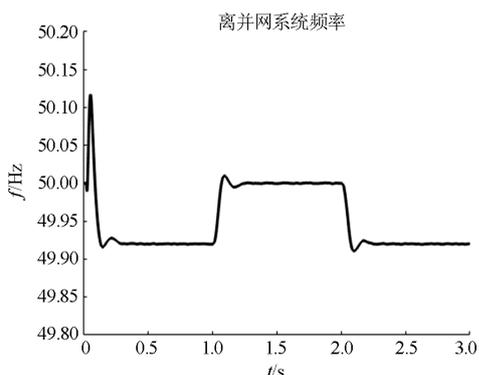


图 12 自同步电压源离并网频率波形

Fig. 12 Frequency waveform of self-synchronizing voltage source when grid-connection switching

需要说明的是,仿真中采用虚拟阻抗解耦方法时,为尽可能抵消线路阻性,虚拟阻抗数值选取较大。实际上,虚拟阻抗存在临界稳定值^[27]。当虚拟负电阻值与线路电阻值接近甚至相等时,能够最大程度地实现解耦,但此时系统可能会面临失稳。所以,改进方法避免了虚拟阻抗法的临界稳定性问题。

4 结论

本文从控制思路的角度进行创新,将下垂控制点进行迁移,提出了考虑下垂系数精确控制的改进 VSG 控制策略。结合虚拟转子匹配原则赋予了微电

网中的并联逆变器以自同步特性。得到以下结论:

(1) 自同步电压源关系对等,可同时处于运行状态,避免因冷切换导致停电,使分布式微电网具有较高的冗余度和拓展性。

(2) 改进 VSG 控制策略可实现用户侧功率解耦和下垂系数的精确控制,稳定实现微源的“即插即用”。此外,该控制方法仅依靠本地信息,无需通信,保证了控制的本地鲁棒性。

(3) 结合改进 VSG 控制策略和虚拟转子匹配原则,并联自同步电压源无需附加改进无功控制即可从静态和动态两个方面实现功率的合理分配,使微电网具有较好的自稳性。

(4) 基于自同步电压源的分布式微电网在孤岛或并网模式工作时无需改变控制策略,为微电网“快速、无缝”地离并网切换提供可行性,使其具备自主性。

(5) 分布式微电网独有的 $N+1$ 冗余模式将集中式微电网中需加倍配置的储能资源降低至 $\left(1 + \frac{1}{n}\right)$ 倍,显著提高经济性。

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.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [2] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31, 58.
ZHENG Zhanghua, AI Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31, 58.
- [3] 任德江, 吴杰康. “源-网-荷-储”协同的园区微电网优化调度[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 16-23.
REN Dejiang, WU Jiekang. Optimized dispatching for park microgrid considering source-grid-load-storage coordination[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 16-23.
- [4] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 6-11.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 6-11.
- [5] 王成山, 杨占刚, 王守相, 等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1):

- 99-105.
WANG Chengshan, YANG Zhangang, WANG Shouxiang, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 99-105.
- [6] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [7] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.
SU Ling, ZHANG Jianhua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.
- [8] 李鑫卓. 基于主从控制的微电网平滑切换控制[J]. 电气自动化, 2019, 41(4): 27-29.
LI Xinzhuo. Smooth switching control of micro-grids based on master-slave control[J]. Power System and Automation, 2019, 41(4): 27-29.
- [9] 江渝, 向竑宇, 钟力强. 基于协调一致算法的微电网频率二次调整策略[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 66-71.
JIANG Yu, XIANG Hongyu, ZHONG Liqiang. Secondary adjustment strategy for microgrid frequency based on consensus algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 66-71.
- [10] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-349.
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-349.
- [11] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-360.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [12] 程军照, 李澍森, 吴在军, 等. 微电网下垂控制中虚拟电抗的功率解耦机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 27-32.
CHENG Junzhao, LI Shusen, WU Zaijun, et al. Analysis of power decoupling mechanism for droop control with virtual inductance in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 27-32.
- [13] 张平, 石健将, 李荣贵, 等. 低压微网逆变器的“虚拟负阻抗”控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1844-1852.
ZHANG Ping, SHI Jianjiang, LI Ronggui, et al. A control strategy of 'virtual negative' impedance for inverters in low-voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1844-1852.
- [14] 王二永, 王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 144-149.
WANG Eryong, WANG Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 144-149.
- [15] ZHANG P, CAI H, HE X, et al. Power decoupling strategy based on 'virtual negative resistor' for inverters in low-voltage microgrids[J]. IET Power Electronics, 2016, 9: 1037-1044.
- [16] WU Teng, LIU Zeng, LIU Jinjun, et al. A unified virtual power decoupling method for droop-controlled parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5587-5603.
- [17] DELGHAVI, M B, YAZDANI A. An adaptive feedforward compensation for stability enhancement in droop-controlled inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1764-1773.
- [18] LI B, ZHOU L. Power decoupling method based on the diagonal compensating matrix for VSG-controlled parallel inverters in the microgrid[J]. Energies, 2017, 10(12): 2159.
- [19] GUO W, MU L. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [20] 艾欣, 金鹏, 孙英云. 一种改进的微电网无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 147-155.
AI Xin, JIN Peng, SUN Yingyun. An enhanced reactive sharing control strategy of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 147-155.
- [21] 韩华, 刘尧, 孙尧, 等. 一种微电网无功均分的改进控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2639-2648.
HAN Hua, LIU Yao, SUN Yao, et al. An improved control strategy for reactive power sharing in microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2639-2648.
- [22] 袁健, 杨伟. 独立微网中多虚拟同步机功率精确分配

- 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 35-42.
YUAN Jian, YANG Wei. Accurate power sharing control strategy of multiple virtual synchronous generators in independent micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 35-42.
- [23] 杨才明, 孙丽敬, 吴鸣, 等. 基于阻抗辨识的并联逆变器无功均分 VSG 控制[J]. 控制工程, 2020, 27(1): 77-83.
YANG Caiming, SUN Lijing, WU Ming, et al. Improved VSG control method based on impedance identification for reactive power sharing in parallel inverter system[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(1): 77-83.
- [24] YE P, HE J, WANG G, et al. An improved droop control strategy for parallel inverters in microgrid[C] // Proceedings of 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-5.
- [25] 麦倩屏, 陈鸣. 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.
- [26] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.
ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52.
- [27] WU X, SHEN C, IRAVANI R. Feasible range and optimal value of the virtual impedance for droop-based control of microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3): 1242-1251.

收稿日期: 2019-04-14; 修回日期: 2019-04-26

作者简介:

武文平(1967—), 男, 在职研究生, 副教授, 研究方向为电力系统建模与分析; E-mail: 2538123803@qq.com

崔扬(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微电网运行与控制; E-mail: bdcuiyang@163.com

颜湘武(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统、电力电子高效变换以及新能源储能与节能等。E-mail: xiangwuy@163.com

(编辑 魏小丽)