

适用于中低压配电网的VSG多机协同鲁棒运行控制方法

张从越¹, 窦晓波¹, 何国鑫², 杨冬梅²

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:虚拟同步发电机(VSG)作为一种新型电网友好型运行控制方法,通常情况下大多以中低压、多节点分散接入配电网,其存在多类不确定因素以及多机协同运行控制问题,给配电网的安全稳定控制带来了一定的挑战。为此,提出了一种面向中低压配电网的VSG多机协同鲁棒运行控制方法,主要针对协同运行控制中的母线电压跟踪、多机功率均分以及中低压配电网中线路阻抗参数不确定造成的功率耦合不确定和系统设备出力不确定等问题进行了讨论。通过建立VSG并网模型,将不确定功率耦合转化为模型不确定问题进行设计;考虑到中低压配电网中可能存在的拓扑未知和模型阶数较高的问题,通过直接扩张母线电压状态和多机功率均分状态,建立多VSG并网协同控制模型;采用鲁棒控制理论设计整体系统的反馈控制器,抑制模型内部的功率不确定耦合和外部设备不确定出力对控制性能的影响。基于MATLAB/Simulink的仿真模型验证了所提方法的有效性。

关键词:虚拟同步发电机;鲁棒控制;多机协同运行;功率耦合;中低压配电网

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009034

0 引言

面对日益严峻复杂的能源和环境问题,以光伏和风能为代表的可再生能源得到广泛的关注和研究^[1]。然而,大量分布式能源接入电网虽然在一定程度上缓解了用电压力,但是同步电机的装机比例下降以及电力电子器件的大量使用等带来了配电网惯性和阻尼降低的问题,在一定程度上影响了配电网系统的安全稳定运行^[2]。因此,为了改善分布式电源在电力系统中的运行特性,虚拟同步发电机VSG(Virtual Synchronous Generator)控制方法应运而生。

不同于常规同步电机,基于电力电子器件的分布式电源虽然具备快速响应的能力,但同时也带来了系统频率和电压频繁波动的问题。VSG控制最早被提出时通过模拟同步电机的转子方程实现惯量及阻尼支撑^[3],同时辅助无功-电压控制,使得分布式电源具有良好的频率、电压调节效果^[4]。目前,国内外学者针对VSG的研究已经实现了在物理结构、数学方程等方面的完整等效,且针对VSG的响应过程^[5-6]和控制能力^[7]也不乏相关的分析和研究。文献[7]为了提高VSG接入系统的频率稳定性,提出了

VSG惯性参数的设计方法;文献[8]将VSG控制应用于微电网的控制设计,提升了整体微电网的频率动态性能。但是现有关于VSG的研究大多以输出至并网节点间线路为纯感性或纯阻性进行设计。而在实际电网运行中,VSG接入中低压配电网,其输出线路的阻感特性造成功率耦合,影响了控制性能^[9]。

为了应对中低压配电网中的功率耦合控制问题,降低耦合对频率、电压控制的影响,提升控制性能,诸多控制方法也得到了充分的研究关注。其中最广为关注的方法为虚拟阻抗控制方法,主要通过设计虚拟阻抗^[10]、虚拟负阻抗^[11],等效地改变输出线路的阻抗比例,以达到等效感性输出,实现分布式电源输出功率解耦的目的。但是值得注意的是,这种等效阻抗设计方法通常不可避免地会带来电压暂降等不利影响^[12],同时在输出线路长度、阻感值未知或不精确的情况下,难以实现精确的感性等效,从而需要通过额外的自适应^[13-14]方法进行补偿,由此增加了控制设计的复杂性。由于解耦控制设计的本质是为了消除有功、无功控制交叉环路的影响,从而提高控制系统的稳定性,因此通过变化矩阵的引入实现消除功率控制回路中耦合过程的方法也得到了关注和研究^[15]。

此外,现有关于VSG多机协调运行控制的研究大多以并联VSG为研究对象进行控制设计和参数优化,文献[16]分析了并联条件下VSG的有功功率均分问题,提出一种基于虚拟电感和暂态阻尼的暂态主动功率分配优化方法,实现了在不影响稳态功率分配的前提下改进暂态有功分配的性能;文献[17]在分析并联VSG响应特性的基础上,同时解决了有功和无功的均分问题。但是研究大多集中于

收稿日期:2020-05-29;**修回日期:**2020-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777031);智能电网保护和运行控制国家重点实验室资助项目(面向电网辅助服务的大容量储能运行控制技术)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777031) and the Program of State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operation Control(Operation Control Technology of Large Capacity Energy Storage for Auxiliary Service of Power Grid)

VSG间的相互影响或并联VSG对电网的影响^[6,18],对于电网中各类不确定因素对VSG控制系统的影响、多点接入协同控制、多机功率均分等问题的研究还相对较少。

因此,基于VSG的接入现状以及上述研究的贡献和不足,本文提出了一种适用于中低压配电网的VSG多机协同鲁棒运行控制方法。该方法主要实现区域配电网中多VSG接入的协同调压与功率均分问题,同时采用鲁棒控制有效地抑制中低压配电网中各类不确定因素对系统控制性能的影响,具体研究和创新点包括:①对VSG多点分散接入的情况进行建模和控制设计,相比于现有单机和多机并联控制,所提方法具备更好的通用性和拓展性;②所提方法不需要进行虚拟阻抗设计,而是直接通过控制回路抑制耦合影响,通过额外的功率控制实现均分,这样避免了虚拟阻抗设计可能带来的电压暂降等不利影响,解决了多机间难以准确分配功率的问题;③通过扩张母线电压状态和功率均分状态得到VSG多机的状态方程,可有效避免线路建模造成的模型阶数过高的问题,便于系统集中协同控制;④基于鲁棒方差控制理论设计了控制器,可以有效抑制模型内部参数不确定和外部功率变化不确定对控制性能的影响,同时保证了一定的控制性能。最后,通过仿真算例验证了所提方法对于多VSG协同运行控制的有效性。

1 传统VSG控制模型

VSG系统的控制结构如图1所示,直流侧接入储能、清洁能源装置,交流侧经LC滤波线路和RL线路接入配电网或微电网系统。图中, L 、 L_f 分别为线路电感、滤波电感; R 为线路电阻; C_f 为滤波电容; e_{dq} 为输出电压; u_{dq} 为并网点电压; i_{dq} 为VSG并网输出电流; $i_{L,dq}$ 为外部负荷电流; P 、 Q 分别为有功输出、无功输出; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为参考有功功率、参考无功功率; J 为虚拟惯量; D 为阻尼系数; ω_n 为稳态角频率值; $\Delta\omega$ 为角频率变化量; U_{ref} 为给定参考电压; K_ω 为角速度下垂增益系数; K_q 为无功下垂系数; E 为VSG

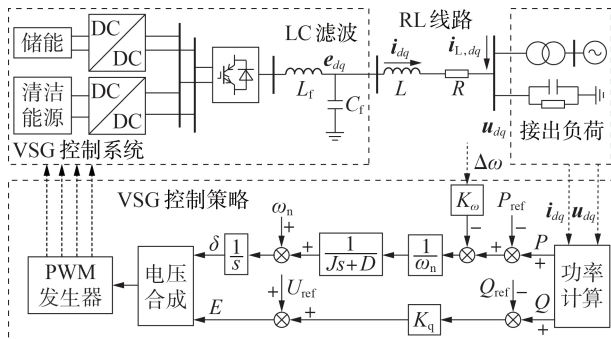


图1 VSG系统的控制结构

Fig.1 Control structure of VSG system

输出电压的幅值; δ 为VSG输出功角。VSG控制系统通过模拟同步发电机的惯性特性实现类似于同步发电机的惯性支撑效果。

为了等效同步发电机的惯性和阻尼特性,VSG的转子结构通过二阶惯性关系方程进行模拟,具体表达式如式(1)所示。

$$\begin{cases} J\omega_n \frac{d\omega}{dt} = P_m - P - D\omega_n(\omega - \omega_n) \\ P_{ref} - P_m = -K_\omega(\omega_n - \omega) \\ d\delta/dt = \omega - \omega_n \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_m 为机械功率; ω 为角频率。

VSG控制的无功-电压关系与下垂控制相同,其电压幅值由给定参考电压值和无功偏差共同决定,如式(2)所示。

$$\begin{cases} e_d - U_{ref} = K_q(Q_{ref} - Q) \\ e_q = 0 \end{cases} \quad (2)$$

VSG系统经LC滤波和RL线路接入电网。通过在母线处引入虚拟电容 C ,从而引入母线电压变量,得到VSG的并网电压、电流方程如式(3)所示。

$$\begin{cases} u_{dq} = e_{dq} - (L + L_f) \frac{di_{dq}}{dt} + Ri_{dq} \\ C \frac{du_{dq}}{dt} = i_{dq} - i_{L,dq} \end{cases} \quad (3)$$

一般而言,VSG的输出功率由功率计算模块中的一阶滤波得到,则VSG的输出功率可表示为:

$$\begin{cases} P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} P^* = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (i_d u_d + i_q u_q) \\ Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Q^* = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (i_d u_q - i_q u_d) \end{cases} \quad (4)$$

其中, ω_c 为一阶滤波常数; P^* 、 Q^* 分别为VSG实际有功、无功输出功率。

结合式(1)~(4),得到VSG整体系统状态空间方程的小信号模型为:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_2 u + B_1 w \\ x &= [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta i_{dq}, \Delta u_{dq}, \Delta P, \Delta Q]^T \\ u &= [\Delta\omega_{ref}, \Delta U_{ref}, \Delta P^*, \Delta Q^*]^T, w = [\Delta i_{L,dq}]^T \end{aligned} \quad (5)$$

其中, Δ 表示对应变量的小信号形式; A 、 B_2 、 B_1 为常数矩阵,具体见附录A中式(A1)。

2 多VSG协同运行控制模型

2.1 中低压配电网的功率耦合特性

常规VSG基于感性电路进行设计。典型线路阻抗值见附录B中表B1。由表B1可见,中低压配电网的阻抗比相对较高,若不进行解耦处理则难以保证系统安全稳定运行。

假设VSG系统接入电网的公共连接点处的电压恒定不变,则VSG系统的输出功率可表示为:

$$\begin{cases} P^* = \frac{EU}{\sqrt{X^2 + R^2}} \sin\left(\delta + \arctan \frac{R}{X}\right) - \frac{RU^2}{X^2 + R^2} \\ Q^* = \frac{EU}{\sqrt{X^2 + R^2}} \cos\left(\delta + \arctan \frac{R}{X}\right) - \frac{XU^2}{X^2 + R^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中, U 为并网电压幅值; X 为线路等效电抗。

当系统线路不为纯感性时, VSG 的输出功率存在耦合, 如附录 B 中图 B1 所示。这种耦合关系由线路阻抗比和功角共同作用产生, 导致在多机运行控制时可能会出现环流造成振荡, 从而影响系统的稳定性。

因此, 为了实现在控制设计中考虑并处理功率耦合问题, 同时避免虚阻抗设计可能造成的功率均分准确性和电压跌落问题, 本文定义了功率耦合增益系数 $K_{P\delta}$ 、 K_{PE} 、 $K_{Q\delta}$ 、 K_{QE} 表征对应的耦合特性, 具体表达式见附录 A 中式 (A2)。通过在稳态工作点进行小信号建模, 以 $\gamma = \arctan(R/X)$ 表示等效输出功角, 可以得到:

$$\begin{cases} \Delta P^* = K_{P\delta} \Delta \delta + K_{PE} \Delta E \\ \Delta Q^* = K_{Q\delta} \Delta \delta + K_{QE} \Delta E \end{cases} \quad (7)$$

进一步考虑中低压配电网中可能存在的 VSG 连接线路阻抗参数不准确或不确定的影响, 用 e_d 近似表示 E , 则 VSG 输出功率的状态方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^* \\ \Delta Q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{P\delta} + K_{P\delta, \Delta} & K_{PE} + K_{PE, \Delta} \\ K_{Q\delta} + K_{Q\delta, \Delta} & K_{QE} + K_{QE, \Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta e_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $K_{P\delta, \Delta}$ 、 $K_{PE, \Delta}$ 、 $K_{Q\delta, \Delta}$ 、 $K_{QE, \Delta}$ 用于表征线路阻抗参数不确定对耦合增益系数的影响。

2.2 多 VSG 接入配电网的控制模型

本文所研究的多 VSG 分散接入配电网的总体结构如图 2 所示。现考虑建立含 n 个 VSG 系统分散接入配电网的协同运行控制模型, 结合式 (5) 和式 (8), 可得 VSG 系统 j ($j=1, 2, \dots, n$) 的状态空间方程为:

$$\dot{\mathbf{x}}_j = (\mathbf{A}_j + \mathbf{A}_{\Delta j}) \mathbf{x}_j + (\mathbf{B}_{j2} + \mathbf{B}_{\Delta j}) \mathbf{u}_j + \mathbf{B}_{j1} \mathbf{w}_j \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}_j = [\Delta \omega_j, \Delta \delta_j, \Delta \mathbf{i}_{j, dq}, \Delta \mathbf{u}_{j, dq}, \Delta P_j, \Delta Q_j]^T \\ \mathbf{u}_j = [\Delta \omega_{j, \text{ref}}, \Delta U_{j, \text{ref}}]^T, \mathbf{w}_j = [\Delta \mathbf{i}_{j, L, dq}]^T \end{cases} \quad (10)$$

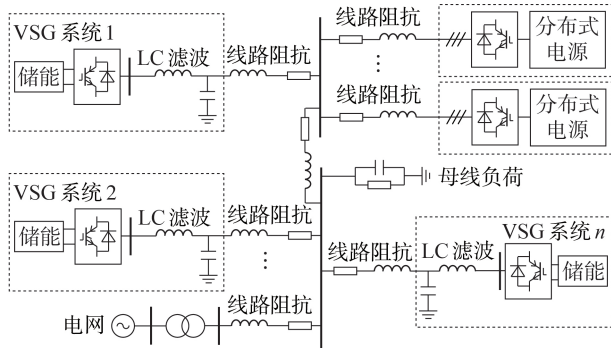


图2 多 VSG 系统接入配电网的结构

Fig.2 Structure of distribution network with multiple VSG systems

其中, $\mathbf{A}_j$ 、 $\mathbf{B}_{j2}$ 、 $\mathbf{B}_{j1}$ 为常数矩阵, $\mathbf{A}_{\Delta j}$ 、 $\mathbf{B}_{\Delta j}$ 为由线路阻抗参数不确定性引入的不确定部分, 表达式见附录 A 中式 (A3)。

得到多 VSG 分散接入系统的状态空间方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_1 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{x}}_n \end{bmatrix} = \mathbf{A}_M \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_n \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{M2} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_n \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{M1} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{w}_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{A}_M$ 、 $\mathbf{B}_{M1}$ 、 $\mathbf{B}_{M2}$ 见附录 A 中式 (A4)。

考虑到在中低压配电网中各个 VSG 系统间的线路拓扑复杂或存在局部拓扑未知不确定的情况, 这可能造成无法准确地得到拓扑模型, 或得到的拓扑模型阶数过高, 后续难以简化和求解。此外, 复杂或不确定的拓扑参数也极大地复杂了多 VSG 实现功率均分的过程。因此, 为了解决分散接入的 VSG 之间存在的功率均分问题, 保证如式 (12) 所示的多 VSG 功率均分状态。

$$\frac{\Delta P_1}{K_{1, \omega}} = \frac{\Delta P_2}{K_{2, \omega}} = \dots = \frac{\Delta P_n}{K_{n, \omega}} \quad (12)$$

基于可测多机功率平均量, 采用积分趋近设计各 VSG 的功率均分控制状态 Δm_j , 如式 (13) 所示。

$$\Delta m_j = \frac{1}{ns} \left(n \frac{\Delta P_j}{K_{j, \omega}} - \sum_{k=1}^n \frac{\Delta P_k}{K_{k, \omega}} \right) \quad (13)$$

进一步考虑含多 VSG 的中低压配电网母线电压协同跟踪控制, 引入母线电压误差积分状态 $\Delta v_{j, d}$ [15] 如式 (14) 所示。

$$\Delta v_{j, d} = \frac{1}{s} (\Delta u_{\text{bus}} - \Delta u_{\text{ref}}) = \frac{1}{s} (\Delta u_{j, d} + \Delta V_j) \quad (14)$$

其中, ΔV_j 为 VSG 系统 j 到公共母线的电压不确定电压降落; Δu_{bus} 、 Δu_{ref} 分别为 VSG 接出母线电压、电压参考值的小信号形式。

将式 (13)、式 (14) 与式 (11) 相结合, 可以得到整体系统多 VSG 协同控制的状态空间方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{m}} \\ \dot{\mathbf{v}} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_F \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{m} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{F2} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_n \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{F1} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{F1} \\ \mathbf{w}_{F2} \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{Fn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]^T, \mathbf{m} = [\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_n]^T$$

$$\mathbf{v} = [\Delta v_{1, d}, \Delta v_{2, d}, \dots, \Delta v_{n, d}]^T$$

$$\mathbf{w}_{Fj} = \left[\mathbf{w}_j, \Delta V_j, \sum_{j=1}^n \Delta P_j / K_{j, \omega} \right]^T$$

其中, $\mathbf{A}_F$ 、 $\mathbf{B}_{F2}$ 、 $\mathbf{B}_{F1}$ 为对角系数矩阵。

3 鲁棒协同运行控制方法设计

3.1 多 VSG 系统协同控制模型简化

通过上述对 VSG 的详细建模, 可得到含 n 个 VSG 系统分散接入的配电网模型为阶数是 $n \times 10$ 且

含有协同控制的模型。但是值得注意的是,随着VSG系统数量的增加,模型的阶数过高可能会造成控制器求解困难等问题。因此,针对多VSG接入的系统层协同控制,需要对上述模型进行一定的简化。

由于配电网中需重点关注频率和电压幅值的控制性能,考虑到状态量的 q 轴分量对控制性能的影响较小,故忽略 q 轴分量,以 d 轴分量近似代表幅值,建立输出相角和并网点电压的传递函数为:

$$\Delta\delta = \frac{(s + \omega_c)(K_\omega + D\omega_n)\Delta\omega_{\text{ref}} - K_{PE}\Delta e_d}{[J\omega_n s^2 + (K_\omega + D\omega_n)s](s + \omega_c) + K_{PE}\omega_c} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \Delta u_d = \frac{(s + \omega_c)\Delta U_{\text{ref}} - (s + \omega_c + G)H + G\Delta\delta}{s + \omega_c + G} \\ H = [(L + L_f)s + R]i_d, G = K_q\omega_c K_{QE} \end{cases} \quad (17)$$

值得注意的是,在协同控制模型中,输出电流状态 i_d 仅影响并网电压状态量,与频率状态无关,此外其影响过程中 H 同时受到并网线路参数不确定性的影响,因此为了进一步简化设计流程和降低模型阶数,将上文中并网方程中的电流相关量用一个非线性函数进行替代,即式(2)和式(3)所示无功-电压过程可以更加简单地表示为式(18),大幅降低了模型的复杂度。但是由于非线性过程后续不可通过线性矩阵不等式(LMI)进行求解,所以加入扰动项以一扰动过程进行处理表示。

$$\begin{cases} \Delta u_d = H(\Delta i_{dq}) - K_q\Delta Q + \Delta U_{\text{ref}} \\ H(\Delta i_{dq}) = [(L + L_f + L_\Delta)s + R + R_\Delta]i_d \end{cases} \quad (18)$$

其中, L_Δ 、 R_Δ 为由量测误差等原因产生的VSG并网线路阻抗参数的不确定部分。

将式(18)与VSG接入系统模型进行简化,可以得到简化后VSG系统 j 的模型为:

$$\dot{\mathbf{x}}'_j = (\mathbf{A}'_j + \mathbf{A}'_{\Delta j})\mathbf{x}'_j + (\mathbf{B}'_{j2} + \mathbf{B}'_{\Delta j})\mathbf{u}'_j + \mathbf{B}'_{j1}\mathbf{w}'_{Fj} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}'_j = [\Delta\omega_j, \Delta\delta_j, \Delta P_j, \Delta Q_j, \Delta v_{j,d}, \Delta m_j]^T \\ \mathbf{u}'_j = [\Delta\omega_{j,\text{ref}}, \Delta U_{j,\text{ref}}]^T \\ \mathbf{w}'_{Fj} = \left[\Delta V_j, \sum_{j=1}^n \Delta P_j / K_{j,\omega}, H(\Delta i_{j,dq}) \right]^T \end{cases} \quad (20)$$

其中, $\mathbf{A}'_{\Delta j}$ 、 $\mathbf{B}'_{\Delta j}$ 为反映系统模型中不确定性的未知矩阵, $\mathbf{A}'_j$ 、 $\mathbf{B}'_{j2}$ 、 $\mathbf{B}'_{j1}$ 为系数矩阵,表达式见附录A中式(A5)。

可以看出,利用式(19)替代式(9)并代入式(15),得到简化后系统的状态模型阶数从原本的 $n \times 10$ 变为 $n \times 6$,有效地降低了需要求解的状态数,从而有效地降低了控制的求解难度。

3.2 基于LMI的鲁棒方差控制方法

鲁棒反馈控制作为现代控制理论的一种,可以有效抑制各类不确定性对系统输出的影响,提高系统的稳定性^[19]。但常规鲁棒控制仅适用于抑制外部不确定因素对控制的影响,且求得的结果往往存在一定的保守性。而在一个实际的控制系统中,如本

文的多VSG接入协同控制系统,控制对象不可避免地存在一定的内部参数不确定性;同时,一个系统的控制需要具有良好的稳态特性之外,也应该具备良好的瞬态性能,以保证良好的控制过渡过程^[20]。由于系统控制性能可以通过极点位置确定,而鲁棒方差控制为一种可以解决不确定系统具有闭环方差和极点约束的控制方法,因此适用于本文控制需求。

本文采用鲁棒方差控制方法对多VSG系统进行协同控制的具体目标为:在实现母线电压快速跟踪控制、多VSG功率准确均分控制的同时,抑制系统内不确定线路参数和系统外随机设备出力对控制性能的影响。结合上文简化后的VSG协同控制模型,建立适用于鲁棒LMI求解的标准多VSG协同控制方程如下:

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}'_F + \mathbf{A}'_\Delta)\mathbf{X} + (\mathbf{B}'_{F2} + \mathbf{B}'_\Delta)\mathbf{U} + \mathbf{B}'_{F1}\mathbf{W} \quad (21)$$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_n]^T$$

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}'_1, \mathbf{u}'_2, \dots, \mathbf{u}'_n]^T$$

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}'_{F1}, \mathbf{w}'_{F2}, \dots, \mathbf{w}'_{Fn}]^T$$

其中, $\mathbf{A}'_F$ 、 $\mathbf{B}'_{F2}$ 、 $\mathbf{B}'_{F1}$ 为对角系数矩阵; $\mathbf{A}'_\Delta$ 和 $\mathbf{B}'_\Delta$ 为反映系统模型中不确定性的未知矩阵,满足式(22)所示结构形式。

$$[\mathbf{A}'_\Delta, \mathbf{B}'_\Delta] = \mathbf{M}\mathbf{F}[\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2] \quad (22)$$

其中, $\mathbf{F}$ 为满足 $\mathbf{F}\mathbf{F}^T \leq \mathbf{I}$ 的不确定矩阵, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{N}_1$ 、 $\mathbf{N}_2$ 为常数矩阵。

求解多VSG接入系统的鲁棒方差控制,即对给定的多VSG协同系统设计极点圆盘 $D(g, r)$ (圆盘的中心坐标为 $(-g, 0)$,半径为 r)和一组常数 ρ_j ($j = 1, 2, \dots, n$),使其对于所有允许的不确定性,闭环控制系统方程式(21)具备以下的控制性能:

(1)所有极点位于圆盘 $D(g, r)$ 中;

(2)稳态方差矩阵 $\mathbf{P} = \lim_{t \rightarrow \infty} E(\mathbf{X}\mathbf{X}^T)$ ($E(\cdot)$ 为期望算子)对角线上的第 j 个元素小于 ρ_j 。

在此条件下,方差矩阵 $\mathbf{P}$ 满足Lyapunov方程:

$$\Phi\mathbf{P} + \mathbf{P}\Phi^T + \mathbf{B}'_{F1}(\mathbf{B}'_{F1})^T = 0 \quad (23)$$

其中, $\Phi = (\mathbf{A}'_F + \mathbf{A}'_\Delta) + \mathbf{K}(\mathbf{B}'_{F2} + \mathbf{B}'_\Delta)$ 。

因此,为了实现抑制系统内、外不确定扰动和变化对控制输出的影响,同时保证多VSG系统具有一定的控制性能,上述控制问题即转化为求解式(24)所示约束。

$$\begin{bmatrix} -\tau\mathbf{P} \\ \mathbf{A}\mathbf{P} + \mathbf{B}_{F2}\mathbf{Y} + g\mathbf{P} - r\mathbf{P} + ar\mathbf{B}_{F1}\mathbf{B}_{F1}^T + \varepsilon\mathbf{M}\mathbf{M}^T \\ \mathbf{N}_1\mathbf{P} + \mathbf{N}_2\mathbf{Y} & 0 & -\varepsilon\mathbf{I} \\ [\mathbf{P}]_{jj} & & & \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

那么,如果存在矩阵 $\mathbf{Y}$ 和对称矩阵 $\mathbf{P}$,常数 ε 使上述不等式约束问题成立,则 $\mathbf{u} = \mathbf{Y}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x}$ 就是系统式

(21)鲁棒协方差控制器的一个有效解^[20]。最终,得到整体系统的控制结构如图3所示。

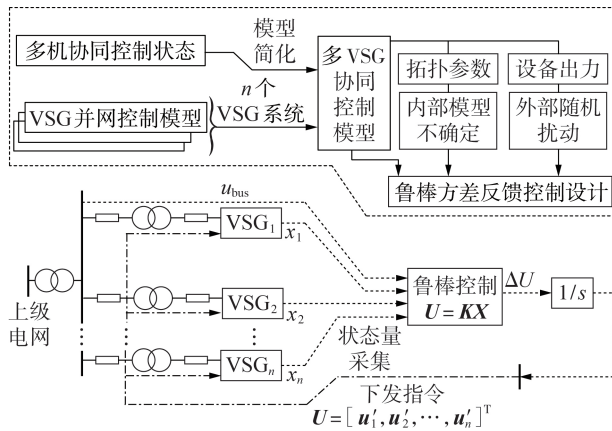


图3 中低压配电网 VSG 多机协同鲁棒运行控制结构

Fig.3 Cooperative robust operation control of multi-VSG in low- and medium-voltage distribution network

4 仿真分析

为了验证本文所提控制方法的有效性,以400 V配电网区域(拓扑结构见附录B中图B2)和标准IEEE 33节点中压配电网进行仿真验证。

在低压配电网中为了简化仿真设计,线路参数全部以附录B中表B1所示低压线路参数设置,节点间线路长度为300 m,在节点3、6、8、9处接入4个分布式光伏,其出力变化曲线见附录B中图B3,模拟短暂的光伏出力激增情况。3台VSG接入节点7、4、11。系统主要参数见附录B中表B2。

为了验证本文所提方法的有效性,本文在所设计控制器中进行了如下仿真设置:在前20 s,所设计的控制器未投入,系统中仅存在分散独立运行的光伏和VSG;在20 s时控制投入运行;在20~120 s时段内系统中4个光伏的出力变化情况如附录B中图B3所示。图4对比了施加本文所提控制方法与无控制情况下配电网区域系统节点1的电压曲线。从图中可以看出,在未施加控制(前20 s)时,系统母线电压因内部光伏的短暂出力变化而超出了系统电压所允许的上限400 V(1.05 p.u.),导致配电网系统出现了短暂的电压安全问题,而在实际系统中也可能因此造成分布式电源或其他设备脱网/损坏,影响系统的安全运行;但是在20 s施加本文所提控制方法后,

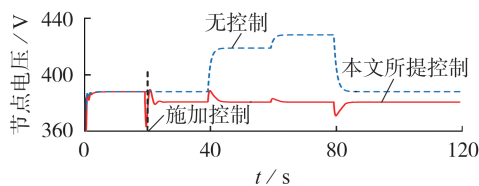


图4 节点1的电压曲线

Fig.4 Voltage curves of Bus 1

通过控制器对VSG的协调控制,实现了系统母线电压稳定跟踪在给定额定值380 V附近,且当系统内光伏出力发生变化时,也能快速协调吸收消纳多余的功率,从而避免因光伏出力变动可能导致的母线电压越限问题的发生,提高配电网系统的动态稳定性,有效减少了因电压越限而导致的应急动作次数。

为了尽可能地提升设备的利用效率,系统中的各类可控电源通常希望能够按容量(有功下垂系数)比例进行功率均分。图5给出了区域配电网系统在本文所提控制策略下各VSG的功率均分情况。从图5中可以看出,在控制施加之前,由于分散接入VSG的线路不同且存在功率耦合问题,功率并未实现准确的平均分配;但是在控制施加后,3个VSG系统输出的有功功率快速地根据其下垂系数进行了再平均分配,且在此后的光伏出力变化过程中,3个VSG系统的功率均分也很好地保持一致。这有效地证明了本文所提控制方法对多个VSG系统出力的协调效果,有效地避免了近端消纳多、远端消纳少的问题出现,提高了VSG设备的运行效率。

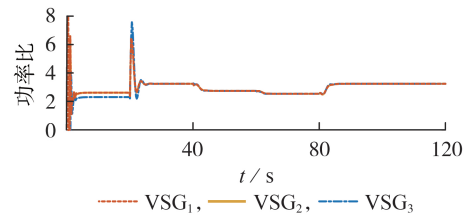


图5 VSG的功率比

Fig.5 Power ratio of VSGs

图6(a)、(b)分别给出了配电网区域系统中接入VSG节点的输出电压和频率情况。从图6(b)中可以看出,本文所提控制方法可以有效保证区域系统的频率稳定在额定值50 Hz附近,且在光伏出力波动时也可以通过VSG控制模拟转子惯性以及所提鲁棒控制器快速反馈的联合作用,抑制频率波动,提升配电网系统运行频率的动态稳定性。由于配电网系统主要关注的是接入母线节点的电压稳定性,从图6(a)可以观察到鲁棒控制系统通过调整各VSG的输出电压,实现了对母线节点电压的快速稳定跟踪。此外,图6(c)、(d)分别给出了各VSG的有功、无功功率仿真曲线。

为了验证本文所提控制方法对不同功率耦合情况(不同线路参数)的鲁棒性能,以下给出了2组仿真对比:其中一组将整体配电网系统中所有线路的电感值减少为原来的50%,另一组将线路的电阻值减少为原来的50%。图7直观地对比了这2组线路参数下控制系统对母线电压、系统频率和VSG功率均分的控制情况。从图中可以看出,在不同的线路

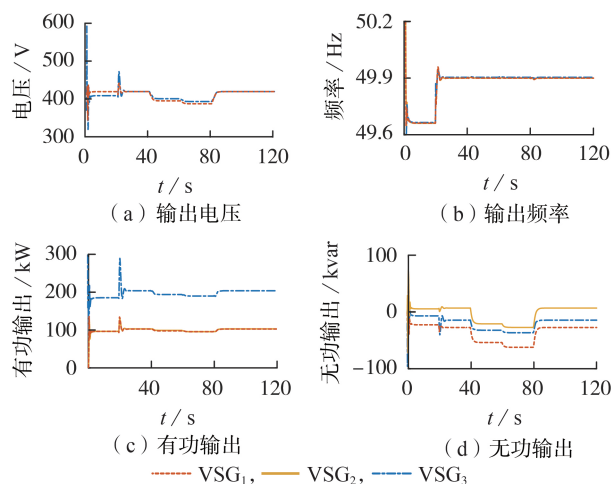


图6 VSG的仿真曲线

Fig.6 Simulative curves of VSGs

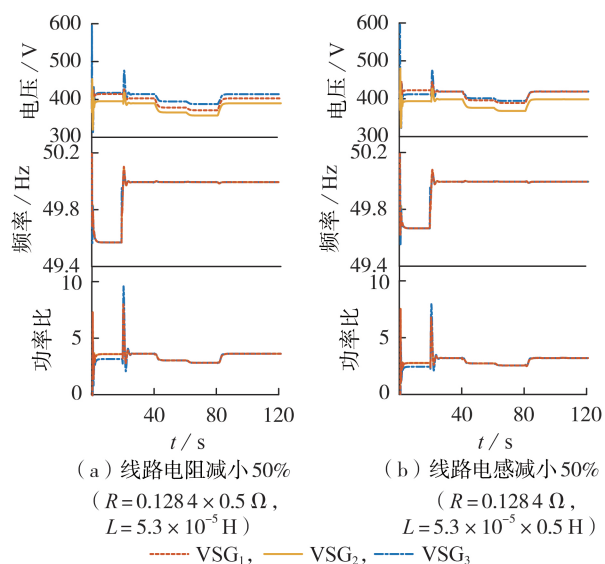


图7 线路参数变化时的仿真结果

Fig.7 Simulative results with changed line parameters

参数条件下,本文所提控制方法不仅可以实现稳定、高效的控制,同时具有相同的控制效果和性能。这直观地体现了本文所提控制方法对不同功率耦合情况(不同线路参数)有良好的适应性。

此外还进一步验证了系统对分布式电源投退场景下的鲁棒性。设置在40 s时VSG₂退出系统,60 s时重接接入,80 s时分布式光伏1退出系统,100 s时重新接入,观察此场景下本文所提控制方法对电压和频率的控制性能,仿真结果分别见图8和附录B中图B4。由图8可看出,在可控VSG和不可控分布式光伏发生因故障等问题造成的投退情况下,本文所提控制方法仍能够较好地快速支撑和消纳区域内的不平衡功率,稳定节点电压在380 V附近。由图B4(a)可以看出,在出现电源投退情况时,VSG仍可以保证稳定的频率支撑,且由于VSG自身惯性的良好作用,较大的频率波动仅产生于投退的VSG₂中,

而并网运行的VSG₁、VSG₃都具有良好的稳定性,波动较少;由图B4(b)可以看出,当VSG₂退出系统时,其支撑的功率被平均分配给其他两VSG,而在重新接入系统后,则快速与其他VSG恢复功率均分,这一方面证明了本文所提控制方法在功率均分控制的快速有效性,另一方面也体现了该方法对分布式电源即插即用的良好适应性。

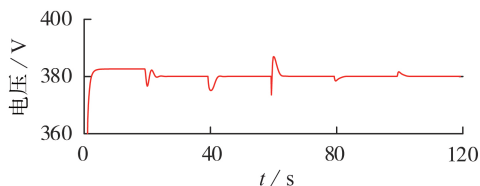


图8 分布式电源投退情况下的母线电压

Fig.8 Bus voltage under DGs plugging in and out

进一步地,为了验证本文所提控制方法在更大系统情况下的运行控制情况,还设计了基于IEEE 33节点的多VSG接入系统(拓扑结构见附录B中图B5)进行仿真验证。系统参数按照标准参数设置,场景设置如下:20 s时施加本文所提控制方法,系统中光伏出力变化曲线见附录B中图B6,60~80 s时段节点4、10、29处的负载退出。线路参数给定了标准值±20%的偏差。

系统在有、无控制方法下各节点的电压曲线如图9所示(图中节点电压为标么值,后同)。由图9可以看出,通过本文所提控制方法对系统中6台VSG进行协调运行控制,节点电压得到了有效地稳定跟踪,从而使得施加控制后的系统在光伏出力陡增、负载投切变动时刻并未出现潮流反转及电压越限情况的发生,有效地提升了控制系统的运行稳定性。图10给出了多VSG的功率均分控制结果。可以看出,在20 s施加本文所提控制方法前、后,各VSG从原本的出力不均分状态转变为功率均分输出,同时在后期的控制中,各VSG的有功同样保证了均分输出,有效地提升了系统的能源利用效率。

IEEE 33节点系统标准线路参数的基础上设定±20%的随机线路阻抗参数变化,以模拟实际运行过程中线路参数可能随温度、天气或量测不完全而变

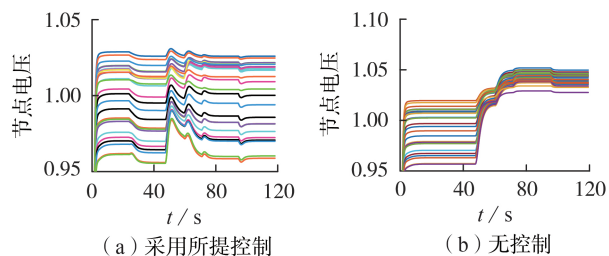


图9 有、无控制时节点电压对比

Fig.9 Comparison of node voltage between with and without control

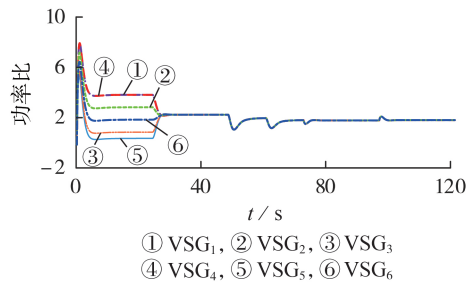


图10 VSG的功率比

Fig.10 Power ratio of VSGs

化的情况,进一步验证控制系统在线路参数不确定(功率耦合不确定)条件下的稳定控制效果。仿真结果见图11。由图11可看出,施加本文所提控制方法后,系统同时存在内部扰动(内部不确定耦合)、外部扰动(外部光伏和负载不确定变化)的情况下依然可以保证稳定的反馈控制,很好地实现了协同控制中对节点电压的稳定跟踪和多VSG的功率平均分配,验证了本文所提控制方法所具备良好的鲁棒性。

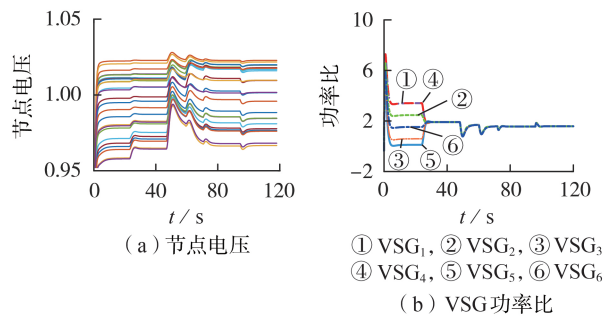


图11 IEEE 33节点系统在线路参数不确定情况下的仿真结果

Fig.11 Simulative results of IEEE 33-bus system with uncertain line parameters

5 结论

本文提出了一种面向中低压配电网的多VSG鲁棒协同运行控制方法,主要针对多VSG分散接入协同运行控制中的节点电压跟踪控制问题、多VSG之间的功率均分问题以及系统线路参数不确定性导致功率耦合问题进行了讨论。基于现有中低压配电网中的多不确定问题,采用鲁棒方差理论设计状态反馈控制器实现对多VSG的协同运行与抗扰控制。相比于现有VSG单机和并联运行控制方法,本文所提方法更多地考虑了系统中的其他随机因素和线路拓扑对建模的影响,通过基于分散接入的模型设计,使得所提方法更具有实际性和通用性;直接通过功率反馈的方式实现功率均分,避免了常规虚拟阻抗设计实现功率均分可能带来的不利影响,提升了多VSG间的功率均分准确度。中低压配电网区域系统的仿真结果进一步验证了本文所提控制方法可以有效地实现系统中多VSG的高效协同运行,无论是对

系统节点电压的跟踪、多VSG的功率均分,还是在不同的线路参数运行场景和分布式电源投退场景下,都具有良好的控制效果。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 白建华,辛颂旭,刘俊,等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3699-3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.
- [2] 王扬,张靖,何宇,等. 虚拟同步发电机暂态稳定协同控制[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):181-185.
WANG Yang, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Transient stability synergetic control of virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 181-185.
- [3] 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.
- [4] 苏宏升,江昆,杨祯,等. 基于虚拟同步发电机的微网频率与电压综合控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):21-28.
SU Hongsheng, JIANG Kun, YANG Zhen, et al. Comprehensive control strategy of microgrid frequency and voltage based on virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 21-28.
- [5] CHEN J, O'DONNELL T. Analysis of virtual synchronous generator control and its response based on transfer functions[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(11): 2965-2977.
- [6] 曾德银,姚骏,张田,等. 虚拟同步发电机多机并联系统的频率小信号稳定性分析研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(7):2048-2061,2385.
ZENG Deyin, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Research on frequency small-signal stability analysis of multi-parallel virtual synchronous generator-based system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2048-2061, 2385.
- [7] 殷桂梁,董浩,代亚超,等. 光伏微网中虚拟同步发电机参数自适应控制策略[J]. 电网技术,2020,44(1):192-199.
YIN Guiliang, DONG Hao, DAI Yachao, et al. Adaptive control strategy of VSG parameters in photovoltaic microgrid[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 192-199.
- [8] FATHI A, SHAFIEE Q, BEVRANI H. Robust frequency control of microgrids using an extended virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6289-6297.
- [9] ASRARI A, MUSTAFA M, ANSARI M, et al. Impedance analysis of virtual synchronous generator-based vector controlled converters for weak AC grid integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1481-1490.
- [10] LI G X, MA F J, LUO A, et al. Virtual impedance-based virtual synchronous generator control for grid-connected inverter under the weak grid situations[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(13): 2125-2132.
- [11] 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.

- [12] 梁海峰,郑灿,高亚静,等. 微网改进下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(17):4901-4910,5209.
LIANG Haifeng,ZHENG Can,GAO Yajing,et al. Research on improved droop control strategy for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(17):4901-4910,5209.
- [13] 屈子森,蔡云旖,杨欢,等. 基于自适应虚拟阻抗的虚拟同步机功率解耦控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(17):58-66.
QU Zisen,CAI Yunyi,YANG Huan,et al. Strategy of power decoupling control for virtual synchronous generator based on adaptive virtual impedances[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(17):58-66.
- [14] 王逸超,谢欣涛,陈仲伟,等. 不同容量微网逆变器的自适应虚拟阻抗运行策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):29-33.
WANG Yichao,XIE Xintao,CHEN Zhongwei,et al. Adaptive virtual impedance operation strategy of microgrid inverters with different capacities[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(6):29-33.
- [15] LI B,ZHOU L,YU X R,et al. Improved power decoupling control strategy based on virtual synchronous generator[J]. IET Power Electronics,2017,10(4):462-470.
- [16] 周晖,王跃,李明烜,等. 孤岛并联虚拟同步发电机暂态功率分配机理分析与优化控制[J]. 电工技术学报,2019,34(增刊2):654-663.
ZHOU Hui,WANG Yue,LI Mingxuan,et al. Analysis and optimal control of transient active power sharing between islanded parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(Supplement 2):654-663.
- [17] LIU J,MIURA Y,BEVRANI H,et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(5):2268-2277.
- [18] 任碧莹,邱姣姣,刘欢,等. 基于虚拟同步发电机双机并联系统的参数自调节优化控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(1):128-138.
REN Biying,QIU Jiaojiao,LIU Huan,et al. Optimization control strategy of self-adjusting parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(1):128-138.
- [19] 聂永辉,张艺川,马彦超,等. 计及时滞影响的电力系统 H_∞ 阻尼控制[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):96-100.
NIE Yonghui,ZHANG Yichuan,MA Yanchao,et al. H_∞ damping control of power system with time delay[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):96-100.
- [20] 俞立. 鲁棒控制:线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京:清华大学出版社,2002:141-152.

作者简介:



张从越

张从越(1993—),男,河北保定人,博士研究生,主要研究方向为分布式电源(储能)动态控制、有源配电网系统优化控制等(E-mail:742526826@qq.com);

窦晓波(1979—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为分布式电源(储能)变流器优化控制、分布式电源高渗透配电网、微电网运行控制与能量优化、智能变电站与电力通信(E-mail:

dxh_2001@sina.com)。

(编辑 陆丹)

Cooperative robust operation control method of multi-VSG available for low- and medium-voltage distribution network

ZHANG Congyue¹,DOU Xiaobo¹,HE Guoxin²,YANG Dongmei²

(1. School of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China;

2. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute),Nanjing 211106,China)

Abstract: As a new power grid friendly operation control method,VSG(Virtual Synchronous Generator) is generally integrated to distribution network in a decentralized way with multiple low- and medium-voltage nodes. There are many kinds of uncertainties and multi-generator cooperative operation control problems, which pose a certain challenge to the security and stability control of distribution network. For this reason, a cooperative robust operation control method of multi-VSG available for low- and medium-voltage distribution network is proposed,which mainly discusses the problems of bus voltage tracking,active power sharing among multiple generators,uncertainties of power coupling caused by line impedance parameter uncertainties of low- and medium-voltage distribution network,output uncertainties of system equipment,and so on. The uncertain power coupling is transformed into model uncertainties by establishing the VSG grid-connected model. Considering the possible problems of unknown topology and high order of model in low- and medium-voltage distribution network,a multi-VSG grid-connected cooperative control model is established by directly expanding the bus voltage state and the average power distribution state of multiple generators. The feedback controller of the whole system is designed by using robust control theory to suppress the influence of uncertain power coupling inside the model and uncertain output of external equipment on the control performance. The effectiveness of the proposed method is verified by the simulation model in MATLAB/Simulink.

Key words: virtual synchronous generator;robust control;cooperative operation of multi-generator;power coupling;low- and medium-voltage distribution network

附录 A

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{\omega} + D\omega_n}{J\omega_n} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J\omega_n} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R}{L + L_f} & -\frac{1}{L + L_f} & 0 & \frac{-K_q}{L + L_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_c \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{K_{\omega} + D\omega_n}{J\omega_n} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_q}{L + L_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_c \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{C} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{A1})$$

$$\begin{cases} K_{p\delta} = EU \cos \gamma / \sqrt{X^2 + R^2}, \quad K_{pE} = U \sin \gamma / \sqrt{X^2 + R^2} \\ K_{Q\delta} = -EU \sin \gamma / \sqrt{X^2 + R^2}, \quad K_{QE} = U \cos \gamma / \sqrt{X^2 + R^2} \end{cases} \quad (\text{A2})$$

$$\left\{ \begin{aligned}
A_j &= \begin{bmatrix} -\frac{K_\omega + D\omega_n}{J\omega_n} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J\omega_n} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R}{L+L_f} & -\frac{1}{L+L_f} & 0 & \frac{-K_q}{L+L_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_c K_{p\delta} & 0 & 0 & -\omega_c & -K_q \omega_c K_{pE} \\ 0 & \omega_c K_{q\delta} & 0 & 0 & 0 & -K_q \omega_c K_{qE} - \omega_c \end{bmatrix} \\
B_{j2} &= \begin{bmatrix} \frac{K_\omega + D\omega_n}{J\omega_n} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L+L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_q \omega_c K_{pE} \\ 0 & K_q \omega_c K_{qE} \end{bmatrix}, \quad B_{j1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{C} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{\Delta j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_q \omega_c K_{pE,\Delta} \\ 0 & -K_q \omega_c K_{qE,\Delta} \end{bmatrix} \\
A_{\Delta j} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_c K_{p\delta,\Delta} & 0 & 0 & -K_q \omega_c K_{pE,\Delta} \\ 0 & 0 & \omega_c K_{q\delta,\Delta} & 0 & 0 & -K_q \omega_c K_{qE,\Delta} - \omega_c \end{bmatrix}
\end{aligned} \right.$$

(A3)

$$\begin{cases}
B_{M1} = \text{diag}(B_{11}, B_{21}, \dots, B_{N1}) \\
A_M = \text{diag}(A_1 + A_{\Delta 1}, A_2 + A_{\Delta 2}, \dots, A_N + A_{\Delta N}) \\
B_{M2} = \text{diag}(B_{12} + B_{\Delta 1}, B_{22} + B_{\Delta 2}, \dots, B_{N2} + B_{\Delta N})
\end{cases}$$

(A4)

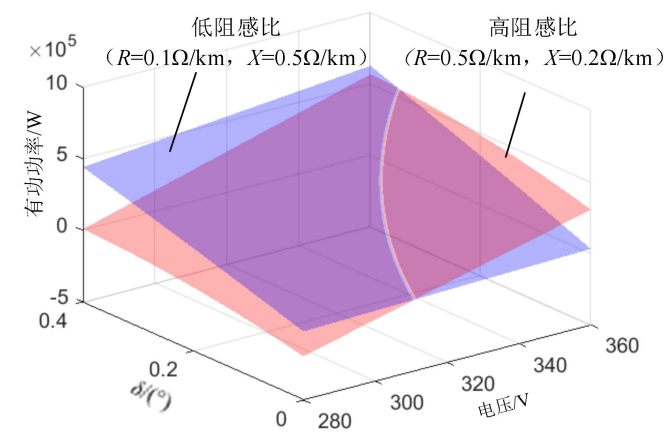
$$\left\{ \begin{aligned}
\mathbf{A}'_j &= \begin{bmatrix} \frac{K_\omega + D\omega_n}{J\omega_n} & 0 & -\frac{1}{J\omega_n} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_c K_{P\delta} & -\omega_c & -K_q \omega_c K_{PE} & 0 & 0 \\ 0 & \omega_c K_{Q\delta} & 0 & -K_q \omega_c K_{QE} - \omega_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{K_\omega} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_q \end{bmatrix} \\
\mathbf{A}'_{\Delta j} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_c K_{P\delta, \Delta} & 0 & 0 & -K_q \omega_c K_{PE, \Delta} \\ 0 & 0 & \omega_c K_{Q\delta, \Delta} & 0 & 0 & -K_q \omega_c K_{QE, \Delta} - \omega_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{B}'_{j2} &= \begin{bmatrix} \frac{K_\omega + D\omega_n}{J\omega_n} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_q \omega_c K_{PE} \\ 0 & K_q \omega_c K_{QE} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}'_{j1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{n} \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}'_{\Delta j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_q \omega_c K_{PE, \Delta} \\ 0 & -K_q \omega_c K_{QE, \Delta} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \right.$$

(A5)

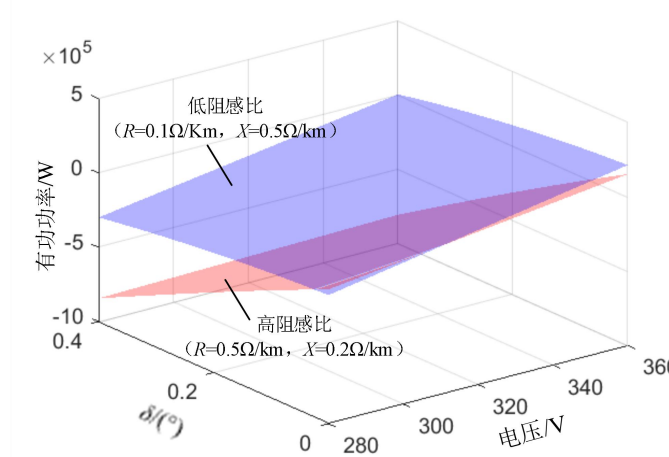
附录 B

表 B1 典型线路阻抗
Table B1 Typical line impedance

电压等级	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电抗/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	阻抗比
低压	0.642	0.083	7.7
中压	0.161	0.190	0.85
高压	0.060	0.191	0.31



(a) 输出相角、电压幅值与有功功率的关系



(b) 输出相角、电压幅值与无功功率的关系

图 B1 VSG 输出功率与电压相角和幅值间的关系
Fig.B1 Relationship among output power,voltage phase angle and amplitude of VSG

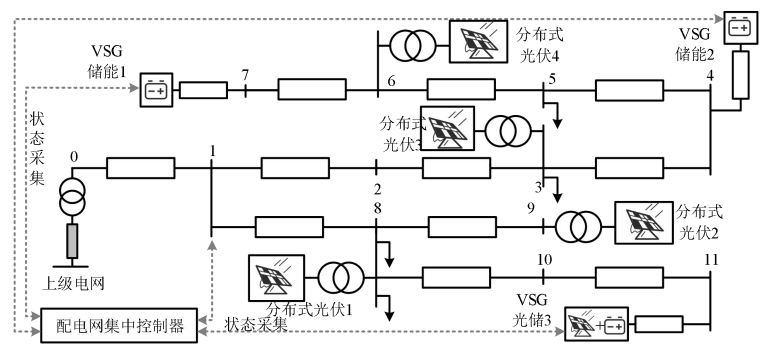


图 B2 12 节点 400 V 低压配电网结构
Fig.B2 Structure of 400 V low-voltage distribution network with12 nodes

表 B2 系统主要参数
Table B2 Main parameters of system

设备	参数	数值	设备	参数	数值
VSG ₁ , VSG ₂	惯性系数 J	10	VSG ₃	惯性系数 J	10
	阻尼系数 D	20		阻尼系数 D	20
	K_{ω}	10^4		K_{ω}	2×10^4
	K_q	10^{-3}		K_q	2×10^{-3}

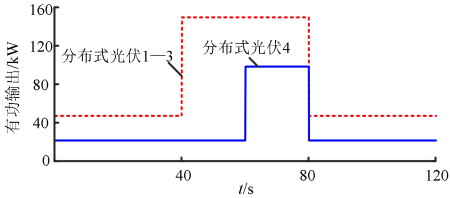


图 B3 分布式光伏出力曲线
Fig.B3 Output power curves of distributed photovoltaic

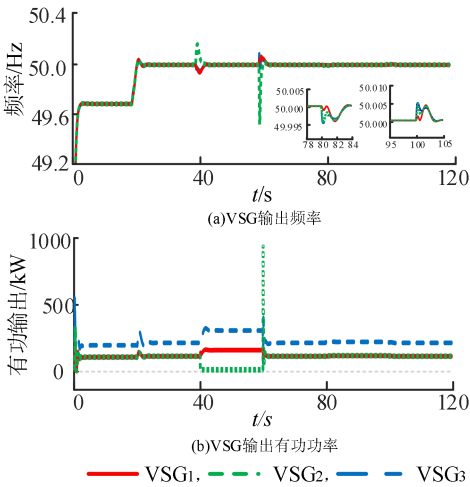


图 B4 分布式电源投退下 VSG 的仿真结果
Fig.B4 Simulative results of VSGs under DGs plugging in and out

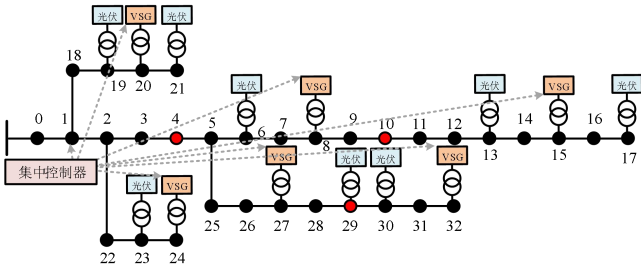


图 B5 IEEE 33 节点中压配电网拓扑
Fig.B5 Topology of medium-voltage IEEE 33-bus distribution network

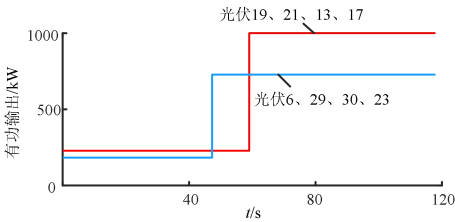


图 B6 IEEE 33 节点系统中分布式光伏出力曲线
Fig.B6 Output power curves of distributed photovoltaic in IEEE 33-bus system