

微电网惯量与阻尼模拟技术综述及展望

赵恩盛, 韩杨*, 周思宇, 刘宇翔, 杨平

(电子科技大学机械与电气工程学院, 四川省 成都市 611731)

Review and Prospect of Inertia and Damping Simulation Technologies of Microgrids

ZHAO En'sheng, HAN Yang*, ZHOU Siyu, LIU Yuxiang, YANG Ping

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu 611731, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Microgrids have attracted widely attention due to its high proportion of renewable energy sources, high proportion of power electronic equipment and its flexible and controllable characteristics. However, microgrids are characterized by low inertia and weak damping because they convert energy through power electronic converters and do not have the inertia support provided by synchronous generators in traditional power grids. Therefore, the stability problem caused by the lack of inertia and damping of microgrid system is particularly prominent. Firstly, the problems caused by the lack of inertia and damping in microgrids and the interaction mechanism with frequency stability were described. Then, various control technologies based on inertia and damping simulation were summarized, such as virtual synchronous generator, virtual inertia adaptive control, generalized droop control and so on. And the research status of frequency stability and oscillation suppression strategy of AC microgrids and voltage stability of DC microgrids were summarized respectively. Finally, the future research and development direction was prospected from different operating scenarios, different load types and instability mechanism of microgrids.

KEY WORDS: microgrid; inertia; damping; control strategy; stability

摘要: 微电网因含有高比例可再生能源、高比例电力电子设备及灵活可控等特点而受到广泛关注。然而,微电网通过电力电子变换器进行能量转换,不具备传统电网中同步发电机所提供的惯量支撑,使其呈现出“低惯量”、“弱阻尼”特点。因此,微电网系统因惯量与阻尼缺失而引发的稳定性问题尤为突出。该文首先阐述微电网中惯量与阻尼缺失所带来的问

题及其与频率稳定性交互机理。然后,梳理虚拟同步发电机、虚拟惯量自适应控制、广义下垂控制等各种基于惯量与阻尼模拟的控制技术。分别整理交流微网频率稳定性问题、振荡抑制策略及直流微网电压稳定性问题的研究现状。最后,从微电网不同运行场景、不同负荷类型及失稳机理等方面对未来研究发展方向进行展望。

关键词: 微电网; 惯量; 阻尼; 控制策略; 稳定性

0 引言

“碳达峰、碳中和”战略目标的提出,加快了能源变革的进程,从化石能源向可再生能源转型刻不容缓。近年来,可再生能源利用率不断提高,预计2030年全国风电、光伏的装机总量将达到200万MW,占比突破50%^[1-2]。与此同时,“源-网-荷”核心设备的“电力电子化”程度不断加深,电力电子装备渗透率逐年提高,“高比例可再生能源”与“高比例电力电子设备”发展趋势日益显著。微电网作为一种小型发配电系统,具有显著的“双高”特征,含有大量风电、光伏、储能等分布式电源^[3],与传统发电单元不同的是,这些分布式电源需要通过电力电子变换器来实现能量的传递。相较于传统电力系统的同步发电机,电力电子变换器具有更好的灵活性和可控性。但是,经电力电子变换器连接分布式电源而组成的微电网系统不具备传统电网中大量同步发电机所提供的惯量支撑,这使得以分布式电源为主要能量来源的微电网系统因惯量和阻尼缺失所引起的稳定性问题尤为突出^[4-7]。其中,交流微网较为严重的是频率稳定性问题,而直流微网的主要问题在于电压稳定性。

为了解决微电网“低惯量”、“弱阻尼”问题,模拟传统电力系统中同步发电机的方法引起人们

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977026); 四川省科技计划项目(2021YFG0255)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51977026); Science and Technology Program of Sichuan province (2021YFG0255).

的关注,其中应用较为广泛的方法包括虚拟同步发电机技术(virtual synchronous generator, VSG)、虚拟惯量自适应控制技术(virtual inertia adaptive control, VIAC)及广义下垂控制技术(generalized droop control, GDC),这些方法可以有效地提升交流微网的频率稳定性和直流微网的电压稳定性。但是,对于交流微网,由于模拟同步发电机的惯量和阻尼特性,会在提升频率稳定性的同时不可避免的引起功率振荡问题。

近年来,惯量与阻尼模拟技术蓬勃发展,受到学者广泛关注。文献[8]对虚拟同步发电机技术进行综述,详细整理了虚拟同步发电机的原理、本质及控制算法等内容。文献[9]综述低惯量电力系统因惯量支撑不足而引发频率失稳等问题,梳理惯性评估、支撑能力及优化运行等方面的研究现状,有助于后续对低惯量系统的深入研究。文献[10]针对含有高比例新能源和电力电子设备的电力系统宽频振荡问题,详细介绍高比例电力电子设备对系统振荡的影响,并对振荡机理、数学模型及抑制措施等方面展开综述。然而,目前却鲜有文献针对微电网系统的惯量与阻尼模拟技术进行回顾与总结。

本文对微电网惯量与阻尼模拟技术进行综述与展望。首先介绍电力系统惯量和阻尼的概念,并针对微电网分析惯量与阻尼缺失所引发的问题及其与频率稳定性交互机理。然后,综述各类增强微电网系统惯量与阻尼的控制方法,包括虚拟同步发电机技术、虚拟惯量自适应控制技术及广义下垂控制技术等。基于惯量与阻尼模拟的控制方法可以有效提高交流微网的频率稳定性,但同时会引发功率振荡问题。因此,梳理交流微网中利用惯量与阻尼模拟技术解决频率稳定性问题及由虚拟惯量和阻尼所引发振荡的抑制策略。对于直流微网,主要整理惯量与阻尼模拟技术提升电压稳定性问题的研究现状。最后,对微电网惯量与阻尼模拟技术的研究发展方向做出展望。

1 微电网惯量与阻尼

微电网整合了风电、光伏、储能等各种分布式发电单元,通过高渗透率电力电子变换装备进行能量转换。如图1所示,为一种常见的交、直流混合微电网结构,根据不同运行场景,微电网可以在孤岛模式或并网模式下运行。微电网中含有高比例电力电子变换装备,在能量转换和控制上具有高度

灵活性,但也会因此带来多尺度动态稳定性问题^[11-12]。与传统电力系统相比,高比例电力电子化电源没有同步发电机的惯量支撑,因此微电网系统的惯量缺失和“弱阻尼”、“负阻尼”问题更为突出。对于交流微网,“低惯量”、“欠阻尼”会引发较严重的频率稳定性问题;对于直流微网,母线电压波动问题较为突出。

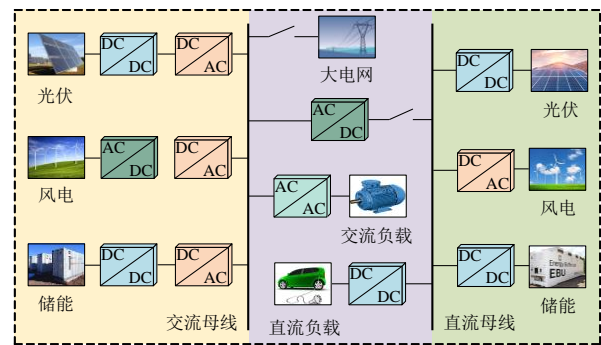


图1 交、直流混合微电网拓扑结构

Fig. 1 AC and DC hybrid microgrid topology

1.1 微电网惯量缺失问题

物理学中,惯性被描述为物体抵抗自身运动状态被改变的固有属性。通常转动物体的惯性可由转动惯量来衡量,转动惯量与转轴的位置、刚体形状及质量分布有关。对于电力系统,惯性可用来衡量系统对外来干扰引起能量波动的阻抗能力,系统惯量越大,频率变化越缓慢。惯量是系统稳定运行的重要保障^[13]。

惯量可以通过以下3种形式定义^[14-15]:

1) 将发电机转子视为质量连续分布的刚体,在式(1)中,可用积分方法表示电机转子的转动惯量 J , $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

$$J = \int r^2 dm \quad (1)$$

式中: dm 为质量元; r 为转动半径。

2) 发电机惯性时间常数 T_J 表示2倍电机机械能与基准功率的比值,约等于空载电机在额定转矩下从静止到额定转速的时间, s 。

$$T_J = J\omega^2 / S_B \quad (2)$$

式中: J 为电机转子的转动惯量; ω 为转子转速; S_B 为基准功率。

3) 在国外研究中,常用 $H = T_J/2$ 表示惯性时间常数,约等于空载电机在额定转矩下从静止到额定转速一半的时间, s 。

$$2H \frac{d\omega^*}{dt} = P_{M^*} - P_{E^*} \quad (3)$$

式中 ω^* 、 P_M^* 、 P_E^* 分别为转子转速、机械功率和电磁功率的标么值。

微电网比传统电力系统含有更高比例的风电、光伏和储能等分布式电源，需要通过电力电子变换器进行能量转换。因此，对于微电网而言，惯量对整个系统的支撑更为重要，但微电网系统却呈现出较为严重的惯量缺失问题。

不同的电源类型、负荷类型及控制策略等因素决定了整个系统的惯量。如图2所示，为系统惯量的影响因素分类。

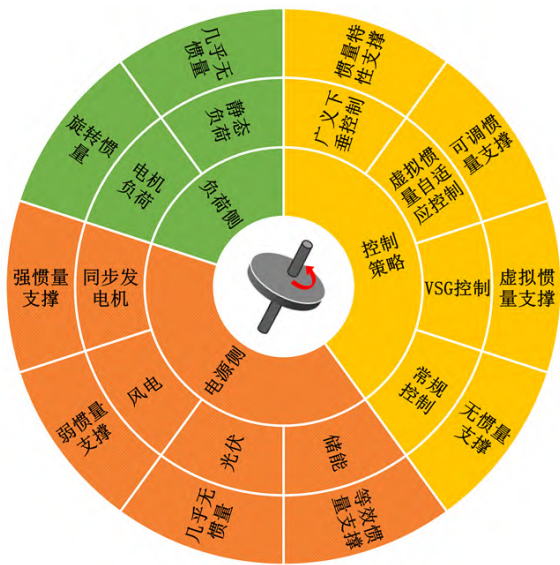


图2 惯量影响因素分类

Fig. 2 Classification of the influencing factors of inertia

由于微电网中风电、光伏等可再生能源取代传统同步发电机成为主要的能量来源，而这些分布式发电单元缺少传统同步发电机的转动惯量，无法为微电网系统提供惯量支撑^[16]，因此会导致严重的惯量缺失问题，使稳定性下降^[13]。与此同时，风电、光伏等可再生能源的出力具有较为明显的间歇性和波动性，这也会加深系统因惯量缺失而导致的稳定性问题。有鉴于此，可通过模拟传统发电机转动惯量的控制方式来增加低惯量系统的等效惯量，并借助储能来抵消可再生能源出力的波动性^[11,17-18]，以此来提升系统的稳定性。

1.2 微电网欠阻尼问题

在物理学中，阻尼是指运动物体受到阻力影响从而使能量衰减的现象。阻尼也是维持电力系统稳定的重要因素。在传统电力系统中，同步机外在阻尼特性由转子本身和阻尼绕组决定。阻尼绕组具有启动电机和抑制振荡的作用^[14]。在电机启动阶段，阻尼绕组与旋转磁场互相作用，产生异步转矩使电

机启动。当发生振荡时，由于磁场变化，阻尼绕组中会生成感应电流，通过感应电流产生的转矩阻碍转子与旋转磁场的相对运动，从而起到抑制振荡的作用。式(4)为同步发电机的摇摆方程。

$$2H \frac{df}{dt} = \Delta P \cdot K_D (f - f_0) \quad (4)$$

式中： H 表示惯性时间常数； K_D 为阻尼系数； f 为电网额定频率； f_0 为同步发电机频率。

可以看出，当同步发电机频率与电网额定频率存在偏差时，发电机会不断产生有功功率增量，从而实现阻尼作用。

而微电网中，由可再生能源构成的分布式发电单元缺乏传统同步机阻尼绕组产生的阻尼作用，又具有高度电力电子化的特点，换流器的储能能力不足，因而使微电网系统呈现出“弱阻尼”、“负阻尼”的特性。阻尼的缺失会引发系统变流器驱动稳定性和谐振稳定性问题。因此，基于阻尼模拟的控制技术可以有效提高系统经受故障后的恢复速度，减小振荡幅度^[19-20]。

1.3 惯量、阻尼与频率稳定性交互机理

当传统电力系统产生扰动后，首先会按同步功率系数自动分配扰动功率，这一阶段持续时间很短。然后，惯量开始产生响应，一般在十数秒左右^[21]。接下来是一次调频、二次调频和三次调频阶段，持续时间相对较长^[22]。

如图3所示，为微电网频率响应时间示意图。微电网因含有高比例可再生能源，而缺少了传统同步机的支撑，因此几乎没有功角特性。当系统发生

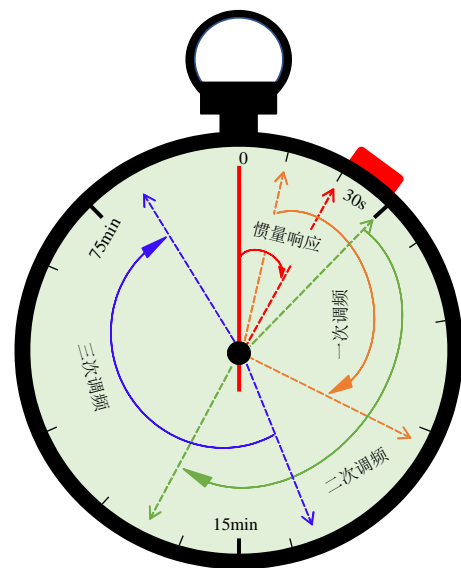


图3 微电网频率响应时间

Fig. 3 Frequency response time of microgrids

扰动后，无法根据同步功率系数分配扰动功率，惯量直接参与响应。相较于传统电力系统，微电网频率响应时间更快，且呈现出多时间尺度特性。微电网的惯量缺失问题尤为明显，会导致系统频率变化率显著增加。

同时，可再生能源的出力波动大，对扰动抵抗力弱，更易引发系统产生不平衡功率。此外，对于含有大量风电的微电网系统而言，当发生扰动后，为了减小风机功率恢复过程的机械应力，需要较长的恢复时间，而系统长时间维持较大的频率变化率会导致频率变化幅值进一步增大^[23]，进而加深频率稳定性问题。

2 惯量与阻尼模拟技术

为了解决惯量缺失与欠阻尼问题，众多研究学者提出了多种基于虚拟惯量与阻尼的控制技术。主要包括虚拟同步发电机技术、虚拟惯量自适应控制技术及广义下垂控制技术等。微电网中基于虚拟惯量与阻尼的控制方法与针对大电网新能源并网控制策略的原理是相通的^[8]，只是在微电网中，惯量与阻尼缺失的问题更为严重。其中，虚拟同步发电机技术应用最为广泛，可用于微电网孤岛和并网运行状态；虚拟惯量自适应控制是对虚拟同步发电机的进一步改进，虚拟惯量参数可根据不同运行情况自适应调节；而广义下垂控制是在传统下垂控制的基础上加入了频率二次调节，使下垂控制具有惯量的特性。

2.1 虚拟同步发电机技术

虚拟同步发电机技术的本质是通过对电力电

子变换器的控制，来模拟同步发电机工作原理，使电力电子变换器具有有功调频、无功调压等与同步机相似的外特性。虚拟同步发电机包括电流控制型和电压控制型两种方案。以丁明教授、钟庆昌教授等为代表学者提出的电压控制型 VSG 技术因弥补了电流型 VSG 技术无法为系统提供电压与频率支撑的缺陷，而受到广泛应用^[24]。

如图 4 所示，为并网逆变器的虚拟同步发电机拓扑结构^[8]。其中： $e_a、e_b、e_c$ 表示三相感应电动势； $u_a、u_b、u_c$ ，表示三相输出端电压； $i_a、i_b、i_c$ 表示三相并网电流； $R_s、L_s$ 分别表示虚拟的定子电枢电阻与同步电感； $P_e、Q_e$ 分别表示有功功率和无功功率。虚拟同步发电机可以将直流电压源看作原动机，并网逆变器及滤波器则对应同步发电机的能量转换过程。VSG 从机理上模拟了同步发电机的机械运动及电磁关系，控制算法是 VSG 的核心，用来实现同步发电机的有功调频、无功调压等外特性^[8]。

利用 VSG 控制策略研究微电网，首先需要基于虚拟同步发电机建立并网逆变器模型^[25]，根据虚拟转矩与励磁来调节有功、无功功率，然后需要选定虚拟惯量与阻尼等各部分参数，并充分考虑并网跟踪功率与参数摄动的内在联系，最后确定参数取值和控制方案。图 5 为虚拟同步发电机的控制框图^[25]。该控制策略包括机械、电气、有功调节、电流跟踪等部分。其中， U_{ref} 为有功参考值； Q_{ref} 为无功参考值； T_e 为电磁转矩； T_m 为机械转矩。通过虚拟同步发电机控制，可实现并网功率调节，同时具有良好的有功、无功跟踪性能。

目前，虚拟同步发电机技术在微电网中已得到

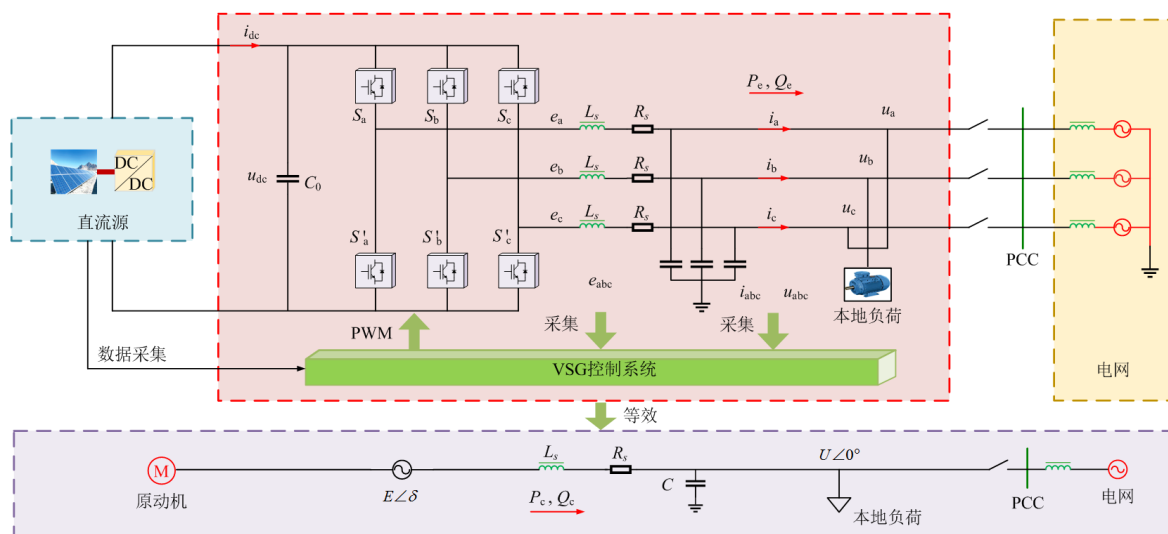


图 4 虚拟同步发电机拓扑结构
Fig. 4 Topology of virtual synchronous generator

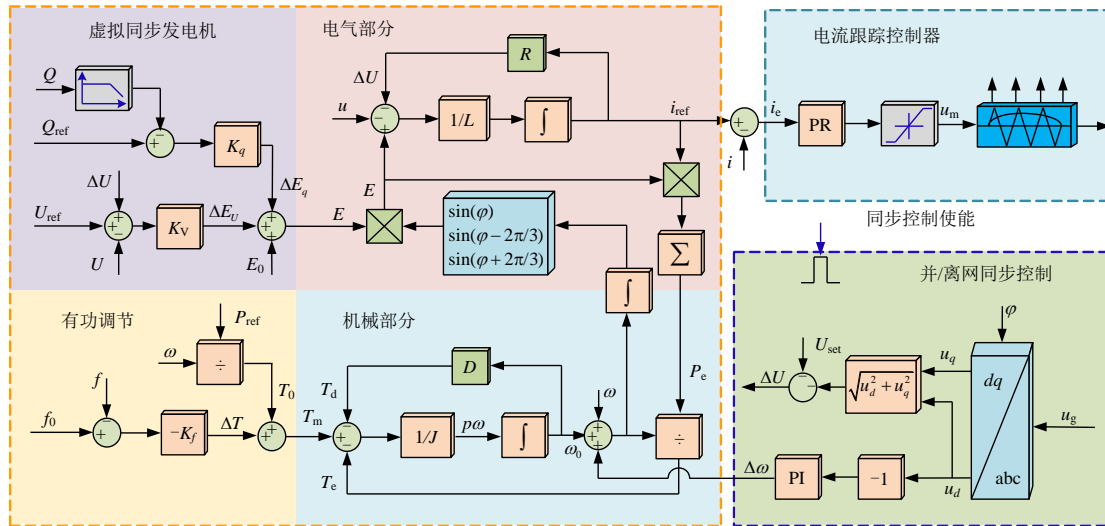


图 5 虚拟同步发电机控制框图

Fig. 5 Control Strategy of virtual synchronous generator

广泛应用。文献[26]针对微电网“低惯量”、“功率不平衡”等问题，提出了一种综合惯量控制方案。该控制方法综合利用交、直混合微电网中的风机与储能单元，将风机与储能相结合，通过储能单元为系统提供额外的惯量支撑，使系统具有更好的调频调压特性。该控制方法可以有效地提升电能质量，削弱微电网不平衡功率的产生并增强系统的动态性能。

对于微电网而言，可再生能源渗透率不断提高，直接导致其惯量显著降低。而惯量的大小又会直接对微电网的频率稳定性产生影响。基于此，文献[27]研究提出，微电网系统具有一个最低的惯量需求标准，可以作为衡量系统惯量缺失和充裕度的指标。为此，该研究首先分析了微电网惯量与频率之间的关系，进而提出系统最低惯量的影响因素。然后，综合考虑源-网-荷惯量及一次调频作用，提出微电网最低惯量评估模型及优化方案。这种惯量评估方法的难点在于系统受到多种影响因素的共同作用，要确定最低需求惯量就必须全面考虑各种可能发生的故障及扰动。从对比分析中确定最低惯量，可以有效地判断惯量充裕或缺失程度，为微电网安全稳定运行提供保障。

2.2 虚拟惯量自适应控制技术

传统 VSG 技术虽然可以模拟同步发电机的惯量和阻尼，但是，由于其产生的虚拟惯量和阻尼是固定不变的，会影响控制的灵活性。针对该问题，有研究提出了一种自适应虚拟转子惯量控制算法^[28]。在虚拟同步发电机技术的基础上，加入了对功角曲线的分析，设计出基于 VSG 的自适应虚拟

转子惯量控制算法。该方法中惯量系数的确定需要基于对小信号模型的分析，如式(5)所示，为自适应惯量系数的选取原则。

$$J = \begin{cases} J_0, & \frac{d\omega}{dt} \leq C \\ J_0 + k \frac{|\omega - \omega_g|}{\omega - \omega_g} \frac{d\omega}{dt}, & \frac{d\omega}{dt} > C \end{cases} \quad (5)$$

式中： J 和 J_0 分别为虚拟转子惯量和稳态惯量； ω_g 和 ω 分别为同步角速度与虚拟转子角速度； k 和 C 分别为常数和阈值。不难看出，这种方法采用的虚拟转子惯量可以在不同情况下改变参数值，其取值由稳态惯量和虚拟转子角速度变化率共同决定。通过这一方法，可使虚拟惯量参数不再固定，可根据实际情况对其进行调节，使系统控制更为灵活。

同样为了解决由于虚拟同步发电机系统参数固定不变而导致的控制系统快速性与稳定性无法兼顾的问题，文献[29]设计了一种虚拟惯量自适应控制方法。当 VSG 的角速度变化率及偏差量随负荷变化而产生摄动时，可以通过控制策略动态调节虚拟转动惯量，该控制策略能够在系统发生扰动后快速调节虚拟惯量，同时兼顾稳定性。如式(6)所示，为虚拟惯量自适应表达式。

$$J = \begin{cases} J_0 + a|\omega_n - \omega| - b \frac{d\omega}{dt}, & -(\omega_n - \omega) \frac{d\omega}{dt} > k \\ J_0, & -k < -(\omega_n - \omega) \frac{d\omega}{dt} < k \\ J_0 - c \left| \frac{d\omega}{dt} \right|, & -(\omega_n - \omega) \frac{d\omega}{dt} < -k \end{cases} \quad (6)$$

式中： J_0 为参考转动惯量； a 、 b 、 c 为影响因子； k

为判定阈值。

该方法的优点在于，当发生不同类型的扰动时，改变影响因子参数的值可以调节频率动态特性。调整 k 的取值可以减少转动惯量的频繁波动，使虚拟惯量参数调节的快速性进一步提升，同时系统的稳定性得到保证。

由于传统 VSG 控制没有考虑直流侧分布式电源特性并且参数取值一成不变，因此当微电网系统中存在多个逆变器并联运行时，存在可再生能源利用率下降和频率动态响应较差的问题。针对多个光伏、储能并联孤岛运行的微电网，文献[30]设计了一种用于功率协调及频率优化的参数自适应调节控制策略，该方法综合考虑源-网-荷的需求和频率、出力等波动，通过控制算法实现虚拟惯量惯和阻尼等参数的自适应调节。该方法可以提高光伏利用率、减少逆变器过载和功率变动引起的频率波动问题。使孤岛微电网系统功率分配更加合理，提升系统频率动态特性。

然而，虚拟惯量自适应控制技术也存在不足之处。为了满足系统在各种扰动下的稳定运行，要求虚拟惯量系数的调节范围尽可能大，这就需要具备更大容量的储能单元。因此，虚拟惯量自适应调节范围会到储能容量的制约。

2.3 广义下垂控制技术

在微电网中，传统下垂控制策略因能够有效地解决线路阻抗不同而引起的功率不均分问题而被广泛应用。但是，传统的下垂控制策略不具备惯量与阻尼的模拟特性，无法为系统提供惯量支撑。有鉴于此，有学者提出了广义下垂控制策略^[31-32]。广义下垂控制弥补了传统下垂控制的不足，进一步提升了微电网的控制效果。

如图 6 所示，将传统下垂控制、广义下垂控制及 VSG 控制进行对比^[31-32]。其中， P 、 P_0 、 Q 、 Q_0 分别表示有功功率与无功功率的实际值和参考值； ω_0 、 ω^* 、 ω_{ref} 分别表示角频率额定值、角频率参考值和二次控制频率参考值； G_{PLC} 、 G_{CFF} 、 H_{CPF} 分别表示功率前向通路控制器、二次控制器及反馈环补偿器。可以看出，广义下垂控制策略是在传统下垂控制的有功功率环上增加了二次频率控制，通过二次控制来模拟惯量和阻尼特性。

从广义下垂控制和 VSG 控制的对比中不难发现，二者具有相似性，它们都是通过模拟下垂特性从而使电力电子变流器获得等效惯量。当广义下垂

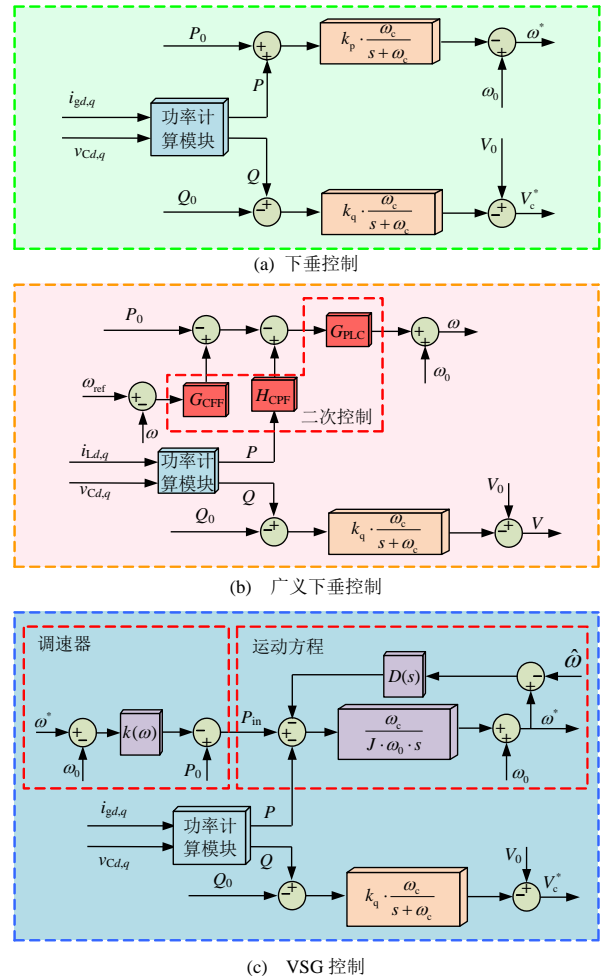


图 6 下垂控制、广义下垂控制及 VSG 控制对比

Fig. 6 Comparison of droop control, generalized droop control and VSG control

控制的二次控制参考值等于角频率额定值，且二次控制器与 VSG 控制策略阻尼 D 相同时，广义下垂控制和 VSG 控制的有功功率控制环是等效的。采用广义下垂控制策略的逆变器，输出有功功率可以快速、准确地跟随参考值的变化，在并网运行有功功率产生阶跃变化时，广义下垂控制可以减少有功功率超调量和振荡^[32]。

2.4 交流微网频率稳定性问题

电网频率作为交流电力系统的基本健康指标，反映了发电侧与需求侧的平衡程度。如果需求侧的消耗超过了发电量，电网频率就会下降，反之，如果需求侧的消耗低于发电量，电网频率就会上升^[33]，这是电力系统频率控制的基本原则。对于交流微网系统而言，频率稳定性是首要之重。惯量与阻尼模拟的各种方法均可在一定程度上提升系统频率稳定性。现有的研究大多针对系统小信号稳定性展开，也有一些关于暂态稳定性的分析。

惯量与阻尼模拟技术通过模拟传统同步发电

机而使电力电子变换器具有类似同步机的惯量和阻尼等特性，从而为系统提供惯量和阻尼支撑，提升交流微网的频率稳定性。研究虚拟惯量、虚拟阻尼与频率失稳的交互机理及稳定性提升方法^[34]，首先需要建立微电网虚拟同步发电机模型，然后通过虚拟惯量与虚拟阻尼参数优化来提升系统的频率稳定性。文献[35]在多个虚拟同步发电机并联的场景下建立系统小信号模型，研究特征根与阻抗、功率及控制环参数的内在联系，从而可以获取最佳的系统参数来提升频率稳定性。目前，有关小信号稳定性的研究已较为成熟，然而该方法的特点在于其适用于多台虚拟同步机并联的场景，多 VSG 之间及其与全网的动态交互使系统更易失稳，该方法可有效提升多机并联系统小信号稳定性，对于暂态稳定性的分析还需要进一步深入研究。为了量化虚拟惯量对频率的影响，文献[36]借助 H_2 范数与 H_∞ 范数分析从扰动到频率输出的传递函数矩阵，获取频率响应特性，从而可以量化分析虚拟惯量对系统频率扰动的抑制效果。借助从扰动到输出的闭环传递函数范数来量化虚拟惯量抑制扰动的效果，是一种较为新颖的研究思路。可以考虑将此方法应用于大容量的混合微网研究，但对于混合微网，其闭环传递函数相对复杂很多，该方法的有效性还有待验证。

虚拟惯量自适应控制策略的参数可随系统状态来调节，解决了传统 VSG 中惯量系数固定不变的问题。文献[37]通过速度反馈调节系统阻尼，并根据系统暂态功角特性提出一种能够减少调节时间的自适应控制策略。该方法能够改善电网频率调节的暂态性能且抑制功率超调。

然而，虚拟惯量自适应控制策略面临的主要问题在于：大范围调整虚拟惯量和虚拟阻尼系数，需要微电网系统具有较大的储能单元，才能满足不同运行状况对惯量和阻尼的需求。此外，暂态调节过程存在功率超调现象，对电力设备不利。

文献[31-32]采用广义下垂控制方法，在传统下垂控制的基础上加入频率二次调节，使传统下垂控制具有惯量特性，以使微电网在孤岛运行时的稳定性得到提升。

表 1 对比 VSG 控制策略、虚拟惯量自适应控制策略及广义下垂控制策略对频率稳定性的影响。VSG 控制技术成熟，应用最广泛，对于孤岛和并网型微电网均适用。可以通过参数优化提升控制效果，并且可以定量分析系统稳定性的提升效果。

表 1 惯量与阻尼模拟方法对频率稳定性的影响
Table 1 Influence of inertia and damping simulation methods on frequency stability

控制方法	模型分析	优点	缺点	应用场合
VSG 控制 ^[25,34,36]	小信号	技术成熟应用广泛	控制欠灵活；惯量	孤岛/并网
	模型/大信号模型	广泛参数可优化 定量分析稳定性 提升效果	和阻尼参数固定 不变系统经受 扰动后恢复较慢	
虚拟惯量自适应控制 ^[28,37]	小信号模型	参数自适应调节 控制灵活	参数调节范围有限 受制于系统储能裕 量功率超调现象	多用于 并网
广义下垂控制 ^[31-32,38-39]	小信号模型	控制回路灵活适应 多种需求较好的 参考值跟随性超 调量和振荡较小	并、离网不同 场景效果不同 引入二次控制 增加了复杂性	孤岛/并网

但是传统 VSG 控制不够灵活，因惯量和阻尼参数不能自适应调节，因此当系统经受扰动后，需要较长的恢复时间。虚拟惯量自适应控制在 VSG 控制基础上做了进一步改进，因惯量和阻尼参数可根据不同工况自适应调节，所以比 VSG 控制更加灵活。但是，如果需要参数在较大变化范围调节，则需要系统具备较高的储能裕量。同时，虚拟惯量自适应控制还可能导致功率超调现象发生。广义下垂控制是在传统下垂控制中加入二次控制环节后改进得到的，其控制回路设计较灵活，能够快速、准确地跟踪参考值，且超调量和振荡较小。但是由于加入了二次控制环节，因此控制相对复杂。由此可见，每种控制方法各有利弊，应该根据实际系统特点和具体需求选择合适的控制方法。

4 功率振荡抑制策略

采用模拟传统大电网中同步发电机惯量与阻尼的控制方法，为微电网系统提供类似同步发电机的调频特性和惯量支撑，可以显著提升交流微网的频率稳定性。但由于同步机的有功—频率外特性，又会引入有功功率振荡等问题。尤其是当交流微电网系统中存在多个 VSG 变换器并联运行时，功率振荡问题会变得更为突出。

文献[40]设计了一种互阻尼控制策略，该策略的提出是基于一种分布式通信架构。如图 7 所示，为该控制策略框图。图中，左侧为传统 VSG 控制策略，右侧为改进后基于分布式通信架构的互阻尼控制策略； U_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功和无功参考值； u_{abc} 、 i_{abc} 分别为输出端电压和并网电流； P_e 、 P_m 分别为电磁功率和机械功率； D 、 J 分别为 VSG 的阻尼系

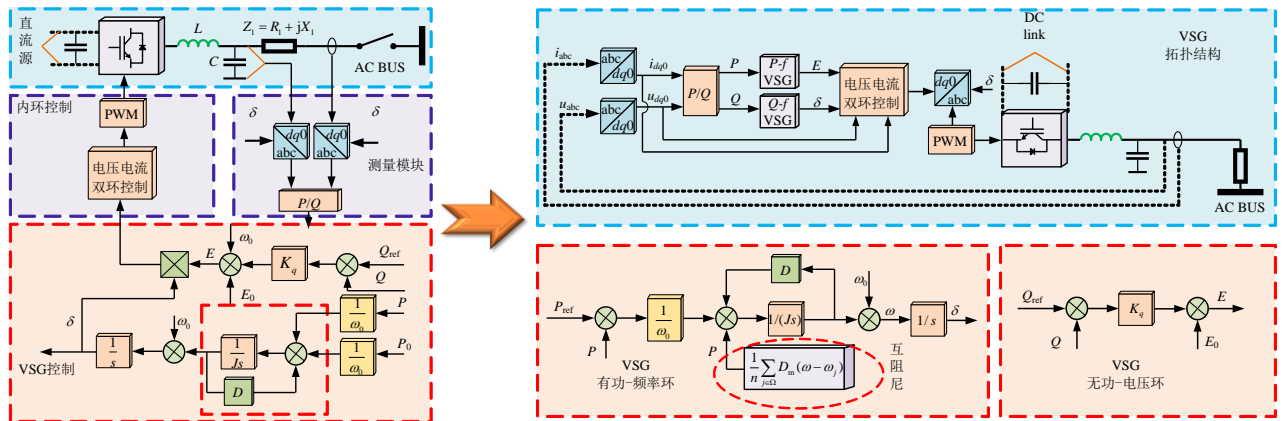


图7 基于分布式通信架构的互阻尼控制策略

Fig. 7 Control strategy based on mutual damping under distributed communication

数和转动惯量。可以看出，该控制策略在转子运动方程中加入互阻尼项，将有功频率控制环路得到的输出频率进行信息交互，通过相邻 VSG 间的互阻尼控制，使得扰动下系统内 VSG 时刻趋于相同的输出频率，提升 VSG 的动态特性，实现抑制功率振荡的目的。

文献[41]在双馈风电机组并网场景下，建立系统小信号模型，通过模态分析法对基于惯量模拟控制策略的有功控制环、锁相环等回路进行分析。适当增加下垂系数和滤波时间常数，能使振荡阻尼比得到提升，从而有效抑制机电振荡。该方法揭示了虚拟惯量与机电振荡之间的交互机理，在此基础上，还可进一步量化研究两者之间的交互特性。

类似传统同步发电机，VSG 控制策略在动态过渡阶段产生的不稳定因素易引发系统功率振荡。为了解决该问题，文献[42]在传统虚拟同步发电机控制的基础上，引进参数可调和虚拟阻尼补偿环节。

如图 8 所示，在加入虚拟阻尼补偿环节后设计出一种改进型 VSG 控制策略。图中 P_e 、 P_m 分别表示电磁功率和机械功率。 D 、 J 分别表示 VSG 的阻尼系数和转动惯量。该控制策略中参数 α 可以通过优化设计进行修正，以此达到较为明显的振荡抑制效果。

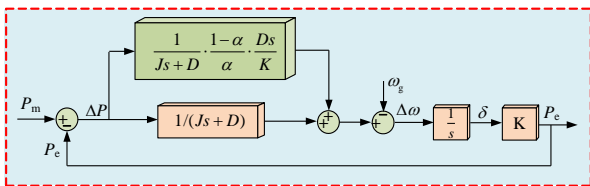


图8 改进型 VSG 控制策略框图

Fig. 8 Control diagram of improved VSG control strategy

当分析系统中含有多个虚拟同步发电机的振荡问题时，可以采用基于传递函数的分析方法，但基于该方法确定振荡频率所需的传递函数复杂、阶数

高、计算量较大且无法准确获取功率振荡时变换器的参与度。基于此，文献[43]在虚拟同步发电机有功-频率控制环路基础上建立导纳模型，推导多 VSG 并网系统的阻抗矩阵。再通过灵敏度分析法获取 VSG 在发生振荡时的参与程度，以实现对振荡频率及振荡影响范围的模态评估。针对由 VSG 所引起的低频振荡问题，文献[44]建立了一种互联系统小信号模型，分析系统低频振荡机理，并以此为基础进一步研究 VSG 对系统低频振荡模态的影响程度。另有学者提出了针对风电场的自适应鲁棒滑膜控制策略[45]，可以有效提升系统的动态稳定性。以上方法均可为解决微电网中由惯量与阻尼模拟控制引发的振荡问题提供参考。然而，由虚拟惯量模拟而引起功率振荡问题的产生机理复杂，现有研究多是从不同角度研究其抑制策略。要彻底消除功率振荡问题，还需要更加深入的对振荡交互机理进行探究，从虚拟惯量控制的源头寻找解决问题的方法。

5 直流微网电压稳定性问题

对于直流微电网系统，“低惯量、欠阻尼”特性会引起母线电压波动，带来电压稳定性问题。为了解决此类问题，有学者提出了类似虚拟同步发电机的虚拟直流电机技术(virtual DC motor, VDM)，该方法可以用来解决直流微网的惯量缺失问题[46-49]。

另有学者提出了类 VSG 虚拟惯性控制策略[38]，该方法可用于对直流微电网多端口变换器的控制，能够提升直流微网的惯性。如图 9 所示，为 DC/AC 和 DC/DC 变换器的虚拟惯性控制策略控制框图[38]。其中， K_u 为电压偏差前馈系数。为了加快电流控制的响应速度，相较于传统下垂控制，类 VSG 虚拟惯性控制中加入了 $K_u(U_{dcn}-U_{dc})$ 作为电压偏差的前馈控制，以达到抑制直流母线电压波动的控制效果。

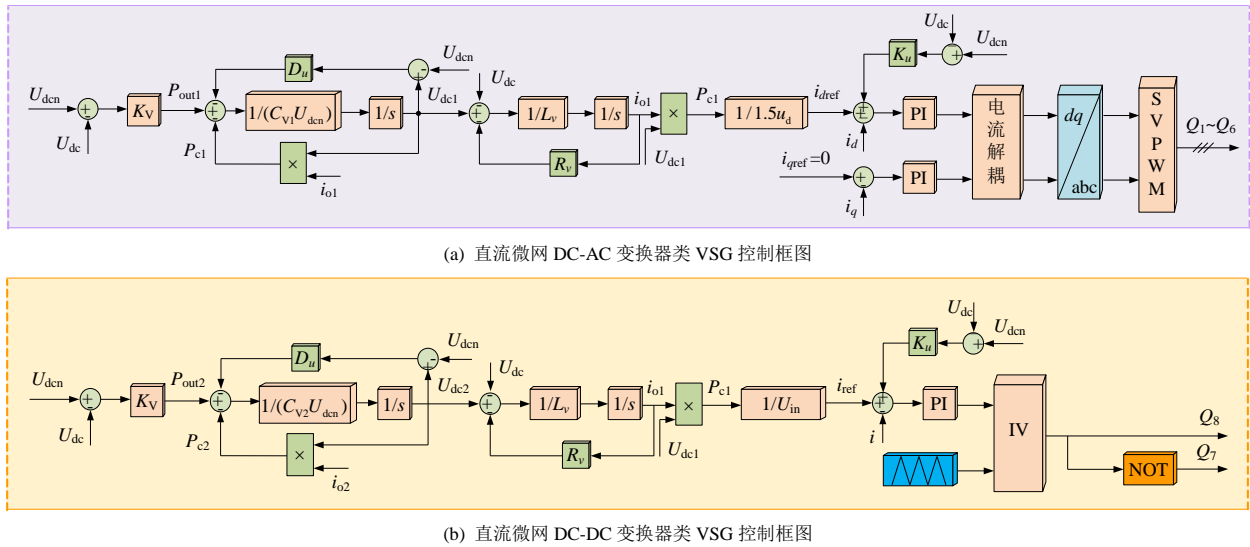


图 9 直流微电网 DC-AC 与 DC-DC 变换器类 VSG 控制策略框图

Fig. 9 Control diagram of DC-AC and DC-DC converter analogous VSG control strategy of DC microgrid

除此之外，还有变下垂系数控制、附加惯性控制等适用于直流微网的惯量模拟技术^[39]。变下垂系数控制方法需引入电压微分项，将电压变化率和下垂系数统一协调且兼顾动态惯性裕度，可使直流微电网中 DC-DC 变换器产生虚拟惯量特性^[50-51]。附加惯性控制也是一种较为有效地惯量模拟技术。比如，可以将虚拟电容和电阻串联后添加至控制回路，以实现为电力电子变换器提供虚拟惯量和阻尼的目的^[52]。

针对含有风电和储能的直流微电网，将附加惯性控制策略应用在控制回路中，充分利用储能元件特性进而使系统具备惯量的支撑^[53]。基于此方法，还可以用一阶惯性环节取代附加惯性控制策略中的高通滤波器^[54]，这样可以消除由高通滤波器引起的干扰。

总而言之，近年来直流型负荷和电源的占比逐渐增加，以虚拟直流电机为代表的各类直流微电网惯量模拟技术也在蓬勃发展。未来交、直流微电网交互不断加深，可广泛借鉴交流微网的研究理论来充实直流微网的相关研究。

6 展望

6.1 惯量与阻尼模拟技术对多机并联协同控制与稳定运行的影响

微电网中分布式电源主要由风电、光伏等新能源组成，与传统电网中同步发电机组相比，这些分布式电源的容量要低很多。为了增加系统容量，必然要求接入更大规模和数量的新能源机组^[55-57]。然而，新能源机组数量与组合方式的增加，会给系统

协同控制和稳定运行带来更大挑战^[58]。

目前关于微电网惯量与阻尼的模拟技术，大多是以单一或数台变流器为对象研究其控制策略。而在实际的微电网场景中，通常含有多台不同类型的变流器参与能量转换。在这样复杂的情况下应用惯量与阻尼模拟技术，既有优势也有劣势。其优势在于，不同类型的变流器可以充分利用不同电源类型的特点互相提供惯量支撑，弥补单一变流器的不足之处。缺点在于多台不同类型变流器并联使整个系统更加复杂，增加了协调控制的难度。

例如，在由风电、光伏组成的分布式电源中加入大容量的储能单元，增加系统的等效惯量从而达到提升频率稳定性的目的。但是，当扰动达到一定程度时，可能会因缺乏持久的能量支持使系统失稳且难以恢复^[59]。目前已有学者对此类问题进行了探索性分析，在未来的发展中还需要进一步研究不同类型和数量的分布式电源相互作用机理，优化协同控制策略，以保证系统安全稳定运行。

6.2 交、直流混合微网综合惯量与阻尼模拟

微电网根据母线类型不同，通常被习惯性的分为交流微电网和直流微电网。目前学者所关注的问题也分别针对交流微电网和直流微电网各自单独展开。对于交流电网，普遍受到关注的是其因惯量与阻尼缺失而导致的频率稳定性问题。对于直流微网，目前主要研究点集中在母线的电压稳定性问题。

然而，随着直流型负荷和电源的占比越来越高，交、直流负荷和电源的交互日益增加，交、直流混合微电网越来越受到学者关注。它涵盖了更多类型的分布式电源、负荷和更多应用场景，相较于

单一型交流或直流微电网,它可以为系统提供更多的惯量支撑^[60-61],而且减少了直流负载接入所需的变换器,因具有更好的经济性和低功耗等优点,成为未来的发展趋势。

在已有研究中,大多是针对单一的交流或直流微网来模拟惯量与阻尼,而针对交、直流混合微电网综合惯量与阻尼模拟的研究较少。对于交、直流混合微电网来说,因其电源、负荷的类型和数量更多,导致其控制策略更加复杂^[62-63]。特别是对于系统的惯量和阻尼模拟而言,更具挑战性。

未来的发展中,应进一步针对交、直流混合微电网惯量与阻尼提升开展相关的深入研究。对交、直流母线接口变换器的控制是关键和难点所在,不应局限在仅通过直流微网储能单元为交流频率提供惯量支撑或仅通过交流微网为直流母线电压提供惯量支撑。需要扩大惯量来源,充分利用交、直流微电网中不同类型电源和负荷的吞吐特性,为交流频率和直流电压提供惯性支撑^[64],从而整体提升电压和频率的动态响应。

6.3 充分考虑不同类型负荷与系统惯量交互影响

微电网系统的惯量包括电源侧、负荷侧及各类惯量与阻尼模拟控制策略所提供的等效惯量。然而,在以往的研究中,大多集中在对源侧的惯量与阻尼模拟而忽略了负荷中普遍存在的惯量。其实,不同类型的负荷也会影响整个微网系统的惯量和阻尼^[65]。

负荷的惯量特性是通过其转子的机械能主动响应系统功率波动从而阻碍系统频率变化来体现的^[66]。对电动机负荷而言,可以主动响应系统频率扰动,通过电动机转子机械能为系统提供惯量支撑^[67]。而本身不具备转动惯量的负荷,也会因系统电压和频率的突变而引起负荷功率变化,表现出等效的惯量特性^[68]。

随着电动汽车充电桩等新型负荷的大量接入,微电网正在向多应用场景和多类型负荷方向发展,因此,有必要深入分析不同类型负荷与整个系统惯量、阻尼及失稳的内在联系,从而根据不同类型负荷设计更适宜的控制策略,以此来提高系统的稳定性。

6.4 惯量与阻尼对变流器驱动稳定性、谐振稳定性的影响

对于传统电力系统的稳定性问题,主要关注的是功角稳定性、电压稳定性及频率稳定性这三大类

问题。随着新能源利用率的不断提高,“高比例可再生能源”和“高比例电力电子设备”对电力系统产生深刻影响,带来新的稳定性问题,使电力系统失稳机理变得更加复杂^[69-70]。

由于微电网系统具有显著的“双高”特征^[71],其控制以电力电子变换器为主导,多级控制相互作用,涉及更宽时间尺度动态,这些动态在高度非线性化的控制结构中存在交互作用,这也导致系统在宽频域范围内响应扰动。机电暂态和电磁暂态耦合交互,引发谐振和振荡。这与IEEE/Cigre在技术报告PES-TR77中新提出的变流器驱动稳定性和谐振稳定性问题密切相关^[72]。

一方面,这两类新的稳定性问题,主要在于具有“弱阻尼”特性的电力电子变流器接口发电设备替代了具有“强阻尼”特性的同步发电机,导致谐振和振荡的产生。另一方面,微电网惯量与阻尼的缺失使系统对扰动更为敏感,从而进一步影响其多时间尺度动态响应特性。目前已有一些利用阻尼抑制谐振的方法,因此有必要站在惯量与阻尼角度对变流器驱动稳定性、谐振稳定性的机理及谐振和振荡的抑制策略展开深入研究。

7 结论

微电网系统含有多种不同类型的分布式电源,采用高比例电力电子变换器进行能量转换,从而提高了对新能源的利用效率和控制灵活性。但由于其缺少传统电网的惯量和阻尼,使系统稳定性受到影响。因此,本文针对微电网惯量与阻尼模拟技术展开综述。梳理了各种主要的控制方法,包括虚拟同步发电机技术、虚拟惯量自适应控制技术及广义下垂控制技术,这些方法借助模拟同步发电机、改进传统下垂控制、利用储能模块增加系统惯量等思路,可以有效地提升交流微网的频率稳定性和直流微网的电压稳定性。对于交流微网,在提升频率稳定性的同时,又会引入系统功率振荡的问题。因此,又针对此类问题开展了振荡抑制策略的分析,并探索了未来可能的发展方向与研究思路,期望本研究可为微电网惯量与阻尼模拟技术的发展提供有益帮助和贡献。

参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.

- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475(in Chinese).
- [2] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457-5467.
HU Jianbing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467(in Chinese).
- [3] 彭也伦, 黄文, 帅智康. 含异构微源孤岛微电网的瞬时有功功率分配问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5167-5178.
PENG Yelun, HUANG Wen, SHUAI Zhikang. The research of transient load sharing in islanded microgrid with heterogeneous DGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5167-5178(in Chinese).
- [4] 迟永宁, 张占奎, 李琰, 等. 大规模风电并网技术问题及标准发展[J]. 华北电力技术, 2017(3): 1-7.
CHI Yongning, ZHANG Zhankui, LI Yan, et al. Development of large-scale wind power grid integration and technical standard[J]. North China Electric Power, 2017(3): 1-7(in Chinese).
- [5] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027(in Chinese).
- [6] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-411.
SHANG Lei, HU Jianbing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-411(in Chinese).
- [7] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报, 2012, (3): 1-6, 12.
ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply, 2012, (3): 1-6, 12(in Chinese).
- [8] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-75.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175(in Chinese).
- [9] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3006.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3006(in Chinese).
- [10] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4719-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4719-4731(in Chinese).
- [11] GHAFOURI A, MILIMONFARED J, GHAREHPETIAN G B. Coordinated control of distributed energy resources and conventional power plants for frequency control of power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 104-114.
- [12] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time Scale Voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154(in Chinese).
- [13] 曾繁宏, 张俊勃. 电力系统惯性的时空特性及分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 50-58.
ZENG Fanrong, ZHANG Junbo. Temporal and spatial characteristics of power system inertia and its analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 50-58(in Chinese).
- [14] ZHU Jiebei, HU Jiabing, HUNG W, et al. Synthetic inertia control strategy for doubly fed induction generator wind turbine generators using lithium-ion supercapacitors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 773-783.
- [15] ZHU Jiebei, BOOTH C D, ADAM G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1277-1287.
- [16] 秦晓辉, 苏丽宁, 迟永宁, 等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 36-43.

- QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 36-43(in Chinese).
- [17] 李宇骏, 杨勇, 李颖毅, 等. 提高电力系统惯性水平的风电场和 VSC-HVDC 协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6021-6031.
- LI Yujun, YANG Yong, LI Yingyi, et al. Coordinated control of wind farms and VSC-HVDC to improve inertia level of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6021-6031(in Chinese).
- [18] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716.
- FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716(in Chinese).
- [19] ZHU Jiebei. Tuning method for VSC current controller gains aimed at optimized settling time and damping ratio[C]//Proceedings of the 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference. Glasgow, UK, 2018.
- [20] SHEN Zhipeng, ZHU Jiebei, ADAM G P, et al. State-varying inertia and time-decaying damping emulation control scheme for VSC-HVDC transmission system[C]//Proceedings of the 8th Renewable Power Generation Conference. Shanghai, China: IET, 2019.
- [21] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5191.
- SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5191(in Chinese).
- [22] 汤涌, 孙华东, 易俊, 等. 两大区互联系统交流联络线功率波动机制与峰值计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 1-6.
- TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. AC tie-line power fluctuation mechanism and peak value calculation for two-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 1-6(in Chinese).
- [23] SULLIVAN J O, ROGERS A, FLYNN D, et al. Studying the maximum instantaneous non-synchronous generation in an island system—frequency stability challenges in Ireland[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2943-2951.
- [24] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
- DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-93(in Chinese).
- [25] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- LV Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603(in Chinese).
- [26] 施静容, 李勇, 贺悝, 等. 一种提升交直流混合微电网动态特性的综合惯量控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 337-345.
- SHI Jingrong, LI Yong, HE Li, et al. A comprehensive inertia control method for improving the dynamic characteristics of hybrid ac-dc microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 337-345(in Chinese).
- [27] 文云峰, 林晓煌. 孤岛与并网模式下微电网最低惯量需求评估[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2040-2052.
- WEN Yunfeng, LIN Xiaohuang. Minimum inertia requirement assessment of microgrids in islanded and grid-connected modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2040-2052(in Chinese).
- [28] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82-89.
- CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89(in Chinese).
- [29] 章伟明, 赵巧娥, 刘毓梅, 等. 孤岛模式自适应转动惯量 VSG 逆变电源控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(2): 95-100.
- ZHANG Weiming, ZHAO Qiaohu, LIU Yumei, et al. VSG inverter power source control strategy with adaptive rotary inertia in island mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(2): 95-100(in Chinese).
- [30] 茆美琴, 丁勇, 胡健, 等. 含多光储 VSG 单元孤岛微电网参数自适应功率协调与频率优化控制[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 20-32.
- MAO Meiqin, DING Yong, HU Jian, et al. Parameter adaptive power coordination and frequency optimization of islanded microgrid with PV/battery VSG units[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 20-32(in Chinese).
- [31] MENG Xin, LIU Zeng, LIU Jinjun, et al. Comparison between inverters based on virtual synchronous generator and droop control[C]//Proceedings of the 2017 IEEE

- Energy Conversion Congress and Exposition(IECON), Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2017.
- [32] MENG Xin, LIU Jinjun, LIU Zeng. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [33] FANG Jingyang, LI Hongchang, TANG Yi, et al. On the inertia of future more-electronics power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(4): 2130-2146.
- [34] 王淋, 巨云涛, 吴文传, 等. 面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4479-4489.
- WANG Lin, JU Yuntao, WU Wenchuan, et al. Optimal design of inertia and damping parameters of virtual synchronous microgrid for improving frequency stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4479-4489(in Chinese).
- [35] 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.
- 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(in Chinese).
- [36] 黄林彬, 辛焕海, 黄伟, 等. 含虚拟惯量的电力系统频率响应特性定量分析方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 31-38.
- HUANG Linbin, XIN Huanhai, HUANG Wei, et al. Quantified analysis method of frequency response characteristics for power systems with virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 31-38(in Chinese).
- [37] 任海鹏, 陈琦, 张亮亮, 等. 虚拟同步发电机参数自适应调节[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2571-2580.
- REN Haipeng, CHEN Qi, ZHANG Liangliang, et al. Parameter adaptive strategy for virtual synchronous generator control[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(12): 2571-2580(in Chinese).
- [38] 曹建博, 王林, 黄辉, 等. 直流微电网多端口变换器虚拟惯性控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2604-2615.
- CAO Jianbo, WANG Lin, HUANG Hui, et al. Virtual inertia control strategy of multi-port converter used in DC micro-grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2604-2615(in Chinese).
- [39] 朱晓荣, 孟凡奇. 含虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 208-218.
- ZHU Xiaorong, MENG Fanqi. Stability analysis of DC microgrid with virtual inertia control[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 208-218(in Chinese).
- [40] 洪灏灏, 顾伟, 黄强, 等. 微电网中多虚拟同步机并联运行有功振荡阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6247-6254.
- HONG Haohao, GU Wei, HUANG Qiang, et al. Power oscillation damping control for microgrid with multiple VSG units[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6247-6254(in Chinese).
- [41] 徐筱倩, 黄林彬, 汪震, 等. 双馈风电机组虚拟惯量控制对电力系统机电振荡的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 11-17, 43.
- XU Xiaoqian, HUANG Linbin, WANG Zheng, et al. Analysis on impact of virtual inertia control of DFIG-based wind turbine on electromechanical oscillation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 11-17, 43(in Chinese).
- [42] 毛福斌, 张兴, 刘芳, 等. 基于虚拟阻尼补偿的改进型VSG控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 75-78.
- MAO Fubin, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Research on improved VSG control strategy based on virtual damping compensation[J]. Power Electronics, 2016, 50(9): 75-78(in Chinese).
- [43] 秦本双, 徐永海. 多虚拟同步机并网系统功频振荡模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6570-6580.
- QIN Benshuang, XU Yonghai. Modal analysis of multi-virtual synchronous machine grid-connected power-frequency oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6570-6580(in Chinese).
- [44] 孙大卫, 刘辉, 吴林林, 等. 虚拟同步发电机对低频振荡的影响建模与特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 134-144.
- SUN Dawei, LIU Hui, WU Linlin, et al. Modeling and characteristic analysis on influence of virtual synchronous generator on low-frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 134-144(in Chinese).
- [45] 杨涛, 廖勇, 汤梦阳. 改善含风电场虚拟惯量互联电力系统稳定性的自适应鲁棒滑模控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 223-228.
- YANG Tao, LIAO Yong, TANG Mengyang. Adaptive robust-sliding mode control strategy for improving stability of interconnected power system with virtual inertia of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 223-228(in Chinese).
- [46] SHAMSI P, FAHIMI B. Stability assessment of a dc distribution network in a hybrid micro-grid application[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2527-2534.
- [47] 伍文华, 陈燕东, 罗安, 等. 一种直流微网双向并网变

- 换器虚拟惯性控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 360-371.
- WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An, et al. A virtual inertia control strategy for bidirectional grid-connected converters in DC micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 360-371(in Chinese).
- [48] 崔健, 房建军. 虚拟直流电机技术参数分析及虚拟惯量自适应控制[J]. 电源学报, 2021. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=DYXB20210104000>.
- CUI Jian, FANG Jianjun. Parameters analysis and virtual inertia adaptive control of virtual dc motor technique[J]. Journal of Power Supply, 2021. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=DYXB20210104000>(in Chinese).
- [49] 程启明, 杨小龙, 褚思远, 等. 基于虚拟直流发电机的光伏系统控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2097-2104.
- CHENG Qiming, YANG Xiaolong, CHU Siyuan, et al. Research on control strategy of PV system based on virtual DC generator[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2097-2104(in Chinese).
- [50] 王毅, 黑阳, 付媛, 等. 基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 116-24.
- WANG Yi, HEI Yang, FU Yuan, et al. Adaptive virtual inertia control of dc distribution network based on variable droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 116-124(in Chinese).
- [51] WANG Yi, WANG Chen, XU Lie, et al. Adjustable inertial response from the converter with adaptive droop control in DC grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3198-3209.
- [52] UNAMUNO E, BARRENA J A. Design and small-signal stability analysis of a virtual-capacitor control for DC microgrids[C]//Proceedings of the 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications, Warsaw, Poland: IEEE, 2017.
- [53] 朱晓荣, 蔡杰, 王毅, 等. 风储直流微网虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 49-58.
- ZHU Xiaorong, CAI Jie, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of wind-battery-based dc micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 49-58(in Chinese).
- [54] 朱晓荣, 谢志云, 荆树志. 直流微电网虚拟惯性控制及其稳定性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3884-3891.
- ZHU Xiaorong, XIE Zhiyun, JING Shuzhi. Virtual inertia control and stability analysis of DC micro-grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3884-3891(in Chinese).
- [55] 国家发展和改革委员会能源研究所. China renewable energy outlook 2019[EB/OL]. 北京: 可再生能源发展中心 2019[2020-05-20]. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/CREO2019_-_Executive_Summary_2019.pdf.
- [56] 国家发展和改革委员会能源研究所. 2019 年度全国可再生能源电力发展监测评价报告[EB/OL]. (2020-05-06). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-05/16/content_5512148.htm.
- [57] REN21. Renewables 2020 global status report[R]. Paris: REN21, 2020.
- [58] YI Wenting, HILL D J, SONG Yue. Impact of high penetration of renewable resources on power system transient stability[C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019.
- [59] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26(in Chinese).
- [60] EGHTEHDARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [61] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2756-2767.
- ZHU Yongqiang, JIA Lihu, CAI Bingqian, et al. Overview on topologies and basic control strategies for hybrid AC/DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2756-2767(in Chinese).
- [62] CHEN Dong, XU Yizhe, HUANG A Q. Integration of DC microgrids as virtual synchronous machines into the AC grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7455-7466.
- [63] PEYGHAMI S, MOKHTARI H, BLAABJERG F. Autonomous operation of a hybrid AC/DC microgrid with multiple interlinking converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6480-6488.
- [64] 李峰, 秦文萍, 任春光, 等. 混合微电网交直流母线接口变换器虚拟同步电机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3776-3787.
- LI Feng, QIN Wenping, REN Chunguang, et al. Virtual synchronous motor control strategy for interfacing converter in hybrid AC/DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3776-3787(in Chinese).
- [65] TIELENS P, VAN HERTEM D. The relevance of inertia in power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 999-1009.
- [66] 张武其, 文云峰, 迟方德, 等. 电力系统惯量评估研究框架与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20):

- 6842-6855.
ZHANG Wuqi, WEN Yunfeng, CHI Fangde, et al. Research framework and prospect on power system inertia estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6842-6855(in Chinese).
- [67] 王珂, 袁小明. 异步电机机电时间尺度有效惯量评估及其对可再生能源并网系统频率动态的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7258-7266.
WANG Ding, YUAN Xiaoming. Available inertia estimation of induction machine in electromechanical timescale and its effects on frequency dynamics of power systems with renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7258-7266(in Chinese).
- [68] WILSON D, YU J, AL-ASHWAL N, et al. Measuring effective area inertia to determine fast-acting frequency response requirements[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 113: 1-8.
- [69] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 1-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1-11(in Chinese).
- [70] 鲁宗相, 汤海雁, 乔颖, 等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 51-58.
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58(in Chinese).
- [71] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [72] HATZIARGYRIOU N D, MILANOVIĆ J V, RAHMANN C, et al. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies [R]. PES-TR77, Piscataway: IEEE, 2020.



赵恩盛

在线出版日期: 2021-07-28。

收稿日期: 2021-03-12。

作者简介:

赵恩盛(1990), 男, 博士研究生, 研究方向为虚拟同步发电机技术、微电网及其协调控制技术, zhaovens@163.com;

*通信作者: 韩杨(1982), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源分布式发电、微电网, hanyang@uestc.edu.cn;

周思宇(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化与控制、电能质量, zhousy@std.uestc.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)

Review and Prospect of Inertia and Damping Simulation Technologies of Microgrids

ZHAO En'sheng, HAN Yang*, ZHOU Siyu, LIU Yuxiang, YANG Ping
(University of Electronic Science and Technology of China)

KEY WORDS: microgrid; inertia; damping; control strategy; stability

With the acceleration of the energy transition process, the utilization rate of renewable energy sources is constantly improving. High penetration of renewable energy plus high penetration of power electronic equipment (namely, "double high") is becoming the inevitable trend of power system development. Microgrids have significant "double high" characteristics and convert energy through power electronic converter, which do not have the inertia support provided by synchronous generator in traditional power grid, so they present the distinct characteristics of low inertia and weak damping.

Influencing factors such as different power types, load types and control strategies in microgrid determine the inertia of the whole system. As shown in Fig. 1, the influencing factors of system inertia are classified.



Fig. 1 Classification of the influencing factors of inertia

Distributed energy sources such as wind power and photovoltaic in microgrids have replaced traditional synchronous generators as the main energy source. However, these distributed generation units do not have the inertia like traditional synchronous generators and cannot provide inertia and damping support for the microgrid system, which will lead to serious problem of missing inertia and damping.

At the same time, without the support of traditional synchronous machine, there is almost no power angle characteristic in microgrids. When the system is disturbed, the disturbance power cannot be allocated according to the synchronous power coefficient, and the

inertia directly participates in the response. As shown in Fig. 2, it is the frequency response time of microgrids.

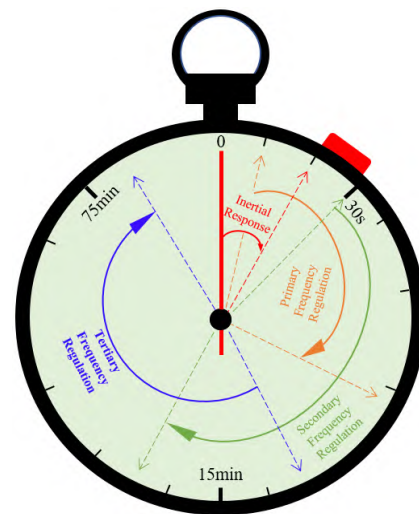


Fig. 2 Frequency response time of microgrids

Compared with the traditional power system, the frequency response time of microgrid is faster and presents the characteristics of multiple time scales. The lack of inertia problem of microgrid is particularly obvious, which will lead to a significant increase in the frequency change rate of the system.

This paper focuses on the common problems of inertia and damping loss in microgrids, the characteristics of "low inertia" and "weak damping" are analyzed, and the problems caused by inertia and damping loss in microgrids and its interaction mechanism with frequency stability are expounded. Various control technologies based on inertia and damping simulation, such as virtual synchronous generator, virtual inertia adaptive control and generalized droop control are summarized. The research status of AC microgrids frequency stability, oscillation suppression strategy and DC microgrids voltage stability are reviewed. Finally, the future research and development direction is prospected from different operation scenarios, different load types and instability mechanism of microgrid. It is expected to provide useful help and contribution for the development of simulation technology of inertia and damping of microgrids.