

虚拟同步发电机技术及展望

郑天文^{1,2}, 陈来军^{1,2,3}, 陈天一^{1,2}, 梅生伟^{1,2,3}

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084;

3. 青海大学新能源光伏产业研究中心, 青海省西宁市 810016)

摘要: 随着分布式电源渗透率增加, 电网将逐步发展为电力电子变换器为主导的低惯量、欠阻尼网络, 稳定性问题愈发严重。虚拟同步发电机(VSG)技术因其能使逆变器模拟同步发电机运行机制、有利于改善系统稳定性而成为研究热点, 并具有广泛的应用前景。首先介绍了 VSG 的基本原理, 然后从运行控制、稳定分析以及典型应用等方面分别综述了 VSG 技术的关键问题与研究现状, 并从中提炼出后续可能的研究方向。

关键词: 分布式电源; 虚拟同步发电机; 虚拟惯量; 有功-频率调节; 无功-电压调节

0 引言

能源在社会发展中起着重要的推动作用。电力作为清洁高效的能源形式, 关乎国计民生。为应对能源危机和环境压力, 风能、太阳能等分布式能源受到越来越广泛的关注^[1-2]。

大力发展分布式发电, 在改善电网运行经济性、优化电力系统运行方式以及构建环境友好型电力系统等方面均具有重要意义^[3-4]。2015 年 7 月, 国家发改委、能源局颁布的《关于促进智能电网发展的指导意见》明确指出, “将推广具有即插即用、友好并网特点的并网设备, 满足新能源、分布式电源广泛接入要求”^[5]。一般地, 分布式电源主要通过并网逆变器接入电网, 相比传统同步发电机, 其具有控制灵活、响应迅速等优点, 但也存在缺少惯性和阻尼等不足^[6-8]。

随着分布式电源渗透率的不断增加, 传统同步发电机的装机比例将逐渐降低, 电力系统中的旋转备用容量及转动惯量相对减少, 这对电网的安全稳定运行带来了严峻挑战。再者, 并网逆变器控制策略各异, 加之分布式电源输出功率具有波动性、不确定性等特点, 很难实现其即插即用与自主协调运行。

在此背景下, 如何通过控制并网逆变器以实现分布式电源友好接入已成为亟待解决的关键问题^[7,9]。

同步发电机具有对电网天然友好的优势, 若借鉴传统电力系统运行经验, 使并网逆变器具有类似同步发电机的运行特性, 则可实现分布式电源的友好接入并提高电力系统稳定性。此外, 传统同步发电机的相关控制策略与理论分析方法也可有效地引入其中。

为此, 国内外学者提出了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术^[10-17], 可使并网逆变器模拟同步发电机运行机理。具体而言, 主要通过模拟同步发电机的本体模型、有功调频以及无功调压等特性, 使并网逆变器从运行机制和外特性上可与传统同步发电机相比拟。VSG 因集成了同步发电机的优点而备受学者青睐, 其在现代电力系统中的应用也将日益广泛。

目前, 国内外学者提出了多种 VSG 技术的实现思路。依托欧洲 VSYNC 项目, 致力于利用储能系统改善电网稳定性的控制研究, 比利时鲁汶大学以及德国克劳斯塔工业大学提出了电流控制型 VSG 技术方案^[10-11]。其中, 鲁汶大学所提 VSG 方案主要在外特性上模拟了同步发电机的摇摆方程, 并未模拟同步发电机的电压调节特性。相比而言, 克劳斯塔工业大学所提“VISMA(virtual synchronous machine)”技术更能体现同步机运行特性。然而, 电流控制型 VSG 等效于电流源, 难以为系统提供电压和频率支撑。

收稿日期: 2015-05-08; 修回日期: 2015-07-24。

国家自然科学基金创新研究群体项目(51321005); 国家自然科学基金地区科学基金资助项目(51567021); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA050204); 青海省光伏发电并网技术重点实验室项目(2014-Z-Y34A)。

为弥补电流控制型 VSG 的缺陷,学者们提出了电压控制型 VSG 技术方案^[12-17]。颇具代表性的学术团队包括合肥工业大学丁明教授、英国利物浦大学钟庆昌教授以及日本大阪大学 Toshifumi Ise 教授等研究团队。其中,丁明教授、Toshifumi Ise 教授等提出的 VSG 技术主要基于同步发电机机电暂态模型^[12,17]。其本质是在频率控制上模拟同步发电机的转子惯量与系统调频特性,以提高系统频率稳定性;同时,在电压控制方面,主要考虑无功-电压关系,以控制电压稳定输出。功率控制器和电压频率控制器使 VSG 具有功率控制和调频调压双重功能。此外,钟庆昌教授等从 VSG 交流侧的动态模型入手,同时考虑了同步发电机的机电暂态和电磁暂态特性,提出了同步逆变器的概念,实现了 VSG 和同步发电机在物理和数学模型上的很好等效,并可实现 VSG 无锁相环的自同步运行^[14]。

与此同时,上述学派以及其他研究团队在 VSG 的建模、控制、稳定与应用等方面都开展了许多很有意义的工作,所取得的研究成果对理解 VSG 技术具

有很好的参考价值。

然而,VSG 技术的研究尚处于兴起阶段,其理论体系和工程应用方面还有待完善^[18-20]。现有文献主要是介绍不同类别 VSG 控制技术及其实现方式,较少系统性地综述 VSG 技术。此外,对于 VSG 技术的典型应用场景、主要难点以及今后可能的研究思路也鲜有文献报道。

有鉴于此,本文首先介绍了 VSG 的基本原理;然后从运行控制、稳定分析以及典型应用等层面对国内外相关研究成果进行了系统的梳理,并提出目前存在的关键问题以及可能的解决思路,以期对 VSG 技术的发展提供有益借鉴。

1 VSG 基本原理

1.1 拓扑结构

VSG 本质是通过控制逆变器模拟同步发电机的工作原理,从而获得类似同步发电机的运行特性。其基本拓扑结构如图 1 所示。

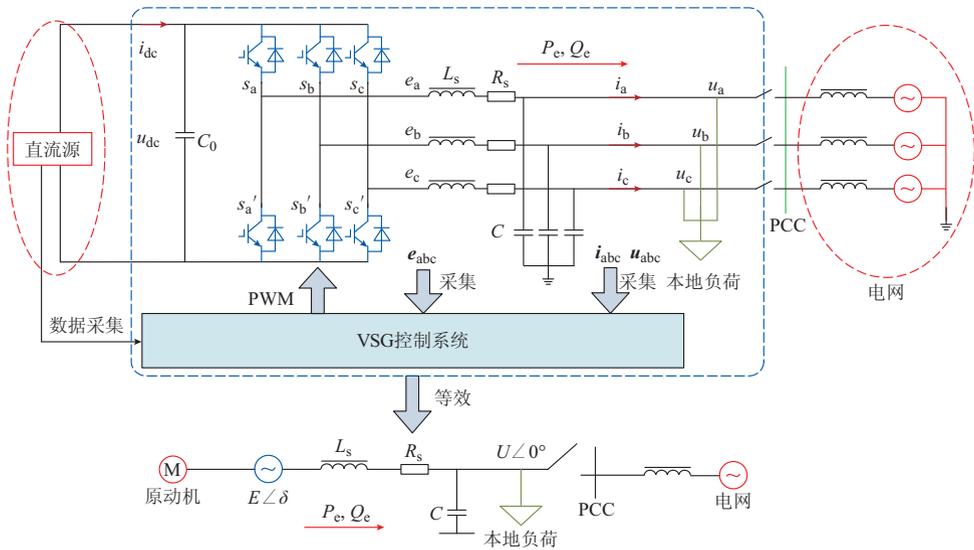


图 1 VSG 基本拓扑
Fig.1 Basic topology of VSG

图中, $e_{abc} = [e_a, e_b, e_c]^T$, $u_{abc} = [u_a, u_b, u_c]^T$, $i_{abc} = [i_a, i_b, i_c]^T$, 分别为 VSG 三相输出端电压、感应电动势与并网电流; R_s 和 L_s 分别为虚拟的定子电枢电阻与同步电感; P_e 与 Q_e 分别为 VSG 输出的有功功率与无功功率。

由图 1 可知, VSG 主要包括主电路与控制系统。其中,主电路为常规的并网逆变器拓扑,包括直流电压源(可视为原动机)、DC/AC 变换器及滤波电路等(对应同步发电机的机电能量转换过程);控制

系统是实现 VSG 的核心,其主要包括 VSG 本体模型与控制算法,前者主要是从机理上模拟同步发电机的电磁关系与机械运动,后者则主要从外特性上模拟同步发电机的有功调频与无功调压等特征。

1.2 本体建模

本体建模主要是根据不同阶次的同步发电机模型建立 VSG 的数学模型。因此,模拟不同的发电机模型可实现不同类型的 VSG。其中,有学者提出采用同步发电机的三阶^[21]、五阶^[22]等较高阶次的数

学模型来实现 VSG 本体建模,具有一定的理论研究价值,但其实现复杂、实用性不强。目前的研究以同步发电机经典的两阶模型为主,主要包括电磁部分与机械运动部分。

电磁部分建模以定子电气方程为原型,如下所示:

$$\mathbf{u}_{abc} = -R_s \mathbf{i}_{abc} - L_s \frac{d\mathbf{i}_{abc}}{dt} + \mathbf{e}_{abc} \quad (1)$$

上述建模过程重点考虑了定子电路的电压-电流关系,由于较为简单而不能反映其磁链以及内在的电磁特性。

文献[14,23]根据同步发电机定子与转子间的电气与磁链关系推导得到其感应电动势为:

$$\mathbf{e}_{abc} = M_f i_f \dot{\theta} \mathbf{A} - M_f \frac{di_f}{dt} \mathbf{B} \quad (2)$$

式中: M_f 为互感系数; i_f 为励磁电流; θ 为转子角度,此外,定义 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 表达式如下。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

式(2)即钟庆昌教授研究团队提出的同步逆变器的电磁模型^[14]。该模型充分考虑了同步发电机的机电与电磁暂态特征,增强了虚拟定子与转子的耦合度,更能反映同步发电机特性。

机械运动方程反映了 VSG 的转子惯性以及阻尼特征。目前针对 VSG 的机械部分建模较为统一,主要利用转子运动方程^[23-24],其表达式如下:

$$\begin{cases} T_m - T_e - D(\omega - \omega_{ref}) = J \frac{d\omega}{dt} \\ \frac{d\theta_1}{dt} = \omega \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_m 和 T_e 分别为机械转矩与电磁转矩; ω 和 ω_{ref} 分别为实际电角速度与额定电角速度; θ_1 为电角度; D 为阻尼系数; J 为转子转动惯量。

正是由于 J 的存在,使 VSG 在功率和频率动态过程中具有惯性;而 D 则使得 VSG 具备阻尼功率振荡的能力。

在实际应用过程中,若以模拟同步发电机惯量为主,而不关心同步机的电磁暂态过程,则可采用式(1)与式(5)建模;若需更好地模拟同步发电的电磁暂态特性,并赋予 VSG 各变量更为明确的物理意义,则可选择包含式(1)、式(2)和式(5)的同步逆变器建模方案^[14]。

2 VSG 运行控制

VSG 控制与常规逆变器控制的本质区别在于前者通过控制算法模拟同步发电机的运行机制,但其仍可部分保留传统的逆变器控制环节。借鉴分布式电源分层控制架构^[25],可设计 VSG 控制框架如图 2 所示。

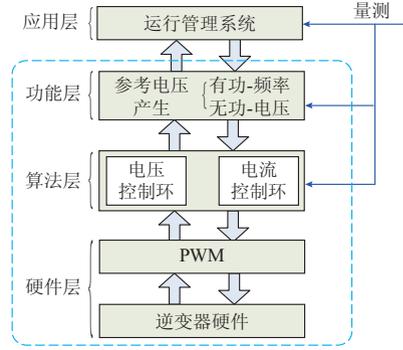


图 2 VSG 分层控制框架
Fig.2 Hierarchical control architecture for VSG

图 2 中,VSG 的控制框架主要包括功能层、算法层与硬件层,各层之间可交互数据或指令信息,并接收应用层的运行管理。其中,功能层是 VSG 技术的主要载体,以实现类似同步发电机的有功调频与无功调压功能,并产生逆变器控制参考电压;算法层则包含电压控制环与电流控制环的实现算法,可采用比例积分控制^[26]、比例谐振控制^[27]以及重复控制^[26,28]等常规的逆变器控制技术;而硬件层主要为开关逻辑与波形调制,用于控制变流器硬件开关动作,多采用正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM)^[29]、空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM)^[30] 等方式。

2.1 有功-频率控制

VSG 的有功-频率控制实际上是模拟同步发电机的调速器,用以表征有功功率和系统频率的下垂特性。有功-频率控制通过检测功率差 ΔP 来控制虚拟机械转矩输出而调节频率,并采用 VSG 阻尼系数来描述频率发生单位变化时的输出功率变化量。其控制框如图 3 所示。图中: P_e 、 P_{ref} 分别为有功功率的量测值和参考设定值。

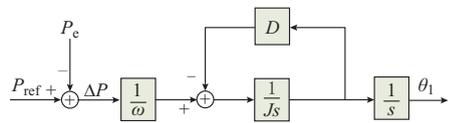


图 3 VSG 有功-频率控制框图
Fig.3 Active power and frequency control of VSG

目前,大多 VSG 技术主要采用上述有功-频率下垂控制方法^[12,14,16]。该方法简单易行,且能够实现多台 VSG 并联运行时的有功功率按容量分配。文献[31]进一步提出在微电网孤岛运行时,将 VSG 分为非调频发电单元和调频发电单元,前者按照功率调度指令发电并参与一次调频,可缓解扰动情况下系统频率的波动;后者为微电网提供参考电压,并利用二次调频实现频率的无差控制。

在此基础上,国内外不少学者还围绕 VSG 有功-频率控制的准确性、频率稳定性与运行经济性等问题提出了相应的控制策略。

在有功功率分配的准确性方面,为减小 VSG 之间的线路阻抗对有功-频率下垂特性的影响,文献[32]在有功-频率下垂表达式中,加入了无功功率项并同时引入有功功率和无功功率的微分项,其中有功功率和无功功率项用来保证稳态特性,微分项用来改善动态特性。这使得并联运行的 VSG 具有更好的功率分配性能和环流抑制能力。

在频率稳定性方面,文献[33]考虑电网故障时的频率控制问题,通过设计级联的频率、相角和直流电压环控制策略,使 VSG 在故障时可为电网提供频率支撑,实现频率快速恢复。针对 VSG 的转子功角振荡可能会造成有功功率波动的问题,文献[34-35]提出 VSG 的功率振荡平抑方法,其基本思想是将 VSG 的有功功率传输方程线性化,并引入线性控制理论,将阻尼因子与转角偏差解耦,以实现有功功率振荡抑制并保证频率稳定。

为提高 VSG 运行的经济性,文献[36]从参数实时优化的角度讨论了其有功-频率控制问题,在保证系统惯性、阻尼效果不变的情况下,以 VSG 直流端电池储能的有功出力最小为优化目标进行关键参数实时调节,减小了 VSG 有功功率控制的成本。

2.2 无功-电压控制

VSG 的无功-电压控制是为了模拟同步发电机的励磁调节功能,用以实现无功功率和电压幅值的下垂特性。无功-电压控制主要根据 VSG 输出电压幅值偏差 ΔU 与无功功率差额 ΔQ 调整输出电压,并采用电压调整系数 k_u 来表征 VSG 的电压调节能力^[12,14,37],其基本控制结构如下。

图中: Q_c 、 Q_{ref} 分别为无功功率的量测值和参考设定值; U 、 U_{ref} 分别为电压幅值的实际值和参考设定值; k_u 和 K 分别为无功-电压下垂系数与积分系数; E 为通过该控制所获取的参考电压幅值,其可与有功-频率控制所获得的角度 θ_1 共同合成 VSG 参

考电压。

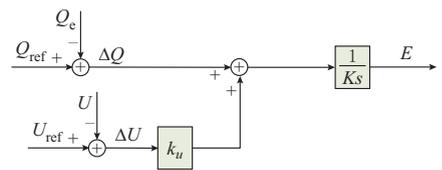


图4 VSG 无功-电压控制框图

Fig.4 Reactive power and voltage control of VSG

类似有功-频率下垂控制,目前较多 VSG 技术多采用无功-电压下垂控制方法来实现多台 VSG 的无功功率按容量分配。

与频率控制不同的是,无功-电压控制易受到线路阻抗、负荷波动等因素影响,使得其控制结果偏离设定的下垂特性,最终导致无功功率无法精确分配。

针对并网工况下的上述问题,文献[38-39]提出的下垂参数自适应、利用虚拟阻抗压降低输出电压跌落、电压自恢复等改进的下垂控制方法同样适用于 VSG 的无功-电压控制,可获得更好的控制效果。

文献[40]针对孤岛运行时有功和无功分量紧密耦合引起的无功功率难以精确分配的问题,基于 VSG 一次电压控制器,根据调度有功功率和无功功率预先估算感应电动势,通过补偿 VSG 固有下垂特性和线路阻抗的电压跌落,从而保证 VSG 按照设定的无功-电压下垂特性运行。在此基础上,亦可设计二次电压控制,用以解决负荷的波动性、一次电压控制的有差性等带来的电压质量问题^[41]。

除上述控制方法外,文献[42]提出了通过指令修正的方法以实现 VSG 输出电压恒定不变的控制目标。其基本思路是通过分析多台 VSG 并联运行时有功功率与无功功率的耦合关系,求得各台无功功率控制指令的修正项,并将此修正项加入至基本的无功-电压控制环节,从而实现 VSG 输出电压恒定。

在 VSG 的无功-电压控制中,由于欠阻尼特性明显而出现的无功功率波动现象也是较为重要的问题。针对此问题,文献[43]设计了 VSG 非线性阻尼控制器,在无功-电压控制环中引入附加励磁控制量,其作用类似于同步发电机的电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS),可有效实现 VSG 电压稳定并抑制系统低频振荡。

3 VSG 稳定分析

VSG 概念提出的初衷之一是解决由于电力系

统电力电子化程度增加而造成系统稳定性减弱的问题。但由于 VSG 与传统的同步发电机并不完全等价,亟须发展针对 VSG 本身以及其接入系统的小信号稳定与暂态稳定分析方法,并提出利用 VSG 灵活可控的优势提高系统稳定性的措施。

3.1 小信号稳定分析

小信号稳定性主要指系统遭受小扰动后保持同步的能力,取决于初始运行状态、系统中各元件联系的紧密程度以及各种控制装置的特性等^[44]。小信号稳定分析在大电网的研究中已经较为成熟,而针对 VSG 的相关研究目前还不多。

VSG 的小信号稳定问题与传统电力系统的小信号稳定问题存在一定差异,其中的难点主要体现在:①VSG 属于电力电子接口,控制参数复杂可变,需定量分析 VSG 运行稳定域与运行参数的关系,以便指导控制器的优化设计;②VSG 对系统小信号稳定性的影响规律尚待厘清,重要状态变量的灵敏度还需要进一步分析。

为分析模型参数与系统稳定性之间的关系,文献[45]建立了 VSG 中逆变器、滤波器以及 VSG 控制器以及负荷的状态空间模型,进而构建了 VSG 的高阶小信号模型,并基于该模型进行了参与因子和根轨迹分析:通过参与因子分析了功率参考值、下垂系数、电压/电流控制器增益等多个状态变量对不同模式的参与程度;并通过根轨迹方法分析了负荷功率变化、有功-频率调节系数以及无功-电压调节系数等参数变化对系统稳定的影响。

为研究模型参数的灵敏度,文献[46]从参数摄动的角度出发,定量分析 VSG 参数摄动对并网功率跟踪的影响,由于实际运行过程中的电感和电阻参数变化幅度不大,其参数摄动对实际并网功率的影响较小;此外,该文还详细分析了虚拟惯量和阻尼参数的影响与整定方法,并指出 VSG 的转动惯量决定了其动态响应过程中的振荡频率,而阻尼决定了其振荡衰减的速率。

针对 VSG 的参数优化设计问题,文献[47]以并网时系统的稳态特性、动态特性以及稳定性为约束条件从开关频率、功率等级等方面分析了系统对运行参数的要求,并采用小信号模型,对所提出的 VSG 控制器参数进行了优化设计,并说明通过合理的设计控制器调频系数,可以扩大参数选择范围,进一步改善系统的动态特性,提高系统的稳定性和鲁棒性。文献[48]进一步考虑并网与自治等工作模式下 VSG 的小信号稳定性,并针对 VSG 控制算法中

相关参数对系统稳定性及动态响应的影响进行了分析,指出 VSG 的惯性时间常数、阻尼系数及无功下垂系数的变化对系统稳定性影响较大,其与系统动态响应、超调量及达到稳定所需时间等性能密切相关。

3.2 暂态稳定分析

暂态稳定是指电力系统遭受严重暂态扰动时保持同步的能力。与小信号稳定分析不同,暂态稳定分析一般难以做线性化处理^[44,49]。暂态稳定与转子功角关系密切,传统同步发电机转子惯性固定,转子角不能瞬时从初始点变化到新的平衡点,当加速面积超过减速面积时,就会发生暂态失稳。然而,VSG 具有很强的可控性,当发生大扰动时,可以迅速改变控制参数以达到新的平衡点。

目前针对 VSG 的暂态稳定分析研究较少,主要采用李雅普诺夫函数法和等面积法分析 VSG 虚拟惯量对系统暂态稳定的影响。文献[34]利用李雅普诺夫函数法,分析了含 VSG 的系统暂态稳定性,并采用 bang-bang 控制,自适应改变 VSG 的惯性参数,以提高暂态稳定。文献[50]利用等面积法分析了暂态过程中的动能与势能,以及加速面积、减速面积与 VSG 控制参数之间的关系,并提出了负惯性(negative moment of inertia, NMI) VSG 的概念,通过转动惯量实时改变的控制技术以增强系统暂态稳定性,且进行了实验验证。文献[51]进一步提出了自适应虚拟转子惯量的 VSG 控制算法,并确定了自适应惯量系数的选取原则,指出要综合考虑系统对于暂态响应超调和整体阻尼的要求,灵活选择惯量系数。

4 VSG 技术典型应用

4.1 VSG 在分布式电源接入中的应用

分布式电源,诸如储能、风电、光伏、电动汽车等,多以逆变器为接口形式接入配电网,这为 VSG 技术提供了良好的应用场景。

在储能系统中,VSG 技术应用的基本思路是根据系统功率波动情况,利用 VSG 技术实时调节储能单元的输出功率,在平抑功率波动的同时还可为系统提供惯性支撑,以维持频率与电压稳定^[13,36,52-54]。此外,考虑到储能单元是 VSG 提供惯量的重要组成,文献[53,55]研究了 VSG 储能单元的充放电优化控制策略,并初步给出了储能单元容量选择方法;文献[56]进一步给出了储能单元容量选择和 VSG 控制参数之间的定量关系,并根据储能单元优化配

置的功率、能量和动态响应时间等指标参数与不同的惯性和阻尼参数的联系,推导了储能单元优化配置的解析设计方法。

在风力发电控制方面,文献[57]提出了基于VSG的电网友好型风电并网系统,将同步逆变器方案应用于永磁同步发电机(PMSG)的背靠背(back-to-back)变换器控制之中,分为转子侧与电网侧两个部分,前者用于实现直流侧电压稳定,后者则用于实现最大风功率跟踪,二者的有机结合实现了“发电机-电动机-发电机”的新型风力发电控制系统,可实现风电的友好并网。

在光伏发电控制方面,通常需在光伏直流侧配置电池储能,并将光-储视为一个整体,对并网逆变器采用基于VSG技术,以实现光伏发电的友好消纳^[37]。

电动汽车作为重要的分布式电源之一,具备调频调压、能量双向流动的特点。文献[58]提出一种基于虚拟同步电动机的电动汽车快速充电解决方案,显著减小了并网电流畸变,并能为系统提供电压和频率支撑。通过将充电桩控制为一个具有同步电机特性的负荷,可以自动参与电网的调频响应。

此外,文献[47,59]进一步提出了基于VSG技术的分布式电源参与微电网频率调节的控制方法,并可在不改变控制结构和控制参数的条件下,用于实现微电网的多模式运行。

需要说明的是,虽然分布式电源接入的载体可能不同,如分布式电源接入微电网或分布式电源接入主动配电网^[3-4,60-62],但二者在底层所依赖的VSG技术是基本相通的。随着智能电网技术的发展,VSG技术在分布式电源接入方面还可能会出现更多新的应用场景。

4.2 VSG在柔性直流输电中的应用

柔性直流输电(VSC-HVDC)是一种基于电压源型换流器、全控型开关器件和脉冲宽度调制的新型直流输电形式,也是远距离大规模海上风电并网的典型结构^[63-64]。虽然直流输电能够解耦陆上和海上两端交流电网,但却带来海上风电场很难为电力系统提供惯性支撑的问题。随着海上风电机组容量不断增加,导致电力系统的“有效惯量”不断减少,严重影响系统安全运行^[65]。

为此,利用VSG可提供系统惯性的特点,文献[66]提出了基于VSG的VSC-HVDC并网控制策略,不仅可以使变流器输出电流更加快速准确地跟踪电网电压相位而实现友好并网,还可以为系统提

供惯性支撑。文献[67]则利用同步逆变器控制技术,提出了基于同步逆变器的直流输电方案(synchronverter-based HVDC,SHVDC),并给出了相关控制参数设计方法,实现了直流输电系统中背靠背变流器的虚拟同步机控制,使得HVDC系统具备了同步机发电机的运行特性。文献[68]根据VSG原理,提出了多端电压源型直流输电系统的通用惯量模拟控制器(inertia emulation controller, INEC),通过利用直流侧电容存储的能量进行能量交换,不仅实现了交直流系统解耦运行,还可为系统提供惯量,提高系统频率稳定性。

5 VSG的关键问题与研究思路

在国家积极推进分布式能源网络与智能电网建设与发展的大背景下,VSG技术一度成为研究热点,并取得了一定的研究进展。与此同时,笔者所在研究团队近年来主要从事微电网与主动配电网技术相关研究。针对VSG技术,主要对不平衡控制、稳定性分析以及协同运行等方面开展了系列理论研究,并在动模实验室搭建了多台VSG并联运行的实验平台,力图进一步推进VSG技术的研究进展。

然而,随着分布式电源渗透率的不断增加,VSG技术也面临着新的挑战与机遇,诸多关键问题值得深入探究。

5.1 VSG协同控制与稳定运行

当多台VSG组网接入配电网时,面临的关键问题是如何在系统动态特征更为复杂的情况下实现VSG之间协同控制,并保证系统的运行稳定性。为此,VSG的协同控制与稳定运行有待进一步研究。

1) VSG协同控制架构与方法

目前VSG并联运行仍基于传统同步发电机固定式的下垂机制,无需通信,但存在局部信息共享困难的问题,如此便会造成全局信息获取不便,难以实现VSG与电网之间的良好互动与协同运行。在今后的研究中,除了需进一步完善VSG的具体控制方法,如不平衡控制、并网预同步控制、并联环流抑制等控制方法,还需研究多VSG之间的协同控制策略。可行思路之一是借鉴微电网运行控制中的多代理分布式理论^[69],将VSG协同运行问题转变为分布式控制问题,进而从VSG的分布式特性出发,提出VSG分布式运行控制架构。此外,还需研究系统中局部约束与全局约束条件下的运行问题,并采用诸如分布式优化^[69]、量子遗传算法^[70]、博弈论^[71]等方法进行分析与求解,以获得各VSG的运行策略,

实现从局部到整体的协同运行。

2) 考虑 VSG 与电网动态特征的稳定运行

现有 VSG 稳定控制主要从设备层关注单个 VSG 的运行稳定性,较少从系统角度考虑稳定问题。VSG 接入电网后,虽可向系统提供惯性支撑,但同时也改变了系统的动力学特性,并增强了其与系统的耦合程度,使得系统稳定控制更为复杂。后续研究中,还可结合系统的非线性与不确定性等动力学特征,并利用 VSG 控制参数灵活可调的特点,设计稳定控制器以提高系统控制运行稳定性。

5.2 VSG 性能分析与评估

VSG 具备同步发电机的运行机制,但在物理上和机理上却与同步发电机存在一定的区别。目前对 VSG 的认识主要停留在其与同步发电机相似性的层面,对 VSG 本身的综合性能理解尚浅,如何分析与评估 VSG 性能是尚需解决的关键问题之一。

1) VSG 多维度性能指标体系建立

VSG 性能指标体系可视为从整体上反映其运行能力的集合。就笔者认知而言,VSG 的虚拟惯量水平、可传输容量、负荷跟踪能力、安全稳定区域等都是其重要性能特征。在 VSG 性能指标体系建立过程中,可优先考虑对上述指标的描述,并给出其计算方法。此外,还可根据发展需求扩充其他指标内容,并根据需求分析、分解和转化等方法给出相应指标的指标边界,进而建立其多维度的性能指标体系。

2) VSG 性能影响因素及评估

VSG 运行性能会受原动机、负荷、电网等因素的影响,这些因素的特征复杂,给 VSG 性能评估带来一定困难。为此,有必要探索 VSG 性能影响因素及评估方法。在后续研究中,在源端,需考虑原动机出力的有限性、时变性与不确定性等特点;在负荷侧,可考虑负荷随机波动性并建立负荷的动态模型;在网侧,需充分考虑配电网较为复杂的电气环境,如单相短路故障、负载波动以及三相不平衡等工况对 VSG 运行性能的影响;充分考虑源-网-荷动态特征的影响,并通过计算与分析所建立的性能指标,有望对 VSG 的性能进行定量刻画与评估。

5.3 VSG 接入标准与管理机制

《关于促进智能电网发展的指导意见》中指出:“将健全广域分布式电源运营管理体系,完善分布式电源调度运行管理模式”^[5]。就 VSG 相关研究而言,当大量的分布式电源以 VSG 形式接入微电网或配电网时,面临的关键问题是 VSG 应以何种标准的接口形式接入,并能方便系统运行管理。因此,

VSG 接口的标准化及 VSG 高渗透率系统的管理机制值得探讨。

1) 融合物理-信息技术的 VSG 标准化接口形式

接口标准化是实现大量分布式电源以 VSG 方式接入电网的重要基础,对系统的建模仿真、分析控制以及运行管理等都具有重要意义。目前 VSG 作为交直流互动的能源处理器,虽具有即插即用的特点,但并未具备标准化的接口,较难在智能微电网或能源互联网中大量应用^[72-73]。为此,在今后的研究中,可从物理与信息角度展开:①研究支持分布式电源与储能设备友好接入的 VSG 物理接口,实现基于 VSG 技术的物理接口支持各种符合相应电气标准的分布式电源的接入;②研究支持各种分布式电源识别与通信的 VSG 通信协议,即通过 VSG 接入的分布式电源对于智能电网或能源互联网而言是可见可控的。此时,VSG 可视为融合了物理-信息技术的智能体,将为实现分布式电源的大量接入与综合管理奠定基础。

2) 基于集中-分散策略的系统管理机制

分布式电源以 VSG 标准化形式接入电网后,虽可与电网进行能量交换,并为系统提供惯量、调峰调频等辅助服务,但是系统的拓扑结构、辅助服务的市场定位与盈利模式等也将随之发生变化。尤其是数量剧增之后,同样存在管理困难的问题;此外,VSG 接入电网后,每台 VSG 或其同盟均有各自的利益追求,彼此之间存在竞争与合作关系,利益分配较为困难。为此,后续研究中可将各 VSG 按区域范围、容量大小进行聚类分析,分为调频式 VSG 机组与非调频式 VSG 机组,采用集中管理、分散自治的策略进行管理;此外,还可将各 VSG 视为交易主体,并根据发电能力、惯性水平、市场价格等,建立 VSG 多主体博弈模型与利益分配规则,以实现各主体效益最大化,同时实现整个系统的高效管理。

6 结语

推动分布式电源的广泛接入和有效互动,是实现能源资源优化配置和能源结构调整的重要举措。VSG 技术融合了电力电子设备的灵活性与同步发电机的运行机制,不仅可实现分布式电源的即插即用与自主运行,还可有效解决系统欠阻尼、低惯性的问题。正因如此,VSG 技术的发展为分布式电源的友好消纳提供了良好途径,并具有广阔的应用前景。

本文主要针对 VSG 的基本原理、控制策略、稳

定分析以及应用场景等方面,综述了各部分的研究现状、关键问题,并探讨了后续可能的研究方向与思路,挂一漏万、不一而足。希望本文工作可为 VSG 技术的发展提供有益参考,不断推进 VSG 技术在智能电网和能源互联网中的广泛应用。

参考文献

- [1] YANG X, SONG Y, WANG G, et al. A comprehensive review on the development of sustainable energy strategy and implementation in China [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2010, 1(2): 57-65.
- [2] LASSETER R H. Microgrids and distributed generation [J]. Journal of Energy Engineering, 2007(133): 144-149.
- [3] LI Qing, XU Zhao, YANG Li. Recent advancements on the development of microgrids [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 206-211.
- [4] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the microgrid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [5] 国家发展改革委、国家能源局关于促进智能电网发展的指导意见[发改运行[2015]1518号][EB/OL].[2015-07-06].http://www.sdpc.gov.cn/gzdt/201507/t20150706_736625.html.
- [6] 王成山,王守相.分布式发电供电系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [7] BARTOSZ W, OMAR A J, 王靖.分布式发电的高覆盖率对电力系统设计和运行的影响分析(英文)[J].电网技术,2009, 33(15):37-46.
BARTOSZ W, OMAR A, WANG J. Impact of high penetration of distributed generation on system design and operations [J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 37-46.
- [8] CARRASCO J M, FRANQUELO L G, BIALASIEWICZ J T, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1002-1016.
- [9] BALAGUERR I J, LEI Q, YANG S, et al. Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 147-157.
- [10] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine [C]// Proceedings of 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, October 9-11, 2007, Barcelona: 1-6.
- [11] DE HAAN K V S W. Virtual synchronous machines (VSG'S) for frequency stabilization [C]// CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution, June 23-24, 2008, Frankfurt, Germany: 1-4.
- [12] 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器电源控制策略[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.
- [13] YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Control strategy for virtual synchronous generator in microgrid [C]// Proceedings of 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, July 6-9, 2011, Weihai, Shandong, China: 1633-1637.
- [14] ZHONG Q, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [15] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. Control system tuning and stability analysis of virtual synchronous machines [C]// Proceedings of 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-19, 2013, Denver, USA: 2664-2671.
- [16] ASHABANI S M, MOHAMED Y A I. A flexible control strategy for grid-connected and islanded microgrids with enhanced stability using nonlinear microgrid stabilizer [J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(3): 1291-1301.
- [17] SAKIMOTO K, MIURA Y, ISE T. Stabilization of a power system with a distributed generator by a virtual synchronous generator function [C]// Proceedings of 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia May 30, 2011-Jun 3, 2011, Jeju, Korea (South): 1498-1505.
- [18] 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,2012,41(3):1-6.
ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation [J]. Journal of Power Supply, 2012, 41(3): 1-6.
- [19] D'ARCO S. Virtual synchronous machines-Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids [C]// Proceedings of 2013 IEEE Grenoble PowerTech, June 16-20, 2013, Grenoble, France: 1-7.
- [20] BEVRANI H. Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014(54): 244-254.
- [21] ZHANG C, ZHONG Q, MENG J, et al. An improved synchronverter model and its dynamic behaviour comparison with synchronous generator [C]// Proceedings of IET 2nd Renewable Power Generation Conference (RPG), September 9-11, 2013, Beijing, China: 1-4.
- [22] 张玉治,张辉,贺大为,等.具有同步发电机特性的微电网逆变器控制[J].电工技术学报,2014,29(7):261-268.

- ZHANG Yuzhi, ZHANG Hui, HE Dawei, et al. Control strategy of micro grid converters with synchronous generator characteristic [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 261-268.
- [23] ZHONG Qingchang, NGUYEN P, MA Zhenyu, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [24] YUKO H, KAZUHIRO A, KAZUSHIGE S, et al. A grid-connected inverter with virtual synchronous generator model of algebraic type [J]. Electrical Engineering in Japan, 2013, 184(4): 10-21.
- [25] WANG Jing, CHANG N, FENG Xiaowei, et al. Design of a generalized control algorithm for parallel inverters for smooth microgrid transition operation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 4900-4914.
- [26] 张兴,汪杨俊,余畅舟,等.采用PI+重复控制的并网逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5287-5295.
ZHANG Xing, WANG Yangjun, YU Changzhou, et al. Mechanism of the control coupling and suppression strategy using PI and repetitive control in grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5287-5295.
- [27] 周洁,罗安,陈燕东,等.低压微电网多逆变器并联下的电压不平衡补偿方法[J].电网技术,2014,38(2):412-418.
ZHOU Jie, LUO An, CHEN Yandong, et al. Voltage unbalance compensation for low-voltage microgrid with multi parallelly connected inverters[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 412-418.
- [28] 罗德荣,姬小豪,黄晟,等.电压型PWM整流器模型预测直接功率控制[J].电网技术,2014,38(11):3109-3114.
LUO Derong, JI Xiaohao, HUANG Sheng, et al. Model predictive direct power control for three-phase voltage source PWM rectifiers[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3109-3114.
- [29] 戴珂,王舰威,陈睿,等.两种典型的三相SPWM逆变器电路比较[J].电工技术学报,2012,27(2):82-88.
DAI Ke, WANG Jianwei, CHEN Rui, et al. Comparison research on two typical three-phase SPWM inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 82-88.
- [30] 周卫平,吴正国,唐劲松,等.SVPWM的等效算法及SVPWM与SPWM的本质联系[J].中国电机工程学报,2006,26(2):133-137.
ZHOU Weiping, WU Zhengguo, TANG Jinsong, et al. A novel algorithm of SVPWM and the study on the essential relationship between SVPWM and SPWM[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 133-137.
- [31] 杨向真,苏建徽,丁明,等.微电网孤岛运行时的频率控制策略[J].电网技术,2010,34(1):164-168.
YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168.
- [32] 刘喜梅,赵倩,姚致清.基于改进下垂算法的同步逆变器并联控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(14):103-108.
LIU Ximei, ZHAO Qian, YAO Zhiqing. Research on control strategy of parallel synchronous inverters based on improved droop algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 103-108.
- [33] ASHABANI M, MOHAMED Y A R. I. Novel comprehensive control framework for incorporating VSCs to smart power grids using bidirectional synchronous-VSC[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(2): 943-957.
- [34] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [35] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [36] TORRES L M A, LOPES L A C, MORAN T L A, et al. Self-tuning virtual synchronous machine: a control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2014, 29(4): 833-840.
- [37] 张卫红,佟宗超,许鑫.基于VSG的分布式光伏系统运行与控制[J].电力电子技术,2013,47(8):38-40.
ZHANG Weihong, TONG Zongchao, XU Xin. Control and operation of distributed photovoltaic system based on virtual synchronous generator[J]. Power Electronics, 2013, 47(8): 38-40.
- [38] 荆龙,黄杏,吴学智.改进型微源下垂控制策略研究[J].电工技术学报,2014,29(2):145-152.
JING Long, HUANG Xing, WU Xuezhi. Research on improved microsource droop control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 145-152.
- [39] 郑永伟,陈民铀,李闯,等.自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(7):6-11.
ZHENG Yongwei, CHEN Minyou, LI Chuang, et al. A microgrid control strategy based on adaptive drooping coefficient adjustment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 6-11.
- [40] DU Y, SU J, SHI Y. A unified power controller for photovoltaic generators in microgrid[C]// Proceedings of 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, July 6-9, 2011, Weihai, China: 1121-1125.
- [41] 杨向真,苏建徽,丁明,等.面向多逆变器的微电网电压控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(7):7-13.
YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Voltage control strategies for microgrid with multiple inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 7-13.

- [42] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Reactive power control for load sharing with virtual synchronous generator control[C]// Proceedings of 2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, June 2-5, 2012, Harbin, China; 846-853.
- [43] ASHABANI M, MOHAMED Y A R I. Integrating VSCs to weak grids by nonlinear power damping controller with self-synchronization capability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(2): 805-814.
- [44] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [45] ARCO S D, SUUL J A, FOSSO O B. A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in Smart Grids [J]. Electric Power Systems Research, 2015(122): 180-197.
- [46] 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.
LÜ 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.
- [47] 杜燕, 苏建徽, 张榴晨, 等. 一种模式自适应的微网调频控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 67-75.
DU Yan, SU Jianhui, ZHANG Liuchen, et al. A mode adaptive frequency controller for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 67-75.
- [48] 孟建辉, 王毅, 石新春, 等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变器控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 1-10.
MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.
- [49] GRIGSBY L L. Power system stability and control[M]. CRC Press Inc: 3rd Revised edition, 2012.
- [50] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adoptive virtual inertia [C]// Proceedings of 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-19, 2013, Denver, USA; 4546-4552.
- [51] 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 Huang, ZENG Zheng, et al. A novel control method of VSG with adaptive virtual rotor inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [52] DRIESEN J, VISSCHER K. Virtual synchronous generators [C]// Proceedings of 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA; 1-3.
- [53] VASSILAKIS A, KOTSAMPOPOULOS P, HATZIARGYRIOU N, et al. A battery energy storage based virtual synchronous generator[C]// Proceedings of 2013 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control-IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid, August 25-30, 2013, Rethymno, Greece; 1-6.
- [54] MIGUEL T, LUIZ A C L. Virtual synchronous generator: a control strategy to improve dynamic frequency control in autonomous power systems [J]. Energy and Power Engineering, 2013, 5(2): 32-38.
- [55] ALBU M, VISSCHER K, CREANGA D, et al. Storage selection for DG applications containing virtual synchronous generators[C]// Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech, June 28-July 2, 2009, Bucharest, Romania; 6p.
- [56] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 22-31.
ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 22-31.
- [57] ZHONG Qingchang MA Zhenyu, MING Wenlong. Grid-friendly wind power systems based on the synchronverter technology [J]. Energy Conversion and Management, 2015(89): 719-726.
- [58] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287-4294.
LÜ Zhipeng, LIANG Ying, ZENG Zheng, et al. Virtual synchronous motor based control scheme of fast charger for electric vehicle application[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4287-4294.
- [59] DU Y, GUERRERO J M, CHEN L, et al. Modeling, analysis, and design of a frequency-droop-based virtual synchronous generator for microgrid applications [C]// Proceedings of 2013 IEEE ECCE Asia Downunder, June 3-6, 2013, Melbourne, Australia; 634-649.
- [60] D'ADAMO C, JUPE S, ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks: update of CIGRE C6.11 working group activities [C]// CIRED 2009 (20th International Conference on Electricity Distribution), June 8-11, 2009, Prague, Czech; 1-4.
- [61] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.
- [62] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-19.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-19.
- [63] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC

- technology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [64] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [65] 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.
- [66] 刘喜梅,陈朋,张群,等. 同步发电机模型在MMC并网控制中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 83-87.
LIU Ximei, CHEN Peng, ZHANG Qun, et al. Application of synchronous generator's model in grid-connected control of MMC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 83-87.
- [67] AOUBI R, MARINESCU B, BEN KILANI K, et al. Synchronverter-based emulation and control of HVDC transmission[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2015(99): 1-9.
- [68] ZHU J, GUERRERO J M, HUNG W. Generic inertia emulation controller for multi-terminal voltage-source-converter high voltage direct current systems [J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(7): 740-748.
- [69] 喻磊. 基于多代理理论的微电网分布式优化控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [70] 王瑞琪. 分布式发电与微网系统多目标优化设计与协调控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [71] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5509-5517.
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5509-5517.
- [72] HUANG A Q, BALIGA J. FREEDM system: role of power electronics and power semiconductors in developing an energy internet[C]// Proceedings of 21st International Symposium on Power Semi-conductor Devices & IC's, June 15-17, 2009, Consejo, Spain: 9-12.
- [73] 董朝阳, 赵俊华, 文福松, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.

郑天文(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 分布式发电系统稳定分析与控制技术。E-mail: tianwenscu@163.com

陈来军(1984—), 男, 通信作者, 副教授, 主要研究方向: 新能源发电与储能技术。E-mail: chenlaijun@tsinghua.edu.cn

陈天一(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 新能源发电与并网技术。E-mail: chwangch@sina.com

(编辑 王志鸿)

Review and Prospect of Virtual Synchronous Generator Technologies

ZHENG Tianwen^{1,2}, CHEN Laijun^{1,2,3}, CHEN Tianyi^{1,2}, MEI Shengwei^{1,2,3}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. New Energy (Photovoltaic) Industry Research Center, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: With the increased penetration of distributed generation, the power grid will gradually develop into a converter-dominant network with low inertia and under-damped, which leads to stability problems becoming more and more serious. Virtual synchronous generator (VSG) control technologies can mimic the mechanism of synchronous generator to improve the system stability, which earns it more concern and wide application. Firstly, the architecture and principles of the virtual synchronous generator control system are described, and then some key issues about VSG modeling, operation control, stability analysis and typical application are deeply reviewed. Many potential research hot points and solutions about VSG are also proposed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51321005, No. 51567021), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050204) and Qinghai Province Key Laboratory of Photovoltaic Power Generation and Grid-connected Technology (No. 2014-Z-Y34A).

Key words: distributed generator; virtual synchronous generator; virtual inertia; P - f control; Q - V control