

[清洁能源]

虚拟同步机技术在电力系统中的应用

文/国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司 倪 坤

虚拟同步机技术以其有助于清洁能源融合电网、改善现有并网技术和规避潜在电网安全的特性成为目前的研究热点。论述了近年来国内外的研究成果，介绍了虚拟同步机技术的基本概念、分类以及数学模型，对虚拟同步机技术在并网、调频和虚拟惯量等领域的应用进行了综述，阐述了现有研究中对其稳定性分析的方法。最后总结了当前研究存在的问题和发展前景。

随着能源问题的日益加剧，传统的化石能源已经无法满足人类可持续发展的要求，全球范围内能源危机和环境问题日益突出。风、光等可再生能源得到了快速发展，分布式发电技术和微电网技术得到越来越多的关注，作为分布式资源与电网的纽带，并网逆变器的功能被深入挖掘并肯定了其有益的作用。

利用分布式电源可以就近并入电网，改善电网末端电能质量，缓解用电压力，提高电网抗灾能力，保证对重要用户的可靠供电。但是随着分布式发电技术的大力发展，以逆变器为接口的分布式电源比例随之增大，并取代了一部分常规电源，给电力系统稳定运行带来了新的挑战。一方面，由于风速和光照强度的非线性、随机性和不可控性等特征，频繁出现的风光电场事故使得大型风光电场的并网小时数偏低，大量弃风、弃光现象不但影响投资成本的回收，还对电力系统的稳定运行造成威胁；另一方面，逆变器属于静止元件，大多采用数字电路进行控制，响应速度快，几乎没有转动惯量，且不参与电网的调频和调压，无法为电网提供必要的电压和频率支撑，更无法为稳定性相对较差的微电网提供必要的阻尼作用，缺乏一种与电网有效“同步”的机制。

因此，分布式能源的大量接入会造成电力系统等效转动惯量降低，限制了电力系统应对功率缺额和功率波动的能力，对电力系统安全、稳定、优质和高效运行带来了巨大的挑战。

为了应对大量分布式并网发电单元对配电网的冲击，保证电力系统的安全稳定运行，国家能源局发布了《关于促进智能电网发展的指导意见》，其中指出“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、分布式能源广泛接入要求”。在清洁能源大量接入的条件下，并网设备应逐步摆脱“只管发电，不管电网”的思路，只有电网安全稳定，清洁能源才能提升其自身的生存能力，清洁能源应依托灵活可控的电力电子技术，增强服务电网的能力，共同为维护当前电网安全稳定做出贡献。

为了改善分布式电源在电力系统中的特性，一些研究人员将传统同步发电机的特性引入到逆变器控制中，通过适当的控制使得分布式逆变电源从外特性上具有与同步发电机相同或相似的频率和电压特性，能方便地将一些传统电网的运行控制策略移植到分布式发电和微电网中。基于该思想，有学者提出，在并网逆变器的功率外环中引入类似于同步发电机的电压和频率调差特性，

并给出了一些并网逆变器的下垂控制策略。然而,基于下垂控制的一些方法只是针对同步发电机下垂外特性来做适当的近似,还不足以模拟同步发电机的真实运行特性。

1997年,IEEE Task Force工作组A—A.Edris等人首次提出了静止同步机的概念。之后,德国劳斯克塔工业大学的Beck教授率先提出虚拟同步机概念,通过模拟同步发电机数学模型,虚拟了同步发电机的转动惯量与阻尼特性。2009年钟庆昌教授提出“Synchronverter”概念,通过模拟同步发电机的二阶模型,较为全面地模拟了同步发电机的电磁特性、转子惯性、调频和调压特性;此后,国内外研究人员对虚拟同步机技术展开了深入的研究,并开始首次将虚拟同步机技术引入光伏逆变器,虚拟同步机技术得到飞速发展。自此,国内外学者在虚拟同步机技术的仿真建模、有功/转矩控制、无功/电压控制、惯量阻尼特性、多机并联和稳定性分析等方面开展了大量的研究工作,证实了虚拟同步机技术在清洁能源并网,尤其是分布式发电中应用具有广泛的应用前景。

虚拟同步机技术

虚拟同步机技术通常是指电力电子变流器的控制环节采用同步发电机的机电暂态方程,使采用该技术并网运行的装置具有同步机组并网运行的惯性、阻尼特性、有功调频和无功调压特性等运行外特性的技术。虚拟同步机技术在控制环节引入同步机转子运动与电磁暂态方程,可以等效为功角和幅值均可控的电压源,通过改变电压相角调节有功功率输出,改变电压幅值调节无功功率输出。

1. 虚拟同步机技术分类

根据其应用对象的不同,虚拟同步机分为清洁能源虚拟同步机与负荷虚拟同步机。清洁能源虚拟同步机包括风机虚拟同步发电机、光伏虚拟同步发电机等应用虚拟同步机技术的分布式发电或者微网单元,负荷虚拟同步机包括采用虚拟同步机技术的输配电单元或者各类用电设备,例如柔性直流输电、含整流器的电动汽车充电桩、变频设备和电子产品等。

根据其应用范围的不同,虚拟同步机可用于分布式发电系统的并网、参与电网调频和为电网提供虚拟惯量等方面,并网包括新能源并网如风

电并网、光伏并网和电动汽车并网等;参与电网调频包含电网一次调频和二次调频;为电网提供虚拟惯量利用虚拟同步机的参数不受物理特性的约束,可以动态调节,控制灵活的特点,有利于电力系统安全运行。

2. 虚拟同步机技术数学模型

虚拟同步机技术通过引入同步发电机机电暂态方程建模,实现对电磁和机械运动特性的模拟。虚拟同步机技术的核心是电源的控制环节采用同步发电机的转子运动方程和定子电气方程,完成机械部分和电磁部分建模,以模拟转动惯量与电磁暂态特征,并检测电网频率和电压变化,依据一次调频和励磁控制算法从外特性上模拟有功调频和无功调压过程。

虚拟同步机技术的应用

1. 并网

风能、光能等新能源作为洁净的可再生能源,符合环境保护计划的要求,在世界范围内得到飞速发展。但是由于风光等具有随机性和间歇性,随着电网中风能、光能等装机容量所占的比例逐步提高,其对系统的稳定性造成的影响也逐渐加大。虚拟同步机技术能够为风能、光伏等新能源的并网提供电网友好的接口,实现友好接入。

在风电并网中,风机虚拟同步发电机惯量的模拟主要靠风机叶轮转动惯量实现,与常规风机相比,主电路基本不变,其控制环节采用虚拟同步机技术。

应用虚拟同步机技术的光伏并网逆变器,通常安装在光伏阵列的直流汇集出口处。与常规光伏相比,其控制环节模拟传统发电机的外特性,根据应用场景的不同,有时需要增加储能单元。在光伏并网中,早期光伏系统设计的虚拟同步机方案将光-储结合结构作为直流侧,其性能的实现仅需要控制逆变器模拟同步机特性即可,策略简单,但硬件结构复杂、不灵活。

此外,虚拟同步机技术还可以应用于电动汽车并网中。

2. 调频

在风力发电、光伏发电和微电网等系统中,引入虚拟同步发电机技术的逆变器控制方法,在抑制频率的快速变化方面具有良好的效果。结合对发电机一次调频动作的模拟,即虚拟同步机技

术的有功-频率特性,能够有效降低系统频率的稳态偏移,这对调频控制而言极具借鉴价值,可以有效消除分布式电源的接入对电网频率动、稳态响应方面的不利影响。

国内外学者对于虚拟同步机技术在分布式电源和微电网调频中的应用展开多方面的研究。应用虚拟同步机技术中的有功-频率特性,可以解决一次调频中的功率波动问题。

3. 虚拟惯性

虚拟同步机控制是在传统下垂控制的基础上加入转子运动方程来模拟转子惯性和阻尼特性,简言之,它是具有转子惯性的下垂控制。虚拟同步机控制技术模拟同步发电机的转子惯性和阻尼特性,可改善逆变器运行特性,能够一定程度上抵御负载扰动,其中,转动惯量控制使频率变化具有一定的过渡时间,赋予逆变器类似同步发电机的转子惯性。

虚拟同步机技术与传统实际的同步发电机相比,其优势是具备四象限控制及有功/无功解耦控制的能力,转子运动方程式的参数都是虚拟量,不受物理特性的约束,可以实现动态调节,其控制与传统电源相比更加灵活。

稳定性分析

在稳定性分析方面,由于机械与电磁方程上的相似性,虚拟同步机在模拟传统同步发电机惯量与阻尼特性的同时,也会引入传统同步发电机的功率振荡问题。

目前有关对虚拟同步机进行稳定性分析的研究较少,在现有国内外文献中,其稳定性分析方法有小信号分析法、功角曲线法、能量函数法以及李雅普诺夫稳定性分析法。日本大阪大学Toshifumi教授通过小信号分析证明,尽管在频率稳定性方面虚拟同步机控制策略优于传统下垂法,然而却更易出现低频振荡功角稳定性分析现象,通过建立工频小信号模型,可给出基于系统截止频率和相角裕度的虚拟同步机参数设计方案。

虚拟同步机接入电网提供惯性支撑的同时也改变了系统的动力学特征,控制环路的多时间尺度使得参数设计和稳定性分析更为复杂,特别是在参数自适应控制情况下的大范围变动、限幅设计和控制系统参数等因素均有可能影响稳定性,需要更为全面的理论研究。

当前存在问题

1. 短路问题

虚拟同步机技术主要应用于电力电子器件的控制中,由于现有技术条件下,电力电子器件过流特性与传统的同步机相比,难以支撑较大的短路电流,一旦外界发生故障引起电力电子器件短路,会使得整个变流器发生崩溃,不利于电网的稳定运行。

2. 振荡问题

虚拟同步机具有与传统同步机类似的机电暂态特性,现有的虚拟同步机技术的数学模型一般采用同步机的二阶模型,其参数的选取范围很窄。一旦参数采取不当,极易造成功角振荡,且振荡过程受到运行状态的影响,较为复杂。

3. 控制参数整定问题

虚拟同步机的参数配置较为复杂,既可等效为电压源也可控制为电流源,当等效为电压源时为开环控制,不利于整个系统的稳定运行;当等效为电流源时,则面临关联耦合和互相激励难题。

4. 配套测试规范量化指标不清晰

虽然微网应用可有效体现虚拟同步机的有益作用,但更多的应用场合为集群接入电网或电站应用。这两种应用均难以测试,对电网的有益作用暂时无法量化。

结束语

随着电力系统的电力电子化的程度不断提高以及新能源分布式发电的不断发展,虚拟同步机技术为解决惯量缺乏、阻尼下降和电网安全稳定裕度减小等问题提供了新的思路,其在并网、调频和为电网提供虚拟惯量等方面的优良特性使其具有广阔的应用前景和提升空间。

本文针对虚拟同步机控制技术,对虚拟同步机控制技术在并网、调频和虚拟惯量等领域的应用进行了综述,探讨了虚拟同步机控制技术在降低大规模新能源分散的接入对电网的冲击,提高电力系统稳定运行的有益作用,同时列举了现有研究中对其稳定性分析的方法,对虚拟同步机控制技术研究具有一定的指导意义。EA

(收稿日期: 2019.04.19)

(编辑: 朱金凤)