

虚拟电机技术应用前景和发展方向

孔祥平¹, 冯畅², 丁昊³, 史明明¹, 袁宇波¹, 张宸宇¹

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 南京磐能电力科技股份有限公司, 江苏 南京 210031; 3. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

摘要:随着高压大容量电力电子技术的迅速发展,越来越多的电力电子设备将投入运行,电力电子化已成为电力系统发展的必然趋势。但是,电力系统电力电子化程度的不断加深使系统相对惯量、阻尼下降,不利于电力系统的安全稳定运行。虚拟电机技术可以使电力电子设备模拟传统旋转电机惯量和阻尼特性,解决电力电子化电力系统所面临的安全稳定问题。文中主要介绍了虚拟同步电机和虚拟直流电机技术的基本原理,并描绘了虚拟电机技术在光伏和风力发电、电力电子式变压器、柔性交直流输电和负荷响应控制等方面的应用前景,最后对虚拟电机技术的发展方向进行了探讨。

关键词:电力电子化电力系统;虚拟电机;虚拟惯量;阻尼特性

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)05-0035-10

0 引言

随着高压大容量电力电子技术的迅速发展,电力电子设备在电力系统发电、输电和配用电等环节中得到了广泛的应用,主要体现在以下几个方面:(1)发电。风电、光伏等新型发电技术几乎都需要依赖电力电子换流器接入电网。基于“经济-能源-环境”协调发展的战略需求,可再生能源发电占比将不断提高,并逐步取代传统火力发电^[1,2]。(2)输配电。传统高压直流输电逐渐成为远距离、大容量电力输送的常规手段^[3],而新型柔性直流输电也在区域电网互联、海上风电并网等领域得到工程应用^[4]。基于电力电子换流器的柔性交流输电技术也越来越普遍地得到应用^[5]。(3)配用电。分布式电源、储能、电动汽车及其他电力电子设备大量接入,固态照明、变频调速等节能技术将使大多数常规负载电力电子化^[6]。

同时,作为由分布式电源、储能系统、能量转换装置、监控和保护装置及负荷等汇集而成的小型发、配、用电系统,交、直流微电网可以作为独立运行的自治区域接入配电系统。既可以并网运行,也可以孤立运行,是提高对分布式电源的接纳能力和利用效率的一个有效途径^[7,8]。因此,交、直流微电网技术得到了快速的发展,并将逐步得到应用。

电力电子技术的广泛应用极大地完善了电网性能,提高了电网运行效率,满足了电网对自动化

和信息化的巨大需求。在加快智能电网建设步伐的今天,越来越多的电力电子设备将投入运行,电力电子化已成为电力系统发展的必然趋势。

在传统电力系统中,同步电机、直流电机的转子具有机械转动惯量,蕴含大量动能,在电网发生扰动或故障时,能够利用转子的动能与电网进行能量交换,以维持电网的稳定性。并且,旋转电机的阻尼特性也可抑制电网的频率振荡^[9]。然而,相对于传统电机,电力电子设备的响应速度非常快,且自身没有传统电机所固有的旋转惯量和阻尼分量,因此电力电子化的电力系统中大量接入的几乎无惯量和阻尼的电力电子设备给电力系统的安全稳定运行带来了巨大的挑战^[10]。

虚拟电机技术是一种使得柔性交直流输电设备、可再生能源发电、电动汽车、储能等电力电子设备可以模拟出类似旋转电机所具有的旋转惯量和阻尼特性的换流器控制技术^[10],为解决电力系统电力电子化程度不断加深所面临的一系列挑战提供了新的思路和解决方案。本文将介绍虚拟电机技术的基本原理,分析虚拟电机技术的典型应用场景,并进一步展望虚拟电机技术的发展方向。

1 虚拟电机技术的基本原理

1.1 传统旋转电机的惯性和阻尼

电动机可以认为是发电机的一种“逆变换”。因此,下文主要以发电机为例对传统旋转电机的惯性和阻尼进行介绍。

同步发电机与直流发电机的转子机械特性方程相同,如式(1)所示。

收稿日期:2017-04-07;修回日期:2017-05-23

基金项目:国家电网公司科技项目(适应高渗透率分布式电源接入的配电网继电保护技术研究)

$$\begin{cases} T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D\Delta\omega = J \frac{d\Delta\omega}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_m, T_e 分别为机械转矩和电磁转矩; P_m, P_e 分别为机械功率和电磁功率; D 为阻尼系数; J 为转子转动惯量; θ 为电角度; ω 为实际电角速度; $\Delta\omega = \omega - \omega_n$ 为电角速度差; ω_n 为额定电角速度。

从式(1)可以看出, 由于转子运动方程中转动惯量 J 和阻尼系数 D 的存在, 传统旋转电机在电网电压、频率扰动以及负荷波动过程中具有对机械惯性和阻尼功率振荡的能力, 有利于电力系统的安全稳定运行。

1.2 虚拟同步发电机技术

以光伏逆变电源为例, 介绍虚拟同步发电机(VSG)的结构框架和控制策略。逆变电源和传统同步发电机的对应关系如图1所示。

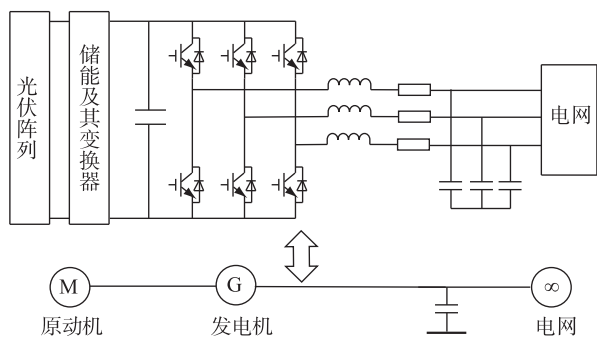


图1 光伏逆变电源与同步发电机之间的对应关系

Fig.1 Relationship between PV inverter and synchronous generator

对比图1所示, 光伏逆变电源和同步发电机之间存在一一对应的关系: 光伏阵列可以等效为同步发电机的原动机; 储能及其双向变换器对应原动机和同步发电机的转动惯量; 三相两电平逆变器对应同步发电机的机电能量转换过程; 逆变器桥臂中点的平均输出电压可以等效为同步发电机的内电势; 逆变器滤波电感和寄生电阻可以分别等效为同步发电机的定子电感和电阻^[12-14]。

为了使得光伏逆变电源模拟出传统旋转电机的惯性和阻尼, 其VSG控制策略如图2所示^[10, 12-22]。

在图2中, P_{set}, Q_{set} 分别为有功功率和无功功率的给定; P_{fed} 和 Q_{fed} 分别为有功功率和无功功率的反馈(即实测值); D_p, D_q 分别为虚拟的频率下垂系数和电压下垂系数; ω 为VSG的角频率; ω_n 为额定角频率; U_n 为额定电压有效值; U_{fed} 为VSG的实测机端电压; J 为虚拟转动惯量; θ, E_m 分别为三相调制波的相位和幅值。

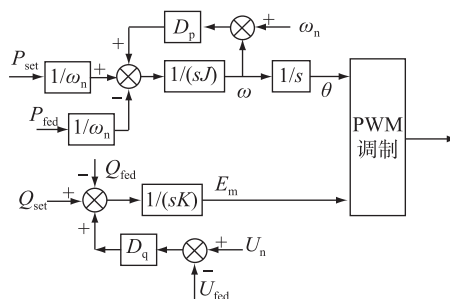


图2 VSG控制策略

Fig.2 Control diagram of VSG

传统同步发电机通过对机械转矩的调节, 调节发电机的有功输出, 从而实现对电网频率偏差的响应; 通过调节励磁调节其无功输出及机端电压。相对应地, 在图2中, 可以通过对式(2)中VSG的虚拟机械转矩 $T_{m_virtual}$ 的调节, 实现光伏逆变电源对电网频率的响应。

$$T_{m_virtual} = \frac{P_{set}}{\omega_n} + D_p(\omega_n - \omega) \quad (2)$$

类似地, 可以通过调节VSG模型的虚拟电势 E_m 来调节机端电压和无功功率。

2.2 虚拟直流发电机技术

以光伏直流电源为例, 介绍虚拟直流发电机(VDCG)的结构框架和控制策略。光伏直流电源^[23]和传统直流发电机之间的对应关系如图3所示。

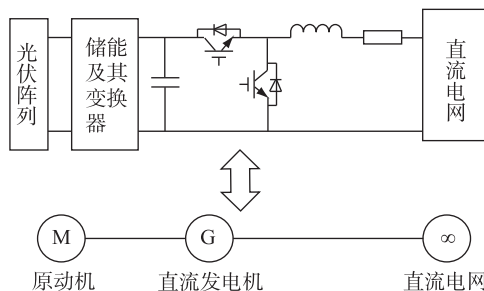


图3 光伏直流电源与直流发电机之间的对应关系

Fig.3 Relationship between PV DC/DC converter and DC generator

对比图3所示, 光伏直流电源和直流发电机之间存在一一对应的关系: 光伏阵列可以等效为直流发电机的原动机; 储能及其双向变换器对应原动机和直流发电机的转动惯量; DC/DC换流器对应直流发电机的机电能量转换过程; 换流器输出电压可以等效为直流发电机的感应电动势; 滤波电感和寄生电阻可以分别等效为直流发电机的电枢电感和电阻。

为了使得光伏直流电源模拟出传统旋转电机的惯性和阻尼, 其VDCG控制策略如图4所示。

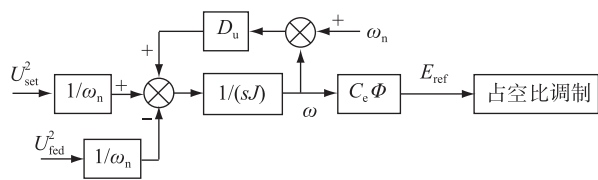


图4 VDCG 控制策略

Fig.4 Control diagram of VDCG

在图4中, U_{set} 为机端电压的给定; D_u 为虚拟下垂系数; Φ 为磁链; E_{ref} 为感应电动势的参考值。

上述 VSG 技术和 VDCG 技术均是针对电源提出的虚拟发电机技术, 以使得基于电力电子器件的电源可以模拟传统旋转发电机的惯性和阻尼特性。同样的, 为了使基于电力电子器件的可调负荷可以参与电网交互、响应电网电压和频率扰动、提高电网稳定性, 可以采取相应的虚拟电动机技术, 其基本原理与虚拟发电机技术类似, 仅在具体实现上(如: 在虚拟电动机技术中, 模拟调速系统性能时应为 $T_m - T_e$) 存在一定区别, 不再赘述。

虚拟发电机技术和虚拟电动机技术统称为虚拟电机技术。

2 虚拟电机技术的应用前景

虚拟电机技术可以使得基于电力电子器件的电源和可控负荷模拟出传统旋转电机的惯性和阻尼特性, 从而有效地响应电网电压和频率波动, 提高电网的稳定性。因此, 在电力系统电力电子化程度日益加深的未来, 虚拟电机技术具有广阔的应用前景。

2.1 光伏电源的虚拟同步发电机技术

一方面, 受外界光照强度变化的影响, 在最大功率跟踪(MPPT)控制策略下的光伏电源出力具有明显的间歇性和随机性。不仅会对电网电压稳定性带来不利的影响, 也会引起电网频率的波动^[24], 甚至可能会导致电力系统崩溃, 造成大面积停电事故。另一方面, 光伏电源通过逆变器与电网接口, 在常规控制策略下, 严格跟踪电网频率, 且响应迅速, 缺乏传统同步发电机所具有的惯量和阻尼特性^[25, 26]。随着并网容量的不断增长, 尤其是应用于微电网这种容量较小的系统中时, 光伏电源的接入将导致电网动态特性变差, 稳定裕度降低。

针对此, 国内外学者提出了多种光伏电源的 VSG 控制方案^[10, 12-22, 27-31], 其虚拟惯量和阻尼的实现原理大体与图2相同。VSG 使得光伏电源可以模拟出同步发电机特性, 从而有效应对光伏电源大规模接入带来的电网安全隐患问题, 这对于光伏发

电技术的发展和应用具有重要意义。

为了模拟传统同步发电机的惯量, 不具备储能特征的光伏电源需要配置一定容量的储能装置。对于分布式光伏电源, 可在其直流母线或并网出口处配置储能装置; 对于集中式光伏电站, 为了提高 VSG 改造的经济性和可靠性, 应在并网出口处集中配置储能装置。储能装置不仅可以提供光伏阵列所不能提供的差额功率, 实现 VSG 控制, 也可以平抑光伏电源的功率波动。

2.2 风电机组的虚拟惯量和阻尼控制

目前风电场中的主力机型——双馈感应发电机(DFIG)和直驱永磁风力发电机(PMSG)的 MPPT 控制策略使得风力机的转速和电网频率之间不再存在耦合关系。当电网有功功率和频率扰动时, 风电机组仍然遵循 MPPT 的控制指令向电网输送功率, 不能响应电网的动态变化, 无法提供惯性支持^[32]。同时, 风电机组的有功功率输出也对电网功率振荡没有任何响应措施, 缺乏对系统功率振荡的抑制能力。因此, 国内外的风电场中不同程度和不同类型的(次同步、超同步)振荡问题时有发生, 特别是在风电渗透率较高的区域电网中尤为突出。通过改进现有风电机组的控制策略, 增加其惯量和阻尼特性, 对风电渗透率较高的区域电网的安全运行具有重要意义。

国内外学者对 DFIG 和 PMSG 的虚拟惯量控制开展了研究, 提出了基于 MPPT 的附加惯量控制^[32-35]和基于 MPPT 曲线优化的虚拟惯量控制^[36-38]等多种实现方案, 使得风电机组可以根据电网频率变化来释放或储存转子动能, 从而为电网有功扰动提供动态频率支撑, 改善风电场接入电网后降低系统惯量的不利影响。针对上述控制策略中风电机组在提供动态频率支撑的同时无法实现 MPPT 的问题, 文献[39]建议在风电场并网处安装储能装置, 并提出利用储能装置补偿风电场惯量的控制策略。文献[40, 41]提出了一种风电机组的基于有功、无功附加控制的阻尼控制策略, 可使系统功率振荡迅速衰减, 改善系统的阻尼特性。进一步地, 文献[42, 43]分别提出了包含虚拟惯量和阻尼控制在内的风电机组综合电力系统稳定器(PSS)控制策略和 DFIG 的虚拟同步发电机控制, 同时模拟了传统同步发电机组的惯量和阻尼特性。

2.3 电力电子式变压器的虚拟电机控制

文中将电力电子变压器(PET)^[44]和 DC/DC 直流变压器^[45]及能量路由器^[46]等统一定义为电力电子式变压器。电力电子式变压器可以整合各种交

直流分布式电源、储能和负荷,具有更加灵活的输电方式,实现更高的电力系统安全稳定运行。因此,电力电子式变压器可以满足智能电网的各种新要求,在交直流混联电压和能源互联网及直流电网中具有广阔的应用前景^[47]。

电力电子式变压器是实现电能转换和分配的核心器件,可有效地增强其惯量和阻尼特性,有利于提高电力电子化电力系统的安全稳定运行能力。以能源路由器为例,文献[48]不仅提出了一种交直流混合、工频隔离、交直流模块化的能量路由器拓扑结构,还提出了交流侧接口的VSG和直流侧接口的VDCG控制策略。基于所提出的虚拟电机控制策略,能量路由器能够虚拟传统电网中的惯量和阻尼,提升系统的稳定性;所提出的VDCG控制策略能有效地实现混合直流接口(Boost型和Buck-Boost型)的能量分配控制。

2.4 虚拟电机技术在柔性交直流输电中的应用

2.4.1 柔性直流输电

随着高压大功率绝缘栅双极型晶体管、多电平拓扑结构和控制技术的发展和成熟,基于电压源换流器的柔性直流输电技术得到了迅猛发展。与传统直流输电技术相比,柔性直流输电技术具有可独立调节有功和无功功率、无需滤波及无功补偿设备、可向无源负荷供电、潮流翻转时电压极性不改变等优势。因此,柔性直流输电在海上风电并网、多端直流输电、直流电网中得到了广泛应用,国内外均有大量已投运的柔性直流输电工程^[49, 50]。

然而,柔性直流输电使得外部的两端或多端交流电网之间实现了动态解耦,导致外部交流电网之间无法相互提供惯量和阻尼支撑,不利于整个电力系统的安全稳定运行。

针对此,文献[51]提出一种柔性直流输电系统联网和孤岛运行的通用控制策略,可实现交流侧频率-有功功率和直流侧有功功率-直流电压的下垂控制,且可与交流电网的一次调频和二次调频相配合。文献[52, 53]分别提出了多端柔性直流输电和双端柔性直流输电的VSG控制方案,有效提高了系统动态响应性能(阻尼增大、超调减小)和稳定裕度。文献[54]针对海上风电场采用柔性直流输电接入陆上电网的技术方案,提出利用直流侧电容和风电机组转子动能模拟同步发电机惯量的协同控制策略,可有效抑制同步电机转子振荡和风机随机出力带来的系统频率波动,提高系统稳定性。

2.4.2 柔性交流输电

柔性交流输电技术能够起到提升电网可控性

和安全性、均衡电网潮流、提高电网暂态、热稳定输送极限及为电网提供动态无功支撑等作用^[55]。因此,近年来可控串补、统一潮流控制器^[56]、静止同步补偿器(STATCOM)等柔性交流输电设备在电网中的应用越来越普遍。

为了在电网的安全运行中充分发挥柔性交流输电设备灵活可控的特点,国内外学者提出了多种可抑制电力系统振荡和提高系统安全性的柔性交流输电设备附加阻尼控制策略^[57-60]。进一步地,文献[61]提出可通过VSG控制使得STATCOM模拟传统同步发电机的惯量和阻尼。VSG控制技术不仅可以有效发挥柔性交流输电设备对电网的惯量和阻尼的支撑作用,也为多柔性交流输电设备之间的协调控制^[62, 63]提供了新的思路。

2.5 负荷虚拟同步机

电网中的同步电动机负荷具备同步机制,能自主参与电网调整,应对暂态和动态稳定问题。借鉴该思路,通过负荷虚拟同步机技术,大量通过换流器并网的典型负荷具备需求侧调节能力、一定的惯性和阻尼特性,甚至故障穿越能力,无疑将有益于电网的稳定,同时也有益于日益增长的一类敏感负荷供电稳定性和电能质量改善。

以电动汽车为例,在能源紧缺、环境污染和全球气温上升等多重压力下,具有节能和减排优势的电动汽车得到了快速发展和广泛应用^[64, 65]。但是,电动汽车的普及和充电桩的快速建设给电网安全运行和电能质量等方面带来了不利影响^[66]。首先,受电动汽车类型、充电方式和用户行为的影响,其充电行为具有随机性、间歇性,大量电动汽车的集中快速充电将给电网带来较大的冲击;其次,电动汽车充电需要采用整流器或DC/DC换流器,这些换流器在工作时会产生大量的谐波,给电网带来谐波污染。针对此,基于高频隔离型PWM整流电路,文献[67]提出一种交流接口方案采用虚拟同步电机技术的电动汽车快充解决方案。在该方案中,和电网连接的交流接口采用虚拟同步电机控制策略,不仅可减小充电负荷电流的畸变程度,且可模拟传统同步电机的惯量和阻尼特性,为电网提供必要的电压和频率支撑。同时,采用虚拟同步电机技术的充电桩还具有与电网间交互、需求侧响应等高级功能。

负荷虚拟同步机是虚拟同步机技术的重要组成部分,可提高地区负荷在电压暂降、频率突变等异常情况下的自适应调节能力,加强负荷对电网的感知和参与能力,是构建“源-网-荷”集成优化系统

和自主电力系统的关键技术,更是当前充分挖掘需求侧资源,实现电能替代、构建有机融合“互联网+”智慧能源网络等先进理念的重要底层技术之一。

综上所述,虚拟电机技术在集中式风光消纳、分布式电源并网、柔性交直流输电系统性能提升以及可控负荷主动参与电网调节等场合均有广泛的应用前景,是解决电力系统电力电子化进程中所面临的诸多技术难题的有效途径。

3 虚拟电机技术的发展方向

虚拟电机技术为解决电力系统电力电子化所带来的惯量和阻尼减小等安全稳定运行问题提供了解决思路。目前国内外学者已开展了大量虚拟电机技术的研究工作,并取得了丰硕的成果。但是,现阶段虚拟电机技术的发展和应用仍存在体系化和标准化等主要问题亟待解决,这也是虚拟电机技术今后的发展方向。

3.1 虚拟电机技术的体系化

虚拟电机技术的现有研究目标主要是如何在电网电压正常且三相平衡的情况下实现电力电子设备的虚拟电机化运行,从而模拟出传统旋转电机的惯量和阻尼特性。但是,电力电子设备与传统旋转电机的区别不仅在于其惯量和阻尼较小,也在于其承受过电压、过电流的能力较差。因此,如何在电网异常和故障情况下保证电力电子设备的运行安全(如:要求风电和光伏等电力电子设备具有低/零电压故障穿越和高电压故障穿越等能力)^[68-70],是电力电子设备虚拟电机技术需要解决的关键问题和发展方向之一。

目前电网异常或故障情况下VSG运行控制方面的研究尚处于起步阶段,仅有少量文献进行了探讨。文献[71]提出了电压暂降情况下的VSG控制策略,提高了VSG的低电压穿越能力;文献[72]则提出了基于负序电流抑制的VSG平衡控制方法,可在电网电压不平衡时有效控制VSG输出三相平衡电流。

然而,在电网非全相运行和短路故障等更为复杂的电网运行状态下,现有虚拟电机控制策略难以适用,也尚未有文献对电网故障情况下虚拟电机的故障穿越运行控制技术进行研究。因此,就目前来说,尚无一个形成完整体系的、可适用于电网所有运行状态下电力电子设备控制的虚拟电机技术,这是虚拟电机技术进一步发展和工程应用所必须解决的关键技术问题之一。

此外,故障特征是继电保护鉴别和隔离故障设

备或元件的重要依据,而电力电子设备的故障特征又取决于其采用的故障穿越运行控制策略。因此,电网异常运行、故障状态下虚拟电机技术的研究不仅是推动虚拟电机技术体系化进程和工程应用的重要工作,也是在电力电子设备虚拟电机化运行的背景下构建新型电网继电保护系统的基础。

为了形成完整的、体系化的虚拟电机技术,需要从以下几个方面对电网异常或故障情况下虚拟电机的故障穿越运行控制策略开展进一步研究。(1)在电网短路故障、非全相运行或其他异常情况下,虚拟电机会出现并网电流畸变、输出有功功率和无功功率振荡等问题。因此,在虚拟电机的故障穿越运行控制策略方面,应当根据应用场合的不同,提出电网异常或故障情况下虚拟电机的运行控制目标,如限制输出电流、保障三相输出电流平衡、抑制功率波动等。(2)进一步分析稳态虚拟电机技术在电网异常或故障情况下所存在的问题及原因。(3)根据故障穿越运行的控制目标,有针对性地提出改进措施,保证电网异常或故障情况下虚拟电机的运行安全。

3.2 虚拟电机技术的标准化

虚拟电机技术的标准化包含控制参数标准化、接口标准化和管理标准化等多方面内容。虽然在虚拟电机的接口标准化和管理标准化等方面均存在大量问题值得深入探讨^[73],但本文主要从技术角度出发,关注虚拟电机技术控制参数标准化方面的内容。这是因为虚拟电机技术控制参数,即虚拟惯量和阻尼系统的整定不仅关系到储能装置类型和容量的选择,也与复杂电力电子环境下多虚拟电机的协同控制与稳定运行密切相关。

在电力电子设备的传统控制策略中,一般按照提高控制系统动态响应速度或抗扰动能力等原则设计和调整控制器参数,且形成了相应的标准化指导方法。但是,虚拟电机技术的控制目标不同于传统控制策略,显然无法直接套用传统控制器参数整定方法;且其对电力电子设备虚拟惯量和阻尼的要求也不同于传统旋转电机对惯量和阻尼系数的要求^[57]。因此,无法根据传统旋转电机惯量和阻尼的大小来指导虚拟电机技术控制参数的整定。

针对此,国内外学者在虚拟电机技术控制参数整定方面开展了相应的研究工作,文献[16, 57, 74-77]分别给出了风电场等效虚拟惯性时间常数DFIG的虚拟惯量、储能装置的虚拟惯量和阻尼系数以及柔性直流输电和逆变电源的虚拟惯量和阻尼系数的整定方法。但是上述控制参数整定方法都

是从不同电力电子设备自身角度出发,没有形成通用的整定计算规程。另外,对于虚拟电机技术而言,其目的是使得电力电子设备模拟出传统旋转电机的惯量和阻尼特性,并自发、主动地参与电网电压和频率调节,使电力电子设备成为更加友好的设备。因此,虚拟电机技术更需要关注电力电子设备模拟出来的虚拟惯量和阻尼大小对电力系统稳定性和动态性能的影响。

因此,在虚拟电机技术控制参数标准化方面,亟需从系统全局稳定性和动态性能等角度出发,研究多虚拟电机之间、虚拟电机与电网之间的关联耦合和互相激励的机理,研究复杂电力电子环境下电力系统的动态行为;进而开展电力电子设备虚拟电机技术控制参数整定的深化研究工作,形成相应的标准化整定规程;从而实现多虚拟电机的协同控制和稳定运行,确保复杂电力电子环境下电力系统的运行安全,并指导储能装置的容量配置。

4 结语

虚拟电机技术是一种使得电力电子设备模拟传统旋转电机惯量和阻尼特性的新型换流器控制技术。虚拟电机技术为解决电力系统电力电子化程度不断加深而引起的系统相对惯量、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,有望成为换流器的主流控制技术,具有广阔的应用前景。

本文主要介绍了虚拟同步电机和虚拟直流电机技术的基本原理,并从虚拟电机技术在光伏和风力发电、电力电子式变压器、柔性交直流输电和负荷响应控制等方面的应用出发,对现有研究成果进行了综述,展望了虚拟电机技术的广阔应用前景。同时,探讨了虚拟电机技术的发展方向,以期为虚拟电机技术的进一步发展和推广应用提供参考。

参考文献:

- [1] 卫蜀作,蔡 邠. 中国电网高速发展与可再生能源发电的关系[J]. 电网技术,2008,32(5):26-30.
WEI Shuzuo, CAI Bin. Relations between rapid development of power grids in China and power generation by renewable energy resources [J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 26-30.
- [2] 金 楚,黎嘉明,徐沈智,等. 大规模光伏发电并网概率潮流计算及对电网的影响[J]. 电力工程技术,2017,36(1):1-8.
JIN Chu, LI Jiaming, XU Shenzhi, et al. Probabilistic load flow calculation and influence analysis for power grid connected with large scale photovoltaic generation system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 1-8.
- [3] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):1-8.

- LIU Zhenya, SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.
- [4] 汤广福,贺之渊,庞 辉,等. 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, et al. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [5] 王薪苹,李 群,刘建坤,等. 计及UPFC的220 kV分区电网运行可靠性研究[J]. 电力工程技术,2017,36(1):39-42.
WANG Xinping, LI Qun, LIU Jiankun, et al. Operating reliability research of 220 kV divisional power grid considering UPFC [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 39-42.
- [6] MCDONALD J. Adaptive intelligent power systems: Active distribution networks [J]. Energy Policy, 2008, 36(12): 4346-4351.
- [7] 刘进军. 电能系统未来发展趋势及其对电力电子技术的挑战[J]. 南方电网技术,2016,10(3):78-81.
LIU Jinjun. Future trends of power systems and their challenges to power electronics [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 78-81.
- [8] 李霞林,郭 力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrid: an overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [9] 孙宏斌. 电力系统分析[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
SUN Hongbin. Power System Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [10] 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.
LYU 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.
- [11] 孙旭东,王善铭. 电机学[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
SUN Xudong, WANG Shanming. Electrical Science [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [12] 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 strategies energy storage selection of virtual synchronous generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 22-31.
- [13] 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 character-

- istics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 261-268.
- [14] 侍乔明, 王刚, 付立军, 等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 783-790.
- SHI Qiaoming, WANG Gang, FU Lijun, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 783-790.
- [15] 孟建辉, 王毅, 石新春, 等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源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.
- [16] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.
- WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.
- [17] D'ACRO S, SUUL J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 394-395.
- [18] ZHONG Q, WESIS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [19] SAKIMOTO K, MIURA Y, ISE T. Stabilization of a power system including inverter-type distributed generators by a virtual synchronous generator [J]. Electrical Engineering in Japan, 2014, 187(3): 7-17.
- [20] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [21] 王思耕. 基于虚拟同步发电机的光伏并网发电控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- WANG Sigeng. Research on PV grid-connected generation control based on virtual synchronous generator [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [22] 吴轩钦, 谭国俊, 何凤有, 等. 变频驱动系统电网接口虚拟同步发电机控制技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 83-92.
- WU Xuanqin, TAN Guojun, HE Fengyou, et al. Virtual synchronous generator control scheme of grid interface for variable frequency drive systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 83-92.
- [23] 张方华, 朱成花, 严仰光. 双向DC-DC变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 46-49.
- ZHANG Fanghua, ZHU Chenghua, YAN Yangguang. The controlled model of bi-directional DC-DC converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 46-49.
- [27] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.
- CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [25] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性及故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
- KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [26] 孔祥平, 袁宇波, 黄浩声, 等. 光伏电源故障电流的暂态特性及其影响因素[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2444-2449.
- KONG Xiangping, YUAN Yubo, HUANG Haosheng, et al. Fault current transient features and its related impact factors of PV generator [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2444-2449.
- [27] LOIX T, DE BREUCKER S, VANASSCHE P, et al. Layout and performance of the power electronic converter platform for the VSYNC project [C] // Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania; 2009: 1-8.
- [28] VAN T V, WOYTE A, ALBU M, et al. Virtual synchronous generator laboratory scale results and field demonstration [C] // Proceedings of IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, Romania; 2009: 1-6.
- [29] CHEN Y, HESSE R, TURSCHENER D, et al. Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters [C] // Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela, Spain, 2012: 1-6.
- [30] HIKIHARA T, SAWADA T, FUNAKI T. Enhanced entrainment of synchronous inverters for distributed power sources [J]. IEEE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2007, 90(11): 2516-2525.
- [31] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 70-79.
- MENG Jianhui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. Control strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 70-79.
- [32] KAYIKCI M, MILANOVIC' J V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 859-867.
- [33] MORREN J, DE HAANS W H, KING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 433-434.
- [34] 赵晶晶, 吕雪, 符杨, 等. 基于双馈感应风力发电机虚拟惯量和桨距角联合控制的风光柴微电网动态频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3815-2822.

- ZHAO Jingjing, LYU Xue, FU Yang, et al. Dynamic frequency control strategy of wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG virtual inertia control and pitch angle control [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3815-2822.
- [35] 曹 军, 王虹富, 邱家驹. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 78-82.
- CAO Jun, WANG Hongfu, QIU Jiaju, et al. Frequency control strategy of variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 78-82.
- [36] 李和明, 张祥宇, 王 毅, 等. 基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 32-39.
- LI Heming, ZHANG Xiangyu, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines based on the optimal power tracking [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 32-39.
- [37] 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.
- [38] 陈宇航, 王 刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 27-33.
- CHEN Yuhang, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 27-33.
- [39] 刘 巨, 姚 伟, 文劲宇, 等. 一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1596-1605.
- LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. A wind farm virtual inertia compensation strategy based on energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1596-1605.
- [40] 王 毅, 张祥宇, 李和明, 等. 永磁直驱风电机组对系统功率振荡的阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 162-171.
- WANG Yi, ZHANG Xiangyu, LI Heming, et al. Damping control of PMSG-based wind turbines for power system oscillations [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 162-171.
- [41] 张祥宇, 王 毅, 李和明, 等. 永磁直驱风电机组改善系统阻尼的控制技术[J]. 电测与仪表, 2013, 50(2): 26-31.
- ZHANG Xiangyu, WANG Yi, LI Heming, et al. Damping improvement of power system using PMSG-based wind turbine [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(2): 26-31.
- [42] 张祥宇, 付 媛, 王 毅, 等. 含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合 PSS 控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 159-169.
- ZHANG Xiangyu, FU Yuan, WANG Yi, et al. Integrated PSS controller of variable speed wind turbines with virtual inertia and damping control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 159-169.
- [43] WANG S, HU J, YUAN X, et al. On inertial dynamics of virtual-synchronous-controlled DFIG-based wind turbines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1691-1702.
- [44] 李子欣, 王 平, 楚遵方, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2592-2601.
- LI Zixin, WANG Ping, CHU Zunfang, et al. Research on medium and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2592-2601.
- [45] 张方华, 严仰光. 直流变压器的研究与实现[J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 76-80.
- ZHANG Fanghua, YAN Yangguang. Research and verification on DC transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 76-80.
- [46] 曹 阳, 袁立强, 朱少敏, 等. 面向能源互联网的配网能量路由器关键参数设计[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3094-3101.
- CAO Yang, YUAN Liqiang, ZHU Shaomin, et al. Parameter design of energy router orienting energy internet [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3094-3101.
- [47] 赵 彪, 赵宇明, 王 一振, 等. 基于柔性中压直流配电网的能源互联网系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4843-4851.
- ZHAO Biao, ZHAO Yuming, WANG Yizhen, et al. Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4843-4851.
- [48] 盛万兴, 刘海涛, 曾 正, 等. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3541-3550.
- SHENG Wanxing, LIU Haitao, ZENG Zheng, et al. An energy hub based on virtual-machine control [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3541-3550.
- [49] 汤广福, 罗 湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
- TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [50] 李 爽, 王志新, 王国强. 海上风电柔性直流输电变流器 P-DPC 控制研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 264-270.
- LI Shuang, WANG Zhixin, WANG Guoqiang. Predictive direct power control strategy for offshore wind power VSC-HVDC converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 264-270.
- [51] 管敏渊, 张 静, 刘 强, 等. 柔性直流输电系统的联网和孤岛运行通用控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 103-109.
- GUAN Minyuan, ZHANG Jing, LIU Qiang, et al. Generalized control strategy for grid-connected and island operation of VSC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2015, 39(15): 103-109.
- [52] ZHU J, GUERRERO J M, HUANG W, et al. 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.
- [53] AOUINI R, MARINESCU B, KILANI K B, et al. Synchronverter-based emulation and control of HVDC transmission [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 278-286.
- [54] 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): 6201-6211.
LI Yujun, YANG Yong, LI Yinyi, 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): 6201-6211.
- [55] PADIYAR K R. Facts Controllers in Power Transmission and Distribution [M]. New Delhi: New Age International Publishers, 2007.
- [56] 陈刚, 李鹏, 袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 121-127.
CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo. Application of MMC-UPFC on Nanjing western grid and its harmonic analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.
- [57] 袁志昌, 柳勇军, 黎小林, 等. 兼顾阻尼抑制和电压支撑的动态无功补偿装置控制方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 74-78.
YUAN Zhichang, LIU Yongjun, LI Xiaolin, et al. Control of dynamic reactive power compensator with damping control and voltage control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 74-78.
- [58] 宋鹏程, 甄宏宁, 王震泉, 等. UPFC 附加阻尼控制器设计研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 10-13, 17.
SONG Pengcheng, ZHEN Hongning, WANG Zhenquan, et al. Parameters tuning for UPFC auxiliary damping controller [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 10-13, 17.
- [59] BONGIOMO M, ÅNGQUIST L, SVENSSON J. A novel control strategy for subsynchronous resonance mitigation using SSSC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 23(2): 1033-1041.
- [60] 郑翔, 徐政, 张静. TCSC 次同步谐振附加阻尼控制器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 181-186.
ZHENG Xiang, XU Zheng, ZHANG Jing. A TCSC supplementary damping controller for SSR mitigation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 181-186.
- [61] NGUYEN P, ZHONG Q, BLAABJERG F, et al. Synchronverter-based operation of STATCOM to mimic synchronous condensers [C] // Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore: 2012: 942-947.
- [62] 刘晓军, 杨冬锋, 高磊. 一类多静止无功补偿器阻尼控制器间的交互影响机理[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 534-540.
LIU Xiaojun, YANG Dongfeng, GAO Lei. Research on the mechanism among multiple static var compensator damping controllers [J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 534-540.
- [63] 高磊, 刘玉田, 汤涌, 等. 基于多 FACTS 的网侧协调阻尼控制机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4913-4922.
GAO Lei, LIU Yutian, TANG Yong, et al. Research on coordinated control and interaction mechanism among multiple FACTS damping controllers [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4913-4922.
- [64] 张文亮, 武斌, 李武峰, 等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 1-5.
ZHANG Wenliang, WU Bin, LI Wufeng, et al. Discussion on development trend of battery electric vehicles in China and its energy supply mode [J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 1-5.
- [65] 李秋硕, 肖湘宁, 郭静, 等. 电动汽车有序充电方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 32-38.
LI Qiushuo, XIAO Xiangning, GUO Jing, et al. Research on scheme for ordered charging of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 32-38.
- [66] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [67] 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.
LYU 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.
- [68] 曹贞贞, 徐其惠, 苏昭晖, 等. 电网电压深度不对称跌落时的双馈风电变流器控制技术[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 88-93.
CAO Beizhen, XU Qihui, SU Zhaohui, et al. DFIG converter control technology during serious asymmetric voltage sag [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(5): 88-93.
- [69] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 112-119.
XU Hailiang, ZHANG Wei, CEHN Jiansheng, et al. A high-voltage ride-through control strategy for DFIG based wind turbines considering dynamic reactive power support [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 112-119.
- [70] 郭小强, 刘文钊, 王宝诚, 等. 光伏并网逆变器不平衡故障穿越限流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5155-5162.
GUO Xiaoqiang, LIU Wenzhao, WANG Baocheng, et al. Fault

- ride through control of PV grid-connected inverter with current-limited capability under unbalanced grid voltage conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5155-5162.
- [71] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Voltage sag ride-through performance of virtual synchronous generator [C] // 2014 International Power Electronics Conference, Hiroshima, Japan; 2014: 3298-3305.
- [72] 陈天一, 陈来军, 汪雨辰, 等. 考虑不平衡电网电压的虚拟同步发电机平衡电流控制方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(3): 904-909.
CHEN Tianyi, CHEN Laijun, WANG Yuchen, et al. Balanced current control of virtual synchronous generator considering unbalanced grid voltage [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 904-909.
- [73] 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): 165-175.
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.
- [74] 李世春, 邓长虹, 龙志君, 等. 风电场等效虚拟惯性时间常数计算 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 22-29.
LI Shichun, DENG Changhong, LONG Zhijun, et al. Calculation of equivalent virtual inertia time constant of wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 22-29.
- [75] 田新首, 王伟胜, 迟永宁, 等. 基于双馈风电机组有效储能的变参数虚拟惯量控制 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 20-26, 33.
- TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Variable parameter virtual inertia control based on effective energy storage of DFIG-based wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 20-26, 33.
- [76] MIGUEL A T L, LUIZ A C L, LUIS A M T, et al. Synchronverter-based emulation and control of HVDC transmission [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 833-840.
- [77] SONI N, DOOLA S, CHANDORKAR M C. Inertia design methods for islanded microgrids having static and rotating energy sources [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 5165-5174.

作者简介:



孔祥平

孔祥平(1988—),男,江西上饶人,博士,工程师,从事电力系统保护与控制工作,电力电子设备在电力系统中的应用研究工作(E-mail:kongxphust@163.com);

冯畅(1977—),男,江苏南京人,硕士,工程师,从事继电保护技术及其应用工作;

丁昊(1987—),男,江苏南京人,硕士,工程师,从事电力系统保护与控制,电力系统

自动化;

史明明(1986—),男,江苏南京人,高级工程师,从事电能质量工作;

袁宇波(1975—),男,江苏丹阳人,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护研究工作;

张宸宇(1989—),男,江苏扬州人,博士,从事微网电能质量治理工作。

Application Prospective and Development Trends of Virtual Generator Technology

KONG Xiangping¹, FENG Chang², DING Hao³, SHI Mingming¹, YUAN Yubo¹, ZHANG Chenyu¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Nanjing Panneng Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210031, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: With the development of high voltage and large capacity power electronic technology, more and more power electronic devices have been put into operation. Hence, the future power system must be the power system with presence of massive power electronic devices, which is defined as power electronics based power system. However, with the large scale integration of the power electronic devices, the inertia and damping ratio of the power system is decreasing, adversely impact the safe and stable operation of the power system. The virtual generator technology can make the power electronic device emulate the inertia and damping feature of the conventional rotating machine, and help to address the safe and stable issues faced by the power electronics based power system. The basic principles of the virtual synchronous generator and virtual DC generator are described in this paper. Moreover, the application prospective of virtual generator technology in PV generator and wind plant, power electronic transformer, flexible AC and DC transmission, as well as load response and control is introduced. Finally, the development trends of the virtual generator technology are discussed.

Key words: power electronics based power system; virtual generator technology; virtual inertia; damping feature

(编辑 方 晶)