

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.09.009

构网型变流器技术的发展现状与趋势研究

Study on the status quo and development trend of grid-forming converter technology

余果^a, 吴军^b, 夏热^a, 陈逸琿^b, 郭子辉^b, 黄文鑫^b

YU Guo^a, WU Jun^b, XIA Re^a, CHEN Yihui^b, GUO Zihui^b, HUANG Wenxin^b

(武汉大学 a. 动力与机械学院; b. 电气与自动化学院, 武汉 430072)

(a.School of Power and Machinery; b.School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

摘要: 由于电力电子设备和新能源的高渗透率, 电力系统存在惯性减小、系统强度变弱的趋势, 稳定性问题也越来越严重。为提升系统稳定性, 提出一种构网型变流器技术, 可发挥变流器灵活可控的优势, 补偿系统缺失的惯性阻尼, 为系统提供可靠的电压、频率支撑。比较了构网型控制技术与跟网型控制技术的差异, 介绍了几类构网控制策略与构网型高压储能技术。指出该技术目前面临的瓶颈与挑战以及可实现的解决思路。研究结果显示, 构网控制技术能够有效提升电网惯量阻尼特性, 为系统提供电压和频率支撑, 在高比例新能源和高比例电力电子设备的新型电力系统中有着广阔的应用前景。

关键词: 新能源; 高渗透率; 构网型控制; 变流器; 虚拟同步发电机; 虚拟惯量; 构网储能; 电力电子设备; 新型电力系统; 碳中和

中图分类号: TK 01: TM 46

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2022)09-0065-06

Abstract: Due to the numerous electric and electrical devices and high-penetration new energy in a power system, the system's inertia tends to decrease and its strength and stability are hampered. In order to improve the stability of the system, a grid-forming converter technology which gives play to the flexibility and controllability of converters, compensates for the missing inherent inertia damping and provides reliable voltage and frequency support for the system is proposed. Based on the comparison between grid-forming control and grid-following control technologies, different network construction control strategies are analyzed. Then, the grid-forming high-pressure energy storage technology is introduced. The bottlenecks, challenges and feasible solutions of the technology are pointed out. The research results show that since the grid construction control technology can effectively improve the inertia damping, and provide the voltage and frequency support for the power system, it is promising in new power systems with high proportion of new energy and a large quantity of electronic equipment.

Keywords: new energy; high permeability; grid-forming control; converter; virtual synchronous generator; virtual inertia; grid-forming energy storage; electric and electrical devices; new power system; carbon neutrality

0 引言

能源是人类发展的基本动力。当前人类为了实现“低碳、清洁、可持续”发展, 正在进行能源变革。在2020年9月的联合国大会上, 我国明确提出“努力争取2060年前实现碳中和”, 这也是我国首次在国际社会上提出“碳中和”的承诺^[1]。

“双碳”目标下, 能源低碳转型将显著加快^[2], 能源转型主要依靠扩大清洁能源、低碳能源、零碳能源的占比, 推动以电为中心的能源生产以及消费方

式的实现。

“双碳”目标的确定, 势必会为能源电力行业的发展带来新的挑战, 能源供给、能源消纳、能源信息化、能源结构调整、新兴能源技术利用等方面都需要做出新的调整和部署^[3]。

在新能源高渗透率的电力系统中, 随着电力电子变流器在电力系统中的占比不断增加, 以同步发电机为主导的传统电网形态正在发生转变。相应的变流器在电力系统中的占比提升, 系统惯性大幅降低, 系统频率指标恶化, 但变流器比同步发电机的响应更快、功率可控性更强。

为提升“双高”系统稳定性, 本文提出一种构网型变流器技术, 可发挥变流器灵活可控的优势, 补

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0904800)

偿系统缺失的固有惯性阻尼特性,为系统提供可靠的电压、频率支撑。

大量研究表明,构网型变流器在基于高渗透性电力电子技术发电、电力系统中的潜力以及稳定电力系统的能力引发了不同国家对于构网型技术带来的挑战和机遇的讨论。2017年,欧洲输电系统运营商网络电力公司(ENTSO-E)成立了一个“电力电子接口电源的高渗透性”工作组,其成员代表包含风能、太阳能的学术界研究人员,高压直流输电行业和电力系统供应商。英国于2018年初召集了一个电网规范咨询相关的专家组。

在国内,依托张北柔性直流电网示范工作,开展基于直流电网功率互济的电压源换流器构网控制研究。四端柔性直流环形电网组网中张北和康保站采用构网控制技术,具备新能源孤岛和交流连接方式。

将深刻改变电力系统运行特性为目标,但是交流系统同步机制本质并未改变,维持系统同步稳定依然是基础。电网稳定运行需要组网能力,即具备电压源特性和自同步并联能力,也需要惯量支撑能力,惯量减缓功率波动产生的频率变化速率,为一次调频争取时间;发电机组频率既是电气量,也是机械量,电网频率偏移较大触发机组保护;关键负荷对于系统频率有严格要求。本文首先介绍了构网型技术的基本概念,然后介绍了构网型高压储能技术的优势,接着说明了构网控制技术可能面临的挑战。

1 构网型技术理念

构网型技术,可在扰动前、中、后各阶段,构建起电力系统稳定运行必须的电势,起到“顶梁柱”的作用。

1.1 构网型与跟网型技术对比

跟网型与构网型变流器的显著区别在于同步机制的不同^[4]:跟网型变流器利用锁相环实现与交流电网的同步,而构网型变流器一般采用功率控制实现同步。跟网型会呈现出低惯量甚至无惯量,大规模接入会使电力系统的系统惯量降低。

当前没有一个成熟的公式来描述构网型变流器。官方的定义目前正在工业界和学术界中讨论。然而几种构网型控制结构已经被提出。跟网型变流器被认为是其行为可以近似于受控状态的单元,并且具有高并联阻抗的电流源。构网型变流器则被认为是一个低电压源的串联阻抗。如图1所示,是跟网型变流器和构网型变流器的通用表示。

这强调了一个事实,即跟网型变流器实现了功

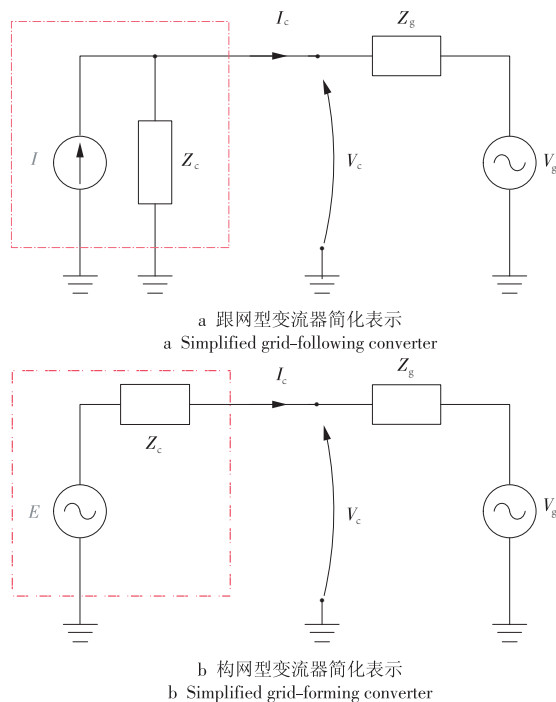


图1 2种类型变流器简化表示

Fig. 1 Simplified representation of two types of converters

率输入或电压输入的目的,通过控制输入电流进行调节,而构网型变流器直接通过控制其输出端的电压来调节功率。此外,构网型变流器在空载条件下,为负载和附近运行的其他装置提供了参考电压,而跟网型变流器对于电流的输入需要一个参考功角。尽管工作原理不同,但在稳态运行时,构网型和跟网型变流器都会根据实际运行的条件控制电网中的有功功率和无功功率的输入,同时考虑变流器的内部物理电压和电流的限制。此外,这类型的变流器都可以实现电压和频率的调节,按照电网规范的要求修改实际有功功率和无功功率的设定值。

然而,这2种变流器的主要区别体现在对电网事件的反应中,以及它们在弱电网条件和刚性电网条件下的小信号行为。不同类型的变流器对于同一网格事件的不同反应如图2所示。

图2a描述了跟网型变流器对于电网电压扰动的反应。由于其固有的电流源特性,在锁相环重新跟踪到电网相位之前,跟网型变流器的瞬时反应是保持当前电流相量 I_g 在大小和相位方面恒定,由此不可避免地导致输出电压相位 V_c 的突变。图2b描述了一个构网型变流器对同一事件的反应。根据其具有电压源的固有特性,变流器内部电压相量 E 最初不受扰动的影响,因此相量的瞬时变化几乎为0,有利于系统电压稳定,虽然这一方面优于跟网型变流器,但这种行为可能会导致变流器电流的快速增长,存在过流风险,因此危及变流器硬件组件。

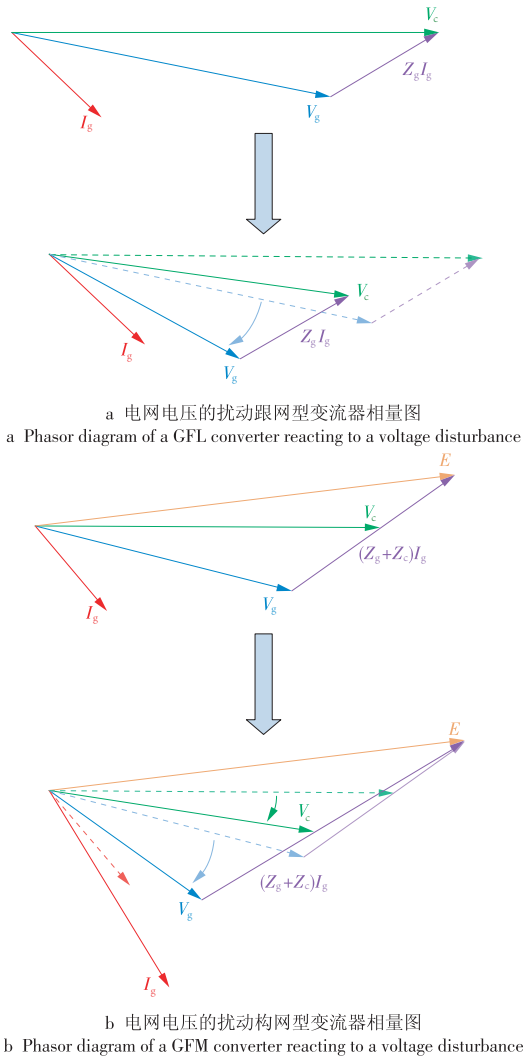


图2 不同类型的变流器对于同一网格事件的不同反应

Fig. 2 Reactions of different types of converters on the same grid event

跟网型变流器依赖锁相环同步,然而在电网强度较低时,锁相环与电网阻抗之间存在强耦合,严重降低了并网变流器的小干扰稳定性^[5]。对比跟网型变流器,构网型变流器的功率同步策略和电压源特性使其在弱电网中更为稳定。当电网发生波动时,构网型变流器通过改变输出电压的相位和幅值以调节有功和无功功率的输出,可为系统提供频率和电压的支撑,并且在调压调频时间段响应快。总的来说,构网型变流器不依赖电网频率和相位测量以实现同步,在弱电网中对频率和电压的调节更为灵活,有利于系统的稳定运行。在新能源高渗透率的电力系统中,由于同步发电机减少而导致系统强度降低,此时变流器更宜采用构网控制方式,以减小电压与系统频率波动。

根据上文中2种变流器的同步特性,可以明确:对于跟网型变流器,其失去同步性(即失稳)的关键因素是锁相环控制器(PLL)的动态稳定性受到摧

毁;对于构网型变流器,其失去同步性的关键因素是具有同步功能的功率控制失稳^[6]。

1.2 构网控制策略

为解决大规模电力电子设备接入带来的频率稳定问题,相关研究通过对变流器进行控制使其具备频率调节能力,包括虚拟惯性控制、下垂控制、虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)等^[7]。

构网控制策略主要包括下垂控制、虚拟同步发电机、匹配控制、虚拟振荡器控制、虚拟同步机等。本文简单介绍2类常见的构网控制策略:下垂控制、虚拟同步发电机控制技术。

1.2.1 下垂控制

下垂控制是模拟同步发电机的有功-频率和无功-电压下垂特性,是构网型控制中最简单、最常见的策略之一。图3展示了下垂控制的控制框图。 ω_{ref} 和 V_{ref} 分别为频率和电压的参考值,输出功率参考值 $P^*(Q^*)$ 和检测值 $P(Q)$ 的差值为功率偏差,功率偏差与下垂系数 $D_f(D_q)$ 的乘积为频率(电压)调节项。频率 ω 和电压 E 的控制如下

$$\begin{cases} \omega = \omega_{ref} + D_f(P^* - P) \\ E = V_{ref} + D_q(Q^* - Q) \end{cases} \quad (1)$$

在实际应用中,在下垂控制的功率外环中串联低通滤波器,以降低控制系统对交流信号扰动的敏感度,相当于增大了变流器的阻尼^[8]。

在理想条件下,下垂控制无需通信便可以实现多个变流器按容量分配功率。然而,受到线路阻抗、负荷波动等因素的影响,实际上难以实现功率的精确分配^[9]。

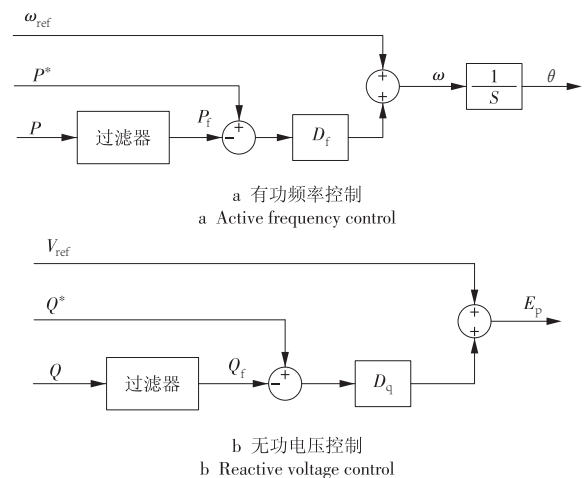


图3 下垂控制示意

Fig. 3 Droop control

1.2.2 虚拟同步发电机控制

VSG控制技术通过模拟同步发电机机械和电磁部分,使变流器具备同步发电机的惯性阻尼特征^[10]。

虚拟同步发电机的有功-频率控制模拟了同步发电机的转子和一次调频过程,用于表征有功-频率下垂特性。有功-频率控制框如图 4 所示,根据检测有功功率偏差来改变虚拟同步发电机的虚拟机械功率输出,从而实现频率调节。频率动态调节过程如下

$$J\omega = (P^* - P)/\omega - D(\omega_{\text{ref}} - \omega), \quad (2)$$

式中: J 为虚拟转动惯量; D 为阻尼系数,表示单位频率变化对应的有功功率调整值。 J 的存在使虚拟同步发电机在频率动态过程中的虚拟惯量, D 的存在使虚拟转动惯量对振荡具有阻尼作用;通过对 ω 积分,生成变流器输出电压的相位参考值 θ 。

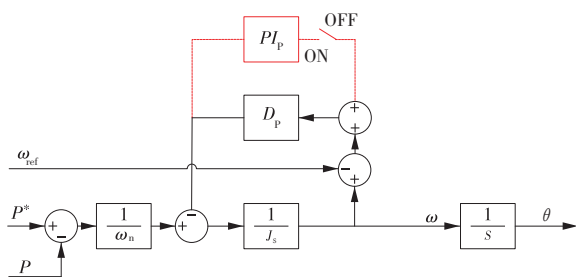


图 4 虚拟同步发电机有功-频率控制

Fig. 4 Active power-frequency control of a virtual synchronous generator

2 构网型高压储能

储能系统在电网中的作用包括:为系统提供有功或无功支撑、提高新能源并网能力、参与调峰调频、故障期间短时供电等。采用构网控制技术来控制储能变流器,可以提高新型电力系统的稳定性。

文献[11]提出储能与风机配合的微电网控制方法,储能系统不仅对补偿并网(PCC)点进行功率补偿,而且能在风速变化时保证风机在离网和并网模式之间无缝切换。文献[12]提出了基于下垂控制的储能系统聚合方法,加入了荷电状态的反馈回路,使得储能系统具备更优良的调频能力。文献[13]考虑到 VSG 控制受到储能容量和响应速度的限制,采取快速/慢速储能系统相结合的策略,前者储能容量大、用于模仿惯性和阻尼,后者储能容量小、用于改变功率进行调速,这种改进策略可以提供良好的频率响应。

2.1 构网型设备

目前,构网型变流系统主要包括构网型直流、构网型储能、构网型静止无功补偿发生器、构网型调相机、构网型风机、构网型光伏等。柔直、风机、光伏、储能均有逆变器,理论上都可以采用构网型技术,但是由于构网型技术需要相对稳定的能源作为支撑等原因,各自发挥的作用具有模型差异。例

如构网型光伏仅有微量的电容储能,只能降功率不能升功率;构网型风电同样只有微量的电容储能,将少量的风机旋转势能作为惯量;相比之下构网型储能的储能容量大,可瞬间自然释放。

2.2 构网型储能与其他储能方式

当电网异常时,构网型存储变流器能主动支撑系统频率和电压,提供惯量,具备与传统同步发电机相似的运行特性,无需集群控制。

2.2.1 构网型储能对比调相机

以系统发生三相短路故障为例,可真实模拟调相机的三阶动态过程。次暂态:利用调相机固有特性,故障后 1 至 2 个周波提供较大无功支撑;暂态:励磁系统作用,提供无功支撑;稳态:提供系统无功补偿。构网型储能的系统阻抗、惯量和阻尼都是可变的,调频调压为高性能;而同步调相机的系统阻抗、惯量、阻尼都是不可变的,调频调压性能一般。因此,与调相机相比,构网型储能控制特性更优,整体损耗、运维成本更低。

2.2.2 构网高压储能对比低压储能

构网高压储能的并网电压高,单机容量更大,架构简单,控制一致性高,而低压储能采用多个带有升压变压器的储能单元并联,需要考虑系统之间的协调控制,通信延时更大,影响对能量管理系统指令的响应速度。同等条件下,构网高压储能的单电源为主构网方式,与低压储能的多电源协同构网相比,暂态控制复杂度更低。传统的大容量多机构网型控制,穿越能力差,易发生环流、谐振等问题,风险更高。高压直挂储能的单机容量大,对电网支撑能力强,构网控制实现难度更低。

因此,与低压储能相比,构网型高压储能单机容量更大,对电网支撑更为直接、高效。

2.3 构网型高压储能技术优势

构网型高压储能与主网电气距离近,暂态过程中电压支撑效果更好。避免了传统低压储能较为分散的特点,单体容量大,协同性更优。此外,它的电压等级与发电机相当,兼做静止无功发生器,替代“储能+调相机”方案。总的来说,构网型高压储能技术可实现对系统频率、电压支撑,集成“低压储能+调相机”功能。

高压直挂式储能的技术先进,发展方向清晰。它的转换效率在 97% 以上,多电平换流,无升压变压器;安全性较高,电池分散在子模块中,运行相对独立;控制响应速度小于 5 ms,控制通信层次少,响应速度快;国内有示范应用,推广正在加快,需要进一步提升直挂电压和容量。因此,高压直挂储能更契合未来电网储能大功率、大容量、高电能转换效

率、高控制性能的技术发展要求。

3 构网控制技术面临的问题以及挑战

随着新能源高渗透率电力系统的发展,构网型变流器将逐步取代同步发电机。很多构网型变流器相关的关键问题有待进一步研究,构网型变流器的大规模应用带来了新的机遇和挑战。

3.1 构网型设备面临的挑战

构网型变流器通过控制内电势幅值和相角,实现功率自同步控制,呈电压源特性,具有传统发电机特性,可应用于大电网。与同步机相比,电力电子设备过流能力差,提供短路容量、惯量支撑时功率容易受限,构网型技术实现电压源支撑应首先提升器件过流能力。如何加强变流器的过流能力,使得当变流器电流的快速增长,存在过流风险,危及变流器硬件组件时,有效降低风险是我们当前对于构网型设备面临的主要挑战之一。

当前构网型控制技术路线较多,控制以虚拟同步机技术为基础,如何有效依托合适的变流器过载能力,建立完整系统分析方法和控制算法验证体系也是构网型设备面临的一项重大挑战。

3.1.1 大干扰同步稳定性

构网设备有与同步机类似的同步特性,在大的干扰下会发生类似于同步机的暂态失稳现象。根据相关研究,构网型电流内环和电压外环在暂态稳定的过程中存在动态交互,也可能会减弱变流器的大干扰同步稳定性^[14]。

当变流器受到大的干扰,并且存在平衡点时,它一直保持同步稳定;就算不存在平衡点,它在振荡了一个周期后依然能够与电网保持同步,降低了延迟故障清除而导致系统崩溃的风险^[15]。当构网型变流器采用VSG或下垂控制时,即变流器能够提供惯性时,虚拟功角存在二阶动态过程,导致变流器响应欠阻尼,将出现与同步发电机类似的暂态稳定问题^[16]。

3.1.2 孤网与并网模式切换

对于分布式系统和微电网等应用场景,并网和孤网之间的切换很重要。例如微电网中,边界特性动态可调,因此微电网中多个构网变流器在并网和孤网模式之间的灵活切换为系统提供了功率响应。2种模式的相互切换会导致系统的参数振荡,导致系统不稳定的原因有^[17]:(1)并网到孤网时,存在输出功率;(2)孤网到并网时,电网电压与微电网电压不匹配。

为了实现孤网和并网的自由切换,关键点在于改进构网控制策略。将下垂控制作为一级控制,在

二级控制中添加补偿项,能够使变流器在孤网切换到并网模式时实现与系统电压同步,同时在并网切换到孤网时实现功率最小化^[18]。

3.2 发展与展望

作为一种适应大电网100%换流器并网比例的技术,构网型技术在发展过程中需要重点解决以下问题。首先是储能和过流水平的选择,这是技术问题同时也是经济问题,与电子器件的发展水平息息相关。其次,换流器容量和电压等级太大、太小都存在问题,需要选择合适参数,降低控制难度。再者是系统性配置问题,电力系统中全部都是构网型设备控制难度十分大,需做到构网型设备和主动支撑型设备合理配置。最后是技术标准、应用时间点、多种应用技术过渡阶段等其他问题。

虽然从技术维度论述构网型储能能够有效调和新能源占比提升过程中的电网矛盾,但是在推广应用方面还需要考虑到新能源建设、运营,电网建设、运营主体不同,关注侧重点各不相同。2022年5月24日国家发展改革委下发的《关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知》,对相关利益的协调提出了指导,包括新型储能可作为独立储能参与电力市场、加快推动独立储能参与电力市场配合电网调峰、建立电网侧储能价格机制等指导意见。后续落实时建议也对储能参与电网调频、调压^[19-20],提供惯量等贡献的定价进行探讨和创新尝试,推动构网型储能等新技术在建设以新能源为主体的新型电力系统过程中,为电力系统安全稳定运行做贡献。

4 结论

构网控制技术能够有效提升电网惯量阻尼特性,为系统提供电压和频率支撑,在高比例新能源和高比例电力电子设备的新型电力系统中有广阔的应用前景。在“双碳”目标下,电力系统中新能源渗透率越来越高,通过构网型储能技术,能够有效推动未来电网储能大功率、大容量、高电能转换效率、高控制性能的技术发展要求,对新能源为主体的新型电力系统构建起到十分重要的作用,助力“双碳”目标的早日实现。

参考文献:

- [1]何建坤.碳达峰碳中和目标导向下能源和经济的低碳转型[J].环境经济研究,2021,6(1):1-9.
HE Jiankun. Low carbon transformation of energy and economy aiming for the peaking of carbon emission and

- carbon neutrality [J]. Journal of Environmental Economics, 2021, 6(1): 1-9.
- [2] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.
ZOU Caineng, HE Dongbo, JIA Chengye, et al. Connotation and pathway of world energy transition and its signification for carbon neutral [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 233-247.
- [3] 赵国涛, 钱国明, 王盛. “双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 11-20.
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. Analysis on green and low-carbon development path for power industry to realize carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 11-20.
- [4] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [5] ROSSO R, ANDRESEN M, ENGELKEN S, et al. Analysis of the interaction among power converters through their synchronization mechanism [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 12321-12332.
- [6] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 3-9.
XU Zheng. Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability of power system [J]. Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 3-9.
- [7] WU Z, GAO W, GAO T, et al. State-of-the art review on frequency response of wind power plants in power systems [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 1-16.
- [8] 颜湘武, 刘正男, 张波, 等. 具有同步发电机特性的并联逆变器小信号稳定性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 910-917.
YAN Xiangwu, LIU Zhengnan, ZHANG Bo, et al. Small-signal stability analysis of parallel inverters with synchronous generator characteristics [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 910-917.
- [9] 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, (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.
- [10] DRIESEN J, VISSCHER K. Virtual synchronous generators [C]//General Meeting of the IEEE Power and Energy Society. Pittsburgh: IEE, 2008: 1323-1325.
- [11] CHAUHAN P J, REDDY B D, BHANDARI S, et al. Battery energy storage for seamless transitions of wind generator in standalone microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 69-77.
- [12] SHIM J W, VERBIC G, KIM H, et al. On droop control of energy-constrained battery energy storage systems for grid frequency regulation [J]. IEEE Access, 2019, 7: 166353-166364.
- [13] SUN C, ALI S Q, JOOS G, et al. Virtual synchronous machine control for low-inertia power system considering energy storage limitation [C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore: IEEE, 2019: 6021-6028.
- [14] QORIA T, GRUSON F, COLAS F, et al. Analysis of the coupling between the outer and inner control loops of a grid-forming voltage source converter [C]//22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE ECCE Europe). Lyon: IEEE, 2020: 1-10.
- [15] ZHANG L, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [16] WANG X, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—An overview [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.
- [17] ROSSO R, ENGELKEN S, LISERRE M. Current limitation strategy for grid-forming converters under symmetrical and asymmetrical grid faults [C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit: IEEE, 2020: 3746-3753.
- [18] DU Y, LU X, TU H, et al. Dynamic microgrids with self-organized grid-forming inverters in unbalanced distribution feeders [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(SI): 1097-1107.
- [19] 刘林鹏, 陈嘉俊, 朱建全, 等. 风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标策略[J]. 华电技术, 2021, 43(9): 46-53.
LIU Linpeng, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimization bidding strategy for wind power and energy storage participating in energy market [J]. Huadian Technology, 2021, 43(9): 46-53.
- [20] 彭占磊, 杨之乐, 杨文强, 等. 电化学储能参与电力系统规划运行方法综述[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 37-44.
PENG Zhanlei, YANG Zhile, YANG Wenqiang, et al. Review on planning and operation methods for power system with participation of electrochemical energy storage systems [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 37-44.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

余果(1997), 男, 在读硕士研究生, 从事电力系统运行与控制方面的研究, yg1997@whu.edu.cn;

吴军(1976), 男, 副教授, 工学博士, 从事电力系统运行分析与控制、电力系统规划等方面的研究, byronwu@whu.edu.cn。