

双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施

张子扬¹, 张宁^{1*}, 杜尔顺², 康重庆¹, 王智冬³

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084; 2. 清华大学低碳能源实验室, 北京市 海淀区 100084; 3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

Review and Countermeasures on Frequency Security Issues of Power Systems With High Shares of Renewables and Power Electronics

ZHANG Ziyang¹, ZHANG Ning^{1*}, DU Ershun², KANG Chongqing¹, WANG Zhidong³

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. Laboratory of Low Carbon Energy, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

ABSTRACT: In the low carbon transition of the energy system, the shares of renewable energy and power electronics in power systems are rapidly increasing. High shares of renewable energy and power electronics (High-RE-PE) significantly challenge the frequency security of power systems. In this paper, four new features of power system frequency response brought by High-RE-PE characteristics were first analyzed: the scarcity of conventional frequency regulation resources, differentiation of the spatio-temporal frequency distribution, diversification of frequency control methods, and complexity of frequency dynamics. Then, three mainstream frequency response analysis methods: time-domain simulation method, analytical model analysis method and machine learning method, were compared. On this basis, this paper analyzed the new technological progress of improving the frequency response characteristic of High-RE-PE power systems from five aspects: inverter control, under-frequency load shedding, DC power mutual support, system scheduling and ancillary market design. Finally, the frequency security issue of future High-RE-PE power systems was summarized and prospected.

KEY WORDS: high shares of renewables; high shares of power electronics; low inertia; frequency security; virtual synchronous control

摘要: 在能源系统低碳化转型的过程中, 电力系统中的可再生能源和电力电子设备比例快速增长, 高比例可再生能源、高比例电力电子设备的“双高”特征为未来电力系统的频率

安全带来严峻挑战。文中首先分析电力系统的双高特征为电力系统频率响应特性所带来的 4 点新特性: 传统调频资源稀缺化、频率时空分布差异化、频率调控手段多样化和频率动态机理复杂化。然后对比了时域仿真法、模型分析法和机器学习法 3 类主流的频率响应分析方法, 在此基础上, 从逆变器控制、低频减载保护、直流功率支援、系统调度运行和调频市场设计 5 个方面分析了改善双高电力系统频率响应特性的技术新进展。最后针对未来双高电力系统频率安全问题进行总结和展望。

关键词: 高比例可再生能源; 高比例电力电子设备; 低惯量; 频率安全; 虚拟同步

0 引言

在我国 2060 年碳中和的宏伟目标下, 能源系统的低碳化转型将成为我国能源系统的重要发展战略^[1], 高比例可再生能源并网将成为我国未来电力系统的重要特征^[2]。截至 2019 年底, 我国风力发电和太阳能发电装机已分别达 209GW 和 204GW, 均居世界第一位^[3]。针对 2030 年碳达峰的近期目标, 我国计划在 2030 年将风电太阳能总装机提升至 12 亿 kW, 非化石能源消费占比提高到 25%, 并计划在 2050 年进一步将能源消费中可再生能源比例提升至 60% 以上^[4]。风电和光伏等间歇性可再生能源将逐渐从电力系统中的次要能源变为主要能源, 消纳可再生能源将成为我国第三代电网的主要任务之一^[5]。

风电和光伏等间歇性可再生能源在发电特性上与传统同步发电机有着显著的差异, 为消纳高比

基金项目: 国家电网公司科技项目(5100-202156290A-0-0-00)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation (5100-202156290A-0-0-00).

例可再生能源,电力系统在源网荷侧都在经历着深刻的变化^[6]。在电源侧,风电和光伏等可再生能源间歇性强、波动性大,需经由电力电子逆变器实现电力系统并网,电源侧大量的同步发电机正在逐步被电力电子设备所取代^[7];在电网侧,可再生能源发电效益与资源禀赋高度相关,但我国可再生资源与负荷中心在空间上呈现出明显的逆向分布特征^[8],特高压直流输电、柔性直流输电(voltage source converter based high-voltage direct current, VSC-HVDC)和柔性交流输电技术等长距离、大容量的先进输电技术开始在我国电力系统中大量应用^[9-10],以消纳快速发展的西北可再生能源基地和海上风电基地的可再生能源,电网侧将出现越来越多的大容量电力电子设备,并将形成交直流混联的网架结构^[11];在负荷侧,以电动汽车、变频驱动电机、开关电源驱动的电子设备为代表的电力电子类负荷的比例也在持续提升,其中快速发展的分布式储能^[12-13],电转气^[14]和电制氢^[15]也从一定程度上平抑了可再生能源的波动性。源网荷侧的电力电子化趋势使电力系统呈现出了越来越明显的低惯量特性。

电力系统的高比例可再生能源和高比例电力电子设备(后文中简称双高)并网会使得未来电力系统在规划、运行、控制和保护方面均与传统电力系统存在差异,呈现出电力电量平衡概率化、电力系统运行方式多样化、电网潮流双向化、电力系统稳定机理复杂化等新特点^[2],将给电力系统引入一系列的新挑战,如灵活性不足^[16]、宽频带振荡^[17]等。同时双高特性也使得传统电力系统中已存在的一些问题更加凸显,频率安全就是其中的典型代表。频率安全要求电力系统在受到严重扰动出现有功功率失衡后,系统频率能够保持或恢复到允许范围内,不出现频率崩溃现象。近几年国内外电力系统均出现了一些与双高特性密切相关的频率安全事故。2015年9月19日,锦苏特高压直流线路发生双极闭锁,3.55%的发电功率损失造成频率最低跌落至49.56 Hz,经240s的调整后电网频率才顺利恢复至50Hz^[18];2016年9月28日,澳大利亚南部电网由于台风造成了长达10h的停电事故,事故前非同步发电功率接近80%,在极低的惯量水平下电力系统频率快速跌落诱发系统解列^[19];2019年8月9日,英国出现大规模停电事故,影响了超过100万用户,最长停电时长近1.5h,事故前非同步发电占

比接近40%,导致系统惯量明显偏低,频率的快速跌落诱发后续的连锁故障,仅3.9%的全网发电功率损失导致系统最低频率跌落至48.8Hz^[20]。

这些频率安全事故的发生与双高电力系统的高不确定性和低惯量特性密切相关,在事故发生过程和事故影响规模上均与传统电力系统呈现出明显的差异,体现出双高电力系统在频率响应特性上具有一系列的新特性,将对未来电力系统运行的安全性和经济性带来显著影响。频率问题有可能成为我国电力系统低碳化转型路径上的重要瓶颈,因而双高电力系统的频率安全问题正在逐渐成为学术界的研究热点。本文将结合现有的研究,对双高电力系统频率安全问题进行评述,本文的框架如图1所示,首先归纳双高电力系统频率响应方面的新特性,然后综述3类主流的频率响应分析方法,在此基础上,进一步讨论双高电力系统频率响应特性的改善措施,最后对双高电力系统的频率安全问题进行总结和展望。

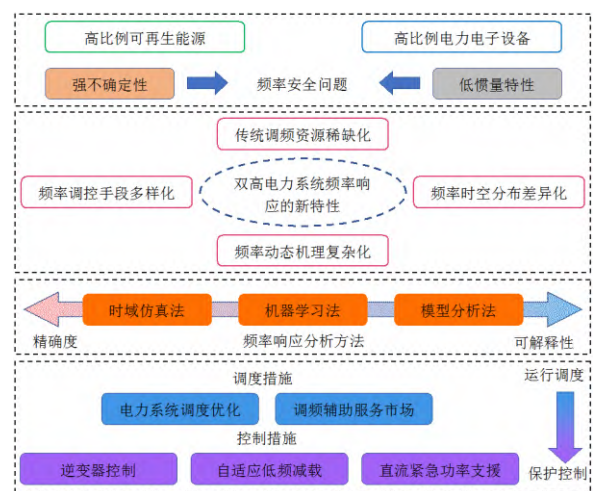


图1 双高电力系统频率安全问题的研究框架

Fig. 1 Framework of frequency security issue of High-RE-PE power systems

1 双高电力系统频率响应的新特性

双高电力系统频率响应方面的新特性可以归结为如下4个方面。

1.1 传统调频资源稀缺化

在传统电力系统中,火电和水电等同步发电机是系统内调频资源的主要来源。源荷的惯量和同步发电机的调频能力这两类传统调频资源很好地保障了电力系统的频率安全^[21]。传统电力系统中的惯量主要由火电和水电等同步机提供,电力系统的惯量大小反映了电力系统的频率抗扰性。在电网频率

发生波动时,同步发电机的转速会随之发生变化,存储在同步发电机转子中的动能会与电网发生能量交换,从而为电力系统提供惯量支持。从一定程度上而言,电力系统的惯量可被理解为一种由频率自适应控制的“储能”,有效降低扰动后系统的频率变化率,为后续的调频措施争取了时间;而火电和水电提供的调频能力反映了电力系统对频率偏差的校正能力,从时序上而言,火电和水电等同步机组除了提供惯量支撑外,还可为电力系统提供一次调频及二次调频服务。在电网频率波动时,同步发电机会由调速器自动调整机组出力,抑制频率的继续偏移。但一次调频是有差调频,为将频率校正至额定值,会进行二次调频,即调频机组根据调度中心下达的自动发电控制(automatic generation control, AGC)信号调整出力。

但随着双高电力系统中同步发电机逐步被电力电子设备所替代,系统内的传统调频资源逐渐稀缺化。惯量持续降低已成为大多数国家电力系统所面临的共同难题,文献[22]对世界各地1996年和2016年的电力系统等效惯量进行了估计,结果显示除非洲外,世界其他各洲均由于可再生能源的快速发展而出现了惯量下降的现象,其中,欧洲的系统惯量下降幅度最大,20年间的下降幅度接近20%,可再生能源渗透率较高的丹麦下降幅度最大,高达60%。文献[23]对欧洲各国2030年的惯量水平进行了预测,结果表明德国、意大利、丹麦、爱尔兰、英国等国在全年至少10%的时间内电力系统将运行在惯量严重不足的情况下(系统惯量小于2s)。虽然目前我国电网整体上还未面临严重的惯量不足问题,但在可再生能源装机集中的区域和大容量高压直流线路馈入的受端电网,低惯量特性也已开始显现^[2,18]。由于目前大多仍采取最大功率点跟踪方式进行出力控制,可再生能源电站不能主动参与到电力系统调频过程之中,为电力系统提供的调频能力明显弱于火电和水电等同步发电机组,随着可再生能源的大规模并网和传统火电机组的持续退役,系统内同步机可提供的调频能力将明显降低,系统校正频率偏差的能力减弱^[24],导致系统在故障后频率难以快速恢复,扩大了频率安全事故的影响规模。

1.2 频率时空分布差异化

电力系统在出现扰动后,系统内不同节点的频率动态过程实际上是存在差异的,其根源在于频率动态过程同时伴有功角摇摆过程^[25]。具体而言,在

电力系统出现扰动瞬间,系统功率缺额将在同步机间按照同步机节点与扰动点电气距离的远近进行分配^[26],这一分配将引起不同同步机转速之间的相对偏差,导致各节点频率出现差异,节点之间的电压相角差发生变化,进而影响了系统内的潮流分布,将对系统的功率缺额进行重新分配,直至各节点频率重新达到同步。在系统达到同步前,不同发电机节点转速的相对偏差会使得不同节点频率出现差异,引起频率在空间上的不均匀分布,这种空间上不均匀分布又将导致各节点调频资源频率响应在时间上的不同步性,进而引起系统频率时空分布的差异性。

频率时空分布的差异化程度与功角摇摆过程密切相关,而功角摇摆过程又受到系统网架结构、调频特性和惯量空间分布等诸多因素的影响^[27],传统电力系统与双高电力系统在上述诸多因素上均存在显著差异,使得频率时空分布差异化成为双高电力系统频率响应的一大新特性。

在传统电力系统中,频率时空分布差异化特性虽客观存在,但对于系统的影响相对较小。一方面,传统电力系统内同步机提供的转动惯量相对充足,系统频率变化相对平缓,功角摇摆过程时间尺度要显著快于频率动态过程,因而传统电力系统中频率时空分布差异化程度相对较低;另一方面,在传统电力系统中,火电和水电等同步机组是调频资源的主要来源,因而传统电力系统主要关注发电机节点频率动态过程;惯量与调频备用相对于发电机出力的分布相对均匀,各发电机节点的频率特性差异不大,可通过惯量中心假设来反映系统整体的频率响应特性,认为全网各节点频率动态过程相同对传统电力系统的频率安全分析、控制和保护准确性的影响较小。

但在双高电力系统中,频率时空分布差异化的影响将不再能被忽视。其一,系统惯量的下降使得扰动后频率波动更加剧烈,功角摇摆过程中不平衡功率的不均匀分布可能导致扰动初期各节点的频率变化率存在显著差异,诱发电力电子设备脱网;其二,大量低惯量的电力电子设备集中或分散式并入电力系统,除同步机外将有更多样化的调频资源参与到系统频率动态过程之中,频率动态过程的分析将不再局限于发电机节点,改变了电力系统惯量和调频资源的空间分布,功角摇摆过程将使频率时空分布差异化更为显著^[28];其三,经电力电子设备

并网的电源或负荷的调频特性很大程度上由其控制方式决定,且电力电子设备与同步机物理结构不同,这使得频率动态过程中,各节点调频特性的异质化特性明显^[27];其四,可再生能源的资源禀赋使得各区域电网内电源结构差异化明显,跨区联络线两侧呈现出典型的“受端”和“送端”特征,联络线两侧电网的惯量水平与调频资源差异化明显,当跨区联络线中直流线路不参与调频时,电网之间的电气距离较大,使得区域电网频率动态过程产生显著差异^[29]。

在双高电力系统下,系统频率时空分布差异化可能对系统频率分析、保护与控制产生显著的影响。文献[30]指出扰动中心与其他节点到达同一频差的时间间隔可能高达2s以上,这使得电网内远离扰动点的调频资源难以充分发挥其调频作用,导致系统整体调频能力低于预期,增大了系统失稳的风险;区域电网(“广义节点”)之间频率动态过程的差异性使得不同区域内的调频资源难以充分互济,需要配置更多的调频资源来确保频率安全,严重影响系统运行的经济性。

1.3 频率调控手段多样化

传统调频资源稀缺化激励了系统中更多元化的调频资源参与到电力系统调频过程之中,高比例电力电子化趋势使得双高电力系统具备了更强的可控性,电力电子器件动作速度快、控制自由度高,使得源网荷储各要素内的调频资源可根据自身特性采取差异化的调频策略,而当前电力系统快速发展的同步相量测量装置(phase measurement unit, PMU)^[32]和广域量测系统(wide area measurement system, WAMS)^[33]也将极大地提升双高电力系统的可观性,有助于不同调频资源的协调互补,有望进一步实现基于大数据分析、边缘计算的信息物理融合的频率控制方法^[34]。

频率调控手段多样化将成为双高电力系统的重要特征,目前已有非常多的文献研究了如何挖掘电力系统源网荷储各个环节的调频潜力。

在源侧,以风电和光伏为代表的间歇性可再生能源将成为未来电力系统中的主力电源,也将逐渐承担起电力系统内的调频责任,在2020新版国标《电力系统安全稳定导则》中已对新能源发电场站的惯量支撑能力提出了明确要求^[35],而通过并网逆变器的合理控制,新能源发电场站还可通过减载、与储能联合运行等多种方式为系统提供调频服

务^[36-37],其中,风电还通过释放和吸收风机桨叶中的动能来提供短时频率支撑^[38],具有较好的经济性。

在网侧,电力电子设备赋予了直流线路和柔性交流线路主动控制线路潮流的可能性,可采取一定的主动控制方式来实现线路两侧区域电网调频资源的有效互济,提升系统的频率安全性。其中VSC-HVDC具有极强的控制灵活性,利用VSC-HVDC挖掘海上风电的调频潜力成为了目前学术界研究的热点之一^[39-40],针对VSC-HVDC自身,也提出了包括下垂控制、模拟惯量控制和虚拟同步控制等多种控制方式^[41-42];

在荷侧,负荷主动调整需求参与系统调频在近年来受到了学术界广泛而普遍的关注。风电、光伏出力的间歇性与不确定性凸显出了负荷侧灵活性资源的巨大价值,电动汽车和智能楼宇是目前主要研究的两类主动参与调频的需求侧资源^[43-44]。电动汽车可与电网灵活交换电能,与储能特性十分相近,其研究的关键点在于电动汽车充放策略的控制^[45];而智能楼宇自身具备较大的热惯性,软通空调(heating, ventilating, and air-conditioning)主动调整功率参与调频具有对用户友好,经济性高等优点,被视作一类非常有潜力的调频资源^[46],除此之外,近年来快速发展的综合能源系统,电制氢也具有主动参与调频的巨大潜力。需求侧主动控制参与调频的一大技术难点在于海量负荷的相互协调,为此学者们提出了包括全分布式^[47]、有协调层分布式^[48],集中式^[49]的多种控制方法,并针对软通空调的调频能力进行了实证研究^[50]。

储能是电力系统中的多面手,在发电侧可以平抑间歇性可再生能源波动,参与系统调峰调频,在输配电侧可以缓解网络阻塞、延缓线路投资,在用电侧还可提升电能质量、降低电能成本^[51]。具体到频率控制,储能可为系统提供包括惯量响应、一次调频、二次调频在内的多种调频服务,还可与可再生能源电站配合参与调频。但鉴于储能的成本相对较高,为充分发挥储能响应速度快、爬坡能力强的优势,基于储能的快速频率响应应运而生^[52]。快速频率响应是在扰动后短时间内快速调节储能功率,从而在扰动初期为系统提供强有力的频率支撑,改善低惯量系统的频率动态特性,目前英国电力市场中已将快速频率响应作为了一类新型的辅助服务类型,用于提升系统的频率安全性^[53]。

1.4 频率动态机理复杂化

高比例可再生能源与高比例电力电子设备将使电力系统频率动态机理更加复杂化,对电力系统的频率响应分析方法提出了更高的要求,也将驱动一系列更精细化的电力系统频率调控手段的研究与应用。

可再生能源在出力特性上与传统火电和水电存在显著差异,增大了系统惯量水平的分散性与波动性,导致传统的静态功频分析方法将难以适用于双高电力系统。由于可再生能源出力的强不确定性,双高电力系统将不再能借助“冬大冬小,夏大夏小”等少数典型场景来表征其运行规律^[54],海量多变的运行场景将使得系统惯量水平在中长期时间尺度上呈现出显著的分散性;而在日内光伏、风电等可再生能源又具有较强的间歇性,引起了双高电力系统中净负荷曲线峰谷差的显著增大,在青海、美国加州等高比例光伏接入地区已呈现出较为明显的鸭型曲线^[55],这将使得日内同步机组启停更加频繁,惯量水平在日内呈现出较强的波动性。惯量水平的分散性与波动性将使得系统频率动态过程更复杂多变,频率变化率、频率最低点和准稳态频率之间的相对关系将更为复杂,而传统的静态功频分析方法^[21]并未能考虑系统惯量对频率动态过程的影响,依据准稳态频率所确定的调频备用需求并不能有效保障频率动态过程中频率变化率与频率最低点不越限,基于这一调频备用需求的系统运行调度方法很可能面临安全性与经济性的两难问题:当系统惯量充足时,预留的调频备用可能过剩,影响系统运行的经济性;而当系统惯量偏低时,预留的调频备用又可能不足,增大系统出现频率失稳的风险^[56]。

电力电子设备在并网特性上与传统同步机同样存在差异,导致系统内不同节点具有异质化的频率响应特性,频率时空分布特性的影响将更加显著,传统电力系统中广泛采用的惯量中心假设^[25]将受到挑战。在传统电力系统中,同步机是系统内主要的并网装置也是系统调频资源的主要来源,传统电力系统的频率响应特性主要由同步机动态特性所决定,各同步机调频特性相近,频率时空分布差异化的影响较小,惯量中心假设具备较强的合理性,可提升系统频率动态特性的分析效率。但在双高电力系统中,频率调控手段多样化使源网荷储侧更多元的调频资源共同参与到了频率响应过程之

中,系统的频率响应特性将由同质化的同步机决定转变为由大量异质化的源网荷储侧调频资源共同影响,频率动态机理的复杂化程度显著提高。随着可再生能源渗透率和直流负荷比例的持续提升,电力电子设备将成为双高电力系统内主要的并网装置,电力电子设备的频率响应特性与其控制密切相关,目前学术界已出现了电网跟随型(grid following, GFL)^[57]和电网支撑型(grid forming, GFM)^[58]两类逆变器控制范式,这两类控制范式下逆变器的频率响应特性将有着截然不同的特性,GFL逆变器不能主动决定所在节点的频率,而是通过锁相环来跟随所在节点频率,并依靠该改变输出功率的方式间接影响节点频率,并网表现出电流源特性;而电网支撑型逆变器则可通过控制输出电压相角直接决定所在节点频率,对电网表现出电压源特性;间接影响节点频率和直接决定节点频率两种控制特性将使得频率动态过程更为复杂,节点频率时空分布差异化的影响更加显著。传统基于惯量中心假设的频率动态分析方法不能很好地体现不同节点调频能力与调频特性上的差异,难以建模频率时空差异化对异质化调频资源实际调频作用的影响,亟需在全模型仿真方法与惯量中心假设寻找一个合理的折中分析方法,也需发展一些考虑频率时空分布特性的精细化频率调控方法。

2 双高电力系统频率响应的分析方法

双高电力系统频率动态机理复杂化客观上推动了精细化频率响应分析方法的相关研究,本节首先对现有3类频率响应分析方法进行综述,然后对3类频率响应分析方法进行对比和综合分析,最后介绍一些利用上述频率响应分析方法得出的刻画频率响应特性的量化指标。

2.1 时域仿真法

频率响应从本质上是由微分方程所描述的动态问题,与小干扰稳定具有严格的理论判据不同^[21],电力系统的频率安全性更多地依赖于判断频率最低点、频率变化率等关键指标是否越限。因此,采用时域仿真法获得扰动后系统的频率变化曲线是目前最为直接和精确的频率响应分析方法,也是其他频率响应分析方法的基础和重要参考。从时间尺度上而言,电力系统的频率动态仿真属于机电暂态仿真的范畴,目前广泛使用的成熟的机电暂态仿真软件包括 PSASP、BPA 和 PSS/E,而 DiGSILENT

开发的PowerFactory工具也在频率相关的研究中被大量使用。

双高电力系统对时域仿真法提出了新的要求。大量接入的电力电子设备与交流电网之间的耦合紧密,文献[59]指出受端交流电网内部的不对称故障可能会引发电力电子变流器的换相失败,可能导致电力系统高压直流输电线路出现单极闭锁或双极闭锁。这种耦合引发的闭锁事故会对系统频率安全带来很大的挑战,但在传统机电暂态范畴内难以建模和仿真电力电子设备的开关特性,机电-电磁暂态混合仿真为解决这一难题提供了一种思路^[59-60]。在机电-电磁暂态混合仿真中,传统的交流电网部分仍采用机电暂态仿真方法,而对于直流电网与电力电子装置则采用电磁暂态仿真的方式分析其动态特性,通过设置合适的仿真接口进行电磁暂态仿真和机电暂态仿真的协调,实现对于交直流混联电路频率响应特性的分析,还可以通过多速率并行计算的方式进一步提升混合仿真的仿真效率^[61]。在进行包含大量可再生能源发电机组的大系统仿真时,为降低仿真模型的复杂度,可以简化可再生能源发电机组的电力电子装置开关特性,而仅考虑其控制环节,文献[62]对风电和光伏机组提供一次调频与惯性响应的控制方式进行了综述。

2.2 模型分析法

与时域仿真法得到扰动后系统频率动态过程的数值曲线不同,模型分析法的目标在于通过对时域仿真的详细模型进行合理的假设和近似得到简化的电力系统频率动态模型,在此基础上得到频率动态特征量的解析化表达式。

模型分析法中普遍采用的一个假设是惯性中心假设(center of inertia, COI),即认为系统的惯量集中于一个等效的惯性中心上,将系统简化为单节点系统,用惯性中心的等效频率来反映系统的频率整体变化特性,即:

$$\omega_{\text{COI}} = (\sum_{i \in \Omega} H_i \omega_i) / \sum_{i \in \Omega} H_i \quad (1)$$

式中: ω_{COI} 即为惯性中心频率; H_i 和 ω_i 分别为各节点惯量大小和频率; H 为系统惯量大小:

$$H = \sum_{i \in \Omega} H_i \quad (2)$$

在采用惯量中心假设的前提下,系统频率动态过程可由转子摆动方程(swing equation, SE)来描述^[21]

$$2H \frac{d\omega_{\text{COI}}(t)}{dt} + D\omega_{\text{COI}}(t) = P_G(t) - P_D(t) - P_L(t) \quad (3)$$

式中: D 为电力系统负荷阻尼系数; $P_G(t)$ 、 $P_D(t)$ 和 $P_L(t)$ 分别为系统内发电机输出功率, 负荷需求功率和系统功率缺额。

转子摆动方程将详细的频率动态模型简化为一个相对简单的微分方程, 揭示了电力系统频率响应特性的本质是有功功率的平衡。通过对发电机组和负荷调频特性的建模, 可以进一步得到具体的频率响应分析模型。

其中最为经典的是 P. M. Anderson 于 1990 年所提出的系统频率响应模型(system frequency response, SFR)^[25], 如图 2 所示, 其中 R 为系统的等效下垂系数。该模型是一个低阶的线性传递函数模型, 由于它可以得到系统解析化的频率动态函数, 如因而被广泛应用于考虑频率动态特性的电力系统的规划^[63]、运行^[64-67]、保护^[68-70]和控制^[71-72]的相关研究之中。

$$\Delta\omega_{\text{COI}}(t) = \frac{R\Delta P}{DR + K_m} [1 + \alpha e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n t + \phi)] \quad (4)$$

式中 α , ζ , ω_n , $\omega_n\phi$, K_m 的物理意义和计算方法可参考文献[25]。

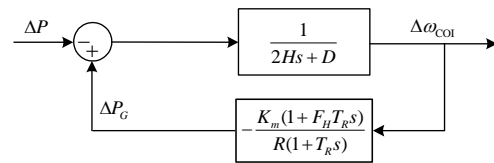


图2 系统频率响应模型

Fig. 2 System frequency response(SFR) model

为更符合实际电力系统的特性, 也有不少文献对 SFR 模型进行了改进。如图 3 所示的多机频率响应模型可体现不同同步机调速器特性之间的差异性, 更符合电力系统内存在多种类型火电机组的实际情况; 但多机频率响应模型是一个高阶传递函数模型, 计算复杂度高, 难以直接得到解析化频率动态特征量, 制约了多机频率响应模型的应用。为降低多机频率响应模型的计算复杂度, 文献[73]分析了多种简化调速器特性的建模方法, 最具代表性的一种简化方式是认为故障后调速器在时域上线性调整机组出力。简化后的多机频率响应模型可表述为方程(5), 其中, C_{Ri} 为各机组扰动后的线性爬坡率, 这一方程可以得到解析化的频率动态过程, 并已在多篇文献中得到了应用^[53,75]。其传递函数形式如图 4 所示, 这种将闭环传递函数转换为开环的处理思路与文献[76]中提出的平均系统频率模型(average system frequency model, ASF)相近, 能够

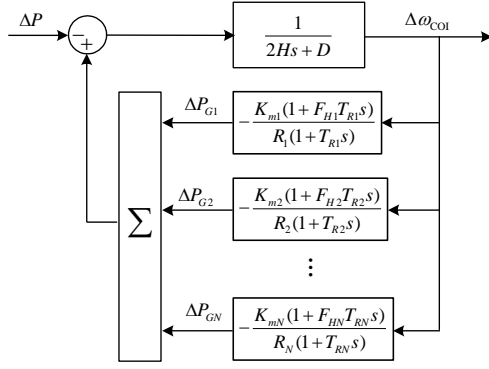


图 3 多机系统频率响应模型

Fig. 3 Multi-machine system frequency response model

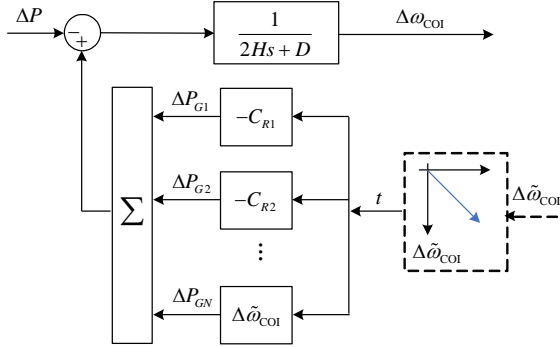


图 4 简化多机系统频率响应模型

Fig. 4 Simplified multi-machine system frequency response model

显著降低了模型的复杂性。除简化调速器建模外，文献[77]提出了一种将多机的调速器特性聚合为单一调速器的方法，实现了多机系统频率响应模型向 SFR 模型的转换，降低了模型的阶数，其算例表明这一近似误差低于 2%。

$$2H \frac{d\Delta\omega_{COI}(t)}{dt} + D\Delta\omega_{COI}(t) = \sum_{i \in \Omega_G} C_{Ri}t - P_L(t) \quad (5)$$

随着双高电力系统频率响应新特性的日益突出，模型分析法也有了更进一步的发展。文献[78]提出了一种基于参数辨识的改进 SFR 模型，提升了频率动态分析的精度。文献[64,66]修正了 SFR 模型以考虑采用虚拟同步控制的可再生能源发电机组的调频特性。文献[71]研究了如何在 SFR 模型中嵌入低频减载措施。文献[80-81]则分别在 SFR 模型中考虑了储能和电动汽车的调频作用。面向双高电力系统下可再生能源出力的强不确定性，文献[82]采用随机微分方程来表述系统的频率动态特性，并建立了可考虑系统不确定性的随机 SFR 模型。上述这些研究使得 SFR 模型能够考虑更多元化的频率调控手段。但在惯量中心的假设下，SFR 等传统频率响应模型并不能体现不同节点频率动态过程的差异，为此近些年出现了不少考虑频率时空分布特性

的模型分析方法研究。文献[83]提出了一种基于直流潮流的电力系统频率响应分析方法，通过数值计算可以得到各节点的频率动态特性，在计算效率上要优于传统的时域仿真法，但尚不能得到系统频率时空分布特性的解析表达式。文献[84]提出了分频器理论(frequency divider)，通过对输电系统进行一系列的合理假设构建了频率动态过程中各母线节点频率与发电机转速的解析关系式，并基于此理论提出了一种频率相依模型(frequency dependent model)，用于考虑频率时空分布特性对于暂态安全分析的影响^[85]。文献[86]建立了两机电力系统的频率响应模型，并据此推导了两机电力系统频率动态的解析表达式。文献[29]利用解析推导与数值求解相结合的方式对多区域电力系统的频率动态特性进行了研究，给出了多区域电力系统频率安全的充分条件。

2.3 机器学习法

随着双高电力系统的频率动态机理复杂性显著提升，为得到频率动态特征量的解析表达式，模型分析法不可避免地要忽略部分细节，限制了模型分析法的精确性。而针对复杂因素影响下问题的分析和建模恰恰是近年来迅猛发展的机器学习方法的强项，目前已有不少学者研究了机器学习算法在电力系统频率安全问题中的应用。文献[87]采用决策树对于电力系统的频率安全域进行了估计和辨识，并用之来指导机组调频和减载方式以提升电力系统运行的安全性。文献[88]利用神经网络描述电力系统的频率动态特性，从而在保证电力系统频率安全的前提下优化故障后低频减载的负荷量，降低扰动对于电力系统运行的影响。文献[89]通过采用强化学习从历史数据中辨识出电力系统的频率动态特征，并在线更新模型参数，进而指导风电的调频策略。文献[90]利用多层极限学习机评估电力系统的频率安全状态，相较于时域仿真法，该方法在保持较高准确度的同时大大提升了评估的效率。针对交直流混联电力系统，文献[91]基于支持向量机提出了一种包含频率稳定预测、频率稳定控制方式判断和频率稳定控制策略制定的三阶段频率稳定紧急控制方法。

2.4 综合比较

表 1 对上述 3 类频率响应分析方法进行了对比和综合分析。

在采用这 3 类频率响应分析方法进行电力系统

表 1 频率响应分析方法的特性比较

Table 1 Comparison of frequency response analysis methods							
分析方法	分析结论	假设/近似	精确程度	计算复杂度	可扩展性	可解释性	泛化能力
时域分析法	频率动态数值表达式	不需要假设	高	高	高	较强	偏弱
模型分析法	频率动态解析表达式	依赖假设和近似	较低	低	较低	强	强
机器学习法	数值化频率动态特征量	不需要假设或少量假设	较高	低	较高	较弱	弱

频率安全性评估时，会得到不同形式的分析结论，时域仿真法得到的是频率动态的数值结果，而借助于合理的假设和近似，模型分析法往往可以得到频率动态解析表达式，而机器学习法依赖于针对大量数据的训练，为降低训练复杂度，机器学习法给出的往往是数值化的频率动态特征量。分析结论形式的不同带来了 3 类频率响应分析方法特性上的差异。由于分析的目标是数值化结果，时域分析法和机器学习法的分析基础可以是详细的系统频率动态模型，并能够比较方便地考虑影响频率动态过程的诸多因素，具有较好的可扩展性，得到的频率动态的精确度也较高。但另一方面，数值化结果通常只能表征某一特定参数下的系统频率动态过程，因此所得结论往往也仅适用于特定参数下的特定系统，可解释性和泛化能力偏弱。而这恰恰是模型分析法的强项，模型分析法抓住了影响电力系统频率动态特性的主要参数，如惯量、调频特性、负荷阻尼等，可以给出系统频率动态与这些参数的解析关系，因此可以很方便地进行一些规律性和灵敏度方面的分析，具有较好的可解释性和泛化能力。

2.5 频率安全评估指标

电力系统频率响应分析的重要作用在于得到一系列电力系统频率安全性的量化评估指标，进而为规划和运行提供参考。调频备用大小是传统电力系统中常用的指标，为保障电力系统的频率安全性，在传统规划和运行模型中均包含备用率约束^[92-93]。但仅仅依靠调频备用指标难以准确反映双高电力系统下复杂化的频率动态机理，也就难以可靠地对电力系统的频率安全性进行评估。迫切需要借助上述的频率响应分析方法引入更多的频率安全评估指标，以反映双高电力系统新特性对于系统频率安全性的影响。

传统调频资源稀缺化使惯量成为了影响系统频率响应特性的重要因素，也成为了未来双高电力系统频率安全评估的重要指标，但惯量本身很难直接从电力系统中精确获取，往往需要借助 WAMS 系统进行估计^[94-95]。在电力系统的规划和运行中需

要一些更为直观的指标，系统非同步发电渗透率(system non-synchronous penetration, SNSP)是目前得到广泛使用的一类间接衡量电力系统惯量水平的指标，SNSP 最先在文献[96]中被定义，反映了电力系统非同步发电(逆变器接口发电装置与直流馈入功率)在总负荷需求中所占的比例，体现了传统调频资源的稀缺化程度。文献[96]基于 SNSP 对爱尔兰电网进行了实证研究，结果如图 5 所示，当 SNSP 在 50%以下时，电力系统频率响应特性与传统电力系统相近，对 SNSP 不敏感，当 SNSP 在 50%到 75%之间时，电力系统的频率响应特性与 SNSP 密切相关，当 SNSP 在 75%以上，若不采取相关措施，电力系统将难以保证运行中频率的安全性^[97]，体现了惯量对于电力系统频率动态机理的深刻影响。

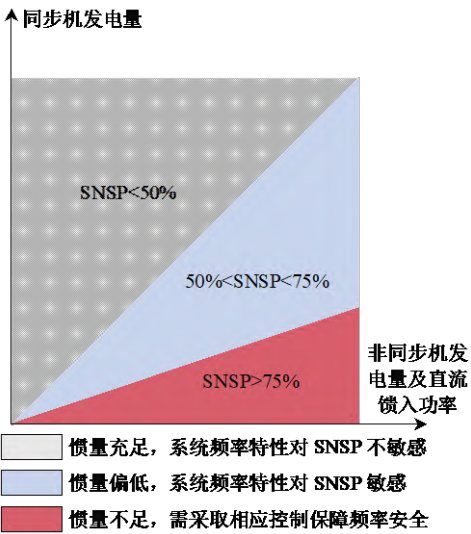


图 5 SNSP 对爱尔兰电网频率安全性的影响

Fig. 5 Impacts of SNSP on the frequency security of Irish power grid

频率调控手段多样化丰富了电力系统内调频资源的种类，不同调频资源提供的调频服务的特性也具有显著差异。在低惯量电力系统中，由同步机所提供的频率支撑能力降低，扰动后频率变化剧烈，难以为后续的调频措施提供足够多的响应时间，调频资源的响应时间将成为未来电力系统频率安全的重要决定性因素^[98]，调频资源的响应速度被作为反映不同调频控制手段的重要指标。

频率时空分布差异化将凸显电力系统调频资源分布对于系统频率安全性的重要影响。文献提出了一种基于 PMU 频率量测数据的惯量分布指标(inertia distribution index, IDI)^[99], 各节点 IDI 指标的数值取决于特定扰动后一定时间内该节点频率与惯量中心频率的偏差, IDI 数值越大表明该节点离惯量中心的电气距离较远且该节点所处区域的惯量水平较低。在系统的调频备用相同时参与调频的机组越多, 系统的频率响应特性越好, 调频机组数量(count of governors, COD)可被作为反映调频备用在机组间分配均匀性的重要指标^[100]。网络特性也是频率时空分布特性的重要影响因素, 文献[27]基于平均出线度和节点阻抗矩阵定义了网络拓扑量化指标, 并在一个四区域系统中分析了网络拓扑与潮流对于频率动态特性的影响。此外, 文献[101-102]建立了一套刻画频率时空分布的差异化程度的量化指标。

3 双高电力系统频率响应的改善措施

针对双高电力系统下传统调频资源稀缺化和频率动态机理复杂化的趋势, 目前不少学者提出了更加精细化的调控措施, 以充分利用双高电力系统内多样化调频资源改善系统频率安全性。本章将综述逆变器控制、低频减载和直流紧急功率、调度优化和市场机制这 5 个方面的新进展。其中, 前三类属于控制措施, 在系统出现扰动后校正电网频率, 避免系统频率出现越限; 而后两类则属于调度措施, 通过扰动前合理配置调频资源提升电力系统的频率响应能力。这 5 类改善措施与双高电力系统频率响应的新特性的关系如图 6 所示。

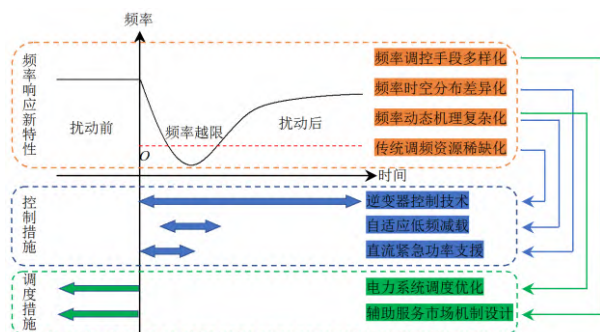


图 6 双高电力系统频率响应改善措施

Fig. 6 Improvement measures for frequency response of High-RE-PE power systems

3.1 逆变器控制技术

风电、光伏等间歇性可再生能源与各类直流负荷并不能直接并入交流同步电网, 需要借助电力电

子设备实现电能形式的转换。相较于同步发电机, 电力电子设备响应速度快, 控制自由度高, 因而可采用多样化的控制模式。目前逆变器的控制模式大致可被分为两大类: GFL 和 GFM。GFL 逆变器采用锁相环追踪并跟随电网频率, 通过控制器中内嵌的功频特性曲线确定逆变器输出功率, 进而改变电流控制环中的参考电流值, 控制逆变器输出的 d 轴电流和 q 轴电流, 因而 GFL 逆变器在并网特性上近似于一个受控电流源^[103]。GFL 是目前实际系统中风电或光伏并网逆变器中普遍采用的控制方式, 能够方便地控制逆变器的有功、无功及故障电流^[104], 但其受控电流源的特性也带来了一定的局限性。一方面, GFL 逆变器不能控制其所在节点的电压幅值与相角, 其稳定运行必须依赖外界电网提供一个相对稳定的节点电压, 难以独立运行, 仅依靠 GFL 逆变器不能保证双高电力系统的稳定运行^[58]; 另一方面, GFL 逆变器的内环控制为电流控制环节, 而外环控制为功率控制环节, 因而其响应速度和稳定性均要弱于 GFM 逆变器^[105]。为保证其稳定性, 对于控制器内嵌的功频控制曲线有着较多的限制, 实际工程中的 GFL 控制方法通常都较为简单, 如 Frequency-Watt^[106]和虚拟惯量控制^[107]等。

为克服 GFL 逆变器上述的局限性, GFM 逆变器成为近年来学术界研究的热点。与 GFL 控制逆变器输出电流不同, GFM 直接控制逆变器输出电压的幅值与相角, 因而 GFM 型逆变器在并网特性上呈现出电压源特性, 可以为系统的电压和频率提供支撑, 也可独立运行^[108]。根据对输出电压控制方式的不同, GFM 包括下垂控制(droop control)^[109], 虚拟同步控制(virtual synchronous machine, VSM)^[110], 匹配控制(matching control)^[111]和可控虚拟振荡控制(dispatchable virtual oscillator control)^[112]等。这 4 种逆变器控制方式的技术出发点有所不同: 下垂控制根据输出有功功率与有功功率参考值之间的偏差线性调整节点电压频率, 这种控制方式最为简单, 但由于是滞后控制, 因而在扰动初期并不能为系统频率提供有力支撑, 对频率最低点的改善作用较弱; 虚拟同步控制则是试图在并网特性上尽可能模拟同步机特性, 为系统提供与同步机相近的惯量支撑与调频服务; 匹配控制利用了逆变器直流母线电压与同步机转子转速的相似性, 二者的变化均反映了系统有功功率的不平衡程度, 因而在匹配控制中定义了基于直流母线电压的“虚拟频率”,

匹配控制减少了逆变器过压限制对控制性能的影响,因而在大扰动下具有较高的鲁棒性;可控虚拟振荡控制则主要是为了解决多个逆变器在全分布式控制下的稳定性问题,这种方法通过合理的参数设计可以基本保证逆变器在正常运行下的全局渐近稳定性。文献[105]对比了多种情形下4种GFM的调频性能。

在诸多的逆变器控制方法中,VSM技术得到了工业界较多的关注,并在一些示范工程中得到了初步的应用,张北风光储示范工程已于2017年建设完成118MW风机VSM、12MW光伏VSM与10MW储能VSM^[113]。虚拟同步机的突出优势在于其与传统同步发电机具有非常相近的并网特性,因而可以基本沿用目前电网中非常成熟的基于同步机的运行调控技术和保护方式,能够较为平滑地实现传统电力系统向双高电力系统的过渡。VSM技术思路最早在文献[114-115]提出,在此后得到学术界持续而深入的研究。目前VSM的一般结构如图7所示,为实现与同步机相近的并网特性,VSM在很大程度上借鉴了传统同步机的物理结构。传统同步机主要由定子和转子组成,同步机定子实现了机械能向工频交流电的能量形式转换功能,VSM内的“虚拟定子”则是以电力电子逆变器为核心的电路部分,实现了直流电或非工频交流电向工频交流电的转换;同步机转子可以实现3类功能:1)电机转子转速与电网的同步;2)在频率变化时,通过转子动能的变化为电网提供频率支撑;3)借助调速器改变原动机出力。在VSM内则通过控制部分的同步环节、频率控制和电压控制环节构造了一

个“虚拟转子”,以实现与同步机物理转子相近的功能。

虽然VSM与同步机在并网特性上具有非常多的共性,但电力电子设备自身的物理特性也给VSM带了一些其独有的“个性”。其一,电力电子设备响应速度快,控制自由度高,为控制参数的设置提供了更多的灵活性,文献[116]提出了一种自适应调整惯量和阻尼的虚拟同步机制方法;文献[117]指出通过动态调整风电提供的虚拟惯量大小可以显著提升系统运行的经济效益。其二,电力电子设备对于过电压和过电流更为敏感,VSM必须增加过流和过压限制环节^[118],故障状况下短路电流和电压穿越能力显著弱于同步机,制约了虚拟同步机的调频性能;其三,与同步机响应速度受到汽轮机、水轮机物理特性的制约不同,VSM主要受到控制环节延时的制约,采用复杂的锁相环将显著影响VSM的动态特性,文献[119]中提出的自同步虚拟同步逆变器,通过独特设计去掉了VSM中复杂的同步环节,极大提升了VSM的动态特性;其四,与同步机惯量响应能量源于转子动能不同,VSM则需要新能源电站采用降出力或与储能协调运行的方式来提供惯性响应的能量,对风电而言,桨叶中的转动动能可能是一种更经济的能量来源,但这种调频特性会受到风机最低转速的限制,且可能诱发系统频率的二次跌落^[117]。因此近年来不少学者提出了基于风机出力特性的个性化频率支持方案^[120-121]。

3.2 自适应低频减载

低频减载是电力系统频率安全控制中的最后一道防线^[122],是在大扰动下防止连锁故障和大停电的有效措施,因此,低频减载方案的设计要求是简单高效,快速可靠,鲁棒性强^[123-124]。目前应用最为广泛的是多轮次的低频减载方案^[125-126],在该方案中,各轮次的切负荷量和启动频率是固定不变的,具体数值的确定往往依赖于专家经验和对于一系列典型场景的分析^[123,127]。在双高电力系统中,可再生能源出力的强不确定性将使系统出现更多元化的极端运行场景,传统固定式的切负荷方式很难兼顾各类故障场景,这对电力系统的低频减载措施提出更高的要求。

鉴于双高电力系统频率动态机理复杂化的特性,故障状况后的最优切负荷量对系统惯量和可用调频资源十分敏感,而传统的多轮次切负荷方案缺乏对系统频率响应能力的感知力,导致其在绝大多

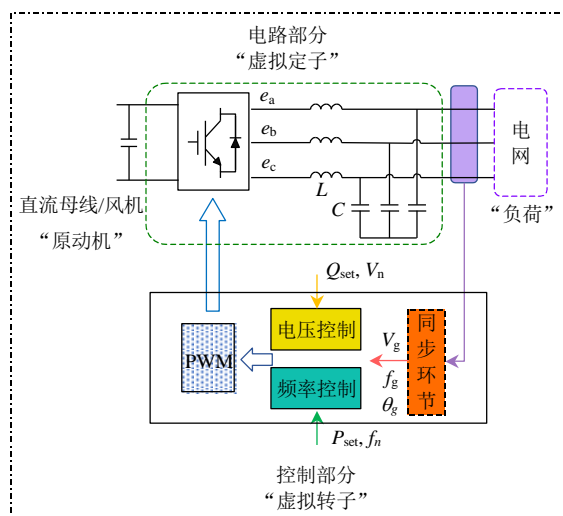


图7 虚拟同步机示意图

Fig. 7 Diagram of virtual synchronous machine

数情况下的切负荷量均不是最优的,影响了低频减载方案的经济性,而且在部分极低惯量场景下还可能由于切负荷的不及时对系统安全产生威胁。增强系统切负荷方案的自适应性是双高电力系统下低频减载技术的发展方向。其核心思想是通过引入更多对系统状态量的量测或估计信息提升低频减载控制对故障规模和系统频率响应能力的感知力,进而自适应优化调整切负荷量及切负荷位置^[128-129]。

在自适应调整切负荷量方面,根据低频减载方案中是否采用多轮次的切负荷框架可将其进一步划分为全自适应类和半自适应类。半自适应类低频减载方案保留了多轮次的低频减载框架,通过量测的频率变化率自适应调整各轮次的切负荷量^[130-131],这种半适应低频减载方案对通信快速性和测量精确度的要求相对较低,与现有电网的保护控制装置兼容性较好,但此方案中很多参数仍依赖于对调度人员的先验知识^[132]。而全自适应类低频减载方案则不再采用多轮次的低频减载方案,而是通过量测信息对故障后的频率动态有一个全局性的估计,进而直接确定出最优切负荷量。这种全局性的估计主要有两种实现思路,第一类思路是对造成频率波动的功率缺额进行估计,进而确定切负荷量^[124,133];第二种思路则是对频率动态过程进行预测,进而优化切负荷策略^[132,134]。全自适应低频减载理论上可以实现切负荷量的最优^[135],具有经济性好、及时性强的优点,但对系统量测和通信能力要求高^[136],其鲁棒性和可靠性也相对较弱。全自适应类低频减载方案的实用性很大程度上还依赖于WAMS的发展和电力系统信息化程度的提高^[137]。

双高电力系统频率时空分布的差异揭示了调频资源空间分布的重要性,确定切负荷位置也是未来自适应低频减载技术的重要任务。目前主要通过故障后的节点电压信息来确定切负荷位置,与频率主要反映全网的功率平衡关系不同,节点电压更多反映了电力系统局域的功率平衡关系。一般而言,在系统扰动后,扰动点附近的电压波动更大^[138-141],因而可据此对不同节点采取差异化的切负荷策略。文献[139]根据扰动后不同节点的电压变化程度调整各节点的低频减载触发频率,从而优先切除电压波动更大的节点负荷,即离扰动点更近的负荷优先被切除,从而更好地抑制系统频率的持续下降。文献[142]则利用功率追踪法分析频率安全故障后各节点的电压安全裕度,以此为依据选取合适的切负

荷节点。文献[143]提出了一种离线决策在线匹配的低频减载方案,利用离线阶段的无功优化模型得到切负荷量的份额分配预案,在线阶段进行事故类型辨识,匹配合适的切负荷预案。

3.3 直流紧急功率支援

频率时空分布的差异化将是未来双高电力系统的重要特征。对我国当前电力系统而言,虽然频率动态过程中节点频率差异还不显著,但可再生资源负荷中心逆向分布和交直流混联网架结构已造成调频资源在区域电网间的不均匀分布,使扰动后各区域频率动态过程可能存在显著差异,难以做到各区域调频资源的充分互济。因此,直流紧急功率支援将在维持双高电力系统的频率安全中发挥越来越重要的作用。

与交流输电线路不同,HVDC输电线路的传输功率不由两端交流系统的功角决定,而是由两侧换流站的控制系统确定^[144],因而可以主动参与到电力系统的调频过程之中。HVDC有诸多适用于紧急调度的特性,一方面,HVDC换流站中电力电子设备的控制响应速度远快于交流系统的常规控制器,且控制灵活度高,可以实现两侧交流系统间调频资源的快速互济,为故障侧电网频率提供有力支撑;另一方面,HVDC输电系统还具备一定的过负荷运行能力,我国HVDC线路通常可支撑2h的1.05~1.1倍长期过负荷运行和3s的1.2~1.5倍短时过负荷运行^[145-146],HVDC线路的过负荷运行能力提升了采取紧急直流调度措施的经济性。

在未来双高电力系统中,当HVDC所连接的电网出现故障时,可通过直流紧急调度调整HVDC的传输功率,实现非故障侧电网调频资源对故障侧的支援。通过对HVDC输电系统附加合适的频率控制环节,HVDC输电系统可以为故障电网提供惯性响应和一次调频^[147],改善故障侧电网的频率动态特性,对于VSC-HVDC,由于其高度的灵活可控性,还可以进一步采用虚拟同步控制,使得VSC-HVDC对所接入的交流系统呈现出与同步机相近的特性^[42,149]。文献[150]还进一步提出了主动频率控制的思想,即在扰动后通过通信等手段主动控制系统内的调频资源实现同步响应,通过联络线做到各区域间调频资源的充分互济,降低频率时空分布差异化造成的调频资源响应不同步的影响。在HVDC进行直流功率支援时,HVDC系统与交流系统之间以及多个HVDC输电线路之间的相互协调对

于电力系统的频率安全稳定至关重要。文献[151-152]分别提出了直流功率支援因子和多送端直流功率相互支援的归一化指标,这些指标可为选取合适HVDC输电线路参与紧急功率支提供参考。

3.4 面向频率安全的电力系统调度优化

随着双高电力系统频率动态机理的复杂化,由静态功频特性确定的频率备用需求难以适配双高电力系统下的海量场景,使得传统的电力系统调度方法可能同时面临安全性和经济性的双重问题。因此,需要在调度运行模型中建模系统的频率动态约束,以更好地权衡电力系统运行的安全性与经济性。

文献[153]是较早早在电力系统机组组合模型中考虑频率响应特性的研究之一,该研究能保证系统一次调频和三次调频备用的充裕性,但该研究中的考察对象是系统扰动后的准稳态频率而非频率动态过程中的频率最低点。文献[154]提出了一种考虑频率最低点的机组组合模型,但该模型中对故障后频率最低点的估计依赖于历史数据,不便于推广拓展。此后,有不少文献研究了基于模型分析法的频率安全约束运行模型,在系统运行模型中引入频率变化率、频率最低点和准稳态频率的约束条件,其中的主要难点在于对频率最低点安全约束的建模。在忽略系统负荷阻尼特性并简化调速器特性的前提假设下,文献[75]提出了考虑频率安全约束的最优潮流模型,并采用了美国德州电力系统验证了所提方法的作用。文献[65]基于系统频率响应模型,解析化计算了系统频率动态中的频率最低点,并利用分段线性化方法得到了适合于机组组合模型的线性频率安全约束,最后采用六机系统验证了模型的有效性。文献[53]建立了线性的系统频率安全约束,并将其运用到随机机组组合模型当中。文献[64]提出了频率安全裕度的概念来量化电力系统的频率响应能力,并建模了基于频率安全裕度的频率安全约束,分析了高比例可再生能源对于电力系统频率安全性的影响。由于频率动态过程本质上一个高阶非线性微分方程,因而上述研究在形成频率最低点安全约束时必然会进行一系列的近似或简化,文献[155]提出了一套频率安全约束的性能评估框架,所提的评价指标可量化评估频率安全约束的精度、保守性和可靠性。

有部分文献研究了多样化调频资源参与电力系统优化调度所带来的经济效益。文献[64,66]均在机组组合模型中建模了采用虚拟同步控制的可再

生能源发电机组,并定量评估了虚拟同步控制技术带来的经济效益。文献[156]提出了考虑储能快速频率响应能力的机组组合模型,并基于此模型分析了储能参与调频在提升电力系统频率安全性方面的作用。文献[157]通过频率安全约束的机组组合模型揭示了电热耦合在提升电力系统频率安全性上的效益。文献[158]则将关注点放在了需求侧的恒温负荷上,通过所提出的运行模型展现了恒温负荷在提升系统频率安全性上的潜力和价值。

3.5 调频辅助服务市场机制设计

市场化是我国电力系统未来的发展方向,调频问题的解决也将更加依赖于电力市场机制的合理设计。我国电力市场由容量市场,能量市场和辅助服务市场组成。但随着可再生能源占比的逐渐增高,边际发电成本将呈现下降的趋势,为了消纳可再生能源所需的辅助服务费用将呈现上升趋势^[159]。辅助服务市场设计将是未来解决双高电力系统频率安全问题的重要途径。

调频辅助服务应当设置合理的补偿和分摊机制,从而有效激励市场内的各类调频资源提供高质量的调频辅助服务并引导可再生能源减少其出力的波动性,进而降低系统出现频率安全问题的概率。在减少系统功率扰动方面,文献[160]对电力市场中调频辅助服务的成本传递路径进行了研究,分析了电力系统频率波动的原因,对电力市场中各参与者的调频引发责任进行了计算,并设计了一套调频辅助服务成本的分摊机制,实现了基于引发责任的调频成本分摊。文献[161]提出了一种可再生能源动态并网价格的动态计算方法,在可再生能源的并网电价中体现了其出力波动性和随机性所带来的额外调频辅助服务成本,从而能够激励可再生能源减少其出力的波动性。在激励多样化调频资源提供辅助服务方面,文献[162-163]分别研究了如何在电力系统中对电动汽车和储能所提供的调频辅助服务进行合理补偿,从而更好地激励他们参与到电力系统的调频过程之中。虚拟电厂是在电力市场环境下一大来源,可为电力系统提供调频和备用等多种类型辅助服务,文献[164]研究了虚拟电厂所提供的调频服务的定价出清策略。

传统的调频和备用辅助服务主要针对的是短期负荷预测误差和机组非计划停运等偶发性故障^[165]。但在双高电力系统中,频率动态机理复杂程度提升,一次调频过程中的频率安全问题将日益

凸显,惯量和快速频率响应能力将成为电力系统内的重要稀缺资源,由火电和水电等传统同步机组提供的日益稀缺的传统调频资源很难完全保障电力系统的频率安全性,也难以兼顾系统运行的经济性,需要面向双高电力系统设置更加精细化的辅助服务类型和合理的定价出清机制。文献[166-167]分析了在电力市场中引入一次调频辅助服务的必要性。文献[56]提出了针对一次调频辅助服务的补偿定价策略,通过对历史负荷数据的分析,提出了基于系统净负荷的调频资源需求确定方法及快速调频响应的补偿定价方式。文献[168]设计了一种针对一次调频和二次调频的辅助服务定价出清机制。文献[169]研究了高比例可再生能源并网电力系统的能量与调频辅助服务联合优化出清市场及其纳什均衡。

4 研究展望

在能源革命和“碳中和”的大背景下,双高将成为电力系统不可逆转的发展趋势。目前学术界针对双高电力系统的频率安全问题已从多个方面开展一系列研究,取得了一定的研究进展,但尚未形成成熟和完善的理论与方法体系,本文认为需要在如下几个方面进一步开展研究。

4.1 多逆变器协调调控技术

传统并网逆变器研究的技术出发点通常是如何合理设置单个逆变器的控制算法使之更好地适应以同步机为主的电力系统。但在双高电力系统中,逆变器将逐渐取代同步机并成为系统内主要的并网装置,系统的频率响应特性也将逐渐由以同步机决定转变为主要由逆变器控制特性所影响。逆变器控制的研究思路也需转变为如何控制逆变器群构建一个频率响应能力足够强的双高电力系统。在同步机支撑能力足够强时,基于传统研究思路所提出的逆变器控制方法往往能够达到其设计目标,但当系统内同步机逐步减少时,这种面向以同步机为主电力系统的研究思路可能会带来一系列问题,如GFL型逆变器难以独立运行,电力电子化新型振荡^[170],短路电流下降^[171]等,这种设计思路将给电力系统的运行、控制和保护带来较大的挑战。为保障双高电力系统的安全稳定运行,有必要深入研究多逆变器及多类型逆变器协调调控技术。从规划层面,不同逆变器控制算法在设计上有着不同的技术出发点,因而具有差异化的调频特性,在不同的应

用场景下可能各有优劣,有必要从系统层面分析各类逆变器控制技术的适配场景,研究双高电力系统不同发展阶段下不同控制策略逆变器的最优配比,如确定不同可再生能源渗透率下GFL和GFM逆变器的合理比例等;从运行层面,相较于传统同步机,电力电子逆变器控制自由度高、响应速度快,具有更强的可控性和可观性,信息和通信将在高比例电力电子设备电力系统中发挥出更大的价值,可研究基于全景信息感知^[172]的多类型逆变器协调运行方法;从控制层面,由于单个逆变器额定功率较低,因而在未来电力系统中将存在海量的逆变器,海量逆变器的相互协调需要一个合理的控制架构,有必要研究全分布式或半分布式的逆变器群控制方法,并可进一步研究多逆变器控制参数的协调优化。

4.2 异质调频资源的通用化建模和分析框架

调频控制手段多样化是未来双高电力系统的重要特性。但在现有研究中不同调频资源的建模方式差异化明显,这使得电力系统调度优化模型和市场机制往往需要根据不同类型的调频资源进行“定制化”设计,难以进行异质调频资源的综合利用和效益评估。面向未来双高电力系统,有必要研究异质调频资源的通用化建模和分析框架。针对规划和市场出清等对计算效率要求较高的场景,可基于调频效果研究异质调频资源与传统同步机的等效方法,为未来双高电力系统的规划和辅助服务市场下调频资源的配置提供重要参考;针对系统运行这类对模型精度要求较高的场景,可从调频过程的视角出发,研究调频资源调频特性的关键特征量的提取与辨识技术,提出海量异质调频资源的聚合分析理论,建立考虑海量异质调频资源的频率安全约束运行模型,实现对异质调频资源的综合调度。

4.3 具有可解释性的精细化频率响应分析方法

频率动态机理复杂化对频率响应分析方法提出更高的要求。目前的时域分析法、模型分析法和机器学习法各有优劣,但还均不能完全满足未来双高电力系统在频率响应分析方面的实际需要。其一,双高电力系统的低惯量特性将导致系统在扰动后的频率波动更加剧烈,因此要求频率响应分析方法具有很高的精度;其二,双高电力系统内将有着更多类型的调频资源,对频率响应分析方法的可扩展性提出了要求,需要分析方法中能够考虑多类不同特性调频服务。其三,可再生能源的高不确定性

给双高电力系统带来了海量的运行场景,针对大量场景进行高精度的时域仿真分析并不现实,因此迫切需要频率响应分析方法能够提供一些具有较强解释性的结论。为满足双高电力系统的实际需求,有必要进一步提升频率响应分析方法的精度、可扩展性和可解释性。一种可行的思路是将模型驱动与数据驱动结合起来^[173-174],采用模型分析法得到的一系列规律性结论来引导机器学习法中的特征选取和模型训练,提升基于机器学习的频率响应分析结果的可解释性。

4.4 频率时空特性约束的多区域电力系统运行调度

频率时空分布差异化是双高特性下日益突出的一个特征,但目前研究中对频率时空分布差异化的关注相对较少,这一研究领域仍有不少难点有待研究和解决。一方面,需要研究频率时空分布特性量化指标的快速评估方法,目前对频率时空分布特性量化指标的获取还主要依赖于实测频率数据或时域仿真法得到的频率动态曲线^[101-102],难以对这些指标进行快速评估和灵敏度分析,分频器理论可能是解决这一问题的一种可行思路^[84]。另一方面,目前电力系统调度优化对频率时空分布特性的关注较少,在调度优化模型中往往采用惯量中心假设且仅考虑单区域系统,难以体现扰动后频率时空分布特性上的差异,不能充分实现不同区域调频资源的互济,可能对电力系统的安全性和经济性产生较大影响。有必要进一步研究频率时空特性约束的多区域电力系统运行调度方法。

4.5 电力电子化电力系统的有功调控方式

有功功率的实时平衡是电力系统运行调度控制的基本任务。在传统电力系统中,维持系统扰动后的有功功率平衡主要依靠火电、水电等同步发电机组调节出力匹配负荷,同步机的物理机理决定其输出有功功率、转子转速与系统频率之间存在较强的“刚性”关系,因而频率很自然地成为传统电力系统中联系各同步机有功控制的重要纽带,系统频率可方便反映系统有功功率平衡关系,采用一次调频、二次调频和三次调频可以较好地实现各时间尺度上有功功率的平衡控制。但对双高电力系统而言,来自同步机的调频资源将逐渐稀缺,需要依靠源网荷储侧更多样化灵活性资源的共同调节来维持系统的实时有功平衡,电力电子设备将成为系统内主要的并网装置。电力电子设备不具有物理的转

动结构,并不自然具有有功功率与频率之间的“刚性”关系,控制环节的差异化设计还可能使得逆变器具有多样化的有功功率调节特性,因此对未来双高电力系统的有功控制方式而言,可能存在着两种截然不同的发展路线,对电力系统的有功控制机理将产生很大影响。

第一种发展路线是系统内绝大部分逆变器模拟传统同步机发电特性,如采用虚拟同步控制,此时系统有功功率控制仍以频率为主要控制对象,在频率响应特性上与传统电力系统差异不大,很大程度上仍可沿用传统的基于同步机的运行调控技术和保护方式,可以实现传统电力系统向双高电力系统的平滑过渡。在这种发展路线下,系统的有功控制机理并没有根本性变化,但系统内调频资源特性差异明显,均模拟同步机特性可能并不是效率最优的方式,并可能对于提供调频资源的源网荷储设备在非故障状况下的运行调度产生较大的影响。

第二种发展路线则是充分发挥逆变器控制自由度高的优势,不再要求逆变器必须采用有功-频率的控制模式,而时根据逆变器所连接调频资源的特性采取个性化的控制方式,进而提升系统有功调控的效率;在这种发展路线下,系统有功功率与频率之间的刚性耦合可能被打破,系统有功调控的机理将被重构。如何协调系统海量逆变器高效参与系统有功调控将成为主要的技术挑战,做到协调可能仍需要寻找一个“广义频率”来实现传统电力系统内频率的两大功能:1)反映系统有功平衡关系;2)引导灵活性资源参与有功调控。这一“广义频率”可能是系统内电压电流幅值、频率或相角,或线路有功无功潮流,或为多种量的综合值等。双高电力系统的有功调控方式将与所选取的“广义频率”特性密切相关,若“广义频率”可反映全系统的有功平衡关系,则可借鉴传统电力系统中基于频率的控制架构,若“广义频率”仅表征了系统局部的有功平衡关系,则更有可能采用分布式控制或云边协同等技术手段。且电力电子设备的过压过流能力也明显弱于同步机,所采用的有功调控方式应具有较高的可靠性与及时性。

“频率-功率”控制是当前最适应以交流电网和同步机为主要特征的传统电力系统的有功调控方式;但对于以交直流混联和电力电子设备为特征的双高电力系统,现阶段对其平衡机理的认识还不够深入,其调控方式是一个非常值得研究的问题,

上面讨论的两种发展路线的可行性和经济性也尚待进一步的研究; 面向碳中和目标, 我国电力系统无论从网架结构还是电源形态上都将发生巨大的变化, 有必要对未来电网的有功平衡方式做出前瞻性的研究并合理规划其演化路径。

5 结语

频率问题正在成为我国电力系统低碳化转型过程中所面临的重要挑战。本文从近年来发生的几起频率安全事故出发, 分析了双高电力系统频率响应的4个新特性, 综述和对比了3类频率响应特性分析方法, 在此基础上分析了有望改善频率响应特性的5个方面的关键技术, 并在文末围绕4个新特性对未来双高电力系统频率安全问题的研究进行了展望和总结, 希望本文能为提升双高电力系统的频率经济性和安全性提供有益的参考, 助力我国碳中和目标的实现。

参考文献

- [1] 安琪. 新形势下构建能源技术创新体系思路与措施[J]. 中国能源, 2020, 42(11): 40-43.
AN Qi. Policy frame and measures for constructing an energy technology innovation system under the new situation[J]. Energy of China, 2020, 42(11): 40-43(in Chinese).
- [2] 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): 2-11.
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): 2-11(in Chinese).
- [3] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2020[R]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020.
China Electricity Council. China Power Industry Annual Development Report 2020[R]. Beijing: China Building Materials Press, 2020(in Chinese).
- [4] 国家发展改革委员会能源研究所. 中国2050高比例可再生能源发展情景暨途径研究[R]. 北京: 国家发展改革委员会能源研究所, 2015.
Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. China 2050 High Renewable Energy Penetration Scenario and Roadmap Study[R]. Beijing: Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, 2015.
- [5] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11(in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8(in Chinese).
- [9] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020(in Chinese).
- [10] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771(in Chinese).
- [11] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in china[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008(in Chinese).

- [12] 刘静琨, 张宁, 康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3361-3371.
LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3361-3371(in Chinese).
- [13] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 194-207.
JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 194-207(in Chinese).
- [14] 陈沼宇, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑 P2G 多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3067-3077.
CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3067-3077(in Chinese).
- [15] LI Jiarong, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Operation optimization of power to hydrogen and heat(P2HH) in ADN coordinated with the district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1672-1683.
- [16] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-19.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-19(in Chinese).
- [17] 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): 4720-4731.
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): 4720-4731(in Chinese).
- [18] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China grid after bipolar locking of “9·19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155(in Chinese).
- [19] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6(in Chinese).
- [20] 方勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 1-5.
FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5(in Chinese).
- [21] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [22] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109369.
- [23] European Network of Transmission System Operators for Electricity. High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources(HPoPEIPS): ENTSO-E guidance document for national implementation for network codes on grid connection[EB/OL]. (2017-03-29)[2018-09-14].
https://consultations.entsoe.eu/system-development/entso-e-connection-codes-implementation-guidance-d-3/user_uploads/igd-high-penetration-of-power-electronic-interfaced-power-sources.pdf.
- [24] 胡泽春, 罗浩成. 大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 2-15.
HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 2-15(in Chinese).
- [25] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [26] MA Ningning, WANG Delin. Extracting spatial-temporal characteristics of frequency dynamic in large-scale power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,

- 34(4): 2654-2662.
- [27] FRADLEY J, PREECE R, BARNES M. The influence of network factors on frequency stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2826-2834.
- [28] MARTÍNEZ-SANZ I, CHAUDHURI B, JUNYENT-FERRÉ A, et al. Distributed vs. concentrated rapid frequency response provision in future great britain system[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston: IEEE, 2016: 1-5.
- [29] BADESA L, TENG Fei, STRBAC G. Conditions for regional frequency stability in power system scheduling—Part I: theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3073083.
- [30] 李卫东, 晋萃萃, 温可瑞, 等. 大功率缺失下主动频率响应控制初探[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 22-30. LI Weidong, JIN Cuicui, WEN Kerui, et al. Active frequency response control under high-power loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 22-30(in Chinese).
- [31] 李兆伟, 方勇杰, 黄慧, 等. 系统保护中跨区直流频率调制与紧急功率支援的协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 31-36. LI Zhaowei, FANG Yongjie, HUANG Hui, et al. Coordinated control of cross-region DC frequency control and emergency power support in system protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 31-36(in Chinese).
- [32] 王印峰, 陆超, 李依泽, 等. 一种配电网高精度快响应同步相量算法及其实现[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 753-760. WANG Yinfeng, LU Chao, LI Yize, et al. A high-accuracy and fast-response synchrophasor algorithm and its implementation for distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 753-760(in Chinese).
- [33] 刘克天, 王晓茹, 薄其滨. 基于广域量测的电力系统扰动后最低频率预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2188-2195. LIU Ketian, WANG Xiaoru, BO Qibin. Minimum frequency prediction of power system after disturbance based on the WAMS data[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2188-2195(in Chinese).
- [34] 陈冠宏, 刘东, 翁嘉明. 电力调频系统的信息物理融合建模及其在容错控制中的应用[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2376-2383. CHEN Guan hong, LIU Dong, WENG Jiaming. Cyber physical modeling of power frequency control system and its application in fault-tolerant control[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2376-2383(in Chinese).
- [35] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB38755—2019 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB38755—2019 Code on security and stability for power system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019(in Chinese).
- [36] 钟诚, 周顺康, 严干贵, 等. 基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1013-1024. ZHONG Cheng, ZHOU Shunkang, YAN Gangui, et al. A new frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve level control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1013-1024(in Chinese).
- [37] TAN Jin, ZHANG Yingchen. Coordinated control strategy of a battery energy storage system to support a wind power plant providing multi-timescale frequency ancillary services[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1140-1153.
- [38] 孙铭, 徐飞, 陈磊, 等. 利用转子动能的风机辅助频率控制最优策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 506-513. SUN Ming, XU Fei, CHEN Lei, et al. Optimal auxiliary frequency control strategy of wind turbine generator utilizing rotor kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 506-513(in Chinese).
- [39] LI Yujun, XU Zhao, ØSTERGAARD J, et al. Coordinated control strategies for offshore wind farm integration via VSC-HVDC for system frequency support[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 843-856.
- [40] LU Zongxiang, YE Yida, QIAO Ying. An adaptive frequency regulation method with grid-friendly restoration for VSC-HVDC integrated offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3582-3593.
- [41] NANO S I, PAPATHANASSIOU S A. Frequency control of island VSC-HVDC links operating in parallel with AC interconnectors and onsite generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 447-454.
- [42] CAO Yijia, WANG Weiyu, LI Yong, et al. A virtual synchronous generator control strategy for VSC-MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 750-761.
- [43] LOPES J A P, SOARES F J, ALMEIDA P M R. Integration of electric vehicles in the electric power

- system[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 168-183.
- [44] BEIL I, HISKENS I, BACKHAUS S. Frequency regulation from commercial building HVAC demand response[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(4): 745-757.
- [45] LIU Hui, QI Junjian, WANG Jianhui, et al. EV dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of EV owners[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3763-3772.
- [46] CAI Jie, BRAUN J E. Laboratory-based assessment of HVAC equipment for power grid frequency regulation: methods, regulation performance, economics, indoor comfort and energy efficiency[J]. Energy and Buildings, 2019, 185: 148-161.
- [47] ZHAO Changhong, TOPCU U, LI Na, et al. Design and stability of load-side primary frequency control in power systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(5): 1177-1189.
- [48] DELAVARI A, KAMWA I. Sparse and resilient hierarchical direct load control for primary frequency response improvement and inter-area oscillations damping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5309-5318.
- [49] MARINELLI M, MARTINENAS S, KNEZOVIC K, et al. Validating a centralized approach to primary frequency control with series-produced electric vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 7: 63-73.
- [50] LIN Yashen, BAROOAH P, MEYN S, et al. Experimental evaluation of frequency regulation from commercial building HVAC systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 776-783.
- [51] DIVYA K C, ØSTERGAARD J. Battery energy storage technology for power systems—an overview[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 511-520.
- [52] AKRAM U, NADARAJAH M, SHAH R, et al. A review on rapid responsive energy storage technologies for frequency regulation in modern power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 120: 109626.
- [53] TENG Fei, TROVATO V, STRBAC G. Stochastic scheduling with inertia-dependent fast frequency response requirements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1557-1566.
- [54] HOU Qingchun, DU Ershun, ZHANG Ning, et al. Impact of high renewable penetration on the power system operation mode: a data-driven approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 731-741.
- [55] HOU Qingchun, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Probabilistic duck curve in high PV penetration power system: concept, modeling, and empirical analysis in China[J]. Applied Energy, 2019, 242: 205-215.
- [56] LI Weifeng, DU Pengwei, LU Ning. Design of a new primary frequency control market for hosting frequency response reserve offers from both generators and loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4883-4892.
- [57] DU Wei, TUFFNER F K, SCHNEIDER K P, et al. Modeling of grid-forming and grid-following inverters for dynamic simulation of large-scale distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2035-2045.
- [58] MATEVOSYAN J, BADRZADEH B, PREVOST T, et al. Grid-forming inverters: are they the key for high renewable penetration?[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(6): 89-98.
- [59] 陈绪江, 张星, 田芳, 等. 含大量电磁直流模型的机电—电磁暂态混合仿真技术研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1203-1210.
- CHEN Xujiang, ZHANG Xing, TIAN Fang, et al. Electromechanical-electromagnetic hybrid simulation technology with large number of electromagnetic HVDC models[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1203-1210(in Chinese).
- [60] 刘洪波, 边娣, 孙黎, 等. 交直流混联系统机电—电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 39-47.
- LIU Hongbo, BIAN Di, SUN Li, et al. Electromechanical transient-electromagnetic transient hybrid simulation of AC/DC hybrid system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 39-47(in Chinese).
- [61] SHU Dewu, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. A multirate EMT Co-simulation of large AC and MMC-based MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1252-1263.
- [62] DREIDY M, MOKHLIS H, MEKHILEF S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 144-155.
- [63] NAKIGANDA A M, DEGHAN S, MARKOVIC U, et al. A stochastic-robust approach for resilient microgrid investment planning under static and transient islanding security constraints[EB/OL]. (2020-07-07). <https://arxiv.org/abs/2007.03149>.
- [64] ZHANG Ziyang, DU Ershun, TENG Fei, et al. Modeling

- frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4383-4395.
- [65] AHMADI H, GHASEMI H. Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1536-1545.
- [66] PATURET M, MARKOVIC U, DELIKARAOGLU S, et al. Stochastic unit commitment in low-inertia grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3448-3458.
- [67] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 大规模风电并网条件下考虑动态频率约束的机组组合[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2513-2519.
- WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Dynamic frequency constraint unit commitment in large-scale wind power grid connection[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2513-2519(in Chinese).
- [68] SHI Qingxin, LI Fangxing, HU Qinran, et al. Dynamic demand control for system frequency regulation: concept review, algorithm comparison, and future vision[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 154: 75-87.
- [69] PULENDRAN S, TATE J E. Energy storage system control for prevention of transient under-frequency load shedding[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 927-936.
- [70] WANG Siqi, TOMSOVIC K. Fast frequency support from wind turbine generators with auxiliary dynamic demand control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3340-3348.
- [71] LI Changgang, WU Yue, SUN Yanli, et al. Continuous under-frequency load shedding scheme for power system adaptive frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 950-961.
- [72] WANG Guannan, XIN Huanhai, GAN Deqiang, et al. An investigation into WAMS-based Under-frequency load shedding[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego: IEEE, 2012: 1-7.
- [73] EGIDO I, FERNANDEZ-BERNAL F, CENTENO P, et al. Maximum frequency deviation calculation in small isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1731-1738.
- [74] TENG Fei, TROVATO V, STRBAC G. Stochastic scheduling with inertia-dependent fast frequency response requirements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1557-1566.
- [75] CHÁVEZ H, BALDICK R, SHARMA S. Governor rate-constrained OPF for primary frequency control adequacy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1473-1480.
- [76] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(4): 1637-1642.
- [77] SHI Qingxin, LI Fangxing, CUI Hantao. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6355-6367.
- [78] JU Ping, ZHENG Yi, JIN Yuqing, et al. Analytic assessment of the power system frequency security[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(15): 2215-2225.
- [79] LI Changgang, WU Yue, SUN Yanli, et al. Continuous under-frequency load shedding scheme for power system adaptive frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 950-961.
- [80] XU Ti, JANG W, OVERBYE T. Commitment of fast-responding storage devices to mimic inertia for the enhancement of primary frequency response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1219-1230.
- [81] MU Yunfei, WU Jianzhong, EKANAYAKE J, et al. Primary frequency response from electric vehicles in the Great Britain power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1142-1150.
- [82] LI Hongyu, JU Ping, GAN Chun, et al. Analytic analysis for dynamic system frequency in power systems under uncertain variability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 982-993.
- [83] 李常刚, 刘玉田, 张恒旭, 等. 基于直流潮流的电力系统频率响应分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 36-41.
- LI Changgang, LIU Yutian, ZHANG Hengxu, et al. Power system frequency response analysis based on the direct current loadflow[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 36-41(in Chinese).
- [84] MILANO F, ORTEGA A. Frequency divider[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1493-1501.
- [85] MILANO F, MANJAVACAS A O. Frequency-dependent model for transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 806-809.
- [86] SHEN Jiakai, LI Weidong, LIU Liu, et al. Frequency response model and its closed-form solution of two-machine equivalent power system[J]. IEEE

- Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2162-2173.
- [87] GENCO I, DIAO Ruisheng, VITTAL V, et al. Decision tree-based preventive and corrective control applications for dynamic security enhancement in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1611-1619.
- [88] PADRÓN S, HERNÁNDEZ M, FALCÓN A. Reducing under-frequency load shedding in isolated power systems using neural networks. Gran Canaria: a case study[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 63-71.
- [89] 杨丽, 孙元章, 徐箭, 等. 基于在线强化学习的风电系统自适应负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 74-83.
- YANG Li, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Adaptive load frequency control of wind power system based on online reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 74-83(in Chinese).
- [90] 文云峰, 赵荣臻, 肖友强, 等. 基于多层极限学习机的电力系统频率安全评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 133-140.
- WEN Yunfeng, ZHAO Rongzhen, XIAO Youqiang, et al. Frequency safety assessment of power system based on multi-layer extreme learning machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 133-140(in Chinese).
- [91] 胡益, 王晓茹, 滕予非, 等. 基于多层支持向量机的交直流电网频率稳定控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4104-4117.
- HU Yi, WANG Xiaoru, TENG Yufei, et al. Frequency stability control method of AC/DC power system based on multi-layer support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4104-4117(in Chinese).
- [92] DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. A high-efficiency network-constrained clustered unit commitment model for power system planning studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2498-2508.
- [93] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 183-223.
- WANG Xifan. Power System Optimal Planning[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990: 183-223(in Chinese).
- [94] ZOGRAFOS D, GHANDHARI M. Estimation of power system inertia[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston: IEEE, 2016: 1-5.
- [95] TUTTELBERG K, KILTER J, WILSON D, et al. Estimation of power system inertia from ambient wide area measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7249-7257.
- [96] O'SULLIVAN J, 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.
- [97] 曹伟, 张甜, 傅业盛, 等. 同步调相机增强电力系统惯性和改善频率响应的研究与应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 1-10.
- CAO Wei, ZHANG Tian, FU Yesheng, et al. Research and application for increasing inertia and improving frequency response of power system by using synchronous condenser[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 1-10(in Chinese).
- [98] SENEVIRATNE C, OZANSOY C. Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation—a literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 659-668.
- [99] PULGAR-PAINEMAL H, WANG Yajun, SILVA-SARAVIA H. On inertia distribution, inter-area oscillations and location of electronically-interfaced resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 995-1003.
- [100] MILLER N W, SHAO Miaolei, VENKATARAMAN S. California ISO (CAISO) Frequency Response Study[R]. New York: GE Energy Consulting, 2011.
- [101] 张恒旭, 刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 64-70.
- ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency responses[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70(in Chinese).
- [102] 张怡, 张恒旭, 李常刚, 等. 电力系统频率响应模式及其量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5877-5887.
- ZHANG Yi, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Power system frequency responses pattern and its quantitative analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5877-5887(in Chinese).
- [103] LASSETER R H, CHEN Zhe, PATTABIRAMAN D. Grid-forming inverters: a critical asset for the power grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 925-935.
- [104] ELKHATIB M E, DU Wei, LASSETER R H. Evaluation

- of inverter-based grid frequency support using frequency-watt and grid-forming PV inverters[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland: IEEE, 2018: 1-5.
- [105] TAYYEBI A, GROß D, ANTA A, et al. Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1004-1018.
- [106] HOKE A, GIRALDEZ J, PALMINTIER B, et al. Setting the smart solar standard: collaborations between Hawaiian electric and the national renewable energy laboratory[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2018, 16(6): 18-29.
- [107] DUCKWITZ D, FISCHER B. Modeling and design of df/dt -based inertia control for power converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1553-1564.
- [108] PATTABIRAMAN D, LASSETER R H, JAHNS T M. Comparison of grid following and grid forming control for a high inverter penetration power system[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Portland: IEEE, 2018: 1-5.
- [109] DE BRABANDERE K, BOLSENS B, VAN DEN KEYBUS J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [110] 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(in Chinese).
- [111] ARGHIR C, JOUINI T, DÖRFLER F. Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines[J]. Automatica, 2018, 95: 273-282.
- [112] COLOMBINO M, GROß D, BROUILLON J S, et al. Global phase and magnitude synchronization of coupled oscillators with application to the control of grid-forming power inverters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(11): 4496-4511.
- [113] 杨帆. 具备虚拟同步机功能的新能源电站在河北建成投运[EB/OL]. (2017-12-27)[2021-06-08]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/27/content_5250835.htm. YANG Fan. New energy stations with virtual synchronous control were put into operation in Heibe[EB/OL]. (2017-12-27)[2021-06-08]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/27/content_5250835.htm.
- [114] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]//2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona: IEEE, 2007: 1-6.
- [115] DRIESEN J, VISSCHER K. Virtual synchronous generators[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1-3.
- [116] LI Dongdong, ZHU Qianwei, LIN Shunfu, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 397-398.
- [117] CHU Zhongda, MARKOVIC U, HUG G, et al. Towards optimal system scheduling with synthetic inertia provision from wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 4056-4066.
- [118] GUAN Minyuan, PAN Wulue, ZHANG Jing, et al. Synchronous generator emulation control strategy for Voltage Source Converter(VSC) stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3093-3101.
- [119] ZHONG Qingchang, NGUYEN P L, MA Zhenyu, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [120] YOO J I, KANG Y C, YANG Dejian, et al. Power smoothing of a variable-speed wind turbine generator based on a two-valued control gain[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2765-2774.
- [121] YANG Dejian, KIM J, KANG Y C, et al. Temporary frequency support of a DFIG for high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3428-3437.
- [122] 李兆伟, 方勇杰, 李威, 等. 电化学储能应用于电网频率安全防御三道防线的探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 1-7. LI Zhaowei, FANG Yongjie, LI Wei, et al. Discussion on application of electrochemical energy storage in three defense lines of power grid frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 1-7(in Chinese).
- [123] 国家能源局. DL/T428—2010 电力系统自动低频减负荷技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011. National Energy Administration. DL/T428 — 2010 Technical rules for power system automatic under-frequency load shedding[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011(in Chinese).
- [124] TERZIJA V V. Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3):

- 1260-1266.
- [125] MILANO F, DÖRFLER F, HUG G, et al. Foundations and challenges of low-inertia systems(invited paper)[C]// 2018 Power Systems Computation Conference(PSCC). Dublin: IEEE, 2018: 1-25.
- [126] 赵强, 刘肇旭, 张丽. 对中国低频减载方案制定中若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 48-53. ZHAO Qiang, LIU Zhaoxu, ZHANG Li. Discussions on the several problems of under-frequency load shedding scheme in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 48-53(in Chinese).
- [127] HOSEINZADEH B, DA SILVA F F, BAK C L. Decentralized coordination of load shedding and plant protection considering high share of RESs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3607-3615.
- [128] CHUVYCHIN V N, GUROV N S, VENKATA S S, et al. An adaptive approach to load shedding and spinning reserve control during underfrequency conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1805-1810.
- [129] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2): 647-655.
- [130] AIK D L H. A general-order system frequency response model incorporating load shedding: analytic modeling and applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 709-717.
- [131] BANIJAMALI S S, AMRAEE T. Semi-adaptive setting of under frequency load shedding relays considering credible generation outage scenarios[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 1098-1108.
- [132] RUDEZ U, MIHALIC R. Wams-based underfrequency load shedding with short-term frequency prediction[J]. IEEE Transactions On Power Delivery, 2016, 31(4): 1912-1920.
- [133] REDDY C P, CHAKRABARTI S, SRIVASTAVA S C. A sensitivity-based method for under-frequency load-shedding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 984-985.
- [134] RUDEZ U, MIHALIC R. A novel approach to underfrequency load shedding[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2): 636-643.
- [135] TOFIS Y, TIMOTHEOU S, KYRIAKIDES E. Minimal load shedding using the swing equation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2466-2467.
- [136] ZUO Yihui, FRIGO G, DERVIŠKADIĆ A, et al. Impact of synchrophasor estimation algorithms in ROCOF-based under-frequency load-shedding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1305-1316.
- [137] MANSON S, ZWEIGLE G, YEDIDI V. Case study: an adaptive underfrequency load-shedding system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 1659-1667.
- [138] TANG Junjie, LIU Junqi, PONCI F, et al. Adaptive load shedding based on combined frequency and voltage stability assessment using synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 2035-2047.
- [139] HOSEINZADEH B, SILVA F M F D, BAK C L. Adaptive tuning of frequency thresholds using voltage drop data in decentralized load shedding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2055-2062.
- [140] HOSEINZADEH B, DA SILVA F F, BAK C L. Decentralized coordination of load shedding and plant protection considering high share of RESs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3607-3615.
- [141] SAFFARIAN A, SANAYE-PASAND M. Enhancement of power system stability using adaptive combinational load shedding methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1010-1020.
- [142] SHEKARI T, AMINIFAR F, SANAYE-PASAND M. An analytical adaptive load shedding scheme against severe combinational disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 4135-4143.
- [143] SHEKARI T, GHOLAMI A, AMINIFAR F, et al. An adaptive wide-area load shedding scheme incorporating power system real-time limitations[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(1): 759-767.
- [144] 孙华东, 王华伟, 林伟芳, 等. 多端高压直流输电系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 89. SUN Huadong, WANG Huawei, LIN Weifang, et al. Multi-terminal HVDC transmission system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 89.
- [145] 段瑶, 陈龙, 张步涵, 等. 华中电网的直流紧急功率支援问题[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 104-108. DUAN Yao, CHEN Long, ZHANG Buhan, et al. Research on emergency DC power support in central China power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 104-108(in Chinese).
- [146] SANZ I M, JUDGE P D, SPALLAROSSA C E, et al. Dynamic overload capability of VSC HVDC interconnections for frequency support[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1544-1553.

- [147] YU Mengran, DYŠKO A, BOOTH C D, et al. A review of control methods for providing frequency response in VSC-HVDC transmission systems[C]//2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Cluj-Napoca: IEEE, 2014: 1-6.
- [148] CAO Yijia, WANG Weiyu, LI Yong, et al. A virtual synchronous generator control strategy for VSC-MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 750-761.
- [149] 姚为正, 杨美娟, 张海龙, 等. VSC-HVDC 受端换流器参与电网调频的 VSG 控制及其改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 525-533.
- YAO Yuzheng, YANG Meijuan, ZHANG Hailong, et al. VSG control and its modified algorithm for VSC-HVDC inverter participating grid's frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 525-533(in Chinese).
- [150] JIN Cuicui, LI Weidong, SHEN Jiakai, et al. Active frequency response based on model predictive control for bulk power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3002-3013.
- [151] 张英敏, 陈虎, 李兴源, 等. 基于直流功率支援因子的紧急直流功率支援策略研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(5): 175-178, 196.
- ZHANG Yingmin, CHEN Hu, LI Xingyuan, et al. Study of emergency DC power support strategy based on DC power support factor[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(5): 175-178, 196(in Chinese).
- [152] 陈静, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 多送端直流紧急功率相互支援的评估指标[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2416-2421.
- CHEN Jing, LIU Dichen, LIAO Qingfang, et al. Assessment index of emergency DC power mutual support for HVDC transmission system with multiple sending ends[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2416-2421(in Chinese).
- [153] RESTREPO J F, GALIANA F D. Unit commitment with primary frequency regulation constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1836-1842.
- [154] CHANG G W, CHUANG C S, LU Taiken, et al. Frequency-regulating reserve constrained unit commitment for an isolated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 578-586.
- [155] ZHANG Ziyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Modeling frequency response dynamics in power system scheduling[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106549.
- [155] WEN Yunfeng, LI Wenyuan, HUANG Gang, et al. Frequency dynamics constrained unit commitment with battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5115-5125.
- [157] ZHANG Xi, STRBAC G, SHAH N, et al. Whole-system assessment of the benefits of integrated electricity and heat system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 1132-1145.
- [158] TROVATO V, TENG Fei, STRBAC G. Role and benefits of flexible thermostatically controlled loads in future low-carbon systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5067-5079.
- [159] 李明, 焦丰顺, 任畅翔, 等. 新一轮电改下电力辅助服务市场机制及储能参与辅助服务的经济性研究[J]. 南方能源建设, 2019, 6(3): 132-138.
- LI Ming, JIAO Fengshun, REN Changxiang, et al. China's power auxiliary service market mechanism and the economics of energy storage systems participating in auxiliary services[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(3): 132-138(in Chinese).
- [160] 何永秀, 周丽, 庞越侠, 等. 新电改下基于引发责任的调频辅助服务成本分摊机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 88-94, 144.
- HE Yongxiu, ZHOU Li, PANG Yuexiao, et al. Design of causing responsibility based cost allocation mechanism for frequency regulation ancillary service in new electricity reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 88-94, 144(in Chinese).
- [161] 陶仁峰, 李凤婷, 李燕青, 等. 基于辅助服务费用分摊的新能源电厂并网价格动态计算方法[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 962-972.
- TAO Renfeng, LI Fengting, LI Yanqing, et al. A dynamic tariff calculation method of renewable power plants based on ancillary service cost allocation[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 962-972(in Chinese).
- [162] 陆凌蓉, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 43-49, 58.
- LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Economic analysis of ancillary service provision by plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 43-49, 58(in Chinese).
- [163] 肖云鹏, 张兰, 张轩, 等. 包含独立储能的现货电能与调频辅助服务市场出清协调机制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 167-180.
- XIAO Yenpeng, ZHANG Lan, ZHANG Xuan, et al.

- The coordinated market clearing mechanism for spot electric energy and regulating ancillary service incorporating independent energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 167-180. (in Chinese).
- [164] 仪忠凯, 许银亮, 吴文传. 考虑虚拟电厂多类电力产品的配电侧市场出清策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 143-151.
- YI Zhongkai, XU Yinliang, WU Wenchuan. Market clearing strategy for distribution system considering multiple power commodities offered by virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 143-151. (in Chinese).
- [165] 郭鸿业, 陈启鑫, 夏清, 等. 电力市场中的灵活调节服务: 基本概念、均衡模型与研究方向[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3057-3066.
- GUO Hongye, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Flexible ramping product in electricity markets: basic concept, equilibrium model and research prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3057-3066(in Chinese).
- [166] ELA E, GEVORGIAN V, TUOHY A, et al. Market designs for the primary frequency response ancillary service—Part I: motivation and design[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 421-431.
- [167] ELA E, GEVORGIAN V, TUOHY A, et al. Market designs for the primary frequency response ancillary service—Part II: case studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 432-440.
- [168] ZHANG Guangyuan, ELA E, WANG Qin. Market scheduling and pricing for primary and secondary frequency reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2914-2924.
- [169] RAYATI M, TOULABI M, RANJBAR A M. Optimal generalized Bayesian Nash equilibrium of frequency-constrained electricity market in the presence of renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 136-144.
- [170] 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): 6570-6581.
- QIN Benshuang, XU Yonghai. Modal analysis of multi-virtual synchronous machine grid-connected power-frequency oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6570-6581(in Chinese).
- [171] CHU Zhongda, TENG Fei. Short circuit current constrained UC in high IBG-penetrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3776-3785.
- [172] 张宁, 马国明, 关永刚, 等. 全景信息感知及智慧电网[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1274-1283.
- ZHANG Ning, MA Guoming, GUAN Yonggang, et al. Panoramic information perception and intelligent grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1274-1283(in Chinese).
- [173] 尚宇炜, 郭剑波, 吴文传, 等. 数据-知识融合的机器学习(1): 模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4406-4415.
- SHANG Yuwei, GUO Jianbo, WU Wenchuan, et al. Machine learning methods embedded with domain knowledge(Part I): model analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4406-4415(in Chinese).
- [174] 韩天森, 陈金富, 李银红, 等. 电力系统稳定评估机器学习可解释代理模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4122-4130.
- HAN Tiansen, CHEN Jinfu, LI Yinghong, et al. Study on interpretable surrogate model for power system stability evaluation machine learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4122-4130(in Chinese).



张子扬

在线出版日期: 2021-08-11.

收稿日期: 2021-07-04.

作者简介:

张子扬(1997), 男, 博士研究生, 研究方向为可再生能源, 低惯量电力系统, 电力系统规划与运行等, zy-zhang19@mails.tsinghua.edu.cn;

*通信作者: 张宁(1985), 男, 副教授, 研究方向为可再生能源、多能源系统、电力系统规划及运行等, ningzhang@tsinghua.edu.cn;

杜尔顺(1992), 男, 助理研究员, 主要研究方向为能源政策、光热发电、电力系统规划、新能源消纳, duershun@tsinghua.edu.cn;

康重庆(1969), 男, 教授, 研究方向为电力规划与运行、可再生能源、负荷预测、低碳电力技术等, cqkang@tsinghua.edu.cn;

王智冬(1981), 男, 博士, 研究方向为电力系统规划, wangzd1981@163.com.

(责任编辑 乔宝榆)

Review and Countermeasures on Frequency Security Issues of Power Systems With High Shares of Renewables and Power Electronics

ZHANG Ziyang¹, ZHANG Ning¹, DU Ershun², KANG Chongqing¹, WANG Zhidong³

(1.State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University); 2. Laboratory of Low Carbon Energy, Tsinghua University;
3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd.)

KEY WORDS: high shares of renewables; high shares of power electronics; low inertia; frequency security; virtual synchronous control

In the low carbon transition of the energy system, the shares of renewable energy and power electronics in power systems are rapidly increasing. However, high shares of renewables and power electronics (High-RE-PE) significantly challenge the frequency security of power systems. Several power grid outages were recently caused by severe frequency deviation, such as the blackout in Great Britain power grid on August 9th. Thus, it is necessary to review on frequency security issues of High-RE-PE power systems and discuss the countermeasures.

The High-RE-PE characteristics will significantly increase the uncertainty and reduce the synchronous inertia of power systems. Consequently, the frequency response characteristics of the High-RE-PE power system will be different from the traditional power system. This paper summarizes these new features into four points: the scarcity of conventional frequency regulation resources, differentiation of the spatio-temporal frequency distribution, diversification of frequency control methods, and complexity of frequency dynamics. Under these new features, High-RE-PE power systems set higher requirements for analysis and control methods of frequency response.

Then, this paper compares three main types of frequency response analysis methods: time-domain simulation method, analytical model analysis method, and machine learning method. Time-domain simulation is the fundamental method of frequency response analysis, which provides very accurate numerical values of frequency dynamics. However, the weak interpretability and high computational complexity are essential obstacles to applying the time-domain simulation method in a High-RE-PE power system. On the other hand, the analytical model analysis method can derive the analytical expression of frequency dynamics with some assumptions and simplifications. As a result, the analytical model analysis method has great interpretability, computational efficiency, and generalization ability, while strong assumptions limit its accuracy and scalability. The machine learning method mainly estimates the frequency nadir or rate of change of

frequency (RoCoF). The machine learning method trades between accuracy and computational complexity, and its performance is between the two methods above. The main concern with this method is its generalization ability. Moreover, this paper also investigates the improvements of these three methods to adapt to High-RE-PE power systems.

Further, this paper reviews the new technological progress of improving the frequency response characteristic of High-RE-PE power systems from five aspects: inverter control, under-frequency load shedding (UFLS), DC power mutual support, system scheduling and ancillary market design. As renewables replace thermal units, power electronic inverters will play an increasingly important role in High-RE-PE power systems. This article analyzes two typical modes of inverter frequency control: grid forming and grid following and introduces the virtual synchronous control in detail. Furthermore, improving adaptability is an essential development for UFLS to adapt to the complexity of frequency dynamics. Three main groups of UFLS are compared, including traditional, semi-adaptive and adaptive UFLS. In addition, this paper highlights the benefit of DC power mutual support in mitigating the impacts of differentiation of the spatio-temporal frequency distribution. The above three control methods aim to draw frequency back to its nominal value after contingency, while system scheduling and ancillary market mainly focus on allocating frequency regulation resources before contingency. The main modification of the scheduling model is the formulation of frequency dynamic constraints related to system inertia. This paper lists some typical frequency-constrained scheduling models and discusses their applications in evaluating the benefits of varieties of frequency regulation resources, including renewables, energy storage and demand response. The development of the ancillary market is two-fold: 1) introducing new ancillary services; 2)improving the cost-sharing mechanism.

Finally, the frequency security issue of future High-RE-PE power systems is summarized and prospected based on four new features.