

四川电力辅助服务市场建设的思考

马瑞光,王潇笛,刘洁颖,马天男

(国网四川省电力公司经济技术研究院,四川 成都 610041)

摘要:电力辅助服务市场是保障新型电力系统安全稳定高效运行的基础。中国电力辅助服务市场建设不断向纵深推进,产品种类不断丰富,分摊机制持续优化,出清规则逐步完善。但四川地区电力辅助服务市场建设相对滞后,存在产品种类与提供主体相对单一、市场成熟度相对偏低等问题。文中通过系统总结中国电力辅助服务市场的发展历程和经验,紧密结合四川资源禀赋和电网特点,对四川电力辅助服务市场建设进行了分析,并提出丰富辅助服务品种、培育新型市场主体、完善补偿分摊机制、做好市场衔接等建议,可为四川地区电力辅助服务市场建设提供支撑。

关键词:辅助服务;新型电力系统;电力市场

中图分类号:TM 712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)04-0075-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230414

Thoughts on Construction of Sichuan Electricity Ancillary Service Market

MA Ruiguang, WANG Xiaodi, LIU Jieying, MA Tiannan

(State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The electricity ancillary service market is the foundation to ensure the safe, stable and efficient operation of new power system. The electricity ancillary service market in China develops organically, where the product are enriched, the fee compensation mechanism is optimized, and the market clearing regulations are gradually improved. However, the electricity ancillary service market in Sichuan is relatively lagging behind, which exists the problems such as limited number of products and market entities with low market maturity. Through the systematical summary of development process and experiences, and based on the resource endowment and power grid characteristics in Sichuan, the construction of electricity ancillary service market is analyzed. Suggestions such as enriching the types of ancillary service, developing new market entities, improving compensation mechanism, and completing market framework are proposed, which can provide support for the construction of electricity ancillary service market in Sichuan.

Key words: power ancillary service; new power system; electricity market

0 引言

实现“双碳”目标,能源绿色低碳转型是必由之路,大力发展风能、太阳能等新能源是关键。但由于风电、光伏等新能源天然不具备调节能力,发电出力具有很强的波动性、间歇性和随机性,电力系统中新能源接入比例的持续提升,将给系统电力电量平衡带来巨大挑战,从而对调峰、调频、备用等电力辅助服务提出了更多需求。与此同时,随着储能、电动汽车和温控负荷等多元互动负荷的增长,具有快速响

应能力和调节能力的灵活性资源成为了系统调峰、调频和备用等辅助服务的提供者。因此,通过设计合理的辅助服务市场机制,充分调动发用两侧资源主动参与供需调节,对于消除或弱化新能源不确定性对系统安全以及经济运行的影响,构建可持续的电力保供格局具有十分重要的意义。

随着中国电力市场化改革的不断深入,售电侧市场逐渐放开,电力辅助服务市场的建设也在不断加速,多个省份和地区均已陆续出台电力辅助服务市场建设的指导性文件^[1-3]。国内已有多位学者在辅助服务市场机制方面开展了较为深入的研究,通

过定性分析和定量评估的手段,对中国各个区域电网、省级电网的辅助服务进行了总结分析,并对典型地区补偿机制的优缺点进行了较为细致的探讨^[4-7]。但从四川地区来看,目前省内电力辅助服务市场建设仍处于初期,面临着产品种类不够丰富、市场交易规则不够完善、补偿分摊机制不够合理等诸多挑战。

下面系统归纳总结了我国电力辅助服务市场的发展历程和经验,梳理了四川电力辅助服务市场的发展现状和建设难点,提出了加快推进四川电力辅助服务市场建设的相关建议。

1 中国电力辅助服务市场发展现状

1.1 发展历程

普遍认为,2014年东北电网启动电力调峰辅助服务市场建设,是中国电力辅助服务市场化探索的开始。2015年,中发9号文《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》提出,以市场化原则建立辅助服务分担共享新机制,则进一步确立了电力辅助服务市场化建设的方向。在此背景下,中国多个区域和省级电网在电力辅助服务市场建设方面开展了大量探索。截至2020年年底,电力辅助服务市场已经基本实现全国各区域、省级电网的全面覆盖^[8]。

除了电力体制改革的直接驱动外,中国电力辅助服务市场建设的提速,与近年来新能源的快速发展密切相关。以风电、光伏为代表的新能源大规模并网后,其出力的波动性、随机性直接导致电力系统调频、调峰等调节需求增加。在2020年中国提出“双碳”目标之后,新能源产生的调节能力需求则更加突显。2021年12月,国家能源局修订发布《电力并网运行管理规定》《电力辅助服务管理办法》,为能源绿色低碳转型背景下电力辅助服务市场的建设指明了方向,势必将推动全国电力辅助服务市场不断向纵深推进。

1.2 主要特点

1) 品种设置

根据《电力辅助服务管理办法》,中国电力辅助服务可划分为基本辅助服务与有偿辅助服务。基本辅助服务一般是指根据电力系统安全稳定运行需求,发电机组和电力用户必须无偿提供的服务,如基本调峰、一次调频等。有偿辅助服务则充分考虑不同机组和电力用户自身的性能特点,以及在电力系统中实际发挥的作用,可为相关提供主体提供一

定的资金补偿的服务,如自动发电控制(automatic generation control, AGC)、自动电压控制(automatic voltage control, AVC)、顶峰发电(或深度调峰)、有偿无功调节、旋转备用与黑启动等。目前,中国范围内各区域有偿辅助服务以调峰、调频和黑启动服务为主,部分区域展开了备用品种的探索与尝试。

2) 提供主体

目前,中国可提供辅助服务的主体仍以常规火电、水电等发电侧主体为主。但为了充分激励源网荷储市场化主体参与至电网灵活性调节服务中,各地区纷纷出台需求侧资源、储能设备、自备电厂、电动汽车充电网络、聚合商、虚拟电厂等新型调节资源参与调峰、调频等辅助服务的市场规则,促进电力辅助服务市场主体多元化发展。主要区域调峰辅助服务市场参与主体如表1所示。

表1 主要区域调峰辅助服务市场参与主体

区域	发电侧	用电侧	新型主体
东北	火电、风电、光伏、核电、抽蓄	可中断负荷	电化学储能
西北	直调火电、水电、风电、光伏、直流配套新能源发电	负荷集成商、可调节负荷	自备电厂、新型储能
华北	火电	按需扩大辅助服务提供主体,鼓励储能设备、需求侧资源等新兴主体参与	
南方电网	火电、水电、核电、风电、光伏、光热、抽水蓄能、自备电厂等	传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷、电动汽车充电网络等的可调节负荷	电化学、压缩空气、飞轮储能等新型储能

3) 分摊机制

不同的电力辅助服务市场组织模式,适用的费用分摊机制也不尽相同,一般可分为发电企业承担、终端用户承担、共同承担和引发负责4种。中国大多数地区按照“谁提供、谁获利;谁受益、谁承担”的原则,结合电网运行特性和需求,对有偿辅助服务费用进行补偿和分摊。一般情况下,发电侧按照发电量或上网电量进行分摊,用户侧按照用电量进行分摊。主要区域辅助服务费用分摊主体与模式如表2所示。

4) 市场出清

总体来看,中国各地区电力辅助服务市场仍独立于电能市场,各类辅助服务产品分开报价、分别交易、分别调度。辅助服务市场产品报价一般采用卖方单向报价、集中竞争、统一价格出清的交易方式^[9],出清价格一般为成交主体报价的边际价格。部分辅助服务产品采用双边或多边协商、固定补偿

的交易方式。为避免辅助服务市场增加系统运行成本,实现经济最优,调度方一般根据按需调用、按序调用、价格优先的原则进行调用。

表2 主要区域辅助服务市场费用分摊主体与模式

区域	分摊主体	分摊模式
东北	火电厂及风电场、光伏电站、核电厂共同分摊	按照发电比例分摊
西北	火电厂及风电场、光伏电站共同分摊	按照发电比例分摊
华北	风电、光伏(扶贫光伏场站除外)等发电企业	按照上网电量分摊
南方电网	由发电侧并网主体、市场化电力用户等并网主体共同分摊,逐步将非市场化电力用户纳入补偿费用分摊范围	发电侧与市场用户按分摊系数共同分摊。市场化用户按用电比例,发电侧并网主体按上网电量分摊

5) 跨区衔接

目前多数区域市场设计坚持市场化导向,按照集中报价、统一边际出清的方式开展,市场主体自主自愿参与,根据“先省内、后跨省”的优先级顺序,优先满足省网(控制区)调节服务需求,再参与区域市场。然而,辅助服务交易的区域间壁垒依然存在,如存在区域价格壁垒、跨省区辅助服务交易价格普遍较低等,阻碍了跨省区资源的优化配置。后续仍需坚持全国统一电力市场的建设与全国统一辅助服务市场的建设,实现电力资源在更大范围内共享互济和优化配置,提升电力系统稳定性和灵活调节能力。

1.3 发展趋势

在“双碳”目标和能源绿色低碳转型战略的驱动下,中国新能源开发不断提速,风电、光伏装机规模持续扩大,电力系统运行管理的复杂性不断提高,对调节能力的需求量显著增加,电力辅助服务市场建设的迫切性也在不断增强。在此背景下,中国电力辅助服务市场的建设不断加速,并呈现出一些新的特点。

1) 辅助服务市场产品种类不断丰富。《电力辅助服务管理办法》对电力辅助服务进行了标准化分类,分为有功平衡服务、无功平衡服务和事故应急及恢复服务^[9]。同时为适应新型电力系统的发展需求,新增引入转动惯量、爬坡、稳定切机服务、稳定切负荷服务等辅助服务新品种。

2) 辅助服务费用分摊机制持续优化。逐步推动辅助服务费用向用户侧疏导的分摊机制,将辅助服务补偿费用由发电企业、市场化电力用户等所有并网主体共同分摊。按照“谁提供、谁获利;谁受

益、谁承担”的原则,推动为特定并网主体服务的电力辅助服务,补偿费用由相关发电侧或用户侧特定并网主体分摊^[9]。

3) 辅助服务市场出清规则有序完善。由于辅助服务市场的只要交易标的与传统电能量市场有着显著区别,目前大部分地区暂采用电力辅助服务市场独立于电能量市场出清的模式,以降低出清工作的难度。但随着现货市场等市场组织模式的快速发展,未来辅助服务市场将和电能量市场有一定的功能重叠,可由电网调度和交易机构统一组织,采用联合出清的边际价格结算辅助服务费用,以在系统全局实现电力资源的优化配置。

2 四川电力辅助服务市场建设特点

2.1 四川电力系统的基本特性

1) 电源侧

水能资源富集,水电将长期处于主体地位,如图1所示。截至2021年年底,四川电网全口径水电装机容量达到88.87 GW,居全国首位。预计至“十五五”末,四川水电装机容量将分别增加112 GW和128 GW,约占全省全口径装机容量的71%和63%。

新能源资源丰富,装机加速增长态势明显。四川全省新能源技术可开发量约为120 GW(其中风电20 GW,光伏100 GW),主要集中在以“三州一市”为代表的西部地区。目前已开发规模相对较小,但“十四五”期规划新增装机约为16 GW,预计2025年新能源装机总量可以达到约为22 GW。

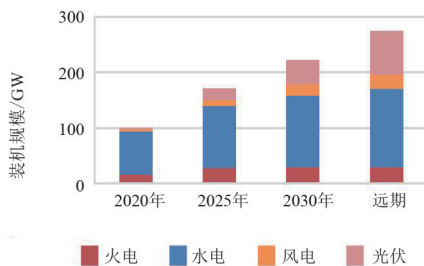


图1 四川电源装机未来发展情况

煤少气丰,火电装机发展趋势出现明显分化。四川省内煤炭资源相对贫乏,燃煤火电发展受限。截至2021年年底,全省燃煤火电装机容量为14.12 GW,仅占全省装机容量的12.35%,且未来将不再新建单纯以发电为目的的燃煤火电机组。省内天然气储量

丰富,具有发展燃气机组的先天优势。“十四五”期燃气机组发展将明显加速,预计 2025 年装机容量可由目前的 1.19 GW 增加至 6.00 GW。

2) 电网侧

四川电网因资源大多集中于盆地周边而远离负荷中心,形成了长距离、大容量、接力式外送的特殊电网网架,电网稳定性不高。伴随新型电力系统建设,新能源装机容量逐年增长,同时随着新一批特高压直流的陆续投产,四川电网将呈现出高比例新能源及高比例电力电子设备的“双高”特性。由此带来的系统低转动惯量等问题将进一步削弱四川电网的稳定运行能力。

3) 负荷侧

全网用电负荷率低、峰谷差大,对调节能力需求高。从负荷率来看,四川平均负荷率维持在 80% 左右,相较于全国 90% 左右的平均水平明显偏低,电网调峰和经济运行难度较大。从负荷侧的波动情况看,四川电网因季节性制冷取暖负荷波动导致分月负荷呈夏、冬“双峰”特征;因居民生产生活方式影响又导致日内负荷呈午、晚“双峰”分布。为确保电力供需的实时平衡,四川对调节能力的需求大于其他省份。

电能消费量较低,如图 2 所示。2020 年四川省人均用电量为 3421 kWh,仅为全国平均水平的 64%,全省用电量占全省终端能源消费比例为 21.1%,较全国平均水平低近 6 个百分点。但四川正处于快速工业化、城镇化阶段,全省用电量保持年均 7.8% 的增速增长。随着成渝地区双城经济圈建设推进及“双碳”目标下以电能为中心的能源消费格局加速形成,四川能源消费量与电能消费水平将迎来显著提升。

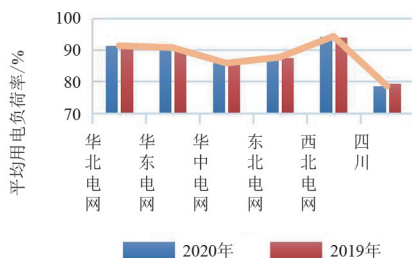


图 2 四川和全国各地平均用电负荷率对比

2.2 四川辅助服务市场建设基本情况

如上面所述,四川新型电力系统建设面临调节需求大但调节能力不够充足的现实问题,亟需要通过加快辅助服务市场建设,充分挖掘源网荷侧各类

灵活性资源的调节潜力,以保障系统的安全经济运行,更好地服务于省内新能源的快速发展。

但目前四川尚未发布省级电力辅助服务管理细则,省内电力辅助服务市场化建设尚处于探索阶段。四川现有的市场化电力辅助服务主要有 AGC 和黑启动两个品种,相关交易细则由四川能监办于 2019 年发布。一次调频、调峰、无功功率调节、AVC、备用等辅助服务品种尚未开展市场化探索,主要依据华中能源监管局于 2020 年颁布的电厂并网运行管理和辅助服务管理的“两个细则”执行。省间市场方面,已建立四川、重庆之间的电力调峰辅助服务市场,主要参照华中能监办 2022 年发布的《川渝一体化电力调峰辅助服务市场运营规则》执行。

具体来看,四川电力辅助服务市场的建设还存在以下问题。

1) 辅助服务市场产品种类与提供主体较为单一。现阶段,四川辅助服务品种仅含调峰、调频、备用、无功调节、黑启动等常规品种,且调峰、备用、调频等辅助服务提供商仅局限于直调水电、火电等传统机组。后续需结合四川电力系统运行需求,明确各类辅助服务的市场功能定位,丰富服务品种,拓展提供主体,逐步将新能源、储能、需求侧资源、抽水蓄能等新型主体纳入辅助服务体系。

2) 市场化补偿机制不够完善,难以激励市场主体自主提供服务。现阶段,部分辅助服务品种补偿价格设计并不完全合理,如火电机组运行调峰参照华中“两个细则”深度调峰价格进行补偿,不符合四川火电深度调峰能力普遍不足的生产实际,难以激励火电机组进行灵活性改造。需进一步对各品类辅助服务补偿价格进行测算,以设定更加科学合理的补偿标准,建立更加完善的补偿机制。

3) 电力市场建设成熟度偏低,参与主体市场意识不强。近年来,四川市场化交易电量比例持续提升,但仍然以中长期电量交易为主,现货市场仍处于试点推进阶段。用户、售电公司、新型储能等市场主体的市场成熟度有待提高,相关主体的市场意识、技术手段,距离参与以电力为标的的现货交易、辅助服务交易仍相距较远。

2.3 四川电力辅助服务市场建设难点

1) 以水电为主的电源结构决定了丰枯季电网运行方式差异明显。丰水期,为保障清洁水电的高水平消纳,火电一般以最小开机方式运行;枯水期,

为了保障省内用电需求,火电一般需要满负荷发电。丰枯季电网运行方式差异巨大,水电、火电承担的角色不尽相同,增大了辅助服务市场规则设计的难度。

2) 源荷分离的电力格局决定了辅助服务需求具有地区性差异。四川电源多分布于川西高原,用电负荷多分布于成都平原,省内电网呈西电东送格局,存在多个输电通道断面。受限于断面输送能力,断面内外的辅助服务需求和供给无法互相替代,辅助服务市场的设计需要充分考虑分区、分片的局部供需平衡问题。

3) 水-电耦合特性导致辅助服务补偿费用测算困难。四川水电的调节能力差异较大,除大量径流式电站外,具有较好调节能力的大型水电站多为三江流域大型梯级电站,上下游水电站具有较强的水力耦合特性。在参与辅助服务市场时,上游水电站的出力变化会影响到下游水电站,导致辅助服务补偿费用的科学测算存在一定困难。

4) 多种类市场衔接难度较大。以现货市场为例,受丰枯差异影响,省内电力现货市场交易在枯水期以火电现货为主,丰水期以水电现货为主,辅助服务市场与现货市场的衔接存在一定的难度。在辅助服务市场品种方面,调频与备用存在一定的复用空间,如何统筹协调各类辅助服务品种的调用和结算出清机制,也是一大难点。

3 四川电力辅助服务市场建设建议

1) 丰富辅助服务品种,增强电源协调优化运行能力。加大对火电机组深度调峰、启停调峰的补偿力度,探索建立短期发电、应急备用、稳定切机、转动惯量等辅助服务品种,激励水电、火电等市场主体为系统提供更大的灵活性调节空间。处理好多品种辅助服务之间的运行结算衔接机制,分阶段、逐步建立交易品种齐全的辅助服务市场。

2) 鼓励新型储能电站、虚拟电厂等新型主体参与辅助服务市场。发挥新型市场主体在消纳新能源、削峰填谷、增强电网稳定性和应急供电等方面的多重作用,明确各类新型主体独立参与深度调峰、调频等辅助服务交易的商业模式,有效扩大辅助服务提供主体。

3) 持续完善辅助服务产品成本测算与补偿分摊机制。针对各类辅助服务品种,按照电力系统实

际运行需求和各市场主体实际投入成本构成情况,合理测算补偿标准,避免出现过补偿与欠补偿造成市场主体投机现象。结合电力市场化改革进展,推动辅助服务补偿费用分摊主体由发电企业逐步扩大到市场化电力用户等所有并网主体。

4) 推动现货市场与辅助服务市场的融合发展。以交易规则、价格机制、出清模式等为重点,建立并完善电力辅助服务市场和电力现货市场的过渡衔接机制,以现货市场带动辅助服务市场、以辅助服务市场互补现货市场,实现现货市场与辅助服务市场的平稳融合发展,充分发挥市场在电力保供中的支撑调节作用。

4 结 论

电力辅助服务是保障电力系统安全、经济、高效运行的公共产品,但四川电力辅助服务市场建设相对滞后,应充分立足四川电源、电网和负荷特点,在丰富辅助服务品种、培育新型市场主体、完善补偿分摊机制、做好市场衔接等方面重点发力,全面加快辅助服务市场建设进度,为省内新能源的大规模开发利用、构建四川特色新型电力系统创造有利条件。

参考文献

- [1] 代江,姜有泉,田年杰,等.“双碳”目标下贵州电力调峰辅助服务市场设计与实践[J].华电技术,2021,43(9):85-90.
- [2] 史晋鑫,史沛然,王佩雯,等.华北区域电力调峰辅助服务市场分析与运行评估[J].电力系统自动化,2021,45(20):175-184.
- [3] 马晓伟,薛晨,任景,等.西北省间调峰辅助服务市场机制设计与实践[J].中国电力,2021,54(6):2-11.
- [4] 周椿奇,向月,张新,等.V2G 辅助服务调节潜力与经济性分析:以上海地区为例[J].电力系统自动化,2021,41(8):135-141.
- [5] 刘志成,彭道刚,赵慧荣,等.双碳目标下储能参与电力系统辅助服务发展前景[J].储能科学与技术,2022,11(2):704-716.
- [6] 杜学慧.火电机组影响和制约一次调频辅助服务的原因分析[J].中国管理信息化,2020,23(16):136-137.
- [7] 罗桓桓,王昊,葛维春,等.考虑报价监管的动态调峰辅助服务市场竞价机制设计[J].电工技术学报,2021,36(9):1935-1947.

- [8] 袁家海,席星璇.我国电力辅助服务市场建设的现状与问题[J].中国电力企业管理,2020(7):34-38.
- [9] 曾鸣,王雨晴.提升电力系统综合调节能力 支撑新型电力系统建设——解读《电力并网运行管理规定》《电力辅助服务管理办法》[J].中国电力企业管理,2022(1):8-10.

作者简介:

马瑞光(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为能源

(上接第 53 页)

可靠性得到增强,又能够有效地解决系统设备的低效率利用问题。

2)在江北 220 kV 电网中建设柔性直流背靠背输电工程,在不明显增加短路电流的基础上,解决了金山变电站 500 kV 失电后产生的过载问题,相比于交流方案,投资更低、实施难度较小。

3)在江北 110 kV 电网中建设柔性直流背靠背输电工程,可充分利用 220 kV 轻载变电站的变电容量,缓解 220 kV 重载变电站的下网压力,实现了各分区之间的负荷均衡,提升了系统的经济性和安全性。

参考文献

- [1] 王帆,刘一民,杨慧敏,等.柔性直流输电并网建模及故障分析[J].控制工程,2020,27(7):1293-1298.
- [2] 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.
- [3] 饶宏,黄伟煌,郭知非,等.柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J].高电压技术,2022,48(9):3347-3355.
- [4] 黄素娟,吴爽,冯秋侠.柔性直流技术在配电网中的应用及运行控制[J].电工电气,2023(1):34-38.
- [5] LOUREN L F N, PEREZ F, IOVINE A, et al. Stability analysis of grid-forming MMC-HVDC transmission connected to legacy power systems[J]. Energies, 2021, 14(23):8017
- [6] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,53(7):55-71.
- [7] 肖磊石,盛超,卢启付.南方电网首台机械式高压直流断路器在柔性直流输电系统挂网短路试验及仿真[J].高电压技术,2019,45(8):2444-2450.
- [8] 李岩,罗雨,许树楷,等.柔性直流输电技术:应用,进步与期望[J].南方电网技术,2015,9(1):7-13.
- [9] 单节杉,任敏,田鑫萃,等.基于故障电流回路特性的柔

经济、电力市场、电网规划;

王潇笛(1994),男,博士,助理工程师,研究方向为电力市场、优化运行;

刘洁颖(1990),女,硕士,工程师,研究方向为电力市场、电力电量平衡;

马天男(1992),男,博士,高级工程师,研究方向为宏观经济、电力价格、电力市场。

(收稿日期:2022-11-31)

性直流架空线路纵联保护[J].电力系统自动化,2022,46(21):152-159.

- [10] 饶宏,周月宾,李巍巍,等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(1):1-11.

- [11] LIU D, KISH G J, AZAD S P. Control strategies to improve stability of LCC-HVDC systems with multiple MMC taps[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2019,13(20):4685-4693.

- [12] 邹常跃,韦嵘晖,冯俊杰,等.柔性直流输电发展现状及应用前景[J].南方电网技术,2022,16(3):1-7.

- [13] SUN K Q, XIAO H Q, PAN J P, et al. A station-hybrid HVDC system structure and control strategies for cross-seam power transmission[J]. IEEE Transactions on power systems 2021,36(1):379-388.

- [14] 蒋晓娟,姜芸,尹毅,等.上海南汇风电场柔性直流输电示范工程研究[J].高电压技术,2015,41(4):1132-1139.

- [15] 刘黎,蔡旭,俞恩科,等.舟山多端柔性直流输电示范工程及其评估[J].南方电网技术,2019,13(3):79-88.

- [16] 潘尔生,乐波,梅念,等.±420 kV 中国渝鄂直流背靠背联网工程系统设计[J].电力系统自动化,2021,45(5):175-183.

- [17] 樊云龙,任建文,叶小晖,等.基于 MMC 的渝鄂直流背靠背联网工程控制策略研究[J].中国电力,2019,52(4):96-103.

- [18] 张猛,马骢,王银岭,等.基于电路仿真法的叠装电抗器雷电冲击电压分布特性研究[J].高压电器,2020,56(12):191-195.

- [19] POSTALWAIT J. Hitachi ABB power grids wins major HVDC order linking shetland islands to the UK grid[J]. T & D World, 2020,72(10):192-204.

作者简介:

雷宇(1976),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统控制及运行优化。

(收稿日期:2023-03-02)