

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.002

# 适应大规模新能源并网的电力系统备用配置及优化综述

杨肖虎<sup>1,2</sup>, 罗剑波<sup>2</sup>, 郁琛<sup>2</sup>, 谢东亮<sup>2</sup>, 葛睿<sup>3</sup>, 冯长有<sup>3</sup>

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210046; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 国家电力调度控制中心, 北京 100031)

**摘要:**大规模新能源并网后,传统的备用体系在应对电力系统电源侧及负荷侧存在的双侧随机性时,存在经济性 & 可靠性欠优的问题,为保证系统安全稳定运行,需要对系统备用的配置及优化方法进行研究。文中阐述了大规模新能源并网对电力系统备用的影响,充分挖掘系统多类备用资源;并阐述了电力系统源、荷、储3类备用资源及其作为互联电网跨区备用的研究现状,用以应对大规模新能源并网环境下系统面临的各类长时间、大扰动、大容量功率缺额风险事件;详细分析了电力系统备用现有的各类容量配置方法及调度优化方法,并指出下一阶段的研究方向,为后续大规模新能源并网下电力系统的备用配置及优化方法研究提供参考。

**关键词:**新能源并网;电力系统;多类备用;备用配置;备用优化

**中图分类号:**TM732

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)01-0010-11

## 0 引言

电力系统中,电能的生产与消耗几乎同时完成,理想状态下,发电与耗电必须达到实时动态平衡<sup>[1]</sup>。然而,在电力系统实际运行过程中,电能的生产、传输及消耗环节均存在诸多不确定性因素,且电能无法大量存储,因此需要引入电力系统备用,以满足电力系统供、需两端的动态平衡,提高系统可靠性。

近年来,我国新能源发展突飞猛进,据国家能源局统计数据显示<sup>[2]</sup>,截至2018年底,我国风电和光伏累计并网装机容量已达到1.84亿kW和1.74亿kW,分别同比增长12.4%和34%,新能源占比逐步提高。大规模新能源集中接入电网后,系统调频成本增加、调峰能力不足等问题日益凸显<sup>[3]</sup>。在应对新能源并网带来的一系列问题时,传统电力系统备用体系存在可靠性及经济性不佳的情况<sup>[4]</sup>。因此,为适应大规模新能源并网,亟需对电力系统备用配置及优化展开研究。

随着电力市场机制的引入、智能电网相关技术的发展,电力系统备用呈现出多形态、多等级、多种类的发展趋势<sup>[5-6]</sup>,为应对大规模风、光等新能源并网带来的一系列问题提供了新思路、新方向。

文中首先阐述了大规模新能源并网对电力系统备用的影响;其次,针对大规模新能源并网下系

统可能出现的高风险事件,充分挖掘系统备用资源,分别对源、荷、储3类备用及互联电网的跨区备用研究现状进行概括总结;再次,详细阐述分析了电力系统备用容量配置方法;然后对备用的各类优化方法进行了归纳总结;最后,对大规模新能源并网背景下备用的配置及调度优化进行了展望。

## 1 大规模新能源并网对电力系统备用的影响

大规模新能源并网在给电网带来大量清洁能源的同时,也给电力系统备用带来了巨大的挑战。

(1) 双侧随机性致使传统备用体系应对风险事件能力不足。传统电力系统的备用需求主要由负荷侧单侧波动引起,波动规律性强,随机扰动幅度小。备用的配置及调度优化尽管较为粗放,但其经济性及可靠性尚且可控。大规模新能源并网后,电力系统已从单侧波动转变为电源侧和负荷侧双侧波动<sup>[3]</sup>,波动规律性弱且随机扰动幅度大、周期长。尽管国内省级以上调度机构均部署了新能源运行信息监测、发电能力预测和新能源调度计划模块,提升了电网应对风险的能力,但现有备用体系中的备用多来自电源侧发电机组,来源单一,且配置及调度优化过程中缺乏风险决策、风险管控的经验与手段。在以煤电为主的我国电力系统中,采用传统的备用配置及调度优化方法,有可能引起弃风弃光,进而造成新能源的极大浪费。

(2) 系统惯量降低对备用体系提出新的要求。2019年8月9日,英国发生大规模停电事故。大停电起源于英格兰的中东部地区及东北部海域,最终

收稿日期:2019-08-23;修回日期:2019-09-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目“促进可再生能源消纳的风电/光伏发电功率预测技术及应用”(2018YFB09042-00);国家电网有限公司科技项目“适应新能源发展的跨区全网一体化运行控制策略”

导致英格兰与威尔士大部分区域停电。此次事故暴露出在新能源高渗透率条件下,新能源大量替代同步机,将导致系统惯量水平下降,恶化频率响应特性,削弱系统抵御功率缺额的能力。此外,我国的新能源与负荷需求呈逆向分布特点,为此,我国正大力建设特高压直流输电通道,随着特高压的不断投运,可以预想,弱同步支撑直流送端电网系统将是一大主流系统。此类系统转动惯量较小,频率调节能力弱,在大扰动下频率容易发生急剧变化<sup>[7]</sup>,因此电力系统备用体系需具备快速大额功率支援能力。

因此,为保证电力系统可靠性,提升电力系统消纳大规模新能源的能力,可靠、经济的备用配置及优化方法具有重要的意义<sup>[8-9]</sup>。为适应大规模新能源并网,在保证经济性的同时,需要提高电力系统备用的配置容量,提升电力系统备用调度优化的灵活性、可靠性。如图1所示,文中将从电力系统多类备用、备用容量配置及备用调度优化3个方面对备用的配置及优化进行阐述。

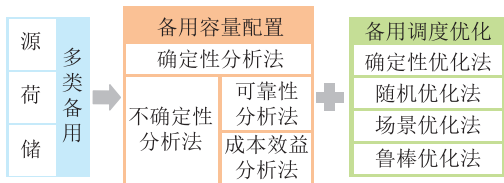


图1 含大规模新能源并网的电力系统备用配置及调度优化流程

Fig.1 The flow chart of reserve configuration and dispatching optimization of grid-connected power system with large-scale renewable energy

## 2 电力系统多类备用的发展现状

随着新能源渗透率的逐步提高,为降低弃风、弃光率,大规模消纳新能源,国家发改委、国家能源局明确提出要全面推动火电机组灵活性改造,同时从电力系统多侧出发,多措施并举,充分挖掘现有系统的备用能力<sup>[10]</sup>。为此,如图2所示,将电力系统中的备用划分为电源类、负荷类及储能类3类备用,并分别对其研究发展现状进行阐述,同时针对各类备用作为互联电网跨区备用存在的问题及发展前景进行讨论。

### 2.1 电源类备用

传统电力系统中,主要是发电侧机组承担着为系统提供备用服务的任务。水电机组能够实现快速启停,备用调节能力大,但其建设取决于各地区的自然资源禀赋,局限性较大<sup>[11]</sup>;燃气机组输出功率范围广、运行方式灵活,启动速度快,但其经济性

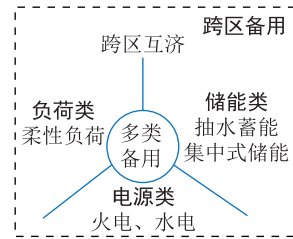


图2 多类备用分类示意

Fig.2 Diagram of multiple reserve classification

及效率受负荷率影响较大<sup>[11]</sup>,且燃气机组在我国电源占比较小,可调容量有限。在我国,煤电在传统电源中占比较大,仍然是电源类备用的主要来源。在新能源占比较低时,负荷波动规律性强,随机波动幅度较小<sup>[12]</sup>,以煤电为主的机组参与电力系统备用服务的可靠性及经济性尚且可控。当大规模新能源接入电网后,系统的电源侧及负荷侧的两侧随机性大大加强,使得功率失衡的幅度更大、周期更长,此时以煤电机组为核心的传统备用体系在可靠性及经济性方面将不再占优。

大规模新能源接入电网后,风电、光伏可通过减载运行,预留一定容量的备用功率参与系统调频,亦可依托储能系统参与系统调频,也可基于虚拟同步发电机技术,通过模拟同步发电机的调频特性实现主动调频控制<sup>[13-14]</sup>,但新能源的备用容量受其随机性波动影响较大,相较于传统电源类备用,其可信度不高。当新能源与扰动源不同源时,可通过减小出力参与系统调峰,但主动地通过弃风弃光参与调峰显然意义不大。此外,也可依托储能系统参与调峰,但存在经济性不佳的问题。

### 2.2 负荷类备用

长期以来,负荷都被视为被动受控的物理终端,当系统出现有功功率不平衡时,往往采用降低部分负荷供电可靠性甚至是切负荷的方式保证系统的安全运行<sup>[15-16]</sup>。这种方法不仅影响了系统的供电质量,也给负荷用户造成了不必要的经济损失。随着我国电力市场改革的深化,我国电力系统已逐步从封闭型走向开放型,不同于传统用电负荷的刚性需求,出现了一些可在一定范围内调整的柔性负荷。

作为优质备用资源,柔性负荷参与备用计划备受关注,特别是针对可中断负荷(interruptible load, IL),国内外学者进行了大量的研究。IL是指以合约等方式允许有条件停电的负荷<sup>[16]</sup>,其用电量调整一般由用户完成,从系统功率平衡的角度看,IL可视作负荷侧参与电力系统备用服务的重要手段<sup>[15-17]</sup>。文献[18]将IL视作备用资源,建立了需

求弹性模型,采用最优潮流算法研究了需求弹性对最优备用投入的影响。文献[19]指出了IL与发电商参与电力系统备用的区别,借鉴福利经济学思想建立了备用市场的帕累托优化模型,实现了IL的优化配置。文献[20]将负荷侧用户需求进行模糊变量处理,并通过动态规划搜索获得最优或近似最优的IL备用配置计划。文献[21]同时考虑了IL的响应不确定性及用户集群响应效应,基于蒙特卡洛模拟和粒子群算法,建立了IL与备用协调优化模型。

不同于IL的用电量调整方式,直接负荷控制(direct load control, DLC)往往基于电力公司或负荷聚合商(load aggregator, LA)的负荷控制装置对负荷进行削减<sup>[22]</sup>。DLC具有快速响应能力,主要针对居民或小型商业用户,简单实用,易形成规模。通过合理设计控制策略,DLC也可参与电力系统备用服务。文献[23]提出了一种DLC算法聚集电热水器,并研究了为电热水器提供备用调节服务的可能性。文献[24]提出了气象分区的方法并将电力系统空间区域进行划分,将空调负荷作为备用提供者,建立了多区域空调负荷聚合模型。

考虑用户自主响应行为的不确定性及其负荷聚合效应,分解协调不同类型的负荷类备用,根据用户需求及负荷特性采取合适的控制方式,在不同的时间尺度内对各类负荷进行资源整合互补,是负荷类备用未来的研究方向之一。

### 2.3 储能类备用

储能装置具备平滑风光出力、削峰填谷、跟踪计划发电、参与系统调频等功能<sup>[3]</sup>。相对于系统其他备用,储能备用作为一种灵活备用,不仅能在系统出现功率波动及功率缺额时提供备用支撑,还可以在负荷低谷期作为负荷吸收储备有功功率,有效提升新能源的接纳空间。近年来,储能技术的快速发展为电力系统备用配置优化及调度提供了新的思路。储能电源按照运行特性可分为功率型和能量型2类,如表1所示。其中,功率型储能电源充放电速度快,能量型储能电源充放电过程较长但容量较大<sup>[25]</sup>。针对新能源系统中可能出现的不同特性的功率缺额及波动事件(如短期功率波动事件和长期大容量功率缺额事件),利用各类储能装置在响应时间、容量大小及提供功率持续时间方面的互补特性,构建混合储能装置为电力系统提供备用支持<sup>[26-28]</sup>。在储能装置有效改善新能源系统输出功率波动的同时,为提高新能源发电系统的经济效益,储能系统容量配置及运行策略的经济性问题也不容忽视<sup>[29-31]</sup>。

表1 储能电源的分类及应用领域

Table 1 Classification and application fields of energy storage power sources

储能类型	额定功率/kW	持续放电时间	应用领域	
功率型	超导储能	10~1 000	5 s~5 min	电能质量
	电容器	1~100	1 s~1 min	电能质量
	飞轮储能	5~1 500	15 s~15 min	调频、电能质量
能量型	抽水蓄能	$1 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$	4~10 h	系统备用、调峰、能量管理
	压缩空气储能	$1 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$	6~20 h	系统备用、调峰
	液流电池	$100 \sim 1 \times 10^5$	数小时	新能源发电、抑制功率波动

### 2.4 小结

新能源大规模并网后,尽管电源类备用在备用容量、备用时长等方面占优,但迅速增长的备用需求不能仅仅依靠此类备用来满足。负荷类备用通过经济及技术手段将系统失稳后用户的被动切负荷转变为主动切负荷,在减小用户停电损失的同时也增加了系统的备用容量,提高了系统运行的稳定性。储能类备用种类繁多,在备用容量、响应时滞、备用时长等方面覆盖范围广,是应对大规模新能源并网的备用体系中不可缺少的一部分。此外,在特高压交直流输电线路大力建设,全国电网逐步互联的背景下<sup>[32-33]</sup>,充分发挥互联电网资源优化配置的优势,统筹多区域的备用资源,考虑各类备用资源的跨区支援,具有重要的现实意义。但是,当备用范围拓展到互联电网层面时,节点注入容量受传输容量制约,采用随机规划法<sup>[34-35]</sup>或鲁棒优化法<sup>[36]</sup>求解备用配置计算效率低下,在实际电力系统中难以满足时效性要求。且外区域备用的不合理分布也会在输电阻塞情况下造成备用支援功率不足<sup>[37]</sup>。同时,外区域备用与本区域各类备用间存在互补替代效应问题<sup>[38]</sup>。

因此,在未来的研究中,需综合考虑源、荷、储等多类备用,考虑备用的跨区支援,充分挖掘电力系统备用资源,提高新能源电力系统的可靠性及经济性。

## 3 电力系统备用容量配置方法

根据现阶段已有研究,电力系统备用容量的配置方法可分为确定性和不确定性分析方法,具体可细化为以下几种。

### 3.1 基于某一准则的确定性分析方法

确定性方法基于长期积累的电力系统运行经验,按照确定性准则(如N-1准则、负荷百分比准则

等)预留一定的备用容量,以应对系统中可能出现的功率波动及缺失等问题<sup>[8]</sup>,如将备用容量设为系统内最大机组容量或系统高峰负荷的一定百分比。

新能源出力的本质间歇性导致其预测精度难以快速提升<sup>[39—40]</sup>。不同于传统能源稳定的可计划出力,按照新能源预测结果组织电力生产的风险将长期存在。在新能源发展初期,其装机容量占比较小,双侧随机性影响较小,按照传统的确定性方法配置电力系统备用容量,其可靠性和经济性仍可得到保证。但是,我国新能源开发利用规模不断扩大,并呈现出集中式开发外送的特点,其净负荷(用电负荷扣除新能源发电)的波动性比传统电力系统的波动性更大<sup>[41]</sup>,加之如风电的反调峰特性,进一步加大了电力系统对备用容量的需求。现阶段,在以煤电为主的中国电力系统中,主要依赖煤电机组平衡新能源出力波动,但煤电机组存在启动慢、最小技术出力约束、环境污染等缺点,在此基础上仍采用确定性方法配置备用容量则会存在较大局限性。若煤电开机过多,则会压缩新能源出力空间,产生弃风弃光,也有悖于绿色清洁能源的宗旨;若煤电机组开机过少,则备用调节可能跟不上新能源出力的快速波动,系统可靠性得不到保证。

### 3.2 基于可靠性的不确定性分析方法

基于可靠性的概率方法从备用需求的角度出发,计及系统中诸多方面的不确定性因素(发电能力、计划检修、负荷水平特性等)所具有的概率特性来综合判断系统的可靠性水平,通过设定某一可靠性指标,如电力不足概率、电量不足期望值(expected energy not severed, EENS),来配置系统所需备用容量<sup>[42]</sup>。

文献[43—44]将备用给定条件下求解机组组合和机组组合确定后的可靠性指标相结合,通过反复迭代求解备用容量。当系统规模达到一定量级时,该方法通常求解时间长,且不易求得最优解,无法满足工程实际需求。此外,该方法并未将可靠性指标作为约束条件带入机组组合的模型中,并不是真正意义上的备用优化。针对上述问题,文献[45—46]明确了系统投运风险度与机组状态之间的近似关系,得到电力系统备用可靠性约束的显示关系式,并将其牵制到机组组合模型中,实现真正意义上的优化。

然而,基于可靠性的概率方法仅将系统的可靠性约束纳入考虑范畴,未考虑备用效益即经济性问题。在大规模新能源并网后,诸如新能源大面积脱网事件、极端爬坡事件等大容量功率缺额事件发生

概率较小,采用可靠性方法配置备用难以将这些事件考虑在内,即使考虑在内,配置的某些备用调用概率可能很低,经济性也不佳。且尽管概率性方法考虑了系统中不确定性因素对备用需求的影响,但其设定的可靠性指标往往基于工程实际经验,实质是确定性方法的延伸<sup>[11]</sup>。

### 3.3 基于成本效益的不确定性分析方法

成本效益法引入经济学理论,通过分析电力系统备用的成本及经济价值,以社会总成本最小化或社会福利最大化为目标函数,构建备用模型,进而配置系统的最优备用容量<sup>[47]</sup>。不同于概率性方法,该方法不需要预先设定满足系统可靠性要求的指标,而是将可靠性要求转换为系统稳定安全运行的经济成本或经济价值,联合备用的经济成本或价值进行优化,寻求可靠性与经济性之间的平衡。

不同于仅考虑发电成本、运行成本等成本组成本项的传统方法,文献[48—50]针对大规模风电及光伏并网,运用成本效益分析法,将失负荷成本以EENS与失负荷价值(value of lost load, VOLL)的乘积纳入目标函数中并建立模型,进而求解系统最优旋转备用容量,实现了经济性 with 可靠性之间的平衡。文献[51]考虑了风电及负荷的预测误差,并指出旋转备用需求的大小与目标函数中的统计数据VOLL取值密切相关,针对所优化的电力系统的不同,在目标函数中根据实际调研数据选择不同的VOLL取值,从而获得经济效益更好的旋转备用组合。文献[12]指出通过VOLL等平均统计数据来评估电力系统备用停电风险损失不能量化控制成本,故采用中断成本替代大部分的不受控停电损失,以系统风险总成本最小为目标函数对旋转备用进行优化。然而,上述文献均忽略了系统中的非旋转级备用,仅对旋转备用进行优化。将非旋转级备用引入电力系统备用优化体系中能提高系统运行效率,同时通过调度非旋转级备用替代旋转级备用还能降低大规模新能源接入后的备用成本<sup>[52]</sup>。针对上述问题,文献[53]在文献[12]的基础上,基于提前通知时间 $IL$ 延时提供备用服务的特性,将其引入非旋转备用体系中,考虑旋转级和非旋转级备用在物理及经济特性方面的差异性及互补性,以系统总控制风险最小为目标函数,通过快速寻优法,实现多等级备用混合优化,并通过算例验证了旋转级-非旋转级备用联合协调优化较旋转级备用单独优化具有的更加优良的经济特性。文献[8]基于多时间尺度的各类需求响应备用资源的经济及技术特性,与电源类备用资源互动,兼顾了系统的可靠性

效益与经济性成本,针对新能源和负荷预测精度随预测时间尺度的减小而逐步提高的特点,以最大化社会福利为目标函数,分别建立日前备用优化模型、日内 2 h 备用优化模型和日内 15 min 备用优化模型,实现电源类及负荷类 2 类资源备用容量的多等级多时间尺度滚动修订优化。文献[38]在综合考虑网络约束及负荷类备用的基础上,考虑了备用的跨区域支援,建立了源-网-荷备用的协同优化配置模型,实现了电力系统多类备用的联合配置。

### 3.4 小结

如表 2 所示,在大规模新能源接入电网的大环境下,若采取确定性分析方法配置电力系统的备用容量,为提高系统可靠性,需设置足够大的负荷百分比,亦或是参照  $N-m$  准则,但其显然存在经济性差及维数爆炸等问题,效果不佳。不确定性分析方法中,可靠性分析法虽然将电力系统中的各类不确定因素考虑在内,但其需要满足人为设定的可靠性指标,可靠性和经济性难以得到权衡。成本效益分析法将系统的可靠性及经济性要求统一量化为货币的形式,通过设定目标函数实现系统可靠性及经济性的统一考量,但也存在诸如不受控停电损失等成本难以准确量化的问题。因此,在配置系统备用容量时,可综合考虑可靠性分析及成本效益分析,兼顾经济性及可靠性。

表 2 电力系统备用容量的配置方法  
Table 2 Configuration method of reserve capacity of power system

配置方法	优点	缺点
确定性分析法	方法简单,新能源发展初期经济性及可靠性可控	新能源并网规模增大后可靠性及经济性难以保证
不确定性分析法	可靠性较高,相对于确定性分析法经济性有所提高	难以权衡可靠性及经济性
	成本效益分析法	兼顾可靠性及经济性

## 4 电力系统备用的调度优化

备用需求与系统的调频、调峰直接相关,也关系到功率在不同区域内的获取和不同机组上的分配<sup>[54]</sup>。因此,备用需求与电网的安全稳定及经济运行关系密切。大规模新能源并网后,新能源的间歇性、波动性及不可控性进一步加大了备用调度优化的难度。现有研究中,备用的调度优化主要有以下几种方法。

### 4.1 基于确定性出力的优化方法

该方法以新能源预测得到的确定性出力曲线

为基准线,通过附加新能源出力一定比例大小的备用容量来平抑其不确定性<sup>[55-57]</sup>。方法简单易行,但由于其过度依赖新能源预测结果的准确性,给出的备用调度优化结果准确度不高,不利于电网的经济运行。

### 4.2 基于置信区间的随机优化方法

与传统经济调度目标函数及约束条件的确定性不同,含大规模新能源的经济调度需要考虑新能源并网引入的不确定性因素,该方法可通过置信区间反映新能源出力的不确定性,确保系统备用满足给定的置信水平。文献[58]在风速预测的基础上,采用机会约束规划建模,将包含随机变量的约束条件以概率的形式表示,建立包含上、下旋转备用约束的电力系统动态经济调度模型,并在求解模型时运用混合智能算法以提高算法收敛速度及搜索性能。文献[59]考虑电力系统元件的随机停运、新能源出力及负荷的预测误差,将备用需求和线路潮流约束建模为机会约束以满足系统高置信水平的可靠性要求,并采用分解算法求解模型。文献[60]基于置信度概念,通过优化处理发电偏差,实现滚动计划阶段各调度时段的备用容量配置与优化。

尽管基于机会约束的随机优化方法能够确保所得到的系统运行方案能够使系统约束条件以较大概率满足<sup>[61]</sup>,进而能够覆盖尽可能多的工况,但其置信区间划定需在系统的经济性与可靠性之间取得平衡,且该方法缺乏对区间外风险的度量及防范。

### 4.3 基于场景分析的优化方法

场景法是通过若干个场景以描述新能源出力的不确定性,并在场景中校核备用计划的可靠性及经济性,从而完成系统的备用优化。文献[62]引入 IL 及储能装置两项备用措施以提高调度性能,利用场景生成及缩减技术模拟新能源出力的波动性,将风光出力的不确定性问题转化为多场景下的确定性问题,同时定义了系统备用紧张程度的风险指标,建立了满足一定风险指标的备用协调调度模型。文献[63]区别于传统场景法“先场景削减,再优化”的思路,提出一种自适应选取待优化场景集的方案,考虑旋转级煤电机组及高赔偿 IL,对备用进行调度优化,通过算例验证该方案能够有效识别小概率高风险场景,计算效率较高。

场景法的首要问题便是多场景的构造,国内外专家学者对其已有大量研究。文献[64]运用蒙特卡洛抽样构建风电出力及负荷预测误差场景;文献[65]为减小蒙特卡洛抽样的运行规模,采用拉丁超

立方抽样生成风电出力场景;文献[66]采用基于自回归滑动平均模型的时间序列法生成风电出力及负荷场景,着重考虑了预测误差在时间上的耦合性。但是,无论选取何种场景构建模型,都需要随机生成大量场景,若场景规模较大,则会降低求解效率,甚至无法满足在线应用的时效性要求。因此,需要对场景集进行合理有效的筛选简化,如串行遍历搜索法<sup>[67-68]</sup>和并行架构法<sup>[69]</sup>。需要注意的是,在场景筛选削减的过程中,一些关键场景(如小概率高风险场景)容易被错误地筛去,从而影响备用优化的精度,降低系统的可靠性。因此,如何平衡场景集的优化效率和精度是下一阶段的研究重点之一。

#### 4.4 鲁棒优化法

鲁棒优化法利用区间扰动信息,在最劣扰动条件下进行最优决策<sup>[70]</sup>。该方法具有不依赖不确定参数的概率分布、适用于大规模系统求解等优点<sup>[71]</sup>。在给定新能源的波动区间下,经过鲁棒优化算出的备用调度决策能够确保在任意波动下均能满足系统的运行约束条件。近年来,鲁棒优化法在备用优化领域也得到了应用。文献[72]在鲁棒优化建模时,运用表征元件运行状态的向量构建出包含系统备用容量在内的具有一致性的不等式约束,并利用 Benders 分解对原问题进行分解,以提高计算效率。相较于文献[72]将备用作为约束条件进行优化,文献[73]深入分析备用约束与不确定集的关系,通过对不确定集进行限制,进而实现备用的优化。文献[74]提出一种综合体现鲁棒备用调度及鲁棒经济调度的鲁棒调度方法,为将机组出力与备用进行协调优化,在目标函数中对鲁棒运行轨迹点和不同场景下常规机组备用需求进行了统一建模。

鲁棒优化模型需要在系统不确定性集合的边界最劣扰动条件下求得最优解,这种方法往往缺乏对经济性的考量。因此,如何平衡鲁棒性和经济性将是下一阶段的研究方向之一。一类方法是通过描述系统不确定性的波动范围来控制优化方法的保守程度,如多面体不确定集<sup>[73]</sup>、基数性不确定集<sup>[75]</sup>、 $N-k$  不确定集<sup>[76]</sup>等,但各方法对持续扰动或偶发故障扰动的描述均有所偏重。另一类方法是将鲁棒优化与随机优化相结合,文献[77]在目标函数中的随机优化项和鲁棒优化项引入权重因子,决策者可以根据偏好调整权重,并开发了 Benders 的分解算法来有效地求解模型;文献[78]将鲁棒优化的鲁棒性及随机优化的低成本特性相结合,通过电

力 VOLL 反映调度决策者对于短期供电连续性的重视程度,以控制调度优化的保守性,但其保守性控制依赖于经验,仍有改进空间。

#### 4.5 小结

如表 3 所示,尽管新能源出力预测的精度随预测时间尺度的减小而提高,但其提高幅度有限,且受技术发展等因素的制约,其预测精度在短期内不会有质的提升<sup>[79-83]</sup>,因此,依赖于预测出力的确定性优化方法的可靠性及经济性不佳。基于置信区间的优化方法尽管能尽可能涵盖电力系统可能出现的各类风险事件,但出于经济性方面的考量,不可能将各类小概率事件均涵盖在内,而这些未涵盖在内的事件恰恰是影响电网安全运行的高风险因素。鲁棒优化法可以将电力系统最劣扰动考虑在内,不依赖于概率分布特性,可靠性优,但其经济性还有待提升。场景法可以通过各类场景很好地描述新能源出力的连续性及其概率分布特性,但其应用过程中也存在维数灾等问题,场景的构造、筛选及有效削减技术还有待深入研究。

表 3 电力系统备用调度优化方法  
Table 3 Reserve dispatching optimization method for power system

调度优化方法	优点	缺点
确定性优化法	方法简单易行	过度依赖新能源预测结果,可靠性及经济性不佳
随机优化法	置信区间能够覆盖大量工况	缺乏对区间外风险的度量及防范
场景优化法	备用调度成本易于量化、能够反映新能源出力的连续性及其概率分布特性	场景的构建、筛选及削减存在难点、停电损失难以评估
鲁棒优化法	可靠性优	经济性不佳

## 5 对备用配置及调度优化的展望

随着新能源渗透率的逐步提高,传统备用体系措施单一、容量有限、配置及调度优化的经济性及可靠性不佳等问题日益显著。为适应大规模新能源并网,提高新能源的消纳水平,提升电力系统运行的可靠性及经济性,需要充分挖掘电力系统除电源侧以外的其余各侧备用资源,同时需要对备用的配置及调度优化进行改进。具体路线如图 3 所示。

(1) 考虑到传统备用体系资源有限、经济性不佳等缺点,需要充分挖掘电力系统源、荷、储多类备用资源,将柔性负荷、大规模储能等备用资源纳入考虑范畴,研究电源类备用的响应时滞、响应容量,负荷类及储能类备用的响应持续时间等技术特性,结合电源类备用的开机成本、电量成本,负荷类及

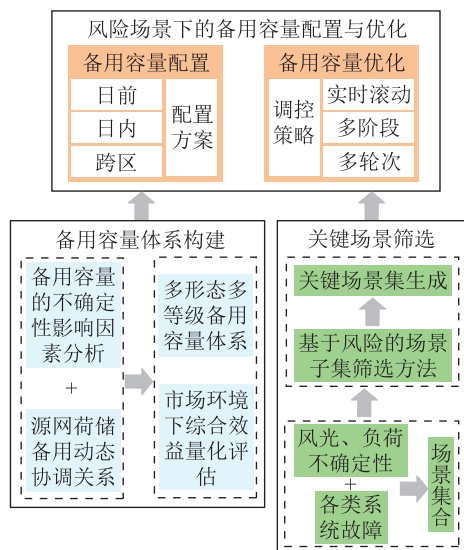


图3 改进措施路线

Fig.3 Roadmap for improvement measures

储能类备用的容量成本等经济特性分析,从电力市场运行特点出发,量化评估各类备用参与新能源消纳的经济效益,建立考虑技术经济特性差异的多形态多等级备用容量体系。

(2) 大规模新能源并网后,可通过构建场景集用以描述其出力的不确定性,但大量场景的引入会导致多场景分析计算复杂度急剧增加,简单的聚合又容易风险泄露,特别是小概率高风险事件的丢失。因此,在保证场景集的合理性及全面性的同时,可基于风险的概念,对场景集进行有效削减,为后续备用容量的优化及配置奠定基础。

(3) 在备用配置方面,计及备用事前配置的不确定性成本,量化学事后调控的风险性成本,综合考虑确定性及风险性成本以形成备用配置的总成本,实现经济性与可靠性之间的平衡。研究各等级各类备用容量的组合配置方法,通过衔接日前及日内计划,考虑备用的跨区互济,完成多区域备用容量配置。备用容量优化方面,在满足在线计算要求同时,通过实时滚动,实现多阶段、多轮次调控策略优化,保证电力系统的经济稳定运行。

## 6 结语

为应对大规模新能源并网环境下系统面临的各类长时间、大扰动、大容量功率缺额风险事件,文中阐述了大规模新能源并网对电力系统备用的影响,系统性地概括了电力系统多类备用的研究现状,指出了未来应综合考虑多类备用,充分挖掘备用资源,发挥大电网的资源优化配置能力,提升电力系统的可靠性;归纳总结了电力系统备用容量的

各类配置方法,分析了现行备用容量配置方法的优缺点,指出了应综合考虑固定成本及风险成本,以实现备用的最优配置;详细总结了电力系统备用调度优化的各类方法及其优缺点,指出了优化过程中应平衡可靠性与经济性之间的关系,过分追求系统的可靠性可能造成其经济性不佳,反之,过分追求调度的经济性则可能影响系统的安全稳定运行。因此,在提高新能源及负荷预测精度的同时,充分考虑上述问题,深入研究经济可靠的备用容量配置及优化方法,是应对大规模新能源并网带来的不确定性风险的重要手段。

### 参考文献:

- [1] 檀晓林. 含大规模风电场的电力系统备用容量优化研究[D]. 保定:华北电力大学,2014.  
TAN Xiaolin. Reserve capacity optimization of the power system with large-scale wind farm[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 国家能源局发布 2018 年可再生能源并网情况等 [EB/OL]. (2019-01-28) [2019-08-23]. [http://www.gov.cn/xinwen/2019-01/28/content\\_5361939.htm#1](http://www.gov.cn/xinwen/2019-01/28/content_5361939.htm#1).  
Central People's Government of the People's Republic of China. The National Energy Administration released the integration of renewable energy in 2018, et al [EB/OL]. (2019-01-28) [2019-08-23]. [http://www.gov.cn/xinwen/2019-01/28/content\\_5361939.htm#1](http://www.gov.cn/xinwen/2019-01/28/content_5361939.htm#1).
- [3] 罗剑波,陈永华,刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(22):140-146.  
LUO Jianbo, CHEN Yonghua, LIU Qiang. Overview of large-scale intermittent new energy grid-connected control technology [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 140-146.
- [4] 薛禹胜,谢东亮,薛峰,等. 智能电网运行充裕性的研究框架(一)要素与模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(10):1-9.  
XUE Yusheng, XIE Dongliang, XUE Feng, et al. A research framework for operation adequacy in smart grid part I elements and models [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 1-9.
- [5] 蔡斌,薛禹胜,薛峰,等. 智能电网运行充裕性的研究框架(二)问题与思路[J]. 电力系统自动化,2014,38(11):1-6.  
CAI Bin, XUE Yusheng, XUE Feng, et al. A research framework for operation adequacy in smart grid part II problems and ideas [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 1-6.
- [6] 许汉平,李姚旺,苗世洪,等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(17):18-25.  
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on "source-load-energy storage" coordination in power system [J]. Power System Protection and Control, 2017,

- 45(17):18-25.
- [7] 马进,赵大伟,钱敏慧,等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术,2017,41(10):3112-3120.  
MA Jin,ZHAO Dawei,QIAN Minhui, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. Power System Technology,2017,41(10):3112-3120.
- [8] 王蓓蓓,唐楠,方鑫,等. 大规模风电接入系统多时间尺度备用容量滚动修订模型[J]. 中国电机工程学报,2017,37(6):77-89.  
WANG Beibei,TANG Nan,FANG Xin, et al. A multi time scales reserve rolling revision model of power system with large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(6):77-89.
- [9] 裴哲义,王彩霞,和青,等. 对中国新能源消纳问题的分析与建议[J]. 中国电力,2016,49(11):1-7.  
PEI Zheyi,WANG Caixia,HE Qing, et al. Analysis and suggestions on renewable energy integration problems in China[J]. Electric Power,2016,49(11):1-7.
- [10] 国家发展改革委,国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016-2020年)[EB/OL]. (2016-11-07)[2019-08-23]. [http://ghs.ndrc.gov.cn/g\\_hwb/gjjgh/201706/t20170605\\_849993.html](http://ghs.ndrc.gov.cn/g_hwb/gjjgh/201706/t20170605_849993.html).  
National Development and Reform Commission,National Energy Administration. Electric power development "13th five-year plan" (2016-2020) [EB/OL]. (2016-11-07)[2019-08-23]. [http://ghs.ndrc.gov.cn/ghwb/gjjgh/201706/t20170605\\_849993.html](http://ghs.ndrc.gov.cn/ghwb/gjjgh/201706/t20170605_849993.html).
- [11] 赵云丽. 含风电电力系统的运行备用相关问题研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.  
ZHAO Yunli. Research on operation reserve of power system with wind power integration[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2015.
- [12] 吴俊,薛禹胜,舒印彪,等. 大规模可再生能源接入下的电力系统充裕性优化:(一)旋转级备用的优化[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):101-109.  
WU Jun,XUE Yusheng,SHU Yinbiao, et al. Adequacy optimization for a large-scale renewable energy integrated power system part one spinning-grade reserve optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(8):101-109.
- [13] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4304-4314.  
TANG Xisheng,MIAO Fufeng,QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4304-4314.
- [14] 张金平,汪宁渤,黄蓉,等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(15):1-8.  
ZHANG Jinping,WANG Ningbo,HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic[J]. Power System Protection and Control,2019,47(15):1-8.
- [15] 孔祥清. 可中断负荷参与系统备用的研究[D]. 成都:西华大学,2012.  
KONG Xiangqing. A study of interruptible load participating in system reserve[D]. Chengdu:Xihua University,2012.
- [16] 薛禹胜,罗运虎,李碧君,等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化,2007,31(10):1-6.  
XUE Yusheng,LUO Yunhu,LI Bijun, et al. A review of interruptible load participating in system reserve[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(10):1-6.
- [17] 董蓓,毛文博,李峰,等. 考虑多类型柔性负荷的日前优化调度技术[J]. 电力工程技术,2018,37(6):97-102.  
DONG Bei,MAO Wenbo,LI Feng, et al. The technique of day-ahead optimized scheduling with multi-type of flexible loads[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(6):97-102.
- [18] 王蓓蓓,李扬,万秋兰,等. 需求弹性对系统最优备用投入的影响[J]. 电力系统自动化,2006,30(11):13-17.  
WANG Beibei,LI Yang,WAN Qiulan, et al. Influence of demand elasticity on optimal system spinning reserve[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(11):13-17.
- [19] 葛炬,张粒子. 可中断负荷参与的备用市场帕累托优化模型[J]. 电力系统自动化,2006,30(9):34-37.  
GE Ju,ZHANG Lizi. Pareto optimality model of reserve market including interruptible load as participants[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(9):34-37.
- [20] HUANG K Y,CHIN H C,HUANG Y C. A model reference adaptive control strategy for interruptible load management[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(1):683-689.
- [21] 王蓓蓓,李义荣,李扬,等. 考虑响应不确定性的可中断负荷参与系统备用配置的协调优化[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):82-89.  
WANG Beibei,LI Yirong,LI Yang, et al. Optimal coordination between system reserve and interruptible loads with response uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(11):82-89.
- [22] 王珂,姚建国,姚良忠,等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):127-135.  
WANG Ke,YAO Jianguo,YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(20):127-135.
- [23] KONDOH J,LU N,HAMMERSTROM D J. An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(3):1309-1316.
- [24] 褚晓东,李娜,张文. 气象分区在负荷备用容量评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(21):19-24.  
CHU Xiaodong,LI Na,ZHANG Wen. Application of meteorological partition to assessment of reserve capacity from responsive load[J]. Power System Protection and Control,2012,40(21):19-24.
- [25] 章伟. 市场环境大规模风电并网系统中储能容量优化配置[D]. 镇江:江苏大学,2016.



- ZHANG Wei. Capacity optimization of energy storage power of wind power grid under the electricity market environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [26] 鲍雪娜,张建成,徐明,等. 基于混合储能的并网光伏电站有功分级控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 115-121.
- BAO Xuena, ZHANG Jiancheng, XU Ming, et al. Active power hierarchical control strategy of interconnected photovoltaic station based on hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 115-121.
- [27] 刘世林,文劲宇,孙海顺,等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 145-153.
- LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 145-153.
- [28] 杨珺,张建成,周阳,等. 针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 38-44.
- YANG Jun, ZHANG Jiancheng, ZHOU Yang, et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in stand-alone wind/PV power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 38-44.
- [29] 李滨,陈姝,韦化. 风电场储能容量优化的频谱分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2128-2134.
- LI Bin, CHEN Shu, WEI Hua. Optimization of energy storage capacity based on spectral analysis for wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2128-2134.
- [30] 李滨,陈姝,梁水莹. 一种平抑光伏系统输出波动的储能容量优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 45-50.
- LI Bin, CHEN Shu, LIANG Shuiying. A capacity optimization of energy storage system for output smoothing of photovoltaic station[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 45-50.
- [31] 陈厚合,杜欢欢,张儒峰,等. 考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 174-182.
- CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182.
- [32] 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
- LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of china[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [33] 杨海涛,吉平,苗淼,等. 未来中国特高压电网结构形态与电源组成相互关系分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 9-17.
- YANG Haitao, JI Ping, MIAO Miao, et al. Analysis on interrelationship between future UHV power grid structural form and power source composition in china[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 9-17.
- [34] WU L, SHAHIDEHPOUR M, LI T. Stochastic security-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 800-811.
- [35] HEJAZI H A, MOHABATI H R, HOSSEINIAN S H, et al. Differential evolution algorithm for security-constrained energy and reserve optimization considering credible contingencies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1145-1155.
- [36] WANG Q, WATSON J P, GUAN Y. Two-stage robust optimization for  $N-k$  contingency-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2366-2375.
- [37] WANG F, HEDMAN K W. Reserve zone determination based on statistical clustering methods[J]. North American Power Symposium, 2012: 1-6.
- [38] 王凯. 考虑网络约束的源-荷备用优化配置模型与方法[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- WANG Kai. Models and methods on optimal allocation for supply/demand side reserve considering power network constraints[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [39] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
- XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [40] 赖昌伟,黎静华,陈博,等. 光伏发电出力预测技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1201-1217.
- LAI Changwei, LI Jinghua, CHEN Bo, et al. Review of photovoltaic power output prediction technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1201-1217.
- [41] 宫本辉,姚力,傅旭,等. 基于等效负荷区间和随机生产模拟的新能源接纳能力快速计算方法[J]. 电力建设, 2016, 37(3): 24-30.
- GONG Benhui, YAO Li, FU Xu, et al. A fast calculation method of renewable energy accommodation capacity based on equivalent load interval and probability production simulation[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(3): 24-30.
- [42] 杨娜娜. 消纳大规模风电的备用容量在线滚动决策与模型研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- YANG Nana. Research on an on-line spinning reserve rolling dispatch method for accommodating large-scale wind power[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [43] GOOI H B, MENDES D P, BELL K R W, et al. Optimal scheduling of spinning reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4): 1485-1492.
- [44] XIA L M, GOOI H B. A reserve market with reliability incentives[C]//International Conference on Power System Technology. IEEE, 2004.
- [45] CHATTOPADHYAY D, BALDICK R. Unit commitment with

- probabilistic reserve [C]//Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE,2002.
- [46] 杨朋朋,韩学山,王静,等. 用拉格朗日松弛法求解概率备用解析表达的机组组合[J]. 山东大学学报(工学版),2007(2):58-62.  
YANG Pengpeng, HAN Xueshan, WANG Jing, et al. Unit commitment with analytic expression of probability reserve by the Lagrangian relaxation method[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science),2007(2):58-62.
- [47] 赵云丽,吕泉,朱全胜,等. 风电并网后系统备用的相关问题综述[J]. 可再生能源,2015,33(4):565-571.  
ZHAO Yunli, LYU Quan, ZHU Quansheng, et al. Overview on issues related to reserve capacity by wind power connected to the grid [J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(4):565-571.
- [48] 苏鹏,刘天琪,李兴源. 含风电的系统最优旋转备用的确定[J]. 电网技术,2010(12):158-162.  
SU Peng, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Determination of optimal spinning reserve of power grid containing wind[J]. Power System Technology,2010(12):158-162.
- [49] LIU G, TOMSOVIC K. Quantifying spinning reserve in systems with significant wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012,27(4):2385-2393.
- [50] 胡斌,娄素华,李海英,等. 考虑大规模光伏电站接入的电力系统旋转备用需求评估[J]. 电力系统自动化,2015(18):15-19.  
HU Bin, LOU Suhua, LI Haiying, et al. Spinning reserve demand estimation in power systems integrated with large-scale photovoltaic power plants [J]. Automation of Electric Power Systems,2015(18):15-19.
- [51] ORTEGA-VAZQUEZ M A, KIRSCHEN D S. Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(1):114-124.
- [52] HULTHOLM C. Non-spinning standby reserves enabling an efficient integration of renewables [C]//International Energy & Environment Fair Conference, Istanbul, Turkey,2014.
- [53] 吴俊,薛禹胜,舒印彪,等. 大规模可再生能源接入下的电力系统充裕性优化:(二)多等级备用的协调优化[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):19-26.  
WU Jun, XUE Yusheng, SHU Yinbiao, et al. Adequacy optimization for a large-scale renewable energy integrated power system (II) multi-grade reserve collaborative optimization [J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(10):19-26.
- [54] 夏天宇. 高渗透率风力电源的区域电网备用调度决策研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.  
XIA Tianyu. Research on reserve dispatch of regional power grid with significant wind power generation penetration [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2012.
- [55] 陈功贵,陈金富. 含风电场电力系统环境经济动态调度建模与算法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):27-35.  
CHEN Gonggui, CHEN Jinfu. Environmental/economic dynamic dispatch modeling and method for power systems integrating wind farms [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(10):27-35.
- [56] 杨柳青,林舜江,刘明波,等. 考虑风电接入的大型电力系统多目标动态优化调度[J]. 电工技术学报,2014,29(10):286-295.  
YANG Liuqing, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Multi-objective dynamic optimal dispatch for large-scale power systems considering wind power penetration [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(10):286-295.
- [57] 周玮,彭昱,孙辉,等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(25):13-18.  
ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(25):13-18.
- [58] 孙元章,吴俊,李国杰,等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):41-47.  
SUN Yuanzhang, WU Jun, LI Guojie, et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):41-47.
- [59] WU H, SHAHIDEHPOUR M, LI Z, et al. Chance-constrained day-ahead scheduling in stochastic power system operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(4):1583-1591.
- [60] 杨娜娜,张建成,顾志东. 消纳大规模风电的备用容量在线滚动决策与模型[J]. 现代电力,2015,32(1):52-58.  
YANG Nana, ZHANG Jiancheng, GU Zhidong. An online rolling dispatch method and model of spinning reserve for accommodating large-scale wind power [J]. Modern Electric Power,2015,32(1):52-58.
- [61] 赵文猛. 含风电接入的大规模电力系统日前优化调度研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.  
ZHAO Wenmeng. Research on optimal day-ahead dispatch of large scale power systems considering wind generation integration [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2016.
- [62] 孟杰. 含大规模新能源的电力系统优化调度问题研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.  
MENG Jie. Research on optimal dispatch of power systems incorporating large-scale renewable energy [D]. Beijing: North China Electric Power University,2014.
- [63] 吴俊,薛禹胜,舒印彪,等. 大规模可再生能源接入下的电力系统充裕性优化:(三)多场景的备用优化[J]. 电力系统自动化,2019,43(11):1-7.  
WU Jun, XUE Yusheng, SHU Yinbiao, et al. Adequacy optimization for a large-scale renewable energy integrated power system part three reserve optimization in multiple scenarios [J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(11):1-7.
- [64] SAHIN C, SHAHIDEHPOUR M, ERKMEN I. Allocation of hourly reserve versus demand response for security-constrained

- scheduling of stochastic wind energy [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 219-228.
- [65] WANG J, SHAHIDEHPOUR M, LI Z. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1327.
- [66] BARTH. Stochastic optimization model to study the operational impacts of high wind penetrations in ireland [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1367-1379.
- [67] GROWE-KUSKA N, HEITSCH H, ROMISCH W. Scenario reduction and scenario tree construction for power management problem [C]//Power Technology Conference Proceedings. IEEE, 2003.
- [68] HEITSCH H, WERNER R. Scenario reduction algorithms in stochastic programming [J]. Computational Optimization and Applications, 2003, 24(2): 187-206.
- [69] 王群, 董文略, 杨莉. 基于 Wasserstein 距离和改进 K-medoids 聚类的风电/光伏经典场景集生成算法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2654-2661.
- WANG Qun, DONG Wenlue, YANG Li. A wind power/photovoltaic typical scenario set generation algorithm based on wasserstein distance metric and revised K-medoids cluster [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2654-2661.
- [70] 于丹文, 杨明, 翟鹤峰, 等. 鲁棒优化在电力系统调度决策中的应用研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 134-143.
- YU Danwen, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. An overview of robust optimization used for power system dispatch and decision-making [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 134-143.
- [71] 范刘洋, 汪可友, 吴巍, 等. 多时间尺度的电力系统鲁棒调度研究 [J]. 电网技术, 2017(5): 238-245.
- FAN Liuyang, WANG Keyou, WU Wei, et al. A study of multi-time scale robust schedule and dispatch methodology [J]. Power System Technology, 2017(5): 238-245.
- [72] WANG J, SHAHIDEHPOUR M, LI Z. Contingency-constrained reserve requirements in joint energy and ancillary services auction [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1457-1468.
- [73] JIANG R, ZHANG M, LI G, et al. Two-stage network constrained robust unit commitment problem [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 234(3): 751-762.
- [74] 徐秋实, 邓长虹, 赵维兴, 等. 含风电电力系统的多场景鲁棒调度方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(3): 653-661.
- XU Qiushi, DENG Changhong, ZHAO Weixing, et al. A multi-scenario robust dispatch method for power grid integrated with wind farms [J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 653-661.
- [75] LI Zukui, FLOUDASC A. Robust counterpart optimization: uncertainty sets, formulations and probabilistic guarantees [R]. Princeton; Princeton University, 2012.
- [76] STREET A, OLIVEIRA F, JOSÉ M A. Contingency-constrained unit commitment with N-k security criterion: a robust optimization approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1581-1590.
- [77] ZHAO C, GUAN Y. Unified stochastic and robust unit commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3353-3361.
- [78] DVORKIN Y, HRVOJE P, ORTEGA-VAZQUEZ M A, et al. A hybrid stochastic/interval approach to transmission-constrained unit commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(2): 621-631.
- [79] 陶玉波, 陈昊, 秦晓辉, 等. 短期风电功率预测概念和模型与方法 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 7-13.
- TAO Yubo, CHEN Hao, QIN Xiaohui, et al. A review of the short-term wind power forecasting theory, model and approach [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 7-13.
- [80] 韩自奋, 景乾明, 张彦凯, 等. 风电预测方法与新趋势综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 178-187.
- HAN Zifen, JING Qianming, ZHANG Yankai, et al. Review of wind power forecasting methods and new trends [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 178-187.
- [81] 杨茂, 张罗宾. 基于数据驱动的超短期风电功率预测综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 171-186.
- YANG Mao, ZHANG Luobin. Review on ultra-short term wind power forecasting based on data-driven approach [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 171-186.
- [82] 薛禹胜, 郁琛, 赵俊华, 等. 关于短期及超短期风电功率预测的评述 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 141-151.
- XUE Yusheng, YU Chen, ZHAO Junhua, et al. A review on short-term and ultra-short-term wind power prediction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 141-151.
- [83] 宋阳, 张静页, 王磊, 等. 计及预测偏差的光伏消纳多时间尺度调度研究 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 58-64.
- SONG Yang, ZHANG Jingye, WANG Lei, et al. Research on multi-time scheduling of accommodating photovoltaic considering the error of photovoltaic prediction [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 58-64.

## 作者简介:



杨肖虎

杨肖虎(1995),男,硕士在读,研究方向为电力系统充裕性(E-mail:somnusyangxh@163.com);

罗剑波(1963),男,博士,研究员级高级工程师,从事电网安全稳定与控制相关工作;

郁琛(1985),男,博士,高级工程师,从事新能源发电预测及电力系统外部灾害防御相关工作。

(下转第 63 页)

- 2016,37(7):71-77.
- [26] 张碧涵,赵海森. 基于 PSCAD 仿真的柔性直流输电技术研究[J]. 上海电气技术,2016,9(2):56-63.
- ZHANG Bihan,ZHAO Haisen. Research on VSC-HVDC transmission technology based on PSCAD[J]. Journal of Shanghai Electric Technology,2016,9(2):56-63.
- [27] 张汀荃,张汀荟,张海龙,等. 双端柔直输电系统的改进无差拍控制策略研究[J]. 电力工程技术,2018,37(4):84-89.
- ZHANG Tingquan,ZHANG Tinghui,ZHANG Hailong, et al. Operation characteristics of improved deadbeat flexible HVDC

transmission [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):84-89.

作者简介:



陈大林

陈大林(1992),男,硕士,助理工程师,从事柔性直流输电相关工作(E-mail:chendalin1-992@foxmail.com);

范绚然(1993),女,硕士,助理工程师,从事电力系统分析相关工作;

赵健(1993),男,硕士,助理工程师,从事电力系统分析相关工作。

## Integrated control strategy of VSC inverter supplying power to the isolated grid

CHEN Dalin, FAN Xuanran, ZHAO Jian, YE Jianqiao, ZHU Zhengyi, ZHOU Hao

(State Grid Nanjing Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Considering the isolated power grid state changing between active power grid and passive power grid, an integrated control strategy is proposed for VSC station to supply power to isolated power grid. Based on the principle of VSC control, the difference of control modes of VSC-HVDC inverter in active and passive power grids is analysed. When isolated power grid changes from active power grid to passive power grid, the control mode of VSC station changes. Considering the stabilization of AC voltage and fast restoration of active power balance, two control strategies, angle following and active power priority, are proposed in the paper. A comprehensive control system is designed to ensure the minimum fluctuation of each electrical quantity of islanded power grid and DC system at the time of switching. The PSCAD/EMTDC simulation model of VSC-HVDC transmission system is established. The simulation results verify the validity of the integrated controller and control strategy proposed in this paper. The continuous and reliable power supply can be realized when the isolated grid state changes.

**Keywords:** voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission system; isolated grid; control mode switching; angle following; active power priority

(编辑 方晶)

(上接第 20 页)

## Review of power system reserve configuration and optimization for large-scale renewable energy integration

YANG Xiaohu<sup>1,2</sup>, LUO Jianbo<sup>2</sup>, YU Chen<sup>2</sup>, XIE Dongliang<sup>2</sup>, GE Rui<sup>3</sup>, FENG Changyou<sup>3</sup>

(1. School of NARI Electrical Engineering and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China)

**Abstract:** After the large-scale renewable energy is connected to the grid, the traditional reserve system has the problem of poor economy and reliability when dealing with the bilateral randomness of the power supply side and the load side of the power system. To ensure the safe and stable operation of the system, it is necessary to study the configuration and optimization methods of the system reserve. This paper expounds the impact of large-scale renewable energy grid-connected on power system reserve, fully explores various types of reserve resources of the system and expounds the three types of reserve resources of source, load and storage and their research status as cross-regional reserve of interconnected power grids, in order to deal with various long-term, large disturbance, large-capacity power shortage risk events faced by the system under large-scale renewable energy grid-connected environment. This paper analyzes in detail the various methods for configuring the reserve capacity of power systems, reserve dispatching optimization, and points out the research direction of the next stage, which provides reference for the research on the reserve configuration and optimization method of the power system in the context of large-scale renewable energy grid connection.

**Keywords:** renewable energy integration; power system; multiple reserve; reserve configuration; reserve optimization

(编辑 方晶)