

# 高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望

姚良忠<sup>1</sup>, 朱凌志<sup>1</sup>, 周明<sup>2</sup>, 林振智<sup>3</sup>, 罗凤章<sup>4</sup>, 赵大伟<sup>1,2</sup>

(1. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院), 北京市 100192;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206;

3. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 4. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津市 300072)

**摘要:**近年来,随着风力发电和太阳能发电的大规模快速发展,以及交流、直流输电线路的不断建设,中国电力系统呈现高比例可再生能源和交直流混联电网两大重要特征和趋势。在分析国内外研究现状及存在问题的基础上,文中从源-荷双重不确定性的交直流混联系统态势感知、考虑宽频带稳定约束的大规模可再生能源集群并网协调控制、高渗透率可再生能源配电系统源-网-荷交互的灵活重构与协同运行、高比例可再生能源并网的交直流混联系统多尺度运行优化与决策等四个方面,提出了含高比例可再生能源电力系统协同优化运行方面亟待研究的关键技术内容,构思了研究方案,并对其难点问题与挑战进行了展望。

**关键词:**高比例可再生能源;交直流混联电网;源-网-荷交互;协同优化运行

## 0 引言

大力发展风电和太阳能发电等可再生能源已成为国内外应对气候变化、解决能源危机和促进节能减排的共识与重要手段。至2015年底,中国风电和太阳能发电并网装机容量均位居世界第一,华北、东北、西北等“三北”地区可再生能源经特高压直流、交流输电通道送至中东部负荷中心是重要特征。根据《能源发展“十三五”规划》<sup>[1]</sup>和《可再生能源发展“十三五”规划》<sup>[2]</sup>,国家将继续大力发展风电和太阳能发电,并配套建设特高压输电通道,通过多种措施有效扩大可再生能源消纳范围,最大限度地提高外送可再生能源电量比重。同时,风电、太阳能发电布局将向中东部转移,以分布式开发、就地消纳为主。《配电网建设改造行动计划(2015—2020年)》<sup>[3]</sup>明确将全面加快现代配电网建设,满足新能源、分布式电源和电动汽车等多元化负荷发展和接入需求。

从以上现状和发展规划可以看出,中国电力系统在当前和未来较长时间内,均将呈现高比例可再生能源和交直流混联电网特征。文献[4]从高比例可再生能源并网带来的强不确定性和高度电力电子化带来的稳定机理变化两个方面,分析了高比例可再生能源并网电力系统面临的关键科学问题。在文

献[4]的整体框架内,本文着力阐述含高比例可再生能源电力系统协同优化运行技术研究思路,具体包括四个方面:源-荷双重不确定性的交直流混联系统态势感知、大规模可再生能源集群并网协调控制、高渗透率可再生能源配电系统源-网-荷交互的灵活重构与协同运行、高比例可再生能源并网的交直流混联系统多尺度运行优化与决策。

## 1 含可再生能源的电力系统协同优化运行研究现状

### 1.1 源-荷双重不确定性的电力系统态势感知

态势感知指在特定的时间和空间下,对环境各元素或对象的察觉、理解及预测,包括态势要素采集、实时态势理解和未来态势预测3个阶段<sup>[5]</sup>。近20年来,世界范围内因态势感知不足发生的大规模停电事故屡见不鲜<sup>[6-7]</sup>,引发了学术界和工程界的广泛关注。在态势感知测量设备方面,基于相量测量单元(PMU)的广域测量系统(WAMS)在国内外得到了不断发展和推广应用<sup>[8]</sup>,此外,近年来针对配电网的测量装置和技术也开始得到重视和发展<sup>[9-10]</sup>。在态势感知技术方面,已有研究主要从评估<sup>[11]</sup>、提升<sup>[12]</sup>等角度分析状态感知不足对电网调度甚至大停电造成的影响。在配电网方面,大量分布式能源和双向互动负荷的接入使得传统配电网成为有源配电网,系统采集的数据大量增长,配电网运行复杂度大幅提高,在态势觉察、态势理解、态势预测、态势呈

收稿日期:2017-01-12;修回日期:2017-02-17。

上网日期:2017-03-16。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900105)。

现、态势利导等多方面均面临挑战<sup>[13]</sup>。总体上,目前国内外在态势感知技术研究方面仍处于起步阶段,考虑电源侧-负荷侧双重不确定性的交直流混联系统的态势感知理论尚待建立。

### 1.2 大规模可再生能源集群并网协调控制

国内在大规模可再生能源集群并网控制方面走在世界前列,提出了包含机组/组件、场站、场站群、集群4层的分层分区控制体系<sup>[14]</sup>,并在甘肃等地成功应用了大型集群风电有功智能控制系统。近年来,该领域研究主要围绕机组层面的故障穿越<sup>[15]</sup>、场站/场群层面的功率控制<sup>[16]</sup>和无功/电压控制<sup>[17]</sup>展开。此外,风电/光伏发电呈现低惯量/零惯量,影响系统调频,且其大量接入及远距离传输会显著改变系统潮流和惯量分布,对系统低频振荡模式可能产生明显影响<sup>[18-19]</sup>。2009年、2011年、2015年美国德州、中国河北、中国新疆等地相继发生风电场经串联补偿或直流送出系统的振荡事件,如新疆现场发现振荡中同时存在次同步和超同步分量,且超同步分量幅值更大,引起了国内外学术界的极大关注<sup>[20-22]</sup>。目前,含风电等可再生能源的系统次同步振荡问题机理尚不够清晰。如何在充分考虑低频一次同步-超同步等宽频带稳定问题的情况下更好地实施可再生能源集群并网协调控制亟须开展研究。

### 1.3 可再生能源配电系统的网架重构与协同运行

电动汽车、储能和间歇性分布式电源的接入使得配电系统运行状态不确定、波动性大幅增大。传统的配电网重构方法(如支路交换法、动态规划法)对电源及负荷的随机性考虑不足,场景分析法可有效分析随机性问题,但面临场景组合“爆炸”问题。建立分场景随机性模型,将场景分析和随机潮流计算相结合是一种有效方法<sup>[23]</sup>。此外,已有文献重点研究了配电孤岛短时恢复供电策略<sup>[24]</sup>、考虑 $N-1$ 安全准则的多目标重构策略<sup>[25]</sup>、考虑长周期(年)并兼顾经济性的系统重构<sup>[26]</sup>。在配电网协同运行方面,国内主要集中在分布式电源接入、微网、电动汽车充电设施、配电自动化等各系统的独立研究<sup>[27]</sup>,国外则侧重考虑降低配电系统的损耗等经济性问题<sup>[28]</sup>。总体上,目前已有文献尚未充分考虑多类型电源-多结构电网-多种类负荷交互下的灵活重构和协同运行问题。此外,目前重构的目标多局限于降低网损与提升电网运行可靠性,并未考虑在高比例可再生能源接入后如何通过重构提升可再生能源的消纳能力,也未考虑在高比例可再生能源接入后,重构后电网可能出现的电压越限、可再生能源消纳能力下降等情况。

### 1.4 可再生能源并网的电力系统运行优化与决策

风电和太阳能发电的出力预测存在误差,且误差大小随预测周期和出力水平的不同存在较大差异,需要不同的备用容量。针对含可再生能源的系统旋转备用优化确定,目前国内外采取的方法大概有4类:确定性方法、风险备用方法<sup>[29]</sup>、随机规划方法以及多场景概率风险方法<sup>[30]</sup>。为减少备用容量需求,也可从可再生能源本身考虑措施,如合理弃风、提高风机可控性<sup>[31]</sup>。在可再生能源接入电网后的优化调度研究方面,国外主要考虑局域电网的运行可靠性、风险等因素,对大范围交直流混联电力系统缺乏研究。国内主要从风电预测误差的准确描述<sup>[32-33]</sup>、风电集群内部互补优化<sup>[34]</sup>等角度开展风电对电网调度计划影响研究,并基于智能电网调度控制系统基础平台设计开发了新能源调度技术支持系统<sup>[35]</sup>,整体研究思路在一体化调度<sup>[36]</sup>模式框架下开展。对于考虑安全与效能的多尺度备用、交直流混联系统的跨区域备用共享和多层级协调优化风险调度方面的研究较为缺乏,亟待开展。

综上所述,国外从经济性、运行可靠性、风险等角度建立了适应可再生能源消纳的输电网、主动配电网、微电网等的优化运行理论,但在高比例可再生能源并网背景下相关理论实施困难,并缺乏考虑交直流混联电力系统运行方法的研究。国内主要以提高可再生能源消纳能力、电网安全性为目标开展输电网运行优化研究,现有一体化调度模式罕有考虑市场模式和用户的互动参与影响;配电网运行研究聚焦于配电网智能化和微电网研究,尚未充分考虑可再生能源、负荷的不确定性与运行风险。

本文首先提炼了含高比例可再生能源电力系统协同优化运行研究的科学问题,给出了研究框架,然后提出了主要研究内容,接着构想了研究方案/方法,最后探讨了主要面临的技术难点和挑战。

## 2 科学问题剖析与研究框架

### 2.1 科学问题

基于对国内外研究现状的分析以及可再生能源(风电和太阳能)的发展态势,围绕高比例可再生能源接入的交直流混联电力系统安全高效运行的目标,本文提炼出两个科学问题:一个针对输电系统,即含高比例可再生能源交直流混联系统多类型源-荷互补运行策略和多时空尺度协调优化运行方法;另一个针对配电系统,即高渗透率可再生能源配电系统源-网-荷交互的灵活重构与自治运行方法。

### 2.2 研究框架

针对高比例可再生能源接入交直流混联系统的

优化运行问题,围绕两个科学问题,首先研究含高比例可再生能源、电动汽车及储能的交直流混联系统运行实时状态评估与系统态势感知和多维度运行风险分析方法。然后,以高比例可再生能源集群并网

及多源互补优化运行、源-网-荷交互的灵活重构与协同运行、多尺度运行优化与决策为手段,建立高比例可再生能源混联系统的安全高效运行分析理论和方法体系。总体研究框架如图 1 所示。



图 1 高比例可再生能源电力系统协同优化运行研究框架

Fig.1 Research framework for coordination and optimization of power systems with high proportion of renewable energy

### 3 研究主线与研究内容

含高比例可再生能源的交直流混联系统协同优化运行研究主线如图 2 所示。

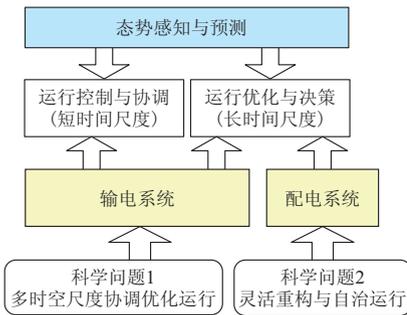


图 2 高比例可再生能源电力系统协同优化运行研究主线

Fig.2 Research outline for coordination and optimization of power systems with high proportion of renewable energy

#### 3.1 源-荷双重不确定性交直流混联系统态势感知

针对集中式/分布式可再生能源、双向互动负荷接入电网后电力系统的源-荷两端双重不确定,需要研究和建立可再生能源多点随机注入电网的耦合特性模型,在此基础上,考虑中国电网和电源现状及发展规划,需要研究和构建适用于高比例可再生能源并网与交直流混联系统优化运行的源-荷出力和电网运行典型场景,具体可包括 2020 年、2030 年、2050 年三个时间节点。

针对含高比例可再生能源、电动汽车及储能的交直流混联系统,需要研究系统运行实时状态的评估方法;在此基础上,综合考虑可再生能源不确定性、负荷波动性以及系统可调控能力,研究交直流混联系统运行发展态势的评估方法;同时,开展含高比例可再生能源的交直流混联系统多维度运行风险分

析方法研究,最终形成具有多源数据融合的状态感知、趋势预测与风险评估一体化的交直流混联系统态势感知方法体系。

#### 3.2 考虑宽频带稳定约束的大规模可再生能源集群并网协调控制

针对现场出现的宽频带稳定问题,需要综合考虑大规模可再生能源集群的多时间尺度、多扰动形式的稳定特性以及各时间尺度动态耦合特征,研究和建立可再生能源集群宽频带稳定约束评估方法;同时,考虑不同时间/空间尺度大规模可再生能源集群随机波动特性,需要研究可再生能源集群出力的多时空尺度重构方法,基于所构建的可再生能源集群出力场景,研究和分析不同时/空尺度下交直流互联系统对可再生能源集群并网的适应性及其对系统调节能力的需求。

进一步,需要在重点考虑资源的类型/时空互补性和宽频带稳定约束的基础上,研究可再生能源机组/场站/集群的多层级并网控制及协调运行方法;此外,需要站在场群级的角度,研究和分析多种电源(高比例可再生能源、传统电源、储能)的协调运行机制,进而研究多种电源互补优化运行和平抑可再生能源出力波动的方法。

#### 3.3 高渗透率可再生能源配电系统源-网-荷交互的灵活重构与协同运行

需要建立含电动汽车、储能和间歇性电源的配电系统在多源接入多时空不确定性下的主动重构模型,在此基础上,研究高渗透率可再生能源配电系统灵活重构与自愈方法;此外,需要分析含电动汽车、储能和间歇性电源的配电系统拓扑结构灵活变换特性与多元负荷多样调节形式,研究高渗透率可再生能源配电系统主动孤岛与自治运行方法;同时,开展

市场环境下游-网-荷动态合作模式分析,建立多层级博弈模型与策略,进而研究含高渗透率可再生能源的配电系统协同优化运行方法。

### 3.4 高比例可再生能源并网的交直流混联系统多尺度运行优化与决策

需要研究风、光、水等高比例可再生能源发电与双向互动负荷、储能在交直流混联系统中多源多级互补特性,并建立考虑安全与效能双重因素的系统多尺度备用水平评价标准,研究高比例可再生能源的备用需求准则;需要建立考虑多重不确定因素的多源互补的交直流混联系统跨区域电力电量分配与消纳机制,在此基础上,研究考虑交直流混联网络特性约束下多样化运行场景和输电方式,研究跨区域备用共享的优化运行方法;此外,需要研究考虑市场环境下游-网-荷动态合作、多层级博弈下的输配电网联合调度方法,建立输配电网时空解耦的多层级协同优化调度形态体系;并研究适应多重不确定性的预防与紧急控制方法,最终形成输配电网多层级风险调度策略与方法体系。

## 4 研究方案与主要方法构想

### 4.1 交直流混联系统态势感知

首先,对高比例可再生能源的不确定性和随机性因素进行建模,分析多点随机注入的可再生能源耦合特性,分别构建可再生能源多点随机注入的典型输电网和配电网场景;接着,基于电网拓扑与模型数据、数据采集与监控(SCADA)量测数据、WAMS量测数据、仿真数据等电力系统大数据,在计及量测不确定性的基础上采用复杂网络理论、数据挖掘技术等方法评估电网的运行状态以及电网的脆弱性等;在此基础上,基于轨迹相似度理论、多属性决策理论等理论研究电网运行轨迹的辨识方法;然后,基于发电出力与负荷的预测数据,研究电网运行轨迹的预测方法以及电网的发展态势评估方法;最后,从时间、空间、标准、评价等维度提出越限驱动型和事件驱动型的风险指标,形成含高比例可再生能源的电力系统多维度运行风险指标体系,在此基础上,研究基于多属性决策理论的含高比例可再生能源的交直流混联系统运行风险评估方法,整体方案见图3。

### 4.2 可再生能源集群并网协调控制

首先,结合新疆哈密次同步振荡等现场问题,分析大规模可再生能源集群的多时间尺度、多扰动形式的稳定特性以及各时间尺度动态耦合特征,建立可再生能源集群宽频带稳定约束评估方法;接着,构建可再生能源集群出力典型场景,分析不同时/空尺度下交直流互联系统对可再生能源集群并网的适应

性及其对系统调节能力的需求;然后,考虑可再生能源资源类型及分布特征、资源的互补性以及含低频-次同步-超同步的宽频带稳定约束,采用多时间尺度时域仿真方法、智能优化算法、大系统理论及模态分析理论开展可再生能源机组-场站-集群的分层协调优化控制研究;最后,考虑潮流平衡、出力限值、弃风弃光指标等约束条件,构建优化目标函数,采用时序运行模拟方法研究多种电源优化协调运行问题,整体研究方案如图4所示。

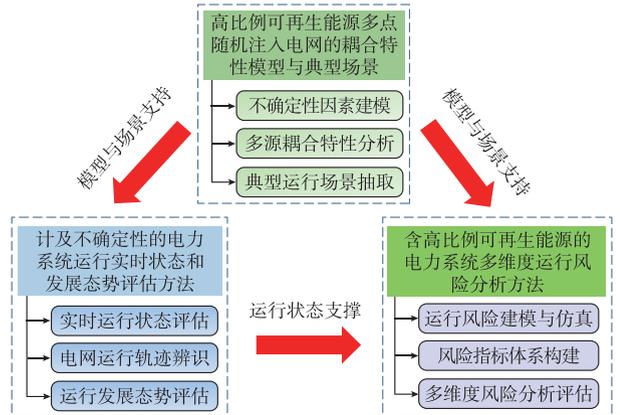


图3 交直流混联系统态势感知研究方案

Fig.3 Research scheme for situation awareness of AC/DC hybrid system

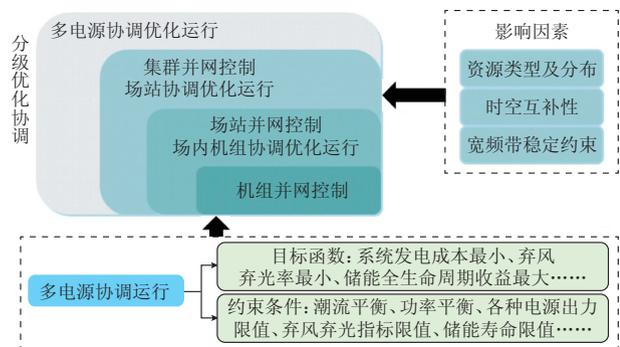


图4 可再生能源集群并网协调控制研究方案

Fig.4 Research scheme for coordinated control of grid-connected renewable energy clusters

### 4.3 可再生能源配电系统灵活重构与协同运行

在分析各类分布式间歇性电源的出力不确定特性和系统供电能力的基础上,研究利用电动汽车、储能平衡高比例间歇性电源出力波动的策略,提出含高渗透率间歇性电源、电动汽车、储能的配电系统灵活重构与协同运行的优化模型与求解方法。首先,考虑系统重构、主动孤岛与协同运行问题的统一性,建立适用于配电系统多类型运行场景的网络重构模型体系,包括正常状态与故障状态下的网络重构、主动孤岛、自治运行与协同优化运行模型。然后,考虑

潮流平衡、出力限值、可再生能源和储能技术等约束条件,采用图论、分支定界、协同演化博弈、多智能体等方法进行求解。在系统重构优化过程中,将充分应用电动汽车、储能控制等的协同运行控制技术,以平抑可再生能源的出力波动,最大程度地消纳可再生能源出力,整体研究方案如图5所示。

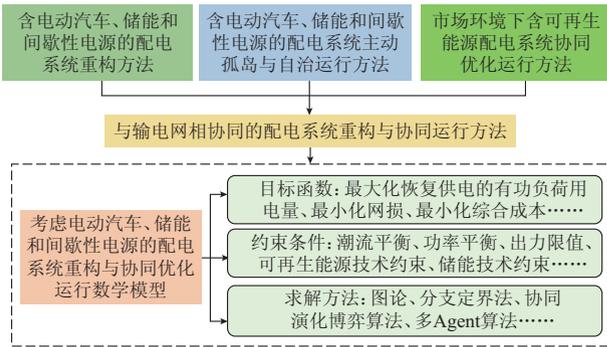


图5 可再生能源配电系统灵活重构与协同运行研究方案

Fig.5 Research scheme for flexible reconfiguration and cooperative operation of distribution system with renewable energy

#### 4.4 交直流混联系统多尺度运行优化与决策

综合利用可靠性理论、风险评估方法等,开展高比例可再生能源接入对系统备用需求的多尺度影响机理研究,建立相应的多尺度备用水平评价指标。进而考虑交直流联络线潮流控制、功率平衡、出力限值、预想事故潮流过载风险等约束条件,构建交直流混联多区域系统发电和备用联合优化目标函数,采用交直流混合潮流计算、随机生产模拟方法、大系统分解协调算法等,开展含可再生能源的交直流混联系统跨区电量分配和消纳研究。最后,利用复杂系统分解方法,研究输配电网时空解耦方法,结合工程博弈论、分布式并行计算方法开展输配电网时空解耦的多层级风险协同优化调度方法研究,整体研究方案如图6所示。

### 5 主要挑战与展望

研究含高比例可再生能源的电力系统的协同优化运行,首先需要建立典型的算例系统和分析场景,该算例系统/场景不宜仅采用IEEE等提供的理论算例系统,而应重点基于中国电力系统现状和发展规划,充分考虑各种类型可再生能源(风力发电、光伏发电、光热发电<sup>[37]</sup>、抽水蓄能/电池储能<sup>[38]</sup>)、多种结构电网、不同种类用电技术发展的可行性和成熟度,构建合适的算例系统和分析场景,在此基础上针对以下技术难点开展研究。

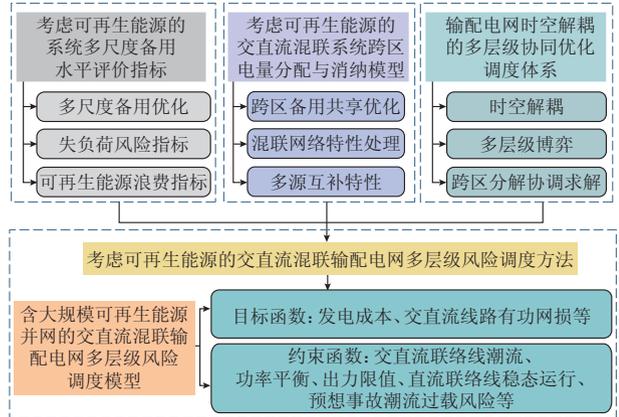


图6 交直流混联系统多尺度运行优化与决策研究方案  
Fig.6 Research scheme for multi-scale operation optimization and decision-making of AC/DC hybrid system

#### 5.1 交直流混联系统态势感知

多种不同类型的可再生能源的时空相关性导致系统约束复杂,多源的耦合特性难以刻画和求解,因此将随机变化的可再生能源出力与系统运行条件一一对应亟待提取可再生能源出力的共性特征,建立可再生能源出力不同时间尺度和空间尺度的特征模型。根据多点随机注入的可再生能源特征模型,从多时空角度量化评估可再生能源出力特性对各级调度运行的影响,需从大量仿真和统计结果中得出通用的评估方法。此外,可再生能源具备多维度不确定性,随着其并网装机比例的不断升高,其不确定性对系统运行的影响大,在此情况下,评估电力系统的运行态势和发展趋势更加困难。目前来看,可望采用大数据理论和方法攻克态势感知方面的难题<sup>[39]</sup>。

#### 5.2 可再生能源集群并网协调控制

可再生能源集群接入电网,对电力系统的低频振荡模态产生了影响,目前此方面的研究主要采用两区域四机系统等理论算例,后续需重点结合实际工程算例系统开展分析;并且,目前中国新疆哈密等地出现的次同步振荡混叠超同步振荡问题机理尚不清晰,如何分析可再生能源集群接入电网后的低频振荡-次同步振荡-超同步振荡等宽频带稳定特性是一大技术挑战。可再生能源机组-场站-集群的多层控制系统具备不同的时间尺度,虽已在中国甘肃部分地区实现了现场应用,然而,考虑多种有功和无功源的机组-场站-集群之间的综合控制(功率控制、调压、调频等)技术和系统仍有不少需完善之处,并且需要进一步考虑宽频带稳定约束对现有机组-场站-集群分层控制系统的影响,实施必要的附加控制措施,实现整体协调优化控制和运行。

### 5.3 可再生能源配电系统灵活重构与协同运行

可再生能源出力的间歇性和波动性,对配电系统运行态势的预测分析带来极大困难,如何通过配电网的网络重构和主动孤岛自治运行,优化系统结构、提高系统安全性、最大化消纳可再生能源的出力是研究的难点之一;含电动汽车、储能和间歇性可再生能源的配电系统控制要素多样,多要素配合机理复杂,如何通过多场景的网络重构策略,实现配电系统的协同优化运行亦是一项具有技术挑战的工作;在求解算法方面,需要针对日益复杂的智能配电网多目标重构和多场景下的协调优化运行问题,发展/引入新的数学优化算法和理论。

### 5.4 交直流混联系统多尺度运行优化与决策

量化多电源多层次互补特性对交直流混联系统安全与效能的双重影响是一大难点。大规模间歇性可再生能源功率的不确定性使在线有功调度面临系统运行备用需求方面的不确定性问题,需要在风险评估基础上,建立不同时间尺度的备用容量决策模型,建立应对大规模间歇式能源波动特性的多级备用体系,通过对备用指标的评估,对系统风险进行预警。建立输配电网时空解耦的多层级风险调度策略亦是重大挑战,基于不同区域的系统消纳能力及电力电量分配,区域间的协调消纳方法需信息技术的共享和电网之间的相互撮合,需考虑相关的政策、经济、技术和安全等层面的因素,需要实现模式更新,支撑最大限度地消纳间歇性可再生能源。对于不确定运行条件下的电力系统调度决策问题,鲁棒优化提供了一种“劣中选优”的决策思路,其关注最劣情况下的最优解,仅需扰动边界信息进行决策,计算效率较高,具备很高的应用价值;当然,鲁棒调度的决策过程缺乏了对电力系统抗扰动能力提升与经济代价折中协调的过程,具备一定保守性,需要通过合理构建不确定集控制其保守性<sup>[40]</sup>。

## 6 结语

围绕含高比例可再生能源的电力系统协同优化运行问题,在分析国内外研究现状和存在问题的基础上,首先提出了“含高比例可再生能源交直流混联系统多类型源-荷互补运行策略和多时空尺度协调优化运行方法”和“高渗透率可再生能源配电系统源-网-荷交互的灵活重构与自治运行方法”两个科学问题,然后从系统态势感知、并网协调控制、灵活重构与协同运行、多尺度运行优化与决策等四个方面阐述了主要研究内容和目标。接着,对四个方面的研究内容实施方案/方法进行了分析,最后,针对标准算例系统和四个主要研究内容分析了面临的技

术挑战,进行了技术展望。期望对本专业方向后续相关研究工作提供借鉴和参考。

本文的研究得到了山东大学王洪涛老师、武汉大学徐箭老师、华中科技大学罗毅老师、清华大学朱桂萍老师、上海交通大学宋依群老师和中国电力科学研究院新能源研究中心王伟胜主任、丁杰副主任的指导和帮助,在此向他们表示衷心感谢!

## 参考文献

- [1] 国家发展改革委.能源发展“十三五”规划[R].2016.
- [2] 国家发展改革委.可再生能源发展“十三五”规划[R].2016.
- [3] 国家能源局.配电网建设改造行动计划(2015—2020年)[R].2015.
- [4] 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[2017-03-07].DOI:10.7500/AEPS20170120004.  
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2017-03-07]. DOI: 10.7500/AEPS20170120004.
- [5] ENDSLEY M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems [J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 1995, 37(1): 32-64.
- [6] KOSTEREV D N, TAYLOR C W, MITTELSTADT W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [7] 方勇杰.美国“9·8”大停电对连锁故障防控技术的启示[J].电力系统自动化,2012,36(15):1-7.  
FANG Yongjie. Lessons from september 8, 2011 southwest America blackout for prevention and control of cascading outages [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 1-7.
- [8] 段刚,严亚勤,谢晓冬,等.广域相量测量技术发展现状与展望[J].电力系统自动化,2015,39(1):73-80. DOI:10.7500/AEPS20141008016.  
DUAN Gang, YAN Yaqin, XIE Xiaodong, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 73-80. DOI: 10.7500/AEPS20141008016.
- [9] 张恒旭,靳宗帅,刘玉田.轻型广域测量系统及其在中国的应用[J].电力系统自动化,2014,38(22):85-90. DOI:10.7500/AEPS20131109004.  
ZHANG Hengxu, JIN Zongshuai, LIU Yutian. Wide-area measurement system light and its application in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 85-90. DOI: 10.7500/AEPS20131109004.
- [10] 谢潇磊,刘亚东,孙鹏,等.新型配电网线路PMU装置的研制[J].电力系统自动化,2016,40(12):15-20. DOI:10.7500/AEPS20160311010.  
XIE Xiaolei, LIU Yadong, SUN Peng, et al. Development of novel PMU device for distribution network lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 15-20. DOI: 10.7500/AEPS20160311010.

- [11] PANTELI M, CROSSLEY P A, KIRSCHEN D S, et al. Assessing the impact of insufficient situation awareness on power system operation[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2013, 28(3): 2967-2977.
- [12] PANTELI M, KIRSCHEN D S. Situation awareness in power systems: theory, challenges and applications [J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 122: 140-151.
- [13] 王守相,梁栋,葛磊蛟.智能配电网态势感知和态势利导关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(12): 2-8. DOI: 10.7500/AEPS20160509003.  
WANG Shouxiang, LIANG Dong, GE Leijiao. Key technologies of situation awareness and orientation for smart distribution systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(12): 2-8. DOI: 10.7500/AEPS20160509003.
- [14] 薛峰,常康,汪宁渤.大规模间歇式能源发电并网集群协调控制框架[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(22): 45-53.  
XUE Feng, CHANG Kang, WANG Ningbo. Coordinated control frame of large-scale intermittent power plant cluster [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(22): 45-53.
- [15] YANG L H, XU Z, ØSTERGAARD J, et al. Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2012, 27(2): 713-722.
- [16] KARTHIKEYA B R, SCHÜTT R J. Overview of wind park control strategies [J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 2014, 5(2): 416-422.
- [17] 周明,葛江北,郭飞,等.改善连锁脱网的风电场群电压无功紧急控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(5): 71-77. DOI: 10.7500/AEPS20150601001.  
ZHOU Ming, GE Jiangbei, GUO Fei, et al. Voltage and reactive power emergency control strategy of wind farm cluster against cascading trip-off [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(5): 71-77. DOI: 10.7500/AEPS20150601001.
- [18] QUINTERO J, VITTAL V, HEYDT G T, et al. The impact of increased penetration of converter control-based generators on power system modes of oscillation [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2014, 29(5): 2248-2256.
- [19] GARMROODI M, HILL D J, VERBI Ć G, et al. Impact of tie-line power on inter-area modes with increased penetration of wind power [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2016, 31(4): 3051-3059.
- [20] LIU H K, XIE X R, ZHANG C Y, et al. Quantitative SSR analysis of series-compensated DFIG-based wind farms using aggregated RLC circuit model [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2017, 32(1): 474-483.
- [21] WU M, XIE L, CHENG L, et al. A study on the impact of wind farm spatial distribution on power system sub-synchronous oscillations [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2016, 31(3): 2154-2162.
- [22] 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.
- [23] 朱正,廖清芬,刘涤尘,等.考虑新能源与电动汽车接入下的主动配电网重构策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(14): 82-88. DOI: 10.7500/AEPS20141217002.  
ZHU Zheng, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Strategy of distribution network reconfiguration considering wind power and electric vehicle integration [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(14): 82-88. DOI: 10.7500/AEPS20141217002.
- [24] 刘伟佳,孙磊,林振智,等.含间歇电源、储能和电动汽车的配电孤岛短时恢复供电策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(16): 49-58. DOI: 10.7500/AEPS20141226008.  
LIU Weijia, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Short-period restoration strategy in isolated electrical islands with intermittent energy sources, energy storage systems and electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(16): 49-58. DOI: 10.7500/AEPS20141226008.
- [25] 刘佳,程浩忠,肖峻,等.计及  $N-1$  安全准则的智能配电网多目标重构策略[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(7): 9-15. DOI: 10.7500/AEPS20150527006.  
LIU Jia, CHENG Haozhong, XIAO Jun, et al. A multi-objective reconfiguration strategy for smart distribution network considering  $N-1$  security criterion [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(7): 9-15. DOI: 10.7500/AEPS20150527006.
- [26] LI Z C, JAZEBI S, LEÓN F D. Determination of the optimal switching frequency for distribution system reconfiguration [J/OL]. *IEEE Trans on Power Delivery* [2017-03-07]. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2594385.
- [27] 蒲天骄,陈乃仕,王晓辉,等.主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(1): 17-23. DOI: 10.7500/AEPS20150520010.  
PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui. Application and architecture of multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(1): 17-23. DOI: 10.7500/AEPS20150520010.
- [28] KOUVELIOTIS-LYSIKATOS I, HATZIARGYRIOU N. Fully distributed economic dispatch of distributed generators in active distribution networks considering loss [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(3): 627-636.
- [29] MANUEL A M, BESSA R J. Setting the operating reserve using probabilistic wind power forecasts [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2011, 26(2): 594-603.
- [30] LIU G D, TOMSOVIC K. Quantifying spinning reserve in systems with significant wind power penetration [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2012, 27(4): 2385-2393.
- [31] 杨正清,汪震,展肖娜,等.考虑风电有功主动控制的两阶段系统备用双层优化模型[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(10): 31-37. DOI: 10.7500/AEPS20150627001.  
YANG Zhengqing, WANG Zhen, ZHAN Xiaona, et al. Bi-level optimization model of two-stage reserve scheduling with proactive wind power control [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(10): 31-37. DOI: 10.7500/AEPS20150627001.
- [32] ZHANG Z S, SUN Y Z, GAO D W, et al. A versatile probability distribution model for wind power forecast errors and its application in economic dispatch [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2013, 28(3): 3114-3125.

- [33] 王豹,徐箭,孙元章,等.基于通用分布的含风电电力系统随机动态经济调度[J].电力系统自动化,2016,40(6):17-24.DOI:10.7500/AEPS20150807004.  
WANG Bao, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Stochastic dynamic economic dispatch of power systems considering wind power based on versatile probability distribution [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 17-24. DOI: 10.7500/AEPS20150807004.
- [34] 叶希,乔颖,鲁宗相,等.基于集群风电虚拟机组的源端系统分层协调日前计划[J].电力系统自动化,2016,40(1):24-32.DOI:10.7500/AEPS20150526002.  
YE Xi, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Virtual power generator based day-ahead hierarchically coordinated generation schedule for source side system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 24-32. DOI: 10.7500/AEPS20150526002.
- [35] 刘纯,黄越辉,张楠,等.基于智能电网调度控制系统基础平台的新能源优化调度[J].电力系统自动化,2015,39(1):159-163. DOI:10.7500/AEPS20141008018.  
LIU Chun, HUANG Yuehui, ZHANG Nan, et al. Renewable energy dispatching based on smart grid dispatching and control system platform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 159-163. DOI: 10.7500/AEPS20141008018.
- [36] 许丹,王斌,张加力,等.特高压直流外送风光火电力一体化调度计划模型[J].电力系统自动化,2016,40(6):25-29.DOI:10.7500/AEPS20150727003.  
XU Dan, WANG Bin, ZHANG Jiali, et al. Integrated transmission scheduling model for wind-photovoltaic-thermal power by ultra-high voltage direct current system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 25-29. DOI: 10.7500/AEPS20150727003.
- [37] 杜尔顺,张宁,康重庆,等.太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5765-5775.  
DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5765-5775.
- [38] YAO L Z, YANG B, CUI H F, et al. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 519-528.
- [39] WU J, OTA K, DONG M X, et al. Big data analysis-based security situational awareness for smart grid [J/OL]. IEEE Trans on Big Data [2017-03-07]. DOI: 10.1109/TBDATA.2016.2616146.
- [40] 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.DOI:10.7500/AEPS20150728008.  
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. DOI: 10.7500/AEPS20150728008.

姚良忠(1961—),男,博士,教授,博士生导师,国家“千人计划”特聘专家,主要研究方向:直流电网技术、可再生能源发电与并网。E-mail: yaoliangzhong@epri.sgcc.com.cn

朱凌志(1975—),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:可再生能源发电并网分析与平台开发、电压稳定。E-mail: zhulingzhi@epri.sgcc.com.cn

周明(1967—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:风电并网分析与调度、电力系统规划与可靠性、电力市场。

赵大伟(1981—),男,通信作者,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:可再生能源发电并网模型验证、运行控制与稳定性分析。E-mail: zhaodawei@epri.sgcc.com.cn

(编辑 代长振)

## Prospects of Coordination and Optimization for Power Systems with High Proportion of Renewable Energy

YAO Liangzhong<sup>1</sup>, ZHU Lingzhi<sup>1</sup>, ZHOU Ming<sup>2</sup>, LIN Zhenzhi<sup>3</sup>, LUO Fengzhang<sup>4</sup>, ZHAO Dawei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems  
(China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China;

3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** With the rapid development of wind power and solar power generation as well as steady development of AC and DC transmission lines, China's power system exhibits two important characteristics and trends: high proportion of renewable energy and AC/DC hybrid power grid in recent years. Based on an analysis of the present development and existing problems concerning collaborative optimization operation of AC/DC hybrid system with a high proportion of renewable energy, the key technologies demanding prompt research in four aspects are proposed, respectively. That is, situation awareness of AC/DC hybrid system under dual uncertainties of source and load, coordinated control of large renewable energy clusters considering the broadband stability constraints, flexible reconfiguration and cooperative operation with the interaction of source-grid-load in distribution systems with a high proportion of renewable energy, and multi-scale operation optimization and decision making in AC/DC hybrid system with a high proportion of renewable energy integrated. Difficulties and challenges are previewed.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900105).

**Key words:** high proportion of renewable energy; AC/DC hybrid power grid; interaction of source-grid-load; coordination and optimization