

中国电科院：瞄准电力科技前沿 引领电网创新发展

开发“电网友好型”风电机组，助力“新时代”电网稳定运行——大容量风电机组电网友好型控制技术

我国是全球风电装机最大、发展最快的国家。2017年我国新增风电装机容量1563万千瓦，累计装机达1.64亿千瓦，均为世界第一。预计到2050年末，全国风电装机将突破10亿千瓦。随着风电并网比例不断攀升，局部区域风电穿透率已超100%，具备高比例风力发电的“新时代”电力系统正逐渐形成。

跟以同步发电机为主导的传统电力系统相比，“新时代”电力系统最大的特征在于风电带来的高比例电力电子装备接入，随着风电容量在电力系统比重不断加大，电力系统质量不足、频率稳定问题凸显；风电抗扰性低，在系统电压/频率波动时易大规模脱网引发生故障；产生的多形态低频和次/超同步振荡机理尚未探明，振荡事故频发。系统呈现弱惯性、弱电机阻尼以及弱电压支撑的运行特性，安全稳定运行面临重大挑战。

据国家重大研发计划项目“大容量风电机组电网友好型控制技术”负责人、中国电科院新能源研究中心副主任程世超介绍，本项目按“理论基础—关键技术—试验检测—工程示范”的主线开展研究，并设置了5个课题，攻克一个科学问题，突破四项关键技术：

风电机组振荡动态特性及其控制策略的联合优化控制。电网扰动条件下双馈/直驱风电机组并网可能出现的宽频振荡特性涉及风电机组多物理控制动态环节和主动支撑控制动态环节的耦合，目前仍未揭示其相互作用关系。采用时域振荡模态，分析风电机组宽频动态的振荡特征及各控制环节间动态和暂态耦合作用机理，是实现大容量风电机组友好型并网控制优化的关键科学问题。研究双馈/直驱风电机组多物理控制环节动态特性和风电系统振荡模态与物理控制环节耦合关系至关重要。通过建立风电机组宽频动态模型，提出风电机组电压耦合和次/超同步振荡的降阶解耦模型，为风电友好型控制的关键技术突破奠定基础。

计及能量约束与应力的主动频率支撑优化控制技术。大容量风电机组运行过程主要考虑自身运行安全与发电量，对电网频率并不具有支撑能力，降低电网整体有效容量，致使电网频率稳定性下降。同时风电机组缺乏一次调频能力，缺乏了系统的功率支撑。而风电机组参与调频的机组控制系统通常存在诸多挑战，包括频率支撑能量来源和机组出力边界受限。频率支撑过程中惯量响应能释放规模和一次调频初期各容量单元的电压直接影响机组的稳定运行。通过量化机组机械结构特性和电气设备运行边界，建立转子动态预测模型，优化惯量性能，确保频率响应的可靠实现。以风电机组频率支撑动态特性和稳态特性为目标，建立以机组容量、机械出力、电气应力 and 电网阻抗适应性为约束条件，综合设计惯量容量、阻尼系数和一次调频系数的目标优化函数，同时考虑到三者之间交互耦合，通过迭代

优化得到自适应的频率支撑策略核心参数，并建立惯量与一次调频协调控制策略。**次超同步振荡不确定、多形态下风电机组主动阻尼控制技术**。次/超同步振荡具有频率不确定、形态多样化特点，现有控制无法快速跟踪振荡变化，难以兼顾风电机组基本控制回路需求，无法实现大规模推广。基于动态能量/阻抗特性理论，研究单机次/超频特性的关键影响因素，结合风场—设备网络模型，描述振荡分量的传播与演化规律，揭示风电设备的耦合机理。采用时频耦合技术，构建自适应阻抗/动态能量设计方案，并基于多支路阻抗/能量重塑理论优化接入位置；评估振荡特性与次/超频特性的影响程度，以不同工况下运行边界条件为约束，实现多目标风电机组主动阻尼控制；通过高压电压同步技术，研究风电电网阻抗/能量匹配模式，实现具有时空、功率耦合的设备协同。拟构建快速锁相和振荡追踪技术，通过带宽调整策略次/超频和基频跟踪，并以风电机组基频响应需求为约束，制定风电机组自适应主动阻尼控制。

电网故障情况下机组可控性提升及动态功率优化控制技术。风电机组在故障暂态中承担着由电压幅值突变、相位跳变和负序扰动等引起的电气应力。当前，风电机组在故障暂态过程中可控性变差，导致故障暂态过程中风电机组对电网频率/电压的支撑缺乏主动性，因此，应改进控制方法提高可控性。为了实现风电机组故障暂态支撑，风电机组在故障暂态中保有可能性是其基础。首先从故障快速检测、动态PLL、虚拟阻抗/欠励和低高穿连续故障穿越控制等方面提高故障穿越关键技术。以变频器容量、载流约束为边界条件，动态识别故障暂态支撑可控域，采用多维度响应动力学抑制策略实现可控动态扩展，提升风电机组故障暂态支撑的可控性。构建典型场景，量化分析不同故障类型下风电机组故障暂态支撑需求，提出风电机组故障暂态

支撑的优化控制策略。研制风电机组电压/频率振荡暂态支撑控制器，突破风电机组“电网友好型”控制技术中的故障暂态支撑技术。

电网故障/扰动条件下风电机组传动链动态阻尼控制技术。电网出现故障/扰动会对风电机组机械子系统造成较大载荷，甚至可能造成传动链扭振失稳从而引发事故，因此需要研究电网故障、频率扰动、电力系统振荡等电网运行条件下的风电机组载荷动态响应机理，在电网故障/扰动条件下对风电友好型”风电机组载荷进行稳定优化控制，对风电机组传动链进行动态阻尼控制，抑制传动链扭振，提高风电机组运行稳定性和可靠性。研究电网故障、频率扰动、电力系统振荡等条件下的风电机组载荷动态特性及风电机组与电网相互影响的机理，明确电网故障/扰动工况下的风电机组载荷约束条件，提出风电机组载荷约束和极限载荷的定量评价方法，突破电网故障、频率扰动、电力系统振荡等电网运行条件下风电机组稳定优化控制技术。

项目预期研制双馈/直驱风电机组宽频动态特性数据库实时仿真平台、风惯耦合一次调频优化控制系统、具备主动阻尼和电压频率主动支撑能力的风电机组电控系统、风电机组宽频优化控制系统等，最终研发出两台“电网友好型”风电样机，并将在张北国家风电试验检测基地开展示范验证，展示“电网友好型”风电机组的惯量一次调频性能、振荡主动抑制能力、故障暂态支撑性能。

项目的实施将推动我国风电技术及自主研发制造的发展，提高我国风电关键技术在国际上的核心竞争力，为我国实现高比例风电电力系统安全稳定运行，提升风电接入和消纳能力奠定良好基础。

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。

功率预测和调度技术面临挑战。针对面临的挑战，项目从预测精度和调度两个技术维度，中长期、短期和超短期三个时间尺度开展技术攻关。预测技术方面，创新预报方法，深入挖掘气象—功率时空关联性，运用深度学习技术，提升预测精度，延长预测时长，填补中长期预测、载率预测等技术空白。调度技术方面，研究考虑预测不确定性的调度决策、风险辨识、备用设置和紧急控制等关键技术，实现风险与控制下风光最大化消纳。

天气预报是风光功率预测最主要的输入数据，天气预报误差也是功率预测最主要的误差源。受数值天气预报技术水平限制，数值天气预报对不同天气过程的预报能力不同，导致功率预测误差在不同的天气过程和天气过程的不同阶段呈现不同的形式。由于天气过程演化规律和可再生能源功率预测误差的影响机理不明，导致功率预测精度提升较为困难，揭示天气过程演化规律对风光功率预测精度提升和实现预测误差量化评估的关

键，因此，必须突破天气过程演化规律对风光功率预测误差的影响机理这一科学问题。风光光源具有较强的时空关联性。风光功率预测精度的提升依赖于对可用气象信息的充分利用，依据单一时刻、单一地点数值天气预报数据的传统风光功率预测技术，忽略了气象变化的时空关联性，未能实现对可用气象信息的充分利用。对于不同时间、空间尺度上的风光功率预测问题，需借助先进的智能化学习手段，充分利用与预测相关关联的数值天气预报大数据，在时间与空间维度上开展模型可用的气象数据，建立气象—功率的高维映射模型，提升风/光功率预测的精度。亟待开展基于数值天气预报大数据时空关联性的多尺度风/光功率预测的长期规划。

项目预期提升预测精度。目前行业标准规定功率预测的预测期为72小时，在以火电为主的电源结构下，无法适应机组组合的动态化需求，也严重影响电力建设、设备检修、常规电源发电和场交易的年度计划安排，亟待误差可控的前提下进一步提升功率预测精度。

预测应用水平需要提升。现有功率预测技术对预测精度缺乏科学预估，只能凭借以往运行经验安排调度计划，既可能影响充分消纳，又存在供电不足风险，亟需研究刻画预测偏差范围的概率预测技术，同时提升多层次化调度与风险防范技术。

针对面临的挑战，项目从预测精度和调度两个技术维度，中长期、短期和超短期三个时间尺度开展技术攻关。预测技术方面，创新预报方法，深入挖掘气象—功率时空关联性，运用深度学习技术，提升预测精度，延长预测时长，填补中长期预测、载率预测等技术空白。调度技术方面，研究考虑预测不确定性的调度决策、风险辨识、备用设置和紧急控制等关键技术，实现风险与控制下风光最大化消纳。

天气预报是风光功率预测最主要的输入数据，天气预报误差也是功率预测最主要的误差源。受数值天气预报技术水平限制，数值天气预报对不同天气过程的预报能力不同，导致功率预测误差在不同的天气过程和天气过程的不同阶段呈现不同的形式。由于天气过程演化规律和可再生能源功率预测误差的影响机理不明，导致功率预测精度提升较为困难，揭示天气过程演化规律对风光功率预测精度提升和实现预测误差量化评估的关

键，因此，必须突破天气过程演化规律对风光功率预测误差的影响机理这一科学问题。风光光源具有较强的时空关联性。风光功率预测精度的提升依赖于对可用气象信息的充分利用，依据单一时刻、单一地点数值天气预报数据的传统风光功率预测技术，忽略了气象变化的时空关联性，未能实现对可用气象信息的充分利用。对于不同时间、空间尺度上的风光功率预测问题，需借助先进的智能化学习手段，充分利用与预测相关关联的数值天气预报大数据，在时间与空间维度上开展模型可用的气象数据，建立气象—功率的高维映射模型，提升风/光功率预测的精度。亟待开展基于数值天气预报大数据时空关联性的多尺度风/光功率预测的长期规划。

项目预期提升预测精度。目前行业标准规定功率预测的预测期为72小时，在以火电为主的电源结构下，无法适应机组组合的动态化需求，也严重影响电力建设、设备检修、常规电源发电和场交易的年度计划安排，亟待误差可控的前提下进一步提升功率预测精度。

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。

功率预测和调度技术面临挑战。针对面临的挑战，项目从预测精度和调度两个技术维度，中长期、短期和超短期三个时间尺度开展技术攻关。预测技术方面，创新预报方法，深入挖掘气象—功率时空关联性，运用深度学习技术，提升预测精度，延长预测时长，填补中长期预测、载率预测等技术空白。调度技术方面，研究考虑预测不确定性的调度决策、风险辨识、备用设置和紧急控制等关键技术，实现风险与控制下风光最大化消纳。

天气预报是风光功率预测最主要的输入数据，天气预报误差也是功率预测最主要的误差源。受数值天气预报技术水平限制，数值天气预报对不同天气过程的预报能力不同，导致功率预测误差在不同的天气过程和天气过程的不同阶段呈现不同的形式。由于天气过程演化规律和可再生能源功率预测误差的影响机理不明，导致功率预测精度提升较为困难，揭示天气过程演化规律对风光功率预测精度提升和实现预测误差量化评估的关

键，因此，必须突破天气过程演化规律对风光功率预测误差的影响机理这一科学问题。风光光源具有较强的时空关联性。风光功率预测精度的提升依赖于对可用气象信息的充分利用，依据单一时刻、单一地点数值天气预报数据的传统风光功率预测技术，忽略了气象变化的时空关联性，未能实现对可用气象信息的充分利用。对于不同时间、空间尺度上的风光功率预测问题，需借助先进的智能化学习手段，充分利用与预测相关关联的数值天气预报大数据，在时间与空间维度上开展模型可用的气象数据，建立气象—功率的高维映射模型，提升风/光功率预测的精度。亟待开展基于数值天气预报大数据时空关联性的多尺度风/光功率预测的长期规划。

项目预期提升预测精度。目前行业标准规定功率预测的预测期为72小时，在以火电为主的电源结构下，无法适应机组组合的动态化需求，也严重影响电力建设、设备检修、常规电源发电和场交易的年度计划安排，亟待误差可控的前提下进一步提升功率预测精度。

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。

功率预测和调度技术面临挑战。针对面临的挑战，项目从预测精度和调度两个技术维度，中长期、短期和超短期三个时间尺度开展技术攻关。预测技术方面，创新预报方法，深入挖掘气象—功率时空关联性，运用深度学习技术，提升预测精度，延长预测时长，填补中长期预测、载率预测等技术空白。调度技术方面，研究考虑预测不确定性的调度决策、风险辨识、备用设置和紧急控制等关键技术，实现风险与控制下风光最大化消纳。

天气预报是风光功率预测最主要的输入数据，天气预报误差也是功率预测最主要的误差源。受数值天气预报技术水平限制，数值天气预报对不同天气过程的预报能力不同，导致功率预测误差在不同的天气过程和天气过程的不同阶段呈现不同的形式。由于天气过程演化规律和可再生能源功率预测误差的影响机理不明，导致功率预测精度提升较为困难，揭示天气过程演化规律对风光功率预测精度提升和实现预测误差量化评估的关

键，因此，必须突破天气过程演化规律对风光功率预测误差的影响机理这一科学问题。风光光源具有较强的时空关联性。风光功率预测精度的提升依赖于对可用气象信息的充分利用，依据单一时刻、单一地点数值天气预报数据的传统风光功率预测技术，忽略了气象变化的时空关联性，未能实现对可用气象信息的充分利用。对于不同时间、空间尺度上的风光功率预测问题，需借助先进的智能化学习手段，充分利用与预测相关关联的数值天气预报大数据，在时间与空间维度上开展模型可用的气象数据，建立气象—功率的高维映射模型，提升风/光功率预测的精度。亟待开展基于数值天气预报大数据时空关联性的多尺度风/光功率预测的长期规划。

项目预期提升预测精度。目前行业标准规定功率预测的预测期为72小时，在以火电为主的电源结构下，无法适应机组组合的动态化需求，也严重影响电力建设、设备检修、常规电源发电和场交易的年度计划安排，亟待误差可控的前提下进一步提升功率预测精度。

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。

功率预测和调度技术面临挑战。针对面临的挑战，项目从预测精度和调度两个技术维度，中长期、短期和超短期三个时间尺度开展技术攻关。预测技术方面，创新预报方法，深入挖掘气象—功率时空关联性，运用深度学习技术，提升预测精度，延长预测时长，填补中长期预测、载率预测等技术空白。调度技术方面，研究考虑预测不确定性的调度决策、风险辨识、备用设置和紧急控制等关键技术，实现风险与控制下风光最大化消纳。

天气预报是风光功率预测最主要的输入数据，天气预报误差也是功率预测最主要的误差源。受数值天气预报技术水平限制，数值天气预报对不同天气过程的预报能力不同，导致功率预测误差在不同的天气过程和天气过程的不同阶段呈现不同的形式。由于天气过程演化规律和可再生能源功率预测误差的影响机理不明，导致功率预测精度提升较为困难，揭示天气过程演化规律对风光功率预测精度提升和实现预测误差量化评估的关

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。



科研人员正在讨论超导直流能源管道新技术。

发展超导直流能源管道新技术 构建西电东送西气东输新模式——超导直流能源管道的基础研究

超导直流电缆具有载流大、损耗小等特点，但需要低温环境以维持其工作，以液氮形式输送液氮(如氢气、液化天然气、乙烯等)能量密度高、单位容量输送量大，同样需要低温环境。充分利用两者在低温方面的共同要求，用低温液氮液燃料超导体管，共用制冷系统和绝热管道，形成能源管道，实现电力与液体燃料一体化输送，可提高整体效率，降低综合成本，符合能源大规模集成的发展趋势，也为能源互联网建设提供了先进技术方案。

新技术应对新挑战。早在上世纪末和本世纪初，日本和美国就分别提出了液氢冷却超导电缆的设想和氢电一体化输送超导能源管道的概念，美、日、俄等国相继开展了初步探索。由于液氢沸点20K，远远低于高温超导临界转变温度，一体化输送具有天然优势。然而，由于液氢燃料产能有限，加之液氢低温液经济性和液氢安全等问题的考虑，短时间内电力/液氢能源管道难以规模化应用。

采用液氮冷却的高温超导电缆发展至今已近二十年，

本体技术基本成熟，工程应用已进入试验示范运行阶段。由于目前超导材料价格高，制冷等辅机费用占比大，一定程度上制约了高温超导输电技术实用化的进程。商品化的液氮超导体材料临界转变温度110K，与天然气液化温度相当；加之西电东送和西气东输、近海风电与液化天然气(LNG)站等能源工程加速建设；这一切均为电力/LNG一体化输送创造了条件/契机。

关键技术1: LNG混合工质的低温液氮传质机理及传热流动特性。项目围绕上述科学问题和关键技术，开展多时空尺度功率预测和调度技术研究，项目预期将突破风/光/伏中长期(年/月)电量预测、短期(0—6天)和超短期(0—4小时)功率预测技术，提升预测精度，延长预测时长，填补中长期预测、载率预测等技术空白。调度技术方面，研究考虑预测不确定性的调度决策、风险辨识、备用设置和紧急控制等关键技术，实现风险与控制下风光最大化消纳。

天气预报是风光功率预测最主要的输入数据，天气预报误差也是功率预测最主要的误差源。受数值天气预报技术水平限制，数值天气预报对不同天气过程的预报能力不同，导致功率预测误差在不同的天气过程和天气过程的不同阶段呈现不同的形式。由于天气过程演化规律和可再生能源功率预测误差的影响机理不明，导致功率预测精度提升较为困难，揭示天气过程演化规律对风光功率预测精度提升和实现预测误差量化评估的关

键，因此，必须突破天气过程演化规律对风光功率预测误差的影响机理这一科学问题。风光光源具有较强的时空关联性。风光功率预测精度的提升依赖于对可用气象信息的充分利用，依据单一时刻、单一地点数值天气预报数据的传统风光功率预测技术，忽略了气象变化的时空关联性，未能实现对可用气象信息的充分利用。对于不同时间、空间尺度上的风光功率预测问题，需借助先进的智能化学习手段，充分利用与预测相关关联的数值天气预报大数据，在时间与空间维度上开展模型可用的气象数据，建立气象—功率的高维映射模型，提升风/光功率预测的精度。亟待开展基于数值天气预报大数据时空关联性的多尺度风/光功率预测的长期规划。

项目预期提升预测精度。目前行业标准规定功率预测的预测期为72小时，在以火电为主的电源结构下，无法适应机组组合的动态化需求，也严重影响电力建设、设备检修、常规电源发电和场交易的年度计划安排，亟待误差可控的前提下进一步提升功率预测精度。

提升风光功率预测和调度水平 助力可再生能源消纳——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

随着《可再生能源法》的发布，我国风力和光伏发电取得长足发展。截至2017年底，风电和光伏装机分别达到1.64、1.30亿千瓦，均居世界第一位。风电、光伏已经成为我国主力电源，在总装机中占比达到17%，在20个省区已成为第二大电源。电力系统是一个实时平衡系统，在不含大规模风电/光伏的电力系统，可利用常规能源的可调节能力来满足不同动态变化的风光等新能源出力波动大、与负荷需求时空不匹配、加重了系统调节负担。随着风/光装机容量增加，其功率预测成为电网运行控制的关键环节。我国电源结构以煤电为主，调节速度、调节能力不足，对预测水平的要求更高，同时大规模集中开发的特点要求充分发挥电网调节能力，促进可再生能源消纳。



超导直流能源管道试验装置。

LNG的凝固温度，使得低温下 LNG 具有良好的传输特性，保证超导电缆(在85K—90K温区)运行，是首先要解决的问题。这就是本项目要研究的第一个科学问题，即LNG混合工质的低温液氮传质机理及流动特性。旨在探索液氮分相熔体的凝固机理，揭示 LNG 混合工质的固液平衡相特性，突破 LNG 主要由分相熔 90K 三相点的局限，阐明 LNG 混合工质流动传热特性。

科学难题2: 电力/LNG一体化输送动态稳定性及其协同控制理论。电力/LNG 共输，既要考虑 LNG 为超导电缆提供充分的冷量，又要考虑超导电缆的热量损失对 LNG 输送的影响。因此掌握相互影响规律，保证管道高效可靠运行是必须解决的问题。明确动态稳定性，构建输电—热—一流耦合机理，阐明电和燃料输送的相互影响规律，提出调控过程的动态稳定性判据，构建协同控制理论和调度策略。

科学难题3: 超导直流能源管道故障演化机理与安全防御策略。对能源管道而言，当出现网侧短路、电缆绝缘击穿、以及 LNG 泄漏等极端情况，可能存在安全风险，如何在严重故障下，确保能源管道安全可靠运行是必须解决的问题。制定防御策略，需要揭示能源管道故障演化(机理与演化过程)的演化规律，这就是本项目的第二个科学问题。旨在表征系统运行在风险，揭示低温液氮传质机理及流动特性，构建输电—热—一流耦合机理，阐明电和燃料输送的相互影响规律，提出调控过程的动态稳定性判据，构建协同控制理论和调度策略。

关键技术: 安全、高效的超导直流能源管道系统级设计技术。为了研发超导直流能源管道样机，在解决上述科学问题的同时，还需攻克“安全、高效的超导直流能源管道系统级设计技术”这一关键技术。主要研究本体与系统级部件的设计方法，确定能源管道的传热、绝缘、机械、安全等系统级结构设计方法。重点解决: 混合工质与超导电缆之间的高效换热结构，以及低涡流、高抗热的绝缘和机械结构。

项目预期将发展低温液相平衡理论，揭示电力/LNG一体化输送耦合和故障演化机理，掌握安全高效系统级设计、关键部件制作、系统级仿真等关键技术，形成自主知识产权/研制基于天然气的混合工质温区(不低于85K—90K)的输电/输送技术。在良、LNG 温度温区(不低于85K—90K)的输电/输送技术中，会引起磁体温度增大，甚至凝固，难以输送。因此，如何在温度不增、热值不减的条件下，降低

制机，揭示耦联设备耦合作用机理，研制主变类设备三维防震装置和支柱类设备自恢复减震装置，提出抗震设备抗震能力加强的构造措施，造成地震响应在线监测与震损快速评估技术；形成满足 110kV 及以上电压等级 7—9 度抗震设防等级的安全防护技术，使 6 度及以上 II 类地区电力设施抗震能力提高 50%以上，全面提升变电站(换流站)设备抗震能力。

在雷击作用下变电站(换流站)暂态地电位升高安全防护水平，通过建立接地网分布式多点入地场路耦合模型及二次系统设备的多路耦合模型，提出接地网暂态地电位及其对二次系统耦合特性的模拟仿真方法，提出接地网暂态地电位及其危害的抑制措施和风险评估方法，开发接地网暂态特性及风险评估分析软件，为变电站(换流站)的安全稳定运行提供技术支持。

在大区域电网设施输电线路设备的安全保障方面研发方法，构建电网作用下输电线路设备风险分析、易损性分析及风险评估模型，建立输电线路塔架灾害风险评估及预警方法，提出超非线性输电线路塔架结构优化设计技术，搭建面向大区域电网设施安全风险评估的云计算环境下，大数据并行计算基础设施框架和服务框架，研发设备级安全的大区域电网设施安全保障平台，实现数值天气预报、典型极端天气安全防护、线路快速抢修等一套完整的技术体系，对整个安全保障流程进行管控，提出从监测预警到快速抢修的一体化解决方案。

项目将揭示杆塔基础薄弱、大跨导线微风振动、变电站(换流站)地震等成因机理，提出电网线路耦合模型及暂态地电位升高及其危害抑制、杆塔快速抢修等关键技术；研制微风雷击动态风险评估、非线性零响应的、三维防震等装置，开发接地网雷击暂态分析软件，构建对强降潮、地质灾害、风、强、地震、雷、覆冰等极端条件，攻克考虑强非线性本质的次级模式、外部环境与电网设施耦合作用机理、多源多场风险评估方法等关键技术，遵循“风险识别—风险分析—风险处置”的思路，从六个方面开展关键技术攻关。

在输电线路杆塔基础薄弱风险评估和安全防护方面，通过揭示杆塔基础与覆冰耦合作用机理和灾次模式，构建杆塔基础薄弱多源立体智能监测预警体系，攻克杆塔基础薄弱风险评估和安全的防护关键技术，有效提升大区域电网杆塔基础设备应对灾害的能力。

在输电线路杆塔基础薄弱风险评估与灾害防治方面，通过揭示杆塔基础与覆冰耦合作用机理和灾次模式，构建杆塔基础薄弱多源立体智能监测预警体系，攻克杆塔基础薄弱风险评估和安全的防护关键技术，有效提升大区域电网杆塔基础设备应对灾害的能力。

在输电线路杆塔基础薄弱风险评估与灾害防治方面，通过揭示杆塔基础与覆冰耦合作用机理和灾次模式，构建杆塔基础薄弱多源立体智能监测预警体系，攻克杆塔基础薄弱风险评估和安全的防护关键技术，有效提升大区域电网杆塔基础设备应对灾害的能力。

在输电线路杆塔基础薄弱风险评估与灾害防治方面，通过揭示杆塔基础与覆冰耦合作用机理和灾次模式，构建杆塔基础薄弱多源立体智能监测预警体系，攻克杆塔基础薄弱风险评估和安全的防护关键技术，有效提升大区域电网杆塔基础设备应对灾害的能力。

在输电线路杆塔基础薄弱风险评估与灾害防治方面，通过揭示杆塔基础与覆冰耦合作用机理和灾次模式，构建杆塔基础薄弱多源立体智能监测预警体系，攻克杆塔基础薄弱风险评估和安全的防护关键技术，有效提升大区域电网杆塔基础设备应对灾害的能力。