

我国电力系统第3个 “973计划”项目：分布式 发电供能系统相关基础研究

——访项目首席科学家王成山教授

近来，本刊编辑部就“分布式发电供能系统相关基础研究”（“973计划”项目）访问了该项目首席科学家、天津大学教授王成山先生。现将书面采访情况报道如下，以飨读者。

● **编辑：**提出该项目的背景是什么，其研究的必要性、紧迫性、立项的依据是什么？

● **王教授：**提高能源利用效率、开发新能源、加强可再生能源的利用，是解决我国经济和社会快速发展过程中日益凸显的能源需求增长与能源紧缺、能源利用与环境保护之间矛盾的必然选择。在我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》中明确提出了要大力开展“可再生能源低成本规模化开发利用”以及“间歇式电源并网及输配技术”。开展分布式发电供能技术方面的研究符合国家重大需求。开展本项目研究的必要性、迫切性和立项依据主要体现在如下几个方面：

（1）采用分布式发电供能技术，有助于充分利用各地丰富的清洁和可再生的能源，向用户提供“绿色电力”，是实现我国“节能减排”目标的重要举措；

（2）大电网与分布式发电供能系统相结合，不仅有助于提高分布式发电的供能质量，有助于分布式发电技术的大规模推广应用，也有助于提高电力系统的安全性和可靠性；

（3）分布式发电供能技术将成为国际上一项重要的技术增长点，开展这一领域的基础研究工作，将有助于培育自主创新能力，提升我国在能源技术领域的国际竞争力；



王成山教授

（4）分布式发电供能技术的广泛应用，将从规划建设、运行管理、发展理念等多方面给传统电力系统带来革命性的变化，适时开展相关基础性研究工作，将大大提高电网建设和改造的科学性，有助于电力系统的健康发展。

● **编辑：**什么叫分布式发电供能系统，它与微网是什么关系，微网与配电网、供电网的区别是什么？

● **王教授：**分布式发电供能是指利用各种可用的分散存在的能源，包括可再生能源（如太阳能、生物质能、小型风能、小型水能、波浪能等）和本地可方便获取的化石类燃料（主要指天然气）进行发电供能，是分布式能源最清洁、最高效的利用方式。与传统电源相比，分布式发电供能系统既可发电，也可供冷、供热，是一种能源的高效利用方式。

微网是指由分布式电源、储能装置、能量变换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统，是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统，既可以与大电网并网运行，也可以

孤立运行。微网是未来分布式发电供能系统的高级应用形式。微网与常规配电网和供电网的最大区别在于它可以在保证电能质量的前提下独立运行。

● **编辑:** 研究分布式发电供能系统对节能减排有多大影响?

● **王教授:** 分布式发电供能系统可采用多种形式的能源,例如太阳能、风能这样的可再生能源,提高这些能源的利用率无疑将有助于我国节能减排目标的实现。以天然气为燃料的冷、热、电联供系统也是一种典型的分布式发电供能系统形式,由于能够对系统发电过程中产生的

余热加以充分利用,因而大大提高了能源的综合利用效率(效率可以达到70%以上),这无疑对节能减排具有重要的实际价值。此外,由于分布式能源具有就地向负荷供电的特点,因此还可以有效降低电能传输和分配过程中造成的损失。

● **编辑:** 该项目研究中面临的科学技术问题是什么?

● **王教授:** 本项目紧紧围绕分布式发电供能系统开展研究,以微网及其所接入的大电网为研究对象,以保证微网与大电网的安全稳定和经济高效运行为目标,重点解决4个方面的科学技术问题:

- (1) 微网运行特性及高渗透率下与大电网相互作用的机理;
- (2) 含微网新型配电系统的规划理论与方法;
- (3) 微网及含微网配电系统的保护与控制;
- (4) 分布式发电供能系统综合仿真与能量优化管理方法。

● **编辑:** 什么叫分布式发电供能系统的渗透率?其与分布式发电供能系统的构成有何关系?

● **王教授:** 分布式发电供能系统渗透率是指分布式发电系统的容量占系统所供负荷总量的比例。该比例的大小与采用何种形式的分布式发电供能系统没有直接的关系。

● **编辑:** 该项目研究的科学意义是什么,对我国社会、经济和科技发展将有什么贡献?

● **王教授:** 本项目研究的科学意义主要体现在:

- (1) 奠定分布式发电供能系统研究的理论基



王成山教授(前排右一)和学生在实验室

础,为分布式发电供能系统的规划、设计、运行与管理提供科学依据和分析手段,为微网控制和保护等技术装备的研发开辟新的技术途径,解决分布式发电供能技术工业化应用中面临的技术瓶颈,并在此基础上推动电力系统学科的发展。

(2) 通过对分布式发电供能系统的研究和研究过程中的学科交叉,在推动能源学科的基础性研究和技术发展的同时,也将促进其他相关学科的发展。例如对微网运行特性、微网与大电网交互作用机理的研究,有可能促进复杂系统科学理论、大系统理论的发展;微网保护与控制方面的研究将会推动控制理论的发展和信息通信技术的创新。

本项目研究对我国社会、经济和科技发展的贡献主要表现在以下几个方面:

- (1) 加速推动可再生能源的规模化高效利用,解决我国能源需求增长与能源紧缺、能源利用与环境保护之间的矛盾;
- (2) 有助于加速我国在分布式发电供能领域的自主创新,为国家经济建设和社会发展提供持久的动力;
- (3) 将为我国能源和电网结构的优化调整提供科学依据,尤其为我国未来配电系统的大规模改造建设提供科学指导;
- (4) 有助于提高电力系统的供电安全性和可靠性,为灾变事件发生后保证重要负荷的供电安全性提供技术手段,从而提高社会应付突发事件的能力,起到维护社会稳定的作用。

● **编辑:** 该项目研究的主要内容是什么?

● **王教授:** 研究的内容主要涉及8个方面:

- (1) 高渗透率下微网与大电网相互作用的机



理。重点研究不同种类分布式电源的稳态运行特性和暂态响应的典型特征；微网结构及其对微网运行特性的影响；微网接入大电网的典型模式；微网与配电网相互作用的动力学机制；含微网的配电网的安全稳定分析理论和方法；保证运行稳定性下的微网设计原则等等。

(2) 分布式储能对微网安全稳定运行的作用机理。重点研究各种分布式储能装置的自身动态特性及其对微网运行动态特性的影响；储能环节对微网电压/频率调节、平抑系统扰动、保障微网安全稳定的作用等机理；微网中储能系统的优化配置理论与方法等，进而发展分布式储能系统的综合控制策略，研发相关的控制系统。

(3) 含微网的新型配电系统的规划理论与方法。重点研究有助于微网接入的配电系统结构设计方法；含微网的配电系统的综合性能评价指标体系；新型配电系统优化规划理论和方法。在此基础上，开发出具有空间负荷预测、分布式电源（微网）容量与位置优化、配电网优化、分布式能源结构优化等功能，适用于微网发展的电网规划决策支持系统。

(4) 微网及含微网配电系统的保护原理与技术。重点研究不同类型的分布式电源、储能装置及微网的故障特征；含微网配电系统的故障特征；微网内部电气元件及系统故障保护的配置原则、原理与技术；微网异常运行保护的原理与技术；含微网配电系统故障保护的配置原则、原理与技术；多微网配电系统解列控制的原理与技术；大电网瓦解的紧急情况下多微网之间的协调控制的原理与技术等。通过理论研究与技术开发，提出微网内部故障与异常保护的原理，开发基于通信技术及多点信息综合比较的集成式微网综合保护系统；提出多微网配电系统区域纵联保护、解列控制及紧急协调控制的原理，基于通信网络，设计开发集故障保护、解列控制及紧急协调控制等功能于一体的多微网配电系统综合保护控制系统。

(5) 微网并网控制及微网中多分布式电源协调控制。重点研究微网在并网和孤岛运行模式下的协调控制策略；保证微网运行模式平稳切换的并网方法与控制策略；分布式发电设备、储能设备的逆变接口系统的原理与技术。在此基础上，开发适合于不同分布式电源及储能装置并网的逆变接

口装置和适应性强的微网综合控制系统。

(6) 微网及含微网的配电系统的电能质量分析与控制。重点研究微网中造成电能质量问题的机理；微网及含微网配电系统的电能质量检测及分析理论；微网及含微网配电系统的电能质量综合控制方法。在上述研究成果的基础上，研发含微网配电系统的电能质量综合控制系统。

(7) 分布式发电供能微网系统综合仿真。重点研究微网元件稳态与动态建模方法，包括微型燃气轮机、内燃机、燃料电池、光伏电池等分布式电源以及建立储能装置的数值仿真和物理仿真模型的方法；集稳态分析、电磁暂态仿真、机电暂态仿真为一体的微网动态全过程数字仿真实理论与方法；含微网的新型电力交换系统的动态物理模拟仿真方法及实验验证理论。在此基础上，构建物理模拟和数字仿真相结合的含微网配电系统的综合仿真实验平台。

(8) 微网经济运行理论与能量优化管理方法。重点研究微网经济运行理论与分布式电源优化调度方法；微网高渗透率下的大规模配电系统经济调度理论。在此基础上，开发微网能量优化管理系统，构建微网高渗透率下的配电系统综合能量管理支持平台。

● **编辑：**据您估计，该项目研究中可能的突破点是什么？会遇到哪些困难？

● **王教授：**可能的突破点将体现在两个层面：

(1) 科学层面——创立微网分析的理论体系。包括：微网与大电网相互作用的机理，分布式储能在微网中的作用机理，微网及含微网配电系统的保护与控制理论，分布式发电供能系统全过程仿真实理论，含微网新型配电系统的规划理论，微网能量优化管理理论。

(2) 技术层面——解决保证微网安全可靠运行的关键技术问题。包括：微网和含微网配电系统的保护技术，微网中分布式电源协调控制技术，电能质量综合监控技术，分布式储能系统控制技术，含微网配电系统的数字仿真系统，含微网配电系统的规划辅助决策系统，微网物理与数字综合仿真实验平台。

研究过程中遇到的主要困难是：

(1) 分布式电源的接入，改变了电力系统的结构，将配电系统从简单的受电网络变成了复杂的有源网络。如何协调大电网与微网之间的运行，一方

面要确保绿色、环保可再生能源的充分利用,另一方面又要保证系统的电能质量、运行稳定性与供电可靠性,是当前分布式发电供能技术应用中的一个主要难题,是限制分布式电源渗透率进一步提高的主要障碍。

(2) 配电系统本身具有结构复杂、设备类型多样、负荷预测困难等特点,其规划问题面临着很多不确定性因素的影响。由于分布式电源的出力以及微网与配电系统间的交换功率受多种不确定因素的影响,同时分布式电源或微网的投资主体具有多样性,致使大量分布式电源的接入,因而增加了未来配电系统规划工作的复杂性。

(3) 当前配网保护与控制装置的配置方案不能适应多分布式电源、多微网接入的方式,已经成为广泛应用分布式发电供能系统的技术瓶颈。此外,大量分布式电源通过逆变装置并网,势必会带来诸多电能的质量问题,需要将分布式电源逆变并网装置的控制与微网电能质量的综合治理相结合,保证系统电能质量满足要求。

(4) 灵活可靠的仿真工具是进行分布式发电供能系统复杂动态行为研究的重要手段。在微网全过程的数字与物理混合仿真中,如何实现电磁暂态、机电暂态到中期、长期过程的全过程仿真是一个极具挑战性的难题。

● **编辑:** 目前国内外的研究现状、发展趋势如何?

● **王教授:** 为保持和加强在可再生能源和分布式发电供能技术上的优势地位,欧盟于2001年开始资助相关研究工作,实施了“可再生能源和分布式发电在欧洲电网中的集成应用”(IREN)项目。该项目在世界范围内吸引了100多家各类研究机构参与。美国能源部和国家自然科学基金委共同赞助并组建了由40多家高校、研究机构和企业参加的研究中心,开展了与分布式发电供能技术相关的研究。日本则很早就开展分布式发电供能技术的理论和实用化研究,并在超级电容器、燃料电池、潮汐发电、光伏发电等技术上处于领先地位。分布式发电供能技术涉及能源、材料、机械、环保、控制等诸多领域,是一个典型的多学科交叉的系统工程。

尽管很多国家已投入大量人力物力对分布式发电供能技术展开研究,但除在分布式发电设备研发、制造和设备自身控制方面具有一些较成熟的技术外,涉及分布式发电供能系统与大电网的并

网,以及并网运行后的系统优化、协调和控制等领域研究多还刚刚起步。能否解决好大量分布式发电供能系统的安全并网运行,是决定分布式发电供能技术能否大规模工业化应用的关键。

● **编辑:** 该项目的总体目标是什么?需用多长时间?预期有哪些成果?这些成果将如何推广?

● **王教授:** 本项目的总体目标是通过分布对分布式发电供能系统的基础理论和关键技术的研究,建立分布式发电供能系统的相关理论体系和分析方法,在一些关键科学技术问题上取得突破。项目预期完成时间为5年。预期成果体现在理论和技术两个方面。

(1) 在理论方面。

1) 系统地建立一个分布式发电供能系统的建模、分析、仿真和控制的完整理论体系,为分布式发电供能系统的科学发展和广泛应用提供理论依据;

2) 建立分布式发电供能系统经济性、电能质量和可靠性评估的理论体系及评价指标体系,以促进“绿色电力”的发展,为缓解我国能源需求增长与能源紧缺、能源利用与环境保护之间的矛盾提供保障;

3) 揭示分布式发电供能系统与大电网相互作用的机理,提出分布式发电供能系统与大电网协调运行和控制策略,提高电力系统运行可靠性,为我国科学应对灾变性突发事件提供保障;

4) 建立分布式发电供能系统接入后的电网规划理论体系,给出适合于我国国情的电网规划理论和方法,为分布式发电供能系统和电网的协调发展提供保障。

(2) 在技术方面。

1) 发展分布式发电供能系统数字与物理模拟仿真技术,建立适合于微网高渗透率下的大规模配电系统快速仿真分析平台,实现分布式发电供能系统的全过程仿真;

2) 建立具有空间负荷预测、电源优选、网络优化、信息系统规划、能源优化等功能,适用于含分布式发电供能系统的电网规划计算机决策支持系统,提高我国电网规划的科学性及建设资金的利用效率;

3) 发展微网及含微网配电系统的电能质量检测与控制方法,提出微网电能质量的控制方案和综合治理措施,研制综合电能质量控制系统;

4) 提出微网及相关配电系统保护与控制的原理



理和方法,开发通用并网控制装置和新型保护设备,研制微网综合控制系统;

5)建立具有多种能源综合利用的微网并网运行系统的示范工程,达到实际工程的应用水平。

在项目执行过程中,估计有三四项新技术可达到向生产转化的水平,原理性样机和软件支持系统将陆续在一些示范工程中投入运行。

● **编辑:**请您介绍一下该项目的总体研究方案,有哪些具体的研究课题?研究的创新性和特色是什么?

● **王教授:**项目设8个课题开展研究:

(1)高渗透率下微网与大电网相互作用的机理研究;

(2)分布式储能对微网安全稳定运行的作用机理研究;

(3)含微网新型配电系统的优化规划;

(4)微网及含微网配电系统的保护原理与技术;

(5)微网并网控制及微网中多分布式电源协调控制;

(6)微网及含微网配电系统的电能质量分析与控制;

(7)分布式发电供能微网系统综合仿真;

(8)微网经济运行理论与能量优化管理方法。

项目的创新性和特色主要体现在以下几个方面:

(1)在微网特性研究及微网与大电网相互作用的机理研究方面取得进展。针对现代分布式电源、微网及含微网配电系统的特点,通过理论分析、仿真计算和模拟实验,研究其在不同运行模式之下的运行特征和动态特性;全面分析研究微网与大电网之间相互作用的机理,客观准确地评价微网在提高系统安全性、稳定性、可靠性和经济性等方面的积极作用及不利影响;通过研究寻求充分发挥其正面作用和消除不利影响的方法及措施。为充分发挥分布式电源在提高能源综合利用率、提高供电可靠性、提高系统稳定性等方面的作用,提供理论上的依据和指导,为进一步提高配电系统中分布式电源的渗透率奠定理论基础。

(2)建立适应分布式发电供能系统未来发展的配电系统灵活规划理论体系,构建大规模配电系统规划决策支持平台。结合我国配电系统的结

构特征以及未来大量分布式发电供能系统接入系统的要求,针对分布式发电供能系统给规划工作带来的负荷不确定性、投资主体不确定性、容量与类型不确定性、设备可靠性与运行特性不确定性等问题,发展科学的规划理论和方法,为发展出适合于我国国情的配电系统规划方法奠定理论基础,并提供决策支持平台。

(3)提出构建微网及含微网配电系统区域保护与控制系统的理论和方法,研制开发新一代保护与控制技术。根据微网及含微网配电系统对保护与控制的需求,以现代化的通信技术和信息处理技术为基础,研究集散式的区域保护与控制系统,探讨系统的构成与通信方式,提出新的故障检测原理和运行监控方法,为实现分布式电源、微网灵活多变的运行方式和即插即用提供技术支撑。

(4)在微网分析建模与仿真实论方面取得重要进展,建立具有数字与物理模拟综合仿真功能的微网实验仿真分析平台。在深入分析微网结构、分布式电源及储能系统特点和控制系统特性的基础上,建立微网动态全过程仿真分析模型,研究微网及含微网配电系统的仿真分析方法,构建数字仿真技术与物理模拟仿真技术有机结合的微网综合仿真实验平台,为保护与控制系统研究、电能质量综合控制和微网运行特性研究等提供基础性的支撑平台。

(5)建立分布式发电供能系统的综合评价理论体系和指标体系。将分布式发电供能系统作为一个整体,从经济性、电能质量和可靠性等方面进行综合评价。既针对经济性、电能质量和可靠性提出符合各自特点的评价指标体系,又根据三者之间的相互联系和相互作用,从理论的高度提出分布式发电供能系统的综合评价体系和指标体系。

(6)在微网优化运行与能量管理方面取得进展。根据微网运行的特点和要求,以总体利益最大化为目标,在特定的约束条件下建立优化运行的目标函数,提出不同能源形式、不同运行模式、不同负荷特征、不同网络架构下的微网系统的优化运行的理论、方法和技术手段。

● **编辑:**请您展望一下将来我国分布式发电在整个发电结构中的位置和发电比例。

● **王教授:**我想分布式发电系统在未来我国的电力系统发展中一定会占有一定的重要地位,这一点毋庸置疑。发展可再生能源,提高能源的综合

利用效率,这是国际上的大趋势。我国《可再生能源法》的实施,从政府层面的大力推动,都会有助于提高分布式发电系统的容量比例。至于分布式发电在整个发电结构中的比例,我想需要专门的政府部门和研究机构进行综合的研究及规划。欧洲国家这一比例已经很高,但我国有自己的国情,需要有针对性地研究才能有结论。

● **编辑:** 分布式发电大量发展后我国网架结构会有什么样的变化?对全国联网有何影响吗?

● **王教授:** 就我国电力系统的现状及未来的发展而言,未来一定是一种分布式发电系统和大电网的共存、共同发展的局面,单纯靠分布式发电系统的发展不可能解决我国的电能需求问题,而坚强的大电网建设也不可能排斥高效和有助于可再生能源利用的分布式发电供能技术的发展。

● **编辑:** 谢谢王教授在百忙中接受我们的采访。📌



作者简介:

王成山(1962-),男,天津大学电气与自动化工程学院院长,教育部长江学者特聘教授,国家杰出青年基金获得者,首批新世纪百千万人才工程国家级人选。任中国电机工程学会常务理事、学术工作委员会委员,中国电机工程学会电力系统专委会委

员,天津市自动化学会副理事长,教育部电气工程及其自动化专业教学指导委员会委员,国际大电网组织(CIGRE)中国国家委员会委员,《电力系统及其自动化学报》编辑委员会主任委员,《Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China》等学术刊物编委会委员,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部第十届、第十一届专家评审组成员、副组长,“十一五”国家863计划“MW级并网光伏电站系统重点项目”总体专家组成员。天津大学“电力系统仿真控制”教育部重点实验室主任。

研究工作获国家科技进步二等奖1项,省部级自然科学一等奖1项、科技进步一等奖1项、科技进步二等奖3项。在城市电网规划领域的研究成果已成功应用于国内100多个城市的600余项电网规划工作。

E-mail: cswang@tju.edu.cn

简 讯

《高电压技术》 成为Ei核心数据库收录期刊

2009年3月7日,ELSEVIER工程信息公司中国信息部通知,《高电压技术》成为《工程索引》核心数据库Ei Compendex (Core)收录期刊。

《高电压技术》依托中国电力工业及高压工程的科技进步,经过多年努力已成为高压技术研究领域具有重要影响力的期刊。近年来,在国家电网公司、国网电力科学研究院、中国电机工程学会领导及高压技术学界专家、学者、作者和读者的支持与帮助下,《高电压技术》跟踪国家及国家电网公司重点研究项目,加快期刊的国际化进程,加强与大学及科研机构的交流,及时报道相关科研成果,在促进高压技术学术交流方面发挥了重要作用。《高电压技术》进入Ei核心数据库为中国高压科技工作者提供了更高层次的学术交

流平台,将更加有利于高压及其相关领域的国际学术交流。

《高电压技术》将继续秉承服务于中国电力科技进步的办刊方针,进一步提升刊物的学术影响力和工程实用价值,努力办成在专业领域内具有国际影响力的期刊,引领高压技术的发展。📌

【小资料】Ei Compendex 是全球权威的工程文献数据库,在全世界工程界享有广泛信誉。该数据库提供超过900余万项参考资料选自全球5000多种学术期刊、行业杂志及会议论文集,是全球工程技术研究的重要信息来源。2009年中国6000余种科技期刊中有175种被Ei Compendex (Core) 核心数据库收录。