

中国式智能电网的构成和发展规划研究

杨德昌¹, 李勇², C. Rehtanz¹, 刘泽洪³, 罗隆福²

(1. 电力系统与电力经济研究所, TU-Dortmund, Germany 44227;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082;

3. 国家电网公司建设部, 北京市 西城区 100031)

Study on the Structure and the Development Planning of Smart Grid in China

YANG De-chang¹, LI Yong², C. Rehtanz¹, LIU Ze-hong³, LUO Long-fu²

(1. Institute for Power Systems and Power Economics, TU Dortmund, Germany 44227;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China;

3. Construction Ministry of State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: The research on the smart grid is very significant in energy conservation and economical operation of power systems. In this paper, the current situation of power system in China and the definition of smart grid are presented in brief. Then, the effects of the influences of smart grid on the constituents of power grids in China, including power generation, transmission and utilization, load composition, construction of substations and dispatching system and so on, are analyzed in detail. On this basis, the fundamental conditions, development thinking and requirements for the selection of experimental cities are pointed out. Finally, the preliminary medium-term and perspective structural diagrams for Chinese style of smart grids are given.

KEY WORDS: smart grid; ultra high voltage grid; upgrade of distribution network; intelligent dispatching; new energy generation

摘要: 智能电网对现代电力系统的经济优化运行和降损节能具有重要的意义。文章简要介绍了我国电力系统的发展现状和智能电网的定义,详细分析了智能电网对我国发电、输电、配电、用电、负荷构成、变电站建设以及调度系统等环节的影响。在此基础上,指出了我国建设智能电网的基本条件、发展思路以及试点城市的选择要求。最后,初步提出了中国式智能电网的中期和远景结构简图。

关键词: 智能电网; 特高压电网; 配电网升级; 智能调度; 新能源发电

0 引言

电力工业是涉及到国计民生的基础性产业,是经济和社会发展的重要保障。目前,世界电力行业面临着两大转变: 1) 大机组集中发电模式向集中

和分布式发电相结合的模式转变; 2) 由供方主导的电网模式向用户和供方共同参与的互动电网模式转变。这两大转变决定了未来电力系统发展的2个方向: 1) 支持新能源接入的统一联合的特高压输电与分布式电源相结合的智能电网; 2) 分布发电与交互式供电相结合的智能电网。由此可见,智能电网将是未来电力工业的核心内容。

智能电网不仅是现代电网的结构升级,更是全球电力行业的深刻性变革。各个国家都根据自身的实际,制定了适应本国的智能电网发展规划^[1],不同电力企业对智能电网的各个方面也进行了相关研究^[2-4]。由于我国能源和负荷分布的特殊性,为了适应我国能源发展的战略需求,我国的智能电网建设必须结合特高压电网和电力体制改革来进行^[5-6]。在宏观政策方面,电力行业需要满足建设资源节约型和环境友好型社会的要求; 在市场化改革层面,电能交易手段与定价方式正在改变,市场供需双方的互动将越来越频繁,电网必须能够灵活地支持多类型电能交易^[6]。

本文将简要分析我国电力系统的现状和智能电网的定义,研究智能电网对我国现行电力系统各环节的影响,指出我国发展智能电网的基础条件和面临的挑战,并给出相应的切实可行的建议,最后初步提出中国式智能电网的中期和远景结构简图。

1 中国电力系统现状简析

进入21世纪以来,我国电力建设事业快速发展,装机容量和发电量持续增长,电源结构调整和技术

升级取得了一定成就；电网规模不断扩大，输变电容量和电压等级不断提高，网络架构不断加强，已经初步实现了全国联网；同时，新能源发电技术也取得了很大进步，城乡电网改造成绩显著，电力市场的改革初见成效。但仍然存在以下问题：

1) 尽管发电能力有很大提高，但还是以传统意义的火电为主，电源结构亟待调整和优化。这主要表现在：电源的快速调节能力不足，电网的调峰平谷矛盾突出，各种新型清洁能源接入电网的技术还不完善成熟。

2) 特高压电网建设仍处于起步阶段，特高压线路的规划、设计、建设、运行与控制等方面的技术还没有形成一个标准的体系。区域电网之间的同步性还没有完全实现，大电网的动态监测、评估诊断与辅助决策的技术手段不够完善，柔性交流输电技术有待进一步应用。这使得电网的控制手段灵活性有限，输电网的应灾能力和供电恢复能力较弱。

3) 配电网的网架结构相对薄弱。这主要表现在：部分城市的配电网供电能力不足，配网自动化覆盖率低，电力通信设施落后，配电网网损过高，供电可靠性和电能质量问题仍然严峻；配电网相关技术和管理制度亟待完善，配电网对用户的双向互动支持不足；微电网的技术应用研究还不成熟。

4) 负荷发展不平衡，信息化程度差异大。现有的电能计量主要是完成电费计算，对客户计量数据的采集精细度不够，数据没有得到充分的深度利用。城市电网和农村电网的设备水平和管理水平以及与用户的双向互动难以满足现代化电网的要求。

5) 在工业化、城镇化进程以及人民生活水平提高的影响下，负荷将会持续增长，所以城网改造还需要进一步深入；并且，随着电力汽车、储能设备的接入，负荷的类型和性质也发生了一定的变化。

6) 变电站自动化系统整体技术水平较为先进，但综合利用效益还未充分发挥。数字化变电站的试点尽管已经完成，但是还没有进行全面的推广。

7) 高级调度中心的建设已经起步，但是在特高压互联电网运行与控制、运行状态的实时监控与预警、调度计划的经济协调、全网和区域电网协调控制等方面仍需进行深入的研究。

8) 我国电力通信发展不平衡，输电通信基本实现主干通道光纤化、数据传输网络化，建设了覆盖全国的电力综合通信业务网，但配电网缺乏可靠、经济、实用化的通信方式^[7]。

2 中国式智能电网的定义

我国电力系统的专家学者已经对智能电网的各个方面进行了深入的研究，由于研究的侧重点不同，对智能电网的定义也有所区别。

文献[8]提出了数字电力系统的概念，并指出智能电网是数字电力系统概念的升级。文献[9]指出智能电网通过分布式智能通信和高度集成的自动控制系统，保证市场交易的实时进行和电网各个环节的实时监控和双向互动，是一个完全智能化的供电网络。文献[10]将智能电网定义为“互动电网”，并指出智能电网是集合产业革命、技术革命和管理革命的综合效率变革。文献[11]详细分析了智能配电网的结构特点，指出智能配电网是通信、控制、传感、计算机等技术在配电系统中应用的总和。

国家电网公司综合世界各国对智能电网的研究成果，并根据我国电力发展水平、能源和负荷分布的特点，提出中国智能电网的发展总思路为：以统一规划、统一标准、统一建设为原则，以特高压电网为骨干网架，各级电网协调发展，建设具有信息化、自动化、互动化特征的国家电网。统一坚强智能电网包括5大区域电网，涵盖所有电压等级，由发电、输电、变电、配电、用电、调度等环节有机组成，是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的电网^[12]。

3 中国式智能电网的结构分析

3.1 智能电网的内涵

智能电网的核心内涵是在电力系统各环节实现新型信息与通信技术的集成，以促进智能水平的提高。智能电网的覆盖范围，包括从需求侧设施到广泛分散的分布式发电，再到电力市场的整个电力系统及所有的相关环节。由此可以看出，智能电网不是电网设备的技术升级，而是电力系统的根本性变革，而这种变革必将对我国现行电力系统各个环节产生深远的影响^[13-17]。

3.2 发电系统

截至2008年底，我国装机容量和全口径发电量构成见表1所示^[18]。

目前我国正在推进“一特四大”的电网发展战略

表1 2008年底我国电力总装机容量构成
Tab. 1 Configuration of installed power capability at the end of 2008

总量/GW	火电/GW	水电/GW	风电/GW	核电/GW
792.73	602.86	172.60	8.39	8.85

略，即以大型能源基地为依托，建设由 1000 kV 交流和 ±800 kV 直流构成的特高压电网，形成电力“高速公路”，促进大煤电、大水电、大核电、大型可再生能源基地的集约化开发，在全国范围内实现资源优化配置。其中，发电系统的基本构成如图 1(a) 所示。由此可见，发电系统仍然是集约化发展。随着中国智能电网建设的不断深入，新能源和分布式发电有很大的发展空间，但这并不能从根本上改变我国的装机结构。随着环保意识的增强和国家能源政策的实施，装机结构的内部将会发生变化，传统、低效的能源转化方式将被优质高效的转化方式代替，并在火电的装机容量中占有相当大的份额。我国未来能源构成的比例^[19]如图 1(b) 所示。智能电网将会在发电计划、机组调度等方面发挥优势，实现全国范围内的电力资源调配，实现电力与自然的和谐发展。

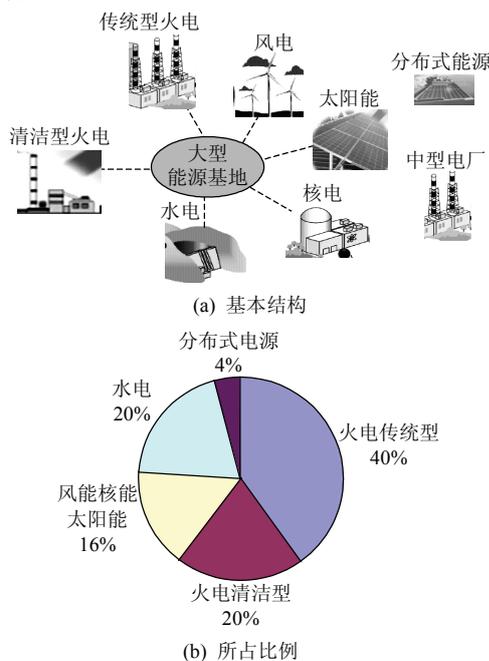


图 1 我国未来能源的基本结构与比例
Fig. 1 Basic structure and proportion of energy sources in China in the future

3.3 输电系统

智能输电运行是智能电网的重要组成部分。我国能源与负荷分布的矛盾决定了发展特高压是实现能源转移最为经济有效的方式。国家电网公司特高压骨干网规划的总体思路为：以构建华中—华北坚强的同步电网为核心，以晋、陕、蒙、宁煤电基地和西南水电开发为契机，在华北与华中电网率先建设贯通南北的百万伏级交流通道，将华中与华北构筑成为联系紧密的同步电网。华中—华北同步电

网的范围将通过交流特高压扩大到华东电网。在华北、华中和华东建设成坚强的特高压网架；西南水电外送采用特高压交流或直流，共同形成覆盖大电源基地和负荷中心的特高压电网。全国电网电力流向总体上呈现西电东送、北电南送的格局。

智能输电运行优化管理系统包括同步数据采集处理系统、广域动态监测系统、实时在线报警系统和故障诊断分析系统。目前，各个区域电网都建立了广域测量保护系统，初步实现了电网的动态监控，部分区域电网已经开始了高级调度中心的建设，这些都为智能输电的实现创造了条件。我国高级输电运行优化管理系统的建设应以广域测量系统为基础^[20-21]。

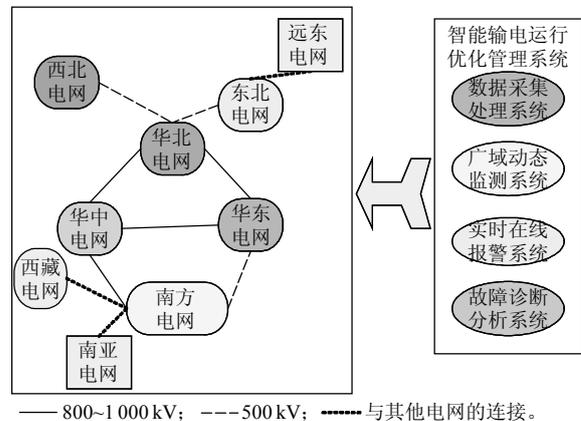


图 2 智能输电运行优化与管理系统的的基本构成
Fig. 2 Structure of smart transmission system

3.4 配电系统

配电网的智能化是智能电网的核心部分，灵活可重构的配电网拓扑结构和自动愈合功能是未来智能电网的基础。我国独特的城市结构限制了分布式发电在城市的发展，这与欧美国家有着本质的区别。我国城市的平均负荷密度高，并且高楼大厦林立，限制了太阳能等分布式电源的发展。并且，随着城市化率的增高，中等城市的负荷密度也呈现快速增长的趋势。20 kV 在提高线路输电能力，增大供电半径、提高供电质量、减小电能损耗等方面具有明显的优势^[22-23]。因此，智能配电网的建设必须结合配电网的电压等级改造进行。图 3 为我国配电网电压等级改造的过程示意图。

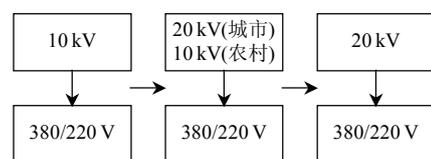


图 3 配电网电压等级改造过程示意图
Fig. 3 Sketch of distribution network upgrade

智能配电网供电可靠性高、电能质量好、支持大量的分布式电源接入和用户的能源管理，能够提高电网资源利用率和有效降低网损。文献[9]和文献[11]提出了智能配电网的基本结构——高级配电运行(ADO)，在此基础上提出了智能化配电网的规划结构，如图4所示。

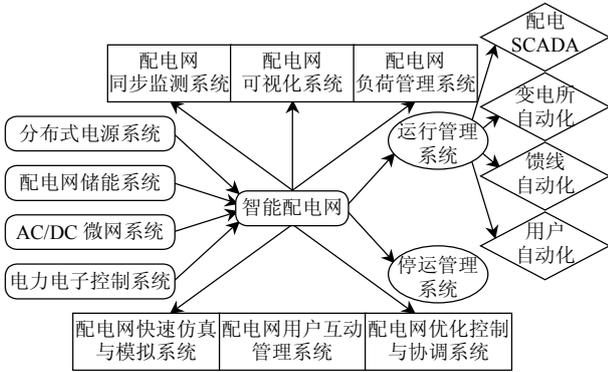


图4 智能配电网的总体规划

Fig. 4 Planning structure of smart distribution network

智能化配电网在运行时能够提高电网的资产利用率，并且能对配电网设备进行可视化管理，实现配电网运行管理和停运管理的自动化与信息化，实现电力运营商与电力终端用户的信息互动。

3.5 用户系统

经济和社会的发展对电力营销的精细化提出了更高的要求。如何全面地采集用户信息，掌握用户侧的电网运行状态是中国式智能电网首先要解决的问题，因此建设智能化的计量体系是我国智能电网的第一步。它不仅能为电力公司提供遍及全部用电系统的通信网络，也能提供系统范围内的测量和可观测性；既可以使用户参与到实时电力市场中来，也可以为系统的运行和资产管理带来显著的经济效益^[8]。智能计量体系通过在用户侧安装智能电表，采集更为全面和详细的计量信息，与分时电价措施相配合，抑制峰值负荷，从而减少用电高峰负荷需求的增长；根据对负荷情况更细致、实时的掌握，指导电网建设，减少电网扩容和建设费用；同时，智能计量管理还可以帮助电网企业有效定位和防止窃电。

我国城市和农村负荷水平以及信息化水平差异悬殊，智能计量体系的建设(见图5)必须首先从负荷密度高、信息化程度高、电网结构坚强的大城市开始，以智能电表的安装为切入点，结合用户通信系统和计量数据管理系统的建设，逐步发展到用户动态的可视化管理，从而实现用户电网动态的全监控。智能电网通过智能计量体系，将用户之间、

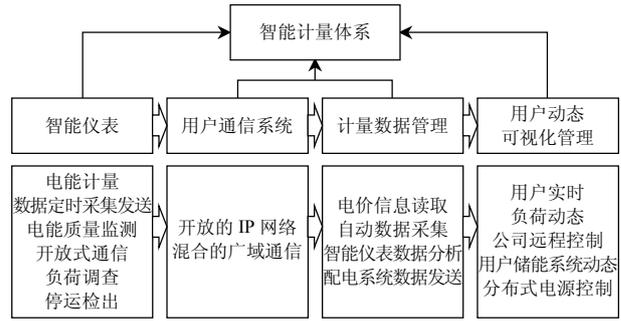


图5 智能计量体系的构成和建设示意图

Fig. 5 Structure of smart measurement system

用户和电网公司之间形成网络互动和即时连接，实现电力数据读取的实时、高速、双向的总体效果，实现电力、电讯的有效结合，可以整合系统中的数据，完善中央电力体系的集成作用，实现有效的临界负荷保护；实现各种电源和客户终端与电网的无缝互连，由此可以优化电网的管理，将电网提升为互动运转的全新模式，形成电网全新的服务功能，提高整个电网的可靠性、可用性和综合效率^[24-25]。

3.6 负荷系统和变电站

在智能电网条件下，接入电网的电力负荷发生了一定程度的变化，在原有无源负荷存在的同时，出现了一种有源负荷，它既可以作为负荷也可以作为电源。图6为智能电网的负荷构成图。

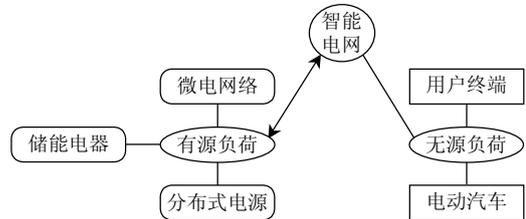


图6 智能电网负荷构成

Fig. 6 Load structure of smart grid

有源负荷的出现从根本上改变了传统负荷格局，其在降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性等方面具有巨大的潜力。世界上很多国家都参与到各种类型的有源负荷研究和开发中，但是关于如何实现各种有源负荷的最优控制和提高各种有源负荷的可靠性等方面有待深入研究^[14]。随着智能电网研究的深入，“即插即用”的储能电器和储能电池应该成为我国智能负荷研究的重点，而电动汽车作为一种特殊的负荷的大规模应用，应该成为我国负荷峰谷平衡的重要手段之一。

智能化电气的发展和计算机网络在实时系统中的开发应用为变电站信息采集和传输系统的智能化提供了技术支持。文献[26]提出了具有高可靠性的数字化变电站系统结构，并通过探讨在数字化

变电站中接入常规系统的技术方案,提出了智能变电站的简单模型。文献[27]总结了智能化变电站的技术特征,初步描述了智能化变电站的自动化系统结构和网络选型,并指出了建设智能化变电站面临的技术问题。智能变电站的建设必须以数字变电站为基础,华东电网已经开展了数字化变电站的建设^[5]。我国智能化变电站的建设可以分为如图 7 所示的 3 个发展阶段^[28-29]。

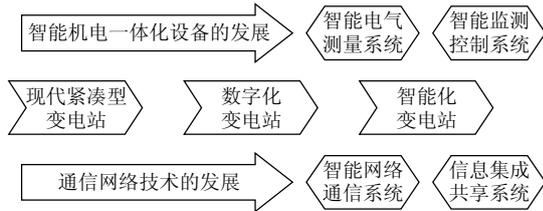


图 7 智能化变电站发展过程

Fig. 7 Developing process of smart substation

3.7 智能调度中心

智能调度中心是智能电网建设中的一个重要环节,但是其建设必须依赖于其他技术的发展。可视化技术、智能通信技术、广域同步监测技术、协调优化运行技术、智能预警控制技术、调度安全防护技术和智能算法应用技术可为智能调度中心的建设提供技术支持;同时智能调度中心应该与电力系统实时动态监控系统以及同步信息传输系统相连接,形成对发电、输电、配电、用电系统的同步监控^[30]。图 8 所示为智能调度的基本架构。其中,发电调度应侧重于大型能源基地和清洁能源的装机接入与发电调度;输电调度应侧重于电网的经济评估和优化协调特高压输电线路的传输容量;配电调度应侧重于分布式电源的控制和配电网的灵活重构;用户调度是智能电网建设的出发点,其中包括微电单元的运行、负荷协调投入、智能负荷的控制、虚拟电厂接入以及混合机车的调荷功能。

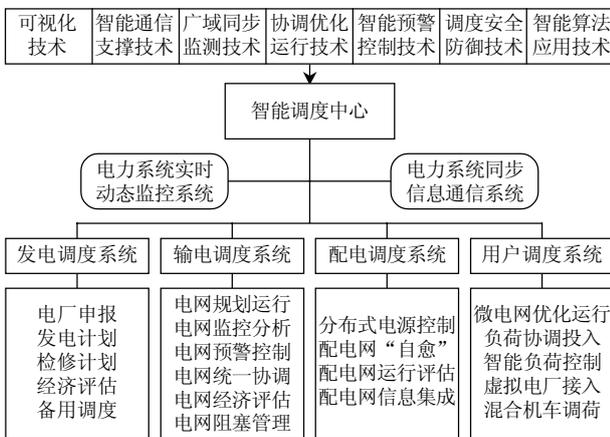


图 8 智能调度的基本架构

Fig. 8 Basic structure of smart dispatching center

制、虚拟电厂接入以及混合机车的调荷功能。智能调度中心应该能优化协调资源配置并灵活高效地控制电网状态,同时具有智能决策能力和智能市场调配能力。

目前,华东电网公司以提升大电网安全稳定运行水平为目标,已经开始了高级调度中心的建设,完成了高级调度中心整体架构和实施方案研究^[5]。中国发展智能电网层级增多,交直流混联,运行控制难度大,因此应该首先建立协调统一的大电网调度中心,实时监控电力系统内所有电源和电网的运行状态,并为各个区域调度中心提供实时信息。在此基础上,区域调度中心根据实时信息,进行电网的控制;市县配电调度中心可以灵活控制用户的调度系统,从而实现电力系统的分层分区调度和需求侧管理的有效结合。

4 关于我国智能电网发展的几点看法

4.1 智能电网建设的基础条件

我国智能电网的建设应该首先满足日益增长的负荷用电需求,这与美国、欧洲、日本等发达国家智能电网建设的出发点有所不同。目前我国发展智能电网的基本条件如下:

- 1) 宏观政策上,国家电网公司已经指定了“一特四大”的能源规划和电网结构,为智能电网的发电和输电环节进行了初步的规划。
- 2) 华东电网公司开展了高级调度中心、数字化变电站的研究以及统一数据平台的规划。
- 3) 江苏电网公司开展了 20 kV 配电网等级的研究,并建立了 20 kV 的配电系统技术导则。
- 4) “三华”同步电网的建设已经起步,到 2012 年,“三华”特高压同步电网将形成“两纵两横”格局。“两纵”即陕北—晋东南—南阳—荆门—长沙,锡盟—北京东—天津—济南—徐州—南京;“两横”即荆门—武汉—芜湖—南京,蒙西—晋北—石家庄—济南—潍坊。
- 5) 各个区域电网都在建设广域测量系统(wide area measurement system, WAMS),为电网的动态监控创造了基本条件。
- 6) 各种新型负荷的研究已经起步,但是远远不能达到智能电网的要求。

4.2 智能配电网试点城市的选择

我国电网的特点和负荷增长的趋势决定了智能电网建设不能搞“一刀切”,应结合我国国情,选择合适的城市对智能配电网运营进行试点。试点

范围应满足以下条件：1) 该区域内用户的智能化程度高，各种通信设备完善，智能建筑和智能小区建设已经完成；2) 试点规模适中，配电网自动化和电力通信水平高，技术比较成熟；3) 该区域现有负荷密度适中，负荷增长速度快；4) 电网运行灵活，供电可靠性高；5) 电网设施接入性好，支持各种新型负荷和分布式电源的接入。

4.3 我国智能电网应优先建设的方面

根据我国电网的现状和智能电网发展的基础条件，我国智能电网的建设应优先在以下几个方面开展：

1) 首先建设双向、实时、可靠的全网双向通信系统，以承载智能电网的发展需求。

2) 在我国特高压电网的总体架构下，将现有的 WAMS 系统扩展改造成功能强大、动态实时的输电网监控系统，并通过通信网络向调度中心和配电网提供实时的输电网信息。

3) 制定具有中国特色并与国际智能电网发展相接轨的标准规范，指导我国智能电网建设。

4) 在终端用户侧安装智能电表和负荷优化管理系统，以实现家庭能源消费的自动化。

5) 在数字化变电站的基础上，建设具备远程监控、实时数据发布等优化性能的智能变电站。

6) 积极开展配电网的电压升级改造和配电自动化的建设。

7) 完善高级调度中心的功能，实现全网的动态监控和优化调度。

8) 研制新型超导电力材料和各种储能设备。

5 中国智能电网的结构预测

目前，我国城市化的步伐正在加快，对于用户系统，通过在用户端通过安装智能仪表来建设智能

家庭，在此基础上建设智能建筑，进而形成智能小区和智能城市；随着新能源并网技术的不断成熟，将会有越来越多的新能源接入到高压配电网中，并且不断有新的新型能源基地通过输电网接入电力系统；在 WAMS 的基础上建设特高压(高压)输电网的实时动态监控和保护系统；在建设数字化变电站的基础上建设智能的控制中心。智能电网的中期规划预测如图 9 所示。

通过对现代智能电网的结构，以及智能电网对我国电力系统各个环节影响的分析，可初步规划符合我国国情的，以特高压为大区电网输电骨架、以高压输电为区域电网核心，配电网的电压等级改造和用户智能设备的换代相结合的中国式智能电网远景基本结构，如图 10 所示。

6 结论

本文从现代电力系统发电、输电、配电、用户系统、负荷种类、变电站建设以及电力调度等环节对我国智能电网的现状与发展进行了系统分析。其中，发电系统的新能源和清洁能源发电体的接入将会对现有的电源结构产生深远影响；输电系统主要涵盖了广域动态监测、实时在线报警、故障诊断分析等方面；配电系统主要包括配网电压等级的升级改造、配电网同步检测、可视化和负荷管理系统、快速仿真模拟系统以及优化控制和协调系统；用户系统重点在于智能营销系统、智能计量体系、用户优化管理体系；负荷系统主要包括新型储能设备的研制、分布式电源的接入、用户友好型电器的设计、新型电力汽车的研发等；智能变电站的建设集合了智能网络通信、信息共享集成以及智能实时保护系统；智能调度中心在可视化技术、协调优化运行技术、智能预警控制和调度安全技术的基础上，实现

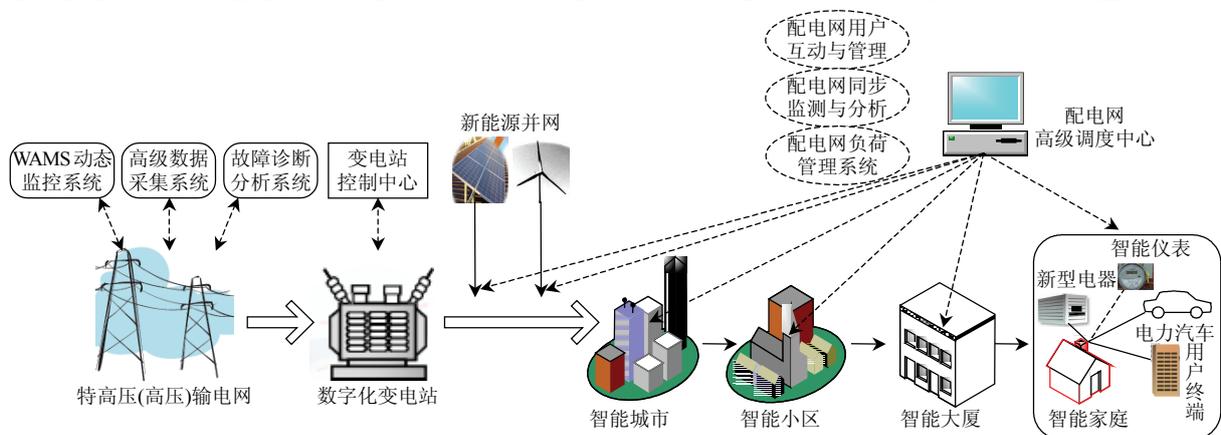


图 9 智能电网中期规划预测

Fig. 9 The medium-term planning forecast of smart grid in China

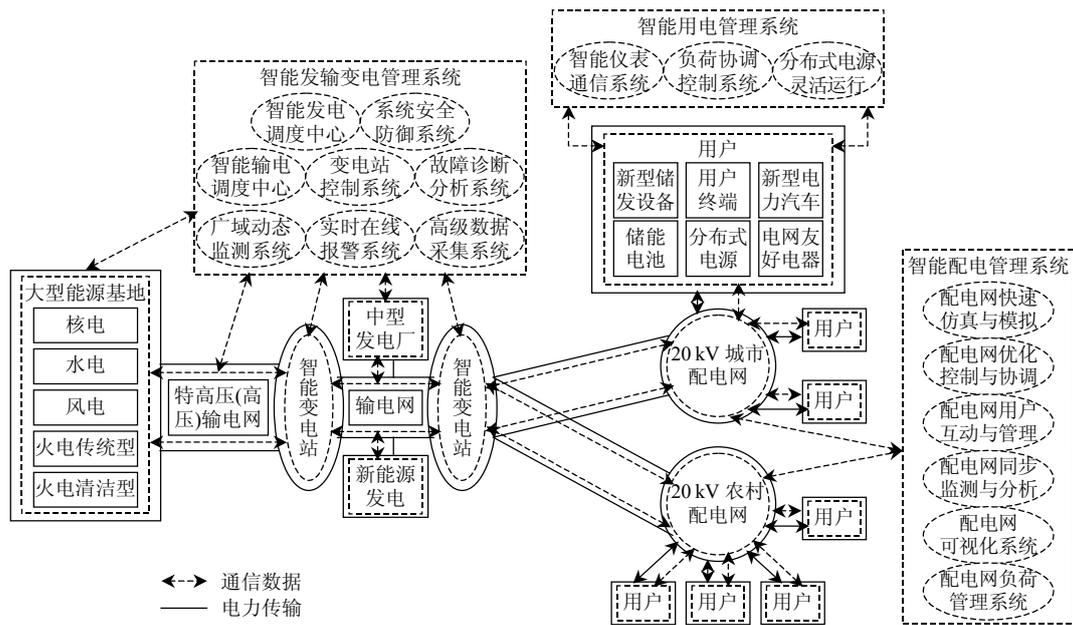


图 10 中国智能电网的结构预测

Fig. 10 Structure prediction of smart grid in China

电网的优化、经济、协调、安全调度。

我国智能电网的发展需要科学谋划电网发展布局，大型能源基地建设和分布式电源的开发相结合，特高压输电网的建设和配电网升级改造相结合，全网的动态监控管理和新型储能设备的研制相结合，智能化变电站和一体化调度中心的建设与电网信息采集系统的建设相结合，以实现我国电网运行的安全、自愈、兼容、高效、优质的目标。

参考文献

[1] 胡婧. 国外智能电网的研究与应用[J]. 国家电网, 2009(6): 46. Hu Jing. Investigation and application of smart grid in overseas[J]. State Grid, 2009(6): 46(in Chinese).

[2] 世界能源电力网. 法国电力公司试验智能电网提高风电使用率[EB/OL]. 2009-02-03. http://www.wefweb.com/news/200923/1017348758_0.shtml.

[3] 蒋明桓. 关于“智能电网”与“智慧能源”情况汇编[EB/OL]. 2009-03-17. <http://power.nengyuan.net/200903/17/25057.html>.

[4] 马丰敏. 智能电网将拉动 IT 领域投资[EB/OL]. 2009-07-21. http://www.bulude.com/news_view2856.html.

[5] 帅军庆. 创新发展 建设智能电网: 华东高级调度中心项目群建设的实践[J]. 中国电力企业管理, 2009(4): 19-21.

[6] 何华峰. 电网的智能革命[EB/OL]. 2009-02-20. <http://www.caijing.com.cn/2009-02-20/110072215.html>.

[7] 汤效军. 改革开放 30 年电力线载波通信的回顾与展望[J]. 电力系统通信, 2009, 30(195): 26-32. Tang Xiaojun. Review and prospect of power line carrier communication during the 30 years of reform and opening up[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(195): 26-32 (in Chinese).

[8] 卢强. 智能电网成本高 回报更高[EB/OL]. 2009-05-22. http://www.indaa.com.cn/dwxw/dwjs/200905/t20090522_165941.html.

[9] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1), 7-11. Yu Yixin, Luan Wenpeng. Smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(1): 7-11(in Chinese).

[10] 武建东. 全面推互动电网革命 拉动经济创新转型[EB/OL]. 2009-02-02. <http://www.hy5188.com/n31947c29.aspx>.

[11] 徐丙垠. 智能电网与配电自动化技术讲座[EB/OL]. 2009-05-22. <http://bbs.cepsc.com/viewthread.php?tid=35905&extra=&page=1>.

[12] 刘振亚. 2009 年国家电网公司 2009 年年中会议上的讲话[N]. 国家电网报, 2009-07-21.

[13] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7. Kang Chongqing, Chen Qixin, Xia Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7(in Chinese).

[14] 王明俊. 突出自愈功能的智能电网[J]. 动力与电气工程师, 2007(2): 12-16.

[15] 李亚楼, 周孝信, 林集明, 等. 2008 年 IEEE PES 学术会议新能源发电部分综述[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 1-7. Li Yalou, Zhou Xiaoxin, Lin Jiming, et al. A review of new energy power generation part in 2008 IEEE PES general meeting[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 1-7(in Chinese).

[16] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7. Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7(in Chinese).

[17] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22. Xie Kai, Liu Yongqi, Zhu Zhizhong, et al. The vision of future smart grid[J]. Electric Power, 2008, 41(6): 19-22(in Chinese).

[18] 中国电力企业联合会. 2008 年电力工业统计资料汇编[M]. 北京: 中国电力企业联合会, 2009.

[19] 叶雷. 2020 年中国电力可持续发展战略研究[C]. 中国科协 2004 年学术年会电力分会场暨中国电机工程学会 2004 年学术年会论文

- 集, 中国海南, 2004.
- [20] 吴京涛, 谢小荣, 王立鼎, 等. 广域测量系统在电力系统的发展与展望[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 1-7.
Wu Jingtao, Xie Xiaorong, Wang Liding, et al. Development and prospect of WAMS in power system[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(3): 1-7(in Chinese).
- [21] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-48.
Xu Shukai, Xie Xiaorong, Xin Yaozhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-48(in Chinese).
- [22] 王俊. 20 kV 中压配电网的优化设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007.
- [23] 魏庆海, 吕鸣镝, 周莉梅, 等. 配电网采用 20 kV 供电的前景分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 61-66.
Wei Qinghai, Lü Mingdi, Zhou Limei, et al. Prospective analysis of adopting 20 kV voltage in distribution system[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 61-66(in Chinese).
- [24] Mesut B, McDermott T E. Distribution system state estimation using AMI data[C]. IEEE Power Systems Conference and Exposition, 2009.
- [25] Cleveland F M. Cyber security issues for Advanced Metering Infrastructure (AMI)[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
- [26] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 73-77.
Zhang Peichao, Gao Xiang. System architecture of digitized substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77(in Chinese).
- [27] 孙一民, 李延新, 黎强. 分阶段实现数字化变电站系统的工程方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 90-93.
Sun Yimin, Li Yanxin, Li Qiang. A grading solution for building digital station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 90-93(in Chinese).
- [28] 刘慧源, 郝后堂, 李延新, 等. 数字化变电站同步方案分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 44-48.
Liu Huiyuan, Hao Houtang, Li Yanxin, et al. Research on a synchronism scheme for digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 44-48(in Chinese).
- [29] 李九虎, 郑玉平, 古世东, 等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 94-98.
Li Jiuhu, Zheng Yuping, Gu Shidong, et al. Application of electronic instrument transformer in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 94-98(in Chinese).
- [30] 姚建国, 杨胜春, 高宗和, 等. 电网调度自动化系统发展趋势展望[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 7-11.
Yao Janguo, Yang Shengchun, Gao Zonghe, et al. Development trend prospects of power dispatching automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 7-11(in Chinese).



杨德昌

收稿日期: 2009-09-22。

作者简介:

杨德昌(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为交直流混合电力系统的稳定控制和广域保护,
E-mail: yang.dechang.cau@gmail.com;

李勇(1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为基于新型换流变压器的直流输电系统新理论, 电能质量控制与电能经济管理技术, 及相关的 HVDC

和 FACTS 技术;

C. Rehtanz(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大电网稳定控制与安全评估、HVDC 和 FACTS 控制技术、电力系统广域监视、控制与保护方面的研究工作;

刘泽洪(1961—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事特高压输电工程的建设管理和技术研究工作;

罗隆福(1962—), 男, 教授, 主要从事电能质量的管理和高压直流输电新理论及其应用的研究工作。

(责任编辑 李兰欣)