

高电压输变电装备 智能化关键技术与发展趋势

◆ 孙才新 司马文霞 李剑 廖瑞金 唐炬 陈伟根

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

0 概述

2007年,美国制定了能源独立与安全法案。法案第1301节规定智能电网应具有10大特征:①增加应用数字信息和控制技术,提高电网的可靠性、安全性和效率;②电网运行和资源动态优化,保障全网络空间安全;③包括可再生能源的分布式资源和发电的调度与集成;④需求响应、需求侧资源、能效资源的发展与未来相结合;⑤发展与电能计量、电网操控、状态信息通信和配网自动化相关的实时、自动、交互式智能技术,优化电网装备和用户设备操控;⑥智能化的电网装备与用户设备的集成;⑦包括电动汽车、混合动力汽车和蓄热空调等先进储能及削峰技术调度与集成;⑧向用户提供实时信息和控制选择;⑨电网装备及系统的通信和协同标准的形成;⑩辨认和降低不合理或不必要的智能电网技术应用与实施的障碍。

美国国家标准与技术协会依据法案,给出的智能电网的定义是^[1]:智能电网是电网的现代化,它可监测、保护及自动优化集中与分布式发电厂、高压电网、配电系统、储能设施、终端用户等电网装备以及温控设备、电动汽车、家用电器等的运行。

欧盟委员会出版物^[2]指出,智能电网是为了满足2020年及更长时期内欧洲电网的发展需要,它将是一个具有灵活性、可接入性、可靠性及经济性的电网。灵活性是指满足未来具有变化和挑战的用户需求;可接入性是指允许任何种类电网用户的接入,特别是零排放和低碳可再生能源与高效局域发电的接入;可靠性是指保障和提高供电安全与质量,

满足数字化时代的需要;经济性是指通过创新、能效管理、公平竞争和调节,提供最优价格电能。

为了保障电网的安全稳定运行并提供高效优质清洁的电力供应,我国国家电网公司2009年5月提出了建设“以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强电网为基础,利用先进的通信、信息和控制技术,构建以信息化、自动化、互动化为特征的自主创新、国际领先的统一坚强智能电网”的战略发展目标。与欧美智能电网相比,特高压电网是我国智能电网的重要特征,以特高压电网为骨干网架的各级电网输变电装备的智能化,成为了我国智能电网技术发展的根本目标之一。因此,我国智能电网技术对高电压输变电装备的智能化提出了新的要求和发展目标。

1 我国智能电网与高电压输变电装备智能化的关系

“统一坚强智能电网”具有深刻的内涵,其中智能电网较传统电网更加坚强并具有更大“弹性”,可以有效地抵御自然灾害、外力破坏等各类突发事件对电力系统的冲击,并具有强大的“自愈”功能。所谓“自愈”是指电网对故障具有自适应和自恢复的能力,能及时把电网中有问题的元件从系统中隔离出来,并且在很少或无人干预的情况下使系统迅速恢复到正常运行状态。这对我国智能电网中的装备智能化提出了很高的要求。而且,由于我国智能电网以特高压电网为骨干网架,高电压输变电设备智能化与我国智能电网技术发

展具有无法分割的联系。

坚强电网即为高度安全可靠的电网。智能电网远比传统电网安全。而高电压输变电装备自身安全是以特高压电网为骨干网架的各级电网安全的源头。高电压输变电装备的智能化目标,是实现装备的状态信息实时监测、信息交互传递、数据动态分析、故障评估预测、事故预警及快速处置。由此可见,高电压输变电装备的智能化是实现电网运行智能化的基础,是我国智能电网技术发展的重要技术支撑。

同时,智能电网的发展,对高电压输变电装备的智能化提出了更高的要求。目前,与电网二次设备的智能化、自动化、信息数字化相比,我国高电压一次设备的智能化程度还较低,高电压输变电装备运行状态的现场信号获取、识别与分析、开关电器智能操控等关键技术还未得到解决,装备信息的网络化交互、共享与控制能力不足,由高电压输变电装备引起的电网事故的自动分析评估和快速处置等技术尚未取得重大突破。因此,我国智能电网的发展,要求智能化高电压输变电设备不仅仅具有状态信息监测、数字化传输、故障诊断与评估等功能,而且应具有在自身潜伏性故障下的事故预测能力和在故障状态下的应急控制决策能力,实现电网在故障状态下的自适应和自恢复,以确保电网安全稳定运行,从而实现以特高压电网为网架的我国坚强统一的智能电网建设目标。

2 高电压输变电装备智能化的关键技术及研究基础

根据国家电网公司提出的建设以特高压输电网为骨干网架的坚强统一的智能电网的目标,信息数字化及信息交互已成为从输电网到配电网和用户设备的基本特征。针对我国智能电网的特点,高电压输电装备智能化还应具3个特征:安全监测、安全评估与故障预测、事故预警与快速处置。

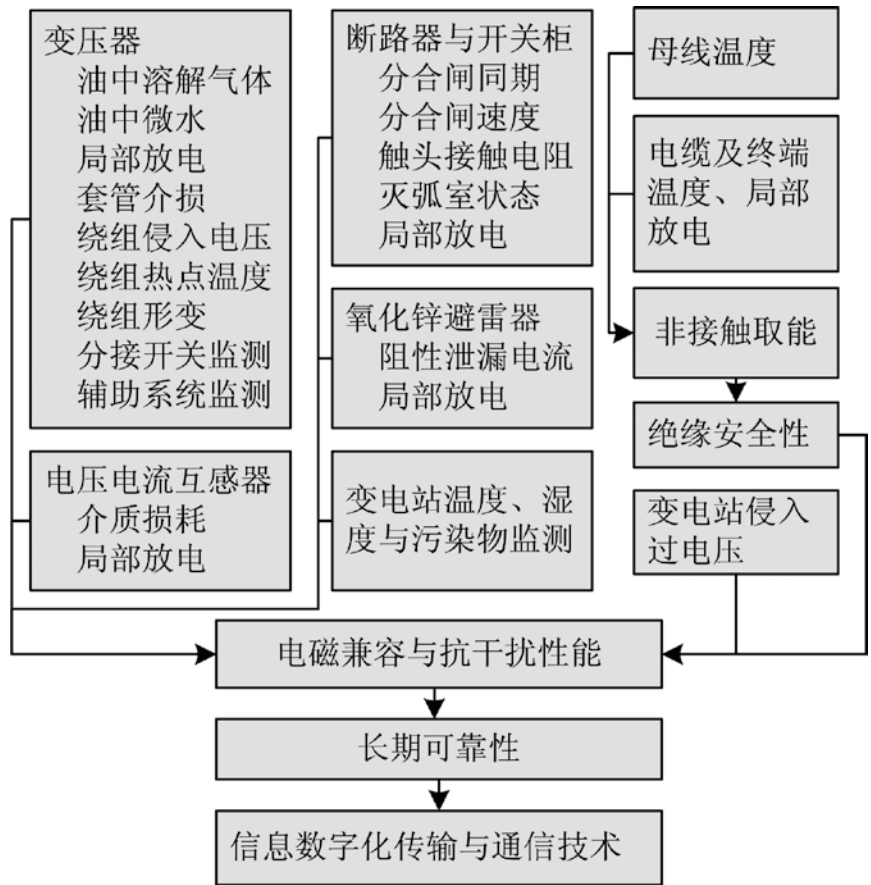


图1 智能变电站高压变电设备的关键技术

(1) 安全监测技术

高电压输变电装备安全监测可分为智能变电站高压电气设备安全监测与智能输电线路安全监测。图1简要描述了智能变电站高压电气设备安全监测的关键技术,包括满足电力变压器、高压开关设备、高压保护及测量设备的绝缘以及机械状态在线监测的各种技术,同时包括提高监测技术水平的电磁兼容、抗干扰、监测设备自身寿命及可靠性、数据数字化及通信技术等方面。

变电站设备安全技术的研究成果已比较丰富,图1所示的各种设备的监测项目都有研究和应用,其中变压器绝缘安全监测技术始终是研究的热点。自20世纪70年代以来,国内外对变压器油中的溶解气体监测技术进行了广泛研究。近年来又提出了应用油中糠醛含量和绝缘纸聚合度作为特征值对变压器等设备进行故障诊断^[3~5]。局部放电是有效反映输变电装备内绝缘运行状态的特征量,变压器、断路器、互感器和避雷器等设备的局部放电机理、传播特性与规律、传感器技术、强电

磁干扰去噪理论与方法、故障定位、特征信息提取与故障辨识是目前的研究热点^[6~10]。

高压输电线路安全监测包括对输电线路杆塔、绝缘子、线路避雷器、避雷线、导线、金具、接地装置等设备的监测。监测设备及参数包括：输电线路过电压与雷电流；绝缘子泄漏电流、盐密与灰密；线路避雷器；输电线路噪声；导线温度、覆冰、舞动；杆塔位移与倾斜程度；输电线路气象条件与远程视频等。这些参数包括输电线路的雷电、输电线路设备绝缘状态、输电线路机械、输电线路大气及其它参量。这些参量反映了高压输电线路的电气、机械、气象、状态等参数。进行实时监测，是实现电网智能化和提高电网运行安全性的重要保障。同时，输电线路安全监测数据通信技术也是实现输电线路智能化的关键技术之一。

目前在高压输电线路安全监测方面已开展的主要研究工作有：从气象学、流体力学、热力学等多尺度研究输电线路覆冰的形成、增长，导线静、动力载荷影响规律与特征信息；绝缘子的覆冰及融冰规律，污秽、低气压对交直流覆冰绝缘子放电过程影响的规律及影响闪络电压的特征指数^[11~13]；大气污染环境中输电线路绝缘子的积污规律，湿润机理和数值仿真模型及特征信息^[12]；基于长空气间隙放电理论的超特高压输电线路雷电绕击分形先导发展模型的理论 and 上下行先导起始判据与沿面放电理论；雷击输电线路故障的实时监测与在线识别、定位的理论及方法^[15,16]。

(2) 安全评估与故障预测技术

输电线路安全评估与故障预测包括3个方面：

①由自然灾害导致的事故。如线路严重覆冰导致的输电线路断线和倒塔事故及线路脱冰过程中导致的线路舞动而引起的线路绝缘击穿事故。这可通过对输电线路的气象监测、视频监控、覆冰监测等综合参数进行线路和杆塔动态载荷分析及预测，达到对线路和杆塔安全评估及故障预测的目的；②由绝缘子覆冰或积污导致的闪络故障。可通过监测绝缘子的泄漏电流、覆冰重量、盐密与灰密等参数，依据绝缘子冰闪电压和污闪电压模型评估线路绝缘安全，预测临闪覆冰和积污程度；③由雷击输电线路或系统开关性操作引起的过电压而导致的输电线路短路故障。可通过对雷电过电压在线监测系统获取过电压种类、波形特征等特

征信息的识别和气象全球定位系统(GPS)、电力GPS信息的实时综合分析，不仅可以为雷害事故的定量分析和防雷措施的改进提供理论支撑，而且还可以通过专家系统预测雷电过电压对设备内绝缘的影响程度。

目前已开展的研究工作有：架空导线不覆冰所需要的保线电流，导线覆冰的融冰电流，融冰时间内导线最大允许电流的限值、融冰电流与覆冰厚度，融冰时间和环境温度的关系的计算模型；输电线路覆冰绝缘子的临界闪络条件，闪络判据，冰闪电压数字仿真计算模型，不同条件下覆冰绝缘子冰闪电压预测计算模型^[17,18]；大气污染环境中输电线路绝缘子污秽放电的特征信息和数值仿真数学物理模型，临界闪络条件及判据，闪络电压的数字仿真计算方法，污闪电压预测计算模型^[19,20]；预测雷电波侵入变电站对设备绝缘水平影响的理论及方法^[21]。

变电设备不仅在制造、安装、调试中都可能留下潜伏性缺陷，而且在运行中受电、热、机械应力等作用后都会逐渐老化。从多方面(即多种参数)对变压器等大型设备进行安全评估和故障预测，是目前普遍认可的方法。由于引发设备故障的因素可能是多种多样的，因此研究多种参数与设备状态的复杂关系也是目前的热点问题；绝缘老化的影响因子很复杂，依据多因子绝缘寿命模型预测变电设备绝缘寿命，判断绝缘的老化程度，对于设备安全评估和故障预测具有重要意义。

已开展的变电设备安全评估与故障预测的相关研究有：变电设备内绝缘早期及突发性故障的发生、发展过程及其规律；变电设备故障新特征量的提取方法和故障评估理论与方法；内绝缘早期和突发性故障的多因子预测及评估理论模型；变电设备剩余寿命及运行状态综合评估系统的原理及关键技术^[22,23]。

(3) 事故预警与快速处置技术

由于对输变电装备故障的发生、发展机理和特征信息量的基础研究还难以支撑在线预警与故障处置决策系统的研发，国内外开发的单一目标的预警系统还难以起到有效的预警作用，特别是对其中的信号采集传感器和故障处置专家决策系统的关键技术还缺乏系统的理论研究，因而在应用中尚还达不到预期目的。因此，由于电力行业和公

共安全的迫切需求,对输变电装备故障导致电网事故的发生发展进行有效的预警和处置的理论及方法的研究,既是国内外研究的热点,也是一个具有挑战性的难题。

对变电设备内绝缘运行状态的预警和故障处置的研究,虽然近几年来随着在线监测及故障诊断技术的进步和运行经验的积累,有了一定的基础,但现场采集特征信息的各种传感器的研究、强电磁场中的电磁兼容技术和后台对故障处置决策的专家系统仍是具有挑战性的难题。目前国内外研究的重点是先进的多传感器及其信息融合技术,以在线监测为基础,以可靠性与经济性为中心的状态维修理论及方法,特别是需要建立各种可能的典型的故障物理模型、工业模型和真实模型;对故障的产生机理、种类、位置、危险性程度进行大量的理论分析;结合大量的现场运行数据,建立大型的样本数据库,并引入现代数学方法,对故障进行正确的识别及诊断并提出相应的处置决策。只有这样,才能为建立智能化的在线预警系统提供理论和关键技术支撑。

已开展的研究工作包括:输电线路导线覆冰、绝缘子冰闪及污闪多特征信息参量在线综合预警系统的原理和实现方法;导线覆冰量、绝缘子覆冰量和污秽度超过预警阈值的处置决策理论及方法;各种材质绝缘子(串)的防冰(污)造型优化理论和防冰(污)涂料的原理及方法;交直流、脉冲除冰等防冰融冰新技术;雷击输电线路对变电设备绝缘水平影响的预测方法;预测雷电波侵入变电站对设备绝缘水平影响的理论及方法;用新型添加剂等提高油纸绝缘抗老化性能的理论及方法;以在线监测为基础的变电设备内绝缘故障处置的状态维修理论和以可靠性及经济性为中心的决策支持专家系统^[24,25]。

3 高电压输变电装备智能化技术发展趋势及任务

关于高电压输变电装备的故障诊断和状态安全评估,目前还处在依据预防性试验和在线监测数据,诊断和评估结果还不能直接用于电力变压器的自动控制,而仅供专家参考。虽然模糊数学、人工神经网络、分形几何等现代数学分析和人工智能方法得到了应用,但计算机辅助的智能化评估

方法尚未得到广泛应用。其根本原因在于:一是高电压输变电装备在线监测尚未系统化,监测体系不完备,仅有个别在线监测技术比较成熟并得到认可;二是电力变压器等大型变电设备内部结构和工况环境比较复杂,内部缺陷的发展及致障机理尚不完全清晰,故障特征信号在线提取困难,故障智能化诊断和状态评估模型不完善,因而致使多数在线监测技术难以取得良好效果;三是输电线路工况环境恶劣,线路绝缘子等设备的故障诊断模型受冰雪等湿沉降及污染物等多种环境因素影响,其判断的准确性还有待提高。

根据我国智能电网的研究基础和发展趋势,高电压输变电设备的智能化技术未来的任务主要包括:

(1) 建立完备的高电压输变电装备安全监测体系 该体系包括两个层次的含义。

第一,建立符合智能电网发展需要的充分保障智能电网安全和信息交互的高电压输配电装备监测体系,即需充分考虑哪些设备需要监测,各设备中哪些监测量与监测技术是完备监测体系的内容和项目。被测设备的选择,可以电网可靠性和信息交互性为依据进行选择。各设备被测量的选择相对较困难,需要结合设备故障机理及被测量间的关系进行选择,此项研究工作尚需深入和加强。

第二,建立标准化的监测体系。根据监测技术水平,逐步制定智能电网被测设备和设备监测量的标准体系以及各项监测性能指标的技术标准,实现智能电网设备在制造、运行与维护各个环节的标准化。

(2) 提高监测设备自身的可靠性,建立监测设备可靠性评估试验方法和标准

高电压输变电装备监测设备种类繁多,涉及化学测量、电气测量、机械测量以及图像测量等。阻碍监测技术推广应用的主要原因之一就是监测设备自身的可靠性问题。然而,监测设备在入网应用时,由于对监测设备可靠性没有标准可依,对监测设备的考核,通常只能通过用户根据对比试验和运行经验来选择设备制造商及监测设备,从而造成监测设备在应用过程中出现可靠性下降的概率较高,给监测设备的应用带来困难。

因此,建立监测设备的可靠性评估试验方法标准,达到以客观的可靠性试验和指标来判断监

测设备的可靠性水平及可靠性水平保障时间,为用户选择监测设备提供技术依据,也可为用户建立监测设备的维护规程提供技术支持,从而在未来的智能电网中,高电压输配电设备信息交互和安全监测可以自动完成,用户根据监测设备的自检报告和可靠性试验报告,实现以花费成本较低的监测设备检修为主,由高电压输配电装备的计划检修或被动检修向状态检修转变。

(3) 加强高电压输变电装备的智能化基础研究

1) 加强输电线路故障的机理及特征信息获取、识别与预测预防的基础研究,主要包括输电线路导(地)线覆冰的形成过程和覆冰量预测理论及方法,新的抗冰融冰理论及方法,绝缘子冰闪和污闪放电的机理与物理过程,表征覆冰、积污程度和冰闪、污闪的特征信息并建立计算及预测数学模型等。

2) 变电设备内部故障的机理及特征信息获取、识别与预测预防,主要包括高电压输变电装备的新型传感器技术和抗干扰技术,设备内部缺陷的产生、发展和致障机理,复杂电磁场、温场、内部电介质材料状态与杂质等因素对致障过程的影响,精确的设备安全评估模型与在线诊断和预警方法等。

3) 输变电装备故障导致电网突发性事故的预警与处置理论及方法,涉及传感器技术和小波分析、混沌、粗糙集、神经网络、分形等一系列现代数学理论与方法,信号的远程传输所涉及的现代网络与通信技术。对输电线路和变电设备故障的预警与处置是涉及多学科交叉的难题,需要利用多学科交叉融合开展大量的基础研究。

4 结束语

本文在论述智能电网与高电压输变电装备智能化关系的基础上,指出了智能电网对输变电装备的智能化的要求;针对高电压输变电装备智能化的安全监测、安全评估与故障预测、事故预警与快速处置等关键技术及其研究基础、发展趋势以及未来任务,阐述了作者的观点,提出在未来智能电网发展中,高电压输变电装备的智能化应建立完备的高电压输变电装备安全监测体系,提高监测设备自身的可靠性,建立监测设备可靠性评估试验方法和标准,以及加强高电压输变电装备智能化基础研究。

参考文献

- [1] Report to NIST on the smart grid interoperability standards roadmap. Prepared by the Electric Power Research Institute, August, 2009
- [2] European technology platform –SmartGrids vision and strategy for Europe’s electricity networks of the future, European Comission 2006, EUR 22040, ISBN 92-79-01414-5
- [3] 陈伟根,潘昶,云玉新,等. 基于小波网络及油中溶解气体分析的电力变压器故障诊断方法. 中国电机工程学报, 2008,28(7):121~126.
- [4] 梁帅伟, 廖瑞金,杨丽君,等. 天然酯与矿物油纸绝缘的加速热老化特性研究. 中国电机工程学报, 2008,28(25):20~24.
- [5] 杨丽君,廖瑞金,孙会刚,等. 油纸绝缘热老化特性及生成物的对比分析. 中国电机工程学报, 2008,28(22):53~58.
- [6] Ju Tang, Qian Zhou, Ming Tang, et al. Study on mathematical model for VHF partial discharge of typical insulated defects in GIS. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007,14(1):30~38.
- [7] Zhongrong Xu, Ju Tang, Caixin Sun. Application of complex wavelet transform to suppress white-noise in GIS UHF PD signals. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007,22(3):1498~1504.
- [8] Xiaoxing Zhang, Jiangbo Ren, Ju Tang, et al. Kernel statistical uncorrelated optimum discriminant vectors algorithm for GIS PD recognition. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 206~213.
- [9] Jian Li, Caixin Sun. Partial discharge image recognition influenced by fractal image compression. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008,15(2):496~504.
- [10] 唐炬,陈娇,张晓星,等. 用于局部放电信号定位的多样本能量相关搜索提取时间差算法. 中国电机工程学报, 2009, 29(19):125~130.
- [11] 蒋兴良,温作铭,孙才新. 复合绝缘子表面水滴撞击特

性的数值模拟与伞裙结构分析. 中国电机工程学报, 2008,28(19):7~12.

[12]杨庆,司马文霞,孙才新,等. 覆冰绝缘子交直流闪络场路模型的研究. 中国电机工程学报, 2008,28(6):13~19.

[13]朱宽军,刘彬,刘超群,等. 特高压输电线路防舞动研究. 中国电机工程学报, 2008,28(34):12~20.

[14]张志劲,蒋兴良,孙才新,等. 染污绝缘子串直流污闪放电的电路模型. 中国电机工程学报, 2009,29(13):104~109.

[15]魏本刚,傅正财,袁海燕,等. 改进先导传播模型法500kV架空线路雷电绕击分析. 中国电机工程学报, 2008,28(25):25~29.

[16]郭宁明,覃剑. 输电线路雷击故障情况下的短路点定位方法. 电力系统自动化, 2009,39(10):74~77

[17]张恒旭,刘玉田,张鹏飞. 极端冰雪灾害下电网安全评估需求分析与框架设计. 中国电机工程学报, 2009,29(16):8~14.

[18]石岩,蒋兴良,苑吉河. 基于RBF网络的覆冰绝缘子闪络电压预测模型. 高电压技术, 2009,35(03):591~596.

[19]宿志一,范建斌,谷琛,等. 高压直流换流站污秽水平预测方法研究. 中国电机工程学报, 2007,27(13):1~5.

[20]毛颖科,关志成,王黎明,等. 基于BP人工神经网络

的绝缘子泄漏电流预测. 中国电机工程学报, 2007,27(27):7~12.

[21]袁兆祥,周洪伟. 500kV HGIS变电站雷电侵入波的计算分析. 高电压技术. 2007,33(6):71~79.

[22]何剑,程林,孙元章,等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型. 中国电机工程学报, 2009,29(27):39~46.

[23]廖瑞金,冯运,杨丽君,等. 油纸绝缘老化特征产物生成速率研究. 中国电机工程学报, 2008,28(10):142~147.

[24]宁辽逸,吴文传,张伯明,一种适用于运行风险评估的元件修复时间概率分布. 中国电机工程学报, 2009,29(16):15~20.

[25]梁帅伟,廖瑞金,杨丽君,等. 天然酯与矿物油纸绝缘的加速热老化特性研究. 中国电机工程学报, 2008,28(25):20~24.



作者简介:

孙才新, (1944—), 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事高电压工程(高电压与绝缘及故障诊断技术)方面的教学和科研工作。

简讯

中国电机工程学会在京举办茶话会 庆祝三·八国际妇女节

今年是“三·八”国际劳动妇女节100周年, 3月4日上午, 虽春寒料峭但这里却春风和煦, 2010年度“中国电机工程学会三·八节老同志茶话会”在京举行, 老科技工作者白凡主任, 来自学会科技人员之家的离退休女同志共30余人出席。茶话会由科技人员之家副主任毛文杰主持。

白凡主任在讲话中祝愿学会各位女同志节日快乐, 并鼓励大家特别是女同志, 继续保持积极乐观的生活态度, 健康向上的生活方式, 更多地为电

力科技事业的发展贡献力量。

学会综合部副主任周纛代表中国电机工程学会领导, 对参加活动的女同志致以节日问候和良好祝愿, 表示学会将一如既往地关心支持科技人员之家的活动, 为广大科技工作者做好服务。

田雨处长代表国家电网公司离退休工作部对女同胞们表示节日的祝福。茶话会期间, 与会老同志热情交流, 畅谈工作、生活, 并纷纷合影留念。

茶话会在温馨快乐的气氛中结束。🇨🇳