

光伏发电并网大电网面临的问题与对策

李碧君, 方勇杰, 杨卫东, 徐泰山

(国网电力科学研究院 南京 210003)

Problems and Countermeasures for Large Power Grids in Connection with Photovoltaic Power

LI Bi-jun, FANG Yong-jie, YANG Wei-dong, XU Tai-shan

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT It is one of the key for photovoltaic power generation systems large-scale application in industry to properly deal large grid connection with photovoltaic power to make the two parts safe and efficient operation. This paper presents special characteristics of PV and its interconnection with the large power system, and reviews the status of the grid-connected PV. This paper concludes that the large-scaled photovoltaic power generation and its interconnection with power grids might give rise to many problems in terms of the research and testing means for the large grid, understanding of the impact mechanism of the PV generation on large power grids, planning of the new distribution system, operation and control, monitoring and protection system and control equipment of the grid, technical standards and codes and etc. Corresponding countermeasures for these problems are proposed in the paper.

KEY WORDS: photovoltaic; large power system; wind power connected with grid; security and stability; distributed generation; micro-grid; renewable energy resources

摘要:妥善解决光伏发电系统接入大电网后2部分都能安全、高效运行是光伏发电技术大规模工业化应用的关键之一。分析了光伏发电系统及其并网的技术特点,简要阐述了光伏发电并网问题的研究现状。指出光伏发电大规模并网使大电网在研究与实验验证手段、对光伏发电系统影响大电网机理的认识、新型配电系统的规划、电网运行控制、电网监测保护与控制装备、技术标准与规范等方面面临新的问题,并提出了应对这些问题的策略。

关键词:光伏发电;大电网;风电并网;安全稳定;分布式发电;微网;可再生能源

0 引言

太阳能发电是传统发电的有益补充,鉴于其对环保与经济发展的重要性,各发达国家无不全力推动太阳能发电工作,目前中小规模的太阳能发电已形成了产业。太阳能发电有光伏发电和太阳能热发电2种方式,其中光伏发电具有维护简单、功率可大可小等突出优点,作为中、小型并网电源得到较广泛应用^[1-4]。随着太阳电池成本的下降和发电效率的不断提高,世界光伏产业发展迅猛,截止2007年底,世界太阳电池累计装机容量已达到12 300 MW^[5]。2008年全世界太阳电池总产量达6 850 MW,我国太阳电池总产量达1 780 MW,到2008年年底我国光伏系统的累计装机容量达到140 MW^[5]。

光伏发电系统可分为离网光伏发电系统和并网型光伏发电系统,并网光伏发电系统比离网型光伏发电系统投资减少25%^[6]。将光伏发电系统以微网的形式接入到大电网并网运行,与大电网互为支撑^[7],是提高光伏发电规模的重要技术出路,光伏发电系统并网运行也是今后技术发展的主要方向,通过并网能够扩张太阳能使用的范围和灵活性。在大量光伏发电设备亟待并网的今天,除了在经济政策和法规方面进一步完善外,在技术层面能否解决好光伏发电系统接入大电网后2部分都能安全高效运行这一重大问题,也是决定光伏发电技术能否大规模工业化应用的关键。

尽管很多国家对光伏发电等分布式发电供电技术展开研究,但除了在发电设备研发、制造和设备自身控制方面具有一些较成熟的技术外,涉及其并网对大电网的影响,以及并网运行后大电网在系统优化、协调和控制等诸多领域的研究大多刚刚起步。分布式发电系统并网后,对大电网的系统稳定性、电能质量和运行的经济性等方面都可能产生影响^[8]。有关分布式发电系统并网对大电网的影响及应对措施的研究,已取得一定研究成果,目前以风电并网问题研究居多^[9-12]。光伏发电系统属于分布式发电系统的一种,一般而言,光伏发电系统并网与其他分布式发电系统并网给大电网带来的问题可能相同,但与其他分布式电源相比较,光伏发电在时间周期和地理位置、与大电网并网接入的方式有区别、发电系统及控制系统特性等方面有其自身特点,因此,可以借鉴其他分布式电源并网方面的研究成果,但仍然有必要研究光伏发电系统并网后大电网可能面临的问题及对策。

1 光伏发电系统及并网的特点

1.1 光伏发电系统

在光生伏打效应的作用下,太阳能电池的两端产生电动势,将光能转换成电能。通常光伏系统由太阳能电池方阵、蓄电池、控制器、直流配电柜、逆变器和交流配电柜等设备组成,见图1。其中太阳能电池方阵和逆变器是光伏系统的基本要素。通过太阳能电池组件的串并联形成太阳能电池方阵,使得方阵电压达到系统输入电压的要求。太阳能通过光伏组件转化为直流电力,通过直流监测配电箱汇集至逆变器(有蓄电池组时,还经充放电控制器同时向蓄电池组充电),将直流电能转化为交流电力。

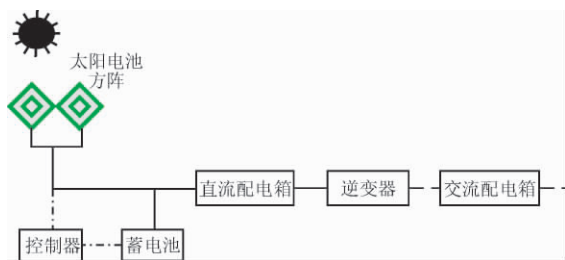


图1 光伏发电系统构成示意图

与现有的主要发电方式相比较,光伏发电系统的特点有:工作点变化较快,这是由于光伏发电系

统受光照、温度等外界环境因素的影响很大,输入侧的一次能源功率不能主动在技术范围内进行调控,只能被动跟踪当时光照条件下的最大功率点,争取实现发电系统的最大输出;光伏发电系统的输出为直流电,需要将直流电优质地逆变为工频交流才能带负荷。

1.2 光伏发电系统并网

光伏发电系统并网的基本必要条件是,逆变器输出之正弦波电流的频率和相位与电网电压的频率和相位相同。光伏发电系统并网有2种形式:集中式并网和分散式并网。

集中式并网:特点是所发电能被直接输送到大电网,由大电网统一调配向用户供电,与大电网之间的电力交换是单向的。逆变器后380 V三相交流电,接至升压变前380 V母线,升压后上网,升压变比0.4/10.5 kV,示意图如图2所示。适于大型光伏电站并网,通常离负荷点比较远,荒漠光伏电站采用这种方式并网。

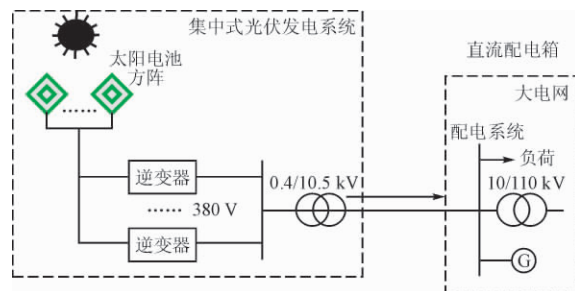


图2 光伏发电系统集中式并网

分散式并网:特点是所发的电能直接分配到用电负载上,多余或不足的电力通过联接大电网来调节,与大电网之间的电力交换可能是双向的,如图3所示。适于小规模光伏发电系统,通常城区光伏发电系统采用这种方式,特别是与建筑结合的光伏系统。

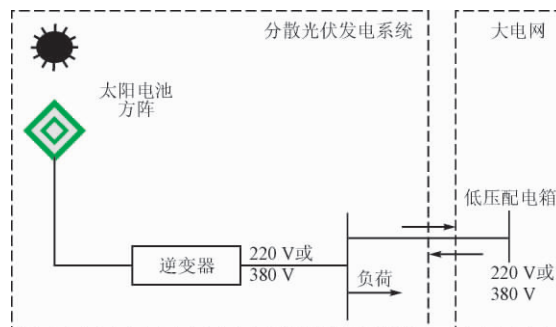


图3 光伏发电系统分散式并网

在微网中运行,通过中低压配电网接入互联特/超高压大电网,是光伏发电系统并网的重要特点。

2 光伏发电并网研究现状

光伏电池阵列输出的功率与环境因素密切相关,太阳能电池的伏-安特性呈非线性,需要MPPT控制器找到光伏阵列在确定日照和温度条件下输出最大功率时对应的工作电压,以适应环境的变化。光伏电池阵列输出的直流电力通过逆变器转换为交流电力,逆变器的工作点在输入侧要与光伏电池阵列输出电压匹配,在输出侧要满足交流并网的条件,逆变器会在交流侧注入高次谐波,要通过优化逆变器控制方式和滤波来降低谐波含量;光电能量转换过程中不产生也不消耗无功,在逆变过程需要消耗无功,这是与其他常规发电系统的重要区别之一,因此光伏发电系统需要配置无功补偿设备,对并网点的功率因数进行控制。大电网受到的扰动可能影响并网光伏发电系统正常运行,尤其是如果出现光伏发电系统孤岛运行时,必须迅速感知以调整逆变器的运行状态,避免光伏发电系统受到危害,且为后续再并网做好准备。目前光伏发电并网研究的问题主要是围绕这些特点展开,包括最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[13]、逆变器的拓扑结构和控制方式^[14-17]、滤波(降低谐波含量)、无功补偿(功率因数控制)、孤岛检测^[18]等方面及其相互之间的协调配合^[19-25],侧重于以逆变器为核心的并网光伏发电系统设备设计与应用研究。

在建模方面,文献[26]基于并网光伏发电系统的主要环节,建立了如图4的等值电路,并进一步提出了光伏阵列的功率模型、并网汇集点的注入功率模型和逆变器的功率平衡模型,对于分析研究并网光伏发电系统的运行方式及其向大电网传输功率的大小具有重要作用,文献[26]是极为罕见的从电网分析计算的角度研究光伏发电系统并网的文

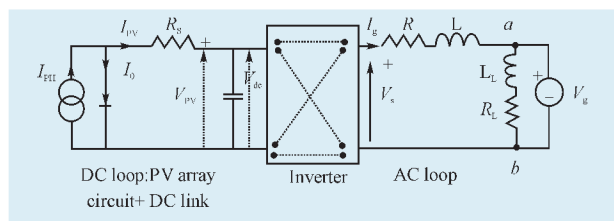


图4 光伏发电系统并网等值电路图^[21]

章。文献[27]建立了包含光伏阵列、具有最大功率跟踪功能的逆变器、变压器及控制系统的并网光伏电站整体模型,提出了并网光伏电站等值简化电路、光伏阵列至逆变器出口侧等效电路、逆变器出口侧至变压器部分的等效电路和变压器出口侧至并网点部分的等效电路,用实测数据进行了仿真验证。

在分析软件方面^[26],PV F-CHART是综合性的光伏发电系统设计与分析软件,其中的公共电网接口子系统与并网问题相关,PV-DesignPro是光伏发电系统运行的仿真软件,其中PV-DesignPro-G”版适于并网系统(grid-connected systems),PV*SOL是光伏发电系统的设计、规划和仿真软件,对与公共电网的关联也有所考虑,PVSYST面向规划人员、运行工程师和研究人员,能够进行完整光伏发电系统的研究、仿真和数据分析,包括与公共电网的互联,也是教辅工具。除了这些英语版的软件外,还有德语版的PV Professional和意大利语版的Tetti FV等分析软件。目前光伏发电系统的分析软件,能够根据地理位置和气象条件仿真一段时间内的太阳光照情况,可以用于进行光伏发电系统的规划,对于光伏发电系统自身的MPPT、逆变器和滤波器的运行控制和参数选取有比较周全的考虑,用于电网分析计算则还有很大的欠缺,尤其是难以用于并网后大电网的分析计算。

关于光伏发电系统并网问题已经开展的大量研究,目前主要是针对光伏发电系统自身,以逆变器及其相关协调配合为核心。而对光伏发电系统与电网的相互影响及协调配合,特别是大规模并网后大电网面临的问题及对策,相应的研究成果很少见。

3 大电网面临的问题

光伏发电功率输出受环境因素影响很大,在微网中运行,通过中低压配电网接入互联特/超高压大电网,大规模并网将给整个电网带来深刻的影响,大电网在研究与实验验证手段、对光伏发电系统影响大电网机理的认识、新型配电系统的规划、电网运行控制、电网监测保护与控制装备、技术标准与规范等方面面临新的问题。

1) 仿真分析研究与实验验证的技术装备。仿真是研究电网运行和安全稳定与控制的重要技术手

段,光伏发电系统及并网方式有其自身特点,发电系统的稳态特性和动态特性与传统发电模式有较大的区别,因此,传统的电力系统分析工具不能胜任开展光伏发电系统接入公共电网后大电网的理论研究、规划与设计、运行与控制分析研究工作的需要。鉴于光伏发电系统通过微网系统接入大电网的复杂性,为了能够真实地研究并网光伏发电系统对大电网安全稳定和电能质量可能带来的各种技术问题,有必要建立针对光伏发电系统特点的试验基地,克服传统的研究实验环境的不足。研究开发精良的仿真分析研究、实验与验证的技术装备,无论是对研究光伏发电系统与电网相互作用的机理,还是对研究在它们在各种扰动下的复杂动态行为,无论是对研究开发与检测其保护与控制装备,还是对研究其规划与设计 and 运行与控制问题,都是不可缺少的。

2) 光伏发电系统影响大电网运行特性的机理。光伏发电系统通过微网接入大电网,微网存在多种运行状态,当光伏发电系统以分散式并网运行时,功率可以双向流动;在大电网故障时,通过保护动作和解列控制,可使微网与大电网解列形成孤岛运行,独立向其所辖重要负荷供电;在大电网故障消除后,通过并网控制可再次将微网并入大电网,重新进入并网运行状态^[7]。光伏发电系统的特性与传统发电方式有很大区别,虽然并网光伏发电系统单个接入点上网功率小,但接入点多且分散,当光伏发电大规模接入大电网后,与大电网间的相互作用将十分复杂,对大电网的运行特性产生重要影响,且是常规发电系统并网没有的。深入认识光伏发电系统影响大电网运行特性的机理,揭示出与其直接相连的微网和大电网相互作用的本质,发展相关理论和方法,是使二者相得益彰的关键。

3) 新型配电系统的规划。当光伏发电系统以微网形式接入配电系统后,配电系统将由原来单一电能分配的角色转变为集电能收集、电能传输和电能分配于一体的新型电力交换系统^[7]。光伏发电系统可能给配网带来电能质量问题,如谐波污染、电压波动及闪变,需要在规划阶段就予以考虑。因此,对配电网的规划提出了新的要求。

合理规划与设计的光伏发电等新能源分布式供能系统能有效提高可再生能源利用的效率,提高电力系统运行的安全性、经济性和对重要负荷供电

的可靠性。反之,不仅不能充分发挥分布式供能系统的正面作用,还可能对配电系统的运行产生负面影响^[7]。微网设备建设和设备运行的不确定性问题将更加突出,必须在传统规划的思路与方法上有所创新。光伏发电等分布式发电的接入对配电网的供电经济性和母线电压、潮流、短路电流、网络供电可靠性等都会带来影响,由此也对规划设计提出了新的要求。

4) 电网运行控制。由于太阳能发电的不确定性,使大电网短期负荷预测准确性降低,增加了传统发电和运行计划的难度,断面交换功率的控制难度加大。光伏发电系统接入公共电网,使大电网中电源点增加了很多,电源点分散,单点规模小,显著增加了电源协调控制的困难,常规的无功调度及电压控制策略难以适应,将可能在电网调峰、安全备用、电压稳定和频率安全稳定等方面带来一定影响,增加了大电网运行控制的难度。因此,光伏发电大规模接入公共电网后,原有常规电源对大电网运行的调整与控制能力被削弱,给大电网安全稳定运行控制带来新问题。

光伏发电设备种类繁多、运行模式多样、可控程度不同,电源的协调控制问题非常复杂。随着太阳能发电规模的提高,逆变器可能产生的谐波也会使配电系统的谐波水平上升。光伏发电系统可能引起铁磁谐振。由此,配电系统的安全、优质运行面临新的挑战。

5) 电网监测、保护与控制装备。发电系统的运行工况是电网调度运行最为关注的信息,光伏发电系统通过中低压配网接入大电网,使大电网运行实时监测的范围需要有很大延伸;光伏发电作为新的发电模式,实时监测的信息类型与传统发电模式有所区别。因此,对电网监测设备有新的要求。

类型的多样化和电力电子装置的应用使得接入光伏发电设备的微网与常规配电系统或输电系统都有根本性的差异;同时,微网的并网运行和独立运行两种模式间常常需要切换,因而带来了一系列复杂的保护与控制问题,必须对传统的保护与控制方法进行较大调整才能满足要求。

6) 技术标准与规范。目前,由于包括光伏发电在内的太阳能发电在我国的发展仍处于起步阶段,很多技术尚处于发展中,有关其设计、与公共电网

接入的相关标准,都远未成熟且十分缺乏。特别是,目前的技术规范与标准主要是针对并网发电设备(系统),而对大电网为了大规模接入光伏发电应具备的技术条件没有规范与约束。为了使太阳能发电产业有序发展,充分发挥太阳能发电的优势,尽量减少其接入对公共电网造成的负面影响,应尽快开展健全太阳能发电接入公共电网的技术标准与规范的工作。

4 对策

随着并网光伏发电规模的不断增大,对大电网的影响也越来越明显,除了在经济政策和法规方面外,也需要在技术层面积极应对光伏发电并网给大电网带来的新问题。

4.1 构建光伏发电系统的研究实验与验证环境

1) 光伏发电系统的建模研究、仿真对比与验证环境。基于典型的实际光伏发电系统,研究分析光伏发电系统的特性,在电力系统分析软件中建立光伏发电系统及其控制系统的静态和动态模型,并与实际光伏发电系统及其控制器的静态特性和动态性进行比较,从而构建完善的光伏发电系统及其控制系统的模型,使电力系统仿真分析软件具备包含光伏发电系统的大电网分析计算的能力,为进行光伏发电系统与电网相互影响的测试与验证打下良好的技术基础。

2) 光伏发电系统对大电网安全稳定影响的仿真实验环境。在进行光伏发电系统建模研究的基础上,建立光伏发电系统并网的典型案例,包括典型光伏发电系统、光伏发电系统典型运行方式、典型并网方式、典型故障场景、典型控制措施等,然后对案例进行仿真计算,通过对这些典型案例的不断积累,建立光伏发电系统并网的典型案例数据库,从而为仿真分析研究光伏发电系统对大电网安全稳定影响提供良好的实验环境。

3) 光伏发电系统对大电网安全稳定影响的闭环实验环境。建立真实的光伏发电系统试验基地,在其中辅之以RTDS等实时仿真工具,并研究开发将光伏发电系统接入RTDS的各种接口工具,构成光伏发电系统对大电网安全稳定影响的闭环实验环境。设置光伏发电系统的典型运行方式、并网方式和典型故障场景,仿真大电网的动态特性,测试与验证光伏

发电系统及控制设备对大电网安全稳定性的影响。

4) 大电网扰动对光伏发电影响的实验环境。建立光伏发电系统与电力系统仿真分析软件的数据接口,在光伏发电系统的运行方式和并网方式的基础上,在大电网中设置典型扰动,观察与分析研究光伏发电系统的运行特性,从而为研究大电网扰动对光伏发电影响提供平台。

4.2 深入研究光伏发电系统及微网与大电网相互作用的机理

当大量光伏发电以微网形式接入大电网后,微网与大电网间的相互作用将十分复杂,对大电网的运行特性产生重要影响,而对于这种影响的分析则需要以全新方法为基础。配电系统的安全稳定问题完全是由于微网的存在而提出的,其分析方法可能与高压电力系统截然不同。研究目的是要揭示出微网与大电网相互作用的本质,发展相关理论和方法,为含微网配电系统的稳定分析与控制奠定理论基础^[7]。

4.3 研究与应用新型配电系统的规划理论与方法

在含分布式电源配电网规划理论与方法研究成果^[7,8,28]和微网研究成果的基础上,考虑光伏发电及并网的特点,研究新型配电系统的规划理论与方法。需要研究光伏发电电源的优化配置,包括选址和容量,研究光伏发电输出控制方式、接入位置和并网方式,研究其对电网谐波和电压波动与闪变的影响等。在规划中,优先考虑光伏发电等可再生能源作为电源的合理性,充分光伏发电对可靠性的影响,对采用传统的电网升级与分布式电源供电的多种电网扩充策略之间的优劣进行比较,从规划层面保证配电网经济性、安全性、环保性和电能质量的综合优化。

4.4 研究与开发含光伏发电系统的电网运行控制理论与技术

1) 经济运行理论与能量优化管理方法。研究光伏发电系统并网后的能量优化管理方法,有助于提高系统运行的经济性,为能源的高效利用创造条件。结合光伏发电的特点,研究微网运行的安全经济调度及优化控制的理论与方法,最大限度地利用可再生能源,协调其他形式能量的合理分配,降低配电系统中的配电变压器损耗和馈线损耗,保证整个系统运行的经济性。

研究光伏发电大规模并网后,对电网调峰和备

用配置的技术要求。

2) 含光伏发电系统的电网分析与运行控制技术。电力系统分析离不开潮流计算和动态仿真,建立恰当的模型是获得有效结果的保证。分析光伏电池等各种分布式电源的特性,建立相应的动态模型,并计及不同运行情况下的不确定性。随着光伏发电的广泛应用,光伏发电的大规模并网可能带来大系统电网功角、电压、频率稳定问题,研究典型光伏发电系统、光伏发电系统典型运行方式、典型并网方式、典型故障场景、典型控制条件、换流器的电压频率可控能力、接入功率对大系统的静态、暂态和动态稳定影响及其控制方法和控制策略,研究无功调度和电压控制的新策略。研究提高预测光伏发电功率准确性的方法,为在不确定性因素较多的情况下制定切实可行的发电和运行计划提供保障。

3) 分析光伏发电系统对配网运行的影响。研究光伏发电系统运行方式对配网潮流分布和运行控制的影响,研究配网的安全稳定问题和运行管理问题,研究逆变器的运行特性对电能质量的影响,研究光伏发电系统对供电可靠性的影响。

4) 大电网扰动对光伏发电系统影响的研究。大电网扰动可能引起光伏发电系统不能正常运行,反过来会加剧大电网受到的冲击。在光伏发电系统的型运行方式和并网方式的基础上,在大电网中设置典型扰动,观察与分析光伏发电系统的运行特性。研究当大电网内发生扰动导致逆变器的交流母线电压降低时,逆变器将无法完成正常换相的条件和判断方法。

4.5 研究开发支撑光伏发电接入公共电网运行的监测、保护与控制装备

1) 含光伏发电系统的配电系统的保护原理与技术。光伏发电系统通过微网的接入,彻底改变了配电系统故障的特征,使故障后电气量的变化变得十分复杂,传统的保护原理和故障检测方法将受到巨大影响,甚至无法满足要求,需要探讨新的保护方法和保护技术^[7]。

2) 孤岛检测及紧急控制与继电保护。并网运行的分布式电源在发生大电网故障等情况时,与大电网断开并继续向本地负荷供电、独立运行的情况称为孤岛运行。出于用电安全和用电质量的考虑,须迅速检测出孤岛,对分离系统部分和孤岛采取相应

的调控措施,至系统故障消除后再恢复并网运行^[25]。研究光伏发电系统孤岛检测方法,研究紧急状态下负荷切除和孤岛划分的优化选择技术,研究孤岛运行和联网运行的无缝切换控制技术。研究光伏发电对配电网中短路电流大小、流向及分布的影响,以及含光伏电源的配电网保护与控制技术,以保证故障的快速、可靠切除和及时智能地恢复供电。

3) 含光伏发电的配电系统电能质量分析与控制。光伏发电存在较大的不确定性,功率输出的波动,都可能给所接入系统的用户带来电能质量问题。逆变器可能产生的谐波也会使配电系统的谐波水平上升。光伏发电可能以单相电源的形式并网,也增加了配电系统的三相不平衡水平。因此需要研究含光伏发电的配电系统的电能质量相关的独特问题及其电能质量综合监控技术。

4) 配电系统的实时监视、控制和调节。原有配电系统的实时监视、控制和调度是由供电部门统一执行的,由于原配电网是一个无源的放射形电网,信息的采集、开关的操作、能源的调度等相应比较简单。光伏发电系统的接入使此过程趋于复杂化,电网运行需要监测的信息类型和范围增加,需要协调控制的对象增加。

5) 计量设备。光伏发电系统等分布式电源并入配电网以前,配电网基本呈放射状,且末端无电源,电能的流向基本是单一方向,分布式发电系统并入配电网后,个别配电网区域内的潮流流向则可能是双向的,因此需要将原有的电能计量模式由单向改为双向计量模式。

另外,由于光伏发电系统的发电成本仍然相对较高,如何在计量系统中合理地反映电价差别,也是个必需要研究的问题。

4.6 健全光伏发电接入公共电网的技术标准与规范

研究并网光伏发电系统的技术参数和控制特性及承受大电网扰动能力的技术要求与标准,研究光伏发电系统并网的规模、接入电压等级、无功配置和电能质量等方面的技术标准,研究大电网接纳光伏发电系统应具备的条件等技术标准与规范。健全光伏发电接入公共电网的技术标准与规范,将有利于引导与规范光伏发电等新能源分布式发电系统有序接入大电网,确保这些新型发电系统及其控制设备不会对大电网的安全稳定运行造成危害。

5 结语

节能与环保是推动光伏发电发展的强劲动力,随着光伏发电技术的成熟和发电成本的不断下降,除了在经济政策和法规方面外,在技术层面妥善解决光伏发电系统接入大电网后两部分都能安全、高效运行这一重大问题,成为决定光伏发电技术大规模工业化应用的关键。与传统发电方式相比较,光伏发电及其并网具有鲜明的特点,由此给大电网的安全经济运行、优化控制和电能质量保证等方面带来了新的问题,还缺乏相应的研究与实验验证手段,对光伏发电系统影响大电网的机理的认识还有待深入,需要完善含光伏发电等新能源的新型配电系统规划的理论与方法,目前的电网运行控制理论与技术还不能完全适应光伏发电大规模并网后的新要求,支撑光伏发电接入公共电网运行的监测、保护与控制、计量装备亟待开发,迫切需要健全技术标准与规范。本文倡议各界加大支持光伏发电大规模并网相关问题研究的力度,为主动探寻可能存在的问题并积极研究对策创造有利条件,从而引导与规范其有序发展,充分发挥可再生能源的优势,避免对大电网的安全稳定运行造成危害,实现大电网与光伏发电等分布式可再生能源发电的协调发展。

参考文献

- [1] 刘利成. 光伏太阳能在变电站直流系统的应用[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24 (4): 23-25.
- [2] 方廷, 韩郁, 张岚. 一种多逆变器太阳能光伏并网发电系统的组群控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 57-60.
- [3] 明廷臻, 刘伟, 程时杰. 一种新型的太阳能发电技术[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24 (4): 23-25.
- [4] 严陆光. 发展大规模非水能可再生能源 构建能源可持续发展体系[J]. 科技导报, 2008, 26 (13): 96-97.
- [5] 姜谦. 我国太阳能光伏产业现状分析及前景预测. [2009-08-10]. 中国投资咨询网. <http://www.ocn.com.cn/market/200908/taiyangneng101136.htm>.
- [6] 王长贵. 并网光伏发电系统综述(上)[J]. 太阳能, 2008(2): 14-17.
- [7] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4, 31.
- [8] 王建, 李兴源, 邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90-96.
- [9] 李锋, 陆一川. 大规模风力发电对电力系统的影响[J]. 中国电力, 2006, 39(11): 80-84.
- [10] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华, 等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 30(15): 10-14.
- [11] 韩民晓, 崔军立, 姚蜀军, 等. 大量风电引入电网时的频率控制特性[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 28-32.
- [12] 王成山, 孙玮, 王兴刚. 含大型风电场的电力系统最大输电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 17-21.
- [13] Il-Song Kim, Myung-Bok Kim, Myung-Joong Youn. New Maximum Power Point Tracker Using Sliding-mode Observer for Estimation of Solar Array Current in the Grid-Connected Photovoltaic System [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1027-1035.
- [14] Jeyraj Selvaraj, Nasrudin A, Rahim. Multilevel Inverter for Grid-Connected PV System Employing Digital PI Controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(1): 149-158.
- [15] Martina Calais, Johanna Myrzik, Ted Spooner, Vassilios G. Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems - an Overview [J]. 0-7803-7262-X/02/IEEE: 1995-2000.
- [16] Young Roc Kim¹, Byung Hun Ra¹, Sung Hwon Kim¹, et al. Development of 10 kW Grid-Connected Photovoltaic Inverter with High Frequency Transformer [C]// Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8-11, Seoul, Korea: 346-348.
- [17] Raymond M Hudson¹, Michael R Behnke¹, Rick Wed, et al. Design Considerations for Three-Phase Grid Connected Photovoltaic Inverters [J]. IEEE: 1396-1401.
- [18] 袁玲, 郝建勇, 张先飞. 光伏发电并网系统孤岛检测方法的分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 72-75.
- [19] 王飞, 余世杰, 苏建徽, 等. 太阳能光伏并网发电系统的研究 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 72-74, 91.
- [20] 刘树, 刘建政, 赵争鸣, 等. 太阳能发电并网系统的仿真分析[J]. 电力电子, 2003, 1(2): 24-28.
- [21] Wang B, Joe Chen, Ronald Li. A Grid Connected Photovoltaic System with Irradiation Injected Current Control [C]//The 7th International Conference on Power Electronics October 22-26, 2007 I EXCO, Daegu, Korea: 431-435.
- [22] Aslain Ovono Zue, Ambrish Chandra, Grid Connected Photovoltaic Interface with VAR Compensation and Active Filtering Functions [C]//Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES apos;06. International Conference on Volume, Issue, 12-15 Dec. 2006: 1-6.
- [23] Mekhilef S, Rabim N A. Implementation of Grid-Connected Photovoltaic System with Power Factor Control and Islanding Detection [C]//2004 35th Annual IEEE Power

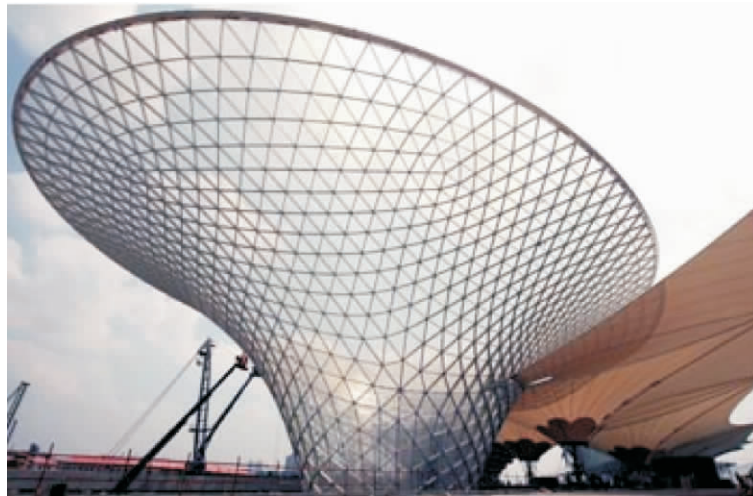
- Electronics Specialists Conference, Germany: Aachpn, 2004: 1409-1402.
- [24] Mekhilef S, Ahmed M E, Younis M A A. Performance of Grid Connected Photovoltaic Inverter with Maximum Power Point Tracker and Power Factor Control [C]// CCECE/CCGEI May 5-7 2008 Niagara Falls, Canada: 1129-1134.
- [25] Mateus F Schonardie, Denizar C Martins. Three-phase Grid-Connected Photovoltaic System with Active and Reactive Power Control Using $dq0$ Transformation [C]// Power Electronics Specialists Conference, 2008. Rhodes, 15-19 June 2008: 1202-1207.
- [26] Djarallah M, Azoui B. Grid Connected Interactive Photovoltaic Power Flow Analysis: a Technique for System Operation Comprehension and Sizing [C]// 41st International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2006) Newcastle, U.K. 69-73.
- [27] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等. 并网光伏电站动态建模及仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 83-87.
- [28] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.

收稿日期 2009-07-15。

作者简介：

李碧君(1966—)男, 博士, 研究员级高工, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(编辑 徐花荣)



上海世博会世博轴“阳光谷”。上海世博园集成了大跨度索膜结构、“阳光谷”自然采光、雨水收集与回用、江水源和地源热泵调控室温以及冰蓄冷空调、光伏发电与建筑一体化、透水地面、垃圾气力输送、半导体照明、垂直生态绿化幕墙、节能电梯等一大批创新科技。(新华社记者 任珑 摄)



神华集团投资建设的内蒙古锡林郭勒盟灰腾梁风电场一景。(新华社记者 张领 摄)