电气自动化技术在电力系统中的应用

张　虎

榆林市旅游投资集团有限公司　陕西　榆林　719000

摘　要：本文介绍了电气自动化技术的概念及其组成，对它在发电、输电、变电、配电以及调度运行中所起到的作用进行了详细论述，并对其所涉及的智能控制、数据通信与信息安全等问题作了充分讨论，并对其与电力系统融合发展前景进行了展望。研究发现电气自动化技术不断进步使电力系统由传统的以化石燃料为基础转变为清洁能源为主导并且更加高效、智能，它是建设新型电力系统的必要条件。但是由于现阶段高比例可再生能源接入以及电力市场化的迫切需要使得电气自动化技术还需在协调配合、安全性以及标准化等方面进行提升。

关键词：电气自动化；电力系统；智能控制；自动调度；继电保护

引言

电力系统是国家能源供应和社会发展的基础性设施，其安全可靠至关重要。随着近年来电力需求日益增加、大量可再生能源接入以及电力体制改革不断推进，系统规模不断扩大、结构越来越复杂。传统的依靠人的经验和方法进行管理已经不能满足瞬息万变的情况以及精细的要求。而在这种情况下，电气自动化以其准确感知能力、迅速做出决定以及自主行动的能力为解决电力系统所面临的问题提供了可能。它结合了自动控制理论、电力电子学、计算机科学、通信技术和电力系统知识，目的是对电力生产和输送、分配和使用的各个环节实施有效的监视、防护、控制和改进。它是整个电力系统的“大脑”，通过各种传感器监测情况，借助于通信设备传送信息，使用智能化的方法制定出命令然后通过相应的装置作用到电力系统上以保证电力系统的正常运行。

1 电气自动化技术体系概述

1.1 电气自动化的技术内涵与演进历程

电气自动化是以控制理论为基础，以计算机及微电子技术为核心，以电力系统为对象所涉及的信息获取、信息传递、信息处理以及信息执行全过程的技术。从发展过程看，电气自动化技术在电力系统中的应用是从局部自动化到整体自动化、从单项自动化到多项综合化的过程。以前的自动化主要是某一方面的自动化设备，比如自动励磁调节器、自动重合闸等；而在 20 世纪末期由于计算机与通信技术的发展使得分布式控制以及能量管理系统得到广泛的应用；而今随着人工智能、大数据、云技术等新技术的发展使电气自动化具备更高层次的智能化。

1.2 电气自动化技术的主要构成

电气自动化技术的体系结构可以分为三层来认识，在感知与执行层，有各种各样的传感器、变送器、智能电子设备以及执行机构，完成对运行参数的测量并执行控制命令；而在信息与通信层，则有各种通信协议、数据网络和信息交换平台等，保证信息的有效传递以及共享；而在决策与应用层，则有各种各样的控制算法、优化模型以及应用程序等，对系统的运行情况进行分析判断并且制定出最优的控制方案；这三层之间互相配合，互为支撑，构成一个整体就是整个电气自动化技术体系，而这正是由于其分层的设计理念使得它具有很好的灵活性和可扩充性以满足不同的电力系统的需要。

2 电气自动化在发电环节的应用

2.1 发电机组自动控制与调节

电气自动化技术在发电环节最基本应用即为发电机组自动控制与调整。同步发电机励磁自动控制系统通过对机端电压以及无功功率进行监测从而改变励磁电流大小使机端电压保持在一定范围之内并且在发生事故情况下给予强励来保证电网稳定运行[1]。同时，原动机调速器以及自动发电控制（AGC）相互协作，在系统频率偏差以及调度命令基础上自动改变发电机有功出力实现发供用电之间平衡。以上各种自动控制互相配合可使发电机组无论是在何种工况下都具有良好动态性能从而大大提高发电环节自动化程度。

2.2 电厂综合自动化与管理信息系统

在电厂方面，电气自动化技术应用已由单一机组发

展到全厂综合自动化。分散控制系统 (DCS) 及厂级监控信息系统 (SIS) 大量使用，在锅炉、汽轮机、发电机及其附属设备上实现统一监视、统一控制。运行人员可在集控室进行全厂启停、负荷分配、故障处理等工作。在此之上，厂级管理信息系统 (MIS) 又把自动化延伸到生产管理中，如设备管理、检修安排、用能情况等，形成了一套完整的运行管理和运营决策系统。而在新能源场站中，电气自动化也起着非常重要的作用。风力发电场的自动功率调节、光伏发电站的最大功率点跟踪、新能源场站的自动电压控制等都是电气自动化技术在发电中的具体表现。

3 电气自动化在输变电环节的应用

3.1 变电站综合自动化系统

输变电是电力系统从发电到用电之间的纽带，在这个过程中电气自动化技术得到了最广泛的应用，也是最成功的一个例子就是变电站综合自动化系统。它是将传统的变电站内的继电保护、测量控制以及远动通讯等都集中在一台计算机上完成，实现了对整个变电站的监控、管理和保护功能。采用面向对象的思想以及标准化的通讯规约使得站内的所有智能化的一次设备之间可以互相通信并协调工作。与传统的变电站相比，综合自动化大大减少了二次设备的数量，去除大量的控制电缆，使系统的安全性和快速性大大提高，并为无人值班变电站创造了条件。

3.2 智能一次设备与在线监测

伴随着电力电子技术和传感器技术的发展，电气自动化与一次设备的结合越来越紧密。智能断路器、智能变压器等智能一次设备将传统电气设备与智能化部件相结合，既具有普通电气设备的功能如通断、变换电压等，同时又具有监测自身健康状况、自我诊断以及通信等功能[2]。由于在线监测的应用，使得设备绝缘情况、局部放电、油中溶解气体含量、温升等重要参数能够得到及时、准确地获取并进行分析研究，从而实现由“定期检修”到“状态检修”的转变，大大减少了设备因检修而产生的停运时间或者避免设备发生故障后未能及时发现导致严重事故的发生，延长使用寿命，提高供电可靠性。

3.3 柔性交流输电与直流输电控制

在输电方面，以静止无功补偿器 (SVC)、静止同步补偿器 (STATCOM)、可控串联补偿 (TCSC) 等为代表柔性交流输电技术 (Flexiable Alternating Current Transmission Systems, FACTS)，利用大功率电力电子器件快速通断特点，可以方便地调节输电线路上电压、阻抗以及功角等参数，从而大大增强输电能力和系统稳定性。另外，基于电压源换流器的高压直流输电 (Voltage Source Converter-based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC) 由于具有独立控制有功和无功功率、不存在换相失败问题等优点，在大规模远距离输送电能、风电接入以及两个不同步电网之间连接等方面起到越来越重要作用，而这又离不开高效能自动控制系统支持。

4 电气自动化在配电与用电环节的应用

4.1 配电自动化系统

配电环节是电力系统最接近用户的部分，也是最薄弱的部分，配电自动化程度决定了供电可靠性和电能质量。配电自动化通过馈线终端单元（FTU）、站所终端单元（DTU）以及配变终端单元（TTU）等智能化装置对配电网进行监测并且可以遥控配网线路中的开关，一旦出现故障，配电自动化可以及时发现故障点，自动切除故障并且使未受影响区域正常送电，从而大大缩短停电时间，由原来的小时级降低到分钟级甚至是秒级。同时，配电自动化有利于分布式电源的接入和消纳。

4.2 智能用电与需求侧管理

在用电方面，电气化正在改变人们的用电习惯。而智能电表是用电自动化的基础工具，它能够自动采集用电信息并将其远距离发送到远方以及进行双向通讯，从而支持阶梯电价、分时电价等精细化电价制度的落地实施，在此基础上，需求侧管理系统（DSM）通过分析用户的用电情况让其主动参与到用电量管理中来以达到削峰填谷的目的，减少供电紧张的情况发生[3]。与此同时，由于电动汽车以及智能家居越来越普遍，用电端的自动化也日趋分散并与用户之间形成更多互动，负荷聚合以及虚拟电厂等新事物不断出现，给电网调节能力带来更大的帮助。

4.3 分布式能源接入的自动化管理

分布式电源（例如光伏、风电、燃气轮机等）大量接入电网给配电网带来双向潮流、电压波动等问题。电气自动化技术在分布式电源接入管理中起到重要作用主要是对分布式电源并网控制、功率调节以及孤岛检测等。安装具有通信能力和控制功能并网逆变器与协调控制器可使分布式电源与电网良好配合工作充分利用分布式电源环保优势同时也保证电网安全可靠运行。

5 电气自动化在电力调度与系统运行中的应用

5.1 能量管理系统与自动发电控制

电力调度是电力系统运行的重要组成部分，而其自动化程度又直接影响到电力系统安全性和经济性，现代能量管理系统（EMS）是在 SCADA 基础上发展起来的一种高级应用系统，它包含了状态估计、潮流计算、安全分析以及自动发电控制（AGC）等功能模块，在 EMS 上，调度员可以了解全网情况并做出合理判断和决策，AGC 通过对系统频率偏差和地区控制偏差进行处理来改变参与调频电厂的有功出力从而保证频率合格并且使联络线交换功率达到最优，这就是所谓的“采集-分析-决策-执行”的闭环控制系统，也是当今电力调度运行的基本手段。

5.2 广域测量与动态安全监控

广域测量系统（WAMS）利用同步相量测量技术可以实现对电力系统动态过程进行实时监测，从而为电力系统动态安全监视提供一种新方法。它可以每隔几毫秒甚至更短的时间周期从各个地点获得整个电网所有节点上的电压及电流相量信息，使得调度员可以直接观察到电网中功角的变化以及阻尼情况[4]。利用 WAMS 的数据进行动态安全分析、低频振荡在线检测以及广域阻尼控制等高级应用大大提高了对大电网动态特性的了解程度以及管理水平，有利于避免大范围停电事件的发生。

5.3 电力市场运营的自动化支持

电力市场化改革对电力系统运行提出新要求，而电气自动化技术起到重要支持作用。电力市场运营系统包括交易管理、结算管理、信息发布以及合同管理等功能子系统，实现电力交易的自动化及市场的公开、透明。自动化的市场运营提升了市场运作效率，减少了市场运作成本，也促进了市场竞争者之间的平等竞争。进一步说，随着电气自动化技术的发展进步，正在改变电力系统运行方式，使电力系统由原来的集中控制转变为源网荷储协调配合的新模式。

6 关键技术问题

第一是智能化程度仍需进一步提高，在暂态评估以及故障诊断等方面，虽然机器学习等方法有很大潜力，但是缺乏有效的解释能力和鲁棒性，需要把智能算法的优势与传统的控制理论结合起来，使它能够落地应用。第二是信息安全以及数据融合的重要性不容忽视。随着电力系统与信息化系统的高度融合，信息安全问题日益严重，必须建立多层次的安全防护以及具有弹性的系统来保证本质安全；另外还需要用大数据对大量的多源的数据进行挖掘，得到有用的信息为决策提供支持，从而实现智能化的发展目标。第三是需要进一步完善标准化工作并实现互操作性。目前由于各种各样的协议并存，互相之间不能很好地配合使用，虽然有一些像 IEC61850 这样的标准出现，但是仍然缺乏一个完整统一的标准体系，在这方面的进步还需要继续努力。标准化有利于降低成本并且提高灵活性，对于推广新的技术和产品有着重要的意义。

结束语

电气自动化技术已经深度融入电力系统的发电、输电、变电、配电、调度和用电等各个环节，成为支撑现代电力系统安全、稳定、经济运行不可或缺的技术力量。本文系统梳理了电气自动化技术的体系构成，全面分析了其在电力系统各环节的具体应用，探讨了智能控制、信息安全与标准化等关键技术问题。研究表明，电气自动化技术正在推动电力系统从传统的刚性运行模式向灵活、智能的方向深刻转变。面对高比例可再生能源接入、电力市场化改革和数字化转型的多重挑战，电气自动化技术需要在系统协同优化、安全防御能力和标准开放互联等方面持续创新，为构建新型电力系统提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 李立涅, 饶宏, 许树楷. 柔性直流输电技术在电力系统中的应用与发展 [J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):1-13.

[2] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 面向新型电力系统的智能调度技术综述 [J]. 电力系统自动化,2023,47(1):1-16.

[3] 董新洲, 汤涌, 卜广全, 等. 面向新型电力系统的继电保护与安全自动装置关键技术 [J]. 电力系统保护与控制,2022,50(8):1-12.

[4] 刘俊勇, 魏震波, 向月. 配电自动化技术的发展现状与趋势 [J]. 电网技术,2021,45(3):831-841.