

基金项目：国家电网公司科技项目（5222AS15000C），国家自然科学基金项目（61472200）

## 电力电子装置智能化研究综述

曹军威<sup>1</sup>，杨洁<sup>1</sup>，袁仲达<sup>1</sup>，吴扣林<sup>2</sup>，方太勋<sup>2</sup>，杨飞<sup>3</sup>

(1.清华大学信息技术研究院，北京市 100084；2.南京南瑞继保电气有限公司研究院，南京市 211102；3.国网辽宁省电力有限责任公司，沈阳市 110004)

**摘要：**智能化的电力电子装置是建设智能电网与能源互联网的重要基础，对电力电子装置的智能化研究具有重要的现实意义。为了推进电力电子装置智能化理论研究和实用化研制，对目前电力电子装置智能化研究现状进行了综述。该文按功能不同对电力电子装置进行了分类，针对不同类别，分析了电力电子装置智能化的主要技术如传感、通信、控制等方面的应用进展。在分析电力电子装置智能化智能监控、故障诊断、状态评估等研究方向的基础上，总结了电力电子装置智能化研究多方面的应用情况。最后对电力电子装置智能化发展趋势进行了展望，针对若干亟待解决的问题提出了研究建议。

**关键词：**能源互联网；智能电网；电力电子装置；智能化

### Review of Intelligent Power Electronic Device Research

CAO Junwei<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>1</sup>, YUAN Zhongda<sup>1</sup>, WU Koulin<sup>2</sup>, FANG Taixun<sup>2</sup>, YANG Fei<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211102, China; 3. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110004, China)

**ABSTRACT:** Intelligent power electronics device is the important foundation for smart grid and energy Internet. It is vitally important and has practical significance to carry out research on intelligent power electronics device. In order to promote the theoretical research and practical development of intelligent power electronics devices, in this paper, current progress of intelligent power electronics device is surveyed. Power electronics devices are classified according to their major functionalities. For each class, supporting techniques are discussed such as sensing, communication, automatic control and so on. Based on the analysis of research directions of intelligent monitoring, fault diagnosis and condition assessment, the application situation of intelligent power electronics devices is summarized. In the end, the upcoming trend of research is estimated, and suggestions on some urgent problems are provided.

**KEY WORDS:** energy internet; smart grid; power electronic device; intelligent

中图分类号：TM 1;TM 7

## 0 引言

随着智能电网与能源互联网的迅速发展，电力电子技术越来越得到普遍采用。先进的电力电子技术是建设智能电网与能源互联网的重要基础和手段，用于解决其中关键问题，如输电环节的高压直流输电和灵活交流输电、配电环节电能质量治理技术、储能技术和固态开关技术、以及新兴的能源路由技术等，所涉及到的电力电子装置种类繁多。

智能电网与能源互联网均是互动系统，均要求对其中变更做出迅速响应并保证系

统安全。因而在电力电子装置普遍采用的同时，对其智能化要求也提高了许多。需要将先进的计算技术、通信技术、传感技术、可视化技术等与电力电子装置有机结合，实现装置运行状态的感知、分析、预警、状态评估、信息分享等功能，增强智能电网与能源互联网的自适应能力与稳定性，提升装置自身的可靠性和利用率。电力电子装置智能化是实现智能电网与能源互联网的重要技术基础。

事实上，随着电力电子在能源电力系统中的广泛应用，电力电子装置的功能从以往

的单一化向未来的集成化方向发展,将发挥越来越重要的作用。如目前比较成熟的无功补偿、有源滤波等电能质量方面的装置主要在单点针对特定问题发挥作用。而随着未来能源互联网的发展,能量交换与路由装置的大量应用,电力电子装置的功能更加综合,对系统级智能化支撑的需求将越来越迫切。

目前,已有的电力电子装置的研制重点在于其基本功能的实现与性能提高,很少考虑其智能化和对上层支撑。而智能电网与能源互联网系统的智能化又很少与电力电子装置功能相结合,真正针对电力电子装置的

智能化研究较少,对这一问题的研究具有重要的现实意义。

为了推进电力电子装置智能化理论研究和实用化研制,本文从已有电力电子装置各类技术现状、电力电子装置智能化研究已使用的基础技术、装置智能化研究方向、智能化应用等四个方面对目前电力电子装置智能化研究与应用现状进行了综述与分析,并指出未来电力电子装置智能化研究发展方向与需要解决的问题。文章主要结构如图1所示。

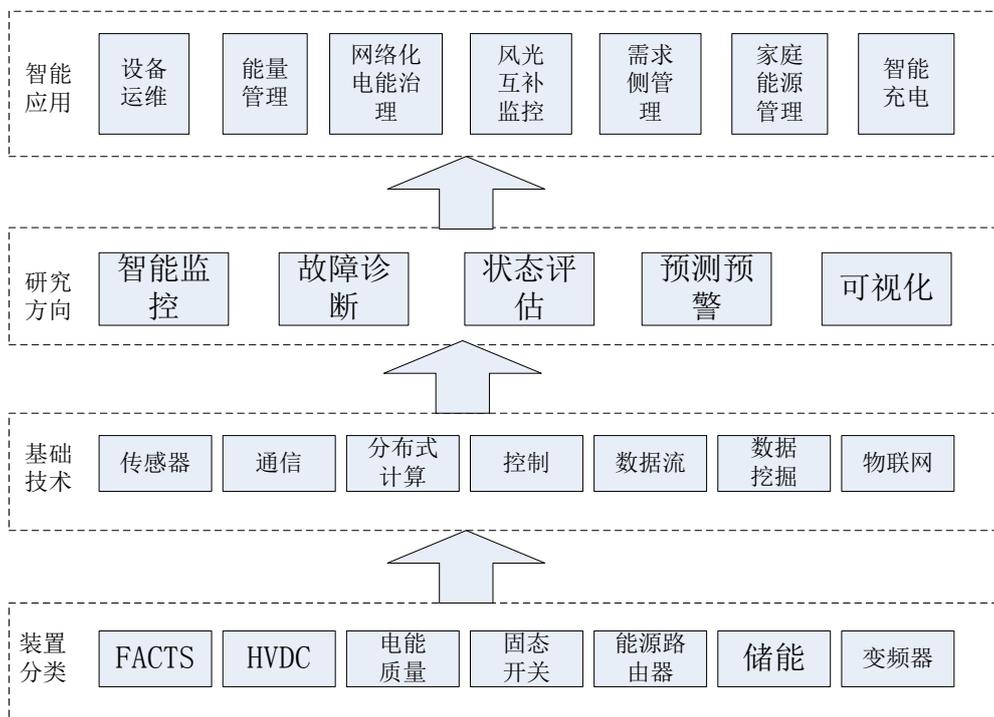


图1 本文结构图

Fig. 1 Structure diagram of this paper

## 1 电力电子装置功能分类

不同的电力电子装置在电网中的职责也不同,已有相对成熟的电力电子技术包括灵活交流输电 (flexible AC transmission system, FACTS) 技术、高压直流输电 (high-voltage direct current, HVDC) 技术,能够充分提高传输容量和稳定性。用户电力技术中的电能质量技术、开关技术、储能技术也有了一定的发展规模,另外还有近几年提出的能量交换与路由技术。

### 1.1 FACTS 技术

FACTS 技术用于提高交流输电系统快速灵活性和稳定性的技术。FACTS 技术包括静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、可控串补(thyristor controlled series compensator, TCSC)技术,这两种技术已经发展成熟。伴随电力电子元器件技术与功能的不断进步,近些年静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)、统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)等也得到了关注与发展<sup>[1]</sup>。其中 SVC

是目前基于 FACTS 技术应用最广泛的无功补偿装置,通过控制可控器件晶闸管的导通角来改变阻抗特性,从而实现对无功功率的调节<sup>[2]</sup>。而 STATCOM 采用门极可关断晶闸管(gate-turn-off Thyristor, GTO)、绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)等全控开关器件组成桥式电路通过电抗器或者直接并联在电网上,生成与系统电压具有一定相位差的信号并控制注入电力系统或直接控制其交流测电流,实现无功补偿的目的。SVC 与 STATCOM 因核心电力电子器件的不同而导致了装置应用领域与特点的不同。SVC 价格较低,适用于对谐波与平衡性要求高的线路,STATCOM 适用于对响应时间和运行效果、输电稳定性要求高的线路<sup>[3]</sup>。TCSC 通过可控硅的触发作用快速连续地控制输电线路的等值电抗,灵活调节系统潮流,增强系统阻尼,抑制低频振荡,提高电力系统的运行稳定性<sup>[4]</sup>。UPFC 则综合了以上各种 FACTS 设备的功能,同时具有无功补偿、调节电压等作用,并且可以实现各功能之间良好的切换<sup>[5]</sup>。

## 1.2 HVDC 技术

高压直流输电技术的电能损耗低于传统交流输电技术的损耗,能有效提高电能质量并确保电网安全稳定运行,在我国具有广阔的应用前景<sup>[6]</sup>。基于电压源换流器(voltage source converter, VSC)的电压源换流器型高压直流输电 VSC-HVDC 技术是其中代表技术之一,世界首个 VSC-HVDC 工程在 1997 年投运成功,自此之后此项技术展开了广泛应用<sup>[7]</sup>。常见的多电平换流器有中性点箝位型、级联型和模块化多电平型,但当输出电平较多时,以上类型均不占优势,有学者提出了一种新型的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的概念<sup>[8]</sup>。与传统模块化电平的 VSC-HVDC 相比,基于 MMC 的 HVDC(MMC-HVDC)系统在安全性和节能方面具有明显的优势。世界首个 MMC-HVDC 工程在 2010 年美国旧金山市北部投入运行,我国首个 MMC-HVDC 工程于 2011 年在上海投入运行,该技术仍需进一步研究与实践。另外还有轻型 HVDC 是 20 世纪 90 年代发

展起来的一种新型 HVDC 技术,它克服了传统 HVDC 受端必须是有源网络的缺陷,另外还有多端 HVDC 也将得到广泛应用。

特高压直流输电(ultra high-voltage direct current, UHVDC)是指电压等级超过 800kV 的 HVDC 技术。其拓扑结构主要有多端直流和公用接地级 2 种,其技术主要以两端线换相(line commutated converter, LCC)为主。UHVDC 技术的研究以 HVDC 技术为基础,2010 年,国家电网向家坝—上海±800 kV 等级复奉 UHVDC 输电工程投运,是国内首个 UHVDC 试点工程。2014 年,正负 800 千伏复奉、锦苏、宾金三大特高压直流首次同时满功率运行,为上海、江苏地区迎峰度夏提供了充足电能<sup>[9]</sup>。

## 1.3 电能质量技术

目前国际上广泛采用的提高电能质量的电力电子装置主要有有源电力滤波器(active power filter, APF),动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)以及统一电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)等。

DVR 主要是针对电压暂降等动态电能质量问题的补偿装置。DVR 串联于电网和负载之间,当电网电压出现瞬时下降时,装置在几个毫秒内迅速动作,输出电网侧同相位下降的电压值,与原本输出电压相叠加,保证负载侧电压不受影响,保证用户用电安全<sup>[10]</sup>。其关键技术在于如何提升补偿容量,提高装置动态响应时间。APF 为无功补偿抑制谐波的装置,当负载中谐波过大时,装置迅速动作,输出负载侧大小相同方向相反的电流,使其相互抵消,从而消除谐波影响,其结构可以分为串联型和并联型<sup>[11]</sup>。统一电能质量控制器 UPQC 近年来的新兴装置,将串联电压补偿原理和并联电流补偿原理结合在一个装置中,统一实现多重电能质量调节功能<sup>[12]</sup>。对 UPQC 的研究重点不仅在于补偿效果,还要有各种功能之间的迅速平滑切换<sup>[13]</sup>。

## 1.4 固态开关技术

电网中非线性负荷的增多以及对短路容量的需求不断增大,对其中开关设备的要

求也不断增加,传统开关设备如接触器、继电器等在开断容量方面很难有大幅度提升,因而固态开关这一概念被提出来,主要用于隔离故障、保证设备及人身安全<sup>[14]</sup>。固态开关种类主要有固态转换开关和固态断路器,两者不同之处在于:故障发生时,固态转换开关将负载切换至备用电源,而固态断路器则将负载断开。

### 1.5 能量路由器

随着能源互联网的发展,能量路由器这一概念被提出,便引起了研究者的广泛关注,能量路由器是能源互联网架构的核心部件,实现不同特征能源流融合是能量路由器必须具备的功能。借鉴能源互联网的理念、技术、方法和架构,能量路由器效仿信息网络路由器,以实现能量交换像信息分享一样便捷。能量路由器能实现分布式微网等能量自治单元间的能量分享,能量路由器集电子电子控制、储能缓存、数据中心智能处理、信息通信等功能于一体,是能源互联网信息能量融合特征的典型体现,是能源互联网的核心装备<sup>[15]</sup>。

国外对能量路由器的研究已进入应用阶段,而国内对能量路由器的研究刚处于起步阶段,其定义尚未明确,但对其功能的研究较多。文献[16]分析了能源路由起的关键技术,指出了该领域需要突破的研究方向。文献[17]提出多端口能量路由器,使其适用于家庭中,其优势在于能量密度高、转换快、电压等级多。文献[18]提出一种能量路由器的拓扑结构,运用多代理系统技术实现了能量路由器的自主控制和网络的协调控制。文献[19]利用能量路由器实现了线路中潮流的优化分布,并利用智能算法对其主公能和容量进行了优化配置,该线路大幅度上会受到风能影响。文献[20]同样是为家庭设计了一种能量路由器的拓扑结构,重点考虑了新能源中光能的运用。

### 1.6 储能技术

储能是建设智能电网与能源互联网的关键技术,在电力系统的各个环节都可以得到利用,可以起到保证电网稳定运行、改善电能质量、提高新能源利用率等重要作用,

具有重要的研究意义。按照存储具体方式可分为机械、电化学、电磁、和热力储能四大类型<sup>[21]</sup>。4 种类型中都包含不同的储能元件,单一的技术均存在着一定的缺陷,对不同性能的储能进行有机结合,发展复合储能技术,可发挥各种储能的优点。目前,蓄电池在储能设备中应用广泛,其能量密度大,但功率密度小,而超级电容功率密度非常高,并且充放电过程具有良好的可逆性,故而常将这2种储能元件通过一定的方式连接构成混和储能系统。充分发挥两者优点使系统获得更好的性能。复合储能在经济上有着比单一储能无法比拟的优势,已成为重要的发展方向<sup>[22]</sup>。储能在电力系统中可以发挥削峰填谷的作用,在接入电网时需要采用电力电子双向逆变的支持。

### 1.7 变频器

以上方面均为电力电子在电网中的应用装置,从电力系统的整体角度电力电子技术还有许多应用。变频器(variable-frequency drive, VFD)是应用变频技术与微电子技术,通过改变电机工作电源频率方式来控制交流电动机的电力控制设备。变频器有多种拓扑结构,分类方法也多种多样<sup>[23]</sup>。受功率器件耐压水平及技术成本的影响,高压变频器不像低压变频器具有成熟一致的拓扑结构,功率器件的耐压问题可用多个器件串联方式来解决,但会给驱动电路带来压力,另外也会导致受压不均等问题<sup>[24]</sup>。目前随着高压变频器等装置的广泛应用,在远程运维等领域也出现了智能化需求。

## 2 智能化基础技术

### 2.1 传感器技术

传感器是将非电信号转换为电信号的装置,是信息系统的源头。不同传感器在装置中起到的作用不同。电力电子装置中常用的有互感器、温度传感器、光纤传感器、无线传感器网络等<sup>[25]</sup>。互感器又称为仪用变压器,是电流互感器和电压互感器的统称,用于测量或保护系统。温度传感器是指能感受温度并转换成可用输出信号的传感器。近年来,光纤传感器因具有敏感度高、抗干扰能力强、结构简便、环境适应性强等优点而得

到了广泛应用。无线传感器网络是指布置大量低成本、低功耗的传感器节点，节点之间以无线通信方式连接，节点与网络完成感知、数据采集、传输、接受等工作。无线传感器网络是一种全新的信息获取和信息处理模式<sup>[26]</sup>。

在智能电网发展阶段，电网测量传感装置得到广泛应用，未来能源互联网对需求侧低成本的量测传感装置需求迫切。

## 2.2 通信技术

通信技术的发展为电力电子装置智能化建设奠定了基础，装置智能化所主要体现的方面都需要通信技术的支撑，使装置的运行更加高效、经济和安全。

常用的通信传输方式有电力线通信、光纤通信和无线通信等。各种通信方式并存，相互补充。电力线通信频谱资源有限，信道时变衰减大、噪声干扰严重。而光纤通信是利用光波作为载波，以光纤作为传输媒质的通信方式。光纤通信的传输频带宽、抗干扰性高、信号衰减小，已成为通信中主要传输方式。重要的光纤通信网络有光纤以太网、串行异步光纤网等。智能电网时代无线通信得到了广泛应用和飞速发展。电力电子通信领域用到的无线通信技术主要由微波通信和移动通信。无线通信具有成本低廉、建设周期短、适应性和扩展性好等特点，但存在通信环境和距离受限制等影响的缺点<sup>[27]</sup>。

随着 5G 等无线移动通信的发展，泛在的通信支撑将以更低的成本、更高的带宽和更好的性能唾手可得，将给大规模智能化系统的实现提供有力的支撑。

## 2.3 分布式计算

随着智能电网与能源互联网的发展，电力电子装置在线监测各种数据的数量呈几何级增长，海量数据需要进行采集、分析和存储，单台计算机的能力明显不足。分布式计算是指利用网络将多台计算机连接，组成虚拟超级计算机，完成单台计算机所无法解决的海量数据处理问题。典型的分布式计算技术有中间件技术、网格技术、移动 Agent 技术、P2P 技术和 Web Service 技术。通过引入分布式计算技术，可以增强电力电子装

置在线监测时计算分析能力，快速提供操作依据，增强系统可靠性。

## 2.4 控制

电力电子装置主电路拓扑和参数确定后，其性能主要由控制器决定。因此提高系统动静态性能及鲁棒性的控制算法研究是其关键技术。目前，很多控制技术都应用到电力电子控制器的设计中，大致可分为线性控制和非线性控制，线性控制理论把高压开关频率 PWM 调制下的电压源逆变器等效为线性比例环节进行控制器设计，非线性方法考虑了逆变器的非线性本质进行控制器的设计。线性控制方法主要有基于经典控制理论的前馈开环控制，反馈控制，复合控制，以及基于现代控制理论的最优控制、状态反馈控制等。非线性控制方法主要有 Lyapunov 直接法、反馈线性化法、鲁棒控制、滑模、模糊等智能控制方法<sup>[28-29]</sup>。

## 2.5 数据流技术

电力电子装置一次系统能量流分析方法构成了装置分析的基本框架<sup>[30]</sup>，装置潮流计算、稳定计算、短路计算均需要能量流。信息流对于二次系统非常重要，一般说来，电力电子装置二次系统是由继电保护、监控、故障录波、保护等多个子系统相互连接而成<sup>[31]</sup>。通过信息流，可以对系统进行稳态分析、动态分析及对系统的优化控制<sup>[32]</sup>。

流计算是指一种高效地利用并行和定位，使用流计算处理器，流计算编程语言等多种技术手段处理流数据的新型计算模式<sup>[33]</sup>。不同于大数据中的面向非实时数据的批处理计算框架（例如 Hadoop），流计算面向的数据规模庞大且实时持续不断地到达，数据次序独立且时效性强，同时流数据的价值会随着时间的流逝而降低，要求数据在产生后必须立即对其进行处理。面对这种“大数据流”，传统的分布式计算模型不再能满足需求，而批处理计算框架在实时性、容错性等方面都有所欠缺。能够实时处理流动数据并做出合适决策的流计算技术应具备、实时处理并丢弃、兼容静态数据与流数据、节点拓展、多线程应用等能力。目前，流计算的模型和框架成为研究的焦点，并已经形成了

一系列分布式流计算框架<sup>[34]</sup>。

## 2.6 数据挖掘

电力电子装置所产生数据具有格式多样化、种类繁多、来源广泛、时变、不完整、含噪声等特点，而近年来在国内外受到极大重视的数据挖掘技术就是从海量复杂数据中，提取隐含在其中但有效的信息的过程。数据挖掘在电力系统中的应用主要集中在以下几个方面：电力系统安全稳定分析、负荷预测模型构建、故障诊断、仿真模型性能评估、用户行为分析和异常监测等。根据目标模式的不同，数据挖掘任务主要可以分为：概念/类描述、频繁模式挖掘、分类与预测、聚类分析、离群点分析和演变分析等几类。国际权威的学术组织 the IEEE International Conference on Data Mining (ICDM) 2006 年 12 月评选出了数据挖掘领域的十大经典算法：C4.5, k-Means, SVM, Apriori, EM, PageRank, AdaBoost, kNN, Naive Bayes 和 CART。而随着机器学习、深度学习等人工智能算法的性能提升，以及大规模计算能力的提高，大数据分析和数据挖掘将成为智能化的核心。

## 2.7 物联网技术

电力电子装置运行状态、电气量、故障诊断等信息的网络化共享是实现智能电网与能源互联网中各装置之间的信息交互、调度优化的必然要求。物联网利用智能传感器、RFID 技术、无线传感网络、GPS 等技术实现物体之间的信息交互，作为“智能信息感知末梢”，将推动电力电子装置智能化的发展<sup>[35]</sup>。物联网技术已在电网初步应用，但尚未在电网设施运行安全监控等方面得到应用。文献[36]提出以物联网技术为基础的智能监控体系，为实现电力电子装置的智能监测与控制提供了理论指导和技术支撑。文献[37]首次提出电力物联网的概念，应用该技术可提高系统安全性，提高电力设备状态评估和智能诊断水平，并可满足可持续发展要求。

# 3 电力电子装置智能化研究方向

## 3.1 智能监控

变电站智能监控系统的发展要早于各

电力电子装置监控系统的发展，因而电力电子装置智能监控可以借鉴变电站，变电站监控系统的发展经历了三个阶段：早期传统的监控系统配备值班人员；第二个阶段是利用远动装置来采集各装置电压电流等实时数据；而第三个阶段是伴随通信技术和计算机技术等发展起来的，用分层分布式机构取代了传统的集中模式，将变电站监控系统。已有的研究中，针对电力电子装置的监控系统的研究较少，忽略了对其性能稳定性的考虑。电力电子装置智能化监控系统的设计要点主要包括以下几个方面：实时数据采集与处理、在线监视、运行控制、历史数据记录与查询、状态评估、与上级调度通信、曲线报表打印等功能。

文献[38]提出了基于分层分布式体系结构的 SVC 监控系统，将监控系统分为上中下三层，其中，上层由后台工作站组成，中层由就地工作站、监控单元和调节单元组成。底层由水冷系统监控等组成。文献[39]结合 500 kV 东莞变电站 200 Mvar 链式 STATCOM 工程应用实践，将其监控系统分为 5 个相对独立的单元：基于 CAN 总线的主控单元、可编程控制器 PLC 水冷控制单元、脉冲触发单元、二次继保单元和就地控制单元，监控系统分为 5 层：远程控制、就地控制、上层控制、中层控制和下层控制。这种分层控制模式可供同类大功率电力电子装置工程化应用借鉴。文献[40]在以 .NET 为体系架构的基础上，对锂电池储能监控系统进行了设计，该系统主要由信息采集系统和各级服务器监控系统 2 部分组成。该系统通过了实践验证，在一定程度上满足了用户的要求。文献[41]提出一种模块化、智能化的 MW 级钠硫电池储能监控系统，研究并设计其总体架构、逻辑架构和功能模块，以及安全防护方案，在此基础上开展软硬件平台设计。

## 3.2 故障诊断

电力电子装置中，故障诊断的目的是为了快速定位故障位置、缩短故障处理时间，以提高故障处理的效率。智能监控系统及数据库在电力电子装置中的应用为其故障诊断提供了数据基础，使自动故障分析有可能

实现。故障诊断面临的问题在于故障征兆与真实故障之间关系复杂,需反复探索,所涉及故障诊断方法众多。

对于电力电子装置的故障诊断,目前仅仅针对其中某一设备的方法,大型电力电子装置中均含有变压器,随着计算机、信息技术以及人工智能的发展,采用 DGA 与粗糙集技术<sup>[42]</sup>、人工神经网络<sup>[43]</sup>以及支持向量机(support vector machine, SVM)<sup>[44]</sup>等方法可以对变压器故障进行有效诊断,为电力变压器故障诊断技术的发展提供了新思路。文献[45]为了提高故障诊断的准确率,提出了一种多分类最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LSSVM)和改进粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)相结合的电力变压器故障诊断方法,可以准确、有效地对变压器进行故障诊断

电力电子装置中,高压断路器是其必不可少的设备,目前对其诊断方法主要有模糊理论<sup>[46]</sup>、专家系统<sup>[47]</sup>、BP 神经网络<sup>[48]</sup>、概率神经网络<sup>[49]</sup>等。

电力电子装置中对逆变电路的诊断方法主要分为电流检测方法和电压检测方法,增加电压或电流传感器的方法均不能检测出故障位置,其它电流检测方法如在对直流侧电流或分析其波形频谱、电流矢量轨迹诊断法、电流瞬时功率法、三相平均电流帕克变换法等,以上方法可以判断功率器件故障位置,但缺点在于诊断过程中需要采集电流并分析,时间长。

文献[50]针对电力有源滤波器(active power filter, APF)中 IGBT 容易损坏的特点,提出一种低成本的基于硬件电路的开路故障诊断与容错控制方案。文献[51]针对电池储能系统换流桥器件 IGBT 发生故障时,会导致电压电流的畸变,影响电能质量,严重时会对储能系统的安全运行造成威胁这一问,提出了一种开路故障诊断方法。

### 3.3 状态评估

电力电子装置的安全运行是十分重要的,所有设备均无故障才能保证整个系统的安全运行。设备有无故障与安全运行需要通过检修的方式,对于高压、大容量的电力电

子装置来说,其设备数量庞大造成检修工作量也非常大,以往所提倡的故障检修和定期检修限制了系统自动化程度的发展。采用科学的状态检修模式才可适应其发展要求,状态检修在降低系统运维成本、缩短停电时间、延长设备寿命等方面表现出极大的优势。状态检修第一步便是对装置进行状态评估。

电力电子装置中需要进行评估的设备普遍有变压器、电抗器、电流电压互感器、断路器、真空接触器、负荷开关、功率单元(IGBT)、空冷或水冷系统、线路等。为分析电力电子装置系统是否安全运行,则需要考虑每个设备的多种因素,绝大多数设备都可以从预防性试验、运行数据、历史数据等几个方面来综合分析自身运行安全状态。

变压器的状态评估工作已经引起了学者的广泛重视,文献[52]综合考虑了其模型中存在的 uncertainty 问题,建立了多层次的状态评估模型。文献[53]为提高这一类设备状态评估的准确性,对 220 kV 高压等级油浸式变压器进行了状态评估。文献[54]针对高压断路器提出了两级模糊评估模型。文献[55]讨论了电容器工作中的缺陷,并利用红外技术解决运行中的问题。文献[56]针对绝缘栅双极型晶体管的在线评估,提出一种监控压降变化的有效方法。以上均是对电力电子装置中的某一设备进行评估,对于整个装置来说,需要从宏观上对其安全运行状态进行整体评估。

评估指标体系是整个状态评估工作的重点内容,文献[57]与文献[58]分别将智能电网评估体系划分为不同的 2 个层次。文献[59]建立了变电站状态检修决策模型,根据所提出设备状态转移的马尔科夫过程求解设备状态概率。文献[60]建立了电力设备安全状态模糊综合评估模型,构建了较为完整的电力设备安全状态评估体系,并提出了 3 层架构的评估系统设计方案。

### 3.4 预测与预警

随着电力电子装置的规模越来越大,智能化程度越来越高、运行方式越来越复杂,装置的安全稳定控制、运行难度也比以往复杂琐碎,这就需要对装置设计具有自动监

控、自动预测与报警的平台。自动的预警报警系统可以帮助维修人员在第一时间发现故障。系统设计的目标是利用目前先进的软硬件和通信技术共同完成一套预警和报警系统。

对电力电子装置的预测与预警还没有开展大规模研究，目前的研究集中于电力系统和变电站。对电力电子装置预测与预警可以起到借鉴作用。文献[61]为合理应对电力系统大规模停电事故，研究了电网灾变预测预警系统的功能和架构，并进行了仿真验证。文献[62]指出，研究在线预警系统对于风电并网的电力系统的安全稳定具有重大意义，完成了预警系统的研制，并通过实际运行证明了该系统的功能。文献[63]给出了电力设备载流故障预测的各种实现方法。

### 3.5 可视化技术

随着电力电子装置不断往高压、大容量方向的发展，数据激增，运行更趋于极限。原有监控系统中的数据显示方式已不能满足实际要求。装置运行时，大量复杂的信息需要有效、直观的方式来将其各种信息以告警、图形、分析结果等方式提供给管理人员，方便管理人员采取有效措施，为装置监控、分析、安全等提供有力保证<sup>[64]</sup>。这就用到可视化技术，可视化技术是指利用计算机图形学和图像处理技术，将数据转换成图形或图像显示出来，并进行交互处理的理论、方法和技术。可视化技术主要关注的数据类型包括电器元件信息、电气量信息、预测预警信息等。

文献[65]对变压器通过可视化诊断后，可以迅速、准确地掌握变压器绝缘故障全面的故障信息，具有很强的实用价值。文献[66]对变电站继电保护故障，利用可视化技术，可以对内部工作及潜在问题进行分析。文献[67]对电网的实时监控可视化技术进行了研究分析，提出一套较为完整的解决方案，并在实际系统中实现了稳定利用。

## 4 电力电子装置智能化应用

### 4.1 设备维护运维

传统运维方案为保证装置状态良好，会对其中设备进行定检、全检等几种运维模

式，在设备数量大量增加、设备电压等级升高、新技术大量引入的情况下，有限时间内完成大量的运维检修任务会有巨大困难，也会带来许多问题如：维修不足、维修过剩、提前维修、维修滞后等。

智能电网与能源互联网的发展，对电力电子装置的管理、运行、维护、检修人员也提出了更高的要求，传统的运维模式已经不能适应智能电网与能源互联网运维需求。为适应智能电网与能源互联网的发展，智能化的运维模式需要得到快速应用。智能电力电子装置的设备自检和通信能力都比传统装置要强，可提供详细全面的状态信息，使得运维人员能够更准确的掌握装置运行情况。随着精细化管理要求的不断提升，文献[68]指出实现电力设备运维的可视化技术可以提高电网信息运维人员对信息设备的管控能力。文献[69]提出了智能运维系统的整体系统架构和功能部署方案，有效解决了目前智能变电站二次设备在实际运维过程中出现的一系列问题。文献[70]提出了一种综合考虑基于风险的检修和基于全寿命周期成本的电网主设备运行维护策略辅助决策方法，采用定量的方法评估设备运行风险，并在深圳供电局各变电站的变压器上得到了实际应用。以上方法均可作为电力电子装置智能化的运维提供了借鉴。

### 4.2 储能能量管理

储能能量管理分为两块研究内容：一是储能装置本身的能量管理，二是微电网监控和能量管理。目前适用于分布式发电系统及微电网中的储能方式主要为蓄电池储能，主要原因为其能量密度高、技术成熟，但其缺点为功率密度低，使用寿命短。超级电容与蓄电池具有较强的互补性，其功率密度大，工作寿命长，但是能量密度较低，不适用于大规模的电力储能。如果将二者结合起来，组成混合储能系统，充分发挥各自的优点，则可以扬长避短，即可以实现高功率密度的要求，也可以实现高能量密度的要求，同时可以减少蓄电池的额定容量并延长其寿命，这也成为目前储能研究的热点。

对储能系统能量管理国外研究起步较早，文献[71]对于混合储能系统的能量管理

进行了研究并提出了一种基于多项式控制方式来控制储能单元的充放电。文献[72]采用模糊控制的方式对混合储能系统的功率进行分配。文献[73]采用了滑模控制来进行蓄电池和超级电容之间的功率分配。文献[74]提出了基于多模式模糊控制的能量管理方法,将工作状态分为多种模式切换工作。文献[75]中将蓄电池作为主要储能元件,超级电容仅起到补充辅助作用。

国内学者在国外研究基础上,也取得了一定的成就,文献[76]提出了一种动态能量优化(dynamic energy optimization based on energy prediction, DEOEP)算法。文献[77]提出了基于平滑控制的混合储能系统的能量管理方法。文献[78]为满足对微电网进行监控和能量管理的需要,借鉴智能变电站分层体系结构,提出多层微电网监控与能量管理一体化系统。

#### 4.3 网络化电能质量治理

目前对电能质量问题的治理,技术上主要各种电能质量治理装置的介入,并建立电能质量监测体系,完善用户电能质量投诉流程管理等。这些手段仅仅取得了一定程度的应用,由于目前电力电子装置智能化的普及水平不足,中低压侧还主要依靠人工监测、定期巡视和用户投诉等途径来掌握电能质量情况,无法保证对电能质量存在问题掌控与处理的正确性与及时性<sup>[79]</sup>。

电能质量监测与治理是一个系统性工程,网络化的电能质量监测系统已经成为电能质量监测系统的主流趋势,而网络化的电能质量治理还未得到应用。已建设的各监测装置多处于孤立运行状态,缺乏统一平台对已有监测采集系统中电能质量相关数据统一分析,制定优化的协同处理策略,无法达到对区域配电网电能质量网络化监控与决策治理的目的。

互联网通信技术的发展为网络化的电能质量治理提供了可能。网络化的电能质量治理装置可由多个电力电子装置和其通信系统位于电网同一或不同线路上,各电力电子装置通过通信系统与后台计算中心相连,用于采集其所位于的电网线路的实时信息后通过互联网上传,并接收后台计算中心的

指令,输出补偿电流或电压进行补偿;后台计算中心用于计算补偿总量及每一电力电子装置的补偿分量,且将每一补偿分量均转换成具有一定下发顺序的指令,并待所有指令转换完毕后,将指令分别下发给相应补偿单元中的电力电子装置。这种方式能够实现多个电力电子装置动态协调输出,提高电能质量治理效果,并可采用相同的低容量电力电子装置,从而节约运行成本和维护成本。

#### 4.4 风光互补监控

可再生能源的合理开发与利用是当今世界的热点话题,目前绝大多数发达国家都将发电形式从火力发电向可再生能源发电转变。风光互补发电机由风力发电机、太阳能光伏板、风光互补控制器和逆变器等许多部分组成,在各部分之间都存在大量的数据传输,系统并网时必须保证其电能质量,为了便于工作人员能够实时监测和控制风光互补发电系统的运行状况,需要对其进行实时监测,并针对实时监测的数据对风光互补发电系统接入电网后对电网电能质量的影响加以评估,观察电能质量指标是否存在超出规定限值的情况<sup>[80]</sup>。文献[81]开发了风光互补智能控制系统。文献[82]考虑了风电场、光伏电站出力的随机性,并且设计两者出力的相关性,提出应用 Couple 理论建立风电场、光伏电站出力联合概率分布模型的方法。并对风光互补发电系统进行了可靠性评估。

#### 4.5 需求侧管理

电力需求侧管理(power demand side management, PDSM)是为合理利用资源,提高用电效率和减少环境污染而进行的用电管理活动。需求侧管理是智能电网与能源互联网重要的组成部分之一<sup>[83]</sup>。传统的PDSM还处于政策性管理阶段,智能化的电力电子装置中先进的监控、计算、通信和控制手段对于需求侧管理技术的推进起到了促进作用。与传统的PDSM相比,智能电网与能源互联网下的PDSM可具有更强的能力,高水平的监控、智能控制及通讯技术,可实现终端用户的及时响应,并且支持分布式能源自由接入。

## 4.6 家庭能源管理

居民侧用电量占全社会的 36.3%，但存在用电效率低、浪费严重的情况。为提高这一用电效率，避免环境资源浪费，国外在上世纪已开展了家庭能源管理系统（home energy management system, HEMS）的研究<sup>[84]</sup>。该项领域利用传感器与无线传感器网络，采集与传输室内温湿度、空气质量、人员活动数量和用电设备等信息，将数据综合处理后，对用电设备进行控制，满足用户舒适度的同时实现节能减排。

家庭能源管理系统是智能电网与能源互联网在居民侧的延伸，在这样的大环境下，家庭能源管理也有了新的需求，如考虑大量用户协同工作、能量流的双向流动、支持需求响应在居民侧的实施、支持新能源接入电网等。对电力电子装置智能化的研究有助于家庭能源管理系统的健康发展。

## 4.7 智能充电系统

如何高效、快速、无损地对蓄电池进行科学充电，一直是蓄电池界关心的问题。充电技术从传统的恒流充电、恒压充电、恒压限流充电，发展到了现在的智能充电。目前国内对大容量智能充电技术的研究还处于初始阶段，电动汽车智能充电桩不仅能够解决电动汽车需要随时随地充电的问题，还能够对其电池进行维护，并且具有人性化的人机交互界面和完善的通讯能力。文献[85]将电力电子技术、智能监控技术、物联网以及通信中 CAN 总线技术应用到电动汽车智能充电桩的设计与研究中，保证了电动汽车的续航能力与运行安全。文献[86]在风光互补发电的基础上，通过总线与监控等技术实现了风光互补发电向电动汽车充电的智能控制。

## 5 电力电子智能化研究发展方向

已有的电力电子装置的研制重点在于其基本功能的实现与性能提高，很少考虑其智能化和对上层支撑。智能电网与能源互联网系统大环境对电力电子装置的智能化提出了高要求，对这一问题的研究具有重要的现实意义。而电力电子装置本身一般已经有相应的装置级控制系统、上位机监控系统甚

至互联网数据接入系统，这些都为电力电子装置的智能化研究提供了基础。未来电力电子智能化研究可以考虑以下方向。

(1) 大多智能化的技术或手段，已在变电站或电力系统中得以实现，对于电力电子装置智能化的是一个很好的借鉴：智能传感装置工作中容易受到电磁干扰甚至损坏，提高此类装置的抗干扰能力及精度是一项重要工作；智能化技术的深度使用，必须要有相应的管理制度与评估标准；智能监控系统应根据装置特性，多考虑分层分布式的体系结构；对智能装置的能量流与信息流分别进行分析，以保证装置稳定与运行优化；应用最新的大数据存储、分析和深度学习方法，结合电力电子装置的特点，有助于从数据分析层面解决其所面临的问题，从海量数据中提炼更多有价值的信息，但在实时性、数据一致性和安全性等方面仍面临挑战。

(2) 已有的电力电子装置侧重于对其拓扑结构的研究，对其性能的控制则多数还停留在理论阶段，已在实际装置中应用的控制方法仍是以传统方法居多，研究先进的控制算法，有利于充分发挥装置的性能，在保证装置安全稳定的前提下，提高电能质量和经济性能。电力电子装置是庞大的信息数据系统，具有很强的非线性与不确定性，考虑其鲁棒性控制与多种运行方式如何并存与协调是关键技术问题。

(3) 已有的故障诊断与状态评估方法，仅限于电力电子装置中某一单一设备如变压器、断路器等，没有考虑各器件之间的联系，缺乏所有设备系统地评估与诊断方法，电力电子装置智能化研究中可以考虑健全整个装置的故障诊断与状态评估体系。对于超大容量、高压的电力电子装置来说，因其组成复杂，状态评估时面临诸多困难和挑战，不仅要考虑装置性能变化，还要考虑到运行环境的变化，每个装置构成特点迥异，评价标准无法统一，需要监测的信息量也非常庞大，正确、有效地评估其安全状态是状态检修成功的关键，对系统运行的安全性与稳定性起着至关重要的作用。同时评估指标的选取应遵守状态评估科学性、全面性等原则，可考虑对装置进行分级评估，避免资源

浪费。

(4) 发展网络化智能应用于智能电网和能源互联网,如网络化的电能质量治理,是电能质量治理技术中电力电子装置智能化的重要发展方向。首先要建立完善的电能质量评估方法与等级划分体系,并基于供用电接口的经济性分析,分别建立内部技术等级评估体系与用户经济性评估体系,建立与健全相关政策、法规,实现智能电网与能源互联网的“优质经济”运行。

(5) 通过物联网技术,可实现电力电子装置信息安全共享,提高预测预警水平,尤其是在未来能源互联网延伸到需求侧,实现源网荷协同等场景。其中,电力电子装置信息模型、网络架构、感知体系、通讯模型与接口规范、网络与信息安全、设备间的信息共享与交互策略等问题都是需要深入研究。

## 6 参考文献

[1]张文亮,汤广福,查鲲鹏,等.先进电力电子技术  
在智能电网中的应用[J].中国电机工程学报,  
2010,30(4):1-7.  
ZHANG Wenliang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng,  
et al. Application of advanced power electronics in  
smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4):  
1-7.  
[2]金立军,安世超,廖黎明,等.国内外无功补偿  
研发现状与发展趋势[J].高压电器,2008,44(5):  
463-465.  
JIN Lijun, AN Shichao, LIAO Liming, et al. Present  
simulation and development of reactive power  
compensation both at home and abroad[J]. High  
Voltage Application, 2008, 44(5): 463-465.  
[3]周建丰,顾亚琴,韦寿祺.SVC与STATCOM的  
综合比较分析[J].电力自动化设备,2007,27(12):  
57-60.  
ZHOU Jianfeng, GU Yaqin, WEI Shouqi. Improved  
FMEA method for reliability evaluation of  
mid-voltage distribution system based on divide  
feeder equivalence[J]. Electric Power Automation  
Equipement, 2007, 27(12): 57-60.  
[4]张健,冀瑞芳,李国庆.TCSC优化配置提高可  
用输电能力的研究[J].电力系统保护与控制,2012,  
40(1):23-28.  
ZHANG Jian, JIN Ruifang, LI Guoqing. Study of  
enhancement of available transfer capability using  
TCSC optimal allocation[J]. Power System Protection  
and Control, 2012,40(1):23-28.  
[5]王建,吴捷.统一潮流控制器的建模与控制研究  
综述[J].电力自动化设备,2000,20(6):41-45.

WANG Jian, WU Jie. Overview of UPFC modeling  
and control[J]. Electric Power Automation Equipment,  
2000, 20(6):41-45.

[6]赵国梁,吴涛.HVDC技术的发展应用情况综述  
[J].华北电力技术,2006,8:28-34.

ZHAO Guoliang, WU Tao. Summarization for  
development and application status of HVDC  
technology[J]. North China Electric Power,  
2006,8:28-34.

[7]FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G,  
DEMETRIADES G D. VSC based HVDC power  
transmission systems: an overview[J]. IEEE  
Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3):  
592-602.

[8]丁冠军,汤广福,丁明,等.新型多电平电压源  
换流器模块的拓扑机制与调制策略[J].中国电机工  
程学报,2009,29(36):1-8.

DING Guanjun, TANG Guangfu, DING Ming, et al.  
Topology mechanism and modulation scheme of a  
new multilevel voltage source converter modular[J].  
Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 1-8.

[9]郑晓冬,郇能灵,杨光亮,等.特高压直流输电  
系统的建模与仿真[J].电力自动化设备,2012,32:  
10-15.

ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, YANG Guangling,  
et al. Modeling and simulation of UHVDC system[J].  
Electric Power Automation Equipment, 2012, 32:  
10-15.

[10]杨潮,韩英铎,黄瀚,等.动态电压调节器串  
联补偿电压研究[J].电力自动化设备,2001,21(5):  
1-8.

YANG Chao, HAN Yingduo, HUANG Han, et al.  
Study on series compensating voltage in DVR[J].  
Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(5):  
1-8.

[11]侯桂兵,涂春鸣,罗安,等.微电网中APF接  
入位置与容量优化配置方案[J].电力自动化设备,  
2012,32(5):29-34.

HOU Guibing, TU Chunming, LUO An, et al.  
Optimal configuration of APF in microgrid[J].  
Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):  
29-34.

[12]冯兴田,张丽霞,康忠健.基于超级电容器储  
能的UPQC工作条件及控制策略[J].电力自动化  
设备,2014,34(4):84-89.

FENG Xingtian, ZHANG Lixia, KANG Zhongjian.  
Working conditions and control strategy of UPQC  
based on supercapacitor energy storage[J]. Electric  
Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 84-89.

[13]吴峰,郑建勇,梅军.多换流器式统一电能质  
量控制器的多目标控制策略[J].电力自动化设备,  
2012,32(10):88-93.

WU Feng, ZHENG Jianyong, MEI Jun.

- Multi-objective control strategy of multi-converter unified power quality controller[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 88-93.
- [14]POKRYVAILO A, WOLF M, YANKELEVIEH Y. Investigation of operational regimes of a high-power pulsed corona source with an all-solid state pulser[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(4): 846-857.
- [15]曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 1-10.
- CAO Junwei, YANG Mingbo, ZHANG Dehua, et al. Energy internet: an infrastructure for cyber-energy integration [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 1-10.
- [16]曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学, 2014, 44(6): 714-727.
- CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy internet and energy routers[J]. Science China, 2014, 44(6): 714-727.
- [17]刘显苗, 郑泽东, 李永东. 采用电力电子变压器的多端口能源路由器电气传动[J]. 电气传动, 2016, 46(4): 80-83.
- LIU Xianzhuo, ZHEGN Zedong, LI Yongdong. Multi-port energy router with power electronic transformer[J]. Electric Drive, 2016, 46(4): 80-83.
- [18]NGUYEN P H, KLING W L, RIBEIRO P F. Smart power router: A flexible agent-based converter interface in active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 487-495.
- [19]DENG Y, VENAYAGAMOORTHY G K, HARLEY R G. Optimal allocation of power routers in a STATCOM-installed electric grid with high penetration of wind energy [C]//Power Systems Conference (PSC). IEEE: Clemson, 2015: 1-6.
- [20]ZHANG Y, UMUHOZA J, LIU Y, et al. Optimized control of isolated residential power router for photovoltaic applications[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE: Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2014: 53-59.
- [21]修晓青, 李建林, 惠东. 用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J]. 电力建设, 2013, 34(2): 35-39.
- XIU Xiaoqing, LI Jianlin, HUI Dong. Capacity configuration and economic evaluation of energy storage system for grid peak load shifting[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(2): 35-39.
- [22]张峰, 董晓明, 梁军, 等. 考虑目标分解及其互补平抑的风电场负荷储能容量优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 38(7): 9-15.
- ZHANG Feng, DONG Xiaoming, LIANG Jun, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system based on target decomposition and complementary fluctuations smoothing[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 38(7): 9-15.
- [23]华明, 胡海兵, 邢岩, 等. 一种变频器并联运行的分布式控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(24): 48-53.
- HUA Ming, HU Haibing, XING Yan, et al. Distributed control for AC-motor-drive-inverters in parallel operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(24): 48-53.
- [24]徐甫荣. 中高压变频器主电路拓扑结构的分析比较[J]. 电气传动自动化, 2003, 25(4): 5-12.
- XU Purong. Analysis and comparison on the main circuit topology of medium-voltage inverter[J]. Electric Drive Automation, 2003, 25(4): 5-12.
- [25]司海飞, 杨忠, 王珺. 无线传感器网络研究现状与应用[J]. 机电工程, 2011, 28(1): 16-21.
- SI Haifei, YANG Zhong, Wang Jun. Review on research status and application of wireless sensor networks[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2011, 28(1): 16-21.
- [26]王翔. 无线通信技术发展分析[J]. 通信技术, 2007, 40 (6): 60-62.
- WANG Xiang. Analysis on the development trend of wireless communication technology[J]. Communications Technology, 2007, 40 (6): 60-62.
- [27]苏斌. 智能电网时代电力信息通信技术的应用和研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- SU Bin. Research and application on information and communication technology of the smart grid ear[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [28]王晶, 徐爱亲, 翁国庆, 等. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 145-151.
- WANG Jing, XU Aiqin, WENG Guoqing, et al. A survey on control strategy of DVR[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 145-151.
- [29]李春华, 黄伟雄, 袁志昌, 等. 南方电网±200Mvar 链式 STATCOM 系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 116-121.
- LI Chunhua, HUANG Weixiong, YUAN Zhichang, et al. Systematic control strategies for ±200Mvar cascaded STATCOM in China southern power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 116-121.
- [30]何磊, 郝晓光. 数字化变电站通信网络的性能测试技术[J]. 电力系统保护与控制, 2010, (10): 75-78.
- HE Lei, HAO Xiaoguang. Acceptance test technology of communication network in digitalized substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, (10): 75-78.

- [31]张小建, 吴军民. 智能变电站网络交换机信息模型及映射实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 134-139.
- ZHANG Xiaojian, WU Junmin. Information model and mapping implementation of Ethernet switches in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 134-139.
- [32]付国新, 戴超金. 智能变电站网络分析与故障录波一体化设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 163-167.
- FU Guoxin, DAI Chaojin. Design and implementation of digital battery simulator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 163-167.
- [33] KUO K, RABBAH R. A productive programming environment for stream computing[J]. Computer Science and Artificial intelligence Laboratory, 2005, 6(10): 198-201.
- [34]王钦, 蒋怀光, 文福拴, 等. 智能电网中大数据的概念、技术与挑战[J]. 电力建设, 2016, 37(12): 1-10.
- WANG Qin, JIANG Huaiguang, WEN Fushuan, et al. Concept, technology and challenges of big data in smart grid[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(12): 1-10.
- [35]郭创新, 高振兴, 张金江, 等. 基于物联网技术的输变电设备状态监测与检修资产管理[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(4): 36-41.
- GUO Chuangxin, GAO Zhenxing, ZHANG Jinjiang, et al. IOT based transmission and transformation equipment monitoring and maintenance assets management[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(4): 36-41.
- [36]黄小庆, 张军永, 朱玉生, 等. 基于物联网的输变电设备监控体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 137-141.
- HUANG Xiaoqing, ZHANG Junyong, ZHU Yusheng, et al. Research on monitoring system for power transmission and transformation equipments based on IoT[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 137-141.
- [37]李勋, 龚庆武, 乔卉. 物联网在电力系统的应用展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 232-236.
- LI Xun, GONG Qingwu, QIAO Hui. The application of IOT in power systems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 232-236.
- [38]史英. SVC 监控系统的研究及其应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- SHI Ying. Research and application on SVC monitoring system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [39]刘洋. 大容量链式 STATCOM 监控系统的设计与应用[J]. 广西电力, 2016, 39(1): 49-53.
- LIU Yang. Design and application of monitoring system for large capacity chain type STATCOM[J]. Guangxi Electric Power, 2016, 39(1): 49-53.
- [40]鲍慧, 乔立贤. 基于 CAN 总线的锂电池储能监控系统设计与实现[J]. 电力系统通信, 2012, 33(237): 40-43.
- BAO Hui, QIAO Lixian. Design and implementation of lithium battery energy storage monitoring system based on CAN bus[J]. Telecommunication for Electric Power System, 2012, 33(237): 40-43.
- [41] 陈光, 刘娟, 邹丹平, 等. MW 级钠硫电池储能监控系统设计与开发[J]. 电气应用, 2015 (S2): 760-764.
- CHEN Guang, LIU Juan, ZOU Danping, et al. Design and development of energy storage monitoring system for MW sodium sulfur battery [J]. Grid Technology, 2015 (S2): 760-764.
- [42]王永强, 律方成, 李和明. 基于粗糙集理论和贝叶斯网络的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 137-141.
- WANG Yongqiang, LYU Fangcheng, LI Heming. Synthetic fault diagnosis method of power transformer based on rough set theory and Bayesian network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 137-141.
- [43] MENG K, DONG Z Y, WANG D H, et al. A self-adaptive RBF neural network classifier for transformer fault analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1350-1360.
- [44] FEI S W, SUN Y. Forecasting dissolved gases content in power transformer oil based on support vector machine with genetic algorithm[J]. Electrical Power Systems Research, 2008, 78(3): 507-514.
- [45]郑含博, 王伟, 李晓纲, 等. 基于多分类最小二乘支持向量机和改进粒子群优化算法的电力变压器故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3424-3429.
- ZHENG Hanbo, WANG Wei, LI Xiaogang, et al. Fault diagnosis method of power transformers using multi-class LS-SVM and improved PSO[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3424-3429.
- [46]黄凌洁, 王玮, 吴振升, 等. 基于模糊理论的高压断路器故障诊断模型的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 246-249.
- HUANG Lingjie, WANG Wei, WU Zhensheng, et al. Diagnosis model of HV SF<sub>6</sub> circuit breaker based on fuzzy theory[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 246-249.
- [47]黄建, 胡晓光, 巩玉楠, 等. 高压断路器机械故障诊断专家系统设计[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(10): 43-49.
- HUANG Jian, HU Xiaoguang, GONG Yunan, et al. Machinery fault diagnosis expert system for high voltage circuit breaker[J]. Electric Machines and

---

Control, 2011, 15(10): 43-49.

[48] QI Bensheng. Research on fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on the improved BP neural network[C]//2010 2nd International Conference on Information Science and Engineering(ICISE). IEEE, 2010: 1460-1463.

[49] 杨凌霄, 朱亚丽. 基于概率神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 62-67.

YANG Lingxiao, ZHU Yali. High voltage circuit breaker fault diagnosis of probabilistic neural network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 62-67.

[50] 董伟杰, 白晓民, 朱宁辉, 等. 电力有源滤波器故障诊断与容错控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 65-73.

DONG Weijie, BAI Xiaomin, ZHU Ninghui, et al. Research on fault diagnosis and fault tolerant control of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 65-73.

[51] 钱德周, 徐习东. 电池储能系统换流桥 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 能源工程, 2015(2): 45-50.

QIAN Dezhou, XU Xidong. A diagnosis method for converter bridge IGBT open circuit fault of battery energy storage system[J]. Energy Engineering, 2015(2): 45-50.

[52] 梁永亮, 李可军, 牛林, 等. 变压器状态评估多层次不确定模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 73-78.

LIANG Yongliang, LI Kejun, NIU Lin, et al. A multilayer uncertain transformer condition assessment model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 73-78.

[53] 廖瑞金, 黄飞龙, 杨丽君, 等. 多信息量融合的电力变压器状态评估模型[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1455-1460.

LIAO Ruijin, HUANG Feilong, YANG Lijun, et al. Condition assessment of power transformer using information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1455-1460.

[54] 韩富春, 张海龙. 高压断路器运行状态的多级模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 60-64.

HAN Fuchun, ZHANG Hailong. The multi-level fuzzy evaluation of high-voltage circuit breakers' running[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 60-64.

[55] 徐青龙, 曹永源, 侍海军, 等. 红外检测在无功补偿电容器组状态检修中的运动[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(3): 39-42.

XU Qinglong, CAO Yongyuan, SHI Haijun, et al. Application of infrared detection in the condition maintenance of reactive power compensation

capacitor bank[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2013, 34(3): 39-42.

[56] 唐勇, 汪波, 陈明, 等. 高温下的 IGBT 可靠性与在线评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 17-23.

TANG Yong, WANG Bo, CHEN Ming, et al. Reliability and on-line evaluation of IGBT modules under high temperature[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 17-23.

[57] 王彬, 何光宇, 梅生伟, 等. 智能电网评估指标体系的构建方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 1-5.

WANG Bin, HE Guangyu, MEI Shengwei, et al. Construction method of smart grid's assessment index system[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(23): 1-5.

[58] 张心洁, 葛少云, 刘洪, 等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 40-46.

ZHANG Xinjie, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid [J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 40-46.

[59] 李明, 韩学山, 王勇, 等. 变电站状态检修决策模型与求解[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 196-203.

LI Ming, HAN Xueshan, WANG Yong, et al. Decision-making model and solution of condition-based maintenance for substation [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 196-203.

[60] 姚建刚, 肖辉耀, 章建, 等. 电力设备运行安全状态评估系统的方案设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(1): 52-58.

YAO Jiangang, XIAO Yaohui, ZHANG Jian, et al. Design of electric equipment operation security condition assessment system[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2009, 21(1): 52-58.

[61] 田超, 沈沉, 孙英云. 电力应急管理中的综合预测预警技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(4): 481-484.

TIAN Chao, SHEN Chen, SUN Yingyun. Integrated forecasting and warning technologies for electrical power system emergency management[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(4): 481-484.

[62] 付超, 朱凌, 王慧, 等. 风电场并网在线预警系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 64-69.

FU Chao, ZHU Ling, WANG Hui, et al. Study on the online early-warning system of wind farm integration [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 64-69.

[63] 张慧源. 电力设备载流故障预警与预测的若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

ZHANG Huiyuan. Research on some key techniques

---

of current-carrying fault precaution and prediction for electric equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[64]沈国辉, 余东香, 孙湃, 等. 电力系统可视化技术研究及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 31-36.

SHEN Guohui, SHE Dongxiang, SUN Bai, et al. Research and application of power system visualization technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 31-36.

[65]周媛媛, 刘功能, 周力行, 等. 基于 DGA 的变压器故障可视化诊断[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(3): 87-91.

ZHOU Yuanyuan, LIU Gongneng, ZHOU Lixing, et al. DGA based transformer faults visual diagnosis [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(3): 87-91.

[66]李宝伟, 倪传坤, 李宝潭, 等. 新一代智能变电站继电保护故障可视化分析方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 73-77.

LI Baowei, NI Chuankun, LI Baotan, et al. Analysis scheme for relay protection fault visualization in new generation smart substation[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(5):73-77.

[67]赵林, 王丽丽, 刘艳, 等. 电网实时监控可视化技术研究与分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 538-543.

ZHAO Lin, WANG Lili, LIU Yan, et al. Research and analysis on visualization technology for power grid real-time monitoring [J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 538-543.

[68]肖家锴, 刘年国, 吴克良, 等. 电力系统运维可视化平台的研究与设计[J]. 电力信息与通信技术, 2012, 10(11): 69-74.

XIAO Jiakai, LIU Nianguo, WU Keliang, et al. Research and design of power system operation and maintenance visualization platform [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2012, 10(11): 69-74.

[69]秦红霞, 武芳瑛, 彭世宽, 等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 35-40.

QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 35-40.

[70]黄炜昭, 皇甫学真, 陈建福, 等. 电网主设备运行维护策略辅助决策方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 119-124.

HUANG Weizhao, HUANGPU Xuezheng, CHEN Jianfu, et al. An assistant decision-making method for operation and maintenance strategy of primary equipment in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 119-124.

[71]TANI A, CAMARA A B, DAKYO B. Energy

management in the decentralized generation systems based on renewable energy-ultra capacitors and battery to compensate the wind/load power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1817-1825.

[72]ISE T, KITA M, TAGUCHI A. A hybrid energy storage with a smes and secondary battery[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.

[73]LIU C F, ZHANG B, ZHANG H D, et al. Energy management of hybrid energy storage system (HESS) based on sliding mode control[C]//2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference(IPEMC). IEEE,2012: 406-410.

[74]FENG X, GOOI H B, CHEN S X. Hybrid energy storage with multimode fuzzy power allocator for PV systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 389-396.

[75] WANG G S, CIOTOTARU M, AGELIDIS V G. Power smoothing of large solar pv plant using hybrid energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 834-842.

[76]王虹富, 曹军, 邱家驹, 等. 一种用于分布式发电系统的有功功率补偿模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 94-98.

WANG Hongfu, CAO Jun, QIU Jiaju, et al. An active power compensation model for grid-connected distributed generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 94-98.

[77]张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 36-41.

ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hongjie, et al. An energy management method of hybrid energy storage system based on smoothing control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 36-41.

[78]查申森, 窦晓波, 王李东, 等. 微电网监控与能量管理装置的设计与研发[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 232-239.

ZHA Shensen, DOU Xiaobo, WANG Lidong, et al. Design and research of microgrid monitoring and energy management device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 232-239.

[79]王金丽, 盛万兴, 宋祺鹏, 等. 配电网电能质量智能监控与治理仿真[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 515-519.

WANG Jinli, SHENG Wanxing, SONG Qipeng, et al. Research on intelligent power quality monitoring and on-line simulation for distribution network [J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 515-519.

[80] SHI Shengyao, WANG Yingnan, JIN Peng. Study of maximum power point tracking methods for photovoltaic power generation system[C]//Chinese

---

Automation Congress, 2013: 835-840.

[81]程军. 风光互补智能控制系统的设计与实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.

CHENG Jun. Design and realization of hybrid wind/photovoltaic intelligent generation system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.

[82]赵继超, 袁越, 傅质馨, 等. 基于 Copula 理论的风光互补发电系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 124-129.

ZHAO Jichao, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory Copula[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 124-129.

[83]王蓓蓓, 李扬, 高赐威. 智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 17-22.

WANG Beibei, LI Yang, GAO Ciwei. Demand side management outlook under smart grid infrastructure [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 17-22.

[84]张延宇, 曾鹏, 臧传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 144-154.

ZHANG Yanyu, ZENG Peng, ZANG Chuazhi. Review of home energy management system in smart grid [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 144-154.

[85]王旭, 齐向东. 电动汽车智能充电桩的设计与研究[J]. 机电工程, 2014, 31(3): 393-396.

WANG Xu, QI Xiangdong. Research and design of electric car intelligent charging pile[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2014, 31(3): 393-396.

[86]杨金相. 风光互补电动汽车充电智能控制系统[D]. 唐山: 河北联合大学, 2013.

YANG Jinxiang. The system of intelligent control charging for wind/photovoltaic hybrid electric vehicle[D]. Tangshan: Hebei United University, 2013.

收稿日期: 2017-01-09

作者简介:

曹军威(1973), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为电能质量、能源互联网、先进计算技术等;

杨洁(1985), 女, 博士, 助理研究员, 本文通信作者, 主要研究方向为智能电力与控制;

袁仲达(1976), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为数字信号处理以及嵌入式系统;

吴扣林(1984), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为静止无功发生器等大功率电力电子技术;

方太勋(1973), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为大功率电力电子技术;

---

杨飞(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护及安全自动装置管理和直流输电控制保护工作。

(编辑 张媛媛)