

面向新型电力系统的智能电气设备 转型与发展

殷华新¹ 芮祖存¹ 任旭会²

(1. 双杰电气合肥有限公司 2. 费兰蒂电气(上海)有限公司)

摘要：新型电力系统是新型能源体系的重要组成和实现“双碳”目标的关键载体，新型电力系统要求电网从传统单向输电模式转变为双向互动模式，在实现高度智能化的同时，加强与其他能源系统的互联互通。电源侧进行有效“统筹协同”，消费侧推进“综合能源管理”。智能电气设备是新型电力系统中能量变换、电力传输和运行控制的直接载体，向低碳、智能、可靠、集成等方向的转型和发展将有力促进新型电力系统的建设，保障清洁低碳电能的接入，绿色智能用电的安全可靠，电能之间的高效转换。

关键词：新型电力系统；智能电气设备；转型与发展

0 引言

新型电力系统是以实现碳达峰碳中和，贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求为前提，以确保能源电力安全为基本前提，以满足经济社会发展电力需求为首要目标，以最大化消纳新能源为主要任务，以坚强智能电网为枢纽平台，以源网荷储互动与多能互补为支撑，具有清洁低碳、安全可控、灵活高效、智能友好、开放互动基本特征的电力系统。

1 新型电力系统的总体要求

1) 清洁低碳，形成清洁主导、电为中心的能源供应和消费体系，生产侧实现多元化、清洁化、低碳化，消费侧实现高效化、减量化、电气化。

2) 安全可控新能源具备主动支撑能力，分布式、微电网可观可测可控，大电网规模合理、结构坚

强，增强系统韧性、弹性和自愈能力。

3) 灵活高效，发电侧、负荷侧调节能力强，电网侧资源配置能力强，各类能源互通互济、灵活转换，提升整体效率。

4) 智能友好，高度数字化、智慧化、网络化，实现对海量分散发、供、用电侧对象的智能协调控制，实现源网荷储各要素友好协同。

5) 开放互动，适应各类新技术、新设备以及多元负荷大规模接入，与电力市场紧密融合，主动响应、双向互动。

智能电气设备是新型电力系统中能量变换、电力传输和运行控制的直接载体，直接决定运行效率、安全性和系统成本。

2 清洁低碳、安全可控智能电气设备的需求与响应

2.1 清洁低碳—新能源接入的智能电气设备

1) 对于垃圾焚烧电站、光热发电站、抽水蓄能电站、燃气电站、联合循环工厂等新能源发电的接入, 需要安全、灵活的智能电气设备, 交流发电机出口断路器及其成套装备是新能源接入的重要设备, 可以通过车载形式实现灵活快速部署。

2) 对于海上风电、光伏等能源接入需要清洁低碳设备, 海上风场的接入需要高电压、大电流的智能电气设备, 以总装机容量 400MW 的海上风电项目为例, 采用 2 台 225MVA 的升压变压器, 采用 40.5kV 开关设备电流达 3208A, 需要 40.5kV 4000A 开关设备, 已达到开关设备的最大电流值; 采用 72.5kV 开关设备电流只有 1792A, 大幅降低电流, 综合成本降低。

海上风电还需要无 SF₆ 的环保化、小型化产品, 以及采用中压直流汇集、高压直流送出, 直流汇集电缆损耗小, 电缆成本低, 无需工频变压, 降低平台体积重量; 陆上风电也逐步使用 72.5kV 开关设备, 72.5kV GIS 具有可靠性高、经济性强、结构紧凑、运维简便等特点, 对整个风电场运行的可靠性、稳定性和安全性起着非常重要的作用。

2.2 智能电气设备自身的低碳

通过对产品全生命周期的碳足迹评价, 即对原材料生产加工、运行中的功率能耗、产品报废时废弃物处置等产生的碳排放评价, 可以得出智能电气设备的能耗主要发生在产品生产阶段、产品运行阶段。使用低碳环保材料、减少材料消耗, 应用新技术新材料实现资源消耗最小化; 提高材料利用率, 降低集肤效应、邻近效应、涡流等运行中的额外功率损耗; 提高原材料利用率、延长产品生命周期, 优化老旧产品的改造, 数字化提升, 延长产品寿命; 智能化全生命周期资产维护, 保证安全可靠运行; 可降解材料使智能电气设备报废后无污染, 无需额外能源处理废弃物。智能电气设备采用绿色可持续产品设计原则, 降低自身碳足迹, 实现从摇篮到坟墓的能源消耗

和环境影响全过程低碳。

2.3 清洁低碳—消费侧的低碳应用输出

(1) 船舶岸电系统

当船舶在停靠港口期间, 船舶用岸电代替传统柴油发电, 以电代油, 从源头实现“零排放”, 中压船舶岸电一般通过变压/变频实现不同电压、频率的使用, 6kV/50Hz、6.6kV/60Hz、400V/50Hz、440V/60Hz 满足不同船只要求, 船舶岸电需要限流柜控制送电过程中产生的励磁电流和瞬时冲击电流, 减少对电网的冲击。输出端的并网电抗器可以有效减少并网过程中产生的冲击电流, 起到缓冲作用。船舶岸电隔离柜采用输出端的隔离变压器实现岸上电源系统与船上电源系统之间的隔离。船舶岸电系统还具有电费计量以及自动化、智能化, 一键操作的功能。

(2) 数据中心

采用中压直供 DC 供电系统, 传统变压器到移相变压器, 减少了低压交流配电, 整机效率 >97%, 投资成本降低 20%、节省占地面积 30% 以上, 预制化工程量减少约 50%, 提高 MTBF>30%; 中压 UPS, 为数据中心和其他关键任务设施提供高达 24kV 的连续可靠供电, 以保护服务器和机械负载, 同时减少停机时间。最高水平 98% 的运行效率支持可持续发展, 预计可在 15 年生命周期内减少 1245t 的潜在碳排放量。拥有低成本、高性能和强大的应对主网事件的能力, 同时结合了现代静态逆变器系统的灵活性和功能。中压 UPS 系统提供包括 UPS 需求响应、最大限度减少停机时间和停电等更多电网支持功能。它解决了关键的电力质量问题, 通过保护电压暂降、暂升、尖峰和电源中断, 防止数据处理错误、电路板故障和过热。

(3) 充电站箱式变电站

作为一种电能处理、转换、监测综合设备, 在接入 10kV 的电能之后, 设备将定量的稳定电源分配

给充电桩使用，一台箱式变电站可以为四个充电桩提供电能，不同的设计标准，可以达到不同的对应效果。高低压一体化群充电系统，高压开关柜、变压器、群充电机柜等，无需单独规划变电站，根据不同的地区要求和应用场景需求，选择变压器容量和充电机装机功率，如 600kW、720kW、960kW、1200kW、1440kW、1920kW 等。

(4) 储能一体舱

随着新能源的大规模开发与利用，以及人们对电能的多样性和可靠性要求越来越高，电力从生产至消费的各个环节都在经历着深刻的变革，储能技术及系统，打破了传统电力系统中电力实时平衡的瓶颈，显著增强了电力系统的灵活性。双杰储能一体舱的主要应用场景包括新能源发电的储能（如风电配备风储，光伏配备光储）以及电网侧的大型集中式储能电站。电池储能系统（BESS）内部主要设备包含电池（能量存储）、电池管理系统（BMS）、储能变流器（PCS 或 DC/AC 等功率变换器）、本地控制器、配电单元、预制舱、环网柜、MV 变压器及其他温度、消防等辅助设备，并在本地控制器的统一管理下，独立或接受外部能量管理系统（EMS）指令以完成能量调度与功率控制，实现安全、高效运行、一体设计、整体交付。电压变比 0.4kV/10~35kV(Dy11)，为客户提供含中压全套交钥匙储能系统。随着可再生能源的普及和能源结构的调整，储能一体舱的需求预计将不断增加，同时技术的不断进步将进一步提高储能一体舱的性能和降低成本，推动其在更多领域的应用。

2.4 坚强智能电气设备

(1) 新型电力系统需要能源转换

智能电气设备自动切换频繁，必须处理更多的电气操作，而且操作时必须成功。切换过程可能会造成在整个设施中出现故障、中断或电弧闪光等问题。巨大的电能不仅能够通过，而且还可以通过开关设备进

行有效的路由和重新路由，给智能电气设备可靠性带来要求，特别是在环境不理想的情况下。

(2) 抽水蓄能电站用断路器

断路器的开断频率高，3000 次/年；电寿命要求高，开关触头的烧蚀次数多，开关的电寿命要求高；低频启动，断路器具备低频开断能力；很好的耐烧蚀、长时间的动热、温升能力；智能化监控与状态监测技术要求高。

(3) 储能系统

多条集电线路并联，15 年内需要保证中压智能电气设备的可靠度不低于 95%，中压智能电气设备未发生故障的概率 $R(t)$ 需要大于 99.4%，智能电气设备的平均无故障时间大于 25 年。

2.5 安全可控——大容量限流，限制短路电流

快速开关型无损耗限流装置，超快速真空断路器（分闸时间 $\leq 5\text{ms}$ ）与电抗器并联，出现短路情况时，在短路电流的第一次过零点投入限流器，限流装置立即由“零损耗”状态转变为“深度限流”状态。零损耗深度限流装置不仅限流效果可以做到足够好，而且克服了常规限流电抗器和高阻抗变压器存在的电能损耗和电压波动问题，避免了限流电抗器漏磁场带来的电磁干扰和附加损耗问题。

爆破式高速限流开断装置，出现短路故障时限流器可以隔离短路电流。保护设备安全，故障解除后，通过断路器合闸投入后备限流器，保持系统持续运行。

2.6 弧光保护

相关调查资料显示，我国变电所每年出现开关柜故障的概率超过 0.8%，农村配电网中开关柜故障的概率甚至更高。开关柜内部故障电弧会给整个电力系统和用户带来非常严重的影响，给电力企业造成巨大的经济损失，同时造成严重的人员伤亡事故和周边建筑物破坏等危害。这些时有发生的故事严重威胁着配电系统的安全经济运行，已引起国内电力部门的高度重

视并实施反措。

对于内部电弧故障的解决方案及破坏程度、恢复送电时间等对比如表 1 所示。采用快速熄弧装置，迅速将空气电弧故障转换为导体短路故障，可以大幅度降低内

部电弧造成的机械应力和热应力，防止热污染以及环境被破坏而产生的毒性效应；快速重启，减少智能电气设备停机时间并减少经济损失；快速机械储能弹簧、电磁操动机构可多次关合、免维护，总体成本低。

表 1 内部电弧故障防护解决方案对比

保护方式	无 IAC 等级开关柜	有 IAC 等级开关柜	弧光保护装置	熄弧装置
说明	无弧光监视，当出现内部电弧时，开关柜无法承受内部电弧的机械和热应力破坏。	无弧光监视，开关柜可以承受内部电弧的机械和热应力破坏，直到断路器将短路电流开断。	持续的弧光及过流监视，当出现内部电弧时，通过相应断路器快速将短路电流开断。	持续的弧光及过流监视，当出现内部电弧时，通过装置将三相金属短接、接地。
熄弧时间	≥300ms	~300ms	~100ms	≤10ms
破坏程度	设备损毁、人身伤亡	内部损毁	少量变形	轻微
恢复送电	更换设备，维修开关室	维修、更换设备	解决原因，整修设备	解决原因，快速恢复
影响时间	≥10 天	≥3 天	≥1 天	≤0.5 天

3 灵活高效、智能友好、开放互动智能电气设备的需
求与响应

3.1 灵活高效——直流柔性配电

中压直流方案，可有效支撑新能源的规模化开发，降损、增加供电能力、提高灵活性；光伏、储能、通信基站等以直流形式的综合能源和负荷接入的场景，采用交流形式组网，中间产生多级能量形式变换环节。同时，分布式能源和负荷的波动性很大，交流系统无法快速应对。

相对于传统的交流配电网，直流配网可以减少源、储、荷等入网和供电的电力变换环节，降低接入系统的复杂度和成本，提高电能转换效率和电能质量，符合电力发展方向。随着新型电力系统构建，电网形态将由单向逐级输配电为主的传统电网向包括交直流混联大电网、直流电网、微电网和可调节负荷的能源互联网转变。

中压直流断路器实现故障选择性隔离、电能灵活调度、故障后连续供电，是直流配电网供电可靠性、

灵活性和安全性的重要保障。

3.2 灵活高效——一体化分界装置

新型电力系统配电网将由单一的电能配送网络演化为多能互补配置平台，网络结构、运行工况、运营环境复杂，分界装置作为各个网络单元节点集成远程操控、故障隔离、配电自动化、计量等功能，一体化户外智能电气设备安装于单元节点边界，如图 1 所示，实现与主网故障隔离、单相接地等全范围保护，模块预制化、快速部署，低碳、环保，无线通信、负荷控制，符合商业计费要求的双向关口计量。新型分界装置的组成包括低碳环保型密封开关模块，集成保护、四遥功能的智能操控模块，集成电压、电流测量、高精度电量表、通讯单元的计量模块，由供电电源 PT、电源管理单元、低能量脱扣系统组成的电源模块，ONU 光纤或 5G 无线通信量子加密的通讯模块。积木式模块单元组合，进出线位置、计量位置等可变换，功能单元完全分隔，电缆柜前连接，IP43/IP54 防护外壳。体积小、重量轻、环境适应性强。

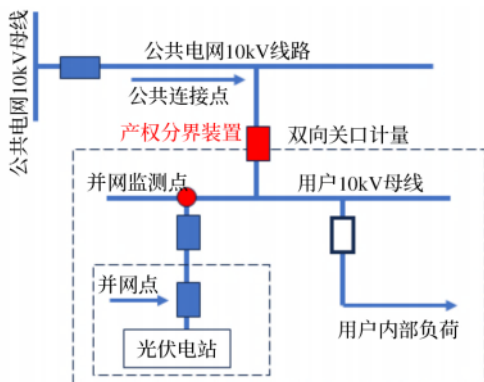


图1 分界装置用于光伏电站

3.3 灵活高效——固态开关

固态软启动器用于中压电动机控制，主回路的开关元件为高压大功率晶闸管，通过改变晶闸管的导通角来控制电动机起动电压平稳上升和无触点通断，实现电动机的平稳起动。固态开关软启动器由CPU控制，使用基于微处理器的电机和启动器组件保护和控制系统。CPU使用SCR的相位角点火控制向电机施加降低的电压，然后使用电压和电流控制缓慢而温和地增加扭矩，直到电机加速到全速。

相比较传统的接触器+熔断器组合控制柜，固态软启动降低了电机的启动电流，从而降低了电力系统和电机上的电应力，还降低了电机和机械负载上的峰值起动转矩应力，延长了使用寿命，减少了停机时间，可数字化控制。

3.4 智能友好——数智化智能电气设备

1) 利用智能传感、物联网、云计算、大数据、人工智能等先进的数字化和智能化技术实现电力设备运行情况、健康状态数据的采集、传输、处理、分析及应用，为设备研发设计和智能运维提供全面支撑。

2) 电力设备设计制造、测试试验、状态监测、运行维护等全生命周期管理各环节的数据深度融合，通过云平台、区块链等技术实现全生命周期数据的安全共享和互通。

3) 通过数字化建模、多物理场仿真等手段构建高度保真的电力设备数字孪生体，在设备数字孪生体上全面、动态反映物理设备状态变化，实现设备状态精准感知、推演预测和模拟操作，并可作用于物理实体进行信息交互和优化控制。

双杰电气智能型固体绝缘环网柜，一次部分采用环保型固体绝缘介质进行封闭绝缘，匹配真空灭弧、电子式电流电压传感器、气体压力传感器、温湿度传感器及除湿器、接头温度传感器、动作特性传感器等，通过与二次DTU功能融合，实现一次部分安全可靠、智能感知、健康诊断。

一二次深度融合柱上开关，一次部分采用一体化固封极柱技术，集成电子式电流电压传感器、高压电容取电模块，通过与低功耗FTU功能融合实现“集成化、小型化、轻量化、数字化、智能化”提升。

3.5 开放互动——配电自动化设备

配电自动化设备包括以下系统：

1) 智能电力监控系统：通过物联网技术，实现对电力系统各个节点的实时监测和数据采集，包括负荷、电压、电流、温度等参数。

2) 智能电力预测系统：基于大数据分析和机器学习算法，对电力系统的负荷、故障等进行预测和预警，提前发现风险并解决问题。

3) 智能电力诊断系统：通过对电力设备的数据分析和故障诊断，实现对电力设备的健康状况进行评估和管理。

4) 智能电力维护系统：通过对电力设备的远程监控和维护，实现对电力设备的智能化管理和维护。

5) 智能电力调度系统：通过对电力系统的数据分析和优化，实现电力的合理调度和分配，提高电力系统的效率和稳定性。

6) 智能电力安全系统：通过对电力系统的安全监测和预警，确保电力系统的安全稳定运行。

3.6 开放互动——电能路由器

电能路由器实现主动配电网、交直流混合电网，可再生能源、分布式能源、电动汽车、储能设备等多类型电气设备在电网中的接入，管理接入的电源和负荷。电网节点、分区之间互联互通及电能的精确、灵活调配。

将多台变流器、配电保护、本地控制系统整合成一个整体，解决新能源发电间歇性和波动性大的问题；直发直用减少逆变损耗，实现功率平滑控制，消除冲击。用户侧部署电能路由器，通过 AC/DC 对交流电网与直流母线的解耦，实现直流母线端的独立控制和故障隔离，提高用户侧电能质量。针对供电能力及电能质量需要，电能路由器协调电源与负载运行的电力网络控制系统。

4 智能电气设备的转型与发展

基于对新型电力系统的基本特性分析和智能电气设备的响应分析，智能电气设备的发展方向是环保低碳化、智能互联化、直流电子化、高效轻量化、可靠长用化、模块小型化、集成预制化。

4.1 环保化、低碳化

智能电气设备小型化，材料消耗少、占地空间少，通过优化导电材料、截面形状、回路长度等降低交流效应导致的额外功率损耗、减少设备长期运行中的能源消耗。使用环保、可降解绿色材料，模块化方便拆解，减少原材料生产、设备运行、后期报废阶段对环境的破坏，降低排放。采用高可靠性、长使用寿命材料，提高材料利用率。通过设备的智能化监测、诊断，实现智能化运维，提高效率，提升产品的健康程度，保证长期可靠运行。

4.2 智能化、互联化

智能电气设备的智能环境感知，预测湿度、温度、水浸，保证设备的风险管控。通过状态感知，

预判温升、局放、真空度等关键参数，提升产品的可靠性。通过机械感知，马达、线圈电流、电压，分合闸机械特性预警，保障安全运行。而通过电参量感知，对于电流、电压监测，不同负载、故障类型、协同保护实现系统安全的核心保证。

1) 数字化开关柜，全数字化一次元件，边缘计算，出厂即互联，一次模块式组装、二次全数字传输，5G/WiFi 无线传输，自组、可控、安全，感知技术一体化设计，数字孪生-系统管理、专家诊断技术，人工智能决策-健康诊断，运维处理。① 数字化接地开关：具有触头带电、分合闸状态、分合闸速度、触头咬合、电动操作电压/电流等数据监测、采集，系统联锁、电动控制数字化处理、传控。② 数字化母线系统：具有电流、电压监测，高压带电、温度、局缘放监测，电动力测量等功能，通过智能设备数字化处理、传输。③ 数字化隔离系统，实现隔离电动操作，活门位置、触头对中性校核，系统联锁、电动操作电流/电压监测，信息数字化处理、传输。

2) 数字式一二次融合开关设备：将模拟量和状态量就地数字化的户外配电开关设备，由数字式传控单元、数字式主控单元、环网单元、测供一体化电压互感器、后备电源、一二次连接电缆、外箱等进行一体化深度融合设计，实现在线监控、短路和接地故障处理、电能量计算等功能。① 数字式传控单元：将电子式传感器模拟量、状态量就地数字化，同时执行数字式主控单元下发的控制指令。完成采集、控制回路及压板状态监测、远方/就地切换、本地分合闸操作等功能。② 数字式主控单元：就地数字化并接收数字式传感单元上送的状态量、模拟量，实现短路故障与单相接地故障处理，根据计算结果下发分合闸控制指令给数字式传感单元。数字式主控单元同时完成电能量计算并与配电主站实现通讯。

4.3 直流化、电子化

固态直流断路器（SSCB）以大功率电力电子器件作为执行承载和分断电流部件的断路器，面临分断容量受限于功率器件容量、通态损耗较高等关键问题。

混合型直流断路器（HDCCB）由机械开关负责承担正常通流任务，以固态开关或机械开关作为主要分断部件，因此兼具机械开关通态损耗低和固态开关分断速度快的优点。

断路器通过设计增加了触头零电压介质恢复的过程，优化了触头的介质恢复环境，触头能够在燃弧时间为几十微秒的运动小间隙下完成可靠分断短路电流，其限流效果大幅提升。

基于真空断路器和固态开关的混合式直流断路器，机械开关和固态开关部分分别应用于常通流支路和电流转移支路，通态损耗低，而且开断速度快。典型固态断路器参数如表 2 所示。

表 2 中压固态断路器参数示例

项目	单位	参数
额定电压	kV	11
额定电流	A	1000/2000
额定短路截断电流	kA	15
全电流范围截流时间	ms	≤2/3
额定直流耐受电压	kV	24 (断口) 30 (对地)
额定雷电冲击耐受电压峰值	kV	75
尺寸 (宽×深×高)	mm	1600×2000×2600

4.4 高效化、轻量化

基于南方电网公司智能型永磁快分环网柜，双杰电气自行研发单稳态永磁机构的快速断路器，电磁斥力操动机构的快速断路器，电容器储能、电磁斥力驱动、永磁保持、直动式真空断路器，分闸时间 ≤ 5ms，实现故障的快速隔离，减少对母线上设备负荷对于“晃电”低电压的影响时间。“零前分闸”技术提升快速断路器的开断容量，最大开断电流达到 25kA，开断短路电流 30 次，机械寿命可达到 2~3 万次，其具有结构简单、可靠性高、寿命长、动作速度快、保护性能好以及节能环保等优点，基于供电电

源故障快速判断技术的控制，“电磁斥力”快速开关的电源故障时的备用电源的快速切换装置，电源短路故障时的最快切换时间 ≤ 15ms，以保证用电设备的安全持续运行。

超导体实现电力传输高效、用量少，电力电子实现保护、控制一体化，对于旋转用电设备，通过逆变 - 变频技术，实现低功耗。

轻量化开关设备采用罗氏线圈电流传感器、电阻分压电子式传感器、小型传感器；绝缘材料用量少，占用空间小，绝缘劣化风险小；磁控操动机构高效率，分闸速度快，所需能量小。

4.5 高可靠、长寿命

先进电工磁性材料用于智能传感器，提高系统运行的可靠性；先进的导热材料、热管用于热能控制，电弧控制、弧光保护、控制避免意外失效；新型绝缘材料绝缘，降低绝缘风险；超长寿命—机械寿命、电气寿命；环境对智能电气设备的影响降到最低；MTBF 即平均故障间隔时间 >200 万 h；提高智能监测设备的有效性、提高可靠性。

4.6 模块化、小型化

模块化设计可以实现根据应用快速配置产品，如开关位置、母线位置等不同位置实现不同应用的定制化设计；模块化、小型化重量轻，便于一个人操作、组装；功能集成，可现场组装，核心部件提供可以保证安装精度、质量，降低工厂技术难度，质量可控。对常用功能模块备库存，快速组装，减少交货时间，快捷、高效，标准化设计，SKU（最小存货单元）数量少，超市化采购；工程设计和物料清单 BOM 快速组织，减少工程设计及生产准备时间；现场容易维修、更换，功能单元可互换，标准化通用接口设计，保证安装位置一致。快速实现改造项目应用，设备升级，智能化提升；老旧开关柜更换成本高，采用新型断路器模块单元，直接放置在旧柜体内

部，保持主母线位置不变，机械、电气连接，智能化远程操控，无线连接，不用担心操作不便，安全联锁，系统解决方案，逻辑程序化控制，即插即用。

4.7 集成化、预制化

集成化体现在中低压一体化、一二次系统一体化、交直流一体化。电能接入并网、储能、电能转换分配等集成，典型应用中压 UPS，电能路由器、新能源专用箱变、船舶岸电箱变等；实现电力设备的高度系统集成、全数字控制，实现具有远程监测功能，实时显示电源运行状态。模块化预制舱结构，环境适应性强，具有防盐雾、防潮湿、防霉菌功能，紧凑型智能电气设备，占地少，免维护。如船舶岸电系统，采用全自动无扰动切换技术，自动切换，无需人为操作，减少人为失误风险。采用最新 IGBT 逆变技术，全数字化控制电路；无需功率因数补偿及谐波抑制装置。输入电压频率范围宽，输出电压、频率稳定

度高；正弦波输出，失真度低。

5 结束语

具有清洁低碳、安全可控、灵活高效、智能友好、开放互动基本特征的电力系统需要实实在在的一二次智能电气设备。

清洁低碳需要全生命周期的低碳产品，以及服务于电能输入、电能配出的智能电气设备；安全可控需要高可靠性智能电气设备，以满足电能互通的正常切换；灵活高效需要产品小型化、轻量化，摆脱传统智能电气设备运行功耗大的特点；智能友好需要智能电气设备的数字化、智能化、互联互通，边缘计算；开放互动、灵活配置需要模块化、预制化的电能路由器、UPS 等配电自动化一体化设备。

(收稿日期：2024-07-26)