

新兴 ICT 技术对电力系统自动化的协同支撑作用研究

高志远¹, 彭林², 李炳林², 胡娱欧³, 孙芊⁴, 姜玉磊¹

(1. 中国电力科学研究院(南京), 江苏 南京 210003; 2. 全球能源互联网研究院(南京), 江苏 南京 210003;
3. 国家电网公司华北分部, 北京 100053; 4. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450000)

摘要: 电力系统的进步离不开 ICT 技术的支撑。近年来各类 ICT 技术迅猛发展, 给电力系统的发展提供了多种可能的技术路线和发展愿景。通过梳理电力系统信息化、自动化的发展历程和对 ICT 技术的核心需求, 系统化分析了部分新兴 ICT 技术对电力系统的支撑作用, 以及在实际应用过程中的关键挑战, 并基于不同的理想偏好, 分析了未来可能的电力自动化发展愿景。指出: 当前电力系统对 ICT 技术有着信息化、自动化、智能化和通信支撑等多方面的复杂需求, 而各类 ICT 技术通过相互协同从基础设施层、设备层、数据层、应用层等多个层次提供了系统支撑。面对成本、可靠性等各方面约束, 通过不同的理想偏好, 有不同的发展愿景, 其中大数据、人工智能、北斗等技术具有普遍的重要性。

关键词: 信息通信技术(ICT); 人工智能; 北斗卫星导航系统; 大数据; 区块链; 云计算; 5G 通信

Research on the collaborative support of emerging new ICTs for power system automation

GAO Zhiyuan¹, PENG Lin², LI Binglin², HU Yuou³, SUN Qian⁴, JIANG Yulei¹

(1. China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China; 2. Global Energy Interconnection Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China; 3. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China; 4. State Grid HAEP Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The progress of a power system is inseparable from the support of ICTs. In recent years, the rapid development of ICTs provides a variety of possible technical routes and development visions for the development of power systems. By combining the development process of power system information and automation, as well as their core demands for ICTs, this paper systematically analyzes the supporting roles of some new ICTs for power systems, as well as the key challenges in the application processes, and puts forward some possible development visions for a power automation system in the future based on different ideal preferences. At present, a power system has complex demands for ICTs in many respects, such as information, automation, intelligence and communication support. All kinds of ICTs provide systematic support through mutual cooperation from the infrastructure, equipment, data, and application layers as well as other layers. Faced with the constraints of cost, reliability and other aspects, through different ideal preferences, there are different development visions. Among them big data, artificial intelligence, and Beidou technologies are of universal importance.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902600) and the Science and Technology Project of North China Branch of State Grid Corporation of China (No. SGNC0000TJJS2000149).

Key words: information and communication technology (ICT); artificial intelligence (AI); Beidou navigation satellite system; big data; block chain; cloud computing; 5G communication

0 引言

依靠 ICT 创新推动数字产业化, 催生新产业、

新业态和新模式^[1], 已经成为许多行业的发展共识。当前, 电力信息通信技术已经成为电力系统创新发展的核心引擎, 助力中国能源转型和电力转型。

新世纪以来, ICT 技术呈现加速发展态势, 各类新的热点和应用成果不断涌现。针对这些新兴技术, 电力行业根据本身业务发展需求, 积极

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902600);
国家电网有限公司华北分部科技项目资助(SGNC0000TJJS
2000149)

开展研究和规划, 已经取得了丰富的成果, 比较有代表性的, 包括云计算、大数据^[2]、5G 通信(移动互联网)^[3-4]、物联网、北斗导航系统^[5]、人工智能^[6]、区块链^[7]、边缘智能等。

但是对这些技术的综合研究尚不多见。实际上这些技术相互间有一定的互相支撑甚至依赖关系, 其横向(相互之间)和纵向(与电力自动化系统之间)的复杂综合作用对电力系统自动化的发展有重要影响, 也提供了多种技术路线和发展前景。换言之, 仅仅开展个别技术的深入研究和应用, 往往会受到各种外部技术条件的限制, 同时没有充分利用其他相关技术的辅助和支撑作用, 也限制了可能的技术路线选择。所以, 有必要对此类新兴技术进行综合分析和规划, 做系统性地整体研究, 科学选择技术发展路线。这对于当前正在开展的能源互联网研究和建设也有重要意义^[8-9]。

为此, 本文从电力系统自动化对 ICT 技术的核心需求出发, 系统化梳理了部分新兴 ICT 技术的综合支撑作用及其相互间的制约关系, 剖析了在应用中的关键挑战, 分析了在理想偏好下, 未来电力系统自动化的发展愿景。

1 电力系统自动化对 ICT 技术的核心需求

电力系统是由发电厂、送变电路、供配电所和用电等环节组成的电能生产、传输、分配和消费系统。为实现以上目标, 它需要在各个环节和层次的一次系统基础上实现监视、调节、控制、保护、通信和调度^[9-10]等二次系统功能。

ICT 能够提供信息的处理和传输功能。电力系统对 ICT 的需求归根到底还是二次系统的自动化和智能化需求, 具体来说就是要从功能、性能、安全性、可靠性、低成本等各方面不断实现和提升电力二次系统各项功能。

ICT 技术在电力自动化系统中的应用经历了漫长的过程, 从起初可有可无的辅助系统, 到如今已经渗透到电力行业的几乎所有领域^[11-17]。图 1 采用类似思维导图的方式展示了电力系统自动化需求和部分 ICT 技术应用的发展情况^[18-29]。图中方框表示电力系统自动化在不同发展阶段的核心需求, 标注的是实现该需求的部分支撑技术。实际上, 电力系统自动化的各项需求、各类技术的应用、标准规范和安全技术之间, 是交互影响的。

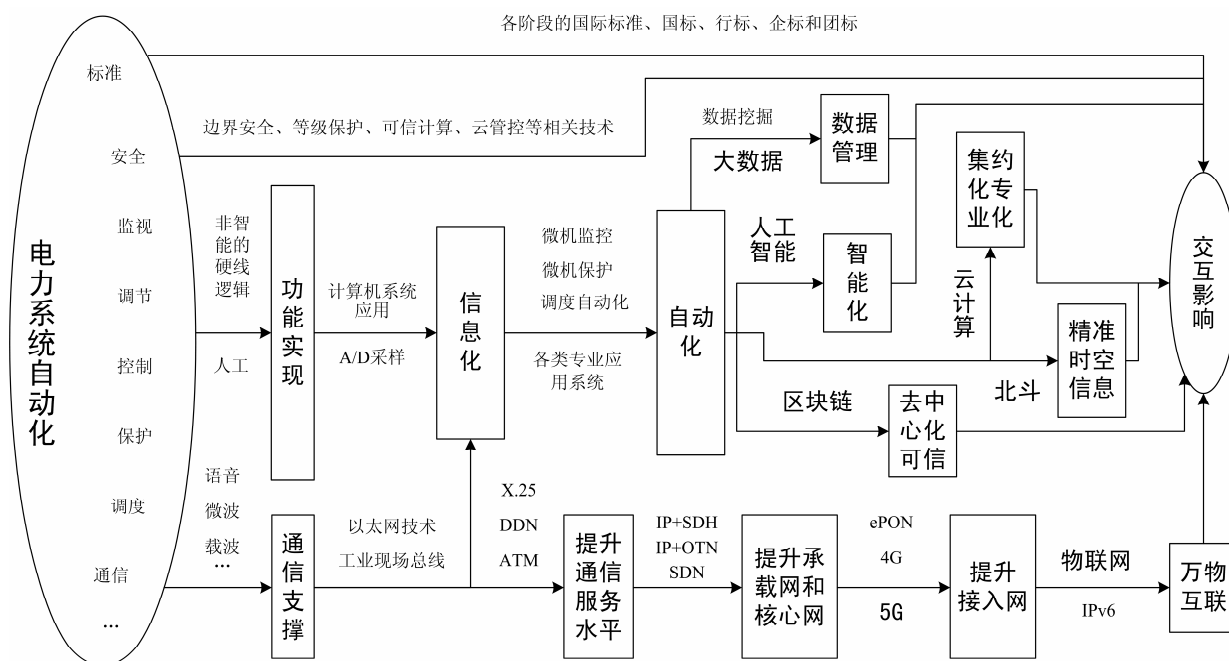


图 1 ICT 支撑电力系统发展思维导图

Fig. 1 Thought map of ICT supporting power system development

2 新兴 ICT 技术及对电力系统自动化的影响

由于新兴 ICT 技术非常多, 实际上这是一个快速发展和更新的领域。基于电力系统自动化的核心

需求分析, 本文选取了在电力行业中广泛研究的“云大物移智”技术^[10], 加上当前引起广泛关注的区块链和北斗导航技术, 作为代表性技术进行了综合分析。表 1 对它们的技术内容、对电力系统的影响作

用进行了分析。

表 1 部分关键 ICT 技术的电力系统应用及影响分析

Table 1 Power system application and impact analysis of some key ICT technologies

名称	技术内容	影响作用
云计算	分布式计算的一种,基于网络在基础设施层(IaaS)、平台层(PaaS)和应用层(SaaS)提供集成化的专业服务	为各类相关应用,提供了集成化部署、专业化服务方案
大数据	一种特定的数据处理技术,具有 5V 特点: Volume(大量)、Velocity(高速)、Variety(多样)、Value(低价值密度)、Veracity(真实性)	为各类电力自动化系统提供广泛的数据支撑
5G	第 5 代移动通信技术,具有高带宽、高可靠、低时延和大连接的特点	为能源互联网的发展提供了理想的通信支撑;涉及到接入网、承载网和核心网等一整套技术体系,对电力系统通信具有长远影响
物联网	基于网络,让所有能够被独立寻址的普通物理对象形成互联互通的网络	为电力系统各个环节的设备层连接提供技术手段
北斗	中国北斗卫星导航系统,目前已发展到 3.0,可提供授时、定位、导航和短信息通信服务	为所有电力系统应用提供可靠的时空信息服务
人工智能	研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门技术科学	提高各类电力应用的智能化水平
区块链	起源于比特币的一种分布式数据库技术,具有去中心化、不可伪造、可追溯等特征	提供了去中心、可追溯的可信存证支撑

3 新兴 ICT 技术的综合支撑作用

电力系统自动化的发展离不开各种 ICT 技术的支撑,同时各种 ICT 技术之间也存在相互支撑的关系,实际上起到了扩展共同支撑力的作用。基于各类 ICT 技术对电力自动化应用的影响作用分析,形成如图 2 所示的支撑体系,共分为 5 层:5G 和北斗技术处于基础支撑层,提供基本的通信和信息支撑;物联网处于通信设备层;区块链和大数据技术提供数据支撑服务;人工智能和云计算则提供了智能化和集成化的应用服务;以上各层协同支撑应用层中电力系统各环节应用。

其交互作用分为两类:

1) 横向相互支撑。各类技术之间存在相互支撑甚至依存关系。

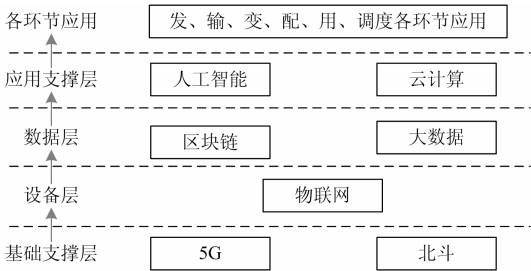


图 2 新兴 ICT 技术对各类电力应用的支撑作用示意

Fig. 2 Supporting role of new ICT technologies in various power applications

人工智能:依赖于大数据、云计算等技术的支撑,间接地也需要各类通信技术的支撑。

云计算:直接依赖通信类技术支撑,同时也为通信技术应用提供了重要的应用场景。与其他各类信息技术存在相互支撑关系,可以为这些技术的应用提供平台服务,也需要这些技术的支撑。

大数据:需要各类通信技术以及北斗、区块链技术的支撑;为人工智能和云计算应用提供了支撑。

区块链:底层需要各类通信技术的支撑;为云计算、大数据等应用提供了一种技术支撑手段。

物联网:为 5G 技术提供了应用场景;为大数据、云计算提供信息来源,也需要这些技术以充分挖掘和拓展信息的价值;与北斗技术存在相互服务和相互促进的作用。

5G:为云计算、北斗、大数据等技术应用提供支撑;反过来,其他各类技术的高度发展为 5G 通信提供了需求和应用场景。

北斗:为人工智能、大数据、区块链应用提供数据支撑;其应用推广需要各类通信技术的支撑。

2) 纵向支撑。电力系统各环节的应用,都需要 ICT 技术的服务支撑,有时是不同层次的多种技术的联合支撑,有时重点在某一层次的某种技术。

人工智能服务:目前已在多个环节开展研究和应用^[10],其底层需要系统化的数据支撑、通信支撑。

云计算服务:已经在电力系统得到广泛应用,其实云计算是一种集成服务技术,其底层需要系统化的数据、通信等各类技术支撑。

大数据服务:可以为各类电力应用提供数据服务,其底层需要各类通信和信息技术的综合支撑。

区块链和北斗技术支撑:可以基于网络直接嵌入于各类应用,也可以集成于大数据、云计算和人工智能等综合服务里。

5G 和物联网技术支撑:可以直接服务于各类具体应用,也可以为大数据、云计算、人工智能、区块链、北斗技术的应用提供支撑服务。

4 关键挑战

新兴 ICT 技术在电力系统中的应用面临着很多约束, 其中有一些是共性的关键挑战。

1) 成本因素。新技术的普及应用其实面临着很多成本问题, 这决定了新技术的应用普及必然是一个长期的过程, 必然长期与旧有的系统和技术并存。例如 5G 的应用^[5], 除了政策因素外, 在接入网建设、承载网和核心网复用和改造方面, 都需要巨大的投资。需要通过技术进步控制应用成本, 同时不断发掘合适的市场机制分摊成本投入。

2) 风险问题。电力系统普遍存在高安全性要求, 而很多新兴 ICT 技术尚未经电力系统大规模考验。这也是目前电力系统对很多 ICT 技术主要以研究和试点应用, 逐步推广为主的原因。例如人工智能技术在可靠性方面还需要长期考验^[6]。

3) 技术路线选择。许多新兴的 ICT 技术正处于迅猛发展阶段, 技术路线多样, 各类技术路线的优劣和未来的主流技术发展方向可能一时不能完全看清楚, 需要辨析和验证。例如当前电力系统各个专业对区块链技术的应用探索^[7]。

5 基于新兴 ICT 技术的电力自动化愿景

各类 ICT 技术的发展实际上为电力系统自动化的发展提供了多种可能的愿景, 分析如表 2 所示。

如果以上技术都得以广泛应用, 可以设想一下如下的理想电力系统自动化愿景: 电力系统各环节的设备普遍联网, 持续进行高频率信息采集, 并实时传送到各级处理单元和中心, 在那里基于高精度和统一的时空基准信息进行数据处理, 在传送和处理数据过程中通过区块链技术确保所有数据“保真”, 各级处理单元(边缘智能)和中心有充分的处理能力和智能, 响应市场规律和优化结果对全网设备进行精准控制(限于可靠性要求, 保护设备可能优先就地化采集、控制), 同时全网的 ICT 资源和服务, 根据需要进行了高度的集约化和合理部署分配。

6 关键技术路线选择

然而限于各类技术应用的约束条件和可能的技术路线选择, 不可能所有的技术都得到重点发展。正如文献[30]的分析, 重点发展的技术应该是根据所选择的理想偏好, 对理想指标贡献度最大的技术组合。

假定考察 i 项关键技术, 选择了 j 项电力系统理想化偏好, 则对这些技术的选择性投入, 实际上是如下形式的一个优化问题。

表 2 部分关键 ICT 技术给电力系统带来的愿景分析

Table 2 Analysis of the visions that some key ICT technologies may bring to power system

技术	可能愿景	颠覆性改变
云计算	① 基于网络的专业化服务 ② 各类应用的集中化、集约化	① 大量自动化系统的部署方式改变 ② 专业分工和协作的方式改变
大数据	① 各类电力数据的广泛采集、传输、管理和挖掘 ② 为各类应用提供数据基础支撑, 推进信息化、自动化和智能化的进一步发展	① 电力数据资源的利用方式、价值和意义改变
5G	① 实现设备层大量设备的高质量联网和交互 ③ 推进和实现各类自动化应用的网络化和集中化	① 电力设备通信的范围和质量大幅改进
物联网	① 为大量电力设备的“万物互联”提供可能 ② 为能源互联网的建设、发展提供可能	① 电力设备信息联系紧密度加强
北斗	① 减少对 GPS 的依赖 ② 为电力通信增加一种卫星通信保障 ③ 电力应用广泛获得可靠、精确的时间和空间信息支撑 ④ 时间和空间信息与其他数据共同推进人工智能等应用	① 时间和位置信息服务的准确性、可靠性和易用性提高
人工智能	① 电力系统智能化水平提升, 大量原来必须人工完成的工作可以自动完成, 甚至完成得更好, 人、机协作水平不断提高	① 电力自动化系统的工作模式改变; ② 工作质量提升
区块链	① 助力人、机交互类应用, 使得自动化系统的客观化水平得到极大提高, 关键数据不可篡改、可追溯, 并可以“去中心化”实现	① 各类数据的可靠性、客观性和可追溯性得到提高

$$\begin{cases} \min(-\Delta T \mathbf{I} \mathbf{P} \boldsymbol{\eta}) \\ \text{s.t.} \\ \Delta T \mathbf{D}_T^T = \mathbf{F} \\ \Delta T \cdot \mathbf{D}_T \leq [\mathbf{F}_n \quad \mathbf{F}_n \quad \cdots \quad \mathbf{F}_n] \\ 0 \leq \Delta T_k \quad k=1, 2, \dots, i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1 \quad \mathbf{T}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{T}_i]$, 表示所选择的 i 项关键技术状态, 其取值为无量纲的相对值。有关相对值, 可以通过统计分析历史数据, 或者通过征询专家意见、统计处理数据获得, 下同; ΔT 表示 T 值的相对改变; \mathbf{I} 为 $i \times i$ 阶的矩阵, 其元素 I_{mn} 表示第

m 项技术的进步对第 n 项技术的影响作用, 取值区间为 $[0,1]$; \mathbf{P} 为 $i \times j$ 阶的矩阵, 其元素 P_{mn} 表示第 m 项技术对第 n 项理想偏好的贡献转化率, 取值区间为 $[0,1]$; $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1 \ \eta_2 \ \cdots \ \eta_j]^T$, 表示所选取的 j 项理想化指标的权重组成; $\mathbf{D}_T = [1 \ D_2 \ \cdots \ D_i]^T$, 表示为取得各项技术状态的改变, 需要投入的资源值。这里以第一项技术的单位效益的投入值为基准值 1, 则 D_m 表示相对于第 1 项技术, 为取得第 m 项技术的单位效益所需要投入的相对资源值。这里的资源值, 取无量纲的相对值; F 表示所考察期间的投入资源值总量, 取无量纲的相对值; F_n 表示对某一项技术在考察期内的最大投入值, 目的是防止投入过度集中。

优化的目标就是产生对理想偏好指标的最大化贡献。

约束条件包括: 1) 投入资源总量小于 F ; 2) 约束条件 2 用 Hadamard 乘积表示每一个单项技术的投入小于其上限 F_n ; 3) 假定每一项技术状态本身不会退步。

基于前文的分析, 考察云计算、大数据、物联网、5G 通信、人工智能、区块链、北斗 7 项 ICT 关键技术, 设计其交互促进关系矩阵 \mathbf{I} 如式(2)。

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 1 & 0.1 & 0 & 0.8 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 1 & 0.7 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.5 & 0.9 & 1 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.3 & 0 & 0 & 0.1 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.4 & 0 & 0.3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

选取集约化服务水平、智能化水平、数据资源获取和利用能力、通信支撑能力 4 项指标作为电力系统的理想化衡量指标。其权重值构成理想化偏好 $\boldsymbol{\eta}$ 。

依据各项技术对理想化指标的贡献作用, 定义技术系统关联矩阵 \mathbf{P} 如式(3)。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0.6 & 0.8 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.7 & 0.7 \\ 0.3 & 0.3 & 0.7 & 0.9 \\ 0.1 & 0.9 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.5 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据对各项技术发展所需要的资源投入情况分析, 定义 \mathbf{D}_T 如式(4)。

$$\mathbf{D}_T = [1 \ 0.75 \ 1.25 \ 1.5 \ 0.5 \ 0.4 \ 0.6] \quad (4)$$

在控制投入资源总量 $F=10$ 的情况下, 选择不同的理想偏好 $\boldsymbol{\eta}$, 计算得到如表 3 所示重点发展技术方向。

表 3 不同理想偏好下的电力系统技术方向

Table 3 Power system technology direction under different ideal preferences		
路线	技术方向	
路线 1	理想偏好	$\boldsymbol{\eta} = [0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25]$
	偏好含义	各项理想偏好均衡发展
	重点技术	重点发展区块链、北斗和大数据技术、人工智能技术
路线 2	理想偏好	$\boldsymbol{\eta} = [0.16 \ 0.16 \ 0.18 \ 0.50]$
	偏好含义	偏重于通信支撑能力和数据资源管理水平提升
	重点技术	重点发展 5G 通信、物联网、北斗和大数据技术
路线 3	理想偏好	$\boldsymbol{\eta} = [0.4 \ 0.4 \ 0.1 \ 0.1]$
	偏好含义	偏重于系统集约化建设和智能化水平的提高
	重点技术	重点发展大数据、人工智能、云计算和北斗技术

7 结论

新兴 ICT 技术给电力系统自动化的发展带来了新的可能愿景, 有很多改变都是颠覆性的, 甚至可能给整个产业链带来深刻变化。需要我们持续关注、深入研究、抢占市场先机。

通过本文的分析可以看到: 1) 新兴 ICT 技术对电力系统自动化的支撑作用, 不是单独烟囱式的, 而是综合起来发挥作用, 其相互之间存在复杂的相互支撑甚至相互依存关系; 2) 新兴 ICT 技术在电力自动化系统的应用和发展, 也普遍面临着成本、风险、技术路线等各种挑战; 3) 对不同的新兴 ICT 技术进行重点发展, 会获得不同的电力系统自动化发展愿景, 本文提供了分析方法, 并进行了初步分析。

新兴 ICT 技术在电力系统中的应用存在很多变数。一方面, 这些技术本身也在不断地发展, 有些甚至变化很快, 例如 5G 之后已开始研究 6G, 人工智能和区块链技术路线众多等; 另一方面, 中国电力系统的发展也面临着国内外各种环境变化的影响, 例如新能源快速发展、电力市场改革、不同时期的发展战略等。后续需要深入跟踪和研究各类技术的发展和运用, 并予以验证, 紧密结合中国电力行业的发展战略需要, 科学设计新兴 ICT 技术在电力系统中的应用方案。

参考文献

- [1] 全国网络安全和信息化工作会议[EB/OL]. (2018-08-03). [2020-08-18]. <http://www.dzwww.com/2018/wlaq/>. National Conference on network security and informatization[EB/OL]. (2018-08-03). [2020-08-18]. <http://www.dzwww.com/2018/wlaq/>.
- [2] 盛海华, 王德林, 马伟, 等. 基于大数据的继电保护智能运行管控体系探索[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 168-175. SHENG Haihua, WANG Delin, MA Wei, et al. Exploration of intelligent operation management system of relay protection based on big data[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 168-175.
- [3] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69. HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [4] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8. CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.
- [5] 李博, 方彤. 北斗卫星导航系统(BDS)在智能电网的应用与展望[J]. 中国电力, 2020, 53(8): 107-116. LI Bo, FANG Tong. Application and prospect of Beidou navigation satellite system (BDS) in smart grid[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 107-116.
- [6] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources-a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [7] 黄虹, 文康珍, 刘璇, 等. 泛在电力物联网背景下基于联盟区块链的电力交易方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 22-28. HUANG Hong, WEN Kangzhen, LIU Xuan, et al. Power trading method based on consortium blockchain under ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 22-28.
- [8] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [9] 高志远, 黄海峰, 孙芊, 等. 跨国调度与交易系统互联的信息通信支撑研究[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 40-47. GAO Zhiyuan, HUANG Haifeng, SUN Qian, et al. Research on information and communication support for transnational interconnection of power dispatching and trading systems[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 40-47.
- [10] 陈英达, 李一兵, 赖蔚蔚, 等. 支撑电网业务的云大物移智技术支撑融合体系[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(2): 14-20. CHEN Yingda, LI Yibing, LAI Weiwei, et al. Technical supporting fusion system of cloud computing, big data, internet of things, mobile internet and artificial intelligence for supporting power grid businesses[J]. Electric Power ICT, 2020, 18(2): 14-20.
- [11] 电力系统定义[EB/OL]. (2009-01-10). [2020-04-07]. <https://baike.baidu.com/item/>. Definition of power system[EB/OL]. (2009-01-10). [2020-04-07]. <https://baike.baidu.com/item/>.
- [12] 唐涛, 诸伟楠, 杨仪松. 发电厂与变电站自动化技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [13] 杨奇逊. 计算机继电保护的发展和应用的若干问题[J]. 电力系统自动化, 1983, 7(3): 62-66. YANG Qixun. Several problems relating to development and application of computer relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(3): 62-66.
- [14] 张力平. 新型计算机在电力系统自动化中的应用[J]. 电力系统自动化, 1991, 15(2): 56-60. ZHANG Liping. Application for new generation computers in power system automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1991, 15(2): 56-60.
- [15] 丁道齐. 迈入 21 世纪的中国电力通信[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(10): 1-7. DING Daoqi. Chinese power system telecommunicatoins towards the 21 century[J]. Automation of Electric Power System, 1996, 20(10): 1-7.
- [16] 王益民. 国家电力调度数据网的设计与实施[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 1-6. WANG Yimin. Deisgn and implementation of state grid dispatching digital network[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 1-6.
- [17] 唐涛. 电力系统厂站自动化技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 92-97. TANG Tao. Development and prospects for the automation technology of power plants and substaiions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 92-97.
- [18] 高志远, 高艺, 卢文冰, 等. 基于联盟链技术的跨国电力交易框架设计[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 264-271. GAO Zhiyuan, GAO Yi, LU Wenbing, et al. Framework design of transnational power trade based on consortium block chain[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 264-271.
- [19] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统

- 现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.
XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.
- [20] 辛耀中. 智能电网调度控制技术国际标准体系研究[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 1-10.
XING Yaozhong. Research on international standard architecture for smart grid dispatching and control technology[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 1-10.
- [21] 张晶, 李彬, 戴朝波. 全球能源互联网标准体系研究[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2055-2063.
ZHANG Jing, LI Bin, DAI Chaobo. Study on standard system for global energy interconnection[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2055-2063.
- [22] 戴观权, 蔡泽祥, 蔡煜, 等. 基于 IEC 61850 的配电网网络化保护通信建模与实时性可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 97-103.
DAI Guanquan, CAI Zexiang, CAI Yu, et al. Modeling and real-time reliability analysis of communication network for networked protection of distribution network based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 97-103.
- [23] 吕雅婧, 滕玲, 邢亚, 等. 北斗卫星导航系统在电力行业的应用现状[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(8): 70-74.
LÜ Yajing, TENG Ling, XING Ya, et al. Application status of Beidou satellite navigation system in power industry[J]. Electric Power ICT, 2019, 17(8): 70-74.
- [24] 刘林, 张运洲, 王雪, 等. 能源互联网目标下电力信息物理系统深度融合发展研究[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 2-9.
LIU Lin, ZHANG Yunzhou, WANG Xue, et al. Research on deep integration of power cyber physical system under energy internet goals[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 2-9.
- [25] 廖会敏, 玄佳兴, 甄平, 等. 泛在电力物联网信息安全综述[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(8): 18-23.
LIAO Huimin, XUAN Jiaying, ZHEN Ping, et al. Overview of information security in ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power ICT, 2019, 17(8): 18-23.
- [26] 陶鹏, 张洋瑞, 李梦宇, 等. 基于 Graph 模型的海量用电数据并行聚类分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 144-151.
TAO Peng, ZHANG Yangrui, LI Mengyu, et al. Parallel clustering analysis for power consumption data based on graph model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 144-151.
- [27] 王之伟, 陆晓, 刁瑞盛, 等. 基于深度强化学习的电网自主控制与决策技术[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 34-43.
WANG Zhiwei, LU Xiao, DIAO Ruisheng, et al. Deep-reinforcement-learning based autonomous control and decision making for power systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 34-43.
- [28] 孙毅, 黄婷, 崔晓昱, 等. 互联网视角下的泛在电力物联网[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 3-12.
SUN Yi, HUANG Ting, CUI Xiaoyu, et al. Ubiquitous power internet of things from the perspective of internet[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 3-12.
- [29] 李大伟, 霍瑛. 基于侧链技术的电力物联网跨域认证研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 8-12.
LI Dawei, HUO Ying. Cross domain authentication of power IoT based on side chain[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 8-12.
- [30] 高志远, 曹阳, 徐昊亮, 等. 电力系统关键技术发展论刍议[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 14-17.
GAO Zhiyuan, CAO Yang, XU Haoliang, et al. Primary discussion on the key technologies development of power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 14-17.

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-09-11

作者简介:

高志远(1972—), 男, 通信作者, 教授级高级工程师, 研究方向为智能电网、厂站自动化系统; E-mail: gaozhiyuan@epri.sgcc.com.cn

彭林(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为智能电网信息技术;

李炳林(1970—), 男, 研究员级高工, 研究方向为电力通信网络与传感。

(编辑 葛艳娜)