

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191212

美国 NIST 互操作性智能电网框架分析与启示

邓杰¹, 姜飞¹, 涂春鸣²

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 智能电网发展至今, 各国根据本国能源特点建立了不同的智能电网技术标准, 较好地发展了适合于本国的智能电网。近年来泛在电力物联网的建设逐步成为我国电网智能化发展的新战略, 美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)公布的互操作智能电网技术框架以及智能电网网络安全标准体系对我国泛在电力物联网建设具有一定借鉴意义。分别从技术框架构成、网络安全策略角度分析了美国 NIST 公布的互操作智能电网技术框架以及智能电网网络安全标准体系。通过研究美国 NIST 互操作性智能电网技术框架及网络安全标准, 分析智能电网中互操作性的设计方案, 并总结美国智能电网技术对我国新阶段泛在电力物联网建设的启示。

关键词: 智能电网; 泛在电力物联网; 技术框架; 互操作性

Study of NIST's interoperable smart grid technology architecture

DENG Jie¹, JIANG Fei¹, TU Chunming²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Since the development of smart grids, countries have established different smart grid technical standards based on their own energy characteristics, and developed smart grids suitable for their own countries. The construction of Ubiquitous Power Internet of Thing (UPIoT) has become a new strategy for the development of smart grids in China. The NIST's (National Institute of Standards and Technology) interoperable smart grid conceptual architecture model and smart grid cybersecurity standards have certain reference significance for the construction of UPIoT in China. This paper analyzes the NIST's interoperable smart grid conceptual architecture model and smart grid cybersecurity standards from the perspective of technical architecture and cybersecurity strategy. By studying conceptual architecture model and cybersecurity standards of the NIST, it analyzes interoperability design of the smart grid and summarizes the inspiration of U.S. smart grid technology to China's new stage of UPIoT construction.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707014), Youth Fund of Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2018JJ3534), and Key Laboratory of Renewable Energy Electric-Technology of Hunan Province (No. 2017ZNDL005).

Key words: smart grid; UPIoT; technology architecture; interoperability

0 引言

分布式能源、能效技术、可再生能源技术等新兴节能技术及大数据、云计算、移动互联网、物联网等新兴信息技术的发展, 使全球能源向清洁化、电气化和智能化方向快速推进^[1-3]。电力物联网作为物联网在智能电网中的应用, 成为全世界电网发展的重要方向^[4-5]。

2001 年, 美国电力科学研究院(Electric Power

Research Institute, EPRI)首次提出“Intelligrid”(智能电网)概念, 并于 2003 年提出了《智能电网研究框架》^[6]。美国政府于 2007 年发布了《能源独立和安全法案》(Energy Independence and Security Act, EISA), 其将“构建现代化国家电力输配电网系统最终建成智能电网系统”编纂为法律条款; 其后, 于 2009 年发布了《美国复苏与再投资计划法案》(The American Recovery and Reinvestment Act, ARRA), 关注电力传输和能源可靠性等关键技术领域, 并投资 45 亿美元用于建设智能电网^[7-8]。美国能源部输配电办公室于 2003 年出版的《GRID 2030》中, 明确提出到 2030 年美国电力网络将提高电力网络间任意两点之间的电力流和信息流双向联通^[9]。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目资助(51707014); 湖南省自然科学基金青年项目资助(2018JJ3534); 可再生能源电力技术湖南省重点实验室基金资助(2017ZNDL005)

目前,美国重点关注电力网络基础架构的升级,较大力度地利用新兴信息技术,实现电力系统信息化、智能化。

欧洲分布式能源和电动汽车的迅速发展对其配电网稳定与经济运行带来巨大挑战。1998年,欧盟启动实施的第5框架计划(EU's Fifth Framework Programme, FP5)中,开设了“欧洲电网中可再生能源和分布式发电整合”专题^[10]。2005年,“智能电网(Smart Grids)欧洲技术论坛”正式成立,提出了较为完善的智能电网概念^[11]。近年来,欧盟提出的“战略能源技术规划”(Strategic Energy Technologies Plan, SET Plan),使欧盟智能电网建设再次成为高度关注的关键领域,并随之实施了以输电公司和供电公司作为研究主体的“欧洲电网计划”(European Electricity Grid Initiative, EEGI)^[12-13]。由于欧洲能源政策强调对环境的保护与可再生能源的发展,欧洲电网建设更侧重于关注新能源和分布式能源的友好、灵活接入^[14-15]。

作为能源消耗大国日本一次能源长期大量依赖进口,其能源发展强调实现非石油能源多样化,其电网注重核电与新能源的发展。因此,日本政府先后出台多项政策鼓励光伏等新能源发展^[16-17]。大规模光伏、风能等间歇性新能源并网,会产生电力短缺和频率波动等负面影响。为使本国智能电网持续发展,日本政府重点关注孤岛电网环境下构建智能电网稳定与经济运行,致力于解决在大规模间歇性新能源下如何统一控制电力、频率波动等问题^[18]。

在我国,1999年,清华大学相关学者较早提出了“数字电力系统”概念^[19]。国家电网公司于2009年5月举行的特高压输电技术国际会议上系统性提出了建立“坚强智能电网”计划(建设以特高压电网为骨干网架,各级电网协调发展,具有信息化、自动化、互动化特征的统一坚强智能电网)^[20];并于2011年发布《智能电网全面建设行动计划总报告》,使得我国智能电网建设从“规划试点”走向了“全面建设”阶段。2012年,国家科技部发布《智能电网重大科技产业化工程“十二五”专项规划》,确定了“十二五”期间智能电网科技发展思路与发展目标;2013年,科技部和发改委印发《“十二五”国家重大创新基地建设规划》,将智能电网与特高压纳入国家重大创新基地建设;2013年3月,我国颁布的《能源发展“十二五”规划纲要》明确提出了要推进智能电网建设;2019年10月,国家电网公司发布了《泛在电力物联网白皮书 2019》,明确了泛在电力物联网的发展目标、技术及标准体系等战略问题^[21-22]。

目前,我国及美国、欧洲、日本等国家和地区都在积极开展电网智能化、信息化建设,各个国家和地区基于对本国或本地区能源禀性的理解,致力于建设适合本国或本地区的智能电网。然而,各建设主体在智能电网标准制定等多方面未达成共识。

本文分析了电网智能化、信息化的发展趋势,重点研究了美国国家标准与技术研究院发布的可互操作性智能电网框架路线图,旨在进一步梳理智能电网的基本准则及建设思路,为我国电网智能化发展新阶段建设泛在电力物联网,实现泛在电力物联网与坚强智能电网的“两网”深度融合最终形成能源互联网提供参考。

1 新型现代化智能电网内涵理解

1.1 智能电网的含义

智能电网通常是指将现代信息系统融入到传统电力网络后所形成的新型电力网络系统。目前对于智能电网的定义,国际上并未形成统一的观点。电力物联网是物联网技术与智能电网技术融合的新型电力网络技术。

美国依托先进的互联网信息技术,强调利用数字信息技术与新能源技术改进传统电力系统的稳定性、安全性。美国智能电网覆盖发电、输配电、市场等多方面,以实现电网任意两点之间的互联互通为目标。美国 NIST 发布的智能电网概念框架从本国的能源发展角度出发,利用所建立的智能电网概念参考模型及其框图,分析互操作标准需求,提出优先行动计划,其内容涵盖用例分析、标准互操作性测试、信息安全等。

我国电力行业仍处于发展期,强调在增强电网智能信息化的同时,关注输配电网的建设以及各级电网之间的协调发展。目前,国家电网公司正在推进坚强智能电网和泛在电力物联网两网建设。通过坚强智能电网建设,推动各类用能设备之间协同互动,保障能源电力可靠优质供应,大电网安全运行^[23];通过泛在电力物联网建设,实现电力系统各个环节万物互联、状态全面感知;“两网”深度融合建设实现物理网与互联网的结合,打造以电力为中心,生态互联的新型智慧能源平台。

1.2 智能电网的特点

各国根据本国传统电力系统及能源体系的特点,形成了具有不同特征的电网体系。通过对比分析,发现相比于传统电力网络,新型信息化、智能化电网的主要特点可以概括如下^[24-27]。

1) 可监控性

智能电网中连接着数量不少的不可控源和多变源, 借助信息技术, 可实现实时监控电力系统中的多变源, 实时跟踪不可控源变化, 保证电力系统的稳定运行。近年来, 分布式电源的快速发展, 加剧了电网面临的不确定性, 因此, 可观测性和可控性对于智能电网的安全稳定运行至关重要。

2) 灵活性

相比传统电力网络, 新型智能电网中以风、光等为主的可再生能源发电接入电力网络, 并存在更多类型的负荷。在系统功率/负荷发生较大变化、功率存在较大不平衡情况下, 智能电网的灵活性应能够通过调节系统内部发电或用电行为, 维持电网运行的高质量。

3) 互操作性

以信息通信技术(Information and Communication Technology, ICT)作为支撑, 智能电网在满足可监控性与灵活性要求的同时, 实现信息通信技术与控制技术、传统电力系统的结合, 最终达到智能电网系统中各网络、设备或元件等互相协调运行、互联互通, 即互操作性。

综合型的智能电网系统需要在“电力设备层、信息交流层、商业交易层”等多层级满足互操作性。美国电网智能化架构委员会(Grid Wise Architecture Council, GWAC)从系统全局角度提出了智能电网互操作性层级, 又称为 GWAC 堆层(GWAC Stack), 将智能电网构建过程从底层到高层的互操作性要求明确区分。GWAC 智能电网互操作性层级具体如图 1 所示。



图 1 GWAC 智能电网互操作性层级

Fig. 1 GWAC's interoperability layers of the smart grid

由图 1 可知, 在互操作性层级划分中, 基本的物理设备及用户数据传输和信息交互等技术性层级, 一般定义为互操作性层的最底层; 商业内容及语义认知等信息层级定义为次高级; 商业流程、目标等组织性层级定义为互操作性层级最高层。GWAC 互操作性层级从纵向跨部门角度划分了智能电网不同部门、不同层级下保证智能电网基本运营及信息互联的互操作性要求, 帮助智能电网利益相关方理解智能电网的具体互操作性要求, 以建立互联互通的智能电网。

智能电网的建设和发展围绕着可监控性、灵活性、互操作性展开。目前, 我国电网建设在互操作方面研究较少, 发展较缓慢; 而欧美国家在国际上有常设的技术委员会或工作组参与到国际标准的制定, 在互操作性上占有优势。因此, 在智能电网建设的新阶段, 我国需要重视互操作性的研究, 建立新型互联互通的智能电网, 为以后参与国际智能电网标准的定制提供中国思路。

2 NIST 智能电网架构框架

随着世界多国进行各自智能电网的建设, 为实现各智能电网之间的互联互通, 美国 NIST 发布了互操作性智能电网架构框架^[28]。NIST 从美国能源互联网发展的角度出发, 利用所建立的智能电网概念模型及其框图, 分析了智能电网下各子系统的互操作标准需求, 提出优先行动计划以及智能电网发展带来的相关问题解决方案, 诸如: 用例分析、互操作性标准测试认证策略、信息安全策略等。

2.1 NIST 智能电网架构框架预期目标

美国 NIST 智能电网框架旨在为建设多方互联互通、涵盖面广的智能电网提供技术参考, 其基本预期目标如下。

1) 兼容性

智能电网框架应能支持大量无论新旧的技术方案, 应当能够灵活地将新兴技术和传统电力设备纳入智能电网框架体系, 并尽可能减少额外投资和额外用户定制。

2) 互操作性

智能电网框架应能够实现智能电网与其他系统和标准的互通互联。互操作性包括智能电网与第三方产品、管理体系、网络安全体系等互联互通。

3) 安全可靠

智能电网框架需要具备抵御非法入侵与非法盗取网络及实体资产的能力, 且能够满足智能电网体系中所有利益相关成员的安全要求。

4) 可升级性

随着智能电网的不断发展，智能电网框架应保证整个智能电网对新兴技术的高接受度，保证在不影响智能电网正常运营情况下实现平滑升级。

5) 创新性

智能电网框架应具备创新力。这包括了适应管理和政策上的创新、商业进程和模式上的创新、信息技术方面的创新以及新型能源系统并入智能电网框架体系。

6) 管理性

智能电网框架应具备一个好的管理系统，该管理系统应能保证整个智能电网各利益相关方的政策一致性，规范化智能电网系统整个生命周期内的设计和操作，实现智能电网的可持续性发展。

7) 经济高效

智能电网框架应能通过规范标准的操作和运营，节省投资资本以及运营资本。并保证智能电网运营商或参建方能通过日渐成熟的本国和国际市场采购来自多供应商的互操作性智能电网设备。

2.2 NIST 智能电网概念模型框架

为实现智能电网架构预期目标，在 NIST 智能电网概念框架模型中 NIST 将智能电网划分为七个领域，每个领域及其子域为智能电网概念框架下的成员和商业服务内容，各个领域范围包括各类型的服务、各组成成员及利益相关方。NIST 智能电网概念模型下七个领域中各领域包含的成员及其在智能电网中发挥的作用具体如表 1 所示。

表 1 NIST 智能电网概念模型的领域及其角色/功能

Table 1 Domains and roles/services in the NIST smart grid conceptual model

序号	领域	角色/功能
1	用户	电能的终端用户，同时也可以发电、储存和管理能源。通常包括三类用户：居民用电用户、商业用电用户、工业用电用户。
2	市场	电力市场的参与者和经营者
3	服务供应商	给用户和电网系统提供服务
4	运营商	管理电力系统的操作运行
5	发电	发电，具备一定的储能功能以作备用，包括了传统的发电厂及分布式能源
6	输电	长距离大功率输电网络，储能和发电
7	配电	向用户供电的配电网络，储能和发电

由表 1 可以看出：通常同一领域下的组成成员具有相似性。但同一领域下，不同成员间可能存在不同类型的信息通信方式，不同成员也可能需要满足不同的可操作性要求。为使智能电网实现稳定运行，某一特定领域下的成员通常会和其他领域的成员进行互动交流；并且，某一特定领域可能包含其

他领域的组成部分，某一组成成员也可能在多领域下存在多种角色。例如，某一地区的配电网除了该地区配电网部分，同样包括运营商部分以实现诸如配电管理等功能，也包括用户侧以实现诸如能源监控等功能。

NIST 智能电网概念模型框架是个法律和管理规范框架体系，能够保证智能电网体系下多成员之间的互联互通，满足多成员的互操作性要求，保证政策的实施以及管理。从管理规范的角度，在国家层面 NIST 概念模型框架采用美国能源监管委员会 (Federal Energy Regulatory Commission, FERC) 的管理规范，在州及以下层面采用公共事业委员会管理规范。以上规范旨在保证电力市场公平公正，保证智能电网安全可靠运行。

NIST 智能电网概念模型包括七个领域不同成员间的关系以及整个智能电网框架，其具体概念模型如图 2 所示。

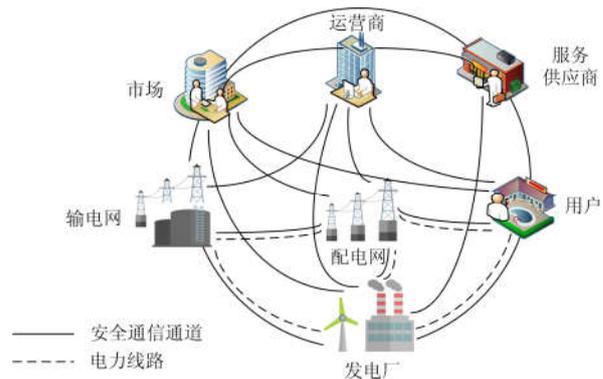


图 2 NIST 智能电网概念模型^[28]

Fig. 2 NIST smart grid conceptual model

图 2 中 NIST 智能电网概念模型将整个智能电网划分为发电、输电、配电、用户、市场、运营商、服务供应商等七个领域，领域之间除通过传统物理电力线路连通，还包含安全通信通道实现信息连通。发电厂、输电网、配电网、用户组成的电力物理网络除了通过传统的电力线路实现基本的电力连通，也通过安全通信通道实现电力网络内部的互联互通。市场、运营商、服务供应商等领域为电力物理网络服务，通过安全通信通道与电力网络中每个领域连通，从而实现各领域之间的信息连通、互联互通，将智能电网整体框架内涵扩宽，形成了一个包含各利益相关体、生产者、消费者、服务者在内并实现各领域之间互联互通的智能电网大架构。

2.3 美国智能电网架构模型

美国智能电网架构模型(Smart Grid Architecture Model, SGAM)由 NIST 下属智能电网互操作性专家

小组(Smart Grid Interoperability Panel, SGIP)联合欧盟智能电网合作小组(European Union Smart Grid-Coordination Group, SG-CG)与国际电工委员会相关合作小组共同开发。SGAM 架构采纳多种信息通信技术标准, 从多个角度更深层次描述了智能电网中互联互通功能和信息通信技术的关系。

2.3.1 SGAM 架构模型迭代层级

作为发展的新兴技术, 智能电网系统框架构建是个迭代更新的过程, 通过迭代更新实现智能电网系统框架的发展, 形成成熟的框架体系。许多智能电网框架只描述了电网框架的技术部分而没有将技术部分反映到实际商业需求。为反映技术框架同实际商业需求间的关系, NIST 下属智能电网互操作性专家组(Smart Grid Interoperability Panel, SGIP)将智能电网概念框架的构建过程定义为一个多迭代层级结构, 该多迭代层级结构具体层级划分以及相关定义如下。

1) 概念层

概念层包括各利益相关方希望智能电网实现的功能架构, 也包括未来智能电网发展方向需要满足的功能, 以及满足新功能应有的服务和成员结构。

2) 逻辑层

逻辑层为智能电网各服务案例的逻辑性模型, 解释智能电网各服务逻辑上的执行过程以及智能电网框架各架构层次间、各服务角色间的理论逻辑关系及逻辑构成。

3) 物理层

物理层是整个智能电网系统实体化落地的关键。物理层包括智能电网具体实施及智能电网相关人员构建的操作规范, 包括实现智能电网各利益相关方互联互通、互操作所必要的软件、通信网络以及电力网络。

4) 执行操作层

执行操作层是使智能电网系统中的软件产品、工作人员以及各独立运营部门实现具体功能的重要层级。规范合理的正确操作执行才能保证整个智能电网大系统的健康稳定发展。

2.3.2 不同智能电网架构互联模型

为实现各个国家不同标准下智能电网的互操作, 美国智能电网架构委员会(Smart Grid Architecture Committee, SGAC)将图 1 所示的 NIST 智能电网概念模型中的主要领域模型细分为多个层次, 这些层次主要聚焦实现不同智能电网架构间互操作的智能电网新兴技术。

智能电网架构分层的概念最初由 GWAC 提出并发布了 GWAC 互操作堆层框架, 该组织发布的

GWAC 互操作堆层框架为 SGAM 架构的参考框架。SGAC 将多个框架结构进行整合, 扩展成涵盖内容更宽、包含利益相关方更多的智能电网框架体系, 该体系下包含 GWAC 互操作堆层框架、开放组架构框架(The Open Group's Architecture Framework, TOGAF)以及 SGAM 框架, 实现了多个不同框架间的互联互通, 各框架之间的关系如图 3 所示。

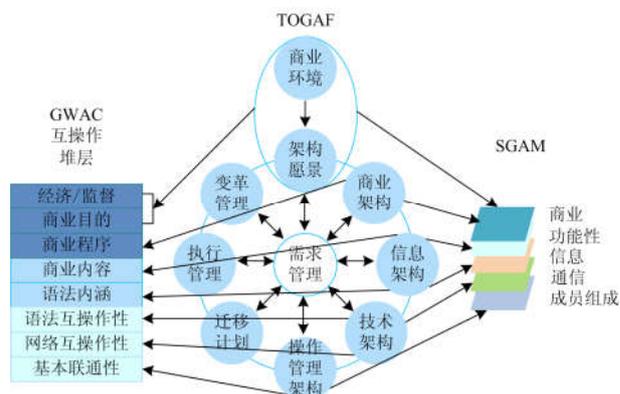


图 3 SGAM 架构与 GWAC 堆层、TOGAF 框架互联图^[28]

Fig. 3 Interaction between SGAM architecture, GWAC stack and TOGAF

图 3 反映了各智能电网框架体系内部的关系以及框架间的关系。GWAC 互操作堆层框架将智能电网架构划分为基本联结、网络互操作性、语法互操作性、语法内涵、商业环境、商业程序、商业目的、经济/监督等多层次。SGAM 架构将智能电网架构分为商业、功能、信息、通信、成员组成等多层次。TOGAF 框架以需求管理为中心, 将智能电网框架划分成架构愿景、商业架构、信息架构、技术架构、操作管理架构、技术迁移、操作执行管理、变革管理等多层次。各个框架体系之间的架构并不完全相同, 为实现各框架之间的互联互通, 将 TOGAF 框架映射到其他框架体系, 寻找 TOGAF 框架与其他框架之间的联系, 构建具有互操作性的多框架智能电网框架体系。

其中, TOGAF 框架映射到 SGAM 框架时, TOGAF 框架中的商业架构映射到 SGAM 框架中的商业层, 信息架构映射到功能层以及信息层, 技术层映射到通信层, 操作管理架构映射到成员组成层。TOGAF 框架映射到 GWAC 互操作堆层框架时, TOGAF 框架中的架构愿景映射到 GWAC 互操作堆层框架中的商业目标及经济/管理层, 商业架构映射到商业程序层, 信息架构映射到商业环境以及语法体系层, 技术架构层映射到语法互操作性、网络互操作性层, 操作管理架构映射到基本联结层。各框

架之间的互相映射使不同系统框架实现互联互通，扩大了智能电网框架体系，为新兴技术、新兴服务融入到智能电网已有框架、其他不同的框架体系接入智能电网框架体系提供参考。

2.3.3 智能电网架构矩阵模型

为更好地理解智能电网架构体系中各领域、各成员、各层级之间的关系以及相互之间的影响，NIST 从智能电网框架的迭代层级与系统架构的层级等多维度角度考虑，构成了图 4 所示的反映智能电网系统内部具体关系的系统框架矩阵图。

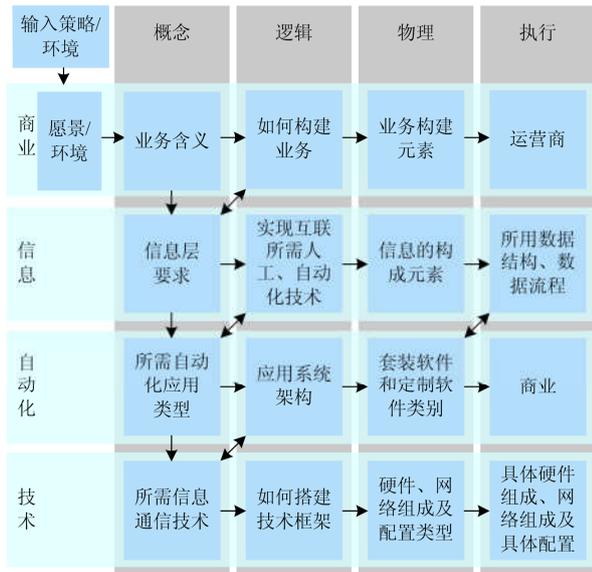


图 4 考虑框架层级和迭代等级的架构矩阵图^[28]

Fig. 4 Architecture matrix considering architecture layers and iteration levels

图 4 描述了在综合考虑架构迭代及架构层级的情况下，智能电网架构体系构建过程中各层级各领域间的联系，以及细化到每一单独决策步骤的含义和各步骤所做的决定对相关架构建设的影响。

在图 4 所示的架构矩阵图中，智能电网系统层级表示矩阵的行，包括商业、信息、自动化、技术等四个层级；SGAM 架构模型迭代层级表示矩阵的列，包括概念层、逻辑层、物理层、执行层等四个层级；矩阵中每个元素块代表了在综合考虑两种层级下智能电网架构框架中某一业务的概念，矩阵元素之间关系反映了智能电网各领域之间的互操作性。其中，矩阵的各行具体含义如下。

- 1) 商业架构主要描述产品/服务策略，包括组织架构、功能、信息以及地理层的商业环境。
- 2) 信息架构确定信息组织、信息流及信息协议，是数据结构中信息通信技术概念的超集。
- 3) 自动化架构确定满足企业信息管理所需要

的自动化智能服务(包括软件、感应器等)。

4) 技术架构反映满足自动化所需要的信息技术，包括计算机、通信拓扑和配置。

矩阵中输入的决策与环境为智能电网架构体系建设的大背景环境与整体目标。确定各相关利益方的整体需求及架构建设整体目标是智能电网架构建设的前提要求，智能电网架构框架政策与背景由技术体系及相关利益方中影响力最大、受益最大的成员组织所决定，同时也考虑影响其他组织成员在智能电网体系中正常工作的因素。

利用图 4 描述的架构矩阵，将 NIST 智能电网概念模型映射到该架构矩阵中，分解 NIST 智能电网概念模型到每一细节，得到如图 5 所示的智能电网概念框架映射图。

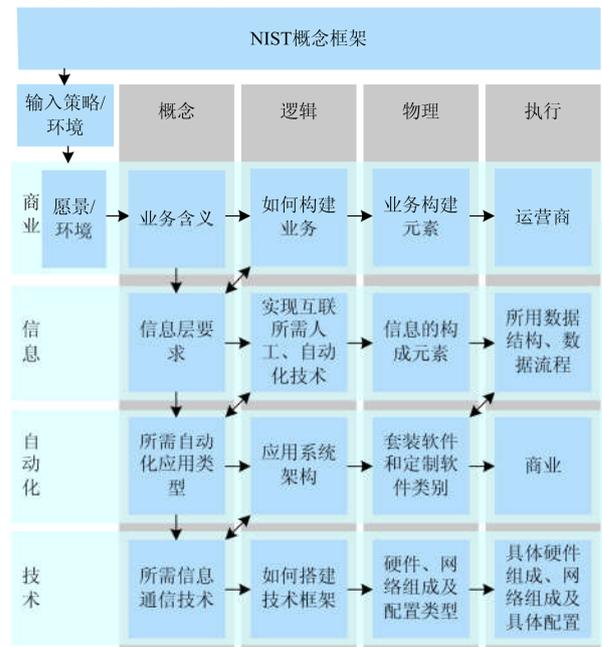


图 5 NIST 智能电网概念框架映射架构矩阵图^[28]

Fig. 5 NIST smart grid conceptual model mapping to architecture matrix

服务导向型架构设计需要将整体工作具体细化到各个服务模块，并实现各服务之间的互操作性。图 5 反映了 NIST 智能电网概念模型映射到架构矩阵的具体情况。NIST 智能电网概念模型将各领域模型映射到架构矩阵中，解释了智能电网的架构构成以及各专业成员的概念。将概念模型映射到架构矩阵图中，有利于减少对智能电网概念模型解读的误解，减少因此引起的架构理解偏差及其可能造成的对整体架构的影响。同时，有利于实现平台入口统一化、细则建设规范化，满足智能电网的互操作性。接入架构矩阵中各步骤之间的互操作性关系，明确

了各利益相关方设计智能电网子系统及相关服务时需要考虑的因素, 反映了 NIST 智能电网概念模型具体构建过程。

2.3.4 智能电网三维立体架构模型

在确定智能电网设计目标和原则的基础上, 结合智能电网的特点, 从电网结构、系统构建、关键设备、信息交换、商业支持以及关键技术等多个角度分析智能电网框架结构, 提出智能电网三维立体架构, 三维立体架构细致地描述了智能电网内部结构及成员间互操作关系, 其具体架构如图 6 所示。

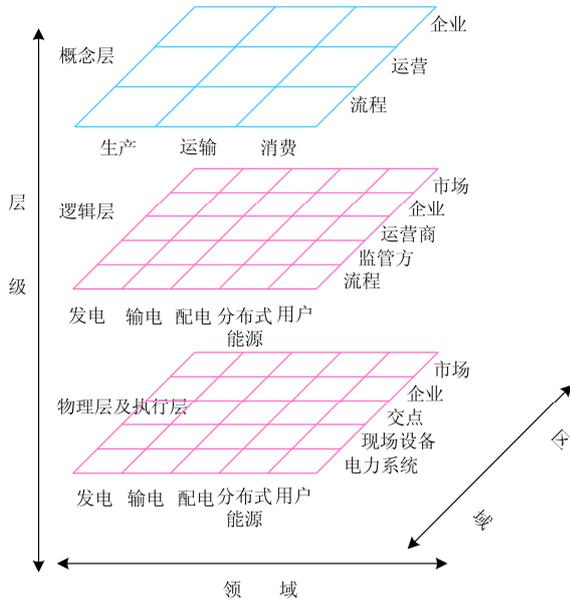


图 6 NIST 智能电网概念模型三维立体架构图^[28]

Fig. 6 NIST smart grid conceptual model three-dimensional architecture diagram

图 6 中, 第一维度为架构迭代层, 包括概念层、逻辑层、物理层及执行操作层; 第二维度为系统领域, 包括发电、输电、配电、分布式电源(Distributed Energy Resources, DER)、前端用户等; 第三维度为

系统区域, 描述了智能电网中参与发电、输电、用电中的各实体, 反映了智能电网中的层级架构, 包括市场、企业、运营商、电力系统等。将 NIST 概念模型框架细分到每个维度。其中, 在概念层按照领域分包括了发电、输电、用电, 按照区域划分包括了企业、运营、商业流程。逻辑层按领域区分包括了发电、输电、配电、分布式能源、用户, 按区域分包括了市场、企业、运营商、监管方、商业流程。物理层及执行层按照领域分包括了发电、输电、配电、分布式能源、用户, 按区域分可分为市场、企业、交点、现场设备、电力系统。

在 NIST 智能电网概念模型三维立体图中, 各分层不同维度所包含项可根据具体情况分类。同时, 为实现智能电网子业务间的互操作性, 在每个分层中智能电网具体业务单元可以映射到多个分块上, 即一种业务单元可以跨多个领域、涉及多个区域、同时也可涵盖多个系统层级。从宏观角度进行分析, 将三维架构图中每一领域作为体系架构的一个纵切面, 每个纵切面根据该领域自身的特点和构建形式, 可以独立形成该领域下的包含多种业务智能电网框架体系, 将各领域剖面联系起来可组成系统整体框架。各领域剖面反映了该领域下各成员之间的互操作性关系, 各领域剖面之间的联系反映了各领域之间的互操作性。

智能电网三维立体图从系统层级、领域划分、区域划分三个维度构建了完整细致的智能电网的具体架构, 可以反映智能电网新兴业务在智能电网架构中的具体构成; 也可选取其中单个或两个维度, 聚焦到系统层级、领域层或区域层下智能电网的具体业务构成、物理架构等。

2.4 NIST 智能电网概念框架多维剖析

将 NIST 智能电网概念框架从迭代层级、系统层级及领域级别等多个维度剖解, 得到如图 7 所示 NIST 概念模型具体架构组成情况。

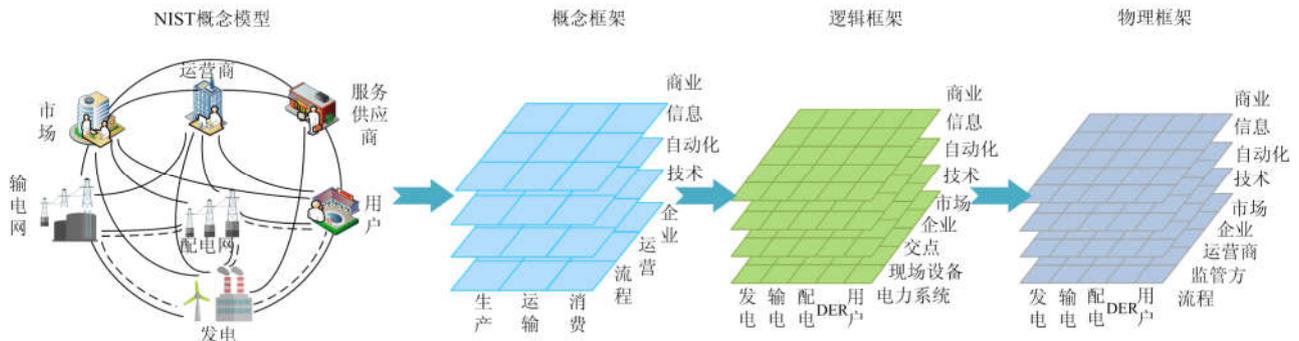


图 7 NIST 智能电网概念模型多维度剖析图^[28]

Fig. 7 Multi-dimensional analysis of NIST smart grid conceptual model

由图 7 可以得知,NIST 智能电网概念模型涵盖面广。从系统迭代层级角度,智能电网的建设按照由概念框架到逻辑框架再到最后物理框架的流程,实现智能电网的最终落地。同时,不同迭代层级下,包含有领域层级及区域层级,反映了该迭代层级下智能电网的具体构成。多维度剖析图将智能电网多种分析模型及分析方法融入其中,宏观上反映了 NIST 智能电网概念模型整体架构的构建过程,微观上反映了各层级之间的结构及互操作性。

多维度剖析图将宏观角度的 NIST 智能电网概念框架解构到具体内在结构,细致地反映了 NIST 概念框架中七个领域之间在迭代过程中和不同系统层级之间的相互关联性,说明 NIST 概念框架在标准体系建设过程始终围绕实现智能电网内部及各系统间的互操作进行设计。

3 网络安全策略

电网正在从一个相对封闭的系统转变为一个复杂的、高度互联的大互联系统。智能电网除发电、输电、配电网中的基础电力设施外,还包括以信息技术(Information Technology, IT)、工业控制技术(Industrial Control Systems, ICS)以及网间传送命令信息为基础的通信设施。这些通信技术及设施用于电网运营商及用户之间的用户用能及消费信息通信交流。在不影响智能电网运行的情况下,设计能维护智能电网安全的网络安全策略成为智能电网技术发展面临的新问题^[29-30]。

随着智能电网与支持智能电网运行的信息通信网络基础设施结合愈趋紧密,信息通信系统故障或物理电力系统故障都会导致智能电网系统整体发生连锁故障,提高智能电网运行面临的风险隐患,严重时可引起电力运行过程中大停电事故。

传统的网络安全主要考虑信息系统的安全,以保证系统安全稳定性、用户信息私密性。智能电网的网络安全性除考虑网络信息系统外,还需要考虑网络信息系统、控制系统与物理电网系统的结合,以保证智能电网的安全可靠及用户隐私。智能电网的网络安全策略需要保证物理电网与信息通信网络在技术、执行操作、管理等多方面的平衡。

为解决智能电网技术发展带来的新型网络安全问题,为智能电网网络安全的发展提供政策支持、标准支撑,NIST 成立了智能电网信息网络安全委员会(Smart Grid Cybersecurity Committee, SGCC),该委员会共有 13 个下属工作小组,各工作小组负责不同内容,共同建设智能电网信息网络安全。2010 年,该组织发布了 NISTIR 7628 号报告(National Institute

of Standards and Technology Interagency Report 7628)《智能电网信息安全指南》(Guidelines for Smart Grid Cybersecurity)^[31]。

3.1 SGCC 下属小组

SGCC 下属 13 个工作小组具体包括了:架构小组、底层-高层分析小组、云计算小组、密码学小组、设计原则小组、高级安全需求小组、NISTIR 7628 用户指南小组、隐私小组、研发小组、风险管理过程案例研究小组、标准小组、测试认证小组、缺陷分析小组。这 13 个小组的具体负责内容及介绍如表 2 所示。

SGCC 下属 13 个小组分工各不一样,各小组从智能电网网络安全多角度出发解决网络安全问题。

1) 架构小组、底层-高层分析小组、设计原则小组等旨在从智能电网架构层面及业务设计层面规范智能电网网络安全标准,并确定网络安全隐患类别。

2) 云计算小组、密码学小组旨在通过构建技术规范及相关评估框架解决智能电网特殊技术领域的网络安全问题。

3) NISTIR 7628 用户指南小组、高级安全需求小组、隐私研究小组、风险管控过程案例研究小组等从系统全局及智能电网相关利益方角度出发,为智能电网提供相关的技术指南,评估相关安全风险,同时通过分析和研究可能存在的隐私和安全隐患保护用户的隐私和安全。

4) 研发小组、标准小组、测试认证小组、缺陷分析小组等从系统全局、高层角度,研讨并确定智能电网网络安全策略及网络安全发展方向,评估智能电网现行标准是否存在网络安全隐患,并对智能电网各子系统下组成成员提供网络安全测试及安全隐患测试。

3.2 NISTIR 7628 标准

NISTIR 7628 报告分三卷介绍了 NIST 智能电网网络安全,第一卷(NISTIR 7628 标准)主要介绍智能电网信息安全的战略结构和信息安全需求;第二卷主要介绍网络隐私风险问题;第三卷主要提供智能电网网络安全现有标准目录和参考内容等。

NISTIR 7628 标准中提出了全面的智能电网网络安全分析框架,可用于智能电网中各相关利益方开发适合特定智能电网安全风险和脆弱性等特性的网络安全策略。实施智能电网网络安全战略要求智能电网体系制定和执行一个总体网络安全风险评估流程。NISTIR 7628 中将智能电网网络安全发展战略的任务定义为五大项,战略中各项任务由 NIST 下属网络安全工作小组(Cybersecurity Working Group, CSWG)及 SGCC 承担。各项任务具体如图 8 所示。

表 2 SGCC 下属小组介绍

Table 2 Introduction of the SGCC subgroups

小组名称	小组介绍
架构小组 (Architecture Subgroup)	旨在基于智能电网整体架构, 保证智能电网网络安全架构的发展。同时积极推进智能电网网络安全架构的发展满足新兴技术的发展要求。
底层-高层分析小组 (Bottom-Up Analysis Subgroup)	底层-高层分析小组确定了智能电网中的一些具体网络安全问题, 供智能电网网络安全建设进一步开展工作。
云计算小组 (Cloud Computing Subgroup)	旨在研究智能电网中的云计算服务。介绍智能电网云计算的风险, 提供用以评估和执行智能电网特定云计算的框架。
密码学小组 (Cryptography Subgroup)	旨在识别智能电网系统及其相关设备范围内的技术密码学和密钥管理问题以及可能的解决方案。
设计原则小组 (Design Principle Subgroup)	承接底层-高层分析小组、密码学小组的系统设计需考虑因素的工作。
高级安全需求小组 (High-Level Security Requirements Subgroup)	高级安全需求小组发布了一组适用于智能电网的初始安全需求, 并审查其他安全需求文件, 以确保与智能电网中其他组织的需求协调一致。
NISTIR 7628 用户指南小组 (NISTIR 7628 User's Guide Subgroup)	发布了智能电网系统各子系统组成成员易于理解的指南。指南主要用于帮助用户根据 NISTIR 7628 标准确定各子系统网络安全等级及网络安全要求。
隐私小组 (Privacy Subgroup)	旨在研究和识别已有或新兴智能电网互操作标准中可能存在的隐私安全和风险。
研发小组 (Research and Development(R&D) Subgroup)	旨在确定智能电网系统及其相关设备范围内的网络安全高级研究和开发主题。
风险管控过程案例研究小组 (Risk Management Process(RMP)Case Study Subgroup)	通过将理论架构转入风险管控案例学习程序, 帮助用户了解理论架构接入实际系统后会面临的机遇和风险。
标准小组 (Standards Subgroup)	主要根据 NISTIR 7628 文件中的网络安全和隐私保护要求评估相关技术标准及其他相关文件。
测试认证小组 (Testing and Certification Subgroup)	旨在为智能电网系统、各子系统及各组成成员建立起网络安全测试指南及方法。
缺陷分析小组 (Vulnerabilities Subgroup)	旨在研究并划分智能电网中的潜在脆弱性缺陷类别, 并按照潜在缺陷类别分析可能存在的脆弱性缺陷。

由图 8 可知, 智能电网信息开发战略任务包括五个任务。

1) 考虑网络安全因素选取用例分析

通过一系列用例提供一个用于风险测评、逻辑

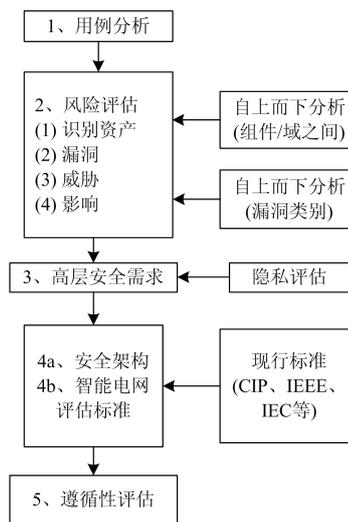


图 8 智能电网网络安全战略任务^[31]

Fig. 8 Smart grid cybersecurity strategy tasks

参考模型构建、分析真实网络安全需求的公共框架。

2) 风险评估

风险评估从全局高度评估资产, 评估网络潜在缺陷, 评估潜在威胁, 确认风险影响。评估方法包括: 缺陷分类、全面分析、自下而上分析、自上而下分析等。

3) 规范高层安全需求和隐私风险评估

从系统全局、高层角度规范智能电网网络安全需求, 智能电网信息开发战略任务包括了含信息通信和控制系统在内的信息安全需求以及传统电力系统的安全稳定运行需求。针对智能电网发展过程中出现的潜在隐私风险, 进行隐私风险评估。并提供给智能电网利益相关方一系列执行智能电网相关操作中所需考虑的隐私要求。

4) 开发逻辑参考模型、评估智能电网标准

根据智能电网概念框架模型, 需要从系统全局、高层角度开发一个更细化的网络安全逻辑参考模型。其能够反映概念框架中各组织间更具体的逻辑互动关系, 评估现有电网标准体系下与智能电网安全性有关的标准, 解决日益增加的安全需求所需的安全技术标准。

5) 遵循性评估

遵循性评估旨在为智能电网网络构建遵循性评估平台。SGIP 下属智能电网测试认证协会(Smart Grid Testing and Certification Committee, SGTCC)发布的《互操作性过程参考手册》(Interoperability Process Reference Manual, IPRM)中推荐了该组织认可的智能电网构建中提升网络安全性及互操作性的最佳方式及相应流程, 为智能电网平台搭建遵循性

评估平台。

智能电网网络安全战略涉及预防、监测、响应和恢复等多个方面，网络安全战略任务从这些方面提醒各利益相关方在开展智能电网网络安全工作时需要考虑的因素。

3.3 网络-物理联合攻击

网络安全战略的制定需要综合考虑网络攻击和物理攻击，智能电网作为传统电力网络与信息通信网络融合的产物，网络-物理联合攻击是智能电网可能遭受攻击的特有方式。网络-物理联合攻击分为三类。

1) 通过网络获取信息而开展的物理攻击

攻击者通过网络途径获取智能电网重要机密信息，通过获取的机密信息(重要负荷、重要发电厂变电站信息)物理攻击智能电网中重要节点，对整个电力系统生产活动产生重要影响。

2) 结合物理攻击的网络攻击

攻击者利用网络攻击联合物理攻击使攻击造成的影响最大化，或通过网络攻击影响物理攻击后电网的恢复过程。

3) 使用网络系统导致物理系统破坏的攻击

攻击者利用网络系统控制智能电网中物理设备，使设备处于非正常运行状态，最终导致物理系统受到破坏。

相比于传统电网承受的攻击形式，智能电网中特有的网络-物理联合攻击形式对智能电网系统造成的影响范围更大，持续性时间更长。在制定智能电网安全策略规划时，需要充分考虑智能电网面临的多种网络安全威胁，考虑电网面临的多种攻击，以减小安全威胁，减少对电网的安全运行影响。

4 泛在电力物联网

4.1 泛在电力物联网技术架构

在我国，泛在电力物联网的建设有助于加强传统电力网络的信息通信能力，提高电网数字化信息化水平。坚强智能电网承载实体电力传输能源流，泛在电力物联网承载电力网络之间信息通信数据流，两者融合建设，共同打造新型现代化电网。

从技术架构上看，泛在电力物联网主要分为感知层、网络层、平台层与应用层等四层结构^[32]。

感知层是泛在电力物联网的基础层级，主要承担网络终端数据采集任务，重点是借助物联网、新型传感技术，推动用户终端标准统一，实现终端数据统一感知接入；网络层是泛在电力物联网实现功能的重要部分，主要承担数据信息传输任务，重点是构建能满足泛在电力物联网下新兴业务发展需要

的信息通信网络；平台层主要解决数据管理问题，通过建立统一数据中心、完善终端物联管理平台、推广一体化“国网云”平台建设等数据、业务管理平台实现数据的高效管理，业务的协同处理；应用层主要解决数据价值创造的问题，包括电网企业对内、对外业务两方面的建设，打造新型能源生态，实现业务智慧化运营。

4.2 泛在电力物联网与坚强智能电网的关系

坚强智能电网承载电力能源流，泛在电力物联网承载信息数据流，两网不是相互独立的两部分，而是相辅相成、互相融合发展的。

坚强智能电网是新型现代化电网的核心组成成分，为大电网中电力安全稳定、灵活可靠运行提供输电、变电、配电等基础电力能源支撑。泛在电力物联网是新型现代化电网的信息神经网络，为电网中各组成成员间的信息交流、互联互通提供信息技术支撑。

泛在电力物联网与坚强智能电网共同融合发展，旨在最终实现物理网络与信息网络的融合，形成“物网统一”的能源互联网络系统。

5 美国 NIST 互操作性智能电网技术启示

5.1 中美两国智能电网技术发展方向对比

1) 美国电网技术发展

随着大量分布式能源、电动汽车、储能、需求响应设备接入电网，及复杂电力电子器件、控制和通信技术在电网中应用，美国电网逐步建成为一个高度互联的信息物理融合系统(Cyber-Physical System, CPS)。智能电网的高度集成、高度融合的特点对智能电网互操作性提出更严格要求。美国强调利用先进的信息通信技术建设智能电网，建立起互联互通、万物交互的智能电网；并在智能电网概念框架中将智能电网分为发电、输电、配电、用电、运营、市场、服务供应商七个领域，从不同领域间、领域内部各组成成分之间如何实现互操作出发，建立起多层次、多角度的智能电网框架。

2) 我国电网技术发展

我国电力行业仍处于发展阶段，早期电网建设更加注重输电网络的建设，即建设“坚强智能电网”，满足大电网安全稳定运行^[33-34]。近年来，大数据、云计算、物联网、移动互联网、人工智能、区块链等先进信息技术的快速发展，特别是物联网技术的突破，给我国电网技术的新一轮发展带来了新契机。

其中，泛在电力物联网是在坚强智能电网多年实践后提出的概念，并且坚强智能电网与泛在电力物联网的融合建设，打造能源流、业务流、数据流

“三流合一”的能源互联网,使我国电网的建设过程进入新阶段。

我国泛在电力物联网的建设,旨在围绕电力系统从用户至电网运行侧各环节,充分利用新兴信息技术,实现整个系统各个环节的互联互通。泛在电力物联网为坚强智能电网提供各部门间通信互联,是坚强智能电网实现生态互联的技术支撑。

目前,我国泛在电力物联网的建设处于战略突破期,如何结合新兴技术,实现业务协同、数据互通,初步建成泛在电力物联网成为主要攻坚点。在泛在电力物联网与坚强智能电网建设过程中,应该合理地参考其他国家电网技术发展的历程与遇到问题的解决方案。

5.2 美国智能电网技术对我国的启示

美国智能电网建设过程中,对互操作性的重视,对智能电网系统中各方如何实现互联互通的关注,给我国坚强智能电网及泛在电力物联网的建设发展提供重要的参考。

1) 建设电力系统与信息系统深度融合的新型现代化电网。在电网建设实践过程中,注重建立起信息与物理系统深度融合、实现高度互联互通的信息物理融合系统,实现坚强智能电网与泛在电力物联网的深度融合。

2) 注重新兴信息通信技术和新能源技术的发展及与泛在电力物联网和坚强智能电网融合。当前,5G 通信技术、云计算和大数据处理等信息通信技术在全球范围内受到广泛重视;风电、光伏等新能源在中国发展迅速。应注重将新兴信息通信技术及新能源技术应用于电网建设,打造信息通信快速便捷、能源需求高效响应的现代化电网体系。

3) 注重网络安全问题。电网信息化、智能化发展过程带来的新安全问题不可忽略,信息系统的信息安全问题与电力系统的传统安全问题交相叠加,对电网整体可能造成的影响很大。应注重建立涵盖电网各利益相关方的网络安全标准,并建立泛在电力物联网与坚强智能电网的相关网络安全评测机构。

4) 关注多平台的融合,构建统一包容的新型现代化电网平台。泛在电力物联网与坚强智能电网的融合建设作为我国电网建设的新兴目标,应注重打造一个贯穿电力系统生产运行、经营管理和对用户服务的综合数据业务平台,实现跨领域、多学科间的相互融合。包括注重平台入口的相通性,数据应用的互操作性、系统技术架构的统一性。

5) 建立相关行业标准、政策法规、监管机制及

工作小组等。行业标准是实现电网间各组成成员互联互通的必要条件,完善政策法规及良好的监管机制是电网发展的前提保障,成立相关工作小组有助于电网可持续发展。

6 结语

本文主要分析研究了美国 NIST 互操作性智能电网技术框架以及智能电网网络安全策略,突出了美国智能电网技术框架的互操作性。该智能电网框架将整个系统分为发电、输电、配电、用电、运营、市场、服务供应商七个领域,考虑多领域间的互联互通,各设备间的互操作性,构建了一个贯穿电力发配用电、企业经营管理的综合性电力物联平台,实现互联互通的智能电网体系。

通过对比美国 NIST 互操作性智能电网技术与我国电网技术的长期实践认为,我国泛在电力物联网与坚强智能电网的建设应当更加重视电力系统与信息系统深度融合,注重新兴信息通信技术和新能源技术的发展,关注网络安全、多平台融合,构建统一包容的新型数字化电力物联网平台,最终建成智能互联的能源互联网。

参考文献

- [1] 余贻鑫. 智能电网实施的紧迫性和长期性[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 1-5.
YU Yixin. Urgency and long-term nature of smart grid implementation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 1-5.
- [2] 王明俊. 智能电网与智能能源网[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 1-5.
WANG Mingjun. Smart grid and smart energy resource grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 1-5.
- [3] JIANG Fei, TU Chunming, QI Guo, et al. Dual-functional dynamic voltage restorer to limit fault current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5300-5309.
- [4] 张东霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 1-15.
ZHANG Dongxia, YAO Liangzhong, MA Wenyuan. Development strategies of smart grid in China and abroad[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 1-15.
- [5] 汤奕, MANISA P, 邵盛楠, 等. 中国与美国和欧盟智能电网之比较研究(英文)[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 7-15.
TANG Yi, MANISA P, SHAO Shengnan, et al. Comparative study on smart grid related R&D in China, the United

- States and the European Union[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 7-15.
- [6] EPRI. The integrated energy and communication systems architecture, volume I: user guidelines and recommendations[R]. 2003.
- [7] US Government Printing Office. Energy independence and security act[R/OL]. [2014]. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-energy-independence-and-security-act>.
- [8] Office of Electricity. Smart Grid Investment Grant Program-Progress Report[R/OL]. [2012]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/Smart%20Grid%20Investment%20Grant%20Program%20-%20Progress%20Report%20July%202012.pdf>.
- [9] Office of Electric Transmission and Distribution. "Grid 2030" a national vision for electricity's second 100 years[R/OL]. [2003]. https://www.energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Electric_Vision_Document.pdf.
- [10] FUNNELL C M. The fifth framework programme of the EU[J]. Underwater Technology, 1998, 23(3): 133-136.
- [11] 霍沫霖, 单葆国. 欧洲智能用电发展综述及启示[J]. 中国电力, 2012, 45(11): 91-95.
HUO Molin, SHAN Baoguo. Overview and reflection of European smart end-use development[J]. Electric Power, 2012, 45(11): 91-95.
- [12] EU JRC reference reports. Smart grid projects in Europe: lessons learned and current developments[R/OL]. [2011]. https://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ses/files/documents/smart_grid_projects_in_europe_lessons_learned_and_current_developments.pdf.
- [13] EEGI. European Electricity Grid Initiative Roadmap and Implementation plan[R/OL]. [2010]. https://setis.ec.europa.eu/system/files/Grid_EII_2010-2012_IP.pdf.
- [14] 白明月, 刘甲男, 张雪萍, 等. 欧盟智能电网发展及启示[J]. 中国电力, 2012, 45(1): 6-9.
BAI Mingyue, LIU Jianan, ZHANG Xueping, et al. Development and enlightenment of smart grid in EU[J]. Electric Power, 2012, 45(1): 6-9.
- [15] 张毅威, 丁超杰, 闵勇, 等. 欧洲智能电网项目的发展与经验[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1717-1723.
ZHANG Yiwei, DING Chaojie, MIN Yong, et al. Development and experiences of smart grid projects in Europe[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1717-1723.
- [16] 中山元, 顾立强. 日本智能电网的动向[J]. 中国电力, 2011, 44(1): 41-44.
NAKAYAMA H J, GU Liqiang. Trend of Japanese smart grid[J]. Electric Power, 2011, 44(1): 41-44.
- [17] 陈志恒, 万可. 日本智能电网的发展机制分析[J]. 现代日本经济, 2013(4): 35-42.
CHEN Zhiheng, WAN Ke. An analysis of development mechanism of Japan's smart grid[J]. Contemporary Economy of Japan, 2013(4): 35-42.
- [18] 胡波, 周意诚, 杨方, 等. 日本智能电网政策体系及发展重点研究[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 110-114.
HU Bo, ZHOU Yicheng, YANG Fang, et al. Research on policy system and development priorities of smart grid in Japan[J]. Electric Power, 2016, 49(3): 110-114.
- [19] 卢强. 数字电力系统(DPS)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 1-4.
LU Qiang. Digital power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 1-4.
- [20] 黄晓莉, 李振杰, 张韬, 等. 新形势下能源发展需求与智能电网建设[J]. 中国电力, 2017, 50(9): 25-30.
HUANG Xiaoli, LI Zhenjie, ZHANG Tao, et al. Study on the energy development demand and smart grid construction under new situation[J]. Electric Power, 2017, 50(9): 25-30.
- [21] 王益民. 坚强智能电网技术标准体系研究框架[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 1-6.
WANG Yimin. Research framework of technical standard system of strong & smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 1-6.
- [22] 田廓, 鄢帆, 薛松, 等. 建设中国特色坚强智能电网技术经济关键问题框架研究[J]. 华东电力, 2010, 38(1): 1-5.
TIAN Kuo, YAN Fan, XUE Song, et al. Framework study on key problems of technical economy to construct unified strong smart grid with Chinese characteristics[J]. East China Electric Power, 2010, 38(1): 1-5.
- [23] 白建华. 坚强智能电网发展方式及其效益研究[J]. 能源技术经济, 2010, 22(10): 1-6.
BAI Jianhua. Benefit evaluation on development mode of building the strong and smart grid[J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(10): 1-6.
- [24] 梁子鹏, 陈皓勇, 王勇超, 等. 含电动汽车的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2647-2658.
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, WANG Yongchao, et al. Robust economic dispatch of microgrids containing electric

- vehicles[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(8): 2647-2658.
- [25] 孙芊, 吉祥鑫, 王忠强, 等. 新一轮能源革命下智慧电网发展理论及关键技术体系研究[J]. *工业控制计算机*, 2019, 32(12): 91-92.
SUN Qian, JI Xiangxin, WANG Zhongqiang, et al. Research on theory and key technology system of smart grid development under new round of energy revolution[J]. *Industrial Control Computer*, 2019, 32(12): 91-92.
- [26] 高志远, 严春华, 郭昆亚, 等. 智能电网与智慧城市业务互动研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(2): 65-73.
GAO Zhiyuan, YAN Chunhua, GUO Kunya, et al. Research on interactive operation between smart grid and smart city[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(2): 65-73.
- [27] JIANG Fei, TU Chunming, QI Guo, et al. Adaptive soft starter for a three-phase induction-motor driving device using a multifunctional series compensator[J]. *IET Electric Power Applications*, 2019, 13(7): 977-983.
- [28] NIST special publication 1108r3. NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, Release 3.0[R/OL]. [2014]. <http://www.grid-interop.com>.
- [29] 田继伟, 王布宏, 李夏. 智能电网状态维持拓扑攻击及其对经济运行的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(1): 50-56.
TIAN Jiwei, WANG Buhong, LI Xia. State-preserving topology attacks and its impact on economic operation of smart grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1): 50-56.
- [30] ZHANG B, HAO Z, BO Z. New development in relay protection for smart grid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [31] NISTIR 7628 revision 1. Guidelines for smart grid cybersecurity[R/OL]. [2014]. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7628r1>.
- [32] 《泛在电力物联网白皮书 2019》摘要[N]. *国家电网报*, 2019-10-15(002).
Summary of ubiquitous power internet of things white paper 2019[N]. *State Grid News*, 2019-10-15(002).
- [33] 国家电网有限公司. 全面部署泛在电力物联网建设[EB/OL]. [2019-04-16]. <http://h5ip.cn/ozIF>.
State Grid Corporation of China. Full deploys of the construction of ubiquitous power internet of things[EB/OL]. [2019-04-16]. <http://h5ip.cn/ozIF>.
- [34] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 1-8.
CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 1-8.

收稿日期: 2019-10-01; 修回日期: 2019-12-20

作者简介:

邓杰(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网、综合能源系统规划与运行; E-mail: dengjie199588@sina.com

姜飞(1985—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用, 综合能源系统规划与运行; E-mail: jiang85521@126.com

涂春鸣(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

(编辑 葛艳娜)