

智能电网对智慧城市的支撑作用研究

高志远¹, 姚建国¹, 郭昆亚², 曹阳¹, 宋宁希³, 李强⁴, 孙芊⁴

(1. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110811;
3. 河南电力调度通信中心, 河南 郑州 450052; 4. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 智能电网在智慧城市建设中的支撑地位、作用还没有得到充分的挖掘。在系统化梳理智慧城市体系架构的基础上, 分析了智能电网和智慧城市相互之间的促进和制约作用, 并对两者间的协调和支撑作用做了定量分析, 最后对智能电网支撑智慧城市建设的關鍵技术和应用做了系统梳理。指出能源技术和信息、通信技术一样是智慧城市的基本支撑技术, 智能电网和智慧城市在其交集范围内具有相互促进或者制约的关系, 智能电网中各环节的技术和应用对智慧城市建设的支撑作用依据其密切程度呈现层次化分布的特点。

关键词: 智能电网; 智慧城市; 变权综合; 均衡函数; 能源技术; 信息通信技术

Study on the supporting role of smart grid to the construction of smart city

GAO Zhiyuan¹, YAO Jianguo¹, GUO Kunya², CAO Yang¹, SONG Ningxi³, LI Qiang⁴, SUN Qian⁴

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. Shenyang Power Supply Company, Shenyang 110811, China; 3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;
4. State Grid HAEP Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The status and role of smart grid in smart city construction has not been fully excavated. Based on the systematic combing smart city architectures, the mutual promotion and restriction effects between smart grid and smart city are analyzed, and some quantitative analysis is made for the coordination and supporting effects. Finally, the key technologies and applications of smart grid to support the construction of smart city are systematically researched. It is pointed out that energy technology is the basic support technology of smart city as information communication technology (ICT), smart grid and smart city have a relationship of mutual promotion or restriction within the scope of their intersection, a hierarchical distribution characteristic is shown for the technologies and applications of smart grid according to their effects of supporting to smart city construction.

Key words: smart grid (SG); smart city (SC); variable weights; balanced functions; energy technology; information communication technology (ICT)

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)11-0148-06

0 引言

城市化过程是人类文明的重要特征, 智慧城市建设更是目前世界各国的发展趋势。以国内为例, 住建部早在 2012、2013 年就已先后启动 2 批次共 193 个智慧城市试点。截至 2014 年 2 月, 国内已有总计约 230 多个城市提出或在建智慧城市, 包括 95% 的副省级以上城市、76% 的地级以上城市^[1]。它主要有两方面的技术背景: 1) 上世纪后半叶以来

信息通信技术和应用为城市建设注入了新的动力。2) 面对长期以来城市建设面临的能源、环境、空间、人口等多重瓶颈和多元化的需求, 前期有关新城市运动、生态城市、数字城市等理论的研究和实践为城市发展奠定了坚实的基础^[2-5]。

2004 年以后 IBM、CISCO、Siemens 等 IT 厂商陆续正式提出有关智慧城市理念^[6], 强调通过加强信息通信等基础设施建设实现全面的感知和互联, 并在能源、交通、水、政务、公共安全、食品等领域实现深入和广泛的智能应用。其特征在于感知、互联、智能、高效(物质最佳循环, 能量充分利用)。随着认识的深入, 这种技术导向型的理念目前已逐

基金项目: 国家电网公司科技项目; 北京市自然科学基金资助项目(3132035)

步向知识导向型发展, 人们在数字化、智能化基础上赋予了城市更多的内涵, 它实际上代表了一种集约的、绿色的、智能的、可持续的、和谐的城市生产和生活方式, 强调创新, 并最终实现经济、社会和生态可持续发展的良性循环^[7]。

智能电网是本世纪初世界电力工业最大的变革和创新, 已引起了世界性的研究和建设热潮^[8-9]。从 2011 年开始, 国家电网公司智能电网建设从试点阶段走入了全面建设阶段。但是目前各类智慧城市建设中, 对于智能电网的重视不够, 通常仅仅是归入智能能源应用中。大部分电网功能被社会认为是局部的、电力行业应该完成的。例如在对几个国内典型智慧城市的调研中发现, 除了基本的供电服务, 政府主管部门极少对电力部门提出过更进一步的要求, 智能电网在当地智慧城市标志性建设项目中也没有得到多少展现机会。住建部 2012 年底发布的《国家智慧城市(区、镇)试点指标体系(试行)》的 57 个 3 级指标中, 与智能电网直接相关的仅有 2 项——智慧能源和照明系统, 但实际上, 智能电网对其他如网络、信息、绿色建筑和节能、应急安全社区, 家居、环保、交通等指标都有巨大的作用潜力。

我们认为目前以智能电网为主体的有关能源技术在智慧城市中的地位、作用还没有充分地挖掘和如实地体现; 智能电网与智慧城市两大体系的相互制约、促进作用有待深入研究; 智能电网支撑智慧城市的关键技术和应用亟需系统化梳理。

有鉴于此, 本文在已有的相关研究^[10-15]基础上, 从智慧城市的体系架构和发展阶段、智能电网对智慧城市的支撑作用、实例分析等方面进行了深入研究。(以下智能电网简称 SG, 智慧城市简称 SC, 信息通信技术简称 ICT)

1 能源技术的基础支撑作用

目前普遍认为 SC 的基本支撑技术是 ICT 技术, 但本文认为能源技术同样是基本支撑技术之一。其原因如下: 1) 能源技术关系到 SC 所有的愿景、特征和应用, 对于建立绿色、可持续的生产和生活方式, 其影响的全面性不次于 ICT。2) 能源技术包含大量信息、通信技术之外的专业性内容, 是 ICT 技术所不能覆盖的。能源技术中包含 ICT 的应用, 反过来 ICT 中也包含能源技术的应用。3) 生态可持续是当前城市发展的突出问题, 雾霾问题已成为我国目前社会关注度最高的问题之一, 而能源技术是其中最重要的影响因素^[16]。4) 能源系统的建设是城市发展的基础, 特别是 SG 技术对于城市非化石能源占一次能源消费的比重、二氧化碳排放强度等约束

性指标意义重大。作为能源技术主要部分的 SG, 许多应用需要电力系统外广大用户和部门参与, 直接以基本电力供应外的形式影响城市生活。可见, 能源技术是城市发展中具有广泛影响的全局性技术, 其专业性、重要性、关注度决定了其基础支撑地位。

因此, 本文在已有的各类架构^[4-7,10]的基础上梳理了如图 1 所示的 5 层 SC 体系架构, 能源技术作为底层基础支撑技术之一, 直接关系到 SC 的技术方案、应用、特征等各个层面, 是 SC 实现可持续发展目标的最重要基础。

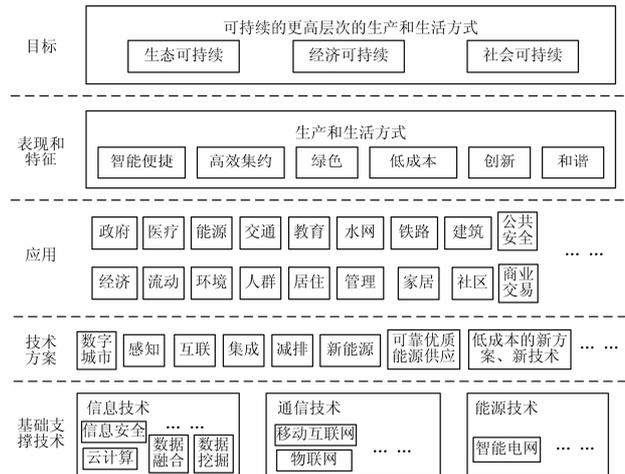


图 1 智慧城市体系架构

Fig. 1 Overall system architecture of smart city

2 智慧城市的发展阶段

SC 在不同的时空条件下具有不同的特征。为便于研究, 在国内外各类 SC 研究的基础上, 划分了如表 1 所示的 4 个具有典型意义的 SC 发展阶段。

表 1 智慧城市发展阶段

Table 1 Development stages of smart city

阶段	特点
现代城市	现代社会进入工业化后, 尚未明确发展 SC 的阶段。
技术导向型	随着信息、通信等现代技术的发展和应用, 城市在集约化、互联化、智能化等方面获得长足的进步, 正是目前世界上大多数 SC 所处的阶段。
知识导向型	随着 SC 建设的深入, 关注的焦点不再局限于基础硬件设施的建设, 而更重视城市建设的软实力、各类应用的深层次知识挖掘和应用。
协调智慧发展	理想的智慧城市可持续发展状态。

为了从经济、社会生活、生态可持续角度对 SC 发展阶段做进一步刻画, 采用专家打分方式对 SC 各个阶段进行了量化评估, 如表 2 所示。

表 2 智慧城市各发展阶段的多维度评估
Table 2 Multidimensional evaluation of smart city
in different stages

	现代城市	技术导向 阶段	知识导向 阶段	协调智慧发展 阶段
经济可持续	4	6	8	8
社会可持续	3	5	7	8
生态可持续	4	4.5	6.5	9
总体	3.623	5.118	7.131	8.316

注：评估分数范围：0~10。表中的分数是相对的，假定未来理想智慧城市评估分数为满分 10 分。

表 2 中“总体”一行是经计算得出的该阶段 SC 发展水平的总体评价。SC 的发展需要在经济、社会和生态方面的均衡，例如当经济超高速发展，生活极端便利，但是生态环境也同样以超高速向不适宜居住方向发展，这种“智慧城市”显然不可取。为此选取了如下的惩罚型变权均衡函数 [17-19]。

$$Z = \sum_{i=1}^3 w_i(x_1, x_2, x_3) \times x_i \quad (1)$$

其中：Z 表示总体评价结果； x_i 表示某一分项评价结果； $w_i(x_1, x_2, x_3)$ 是惩罚型变权均衡函数，定义如式(2)。

$$w_i(x_1, x_2, x_3) = \frac{w_i^{(0)} \times x_i^{(\alpha-1)}}{\sum_{k=1}^3 w_k^{(0)} \times x_k^{(\alpha-1)}} \quad (2)$$

其中： $w_i^{(0)}$ 表示预先给定的常数，假定对经济、社会、生态同等重视，所以： $w_1^{(0)} = w_2^{(0)} = w_3^{(0)}$ ； $0 \leq \alpha < 1$ ，表示特征指数，当 $\alpha = 1$ 变成常数，当 $\alpha = 0$ ，则最注重因素间均衡的评估，取 $\alpha = 1/3$ ； $w_i(x_1, x_2, x_3)$ 具有归一性、连续性和惩罚性特征 [19]，其中 w_i 是 x_i 的单调减函数，当 $i \neq j$ 时， w_i 是 x_j 的单调增函数，当某一项指标特别差时，其总体评价也趋于 0，即 $\lim_{x_i \rightarrow 0^+} Z(x_1, x_2, x_3) = 0$ 。

3 智能电网对智慧城市的支撑作用分析

智能电网对 SC 提供的支撑，基础是能源供应，但已经扩展到环境(新能源、减排、节能)、交通(电动汽车)、新用能(生活方式(微网、用电、需求响应、分布式能源等)、信息(电力数据综合应用)、经济生产(需求响应、能效系统)等各个方面。为此，分环节详细梳理了各类 SG 技术(其中电力市场、调度、参与主体等因素归在信息通信环节)对 SC 的支撑作用，其层次化分布如图 2 所示。

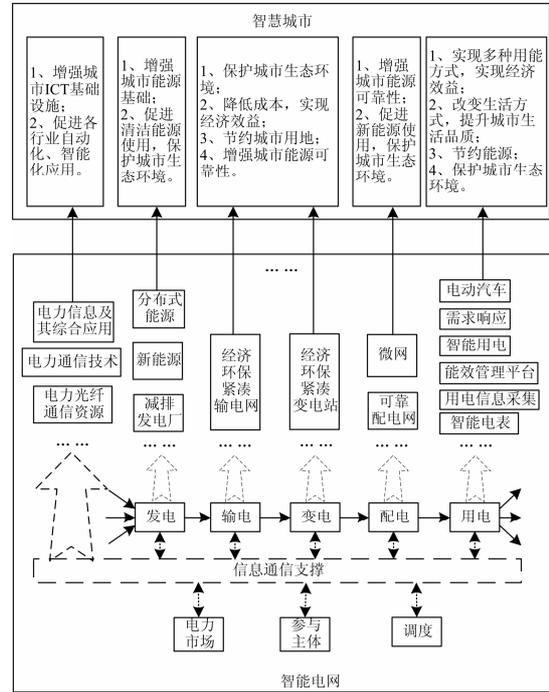


图 2 智能电网支撑智慧城市的层次化体系

Fig. 2 Hierarchical architecture of the supporting functions for smart city from smart grid

对于图 2 中各类典型 SG 技术和应用，采用专家打分方式，在经济、社会、生态等方面进行了评估，得到如表 3 所示的对 SC 建设的典型贡献度。

表 3 智能电网关键技术和应用的多维度贡献

Table 3 Multidimensional contributions of key technologies and applications of smart grid

领域	技术和应用	经济可持续	社会可持续	生态可持续
参照	电子政务(参照)	8	8	4
调度和信息通信	电力信息综合应用	7	6	7
	电力通信技术	6	4	3
发电	分布式能源	8	7	10
	清洁能源和新能源	8	8	10
	减排发电厂	3	3	8
	储能系统应用	3	3	7
输电	经济环保紧凑输电	8	8	5
	经济环保紧凑变电	8	8	5
配电	微网	5	5	8
	可靠配电网	8	8	4
	电能质量监测和治理(定制电力)	7	6	4
	电动汽车	4	5	10
用电	需求响应	5	3	7.5
	智能用电(互动服务、智能家居)	5	9	6.5
	能效管理平台	6	4	8
	用电信息采集	6	6	4
	智能电表	6	6	4

同一项 SG 技术或应用在 SC 的不同发展阶段其支撑作用是不同的。SC 对于最符合当前阶段发展特征的技术需求度最大。结合表 2、表 3 数据, 对各项 SG 技术的支撑度计算为

$$R_j = \sum_{i=1}^3 d_i \times w_{ij} \quad (3)$$

其中: j 取值 1~4, 表示 SC 的发展阶段; i 取值 1~3; d_i 表示该技术对于经济、社会和生态的贡献度(如表 3); $w_{ij}(x_1, x_2, x_3)$ 是激励型变权处理函数

$$w_{ij}(x_1, x_2, x_3) = \frac{w_i^{(0)} \times x_i^{1-\alpha}}{\sum_{k=1}^3 w_k^{(0)} \times x_k^{1-\alpha}} \quad (4)$$

其中: $w_i^{(0)}$ 、 x_i 含义同式(1)、式(2); $0 \leq \alpha < 1$ 表示特征指数, 当 $\alpha = 1$ 则变成常权, 当 $\alpha = 0$, 则最注重对个别因素激励评估, 取 $\alpha = \frac{1}{3}$, 该函数满足归一性、连续性和激励性特征要求。不同于式(2), w_{ij} 是 x_i 的单调增函数, 当 $i \neq k$ 时, w_{ij} 是 x_k 的单调减函数。当 x_i 趋向于 0 时, 其权重也趋于 0, 即 $\lim_{x_i \rightarrow 0^+} w_{ij}(x_1, x_2, x_3) = 0$ 。计算结果如表 4。

表 4 智能电网关键技术 in 智慧城市不同阶段的支撑作用

Table 4 Supporting effects from key technologies of smart grid in different stages of smart city

领域	技术和应用	现代城市	技术导向	知识导向	协调智慧
		阶段	阶段	阶段	发展阶段
调度和信	电力信息综合应用	6.708	6.673	6.672	6.676
息通信	电力通信技术	4.354	4.433	4.405	4.298
发电	分布式能源	8.416	8.282	8.297	8.378
	清洁能源和新能源	8.708	8.609	8.625	8.702
	减排发电厂	4.770	4.522	4.563	4.755
	储能系统应用	4.416	4.218	4.250	4.404
输电	经济环保紧凑输电	6.938	7.087	7.062	6.947
变电	经济环保紧凑变电	6.938	7.087	7.062	6.947
配电	微网	6.062	5.913	5.938	6.053
	可靠配电网	6.584	6.782	6.750	6.596
	电能质量监测和治理(定制电力)	5.646	5.760	5.734	5.622
	电动汽车	6.416	6.154	6.204	6.431
用电	需求响应	5.300	5.108	5.125	5.229
	智能用电(互动服务、智能家居)	6.700	6.763	6.783	6.824
	能效管理平台	6.124	5.956	5.968	6.053
	用电信息采集	5.292	5.391	5.375	5.298
	智能电表	5.292	5.391	5.375	5.298

在表 4 的基础上, 采用取平均值的方式可以获得 SC 的四个发展阶段中智能电网的总体支撑作用为

$$R_p = \left[\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^3 d_i \times w_{ij} \right) \right] / n \quad (5)$$

其中: R_p 为所计算的总体支撑作用; d_i 和 w_{ij} 同式(3)中的定义。

选取分布式能源、清洁能源和新能源、减排发电厂、储能系统应用、微网、电动汽车、需求响应等 SG 核心应用, 计算了 SG 核心技术支撑作用。又考虑到各项 SG 技术的实施需要一定的基础条件, 所以根据 SC 发展阶段的不同加入了可行度如式(6)。

$$R_{pf} = \left[\sum_{j=1}^n \left(f_j \times \left(\sum_{i=1}^3 d_i \times w_i \right) \right) \right] / n \quad (6)$$

其中, f_j 表示第 j 项技术在当前 SC 阶段中的可行度因素, 其取值 $0 \leq f_j \leq 1$ 。计算结果如表 5 所示。

表 5 智能电网对智慧城市不同阶段的总体支撑作用

Table 5 Overall supporting effects from key technologies of smart grid in different stages of smart city

	现代城市	技术导向阶段	知识导向阶段	协调智慧发展
能源技术 (智能电网)	6.157	6.125	6.129	6.148
智能电网 核心应用	6.298	6.115	6.143	6.279
能源技术 (智能电网)	2.334	4.331	5.041	5.611

(加入可行度因素)

在现代城市阶段, 对 ICT 的需求是落后于对能源技术的需求的, 这可以理解为智慧城市发展前期和初期, 可靠和高质量供电的需求是整个社会发展的基础; 随着城市建设进入技术导向阶段, 对于以智能电网为特征的新型能源技术的要求逐步落后于对于 ICT 的需求, 这时通过 ICT 的智能化应用可以迅速和显著地实现城市整体资源优化和智慧化的效果; 当 ICT 应用得到一定普及, 城市建设进入知识导向阶段时, 对于 ICT 的需求又缓慢让步于智能电网技术, 最后当能源和环境生态问题成为全世界关注的焦点时, 智能电网技术的重要性逐步凸显, 成为智慧城市可持续发展的最重要基础。

4 实例分析

为验证以上框架体系和分析结论, 对国内部分

开展 SC 建设的典型城市进行了考察调研。

表 6 是一座小型煤炭工业城市 2009 年以来的重要统计数据。该市面积 2 182 km²，2013 年底人口 192 万。从 2011 年开始正式启动智慧城市建设，目前正在加紧 4G 宽带网覆盖和基于云计算的数据中心部署。从表中数据看，随着 SC 建设的开展，信息和通信也得到长足的发展，而对于电力的需求则基本保持平稳。

表 6 智能电网对智慧城市不同阶段的总体支撑作用
Table 6 Overall supporting effects from key technologies of smart grid in different stages of smart city

	2009	2010	2011	2012	2013
全年生产总值/亿元	377.52	427.74	510.93	553.35	622.12
发电量/亿度	106.63	113.75	124.68	107.84	106.69
信息、计算机和软件投资/万元		300	1 000	500	9 500
水利、环境和公共设施投资/亿元	14.38	21.32	27.43	46.85	25.96

实际上，该市 SG 建设在 SC 正式开始建设之前一年就已开始，目前其对于 SC 建设的支撑作用已经基本能够满足需求，很少体现出制约作用。SC 建设中对于 SG 也没有什么特殊要求。预计随着该市 SC 建设进入知识导向阶段，对于生态、社会、经济要求的逐次深入，SG 将逐渐体现出对于 SC 的制约作用，进而 SC 对于 SG 的需求度大大提高。

表 7 是某大型海滨旅游城市 2009 年以来的重要
表 7 某大型智慧城市近年发展统计数据

Table 7 Development statistical data of a large smart city in recent years

	2009	2010	2011	2012	2013
全年生产总值/亿元	4 890.33	5 666.19	6 615.60	7 302.11	8 006.60
发电量/亿度		181.93	173.69	174.7	
全社会用电量/亿度	259.4	292.97	313.44	318	339.3
电力、热力、燃气及水的生产和供应业/亿元	29.4	70.5	64.9	52.1	71.2
信息传输、软件和信息技术服务业/亿元	1.7	4.4	8.4	22.8	23.3
水利、环境和公共设施投资/亿元	234.0	227.5	187.2	232.5	273.7

统计数据。该市面积 11 282 km²，2013 年底常住人口为 896.4 万人。该市智慧城市建设声势浩大，举办过多次智慧城市研讨会，其经济、人居、生态保持等方面的成就在国内比较领先。但调研中也发现，除了基础供电服务，政府也从未对电力部门提出过什么特殊要求，也没有任何 SG 技术和应用被作为该市 SC 建设的重点工程。虽然该市电力通信资源“非常丰富”，但社会化使用基本为零，也基本没有参与到全市光纤到户工程建设中。当前该市分布式能源和电动汽车充换电站建设还处于前期摸索试点阶段，规模很小。表 7 中的数据也清晰地体现出，该市 SC 建设以信息、通信基础设施建设为重点，电力消费和生产基本保持平稳发展。

5 结语

能源技术和信息、通信技术一样是智慧城市的基本支撑技术，而智能电网和智慧城市建设这两大体系存在着相互制约和促进的作用。经过长期的发展，目前国内电力系统基本能够满足经济社会的发展需求，SG 对 SC 的制约作用不突出，而 SC 对 SG 的需求一般仅限于有足够的电力供应和通过配电自动化等提高供电可靠性方面。未来随着能源和环境系统对 SC 发展的制约作用逐渐突出，SG 中各类技术和应用对 SC 发展的促进作用将逐步加强。合理地利用这种相互作用，既可以实现整个社会角度的整体最优，也可以最终实现两大体系的“双赢”。

在后续研究和建设实践中，亟需持续地深入分析、选择和推进智慧城市建设中的智能电网应用，在确保可靠优质供电服务的基础上，逐步把各类智能电网应用深入融合到智慧城市建设中。

参考文献

- [1] 丁吉林, 武琪. 中国智慧城市发展之路任重道远——访国家信息中心信息化研究部副主任、中国智慧城市发展研究中心秘书长单志广[J]. 财经界, 2013, 7: 12-15.
- [2] 李德仁, 邵振峰, 杨小敏. 从数字城市到智慧城市的理论与实践[J]. 地理空间信息, 2011, 9(6): 1-5. LI Deren, SHAO Zhenfeng, YANG Xiaomin. Theory and practice from digital city to smart city[J]. Geospatial Information, 2011, 9(6): 1-5.
- [3] 史璐. 智慧城市的原理及其在我国城市发展中的功能和意义[J]. 中国科技论坛, 2011(5): 97-102. SHI Lu. Smart city theory and its function and significance of chinese urban development[J]. Forum on Science and Technology in China, 2011(5): 97-102.
- [4] 王家耀, 刘嵘, 成毅, 等. 让城市更智慧[J]. 测绘科学

- 技术学报, 2011, 28(2): 79-83.
WANG Jiayao, LIU Rong, CHENG Yi, et al. Making the city smarter[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2011, 28(2): 79-83.
- [5] 王静远, 李超, 熊璋, 等. 以数据为中心的智慧城市研究综述[J]. 计算机研究和发展, 2014, 51(2): 239-259.
WANG Jingyuan, LI Chao, XIONG Zhang, et al. Survey of data-centric smart city[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(2): 239-259.
- [6] IBM. 智慧的城市在中国 -IBM- 白皮书 [R/OL]. [2010-12-11].
http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/cn_zh_cn_cities_white_paper_0924_4918kb.pdf.
- [7] 许庆瑞, 吴志岩, 陈力田. 智慧城市的愿景与架构[J]. 管理工程学报, 2012, 26(4): 1-7.
XU Qingrui, WU Zhiyan, CHEN Litian. The vision architecture and research models of smart city[J]. Journal of Industrial Engineering/Engineering Management, 2012, 26(4): 1-7.
- [8] 高志远, 姚建国, 曹阳, 等. 智能电网发展机理研究初探[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 116-121.
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang, et al. Primary study on the development mechanism of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 116-121.
- [9] 高志远, 曹阳, 朱力鹏. 智能变电站未来发展的分析方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 11-18.
GAO Zhiyuan, CAO Yang, ZHU Lipeng. Research on the analysis method of the future development of smart substation[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(2): 11-18.
- [10] 周建其, 方景辉, 朱晓峰. 智能电网与智慧城市的契合与研究[J]. 华东电力, 2002, 40(5): 840-844.
ZHOU Jianqi, FANG Jinghui, ZHU Xiaofeng. Correlation between smart grid and intelligent city[J]. East China Electric Power, 2002, 40(5): 840-844.
- [11] 肖湘宁, 陈征, 刘念. 可再生能源与电动汽车充电设施在微电网中的集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 1-13.
XIAO Xiangning, CHEN Zheng, LIU Nian. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles's charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 1-13.
- [12] 牟龙华, 朱国锋, 朱吉然. 基于智能电网的智能用户端设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 53-56.
MU Longhua, ZHU Guofeng, ZHU Jiran. Design of intelligent terminal based on smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 53-56.
- [13] 马丽叶, 卢志刚, 胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.
- MA Liye, LU Zhigang, HU Huawei. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171.
- [14] 张新昌, 周逢权. 智能电网引领智能家居及能源消费革新[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 59-67.
ZHANG Xinchang, ZHOU Fengquan. Smart grid leads the journey to innovative smart home and energy consumption patterns[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 59-67.
- [15] 何永秀, 朱荏, 罗涛, 等. 城市电网规划自然灾害风险评估研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 205-210.
HE Yongxiu, ZHU Jiang, LUO Tao, et al. Risk assessment of natural disaster in urban electric power network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 205-210.
- [16] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
ZHANG Xiaoye, SUN Junying, WANG Yaqiang, et al. Factors contributing to haze and fog in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [17] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)——变权综合原理[J]. 模糊系统和数学, 1995, 5(3): 1-9.
LI Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (VIII) — variable weights analysis[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995, 5(3): 1-9.
- [18] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58-64.
LIU Wenqi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 1997, 17(4): 58-64.
- [19] 刘文奇. 一般变权原理与多目标决策[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(3): 1-11.
LIU Wenqi. The ordinary variable weight principle and multiobjective decision-making[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2000, 20(3): 1-11.

收稿日期: 2014-08-24; 修回日期: 2014-10-29

作者简介:

高志远(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事智能电网、厂站自动化系统的应用研究; E-mail: gaozhiyuan@epri.sgcc.com.cn

姚建国(1963-), 男, 教授级工程师, 主要从事智能电网、智能调度等方面的研究工作。

郭昆亚(1967-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

(编辑 葛艳娜)