

DOI: 10.7667/PSPC161304

电力系统关键技术发展论刍议

高志远¹, 曹阳¹, 徐昊亮², 余泳²

(1. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 在智能电网和能源互联网的建设和发展中, 需要科学地选择不同时段的关键技术予以优先发展。利用理想电力系统的概念, 基于对电力系统发展状态的评析, 提出了一种系统化的电力系统关键技术发展价值分析方法, 并利用所提方法对当前电力系统关键技术的发展作了简要分析。指出关键技术的优先发展不仅需要考虑技术本身对提高电力系统理想化程度的贡献, 还需要综合考虑技术相互之间的促进作用和经济投入情况。当前, 大数据、储能、新材料和云计算等是值得优先发展的技术方向。

关键词: 智能电网; 能源互联网; 关键技术; 优化规划; 可再生能源; 大数据

Primary discussion on the key technologies development of power system

GAO Zhiyuan¹, CAO Yang¹, XU Haoliang², YU Yong²

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Gansu Electric Power Company Economic Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In the construction and development of smart grid and energy internet, some key technologies should be given priorities to develop in different periods of time. Based on the concept of ideal power system and the development status of current power system, a systematic approach to analyze the development of key technologies of power system is put forward, and the development of the key technologies of the current power system is analyzed by using the proposed method. It is pointed out that the development priority of a technology not only depends on its contribution to improve the ideal degree of the power system, but also depends on the interaction between technologies and the economic benefits. At present, some technologies, such as big data, energy storage, new materials and cloud computing, should be given priorities to development.

Key words: smart grid; energy internet; key technologies; optimal planning; renewable energy; big data

0 引言

随着智能电网、能源互联网研究和应用的发展, 电力系统在发电、变电、输电、配电、用电、调度等各个领域都取得了巨大的技术进步^[1-3]。

这其中有一种现象, 许多短期内很难突破的技术有重要价值, 一旦突破将极大地改变电力系统的格局。可以说技术突破是一柄“双刃剑”。它既是大发展的前奏, 是决定格局的根本, 也具有很大的不确定性, 可能是时间和资源投入的“无底洞”。

在有限的资源条件下, 怎样科学选择技术突破方向值得深入研究。本文在已有的中国电网发展模式^[4]和智能电网发展机理^[5]等研究的基础上, 提出了理想电力系统的理念, 给出了一个初步的电力系

统技术发展分析方法, 并应用该方法对当前电力系统的现状和可能的技术发展进行了分析, 据此提出了当前电力系统技术发展的战略选择和应对策略。

1 理想电力系统及其表征

就根本而言, 当前电力系统的理想愿景在于:

1) 向经济社会提供充足、可靠和高质量的电能供应; 2) 通过可再生能源的利用实现能源的可持续供应; 3) 实现“绿色”运转, 降低对环境和气候的不良影响; 4) 降低成本, 实现能源的高效利用^[1-5]。

据此, 提出理想电力系统的理念。其核心特征在于: 1) 能源供应具有无限的伸缩性(服务功率瞬间可以大到无限大, 小到0); 2) 系统可靠性 100%; 3) 电能质量在电压、频率、波形方面完全理想化; 4) 清洁能源渗透率 100%; 5) 对环境和气候的影响为 0; 6) 网损为 0; 7) 全周期经济成本为 0。显然, 理想电力系统是电力系统发展的目标, 但永远也不可能达到。

可以用一定的关键指标来衡量电力系统的理想化程度,例如系统容量(最大供电能力)、系统伸缩性、最大负荷、负荷可调节性、平均无故障时间、可再生能源渗透率、污染物排放量、温室气体排放量、投入产出比等。

2 电力系统技术发展分析方法

电力系统从现有状态向理想状态的发展,技术在其中起着决定作用^[5],电力技术的状态决定了电力系统的实际运行状态,而电力系统的实际运行状态也就决定了电力系统的实际效益及其理想化程度。这其中,关键技术的突破具有重要意义,为此提出了一种电力系统技术发展分析方法。

设待考察 n 项电力系统关键技术,则有如下所述。

当前 n 项关键技术的技术状态可以用 \mathbf{T} 表达。

$$\mathbf{T} = [t_1 \ t_2 \ t_3 \ \cdots \ t_n] \quad (1)$$

其中, $t_i (i=1,2,\dots,n)$ 表示第 i 项关键技术的状态,其数值可以是某项核心指标,也可以是经过归一化处理后的无量纲的映射值。

技术的进步可以用新状态相对于旧状态的改变 $\Delta\mathbf{T}$ 来表示。

$$\Delta\mathbf{T} = [\Delta t_1 \ \Delta t_2 \ \Delta t_3 \ \cdots \ \Delta t_n] \quad (2)$$

其中, $\Delta t_i (i=1,2,\dots,n)$ 表示第 i 项关键技术的状态改变量。

关键技术之间存在交互影响,一项技术的进步可能促进其他技术的进步,所以定义关键技术相互之间的交互促进关系矩阵 \mathbf{I} 为

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & i_{12} & i_{13} & \cdots & i_{1n} \\ i_{21} & 1 & i_{23} & \cdots & i_{2n} \\ i_{31} & i_{32} & 1 & \cdots & i_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{n1} & i_{n2} & i_{n3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $i_k (k=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n)$ 表示第 k 项技术对第 j 项技术的促进作用,对角线全部为 1 表示对自身促进作用为 100%。

针对理想电力系统的 m 项关键指标,则当前电力系统的理想化程度可以用 \mathbf{S} 表达。

$$\mathbf{S} = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ \cdots \ s_m] \quad (4)$$

其中, $s_i (i=1,2,\dots,m)$ 表示当前电力系统第 i 项关键指标的值。

在不同的时期,对各项电力系统的理想化指标的偏好是不同的。据此,每项理想化指标的当前权重 $\boldsymbol{\eta}$ 为

$$\boldsymbol{\eta} = [\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3 \ \cdots \ \eta_m]^T \quad (5)$$

其中, $\eta_i (i=1,2,\dots,m)$ 表示当前第 i 项指标在总体

目标中的权重,且 $\sum_{i=1}^m \eta_i = 1$,则对当前电力系统的理想化综合评价价值 $v(\mathbf{S})$ 为

$$v(\mathbf{S}) = \mathbf{S}\boldsymbol{\eta} \quad (6)$$

每一项技术对电力系统理想化的各项指标可能都有不同影响,定义技术系统关联矩阵 \mathbf{P} 为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $p_{ij} (i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m)$ 表示第 i 项技术对第 j 项理想化指标的贡献转化率。

以上技术交互影响(\mathbf{I})、技术系统关联(\mathbf{P})和理想化偏好 $\boldsymbol{\eta}$ 在不同的技术状态(\mathbf{T})和系统状态(\mathbf{S})下是不同的,但在 \mathbf{T} 、 \mathbf{S} 的一定范围内和一定时间阶段内是稳定的。

通过若干技术的进步 $\Delta\mathbf{T}$,引起全面的技术进步 $\Delta\mathbf{T}\mathbf{I}$,进而通过技术系统的关联作用,引起电力系统理想化程度的改变 $\Delta\mathbf{S}$ 。

$$\Delta\mathbf{S} = \Delta\mathbf{T}\mathbf{I}\mathbf{P} \quad (8)$$

据式(6),综合性的理想化提升量 $v(\mathbf{S})$:

$$v(\Delta\mathbf{S}) = \Delta\mathbf{S}\boldsymbol{\eta} = \Delta\mathbf{T}\mathbf{I}\mathbf{P}\boldsymbol{\eta} \quad (9)$$

在当前既有的技术互换影响(\mathbf{I})、技术系统关联(\mathbf{P})和理想化偏好 $\boldsymbol{\eta}$ 下,通过 $\Delta\mathbf{T}$ 的改变,实现最大化的 $v(\Delta\mathbf{S})$,就是最合理的电力系统技术发展策略。这是一个复杂的优化问题,涉及到各项经济和社会资源、政策在各个技术方向上的科学分配。

$\Delta\mathbf{S}$ 的改变,其实可以分解到各项关键技术的进步。定义单项技术的进步 $\Delta\mathbf{T}_i$ 为

$$\Delta\mathbf{T}_i = [0 \ 0 \ \cdots \ \Delta t_i \ \cdots \ 0] \quad (10)$$

单项技术引起的电力系统理想化程度改变:

$$\Delta\mathbf{S}_i = \Delta\mathbf{T}_i\mathbf{I}\mathbf{P} \quad (11)$$

则有:

$$\Delta\mathbf{S} = \Delta\mathbf{T}\mathbf{I}\mathbf{P} = \sum_{i=1}^n (\Delta\mathbf{T}_i\mathbf{I}\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^n \Delta\mathbf{S}_i \quad (12)$$

所以 $\max(v(\mathbf{S}))$ 所对应的诸 \mathbf{T}_i 组合,就表示当前既有条件下,对提升系统理想度最具价值的技术发展方向组合。

但是技术的发展及其具体影响具有一定的随机性,体现在式(12)中,资源分配所引起的 $\Delta\mathbf{T}$ 的改变、技术交互影响(\mathbf{I})、技术系统关联(\mathbf{P})都只具有概率意义。

3 当前电力系统关键技术发展分析示例

面对理想电力系统的愿景,选取了系统供电能

力(综合考虑发电和输电能力、可靠性、电能质量因素)、清洁能源渗透率、环保、经济性(综合考虑网损等多环节成本因素)等 4 项关键指标来衡量电力系统的理想化程度。采用归一化方法,以 10 分为理想电力系统的评价指标,则当前中国电力系统的理想化程度可以表示为(综合相关期刊文献、电力公司技术报告以及有关专家意见,得到的初步判断和量化表示,下同)

$$S_{\text{now}} = [7 \ 4 \ 3 \ 5] \quad (13)$$

假设以上 4 个指标都同等重要,即理想化指标偏好为

$$\eta = [0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25]^T \quad (14)$$

则当前电力系统的理想化程度综合评价为

$$v(S_{\text{now}}) = S_{\text{now}} \eta = 4.75 \quad (15)$$

基于所提出的电力系统技术发展分析方法,结合当前我国电力发展的需求,代表性地选择了特高压、储能、电动汽车、云计算、大数据、光伏发电、超导、新材料等 8 个技术领域[6-11],进行了关键技术战略发展分析。以它们的理想化水平为 10 分,则当前的技术水平为

$$T = [6 \ 3 \ 2 \ 4 \ 4 \ 4 \ 3 \ 5] \quad (16)$$

以上 8 种关键技术之间存在复杂的交互影响关系,梳理其交互促进关系矩阵如式(17)。该矩阵在行列顺序上都严格依次按照特高压、储能、电动汽车、云计算、大数据、光伏发电、超导、新材料的顺序,其成员含义如式(3)的定义。

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.6 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 1 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0.1 \\ 0.1 & 0 & 0.2 & 1 & 0.6 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 1 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 1 & 0.1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0 & 0.1 & 0.2 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

构建以上 8 项技术对理想电力系统的技术系统关联矩阵如式(18),其成员含义如式(7)中定义。

$$P = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.8 & 0.5 \\ 0.5 & 0.9 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.5 \\ 0.1 & 0.1 & 0.5 & 0.4 \\ 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.3 \\ 0.4 & 1.0 & 0.7 & 0.3 \\ 0.4 & 0.6 & 0.6 & 0.5 \\ 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

在政策和资金扶持下,各项技术本身的进步和突破的可能性会改变。各项电力系统关键技术的发展价值分析和资源调配策略存在着各种复杂的约束。

这里简化举例如下,假定当前有限的资源可以统一折合成年度投入资金:

$$F = 4000 \text{ (亿元)} \quad (19)$$

而 8 项目标技术在 T 中单位技术水平的进步需要的资金量组成向量如式(20)。

$$D_f = [2500 \ 2400 \ 2000 \ 1800 \ 1700 \ 2500 \ 3000 \ 2200] \quad (20)$$

则资源优化问题可以简化抽象为

$$\begin{cases} \min(-\Delta T I P \eta) \\ \text{s.t. } \Delta T D_f^T = F \\ \Delta T \cdot D_f \leq \left[\frac{F}{n} \ \frac{F}{n} \ \dots \ \frac{F}{n} \right] \\ 0 \leq \Delta T_i \quad i=1, 2, \dots, 8 \end{cases} \quad (21)$$

其中式(21)的约束条件 2 是用矩阵 Hadamard 乘积表示的,不允许资源完全集中分配在若干技术方向上,即至少需要覆盖其中的 n 个技术方向(这里 $n \leq 8$)。

用线性规划方法解以上优化问题,可知在当前假定下,各技术方向的优先价值依次如表 1。必须说明的是,表 1 中的分析结果是基于简化例子中的式(17)—式(20)中的数据分析获得的,结果具有参考价值,但更多地是为了验证所提出分析方法的有效性和示例说明分析过程。

表 1 技术优先价值分析结果

Table 1 Analysis of the priorities of some electric power technologies

优先顺序	技术方向	分析
1	大数据	具有广泛的技术促进作用,且投资见效快。
2	储能	对电动汽车、光伏发电等具有突出的技术促进作用,对提高电力系统理想化程度有广泛的基础支撑作用。
3	新材料	具有广泛的技术促进作用。
4	云计算	对提高电力系统自动化程度具有广泛的促进作用(在选定的 8 个技术方向中则主要对大数据技术有突出促进作用),投资见效快。
5	光伏发电	对提高电力系统环保水平、清洁能源渗透率有突出作用。
6	特高压	对提升电力系统理想化程度有突出作用,对其他技术促进作用有限,投资门槛高。
7	超导	对提升电力系统理想化程度有重要作用,推广应用门槛高。
8	电动汽车	社会效益显著,对电力系统技术本身作用有限,且投资门槛高。

从以上对当前电力系统关键技术发展的分析中可以看到:

1) 有 2 类技术值得重点发展, 一是该技术本身对其他技术有广泛的促进作用, 具体体现在交互促进关系矩阵 I 中; 二是对理想化程度综合贡献最大的技术, 具体体现在技术系统关联矩阵 P 中。它们的综合效果体现在式(11)的最大化。

2) 最优价值的技术方向, 并不代表要把所有的资源都投入到该方向, 总体最优需要合理分配资源。

3) 不同的时期, 有不同的理想化偏好 η , 这取决于当前的发展目标, 对电力系统的技术发展有直接影响。

4 结语

电力系统庞大复杂, 准确地对电力系统技术突破进行科学的分析和预测, 进而制定科学的发展战略是一项系统工程。本文所提的方法, 需要用到各种综合数据, 这些数据客观上都是存在的, 但是实际应用中难以准确、全面地获得。显然数据越客观, 结果也就越可靠。随着电网数字化和智能化的不断发展, 云计算和大数据技术得到越来越广泛的应用, 为本文所提方法提供了良好的前景。

参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of Three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11.
- [2] 宋璇坤, 韩柳, 鞠黄培, 等. 中国智能电网技术发展实践综述[J]. 电力建设, 2016, 37(7): 1-11.
SONG Xuankun, HAN Liu, JU Huangpei, et al. A review on development practice of smart grid technology in China[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(7): 1-11.
- [3] 王益民. 全球能源互联网理念及前景展望[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 1-11.
XIE Guohui, LI Qionghui. Concept and prospect of global energy interconnection[J]. Electric Power, 2016, 49(3): 1-11.
- [4] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [5] 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.
- [6] 王继业, 马士聪, 仝杰, 等. 中日韩电网关键技术发展及趋势分析[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 491-499.
WANG Jiye, MA Shicong, TONG Jie, et al. Current development and trend analysis of power grid key technologies in China, Japan and Republic of Korea[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 491-499.
- [7] 严陆光, 周孝信, 甘子钊, 等. 关于发展高温超导输电的建议[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(1): 1-9.
YANG Luguang, ZHOU Xiaoxin, GAN Zizhao, et al. Proposal for development of high-temperature superconducting power transmission[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(1): 1-9.
- [8] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 44(3): 78-84.
- [9] 谢国辉, 李琼慧. 全球能源互联网技术创新重点领域及关键技术[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 18-23.
XIE Guohui, LI Qionghui. Important fields and key technologies of innovation for global energy interconnection[J]. Electric Power, 2016, 49(3): 18-23.
- [10] 高志远, 姚建国, 郭昆亚, 等. 智能电网对智慧城市的支撑作用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 148-153.
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, GUO Kunya, et al. Study on the supporting role of smart grid to the construction of smart city[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 148-153.
- [11] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.

收稿日期: 2016-08-15; 修回日期: 2016-09-19

作者简介:

高志远(1972—), 男, 硕士, 研究员级高工, 主要研究方向为智能电网和厂站自动化系统; E-mail: gaozhiyuan@epri.sgcc.com.cn

曹阳(1978—), 男, 硕士, 研究员级高工, 研究方向为电网调度自动化、电力系统自动化和需求响应等;

徐昊亮(1981—), 男, 高级工程师, 从事电力系统自动化和智能电网规划应用研究工作。

(编辑 葛艳娜)