

基于技术成熟度理论的 智能输电网多阶段投资决策模型

熊浩清¹, 张晓华¹, 孟远景¹, 汤涌², 孙华东², 易俊², 熊传平¹

(1. 河南省电力公司, 河南省 郑州市 450052; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

A Decision-Making Model of Multi-Stage Investment for Smart Transmission Grid Based on Technology Readiness

XIONG Haoqing¹, ZHANG Xiaohua¹, MENG Yuanjing¹, TANG Yong²,
SUN Huadong², YI Jun², XIONG Chuanping¹

(1. Henan Electrical Power Company, Zhengzhou 450052, Henan Province, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The investment of transmission grid is faced with various potential market risks during the construction of smart transmission grid, and this condition makes higher demand on the flexibility of investment decision-making. By means of analyzing investment decision-making of smart transmission grid by technology readiness and marking off effective investment stages for smart transmission grid based on technology readiness level, a technology readiness based multi-stage investment decision-making model is built to determine optimal investment project and the amount of investment in different stages. Taking IEEE 24-bus system for example, a three-stage investment decision-making for smart transmission grid, in which the transmission lines, thyristor controlled series compensator (TCSC) are considered, is analyzed to verify the correctness and effectiveness of the built model.

KEY WORDS: technology readiness level; multi-stage investment; smart transmission grid

摘要: 在智能电网建设背景下, 输电网投资面临各种潜在的市场风险, 对投资决策的灵活性提出了较高的要求。应用技术成熟度理论分析智能输电网投资决策问题, 根据技术成熟度等级划分智能输电网的有效投资阶段, 建立基于技术成熟度的智能输电网多阶段投资决策模型, 以确定最优投资方案及各阶段的投资资金数量。以 IEEE-24 节点系统为例分析考虑输电线路、晶闸管控制串联电容器补偿方案的 3 阶段智能输电网投资决策问题, 验证了上述模型的正确性和有效性。

关键词: 技术成熟度; 多阶段投资; 智能输电网

0 引言

随着世界电网向智能电网方向发展, 我国已经

提出了建设坚强智能电网的战略目标。而智能输电网投资建设是智能电网发展的核心环节^[1]。输电网投资项目具有投资规模大、周期长、收益不确定等特性, 其投资过程需要考虑众多影响因素^[2-5]。目前, 我国将柔性直流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)技术作为智能输电网建设的关键组件, 而该项技术尚处于快速发展阶段^[6-7]。因此, 在输电网领域考虑引入 FACTS 技术的投资决策问题属于高风险、大型投资组合问题。如何在智能电网建设背景下, 提出有效的输电投资策略, 降低投资风险, 具有较高的理论意义。

目前, 国内外学者对输电领域投资决策问题开展了大量的研究。文献[8]分析了包含 FACTS 设备的输电投资问题, 为投资者获得最优投资决策提出了新方法。文献[9]基于实物期权理论和非合作博弈理论, 构造了输电投资决策的延迟期权博弈模型, 为电力投资决策提供了依据。文献[10]分析了输电投资的决策过程, 构建了输电市场投资评估指标计算不同市场主体的利益。文献[11]充分考虑了电力市场各主体的自主性以及电力市场环境的不确定性, 提出了基于多智能体的输电投资决策模型。文献[12]利用模糊实物期权框架分析不确定环境下的输电投资决策问题。

近年来, 由美国国防军事部提出的技术成熟度评价(technology readiness assessment, TRA)广泛应用于军事技术风险管理^[13-14]。该方法为我国智能输电网投资决策提供了新思路。本文应用技术成熟度

理论分析智能输电网投资决策问题。首先，根据技术成熟度等级划分智能输电网的有效投资阶段；其次，建立基于技术成熟度的智能输电网多阶段投资决策模型，确定最优投资方案及各阶段的投资资金数量；最后，以 IEEE-24 节点系统验证上述模型的有效性。

1 智能输电网技术成熟度分析

1.1 技术成熟度

技术成熟度是许多政府机构，尤其是美国航天局和国防部，用以评价技术发展成熟度的通用指标。技术成熟度(technology readiness, TR)是指技术相对于某个具体系统或项目所处的发展状态，它反映了技术对于项目预期目标的满足程度。任何一项技术都必然有一个发展和验证的过程，在技术成熟度评价体系中往往根据技术达到的成熟水平分成不同的等级。技术成熟度等级(technology readiness level, TRL)是指对技术成熟程度进行量度和评测的一种标准，将技术从萌芽状态到成功应用于系统的整个过程划分为几个阶段，为管理层和科研单位提供了一种统一的标准化通用语言^[15]。目前 TRL 已发展至 9 个等级：

- 1) TRL₁, 基本原理被发现和报告；
- 2) TRL₂, 技术概念和用途被阐明；
- 3) TRL₃, 关键功能和特性的概念验证；
- 4) TRL₄, 实验室环境下的部件和试验台验证；
- 5) TRL₅, 相关环境下的部件和试验台验证；
- 6) TRL₆, 相关环境下的系统及子系统模型或原型机验证；
- 7) TRL₇, 模拟作战环境下的原型机验证；
- 8) TRL₈, 系统完成技术试验和验证；
- 9) TRL₉, 系统完成使用验证。

1.2 基于技术成熟度的智能输电网多阶段投资决策分析

输电网技术项目的研发与投资，同样存在项目不同完成程度的度量问题。在智能输电网投资中引入技术成熟度理论，将智能输电网投资项目划分为多个阶段，分别针对各个阶段的实际情况制定投资策略。与一次性投资相比，考虑技术成熟度的多阶段投资能够提高投资的灵活性，投资者可根据掌握的最新信息，更改后期的投资决策，如继续、延缓或放弃某项投资方案等。

应用技术成熟度进行智能输电网多阶段投资

决策的分析步骤如图 1 所示。

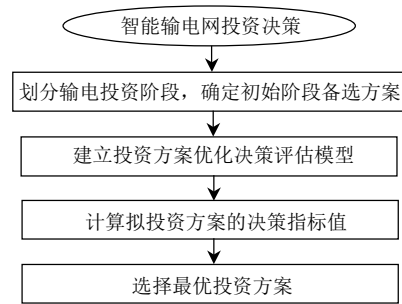


图 1 基于技术成熟度的智能输电网多阶段投资决策分析步骤

Fig. 1 Analysis process for decision-making on stage financing for smart transmission grid investment based on technology readiness

- 1) 根据技术成熟度等级，划分智能输电网投资阶段，确定初始阶段可供选择的投资方案。
- 2) 建立各种投资方案的优化决策评估模型。
- 3) 依据 2 种评估模型，计算各种拟投资方案的决策指标值。
- 4) 基于上述步骤，对多个投资方案以及组合方案进行比选，选择最优方案。

2 基于技术成熟度的智能输电网多阶段投资决策模型

2.1 模型建立

利用技术成熟度理论构建智能输电网多阶段投资决策模型。以 TRL 作为各种投资方案在每个阶段达成既定目标的度量，并以投资结束时项目实现 TRL₈ 级的概率最大化为目标函数(TRL₉ 级通常作为系统现场验证的度量，因此不作考虑)。

假设在投资起始阶段各备选方案均起始于某一特定的 TRL 等级，并按照特定的概率升级。概率大小可通过风险评估工具计算获得。智能输电网总投资成本固定，各个阶段的投资额分配存在一定的灵活性。加大对某一投资方案的投资将提高该方案从特定 TRL 等级向其他 TRL 等级过渡的概率。

在任意阶段，投资方案的起始状态集合可表示为 $H=\{1,2,3,4,5,6,7,8,\emptyset\}$ ，其中 1~8 表示项目所达到的 TRL 等级， \emptyset 表示放弃投资(或者从未投资)。

第 n 阶段输电投资决策的状态及资金分配情况为

$$(S_n, M_n) \in \left(\prod_{i \in I} H \right) \times \mathbf{R}_+ \quad (1)$$

式中： S_n 为第 n 阶段智能输电网投资方案的状态集合($S_n \subseteq H$)； M_n 为第 n 阶段的投资金额； I 为备选方案数量； \mathbf{R}_+ 为各项投资方案的投资金额矩阵。

第 n 阶段输电投资项目决策集合为

$$X(S_n, M_n) = (X_n, M_{n+1}) \in \{0, 1\}^{I \times L} \times \mathbf{R}_+ \quad (2)$$

式中: X_n 表示第 n 阶段的决策变量, $X_n \subseteq \{0, 1\}^I$; L 表示 TRL 等级数。

综上所述, 可构建以最大化项目达到 TRL₈ 等级概率为目标函数的基于技术成熟度的智能输电网多阶段投资决策模型:

$$\begin{aligned} \max_{(X_n, M_{n+1}) \in X(S_n, M_n)} & E\{F_{n+1}(S_{n+1}, M_{n+1}) | S_n, X_n\} \quad (3) \\ \text{s.t.} & \sum_{i \in I, l \in L} C_{nil} X_{nil} \leq M_n \\ & \sum_{l \in L} X_{nil} \leq 1, \forall i \in I \\ & X_{nil} = 0, \text{若 } S_{ni} = \emptyset; \forall i \in I, l \in L \\ & M_{n+1} = M_n - \sum_{i \in I, l \in L} C_{nil} X_{nil} \end{aligned}$$

式中: C_{nil} 、 X_{nil} 分别表示在技术成熟度等级为 l 时第 n 阶段第 i 项方案的投资成本和决策变量; $X_{nil}=0$ 表示在第 n 阶段、技术成熟度等级为 l 时放弃第 i 项投资方案; $X_{nil}=1$ 表示执行第 i 项投资方案。

2.2 模型求解

利用逆向归纳法求解基于技术成熟度的智能输电网多阶段投资决策问题。模型求解步骤如下:

1) 计算最后一个投资阶段(第 N 阶段)中备选方案达到 TRL₈ 等级的最大概率, 记为 $f_N(S_N, M_N)$, 计算公式为

$$f_N(S_N, M_N) = \max_{(X_N, M_{N+1}) \in X(S_N, M_N)} 1 - \prod_{i \in I} (1 - P\{C_{i, N+1} = 8 | S_{Ni}, X_{Nil}\}) \quad (4)$$

2) 计算第 $N-1$ 阶段备选投资方案的最大过渡概率 $f_{N-1}(S_{N-1}, M_{N-1})$, 计算公式为

$$f_{n-1}(S_{n-1}, M_{n-1}) = \max_{(X_{n-1}, M_n) \in X(S_{n-1}, M_{n-1})} \sum_{S_n \in H} f_n(S_n, M_n) P\{S_n | S_{n-1}, X_{n-1}\} \quad (5)$$

3) 根据式(5)逐步逆推, 可求每个投资阶段的最大过渡概率。

4) 根据各个方案的决策指标值, 选出最优投资方案或投资方案组合。

3 算例结果与分析

利用 IEEE-24 节点系统分析基于技术成熟度的智能输电网多阶段投资决策问题。系统初始结构如图 2 所示。节点之间线路长度及输电容量数据见参考文献[16]。考虑提高节点 11、13(L₁)及节点 15、21(L₂)之间的线路容量的输电投资项目, 可选的投资方案为输电线路投资方案、晶闸管控制串联电容

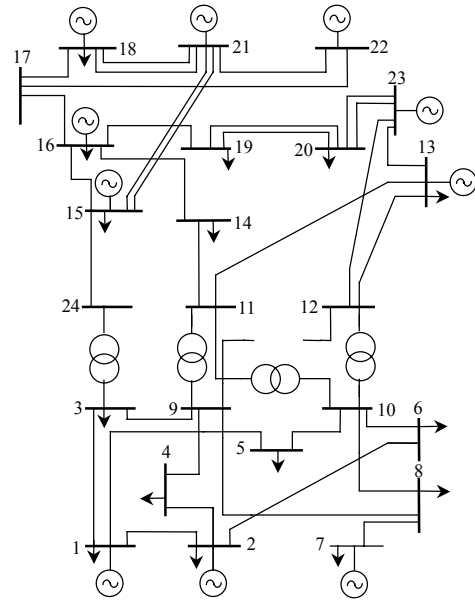


图 2 IEEE-24 节点测试系统
Fig. 2 IEEE-24 nodes testing system

器补偿技术(thyristor controlled series compensation, TCSC)。

根据技术成熟度等级, 将智能输电网投资划分为 3 个阶段, 即 $N=3$, 且在第 3 阶段末至少存在一种投资方案, 使输电项目的技术成熟度等级为 8。各投资阶段的 TRL 过渡情况如图 3 所示。利用德尔菲法求得各投资方案的状态转移概率, 如表 1 所示。

设智能输电网投资预算为 60 亿元, 输电线路投资成本为 281.56 万元/km^[17], 柔性输电设备 TCSC 的投资成本为 460 元/kvar^[18]。利用基于技术成熟度的智能输电网多阶段投资决策模型, 计算可得各投资方案达到 TRL₈ 等级的概率, 如表 2 所示。各阶段的投资金额如图 4 所示。

由表 2 可知, 输电线路投资方案实现 TRL₈ 的概率值最小, 柔性输电设备 TCSC 投资方案可获得最大概率值, 若同时投资输电线路及 TCSC, 则输电投资项目实现 TRL₈ 的概率值介于 2 者之间。造成上述现象的原因在于, 同一个投资阶段内输电线路与 TCSC 的建设成本不同, 相比而言, 实现相同的输电容量水平, 柔性输电设备 TCSC 的投资成本

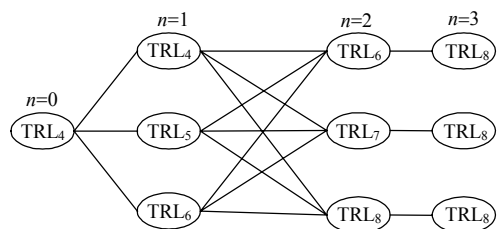


图 3 投资阶段 TRL 过渡情况
Fig. 3 TRL transition on investment stages

表 1 投资方案状态转移概率

Tab. 1 State transitional probabilities for investment cases

投资方案	起始 TRL	终止 TRL	转移概率
输电线路	TRL ₄	TRL ₄	0.30
	TRL ₄	TRL ₅	0.10
	TRL ₄	TRL ₆	0.40
	TRL ₄	TRL ₇	0.15
	TRL ₄	TRL ₈	0.05
	TRL ₅	TRL ₅	0.10
	TRL ₅	TRL ₆	0.40
	TRL ₅	TRL ₇	0.30
	TRL ₅	TRL ₈	0.20
	TRL ₆	TRL ₆	0.10
	TRL ₆	TRL ₇	0.50
	TRL ₆	TRL ₈	0.40
	TRL ₇	TRL ₇	0.10
	TRL ₇	TRL ₈	0.90
	TRL ₈	TRL ₈	1.00
TCSC	TRL ₄	TRL ₄	0.10
	TRL ₄	TRL ₅	0.10
	TRL ₄	TRL ₆	0.50
	TRL ₄	TRL ₇	0.20
	TRL ₄	TRL ₈	0.10
	TRL ₅	TRL ₅	0.20
	TRL ₅	TRL ₆	0.50
	TRL ₅	TRL ₇	0.20
	TRL ₅	TRL ₈	0.10
	TRL ₆	TRL ₆	0.10
TRL ₆	TRL ₇	0.60	
TRL ₆	TRL ₈	0.30	
TRL ₇	TRL ₇	0.15	
TRL ₇	TRL ₈	0.85	
TRL ₈	TRL ₈	1.00	
输电线路及 TCSC	TRL ₄	TRL ₄	0.20
	TRL ₄	TRL ₅	0.10
	TRL ₄	TRL ₆	0.45
	TRL ₄	TRL ₇	0.18
	TRL ₄	TRL ₈	0.07
	TRL ₅	TRL ₅	0.15
	TRL ₅	TRL ₆	0.45
	TRL ₅	TRL ₇	0.25
	TRL ₅	TRL ₈	0.15
	TRL ₆	TRL ₆	0.10
	TRL ₆	TRL ₇	0.55
	TRL ₆	TRL ₈	0.35
	TRL ₇	TRL ₇	0.12
	TRL ₇	TRL ₈	0.88
	TRL ₈	TRL ₈	1.00

表 2 投资方案达到 TRL₈ 等级的最优概率Tab. 2 The optimal probabilities when investment cases reached TRL₈

投资方案	输电线路	TCSC	输电线路及 TCSC
概率值	0.59	0.76	0.68

小于输电线路投资成本。因此，在总成本固定的情况下，为使输电投资项目实现 TRL₈ 的概率最大，应选择投资柔性输电设备 TCSC。

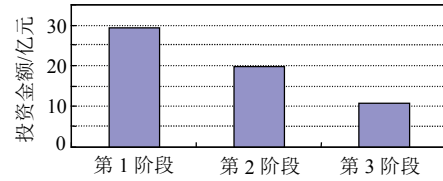


图 4 智能输电网投资各阶段资金分配

Fig. 4 Fund distribution at investment stages for smart transmission grid

由图 4 可知，在智能输电网投资中，各阶段的资金投资数量依次递减，第 1 阶段投资量最大，第 3 阶段最小。这与每个阶段需要实现的 TRL 有关：第 1 阶段预期实现的 TRL 为 TRL₄、TRL₅、TRL₆；第 2 阶段预期实现的 TRL 为 TRL₆、TRL₇、TRL₈；第 3 阶段预期实现的 TRL 为 TRL₈。根据 TRL 划分标准可知，第 1 阶段是一项技术投入的关键环节需要投入较多的资金，而在第 2 阶段、第 3 阶段，随着研究深入，技术的开发资金投入反而逐渐减少。因此，在智能输电网投资中，应根据实际需要合理安排资金投资，提高资金的利用效率。

4 结论

在智能输电网投资中，TCSC 投资方案实现 TRL₈ 的概率值大于输电线路投资，若同时投资输电线路及 TCSC，则输电投资项目实现 TRL₈ 的概率值位于二者之间。因此，柔性输电设备是智能输电网投资中应优先予以考虑的方案。此外，通过技术成熟度等级将投资划分为多个阶段，各阶段根据实际需要安排合理的投资金额、制定相应的投资策略，有效控制投资风险。

致 谢

本文的研究得到了河南省电力公司重点科技项目(豫电智能 KJ[2011]55 号)的资助，谨此致谢!

参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 罗凤章, 肖峻, 王成山, 等. 计及电价波动的电网建设项目经济评估区间法[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 20-24.
Luo Fengzhang, Xiao Jun, Wang Chengshan, et al. An interval economic evaluation method for projects of power system planning considering electricity price fluctuation[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 20-24(in Chinese).
- [3] 宋依群. 电力市场的多代理模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 80-83.

- Song Yiqun. Multi-agent model of the electricity market [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 80-83(in Chinese).
- [4] 孙旭, 任震. 市场环境下电网优化规划的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 41-44.
- Sun Xu, Ren Zhen. Research on optimal planning of power system in market environment[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 41-44(in Chinese).
- [5] 曾鸣, 田廓, 鄢帆, 等. 电力市场中考虑灵活性措施的发电投资决策分析[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 151-155.
- Zeng Ming, Tian Kuo, Yan Fan, et al. Analysis on investment decision of power generation project in electricity market environment and considering flexible tactics[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 151-155(in Chinese).
- [6] 胡学浩. 智能电网: 未来电网的发展态势[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 14-17.
- Hu Xuehao. Smart grid: a development trend of future power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 14-17(in Chinese).
- [7] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 10-15.
- Chang Kang, Xue Feng, Yang Weidong. Review on the basic characteristics and its technical progress of smart grid in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 10-15(in Chinese).
- [8] 王成山, 冯丽, 吉兴全. 包含 FACTS 设备的输电网投资规划的博弈论分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(5): 26-31.
- Wang Chengshan, Feng Li, Ji Xingquan. Game theory analysis of transmission expansion including FACTS devices[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(5): 26-31(in Chinese).
- [9] 贾德香, 程浩忠, 韩净. 发电与输电投资的期权博弈决策方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 11-15.
- Jia Dexiang, Cheng Haozhong, Han Jing. An approach to generation and transmission investment decision-making based on real option game in power market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9): 11-15(in Chinese).
- [10] 曾鸣, 田廓, 鄢帆, 等. 基于不同市场主体的输电投资效益计算模型[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 7-11.
- Zeng Ming, Tian Kuo, Yan Fan, et al. Evaluation model of transmission investment benefit based on different market entities[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 7-11(in Chinese).
- [11] 董军, 陈小良, 张婧. 电力市场环境基于多智能体的输电投资决策研究[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(4): 89-94.
- Dong Jun, Chen Xiaoliang, Zhang Jing. Study on the transmission investment decision based on multi-agent system in the deregulated power market[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(4): 89-94(in Chinese).
- [12] Zeng Ming, Tian Kuo, Li Na, et al. Transmission investment decision based on fuzzy real option method under uncertain environment [C]//The Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2009: 355-360.
- [13] Office of Under Secretary of Defense, Technology and Logistics. Mandatory procedures for major defense acquisition programs(MDAPS) and major automated information system(MAIS) acquisition programs[R/OL]. 2002-04-05. <https://acc.dau.mil/CommunityBrowser.aspx?id=50466>.
- [14] Definitions of technology readiness levels[DB/OL]. 2008-06. https://www.Esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf.
- [15] 李瑶. 航空发动机技术成熟度评价方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2010, 23(2): 47-51.
- Li Yao. Aero-engine technology readiness assessment[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(2): 47-51(in Chinese).
- [16] Romero R, Rocha C, Mantovani J R S, et al. Constructive heuristic algorithm for the DC model in network transmission expansion planning[J]. IEE proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(2): 277-282.
- [17] 党晓峰. 750 kV 输电工程造价分析[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(11): 37-39.
- Dang Xiaofeng. Cost analysis of 750 kV transmission projects [J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(11): 37-39(in Chinese).
- [18] 钱峰, 汤广福, 贺之渊. 基于智能帕雷托解的 FACTS 装置多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 57-63.
- Qian Feng, Tang Guangfu, He Zhiyuan. Multi-objective optimal placement of FACTS devices based on smart pareto solution [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 57-63(in Chinese).



熊浩清

收稿日期: 2011-05-06.

作者简介:

熊浩清(1979), 男, 博士, 在站博士后, 从事智能电网、电力系统规划与运行方面的研究工作, E-mail: thomasxiong@sina.com;

张晓华(1963), 男, 教授级高级工程师, 从事智能电网、电力系统规划与运行研究工作;

孟远景(1955), 女, 教授级高级工程师, 从事智能电网、电力系统规划与运行方面的研究工作;

汤涌(1959), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统分析软件开发和电力系统分析工程研究工作;

孙华东(1975), 男, 博士, 高级工程师, 从事智能电网、电力系统规划与运行方面的研究工作;

易俊(1980), 男, 博士, 从事智能电网、电力系统规划与运行方面的研究工作。

(责任编辑 杜宁)