基于博弈论的电源、电网和负荷的适应性评价

刘连光, 陈艳伟*, 陈为化, 刘自发, 闫旭东

华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

* E-mail: yanweichen@csu.edu.cn

收稿日期: 2014-10-08; 接受日期: 2014-12-18

国家电网公司大电网重大专项课题(批准号: SGCC-MPLG019-2012)资助项目

摘要 由于电源容量和电网、负荷规模增大以及影响电网安全性、经济性的因素增多, 认识电源、电网及负荷的相互作用及影响, 对建立电网适应性的评价体系有重要意义. 在建设及投资上, 电源、电网及负荷隶属于不同的主体; 在运行及收益上, 三者必须遵守电力系统统一调控的准则, 而各投资主体方的收益通过电量或电价联系. 针对电源、电网及负荷投资方关注的投资收益, 基于博弈论建立了变电容量、机组容量、负荷容量与投资收益关系的模型, 提出了基于独立系统运行机构(ISO)调度模型和节点电价模型的电源、电网、负荷各方投资收益算法. 通过算例的计算结果证明了电源、电网和负荷博弈模型及收益算法的有效性, 同时分析了电源、电网和负荷三者间的相互作用及相互影响, 找出了纳什均衡点并解释了各方的行为. 电源、电网与负荷的适应性评价是大电网适应性评价的重要内容, 本文的研究工作及成果可分析电源、电网及负荷的相互作用及影响, 计算各种策略组合下各投资方的收益, 为各方的决策提供依据.

关键词

博弈论
电源
电网
负荷
适应性
节点边际电价
直流潮流

1 引言

适应经济和社会发展的需要是制定电网规划的原则. 电网规划的适应性通常是以未来的电力负荷预测为依据. 在负荷预测基础上, 制定几种可行的电网规划方案, 然后通过安全性、经济性比较确定最佳的方案. 随着风电、太阳能等可再生能源的开发与利用, 电网安全性、供电可靠性要求的提高, 以及电力市场的兴起与发展, 影响电网规划合理性的内外部因素、约束条件增多, 仍然按照未来电力负荷预测以及只是评价安全性和经济性的电网规划方法, 已难以满足制定科学、合理电网规划的需要. 近些年, 在安全性和经济性评估的基础上, 评估电网的安全风

险^[1~3], 挖掘电网的潜在经济效益等研究^[4~6], 都得到了长足的发展和取得了重要成果, 电网规划的安全性和经济性的评价理论与方法体系得以不断完善.

由于我国的水电、火电、风电能源 70% 分布在中西部地区, 而负荷集中在中东部及沿海地区, 电力输送距离长达 1000~3000 km, 为实现全国能源资源的优化配置, 我国提出建设特高压同步电网^[7,8]. 规划的特高压同步电网规模大、覆盖范围广, 面对的内外影响因素更多, 尤其是一旦确定了方向或既成了事实将很难再改变, 可能对未来的电网建设及发展产生重大影响. 因此, 对关系未来国家经济、社会安全的大电网, 仍然按照传统的只评价电网安全性、经济性的方法规划电网, 或者说, 只从电网内部、自身

引用格式: 刘连光, 陈艳伟, 陈为化, 等. 基于博弈论的电源、电网和负荷的适应性评价. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 81~90
Liu L G, Chen Y W, Chen W H, et al. The evaluation of adaptability among power source, power grid and load based on game theory (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 81~90, doi: 10.1360/N092014-00266

的角度评价电网是不是仍然合适, 以及能否正确反映外界环境与电网的相互作用及相互影响等, 都是值得认真思考和深入研究的问题. 通过研究、建立电网适应性的评价理论与方法体系是大电网发展的需要.

分析电网规划的评价体系可看出, 目前的评价体系主要针对电力系统的内部影响因素, 缺少对影响电力系统发展的外部因素的评价, 或者说, 还没有建立完善的内外部影响因素的评价体系, 以致造成对大电网的发展方向、发展模式缺少足够的理论支撑. 目前适应性评价急需解决两方面的问题: 一是如何评价电网与内外部影响因素的相互作用、相互影响; 二是如何评价电网发展方向与发展模式的选择. 建立适应性的评价体系可为解决上述问题提供了有力支撑. 所谓适应性就是系统主体通过处理与内外因素的相互影响、相互作用, 达到稳定优化发展的能力与性质.

大电网的发展、建设, 除受电力系统安全性和建设、运行经济性内部因素的影响外, 还会受到能源资源、技术进步、环境保护等外部影响因素的制约, 如图 1 所示. 影响电网发展模式的外部影响因素纷繁复杂, 包括负荷需求、电源、国民经济、社会发展、能源资源、技术进步等多方面. 这些因素通过影响全社会用电量、最大负荷或者电源的装机容量以及电网结构的建设, 最终影响电网的发展模式. 虽然影响大电网规划、建设的内外部因素很多, 但建立适应性评价体系对大电网的目的和意义在于, 认识大电网规划、建设与内外部影响因素相互影响、相互作用的关系, 评价电网能否满足长期发展的需要.

本文提出建立的大电网适应性评价体系是个复杂的理论体系, 包括扩展安全性评价体系、完善经济性评价体系和建立适应性评价体系. 首先针对经济

性评价, 研究大电网的变电容量与电源机组容量、负荷容量的相互影响及相互作用关系, 在电网发展因素影响各方投资收益经济参数情况下, 提出基于投资收益的电源、电网和负荷三方博弈模型及算法, 证明电源、电网和负荷的相互作用及影响关系.

2 电源、电网和负荷的博弈关系

在我国, 电源、电网和负荷建设及投资由不同主体管控. 对电力系统而言, 电源、电网和负荷是电力系统的主要组成部分, 同时隶属于不同的主体, 相互之间通过电量或电价联系. 由于各方投资对象和关注的重点不同, 各方的投资收益受对方决策的影响, 电源、电网和负荷之间存在博弈关系. 其中, 电源方投资的是发电机组(电厂), 关注的重点包括发电机组的投资费用、运行维护费用、以及机组发电量增加所带来的收入; 电网方投资的是输电线路和变压器, 即输变电系统的容量, 关注的重点包括输电线路和变压器的投资费用、运行维护费用、以及设备投入后电量销售增加所带来的收入; 负荷方投资的是生产设备, 即用户的设备容量, 关注的重点包括生产设备的投资费用、运行维护费用、用电费用、以及设备投入产品产量增加带来的收益. 因此, 电力系统电源、电网和负荷的博弈以投资方收益为决策依据.

博弈论在电力市场、电网投资规划上已有很多应用^[9-13], 已被证明是研究不同事物主体相互作用与相互影响的有效的科学理论. 本文针对电源、电网及负荷投资方所关注的投资收益, 研究、建立基于博弈论的电源、电网和负荷各投资方收益关系的模型, 以及考虑独立系统运行机构(independent system operator, ISO)调度规则^[14]的电源、电网和负荷三方投资收益算法, 然后通过计算不同策略组合下各建设投资方的收益, 评价电源、电网和负荷之间相互博弈的作用及其影响, 给出供电源、电网和负荷各投资方做决策的最优策略, 使各方的收益最大化, 得出 Nash 均衡策略组合^[12,13].

电源、电网和负荷是电力系统的主要组成部分, 各投资方的投资及建设容量影响电力系统构建规模, 从而影响大电网建设适应性的评价. 在运行上, 电源、电网和负荷各投资主体方除考虑自身的收益外, 三者必须遵守电力系统统一调控的准则, 以及基于博弈论基本规则^[15]. 为此, 本文的假设如下: 博弈参

图 1 电网发展影响因素

与者为电源方、电网方和负荷方; 各博弈方都是理性的, 各方追求投资的最大收益; 采用一次同时博弈模式, 各方投资收益等均折算到同一经济评价年度内; 电力市场采用节点电价模型, 负荷采用刚性负荷, 系统由 ISO 调度。

3 基于投资收益的源网荷博弈模型

电力系统建设和运行经济性是影响电力系统规划方案决策的关键内容之一, 也是建立大电网适应性评价体系中, 完善大电网经济性评价体系需要研究、解决的问题。针对我国远距离输电和跨大区电力系统的建设, 为客观评价电源、电网及负荷投资收益, 认识三者间的相互作用及影响, 建立电源、电网及负荷收益博弈模型。

3.1 电源投资收益博弈模型

电源方根据电网新增变电容量和负荷需求决定其新建机组容量, 电源方的策略和决策目标是通过新建适当的装机容量来最大化其收益, 电源博弈模型如下^[16]。

$$\max_{P_{g,k}^{\text{new}}} \{ \rho_k P_{g,k} - C_{\text{inv}g} P_{g,k}^{\text{new}} - C_{\text{opg}} P_{g,k}^{\text{new}} \}, \quad (1)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_{g,k} \leq P_{g,k}^{\text{new}}. \quad (2)$$

(1)式中, ρ_k 表示节点 k 的电价; $P_{g,k}^{\text{new}}$ 为节点 k 新增电源的出力; $C_{\text{inv}g}$ 为新增电源的投资价格系数; C_{opg} 为新增电源的运行价格系数。

(1)式是电源模型的目标函数, 代表电源方投资电厂后的收益。在该目标函数中, 节点 k 新增的电机装机容量 $P_{g,k}^{\text{new}}$ 和其实际出力 $P_{g,k}$ 是该优化问题的决定变量。(2)式是发电机出力的约束不等式。

3.2 电网投资收益博弈模型

输电网包括输电线路和变压器两部分, 为了适应负荷发展的需要, 电网方一方面需要增加一定的变电容量, 另一方面可以选择是否投资输电线路。

设电网方在节点 k 增加的变电容量为 T_k , 电网方的策略和决策目标是通过选取适当的变电容量和选择是否投资线路 L_{mn} 来最大化其收益, 电网方的博弈模型如下^[16]。

$$\max_{T_k} \{ (\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (\rho_j - \rho_i) F_{ij}' - C_{\text{opl}} F_{ij}') + C_t P_{d,k}^{\text{new}} - C_{\text{opt}} T_k - C_{\text{inv}t} T_k \}, \forall F_{ij}' \geq 0, \quad (3)$$

$$\max_{T_k} \{ (\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (\rho_j - \rho_i) F_{ij} - C_{\text{opl}} F_{ij}) - C_{\text{inv}l} F_{mn} - (\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (\rho_j - \rho_i) F_{ij}' - C_{\text{opl}} F_{ij}') + C_t P_{d,k}^{\text{new}} - C_{\text{opt}} T_k - C_{\text{inv}t} T_k \}, \forall F_{ij}' \geq 0, \quad (4)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_{d,k}^{\text{new}} \leq \min(T_k, D_k). \quad (5)$$

(3)式是电网方不扩展输电线路的收益模型, (4)式是扩展线路 L_{mn} 的收益模型。式中, N 为系统的节点数; ρ_i 与 ρ_j 分别为节点 i 和节点 j 的节点电价; F_{ij}' 为不扩展线路情况下, 节点 i 到节点 j 的支路潮流; F_{ij} 为扩展线路 L_{mn} 情况下, 节点 i 到节点 j 的支路潮流; F_{mn} 表示线路 L_{mn} 的线路容量; $C_{\text{inv}l}$ 为扩展线路 L_{mn} 的投资价格系数; C_{opl} 为输电线路的运行价格系数; $P_{d,k}^{\text{new}}$ 为节点 k 新增的负荷传输量; C_t 为新增负荷传输量的价格系数; T_k 为节点 k 新增加的变电容量; C_{opt} 为新增变电容量的运行价格系数; $C_{\text{inv}t}$ 为新增变电容量的投资价格系数。

(5)式是电网方模型的约束不等式, 其表示节点 k 实际新增的负荷传输量 $P_{d,k}^{\text{new}}$ 受到新增变电容量 T_k 与新增负荷容量 D_k 的限制, 实际新增的负荷传输量 $P_{d,k}^{\text{new}}$ 必须小于新增变电容量 T_k 与新增负荷容量 D_k 中的最小值。

3.3 负荷投资收益博弈模型

随着经济的发展和需求, 电力用户通常是通过扩大生产规模来增加产能, 以获取更大的收益。设在节点 k 增加的负荷容量为 D_k , 负荷方的策略和决策目标是通过选取适当的负荷容量来最大化自己的收益, 负荷方的博弈模型如下:

$$\max_{D_k} \{ C_s P_{d,k}^{\text{new}} - \rho_k P_{d,k}^{\text{new}} - C_{\text{opd}} D_k - C_{\text{inv}d} D_k \}, \quad (6)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_{d,k}^{\text{new}} \leq \min(T_k, D_k). \quad (7)$$

(6)式中, C_s 为新增负荷容量的产值价格系数; ρ_k 为节点 k 的节点电价; D_k 为节点 k 新增加的负荷容量; C_{opd} 为新增负荷容量的运行价格系数; $C_{\text{inv}d}$ 为新增负荷容量的投资价格系数。

(7)式是负荷模型的约束不等式, 其表示节点 k 实际新增的负荷传输量 $P_{d,k}^{\text{new}}$ 受到新增变电容量 T_k 和新增负荷容量 D_k 的限制, 实际新增的负荷传输量 $P_{d,k}^{\text{new}}$ 必须小于新增变电容量 T_k 与新增负荷容量 D_k 中的最小值。

4 源网荷投资收益博弈算法

上述建立的电源、电网和负荷投资收益博弈模型都是相互独立的, 只是考虑了各方自身利益最大化, 但电力系统是一个有机的整体, 运行中须满足电力供需平衡和电力系统的安全运行准则, 需要统一调度机构将各方统一起来, 并以一定规则调度机组出力, 满足线路潮流和保障运行安全等约束。本文提出采用 ISO 调度模型和基于支路潮流的节点电价模型求解发电机组出力、支路线路潮流和系统中各节点的电价, 然后通过建立的博弈模型计算源网荷各方在投资策略组合下的投资收益, 通过比较策略组合下各方的收益, 分析得出源网荷的相互作用及影响。ISO 调度策略是基于网络安全等约束条件, 以社会生产成本最小为目标安排发电机组出力。节点电价模型反映的是为满足某节点新增 1 MW 电量需求时的系统边际成本。采用 ISO 经济调度模式, 能够引导电源、电网以及负荷各方的合理投资, 优化电力资源配置, 从而达到实现电源、电网以及负荷协调发展的目标。

4.1 ISO 调度模型

ISO 调度模型是 ISO 根据每个发电商向 ISO 报送的出力报价, 基于网络安全等约束条件, 以社会生产成本最小为目标安排发电机组出力的调度模式, 其模型如下^[14]:

$$\min \left\{ \sum_{i \in N_g} C_i P_{g,i} \right\}. \quad (8)$$

$$\text{s.t. } e^T (P_G - P_D) = 0, \quad (9)$$

$$T(P_G - P_D) \leq F, \quad (10)$$

$$P_{G-} \leq P_G \leq P_{G+}. \quad (11)$$

(8)式中, N_g 为系统中的发电机数; C_i 为发电机组 i 的出力报价; $P_{g,i}$ 为机组 i 的实际出力; P_G 为发电机出力矩阵; P_D 为负荷矩阵; e^T 为系统关联矩阵; T 为系统支路潮流与发电机出力的灵敏度矩阵; F

为系统支路潮流矩阵; P_{G-} 和 P_{G+} 分别为发电机组的出力上下限矩阵。

(8)式是 ISO 模型的目标函数, 其代表了社会总生产成本最小。在该目标函数中, 各个发电机组的出力 $P_{g,i}$ 是该优化问题的决定变量。(9)式是系统的有功约束, 本文主要研究电源、电网和负荷的相互影响及相互作用关系, 对潮流计算的精确度要求不高, 主要考虑有功问题, 因此可采用直流潮流模型; (10)式是线路潮流约束, 其表示线路的潮流被限制在一定的范围内; (11)式是发电机组的出力约束, 其表示发电机组的出力被限制在一定的范围内。

4.2 节点电价模型

在 ISO 调度模型中已经提及, 本文最主要目的是研究电源、电网和负荷的相互影响及相互作用关系, 对线路潮流的计算精确度要求不高, 在 ISO 调度模型中采用直流潮流的计算方法, 相对应, 在计算节点电价时, 亦采用基于直流潮流计算法的节点电价模型, 其计算模型如下^[17]:

$$p_i = \lambda_1 + \sum_{ij} \lambda_{2ij} \cdot \left(\frac{\partial F_{ij}(P_G)}{\partial (P_G)} \right). \quad (12)$$

(12)式中, p_i 为节点 i 的电价; λ_1 为系统满足(9)式约束下的拉格朗日等式系数; λ_{2ij} 为系统满足(10)式线路潮流约束的拉格朗日不等式系数; F_{ij} 为系统支路 ij 的线路潮流; P_G 为发电机出力矩阵。

4.3 算法流程

通过分析电源、电网以及负荷各方博弈模型和 ISO 调度模型, 可得到电源、电网和负荷的博弈关系算法流程如图 2 所示。步骤一, 输入系统参数和经济参数; 步骤二, 通过各方报价形成策略组合; 步骤三, 在 ISO 调度机组出力的基础上, 通过建立的电源、电网和负荷的博弈模型求解各策略下的各方收益; 步骤四, 确定纳什均衡点, 输出博弈结果。

5 源网荷相互作用及影响分析

5.1 博弈原始数据

研究电源、电网和负荷投资收益的关系, 需对复杂的大规模系统化简。例如, 根据我国电源、电网和

图 2 算法流程图

负荷投资、建设体制国情, 包括±800 或±1100 kV 直流输电的送端电网可简化成电源, 而受端电网可看成负荷, 电源、电网和负荷分别由不同主体方投资. 因此, 本文模拟分析电源、电网和负荷三者关系的系统如图 3 所示. 其中, 电源 G_1 和 G_2 模拟我国的西部、北部两大能源基地, 两地区能源资源丰富, 环境容量充裕, 机组边际成本报价较低; 负荷中心 D 模拟东部沿海负荷地区, 该区域负荷量大. 为满足负荷中心的负荷发展需求, 其一负荷中心可向能源基地 G_1 和 G_2 受电; 其二电源方也可以在该区域新建电源 G_3 , 由于受能源资源和环境容量的影响, 若在该区域新建电源, 其机组边际成本报价较高. 该系统亦有三条输电通道, 分别用 L_{12} , L_{13} 和 L_{23} 表示, 负荷的增大会使线路出现输电阻塞甚至线路潮流越限问题, 因此, 为适应负荷发展需求, 电网方亦可选择通过扩展线路 L_{23} , 将 G_1 和 G_2 的电力输送至负荷中心, 由此形成 G_1 和 G_2 通过 L_{12} , L_{13} 和 L_{23} 向负荷中心送电. 发电机(电源)参数和线路参数如表 1 和 2 所示.

图 3 大电网模拟系统

表 1 发电机参数^{a)}

序号	母线	下限(MW)	上限(MW)	报价(\$/MW)
1	1	0	200	10
2	2	0	100	12
3	3	0	—	14

a) 电源 G_1 和 G_2 机组报价参数取自文献[16], 电源 G_3 机组报价较 G_1 , G_2 高, 但为同一数量级, 在此假设取 14.

表 2 线路参数

序号	i	j	导纳	最大容量(MW)
1	1	2	0.1	100
2	1	3	0.2	80
3	2	3	0.2	80

在本文电源、电网和负荷关系的研究中, 假设负荷中心初始负荷为 100 MW, 降压变下载容量达到满载, 负荷区域某企业(负荷方)为进一步扩大生产力, 使该地区负荷增大, 至于选择新增多少负荷容量, 需根据其能获得的电力做出决策, 亦即会受到电源和电网的影响; 对于电源方, 由于负荷增大, 其可以在该区域新增电源 G_3 , 为企业供电; 对于电网方, 根据负荷方电力需求在负荷区新增变压器, 同时由于线路 L_{13} 和 L_{23} 存在电力输送容量约束, 为占领负荷中心新增负荷的市场, 其也可以投资扩展线路 L_{23} (由单回路线路扩展为双回路线路). 由此, 电源、电网和负荷三者之间就各自新增容量问题形成了博弈关系, 源网荷三方投资信息如表 3 所示.

对于电源方 G_3 , 其可选择的 3 个策略分别为: 不投资、投资 50 MW 机组和投资 100 MW 机组. 假设机组经济参数如表 4 所示.

表 3 参与者投资信息

参与者	投资对象	容量(MW)	策略代号
电源方(μ_1)	G_3	0	0
		50	1
		100	2
电网方(μ_2)	不扩展线路	—	0
	扩展 L_{23}	—	1
	T_2	90	0
		110	1
负荷方(μ_3)	低能耗产业	130	2
		100	1
		120	2

表 4 电源方策略经济参数

参数	单位	参数值
C_{opg}	\$/MW	0.1
C_{invg}	\$/MW	14

对于电网方, 根据负荷方的电力需求, 其可选择的 6 个策略分别为: (不投资线路, 投资 90 MW 变压器)、(不投资线路, 投资 110 MW 变压器)、(不投资线路, 投资 130 MW 变压器)、(投资线路 L_{23} , 投资 90 MW 变压器)、(投资线路 L_{23} , 投资 110 MW 变压器)、(投资线路 L_{23} , 投资 130 MW 变压器). 假设电网方策略的经济参数如表 5 所示.

对于负荷方, 基于生产工艺有 2 个策略选择, 分别是采用低能耗产业方案: 新增用电负荷 100 MW, 该方案属于技术升级方案, 产品价值高; 高能耗产业方案: 新增 120 MW 用电负荷, 产品价值低. 假设负荷方策略的经济参数如表 6 所示.

5.2 博弈计算结果

通过分析电源、电网和负荷三方的投资策略得出, 该博弈的纯策略空间含有 36 个策略组合($3 \times 2 \times 3 \times 2 = 36$), 通过各方博弈模型可计算出策略组合下各方的收益组合, 如表 7 所示.

5.3 博弈关系分析

通过遍历法可知, 该博弈的 Nash 均衡点只有一个, 其策略组合为: $S^* = (0, (1, 1), 1)$. 亦即: 电源方不进行任何投资; 输电方投资线路 L_{23} , 新增变压器 110 MW; 负荷方采用低能耗的技术升级方案. 造成这一结果的原因为: 对于电源方而言, 由于新建电厂位于

表 5 电网方策略的经济参数^{a)}

参数	单位	参数值
C_t	\$/MW	20
C_{opL}	\$/MW	0.01
C_{invL}	\$/MW	0.5
C_{opt}	\$/MW	0.1
C_{invt}	\$/MW	10

a) 单位容量变压器边际成本较电机边际成本低, 二者取同一数量级, 线路成本相对较低, 在此假设变压器边际成本为 10, 线路边际成本取 0.5

表 6 负荷方策略的经济参数^{a)}

参数	单位	参数值
C_s	低方案	\$/MW 35
	高方案	\$/MW 30
C_{opd}	\$/MW	0.2
C_{invd}	\$/MW	11

a) 低能耗方案产品价值较高能耗产品高, 但为同一数量级, 在此假设低方案边际产值为 35, 高方案取 30. 企业设备投资边际成本与机组边际成本也取同一数量级, 取值为 11

表 7 策略组合及收益

策略组合	收益(μ_1, μ_2, μ_3)单位: \$
(0, (0, 0), 1)	(0, 930, -670)
(0, (0, 0), 2)	(0, 930, -1194)
(0, (0, 1), 1)	(0, 728, -670)
(0, (0, 1), 2)	(0, 728, -1194)
(0, (0, 2), 1)	(0, 526, -670)
(0, (0, 2), 2)	(0, 526, -1194)
(0, (1, 0), 1)	(0, 1448, 770)
(0, (1, 0), 2)	(0, 1448, 960)
(0, (1, 1), 1)	(0, 1646, 980)
(0, (1, 1), 2)	(0, 1646, 416)
(0, (1, 2), 1)	(0, 1244, 980)
(0, (1, 2), 2)	(0, 1244, 576)
(1, (0, 0), 1)	(-65, 1009, 410)
(1, (0, 0), 2)	(-65, 1009, -264)
(1, (0, 1), 1)	(115, 1007, 580)
(1, (0, 1), 2)	(693, 1481, -899)
(1, (0, 2), 1)	(115, 1005, 580)
(1, (0, 2), 2)	(693, 1279, -899)
(1, (1, 0), 1)	(-605, 888, 950)
(1, (1, 0), 2)	(-605, 888, 276)
(1, (1, 1), 1)	(-605, 886, 1180)
(1, (1, 1), 2)	(-605, 1086, 636)
(1, (1, 2), 1)	(-605, 684, 1180)
(1, (1, 2), 2)	(-605, 1084, 816)
(2, (0, 0), 1)	(-549, 1009, 410)
(2, (0, 0), 2)	(-670, 1009, -264)
(2, (0, 1), 1)	(-490, 1007, 580)
(2, (0, 1), 2)	(-310, 1207, -24)
(2, (0, 2), 1)	(-490, 805, 580)
(2, (0, 2), 2)	(-130, 1205, 96)
(2, (1, 0), 1)	(-1089, 888, 1130)
(2, (1, 0), 2)	(-1210, 888, 456)
(2, (1, 1), 1)	(-1210, 1048, 1254)
(2, (1, 1), 2)	(-1160, 1886, 416)
(2, (1, 2), 1)	(-1210, 846, 1254)
(2, (1, 2), 2)	(-1080, 1884, 576)

负荷中心区, 该地区经过多年的发展, 人口密集、征地费用高、资源短缺、环境容许排放量小, 导致电源方新建电厂 G_3 较 G_1, G_2 费用高, 根据 ISO 调度模型, 只有在输电线路满载或 G_1, G_2 满出力的情况下, G_3 才为负荷提供电力, 否则其出力为零, 相对应其收益为零或负值. 因此, 电源方收益受电网方和负荷方投资策略的影响, 若电网方不投资输电线路 L_{23} 且新增变压器为 130 MW, 负荷方采取高耗能方案, 则电源方采取新建 50 MW 电厂会取得最大收益(对应组合: (1, (0, 2), 1)). 但对于电网方而言, 无论负荷方的策略是高耗能产业还是低耗能产业, 其投资 130 MW 变压器

的收益均较投资 110 MW 变压器减少, 这是因为电网方投入变电容量过大使变电容量闲置, 从而使其收益减少. 另外, 电网方为了占有负荷区的市场, 利用能源基地 1, 2 机组报价成本低的优势, 根据负荷方的投资策略, 一定会投资扩展输电线路 L_{23} , 这使得电源方的最优策略偏离原来的建设 50 MW 电厂, 而选择不做任何投资. 对于负荷方, 其最优策略的选择同样会受到电源方和电网方选择策略的影响, 虽在策略组合(2, (1, 1), 1)和(2, (1, 2), 1)下, 均可获得最大收益 1254 \$, 但电源方为了追求其最大利益, 不会投资建设电源 G_3 , 相对应, 负荷方不能获得最大收益 1254 \$. 在电源方选择策略 0, 电网方选择策略(1, 1)的情况下, 负荷方选择低能耗产业才能使其收益最大化, 即选择策略 1. 综合电源方、电网方与负荷方三方面的策略, (0, (1, 1), 1)策略组合是符合纳什均衡条件的策略组合.

根据建立的电源、电网和负荷的投资收益博弈模型和算法, 由各方收益博弈结果可得出, 电源、电网及负荷三者的相互作用和相互影响关系如下:

1) 对电源方而言, 若电网方选择不投资线路 L_{23} , 且投资新增变电容量 130 MW, 负荷方选择投资高耗能产业, 而其选择投资 50 MW 机组, 则会获得最大收益 693 \$(对应组合(1, (0, 2), 2)), 但在这种策略组合下, 电网方不能获得其最大利益, 且负荷方还将处于亏本状态, 因此对于电网方和负荷方, 二者不会选择这种策略组合, 相对应, 电源方也不会收到此时的最大收益 693 \$.

2) 对电网方而言, 若电源方选择投资 100 MW 机组, 负荷方选择投资高耗能产业, 而其选择投资线路 L_{23} 和新增变电容量 110 MW, 则会获得最大收益 1886 \$(对应组合(2, (1, 1), 2)), 但在这种策略组合下, 负荷方不能获得其最大利益, 且电源方还将处于亏本状态, 因此对电源方和负荷方, 二者不会选择这种策略组合, 相对应, 电网方也不会收到此时的最大收益 1886 \$.

3) 对负荷方而言, 若电源方选择投资 100 MW 机组, 电网方选择投资线路 L_{23} 和新增变电容量 110 或 130 MW, 而其选择投资低能耗产业, 则会获得最大收益 1254 \$(对应组合(2, (1, 1), 2)), 但在这种策略组合下, 电网方不能获得其最大利益, 且电源方还将处于亏本状态, 因此对电源方和电网方, 二者不会选择这种策略组合, 相对应, 负荷方也不会收到此时的

最大收益 1254 \$.

4) 在博弈过程中, 因三方均是理性的, 都在追求自身的最大利益, 从而达到 Nash 均衡(策略组合: (0, (1, 1), 1)), 三方都不愿单独偏离该均衡点.

上述研究结果表明, 电力系统的电源、电网和负荷三者所属不同, 诉求不同, 在选择投资和收益方面, 三者相互依存, 相互影响, 任一方投资策略的改变会直接影响其他两方的收益, 在博弈过程中, 三者都在追求自身的最大利益, 从而可求得 Nash 均衡点, 为各方的投资策略提供依据.

5.4 博弈参数影响

博弈结果受博弈参数的影响. 电网发展受国民经济、能源资源、环境保护以及技术发展等因素的影响, 在博弈过程中, 这些因素通过影响电源、电网及负荷各方的投资收益经济参数, 进而影响三方的博弈结果. 本文再考虑另一种情形, 假设海上风电场和光伏发电等清洁能源大规模开发技术逐步成熟, 东部沿海地区电力资源不再匮乏, 同时环境压力亦逐步改善, 建设大规模新能源电源基地的成本大大降低, 机组报价应较能源基地 G_1 和 G_2 较低. 对应 5.1 节的博弈原始数据, 并基于以上分析, 假设源网荷三方的投资经济参数如表 8 所示.

通过源网荷各方博弈模型可计算出策略组合下各方的收益组合, 如表 9 所示.

通过遍历法可知, 该博弈的 Nash 均衡点只有一个, 其策略组合为: $S^*=(1, (0, 1), 1)$. 亦即: 电源方投资 50 MW 机组, 输电方不扩展线路(不投资线路 L_{23}), 新增变压器 110 MW; 负荷方采用低能耗的技术升级方案. 造成这一结果的原因为: 对于电源方而言, 由

表 8 各参与者投资经济参数

参与者	参数	单位	参数值
电源方	$C_{\text{inv}g}$	\$/MW	8
	$C_{\text{op}g}$	\$/MW	0.1
电网方	C_t	\$/MW	20
	$C_{\text{op}L}$	\$/MW	0.01
	$C_{\text{inv}L}$	\$/MW	0.5
	C_{opt}	\$/MW	0.1
	$C_{\text{inv}t}$	\$/MW	10
	C_{S1}	\$/MW	35
负荷方	C_{S2}	\$/MW	30
	$C_{\text{op}d}$	\$/MW	0.2
	$C_{\text{inv}d}$	\$/MW	11

表9 策略组合及收益

策略组合	收益(μ_1, μ_2, μ_3) 单位: \$
(0, (0, 0), 1)	(0, 930, -670)
(0, (0, 0), 2)	(0, 930, -1194)
(0, (0, 1), 1)	(0, 728, -670)
(0, (0, 1), 2)	(0, 728, -1194)
(0, (0, 2), 1)	(0, 526, -670)
(0, (0, 2), 2)	(0, 526, -1194)
(0, (1, 0), 1)	(0, 888, 1130)
(0, (1, 0), 2)	(0, 888, 456)
(0, (1, 1), 1)	(0, 1071, 1248)
(0, (1, 1), 2)	(0, 2886, 416)
(0, (1, 2), 1)	(0, 870, 1248)
(0, (1, 2), 2)	(0, 1884, 576)
(1, (0, 0), 1)	(395, 1689, 590)
(1, (0, 0), 2)	(395, 1689, -84)
(1, (0, 1), 1)	(395, 1787, 780)
(1, (0, 1), 2)	(575, 2463, -200)
(1, (0, 2), 1)	(395, 1485, 780)
(1, (0, 2), 2)	(575, 2261, -200)
(1, (1, 0), 1)	(95, 888, 1130)
(1, (1, 0), 2)	(95, 888, 456)
(1, (1, 1), 1)	(95, 886, 1380)
(1, (1, 1), 2)	(95, 1086, 856)
(1, (1, 2), 1)	(95, 684, 1380)
(1, (1, 2), 2)	(95, 1084, 1056)
(2, (0, 0), 1)	(190, 889, 1130)
(2, (0, 0), 2)	(190, 889, 456)
(2, (0, 1), 1)	(190, 887, 1380)
(2, (0, 1), 2)	(190, 1087, 856)
(2, (0, 2), 1)	(190, 685, 1380)
(2, (0, 2), 2)	(190, 1085, 1056)
(2, (1, 0), 1)	(271, 889, 1130)
(2, (1, 0), 2)	(190, 889, 456)
(2, (1, 1), 1)	(190, 888, 1380)
(2, (1, 1), 2)	(190, 1087, 856)
(2, (1, 2), 1)	(190, 685, 1380)
(2, (1, 2), 2)	(190, 1085, 1056)

于在负荷中心地区, 海上风电和光伏等新能源的大力开发, 该地区新建电厂机组边际成本低, 为占领负荷区电力市场, 其新建机组 G_3 报价较 G_1 , G_2 低, 根据 ISO 调度模型, G_3 首先达到满载, 余下负荷由 G_1 , G_2 的出力平衡, 因此, 电源方为获得其最大收益必然会投资电源 G_3 , 但 G_3 容量不宜过大, 否则由于变压器容量和负荷约束, 使 G_3 部分容量处于闲置状态, 电源方达不到最大收益. 对于电网而言, 其收益受电源方和负荷方投资策略的影响, 若电源方不投资电源 G_3 (即 $G_3=0$ MW), 负荷方采取高耗能方案, 则电网方选择投资线路 L_{23} 和新增变电容量 110 MW 会取

得最大收益 2886 \$ (对应组合: (0, (1, 1), 2)), 但电源方为获得其最大收益, 一定会选择投资电源 G_3 , 因此, 博弈结果 Nash 均衡点必然会偏离该点. 在电源方选择策略 1 ($G_3=50$ MW) 的情况下, 电网方选择不投资线路 L_{23} 且新增变压器容量为 110 MW 时可获得其最大收益. 对于负荷方而言, 其最优策略的选择同样会受到电源方和电网方选择策略的影响, 虽在策略组合 (0, (1, 1), 1) 和 (0, (1, 2), 1) 下, 均可获得最大收益 1248 \$, 但电源方为了追求其最大利益, 一定会投资建设电源 $G_3=50$ MW, 相对应, 负荷方不能获得最大收益 1248 \$. 在电源方选择策略 1, 电网方选择策略 (0, 1) 的情况下, 负荷方选择低能耗产业才能使其收益最大化, 即选择策略 1. 综合电源方、电网方与负荷方三方面的策略, (1, (0, 1), 1) 策略组合是符合纳什均衡条件的策略组合.

通过对比表 7 和 9 源网荷三方收益的 Nash 均衡点可得, 由于经济发展、能源资源、环境保护和技术水平等因素对博弈各方经济参数的影响, 三方博弈结果不同, 影响电网的规划、发展方向. 因此, 本文所提出的评价方法, 在电网规划过程中, 需根据经济发展、能源资源、环境保护和技术水平等影响因素的客观情况, 确定参与博弈各方的经济参数, 通过计算各方收益 Nash 均衡点, 得出合理的规划方案.

6 结论

1) 我国电网的发展模式与规模是目前研究及争论的热点之一, 现有的安全性、经济性、风险性评价标准不能得出让各方都接受的结论. 研究远距离输电和大电网建设各种内外部因素的影响与作用, 建立大电网适应性的评价体系, 有望解决现有评价体系支撑力不足的问题, 更科学、客观地评价电网的发展模式与规模问题. 本文分析了建立大电网适应性评价体系的需求, 以及建立电网适应性评价理论体系的意义, 首先开展了基于投资收益的电源、电网、负荷适应性评价研究.

2) 研究结果证明, 在电力系统建设及运行上, 电源、电网和负荷三者间相互依存, 任一方投资策略的改变不仅影响其他两方的收益, 也影响各方未来的发展方向. 同时, 建立的基于投资收益的电源、电网和负荷博弈模型, 各博弈方的经济参数受经济发展、能源资源和技术发展等因素的影响, 经济参数的

变化会对博弈结果产生影响, 因此, 在电网发展的不同阶段, 由于影响因素对各方经济参数的影响, 电网规划和建设的发展方向会有所不同.

3) 算例电源、电网和负荷三方相互作用及影响的研究也表明, 在电源、电网和负荷三方博弈的过程中, 出现的纯策略 Nash 均衡不存在或同时存在多个 Nash 均衡情况对各投资方的决策造成困难. 说明还

有其他因素影响投资策略及各方决策, 采用混合策略的博弈评价还有待进行深入研究.

4) 采用的算例为小规模系统, 采用遍历法求解 Nash 均衡, 能够达到很好的效果. 但对于大规模系统以及参与者决策组合较多的情况下, 遍历法将会效率低下, 因此, 对于大规模系统, 采用基于遗传算法求解混合策略均衡的方法还有待进一步研究.

参考文献

- 1 周玮, 孙辉, 顾宏, 等. 计及风险备用约束的含风电场电力系统动态经济调度. 中国电机工程学报, 2012, 32: 47–56
- 2 Liu C C, Vittal V. The strategic power infrastructure defense system. IEEE Contr Syst Mag, 2000, 13: 40–52
- 3 刘铠滢, 蔡述涛, 张尧, 等. 基于风险评判的电网规划方法. 中国电机工程学报, 2007, 27: 69–73
- 4 李卫星, 李志民, 郭志忠, 等. 考虑经济性收益最大的可用输电能力计算. 电力系统自动化, 2004, 28: 7–11
- 5 牛辉, 程浩忠, 张焰, 等. 电网扩展规划的可靠性和经济性研究综述. 电力系统自动化, 2000, 24: 51–56
- 6 刘连光, 赵万里, 王智冬, 等. 大电网建设经济性评价内容与评价指标的研究. 电力建设, 2013, 34: 22–26
- 7 舒印彪, 张文亮, 周孝信, 等. 特高压同步电网安全性评估. 中国电机工程学报, 2007, 27: 1–6
- 8 印永华, 郭强, 张运洲, 等. 特高压同步电网构建方案论证及安全性分析. 电力建设, 2007, 28: 1–4
- 9 刁勤华, 林济铿, 倪以信. 博弈论及其在电力市场中的应用. 电力系统自动化, 2001, 25: 19–23
- 10 刘建良, 周杰娜, 杨华. 基于双人博弈且参数估计下的发电商报价策略研究. 中国电机工程学报, 2007, 27: 62–67
- 11 李清清, 周建中, 莫莉, 等. 基于通用博弈模型的电力市场均衡对比分析. 电网技术, 2010, 34: 14–19
- 12 王成山, 吉兴全. 输电网投资规划的 Nash 均衡分析(一)——纯策略 Nash 均衡的分析. 电力系统自动化, 2002, 26: 11–15
- 13 王成山, 吉兴全. 输电网投资规划的 Nash 均衡分析(二)——混合策略 Nash 均衡的分析. 电力系统自动化, 2002, 26: 1–6
- 14 王永强. 基于最优潮流的节点电价计算方法研究. 上海: 上海交通大学, 2007
- 15 弗登博格, 梯若尔. 姚洋校, 黄涛, 译. 博弈论. 北京: 中国人民大学出版社, 2010
- 16 Ng S K K, Zhong J, Lee C W. A Game-Theoretic Study of the Strategic Interaction between Generation and Transmission Expansion Planning. In: Proceedings of Symposium Conference on Power. Seattle, 2006
- 17 黄山隆一, 著. 周意诚, 余锦华, 吴国红, 等, 译. 电力改革及新能源技术. 北京: 清华大学出版社, 2013

The evaluation of adaptability among power source, power grid and load based on game theory

LIU LianGuang, CHEN YanWei, CHEN WeiHua, LIU ZiFa & YAN XuDong

State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

As the increase of the capacity of power source, the scale of power grid and load, and the internal and external factors of security and economy on large-scale grid, understanding of the interactions and effects of power source, power grid and load, has very important significance for establishing the evaluation theory system of the adaptability of large-scale power grid. In the aspect of construction and investment, power source, power grid and load belong to different; in the aspect of operation and income, the three must comply with uniform guidelines for the regulation of the power system, and their incomes for each connect by electricity and price. For the problems of investments and incomes of power source, power grid and load, the paper establishes models of substation capacity, generator capacity, load capacity and the relationship of their investment and income based on game theory; the paper also proposes

investment and income algorithm of power source, power grid, and load based on the ISO scheduling model. Numerical result demonstrates the effectiveness of game models and the algorithm, at the same time, it also analyses the interaction and influence and finds Nash equilibrium point among power source, power grid and load. These explain behaviors of power source, power grid and load respectively. The evaluation of adaptability among power source, power grid and load is an important part of the evaluation of large scale power grid, the research work and achievements of this paper can analyse the interaction and influence among power source, power grid and load, and calculate the income of each investor under a variety of strategies. And these provide the basis for each investor's decision.

game theory, power source, power grid, load, adaptability, locational marginal price, DC power flow

doi: 10.1360/N092014-00266