

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201347

输配电价改革背景下电网项目多阶段投资优化决策研究

程曦¹, 吴霜¹, 王静怡¹, 张旺¹, 张沈习², 黄琬迪², 程浩忠²

(1. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210000;

2. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 针对目前电网项目投资模型难以同时考虑输配电价与建设时序的问题, 提出了一种输配电价改革背景下电网项目多阶段投资优化决策方法。首先, 利用输配电价改革后的电价核算方式, 计算电网项目投资的成本与收益。在此基础上, 将投资周期分为若干阶段, 在每个投资阶段初期增加设备投入以满足逐渐增长的电网负荷需求。以全投资期收益最高为目标, 以各阶段功率平衡、投产项目数量、紧后关系等为约束, 建立输配电价改革下电网项目多阶段投资优化决策模型。最后, 通过 IEEE 24 节点算例的仿真和分析验证了模型的有效性与在提高投资效率方面的优越性。

关键词: 输配电价改革; 电网项目; 多阶段; 投资优化; 建设时序

Research on multi-stage investment optimization of power grid projects under transmission and distribution price reform

CHENG Xi¹, WU Shuang¹, WANG Jingyi¹, ZHANG Wang¹, ZHANG Shenxi², HUANG Wandidi², CHENG Haozhong²

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: It is hard for the current power grid project investment model to simultaneously involve Transmission and Distribution Price (TDP) and construction timing. A novel multi-stage investment decision optimization method for power grid projects under the background of TDP reform is proposed. First, we use the electricity price accounting method after TDP reform to calculate the cost and income of grid project investment. Then the investment period is divided into several stages. Equipment investment is made at the beginning of each stage to meet increasing grid load demand. Taking the highest return in the entire investment period as the objective function, using power balance, maximum projects number and precursor relationship etc. at each stage as constraints, a multi-stage investment optimization decision model for power grid projects investment under TDP Reform is established. Finally, an example based on the IEEE 24-bus test system is used to verify the effectiveness of the model and demonstrate its superiority in improving investment efficiency.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51907123) and Economic and Technological Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (No. SGJSJY00JJJ2000057).

Key words: transmission and distribution price reform; power grid projects; multi-stage; investment optimization; construction timing

0 引言

中共中央国务院《关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发〔2015〕9号)》提出了“三放开、

一独立、三加强”的电力体制改革方针,重新定义了电网公司的职能^[1]。随后《关于推进输配电价改革的实施意见》^[2]的公布,推进了输配电价改革的进程。输配电价改革背景下,电网企业的收入来源发生了根本性变化,其单位电量营收由购销价差转变为核定的输配电价,对电网项目投资产生了极大影响^[3-4]。因此,在输配电价改革背景下优化电网项目投资决策方法有利于提高电网企业投资效率与运

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51907123);国网江苏省电力有限公司经济技术研究院研究课题(SGJSJY00JJJ2000057)

营收益, 促进电力市场发展。

国内外已有不少学者对电价定价机制、输配电价改革与电网投资决策优化进行了研究。电价制定方面, 文献[5]分析了当前西班牙电价定价机制, 即综合考虑能源成本、过网费、税金及附加费用进行定价; 文献[6-7]分析了当前美国居民用电定价机制, 即由发电价格、输电价格、配电价格和政府性基金构成, 并以德克萨斯州为例, 对高比例可再生能源系统进行了电价分析与预测; 文献[8]比较了10个欧盟国家的电价组成, 分别分析了其定价机制。输配电价改革内容及影响分析方面; 文献[9-10]简要分析了输配电价改革及其动态调整机制对电网企业投资的影响, 并设计电网差异化投资策略; 文献[11]提出了输配电价改革环境下电力营销发展的新模式。投资决策优化方面; 文献[12]利用法国输电网算例, 分析了多阶段规划在电网投资优化的应用; 文献[13]建立了采用多目标粒子群优化方法的电网规划模型; 文献[14]建立了基于神经网络算法的人工智能投资决策模型, 以预测输电线路工程的建设成本; 文献[15]在输配电价改革背景下, 提出了基于NSGA-II算法的电网投资多目标优化模型; 文献[16-18]在电力需求、电网企业投资能力和可靠性约束下, 分别基于粒子群算法、改进遗传算法与萤火虫算法构建了投资组合优化模型; 文献[19-20]建立了投资、运行双层场景规划模型, 得到最优的配电网投资决策方案, 并最终提供了多阶段投资计划。

上述文献聚焦于输配电价核算方法、输配电价动态调整机制等方向, 分析了当前各国电价制定机制, 研究了输配电价改革对电价核算方法及电网项目投资的影响, 但没有将改革后电价具体应用于电网项目投资决策中, 使研究内容缺乏可行性; 此外, 现有研究对于电网项目投资决策的分析多集中于多目标组合优化, 忽略了对于时序性的考虑。电网负荷逐渐增加对不同时序的供电水平提出了更高要求, 单阶段投资优化不仅会产生运行前期容量冗余与资源浪费, 也容易造成后期容量不足等问题。

针对上述问题, 本文在电网投资的多阶段规划^[21-22]、输配电价改革对电网投资收益及成本的影响^[23-24]等基础上, 提出一种输配电价改革背景下电网项目多阶段投资优化决策模型。以最大化项目投资收益为目标, 以各阶段功率平衡、投产项目数量、紧后关系等为约束, 求解得到各阶段最优的投资决策方案。在算例中通过分别与输配电价改革前电价核算方法和不考虑投资时序的单阶段优化方法的对比, 验证该模型在输配电价改革背景下的准确性与优势。

1 输配电价改革下电网项目投资成本及收益

1.1 输配电价核算方法

输配电价核算是新一轮电改的核心内容之一, 平均输配电价的计算方式可概括为图1^[1]。由图1可得, 电网准许收入以“准许成本加合理收益”的方式进行核定。

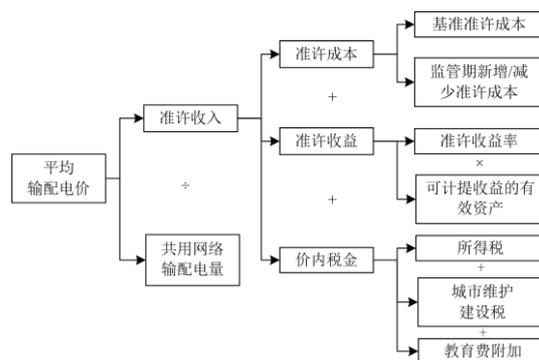


图1 输配电价核算方法

Fig. 1 Calculation method of TDP

1) 准许收入

根据定价办法中的要求, 省级电网第 t 年的准许收入 $I(t)$ 为

$$I(t) = C(t) + R(t) + T(t) \quad (1)$$

式中: $C(t)$ 为第七年的准许成本; $R(t)$ 为第七年的准许收益; $T(t)$ 为第七年的价内税金。

2) 输配电价

输配电价改革中, 第 t 年平均输配电价 $P(t)$ 为

$$P(t) = \frac{I(t)}{Q(t)} \quad (2)$$

式中, $Q(t)$ 为第 t 年省级电网共用网络输配电电量。

1.2 输配电价改革下电网项目投资成本分析

输配电价改革背景下电网项目投资成本主要由电网建设成本、电网运行成本以及电网可靠性成本构成, 不包含购电成本。

1) 电网建设成本

电网项目投资首先应考虑设备投入及施工等建设成本, 具体可表示为

$$C_{\text{con}} = \sum_{l \in L} C_l \times X_l \quad (3)$$

式中: C_{con} 为电网投资优化决策中的建设总费用; C_l 为线路 l 的建设费用, 单位为元; X_l 为线路 l 的0-1决策变量, 投建线路 l 则 $X_l = 1$, 否则, $X_l = 0$; L 为待选线路集。

2) 电网运行成本

电网项目投资需考虑电力网络设备的运行维护费用及电网企业的运营费用, 主要包括材料费、

修理费、人工费等，具体可表示为

$$C_{\text{ope}} = \sum_{i=1}^N p_{\text{ope},i} \times P_{\text{gen},i} \quad (4)$$

式中： C_{ope} 为电网运行成本； N 为系统中的节点数； $p_{\text{ope},i}$ 为节点*i*的运行成本评价系数，单位为元/kWh； $P_{\text{gen},i}$ 为研究期间内节点*i*连接的发电机出力，单位为kWh/年。

3) 电网可靠性成本

当供电未能达到节点负荷需求期望值时，切除负荷会产生相应电网可靠性成本，计算方法具体可表示为

$$C_{\text{shed}} = \sum_{i=1}^N p_{\text{shed},i} \times EENS_i \quad (5)$$

式中： C_{shed} 为电网公司赔偿给用户的缺电损失成本，即电网可靠性成本； N 为系统中的节点数； $p_{\text{shed},i}$ 为节点*i*的缺电损失评价系数，单位为元/kWh； $EENS_i$ 为投资期间内每年节点*i*不足期望值的电量，单位为kWh/年。

1.3 输配电价改革下电网项目投资收益分析

按照输配电价改革后的电价核算方法，输配电价最终定价包括电度电价与容量电价，在该核算方法下电网项目经济性投资优化决策方案的总收益 T_{selling} 为

$$T_{\text{selling}} = p_{\text{ele}} \times (1 - r_{\text{loss}}) \times h \times \sum_{i=1}^N P_i + n \times p_{\text{cap}} \times \sum_{i=1}^N C_i \quad (6)$$

式中： p_{ele} 为电度电价； r_{loss} 为网损率； h 为年用电最大负荷利用小时数； P_i 为节点*i*的总有功负荷量； n 为当年计及容量电价的月数； p_{cap} 为容量电价； C_i 为节点*i*的最大有功负荷量。

2 输配电价改革下电网项目多阶段投资优化决策模型及求解

按照多阶段优化的原理和思想^[21-22,25]，可将输配电价改革下电网项目具体投资阶段进行划分，示意图如图2所示。

输配电价改革下电网项目多阶段投资优化决策思路为：首先，在已有设备参数、输配电价等市场信息基础上优化投资初期*p*(1)需投建的电网项目；其次，在既有项目的基础上，优化配置投资阶段*p*(2)的电网项目，以满足负荷增长下的用电需求；以此类推，投资阶段*p*(*n*)时，在既有项目的基础上新建电网项目*n*，使所有阶段用电需求得到满足。

2.1 目标函数

输配电价改革下电网项目多阶段投资优化决策

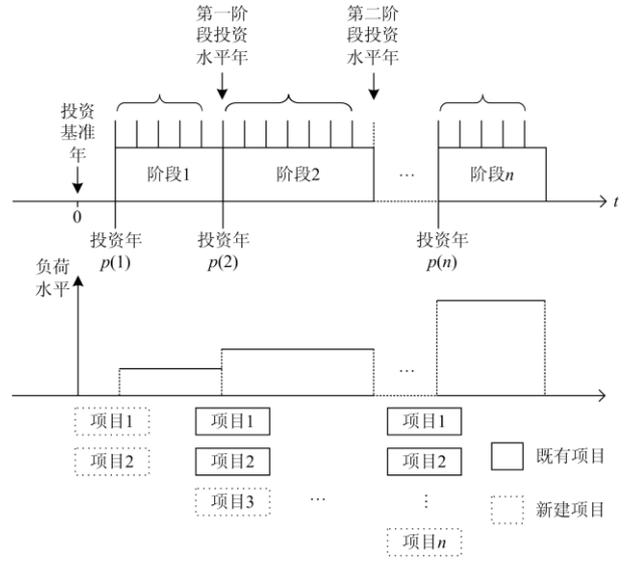


图2 电网项目投资阶段划分

Fig. 2 Grid project investment stage division

模型的目标函数为全投资周期的最终收益最高，包括投资周期内发生的所有投资成本及在输配电价改革背景下的售电收入，并通过折现率 r_{disc} 将各年产生的费用折算为投资周期初的现值。本文在输配电价改革下的电网项目多阶段投资优化决策模型的目标函数具体可表示为

$$\begin{aligned} \max f = & \sum_{i=1}^N \sum_{t \in T} P_{\text{sell},i,t} - \sum_{t \in T} (C_{\text{con},t} + C_{\text{ope},t} + C_{\text{shed},t}) = \\ & p_{\text{ele}} \times (1 - r_{\text{loss}}) \times h \times \sum_{i=1}^N P(t)_i + n \times p_{\text{cap}} \times \sum_{i=1}^N C(t)_i - \\ & \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} C_l \times \frac{X_{l,t} - X_{l,t-1}}{(1 + r_{\text{disc}})^{t-1}} \times \frac{1 - r_{\text{depre}}}{n_{\text{depre}}} \times (T - t) - \\ & p_{\text{ope}} \times \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} P_{\text{gen},i,t} - p_{\text{shed}} \times \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} EENS_{i,t} \end{aligned} \quad (7)$$

式中： f 为全投资周期利润； $P_{\text{sell},i,t}$ 为节点*i*在投资阶段*t*内的售电收益； T 为投资阶段总数； t 为当前投资阶段； r_{disc} 为折现率； r_{depre} 为投资线路设备折旧率； n_{depre} 为投资线路总使用年限。

2.2 约束条件

1) 节点功率平衡约束

$$\sum_{j \in \Omega^c} P_{c,j,t} + r_{i,t} - \sum_{l \in \Omega^{L1}, \Omega^{L2}} f_{l,t} = d_{i,t} \quad \forall i \in \Omega^T, \forall t \quad (8)$$

式中： Ω^c 为*i*节点上的发电机组集合； $f_{l,t}$ 为线路*l*在第*t*个投资阶段内的有功潮流； Ω^{L1} 、 Ω^{L2} 分别为以*i*节点为始端和末端的线路集合； $d_{i,t}$ 为节点负荷。

2) 线路直流潮流约束

$$f_{l,t} = b_l(\theta_{1,t} - \theta_{2,t}) \quad l \in \Omega^{LE}, \forall t \quad (9)$$

式中: b_l 为线路电纳; $\theta_{1,t}$ 和 $\theta_{2,t}$ 分别为线路始端节点和末端节点相角; Ω^{LE} 为已建线路集合。

3) 紧后关系约束

投资过程中, 两个投资项目可能出现紧前、紧后关系, 电网项目 j 的投资时间只能安排在项目 i 之后, 则

$$u_{kj} = [x_{ki}] \quad (10)$$

式中: u_{kj} 表示第 k 阶段项目 j 的决策变量; x_{ki} 表示第 k 阶段项目 i 的状态值; $u_{kj} = [x_{ki}]$ 表示 u_{kj} 是小于等于 x_{ki} 的最大整数。

4) 投产时间约束

由于用户的紧急用电需求等原因, 项目 i 必须在第 k 投资阶段之前完成投产, 则

$$\sum_{d=1}^k u_{di} = 1 \quad \sum_{d=k+1}^m u_{di} = 0 \quad (11)$$

式中, u_{di} 为项目 i 在第 d 个投资阶段的决策变量。

5) 投资项目数量约束

受人力资源、资金投入等因素影响, 某一投资阶段 k 内, 某一地区同时投资的电网项目不能超过一定范围, 则

$$\sum_{i \in \Omega} u_{di} \leq B \quad (12)$$

式中: Ω 为该地区待投资项目库; B 是一个常数, 表示第 k 阶段内该地区可以投资的最大项目个数。

6) 发电机出力约束

受原动机出力、发电机机械强度、机组稳燃极限等因素限制, 各发电机有功出力应在一定范围内波动, 则

$$P_{k \min} \leq P_k \leq P_{k \max} \quad (13)$$

式中: P_k 为第 k 台发电机的有功出力; $P_{k \min}$ 与 $P_{k \max}$ 分别为该发电机有功出力的下限与上限。

7) 总投资额约束

投资过程中, 计及折旧的最终建造成本应控制在最大投资额限制以内, 则

$$\sum_{l \in L} \sum_{t \in T} C_l \times \frac{X_{l,t} - X_{l,t-1}}{(1 + r_{\text{disc}})^{t-1}} \times \frac{1 - r_{\text{depre}}}{n_{\text{depre}}} \times (T - t) \leq C_{\text{totcon}} \quad (14)$$

式中: T 为投资阶段总数; t 为当前投资阶段; r_{disc} 为折现率; r_{depre} 为投资线路设备折旧率; n_{depre} 为线路总使用年限; C_{totcon} 为投资期内计及折旧的总投资额。

2.3 模型求解

上述输配电价改革背景下考虑投资时序的电网项目投资优化决策模型中, 电网项目决策变量、投建项目数量等变量为整数, 线路潮流、投资额等变量为非整数, 且目标函数与约束条件中均不存在非

线性项, 因此该模型的本质为混合整数线性规划 (Mixed Integer Linear Programming, MILP) 问题, 可以利用成熟的 Gurobi 商用求解器获得求解结果。Gurobi 商用求解器通常使用分支-割平面法, 在分支定界法的基础上添加割平面, 对混合整数线性规划模型进行快速、准确求解^[26], 其结果较为可靠。

3 IEEE 24 节点算例分析

3.1 参数设置

选取 IEEE 24 节点算例, 对其线路投建进行投资决策, 网络结构如图 3 所示。系统初始总负荷为 3184.38 MW+j580 Mvar; 已有线路 24 条, 待选线路 9 条; 共有发电机 27 台, 分布于 10 个节点; 各待选线路投建成本和容量参数如表 1 所示。

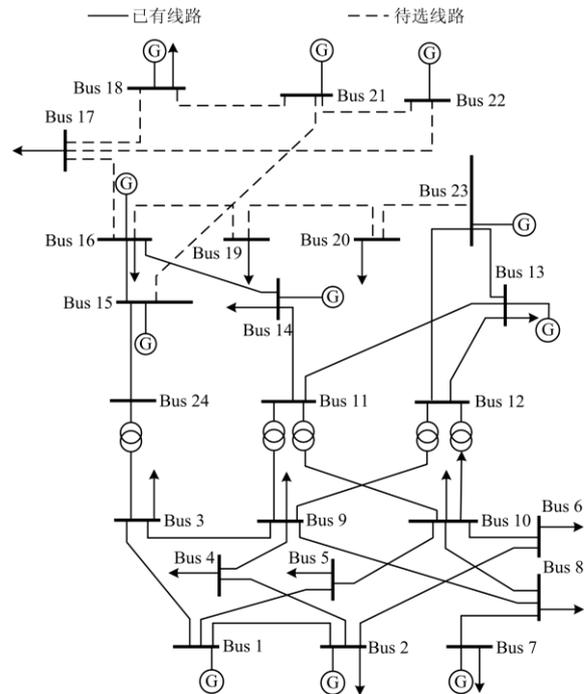


图 3 IEEE 24 节点系统与待选线路

Fig. 3 IEEE 24-bus system and candidate branches

表 1 待选线路参数设置

Table 1 Parameters setting of the candidate branches

待选线路	首节点	末节点	成本/(10 ⁶ 元)	P_{\max} /MW
1	15	21	860.58	110
2	16	17	1 174.76	170
3	16	19	1 120.12	195
4	17	18	956.2	110
5	17	22	1 994.36	155
6	18	21	1 174.76	180
7	19	20	751.3	120
8	20	23	1 092.8	100
9	21	22	1 284.04	180

投资期内, 各节点负荷每年均有一定程度的增长, 具体增长趋势如图 4 所示。

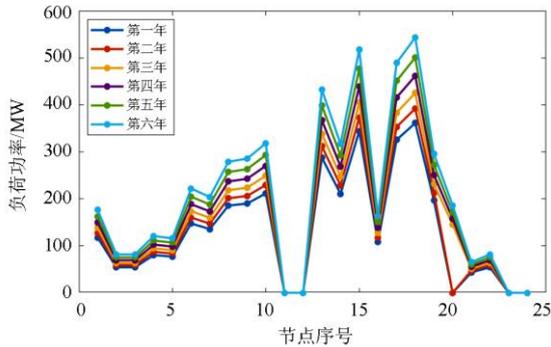


图 4 节点负荷设置
Fig. 4 Bus load setting

将投资总期限划分为 3 个投资阶段, 各投资阶段持续时间均为 2 个日历年。此外, 考虑到用户紧急用电需求, 项目存在投产时间约束, 具体为第 2 个投资阶段结束前需要完成线路 3 的投建。其余模型参数如表 2 所示, 其中输配电价采用江苏省 2019 年 7 月后实施的核算电价。

表 2 其余参数设置

Table 2 Other parameters settings

参数	取值
每阶段线路投建上限	3 条/投资阶段
线路使用年限	20 年
预计净残值率	5%
折现率	10%
线损率	4%
企业运维成本	0.18 元/kWh
电度电价	0.168 元/kWh
容量电价	40 元/kW·月
年用电最大负荷利用小时数	5 500 h
单位可靠性成本	30 元/kWh

3.2 电网项目多阶段投资优化结果及分析

求解输配电价改革下电网项目多阶段投资优化模型, 投资期结束时需对 9 条待选线路中的 6 条进行投建, 结果如图 5 所示。

由图 5 可看出, 线路投建在三个投资阶段内分布较为均匀, 对短时间内的人力资源、硬件投资要求较低, 投资难度较小。现金流方面, 各投资阶段产生成本及收益如表 3 所示。

由表 3 可得, 售电收益作为主要收益来源随负荷量逐年增长, 使得最终利润也逐年增长。负荷需求基本被满足, 仅在第三阶段产生了可靠性成本。

3.3 输配电价改革前后投资优化结果对比

为说明本文方法在输配电价改革后的有效性与

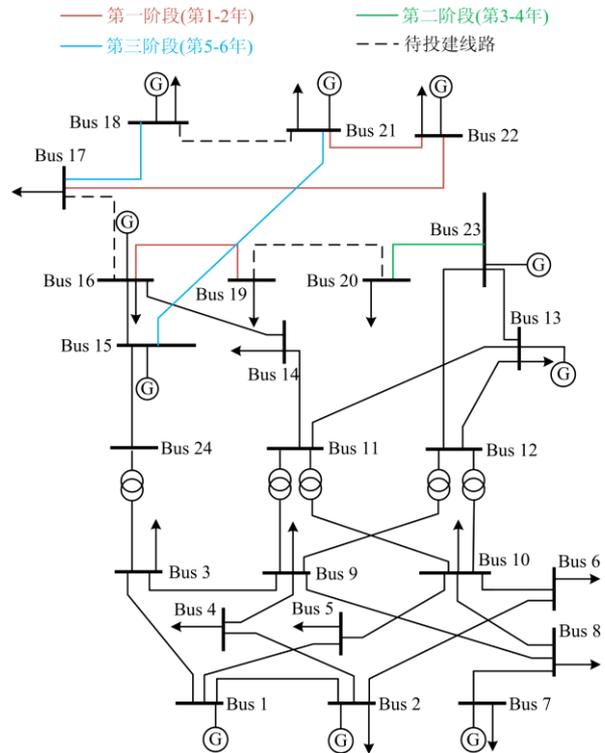


图 5 输配电价改革下多阶段投资优化决策结果

Fig. 5 Multi-stage investment optimization decision results for power grid projects under TDP Reform

表 3 各阶段成本及收益(输配电价改革下)

Table 3 Costs and benefits at each stage (under TDP Reform)

阶段	售电收益/万元	建设成本/万元	企业运维成本/万元	可靠性成本/万元	最终利润/万元
1	907 664.0	100 093.8	657 323.4	0.0	150 246.8
2	1 110 028.0	18 099.6	80 3873.8	0.0	288 054.6
3	1 305 196.0	16 474.9	944 604.0	523.7	343 593.4
总计	3 322 888.0	134 668.3	2 405 801.2	523.7	781 894.8

输配电价改革对电网项目投资决策的影响, 在上述算例的基础上, 采取输配电价改革前江苏省输配电价(电度电价 0.557 元/kWh, 基本电价 38 元/kW·月)建立投资优化模型。选取煤炭企业商品煤平均售价 400 元/吨, 计算可得发电成本约为 0.3 元/kWh。求解多阶段投资优化决策模型, 投资期结束时在 9 条待选线路中选择 7 条进行投建, 结果如图 6 所示。

由图 6 分析可得, 当前投资决策下, 三个投资阶段均需要进行线路投建, 线路投建在三个投资阶段内分布较为均匀。输配电价改革前线路投建结果与改革后有所差别, 改革前投建线路更多, 建造成本也有所提高, 其中各投资阶段产生成本及收益如表 4 所示。

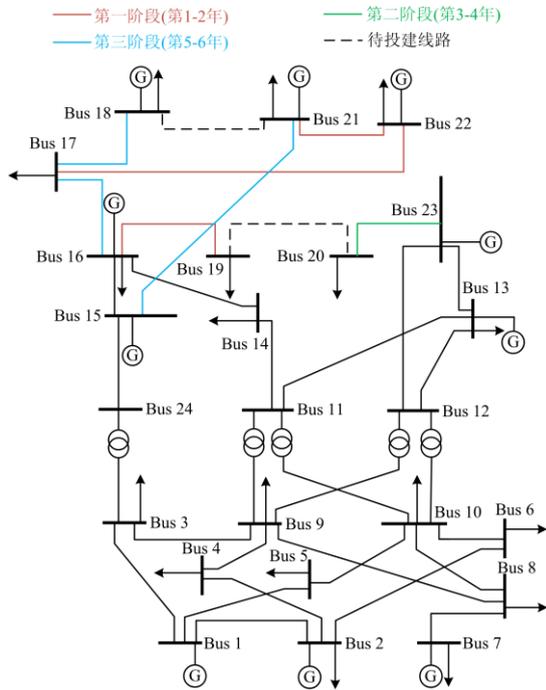


图 6 输配电价改革前多阶段投资优化决策结果

Fig. 6 Multi-stage investment optimization decision results for power grid projects before TDP reform

表 4 各阶段成本及收益 (输配电价改革前)

Table 4 Costs and benefits at each stage (before TDP reform)

阶段	售电收益/ 万元	建设成本/ 万元	购电成本/ 万元
1	2 255 455.9	100 093.8	1 095 539.0
2	2 758 310.4	18 099.6	1 339 789.7
3	3 247 151.9	27 004.0	1 577 234.0
总计	8 260 918.2	145 197.4	4 012 562.7
阶段	企业运维成本/ 万元	可靠性成本/ 万元	最终收益/ 万元
1	657 323.4	0.0	402 499.7
2	803 873.8	0.0	596 547.3
3	946 340.4	0.0	696 573.5
总计	2 407 537.6	0.0	1 695 620.5

由表 4 可得, 虽然此时各阶段成本有所提高, 但输配电价改革前电度电价高于改革后电价, 因此在负荷相同的情况下, 此时最终收益有了较大提高。

输配电价改革前, 电价制定过程计及购电成本, 其中每个日历年内每台发电机的具体购电成本如图 7 所示。

对比可得, 输配电价改革等新电改政策的实施对电网企业投资的收益计算方法产生了较大影响, 使投资方案发生了改变。由于输配电价改革后的核定电价低于改革前电价, 改革后最终售电收益有所减少。可靠性成本方面, 改革前的投资方案中投建

线路数量增多, 在投资期限内没有产生切负荷量, 未产生可靠性成本。

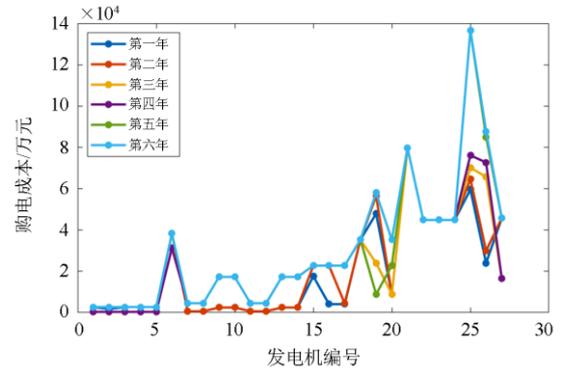


图 7 各发电机购电成本 (输配电价改革前)

Fig. 7 Power purchasing cost of each generator (before TDP reform)

3.4 单阶段与多阶段投资优化结果对比

按照输配电价改革后江苏省核定输配电价, 以最大化最终利润为目标建立单阶段投资优化模型。对模型进行求解可得, 最终需在 9 条待选线路中共选择 5 条进行投建, 最终投资结果如图 8 所示。

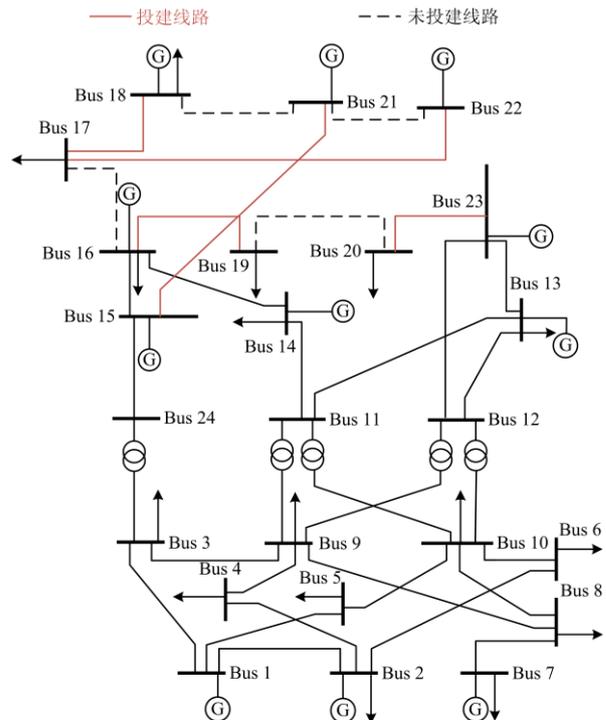


图 8 输配电价改革下单阶段投资优化结果

Fig. 8 Single-stage investment optimization results under TDP reform

由图 8 可得, 单阶段投资优化最终线路投建结果相同, 但在单阶段规划中, 所有线路的投建均需在首个投资阶段之前完成。现金流方面, 具体成本

及收益分布如表 5 所示。

表 5 单阶段投资优化成本及收益

Table 5 Costs and benefits of single-stage investment optimization

售电收益/万元	建设成本/万元	企业运维成本/万元	可靠性成本/万元	最终收益/万元
3 322 098.3	137 084.9	2 404 918.9	5 871.0	764 223.5

由表 5 可得,在相同参数设置的条件下,单阶段投资产生的最终收益减少了 7 671.3 万元。由此分析可得,单阶段投资优化结果中线路投建数量减少,可靠性成本增大,导致售电收益有所减少。与多阶段投资优化对比,单阶段投资优化下可靠性成本大大提高,为电网运行可靠性造成更大压力。除此之外,较短时间内投建 5 条线路会对人力资源、资金投入等条件提出更高要求,项目投资的操作难度也有所提升。

4 结论

本文提出了一种输配电价改革背景下电网项目多阶段投资优化决策方法,将投资周期分为若干阶段,以计及输配电价改革后售电收益、电网运行成本、电网可靠性成本与计及折现的电网建设成本后的全投资周期收益最高为目标,以节点功率平衡、线路潮流、紧后关系等为约束建立投资优化模型,通过求解该模型得到最终的投资决策结果。通过算例将该模型分别与输配电价改革前投资决策和考虑投资时序的单阶段投资方法对比,验证了本文方法的有效性和相对优势,所得结论如下:

1) 本文模型采用输配电价改革后电价核算方式,为输配电价改革背景下电网公司的投资决策和政府相关部门政策的制定等提供参考依据。

2) 通过建立的模型,以电力负荷增长为系统的驱动因素,采用多阶段优化可提高电网项目投资决策的经济性,全投资周期成本相较于单阶段投资有较大幅度的降低。

3) 采用多阶段投资优化,随着电力负荷的增长分阶段进行项目投建,可避免投资初期由于超前投资产生的多余设备折旧成本与短期内对人力资源、设备物资的集中投资,也可避免投资后期由于设备容量不足产生的多余可靠性成本。

4) 当前储能技术的快速发展可在售电侧提供经济效益,新能源的接入对发电成本、电价制定机制、电网稳定运行也产生相应影响。未来将对考虑储能系统接入及新能源定价机制的电网项目投资决策优化进行深入研究。

参考文献

- [1] 中共中央,国务院.关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发[2015]9号)[Z].2015.
- [2] 国家发展改革委.省级电网输配电价定价办法(试行)(发改价格[2016]2711号)[Z].2016.
- [3] 曹严,穆云飞,贾宏杰,等.考虑建设时序的园区综合能源系统多阶段规划[J/OL].中国电机工程学报:1-15 [2020-10-09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.202006-11.1129.002.html>.
- [4] 黄晨洋,严正,杨火明,等.输配电价改革对省级电网投资的影响及动态评估方法[J].电网技术,2018,42(10):3291-3298.
HUANG Chenyang, YAN Zheng, YANG Huoming, et al. Coordinated planning model of wind power and transmission grid investment considering demand side response[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3291-3298.
- [5] JAVIER G, CESAR A. Industrial electricity prices in Spain: a discussion in the context of the European internal energy market[J]. Energy Policy, 2021, 148.
- [6] BROWN D P, TSAI C H, WOO C K, et al. Residential electricity pricing in Texas's competitive retail market[J]. Energy Economics, 2020, 92.
- [7] MING Hao, XIA Bainan, LEE K Y, et al. Prediction and assessment of demand response potential with coupon incentives in highly renewable power systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 124-137. DOI: 10.1186/s41601-020-00155-x.
- [8] PEÑA J I, RODRIGUEZ R. Are EU's climate and energy package 20-20-20 targets achievable and compatible? Evidence from the impact of renewables on electricity prices[J]. Energy, 2019, 183: 477-486.
- [9] CUI Kai, ZHAO Juan, WU Xiao, et al. The impact of new electricity reform on the management of power network investment planning and its countermeasures[C] // Proceedings of 2019 4th International Conference on Advances in Energy and Environment Research (ICAEEER 2019), 2019, Shanghai, China.
- [10] 杨娜,刘敦楠,刘明光,等.考虑地市发展阶段的省级电网差异化投资策略[J].电力系统自动化,2020,44(7):115-122.
YANG Na, LIU Dunnan, LIU Mingguang, et al. Differentiated investment strategy of provincial power grid considering development stage of city region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 115-122.
- [11] 白杨,李昂,夏清.新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J].电力系统保护与控制,2016,44(5):10-16.

- BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.
- [12] ERGUN H, RAWN B, BELMANS R, et al. Stepwise investment plan optimization for large scale and multi-zonal transmission system expansion[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 17-21, 2016, Boston, USA.
- [13] SANNIGRAHI S, GHATAK S R, ACHARJEE P. Point estimate method based distribution system planning using MOPSO technique[C] // 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE), January 2-4, 2020, Cochin, India.
- [14] MA Li, MING Yue, SUN Liping, et al. Research on investment aid decision of transmission line project based on artificial intelligent technology[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 15(5): 1-4.
- [15] GUO Yue, CUI Rongjing, CUI Kai, et al. Research on project demand pre-judgment and hierarchical ordering technology of power grid company[C] // Proceedings of 2nd International Conference on Business, Economics, Management Science (BEMS 2020), Hangzhou, China.
- [16] LIU Zifa, PENG Dong, WANG Xinyue, et al. Research on optimization model of power grid project investment[C] // Proceedings of 1st international symposium on economic development and management innovation (EDMI 2019), 2019, Hohhot, China.
- [17] 刘巍, 李镭, 李秋燕, 等. 基于改进遗传算法的电网投资组合预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 78-85.
- LIU Wei, LI Meng, LI Qiuyan, et al. Power grid portfolio forecasting method based on an improved genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 78-85.
- [18] ABDOLLAH R, JAMAL M. Application of firefly algorithm for multi-stage transmission expansion planning with adequacy-security considerations in deregulated environments[J]. Applied Soft Computing, 2016, 41: 373-389.
- [19] 栾乐, 周凯, 肖天为, 等. 基于证据推理的优质电力投资决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 139-146.
- LUAN Le, ZHOU Kai, XIAO Tianwei, et al. Premium power investment decision-making method based on evidence reasoning[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 139-146.
- [20] HAKAN E, BARRY R, RONNIE B, et al. Stepwise investment plan optimization for large scale and multi-zonal transmission system expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2726-2739.
- [21] LUO Shujuan, BAI Sijun, LI Suike. Multi-stage rolling optimization model of project portfolio configuration under phased strategy scenarios[J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2015, 20(2): 65-77.
- [22] ZHANG Yao, WANG Jianxue, LI Yunhao, et al. An extension of reduced disjunctive model for multi-stage security-constrained transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1092-1094.
- [23] 王永利, 王晓海, 王硕, 等. 基于输配电价改革的电网运维成本分摊方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 332-339.
- WANG Yongli, WANG Xiaohai, WANG Shuo, et al. A method allocating operation and maintenance cost of power grid project based on transmission and distribution price reform[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 332-339.
- [24] 曾鸣, 怀文明, 叶嘉雯, 等. 输配电价监管下供电公司投资规模仿真模型研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3): 1-7.
- ZENG Ming, HUAI Wenming, YE Jiawen, et al. Investment scale simulation model of power supply company under transmission and distribution price regulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 1-7.
- [25] 乐健, 周谦, 王曹, 等. 无功补偿设备和分布式电源协同的配电网优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 38-47.
- LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on distributed optimal control strategy for a distribution network based on the cooperation of DGs and Var compensators[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 38-47.
- [26] MOHAMMAD J, ALI A, MAHMUD F, et al. MILP model of electricity distribution system expansion planning considering incentive reliability regulations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4300-4316.

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2020-12-28

作者简介:

程曦(1993—), 男, 硕士, 从事输变电工程投资分析和环保评价研究;

张沈习(1988—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 从事新能源电力系统投资与规划研究; E-mail: willzxs@sjtu.edu.cn

程浩忠(1962—), 男, 博士, 教授, 从事新能源电力系统投资与规划研究。

(编辑 张爱琴)