考虑投资能力反馈的电网规划项目投资时序优化方法

金智博[1],李华强[1],李山山[1],邓靖微[2],尹 硕[3],路 尧[3]
(1. 四川大学 智能电网四川省重点实验室,四川 成都 610065;
2. 国网四川省电力公司经济技术研究院,四川 成都 610041;
3. 国网河南省电力公司经济技术研究院,河南 郑州 450052)

摘要:随着电力体制改革的逐步推进,电网企业的经营管理模式必须做出相应的改变,对企业的精准投资也提出了更高的要求。基于新形势下的电网投资影响要素,建立包含经济效益、可靠性效益与环境效益的规划项目投资价值成效评估体系;以规划期间综合效益最大为目标,考虑投资能力、项目间关联关系等约束,并引入投资行为对投资能力的反馈机制,建立电网规划项目投资时序优化模型。某省某批次19个规划项目的算例仿真结果表明,所提模型能有效适应新形势下电网营收模式的转变,有助于实现基建项目的精准投资。

关键词:精准投资;投资能力反馈;投资价值;时序优化
中图分类号:TM 715 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202201025

0 引言

随着国民经济的快速发展,为应对电力负荷需求的急速增长,电网的基础建设工作十分重要。相应地,对规划项目库中的各类项目进行准确客观的评估并有选择地进行投资安排就显得尤为关键。电网投资决策是一个持续滚动的阶段性行为,投资效益的动态变化要符合电网企业的长期发展战略。同时,电网投资决策是一个多目标优化问题,必须从多个方面衡量投资行为的综合效益。新一轮电力体制改革使电网企业的营收方式发生了根本性的变化,电网企业的单位电量营收由销售与上网价差转变为核定的输配电价。因此在实际投资决策过程中,必须考虑投资行为对电网最大投资能力(简称投资能力)的反馈作用,还应考虑项目投资时序对总体效益的影响。科学地开展电网规划项目的优选与投资时序安排工作,合理地对电网建设项目进行整体分析综合评价,对于减少电网建设过程中的盲目性和重复性、提高电网的可持续发展能力、保障投资回报水平以及提升电网建设的综合效益有重要意义。

对电网企业投资决策的研究最初是针对单一规划项目,其基本思想是通过项目得分排序来确定储备项目的投资顺序。在建立项目投资效益评估指标时,早期研究大多重点关注投资项目的经济效益、可靠性[1]等单一指标,缺乏对投资项目整体效益的评价,针对这一缺陷,有学者建立多维度的综合评价指标体系,从多个角度更全面地对电网投资项目的综合效益进行评价[2-3],如文献[4]提出一种电网基建项目辅助决策方法,从电网安全稳定性、设备利用水平、供电可靠性、电能质量、促进电网协调发展和服务经济社会发展6个方面建立电网基建项目辅助决策指标体系。在确定指标权重方面,大多研究采用主客观相结合的方法,包括层次分析法[5]、德尔菲法、熵权法等。该类方法对各项目的评分没有明确的物理含义,评价指标大多非线性且不具备可加性,因此该类方法只能适用于单个项目的效益评估而难以对多个投资项目的综合效益进行有效评估。

在单个项目投资效益评估的基础上,已有文献进行了项目组合方案评估比选方面的研究。文献[6]建立一种考虑负荷不确定性和差异化需求的混合多属性评价优选模型,可实现预设项目组合的优选。文献[7]以规划项目组合的综合效益最大为目标建立组合优选模型,并按照综合评价得分从高到低安排选定项目的出库时序,但由于存在2套不同的指标体系,当评价结果出现矛盾时,仍需依赖于决策者的经验进行选择,缺乏统一客观的标准,此外,安排项目出库时序时忽视了项目效益的时间属性,并且这种出库时序的安排也难以处理不同项目间存在的关联关系。针对该问题,文献[8]在项目时序优选模型中创新性地通过效益耦合特性矩阵定量考虑项目间的相互关系,提出一种处理不同项目间关系的崭新思路,但该方法难以界定3个及以上规划项目之间的相互关系,存在一定的局限性。文献[9]则分别将不同的规划项目组合接入系统,通过核算系统全成本电价的变化来评估项目间的相互关系,但该方法计算量大,不适用于大量项目的评估。

针对以上问题,本文提出适用于单个项目的投资效益评估指标体系,在此基础上,建立以规划期内综合效益最大为目标的电网规划项目投资时序优化模型,在模型中充分考虑项目投资效益的时间属性与投资行为对未来电网投资能力的反馈作用。最后通过某省电网某批次规划项目库计算得到项目出库方案,并与传统顺序出库方法进行比较,验证了所建

收稿日期:2021-03-19;**修回日期:**2021-11-23

模型的可行性与有效性。

1　新形势下电网投资影响要素分析

在输配电价改革条件下,电网收益方式由原来的购售价差变为核定的输配电价[10]。由于电网的投资能力受营收能力的直接影响,这一转变促使电网企业在投资决策时必须考虑以效益为导向的精准投资。这意味着电网企业不但要重新对当前的投资能力进行测算,而且要对部分投资行为发生后未来一段时间的投资能力进行预测。此外,由于电网企业实际输配电收入与准许收入通常会存在一定的差异,为使准许收入能够合理补偿成本,在投资决策过程中必须考虑输配电价因素的影响,以使预期的价格政策经过不断调整尽可能地反映实际的变化情况[11]。附录A图A1展示了输配电价的动态调整机制[12],该机制说明输配电价调整将直接影响电网投资能力,是电网规划项目投资决策过程中的一个重要影响因素。输配电价调整的影响要素也将在后文项目投资价值成效测算、投资优化模型搭建时进行考虑,厘清输配电价调整过程中各关键环节的关系也是优化模型在应用时必须进行的前期工作。

1)投资需求预测。对未来一段时间的最大负荷进行预测是电网投资决策的基础,因此要对每年度各电压等级的最大负荷进行预测,将预测值与规划水平年的负荷存量进行比较,得出负荷计划增量,并根据规划容载比测算出当年的新增变电容量需求。

2)投资能力测算。电网公司的投资能力与公司的营收情况息息相关,由贷款和自有资金组成。其中贷款主要受到资产负债率的影响,投资决策部门应关注公司的财务状况,对贷款额度进行测算;而用于基础项目建设的投资资金一方面受到公司净利润的影响,另一方面与公司其他事项开支密切相关。

3)投资决策。一般而言,电网规划部门的项目库中存在大量可满足各年度新增投资需求的待选投资项目,需要对各项目进行分析比选,对其中综合效益最佳的项目进行投资。另外,对于可能会出现的投资能力不能满足全部投资需求的情况,也可以通过尽可能提高综合效益、降低潜在损失的方式筛选出其中最具建设紧迫性与必要性的项目。

4)准许成本[13]。在输配电价的核定中,准许成本由折旧费和运行维护费构成。折旧费与新增固定资产和定价折旧率直接相关,定价折旧率由新增固定资产的结构和设备折旧年限决定。运行维护费主要包括材料费、人工费及其他费用。

5)准许收益。准许收益取决于可计提收益的有效资产和准许收益率。可计提收益的有效资产是指由电网公司投资形成的与输配电业务相关的资产。准许收益率根据权益资本收益率、债务资本收益率以及资产负债率计算得到。

6)税费。输配电项目需缴纳的税费包括增值税、企业所得税、城市维护建设费及教育费附加税。

7)输配电价核定与调整。输配电价核定通常以3 a作为一个监管周期,在监管周期内,省级电网各电压等级的输配电价为该电压等级单位输配电量对应的准许收入。某电压等级总允许收入由该电压等级准许收入和上一电压等级传导的准许收入构成,以平衡账户为基础进行动态调整。在多个监管周期内,根据电网实际投资与发展情况进行核准调整[14]。

2　电网规划项目投资价值成效测算

电网规划项目投资价值成效是对电网公司的投资行为在一段经营期内的效果和收益的评价,是电网公司投资决策的重要参考指标和依据[15]。

从电网公司投资的目的与应承担的社会责任出发,可将投资行为产生的效益分为以提高输配电业务收入为代表的经济效益、以创建更加安全可靠的电网结构为代表的可靠性效益以及以促进新能源消纳为代表的环境效益。因此,本文将从经济效益、可靠性效益、环境效益这3个维度对电网规划项目投资价值成效进行测算,得到的测算值均为预测值。

2.1　经济效益指标

一定时期内投资带来的利润是衡量该时期内投资行为经济效益的有效手段。新一轮电力体制改革重新定义了电网公司的盈利模式,规定电网公司输配电方面的投资收益主要以输配电价的形式进行回收。政府监管部门周期性调整和设立平衡账户的形式基本上确保了电网公司的准许收入由准许收益和准许成本构成,扣除相应的税费后很容易得到电网公司在一段时间内的利润。

电网公司进行投资后不同规划项目按照不同的有效资产形成率对输配电资产产生影响,从而对下一监管周期的输配电价和电网公司的输配电收入产生影响,进而影响企业后续的投资能力与投资行为。监管部门以准许成本和准许收益为依据对输配电价进行周期性调整,因此各规划项目可通过形成固定资产的方式产生一定的经济效益。

电网公司输配电资产的计算方式为:

$$A_k = A_{k-1}(1-\eta) + \sum_{i \in I_k} \gamma_i C_i \tag{1}$$

式中:A_k为第k阶段电网公司的输配电资产;η为输配电资产折旧率;I_k为第k阶段投资项目的集合;γ_i、C_i分别为项目i的有效资产形成率与总成本。

电网公司的输配电收入为该阶段输配电量与输配电价的乘积,在受到监管的情况下为准许成本与准许收益之和,即输配电收入可表示为:

$$e_k = \lambda_k \Omega_k = A_k(\beta_{\text{cost}} + \beta_{\text{revenue}})(1-\beta_{\text{tax}}) \tag{2}$$

式中：e_k为第k阶段输配电收入；λ_k、Ω_k分别为第k阶段的输配电价和输配电量；β_{cost}、$\beta_{revenue}$、β_{tax}分别为准许成本率、准许收益率和综合税率。本文认为电网公司在每个监管周期的第1阶段调整输配电价并保持恒定，则各阶段输配电收入与输配电量成正比。

值得说明的是，随着电网公司发展阶段的不同和相关政策环境的变化，企业的准许成本、准许收益和税费的测算方式都有可能发生变化，从而对各项目的经济效益产生影响。

2.2 可靠性效益指标

缺电损失是电力系统可靠性评价中的一项重要参考指标，是指因电力系统可靠性不足导致电力供应中断而对电力用户造成的经济损失[16]。对一个地区而言，电网的安全可靠性越高，则由各类事故引发的缺电损失就越低。一般而言，随着负荷水平逐年提高，地区的缺电损失也将逐年增加。电网项目的投资建设可提高电网的安全稳定性水平，减少由供电能力不足或事故导致的用户缺电损失，即产生可靠性效益。本文用产电比法计算缺电损失改善量$r_{k,i}$，以表示基建项目的可靠性效益，并在测算过程中考虑用户类别对缺电损失的影响，测算方法[17]为：

$$r_{k,i}=\Delta E_i[a_{k_1}\delta_{k_1}+a_{k_2}\delta_{k_2}+(1-a_{k_1}-a_{k_2})\delta_{k_3}] \tag{3}$$

式中：ΔE_i为项目i建设前后该地区的电量不足期望值EENS（Expected Energy Not Served）变化，单位为kW·h；δ_{k_1}、δ_{k_2}、δ_{k_3}分别为第k阶段该地区的第一产业、第二产业、第三产业的产电比，表示单位电量对应的GDP产值；a_{k_1}、a_{k_2}分别为第k阶段该地区第一产业和第二产业的用电量所占的比例。

单个项目所改善的电量不足期望值ΔE_i可根据预想事故集进行计算，通过蒙特卡洛模拟法对待评估电网发生故障引起负荷削减的状态进行抽样，可得到该地区的EENS：

$$E_{EENS}=\sum_{s\in S}p_sT_s\xi_s \tag{4}$$

式中：E_{EENS}为该地区的EENS；S为预想事故集；p_s为负荷削减状态s发生的概率；T_s为状态s的持续时间；ξ_s为状态s的负荷削减量。

2.3 环境效益指标

随着能源危机、环境污染等问题日益受到全社会的广泛关注，电网公司作为电能调配的关键环节，关系到整个社会的环境改善。电网基建项目除了承担常规能源电力的输送实现经济效益和社会效益外，还承担了绿色能源电源接入、低碳电力输送的任务[18]。因此在电网的投资建设中，必须要保持对绿色环保的高度关注，项目的环境效益也是电网规划项目投资价值成效的重要组成部分。

准确计算污染物的环境价值是很困难且没有必要的，电力行业主要污染物的环境价值通常是基于治理成本来间接进行评估的，因此，可根据污染物的减排量衡量规划项目的环境效益，如式（5）所示。

$$h_i=\Delta\Omega_i^{clear}\sum_{j=1}^{J}\mu_j \tag{5}$$

式中：h_i为项目i的环境效益；$\Delta\Omega_i^{clear}$为项目i建成后促进清洁能源的消纳量；J为污染物的种类数；μ_j为单位电量产生的第j类污染物的治理成本。

本文主要以规划项目通过促进清洁能源消纳而减少的煤炭耗费来衡量各类污染物的减排量。在从电能生产到消费的全过程中，除了发电侧燃煤导致的污染物排放外，还应考虑电能传输过程、原煤运输损失导致的污染物排放，具体计算公式见文献[19]。

此外，除了污染物排放造成的间接环境效益外，各基建项目的建设还会对周边环境产生直接环境效益，如电磁辐射、噪声污染、生态污染等，然而目前还没有形成统一的测算与价值衡量标准。本文认为各基建项目的征地成本中已考虑项目产生的直接环境效益，因此不再另外进行测算。

3 电网规划项目投资时序优化模型

3.1 状态变量与决策变量

将规划期内的每一年作为一个阶段，将整个规划期分为M个阶段，以m个阶段为时间窗口长度进行滚动优化。将第k阶段开始时项目库内所有规划项目（项目总数为n）的建成投产情况作为状态变量，记为$\boldsymbol{X}_k=[x_{k,1},x_{k,2},\cdots,x_{k,i},\cdots,x_{k,n}]^{\mathrm{T}}$，$x_{k,i}$为布尔变量，其值为1表示在第$k$阶段初项目$i$已投产，为0表示在第$k$阶段初项目$i$未投产。以第$k$阶段的项目投资情况为决策变量，记为$\boldsymbol{U}_k=[u_{k,1},u_{k,2},\cdots,u_{k,i},\cdots,u_{k,n}]^{\mathrm{T}}$，$u_{k,i}$为布尔变量，其值为1表示在第$k$阶段项目$i$出库，为0表示第$k$阶段项目$i$不出库。由状态变量与决策变量可得到状态转移方程为：

$$x_{k+1,i}=x_{k,i}+u_{k-w_i+1,i} \tag{6}$$

式中：w_i为项目i的建设工期。

3.2 目标函数

本文主要考虑我国电网公司所承担的社会责任，以各阶段投资行为产生的可靠性效益与环境效益之和为该阶段的指标函数，将指标函数$V_k(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U})$的最优值定义为最优值函数，记为$F_k(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U})$，则：

$$\begin{cases}F_k(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U})=\max V_k(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U})\\ V_k(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U})=\sum_{j=k}^{k+m-1}v_j(\boldsymbol{X}_j,\boldsymbol{U}_j)\\ v_k(\boldsymbol{X}_k,\boldsymbol{U}_k)=(R_k+H_k)/(1+\rho)^{k-1}\\ R_k=\sum_{i=1}^{n}r_{k,i}x_{k,i},\ \ H_k=\sum_{i=1}^{n}h_{k,i}x_{k,i}\end{cases} \tag{7}$$

式中：$V_k(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U})$为从第$k$阶段初到第$k+m-1$阶段终止状态下的指标函数；$v_k(\boldsymbol{X}_k,\boldsymbol{U}_k)$为第$k$阶段的指标

函数，表示该阶段投资状态下的投资效益；R_k、H_k 分别为第 k 阶段投资状态下的可靠性效益和环境效益；$h_{k,i}$ 为第 k 阶段项目 i 的环境效益；ρ 为折现率，由于原始指标值有明显的时间属性，在公式中加入 ρ 是为保持这种特性使计算结果更准确。只有当 $x_{k,i}=1$，即基建项目 i 在第 k 阶段已完成投产时，基建项目 i 的各效益指标才可以计提。

3.3 约束条件

1）最大投资额约束。第 k 阶段的建设投资不应超过该阶段的最大允许投资额，即：

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=k-w_i+1}^{k} C_{k,i}u_{j,i} \leqslant C_{k,\Sigma} \tag{8}$$

式中：$C_{k,i}$ 为第 k 阶段项目 i 的投资费用，其值根据项目的建设周期与资金投入进度确定；$C_{k,\Sigma}$ 为第 k 阶段最大允许投资额。

为了体现新形势对电网投资能力的影响，即电网的最大投资能力随运营状况的变化，$C_{k,\Sigma}$ 满足：

$$C_{k,\Sigma}=b_kD_k+\Delta C_{k-1} \tag{9}$$

式中：b_k 为第 k 阶段电网公司基建项目投资比例，其值根据电网发展阶段综合确定；D_k 为第 k 阶段电网投资总资金；ΔC_{k-1} 为第 $k-1$ 阶段专项投资资金结余，如式（10）所示。

$$\Delta C_{k-1}=C_{k-1,\Sigma}-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=k-w_i}^{k-1} C_{k-1,i}u_{j,i} \tag{10}$$

由于电网总资产直接受到投资行为的影响，输配电价改革实施后电网经营的经济效益又与电网总资产直接关联，因此电网的投资效益将通过电网总资产对投资能力产生反馈，该过程中考虑了电网公司每个阶段投资行为所产生的经济效益，反映了电网公司在扩大生产规模时对经济效益的合理追求。具体形式如下：

$$D_k-D_{k-1}=e_{k-1}+Q_k \tag{11}$$

式中：Q_k 为第 k 阶段电网公司其他收支与贷款总额之和，其值通过对电网公司其他收支（如售电公司收入、人员工资、偿还债务等）状况及公司的财务状况进行预测得到。

当设定电网公司的最大资产负债率为 W_a 时，电网公司可获得的最大贷款额为：

$$l_k=\frac{W_a(A_{k-1}+e_k)+P_k-L_{k-1}}{1-W_a} \tag{12}$$

式中：l_k、P_k 分别为第 k 阶段电网公司可获得的最大贷款额与应偿还的贷款额；L_{k-1} 为第 $k-1$ 阶段电网公司的负债总额。

2）强制建设项目与投产时间约束。强制建设项目约束是指在单纯的效益分析下某些项目相较于其他项目可能并没有明显的优势，但对于区域网架结构而言，该项目的投产对电网的安全可靠性有着至关重要的作用，则该项目就属于强制建设的项目。这类项目的建设具有强制性，即具备出库建设的最高优先级。另外，部分项目可能在当前并不具有建设的必要性，但由于园区规划、紧急用电需求等原因，要求该项目必须在第 k 阶段之前完成投产，则：

$$\begin{cases}\sum_{d=1}^{k}u_{d,i}=1\\ \sum_{d=k+1}^{M}u_{d,i}=0\end{cases} \tag{13}$$

3）从属关系与紧后关系约束。在投资过程中，2 个项目间可能出现从属关系，如由于技术、土地、人员配置等原因，基建项目 j 的投资时间只能安排在项目 i 之后，则：

$$u_{k,j}\leqslant x_{k,i} \tag{14}$$

且这种从属关系还可能表现为紧前紧后关系，即一旦项目 i 投产，项目 j 需立即开始投资建设，则：

$$u_{k,j}=x_{k,i} \tag{15}$$

4）互斥项目约束。由于待选规划项目中不乏建设目的和主要功能相同的项目，为了避免投资的重复性、节省投资成本以及提升投资水平，这类项目不必同时建设。如项目 i 与项目 j 间存在互斥关系，则：

$$x_{M+1,i}+x_{M+1,j}\leqslant 1 \tag{16}$$

5）同时性项目约束。对于一些需要互相配合才可实现其功能的规划项目，如某座变电站的投入运行需要某条线路接入，而该线路的运行也需要变电站的投运，这种类型的项目必须要同时建设或不建设，如项目 i 和项目 j 必须同时建设或不建设，则：

$$u_{k,i}=u_{k,j}\quad \forall k \tag{17}$$

3.4 滚动求解策略

由上述状态、决策、指标函数的描述可以得出最优值函数的递推关系，通过逐级递推分析可以对每个阶段的最优决策做出合理判断，并在每个阶段决策后计入新入库的基建项目，扩充对应的状态变量、决策变量及相应的约束，以 a 为尺度进行滚动优化。

图 1 为滚动优化示意图。有限时域滚动优化中 N 为滚动优化阶段总数，其值根据外部环境与项目库信息的变化进行合理确定，$M=N+m-1$，滚动窗口每次向后移动 1 个阶段。每次滚动优化结束后，滚动窗口下第 1 阶段决策变量值为 1 的项目完成出库，而其他阶段决策变量值为 1 的项目则进入“预出库”状态，“预出库”项目并不实际出库，而只作为后续规

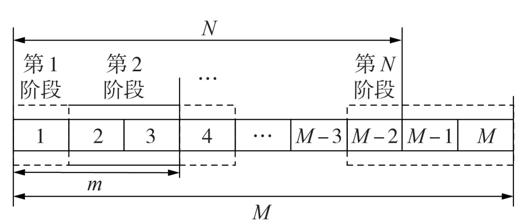


图 1　滚动优化示意图

Fig.1　Schematic diagram of rolling optimization

划、评估工作的参考，其物理意义为：在当前掌握的全部信息条件下，预期可实现最大投资收益的方案。“预出库”项目根据后续的决策结果，可能会如期出库、延期出库或者不出库。

在滚动规划的过程中，根据外部环境与电网自身结构的不断变化，各项目在不同规划阶段的效益与成本也不尽相同。各项目的效益与成本可根据影响参数（如地区产电比、碳交易价格等）的变化趋势进行预测并在滚动过程中不断修正。

4 算例分析

以某省级公司某批次投资计划为例验证本文模型的有效性。对项目库内的19个输电网规划项目进行投资价值成效测算与投资时序优化，得出投资决策结果，并与传统投资决策方法（即按照项目评分从高到低顺序出库[3]）的结果进行对比。由于传统投资决策方法不考虑项目投资成效随时间的变化，为了保证对比的客观公平，算例中各项目的各类投资效益与成本均为项目入库年份测算值，实际应用时可随预测值变动。为体现滚动求解机制对项目库实时更新的适应能力，对项目入库年份进行合理假设。优化模型为典型的整数线性优化模型，采用商业求解器CPLEX 12.8进行求解。

4.1 项目概况

根据各项目可行性报告中包含的基础数据及地区相关数据对待建设项目进行投资价值成效评估，得到如附录B表B1所示的各项目基本情况。不失一般性，假定多年期项目各年份投资额（归算至入库年份）平均分配。

对2021—2025年进行实际投资决策，优化窗口设置为5 a，决策期间共产生5 a的项目出库方案及4 a（2026—2029年）的项目“预出库”方案。投资决策期间资金的折现率$\rho=8\,\%$，电网基建项目的资金分配比例b_k固定为35 %，输配电资产年折旧率$\eta=0.01$。假设电网公司初始输配电资产为100亿元，负债50亿元，且最大资产负债率为0.5。企业第1年输配电收入为5亿元，输配电价为301元/（MW·h），且后续每年度输配电量较上一年度增长4 %。

4.2 投资时序优化方案分析

按照本文提出的电网规划项目投资时序优化模型，经过不断更新项目库信息对项目库的待出库项目进行滚动时序优化，得到优化后的项目出库方案（记为方案1），如表1所示。方案1归算至2021年的总投资为199 185万元，总收益为45 796万元。根据对项目进行出库优先级排序的思想，将项目库内的各项目按年产出比（阶段综合效益与项目总成本的比值）从高到低的顺序进行排序，并制定项目出库优先顺序表[3]，如附录B表B2所示。以决策期间的综合效益最高为目标进行优化，各项目间的关联关系及其他约束条件保持不变，根据传统投资决策方法制定的项目出库方案（记为方案2）如附录B表B3所示，方案2归算至2021年的总投资为231 184万元，总收益为44 223万元。对比2种投资方案容易发现，根据本文所提模型制定的方案1在考察期内总投资更低，却获得了更高的综合效益。

图2给出了2种方案形成的投资效益演变趋势。与传统投资决策方法过分追求综合效益快速提升不同，本文提出的投资时序优化方法在投资期的前期舍弃了总体效益最好的项目，转而投资经济效益比较好但建设工期较长的项目。

由于考虑了投资行为对投资能力的反馈作用，在方案1中，决策中期电网公司将获得较强的投资能力，随着投资能力的增强，投资效益很快反超传统投资决策方法。因此可以得出结论：应用本文所提方法进行项目投资安排，电网公司不仅在考察期内获得了更佳的综合效益，未来也将会持续受益。

输配电价改革给电网投资带来的最大影响是电网公司的收入受到了合理的监管，输配电收入直接用于投资成本的回收。由于我国电网企业并非盈利性企业，因此本文所提模型将电网公司投资决策中为扩大再生产的经济效益与反映企业社会责任的可靠性效益、环境效益解耦，以经济效益作为后续投资的反馈，实现可靠性效益与环境效益的综合最优，并通过优化投资时序的方式实现电网公司良性发展。

表1 投资时序优化方案（方案1）

Table 1 Optimization scheme of investment time series（Scheme 1）

年份	出库项目	在建项目	建成项目	输配电收入/万元	投资限额/万元	建设成本/万元	综合效益/万元
2021	5,7,10	—	—	17500	35000	34613	0
2022	2,6,11,13	5	7,10	18200	62439	56915	1584
2023	—	2	5,6,11,13	18928	24452	23449	3783
2024	14	—	2	20592	21743	16352	5762
2025	15	14	—	21416	40243	39245	5762
2026	16	15	14	22272	34300	31736	8244
2027	17,18	—	15,16	22681	25877	19809	14204
2028	19	14	17,18	23589	41177	27183	15567
2029	—	—	19	24532	46647	0	15971

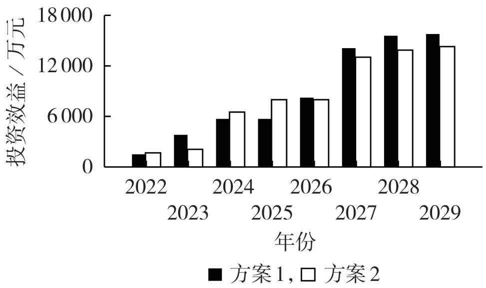


图2　2种方案投资效益演变趋势对比

Fig.2　Comparison of evolution trend of investment benefit between two schemes

另外需要指出的是，随着所在地区经济发展逐步饱和，电网投资需求逐渐降低，电网公司应当调整投资策略，减少基建项目投资占比，将更多的资金用于其他方面。

尽管以上方案对比的前提是项目的投资价值成效与成本保持为恒定值，但本文所提电网规划项目投资时序优化模型同样适用于项目投资价值成效与成本发生变动的应用场景，这也是本文方法相较于传统静态评估排序方法的优势所在。

5　结论

本文在分析输配电价改革对电网规划项目投资能力影响的基础上，提出考虑投资能力反馈的电网规划项目投资时序优化模型，所提模型有以下特点：

1）基于单个规划项目的投资价值成效，通过项目间的关联关系宏观分析投资组合方案对电网公司长期发展的影响；

2）充分考虑规划项目投资价值成效的时间属性，突出处于不同发展阶段下电网公司投资重心变化带来的影响；

3）考虑电网投资行为对投资能力的反馈作用，体现投资时序对投资项目组合的影响。

综上，本文所提模型可有效适应新形势下电网公司精益化投资的需要，适用于不同发展阶段下省级电网公司的投资决策。

此外，本文提出的电网投资决策方法较为宏观，对各项目自身投资价值成效方面的评估大多采用现有文献中的研究结论，对各项目间的相互关系也仅进行了定性考虑。因此，如何考虑多种投资价值成效的有机组合，使投资价值成效更好地为投资决策提供数据支撑，还有待进一步研究。

附录见本刊网络版（http：//www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 柴雁欣，向月，刘俊勇．面向可靠性提升的关联规则驱动下配电网投资规划优选模型与方法[J]．电力自动化设备，2020，40（3）：85-92.
CHAI Yanxin，XIANG Yue，LIU Junyong. Optimization model and method of distribution network investment planning driven by correlation rules for reliability improvement[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40（3）：85-92.

[2] 张华一，文福拴，张璨，等．基于前景理论的电网建设项目组合多属性决策方法[J]．电力系统自动化，2016，40（14）：8-14.
ZHANG Huayi，WEN Fushuan，ZHANG Can，et al. Prospect theory based multiple-attribute decision-making method for determining portfolio of construction projects in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40（14）：8-14.

[3] 马倩，王昭聪，潘学萍，等．新电改环境下基于效用函数的电网投资决策评价方法[J]．电力自动化设备，2019，39（12）：198-204.
MA Qian，WANG Zhaocong，PAN Xueping，et al. Evaluation method of power grid investment decision based on utility function under new electricity reform environment[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39（12）：198-204.

[4] 宋伶俐，杨军，周博文，等．一种电网基建项目辅助决策方法[J]．电力自动化设备，2013，33（6）：64-69.
SONG Lingli，YANG Jun，ZHOU Bowen，et al. Assistant decision making scheme for construction projects of power network[J]. Electric Power Automation Equipment，2013，33（6）：64-69.

[5] 赵书强，汤善发．基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]．电力自动化设备，2019，39（3）：143-148，162.
ZHAO Shuqiang，TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process，CRITIC method and TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39（3）：143-148，162.

[6] 陈诗杰，向月，刘俊勇，等．考虑负荷不确定性与差异化需求的配电网网架结构混合多属性评价优选模型[J]．电力自动化设备，2020，40（11）：24-36.
CHEN Shijie，XIANG Yue，LIU Junyong，et al. Mixed multi-attribute evaluation and optimization model for distribution network configuration considering load uncertainty and different demands[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40（11）：24-36.

[7] 刘恒玮．电网规划项目组合优选与综合评估方法研究[D]．武汉：华中科技大学，2019.
LIU Hengwei. Study on the method of combination optimal selection and comprehensive evaluation of power network planning projects[D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2019.

[8] 沈美燕，胡哲晟，刘曌煜，等．考虑效益耦合和时序关联特性的配电网规划项目多阶段双Q优选[J]．电力自动化设备，2020，40（6）：22-28，48.
SHEN Meiyan，HU Zhesheng，LIU Zhaoyu，et al. Optimal multi-stage dual-Q selection for distribution network planning projects considering benefit coupling and timing correlation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40（6）：22-28，48.

[9] 何凯，王剑晓，王佳伟，等．基于全成本电价的电网规划方案评估与优选[J]．中国电力，2020，53（3）：66-75.
HE Kai，WANG Jianxiao，WANG Jiawei，et al. Evaluation and optimization of power network planning scheme based on total-cost price[J]. Electric Power，2020，53（3）：66-75.

[10] 叶彬，刘敦楠，杨娜，等．基于实物期权的增量配电网投资决策[J]．电力系统自动化，2018，42（21）：178-184.
YE Bin，LIU Dunnan，YANG Na，et al. Real options based investment decision-making for incremental distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems，2018，42（21）：178-184.

[11] 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.

[12] 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. Impacts of TDP reform on investment of provincial power grid and its dynamic evaluation method[J]. Power System Technology,2018,42(10):3291-3298.

[13] 国家发展改革委. 省级电网输配电价定价办法(发改价格规〔2020〕101号)[EB/OL].(2020-02-05)[2021-08-14]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202002/t20200205_1219961_ext.html.

[14] 张粒子,叶红豆,陈逍潇. 基于峰荷责任的输配电价定价方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(14):92-98.
ZHANG Lizi,YE Hongdou,CHEN Xiaoxiao. Transmission and distribution pricing method based on peak-load pricing[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(14):92-98.

[15] 曾令驰. 基于动态规划的配网建设项目投资时序优化研究[D]. 北京:华北电力大学,2018.
ZENG Lingchi. Research on investment timing optimization of distribution network construction project based on dynamic programming method[D]. Beijing:North China Electric Power University,2018.

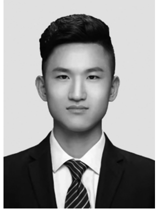
[16] 王梓耀,陈俊斌,林丹,等. 基于精英蚁群Q算法的中压配电网双Q规划模型[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):32-42.
WANG Ziyao,CHEN Junbin,LIN Dan,et al. Double Q planning model for medium voltage distribution network based on elite ant-Q algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(11):32-42.

[17] 韩俊,韩文花,陈曦,等. 基于熵权-灰色关联分析的降低区域停电损失举措研究[J]. 中国电力,2020,53(5):10-17.
HAN Jun,HAN Wenhua,CHEN Xi,et al. Research on reducing regional outage loss based on entropy weight-gray correlation analysis[J]. Electric Power,2020,53(5):10-17.

[18] 穆永铮,鲁宗相,乔颖,等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价指标体系[J]. 电网技术,2015,39(1):23-28.
MU Yongzheng,LU Zongxiang,QIAO Ying,et al. A comprehensive evaluation index system of power grid security and benefit based on multi-operator fuzzy hierarchy evaluation method[J]. Power System Technology,2015,39(1):23-28.

[19] 康重庆,周天睿,陈启鑫,等. 电网低碳效益评估模型及其应用[J]. 电网技术,2009,33(17):1-7.
KANG Chongqing,ZHOU Tianrui,CHEN Qixin,et al. Assessment model on low-carbon effects of power grid and its application[J]. Power System Technology,2009,33(17):1-7.

作者简介：



金智博

金智博(1996—),男,浙江永嘉人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与投资决策(**E-mail**:jinzhb@foxmail.com);

李华强(1965—),男,河北清苑人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统分析、稳定及优化(**E-mail**:lihuaqiang@scu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Optimization method of investment time series of power grid planning projects considering investment ability feedback

JIN Zhibo[1],LI Huaqiang[1],LI Shanshan[1],DENG Jingwei[2],YIN Shuo[3],LU Yao[3]

(1. Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province,Sichuan University,Chengdu 610065,China;
2. State Gird Sichuan Economic Research Institute,Chengdu 610041,China;
3. State Grid Henan Economic Research Institute,Zhengzhou 450052,China)

Abstract:Along with the gradual promotion of power system reform,the operation and management mode of power grid enterprises must be changed,and higher requirements have been put forward for precise investment of the enterprises. Based on the influence factors of power grid investment under the new situation, an evaluation system for investment value effect of planning projects is established,which includes economic benefit,reliability benefit and environmental benefit. An investment time series optimization model of power grid planning projects is established,which takes the maximum comprehensive benefit during the planning period as the goal,considers the constraints such as investment ability and relationship among projects,and the feedback mechanism of investment activities to investment ability is introduced. The case simulative results of a batch of 19 planning projects in a province show that the proposed model can effectively adapt to the change of power grid revenue mode under the new situation and is helpful for realizing precise investment of infrastructure projects.

Key words:precise investment;investment ability feedback;investment value;time series optimization

附录 A:

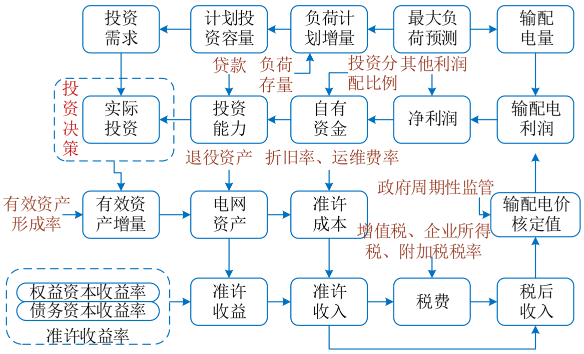


图 A1 输配电价调整对电网投资能力的影响机制

Fig.A1 Influence mechanism of transmission and distribution price adjustment on investment capability of power grid

附录 B:

表 B1 待建项目情况

Table B1 Project library information

序号	入库年份	工期/a	可靠性效益/万元	环境效益/万元	资产形成率	项目成本/万元	备注
1	2020	2	0	76	0.663	30 116	
2	2020	2	1 714	261	0.762	45 161	
3	2020	3	0	154	0.807	64 204	
4	2020	2	0	44	0.798	43 928	与 7 互斥
5	2020	2	844	815	0.849	39 586	
6	2020	1	130	18	0.756	6 747	
7	2020	1	761	148	0.759	6 589	与 4 互斥
8	2021	1	0	127	0.845	13 022	从属于 3
9	2021	3	0	166	0.841	68 135	
10	2021	1	653	22	0.758	7 469	
11	2022	1	0	16	0.804	700	
12	2022	1	0	356	0.794	27 410	
13	2022	1	342	38	0.821	5 465	
14	2023	2	2 174	308	0.767	31 493	
15	2023	2	4 474	496	0.792	44 090	
16	2024	1	962	28	0.779	8 843	
17	2024	1	271	172	0.845	9 523	
18	2025	1	812	108	0.830	10 285	
19	2025	1	0	404	0.778	27 183	

表 B2 项目出库优先顺序表

Table B2 Execution priority list of projects

序号	年产出比	序号	年产出比
7	0.138	11	0.023
15	0.113	6	0.022
16	0.112	19	0.015
10	0.090	12	0.013
18	0.089	8	0.010
14	0.079	1	0.003
13	0.070	9	0.002
17	0.047	3	0.002
2	0.044	4	0.001
5	0.042		

表 B3 顺序出库方案(方案 2)

Table B3 Optimization scheme using execution priority list（Scheme 2）

年份	出库项目	在建项目	建成项目	输配电收入/万元	投资限额/万元	建设成本/万元	综合效益/万元
2021	7，10，6	—	—	17 500	35 000	20 805	0
2022	14，13，2，11	—	6，7，10	18 200	66 264	45 965	1 732
2023	—	14，2	13，11	18 928	50 534	39 801	2 128
2024	16，17，1	—	2，14	21 286	37 116	34 004	6 585
2025	15	1	16，17	22 138	41 818	38 530	8 018
2026	—	15	1	23 023	32 982	22 893	8 094
2027	18，3	—	15	24 254	35 756	33 353	13 064
2028	19	3	18	25 225	56 112	50 250	13 984
2029	—	3	19	26 233	32 305	23 068	14 388