

基于系统动力学理论的输配电价绩效管制建模与分析

陈新晨¹, 潘学萍¹, 马倩², 梁伟¹, 曹阳¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要:现有关于输配电价管制模式的研究大多基于静态分析方法,无法适应新电改环境下电网企业投资-运营-收入的复杂时序及因果关系,为此,提出一种基于系统动力学理论的输配电价绩效管制建模与分析方法。在现有输配电价成本管制的基础上,将生态建设投资、服务质量以及提供就业岗位数等指标引入电网企业投资运营绩效管制指标体系,并构建输配电价绩效管制的系统动力学模型。以某省级电网企业为例,仿真分析其在基期后10 a间的投资运营情况,采用层次分析法确定指标权重,计算电网企业投资运营综合绩效的变化趋势,结果表明,绩效管制模式下电网企业主动修正投资运营策略,在保证自身良性运营的同时达到了监管部门的期望,验证了绩效管制模式的优越性。

关键词:绩效管制;输配电价改革;投资运营;综合绩效;系统动力学

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202202001

0 引言

在当前新电改^[1-2]环境下,我国输配电价管制模式已经从传统的购销差价方式转变为“准许成本加合理收益”的新型管制模式^[2]。2019年1月,国家发展改革委印发《关于开展第二监管周期电网输配电定价成本监审的通知》^[3],输配电价改革进入第二监管周期。

国际上输配电价管制方法也在不断改进。文献[4-5]在研究我国输配电价改革的基础上进一步讨论了欧美国家的实践和经验,指出目前主流的输配电价管制包括成本管制、上限管制以及绩效管制3种模式。成本管制可以消除垄断造成的企业高额利润,但存在被监管企业过度投资、监管部门缺乏对企业成本的控制等问题。上限管制具有激励企业减少成本、提高生产效率、抑制过度投资等优点,但存在企业服务质量降低的问题。绩效管制根据管制对象是否实现既定的绩效目标,对其进行相应的奖励或惩罚,本质上是建立一种基于业绩的利益分享机制,通过提供激励机制引导电网企业提高业绩。绩效管制^[6]目前已得到广泛应用,影响较大的有英国RIIO^[7](Revenue=Incentives+Innovation+Outputs)模式、美国纽约州的REV^[8](Reforming the Energy Vision)模式等。此外,丹麦、墨西哥以及南非等国也进行了绩效管制的实践。

我国现有的输配电价管制模式为“准许成本加

合理收益”,实际上是成本管制模式,该管制模式易导致企业过度投资等问题。文献[3]中强调了对垄断企业的成本监管,而绩效管制模式可以通过业绩评估激励电网企业减少成本,实现资源配置的优化。

绩效管制的核心是效益评估,目前国内外对电网企业的效益评估已有较多的研究报道^[9-10]。文献[11]强调低碳电网对社会发展的作用,基于全生命周期理论构建低碳电网效益综合量化评价体系,并采用电网企业实际数据对所提方法进行分析。文献[12]通过规范安全指标、一般安全指标及效益指标3类指标刻画电网安全与效益的特性。文献[13]研究含多个不确定电源和负荷的区域间电网的经济调度,引入服务质量指标量化分析价格敏感用户的响应行为。上述文献大多针对电网企业的单一属性如安全性、可靠性、环保性等进行业绩评估。文献[14]从安全性、经济性、协调性等方面建立业绩评估综合指标,但仅立足于电网企业单一主体,未考虑电力消费者、政府监管部门等对电网企业的运营期望。

本文在绩效管制模式中考虑我国新电改的特点,综合电网企业、电力消费者和政府监管部门三方诉求,除了传统的资金筹措能力、经济效益、可靠性等指标外,进一步引入生态建设投资、服务质量、提供就业岗位数等新型指标,以激发电网企业提高服务质量,使其承担更多的社会责任。

由于电网投资运营的复杂性,多个评价指标间往往相互影响,且在新电改环境下输配电价管制要求3 a核定1次,不同时间段内电网企业的运营情况和建设投入等具有动态属性。为反映输配电价核定的动态时序及因果关系,本文基于系统动力学方法^[15-16],以输配电价核定为基础,建立包括资金筹措能力、经济效益、可靠性、社会责任和用户满意度在

收稿日期:2021-05-20;修回日期:2021-12-03

在线出版日期:2022-02-23

基金项目:国家重点研发计划中挪合作项目(2019YFE0105200)

Project supported by the National Key Research and Development Project of Chinese-Norwegian Collaboration Projects (2019YFE0105200)

内的输配电价绩效管制新模型。通过对该动力学模型的仿真,计算电网企业的综合绩效动态变化规律,据此研究在监管部门不同绩效管制目标下电网企业的良性发展能力。

1 绩效管制指标体系及绩效标准

绩效管制首先需要明确管制目标,并且以此为依据确定指标体系以及绩效标准。传统的成本管制模式和上限管制模式侧重于降本增效。在全球电力能源转型的背景下,电网企业作为输配电环节的管理者,需要承担更多的社会责任。为此,监管部门需要设计更加全面的考核指标对电网企业进行评估,从现有的对电网企业的成本管制模式转变为考核其绩效。

文献[17]中美国西部洲际能源理事会监管部门设计的绩效管制指标体系包含:传统指标,如可靠性、安全性、投资回报等;新指标,如技术创新、电网弹性、灵活性、用户满意度等;环境指标,如新能源以及分布式发电的比例、排放减少量等。管制目标是在保证电网安全可靠经济运行的前提下,增强电网的弹性、科技革新的响应能力以及对分布式能源的接纳程度等。

本文从传统指标、新型指标和环境指标3个角度出发,综合电网企业、监管部门和电力消费者三方需求,采用层次分析法^[18],按照指标间的关联关系和隶属关系将各个评价指标按不同层次组合,形成一个多层次的分析结构模型,构建电网企业绩效管制指标体系,如图1所示。

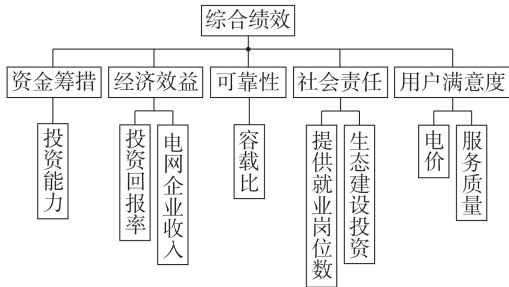


图1 电网企业绩效管制指标体系

Fig.1 Index system of performance-based regulation for power grid enterprise

绩效标准是绩效评估的关键环节,图1中各指标的绩效标准确定如下。

1.1 资金筹措模块

资金筹措模块以电网企业投资能力作为判断标准,包括自有资金、贷款资金和平衡账户投资三部分。其中:自有资金由电网企业上一年的收入及其分配比例决定;贷款资金由现有资金以及电网企业的资产负债率决定;平衡账户投资由平衡账户的收

入决定。根据输配电价定价办法,政府在监管周期前核定输配电价,并以3 a为一个监管周期。在监管周期内,一旦核定的输配电价高于输配电价的政策值,平衡账户就会有盈余资金,这里将盈余资金用于下一个监管周期的电网投资。

电网企业投资能力计算如下:

$$I = I_{\text{own}} + I_{\text{loan}} + I_{\text{bal}} \quad (1)$$

$$I_{\text{own}} = L r_{\text{own}} \quad (2)$$

$$I_{\text{loan}} = \frac{r_{\text{loan}}}{1 - r_{\text{loan}}} I_{\text{own}} \quad (3)$$

式中: I 为电网企业投资能力; I_{own} 为自有资金; I_{loan} 为贷款资金; I_{bal} 为平衡账户投资; L 为电网总收入; r_{own} 为资金分配比例; r_{loan} 为资产负债率。

1.2 经济效益模块

经济效益模块主要以电网企业收入情况和投资回报率为评判标准。收入是电网企业经营的核心,在新电改环境下电网企业的收入包括按输配电价收取的过网费和按传统购销差价的保底收入,如式(4)所示。

$$L = D h r_{\text{m}} p_{\text{tr}} + D h (1 - r_{\text{m}}) p_{\text{d}} \quad (4)$$

式中: D 为电力需求; h 为最大负荷利用小时数; r_{m} 为市场化率; p_{tr} 为输配电价; p_{d} 为购销差价。

同时,由于电网建设项目具有规模大、周期长的特点,在市场环境下对建设项目进行投资效益回报评估至关重要。第 t 年的投资回报率为:

$$i(t) = \frac{\sum_{\tau=1}^t P(\tau)}{\sum_{\tau=1}^t Q(\tau)} = \frac{\sum_{\tau=1}^t A(\tau) r}{\sum_{\tau=1}^t Q(\tau)} \quad (5)$$

式中: $i(t)$ 为第 t 年的投资回报率; $P(\tau)$ 为第 τ 年新准许收益; $A(\tau)$ 为第 τ 年新增资产; r 为准许收益率; $Q(\tau)$ 为第 τ 年新增投资额。

电网企业经济效益指标计算如下:

$$E = k_{\text{L}} \bar{L} + k_{\text{i}} \bar{i} \quad (6)$$

式中: E 为电网企业经济效益指标; k_{L} 为电网企业收入权重; $\bar{L}$ 为电网收入绩效评分; k_{i} 为投资回报率权重; $\bar{i}$ 为投资回报率绩效评分。

1.3 可靠性模块

容载比是反映电网供电能力、评价电网供电可靠性的关键指标,是电网企业设备总额定容量与电网最大负荷的比值,即:

$$R_1(t) = \frac{C(t)}{D(t)} = \frac{C(t-1) + C_{\text{m}}(t) - C_{\text{r}}(t)}{D(t)} \quad (7)$$

$$C_{\text{r}}(t) = C(t-1) r_{\text{re}} \quad (8)$$

$$D(t) = D(t-1) r_{\text{a}} \quad (9)$$

式中: $R_1(t)$ 为第 t 年的容载比; $C(t)$ 为第 t 年电力系统设备总额定容量; $D(t)$ 为第 t 年电力总需求; $C_{\text{m}}(t)$ 为

第 t 年投产容量; $C_r(t)$ 为第 t 年退役容量; r_{re} 为退役率; r_n 为电力需求增长率。

电网投资容量与投资回报都具有延迟反馈特性。在投资建设初期,电网容载比会处于一个比较低的水平;随着项目的不断投产,电网总容量存在一个高速增长的时段,此时容载比也会随之增长;在满足用电需求和供电可靠性之后,电网容载比最终趋于平稳。

1.4 社会责任模块

本文以电网企业提供就业岗位数以及生态建设投资来评价其社会责任完成情况。具体如下:

$$R = k_b \bar{b} + k_c \bar{I}_c \quad (10)$$

$$I_c = I k_{pc} \quad (11)$$

式中: R 为社会责任指标; k_b 和 k_c 分别为提供就业岗位数权重和生态建设投资权重; $\bar{b}$ 为提供就业岗位数绩效评分; $\bar{I}_c$ 为生态建设投资绩效评分; I_c 为生态建设投资额; k_{pc} 为生态建设投资占比。

电网企业的投资能力与其经济效益、资金筹措能力等密切相关,可以将其归为客观因素;而生态建设投资占比则有很强的主观能动性,因此在绩效管制模式下,管制部门可以根据社会需求引导电网企业承担相应的社会责任,如提高在生态环境保护或者新能源开发利用等方面的经济投入占比。

1.5 用户满意度模块

用户满意度是评价电网企业综合效益的一个重要模块,主要包含电力消费者对降低用电成本的强烈意愿以及对电网企业提高服务质量的期望。具体如下:

$$S = k_p \bar{p} + k_s \bar{I}_s \quad (12)$$

$$I_s = I k_{ps} \quad (13)$$

式中: S 为用户满意度指标; k_p 和 k_s 分别为电价权重和服务质量权重; $\bar{p}$ 为电价绩效评分; $\bar{I}_s$ 为服务质量绩效评分; I_s 为用于提升服务质量的投资; k_{ps} 为用于提升服务质量的投资占比。

2 基于系统动力学模型的电网企业绩效管制机制

构建输配电价的绩效管制模型时,常采用静态分析方法,如目前采用的“成本加效益”管制模式。电网企业的收入函数可表示为:

$$P = D + O + E_A [R_e (1 - R_{da}) + R_d R_{da}] + T \quad (14)$$

式中: P 为准许收入; D 为折旧费; O 为运行维护费; E_A 为有效资产; R_e 为权益资本收益率; R_{da} 为资产负债率; R_d 为债务资本收益率; T 为税金。

当前我国输配电价的核定方式为3 a核定1次。前一监管周期核定的输配电价对企业经营行为产生

影响,同时企业经营行为又将反过来影响下一个监管周期的准许收入和价格水平,因此输配电价核定是一个前期与后期紧密衔接、监管与执行相互影响的过程。然而式(14)的静态评估方式无法反映企业长期运营的复杂因果关系,为此,本文根据系统动力学模型,在现有成本管制的基础上,提出进一步考虑社会责任、用户满意度等因素的输配电价绩效管制动力学模型。

系统动力学是美国麻省理工大学的Forrester J W教授于1956年提出的利用计算机进行模拟的系统仿真方法。该方法从系统结构和功能两方面对具有复杂因果关系以及动态变化过程的系统进行仿真,从而反映实际系统的内在规律。

本文提出基于系统动力学进行绩效管制研究的原因在于:系统动力学适合处理因果时序问题,输配电价改革对电网企业发展投资的影响是一个长期的过程,电网企业的规划投资项目需要一定的建设周期,同时建成后项目将被纳入电网企业的固定资产,反过来影响输配电价的核定,构成负反馈;系统动力学能够量化各因素之间的延迟和动态效应,影响输配电价的各因素与下一轮输配电价的核定之间会存在延迟,通过栈流图中的数学函数公式可以反映延迟的效果;系统动力学可从宏观上把握企业的发展方向及绩效管制策略,电网企业绩效管制指标中部分因素无法进行定量描述,系统动力学模型可以通过各因素间的因果关系来解决该问题。

2.1 电网企业投资运营的系统动力学模型

基于系统动力学模型,构建包括资金筹措能力、经济效益、可靠性、社会责任和用户满意度在内的输配电价绩效管制新模型,根据各指标评估电网企业的综合绩效,如图2所示。

2.2 指标绩效

本文采用阶跃函数进行绩效评估,评分结果分为1—5共5档,依次表示差、较差、中等、较好和好,不同指标的评分方法根据实际情况确定。以容载比^[19]为例,根据我国某省电网的实际负荷情况,将容载比的评分范围设为1~1.6 kV·A/kW,实际容载比数值和其绩效分值的对应关系见式(15)。当容载比不高于1 kV·A/kW时,可靠性指标评分结果为1,属于差;当容载比不低于1.6 kV·A/kW时,可靠性指标评分结果达到最高值5。

$$S_c = \begin{cases} 1 & R_l \leq 1 \text{ kV} \cdot \text{A/kW} \\ 2 & R_l \in (1, 1.2) \text{ kV} \cdot \text{A/kW} \\ 3 & R_l \in [1.2, 1.4) \text{ kV} \cdot \text{A/kW} \\ 4 & R_l \in [1.4, 1.6) \text{ kV} \cdot \text{A/kW} \\ 5 & R_l \geq 1.6 \text{ kV} \cdot \text{A/kW} \end{cases} \quad (15)$$

式中: S_c 为评分。

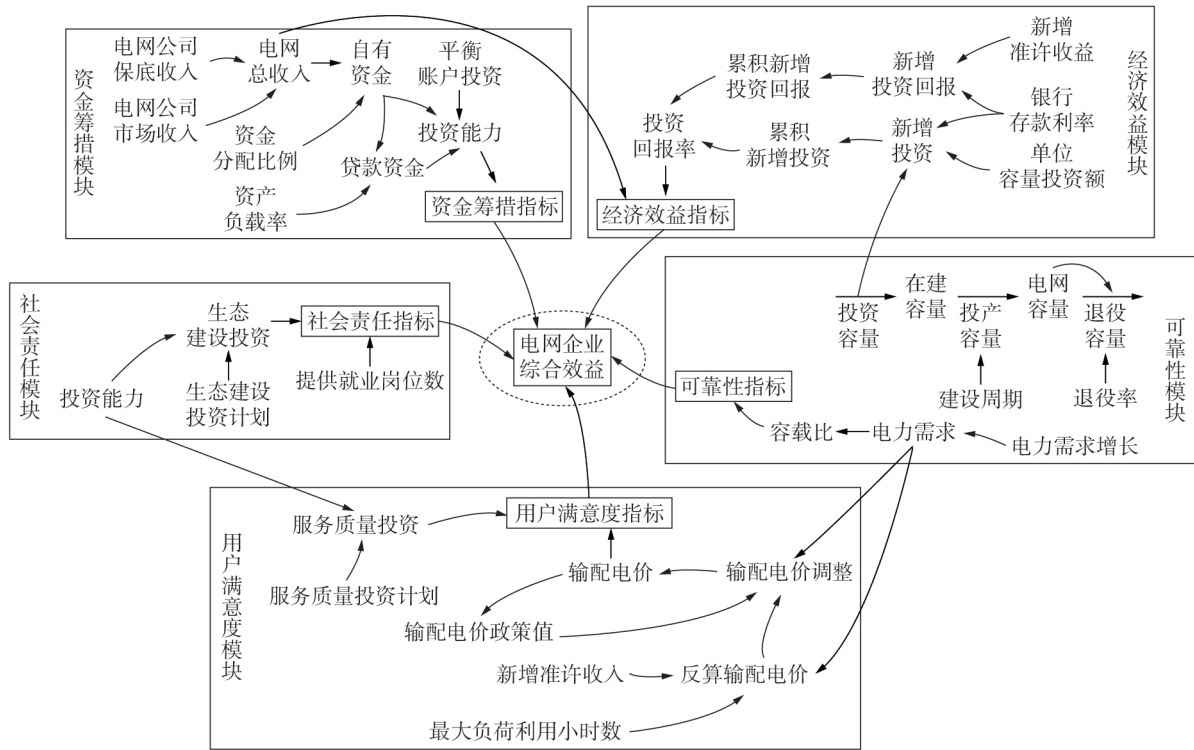


图2 基于系统动力学理论的输配电价绩效管制新模型

Fig.2 New performance-based regulation model of transmission and distribution price based on system dynamics theory

2.3 综合绩效的计算

确定每个指标的绩效评分之后,还需要进一步确定各二级指标权重,据此计算电网企业的综合绩效。本文采用层次分析法^[18]确定指标权重,具体步骤如下。

1)请相关领域的多位专家根据自身经验判断不同评价指标的重要性,并通过两两判别得出多个指标间的序关系。

2)确定各绩效指标权重,并进行一致性检验。

3)根据权重系数以及指标绩效评分得到电网企业综合绩效为:

$$V = \sum_{j=1}^n v_j w_j \quad (16)$$

式中: V 为电网企业综合绩效; n 为指标总数; v_j 和 w_j 分别为第 j 个指标的绩效评分和权重。

2.4 绩效奖惩的激励制度

根据绩效评分结果对电网企业进行经济性奖惩可以引导电网企业实现监管部门的预期目标。电网企业综合绩效越高,则在监管期内其准许收益也就越高。

奖惩规则不同时,企业收益也将不同。假设以图3的二次函数作为激励对电网企业进行奖惩,则具体规则如下:当电网企业综合绩效评分等于3时,奖惩为0,对电网企业既不进行奖励也不进行惩罚;

而当电网企业综合绩效评分不等于3时,按照二次函数规律进行准许收益的奖惩。

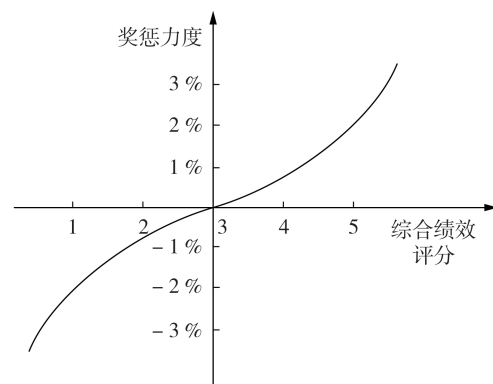


图3 电网企业综合绩效奖惩机制

Fig.3 Reward and punishment mechanism of comprehensive performance for power grid enterprise

3 仿真分析

3.1 基于系统动力学模型的电网企业投资运营仿真

以我国某省级电网 220 kV 以上电压等级主网为例,按照图2构建其在输配电价改革下投资运营的系统动力学模型。输配电价核定参数及仿真模型参数见表1。表中: P_0 为初始输配电价; Z 为电网投资项目的建设周期; b_g 为电网企业提供就业岗位数。以2016年为基期,仿真分析该电网企业在后续 10 a

的投资运营规律。根据仿真结果,进一步从资金筹措、经济效益、可靠性、社会责任和用户满意度5个模块对该电网企业进行绩效评估。

表1 输配电价核定及投资运营仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model for transmission and distribution price verification and investment and operation

参数	取值	参数	取值
固定资产比率 / %	75	定价折旧率 / %	6.14
预期容载比 / ($\text{kV} \cdot \text{A} \cdot \text{kW}^{-1}$)	1.8	材料费比率 / %	0.5
修理费比率 / %	0.5	职工薪酬比率 / %	1
其他费用比率 / %	2.5	城市建设税率 / %	0.7
教育费附加比率 / %	0.3	权益资本收益率 / %	6.59
所得税率 / %	25	基建投资比率 / %	17
$r_{\text{own}} / \%$	5	$r_{\text{loan}} / \%$	47.63
h / h	5500	$r_{\text{m}} / \%$	30
$r / \%$	3.07	$k_{\text{L}} / \%$	0.5
$k_{\text{i}} / \%$	0.5	$r_{\text{re}} / \%$	2
$r_{\text{a}} / \%$	0.7	$k_{\text{pc}} / \%$	10
b_{g}	1500	$k_{\text{c}} / \%$	70
$k_{\text{b}} / \%$	30	$k_{\text{ps}} / \%$	5
$k_{\text{p}} / \%$	70	$k_{\text{s}} / \%$	30
$P_0 / [\text{元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	247	Z / a	3

仿真可以得到该电网企业在2016年之后10 a期间的输配电价以及投资容量的变化情况,如图4所示。

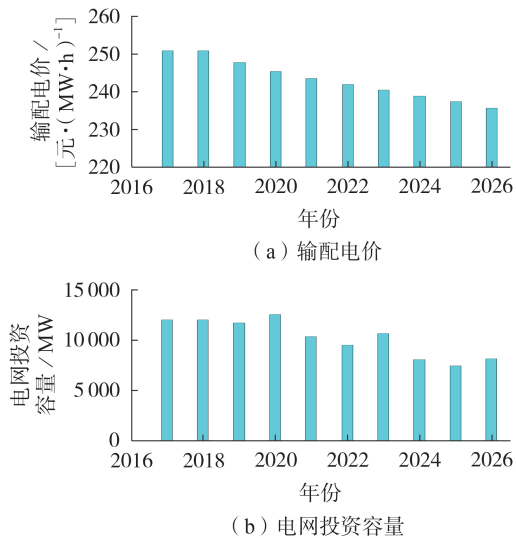


图4 输配电价与电网投资容量变化趋势

Fig.4 Change trend of transmission and distribution price and investment capacity of power grid enterprise

由图4可以得出如下结论。

1)在第一监管周期(2017—2019)内,输配电价呈现下降趋势,投资容量有一定上升。这是由于负荷的增长推动了电网投资的增长,而投资建设项目从建设到投产的延迟限制了电网企业准许收益的上

升,导致输配电价下滑。

2)在第一监管周期后,电网投资容量不断下降,输配电价也逐步趋于稳定。从中电联公布的电网数据^[20]来看,2019年1—9月电网设备投资总体完成额为2 953亿元,同比下降12.5%,这说明电网的投资增速开始持续放缓,与电网企业在输配电价改革以后进入“刹车时代”的相关报道是相符的。

3.2 电网企业综合绩效

根据上述3个监管周期内电网企业的投资运营仿真结果对电网企业综合绩效进行评估。

3.2.1 各评价指标的绩效分值

首先在系统动力学模型中计算图1中5个二级指标的数值,并根据式(15)求取其绩效评分,结果如图5所示。

各模块具体分析如下。

1)资金筹措指标。资金筹措指标采用投资能力进行衡量。由图5(a)可知,在3个监管周期的末期,电网企业资金筹措指标值的波动较大。这主要是由于平衡账户机制的影响,在一个监管周期结束后,若平衡账户的收入为正值,则账户中的累积资金将按计划用于电网投资建设,此时资金筹措指标值激增。

2)经济效益指标。电网企业的经济效益由投资回报率和企业收入2个指标进行衡量。由图5(b)可知:监管初期电网企业的经济效益指标偏低,这是由于监管初期进行了大量的投资建设,且项目投产需要一定的周期,因此投资回报率处于很低的数值;在第二和第三监管周期内,企业收入和投资回报率绩效评分平稳增长,经济效益指标也持续平稳增长,最终保持在一个较理想的水平。

3)可靠性指标。可靠性采用容载比进行衡量。由图5(c)可知:电网可靠性指标与电网企业的投资建设密切相关,在监管初期,电网可靠性指标处于一个较低的数值,并且投资项目需要一个建设期,而电力需求在不断增加,因此,在监管初期容载比有下降趋势,但是随着投资项目的不断投产,容载比也随之增长;随着电网投资建设的不断增加,电网企业的容载比快速上升,可靠性指标也持续增加,最后趋于平稳上升。

4)社会责任指标。社会责任指标由电网企业提供就业岗位数和生态建设投资2个指标进行衡量。由图5(d)可知:在监管周期内,社会责任指标总体偏低,这主要是由于电网企业的生态建设投资占比 k_{pc} 过低,从而导致生态建设投资绩效评分过低,电网企业作为国有企业具有很强的公益性,社会公民也对其社会责任完成度抱有较高的期望,电网企业应尽快提高生态建设投资占比以满足社会需求;在各监管周期末,电网企业社会责任指标会有所提高,

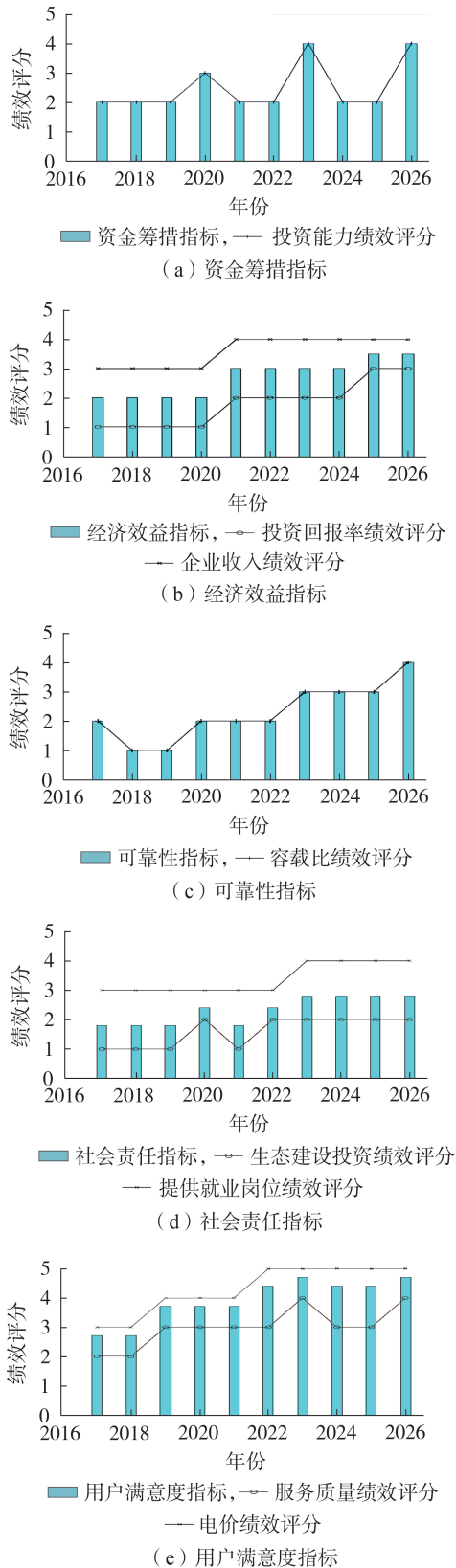


图5 各指标绩效评分结果

Fig.5 Performance scoring results of each index

这是由于平衡账户机制会使得监管周期末平衡账户中的收入用于电网投资,也会相应增加生态建设投资额。

5)用户满意度指标。用户满意度指标由电价、服务质量决定。由图5(e)可知:随着输配电价不断下降(图4(a)),电价绩效评分一直很高,带动了用户满意度指标的提升;用于提升服务的经费投入越多,服务质量提高越多,因此服务质量与电网企业投资能力密切相关,由于电网企业一直都很重视提供更好的服务质量,因此用户满意度指标较高。

3.2.2 指标权重的确定

要计算电网企业综合绩效指标值,需确定各二级指标的权重。本文根据层次分析法^[18],首先邀请4位专家 $a-d$ 对各二级指标进行赋分,并进行重要性判别,结果如式(17)所示。

$$\begin{cases} x_2 > x_5 > x_3 > x_1 > x_4 \\ x_3 > x_2 > x_5 > x_4 = x_1 \\ x_2 > x_3 = x_1 > x_5 > x_4 \\ x_5 > x_4 > x_3 = x_2 > x_1 \end{cases} \quad (17)$$

式中: x_1-x_5 为5个绩效指标的重要性分值。进一步计算指标的相对重要程度,如表2所示。

表2 指标相对重要程度专家评分

Table 2 Expert rating of index relative importance

专家	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
a	1.00	1.60	1.20	0.83	1.40
b	1.00	1.40	1.60	1.00	1.20
c	1.00	1.20	1.00	0.71	0.83
d	1.00	1.20	1.20	1.40	1.60

基于层次分析法^[18],根据表2计算5个绩效指标的权重 w_1-w_5 ,如表3所示。

表3 指标权重

Table 3 Index weights

专家	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
a	0.1658	0.2653	0.1991	0.1376	0.2321
b	0.1613	0.2258	0.2581	0.1613	0.1935
c	0.2109	0.2532	0.2109	0.1498	0.1752
d	0.1562	0.1875	0.1875	0.2187	0.2501
综合权重	0.1735	0.2331	0.2139	0.1668	0.2127

3.2.3 电网企业综合绩效

根据上述指标赋分及其权重结果,基于式(16)计算电网企业综合绩效,如图6所示。

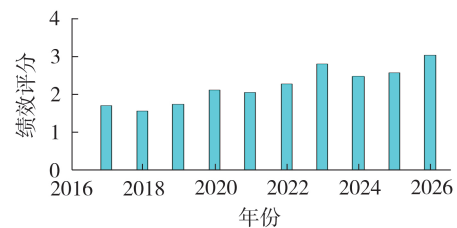


图6 电网企业综合绩效

Fig.6 Comprehensive performance of power grid enterprise

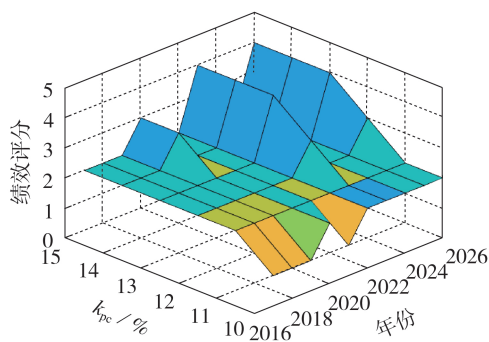
由图6可以看出:电网企业综合绩效在监管前期偏低,但在各监管周期末均有较大幅度的增长,这是由于平衡账户的作用;3个监管周期内,电网企业综合绩效呈现缓慢增长的趋势,因此电网企业在图3的绩效奖励下将得到良性发展。

4 绩效管制的激励作用

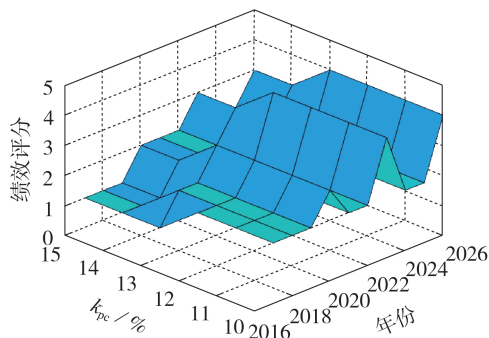
根据图3的绩效奖惩机制,电网企业综合绩效越高,其准许收益也越高,因此提升综合绩效将是电网企业投资运营的目标。由上述算例可以看出:在电网企业综合绩效的5个二级指标中,电网企业的社会责任指标值偏低,社会责任指标包括提供就业岗位数和生态建设投资,由图5(d)可知,提供就业岗位数绩效评分较高,而生态建设投资绩效评分较低,这是由于生态建设投资占比 $k_{pc}=10\%$,投资额偏低。为此,电网企业需加大生态建设投入,以提升其综合绩效。

图7(a)中给出了不同生态建设投资占比 k_{pc} 下的电网企业生态建设投资绩效评分的变化情况,同时由于生态建设投资占比的变化将引起电网建设投资和和服务质量投资等方面的变化,最终将引起电网企业综合效益的变化,为此,图7(b)、(c)中还进一步给出了受影响较大的资金筹措指标以及电网企业综合绩效的变化情况。

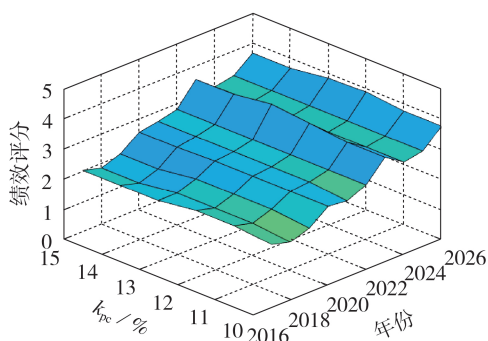
由图7可以看出: k_{pc} 从10%增至13%期间,生



(a) 生态建设投资



(b) 资金筹措指标



(c) 综合绩效

图7 不同 k_{pc} 下部分绩效指标的变化

Fig.7 Variation of partial performance indexes under different values of k_{pc}

态建设投资绩效评分提高较明显,而当 k_{pc} 为14%和15%时,其绩效评分变化不大,维持在平稳水平; k_{pc} 从10%增至13%期间,资金筹措指标维持不变,但当 k_{pc} 继续增至14%时,其值明显下降;当 k_{pc} 为12%和13%时,电网企业综合绩效最高。因此可以得出:绩效管制可以引导电网企业按照监管部门的期望改变投资与运营计划,同时使电网企业运营趋于良性水平,达到双赢的局面。

5 结论

本文以输配电价绩效管制模式为基础,构建了包含资金筹措、经济效益、可靠性、社会责任以及用户满意度这5个方面的电网企业绩效管制指标体系,基于系统动力学理论,构建了输配电价绩效管制新模型。

以某省级电网企业为例,仿真分析了该电网企业在基期后10 a内的投资运营情况,在此基础上计算电网企业综合绩效评估的各指标值。为计算该电网企业综合绩效,采用阶跃函数作为绩效指标的评价函数,采用层次分析法^[18]计算各指标权重。仿真结果表明:当生态建设投资额较低时,社会责任指标值偏低,最终导致电网企业综合绩效也偏低,根据绩效奖惩机制,电网企业的准许收益也较低。因此在绩效管制模式下,电网企业为提高其综合绩效,一般会主动加大其在生态建设方面的投入,其综合绩效也相应增加。然而由于电网企业投资运营的复杂因果关系,如果过度提高社会责任指标值,则将会导致其他指标值的下降,因此,当综合绩效达到最大时,电网企业将不再加大对该指标的投入。

绩效管制的良性发展需要以严格的成本监审为基础,以健全的激励约束机制为保障。在此背景下,输配电价的绩效管制模式不仅能引导电网企业的正确投资方向,保证电网企业处于良性运营状态,还能

使得电网企业和监管部门达到双赢,这也正是绩效管制模式的优越性。

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[EB/OL]. [2021-01-20]. http://smartgrids.Ofweek.com/2015-03/ART-290010-8480-28942130_3.html.
- [2] 国家发展改革委. 省级电网输配电价办法(试行)发改价格([2016]2711号)[EB/OL]. [2021-01-20]. http://www.sdpc.gov.cn/gzdt/201701/t20170104_834330.html.
- [3] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于开展第二监管周期电网输配电定价成本监审的通知发改价格(2019)165号[EB/OL]. [2021-01-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201901/t20190128_962380.html.
- [4] 白玫,何爱民. 发达国家输配电价管制理论的实践和经验借鉴[J]. 价格理论与实践,2016(3):29-36.
BAI Mei, HE Aimin. Lessons learned from the application of regulation theory on transmission and distribution network in developed countries[J]. Price: Theory & Practice, 2016(3): 29-36.
- [5] 余志勇,叶泽,何姣. 国外输配电价管制政策及其对我国的启示[J]. 中国物价,2020(1):65-68.
YU Zhiyong, YE Ze, HE Jiao. Foreign transmission and distribution price regulation policy and its enlightenment to China[J]. China Price, 2020(1): 65-68.
- [6] DAN A. Performance based regulation: theory and applications to California[EB/OL]. [2021-02-20]. http://www.cpuc.ca.gov/uploadedFiles/CPUC_Public_Website/Content/About_Us/History/Aas%20PBR%20Paper%20Final_May_16.pdf. 2019.
- [7] MUJEEB A, WANG P, HONG X F, et al. A comprehensive review on the evolution of ofgem RHO-ED1 electricity distribution price control framework in united kingdom[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Advanced Electrical, Mechatronics and Computer Engineering(AEMCE 2019). Shenzhen, China: [s.n.], 2019: 21-31.
- [8] DALY M, SIMOVIC U. Future New York energy challenges eye current gas moratorium[J]. Natural Gas & Electricity, 2019, 35(10): 11-18.
- [9] 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.
- [10] 刘自发,韦涛,李梦渔,等. 基于改进层次分析法的交、直流微电网综合评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 60-66, 78.
LIU Zifa, WEI Tao, LI Mengyu, et al. Comprehensive evaluation based on improved analytic hierarchy process for AC/DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 60-66, 78.
- [11] 孙彦龙,康重庆,陈宋宋,等. 低碳电网评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 157-162.
SUN Yanlong, KANG Chongqing, CHEN Songsong, et al. Low-carbon power grid index system and evaluation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 157-162.
- [12] 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.

- [13] LÜ K, TANG H, BAK-JENSEN B, et al. Hierarchical learning optimisation method for the coordination dispatch of the inter-regional power grid considering the quality of service index[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(18): 3673-3684.
- [14] 刘万勋,于琳琳,张丽华,等. 基于AHP和多级模糊综合评判的电网发展水平评估[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 80-85.
LIU Wanxun, YU Linlin, ZHANG Lihua, et al. Evaluation of power grid development level based on AHP and multi-level fuzzy comprehensive evaluation[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 80-85.
- [15] 姜庆国,王昀昀,林海涛. 基于系统动力学的电力批发市场和零售市场相互关系分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 77-84.
JIANG Qingguo, WANG Yunnyun, LIN Haitao. Analysis on relationship between electricity wholesale market and retail market based on system dynamics method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 77-84.
- [16] 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.
- [17] WHITED M, WOOLF T, NAPOLEON A. Utility performance incentive mechanisms-a handbook for regulators[EB/OL]. [2021-03-15]. http://www.synapseenergy.com/sites/default/files/Utility%20Performance%20Incentive%20Mechanisms%2014-098_0.pdf. 2020.
- [18] 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.
- [19] 舒永钊. 输变电工程项目后评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
SHU Yongzhao. Research on post project evaluation of power transmission and transformation engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [20] 中电联行业发展与环境资源部. 2019年1—9月份电力工业运行简况[EB/OL]. [2020-12-17]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html/3-172635>. 2020.

作者简介:



陈新晨

陈新晨(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统经济运行(E-mail: 752212285@qq.com);

潘学萍(1972—),女,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: xueping_pan@163.com);

马倩(1973—),女,高级工程师,硕士,主要研究方向为电网投资与管理(E-mail: 13770683400@139.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第42页 continued on page 42)

PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J].
Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8):
1903-1910.

作者简介:

周步祥(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统调度自动化以及计算机信息处理(E-mail:hiaway_scu@126.com);



周步祥

曹强(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网和电力市场(E-mail:362708177@qq.com);

臧天磊(1986—),男,特聘副研究员,博士,通信作者,主要研究方向为综合能源系统运行优化与控制(E-mail:zangtianlei@126.com)。

(编辑 陆丹)

Electricity trading optimization decision for microgrid based on blockchain and two-level game

ZHOU Buxiang, CAO Qiang, ZANG Tianlei, ZHANG Yue, PENG Haoyu

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The establishment of effective and reasonable microgrid electricity market trading mechanism to promote the local consumption of distributed clean energy is an important way to realize the economic and environmental protection and win-win situation of microgrid operation. In order to optimize the operation of microgrid electricity market, an electricity trading model of microgrid based on blockchain and game theory is proposed. Firstly, the utility function of electricity users is improved to quantify the impact of blockchain technology on its electricity consumption welfare. Then, based on the evolutionary game theory, the dynamic process of each demand-side subject choosing the trading object is constructed, and the interaction mechanism between supply and demand is constructed based on Stackelberg game theory. The two-level game model of microgrid electricity market based on blockchain is established, and the iterative algorithm is used to solve the model. Finally, the simulation analysis on the blockchain platform shows that, the proposed method can effectively achieve state equilibrium, obtain the optimal trading strategy, improve the total welfare of the microgrid, and realize the win-win and coordinated development of multi-subjects in the microgrid electricity market.

Key words: microgrid; electricity market; two-level game; state equilibrium; distributed energy resources; blockchain; Stackelberg game theory

(上接第34页 continued from page 34)

Modeling and analysis of transmission and distribution price performance-based regulation based on system dynamics theory

CHEN Xinchun¹, PAN Xueping¹, MA Qian², LIANG Wei¹, CAO Yang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: The current researches about transmission and distribution price regulation modes are mostly based on static analysis method, which cannot adapt to complex timing sequence and causal relationship among investment-operation-revenue of power grid enterprise under electricity reform environment. Therefore, a modeling and analysis method of transmission and distribution price performance-based regulation is proposed based on system dynamics theory. On the basis of current transmission and distribution price cost control, the indexes of ecological construction investment, service quality and providing job number are introduced into the performance-based regulation index system for investment and operation of power grid enterprise, and a dynamic model of transmission and distribution price performance-based regulation is built. A provincial power grid enterprise is taken as an example, the investment and operation condition of the power grid enterprise during 10 years after the base period is simulated and analyzed, the analytic hierarchy process is adopted to determine the index weights, the comprehensive performance variation trend of investment and operation of the power grid enterprise is calculated. The results show that the power grid enterprise actively modifies the investment and operation strategy under performance-based regulation mode, meets the expectation of regulatory authority while ensures its good operation, which verifies the advantages of performance-based regulation mode.

Key words: performance-based regulation; transmission and distribution price reform; investment and operation; comprehensive performance; system dynamics