

基于ESS演化博弈的电力市场风险监管防范策略研究

周浩¹, 丁羽¹, 魏旭², 李雪松², 樊天荣²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000;

2. 江苏电力交易中心有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:随着“双碳”战略目标的持续推进,我国电力市场化改革已迈入新的阶段,但电力市场总体建设仍处于初级阶段,亟需制定科学可行的监管防范策略。建立监管机构与风险主体的“演化博弈—优化出清”迭代模型,形成市场风险与收益指标库,并定量构建电力市场风险监管防范策略,探索了双方在持续博弈交互过程中的演化稳定策略以及市场风险变化。基于真实数据进行迭代仿真,结果表明,当市场风险较大时,经过有限轮次演化博弈,监管防范策略降低了交易风险程度,验证了监管防范策略的有效性,为电力市场监管策略制定提供了理论支撑。

关键词: 电力市场风险; 量化监管防范策略; 演化博弈; 优化出清

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24696

Study of Risk Regulatory and Prevention Strategy of Electricity Market Based on ESS Evolution Game Theory

ZHOU Hao¹, DING Yu¹, WEI Xu², LI Xuesong², FAN Tianrong²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Electric Power Trading Center Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: With the continuous promotion of the "double carbon" strategy, the reformation of China's electricity market has entered a new stage, but the overall construction of the electricity market is still in the primary stage, and there is an urgent need to develop a scientific and feasible regulatory prevention strategy. An iterative model of "evolution game—optimized clearing" was established between regulators and risky subjects. A library of market risk and profit indicators was formed. And the risk prevention strategy was quantitatively constructed for the electricity market. The evolutionary stabilization strategy and market risk changes in the process of continuous game interaction between the two participants was explored. Iterative simulations base on real data, the simulation results show that when the market risk is high, after limited rounds of evolutionary game, the regulatory prevention strategy can reduce the degree of transaction risk, which verifies the effectiveness of the regulatory prevention strategy. The proposed method can provide theoretical support for the formulation of electricity market regulatory strategy.

Key words: power market risk; quantitative regulatory prevention strategy; evolution game; optimal market clearing

截至2022年8月,全国第二批电力现货市场试点地区已全部模拟试运行成功,其中江苏完成了结算试运行,这标志着我国新一轮电力体制改革进入现货市场建设的关键阶段^[1],合理有效的市场风险监管防范策略将在保证电力现货市场健康平稳运行中发挥着愈发突出的作用。当前我国电力市场监管存在相关法律法规不完善、监管职能体系欠合理、监管指标体系欠完整等问

题。针对这些问题,目前对于电力市场监管防范策略的研究主要有3个方面^[2]:1) 基于实际问题反馈的探究监管效能提升路径。文献[2]建立了监管机构、发电企业和电力用户的三方演化博弈模型,验证了在动态奖惩机制下可以实现三方策略的稳定均衡态,使市场达到良性运行状态。文献[3]构建了地方政府、企业群体的演化博弈模型,研究了动态奖励与惩罚机制下双方的演化稳

基金项目: 国网科技项目(J2021199)

作者简介: 周浩(1989—),男,本科,工程师,主要研究方向为电力市场,Email:751823272@qq.com

定策略。文献[4]调研了欧美电力市场的市场力检测措施与防范机制,提出了对于我国电力市场监管体系建设的建议。2) 潜在市场力(串谋、容量滞留、极端报价等)的识别与防范。文献[5]建立了新能源高渗透率下市场力风险识别指标体系,运用改进优劣距离法综合评价模型进行市场力风险评估。文献[6]建立了风险形式分析库,利用专家逻辑系统推演识别违规机组,并法规化处置。文献[7]构建了特征云与Petri网模型对市场力量化识别,并实时预警管控电力市场风险。文献[8]建立了基于序关系-熵权法的电力市场风险评估模型,量化判断电力市场风险水平。3) 引导市场主体提升诚信水平的信用评价。文献[9]基于主成分分析法和物元可拓理论,构建了信用评价模型,对市场主体的信用等级进行评价。文献[10]建立了广东电力现货市场信用评级模型,通过量化市场主体信用额度提高电力市场监管效率。

综上所述,已有不少研究参考国外经验,建立了适用于我国电力市场的监管方法。在电力市场风险识别方面也已有较多研究,实现了量化识别。然而,监管建议仍停留在宏观层面,对于监管防范策略中监管力度、处罚强度的定量研究上仍有欠缺,仅通过定性研究不能有效衡量监管办法落地时的市场效果。

本文基于实际电力市场交易环境,首先建立了收益评价指标体系,基于此制定风险量化监管防范策略,然后构建“演化博弈—优化出清”模型,改善了过去对于演化博弈模型定性研究以及无现实意义的定量研究的局限性;其次,由优化出清算法得到演化稳定策略(evolutionarily stable strategy, ESS)的市场出清结果反馈;最后,对比采用收敛的ESS前、后电力市场运营情况变化,分析策略演化的内在逻辑,验证文中所提量化监管防范策略的有效性。模型旨在通过呈现处于不断博弈中的参与方策略选择演化过程以及策略数据变化,对电力市场风险监管防范策略进行研究,为交易风险防范办法的制定提供参考。

1 演化博弈模型

动态迭代模型具有“决策-追随”双层结构,上层为演化博弈层,下层为市场出清层。在一阶段演化博弈中形成参与方的ESS和非ESS,作为出清层市场出清的输入数据,经过出清计算得到

结果后,与机组策略数据一同返回至上层计算参与方的收益参数,从而确定新一阶段的ESS和非ESS,形成循环迭代,如图1所示。

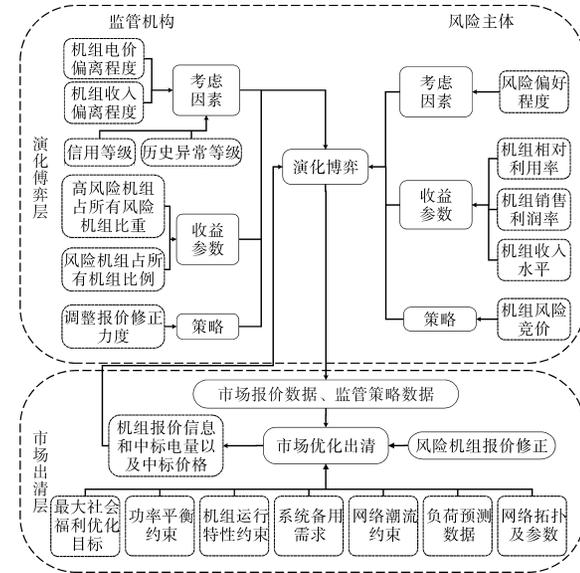


图1 双层迭代模型框架

Fig.1 Two-layer iterative model framework

1.1 上层模型

参与方为监管机构与采用风险交易策略的机组(以下简称风险机组)。双方策略及对应收益参数的纯策略博弈矩阵如表1所示。处罚指监管方在出清计算过程中向上修改机组报价,“强”、“弱”指示修改力度的大小;风险竞价指机组报高价,“中高”、“低”指报高价的幅度。风险程度与处罚力度呈正相关。

表1 监管方和风险机组的纯策略博弈矩阵

Tab.1 Pure strategy game matrix of regulators and risk unit

组合	选择概率	风险机组策略(竞价)	监管机构策略(处罚)	风险机组收益参数	监管机构收益参数
1	x, y	中高风险	强	A_1	B_1
2	$1-x, y$	低风险	强	A_3	B_3
3	$x, 1-y$	中高风险	弱	A_2	B_2
4	$1-x, 1-y$	低风险	弱	A_4	B_4

收益参数 A_i, B_i 分别由多个子收益参数构成,具体指标介绍如下。

1.1.1 风险机组收益参数 A_i 设置

在物理层面上,一些风险机组对机组的利用率有一定的考核要求,以机组相对利用率 $R_{t,n}^{[1]}$ 表示该考核指标:

$$R_{t,n} = \frac{P_{t,n}}{G} \cdot \frac{B_t^{eq}}{G_w} \quad (1)$$

式中: $R_{t,n}$ 为机组 n 在 t 时刻的相对利用率; $P_{t,n}$ 为

机组 n 在 t 时刻的中标容量; G 为风险机组装机容量; B_i^{eq} 为 t 时刻系统负荷; G_w 为市场总装机容量。

在经济层面上,收益要求分为机组总利润与机组单位利润。

在总利润方面,以机组收入水平 $L_{t,n}$ ^[8] 表示该方面的考核指标:

$$L_{t,n} = \frac{S_{t,n}}{\bar{S}_t} \quad (2)$$

式中: $L_{t,n}$ 为机组 n 在 t 时刻的收入水平; $S_{t,n}$ 为机组 n 在 t 时刻的收入; \bar{S}_t 为 t 时刻所有参与市场交易的机组的平均收入。

在单位利润方面,以机组销售利润率 $Q_{t,n}$ 表示该方面的考核指标:

$$Q_{t,n} = \frac{S_{t,n} - C_{t,n}}{S_{t,n}} \quad (3)$$

式中: $Q_{t,n}$ 为机组 n 在 t 时刻的销售利润率; $C_{t,n}$ 为机组 n 在 t 时刻的发电成本。

将经济层面和物理层面的 3 个指标标准化后,通过加权求和得到风险机组 n 在 t 时刻的收益参数 $A_{t,n}$:

$$A_{t,n} = \theta_1 R_{t,n} + \theta_2 L_{t,n} + \theta_3 Q_{t,n} \quad (4)$$

式中: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 为指标权重。

由于博弈参与方皆为群体,故将 $A_{t,n}$ 取加权平均,得到风险机组群体的收益参数 A_i 的表达式:

$$A_i = \frac{\sum_{n=1}^N A_{t,n}}{N} \quad (5)$$

式中: N 为参与交易出清的机组总数。

1.1.2 监管机构收益参数 B_i 设置

监管机构对电力市场进行监测,并管控市场风险,故其收益与市场风险呈反比例关系^[12]。本文中,市场风险与风险机组的风险程度和数量正相关。将采用中高风险竞价策略的机组定义为中高风险机组,反之亦然。监管机构收益参数由两个方面构成:风险规模和风险程度。

在风险规模方面,用统计中高风险机组占所有风险机组比重 V_t 的方式进行考核,指标公式如下式所示:

$$V_t = \frac{HRN_t}{RN_t} \quad (6)$$

式中: HRN_t 为 t 时刻中高风险机组数量; RN_t 为 t 时刻风险机组总数。

在风险程度方面,用风险机组占所有参与交易机组比重 D_t 的方式进行考核,指标公式如下:

$$D_t = \frac{RN_t}{N} \quad (7)$$

将市场风险规模和市场风险程度方面的两个指标标准化后,通过加权求和的方式,可得到监管机构的收益参数,将其正向化处理,得到最终的收益参数表达式 B_i :

$$B_i = \omega_1 V'_t + \omega_2 D'_t \quad (8)$$

式中: V'_t, D'_t 为 V_t, D_t 正向化后的指标; ω_1, ω_2 为指标权重。

1.2 下层模型

下层模型为优化出清层,采用带有机组行为风险防范的优化出清算法^[2,5],将风险机组与无风险机组的报价信息一同输入,统一出清。

考虑社会福利最大化的优化出清算法的目标公式如下式所示:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^K P_{t,c,k} \lambda'_{t,c,k} + \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^E \sum_{k=1}^K P_{t,e,k} \lambda'_{t,e,k} \quad (9)$$

式中: T 为交易时刻总数; C 为参与市场交易的常规火电机组总数; E 为参与市场交易的新能源机组总数; K 为机组申报容量段数; $P_{t,c,k}$ 为 t 时刻火电机组 c 在第 k 段申报容量段中标容量; $P_{t,e,k}$ 为 t 时刻新能源机组 e 在第 k 段申报容量段中标容量; $\lambda'_{t,c,k}$ 为 t 时刻火电机组 c 修改后的第 k 段容量报价; $\lambda'_{t,e,k}$ 为 t 时刻新能源机组 e 修改后的第 k 段容量报价。

优化出清算法的约束条件^[13-15]具体介绍如下:

1) 火电机组出力上下限约束:

$$U_{t,c} \cdot p_c^{\min} \leq \sum_{n=1}^N P_{t,c,n} \leq U_{t,c} \cdot p_c^{\max} \quad (10)$$

式中: p_c^{\min} 为机组 c 的最小技术出力; $U_{t,c}$ 为火电机组 c 在时段 t 的启停状态, $U_{t,c}=1$ 表示开机状态, $U_{t,c}=0$ 表示关机状态。

2) 新能源机组出力上下限约束:

$$0 \leq \sum_{n=1}^N P_{t,e,n} \leq P_{t,e}^{\max} \quad (11)$$

式中: $P_{t,e}^{\max}$ 为新能源机组 e 在时段 t 的最大出力。

3) 火电机组爬坡约束:

$$\sum_{n=1}^N P_{t,c,n} - \sum_{n=1}^N P_{t-1,c,n} \leq P_c^U U_{t,c} + p_c^{\min} [U_{t,c} - U_{t-1,c}] + p_c^{\max} [1 - U_{t,c}] \quad (12)$$

$$\sum_{n=1}^N P_{t-1,c,n} - \sum_{n=1}^N P_{t,c,n} \leq P_c^D U_{t-1,c} - p_c^{\min} [U_{t,c} - U_{t-1,c}] + p_c^{\max} [1 - U_{t-1,c}] \quad (13)$$

式中: P_c^U, P_c^D 分别为机组 c 的向上爬坡速率和向下爬坡速率。

4) 系统备用容量约束:

$$\sum_{c=1}^C U_{i,c} \cdot p_c^{\max} \geq G_t + R_t^{\text{up}} \quad (14)$$

式中: p_c^{\max} 为机组 c 的最大出力; R_t^{up} 为时段 t 的正备用需求; G_t 为时段 t 的系统总负荷。

5) 系统有功平衡约束:

$$\sum_{c=1}^C \sum_{n=1}^N P_{t,c,n} + \sum_{e=1}^E \sum_{n=1}^N P_{t,e,n} = D_t \quad (15)$$

6) 线路最大传输容量约束:

$$-P_{L,\max} \leq \sum_{c=1}^C \sum_{n=1}^N P_{t,c,n} G_{L-c} + \sum_{e=1}^E \sum_{n=1}^N P_{t,e,n} G_{L-e} - \sum_{b=1}^B D_{b,t} G_{L-b} \leq P_{L,\max} \quad (16)$$

式中: $P_{L,\max}$ 为线路 L 的最大有功传输容量; $D_{b,t}$ 为节点 b 在时段 t 的母线负荷值; G_{L-c} 为火电机组 c 所在节点对线路 L 的转移分布因子; G_{L-e} 为新能源机组 e 所在节点对线路 L 的转移分布因子; G_{L-b} 为节点 b 对线路 L 的转移分布因子; B 为节点总数。

7) 报价段中标容量约束:

$$P_{c,n}^{b,d} \leq P_{i,c,n} \leq P_{c,n}^{b,u} \quad (17)$$

$$P_{e,n}^{b,d} \leq P_{i,e,n} \leq P_{e,n}^{b,u} \quad (18)$$

式中: $P_{c,n}^{b,d}, P_{c,n}^{b,u}$ 分别为火电机组 c 在第 n 段申报容量的出力下限、出力上限; $P_{e,n}^{b,d}, P_{e,n}^{b,u}$ 分别为新能源机组 e 在第 n 段申报容量的出力下限、出力上限。

1.3 模型计算流程

“演化博弈—优化出清”模型采用由上至下的循环计算流程,如图2所示,具体如下:

1) 通过上层演化博弈稳定性分析,得出演化稳定均衡点 (x, y) 及参与方的 ESE,并由 x, y 值计算双方 4 个组合的策略数据。

2) 将策略数据分别输入至下层优化出清算法中与非风险机组统一出清,得到 4 个策略组合下的风险机组中标容量与出清电价。

3) 根据出清结果计算博弈参与方的收益参数,填入上层模型的演化博弈收益矩阵。

4) 进行新一阶段演化博弈稳定性分析,得到新一阶段的演化稳定均衡点 (x', y') 以及参与方各自的 ESS,再计算出所有策略组合数据,回到模型第 1) 步,完成一阶段迭代。当前、后阶段迭代得到的 ESE 数据相同时,模型达到收敛条件,输出最终的 ESE 数据。

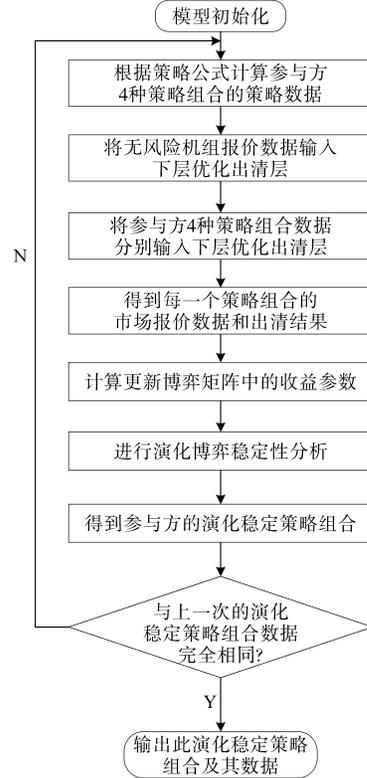


图2 模型迭代计算流程图

Fig.2 Flow chart of model iterative calculations

2 电力市场风险监管防范策略

2.1 监管方策略制定

基于机组行为风险识别机制^[5]和事中风险防范机制,制定对电力市场起到兜底作用的监管防范策略。监管机构识别出风险机组,在出清过程中提高其报价,减弱其竞争力造成中标容量减少,以此“处罚”风险机组。本文中监管方策略为调整报价修正力度,该策略的制定考虑主、客观两重因素。

2.1.1 市场客观因素

市场客观因素从风险机组收益方面和风险机组历史表现方面选定指标,风险机组收益方面的指标包括风险机组电价平均偏离程度和风险机组收入平均偏离程度,具体介绍如下:

1) 风险机组电价平均偏离程度^[4]。机组电价平均偏离程度定义为风险机组出清电价偏离同成本类型机组平均出清电价的程度的平均值,其计算公式为

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \left[\frac{1}{RN} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \left(\frac{H_{t,n} - \bar{O}_{t,n}}{\bar{O}_{t,n}} \right) \right] \quad (19)$$

式中: RN 为风险机组数量; \bar{U} 为机组电价平均偏离程度; $H_{t,n}$ 为风险机组 n 在 t 时刻的出清电价;

$\bar{O}_{t,n}$ 为与风险机组 n 同成本类型的正常机组的 t 时刻平均出清电价。

2) 风险机组收入平均偏离程度。机组收入平均偏离程度定义为风险机组发电收入偏离同成本类型机组平均发电收入的程度的平均值,其计算公式为

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \left(\frac{S_{t,n} - \bar{Z}_{t,n}}{\bar{Z}_{t,n}} \right) \right] \quad (20)$$

式中: \bar{I} 为机组收入平均偏离程度; $\bar{Z}_{t,n}$ 为与风险机组 n 同成本类型的正常机组的 t 时刻平均收入。

风险机组历史表现方面的指标包括历史异常等级和机组信用等级^[5]:①历史异常等级。通过统计机组在历史上被定义为风险机组的次数来判定其历史异常等级。②机组信用等级。通过统计市场相关部门对机组所在发电企业的综合信用情况来判定其信用等级。

2.1.2 监管机构主观处罚意愿因素

基于参与方有限理性假设,以监管方演化稳定策略的选择概率 $\{y, 1-y\}$ 的大小,衡量监管方主观意愿对报价修正力度的影响,概率 $y/(1-y)$ 越大,监管方选择强/弱处罚策略的意愿越高,报价修正力度越大,反之亦然^[16]。

结合市场客观因素与主观处罚意愿因素的监管机构策略公式如下式所示。

强处罚策略:

$$a_1 = a_0 \cdot (\mu_1 C_1 + \mu_2 C_2) \cdot S_1(y) \quad (21)$$

弱处罚策略:

$$a_2 = a_0 \cdot (\mu_1 C_1 + \mu_2 C_2) \cdot S_2(y) \quad (22)$$

式中: a_1, a_2 为报价修正力度,即机组行为风险评估函数中的调形系数,取值范围为 $[0.8, 1.2]$; a_0 为给定初始调形系数; C_1, C_2 分别为风险机组收益和历史表现方面对策略公式的修正因子; μ_1, μ_2 分别为 C_1, C_2 的权重; $S_1(y), S_2(y)$ 为监管方主观处罚意愿强度对策略公式的修正因子。

2.2 风险机组策略制定

风险机组的策略为在自身原有基准报价的基础上,调整竞价风险程度。作为有限理性群体,且与监管机构信息不对称,风险机组只能根据自身收益的变化,在考虑主观风险意愿因素下制定竞价策略,风险竞价策略公式如下式所示^[16]。

中高风险竞价策略:

$$\lambda_{t,n}^h = \lambda_{t,n} S_1(x) \quad (23)$$

低风险竞价策略:

$$\lambda_{t,n}^l = \lambda_{t,n} S_2(x) \quad (24)$$

式中: $S_1(x), S_2(x)$ 为风险偏好因子,表征主体的主观风险偏好程度; $\lambda_{t,n}$ 为风险机组的基准报价。根据文献[17-18],将风险报价的取值范围规定为基准风险报价上下浮动10%。

2.3 量化指标计算与规则设定

为计算参与方的量化策略数据,需要确定策略区分规则和指标数据模糊分类规则,并计算修正因子与风险因子。

2.3.1 参与方策略区分规则

当某风险机组报价 $\lambda_{t,n}$ 高于风险机组基准平均报价 $\bar{\lambda}_t$ 时,被判定为中高风险竞价策略,反之则被判定为低风险竞价策略。当报价修正力度 a 高于其基准值 a_0 ,被判定为强处罚策略,反之则被判定为弱处罚策略。参与方策略区分规则如表2所示。

表2 参与方策略分类表

博弈方	分类阈值	策略分类
市场主体	$\lambda_{t,n} \geq \bar{\lambda}_t$	中高风险竞价策略
	$\lambda_{t,n} < \bar{\lambda}_t$	低风险竞价策略
监管机构	$a \geq a_0$	强处罚
	$a < a_0$	弱处罚

2.3.2 相关指标数据模糊分类规则

1) 策略选择概率模糊分类。在概率范围区间 $[0, 1]$ 取上四分位数、中位数、下四分位数0.25, 0.5, 0.75, 根据概率 $\{x, y, 1-x, 1-y\}$ 的大小,将其分为4个等级,如表3所示。

表3 策略选择概率模糊分类表

指标名称	分类等级			
	小	较小	较大	大
概率 $x, y,$ $1-x, 1-y$	$[0, 0.25)$	$[0.25, 0.5)$	$[0.5, 0.75)$	$[0.75, 1]$

2) 风险机组收益指标数据模糊分类。两个指标分别根据市场交易出清数据选取上四分位数、中位数、下四分位数 j_1, j_2, j_3 和 g_1, g_2, g_3 ,具体模糊划分规则如表4所示。

表4 风险机组收益方面指标模糊分类表

指标名称	模糊分类等级			
	小	较小	较大	大
机组电价平均偏离程度	$[0, j_1]$	$(j_1, j_2]$	$(j_2, j_3]$	$(j_3, +\infty)$
机组收入平均偏离程度	$[0, g_1]$	$(g_1, g_2]$	$(g_2, g_3]$	$(g_3, +\infty)$

3) 风险机组历史表现指标数据模糊分类。

两个指标分别根据市场交易出清数据选取上四分位数、中位数、下四分位数,具体模糊划分规则如表5所示。

表5 风险机组历史表现方面指标模糊分类表

Tab.5 Fuzzy classification table of the historical performance indicators of the risk units

指标名称	模糊分类等级			
	好	较好	较差	差
历史异常等级	$[0, e_1]$	$(e_1, e_2]$	$(e_2, e_3]$	$(e_3, +\infty)$
信用等级	AAA, AA	A, BBB	BB, B, CCC	CC, C, D

2.3.3 因子隶属度函数

因子对博弈双方策略进一步修正。为计算监管方策略中的修正因子和风险机组策略中的风险因子,需将其与相应指标建立隶属度关系,修正因子的取值如表6~表9所示。其中,修正因子 C_1, C_2 计算方式如下:

$$C_1 = \alpha_1 e^{p_1 + p_2} + \beta_1 \quad (25)$$

$$C_2 = \frac{\alpha_2}{q_1 + q_2} + \beta_2 \quad (26)$$

式中: p_1, p_2, q_1, q_2 为隶属度函数自变量; $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 为待定系数。

当机组电价偏离程度分别为小、较小、较大、大时, p_1 可分别取1,2,3,4;当机组收入偏离程度分别为小、较小、较大、大时, p_2 可分别取1,2,3,4;当机组的历史异常等级分别为差、较差、较好、好时, q_1 分别取1,2,3,4;当信用等级分别为差、较差、较好、好时, q_2 分别取1,2,3,4。修正因子 C_1, C_2 的取值汇总如表6、表7所示。

表6 风险机组收益方面修正因子 C_1 取值汇总表

Tab.6 Summary table of correction factor C_1 for risk unit benefits

修正因子 C_1	机组收入偏离程度			
	小	较小	较大	大
小	0.993	0.995	1.000	1.015
较小	0.995	1.000	1.015	1.053
较大	1.000	1.015	1.053	1.159
大	1.015	1.053	1.159	1.445

表7 风险机组历史表现方面修正因子 C_2 取值汇总表

Tab.7 Summary table of the correction factor C_2 for the historical performance of the risk unit

修正因子 C_2	信用等级			
	差	较差	较好	好
差	1.445	1.223	1.112	1.045
历史异常等级	较差	1.223	1.112	1.045
较好	1.112	1.045	1.000	0.969
好	1.045	1.000	0.969	0.945

修正因子 $S_1(y)$ 和 $S_2(y)$ 取值范围由报价修正力度 a 和客观层面修正因子 C_1, C_2 的取值范围决定,取上四分位数、中位数、下四分位数,分别与概率 $y, 1-y$ 形成隶属度函数,如表8所示。

表8 监管方主观处罚意愿修正因子 $S_1(y)$ 和 $S_2(y)$ 取值汇总表

Tab.8 Summary of values of punishment correction factor $S_1(y)$ and $S_2(y)$

修正因子	概率 $y, 1-y$ 分类等级			
	小	较小	较大	大
$S_1(y)$	1.000	1.017	1.034	1.050
$S_2(y)$	1.000	0.944	0.887	0.830

风险偏好因子 $S_1(x)$ 和 $S_2(x)$ 取值范围根据风险机组报价上下限值确定,取其上四分位数、中位数、下四分位数,分别与概率 $x, 1-x$ 形成隶属度函数,如表9所示。

表9 风险机组竞价风险因子 $S_1(x)$ 和 $S_2(x)$ 取值

Tab.9 The values of risk factors $S_1(x)$ and $S_2(x)$ for the risk unit bidding

风险因子	概率 $x, 1-x$ 分类等级			
	小	较小	较大	大
$S_1(x)$	1.000	1.033	1.066	1.100
$S_2(x)$	1.000	0.966	0.933	0.900

3 算例分析

数据采用华东某地区电力市场运行数据,该地区共有54台机组,其中火电机组编号为1~25,新能源机组编号为26~54。通过风险识别机制^[5],识别出风险机组编号集合 $M=\{3, 4, 8, 26, 28\sim 31, 33, 35, 48\}$,其余机组始终为无风险机组。本算例为排除干扰因素,假定风险机组集合固定,风险竞价策略在每阶段交易中可以改变,而非风险机组保持原有竞价策略不变。同时每阶段迭代时的系统参数、机组参数、市场环境、负荷需求等背景数据均保持不变。

3.1 演化迭代运算

3.1.1 首阶段迭代运算及结果

为开启首阶段迭代,需进行初始化设定。设置策略选择概率 $\{x=0.7, y=0.6\}$,即 $(0.7, 0.6)$ 为演化稳定均衡点。将各个策略组合数据输入下层优化出清算法得到出清结果,可计算相应的收益参数,如表10所示。

得到演化博弈收益矩阵后,进入演化均衡稳定性分析阶段。

表10 首阶段迭代演化博弈收益矩阵

收益矩阵		监管机构	
		强处罚 B_1 ($y=0.6$)	弱处罚 B_2 ($1-y=0.4$)
风险 机组	中高风险竞价策略 A_1 ($x=0.7$)	(0.66, 0.63)	(0.75, 0.57)
	低风险竞价策略 A_2 ($1-x=0.3$)	(0.69, 0.66)	(0.80, 0.70)

3.1.1.1 建立复制动态系统

风险主体采取中高风险竞价策略 A_1 和低风险竞价策略 A_2 的期望支付为

$$E(A_1) = 0.66y + 0.75(1 - y) \quad (27)$$

$$E(A_2) = 0.69y + 0.80(1 - y) \quad (28)$$

则风险主体以 x 和 $1-x$ 的概率选取策略 A_1 和 A_2 的期望支付为

$$E(A) = xE(A_1) + (1 - x)E(A_2) \quad (29)$$

监管机构采取强处罚策略 B_1 和弱处罚策略 B_2 的期望支付为

$$E(B_1) = 0.63x + 0.66(1 - x) \quad (30)$$

$$E(B_2) = 0.57x + 0.70(1 - x) \quad (31)$$

则监管机构以 x 和 $1-x$ 的概率选取策略 A_1 和 A_2 的期望支付为

$$E(B) = yE(B_1) + (1 - y)E(B_2) \quad (32)$$

复制动态系统(RD方程)为

$$\frac{dx}{dt} = x(1 - x)(0.02y - 0.05) \quad (33)$$

$$\frac{dy}{dt} = y(1 - y)(0.1x - 0.44) \quad (34)$$

那么系统均衡点为 $E_1(0, 0)$, $E_2(0, 1)$, $E_3(1, 0)$, $E_4(1, 1)$, $E_5(4.4, 2.5)$, 其中 E_5 超出 $[0, 1] \times [0, 1]$ 空间域, 视为无效, 将其舍去。

3.1.1.2 李雅普诺夫演化博弈稳定性分析

RD方程的雅可比矩阵 J 为

$$J = \begin{bmatrix} (1 - 2x)(0.02y - 0.05) & 0.02x(1 - x) \\ 0.1y(1 - y) & (1 - 2y)(0.1x - 0.44) \end{bmatrix} \quad (35)$$

由RD方程雅可比矩阵 J 稳定性判据可知, 只有 $E_1(0, 0)$ 为演化稳定均衡点, $E_2(0, 1)$, $E_3(1, 0)$ 为鞍点, $E_4(1, 1)$ 为演化不稳定点, 系统均衡点性质及判据如表11所示。

首阶段长期演化稳定策略相轨迹如图3所示, 双方在经过较短时间的博弈交互即可达到渐进稳定均衡态, 其中监管机构明显快于风险主体。最终可知双方在经历首阶段多轮演化博弈后, 将组合4作为ESS, 如表12所示。

表11 首阶段演化博弈局部稳定性分析结果

均衡点	J 的行列式	J 的迹	均衡点性质
$E_1(0, 0)$	0.022	-0.49	演化稳定均衡点
$E_2(0, 1)$	-0.013	0.41	鞍点
$E_3(1, 0)$	-0.017	-0.29	鞍点
$E_4(1, 1)$	0.010	0.37	演化不稳定均衡点
$E_5(4.4, 2.5)$	/	/	/

表12 首阶段演化博弈稳定点及策略组合

演化稳定均衡点	策略组合	风险主体—监管机构
$E_1(0, 0)$	4	低风险竞价策略—弱处罚

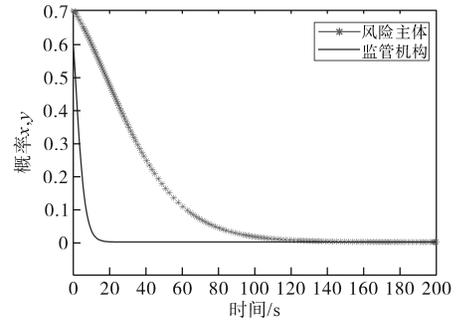


图3 首阶段演化稳定相轨迹图

Fig.3 First round evolution and stable phase trajectory diagram

后续阶段次迭代计算、演化博弈稳定性分析与此阶段原理相同, 本文不再赘述, 仅展示关键步骤及结果。

3.1.2 第二阶段迭代运算及结果

第二阶段迭代的演化博弈收益矩阵如表13所示。

表13 第二阶段迭代演化博弈收益矩阵

收益矩阵		监管机构	
		强处罚 B_1 ($y=0$)	弱处罚 B_2 ($1-y=1$)
风险 机组	中高风险竞价策略 A_1 ($x=0$)	(0.67, 0.64)	(0.76, 0.56)
	低风险竞价策略 A_2 ($1-x=1$)	(0.71, 0.68)	(0.81, 0.71)

复制动态系统(RD方程)为

$$\frac{dx}{dt} = x(1 - x)(0.01y - 0.05) \quad (36)$$

$$\frac{dy}{dt} = y(1 - y)(0.11x - 0.03) \quad (37)$$

经稳定性分析后可知, 只有 $E_1(0, 0)$ 为演化稳定均衡点, $E_2(0, 1)$, $E_4(1, 1)$ 为鞍点, $E_3(1, 0)$ 为演化不稳定点, 系统均衡点性质及判据如表14所示。

表 14 第二阶段演化博弈局部稳定性分析结果

Tab.14 Results of the local stability analysis of the second round evolution game

均衡点	J 的行列式	J 的迹	均衡点性质
$E_1(0,0)$	0.001 5	-0.08	演化稳定均衡点
$E_2(0,1)$	-0.001 2	-0.01	鞍点
$E_3(1,0)$	0.04	0.31	演化不稳定均衡点
$E_4(1,1)$	-0.032	-0.04	鞍点
$E_5(0.27,5)$	/	/	/

概率 x, y 以 1/10 为间隔, 即进行 121 轮演化博弈后, 第二阶段演化相轨迹如图 4 所示, 可见双方的策略选择达到稳定均衡态的时间总体仍然较短, 风险主体较快收敛于低风险策略, 而监管机构则先倾向于强处罚, 但在风险主体持续保持选择低风险行为的趋势下, 转为了弱处罚。双方在经历此阶段演化博弈后, 将采取的 ESS 是策略组合 4, 见表 12。

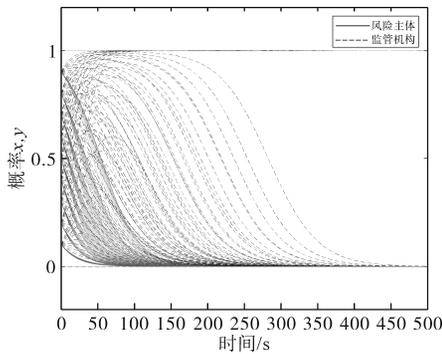


图 4 第二阶段演化稳定相轨迹图

Fig.4 Second round evolution and stable phase trajectory diagram

3.1.3 第三阶段迭代运算及结果

第三阶段迭代的演化博弈收益矩阵如表 15 所示。可见演化博弈收益矩阵不再变化, 参与方的演化稳定策略不再改变, 出清结果亦不发生变化, 模型退出迭代。

表 15 第三阶段迭代演化博弈收益矩阵

Tab.15 The third round of iterative evolution game payoff matrix

收益矩阵		监管机构	
		强处罚 B_1 ($y=0$)	弱处罚 B_2 ($1-y=1$)
风险 机组	中高风险竞价策略 A_1 ($x=0$)	(0.67, 0.64)	(0.76, 0.56)
	低风险竞价策略 A_2 ($1-x=1$)	(0.71, 0.68)	(0.81, 0.71)

综上, 经过三阶段迭代后, 得到了参与方收敛的演化稳定策略组合, 即风险主体选择低风险竞价策略, 监管机构选择弱处罚, 且双方策略数据亦不变。可见基于考虑收益与主体评价的量化风险监管防范策略在降低市场主体的行为风

险上具有明显的促进作用, 并且能够令市场状态收敛至较为理想的状态, 即市场风险低, 且行政干预弱, 利于电力经济的良性发展。

3.2 电力市场风险监管防范情况

根据模型收敛的 ESE 和初始策略组合下的出清结果计算电力市场运营情况指标, 对降低的风险进行定量研究。指标包括风险机组中标容量、市场平均出清电价和系统购电成本。市场运营指标在两种情况下的变化如图 5、图 6 所示。

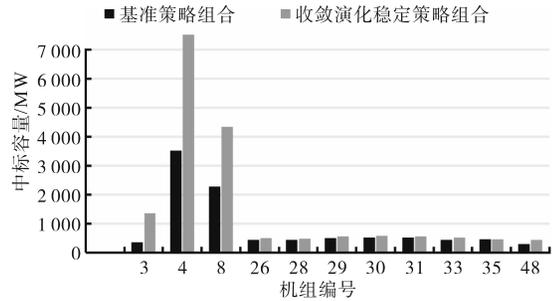


图 5 风险机组中标容量变化综合对比

Fig.5 Comprehensive comparison of the bid-winning capacity change of the risk unit

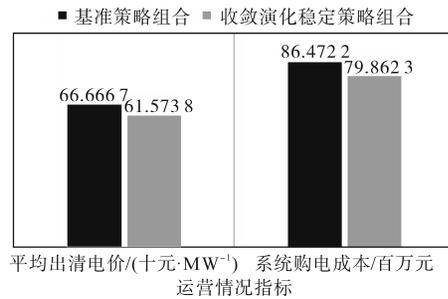


图 6 电力市场交易情况综合对比

Fig.6 Comprehensive comparison of electricity market transactions

由于机组 {3, 4, 8} 为火电机组, 报价修改敏感度高, 且由于申报电量大, 因此不同竞价风险程度对其中标容量影响远大于对新能源机组中标容量影响。由于每个风险机组基准竞价策略的风险程度皆高于迭代收敛的演化稳定策略的风险程度, 造成报价修正力度的加大, 故基准策略组合下的中标容量低于迭代收敛的演化稳定策略组合下的中标容量。基于宏观视角, 描述市场交易情况的平均出清电价与系统购电成本指标反映了市场整体的波动情况, 变化率相对较小, 但给市场带来的实质收益或损失则非常大。与选择基准策略组合相比, 当参与方选择收敛的演化稳定策略组合时, 平均出清电价差达到 -50.93 元, 变化率为 -7.64%, 系统购电成本差达到 -6 609 860 元, 变化率为 -7.63%, 可见社会福利显著提升。进一步佐证了当两方分别采取低风

险竞价和弱处罚的策略组合较有利于电力市场交易风险的降低以及社会福利的提高。

4 结论

本文以提取指标并制定策略公式的方式,对风险监管防范策略进行了量化研究,并构建“演化博弈—优化出清”模型加以验证,旨在为电力市场监管与风险防范提供参考。基于仿真结果得出如下结论:

1)在风险监管防范策略下,风险机组无法通过违规交易行为达到其攫取超额利润的目的,相反,风险机组的中标容量会大幅下降。与监管机构不采用监管防范策略相比,火电风险机组中标容量平均下降率达到70.95%,新能源风险机组中标容量下降率达到44.65%。正常机组因风险机组中标容量下降而受惠,火电机组和新能源机组的中标容量皆上涨,其中火电机组中标容量平均上涨率为43.21%,新能源机组中标容量平均上涨率为4.67%。

2)监管防范策略可根据市场主体每次的竞价风险程度和市场出清的实际动态调整,对风险机组起到威慑与处罚作用。故在双方持续博弈交互过程中,风险机组于不断的试探下最后会降低自身竞价风险程度,以此在每次交易出清时保证自身的中标容量。从市场运营的角度看,当电力交易中心采用此风险监管防范策略后,市场风险降低,社会福利显著升高了6 609 860元。

本文在常规市场环境下进行了风险监管防范策略研究,若面对极端情况,例如发电燃料价格巨幅波动、新能源发电条件恶劣时,对风险机组的监管防范策略尚需进一步研究完善。

参考文献

- [1] 唐成鹏,张粒子,刘方,等.基于多智能体强化学习的电力现货市场定价机制研究(一):不同定价机制下发电商报价双层优化模型[J].中国电机工程学报,2021,41(2):536-552.
TANG Chengpeng, ZHANG Lizi, LIU Fang, et al. Research on pricing mechanism of electricity spot market based on multi-agent reinforcement learning (part I): bi-level optimization model for generators under different pricing mechanisms[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 536-552.
- [2] 谢敬东,王诗瑶,周雪梅,等.基于三方演化博弈的电力市场监管防范策略[J].科学技术与工程,2021,21(35):15072-15083.
XIE Jingdong, WANG Shiyao, ZHOU Xuemei, et al. Electricity market supervision strategy based on tripartite game[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 15072-15083.
- [3] 焦建玲,陈洁,李兰兰,等.碳减排奖惩机制下地方政府和企业行为演化博弈分析[J].中国管理科学,2017,25(10):140-150.
JIAO Jianling, CHEN Jie, LI Lanlan, et al. A study of local governments' and enterprises' actions in the carbon emission mechanism of subsidy or punishment based on the evolutionary game[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(10): 140-150.
- [4] 陈青,杨骏伟,黄远明,等.国外电力市场中市场力监测与缓解机制综述[J].南方电网技术,2018,12(12):9-15,63.
CHEN Qing, YANG Junwei, HUANG Yuanming, et al. Review on market power monitoring and mitigation mechanisms in foreign electricity markets[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(12): 9-15, 63.
- [5] 谢敬东,鲁思薇,黄溪滢,等.适应新型电力系统的电力市场力风险特征分析及其识别技术研究[J/OL].电测与仪表:(2022-05-23)[2022-10-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220523.1011.002.html>.
XIE Jingdong, LU Siwei, HUANG Xiying, et al. Analysis on risk characteristics of power market force adapted to new power system[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: (2022-05-23) [2022-10-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220523.1011.002.html>.
- [6] 谢敬东,黄溪滢,卢浩哲,等.电力市场中市场力风险防范方法的研究[J].价格理论与实践,2020(12):49-53,162.
XIE Jingdong, HUANG Xiying, LU Haozhe, et al. Research on the risk prevention method of market force in electricity market[J]. Price: Theory & Practice, 2020(12): 49-53, 162.
- [7] 刘敦楠,张潜,李霄彤,等.基于云模型与模糊Petri网的电力市场潜在危害行为识别[J].电力系统自动化,2019,43(2):25-33.
LIU Dunnan, ZHANG Qian, LI Xiaotong, et al. Identification of potential harmful behaviors in electricity market based on cloud model and fuzzy petri net[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 25-33.
- [8] 谢敬东,陆池鑫,鲁思薇,等.基于序关系-熵权法的电力市场风险评估[J].中国电力,2021,54(6):71-78.
XIE Jingdong, LU Chixin, LU Siwei, et al. Electricity market risk evaluation based on order relation-entropy weight method[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 71-78.
- [9] 张云雷,段光,俞静,等.基于KPCA-MEE的电力市场售电公司信用评价研究[J].中国电力,2018,51(7):128-135.
ZHANG Yunlei, DUAN Guang, YU Jing, et al. Study on credit evaluation of power supply company in power market based on KPCA-MEE[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 128-135.
- [10] 孙谦,杨悦勇,田琳,等.广东电力现货市场主体信用额度评估实践与理论探索[J].价格理论与实践,2020(5):102-105,175.
SUN Qian, YANG Yueyong, TIAN Lin, et al. Practice and theoretical exploration of credit limit assessment of participants in

guangdong power spot market[J]. Price: Theory & Practice, 2020 (5): 102-105, 175.

[11] 冯恒,杨争林,郑亚先,等. 发电商多输入决策因子竞价的智能代理模拟方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 72-77. FENG Heng, YANG Zhenglin, ZHENG Yaxian, et al. Intelligent agent based bidding simulation method for multi-input decision factors of power suppliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 72-77.

[12] 国家能源局.《2021年能源监管工作要点》(国能发监管[2021]2号)[EB/OL]. (2021-01-18) [2022-10-20]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-01/18/c_139713326.htm. National Energy Administration.《2021 nian neng yuan jian guan gong zuo yao dian》(guo neng fa jian guan)[2021]2 hao)[EB/OL]. (2021-01-18) [2022-10-20]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-01/18/c_139713326.htm.

[13] 钟儒鸿,程春田,廖胜利,等. 耦合复杂水力联系的跨区交易现货市场出清模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 164-173. ZHONG Ruhong, CHENG Chuntian, LIAO Shengli, et al. Clearing model for cross-regional transaction spot market coupled with complex hydraulic connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 164-173.

[14] 禰培正,周保荣,黎小林,等. 清洁能源消纳政策下含水电的现货市场出清模型[J]. 广东电力, 2020, 33(8): 120-129. XUAN Peizheng, ZHOU Baorong, LI Xiaolin, et al. Clearing model of spot market with hydropower under clean energy consumption policy[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 120-129.

[15] 张馨瑜,陈启鑫,葛睿,等. 考虑灵活块交易的电力现货市场出清模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 35-41. ZHANG Xinyu, CHEN Qixin, GE Rui, et al. Clearing model of electricity spot market considering flexible block orders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 35-41.

[16] 曾次玲. 电力市场中发电企业的报价策略及相关问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. ZENG Ciling. Research on power supplier's bidding strategies and its related issues in electricity market[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

[17] 国家发展改革委. 关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知(发改价格[2021]1439号)[EB/OL]. (2021-10-11) [2022-10-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/12/content_5642159.htm. National Development and Reform Commission. Guan yu jin yi bu shen hua ran mei fa dian shang wang dian jia shi chang hua gai ge de tong zhi (fa gai jia ge [2021] 1439 hao)[EB/OL]. (2021-10-11) [2022-10-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/12/content_5642159.htm.

[18] 国家发展改革委. 关于2021年新能源上网电价政策有关事项的通知(发改价格[2021]833号)[EB/OL]. (2021-06-07) [2022-10-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/11/content_5617297.htm. National Development and Reform Commission. Guan yu 2021 nian xin neng yuan shang wang dian jia zheng ce you guan shi xiang de tong zhi (fa gai jia ge [2021] 833 hao)[EB/OL]. (2021-06-07) [2022-10-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/11/content_5617297.htm.

收稿日期: 2022-10-20

修改稿日期: 2022-11-22

(上接第60页)

[3] 张立新,王旭东,李鑫,等. 基于半桥 LLC 谐振式通信电源的设计[J]. 电气传动, 2016, 46(5): 34-37. ZHANG Lixin, WANG Xudong, LI Xin, et al. Design of half-bridge LLC resonant type communication type power supply[J]. Electric Drive, 2016, 46(5): 34-37.

[4] JANG J, PIDAPARTHY S, CHOI B, et al. Current mode control for LLC series resonant DC-to-DC converters[J]. Energies, 2015, 8(6): 6098-6113.

[5] DONG H, XIE X, MAO F, et al. A novel primary-side regulation control scheme for CCM and DCM LLC LED driver based on "magnetizing current cancellation method"[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12223-12237.

[6] HU Z, LIU Y, SEN P C. Bang-Bang charge control for LLC resonant converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 1093-1108.

[7] MCDONALD B, LI Y. A novel LLC resonant controller with best-in-class transient performance and low standby power consumption[C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, 2018: 489-493.

[8] Texas Instruments. Hybrid hysteretic mode wide VIN LLC resonant controller enabling ultra-low standby power, document Ucc256301[Z]. 2017.

[9] FENG W, LEE F C, MATTAVELLI P. Simplified optimal trajectory control (SOTC) for LLC resonant converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(5): 2415-2426.

[10] FEI C, LEE F C, LI Q. Multi-step simplified optimal trajectory control (SOTC) for fast transient response of high frequency LLC converters[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, 2015: 2064-2071.

[11] NABIH A, AHMED M H, LI Q, et al. Transient control and soft start-up for 1 MHz LLC converter with wide input voltage range using simplified optimal trajectory control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 9(1): 24-37.

[12] 陈桂鹏,邓焰,董洁,等. 基于移相全桥的串联升压式部分功率 DC-DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 128-135. CHEN Guipeng, DENG Yan, DONG Jie, et al. Series-connected step-up partial power processing DC-DC topology based on phase-shifted full-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 128-135.

收稿日期: 2022-12-01

修改稿日期: 2023-01-12