

考虑静态安全约束的 金融输电权拍卖交流最优潮流模型

汤奕, 许卉, 万秋兰

(东南大学 电气工程学院, 江苏省 南京市 210096)

Implementation of AC Optimal Power Flow Based Financial Transmission Right Auction Model Under Static Security Constraints

TANG Yi, XU Hui, WAN Qiu-lan

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: As a financial instrument for hedging risk, financial transmission right (FTR) has been put into application in some electricity markets. Considering the contingency constraints, this paper proposes a new FTR auction model based on AC optimal power flow (OPF) in which the $n-1$ static security constraints are included, and the AC-OPF based on Monte Carlo simulation is applied to solve the proposed model. Corresponding contingency set is chosen by probabilistic algorithm, and the optimization solution of expectation value and frequency distribution of clearing results is obtained. The proposed method is verified by IEEE 5-bus system and IEEE 30-bus system respectively, calculation results show that the proposed model and method are reasonable and feasible.

KEY WORDS: electricity market; financial transmission right (FTR); AC optimal power flow; Monte Carlo simulation

摘要: 金融输电权(financial transmission right, FTR)作为一种规避阻塞风险的金融工具,已在电力市场中得到了实际应用。提出了一种考虑预想事故状态的 FTR 拍卖交流最优潮流模型,通过基于蒙特卡罗模拟的交流最优潮流来求解该模型,即将 $n-1$ 静态安全约束纳入优化模型,应用概率性算法来选取相应的预想事故集,优化求解得到出清结果的期望值及频数分布图。分别用 5 节点和 IEEE-30 节点系统进行了验证,结果表明所提模型方法是合理可行的。

关键词: 电力市场; 金融输电权; 交流最优潮流; 蒙特卡罗模拟

0 引言

金融输电权(financial transmission right, FTR)作为一种金融性的风险规避工具,并不改变实际调

度和运行,而是从一个全新的角度给出缓解阻塞问题的途径。Hogan William W 于 1992 年在合同路径模型基础上提出了 contract network 模型和输电容量权的概念^[1],其主要观点是采用输电容量权来分摊阻塞成本,同时为市场参与者提供一个规避价格风险的工具;文献[2-3]对 PJM 的 FTR 市场的实际运营进行了系统介绍,并对其运营效果进行了评述;文献[4-5]分别介绍了基于潮流的输电权(flowgate right, FGR)和 FTR 的原理和特点,并进行了比较,指出了两者实现机制的差异及不同的市场适用范围;文献[6]明确提出了我国电力市场交易类型中包括输电权交易。为规避输电阻塞风险,在满足规定条件时我国将组织开展输电权交易,因此有必要对 FTR 拍卖的优化过程进行深入研究。

鉴于交流模型的复杂性,目前研究大多基于直流潮流模型,而对于交流模型下输电权交易的实施研究较少^[7-8]。已投入实际运营的 FTR 拍卖市场中,只有 New York ISO 采用等值交流网络来进行相应的拍卖出清计算^[7],用泰勒级数线性表达原有的非线性约束条件,迭代求解,但求解过程中需要较好的起始点。文献[9-10]建立了电能与输电权交易统一拍卖的交流最优潮流模型,但出清电价物理含义不够明确,实际运营时市场设计的复杂性增大;文献[11]介绍了双方叫价方式下的输电权容量拍卖模型,该模型考虑了某线路拍卖的 FGR 对其他线路潮流的影响。该文还从实际出发,对未来华东电力市场中 FTR 的交易品种、拍卖出清模型和利益分配方式进行了设计,对 FTR 在中国的实际应用进行了有益的探索。

对于存在耦合的大型互联电力系统,虽然直流

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217905)。

Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China(2004CB217905).

潮流具有计算简化且快速的优点,但其结果也必将是粗略的。在计算准确度直接影响经济利益的电力市场背景下,进行交流模型下的交易研究显然是必不可少的。虽然采用交流潮流增加了优化计算的复杂性,但能更真实遵循原电力网络的物理特性,包括网损和电压限制等一系列问题,交易结果更能真实发挥 FTR 所具有的规避阻塞费用及风险的作用,且满足补偿费用的充足性^[12]。

根据 FTR 的初始定义,在同时进行可行性计算时, FTR 拍卖的出清结果不但要满足正常运行状态下一系列约束条件(包括节点电压约束、线路热稳定约束等),还须满足 $n-1$ 静态安全约束,即当系统出现 $n-1$ 故障时,仍能保证补偿费用的充足性^[2]。然而目前已有文献基本只考虑系统正常运行状态下的 FTR 拍卖,未能全面考虑静态安全约束。

本文充分考虑预想事故状态,提出考虑 $n-1$ 静态安全约束的 FTR 拍卖交流最优潮流模型,应用蒙特卡罗模拟和概率性算法,选取相应的预想事故集,优化求解得到出清结果的期望值及频数分布图。

1 FTR 拍卖交流模型

1.1 网损表示部分

采用 AC 潮流求解要考虑有功网损。根据 FTR 的初始定义,购买 FTR 主要为了规避阻塞费用或线路使用费用,暂不考虑网损费用,相应补偿费用中不包括网损费用。因此在拍卖过程中 ISO 无偿提供相应的不平衡 FTR 量以保证交流算法的可解性,即在目标函数中体现为零报价。

本文采用边际网损系数法^[13]表示有功网损部分。该方法也是目前国外大多数电力市场的网损表示方法。边际网损系数法是一种对各节点上负荷或发电机进行网损分摊的灵敏度方法。节点注入功率的单位变化引起全网网损变化量的大小,称边际网损系数(marginal loss coefficients)。

1) 节点边际网损系数。

对于第 i 个节点,其有功边际网损系数 $k_{P_i} = \partial L / \partial P_i$ 。其中 P_i 表示节点 i 的注入有功功率, L 表示全网的有功总耗。系数与系统节点注入功率、Jacobi 相关,由电能量市场的电能调度结果确定^[13]。

2) FTR 交易边际网损系数。

FTR 交易边际网损系数是指在一定系统运行方式下,单位交易引起的系统网损增量,其公式为

$$\partial L / \partial F_i = (\partial L / \partial \mathbf{P})^\top \mathbf{M}_i, \quad i \in B \cup O \cup B_{\text{ases}} \quad (1)$$

式(1)表示第 i 个 FTR 投标的单位交易引起的系统网损增量。 $[\partial L / \partial \mathbf{P}]_{n \times 1}$ 为节点边际网损系数列向量。每一个买标的 FTR 可以表示为带有 2 个元素的向量: 1 表示注入节点处, -1 表示送达节点处,而卖标的 FTR 则表示恰好相反。对于有多个注入节点和送达节点的 FTR 投标数据,同理可表示为相应的比例系数。考虑以前分配仍有效的 FTR 集合 B_{ases} , 则可得 \mathbf{M} 为 $n \times (B + O + B_{\text{ases}})$ 维的 FTR 分配矩阵, n 为系统节点数。

1.2 FTR 拍卖交流模型

本文根据 PJM 输电权月度拍卖市场的运营规则^[2], 考虑拍卖市场中的 FTR 为平衡型的责任型 FTR。优化目标为拍卖收益最大化, 目标函数为

$$\max \left(\sum_{i \in B} \rho_i F_i - \sum_{j \in O} \rho_j F_j \right) \quad (2)$$

式中: ρ_i 为第 i 个买标方 FTR 的报价; F_i 为第 i 个买标方中标的容量数; B 为所有买标方的集合; ρ_j 为第 j 个卖标方 FTR 的报价, F_j 为第 j 个卖标方中标的容量数; O 为所有卖标方的集合。

约束条件包括:

1) FTR 投标的容量数限制。

$$\begin{cases} 0 \leq F_i \leq F_{i\max} \\ 0 \leq F_j \leq F_{j\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $F_{i\max}$ 、 $F_{j\max}$ 分别为买标和卖标所能投标的最大容量数。

2) 节点功率平衡约束。

$$\mathbf{M}_i \mathbf{F} + m_i \boldsymbol{\alpha} \cdot (\partial L / \partial \mathbf{F}) \cdot \mathbf{F} -$$

$$V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$Q_i - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

式中: $\mathbf{F}_{(B+O+B_{\text{ases}}) \times 1}$ 为出清容量数列向量; \mathbf{m} 为对应于 \mathbf{M} 的网损分配矩阵; 1 表示注入节点; 0 表示送达节点,即系统的有功网损表现为各 FTR 投标的注入节点注入相应网损分量; $\boldsymbol{\alpha}_{(B+O+B_{\text{ases}}) \times 1}$ 为相应的网损比例因子列向量,在拍卖模型中作为优化变量,通过注入可变的网损找到最优平衡点,取值范围为[0,1]。集合 B_{ases} 不参与优化,设其值恒为 1。 $[\partial L / \partial \mathbf{F}]_{(B+O+B_{\text{ases}}) \times 1}$ 为 FTR 交易边际网损系数列向量,由电能量市场的电能调度结果确定。 $m_i \boldsymbol{\alpha} \cdot (\partial L / \partial \mathbf{F}) \cdot \mathbf{F}$ 即为 ISO 无偿提供相应的不平衡 FTR 量,保证交流算法的可解性,其中“ \cdot ”表示点乘,

即向量中各对应元素相乘。

式(5)表示 FTR 注入节点等效的无功功率平衡, Q_i 为等效的无功出力, 提供相应的无功线损。

3) 线路传输容量约束。

$$P_{ij,\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij,\max}, \quad i, j=1,2,\dots,n, i \neq j \quad (6)$$

式中: P_{ij} 为线路 ij 的传输有功功率; $P_{ij,\max}$ 、 $P_{ij,\min}$ 为线路 ij 的有功功率上、下限值。

4) 电压约束。

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max}, \quad i, j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式中: V_i 为节点 i 的电压; $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$ 为节点 i 的电压上、下限值。

FTR 的拍卖过程中, 以上的约束条件实现了物理性的约束到经济性约束的转换, 即同时进行可行性验证, 保证补偿费用的足够性。

2 $n-1$ 静态安全约束下 FTR 拍卖的交流最优潮流实现

2.1 优化算法简介

依照 FTR 的初始定义, 本文在优化模型中考虑 $n-1$ 静态安全约束。对于 $n-1$ 预想事故的优化算法普遍有 2 种解法: 一种是确定性算法, 即算出所有可能故障情况下的出清结果, 取相应的最小值作为发布结果; 另一种是概率性算法, 即通过概率论和数理统计的方法对出清结果进行处理, 得到相应的期望值或概率密度曲线作为发布结果。

本文提出基于蒙特卡罗模拟的交流最优潮流 (AC-OPF) 求解该模型, 将 $n-1$ 静态安全约束直接纳入优化模型, 即应用概率性算法, 充分考虑电力网络中数目庞大的不确定因素, 选取相应的预想事故集, 优化求解得到出清结果的期望值及频数分布图。

2.2 蒙特卡罗模拟的应用

针对 FTR 的金融特性, 本文只考虑 $n-1$ 线路故障, 不考虑发电机故障。因为若发电机故障, FTR 投标和实际的物理运行一定程度上相隔离, 仍可以进行相应数量的投标。应用蒙特卡罗模拟法^[14]对输电线路故障进行随机抽样, 其服从均匀分布。系统元件的数学模型可具体表示为^[15]

$$\xi_{bi} = \begin{cases} 1, & x \geq F(b_i), \text{ 输电线 } i \text{ 处于运行状态} \\ 0, & x < F(b_i), \text{ 输电线 } i \text{ 处于故障状态} \end{cases} \quad (8)$$

其中: x 是服从均匀分布 $U(0,1)$ 的随机数; $F(b_i)$ 为线路故障率; b_i 为第 i 条支路。

为保证每次系统抽样状态只有一条线路故障, 本文引入累积概率的概念, 对线路故障的概率依次

累加, 得到一组唯一确定系统状态的概率区间组。累积概率的计算顺序可以随意, 因为故障类型的顺序固然不同, 但相应发生故障的概率区间恒定, 不发生变化。因此每次抽样过程中随机产生一个 $(0,1)$ 区间上的均匀分布的随机数, 依据相应的概率区间组来判断系统是否发生单条线路故障。

对 $n-1$ 静态安全校验的情况, 可采用模态分析的故障排序方法^[16]进行故障排序, 选取对相应出清结果影响较大且发生概率相对较大的线路, 转化为条件概率, 去除其他多数非主要支路, 提高计算速度。

2.3 FTR 投标出清结果的期望值

假设系统故障的发生具有独立性, 根据概率论可以得到各 FTR 投标出清结果的期望值为

$$E(F_j) = \sum_i \eta_{ri} F_{i,j}, \quad i \in \Omega_{\text{all}}, j \in B \cup O \quad (9)$$

式中: η_{ri} 是各个故障发生的相对概率; $F_{i,j}$ 是状态 i 对应的第 j 个 FTR 的出清结果; Ω_{all} 为系统所有故障的集合。节点电价的期望值可以类似推出。

第 i 种运行状态的相对概率为

$$\eta_{ri} = \eta_i / \sum_j \eta_j, \quad i, j \in \Omega_{\text{all}} \quad (10)$$

其中: η_i 为第 i 种故障发生的绝对概率; $\sum_j \eta_j$ 为所选故障集各个故障发生绝对概率的累加。

2.4 FTR 交流最优潮流实现

图 1 为 $n-1$ 静态安全约束下 FTR 拍卖的交流最

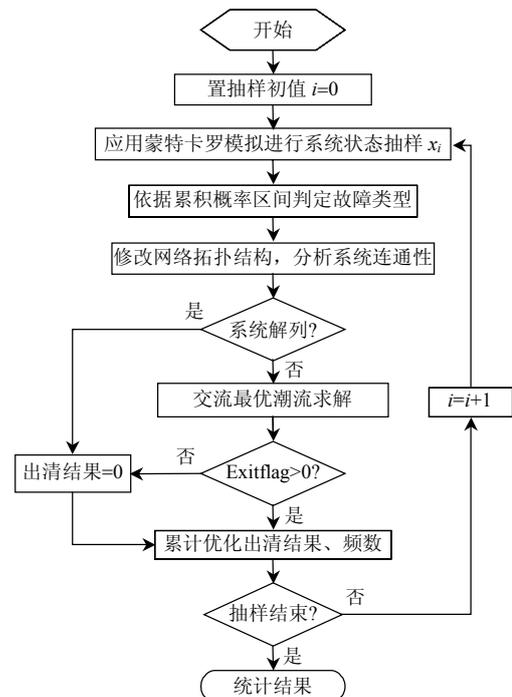


图 1 FTR 拍卖的交流最优潮流实现流程
Fig. 1 Flow chart of AC optimal power flow based on FTR auction

优潮流实现流程图。判断“系统解列”是指判断开断后会造系统解列或形成“孤岛”的线路。当优化结果显示标识符 $Exitflag \leq 0$ 时,表示在相应的可行域内找不到可行解,约束条件过于苛刻,需要调整基础数据,置出清结果为 0。

3 算例分析

3.1 5 节点系统

以图 2 所示 5 节点系统为例来定量分析 $n-1$ 静态安全约束下 FTR 拍卖过程的 AC-OPF 实现。具体线路参数、线路热稳定约束见文献[17]。FTR 月度拍卖市场的具体投标数据见文献[18],选取 Case1 为投标算例。 $\partial L/\partial F$ 即 FTR 交易边际网损系数依据电能市场的电能调度结果设定经验值为 0.05。采用标么值进行计算,所有节点的电压上、下限分别取 1.05 和 0.95,容量基值为 100 MW,DC、AC 及 $n-1$ 预想故障下的确定性出清结果如表 1 所示。

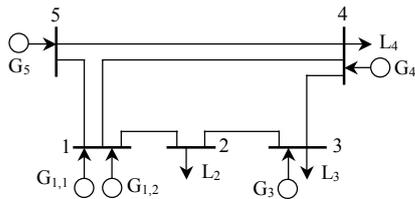


图 2 5 节点系统
Fig. 2 5-bus system

考虑 $n-1$ 静态安全约束时,针对 5 节点系统,表 2 列出了系统无故障及所有线路故障情况下的相对概率、累计概率区间分布。在应用蒙特卡罗模拟进行系统状态抽样时,依据上文流程图可知,每一次抽样循环产生一个(0,1)区间上的均匀分布的随机数,根据表 2 确定系统运行状态,而后进行优化计算。设抽样次数 $N=1\ 000$,根据式(10)和相应状态的频数统计可得各投标量的出清量期望值分别为 0.361 72、0.841 73、0.811 18、0.071 977、0.701 68。

1) 如表 1 所示,根据优化出清的网损比例因子可知,正常运行状态下基于 AC-OPF 的 FTR 拍卖过程中 ISO 提供的不平衡 FTR 量即有功网损为 16.08 MW。与 DC-OPF 相比,线路 1-2 影子价格 $\lambda=17.085$ (DC-OPF 计算时, $\lambda=17.854$),且 Offer1 有 12.424 MW 的容量中标,说明部分中标的卖标形成反向潮流一定程度上缓解了阻塞情况。与 DC-OPF 相比较,由于不平衡 FTR 分量的无偿提供,应用 AC-OPF 时拍卖所得费用 $f(x)$ 有所减少,表明该情况下卖标出清相对总数增加。由于 AC 模型综合考虑了网损和电压限制,更为准确地反映了原物理网络的物理特性,因此更具参考价值。

2) 线路 1-5 故障时,应用 AC-OPF 在相应的可行域内找不到可行解,约束条件过于苛刻,ISO 有必要在拍卖市场中调整基础数据,因此置出清结果为 0。

表 1 5 节点系统中 FTR 拍卖出清结果

Tab. 1 Clearing results of FTR auction in 5-bus system

故障线路	Offer1	Bid 1	Bid 2	Bid 3	Bid 4	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	$f(x)$	网损
DC	0	1.0659	1	0	1	—	—	—	—	—	30.791 0	0
无	0.124 2	1.1	1	0	1	1	0.991 5	0.999 7	0.461 1	1	29.709 0	0.160 8
1-2	1.1	0.078 6	0.276 4	0.096 4	0.095 5	1	1	1	1	1	-7.595 7	0.082 3
1-4	0.414 0	0.985 7	0.988 2	0	0.277 2	1	1	1	0.676 5	1	20.381 0	0.133 3
AC	1-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	0.103 6	0.726 7	0.809 1	1.1	0.751 5	1	1	1	1	1	30.495 0	0.174 5
3-4	1.1	0.805 5	0.776 3	0	1	1	0.135 8	0.167 9	0.653 0	0.585 7	11.781 0	0.096 3
4-5	1.1	0.402 6	0.504 6	0	0	1	0.148 0	0.133 5	0.421 9	0.474 5	-2.313 1	0.061 3

表 2 5 节点系统中各预想事故集概率分布

Tab. 2 Probability distribution of contingency set in 5-bus system

故障线路	1-2	1-4	1-5	2-3	3-4	4-5	无故障
相对概率	0.063 6	0.084 6	0.081 4	0.069 4	0.076 7	0.089 3	0.535 0
累计概率区间	[0, 0.063 6]	[0.063 6, 0.148 2]	[0.148 2, 0.229 6]	[0.229 6, 0.299 0]	[0.299 0, 0.375 7]	[0.375 7, 0.465 0]	[0.465 0, 1]

3) 由出清结果的期望值可知,本文提出的方法全面考虑了 $n-1$ 静态安全约束及相应概率,出清结果更能保证补偿费用的充足性。且在 FTR 拍卖市场发布过程中,发布相应的频数分布图,可供投标者进一步了解系统各种可能的 $n-1$ 运行状态,作为下一轮投标参考。图 3 为各种 $n-1$ 预想事故状态下 Bid 2 不同出清结果的频数分布。

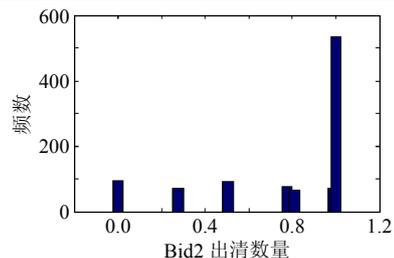


图 3 Bid 2 频数分布

Fig. 3 Frequency distribution plot of Bid 2

3.2 IEEE-30 节点系统

以 IEEE-30 节点系统为例来分析 $n-1$ 静态安全约束下 FTR 拍卖过程的 AC-OPF 实现,其结构如图 4 所示。具体线路参数、线路热稳定约束及 FTR 买标、卖标和基础数据见文献[19]。 $\partial L/\partial F$ 设定基础数据经验值为 0.05, 参与投标的 FTR 经验值为 0.1。

表 3 列出了 IEEE-30 节点系统在 $n-1$ 准则下经模态分析方法进行故障排序后选取的对出清结果影响较大且发生概率相对较大的 10 条故障线路,共 11 种运行状态的确定性出清结果,相应优化出清的网损比例因子如表 4 所示。

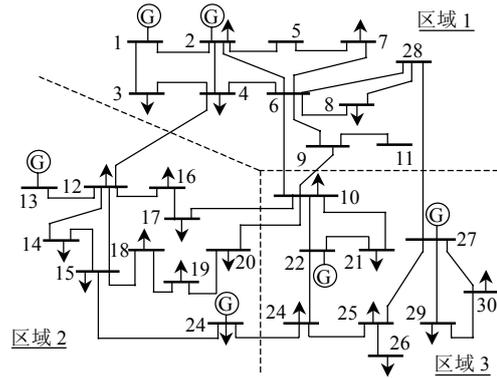


图 4 IEEE-30 节点系统
Fig. 4 IEEE 30-bus system

表 3 IEEE-30 节点系统中 FTR 拍卖出清结果

Tab. 3 Clearing results of FTR auction in IEEE-30 nodes system

故障线路	Bid1	Bid 2	Bid 3	Bid 4	Bid 5	Offer1	Offer 2	
DC	0.039 5	0.213 9	1.2	0	0.224 1	0.250 4	0	
无	0	0.214 8	1.2	0.032 8	0.201 7	0.131 3	0	
6-10	0.180 9	0.173 7	1.2	0	0.090 0	0.362 2	0	
28-27	0	0.214 8	0.885 6	0.393 0	0.234 3	0.025 9	0	
9-10	0	0	0	0	0	0	0	
4-12	0.170 0	0.176 2	1.2	0.217 4	0.234 7	0.621 0	0	
AC	10-17	0	0.214 8	1.2	0.108 9	0.202 2	0.146 6	0
23-24	0.396 5	0.123 7	0.725 4	0	0.113 5	0.271 1	0	
12-14	0	0.214 8	1.2	0.050 0	0.199 0	0.136 3	0	
1-2	0.371 4	0.125 9	1.2	0.555 3	0	0.350 0	0	
10-21	0	0.214 8	0.956 3	0.310 1	0.171 6	0.052 3	0	
4-6	0	0.214 8	1.2	0	0.150 7	0.182 0	0	

表 4 网损比例因子

Tab. 4 Loss scaling factor

故障线路	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
无	0.152 8	1	0	0	1	1	0.453 2
6-10	0	1	0	0.381 4	1	0.788 9	0.479 4
28-27	0.512 6	1	0	0.335 9	1	1	0.953 5
9-10	0	0	0	0	0	0	0
4-12	0	1	0	0	1	0.094 4	0.756 1
10-17	0.328 5	1	0	0	0.857 4	1	0.491 4
23-24	0	1	0	0.486 0	1	1	0.291 9
12-14	0.128 2	1	0	0	0.744 3	1	0.421 8
1-2	0	1	0	0.740 1	0.059 9	0	0.983 9
10-21	0.418 4	1	0	0.680 8	1	1	0.998 9
4-6	0.281 8	1	0	0.118 9	1	1	0.780 1

考虑 $n-1$ 静态安全约束时,针对 IEEE-30 节点系统,表 5 列出了系统无故障及经模态分析的 10 条线路分别故障情况下的相对概率、累计概率区间分布。设抽样次数 $N=1\ 000$,循环优化得到节点出清电价期望值和各投标量的出清量期望值,分别为

表 5 IEEE-30 节点系统中各预想事故集概率分布

Tab. 5 Probability distribution of contingency set in IEEE-30 nodes system

故障线路	6-10	28-27	9-10	4-12	10-17	23-24	12-14	1-2	10-21	4-6	无故障
相对概率	0.084 6	0.073 5	0.069 6	0.048 3	0.086 9	0.041 4	0.082 4	0.043 3	0.081 3	0.082 4	0.306 3
累计概率	[0,	[0.084 6,	[0.158 1,	[0.227 7,	[0.276 0,	[0.362 9,	[0.404 3,	[0.486 7,	[0.530 0,	[0.611 3,	[0.693 7,
区间	0.084 6]	0.158 1]	0.227 7]	0.276 0]	0.362 9]	0.404 3]	0.486 7]	0.530 0]	0.611 3]	0.693 7]	1]

0.054 588、0.185 38、1.048 4、0.103 58、0.160 28、0.172 94、0。

1) 根据优化出清的网损比例因子可知,正常运行状态下基于 AC-OPF 的 FTR 拍卖过程中 ISO 提供的不平衡 FTR 量即网损为 21.48 MW。如表 3 所示,当线路 4-12 故障时,出清相对总数量增加,特别是 Offer1 中标量大大增加,由于此时区域 1 到区域 2 的唯一联络线故障, Offer1 出售的 FTR 注入节点为 1, 送达节点为 15, 可形成反向潮流缓解系统阻塞。

2) 图 5 为各种 $n-1$ 预想事故状态下 Offer1 不同出清结果的频数分布。图 6 为基于 DC-OPF 的节点出清电价,以及 $n-1$ 静态安全约束下基于 AC-OPF 的节点出清电价期望值分布。从图中可得出相应投标 FTR 的出清电价,也可作为 FTR 二级市场交易的参考信息。

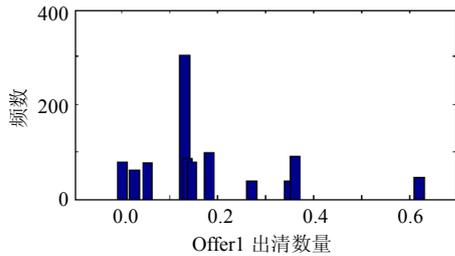


图5 Offer1 频数分布

Fig. 5 Frequency distribution plot of Offer1

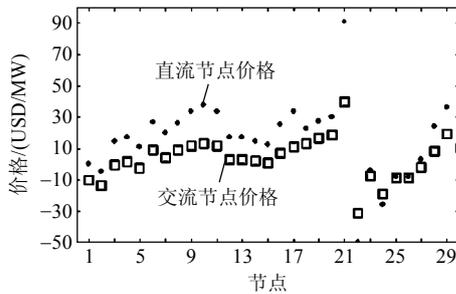


图6 节点出清电价分布

Fig. 6 Plot of nodal market clearing price

4 结论

1) 相对于直流潮流简化且快速的特点, 采用交流潮流增加了优化计算的复杂性, 计算量有所增加, 但是提高了优化计算的准确度。

2) 综合考虑了网损和电压限制, 真实地反映了原物理网络的物理特性, 出清结果更具参考价值。

3) 全面考虑了 $n-1$ 静态安全约束, 应用蒙特卡罗模拟和概率性算法得到出清结果, 更能保证费用的充足性, 因此具有一定的实践意义。

参考文献

- [1] Hogan W W. Contract networks for electric power transmission [J]. *Journal of Regulatory Economics*, 1992, 4(3): 211-242.
- [2] Ma X W, Sun D I, Ott A. Implementation of the PJM financial transmission rights auction market system[C]. *IEEE/PES Summer Meeting*, Chicago, 2002.
- [3] Ma X W, Sun D I, Rosenwald G W, et al. Advanced financial transmission rights in the PJM market[C]. *IEEE/PES General Meeting*, Toronto, 2003.
- [4] 方军, 张永平, 魏萍, 等. 输电阻塞管理的新方法述评(一): 基于潮流的可交易输电权[J]. *电网技术*, 2001, 25(7): 4-8.
Fang Jun, Zhang Yongping, Wei Ping, et al. A new market-based congestion management method part I: flow-based tradable transmission rights[J]. *Power System Technology*, 2001, 25(7): 4-8(in Chinese).
- [5] 张永平, 方军, 魏萍, 等. 输电阻塞管理的新方法述评(二): 金融性输电权及与 FGR 之比较[J]. *电网技术*, 2001, 25(9): 16-21.
Zhang Yongping, Fang Jun, Wei Ping, et al. A new market-based congestion management method part II: financial transmission rights and comparison with flow gate rights[J]. *Power System Technology*, 2001, 25(9): 16-21(in Chinese).
- [6] 电力市场运营基本规则[EB/OL]. http://www.serc.gov.cn/opencms/export/serc/bulletin/tongzhi/news/tongzhi_000017.html, 2005.
- [7] Financial transmission right formulations[EB/OL]. http://ksghome.harvard.edu/whogan/FTR_formulations_033102.pdf, 2002.
- [8] Alsac O, Bright J M, Brignone S, et al. The rights to fight price volatility[J]. *IEEE Power & Energy Magazine*, 2004, 2(4): 47-57.
- [9] Hua K, Xie K, Guo Z Z. Point-to-point FTR obligations auction based on AC-OPF by interior point methods[C]. *Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America*, 2006.
- [10] 华科, 谢开, 郭志忠. 计及无功电价波动的综合输电权拍卖及其内点法实现[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(6): 17-22.
Hua Ke, Xie Kai, Guo Zhizhong. Reactive power included integrated transmission rights auction by nonlinear interior point methods[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(6): 17-22(in Chinese).
- [11] 付慧颖, 周渝慧, 金鑫. 基于关口金融输电权的双边拍卖模型[J]. *电网技术*, 2008, 32(5): 93-96.
Fu Huiying, Zhou Yuhui, Jin Xin. A bilateral auction model based on flowgate right[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(5): 93-96(in Chinese).
- [12] 华月申, 严正, 黄涛, 等. 金融输电权应用于华东电力市场的探讨[J]. *电网技术*, 2009, 33(6): 72-77.
Hua Yueshen, Yan Zheng, Huang Tao, et al. Research on application of financial transmission right in East China electricity market [J]. *Power System Technology*, 2009, 33(6): 72-77(in Chinese).
- [13] 伍期刚, 程浩忠, 刘梓洪. 边际网损系数法中的网损分摊调整方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2005, 17(3): 78-81.
Wu Qigang, Cheng Haozhong, Liu Zihong. New regulation method of marginal loss coefficient in loss allocation of power market [J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2005, 17(3): 78-81(in Chinese).
- [14] 丁明, 李生虎, 黄凯. 基于蒙特卡罗模拟的概率潮流计算[J]. *电网技术*, 2001, 25(11): 10-14.
Ding Ming, Li Shenghu, Huang Kai. Probabilistic load flow analysis based on Monte-Carlo simulation[J]. *Power System Technology*, 2001, 25(11): 10-14(in Chinese).
- [15] 胡泽春, 王锡凡, 张显, 等. 考虑线路故障的随机潮流[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(24): 26-31.
Hu Zechun, Wang Xifan, Zhang Xian, et al. Probabilistic load flow method considering branch outages[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(24): 26-31(in Chinese).
- [16] 李国庆, 陈厚合. 改进粒子群优化算法的概率可用输电能力研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(24): 18-23.
Li Guoqing, Chen Houhe. Study of probabilistic available transfer capability by improved particle swarm optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(24): 18-23(in Chinese).
- [17] Shahidehpour M, Hatim Y, Li Z Y. Market operations in electric power systems[C]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Wiley-Interscience*, 2002.
- [18] 许卉, 汤奕, 万秋兰. 金融输电权在阻塞管理中的应用研究[C]. 第23届全国高校电力系统及其自动化年会, 合肥, 2007.
- [19] Alomoush M I, Shahidehpour S M. Generalized model for fixed transmission rights auction[J]. *Electric Power Systems Research*, 2000(54): 207-220.



汤奕

收稿日期: 2009-09-21。

作者简介:

汤奕(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能电网、分布式电源、电力市场, E-mail: tangyi@seu.edu.cn;

许卉(1984—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力市场;

万秋兰(1954—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力市场。

(责任编辑 王晔)