

基于信息熵的可用输电能力枚举评估方法

郑雅楠, 周明, 李庚银

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

An Information Entropy Based Contingency Enumeration Approach for Available Transfer Capability Assessment

ZHENG Yanan, ZHOU Ming, LI Gengyin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Rapid development of large scale-power grid interconnection promotes the research on available transfer capability (ATC). Contingency enumeration is commonly used to deal with large amount of uncertainties in ATC calculation. Based on the analysis on traditional contingency enumeration approach, the entropy weight is firstly led into fault screening link, and both apparent power behavior index and voltage-reactive power behavior index are taken into account synthetically to establish a state ordering-screening approach in which subjective and objective factors are integrated. The optima power flow model is applied to each time of power flow solution by repeated power flow method, thus both security and economy of power grid are considered. To decrease the deviation caused by state selection, a maximum entropy based calculation model of occurrence probability of ATC is built, and the expectation value of ATC and the probability of insufficient ATC are led in and regarded as the assessment indices. The superiority of the proposed approach in the reasonableness of state screening, calculation accuracy and processing efficiency is verified by numerical simulation results on the IEEE-14 bus system.

KEY WORDS: available transfer capability (ATC); contingency enumeration; entropy weight; repeated power flow; maximum entropy principle

摘要: 大规模电网的互联发展推动了可用输电能力(available transfer capability, ATC)的研究。状态枚举是处理 ATC 计算中大量不确定性的常规方法。在分析传统 ATC 枚举评估方法的基础上, 在故障筛选环节引入熵权, 将视在功率行为指标和电压-无功功率行为指标综合考虑, 建立了主、客观相

结合的状态排序筛选方法; 将最优潮流模型应用到重复潮流法的每次潮流求解中, 综合考虑系统的安全性与经济性; 为了减少状态筛选带来的偏差, 建立了基于最大熵原理的 ATC 发生概率计算模型, 并引入 ATC 期望值和 ATC 不足概率作为评估指标。通过 IEEE-14 节点测试系统的仿真研究, 验证了其在状态筛选合理性、计算精度和处理速度上的优势。

关键词: 可用输电能力; 枚举法; 熵权; 重复潮流; 最大熵原理

0 引言

输电能力是衡量电网两区域间可靠传输电力的能力, 对于大规模电力系统的安全可靠运行和跨区输电显示出越来越重要的指导作用。其中对实时运行有重要指导作用的是可用输电能力(available transfer capability, ATC), 代表在现有的输电合同基础上, 互联电网两区域间的实际物理输电网络中剩余的、可用于商业使用的输电能力^[1]。ATC 与实时运行状况密切相关, 而实时运行时的负荷波动、设备运行情况变化或故障等大量不确定性因素极大地影响着 ATC 的准确计算, 这些不确定性因素在 ATC 的定义里用输电可靠性裕度(transmission reliability margin, TRM)概括, 因此, 如何准确描述和考虑这些不确定性因素是计算 ATC 的关键, 也是难点^[2]。

相对于给出一个确切的 ATC 计算值, 考虑大量的不确定性因素和系统不同的运行方式, 给出 ATC 的分布情况, 对电网输电能力进行全面评估更有必要, 能为电网的规划和运行提供更全面和更准确的帮助, 而这方面的研究最近才引起学者关注^[3-4]。目前, 对于 ATC 计算过程中不确定性的考虑方法主要有 3 类: 1) 取最大输电能力(total transfer

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2008-BAA14B05); 国家自然科学基金项目(50877027); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(10QX35)。

Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2008BAA14B05); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877027); Fundamental Research Funds for the Central Universities (10QX35).

capability, TTC)的一个固定百分比, 比如 4%的 TTC, 或将设备参数限值降低一定比例以换取 TRM^[5]; 2) 采用 Monte Carlo 方法仿真系统状态, 通过大量仿真抽样计算来考虑 TRM^[6-8]; 3) 采用特定的行为指标筛选出对 ATC 影响大的系统状态, 针对这些状态进行计算的状态枚举评估方法^[3,9-10]。第 1 类方法简单快捷, 但难以确定一个合理的比例, 计算结果往往是不准确的。第 2 类基于 Monte Carlo 仿真的方法计算准确度随着仿真数量的增大而提高, 对于小规模电力系统是适用的, 但对于大规模的现代电力系统计算时间难以保证。第 3 类状态枚举评估方法的精度依赖筛选指标和筛选方法的选定, 在所选取的状态空间内进行计算, 能在计算速度和计算精度间取得较好折衷, 得到了广泛的应用, 但是由于仅考虑正常及筛选出来的故障状态, 各状态出现的概率之和必然不等于 1, 因而肯定会带来一定的偏差。

现代电力系统规模庞大, 设备数目众多, 受大量不确定性因素的影响, 其状态集合十分巨大, 如果所有的状态都考虑, 处理起来将十分困难, 事实上某些运行状况对整个系统 ATC 的影响很小, 因此, 20 世纪 90 年代, ATC 枚举评估法被提出^[10-11], 并且已被证实该方法能有效地用于大型电力系统中^[12]。ATC 枚举评估法的基本思想是: 首先枚举系统受各种不确定性因素影响而存在的可能故障状态集合 Ω' , 然后根据一定方法对枚举状态进行排序, 筛选出对系统 ATC 影响大的筛选状态集合 Ω'' , 接下来分别模拟计算筛选状态和系统无设备故障状态的 ATC, 最后通过分别计算 Ω'' 中各故障状态和无设备故障状态的发生概率, 得到系统的 ATC 及相应的 ATC 评估指标。ATC 枚举评估法主要包括状态枚举、状态筛选、模拟计算和综合评估 4 个环节。

状态筛选方法是 ATC 枚举评估法的关键, 直接关系到最后的评估精度。目前常用的方法有^[13-14]: 1) 简单采用截止故障重数的方法进行故障筛选, 该方法简单, 但随着系统规模的增大, 状态数量也会大幅增加, 给后续的 ATC 模拟计算带来很大的压力; 2) 使用单一评价指标进行状态的筛选, 由于指标的单一性, 筛选往往不够全面。虽然近年来多指标综合筛选方法得到了发展^[15], 但仍局限于依据主观经验指定各指标权重。

目前 ATC 枚举法的模拟计算主要采用的算法

有: 重复潮流法^[16]、最优潮流法^[17-18]、灵敏度分析法^[19]等, 这些方法均从系统电压、电流等约束出发, 侧重关注系统的安全性, 而忽略了电力市场的经济性特征。

综合评估环节采用设备故障停运率计算各筛选状态的发生概率, 筛选状态中未包含的故障状态等同于无设备故障状态, 具体计算公式如下:

$$\begin{cases} \Gamma_k = \prod_a \theta_a \prod_{b \neq a} (1 - \theta_b) \\ \Gamma_0 = 1 - \sum_{\Omega'} \Gamma_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: Γ_k 表示状态 k 的发生概率; Γ_0 为系统无故障的概率; a 、 b 分别为故障设备集合和无故障设备集合; θ 表示故障停运概率(强迫停运率)。该评估方法只能通过增加筛选状态的数量来减少状态筛选带来的必然偏差。对于大型系统而言, 由于不确定性因素众多, 为了保证计算精度, 必须大幅增加筛选状态数量, 使得计算量也会随之大大增加, 失去 ATC 枚举评估法的速度优势。

针对以上问题, 本文在状态筛选环节提出采用视在功率行为指标和电压-无功功率行为指标进行基于熵权的综合排序筛选方法; 在模拟计算环节, 将最优潮流应用到重复潮流法计算 ATC 的每次解潮流中; 在综合评估环节应用最大熵原理, 在保证枚举状态不增加的前提下, 减少状态筛选带来的 ATC 评估偏差。通过 IEEE-14 节点系统的仿真研究, 验证了含信息熵的 ATC 枚举评估方法在状态筛选合理性、计算精度、处理速度上的优势。

1 基于熵权的状态排序筛选

1.1 评价指标

作为状态排序筛选的基础, ATC 枚举评估法需要对系统所有可能的故障状态进行枚举。仿真研究表明, 模拟到 2 阶故障, 就可以包含系统绝大部分的状态, 所以一般选取 $N-1$ 和 $N-2$ 状态集合作为可能故障状态集合 Ω 进行状态的排序筛选。

针对 ATC 计算特点, 选取视在功率行为指标 $I_{i,p}$ 和电压-无功功率行为指标 $I_{i,vq}$ ^[15,20] 从不同的侧面衡量不同故障对系统 ATC 的影响, 之所以将 2 者分开考虑, 是因为它们之间并无必然的关联, 即系统在某一预想事故下, 线路的视在功率可能不越限, 但节点电压和发电机组无功功率可能是越限的, 所以将 2 者分开考虑, 计算公式如下:

$$I_{i,P} = \sum_{\alpha} w_{\alpha} \left(\frac{S_{i,l}}{S_l^{\max}} \right)^2 \quad (2)$$

$$I_{i,VQ} = \sum_{\beta} w_{\beta} \left(\frac{Q_{i,g} - Q_g^{\text{av}}}{Q_g^{\text{st}}} \right)^2 + \sum_{\gamma} w_{\gamma} \left(\frac{U_{i,z} - U_z^{\text{av}}}{U_z^{\text{st}}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: $Q_g^{\text{av}} = \frac{1}{2}(Q_g^{\max} + Q_g^{\min})$; $Q_g^{\text{st}} = \frac{1}{2}(Q_g^{\max} - Q_g^{\min})$; $U_z^{\text{av}} = \frac{1}{2}(U_z^{\max} + U_z^{\min})$; $U_z^{\text{st}} = \frac{1}{2}(U_z^{\max} - U_z^{\min})$; α, β, γ 分别表示系统线路集合、无功电源集合和节点集合; $w_{\alpha}, w_{\beta}, w_{\gamma}$ 为加权参数, 其值取决于有关线路或无功电源或节点所处的相对重要地位; $S_{i,l}$ 表示状态 i 下支路 l 的视在功率; S_l^{\max} 表示其最大值; $Q_{i,g}$ 为电源 g 提供的无功功率; Q_g^{\max}, Q_g^{\min} 分别表示其上、下限; $U_{i,z}$ 为节点 z 的电压模值; U_z^{\max}, U_z^{\min} 分别表示其上、下限; $I_{i,P}$ 刻画了线路视在功率的利用情况, 而 $I_{i,VQ}$ 描述了无功电源和节点电压偏离其允许范围的程度。

1.2 基于熵权的状态排序筛选

熵的概念最初来源于热力学, 1948年 C E Shannon 首次提出了信息熵的概念^[21], 把熵作为一个随机事件的“不确定性”或信息量的评价指标, 本文引入信息熵领域的熵权法进行主、客观相结合的综合筛选排序。由每个状态的 2 个指标值构成指标评价矩阵 $\mathbf{I}=(I_{ij})_{n \times 2}(i=1, 2, \dots, k; j=1, 2)$ 。

1) 指标评价矩阵 \mathbf{I} 的标准化。为了消除指标间由于量纲不同而带来比较上的困难, 同时也便于计算和优选分析, 需对各指标进行效益型归一化处理, 转变为标准化矩阵 $\mathbf{I}'=(I'_{ij})_{n \times 2}$, 方法如下:

$$I'_{ij} = \frac{I_{ij} - \min_i I_{ij}}{\max_i I_{ij} - \min_i I_{ij}} \quad (4)$$

2) 各指标权重 w_j 的确定。由规范化的指标矩阵 \mathbf{I}' 计算第 j 个评价指标的熵值 H_j :

$$H_j = -a_E \sum_{i=1}^k f_{ij} \ln f_{ij} \quad (5)$$

式中: $f_{ij} = I'_{ij} / \sum_{i=1}^k I'_{ij}$; $a_E = 1 / \ln k$; 当 $f_{ij}=0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ 。

由此可得第 j 个评价指标的熵权 w'_j 为

$$w'_j = (1 - H_j) / (2 - \sum_{m=1}^2 H_m) \quad (6)$$

熵权只代表各指标给决策者提供的信息量多少, 并不能代表决策中某指标的最终权重。各被评价状态在某指标上的值差别越大时, 熵值越小, 熵

权越大, 说明该指标提供的信息量越多, 应重点考察; 各被评价状态在某指标上的值完全相同时, 熵值达到最大值 1, 熵权为 0, 即该指标未向决策者提供任何有用信息, 可考虑取消。由于熵权表示的是各指标在竞争意义上的相对激烈程度系数^[22], 因而, 本文还进一步考虑各指标的重要性, 增加重要性权重 w_j'' 。将重要性权重与熵权相结合, 既克服了单纯的客观权重不能考虑指标重要性的不足, 又避免了传统的经验判断给出的重要性权重不够客观的弊端, 最终权重 w_j 为

$$w_j = w'_j w''_j / \sum_{m=1}^2 w'_m w''_m, \quad j=1, 2 \quad (7)$$

3) 系统状态的排序筛选。各状态对系统性能的影响不仅体现在性能指标上, 也与各状态的发生概率密切相关。在对状态排序时, 应综合考虑状态发生的可能性及其所产生后果的严重性, 定义状态风险函数 F_i 为

$$F_i = d_i \Gamma_i \quad (8)$$

式中 $d_i = (\sum_{m=1}^2 w_m (I'_{ij} - I_m^*)^2)^{1/2}$ 表示状态 i 对系统性能产生影响的严重程度, $i=1, 2, \dots, k$; $I^*=(I_1^*, I_2^*)$ 为每个指标的最优值组成的理想点状态, 即 \mathbf{I}' 每列的最小值; Γ_i 由设备的故障停运率求得, 见公式(1)。

最后对 F_i 进行降序排列, F_i 越大表明对系统性能影响越大, 由此筛选出对系统影响大的前 K 个状态构成 Ω 。引入熵权综合确定各指标权重的方法, 有利于决策者调整决策指标, 删减无用指标, 更能在专家主观经验权重的基础上充分利用客观信息, 使主观经验、偏好与客观信息相结合, 得出更为合理的筛选状态。

2 基于改进重复潮流法的 ATC 计算

根据排序筛选出的状态集合 Ω' 和系统无设备故障状态 Ω_0 , 可构成用于评估的状态集合 $\Omega''(K+1$ 个状态):

$$\Omega'' = \Omega' \cup \Omega_0 \quad (9)$$

针对 Ω'' 中各状态采用重复潮流法, 即从一个基准潮流点出发, 逐步增加受端区域的负荷功率, 同时增加送端的发电机有功出力, 直到某一个约束条件越限, 此时得到的区域间功率净增长值即是该状态的 ATC 值。常规的重复潮流法往往重视系统的安全性, 而忽略了经济性, 本文在重复潮流法的每次解潮流中应用式(10)的最优潮流模型, 综合考虑该状态的安全性和经济性, 计算 ATC, 使得计算

结果更符合实际的运行:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum f_{i,p}(P_{i,g}) \\ \text{s.t. } P_{i,g} - P_{i,d} - U_{i,x} \sum U_{i,y} (G_{xy} \cos \delta_{xy} + \\ \quad B_{xy} \sin \delta_{xy}) = 0 \\ Q_{i,g} - Q_{i,d} + U_{i,x} \sum U_{i,y} (G_{xy} \cos \delta_{xy} - \\ \quad B_{xy} \sin \delta_{xy}) = 0 \\ P_g^{\min} \leq P_{i,g} \leq P_g^{\max} \\ Q_g^{\min} \leq Q_{i,g} \leq Q_g^{\max} \\ U_z^{\min} \leq U_{i,z} \leq U_z^{\max} \\ |S_{i,l}| \leq S_l^{\max} \end{array} \right. \quad (10)$$

式中: $f_{i,p}(P_{i,g})$ 表示状态 i 下的购电费用函数; $P_{i,g}$ 为该状态下电源 g 提供的有功功率; P_g^{\max} 、 P_g^{\min} 分别表示其上、下限; $P_{i,d}$ 、 $Q_{i,d}$ 分别为该状态下负荷 d 需要的有功和无功功率; G_{xy} 、 B_{xy} 、 δ_{xy} 分别表示节点 x 、 y 间的支路电导、电纳和电压相位角。

针对这一复杂的非线性优化问题, 采用 Matpower4.0b4^[23]提供的对偶内点法求解, 对多核、多线程 CPU 进行优化, 实现了多核并行运算, 大幅提高了计算处理速度。最后根据分别求得的基准潮流下和某一个约束条件越限情况下的传输功率, 计算得到状态 i 下的 ATC 值 e_i :

$$e_i = P_i^{\max} - P_i^0 \quad (11)$$

式中 P_i^0 、 P_i^{\max} 分别表示状态 i 下区域间基准传输功率和最大传输功率。

3 基于最大熵原理的 ATC 概率分布计算

本文引入最大熵原理求取 Ω 中各状态对应 ATC 值的发生概率, 可以综合考量系统各种状态对 ATC 的影响, 以便更客观、准确地评估系统的 ATC 情况。

1957 年, 在信息熵的基础上, E T Jaynes 在统计力学中揭示^[24]: “最少为偏见的概率分布是这样一种分布: 它使熵在已知信息的附加约束条件下最大化”。这一准则被称为最大熵原理, 表明系统内的熵总会自动地处于约束条件所允许的最大值状态。对于 ATC 评估来说, 由于 Ω 中各状态对应的 ATC 值可以体现系统主要的 ATC 情况, 因此近似选取 Ω 中各 ATC 值的发生概率作为计算变量; 另一方面由于区域联络线的视在功率行为指标可以最直接、客观地辅助反映区域间的 ATC 情况, 通过大量统计样本得到该指标的分布, 能体现系统各

种状态对 ATC 的影响, 所以选取该指标作为已知信息约束条件。由最大熵原理可知, 在满足行为指标分布约束的情况下, 以熵最大为目标函数优化得到各 ATC 值的发生概率, 能客观地反映 ATC 的发生本质。采用最大熵原理计算 ATC 的客观发生概率模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max H = - \sum_{i=1}^{K+1} p'_i \ln p'_i \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^{K+1} p'_i = 1 \\ \sum_{i=1}^{K+1} (I'_{i,p})^h p'_i = E_h, \quad h=1,2,\dots,N \end{array} \right. \quad (12)$$

式中: p'_i 表示 e_i 的发生概率; $I'_{i,p} = \sum_{\tau} w_{\tau} \cdot (S_{i,l} / S_l^{\lim})^2$, 表示状态 i 下所求区域间联络线的视在功率行为指标; τ 为区域联络线集合; w_{τ} 为加权参数; E_h 表示联络线视在功率行为指标的第 h 阶原点距。本文采用的联络线视在功率行为指标 $I'_{i,p}$ 不同于式(2)考虑系统所有线路, 它仅刻画区域间输电断面上联络线的情况。各状态的联络线视在功率行为指标分布规律可以从样本数据的前 $N=4$ 阶原点距中获取^[25]: 1 阶矩为平均值刻画取值的“中心”; 2 阶矩刻画围绕均值的离散程度; 3 阶矩(或偏度系数)刻画对称性(偏倚程度); 4 阶矩(或峰度系数)刻画集中和分散程度(尖平程度)。通过建立拉格朗日方程可以求解上述问题, 得到各 ATC 的发生概率。

4 ATC 评估指标及步骤

为了更准确地评估电网的输电能力, 和与其他算法进行比较, 本文定义了 2 个 ATC 评估指标, 即 ATC 的期望值 E 和 ATC 不足概率 P_S (ATC 值小于特定值 S 的概率)

$$E = \sum_{i=1}^{K+1} e_i p'_i \quad (13)$$

$$P_S = \sum_{i \in \Omega_S} p'_i \quad (14)$$

式中 Ω_S 表示 ATC 值小于 S 的状态集合。

基于信息熵的 ATC 枚举评估方法的具体求解步骤如下:

1) 利用视在功率行为指标和电压-无功功率行为指标进行基于熵权的综合排序筛选, 选择出对系统 ATC 影响大的状态集合 Ω , 并与系统无设备故障状态 Ω_0 构成用于评估的状态集合 Ω' ;

2) 应用改进的重复潮流法分别求取集合 Ω' 中

各状态的 ATC 值和联络线视在功率行为指标;

3) 采用模型(12)计算 Ω'' 中各状态对应的 ATC 值的发生概率;

4) 计算 ATC 的评估指标。

5 算例结果与分析

仿真程序使用 Gateway MX1050c(CPU: Core2 Duo 1.20 GHz, RAM: 2G)作为计算平台, 采用 Matlab R2008a 结合 Matpower4.0b4^[23]潮流计算软件使用标么值(基准容量取 100 MVA)对 IEEE-14 节点测试系统进行研究, 测试系统详细的元件参数见文献[26]。选取节点 12、13、14 作为输电断面的负荷区域, 其余为送电区域, 这样区域间存在 3 条联络线, 计算涉及的可调节参数 w_α 、 w_β 、 w_γ 和 w_τ 均取 0.5^[27], 取重要性权重 $w_1''=0.5$, $w_2''=0.5$, 评估 ATC 不足概率用到的 $S=30\text{MW}$ 。本文分别就对 ATC 评估精度有影响的状态筛选和综合评估 2 个方面进行研究。

1) 状态筛选方法对 ATC 评估精度的影响。首先选取系统 2 重以下故障状态集合作为枚举状态集合, 然后根据应用单一视在功率行为指标的传统枚举评估法(模型 B)、应用单一电压一无功功率行为指标的传统枚举评估法(模型 C)以及本文提出的基于熵权的综合枚举评估法(模型 D), 分别排序筛选出前 19 个状态构成不同的筛选状态集合, 其中模型 D 的排序筛选结果如表 1 所示, 表中 L_{ij} 表示该线路 $i-j$ 处于故障开断状态。然后应用改进的重复潮流法求取各状态对应的 ATC 值; 最后模型 B、模型 C 和模型 D 均采用设备故障停运率计算各状态发生概率, 进而得到 ATC 各评估指标, 如表 2 所示。同时表 2 还给出了采用蒙特卡罗随机模拟(模型 A)对测试系统进行 10000 次抽样模拟的结果, 并将其

表 1 模型 D 的筛选状态集合排序(前 19 个)
Tab. 1 The ranking for the selection state set of model D (the top 19)

排序	故障设备	$F_i/10^{-5}$	排序	故障设备	$F_i/10^{-5}$
1	L ₇₋₉	5	11	L ₂₋₅	4
2	L ₁₋₂	5	12	L ₃₋₄	4
3	L ₉₋₁₄	4	13	L ₁₀₋₁₁	4
4	L ₂₋₄	4	14	L ₆₋₁₂	4
5	L ₄₋₉	4	15	L ₁₃₋₁₄	4
6	L ₄₋₇	4	16	L ₆₋₁₃	4
7	L ₂₋₃	4	17	L ₆₋₁₁	4
8	L ₄₋₅	4	18	L ₅₋₆	4
9	L ₉₋₁₀	4	19	L ₁₋₅	3
10	L ₁₂₋₁₃	4	—	—	—

表 2 5 种模型的计算结果
Tab. 2 The calculation results of the five models

模型	评估指标	E/MW	$P_g/\%$	t/s
A	指标值	55.120 8	0.069 1	24 548.766 0
	绝对相对误差/%	60.480 3	0.002 2	60.657 0
B	指标值	60.480 3	0.002 2	60.657 0
	绝对相对误差/%	9.723 2	96.816 2	
C	指标值	60.500 8	0.001 6	58.422 0
	绝对相对误差/%	9.760 4	97.684 5	
D	指标值	58.432 4	0.025 9	76.172 0
	绝对相对误差/%	6.007 9	62.518 1	
E	指标值	54.224 3	0.062 5	79.875 0
	绝对相对误差/%	1.626 4	9.551 4	

作为比较基准。表中 t 为计算耗时。图 1 给出了模型 A、B、C、D 对应的系统 ATC 概率分布。

由表 2 和图 1 分析可以发现: 1) 综合考虑多行为指标的主客观相结合的模型 D 的计算精度优于仅考虑单一行为指标的模型 B 和模型 C, 模型 D 和模型 A 的误差仅为 6.0079%; 2) 而模型 D 的 ATC 不足概率指标更是大幅优于模型 B 和模型 C, 可以更准确地反映 ATC 的分布情况, 图 1 中模型 D 的分布相比模型 B 和模型 C 更接近模型 A, 也更好地说明了这点; 3) 由于计算复杂性的增加, 模型 C 的计算耗时相比模型 B 和模型 C 有 30% 左右的增长, 但仍大幅少于蒙特卡罗随机模拟的模型 A。所以本文在状态筛选环节提出的将视在功率行为指标和电压一无功功率行为指标综合考虑, 建立的基于熵权的主、客观相结合的状态筛选方法能更加准确地筛选出对 ATC 影响大的系统状态。

2) 综合评估方法对 ATC 评估精度的影响。在模型 D 的综合评估环节使用最大熵原理求取 ATC 概率分布, 便得到基于信息熵的 ATC 枚举评估法(模型 E)。由于无从获取相关联络线视在功率样本数据, 而蒙特卡罗随机模拟在抽样数量足够大时, 可以近似作为系统的无偏估计, 所以本文采用蒙特卡罗随机模拟的方法获取联络线视在功率行为指标的样本数据。通过 3 000 次抽样模拟的结果计算模型 E 的 I_i, P_i' 的前 4 阶距, 进而根据式(12)求取各状态对应的 ATC 值的发生概率, 得到系统的 ATC 期望值、ATC 不足概率和求解的总耗时 t , 结果如表 2 所示, 概率分布见图 1。同时表 3 给出了模型 C 根据不同的联络线行为指标样本量得到的评估结果: 情况 1 取 3 000 抽样样本; 情况 2 取 4 000 抽样样本; 情况 3 取 5 000 抽样样本。表 4 给出了模型 C 采用不同原点距阶数约束的评估结果: 情况 4 为取前 2 阶原点距约束; 情况 5 为取前 3 阶原点距约

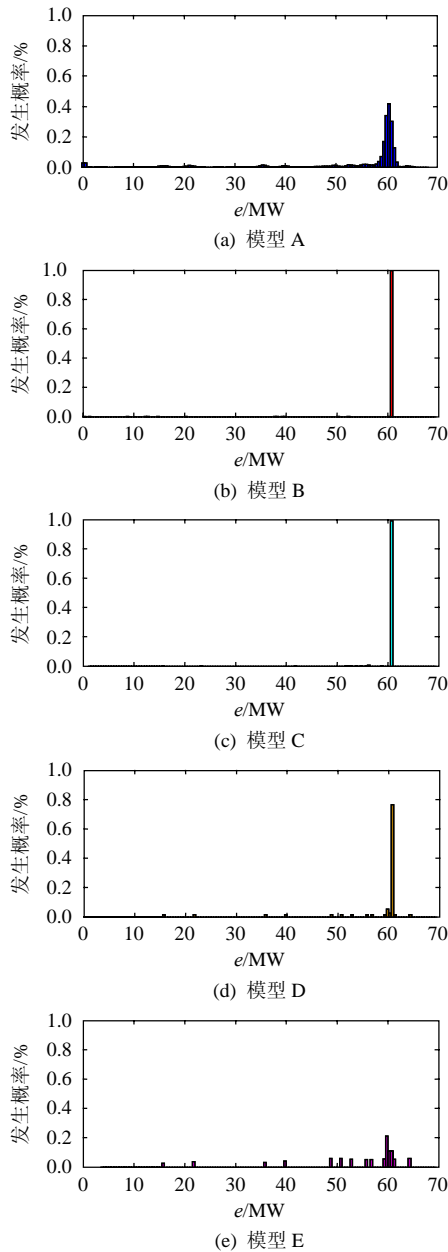


图 1 5 种模型的 ATC 分布

Fig. 1 The ATC distribution of the five models

表 3 情况 1、情况 2 和情况 3 的计算结果

Tab. 3 The results for Case 1, Case 2 and Case 3

评估 指标	情况 1		情况 2		情况 3	
	指标值	绝对相对 误差/%	指标值	绝对相对 误差/%	指标值	绝对相对 误差/%
E/MW	54.224 3	1.626 4	54.224 3	1.626 4	54.224 3	1.626 4
$P_S/\%$	0.062 5	9.551 4	0.062 5	9.551 4	0.062 5	9.551 4
t/s	79.875 0		79.328 0		77.938 0	

表 4 情况 1、情况 4 和情况 5 的计算结果

Tab. 4 The results for Case 1, Case 4 and Case 5

评估 指标	情况 1		情况 4		情况 5	
	指标值	绝对相对 误差/%	指标值	绝对相对 误差/%	指标值	绝对相对 误差/%
E/MW	54.224 3	1.626 4	54.221 7	1.631 1	54.224 2	1.626 6
$P_S/\%$	0.062 5	9.551 4	0.062 5	9.551 4	0.062 5	9.551 4
t/s	79.875 0		79.016 0		77.625 0	

束；加上前面情况 1 为取前 4 阶原点距约束。

由表 2 和图 1 分析可以发现：1) 模型 E 的计算精度优于模型 D，和模型 A 的误差不超过 2%，图 1 中模型 E 的 ATC 分布相比模型 D 同模型 A 的吻合度更高，也更好地说明了这点；2) 从 ATC 不足概率指标看，模型 E 大幅优于模型 D，可以更准确地反映系统的性能；3) 模型 E 的计算耗时不足模型 A 的千分之四，略慢于模型 D，基本保持了枚举评估法的速度优势。因此可以说明基于最大熵原理的 ATC 概率分布计算方法在处理状态数量不变的情况下可以弥补状态筛选带来的偏差，进一步提高计算精度，唯一不足的是略微增加了计算耗时。

表 3 和表 4 的结果进一步说明：1) 在相同的筛选状态集合下，通过增加联络线行为指标抽样样本数量，对于进一步提高模型 E 的计算精度和 ATC 不足概率的作用很小，基本可以忽略；2) 在筛选状态集合和行为指标样本量均相同的情况下，增加模型 E 的原点距阶数约束，可以一定程度提高计算结果的精度，虽然与此同时会带来模型求解的复杂性，但计算耗时基本保持一致，如情况 1、情况 4 和情况 5 的对比；随着原点距阶数进一步提高，对结果精度的改善会变得非常有限，如情况 5 和情况 1 的比较。所以就对计算结果精度的进一步提高而言，增加模型 E 的原点距阶数约束相比增加联络线行为指标抽样样本数量的作用更大，但是提高的幅度非常有限。

6 结论

针对 ATC 计算中如何准确处理不确定性因素的问题，本文在分析传统枚举评估法的基础上，在故障筛选环节将视在功率行为指标和电压一无功功率行为指标综合考虑，建立了基于熵权的主、客观相结合的状态排序筛选方法；针对传统状态模拟计算环节忽略经济性的问题，将最优潮流模型应用到重复潮流法的每次潮流求解中，使系统的安全性与经济性相结合；同时为了减少状态筛选带来的偏差，建立了基于最大熵原理的 ATC 发生概率计算模型，最后得到了 ATC 相关评价指标。通过 IEEE-14 节点系统的仿真研究，验证了基于信息熵的 ATC 枚举评估方法在保持枚举评估法处理速度优势的同时，在状态筛选的合理性和计算的准确性上均有较大程度的提高，并比较了行为指标样本量和所选原点距阶数对结果的影响，为实际处理大型系统

ATC 的计算评估提供了一条有效途径。

参考文献

- [1] North American Electric Reliability Council(NERC). Available transfer capability definitions and determination[R]. New Jersey: NERC, 1996.
- [2] Power Systems Engineering Research Center (PSERC). Electric power transfer capability: concepts, applications, sensitivity and uncertainty[R]. Arizona: Arizona State University, 2001.
- [3] 高亚静, 周明, 李庚银, 等. 基于马尔可夫链和故障枚举法的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 41-46.
Gao Yajing, Zhou Ming, Li Gengyin, et al. Available transfer capability calculation based on Markov chain and enumeration method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 41-46(in Chinese).
- [4] Rodrigues A B, Silva M G D. Probabilistic assessment of available transfer capability based on Monte Carlo method with sequential simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 484-492.
- [5] Sauer P W. Alternatives for calculating transmission reliability margin (TRM) in available transfer capability[C]//HICSS '98 Proceedings of the Thirty-First Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Washington DC, USA: IEEE, 1998: 89.
- [6] Ou Y, Singh C. Assessment of available transfer capability and margins[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 463-468.
- [7] Leite da Silva A M, de Carvalho Costa J G, da Fonseca Manso L A, et al. Transmission capacity: availability, maximum transfer and reliability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 843-849.
- [8] 李庚银, 高亚静, 周明. 可用输电能力评估的序贯蒙特卡罗仿真法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 74-79.
Li Gengyin, Gao Yajing, Zhou Ming. Sequential Monte Carlo simulation approach for assessment of available transfer capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 74-79(in Chinese).
- [9] 李国庆, 王成山, 余贻鑫. 大型互联电力系统区域间功率交换能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 20-25.
Li Guoqing, Wang Chengshan, Yu Yixin. A survey on transmission transfer capability of interconnected electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 24(4): 20-25(in Chinese).
- [10] Xia Feng, Meliopoulos A P S. A methodology for probabilistic simultaneous transfer capability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1269-1278.
- [11] Meliopoulos A P S, Feng Xia. Simultaneous transfer capability analysis: a probabilistic approach[C]//11th Power System Computation Conference. Avignon, France: IEEE, 1993: 569-576.
- [12] Electric Power Research Institute. Reliability evaluation for large-scale bulk transmission systems, Volume 1: Comparative evaluation, method development, and recommendation[R]. California: EPRI, 1988.
- [13] Yoshinori Y, Masaki N, Kazuyuki T. An energy function based contingency screening method for ATC assessment with transient stability constraints[C]//1st Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002. Yokohama, Japan: IEEE/PES, 2002: 886-890.
- [14] Masaki N, Kazuyuki T. A hybrid approach of contingency screening for ATC assessment with stability constraints[C]//1st Quality and Security of Electric Power Delivery Systems 2003. CIGRE/IEEE PES International Symposium. Montreal, Canada: IEEE PES, 2003: 137-142.
- [15] 毛建容, 杨洪耕. 二重预想事故排序的快速计算[J]. 继电器, 2001, 29(11): 24-26.
Mao Jianrong, Yang Honggeng. A fast algorithm of double contingency evaluation[J]. Relay, 2001, 29(11): 24-26(in Chinese).
- [16] Gravener M H, Nwankpa C. Available transfer capability and first order sensitivity[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(2): 512-518.
- [17] 李国庆, 郑浩野. 一种考虑暂态稳定约束的可用输电能力计算的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 20-25.
Li Guoqing, Zheng Haoye. A novel algorithm for available transfer capability considering transient stability constrains[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 20-25(in Chinese).
- [18] 潘雄, 徐国禹. 基于最优潮流并计及静态电压稳定性约束的区域间可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 86-91.
Pan Xiong, Xu Guoyu. OPF based ATC calculation with static voltage stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 86-91(in Chinese).
- [19] 李国庆, 李雪峰, 沈杰, 等. 牛顿法和内点罚函数法相结合的概率可用功率交换能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 17-22.
Li Guoqing, Li Xuefeng, Shen Jie, et al. A probability ATC computation by a combination of Newton's method with SUMT interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 17-22(in Chinese).
- [20] 邹森. 电力系统安全分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 1-10.
- [21] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technology, 1948, 27(7): 379-423, 623-656.
- [22] 邱苑华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [23] Zimmerman R D, Murillo-Sánchez C E, Thomas R J. Matpower's extensible optimal power flow architecture[C]//2009 Power and Energy Society General Meeting. Calgary, Canada: IEEE, 2009: 1-7.
- [24] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics[J]. Physics Review, 1957, 106(4): 620-630.
- [25] Soglo A B, Yang Xianhui. Networked control system simulation design and its application[J]. Tsinghua Science and Technology, 2006, 11(3): 287-294.
- [26] Wang F, Shrestha G B. Allocation of TCSC devices to optimize total transmission capability in a competitive power market[C]//IEEE 2001 Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus, OH, USA: IEEE, 2001: 587-593.
- [27] Ejebe G C, Wollenberg B F. Automatic Contingency Selection[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(1): 97-109.



郑雅楠

收稿日期: 2011-01-04。

作者简介:

郑雅楠(1982), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场、电力系统规划等, E-mail: zhengyn@ncepu.edu.cn;

周明(1967), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、电能质量、电力系统规划与可靠性等, E-mail: zhouming@ncepu.edu.cn;

李庚银(1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量、新型输配电技术、电力市场等, E-mail: ligy@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 杜宁)