

# 交直流混合系统可用输电能力评估

卢锦玲, 蔡红艳, 周明

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003)

## Available Transfer Capability Evaluation for AC/DC Hybrid System

LU Jinling, CAI Hongyan, ZHOU Ming

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** Along with the unceasing expansion of the scale of AC/DC hybrid power system in China, the computing model and methodology of available transfer capability (ATC) for AC/DC hybrid power system become the crux to be researched in this field. Power system is a time-varying system with uncertainties and randomness, so it is a difficult point for the accurate calculation of ATC to consider the influence of these factors on it. A non-sequential Monte Carlo simulation-based evaluation method for ATC, in which the uncertain factors such as load fluctuation, equipment failures, variation of control mode for DC system and weather are taken into account comprehensively, is proposed and in the viewpoint of adequacy a series of probability indices are defined for the evaluation of ATC. Relevant calculation program is programmed by Matlab7.1 software, and the case study on improved IEEE 14-bus system is performed. Calculation results show that the proposed method is correct and effective, and more accurate ATC information can be obtained by the proposed method.

**KEY WORDS:** AC/DC hybrid system; available transfer capability (ATC); non-sequential Monte Carlo simulation; evaluation indices

**摘要:** 随着我国交直流混合系统规模的不断扩大, 交直流混合系统可用输电能力(available transfer capability, ATC)的计算模型和方法的研究成为一个关键问题。电力系统是一个动态时变系统, 存在大量的不确定性和随机性, 考虑这些不确定性因素对 ATC 的影响是准确计算 ATC 的一个难点。文中提出了一种基于非序贯蒙特卡罗仿真的可用输电能力评估方法, 综合考虑负荷变化、设备故障、直流系统控制方式变化和天气等不确定性因素的影响, 并从充裕性方面定义一系列的概率指标进行 ATC 评估。采用 Matlab7.1 编写相关的计算程序, 并用改进的 IEEE 14 节点系统进行算例分析。计算结果表明, 文中所提方法正确有效, 能给出更准确的 ATC 信息。

**基金项目:** 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(09QG06)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(50877027); Project Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(09QG06)。

**关键词:** 交直流混合系统; 可用输电能力; 非序贯蒙特卡罗仿真; 评估指标

## 0 引言

随着电网建设的发展, 直流输电在电力系统的研究和电网的实际运行中正在扮演着越来越重要的角色。因此发展特高压交直流联网, 实现长距离、大规模输电, 全面提升电网的输电能力是我国电网发展的主要任务<sup>[1]</sup>。

电力市场环境下, 电网输电能力不仅是电力系统的一个技术指标, 也是反映电网输电容量的市场信号, 是调度部门调整阻塞的参考, 因此更加迫切地要求及时、准确地确定电网的可用输电能力(available transfer capability, ATC)。北美电力可靠性委员会给出的 ATC 定义为<sup>[2]</sup>: 在现有的输电合同基础上, 实际物理输电网络中剩余的、可用于商业使用的传输容量, 即

$$A_T = T_{\max} - T_r - C_B - E_T \quad (1)$$

式中:  $A_T$  为可用传输能力;  $T_{\max}$  为最大输电能力;  $T_r$  为输电可靠性裕度, 计算时需考虑各种不确定性因素的影响;  $C_B$  为容量效益裕度, 计算时一般根据具体情况取经验值;  $E_T$  为现存输电协议。

由此可见, ATC 表示在现有输电协议的基础上, 考虑各种裕度和约束后系统还能安全可靠地输送电能的能力。因此计算 ATC 时, 要考虑天气因素、发电机调度、设备(发电机、线路、变压器等)故障等大量不确定性因素的影响。

然而至今, 北美电力可靠性委员会给出的关于输电能力计算和规范中没有包含直流输电的内容<sup>[3]</sup>, 也就是关于交直流混合大电网的输电能力计算尚缺乏明确的方法指导和标准。而直流系统的引入对整个电网的输电能力是有影响的, 在输电能力计算时需要综合考虑直流系统的作用, 相应的计算模型和方

法也有所不同。

目前，关于交直流混合系统输电能力的研究非常少，例如文献[4-9]等。交直流混合系统 ATC 计算方法主要有内点法和连续潮流法等。然而这些方法都没能考虑系统的不确定性因素。

为准确地描述各种不确定性因素影响下的 ATC，本文从充裕性方面建立包括 ATC 期望值、方差、最大值、最小值、为零概率和不足概率等在内的一系列概率评估指标；提出一种基于非序贯蒙特卡罗仿真的 ATC 计算模型；并采用线性规划法计算各种可能系统状态下的 ATC，进而获得 ATC 的概率评估指标。

### 1 系统状态的非序贯蒙特卡罗仿真

#### 1.1 蒙特卡罗法简介

蒙特卡罗仿真法<sup>[10]</sup>是一种基于概率统计理论的计算机仿真算法，它能很方便地处理系统不确定性因素的影响，尤其适用于系统运行条件复杂或考虑影响因素较多的情况。用于系统仿真时，蒙特卡罗仿真法可以分为 2 种基本类型：序贯蒙特卡罗仿真法和非序贯蒙特卡罗仿真法<sup>[11]</sup>。较非序贯蒙特卡罗仿真法，序贯蒙特卡罗仿真法需要更多的 CPU 时间和存储空间；此外，它还需要与所有元件状态持续时间分布有关的参数，有些情况下可能难以获得所需要的全部输入数据。因此本文采用非序贯蒙特卡罗仿真法来确定交直流混合系统的状态。

非序贯蒙特卡罗仿真法也被称为状态抽样法。该方法的依据是：一个系统状态是所有设备状态的组合，且每一个设备的状态可由设备出现在该状态的概率进行抽样来确定。每一个设备可用一个在[0, 1]区间的均匀分布来仿真<sup>[12]</sup>。

#### 1.2 交流设备状态抽样

假设交流系统的每一个设备(线路、发电机和变压器)有故障和运行 2 个状态，可用图 1 所示的 2 状态模型来描述，且设备故障是相互独立的，令  $x_i$  代表设备  $i$  的状态， $\lambda_i$  代表其故障概率，则对设备产生一个在[0, 1]区间均匀分布的随机数  $R_i$ ，使

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{如果 } R_i > \lambda_i & (\text{运行状态}) \\ 0, & \text{如果 } 0 \leq R_i \leq \lambda_i & (\text{故障状态}) \end{cases} \quad (2)$$

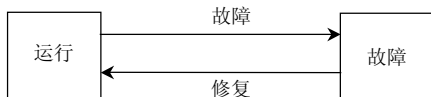


图 1 2 状态元件的状态转移  
Fig. 1 The state transfer of two-state component

具有  $m$  个设备的系统状态由向量  $\mathbf{x}$  表示  $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_i, \dots, x_m)$ 。

对于负荷，认为各节点负荷的波动服从正态分布，即  $N(\nu, \sigma^2)$ ，期望  $\nu$  一般为节点负荷的预测值；均方差  $\sigma$  一般根据具体的输电系统给出其经验值。

#### 1.3 直流设备状态抽样

直流线路有单极和双极之分，对于单极直流线路，其有单极运行和停运 2 个状态，可用上述 2 状态的蒙特卡罗法来模拟；对于双极直流线路，其有双极运行、单极运行和双极停运 3 个状态，可用图 2 所示的 3 状态模型来描述<sup>[13]</sup>。

$$x_i = \begin{cases} 0, & \text{如果 } R_i > \lambda_{1i} + \lambda_{2i} & (\text{双极运行状态}) \\ 1, & \text{如果 } \lambda_{2i} < R_i \leq \lambda_{1i} + \lambda_{2i} & (\text{单极运行状态}) \\ 2, & \text{如果 } 0 \leq R_i \leq \lambda_{2i} & (\text{双极停运状态}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $x_i$  是直流线路  $i$  的抽样状态； $R_i$  是直流线路  $i$  在[0,1]区间的均匀分布随机数； $\lambda_{1i}$  和  $\lambda_{2i}$  分别是直流线路  $i$  发生单极停运和双极停运故障的概率。

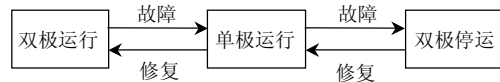


图 2 3 状态元件的状态转移

Fig. 2 The state transfer of three-state component

#### 1.4 考虑天气影响的线路故障率

电力系统中的输电线受气象影响很大，例如台风、龙卷风、大雾、暴风雪等。输电线在坏天气的故障率远比正常天气时高<sup>[14]</sup>。如果正常天气和坏天气下元件的故障率可被分辨出来，则 2 种气候条件下的系统 ATC 可分别评估，最终的评估指标则由 2 种气候状态的概率加权而得。可是大多数数据采集系统并不区分正常和恶劣气候条件下的失效事件，而仅有过去年份的平均失效频率<sup>[12]</sup>。所以本文首先对线路进行考虑天气影响时的可靠性评估，计算出正常天气和坏天气情况的故障率。

假设正常天气时元件的故障率为  $\lambda$ ，坏天气时元件的故障率为  $\lambda'$ 。考虑两态天气模型，假定正常天气和坏天气的持续时间服从指数分布。记  $N$ 、 $S$  分别为正常天气和坏天气的期望持续时间。

通过文献[14]的求解可得，故障率  $\lambda_f$  的近似值

$$\lambda_f = \left(\frac{N}{N+S}\right)\lambda + \left(\frac{S}{N+S}\right)\lambda' \quad (4)$$

令  $P_{ad} = \frac{S}{N+S}$  表示坏天气的概率，则  $1-P_{ad}$  表示正常天气的概率，设  $F$  表示坏天气下发生故障的百分比，那么由文献[12]可得

$$\begin{cases} \lambda' = \lambda_f F / P_{ad} \\ \lambda = [\lambda_f (1-F)] / (1-P_{ad}) \end{cases} \quad (5)$$

## 2 交直流混合系统 ATC 评估

### 2.1 ATC 评估指标

通过蒙特卡罗仿真法计及系统的不确定性因素影响后,从充裕性方面定义一系列的 ATC 评估指标来量化这些因素对 ATC 的影响,以便从不同侧面反映静态情况下输电能力的充裕度。评估指标的定义及计算公式如下<sup>[15]</sup>。

1) ATC 的期望值为

$$E_{ATC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{ATC}(x_i) \quad (6)$$

式中:  $F_{ATC}(x_i)$  为第  $i$  次仿真状态下的 ATC 值;  $x_i$  为第  $i$  次仿真状态;  $N$  为仿真次数。

2) ATC 的方差为

$$V_{ATC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F_{ATC}(x_i) - E_{ATC}]^2 \quad (7)$$

3) ATC 的变异系数为

$$\beta = \sqrt{V_{ATC}} / E_{ATC} \quad (8)$$

4) ATC 的最大值为

$$F_{ATC,max} = \max[F_{ATC}(x_i)], i \in N \quad (9)$$

5) ATC 的最小值为

$$F_{ATC,min} = \min[F_{ATC}(x_i)], i \in N \quad (10)$$

6) ATC 等于零的概率  $P_{PAEZ}$  表示当前供电网络无法满足负荷需求,为保证正常供电必须采取措施,如发电再调度或削负荷等。

$$P_{PAEZ} = M_{ATC=0} / N \quad (11)$$

式中  $M_{ATC=0}$  为 ATC 值等于零的仿真次数。

7) ATC 不足概率  $P_{PANS}$  指 ATC 值小于特定值的概率,设  $C$  为特定值,则

$$P_{PANS} = M_{ATC < C} / N \quad (12)$$

式中  $M_{ATC < C}$  为 ATC 值小于特定值  $C$  的仿真次数。

### 2.2 ATC 概率评估指标的计算模型

采用蒙特卡罗法仿真系统的运行状态,仿真次数至少几十万次,得到相应的系统状态也几十万,考虑到计算的快速性和实用性,采用能够满足工程需要计算精度的直流潮流线性规划法<sup>[12]</sup>来快速计算对应状态的 ATC 值。

目标函数为

$$\max J = \frac{1}{2} (1 - k_1) \left[ \sum_{i \in R_G} (P_{Gi} - P_{Gi}^0) + \sum_{j \in R_L} (P_{Lj} - P_{Lj}^0) \right] \quad (13)$$

式中:  $R_G$  为选定源点的发电机集合;  $R_L$  为选定潭

点的负荷集合;  $P_{Gi}$  为源点发电机  $i$  的有功出力;  $P_{Lj}$  为潭点负荷  $j$  的有功负荷;  $P_{Gi}^0$  和  $P_{Lj}^0$  分别为现存输电协议中的发电机有功出力和有功负荷;  $k_1$  为裕度系数,即为保证系统安全稳定运行留出的容量效益裕度,这里取经验值 5%<sup>[16]</sup>。仿真过程中已经考虑了系统的各种可能故障和负荷波动,即在 ATC 的计算过程中已充分考虑了电网输电可靠性裕度 TRM,因此无需再单独考虑 TRM。

1) 等式约束条件。

等式约束包括交直流混合系统的潮流方程、直流系统中各换流站的特性方程以及直流网络方程。基于直流潮流的方程为

$$-B\theta + g = d + P_{dc} \quad (14)$$

式中:  $g$  为发电机的有功出力向量;  $d$  为节点的负荷向量;  $P_{dc}$  为从交流节点流进直流系统的有功功率向量(不与直流系统相关联的节点,对应的分量为零);  $\theta$  为节点电压相角向量(参考节点的电压相位为零,不在其中);  $B$  为去掉平衡节点后的交流子系统节点导纳矩阵的虚部(直流线路全部断开)。

直流系统中各换流站的特性方程为

$$\begin{cases} U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_b k_T U_i \cos \theta_{di} - \frac{3}{\pi} X_{ci} I_{di} \\ U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_r N_b k_T U_i \cos \varphi_i \\ P_{dci} = U_{di} I_{di} \end{cases} \quad (15)$$

规定电流正方向为交流子系统流向直流子系统侧,可以得到用电流表示的直流输电子系统网络方程<sup>[17]</sup>

$$I_d = G_d V_d \quad (16)$$

式中:  $I_d$ 、 $V_d$  分别是直流输电子系统电流向量和电压向量;  $G_d$  是直流子系统的节点导纳矩阵。

根据换流站的个数,直流系统可分为两端直流系统和多端直流系统。对于多端直流系统一种实用的运行控制方案是:选择其中一个端点作为电压控制端<sup>[18]</sup>。对  $m$  端直流系统,端点  $m$  的直流电压作为参考电压  $U_{dm}$ ,那么整个直流网络方程表示

$$\begin{bmatrix} U_{d1} \\ U_{d2} \\ \vdots \\ U_{dm-1} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ \vdots \\ I_{dm-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} U_{dm} \quad (17)$$

式中  $\mathbf{R}$  为直流子系统的阻抗方阵。

2) 不等式约束条件。

不等式约束条件首先考虑交流系统不等式约

束条件，采用直流潮流模型后的约束条件

$$\begin{cases} |P_l| \leq f_{l,\max}, & P_l = B_l A \theta \\ P_{G_i,\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i,\max}, & i \in R_G \\ P_{L_j,\min} \leq P_{L_j} \leq P_{L_j,\max}, & j \in R_L \end{cases} \quad (18)$$

式中： $P_l$ 为线路有功潮流向量； $B_l$ 为由各支路导纳组成的对角矩阵； $A$ 为支路节点关联矩阵； $f_{l,\max}$ 为线路的热稳定约束； $P_{G_i,\min}$ 、 $P_{G_i,\max}$ 为发电机*i*的有功出力约束； $P_{L_j,\min}$ 、 $P_{L_j,\max}$ 为负荷*j*的有功约束。

直流系统的不等式约束条件为

$$\begin{cases} U_{d_i,\min} < U_{d_i} < U_{d_i,\max}, & i \in R_d \\ I_{d_i,\min} < I_{d_i} < I_{d_i,\max}, & i \in R_d \\ k_{T_i,\min} < k_{T_i} < k_{T_i,\max}, & i \in R_d \\ \theta_{d_i,\min} < \theta_{d_i} < \theta_{d_i,\max}, & i \in R_d \end{cases} \quad (19)$$

式中： $R_d$ 为所有换流站节点的集合； $U_{d_i,\min}$ 和 $U_{d_i,\max}$ 、 $I_{d_i,\min}$ 和 $I_{d_i,\max}$ 、 $k_{T_i,\min}$ 和 $k_{T_i,\max}$ 、 $\theta_{d_i,\min}$ 和 $\theta_{d_i,\max}$ 分别为直流系统的换流站的直流电压与电流约束、换流变压器变比约束、换流器的控制角约束。

### 2.3 考虑天气影响的 ATC 计算及评估流程

考虑天气影响的 ATC 计算及评估流程如图 3 所示。

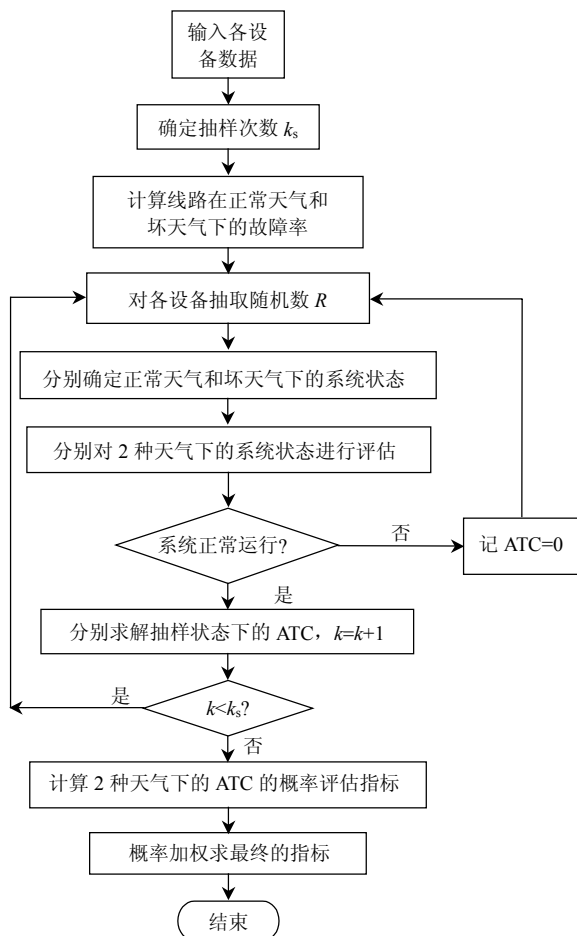


图 3 ATC 评估流程

Fig. 3 Flow chart for ATC evaluation

### 3 算例分析

根据所提出的评估指标、模型和算法，采用 Matlab7.1 编写基于非序贯蒙特卡罗仿真的 ATC 评估程序，采用改进的 IEEE-14 节点系统来验证基于非序贯蒙特卡罗仿真的 ATC 评估算法。改进的 IEEE-14 节点系统接线如图 4 所示。各换流站为双极换流站，直流系统参数见表 1。系统的基准容量取 100 MW，选取发电机 2 和 3 为输电断面的源点，选取负荷 12、13、14 为输电断面的负荷侧。设定抽样次数为 10 000，采用非序贯蒙特卡罗法仿真抽样系统的状态，具体参数见表 2 和 3。

考虑天气对线路的影响，若线路的故障有 80% 发生在坏天气，且正常天气和坏天气的平均持续时间分别为 250 h 和 2 h，即  $F=0.8$ ， $N=250$ ， $S=2$ 。设  $\lambda_1$  为正常天气下的故障率， $\lambda_2$  为坏天气下的故障率。

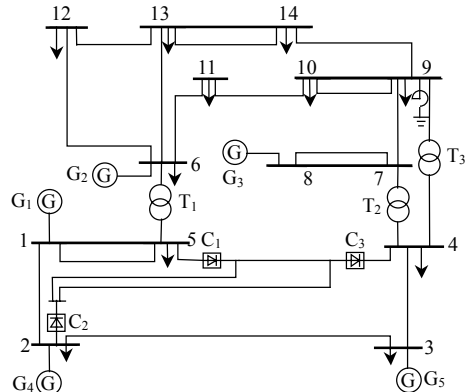


图 4 改进 IEEE-14 节点交直流混合系统

Fig. 4 The modified IEEE 14-bus test system

表 1 三端直流输电系统参数

Tab. 1 Parameters of three-terminal HVDC transmission system

换流器	换流器类型	交流母线	换流电抗/pu	补偿电纳/pu
C <sub>1</sub>	整流器	5	0.125	0.31
C <sub>2</sub>	整流器	2	0.080	0.32
C <sub>3</sub>	逆变器	4	0.125	0.69

直流线路	线路	线路单极	线路双极
首末端	电阻/pu	故障率	故障率
5-4	0.04	0.155	0.235
2-4	0.04	0.155	0.235
5-2	0.10	0.155	0.235

表 2 支路参数

Tab. 2 Parameters of branches

支路号	首末节点	支路故障率	支路号	首末节点	支路故障率
1	1-2	0.005 820	8	7-8	0.004 450
2	1-5	0.004 380	9	7-9	0.004 450
3	2-3	0.004 380	10	9-10	0.004 450
4	3-4	0.004 380	11	9-14	0.001 653
5	6-11	0.001 653	12	10-11	0.001 653
6	6-12	0.001 653	13	12-13	0.001 653
7	6-13	0.001 653	14	13-14	0.001 653

表 3 变压器、发电机和负荷参数

Tab. 3 Parameters of transformers, generators and loads

变压器	首末节点	变压器故障率	发电机节点号	发电机故障率	负荷波动规律
1	5-6	0.004 38	1	0.001	服从 $\sigma=0.02$ 的正态分布
2	4-7	0.004 38	3	0.003	
3	4-9	0.004 38	6	0.002	
			8	0.002	

由式(5)可得线路在正常天气和坏天气下的故障率, 计算结果见表 4。

针对正常天气和坏天气, 分别求取 ATC 的概率指标, 最终的 ATC 指标由二者的加权可得。求得 2 种天气状态下的部分状态的 ATC 结果见表 5 和 6, 求得的 ATC 概率指标见表 7, 衡量 ATC 不足量的定值  $C$  为 12 MW。

表 4 线路在正常天气和坏天气下的故障率

Tab. 4 Values of  $\lambda$  of lines in different weather condition

线路号	首末端节点号	故障率 $\lambda_1$	故障率 $\lambda_2$
1	1-2	0.001 2	0.586 7
2	1-5	0.000 9	0.441 5
3	2-3	0.000 9	0.441 5
4	3-4	0.000 9	0.441 5
5	6-11	0.000 3	0.166 6
6	6-12	0.000 3	0.166 6
7	6-13	0.000 3	0.166 6
8	7-8	0.000 9	0.448 6
9	7-9	0.000 9	0.448 6
10	9-10	0.000 9	0.448 6
11	9-14	0.000 3	0.166 6
12	10-11	0.000 3	0.166 6
13	12-13	0.000 3	0.166 6
14	13-14	0.000 3	0.166 6

表 5 正常天气下蒙特卡罗仿真法计算 ATC 的部分结果

Tab. 5 Partial results of ATC in normal weather condition

序号	TTC/MW	ATC/MW	序号	TTC/MW	ATC/MW
1	56.085 01	20.800 47	8	55.976 82	20.730 58
2	56.447 25	21.205 45	9	56.523 56	21.276 66
3	56.223 63	20.998 32	10	49.760 16	14.892 73
4	56.468 62	21.263 07	11	56.278 85	21.084 82
5	56.140 48	20.857 75	12	56.566 32	21.317 51
6	49.891 19	14.946 97	13	56.598 69	21.414 48
7	56.571 05	21.252 59	14	55.966 45	20.724 72

表 6 坏天气下蒙特卡罗仿真法计算 ATC 的部分结果

Tab. 6 Partial results of ATC in bad weather condition

序号	TTC/MW	ATC/MW	序号	TTC/MW	ATC/MW
1	56.085 01	20.800 47	8	55.976 82	20.730 58
2	56.447 25	21.205 45	9	56.523 56	21.276 66
3	56.223 63	20.998 32	10	49.760 16	14.892 73
4	56.468 62	21.263 07	11	56.278 85	21.084 82
5	63.998 76	28.323 12	12	56.566 32	21.317 51
6	49.891 19	14.946 97	13	41.425 56	0
7	56.571 05	21.252 59	14	55.966 45	20.724 72

表 7 ATC 的概率指标

Tab. 7 Indices of ATC statistic

指标	正常天气	坏天气	最终
$E_{ATC}/MW$	19.611 5	18.098 5	18.855 0
$V_{ATC}$	3.115 3	3.258 9	3.187 1
$\beta$	0.090 0	0.099 7	0.094 8
$F_{ATC,min}/MW$	0	0	0
$F_{ATC,max}/MW$	38.796 4	31.254 8	35.025 6
$P_{PAEZ}$	0.007 2	0.011 7	0.009 5
$P_{PANS}$	0.007 2	0.012 1	0.009 6

由表 5 和 6 可知, 正常天气和坏天气下的 TTC 和 ATC 大部分是相同的, 分析其原因如下。由于线路在坏天气下的故障率大于正常天气下的故障率, 那么用蒙特卡罗仿真法抽取线路状态时, 若得到正常天气下线路为故障状态, 则坏天气下线路也必为故障状态, 所以在 2 种天气情况下抽取出的系统状态大部分是相同的, 因此计算出的 TTC 和 ATC 也是相同的。

从表 7 可以看出, 坏天气下 ATC 等于 0 的概率  $P_{PAEZ}$  和 ATC 不足概率  $P_{PANS}$  比正常天气大, 原因是当坏天气下线路为故障状态时不能得出正常天气下也为故障状态的结论, 所以坏天气下整个系统的故障线路可能比正常天气下的故障线路多, 显然系统出现不稳定的概率也大, 因此  $P_{PAEZ}$  和  $P_{PANS}$  也大。

同时  $P_{PAEZ}$  和  $P_{PANS}$  是用来描述 ATC 的概率指标, 如果  $P_{PAEZ}$  比较高, 说明整个系统的运行风险很高, 需要采取一些必要的措施来保证现有输电任务的顺利执行, 如发电再调度、削负荷等。如果  $P_{PANS}$  比较高, 说明当输电任务增大时, 尤其是输电任务超过了特定值时, 系统的运行风险将会增加, 若网络的负荷持续增长, 则应该考虑相应区域的电网扩建或改造。

通过对正常天气和坏天气下的 ATC 进行评估得出系统最终的 ATC 概率指标, 这样能综合考虑包括天气在内的各种不确定性因素对 ATC 的影响。

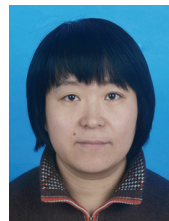
## 4 结论

为了综合考虑和反映各种不确定性因素对 ATC 的影响, 本文提出对交直流混合系统 ATC 进行概率评估的思想。采用非序贯蒙特卡罗仿真法仿真了系统可能的运行状态; 针对得到的系统状态, 用基于直流潮流的线性规划法来快速计算 ATC 值; 从充裕性方面定义了一系列概率评估指标, 最后采用概率统计的方法求得 ATC 的概率评估指标。通过

算例的验证和分析表明, 该算法能更全面描述不确定性因素影响下的电网输电能力, 并能为电力系统安全经济性能评估提供重要的参考信息。

## 参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 30-35.
- [2] Transmission Transfer Capability Task Force. Available transfer capability definitions and determination[C]//Princeton, New Jersey, USA: North American Electric Reliability Council, 1996: 1-40.
- [3] North American Reliability Council(NERC). Long term AFC/ATC task force: final report [EB/OL]. [2005-04-14]. [http://www.nerc.com/docs/docs/pubs/LTATF\\_Final\\_Report\\_Revised.pdf](http://www.nerc.com/docs/docs/pubs/LTATF_Final_Report_Revised.pdf).
- [4] 荆勇, 任震, 李柏青, 等. 天广交直流混合系统输电能力的研究[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 52-55.  
Jing Yong, Ren Zhen, Li Boqing, et al. Research on transmission capability of Tianguang AC and DC hybrid system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 52-55(in Chinese).
- [5] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 61-66.
- [6] 杨慎林, 李华强, 邸弢. 基于电压稳定约束下的交直流系统可用传输能力计算[J]. 四川电力技术, 2008, 31(5): 31-34.  
Yang Shenlin, Li Huaqiang, Di Tao. Available transfer capability calculation based on voltage stability constraints for AC/DC system[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2008, 31(5): 31-34(in Chinese).
- [7] 李国庆, 姚少伟, 陈厚合. 基于内点法的交直流混合系统可用输电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 35-39.  
Li Guoqing, Yao Shaowei, Chen Houhe. Available transfer capability calculation for hybrid AC/ DC systems based on interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 35-39(in Chinese).
- [8] Ji Ning, Gao Yajing, Zhou Ming, et al. The AC-DC hybrid transmission system ATC calculation based on continuation power flow[C]//Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing, China: SuperGen, 2009: 1-7.
- [9] Ji Ning, Gao Yajing, Zhou Ming, et al. A novel approach on ATC determination for AC/DC transmission system[C]//Power & Energy Society General Meeting. Calgary: PES', 2009: 1-8.
- [10] 刘健, 杨文字, 赵高长. 基于蒙特卡罗分析的配电网架规划方法比较[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 73-78.  
Liu Jian, Yang Wenyu, Zhao Gaochang. Comparison of expansion planning algorithms for distribution networks based on Monte-Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 73-78(in Chinese).
- [11] 李文沅, 卢继平. 暂态稳定概率评估的蒙特卡罗方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 18-23.  
Li Wenyuan, Lu Jiping. Monte Carlo method for probability transaction stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005 25(10): 18-23(in Chinese).
- [12] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型、方法和应用[M]. 周家启, 卢继平, 胡小正, 等译. 北京: 科学出版社, 2006: 30-80.
- [13] 任震, 何建军, 谌军, 等. 交直流网络系统可靠性评估的 Monte Carlo-FD 混合法[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 13-19.  
Ren Zhen, He Jianjun, Chen Jun, et al. Monte Carlo-FD comprehensive method for reliability evaluation of AC/DC hybrid network systems[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 13-19(in Chinese)
- [14] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 施普林格出版社, 2002: 1-154.
- [15] 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).
- [16] Ou Y, Singh C. Assessment of available transfer capability and margins[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 463-468.
- [17] 陆进军, 黄家裕. 一种高效灵活的电力系统多端直流潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 48-53.  
Lu Jinjun, Huang Jiayu. A versatile multi-terminal HVDC power flow method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 48-53(in Chinese).
- [18] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 200-201.



卢锦玲

收稿日期: 2010-09-26。

作者简介:

卢锦玲(1971), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行、分析与控制;

蔡红艳(1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制;

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。

(责任编辑 王晔)