

计及风险控制的多区域 ATC 概率优化 协调决策模型与方法

黄裕春¹, 杨 燕², 文福拴¹, 李 力³, 王 珂³, 高 超³

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641;

3. 广东电网公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

摘要: 在电力市场环境下进行多区域可用输电容量(ATC)决策时,需要在维持系统安全运行与风险可控的前提下优化分配和协调利用现有的输电网络资源。利用非序贯蒙特卡洛仿真导出指定子区域在各种不确定性因素影响下的 ATC 概率密度分布,在此基础上构造能够使得风险收益最大化的多区域 ATC 概率优化协调决策模型,并利用多目标非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解,由该模型得到的各区域 ATC 计及了系统运行中有关不确定性因素所引起的风险成本和区域间同步协调问题。以 IEEE 118 节点测试系统为例对所发展的模型与采用的算法的基本特征进行了说明。仿真结果表明,电力系统运行中的不确定性以及不同区域的相对重要程度影响多区域 ATC 的决策风险。

关键词: 可用输电容量; 风险; 收益; 多目标协调决策; 多目标非支配排序遗传算法; 模型

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.014

0 引言

区域间的可用输电容量(ATC)是指导电力市场交易活动的一个重要指标。ATC 能够综合反映电力系统的可靠性水平和经济性水平。北美电力可靠性委员会(NERC)对 ATC 的定义为:ATC 是在现有输电合同基础之上,在保证系统安全可靠运行前提下系统剩余的、可用于商业的最大输电容量^[1]。在数学上,ATC 等于最大输电容量(TTC)减去现有输电交易量(ETC)、输电可靠性裕度(TRM)和容量效益裕度(CBM)后的输电容量。

传统的 ATC 决策方法^[2]主要包括确定性方法如线性规划法、连续潮流法、最优潮流法、灵敏度分析法,以及能够考虑随机因素的不确定性方法如枚举法、蒙特卡洛仿真 MCS(Monte Carlo Simulation)法等^[1]。现有的方法侧重于考虑系统可靠性。

随着电力工业化改革的逐步深入,在 ATC 决策时就需要兼顾可靠性与经济性。国内外已有一些相关文献报道。文献[3]以枚举法为基础发展了一个以经济性最优为目标、安全性为约束的 ATC 决策模型。文献[4]构造了考虑发电报价的 ATC 决策模型,并提出了基于近似半光滑牛顿算法的求解方法;文献[5]在文献[4]的基础上进一步提出了考虑消费

者意愿的 ATC 模型。文献[6-7]考虑了系统运行中相关的不确定性因素,构建了 ATC 概率优化模型。文献[8]则引入广义保险理论,通过构建虚拟保险方法来求解 TRM。文献[9]发展了同时考虑输电能力最大和经济性最优的多目标 ATC 优化模型。

从数学上讲,ATC 是一个多维多约束非线性优化问题,已经提出了多种求解方法,如光滑函数算法^[10-11]、Benders 分解法^[12-13]、粒子群进化方法^[14]、模糊方法^[15]等。

上述模型和方法从不同角度研究了电力市场环境下 ATC 的数学模型和求解办法。然而,这些模型多数只考虑单一送/受电区域,假设考察对象区域外的系统情况是不变的。对于现代复杂电力系统,需要适当考虑整个系统内的潮流多区域间的安全同步输电问题^[16-17]。事实上,多个区域间的输电容量存在相互制约关系,这样把研究目标区域之外的其他区域看成固定不变而得到的 ATC 往往偏于乐观,在实际运行中很难达到。

在上述背景下,本文发展了一种以风险收益最大化为目标的多个区域输电容量优化协调的概率决策模型。风险收益原指投资者由于冒险投资而获得的额外收益。为集中于对不确定性因素的讨论,本文把风险收益定义为扣除各种不确定性因素所引起的风险损失后的经济收益。文中所涉及的风险收益是为了强调与无风险的经济收益的区别。首先,将多个区域间 ATC 决策表示为多目标优化问题,每个子区域 ATC 决策的风险收益最大化问题为其子目标;然后利用非序贯 MCS 法来模拟系统中的随机因素,并求取不同区域间 ATC 的概率密度分布;再采用多目标

收稿日期:2012-04-02;修回日期:2013-01-01

基金项目:国家高科技研究发展计划(863计划)资助项目(2011-AA05A105);国家自然科学基金资助项目(51177145);广东电网公司重点科研项目(DK0010DT0008)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program(863 Program) of China(2011AA-05A105),the National Natural Science Foundation of China(51177145) and the Key Program from Guangdong Power Grid Corporation(DK0010DT0008)

非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解所构造的优化模型,对不同区域间的ATC进行同步协调优化后得到一系列帕累托(Pareto)最优解,决策者只需从中“选择”满意解即可完成多区域ATC的协调决策;最后以IEEE 118节点系统说明了所发展的模型和采用的方法的基本特征。

1 以风险收益最大化为目标的ATC概率优化协调决策模型

无论是电力系统参数、元件随机停运等不确定性,还是电力市场交易所引起的不确定性,都会给电力系统运行带来风险。为了最小化不确定性因素可能导致的决策风险,已提出的针对单一区域ATC决策的优化模型^[3,7]为:

$$\max W(T) = B(T) - C(T)$$

其中, T 为待决策的ATC; $B(T)$ 为收入函数,譬如定义为输电服务收入函数,即单位输电服务价格与协议输电容量的乘积^[18]; $C(T)$ 为风险成本函数,表示由于风险的存在和风险事故发生后所必须支出的费用和预期经济利益的减少,因此可将其定义为输电合同中断的风险损失函数^[7],也可为其他各种机会成本函数如放弃商业用途换取其他社会经济收益等^[8]; $W(T)$ 为净收益函数,即风险收益。约束条件包括潮流约束和相关安全约束。

上述模型对解决单一区域ATC优化决策问题可以取得较好的效果。然而,随着电力系统规模的持续增大,其往往需要满足多个区域间电力同步输送的要求。因此,在满足系统安全性和可靠性的前提下,如何将输电资源合理地分配到各个区域中,以充分利用有限的输电资源,同时把相关的风险约束到有限的范围内,是电力市场环境值得重视的问题。针对单一区域模型所求得多个区域ATC最优决策量,是在假定其他区域ATC为零的情况下得到的,实际运行时一般是无法实现的。此外,在一个电力系统的不同区域中,可靠性和经济性的价值也是有差异的,如政治与经济中心地区的供电可靠性和经济性价值一般高于其他区域^[8]。因此,对多个区域输电容量进行兼顾可靠性与经济性的协调优化决策,不仅有利于充分利用现有的输电网络资源,同时能够降低系统运行风险并最大化风险收益。

以上述单一区域ATC优化决策模型为基础,本文把每个子区域ATC优化决策问题表示为一个优化子目标,构建了考虑风险收益最大的多区域ATC协调决策的多目标优化模型,定义其目标函数为:

$$\max [W_1, W_2, W_3, \dots, W_m]^T \quad (1)$$

其中, m 为待优化区域的数量; $[W_1, W_2, W_3, \dots, W_m]^T$ 为由各个子区域ATC决策的风险收益组成的优化

向量,子目标 $W_i(i=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个子区域ATC决策量相应的净收益,具体如式(2)所示。这样,多区域ATC优化决策就转化为多目标优化问题。

$$\begin{aligned} W_i(T_i) &= B_i(T_i) - C_i(T_i) \\ B_i(T_i) &= \lambda_{\text{ATC}_i} T_i \\ C_i(T_i) &= \sum_{h \in S} \beta_i(T_i - T_i(h)) P(h) \end{aligned} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

其中, $W_i(T_i)$ 为区域 i 在ATC决策量为 T_i 时的风险收益; $B_i(T_i)$ 为电网公司在区域 i 提供输电服务的收入函数; $C_i(T_i)$ 为区域 i 在ATC决策量为 T_i 时的风险成本函数,取为输电协议中规定的对区域 i 中断输电服务的支付赔偿费,一般由电网公司支付给输电服务购买方; λ_{ATC_i} 和 β_i 为对区域 i 的单位输电服务价格和输电服务中断时的赔偿费系数,可由输电服务供求双方协定,一般满足 $\beta_i < \lambda_{\text{ATC}_i}$; $P(h)$ 为系统状态 h 发生的概率; $T_i(h)$ 为系统状态 h 下的区域 i 的ATC;集合 S 为 $T_i(h) \leq T_i$ 的系统状态集合。

需要考虑的约束条件如下。

a. 潮流约束。

b. 发电机出力约束:

$$\begin{cases} P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \\ Q_{G,i}^{\min} \leq Q_{G,i} \leq Q_{G,i}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $P_{G,i}^{\max}$ 和 $P_{G,i}^{\min}$ 分别为第 i 台机组有功出力的上、下限; $Q_{G,i}^{\max}$ 和 $Q_{G,i}^{\min}$ 分别为第 i 台机组无功出力的上、下限。

c. 节点电压约束:

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_n \quad (4)$$

其中, U_i^{\max} 和 U_i^{\min} 分别为节点 i 电压幅值的上、下限; N_n 为系统节点总数。

d. 支路有功功率约束:

$$|P_j| \leq P_j^{\max} \quad j = 1, 2, \dots, N_b \quad (5)$$

其中, P_j^{\max} 为第 j 条支路有功容量; N_b 为系统中的支路总数。

2 子区域ATC的概率分布

2.1 随机因素的模拟

电力系统中存在多种不确定因素,如负荷随机波动和元件随机停运等。节点负荷波动一般可采用正态分布模拟;而元件的随机停运则可以用两状态模型模拟,即运行状态和非计划停运状态服从概率分布。

可以利用MCS法对随机因素进行抽样,进而通过潮流计算得到相应的系统运行状态。考虑到电力系统中元件的随机停运对区域ATC的影响较大,因此本文所研究的不确定因素主要针对这种情况。

2.2 子区域ATC概率分布的确定

在大规模电力系统不同区域间的功率交换方

面,现有研究工作已经证实了非相关区域也能通过相邻区域对功率交换产生难以准确模拟和分析的非线性影响^[19],即不同子区域间的 ATC 概率分布具有一定的相关性。由于要准确获取相关子区域间的 ATC 概率联合分布在技术上往往难以实现,一般可以考虑利用各个子区域的 ATC 边缘概率分布进行多区域 ATC 协调决策。各个子区域的 ATC 边缘概率分布的相关性可以借助经验知识或者运用 Copula 函数进行分析^[20]。为了简化计算,这里假设在系统各种可能的运行状态下,各个子区域间的 ATC 边缘概率分布相互独立。

对各个子区域 ATC 边缘概率分布的求取可沿用单一区域 ATC 的求解思路,即先假定所研究子区域外的机组出力 and 负荷水平保持不变,进而运用 MCS 法求得该子区域的 ATC 边缘概率分布。考虑到该方法计算量较大,可以提前离线求取。

采用 MCS 法时,首先对系统中的发电机组、输电元件和节点负荷进行随机抽样,然后通过对系统进行拓扑分析和潮流分析来判断系统状态是否可行。用 X 表示全部可行状态集合,对每个系统状态 $x \in X$,求取指定子区域 i 相应的最优 ATC 值 θ_i ,由式(6)可得相应的概率 P_{θ_i} 及其边缘概率密度分布 f_{pd} :

$$\begin{aligned} P_{\theta_i} &= \frac{N(\theta_i)}{N} \\ f_{pd}(\theta) &= \frac{N(\theta_i \leq \theta)}{N} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $N(\theta_i)$ 和 $N(\theta_i \leq \theta)$ 分别表示在仿真结果中 θ_i 和 $\theta_i \leq \theta$ 出现的次数, N 为总仿真次数。

具体步骤如下:

- a. 输入原始数据,包括系统设备(发电机组、输电元件)的故障率(强迫停运率)以及负荷的概率分布数据等;
- b. 对系统状态进行采样,得到 x ;
- c. 对系统状态 x ,假设所研究子区域外的发电和负荷保持不变,采用最优潮流法^[21]求取指定区域的 ATC 值 θ_i ;
- d. 重复步骤 b 和 c,直至达到给定抽样次数或者控制精度要求;
- e. 根据式(6)对得到的抽样结果进行分析处理,得到指定区域的 ATC 边缘概率分布。

3 求解方法

3.1 基于 NSGA-II 的求解方法

文献[22]在 NSGA(Nondominated Sorting Genetic Algorithm)的基础上发展了一种快速的多目标非支配排序遗传算法,简称 NSGA-II。该算法的最主要优点在于通过非支配排序划分等级和拥挤距离这

2 个指标来评价每个个体的优劣。在整个评价过程中不需要任何人为干预来给定权重系数以便将多目标转换为传统的单目标优化进行求解,这样可以最大限度地保持每个优化目标间的独立性。同时引入了精英策略,将父代种群与中间子代种群组合,共同竞争产生下一代,这有利于保证父代中的优秀个体不至于丢失,进而提高算法的寻优性能。文献[23-24]证明了 NSGA-II 是多目标算法家族中算法效率和寻优特性较为优异的一种多目标遗传算法。

NSGA-II 不需要人为定义偏好信息,这为多目标优化问题提供了一种求解思路。这种算法通过对解空间全局搜索得到一系列 Pareto 最优解,决策者只需根据实际问题的特征和需要从中选择满意解,即通过“选择”对各目标进行适当权衡。对于式(1)所描述的多目标优化问题,决策者只需从所得到的 Pareto 最优解集合(即所谓的 Pareto 前沿)中选取满意解,即可完成多区域 ATC 的协调决策。

采用 NSGA-II 求解 ATC 协调决策优化问题的步骤如下。

- a. 输入原始数据并设置算法参数,如最大允许迭代次数 k_{max} 、种群规模 M 、变异步长 F 和交叉概率 s 等。
- b. 采用随机方法生成初始种群,设置迭代次数 $k=1$ 和初始 Pareto 前沿为空集。
- c. 对于初始种群中的每一个体,修改电源区域中的发电机组出力和受电区域中的负荷水平,并基于式(2)及相应子区域的 ATC 概率密度分布 f_{pd} ,计算相应的目标函数 $W_i(i=1,2,\dots,m)$,并检验个体是否满足约束,对不满足约束的个体计算违反约束的程度。

d. 参照文献[25]中的方法进行变异和交叉操作,产生第 k 代子代种群。

e. 根据第 k 代子代种群中个体所表示的负荷水平,进行相应的机组出力和负荷水平调整,之后按照步骤 c 的办法逐一计算个体的目标函数值 W_i ,并对约束条件进行检验。

f. 采用非支配级别和拥挤距离指标判别解的优劣。对于第 k 次迭代产生的 $2M$ 个个体,分别计算每个个体的非支配级别和拥挤距离指标,判别出这 $2M$ 个个体的优劣。

g. 挑选出 M 个个体作为第 $k+1$ 代的父代种群,并更新第 k 代的 Pareto 前沿。

h. 若 $k > k_{max}$,则迭代结束;否则,令 $k=k+1$,再转入步骤 d。

i. 输出最新 Pareto 前沿结果。

3.2 求解流程

以风险收益最大化为目标的多区域输电容量优化协调概率决策模型的求解流程如图 1 所示。其中,

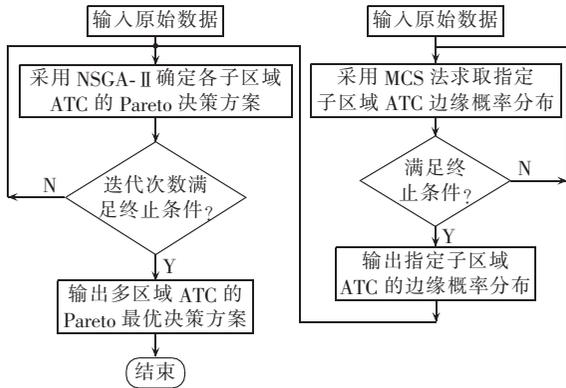


图 1 多区域 ATC 概率优化协调决策模型的求解流程
Fig.1 Flowchart for solving coordinated probabilistic optimal decision-making model of multi-area ATC

区域 ATC 的概率密度分布由提前离线计算得到,有关概率分布数据作为 NSGA-II 的优化程序的输入。

4 算例及结果分析

采用 IEEE 118 节点测试系统进行仿真计算。参照文献[26]中的方法,研究区域 B 到区域 A 和区域 C 的输送电力的、以风险收益最大化为目标的协调决策问题。主要经济参数的取值为:区域 B 至区域 A 的单位时间、单位容量的 ATC 价值为 48 \$/(MW·h),输电中断时所支付的需要支付的单位 ATC 赔偿系数为 96 \$/(MW·h);区域 B 至区域 C 的单位 ATC 价值为 60 \$/(MW·h),输电中断时需支付的单位 ATC 赔偿系数为 120 \$/(MW·h)。基于 Visual Studio 2005 平台编写了计算程序,仿真所用计算机的 CPU 为 Intel Core2 Duo,内存为 1 GB。

4.1 概率密度分布

首先按照第 2 节讨论的仿真方法求取所研究子区域的 ATC 概率分布。本文指定所研究的子区域为区域 A 和区域 C。计算过程中采用标么值,功率基准值取为 100 MV·A,仿真时段以小时为单位,负荷波动方差取为 0.01,仿真次数给定为 5000 次。图 2 和图 3 分别展示了区域 B 至区域 A 和区域 C 的 ATC 概率密度分布。

4.2 多目标优化结果

根据 MCS 法得到的指定子区域 ATC 的概率密度分布后,采用前述以风险收益最大为目标的多区域 ATC 协调决策模型,可得到相应的 Pareto 前沿,如图 4 所示。图 4 中同时给出了用传统的单区域 ATC 概率优化方法^[7](称文献[7]方法)所求得的结果,即图中的 a、b 和 c 3 点。

从图 4 可以看出,区域 B 至区域 A 和区域 B 至区域 C 的 ATC 是一种此消彼长的竞争关系。用文献[7]求得的最优 ATC 决策组合(图中 a 点)并没有落在解的可行域内,这表明用这种方法求得的多区域

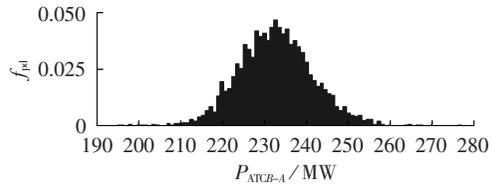


图 2 区域 B 至区域 A 的 ATC 概率密度分布
Fig.2 ATC probabilistic density distribution from area B to area A

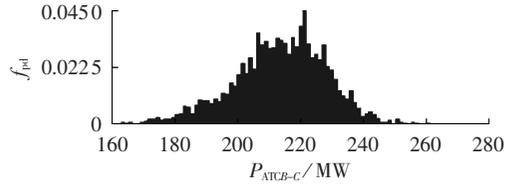


图 3 区域 B 至区域 C 的 ATC 概率密度分布
Fig.3 ATC probabilistic density distribution from area B to area C

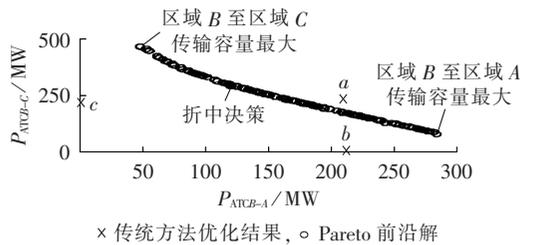


图 4 本文方法求得的 Pareto 前沿和传统方法的求解结果

Fig.4 Pareto front obtained by proposed method and result obtained by traditional method

ATC 决策组合并不能保证方案可行。这是由于文献[7]的方法没有考虑多区域 ATC 同步功率交换时不同区域之间存在非线性交互约束的问题,从而导致对多区域 ATC 评估结果偏于乐观。若只考虑单区域 ATC 优化,如图中的 b 和 c 2 点,则这样求得的最大风险收益并不满足 Pareto 最优。

为了说明所提出的模型与方法的有效性,表 1 给出了分别用文献[7]的方法和本文方法计算得到的区域 B 至区域 A 和区域 B 至区域 C 的以风险收益最大化为目标时 ATC 结果中的 2 组典型数据。

表 1 采用本文方法和传统方法求得的风险收益比较
Tab.1 Comparison of risk benefit between proposed method and traditional method

组别	指定区域	文献[7]方法		本文方法	
		最优 ATC/MW	最大风险收益/\$	最优 ATC/MW	最大风险收益/\$
1	B-A	234.51	11 256.25	48.62	2333.82
	B-C	228.13	13 688.02	464.90	27885.72
	合计	462.64	24 944.27	513.52	30219.54
2	B-A	234.51	11 256.25	93.35	4667.73
	B-C	228.13	13 688.02	406.21	20310.29
	合计	462.64	24 944.27	499.56	24978.02

下面对用本文方法和文献[7]方法得到的 2 组典型数据依次进行分析。

a. 第 1 组数据。当用文献[7]方法分别单独求取区域 B 至区域 A 和区域 B 至区域 C 的以风险收益最大化为目标的最优 ATC 时,获得的 2 个子区域的最优 ATC 都能达到 200 MW 以上,风险收益总和接近 \$25000。然而,在用本文方法所求得 Pareto 前沿中,包括最大风险收益总和超过 \$30000 的 ATC 决策组合 ($\theta_{B-A}=48.62$ MW, $\theta_{B-C}=464.90$ MW)。通过减少区域 B 至区域 A 的低价 ATC 换取了区域 B 至区域 C 的高价 ATC 的大幅提升,从而提高了最大风险收益的总和。因此,与文献[7]方法相比,采用本文方法能够发现风险收益更大的决策组合。

b. 第 2 组数据。在风险收益总和和相差不大的情况下,由文献[7]方法求得 ATC 决策组合 ($\theta_{B-A}=234.51$ MW, $\theta_{B-C}=228.13$ MW) 大体实现了对从区域 B 至区域 A 和从区域 B 至区域 C 在输电资源方面的平均分配。而由本文方法求得的 ATC 决策组合为 $\theta_{B-A}=93.35$ MW, $\theta_{B-C}=406.21$ MW, 输电资源更多地偏向于重要性更高的区域 C 。这表明本文方法可以在基本不影响风险收益总量的情况下根据不同区域的重要性来实现对输电资源的更合理分配。

从 IEEE 118 节点测试系统的仿真结果可以看出,采用文献[7]方法所求得的多区域 ATC 优化结果没能适当计及多个区域 ATC 同步增长情况,由此得到的优化结果未必可行。此外,文献[7]方法也无法计及以风险收益最大为目标的多区域 ATC 问题中不同区域在重要性方面的差异,而本文方法则可以处理该问题。

5 结语

电力市场环境下的多区域 ATC 决策需要同时兼顾可靠性和经济性因素。在保证系统安全运行的前提下,应该充分利用有限的输电资源,对多区域 ATC 进行协调优化决策。在此背景下,本文构造了一种以风险收益最大化为目标的多区域 ATC 概率优化协调决策模型。首先利用 MCS 法推导出考虑不确定性因素影响时指定子区域的 ATC 概率密度分布,在此基础上建立了以风险收益最大为目标的多区域 ATC 协调决策模型。与现有方法相比,所发展的模型与方法能够充分考虑系统运行中的不确定性和不同区域在重要性方面的差异,对多区域 ATC 进行同步协调优化,得到一系列 Pareto 最优解。最后,以 IEEE 118 节点系统对所提出的模型和方法进行了说明。

参考文献:

- [1] 崔雅莉,别朝红,王锡凡. 输电系统可用传输能力的研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(4):70-75.
CUI Yali, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Study on available transfer capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4):70-75.
- [2] 杨洪明,荆朝霞,段献忠. 电力市场下电网的可传输容量[J]. 电力自动化设备,2002,22(2):34-37.
YANG Hongming, JING Zhaoxia, DUAN Xianzhong. Available transfer capability of transmission network in power market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(2):34-37.
- [3] da SILVA A M L, MARANGON L J W, ANDERS G J. Available transmission capability-sell firm or interruptible[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4):1299-1305.
- [4] 李国庆,唐宝. 计及发电报价的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):18-22.
LI Guoqing, TANG Bao. Available transfer capability calculation considering generation bidding in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8):18-22.
- [5] 张昌华,孙荣富,何峰,等. 计及发电机报价和负荷消费意愿的可用输电能力计算[J]. 电力系统自动化,2007,31(23):19-23.
ZHANG Changhua, SUN Rongfu, HE Feng, et al. Available transfer capability assessment considering generation bidding and consumer inclination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23):19-23.
- [6] 崔雅莉,别朝红,王锡凡. 输电系统可用输电能力的概率模型及计算[J]. 电力系统自动化,2003,27(14):36-40.
CUI Yali, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Study on probabilistic models and algorithms of available transfer capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14):36-40.
- [7] 张强,韩学山,徐建政. 可用输电能力的概率优化决策模型与计算[J]. 电力系统自动化,2007,31(23):15-18.
ZHANG Qiang, HAN Xueshan, XU Jianzheng. Probabilistic optimal decision-making model and solution for available transfer capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23):15-18.
- [8] 凡鹏飞,张粒子,麻秀范,等. 基于保险理论的输电可靠性裕度决策模型[J]. 电力系统自动化,2010,34(10):40-44.
FAN Pengfei, ZHANG Lizi, MA Xiufan, et al. A decision model of transmission reliability margin based on insurance theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10):40-44.
- [9] GOH S H, XU Z, DONG Z Y, et al. Economic constrained transfer capability assessment[C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. San Francisco, USA: [s.n.], 2005:251-258.
- [10] 张永平,童小娇,倪以信,等. 基于半光滑牛顿法的可用输电能力新算法[J]. 电力系统自动化,2004,28(7):35-38.
ZHANG Yongping, TONG Xiaojiao, NI Yixin, et al. A novel method for calculating available transfer capability using semi-smooth Newton method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7):35-38.
- [11] 吴伟杰,童小娇,严正,等. 基于光滑化函数的 ATC 新模型及其有效算法[J]. 电力系统自动化,2004,28(19):32-35.
WU Weijie, TONG Xiaojiao, YAN Zheng, et al. New smooth-function based ATC model and its effective algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19):32-35.
- [12] SHAABAN M, LI W, LIU H, et al. ATC calculation with steady-state security constraints using Benders decomposition[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(5):611-615.
- [13] 默哈莫德·夏班,刘皓明,李卫星,等. 静态安全约束下基于 Benders 分解算法的可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报,2003,23(8):8-11.

- MOHAMED Shaaban,LIU Haoming,LI Weixing,et al. ATC calculation with static security constraints using Benders decomposition[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(8):8-11.
- [14] RAMEZANI M,HAGHIFAM M R,SINGH C,et al. Determination of capacity benefit margin in multiarea power systems using particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Power Systems,2009,24(2):631-641.
- [15] 金华征,程浩忠,杨晓梅,等. 模糊集对分析法应用于计及ATC的多目标电网规划[J]. 电力系统自动化,2005,29(21):45-49.
- JIN Huazheng,CHENG Haozhong,YANG Xiaomei,et al. Application of fuzzy set pair analysis in multi-objective transmission network planning considering ATC[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(21):45-49.
- [16] OTHMAN M M,RAHMAN N,SASI D S,et al. Inter-area transfer capability assessment considering optimal flexible solutions of capacity benefit margin[C]//Proceedings of IEEE International Power Engineering and Optimization Conference(PEOCO'2012). Melaka,Malaysia:[s.n.],2012:475-479.
- [17] KHATIR A A,ETARD V,CHERKAOUI R. Assessment of total transfer capability for simultaneous transactions in decentralized multi-area power systems[C]//Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,CA,USA:[s.n.],2012:1-6.
- [18] 王蓓蓓,李扬,黄霆,等. 市场环境计及风险和商业化成分的可用输电能力粒子群优化计算[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):8-13.
- WANG Beibei,LI Yang,HUANG Ting,et al. Available transfer capability calculation with particle swarm optimization considering risk and commercial components of power market[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(10):8-13.
- [19] 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):21-25.
- LI Guoqing,WANG Chengshan,YU Yixin. A survey on transmission transfer capability of interconnected electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(4):21-25.
- [20] PAPAETHYMIU G,KUROWICKA D. Using copulas for modeling deling stochastic dependence in power system uncertainty analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems,2009,24(1):40-49.
- [21] 汪峰,白晓民. 基于最优潮流方法的输电容量计算研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):35-40.
- WANG Feng,BAI Xiaomin. OPF based transfer capacity calculation[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(11):35-40.
- [22] DEB K,PRATAP A,AGARWAL S,et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm:NSGA-II[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.
- [23] 李智欢,段献忠. 多目标进化算法求解无功优化问题的对比分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):57-64.
- LI Zhihuan,DUAN Xianzhong. Comparison and analysis of multiobjective evolutionary algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(10):57-64.
- [24] ABIDO M A. Multi-objective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation,2006,10(3):315-329.
- [25] DAS S,SUGANTHAN P N. Differential evolution:a survey of the state-of-the-art[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation,2011,15(1):4-31.
- [26] 杨燕,文福拴,李力,等. 可用输电容量协调决策的多目标机会约束规划模型与方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):37-43.
- YANG Yan,WEN Fushuan,LI Li,et al. A coordinated model for available transfer capability decision-making employing multi-objective chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(13):37-43.

作者简介:

黄裕春(1987-),女,广东广州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性评估(**E-mail**:eehuangyc@gmail.com);

杨燕(1986-),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性分析(**E-mail**:yangyan.tracy@gmail.com);

文福拴(1965-),男,河南林州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统故障诊断与系统恢复和电力市场(**E-mail**:fushuan.wen@gmail.com)。

Coordinated probabilistic optimal decision-making model for multi-area ATC with risk control

HUANG Yuchun¹, YANG Yan², WEN Fushuan¹, LI Li³, WANG Ke³, GAO Chao³

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

3. Electric Power Dispatch and Control Center of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China)

Abstract: In the decision-making of multi-area ATC (Available Transfer Capacity) in electricity market environment, the existing resources of transmission network should be optimally dispatched and coordinately employed on the premise that the secure system operation is maintained and risk associated is controllable. The non-sequential Monte Carlo simulation is used to determine the ATC probability density distribution of specified areas under the influence of several uncertainty factors, based on which, a coordinated probabilistic optimal decision-making model with the maximal risk benefit as its objective is developed for multi-area ATC. The NSGA-II is applied to calculate the ATC of each area, which considers the risk cost caused by relevant uncertainty factors and the synchronous coordination among areas. The essential characteristics of the developed model and the employed algorithm are illustrated by the example of IEEE 118-bus test system. Simulative result shows that, the risk of multi-area ATC decision-making is influenced by the uncertainties in power system operation and the relative importance degrees of different areas.

Key words: available transfer capacity; risks; benefit; multi-objective decision-making; NSGA-II; models