

用随机规划法计算可用传输容量

谭永丽¹, 赵遵廉², 陈允平¹

(1. 武汉大学, 湖北 武汉 430072; 2 国家电力调度通信中心, 北京 100031)

摘要: 该文提出了一种新颖的方法, 来计算互联系统中通过预定界面的 ATC (Available Transfer Capability) 值。它把电力系统中的不确定因素: 发电机开断、线路开断和负荷预测误差, 处理为随机变量, 用基于随机规划法的混合方法, 二阶段求索随机规划法和机会约束规划法求解。经过算例检验, 此方法是有效的。

关键词: 可用传输容量 ATC; 随机规划法; 互联系统

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)11-0001-04

0 引言

1992 年美国国会发布了联邦电力法, 随之联邦能源管制委员会 (FERC) 按其要求开放输电网并在发电企业中引入竞争。为促进企业竞争和输电服务的开放, 要求计算每一控制区域的可用传输容量 ATC (Available Transfer Capability), 并在实时信息系统 (OASIS) 上及时发布。

1 ATC 定义

根据 FERC 的定义, ATC 是输电网传输能力的一种度量标准, 它反映出在已成交的传输容量基础上, 输电网对市场交易还可提供的最大传输容量。ATC 可以减少输电网在实时运行中发生阻塞的概率, 还可以作为输电网裁减交易, 消除阻塞的标准。因此, 计算出准确的 ATC 能促进电力市场的发展。

ATC 值的计算需要考虑许多因素的影响, 如热过载能力约束, 节点电压偏差、静态稳定约束、动态稳定约束和电压稳定约束及基准传输情况、系统网络拓扑、合同签订数量和有效时间、预测负荷、输电线路和发电机的检修计划、系统预想事故情况。因此其计算相当复杂, 而公布到 OASIS 上的 ATC 信息要求不断更新, 来实时、准确地反映电网现有传输能力, 所以 ATC 的准确性和实时性是计算的研究重点。

2 ATC 的计算方法

目前 ATC 的计算方法主要有线性算法、连续潮流法、最优潮流法、灵敏度分析法等。线性算法以直流潮流为基础, 计算速度快, 目前得到广泛应用, 但它只能考虑热过载能力约束, 无法计及无功潮流和电压限值情况。连续潮流法可以方便地考虑各

种约束条件, 精度高, 但也有缺点如: 计算时间长, 无法满足在线计算要求; 系统节点功率注入变化的方向向量在计算中取为定值, 因而计算结果较为保守; 考虑 $N-1$ 静态安全约束时很不方便, 只能机械地重新计算潮流方程; 条件数 增长步长难以合理确定。最优潮流法以数学规划为基础, 对约束条件有很强的处理能力, 计算效果比连续潮流法更好, 但它难以考虑动态约束条件; 计算时间更长, 难以满足在线要求; 计算前, 所有网络参数必须已知。灵敏度分析法利用系统中某些量的变化关系分析问题, 与连续潮流法和最优潮流法配合使用, 当电网支路断开、发电机中断或其他因素改变后, 能快速计算变化了的 ATC 值。

3 随机规划法

当前, 计算 ATC 值的大多数方法在考虑到系统中的不确定因素如: 输电线开断、发电机开断和负荷预测误差时, 存在一定局限性。它们有的是用一阶灵敏度方法考虑网络不确定性因素; 有的是用最优潮流法对故障筛查, 在不同的假设系统条件下进行大量的最优潮流计算。那么如何更合理有效地考虑网络不确定性因素? 随机规划法在这方面作出了探索。

3.1 随机规划法数学模型

用随机规划法计算出准确的 ATC 值, 要考虑三个不确定因素: 输电线开断、发电机开断和负荷预测误差。根据数据特征, 在模型中把发电机的可用性和输电线的可用性看作是服从 $0-1$ 分布的离散型随机变量 x 和 y , 如式 (1) 和 (2) 所示, 其中 $p(\tilde{x})$ 和 $p(\tilde{y})$ 式中的 p 是对应不同状态的概率。负荷变量看作是由于天气条件或预测误差等因素导致在预测值附近波动的连续型随机变量 z 。这里的负荷预测

值,是指在某一个时刻的预测值,它是负荷的近似值。由于天气条件或预测误差等因素导致在预测值附近波动,我们可以认为它服从正态分布。因为根据经验,预测的误差是服从正态分布的。一般来说,若影响某一数量指标的随机因素很多,而每个因素的随机影响所起的作用都不太大,则这个指标近似服从正态分布。而且在自然现象和社会现象中,大量随机变量都服从或近似服从正态分布。

在模型中认为它是服从参数为 μ , σ^2 的正态分布 $\tilde{\sim} N(\mu, \sigma^2)$, μ 是期望值, σ^2 是均方差,如式 (3) 所示。

$$p(\tilde{\sim}) = \begin{cases} p^1, & \text{当 } \tilde{\sim} = 1, \text{ 即输电线在运行} \\ p^0, & \text{当 } \tilde{\sim} = 0, \text{ 即输电线开断} \end{cases} \quad (1)$$

$$p(\tilde{\sim}) = \begin{cases} p^1, & \text{当 } \tilde{\sim} = 1, \text{ 即发电机在运行} \\ p^0, & \text{当 } \tilde{\sim} = 0, \text{ 即发电机开断} \end{cases} \quad (2)$$

$$f(\tilde{\sim}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tilde{\sim}-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

求取 ATC 值的数学模型为:

$$P_1: \text{Max} F(X, \tilde{\sim}, X^*) = \sum_h (P_{L_h^*}(\tilde{\sim}, X^*) - P_{L_h}(X)) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } G(X, \tilde{\sim}, \tilde{\sim}) = \tilde{\sim} \quad (5)$$

$$G^*(\tilde{\sim}, X^*, \tilde{\sim}, \tilde{\sim}) = \tilde{\sim}^* \quad (6)$$

$$L_{\min} \leq L(X), L^*(\tilde{\sim}, X^*) \leq L_{\max} \quad (7)$$

这里 X 是状态向量,代表电压角度和电压幅值 V , $\tilde{\sim}$ 是通过预定断面的线路集合, P_{L_h} 是输电线路 h 的有功功率, $h \in \tilde{\sim}$, L 表示运行约束,包括节点电压约束和线路热过载约束。带有 * 号表示临界状态,不带 * 号表示当前运行状态, \min 和 \max 分别表示变量最小值和最大值。

式 (4) 是目标函数,为使通过预定断面的线路有功传输容量在已成交的传输容量基础上,对市场交易还可提供的最大传输容量。

等式 (5) 是当前状态潮流等式,等式 (6) 是临界状态潮流等式,即表示从当前状态等值点过渡到了对应于负荷因子 $\tilde{\sim}$ 的临界状态等值点。

ATC 值的求解,是通过使所有的负荷在功率因数保持恒定的情况下,统一按负荷因子 $\tilde{\sim}$ 逐渐增加,一直达到线路热过载约束极限或节点电压约束极限即临界状态时,求得的预定断面增加的传输功率就是可用传输容量 ATC。负荷可按式增加。

$$P_{ij} = P_{i0} + (s \cos \theta_i), \quad i \text{ 是节点, } s \text{ 是视在功率, } \cos \theta_i \text{ 是功率因数}$$

当负荷因子 $\tilde{\sim} = \tilde{\sim}_0$ 时,对应基本负荷,当 $\tilde{\sim} =$

$\tilde{\sim}_*$ 时,对应临界负荷, $\tilde{\sim}_*$

等式 (5)、(6)、(7) 的详细表达式为:

$$\begin{cases} \tilde{\sim} P_{Gi} - \sum_{j=1}^n v_i v_j \tilde{\sim} y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - v_{ij}) = \tilde{\sim} \cos \theta_i \\ \tilde{\sim} Q_{Gi} - \sum_{j=1}^n v_i v_j \tilde{\sim} y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - v_{ij}) = \tilde{\sim} \sin \theta_i \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tilde{\sim}^* P_{Gi} - \sum_{j=1}^n v_i^* v_j^* \tilde{\sim}^* y_{ij} \cos(\theta_i^* - \theta_j^* - v_{ij}^*) = \tilde{\sim}^* \cos \theta_i \\ \tilde{\sim}^* Q_{Gi} - \sum_{j=1}^n v_i^* v_j^* \tilde{\sim}^* y_{ij} \sin(\theta_i^* - \theta_j^* - v_{ij}^*) = \tilde{\sim}^* \sin \theta_i \end{cases} \quad (9)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max}, \quad 0 \leq I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \quad (10)$$

y_{ij} v_{ij} 是 (i, j) 支路的导纳。

3.2 数学方法

最优随机规划法的基本思想是把随机问题转化为等价的确定性问题,这样常规的最优规划解法就可以被用来求出最优解。目前,求解随机规划有 2 种主要方法:二阶段求索随机规划法 (SPR) 和机会约束规划 (CCP)。

二阶段求索随机规划法的基本思想是把整个问题分为二阶段,把第二阶段求索的结果带入第一阶段,再对第一阶段的目标函数求最优。这一规划法的主要缺点是会扩大模型规模,增加计算量,尤其是有连续变量的情况下更严重。

机会约束规划法主要针对约束条件中含有随机变量且必须在观测到随机变量的实现之前作出决策的问题。考虑到所作决策在不利的情况发生时可能不满足约束条件,而采用一种原则,即允许所作决策在一定程度上不满足约束条件,但该决策应使约束条件成立的概率不小于某一置信水平。机会约束规划的最大优点是它转化为确定性的数学规划问题的规模并不比原始的随机模型大,但是它是利用连续随机变量的概率密度函数求解,因此只能处理连续型变量。为了有效地求解既包含离散型变量又包含连续型变量的随机模型,提出一个新颖的混合随机数学法,它综合利用二阶段求索随机规划法和机会约束规划法,一步步地把原始的复杂随机模型转化为等价的确定型模型。

第一步,为了处理离散变量,用二阶段求索随机规划法,把原始的既包含离散变量又含连续变量的随机模型转化为暂时的只含有连续变量的随机模型。

$$P_2: \text{Stage1: Max} F(X, \tilde{\sim}, X^*) \quad (11)$$

$$s t : G(X) = E(\tilde{\omega}) \quad (12)$$

$$G(\omega, X) = E(\tilde{\omega}) \quad (13)$$

$$L_{\min} \leq L(X), L(\omega, X) \leq L_{\max} \quad (14)$$

$$\text{Stage 2: Min} Q = E (f(Y^{+s} + Y^{-s}) + f_s (Y^{+s} + Y^{-s})) \quad (15)$$

$$s t : Y^{+s} - Y^{-s} = G(X, \tilde{\omega}, \tilde{\omega}^s) - \tilde{\omega} \quad (16)$$

$$Y^{+s} - Y^{-s} = G_s(\omega, X, \tilde{\omega}, \tilde{\omega}^s) - \tilde{\omega} \quad (17)$$

$$Y^{+s}, Y^{-s}, Y^{+s}, Y^{-s} \geq 0, \forall s, s \in S_c \quad (18)$$

带标号 s 的离散变量是表示实现情况, S_c 表示离散变量的所有可能情况, E 表示 $\tilde{\omega}$ 变量的期望值。第一阶段, 假设系统未受扰动并且不存在负荷预测误差, 确定 X, X^* 和 $\tilde{\omega}$ 的值, 在第二阶段, $G(X, \tilde{\omega}, \tilde{\omega}^s)$ 与 $\tilde{\omega}$ 的差为 $|Y|$, f 是差值 $|Y|$ 的罚函数, 这样问题就表述为在约束条件下, 极小化求索值 Q , Q 值是罚函数的期望值。

第二步, 现在, 我们可以清楚地看到在暂时的随机模型 P_2 中只包含连续型随机变量, 为了处理连续型变量, 把这个模型转化为等价的确定性问题, 由于 $\tilde{\omega}$ 服从正态分布, 因此根据式 (16), Y^{+s} 和 Y^{-s} 也是随机变量。考虑到在离散变量的不同实现情况下, $\tilde{\omega}$ 的实现情况不同, 最小化 $G(X, \tilde{\omega}, \tilde{\omega}^s)$ 和 $\tilde{\omega}$ 的差值就相当于最小化 Y^{+s} 和 Y^{-s} 的极大值。很明显, 有了第一阶段的不确定性结果, 在情况 s 下, $\tilde{\omega}$ 的极限值直接影响到 Y^{+s} 和 Y^{-s} 的极大值。由于正态分布变量 $\tilde{\omega}$ 是无界的, 我们只考虑相对置信区间的 $\tilde{\omega}$ 极限值。一般取为 $0.95 \sim 1$, 式子为

$$p(\min \tilde{\omega} \leq \tilde{\omega} \leq \max \tilde{\omega}) = \quad (19)$$

运用机会约束规划法, 可以求得 $\tilde{\omega}$ 的极限值, 随之可以得到 s 情况下的 Y^{+s} 和 Y^{-s} 的极大值, 类似地也可以得到 Y^{+s} 和 Y^{-s} 的极大值。

根据以上的分析, 我们可以从模型 P_2 中得到一个完整的确定的模型 P_3 。

$$P_3: \text{Max} F(X, \omega, X^*) - E (f(\max(Y^{+s} + Y^{-s})) + f_s (\max(Y^{+s} + Y^{-s}))) \quad (20)$$

$$s t : G(X) = E(\tilde{\omega}) \quad (21)$$

$$G(\omega, X) = E(\tilde{\omega}) \quad (22)$$

$$L_{\min} \leq L(X), L(\omega, X) \leq L_{\max} \quad (23)$$

$$\max Y^{+s} = Y_+(X, \tilde{\omega}, \tilde{\omega}^s, \tilde{\omega}) \quad (24)$$

$$\max Y^{-s} = Y_-(X, \tilde{\omega}, \tilde{\omega}^s, \tilde{\omega}) \quad (25)$$

$$\max Y^{+s} = Y_{+*}(\omega, X^*, \tilde{\omega}, \tilde{\omega}^s, \tilde{\omega}) \quad (26)$$

$$\max Y^{-s} = Y_{-*}(\omega, X^*, \tilde{\omega}, \tilde{\omega}^s, \tilde{\omega}) \quad (27)$$

$$\max Y^{+s}, \max Y^{-s}, \max Y^{+s}, \max Y^{-s} \geq 0, \forall s, s \in S_c$$

以上由 P_1 型转换到 P_2 型, 是用二阶段求索随机规划法处理离散变量, P_2 型只含有连续型随机变量。由 P_2 型转换到 P_3 型是用机会约束规划法处理连续型变量。

实际运算中程序包含三个步骤: 用二阶段求索随机规划法和机会约束规划法转化为确定性模型, 交流潮流模型, 运用负荷因子按常规最优规划法求解 ATC。

4 算例

本方法用一个含 29 节点、69 分支的系统进行计算检验, 系统拓扑图见图 1, 此系统发电中心和负荷中心分布于北面 and 南面, 这样导致大量电量由北至南通过输电走廊传输。

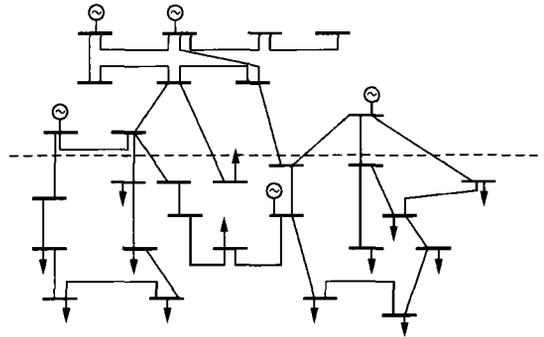


图 1 系统拓扑图

Fig 1 System topology

在计算中假设: 未受扰动的系统所有高压节点电压标幺值在 $0.9 \sim 1.1$ 之间。为简化计算, 假设随机变量是相互独立的, 发电机开断和线路开断不会同时发生。

计算时分 2 种情况求 ATC 值:

情况 1 是考虑到三个主要的不确定因素时, 预定界面的计算值。情况 2 是未考虑到不确定因素时的计算值。两种情况的计算结果在表 1 中给出。从表 1 中可以很清楚地看到当忽略了不确定因素时, 可能导致系统危机。

表 1 ATC 计算结果表

Tab 1 Results of ATC calculation

情况	描述	ATC MW	ω
1	考虑不确定因素	4 627.85	1.364 8
2	不考虑不确定因素	4 723.41	1.379 1

5 结论

本文提出的混合随机规划法综合利用了两阶段

求索随机规划法和机会约束规划法。本方法考虑到了影响值的不确定因素,经过实际系统计算和比较,表明本方法是有效的。

参考文献:

- [1] Kall P, Wallace S W. Stochastic Programming[M]. New York: Wiley, 1994.
- [2] Xiao Y, Song Y H. Available Transfer Capability (ATC) Evaluation by Stochastic Programming[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000: 50-52.
- [3] Gravener M H, Nwankpa C. Available Transfer Capability and First Order Sensitivity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14: 512-518.
- [4] 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 Hong-ming, JING Zhao-xia, DUAN Xian-zhong Available Transfer Capability of Transmission Network in PowerMarket[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(2): 34-37.

收稿日期: 2004-09-22; 修回日期: 2005-01-06

作者简介:

谭永丽(1973-),女,博士研究生,研究方向为电力市场; E-mail: dhtan@whu.edu.cn

赵遵廉(1946-),男,博士生导师,研究方向为电力市场;

陈允平(1945-),男,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制、电力市场、灵活交流输电系统。

Stochastic programming application in available transfer capability estimation

TAN Yong-li¹, ZHAO Zun-lian², CHEN Yun-ping¹

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. National Electric Power Dispatch & Communication Center, Beijing 100031, China)

Abstract: This paper proposes a novel method which evaluates the available transfer capability of prescribed interfaces in interconnected power networks. The uncertainty factors, including generator forced outage, transmission line outage, and load variations are considered as random variables. This complex problem is solved by hybrid Stochastic method that takes advantage of both two-stage Stochastic programming with recourse and chance constrained programming. The effectiveness of the method is proved by an example.

Key words: available transfer capability(ATC); Stochastic programming; interconnected power systems

征 稿 启 事

《继电器》杂志 1973 年创刊,一直坚持“理论联系实际、面向生产应用”的办刊宗旨,关注继电保护行业的发展,传承技术领域的精髓。多年来在继电保护及自动化行业里兢兢业业,见证了继电保护技术的进步与超越。从电磁型继电保护到今天的微机保护,继电器杂志一直站在技术的前沿,与广大科技工作者一起为推动继电保护行业的繁荣尽一份绵薄之力。2004 年《继电器》杂志改为半月刊,以更多的精力关注继电保护技术的新发展。随着微机保护的普及和网络技术、人工智能等技术的应用,继电保护向微机化,网络化,智能化,保护、控制、测量和数据通信一体化发展,各种新原理新理论层出不穷。

为此,《继电器》杂志从 2005 年第 13 期起隆重推出继电保护专栏,与权威专家一起审视行业发展的趋势。作为一个长期保留栏目,它的生命力源自大家的关心与支持,特征求以下方面的稿件:

1. 继电保护新原理和新算法的探讨;
2. 继电保护新技术的应用;
3. 继电保护新产品的开发;
4. 继电保护装置现场运行经验。

凡有关以上内容的优秀稿件,一经录用适当优先提前发表。欢迎业内所有致力于继电保护技术发展的同仁踊跃投稿,共同促进继电保护行业的繁荣与发展。

联系电话: 0374 - 3212254, 3212234

投稿邮箱: dep_s@xjgc.com, dep_s@sina.com