1993 年 7 月
第 16 卷第 4 期

重 庆 大 学 学 报
JOURNAL OF CHONGQING UNIVERSITY

Vol. 16, №. 4
Jul. 1993

93, 16 (4) 1—5

负荷不相关时两互联系统的随机生产模拟*

The Probabilistic Production Simulation of Interconnected Generating Systems with Independent Loads

杨秀苔 Yang Xiutai　张宗益 Zhang Zongyi　徐国禹 Xu Guoyu
（重庆大学）

TM 743

摘要 在加权多正态分布直接算法的基础上，提出了负荷不相关时互联系统的随机生产模拟法，该法可求出互联系统机组的发电量、发电费用、可靠性指标及系统互联后产生的经济效益。此外，还研究了联络线对系统互联时的影响。

关键词 概率/概率积分计算；模拟　电力系统，互联系统
中国图书资料分类法分类号 TM743

ABSTRACT A new method, based on the direct method of weighting multiple normal distributions, is proposed to evaluate the production costs of two interconnected systems. It can be applied in calculation of expected power generation, reliability indexes and production coats of two interconnected systems without their load correlation. The effect of the linking line on the interconnection is also studied.

KEYWORDS probability; calculus of probability integral; simulation

0 引　言

两个电力系统互联不仅可以提高系统运行的可靠性，而且还将产生互联经济效益。这是因为在某些时间段内，一个系统的发电成本可能低于另一个系统，而在其它时间段内则可能相反。这样发电成本高的系统（买方）将考虑通过联络线向发电成本低的系统（卖方）购电以降低发电成本。在售（购）电价格高于卖方的边际发电成本且低于买方的边际发电成本时，售（购）电对双方都是有利的，双方将考虑达成某种售（购）电协议，以分享由于联网带来的经济效益。显然，在协议达成之前，买卖双方都希望了解是否存在这种机会以及其效益究竟有多大？这就要求对互联系统进行随机生产模拟。Khan 和 Lee 曾提出了一种简化的互联系统效益估计法[1]，先对各个系统进行单独模拟，然后再对去掉联络线的所有系统的组合系统进行模拟，最后把模拟结果送入联合系统成本分析模型中以估计互联效益。Billinton 等用等效支援机组法来对多地区系统进行生产模拟[2]，首先建立容量支援概率表，然后将容量支援概率表转换成一个多状态等效机组来表示两个系统间互联的效益，当机组数及状态数较多时，或

* 收文日期　1992-12-05

负荷持续时间长时，可能会遇到难以承受的计算时间。

本文将文献[3]的单一系统随机生产模拟直接法扩展到两互联系统的情况，利用概率理论导出了互联情况下每一系统中各机组对另一系统的支援电量计算公式以及互联后每一系统的电力不足概率值及电量不足期望值的计算公式，可以方便地计算出互联带来的效益及系统间的供电情况，为规划决策人员提供有益的参考。

1 模型与算法

1.1 发电系统模型与负荷模型

如文献[3]所述，用加权多正态分布来表示系统出力与负荷时，所建立的随机生产模拟直接算法具有快速、准确的优点。在互联系统的随机生产模拟中，每一系统的负荷及系统出力仍用加权多正态分布表示，即

$$f_{L1}(x)=\sum_{i=1}^{n1}\alpha_{1i}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{L1,i}}\exp\left[-\frac{(x-\mu_{L1,i})^2}{2\sigma_{L1,i}^2}\right]$$

$$f_{G1}(x)=\sum_{j=1}^{m1}\beta_{1i}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{G1,j}}\exp\left[-\frac{(x-\mu_{G1,j})^2}{2\sigma_{G1,j}^2}\right]$$

$$f_{L2}(x)=\sum_{k=1}^{n2}\alpha_{2k}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{L2,k}}\exp\left[-\frac{(x-\mu_{L2,k})^2}{2\sigma_{L2,k}^2}\right]$$

$$f_{G2}(x)=\sum_{t=1}^{m2}\beta_{2t}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{G2,t}}\exp\left[-\frac{(x-\mu_{G2,t})^2}{2\sigma_{G2,t}^2}\right]$$

式中：$L1$ 与 $L2$ 分别表示系统 1 与 2 的负荷；$G1$ 与 $G2$ 分别表示系统 1 与 2 的系统出力，它们均为随机变量；$n1$，$n2$ 表示系统 1 与 2 的负荷正态分布数，α_{1i}，α_{2k} 则为各正态分布的权系数；$m1$，$m2$ 表示系统 1 与 2 的系统出力正态分布数，β_{1j}，β_{2t} 为其正态分布的权系数；$\mu_{\cdot}$，$\sigma_{\cdot}^2$ 分别为正态分布的均值与方差；$f_{\cdot}(\cdot)$ 为负荷或系统出力的概率密度函数。概率密度函数的形成，读者可参阅文献[3]。

1.2 联络线传输容量模型

通常，两个互联系统间存在着多条联络传输线。各条联络线存在着完全或部分故障的可能性，亦即各联络线的电力输送容量存在着不确定性。为了计算简便，通常将多条联络线等效为一条联络线。在目前的互联系统随机生产模拟模型及算法中，大多认为联络线容量是一固定值。为了考虑两系统间有多条联络线以及各联络线的多状态性质，下面用正态分布来近似表示等效联络线的传输容量及其变化情况。

$$f_T(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T}\exp\left[-\frac{(x-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right]$$

式中：随机变量 T 表示等效联络线的传输容量；μ_T 表示传输容量均值；σ_T^2 表示传输容量的方差。

1.3 互联系统随机生产模拟模型及算法

令随机变量 $R1$ 表示 $G1$ 和 $L1$ 之差，$R2$ 表示 $L2$ 和 $G2$ 之差，则有

$$R1=G1-L1$$

$$R2=L2-G2$$

且
$$f_{R1}(x)=\int_{-\infty}^{\infty}f_{G1}(u+x)f_{L1}(u)\mathrm{d}u$$
$$f_{R2}(x)=\int_{-\infty}^{\infty}f_{L2}(u+x)f_{G2}(u)\mathrm{d}u$$

系统 1 能够输送给系统 2 的电力应该为 $R1$ 与 T 中较小者，即
$$T1=\min(T,R1)$$
随机变量 $T1$ 的概率密度函数为
$$f_{T1}(x)=f_{R1}(x)\left[1-\int_{-\infty}^{x}f_{T}(u)\mathrm{d}u\right]+f_{T}(x)\left[1-\int_{-\infty}^{x}f_{R1}(u)\mathrm{d}u\right]$$
设考虑系统 1 的支援后，系统 2 的未满足负荷为随机变量 $T2$，则
$$T2=R2-\max(0,T1)=\min(R2,R2-T1)$$
令 $X=R2-T1$，则 X 的概率密度函数为
$$f_{X}(x)=\int_{-\infty}^{\infty}f_{R2}(t+x)f_{T1}(t)\mathrm{d}t$$
因而 $T2$ 的概率密度函数为
$$f_{T2}(x)=f_{R2}(x)\left[1-\int_{-\infty}^{x}f_{X}(u)\mathrm{d}u\right]+f_{X}(x)\left[1-\int_{-\infty}^{x}f_{R2}(u)\mathrm{d}u\right]$$

当 $T2>0$ 时，表明系统 2 尚有负荷未得到满足，系统 2 处于缺电状态。因此，考虑系统 1 支援后，系统 2 的电力不足概率值 LOLP_{21} 为
$$\mathrm{LOLP}_{21}=\int_{0}^{\infty}f_{T2}(x)\mathrm{d}x$$
系统2的电量不足期望值
$$\mathrm{EENS}_{21}=T\int_{0}^{\infty}xf_{T2}(x)\mathrm{d}x$$
其中 T 为负荷持续期。在 LOLP_{21}和 EENS_{21}的最终表达式中，含有形如
$$\int_{0}^{\infty}\mathrm{e}^{-\frac{(x-b)^2}{2a^2}}\left[\int_{-\infty}^{x}\mathrm{e}^{-\frac{(u-d)^2}{2c^2}}\int_{-\infty}^{u+f}\mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2}}\mathrm{d}t\mathrm{d}u\right]\mathrm{d}x$$
的积分项，其中 a、b、…、f 为常数。以上积分可采用数论网格方法或蒙特卡罗法。我们在积分时先用多项式来逼近最里层积分。为此先作变换
$$\int_{-\infty}^{z}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2}}\mathrm{d}t=\begin{cases}0.5+\int_{0}^{z}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2}}\mathrm{d}t, & z>0\\ 0.5, & z=0\\ 0.5-\int_{0}^{-z}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2}}\mathrm{d}t, & z<0\end{cases}$$
再进行多项式逼近
$$\int_{0}^{z}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2}}\mathrm{d}t=\begin{cases}1.0, & z\geqslant 6\\ f_1(z), & 2\leqslant z<6\\ f_2(z), & 0<z<2\end{cases}$$
其中
$$f_1(z)=\sum_{i=0}^{11}A_i(0.5z-2.0)^i$$

$$f_2(z) = \sum_{i=0}^{8} B_i(0.5z - 2.0)^{2i}$$

常数 $A_i(i = 0,1,\cdots,14)$,$B_i(i = 0,1,\cdots,8)$ 的值参见[4],这里不再列出。

在最里面一层积分用多项式表示后,即可用 SIMPSON 积分公式求出得到的二重积分之值。

设系统 2 的机组已全部投入运行。系统 1 有 i 台机组运行和系统 1 有 $i+1$ 台机组运行时,系统 2 的电量不足期望值之差,即为系统 1 第 $i+1$ 台机组供给系统 2 的电量,表示为 $E_{i+1,21}$,有

$$E_{i+1,21} = EENS_{i,21} - EENS_{i+1,21}$$

2 数值算例

以下对修正的 IEEE RTS 系统[5]进行了计算。负荷数据为 IEEE RTS 系统1－8周及48－52周的数据,发电系统数据列于表1. 为了简便起见,计算中认为两个系统完全相同。联络线传输容量参数为 μ_T=200 MW,σ_T=100 MW. 机组投入运行后,各机组优先带本系统负荷,剩余容量才考虑支援另一系统。各机组供给本系统的发电量及无联络线时各系统的可靠性指标可从文献[3]求出,而互联后各机组供给另一系统的发电量及互联后各系统的可靠性指标可利用本文前述模型与算法得到,结果列于表1和表2中。联络线传输容量均值与方差变化时对系统可靠性指标 LOLP 的影响如表3所示。

从计算结果可以看到,系统互联后可以有效地提高互联系统的可靠性。在可靠性要求已满足的情况下,接受外系统低成本电量及停开本系统的高成本机组,可以降低购电系统的总运行费,降低的总运行费数值可以从停开机组原来的发电费用及购电价格与购电量得到。售电系统获得的收入则可从售电价格与售电量及本系统机组多发电所承受的费用中得到。一旦确定了某一可靠性水平,从表1即可得到有关结果,这里不再详述。

表 1 发电系统数据及各机组的发电量

机组数目	强迫停运率	容量(MW)	运行成本($/MWh)	发电量 (GWh) 供给本系统	供给另一系统
2	0.12	400	5.45	1537.536	0
4	0.04	150	10.704	1240.441	0.6011
1	0.08	350	10.883	563.909	0.6786
4	0.027	80	13.494	404.420	1.1108
2	0.05	200	20.730	223.102	1.7258
1*	0.01	300	20.730	161.613	1.5747
2	0.04	100	20.853	21.139	0.5016
3	0.02	10	25.873	1.817	0.0378
2	0.10	20	37.500	2.097	0.0466

* 该机组的负荷位置在前一行的两台200 MW 机组之间

表 2 有无联络时系统可靠性指标 LOLP 的变化

无联络线	有联络线(μ_T=200 MW,σ_T=100 MW)
0.02177	0.00736

表 3　联络线传输容量均值与方差变化时，LOLP 的变化情况

$\sigma_T^2=300\ MW^2$ 不变		$\mu_T=200$ MW 不变	
μ_T(MW)	LOLP(%)	$\sigma_T^2(MW^2)$	LOLP(%)
200	0.5191	6000	0.6517
400	0.2904	12000	0.7758
600	0.2305	18000	0.8912
800	0.2174	24000	1.0013
1000	0.2150	30000	1.1084

另外从表3可以看到，传输容量的均值与方差都对系统的可靠性指标 LOLP 有较大影响，μ_T 增大时，LOLP 先急剧下降，到后来则逐渐趋于平稳，这表明当 $\mu_T=1000$ MW 时，联络线传输容量基本上不再对系统间的支援容量构成限制。当 μ_T 不变而 σ_T^2 增大时，LOLP 随 σ_T^2 的增大近似于线性增大。

用 FORTRAN 语言编程在 VAX MICRO I 上计算上述互联系统可靠性指标 LOLP 时，CPU 时间为8秒，而进行上述系统的随机生产模拟时，CPU 时间为9.5分钟。这主要是由于 SIMPSON 公式计算双重积分耗时较多，SIMPSON 积分计算中要求误差小于10^{-5}. 如果能用更有效的方法计算前述三重或二重积分，计算时间有可能大大下降。

4　结束语

本文将加权多正态分布随机生产模拟算法用于互联电力系统负荷不相关时的随机生产模拟，能够较快地计算出互联系统的可靠性指标及各机组供给本系统和支援另一系统的发电量，从而得到互联后产生的效益，便于确定系统间的售(购)电协议以及制定本系统的新机组投产情况，对系统规划人员有较大实用价值。

参　考　文　献

1　Khan SU, Lee S T. Estimation of Power-Pooling Benefits from Production Simulations. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1981, 100(4): 1759～1765

2　别林登 R, 阿伦 R N 著, 周家启, 任震等译. 电力系统可靠性评估. 重庆: 科技文献出版社重庆分社, 1986, 147～149

3　张宗益等. 基于多正态分布的随机生产模拟直接算法. 重庆大学学报, 1991, 14(4): 86～92

4　刘德贵等. FORTRAN 算法汇编, 第二分册. 北京: 国防工业出版社, 1983, 205～206

5　IEEE committee Report. IEEE Reliability Test System. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047～2054