

# 基于元件强迫停运率的互联系统可靠性指标灵敏度分析

万军平

(江西赣西供电公司樟树分公司, 江西 樟树 331200)

**摘要:** 电力系统通过互联可以实现发电容量的相互支援, 提高了各独立系统的可靠性水平。分析了新增发电容量和区域之间联络线的强迫停运率 (FOR) 对互联系统各区域可靠性的影响, 提出了基于元件强迫停运率的区域发电可靠性指标灵敏度表达式: 首先从理论上推导了互联系统多区域发电可靠性对于发电机组和联络线强迫停运率的灵敏度解析式, 并分析机组和联络线 FOR 的不确定性对区域可靠性指标方差的影响; 在此基础上根据区域备用容量变化与机组及联络线 FOR 变化之间的相互独立性, 对互联系统指数解析模型进行修正。此模型可计及新增发电机组和区域之间联络线 FOR 变化, 快速准确计算变化后的可靠性水平, 并能够根据灵敏度的大小判断对系统可靠性影响较大的关键环节和薄弱环节, 计算结果表明了修正指数解析模型的有效性。

**关键词:** 元件强迫停运率; 区域发电可靠性; 指数解析模型

## Sensitivity analysis of multi-area power system reliability based on component's forced outage rate

WAN Jun-ping

(Zhangshu Branch, Ganxi Power Supply Bureau of Jiangxi Electric Power Company, Zhangshu 331200, China)

**Abstract:** Generation system reliability of every single area will be improved by the support from other areas' generation capacity through interconnection. The influences of forced outage rates (FORs) of units and tie lines on system reliability is analyzed in this paper, and sensitivity expressions are put forward based on component forced outage rate. Firstly, sensitivity expressions between reliability index and component FOR are deduced theoretically, then the influence of units and tie lines FOR uncertainties on reliability index variance is analyzed, and at last, exponential analytic model is modified based on the presumption that changes in reserve capacity and in units (and/or tie lines) FOR are independent. In this model, reliabilities can be computed at different reserve capacity and transfer capability taking the units and tie lines FOR into account, system key segments and weak segments can be found according to the sensitivity values. Test results show the effectiveness of this modified exponential analytic model.

**Key words:** component forced outage rate; area generation reliability; exponential analytic model

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0015-06

## 0 引言

文献[1,2]提出了基于区域发电可靠性的指数解析模型, 表征了本区域和互联区域的备用容量以及联络线的传输容量变化对各个区域的发电可靠性的影响, 得到了互联系统区域备用和联络线传输容量的大小对区域风险水平的影响。但此模型忽略了新增发电容量和区域之间联络线的故障率, 因此在区域发电可靠性的指数解析模型中新增发电机组和区域之间联络线强迫停运率变化对区域风险水平的影响不能得到体现。文献[3]提出了系统发电可靠性对于新增发电机组强迫停运率的灵敏度, 算例证明灵敏度表达式的准确性; 文献[4~7]则在此基础上考虑机组和联络线强迫停运率以及负荷预测的不确定性引起的系统可靠性指标不确定, 并计算其对 LOLE

的方差的影响。

本文提出了基于元件强迫停运率的互联系统多区域发电可靠性指标灵敏度表达式以修正文献[1]的指数解析模型。第2节分析了互联系统多区域发电可靠性对于发电机组和联络线强迫停运率 (FOR) 的灵敏度解析式, 并得到机组和联络线强迫停运率的不确定性对区域 LOLE 指标方差的影响; 第3节用2区域算例对理论分析进行论证; 第4节根据区域备用容量变化与机组及联络线的 FOR 变化之间的相互独立性, 对文献[1]提出的互联系统指数解析模型进行修正。对于大型互联电力系统, 其包含元件数量较大, 当某些元件强迫停运率发生变化时, 可采用本文算法快速评估变化后的各个区域可靠性水平。而且根据灵敏度计算的结果可迅速定位系统中关键元件和薄弱环节, 在系统规划时采用差异化

规划,对关键环节和薄弱环节提高设计标准,从而较好地改善系统可靠性水平。计算结果表明了修正指数解析模型的有效性。

### 1 理论分析

本文从互联系统的角度出发,考虑机组和联络线 FOR 的变化对各区域可靠性指标的灵敏度影响,并分析考虑机组和联络线 FOR 不确定性给区域可靠性指标 LOLE 带来的方差。本算例以文献[8]中的一个二区域简单系统为例校验优化模型的准确性,如表 2 所示,区域 A 包含 6 台机组,总装机容量为 75 MW,负荷水平为 70 MW;区域 B 包含 5 台机组,总装机容量为 60 MW,负荷水平为 50 MW。负荷模型则采用 IEEE-RTS79 系统<sup>[9]</sup>的负荷参数。假设联络线 FOR 方差为  $3.3 \times 10^{-6}$ 。

表 1 简单二区域系统

Tab.1 Simple two-area system

	区域 A	区域 B
机组容量/MW	10 0.02 3.3e-006	10 0.02 3.3e-006
及个数(第 1 列表	10 0.02 3.3e-006	10 0.02 3.3e-006
示装机容量;第	10 0.02 3.3e-006	10 0.02 3.3e-006
2 列表示机组	10 0.02 3.3e-006	10 0.02 3.3e-006
FOR;第 3 列表	10 0.02 3.3e-006	20 0.02 6.7e-006
示 FOR 方差)	25 0.02 7.5e-006	
负荷水平/MW	70	50

分为以下 5 种情况:

Case A: 区域 A 内的机组 FOR 对区域 A 可靠性水平 LOLE<sub>A</sub> 的影响;

Case B: 区域 A 内的机组 FOR 对区域 B 可靠性水平 LOLE<sub>B</sub> 的影响;

Case C: 考虑多台机组 FOR 的同时变化对可靠性指标的影响;

Case D: 联络线 FOR 对区域 A 可靠性水平 LOLE<sub>A</sub> 的影响;

Case E: 考虑机组和联络线 FOR 的不确定性对区域 A 可靠性指标方差的影响。

下面分别对上述 5 种情况进行分析。

Case A: 求解区域 A 的机组  $j$  的强迫停运率  $R_j$  的变化对区域 A 可靠性水平 LOLE<sub>A</sub> 的影响。根据发电可靠性定义可知:

$$LOLE_A = \sum_{i=1}^N P(M_i) \quad (1)$$

其中:  $M_i$  为区域 A 减去计划停运机组后的装机容量与第  $i$  时段负荷的差值,即区域 A 可供停运的备用容量。

假设第  $i$  时段区域 A 的备用容量为  $A_0^i$ , 区域 B 的备用容量为  $B_0^i$ , 假设支援合同采用第二类合同,即一个系统在月或季预测尖负荷的基础上,以其可用备用容量支援其他系统。新增机组  $j$  的容量为  $C_j$ , 强迫停运率为  $R_j$ , 此时区域 A 停运容量大于等于  $X$  的累积概率:

$$P_{A \leftarrow B}^j(X) = P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X) \cdot (1 - R_j) + P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X - C_j) \cdot R_j \quad (2)$$

$P_{A \leftarrow B}^j(X)$  和  $P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X)$  分别为新增机组  $j$  前后区域 A 的停运容量概率(注:此时  $P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X)$  已考虑区域 B 支援的影响,本文中用下标  $A \leftarrow B$  表示已考虑区域间互援的停运概率,用下标  $A$  表示仅考虑区域 A 自身装机容量所对应的停运概率;用  $P(X)$  表示停运容量大于等于  $X$  的累积概率,用  $p(X)$  表示停运容量等于  $X$  的确切概率。下面公式也作相同处理,不再赘述)。

对式(2)求偏导可得:

$$\frac{\partial P_{A \leftarrow B}^j(X)}{\partial R_j} = P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X - C_j) - P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X) \quad (3)$$

对于停运容量累积概率表来说,机组增加的顺序可以是随机的,因此假设新增机组  $j$  为区域 A 最后增机的机组,则有区域 A 可靠性水平 LOLE<sub>A</sub> 对新增机组强迫停运率  $R_j$  的偏导:

$$\frac{\partial LOLE_A}{\partial R_j} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_{A \leftarrow B}^j(M_i)}{\partial R_j} = \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N [P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i) - P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j)]$$

Case B: 不考虑区域 B 对区域 A 的支援,区域 A 停运容量大于等于  $X$  的累积概率:

$$P_A^j(X) = P_A^{j-1}(X) \cdot (1 - R_j) + P_A^{j-1}(X - C_j) \cdot R_j \quad (5)$$

增加机组  $j$  之前,区域 A 的可供停运的备用容量为  $A_0^i$ , 因此对于区域 B, 停运容量超过可供停运备用容量的概率:

$$P_{B \leftarrow A}^{j-1}(M_i) = P_{B \leftarrow A}^{j-1}(A_0^i + B_0^i) = \sum_{i=0}^{n_a} p(i \cdot \Delta x) \cdot P_A^{j-1}(A_0^i + B_0^i - i \cdot \Delta x) \quad (6)$$

增加机组  $j$  之后,区域 A 的可供停运的备用容量为  $A_0^i + C_j$ , 假设区域 B 的机组确切停运容量概率为  $p_B(x)$ , 并假设并联后  $M_i'$  状态数为  $n$ , 步长为  $\Delta x$ 。此时区域 B 停运容量超过可供停运备用容量的概率:

$$P_{B \leftarrow A}^j(M_i) = \sum_{k=0}^n p_B(k \cdot \Delta x) \cdot P_{A, \text{equ}}^j(A_0^i + B_0^i + C_j - k \cdot \Delta x) = \sum_{k=0}^n p_B(k \cdot \Delta x) \cdot \left\{ \begin{aligned} &P_{A, \text{equ}}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j - k \cdot \Delta x) \cdot (1 - R_j) + \\ &P_{A, \text{equ}}^{j-1}(A_0^i + B_0^i - k \cdot \Delta x) \cdot R_j \end{aligned} \right\} = \sum_{k=0}^n p_B(k \cdot \Delta x) \cdot P_{A, \text{equ}}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j - k \cdot \Delta x) - R_j \cdot \sum_{k=0}^n p_B(k \cdot \Delta x) \cdot \left\{ \begin{aligned} &P_{A, \text{equ}}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j - k \cdot \Delta x) - \\ &P_{A, \text{equ}}^{j-1}(A_0^i + B_0^i - k \cdot \Delta x) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中:  $P_{A, \text{equ}}(X)$  为区域 A 等效支援机组停运容量大于等于  $X$  的累积概率, 因此:

$$\frac{\partial LOLE_B}{\partial R_j} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_{B \leftarrow A}^j(M_i)}{\partial R_j} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^n p_B(k \cdot \Delta x) \cdot \left\{ \begin{aligned} &P_{A, \text{equ}}^{j-1}(A_0^i + B_0^i - k \cdot \Delta x) - \\ &P_{A, \text{equ}}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j - k \cdot \Delta x) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Case C: 假设新增机组  $j, k$  为区域 A 最后增机的机组, 则区域 A 停运容量大于等于  $X$  的累积概率  $P_{A \leftarrow B}(X)$  与新增机组强迫停运率  $R_j, R_k$  有如下关系:

先加入机组  $j$  后停运累积概率变为:

$$P_{A \leftarrow B}^j(X) = P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X) \cdot (1 - R_j) + P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X - C_j) \cdot R_j \quad (9)$$

最后加入机组  $k$  停运累积概率变为:

$$P_{A \leftarrow B}^k(X) = P_{A \leftarrow B}^j(X) \cdot (1 - R_k) + P_{A \leftarrow B}^j(X - C_k) \cdot R_k \quad (10)$$

把式(9)代入:

$$P_{A \leftarrow B}^k(X) = P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X) \cdot (1 - R_j) \cdot (1 - R_k) + P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X - C_j) \cdot R_j \cdot (1 - R_k) + P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X - C_k) \cdot (1 - R_j) \cdot R_k + P_{A \leftarrow B}^{j-1}(X - C_j - C_k) \cdot R_j \cdot R_k \quad (11)$$

因此区域 A 可靠性水平  $LOLE_A$  对新增机组强迫停运率  $R_j, R_k$  的偏导如式(12)~(14)所示:

$$\frac{\partial LOLE_A}{\partial R_j} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_{A \leftarrow B}^k(M_i)}{\partial R_j} = \sum_{i=1}^N [P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_k) - P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j + C_k)] \cdot (1 - R_k) + \sum_{i=1}^N [P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i) - P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j)] \cdot R_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial LOLE_A}{\partial R_k} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_{A \leftarrow B}^k(M_i)}{\partial R_k} = \sum_{i=1}^N [P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j) - P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j + C_k)] \cdot (1 - R_j) + \sum_{i=1}^N [P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i) - P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_k)] \cdot R_j \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 LOLE_A}{\partial R_j \cdot \partial R_k} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial^2 P_{A \leftarrow B}^k(M_i)}{\partial R_j \cdot \partial R_k} = \sum_{i=1}^N [P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j + C_k) - P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_j)] + \sum_{i=1}^N [P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i) - P_{A \leftarrow B}^{j-1}(A_0^i + B_0^i + C_k)] \quad (14)$$

Case D: 对于支援区域 B 的等效支援机组, 通过联络线  $l$  给区域 A 提供支援, 因此, 等效支援机组和联络线构成了元件串联:

1) 不考虑联络线传输容量限制, 串联后元件的最大停运容量由等效支援机组决定;

2) 假设等效支援机组和联络线的故障停运是相互独立的。则串联后的元件停运容量累积概率可表示为:

$$P_{\text{series}}(X) = 1 - (1 - P_{B, \text{equ}}(X)) \cdot (1 - P_l(X)) = \begin{cases} P_{B, \text{equ}}(X) + R_l - P_{B, \text{equ}}(X) \cdot R_l, & \text{若停运容量 } X > 0 \\ 1, & \text{若停运容量 } X = 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $P_{B, \text{equ}}(X)$  为区域 B 等效支援机组停运容量大于等于  $X$  的累积概率,  $P_l(X)$  为联络线的停运容量累积概率。

串联后支援元件与区域 A 形成并联, 因此:

$$P_{A \leftarrow B}(M_i) = p_A(M_i) + \sum_{k=0}^{M_i-1} p_A(k \cdot \Delta x) \cdot P_{\text{series}}(M_i - k \cdot \Delta x) = p_A(M_i) + \sum_{k=0}^{M_i-1} p_A(k \cdot \Delta x) \cdot \left\{ \begin{aligned} &P_{B, \text{equ}}(M_i - k \cdot \Delta x) + R_l - \\ &P_{B, \text{equ}}(M_i - k \cdot \Delta x) \cdot R_l \end{aligned} \right\} = p_A(M_i) + \sum_{k=0}^{M_i-1} p_A(k \cdot \Delta x) \cdot P_{B, \text{equ}}(M_i - k \cdot \Delta x) + R_l \cdot \sum_{k=0}^{M_i-1} p_A(k \cdot \Delta x) \cdot [1 - P_{B, \text{equ}}(M_i - k \cdot \Delta x)] \quad (16)$$

由于  $M_i > 0$ , 则区域 A 可靠性水平  $LOLE_A$  对联络线强迫停运率  $R_l$  的偏导:

$$\frac{\partial LOLE_A}{\partial R_l} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_{A \leftarrow B}(M_i)}{\partial R_l} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^{M_i-1} p_A(k \cdot \Delta x) \cdot [1 - P_{B, \text{equ}}(M_i - k \cdot \Delta x)] \quad (17)$$

Case E: 根据定义, 由于机组和联络线强迫停运率参数的不确定引起的  $LOLE$  方差可表示为  $P_{A \leftarrow B}(M_i)$  的关系式(简称为  $P(M_i)$ ):

$$V(LOLE_A) = \sum_{i=1}^N V[P(M_i)] + 2 \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{r=i+1}^N \text{Cov}[P(M_i), P(M_r)] \quad (18)$$

假设: 1) 各发电机以及联络线的随机停运事件相互独立, 即  $R_j, R_k, R_l$  是相互独立的; 2) 区域 A

停运容量累积概率  $P(M_i)$  在其均值  $\bar{P}_i$  附近有三阶以上偏导数。

则有：

$$P(M_i) = \bar{P}_i + \sum_{j=1}^{N_G} (R_j - \bar{R}_j) \cdot \frac{\partial \bar{P}_i}{\partial R_j} + (R_j - \bar{R}_j) \cdot \frac{\partial \bar{P}_i}{\partial R_j} + \left. \begin{aligned} &1 \left\{ \sum_{j=1}^{N_G} (R_j - \bar{R}_j)^2 \cdot \frac{\partial^2 \bar{P}_i}{\partial R_j^2} + 2 \cdot \sum_{j=1}^{N_G} \sum_{k=j+1}^{N_G} (R_j - \bar{R}_j) \cdot (R_k - \bar{R}_k) \cdot \frac{\partial^2 \bar{P}_i}{\partial R_j \partial R_k} \right\} \\ &2 \left\{ 2 \cdot \sum_{j=1}^{N_G} (R_j - \bar{R}_j) \cdot (R_j - \bar{R}_j) \cdot \frac{\partial^2 \bar{P}_i}{\partial R_j \partial R_j} + (R_j - \bar{R}_j)^2 \cdot \frac{\partial^3 \bar{P}_i}{\partial R_j^3} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

其中： $\bar{R}_j$ 、 $\bar{R}_k$ 、 $\bar{R}_l$  分别为机组和联络线的强迫停运率期望值， $N_G$  为区域 A 机组总数。

则可得到期望和方差的表达式分别如式(20)、(21)所示：

$$E[P(M_i)] = \bar{P}_i + \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\partial^2 \bar{P}_i}{\partial R_l^2} \cdot V(R_l) + \sum_{j=1}^{N_G} \frac{\partial^2 \bar{P}_i}{\partial R_j^2} \cdot V(R_j) \right] \quad (20)$$

$$V[P(M_i)] = E\{[P(M_i) - E[P(M_i)]]^2\} = \sum_{j=1}^{N_G} \left( \frac{\partial \bar{P}_i}{\partial R_j} \right)^2 \cdot V(R_j) + \left( \frac{\partial \bar{P}_i}{\partial R_l} \right)^2 \cdot V(R_l) + \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^{N_G} \sum_{k=j+1}^{N_G} \left( \frac{\partial^2 \bar{P}_i}{\partial R_j \partial R_k} \right)^2 \cdot V(R_j) \cdot V(R_k) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\partial^2 \bar{P}_i}{\partial R_l^2} \cdot V(R_l)$$

根据式(19)，可得到协方差：

$$\text{Cov}[P(M_i), P(M_r)] = \sum_{j=1}^{N_G} \frac{\partial \bar{P}_i}{\partial R_j} \cdot \frac{\partial \bar{P}_r}{\partial R_j} \cdot V(R_j) + \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^{N_G} \sum_{k=j+1}^{N_G} \frac{\partial^2 \bar{P}_i}{\partial R_j \partial R_k} \cdot \frac{\partial^2 \bar{P}_r}{\partial R_j \partial R_k} \cdot V(R_j) \cdot V(R_k)$$

## 2 计算结果

按照第二节理论分析，对于上述二区域系统对应的 5 种情况计算结果如下。

表 2 不同装机容量对应的灵敏度

Tab.2 Sensitivities of different install capacities

$C_j$ /MW	$\frac{\partial LOLE_A}{\partial R_j}$ /(hours/yr)
2	10.792 4
5	24.202 9
10	36.789 2
12	38.910 4
15	40.844 0
20	42.146 1

Case A 计算了不同装机容量和机组 FOR 情况下可靠性指标。

a) 不同装机容量  $C_j$  对应的灵敏度如表 2 所示，可知随着装机容量的增加，可靠性指标对应于机组 FOR 的灵敏度也增加。

b)  $C_j=15$  MW 时可靠性指标实际值与灵敏度计算值比较如表 3 所示。

表 3 计算值与实际值对比

Tab.3 Comparison between computed values and true values

$R_j$	真实值	计算值
0.01	2.071 9	2.071 84
0.02	2.480 3	2.480 28
0.03	2.888 8	2.888 72
0.04	3.297 2	3.297 16
0.05	3.705 6	3.705 6
0.06	4.114 1	4.114 04
0.08	4.931 0	4.930 92
0.10	5.747 8	5.747 8
0.12	6.564 7	6.564 68

Case B 计算了不同装机容量和机组 FOR 情况下对其他区域可靠性指标的影响。

a) 不同装机容量  $C_j$  对应的灵敏度如表 4 所示，可知随着装机容量的增加，可靠性指标对应于机组 FOR 的灵敏度也增加。

表 4 不同装机容量对应的灵敏度

Tab.4 Sensitivities of different install capacities

$C_j$ /MW	$\frac{\partial LOLE_A}{\partial R_j}$ /(hours/yr)
5	7.549 1
10	13.821 1
15	14.910 1

b)  $C_j=15$  MW 时可靠性指标实际值与灵敏度计算值比较如表 5 所示，可知随着 FOR 增加，真实值与计算值的误差变大。

表 5 计算值与实际值对比

Tab.5 Comparison between computed values and true values

$R_j$	真实值	计算值
0.01	1.830 6	1.830 7
0.02	1.979 7	1.979 8
0.03	2.128 8	2.128 9
0.04	2.277 8	2.278 0
0.05	2.426 9	2.427 1
0.06	2.576 0	2.567 2
0.08	2.874 1	2.874 4
0.10	3.172 3	3.172 6
0.12	3.470 4	3.470 8

CaseC 中假设初始强迫停运率  $R_j=R_k=0.02$ ，机

组增加容量分别为 5 MW 和 10 MW 时偏导计算结果如表 6 所示。

表 6 偏导数计算

Tab.6 Computation of partial derivatives

$C_j, C_k/MW$	$\frac{\partial LOLE_A}{\partial R_j}$	$\frac{\partial LOLE_A}{\partial R_k}$	$\frac{\partial^2 LOLE_A}{\partial R_j \cdot \partial R_k}$
5,10	4.457 8	16.792 3	20.148 2

可靠性指标真实值与灵敏度计算值比较如表 7 所示( $LOLE_A^0 = 2.0854$ )。由表 7 可知:

- 1) 相对于 Case A, 同时增加两台机组的灵敏度计算误差增大;
- 2) 随着两台新增机组 FOR 的增大, 计算结果误差也增大。

表 7 计算值与实际值对比

Tab.7 Comparison between computed values and true values

$R_j (R_k)$	真实值	计算值
0.01	1.872 4	1.870 884
0.03	2.302 4	2.299 916
0.05	2.748 6	2.741 036
0.06	2.977 7	2.967 641
0.10	3.934 5	3.914 356
0.12	4.437 1	4.411 892

Case D 中根据式(17)可求得区域 A 的可靠性水平  $LOLE_A$  对联络线强迫停运率  $R_j$  的偏导值为 22.214 4。计算值与真实值的比较结果如表 8 所示。

表 8 计算值与实际值对比

Tab.8 Comparison between computed values and true values

$R_l$	真实值	计算值
0.01	42.729 5	42.729 54
0.02	42.951 5	42.951 69
0.03	43.137 6	43.173 83
0.10	44.727 9	44.728 84
0.12	45.171 9	45.173 13

Case E 分别计算了停运容量累积概率和可靠性指标的方差。根据式(21)可求解考虑机组和联络线 FOR 的不确定性引起的区域可靠性指标方差。由表 9 可知:

- 1) 联络线 FOR 不确定性对停运容量累积概率的期望值没有影响, 而对方差影响较大;
- 2) 停运容量累积概率的方差主要由联络线 FOR 不确定性引起, 机组 FOR 不确定性对其影响较小。

表 9 停运容量累积概率期望和方差

Tab.9 Expectation and variance of outage capacity cumulative probability

停运容量 /MW	不考虑 $R_l$ 不确定性		考虑 $R_l$ 不确定性	
	期望值	方差	期望值	方差
0	1	0	1	0
1	0.199 2	3.9539e-002	0.199 269	3.1947e-001
5	0.114 1	1.0899e-003	0.114 158	2.4007e-002
11	0.032 4	1.9085e-004	0.032 450	1.0754e-003
15	0.023 7	1.7453e-005	0.023 766	1.7453e-005

根据式(22)可知, 随着机组和联络线 FOR 方差的变化,  $LOLE$  指标的方差变化, 分别考虑不同装机容量的机组和联络线的 FOR 方差的变化对可靠性指标方差的影响。由表 10 可知, 大机组和联络线 FOR 方差的变化对可靠性指标方差的影响相对较大。

表 10 可靠性指标方差

Tab.10 Variances of reliability index

Cases	方差 $Var(LOLE)$
Case 1: 初始状态	2.23436e-003
Case 2: 小机组方差变为 0	2.23410e-003
Case 3: 大机组方差变为一半	1.93143e-003
Case 4: 大机组方差变为 0	1.62850e-003
Case 5: 联络线方差变为 0	6.05859e-004

### 3 对指数解析模型的修正

#### 3.1 模型

文献[1]根据影响区域发电可靠性主要因素的不同分为两种情况进行建模, 本文在考虑机组和联络线 FOR 不确定性变化的情况下修正上述两种模型。

Case F: 对于  $n$  个子区域的系统, 假设子区域之间联络线的传输容量足够大。则各个子区域的发电可靠性主要影响因素为其备用容量, 另外机组和联络线 FOR 不确定性变化也会影响区域的发电可靠性。假设各个区域备用容量的变化与机组及联络线的 FOR 变化之间是相互独立的, 则通过系数矩阵  $D_{n \times n}$ , 各个子区域的发电可靠性水平关于其子区域备用容量的函数表达式可修正为:

$$LOLE_i = LOLE_i^0 \cdot [e^{-D_i \Delta C}] + \sum_{j=1}^{N_i} \Delta R_j \cdot \frac{\partial LOLE}{\partial R_j} + \Delta R_l \cdot \frac{\partial LOLE}{\partial R_l} \quad (23)$$

其中:  $D_i$  为矩阵  $D_{n \times n}$  的第  $i$  行,  $\Delta C$  为各个子区域的备用容量变化,  $LOLE_i^0$  为子区域的初始可靠性水平。

Case G: 假设  $n$  个子区域之间有  $m$  条联络线, 备用容量趋于饱和, 联络线容量成为区域之间互援的主要限制因素, 同样机组和联络线 FOR 不确定性变化也会影响区域的发电可靠性。因此可采用区域

和联络线之间的关联系数矩阵  $T_{n \times m}$  :

$$LOLE_i = LOLE_i^0 \cdot [e^{-T_i \Delta Tie}] + \sum_{j=1}^{N_g} \Delta R_j \cdot \frac{\partial LOLE}{\partial R_j} + \Delta R_l \cdot \frac{\partial LOLE}{\partial R_l} \quad (24)$$

其中:  $T_i$  为矩阵  $T_{n \times m}$  的第  $i$  行,  $\Delta Tie$  为各个子区域的备用容量变化。

### 3.2 算例分析

假设上述二区域系统中, 分为三种情况分别计

算影响可靠性指标的因素:

Case 1: 增加机组装机容量 5 MW(FOR=0.05), 联络线 FOR=0.05;

Case 2: 增加机组装机容量 10 MW(FOR=0.05), 联络线 FOR=0.05;

Case 3: 增加机组装机容量 10 MW(FOR=0.01), 联络线 FOR=0.01;

按照式(23)的计算结果与真实值比较如表 11。

表 11 计算值与实际值对比

Tab.11 Comparison between computed values and true values

	真实值	计算值			
		备用	$\Delta R_j$	$\Delta R_l$	总共
Case1	20.33 72	16.521 8	1.210 15	1.111 07	18.843 02
Case2	7.955 96	6.410 76	1.839 46	1.112 24	9.362 46
Case3	6.159 78	6.410 76	0.367 89	0.222 14	7.000 79

由表 11 可知:

1) 当装机容量比较小的时候, 机组 FOR 对可靠性指标的影响相对较小, 而此时的指数解析模型的准确性也较高, 因此误差较小;

2) 当装机容量增加时, 机组 FOR 对可靠性指标的影响增大, 因此 Case3 中较小的 FOR 计算值误差小。

### 4 结论

本文分析了互联系统多区域发电可靠性对于发电机组和联络线强迫停运率(FOR)的灵敏度解析式, 以及机组和联络线强迫停运率的不确定性对区域 LOLE 指标方差的影响; 并在此基础上根据区域备用容量变化与机组及联络线的 FOR 变化之间的相互独立性, 对文献[1]提出的互联系统指数解析模型进行修正。主要有如下结论:

1) 互联系统各个区域的可靠性指标与每台机组的 FOR 呈近似线性关系, 即灵敏度影响因子不变, 且随着机组装机容量的增加, 灵敏度影响因子增加;

2) 同时考虑多台机组 FOR 变化的灵敏度计算方法误差有所增加;

3) 停运容量累积概率的方差主要由联络线 FOR 不确定性引起, 机组 FOR 不确定性对其影响较小, 因此, 联络线和大机组 FOR 方差的变化对可靠性指标方差的影响相对较大。

4) 计算结果表明了修正指数解析模型的有效性, 同时说明了各个区域备用容量变化与机组及联络线 FOR 变化之间是相互独立性。

### 参考文献

- [1] 孙荣富, 程林, 孙元章. 基于区域发电可靠性的指数解析模型及其应用(一)理论基础[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 11-15.  
SUN Rong-fu, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Generation Reliability Exponential Analytic Model of Interconnected Areas and its Application Part I: Theoretical Methodology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 11-15.
- [2] 孙荣富, 程林, 孙元章. 基于区域发电可靠性的指数解析模型及其应用(二)容量效益裕度评估[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 1-5.  
SUN Rong-fu, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Generation Reliability Exponential Analytic Model of Interconnected Areas and its Application Part II: Capacity Benefit Margin Assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 1-5.
- [3] Patton A D, Tram N H. Sensitivity of Generation Reliability Indices to Generator Parameter Variations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978,97(4):1337-1343.
- [4] Patton A D, Stasinou A. Practical Methods in the Computation of LOLP Variances and Confidence Limits[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1976,95(1): 287 -290.
- [5] Patton A D, Stasinou A. Variance and Approximate Confidence Limits on LOLP for a Single-area System[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975,94(4): 1326-1336.
- [6] Wang L. The Effects of Uncertainties in Forced Outage Rates and Load Forecast on the Loss-of-load Probability (LOLP)[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1997,96(6):1920-1927.

(下转第 81 页 continued on page81)

为了能进行直观对比, 给出了各模型对规划年(2008~2012)供电量预测结果的曲线图。如图 2 所示。

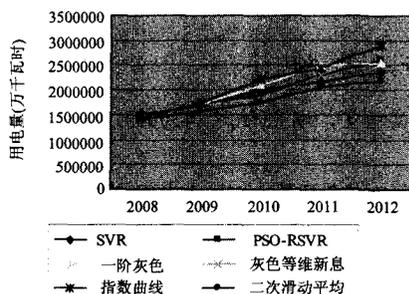


图 2 各模型预测结果曲线对比图

Fig.2 Forecasting curve comparison chart

## 5 结论

中长期电力负荷预测是城市电网规划中的基础性工作, 也是电力系统安全经济运行的前提, 其预测精度的高低直接影响到城市电网规划质量的优劣。本文提出基于粒子群优化算法改进的鲁棒支持向量机的中长期负荷预测方法, 通过算例分析验证了该方法可以极大地提高负荷预测的精度。

## 参考文献

- [1] 牛东晓, 曹树华, 赵磊, 等. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
NIU Dong-xiao, CAO Shu-hua, ZHAO Lei, et al. Load Forecasting Technology and Its Applications[J]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] 肖国泉, 王春, 张福伟. 电力负荷预测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.  
XIAO Guo-quan, WANG Chun, ZHANG Fu-wei. Load Forecasting[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [3] Vapnik N. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. Newyork: Springer-Verlag, 1995.
- [4] Smola A, Scholkopf B. A Tutorial on Support Vector Regression[R]. London: Royal Holloway Coll, Univ, 1998.
- [5] Chen Bo-juen, Chang Ming-wei, LIN Chih-jen. Load Forecasting Using Support Vector Machines: a Study on EUNITE Competition[J]. 2004, 19(4): 1821-1830.
- [6] Mohandes M. Support Vector Machines for Short-term Electrical Load Forecasting[J]. International Journal of Energy Research, 2002, 26(4): 335-345.
- [7] 靳忠伟, 陈康民, 闫伟, 等. 基于支持向量机的中长期负荷预测研究与应用[J]. 上海理工大学学报, 2008, (2): 31-34.  
JIN Zhong-wei, CHEN Kang-min, YAN wei, et al. Study and Application of Support Vector Machine to Forecast Mid-long-term Electric Power Load[J]. J of University of Shanghai for Science and Technology, 2008, (2): 31-34.
- [8] ZHANG Hao-ran, WANG Xiao-dong, ZHANG Chang-jiang, et al. A New Support Vector Machine for Data Mining[J]. New York: Springer-Verlag, 2005.
- [9] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. in: Proceeding of IEEE Int Conf on Neural Networks[C]. Piscataway: 1995. 1942-1948.
- [10] Eberhart R, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory[A]. in: Proc 6<sup>th</sup> Int. Symposium on Micro Machine and Human Science[C]. Nagoya: 1995. 39-43.
- [11] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法-支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
DENG Nai-yang, TIAN Ying-jie. The New Data Mining Method-support Vector Machine[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [12] Mangasarian O L, Musicant D R. Lagrangian Support Vector Machines[J]. Journal of Machine Learning Research, 2001, 1(1): 161-177.

收稿日期: 2008-11-04; 修回日期: 2008-12-30

作者简介:

张雪君(1982-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化, 负荷预测方向研究; E-mail: xiaofeizxj@163.com

陈刚(1964-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、微机在电力系统中的应用、电力MIS系统及负荷预测方向研究;

周杰(1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化, 负荷预测方向研究。

(上接第 20 页 continued from page 20)

- [7] 丁明, 罗初田. LOLE 指标的参数不确定性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1991, 14(1): 105-112.  
DING Ming, LUO Chu-tian. Uncertainty Analysis for LOLE Index[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 1991, 14(1): 105-112.
- [8] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.  
GUO Yong-ji. Reliability Theory and Application of Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986.
- [9] Reliability Test System Task Force. IEEE Reliability Test System[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98 (6): 2047-2054.

收稿日期: 2008-11-14; 修回日期: 2009-01-14

作者简介:

万军平(1979-), 男, 本科, 主要研究方向为继电保护和电力系统运行, 可靠性分析等。E-mail: srf05@mails.tsinghua.edu.cn