

大电力系统可靠性评估的灵敏度分析

赵 渊¹, 周念成¹, 谢开贵¹, 况 军²

- (1. 高电压与电工新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044;
2. 重庆市电力公司生产技术部, 重庆市渝中区 400014)

Sensitivity Analysis on Reliability Assessment of Bulk Power System

ZHAO Yuan¹, ZHOU Nian-cheng¹, XIE Kai-gui¹, KUANG Jun²

- (1. Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology (Chongqing University), Ministry of Education, Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Production and Technology Department, Chongqing Electric Power Company, Yuzhong District, Chongqing 400014, China)

ABSTRACT: The sensitivity of bulk power system's reliability indices can effectually reflect information about system reliability and power network structure, and by use of these information the bottlenecks that suppress system reliability can be found, thereby important guiding opinions can be offered for the planning and operation of power system. The authors deduce a set of formulae to calculate the sensitivities of bulk power system's reliability indices such as loss of load probability (LOLP), loss of load frequency (LOLF) and expected demand not supplied (EDNS) to availability, unavailability, failure rate and repair rate of power system components. By use of mathematical meaning of Lagrange multipliers for equality and inequality constraints in linear programming based optimal load shedding model, the sensitivity of EDNS to component capacity is deduced. The correctness and effectiveness of above-mentioned sensitivity analysis method are verified by the reliability assessment for IEEE-RTS79 test system.

KEY WORDS: Bulk power system; Reliability assessment; Sensitivity analysis

摘要: 大电力系统可靠性指标的灵敏度可以深刻反映系统可靠性与电网结构的相关信息, 利用这些信息可以发现钳制系统可靠性的薄弱环节, 从而为系统规划和运行提供重要的指导意见。文章完整地推导了失负荷概率、失负荷频率和电力不足期望等大电力系统可靠性指标对元件有效度、无效率、故障率和修复率的灵敏度。利用基于线性规划的最优负荷削减模型中等式和不等式约束的拉格朗日乘子的数学含义,

导出了电力不足期望对元件容量的灵敏度。最后通过对 IEEE-RTS79 测试系统的可靠性评估验证了上述灵敏度分析的有效性和正确性。

关键词: 大电力系统; 可靠性评估; 灵敏度分析

1 引言

电网的拓扑结构及系统元件的可靠性和电气参数共同决定了大电力系统的可靠性, 因此当电网的运行方式确定后, 该运行方式下的系统可靠性可以看作以各元件参数为自变量的多元函数。系统元件参数包括元件的容量、故障率、修复率以及系统负荷的大小(如果将系统负荷也当作一种广义系统元件)等。各元件对系统可靠性的贡献取决于其在网络拓扑结构中的位置及其自身参数的大小, 因此系统可靠性对不同元件参数变化的敏感程度有所不同。大电力系统可靠性评估的一个重要功能是可以找到对系统可靠性影响较大的元件参数, 即系统的薄弱环节, 但传统的大电力系统可靠性指标通常只能反映整个系统或各个负荷点供电可靠性的高低^[1-7], 仅通过这些指标很难找到钳制系统可靠性的瓶颈, 而大电力系统可靠性的灵敏度分析则为解决该难题提供了一条较好的途径。

在放松管制和加强竞争的电力市场环境下, 获得最大的经济效益并保证必需的可靠性成为市场参与者共同关心的重要课题^[8-10], 电力公司的投资决策也愈加注重可靠性效益/投资比, 即实现可靠性与经济性的综合协调, 既保证电力公司的投资费用和用户停电损失之和最小, 又使系统可靠性得到最大程

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50307015); 中国博士后科学基金资助项目(2005037160)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50307015); Project Supported by China Postdoctoral Science Foundation (2005037160)。

度的提高, 因此, 准确找到系统中最需投资改造的薄弱部分成为迫切需要解决的问题。由于大电力系统可靠性的灵敏度分析能够有效找到系统的薄弱环节, 因此成为可靠性效益/投资分析的有效工具。

针对可靠性的灵敏度分析, Patton 和 Tram 在文献[11]中提出了发电系统可靠性对设备故障率和修复率的灵敏度分析方法。本文对大电力系统可靠性的灵敏度分析进行研究, 完整推导了大电力系统可靠性指标对元件有效度、无效度、故障率、修复率和元件容量的灵敏度指标, 并在 IEEE-RTS79 等可靠性测试系统上进行了计算。分析结果表明, 通过灵敏度分析不但可以发现钳制系统可靠性的薄弱环节, 而且可为电力系统规划和设计人员的投资分析提供丰富的有效信息。

2 大电力系统可靠性指标计算公式

大电力系统可靠性指标的统一计算公式为

$$E(F) = \sum_{\mathbf{x} \in X} F(\mathbf{x})P(\mathbf{x}) \quad (1)$$

式中 \mathbf{x} 表示系统状态, 假设整个系统由 m 个元件组成, S_k 代表第 k 个系统元件的状态, 则 $\mathbf{x} = (S_1, I_1, S_2, I_2, \dots, S_m, I_m)$, 由于 S_k 是一个随机变量, 因此 \mathbf{x} 是一个随机矢量; X 表示系统状态空间; $F(\mathbf{x})$ 表示以系统状态 \mathbf{x} 为自变量的可靠性指标测试函数; $P(\mathbf{x})$ 表示系统状态 \mathbf{x} 出现的概率, 即 \mathbf{x} 的概率分布函数, 当所有系统元件的状态是彼此独立的随机变量时, $P(\mathbf{x}) = P(S_1)P(S_2) \dots P(S_k) \dots P(S_m)$; $E(F)$ 表示随机函数 $F(\mathbf{x})$ 的概率期望值, 当 $F(\mathbf{x})$ 取我们感兴趣的不同的测试函数时, $E(F)$ 即表示不同的可靠性指标。假设每个系统元件只有故障和运行两种状态并且系统元件的故障是彼此独立的事件, u_k 为元件 k 发生故障的概率 (无效度), a_k 为元件 k 正常工作的概率 (有效度), 则 S_k 是一个离散的随机变量

$$S_k = \begin{cases} 1, & k \text{ 处于正常运行状态} \\ 0, & k \text{ 处于故障状态} \end{cases} \quad (2)$$

设元件 k 的故障率为 I_k , 修复率为 m_k , 则有

$$u_k = P(S_k = 0) = I_k / (I_k + m_k) \quad (3)$$

$$a_k = P(S_k = 1) = 1 - u_k = m_k / (I_k + m_k) \quad (4)$$

下面列出三种最基本的可靠性指标计算公式, 其它可靠性指标计算公式可由它们导出。

(1) 失负荷概率 (Loss of Load Probability, LOLP): 表示系统元件容量不足导致失负荷的概率

$$LOLP = \sum_{\mathbf{x} \in X} F_p(\mathbf{x})P(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x} \in X} I_f(\mathbf{x})P(\mathbf{x}) \quad (5)$$

$$F_p(\mathbf{x}) = I_f(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \mathbf{x} \text{ 为系统正常状态} \\ 1, & \mathbf{x} \text{ 为系统故障状态} \end{cases} \quad (6)$$

(2) 失负荷频率 (Loss of Load Frequency, LOLF): 表示平均每年停电次数 (单位为次/年)

$$LOLF = \sum_{\mathbf{x} \in X} F_f(\mathbf{x})P(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x} \in X} [I_f(\mathbf{x}) \sum_{k=1}^m I_{x,\text{in}}(k)]P(\mathbf{x}) \quad (7)$$

式中 $F_f(\mathbf{x}) = I_f(\mathbf{x}) \sum_{k=1}^m I_{x,\text{in}}(k)$; $I_{x,\text{in}}(k)$ 为元件 k 的增量转移率^[12], 其定义为

$$I_{x,\text{in}}(k) = \begin{cases} m_k, & S_k = 0 \\ -I_k, & S_k = 1 \end{cases} \quad (8)$$

(3) 电力不足期望 (Expected Demand Not Supplied, EDNS): 表示平均每年缺少的电力 (单位为 MW/年)

$$EDNS = \sum_{\mathbf{x} \in X} F_E(\mathbf{x})P(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x} \in X} [I_f(\mathbf{x})L_c(\mathbf{x})]P(\mathbf{x}) \quad (9)$$

式中 $L_c(\mathbf{x})$ 表示在系统故障状态 \mathbf{x} 下为使系统恢复到一个静态安全运行点所必需的最小负荷削减量。

3 大电力系统可靠性的灵敏度分析

大电力系统可靠性的灵敏度分析实质是求取各可靠性指标对系统设备参数的偏微分, 因此灵敏度指标反映了设备参数的微小变化所引起的系统可靠性的改变程度及改变趋势。如果可靠性指标对某一设备参数的灵敏度很大, 通常意味着该设备对系统可靠性的影响很大, 对它进行投资改造以改善设备参数能使系统可靠性得到较大提高。在制定投资方案时, 常用的方法是增大设备的发电或输电容量, 此外, 通过雇用更多的维修人员或对现有维修人员进行更多的培训以及购买更先进的维修工具等可以减少设备的平均修复时间 (Mean Time to Repair, MTTR), 通过更加精细的设备监测和维护保养技术可以延长其平均无故障工作时间 (Mean Time to Failure, MTTF), 故改善设备可靠性也是提高系统可靠性的有效途径, 因此获得系统可靠性指标对设备可靠性参数的灵敏度具有重要的实用价值。

(1) 大电力系统可靠性指标对元件可靠性参数的灵敏度

1) LOLP 对元件可靠性参数的灵敏度

该灵敏度反映元件可靠性参数的微小变化对系统失效概率的影响程度及趋势, 如果 LOLP 对某一元件可靠性参数的灵敏度较大, 则改善该参数有助于减少系统 LOLP 和失负荷期望 (Loss of Load

Expection, LOLE), 从而有效提高系统的供电可靠性。其中, $LOLE = 8760 \times LOLP$ 表示平均每年停电时间, 单位为 h/年。LOLP 对各元件可靠性参数的灵敏度分别为

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_k} = -\frac{\partial LOLP}{\partial a_k} = \sum_{x \in X} I_f(x) A_k(x) P(x) \quad (10)$$

$$\frac{\partial LOLP}{\partial I_k} = \sum_{x \in X} I_f(x) B_k(x) P(x) \quad (11)$$

$$\frac{\partial LOLP}{\partial m_k} = \sum_{x \in X} I_f(x) C_k(x) P(x) \quad (12)$$

2) LOLF 对元件可靠性参数的灵敏度

该灵敏度反映元件可靠性参数的微小变化对系统平均每年失效次数的影响程度及趋势, 如果 LOLF 对某一元件可靠性参数的灵敏度较大, 则改善该参数有助于减少平均每年停电次数。LOLF 对各元件可靠性参数的灵敏度分别为

$$\frac{\partial LOLF}{\partial u_k} = -\frac{\partial LOLF}{\partial a_k} = \sum_{x \in X} [I_f(x) D_k(x) P(x) + A_k(x) F_f(x) P(x)] \quad (13)$$

$$\frac{\partial LOLF}{\partial I_k} = \sum_{x \in X} [-S_k I_f(x) P(x) + B_k(x) F_f(x) P(x)] \quad (14)$$

$$\frac{\partial LOLF}{\partial m_k} = \sum_{x \in X} [I_f(x) (1 - S_k) P(x) + C_k(x) F_f(x) P(x)] \quad (15)$$

3) EDNS 对元件可靠性参数的灵敏度

该灵敏度反映元件可靠性参数的微小变化对系统平均每年负荷削减量的影响程度, 如果 EDNS 对某一元件可靠性参数的灵敏度较大, 则改善该参数有助于减少 EDNS 和电量不足期望 (Expected Energy not Supplied, EENS), $EENS = 8760 \times EDNS$ 为平均每年缺电量。EDNS 对各元件可靠性参数的灵敏度分别为

$$\frac{\partial EDNS}{\partial u_k} = -\frac{\partial EDNS}{\partial a_k} = \sum_{x \in X} A_k(x) I_f(x) L_C(x) P(x) \quad (16)$$

$$\frac{\partial EDNS}{\partial I_k} = \sum_{x \in X} B_k(x) I_f(x) L_C(x) P(x) \quad (17)$$

$$\frac{\partial EDNS}{\partial m_k} = \sum_{x \in X} C_k(x) I_f(x) L_C(x) P(x) \quad (18)$$

在上述公式中, 函数 $A_k(x)$ 、 $B_k(x)$ 、 $C_k(x)$ 和 $D_k(x)$ 的表达式分别为

$$A_k(x) = \frac{1}{u_k} - \frac{S_k}{u_k a_k} \quad (19)$$

$$B_k(x) = \frac{a_k}{I_k} - \frac{S_k}{I_k} \quad (20)$$

$$C_k(x) = -\frac{a_k}{m_k} + \frac{S_k}{m_k} \quad (21)$$

$$D_k(x) = -\frac{S_k m_k}{a_k^2} \quad (22)$$

值得注意的是, 上述公式虽然是用解析方法推导出来的, 但同样适用于 Monte-Carlo 仿真, 当应用 Monte-Carlo 仿真时, 只需将公式中的 $P(x)$ 替换为 $1/N$ (N 为状态抽样次数)。限于篇幅, 下面只给出 LOLP 对元件 k 的无效度 u_k 的灵敏度公式的推导过程。由式(5)可知

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_k} = \sum_{x \in X} \left[\frac{\partial I_f(x)}{\partial u_k} P(x) + I_f(x) \frac{\partial P(x)}{\partial u_k} \right]$$

由于函数 $I_f(x)$ 与 u_k 之间没有直接的函数关系, $\frac{\partial I_f(x)}{\partial u_k} = 0$, 所以

$$\begin{aligned} \frac{\partial LOLP}{\partial u_k} &= \sum_{x \in X} I_f(x) \frac{\partial P(x)}{\partial u_k} = \\ &= \sum_{x \in X} I_f(x) \frac{\partial [P(S_1)P(S_2) \dots P(S_k) \dots P(S_m)]}{\partial u_k} = \\ &= \sum_{x \in X} I_f(x) P(x) \frac{1}{P(S_k)} \cdot \frac{\partial P(S_k)}{\partial u_k} \end{aligned}$$

$$\text{令 } A_k(x) = \frac{1}{P(S_k)} \cdot \frac{\partial P(S_k)}{\partial u_k}, \text{ 当 } S_k = 1 \text{ 时}$$

$$A_k(x) = \frac{1}{P(S_k = 1)} \cdot \frac{\partial P(S_k = 1)}{\partial u_k} = \frac{1}{a_k} \cdot \frac{\partial a_k}{\partial u_k} = -\frac{1}{a_k} = -\frac{S_k}{a_k}$$

当 $S_k = 0$ 时

$$A_k(x) = \frac{1}{P(S_k = 0)} \cdot \frac{\partial P(S_k = 0)}{\partial u_k} = \frac{1}{u_k} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial u_k} = \frac{1}{u_k} = \frac{1 - S_k}{u_k}$$

综合上述两式可得

$$A_k(x) = \frac{1 - S_k}{u_k} - \frac{S_k}{a_k} = \frac{1}{u_k} - \frac{S_k}{u_k a_k}$$

故 $\frac{\partial LOLP}{\partial u_k} = \sum_{x \in X} I_f(x) A_k(x) P(x)$, 它可以看作求取测试函数 $F(x) = I_f(x) A_k(x)$ 的数学期望值, 与式(5)相比, 该式只是增加了一项 $A_k(x)$ 。

(2) EDNS 对元件 k 的容量 C_k 的灵敏度

EDNS 对元件容量的灵敏度反映了发电元件或输电元件容量的微小变化对系统平均每年负荷削减量的影响程度, 如果 EDNS 对某一元件容量的灵敏度较高, 则增大该元件的容量可以显著减小 EDNS 和 EENS, 从而有效提高系统供电可靠性。EDNS 对元件 k 的容量 C_k 的灵敏度为

$$\frac{\partial EDNS}{\partial C_k} = \sum_{x \in X} I_f(x) P(x) \frac{\partial L_C(x)}{\partial C_k} \quad (23)$$

应用式(23)时需取负荷削减量 $L_C(\mathbf{x})$ 对 C_k 的偏导数, 下面将详细叙述如何计算 $\frac{\partial L_C(\mathbf{x})}{\partial C_k}$ 。

为兼顾计算时间和计算精度以求取系统故障状态 \mathbf{x} 下的最小负荷削减量 $L_C(\mathbf{x})$, 通常采用如下线性化最优负荷削减模型^[13]

$$\begin{aligned} L_C(\mathbf{x}) = \min \sum_{i=1}^n r_i & \quad (24) \\ \text{s.t. } -\mathbf{B}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{g} + \mathbf{r} = \mathbf{d} \\ \mathbf{g} \leq \bar{\mathbf{g}} \\ \mathbf{r} \leq \mathbf{d} \\ |\mathbf{f}| \leq \bar{\mathbf{f}} \end{aligned}$$

式中 n 为系统节点数; r_i 为节点 i 的负荷削减量, \mathbf{r} 为节点负荷削减量矢量; \mathbf{g} 为发电机的有功功率矢量, $\bar{\mathbf{g}}$ 为发电机有功功率约束矢量, 即发电机容量; \mathbf{d} 为节点负荷矢量; \mathbf{B} 为系统电纳矩阵, 设 $g_{ij} = -1/x_{ij}$ 为线路 $i-j$ 的支路电纳, 则 $B_{ij} = g_{ij}$, $B_{ii} = -\sum_{jwi} g_{ij}$, jwi 表示与节点 i 关联的所有节点 j ; $\boldsymbol{\theta}$ 为节点电压相位矢量; \mathbf{f} 为线路有功潮流矢量, 且 $f_{ij} = -B_{ij}(q_i - q_j)$, $\bar{\mathbf{f}}$ 为线路容量约束矢量; 对应上述 4 个约束条件的拉格朗日乘子依次为 p_d 、 p_g 、 p_r 、 p_f 。

求解上述线性规划模型最优解的过程中, 除了能得到目标值 $L_C(\mathbf{x})$ 外, 还能得到与各等式和不等式约束相联系的拉格朗日乘子, 它们表示等式和不等式约束的等号或不等号右侧资源变量的微小扰动引起目标值 $L_C(\mathbf{x})$ 的边际变化, 例如 π_d 代表负荷削减量 $L_C(\mathbf{x})$ 随节点负荷的增大而变化的趋势。在此线性规划模型中, $p_{g,i}$ 表示系统负荷削减量随节点 i 的发电机容量的变化而变化的趋势

$$p_{g,i} = \frac{\partial L_C(\mathbf{x})}{\partial \bar{g}_i} \quad (25)$$

式(25)正是需要求取的 $L_C(\mathbf{x})$ 对发电机容量的灵敏度, 如果此值较大, 则说明节点 i 属于不安全区域, 增加节点 i 的发电机容量将给系统可靠性带来较大好处, 反之则说明节点 i 属于安全区域, 没有必要增加它的发电机容量。粗略一看, 负荷削减量 $L_C(\mathbf{x})$ 对线路容量 $\bar{\mathbf{f}}$ 的灵敏度应该是与线路潮流约束 $|\mathbf{f}| \leq \bar{\mathbf{f}}$ 相联系的 π_f , 但事实并非如此, 因为输电线路同时有两个与潮流相关的重要参数, 即线路容量 $\bar{\mathbf{f}}$ 和线路电纳 $\boldsymbol{\gamma}$, 当线路容量增大时线路电纳也会同时发生变化, π_f 表示只有线路容量

变化而线路电纳保持不变的情况下 $L_C(\mathbf{x})$ 对线路容量的灵敏度。文献[14]导出了同时考虑这两个因素时 $L_C(\mathbf{x})$ 对线路 $i-j$ 的容量 C_{ij} 的灵敏度

$$p_{c,ij} = \frac{\partial L_C(\mathbf{x})}{\partial C_{ij}} = (p_{d,i} - p_{d,j})(q_j - q_i) \quad (26)$$

综合式(25)和(26)可以得出

$$\frac{\partial L_C(\mathbf{x})}{\partial C_k} = \begin{cases} p_{g,i}, & \text{元件 } k \text{ 为母线 } i \text{ 上的发电机} \\ p_{c,ij}, & \text{元件 } k \text{ 为线路 } i-j \end{cases} \quad (27)$$

4 算例分析

笔者用 Matlab6.5 编写了大电力系统可靠性评估及其灵敏度分析程序, 并对 RBTS 系统 (6 节点)^[15]、IEEE-RTS79 系统 (24 节点)^[16] 和 IEEE-RTS96 系统 (73 节点)^[17] 进行了计算分析, 下面仅列出 IEEE-RTS79 系统的计算和分析结果。

对 IEEE-RTS79 系统进行可靠性评估时采用状态枚举法, 发电机单独故障考虑至 4 阶, 输电线路单独故障及发输电系统组合故障枚举到 3 阶, 系统年度化可靠性指标见表 1。

表 1 系统年度化可靠性指标
Tab. 1 Annualized reliability indices of system

LOLP	LOLE h	LOLF 次/年	EDNS MW/年	EENS MWh/年
0.075274	659.4017	13.2012	11.9929	105057.79

表 1 列出的系统可靠性指标集中反映了整个系统供电可靠性的优劣程度, 但仅通过这些信息还难于找到钳制系统可靠性的薄弱环节、需要增强的系统元件及需要改善的元件参数, 为解决这个问题有必要进行可靠性的灵敏度分析。

表 2 列出了系统 LOLP 对元件可靠性参数的灵敏度指标, 该表按照各元件对系统 LOLP 影响的大小进行了排序, 并列出了 12 个元件的灵敏度指标, 从该表可以看出, 发电机 #18G1 (#18G1 表示节点 18 上的 1 号发电机, 其它类推) 和 #21G1 对系统可靠性的影响最大, 这是因为它们不但是系统中单机容量最大的发电机 (单机容量为 400MW, 分别占总装机容量的 11.71%), 而且是系统中无效度最高的机组 ($u_k = 0.12$), 因此降低它们的故障率或缩短平均修复时间是提高系统可靠性最有效的措施。另外, 这 12 个元件中只有一条输电线路即线路 11, 这说明相对于发电系统而言输电系统的可靠性是比较充裕的, 改善输电元件的可靠性参数对提高系统整体可靠性不会有明显效果。线路 11 的灵敏度指标较高, 是因为线路 11 是节点 7 与电网相连的

唯一线路，一旦故障会使节点 7 与网络解列，并导致节点 7 上过剩的 175MW 发电机有功功率无法得到利用。

表 2 系统的 LOLF 对元件可靠性参数的灵敏度指标
Tab. 2 Sensitivity indices of system's LOLF with respect to reliability parameters of components

元件名称	元件容量 MW	$\frac{\partial LOLF}{\partial I_k} / 10^{-4}$	$\frac{\partial LOLF}{\partial m_k} / 10^{-4}$	$\frac{\partial LOLF}{\partial a_k} / 10^{-4}$
发电机#18G1	400	39.417	-5.375	-2972.630
发电机#21G1	400	39.417	-5.375	-2972.630
发电机#23G3	350	23.951	-2.082	-2478.955
发电机#13G1	197	9.864	-0.519	-1915.048
发电机#13G2	197	9.864	-0.519	-1915.048
发电机#13G3	197	9.864	-0.519	-1915.048
发电机#23G1	155	4.215	-0.175	-1001.790
发电机#23G2	155	4.215	-0.175	-1001.790
发电机#15G6	155	4.215	-0.175	-1001.790
发电机#16G1	155	4.215	-0.175	-1001.790
发电机#7G1	100	2.137	-0.089	-406.346
线路 11	220	0.877	0.000	-769.194

表 3 和表 4 分别列出了系统的 LOLF 和 EDNS 对元件可靠性参数的灵敏度指标，它们反映了与 LOLF 和 EDNS 指标密切相关的元件参数，这两个表的元件排序与表 2 完全一致，因此也反映了与表 2 相同的信息。

表 5 列出了系统 EDNS 对元件容量的灵敏度指标，表中只列出了灵敏度指标绝对值较大的元件。从表 5 可以看出：①表中的元件全部是发电机，这说明 EDNS 指标对发电机容量的变化比较敏感，而对于输电线路容量的变化则很不灵敏，因此 IEEE-RTS79 系统是输电容量较充裕而发电容量不足的系统；②发电机元件的有效度是决定 $\frac{\partial EDNS}{\partial C_k}$

的主要因素，表 5 基本按照发电机有效度由大到小的顺序排列，这是因为首先提高可靠性最好的机组的容量将使系统可靠性得到明显提高并可有效减少 EDNS；③发电机的单机容量是决定 $\frac{\partial EDNS}{\partial C_k}$ 指标的次要因素，表 5 中发电机#13G1~#13G3 和#23G3 的有效度高于发电机#2G1~#2G2，但其 $\frac{\partial EDNS}{\partial C_k}$ 指标的绝对值却较小，主要是因为#2G1~#2G2 的单机容量远远小于#13G1~#13G3 和#23G3，发电机的单机容量越大，其发生故障时对系统安全运行构成的潜在威胁越大，反之，发电机的单机容量越小，其随机故障对系统的影响越小，因此将增加的发电容量转移到小容量机组上可更有效提高系统可靠性。

表 3 系统 LOLF 对元件可靠性参数的灵敏度指标
Tab. 3 Sensitivity indices of system's LOLF with respect to reliability parameters of components

元件名称	$\frac{\partial LOLF}{\partial I_k} / 10^{-4}$	$\frac{\partial LOLF}{\partial m_k} / 10^{-4}$
发电机#18G1	4888.0185	-309.8300
发电机#21G1	4888.0185	-309.8300
发电机#23G3	3840.7030	-135.6570
发电机#13G1	1773.0140	0.0000
发电机#13G2	1773.0140	0.0000
发电机#13G3	1773.0140	0.0000
发电机#23G1	1311.9940	-14.5940
发电机#23G2	1311.9940	-14.5945
发电机#15G6	1311.9940	-14.5941
发电机#16G1	1311.9940	-14.5940
发电机#7G1	560.4850	-7.0990
线路 11	454.9810	0.0000

表 4 系统 EDNS 对元件可靠性参数的灵敏度指标
Tab. 4 Sensitivity indices of system's EDNS with respect to reliability parameters of components

元件名称	$\frac{\partial EDNS}{\partial a_k} / 10^{-4}$	$\frac{\partial EDNS}{\partial I_k} / 10^{-4}$	$\frac{\partial EDNS}{\partial m_k} / 10^{-4}$
发电机#18G1	-606270.76	8039.3252	-1096.2666
发电机#21G1	-606270.76	8039.3252	-1096.2666
发电机#23G3	-546644.12	5281.7294	-459.2813
发电机#13G1	-265958.08	1370.0173	-72.1061
发电机#13G2	-265958.08	1370.0173	-72.1063
发电机#13G3	-265958.08	1370.0173	-72.1067
发电机#23G1	-163195.87	686.7639	-28.6158
发电机#23G2	-163195.87	686.7639	-28.6152
发电机#15G6	-163195.87	686.7639	-28.6153
发电机#16G1	-163195.87	686.7639	-28.6154
发电机#7G1	-85239.70	448.3842	-18.6821
线路 11	-13132.91	0.0000	0.0000

表 5 系统 EDNS 对元件容量的灵敏度指标
Tab. 5 Sensitivity indices of system's EDNS with respect to capacities of components

元件名称	元件信息		$\frac{\partial EDNS}{\partial C_k} / 10^{-4}$
	元件容量/MW	元件有效度	
#22G1~#22G6	50	0.99	-754.1878
#15G1~#15G5	12	0.98	-747.6112
#1G3~#1G4	76	0.98	-743.3906
#2G3~#2G4	76	0.98	-743.3906
#7G1~#7G3	100	0.96	-721.5625
#23G1~#23G2	155	0.96	-699.7427
#15G6	155	0.96	-699.7422
#16G1	155	0.96	-699.7422
#1G1~#1G2	20	0.90	-686.7648
#2G1~#2G2	20	0.90	-686.7648
#13G1~#13G3	197	0.95	-641.2625
#23G3	350	0.92	-533.5218
#18G1	400	0.88	-353.0418

笔者对表 5 中各元件的容量分别增加 10MW 和 30MW 后的系统进行了可靠性评估，其结果见表 6。

表 6 元件容量增加后的系统年度化指标
Tab. 6 Annualized indices of system after capacities of components are enhanced

元件名称	$\Delta C=10\text{MW}$			$\Delta C=30\text{MW}$		
	EDNS MW/年	EENS MWh/年	LOLP	EDNS MW/年	EENS MWh/年	LOLP
#22G1~#22G6	11.2504	98553.4	0.07482	9.8771	86523.5	0.06596
#15G1~#15G5	11.2565	98606.7	0.07482	9.8912	86646.9	0.06601
#1G3~#1G4	11.2611	98647.1	0.07482	9.9077	86791.1	0.06618
#2G3~#2G4	11.2611	98647.1	0.07482	9.9077	86791.1	0.06618
#7G1~#7G3	11.2824	98833.5	0.07484	9.9697	87334.9	0.06627
#23G1~#23G2	11.3039	99022.2	0.07484	10.0206	87780.7	0.06751
#15G6	11.3039	99022.2	0.07484	10.0206	87780.7	0.06751
#16G1	11.3039	99022.2	0.07484	10.0206	87780.7	0.06751
#1G1~#1G2	11.3170	99136.8	0.07486	10.0576	88105.2	0.06758
#2G1~#2G2	11.3170	99136.8	0.07486	10.0576	88105.2	0.06758
#13G1~#13G3	11.3613	99525.0	0.07495	10.1991	89344.1	0.06776
#23G3	11.4664	100446.0	0.07514	10.4939	91927.0	0.06823
#18G1	11.6468	102025.0	0.07520	11.0287	96611.2	0.06929

对比表 6 中的指标 EDNS、EENS 和 LOLP 与表 5 中的指标 $\frac{\partial EDNS}{\partial C_k}$ 可见, 指标 $\frac{\partial EDNS}{\partial C_k}$ 绝对值越大的元件在增加容量后对系统 EDNS、EENS 和 LOLP 的改善越大, 对提高系统可靠性的效果也越明显, 这说明通过 $\frac{\partial EDNS}{\partial C_k}$ 指标能找到系统中最需增强的系统元件, 反映了其所提供信息的正确性和有效性。

利用灵敏度指标可以估算元件参数变化后的系统可靠性指标, 表 7 列出了发电机#18G1 的故障率和平均修复时间分别发生变化后的系统可靠性指标。其中, 方法 1 表示采用灵敏度指标进行近似计算, 方法 2 表示重新进行可靠性评估, ΔI 表示元件故障率的变化量, Δr 表示元件平均修复时间的变化量。由表 7 可见, 两种方法得出的结果基本一致, 因此在元件参数改变量不太大的情况下利用灵敏度指标计算参数改变后的系统可靠性指标是一种高效的实用方法。

表 7 元件可靠性参数改变后的系统年度化指标
Tab. 7 Annualized indices of system after reliability parameters of component are changed

参数变化量	LOLP		LOLF/(次/年)		EDNS/(MW/年)	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
$\Delta I=5$ 次/年	0.0950	0.0936	15.645	15.474	16.013	15.731
$\Delta I=10$ 次/年	0.1147	0.1095	18.089	17.449	20.032	18.979
$\Delta r=50\text{h}$ /次	0.0831	0.0853	13.654	13.781	13.593	14.045
$\Delta r=100\text{h}$ /次	0.0878	0.0946	13.925	14.318	14.554	15.945

注: 发电机#18G1 的原始参数为 $I=7.9636$ 次/年、 $r=150\text{h}$ /次。

5 结语

大电力系统可靠性的灵敏度指标能够敏感反映设备参数的微小变化所引起的系统可靠性的改变程度和趋势, 通过它们能高效估算元件参数变化后系统的可靠性指标。这些灵敏度指标在大电力系统概率风险评估中的应用, 一方面有助于找到系统可靠性的薄弱点并提供改善系统可靠性的具体措施, 为规避停电风险提供有益指导; 另一方面有助于快速近似计算元件参数变化后系统可靠性指标的改变量, 为可靠性投资/效益分析提供有力工具。

参考文献

- 王韶, 周家启. 基于函数型连接神经网络的发输电系统可靠性评估研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 142-146.
Wang Shao, Zhou Jiaqi. Study on reliability assessment of composite generation and transmission system based on functioned link neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 142-146.
- 吴开贵, 王韶, 张安邦, 等. 基于 RBF 神经网络的电网可靠性评估模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 9-12.
Wu Kaigui, Wang Shao, Zhang Anbang *et al.* The study on reliability assessment of electrical power systems using RBF neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 9-12.
- 吴开贵, 吴中福. 基于敏感度分析的电网可靠性算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 54-56.
Wu Kaigui, Wu Zhongfu. Reliability evaluation algorithm of electrical power systems using sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 54-56.
- 陈举华, 赵建国, 郭毅之. 电力系统可靠性研究的灰关联和模糊贴近度分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 60-63.
Chen Juhua, Zhao Jianguo, Guo Yizhi. Gray relation and fuzzy nearness analysis on the reliability study of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 60-63.
- 王韶, 周家启. 双回平行输电线路可靠性模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 53-56.
Wang Shao, Zhou Jiaqi. A reliability evaluation model for two transmission lines in parallel[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 53-56.
- 郑望其, 程林, 孙元章. 2005 年南方电网可靠性充裕度评估[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 5-8.
Zheng Wangqi, Cheng Lin, Sun Yuanzhang. Adequacy evaluation for South China electric power grid in 2005[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 5-8.
- 刘海涛, 程林, 孙元章. 交直流系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 27-31.
Liu Haitao, Cheng Lin, Sun Yuanzhang. Reliability evaluation of hybrid AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 27-31.
- Melo A C G, Pereira M V F. Sensitivity analysis of reliability indices with respect to equipment failure and repair rates[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 1014-1021.

(下转第 53 页 continued on page 53)