

# 发电系统运行风险的评估算法

刘若溪, 张建华, 刘文霞, 吴迪

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

## Method of Operational Risk Assessment for Generating System

LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia, WU Di

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control

(North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** In order for evaluating the risk of generating system more accurately, this paper introduced the generating system operational risk assessment concept and the relationship between it and traditional reliability evaluation. In this paper, the author put forward an operational risk assessment algorithm for generating system, in which the operating conditions of generator was considered. In this algorithm the generators were divided into two types: time-varying and non-time-varying generator, the time-dependent outage probability of each type was deduced based on Markov theory. The outage rate of generator was calculated by a method in which the operating conditions of generator had been considered. The economic loss model which was caused by unplanned shutdown of generator was also established. At last, the algorithm developed three indices, including the probability of all kinds of active power output states, active power output expectation and economic loss expectation, which can measure the real time operational risk of power plant. The calculation and analysis of IEEE-RTS 79 reliability test systems show that the proposed algorithm is effective.

**KEY WORDS:** generating system; risk; real time operating condition; Markov theory; outage rate model

**摘要:** 为了更加准确地衡量发电系统的运行风险,在简要介绍发电系统运行风险评估的内涵及其与传统可靠性评估关系的基础上,提出一种考虑发电机实时运行状态的发电系统运行风险评估算法。该方法将发电机分为时变与非时变2种类型,应用马尔可夫理论推导出2种类型发电机的时间相关停运概率模型。采用一种计及发电机实时运行状态的停运率模型来计算各发电机的实时停运率,并根据风险理论建立发电机非计划停运给发电系统造成的经济损失后果模型。最后给出发电系统所处各种有功输出状态的概率、期望有功输出和期望经济损失3个指标,用以衡量其实时运行风险的大小。通过对算例 IEEE RTS-79 的计算分析验证所提算法的有

效性。

**关键词:** 发电系统; 风险; 实时运行条件; 马尔可夫理论; 停运率模型

## 0 引言

在电力市场条件下,发电商的经济利益与是否能够按时履行其与电网运营商所签购电协议有着很大关系。由于导致发电厂不能正常运转的原因多种多样,其中不仅包括内部原因也包括外部原因,为此电厂运行人员不仅需要在电网正常运行时获得有关发电机组安全方面的各类信息,而且更要在电网突发故障状态情况下实时评估发电机组的运行风险水平,了解电网故障、负荷波动以及各类人为操作对发电机组安全运行水平的影响。因此,开展针对发电系统运行风险评估方面的研究,拓展原有电力系统运行风险评估理论与方法的适应范围就成为一件很有意义的工作。

风险与可靠性是2个相对的概念,越高的风险对应越低的可靠性,反之亦然<sup>[1]</sup>。因此有关发电系统可靠性方面的研究成果同样有益于风险方面的研究。文献[2-4]采用概率方法评估了发电系统的有效度,并计及了升压变压器和备用元件的影响,但研究成果主要集中在适用于规划的发电系统长期可靠性评估方面。文献[5-8]提出了系统运行可靠性概念与算法,评估系统在当前运行状态下的可靠性水平,将传统可靠性理论从规划领域拓展到了运行领域,大大的扩充了原有理论的适用范围。文献[9]引入了可信性理论以解决运行风险评估中的随机性和模糊性问题,同样取得了不错的效果。

纵观国内外相关文献,有关发电系统运行风险

评估的概念还并不明确,更没有与之相适应的具体评估算法。为此,在简要介绍发电系统运行风险评估内涵及其与传统可靠性关系的基础上,本文提出一种考虑发电机实时运行状态的发电系统运行风险评估算法。该算法将发电机分为时变与非时变 2 种类型,应用马尔可夫理论推导出 2 种类型发电机的时间相关停运概率模型。采用一种计及发电机实时运行条件的发电机停运率模型来计算各发电机的实时停运率,并根据风险理论建立发电机非计划停运给发电系统造成的经济损失后果模型。最后给出发电系统所处各种有功输出状态的概率、期望有功输出和期望经济损失 3 个指标,用以衡量其实时运行风险。通过对算例 IEEE RTS-79 的计算分析验证所提算法的有效性。

## 1 发电系统运行风险评估的概念及其与传统可靠性评估的关系

### 1.1 发电系统运行风险评估的概念

风险是指人类从事某种活动时,在一定时期内可能会发生的具有损失性后果事件的危害,这种危害来自于可能性(概率  $p$ )和严重性(后果  $c$ )2 个方面,而风险值就是两者的乘积,即  $R=pc^{[10]}$ 。

基于此,本文定义发电系统运行风险评估的 5 要素,即描述对象、运行条件、时间期限、危害事件、风险指标,各要素含义分别如下:1)描述对象为发电系统;2)运行条件为在实时运行状态下;3)时间期限为短期(数小时或数分钟);4)危害事件为不能持续稳定按调度要求发出电能;5)评估指标为可能性与后果严重程度的综合度量。

将上述 5 要素组合起来,本文给出发电系统运行风险评估的定义,即:发电系统在实时运行状态下,在短期内不能持续稳定按调度要求发出电能的可能性与后果严重程度的综合度量。

### 1.2 发电系统运行风险评估与传统发电系统可靠性评估之间的关系

不同于传统发电系统可靠性评估,发电系统运行风险评估是利用当前的运行和设备信息预测未来一段时间(几分钟或几小时)的发电系统运行风险,为预防控制策略提供决策参考。下文从发电机停运模型、计算效率和指标定义 3 方面比较两者的异同:

1) 发电机停运模型。规划和运行计划采用的可

靠性评估属于长时间尺度的问题,发电机停运状态概率是一种通过长期的历史数据统计得到的期望值,是稳态概率。但对于在线运行安全性问题是一个短时间尺度的问题。更重要的是,在运行中发电机的失效概率是随运行工况变化而变化的,所以运行风险评估应该采用时变模型,这是运行风险评估模型不同于传统可靠性评估模型的本质特征之一。

2) 计算效率。由于发电系统一般规模都不是很大,因此无论是传统可靠性评估还是运行风险评估都可以采用精确解析法,此方法准确,效率也很高。区别在于运行风险评估需要考虑电网运行工况对发电机停运率的影响,但因为是短时间尺度问题,仅需计及电网当前评估周期内的运行工况,因此其对整体算法的计算效率影响并不大。

3) 指标定义。传统发电系统可靠性评估指标一般只包括概率性指标,而运行风险评估指标则能够从概率性和后果严重性 2 个方面同时衡量危害事件的影响,因此更加具有实用意义。

## 2 发电机瞬时状态概率的详细求解过程

电力系统调度机构根据负荷预测对所辖范围内的发电厂安排发电计划,在发电计划中,有些发电机需要在线长期运行,有些却需要在不同时间段内改变运行状态。

根据发电计划的调度策略,可将系统中的发电机分为 2 种类型:1)时变型,定义为运行状态随时间变化而需要改变的发电机;2)非时变型,定义为要求始终处于运行状态中的发电机,如需长期运行的基荷机组。

在传统可靠性评估中,发电机的可靠性参数通常采用统计平均值。然而,在研究周期较短的运行风险评估中,为准确预测整个系统短期内的风险水平,需要考虑其可靠性参数的时间相关性;并且,由于时变型发电机需要多次投入运行或退出运行,因此与非时变型发电机不同,其可靠性参数除与时间有关外还与投运成功概率有关。

如果发电机停运率、修复率为常数,则其连续工作时间和停运时间服从指数分布,其状态转移过程为齐次马尔可夫过程<sup>[11]</sup>。利用齐次马尔可夫过程进行推导,可得

$$dp(t)/dt = p(t)A \quad (1)$$

式中:  $p(t)=[p_0(t), p_1(t)]$ ,  $p_0(t)$ 和  $p_1(t)$ 分别为发电机

工作状态和停运状态的瞬时概率(此处暂不考虑其降额运行状态);  $A = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix}$ ,  $\lambda$ 和 $\mu$ 分别为发电机的停运率和修复率。求解式(1)可得

$$p(t) = p(0) \cdot \begin{bmatrix} \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} & \frac{\lambda}{\lambda + \mu} [1 - e^{-(\lambda + \mu)t}] \\ \frac{\mu}{\lambda + \mu} [1 - e^{-(\lambda + \mu)t}] & \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $p(0)$  为在 0 时刻状态概率初始值。

若当前时刻发电机处于工作状态, 则  $p(0) = [1, 0]$ , 代入式(2)可得

$$[p_0(t), p_1(t)] = \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right] \quad (3)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时, 可得

$$[\tilde{p}_0, \tilde{p}_1] = \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right] \quad (4)$$

式中  $\tilde{p}_0$  和  $\tilde{p}_1$  为平稳状态概率(长期概率)。

若当前发电机处于停运状态, 则  $p(0) = [0, 1]$ , 代入式(2)可得

$$[p_0(t), p_1(t)] = \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right] \quad (5)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时, 仍可得到式(4)。

更一般的情况是:  $p(0) = [p_w, p_n]$ , 式中  $p_w$  为发电机在 0 时刻处于运行状态的概率;  $p_n$  为发电机在 0 时刻处于停运状态的概率。将  $p(0) = [p_w, p_n]$  代入式(2), 可得

$$[p_0(t), p_1(t)] = \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu} (\lambda p_w - \mu p_n), \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu} (\mu p_n - \lambda p_w) \right] \quad (6)$$

因为发电机的修复时间一般大于运行风险评估的周期, 所以可将其视为不可修复元件, 即认为发电机修复率  $\mu = 0$ , 将此条件代入式(6), 可得发电机在  $t$  时刻的运行概率:

$$p_0(t) = e^{-\lambda t} p_w \quad (7)$$

可见, 只要知道  $p_w$  和  $\lambda$ , 就可以求得发电机在  $t$  时刻的运行概率。但对于不同类型的发电机, 其初始时刻及其  $p_w$  是不同的。

对于时变型发电机, 以实际投入运行的时刻为初始时刻, 该发电机的  $p_w$  为其投运成功概率  $p_s$ 。需要说明的是, 某时刻的发电厂运行风险水平取决于该时刻在线运行的所有机组, 因此, 如果依据调度计划, 时变型发电机  $i$  在时刻  $t$  处于停运或者备用状态, 则该时刻的运行风险评估将不考虑此发电机的影响。

对于非时变型发电机, 以评估起点为初始时刻。如果能确定该发电机在初始时刻处于运行状态, 则其  $p_w = 1$ ,  $p_0(t)$  和  $p_1(t)$  的计算结果为式(3)。

### 3 基于实时运行条件的发电机停运率模型

#### 3.1 发电机停运因素分析

实际系统中, 导致发电机停运的因素<sup>[12]</sup>众多, 一般可以分为 4 类: 1) 发电机不正常运行时引起发电机保护装置的动作; 2) 发电机本身的故障, 例如制造缺陷、部件老化、设备发热、绝缘损坏等; 3) 环境因素, 例如洪水、地震等; 4) 人为误操作以及保护误动。本文设定对应于上述 4 类停运因素的发电机停运率分别为  $\lambda_1(x_i)$ 、 $\lambda_2(x_i)$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$ 。  $x_i$  表示第  $i$  个运行条件变量,  $x_i$  可能是频率  $f$ 、电压  $U$ 、电流  $I$  等某个状态量。

由其定义形式可见, 其中前 2 类停运因素与实际运行条件相关。当发电机运行在非正常工作状态或者偏离额定值时, 其自身的故障率会增加<sup>[13-14]</sup>, 例如, 长时间的过负荷、电气设备的载流部分和绝缘材料过度发热, 将使绝缘老化或损坏。同时, 经过一段延时, 保护装置会将不正常运行的发电机, 即继续运行会造成损坏或发展为故障的发电机切除<sup>[14]</sup>。第 3 类停运因素导致的停运率受气温、天气、季节、地理位置等因素影响, 可以根据不同的外界环境进行分类统计而得到, 在运行评估中, 需要根据实时的外界环境选取对应值, 本文暂取常数。第 4 类停运因素所导致的停运率是指由人为误操作和保护误动作所引起的发电机停运的频率, 通过可靠性数据统计得出, 其值也为常数。

#### 3.2 基于电压、频率的典型汽轮发电机停运率模型

##### 3.2.1 建模条件

本文采用文献[15]的方法, 建立了基于电压、频率的典型汽轮发电机停运率模型, 建模条件如下:

1) 考虑过电压保护, 保护作用于解列灭磁, 动作电压为  $U_{dz}$ , 保护延时为  $T_{dz}$ ; 2) 考虑低频保护,

保护作用于机组跳闸；3) 考虑电压、频率对发电机本身故障率的影响；4) 停运因素 3) 和 4) 所对应的停运率 $\lambda_3$ 和 $\lambda_4$ 为常数。

### 3.2.2 基于电压的停运率模型

1) 基于过电压保护动作的发电机停运率模型。

$$\lambda_1(U) = \begin{cases} 0, & U \leq U_{\max}^n \\ \frac{U}{(U_b^{v1} - U_{\max}^n)T_{dz}} + \frac{U_{\max}^n}{(U_{\max}^n - U_b^{v1})T_{dz}}, & U_{\max}^n < U < U_b^{v1} \\ 1/T_{dz}, & U \geq U_b^{v1} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $U_{\max}^n$ 为正常工作区域上限； $U_b^{v1}$ 为上越限区域下限。且 $U_{\max}^n \leq U_{dz} \leq U_b^{v1}$ ，参数详见文献[15]。

2) 基于发电机自身故障因素的停运率模型。

该停运率是指由于发电机本身故障所引起的发电机停运的频率。当运行电压偏离基准值时，该停运率增大，其值为

$$\lambda_2(U) = \lambda_{2,0} + \Delta\lambda_2(U) \quad (9)$$

式中： $\lambda_{2,0}$ 为所有运行条件在基准值时发电机的故障率，其不包括 $\lambda_3$ 和 $\lambda_4$ ； $\Delta\lambda_2(U)$ 为机端电压 $U$ 偏离基准值时发电机停运率的增量，当机端电压 $U$ 为基准值时， $\Delta\lambda_2(U)=0$ 。

考虑到发电机正常运行时，电压一般小于 1.05 pu，在这个范围内，电压对发电机故障率的影响很小，因此假设

$$\Delta\lambda_2(U) = 0, \quad U \leq 1.05 \text{ pu} \quad (10)$$

当电压大于 1.05 pu，而小于保护动作整定值 $U_{dz}$ 时，假设停运率随着电压的增加而线性增加，即：

$$\Delta\lambda_2(U) = kU + b, \quad 1.05 \text{ pu} < U \leq U_{dz} \quad (11)$$

式中  $k$ 、 $b$  为待定系数。根据点(1.05, 0)和( $U_{dz}$ ,  $\Delta\lambda_2(U_{dz})$ )可得： $k = \frac{\Delta\lambda_2(U_{dz})}{U_{dz} - 1.05}$ ， $b = \frac{-1.05\Delta\lambda_2(U_{dz})}{U_{dz} - 1.05}$ 。

因此基于发电机本身故障的停运率模型 $\lambda_2(U)$ 为

$$\lambda_2(U) = \lambda_{2,0} + \Delta\lambda_2(U) \quad (12)$$

式中 $\Delta\lambda_2(U)=$

$$\begin{cases} 0, & U \leq 1.05 \text{ pu} \\ \frac{\Delta\lambda_2(U_{dz})}{U_{dz} - 1.05}U + \frac{-1.05\Delta\lambda_2(U_{dz})}{U_{dz} - 1.05}, & 1.05 \text{ pu} < U \leq U_{dz} \end{cases}$$

综合 $\lambda_1(U)$ 与 $\lambda_2(U)$ ，可得基于电压的停运率模型：

$$\lambda(U) = \lambda_{2,0} + \lambda_1(U) + \Delta\lambda_2(U) =$$

$$\begin{cases} \lambda_{2,0}, & U \leq 1.05 \text{ pu} \\ \lambda_{2,0} + \Delta\lambda_2(U), & 1.05 \text{ pu} < U \leq U_{\max}^n \\ \lambda_{2,0} + \lambda_1(U) + \Delta\lambda_2(U), & U > U_{\max}^n \end{cases} \quad (13)$$

因为统计平均值 $\bar{\lambda}$ 是停运率对运行条件的加权平均，而元件在绝大部分时间内都运行在正常工作区域 $[0, U_{\max}^n]$ ，因此 $\lambda_{2,0} < \bar{\lambda}$ ，但接近于 $\bar{\lambda}$ 。为了分析方便，取 $\lambda_{2,0} = \bar{\lambda}$ 。

### 3.2.3 基于频率的停运率模型

根据表 1 所示的低频保护的定值与延时，可得基于低频保护的停运率模型 $\lambda_1(f)$ ：

表 1 低频保护动作整定值与延时

Tab. 1 Setting and time delay of under-frequency protection

$f$	保护延时	$f$	保护延时
$f \leq f_{b4}^{v2}$	$T_{dz4}$	$f_{b3}^{v2} < f \leq f_{b2}^{v2}$	$T_{dz2}$
$f_{b4}^{v2} < f \leq f_{b3}^{v2}$	$T_{dz3}$	$f_{b2}^{v2} < f \leq f_{dz}$	$T_{dz1}$

$$\lambda_1(f) = \begin{cases} 0, & f \geq f_{\min}^n \\ \frac{\lambda_1(f_{b1}^{v2})}{f_b^{v2} - f_{\min}^n}f + \frac{f_{\min}^n \lambda_1(f_{b1}^{v2})}{f_{\min}^n - f_b^{v2}}, & f_{b1}^{v2} < f < f_{\min}^n \\ 1/T_{dz1}, & f_{b2}^{v2} < f \leq f_{b1}^{v2} \\ 1/T_{dz2}, & f_{b3}^{v2} < f < f_{b2}^{v2} \\ 1/T_{dz3}, & f_{b4}^{v2} < f < f_{b3}^{v2} \\ 1/T_{dz4}, & f \leq f_{b4}^{v2} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $f_{\min}^n = f_{dz} + 0.1 \text{ Hz}$ ； $f_{b1}^{v2} = f_{dz} - 0.1 \text{ Hz}$ ； $f_{dz}$ 为低频保护动作值。

与 $\lambda_2(U)$ 模型作类似假设，可得 $\lambda_2(f)$ ：

$$\lambda_2(f) = \lambda_{2,0} + \Delta\lambda_2(f) \quad (15)$$

假设停运率随着频率的降低而线性增加，根据点(50, 0)和( $f_{dz}$ ,  $\Delta\lambda_2(f_{dz})$ )可得： $k = \frac{-\Delta\lambda_2(f_{dz})}{f_{dz} - 50}$ ， $b = \frac{50\Delta\lambda_2(f_{dz})}{f_{dz} - 50}$ ， $\Delta\lambda_2(f) = \begin{cases} 0, & f \geq 50 \text{ Hz} \\ kf + b, & f_{dz} \leq f < 50 \text{ Hz} \end{cases}$ 。

综合考虑 $\lambda_1(f)$ 和 $\lambda_2(f)$ ，可得基于频率的停运率模型：

$$\lambda(f) = \lambda_{2,0} + \lambda_1(f) + \Delta\lambda_2(f) =$$

$$\begin{cases} \lambda_{2,0}, & f \geq 50 \text{ Hz} \\ \lambda_{2,0} + \Delta\lambda_2(f), & f_{\min}^n \leq f < 50 \text{ Hz} \\ \lambda_{2,0} + \lambda_1(f) + \Delta\lambda_2(f), & f < f_{\min}^n \end{cases} \quad (16)$$

式中 $\lambda_{2,0} = \bar{\lambda}$ 。在建模中忽略了频率的升高对元件停

运率的影响。

### 3.2.4 基于电压、频率的停运率模型

由于本文所述4种停运因素互相不包含,具有互斥性,因此只考虑单个运行条件 $x_i$ 的发电机停运率为

$$\lambda(x_i) = \lambda_1(x_i) + \lambda_2(x_i) + \lambda_3 + \lambda_4 \quad (17)$$

式中 $x_i$ 代表电压或频率。式(17)进一步合并为

$$\lambda(x_i) = \lambda_0 + \Delta\lambda(x_i) \quad (18)$$

式中: $\lambda_0 = \lambda_{2,0} + \lambda_3 + \lambda_4$ 为发电机的所有运行条件在基准值时的停运率; $\Delta\lambda(x_i) = \Delta\lambda_1(x_i) + \Delta\lambda_2(x_i)$ 为 $x_i$ 偏离基准值时的停运率增量。

因为停运率是一个频率的概念,所以多个运行条件对发电机停运率的影响为多个运行条件的影响之和,因此考虑 $n$ 个运行条件的发电机停运率为

$$\lambda(x_1, x_2, \dots, x_n) = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \Delta\lambda(x_i) \quad (19)$$

由上述分析可得基于电压、频率的停运率模型:

$$\lambda(U, f) = \lambda_0 + \lambda_1(U) + \Delta\lambda_2(U) + \lambda_1(f) + \Delta\lambda_2(f) \quad (20)$$

### 3.3 基于实时运行条件的发电机停运率模型的进一步说明

通过本节所建立的模型可以在已知发电机实时运行状态的条件求得其所对应的实时停运率,由此可见,发电机的停运率在本文所述方法中是随运行工况时刻变化的。但第2节中所述发电机瞬时状态概率的求解方法则要求发电机停运率与修复率为常数,其实两者并不矛盾。因为在运行风险评估的框架下,评估周期一般都相对很短(几分钟或几小时),在发电机瞬时状态概率的求解过程中可以假设其停运率为常数(在计算过程中常数的具体数值取评估周期起始时刻所对应的实时停运率,并假设其在整个评估周期内恒定不变),但不同的评估周期起始时刻的停运率则是不同的,其具体数值则要通过本节所建模型来求解。

上述问题从数学的角度可理解为:自变量初值大小随客观条件变化,但自变量一旦确定则在整个因变量求解过程中其值始终保持不变。

## 4 考虑经济因素的后果评估

随着电力市场化改革的推进,发电商作为参与市场运作的重要一员,其更多的是关心自己的经济

利益,因此对发电系统的运行风险进行经济性量化非常有必要。

由于不同原因导致发电厂不能按照协议发出一定容量的电能可能会对发电厂造成如下3方面的经济损失<sup>[16]</sup>: 1) 非计划切除发电容量造成的电费损失; 2) 违反互联电网规程或协议的惩罚; 3) 机组的启动和维修费用。基于上述考虑,本文建立考虑经济因素的后果评价模型如下:

$$S = (m_1 - m)Ph + S_p + S_r \quad (21)$$

式中: $m$ 为单位发电成本,元/(kW·h); $m_1$ 为上网电价,元/(kW·h); $P$ 为发电厂非计划切除的功率,kW; $h$ 为评估周期,可根据评估需要选取,但不宜过长; $h$ ;  $Ph$ 为发电厂非计划切除的发电量,kW·h; $S_p = m_2Ph$ 为发电厂违反互联电网规程或协议所需缴纳的罚金,元,其中 $m_2$ 为经评估后单位切除发电量应缴纳的罚金,元; $S_r = PZ/C$ 为机组启动和维修的费用,元,其中 $C$ 为电厂所有机组装机总容量,kW, $Z$ 为电厂所有机组维修和启动1次的平均费用,元; $S$ 为发电厂的经济损失。

## 5 风险评估流程

根据第2、3节的分析,给出发电系统运行风险评估的具体步骤,如图1所示。

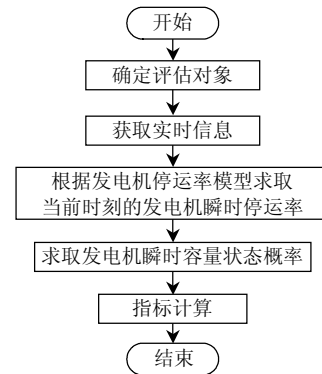


图1 风险评估流程图

Fig. 1 Flowchart of risk assessment

1) 确定评估对象。确定评估周期内发电机组的台数与种类(时变型与非时变型)。

2) 获取实时运行信息。读取机端电压和电网频率等实时运行信息。

3) 根据发电机停运率模型求取当前时刻的发电机瞬时停运率。根据第3节的方法建立基于实时运行条件的发电机停运率模型,并求取当前时刻的发电机瞬时停运率。

4) 确定评估周期并计算评估周期起始时刻的发电机瞬时状态概率。根据式(7)求取 2 种类型发电机的瞬时状态概率。

5) 指标计算。根据发电厂接线图计算整个发电系统的有功输出状态的概率、期望有功输出和期望经济损失 3 个指标。

### 6 算例分析

以 IEEE RTS-79 系统<sup>[17]</sup>为算例, 计算条件如下:

1) 系统总装机容量为 3 405 MW, 负荷为 2850MW, 网损为 43.4MW, 备用容量为 555MW。

2) 采用本文所述方法建立基于电压、频率的发电机停运率模型, 其中假设  $\Delta\lambda_2(U_{dz})=\Delta\lambda_2(f_{dz})=5\bar{\lambda}$ 。

3) 考虑机组、负荷的频率特性, 按照下式进行频率调节。

$$\Delta f = (\Delta P_{D0} - \Delta P_G) / (K_G + K_D) \quad (22)$$

式中:  $\Delta P_{D0}$  为发电出力与负荷的初始容量差额;  $K_G$  为机组的功率静特性系数, 本文假定其为 20;  $K_D$  为负荷的频率调节效应系数, 本文取为 1.5<sup>[18-19]</sup>;  $\Delta P_G$  为由二次调整得到发电机组的功率增量。

4) 不考虑低频减载、低压减载控制措施。

计算在表 2 所示的特定发电机故障状态下部分非故障发电机的停运率。

表 2 发电机故障状态

Tab. 2 Generators' fault states

状态	故障发电机	故障发电机电容量/MW
1	—	0
2	G18	400
3	G18,G15(6)	400+155
4	G18,G15(6),G22(1)	400+155+50
5	G18,G15,G22(1),G22(2)	400+155+50+50

注: G15(6)代表节点 15 处发电厂内的第 6 台机组; 如果该节点的发电厂只有 1 台机组则不表明具体机组号, 如 G18。系统发电机组的详细容量分布见附录 A。

图 2 给出了 G1(1)、G7(1)、G13(1)、G21 在不同状态下的机端电压和频率。由于发电机组的无功调节作用, 电压几乎没有变化。

根据本文所述方法, 求解各状态下的发电机停运率, 如图 3 所示。其中假设:  $U_{max}^n=1.25$  pu;  $U_{dz}=1.3$  pu;  $U_b^{v1}=1.35$  pu;  $T_{dz}=0.5$  s;  $f_{dz}=48.5$  Hz;  $f_{min}^n=48.6$  Hz;  $f_{b1}^{v2}=48.4$  Hz;  $f_{b2}^{v2}=48$  Hz;  $f_{b3}^{v2}=47.5$  Hz;  $f_{b4}^{v2}=47$  Hz;  $T_{dz1}=300$  s;  $T_{dz2}=60$  s;  $T_{dz3}=10$  s;  $T_{dz4}=0$  s。

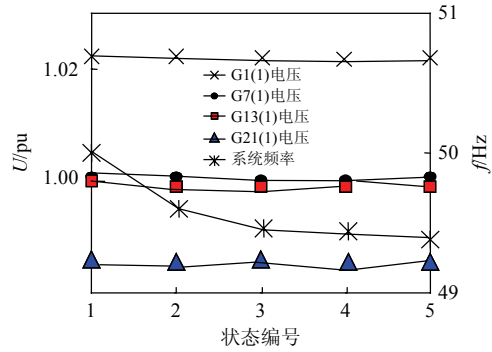


图 2 不同状态下发电机的机端电压和频率  
Fig. 2 Generators' voltage and frequency under different operating conditions

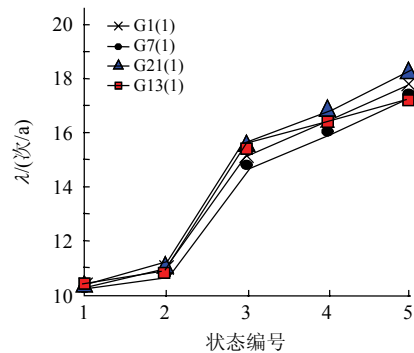


图 3 不同状态下发电机的停运率  
Fig. 3 Generators' outage rate under different operating conditions

从上述结果可看出: 1) 在状态 1 下, 系统发电与用电平衡, 电压和频率保持在各自的额定值, 发电机的停运率为统计平均值; 2) 在状态 2—5 下, 系统功率存在不同程度的缺额, 导致其频率低于额定值 50Hz, 根据  $\Delta\lambda_2(f)$  的模型, 发电机本身故障率增加, 例如在状态 4 下发电机 G1(1)的停运率从原有的统计值 0.1000 次/a 增加至 16.5567 次/a。

假设节点 1 处的发电厂为图 4 所示的单元制接线, 并假设每台锅炉的有效度为 0.91。2 台 20MW 机组和 2 台 76 MW 机组分别按图 4 组成 2 个单元制接线结构。从当前运行状态开始 15 min 之后, 76 MW 机组 G1(4)根据调度计划从热备用状态投入运行, 且其投运成功概率为 0.80<sup>[20]</sup>, 其他 3 台机组

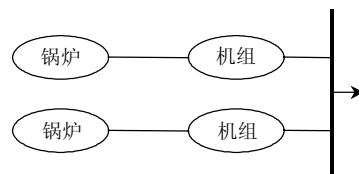


图 4 单元制电厂结构  
Fig. 4 Unit system of power plant

始终在线满载运行。评估时刻为从当前时刻算起, 经过 15 min 后的时间点, 且设评估周期为评估时刻开始后的 15 min。表 3 为各发电机在不同状态下 15 min 后(评估周期起始时刻)仍处在工作状态的概率, 即瞬时状态概率。

表 3 评估周期起始时刻节点 1 处  
4 台发电机的工作概率

Tab. 3 Working probability of 4 generators on node 1  
on start up time of evaluate cycle

状态	工作概率			
	G1(1)	G1(2)	G1(3)	G1(4)
状态 1	0.999 977	0.999 977	0.999 995	0.799 996
状态 2	0.997 496	0.997 496	0.997 515	0.798 012
状态 3	0.996 536	0.996 536	0.996 555	0.797 244
状态 4	0.996 227	0.996 227	0.996 245	0.796 996
状态 5	0.995 918	0.995 918	0.995 936	0.796 749

由表 3 可见, 由于考虑了系统的运行状态, 各台发电机在评估周期起始时刻处的瞬时状态概率发生了明显变化。因为机组 G1(4)为时变型机组, 计算时要考虑其投运成功率, 因此其瞬时状态概率远远低于处在相同运行环境下的同型号机组。

基于表 3 的计算结果, 便可得到评估周期起始时刻 2 台 20MW 和 2 台 76MW 发电机组在单元制接线条件下的瞬时可靠性模型, 以及节点 1 处发电厂的瞬时可靠性模型。

假定式(21)中分别取  $m$ 、 $m_1$  和  $m_2$  为 0.15、0.3 和 0.35 元/(kW·h)。Z 为 600 000 元。计算发电系统的期望有功输出和期望经济损失, 如表 4 所示。

从表 4 的计算结果可看出, 传统的发电系统可靠性评估采用统计平均值作为发电机的停运率, 当系统在故障状态下或负荷波动时, 无法反映运行条件对发电机本身故障率的影响, 更不能反映运行条件对保护动作的影响, 因此传统的发电系统可靠性评估无法反映系统的运行风险水平, 特别是故障状态下的运行风险水平。如果采用传统方法计算在状态 2—5 下系统的期望有功输出和经济损失, 则其结果会与状态 1 时一样, 但采用本文所提方法, 则可很好地区分正常状态与故障状态下发电系统的运行风险, 使计算结果更加符合实际。

## 7 结论

为了有效评估发电系统的运行风险, 本文提出了一种新的发电系统运行风险评估算法。该算法不

表 4 节点 1 处发电厂期望有功输出和风险指标

Tab. 4 Active power output expectation and  
economic loss of power plant on node 1

状态	期望有功输出/MW	期望经济损失/万元
状态 1	$0.548\ 569 \times 192 + 0.259\ 221 \times 116 +$	10.111 8
	$0.020\ 273 \times 40 + 0.108\ 536 \times 172 + 0.051\ 287 \times$	
	$96 + 0.004\ 011 \times 20 + 0.005\ 369 \times 152 +$	
$0.002\ 537 \times 76 = 160.886\ 7$		
状态 2	$0.543\ 147 \times 192 + 0.259\ 997 \times 116 +$	10.241 5
	$0.020\ 815 \times 40 + 0.110\ 432 \times 172 + 0.052\ 862 \times$	
	$96 + 0.004\ 232 \times 20 + 0.005\ 613 \times 152 +$	
$0.002\ 687 \times 76 = 160.487\ 6$		
状态 3	$0.541\ 058 \times 192 + 0.260\ 290 \times 116 +$	10.291 8
	$0.021\ 025 \times 40 + 0.111\ 155 \times 172 + 0.053\ 474 \times$	
	$96 + 0.004\ 319 \times 20 + 0.005\ 709 \times 152 +$	
$0.002\ 747 \times 76 = 160.332\ 9$		
状态 4	$0.540\ 386 \times 192 + 0.260\ 383 \times 116 +$	10.308 0
	$0.021\ 093 \times 40 + 0.111\ 387 \times 172 + 0.053\ 672 \times$	
	$96 + 0.004\ 348 \times 20 + 0.005\ 740 \times 152 +$	
$0.002\ 766 \times 76 = 160.283\ 0$		
状态 5	$0.539\ 716 \times 192 + 0.260\ 476 \times 116 +$	10.324 2
	$0.021\ 161 \times 40 + 0.111\ 619 \times 172 + 0.053\ 869 \times$	
	$96 + 0.004\ 376 \times 20 + 0.005\ 71 \times 152 +$	
$0.002\ 785 \times 76 = 160.233\ 4$		

仅考虑了发电机的实时运行状态, 还在后果分析中计及了经济因素, 基于该算法对 IEEE RTE-79 系统进行评估, 评估结果说明该方法可以有效区分系统各种故障状态下运行风险的相对大小, 使评估结果更加符合实际情况。

## 参考文献

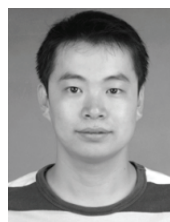
- [1] Li Wenyuan. Risk assessment of power system models, methods and application[M]. New York: John Wiley and Sons, 2005: 1-2.
- [2] 周家启, 任震. 电力系统可靠性评估[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1986: 182-208.  
Zhou Jiaqi, Ren Zhen. Reliability evaluation of power system[M]. Chongqing: Science and Technology Literature Press Chongqing Branch, 1986: 182-208(in Chinese).
- [3] Billinton R, Allan R N. Reliability evaluation of power system[M]. 2nd ed.. New York: Plenum Press, 1996: 18-117.
- [4] Allan R N, Billinton R, Breipohl A M, et al. Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation (1987—1991)[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 41-49.

- [5] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12. Sun Yuanzhang, Cheng Lin, Liu Haitao. Power system operational reliability evaluation based on real-time operating state[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12(in Chinese).
- [6] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 采用瞬时概率的运行可靠性短期评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 20-25. Liu Haitao, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. Short-term operational reliability evaluation by using time dependent state probability[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(13): 20-25(in Chinese).
- [7] 程林, 何剑, 孙元章. 线路实时可靠性模型参数对电网运行可靠性评估的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 8-13. Cheng Lin, He Jian, Sun Yuanzhang. Impact analysis of model and parameters of transmission lines upon power system operational reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 8-13(in Chinese).
- [8] Task Force on Probabilistic Aspects of Reliability Criteria of the IEEE PES Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee. Probabilistic security assessment for power system operations[C]//Proceeding of IEEE PES General Meeting. Denver: IEEE, 2004: 212-220.
- [9] 冯永青, 张伯明, 吴文传, 等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估(一): 运行风险的提出与发展[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 17-23. Feng Yongqing, Zhang Boming, Wu Wenchuan, et al. Power system operation risk evaluation based on credibility theory, part one: a survey of operation risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 17-23(in Chinese).
- [10] Fu Weihui, McCalley J D. Risk based optimal power flow[C]//IEEE Power Tech. Proceedings. Porto: IEEE, 2001: 6-12.
- [11] Billinton R, Allan R N. Reliability evaluation of engineering system: concept and techniques[M]. New York: Plenum Press, 1992: 1-70.
- [12] Wan H, Mccalley J D, Vittal V. Increasing thermal rating by risk analysis[J]. IEEE Trans. on Power System Technology, 1999, 14(3): 815-828.
- [13] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996: 1-44. Wang Weijian. Principle and application of electric power equipment protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996: 1-44(in Chinese).
- [14] Anderson P M. Power system protection[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1999: 3-17.
- [15] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 基于实时运行条件的元件停运因素分析与停运率建模[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 6-12. Liu Haitao, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. Outage factors analysis and outage rate model of components based on operating conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 6-12(in Chinese).
- [16] 王伟, 毛安家, 张粒子, 等. 市场条件下电力系统暂态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 68-73. Wang Wei, Mao Anjia, Zhang Lizi, et al. Risk assessment of power system transient security under market condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 68-73(in Chinese).
- [17] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.
- [18] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 173-218. Chen Hang. Power system steady-state analysis [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 173-218(in Chinese).
- [19] 白钟. 新疆主电网多台发电机有功功率调节装置的作用分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 90-92. Bai Zhong. Analysis about how multi-TPR work in frequency-control system of xinjiang main electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 90-92(in Chinese).
- [20] Billinton R, Fotuhi-firuzabad M. Generating system operating health analysis considering stand-by units, interruptible load and postponable outages[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1994, 9(3): 1618-1625.

## 附表 A

表 A1 IEEE RTS-79 系统发电机组的位置及容量分布  
Tab. A1 Locations and capacity distribution of generating unit of IEEE RTS-79

母线	容量/MW					
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6
1	20	20	76	76		
2	20	20	76	76		
7	100	100	100			
13	197	197	197			
15	12	12	12	12	12	155
16	155					
18	400					
21	400					
22	50	50	50	50	50	50
23	155	155	350			



刘若溪

收稿日期: 2011-05-03。

作者简介:

刘若溪(1982), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统安全和可靠性分析、电力应急管理, Liuruoxi0121123@163.com。

(责任编辑 谷子)