

⑬

发电机开断的预想事故分析

376-83

A CONTINGENCY ANALYSIS FOR GENERATOR OUTAGE

蓝庆华 冉立 秦翼鸿 任震
Lan Qinghua Ran Li Qing Yihong Ren Zhen

TM744

(重庆大学直流输电研究室)

摘要 提出了一种计及系统频率特性的分布系数方法。该方法合理地考虑了因发电机开断而频率变化对潮流分布的影响。算例表明：在电力系统预想事故评定中，该方法既保证了发电机开断模拟的快速性，又提高了计算精度。

关键词 电力系统计算；频率特性；静态安全 / 发电机开断；分布系数

中国图书资料分类法分类号 TM744

ABSTRACT A method of generation distribution factor which considers the frequency characteristic for power system contingency evaluation is presented. The method reasonably considers the influence of frequency change caused by generator outage on load flow distribution. An example is given, and its result shows that the method not only ensures the fast speed for generator outage simulation, but also improves the calculation accuracy in power system contingency evaluation.

KEY WORDS power systems computation; frequency characteristic; static state security / generator outage; distribution factor

0 引言

在电力系统静态安全评定中，一般地，预想事故集应包括如下两类扰动：

(1) 线路开断；(2) 发电机开断。

进行这两种事故评定，目前有多种分析法。这些方法几乎都利用了线性系统的迭加原理。因此可以直接解出事故后的状态变量。它们虽然具有简单、快速、便于实时计算等优点，但对于处理过于严重的事故（重负荷线路或大机组的开断等）往往精度较差。

在发电机的开断模拟中，目前通常采用的方法有：

- (1) 直流法；
- (2) 发电量转移分布系数法(GSDF)；
- (3) 广义发电量分布系数法(GGDF)；
- (4) 计及系统频率变化与快速解耦潮流相结合的方法。

直流法虽然简单，分析时所用机时也很少，但精度较差，而且不能给出系统的电压和无

功潮流解。

GSDF 和 GGDF 也有简单、快速等优点,但没有考虑系统频率特性,即机组和负荷对频率变化的响应特性,因此模拟精度较差。

计及系统频率特性的发电机开断模拟分析法与快速解耦潮流算法相结合,往往可以在精度上取得十分满意的效果,但执行时间有所增加,因此一定程度上限制了该方法的在线应用。

为此,本文提出了计及系统频率特性的分布系数方法。本方法由于考虑了发电机开断引起的系统频率变化的影响,因此既具有普通的广义发电量分布系数法适用范围广、计算时间少等优点,又提高了在预想事故评定中发电机开断模拟的精度。

1 系统频率特性

当预想事故发生发电机开断时,由于整个系统的有功发电量不足以供给有功负荷的需要,系统频率将有所下降。发电机和负荷都将按各自的频率响应特性作出相应的有功调整,以稳定和恢复系统频率。

发电机开断,就有功功率的变化而言,可分为:电磁暂态;机械暂态;调速器发生作用等三个阶段。一般情况下,可以不考虑电磁暂态和机械暂态两个阶段。而调速器将在故障后几秒即开始动作,并在十秒左右抵达稳态,因此可用机组的静态频率特性曲线来计算;当某发电机开断后,其他机组有功出力的变化。图1为发电机和综合负荷的典型静态频率特性曲线。

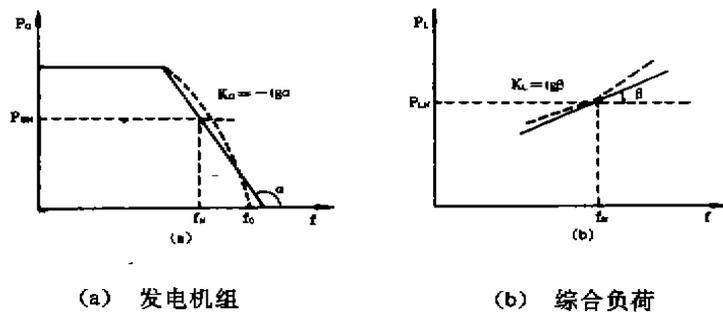


图1 电力系统静态频率特性

在这里,各特性曲线都近似以直线代替。将发电机频率特性曲线的斜率定义为单位调节功率:

$$K_G = - \Delta P_o / \Delta f \quad (1)$$

用标么值表示为:

$$K_G^* = - \frac{\Delta P_o f_N}{P_{GN} \cdot \Delta f} = - \frac{K_G \cdot f_N}{P_{GN}} \quad (2)$$

发电机的单位调节功率是可以整定的,一般定为:

汽轮发电机组: $K_G^* = 33.3 \sim 20$;

水轮发电机组: $K_G^* = 50 \sim 25$ 。

综合负荷静态频率特性曲线也有一个斜率:

$$K_L = \Delta P_L / \Delta f \tag{3}$$

称为负荷的单位调节功率,单位:MW/Hz。用标么值表示为:

$$K_L^* = \frac{\Delta P_L \cdot f_N}{P_{LN} \cdot \Delta f} = \frac{K_L \cdot f_N}{P_{LN}} \tag{4}$$

显然负荷的单位调节功率不能整定。电力系统综合负荷的单位调节功率 K_L^* 大致为 1.5。

因此,节点 i 的单位调节功率为:

$$K_{Bi} = K_{Gi} + K_{Li} \tag{5}$$

对于一个具有 n 节点的系统,假定每一节点都接有发电机和负荷,则系统总频率特性将是每一节点频率特性的总和,即:

$$K_{SS} = \sum_{i=1}^n K_{Bi} \tag{6}$$

系统的单位调节功率表示:系统发电量减少或负荷增加时,在原动机调速器和负荷本身的调节效应共同作用下,系统频率下降的程度。

2 广义发电量分布系数

文献[3]定义的 GSDF:

$$A_{ij-k} = \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta P_{Gk}} \tag{7}$$

表示:当发电机 k 出现了一个单位的有功功率变化时,在支路 ij 中引起的有功功率变化。

设节点电压 $V_i = 1 pu, (i = 1, \dots, n)$, 则式(7)可表示为:

$$A_{ij-k} \cong \Delta I_{ij} / \Delta I_{Gk} \tag{8}$$

而 ΔI_{ij} 则为:

$$\Delta I_{ij} = \frac{\Delta V_i - \Delta V_j}{x_{ij}} \tag{9}$$

式中, x_{ij} 为支路 ij 的实际电抗值; $\Delta V_i, \Delta V_j$ 为由于发电机 k 开断,在节点 i, j 上引起的电压变化。

$\Delta V_i, \Delta V_j$ 由式(10) 求出:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_i \\ \dots \\ \Delta V_j \\ \dots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1k} & \dots & X_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1j} & \dots & x_{kj} & \dots & x_{nj} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{j1} & \dots & x_{jk} & \dots & x_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & \dots & x_{nk} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ \Delta I_k \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

所以

$$\Delta V_i = x_{ik} \Delta I_{Gk} \tag{11}$$

$$\Delta V_j = x_{jk} \Delta I_{Gk} \tag{12}$$

由式(11)、(12)得:

$$\Delta I_{ij} = \frac{x_{ik} - x_{jk}}{x_{ij}} \cdot \Delta I_{Gk} \tag{13}$$

于是由式(8)、(13)得:

$$A_{ij-k} = \frac{x_{ik} - x_{jk}}{x_{ij}} \quad (14)$$

在求得发电量转移分布系数后,即可进一步求出广义发电量分布系数[3]。

广义发电量分布系数由下式定义:

$$P_{ij} = \sum_g (D_{ij-g} P_g) \quad (15)$$

式中, P_{ij} ——线路 ij 的实际有功功率;

P_g ——发电机 g 的有功发电量;

D_{ij-g} ——线路 ij 对发电机 g 的 GGDF。

设发电机 k 增加了 ΔP_{ok} 的发电量,则在线路 ij 中的有功潮流为:

$$P'_{ij} = \sum_g D_{ij-g} P_g + D_{ij-k} \Delta P_{ok} \quad (16)$$

如果选择发电机 r 为参据发电机,并降低其发电量以相同的 ΔP_{or} ($\Delta P_{or} = -\Delta P_{ok}$),则发电量转移后,线路 ij 的有功潮流为:

$$P''_{ij} = \sum_g D_{ij-g} P_g + D_{ij-k} \Delta P_{ok} - D_{ij-r} \Delta P_{or} \quad (17)$$

由式(15)、(17)得:

$$P''_{ij} - P_{ij} = (D_{ij-k} - D_{ij-r}) \Delta P_{ok} = \Delta P_{ij} \quad (18)$$

式中, ΔP_{ij} 表示发电机 k 增加了 ΔP_{ok} 的发电量后,线路 ij 中有功功率变化的增量。

显然,式(19)符合式(7)的定义,所以,

$$D_{ij-k} - D_{ij-r} = A_{ij-k} \quad (19)$$

其中, A_{ij-k} 为可求出的 GSDF。

式(19)与式(15)联立,即可唯一确定所有的 D 系数(GGDF)。

3 计及系统频率特性的分布系数

对于式(15)两边取增量可得:

$$\Delta P_{ij} = \sum_g D_{ij-g} \cdot \Delta P_{og} \quad (20)$$

式中 ΔP_{ij} 表示各节点发电量的变化而引起线路 ij 总的有功潮流变化。

设节点 k 机组开断而失去发电量 P_{ok} ,各节点将根据频率响应特性而作出相应的有功调整,以确保系统功率平衡。

根据式(6)及单位调节功率的定义,由于失去有功功率 P_{ok} ,则系统频率的变化量为:

$$\Delta f = -P_{ok}/k_{\Sigma} \quad (21)$$

其中, k_{Σ} 不包含发电机 k ,所以除节点 k 外有:

$$\Delta P_{oi} = -K_{Bi} \cdot \Delta f \quad (22)$$

式中, ΔP_{oi} 表示因系统频率变化而引起节点 i 发电量与负荷变化量的代数和(或等效发电量的变化量); K_{Bi} 表示节点 i 的单位调节功率。

对于节点 k :

$$\Delta P_{ok} = -(P_{ok} + K'_{Bk} \Delta f) \quad (23)$$

式中, ΔP_{Gk} 为发电机 k 开断后, 节点 k 等效发电量的变化量; K'_{Bk} 为发电机 k 开断后, 节点 k 的单位调节功率。

由式(21)、(22)得:

$$\Delta P_{Gk} = K_{Bk} P_{Gk} / K'_{Gk} \quad (i = 1, \dots, n; \text{且 } i \neq k) \quad (24)$$

对于节点 k :

$$\Delta P_{Gk} = -P_{Gk} + K_{Bk} P_{Gk} / K'_{Gk} = (K_{Bk} / K'_{Gk} - 1) P_{Gk} \quad (25)$$

由式(20)得:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij} &= \sum_{g \neq k} D_{ij-g} \cdot \Delta P_{Gg} \\ &= \sum_{g \neq k} (D_{ij-g} \cdot K_{B_g} P_{Gg} / K'_{Gg}) + D_{ij-k} \Delta P_{Gk} \\ &= \left[\sum_{g \neq k} (D_{ij-g} \cdot K_{B_g} / K'_{Gg}) + D_{ij-k} (K_{Bk} / K'_{Gk} - 1) \right] \cdot P_{Gk} \end{aligned} \quad (26)$$

如果 $K'_{Gk} \gg K_{Bk}$, 则:

$$\Delta P_{ij} = \left[\sum_{g \neq k} (D_{ij-g} \cdot K_{B_g} / K'_{Gg}) - D_{ij-k} \right] \cdot P_{Gk} \quad (27)$$

由此可定义计及系统频率特性的分布系数:

$$B_{ij-k} = \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta P_{Gk}} = \frac{\Delta P_{ij}}{-P_{Gk}} = D_{ij-k} - \sum_{g \neq k} (D_{ij-g} \cdot K_{B_g} / K'_{Gg}) \quad (28)$$

B_{ij-k} 表示: 当节点 k 失去单位发电量后, 计及电力系统各节点频率响应特性时, 在线路 ij 中引起的有功潮流变化。

4 方法的误差考虑

本方法的实质仍然是应用了线性系统的迭加原理。无疑地, 与 GSDF、GGDF 一样, 将电力系统这样一个非线性系统进行线性化处理, 会带来一定误差, 其误差大小取决于运行状态下系统的线性度。

在考虑负荷频率特性时, 实际上假定了各节点电压恒定, 并将其在额定频率 f_N 附近线性化。事实上, 综合负荷有式(29)所示的函数关系:

$$P_L = P(V, f) \quad (29)$$

当 V 恒定, 定义负荷单位调节功率 K_L 为:

$$K_L = \frac{\partial P}{\partial f} \Big|_{f=f_N} \quad (30)$$

如果 V 发生变化, 则:

$$K_L = \frac{\partial P}{\partial f} \Big|_{f=f_N} = \frac{\partial P}{\partial f} \Big|_{f=f_N} + \frac{\partial P}{\partial V} \Big|_{V=V_N} \cdot \frac{dV}{df} \Big|_{f=f_N} \quad (31)$$

显然, 本文所考虑的综合负荷频率调节特性所带来的误差取决于: 发电机开断后, 各节点电压和系统频率变化的大小。

5 算 例

表 1 支路对27号发电机开断的各分布系数

支路编号	起始节点号	终止节点号	GSDF	GGDF	本文方法
1	1	8	.074537	.026928	.026320
2	1	23	.000001	.012122	.005252
3	1	24	-.085743	-.045280	-.036474
4	2	19	-.050464	-.011459	-.012247
5	2	22	.048461	-.020945	-.002081
6	3	4	.233971	.286678	.190501
7	3	30	-.124311	-.253201	-.172939
8	4	5	-.586403	-.143288	-.095155
9	4	6	.293796	.439783	.399088
10	4	29	-.162428	-.273231	-.222416
11	5	14	.021308	.040634	.020944
12	5	15	.100765	.121834	.068575
13	5	16	.095228	.076423	.047205
14	5	25	.000000	-.136519	-.124162
15	6	7	-.222189	-.167090	-.232719
16	6	9	-.509663	-.187752	-.135809
17	6	12	.089528	.158576	.141720
18	6	22	-.212511	-.052795	-.041885

表 2 基本潮流、GGDF 及本文方法计算所得潮流

支路编号	起始节点号	终止节点号	基本潮流	GGDF 法	本文方法
1	1	8	-.042532	-.047918	-.047796
2	1	23	.035516	.033091	.034465
3	1	24	.007014	.016070	.014309
4	2	19	.040586	.042878	.043035
5	2	22	-.132587	-.128398	-.132171
6	3	4	.400326	.342990	.362225
7	3	30	-.424326	-.373686	-.389738
8	4	5	.286925	.315582	.305956
9	4	6	.356628	.268671	.276810
10	4	29	-.321472	-.266826	-.276989
11	5	14	.086939	.078812	.082750
12	5	15	.205087	.180720	.191372
13	5	16	.082903	.067618	.073462
14	5	25	-.200000	-.172696	-.175168
15	6	7	.208719	.242137	.255262
16	6	9	.142289	.179840	.169451
17	6	12	-.153931	-.122215	-.125587
18	6	22	.122594	-.133153	.130971

本文以 IEEE 30节点试验系统作为算例,计及系统频率特性的发电机开断模拟步骤如图

2所示。

为了进行方法比较,分别计算了GSDF,GGDF和计及系统频率特性的分布系数,并应用于发电机开断模拟。表1为各支路对27号发电机开断的部分分布系数;表2为27号发电机开断,分别用GGDF、计及系统频率特性的分布系数法计算所得到的部分支路有功潮流和初始潮流。

从计算结果可见,分别应用GGDF和计及系统频率特性的分布系数法所得到的各支路有功潮流有较大程度的差别。支路有功潮流对所开断的发电机的发电量灵敏度越高,影响就越显著。特别是对一些重负荷线路,当某台发电机开断后,线路实际有功潮流可能已经超限,但用GGDF计算,其结果则可能没有超限;相反,对于另外一些线路,其实际有功潮流可能没有超限,但计算结果反而已经超限。如果用计及系统频率特性的分布系数法,则可以尽可能避免预想事故评定的不准确性,从而为调度的决策提供更为可靠的依据。

6 结 论

对发电机开断后,系统频率特性对电力系统有功潮流分布的影响,本文作了合理考虑,推导了计算计及系统频率特性的分布系数的有关公式。通过理论分析和计算结果比较,可以得到如下结论:

- (1) 发电机开断后,系统频率特性对电力系统有功潮流的分布有较大程度的影响;
- (2) 本文方法比GSDF、GGDF等分布系数法在精度上有较大程度的提高,并适用于各种发电水平;
- (3) 在实时计算中,本方法所占内存及计算速度与GSDF、GGDF相当。而比计及系统频率特性的发电机开断模拟与快速解耦潮流算法相结合的方法少。

参 考 文 献

- 1 吴际舜. 电力系统静态安全分析. 上海:上海交通大学出版社,1985. 63~72
- 2 南京工学院. 电力系统北京:电力工业出版社,1980. 204~206
- 3 Y. N. Wai. Generalized Generation Distribution Factors For Power Systems Evaluations. IEEE Trans on PAS, 1981, PAS-100 (3),1001~1005
- 4 闵勇. 复杂扩展式电力系统中功率——频率动态过程的分析及低频减载装置整定. 清华大学博士学位论文,1990

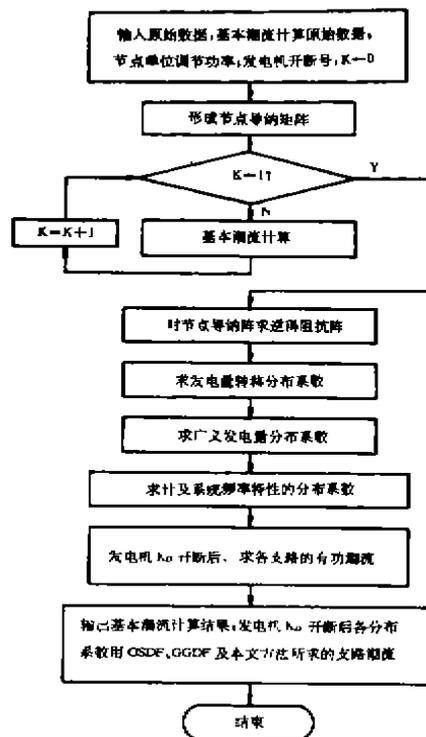


图2 计及系统频率特性后发电机开断模拟程序框图