

# 继电保护系统的可靠性概率\* 指标估计及分析方法

吉林省电力勘测设计院 王野雷

**摘要** 本文提出了继电保护的各种概率型可靠性指标概念以及可靠性指标的统计方法,并对几种典型方案的继电保护系统的可靠性指标进行分析比较。统计方法及分析比较结果可作为继电保护系统设计原则的理论依据。

**关键词** 继电保护系统 可靠性概率指标 状态可靠性概率指标 动作比率指标 频率指标

## 1 前言

在电力系统运行中,继电保护能否正确工作对整个电力系统具有重要的影响,因此对其工作可靠性的要求很高。近年来,人们对继电保护可靠性研究的兴趣日益增加,对可靠性的认识也逐渐深入。本文从电力系统设计的角度对继电保护各个方面的工作可靠性进行分析,给出符合其工作规律及特点的概率型可靠性指标定义。另外,通过应用状态空间法及网络法提出继电保护系统可靠性指标的求解方法。

## 2 电力系统继电保护可靠性指标的表示方法

电力系统继电保护的功能为当被保护设备发生故障时,将故障设备从运行的系统中切除。

具有以下三种功能:

①由1~2LJ、JSJ<sub>13~15</sub>触点,1XJ线圈,1LP、BCJ线圈构成无时限电流速断保护。

②由1~2LJ,1~3YJ触点,2XJ线圈,JSJ<sub>3~11</sub>触点,2LP、BCJ线圈构成低电压闭锁电流后加速保护。

③由1~2LJ触点,SJ线圈构成限时电流速断保护。

(3)接线简单、容易实现,保护大为简化。对短线路及系统运行方式变化大,对稳定性又要求较高的电力网,并不使保护过分复杂时,重合闸前后加速式更有应用价值。

(4)因前加速造成无选择动作,使电力网出口断路器跳合次数增加,增大了断路器的维护检修工作量。并且低电压闭锁后加速保护不能完成保护全线路。

在本文的撰写过程中得到了李清泉总工程师,于志宏高级工程师的大力支持和帮助,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- 1 胡延龄. 单侧电源线路的前后加速式重合闸. 继电器, 1991, 1
- 2 吕继绍. 电力系统继电保护设计原理. 水利电力出版社, 1986, 12
- 3 能源部西北电力设计院编. 电力工程设计手册 2. 水利电力出版社.
- 4 许昌继电器厂. 35kV 变电所定型屏发、变电二次通用设计图册修订本. 1987, 12

\* 本文 1992 年 9 月收稿

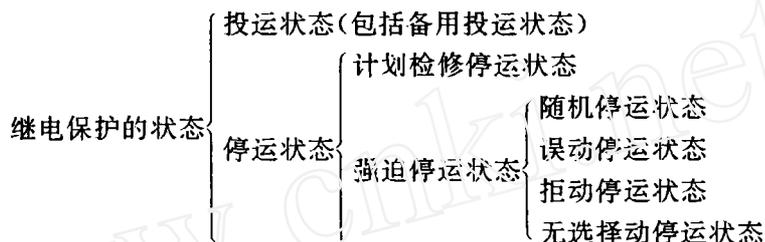
部颁有关规则对继电保护有“四性”的要求，即可靠性、选择性、快速性及灵敏性。可靠性是指保护应该动作时应可靠动作，不该动作时应可靠不动作。可靠性是“四性”的前提，在拟制、配置保护装置时，必须满足可靠性的要求。

与电力系统其它设备（装置）的可靠性概念表示方法类似，继电保护的可靠性也应以适当的指标表示。从电力系统设计的角度出发，以一个具有完整保护功能的整套继电保护装置为最小研究单元，继电保护可靠性指标基本上可用三种概率型指标进行描述，一种为状态概率指标，第二种为动作比率指标，第三种为频率指标。本文将对继电保护的三种概率型指标分别进行分析。

### 3 继电保护的状态可靠性概率指标估计及分析方法。

继电保护的状态可靠性概率指标的分析方法采用状态空间法。

继电保护的状态划分如下：



继电保护的状态可分为两种，一种为投运状态，即保护处于运行工作状态，或虽未投运，但可以随时投运的备用状态；另一种为停运状态，即保护退出运行状态，进行维修的状态。继电保护的两种状态之间是可以相互转换的。保护从投运状态转移至停运状态有以下 5 种原因：

- (1) 计划检修停运。
- (2) 随机停运。
- (3) 误动停运。
- (4) 拒动停运。
- (5) 无选择动停运。

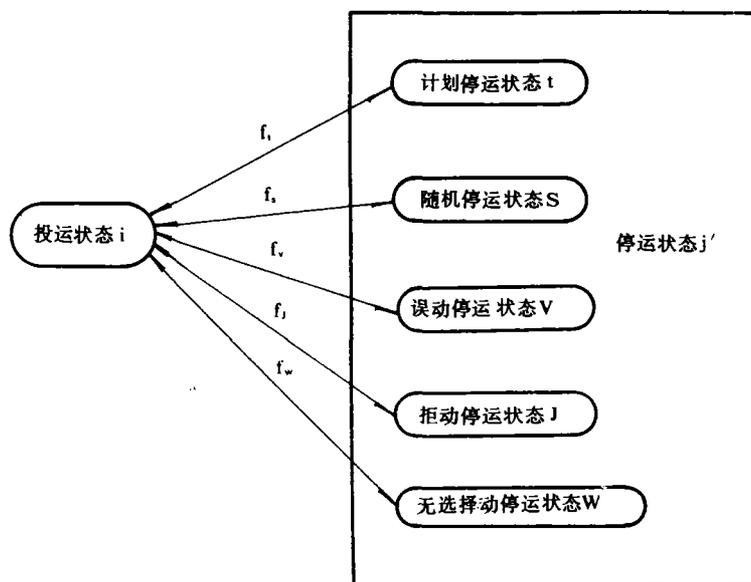


图 1

继电保护可认为是可修复元件，其状态空间图如图 1 所示

在图 1 中， $f_t$ 、 $f_s$ 、 $f_v$ 、 $f_j$ 、 $f_w$  分别为保护的投运状态与计划停运状态、随机停运状态、误动停运状态、拒动停运状态及无选择动停运状态之间的转移频率。

假设保护处于投运状态的概率为  $P_i$ , 处于停运状态的概率为  $P_j^1$ , 其中处于计划停运状态、随机停运状态、误动停运状态、拒动停运状态及无选择动停运状态的概率分别为  $P_t$ 、 $P_s$ 、 $P_v$ 、 $P_j$ 、 $P_w$ 。

也可以事件的方式表示。假设保护投运事件为  $X$ , 停运事件为  $Y^1$ , 计划停运事件为  $Y_t$ , 随机停运事件为  $Y_s$ , 误动停运事件为  $Y_v$ , 拒动停运事件为  $Y_j$ , 无选择动停运事件为  $Y_w$ , 则有  $P_i = p(x)$ ,  $p_j^1 = p(Y^1)$ ,  $P_t = p(Y_t)$ ,  $p_s = p(Y_s)$ ,  $p_v = p(Y_v)$ ,  $p_j = p(Y_j)$ ,  $p_w = p(Y_w)$ 。

继电保护的计划检修基本由人为因素确定, 不具备随机性质。继电保护的随机状态包括投运状态与强迫停运状态, 本文仅对保护处于随机状态的可靠性进行分析。

继电保护的可靠性概率数据可以按照统计方法通过长期统计而得到。一般取一年为一个统计周期。考虑到继电保护的的特殊性, 某个保护的一个实际统计周期时间应为一年减去由于被保护设备停运而导致保护停运的时间及保护的计划检修停运时间。在一个统计周期内, 对整个电力系统中所有同型号的保护进行统计, 按下式可求得可靠性概率指标的统计值。

$$P_i = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \frac{T_{im}}{T_m} \quad P_s = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \frac{T_{sm}}{T_m} \quad P_v = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \frac{T_{vm}}{T_m},$$

$$P_j = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \frac{T_{jm}}{T_m} \quad P_w = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \frac{T_{wm}}{T_m} \quad f_s = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K L_{sm},$$

$$f_v = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K L_{vm} \quad f_j = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K L_{jm} \quad f_w = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K L_{wm}.$$

在上式中,  $K$  为某种型号保护的总数,  $T_m$  及  $T_{im}$ 、 $T_{sm}$ 、 $T_{vm}$ 、 $T_{jm}$ 、 $T_{wm}$  分别为该型号第  $m$  套保护的一个统计周期及在一个统计周期内的运行时间、随机停运时间、误动停运时间、拒动停运时间、无选择动停运时间。 $L_{sm}$ 、 $L_{vm}$ 、 $L_{jm}$ 、 $L_{wm}$  分别为一个统计周期内的随机停运次数、误动停运次数、拒动停运次数、无选择动停运次数。

另外有  $T_m = T_{im} + T_{sm} + T_{vm} + T_{jm} + T_{wm}$ 。

在连续进行几个统计周期工作后, 可求取每个周期的概率平均值。

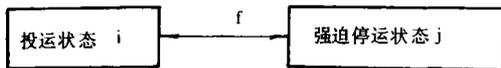


图 2

继电保护的随机状态空间图为图 2。假定继电保护的运行状态与强迫停运状态都具有指数形状的累积概率分布函数。图 2 中  $f$  为保护的运行状态与强迫停运状态之间的转移频率。

参考图 1 与图 2, 由于保护的各种停运状态之间是互不相容的, 因此有下式成立:

$$P_j = P_s + P_v + P_j + P_w \quad (1)$$

$$f = f_s + f_v + f_j + f_w \quad (2)$$

由上式可看出, 保护的强迫停运状态概率为各个子强迫停运状态概率的线性, 转移频率为各个子强迫停运状态转移频率的线性。

继电保护主要的状态概率指标为可用度  $A$ 。可用度是已投入运行使用的继电保护在任何时刻处于运行工作状态的概率, 属于设备的可靠性指标。其它的状态概率指标有继电保护在各个子强迫停运状态的概率指标。

#### 4 几种方案的继电保护系统状态可靠性概率指标的求解

在继电保护的状态概率指标概念明确的基础上, 可以对几种方案的继电保护系统的状态可靠性概率指标进行求解。

目前 220kV 及以上超高压电力系统对各种保护,尤其是输电线路的主保护可靠性要求很高。由于元件质量等方面的原因,多数单一的保护装置可靠性指标无法满足系统运行的要求,因此应选择适当的保护配置方案,由若干套保护组成保护系统,通过相互弥补改善的方法获得满足要求的保护可靠性指标。因此对超高压电力系统继电保护配置方案的可靠性分析是非常必要的。

从系统设计的观点看,继电保护系统即由一套或几套相互独立的保护装置以某种关联方式共同组成的系统。下面仅主要对三种较常见的主保护系统方案的状态可靠性概率指标进行分析求解。

#### 4.1 单一保护系统的状态可靠性概率指标分析求解

此种保护系统方案最为简单,仅由一套保护单独组成。仅对保护系统在随机状态的可靠性进行分析。

单一保护系统的状态有  $i=2$  种,即运行状态与停运状态,状态空间图为图 3。



图 3

在图 3 中,状态“1”为投运状态,状态概率为  $P_1$ ; 状态“2”为停运状态,状态概率为  $P_2$ ;  $\lambda$ 、 $u$  分别为故障率与修复率。有  $p_1 + p_2 = 1$ , 其中有  $p_1 = p_u + p_v + p_j + p_w$

可用度  $A_1 = p_1$

随机停运状态概率  $p_1 = p_u$

误动停运状态概率  $p_{v1} = p_v$

拒动停运状态概率  $p_{j1} = p_j$

无选择动停运状态概率  $p_{w1} = p_w$

#### 4.2 “二取一”方案保护系统的状态可靠性概率指标分析

“二取一”方案保护系统为两套相互独立的单一保护系统以并联方式联接构成。仅对构成保护系统的两套保护均处于随机状态的可靠性指标进行分析。

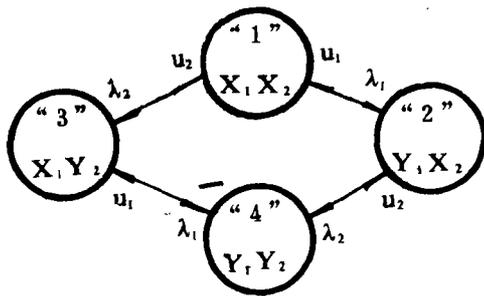


图 4

“二取一”方案保护系统的状态有  $2^2=4$  种,状态空间图为图 4。

在图 4 中,  $\lambda_1$ 、 $u_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $u_2$  分别是第一套保护与第二套保护的故障率及修复率。

状态“1”,两套保护均处于运行状态,事件表示式为  $x_1x_2$ 。

状态“2”,第一套保护处于强迫停运状态,第二套保护处于运行状态。事件表示式为  $y_1x_2$ , 其中  $y_1 = y_{s1} + y_{v1} + y_{j1} + y_{w1}$ 。

状态“3”,第一套保护处于运行状态,第二套保护处于强迫停运状态。事件表示式为  $x_1y_2$ , 其中  $y_2 = y_{s2} + y_{v2} + y_{j2} + y_{w2}$ 。

状态“4”,两套保护均处于强迫停运状态,事件表示式为  $y_1y_2$ 。

假设第一套及第二套保护的运行状态与停运状态概率分别为  $p_{11}$ 、 $p_{12}$ 、 $p_{21}$ 、 $p_{22}$ , 则有下式成立。

$$(p_{11} + p_{12})(p_{21} + p_{22}) = 1$$

即为

$$p_{11}p_{22} + p_{12}p_{21} + p_{11}p_{22} + p_{12}p_{21} = 1$$

上式表明了保护系统的 4 种组合状态，并表明每个组合状态的概率分别等于各套保护为单一保护系统时处于其相应状态的概率指标之积，体现了两套保护之间的相互独立性。

下面分别对保护系统的各个状态可靠性概率指标进行分析求解。

### (1) 可用度

根据可用度定义，“二取一”方案保护系统 4 种随机状态中“1”、“2”、“3”状态均为运行状态，因此有  $A_1 = P_{11}P_{12} + P_{11}P_{22} + P_{11}P_{32}$

### (2) 拒动停运状态概率指标

根据拒动的定义，保护系统拒动停运事件仅为状态“4”的  $y_{11}Y_{12}$ ，拒动停运状态概率为：

$$P_{11} = P(y_{11}Y_{12}) = P(y_{11})P(y_{12}) = P_{11}P_{12}$$

### (3) 无选择动停运状态概率指标

根据无选择动的定义，保护系统无选择动停运事件分别为状态“2”的  $y_{w1}x_2$ ，状态“3”的  $x_1y_{w2}$ ，状态“4”的  $y_{w1}y_{w2} + y_{w1}(y_{s2} + y_{v2} + y_{12}) + y_{w2}(y_{s1} + y_{v1} + y_{11})$ 。

在全部可能状态的无选择动停运事件为：

$$y_{w1}x_2 + x_1y_{w2} + y_{w1}y_{w2} + y_{w1}(y_{s2} + y_{v2} + y_{12}) + y_{w2}(y_{s1} + y_{v1} + y_{11}) = y_{w1} + y_{w2} - y_{w1}y_{w2}$$

无选择动停运状态概率为

$$P_{w1} = P(y_{w1} + y_{w2} - y_{w1}y_{w2}) = P_{w1} + P_{w2} - P_{w1}P_{w2}$$

同理可求得随机停运状态概率为  $p_{s1} = p_{s1}p_{s2}$  误动停运状态概率为  $p_{v1} = p_{v1} + p_{v2} - p_{v1}p_{v2}$ 。

## 5 继电保护系统动作比率可靠性概率指标的求解

继电保护的特点之一是在一次系统发生故障的瞬时发挥其应有的作用。继电保护在一次系统故障瞬时可能正确工作，也可能不正确工作，正确工作或不正确工作的概率即为瞬时可靠性概率指标，亦即动作比率指标。

继电保护的典型动作比率指标有两个，即拒动率  $J$  与无选择动率  $W$ 。动作比率指标是描述处于运行状态的继电保护在一次系统故障瞬时能否正确工作的概率，属于功能可靠性指标。

在一个统计周期内，对整个电力系统中所有同型号的保护进行统计，按下式有可求得动作比率指标。

$$J = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^k \frac{\text{每套保护拒动次数}}{\text{每套保护应正确动作次数}}$$

$$W_E = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^k \frac{\text{每套保护无选择动次数}}{\text{每套保护应正确不动作次数}} \quad (\text{保护区内无选择动率})$$

$$W_F = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^k \frac{\text{每套保护无选择动次数}}{\text{每套保护应正确不动作次数}} \quad (\text{保护区外选择动率})$$

### 5.1 单一保护系统的动作比率指标分析

单一保护系统仅由一套保护组成，拒动率与无选择动率分别为  $J_1$ 、 $W_{E1}$ 、 $W_{F1}$

### 5.2 “二取一”方案保护系统动作比率指标分析

在影响保护发生拒动或无选择动的诸多因素中，只有保护原理缺陷是导致保护不正确工作的必然原因，其它因素均为偶然原因。从实际可能出现的最一般情况考虑，假设组成保护系统的两套保护型号不同，原理不同，两套保护均各自存在原理缺陷。保护系统不正确工作原因如下：(1) 两套保护在某些故障情况下由于原理缺陷必然均不正确工作（共模故障）。(2) 第一套保护在某些故障情况下由于原理缺陷必然不正确工作，而第二套保护在这些故障

情况下仅因偶然随机原因而不正确工作（不包括共模故障情况，仅为第一单模故障情况）。  
 (3) 第二套保护在某些故障情况下由于原理缺陷必然不正确工作，而第一套保护在这些故障情况下仅因偶然随机原因而不正确工作（第二单模故障情况）  
 (4) 两套保护在某些故障情况下均因偶然随机原因而不正确工作。

先对保护系统的拒动率进行分析。对任一保护有： $J = \frac{\text{拒动次数}}{\text{应正确动作次数}}$

应正确动作次数 ( $N$ ) = 区内故障次数 = 共模故障类型次数 ( $N_0$ ) + 第一单模故障类型次数 ( $N_1$ ) + 第二单模故障类型次数 ( $N_2$ ) + 其它故障类型次数 ( $N_3$ )

对第一套保护

拒动次数 ( $N'$ ) = 共模故障拒动次数 ( $N'_0$ ) + 第一单模故障拒动次数 ( $N'_1$ ) + 第二单模故障拒动次数 ( $N'_2$ ) + 其它故障拒动次数 ( $N'_3$ )

其中有  $N'_0 = N_0$ ,  $N'_1 = N_1$ ,  $N'_2 \leq N_2$ ,  $N'_3 \leq N_3$  拒动率为：

$$J = \frac{N'}{N} = \frac{N'_0 + N'_1 + N'_2 + N'_3}{N} = \frac{N_0}{N} + \frac{N_1}{N} + \frac{N'_2}{N} + \frac{N'_3}{N}$$

$$= J_0 + J_1 + J_2 + J_3$$

对第二套保护：

拒动次数 ( $N''$ ) = 共模故障拒动次数 ( $N''_0$ ) + 第一单模故障拒动次数 ( $N''_1$ ) + 第二单模故障拒动次数 ( $N''_2$ ) + 其它故障拒动次数 ( $N''_3$ )

有  $N''_0 = N_0$ ,  $N''_2 = N_2$ ,  $N''_1 \leq N_1$ ,  $N''_3 \leq N_3$ , 拒动率为：

$$J'' = \frac{N''}{N} = \frac{N''_0 + N''_1 + N''_2 + N''_3}{N} = \frac{N_0}{N} + \frac{N''_1}{N} + \frac{N_2}{N} + \frac{N''_3}{N}$$

$$= J_0 + J'_1 + J_2 + J'_3$$

对保护系统：

拒动次数 ( $N^*$ ) = 共模故障拒动次数 ( $N^*_0$ ) + 第一单模故障拒动次数 ( $N^*_1$ ) + 第二单模故障拒动次数 ( $N^*_2$ ) + 其它故障拒动次数 ( $N^*_3$ )

有  $N^*_0 = N_0$ ,  $N^*_1 = N'_1$ ,  $N^*_2 = N''_2$ ,  $N^*_3 = \frac{N'_3 N''_3}{N}$ , 拒动率为：

$$J_1^* = \frac{N^*}{N} = \frac{N^*_0 + N^*_1 + N^*_2 + N^*_3}{N} = \frac{N_0}{N} + \frac{N'_1}{N} + \frac{N_2}{N} + \frac{N'_3 N''_3}{N^2}$$

$$= J_0 + J'_1 + J_2 + J_3 J_3^*$$

以上所求  $J_1^*$  仅为保护系统的两套保护均处于运行状态，即状态“1”时的拒动率。在状态“2”“3”时，此种保护系统实际上变为单一保护系统，因此拒动率即为相应的单一保护系统的拒动率。

用同样方法可求得保护系统的无选择动率。

以上所讨论的最一般情况对于早期的某些整流型及晶体管型保护确实存在。近年来，由于各种新技术的不断应用，尤其是计算机技术的应用，各种继电保护的原理取得了进步与发展，以前保护的各种原理缺陷得到了克服，因此在今后的电力系统继电保护设计中可以不考虑由于原理缺陷而引起的保护不正确工作情况，保护的不正确工作仅是由于某些外界的偶然随机原因引起的。在这一原则的基础上，保护系统的拒动率与无选择动率分析可以简化，假设第一套及第二套保护的拒动率与无选择动率分别为  $J_1$ 、 $W_{E1}$ 、 $W_{F1}$ 、 $J_2$ 、 $W_{E2}$ 、 $W_{F2}$ ，则保护系统在各个状态的动作比率指标分别为  $J_{11} = J_1 J_2$ ,  $W_{E11} = W_{E1} + W_{E2} - W_{E1} W_{E2}$ ,  $W_{F11} = W_{F1} +$

$$W_{F2} - W_{F1}W_{F2}; J_{12} = J_2, W_{E12} = W_{E2}, W_{F12} = W_{F2}; J_{13} = J_1, W_{E13} = W_{E1}, W_{F13} = W_{F1}$$

## 6 继电保护系统频率可靠性指标的求解

仅对继电保护系统的误动停运及随机停运频率指标进行分析求解。

### 6.1 单一保护系统频率可靠性指标分析

误动频率及随机停运频率分别为  $f_{v1}$ 、 $f_s$ 。

### 6.2 “二取一”方案保护系统频率可靠性指标分析

(1) 误动频率指标分析参见图 4

在状态“1”，两套保护中任一保护误动都会引起整个保护系统误动。状态“1”的向外转移频率为： $f_{11} = P_{11}\lambda_{11} = P_1P_2(\lambda_1 + \lambda_2) = P_1f_2 + P_2f_1$

根据本文(2)式，有  $f_{v11} = p_1f_{v2} + p_2f_{v1}$

在状态“2”、“3”误动频率分别为  $f_{v12} = f_{v2}$ ， $f_{v13} = f_{v1}$

(2) 随机停运频率指标分析

从图 4 可看出，从状态“1”只有进入状态“4”整个保护系统才随机停运。进入状态“4”的转移频率为  $f_{14} = P_{14}\lambda_{14} = P_1P_2(u_1 + u_2) = P_1f_2 + P_2f_1$ ，因此有  $f_{s11} = P_1f_{s2} + P_2f_{s1}$

在状态“2”、“3”，随机停运频率分别为  $f_{s12} = f_{s2}$ ， $f_{s13} = f_{s1}$ 。

用同样方法可求得“三取二”方案保护系统的各种可靠性概率指标，求解过程从略。

## 7 继电保护系统的综合可靠性概率指标

在继电保护系统各个方面可靠性概率指标明确的基础上，可以求得一些综合的可靠性概率指标。

在继电保护处于运行状态的条件下，在一次系统故障时保护能够正确工作的概率指标称为可靠率  $R$ 。在保护区内系统发生故障的条件概率为  $P_1$ ，保护拒动的条件概率为  $J$ ，无选择动的条件概率为  $W_E$ ；在保护区外系统发生故障的条件概率为  $P_2$ ，保护无选择动的条件概率为  $W_F$ ，根据全概率公式有  $R = (1 - J - W_E)P_1 + (1 - W_F)P_2$ 。

对任一具体的保护而言， $P_1$  和  $P_2$  可通过统计方法得到。在一个统计周期内，在已确定的一次系统范围内，有  $P_1 = \frac{\text{被保护设备故障次数}}{\text{范围内所有被保护设备故障次数}}$ ， $P_2 = 1 - P_1$ 。另外， $P_1$  与  $P_2$  也可根据需要人为确定。

保护既处于运行状态，又能在一次系统故障时正确工作的概率指标称为完好率  $H$ ， $H = AR$ 。下面分别求取各种方案继电保护系统的综合可靠性概率指标。

### 7.1 单一保护系统的综合可靠性概率指标

$$\text{可靠率 } R_1 = (1 - J_1 - W_{E1})P_1 + (1 - W_{F1})P_2$$

$$\text{完好率 } H_1 = A_1R_1$$

### 7.2 “二取一”方案保护系统的综合可靠性概率指标

$$\text{状态“1”的可靠率 } R_{11} = (1 - J_{11} - W_{E11})P_1 + (1 - W_{F11})P_2$$

$$\text{状态“2”的可靠率 } R_{12} = (1 - J_{12} - W_{E12})P_1 + (1 - W_{F12})P_2$$

$$\text{状态“3”的可靠率 } R_{13} = (1 - J_{13} - W_{E13})P_1 + (1 - W_{F13})P_2$$

根据全概率公式，可用状态的可靠率为：

$$R_1 = \frac{1}{A_{11-1}} \sum_{i=1}^3 R_{1i}A_{1i}$$

完好率  $H_i = A_i R_i$ 。

## 8 各种方案的继电保护系统可靠性概率指标比较分析

为分析方便起见,假设构成保护系统的各套保护均为同一型号,性能完全相同。

以下推导过程均从略

### 8.1 状态可靠性概率指标比较

(1) 可用度比较

有  $A_i < A_j < A_k$ 。

(2) 其它状态概率指标比较

有  $P_{ji} > P_{jk} > P_{jl}$ ,  $P_{si} > P_{sk} > P_{sl}$ 。

在  $P_w < 0.5$  的条件下,有  $P_{wi} > P_{wk} > P_{wl}$ ; 在  $P_v < 0.5$  的条件下,有  $P_{vi} > P_{vk} > P_{vl}$ 。

### 8.2 动作比率指标比较

(1) 状态“1”的动作比率指标比较

当  $J < 0.5$ , 有  $J_{i1} > J_{k1} > J_{l1}$ ; 当  $W_E < 0.5$ , 有  $W_{Ei1} > W_{Ek1} > W_{El1}$ ; 当  $W_F < 0.5$ ,

有  $W_{Fi1} > W_{Fk1} > W_{Fl1}$ 。

(2) 综合动作比率指标比较

一般有  $J_i > J_k > J_l$ ,  $W_{Ei} < W_{Ek}$

当  $A \geq 0.75$ ,  $W_{Ei} \geq W_{Ek}$ 。

### 8.3 可靠率比较

当  $A \geq 0.75$ , 有  $R_i < R_k$ ,  $R_i < R_l$ 。

$R_i$  与  $R_k$  之间一般无法直接进行比较。

### 8.4 频率指标比较

当  $A > 0.5$ , 有  $f_{i1} > f_{k1} > f_{l1}$ ,  $f_{s1} > f_{k1} > f_{l1}$ 。

## 9 结束语

本文以继电保护的实际情况为基础,从系统设计的观点,以系统设计为例,以概率指标的方式从设备可靠性、功能可靠性概率及频率三个方面,全面系统地阐述了继电保护可靠性的概念及求解方法。

本文所阐述的概念思想及方法不仅适用于继电保护的系统设计,而且适用于保护的科研、制造、运行等各方面。

### 参 考 文 献

- 1 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用.
- 2 梅启智等. 系统可靠性工程基础.
- 3 F. C. CHAN. 电力系统继电保护的估计和控制
- 4 苏 M. H. 罗扎诺夫. 电力系统可靠性