

电力系统继电保护设计可靠性研究

吉林省电力勘测设计院 王野雷

内容摘要

本文从系统设计的角度对电力系统继电保护的可靠性进行定义,利用状态空间法及网络法通过算例提出可靠性指标的求解方法,并对各种方案的继电保护系统可靠性指标及冗余优化设计问题进行讨论。

一 前言

目前国内外电力系统继电保护的可靠性研究正在逐渐深入发展,并且取得了一定的成果。从继电保护装置的研制、生产,乃至设计、运行各个阶段都有其可靠性定义,但从系统设计的观点看,至今还没有一个确切、完整的可靠性指标概念,乃至在继电保护系统设计中还不能根据定量理论计算对系统设计方案进行选择。本文所提出的继电保护系统可靠性指标概念及其求解方法可用于对各种系统设计方案进行定量计算分析,计算结果可作为继电保护系统设计原则的理论根据。

二 继电保护系统可靠性指标定义

从系统设计的观点看,所谓继电保护系统即由一套或几套相互独立的继电保护装置以某种方式连接起来共同组成的系统。

描述继电保护系统的可靠性一般有两个指标,即设备的可靠性与功能的可靠性。

设备的可靠性以可用度A描述,即从二次系统的观点描述投入运行的继电保护系统在任何时刻处于工作状态的概率。

功能的可靠性以可靠度R描述,即从一次系统的观点描述处于工作状态的继电保护系统能够正确工作的概率,可靠度与继电保护的误动(包括无选择性动作)、拒动概率有关。

为了能全面描述继电保护系统的可靠性,定义完好率 $P = AR$,作为综合可靠性指标。

三 继电保护系统可靠性指标的求解方法

(一) 可用度A的求解方法

根据状态空间法,继电保护系统的状态可划分为两种,即工作状态与非工作状态。

继电保护系统在任何时刻必处其一状态。

工作状态为正常工作运行状态，非工作状态为保护系统由于发生故障、进行检修等退出运行不能工作的状态。本文以可用度描述继电保护系统处于工作状态的概率。

由于目前继电保护系统设计的主要问题是有关主保护的配置原则问题，因此下面举一算例，分别对一套主保护、两套主保护及三套主保护三种方案的保护系统的可用度进行计算。

对于保护系统的可用度计算可作以下几种假定：

(1) 每套主保护均独立安装于每面保护屏上。

(2) 每套主保护均为可修复元件，其工作状态及非工作状态都具有指数形状的累积概率分布函数，故障率及修复率分别为 λ 、 u 。

(3) 保护屏间相互独立。

(4) 在长期稳定运行情况下不考虑两套保护状态同时发生变化的情况。

以上四点假设在实际工程中是完全可行的。

1. 一套主保护方案的可用度计算

一套主保护安装在一面保护屏上，其状态为工作状态(X)与非工作状态(\bar{X})两种，假设其故障率与修复率分别为 λ_1 、 u_1 。根据状态空间法，在长期运行情况下各状态已臻稳定，有以下状态空间图 1 及状态方程。

$$[M][N] = 0$$

其中 $[M] = [m_1, m_2]$ 为状态概率矩阵

$$[N] = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_1 \\ u_1 & -u_1 \end{bmatrix} \text{ 为状态转移率矩阵}$$

$$\text{即为 } [m_1, m_2] \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_1 \\ u_1 & -u_1 \end{bmatrix} = 0$$

$$\text{此外有 } \sum_{i=1}^2 m_i = 1$$

$$\text{解得 } \begin{cases} m_1 = \frac{u_1}{u_1 + \lambda_1} \\ m_2 = \frac{\lambda_1}{u_1 + \lambda_1} \end{cases}$$

根据可用度定义，一套主保护系统方案的可用度为：

$$A_1 = m_1 = \frac{u_1}{u_1 + \lambda_1}$$

2. 两套并联主保护方案的可用度计算

两套主保护分别安装在两面保护屏上，故障率及修复率分别为 λ_1 、 λ_2 、 u_1 、 u_2 ，两者状态组合可有以下 $2^2 = 4$ 种组合状态。

状态 1：主保护 X 工作，主保护 Y 工作，记为 XY

状态 2：主保护 X 工作，主保护 Y 检修，记为 $X\bar{Y}$

状态 3：主保护 X 检修，主保护 Y 工作，记为 $\bar{X}Y$

状态 4：主保护 X 检修，主保护 Y 检修，记为 $\bar{X}\bar{Y}$

检修状态即为非工作状态。状态空间图如图 2 所示。



图 1

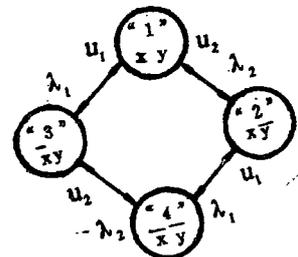


图 2

状态空间方程为 $[M] [N] = 0$

$$[M] = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4]$$

$$[N] = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 \\ u_2 & -(\lambda_1 + u_2) & 0 & \lambda_1 \\ u_1 & 0 & -(u_1 + \lambda_2) & \lambda_2 \\ 0 & u_1 & u_2 & -(u_1 + u_2) \end{pmatrix}$$

$$\text{此外有 } \sum_{i=1}^4 m_i = 1$$

$$\text{解得 } \begin{cases} m_1 = \frac{u_1 u_2}{(u_1 + \lambda_1)(u_2 + \lambda_2)} \\ m_2 = \frac{u_1 \lambda_2}{(u_1 + \lambda_1)(u_2 + \lambda_2)} \\ m_3 = \frac{\lambda_1 u_2}{(u_1 + \lambda_1)(u_2 + \lambda_2)} \\ m_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(u_1 + \lambda_1)(u_2 + \lambda_2)} \end{cases}$$

状态 1、2、3 为工作状态，可用度为：

$$A_i = \sum_{j=1}^3 m_j = \frac{u_1 \lambda_2 + \lambda_1 u_2 + u_1 u_2}{(u_1 + \lambda_1)(u_2 + \lambda_2)} = A_1 A_2 + \bar{A}_1 \bar{A}_2 + \bar{A}_1 A_2$$

$$\text{其中： } A_1 = \frac{u_1}{u_1 + \lambda_1} \quad A_2 = \frac{u_2}{u_2 + \lambda_2}$$

$$\bar{A}_1 = 1 - A_1 \quad \bar{A}_2 = 1 - A_2$$

利用同样计算方法，可求得以 2/3 表决联接方式的三套主保护方案系统的可用度为：
 $A_2 = A_1 A_2 A_3 + A_1 A_2 \bar{A}_3 + A_1 \bar{A}_2 A_3 + \bar{A}_1 A_2 A_3 + A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 + \bar{A}_1 A_2 \bar{A}_3 + \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3$

(二) 可靠度 R 的求解方法

继电保护系统在工作状态下并不一定能够正确地完成各种工作。在某些时候可能由于某些原因而不正确工作。不正确工作方式有两种，一种为不正确动作——误动（包括无选择性动作），另一种为不正确不动作——拒动。继电保护系统在工作状态下发生误动或拒动的可能性可用误动率 W 和拒动率 J 描述。一般情况下误动与拒动两者之间是互不相容的，则总的故障率为 W + J，可靠度为 $R = 1 - (W + J)$ 。仍以前算例的保护系统为例，对可靠度进行求解。

1. 一套主保护方案的可靠度计算

一套主保护系统方案的误动率与拒动率分别为 $W_1 = W$ ， $J_1 = J$ 。可靠度为：

$$R_1 = 1 - (W_1 + J_1)$$

2. 两套并联主保护方案的可靠度计算

两套主保护以并联方式联接，在正常状态下无输出。由状态空间图 2 可见，在“1”状态下两套主保护均为正常工作状态，任一套保护误动都将造成整个保护系统的误动；只当两套保护均拒动时整个保护系统拒动，因此误动率为 $W_1 + W_2 - W_1 W_2$ ，拒动率为 $J_1 J_2$ 。在“2”、“3”状态下只有一套保护工作，其误动率为 W_1 或 W_2 ，拒动率为 J_1 或 J_2 。

两套并联主保护系统的误动率和拒动率可认为是一随机变量，其数学期望值为：

$$W_1 = \frac{(W_1 + W_2 - W_1 W_2) A_1 A_2 + W_1 A_1 \bar{A}_2 + W_2 \bar{A}_1 A_2}{A_1 A_2 + A_1 \bar{A}_2 + \bar{A}_1 A_2}$$

$$J_1 = \frac{J_1 J_2 A_1 A_2 + J_1 A_1 \bar{A}_2 + J_2 \bar{A}_1 A_2}{A_1 A_2 + A_1 \bar{A}_2 + \bar{A}_1 A_2}$$

可靠度为:

$$R_1 = 1 - (W_1 + J_1) \\ = 1 - \frac{(W_1 + W_2 - W_1 W_2 + J_1 J_2) A_1 A_2 + (W_1 + J_1) A_1 \bar{A}_2 + (W_2 + J_2) \bar{A}_1 A_2}{A_1 A_2 + \bar{A}_1 A_2 + A_1 \bar{A}_2}$$

用类似方法可求解得以2/3表决联接方式的三套主保护方案系统的误动率、拒动率及可靠度分别为(注:当三套主保护之一退出运行后剩下的两套以并联方式联接):

$$W_2 = \frac{(W_1 W_2 + W_2 W_3 + W_3 W_1 - 2 W_1 W_2 W_3) A_1 A_2 A_3 + (W_1 + W_2 - W_1 W_2) A_1 A_2 \bar{A}_3 + (W_2 + W_3 - W_2 W_3) \bar{A}_1 A_2 A_3 + (W_3 + W_1 - W_3 W_1) A_1 \bar{A}_2 A_3 + W_1 A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 + W_2 A_1 A_2 \bar{A}_3 + W_3 \bar{A}_1 A_2 A_3}{A_1 A_2 A_3 + A_1 A_2 \bar{A}_3 + \bar{A}_1 A_2 A_3 + A_1 \bar{A}_2 A_3 + A_1 A_2 \bar{A}_3 + \bar{A}_1 A_2 A_3 + A_1 \bar{A}_2 A_3 + \bar{A}_1 A_2 A_3} \\ J_2 = \frac{(J_1 J_2 + J_2 J_3 + J_3 J_1 + 2 J_1 J_2 J_3) A_1 A_2 A_3 + J_1 J_2 A_1 A_2 \bar{A}_3 + J_2 J_3 \bar{A}_1 A_2 A_3 + J_3 J_1 A_1 \bar{A}_2 A_3 + J_1 A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 + J_2 \bar{A}_1 A_2 \bar{A}_3 + J_3 \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3}{A_1 A_2 A_3 + A_1 A_2 \bar{A}_3 + \bar{A}_1 A_2 A_3 + A_1 \bar{A}_2 A_3 + A_1 A_2 \bar{A}_3 + \bar{A}_1 A_2 A_3 + A_1 \bar{A}_2 A_3 + \bar{A}_1 A_2 A_3}$$

可靠度为: $R_2 = 1 - (W_2 + J_2)$

在求得各种方案的继电保护系统可用度A与可靠度R之后,则可得完好率P

$$P_1 = A_1 R_1 \quad P_2 = A_2 R_2 \quad P_3 = A_3 R_3$$

三 各种方案的继电保护系统可靠性指标的比较分析

在求得算例中三种方案的继电保护系统可靠性指标后,可对其进行比较分析。

为计算方便起见,假设各套主保护为同一型号,性能完全相同,即有

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda, \quad u_1 = u_2 = u_3 = u, \quad W_1 = W_2 = W_3 = W, \quad J_1 = J_2 = J_3 = J。$$

1. 三种方案的可用度比较

$$A_1 - A_2 = A \bar{A} > 0$$

$$A_2 - A_3 = A \bar{A}^2 > 0$$

方案3的可用度最高,方案2次之,方案1的可用度最低。

2. 方案1与方案2的误动率、拒动率比较

$$W_1 - W_2 = -\frac{A^2 W (1 - W)}{A^2 + 2 A \bar{A}} < 0$$

$$J_1 - J_2 = \frac{A^2 J (1 - J)}{A^2 + 2 A \bar{A}} > 0$$

方案1的误动率小于方案2，拒动率大于方案2。

3. 方案1与方案2的可靠度比较

$$R_1 - R_2 = \frac{A^2(W-J)[1-(W+J)]}{A^2 + 2A\bar{A}}$$

一般有 $1 - (W + J) > 0$ ，因此 R_1 与 R_2 的比较完全取决于 W 与 J 二者之间的相对值，如下：

$$R_1 - R_2 \begin{cases} > 0 & W > J \\ = 0 & W = J \\ < 0 & W < J \end{cases}$$

4. 方案1与方案3的误动率比较

$$W_1 - W_3 = \frac{A^2W(1-W)[2(2-W)A-3]}{A^3 + 3A^2\bar{A} + 3A\bar{A}^2}$$

一般有 $W \ll 1$ ，因此 $W_1 - W_3 = \frac{A^2W(4A-3)}{A^3 + 3A^2\bar{A} + 3A\bar{A}^2}$

$$\text{当 } A \geq \frac{3}{4} = 0.75, W_1 - W_3 \geq 0$$

$$\text{当 } A < \frac{3}{4}, W_1 - W_3 < 0$$

5. 方案2与方案3的拒动率比较

$$J_2 - J_3 = \frac{A^3J(1-J)[(1+2J)A^2 - 4A(1+J) + 3]}{(A^2 + 2A\bar{A})(A^3 + 3A^2\bar{A} + 3A\bar{A}^2)}$$

一般有 $J \ll 1$ ，则有

$$J_2 - J_3 = \frac{A^3(1-A)(3-A)J}{(A^2 + 2A\bar{A})(A^3 + 3A^2\bar{A} + 3A\bar{A}^2)} > 0$$

6. 方案1、2与方案3的可靠度比较

一般有 $A > 0.75$ ，因此有 $W_1 > W_2 > W_3$ ， $J_1 > J_2 > J_3$ 。

$$R_1 - R_2 = (W_2 + J_2) - (W_1 + J_1) < 0$$

$$R_2 - R_3 = (W_3 + J_3) - (W_2 + J_2) < 0$$

7. 方案1、2、3的完好率比较

显而易见有 $P_3 > P_1$ ， $P_2 > P_1$ 。

P_1 与 P_3 的比较与误动率 W 和拒动率 J 有关。

从以上的比较结果可见，方案3的各项可靠性指标最好。方案2与方案1相比，只是可用度与拒动率两个指标较好，误动率指标较差，可靠度与完好率一般无法直接确定，需通过实际计算决定。

除以上算例的方案2、3外，还有一种备用切换联接方式。例如两套主保护采用备用切换方式联接（方案4），在正常运行情况下仅将两套保护中的一套投入工作运行，另一套作为冷备用；当运行中的保护由于某种原因退出运行时，备用保护可立即投入运行。这种方案的保护系统可用度与方案2相同，但误动率、拒动率及可靠度则与方案1

相同,因此完好率大于方案1。

方案4相对于方案2只是增加一切换环节,对于具有自检功能的微机保护系统尤为适用。

下面做一实例计算,假设 $A = 0.98$, $W = J = 0.01$,经计算得:

$$A_I = 0.98 \quad W_I = 0.01 \quad J_I = 0.01 \quad R_I = 0.98 \quad P_I = 0.9604$$

$$A_{II} = 0.9996 \quad W_{II} = 0.0195 \quad J_{II} = 0.0005 \quad R_{II} = 0.98 \quad P_{II} = 0.9796$$

$$A_{III} = 0.9999 \quad W_{III} = 0.0014 \quad J_{III} = 0.0003 \quad R_{III} = 0.9982 \quad P_{III} = 0.9982$$

$$A_{IV} = 0.9996 \quad W_{IV} = 0.01 \quad J_{IV} = 0.01 \quad R_{IV} = 0.98 \quad P_{IV} = 0.9796$$

四 冗余设计及优化的讨论

继电保护担负着保证电力系统安全稳定运行的重要任务,对其要求是绝对可靠,万无一失。而实际上由于各种原因继电保护退出工作或产生误动、拒动,直接影响电力系统的正常安全运行,并可能由此导致电力系统故障,造成巨大的经济损失,因此需要采取各种措施提高继电保护的可靠性。继电保护系统设计可采取容错技术,即容许保护系统中个别继电保护装置不正确工作,但不影响整个继电保护系统的正确工作。

容错技术的实现方法之一是硬件冗余。继电保护系统设计的冗余方法是通过多套保护之间的适当联接方式,达到限制整个继电保护系统出错概率的目的,提高可用度及可靠性。目前一般有重复(并联)、 $\frac{K+1}{2K+1}$ ($K = 1, 2, \dots$)多数表决及备用切换等冗余方式。重复(并联)方式既能显著改善某些可靠性指标(如可用度、拒动率),又能显著恶化另一可靠性指标(误动率);备用切换方式对一些可靠性指标没有影响(如误动率、拒动率及可靠性),而对可用度指标却有显著的改善;多数表决方式可显著改善所有可靠性指标,使可靠性指标达到任一规定值。

虽然采取冗余方式可极大地提高继电保护系统的可靠性,但投资额也相应成倍地增加,换句话说即以更多的投资换取可靠性指标的改善。

冗余优化是外界条件限制下的求极值问题,继电保护系统冗余优化设计主要考虑两方面的问题,一是可靠性指标的要求,二是投资额限。一般情况下两个问题中的一个为约束条件,另一个为变量,因此实际上有两种求极值问题,一种是满足可靠性指标的要求如何使投资额最小,即通过怎样的冗余方式使所用保护装置数量最小;另一种是在投资额限下使可靠性指标最好,即利用有限数量的保护装置,通过最佳冗余方式使继电保护系统的可靠性最高。以上两种求极值问题可通过各种冗余设计方案之间的比较予以解决。继电保护系统可靠性的提高与投资额的降低是相互矛盾的。

在实际工程设计中,继电保护系统的投资在整个工程造价中所占比例很小,且相对于继电保护的不正确工作所造成的电力系统损失是微乎其微的,因此在实际工程继电保护系统设计中应把可靠性放在第一位,在任何情况下均应满足可靠性指标的要求。

在通过对各种冗余方案的继电保护系统的可靠性计算分析后可发现,在达到一定的冗余程度后可靠性指标的改善基本上达到饱和状态,因此不应以大量的投资换取可靠性的微小提高,只要可靠性指标达到满意的程度即可。

以上所论继电保护系统的可靠性指标概念及求解方法同样适用于电网安全自动装置系统设计的可靠性计算。