

快速方向保护及模糊数学的应用

李晓明 梁 军 山东工业大学 (250014)

【摘要】 本文提出并分析了一种幅值比较原理的快速方向保护新判据。这种判据只需一个比较回路,就能反应各种类型和相别的短路。具有动作速度快,灵敏度高的特点。为了进一步提高保护装置的动作可靠性,本文引用了模糊数学方法,对故障信号进行处理。实验表明,模糊数学方法的应用,使快速方向保护的动作可靠性明显提高。

【关键词】 方向保护 工频变化量 模糊数学 可靠性

引言

近年来,反应工频变化量的快速方向保护,在我国取得长足进展。具有代表性的是文献^{[1][2]}所作的工作。文献^{[1][2]}所提出的快速方向继电器动作判据,基于相位比较原理。国外也先后提出一些快速方向继电器动作判据^{[6][7]},这些判据一般基于幅值比较原理。不难看出,两种原理的主要差别仅比较回路,它们有一个共同作法,都是分相设置的。为了提高方向继电器的性能,文献^[1]巧妙地利用了“电压补偿原理”,有效地增加了保护装置的灵敏度和动作可靠性。为了进一步提高快速方向保护的性能,本文作者在前人工作的基础上,曾于文献^[3]提出一种幅值比较原理的快速方向继电器新判据。经过深入探讨,本文对文献^[3]的工作又作了进一步改进和提高。并通过设计的快速方向保护实验装置检验新判据的性能。由于快速性和可靠性是相互制约的,为了保证快速方向保护既有快的动作速度,又有高的动作可靠性,在设计的实验装置中,在幅值比较程序里,采用模糊数学方法对故障信号进行处理。提高了保护的動作可靠性。本文着重介绍这两方面的工作。

1 方向判据分析

幅值比较原理反应工频变化量方向继电器动作判据比较量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{AB} &= \Delta U_{AB} - \Delta I_{AB} Z_{d1} \\ \Delta U_{BC} &= \Delta U_{BC} - \Delta I_{BC} Z_{d1} \\ \Delta U_{CA} &= \Delta U_{CA} - \Delta I_{CA} Z_{d1} \\ \Delta U_{AB} &= \Delta U_{AB} + \Delta I_{AB} Z_{d2} \\ \Delta U_{BC} &= \Delta U_{BC} + \Delta I_{BC} Z_{d2} \\ \Delta U_{CA} &= \Delta U_{CA} + \Delta I_{CA} Z_{d2} \\ A &= |\Delta U_{AB}| + |\Delta U_{BC}| + |\Delta U_{CA}| \\ B &= |\Delta U_{AB}| + |\Delta U_{BC}| + |\Delta U_{CA}| \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

方向继电器动作判据为:当动作量 A 大于制动量 B 时,方向继电器动作。否则,不动作。

其中: Δ 表示工频变化量, $U_{\varphi\varphi}(U_{AB}, B, C, CA)$ 表示保护安装处的相间电压, $I_{\varphi\varphi}$

($\varphi\varphi = AB, BC, CA$) 表示保护安装处的相差电流(也称两相电流差)。 Z_{d1}, Z_{d2} 分别表示两个整定阻抗。

假设电力系统结构如图 1a 所示。如果已知主要运行方式下的 M 侧系统正序阻抗 Z_M^* 和 N 侧系统正序阻抗 Z_N^* 。并已知线路正序阻抗 Z_L , 则令整定阻抗为

$$\left. \begin{aligned} Z_{d1} &= Z_L + Z_N^* \\ Z_{d2} &= Z_M^* \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

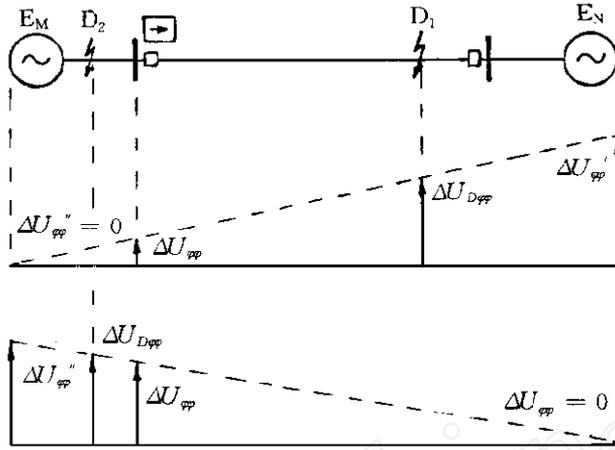


图 1 正、反方向短路电压分布图

为叙述方便, 以主要运行方式下发生相间短路为例, 讨论式 1 所示方向继电器的动作行为。电力系统发生相间短路, 短路处的三个相间电压发生变化 $\Delta U_{D\varphi\varphi}(\varphi\varphi = AB, BC, CA)$ 。分析工频变化量继电器的工作原理, 可将系统所有电源的电势短路(即 $E_M = 0, E_N = 0$), 只在短路处保留附加故障分量电源 $\Delta U_{D\varphi\varphi}$ 保护安装处的工频变化量 $\Delta U_{\varphi\varphi}, \Delta I_{\varphi\varphi}$ 只由 $\Delta U_{D\varphi\varphi}$ 产生。因此, 作出正方向短路时, 电力系统的电压分布如图 1b 所示。可见, 不论短路点在正方向什么位置, 都有 $\Delta U_{\varphi\varphi} = 0, \Delta U_{\varphi\varphi} > \Delta U_{D\varphi\varphi}, A > B$, 方向继电器动作。反方向短路时, 电力系统的电压分布如图 1c 所示。可见, 不论短路点在反方向什么地方, 都有 $\Delta U_{\varphi\varphi} > \Delta U_{D\varphi\varphi}, \Delta U_{\varphi\varphi} = 0, A < B$, 方向继电器不动作。进一步分析可知, 不论电力系统运行方式如何变化, 不论正方向发生什么类型和相别的短路, 方向继电器都动作。反方向短路, 方向继电器不动作。

下面从三个方面进一步分析幅值比较原理方向继电器的特点。

(1) 式 1 所示方向继电器与分相式方向继电器的比较。分相式方向继电器动作判据为

$$\left. \begin{aligned} |\Delta U_{AB}| &> |\Delta U_{AB}| \\ |\Delta U_{BC}| &> |\Delta U_{BC}| \\ |\Delta U_{CA}| &> |\Delta U_{CA}| \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式 3 所示三个方向继电器之中的任何一个动作, 即表示正方向短路; 否则, 为反方向短路。可以看出, 分相式方向继电器有明确方向性。正方向短路, 方向继电器动作; 反方向短路, 不动作。但是, 也可以看出, 不同的短路类型和故障相别, 三个方向继电器的动作灵敏度是不一样的。这样, 方向保护的整体动作可靠性和灵敏度要分别受到三个方向元件的制约和影响。式 1 所示的方向继电器, 只需一个比较回路。动作量由三个量 $|\Delta U_{AB}|, |\Delta U_{BC}|, |\Delta U_{CA}|$ 相加后构成。制动量由 $|\Delta U_{AB}|, |\Delta U_{BC}|, |U_{CA}|$ 相加后构成。构成动作量(或制动量)的三个量总是相互支持, 把各自的优势合并为一个整体后再送到比较回路。可见, 式 1 所示的方向继电器可以获得比分相

式方向继电器更高的灵敏度。

(2) 式 3 的一般表达式为

$$|\Delta U_{\varphi\varphi-} - \Delta I_{\varphi\varphi} Z_{d1}| > |\Delta U_{\varphi\varphi+} + \Delta I_{\varphi\varphi} Z_{d2}| \quad (4)$$

如果令式 4 中的整定阻抗 $Z_{d1} = Z_{d2}$, 则式 4 变为

$$|\Delta U_{\varphi\varphi-} - \Delta I_{\varphi\varphi} Z_{d1}| > |\Delta U_{\varphi\varphi+} + \Delta I_{\varphi\varphi} Z_{d1}| \quad (5)$$

不难看出, 式 5 可写成相位比较原理的动作方程。

$$-90^\circ > \arg \frac{\Delta U_{\varphi\varphi}}{\Delta I_{\varphi\varphi} Z_{d1}} > 90^\circ \quad (6)$$

虽然式 6 所示的动作方程与式 5 所示的动作方程有相同的动作特性(动作特性是等效的), 但是, 他们的结构和性能有很大差别。式 6 所示的相位比较原理的方向继电器必须分相设置, 必须有三个比较回路。不能象幅值比较原理那样, 把三个比较回路合并为一个。下面还将看到, 幅值比较原理能够演变到反应故障分量的方向继电器。

另外, 如果电力系统有 $Z_M \ll Z_L + Z_N$, 则不应该整定 $Z_{d1} = Z_{d2}$ 。只当整定 $Z_{d1} > Z_{d2}$ 时, 方向继电器才能获得比较高的灵敏度^[3]。理想情况是令

$$\left. \begin{aligned} Z_{d1} &= Z_L + Z_N \\ Z_{d2} &= Z_M \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中: Z_N 为 N 侧系统正序阻抗; Z_M 为 M 侧系统正序阻抗。

由于 Z_M 和 Z_N 随着运行方式变化而变化, 式 7 不可能完全满足。所以, Z_{d1} 和 Z_{d2} 按式 2 整定, 能够保证方向继电器在大部分时间有较高的灵敏度。

(3) 可以把反应工频变化量方向继电器的工作原理推广到反应 x 次谐波变化量的方向继电器。设: $\Delta U_{\varphi\varphi}$, $\Delta I_{\varphi\varphi}$ 分别表示保护安装处相间电压和相差电流中的 x 次谐波变化量; Z_{d1x} , Z_{d2x} 分别表示对应于 x 次谐波频率的两个整定阻抗。则反应 x 次谐波变化量方向继电器的动作比较量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{ABX} &= \Delta U_{ABX} - \Delta I_{ABX} Z_{d1X} \\ \Delta U_{BCX} &= \Delta U_{BCX} - \Delta I_{BCX} Z_{d1X} \\ \Delta U_{CAX} &= \Delta U_{CAX} - \Delta I_{CAX} Z_{d1X} \\ \Delta U_{ABX} &= \Delta U_{ABX} + \Delta I_{ABX} Z_{d2X} \\ \Delta U_{BCX} &= \Delta U_{BCX} + \Delta I_{BCX} Z_{d2X} \\ \Delta U_{CAX} &= \Delta U_{CAX} + \Delta I_{CAX} Z_{d2X} \\ A &= |\Delta U_{ABX}| + |\Delta U_{BCX}| + |\Delta U_{CAX}| \\ B &= |\Delta U_{ABX}| + |\Delta U_{BCX}| + |\Delta U_{CAX}| \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

动作判据为: 当动作量 A 大于制动量 B 时, 方向继电器动作; 否则, 不动作。

不难看出, 当 $x = 1$ 时, 式 8 与式 1 是一致的。当 $x = 2$ 时, 式 8 为反应二次谐波变化量的方向继电器; 当 $x = 3$ 时, 为反应三次谐波变化量的方向继电器; 依次类推。如果令

$$\left. \begin{aligned} A &= \left[|\Delta U_{ABX}| + |\Delta U_{BCX}| + |\Delta U_{CAX}| \right]_{x=1} \\ B &= \left[|\Delta U_{ABX}| + |\Delta U_{BCX}| + |\Delta U_{CAX}| \right]_{x=1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

则方向继电器升级为反应故障变化量的方向继电器。故障变化量中, 工频变化量占主要成份。所以, 工频变化量的方向特性在式 9 中始终起主导作用。其他谐波分量起辅助作用。由于谐波

分量的辅助作用, 反应故障分量的方向继电器可以获得比反应工频变化量更快的动作速度。由于高次谐波衰减后, 式 9 自动转变为反应工频变化量的方向继电器, 因此, 式 9 所示的反应故障变化量的方向继电器与反应工频变化量的方向继电器有同样高的动作可靠性。

实际应用中, 没有必要考虑的那么详尽。式 9 不可能也没有必要取无穷多项。只要考虑暂态过程中影响比较大的几个谐波分量就足够了。

2 模糊数学的应用

继电保护的快速性和可靠性是相互制约的。要使快速方向保护既有快的动作速度, 又有高的可靠性, 必须提高保护装置的抗干扰能力。尤其是微机构成的数字式保护装置, 抗干扰能力更为重要。这里由于对模拟信号进行抽样的微机采样系统, 对干扰脉冲有放大作用。换句话说, 任何小的干扰脉冲, 一旦被采样, 就相当把该脉冲展宽至一个采样间隔。另外, 以某种方式直接进入数字电路的干扰, 可能使一个字节的二进制数全部变为 1。因此, 这种干扰危害很大。为了提高保护的動作可靠性, 除了采用一些常用的抗干扰措施外, 本文还应用了模糊数学的方法。下面将说明, 如何应用模糊数学的方法来提高微机快速方向保护的抗干扰能力。

在构成动作量 A 与制动量 B 之前, 先对工频变化量进行模糊处理。工频变化量是工频正弦量, 在时间轴上, 是周期性变化的正弦波。正弦波被整流 (取绝对值) 后的波形如图 2 所示。对图 2 所示波形进行采样 (一个周波 12 采样点), 得到样本序列

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{12}\} \quad (10)$$

样本序列 Y 由 12 个样本值组成。样本值由确定的实数 y_i 表示它的大小。现在, 我们要用另一种方式, 用模糊的语言 (也称语言变量) 来表示这些样本值的大小。换句话说, 要用下列辞集中的元素来表示样本值的大小。

$$\text{数值} = \{\text{很小, 小, 偏小, } \dots, \text{中等, } \dots, \text{偏大, 大, 很大}\} \quad (11)$$

辞集越大, 对数值大小的描述越精细。考虑到快速方向继电器在正方向短路时, 动作量 A 远远大于制动量 B ; 反方向短路时, A 远远小于 B 。因此, 本文只用三个元素粗糙地表示样本值大小, 能够满足保护要求。即有

$$\text{数值} = \{X, Z, D\} \quad (12)$$

其中: $X = \text{小}, Z = \text{中}, D = \text{大}$ 。

这样, 每一个样本值由式 12 中的一个元素来描述。12 个样本值 g_i 构成一个模糊样本序列 G 。由于式 12 是个模糊集, 所以, 从 y_i 到 g_i 的映射, 通过资格函数 μ_x, μ_z, μ_D 来实现。即

$$y_i \begin{array}{c} \mu_x \\ \mu_z \\ \mu_D \end{array} \xrightarrow{\quad} g_i \quad (13)$$

具体的运算程序如下

$$\left. \begin{array}{l} \exists \mu_x(y_i) = (\mu_x(y_i) \quad \mu_z(y_i) \quad \mu_D(y_i)) \longleftrightarrow y_i \quad X \\ \exists \mu_z(y_i) = (\mu_x(y_i) \quad \mu_z(y_i) \quad \mu_D(y_i)) \longleftrightarrow y_i \quad Z \\ \exists \mu_D(y_i) = (\mu_x(y_i) \quad \mu_z(y_i) \quad \mu_D(y_i)) \longleftrightarrow y_i \quad D \end{array} \right\} \quad (14)$$

更为直观的办法是先求下式

$$\left. \begin{array}{l} \mu_x(a_1) = \mu_z(a_1) \\ \mu_z(a_2) = \mu_D(a_2) \end{array} \right\} \quad (15)$$

得到 a_1 和 a_2 后, 运算式 14 就方便了。下面举一例子, 说明实数样本序列 Y 到模糊样本序列 G 的映射。图 2 所示实数样本序列, 经式 14、式 15 运算, 得到模糊样本序列如下

$$G = \frac{\mu_Z(y_1)}{Z} + \frac{\mu_D(y_2)}{D} + \frac{\mu_D(y_3)}{D} + \frac{\mu_D(y_4)}{D} + \frac{\mu_Z(y_5)}{Z} + \frac{\mu_X(y_6)}{X} + \frac{\mu_Z(y_7)}{Z} + \frac{\mu_D(y_8)}{D} + \frac{\mu_D(y_9)}{D} + \frac{\mu_D(y_{10})}{D} + \frac{\mu_Z(y_{11})}{Z} + \frac{\mu_X(y_{12})}{X} \quad (16)$$

对以上处理方法总结如下：以往是通过计算实数 y_i ，求出工频变化量的幅值大小；这里，通过运算模糊样本值 g_i ，反映工频变化量的幅值大小。减少了微机对数据的处理工作量。例如：原来数据是双字节的，转变为大、中、小来描述时，只用单字节来处理就可以了。有时还可当作布尔变量处理，微机对布尔变量的处理是特别方便的。可以很方便地对“大”“中”“小”三个量进行加权处理，提高幅值比较灵敏度。无论数字回路出现的干扰数据多大，它的量值只能被描述为“大”，极大地削减了干扰数据的影响。为下一步辨别数据真伪作准备。

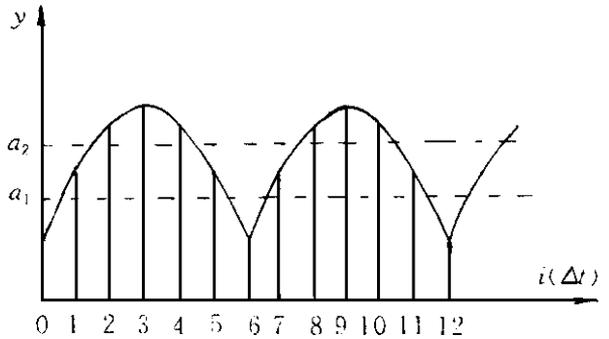


图2 样本序列示意图

得到式 16 所示的样本序列后，接着进行数据的真伪辨别。“真”表示该数据没有受到干扰，“伪”表示该数据是个干扰数据。真用 1 表示，伪用 0 表示。由于“真”和“伪”没有明确边界，所以，它们是模糊集合。一个数据属于真的可能性，可用 $[0, 1]$ 之间的一个值作为它是“真”的资格等级。数值 g_i 是真的资格等级，通过资格函数 $\mu_T(g_i)$ 求得。经验表明，一个没有受到干扰的样本序列，有着正弦变化规律。与这个规律不符合的数据，就是受到干扰数据。偏离这个规律越远，受到的干扰越大，是“真”的可能性越小。因此，一个数据的真伪，与这个数据自身大小，以及前后数据的相对大小都有关系。资格函数 $\mu_T(g_i)$ 的建立，不是本文要讨论的。本文将通过下面几个具体事例说明，针对几种危害较大的干扰信号，建立一种简单的资格函数模型是可行的。只要数据处理工作量不是太大，又能提高保护的抗干扰能力，就算达到要求了。

例 1: 如果 $G = \{X, X, \dots, X, D\}$

$$\text{则 } G = \frac{1}{X} + \frac{1}{X} + \dots + \frac{1}{X} + \frac{0}{D}$$

例 2: 如果 $G = \{X, X, \dots, X, D, D\}$

$$\text{则 } G = \frac{1}{X} + \frac{1}{X} + \dots + \frac{1}{X} + \frac{0.5}{D} + \frac{0.5}{D}$$

例 3: 如果 $G = \{X, X, \dots, X, D, D, Z\}$

$$\text{则 } G = \frac{1}{X} + \frac{1}{X} + \dots + \frac{1}{X} + \frac{1}{D} + \frac{1}{D} + \frac{1}{Z}$$

例 4: 如果 $G = \{X, X, \dots, X, D, X, X\}$

$$\text{则 } G = \frac{1}{X} + \frac{1}{X} + \dots + \frac{1}{X} + \frac{0}{D} + \frac{1}{X} + \frac{1}{X}$$

例 1 说明，微机接收到一个大数，由于它前面的数据都是小，所以，这个大数的资格等级为 0。如果这个大数以后的两个数据仍然是小，如例 4 所示，则这个大数的资格等级始终是 0，资格等级为 0 的数据，保护将其舍去。可见，这个大（也许是很大）的干扰数据，对保护丝毫没有影响。如果这个大数后面紧跟着一个大数，如例 2 所示，则这两个数据的资格等级都是 0.5，相当于保护只接收到一个大数。如果这两个数据后面又来了个中，如例 3 所示，则

这三个数据的资格等级都是 1。微机不但把现时出现的数据完全按它的大小进行运算,还把先前的数据恢复出来。既提高了保护抗干扰能力,又提高了保护动作速度。

数据真伪辨别以后,分别求出动作量 A 和制动量 B ,当 $A > B$ 时,方向继电器动作。

为了验证快速方向保护新判据的性能,为了检验模糊数学方法提高保护动作可靠性的效果,设计了一套快速方向保护硬件系统和编制了有关软件。并在模拟输电线上作了各种类型和不同位置的短路实验。实验表明,本文提出的绝对值比较原理的快速方向保护新判据有优良性能;用模糊数学方法提高保护动作可靠性是十分有效的。并且,线路经 300Ω 过渡电阻接地短路,仍有很高的灵敏度。

3 结束语

本文提出的快速方向保护新判据,具有明确方向性,灵敏度高,只用一个比较回路就能反应各种类型和相别的短路。

模糊数学作为一种工具,能够把人们的抗干扰经验,用语言的方式对数据进行处理。极大地提高了保护的抗干扰能力。

参考文献

- 1 沈国荣 工频变化量方向继电器原理的研究 电力系统自动化, 1983. 1.
- 2 沈国荣, 李抗, 朱声石, 邓绍龙 超高速方向保护—JKF—1. 电力系统自动化, 1987. 3
- 3 李晓明 具有新判据的快速方向继电器. 继电器, 1992. 1.
- 4 熊小伏, 叶一麟. 超高速微机方向保护原理. 电力系统自动化, 1989. 2
- 5 王安定, 葛耀中. 反应正序故障分量的方向元件及其计算机仿算. 中国电机工程学报, 第 6 卷第 5 期, 1986 年
- 6 A. T. Johns, M. A. Martin, A. Barker, E. p. Walker, P. A. Crossley. A new approach to E. H. V. direction comparison protection using digital signal processing techniques IEEE Trans Vol PWRD—1, No. 2, April 1986, PP. 24—33
- 7 K. S. Prakash, O. P. Malik, G. S. Hope, G. C. Hancock, K. K. Wong Laboratory investigation of an amplitude comparator based directional comparison digital protection scheme IEEE Trans Vol 5, No. 4, November 1990, PP. 1687~ 1693

本刊重要启事

为适应国内改革开放经济发展形势之需要,应广大读者和用户的
要求,本刊从 1997 年起由原来季刊改为双月刊,欢迎订阅! 欢迎投
稿! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!