

数字继电保护算法的灵敏度分析及评价方法

上海交通大学 郁惟镛 袁荣弟

摘要 本文给出了一种判据函数,用来评价数字继电保护算法的灵敏度。为了验证这一评价方法的正确性及通用性,选择了有代表性的四种算法,结合一电力系统模型,针对不同的继电保护的要求进行了大量的计算机仿真计算。

1 前言

数字继电保护发展至今已有许多算法。其中,有代表性的算法有:微分方程算法、全波傅里叶算法、半波傅里叶算法、卡尔曼算法。各种算法对电力系统条件和算法参数变化的灵敏度响应不一。至今还没有一种较合适的判据来评价这些算法的灵敏度。本文利用计算机仿真来分析各种算法对电力系统条件和算法参数变化的灵敏度,并利用判据函数针对各种继电保护应用条件来评价有代表性的算法。从而提供了一种能够用于比较和评价数字继电保护算法的常用方法。

2 评价算法的判据函数

已研制出一种判据函数,它能够针对不同的电力系统条件来评价算法,并能够用来比较各种算法在不同的电力系统保护状态下的性能^①。

设用于作出跳闸判定参数的实际值由 $Z(t)$ 表示。此参数从故障前值 Z_{po} 变为故障后值 Z_{∞} 。设此参数在每一采样瞬时的计算值为 $Z(n)$ 。它们的关系由下式限定,即

$$Z(n) = Z_{po} + S(n) \quad (1)$$

式中 $S(n)$ 是计算值的误差。优化计算值的通用技术是应用最小均方误差判据,即

$$\min E \{S^2(n)\} \quad (2)$$

在约束条件下 $E \{S(n)\} = 0 \quad (3)$

式中 E 表示预期的总体平均值。

为在算法中实现以上原则,考虑以下试验环境。对给定的一轮试验 γ , 设 $Z_r(K, N)$ 为在故障后从第 K 个采样时刻开始在时间间隔 $T = N \cdot \Delta T$ 内的计算值 $Z(n)$ 的平均值,

$$\text{即} \quad Z_r(K, N) = (1/N) \sum_{n=K}^{K+N-1} Z(n) \quad (4)$$

如果用于评价第 i 个算法的试验条件的数量为 R , 那么就设第 i 个算法的 $Z_r(K, N)$ 的平均值为:

$$\text{MEAN (平均值)} = (1/R) \sum_{r=1}^R Z_r(K, N) \quad (5)$$

最好以下表达式保持

$$E \{ \text{MEAN} - Z_{po} \} = 0 \quad (6)$$

所以下式可作为度量算法性能的一项措施:

$$| \text{MEAN} - Z_{po} | \quad (7)$$

对第 i 个算法参数 Z (n) 可表示为:

$$Z(n) = \text{MEAN} + D(n) \quad (8)$$

式中 D(n) 代表由 MEAN 估计的数值的偏差。基于对计算值 Z(n) 的判定不仅需要 MEAN 值接近 Z_{po}, 而且 D(n) 要很小。因此对第 r 次试验度量算法性能的一个附加方法是:

$$\text{STD}_r = [1 / (N-1) \sum_{n=K}^{K+N-1} D^2(n)]^{1/2} \quad (9)$$

如果施加全部试验条件 R, 下式可提供又一个衡量算法性能的方法:

$$\text{STD} = [1 / (R-1) \sum_{r=1}^R \text{STD}_r^2]^{1/2} \quad (10)$$

当使用这些度量方法评价多个算法对一组试验条件的性能时必须仔细选择 K 值—故障后开始计算的采样时刻。对于不同的时间间隔及采样频率将有不同的 K 值。

判据函数是这些性能度量方法的线性组合。如下所示:

$$J = |\text{MEAN} - Z_{po}| + a \cdot \text{STD} \quad (12)$$

式中系数 'a' 是正实数, 它决定 STD 项的相对大小。自然 J 值较低就表示性能相对较好。

3 判断函数的说明

象这种形式的所有判据函数一样, 需要有系数 'a' 值的选择应作以下考虑:

a ≠ 0, 在根据单个计算值或几个连续估计值进行继电器的跳闸判定时, 需要测量估计值相对于平均值的波动。该判据函数允许通过增大 'a' 值来增强估计值的稳定性。

选择此系数的基本原理说明如下:

假定 D(n) 具有不变的高斯噪音特性, 然后就可以利用高斯概率函数的特性曲线。例如, 概率为 0.99, 估计值 Z(n) 将位于以下范围:

$$\text{MEAN} - 2.58 \cdot \text{STD} \leq Z(n) \leq \text{MEAN} + 2.58 \cdot \text{STD} \quad (13)$$

在图 1 中这就意味着估计值将位于 MEAN - 2.58 · STD 与 MEAN + 2.58 · STD 这两条区域之间。这意味着实际值与估计值间的最大距离等于 |MEAN| + 2.58 · STD, 其概率为 0.99。还应注意, 此最大距离实际上等于该判据在 a = 2.58 时的值。因此, 判据函数的值在给定概率由 'a' 决定时, 就是估计值与实际值之间距离的度量。

判据函数由四个参数限定: 加权系数 'a'; 故障后采样时刻 K; 时间平均值中使用的采样数 N 和试验条件的数量 R。

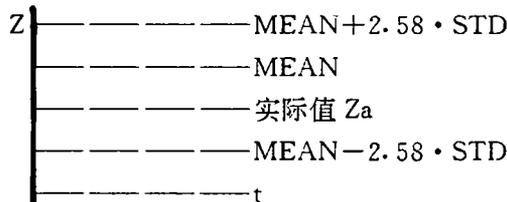


图 1 用于评价算法的判据函数的说明

4 算法评价系统的构成及参数选择

评价算法性能的结构模型示于图 2。

电力系统模型是一条长 300km, 500kV 的线路。附录 I 列出了这个模型的系统接线及参数。各种算法程序产生在故障后各时间段内的 R、X 和 Z 的估计值、故障后的平均值及标准偏

差。

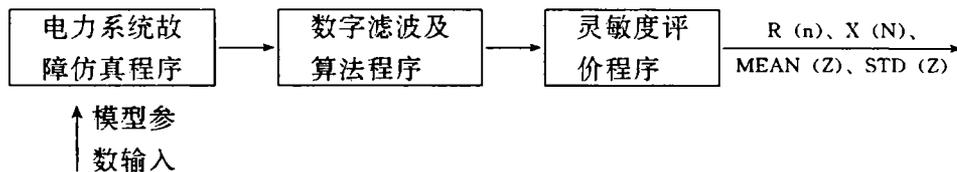


图2 评价系统的结构模型

附录Ⅱ列出了电力系统的故障条件。电力系统条件的变化影响故障时电流、电压信号的数值。这些条件包括：系统频率；故障位置；故障型式；故障初相角。

数字继电器的设计参数影响模拟信号处理和算法参数，这些条件包括：采样频率；数字继电器响应时间；低通滤波器截止频率等。

采样频率选为 24 次/周，12 次/周及 8 次/周；在本文的仿真计算中：跳闸或不跳闸决定的时间间隔。本文中考虑了三种时间间隔： $(0.25 \sim 0.75) T$ 、 $(0.5 \sim 1.5) T$ 和 $(1.5 \sim 2.5) T$ ，此处 T 为工频一周所对应的时间，选择这些时间间隔分别对应于快速继电器，中速继电器和相对慢速继电器。

5 算法的选择

本文选择了四种较为典型的算法。它们的序号及名称见下表：

表1 选择的继电保护算法

序 号	名 称
c-1	微分方程算法 (2)
c-2	傅里叶全波算法 (3)
c-3	傅里叶半波算法 (3)
c-4	卡尔曼滤波算法 (4)

6 灵敏度研究

通过改变上面所有参数进行了广泛的计算。

附录Ⅲ列出了用于参数灵敏度研究的基本试验条件和参数变化范围。

灵敏度的度量由以下数值说明：平均值 (MEAN) —— 在规定时间间隔内 R 、 X 或 Z 的估计值的时间平均值；标准偏差 (STD) —— 在指定时间间隔内 R 、 X 或 Z 的估计值的标准偏差。

下面分别列出各算法对系统频率、采样频率及低通滤波器的灵敏度研究的结果。

1) 系统频率灵敏度

表 2 给出了计算结果。

此结果以 Z 的平均值 MEAN 及其标准偏差 STD 值表示。在计算频率范围内算法 c-1 的偏差最小，没有频率补偿的其他三种算法的偏差都比较大。

2) 采样频率灵敏度

表 3 和表 4 包括在采样频率分别为 24 次/周、12 次/周和 8 次/周时各种算法计算所得到的阻抗的平均之值和标准偏差。

实际阻抗的标么值是 17、190，在表 3 中处在 17.0% 至 17.2% 之间这一范围的平均值下

划有底线。在表 4 中还在各算法的标准偏差的最小值下划有底线。应注意到，要预测到“最佳”采样频率值是很困难的，必须分析平均值和标准偏差。最精确平均值和最小的标准偏差不会总是出现在同一采样频率上。必须针对各个算法和特定的系统用途决定适当的折衷办法。

表 2 频率灵敏度

算 法	f=50Hz		f=52Hz		f=48Hz	
	MEAN	STD	MEAN	STD	MEAN	STD
c-1	16.8	1.3	16.7	1.5	16.9	1.6
c-2	15.9	0.3	15.4	0.9	16.7	1.2
c-3	15.9	0.2	15.3	0.6	16.0	2.6
c-4	15.9	0.3	15.6	0.4	16.3	0.4

表 3 平均值 (Z) 灵敏度—采样率

算 法	S=24	S=12	S=8
c-1	17.2	19.1	25.2
c-2	17.0	17.2	16.8
c-3	17.1	17.1	16.8
c-4	16.2	16.8	16.4

表 4 标准偏差 (Z) 灵敏度—采样率

算 法	S=24	S=12	S=8
c-1	0.5	4.63	3.53
c-2	0.3	0.4	0.4
c-3	0.5	0.3	0.8
c-4	1.51	1.57	0.15

3) 低通滤波器截止频率的影响

表 5 列出了用一只截止频率为 320Hz 的低通滤波器和不用滤波器时计算的结果。

分析结果表明：除了微分方程算法对滤波器的有无非常敏感外，其它三种算法对滤波器的有无不特别敏感，因为微分方程算法本身无滤波能力，而其它三种算法都具有很强的滤波能力。理论分析和计算结果是一致的。

表 5 滤波器截止频率的灵敏度

算 法	平均值 (Z)		算 法	标准偏差 (Z)	
	无滤波器	有滤波器		无滤波器	有滤波器
c-1	148.8	17.2	c-1	563.7	0.3
c-2	19.0	18.7	c-2	5.5	4.9
c-3	18.5	17.0	c-3	0.7	0.5
c-4	17.3	16.7	c-4	15.8	14.6

7 评价算法的实例与分析

为了说明判据函数在确定给定的继电保护状态下的“最佳”算法中的地位，本文进行了

以下三种不同的保护状态下的算法评价。

第一种状态是要求快速继电器响应时间的输电线路状态，即时间间隔考虑为 $(0.5 \sim 0.75) T$ 。

第二种状态是要求相对慢速响应时间的输电线路状态，即时间间隔考虑为 $(1.5 \sim 2.5) T$ 。

第三种状态时考虑中速响应时间，即时间间隔为 $(0.5 \sim 1.5) T$ 。

第一、第二种状态设想依据单个估计值进行跳闸判定，从而采用的“a”值为 2.58。第三种状态设想以平均估计值为跳闸判定的基础，从而“a”整定为 0。

表 6、表 7、表 8 给出了计算结果。在各种情况下，首先使用判据函数确定各算法的最佳采样值，然后，根据判据函数值对这些结果排序（根据 J 的大小排列次序。）

表 6 算法评价—状态 I

算 法	采样率	MEAN	STD	J
c-1	24	18.1	9.46	25.4
c-2	12	18.3	13.1	34.9
c-3	8	16.7	14.6	38.0
c-4	24	33.8	31.2	97.3

表 7 算法评价—状态 II

算 法	采样率	MEAN	STD	J
c-1	12	17.1	0.3	0.8
c-2	24	17.0	0.3	0.9
c-3	8	16.4	0.15	1.69
c-4	24	17.2	0.5	1.39

表 8 算法评价—状态 III

算 法	采样率	MEAN	STD	J
c-1	24	17.2	0.5	0.1
c-2	12	17.0	0.5	0.1
c-3	8	16.7	14.6	0.4
c-4	24	18.7	4.9	1.6

因从表 6 中可得出，具有长数据窗算法在 $(0.25 \sim 0.75) T$ 时间间隔内存在固有的缺点。这是因为在此时间间隔内算法估计值的波动较大的缘故。要求快速响应的保护，长数据窗的算法显然不能满足要求。理论分析与用判据函数判定的结果是一致的。

从表 7 中可得出，当考虑时间间隔为 $(1.5 \sim 2.5) T$ 时，几乎所有算法都具有良好的性能。因为在此时间间隔内估计值波动通常最小。用判据函数判定的结果与理论分析的结果是一致的。

从表 8 中 STD 值表明估计值在 $(0.5 \sim 1.5) T$ 间隔内波动很大。但是，MEAN 值接近实际值，这说明，如果继电器执行程序用平均估计值，其性能应该可以接受的。

基于 ORACLE 建立继电保护数据管理系统

东北电力学院 孙 辉 陈继侠 沈阳电业局 张艾华

摘要 在电力系统生产、运行、分析工作中,提高继电保护数据管理水平,快速准确地提供运行分析资料,对正确指导安全生产是十分重要的。本文基于 ORACLE 工具,研制开发了整定计算数据与数据库管理,图形文档管理互联通信系统。该系统具有很强的动态运行管理功能,可完成现场的数据、图形管理所需的各种图文功能。是电力系统继电保护数据管理中较理想的工具。

关键词 数据库 管理 图形 接口 工具

1 引言

电力系统继电保护定值计算引入计算机技术,有效地提高了工效和计算精度。然而,在继电保护整定计算及保护运行过程中,要涉及大量数据。如:设备参数、定值计算数据、继电保护和自动装置的动作信息等。运行人员通常进行的大量工作是查询、计算、繁琐的数据统计及填制各类报表等。利用计算机数据管理系统将继电保护整定计算与数据管理相结合,实现高水平的信息存贮、查询、统计和综合分析,及时为运行人员提供完整准确的设备及运行资料,是电力系统运行管理技术发展的需要。

2 基于 ORACLE 继电保护数据管理系统的开发

根据 ORACLE 的体系结构,面对应用,设计并开发实用性强的继电保护数据库管理应用系统以实现数据库管理与图形数据的通讯。

8 结 论

从上述计算和分析可以初步得出以下结论:

- (1) 用本文提供的判据函数来评价算法在不同的电力系统保护状态下的性能,效果是令人满意的,具有较高的正确性。
- (2) 本判据函数不依赖于任何特殊算法,因而可以评价所有的算法性能,具有很强的通用性。
- (3) 用本文中的判据函数来评价算法的性能,还没有考虑到各算法的计算量的大小,还有待于今后的进一步研究。

参考文献

- 1 M. Kezunovic, S. K. reso, J. T. Cain, B. Perunicic, "Digital Protective Relaying Algorithm Sensitivity Study and Evaluation." IEEE/PES Winter Meeting 1987.
- 2 陈德树、尹项根编. 计算机继电保护原理与技术. 湖北省电力中心调度所印.
- 3 黄焕昆、李菊泽. 计算机继电保护系统. 水利电力出版社, 1983. 2.
- 4 郁惟镛、许华乔编. 计算机继电保护中卡尔曼滤波的研究. 上海交大科技交流室.