

# 基于相关分析的暂态差动保护原理改进及仿真研究

李岩,陈德树,袁荣湘,尹项根,张哲

(华中科技大学电力系,湖北 武汉 430074)

摘要:从原理上对基于相关分析的新型电流差动保护进行了进一步的分析。针对原有的相关差动判据可能存在的一些问题,提出了更加实用化的新判据,并建立了各种运行工况下的 ATP 仿真模型,对改进后的判据进行了详细的仿真分析。通过仿真可以发现,新判据在保留了原有判据简单、快速的优点的基础上,增加了灵敏性和动作的可靠性和易于整定等新优点,可以作为超高压长输电线路的主保护。

关键词:相关分析;差动保护;超高压输电线路

中图分类号:TM773 文献标识码:A 文章编号:1003-4897(2003)02-0064-05

## 1 引言

电流纵差保护由于其原理简单,具有天然的选相能力,不反映系统振荡等优点,非常适合作为超高压长线的主保护。虽然目前电流差动保护判据已经有很多,但将其应用于超高压长线保护,仍有一些影响保护动作速度和精度的特殊问题未被很好解决。这些问题有:消除线路电容电流的影响、提高严重故障时出口跳闸的速度、增强反映高阻接地故障的能力、选相跳闸的可靠性和抗 TA 饱和的能力等。

针对这些问题,文[1]提出了基于相关分析和故障分量原理的新型差动保护判据,并对该判据的特性进行了分析。其基本判据如下:

$$\sum_{k=t_0}^{t_k} i_{fm}(k) * i_{fn}(k) > E_{\text{set}} \quad (1)$$

$$\sum_{k=t_0}^{t_k} |i_{fm}(k)| > K \sum_{k=t_0}^{t_k} |i_{fn}(k)| \quad \text{或}$$

$$\sum_{k=t_0}^{t_k} |i_{fn}(k)| > K \sum_{k=t_0}^{t_k} |i_{fm}(k)| \quad (2)$$

式中:  $i_{fm}(k)$ 、 $i_{fn}(k)$  是线路两侧故障后第  $k$  点的故障分量电流采样值;  $E_{\text{set}}$  为动作门槛,  $t_0$  为故障起始时刻;  $K$  为比例系数。(1)为主判据,(2)为辅助判据。

分析表明,相关差动判据的原理具有如下优点: 1)动作特性具有反时限的特点,能有效提高严重故障时的动作速度。2)从原理上对电容电流不敏感,只需合理整定就可以不要电容电流补偿。3)选择性好,不仅具有故障分量差动的良好选择性,其抗误动能力还随时间增强。4)合理整定下,抗电流暂态和 TA 饱和能力较强。因此非常适合用在超高压长线的保护上。

文[2]则进一步对相关差动判据和常规相量差动判据的一致性进行了分析,分析表明通过合理整定,在故障后一个周波时两者可以具有相同的动作特性。

本文主要从原理上对该判据的合理性和优缺点进行进一步的分析,针对所发现的该判据弱点,本文提出了改进判据。改进判据具有更高的灵敏度和可靠性,适合现场应用。本文的仿真结果表明,改进后判据克服了原有判据的弱点,是一种适用于超高压长线差动的较理想判据。

## 2 相关差动原理的深入分析

相关差动原理是利用线路两端的故障分量电流的相关性进行判断的,本文的相关是指电流的波形和相位的相似性,如果波形相似、相位接近则称为正相关,如果波形、相位相反可以称为负相关。由于采用故障分量电流,因此相关性的基本特征仅取决于故障情况和系统参数。下面就利用系统的故障附加状态来深入分析各种情况下电流的相关性。

### 1) 双端电源线路

如图 1(a)、(b)所示双端电源线路区内、外故障时的故障附加状态图。

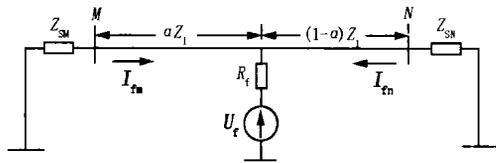
当线路内部故障时,由图 1(a)可以求出线路两端故障分量电流之间的相位差为:

$$\varphi = \arg \frac{I_{fm}}{I_{fn}} = \arg \frac{Z_n + (1 - \dots) Z_l}{Z_m + Z_l} \quad (3)$$

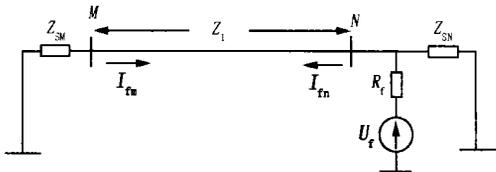
当线路区外故障时,如图 1(b)所示且暂不考虑线路分布电容影响,可得:

$$\varphi = \arg \frac{I_{fm}}{I_{fn}} = \arg \frac{I_{fm}}{-I_{fn}} = -180^\circ \quad (4)$$

由式(3)可以看出,当线路内部故障时,影响线



(a) 区内故障时的故障附加状态图



(b) 区外故障时的故障附加状态图

图1 双端电源线路

Fig. 1 Line with double electric sources

路两侧故障分量电流的因素仅仅是故障点两侧的综合阻抗的阻抗角,在最不利的条件下,假定线路两端的系统阻抗存在较大角差,且短路点和线路阻抗角相差较大的那一侧出口短路,其最大相角差也不会超过 $30^\circ$ ,这也使得线路两端故障分量电流存在着相似的形状和变化趋势,差别仅仅在于电流幅值的大小和两者之间的较小的相位移,也即正相关性很好。外部故障时,电流近似反相,为负相关。

### 2) 单端电源线路

在单端电源线路上发生内部故障时,其故障附加状态同图1,两端故障分量电流也同式(1)、(2),所不同的仅是负荷阻抗的取值。

假设 $Z_n$ 为负荷阻抗,由于系统负荷主要是异步电动机等,一般其功率因数在 $0.68 \sim 0.9$ 之间,也就是说其阻抗角在 $47^\circ \sim 25.8^\circ$ 之间。区内故障时,故障分量电流的相角差较大,但考虑一侧系统阻抗为 $85$ 时,两端电流仍均为感性,角差不会超过 $60^\circ$ ,从理论上讲仍可视作正相关。但在实际应用中,由于线路两侧电流幅值相差悬殊,负荷侧故障分量电流以分布电容的暂态电流为主,相位变化很快,故不宜采用式(1)的相关差动判据。为此文献[1]提出了弱电辅助判据。

区外故障且故障点在电源出口时,故障分量电流在短路后暂态是以电容放电电流为主,此时的电流高频成分很多,两侧电流相位接近,呈现负相关特点,差动判据易误动,需要靠合理整定躲开这一不利情况。

### 3) 双回线或环网结构的线路

这种复杂结构的特殊之处在于功率分点的存在。当在区外功率分点处发生故障时,非故障线路

上两端的故障分量电流为完全相同的电容电流,即:

$$I_{fm} = I_{fn} = I_c/2 \quad (5)$$

两端电流呈现正相关性,和线路内部故障完全相同,因此需要从整定值上加以考虑,躲过最不利的状态。

### 4) 分布电容的影响

对于超高压长线,分布电容对故障分量电流相关性的影响是一个不容忽视的问题,图3示出了被保护线路外部和内部故障时的故障附加状态图。

对于区内故障,分布电容引起了故障分量电流的分流,但故障点两侧的综合阻抗仍为感性,且容抗远远大于系统阻抗,因此故障分量电流相角差不会很大。选取最不利的情况,在线路的一侧短路,按照输电线路T型等效电路进行简化分析可得:

$$\varphi = \arg \frac{I_{fm}}{I_{fn}} = \arg \left[ \frac{Z_l + Z_n}{Z_m} + \frac{0.5 Z_l \cdot (0.5 Z_l + Z_n)}{Z_c Z_m} \right] \quad (6)$$

式中: $Z_c$ 为线路容抗,其它变量同式(2)。

由于每百公里线路容抗在 $2000$ 以上,远远大于线路阻抗和系统阻抗之和,因此上式后一项远小于 $1$ ,即区内故障时分布电容对两侧故障分量电流的影响很小。

区外故障时,假设线路无损,则两侧故障分量电流关系为:

$$I_{fm} = - I_{fn} \left[ \left[ \cos L - \frac{X_n}{Z_c} \sin L \right] + j \frac{R_n}{Z_c} \sin L \right] \quad (7)$$

式中: $L$ 为相移常数( $0.06$  %km);

$$Z_n = R_n + j X_n; \quad Z_c \text{ 为波阻抗。}$$

由于 $R_n$ 远远小于 $Z_c$ ,所以线路外部故障时,分布电容对线路两端的故障分量电流的影响也不大,但对电流幅值有一定影响。特别是接地电阻较大时,这种影响会大些。

综上所述,在线路外部故障时,故障分量电流具有负相关的特点,内部故障时具有正相关的特点,这一特点可以用来区分区内、外故障,因此相关差动从原理上是完全可行的,并且具有反时限和对电容电流不敏感的显著优点。但在实用化研究过程中,通过全面详细的仿真,发现式(1)的相关差动判据在实现形式上存在着需改进的地方。

## 3 相关差动判据存在的问题

通过全面详细地仿真,发现式(1)的相关差动判据实现过程中出现的问题包括:

### 1) 相关判据的判别结果受到故障分量电流的

初始角影响较大。由于相关差动利用的是故障分量的瞬时值,当故障分量电流存在一定的角差时,动作量的累计可能是从正值开始,也可能是从负值开始,因此对于不同的初始角,保护的動作速度不同,特别是当接地电阻和角差较大时,仿真表明在某种临界情况下会出现多相故障时各相動作时间的较大不一致,甚至误判为单相故障。

2) 当判据用于弱馈线路时,可能产生拒动和误动。以单端电源线路为例,当发生电源出口的区外短路时,线路电容存在暂态的冲放电过程,这时的故障分量电流以暂态电流为主,仿真表明,这时的暂态电流开始部分的相位比较接近,且幅值较大,必须整定一个较高的门槛,才能有效地防止误动(具体见仿真部分)。当发生线路末端区内故障时,一侧的故障分量电流较大,而另一侧的值较小,因此动作量很小,接地电阻稍大就会出现拒动,因此必须采用辅助措施。

3) 动作门槛的整定存在一定的困难。由于相关差动判据的动作量是一个累计的结果,动作量的大小受到了累计时间长短及初相角的影响,并且受故障后电流暂态过程的影响较大,比较难以给出。例如考虑到故障分量不可长时间获得和高阻接地的灵敏度等因素,整定值不可能很大,但整定较低,则在环网功率分点短路、弱馈线外部短路和因外部严重故障引起 TA 产生较大传变误差等情况下,判据可能会出现误判。

#### 4 改进的相关判据

上述问题的出现主要是对电流相关性的揭示不足,即仅依靠对故障分量电流采样值积的直接累加无法全面反映两侧电流的相关程度。

本文研究发现,比较故障分量电流采样值乘积为正和负的部分大小,可以更好地反映电流之间的相关性,并且部分解决上述问题,因此提出了如下的改进判据:

$$\sum_{k=t_0}^{t_k} i_{fm}(k) \cdot i_{fn}(k) \cdot t_s \quad E_{dz0} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sum_{k=t_0}^{t_0+10ms} i_{fm}(k) \cdot i_{fn}(k) \cdot t_s \quad E_{dz1} \\ E_{dz+} \quad k | E_{dz-} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $E_{dz+}$  为故障分量电流采样值积为正的各点的累加和;  $E_{dz-}$  为故障分量电流采样值积为负的各点的累加和;  $k$  为比例系数;  $t_s$  为采样间隔;  $i_{fm}(k)$ 、 $i_{fn}(k)$  为线路两侧故障后第  $k$  点的故障分量电流

采样值;  $E_{dz0}$ 、 $E_{dz1}$  为固定门槛;  $t_0$  为故障起始时刻。

式(8)就是相关差动的原始判据,但  $E_{dz0}$  整定的较大,利用它的反时限特性反映非常严重的故障(此时的故障电流很大,可以很快出口);(9)、(10)利用故障后 10 ms 的值进行判断,两式同时满足时也判为内部故障,式(9)采用固定门槛,式(10)采用制动特性,  $k > 1$ ,其整定裕度较大。

下面证明改进判据的合理性。为了方便略去故障分量电流中的谐波和非周期分量,设两侧的故障分量电流为:

$$i_{fm}(t) = I_{fm} \sin(100\pi t + \theta_m) \quad (11)$$

$$i_{fn}(t) = I_{fn} \sin(100\pi t + \theta_n) \quad (12)$$

两者的相位角差为  $\theta$ ,则可以得到式(13)

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_0+10ms} [i_{fm}(t) \cdot i_{fn}(t)] dt = \\ & \int_{t_0}^{t_0+10ms} [I_{fm} \sin(100\pi t + \theta_m) \cdot I_{fn} \sin(100\pi t + \theta_n)] dt = \\ & \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_0+10ms} [I_{fm} I_{fn} \cos(\theta) - \\ & I_{fm} I_{fn} \cos(200\pi t + \theta_m + \theta_n)] dt = \\ & \frac{1}{2} I_{fm} I_{fn} \cos(\theta) \times 0.01 \end{aligned} \quad (13)$$

因此式(9)可以改为:

$$\frac{1}{2} I_{fm} I_{fn} \cos(\theta) > 0.01 E_{dz1} \quad (14)$$

类似地式(10)可以改为:

$$| \cos(\theta) - \sin(\theta) - \cos(\theta) | > k | (\sin(\theta) - \cos(\theta)) | \quad (15)$$

从式(14)、(15)可以很清楚地看出:式(9)是否动作和两侧故障分量电流的幅值和相角差有关,若相角差越小,幅值越大,动作量就越大;式(10)反映的是两侧电流角差和整定值  $k$  之间的唯一对应关系,也即两侧电流的相关程度,例如  $k = 1$  时,只要满足两侧故障分量电流的相角差小于  $90^\circ$ ,在半周波内的式(10)就一定成立。因此(9)、(10)两式均不受故障初始相角的影响,不会出现各相動作速度不一致甚至误选相的情况,由于利用了半周波内的全部故障数据,其受短路暂态过程影响也较小。并且新判据的整定也比较容易,式(8)  $E_{dz0}$  可以参照文献[1]给出,式(9)制动量  $E_{dz1}$  按照躲过 10 ms 时外部故障时可能出现的最大动作量来整定,实用中可以选择在环网功率分点短路和弱馈线外部短路两种情况下,暂态电容电流的较大值,还要加适当的裕度系数来整定;式(10)可以按照外部故障时两侧故障分量

电流的最小角差来整定,由于选用了故障分量,比例系数  $k$  的实际整定裕度很大。

## 5 改进判据的动作特性仿真分析

为了全面考察改进后的相关差动判据的动作特性,本文以某条 500 kV 输电线路参数为基础,建立起了不同系统参数和网络结构的 EMTP 仿真模型,对新判据进行了大量的仿真验证。模型的基本结构如图 5 所示,  $MN$  为被保护线路,长度为 340 km,  $ND$  为外部线路,长度为 68 km。当考察单端电源线路模型时,线路  $ND$  断开,母线  $N$  所接负荷阻抗大小为 10 倍线路阻抗,功率因数 0.9。

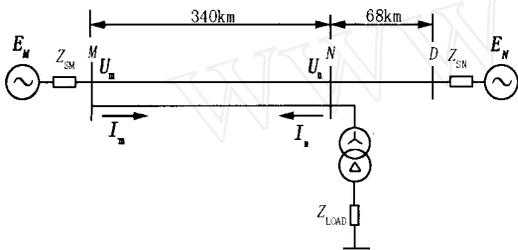


图 2 超高压输电系统仿真模型

Fig. 2 The simulation model of UHV transmission line

仿真模型参数如下:

系统阻抗 1:  $Z_1 = 0.5595 + j33.605$

$Z_0 = 1.268 + j100.24$

系统阻抗 2:  $Z_1 = 1.836 + j18.924$

$Z_0 = 13.246 + j44.159$

系统阻抗 3:  $Z_1 = 18.365 + j189.24$

$Z_0 = 132.464 + j441.59$

系统阻抗 4:  $Z_1 = 85.559 + j41.438$

$Z_0 = 207.47 + j101.45$

负荷阻抗:  $Z_1 = 855.59 + j414.38$

$Z_{SM}$ 、 $Z_{SN}$  分别选用上述系统阻抗。

电源电势角差:  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$

接地电阻: 0, 15, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 250, 300 共 10 种过渡电阻。

故障类型: 单相接地、两相短路、两相接地、三相短路四类共 10 种故障。

故障点: 母线  $M$ 、 $N$  的出口有两个外部故障点,  $MN$  线路 1 始端、中点和末端有 3 个内部故障点。线路 2 的中点设置了功率分点。

按照区外故障不误动,区内故障不拒动的标准,本文采用双端电源线路、单端电源线路、平行双回线等系统模型对新判据进行了仿真验证,并得到了各

种情况下的临界动作值,仿真结果参见表 1。

表 1 保护动作情况统计

Tab. 1 The statistic of protection operating performance

线路结构	故障类型	临界整定值
双侧电源	区内故障	$k = 5.8676$ ; $E_{dz1} = 564633.66$
	区外故障	$k = 0.011$ ; $E_{dz1} = 85091.67$
单侧电源	区内故障 (辅助判据)	$kk = 0.668$ ; $E_{dz} = 5387.49$
	区外故障	$k = 4.1$ ; $E_{dz1} = 444006.73$ $kk = 3.09$ ; $E_{dz} = 5373$
双回线路	区内故障	$k > 10$ ; $E_{dz1} = 539216.19$
	功率分点故障	$k =$ ; $E_{dz1} = 493101.75$
空载合闸	主判据	$k =$ ; $E_{dz1} = 0$
	辅助判据	$kk =$ ; $E_{dz} = 4353.76$
空合于故障	主判据	$k =$ ; $E_{dz1} = 0$
	辅助判据	$kk =$ ; $E_{dz} = 4066.95$

从仿真结果可以看出:

1) 对于双端电源线路,改进后的新判据可以很清楚的区分被保护线路的内外部故障,并且具有相当的裕度。

2) 对保护的動作可靠性最不利的是单侧电源出口外部短路和复杂网络结构中的功率分点短路,此时若整定不当,易引起保护误动,因此整定值的确定应以此为标准。

3) 新判据仍无法保护单侧电源故障和空合于故障,但其不会误动,这是因为这两种情况下的保护动作量均达不到动作门槛值。本文还对文献[1]的辅助判据进行了仿真,单侧电源的区内故障点选在线路末端,区外选在电源出口。仿真表明,外部单相接地故障时,非故障相的电流较大,但动作量和制动量接近,需合理设定电流门槛来防止非故障相的电流引起的误动,相间故障时,超前相的电流不大,但动作量和制动量的比值较大,很多超过了 1,最大的可以达到 3;而当线路内部故障时,若接地电阻很小,故障相的电流很大,两侧电流比值也很大,可以清楚地判断为区内故障,当接地电阻较大时,动作电流变小,两侧电流的比值也变小,特别是两相故障的情况非常不利,此时难以区分区内、外故障以及故障相与非故障相。因此文献[1]的辅助判据还需要进一步研究,以便找到新的辅助判据。

4) 改进后新判据具有稳定、快速、易于整定的特点,消除了原判据动作不一致和难以整定的弱点。仿真表明,在合理整定的情况下,严重故障在 2~3 个采样点可以判出,其它故障,包括高阻故障,均可

在 10 ms 判出。

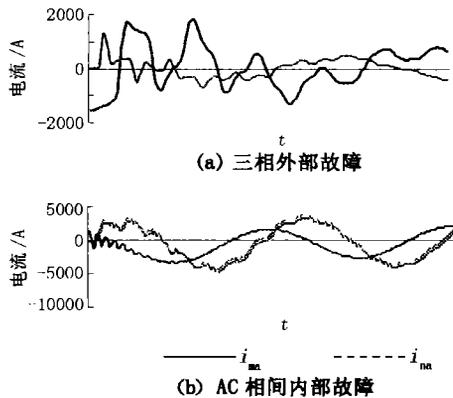


图 3 单端电源线路模型

Fig. 3 The transmission line model with single source

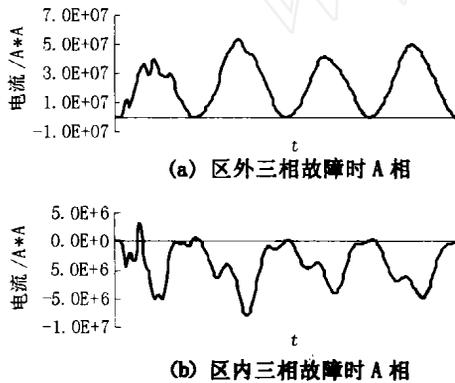


图 4 双侧电源线路模型

Fig. 4 The transmission line model with double sources

## 6 结论

本文对相关差动原理进行了进一步的理论分析,提出了对原有判据的改进,并对其进行了仿真验证,通过研究可以发现:

1) 相关差动在原理上是完全可行的,并且具有快速、可靠、抗分布电容影响等优点。

2) 改进后的判据在保留相关差动优点的基础上,加强了保护动作的一致性和可靠性且更加易于整定。

3) 相关差动判据适于保护双侧电源线路,不保护单侧电源线路,但在线路单侧电源运行时,保护不会误动,而常规的相量差动完全可以保护线路单侧电源运行情况,因此改进后的相关差动判据适合于和常规的相量差动共同使用。

## 参考文献:

- [1] 袁荣湘,陈德树,张哲. 高压输电线路新型差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 9 - 13.
- [2] 袁荣湘,陈德树,张哲. 耐受电流暂态分量影响的新型线路差动保护[J]. 电力系统自动化, 2000, (3): 14 - 18.
- [3] 袁荣湘,陈德树,张哲. 基于相关分析的暂态电流差动保护的原理与性能研究[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 40 - 42.
- [4] Rongxiang Yuan, Deshu Chen, Zhe Zhang. "Principle and Property Investigation of the Transient Current Differential Protection Based on Correlation Analysis"[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2000, Singapore.

收稿日期: 2002-09-28

作者简介:

李岩(1973-),男,博士研究生,从事电力系统继电保护的研究;

陈德树(1930-),男,教授,博士生导师,IEEE高级会员,主要从事电力系统继电保护与安全稳定控制等领域的研究;

尹项根(1956-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护和综合自动化等方面研究。

## Study on simulation and improvement of transient current differential protection based on correlation analysis

LI Yan, CHEN De-shu, YUAN Rong-xiang, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe  
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this paper, the principle of the current correlation differential protection based on the correlation integration [1] is analyzed firstly. The advantages of the correlation differential criterion are proved and the disadvantages are also pointed out. Aiming to the disadvantages of the correlation criterion, an improved scheme was proposed in the paper. The power system models of different structures using ATP program are built to simulate these criterion completely. Simulation studies show that the improved scheme not only preserves the advantages of correlation criterion, but also increases many new virtues such as better sensitivity and reliability, simple to understand, easy to give out setting values. Studies also show that the improved scheme is more reliable and very suitable for the protection of EHV/UHV transmission lines.

**Key words:** correlation analysis; current differential protection; UHV transmission line