

不受衰减直流分量影响的阻抗继电器新算法

哈恒旭¹, 王学明², 张保会³, 袁文广¹

(1. 鲁能积成电子有限公司, 山东 济南 250100; 2. 山东烟台经济技术开发区, 山东 烟台 264000;
3. 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 基于傅里叶算法的阻抗继电器能够滤除和抑制高次谐波的影响, 然而受衰减的直流分量的影响很大, 通常采用差分滤波的方法滤除衰减直流分量的影响, 由此提出一种改进的傅里叶算法, 无需差分滤波, 可以消除衰减直流分量的影响。EMTP 仿真表明: 与差分滤波相比, 本算法对衰减直流分量有更好的抑制能力。

关键词: 阻抗继电器; 衰减直流分量; 傅里叶算法

中图分类号: TM588.3; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)09-0016-04

0 引言

距离保护算法分为两大类, 解微分方程算法和傅里叶算法。解微分方程算法的优点是可以消除衰减直流分量的影响, 然而受高次谐波的影响很大, 同时, 在求解故障距离过程中, 算法的稳定性不够理想^[1]。傅里叶算法利用比较操作电压和极化电压的相位或幅值, 有较好的稳定性, 且对谐波具有天然的抑制力, 因此距离保护大多采用傅里叶算法。然而制约傅里叶算法的最大问题就是衰减的直流分量的影响, 通常采用差分滤波的方法减小衰减直流分量对算法的影响^[2]。本文首先分析了衰减直流分量对傅里叶算法影响的根本原因, 综合了解微分方程算法的优势改进了傅里叶算法, 使得新改进的基于傅里叶算法的阻抗继电器无需差分滤波, 不受衰减直流分量的影响。EMTP 仿真表明, 与传统的经过差分滤波后的算法相比, 本文提出的算法抑制衰减直流分量影响的能力更强, 具有较大的实用价值。

1 传统阻抗继电器的傅里叶算法

如图 1 所示的典型双端电源供电系统, 保护安装在 M 点, 假设在 F 点发生金属性短路, 则在时域内有下述方程成立:

$$u_m(t) = R_1 i_m(t) + L_1 \frac{di_m(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: R_1 和 L_1 分别为保护安装处 M 到故障点的线路电阻和电感。

将上式两边在一个周期内进行傅里叶变换, 即对方程(1)两边卷积傅里叶因子 $e^{-j\omega t}$, $0 \leq t \leq T_0$ (ω 为工频角频率, T_0 为一个工频周期), 得到:

$$U_m = (R_1 + j\omega L_1) I_m \quad (2)$$

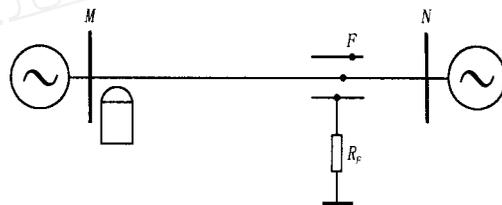


图 1 典型输电系统

Fig. 1 Typical transmission system

其中: $U_m = \int_{t-T_0}^t u_m(t) e^{-j\omega t} dt$, $I_m = \int_{t-T_0}^t i_m(t) e^{-j\omega t} dt$ 。

式(2)是传统的基于傅里叶算法的阻抗继电器的基石。

从式(1)经过傅里叶变换后到式(2)的过程, 对于工频周期分量显然是满足的, 然而对于衰减的直流分量则不然。关键在于式(1)中右侧第二项 $\frac{di_m}{dt}$ 的傅里叶积分:

$$\int_{t-T_0}^t \frac{di_m}{dt} e^{-j\omega t} dt = i_m(t) e^{-j\omega t} \Big|_{t-T_0}^t - \int_{t-T_0}^t i_m(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

对于工频周期分量:

$i_m(t) e^{-j\omega t} - i_m(t-T_0) e^{-j\omega(t-T_0)} = i_m(t) e^{-j\omega t} [1 - e^{-j\omega T_0}] = 0$
而对于衰减的直流分量上式不为零, 因此, 将式(1)经过傅里叶积分变为式(2), 对于工频周期分量是满足的, 而对于衰减的直流分量则不满足, 这就是为什么傅里叶算法受衰减直流分量影响的根本原因。

2 改进基于傅里叶算法的阻抗继电器

2.1 基本原理

为了消除衰减直流分量的影响, 关键在于如何消除式(1)中的电流对时间的导数。因此首先对式(1)在一个时间段内进行积分(积分时间假设为 T_s):

$$\int_{t-T_s}^t u_m dt = R_1 \int_{t-T_s}^t i_m dt + L_1 [i_m(t) - i_m(t-T_s)] \quad (4)$$

然后再对式(4)进行傅里叶积分:

$$U_m(t) = R_1 I_{m1}(t) + L_1 I_{m2}(t) \quad (5)$$

$$\text{上式中: } U_m = \int_{t-T_0}^t [u_m(\cdot) d] d$$

$$I_{m1} = \int_{t-T_0}^t [i_m(\cdot) d] d$$

$$I_{m2} = \int_{t-T_0}^t [i_m(\cdot) - i_m(\cdot - T_s)] d$$

按照下式定义整定点的补偿电压 U :

$$U = U_m - R_{set} I_{m1} - L_{set} I_{m2} \quad (6)$$

其中: R_{set} 、 L_{set} 分别为整定点到保护安装处的线路电阻和电抗。

将式(5)带入上式则有:

$$U = (R_1 - R_{set}) I_{m1} + (L_1 - L_{set}) I_{m2} \quad (7)$$

当发生区内故障时, $R_1 < R_{set}$, $L_1 < L_{set}$, 有:

$$90^\circ < \text{Arg} \frac{U_m}{U} < 270^\circ \quad (8)$$

发生区外故障时, $R_1 > R_{set}$, $L_1 > L_{set}$, 有:

$$-90^\circ < \text{Arg} \frac{U_m}{U} < 90^\circ \quad (9)$$

发生反方向故障时, $U_m = - (R_1 I_{m1} + L_1 I_{m2})$,

$U = - [(R_1 + R_{set}) I_{m1} + (L_1 + L_{set}) I_{m2}]$, 同样有式(9)成立。因此继电器的动作判据为式(8)。

2.2 数字算法

假设采样周期为 T_s , 一个周波采样 N 点, 则改进的阻抗继电器的数字离散算法如下:

1) 在一个采样间隔内进行积分, 采用梯形积分法。 $u_J(k) = u_m(k) + u_m(k-1)$, $i_{J1}(k) = i_m(k) + i_m(k-1)$, $i_{J2}(k) = i_m(k) - i_m(k-1)$, 则将式(1)等式两侧积分后得到:

$$u_J(k) = R_1 i_{J1}(k) + \frac{NX_1}{2} i_{J2}(k) \quad (10)$$

2) 将上式中的 u_J 、 i_{J1} 、 i_{J2} 进行傅里叶积分:

$$U_J = R_1 I_{J1} + \frac{NX_1}{2} I_{J2} \quad (11)$$

$$\text{其中: } U_J(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N [u_m(k) + u_m(k-1)] e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$$

$$I_{J1}(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N [i_m(k) + i_m(k-1)] e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$$

$$I_{J2}(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N [i_m(k) - i_m(k-1)] e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$$

3) 按照下式求出整定点的补偿电压相量 U :

$$U = U_J - R_{set} I_{J1} - \frac{NX_{set}}{2} I_{J2} \quad (12)$$

4) 比较 U 和 U_J 的相位, 如果满足式(8), 则为区内故障。

2.3 三相输电系统的算法

上面所陈述的算法是基于单相系统提出的, 对于三相系统, 线路故障模型为如下。

1) 单相接地短路:

$$u_{m\phi}(t) = R_1 [i_{m\phi}(t) + K_r i_{m0}(t)] + L_1 \frac{d[i_{m\phi}(t) + K_L i_{m0}(t)]}{dt}$$

其中: $u_{m\phi}$ 为 M 点故障相电压, $i_{m\phi}$ 为故障相电流, i_{m0}

为 M 点零序电流, $K_r = \frac{R_0 - R_1}{R_1}$, $K_L = \frac{L_0 - L_1}{L_1}$ 。

2) 相间短路时(包括三相短路、相间短路和相间短路接地), 线路模型为:

$$u_{m\phi\phi}(t) = R_1 i_{m\phi\phi}(t) + L_1 \frac{di_{m\phi\phi}(t)}{dt}$$

其中: $u_{m\phi\phi}$ 、 $i_{m\phi\phi}$ 分别为 M 点故障相间电压和电流。

也就是说, 当发生单相短路时:

$$u_J(k) = u_{m\phi}(k) + u_{m\phi}(k-1),$$

$$i_{J1}(k) = i_{m\phi}(k) + K_r i_{m0}(k) + i_{m\phi}(k-1) + K_r i_{m0}(k-1),$$

$$i_{J2}(k) = i_{m\phi}(k) - i_{m\phi}(k-1) + K_L [i_{m0}(k) - i_{m0}(k-1)].$$

当发生相间短路时:

$$u_J(k) = u_{m\phi\phi}(k) + u_{m\phi\phi}(k-1),$$

$$i_{J1}(k) = i_{m\phi\phi}(k) + i_{m\phi\phi}(k-1),$$

$$i_{J2}(k) = i_{m\phi\phi}(k) - i_{m\phi\phi}(k-1).$$

然后按照文 2.2 中的第 2) ~ 4) 步进行。

3 新算法分析

3.1 动作特性

与传统的基于傅里叶算法的阻抗继电器相比较, 本文提出的改进算法的关键在于增加了一个在采样间隔内的积分过程, 下面将着重讨论这一过程对继电器动作特性带来的影响。

假设 $u_m = U \cos(\omega t)$, $i_m = I \cos(\omega t + \phi_0)$, 经过在一个时间段内积分后得到:

$$\int_{t-T_s}^t u_m dt = \frac{2}{\omega} U \cos(\omega t - \frac{\omega T_s}{2}) \sin(\frac{\omega T_s}{2}) \quad (13a)$$

$$\int_{t-T_s}^t i_m dt = \frac{2}{\omega} I \cos(\omega t + \phi_0 - \frac{\omega T_s}{2}) \sin(\frac{\omega T_s}{2}) \quad (13b)$$

$$i_m(t) - i_m(t - T_s) = -2I \sin(\omega t + \phi_0 - \frac{\omega T_s}{2}) \sin(\frac{\omega T_s}{2}) \quad (13c)$$

由此可见,对于工频周期分量,将方程 1 的两边在一个时间段内积分后,方程并没改变,只是方程中的各个正弦量产生了一个 $T_s/2$ 的相偏移:

$$\int_{t-T_s}^t u_m(t) dt = \frac{2}{0} u_m(t - \frac{T_s}{2}) \sin(\frac{-0 T_s}{2}) \quad (14a)$$

$$\int_{t-T_s}^t i_m dt = \frac{2}{0} i_m(t - \frac{T_s}{2}) \sin(\frac{-0 T_s}{2}) \quad (14b)$$

$$i_m(t) - i_m(t - T_s) = \frac{2}{0} \frac{di_m(t - T_s/2)}{dt} \sin(\frac{-0 T_s}{2}) \quad (14c)$$

因此,对于工频分量,式(4)(由式(1)经过一个采样间隔内的积分得到)等价于:

$$u_m(t - \frac{T_s}{2}) = R_1 i_m(t - \frac{T_s}{2}) + L_1 \frac{di_m(t - T_s/2)}{dt} \quad (15)$$

可见,在对式(1)进行傅里叶积分以前,增加一个在采样间隔内的积分过程,对于工频分量而言,与没有积分前是完全一致的。因此,增加这一步积分,并没有影响阻抗继电器的动作特性,即基于本文提出的新算法的阻抗继电器的动作特性和传统的阻抗继电器特性完全相同。

3.2 衰减直流分量的影响

衰减的直流分量是满足式(1)的,为了说明问题,假设图 1 所示的系统中, M 侧电源的内阻抗为 0 (无穷大电源,即 u_m 中的衰减直流分量为零),在 F 点发生金属性短路,则在保护安装处测量到的衰减的直流分量电流为:

$$i(t) = I e^{-t/T_d} \quad (16)$$

在上述假设下, $T_d = -L_1/R_1$ 。

将该电流带入式(4)中,得到:

$$-R_1 \frac{L_1}{R_1} I (e^{-t/T_d} - e^{-(t-T_s)/T_d}) + L_1 I (e^{-t/T_d} - e^{-(t-T_s)/T_d}) = 0$$

这说明衰减的直流分量满足式(4),进而将式(4)进行傅里叶积分后,衰减的直流分量仍然满足式(5),因此在以式(5)为基石的阻抗继电器的新算法必然不受衰减直流分量的影响。

3.3 高次谐波的影响

高次谐波不满足线路的 RL 方程(即式(1)),因此在算法中必须把高次谐波滤除。本文仍然采用傅里叶积分得到的相量进行比较,因此,在对高次谐波的抑制方面至少与传统的傅里叶算法具有相同的效果。另外,对式(1)进行积分的过程,对高次谐波也有一定程度的抑制。因为对式(1)等号两侧的电气量在一个时间段内的积分相当于将电气量通过一个

矩形时间窗。从矩形时间窗的频率响应来看,该窗为一低通滤波器,因此对高次谐波也具有一定程度的抑制作用。

3.4 新算法的特点

综上所述,基于新算法的阻抗继电器的动作特性与传统的阻抗继电器完全相同,即同样都是一个以整定阻抗为直径的圆。因此,具有传统的阻抗继电器所拥有的一切特征,诸如好的方向性等,同样也面临传统阻抗继电器所面临的一些问题,诸如出口死区问题,当然解决办法同样是利用故障前的电压或者第三相电压作为极化量解决。

除此以外,本文提出的改进算法具有传统傅里叶算法的优点——能抑制高次谐波的影响、算法稳定等,同时还弥补了传统傅里叶算法的缺陷——衰减直流分量的影响很大。

4 EMTP 仿真

本文利用山东电网 500 kV 线路进行了 EMTP 仿真,如图 2 所示,被保护线路为济南至淄博的 115.8 km 长的 500 kV 输电线路,保护安装在济南变侧,线路的工频参数为(每公里的阻抗参数): $z_{L1} = z_{L2} = 0.0575 + j0.3882$; $z_{L0} = 0.0955 + j1.1846$ 。仿真采用不平衡的分布参数模型,整定距离为整条线路长度的 85%,即整定距离为 98 km。

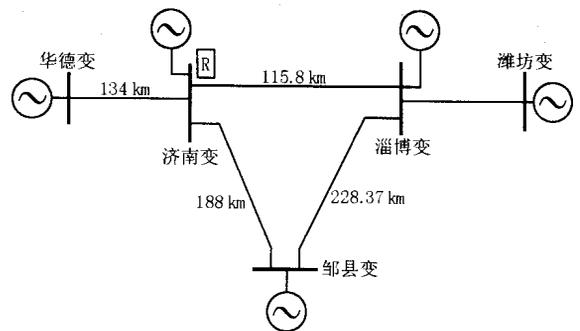
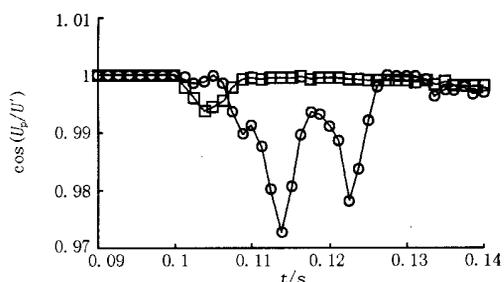


图 2 山东电网 500 kV 输电系统示意图

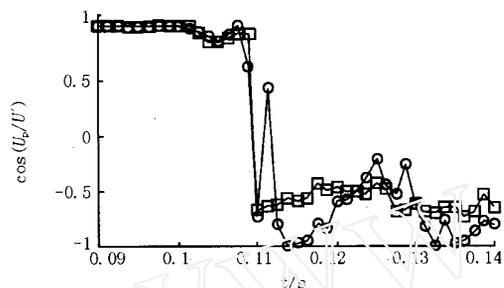
Fig. 2 Diagram of 500 kV transmission system of Shandong power system

当分别在反方向(华德变至济南变线路上,距离济南变 20 km 处)、区内末端(济南至淄博线路上,距离济南变 95 km 处)、正方向区外故障(1. 淄博至邹县变线路上,距离淄博 100 km; 2. 淄博至潍坊变,距离淄博 10 km 处)发生 A 相金属性接地短路时,继电器的动作情况如图 3 所示。

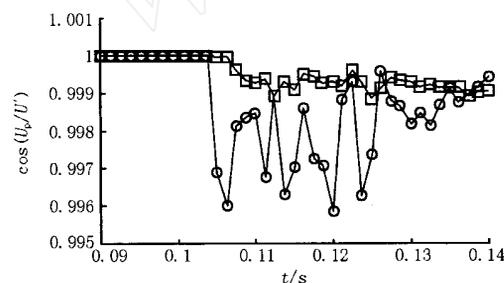
图 3 中,横坐标为时间轴,纵坐标为操作电压和



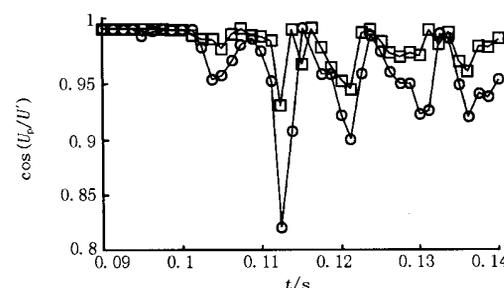
(a) 华德至济南线路上故障(反方向故障)



(b) 济南至淄博线路故障(区内,靠近整定点)



(c) 淄博至邹县线路故障(正方向区外)



(d) 淄博至潍坊线路故障(正方向区外)

“O”曲线代表传统傅里叶算法;“□”曲线代表改进新算法

图3 传统继电器与改进的算法的比较

Fig. 3 Comparison between the conventional algorithm and the improved algorithm

极化电压的相位差的余弦值,即 $\cos(\arg \frac{U_{ml}0l}{U})$,当故障为区内时,上述余弦值应该小于零,反之区外或者反方向故障时,上述余弦值应该大于零。图中的“O”曲线,代表传统傅立叶算法的继电器动作情况,

“□”曲线代表本文提出的新算法的动作情况。通过图(3)不难发现,本文提出的新算法对于抑制衰减直流分量有非常明显的效果,特别是当故障发生在整定点附近时(如图3(b)),衰减直流分量的影响尤为明显,传统的算法导致继电器的输出结果有剧烈的振荡,而改进的算法很快就收敛到保护区,几乎没有大的振荡。通过上述仿真结果表明,改进的算法在抑制衰减直流分量的能力上具有很大的提高。

5 结论

本文提出了一种能够消除衰减直流分量的阻抗继电器的改进傅里叶算法,具体办法是在对故障后的时域方程进行傅里叶积分以前,先在一个时间段内进行积分,然后按照傅里叶积分后得到的方程,重新定义一个整定点的补偿电压,然后利用电压和补偿电压的相位差进行区内外故障判别。

理论分析表明对于工频电气量,改进的阻抗继电器与传统的阻抗继电器具有相同的动作特性;对于衰减的直流分量,改进算法具有很好的抑制作用,对高次谐波分量与传统的继电器具有相同的抑制能力。EMTP仿真结果表明,改进的继电器的动作行为在防止暂态超越上明显优于传统算法。

参考文献:

- [1] 许正亚(XU Zheng-ya). 输电线路新型距离保护(New Type of Distance Relay in Transmission Lines) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 2002.
- [2] 朱声石(ZHU Sheng-shi). 高压电网继电保护原理与技术(Principle and Technology of HV Power Network Relay Protection) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1995.

收稿日期: 2003-09-15

作者简介:

哈恒旭(1972-),男,博士,研究方向为电力系统继电保护;

王学明(1965-),男,从事农电自动化的研究工作;

张保会(1953-),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统继电保护、电力系统安全自动装置、电力系统载波通讯、稳定性分析等方面的研究。

(下转第64页 continued on page 64)

- [24] 刘莉,陈学允,孙小平(LIU Li, CHEN Xue-yun, SUN Xi-ao-ping). 基于遗传算法的配电网电容器优化投切(Optimal Capacitor Switching in Distribution Networks with Genetic Method) [J]. 东北电力学院学报 (Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering), 1999, 19(4): 33-36.
- [25] 张学松,柳焯,于尔铿(ZHANG Xue-song, LIU Zhuo, YU Er-keng). 基于 Tabu 方法的配电电容器投切策略(The Strategy of Distribution Capacitor Scheme Based on Tabu Search) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1998, 22(2): 33-36.
- [26] 邓集祥,张弘鹏(DENG Ji-xiang, ZHANG Hong-peng). 用改进的 Tabu 搜索方法优化补偿电容器分档投切的研究(Optimization of on/off Strategy of Shunt Capacitor Based on Modified Tabu Search Method) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2000, 24(2): 46-49.
- [27] Hsu Y Y, Yang C C. A Hybrid Artificial Neural Network dynamic Programming Approach for Feeder Capacitor Scheduling [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 1069-1075.
- [28] Miu KN, Chiang H D, Gary D. Capacitor Placement, Replacement and Control in Large Scale Distribution Systems by a GA-based Two-stage Algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1160-1166.
- [29] 卢鸿宇,胡林献,刘莉,等(LU Hong-yu, HU Lin-xian, LIU Li, et al). 基于遗传算法和 TS 算法的配电网电容器实时优化投切策略(Application of Genetic Algorithm/Tabu Search Combination Algorithm in Distribution Network Real-time Planning) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2000, 24(11): 56-59.
- [30] 陈星莺,钱锋,杨素琴(CHEN Xing-ying, QIAN Feng, YANG Su-qin). 模糊动态规划法在配电网无功优化控制中的应用(Application of Fuzzy Dynamic Programming Approach to Optimal Reactive Power Control in Distribution System) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2003, 27(2): 68-71.

收稿日期: 2003-08-12

作者简介:

方兴(1975-),男,博士研究生,从事配电网方面的研究;

郭志忠(1961-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统稳定分析与控制,电力系统的自动化、信息化和市场化,光电互感器等。

Study of algorithms for optimal capacitor placement and switching in distribution network

FANG Xing¹, GUO Zhi-zhong^{1,2}

(1. Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing XI Electric Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: Capacitor optimal placement and switching plays an important role in distribution network optimization. The state of technology in optimal capacitor placement and switching in distribution network is reviewed, and the existing approaches to solve capacitor switching problem are expounded. The features and main problems of the corresponding algorithms are analysed for further research and development in this field.

Key words: distribution network; capacitor; allocation; switching; algorithms

(上接第 19 页 continued from page 19)

An improved Fourier algorithm of Mho relay without influence of DC decay component

HA Heng-xu¹, WANG Xue-ming², ZHANG Bao-hui³, YUAN Weir-guang¹

(1. Luneng Jicheng Electronic Ltd, Jinan 250100, China; 2. Yantai Economic and Technique Development Zone, Yantai 264000, China; 3. Dept. of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The Fourier algorithm based Mho relay has advantages of eliminating and restraining the influence of high frequency harmonics, however suffers the strong influence induced by DC decay components. Therefore, differential filter is used to eliminate the DC decay component before the measured signal came into the Mho relay. This paper describes an improved Mho relay algorithm, which can naturally eliminate the influence of DC decay component without any filters. The EMTP simulation shows that the proposed algorithm is better than the conventional processing method.

Key words: Mho relay; DC decay component; Fourier algorithm