

基于故障类型的故障分量提取算法

索南加乐¹, 张健康¹, 宋国兵¹, 杨春明², 毛 鹏²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 东方电子信息产业集团综自所, 山东省烟台市 264001)

摘要: 提出了一种基于故障类型的故障分量提取算法, 适用于中性点接地的高压系统。其原理是根据选相结果, 先计算出保护安装处的负序及零序故障分量, 然后根据故障类型特征计算出保护安装处的正序故障分量, 最后按照对称分量理论, 将各序故障分量合成得到故障相的故障分量。该算法弥补了目前方法由于只能获取故障发生最初短时的故障分量、只能用于快速保护的缺陷, 采用该算法可以求得故障发生后任何时刻的故障分量, 从而将故障分量引入后备保护。

关键词: 故障分量; 正序故障分量; 对称分量; 后备保护

中图分类号: TM773

0 引言

反应故障分量的保护原理是 20 世纪 80 年代提出的一个较新的研究课题^[1]。由于故障分量仅在系统发生故障状态下才出现, 与传统反应全量的保护相比, 反应故障分量的保护具有许多优点^[2,3], 因此一直是保护工作者的研究热点。反应故障分量保护的首要问题是故障分量的准确计算。

目前计算故障分量的做法^[2]是将故障前一个周期的电压、电流值记忆下来, 再与故障后的电压、电流值相减而得到故障分量。由于故障后会出现励磁调节器的动作、负载的改变、系统出现的振荡以及频率发生偏移等诸多情况, 因此, 目前的方法存在以下缺陷: ①只能得到故障发生最初的一两个周期很短时间内的故障分量, 超出这个时间所得的值不再反应故障分量, 不能提取故障发生后任何时刻的故障分量; ②这种方法只适用于快速动作的保护, 而不能用于后备保护; ③当系统发生振荡时, 由于故障分量获取困难, 保护被迫改用全量; ④当发生转换性故障时, 对第 2 次出现的故障分量用目前的方法很难求得。

鉴于目前的方法只能提取短时的故障分量, 不能用于后备保护, 文献[4]给出了一种长时间的故障分量提取方法, 但只适用于中性点不接地的配电网系统的相间短路。本文提出了一种可提取故障发生后任何时刻的故障分量的新算法, 适用于中性点接地的高压系统的各种简单不对称故障。本方法可以极大地改善后备保护及保护在转换性故障、系统振

荡情况下的性能。

1 算法的基本原理

根据对称分量理论, 保护安装处 M 的相故障分量可以由正序、负序及零序 3 个对称的序故障分量合成, 即

$$\begin{bmatrix} \Delta S_A \\ \Delta S_B \\ \Delta S_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ S_2 \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Delta S_A, \Delta S_B, \Delta S_C$ 为保护安装处 M 的三相故障分量电流或电压相量; $\Delta S_1, S_2, S_0$ 为保护安装处 M 的正序、负序及零序故障分量电流或电压相量; $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。

事实上, 如图 1 所示, 设 M 侧为保护安装处, 只要不对称故障存在, 保护安装处的负序、零序故障分量就可以通过下式求得:

$$\begin{cases} S_{M2} = \frac{1}{3}(S_{MA} + \alpha^2 S_{MB} + \alpha S_{MC}) \\ S_{M0} = \frac{1}{3}(S_{MA} + S_{MB} + S_{MC}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_{MA}, S_{MB}, S_{MC} 为 M 侧保护安装处的三相电流或电压相量。

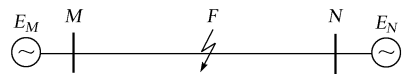


图 1 某一双电源系统简图
Fig. 1 Simplified diagram of double-source system

若再能求得保护安装处的正序故障分量 ΔS_{M1} , 则保护安装处的各相故障分量就可以由式(1)得到。

正序故障分量经常是与负荷分量混在一起的, 提取比较困难, 目前的做法是取故障前后相邻两周

期正序分量电流或电压值之差而得到的,显然该方法只适用于故障发生最初的短时间内。

本文提出了正序故障分量提取的新思路,即从已知的故障类型特点出发,利用各序故障分量之间的关系来获取正序故障分量。

2 算法的推导^[5]

线路发生故障时(如图 1 所示),保护安装侧 M 与短路点 F 的电流存在以下关系:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{M1} = c_{M1} \dot{I}_{F1} \\ \dot{I}_{M2} = c_{M2} \dot{I}_{F2} \\ \dot{I}_{M0} = c_{M0} \dot{I}_{F0} \end{cases} \quad (3)$$

式中: c_{M1}, c_{M2}, c_{M0} 为 M 侧支路各序电流分配系数。

下面结合具体的故障类型来推导故障相故障分量的求取算法。

2.1 单相接地短路

设系统在 F 点发生单相接地短路(以 A 相为例),则故障点故障分量边界条件为: $\Delta \dot{I}_{FB} = \Delta \dot{I}_{FC} = 0$ 。转换为故障点各序故障分量为:

$$\Delta \dot{I}_{F1} = \dot{I}_{F2} = \dot{I}_{F0} \quad (4)$$

其故障分量复合序网如图 2 所示。

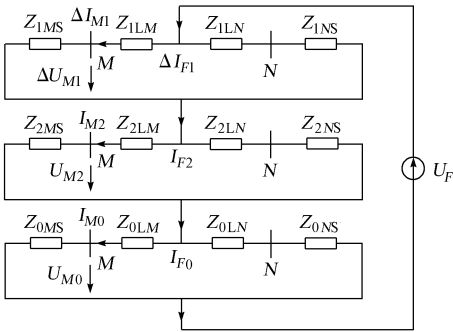


图 2 单相接地短路故障分量复合序网
Fig. 2 Equivalent sequence network under single-phase to ground fault

因为 $c_{M1} = c_{M2}$, 将式(3)代入式(4), 可得保护安装处的正序电流故障分量, 即

$$\Delta \dot{I}_{M1} = \dot{I}_{M2} \quad (5)$$

所以故障相 A 的电流故障分量为:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{MA} &= \Delta \dot{I}_{M1} + \dot{I}_{M2} + \dot{I}_{M0} = 2\dot{I}_{M2} + \dot{I}_{M0} = \\ &\dot{I}_{MA} + j\frac{\sqrt{3}}{3}(\dot{I}_{MC} - \dot{I}_{MB}) \end{aligned}$$

下面给出电压故障分量的求取。如图 2 所示, 由于系统的正负序阻抗相等, 即 $Z_{1MS} = Z_{2MS}$, 由式(5)可得:

$$\Delta \dot{I}_{M1} Z_{1MS} = \dot{I}_{M2} Z_{2MS}$$

$$\text{即} \quad \Delta \dot{U}_{M1} = \dot{U}_{M2} \quad (6)$$

所以故障相电压故障分量为:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{MA} &= \Delta \dot{U}_{M1} + \dot{U}_{M2} + \dot{U}_{M0} = \\ &\dot{U}_{MA} + j\frac{\sqrt{3}}{3}(\dot{U}_{MC} - \dot{U}_{MB}) \end{aligned}$$

A 相接地时故障分量可以统一为:

$$\Delta S_{MA} = S_{MA} + j\frac{\sqrt{3}}{3}(S_{MC} - S_{MB}) \quad (7)$$

2.2 相间短路

设系统在 F 点发生相间短路(以 BC 相为例), 故障点故障分量边界条件为: $\Delta \dot{I}_{FA} = 0$; $\Delta \dot{I}_{FB} = -\Delta \dot{I}_{FC}$ 。转换为故障点各序故障分量为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{F1} = -\dot{I}_{F2} \\ \dot{I}_{F0} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其复合序网如图 3 所示。

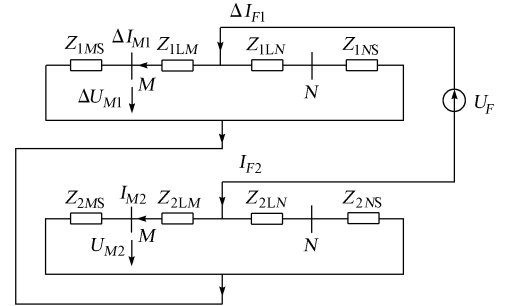


图 3 相间短路故障分量复合序网
Fig. 3 Equivalent sequence network under phase-to-phase fault

因为 $c_{M1} = c_{M2}$, 将式(3)代入式(8), 可得保护安装处的正序及零序故障分量, 即

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{M1} = -\dot{I}_{M2} \\ \dot{I}_{M0} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

所以故障相的电流故障分量分别为:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{MB} &= \alpha^2 \Delta \dot{I}_{M1} + \alpha \dot{I}_{M2} + \dot{I}_{M0} = \dot{I}_{MB} - \dot{I}_{MA} e^{-j120^\circ} \\ \Delta \dot{I}_{MC} &= \alpha \Delta \dot{I}_{M1} + \alpha^2 \dot{I}_{M2} + \dot{I}_{M0} = \dot{I}_{MC} - \dot{I}_{MA} e^{j120^\circ} \end{aligned}$$

如图 3 所示, 由式(9)还可得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{M1} = -\dot{U}_{M2} \\ \dot{U}_{M0} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

所以故障相的电压故障分量分别为:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{MB} &= \alpha^2 \Delta \dot{U}_{M1} + \alpha \dot{U}_{M2} + \dot{U}_{M0} = \dot{U}_{MB} - \dot{U}_{MA} e^{-j120^\circ} \\ \Delta \dot{U}_{MC} &= \alpha \Delta \dot{U}_{M1} + \alpha^2 \dot{U}_{M2} + \dot{U}_{M0} = \dot{U}_{MC} - \dot{U}_{MA} e^{j120^\circ} \end{aligned}$$

BC 相间短路时故障分量可以统一为:

$$\begin{cases} \Delta S_{MB} = S_{MB} - S_{MA} e^{-j120^\circ} \\ \Delta S_{MC} = S_{MC} - S_{MA} e^{j120^\circ} \end{cases} \quad (11)$$

2.3 相间短路接地

以 BC 相间短路接地为例,故障点故障分量边界条件为: $\Delta \dot{I}_{FA} = 0$, 转换为故障点各序故障分量为:

$$\Delta \dot{I}_{F1} + \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{F0} = 0 \quad (12)$$

其复合序网如图 4 所示。

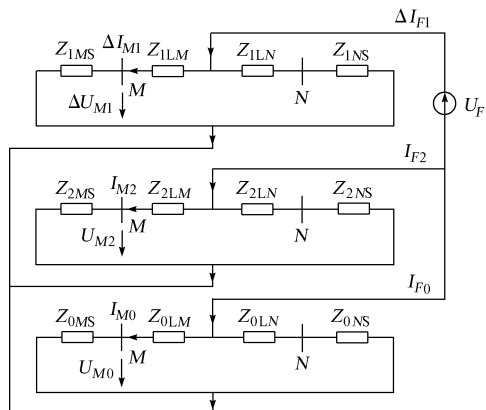


图 4 相间短路接地故障分量复合序网图

Fig. 4 Equivalent sequence network under phase-to-phase with ground fault

由式(3)、式(12)可知,对于保护安装处有:

$$\frac{\Delta \dot{I}_{M1}}{c_{M1}} + \frac{\dot{I}_{M2}}{c_{M2}} + \frac{\dot{I}_{M0}}{c_{M0}} = 0 \quad (13)$$

所以,

$$\Delta \dot{I}_{M1} = - \left(\dot{I}_{M2} + \frac{c_{M1}}{c_{M0}} \dot{I}_{M0} \right) \quad (14)$$

式(14)中 $\dot{I}_{M2}$, $\dot{I}_{M0}$ 始终是已知的,而 c_{M1}/c_{M0} 未知,若能求得 c_{M1}/c_{M0} ,则保护安装处的正序故障分量可得。

故障最初(0~40 ms 内)各相的故障分量 $\Delta \dot{I}_{MA}^0, \Delta \dot{I}_{MB}^0, \Delta \dot{I}_{MC}^0$ 可用故障前后相邻两周期值之差求得,又因 $\Delta \dot{I}_{MA}^0 = \Delta \dot{I}_{M1}^0 + \dot{I}_{M2}^0 + \dot{I}_{M0}^0$,由式(13)得:

$$\frac{c_{M1}}{c_{M0}} = - \frac{\Delta \dot{I}_{M1}^0 + \dot{I}_{M2}^0}{\dot{I}_{M0}^0} = - \frac{\Delta \dot{I}_{MA}^0}{\dot{I}_{M0}^0} + 1 \quad (15)$$

式中: $\dot{I}_{M0}^0 = (\dot{I}_{MA}^0 + \dot{I}_{MB}^0 + \dot{I}_{MC}^0)/3$; $\dot{I}_{MA}^0, \dot{I}_{MB}^0, \dot{I}_{MC}^0$ 为故

障发生最初 0~40 ms 内各相的电流。

由于各序电流分配系数只与该序网结构参数有关,在不发生转换性故障情况下,故障发生的整个程序网结构参数不会发生改变,故 c_{M1}/c_{M0} 为一个常数,可在故障最初由式(15)得到。从而,

$$\Delta \dot{I}_{M1} = - \left[\dot{I}_{M2} + \left(- \frac{\Delta \dot{I}_{MA}^0}{\dot{I}_{M0}^0} + 1 \right) \dot{I}_{M0} \right] \quad (16)$$

电压正序故障分量的求取类似,即

$$\Delta \dot{U}_{M1} = - \left[\dot{U}_{M2} + \left(- \frac{\Delta \dot{U}_{MA}^0}{\dot{U}_{M0}^0} + 1 \right) \dot{U}_{M0} \right] \quad (17)$$

所以 BC 相间短路接地时故障分量可以统一为:

$$\begin{cases} \Delta S_{MB} = \alpha^2 \Delta S_{M1} + \alpha S_{M2} + S_{M0} \\ \Delta S_{MC} = \alpha \Delta S_{M1} + \alpha^2 S_{M2} + S_{M0} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\Delta S_{M1}, S_{M2}, S_{M0}$ 可由式(2)与式(16)或式(17)求得。

3 仿真与验证

为验证本算法的正确性,采用图 1 所示 500 kV 系统进行 EMTP 仿真,其中 M, N 为线路保护装置安装处,线路长度为 300 km,故障点选为 MN 中点,采用全周期傅里叶滤波,每个周期采样 40 点。

M 端系统参数为:正序阻抗 $Z_{M1} = j45.149 \Omega$; 零序阻抗 $Z_{M0} = j23.321 \Omega$ 。

N 端系统参数为:正序阻抗 $Z_{N1} = j96.262 \Omega$; 零序阻抗 $Z_{N0} = j47.480 \Omega$ 。

线路参数为:正序参数 $r_1 = 0.027 \Omega/\text{km}, \omega l_1 = 0.3032 \Omega/\text{km}, \omega c_1 = 4.27 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$; 零序参数 $r_0 = 0.1957 \Omega/\text{km}, \omega l_0 = 0.6945 \Omega/\text{km}, \omega c_0 = 2.88 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。

表 1、表 2 是仿真结果。其中“[]”内的值为故障分量幅值或相位的真实值,它是由故障后实测的电流或电压减去非故障状态的电流或电压得到的;“[]”外的值为按本文算法得到的故障分量。

表 1 结果显示,对于单相接地及相间短路采用本文算法得到的故障分量始终和真实值是一致的。

表 1 故障后负荷不变时本文算法得到的故障分量与故障分量真实值的对比(负荷电流为 1 222 A)
Table 1 Comparison of fault components of two method under invariable load(load current is 1 222 A)

故障类型	故障相	电流故障分量		电压故障分量	
		幅值/A	相位/(°)	幅值/kV	相位/(°)
AG	A 相	2 641.0 [2 640.9]	-60.79 [-60.80]	101.76 [101.69]	-150.8 [-150.8]
	B 相	2 584.5 [2 584.5]	-154.74 [-154.74]	116.65 [116.65]	115.29 [115.29]
	C 相	2 584.7 [2 584.7]	25.26 [25.26]	116.69 [116.69]	-64.75 [-64.75]
BCG	B 相	2 978.3 [2 969.1]	-177.26 [-177.71]	121.02 [126.58]	100.70 [98.63]
	C 相	2 700.9 [2 696.7]	51.24 [50.71]	111.81 [117.78]	-46.02 [-46.82]

表 2 故障后负荷变化时本文算法得到的故障分量与故障分量真实值的对比 (负荷电流从 1 222 A 变为 1 039 A)
Table 2 Comparison of fault components of two method under variable load (load current is varied from 1 222 A to 1 039 A)

故障类型	故障相	电流故障分量		电压故障分量	
		幅值/A	相位/(°)	幅值/kV	相位/(°)
AG	A 相	2 754.1 [2 754.1]	-64.44 [-64.44]	106.13[106.17]	-154.48 [-154.47]
BC	B 相	2 695.2 [2 695.2]	-158.38 [-158.38]	121.72[121.75]	111.62 [111.62]
	C 相	2 695.6 [2 695.6]	21.61 [21.61]	121.75 [121.75]	-68.35 [-68.35]
BCG	B 相	3 106.2 [3 096.4]	179.11 [178.65]	126.25 [132.10]	97.07 [94.98]
	C 相	2 816.9 [2 812.4]	47.61 [47.07]	117.47 [122.80]	-49.63 [-50.43]

对于相间短路接地故障,因本文算法要用故障最初的突变量来确定一些网络参数,如 c_{M1}/c_{M0} ,因而对计算结果会有一些影响。考虑到目前方法得到的故障后 0~40 ms 内的突变量都很准确,因而由此产生的误差也很小。在本例中,按本文算法得到的电流故障分量的幅值误差不超过 0.3%,相位误差不超过 0.5°;电压故障分量的幅值误差不超过 5%,相位误差不超过 2°,能够满足现场的要求。

表 2 是故障后当负荷电流发生改变时(对应于故障后励磁调节器的动作、负载的改变等),按本文算法得到的故障分量和故障分量真实值的对比,结果和表 1 类似。

4 结语

反应故障分量的保护原理是改善保护动作性能的一条有效途径,已在实际中获得了成功的应用。目前求取故障分量的方法只适用于故障最初的短时,限制了故障分量在延时、后备保护中的应用。

采用本算法可以得到故障发生后任何时刻的故障分量,从而将故障分量引入后备保护,也有利于保护在系统振荡、转换性故障情况下采用故障分量改善动作性能。

该算法适用于反应故障分量的距离、方向、差动及电流等诸多保护。

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,

1983,7(1):28—38.
SHEN Guo-rong. Research on Direction Relay Based on Power Frequency Variation Principle. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(1): 28—38.
[2] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术.西安:西安交通大学出版社,1996.
GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
[3] 朱声石.高压电网继电保护原理与技术.北京:中国电力出版社,1995.
ZHU Sheng-shi. The Principle and Technique of High Voltage Network Protection. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
[4] 索南加乐,张健康,刘辉,等.故障分量提取及故障选相的新方法.电力系统自动化,2003,27(16):58—61.
SUONAN Jia-le, ZHANG Jian-kang, LIU Hui et al. A New Method for Fault Components Extraction and Fault Phases Selection. Automation of Electric Systems, 2003, 27(16): 58—61.
[5] 李光琦.电力系统暂态分析.北京:中国电力出版社,1995.
LI Guang-qi. Power System Transient Analysis. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

索南加乐(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事新型继电保护及安全自动装置的教学和科研工作。E-mail: suonan@263.net
张健康(1976—),男,硕士研究生,研究方向为反应故障分量保护及自适应继电保护。E-mail: xjjk2000@sina.com
宋国兵(1972—),男,博士研究生,研究方向为电力系统同杆双回输电线路保护。

Novel Algorithm Based on Fault Type to Extract Fault Components

SUONAN Jia-le¹, ZHANG Jian-kang¹, SONG Guo-bing¹, YANG Chun-ming², MAO Peng²
(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)
(2. Group of Dongfang Electronic Information Technology, Yantai 264001, China)

Abstract: This paper presents a novel method which is capable of extracting fault components at arbitrary time after fault occurrence. From the result of phase selection, this approach firstly calculates the zero sequence and negative sequence fault components at the location where the protection relay is installed. Then it calculates the positive sequence fault components in accordance with the fault boundary condition. Finally, phase fault components are obtained by synthesizing sequence fault components based on the symmetrical components theory. Comparing with the currently available methods that can only obtain the original short-time fault components, this novel algorithm can extract fault components at arbitrary time after fault occurrence. Hence it may be employed for the fault components in back-up protections to improve their performance.

This work is supported by PhD Program Research Foundation of the State Education Ministry (No. 20010698015).

Key words: fault components; positive sequence fault components; symmetrical components; back-up protection