

Current Phase Dynamic Protection Simulation Based on Positive Sequence Fault Component

Lemeng Di, Jijiang Song, Hengfu Liang

School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong
Email: d1m1202@sina.com, songniu@sdut.edu.cn, 478861442@qq.com

Received: Oct. 7th, 2015; accepted: Oct. 26th, 2015; published: Oct. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the superposition principle, this paper gives the positive sequence fault component concept and its characteristics, elaborates the application principle of positive sequence fault component in the current phase longitudinal differential protection, and illustrates the advantages of the protection principle based on positive sequence fault component compared with the traditional one. Using the application of positive sequence fault component in the current phase longitudinal differential protection for an example, through MATLAB simulation verification, it is demonstrated that using positive sequence fault component to achieve the current phase longitudinal differential protection is more sensitive and reliable, and also can overcome the disadvantages of the conventional protection.

Keywords

Positive Sequence Fault Components, Current Phase Longitudinal Differential Protection, MATLAB, Simulation

基于正序故障分量的电流相位差动保护的仿真

狄乐蒙, 宋吉江, 梁恒福

山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博
Email: d1m1202@sina.com, songniu@sdut.edu.cn, 478861442@qq.com

摘要

本文根据叠加原理给出正序故障分量的概念及特点, 详细阐述正序故障分量在电流相位纵联差动保护中的应用原理, 对比说明基于正序故障分量的继电保护原理较传统保护所具有的优点。以正序故障分量在电流相位纵联差动保护中的应用为例, 利用 MATLAB 进行仿真验证, 证明利用正序故障分量实现电流相位纵联差动保护更为灵敏可靠, 还能克服常规保护的许多缺点。

关键词

正序故障分量, 电流相位纵联差动保护, MATLAB, 仿真

1. 引言

电流相位比较式纵联保护是依据两端电流相位的差异来甄别区内、外故障的。在输电线路正常运行及外部故障时, 流过线路两端的电流为同一电流, 在电流参考方向均由母线指向被保护线路的情况下, 两侧电流的相位相反, 即相位差为 180° ; 而在线路内部故障时, 两侧电源均向故障点提供短路电流, 所以, 两端电流的相位差取决于两侧电动势的相位差, 一般不超过 100° 。电流相位纵联差动保护拥有区别电力系统短路和振荡的优秀性能, 只需电流量即可实现保护功能, 可靠简单, 在电力系统的短、中输电线路得到了广泛应用 [1]。随着电力载波技术的发展, 国内外 220 kV 以上输电线路的电流相位纵联差动保护大都采用作为比较量, 具有反应各种短路故障, 节约通道, 简化保护装置的优点。然而, 这种方法仍然存在一下问题:

- 1) 过渡电阻和负荷电流的存在使保护的灵敏度变差, 通过加大 K 值减小负荷电流影响的方法又会使三相短路的灵敏度不足。
- 2) 应用在高压长距离输电线路时易受分布电容电流的影响。
- 3) 操作电流用 $\dot{I}_1 + KI_2$, 起动电流用 I_2 和 I_0 , 不能完全保证灵敏度, 甚至拒动。
- 4) 在单相接地和两相运行发生内部短路时, 保护可能出现拒动。

传统的电流相位纵联差动保护是通过检测故障后的工频量 $\dot{I}_1 + KI_2$ 作为操作电流建立起来的 [2]。被检测的量 $\dot{I}_1 + KI_2$ 包含故障分量和负荷分量。负荷分量属于正常分量, 不具备故障特征, 其结果是给保护的正常动作带来不利影响。故障分量独立于负荷分量之外, 是由故障本身引起的, 因此采用检测故障分量 [3]-[5] 的保护原理具有先天优势。利用故障分量实现电流相位纵联差动保护时, 需要重新选择操作量。操作量选取的主要原则是考虑节约通道, 采用单一的、能反应各种短路故障的电流量为宜。基于正序分量的特点, 采用正序故障分量作为操作量具有显著优势。利用正序故障分量实现电流相位纵联差动保护的优点如下:

- 1) 正序故障分量在任何故障类型下均存在, 不仅能反映各种短路, 具有很高的灵敏度, 还可以独立的判断故障方向, 无需考虑故障选相的问题。
- 2) 正序故障分量不受系统电源电势和负荷电流的影响。
- 3) 正序故障分量电压在系统中性点处为零, 在故障点处最大。
- 4) 正序故障分量滤序器较传统的 $\dot{I}_1 + KI_2$ 构成简单、调试方便。

本文从原理上对正序故障分量实现电流相位纵联差动保护进行分析, 同时结合 Matlab 仿真软件进行

验证 [6]-[8], 为实现这类保护提供理论依据。

2. 线路两端正序故障分量电流的基本特征

保护装置处的故障分量电压、电流可以用故障附加状态进行计算 [9]-[11]。

2.1. 两端电源线路

如 图 1 所示两端电源线路, 当线路 F 点处发生故障时, 根据对称分量理论可得到对应的正序复合序网如 图 2 所示。

图 2 中, Z_{m1} 、 Z_{n1} ——两侧系统正序阻抗;

Z_{l1} ——线路正序阻抗;

α ——故障点百分数;

ΔZ ——故障附加阻抗, 值由故障类型决定。

对 图 2 作等效处理: 在中性点和故障点之间串接两个大小相等相位相反的电压 \dot{U}_F 和 $-\dot{U}_F$ ($-\dot{U}_F$ 为 F 点正常电压), 如 图 3 所示。由叠加原理可将 图 3 所示系统分解为正常运行状态(图略)和 图 4 所示的故障附加状态。

图 4 中, $-\dot{U}_F$ 为故障电动势, 由故障前该点电压及故障边界条件决定, 其单独作用下的状态即为故障附加状态, I_{mg1} 、 I_{ng1} 为正序故障分量电流。求解时, 只需从常规正序分量中减去对应的负荷分量即可。当线路内部故障时, 根据 图 4 所示网络, 线路两端正序故障分量电流的相位关系为:

$$\theta_g = \arg \frac{\dot{I}_{mg1}}{\dot{I}_{ng1}} = \arg \frac{Z_{n1} + (1-\alpha)Z_{l1}}{Z_{m1} + \alpha Z_{l1}} \quad (1)$$

上式表明, 线路内部故障时, 线路两端正序故障分量电流之间的相位关系:

- 1) 仅与故障点两侧正序综合阻抗阻抗角有关, 与负荷电流和线路两端电势无关;
- 2) 故障点过渡电阻的存在只会影响两侧正序故障分量电流的大小, 不会影响其相位关系。

假定在线路内部的 n 端出口处发生短路, 且 $Z_{m1} \ll Z_{l1}$, 则正序故障分量电流 I_{ng1} 和 I_{mg1} 间的最大相角差为:

$$\theta_{g \max} \approx \arg \frac{Z_{n1}}{Z_{l1}} \quad (2)$$

在 220 kV 系统中, $\theta_{g \max} \approx 25^\circ$; 在 330~500 kV 系统中, θ_g 的值一般不会超过 10° , 而在相同情况下, 线路两端 $\dot{I}_1 + KI_2$ 的相位差可高达 $90^\circ \sim 115^\circ$ 。

当线路外部故障时, 根据 图 5 所示网络, 线路两端正序故障分量电流之间的相位关系为:

$$\theta_g = \arg \frac{\dot{I}_{mg1}}{\dot{I}_{ng1}} = \arg \frac{\dot{I}_{mg1}}{-\dot{I}_{mg1}} = 180^\circ \quad (3)$$

以上分析可以看出, 若选择线路两端正序故障分量电流作为操作量, 不仅能正确区分内、外部故障, 还能克服负荷电流和过渡电阻对传统电流相位比较原理影响的缺陷。

2.2. 单端供电系统

单端电源线路上发生内部故障时, 其故障附加状态亦为 图 4 所示, 其中 Z_{n1} 为负荷阻抗。两端正序故障分量电流 I_{mg1} 、 I_{ng1} 间的相位关系亦为式(1)、(2)、(3)所示。

2.3. 过渡电阻的影响

当经过渡电阻短路时, 故障附加状态即为: 在 图 4 的故障点电源 U_F 回路中接入过渡电阻, 此时 ΔZ

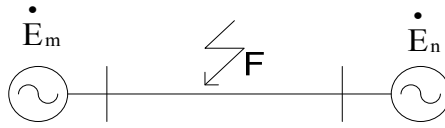


Figure 1. Ends of the power line system diagram
图 1. 两端电源线路系统图

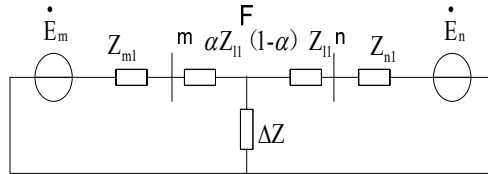


Figure 2. Positive sequence complex sequence network
图 2. 正序复合序网

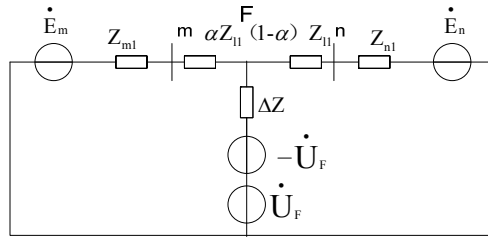


Figure 3. Positive sequence complex sequence network equivalent circuit
图 3. 正序复合序网等值电路图

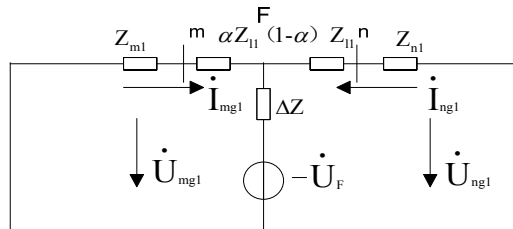


Figure 4. Fault additional state diagram
图 4. 故障附加状态图

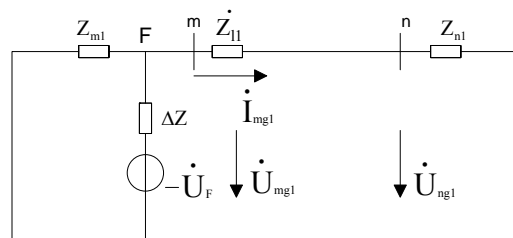


Figure 5. External fault additional state diagram
图 5. 外部故障附加状态图

表示故障附加阻抗与过渡电阻的叠加。不难看出，过渡电阻的接入将影响故障点 F 的正序电流 I_{F1} 的值和保护装设处的正序故障分量电流 I_{mg1} 、 I_{ng1} 的大小及相位，但不影响 I_{mg1} 和 I_{ng1} 的相位差 θ_g ，因为

$$\theta_g = \arg \frac{\dot{i}_{mg1}}{\dot{i}_{ng1}} = \arg \frac{C_m \dot{i}_{F1}}{C_n \dot{i}_{F1}} = \arg \frac{C_m}{C_n} = \arg \frac{Z_{n1} + (1-\alpha)Z_{l1}}{Z_{m1} + \alpha Z_{l1}} \quad (4)$$

式中, C_m 、 C_n 为电流分布系数, 整理显然, 式(4)与式(1)完全相同。

3. 仿真模型的建立

本文利用 MATLAB/Simulink 仿真软件进行仿真实验。模型采用总长 200 km 的 500 kV 的超高压输电线路, 仿真结果真实、清晰的反映了新原理的动作特性。

3.1. 仿真模型的建立

仿真模型采用双端电源系统, 被保护元件为两端电源之间的传输线路。具体仿真模型如图 6 所示。系统频率为 50 Hz, 周期是 0.02 s, 仿真运行持续时间定为 0.3 s, 数据采样间隔 50 μ s。以下各种故障仿真的故障发生时间均设置为 0.22 s, 故障持续时间设置为 0.02 s。

3.2. 500 kV 系统仿真系统参数

下面以电压等级为 500 kV 的两端供电系统为例, 进行 MATLAB 仿真验证。系统示意图见图 1 所示, 电压等级为 500 kV, 输电线长度 $L = 200$ km, 在输电线路 M、N 两端安装电流互感器测量电流。图 1 中线路参数如下: $R_1 = 0.01273 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.9337 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$, $C_1 = 12.74 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$ 。

4. 仿真验证

从故障发生时刻至故障结束, 依次选取 5 个采样点计算 θ_g 的大小。

4.1. 内部故障仿真分析

内部故障发生在距 M 侧 100 km 处, 即线路的 1/2 处, 故障发生时刻为 0.22 s, 持续时间为 0.02 s。以下电流波形图, 蓝色代表 A 相, 红色代表 B 相, 绿色代表 C 相。

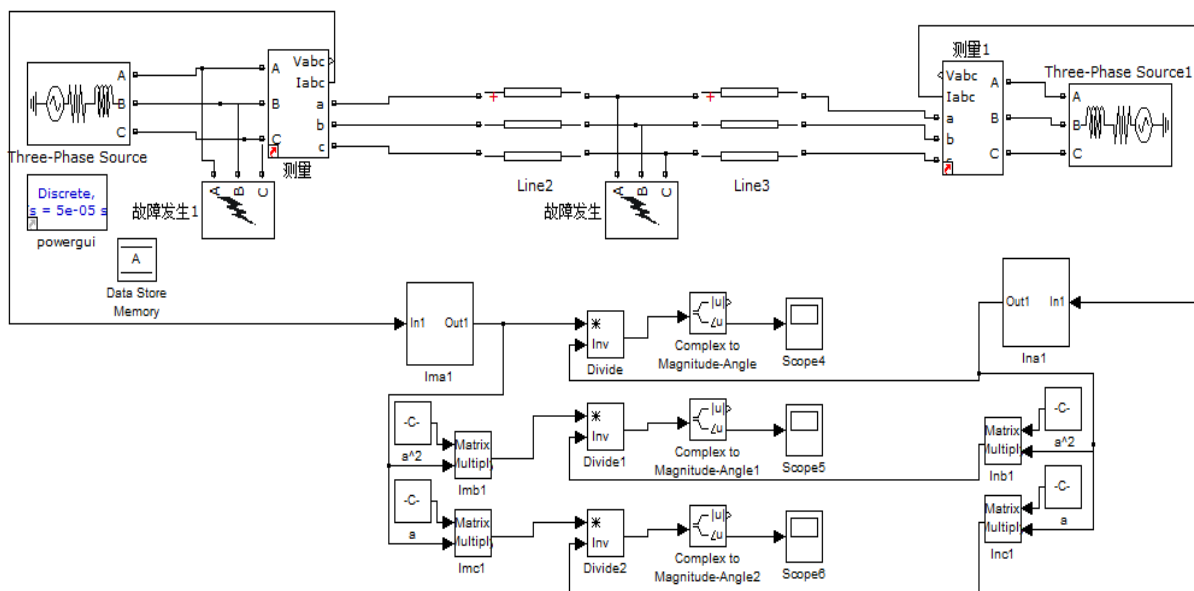


Figure 6. Simulation model
图 6. 仿真模型

4.1.1. 单相短路接地故障

以 A 相接地故障为例，M、N 两点处电流波形如 图 7 和 图 8 所示。

4.1.2. 两相短路接地故障

以 AB 相接地故障为例，M、N 两点处电流波形如 图 9 和 图 10 所示。

4.1.3. 三相短路故障

三相短路故障时，MN 点处电流波形如 图 11 和 图 12 所示。

4.1.4. 两相短路故障

两相短路故障时，MN 点处电流波形如 图 13 和 图 14 所示。

当发生区内故障时，通过不同故障类型对应的不同时刻下的采样值，计算出 θ_g ，列入表 1 中。

在内部故障情况下，由式(2)通过理论分析知，330~500 kV 系统 θ_g 最大不会超过 10° ，系统等级越高， θ_g 值越接近 0° 。显然，表 1 所示：不论发生哪种故障类型，从故障时刻起 θ_g 均近似为 0° ，与理论分析

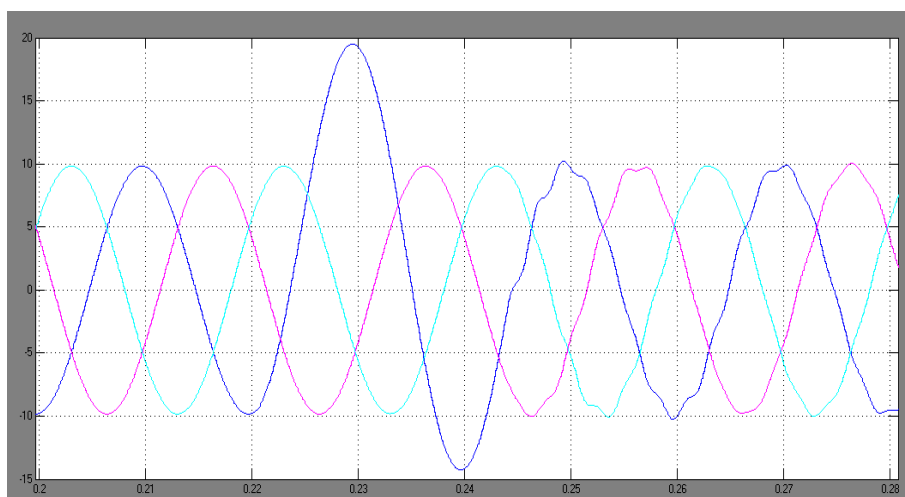


Figure 7. M point of the current waveform
图 7. M 点处电流波形

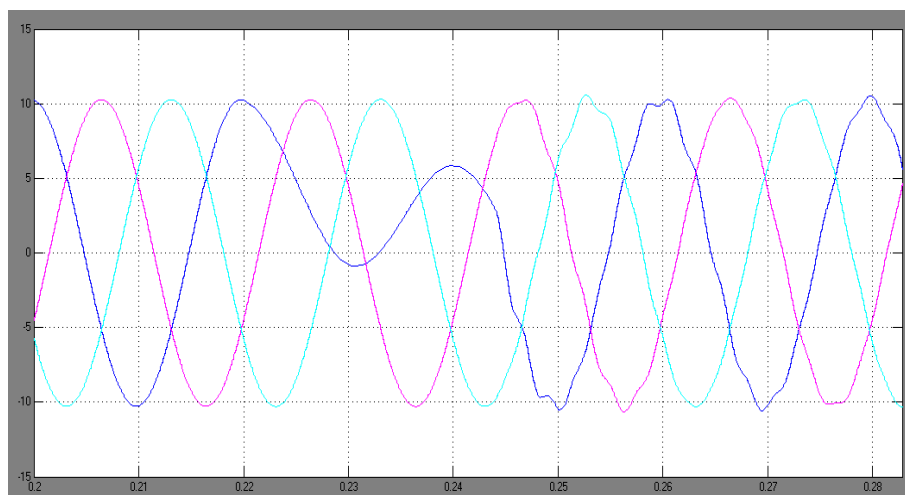


Figure 8. N point of the current waveform
图 8. N 点处电流波形

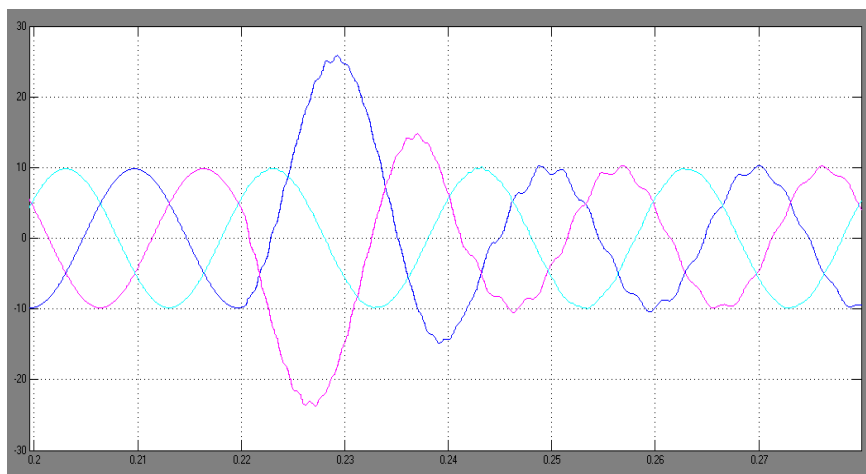


Figure 9. M point of the current waveform
图 9. M 点处电流波形

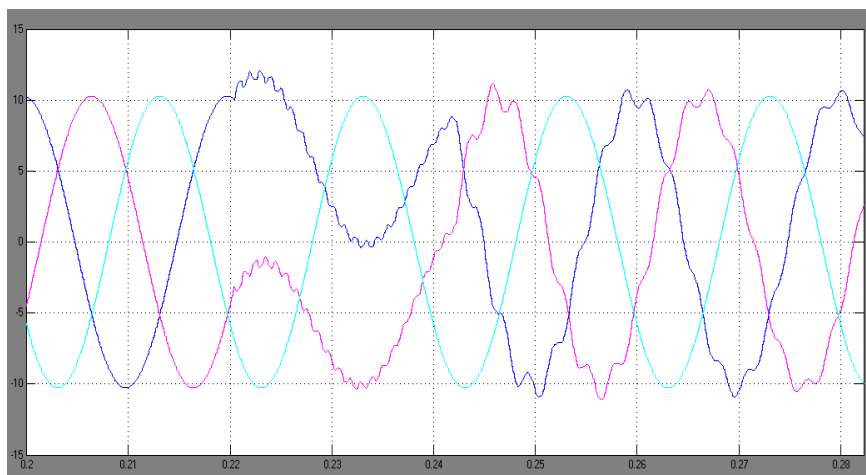


Figure 10. N point of the current waveform
图 10. N 点处电流波形

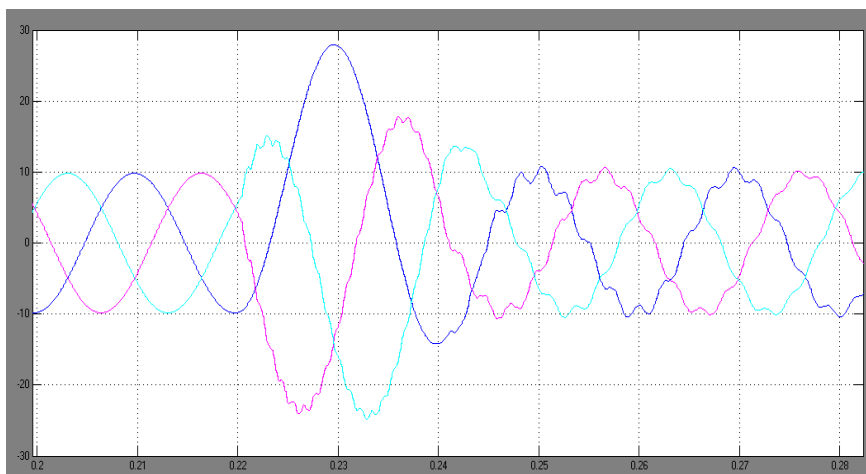


Figure 11. M point of the current waveform
图 11. M 点处电流波形

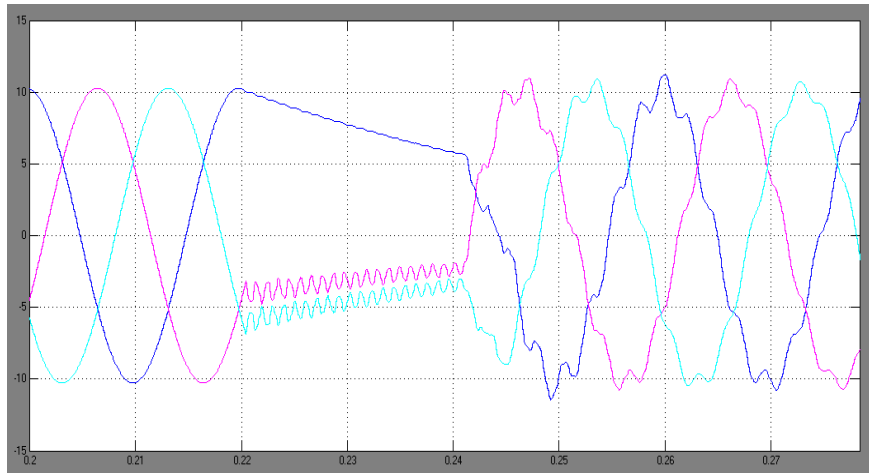


Figure 12. N point of the current waveform

图 12. N 点处电流波形

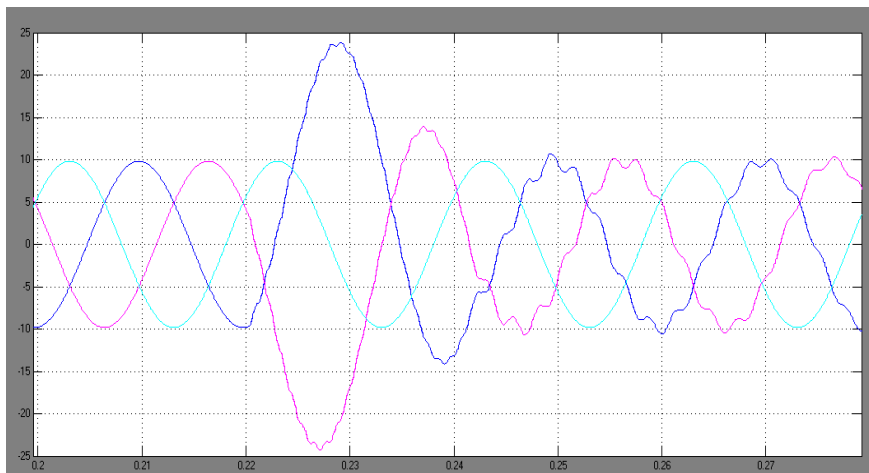


Figure 13. M point of the current waveform

图 13. M 点处电流波形

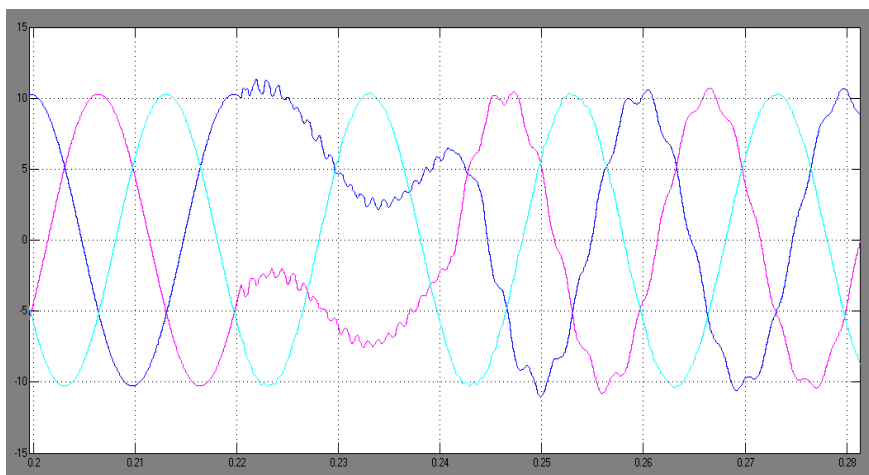


Figure 14. N point of the current waveform

图 14. N 点处电流波形

相符，从而验证了在区内故障时，利用正序故障分量作为操作量的电流相位纵联差动保护的正确性与可靠性。同时，通过以上分析和仿真验证，也能体现出利用正序故障分量判别区内故障从运算和操作角度都更为灵活和准确。

4.2. 外部故障仿真分析

外部故障发生在 M 侧，故障发生时刻为 0.22 s，持续时间为 0.02 s。以下电流波形图，蓝色代表 A 相，红色代表 B 相，绿色代表 C 相。

4.2.1. 单相接地短路故障

以 A 相接地短路为例，M、N 处电流波形如 图 15 和 图 16 所示。

4.2.2. 两相接地短路故障

以 AB 相接地短路为例，M、N 处电流波形如 图 17 和 图 18 所示。

4.2.3. 三相短路故障

发生三相短路故障时，M、N 处电流波形如 图 19 和 图 20 所示。

4.2.4. 两相短路故障

发生两相短路故障时，M、N 处电流波形如 图 21 和 图 22 所示。

Table 1. Zone fault simulation results under different fault types

表 1. 区内故障不同故障类型下的仿真结果

采样时刻	A 相短路接地		AB 两相短路接地		三相短路		AB 两相短路	
	弧度	θ_g	弧度	θ_g	弧度	θ_g	弧度	θ_g
0.22s	-3.1346	179.69°	3.1377	179.63°	3.1401	179.91°	-3.139	179.94°
0.23s	2.6×10^{-5}	0.015°	4.91×10^{-5}	0.00028°	2.07×10^{-6}	0.00001°	5.72×10^{-5}	0.00033°
0.24s	-8.8×10^{-5}	0.0005°	-1.7×10^{-4}	0.010°	-6.9×10^{-5}	0.00039°	-2.5×10^{-4}	0.014°
0.25s	3.2×10^{-4}	0.018°	6.03×10^{-4}	0.036°	9.55×10^{-4}	0.054°	0.0044	0.252°
0.26s	-6.6×10^{-4}	0.037°	-0.005	0.28°	3.8×10^{-4}	0.022°	-0.0012	0.0687°

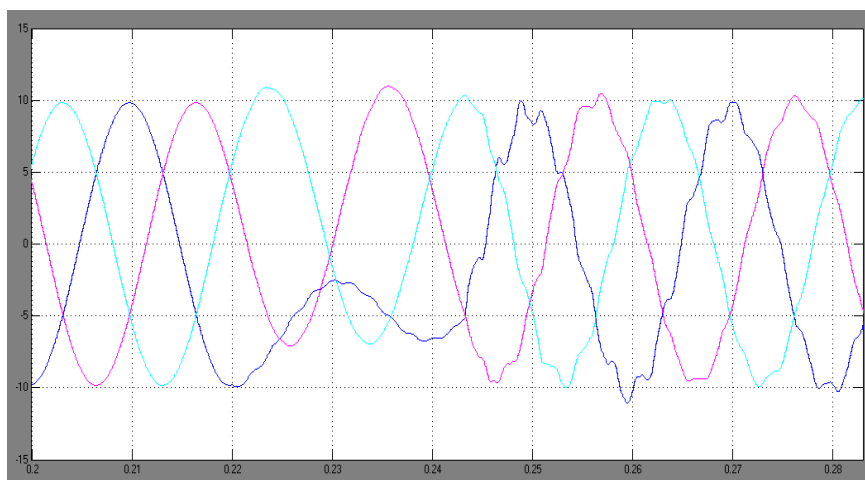


Figure 15. M point of the current waveform

图 15. M 点处电流波形

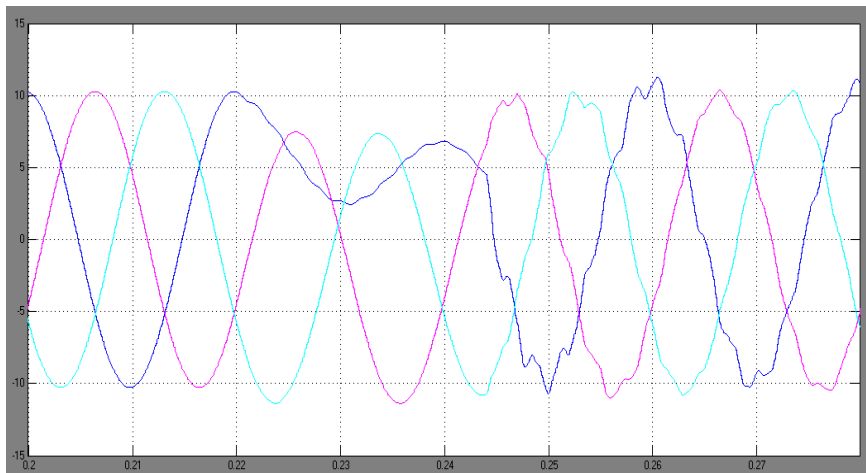


Figure 16. N point of the current waveform

图 16. N 点处电流波形

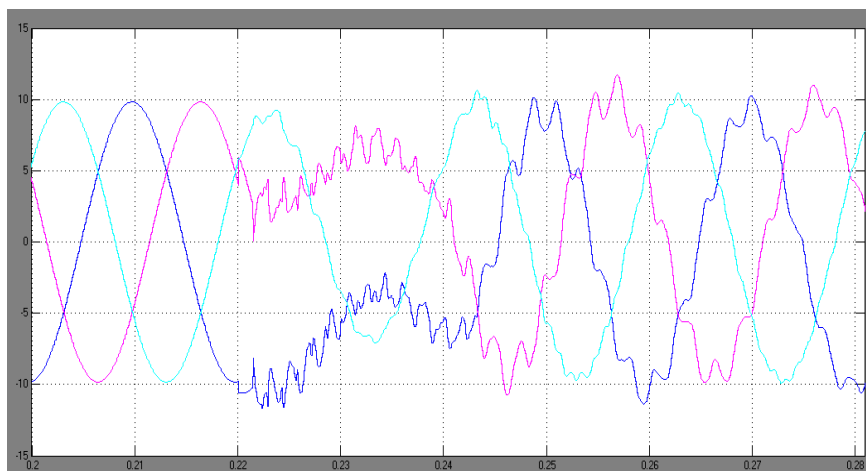


Figure 17. M point of the current waveform

图 17. M 点处电流波形

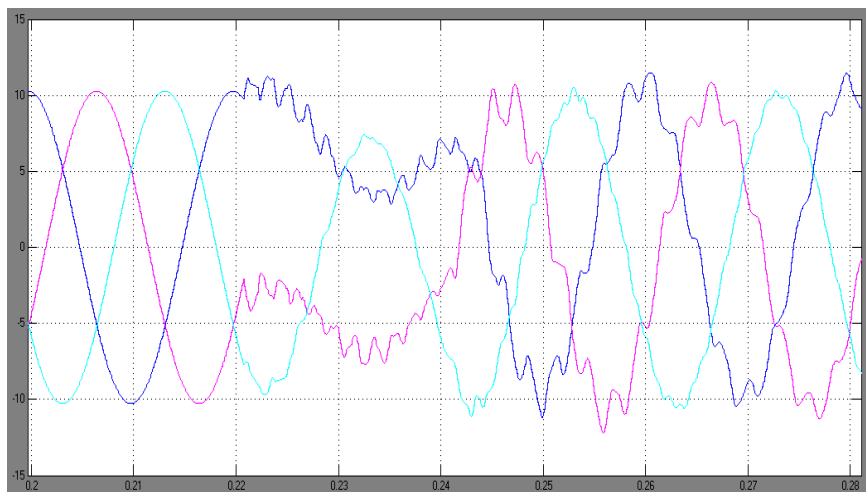


Figure 18. N point of the current waveform

图 18. N 点处电流波形

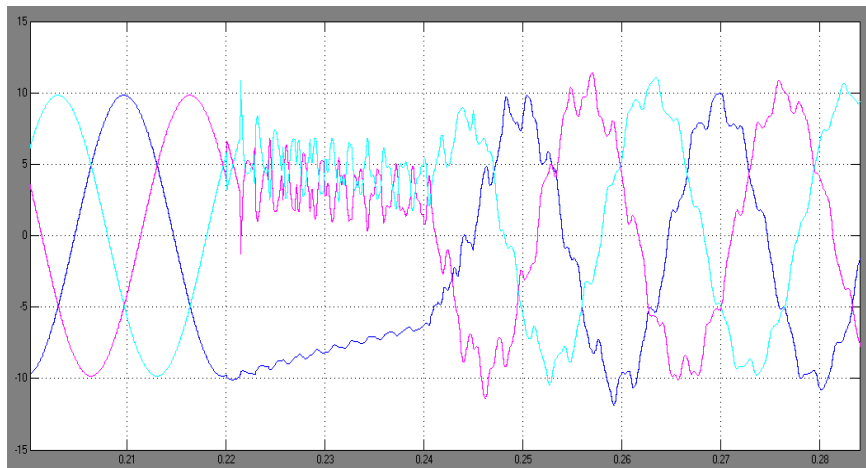


Figure 19. M point of the current waveform
图 19. M 点处电流波形

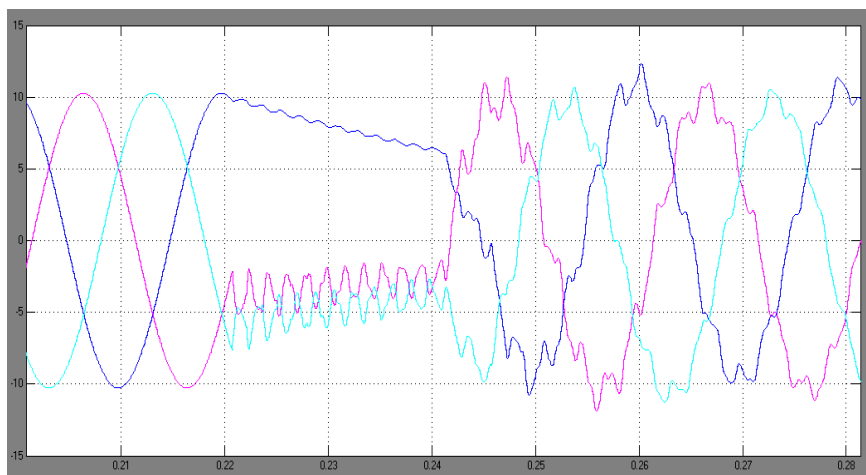


Figure 20. N point of the current waveform
图 20. N 点处电流波形

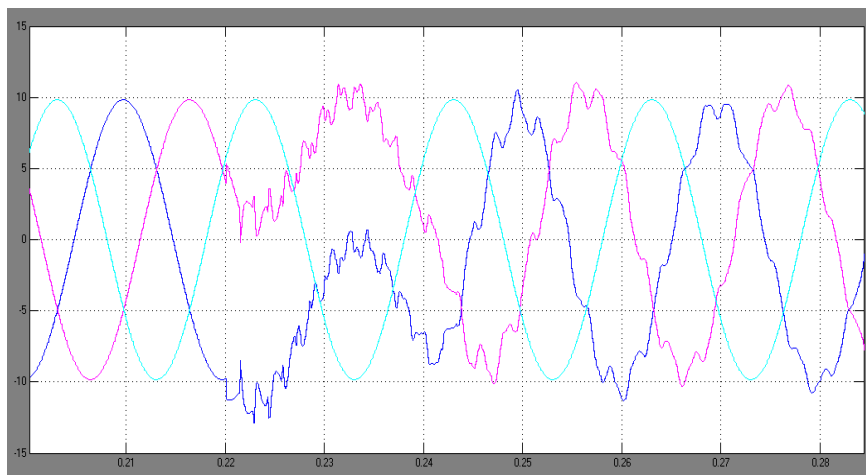


Figure 21. M point of the current waveform
图 21. M 点处电流波形

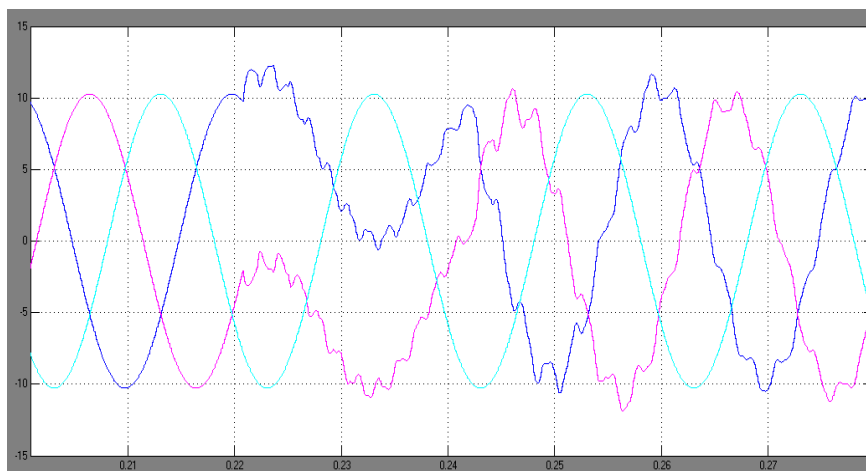


Figure 22. N point of the current waveform

图 22. N 点处电流波形

Table 2. Zone fault simulation results outside under different fault types

表 2. 区外故障不同故障类型下的仿真结果

采样时间	A 相短路接地		AB 两相短路接地		三相接地		AB 两相短路	
	弧度	θ_g	弧度	θ_g	弧度	θ_g	弧度	θ_g
0.22 s	-0.1198	6.867°	-0.9052	51.89°	-1.64	94°	-0.6424	36.82°
0.23 s	3.1416	180°	-3.1316	179.42°	3.136	179.77°	3.1416	180°
0.24 s	-3.1416	180°	-3.034	173.92°	2.51	143.88°	3.1415	180°
0.25 s	1.9×10^{-4}	0.011°	0.0535	3.066°	0.73	41.84°	-9.9×10^{-4}	0.056°
0.26 s	2.5×10^{-4}	0.014°	-0.8158	46.76°	0.42	24.07°	0.0014	0.08°

由图 15~图 22 可以看出, 当系统发生区外故障时, 不论故障类型, M、N 两点处的正序故障分量电流均满足幅值相等、相位相反的特点, 两点处的正序故障分量电流相位差为 180° 。从故障发生时刻 0.22 s 处开始, 依次选取 5 个采样时间点: 0.22 s、0.23 s、0.24 s、0.25 s、0.26 s, 对应的不同故障类型的弧度值, 计算出对应的 θ_g 的大小, 列入表 2 中。

从仿真结果 MN 两点处电流波形可以看出, 不论何种故障类型, MN 两点电流均满足大小相等相位相反, 同时, 由表 2 可以看出, 不论发生何种故障类型, θ_g 值均接近 180° , 以上两点同时验证式(3)的正确性, 即在区外故障时, 利用正序故障分量作为操作量的电流相位纵联差动保护不仅满足可靠性的要求, 其利用正序故障分量判别区外故障从运算和操作角度都更为简便和准确。

5. 结论

仿真结果表明, 利用正序故障分量的电流相位比较式纵联保护是正确可行的, 可以克服常规保护许多缺点。与目前广泛采用 $\dot{I}_1 + KI_2$ 的传统电流相位纵联差动保护相比, 具有一系列优点: 不仅具有不受系统电源电势和负荷电流影响的特点, 能正确反映各种短路, 还具有很高的灵敏度和可靠性, 而且正序故障分量滤序器的构成较 $\dot{I}_1 + KI_2$ 简单, 且调试方便。正序故障分量的应用将大大改善传统电流相位纵联差动保护的性能, 具有广阔的应用前景。

致 谢

在论文即将完成之际,我要特别感谢指导老师宋吉江老师的细心指导。在本论文撰写过程中,宋老师倾注了大量的精力,在定题、构思和材料的收集及研究方法、成文定稿,宋老师给予我悉心的教导和无私的帮助,在此表示真诚地感谢。在论文的写作过程中,也得到了许多同学的宝贵建议,在此一并致以诚挚的谢意。最后,向在百忙中抽出时间对本文进行评审并提出宝贵意见的各位专家表示衷心地感谢!

参考文献 (References)

- [1] 贺家李,李永丽,董新洲,等 (2010) 电力系统继电保护原理(第四版). 中国电力出版社,北京.
- [2] 安艳秋,高厚磊 (2003) 正序故障分量及其在继电保护中的应用. *电力系统及其自动化学报*, **4**, 7-678.
- [3] 索南加乐,张健康,刘辉 (2003) 故障分量提取及故障选相的新方法. *电力系统自动化*, **16**, 58-61.
- [4] Dambhare, S., Soman, S.A. and Chandorkar, M.C. (2009) Adaptive current differential protection schemes for transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **24**, 1832-1841.
<http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028801>
- [5] 索南加乐,张健康,宋国兵 (2005) 基于故障类型的故障分量提取算法. *电力系统自动化*, **3**, 13-16.
- [6] 贾秋玲,袁冬莉,架云凤 (2006) 基于 MATLAB7.X/Simulink 系统仿真分析及设计. 西安工业大学出版社,西安.
- [7] 吴天明,赵新力,刘建存 (2007) MATLAB 电力系统设计与分析. 国防工业出版社,北京.
- [8] 吴天明,谢小竹,彭彬 (2004) MATLAB 电力系统设计与分析. 国防工业出版社,北京.
- [9] 尹项根,陈德树,张哲,等 (1999) 故障分量差动保护. *电力系统自动化*, **11**, 13-17.
- [10] 林湘宁,刘沛 (2004) 全电流与故障分量电流比例差动判据的比较研究. *中国电机工程学报*, **10**, 27-31.
- [11] 李斌,曾红艳,范瑞卿,等 (2011) 基于故障分量的电流相位差动保护. *电力系统自动化*, **3**, 54-58.