

基于正序故障分量的方向元件性能分析

高峰, 高厚磊, 魏然

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 基于正序故障分量的方向继电器是一种新型故障方向判别元件。为全面了解该元件的工作性能, 在 500 kV 输电系统模型上, 对振荡伴随不同类型短路和非全相运行情况下方向元件的动作行为进行仿真计算和分析。仿真结果表明, 基于正序故障分量的方向元件适应于所有故障类型, 不受负荷电流影响, 无电压死区, 灵敏度高。

关键词: 方向元件; 正序分量; 故障分量; 仿真计算

中图分类号: TM588.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)18-0033-05

0 引言

方向元件用于故障方向的判别, 是继电保护装置的重要组成部分。传统方向元件如 90° 接线功率方向元件、负序功率方向元件、零序功率方向元件、相电压补偿式方向元件等虽应用于继电保护装置中, 但都存在各自不同的缺陷^[1], 如: 不能反映所有故障类型、有电压死区、受负荷电流影响等。为克服传统方向元件存在的问题, 人们提出了基于正序故障分量的方向判别原理^[2], 并从理论上给出定性分析。为全面研究分析这种新元件在不同工况下的动作性能, 本文利用计算机辅助分析方法, 在 500 kV 典型系统上对其动作性能进行大量的仿真计算, 并对仿真结果进行分析, 得出了结论。

1 基于正序故障分量的方向判据

根据文献[2], 正序故障分量方向元件的动作判据为:

$$0^\circ < \arg \frac{U_{g1}}{-I_{g1}} < 180^\circ \quad (1)$$

$$180^\circ < \arg \frac{U_{g1}}{-I_{g1}} < 360^\circ \quad (2)$$

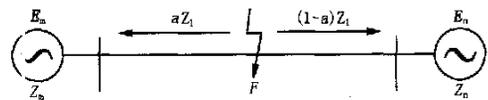
式中: U_{g1} 、 I_{g1} 分别为保护安装处正序故障分量电压和正序故障分量电流。当式(1)满足时判定为正方向故障, 当式(2)满足时判定为反方向故障。

2 计算所用系统、故障类型及数学模型^[3]

计算时采用一等值 500 kV 系统, 其等值图和参数如图 1 所示(阻抗单位: Ω)。

2.1 故障类型

论文主要对以下 5 种有代表性的故障类型计算分析: 振荡伴随单相接地短路; 振荡伴随两相不接地



$e_m = 408 \sin t \text{ kV}$ $e_n = 428 \sin(t + \dots) \text{ kV}$ $Z_{m1} = 104 \angle 85^\circ$
 $Z_{L1} = 106 \angle 75^\circ$ $Z_{n1} = 90 \angle 85^\circ$ $Z_{m2} = Z_{n1}$ $Z_{L2} = Z_{L1}$ $Z_{n2} = Z_{n1}$
 $Z_{m0} = 60 \angle 85^\circ$ $Z_{L0} = 360 \angle 75^\circ$ $Z_{n0} = 200 \angle 85^\circ$

图 1 500 kV 系统图

Fig. 1 Diagram of 500 kV system

短路; 振荡伴随两相接地短路; 振荡伴随三相短路和单相断线。上述故障类型中过渡电阻和断线形式如图 2 所示。计算前需首先建立数学模型, 然后导出不同故障情况下正序故障分量电压和电流的计算公式。

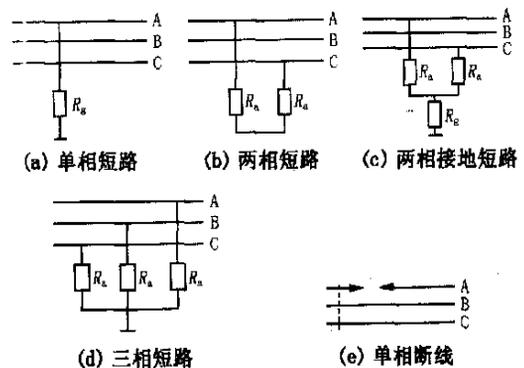


图 2 过渡电阻和断线示意图

Fig. 2 Diagram of transition resistance and broken line

2.2 数学模型的建立

1) 振荡伴随不对称短路

根据基于对称分量法的故障分析理论^[4], 振荡伴随不对称短路这 3 种故障情况下, 其对应的正序复合序网如图 3 所示。

根据故障信息在非故障状态下不存在, 只在设备发生故障时才出现的基本观点, 可用叠加原理来

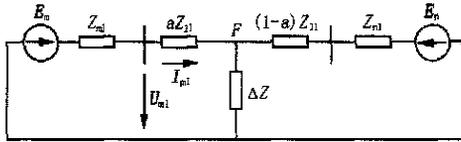


图3 正序复合序网

Fig.3 Compound positive-sequence network

研究故障分量的特征。在线性电路的假设前提下,可以把在网络内发生的故障视为非故障状态与故障附加状态的叠加。因此,可对图3所示状态进行分解。首先用图4(a)等值替代图3,图中 U_F 为故障点在故障前的电压, Z 为等值阻抗,其值与故障类型有关。图4(a)又可以分解为图4(b)和图4(c),前者为故障前正常状态,后者为故障附加状态。故障附加状态下的电压和电流为故障分量。

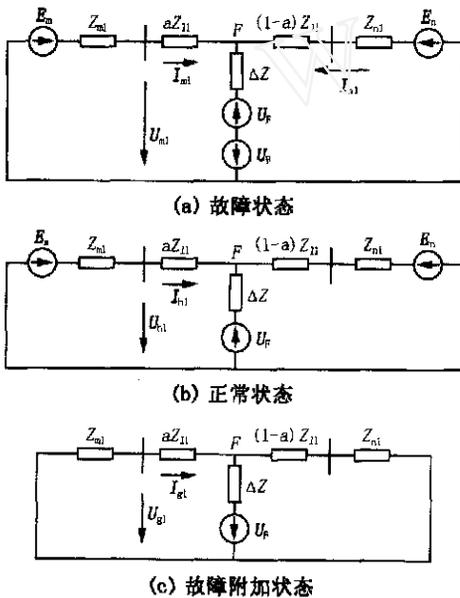


图4 正序复合序网的分解图

Fig.4 Decomposition of compound positive-sequence network

根据图4中的(a)、(b)和(c)可以求出判据中的 I_{g1} 和 U_{g1} 。计算过程与公式如下:

$$E_m = z_1 \cdot I_{m1} + (I_{m1} + I_{n1}) \cdot z \quad (3)$$

$$E_n = z_2 \cdot I_{n1} + (I_{m1} + I_{n1}) \cdot z \quad (4)$$

$$I_{m1} = \frac{E_m \cdot (z_2 + z) - E_n \cdot z}{z_1 \cdot z_2 + (z_1 + z_2) \cdot z} \quad (5)$$

$$I_{h1} = \frac{E_m - E_n}{z_1 + z_2} \quad (6)$$

$$I_{g1} = I_{m1} - I_{h1} \quad (7)$$

$$U_{m1} = E_m - Z_m \cdot I_{m1} \quad (8)$$

$$U_{h1} = E_m - Z_m \cdot I_{h1} \quad (9)$$

$$U_{g1} = U_{m1} - U_{h1} \quad (10)$$

其中: $z_1 = z_{m1} + z_{f1}$; $z_2 = z_{n1} + (1 - a)z_{f1}$; I_{h1} 为

正常状态负荷电流; I_{g1} 为故障附加状态正序电流; 即正序故障分量电流, U_{g1} 为故障附加状态母线电压, 即正序故障分量电压。

从图4(c)不难看出, $\arg \frac{U_{g1}}{-I_{g1}}$ 等于 z_{m1} 的幅角, 能很好地满足式(1)给定的判别条件。这表明, 正方向故障时故障分量电压与电流的相位差只与母线背后系统阻抗有关, 由于过渡电阻只存在于故障支路中, 因此这种判别与过渡电阻没有关系。反方向故障时(假定故障点在 M 母线背后), 则 $\arg \frac{U_{g1}}{-I_{g1}}$ 等于 $-(z_{n1} + z_{f1})$ 的幅角, 能很好地满足式(2)给定的判别条件, 且不受过渡电阻影响。由于取用的是故障分量, 因此从理论上讲, 正、反向故障判别均不受负荷电流的影响。

2) 振荡伴随三相短路

假设在图1所示系统的 F 点发生三相短路, 根据边界条件可画出如图5所示复合序网。

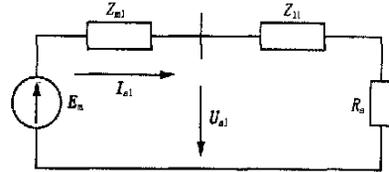


图5 三相短路复合序网

Fig.5 Compound-sequence network of three-phase short circuit

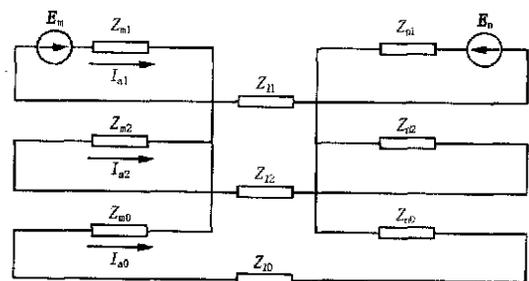


图6 单相断线的复合序网图

Fig.6 Compound-sequence network of single-phase disconnection fault

由图5可得三相短路的计算公式为

$$I_{a1} = \frac{E_m}{Z_{m1} + Z_{f1} + R_a} \quad (11)$$

$$U_{a1} = E_m - Z_{m1} I_{a1} \quad (12)$$

$$I_{ag} = I_{a1} - I_{h1} \quad (13)$$

$$U_{ag} = U_{a1} - U_{h1} \quad (14)$$

U_{ag} 、 I_{ag} 即为所求三相短路时的正序故障分量电压和电流。

3) 单相断线

单相断线故障的复合序网图如图 6 所示。同样可将故障状态分解为正常状态与故障附加状态,得:

$$I_{m1} = \frac{E_m - E_n}{Z_1 \Sigma + \frac{Z_2 \Sigma \cdot Z_0 \Sigma}{Z_2 \Sigma + Z_0 \Sigma}} \quad (15)$$

$$I_{h1} = \frac{E_m - E_n}{Z_1 \Sigma} \quad (16)$$

其余各量的计算与振荡伴随不对称短路时相同。

发生反向故障时计算所用系统、故障类型与正向故障时类似,因此对于反向故障在此不再赘述。

3 仿真结果

根据已经建立的 5 种故障类型的数学模型和方向元件的动作判据,用 TC 编制了仿真计算程序。计算时假定方向元件装在 M 侧,在 M 母线上发生短路视为反向故障。表 1~3 给出计算结果,其中代表 U_{g1} 领先 $-I_{g1}$ 的相角。

表 1 不同振荡角度下正向故障过渡电阻较小时的计算结果

Tab. 1 Calculation results of positive fault with little transition resistance in different oscillations
($R_g=5$, $R_a=5$, $\alpha=0.5$, 电压单位:kV,电流单位:kA)

故障类型	计算值						
	0°	60°	120°	180°	240°	300°	
单相 接地	U_{g1}	69 187.64°	60 219.98°	35 254.65°	4.9 9.975°	35 120.71°	60 155.31°
	$-I_{g1}$	0.7 102.64°	0.6 134.98°	0.3 169.65°	0.05 - 75.03°	0.3 35.71°	0.58 70.31°
		85.000 000°	84.999 998°	85.000 031°	85.000 191°	85.000 014°	84.999 992°
两相 短路	U_{g1}	137 187.1°	119 219.5°	69 254.14°	9.71 9.46°	70 120.2°	119 154.8°
	$-I_{g1}$	1.3 102.1°	1.1 134.5°	0.7 169.14°	0.09 - 75.54°	0.7 35.2°	1.15 69.8°
		84.999 999°	85.000 002°	85.000 013°	85.000 142°	85.000 004°	84.999 993°
两相接 地短路	U_{g1}	164 188.5°	142 220.8°	82 255.5°	11.6 10.83°	83 121.56°	143 156.2°
	$-I_{g1}$	1.6 103.5°	1.4 135.8°	0.79 170.5°	0.11 - 74.17°	0.8 36.56°	1.37 71.2°
		84.999 995°	84.999 998°	85.000 008°	84.999 993°	85.000 007°	84.999 993°
三相短路	U_{ag}	277 185.1°	244 217.6°	147 252.2°	23 - 16.59°	132 117.3°	236 152.6°
	$-I_{ag}$	2.7 100.1°	2.4 132.6°	1.4 167.2°	0.2 258.4°	1.27 32.3°	2.3 67.59°
		85.000 003°	85.000 002°	85.000 002°	85.000 005°	85.000 004°	84.999 995°
单相断线	U_{g1}	3.1 190.7°	64 - 51.66°	111 - 20.1°	129 10.72°	111.4 41.5°	64.4 73.08°
	$-I_{g1}$	0.03 105.7°	0.6 223.34°	1.1 254.92°	1.2 285.72°	1.07 316.5°	0.6 348.08°
		85.000 008°	84.999 993°	84.999 985°	85.000 004°	85.000 002°	85.000 012°

表 2 不同振荡角度下正向故障过渡电阻较大时的计算结果

Tab. 2 Calculation results of positive fault with large transition resistance in different oscillations
($R_g=100$, $R_a=100$, $\alpha=0.5$, 电压单位:kV 电流单位:kA)

故障类型	计算值						
	0°	60°	120°	180°	240°	300°	
单相接地	U_{g1}	46 225.16°	39 257.5°	23 - 67.83°	3.2 47.5°	23 158.23°	40 192.83°
	$-I_{g1}$	0.4 140.16°	0.4 172.5°	0.2 207.17°	0.03 - 37.5°	0.2 73.23°	0.4 107.83°
		85.000 002°	84.999 984°	85.000 011°	84.999 920°	85.000 038°	84.999 997°
两相短路	U_{g1}	78 231.25°	67 263.59°	39 - 61.75°	5.5 53.58°	39 164.31°	68 198.92°
	$-I_{g1}$	0.8 146.25°	0.7 178.59°	0.4 213.25°	0.05 - 31.42°	0.4 79.31°	0.7 113.92°
		84.999 998°	84.999 985°	85.000 021°	84.999 981°	85.000 002°	85.000 000°
两相接 地短路	U_{g1}	81 234.98°	70 267.32°	41 - 58.02°	5.7 57.31°	41 168.04°	70 202.65°
	$-I_{g1}$	0.8 149.98°	0.7 182.32°	0.4 216.98°	0.06 - 27.69°	0.4 83.04°	0.7 117.65°
		84.999 995°	84.999 985°	85.000 038°	85.000 176°	84.999 993°	84.999 995°
三相短路	U_{ag}	221 212.5°	264 246.8°	238 - 79.18°	150 - 42.1°	37 39.51°	121 173.1°
	$-I_{ag}$	2.1 127.5°	2.5 161.8°	2.3 195.82°	1.4 232.88°	0.4 - 45.49°	1.16 88.1°
		85.000 002°	84.999 995°	84.999 995°	85.000 000°	85.000 005°	84.999 996°

表3 不同振荡角度下反向故障的计算结果

Tab.3 Calculation results of reverse faults in different oscillations

($R_g = 5$, $R_a = 5$, $\omega = 0.5$, 电压单位 :kV 电流单位 :kA)

故障类型	计算值												
	0°		60°		120°		180°		240°		300°		
单相接地	U_{gl}	126	184.2°	110	197.9°	79	201.18°	62	178.3°	87	162.15°	117	169.5°
	$-I_{gl}$	0.65	-75.4°	0.57	-61.7°	0.4	-58.41°	0.3	-81.34°	0.5	262.56°	0.6	270°
		-100.409	203°	-100.409	199°	-100.409	150°	-100.409	086°	-100.409	158°	-100.409	179°
两相短路	U_{gl}	177	184.2°	155	197.9°	110	201.2°	87	178.3°	122	162.2°	163	169.6°
	$-I_{gl}$	0.9	-75.4°	0.79	-61.6°	0.56	-58.4°	0.45	-81.3°	0.62	262.6°	0.84	-90°
		-100.409	201°	-100.409	198°	-100.409	184°	-100.409	158°	-100.409	183°	-100.409	183°
两相接 地短路	U_{gl}	241	187.3°	211	201.1°	150	204.4°	119	181.4°	166	165.3°	222	172.7°
	$-I_{gl}$	1.2	-72.3°	1.08	-58.5°	0.77	-55.2°	0.6	-78.16°	0.85	265.7°	1.14	-86.9°
		-100.409	197°	-100.409	489°	-100.409	181°	-100.409	168°	-100.409	182°	-100.409	192°
三相短路	U_{gl}	405	185.9°	321	204.9°	176	208.7°	142	155.5°	285	147.8°	392	164.9°
	$-I_{gl}$	2.08	-73.7°	1.6	-54.7°	0.9	-50.89°	0.73	255.9°	1.46	248.2°	2	265.3°
		-100.409	2°	-100.409	199°	-100.409	194°	-100.409	16°	-100.409	185°	-100.409	192°

4 其它需要考虑的问题

1) 振荡过程中频率发生偏移

故障分量的提取是以故障状态的量减去正常状态下的量取得的,即:

$$S_g = S_m - S_h = S_m \phi - S_h \quad (17)$$

这里, S_m 为故障状态的电压或电流, S_h 为正常状态的电压或电流, S_g 为故障分量电压或电流。如果在振荡伴随故障情况下发生频偏,则有:

$$S_g = S_m - S_h = (S_m + m) (\phi +) - (S_h + h) (+) \quad (18)$$

这里, S_m 为发生频偏后故障状态的电压或电流, S_h 为发生频偏后无故障状态下的电压或电流, S_g 为发生频偏后的故障分量电压或电流。发生频偏时,由于数据窗长度没有改变,使得提取的故障分量电压或电流在幅值和相位上都会发生变化。但由于频率偏大或偏小时, m 与 h 、 ϕ 与 θ 在变化的方向上是一致的,故不会对 S_g 产生大的影响。另外,故障方向判别时是取用故障分量电压和电流的相位差,且允许变化范围达 180°(正常情况下在 90°附近),因此可以说,只要偏频不是特别严重,不会对故障方向的正确判别产生影响。

2) 转换性故障

发生转换性故障时,第二次故障后故障分量的提取比较复杂,本文对该情况暂不作考虑。

3) 强、弱电系统

对于一端系统容量很大、另一端容量小(系统阻抗大)的强弱电系统,线路发生故障时,弱电侧的故障分量电压和电流水平与强侧相比会很小;但只要故障分量存在,不管其大小,故障分量电压与电流

的相位关系不会错,因此对故障方向的判别不会产生影响。当然,若故障分量的量值小于方向判别元件的最小功率值(对数字式元件,其值甚小),将导致不正确判别。

4) 应用中可能出现的问题

当被保护线路正序阻抗很大(线路较长),方向元件装设端系统阻抗很小(该端为大系统)且故障发生在正方向保护区末端时,由于保护安装处正序故障分量电压数值很小,幅角难以确定,会导致方向元件出现拒动。该问题可通过一个合理选取的阻抗(其阻抗角与系统阻抗的阻抗角相同)对故障分量电压进行补偿解决。

5 结论

根据上述仿真计算结果和分析,可以得到如下结论:

1) 振荡伴随各种正、反向短路发生时,以式(1)和(2)为动作判据的正序故障分量方向元件能够正确动作,其方向性明确,灵敏度高。正向故障时,正序故障分量电压和电流间的相位关系完全由背后系统阻抗的阻抗角决定。

2) 故障点的过渡阻抗的大小对故障方向的判别没有影响。过渡电阻较大时对正序故障分量电压和电流的幅值有一定影响。

3) 系统振荡对于故障方向的判断没有影响。

4) 出现非全相运行(单相断线)情况时,发生系统振荡也能够准确地进行方向判断。

5) 在两侧系统摆角较大时(如 180°附近),电压、电流幅值降低,会对方向元件的灵敏度产生一定影响。

通过以上分析可以看出,基于正序故障分量的

方向元件原理比较简单,方向判别不受故障类型、过渡电阻、负荷电流、系统振荡等因素的影响,无电压死区,能够克服传统方向元件存在的缺陷,在方向性保护中有着良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 张志竟,黄玉铮(ZHANG Zhi-jing, HUANG Yu-zheng). 电力系统继电保护原理与运行(The Theory and Operation of Power System Protective Relaying) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),1995.
- [2] 葛耀中(GE Yao-zhong). 新型继电保护与故障测距原理与技术(New Types of Protective Relaying and Fault Location with Their Theory and Techniques) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press),1996.
- [3] 高厚磊,文锋,王广延,等(GAO Hou-lei, WEN Feng,

WANG Guang-yan, et al). 两种多相补偿阻抗继电器动作性能的数字分析(Computer-aided Analysis for Performance of Two Types Distance Relays with Multi-phase Compensation) [J]. 继电器(Relay),1995,23(3):3-9.

- [4] 刘万顺(LIU Wan-shun). 电力系统故障分析(Power System Fault Analysis) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),1998.

收稿日期: 2003-12-19; 修回日期: 2004-03-12

作者简介:

高峰(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为继电保护; E-mail: d1983gf@mail.sdu.edu.cn

高厚磊(1963-),男,教授,博导,主要从事电力系统继电保护、GPS技术在电力系统的应用以及电网实时动态行为监测等方面的研究工作;

魏然(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电网实时动态行为监测。

Analysis of the directional relay performance based on the positive-sequence fault components

GAO Feng, GAO Hou-lei, WEI Ran

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The positive-sequence fault components based directional relay is a new type of unit for recognizing fault direction. To understand the relay's performance comprehensively, this paper carries on the simulation calculation and analysis under the conditions of different fault types accompanied with power oscillation and incomplete phase operation on a 500 kV transmission line model. The simulation results show that this new directional relay can adapt to all transmission line fault types. Moreover, its behavior is not affected by load current, and it has no voltage dead zone and owns a high sensitivity.

Key words: directional relay; positive-sequence component; fault component; simulation calculation

(上接第 32 页 continued from page 32)

(1. College of Information and Electricity, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The research on over-voltage protection of TCSC is mostly about how to protect TCSC and MOV under fault condition as well as how to reduce the energy consumption level. Consequently, the protection can both meet the requirement of economy and benefit the transient stability of system. Based on the relationship between protection mode and the transient stability, this paper proposes the control strategy of over-voltage protection, and studies the start mode of protective bypass. The simulation result is testified by A-NENR software in this paper.

Key words: over-voltage protection; energy consumption; start mode; ARENE simulation