

方向继电器在 T 接线路中的性能分析

袁荣湘, 陈德树, 文明皓, 陈卫, 李岩, 张哲

(华中理工大学电力系, 湖北 武汉 430074)

【摘要】 对 110kV 的 T 接线路及其所在系统进行了较详细的数字模拟, 并对零序分量方向继电器、故障分量阻抗继电器、正序故障分量方向继电器和正序与负序综合故障分量方向继电器在 T 接线路中应用的性能进行了仿真计算与分析。从计算与分析中可以看出, T 接线路继电保护有它的独特之处, 普通线路中性能良好的保护不一定适合 T 接线路。随着电力系统的不断发展, 对 T 接线路继电保护进行更加深入的研究, 具有十分重要的理论和实践意义。

【关键词】 T 接线路; 数字仿真; 方向继电器

1 引言

在高压电网中, 随着电力系统的发展, 特别是城市电网的发展, 将会有越来越多的三端或三端以上的多端输电线路。多端输电线路的出现, 给继电保护的设计与运行带来了许多不利的影响。本文对零序分量方向继电器、故障分量阻抗继电器、正序故障分量方向继电器和正序与负序综合故障分量方向继电器在 T 接线路中应用的性能进行了仿真计算与分析, 结果表明, T 接线路的继电保护与普通线路继电保护存在着一定的差别, 对 T 接线路在许多情况下均不能照搬普通线路中的继电保护方案, 必须通过比较深入的研究和针对具体线路及其所在系统的结构与参数进行认真、细致的仿真计算与分析之后, 才能确定 T 接线路的继电保护方案。

2 系统参数与计算方法

仿真系统结构如图 1 所示, 其中输电线路参数取自我国某电网 110kV 线路, 系统等值参数亦与该实际线路所在系统近似相等。线路与线路为平行双回线路, 在线路的中点有一 T 接线路, 其长度为线路的一半, 单位长度参数与线路完全相同。T 侧接有负荷变压器, 其变比为: $n_r = 110\text{kV}/35\text{kV}$, 其接线方式为: Y/△-11。具体参数与仿真计算方法

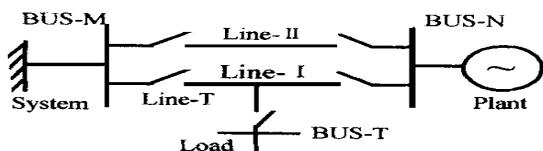


图 1 仿真计算系统模型

见文献^[1]。

3 常用方向/阻抗继电器的基本算法

在最近的继电保护技术中, 常用的方向继电器主要有: 零序分量方向继电器、故障分量阻抗继电器、正序故障分量方向继电器和故障分量方向继电器 (即正序与负序综合故障分量方向继电器) 等, 其详尽的原理阐述与性能分析见文献^{[3],[4],[5],[6]}, 在此仅给出在仿真计算中应用的基本算式及其简单说明。

3.1 零序分量方向继电器^[4]

该继电器是通过比较零序电压和零序电流的相位差值来判断故障的方向, 属于正弦型判据, 其动作方程为: $\sin(\dot{U}_0 / \dot{I}_0) > 0$, 亦即: $180^\circ < \text{ARG}(\dot{U}_0 / \dot{I}_0) < 360^\circ$, 式中: \dot{U}_0 为零序电压, \dot{I}_0 为零序电流。

3.2 故障分量阻抗继电器^[3,5]

故障分量阻抗继电器有两种形式, 一种是相位变化式的, 它直接测量故障前后补偿电压的相位变化, 一种是幅值变化式的, 它直接反应补偿电压的幅值变化。幅值变化式的故障分量阻抗继电器比相位变化式的故障分量阻抗继电器对过渡电阻有更强的反应能力, 在微机保护中实现起来更简单。本文仿真计算幅值变化式的故障分量阻抗继电器的性能, 其动作条件为: $\dot{U} > \dot{U}_0$, 式中 \dot{U} 为补偿电压 \dot{U} 的故障分量 \dot{U} 的幅值, \dot{U}_0 为故障前工作电压的幅值, 在仿真计算中, 近似地取其标称值。

由于故障分量阻抗继电器共有 6 个, 它们的补偿电压将具有不同的形式, 本文以 A 相接地故障分量阻抗继电器为例进行仿真计算, 它的补偿电压为: $\dot{U}_A = \dot{U}_A - (\dot{I}_A + k3\dot{I}_0) Z_{set}$, 补偿电压的故障分量

为: $\dot{U}_A = \dot{U}_A - (\dot{I}_A + k3 \dot{I}_0) Z_{set}$, 式中 Z_{set} 为整定阻抗, \dot{U}_A 、 \dot{I}_A 和 \dot{I}_0 分别为 A 相电压、电流和零序电流, \dot{U}_A 、 \dot{I}_A 和 \dot{I}_0 分别为 A 相电压、电流和零序电流的故障分量, 若不考虑故障前的三相不平衡, 则 \dot{I}_0 与 \dot{I}_0 相等, \dot{U}_A 、 \dot{U}_A 为 A 相补偿电压及其故障分量。

3.3 正序故障分量方向继电器^[6]

该继电器是根据正序电压的故障分量和正序电流的故障分量的相位差值来判断故障的方向, 属于正弦型判据, 其动作条件为: $\sin(\dot{U}_1 / \dot{I}_1) > 0$, 或为: $180^\circ < \text{ARG}(\dot{U}_1 / \dot{I}_1) < 360^\circ$

式中 \dot{U}_1 为正序电压的故障分量, \dot{I}_1 为正序电流的故障分量。

3.4 故障分量方向继电器^[3]

该继电器是测量各相间的电压、电流故障分量的相位, 设有正向和反向两个元件, 正向元件的动作条件为: $90^\circ < \text{ARG}[(\dot{U}_{12} - \dot{I}_{12} Z_{com}) / \dot{I}_{12} Z_d] < 270^\circ$;

反向元件的动作条件为: $90^\circ < \text{ARG}(-\dot{U}_{12} / \dot{I}_{12} Z_d) < 270^\circ$ 。

式中 Z_d 为模拟阻抗, 在仿真计算中取为: $Z_d = e^{j90^\circ}$, \dot{U}_{12} 、 \dot{I}_{12} 为故障时电压、电流的变化量, 该变化量中仅包括正序、负序综合分量, 不含零序分量, Z_{com} 为补偿阻抗, 它是供在长线路、大电源的场合下提高正向方向元件的电压灵敏度之用, 由于被计算系统不是大电源, 也不是长线路, 故取 $Z_{com} = 0$, 此时正向元件的动作条件与反向元件的动作条件完全一致, 故在仿真计算中只需取一种来计算, 不妨取正向元件的动作条件, 即: $180^\circ < \text{ARG}(\dot{U}_{12} / \dot{I}_{12}) < 360^\circ$

表 1 是在 T 接线路及其所连接的母线发生单相接地故障(此处是指 A 相接地故障)时, 该线路三侧继电器中的各零序故障分量电压、电流相位差值的计算结果。从该表中可以看出, 对于零序电压、电流的相位差值不能完全正确反映内部故障的方向(见表中第 2、5、8 列标有 * 号的数据), 当 M 侧母线出口处故障时, N 侧的零序电压、电流的相位差值则错误地判断了内部故障的方向, 将使保护拒动, 产生错误判断的原因见文献^[1]。对于母线故障, 同样存在上述问题, 即 M 侧母线故障时, N 侧继电器错误判断故障方向(见表中第 2、5、8 列标有 * 号的数据), 但此时不会使保护误动, 因为故障母线侧(此即 M 侧)的方向继电器能正确反应故障方向而闭锁保护, 其它情况各继电器均能作出正确判断。该继电器抗

过渡电阻能力强, 几乎不受过渡电阻的影响。

4 仿真计算结果

表 1 $I_d^{(1)}$ (设为 A 相) 时零序分量方向继电器的性能
(单位为度, 相位为电压超前电流之值, 下同)

故障点	$R_f = 0$			$R_f = 50$			$R_f = 100$		
	P_{M0}	P_{N0}	P_{T0}	P_{M0}	P_{N0}	P_{T0}	P_{M0}	P_{N0}	P_{T0}
LINE1	258.1	72.1*	-95.7	-115.8	-303*	-112.8	-116.2	-303*	-113.0
LINE2	258.6	58.8*	-95.7	-115.5	44.69*	-112.5	-115.9	44.59*	-112.8
LINE3	259.0	269.1	264.3	-115.2	-103.3	-112.3	-115.6	-103.9	-112.6
LINE4	259.5	260.1	264.3	-115.0	-113.7	-112.1	-115.4	-114.2	-112.4
LINE5	259.9	257.6	264.3	-114.8	-116.3	-111.9	-115.2	-116.8	-112.2
LINE6	260.3	256.0	264.3	-114.4	-117.6	-111.9	-114.8	-118.0	-112.2
LINE7	260.9	254.9	264.3	-113.7	-118.4	-112.0	-114.1	-118.9	-112.3
LINE8	262.1	254.0	264.3	-112.3	-119.1	-112.0	-112.7	-119.5	-112.4
LINE9	265.5	253.3	264.3	-108.4	-119.6	-112.1	-108.9	-120.1	-112.4
TLNE1	260.1	257.7	264.2	-115.1	-116.7	-111.6	-115.5	-117.1	-112.0
TLNE2	260.2	257.9	264.2	-115.5	-117.1	-111.4	-115.9	-117.5	-111.8
TLNE3	260.2	258.0	264.2	-116.1	-117.7	-111.3	-116.4	-118.0	-111.7
TLNE4	-99.8	258.1	264.1	-116.9	-118.6	-111.1	-117.1	-118.8	-111.5
BUS M	71.4	72.1*	-95.6	-303.0	-303*	-112.8	-303.3	-303*	-113.0
BUS N	265.5	70.7	264.3	-108.4	-302.5	-112.1	-108.9	-302.9	-112.4
BUS T	-99.8	258.0	73.1	-116.9	-118.6	-302.6	-117.1	-118.8	-57.2

表 2 $I_d^{(1)}$ (设为 A 相) 时故障分量阻抗继电器的性能

(故障前电压幅值在此近似取相电压的标称值 $4.57 * 14.53 \text{ kV}$, 表中数据单位为 kV, 且均需乘以比例系数 14.53)

故障点	$R_f = 0$			$R_f = 50$			$R_f = 100$		
	U_M	U_N	U_T	U_M	U_N	U_T	U_M	U_N	U_T
LINE1	11.08	3.86*	6.55	1.01*	0.31*	0.62*	0.51*	0.12*	0.32*
LINE2	10.08	4.33*	6.77	0.94*	0.36*	0.65*	0.48*	0.15*	0.33*
LINE3	9.16	4.81	7.02	0.86*	0.41*	0.68*	0.44*	0.17*	0.35*
LINE4	8.31	5.31	7.32	0.79*	0.46*	0.71*	0.40*	0.19*	0.36*
LINE5	7.52	5.85	7.67	0.72*	0.50*	0.74*	0.37*	0.22*	0.38*
LINE6	6.85	6.40	7.36	0.68*	0.57*	0.73*	0.34*	0.25*	0.37*
LINE7	6.23	6.96	7.11	0.63*	0.63*	0.72*	0.32*	0.28*	0.37*
LINE8	5.67	7.53	6.89	0.58*	0.69*	0.71*	0.30*	0.32*	0.36*
LINE9	5.14	8.12	6.71	0.54*	0.76*	0.69*	0.27*	0.35*	0.35*
TLNE1	7.17	5.63	8.04	0.69*	0.49*	0.78*	0.35*	0.21*	0.40*
TLNE2	6.84	5.42	8.44	0.67*	0.47*	0.82*	0.34*	0.20*	0.42*
TLNE3	6.53	5.24	8.87	0.64*	0.45*	0.86*	0.33*	0.19*	0.44*
TLNE4	6.25	5.07	9.32	0.62*	0.44*	0.90*	0.31*	0.19*	0.46*
BUS M	2.22	3.86*	6.55	0.24	0.31*	0.62*	0.12	0.12*	0.32*
BUS N	5.14	0.95	6.71	0.54*	0.04	0.69*	0.27*	0.05*	0.35*
BUS T	6.25	5.07	0.98	0.62*	0.44*	0.14	0.31*	0.19*	0.07

表 2 是在 T 接线路及其所连接的母线发生单相接地故障(此处是指 A 相接地故障)时, 该线路三侧的幅值变化式故障分量阻抗继电器的 A 相补偿电压故障分量幅值的计算结果。从该表中可以看出, 当没有过渡电阻的影响时, 该继电器存在与零序故障分量方向继电器同样的问题, 即 M 侧母线及其出口附近故障时, N 侧继电器错误判断故障方向(见表中第 2 列标有 * 号的数据), 其它情况各继电器均能作出正确判断。当过渡电阻增大时, 该继电器则不

能正确判断故障的方向,因此,该继电器抗过渡电阻能力不强。

表3 $I_d^{(1)}$ (设为A相)时正序故障分量方向继电器的性能
(单位为度)

故障点	$R_f = 0$			$R_f = 50$			$R_f = 100$		
	P_{M1}	P_{N1}	P_{T1}	P_{M1}	P_{N1}	P_{T1}	P_{M1}	P_{N1}	P_{T1}
LINE1	264.7	267.9	207.6	-111.3	-107.6	-157.9	-111.6	-108.0	-157.8
LINE2	264.7	266.0	207.6	-111.2	-109.7	-158.0	-111.6	-110.1	-157.8
LINE3	264.8	265.4	207.6	-111.1	-110.5	-158.0	-111.5	-110.8	-157.8
LINE4	264.8	265.0	207.6	-111.1	-110.8	-158.0	-111.4	-111.2	-157.8
LINE5	264.9	264.7	207.6	-111.0	-111.1	-158.0	-111.3	-111.5	-157.8
LINE6	265.0	264.5	207.6	-110.9	-111.3	-158.0	-111.2	-111.6	-157.8
LINE7	265.1	264.4	207.5	-110.7	-111.4	-158.0	-111.1	-111.8	-157.8
LINE8	265.2	264.3	207.5	-110.6	-111.5	-158.0	-111.0	-111.9	-157.8
LINE9	265.4	264.2	207.5	-110.4	-111.6	-158.0	-110.8	-112.0	-157.8
TLNE1	264.9	264.7	207.6	-111.0	-111.1	-158.0	-111.3	-111.5	-157.8
TLNE2	264.9	264.7	207.7	-111.0	-111.1	-158.0	-111.3	-111.4	-157.8
TLNE3	264.9	264.7	207.7	-111.0	-111.1	-158.0	-111.3	-111.4	-157.9
TLNE4	264.9	264.7	207.8	-110.9	-111.1	-158.0	-111.3	-111.4	-157.9
BUS M	76.9	267.9	207.6	-299.4	-107.6	-157.9	-299.7	-108.0	-157.8
BUS N	265.4	83.0	207.5	-110.4	-292.9	-158.0	-110.8	-293.3	-157.8
BUS T	264.9	264.7	83.8	-110.9	-111.1	-291.8	-111.3	-111.4	-292.1

表4 $I_d^{(1)}$ (设为A相)时故障分量方向继电器的性能
(单位为度)

故障点	$R_f = 0$			$R_f = 50$			$R_f = 100$		
	P_{M12}	P_{N12}	P_{T12}	P_{M12}	P_{N12}	P_{T12}	P_{M12}	P_{N12}	P_{T12}
LINE1	264.7	267.9	207.6	-111.3	-107.6	-157.9	-111.6	-108.0	-157.8
LINE2	264.7	266.0	207.6	-111.2	-109.7	-158.0	-111.6	-110.1	-157.8
LINE3	264.8	265.4	207.6	-111.1	-110.5	-158.0	-111.5	-110.8	-157.8
LINE4	264.8	265.0	207.6	-111.1	-110.8	-158.0	-111.4	-111.2	-157.8
LINE5	264.9	264.7	207.6	-111.0	-111.1	-158.0	-111.3	-111.5	-157.8
LINE6	265.0	264.5	207.6	-110.9	-111.3	-158.0	-111.2	-111.6	-157.8
LINE7	265.1	264.4	207.5	-110.7	-111.4	-158.0	-111.1	-111.8	-157.8
LINE8	265.2	264.3	207.5	-110.6	-111.5	-158.0	-111.0	-111.9	-157.8
LINE9	265.4	264.2	207.5	-110.4	-111.6	-158.0	-110.8	-112.0	-157.8
TLNE1	264.9	264.7	207.6	-111.0	-111.1	-158.0	-111.3	-111.5	-157.8
TLNE2	264.9	264.7	207.7	-111.0	-111.1	-158.0	-111.3	-111.4	-157.8
TLNE3	264.9	264.7	207.7	-111.0	-111.1	-158.0	-111.3	-111.4	-157.9
TLNE4	264.9	264.7	207.8	-110.9	-111.1	-158.0	-111.3	-111.4	-157.9
BUS M	76.9	267.9	207.6	-299.4	-107.6	-157.9	-299.7	-108.0	-157.8
BUS N	265.4	83.0	207.5	-110.4	-292.9	-158.0	-110.8	-293.3	-157.8
BUS T	264.9	264.7	83.8	-110.9	-111.1	-291.8	-111.3	-111.4	-292.1

注1:表中的故障点是指发生故障的位置,其中LINE1至LINE9是指将线路等分成八段,从M侧到N侧依次排列的点,TLNE1至TLNE4则是将T接线路等分成四段,从T接点到T侧依次排列的点。 P_{M0} 、 P_{M1} 、 P_{M12} 、 P_{N0} 、 P_{N1} 、 P_{N12} 、 P_{T0} 、 P_{T1} 和 P_{T12} 分别表示M侧、N侧、T侧的零序故障分量方向继电器、正序故障分量方向继电器、综合故障分量方向继电器对应的故障分量电压、电流相位差值, U_M 、 U_N 和 U_T 分别表示M侧、N侧、T侧的故障分量阻抗继电器中的补偿电压故障分量的幅值,其具体计算表达式见3中相应的动作条件方程式, R_f 为接地故障时的过渡电阻值。

注2:对于无电源的T侧,由于在模拟计算中增加了负荷阻抗 $Z_{load} = 1000 + j500$,从而在故障时亦有微小的工频变化量正序、负序电流,因此在表4和表5中也可以计算其相位差。在实际应用中却不能据此判断故障的方向,因为如此微小的电流在考虑了干扰的

影响和测量的误差之后将近似为零,不能正确测量其相位差。

表3是在T接线路及其所连接的母线发生单相接地故障(此处是指A相接地故障)时,该线路三侧继电器中的各正序故障分量电压、电流的相位差值的计算结果。从该表中可以看出,对于各种内外部故障,正序故障分量方向继电器均能正确判断故障的方向,但应该注意的是,在某种系统结构与参数条件下,同样存在与零序故障分量方向继电器一样错误判断故障方向的可能性^[1]。该继电器抗过渡电阻能力强,几乎不受过渡电阻的影响。

表4是在T接线路及其所连接的母线发生单相接地故障(此处是指A相接地故障)时,该线路三侧继电器中的各正序与负序综合故障分量电压、电流相位差值的计算结果。由于是单相接地故障,其相位差值与表4中的结果一样,但从原理上分析,该继电器将能改善不对称故障时电压元件、电流元件灵敏度,其它性能与正序故障分量继电器相同。

在上面的计算中只考虑了单相接地故障,对序分量原理的方向继电器,两相接地故障,其相位差值计算结果基本一致,两相短路和三相短路只是零序故障分量方向继电器不能反映,其余计算结果差别不大。对于故障分量阻抗继电器,不同的故障类型对应于不同的阻抗元件,其计算结果没有实质区别。

综上所述,不同的继电器在T接线路中的应用有着不同的表现,抗过渡电阻的能力也不一样。在本文所计算的模拟系统中,正序故障分量方向继电器和正序、负序综合故障分量方向继电器在各种情况下均能正确反映内部故障的方向,而零序故障分量方向继电器则可能出现错误的判断,这三者均具有较强的抗过渡电阻的能力。通过分析可以知道,零序故障分量方向继电器出现这种情况在T接线路中是可能的,合理的,而且如果T接线路满足一定的条件,则正序故障分量方向继电器和负序故障分量方向继电器也可能发生错误判断的情况。故障分量阻抗继电器的抗过渡电阻能力较差,没有过渡电阻影响时,它也和序故障分量方向继电器一样(接地阻抗元件对应零序故障分量方向继电器,相间阻抗元件对应正序故障分量方向继电器),存在错误判断内部故障方向的情况。对于无电源端的方向继电器还应该考虑被比较相位的电压、电流量的幅值,如果某个量幅值太小,方向继电器将错误地判断故障的方向。

5 结论

本文通过对零序故障分量方向继电器、故障分

量阻抗继电器、正序故障分量方向继电器和正、负序综合故障分量方向继电器在 T 接线路中应用的性能进行了仿真计算与分析可知, T 接线路的继电保护有它的独特之处, 普通线路中性能良好的保护不一定适合 T 接线路。随着电力系统的不断发展, 特别是城市电网的发展, T 接线路将进一步增加, 对 T 接线路继电保护的研究, 还有待进一步深入和加强。

[参考文献]

- [1] 袁荣湘等. T 接线路故障仿真计算与分析. 电力自动化设备, 1999, (1).
- [2] Dommel H W 著, 李永庄等译. 电力系统电磁暂态计算理论. 水利电力出版社, 1990.
- [3] 中华人民共和国电力行业标准 DL/T 625—1997. LFP—

900 系列超高压线路成套快速保护装置检验规程.

- [4] 陈德树主编. 计算机继电保护原理与技术. 水利电力出版社, 1992. 11.
- [5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术 (第二版). 水利电力出版社, 1995. 8.
- [6] 葛耀中著. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安交通大学出版社, 1996. 8.

收稿日期: 1999—01—20

作者简介: 袁荣湘 (1965 -), 男, 讲师, 博士生, 从事电力系统保护与控制的科研教学工作; 陈德树 (1930 -), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护与自动化的科研教学工作。

SIMULATION AND ANALYSES OF THE PERFORMANCE OF DIRECTIONAL RELAYS ON TEED LINE

YUAN Rong-xiang, CHEN De-shu, WEN Ming-hao, CHEN Wei, LI Yan, ZHANG Zhe
(Huazhong University of Science and Technology, 430072 Wuhan, China)

Abstract In this paper, a digital simulation on teed line and its system is presented. The performances of relays on teed transmission line, which include the zero-sequence directional relay, the fault component impedance relay, the directional relay using positive-sequence fault component and the directional relay using composite positive-sequence and negative-sequence fault components, are computed and analyzed. It demonstrates that the protection on teed line has their itself features and the well-behaved protection on normal line may inappropriate on teed line. With the development of power system, especially the development of urban power network, the more teed lines will be come forth, the more research work on protection of teed line is very important to theory and practice.

Key words teed line; digital simulation; directional relaying

(上接第 8 页)

- [3] Sun D I, Bruce Ashley, Brain Brewer, Art Hughes, William F Tinney. Optimal Power Flow by Newton Approach. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems. 1984, PAS-103 (10): 2864-2880.
- [4] Sergio Granville. Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods. IEEE Trans on Power Systems. 1994, 9(1): 136-146.
- [5] Momoh J A, Guo S X, Ogbuobiri E C, Adapa R. The Quadratic Interior Point Method Solving Power System Optimization Problems. IEEE Trans on Power Systems. 1994, 9(3):

1327-1336.

- [6] 王宪荣. 潮流与最优潮流的研究. 哈尔滨工业大学博士论文, 1990. 1-40.
- [7] 王永刚, 韩学山, 王宪荣, 柳焯. 动态优化潮流. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 195-198.

收稿日期: 1999—03—30

作者简介: 王永刚 (1970 -), 男, 博士, 主要从事电力系统自动化研究; 柳焯 (1926 -), 男, 教授, 博导, 从事电力系统稳定的研究。

THE RESEARCH ON THE PRACTICAL STRATEGY OF THE OPTIMAL LOAD FLOW

WANG Yong-gang¹, LIU Zhuo²

(1. XI Electric Corporation, 461000 Xuchang, China; 2. Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract Based on the theoretical analysis and the practical procedure of the Optimal Power Flow, this paper presents the practical strategy of OPF. The software which has been used on a large system in China proves that the strategy is an effective tool on the optimal analysis of power system.

Key words Newton; OPF; practical