

负序方向元件在同杆双回线中的动作行为分析

郭 强, 尚海一

(宁波电业局, 浙江 宁波 315000)

摘要: 由于同杆双回线自身的特殊性, 使得在常规线路保护中有着广泛应用的负序方向元件的性能受到影响。从同杆双回线的故障特点出发, 利用六序故障分量法分析了负序方向元件在同杆双回线各种典型故障情况下的动作行为。结果表明, 在发生 I BC II BG, I BC II CG 跨线故障时, II 回线两侧的负序方向元件有可能拒动; 在发生 I A II BCG, I ABC II BCG, I ABC II AG 跨线故障时, 两回线路总有一回线路两侧的负序方向元件拒动。利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建同杆双回线仿真模型, 仿真结果也验证了这一结论。

关键词: 同杆双回线; 负序方向元件; 跨线故障; 拒动

中图分类号: TM 773

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0083-05

0 引言

近年来, 同杆双回线在输电网中得到了越来越广泛的应用^[1-4]。负序方向纵联保护由于不受负荷电流、系统振荡、平行线零序互感及过渡电阻的影响, 在超高压输电线路中得到了广泛的应用^[5-8]。但是由于同杆双回线自身的特殊性, 尤其是发生跨线故障时, 负序方向元件的性能是否受到影响, 本文利用六序分量法对其进行全面的分析。

1 系统模型及分析方法

为了便于分析, 一般都假设同杆双回线参数完全对称, 即每回线的相间互阻抗均为 Z_m ; 两回线的线间互阻抗均为 Z'_m 。于是可用图 1 所示模型表示同杆双回线^[9-12]。

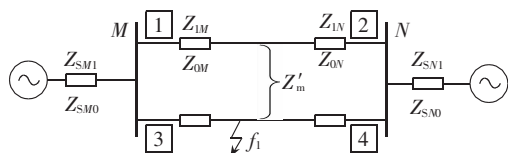


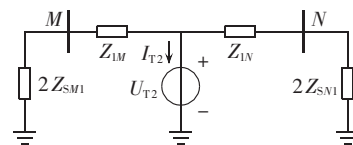
图 1 系统模型图

Fig.1 System model

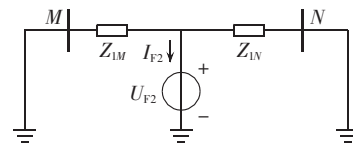
图 1 中, Z_{SM1} 、 Z_{SM0} 、 Z_{SN1} 、 Z_{SN0} 分别为 M 侧和 N 侧等效正序、零序系统阻抗; Z_{1M} 、 Z_{0M} 、 Z_{1N} 及 Z_{0N} 为在故障点 M 侧和 N 侧的正序、零序线路阻抗; Z'_m 为两回线间的互阻抗。

文献[11]提出利用六序故障分量法分析同杆双回线故障。其实质是消去互感, 基本思想是将双回线作为一个整体, 通过矩阵的相似变换分解为 6 个相互独立的序分量。然后列出故障边界条件, 构建六序故障序网进行计算。

对于图 1 所示的系统, 其六序故障分量负序序网如图 2 所示^[11-15]。



(a) 同相负序网



(b) 反相负序网

图 2 六序故障分量负序序网图

Fig.2 Negative sequence chart of six sequence fault components

图 2 中, I_{T2} 、 I_{F2} 、 U_{T2} 、 U_{F2} 分别为故障点流出的负序同相、反相电流和电压。

同杆双回线的 120 种故障, 根据故障时六序分量的相位特征, 可归结为 13 个具有独立相位特征的故障类型, 包含接地故障与不接地故障。本文的分析将主要针对这 13 种故障进行, 在各种故障情况下的故障特征负序相位关系如表 1 所示^[11]。

表 1 同杆双回线故障特征负序相位关系表

Tab.1 Relationship between negative sequence phase and fault of double lines on same tower

序号	故障类型	$\arg \frac{I_{F2}}{I_{T2}}$	序号	故障类型	$\arg \frac{I_{F2}}{I_{T2}}$
1	I AG	0°	6	I A II BC	180°
2	I BC	0°	7	I AB II BC	-90°
3	I B II C	-90°	8	I ABC II BC	180°
4	I BC II B	30°	9	I ABC II A	180°
5	I BC II C	-30°			

注: 对于 I A II AG、I BC II BCG 故障, 由于不存在反相分量, 故表中不讨论。

负序方向元件通过比较负序电压与负序电流相位关系决定动作与否^[5-6]。设流过图 1 中保护 1、保护 3 的负序电流分别为 I_{12} 、 I_{12} , 母线流向线路方向为正方向, M 侧母线上的负序电压为 U_2 。于是:

$$I_{12} = C_{M12}I_{T2} + C_{MF2}I_{F2} \quad (1)$$

$$I_{112} = C_{M12}I_{T2} - C_{MF2}I_{F2} \quad (2)$$

其中, I_{T2} 、 I_{F2} 分别为故障点流出的负序同相、反相分量电流; C_{M12} 、 C_{MF2} 分别为负序同相、反相序网 M 侧的电流分配系数, 如果忽略各阻抗的电阻分量, 仅考虑各阻抗的电抗分量, 则 C_{M12} 、 C_{MF2} 均为实数。

又根据图 2, $U_{F2} = 0$, 于是:

$$U_2 = U_{T2} + U_{F2} = U_{T2} = -2Z_{SM}C_{M12}I_{T2} \quad (3)$$

式(1)(2)(3)为分析负序方向元件动作行为的基础。作为定性分析, 一般地, 负序电流超前负序电压 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时, 判断为正方向故障; 反之, 判断为反方向故障。

2 各种典型故障情况下负序方向元件动作行为

2.1 I AG 故障, I BC 故障

根据故障分析的基本知识可知, 在 I AG 故障和 I BC 故障时, $I_{T2} = I_{F2}$, 于是:

$$I_{12} = C_{M12}I_{T2} + C_{MF2}I_{F2} = (C_{M12} + C_{MF2})I_{T2}$$

$$I_{112} = C_{M12}I_{T2} - C_{MF2}I_{F2} = (C_{M12} - C_{MF2})I_{T2}$$

又由式(3), 于是可以定性做出负序电压、电流的相位关系如图 3 所示。

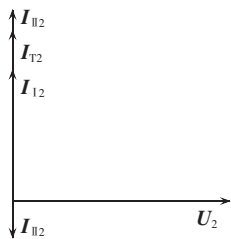


图 3 I AG, I BC 故障负序电压电流相位图
Fig.3 Phase charts of negative voltage and current for I AG, I BC

由图 3 可知, 保护 1 的负序电流超前负序电压 90° , 负序方向元件判断为正方向; 同理, 保护 2 的负序方向元件也判断为正方向。由式(2)可知, 当 $C_{M12} > C_{MF2}$ 时, 保护 3 的负序电流相位超前负序电压 90° , 负序方向元件判为正方向, 但此时保护 4 的负序方向元件判为反方向; 当 $C_{M12} < C_{MF2}$ 时, 保护 3 的负序电流相位滞后负序电压 90° , 负序方向元件判为反方向, 而保护 4 则判为正方向; 当 $C_{M12} = C_{MF2}$ 时, 流过保护 3 的负序电流为 0。

2.2 I B1C 故障, I AB1BC 故障

根据表 1 可知, I B1C 故障时, 有 $\arg(I_{F2}/I_{T2}) = -90^\circ$, 结合式(1)~(3)可定性做出其相位图如图 4 所示。

由图 4 可知, 发生 I B1C 故障时, I 回线的负序电流超前负序电压 $0^\circ \sim 90^\circ$, II 回线的负序电流超前负序电压 $90^\circ \sim 180^\circ$, 根据负序方向元件动作判据, 保护 1 和保护 3 均可以判断为正方向。同理, 保护 2 和保护 4 也可以判断为正方向。

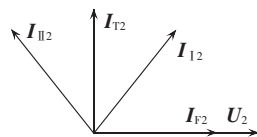


图 4 I B1C 故障负序电压电流相位图
Fig.4 Phase chart of negative voltage and current for I B1C

2.3 I BC1B 故障

根据表 1 可以知道, 当发生 I BC1B 故障时, 有 $\arg(I_{F2}/I_{T2}) = 30^\circ$, 结合式(1)~(3)可定性做出其相位图如图 5 所示。

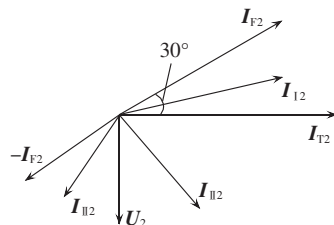


图 5 I BC1B 故障负序电压电流相位图
Fig.5 Phase chart of negative voltage and current for I BC1B

由图 5 可知, 发生 I BC1B 故障时, I 回线保护 1 负序电流超前负序电压 $90^\circ \sim 120^\circ$, 保护 1 的负序方向元件可以正确动作; II 回线的负序电流与负序电压的相位关系较复杂, 有时负序电流超前负序电压 $0^\circ \sim 90^\circ$, 此时保护 3 的负序方向元件判断为正方向, 能够正确动作, 有时负序电流滞后负序电压 $0^\circ \sim 60^\circ$, 此时负序方向元件判为反方向, 保护 3 不能够正确动作。换言之, 发生 I BC1B 故障时, I 回线的负序方向元件能够正确动作, 而 II 回线的负序方向元件有拒动的可能性。至于是否拒动, 取决于故障点的位置以及系统参数。事实上, 根据图 5 可知, 只有当 $C_{MF2}|I_{F2}| < \frac{\sqrt{3}}{2}C_{M12}|I_{T2}|$ 时, 保护 3 才会拒动。

2.4 I BC1C 故障

这种故障情况与 I BC1B 故障相似, 根据表 1 可知, 当发生 I BC1C 故障时, $\arg(I_{F2}/I_{T2}) = -30^\circ$, 结合式(1)~(3)可定性做出其相位图如图 6 所示。

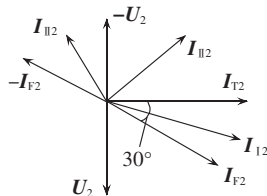


图 6 I BC1C 故障负序电压电流相位图
Fig.6 Phase chart of negative voltage and current for I BC1C

由图 6 可知, 发生 I BC1C 故障时, I 回线保护 1 负序电流超前负序电压 $60^\circ \sim 90^\circ$, 保护 1 的负序方向元件可以正确动作; II 回线的负序电流与负序电压的相位关系比较复杂, 有时负序电流超前负序电压

90°~180°,此时保护 3 的负序方向元件判断为正方向,能正确动作,有时负序电流滞后负序电压 120°~180°,此时负序方向元件判为反方向,保护 3 不能够正确动作。换言之,发生 I BC II C 故障时,Ⅰ回线的负序方向元件能够正确动作,而Ⅱ回线的负序方向元件有拒动的可能性。至于是否拒动,取决于故障点的位置以及系统参数。事实上,根据向量图 6 可知,只有当

$$C_{MF2}|I_{F2}| < \frac{\sqrt{3}}{2}C_{MT2}|I_{T2}|$$
时,保护 3 才会拒动。

2.5 I A II BC 故障, I ABC II BC 故障, I ABC II A 故障

由表 1 可知,当发生 I A II BC 故障时, $\arg(I_{F2}/I_{T2})=180^\circ$,即 I_{F2} 和 I_{T2} 反相。由于反序负序阻抗 Z_{F2} 小于同序负序阻抗 Z_{T2} ,故 $I_{T2} < I_{F2}$,至于 C_{MT2} 及 C_{MF2} 孰大孰小,还需要结合故障点位置判断。于是,做出相位图如图 7 所示。

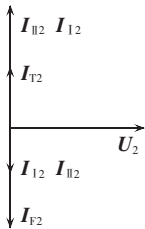


图 7 I A II BC, I ABC II BC, I ABC II A 故障负序电流、电压相位图

Fig.7 Phase charts of negative voltage and current for I A II BC, I ABC II BC, I ABC II A

从图 7 可以看出,由于 $C_{MT2}I_{T2}$ 及 $C_{MF2}I_{F2}$ 大小的不确定性,当 $C_{MF2}|I_{F2}| < C_{MT2}|I_{T2}|$ 时, I_{I2} 超前 U_2 90°, I_{II2} 的相位滞后 U_2 90°,故保护 1 的负序方向元件判断为正方向,保护 3 的负序方向元件则能够判断为反方向。而此时,保护 2 的负序方向元件判断为反方向,保护 4 的负序方向元件则能够判断为正方向。反之,亦是如此。换言之,每回线路两侧的方向元件有一侧判断为正方向,另一侧判断为反方向。

2.6 I A II A 故障, I BC II BC 故障

由于这种故障对双回线而言是对称的,不存在反序分量。

2.7 I ABC 故障, I ABC II ABC 故障

由于该故障是对称故障,理论上不产生负序分量,分析负序方向元件也就没有意义,故不考虑这种情况。

2.8 反方向故障

若在反方向发生不对称故障,负序网络从故障点看双回线相当于并联成一回线,负序电流总是滞后负序电压,故对于每一回线,负序方向元件都判为反方向,保护能够可靠不动作。

3 仿真实验

3.1 仿真模型

为了验证上述分析的正确性,利用 PSCAD/

EMTDC 构建同杆双回线仿真模型,模型接线图如图 8 所示。

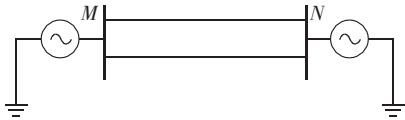


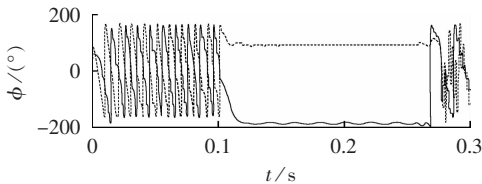
图 8 仿真模型接线图

Fig.8 Wiring diagram of simulation model

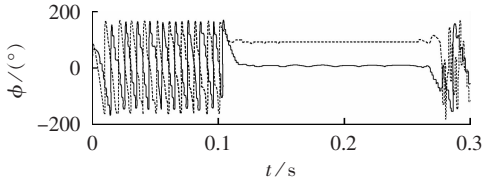
线路参数采用湖北省某 500 kV 同杆并架线路参数,采用双端电源模型,200 km 双回线路等值零序阻抗 $116 \angle 85^\circ \Omega$,等值正序阻抗 $28 \angle 85^\circ \Omega$ 。

3.2 仿真结果

I AG 故障的仿真结果如图 9 所示(图中, ϕ_{II2} 、 ϕ_{UI2} 表示保护 1 处的负序电流、电压相位, ϕ_{I32} 、 ϕ_{U32} 表示保护 3 处的负序电流、电压相位),保护 1 处负序电流超前负序电压 94°,保护 3 处负序电流滞后负序电压 88°,保护 1 判断为正方向,保护 3 判断为反方向。



(a) 保护 1 负序电流、电压相位关系图



(b) 保护 3 负序电流、电压相位关系图

图 9 I AG 故障保护 1、3 处负序电流电压相位图

Fig.9 Phase charts of negative sequence voltage and current of protection 1 and 3 for I AG

通过大量的仿真,设置不同的故障点,对前面的分析进行验证,结果与前面分析基本一致。表 2 给出了故障发生在距离 M 侧 10 % 处的仿真结果。

于是,对于图 1 所示系统,双回线各种故障情况下负序方向元件的动作情况如表 3 所示。

表 2 各种故障情况下负序电流、电压相位差

Tab.2 Phase difference between negative sequence current and voltage for different fault conditions

序号	故障类型	Ⅰ回线		Ⅱ回线	
		保护 1	保护 2	保护 3	保护 4
1	I AG	94°	90°	-88°	95°
2	I BCG	89°	91°	-90°	87°
3	I B II CG	37°	66°	138°	113°
4	I BC II BG	113°	101°	36°	73°
5	I BC II CG	73°	82°	130°	101°
6	I A II BCG	-137°	-167°	46°	32°
7	I AB II BCG	10°	24°	176°	163°
8	I ABC II BCG	-29°	62°	112°	97°
9	I ABC II AG	-61°	32°	106°	106°

表 3 双回线各种故障情况下负序方向元件动作情况

Tab.3 Behavior of negative sequence directional element of double lines under different fault conditions

序号	故障类型	I 回线		II 回线		纵联负序方向保护	
		保护 1	保护 2	保护 3	保护 4	I 回线	II 回线
1	I AG	正方向	正方向	正(反)方向	反(正)方向	动作	不动作
2	I BCG	正方向	正方向	正(反)方向	反(正)方向	动作	不动作
3	I B IICG	正方向	正方向	正方向	正方向	动作	动作
4	I BC II BG	正方向	正方向	正(反)方向	正(反)方向	动作	可能拒动
5	I BC II CG	正方向	正方向	正(反)方向	正(反)方向	动作	可能拒动
6	I A II BCG	正(反)方向	反(正)方向	反(正)方向	正(反)方向	拒动	拒动
7	I AB II BCG	正方向	正方向	正方向	正方向	动作	动作
8	I ABC II BCG	正(反)方向	反(正)方向	反(正)方向	正(反)方向	拒动	拒动
9	I ABC II AG	正(反)方向	反(正)方向	反(正)方向	正(反)方向	拒动	拒动
10	反方向故障	反方向	反方向	反方向	反方向	不动作	不动作

4 结论

本文利用六序分量的一些结论,从理论上分析了同杆双回线在各种典型故障情况下负序方向元件的动作行为,并且利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建同杆并架双回线,对其进行了验证,可以得出以下结论。

a. 在单回线故障中(如 I AG、I BCG),故障线路两侧的负序方向元件均可以正确判明方向,非故障线路有一侧可以判断为正方向,另一侧判断为反方向。

b. 在发生 I B IICG、I AB II BCG 跨线故障时,两回线的 4 个负序方向元件均可以判断为正方向,保护能够正确动作。

c. 在发生 I BC II BG、I BC II CG 跨线故障时, I 回线两侧的负序方向元件均可以判断为正方向,保护能够正确动作; II 回线两侧的负序方向元件有可能出现拒动的情况。

d. 在发生 I A II BCG、I ABC II BCG 及 I ABC I AG 跨线故障时,系统参数及故障点位置对负序方向元件的影响较大,两回线路总有一回线路两侧的负序方向元件不能够正确动作,保护会拒动。

总之,在同杆并架双回线上发生非跨线不对称故障时,负序方向元件都可以正确动作;发生跨线故障时,负序功率方向元件可能会拒动,但不会发生误动。

参考文献:

[1] 夏勇军,尹项根,胡刚,等. 同杆双回线路继电保护原理及工程应用[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(3):98-103.
XIA Yongjun,YIN Xianggen,HU Gang,et al. Principle and engineering application of double-circuit transmission line protection [J]. Power System Protection and Control,2009,37(3):98-103.

[2] 俞波,范樟,李铁群,等. 保护在同杆双回线动模试验中的动作分析[J]. 电力自动化设备,2002,22(11):11-15.
YU Bo,FAN Wei,LI Yiqun,et al. Performance analysis of line protection in dynamic simulation of double lines on same tower [J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(11):11-15.

[3] 舒印彪,赵丞华. 研究实施中的 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路[J]. 电力建设,2002,23(5):6-8.
SHU Yinbiao,ZHAO Chenghua. 500 kV compact type double circuit transmission line on one tower under study and implementation[J]. Electric Power Construction,2002,23(5):6-8.

[4] 潘靖,易辉,陈柏超. 我国紧凑型与同塔双回输电现状与展望[J]. 高电压技术,2005,31(9):25-27.
PAN Jing,YI Hui,CHEN Baichao. Current situation and prospect of compact line and double circuit on same tower in China[J]. High Voltage Engineering,2005,31(9):25-27.

[5] 徐柯,苗世洪,刘沛. 方向高频保护负序功率方向元件的非全相运行性能分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(21):45-48.
XU Ke,MIAO Shihong,LIU Pei. Analysis for the performance of power line carrier protection based on negative sequence power direction in the conditions of incomplete phase operation[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(21):45-48.

[6] 刘世明,尹项根,陈德树. 故障分量负序方向元件若干问题的研究[J]. 电力自动化设备,1999,19(6):18-21.
LIU Shiming,YIN Xianggen,CHEN Deshu. The research on several problems in using negative sequence directional relay protection based on fault component[J]. Electric Power Automation Equipment,1999,19(6):18-21.

[7] 苏斌,董新洲,孙元章,等. 特高压串补线路负序方向高频保护行为分析[J]. 电力系统自动化,2004,28(14):9-13.
SU Bin,DONG Xinzhou,SUN Yuanzhang,et al. Performance of negative sequence directional protection on series compensated UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(14):9-13.

[8] 王辉,何奔腾,李一泉. CVT 对零序(负序)方向保护影响的研究[J]. 继电器,2006,34(9):1-3.
WANG Hui,HE Benteng,LI Yiquan. Research of CVT's influence on zero sequence(negative sequence) direction protection[J]. Relay,2006,34(9):1-3.

[9] 徐磊,胡俊侯,翁子文. 长距离同杆架设双回路保护特点的研究[J]. 电力自动化设备,1999,19(4):14-16.
XU Lei,HU Junhou,WENG Ziwen. Research on protection characteristic for long distance double-line with the same tower [J]. Electric Power Automation Equipment,1999,19(4):14-16.

[10] 孔伟斌,朱晓彤,张俊洪,等. 同杆双回线上零序功率方向继电器的误判问题[J]. 电力系统自动化,2002,26(22):45-48.
KONG Weibin,ZHU Xiaotong,ZHANG Junhong,et al. Wrong judgement of zero sequence directional relay on double-circuit line on the same pole[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(22):45-48.

[11] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2007:149-151.

[12] 黄少锋,刘千宽,王兴国. 互感线路零序方向元件的动作行为分析[C]//第十一届全国保护和学术研讨会论文集. 南京:中国电机工程学会继电保护专业委员会,2007:30-34.
HUANG Shaofeng,LIU Qiankuan,WANG Xingguo. The operation analysis of zero component directional protection on the mutually coupled lines[C]//2007 Eleventh National Symposium on Protection and Control. Nanjing,China:The Chinese Society of Electrical Engineering Committee of Relay,2007:30-34.

[13] 范春菊,蔡华嵘,郁惟镛. 基于六序分量法的同杆双回线精确故障测距[J]. 上海交通大学学报,2004,38(8):1278-1282.
FAN Chunju,CAI Huarong,YU Weiyong. Accurate fault location for parallel transmission line based on six-sequence fault components[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2004,38(8):1278-1282.

[14] 索南加乐,葛耀中,陶惠良. 六序故障分量及其在同杆双回线的故障特征[J]. 电力系统自动化,1989,13(4):44-51.
SUONAN Jiale,GE Yaozhong,TAO Huiliang. Six sequence fault components and its characteristics on double circuit line on the same pole[J]. Automation of Electric Power Systems,1989,13(4):44-51.

[15] 索南加乐. 同杆双回线的故障分析及继电保护[D]. 西安:西安交通大学电气工程学院,1991.
SUONAN Jiale. Fault analysis and protective relaying of double circuit line on the same pole[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1991.

(编辑: 李 玲)

作者简介:
郭 强(1985-),男,河南南阳人,硕士,研究方向为电力系统自动化(E-mail:nyguoqiang@126.com);
尚海一(1983-),男,辽宁沈阳人,研究方向为电力系统自动化。

Analysis of negative sequence directional element behavior
in double lines on same tower

GUO Qiang,SHANG Haiyi
(Ningbo Electric Power Bureau,Ningbo 315000,China)

Abstract: The performance of negative sequence directional element widely used in conventional transmission line protection may be affected when it is used in the double transmission lines on the same tower. Based on the characteristics of double lines on the same tower,the behavior of negative sequence directional element under various fault conditions of double lines on the same tower is analyzed with the six-sequence fault component method. Results show that,for the inter-line faults of “I BC II BG” and “I BC II CG”,the negative sequence directional elements at both side of II line may refuse to operate;for the inter-line faults of “I A II BCG”,“I ABC II BCG” and “I ABC II AG”,the negative sequence directional elements at both side of one line will refuse to operation. Results of simulation with PSCAD/EMTDC verify this conclusion.

Key words: double lines on same tower; negative sequence directional element; inter-line fault; refusal of operation