

# 正序电压极化的横差保护选择元件的动作研究

鄢安河<sup>1</sup>, 李夏阳<sup>2</sup>, 姚晴林<sup>3</sup>, 张太升<sup>1</sup>

(1. 河南电力调度通信中心, 河南 郑州 450052; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044;  
3. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 对两种极化电压下的横联差动电流方向保护的选择元件在同杆并架双回线故障下的动作行为进行了研究。通过理论分析和仿真验证, 指出相比于采用无关相相间电压极化的选择元件, 采用正序电压极化的选择元件还具有其功率方向继电器的测量角与故障点位置无关, 也不随双侧电源的功角差  $\delta$  变化而变化的特点, 从而指出采用该方法使得横差保护具有更好的动作性能。

**关键词:** 同杆双回线; 横差保护; 选择元件; 正序电压; 极化电压

## Research on selectors of transverse differential protection using positive sequence polarizing voltage

YAN An-he<sup>1</sup>, LI Xia-yang<sup>2</sup>, YAO Qing-lin<sup>3</sup>, ZHANG Tai-sheng<sup>1</sup>

(1. Henan Power Dispatch & Communication Center, Zhengzhou 450052, China;  
2. Electric Engineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
3. Hefei Industry University, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This paper analyses selectors of transverse differential current direction protection using two types polarizing voltage for double circuit lines on the same tower. By using academic analysis and simulational validation, it points out that comparing with the selectors using interlinked tension of irrespective phase as polarizing voltage, the selector using positive voltage as polarizing voltage has some more virtues. The metrical angle of the power direction relay is independent of the location of fault, and it does not change along with the change of power declinate  $\delta$  of bilateral sources. Thereby, it shows that the later scheme has better performance.

**Key words:** double circuit lines on the same tower; transverse differential protection; selectors; positive voltage; polarizing voltage

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)08-0006-05

## 0 引言

横联差动电流方向保护与电流平衡保护都是直接比较两回线的电流, 是平行线的专用保护。后者虽简单但不能应用于无电源侧, 应用上有局限性<sup>[1]</sup>; 前者能应用于电源侧及无电源侧, 适应性强。本文只讨论前者。

横联差动电流方向保护一般由两个主判据元件组成: 其一为电流比率制动差动元件(简称为差动元件), 其作用是区分内部和外部故障, 在此不作讨论; 其二为差电流方向元件(又称为选择元件)。选择元件的作用是在内部故障时选择故障线, 它反应差电流的方向。一般横联差动电流方向保护的选择元件采用无关相相间电压作为极化电压, 即其功率方向继电器的端子电压、电流为  $90^\circ$  接线。其优点

是在两相短路时有两个继电器能正确动作, 三相短路时有三个继电器能正确动作, 可靠性高; 而且两相短路时加于继电器的电流为故障相的电流, 电压为与电流不同相别的另两相相间电压, 能提高继电器的精度<sup>[2]</sup>。

本文提出采用正序电压作为选择元件的极化电压, 并结合理论分析与仿真实验比较这两种方法在双回线内部故障时的动作情况, 得出采用正序电压极化的横联差动电流方向保护除了同样具有上述优点外, 还具有方向角固定, 不随故障点位置和双侧电源功角差  $\delta$  变化而变化的特点。

## 1 差电流方向元件(简称选择元件)

选择元件包含三个功率方向继电器, 采用无关相相间电压作为极化电压(即  $90^\circ$  接线)的功率方

向继电器动作方程为:

$$60^\circ > \varphi_{I \cdot \Phi} = \arg \frac{U_{\Phi\Phi}}{I_{I \cdot \Phi} - I_{II \cdot \Phi}} > -120^\circ \quad (1)$$

采用正序电压极化的功率方向继电器动作方程为:

$$150^\circ > \varphi_{I \cdot \Phi} = \arg \frac{U_{1\Phi}}{I_{I \cdot \Phi} - I_{II \cdot \Phi}} > -30^\circ \quad (2)$$

式中:  $U_{\Phi\Phi}$  为无关相相间电压,  $U_{1\Phi}$  为本相正序电压;  $I_{I \cdot \Phi}$  为本线相电流;  $I_{II \cdot \Phi}$  为邻线相电流; 测量角  $\varphi_{I \cdot \Phi}$  满足方程则选本线否则选为邻线。

## 2 两种极化电压下的选择元件动作行为分析

下面的分析都不考虑系统阻抗远大于线路阻抗的情况, 因为在这种情况下, 线路上故障点位置的变化对各电气量的影响必然很小, 可忽略不计。

为让分析方便清晰, 下面先对 M 侧电源单独作用时, 两相短路和三相短路的情况进行分析, 对比选择元件在两种极化电压下的动作特点, 然后再分析双侧电源供电时, 是否仍存在相同的特点, 最后加以仿真验证。文中表示故障类型时, I 表示 I 回线, II 表示 II 回线, 只分析 M 侧保护的动作情况。

### 2.1 单侧电源供电, 双回线运行线路内部短路时选择元件的测量角

#### 2.1.1 L-I 内部 BC 两相短路实例 (单侧电源)

分析 B、C 相选择元件的测量角  $\varphi_{I \cdot B}$  和  $\varphi_{I \cdot C}$ , A 相由差动元件保证不启动, 在此不讨论。

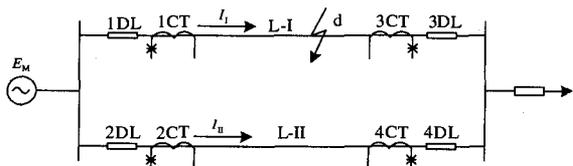


图 1 单侧电源双回线内部故障网络图

Fig.1 Network of double circuit line internal fault with unilateral source

B、C 两相短路,  $I_B$  滞后于  $E_{BC}$  的角度为短路点至电源之间阻抗的阻抗角  $\varphi_d$ , 设为  $70^\circ$ ,  $E$  为电源电势、 $U_M$  为保护安装点 M 侧母线电压、 $U_d$  为短路点电压,  $U_{1\Phi}$  为正序电压, 只计短路电流, 不计负荷电流。

见图 2,  $I_{I \cdot B}$  与  $I_{II \cdot B}$  同相位, 但  $|I_{I \cdot B}| > |I_{II \cdot B}|$ , 故  $\Delta I_B = I_{I \cdot B} - I_{II \cdot B}$ 、 $I_{I \cdot B}$ 、 $I_{II \cdot B}$  三者同相位。同理,  $I_{I \cdot C}$ 、 $I_{II \cdot C}$ 、 $\Delta I_C = I_{I \cdot C} - I_{II \cdot C}$  三者同相位。

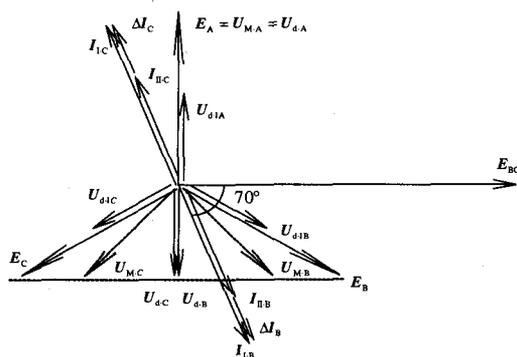


图 2 L-I 回线内部 BC 两相短路相量图

Fig.2 Vector diagram of L-I loop internal BC phases fault

(1) 采用无关相相间电压极化的情况

若 BC 两相短路点 d 十分靠近 M 侧母线, 则  $U_M = U_d$ ; 由采用无关相相间电压极化的选择元件动作方程式 (1) 可得:

$$\varphi_{I \cdot B} = \arg \frac{U_{M \cdot CA}}{I_{I \cdot B} - I_{II \cdot B}} = \arg \frac{U_{d \cdot CA}}{\Delta I_B} = -20^\circ$$

$$\varphi_{I \cdot C} = \arg \frac{U_{M \cdot AB}}{I_{I \cdot C} - I_{II \cdot C}} = \arg \frac{U_{d \cdot AB}}{\Delta I_C} = -20^\circ$$

若短路点 d 靠近 N 侧母线, 且假定双回线的长度非常长, 这意味着短路点 d 距母线 M 的距离为  $\infty$ ,

则  $U_M = E$ , 由式 (1) 得:

$$\varphi_{I \cdot B} = \arg \frac{U_{M \cdot CA}}{I_{I \cdot B} - I_{II \cdot B}} = \arg \frac{E_{CA}}{\Delta I_B} = -50^\circ$$

$$\varphi_{I \cdot C} = \arg \frac{U_{M \cdot AB}}{I_{I \cdot C} - I_{II \cdot C}} = \arg \frac{E_{AB}}{\Delta I_C} = 10^\circ$$

若 BC 两相短路点 d 位于上述两种极端情况之间, 则  $\varphi_{I \cdot B}$  等于  $-20^\circ \sim -50^\circ$  之间某一值,  $\varphi_{I \cdot C}$  等于  $-20^\circ \sim 10^\circ$  之间某一值。

(2) 采用正序电压极化的情况

若 BC 两相短路点 d 十分靠近 M 侧母线, 同样有  $U_M = E$ ; 由式 (2) 可得:

$$\varphi_{I \cdot B} = \arg \frac{U_{M \cdot IB}}{I_{I \cdot B} - I_{II \cdot B}} = \arg \frac{U_{d \cdot IB}}{\Delta I_B} = 40^\circ$$

$$\varphi_{I \cdot C} = \arg \frac{U_{M \cdot IC}}{I_{I \cdot C} - I_{II \cdot C}} = \arg \frac{U_{d \cdot IC}}{\Delta I_C} = 100^\circ$$

若 BC 两相短路点 d 靠近 N 侧母线, 且双回线

的长度非常长, 同样有  $U_M = E$ ; 这时:

$$\varphi_{I_{\bullet B}} = \arg \frac{U_{M \bullet B}}{I_{I \bullet B} - I_{II \bullet B}} = \arg \frac{E_B}{\Delta I_B} = 40^\circ$$

$$\varphi_{I_{\bullet C}} = \arg \frac{U_{M \bullet C}}{I_{I \bullet C} - I_{II \bullet C}} = \arg \frac{E_C}{\Delta I_C} = 100^\circ$$

$\varphi_{I_{\bullet B}}$ 、 $\varphi_{I_{\bullet C}}$  不变。若 BC 两相短路点 d 位于上述两种极端的状态之间, 则 M 侧母线的电压  $U_{M \bullet C}$ 、 $U_{M \bullet B}$  见图 2 虚线所示, 保护测量到的各相正序电压只是幅值发生变化, 相位并不改变, 电流相位也不变, 这时同样有  $\varphi_{I_{\bullet B}} = 40^\circ$ ,  $\varphi_{I_{\bullet C}} = 100^\circ$ 。即采用正序电压极化的选择元件的测量角不随短路点的不同而改变。

如上分析, 单侧电源双回线运行时 L-I 线路内部 AB 两相短路、CA 两相短路, 结论类同。

### 2.1.2 L-I 线路内部三相短路实例 (单侧电源)

三相短路时, 三相电压、电流仍维持对称关系, 两种方法下的三相选择元件的动作行为相同。仍设线路阻抗角  $\varphi_d = 70^\circ$ 。

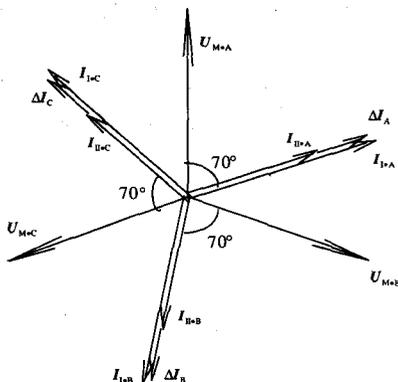


图 3 L-I 回线内部三相短路相量图

Fig.3 Vector diagram of L-I loop internal three-phase fault

见图 3, 由式 (1) 可得:

$$\arg \frac{U_{M \bullet BC}}{\Delta I_A} = \arg \frac{U_{M \bullet CA}}{\Delta I_B} = \arg \frac{U_{M \bullet AB}}{\Delta I_C} = -20^\circ$$

$$\text{又 } U_{M \bullet IA} = U_{M \bullet A}, U_{M \bullet IB} = U_{M \bullet B}, U_{M \bullet IC} = U_{M \bullet C},$$

由式 (2) 可得:

$$\arg \frac{U_{M \bullet IA}}{\Delta I_A} = \arg \frac{U_{M \bullet IB}}{\Delta I_B} = \arg \frac{U_{M \bullet IC}}{\Delta I_C} = 70^\circ$$

在对称故障时, 两种极化电压下的测量角均不随短路点变化而变化。需要指出, 若在保护安装点母线附近三相短路,  $U_A = U_B = U_C \approx 0$ , 此时  $\varphi_j$  应

采用记忆电压求取。

## 2.2 双侧电源双回线运行线路内部短路时选择元件的测量角

双侧电源的情况要比单侧电源复杂得多。下面用叠加法对采用正序电压极化的选择元件进行分析, 看其是否仍具有测量角不随短路点变化而变化的特点, 采用无关相相间电压极化的选择元件不再分析。为了区分方便, 下面带有上标的相量, 其上标表示该相量为对应的某侧电源单独作用时的相量, 下标的含义同前面所述。分析时同样只考虑故障电流, 忽略正常时的负荷电流。

### 2.2.1 L-I 内部 BC 两相短路实例 (双侧电源)

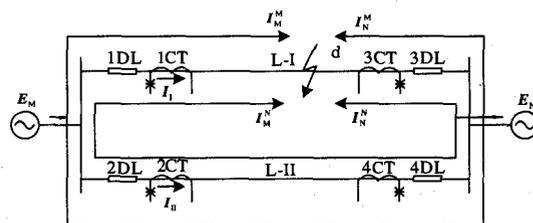


图 4 两侧电源双回线内部故障网络图

Fig.4 Network of double circuit line internal fault with bilateral source

见图 4, 设 M 侧电源为送电端, N 侧为受端。送端电源电势  $E_M$  超前于受端  $E_N$  的功率角一般有  $\delta_{MAX} = 60^\circ$  ( $\delta_{MAX}$  必远小于静稳极限角  $90^\circ$ ), 在此令  $\delta = 40^\circ$ , 则  $E_{BC}^M$  的功率角超前  $E_{BC}^N$  的功率角  $40^\circ$ ; 短路点至两侧电源间的阻抗的阻抗角  $\varphi_d = 70^\circ$ 。

$I_M^M$  与  $I_N^M$  为 M 侧电源对故障点提供的故障电流 (即 M 侧电源提供的, 分别从 M 侧和 N 侧母线流向故障点的故障电流), 它们同相位且都滞后于  $E_M$  的角度为短路点至 M 侧电源之间阻抗的阻抗角  $\varphi_d$ 。 $I_M^N$  为 N 侧电源对故障点提供的故障电流 (从 M 侧母线流向故障点), 滞后于  $E_N$  的角度也为  $\varphi_d$ 。若 L-I 线路内部靠近 M 侧母线 BC 两相短路, 则流经 M 端 1CT 故障相的电流:  $I_{I \bullet \Phi} = I_{M \bullet \Phi}^M + I_{M \bullet \Phi}^N$ , 流经 M 端 2CT 故障相的电流:  $I_{II \bullet \Phi} = I_{N \bullet \Phi}^M - I_{M \bullet \Phi}^N$ 。

B 相电压、电流相量关系见图 5。(注: 图 5 的 a、b 两图分别为 M 侧和 N 侧电源单独作用时 B 相的电压、电流相量, 将所需要的相量移植到图 c 中。)

假设故障点靠近 M 侧, 同样有:

$$U_M = U_d = U_d^M + U_d^N$$

且  $|I_M^M| > |I_M^N| > |I_N^M|$  由图 5(c) 可得:

$$U_{M \bullet B} = U_{d \bullet B}^M + U_{d \bullet B}^N \text{ 超前于 } \Delta I_B = I_{I \bullet B} - I_{II \bullet B} \text{ 的}$$

角度  $\varphi_{J \cdot B}$  大约为  $50^\circ$ , 即  $\varphi_{J \cdot B} = 50^\circ$  ;

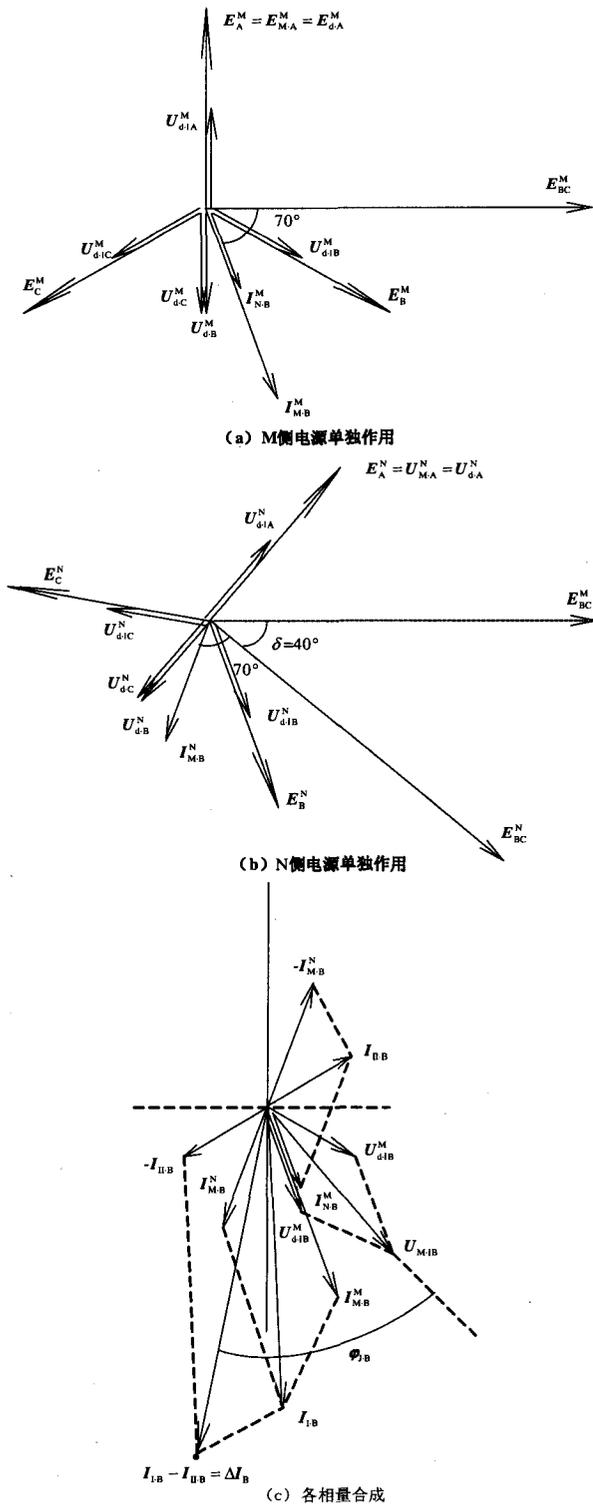


图5 双侧电源供电 L-I 线路内部 BC 两相短路 B 相向量图 (靠近 M 侧)

Fig.5 B phase vector diagram of L-I loop internal BC phases fault with bilateral source (nearby M side)

对于 C 相, 由于  $I_{M \cdot C}^M = -I_{M \cdot B}^M$ 、 $I_{N \cdot C}^N = -I_{N \cdot B}^N$ 、 $I_{M \cdot C}^N = -I_{M \cdot B}^N$ , 因此可得到:

$$I_{I \cdot C} = I_{M \cdot C}^M + I_{M \cdot C}^N = -I_{I \cdot B}$$

$$I_{II \cdot C} = I_{N \cdot C}^M - I_{M \cdot C}^N = -I_{II \cdot B}$$

所以  $\Delta I_C = I_{I \cdot C} - I_{II \cdot C} = -\Delta I_B$ , 见图 6。又因为  $U_{M \cdot IC}$  的角度滞后于  $U_{M \cdot IB}$   $120^\circ$ , 所以  $\Delta I_C = I_{I \cdot C} - I_{II \cdot C}$  滞后于 M 侧母线的电压  $U_{M \cdot IC}$  的角度  $\varphi_{J \cdot C} = \varphi_{J \cdot B} + 60^\circ = 110^\circ$ 。

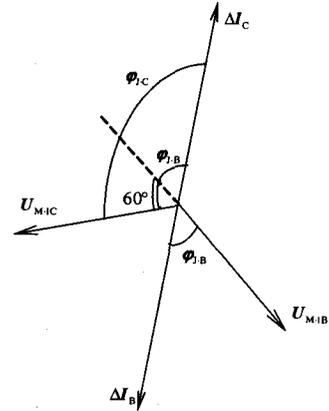


图 6 C 相测量角  $\varphi_{J \cdot C}$  值实例

Fig.6 Instance of the value of C phase metrical angle  $\varphi_{J \cdot C}$

比较图 2 与图 5, 单侧电源靠近 M 侧母线 L-I 线路内部  $d_{BC}^{(2)}$  短路,  $\varphi_{J \cdot B} = \arg \frac{U_{M \cdot IB}}{\Delta I_B} = 40^\circ$ ; 而双侧电源同样是靠近 M 侧母线 L-I 线路内部  $d_{BC}^{(2)}$  短路,  $\varphi_{J \cdot B} = \arg \frac{U_{M \cdot IB}}{\Delta I_B} \approx 50^\circ$ , 即后者的  $\varphi_{J \cdot B}$  比前者的  $\varphi_{J \cdot B}$  大了  $10^\circ$ 。这是由于作图的误差造成的, 前面已指出  $|I_M^M| > |I_M^N| > |I_N^M|$ , 但这三者的幅值在图中无法精确确定, 实际上  $\varphi_{J \cdot B}$  仍应是  $40^\circ$  左右。

假设双回线的长度非常长, 当短路点 d 靠近母线 M 时, 由于与母线 N 的距离为  $\infty$ , 则 N 侧电源对 M 侧保护的影响很小,  $\varphi_J$  可按单侧电源供电的情况分析; 而随着短路点 d 往母线 N 方向移动, 由于双回线的长度非常长,  $I_M^N$ 、 $I_N^M$  的幅值都约等于零, 因此  $\Delta I_\phi \approx I_M^M$ ,  $\varphi_J$  仍近似等于单侧电源供电的情况。对于有限长度的双回线来说,  $\varphi_J$  仅会稍有波动, 这可从仿真结果看出来。

通过上述分析还可以推出, 同一故障类型的测量角也不随 M 侧与 N 侧电源的功角差  $\delta$  变化, 即不随负荷大小变化而变化。

### 3 仿真验证

以 BC 短路为例, 在 58 km 长的双回线 L-I 线路上设三个故障点, 分别为 M 侧母线出口处、中点、N 侧母线出口处。 $\varphi_{j\bullet\Phi}^1$ 、 $\varphi_{j\bullet\Phi}^2$ 、 $\varphi_{j\bullet\Phi}^3$  分别为在这三处发生故障时的测量角。

#### (1) 单侧电源双回线运行 BC 短路

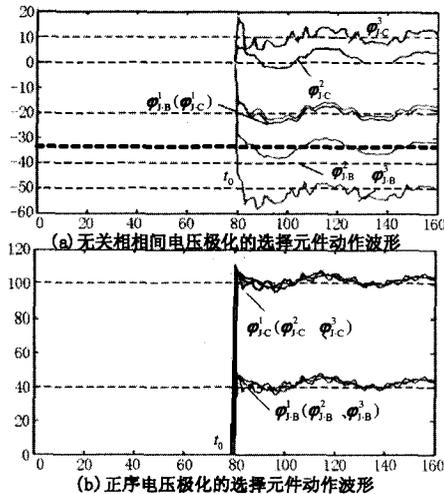


图 7 单侧电源的情况

Fig.7 Situation of unilateral source

图 7 为单侧电源的情况。各  $\varphi_{j\bullet\Phi}$  在故障时刻 ( $t_0$ ) 前均为初始值零。(a) 是采用无关相间电压极化的选择元件动作波形, 可以看到  $t_0$  时刻后, 当故障点的分别位于 M 侧母线出口处、中点、N 侧母线出口处时,  $\varphi_{j\bullet\Phi}$  分别为  $-20^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $-50^\circ$ ,  $\varphi_{j\bullet\Phi}$  分别为  $-20^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ ; 图 7 (b) 是采用正序电压极化的选择元件动作波形, 故障发生于预设的三个点处时, 均有  $\varphi_{j\bullet\Phi} = 40^\circ$ ,  $\varphi_{j\bullet\Phi} = 100^\circ$ 。

#### (2) 双侧电源双回线运行 BC 短路

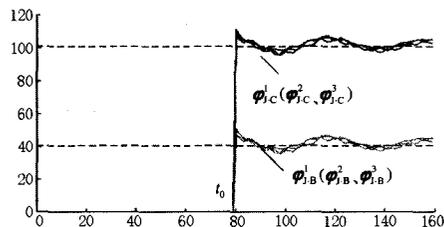


图 8 双侧电源的情况

Fig.8 Situation of bilateral sources

见图 8, 双侧电源双回线运行, L-I 回路内部仍在上述三个不同地点发生 BC 短路时, 以正序电压极化的选择元件测量角依然有  $\varphi_{j\bullet\Phi} = 40^\circ$ ,

$\varphi_{j\bullet\Phi} = 100^\circ$ , 不随故障点位置的改变而改变, 与前面的分析一致。

由于篇幅所限, 单相接地、两相短路接地等故障的仿真就不再一一列出, 其结果表明, 这些故障同样具有前述特点。

### 4 结论

通过前面理论分析和仿真验证可以看出, 采用正序电压极化的选择元件具有如下的特点: 1) 无论单侧电源或双侧电源双回线运行, 线路内部故障时, 选择元件的测量角不随短路点的改变而改变; 2) 相同故障类型在单侧电源和双侧电源供电时, 其测量角基本不变。总之, 测量角与故障点位置无关, 也不随双侧电源的功角差  $\delta$  变化而变化, 只取决于系统参数、故障类型、运行方式等因素, 这样可以根据需要方便地确定最大灵敏角, 使保护具有更好的动作性能。

#### 参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
ZHU Sheng-shi. Principle and Technology of High Tension Networks Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Relay Protection Principle of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [3] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.  
LI Guang-qi. Transient Analysis of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [4] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 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[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

收稿日期: 2007-09-11; 修回日期: 2007-10-10

#### 作者简介:

鄢安河 (1952-), 男, 高级工程师, 从事电网技术、电力系统调度、生产的研究和管理工作; E-mail: zhaoyicqu@163.com

李夏阳 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化;

姚晴林 (1931-), 男, 教授, 主要从事电力系统继电保护领域的研究。