

# 自适应分相重合闸的判据及其仿真计算

黄莹 葛耀中 西安交通大学电力工程系 (710049)

**【摘要】** 本文对无并联电抗器补偿的线路三相跳闸后的自适应分相重合闸原理及实现方法进行了研究, 根据线路一端一相合闸后线路侧的电压状态, 提出了自适应分相重合闸的实用判据, 从而可在合闸前预测出故障是瞬时性的还是永久性的。仿真结果表明, 文中提出的自适应分相重合闸原理及实用判据是正确的、可行的。

**【关键词】** 自动重合闸 自适应技术 高压输电线

## 前言

目前电力系统中的自动重合闸装置普遍存在着盲目合闸的问题, 即在合闸前不能预测出故障是瞬时性的, 还是永久性的。这样, 当重合于永久故障时, 会对系统的安全运行造成严重危害。因此, 在合闸前区分瞬时故障与永久故障十分必要。

近年来, 对单相重合闸及带并联电抗器的线路三相重合闸过程中瞬时故障与永久故障的判别已经进行了一定的研究<sup>[1,2]</sup>; 文献<sup>[3]</sup>也提出了一种自适应式重合闸方案及重合逻辑; 但对无并联电抗器补偿的线路, 在发生故障三相跳闸后如何判别永久故障的问题还有待深入研究。

本文对无并联电抗器补偿的线路三相跳闸后的状况进行了研究, 根据线路一端一相合闸后线路侧的电压状态, 提出了自适应分相重合闸的实用判据。它能解决盲目合闸的问题, 使重合闸装置根据不同的线路状况及故障类型决定相应的对策。理论分析和仿真结果表明, 文中提出的自适应判据简单可靠, 易于在线实现, 且能克服盲目合闸的缺点。

## 1 分相重合闸原理及重合逻辑

### 1.1 分相合闸原理的提出

对于无并联补偿电抗器的高压、超高压线路, 线路两端三相断开后的系统如图 1 所示。

由于两端三相均断开, 线路上不存在电磁感应电压。对于永久故障, 电荷将全部通过电容放掉; 对于瞬时故障, 放电则慢一些。故不论瞬时故障还是永久故障, 稳态时故障相的线路侧电压均为零或很小。通过对 500kV 无电抗器线路的 EMTP 仿真试验, 也证实了这一点。因此, 仅靠断开三相后的线路状态无法区别瞬时与永久故障。

为了解决区分瞬时与永久故障的问题, 提出了分相合闸的方法。假定在线路一端先合上一相, 根据各相感应电压的大小, 就可区分瞬时与永久故障, 从而确定重合闸应该如何动作。

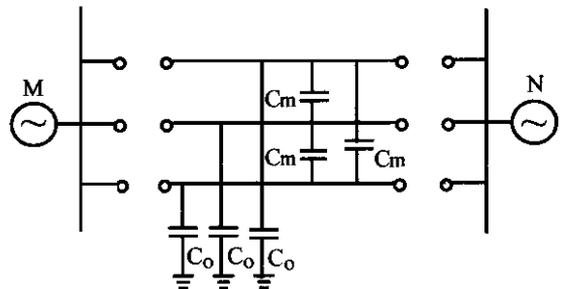


图 1 无并联电抗器的线路模型

## 1.2 分相合闸的重合逻辑

分相合闸的重合逻辑如表 1 所示,它根据系统的故障类型选择先合相。对于单相故障,首先考虑先合上一个距故障相最远的非故障相。例如,A 相故障时,先合 C 相;对于 B 相故障,则先合 A 或 C 并无多大差别;对于三相故障,选择哪一相先合是任意的;对于两相短路,合上两故障相中任一相即可;对于两相接地短路故障,则应合上非故障相。

表 1 自适应分相重合闸的重合逻辑

| 初始故障类型   | 各相导线水平分布 | 各相导线等边三角形分布 |
|----------|----------|-------------|
| AG       | C        | C 或 B       |
| BG       | A 或 C    | A 或 C       |
| CG       | A        | A 或 B       |
| ABG      | C        | C           |
| BCG      | A        | A           |
| CAG      | B        | B           |
| AB       | A 或 B    | A 或 B       |
| BC       | B 或 C    | B 或 C       |
| CA       | C 或 A    | C 或 A       |
| ABC、ABCG | A、B、C 任意 | A、B、C 任意    |

## 2 分相重合后,重合端线路侧的电压状况分析

### 2.1 单相接地短路

以 A 相发生短路接地为例。假定线路两端三相跳开后,过一段时间 M 端合上 C 相(图 2、图 3)。

#### 1) 瞬时故障时线路 M 端的电压状况

根据图 2 可计算出断开相线路侧的感应电压。由于存在分布电容,A、B 相线路侧电压  $U_A$ 、 $U_B$  不为 0。由节点电压法可得,

$$U_A = U_B = \frac{Y_M}{Y_M + Y_0} U_C \quad (1)$$

将  $Y_M = \frac{(Y_1 - Y_0)}{3}$  代入,可得:

$$U_A = U_B = \frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} U_C \quad (2)$$

#### 2) 永久故障时线路 M 端的电压状况

由图 3,可得出各相电压如下:

$$U_A = 0, \quad U_B = \frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} U_C \quad (3)$$

### 2.2 两相短路接地

以 AB 两相短路接地为例,先合上 C 相。

#### 1) 瞬时故障

$$U_A = U_B = \frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} U_C, \quad U_C = E \quad (4)$$

#### 2) 永久故障

$$U_A = U_B = 0, \quad U_C = E \quad (5)$$

有时,故障可能转变为一相永久接地,则重合 C 相后,有  $U_A$  或  $U_B$  为 0  $U_C$  仍为电源电压

值。

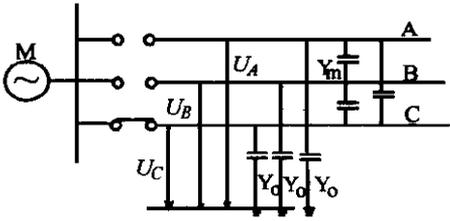


图2 单相接地瞬时故障时系统图

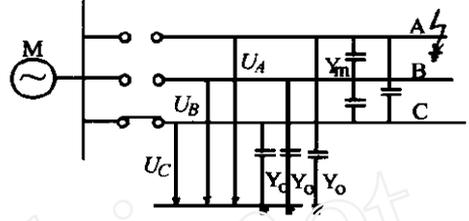


图3 单相接地永久故障时系统图

### 2.3 两相短路

以AE 两相短路为例,先合相为A 相。

#### 1) 瞬时故障

$$U_B = U_C = \frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} U_A, \quad U_A = E \quad (6)$$

#### 2) 永久故障

$$U_C = \frac{2(b_1 - b_0)}{b_0 + 2b_1} U_A, \quad U_B = U_A = E \quad (7)$$

### 2.4 三相短路接地(以先合A 相为例)

#### 1) 瞬时故障

$$U_B = U_C = \frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} U_A, \quad U_A = E \quad (8)$$

#### 2) 永久故障

此时A 相中产生的电流较大,但因三相均为永久性接地,故 $U_B$ 、 $U_C$ 非常小( 0), $U_A$ 与之相比稍大。

### 2.5 三相短路不接地(以先合A 相为例)

#### 1) 瞬时故障

$$U_B = U_C = \frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} U_A, \quad U_A = E \quad (9)$$

#### 2) 永久故障

$$U_A = U_B = U_C = E \quad (10)$$

有时,故障可能转化为两相永久短路,若这两相中包含有重合相,则电压状况与式7类似;若这两相中不含有重合相,则电压状况与式9类似。

从上述各种短路情况下对电压的分析可知,区分永久故障与瞬时故障的关键是 $\frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0}$ 的值。由表2可知,此值约为额定电压的10%以上,故可明显地区分开瞬时故障与永久故障。

表2 不同电压等级线路的 $b_1$ 、 $b_0$ 及 $\frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0}$ 值

| 线路电压(V)                                  | 220                  | 330                   | 500                   |
|--|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $b_1 (\frac{1}{\Omega \cdot \text{KM}})$ | $2.7 \times 10^{-6}$ | $3.49 \times 10^{-6}$ | $4.27 \times 10^{-6}$ |
| $b_0 (\frac{1}{\Omega \cdot \text{KM}})$ | $1.9 \times 10^{-6}$ | $2.43 \times 10^{-6}$ | $2.85 \times 10^{-6}$ |
| $\frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0}$           | 0.1231               | 0.1269                | 0.1424                |

### 3 自适应分相重合闸判据

#### 3.1 分相合闸后线路上电压特点

经前述分析可知,各种短路情况下分相合闸后,线路上电压的特点如下:

##### 1) 不对称接地短路

永久故障:故障相电压为 0

瞬时故障:故障相有一定幅值的耦合电压  $(\frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} U_{\text{重合相}})$

##### 2) 相间短路

永久故障:各故障相电压相等且其值接近电源电压值

瞬时故障:除重合相外,其余故障相为一定幅值的耦合电压  $(\frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} U_{\text{重合相}})$

##### 3) 三相短路接地

永久故障:各故障相电压均非常小

瞬时故障:重合相电压值接近电源电压值,其余故障相为一定幅值的耦合电压

$$(\frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} U_{\text{重合相}})$$

#### 3.2 自适应分相重合闸判据

根据以上特点,提出自适应分相重合闸的判据如下:

##### 1) 不对称接地短路

$$U_{\text{故障相}} > \frac{b_1 - b_0}{b_1 + 2b_0} \times U_{\text{重合相}} / K_K \quad (11)$$

式中  $K_K$  可取 1.2 ~ 1.5

当 11 式成立时,判定为瞬时故障。否则,为永久性故障。

##### 2) 相间短路

$$U_{\text{非重合故障相}} > U_{\text{重合相}} / K_K \quad (12)$$

当 12 式成立时判定为永久故障。否则,为瞬时性故障。

##### 3) 三相短路接地

$$U_{\text{重合相}} > E / K_K \quad (13)$$

当 13 式成立时,判定为瞬时故障,否则,为永久性故障。

表 3 无电抗器 500kV 线路各种故障下分相合闸后的 M 端电压状态

| 故障性质         | 瞬时故障  |       |       | 永久故障  |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | $U_A$ | $U_B$ | $U_C$ | $U_A$ | $U_B$ | $U_C$ |
| AG(重合 A 相)   | 0.146 | 0.146 | 1.039 | 0.003 | 0.128 | 1.038 |
| ABG(重合 C 相)  | 0.146 | 0.146 | 1.038 | 0.005 | 0.005 | 1.042 |
| ABCG(重合 A 相) | 1.053 | 0.148 | 0.148 | 0.135 | 0.044 | 0.044 |
| AB(重合 C 相)   | 0.146 | 0.146 | 1.038 | 0.125 | 0.125 | 1.038 |
| AB(重合 A 相)   | 1.054 | 0.148 | 0.148 | 1.070 | 1.076 | 0.265 |
| ABC(重合 A 相)  | 1.055 | 0.148 | 0.148 | 1.108 | 1.119 | 1.119 |

说明:对两相接地短路转化为一相永久故障的情况,由于两相同时满足式 11 时才判为瞬

时故障, 故判据仍是适用的。

对于三相短路, 在永久性故障时, 若其转化为两相永久性故障, 当重合相为两故障相之一时, 用 12 式仍可正确判別。若两故障相中不包括重合相, 则再合上第二相, 此时若三相电压值均接近电源电压  $E$ , 判为永久性故障, 否则, 判为瞬时性故障。

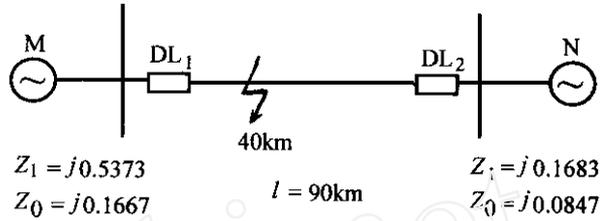


图 4 500kV 系统及参数

#### 4 仿真试验及结果

为了验证以上分析, 对无并联电抗器的 500kV 系统进行了 EM TP 仿真试验, 系统模型如图 4 所示。

其中各参数为标幺值, 故障点为距 M 端 40km 处, 线路参数为:  $Z_1 = 0.98e-4 + j0.11e-2$ ,  $Y_1 = j0.1177e-2$ ,  $Z_0 = 0.71e-2 + j0.252e-2$ ,  $Y_0 = 0.78757e-3$

500kV 系统各种不同短路故障下分相合闸后 M 端的线路侧电压值如表 3 所示, 表中各电压值均为标幺值。典型波形见附录(图 5、图 6)。

附录 500kV 无电抗器系统的仿真实验结果举例

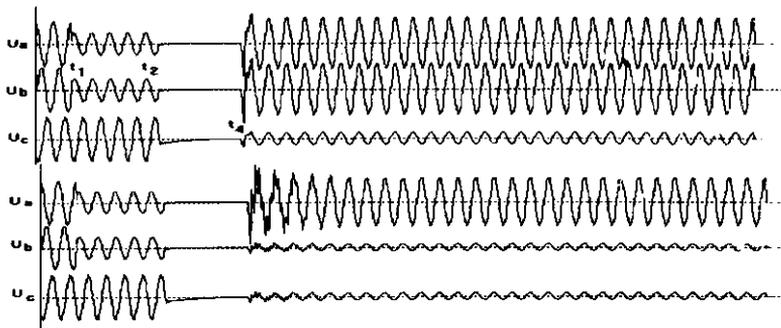


图 5 AB 两相短路 M 侧选相重合 A 相线路 M 端波形图(过渡电阻为  $0\Omega$ )  
(上面三条曲线为永久故障的波形, 下面三条曲线为瞬时故障的波形。)

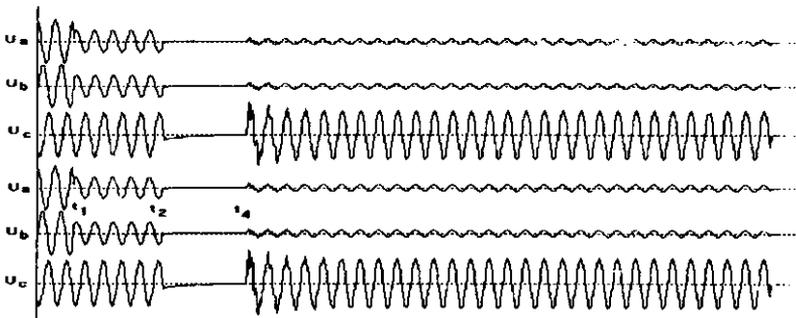


图 6 AB 两相短路 M 侧选相重合 C 相线路 M 端波形图(过渡电阻为  $0\Omega$ )  
(上面三条曲线为永久故障的波形, 下面三条曲线为瞬时故障的波形。)

从表 3 可见, 对于单相接地短路, 重合相电压较高; 故障相在瞬时与永久故障(下转 14 页)

表 1 算例计算结果

| 电气量                        |              | 序分量 | 正序            | 负序            | 零序            |
|----------------------------|--------------|-----|---------------|---------------|---------------|
|                            |              |     |               |               |               |
| 补偿电流                       | $I_c$        |     | 1.336         | 1.336         | 0.825         |
|                            | $I_t$        |     | 0.109         | 0.109         | 0.283         |
|                            | $I_{ft}$     |     | $j0.113$      | $j0.113$      | $j0.258$      |
| $I_{it} = 1.0$ 时的 B、C 母线电压 | $V_B^{(id)}$ |     | $j0.024$      | $j0.024$      | $j0.028$      |
|                            | $V_C^{(id)}$ |     | $-j0.029$     | $-j0.029$     | $-j0.071$     |
| 断相口开路电压 $V_{it}^0$         |              |     | 0.06 94.923   | 0             | 0             |
| 断相口入端阻抗 $Z_{it}$           |              |     | $j0.113$      | $j0.113$      | $j0.258$      |
| 断相口实际注入电流 $I_{it}$         |              |     | 0.124 184.923 | 0.124 184.923 | 0.124 184.923 |
| B、C 母线实际电压                 | $V_B$        |     | 1.025 18.598  | 0.003 274.923 | 0.004 274.923 |
|                            | $V_C$        |     | 1.014 15.656  | 0.004 94.923  | 0.009 94.923  |
| 故障线路电流 $I_{ic}$            |              |     | 0.124 4.923   | 0.124 4.923   | 0.124 4.923   |

参考文献

- 1 曹国臣等. 继电保护整定计算中短路故障的分块算法. 继电器, 1995. 4
- 2 曹国臣. 零序电流保护整定计算的新算法. 继电器, 1995. 1

(上接第 8 页) 下电压明显不同, 永久故障时其电压约为 0。对于两相短路接地, 永久故障时故障相电压约为 0, 瞬时故障时其值与理论计算值相符。对于三相短路接地, 永久故障时的各相电压均较小, 而瞬时故障时重合相电压近似为电源电压, 其余两相电压值与理论计算值相符。对于两相短路, 当两故障相中的一相时, 二者的电压值之比在永久故障与瞬时故障时差别较大。而当重合非故障相时, 二者基本相等。对于三相不接地短路, 二种情况下的电压则明显不同。

由表 3 及附录波形可知, 仿真结果与理论分析是一致的。

5 结论

- 1) 本文对无并联电抗器补偿的线路三相跳闸后的自适应分相重合原理及重合逻辑进行了研究, 并根据线路一端一相合闸后线路侧的电压状态, 提出了自适应分相重合闸的实用判据。
- 2) 理论分析和仿真结果表明, 文中提出的自适应分相重合闸判据简单可靠, 能正确在线预测出瞬时性故障与永久性故障, 使重合闸装置根据不同的线路状况及故障类型决定相应的对策, 解决了盲目合闸的问题。

参考文献

- 1 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障与永久故障的方法. 西安交通大学报, VO1 18, NO. 2, Apr 1984
- 2 葛耀中, 肖原. 超高压输电线自适应三相自动重合闸. 电力自动化设备, 1995. 2
- 3 A. G. PHADKE, S. H. HORWITZ, A. G. MCCABE. 自适应自动重合闸. 国际大电网 1990 年会议论文集