

一种新型选相方案

鲍小鹏, 张 举

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 针对目前微机保护中选相元件的不足, 提出了几种新型的数字化选相元件, 重点探讨了基于模故障分量的选相元件, 基于电压序分量的选相元件和弱电源侧电压选相元件, 由此构成了一套完整的微机线路保护选相方案。针对这几种选相元件作了比较详尽的分析, 进行了横向和纵向的比较。最后, 利用 ATP 与 MATLAB 仿真运算验证了新方案的有效性和可靠性。

关键词: 微机型继电保护; 选相元件; 模故障分量; 电压序分量; 弱电源侧电压选相

中图分类号: TM769 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)05-0019-05

0 引言

在(超)高压输电系统中, 作为继电保护装置的一个重要元件, 选相元件的地位是不容忽视的。系统的发展对选相元件提出了更高的要求, 而微机保护的快速发展为更准确、更快速的数字化选相元件的实现提供了可能。对于微机保护中的选相元件有如下要求: 必须保证正确地判断出故障类型和故障相别; 算法尽可能简单, 判据明确; 占用数据窗短, 选相元件动作速度快, 以缩短保护动作时间。这就需要有比传统选相方法更佳的选相原理。

目前国内数字化高压线路保护中主要采用突变量选相和稳态量选相结合, 利用相电流差突变量元件作为保护启动后第一次选相的选相元件, 而利用序电流的分区选相作为振荡闭锁期间的选相元件。然而, 从理论分析和实际运行情况看, 这两种选相元件还存在某些不足。例如, 当保护位于弱电源侧(尤其是在单电源系统的负荷侧), 或当系统的正负序综合阻抗不相等时, 突变量选相灵敏度可能不足, 序分量选相在某种程度上弥补了这一缺点, 但需要故障后一个周波的数据才能开始判断, 速度相对较慢。此外, 在保护安装处发生正、反向两点故障时, 选相元件可能误动。基于以上原因, 有必要对传统的选相元件作进一步的改进, 提出更新、更好的选相原理和判据。

1 模分量选相

1.1 基本原理

当系统发生任何类型故障时, 各点的电压、电流均可分解为非故障分量和故障分量。在线性电路的假设前提下, 可以用叠加原理研究故障信息的特征。

由线性变换理论可知, 对故障分量网络仍可采用模分量进行分析: 由于模分量各自独立, 从故障边界条件推导出各模量等效电源后, 即可分别求解各模量的独立网络, 以获得保护装置处的各模故障分量。

由克拉克(Cl Clarke)变换公式, 可以把三相电压、电流分解为 I_0 、 I_1 、 I_2 三个分量, 分别以 A、B、C 三相为基准算出的故障电流 I_g^A 、 I_g^B 、 I_g^C 分量如下:

$$I_0 = I_{Ag} + I_{Bg} + I_{Cg}$$

$$\begin{bmatrix} I_g^A \\ I_g^B \\ I_g^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ag} \\ I_{Bg} \\ I_{Cg} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_g^A \\ I_g^B \\ I_g^C \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ag} \\ I_{Bg} \\ I_{Cg} \end{bmatrix}$$

其中: I_{Ag} 、 I_{Bg} 、 I_{Cg} 表示 A、B、C 三相的故障电流, I_0 表示 0 模故障分量, 上标表示以 A、B、C 三相为基准进行的模变换, 下标表示变换后得到 I_0 、 I_1 、 I_2 模分量, 例如 I_g^A 、 I_g^B 表示以 A 相为基准的故障 I_1 、 I_2 模分量, 依此类推。

理论分析表明, 假设系统正、负序阻抗相等, 并且先不考虑零序和正、负序分布系数的影响。发生单相接地故障时, 以特殊相为基准的故障 I_0 模分量为零; 两相接地短路时, 以特殊相为基准的故障 I_0 模分量与 I_1 模分量之和为零, 同时由于发生的是接地故障, I_0 模分量不等于零; 当发生两相短路时, I_0 模分量为零, 同时以特殊相为基准的故障 I_1 模分量也为零。由于 I_1 、 I_2 模分量运算中无复数运算, 可以直接由采样值求得。同时为了保证选相的可靠性, 可以运用判据连续判断 3~6 次才确定故障相。

理论分析表明, 假设系统正、负序阻抗相等, 并且先不考虑零序和正、负序分布系数的影响。发生单相接地故障时, 以特殊相为基准的故障 I_0 模分量为零; 两相接地短路时, 以特殊相为基准的故障 I_0 模分量与 I_1 模分量之和为零, 同时由于发生的是接地故障, I_0 模分量不等于零; 当发生两相短路时, I_0 模分量为零, 同时以特殊相为基准的故障 I_1 模分量也为零。由于 I_1 、 I_2 模分量运算中无复数运算, 可以直接由采样值求得。同时为了保证选相的可靠性, 可以运用判据连续判断 3~6 次才确定故障相。

1.2 对模分量选相元件的评价

当系统正、负序网络的综合阻抗不等,即 $Z_{1\Sigma} \neq Z_{2\Sigma}$ 时,各模分量之间是不能看作相互独立的。当线路参数不对称,不换位线路或换位不完全,发电机和变压器的出口端短路是有可能出现这种情况的。设保护装在支路 m 上, C_{1m} 、 C_{2m} 分别为其正序和负序电流分布系数, $p = C_{2m}/C_{1m}$ 为保护处的负序和正序电流分布系数之比(忽略电阻的情况下, p 为一实数)。

以 A 相为特殊相,单相接地时,考虑到正、负序网络的综合阻抗不等的情况,采用对称分量法,将相电流用正序电流和序电流分布系数表示,即 $I_m^A = \sqrt{3}(I_{mBg} - I_{mCg})$,单相接地时正序电流等于负序电流 $I_{1g} = I_{2g}$,所以实际上 $I_m^A = \sqrt{3}|(a^2 - a)(1 - p)C_{1m}I_{1g}|$,此时以另外两个健全相为基准得到的模电流幅值相等,只考虑故障相与其中一相的比较情况。此时以 B 相为特殊相得到的模电流为 $I_m^B = \sqrt{3}|(1 - a^2) + p(1 - a)C_{1m}I_{1g}|$,可以用两者相除的值 S_1 来判断单相接地时的灵敏度,有 $S_1 = I_m^B / I_m^A = \sqrt{1 + \frac{3p}{(1-p)^2}}$, S_1 越大,表示两者相差越大,选相能力越好。在靠近旋转电机附近短路时, p 的变化范围也在 0.1~1.45 之间,此时 S_1 与 p 的对应关系如图 1 所示。它与微机保护中常用的相电流差突变量选相的灵敏度是完全一样的。

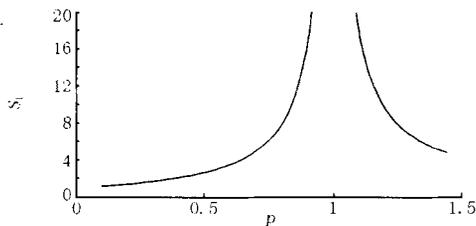


图 1 单相接地时 S_1 对 p 的变化曲线

Fig. 1 Curves of S_1 when p changes during single-phase-to-ground fault

当发生两相短路时,通过分析表明,模分量选相的灵敏度 S_2 和 S_1 完全一样,而此时相电流差突变量选相的灵敏度则有所下降,设两相短路时相电流差突变量选相的灵敏度为 S_3 ,和单相接地时的分析方法类似,有 $S_3 = \sqrt{1 + \frac{3p}{(1-p)^2}}$,如图 2 所示。对比两图可发现,当 $p = 1$ 时(此时正、负序阻抗相等),相电流差突变量选相的灵敏度达到最大值 2,而此时的模分量的灵敏度理论上是 1,所以,模分量

选相在两相短路时具有比相电流差突变量选相更高的灵敏度。

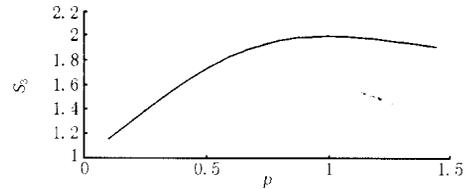


图 2 两相短路时 S_3 对 p 的变化曲线

Fig. 2 Curve of S_3 when p changes during two-phase short circuit

两相接地短路时的分析比较复杂,其灵敏度与正序和零序电流分布系数都有关。大致上,当零序电流分布系数 C_{0m} 从零增大到正序电流分布系数 C_{1m} 的过程中,其灵敏度是逐渐增加的,且一直大于相电流差突变量选相的灵敏度。当 $C_{0m} = C_{1m}$ 时达到最大,判据具有绝对的选择性。当 C_{0m} 进一步增大时,灵敏度逐渐减小,当 $C_{0m} \gg C_{1m}$ 时,其值约等于 1,此时的灵敏度已经相当低,而在此时相电流差突变量判据的形式和 S_3 一样,由于不受 C_{0m} 变化的影响,具有如图 2 所示的变化趋势,其值域始终保持在 1 到 2 之间。因此,在大电源侧,模分量选相的灵敏度不如相电流差突变量选相。

1.3 仿真验证

取闾河至廉州 500 kV 线路作为仿真模型,系统及线路参数如图 3 所示。



图 3 系统仿真模型

Fig. 3 System simulation model

图 3 中,系统参数: $Z_{ms1} = 1.2875 + j55.6377$; $Z_{ms0} = 2.8764 + j37.1267$; $Z_{ns1} = 1.6714 + j35.5391$; $Z_{ns0} = 4.7000 + j37.9784$, 两侧相角差 30° 。线路参数: $Z_1 = 0.01808 + j0.2774$ / km; $Z_0 = 0.23084 + j0.9728$ / km; $c_1 = 0.012917 \mu F$ / km; $c_0 = 0.008116 \mu F$ / km; $L = 250$ km。

理论分析和数字仿真结果都表明,利用模故障分量的选相方法原理简单,动作可靠,受过渡电阻的影响较小;基本上不需整定计算,不需附加任何的滤波运算,易于在微机上实现;动作速度快,连续几次判断确定故障相,可以在 10 ms 内动作。其灵敏度整体上优于相电流差突变量,是一种理想的微机保护选相元件。仿真结果如图 4 所示:

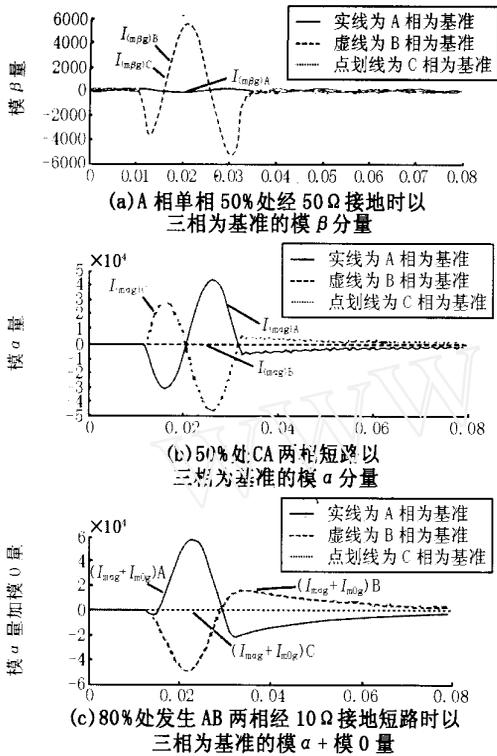


图 4 发生各种不对称故障时的各模分量

Fig. 4 Relevant modal components during various asymmetrical faults

当然,模故障分量选相也有一些缺点和不足。如上所述,当系统正、负序阻抗不等时选相的灵敏度受到影响;另外由于判据受到正序故障分量的影响,当系统结构为大系统对小电源或负荷,保护位于弱电源侧或负荷侧时,发生短路故障时灵敏度不足。

2 电压序分量选相

2.1 基本原理

上面所说的模故障分量选相在保护启动初期时采用,在振荡闭锁中可能出现一系列的系操作(包括区外故障切除等),将使以后所采用的选相结果靠不住,因此,一般采用稳态序分量选相。传统的微机保护中一般采用的零序和负序比相位或正序和负序比相位的方法存在着几点不足:一是在判断单相接地和两相短路接地时不可避免地存在着重叠区,要结合其他方法才能正确选相。二是由于电流选相的局限,当故障点一个位于保护正方向,另一个位于保护反方向时,由于电流一相为正,另一相为负,此时得到的零序电流其实并非真正的零序电流。此时的选相会出现漏判或误判。

如果假设零序阻抗角和负序阻抗角相同的话,负序电压、零序电压的相位关系同负序电流、零序电流的相位关系是一致的。因此,发生单相或两相接地故障时,负序、零序电压的相位差等于负序、零序电流的相位差,即 $\angle U_{G2} / U_{A2} = \angle I_0 / I_{A2}$,此时的故障相区划分与零序和负序电流比相位法是一致的,且这种相位关系不受故障点、负荷电流、故障点位置的影响。保护安装处发生正、反向两点故障时,或者平行双回线路上的跨线故障,电压的方向不会改变,仍能选出故障相。这是电压序分量选相方法的特点之一。

如前所述,负序、零序电压所构成的序分量选相元件具有负序、零序电流选相的特性,它在区分单相接地和两相接地故障时存在着重叠区,这主要是由两相接地的过渡电阻引起的。为此根据潮流的变化引入零序电压和正序电压进行比相,根据负荷的情况进一步区分两相和单相接地故障。用零序和负序电压的相角差判别单相接地和两相接地故障的重叠区一般发生在一个为受端,另一个为送端的情况。如果结合零序和正序电压相角差,只考虑送端或只考虑受端,则一般可以区分重叠的情况。这是电压序分量选相方法的特点之二。

假设故障前保护处电压与故障点电压间的相角差为 δ (计及负荷电流),送电侧 $\delta > 0^\circ$;受电侧 $\delta < 0^\circ$ 。保护处的零序电压和正序电压相位差为 θ ,过渡电阻为 R_F ,则同为受电侧或送电侧发生了单相接地和两相接地时的 θ 角是明显不同的,如图 5 所示。

值得注意的是在长距离重负荷线路上有时 $|\theta| > 90^\circ$, $(1,1)$ 和 (1) 可能出现重叠区。

2.2 选相规则

(1) 首先计算保护侧的有功功率方向,根据潮流方向自动投入不同的判据。 $P > 0$ 时继电器处于送电侧,采用送电侧判据; $P < 0$ 时继电器处于受电侧,采用受电侧判据。当然,继电器处于送电侧还是受电侧,在故障发生时就已经判定了。

(2) 在零序、负序电压比相位的基础上再结合正序电压和零序电压的相位夹角进行选相。以 $\theta = 45^\circ$ 为例,以 A 相为特殊相,当保护处于送电侧时,根据零序与负序电压的相角差 θ 判断,发生 A 相单相接地时, $-30^\circ < \theta < 30^\circ$;发生 BC 两相接地短路时 $-30^\circ < \theta < 90^\circ$,可见在 $-30^\circ < \theta < 30^\circ$ 时存在着重叠区。此时判断保护处的零序和正序电压之间的夹角 θ ,若 $105^\circ < \theta < 285^\circ$ 时判为 A 相接地,则 $-75^\circ < \theta < 105^\circ$ 时判为 BC 相接地。这样,就可以将单相接地和

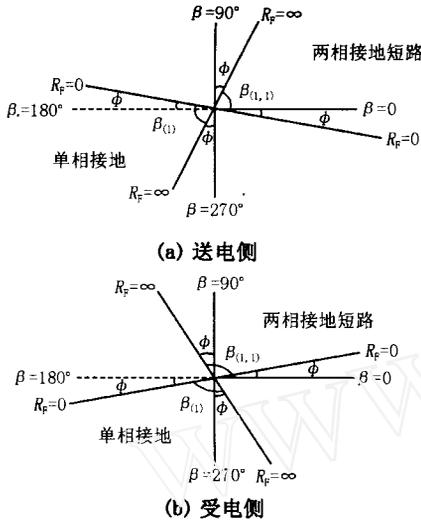


图5 继电器处于送电侧与受电侧时 A 相接地与 BC 两相接地 的变化范围

Fig. 5 Change ranges of β during A phase-to-ground fault and BC two-phase-to-ground fault when relay is set on power sending or receiving side

两相接地明显地区分开来。同理,可推出其他接地故障时选相元件的动作判据如表 1。

表 1 $\beta = 45^\circ$ 时送电侧选相判据

Tab. 1 Phase-selecting criterion on power sending side when $\beta = 45^\circ$

A 相接地	BC 两相接地
$-30^\circ < \beta < 30^\circ$	$-30^\circ < \beta < 30^\circ$
$105^\circ < \beta < 285^\circ$	$75^\circ < \beta < 105^\circ$
	或 $30^\circ < \beta < 90^\circ$
B 相接地	CA 两相接地
$-90^\circ < \beta < 150^\circ$	$-90^\circ < \beta < 150^\circ$
$-15^\circ < \beta < 165^\circ$	$165^\circ < \beta < 325^\circ$
	或 $150^\circ < \beta < 210^\circ$
C 相接地	AB 两相接地
$210^\circ < \beta < 270^\circ$	$210^\circ < \beta < 270^\circ$
$-135^\circ < \beta < 45^\circ$	$45^\circ < \beta < 225^\circ$
	或 $270^\circ < \beta < 330^\circ$

同理给出 $\beta = 45^\circ$ 时受电侧接地故障时选相元件的动作判据如表 2。

采用图 3 的模型运用序电压选相方法进行了实际仿真,在各种接地故障下均能正确判别出故障相。另外对保护正、反方向之间的转换性故障也进行了仿真计算,结果表明电压序分量之间的相位差与单点故障时完全相同,能够正确区分故障相,但电流的序分量则可能要误选相。理论分析和仿真都表明,序电压选相方法具有选相明确,灵敏度高,允许过渡电阻较大的特点;根据潮流方向自动投入不同的判据,消除了单相接地与两相接地的重叠区。若是结

合阻抗继电器的动作情况,还能区分两相短路的情况。因为是序电压选相,所以对于平行双回线的跨线接地故障,保护正、反两向的接地故障,都能够选出故障相;此外,在单侧电源线路上发生接地故障时,负荷侧仍能选出故障相。所以电压序分量选相是一种理想的稳态量选相元件。

表 2 $\beta = 45^\circ$ 时受电侧选相判据

Tab. 2 Phase-selecting criterion on power receiving side when $\beta = 45^\circ$

A 相接地	BC 两相接地
$-30^\circ < \beta < 30^\circ$	$-30^\circ < \beta < 30^\circ$
$-165^\circ < \beta < 15^\circ$	$15^\circ < \beta < 195^\circ$
	或 $30^\circ < \beta < 90^\circ$
B 相接地	CA 两相接地
$-90^\circ < \beta < 150^\circ$	$-90^\circ < \beta < 150^\circ$
$75^\circ < \beta < 255^\circ$	$-105^\circ < \beta < 75^\circ$
	或 $150^\circ < \beta < 210^\circ$
C 相接地	AB 两相接地
$210^\circ < \beta < 270^\circ$	$210^\circ < \beta < 270^\circ$
$-45^\circ < \beta < 135^\circ$	$135^\circ < \beta < 315^\circ$
	或 $270^\circ < \beta < 330^\circ$

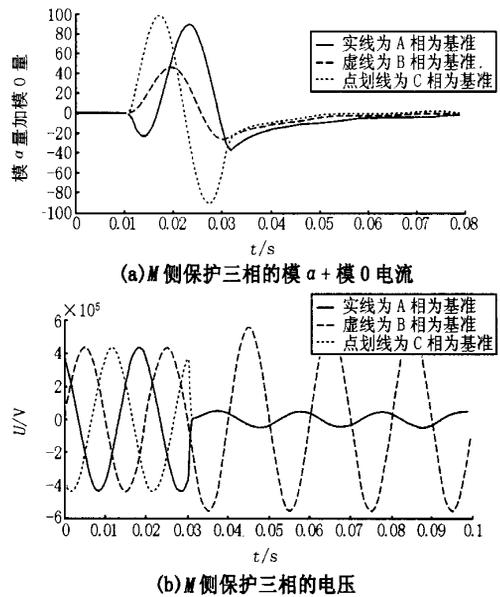


图 6 弱电源侧 AC 两相接地故障时 模分量选相与电压选相之比较

Fig. 6 Comparison of modal component and voltage selector during AC two-phase-to-ground fault on weak source side

3 弱电源侧电压选相

当线路正、负序阻抗相差很大,或保护位于弱电源侧时,由于受正序和零序电流分布系数的影响,模分量选相可能出现灵敏度不足的情况。这时可采用电压选相作为其补充,我们知道单独使用电压选相

元件在长线路末端发生故障或发生高阻接地时灵敏度不足,所以只在弱电源侧模分量选相无法判断的情况下才转入电压选相,这时的电压选相元件有足够的灵敏度。

仿真表明,当保护位于弱电源侧 M ,在线路上距离 M 30%处发生 A、C 两相经 10 Ω 过渡电阻接地故障时,如图 6(a) 所示,以 B 相为基准的模 + 模 0 电流已经和其他两相的模 + 模 0 电流相差不多了,如果仍然采用模分量选相的判据,极易发生误判。而此时 M 侧的电压如图 6(b) 所示, A、C 两故障相的电压已经降到了正常水平的 20% 左右,对于这种情况,电压选相元件完全可以正确判断,从而起到互补的作用。

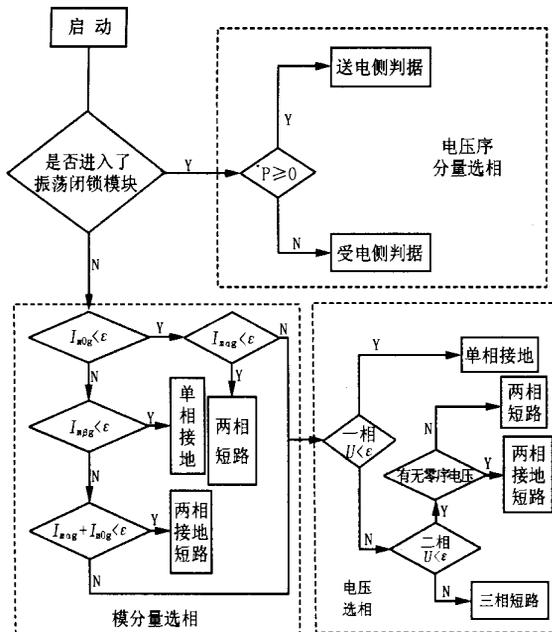


图 7 选相方案的整体流程图

Fig. 7 Flow chart of phase-selecting scheme

4 结论

综上所述,模故障分量选相元件选相性能好,灵敏度高,是一种比较理想的故障选相元件,结合电压选相元件可解决其在弱电源侧灵敏度不足的问题。电压序分量选相法由于滤序和滤波要较长的时间窗,所以一般用在振荡闭锁模块中。它很好地解决了接地故障时的选相重叠区问题,并且由于其序电压的特点,在单电源系统的负荷侧或保护正反方向发生两点故障时也能正确选相。这样就构成了一套完备的微机线路保护选相方案。整套方案的流程图如图 7。

参考文献:

[1] 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: Their Theory and Techniques) [M]. 陕西:西安交通大学出版社 (Shaanxi: Xi'an Jiaotong University Press), 1996.

[2] 许正亚 (XU Zheng-ya). 输电线路新型距离保护 (New Type Distance Protection of Power Line) [M]. 北京:中国水利水电出版社 (Beijing: Publishing House of China Water Resources and Hydropower), 2002.

[3] 林湘宁,刘沛,刘世明,等 (LIN Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, et al). 对模故障分量选相元件的一些探讨 (Studies on Phase-selector Based on Modal Transformation and Fault Component) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2001, 16(6): 70-75.

收稿日期: 2003-06-20; 修回日期: 2003-08-14

作者简介:

鲍小鹏 (1980 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

A new phase-selecting scheme

BAO Xiao-peng, ZHANG Ju

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of phase selecting components existing in microcomputer based protection, it proposes some new digital phase-selecting components, of which are modal transformation based on fault component phase selector, voltage sequence component selector and voltage selector on weak source side. These components constitute an integrated phase selecting scheme of microcomputer based protection. This paper analyses these phase selectors at length, and compares them with each other. At last, the effectiveness and reliability of the scheme are verified with ATP and MATLAB simulation.

Key words: microcomputer-based protection; phase selector; modal transformation based on fault component; voltage sequence component; voltage selector on weak source side