

一种新型振荡中故障选相元件

毛 鹏, 戴 斌, 白日昶

(江西省电力公司超高压分公司, 江西省南昌市 330006)

摘要: 振荡中故障准确选相是有选择切除故障和确保距离保护正确动作的前提。在分析现有振荡中选相元件需开放条件配合, 导致出口延迟, 且易出现误选, 进而导致距离保护误动的基础上, 提出了一种新型选相元件, 此元件首先利用零、负序故障分量进行故障分区, 在分区的基础上改变目前采用阻抗确定故障相的做法, 而采用 Clark 变换, 分别通过 α, β 模量信息进行故障选相。此选相方法充分发挥了零、负序故障分量以及模量变化在振荡期间不涉及相量偏移带来计算误差等优势, 有效避免了阻抗选相在振荡中的弊端。文中给出了基于 RTDS 动模仿真数据的测试结果, 理论和测试表明: 此方法在振荡期间能够可靠、快速、准确地区分故障类型。

关键词: 线路保护; 故障选相; 模变换; 振荡

中图分类号: TM773

0 引言

线路保护中选相元件的准确选相是确定故障环、确保距离元件测量准确以及分相切除故障相别的基础^[1]。目前, 线路保护装置中投入工程应用的选相元件大体为: 工频变化量选相元件和序分量加阻抗配合的稳态量选相元件^[2-3]。前者在突变量启动后的前期故障类型判别中发挥作用; 突变量启动一段时间后, 以及稳态量启动后和振荡闭锁期间, 鉴于故障分量的求取不准确等问题, 容易影响变化量选相元件的性能, 故均采用稳态量选相元件, 即序分量分区加阻抗判别的方法。当系统未发生振荡时, 稳态量选相元件可以很好地判断故障类型, 而在系统失稳后, 再出现故障时, 其选相结果尚需振荡开放条件等因素配合, 存在选相慢、误选相和选相失效等不足。

在分析传统稳态序分量选相元件在振荡中选相动作行为的基础上, 提出一种新的选相元件, 此元件采用序分量分析和模量分析相结合的方法, 首先采用序分量分析中长期稳态存在的零、负序电流分量进行分区处理, 在每一具体选相区间, 采用 Clark 变换计算 α, β 和零模分量, 根据同区间单相接地故障时 β 分量不反映故障, 而对应两相短路接地时 α 分量和零模分量之和反映故障等特征, 提出了一种综合利用变化量和稳态量的组合选相判据来实现振荡中故障选相。

1 振荡中故障选相分析^[4-9]

鉴于国内一次系统网架结构比较薄弱, 发生系统振荡后, 一般要求线路保护不动作, 而由专门的解列装置在特定点解列。为使系统能够更加有利于恢复正常, 国内要求振荡中再发生故障时, 能够有选择地分相切除故障, 此性能也是目前中国电力科学研究院高压线路保护装置动模测试的必要要求之一。因此, 振荡中实现准确选相也是必要的。另一方面, 如果振荡中心位于距离保护整定范围内, 一旦系统发生失稳振荡, 当线路两端电势夹角摆开到一定角度时, 会导致距离元件误动作。因此, 国内微机线路保护装置在振荡闭锁期间, 增加开放条件来实现纯振荡不误动, 振荡中又有故障发生时能及时开放切除故障的要求。其实开放元件不仅仅起故障检测作用, 还承担确保稳态选相元件正确选相的作用。对此问题具体分析如下。如图 1 所示系统, 由阻抗计算公式可知(限于篇幅和本文重点不再列出, 可查阅文献[3]), 对于故障环的测量阻抗, 故障距离计算结果不受两端电势夹角的影响, 即在系统振荡又有故障情况下, 对应于故障环的距离保护元件不会误动作; 但当振荡中心处于距离保护范围内时, 当两端电势夹角摆开后, 非故障环距离元件会误动。由此可知: ①由于稳态选相元件中用到阻抗元件, 为确保选相结果正确, 不对称开放元件中零、负序电流与正序电流的比值系数一般整定得比较大, 此比值系数表征了两侧电势夹角, 亦即当两侧夹角较小时开放, 由此带来故障延迟切除, 且一旦整定不当会导致误选相; ②如果选相元件能适应系统振荡, 即其选相结果

不依赖于振荡开放条件仍能确保故障环的正确选择时,振荡开放条件的整定约束将单一化,即只要判定有无故障即可,可大大提高灵敏度,提高振荡中再次故障时保护的各項性能指标。

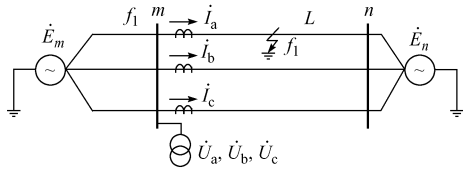


图 1 双电源系统
Fig. 1 Duplicate source power system

由以上分析可知,振荡中选相元件的研究非常必要,其在振荡中起着重要的中枢作用,是降低开放元件约束,确保保护准确动作、正确出口的保障。序分量分析中,零、负序分量是故障分量,且在故障存在时期内一直存在,虽然振荡期间相量求取误差较大,但基于两分量的分区选相元件仍具有很好的性能。鉴于许多文献对稳态序分量选相元件已有论述,在此不再赘述。需要指出,在实际应用和动模仿真中,对一些细小环节进行了适当工程化处理。稳态序量选相的基本思路是利用零、负序量区分出三相对称故障、两相短路故障、接地故障的 3 个选相区(A 区:A 相接地故障或 BCG 故障;B 区:B 相接地故障或 CAG 故障;C 区:C 相接地故障或 ABG 故障)。本文的理论分析和动模仿真重点在于接地故障分为 3 个选相区后的故障相确定,对于两相短路故障情况下的故障环确定原理类似。

2 振荡中故障选相元件原理及实现

2.1 故障选相原理^[10]

对于序分量分区后的进一步故障相确定,采用 Clark 模变换后的各模量的特点来实现,从而有效避免阻抗选相受振荡影响的弊端。

不妨以 A 区为例^[11]。对于 A 区可能的 2 种故障:AG 和 BCG。当以 A 相为基准进行 Clark 变换时,各自的故障边界条件为:①对于 AG 故障,有 $\dot{U}_a=0, \dot{I}_b=0, \dot{I}_c=0$;②对于 BCG 故障,有 $\dot{U}_b=\dot{U}_c=0, \dot{I}_a=0$ 。由 Clark 变换的固有公式关系,可得如下方程组(系统正常情况下也存在 α, β 分量):

$$\begin{cases} \dot{E}_\alpha = \dot{E}_{sa} - Z_\alpha \dot{I}_\alpha \\ \dot{E}_\beta = \dot{E}_{s\beta} - Z_\beta \dot{I}_\beta \\ \dot{E}_0 = -Z_0 \dot{I}_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{E}_\alpha, \dot{E}_\beta, \dot{E}_0$ 分别为故障点端口处模量电压; $\dot{E}_{sa}, \dot{E}_{s\beta}$ 分别为从故障点端口处的开口系统等效模

量电源; Z_α, Z_β, Z_0 分别为由故障处看入的模量综合阻抗,且在对称网络情况下 $Z_\alpha=Z_\beta$ 。

对于 A 相接地故障,根据边界条件,可以得到式(2);对于 BCG 故障可得到式(3)。两方程组分别联立故障后模量固有关系式(1),可求出故障后故障点处的等效电源和故障电流如表 1 所示。

$$\begin{cases} \dot{E}_\alpha + \dot{E}_0 = 0 \\ \dot{I}_\alpha = 2\dot{I}_0 \\ \dot{I}_\beta = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_\alpha + \dot{I}_0 = 0 \\ \dot{E}_\alpha = 2\dot{E}_0 \\ \dot{E}_\beta = 0 \end{cases} \quad (3)$$

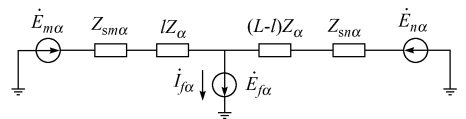
表 1 故障附加模量

Table 1 Fault accessional model transformation components

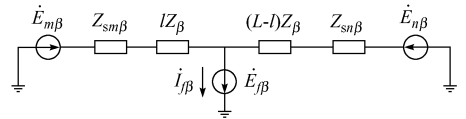
故障类型	$\dot{E}_{fa}$	$\dot{E}_{f\beta}$	$\dot{E}_{f0}$	$\dot{I}_{fa}$	$\dot{I}_{f\beta}$	$\dot{I}_{f0}$
AG	$\frac{\dot{E}_{sa} Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha}$	$\dot{E}_{s\beta}$	$-\frac{\dot{E}_{sa} Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha}$	$\frac{2\dot{E}_{sa}}{Z_0 + 2Z_\alpha}$	0	$\frac{\dot{E}_{sa}}{Z_0 + 2Z_\alpha}$
BCG	$\frac{\dot{E}_{sa} 2Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha}$	0	$\frac{\dot{E}_{sa} Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha}$	$\frac{\dot{E}_{sa}}{2Z_0 + Z_\alpha}$	$\frac{\dot{E}_{s\beta}}{Z_\beta}$	$-\frac{\dot{E}_{sa}}{2Z_0 + Z_\alpha}$

模量变换解耦后的 α, β 网络如图 2 所示。

$\dot{U}_{a|0}, \dot{U}_{b|0}, \dot{U}_{c|0}$ 分别为故障点故障前的各相电压。



(a) 故障后 α 模量网络



(b) 故障后 β 模量网络

图 2 故障模量网络

Fig. 2 Model component network with fault

由网络可知, α, β 模量为非故障分量,即正常情况下两模量也存在,但是对于不同的故障类型,两网络的变化不一样。对于 AG 故障,其 β 模量网络中故障点附加电源 $\dot{E}_{f\beta} = \dot{E}_{s\beta}$,即在 β 模量网络故障附加电源等于 β 网中故障点开路电压,由互易理论可知, β 模量网络没有故障附加电源加入;而对于 BCG 故障,其 β 模量网络故障点处电压为 0,相当于在故障点处短路。由此可知,对于 β 模量网络,发生 AG 故障和 BCG 故障,有着显著的区别。本文提出的新的故障选相元件正是基于此点。

2.2 选相判据及元件实现

对于 RTDS 仿真系统(如图 3 所示)振荡情况

下,线路中点发生 AG 和 BCG 故障时,动模录波图及模量图如图 4 所示。由图 4 可知:仿真结果与理论分析一致,也充分证明振荡中采用非相量偏移的模量变换解耦不会带来附带误差。

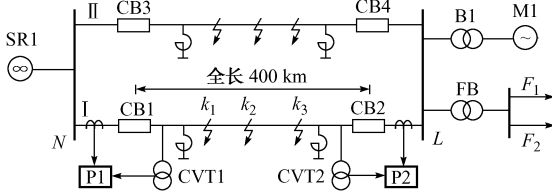
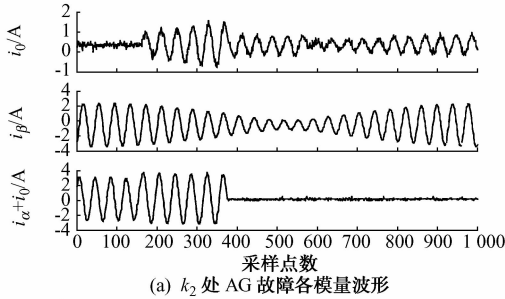
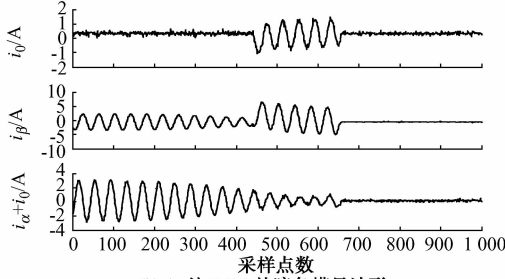


图 3 双回长线路模型
Fig. 3 Double long line model



(a) k_2 处 AG 故障各模量波形



(b) k_2 处 BCG 故障各模量波形

图 4 故障时各模量波形

Fig. 4 Waveforms of model components with fault

本文提出的选相元件判据如下。

1) 模电流变化量选相判据

$$\Delta I_f = I_f - I_{fN}' > I_{f_set} \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{ff} &= \frac{\sum_{n=0}^{N-1} i_f(n) i_f(n-N)}{\left(\sum_{n=0}^{N-1} i_f^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} i_f^2(n-N) \right)^{\frac{1}{2}}} \\ I_{fN}' &> I_{\rho_setting} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

判据式(4)表征选择模量的幅值变化量, I_f , I_{fN}' 分别表示当前故障电流模量幅值和一周前电流模量幅值。幅值求取采用半周期正弦滤波算法,

I_{f_set} 按照躲过正常情况下,系统发生振荡(振荡周期采用最小周期,取 300 ms)时,对应模量最大不平衡量来整定(正常情况,周期之间产生变化量的原因在于振荡时的频率和幅值变化,以及算法误差),并考虑足够的可靠系数。判据式(5)表征当前一周波形与前一周波形的相关度,对于无故障畸变的模分量,尽管系统振荡,但相邻两周期的波形相关度很大,而一旦模量反映故障,则故障后波形与故障前波形相关度下降。两判据均反映模量的变换量,仅在故障检测元件动作后的较短时间内发挥作用,能快速给出选相结果,判据式(4)在线路两端电势夹角摆开不大的情况下具有足够的灵敏度,而当夹角摆开后再发生故障,由于正常振荡电流就很大,所以灵敏度会下降,甚至不动作,而此时判据式(5)具有较高的灵敏度,两判据采用“或”逻辑关系。对于故障类型的判定,采用充分判定逻辑,避免非此即彼式逻辑导致误选相。当确定是两相短路接地故障时,判据模量选择 β 模量,即式(4)和式(5)中的 $I_f = I_\beta$;而要确定是单相接地故障时,判据模量选择 α 模与零模分量的和,即 $I_f = I_\alpha + I_0$ 。由表 1 所示的选相模量可知,对于单相接地故障和两相短路接地故障两种模量具有明显的区别,其中一个是没有故障分量,所以选相判别具有较高的灵敏度。

2) 模量稳态量选相(补偿电压)判据

对于长线路,当线路两端电势夹角摆开时,线路末端发生故障,此时模量变化量选相灵敏度降低,可能出现选相失效;另外,变化量算法仅在故障检测元件(即故障开放元件)动作后的一小段时间内投入。为此,增加模量稳态量予以配合,稳态量选相判据如下:

$$\begin{cases} U_{\beta min} = \min_{0 \leq t \leq L} |\dot{U}(l)_\beta| < U_{\beta_set1} \\ \dot{U}(l)_\beta = \dot{U}_{\beta\beta} \cosh \gamma l - \dot{I}_{\beta\beta} z_c \sinh \gamma l \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \varphi_{\beta_set1} > \Delta\varphi_\beta > \varphi_{\beta_set2} \\ \Delta\varphi_\beta = |\arg \dot{U}(l)_\beta - \arg \dot{U}_{\beta\beta}| \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\dot{U}(l)_\beta$ 为沿线补偿电压; $\dot{U}_{\beta\beta}$ 为本端 β 模量电压相量。

模量稳态量选相的基本依据为:对于单相接地故障,故障后 β 模量网络中故障附加电源为故障前开口电压,由替代定理可知,等效于没有附加电源;而对于两相短路接地故障,故障点附加电压源为 0,等效于短路。由此可知,如果采用本端电量推导沿线电压分布时,其分布图如图 5(a)所示,即对于两相短路接地故障,其沿线电压为 XZ 平面的一组相量,故障点处幅值为 0,过故障点后,为计算出的故障点到对端的虚拟补偿电压。而对于单相接地故

障,计算的沿线电压是空间真实电压分布,如图5(a)中相量 $\dot{U}_N$ 到 $\dot{U}_L'$ ($\dot{U}_L'$ 为L端空间电压相量)的连线分布,沿线电压在YZ平面的投影如图5(a)所示。判据式(6)表征:对于沿线电压幅值,两相短路接地故障肯定有过零点(注:振荡中不考虑经过渡电阻故障)。判据式(7)表征:对于两相短路接地故障,其沿线补偿电压的角度分布在图5(b)OAB和OCD两区域,且基本稳定(考虑一定的计算误差等其他因素),而对于单相接地故障,其沿线电压角度从OR轴均匀过渡到 $\dot{U}_L$ ($\dot{U}_L$ 为L端电压相量)。判据式(7)中的角度定值 φ_{β_set1} 对应于图5(b)中的 $\angle ROB$ (或 $\angle ROA$); φ_{β_set2} 对应于 $\angle ROC$ (或 $\angle ROD$)。限于篇幅,具体的选相流程图请参见附录A。

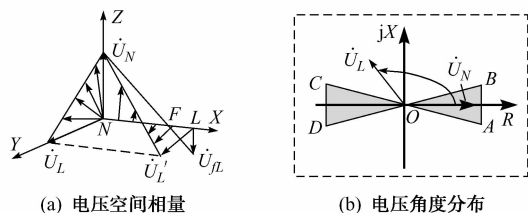


图5 电压相量图
Fig. 5 Voltage vectors

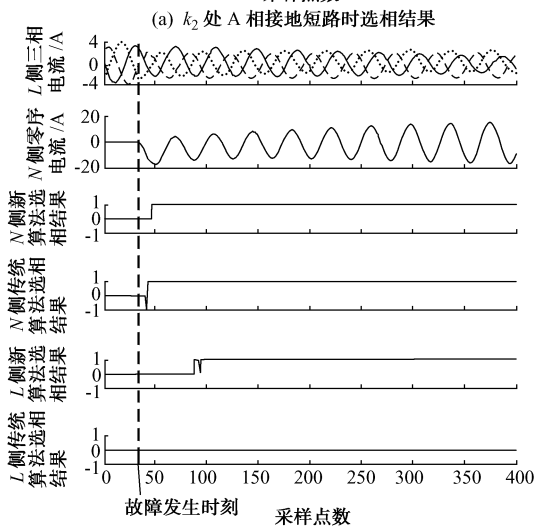
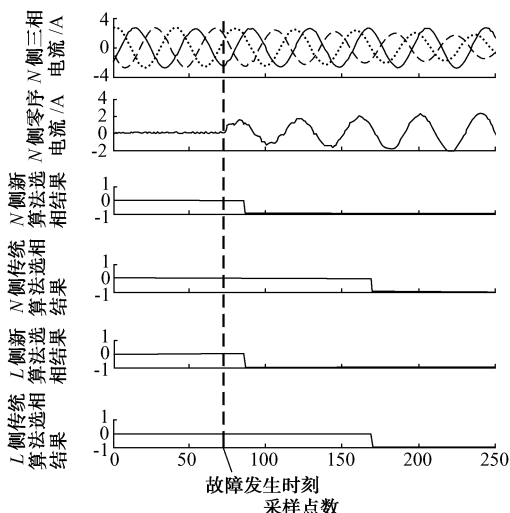
3 RTDS 仿真测试

RTDS 动模仿真系统结构和参数采用中国电力科学研究院高压线路保护装置长线路双回线模型,如图3所示。被测保护装置P1和P2分别安装在I回线的N侧和L侧,保护所需的线路电压信号由500 kV/0.1 kV的电容式电压互感器提供,保护所需的线路电流信号由1 250 A/1 A的电流互感器提供。另外,需要指出:系统的振荡中心大约在线路的中点附近。

为充分测试所提出的选相算法的各项性能指标,故障条件考虑如下几种情况:①故障点位置选择:分别为N端出口(k_1)、距N端40%处(k_2)、L端出口(k_3);②振荡周期分别选择:800 ms, 500 ms, 300 ms;③选择不同的故障发生时刻。

组合产生仿真案例对新旧选相算法进行测试。本文提出的选相算法与理论分析相符合,均取得较好的选相结果,较传统选相算法具有更高的灵敏度。为使读者更感性地了解仿真结果以及本选相元件的动作特性,给出2次故障仿真结果如图6所示,图中分别列出了线路两端新旧选相算法的选相结果,鉴于振荡时负荷电流很大,选择画出某端零序电流,以便明确故障发生时刻。其中图6(a)为500 ms振荡

周期下, k_2 点发生A相接地故障;图6(b)为500 ms振荡周期下, k_1 点发生BC两相短路接地故障。需要指出:鉴于选相元件不受开放元件的影响,相对独立,因此不对称开放条件中的 m 可按照躲过纯振荡时不平衡电流来整定,仿真时取0.1。由图6(a)可知,本文所提出的选相算法较传统算法更快地给出选相结果;由图6(b)可知,对于远故障端(即L端),鉴于故障发生在两电势夹角摆开时,序分量加阻抗判据的稳态量选相元件一直未动作。



(b) k_1 处BG两相接地短路时选相结果
选相元件动作结果用开关量表示:选单相接地故障用“-1”表示,选两相短路接地故障用“1”表示,“0”表示不动作

图6 故障选相仿真结果

Fig. 6 Simulation results of fault phase selectors

4 结语

系统振荡时能否正确确认故障环是确保距离元件正确动作的重要条件,而目前线路保护装置普遍采用的稳态量选相元件中均利用了阻抗元件的配合,为此,必须通过提高故障开放条件来实现选相元

件的正确动作。本文提出了一种新的选相算法,能够适应系统振荡情况,且不需要其他元件的配合,而可以使故障开放条件独立整定,大大提高距离保护元件在振荡情况下的动作时间。研究新的选相元件,以适应系统振荡情况下线路保护的需求,从而使故障开放元件、选相元件、距离元件的性能独立,配合动作时可大大提高保护装置的性能。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] 王亚强, 焦彦军, 张延东. (超)高压输电线路故障选相现状及其发展. 继电器, 2004, 32(24): 72-77.
WANG Yaqiang, JIAO Yanjun, ZHANG Yandong. Current status and development of fault phase selection of (E) HV transmission lines. Relay, 2004, 32(24): 72-77.
- [3] 许正亚. 输电线路新型距离保护. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [4] 焦邵华, 刘万顺, 张振华, 等. 电力系统振荡中不对称故障的选相方法. 华北电力大学学报, 1999, 26(2): 6-11.
JIAO Shaohua, LIU Wanshun, ZHANG Zhenhua, et al. A new approach to select the fault phase of unbalance fault during power swing. Journal of North China Electric Power University, 1999, 26(2): 6-11.
- [5] 吴大立, 尹项根, 胡玉峰, 等. 高压线路保护实用选相方案. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 50-54.
WU Dali, YIN Xianggen, HU Yufeng, et al. Utility fault phase selector scheme for high voltage transmission line protection. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 50-54.
- [6] 陈朝晖, 黄少锋, 陶惠良, 等. 新型阻抗选相方法. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 51-56.
CHEN Zhaohui, HUANG Shaofeng, TAO Huiliang, et al. Research on the new phase selector based on impedance measurement. Automation of Electric Power Systems, 2005,

29(3): 51-56.

- [7] 许庆强, 索南加乐, 柳焕章, 等. 基于相间故障弧光电压特征的高压线路选相元件. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 65-70.
XU Qingqiang, SUONAN Jiale, LIU Huanzhang, et al. Fault phase selector for HV transmission line protective relaying based on the characteristic of the arc voltage between two faulted phases. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 65-70.
- [8] 索南加乐, 刘凯, 刘世明, 等. 一种新的高压线路振荡选相元件. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 949-953.
SUONAN Jiale, LIU Kai, LIU Shiming, et al. New fault phase selector for high voltage transmission line protective relaying during power swing. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(8): 949-953.
- [9] MECHRAOUI A, THOMAS D W P. A new distance protection scheme which can operate during fast power swings// Proceedings of 6th International Conference on Developments in Power System Protection, March 25-27, 1997, Nottingham, UK. Stevenage, UK: IEE, 1997: 206-209.
- [10] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 对模故障分量选相元件的一些探讨. 电工技术学报, 2001, 16(6): 70-76.
LIN Xiangning, LIU Pei, LIU Shiming, et al. Studies on phase selector based on model transformation and fault component. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(6): 70-76.
- [11] 徐振宇, 杨奇逊, 刘万顺, 等. 一种序分量高压线路保护选相元件. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 214-216.
XU Zhengyu, YANG Qixun, LIU Wanshun, et al. A sequence fault phase selector for transmission line protective relay. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 214-216.

毛 鹏(1973—),男,通信作者,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统故障分析、继电保护、二次系统运行维护。E-mail: maopeng7073@vip.sina.com.cn

戴 斌(1978—),男,工程师,主要研究方向:继电保护系统维护、检修及管理。

白日昶(1952—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化、电力通信。E-mail: brc@sina.com

A New Type of Fault Phase Selector During Power Swing

MAO Peng, DAI Bin, BAI Richang

(Jiangxi Electric Power Company Extra-high Voltage Sub-company, Nanchang 330006, China)

Abstract: The result of fault phase selector during power swing is a precondition to switch off the correct fault phase and ensure the right operation of distance protection relays. Based on the analysis of the performances of present selector during power swing, such as the delay of operating and being easy to select false fault phases, and therefore causing false operating of distance protection relay, a novel fault phase selector is presented. The selector firstly uses the zero-sequence and negative-sequence components to distinguish the different fault types, and based on the fault phase recognition, the impedance measure in the presented selector is not used, and Clark transformation is adopted and the model components of α and β are used to select the farther fault phases. This selector fully utilizes the characteristics of zero-sequence, negative-sequence, and the advantages of model components, such as little computation error without phasor deflection during power swing. It can effectively avoid the malpractices of impedance selector during power swing. The simulation results based on RTDS are presented, and the theory and testing results show that this phase selection measure can quickly and correctly select the fault phases during power swing in a reliable way.

Key words: line protection; fault phase selector; model transformation; power swing

附录 A

本文以 A 区的 AG 和 BCG 故障为例给出选相逻辑流程图, 其他故障区雷同。对于两相短路故障的区分本文不做详细论述, 基本思路同接地故障的类型区分。图 A1 的流程只是便于理解选相逻辑, 对于工程实现后的实际选相逻辑流程, 要充分考虑一些具体的环节, 鉴于篇幅, 不详细画出。图 A1 中判据 1.1、判据 1.2 分别对应正文中判据式 (4)、式 (5), 判据 2.1、判据 2.2 分别对应正文中判据式 (6)、式 (7)。

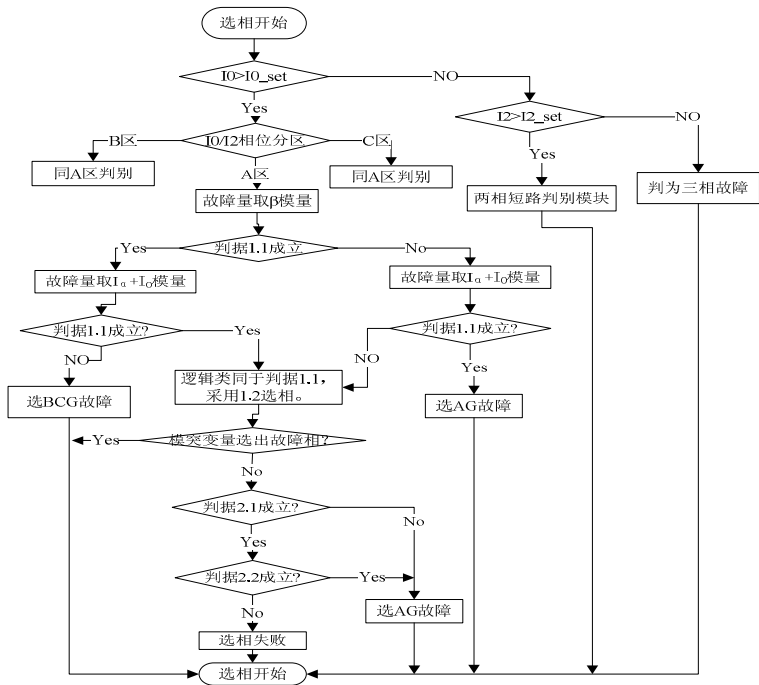


图 A1 选相流程图

Fig.A1 Flow chart of fault phase selector