

基于分层模糊推理的快速综合故障选相新算法

叶朝辉, 黄康乐, 孔凡坊, 潘剑虹, 王金怡

(温州市电力局, 浙江 温州 325000)

摘要: 提取了用于故障选相的特征参数, 从模糊模式识别的角度, 制定了识别故障类型和故障相别的隶属函数及模糊规则, 提出了基于分层模糊推理的快速综合故障选相元件新算法。ATP 仿真表明, 该算法能够正确完成故障选相, 不受故障位置、类型、初始角、过渡电阻等因素的影响, 无误判和漏判现象, 具有很好的可靠性, 适用于超高压电网行波保护或暂态量保护。
关键词: 故障选相; 特征参数; 模糊模式识别; 超高压

New algorithm of speedy comprehensive faulty phase selection based on stratified fuzzy reasoning

YE Chao-hui, HUANG Kang-le, KONG Fan-fang, PAN Jian-hong, WANG Jin-yi
(Wenzhou Electric Power Bureau, Wenzhou 325000, China)

Abstract: The fault feature parameters are extracted, membership functions and fuzzy rules for identifying pattern of fault and selecting phase of fault are developed from perspective of fuzzy pattern recognition, and new algorithm of speedy comprehensive faulty phase selection based on stratified fuzzy reasoning is presented. Simulation on ATP program indicates that the new approach can select fault phase correctly, and its performance can also endure the influences of various factors, including fault distances, types, inception angles, fault path resistance, and is reliable in traveling-wave protection or transient-based protection.

Key words: faulty phase selection; feature parameters; fuzzy pattern recognition; extra high voltage

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0010-06

0 引言

目前, 随着暂态量保护研究的显著进展^[1], 研究新型的快速故障选相元件已势在必行, 这对有选择性地跳开故障相和实现超高压输电线路单相或三相自动重合闸是至关重要的。

基于行波的故障选相易受故障电弧、初始角、过渡电阻等不确定因素的影响^[2-3]; 而基于暂态量的故障选相能够克服以上缺陷^[4-5]。但是仅依靠故障暂态量进行选相需要对每一个特征参数的门槛进行整定, 而门槛的整定很难给出一套完善的整定原则。为此, 将模糊理论引入到基于暂态故障选相中不失为一种好的方法^[6]。本文从模式识别的角度, 提取了识别故障类型和判断故障相别的特征参数, 并结合模糊理论, 提出了基于分层模糊推理的快速综合故障选相新算法。ATP 仿真表明该故障选相算法具有很好的选相性能。

1 故障特征分析

利用 Clark 相模变换技术^[7]求解故障附加网络

中的故障分量, 如表 1 所示。

表 1 不同故障类型下的电流故障分量

Tab.1 Current fault components in case of different type faults

故障类型	AG	BCG	BC	ABC
i_{0f}	$\frac{-U_{fA}}{2Z_{c1} + Z_{c0}}$	$\frac{3U_{fA}}{2Z_{c1} + Z_{c0}}$	0	0
i_{1f}	$2i_{0f}$	$-i_{0f}$	0	$\frac{-3U_{fA}}{Z_{c1}}$
i_{2f}	0	$\frac{-3U_{fA}e^{-j90^\circ}}{Z_{c2}}$	$\frac{U_{fA}e^{-j90^\circ}}{Z_{c2}}$	$\frac{3U_{fA}e^{-j90^\circ}}{Z_{c2}}$
i_A	$\frac{-U_{fA}}{2Z_{c1} + Z_{c0}}$	0	0	$\frac{-U_{fA}}{Z_{c1}}$
i_B	0	$\frac{1.5U_{fA}}{2Z_{c1} + Z_{c0}} - \frac{\sqrt{3}U_{fA}e^{-j90^\circ}}{2Z_{c2}}$	$\frac{\sqrt{3}U_{fA}e^{-j90^\circ}}{2Z_{c2}}$	$\frac{U_{fA}}{2Z_{c1}} + \frac{\sqrt{3}U_{fA}e^{-j90^\circ}}{2Z_{c2}}$
i_C	0	$\frac{1.5U_{fA}}{2Z_{c1} + Z_{c0}} + \frac{\sqrt{3}U_{fA}e^{-j90^\circ}}{2Z_{c2}}$	$-i_B$	$\frac{U_{fA}}{2Z_{c1}} - \frac{\sqrt{3}U_{fA}e^{-j90^\circ}}{2Z_{c2}}$

1.1 故障类型特征

a) 零模量: 单相或两相接地短路 $i_{0f} \neq 0$, 实

际上为接地电流, 数值相对较大; 而两相或三相短路时零模量 $i_{0f} = 0$ 。

b) 线模量: 单相接地短路时, $i_{1f} \neq 0, i_{2f} = 0$; 两相短路时 $i_{1f} = 0, i_{2f} \neq 0$; 而两相接地短路和三相短路时, 两个线模量都不为零。

1.2 故障相别特征

a) 单相接地短路: 三个故障分量中最大者对应故障相, 与故障相无关的两个故障分量为零。

b) 两相接地短路: 非故障相的故障分量为零, 与故障相相关的两故障分量无明显特征。

c) 两相短路: 非故障相的故障分量为零, 两故障相的故障分量幅值相等, 但极性相反。

d) 三相短路: 三个故障分量之间无明显特征。

2 故障选相算法中的特征提取

2.1 区分故障类型的特征参数

设三个电流模量 (i_{0f}, i_{1f}, i_{2f}) 和三相电流量 (i_A, i_B, i_C) 正交小波变换的某尺度归一化能量分别为 (e_0, e_1, e_2) 和 (e_A, e_B, e_C); 将 (e_A, e_B, e_C) 进行大小排序, 记为 ($e_{\min}, e_{\text{mid}}, e_{\max}$)。由上述故障特征分析, 可以总结出:

a) 零模量 e_0

当发生接地短路故障时, $e_0 \neq 0$, 且数值较大; 当发生相间短路故障时, 理想情况下 $e_0 = 0$, 即便是在不换位线路中零模分量也很小, 近似为零。

b) 模域中 $r_m = e_2/e_1$

单相接地短路时, $r_m = e_2/e_1$ 很小, 基本为零; 两相接地短路和三相短路时, $r_m \neq 0$; 两相短路时, $r_m = e_2/e_1$ 很大, 理论值趋于 ∞ 。

c) 相域中 $r_{p1} = e_{\min}/e_{\text{mid}}$

单相接地短路时 $r_{p1} = e_{\min}/e_{\text{mid}}$ 的值基本上为 1; 两相短路和两相接地短路时 $r_{p1} \approx 0$; 而三相短路时 r_{p1} 无明显特征。

d) 相域中 $r_{p2} = e_{\text{mid}}/e_{\max}$

单相接地短路时, $r_{p1} = e_{\text{mid}}/e_{\max}$ 基本为零; 两相接地短路和相间短路时, 无明显特征, 但数值一般比较大, 不会为零。

e) i_{0f} 与 i_{1f} 之间的曼哈坦距离 (Manhattan) d_{M10}

定义序列 $x(n), y(n)$ 的 Manhattan 距离为:

$$d_M = \sum_{n=1}^N |x(n) - y(n)| \quad (1)$$

Manhattan 距离反映两序列的接近程度。两相短路中 $i_{0f} = i_{1f} = 0$, 故二者之间的 Manhattan 距离 $d_{M10} = 0$, 而其他类型的故障无此特征。

2.2 区分故障相别的特征参数

定义如下三个相关系数:

$$\rho_{AB} = \frac{R_{AB}}{\sqrt{R_{AA} + R_{BB}}}, \rho_{BC} = \frac{R_{BC}}{\sqrt{R_{BB} + R_{CC}}}, \rho_{AC} = \frac{R_{AC}}{\sqrt{R_{AA} + R_{CC}}},$$

$$\text{其中: } R_{XY} = \sum_{k=n}^{n+N-1} c_X(j, k) \cdot c_Y(j, k), \quad R_{XX} = \sum_{k=n}^{n+N-1} c_X^2(j, k).$$

由故障相别特征可知, 单相接地短路时, 非故障相的故障电流相等且基本为零, 为正相关, 即 $\rho = 1$; 两相短路时, 故障相的两故障电流具有负相等的关系, 即 $\rho = -1$; 两相接地短路时, 三故障相之间无明显的相关性关系, 故 $-1 < \rho_{AB}, \rho_{BC}, \rho_{AC} < 1$ 。但可以通过非故障相的故障电流为最小来选出故障相别。

3 基于分层模糊推理的快速综合故障选相

利用模糊逻辑理论, 将多个特征进行模糊综合, 制定反映故障类型和相别的隶属函数及模糊规则, 进而建立两层模糊推理结构: 模糊判别故障类型和模糊识别故障相别, 如图 1 所示。

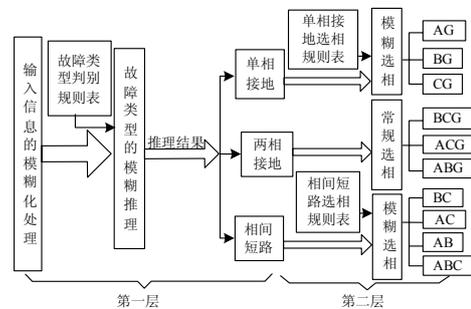


图 1 基于分层模糊推理的故障选相识别框架
Fig.1 Identifying framework of faulty phase selection based on stratified fuzzy reasoning

3.1 基于模糊推理的故障类型识别

3.1.1 特征参数的模糊化及其隶属函数的确定

考虑本线路末端故障时零模量在传输中的衰减, 将 $e_0 > 0.001$ 视为接地性故障, $0.0005 \sim 0.001$ 置为模糊区。 e_0 的隶属函数如图 2 所示, 输出为 λ_1 。

单相接地短路时, $r_m \approx 0$, 其他故障类型时 $r_m \neq 0$, 考虑到故障暂态的不确定性, 将 $0.02 \sim 0.1$ 置为模糊区, 输出为 λ_2 ; r_{p1} 在单相接地短路时基本为 1, 两相短路和两相接地短路时 $r_{p1} \approx 0$, 三相

短路时, r_{p1} 无明显特征, 为此, 将 r_{p1} 的模糊区置为 0.2~0.8, 输出为 λ_3 ; r_{p2} 在单相接地短路时为 0, 两相接地短路和相间短路时, 无明显特征, 但数值比较大, 不会为 0, 可置 0.1~0.9 为 r_{p2} 的模糊区, 输出为 λ_4 。三个特征参数的隶属函数如图 3 所示。

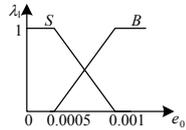


图 2 e_0 的隶属函数

Fig.2 Membership function of e_0

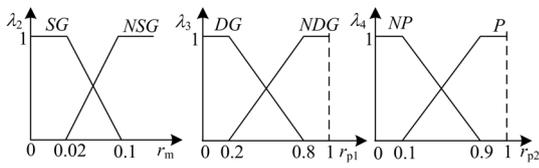


图 3 r_m 、 r_{p1} 、 r_{p2} 的隶属函数

Fig.3 Membership function of r_m , r_{p1} and r_{p2}

3.1.2 模糊判别故障类型的规则

根据故障特征量 e_0 、 r_m 、 r_{p1} 、 r_{p2} 的隶属函数, 制定出故障类型模糊判据的规则如表 2 所示。

表 2 故障类型模糊识别规则

Tab.2 Fuzzy rule of identifying fault type

故障类型	e_0	r_m	r_{p1}	r_{p2}
SG	B	SG	NDG	NP
DG	B	NSG	DG	P
P	S	NSG	DG	P

对以上四个模糊输出设定权值时, 考虑到故障发生的随机性, 可将模糊判别设置相等的权值系数。式 (2) 是第一层判别故障类型的模糊输出:

$$\lambda_{outli} = 0.25(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) \quad (2)$$

其中: i 代表每种故障类型。

根据最大化隶属原则, 得到:

$$R_{outl} = \max(\lambda_{outli}) \quad (3)$$

综合评判的最大输出所对应的故障类型即为模糊判别结果。

需要说明的是: 在两相接地短路时 0 模量较之于其的最大模量较小, 尤其是在当 0 模量在 0° 初始角时, e_0 的值将很小, 可能会落入其模糊区, 甚至会进入到 S 区, 从而将两相接地短路误判为相间短路类型。加以解决的方法是在第二层模糊选相根据选相矛盾进行上述误判的自动校正。

3.2 基于常规判别和模糊推理的故障相识别

3.2.1 单相接地短路的模糊选相

根据相关系数的隶属函数 (如图 4) 和模糊选相的规则 (如表 3) 进行单相接地短路下的模糊选相。

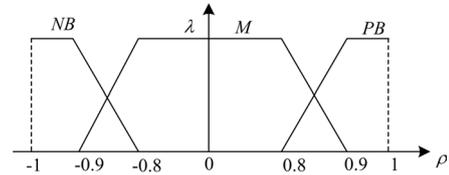


图 4 相关系数 ρ 的隶属函数

Fig.4 Membership function of correlation coefficient ρ

表 3 单相接地短路的模糊选相规则

Tab.3 Fuzzy rule of phase selection for single-phase ground

故障相别	ρ_{AB}	ρ_{BC}	ρ_{AC}
AG	M	PB	M
BG	M	M	PB
CG	PB	M	M

设 ρ_{AB} 、 ρ_{BC} 、 ρ_{AC} 的输出分别为 λ_5 、 λ_6 、 λ_7 ,

综合输出为:

$$\lambda_{out2i} = 10/3 \cdot (\lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \quad (4)$$

其中: i 分别表示三种故障相别。

$$R_{out2} = \max(\lambda_{out2i}) \quad (5)$$

综合评判的最大输出所对应的故障相即为单相接地短路的模糊选相结果。

3.2.2 两相接地短路的常规选相

利用如下方法完成两相接地短路时的故障相识别, 即:

if $e_{\min} = e_A$ then \rightarrow BCG 故障

if $e_{\min} = e_B$ then \rightarrow ACG 故障

if $e_{\min} = e_C$ then \rightarrow ABG 故障

3.2.3 相间短路的模糊选相

相间短路的故障选相不仅要在区分三相及两相短路的基础上选出故障相, 同时还要对可能误判到此故障类型下的两相接地短路进行校正。

选择相关系数和 Manhattan 距离 d_{M10} 作为两相短路模糊选相的特征参数。相关系数的隶属函数仍为图 4。 d_{M10} 的隶属函数如图 5, 系数 a 和 b 可以通过仿真确定, 本文通过大量仿真确定 $a = 50$, $b = 90$ 。两相短路故障时的模糊选相规则如表 4。

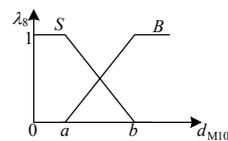


图 5 d_{M10} 的隶属函数

Fig.5 Membership function of d_{M10}

表 4 两相短路的模糊选相规则

Tab.4 Fuzzy rule of phase selection for two-phase short-circuit

故障相别	ρ_{AB}	ρ_{BC}	ρ_{AC}	d_{M10}
BC	M	NB	M	S
AC	M	M	NB	S
AB	NB	M	M	S

综合输出仍为:

$$\lambda_{out3i} = 0.25 \cdot (\lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \quad (6)$$

$$R_{out3} = \max(\lambda_{out3i}) \quad (7)$$

对 R_{out3} 设置一门槛值 $R_{set} = 0.8$ 。如果 $R_{out3} \geq R_{set}$, 表明该故障是两相短路, 进而选出故障相别; 如果 $R_{out3} < R_{set}$, 则表明该故障不是两相短路, 则可能是三相短路或两相接地短路。

两相接地短路时 $i_{1f} = -i_{0f}$, 有 $E_{1f} \approx E_{0f}$ 即 $re_{01} = E_{0f}/E_{1f} \approx 1$; 三相短路时, $i_{0f} = 0, i_{1f} \neq 0$, 有 $re_{01} = E_{0f}/E_{1f} \approx 0$ 。因此可利用此特征差异来识别和区分三相短路和两相接地短路。 re_{01} 的隶属函数如图 6 所示; 模糊规则如表 5 所示。

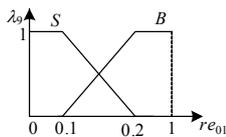


图 6 re_{01} 的隶属函数

Fig.6 Membership function of re_{01}

表 5 相间短路故障类型下进一步判别三相短路和两相接地短路的模糊规则

Tab.5 Fuzzy rule for further identifying the fault type between three-phase and two-phase short-circuit

故障类型	re_{01}
三相短路 (ABC)	S
两相接地短路 (DG)	B

re_{01} 的输出为 λ_9 , 根据最大隶属度原则, 有:

$$R_{out4} = \max(\lambda_{9i}) \quad (8)$$

通过以上方法就可以完成相间短路故障类型下, 两相短路的模糊选相和三相短路的识别以及两相接地短路误判到此类型下的二次校正。

4 故障选相算法的 ATP 仿真

图 7 为 500 kV 超高压输电系统, 线路采用 J.Marti 频率相关模型, 结构参数取自平武线。考察基于分层模糊推理的故障选相元件算法随故障位置、初始角、过渡电阻变化时的选相性能。仿真中采样频率为 400 kHz, 采用 DB4 小波对各特征量进

行三尺度分解, 得到第三尺度空间的小波变换系数。取故障后第三尺度 1 ms 内的数据进行分析。

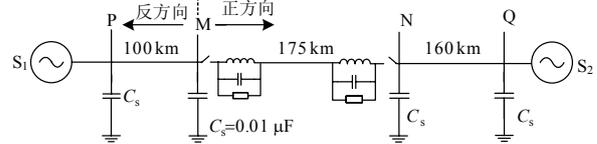


图 7 500 kV 超高压输电系统

Fig.7 500 kV EHV transmission system

4.1 不同位置故障时选相元件的仿真测试

故障初始角为 30° , 过渡电阻为 100Ω , 考察在被保护线路内部距保护 1 km、50 km、100 km、174 km 处故障时的选相结果。

4.1.1 故障类型的模糊识别

图 8 给出了每种类型的故障下判为四种不同类型故障时的隶属度, 其中最大隶属度所对应的故障类型即为模糊判别结果, 用“○”表示。由图 8 可以看出: 不同位置故障时, 四种不同类型的故障均能够被正确地分类到相应的模式空间中, 判别非常明确, 且不受故障位置的影响。

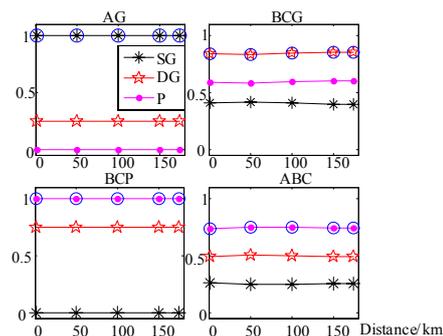


图 8 不同位置故障时故障类型的判别结果

Fig.8 Identifying results of fault type in case of different locations

4.1.2 故障相别的综合评判

综合评判故障相别的部分仿真结果如表 6~9 所示。由表可以看出: 故障选相元件的第二层均能够在识别故障类型的基础上通过综合评判, 正确选出故障相别, 且选相性能不受故障位置的影响。

表 6 不同位置 AG 故障时故障相别的模糊评判结果

Tab.6 Fuzzy identifying results of phase selection for different locations when AG fault

故障位置/km	ρ_{AB} / λ_5	ρ_{BC} / λ_6	ρ_{AC} / λ_7	R_{out2}	选相结果
1	-0.76/1	0.93/1	-0.74/1	1	AG
50	-0.82/0.85	0.94/1	-0.73/1	0.95	AG
100	-0.86/0.42	0.94/1	-0.83/0.69	0.70	AG
174	-0.89/0.06	0.93/1	-0.87/0.29	0.45	AG

表 7 不同位置 BCG 故障时故障相别的常规评判结果
Tab.7 Identifying results of phase selection for different locations in case of BCG fault

故障位置/km	e_A	e_B	e_C	e_{min}	选相结果
1	0.003	1	0.38	0.003	BCG
50	0.006	1	0.37	0.006	BCG
100	0.009	1	0.40	0.009	BCG
174	0.013	1	0.43	0.013	BCG

表 8 不同位置 BC 故障时故障相别的模糊评判结果
Tab.8 Fuzzy identifying results of phase selection for different locations in case of BC fault

故障位置/km	ρ_{AB}/λ_5	ρ_{BC}/λ_6	ρ_{AC}/λ_7	d_{M10}/λ_8	R_{out3}	选相结果
1	-0.18/1	-0.99/1	0.15/1	26.2/1	1	BC
50	-0.25/1	-0.99/1	0.20/1	39.9/1	1	BC
100	-0.28/1	-0.99/1	0.22/1	54.6/0.89	0.97	BC
174	-0.31/1	-0.99/1	0.24/1	74.4/0.39	0.85	BC

表 9 不同位置三相短路时的模糊评判结果
Tab.9 Fuzzy identifying results of phase selection for different locations in case of three-phase fault

故障位置/km	d_{M10}/λ_8	R_{out3}	re_{01}/λ_9	判别结果
1	2271.6/0	0.25	0.0036/1	ABC
50	2078.3/0	0.25	0.0052/1	ABC
100	2069.2/0	0.25	0.0064/1	ABC
174	2060.3/0	0.25	0.0078/1	ABC

4.2 不同初始角故障时选相元件的仿真测试

在距保护安装 100 km 处，过渡电阻 100 Ω ，考察在 0.024~0.034 s（初始角为 $-24^\circ\sim 157^\circ$ ）内故障时的选相性能。仿真中每隔 0.000 2 s 设置一次故障。

4.2.1 故障类型的模糊识别

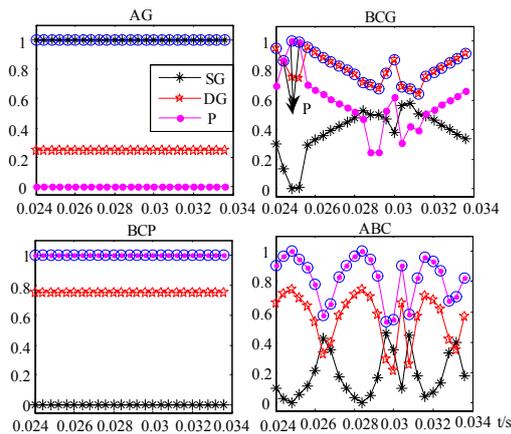


图 9 不同初始角故障时故障类型的判别结果

Fig.9 Identifying results of fault type in case of different fault inception angles

由图 9 可以看出：两相接地短路和三相短路受

初始角的影响较大，但三相短路仍能够可靠正确地判别为相间短路（即 P 类型）故障；两相接地短路在少数情况下会被误判为相间短路故障。

之所以会出现上述的误判，其原因是此类故障发生在 0 模电流过零点附近，图 10 给出了 0.025 4 s 发生两相接地短路时的各模量波形，由图 10 可知，该时刻故障时 0 模量相对于其他两个模量基本为零，不具有接地性短路的基本特征，经第一层模糊识别将其误判为相间短路。如图 9 右上子图中所标出的三个误判情况，针对此问题，将用本文前面提出的二次校正解决之。

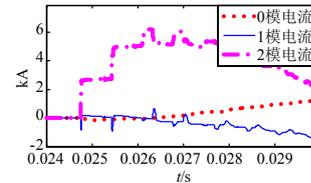


图 10 0.025 4 s 发生两相接地短路时的模电流波形
Fig.10 Modal current traveling-wave in case of two-phase ground fault at 0.025 4 s

4.2.2 故障相别的综合评判

在识别故障类型的基础上，进行第二层故障相别的综合评判，评判结果如表 10 和表 11 所示。

表 10 两相接地短路误判为相间故障时的校正及选相结果
Tab.10 Correction and phase-selection results in case of two-phase ground fault misjustice as phase-fault

故障时刻/s	R_{out3}	re_{01}/λ_9	校正结果	e_A	e_{min}	选相结果
0.024 4	0.75	0.52/1	DG	0.002 8	0.002 8	BCG
0.024 6	0.75	0.40/1	DG	0.002 8	0.002 8	BCG
0.024 8	0.75	0.25/1	DG	0.002 9	0.002 9	BCG

表 11 三相短路在不同故障初始角时的模糊评判结果

Tab.11 Fuzzy identifying results of phase selection for different fault inception angles in case of three-phase fault

故障时刻/s	R_{out3}	re_{01}/λ_9	判别结果	故障时刻/s	R_{out3}	re_{01}/λ_9	判别结果
0.024 2	0.31	0.018/1	ABC	0.025 8	0.25	0.012/1	ABC
0.024 4	0.74	0.027/1	ABC	0.026	0.25	0.010/1	ABC
0.024 6	0.75	0.044/1	ABC	0.027	0.25	0.006/1	ABC
0.024 8	0.75	0.047/1	ABC	0.028	0.38	0.005/1	ABC
0.025	0.68	0.032/1	ABC	0.029	0.27	0.003/1	ABC

由表 11 可以看出：当两相接地短路误判到相间短路类型中时，通过第二层的再次模糊判别，能够正确识别为两相接地短路，从而完成了两相接地短路误判为相间短路时的自动校正，通过校正，均能够正确识别出该故障类型和故障相别。

文中还对不同过渡电阻故障时对该故障选相元件进行了仿真(限于篇幅这里就不再列出)。仿真结果也表明,该故障选相元件同样不受过渡电阻的影响,具有很好的选相性能。

5 结论

本文提出的基于分层模糊推理的快速综合故障选相元件具有以下特点:

1) 能够准确识别出故障的类型和综合评判出故障的相别。由于各特征参数均采用了归一化能量,因此选相性能不受故障位置和过渡电阻的影响,受故障初始角的影响较小。

2) 在少数情况下,两相接地短路会误判为相间短路,但经过校正,仍能可靠识别且选出故障相别。

3) 在计算各特征参数时,选取故障分量在 1 ms 内的小波变换低频尺度能量,计算量小,满足快速故障选相的要求,具有实用性。

参考文献

- [1] Jiang Joe-Air, Chen ching-shan, Liu Chi-wen. A New Protection Scheme for Fault Detection, Direction Discrimination, Classification and Location in Transmission Lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18 (1): 34-42.
- [2] DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu. A Novel Approach to Faulted-phase Selection Using Current Traveling Waves and Wavelet Analysis[A]. in: IEEE Power Con[C]. Kunming(China): 2002.1146-1150.
- [3] 段建东,张保会,周艺.利用电流行波进行超高压输电线路故障类型识别的研究[J].中国电机工程学报, 2005, 25 (7): 58-62.

- DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Study of Fault-type Identification Using Current Traveling-waves in Exrea-high-voltage Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (7): 58-62.
- [4] Omar A S. New Algorithm to Phase Selection Based on Wavelet Transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (4): 908-914.
- [5] 段建东,张保会,周艺,等.基于暂态量的超高压输电线路故障选相[J].中国电机工程学报,2006,26(3): 1-6.
- DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi, et al. Transient-based Faulty Phase Selection in EHV Transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (3): 1-6.
- [6] 姜惠兰,梁昭君,杨维,等.基于模糊逻辑的高压输电线路故障类型识别新方法[J].电工电能新技术,2004,23(1): 60-63.
- JIANG Hui-lan, LIANG Zhao-jun, YANG Wei, et al. Fuzzy Logic Based High Voltage Transmission Line Fault Type Recognition[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23 (1): 60-63.
- [7] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术(第二版)[M].西安:西安交通大学出版社,2007.

收稿日期:2009-03-18; 修回日期:2009-06-26

作者简介:

叶朝辉(1970-),男,本科,工程师,从事电力系统及自动化方面的技术管理工作;

孔凡坊(1984-),男,硕士,从事继电保护及电力系统自动化方面的工作。E-mail: kongfanfang2002@126.com

(上接第9页 continued from page 9)

- GUO Yong-ji. The Reliability Analysis of Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [8] 李丽,华栋.配电网拓扑节点编号方案及其潮流计算[J].华东电力,2005,33(4): 17-20.
- LI Li, HUA Dong. Node Numbering Plan for Distribution Network Topology and its Flow Calculation[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (4): 17-20.
- [9] 齐德昱.数据结构与算法[M].北京:清华大学出版社,2003.
- QI De-yu. Data Structure and Algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

- [10] Billinton R, Jonavithula S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (4): 1670-1676.

收稿日期:2009-03-01; 修回日期:2009-09-01

作者简介:

王辉(1983-)女,硕士研究生,主要研究电力系统分析与控制;

黄丽华(1963-),女,硕士,教授,硕士生导师,主要从事配电网及其自动化及信息处理方面的教学与科研工作。E-mail: bdhllh@yahoo.com.cn