

变压器外部故障切除后差动保护误动原因的分析

张晓宇, 毕大强, 苏鹏声

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 变压器外部故障切除后, 暂态磁通可能超过变压器铁心的饱和点, 从而产生一定的恢复性涌流。同时, 外部故障过程中电流可能有很大的非周期分量, 使 CT 进入饱和区。这两方面因素均有可能使差动保护在故障切除后误动。该文首先对变压器磁链进行理论推导, 然后建立变压器和 CT 模型进行仿真, 并通过实验验证结果。进一步推导得出了影响恢复性涌流大小的因素, 研究了各种状态下涌流对差动保护的影响以及 CT 饱和的作用。最后综合考虑涌流和 CT 饱和, 分析保护误动的主要原因。

关键词: 外部故障; 恢复性涌流; CT饱和; 差动保护; 误动

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)01-0005-05

0 引言

近年来, 变压器差动保护误动时有发生, 其中有一部分是在变压器区外发生故障, 其它保护将故障切除, 变压器恢复正常工作后发生误动。由于情况比较复杂, 对保护误动的原因至今还没有公认的解释。文献 [2, 5, 6] 从故障切除后的磁链出发, 指出影响恢复性涌流的因素, 研究了恢复性涌流对保护的影响, 但没有考虑 CT 饱和的作用。本文在其基础上推导出较完整的变压器故障前后的电流、磁链表达式, 从而研究涌流的特性和影响。并对 CT 饱和情况进行分析, 指出故障切除时影响 CT 饱和的主要因素及相应 CT 误差电流的性质。由于实际中两种因素的影响都可能存在, 因此还进行了综合考虑, 指出两种因素相互作用, 在一定条件下, 更易使保护误动。

1 恢复性涌流的理论分析

图 1 为变压器外部故障时系统接线图。设时间 $t=0$ 时 K 处发生三相接地短路故障, 短路电流流过变压器, 变压器励磁电势降低。 $t =$ 时故障切除, 变压器励磁电势恢复正常, 此恢复过程可能产生恢复性涌流, 下面对其产生原理及影响其大小的因素进行分析。为方便起见, 考虑 Y-Y 接法的变压器, 可取其一相进行分析。 Y 接法的影响将在后面进一步说明。

1.1 故障前后的磁链和电流

1.1.1 正常运行时

设正常运行时 a 相原边电压为:

$$u_a = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

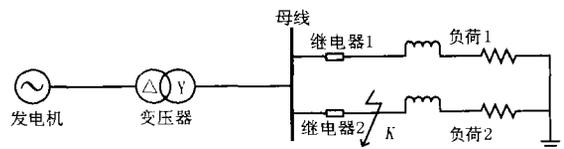


图 1 变压器外部故障时系统接线图

Fig 1 Connection diagram of transformer subjected to an external fault

其中: φ 为 $t=0$ 时 a 相电压相角。

此时励磁电流很小, 原边电流与副边折合电流近似相等。原边电流为:

$$i_a = I_m \sin(\omega t + \varphi - \alpha) \quad (2)$$

其中: α 为负荷阻抗角。

由于励磁电势 e_a 与 u_a , 磁链可表示为:

$$\psi_a = -\frac{1}{\omega} I_m \cos(\omega t + \varphi - \alpha) \quad (3)$$

1.1.2 短路故障时

设 $t=0$ 时, 变压器外部发生三相接地短路故障。励磁电势变为:

$$e_a = h u_a \quad (4)$$

h 为励磁电势降落深度, 取值在 0~1 之间。

忽略励磁电流, 设短路时电流交流分量幅值为 I_k , 短路前后电流不突变, 有:

$$i_a = I_k \sin(\omega t + \varphi - \alpha_k) + I_{dec} e^{-t/T_k} \quad (5)$$

其中: $I_{dec} = I_m \sin(\varphi - \alpha) - I_k \sin(\varphi - \alpha_k)$ 为电流衰减直流分量的初值, α_k 为短路回路阻抗角。

短路前后变压器磁链不能突变, 短路后磁链为:

$$\psi_a = \int_0^t e_a dt + \psi_a(0) \quad (6)$$

其中: $\psi_a(0)$ 为 $t=0$ 时磁链大小, R_{2k}, L_{2k} 为短路后副边总的电阻和电感。

励磁电势实际为:

$$e_a = R_{2k} i_k + L_{2k} \cdot di_k / dt \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 后最后结果为:

$$a = -m h \cos(\omega t + \varphi) + f(t) \quad (8)$$

$f(t)$ 为直流衰减部分, 其大小为:

$$f(t) = -I_{dec} (L_{2k} - T_k R_{2k}) (1 - e^{-t/T_k}) - (1-h) m \cos \omega t \quad (9)$$

其中: T_k 为短路后系统时间常数。

1.1.3 故障切除后

设 $t = t_0$ 时故障切除。此时磁链交流分量大小由励磁电势确定, 应同短路前一样。保证切除前后磁链不变, 得切除后磁链表达式如下:

$$a = [f(t_0) + m(1-h) \cos(\omega t_0 + \varphi)] e^{-(t-t_0)/T_s} - m \cos(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

图 2 为外部故障前后变压器磁链的仿真波形, $t = 0.2$ s 时发生故障, 故障时间 $t_f = 0.0753$ s, 波形分为三部分, 与上面的推导相对应。

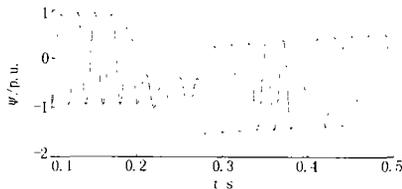


图 2 外部故障前后磁链变化

Fig 2 Variation of flux before and after external fault

1.2 恢复性涌流大小同各参数的关系

恢复性涌流大小主要受故障切除后的暂态磁链影响。暂态磁链中包含交流和衰减直流两部分, 交流部分大小一般固定, 因此衰减直流分量的初始值 (用 $f(t_0)$ 表示) 起着决定性的作用。从式 (10) 可以看出:

$$f(t_0) = -m(1-h) \cos(\omega t_0 + \varphi) - I_{dec} (L_{2k} - T_k R_{2k}) \cdot (1 - e^{-t_0/T_k}) + m(1-h) \cos(\omega t_0 + \varphi) \quad (11)$$

1.2.1 针对大型变压器简化磁链表达式

式 (11) 很复杂, 下面进行适当的简化。假设电流过零时故障切除, 对于大型变压器, 设短路总阻抗角 $\theta_k = 90^\circ$; 式 (11) 可简化为:

$$f(t_0) = -m \cos \theta_k [1 - h(1 - k)] \quad (12)$$

其中: $k = 1 - e^{-t_0/T_k}$, $\theta_k = \sin \theta_{2k} - \cos \theta_{2k} \tan \theta_k$

要满足 $I_k \sin(\omega t_0 - \theta_k) + I_{dec} e^{-t_0/T_k} = 0$ 。

1.2.2 各参数的影响

从以上的近似表达式中可以看出, 如果励磁曲线和 m (通常标么值约为 1) 固定, 则涌流大小主要受以下几个参数影响:

1) 短路时电压相角 θ_k 。| $\cos \theta_k$ | 越大, 涌流越大。

2) 励磁电势降落深度 h 越小, 涌流越大。

3) 短路持续时间 t_f 越长, 涌流越大。

4) 短路时总阻抗角 θ_k 和副边阻抗角 θ_{2k} 越大, θ_k 越小, 涌流越大。

1.2.3 恢复性涌流同空载合闸涌流的对比

设空载合闸前铁心剩磁为 φ_r , $t = 0$ 时刻合闸, 则磁链非周期初始值应为:

$$f = m \cos \varphi_r + \varphi_r \quad (13)$$

φ_r 是影响空载合闸涌流大小的主要因素。对于恢复性涌流, 将式 (12) 中的各参数取到极限情况, 有 $f(t_0) = -m \cos \theta_k$, 对比式 (13) 可知, 空载合闸可能产生的最大涌流应比故障切除时大很多。

2 仿真结果和谐波分析

2.1 改变各参数大小后涌流的变化

利用 matlab/simulink 建立仿真模型。变压器为三相, Y-Y 接法, 23 kV/230 kV, 50 MVA, 绕组电阻为 0.002 (p.u.), 漏抗为 0.05 (p.u.)。直接与电源相连, 带额定负荷。 $t = 0.2$ s 时在近端发生外部三相短路故障, 而后故障切除。

图 3 为不同参数下 a 相标么化后的结果。以图 3(a) 作为参考涌流, 其对应参数如下: $\cos \theta_k = 1$, $t_f = 0.0753$ s, $h = 0.330$, $\theta_k = 85.15^\circ$, $\theta_{2k} = 87.71^\circ$ 。图 3(b) ~ (f) 为改变各参数后的涌流大小。从仿真结果可以看出, 涌流大小随 $\cos \theta_k$, h , θ_k , θ_{2k} 几个参数变化, 基本符合所推导出的规律。

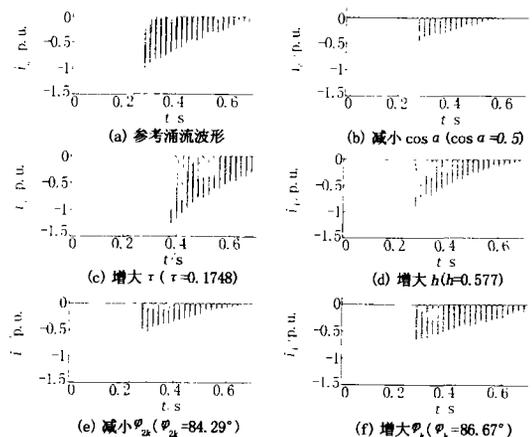


图 3 各参数下涌流的仿真波形

Fig 3 Simulation results of inrush under different conditions

2.2 Y-Y 接法的不同点

在研究 Y-Y 接法变压器的基础上, 建立了 Y-Y 接法的故障切除模型, 其仿真结果与 Y-Y 接

法略有不同。由于原边是 Y 接法,其它两相电压的恢复会对 a 相实际短路时间 t_a 有影响,从而影响涌流大小。但不同参数对 Y 接法涌流大小的影响总体上还是符合以上规律的。

2.3 差流谐波分析

表 1 是不同 α 下差流的谐波分析。可以看出,由于故障切除后制动电流较小,特定角度下基波可以达到启动阈值。但 Y-Y 接法谐波比一般在 70% 以上, Y 接法也在 40% 以上,可见单纯恢复性涌流有很大的二次谐波比,正常情况下可以制动。

表 1 差流谐波分析

Tab 1 Harmonic analysis of differential current

故障时 电压相角 / (°)	Y-Y 接法		Y 接法	
	基波同额定 电流比 / (%)	二次谐波 比 / (%)	基波同额定 电流比 / (%)	二次谐波 比 / (%)
0	40	75	27	68
15	39	74	29	53
30	34	77	33	44
45	25	77	31	45
60	13	87	28	52
75	3.0	97	23	67
90	0.08	0.20	19	79
105	2.2	96	10	86
120	12	90	4	105
135	24	80	7	85
150	34	78	14	79
165	38	76	22	73
180	40	74	27	67

3 实验结果及分析

为了验证仿真模型及相应结果的正确性,做了单相及 Y 接三相变压器短路后故障切除实验,并建立相应的仿真模型进行对比。变压器为 1 kVA, 110 V / 220 V, 短路电阻 2.84 Ω , 短路电抗 0.54 Ω 。

图 4 为实验波形同仿真的波形对比。短路时电流增大,由于变压器容量较小,短路时回路中电阻所占比例大,时间常数小,过渡过程很短。故障切除后电流恢复正常,原边产生一定涌流。可以看出,仿真与实验波形相符,计算所得的差流也基本相同。可以证明仿真模型能够模拟相应的实际情况。

实验表明涌流大小同以下两因素有关:

- (a)故障时刻电压相角 α 的余弦值。
- (b)切除时电流过零方向。

故障时刻影响 $\cos \alpha$ 决定故障时产生的磁链非周期分量的大小。切除时刻决定切除时电流过零方向,同时影响由于切除产生的磁链非周期分量的大小。若两因素方向相同,则产生涌流较大。表 2

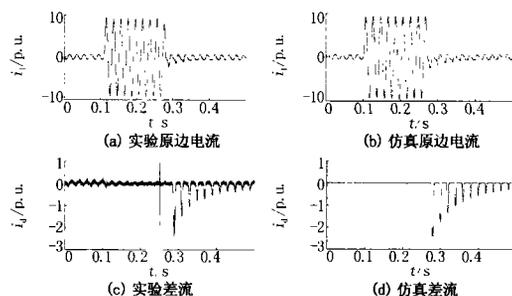


图 4 单相变压器仿真与实验对比

Fig 4 Comparison between simulation and experiment of single phase transformer

为涌流同参数的关系。设电流由正变负时,过零方向为正。

表 2 涌流与参数的关系

Tab 2 Relationship between inrush and parameters

数据	$\cos \alpha$	电流过零方向	涌流第一峰 值大小 / p.u.
1	0.766	+	2.33
2	0	+	0.78
3	0.866	+	2.73
4	0.5	-	0
5	0.645	+	2.11
6	0.866	-	2.89

涌流大小同故障切除后磁链的非周期分量有关,实验用的小型变压器电阻大, $k = 90$ 不再成立,对式 (12)重新化简:

$$f(t) = -m(1-h)\cos \alpha \pm m(1-h)\cos \alpha_k \quad (14)$$

可以看出, $f(t)$ 主要分为两部分。当回路各参数确定后,第一部分主要受 $\cos \alpha$ 影响;而第二部分的符号与切除时电流过零方向有关。推导同实验结果相符。

此外,还做了 Y 接三相变压器外部故障切除实验,实验同仿真结果基本相同。

对 Y 接三相变压器做了空载合闸实验。表 3 是空载合闸涌流和恢复性涌流的对比。可以看出,总体来说,故障切除涌流是要小于空载合闸的。

表 3 空载涌流和恢复涌流比较

Tab 3 Comparison between the inrush caused by no-load switching and the recovery inrush

数据	空载涌流最大值 / A			恢复涌流最大值 / A		
	a相	b相	c相	a相	b相	c相
1	17.8	14.5	17.8	14.0	23.9	22.5
2	9.6	33.1	34.2	4.3	9.5	8.8
3	6.8	31.7	31.9	48.3	47.7	13.1
4	75.0	93.4	104.5	23.8	20.2	15.5
5	53.5	85.2	99.8	10.5	21.2	21.3
6	80.5	83.4	94.5	4.5	12.0	10.2

实验结果和仿真的对比,证明了仿真模型的正确性,同时关于涌流的推导也与实验相符。

4 CT传变误差分析

变压器发生外部故障时,原副边电流幅值都很大,同时可能产生很大的非周期分量,使差动保护的P级CT进入饱和区。故障切除后,CT可能仍有一段时间处在饱和区,产生测量误差,影响差动保护正确动作。定义CT传变误差电流为CT原边电流与折合到原边的副边电流之差,以下简称为CT误差电流。

在CT参数确定后,影响其饱和程度的主要有三个因素:输入电流、剩磁与二次负荷。

1)对于变压器正常工作及各种故障状态来说,输入电流一般可分为两部分:交流分量和直流衰减分量。大的直流衰减分量更容易使CT进入饱和。图5、6、7为不同条件下外部故障及故障切除过程的CT误差电流。 $t=0.2$ 时发生故障,故障时间 $=0.0753$ 。其中图5为输入电流含不同非周期分量时的CT误差电流。

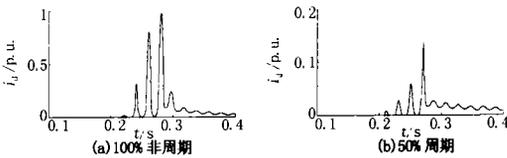


图5 电流非周期分量对CT误差电流的影响

Fig 5 Effect of aperiodic component on the error current of CT

2)P级CT通常会存在一定剩磁。如果输入电流产生的磁通偏移方向与剩磁相同,CT将更容易达到饱和。图6为不同剩磁下的CT误差电流。

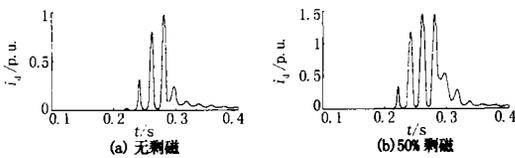


图6 剩磁对CT误差电流的影响

Fig 6 Effect of the residual magnetism on the error current of CT

3)二次负荷的影响比较复杂。首先,负荷越大,CT越易饱和。其次负荷的阻抗角对饱和时的波形也有很大影响。对于暂态过程,通常电感对偏移电流阻抗低,因此电感分量越大,达到饱和时间越长。而电阻分量越大,进入饱和时间短,相应退出饱和也较快。从误差电流的性质来说,CT带电感负荷时,故障切除后的误差电流中有较小的二次谐波。

图7为不同负荷下的CT误差电流。

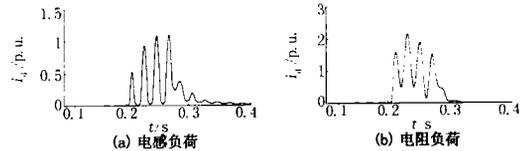


图7 不同负荷下CT误差电流

Fig 7 Error current of CT under different loads

若故障前CT有较大剩磁,且负荷阻抗角较大,就可能在故障切除后的一小段时间内仍然处在饱和区,产生较大的误差电流,如果变压器原副边CT误差电流不一致,就可能影响差动保护正确动作。

5 涌流和CT饱和的综合影响

变压器外部故障切除后,可能同时存在涌流和CT传变误差,两者相互作用,使最后的综合差流比较复杂。对于三相变压器,共有六个CT,可能每个均处于不同的工作状态,同时还存在Y接法换算的影响。图8分别是副边CT饱和与未饱和时仿真所得的综合差流波形(设原边CT始终不饱和, $t=0.2$ 时发生故障,故障时间 $=0.0753$)。图8(a)中a处波峰主要是由CT误差电流产生,b处波谷由涌流产生。可以看出,涌流和CT误差电流叠加,使间断角较小。图9为图8的谐波分析图。图9(a)在故障切除后,差流有较大的基波和较小的二次谐波比,可能引起差动保护误动。

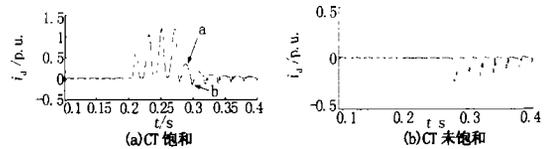


图8 综合影响下的差流

Fig 8 Composite differential current

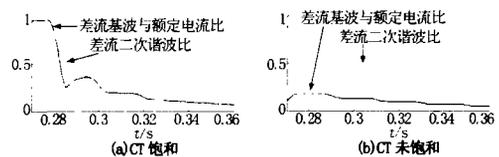


图9 综合影响下的差流谐波分析

Fig 9 Harmonic analysis of composite differential current

某电厂#4机发生外部故障,线路保护切除外部故障后80ms,发变组A、B相差动保护误动。其系统接线方式与本文仿真类似。图10为故障录波器高压侧电流录波波形,可以看出,误动的A、B两相在短路期间都有较大的非周期分量,从而在故障切除后可能存在较大涌流,同时CT也可能处在饱和

区,引起保护误动。从计算结果来看,差流基波值连续 8 个周波达到额定电流的 31% ~ 36%,并逐渐减小,此结果也与本文仿真计算类似。

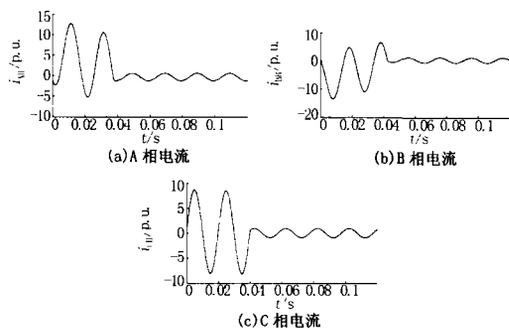


图 10 高压侧电流录波波形

Fig 10 Recorded current waveforms at the high voltage side

6 结论

1)恢复性涌流大小受 $\cos \theta$, h , k , $2k$ 五个因素的影响。

2)通过对恢复性涌流的频域分析,发现尽管其中基波可能达到动作值,但由于各种情况下二次谐波比均很大,可以很好地制动。恢复性涌流的性质同空载合闸涌流相似,只是幅值较小,因此其误动率应与空载合闸相差不多。

3)与 Y-Y 接法相比, Δ -Y 接法可能存在较小的二次谐波比,更易使保护误动。

4)外部故障切除后,在特定条件下,CT 可能仍有一段时间处在饱和区,产生较大的误差电流。

5)通过仿真结果说明,在涌流和 CT 误差电流的共同作用下,差流波形可能更为对称,从而有更小的二次谐波比,使变压器差动保护误动。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
WANG Wei-jian. Relay Protection of Electric Main Equipment Their Principle and Application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 刘中平, 陆于平, 袁宇波. 变压器外部故障切除后恢复性涌流的研究 [A]. 全国主设备保护学术研究会. 2004. 114 - 121.
LU Zhong-ping, LU Yu-ping, YUAN Yu-ba. A Study of

Transformer Recovery Inrush after the Clearance of External Faults [A]. The Chinese Conference on Electric Equipment 2004. 114-121.

- [3] 林湘宁, 刘沛. 变压器外部故障切除后差动保护误动的机理分析 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (19): 57-60.
LN Xiang-ning, LU Pei. Mechanism Analysis of the Maloperation of Transformer Differential Protection After External Fault Clearance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (19): 57-60.
- [4] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (3): 6-11.
LN Xiang-ning, LU Pei, LU Shiming, et al. Ultra-saturation State During Transformer Switch-in Withload and Its Influence to Transformer Differential Protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (3): 6-11.
- [5] 许正亚, 陈月亮. 外部短路故障切除时变压器差动保护行为分析 [A]. 第九届全国继电保护和控制学术研讨会. 288-293.
XU Zheng-ya, CHEN Yue-liang. An Analysis into the Behaviors of the Transformer Differential Protection for the Clearance of an External Short-circuit Fault [A]. The 9th Chinese Conference on Power System Protection 288-293.
- [6] Guasch L, C ócoles F, Pedra J. Effects of Symmetrical Voltage Sags on Three-Phase Three-Legged Transformers [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (2): 875-883.
- [7] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le, WU Ju-ye. Directory of Current Transformer for Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2005-05-31; 修回日期: 2005-07-07

作者简介:

张晓宇 (1981 -), 男, 硕士研究生, 主要从事变压器保护方面的研究; E-mail: zhangxiaoyu99@mails.tsinghua.edu.cn

毕大强 (1973 -), 男, 博士, 主要从事电气主设备继电保护研究;

苏鹏声 (1946 -), 男, 教授, 主要从事电机在线监测和保护。

Analysis of the maloperation of transformer differential protection after external fault removed

ZHANG Xiao-yu, BIDA-qiang, SU Peng-sheng

(下转第 14 页 continued on page 14)

- [4] 操敦奎. 变压器油中气体分析与诊断 [Z]. 中国水利电力企业管理协会, 1987.
CAO Dun-kui Gas Analysis and Diagnosis of Transformer [Z]. China Association of Irrigation and Electric Power Enterprises, 1987.
- [5] 侯利娟, 王国胤, 等. 粗糙集理论中的离散化问题 [J]. 计算机科学, 2000, 27(12).
HOU Li-juan, WANG Guo-yin, et al Discretization in Rough Set Theory [J]. Computer Science, 2000, 27(12).

收稿日期: 2005-04-25; 修回日期: 2005-07-08

作者简介:

俞晓冬 (1974 -), 女, 讲师, 主要研究方向是电力系统的运行与控制; E-mail: xiaodongyu2001@163.com

马凤英 (1971 -), 女, 讲师, 主要研究方向是自动控制领域;

臧宏志 (1971 -), 男, 主要研究方向是电力系统的运行与控制。

Rough sets theory and artificial neural networks applied in the transformer fault diagnosis

YU Xiao-dong¹, MA Feng-ying¹, ZANG Hong-zhi²

(1. Shandong Light Industry College, Jinan 250061, China; 2. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250061, China)

Abstract: Rough set theory is a new intelligent information process technology. It can analyse and deduce all kinds of incomplete data, find the relationship between the data, pick up the useful characters and reduce the information process. Artificial neural networks has the essential nonlinear character, parallel processing ability, and the ability of self organization and self-learning. But when only using ANN to solve a problem, it often has some shortcomings. This paper combines rough set theory with artificial neural networks, applying it in the transformer fault diagnosis. It can fully develop the two methods' advantages, learn from other's strong points to offset one's weakness. Rough set theory can efficiently process the reduction of stylebook collection, so it simplifies the networks' structure, reduces the networks' training epochs and improves the judgement accuracy. Simulation experiment verifies the validity of this method.

Key words: transformer; fault diagnosis; rough sets(RS); artificial neural networks(ANN)

(上接第 4 页 continued from page 4)

Transient energy fault phase selecting scheme on the weak feed backside of transmission line based on wavelet analysis

LI Feng, JIAO Yan-jun, MA Jing

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: This paper is to solve problem of fault phase selecting on the weak feed backside of transmission line. Based on the results of various model component analysis, it analyzes different short faults of transmission line and proposes an efficient principle and algorithm to determine the fault phase on weak feed side. The principle is based on model component analysis. The ATP simulation calculation and the data certification show that the principle is correct and can meet the requirement of phase-selection on the weak feed backside to effectively resolve problem of fault phase selecting.

Key words: wavelet analysis; weak feed backside of transmission line; fault phase selecting; transient energy

(上接第 9 页 continued from page 9)

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: After an external fault of transformer is cleared, the transient flux may enter into the saturation region, and a recovery inrush may be produced. At the same time, the aperiodic component in the fault current usually has a high value during the fault, so that the CT may also enter into the saturation region. Both of them may cause the maloperation of the differential protection. In this paper, the flux of the transformer is obtained by theoretical derivation, then models of transformer and CT are built for simulation, and an experiment is done to prove the results. The factors that affect the inrush are analyzed. The influence on the inrush of the differential protection is investigated and the saturation of CT is studied as well. At last, considering the inrush and the saturation of CT together, the main cause of the maloperation is discussed.

Key words: external fault; recovery inrush; saturation of CT; transformer differential protection; maloperation