

三相五芯柱变压器 内部故障仿真模型研究

郝文斌, 李群湛

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 传统的电力变压器内部故障模型都是基于绕组的分析方法, 忽略漏磁通、变压器铁芯涡流效应, 且考虑铁芯非线性较少。为能进一步准确地描述变压器内部故障的暂态过程, 并深入了解变压器内部故障机理, 基于结构为三相五芯柱变压器模型, 采用磁路分析方法建立了计及涡流效应、漏磁通及铁芯非线性等因素的三相五芯柱变压器内部故障仿真模型。模型从三相五芯柱变压器磁路出发, 建立了磁链方程、电压方程, 并根据铁芯和铁轭的磁通和电流关系及磁路关系列出磁导计算方程; 给出了仿真模型的参数确定方法, 其中参数确定与变压器的结构紧密相关。为了验证仿真模型的有效性, 用该模型仿真了故障后较长时间进入稳态的情况, 其结果与稳态的电路方法电流有效值计算结果相一致。仿真结果的暂态趋势与试验结果基本一致, 从而验证了该模型的有效性。

关键词: 变压器; 短路故障; 暂态模型; 仿真

中图分类号: TM 401+.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)08-0043-04

0 引言

近十多年来, 随着超高压电力系统的发展和全国互联的必然趋势, 将会有更多的超高压大型电力变压器投入系统运行, 特别是三相五芯柱变压器。而大型电力变压器保护的正确率一直很低, 主要问题是鉴别变压器励磁涌流和内部短路的环节不够准确^[1-3], 有必要对变压器的内部短路故障进行仿真研究。

目前, 变压器内部故障仿真计算大致有 2 种: 一种为电路模型^[4-7], 另一种就是磁路模型^[8-15]。前者不能真正反映变压器在内部短路故障中的电磁暂态过程, 后者则能够从变压器磁路出发, 能将变压器内部故障的磁暂态过程更好地描述, 但模型过于简单, 且只针对三相三芯柱变压器。在此, 在文献^[16]变压器模型基础上建立了三相五芯柱变压器内部故障暂态模型。模型充分考虑了变压器铁芯磁路磁通、涡流效应、漏磁通及铁芯非线性等因素, 并通过最后的仿真结果表明本模型的正确性和有效性。

1 三相五芯柱变压器内部短路模型原理

三相五芯柱变压器内部结构如图 1 所示, 1、2、3 绕组为一次绕组, 4、5、6 为二次绕组。假设绕组 1 故障, 分为 a、b 2 个绕组。

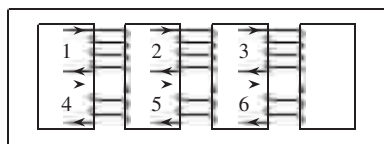


图 1 三相五芯柱变压器结构图

Fig.1 Structure of three-phase five-leg transformer

1.1 磁链方程

三相五芯柱变压器匝间短路故障磁路见图 2。

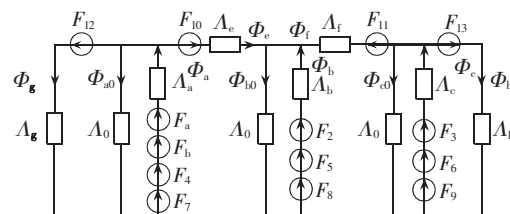


图 2 三相五芯柱变压器匝间短路磁路图

Fig.2 Turn-to-turn magnetic circuit of three-phase five-leg transformer

图 2 中 Λ_a 、 Λ_b 、 Λ_c 为各铁芯的磁导, Λ_e 、 Λ_f 、 Λ_g 、 Λ_h 为铁轭的磁导, Λ_0 为变压器零序磁导;

对于 F_j , $j = a, b, 2, 3, 4, 5, 6$ 时为绕组磁势, $j = 7, 8, 9$ 时为等效铁芯涡流磁势, $j = 10, 11, 12, 13$ 为铁轭等效涡流磁势;

Φ_j 为各铁芯内磁通, $j = a, b, c, e, f, g, h$; Φ_0 为各铁芯零序磁通, $j = a, b, c$ 。

假定三相五芯柱变压器故障前一、二次绕组匝数分别为 N_d 和 N_g , 考虑绕组漏磁导, a 绕组的磁链表示为

$$\begin{aligned} \lambda_a = & N_a^2 (\Lambda_{11} + \Lambda_{K,al}) i_a + N_b N_a \Lambda_{11} i_b - N_d N_a \Lambda_{12} i_2 - \\ & N_d N_a \Lambda_{13} i_3 + N_g N_a \Lambda_{11} i_4 - N_g N_a \Lambda_{12} i_5 - \\ & N_g N_a \Lambda_{13} i_6 + n_{aw} N_a \Lambda_{11} i_{aw} - n_{bw} N_a \Lambda_{12} i_{bw} - \\ & n_{cw} N_a \Lambda_{13} i_{cw} + n_{ewA} N_a \Lambda_{1A} i_{ewA} - n_{ewB} N_a \Lambda_{1B} i_{ewB} + \\ & n_{ewC} N_a \Lambda_{1C} i_{ewC} + n_{ewD} N_a \Lambda_{1D} i_{ewD} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 对于 i_j , 当 $j = a, b, 2, 3, 4, 5, 6$ 时表示各绕组电流值, 当 $j = aw, bw, cw$ 时表示各绕组铁芯等效涡流绕组的电流值, 当 $j = ewA, ewB, ewC, ewD$ 时表示各绕组铁轭等效涡流绕组的电流值; Λ_{1j} 为 a 绕组所在铁芯柱与其他铁芯柱、铁轭的自磁导和

互磁导,其中 $j=1,2,3,A,B,C,D$; $\Lambda_{K,aL}$ 为a绕组漏磁导; n_k 为等效涡流绕组的匝数,其中 $k=aw,bw,cw,ewA,ewB,ewC,ewD$,通常假设 $n_k=1$ 。类似地可以得到其他绕组的磁链公式。

1.2 电压方程

a绕组感应电压可写为

$$U_a = e_a = \frac{d\lambda_a}{dt} =$$

$$N_a^2 (\Lambda_{11} + \Lambda_{K,aL}) \frac{di_a}{dt} + N_b N_a \Lambda_{11} \frac{di_b}{dt} -$$

$$N_d N_a \Lambda_{12} \frac{di_2}{dt} - N_d N_a \Lambda_{13} \frac{di_3}{dt} + N_g N_a \Lambda_{11} \frac{di_4}{dt} -$$

$$N_g N_a \Lambda_{12} \frac{di_5}{dt} - N_g N_a \Lambda_{13} \frac{di_6}{dt} + n_{aw} N_a \Lambda_{11} \frac{di_{aw}}{dt} -$$

$$n_{bw} N_a \Lambda_{12} \frac{di_{bw}}{dt} - n_{cw} N_a \Lambda_{13} \frac{di_{cw}}{dt} +$$

$$n_{ewA} N_a \Lambda_{1A} \frac{di_{ewA}}{dt} - n_{ewB} N_a \Lambda_{1B} \frac{di_{ewB}}{dt} +$$

$$n_{ewC} N_a \Lambda_{1C} \frac{di_{ewC}}{dt} + n_{ewD} N_a \Lambda_{1D} \frac{di_{ewD}}{dt} \quad (2)$$

类似的可以得到其他绕组的感应电压公式。考

虑各绕组电阻,可得到变压器内部故障暂态模型基本状态微分方程为

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

$$U = [U_a, U_b, U_2, U_3, -U_4, -U_5, -U_6, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T \quad (4)$$

$$R = \text{diag}[R_a, R_b, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_{aw}, R_{bw}, R_{cw}, R_{ewA}, R_{ewB}, R_{ewC}, R_{ewD}] \quad (5)$$

$$i = [i_a, i_b, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_{aw}, i_{bw}, i_{cw}, i_{ewA}, i_{ewB}, i_{ewC}, i_{ewD}]^T \quad (6)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SW} \\ L_{WS} & L_{WW} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L_{WS} = L_{SW}^T \quad (8)$$

i 为绕组电流矩阵; U 为绕组电压矩阵,其中负号表示电压升; L 为变压器电感矩阵,由3部分组成, L_{SS} 表示三相绕组之间电感矩阵, L_{SW} 表示三相绕组与等效涡流绕组之间电感矩阵, L_{WW} 为等效涡流绕组之间电感矩阵,限于篇幅,下面只给出 L_{SS} 电感矩阵。

$$L_{SS} = \begin{bmatrix} N_a^2 (\Lambda_{11} + \Lambda_{K,aL}) & N_b N_a \Lambda_{11} & -N_d N_a \Lambda_{12} & -N_d N_a \Lambda_{13} & N_g N_a \Lambda_{11} & -N_g N_a \Lambda_{12} & -N_g N_a \Lambda_{13} \\ N_a N_b \Lambda_{11} & N_b^2 (\Lambda_{11} + \Lambda_{K,bL}) & -N_d N_b \Lambda_{12} & -N_d N_b \Lambda_{13} & N_g N_b \Lambda_{11} & -N_g N_b \Lambda_{12} & -N_g N_b \Lambda_{13} \\ -N_a N_d \Lambda_{12} & -N_b N_d \Lambda_{12} & N_d^2 (\Lambda_{22} + \Lambda_{K,2L}) & -N_d^2 \Lambda_{23} & -N_g N_d \Lambda_{12} & N_g N_d \Lambda_{22} & -N_g N_d \Lambda_{23} \\ -N_a N_d \Lambda_{13} & -N_b N_d \Lambda_{13} & -N_d^2 \Lambda_{23} & N_d^2 (\Lambda_{33} + \Lambda_{K,3L}) & -N_g N_d \Lambda_{13} & -N_g N_d \Lambda_{23} & N_g N_d \Lambda_{33} \\ N_a N_g \Lambda_{11} & N_b N_g \Lambda_{11} & -N_d N_g \Lambda_{12} & -N_d N_g \Lambda_{13} & N_g^2 (\Lambda_{11} + \Lambda_{K,4L}) & -N_g^2 \Lambda_{12} & -N_g^2 \Lambda_{13} \\ -N_a N_g \Lambda_{12} & -N_b N_g \Lambda_{12} & N_d N_g \Lambda_{22} & -N_d N_g \Lambda_{23} & -N_g^2 \Lambda_{12} & N_g^2 (\Lambda_{22} + \Lambda_{K,5L}) & -N_g^2 \Lambda_{23} \\ -N_a N_g \Lambda_{13} & -N_b N_g \Lambda_{13} & -N_d N_g \Lambda_{23} & N_d N_g \Lambda_{33} & -N_g^2 \Lambda_{13} & -N_g^2 \Lambda_{23} & N_g^2 (\Lambda_{33} + \Lambda_{K,6L}) \end{bmatrix}$$

L_{SW} 、 L_{WW} 电感矩阵可进行类似推导。 $\Lambda_{K,iL}$ 为各绕组漏磁导,其中 $i=a,b,2,3,4,5,6$ 。 Λ_{kj} 为各绕组所在铁芯柱与其他铁芯柱、铁轭的自磁导和互磁导,其中 $j=1,2,3,A,B,C,D,k=1,2,3,A,B,C,D$ 。 R 矩阵中,对于 R_j ,当 $j=a,b,2,3,4,5,6$ 时为各绕组电阻值,当 $j=aw,bw,cw$ 时为各铁芯等效涡流绕组的等效电阻值,当 $j=ewA,ewB,ewC,ewD$ 时为各绕组铁轭等效涡流绕组的等效电阻值。

电感矩阵计算涉及到磁导率 μ_i ,这里考虑变压器故障时,铁芯磁化曲线的非线性,公式(3)为非线性微分方程。为计算此非线性微分方程,必须计算各铁芯和铁轭的磁通和电流关系,根据图2的磁路关系列出磁导计算方程:

$$M\Phi = F \quad (9)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ \Lambda_a^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_0^{-1} & 0 \\ 0 & \Lambda_b^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_0^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_c^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_0^{-1} \\ \Lambda_a^{-1} & 0 & 0 & \Lambda_e^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_0^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_c^{-1} & 0 & \Lambda_f^{-1} & 0 & 0 & 0 & \Lambda_0^{-1} & 0 \\ \Lambda_a^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_g^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_c^{-1} & 0 & 0 & 0 & \Lambda_h^{-1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_a i_a + N_b i_b + N_g i_4 + n_{aw} i_{aw} \\ N_d i_2 + N_g i_5 + n_{bw} i_{bw} \\ N_d i_3 + N_g i_6 + n_{cw} i_{cw} \\ N_a i_a + N_b i_b + N_g i_4 + n_{aw} i_{aw} + n_{ewA} i_{ewA} \\ N_d i_3 + N_g i_6 + n_{cw} i_{cw} + n_{ewB} i_{ewB} \\ N_a i_a + N_b i_b + N_g i_4 + n_{aw} i_{aw} + n_{ewC} i_{ewC} \\ N_d i_3 + N_g i_6 + n_{cw} i_{cw} + n_{ewD} i_{ewD} \end{bmatrix}$$

$\Phi = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c \ \Phi_e \ \Phi_f \ \Phi_g \ \Phi_h \ \Phi_{a0} \ \Phi_{b0} \ \Phi_{c0}]^T$ 式(3)~(9)即为此类变压器内部故障暂态模型。

2 参数确定

2.1 串联电阻确定

当变压器某一次绕组发生故障时,分裂为2个绕组a、b,则

$$R_a + R_b = R_1 \quad (10)$$

$$R_a / R_b = N_a / N_b \quad (11)$$

2.2 零序磁导确定

采用文献[1]变压器零序磁导 Λ_0 的计算方法,直接给出计算公式为

$$\Lambda_0 = \frac{\pi \mu_0 (H + 6h_1)}{18 [\ln(L + \pi R_1) - \ln(L + \pi r_1)]} \quad (12)$$

式中 μ_0 为空气磁导率(常数); H 为变压器绕组高度; h_1 为绕组底部与油箱底部的距离; L 为两边芯柱中心间的距离; R_1 为油箱内表面到芯柱中心间的距离; r_1 为绕组外表面到芯柱中心间的距离。

2.3 漏磁导计算

限于篇幅,现以匝间故障绕组漏磁导的确定为例。匝间故障 $H(x)$ 的曲线如图 3 所示。

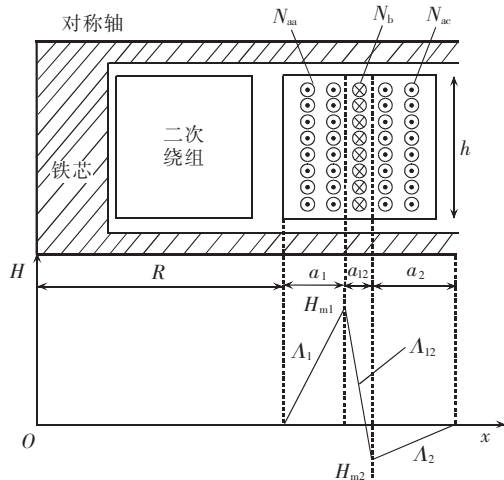


图 3 匝间短路磁场强度示意图

Fig.3 Magnetic field intensity of turn-to-turn fault

图中纵坐标表示磁场强度,横坐标表示铁芯绕组与铁芯中心的距离, R 表示一次绕组内侧与铁芯中心的距离, a_1 表示短路部分绕组与一次绕组内侧距离, a_2 表示短路部分绕组与一次绕组外侧距离, a_{12} 表示短路部分绕组宽度, h 表示绕组高度。由安培定则可得磁场强度 $H(x)$ 的表达式及相关方程。

$$\begin{aligned} H_1(x) &= 0, x < R \\ H_2(x) &= \frac{H_{m2} - H_{m1}}{a_{12}} (x - R - a_1) + H_{m1} \\ R + a_1 &< x < R + a_1 + a_{12} \\ H_3(x) &= 0 \\ x &> R + a_1 + a_{12} + a_2 \\ H_4(x) &= \frac{x - R}{a_1} H_{m1} \\ R &\leq x \leq R + a_1 \\ H_5(x) &= \frac{(x - R - a_1 - a_{12} - a_2)}{a_2} H_{m1} \\ R + a_1 + a_{12} &\leq x \leq R + a_1 + a_{12} + a_2 \end{aligned} \quad (13)$$

其他相关公式为

$$N_{aa} + N_{ac} = N_a \quad (14)$$

$$H_{m1} = \frac{N_{aa}}{h} i_a \quad (15)$$

$$H_{m2} = -\frac{N_{ac}}{h} i_a = -\frac{N_a - N_{aa}}{h} i_a \quad (16)$$

$$i_b = \frac{N_a}{N_b} i_a \quad (17)$$

将故障绕组分为 a、b 2 部分,其中 a 绕组包括 N_{aa} 、 N_{ac} 2 部分空间,分别计算 a、b 各自存储能量。

存储在 a 绕组内的能量为

$$W_a = \mu_0 \pi h \left[\int_{x=R}^{x=R+a_1} x H_4^2(x) dx + \int_{x=R+a_1+a_{12}}^{x=R+a_1+a_{12}+a_2} x H_5^2(x) dx \right] \quad (18)$$

存储在 b 绕组内的能量为

$$W_b = \mu_0 \pi h \int_{x=R+a_1}^{x=R+a_1+a_{12}} x H_2^2(x) dx \quad (19)$$

整理式(18)(19)所得的最后结果为

$$W_a = \mu_0 f(h, R, a_1, a_{12}, a_2, N_a, N_{aa}) i_a^2 \quad (20)$$

$$W_b = \mu_0 f(h, R, a_1, a_{12}, N_a, N_b, N_{aa}) i_b^2 \quad (21)$$

a、b 绕组能量可以分别存在各自的漏抗中,因此, a、b 绕组能量也可表示为式(22)(23)形式。

$$W_a = \frac{1}{2} L_a i_a^2 = \frac{1}{2} N_a^2 A_{K,aL} i_a^2 \quad (22)$$

$$W_b = \frac{1}{2} L_b i_b^2 = \frac{1}{2} N_b^2 A_{K,bL} i_b^2 \quad (23)$$

根据式(20)~(23)可得:

$$A_{K,aL} = \mu_0 f(h, R, a_1, a_{12}, a_2, N_a, N_{aa}) \quad (24)$$

$$A_{K,bL} = \mu_0 f(h, R, a_1, a_{12}, N_a, N_b, N_{aa}) \quad (25)$$

3 仿真算例

这里以 SFP-63000/110 三相五芯柱变压器进行仿真。变压器数据:铁芯柱长度分别为 $D_a = D_b = D_c = 2.16$ m,铁轭长度 $D_e = D_f = 2.72$ m,铁芯及铁轭截面积 $S_a = S_b = S_c = S_e = S_f = 4\,052.5$ cm²,一次侧匝数 $N_d = 411$,二次侧匝数 $N_g = 71$,等效涡流绕组匝数为 71,一次侧电阻为 1.9911 Ω ,二次侧电阻为 0.015 084 4 Ω 。设三相负载为 $R_a = R_b = R_c = 1.920$ Ω ,接线方式为 Y/ Δ 接线,外加无限大三相对称电源,正常运行中突然发生 5% 匝间短路,如图 4 所示。

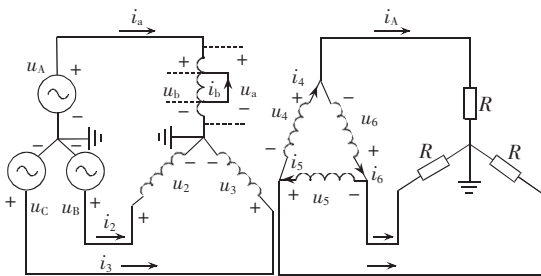


图 4 变压器仿真接线图

Fig.4 Wiring diagram of transformer simulation

仿真结果如图 5 所示。从图 5(a)中看出在合闸后,经过一段时间进入稳态,图中只显示了稳态最后一个周期,即图中 0.02 s 以前为变压器稳态运行。在 0.02 s 变压器一次绕组 A 相发生 5% 故障短路, A 相出现较大的非周期分量,暂态过程明显。B、C 两相只出现较小的非周期分量。从图 5(b)中可以看出,由于二次侧 4 号绕组电流和一次侧 1 号绕组在同一个芯柱上,受到的短路影响较大,另两相受到的短路影响较小。

为了验证仿真结果的正确性,用本磁路模型仿真

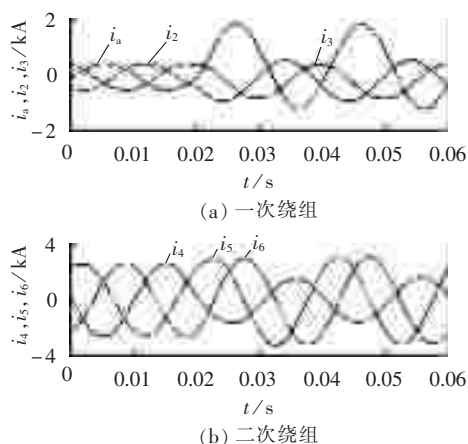


图 5 5%匝间短路时各绕组电流

Fig.5 Winding currents of 5% short-turn fault

了故障后较长时间进入稳态情况,并与稳态的电路方法的电流有效值计算结果进行比较,见表 1。比较结果可以看出,本文磁路模型与传统的电路模型稳态结果是一致的,从而也证明了本文模型的正确性。

表 1 磁路方法与电路方法绕组电流稳态值比较

Tab.1 Comparison of winding steady current between magnetic and electric circuit methods

计算方法	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6
磁路法	850.0	393.4	343.2	1 530	2 287	1 987
电路法	851.8	396.4	343.7	1 523	2 267	1 977

4 结论

提出了一种基于磁路的三相五芯柱变压器内部故障模型,模型中充分考虑了变压器铁芯磁路磁通、涡流效应、漏磁通及铁芯磁化非线性过程,通过求解变系数状态微分方程,计算电流的暂态值。并通过 Matlab 进行仿真,仿真结果的暂态趋势与文献[15]基本一致;并且与传统电路方法进行稳态比较,结果基本一致,从而证明了所提三相五芯柱变压器内部故障磁路模型的有效性。

参考文献:

- [1] 韩正庆,高仕斌,李群湛. 基于半波傅里叶算法的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(14):60-63.
HAN Zheng-qing,GAO Shi-bin,LI Qun-zhan. New method to identify inrush current based on half-wave Fourier analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(14):60-63.
- [2] 李海峰,王钢,李晓华,等. 电力变压器励磁涌流判别的自适应小波神经网络方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(7):144-150.
LI Hai-feng,WANG Gang,LI Xiao-hua,et al. Distinguish between inrush and internal fault of transformer based on adaptive wavelet neural network[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(7):144-150.
- [3] 王增平,徐岩,王雪,等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):54-58.
WANG Zeng-ping,XU Yan,WANG Xue,et al. Study on the novel transformer protection principle based on the transformer model[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(12):54-58.

- [4] BASTARD P,BERTRAND P,MEUNIER M. A transformer model for winding fault studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1994,9(2):690-699.
- [5] 王赞基,刘秀成,陈香辉,等. 用于内部故障分析的变压器电感参数计算模型[J]. 电力系统自动化,2000,24(24):21-25.
WANG Zan-ji,LIU Xiu-cheng,CHEN Xiang-hui,et al. An inductance calculation model of power transformer for internal fault analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(24):21-25.
- [6] 王雪,王增平. 变压器内部故障仿真模型的设计[J]. 电网技术,2004,28(12):50-52.
WANG Xue,WANG Zeng-ping. Study of simulation of transformer with internal faults[J]. Power System Technology,2004,28(12):50-52.
- [7] KEAUNOVIC M,GUO Y. Modeling and simulation of the power transformer faults and related protective relay behavior[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2001,15(1):44-49.
- [8] ELREFAIE H B,MEGAHED A I. Modeling transformer internal fault using Matlab[C]//IEEE MELECON. Cairo,Egypt:[s.n.],2002:226-230.
- [9] 周小沪,李晓庆,纪志成. 基于 Matlab 三相变压器的仿真建模及特性分析[J]. 变压器,2004,41(7):19-23.
ZHOU Xiao-hu,LI Xiao-qing,JI Zhi-cheng. Simulation modeling and characteristic analysis of three-phase transformer based on Matlab[J]. Transformer,2004,41(7):19-23.
- [10] 李晓庆,陈尔奎,纪志成. 基于 Matlab 单相变压器的仿真建模及特性分析[J]. 变压器,2005,42(3):8-12.
LI Xiao-qing,CHEN Er-kui,JI Zhi-cheng. Simulation modeling and characteristic analysis of single-phase transformer based on Matlab[J]. Transformer,2005,42(3):8-12.
- [11] 崔立君. 变压器理论基础与工程计算(五)[J]. 变压器,1978,15(2):10-20.
CUI Li-jun. Transformer theory foundation and engineering calculation(5)[J]. Transformer,1978,15(2):10-20.
- [12] 欧小平. 变压器漏磁通分布与计算[J]. 变压器,1990,27(7):21-23.
OU Xiao-ping. Distributing and calculation for leakage magnetic field of transformer[J]. Transformer,1990,27(7):21-23.
- [13] 郑涛,刘万顺,刘建飞,等. 基于分形理论的变压器磁滞回环拟合新方法[J]. 电网技术,2003,27(3):8-11.
ZHENG Tao,LIU Wan-shun,LIU Jian-fei,et al. A new fitting method for hysteresis loop of transformer based on fractal theory[J]. Power System Technology,2003,27(3):8-11.
- [14] 崔立君. 三相变压器绕组的零序电抗计算[J]. 变压器,1995,32(3):26-29.
CUI Li-jun. Zero-sequence reactors compute of three-phase transformer[J]. Transformer,1995,32(3):26-29.
- [15] 徐岩. 电力变压器内部故障数字仿真及其保护新原理的研究[D]. 保定:华北电力大学,2005.
XU Yan. Research on the digital simulation of power transformer internal faults and new transformer protection principles[D]. Baoding:North China Electric Power University,2005.
- [16] 康积涛. 电力变压器电磁暂态理论研究[D]. 成都:西南交通大学,2001.
KANG Ji-tao. Magnetic transient theory for power transformer[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2001.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

郝文斌(1976-),男,辽宁沈阳人,博士研究生,主要研究方向为继电保护和电力系统综合自动化(E-mail:hw60817@163.com);

李群湛(1957-),男,河北元氏人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统分析、牵引供电系统供电理论、电能质量与控制。

Simulation of internal fault of three-phase five-leg transformer

HAO Wen-bin, LI Qun-zhan

(Department of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In traditional internal fault models of power transformers based on winding analysis, the leak flux and the eddy effect of iron-leg are ignored and the non-linearity of iron-leg is less considered. In order to adequately describe the transient process of power transformer internal fault and find out internal fault causes, a simulation model is established with the magnetic circuit method, which is based on the structural model of three-phase five-leg transformer and considers eddy effect, leak flux and non-linearity. The magnetic flux linkage equations and voltage equation are established according to the magnetic circuits and the magnetic conductance equation is listed according to the relations among magnetic flux, current and magnetic circuit. The method to determine the parameters of simulation model is given, which is closely related to transformer structure. The model is applied in the simulation of fault with long recovering time and the simulative result is same as that of virtual value calculation. The transient trend of simulation is basically in accord with that of experiment, which proves the validity of proposed model.

Key words: transformer; short-circuit fault; transient model; simulation