

## 参数辨识在 SCOTT 变压器保护中的应用

关海川, 高仕斌

(西南交通大学峨眉校区, 四川 峨眉 614202)

**摘要:** 牵引变压器是牵引供电系统中重要的电气设备, 变压器电流差动保护的核心问题是励磁涌流和内部故障电流的识别, 目前的识别方法存在误动作的可能性, 结合辨识理论和最小二乘算法, 提出了基于参数辨识的 SCOTT 变压器保护原理。该方法能有效地区分牵引变压器内部故障与励磁涌流。

**关键词:** 牵引变压器; 参数辨识; 励磁涌流; 变压器保护

## Identification of winding parameter application in SCOTT transformer protection

GUAN Hai-chuan, GAO Shi-bin

(Emei Branch, Southwest Jiaotong University, Emei 614202, China)

**Abstract:** Traction transformers are important devices in electric railways system, inrush current identification and internal fault conditions is a key problem of transformer protection. At present, the distinguishing method may misoperated. Based on system identification and east-square technique, a new theory of transformer protection based on parameter identification is being predominant in distinguishing magnetizing rush current from fault current.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50377035).

**Key words:** traction transformer; identification of winding parameter; magnetizing inrush; transformer protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)04-0001-04

## 0 引言

牵引变压器是牵引供电系统中重要的电气设备, 变压器电流差动保护的核心问题是励磁涌流和内部故障电流的识别, 目前牵引变压器以二次谐波制动的差动保护为主保护。但是在某些情况下二次谐波分量的内容并不能用于正确判定动作状态, 在变压器发生内部故障期间也可能存在着较大的二次谐波; 另外, 当线路发生故障时, 其暂态过程使得 CT 严重饱和, 在饱和期间, 差动电流可能使得差动保护动作。这些缺点使得传统的差动保护不能满足主保护速动性的要求, 可能会引起故障进一步扩大, 带来严重的后果<sup>[1~3]</sup>。

系统辨识理论<sup>[4~7]</sup>作为现代控制理论的重要分支已越来越广泛地运用到电力系统中, 在深入了解变压器差动保护原理的基础上, 建立了 SCOTT 变

器电气模型, 依此为基础, 结合辨识理论和最小二乘法算法, 提出了基于参数辨识的 SCOTT 变压器保护原理。该方法能有效地区分 SCOTT 变压器内部故障与励磁涌流, 通过仿真计算验证了该方法的可行性和有效性。

## 1 SCOTT 平衡变压器模型

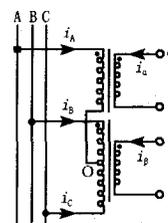


图1 SCOTT 变压器

Fig.1 SCOTT traction transformer

根据图1的 SCOTT 变压器接线图, 定义如下参数:  $u_A, u_B, u_C$  和  $i_A, i_B, i_C$  分别为三相侧三相电压和电流;  $u_a, u_b$  和  $i_a, i_b$  分别为两相侧电压和电流;  $r_A, L_A$  分

别为  $\alpha$  座变压器原边绕组的电阻和漏感;  $r_{BC}, L_{BC}$  分别为  $\beta$  座变压器原边绕组的电阻和漏感;  $r_\alpha, r_\beta, L_\alpha, L_\beta$  分别为  $\alpha$  座和  $\beta$  座变压器次边绕组的电阻和漏感;  $\phi_{m\alpha}, \phi_{m\beta}$  分别为  $\alpha$  座和  $\beta$  座变压器的工作磁通。  $K=N_1/N_2$  为变压器原、次边电压比。

根据 SCOTT 平衡变压器模型的电磁关系, 有下面的关系式成立:

$$\left. \begin{aligned} u_{A0} &= r_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 \frac{d\phi_{m\alpha}}{dt} \\ u_\alpha &= r_\alpha i_\alpha + L_\alpha \frac{di_\alpha}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{m\alpha}}{dt} \\ u_{B0} &= r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + \frac{1}{2} N_1 \frac{d\phi_{mBC}}{dt} \\ u_{0C} &= -r_C i_C - L_C \frac{di_C}{dt} + \frac{1}{2} N_1 \frac{d\phi_{mBC}}{dt} \\ u_\beta &= r_\beta i_\beta + L_\beta \frac{di_\beta}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{mBC}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{由 } r_B = r_C = \frac{1}{2} r_{BC}, L_B = L_C = \frac{1}{2} L_{BC},$$

$$L'_\beta = K^2 L_\beta, \text{ 所以有}$$

$$\left. \begin{aligned} u_{BC} &= \frac{1}{2} r_{BC} (i_B - i_C) + \frac{1}{2} L_{BC} \frac{d(i_B - i_C)}{dt} + N_1 \frac{d\phi_{mBC}}{dt} \\ u_\beta &= r_\beta i_\beta + \frac{1}{K^2} L'_\beta \frac{di_\beta}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{mBC}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式 (2), 有

$$\begin{aligned} u_{BC} - Ku_\beta &= \frac{1}{2} r_{BC} (i_B - i_C) - Kr_\beta i_\beta + \\ &\frac{1}{2} L_{BC} \frac{d(i_B - i_C + 2i_\beta/K)}{dt} - \frac{1}{K} (L_{BC} + L'_\beta) \frac{di_\beta}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

设  $\beta$  座变压器的差动电流为

$$i_{dBC} = i_B - i_C + \frac{2}{K} i_\beta, L_{BC} + L'_\beta = \frac{x_1}{\omega}, \text{ 其中 } x_1 \text{ 为 } \beta \text{ 座变压器的短路电抗, 则式 (3) 变为}$$

$$\begin{aligned} u_{BC} - Ku_\beta &= \frac{1}{2} r_{BC} (i_B - i_C) - Kr_\beta i_\beta - \\ &\frac{x_1}{\omega K} \frac{di_\beta}{dt} + \frac{1}{2} L_{BC} \frac{di_{dBC}}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

又因为

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (u_{AC} + u_{AB}) &= r_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{4} [r_{BC} (i_B + i_C) + \\ &L_{BC} \frac{d(i_B + i_C)}{dt}] + \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 \frac{d\phi_{m\alpha}}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

根据  $i_B + i_C = -i_A, N_1 = KN_2$ , 再结合式 (1) 和式 (5)

有下面的关系式成立:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (u_{AC} + u_{AB}) - \frac{\sqrt{3}}{2} Ku_\alpha &= (r_A + \frac{1}{4} r_{BC}) i_A - \frac{\sqrt{3}}{2} Kr_\alpha i_\alpha + \\ L_A \frac{di_A}{dt} + \frac{1}{4} L_{BC} \frac{di_A}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{2} KL_\alpha \frac{di_\alpha}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

设  $\alpha$  座变压器的差动电流为

$$i_{d\alpha} = i_A + \frac{2}{\sqrt{3}K} i_\alpha, L'_\alpha = \frac{3}{4} K^2 L_\alpha, \frac{x_2}{\omega} = L_A + L'_\alpha,$$

其中  $x_2$  为  $\alpha$  座变压器的短路电抗, 有

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (u_{AC} + u_{AB}) - \frac{\sqrt{3}}{2} Ku_\alpha &= (r_A + \frac{1}{4} r_{BC}) i_A - \frac{\sqrt{3}}{2} Kr_\alpha i_\alpha + \\ L_A \frac{di_A}{dt} - \frac{2x_2}{\sqrt{3}\omega K} \frac{di_\alpha}{dt} + \frac{1}{4} L_{BC} \frac{di_A}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

结合式 (4) 和式 (7), 得到 SCOTT 平衡变压器的电压平衡方程:

$$\begin{aligned} u_{BC} - Ku_\beta &= \frac{1}{2} r_{BC} (i_B - i_C) - Kr_\beta i_\beta - \\ &\frac{x_1}{\omega K} \frac{di_\beta}{dt} + \frac{1}{2} L_{BC} \frac{di_{dBC}}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (u_{AC} + u_{AB}) - \frac{\sqrt{3}}{2} Ku_\alpha &= (r_A + \frac{1}{4} r_{BC}) i_A - \frac{\sqrt{3}}{2} Kr_\alpha i_\alpha + \\ L_A \frac{di_A}{dt} - \frac{2x_2}{\sqrt{3}\omega K} \frac{di_\alpha}{dt} + \frac{1}{4} L_{BC} \frac{di_A}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

从式 (8) 和式 (9) 可以看出:  $u_{AB}, u_{AC}, u_{BC}, u_\alpha, u_\beta, i_A, i_B, i_C, i_\alpha, i_\beta$  是可以直接测量的电气量;  $i_{d\alpha}$  可以通过  $i_A$  和  $i_\alpha$  计算得到,  $i_{dBC}$  可以通过  $i_B, i_C$  和  $i_\beta$  计算得到;  $r_A, r_{BC}, x_1, x_2$  为绕组电阻和短路电抗参数, 根据规程规定, 变压器厂家要提供这些参数, 可以作为需要辨识的参数。但是,  $L_A, L_B$  不易得到, 一般计算可以近似的认为  $L_A = x_2/2\omega, L_B = x_1/2\omega$ , 由此引起的误差可以在保护的整定时予以考虑。所以式 (8) 和式 (9) 可以写成

$$\begin{aligned} u_{BC} - Ku_\beta &= \frac{1}{2} r_{BC} (i_B - i_C) - Kr_\beta i_\beta - \\ &\frac{x_1}{\omega K} \frac{di_\beta}{dt} + \frac{x_1}{4\omega} \frac{di_{dBC}}{dt} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (u_{AC} + u_{AB}) - \frac{\sqrt{3}}{2} Ku_\alpha &= (r_A + \frac{1}{4} r_{BC}) i_A - \frac{\sqrt{3}}{2} Kr_\alpha i_\alpha + \\ \frac{x_2}{2\omega} \frac{di_{d\alpha}}{dt} - \frac{2x_2}{\sqrt{3}\omega K} \frac{di_\alpha}{dt} + \frac{x_1}{8\omega} \frac{di_A}{dt} \end{aligned} \quad (11)$$

由于式(10)和式(11)是根据 SCOTT 变压器正常运行的模型得到的, 所以它适合于外部故障、励磁涌流及过激磁情况, 只有内部故障时, 由于变压器模型本身的内部结构参数发生了变化, 它才不再成立。所以通过上述模型, 利用测到的数据对模型参数  $r_{\alpha}, r_{\beta}, r_A, r_{BC}, x_1, x_2$  进行辨识, 来分析 SCOTT 变压器工作情况。

## 2 基于参数辨识的 SCOTT 平衡变压器保护原理

由系统辨识<sup>[4,5]</sup>的基本原理可知, 辨识的基础在于系统输入和输出数据从给定的一组模型中确定一个与所测系统等价的模型。因此辨识的关键在于建立能描述系统的正确模型和获得系统的输入、输出量。最小二乘参数辨识应用于牵引变压器保护这一问题, 就是根据测量得到的一组输入输出量, 通过代价函数(一般为变压器动态响应的实测值与模型的仿真值之间的误差的平方)评价其优劣, 通过一系列的矩阵运算, 最后得出参数辨识的最优解, 以此作为牵引变压器保护的判断依据。

对于前面介绍的 SCOTT 平衡变压器模型表达式中, 可将其两侧绕组的电流作为输入向量, 两侧绕组的电压作为输出向量, 两端绕组的电阻和漏感值作为待辨识的参数。为了适应微机工作的需要, 需要把式(10)和式(11)离散化, 以便于辨识。

为了提高系统参数的估计精度, 减少内存量, 提高计算的速度以适应在线计算, 可利用最小二乘法参数估计的递推算法(简称 RLS 来计算牵引变压器绕组的待辨识参数即绕组漏感和电阻值。递推最小二乘辨识法的过程实际上就是解式(12)的过程。绕组的待辨识参数即绕组漏感和电阻值。

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - h^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \\ K(k) &= P(k-1)h(k)[h^T(k)P(k-1)h(k) + I]^{-1} \\ P(k) &= [I - K(k)h^T(k)]P(k-1) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

为提高牵引变压器保护动作过程的可靠性, 可设定故障监测数据窗口。保护动作判据定义为:

$$|\theta_{ikf} - \theta_{i0}| < \varepsilon \quad (13)$$

式中:  $\theta_{ikf}$  为  $k$  时刻系统所辨识的参数,  $\theta_{i0}$  为系统辨识参数的初始值,  $\varepsilon$  为阈值。公式中的保护动作阈值  $\varepsilon$  通常是根据牵引变压器出厂的参数的大小以及对设备保护要求所决定的, 由运行人员事先设定, 运行过程中不能随机改变。

## 3 SCOTT 平衡变压器参数辨识仿真分析

为了验证参数辨识算法的可行性, 有必要进行有关变压器的仿真实验, 选取一台 SCOTT 变压器, 技术参数如下, 额定容量: 75/37.5/37.5 MVA; 额定电压: 110/55 kV; 频率:  $f=50$  Hz; 短路电抗:  $x_1=34.848 \Omega$ ,  $x_2=26.136 \Omega$ ; 绕组电阻:  $r_A=1.452 \Omega$ ,  $r_{BC}=1.936 \Omega$ ,  $r_{\alpha}=0.484 \Omega$ ,  $r_{\beta}=0.484 \Omega$ 。每个周波采样 100 点, 分别进行变压器励磁涌流和内部故障仿真, 以检验基于参数辨识的牵引变压器保护原理的正确性。对仿真得到的 SCOTT 变压器两侧绕组电压、电流进行实时采样, 作为辨识模型的输入、输出分量, 根据式(12)和(13), 即可计算出各个采样时刻待辨识参数的值。

### 3.1 励磁涌流的参数辨识

(1) 剩磁为零、合闸角为零(表 1)

表 1 剩磁为零、合闸角为零时空载投入时参数辨识值

Tab.1 There are no residual flux and initial angle

T/s	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1
$r_A/\Omega$	1.8219	1.781	1.542	1.4626	1.4522
$r_{BC}/\Omega$	1.8249	1.784	2.4784	1.928	1.924
$L_A/H$	0.0417	0.0418	0.0414	0.0417	0.0417
$L_{BC}/H$	0.0558	0.264	0.0557	0.0557	0.0557

(2) 剩磁与合闸角不为零时(表 2)

表 2 剩磁与合闸角不为零时参数辨识值

Tab.2 Residual flux and initial angle are not zero

T/s	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1
$r_A/\Omega$	1.458	-26021.9	12.4805	1.459	1.457
$r_{BC}/\Omega$	1.934	-25447.5	14.86	1.9362	1.933
$L_A/H$	0.0416	238.79	121.48	0.0414	0.0414
$L_{BC}/H$	0.0554	128.46	108.46	0.0557	0.0557

### 3.2 内部故障的参数辨识

(1) 次边  $\alpha$  相 10% 匝间短路时

变压器在  $t=0.02$  s 时, 次边发生  $\alpha$  相 10% 匝间短路。SCOTT 变压器原边绕组电阻与漏感参数辨识值如表 3 所示。

表 3 次边  $\alpha$  相 10% 匝间短路

Tab.3 Parameter identification of  $\alpha$  phase 10% internal fault

T/s	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1
$r_A/\Omega$	1.456	-21.258	2.548	12.282	1.594
$r_{BC}/\Omega$	1.936	-21.24	2.925	3.645	1.776
$L_A/H$	0.0422	-1.567	4.792	0.124	0.0632
$L_{BC}/H$	0.0568	-4.582	2.654	0.184	0.0438

(2) 次边  $\alpha$  相 20% 匝间短路

变压器在  $t=0.02$  s 时, 次边发生  $\alpha$  相 20% 匝间短路。SCOTT 变压器原边绕组电阻与漏感参数辨识值如表 4 所示。

表 4 次边  $\alpha$  相 20% 匝间短路

Tab.3 Parameter identification of  $\alpha$  phase 20% internal fault

T/s	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1
$r_A/\Omega$	1.458	-26.25	3.548	11.46	1.601
$r_{BC}/\Omega$	1.935	-22.24	-12.25	2.968	1.758
$L_A/H$	0.0422	-1.45	4.689	0.124	0.0648
$L_{BC}/H$	0.0564	-4.652	2.021	0.184	0.0345

## 4 结束语

与目前常用的变压器微机差动保护相比, 本方法主要有以下几个特点:

1) 该方法的最大优点在于无需鉴别励磁涌流, 且内部故障与正常运行、外部故障及励磁涌流时辨识得到的绕组参数值有明显的变化, 尤其对于励磁涌流和内部故障有很好的选择性。

2) 外部故障时, 辨识参数需要大约 30 ms 才收敛于真值, 而变压器内部故障时, 辨识参数需要 60 ms 以上才收敛, 因此, 保护动作时间需大于 30 ms。

3) 由于该方法仅利用变压器绕组的物理参数作为保护动作的判据, 避免了其它方法较为复杂的整定计算和闭锁条件, 因而使用方便。

4) 采用基于参数辨识的变压器保护, 需要根据变压器模型采样精确的电压、电流以及原始参数的准确性, 而在建立变压器模型以及采样电压、电流等时, 难免做了一些理论上的假设和简化处理, 所以本方法和实际的结果会有一定的误差和出入。

## 参考文献

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

WANG Wei-jian. Electric Equipment Relay Protection Theory and Application, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[2] Yabe Kuniaki. Power Differential Method for Discrimination Between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1109-1118.

[3] Sharp R L, Glassburn W E. A Transformer Differential Relay with Second Harmonic Rescruit[J]. Trans IEEE, 1958, 12.

[4] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

BIAN Zhao-qi, ZHANG Xue-gong. Mode Identification [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2004.

[5] 方崇智, 箫德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

FANG Chong-zhi, XIAO De-yun. Process Identification [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2004.

[6] 熊小伏, 邓祥力, 游波. 基于参数辨识的变压器微机保护[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(11): 18-21.

XIONG Xiao-fu, DENG Xiang-li, YOU Bo. Transformer Protection Using Parameter Identification Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11): 18-21.

[7] 朱明林, 朱子述. 变压器传递函数的系统辨识[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 46-48.

ZHU Ming-lin, ZHU Zi-shu. System Identification of Transformer's Transfer Function[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 46-48.

收稿日期: 2007-01-29; 修回日期: 2007-10-23

作者简介:

关海川(1970-), 男, 讲师, 主要研究方向为电力系统自动化控制和继电保护; E-mail: guanhaichuan@tom.com

高仕斌(1963-), 男, 教授, 博导, 主要从事牵引供电系统自动化、电力设备故障诊断方向的教学与科研工作。

## 许继新型静止无功补偿技术开发项目获国家发改委专项资金支持

日前, 国家发改委正式下文, 对许继集团公司“100 Mvar 新型静止无功补偿技术开发”项目给予 500 万元专项资金支持。作为 2007 年国家重大产业技术开发申报项目, 省、市发改委和许继集团对“100 Mvar 新型静止无功补偿技术开发”项目给予了高度重视。项目申报期间, 集团公司领导多次赴京向国家发改委作专题汇报。在项目评审中, 许继集团“100 Mvar 新型静止无功补偿技术开发”项目获得了与会专家的一致好评, 以总分第一的好成绩顺利通过评审。

STATCOM 应用于输电系统中, 可以大幅度提高电力系统运行的安全性和稳定性, 并且能够在输电线路的设计上极大地提高传输功率极限水平, 从而使已有的电网资源得以充分利用, 实现电网更加经济、安全的运行。据了解, 目前只有少数几个国家能制造出有商业价值、应用于输电系统的  $\pm 100$  Mvar 级以上的 STATCOM 装置, 我国在这方面仍是空白。本项目研制的输电系统用  $\pm 100$  Mvar 级 STATCOM 成套装置, 将极大地推动我国新型无功补偿技术及其产业化发展, 并产生巨大的经济效益和社会效益。