

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.03.016

# Scott 接线牵引变压器特性仿真研究

阳贵明, 李 光

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 介绍了 Scott 接线变压器的工作原理, 建立其等效电路及相应的状态方程; 利用 MATLAB 进行仿真实验, 分析不同负载下变压器的特性证实了状态方程的正确性。仿真结果证明了分析的正确性, 为变压器稳态和暂态分析提供新的思路。

**关键词:** Scott 接线变压器; 等效电路; 状态方程

**中图分类号:** TM922.73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2012)03-0072-04

## Simulation Study on the Characteristics of Scott Traction Transformer

Yang Guiming, Li Guang

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Introduced the working principle of Scott traction transformer, and set up its equivalent circuit and state equation. Made a simulation analysis with MATLAB, analyzed characteristics of the transformer under different loads, and proved the correctness of the equation. The simulation result verified the analysis and provided new ideas for steady and transient analysis of the Scott transformer.

**Keywords:** Scott traction transformer; equivalent circuit; state equations

## 0 引言

牵引变压器是一种特殊的电力变压器, 是电气化铁路牵引供电系统中的重要组成部分。变压器故障将会导致铁路系统故障, 因此, 变压器的可靠、安全运行对整个牵引供电系统的安全稳定运行有着非常重要的意义<sup>[1-2]</sup>。我国牵引变压器接线形式主要有单相接线、V/V 接线、V/X 接线、Scott 接线和阻抗平衡接线 5 种<sup>[3]</sup>。其中, Scott 接线变压器可由 2 台单相变压器并置于同一油箱内, 两套绕组容量可灵活配置。该变压器的结构简单, 容量利用率高, 抗短路能力强, 继承了单相变压器的较多优点<sup>[4]</sup>。在电力工业发展初期, 人们就利用 Scott 接线变压器实现三

相系统与两相系统之间的关联, 用以减少单相负荷对三相电网造成的负序影响<sup>[5]</sup>。在电气化铁路上, 采用 Scott 接线变压器的国家主要有日本、韩国和中国, 在我国电气化铁路使用 Scott 接线变压器已有近 30 a 历史, 目前我国高速客运专线几乎全部采用 Scott 接线变压器的供电方式<sup>[6-7]</sup>。近几年来, 国内外研究者较多关注 Scott 变压器励磁涌流<sup>[8]</sup>、差动保护<sup>[9]</sup>等方面, 较少关注不同负载对 Scott 变压器的数学模型的影响。本文根据 Scott 变压器的特性, 建立其等效电路, 并构建其相应的状态方程, 分析其在不同负载情况下的特性, 为变压器稳态和暂态分析提供新的思路。

收稿日期: 2012-02-25

作者简介: 阳贵明 (1974-), 男, 湖南涟源人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为智能化变电站技术,

E-mail: 656773175@qq.com

# 1 建立等效模型

## 1.1 Scott 接线变压器的工作原理

Scott 接线变压器 (又称 T 形接法变压器), 属于能完成三相 - 两相变换的平衡变压器。Scott 接线变压器可以看作是由 2 个单相变压器构成, 既可以采用单铁心结构, 也可以采用双铁心结构, 其接线方式如图 1 所示。图 1 中标出了各绕组的相对匝数, 水平放置的变压器一般称为主变压器或 M 变压器, 垂直放置的变压器一般称为梯变压器或 T 变压器。从三相 - 两相变换角度将 2 个副边绕组分别称为  $\alpha$  相与  $\beta$  相<sup>[10]</sup>。A, B, C 三个一次端子接 110 kV 三相电网, 一次绕组 BC 的额定电压为 110 kV, AD 的额定电压为  $110 \times \sqrt{3}/2$  kV。两个副边绕组的额定电压为 55 kV, 它可以为  $2 \times 27.5$  kV 的 AT 牵引网供电。

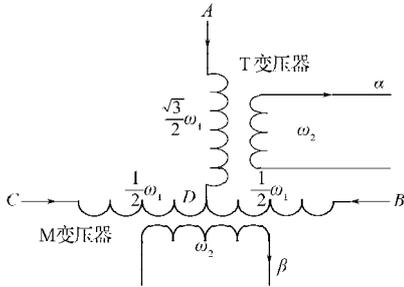


图 1 Scott 变压器接线图

Fig. 1 The wiring diagram of Scott transformer

## 1.2 T 等效电路模型

根据 Scott 接线变压器的接线方式, 可以得出其 T 等效电路图 (忽略感抗励磁回路), 如图 2 所示。

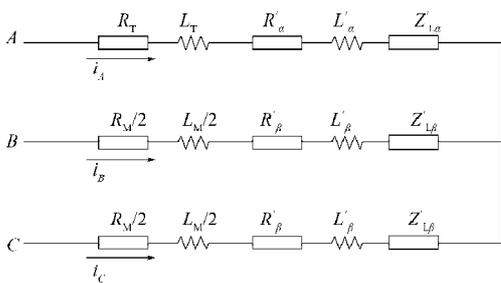


图 2 Scott 变压器 T 型等效电路

Fig. 2 T equivalent circuit diagram of Scott transformer

图 2 中,  $R_T, L_T$  分别为 T 变压器原边绕组的电阻和漏感;  $R_M, L_M$  分别为 M 变压器原边绕组的电阻和漏感, 则原边 B, C 相绕组的内阻和漏感分别为  $R_M/2, L_M/2$ ;  $R'_\alpha, L'_\alpha$  分别为 T 变压器副边绕组  $\alpha$  相的电阻  $R_\alpha$  和漏感  $L_\alpha$  折算到原边的值;  $R'_\beta, L'_\beta$  分别为 M 变压器副边绕组的电阻  $R_\beta$  和漏感  $L_\beta$  折算到原边的值;  $R'_{L\alpha}, L'_{L\alpha}, R'_{L\beta}, L'_{L\beta}$  分别为副边负载  $R_{L\alpha}, L_{L\alpha}, R_{L\beta}, L_{L\beta}$  折算到原边的值, 变比  $k$  为  $\omega_1/\omega_2$  的比值。

由 T 型等效电路可得微分方程如下:

$$\begin{cases} U_{AB} = (R_T + R'_\alpha + R'_{L\alpha})i_A + (L_T + L'_\alpha + L'_{L\alpha})\frac{di_A}{dt} - \\ \quad \left( \frac{R_M}{2} + R'_\beta + R'_{L\beta} \right) i_B - \left( \frac{L_M}{2} + L'_\beta + L'_{L\beta} \right) \frac{di_B}{dt}; \\ U_{CB} = \left( \frac{R_M}{2} + R'_\beta + R'_{L\beta} \right) i_C + \left( \frac{L_M}{2} + L'_\beta + L'_{L\beta} \right) \frac{di_C}{dt} - \\ \quad \left( \frac{R_M}{2} + R'_\beta + R'_{L\beta} \right) i_B - \left( \frac{L_M}{2} + L'_\beta + L'_{L\beta} \right) \frac{di_B}{dt}; \\ i_C = -i_A - i_B \circ \end{cases} \quad (1)$$

假设

$$\begin{aligned} a &= R_T + R'_\alpha + R'_{L\alpha} = R_T + \frac{3}{4}k^2R_\alpha + \frac{3}{4}k^2R_{L\alpha}, \\ b &= L_T + L'_\alpha + L'_{L\alpha} = L_T + \frac{3}{4}k^2L_\alpha + \frac{3}{4}k^2L_{L\alpha}, \\ c &= \frac{R_M}{2} + R'_\beta + R'_{L\beta} = \frac{R_M}{2} + k^2R_\beta + k^2R_{L\beta}, \\ d &= \frac{L_M}{2} + L'_\beta + L'_{L\beta} = \frac{L_M}{2} + k^2L_\beta + k^2L_{L\beta} \circ \end{aligned}$$

将其代入式 (1) 中, 得:

$$\begin{cases} U_{AB} = ai_A - ci_B + b\frac{di_A}{dt} - d\frac{di_B}{dt}; \\ U_{CB} = -ci_B + ci_C - d\frac{di_B}{dt} + d\frac{di_C}{dt}; \\ i_C = -i_A - i_B \circ \end{cases} \quad (2)$$

整理 (2) 式得:

$$\begin{cases} U_{AB} = ai_A - ci_B + b\frac{di_A}{dt} - d\frac{di_B}{dt}, \\ U_{CB} = -ci_A - 2ci_B - d\frac{di_A}{dt} - 2d\frac{di_B}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

选取  $i_A, i_B$  为状态变量,  $U_{AB}, U_{CB}$  为输入变量, 将式 (3) 写成状态方程形式, 即

$$\begin{bmatrix} \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_B}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{-2db - d^2} \begin{bmatrix} -2d & d \\ d & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -a & c \\ c & 2c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} + \frac{1}{-2db - d^2} \begin{bmatrix} -2d & d \\ d & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{CB} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

若选择  $i_\alpha$  和  $i_\beta$  作为输出变量, 可用状态方程式 (5) 进行转换, 即

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}k}{2} & 0 \\ -k/2 & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由式 (3) 可知,  $U_{AB}, U_{CB}$  存在耦合; 由式 (4) 可知,  $i_A, i_B$  也存在耦合,  $i_A, i_B$  由两相负载共同决定; 由

式(5)可知,输出电流 $i_\alpha$ 和 $i_\beta$ 不能解耦。

## 2 仿真实现

由式(4)和式(5)可以建立 Scott 变压器的仿真模型,将不同负载下变压器的参数代入该模型中,并对其进行仿真分析。

### 2.1 负载平衡条件下的仿真

在负载平衡条件下,根据现有的 Scott 变压器,取仿真变压器参数、负载及原边、副边电压等级和变比分别为: $R_M=R_1=R_\alpha=R_\beta=0.002 \Omega$ ,  $L_{L\alpha}=L_{L\beta}=0 \text{ H}$ ,  $L_M=L_1=L_\alpha=L_\beta=0.0008 \text{ H}$ ,  $R_{L\alpha}=1000 \Omega$ ,  $R_{L\beta}=1000 \Omega$ ,  $K=110 \text{ kV}/55 \text{ kV}=2$ 。

将负载平衡条件下各变压器参数代入仿真模型中,仿真得到原边和副边的电压、电流波形,如图3所示。

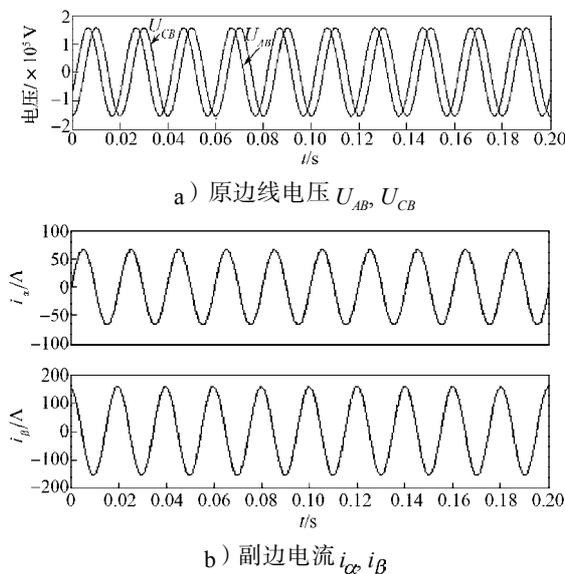


图3 负载平衡下 Scott 变压器的仿真波形

Fig. 3 The simulation waveform of Scott transformer with load balance

由图3b可知, $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 相位相差 $90^\circ$ 。由于负载为纯阻性负载,因此,副边电压 $U_\alpha$ 、 $U_\beta$ 与其相应的电流 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 同相位,即 $U_\alpha$ 、 $U_\beta$ 相位也相差 $90^\circ$ ,其幅值存在 $\sqrt{3}/2$ 倍数关系。这符合 Scott 变压器供电电源的三相电变成两相电(2个相位差 $90^\circ$ 的单相)的原理,即提供两相电源,保证供电的三相电源平衡。这说明了笔者所建立的 T 等效电路及其状态方程模型是正确的。

### 2.2 不负载平衡条件下的仿真

不负载平衡条件下,变压器参数不变,取不平衡纯阻性负载 $R_{L\alpha}=1000 \Omega$ ,  $R_{L\beta}=5000 \Omega$ 。负载不平衡条件下的仿真波形如图4所示。

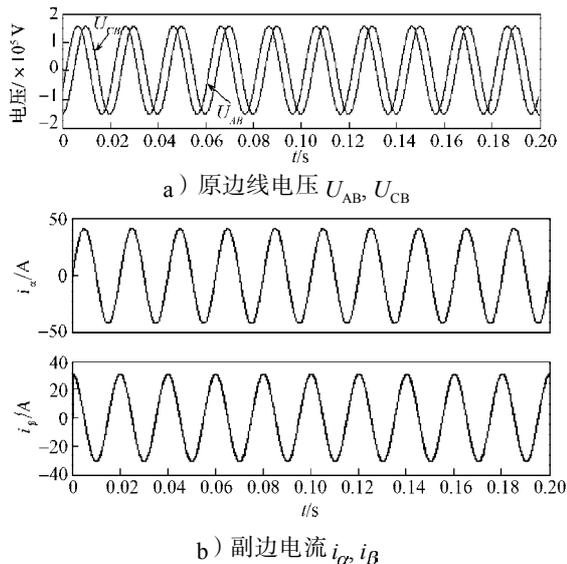


图4 负载不平衡下 Scott 变压器的仿真波形

Fig. 4 The simulation waveform of Scott transformer with load unbalance

由图4b可知,不同阻性负载下, $U_\alpha$ 、 $U_\beta$ 相位还是相差 $90^\circ$ ,原边电压没有发生改变。对图3b和图4b进行比较可知,当仅改变 $\beta$ 相负载情况下,输出电流 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 的幅值都发生了变化,这证实了从 Scott 变压器状态方程得出的电流 $i_\alpha$ 和 $i_\beta$ 不能解耦的结论,也进一步证明了本文所建立的 T 等效电路及其状态方程模型的正确性。

## 3 结语

本文基于变压器特性,建立了其相应的状态方程,分析了 Scott 变压器不同负载情况下,输出电流与负载的解耦关系。仿真结果证实了本文对 Scott 变压器特性分析的正确性,为变压器稳态和暂态分析提供了新的思路。

### 参考文献:

- 符德川. 三相V/V接线牵引变压器的应用[J]. 铁道机车车辆, 1999(4): 25-28.  
Fu Dechuan. The Application of Three Phase V/V Connection Traction Transformer[J]. Railway Locomotive & CAR, 1999(4): 25-28.
- 吴命利, 范瑜, 辛成山. Scott接线牵引变压器运行特性与等值模型研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 75-80.  
Wu Mingli, Fan Yu, Xin Chengshan. Study on Operation Characteristics and Equivalent Model of Scott Connection Traction Transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(4): 75-80.

- [3] 冯存亮, 葛宝明, 毕大强. 三相 V/V 牵引变压器励磁涌流的识别[J]. 铁道学报, 2011, 33(6): 35-40.  
Feng Cunliang, Ge Baoming, Bi Daqiang. Identification of Magnetizing Inrush for Three-Phase V/V Traction Transformer[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(6): 35-40.
- [4] 林国松, 李群湛. Scott 变压器差动保护电流互感器接线方式分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(4): 37-40.  
Lin Guosong, Li Qunzhan. Analysis of Current Transformer Wiring Scheme for Differential Protection on Scott Transformer[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2007, 19(4): 37-40.
- [5] 吴命利, 吴利仁. Scott 接线平衡变压器数学模型与阻抗匹配的实验验证[J]. 铁道学报, 2007, 29(4): 39-44.  
Wu Mingli, Wu Liren. Experimental Verification of Mathematical Model and Impedance Matching of the Scott Connected Balance Transformer[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(4): 39-44.
- [6] 张秀峰, 连级三. 基于斯科特变压器的新型同相 AT 牵引供电系统[J]. 机车电传动, 2006(4): 14-18.  
Zhang Xiufeng, Lian Jisan. A New Cophase AT Traction Power Supply System Based on Scott Transformer[J]. Electric Drive for Locomotives, 2006(4): 14-18.
- [7] 史泽兵, 江卫良, 郝后堂, 等. Scott 变压器差动保护研究[J]. 现代电力, 2011, 28(5): 59-62.  
Shi Zebing, Jiang Weiliang, Hao Houtang, et al. Research on Differential Protection of Scott Transformer[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(5): 59-62.
- [8] 关海川, 高仕斌. 参数辨识在 Scott 变压器保护中的应用[J]. 继电器, 2008, 36(4): 1-4.  
Guan Haichuan, Gao Shibin. Identification of Winding Parameter Application in Scott Transformer Protection[J]. Relay, 2008, 36(4): 1-4.
- [9] 王金浩, 薛磊, 李蒙赞, 等. 不同牵引变压器接线方式的应用研究[J]. 现代电力, 2009, 26(1): 33-39.  
Wang Jinhao, Xue Lei, Li Mengzan, et al. Application and Research on Different Wiring Traction Transformers[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(1): 33-39.
- [10] 卢涛, 韩正庆. 基于感应电压的 SCOTT 三相-两相平衡变压器保护原理研究[J]. 继电器, 2004, 32(22): 25-28.  
Lu Tao, Han Zhengqing. Study of a Novel Protective Scheme Based on Induced Voltages for SCOTT Three-Phase to Two-Phase Balanced Transformer[J]. Relay, 2004, 32(22): 25-28.

(责任编辑: 邓彬)

(上接第 34 页)

- Behavior of Corroded Reinforced Concrete[J]. Industrial Construction, 1999, 29(11): 47-50.
- [12] 徐育才. 钢筋锈蚀拉拔试验及其粘结性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
Yu Yucai. Research on Bond Performance between the Rusted Bar and Concrete by Pullout Tests[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [13] 肖小琼. 锈蚀钢筋混凝土粘结性能试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
Xiao Xiaoqiong. Research on Bond Performance between the Rusted Steel Bar and Concrete[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [14] 赵羽习, 金伟良. 混凝土构件锈蚀胀裂时的钢筋锈蚀率[J]. 水力学报, 2004, 35(11): 97-101.  
Zhao Yuxi, Jin Weiliang. Corrosion Ration of Reinforcement Bar in Reinforced Concrete Construction at Moment of Cracking Due to Corrosion Expansion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 97-101.
- [15] Liu Y W, Xie C, Jiang C Z, et al. Analytical Solution for a Strained Reinforcement Layer Bonded to Lip-Shaped Crack Under Remote Mode III Uniform Load and Concentrated Load[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(9): 1125-1140.
- [16] Muskhelishvili N I. Some Basic Problems of Mathematical Theory of Elasticity[M]. Leyden: Noordhoff, 1975: 327.
- [17] Molina F J, Alonso C, Andrade C. Cover Cracking as a Function of Rebar Corrosion: Part 2-Numerical Model[J]. Materials and Structures, 1993, 26(9): 532-548.

(责任编辑: 邓光辉)