

基于 MATLAB 的变压器空载合闸瞬变过程仿真研究

黄绍平, 李永坚

(湖南工程学院电气与信息工程系, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 变压器空载合闸投入运行时会出现一个较为复杂的电磁瞬变过程, 对其进行工程计算很麻烦。利用 MATLAB 中的电气系统模块库 (PSB), 为研究分析变压器空载合闸瞬变过程建立了系统仿真模型, 它可以分析变压器在空载合闸瞬变过程中励磁涌流、磁通以及谐波的变化情况。本文采用这一模型进行了仿真, 给出了仿真结果, 为分析计算变压器空载合闸瞬变过程中的有关物理量提供了便捷而有效的手段。

关键词: 变压器; 励磁涌流; 电气系统模块库; 仿真

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)08-0019-03

0 引言

当变压器空载合闸或外部故障切除后电压恢复时, 由于铁芯饱和会产生很大的励磁电流, 在最不利的情形下, 可达到正常励磁电流的上百倍, 或者说可达到变压器额定电流的几倍。这一大大超过正常励磁电流的空载合闸电流称为励磁涌流。

励磁涌流的大小和铁芯饱和程度、铁芯的剩磁和合闸时电压的相角等因素有关。同时, 在变压器空载合闸这一瞬变过程中, 电流、电压的波形也会发生畸变, 产生谐波; 在一定的条件下, 还可能会引起电力系统谐振, 产生过电压。因此, 工程上对变压器空载合闸这一瞬变过程进行分析计算是很麻烦的, 通常要作若干简化, 如略去一次绕组的电阻, 假定铁芯不饱和且无剩磁。

本文利用 MATLAB 软件, 对变压器空载合闸这一瞬变过程进行计算机仿真分析。

1 MATLAB PSB 简介

Mathworks 软件公司开发的 MATLAB 软件以矩阵运算为基础, 把计算可视化程序设计融合到一个交互的工作环境中, 可实现工程计算、算法研究、建模与仿真、数据分析及可视化、工程绘图等功能。从 1998 年推出的 MATLAB Version 5.2 开始, 增加了电气系统模块库 PSB (Power System Block), 它是一种针对电气系统的可视化建模与仿真工具。强大的 PSB 和 MATLAB 的仿真工具 Simulink 同时使用将使一些复杂的、非线性的电气系统的建模与仿真变得简捷。

MATLAB PSB 以 Simulink 为运行环境, 涵盖了电路、电力电子、电气传动、电机、电力系统等电工学

科中常用的基本元件和系统的仿真模型。它由以下 6 个子模块库组成:

- 1) 电源模块库。包括直流电压源、交流电压源、交流电流源、可控电压源、可控电流源等;
- 2) 基本元件模块库。包括串联(并联) RLC 负载 / 支路、线性变压器、饱和变压器 / 互感器、断路器、 N 相分布参数线路、单相形集中参数传输线路和浪涌放电器等;
- 3) 电力电子模块库。包括二极管、晶闸管、GTO、MOSFET 和理想开关等;
- 4) 电机模块库。包括励磁装置、水轮发电机及其调节器、异步电动机、同步电动机及其简化模型和永磁同步电动机等;
- 5) 连接模块库。包括地、中性点和母线(公共点);
- 6) 测量模块库。包括电流测量与电压测量。

在 6 个基本子模块库的基础上, 根据需要, 可组合封装出常用的更为复杂的模块。实际上, PSB 附加模块库 (Powerlib Extras) 中的三相电气系统就是用 6 个基本子库中的各模块构造并封装起来的。附加模块库中还包括: 均方根测算、有功与无功功率测算、傅里叶分析、可编程定时器和同步触发脉冲发生器等。

2 仿真模型

2.1 系统模型

利用 MATLAB PSB 所建立的用于变压器空载合闸瞬变过程仿真分析的系统模型如图 1 所示, 图中的变压器、等效电源、负荷、断路器、Fourier (傅里叶) 分析以及测量模块等都是 MATLAB PSB 模块库中的标准模型。

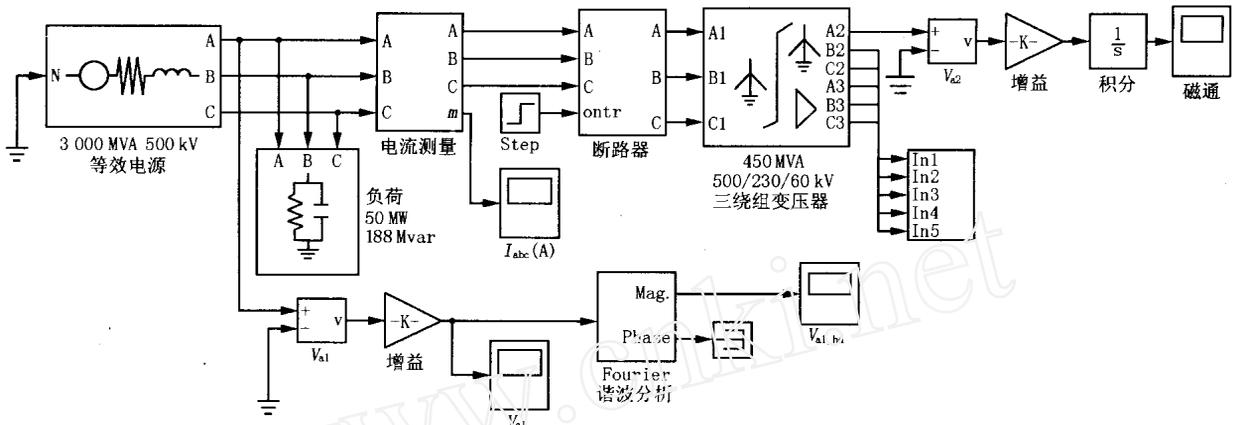


图1 系统模型

Fig. 1 System model

图1实际上也表示了输电系统的基本结构。一台三相三绕组变压器由一个500 kV、60 Hz的等效电源供电,等效电源与变压器之间并联了一个负荷支路。变压器的额定容量为450 MVA,绕组联接方式为 $Y_0/Y_0/$,额定电压为500/315/60 kV,额定频率为60 Hz。

等效电源由一个短路容量为3000 MVA的感性电源来模拟,其电阻为5.55,电感为0.22 H,系统中性点直接接地。

变压器前面的负荷支路是一个容性负荷,其有功功率为50 MW,容性无功功率为188 Mvar。在此,为了模拟在变压器空载合闸瞬变过程中系统发生谐振的条件,在确定负荷的电容参数时构建了系统谐振条件。

为了测量变压器空载合闸瞬变过程中磁通的变化情况,如图1所示,通过对变压器第二绕组的A相电压 U_{a2} 进行增益和积分变换环节来获得铁芯磁通量。增益 $K = 1/(2fU_{a2m})$,其中 U_{a2m} 为 U_{a2} 的幅值。积分后,反映磁通变化波形的示波器就能观测磁通(标么值)的变化。

为了测量变压器空载合闸瞬变过程中谐振过电压和谐波的情况,如图1所示,电压测量模块 V_{a1} 通过增益模块(增益 $K = 1/U_{a1m}$, U_{a1m} 为 U_{a1} 的幅值)将电压 U_{a1} 变换为标么值,示波器 V_{a1} 显示 U_{a1} 。标么值通过Fourier(傅里叶)分析模块,进行傅里叶分析,它的两个输出端输出指定次数谐波成份的数量和相位。这里是在示波器 V_{a1-h4} 上观测 U_{a1} 的4次谐波含量。通过对Fourier模块进行简单设定,也可以得到其它任何次的谐波成份的数量和相位。

励磁涌流通过电流测量模块得到,在示波器

I_{abc} 上观测三相电流的实际值。

断路器用于投入和切除变压器,断路器模块有一个控制端,控制端接一个阶跃信号,用于控制断路器的分合闸时间。

2.2 变压器模型及参数

饱和变压器的电路模型如图2所示,其铁芯的磁化特性用一个表示铁芯有功损耗的电阻 R_m 和一个饱和电感 L_{sat} 模拟。饱和特性用分段线性表示,如图3所示。

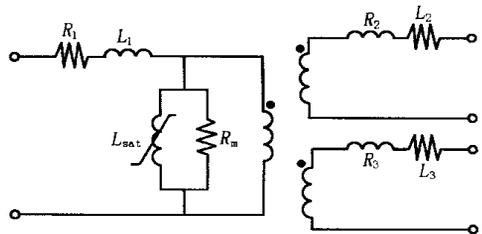


图2 变压器的电路模型

Fig. 2 Circuit model of transformer

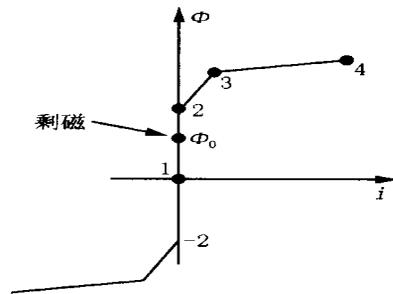


图3 变压器的饱和特性曲线

Fig. 3 Saturation characteristic curve of transformer

本例仿真中,变压器模型的有关参数取值(均为标么值)如下: $R_1 = 0.002$, $X_1 = 0.08$, $R_2 = 0$ 。

002, $X_2 = 0.08$, $R_3 = 0.015$, $X_3 = 0.30$, $R_m = 500$, 饱和特性(对应图 3 中的 1、2、3 点)是 $[i_1 = 0, i_2 = 0; i_3 = 1.0, i_4 = 1.52]$, 三相剩磁 $A_0 = 0.8$, $B_0 = -0.4$, $C_0 = 0.4$ 。

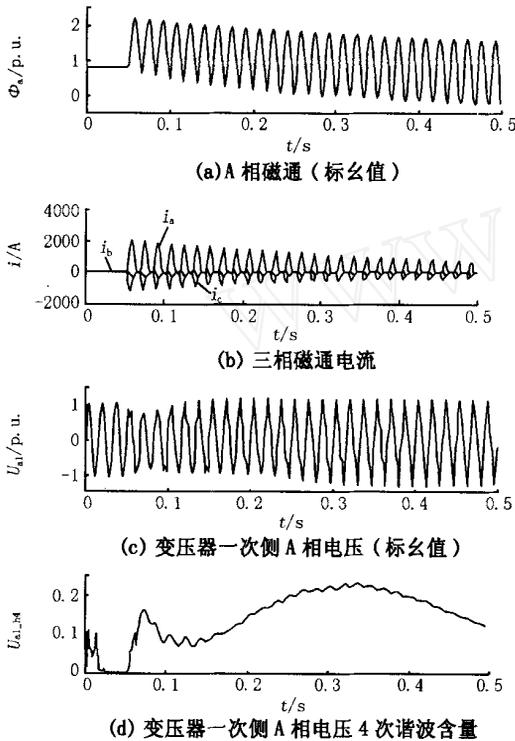


图 4 仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms

3 仿真结果

启动仿真,观察电流、电压和磁通波形。观察断路器合闸后的变压器励磁涌流和过电压变化。图 5(a) ~ (d) 分别是图 1 所示的 4 个观测示波器所观

测到的磁通、电流、电压和电压中 4 次谐波含量的波形(磁通、电压均为标么值,电流为实际值,谐波成份为基波的含量)。

因为变压器 A 相剩磁通为 0.8(标么值),而断路器在此时瞬时合闸,从而引起 A 相磁通标么值超过 2,即达到变压器额定磁通的 2 倍。励磁涌流最高值达到 2000 A,是变压器一次侧额定电流(约 520 A)的近 4 倍。由于励磁涌流中的 4 次谐波电流注入发生了谐振的电力系统,因而电压中含有较高的 4 次谐波成份。

4 结束语

本文利用 MATLAB 的电气系统模块库,为分析研究变压器空载合闸瞬变过程建立了仿真模型,建模简单方便,并可在 Simulink 环境中高效地进行仿真分析。PSB 是 MATLAB 中的一个功能强大的工具箱,可以方便地建立电路、电机、电力传动、电力系统等的各种模型,为系统设计和分析提供了一种有力手段。

参考文献:

- [1] 黄忠霖(HUANG Zhong-lin). 控制系统 MATLAB 计算及仿真(Calculation and Simulation of Control System Based on MATLAB)[M]. 北京:国防工业出版社(Beijing:National Defence Industry Press),2001.

收稿日期: 2003-10-08; 修回日期: 2003-11-20

作者简介:

黄绍平(1964 -),男,工程硕士,副教授,从事电力系统及其自动化的教学与研究工作,目前的研究方向为无功补偿、智能化开关设备。

MATLAB-based simulation of instantaneous change process when transformer no-load switching

HUANG Shao-ping, LI Yong-jian

(Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China)

Abstract: A complicated electromagnetic instantaneous change process will appear when transformer no-load switching, which is complicated to calculate electromagnetic quantities. Using power system blockset (PSB) of MATLAB, a simulation model of analysing instantaneous change process is built when transformer no-load switching. It can analyse the varieties of inrush current, flux and harmonic in the instantaneous change progress. Using this model, a simulation is accomplished, and the result is given. This method is a facile and effective means for analysing and calculating electromagnetic quantities during instantaneous change process when transformer no-load switching.

Key words: transformer; inrush current; power system blockset (PSB); simulation