

# Study on the Real-Time Simulation of Transformer Protection with the Hardware in the Loop

Junjie Qian, Lin Sun, Haiqin Xue, Jianfei Yang, Huaren Wu

School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu  
Email: 1158453989@qq.com

Received: Feb. 16<sup>th</sup>, 2016; accepted: Mar. 1<sup>st</sup>, 2016; published: Mar. 8<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

With a TI Corporation DSPF28335 as the core of control, a transformer protection was designed that meets the needs of selectivity, speed, reliability and sensitivity, clears internal faults by longitudinal differential protection, and uses over-current protection as backup protection. A 110/11 kV transformer model was designed in MATLAB/Simulink. Then, corresponding faults were set to obtain simulation waves and to activate RT-LAB, a real-time simulation platform. With a DSP, hardware for the real-time simulation loop was achieved, and corresponding figures and performance tests of the protection were obtained.

## Keywords

Transformer, Microcomputer Protection, DSP, RT-LAB

---

# 变压器保护硬件在环实时仿真研究

钱俊杰, 孙琳, 薛海芹, 杨建飞, 吴华仁

南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京  
Email: 1158453989@qq.com

收稿日期: 2016年2月16日; 录用日期: 2016年3月1日; 发布日期: 2016年3月8日

## 摘 要

为了满足变压器保护可靠性、速动性和灵敏性的要求,以TI公司的DSPF28335为控制核心,编写算法设计变压器的保护装置。以二次谐波制动的方法躲过变压器合闸时的励磁涌流,利用纵联差动保护作为变压器主保护,利用过电流保护作为后备保护。利用MATLAB/Simulink搭建110 kV/11 kV等级的变压器模型,设置相应的故障,在半实物仿真平台RT-LAB上验证保护装置的性能。

## 关键词

变压器, 微机保护, DSP, RT-LAB

## 1. 引言

在电力系统中广泛地用变压器来升高或降低电压。变压器是电力系统不可缺少的重要电气设备。它的故障将对供电可靠性和系统安全性带来严重影响,同时大容量的电力变压器本身也是很贵重的装置。因此需要根据变压器容量等级和重要程度安装性能良好、动作可靠的继电保护装置[1]。

本文将设计以 DSPF28335 为控制核心的变压器保护装置,保护装置的主要功能为区分变压器区内和区外故障,断开故障电路,保护能够躲过励磁涌流。在 MATLAB/Simulink 中搭建变压器的数学模型,进行变压器区内短路、区外短路的仿真[2] [3]。编写相应的算法程序,纵联差动保护差动电流和过电流保护的电流有效值采用傅里叶变换计算有效值的方法,躲过励磁涌流采用二次谐波制动,也是利用傅里叶变换计算基波和二次谐波的有效值。

TMSF28335 DSP 是 TI 公司新推出的一款浮点型数字信号处理器。这款 DSP 既保持了原有 DSP 芯片的优点,又能够执行复杂的浮点运算,频率可达到 150 MHz,具有精度高、成本低、功耗小、外设集成度高、数据及程序存储量大和 AD 转换更加精确等优点[4]。

最后,在半物理仿真平台 RT-LAB 上验证保护装置的性能,RT-LAB 实时仿真系统是加拿大 Opal-RT 公司开发的一套基于模型的设计和测试应用平台,广泛应用于科研和工程设计。它将 Simulink、SystemBuild 等建模工具所搭建的数学模型,通过上位机和多台目标机的模式,将仿真模型放置在实时仿真平台上运行,从而方便地实现对大型复杂的硬件在环和快速控制原型的实时仿真进行分布式并行计算[5] [6]。本文的设计利用 RT-LAB 将短路电流输出给 DSP 采样,DSP 输出跳闸信号给 RT-LAB。

## 2. 硬件设计

本设计的核心控制板中,使用 DSP28335 为核心处理器。变压器保护的硬件电路框图如图 1 所示,包括数据采集模块、CPU 模块、电源电路模块、开关量输入输出模块、复位电路及 JATG 下载口电路模块等[7]。

以系统硬件框图为基础为本变压器保护装置设计了基于 DSPF28335 的核心板,以便于程序的开发和升级。

## 3. 软件设计

根据变压器保护的需要,设计了基于 DSPF28335 的采样程序、差动保护的程序、过电流保护的程序。使用的开发环境是 TI 公司提供的 CCS (Code Composer Studio)软件,本设计使用的是 CCS3.3 的版本。

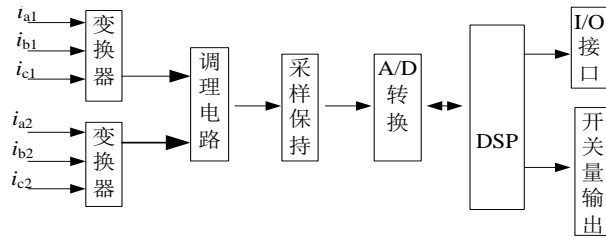


Figure 1. Scientific method of design process

图 1. 系统硬件框图

### 3.1. 采样程序设计

TMS320F28335 内部的 A/D 转换模块是一个 12 位具有带流水线的模数转换器。该模块包含了前端模拟多路复用开关(MUX)、采样/保持(S/H)电路等。该模块还具有 16 个通道, 可以配置为两个独立的 8 通道模块, 分别为 ADCINA0 至 ADCINA7、ADCINB0 至 ADCINB7 [8]。

本装置的采样程序设计为 6 路通道的顺序采样, 使用的通道为 ADCINA0~ADCINA5, 设定的采样频率为 2400 HZ, 即一个周期(0.02 s)采样 48 个点, 使用 EPWM 为采样的触发信号。采样值与转换的数字值之间的关系为:

$$N = 4095 \times \frac{V - \text{ADCLO}}{3} \quad (1)$$

其中  $N$  为转换的数字值,  $V$  为采样的模拟值, 在使用时将 ADCLO 端接地, 因此数字值和模拟值是一个线性对应的关系。

### 3.2. 傅里叶级数算法设计

电流的有效值是采用傅里叶变换来计算, 需要计算基波的有效值, 差动电流基波的有效值。

傅里叶级数算法的基本思路来自傅里叶级数, 算法本身具有滤波作用。它假定被采样的模拟信号是一个周期性时间函数, 除基波外还含有不衰减的直流分量和各次谐波[9], 可表示为:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{2} X_n \sin(n\omega_1 t + \alpha_n) \quad (2)$$

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [b_n \cos n\omega_1 t + a_n \sin n\omega_1 t] \quad (3)$$

$$b_n = X_n \sin \alpha_n, a_n = X_n \cos \alpha_n \quad (4)$$

式中:  $a_n$ 、 $b_n$  分别为直流、基波和各次谐波的正选项和余弦项的振幅。

因为 DSP 处理的是离散信号, 所以需要将连续的信号离散化, 用梯形法则可以求得:

$$a_1 = \frac{1}{N} \left[ 2 \sum_{k=1}^{N-1} x_k \sin \left( k \frac{2\pi}{N} \right) \right] \quad (5)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \left[ x_0 + 2 \sum_{k=1}^{N-1} x_k \cos \left( k \frac{2\pi}{N} \right) + x_N \right] \quad (6)$$

式中:  $N$  为基波信号的一周期采样点数;

$x_k$  为第  $k$  次采样值;

$x_0$ 、 $x_N$  分别为  $k=0$  和  $k=N$  时的采样值。

因此, 可以根据, 求出有效值和相角如式(7)和(8)所示:

$$2X_1^2 = a_1^2 + b_1^2 \tag{7}$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{b_1}{a_1} \tag{8}$$

### 4. 硬件在环实时仿真

RT-LAB 半实物仿真系统结构如图 2 所示。半实物仿真系统由上位机、目标机以及硬件实物组成。RT-LAB 实时仿真系统包括上位机和目标机。上位机装有 MATLAB/Simulink 等图形化建模工具和 RT-LAB 软件包，可以完成系统建模、在线参数调节和信号监测等工作。目标机是 Opal-RT 公司专为半实物仿真应用而设计的基于 PC 的实时仿真器，内部配置有多核处理器，装有 QNX 或者 Redhat 实时操作系统，可以完成复杂系统模型的分布式实时计算。

Simulink 仿真模型在 RT-LAB 中的模型如图 3 所示，需要将 6 路模拟信号配置给板卡输出，将跳闸信号配置给板卡输入。将变压器的 MATLAB/Simulink 仿真模型放在 RT-LAB 中运行，将变压器高压侧和低压侧的电流以模拟信号的形式送出给保护装置采样，并设置区内和区外故障[10]，检验保护装置的性能。具体的保护装置和 RT-LAB 实验系统如图 4 所示。

### 5. 实验结果

图 5(a)显示了差动保护的实验波形，图 5(b)显示了过电流保护的实验波形。



Figure 2. RT-LAB real-time system structure chart  
图 2. RT-LAB 半实物仿真系统结构图

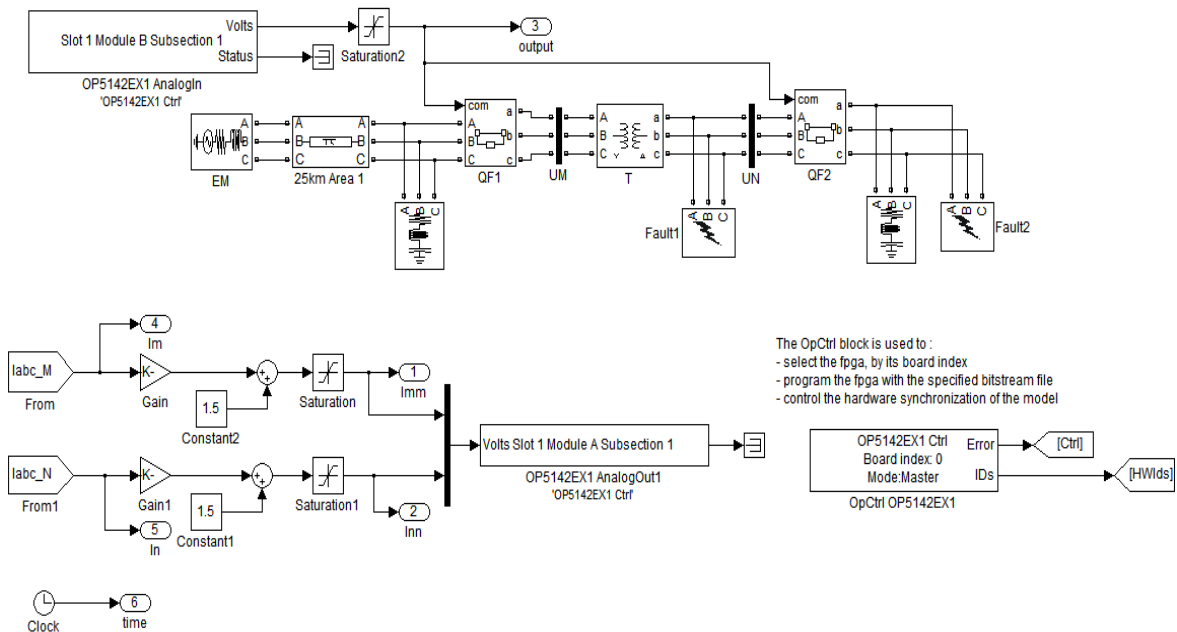


Figure 3. RT-LAB real-time system structure chart  
图 3. RT-LAB 半实物仿真系统结构图

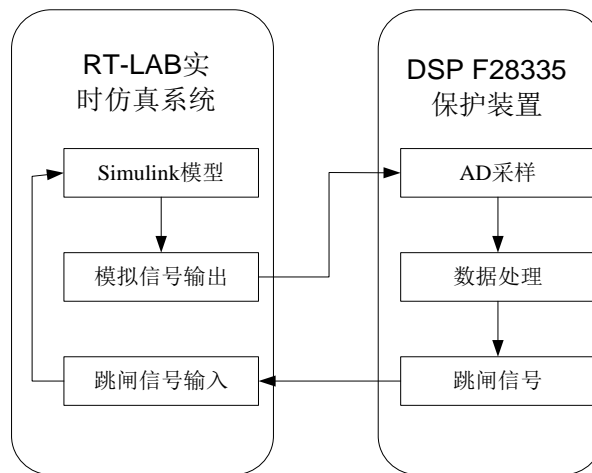


Figure 4. Hardware in the real-time simulation loop system  
图 4. RT-LAB 实验验证系统图

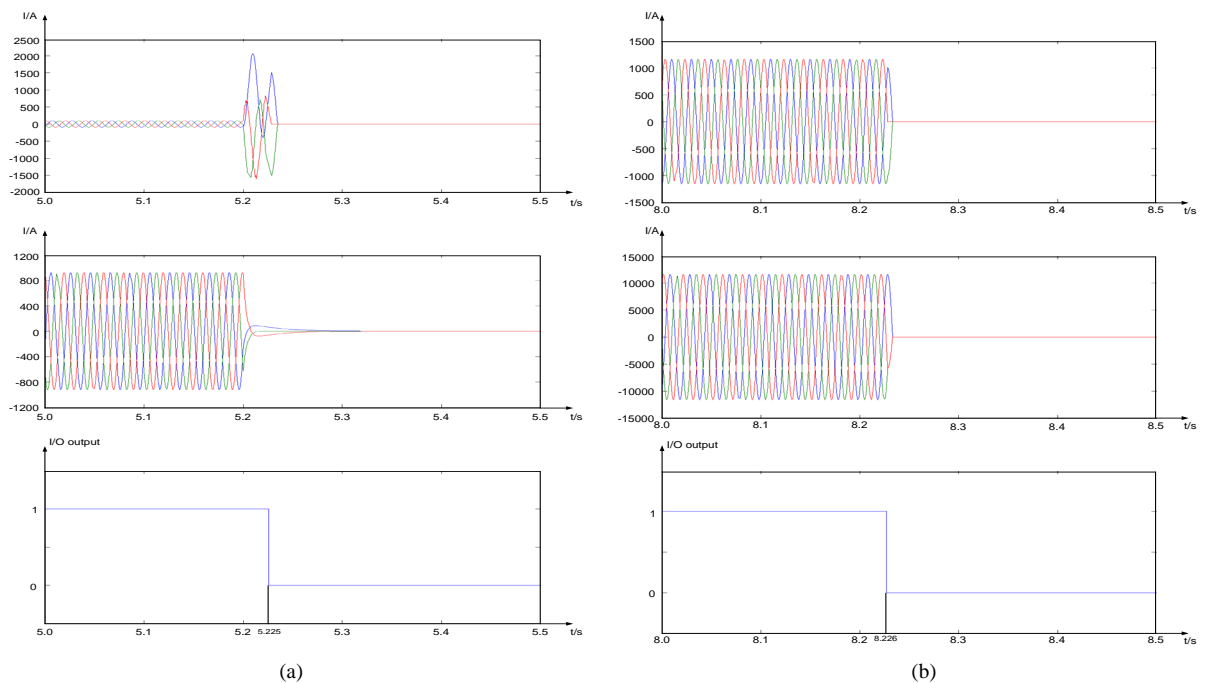


Figure 5. Experimental waveform of differential protection and over-current protection  
图 5. 差动保护和过电流保护实验波形

在 Simulink 中将变压器的区内故障设定为仿真开始后 5.2 s 发生，故障为三相短路，图 5(a)三个波形从上到下依次为变压器高压侧的电流、变压器低压侧的电流、保护装置的跳闸信号，DSP 的 GPIO52 口在系统正常运行时输出高电平，在检测到差动电流时输出低电平，从第三个波形看出从短路发生到 DSP 发出跳闸信号大概经过 25 ms，能够快速切除故障。

在 Simulink 中将变压器的区外故障设定为仿真开始后 7.2 s 发生，故障为三相接地短路，由于过电流保护是后备保护，延时 1 s 动作，图 5(b)三个波形从上到下依次为变压器高压侧的电流、变压器低压侧的电流、保护装置的跳闸信号，DSP 的 GPIO52 口在系统正常运行时输出高电平，在检测到差动电流时输出低电平，从第三个波形看出从短路发生到 DSP 发出跳闸信号大概经过 1.026 s，能够起到保护作用，切

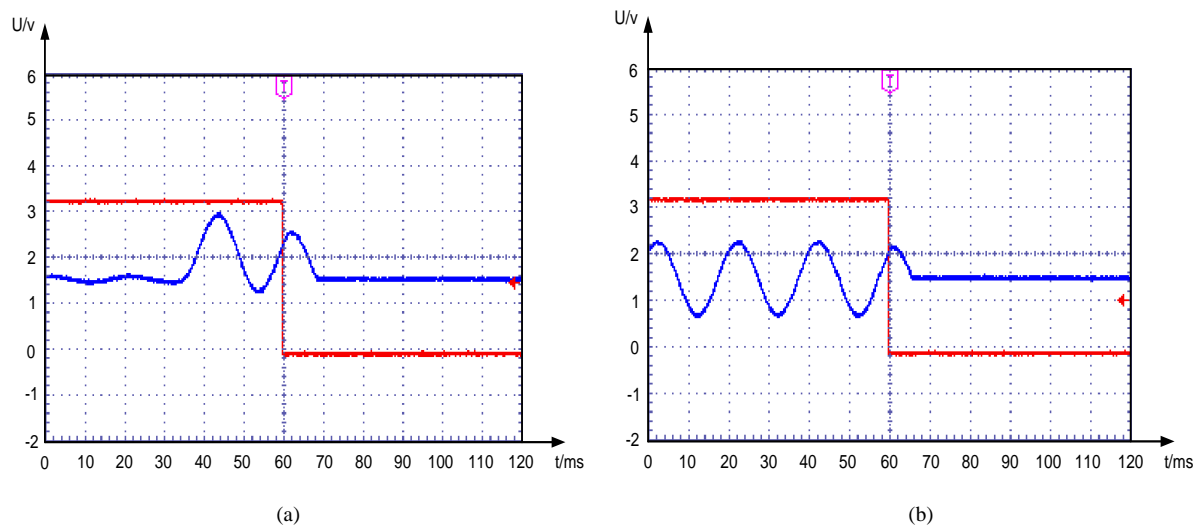


Figure 6. Experimental waveform in oscilloscope  
图 6. 差动保护和过电流保护在示波器中的波形

除变压器低压母线故障。

将高压侧的  $a$  相的电流和 DSP 的跳闸信号输入到示波器中，利用示波器的捕捉功能将跳闸瞬间的波形捕捉，波形如图 6 所示图 6(a) 为差动保护在示波器中的波形，图 6(b) 为过电流保护在示波器中的波形。由于 DSP 只能采样  $0\sim 3\text{ V}$  的信号，而变压器两侧的电流是正弦信号，根据变压器高压侧和低压侧正常运行和短路时电流的大小，将原边和副边的信号分别进行式(9)、(10)的变换

$$I_{out1} = \frac{I_{in1}}{1470} + 1.5 \quad (9)$$

$$I_{out2} = \frac{I_{in2}}{14700} + 1.5 \quad (10)$$

从示波器的波形图 6(a) 中可以看出短路故障在  $35\text{ ms}$  发生，在  $60\text{ ms}$  时 DSP 发出跳闸信号，切除故障的时间约为  $25\text{ ms}$ 。

## 6. 结论

本文结合电力行业变压器保护标准规范的要求，设计了一种基于 DSP 的变压器保护装置，进行了硬件、软件等的设计。通过半实物仿真平台 RT-LAB 的实验验证，本文设计的变压器保护装置能够满足变压器保护的可靠性、速动性、选择性的要求，能够区分变压器区内和区外故障，并且准确切除短路故障。

## 参考文献 (References)

- [1] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 第二版. 北京: 中国电力出版社, 2009: 166-174.
- [2] 王忠礼, 段慧达. MATLAB 应用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 164-167.
- [3] 于群, 曹娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 95-100.
- [4] 刘陵顺, 高艳丽. TMS320F28335DSP 原理及开发编程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 269-274.
- [5] 陈元斌. 基于 RT-LAB 的热连轧主传动系统建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [6] 郑鹤玲, 葛宝明. 基于 RT-LAB 的光伏发电系统实时仿真[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(4): 62-66.
- [7] 刘宇. 基于 TMS320F28335 信号处理板的设计与实现[J]. 电子科技, 2011, 24(5): 44-47.

- [8] 谭浩强. C 程序设计[M]. 第三版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 115-120.
- [9] 杨奇逊, 黄少锋. 微机继电保护基础[M]. 第四版. 北京: 中国电力出版社, 2013: 89-94.
- [10] Yabe, K. (1997) Power Differential Method for Discrimination between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **12**, 1109-1118. <http://dx.doi.org/10.1109/61.636909>