

基于 Matlab 的变压器差动保护闭环仿真研究

刘 强,蔡泽祥

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要: 应用 Matlab 建立了微机保护仿真系统,并对不同原理的变压器差动保护进行了仿真和比较。仿真系统采用积木式结构,根据微机保护的实现原理构建模块,实现保护的闭环仿真,对保护的动作过程进行分析。以变压器差动保护为例,研究比较了常规比率差动、复式比率差动、故障分量比率差动元件的工作原理,分析了二次谐波、波形对称原理识别励磁涌流的方法,构建了相应的保护模块并进行了仿真和比较。仿真结果说明仿真系统可考核保护的各元件判据、动作定值、动作逻辑和分析特殊故障条件下保护内部元件的动作特性,实现保护动作全过程的闭环仿真。

关键词: Matlab; 差动保护; 仿真; 闭环

中图分类号: TM 774

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)09-0031-04

如何将传统的保护原理应用于微机中,并充分利用计算机在数字运算、逻辑处理、记忆方面的优势来改进、完善保护或探索新的保护原理,从而提高保护的总体性能,一直是广大继电保护工作者的重要任务。但由于微机保护的原理是用软件实现,继电保护元件的内部动态行为难以得知,对于保护装置的误动和拒动,往往不清楚装置中是哪个模块或逻辑导致了保护的不正确动作^[1-3]。

根据微机保护采集系统、数据处理算法、保护算法的工作原理,按积木式结构,构建了基于 Matlab 的微机保护闭环仿真系统。并以变压器差动保护为例,对常规比率、复合比率、故障分量比率的差动保护及利用二次谐波、波形对称原理识别励磁涌流的方法进行比较研究,构建了相应的保护模块并在 Simulink 环境下进行闭环仿真和比较。仿真系统可动态观察保护内部元件的动作过程,为改进、完善保护性能或验证新的保护原理,提出合理的方案提供了经济的数字仿真平台。

1 基于 Matlab 的保护原理闭环仿真系统

利用 Matlab 提供的模块及编程环境^[4-5],可构建微机保护数字采集系统模型,实现处理数据的算法和保护算法,进而构建微机保护模块。本仿真系统的总体设计框图如图 1 所示,电力系统的一次系统根据保护的应用环境利用 Simulink 电力系统工具箱直接搭建,微机保护模块根据保护的实现原理搭建。保护模块的输入信号是来自一次系统的电压互感器(TV)、电流互感器(TA),保护的动作信号使断路器 QF 动作跳闸,实现保护的闭环仿真。

对微机保护原理的仿真主要实现数据的采集、数据处理基本算法、保护元件模块算法及逻辑出口^[6],下面介绍其实现原理。

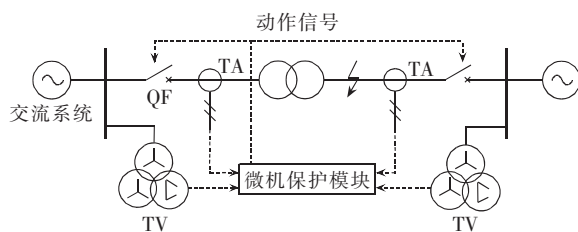


图 1 总体设计框图

Fig.1 Block diagram of overall design

1.1 数据采集系统模块

在 Simulink 环境下搭建的电气一次系统的电气量已是数字信号,因而数据采集系统构成只需经电压变换、模拟低通滤波器(ALF)、采样/保持(S/H)环节^[5],如图 2 所示。

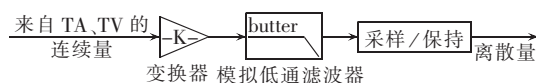


图 2 数据采集系统示意图

Fig.2 Block diagram of data acquisition system

ALF 可直接引用 Simulink 的模块。图 2 中的采样/保持模块利用 Simulink 的子系统进行封装,主要用到触发子系统。设采样频率 f_s 为 600 Hz,仿真效果如图 3、4 所示。图 3 是信号 S/H 前的波形,是频率 50 Hz 的正弦波。图 4 是信号经 S/H 后的波形,每周期采样 12 点。

1.2 数据处理基本算法模块

数据处理基本算法主要是通用的算法,如差分

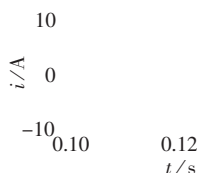


图 3 采样前的波形

Fig.3 The waveform before sampling

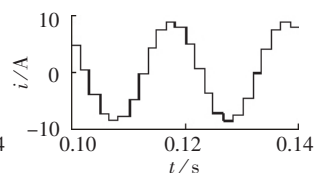


图 4 采样后的波形

Fig.4 The waveform after sampling

滤波算法、傅氏算法、比相算法等,它们主要用于数据处理。这里以实现差分滤波、傅氏算法为例说明。差分滤波和傅氏算法模块如图 5 所示。其中差分滤波和傅氏分解模块用 Simulink 的子系统技术,傅氏分解、计算电量有效值相位模块采用 Simulink 的 S-函数的 M 模板文件(sfuntmpl.m)编程实现^[4]。

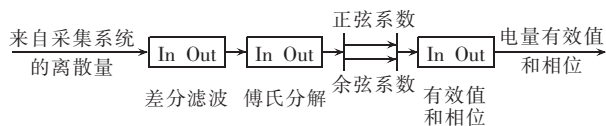


图 5 差分滤波和傅氏算法模块

Fig.5 Module of Fourier algorithm and differential filtering

傅氏算法对衰减的非周期分量敏感,傅氏算法前串上一个一阶差分滤波单元以抑制非周期分量,减小计算误差,其数学模型为

$$y(k) = x(k) - x(k-1) \quad (1)$$

经一阶差分滤波后输入的基波或谐波分量的幅值和相位可能发生变化,应注意补偿^[6]。傅氏分解模块分解出傅氏算法中的基波或各次谐波的正弦系数 a_n 和余弦系数 b_n (第 n 次谐波),进而在有效值和相位计算模块,按式(2)(3)算出相应电量基波或各次谐波的有效值 X_n 和相位 θ_n ^[7]。

$$X_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)/2} \quad (2)$$

$$\tan \theta_n = b_n / a_n \quad (3)$$

在利用傅氏算法计算出三相电流或电压分量的正弦和余弦分量系数以后,可以方便地得到正序、负序和零序分量。基于傅氏算法的滤序算法同样可采用 M 模板编程实现。

1.3 保护元件算法及逻辑模块

保护元件算法则是各种保护原理的具体实现,主要完成各保护元件的动作判断。以二次谐波制动比率差动保护为例说明^[8],逻辑框图如图 6(a)所示,图中的二次谐波制动元件、比率差动元件按动作方程实现,应用 Simulink 的工具箱或通过 M 模板编程,根据保护原理框图搭建就可实现相应的保护。然后利用 Simulink 的子系统技术封装成保护模块,如图 6(b)所示。

利用二次谐波、波形对称原理识别励磁涌流而构成的变压器常规比率、复合比率、故障分量比率的

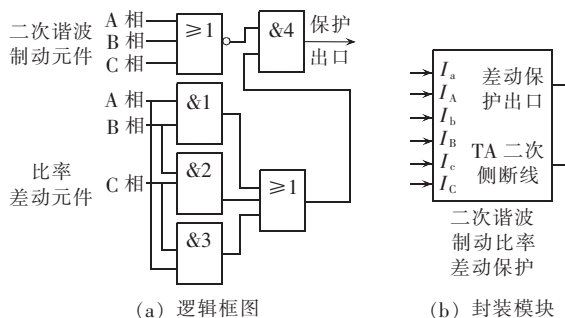


图 6 二次谐波制动比率差动保护模块

Fig.6 Module of second harmonic restraint ratio coefficient differential protection

差动保护均可用类似的方法分别实现保护模块。

2 变压器差动保护原理的分析比较

保护元件模块是根据其工作原理构建的,这里对常规比率、复合比率、故障分量这 3 种比率差动保护的工作原理及利用二次谐波、波形对称原理识别励磁涌流的方法进行理论分析,以构建保护元件模块和进行仿真比较。

2.1 常规和复合比率差动元件

微机变压器差动保护的差动元件均采用分相差动,其动作具有比率制动特性。要实现理想比率制动特性,差动电流总是被选作保护的制动电流,关键是寻找适当的制动电流。比率差动元件动作方程为^[9]

$$\begin{aligned} I_d &\geq I_{d,\min} & I_r &\leq I_{r,\min} \\ I_d &\geq I_{d,\min} + K(I_r - I_{r,\min}) & I_r &> I_{r,\min} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 I_d 为差动保护的差动电流; I_r 为制动电流; K 为动作特性的斜率; $I_{r,\min}$ 为拐点制动电流值; $I_{d,\min}$ 为最小动作电流。

以双绕组变压器为例,设 I_h 、 I_l 分别代表高、低压侧电流,且 I_h 、 I_l 已经过软件相位变换和电流补偿,电流方向:流入变压器为正,流出变压器为负。

在常规比率差动元件中, $I_d = |I_h + I_l|$, $I_r = |I_h - I_l|$ 。由于电流互感器传变误差、电流补偿数误差、变压器带负荷调节分接头等原因,区内故障时 $I_r \neq 0$,即区内故障时仍带制动量,其灵敏度不会很高,对变压器的内部轻微故障(如单相高阻接地或小匝数匝间短路)可能检测不出。

在复合比率差动元件中, I_d 的算法和常规比率差动元件一样,但 I_r 的算法不同,称为复式制动电流,其定义如下:

$$I_r = |I_d - \sum |I_i|| \quad (5)$$

$$\text{式中 } I_d = |I_h + I_l|; \sum |I_i| = |I_h| + |I_l|。$$

在内部故障时 I_d 和 $\sum |I_i|$ 相差很小,因此制动电流 I_r 就很小,而且 I_d 和 $\sum |I_i|$ 之差又把两者中的电流补偿的误差因素消除了,从而有可能做到区内故障时无制动量。因此,复式制动电流能有效地提高内部故障保护动作的灵敏度。在外部故障时,虽然随短路电流增大而变大, I_d 是不平衡电流,比 $\sum |I_i|$ 小得多,所以 $I_d \ll \sum |I_i|$, 因此制动电流 I_r 就很大,外部故障时可靠闭锁保护^[9]。

2.2 故障分量比率差动元件

故障分量电流是从故障后电流中减去负荷分量而得到的,可以由它来构成比率差动保护。习惯上常用“ Δ ”表示故障分量。

与式(1)相似,故障分量比率差动元件的动作方程如下^[10]:

$$\begin{aligned} \Delta I_d &\geq \Delta I_{d,\min} & \Delta I_r &\leq \Delta I_{r,\min} \\ \Delta I_d &\geq \Delta I_{d,\min} + K(\Delta I_r - \Delta I_{r,\min}) & \Delta I_r &> \Delta I_{r,\min} \end{aligned} \quad (6)$$

当 $\Delta I_h = I_h - I_{hL}$, $\Delta I_l = I_l - I_{lL}$, 下标 L 表示正常负荷分量,则式(6)中

$$\begin{aligned}\Delta I_d &= \Delta I_h + \Delta I_l \\ \Delta I_r &= \Delta I_h - \Delta I_l\end{aligned}\quad (7)$$

因正常运行时有 $I_{ll} = -I_{hl} = -I_l$, 故常规比率差动保护的制动量 I_d 和制动量 I_r 可表示为

$$\begin{aligned}I_d &= |I_h + I_l| = \Delta I_d \\ I_r &= |I_h - I_l| = \Delta I_r + 2I_l\end{aligned}\quad (8)$$

比较式(7)(8)可见, 常规和故障分量比率差动保护的工作原理的动作量相同, 主要不同之处表现在制动量上。对内部轻微故障, 故障电流可能比负荷电流小。对常规比率差动元件中的制动量为式(8)中的 I_r , 主要由 $2I_l$ 决定, 因制动量太大而降低了灵敏度。而故障分量比率差动元件的制动量为式(7)中的 ΔI_r , 灵敏度较高^[10]。

2.3 二次谐波电流制动和波形对称识别原理

当变压器空载投入或外部故障切除后变压器端电压恢复过程中, 变压器可能会产生励磁涌流, 差动保护启动后须辨识是励磁涌流还是故障电流, 如果是励磁涌流, 应闭锁差动保护, 否则差动保护可直接跳闸^[11-15]。

2.3.1 二次谐波电流制动原理

目前, 投入运行的计算机变压器保护也大都采用二次谐波制动算法原理, 是运行经验最成熟又比较简单可靠的算法。

当出现励磁涌流时应有^[9]:

$$I_{d2} > K_{d2} I_{d1} \quad (9)$$

式中 I_{d1} 为基波电流模值; I_{d2} 为二次谐波电流模值; K_{d2} 为二次谐波制动系数, 可选 0.15、0.20、0.25。

为提高可靠性, 二次谐波制动方式采用三相“或”门逻辑, 即“一相出现涌流特征, 三相差动保护全部闭锁”。二次谐波制动原理的差动保护, 在原理上存在着缺陷: 差动保护要等涌流消失后才可能出口, 当变压器有励磁涌流同时发生单相或两相内部故障时, 差动保护会因健全相的涌流制动而延迟。特别是大型变压器, 其时间常数较长, 涌流衰减很慢, 保护动作时间长。

2.3.2 波形对称识别原理

波形对称识别原理的实质是将变压器的励磁涌流和故障电流的波形区分开来, 这种波形识别是按相实现的, 解决了二次谐波制动原理上的缺陷^[16]。

当发生内部故障时, 各侧故障电流计算的差电流是基本对称的, 而励磁涌流由于有大量的谐波分量存在, 波形是间断不对称的。因此, 鉴别波形的对称性, 就可区分励磁涌流和故障电流。波形的对称性用如下的算法来检验。

设 $i_{d(n)}$ 是差动电流第 n 点的采样值, $i_{d(n-N/2)}$ 为第 n 点差动电流半周前的采样值, N 为每周期采样点数。在连续半周内如果满足如下关系:

$$|i_{d(n)} - i_{d(n-N/2)}| > |i_{d(n)} + i_{d(n-N/2)}| \quad (10)$$

则差动电流波形是对称的, 即是故障电流; 反之, 即是励磁涌流。在具体实施保护原理时, 先求得 $i_{d(n)} - i_{d(n-N/2)}$ 和 $i_{d(n)} + i_{d(n-N/2)}$ 的半周积分值 S_- 和 S_+ , 然后作比较^[9]。

3 仿真分析

为比较不同原理的变压器差动保护, 构建了以下 5 个保护模块进行仿真和比较: 常规二次谐波制动比率差动保护(模块 A)、二次谐波制动复式比率差动保护(模块 B)、波形对称识别原理的复式比率差动保护(模块 C)、二次谐波制动故障分量比率差动保护(模块 D)、波形对称识别原理的故障分量比率差动保护(模块 E)。

构建好保护模块后, 就可按图 1 的设计思想实现保护的闭环仿真。在相应模块中设置各保护元件的整定值, 差动保护主要的整定值有: 电流平衡调整系数、最小动作电流、拐点制动电流、比率制动系数、二次谐波制动系数、波形对称识别原理的固定常数和比例系数等。

利用 Simulink 的电力系统模块集可以方便地设置各种故障, 仿真的故障类型有: 单相接地短路、两相短路、两相接地短路、三相短路、三相接地短路。根据需要可以设置高阻接地、有短路故障同时变压器出现励磁涌流, 可任意设置变压器油箱外部故障的发生地点、发生时间、保护拒动等。利用 Simulink 的 Display 和 Scope 模块记录显示仿真结果。各保护模块的动作时间如表 1 所示。

表 1 保护模块的动作时间

高压侧区内故障时的短路类型	模块				
	A	B	C	D	E
A、B、C 三相短路	22	22	21	22	21
A、C 两相短路	21	21	21	21	21
B、C 两相接地	24	24	21	23	21
A 相接地	21	22	23	21	23
B 相高阻(500 Ω)接地	不动	25	24	25	26
高压侧 A 相有持续 55 ms 的励磁涌流, 同时低压侧发生 B、C 相短路	94	93	21	不动	21

表 1 说明:

a. 当区内发生高阻单相接地故障时, 常规的比率制动差动保护不动, 而复式比率差动保护、故障分量差动保护能可靠地在 30 ms 之内启动断路器跳闸, 当接地电流很小时, 复式比率和故障分量比率差动保护的灵敏性高于常规比率差动保护;

b. 有励磁涌流时, 比率差动保护采用波形对称识别原理要比二次谐波制动原理速动性好;

c. 采用二次谐波制动的故障分量比率差动保护, 会因故障分量的输出持续时间比励磁涌流的持续时间短, 而出现励磁涌流消失也拒动的现象, 因此不宜采用二次谐波制动的故障分量比率差动保护。

图 7 是波形对称识别原理的故障分量比率差动保护(模块 E)的仿真结果。

当变压器高压侧区内 0.1 s 发生 A 相接地短路时, 高压侧 TA 二次侧的电流波形如图 7(a)所示。保护第 122 ms 命令 QF 跳闸, 保护动作时间为 22 ms。

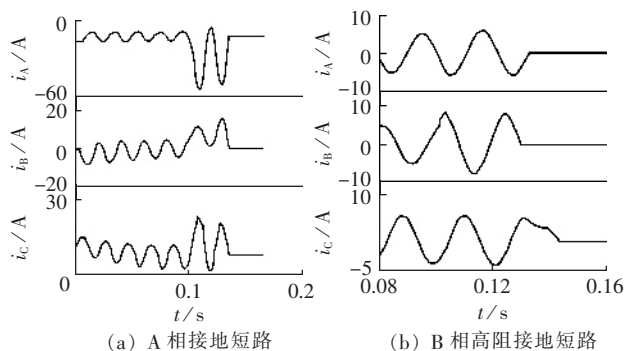


图 7 保护模块 E 仿真结果

Fig.7 Simulative results of protection module E

当变压器的高压侧区内 0.1s 发生 B 相高阻 (500 Ω) 接地短路时, 高压侧 TA 二次侧的电流波形如图 7(b) 所示。保护第 126 ms 命令 QF 跳闸, 保护动作时间为 26 ms。

在仿真过程中, 可实时观察一次系统的运行状态、保护判据有关测量值的变化、保护各逻辑元件的状态、保护的出口信号状态, 从而对保护的動作过程进行动态跟踪, 分析保护内部各元件动作是否合理。

通过大量的闭环仿真, 有如下结论:

- 当变压器产生励磁涌流时或区外故障时各种原理的差动保护可靠不动作;
- 当没有励磁涌流时, 变压器各种原理的差动保护的速动性相当;
- 有励磁涌流时, 比率差动保护采用波形对称识别原理要比二次谐波制动原理速动性好;
- 复式比率差动保护和故障分量比率差动保护的灵敏度高于常规比率差动保护;
- 不宜采用二次谐波制动的故障分量比率差动保护。

4 结语

在分析继电保护性能时, 会涉及保护算法、数据窗长度、滤波处理、保护元件动作特性等。仿真表明, 基于 Matlab 开发的微机保护闭环仿真系统, 可对不同原理保护进行精确的定量分析和仿真试验, 以研究故障时保护内部各元件动态行为, 这对于在系统的特殊工况下分析、评估继电保护动作行为非常必要。

参考文献:

- 贺家李, 郭征. 继电保护可靠性与动态性能仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 18-22.
HE Jia-li, GUO Zheng. Reliability and dynamic performance simulation of protective relaying[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 18-22.
- 刘为雄, 蔡泽祥, 邹俊雄. 模块化的电力系统继电保护图形数据一体化设计[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 51-53.
LIU Wei-xiong, CAI Ze-xiang, ZOU Jun-xiong. Modularized design of graph-datum integration for relay protection of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(11): 51-53.

- 赵志华. 图形化编程与继电保护装置开发[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 70-72.
ZHAO Zhi-hua. Discussion of graphical programming and protective relay development[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 70-72.
- 吴天明, 谢小竹, 彭彬. Matlab 电力系统设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- 韩笑, 徐曦, 陈卓平. 基于 Matlab 与 VB 数据交换的继电保护仿真[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(5): 92-95.
HAN Xiao, XU Xi, CHEN Zhuo-ping. Protection simulation based on data exchange between Matlab and VB[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(5): 92-95.
- 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- 程鹏, 陆于平. 一种进行幅值和相位校正的微机保护新算法[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(1): 4-6.
CHENG Peng, LU Yu-ping. A new algorithm to adjust amplitude and phase angle for microprocessor-based relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(1): 4-6.
- 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- 杨新民, 杨隽民. 电力系统微机保护原理与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- 陈德树, 张哲, 尹项根. 微机继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- 许正亚. 几个励磁涌流新判据分析[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 23-28.
XU Zheng-ya. Analysis on several new criteria of inrush current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(1): 23-28.
- 赵永彬, 卢毅. 主设备变压器保护谐波制动改进[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 23-28.
ZHAO Yong-bin, LU Yi. Analysis on several new criteria of inrush current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(1): 23-28.
- 焦邵华, 刘万顺. 区分变压器励磁涌流和内部短路的积分型波形对称原理[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 35-38.
JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun. A novel scheme to discriminate inrush current and fault current based on integrating the waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 35-38.
- 胡玉峰, 陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 55-58.
HU Yu-feng, CHEN De-shu. A new method to identify inrush current based on sample values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 55-58.
- 杨凌, 张艳霞. 一种防止变压器纵差保护区外故障误动的新方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 57-60.
YANG Ling, ZHANG Yan-xia. A new method for preventing external fault malfunction of transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 57-60.
- 何奔腾, 徐习东. 波形比较法变压器差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 395-398.
HE Ben-teng, XU Xi-dong. The principle of transformer differential protection based on wave comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 395-398.

(责任编辑: 李 玲)

作者简介:

刘 强(1972-), 男, 广东梅州人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护(E-mail: liuqiang601@yahoo.com.cn);

蔡泽祥(1960-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力系统继电保护与控制、电力系统稳定分析与控制。

Study on closed-loop simulation of transformer differential protection based on Matlab

LIU Qiang, CAI Ze-xiang

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A closed-loop simulation system of microcomputer-based protective relay is developed on Matlab, with which the transformer differential protections of different principles are simulated and compared. The system adopts modular structure and the modules are built according to operational principles to realize the closed-loop simulation of protections and the analysis of protective processes. With the transformer differential protection as an example, the operational principles of conventional ratio, compound ratio and fault component ratio differential protections are compared, the exciting inrush detection methods of second harmonic and waveform symmetry are analyzed, based on which the corresponding protection modules are built for simulation and comparison. The simulative results indicate that, the system can be used to examine the criteria, settings and action logic, study the operating characteristics of internal protective components under specific operating conditions, and realize the closed-loop simulation of entire protection process.

This work is supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province(04020015).

Key words: Matlab; differential protection; simulation; closed-loop