

任务 3-5 变压器保护

教案头：

项目名称	项目三 二次回路接线与微机保护		
学习型工作任务	任务 3-5 变压器保护	学时	6
教学目标	知识目标	技能目标	素质目标
	1.熟悉变压器故障类型 2.理解变压器气体保护 3.理解变压器差动保护 4.理解变压器后备保护 5.理解变压器零序电流保护	1.会微机变压器差动保护定值设置和试验； 2.会微机变压器后备保护定值设置和试验； 3.会微机变压器接地短路零序电流保护的定值设置和试验。	1.树立电力设备安全意识,提高电力系统保护重要性认识; 2.培养胆大心细,做事严谨工作作风; 3.建立相互协作,交流沟通团队精神。
工作任务	1. 变压器保护整定计算 2. 变压器保护测试		
教学重点	重点：变压器差动保护		
教学难点	难点：变压器接地短路零序后备保护		
教学策略	1. 小组试验法（教-学） 2. 任务驱动法（做-练）		
教学组织形式	1. 教师讲解并做操作示范 2. 学生分组练习		
教学条件	多媒体设备、电气工具、微机变压器保护装置、保护综合测试仪		
作业	1. 提交实验报告 2. 做课后练习题		
备注			

教学内容：

一、任务概述

供配电系统中，变压器是最为贵重的电气设备，变压器是实现供配电系统安全、经济、稳定运行的重要保障，应对变压器设置性能完善的继电保护。本次任务要熟悉电力变压器的故障类型和保护方式，理解变压器主保护的工作原理，熟悉变压器的后备保护，了解变压器的过负荷保护，能在微机变压器保护装置上设置保护定值并进行测试。

二、知识准备

1. 电力变压器的故障类型、异常运行状态

电力变压器是电力系统的重要设备。它的故障将对供电可靠性和系统安全运行带来严重影响。它的不正常工作状态将会威胁变压器绝缘或造成变压器过热,从而缩短变压器的使用寿命。因此应根据变压器的容

量和重要程度装设性能优良、动作可靠的继电保护装置。

1) 变压器故障

变压器故障分为油箱内故障和油箱外故障。油箱内故障，主要有绕组的相间短路、接地短路和匝间短路等。油箱内故障产生的高温电弧，不仅会损坏绝缘、烧毁铁心，而且由于绝缘材料和变压器油受热分解产生大量气体，有可能引起变压器油箱爆炸。油箱外故障，主要有套管和引出线上的相间短路及接地短路。

2) 变压器不正常工作状态

变压器不正常工作状态，主要有外部短路引起的过电流、过负荷、油箱漏油引起的油位下降、冷却系统故障、变压器油温升高、外部接地短路引起中性点过电压、绕组过电压或频率降低引起过励磁等。

2. 变压器的瓦斯保护

1) 工作原理

当变压器油箱内故障时，短路电流和故障点存在的高温电弧使变压器油和绝缘材料分解，产生大量气体，利用这些气体及其形成油流速度实现的保护，称为瓦斯保护，或气体保护。在变压器油箱内部故障产生轻微气体或油面降低时，轻瓦斯保护动作于发信号；当产生大量气体或油流速度超过整定值时，重瓦斯保护动作于跳开变压器各侧断路器。

2) 瓦斯保护接线

瓦斯保护的主要元件是气体继电器。气体继电器安装在变压器油箱与油枕之间的连通管道中，如图 5—1 所示。

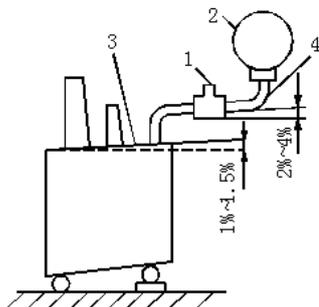


图 5-1 气体继电器安装示意图

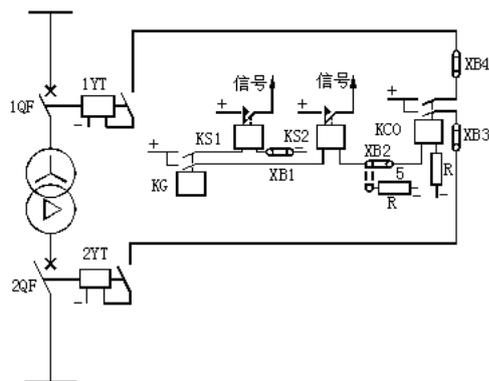


图 5-2 瓦斯保护的原理接线

瓦斯保护的接线如图 5—2 所示。气体继电器 KG 的上触点为轻瓦斯保护，动作后经信号继电器 KS1 发出信号；继电器的下触点为重瓦斯保护，动作后经信号继电器 KS2 接通出口中间继电器 KCO，作用于断路器跳闸，切除变压器。

3) 主要特点

瓦斯保护的主要优点是结构简单、灵敏性高、能反应变压器油箱内的各种故障包括轻微的匝间短路故障。主要缺点是：（1）不能反应变压器套管和引出线的故障，因此，还需要引入其它主保护；（2）在变压器内部发生严重故障时，由于瓦斯保护要有一定的油流速度才能动作，因而动作速度不够快。

3. 变压器纵差动保护

1) 变压器差动保护原理

双绕组变压器纵差动保护的原理接线图如图 5-3 所示。

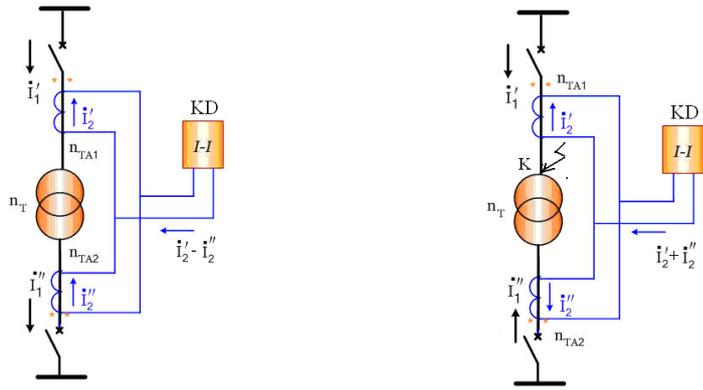


图 5-3 变压器纵差动保护的原理接线图

(1) 正常运行和区外故障时，流入差动继电器 KD 的差动电流为 $\dot{I}_d = \dot{I}_2' - \dot{I}_2''$ ，适当选择两侧电流互感器的变比和接线方式，可使 $\dot{I}_2' = \dot{I}_2''$ ，既 $\dot{I}_d = 0$ ，差动继电器不动作。

(2) 区内故障时，流入差动继电器 KD 的差动电流为 $\dot{I}_d = \dot{I}_2' + \dot{I}_2''$ ，此时 \dot{I}_d 较大，可以使纵差动保护动作，切除故障变压器。纵差动保护的判据为

$$I_d > I_{op}$$

$$I_d = \left| \dot{I}_2' - \dot{I}_2'' \right| \quad (5-1)$$

2) 变压器纵差动保护中的不平衡电流与减小措施

① 变压器两侧绕组连接方式不同产生不平衡电流

双绕组变压器采用 Y, d11 接线方式时，会造成变压器 d 侧的线电流比 Y 侧的线电流在相位上超前 30° ，如果两侧电流互感器采用相同接线方式，即使 \dot{I}_2' 和 \dot{I}_2'' 的数值相等，也会在差动继电器中产生很大的差动电流。为了消除这个电流，在微机保护中常通过程序校正变压器各侧电流的相位差，而在模拟式的差动保护中，常采用相位补偿法消除这个电流，既将变压器 Y 侧的电流互感器的二次侧接成 d 接线方式，而将变压器 d 侧的电流互感器的二次侧接成 Y 接线方式，这样可以使两侧电流互感器二次连接臂上的电流 $\dot{I}_A' - \dot{I}_B'$ 和 \dot{I}_a' 相位一致，如图 5-4 所示。

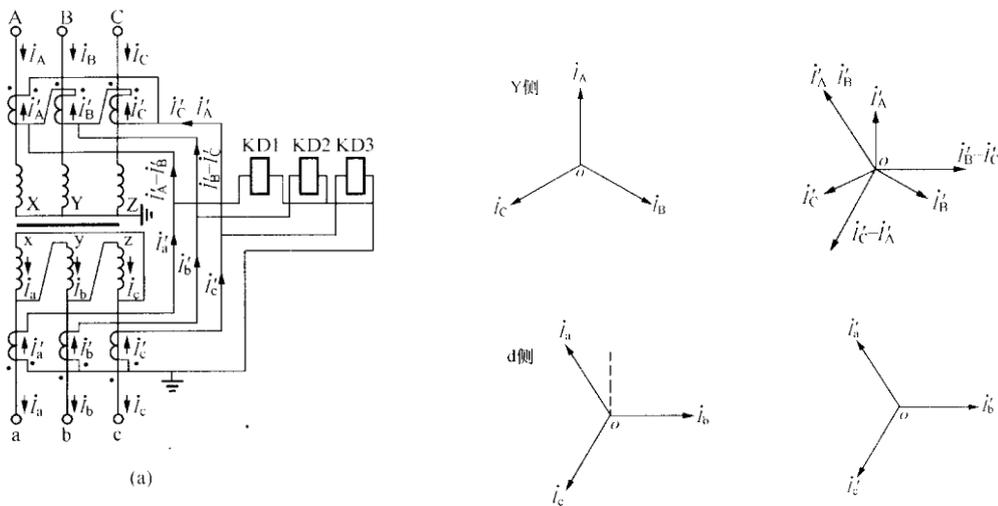


图 5-4 Y, d11 接线的变压器两侧互感器的接线及电流相量图

对双绕组变压器两侧电流互感器变比的选择应该满足

$$\frac{n_{TA,d}}{n_{TA,Y}} = \frac{n_T}{\sqrt{3}} \quad (5-3)$$

② 两侧电流互感器型号不同产生不平衡电流

由于变压器两侧的额定电压不同和额定电流不同，其两侧选用的电流互感器型号是不同的，因此它们的励磁特性也不相同，由此产生的不平衡电流就较大。通常引入同型系数 K_{st} 来消除互感器型号不同所产生的不平衡电流，当两个电流互感器型号相同时，取 $K_{st} = 0.5$ ，否则取 $K_{st} = 1$ 。

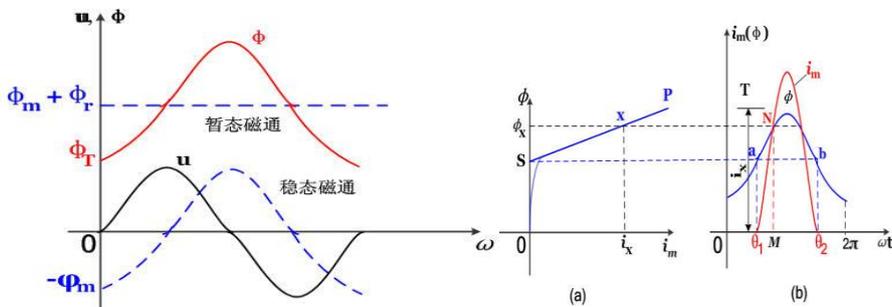
③ 两侧电流互感器的计算变比与实际变比不同产生不平衡电流

④ 变压器带负荷调整分接头产生不平衡电流

电力系统中常采用带负荷调整变压器分接头的方法来调整系统的电压，而调整分接头实际上是改变变压器的变比，其结果必然将破坏电流互感器二次电流的平衡关系，产生了新的不平衡电流。这个电流要在整定计算时考虑躲过，一般引入系数分量 ΔU 。

⑤ 变压器励磁涌流产生不平衡电流

当变压器空载投入或外部故障切除后电压恢复时，变压器电压从零或很小的数值突然上升到运行电压。在这个电压上升的暂态过程中，变压器可能会严重饱和，产生很大的暂态励磁电流，称为励磁涌流。励磁涌流的最大值可达额定电流的 4—8 倍，励磁涌流全部流入差动继电器中，形成较大的不平衡电流。



5-6 变压器空载投入时电压和磁通波形图

5-7 单相变压器励磁涌流曲线

为了躲过不平衡电流的影响，差动保护的動作值应取其和的最大值，在变压器区外故障时，它们的和值达到最大，计算式为：

$$I_{unb.max} = (0.1K_{np}K_{st} + \Delta f_{za} + \Delta U)I_{k.max} \quad (5-4)$$

4. 比率制动特性的纵差动保护

在双绕组变压器中，假设两侧电流的参考正方向如图 5-3 所示，如果动作量取两侧电流的差值 $I_d = \left| \dot{I}_2' - \dot{I}_2'' \right|$ ，制动量取两侧二次电流和值的一半的绝对值 $I_{brk} = \frac{1}{2} \left| \dot{I}_2' + \dot{I}_2'' \right|$ 。那么，在微机纵差动保护中，保护的動作条件就是按图 5-9 所示的特性进行判断。

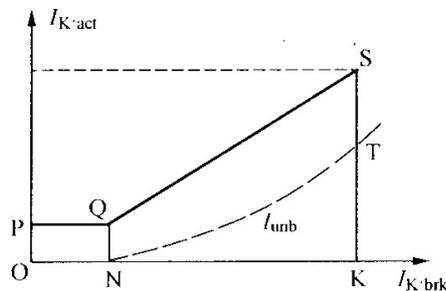


图 5-9 比率制动特性

在图 5-9 中，折线 PQS 为比率制动特性曲线，P 点对应的動作电流 $I_{op.min}$ 为最小動作电流，N 点对应的制动电流 $I_{brk.min}$ 为最小制动电流，也称为拐点电流，QS 的斜率为 K。显然折线 PQS 上方的区域为動作区，下方为制动区。在 PQ 段，当 $I_{brk} \leq I_{brk.min}$ 时，差动电流只要大于最小動作电流 $I_{op.min}$ ，保护就可動作，即制动电流较小时，采用较小的差动動作电流，保证内部轻微故障时具有较高的灵敏度。在 QS 段，動作电

流随制动电流的增大按比例增加，差动电流位于 QS 线上方时，保护才动作，即在外部故障制动电流较大时，采用较大的差动动作电流，保证区外故障时保护不误动。

动作方程为：

$$\begin{cases} I_d > I_{op.min} (I_{brk} \leq I_{brk.min}) \\ I_d > I_{op.min} + K(I_{brk} - I_{brk.min}) (I_{brk} > I_{brk.min}) \end{cases} \quad (5-6)$$

$$K = \frac{I_{op.max} - I_{op.min}}{I_{brk.max} - I_{brk.min}} \quad (5-7)$$

保护的整定计算就是确定最小动作电流 $I_{op.min}$ ，拐点电流 $I_{brk.min}$ 和制动特性的斜率 K 。

最小动作电流按经验公式可以取为：

$$I_{op.min} = (0.2 \sim 0.4)I_N$$

拐点电流可以取为：

$$I_{brk.min} = (0.8 \sim 1)I_N$$

5. 变压器电流速断保护

对 6.3MVA 以下厂用工作变压器和并列运行的变压器，以及 10MVA 以下厂用备用变压器和单独运行的变压器，当后备保护动作时限大于 0.5s 时，应装设电流速断保护。它与瓦斯保护配合，可以保护变压器内部和电源侧套管及引出线上全部故障。

电流速断保护装设在变压器电源侧，电源侧为直接接地系统时，保护采用完全星形接线；电源侧为非直接接地系统时，保护采用两相不完全星形接线，保护动作于跳开两侧断路器。其单相原理接线图如图 5—11 所示。

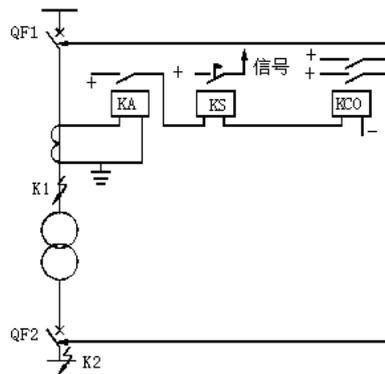


图 5-11 变压器电流速断保护单相原理接线图

保护的動作電流取下列兩條件的較大者作為整定值：

(1)按躲過變壓器負荷側母線上 K2 點短路時流過保護的最大短路電流計算，即

$$I_{op} = K_{rel} I_{k2.max}$$

(2)按躲過變壓器空載投入時的勵磁涌流計算，通常取動作電流 I_{op} 大於 3-5 倍的變壓器額定電流 $I_{T.N}$ ，

$$I_{op} = (3 \sim 5)I_{T.N}$$

保護的靈敏係數按保護安裝處 K_1 點最小兩相短路電流校驗，即

$$K_{sen} = I_{k1.min} / I_{op} \geq 2$$

6. 變壓器的相間後備保護

對於變壓器相間短路故障，變壓器不但要裝設瓦斯保護和縱差動保護作為主保護，同時還要裝設相間後備保護，以作為內部短路時的近後備，又作為相鄰元件的後備保護。變壓器的相間短路後備保護通常採用過電流保護、低電壓起動的過電流保護、複合電壓起動的過電流保護以及負序電流保護。

1) 過電流保護

變壓器過電流保護单相原理接线图如图 5-11 所示，其工作原理与线路定时限过电流保护相同。

变压器过电流保护的動作电流按躲过变压器的最大负荷电流整定，保护的動作时间按阶梯原则确定。变压器最大负荷电流的确定应考虑到下列情况：

(1) 并列运行的变压器，应考虑切除一台变压器后的过负荷情况。当各台变压器的容量相同时，可按下式计算

$$I_{l.\max} = \frac{m}{m-1} I_{N.T} \quad (5-9)$$

(2) 降压变压器，应考虑电动机自启动时的最大负荷电流，即

$$I_l = K_{MS} I_{N.T} \quad (5-10)$$

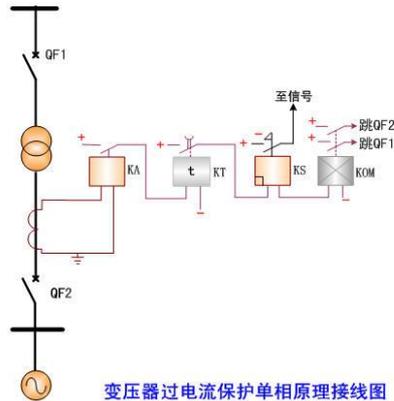


图 5-12 变压器过电流保护单相原理接线图

2) 低电压启动的过电流保护

当过电流保护不能满足灵敏度要求时可采用低电压启动的过电流保护，其原理接线如图 5-13 所示。

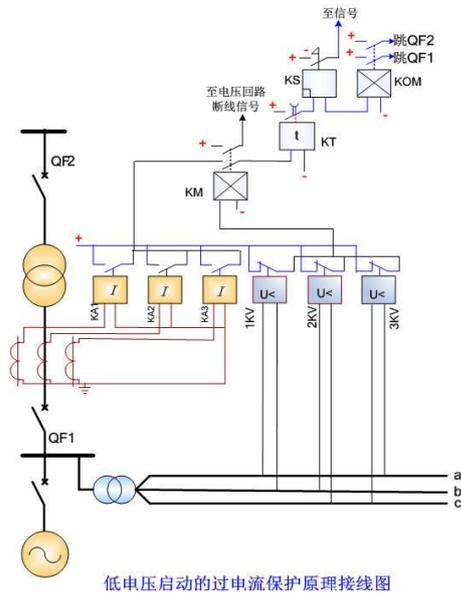


图 5-13 低电压启动的过电流保护原理接线图

它主要由电流元件 KA 和低电压元件 KV 组成，两者在逻辑上是‘与’的关系，即只有在两者均动作的情况下才能启动时间继电器 KT，而后经延时启动出口中间继电器 KOM 动作于跳闸。

由于采用了低电压元件，故保护的動作电流 I_{op} 只须按躲过变压器的额定电流整定的，即

$$I_{op} = \frac{K_{rel}}{K_{re}} I_{N.T} \quad (5-11)$$

低电压继电器的动作电压按躲过正常运行时母线的最低工作电压，且在外故障切除后电动机自启动时继电器能可靠返回。根据运行经验取： $U_{op} = 0.7U_{N.T}$

电流元件的灵敏度校验为： $K_{sen} = \frac{I_{k.min}}{I_{op}} \geq 1.3$

低电压元件的灵敏度校验为： $K_{sen} = \frac{U_{op}}{U_{k.max}} \geq 1.2$

3) 复合电压起动的过电流保护

保护原理接线如图 5-14 所示。其中，复合电压起动元件由一个负序电压继电器 KVN 和一个低电压继电器 KV 组成，KV 的线圈经 KVN 的动断触点接至线电压小母线。

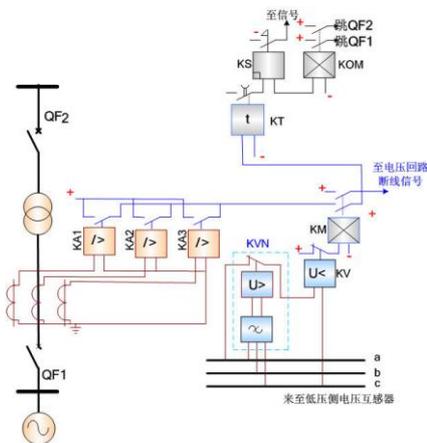
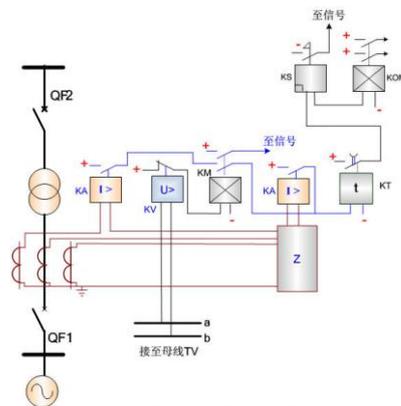


图 5-14 复合电压启动的过电流保护原理接线图

7. 负序电流保护

利用变压器不对称故障时出现的负序电流分量而构成的保护叫负序电流保护，保护的原理接线图如图 5-15 所示，它由两部分构成：一部分是带有负序电流滤过器的负序电流继电器 KA2、时间继电器 KT、信号继电器 KS 和中间继电器 KOM 构成负序电流保护，用以反应保护范围内的不对称短路故障。另一部分是低电压 KV、电流继电器 KA 和中间继电器 KM 构成单相式低电压启动的过电流保护，用以反应保护范围内的对称短路故障。



负序电流保护的原理接线图

图 5-15 负序电流保护的原理接线图

8. 变压器的接地保护

在电力系统中，故障率最高的是接地故障类型，在中性点直接接地系统中发生单相接地故障时，变压器中性点将出现零序电流，系统将出现零序电压。因此，对于中心点直接接地的变压器，要求装设接地保护（又称零序保护），以作为变压器主保护的后备和相邻元件接地短路的后备保护。

变压器的零序电流保护原理接线图如图所示 5-16 所示。零序电流通过变压器中性点接地回路上的电流

互感器 TA 获得。实际上，为了缩小接地故障的影响范围并提高后备保护动作的速动性，中性点直接接地变压器的零序过电流保护通常采用两段式，零序电流保护 I 段与相邻元件零序电流 I 段相配合；零序电流 II 段与相邻元件零序电流保护后备段相配合。每段设两个时限，以较短的时限 (t_1 、 t_3) 动作于缩小故障影响范围，如跳开母联或分段断路器，以较长的时限 (t_2 、 t_4) 跳开变压器各侧断路器，保护的原理框图如图 5-17 所示。

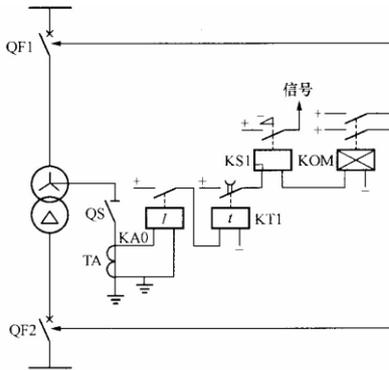


图 5-16 变压器零序电流保护原理接线图

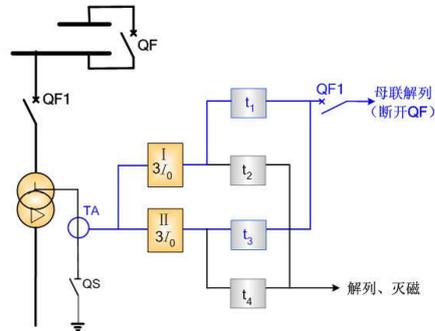


图 5-17 变压器零序电流保护原理框图

零序电流 I 段的动作电流按与相邻线路零序电流 I 段 $I_{0.op.L}^I$ 动作电流配合

$$I_{0.op}^I = K_{co} K_{bra} I_{0.op.L}^I$$

通常，零序电流 I 段的短时限取 $t_1 = 0.5 \sim 1s$ ；长时限为 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 。

零序电流 II 段动作电流为： $I_{0.op}^{II} = K_{co} K_{bra} I_{0.op.L}^{III}$

动作时限为： $t_3 = t_3^L + \Delta t$ (t_3^L 为相邻线路零序后备段时限)， $t_4 = t_3 + \Delta t$

零序电流保护 I 段的灵敏系数按变压器母线处故障校验，II 段按相邻元件末端故障校验，校验方法与线路零序电流保护相同。

9. 过负荷保护

变压器运行过程中可能会过负荷，长期过负荷运行会使绕组过热而损坏。我国规程规定，容量在 400KVA 以上的变压器，应装设过负荷保护。由于变压器过负荷都是三相对称的，因此过负荷保护可为单相式，即采用一个电流继电器接于电源侧的任意一相电流回路中，经延时后发出信号即可，保护原理接线图如图 5-21 所示。

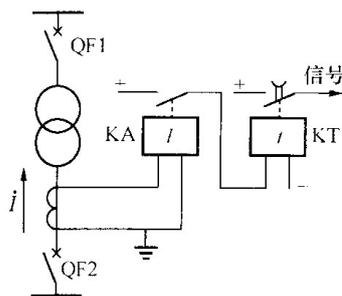


图 5-21 变压器过负荷保护原理接线图

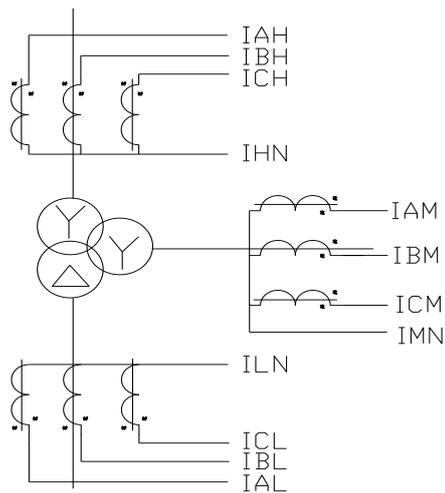
变压器过负荷保护的动作用按躲过变压器额定电流 $I_{N.T}$ 来整定，即

$$I_{op} = \frac{K_{rel}}{K_{re}} I_{N.T}$$

三、任务实施

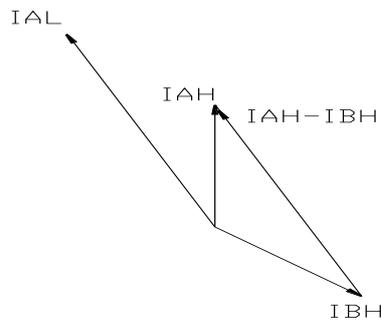
1. 变压器差动速断保护实验

对于 Y/d-11 变压器（对于两卷）保护，在变压器高压侧 CT 采用 D 型接线，在 CT 接线时就进行了 30 度相位调整。（在保护装置内部进行 30 度相位调整，故变压器高低压侧 CT 接线均采用星型接线，如下图）。



对于 Y/d-11 组别变压器差动相位和量值关系原理：

从相位角上讲，变压器低压侧电流 IAL 滞后高压侧电流 IAH 30 度，指在 11 点钟，而 IAH-IBH 的相位正好和 IAL 相同。



从量值关系上讲，变压器低压侧因为是三角型接线，IAL 的大小对应为 A 相线圈电流-B 相线圈电流，A 相线圈电流和 B 相线圈电流又与上面的 IAH 和 IBH 相等。所以：

$$A \text{ 相差流} = (IAH - IBH) - K IAL \quad K \text{ 为调整率。}$$

$$B \text{ 相差流} = (IBH - ICH) - K IBL$$

$$C \text{ 相差流} = (ICH - IAH) - K ICL$$

调整率 K 原理：

根据 A 相差流 = (IAH - IBH) - K IAL K 为调整率

正常运行时无差流 $IAH - IBH = K IAL$

$$IAH - IBH = \sqrt{3} IAH$$

所以 $K = \sqrt{3} IAH / IAL$ 即：高压侧额定电流的 1.732 倍除以低压侧额定电流

变压器高压侧的电流 = 变压器高压侧一次电流（铭牌上）/ 高压侧 CT 变比

变压器低压侧的电流 = 变压器低压侧一次电流（铭牌上）/ 低压侧 CT 变比

调整率 = 变压器高压侧的电流 $\times 1.732$ / 变压器低压侧的电流

对于 Y/y0 组别差动相位不存在角度差，实验时高低压侧反向同量值可相互抵消。

实验步骤：

1. 为电力系统微机保护综合实训装置供直流电源，合上屏内顶部的装置电源开关及控制电源开关，并打开装置后的电源开关。

2. 高压侧与低压侧差动实验。接线组别为 Y/d-11。（以 A 相为例）用黄色的联接线，联接测试电源的 IA 输

出端至屏面前的“高压侧 CT” Iah 插孔，用黑色的联接线，联接“高压侧 CT” Ihn 插孔至“低压侧 CT” Icl 插孔，用黑色的联接线，联接“低压侧 CT” Iln 插孔至测试电源的 IAN 输出端。

3. 插好测试电源的电源线启动测试电源，确认并调整电流档量程为 10A，把电流调整旋钮旋转至最小 0。

4. 合上线路侧断路器 QF1；合上高压侧断路器 QF2；合上中压侧断路器 QF3；合上低压侧断路器 QF4。观察保护装置面板上的指示灯状态变化。

5. 在变压器差动保护测控装置的界面中设置差动速断定值 5A, 由于是实验过程，可设置调整率为 $k=1$ 以方便计算两侧电流，投入低压侧调整率，投入该项保护，退出其他项保护功能并保存。投入 IA 电流，缓慢增加 IA 至设定保护定值（过程中查看保护装置的实时数据界面，看各项电流数据），令保护动作。操作减小电流至 0，退出 IA 电流。此时观察保护装置面板上的指示灯状态变化。查看微机发变组差动保护测控装置事件记录，记下事件名称、动作值、动作时间，填写在表中。

6. 高压侧与中压侧差动。接线组别为 Y/y0（以 A 相为例）用黄色的联接线，联接测试电源的 IA 输出端至屏面前的“高压侧 CT” Iah 插孔，用黑色的联接线，联接“高压侧 CT” Ihn 插孔至测试电源的 IAN 输出端。接下来同步骤 3、4、5。

7. 试验完毕，去掉所联接的联接线恢复初始状态，关掉测试电源。

保护类型	整定值 (A)	断路器 (QF) 的状态	动作值 (A)

2. 变压器过负荷保护

实验步骤：

1) 为电力系统微机保护综合实训装置供直流电源，合上屏内顶部的装置电源开关及控制电源开关，并打开装置后的电源开关。（以 A 相为例，先以无复合电压闭锁情况，B 相、C 相逐项试验）用黄色的联接线，联接测试电源的 IA 输出端至屏面前的“保护测量 CT” Ia 插孔，用黑色的联接线，联接“保护测量 CT” Ian 插孔至测试电源的 IAN 输出端。

2) 插好测试电源的电源线启动测试电源，确认并调整电流档量程为 10A，把电流调整旋钮旋转至最小 0。

3) 用对应颜色的联接线依据保护原理图联接好保护控制回路，操作屏面前的线路侧断路器开关，合上线路侧断路器 QF1；操作屏面前的高压侧断路器开关，合上高压侧断路器 QF2；操作屏面前的中压侧断路器开关，合上中压侧断路器 QF3；操作屏面前的低压侧断路器开关，合上低压侧断路器 QF4。观察保护装置面板上的指示灯状态变化。

4) 设置过负荷定值____A（可设置为 3A），保护时限可先设为 0，投入该项保护功能，退出其他项保护功能并保存。

找出并测量微机变压器高压侧保护测控装置的调压闭锁端子，缓慢增加 IA 大于等于设定保护定值，令保护动作。操作减小电流至 0，退出 IA 电流。此时观察保护装置面板上的指示灯状态变化。查看微机变压器高压侧保护测控装置事件记录，记下事件名称、动作值、动作时间，动作误差应不大于 3%。

5) 试验完毕，去掉所联接的联接线恢复初始状态，关掉测试电源。

四、检查评价

(1) 教师对各组学生实验逐个检查，检查动作电流和工作时间是否合理

(2) 实验结束后各组组长对本组的试验进行自我评价。

(3) 最后由老师对试验做总评，指出试验中存在问题并提出有效的解决办法。

五、总结

通过本次任务的实施，理解了变压器保护的工作原理，熟悉了微机变压器保护装置的硬件结构，掌握了微机变压器保护参数设定和差动保护实验方法，培养了学生继电保护试验能力，建立相互协作的团队精神。