

大型发电机变压器继电保护整定计算导则

DL/T 684—1999

Guide of calculating settings of relay
protection for large generator and transformer

1 范围

本标准规定了大型发电机变压器继电保护的整定计算原则和方法，它是设计、科研、运行、调试和制造部门整定计算的依据。

本标准适用于GB14285所规定的发电机、变压器容量范围，重点规定了200MW及以上发电机与220~500kV变压器的继电保护的整定计算原则和方法。

2 引用标准

下列标准所包含的条文，通过在本标准中引用而构成本标准的条文。本标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB1208—87 电流互感器

GB14285—93 继电保护和安全自动装置技术规程

GB/T7064—1996 透平型同步电机的技术要求

IEC44—6 (1992) 互感器第6部分：保护电流互感器动态性能的要求

3 总则

3.1 本标准是发电机变压器继电保护整定计算的基本依据，设计、科研、运行、调试和制造部门应共同遵守。

3.2 发电机变压器继电保护整定计算的主要任务是：在工程设计阶段保护装置选型时，通过整定计算，确定保护装置的技术规范；对现场实际应用的保护装置，通过整定计算，确定其运行参数（给出定值）。从而使继电保护装置正确地发挥作用，保障电气设备的安全，维持电力系统的稳定运行。

3.3 发电机变压器继电保护装置的技术性能，必须与本标准中提出的具体规定和要求相符合。

3.4 发电机变压器继电保护装置必须满足可靠性、选择性、速动性及灵敏性的基本要求，正确而合理的整定计算是实现上述要求的关键。

3.5 本标准不涉及发电机变压器继电保护的配置；不列举保护装置的具体型式；按不同原理的保护分类编制；整定计算方法适用于国内通用的主要保护原理，本标准所列原理之外的保护其整定计算方法可参考制造厂家技术说明书。

3.6 部分保护装置的动作时限是根据GB14285给出的；对于未给出动作时限的保护装置，其动作时限应根据设备条件及电力系统的具体情况决定。

3.7 为简化计算工作，可按下列假设条件计算短路电流：

3.7.1 可不计发电机、调相机、变压器、架空线路、电缆线路等阻抗参数中的电阻分量；在很多情况下，可假设旋转电机的负序阻抗与正序阻抗相等。

3.7.2 发电机及调相机的正序阻抗，可采用次暂态电抗 X''_d 的饱和值。

3.7.3 各发电机的等值电动势（标么值）可假设为1且相位一致。仅在对失磁、失步、非全相等保护装

置进行计算分析时,才考虑电动势之间的相角差问题。

3.7.4 只计算短路暂态电流中的周期分量,但在纵联差动保护装置(以下简称纵差保护)的整定计算中以非周期分量系数 K_{ap} 考虑非周期分量的影响。

3.7.5 发电机电压应采用额定电压值,系统侧电压可采用额定电压值或平均额定电压值,不考虑变压器电压分接头实际位置的变动。

3.7.6 不计故障点的相间和对地过渡电阻。

3.8 与电力系统运行方式有关的继电保护的整定计算,应以常见运行方式为计算用运行方式。所谓常见运行方式,是指正常运行方式和被保护设备相邻一回线或一个元件停运的正常检修方式。对于运行方式变化较大的系统,应由调度运行部门根据具体情况确定整定计算所依据的运行方式。

3.9 根据 GB14285 的规定,按照故障和异常运行方式性质的不同,机组热力系统和调节系统的条件,本标准所列各项保护装置分别动作于:

a) 停机:断开发电机或发电机变压器组(简称发一变组)断路器、灭磁,关闭原动机主汽门或导水叶,断开厂用分支断路器。

b) 解列灭磁:断开发电机或发一变组断路器和厂用分支断路器、灭磁,原动机甩负荷。

c) 解列:断开发电机或发一变组断路器,原动机甩负荷。

d) 降低励磁。

e) 减出力:将原动机出力减至给定值。

f) 缩小故障范围(例如断开母联或分段断路器)。

g) 程序跳闸:对于汽轮发电机,先关主汽门,待逆功率继电器动作后再断开发电机或发一变组断路器并灭磁;对于水轮发电机,先将导水叶关到空载位置,待逆功率继电器动作后再断开发电机或发一变组断路器并灭磁。

h) 信号:发出声光信号。

3.10 除特殊说明外,本标准列出的计算公式,无论用有名值或标么值进行计算,其计算结果(电流、电压、阻抗等)应以二次侧有名值的形式给出。

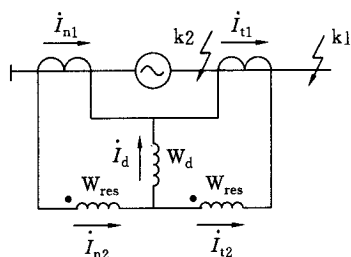


图 1 比率制动式差动保护原理接线图

$$\text{差动电流 } \dot{I}_d = (\dot{I}_{n1} - \dot{I}_{t1}) / n_a$$

$$\text{制动电流 } \dot{I}_{res} = \frac{1}{2} (\dot{I}_{n1} + \dot{I}_{t1}) / n_a$$

式中: \dot{I}_{n1} , \dot{I}_{t1} ——一次电流;

\dot{I}_{n2} , \dot{I}_{t2} ——二次电流;

n_a ——电流互感器变比。

差动保护的制动特性如图 2 中的折线 ABC 所示。图中,纵坐标为差动电流 I_d ,横坐标为制动电流 I_{res} 。为了正确进行整定计算,首先应了解纵差保护的不平衡电流与负荷电流和外部短路电流间的关系。

4 发电机保护的整定计算

4.1 定子绕组内部故障主保护

定子绕组内部故障包括相间短路、同相不同分支间短路、同相不同分支匝间短路和定子绕组的分支开焊故障。

4.1.1 比率制动式纵差保护

比率制动式纵差保护仅反应相间短路故障。具有比率制动特性的差动保护的二次接线如图 1 所示。当差动线圈匝数 W_d 与制动线圈匝数 W_{res} 的关系为 $W_{res} = \frac{1}{2} W_d$ 时,

发电机纵差保护用的 10P 级电流互感器，在额定一次电流和额定二次负荷条件下的比误差为 $\pm 3\%$ 。因此，纵差保护在正常负荷状态下的最大不平衡电流不大于 6% 。但随着外部短路电流的增大和非周期暂态电流的影响，电流互感器饱和，不平衡电流将急剧增大，实际的不平衡电流与短路电流的关系曲线如图 2 中的曲线 OED 所示。

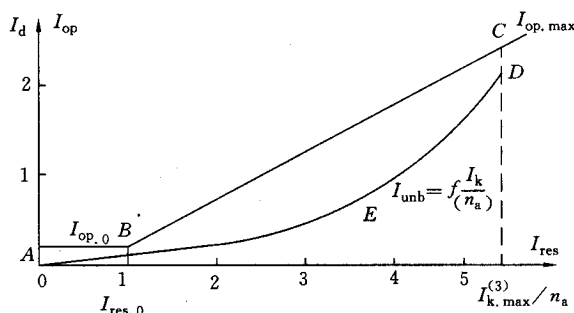


图 2 比率制动式差动保护的制动特性

发电机外部短路时，差动保护的最大不平衡电流由式 (1) 进行估算

$$I_{unb.max} = K_{ap} K_{cc} K_{er} I_{k.max}^{(3)} / n_a \quad (1)$$

式中： K_{ap} ——非周期分量系数，取 $1.5 \sim 2.0$ ；

K_{cc} ——互感器同型系数，取 0.5 ；

K_{er} ——互感器比误差系数，取 0.1 ；

$I_{k.max}^{(3)}$ ——最大外部三相短路电流周期分量。

比率制动特性纵差保护需要整定计算以下三个参数：

1) 确定差动保护的最小动作电流，即确定图 2 中 A 点的纵座标 $I_{op,0}$ 为

$$I_{op,0} = K_{rel} \times 2 \times 0.03 I_{gn} / n_a \quad \text{或} \quad I_{op,0} = K_{rel} I_{unb,0} \quad (2)$$

式中： K_{rel} ——可靠系数，取 1.5 ；

I_{gn} ——发电机额定电流；

$I_{unb,0}$ ——发电机额定负荷状态下，实测差动保护中的不平衡电流。

实际可取 $I_{op,0} = (0.10 \sim 0.30) I_{gn} / n_a$ ，一般宜选用 $(0.10 \sim 0.20) I_{gn} / n_a$ 。如果实测 $I_{unb,0}$ 较大，则应尽快查清 $I_{unb,0}$ 增大的原因，并予消除，避免因 $I_{op,0}$ 过大而掩盖一、二次设备的缺陷或隐患。

发电机内部短路时，特别是靠近中性点经过渡电阻短路时，机端或中性点侧的三相电流可能不大，为保证内部短路时的灵敏度，最小动作电流 $I_{op,0}$ 不应无根据地增大。

2) 确定制动特性的拐点 B。定子电流等于或小于额定电流时，差动保护不必具有制动特性，因此，B 点横坐标

$$I_{res,0} = (0.8 \sim 1.0) I_{gn} / n_a \quad (3)$$

当 $I_{res,0} > I_{gn} / n_a$ 时，应调整保护内部参数，使其满足式 (3)。

3) 按最大外部短路电流下差动保护不误动的条件，确定制动特性的 C 点，并计算最大制动系数。

设 C 点对应的最大动作电流为 $I_{op,max}$ ，其值为

$$I_{op,max} = K_{rel} I_{unb,max} \quad (4)$$

式中： K_{rel} ——可靠系数，取 $1.3 \sim 1.5$ 。

C 点对应的最大短路电流 $I_{k,max}^{(3)}$ 与最大制动电流 $I_{res,max}$ 相对应。C 点的最大制动系数 $K_{res,max}$ 按下式计算

$$K_{res,max} = I_{op,max} / I_{res,max} = K_{rel} K_{ap} K_{cc} K_{er} \quad (5)$$

式 (5) 的计算值为 $K_{res,max} = 0.15$ ，可确保在最大外部短路时差动保护不误动。但考虑到电流互感器的饱和或其暂态特性畸变的影响，为安全计，宜适当提高制动系数值。图 2 中，取 C 点的 $K_{res,max} \approx 0.30$ 。

该比率制动特性的斜率 S 为

$$S = \frac{I_{op. max} - I_{op. 0}}{(I_{k. max}^{(3)}/n_a) - I_{res. 0}} \quad (6)$$

根据上述计算,由 A 、 B 、 C 三点确定的制动特性,确保在负荷状态和最大外部短路暂态过程中可靠不误动。

按上述原则整定的比率制动特性,当发电机机端两相金属性短路时,差动保护的灵敏系数一定满足 $K_{sen} \geq 2.0$ 的要求,不必进行灵敏度校验。

4.1.2 标积制动式纵差保护

设发电机机端和中性点侧电流分别为 \dot{I}_t 和 \dot{I}_n , 它们的相位差为 ϕ , 令标积 $I_t I_n \cos \phi$ 为制动量, $|\dot{I}_t - \dot{I}_n|^2$ 为动作量, 构成标积制动式纵差保护, 其动作判据为

$$|\dot{I}_t - \dot{I}_n|^2 \geq K_{res} I_t I_n \cos \phi \quad (7)$$

式中: K_{res} ——制动系数, 取 $0.8 \sim 1.2$ 。

外部短路时, $\phi = 0^\circ$, 式 (7) 右侧表现为很大的制动作用。当发电机内部短路时, 可能呈现 $90^\circ < \phi < 270^\circ$, 使 $\cos \phi < 0$, 式 (7) 右侧呈现负值, 即不再是制动量而是助动量, 保护灵敏动作。本保护仅反应相间短路故障。

4.1.3 故障分量比率制动式纵差保护

该保护只与发生短路后的故障分量 (或称增量) 有关, 与短路前的穿越性负荷电流无关, 故有提高纵差保护灵敏度的效果。本保护仅反应相间短路故障, 其动作判据为

$$|\Delta \dot{I}_t - \Delta \dot{I}_n| \geq K_{res} \left| \frac{\Delta \dot{I}_t + \Delta \dot{I}_n}{2} \right| \quad (8)$$

式中: $\Delta \dot{I}_t$ ——发电机机端侧故障分量电流;

$\Delta \dot{I}_n$ ——发电机中性点侧故障分量电流。

故障分量纵差保护的动作特性如图 3, 图中 $\Delta \dot{I}_d = \Delta \dot{I}_t - \Delta \dot{I}_n$, $\Delta \dot{I}_{res} = \frac{1}{2} |\Delta \dot{I}_t + \Delta \dot{I}_n|$ 。直线 1 为故障分量纵差保护在正常运行和外部短路时的制动特性; 直线 2 为故障分量纵差保护在内部短路时的动作特性, 其斜率 $S \geq 2.0$; 直线 3 为故障分量纵差保护的整定特性。

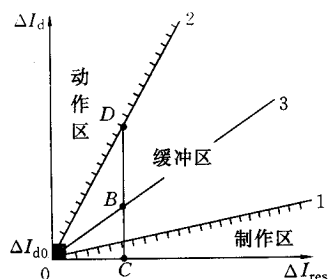


图 3 故障分量比率制动式纵差保护动作特性

整定计算如下:

a) 纵差保护动作特性 (直线 3) 的倾角 α , 一般取 $\alpha = 45^\circ$, 即制动系数 $K_{res} = 1.0$ 。

b) 最小动作电流 $\Delta I_{d0} \approx 0.1 I_{gn}/n_a$, 或 $\Delta I_{d0} >$ 负荷状态下微机输出最大不平衡增量差流。

c) 灵敏系数校验: $K_{sen} = \Delta I_d / \Delta I_{res} = DC/BC$, 要求 $K_{sen} \geq 2.0$, 一般不必进行校验计算。

4.1.4 不完全纵差保护

本保护既反应相间和匝间短路, 又兼顾分支开焊故障。设定子绕组每相并联分支数为 a , 在构成纵差保护时, 机端接入相电流 [图 4 (a) 中的 TA2], 但中性点侧 TA1 每相仅接入 N 个分支, a 与 N 的关

系如下式

$$1 \leq N \leq \frac{a}{2} \quad (9)$$

式中: a 与 N 的取值见表 1。

表 1 a 与 N 的关系

a	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	1	1	2	2	2 或 3*	2 或 3*	3 或 4*	3 或 4*	4 或 5*

* 与装设一套或二套单元件横差保护有关。

图 4 (a) 中互感器 TA1 与 TA2 构成发电机不完全纵差保护。TA5 与 TA6 构成发—变组不完全纵差保护，而 TA3 与 TA4 构成变压器的完全纵差保护。TA1 的变比按 $n_a = \frac{I_{gn}}{a} N / I_{2n}$ 条件选择；TA2 的变比按 I_{gn} / I_{2n} 条件选择，因此 TA1 的变比一定不同于 TA2 的。对于微机保护，TA1、TA2 可取相同变比，由软件调平衡。

图 4 (b) 表示发电机中性点侧引出 4 个端子的情况，TA1 和 TA5 装设在每相的同一分支中。

图 4 (c) 表示每相 8 个并联分支的大型水轮发电机，发电机不完全纵差保护每相接入的中性点侧电流 (TA1) 分支数为 2、5、8，发—变组不完全纵差保护 (TA5) 则为 1、4、7。

本保护不仅反应相间短路，还能对匝间短路和分支开焊起保护作用，其基本原理是利用定子各分支

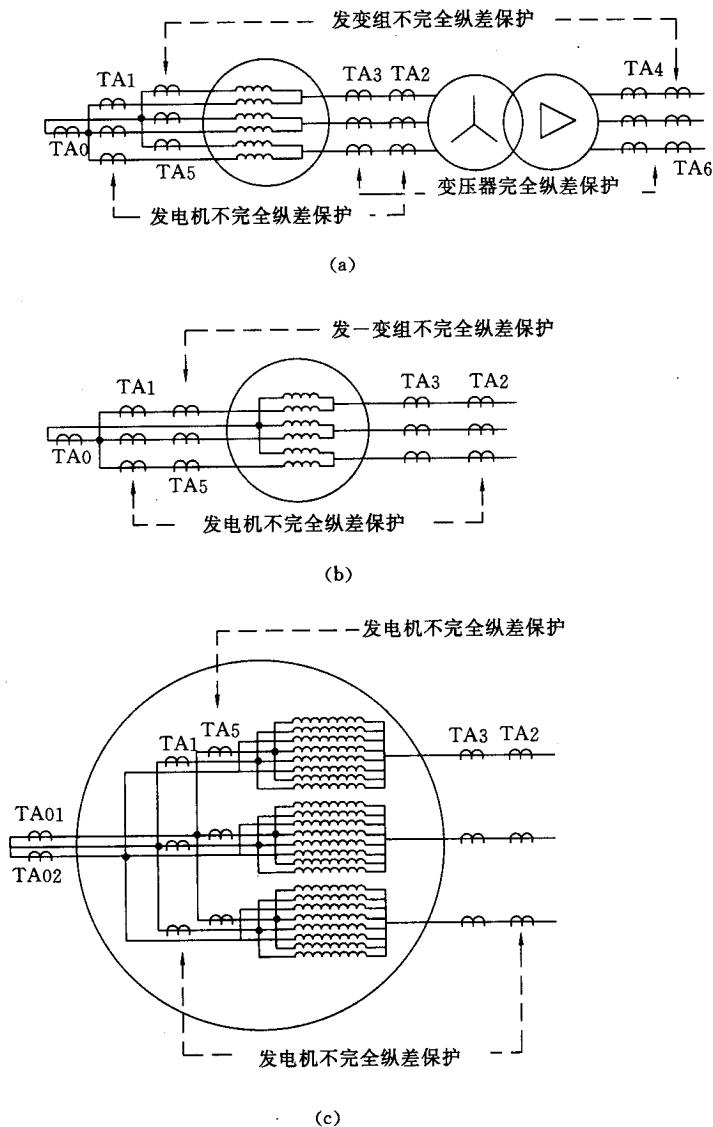


图 4 发电机和发—变组纵联差动保护的互感器配置

绕组间的互感,使未装设互感器的分支短路时,不完全纵差保护仍可能动作。

比率制动特性发电机不完全纵差保护的整定计算工作,除互感器变比选择不同于完全纵差保护外,其余均可按 4.1.1,但当 TA1 与 TA2 不同型号时,互感器的同型系数应取 $K_{cc}=1.0$ 。

4.1.5 单元件横差保护

本保护反应匝间短路和分支开焊以及机内绕组相间短路。

a) 传统单元件横差保护

图 4 (a) 和图 4 (b) 中,接于发电机中性点连线的互感器 TA0 用于单元件横差保护。TA0 的变比选择,传统的做法按下式计算

$$n_a \approx 0.25 I_{gn} / I_{2n} \quad (10)$$

式中: I_{gn} ——发电机额定电流;

I_{2n} ——互感器 TA0 的二次额定电流。

动作电流 I_{op} 按外部短路不误动的条件整定。当横差保护的三次谐波滤过比大于或等于 15 时,其动作电流为

$$I_{op} = (0.20 \sim 0.30) I_{gn} / n_a \quad (11)$$

在励磁回路一点接地保护动作后,发电机可继续运行,为防止励磁回路发生瞬时性第二点接地故障时横差保护误动,应切换为带 0.5~1.0s 延时动作于停机。

b) 高灵敏单元件横差保护

图 4 中的 TA0 (包括 TA01 和 TA02) 均为环氧树脂浇注的单匝母线式互感器 (LMZ 型),应满足动、热稳定的要求。

高灵敏单元件横差保护用的互感器变比 n_a ,根据发电机满载运行时中性点连线的最大不平衡电流,可选为 $600/I_{2n}$ 、 $400/I_{2n}$ 、 $200/I_{2n}$ 、 $100/I_{2n}$ 。初步设计时,宜选前三组 n_a 。

为了减小动作电流和防止外部短路时误动,在额定频率工况下,该保护的三次谐波滤过比 K_3 应大于 80。

高灵敏单元件横差保护动作电流设计值可初选为 $0.05 I_{gn} / n_a$ 。

作为该保护动作电流的运行值应如下整定:

1) 在发电机作常规短路试验时,实测中性点连线电流的基波和三次谐波分量大小 ($I_{unb.1}$ 和 $I_{unb.3}$),此即单元件横差保护的不平衡电流一次值,如图 5 的 OC 和 OA (近似线性)。

2) 将直线 OC 和 OA 线性外推到 $I_{k.max}^{(3)}$ (发电机机端三相短路电流),得直线 OCD 和 OAB,确定最大不平衡电流 $I_{unb.1.max}$ 和 $I_{unb.3.max}$ 。

3) 计算和整定动作电流运行值

$$I_{op} = k_{rel} k_{ap} \sqrt{I_{unb.1.max}^2 + (I_{unb.3.max} / k_3)^2} \quad (12)$$

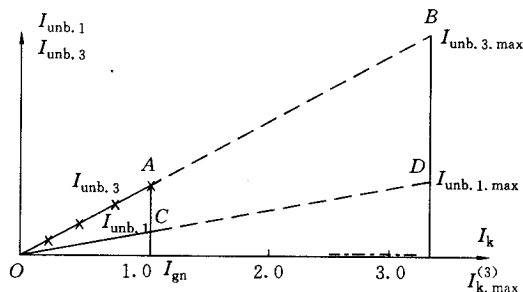


图 5 单元件横差保护的不平衡电流 (I_{unb}) 测试和线性外推

式中: K_{rel} ——可靠系数,取 1.3~1.5;

K_{ap} ——非周分量系数,取 1.5~2.0;

K_3 ——三次谐波滤过比, $K_3 \geq 80$ 。

4) 如不装励磁回路两点接地保护,则高灵敏单元件横差保护兼顾励磁回路两点接地故障的保护,瞬时动作于停机。

5) 如该保护中有防外部短路时误动的技术措施,动作电流 I_{op} 只需按发电机额定负荷时横差保护的不平衡电流整定。

4.1.6 多分支分布中性点水轮发电机的综合差动保护

本保护反应发电机相间、匝间短路和分支开焊故障。

如图 6 所示, 该发电机每相 6 并联分支装设 3 套差动保护, 即:

- 不完全纵差保护 1 (2、4、6 分支的 TA1 与 TA2);
- 裂相横差保护 2 (1、3、5 分支的 TA1 与 2、4、6 分支的 TA1);
- 高灵敏单元件横差保护 3 (TA0)。

保护 1 和 3 已经阐明, 这里只讨论裂相横差保护 2。

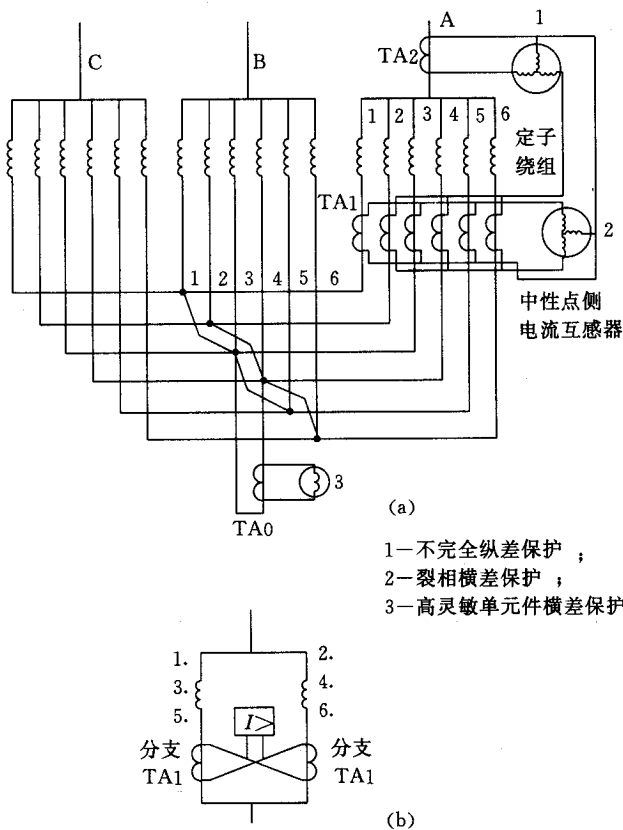


图 6 多分支分布中性点水轮发电机综合差动保护二次接线图

裂相横差保护就是将一台每相并联分支数为偶数的发电机定子绕组一分为二, 各配以电流互感器 TA1, 其变比为 $n_a = \frac{1}{a} I_{gn} / I_{2n}$, a 为每相并联分支数。

该保护采用比率制动特性, 其整定计算与比率制动式纵差保护相似, 但最小动作电流 $I_{op.0}$ 和最大制动系数 $K_{res. max}$ 均较大。

$I_{op.0}$ 由负荷工况下最大不平衡电流决定, 它由两部分组成, 即两组互感器在负荷工况下的比误差所造成的不平衡电流 $i_{unb.1}$; 由于定子与转子间气隙不同, 使各分支定子绕组电流也不相同, 产生的第二种不平衡电流 $i_{unb.2}$ 。因此, 裂相横差保护的 $I_{op.0}$ 比纵差保护的大。

$$I_{op.0} = (0.15 \sim 0.30) I_{gn} / n_a \quad (13)$$

$$I_{res.0} \leq (0.8 \sim 1.0) I_{gn} / n_a \quad (14)$$

$$K_{res. max} = 0.5 \sim 0.6 \quad (15)$$

裂相横差保护也可应用于每相并联分支数为奇数的发电机, 此时两个互感器的变比将不同, 或者仍用相同变比 $n_a = \frac{1}{2} I_{gn} / I_{2n}$, 增设中间互感器; 微机保护可用软件调平衡。

4.1.7 纵向零序过电压保护

发电机定子绕组同分支匝间、同相不同分支间或不同相间短路时，会出现纵向（机端对中性点）零序电压，该电压由专用电压互感器（互感器一次中性点与发电机中性点相连，不接地）的开口三角绕组取得。

a) 零序过电压保护的動作电压 $U_{0.op}$ 设计值可初选为

$$U_{0.op} = 2 \sim 3(V)$$

b) 为防止外部短路时误动作，可增设负序方向继电器，后者具有动合触点，当发电机内部短路时，触点闭合。

c) 三次谐波电压滤过比应大于 80。

d) 该保护应有电压互感器断线闭锁元件。

4.1.8 转子回路二次谐波电流保护

发电机定子绕组内部短路时产生的负序电流，可以用装设在转子回路中的电抗变压器以二次谐波电压的形式来反应。

该保护的二次谐波動作电压 U_{op} ，应按下述原则整定：在发电机长期允许的负序电流 $I_{2\infty}$ 下，实测转子回路中的电抗变换器输出二次谐波电压 $U_{2\omega}$ ，则

$$U_{op} = K_{rel} U_{2\omega} \quad (16)$$

实测 $U_{2\omega}$ 是在做发电机常规短路试验时，在很低的励磁电压下，作机端两相稳态短路试验，使定子负序电流等于 $I_{2\infty}$ ，对应测得转子回路中电抗变换器的 $U_{2\omega}$ 。由于励磁电压变化范围大，为空载额定励磁电压的 6~8 倍，可靠系数 K_{rel} 应取较大值，一般为 1.5~2.0。

发电机外部短路时，转子电流中也有二次谐波，因此必须增设机端的负序方向元件作闭锁。

负序功率方向元件采用动合触点。当发电机内部短路时，负序功率由发电机流入系统，方向元件动合触点闭合。为防止外部短路暂态过程中此保护瞬时误动，保护应增设 0.1~0.2s 延时。

4.1.9 故障分量负序方向保护

利用故障分量负序电压和电流 ($\Delta \dot{U}_2$ 和 $\Delta \dot{I}_2$)，构成故障分量负序方向保护，其動作判据为

$$\Delta P_2 = 3R_e [\Delta \dot{U}_2 \Delta \hat{I}_2 e^{j\varphi_{sen.2}}] \geq \epsilon_{p2} \quad (17)$$

式中： $\Delta \hat{I}_2$ —— $\Delta \dot{I}_2$ 的共轭相量；

$\varphi_{sen.2}$ ——负序方向灵敏角，一般取 75°。

故障分量负序方向继电器是一种方向元件，其阈值 ϵ_{p2} 很小，具体数值由继电器制造厂家供给，一般不作整定计算。

故障分量负序方向保护无需装设 TV 或 TA 的断线闭锁元件，但 TV 断线应发信号，保护较简单；但当发电机未并网前，因 $\Delta I_2 = 0$ ，保护失效，为此还应增设各种辅助判据，其原理和定值整定随各制造厂家而异，详见厂家技术说明书。

4.2 发电机相间短路后备保护

大机组所在电厂的 220kV 及以上电压等级的出线，要求配置双套快速主保护，并有比较完善的近后备保护，不再强调要求发一变组提供远后备保护。大型发一变组本身已配备双重或更多的主保护（例如，发电机纵差、变压器纵差、发一变组纵差、高灵敏单元件横差等）。尽管如此，大机组装设简化的后备保护仍是必要的。

对于中小型机组，不装设双重主保护，应配置常规后备保护，并使其对所连接高压母线和相邻线路的相间短路故障具有必要的灵敏度。

4.2.1 定时限复合过电流保护

该保护由负序过电流元件及低电压启动的单相过电流元件组成。

a) 负序过电流元件的動作电流 $I_{op.2}$ 按防止负序电流导致转子过热损坏的条件整定，一般按下式整定

$$I_{op.2} = \frac{(0.5 \sim 0.6)}{n_a} I_{gn} \quad (18)$$

式中: I_{gn} ——发电机额定电流;

n_a ——电流互感器变比。

间接冷却式汽轮发电机用 $0.5I_{gn}$; 水轮发电机用 $0.6I_{gn}$ 。

其他发电机可用 $I_{op.2} = (\sqrt{A/120}) I_{gn}/n_a$, A 值由电机制造厂给定。

灵敏系数按主变压器高压侧两相短路的条件校验

$$K_{sen} = \frac{I_{k.min.2}^{(2)}}{I_{op} n_a} \quad (19)$$

式中: $I_{k.min.2}^{(2)}$ ——主变压器高压侧母线金属性两相短路时, 流过保护的最小负序电流。

要求灵敏系数 $K_{sen} \geq 1.5$ 。

b) 单相过电流元件的动作电流 $I_{op.1}$ 按发电机额定负荷下可靠返回的条件整定

$$I_{op.1} = K_{rel} I_{gn} / K_r n_a \quad (20)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数, 取 $1.3 \sim 1.5$;

K_r ——返回系数, 取 $0.85 \sim 0.95$ 。

灵敏系数按主变压器高压侧母线两相短路的条件校验

$$K_{sen} = \frac{I_{k.min}^{(2)}}{n_a I_{op}} \quad (21)$$

式中: $I_{k.min}^{(2)}$ ——主变压器高压侧母线金属性两相短路时, 流过保护的最小短路电流。

要求灵敏系数 $K_{sen} \geq 1.2$ 。

c) 低电压元件接线电压, 动作电压 U_{op} 可按下式整定。

对于汽轮发电机

$$U_{op} = \frac{0.6 U_{gn}}{n_v} \quad (22)$$

式中: U_{gn} ——发电机额定电压;

n_v ——电压互感器变比。

对于水轮发电机

$$U_{op} = \frac{0.7 U_{gn}}{n_v} \quad (23)$$

灵敏系数按主变压器高压侧母线三相短路的条件校验

$$K_{sen} = \frac{U_{op} n_v}{X_t I_{k.max}^{(3)}} \quad (24)$$

式中: $I_{k.max}^{(3)}$ ——主变高压侧母线金属性三相短路时的最大短路电流;

X_t ——主变压器电抗, 取 $X_t = Z_t$ 。

要求灵敏系数 $K_{sen} \geq 1.2$ 。

低电压元件的灵敏系数不满足要求时, 可在主变压器高压侧增设低电压元件。

d) 时间元件。复合过电流保护的動作时限, 按大于升压变压器后备保护的動作时限整定, 動作于解列或停机。当整定时限与保证发电机安全所允许时限 (例如 $I_2^2 t \leq A$, 转子负序过负荷允许时限) 有矛盾且没有负序电流反时限保护时, 应以发电机安全的允许时限为准。

4.2.2 定时限复合电压启动的过电流保护

保护装置由负序电压及线电压启动的过电流元件组成。

单相电流元件的动作电流, 低电压元件的动作电压的整定及灵敏系数校验与 4.2.1 相同。

负序过电压元件的动作电压按躲过正常运行时的不平衡电压整定, 一般取

$$U_{op2} = \frac{(0.06 \sim 0.08)U_{gn}}{n_v} \quad (25)$$

灵敏系数按主变压器高压侧母线两相短路的条件校验

$$K_{sen} = \frac{U_{2.min}}{U_{op2}n_v} \quad (26)$$

式中： $U_{2.min}$ ——主变高压侧母线二相短路时，保护安装处的最小负序电压。

要求灵敏系数 $K_{sen} \geq 1.5$ 。

保护动作时间同 4.2.1。

当以上保护不满足要求时，采用低阻抗保护。

4.2.3 低阻抗保护

见 5.5.7。

4.3 定子绕组单相接地保护

我国发电机中性点接地方式主要有以下三种：

——不接地（含经单相电压互感器接地）；

——经消弧线圈（欠补偿）接地；

——经配电变压器高阻接地。

在发电机单相接地故障时，不同的中性点接地方式，将有不同的接地电流和动态过电压以及不同的保护出口方式。

发电机单相接地电流允许值见附录 A。

当机端单相金属性接地电容电流 I_c 小于允许值时，发电机中性点应不接地，单相接地保护带时限动作于信号；若 I_c 大于允许值，宜以消弧线圈（欠补偿）接地，补偿后的残余电流（容性）小于允许值时，保护仍带时限动作于信号；但当消弧线圈退出运行或由于其他原因使残余电流大于允许值时，保护应切换为动作于停机。

发电机中性点经配电变压器高阻接地时，接地故障电流大于 $\sqrt{2}I_c$ ，一般情况下均将大于允许值，所以单相接地保护应带时限动作于停机，其时限应与系统接地保护相配合。

4.3.1 基波零序过电压保护

该保护的動作电压 U_{op} 应按躲过正常运行时中性点单相电压互感器或机端三相电压互感器开口三角绕组的最大不平衡电压 $U_{unb.max}$ 整定，即

$$U_{op} = K_{rel}U_{unb.max} \quad (27)$$

式中： K_{rel} ——可靠系数，取 1.2~1.3。

$U_{unb.max}$ 为实测不平衡电压，其中含有大量三次谐波。为了减小 U_{op} ，可以增设三次谐波阻波环节，使 $U_{unb.max}$ 主要是很小的基波零序电压，大大提高灵敏度，此时 $U_{op} \geq 5V$ ，保护死区 $\geq 5\%$ 。

应校验系统高压侧接地短路时，通过升压变压器高低压绕组间的每相耦合电容 C_M 传递到发电机侧的零序电压 U_{g0} 大小，传递电压计算用近似简化电路，见图 7。

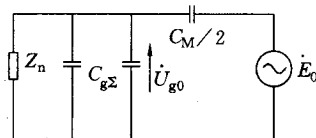


图 7 传递电压计算用近似简化电路

图 7 中， E_0 为系统侧接地短路时产生的基波零序电动势，由系统实际情况确定，一般可取 $E_0 \approx 0.6U_{Hn}/\sqrt{3}$ ， U_{Hn} 为系统额定线电压。 $C_{g\Sigma}$ 为发电机及机端外接元件每相对地总电容。 C_M 为主变压器高低压绕组间的每相耦合电容，见附录 J。 Z_n 为 3 倍发电机中性点对地基波阻抗。

U_{g0} 可能引起基波零序过电压保护误动作。因此，应从动作电压整定值及延时两方面与系统接地保护配合。

4.3.2 三次谐波电压单相接地保护

对于 100MW 及以上的发电机，应装设无动作死区（100%动作区）单相接地保护。一种保护方案是

基波零序过电压保护与三次谐波电压保护共同组成 100% 单相接地保护。

电压互感器变比为：

$$\text{机端 TV} \quad n_v = \frac{U_{gn}}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3} \text{V}$$

中性点 TV

$$n_v = \frac{U_{gn}}{\sqrt{3}} / 100 \text{V}$$

如发电机中性点经消弧线圈或配电变压器接地，保护装置应具有调平衡功能，否则应增设中间电压互感器。

设机端和中性点三次谐波电压各为 \dot{U}_t 和 \dot{U}_n ，三次谐波电压单相接地保护可采用以下两种原理：

$$\text{a)} \quad |\dot{U}_t| / |\dot{U}_n| > a \quad (28)$$

实测发电机正常运行时的最大三次谐波电压比值设为 a_0 ，则取阈值 $a = (1.05 \sim 1.15) a_0$ 。根据发电机定子绕组对地电容和中性点对地三次谐波阻抗的大小，见图 8，可计算 a_0 。 a_0 可能小于或大于 1.0。

$$\text{b)} \quad |\dot{U}_t - \dot{K}_p \dot{U}_n| / \beta |\dot{U}_n| > 1 \quad (29)$$

式中分子为动作量，调整系数 \dot{K}_p ，使发电机正常运行时动作量最小。然后调整系数 β ，使制动量 $\beta |\dot{U}_n|$ 在正常运行时恒大于动作量，一般取 $\beta \approx 0.2 \sim 0.3$ 。

动作判据 1) 的保护装置简单，但灵敏度较低。动作判据 2) 较复杂，但灵敏度高。

定子绕组单相接地保护中的三次谐波部分只动作于信号。

4.3.3 中性点经配电变压器高阻接地的定子绕组单相接地保护

接于配电变压器（变比 n_t ）二次侧的电阻 R_N ，应按机端单相接地时由 R_N 产生的电阻电流大于电容电流选定，即

$$R_N \leq 1 / (3\omega C_{g\sum} n_t^2) \quad (30)$$

式中： $C_{g\sum}$ ——发电机及机端外接元件每相对地总电容。

a) 基波零序过电压保护。与 4.3.1 相同，但此保护用在中性点经配电变压器高阻接地的发电机上，灵敏度较低。

b) 三次谐波电压单相接地保护。与 4.3.2 相同。

c) 95% 定子绕组单相接地基波零序过电流保护。该保护装设在发电机中性点接地连线的电流互感器上，保护应具有三次谐波阻波部件，其动作电流为

$$\dot{I}_{op} \leq (1 - 0.95)(1 - K_{er}) \frac{1 - \Delta U\%}{1 + \Delta U\%} \times \frac{I_k^{(1)}}{n_a} \times \frac{I_{2n}}{I_{2n} + \Delta I_{er}} \quad (31)$$

式中： K_{er} ——电流互感器比误差系数，取为 3%；

$\Delta U\%$ ——机端电压变化百分值，取为 10%；

$I_k^{(1)}$ ——机端单相金属性接地电流；

n_a ——电流互感器变比；

I_{2n} ——电流互感器二次额定电流；

ΔI_{er} ——保护继电器误差，取为 5%。

保护经 0.5s 延时动作于停机。

4.3.4 外加交流电源式 100% 定子绕组单相接地保护

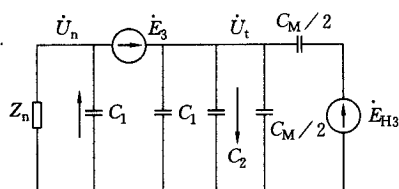


图 8 发电机三次谐波电压分析计算用等值电路
 E_3 —发电机三次谐波相电动势； E_{H3} —系统高压侧三次谐波相电动势； Z_n —发电机中性点对地三次谐波感抗或电阻的三倍； C_1 —发电机每相对地电容之半； C_2 —机端外接元件每相对地总电容； C_M —主变压器高低压绕组间每相耦合电容

图 8 发电机三次谐波电压分析计算用等值电路

国内应用的外加交流电源式定子绕组单相接地保护有两种，其一为外加 20Hz 电源，另一为外加 12.5Hz 电源。

外加电源方式的定子绕组单相接地保护，在启、停机过程中仍有保护作用，但必须增设低频电源，且对其要求有很高的可靠性。

4.4 励磁回路接地保护

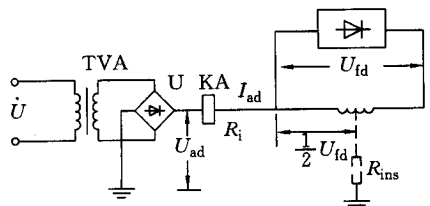
汽轮发电机通用技术条件规定：对于空冷及氢冷的汽轮发电机，励磁绕组的冷态绝缘电阻不小于 $1\text{M}\Omega$ ，直接水冷却的励磁绕组，其冷态绝缘电阻不小于 $2\text{k}\Omega$ 。水轮发电机通用技术条件规定：绕组的绝缘电阻在任何情况下都不应低于 $0.5\text{M}\Omega$ 。

励磁绕组及其相连的直流回路，当它发生一点绝缘损坏时（一点接地故障）并不产生严重后果；但是若继发第二点接地故障，则部分转子绕组被短路，可能烧伤转子本体，振动加剧，甚至可能发生轴系和汽轮机磁化，使机组修复困难、延长停机时间。为了大型发电机组的安全运行，无论水轮发电机或汽轮发电机，在励磁回路一点接地保护动作发出信号后，应立即转移负荷，实现平稳停机检修。对装有两点接地保护的汽轮发电机组，在一点接地故障后继续运行时，应投入两点接地保护，后者带时限动作于停机。

4.4.1 叠加直流式一点接地保护

在励磁绕组负端和大地之间经一电流继电器 KA 叠加直流电压 U_{ad} 构成的转子一点接地保护，由图 9

可知正常运行时流过继电器 KA 的电流为



$$I_{ad} = \frac{U_{ad} + \frac{1}{2}U_{fd}}{R_i + R_{ins}} \quad (32)$$

式中： U_{ad} ——叠加直流电压；

U_{fd} ——发电机励磁电压；

R_i ——继电器 KA 的内阻；

R_{ins} ——励磁绕组对地等效绝缘电阻。

发电机强行励磁但励磁绕组并不接地时，流过继电器 KA

的电流为

$$I_{ad, \max} = \frac{U_{ad} + \frac{1}{2}U_{fd, \max}}{R_i + R_{ins}} \quad (33)$$

式中： $U_{fd, \max}$ ——发电机强励时的转子电压。

对于空冷及氢冷汽轮发电机，要求在励磁绕组负端经过渡电阻 $R_{tr}=20\text{k}\Omega$ 接地时继电器 KA 动作。

发电机空载运行，励磁绕组负端经过渡电阻 R_{tr} 接地条件下，流过继电器 KA 的电流 I_{op} 为

$$I_{op} = \frac{U_{ad}(R_{tr} + R_{ins}) + \frac{1}{2}U_{fd0}R_{tr}}{R_i R_{ins} + R_{tr}(R_{ins} + R_i)} \quad (34)$$

式中： U_{fd0} ——发电机空载励磁电压；

R_{tr} ——接地点的过渡电阻。

按负端经过渡电阻接地时流过继电器 KA 的电流大于发电机强励而励磁绕组并不接地时流过继电器 KA 的电流整定。

$$I_{op} \geq K_{rel} I_{ad, \max} \quad (35)$$

式中： K_{rel} ——可靠系数，取 1.5。

解出表示最小灵敏度的过渡电阻 R_{tr} 为（当 $U_{fd, \max}=2U_{fdn}$ ， U_{fdn} 为正常额定励磁电压）

$$R_{tr} \leq \frac{U_{ad}R_{ins} - 1.5(U_{ad} + U_{fdn})R_a}{0.5U_{ad} + 1.5U_{fdn} - 0.5U_{fd0}} \quad (36)$$

式中: $R_a = R_{ins}R_i / (R_{ins} + R_i)$ 。

当励磁绕组对地绝缘情况良好, $R_{ins} \gg R_{tr}$ 时, 表示最小灵敏度的过渡电阻为

$$R_{tr} \leq \frac{U_{ad}(R_i + R_{ins})}{1.5(U_{ad} + U_{fdn})} - R_i \quad (37)$$

4.4.2 测量励磁绕组对地导纳的一点接地保护

该保护外加工频交流电源经补偿电感 L 与隔直电容 C (L 、 C 对 50Hz 串联谐振) 接于励磁绕组的正负极。励磁绕组正常对地 (大轴) 的绝缘电阻为 R_{ins} (或电导 g_{ins}) 和对地电容为 C_e 。重要的是由外加电源 a、b 两端向励磁绕组看进去的等值电路 (图 10) 中除 R_{ins} 和 C_e 外, 只有纯阻 R_b , 不应有与 R_b 串联的感抗或容抗 (C_e 除外)。

由 a、b 两点看到的输入对地导纳轨迹如图 11 所示, 图中实线圆族为以 g_{ins} 为常量、 C_e 为变量的等电导圆, 虚线圆族为以 C_e 为常量、 g_{ins} 为变量的等电纳圆。

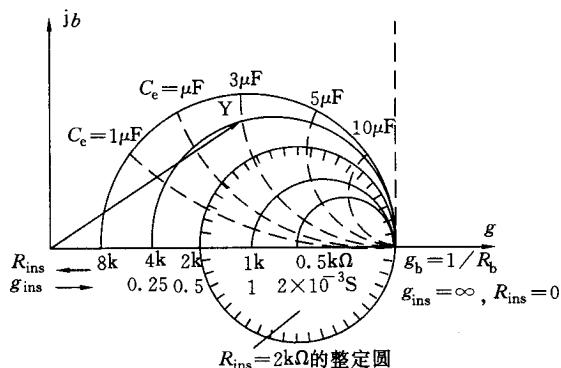


图 11 等电导圆和整定圆

式中: Y ——继电器测得的励磁绕组对地导纳;

g_m ——继电器整定圆圆心;

$g_n - g_m$ ——继电器整定圆半径。

当已确定要求继电器在转子绕组对地绝缘电阻下降到 R_{ins} (相应 $g_{ins} = 1/R_{ins}$) 时动作, 且已知 R_b 值 (制造厂家供给, 相应参考电导 $g_b = 1/R_b$), 则需要整定计算的导纳圆整定圆圆心为 g_m (位于 g 轴上)

$$g_m = \frac{g_b(g_b + 2g_{ins})}{2(g_b + g_{ins})} \quad (39)$$

整定圆半径为 $g_n - g_m$, 由图 12 知, $g_n = g_b$, 所以半径为

$$g_n - g_m = \frac{g_b^2}{2(g_b + g_{ins})} \quad (40)$$

由图 11 可清楚见到, R_{ins} 的整定值不能取得太大 (例如大于 $10k\Omega$), 因为当 R_{ins} 从 $8k\Omega$ 变到无穷大时, 等电导圆十分密集, 极易产生定值变异。一般 R_{ins} 的整定值宜取 $5k\Omega$ 左右, 这是这种保护的原理所决定的。

在实际工作中应注意以下几点:

a) 励磁回路发生金属性一点接地故障时, $R_{ins} = 0$, $g_{ins} = \infty$, 测量对地导纳 Y 位于整定圆的边界上, 处于动作边缘。在发生金属性接地时, 检验保护不应拒动。

b) 电刷与大轴间的接触电阻, 严重影响保护的定值, 为此必须加大电刷的压力, 减小其接触电阻值。

4.4.3 切换采样式一点接地保护

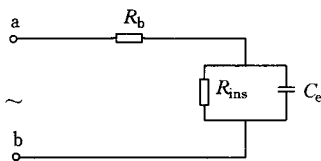


图 10 测量对地导纳式一点接地保护的等值电路

图 11 中, 横坐标右侧端点表示励磁绕组发生金属性接地故障 ($R_{ins} = 0$, $g_{ins} = \infty$), 输入端对地导纳为 $g_b = 1/R_b$ 。

理想的测量对地导纳式一点接地保护的动作特性应只与整定的 R_{ins} 值有关, 而与 C_e 大小无关。因此保护整定的动作特性 (以 $R_{ins} = 2k\Omega$ 为例) 如图 11 中的阴影整圆, 它与等电导圆 ($R_{ins} = 2k\Omega$) 完全重合, 表明该保护的动作特性与 C_e 无关, 只要 $R_{ins} \leq 2k\Omega$, 保护就动作。

继电器的动作判据如图 12 所示, 为

$$|Y - g_m| \leq |g_n - g_m| \quad (38)$$

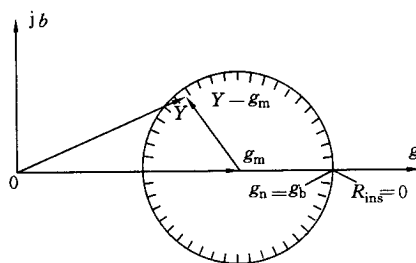


图 12 测量对地导纳继电器的整定圆

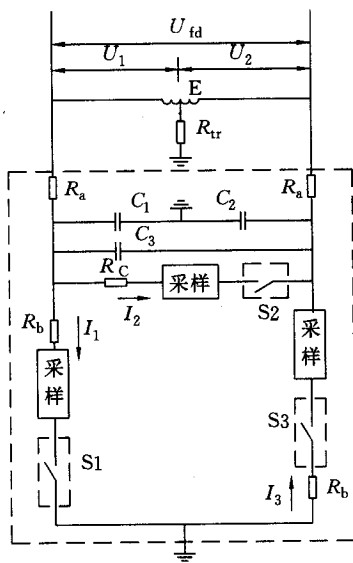


图 13 接地保护装置的阻容网络

该保护要在转子绕组两端外接阻容网络,电子开关 S1~S3 轮流接通和断开,如图 13,对电流 $I_1 \sim I_3$ 采样。

$$I_1 = \frac{K_1 U_1}{R_a + R_b + R_{tr}} \quad (41)$$

$$I_2 = \frac{K_2 U_{fd}}{2R_a + R_c} \quad (42)$$

$$I_3 = \frac{K_1 U_2}{R_a + R_b + R_{tr}} \quad (43)$$

式中: K_1 、 K_2 ——选定的常数;故障点将 U_{fd} 分为 U_1 和 U_2 。

保护的动作为

$$I_1 + I_3 \geq I_2 \quad (44)$$

保护动作时的过渡电阻 R_{tr} 为

$$R_{tr} \leq \frac{K_1}{K_2} (2R_a + R_c) - (R_a + R_b) \quad (45)$$

R_{tr} 即为保护的灵敏度,其定值取决于正常运行时转子回路的绝缘水平。

$$K_2 = \frac{K_1 (2R_a + R_c)}{R_a + R_b + R_{tr}} \quad (46)$$

要求在一定的 R_{tr} 时动作,就有相应的 K_2 值,所以改变 K_2 可以改变转子一点接地保护整定值 R_{set} ,通常取 $R_{set} = 10k\Omega$ 以上。当 $R_{tr} < R_{set}$ 时,保护动作。

切换采样式转子一点接地保护的另一种形式为乒乓式转子一点接地保护。原理图如图 14。

励磁绕组中任一点 E 经过渡电阻 R_{tr} (即对地绝缘电阻) 接地,励磁电压 U_{fd} 由 E 点分为 U_1 和 U_2 。

S1 闭合, S2 打开时 (此时设 $U_{fd} = U_{fd1}$)

$$I_1 = \frac{U_1}{R_0 + R_{tr}} \quad (47)$$

式中: R_0 ——保护的固定电阻;

R_{tr} ——励磁回路对地绝缘电阻。

S2 闭合, S1 打开时 (此时有 $U_{fd} = U_{fd2}$)

$$I_2 = \frac{U_2}{R_0 + R_{tr}} \quad (48)$$

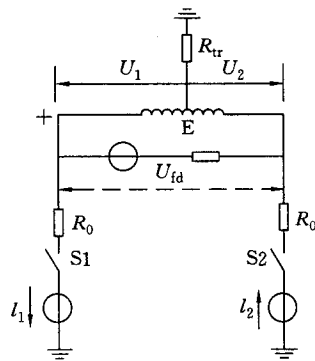


图 14 乒乓式转子一点接地保护

电导为

$$G_1 = \frac{I_1}{U_{fd1}} = \frac{\frac{U_1}{R_0 + R_{tr}}}{U_{fd1}} = \frac{K_1}{R_0 + R_{tr}}, K_1 = \frac{U_1}{U_{fd1}} \quad (49)$$

$$G_2 = \frac{I_2}{U_{fd2}} = \frac{\frac{U_2}{R_0 + R_{tr}}}{U_{fd2}} = \frac{K_2}{R_0 + R_{tr}}, K_2 = \frac{U_2}{U_{fd2}} \quad (50)$$

因 S1、S2 切换前后接地点 E 为同一点,故 $K_1 + K_2 = 1$ 。

保护的动作为

$$G_{set} \leq G_1 + G_2 \text{ 或 } R_{set} \geq R_{tr} + R_0 \quad (51)$$

整定范围 $R_{\text{set}} \geq 0 \sim 40 \text{ k}\Omega$ 。

4.4.4 励磁回路两点接地保护

利用四臂电桥原理构成的励磁回路两点接地保护，在励磁回路发生一点接地后投入运行，并调整平衡。当励磁回路发生第二点的接地故障时，保护延时动作于停机。

保护的動作电流，按躲过电桥不能调整得完全平衡而引起的不平衡电流整定。应选用高灵敏度继电器，以便缩小转子绕组近距离两点接地时的死区。

动作时限按躲过瞬时出现的两点接地故障整定，一般为 $0.5 \sim 1.0 \text{ s}$ 。

4.5 发电机过负荷保护

4.5.1 定子绕组对称过负荷保护

对于发电机因过负荷或外部故障引起的定子绕组过电流，装设单相定子绕组对称过负荷保护，通常由定时限过负荷及反时限过电流二部分组成。

a) 定时限过负荷保护。动作电流按发电机长期允许的负荷电流下能可靠返回的条件整定

$$I_{\text{op}} = K_{\text{rel}} \frac{I_{\text{gn}}}{K_{\text{r}} n_{\text{a}}} \quad (52)$$

式中： K_{rel} ——可靠系数，取 1.05 ；

K_{r} ——返回系数，取 $0.85 \sim 0.95$ ，条件允许应取较大值；

n_{a} ——电流互感器变比；

I_{gn} ——发电机额定电流。

保护延时（躲过后备保护的最大延时）动作于信号或动作于自动减负荷。

b) 反时限过电流保护。反时限过电流保护的動作特性，即过电流倍数与相应的允许持续时间的关系，由制造厂家提供的定子绕组允许的过负荷能力确定。

“汽轮发电机通用技术条件”规定：发电机定子绕组承受的短时过电流倍数与允许持续时间的关系为

$$t = \frac{K_{\text{tc}}}{I^2 - 1} \quad (53)$$

式中： K_{tc} ——定子绕组热容量常数，机组容量 $S_{\text{n}} \leq 1200 \text{ MVA}$ 时， $K_{\text{tc}} = 37.5$ （当有制造厂家提供的参数时，以厂家参数为准）；

I ——以定子额定电流为基准的标么值；

t ——允许的持续时间，s。

定子绕组允许过电流曲线见图 15。

设反时限过电流保护的跳闸特性与定子绕组允许过电流曲线相同。按此条件进行保护定值的整定计算。

反时限跳闸特性的上限电流 $I_{\text{op.max}}$ 按机端三相金属性短路的条件整定

$$I_{\text{op.max}} = \frac{I_{\text{gn}}}{K_{\text{sat}} X''_{\text{d}} n_{\text{a}}} \quad (54)$$

式中： I_{gn} ——发电机额定电流，A；

K_{sat} ——饱和系数，取 0.8 ；

X''_{d} ——发电机次暂态电抗（非饱和值），标么值；

n_{a} ——TA 变比。

当短路电流小于上限电流时，保护按反时限动作特性动作。

反时限动作特性的下限电流 $I_{\text{op.min}}$ 按与过负荷保护配合的条件整定，由 4.5.1 知

$$I_{\text{op}} = K_{\text{rel}} \frac{I_{\text{gn}}}{K_{\text{r}} n_{\text{a}}} \quad (55)$$

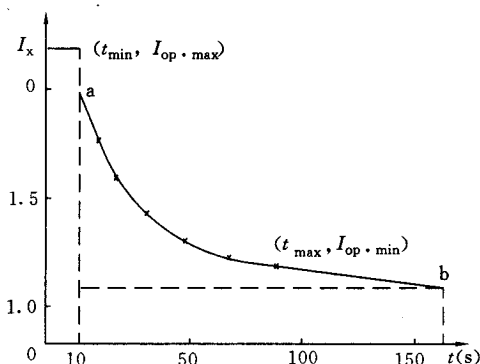


图 15 定子绕组允许过电流曲线
(即反时限过电流保护的動作特性)

则

$$I_{op.min} = K_{c0} I_{op} = K_{c0} K_{rel} \frac{I_{gn}}{K_r n_a} \quad (56)$$

式中: K_{c0} ——配合系数, 取 1.05。

不考虑在灵敏度和动作时限方面与其他相间短路保护的配合。保护动作于解列或程序跳闸。

4.5.2 转子绕组过负荷保护

转子绕组的过负荷保护由定时限和反时限二部分组成。

a) 定时限过负荷保护。动作电流按正常运行的额定励磁电流下能可靠返回的条件整定。当保护配置在交流侧时, 其动作时限及动作电流的整定计算同 4.5.1a) (额定励磁电流 I_{fd} 应变换至交流侧的有效值 I_{\sim} , 对于采用桥式不可控整流装置的情况, $I_{\sim} = 0.816 I_{fd}$)。

保护带时限动作于信号, 有条件的动作于降低励磁电流或切换励磁。

b) 反时限过电流保护。反时限过电流倍数与相应允许持续时间的关系曲线, 由制造厂家提供的转子绕组允许的过热条件决定。整定计算时, 设反时限保护的动作特性与转子绕组允许的过热特性相同, 见图 16 所示, 其表达式为

$$t = \frac{C}{I_{fd*} - 1}$$

式中: C ——转子绕组过热常数;

I_{fd*} ——强行励磁倍数。

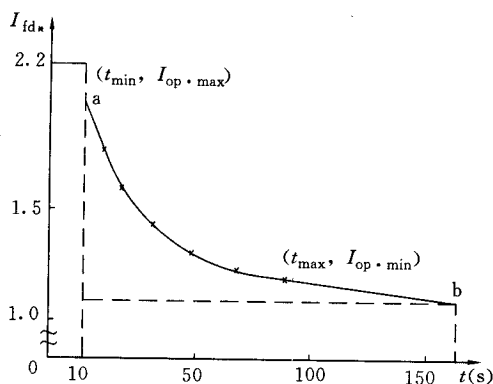


图 16 转子绕组反时限过电流保护跳闸特性

保护动作于解列灭磁。

4.5.3 转子表层负序过负荷保护

针对发电机的不对称过负荷、非全相运行以及外部不对称故障引起的负序过电流, 其保护通常由定时限过负荷和反时限过电流二部分组成。

a) 负序定时限过负荷保护。保护的動作电流按发电机长期允许的负序电流 $I_{2\infty}$ 下能可靠返回的条件整定

$$I_{op} = \frac{K_{rel} I_{2\infty} I_{gn}}{K_r n_a} \quad (57)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数, 取 1.2;

K_r ——返回系数, 取 0.85~0.95, 条件允许应取较大值;

$I_{2\infty}$ ——发电机长期允许负序电流的标么值。

保护延时动作于信号。

b) 负序反时限过电流保护。负序反时限过电流保护的动作特性, 由制造厂家提供的转子表层允许的负序过负荷能力确定。

GB7064—86《汽轮发电机通用技术条件》规定的不同容量机组的转子负序过热允许值见附录 D。

发电机短时承受负序过电流倍数与允许持续时间

$$t = \frac{A}{I_{2*}^2 - I_{2\infty}^2} \quad (58)$$

式中: I_{2*} ——发电机负序电流标么值;

$I_{2\infty}$ ——发电机长期允许负序电流标么值;

A ——转子表层承受负序电流能力的常数
($A = I_{2t}^2$, 附录 D 表 D-1)。

发电机允许的负序电流特性曲线见图 17。

整定计算时, 设负序反时限过电流保护的動作特性与发电机允许的负序电流特性相同。

反时限保护動作特性的上限电流, 按主变压器高压侧二相短路的条件计算

$$I_{op.max} = \frac{I_{gn}}{(K_{sat}X''_d + X_2 + 2X_t)n_a} \quad (59)$$

式中: X''_d , X_2 ——发电机的次暂态电抗 (不饱和值) 及负序电抗标么值;

K_{sat} ——饱和系数, 取 0.8;

X_t ——主变压器电抗, 取 $X_t \approx Z_t$, 标么值。

当负序电流小于上限电流时, 按反时限特性动作。

反时限動作特性的下限电流, 通常由保护所能提供的最大延时决定, 一般最大延时为 1000s, 据此决定保护下限動作电流的起始值

$$I_{op.min} = \sqrt{\frac{A}{1000} + I_{2\infty}^2} \quad (60)$$

如果保护上下限動作电流倍数不能满足要求, 应根据实际情况予以协调, 一般是在满足一定电流倍数的前提下, 保留较小电流下的反时限特性。

在灵敏度和動作时限方面不必与相邻元件或线路的相间短路保护配合; 保护動作于解列或程序跳闸。

4.6 发电机低励失磁保护

发电机低励失磁保护的動作主判据可分为:

a) 系统侧主判据——高压母线三相同低电压继电器。本判据主要用于防止由发电机低励失磁故障引发无功储备不足的系统电压崩溃, 造成大面积停电, 其動作判据为

$$U_{op.3ph} = (0.85 \sim 0.90)U_{h.min} \quad (61)$$

式中: $U_{op.3ph}$ ——三相同低电压继电器動作电压 (此值应经调度部门确定);

$U_{h.min}$ ——高压系统最低正常运行电压。

经辅助判据“与门”输出, 短延时動作于发电机解列。

b) 发电机侧主判据:

- 1) 异步边界阻抗继电器;
- 2) 静稳极限阻抗继电器;
- 3) 静稳极限励磁低电压继电器。

低励失磁保护的辅助判据有:

- 1) 负序电压元件;
- 2) 励磁低电压元件;
- 3) 延时元件。

4.6.1 异步边界阻抗继电器

失磁发电机的机端阻抗最终轨迹一定进入图 18 的圆 1 中, 圆 1 称为异步边界阻抗圆, 其整定为

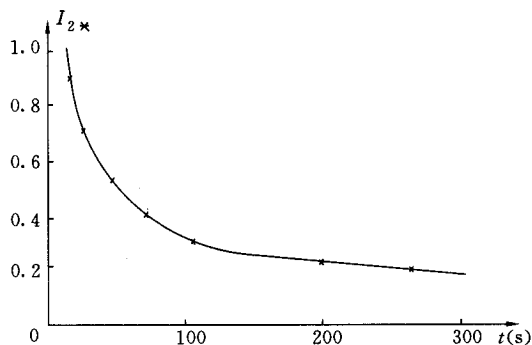


图 17 发电机允许的负序电流特性
(即保护的動作特性)

$$X_a = -0.5X'_d \frac{U_{gn}^2 n_a}{S_{gn} n_v} \quad (62)$$

$$X_b = -X_d \frac{U_{gn}^2 n_a}{S_{gn} n_v} \quad (63)$$

式中: X'_d 、 X_d ——发电机暂态电抗和同步电抗标么值 (取不饱和值);

U_{gn} 、 S_{gn} ——发电机额定电压和额定视在功率;

n_a 、 n_v ——电流互感器和电压互感器变比。

异步边界阻抗圆动作判据主要用于与系统联系紧密的发电机失磁故障检测, 它能反应失磁发电机机端的最终阻抗, 但动作可能较晚。

4.6.2 静稳极限阻抗继电器

a) 汽轮发电机。如图 18 中的圆 2, 其整定值为

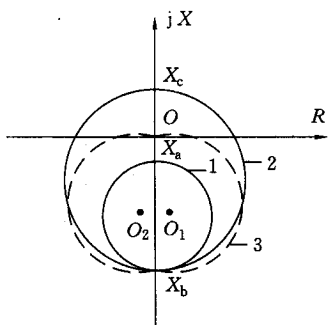


图 18 阻抗动作特性

1—异步边界圆; 2—汽轮发电机静稳边界圆; 3—准静稳极限阻抗特性图

$$X_c = X_{con} \frac{U_{gn}^2 n_a}{S_{gn} n_v} \quad (64)$$

式中: X_{con} ——发电机与系统间的联系电抗 (包括升压变压器阻抗) 标么值 (以发电机额定值为基值), 参见附录 F。

其他符号同上。

X_b 由式 (63) 决定。

鉴于阻抗圆 2 在第 I、II 象限的动作区易发生非失磁故障条件下的误动, 为此在图 18 中, 作 OX_b 直线的中垂线, 在中垂线上取对称于 X 轴的两点 O_1 和 O_2 , 以 O_1 和 O_2 为圆心, 作圆弧 (虚线苹果圆 3) 使之与静稳极限阻抗圆 2 在第 III、IV 象限尽量接近, 苹果圆 3 就是准静稳极限阻抗圆, 它是在整定静稳极限阻抗圆的基准上, 方便地作出的准静稳极限阻抗特性。由于电抗 X_c 是随运行方式而变的, X_c 的变化严重影响圆 2 和苹果圆 3 的大小。作为失磁保护整定计算, 由系统调度部门给定 X_{con} 值即可作出静稳极限圆和准静稳极限苹果圆。 X_{con} 可取最经常运行方式下的数值。

b) 水轮发电机 (包括大型汽轮发电机)。水轮发电机 (包括大型汽轮发电机) 的 $X_d \neq X_q$, 在低励失磁故障时, 其静稳极限的机端阻抗轨迹不是图 18 中的圆 2, 而是图 21 中的滴状曲线 (实线)。具体作图求解该静稳极限滴状阻抗曲线方法如图 19 和图 20 所示。

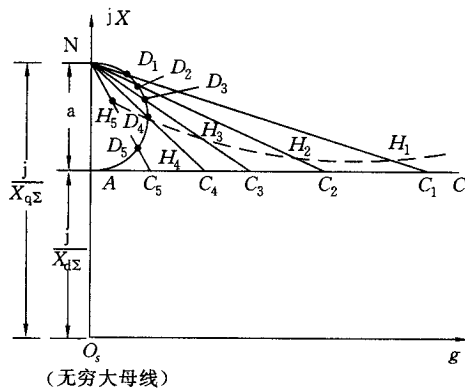


图 19 静稳极限 Y_s 轨迹

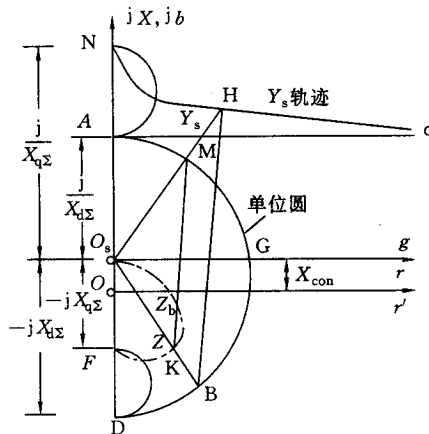


图 20 反演作图法求 Z_s 轨迹

1) 首先作出在无穷大母线 ($U_s = \text{恒定}$) 处观察到的静稳极限导纳 Y_s 的轨迹 $NH_5H_4H_3H_2H_1$ 。已知发电机参数 X_d 、 X_q , 联系电抗为 X_{con} , 并令 $X_{d\Sigma} = X_d + X_{con}$, $X_{q\Sigma} = X_q + X_{con}$ 。由 $1/X_{q\Sigma}$ 和 $1/X_{d\Sigma}$ 分别决定

N 点和 A 点, 作 $AC \perp O_s N$, 并以 NA 为直径作半圆。自 N 点作诸直线 NC_1 、 NC_2 、 NC_3 ……, 交半圆于 D_1 、 D_2 、 D_3 ……, 交直线 AC 于 C_1 、 C_2 、 C_3 ……, 截取 $H_1 C_1 = ND_1$ 、 $H_2 C_2 = ND_2$ 、 $H_3 C_3 = ND_3$ ……, 由此得 H_1 、 H_2 、 H_3 ……, 连 $H_1 H_2 H_3$ ……得一曲线, 则自原点 O_s (无穷大母线处) 到曲线上任一点 H 的直线就是发电机低励失磁故障时, 由无穷大母线处看到的导纳 Y_s 。(图 20)。

2) 用反演作图法求 $Z_s = 1/Y_s$, Z_s 为由无穷大母线处看到的静稳极限阻抗轨迹。具体作法如图 20 所示。

以 O_s 为圆心, $O_s A$ 为半径作单位圆 AGD 。任取 Y_s 轨迹上一点 H , 连 $\overline{O_s H}$ 直线交单位圆于 M 点。作直线 $\overline{O_s B}$, 使 $\angle GO_s B = \angle MO_s G$, $\overline{O_s B}$ 交单位圆于 B 点。连 \overline{HB} 直线, 并作 $\overline{MK} \parallel \overline{HB}$, \overline{MK} 与 $\overline{O_s B}$ 交于 K 点, 则 $\overline{O_s K} = Z_s = 1/Y_s$, 即 $\overline{O_s K}$ 就是从无穷大母线处看到的静稳极限阻抗 Z_s 。

沿 Y_s 轨迹取不同的 H 点, 用上述反演作图法, 求得不同的 K 点; 连接这些 K 点就获得静稳极限阻抗 Z_s 的轨迹 (即滴状曲线的右半侧)。

3) 平移横坐标 $O_s r$ 到 O_r' , $\overline{O_s O} = X_{con}$, 则自原点 O 到滴状曲线 (虚线) 的直线 \overline{OK} 就是发电机机端看到的静稳极限阻抗轨迹。考虑到此曲线过于复杂, 模拟式继电器难以实现, 同时考虑到第 I、第 II 象限的动作区易引起保护误动, 为此将滴状曲线近似改为苹果圆阻抗动作特性, 具体作法如图 21。

取 $-(X_d + X_q)/2$ 定 T 点, 作 \overline{OT} 的垂直平分线 $\overline{O_1 O_2}$; 试选对称于 X 轴的两点 O_1 和 O_2 , 以 O_1 和 O_2 为圆心, r_1 和 r_2 ($r_1 = r_2$) 为半径作圆弧, O_1 、 O_2 和 r_1 ($=r_2$) 的选择应使圆弧尽量在第 III、IV 象限接近滴状曲线。

4.6.3 静稳极限励磁低电压继电器 (变励磁电压判据)

与系统并联运行的发电机, 对应某一有功功率 P , 将有为维持静态稳定极限所必需的励磁电压 U_{fd} 。也就是说, 按照静稳极限条件 (例如汽轮发电机的功角 $\delta = 90^\circ$), 输送一定的有功功率 P , 应有相应的励磁电压 U_{fd} 。 P 值不同, 静稳极限条件下的 U_{fd} 也不同, 如图 22 和图 23。

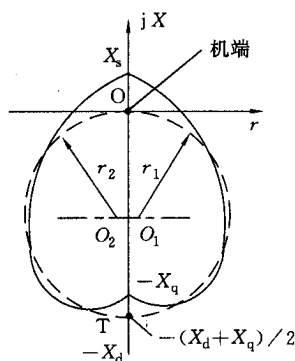


图 21 求作 $X_d \neq X_q$ 时的准静稳极限阻抗苹果圆 (虚线)

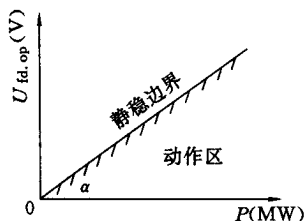
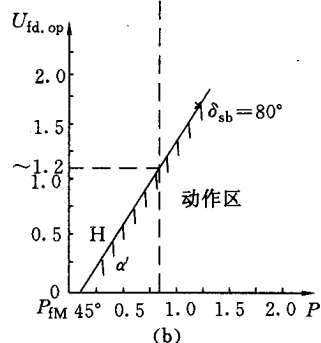
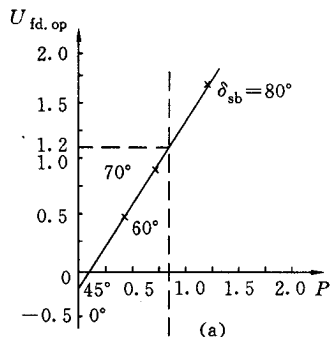


图 22 汽轮发电机 $U_{fd}-P$ 动作特性



(a) 励磁电压动作值与功率关系曲线; (b) 低励失磁保护检测元件的关系曲线

图 23 $X_d \neq X_q$ 发电机的 $U_{fd,op}-P$ 关系曲线

a) 汽轮发电机。由 $P = \frac{E_0 U_s}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$ 可知, 当静稳极限时 $\delta = 90^\circ$, 有

$$P = E_0 U_s / X_{d\Sigma}$$

当以发电机空载额定电压时的励磁电压 U_{fd0} (V) 为基值时, 标么值 $E_0 = U_{fd}$, 故有标么值关系式

$$U_{fd} = E_0 = P X_{d\Sigma} / U_s = P X_{d\Sigma} \quad (U_s = 1.0)$$

U_{fd} 以有名值表示时有

$$U_{fd}(V) = P X_{d\Sigma} U_{fd0}(V)$$

式中: $X_{d\Sigma} = X_d + X_{con}$ 和 P 均为标么值。

若 P 为有名值, 则有

$$U_{fd}(V) = \frac{P}{S_{gn}} X_{d\Sigma} U_{fd0}(V)$$

式中: S_{gn} 为有名值, MVA; P 为有名值, MW; $X_{d\Sigma}$ 仍为标么值。

低励失磁保护的变励磁电压动作判据可写为

$$U_{fd.op}(V) = KP \geq U_{fd} \quad (65)$$

式中: $K = X_{d\Sigma} U_{fd0} / S_{gn}$ 。

在实际保护装置中, P 和 U_{fd} 均经变换器得 U_1 和 U_2 , 即

$$U_1 = K_1 P, U_2 = K_2 U_{fd}$$

式中: K_1 、 K_2 分别为变换器的比例系数。

设继电器动作条件为

$$U_1 \geq U_2$$

即

$$U_{fd} \leq \frac{K_1}{K_2} P$$

调整 K_1 、 K_2 , 使 $K_1/K_2 = K$, 即满足动作判据式 (65)。该动作特性如图 22, 为过原点的直线, 其倾角 α 的整定值为

$$\alpha = \arctg K = \arctg X_{d\Sigma} U_{fd0} / S_{gn} \quad (66)$$

式中: $X_{d\Sigma} = X_d + X_{con}$ 为标么值;

U_{fd0} ——发电机空载励磁电压, V;

S_{gn} ——发电机额定视在功率, MVA。

b) 水轮发电机 (包括 $X_d \neq X_q$ 的大型汽轮发电机)。由于 $X_d \neq X_q$, 发电机输出的有功功率 P 为

$$P = \frac{E_0 U_s}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{X_{q\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta$$

由上式导出 $dP/d\delta = 0$ 的静稳极限关系式比较复杂, 对应不同的静稳极限功角 δ_{sb} , 有相应一定 P 值的励磁电压动作值 $U_{fd.op}$, 见图 23 (a), 它是一条曲线。

作为低励失磁保护的检测元件 ($U_{fd.op} - P$) 见图 23 (b), 已将实际的曲线近似取作直线, 横坐标 OH 为凸极反应功率的最大值 P_{fm}

$$P_{fm} = \frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{X_{q\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \quad (67)$$

保护动作判据为

1) 当 $0 \leq P \leq P_{fm}$ 时, $U_{fd.op} = 0 > U_{fd}$;

2) 当 $P > P_{fm}$ 时, $U_{fd.op} = (P - P_{fm}) \tg \alpha \geq U_{fd}$ 。

式中:

$$\tg \alpha = \frac{2 \cos 2\delta_{sb}}{\cos \delta_{sb} - 2 \sin^3 \delta_{sb}} X_{d\Sigma} \quad (68)$$

其中 $X_{d\Sigma} = X_d + X_{con}$ 为标么值, δ_{sb} 为静稳极限角。

对于 $X_d \neq X_q$ 发电机的静稳极限功角 δ_{sb} 可由图 24 查得, 纵坐标 $K_p = P_o / P_{fm}$ 中, P_o 为发电机失磁前

输出有功功率, MW, P_{fm} 为最大凸极功率, MW。

若图 23 中, U_{fd} 和 P 均用有名值 (V 和 MW), 则此时的倾角应为 α' , 且有

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{2 \cos 2 \delta_{\text{sb}}}{\cos \delta_{\text{sb}} - 2 \sin^2 \delta_{\text{sb}}} \times \frac{X_{\text{d}\Sigma}}{U_{\text{s}}} \times \frac{U_{\text{fdo}}}{S_{\text{gn}}} \quad (69)$$

式中: $X_{\text{d}\Sigma}$ 、 U_{s} 仍为标么值, 且有 $U_{\text{s}}=1.0$;

U_{fdo} ——发电机空载额定励磁电压, V;

S_{gn} ——发电机额定视在功率, MVA。

4.6.4 低励失磁保护的辅助判据继电器

a) 负序电压元件 (闭锁失磁保护)。动作电压为

$$U_{\text{op}} = (0.05 \sim 0.06) U_{\text{gn}} / n_{\text{v}} \quad (70)$$

b) 负序电流元件 (闭锁失磁保护)。动作电流为

$$I_{\text{op}} = (1.2 \sim 1.4) I_{2\infty} / n_{\text{a}} \quad (71)$$

式中: $I_{2\infty}$ ——发电机长期允许负序电流 (有名值)。

由负序电流元件构成的闭锁继电器, 在出现负序电压或电流大于 U_{op} 或 I_{op} 时, 瞬时起动闭锁失磁保护, 经 8~10s 自动返回, 解除闭锁。

c) 励磁低电压元件。取其动作电压 $U_{\text{fd, op}}$ 为

$$U_{\text{fd, op}} = 0.8 U_{\text{fdo}} \quad (72)$$

这些辅助判据继电器与 4.6.1 和 4.6.2 主判据继电器“与门”输出, 防止非失磁故障状态下主判据继电器误出口。对于水轮发电机和中小型汽轮发电机, 式 (72) 比较合适。对于大型汽轮发电机, 式 (72) 的 $U_{\text{fd, op}}$ 定值偏小, 当进相运行时可能 $U_{\text{fd}} < U_{\text{fd, op}}$, 励磁低电压辅助判据继电器会处于动作状态, 失磁保护失去了辅助判据的闭锁作用, 此时宜用 4.6.3 变励磁电压判据。

d) 延时元件。动作于跳开发电机的延时元件, 其延时应防止系统振荡时保护的误动作。振荡周期由电网主管部门提供, 按躲振荡所需的时间整定。对于不允许发电机失磁运行的系统, 其延时一般取 0.5~1.0s。

动作于励磁切换及发电机减出力的时间元件, 其延时由设备的允许条件整定。

失磁异步运行情况下, 动作于发电机解列的延时, 由发电机制造厂和电力部门共同决定允许发电机带 $(0.4 \sim 0.5) P_{\text{gn}}$ 的失磁异步运行时间。

允许失磁后发电机转入异步运行的低励失磁保护装置动作后, 应切断灭磁开关, 防止在转入异步运行时仍有有损大轴的同步功率存在。

4.7 发电机失步保护

4.7.1 双阻抗元件失步保护

图 25 以双透镜阻抗元件为例, 说明失步保护的整定计算方法。

各种原理的失步保护均应满足:

——正确区分系统短路与振荡;

——正确判定失步振荡与稳定振荡 (同步摇摆)。

失步保护应只在失步振荡情况下动作。失步保护动作后, 一般只发信号, 由系统调度部门根据当时实际情况采取解列、快关、电气制动等技术措施, 只有在振荡中心位于发一变组内部或失步振荡持续时间过长、对发电机安全构成威胁时, 才作用于跳闸, 而且应在两侧电动势相位差小于 90° 的条件下使断路器跳开, 以免断路器的断开容量过大。

图 25 中, 如果测量阻抗的轨迹只进入 Z_1 就返回, 说明电力系统发生了稳定振荡, 保护不动作; 如果测量阻抗的轨迹先后穿过 Z_1 及 Z_2 , 说明电力系统发生了非稳定性振荡, 保护动作发信号; 如果测量阻抗

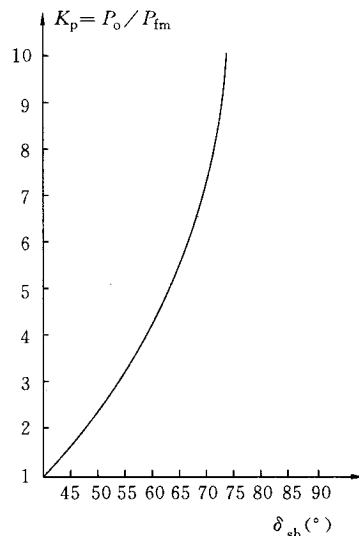


图 24 $X_{\text{d}} \neq X_{\text{q}}$ 发电机的 $\delta_{\text{sb}} - K_{\text{p}}$ 关系曲线 ($K_{\text{p}} = P_{\text{o}} / P_{\text{fm}}$)

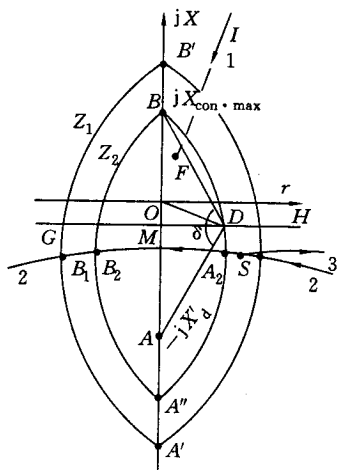


图 25 双透镜失步保护的
动作特性

为了判定系统短路或振荡,可利用阻抗元件 Z_1 、 Z_2 动作时间差的大小。设振荡轨迹进入 Z_1 和 Z_2 时的功角分别为 δ_1 和 δ_2 , 则整定时间继电器的时限 t_{op} 为

$$t_{op} = T_{\min} \frac{\delta_2 - \delta_1}{360} \text{ (s)} \quad (74)$$

式中: T_{\min} ——系统最小振荡周期 (根据系统实际情况, 由系统调度部门提供), s。

若 Z_1 、 Z_2 的动作时间差小于 t_{op} , 则判定不是振荡, 而是短路故障, 失步保护不动作。

4.7.2 遮挡器原理失步保护

所谓“遮挡器”原理, 实际是具有平行直线特性的阻抗保护, 如图 26 所示, 直线 B_1 、 B_2 均平行于系统合成阻抗 \overline{AB} , B_1 的动作区在直线左侧, B_2 的动作区在直线右侧。该失步保护除直线特性阻抗元件外, 还有一个圆特性阻抗元件。图 26 中, X'_d 和 X_t 分别为发电机暂态电抗和升压变压器短路电抗, Z_1 为发一变组以外的总阻抗。

当振荡阻抗轨迹仅进入阻抗圆动作区而未达遮挡器的直线动作区时, 失步保护不动作。

与 4.7.1 相同, 利用式 (74) 来区分短路与振荡。

发电方式下机组加速失步时, 机端测量阻抗的轨迹从右侧首先进入圆特性, 阻抗元件 Z 动作, 当功角 δ 进一步增大, 阻抗轨迹达 B_1 时对应 $\delta_2 = 120^\circ \sim 140^\circ$ 机组处于动稳极限状态; 当阻抗轨迹越过 AB 线时, 发电机失步。

当发电机呈电动机运行方式时, 情况与上述过程相反, 振荡阻抗从左侧进入 Z 阻抗圆。保护整定计算的主要内容为:

a) 圆特性阻抗元件的动作阻抗 Z_{op} , 按躲过发电机的负荷阻抗 Z_L 整定, 即

$$Z_L = \frac{U_{gn}^2 n_a}{S_{gn} n_v}, \quad Z_{op} = 0.8 Z_L \quad (75)$$

式中: U_{gn} ——发电机的额定电压, kV;

S_{gn} ——发电机的视在功率, MVA;

n_a 、 n_v ——电流、电压互感器变比。

b) 遮挡器的阻抗边界

N 为 \overline{AB} 的中点,

$$NR_1 = NR_2 = \frac{1}{2} (jX_A + Z_B) \text{ctg}(\delta_2/2) \quad (76)$$

的轨迹进入 Z_1 及 Z_2 的时间差小于某一定值, 说明电力系统发生了短路故障, 保护应予闭锁。因此, 失步保护是通过整定动作区和时限的相互配合来区分短路故障及系统振荡的。除对 $Z_1 Z_2$ 进行整定外, 阻抗轨迹进入 $Z_1 Z_2$ 的时间差也需整定计算。

根据发电机的动稳极限角来确定 Z_2 的动作边界。

$$\text{取} \quad OA'' = (1.5 \sim 2.0) X'_d \quad (73)$$

$OB = X_{\text{con. max}}$ 即自机端向系统观察的最大联系电抗。

设两侧电动势大小相等, 则系统振荡阻抗轨迹为直线 AB 的垂直平分线 HG 。在 HG 上取一点 D , 使 $\angle BDA = \delta_{ab} = \text{动稳极限角}$ (由系统调度部门给出, 一般为 $\delta_{ab} = 120^\circ \sim 140^\circ$), 则由 B 、 D 、 A'' 三点可作出圆弧, 并有对称于纵轴的另半个圆弧, 共同组成失步保护的透镜形阻抗动作特性 Z_2 。

另一透镜形阻抗元件 Z_1 , 它与 Z_2 为同心圆, 但两者直径之比为 $1.2 \sim 1.3$ 。

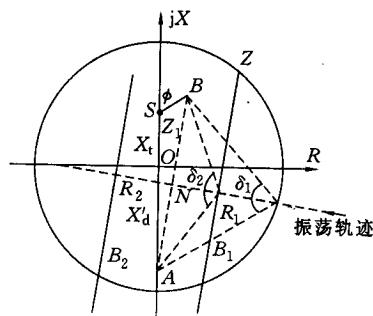


图 26 遮挡器原理失步保护
动作特性 ($Z_1 = \overline{SB}$)

式中: $X_A = X'_d$

$$Z_B = jX_t + Z_1 (\sin\varphi + j\cos\varphi)$$

c) 时间元件的动作时间与式 (74) 相同。

4.7.3 三元件失步保护

其特性由三部分组成, 见图 27。

第一部分是透镜特性, 图中①, 它把阻抗平面分成透镜内的部分 I 和透镜外的部分 A。

第二部分是遮挡器特性, 图中②, 它平分透镜并把阻抗平面分为左半部分 L 和右半部分 R。

两种特性的结合, 把阻抗平面分为四个区, 根据其测量阻抗在四个区内的停留时间做为是否发生失步的判据。

第三部分特性是电抗线, 图中③, 它把动作区一分为二, 电抗线以下为 I 段 (U), 电抗线以上为 II 段 (O)。

保护整定计算的主要内容:

a) 遮挡器特性整定。决定遮挡器特性的参数是 Z_a 、 Z_b 、 φ 。如果失步保护装在机端, 由图 28 可知

$$Z_b = X'_d$$

$$Z_a = X_{con}$$

$$\varphi = 80^\circ \sim 85^\circ$$

式中: X'_d 、 X_{con} ——发电机暂态电抗及系统联系电抗;

φ ——系统阻抗角。

b) α 角的整定及透镜结构的确定。对于某一给定的 $Z_a + Z_b$, 透镜内角 α (即两侧电动势摆开角) 决定了透镜在复平面上横轴方向的宽度。确定透镜结构的步骤如下:

1) 确定发电机最小负荷阻抗 $R_{L.min}$ 。

2) 确定 Z_r

$$Z_r \leq \frac{1}{1.3} R_{L.min}$$

3) 确定内角 α

由

$$Z_r = \frac{Z_a + Z_b}{2} \tan\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right)$$

得

$$\alpha = 180^\circ - 2\arctan \frac{2Z_r}{Z_a + Z_b} \quad (77)$$

c) 电抗线 Z_c 的整定。一般 Z_c 选定为变压器阻抗 Z_t 的 90%, 即 $Z_c = 0.9Z_t$ 。图 27 中过 Z_c 作 $\overline{Z_a Z_b}$ 的垂线, 即为失步保护的电抗线。电抗线是 I 段和 II 段的分界线, 失步振荡在 I 段还是在 II 段取决于阻抗轨迹与遮挡器相交的位置, 在透镜内且低于电抗线为 I 段, 高于电抗线为 II 段。

失步保护可检测的最大滑差频率 f_{smax} 与 α 角存在着如下关系

$$\alpha = 180^\circ (1 - 0.05 \times f_{smax}) \quad (78)$$

或

$$f_{smax} = 20 \times \left(1 - \frac{\alpha}{180^\circ}\right)$$

式中: f_{smax} ——可检测的最大滑差频率, Hz。

4.8 发电机异常运行保护

4.8.1 定子铁心过励磁保护

对于 300MW 及以上发电机, 当发电机与主变压器之间无断路器而共用一套过励磁保护时, 其整定值按发电机或变压器过励磁能力较

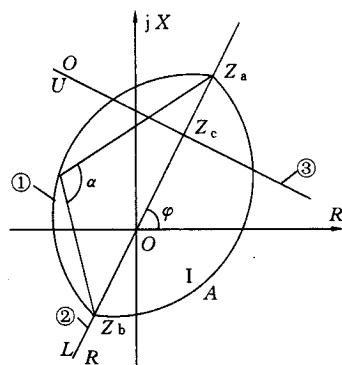


图 27 三元件式失步保护特性

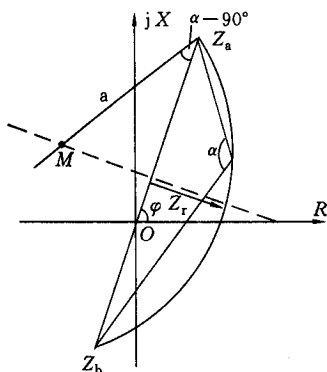


图 28 三元件失步保护特性的整定

低的要求整定。

过励磁倍数 N 为

$$N = \frac{B}{B_n} = \frac{U/U_{gn}}{f/f_{gn}} = \frac{U_*}{f_*} \quad (79)$$

式中： U 、 f ——运行电压及频率；

U_{gn} 、 f_{gn} ——发电机额定电压及频率；

U_* 、 f_* ——电压和频率的标么值；

B 、 B_n ——磁通量及额定磁通量。

定时限过励磁保护的过励磁倍数 N 设二段定值：

低定值部分

$$N_1 = \frac{B}{B_n} = 1.1 \quad (\text{或以电机制造厂数据为准})$$

高定值部分

$$N_2 = \frac{B}{B_n} = 1.3 \quad (\text{或以电机制造厂数据为准})$$

低定值部分带时限动作于信号和降低发电机励磁电流，高定值部分动作于解列灭磁或程序跳闸。

当发电机及变压器间有断路器而分别配置过励磁保护时，其定值按发电机与变压器允许的不同过励磁倍数分别整定。

反时限过励磁保护按发电机、变压器制造厂家提供的反时限过励磁特性曲线(参数)整定。特别注意引进设备时，一次设备的过励磁能力与保护装置的过励磁动作特性不相适应的问题。

4.8.2 发电机频率异常保护

300MW 及以上的汽轮机，运行中允许其频率变化的范围为 48.5~50.5Hz。

低于 48.5Hz 或高于 50.5Hz 时，累计允许运行时间和每次允许的持续运行时间国内尚无正式的统一规定，应综合考虑发电机组和电力系统的要求，并根据制造厂家提供的技术参数确定。大型汽轮发电机组对频率异常运行的要求可参考附录 E。

保护动作于信号，并有累计时间显示。

当频率异常保护需要动作于发电机解列时，其低频段的动作频率和延时应注意与电力系统的低频减负荷装置进行协调。一般情况下，应通过低频减负荷装置减负荷，使系统频率及时恢复，以保证机组的安全；仅在低频减负荷装置动作后频率仍未恢复，从而危及机组安全时才进行机组的解列。因此，要求在电力系统减负荷过程中频率异常保护不应解列发电机，防止出现频率连锁恶化的情况。

4.8.3 发电机逆功率保护

200MW 及以上发电机逆功率运行时，在 P — Q 平面上，如图 29 所示，设反向有功功率的最小值为 $P_{\min} = OA$ 。逆功率继电器的动作特性用一条平行于横轴的直线 1 表示。其动作判据为

$$P \leq -P_{op}$$

式中： P ——发电机有功功率，输出有功功率为正，输入有功功率为负；

P_{op} ——逆功率继电器的动作功率。

a) 动作功率 P_{op} 的计算公式为

$$P_{op} = K_{rel}(P_1 + P_2) \quad (80)$$

式中： K_{rel} ——可靠系数，取 0.5~0.8；

P_1 ——汽轮机在逆功率运行时的最小损耗，一般取额定功率的 2%~4%；

P_2 ——发电机在逆功率运行时的最小损耗，一般取 $P_2 \approx (1-\eta)P_{gn}$ 。

其中： η ——发电机效率；一般取 98.6%~98.7%（分别对应 300MW 及 600MW 机）；

P_g ——发电机额定功率。

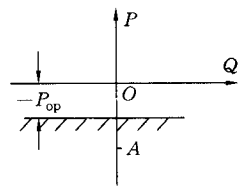


图 29 逆功率继电器动作特性曲线

b) 动作时限。经主汽门触点时, 延时 1.0~1.5s 动作于解列。不经主汽门触点时, 延时 15s 动作于信号。

根据汽轮机允许的逆功率运行时间, 可动作于解列, 一般取 1~3min。

在过负荷、过励磁、失磁等异常运行方式下, 用于程序跳闸的逆功率继电器作为闭锁元件, 其定值一般整定为 $(1\sim3)\%P_{gn}$ 。

对于燃气轮机、柴油发电机也有装设逆功率保护的需要, 目的在于防止未燃尽物质有爆炸和着火的危险。这些发电机组在作电动机状态运行时所需逆功率大小, 粗略地按铭牌 (kW) 值的百分比估计为:

燃气轮机 50%

柴油机 25%

4.8.4 发电机定子过电压保护

定子过电压保护的整定值, 应根据电机制造厂提供的允许过电压能力或定子绕组的绝缘状况决定。

a) 对于 200MW 及以上汽轮发电机

$$U_{op} = \frac{1.3U_{gn}}{n_v} \quad (81)$$

动作时限取 0.5s, 动作于解列灭磁。

b) 对于水轮发电机

$$U_{op} = \frac{1.5U_{gn}}{n_v} \quad (82)$$

动作时限取 0.5s, 动作于解列灭磁。

c) 对于采用可控硅励磁的水轮发电机

$$U_{op} = \frac{1.3U_{gn}}{n_v} \quad (83)$$

动作时限取 0.3s, 动作于解列灭磁。

4.8.5 启停机保护

启停机保护用于反应发电机低转速运行时的定子接地及相间短路故障; 由对频率变化敏感性较差的继电器构成保护装置。

a) 反应接地故障的保护装置, 由装于机端或其中性点零序过电压继电器构成, 不要求滤过三次谐波, 其定值一般取 10V 及以下。外加电源式定子接地保护在启停机过程中仍有效。

b) 反应相间故障的保护装置, 由接于差动回路的电流继电器实现, 其定值按在额定频率下, 大于满负荷运行时差动回路中的不平衡电流整定, 即

$$I_{op} = K_{rel}I_{unb} \quad (84)$$

式中: I_{unb} ——额定频率下, 满负荷运行时差动回路中电流。

K_{rel} ——可靠系数, 取 1.3~1.5。

启停机保护仅作为发电机低频工况下的辅助保护。工频条件下正常运行时, 由断路器的动断触点或低频继电器的输出触点连锁退出; 低频继电器的整定值选取额定频率的 80%~90%。

保护动作于停机。

5 变压器保护的整定计算

5.1 变压器纵差保护

纵差保护是变压器内部故障的主保护, 主要反应变压器油箱内部、套管和引出线的相间和接地短路故障, 以及绕组的匝间短路故障。

5.1.1 对 220~500kV 变压器纵差保护的技术要求

a) 在变压器空载投入或外部短路切除后产生励磁涌流时, 纵差保护不应误动作。

b) 在变压器过励磁时，纵差保护不应误动作。

c) 为提高保护的灵敏度，纵差保护应具有比率制动或标积制动特性。在短路电流小于起始制动电流时，保护装置处于无制动状态，其动作电流很小（小于额定电流），保护具有较高的灵敏度。当外部短路电流增大时，保护的動作电流又自动提高，使其可靠不动作。

d) 在最小运行方式下，纵差保护区内各侧引出线上两相金属性短路时，保护的灵敏系数不应小于 2。

e) 在纵差保护区内发生严重短路故障时，为防止因电流互感器饱和而使纵差保护延迟动作，纵差保护应设差电流速断辅助保护，以快速切除上述故障。

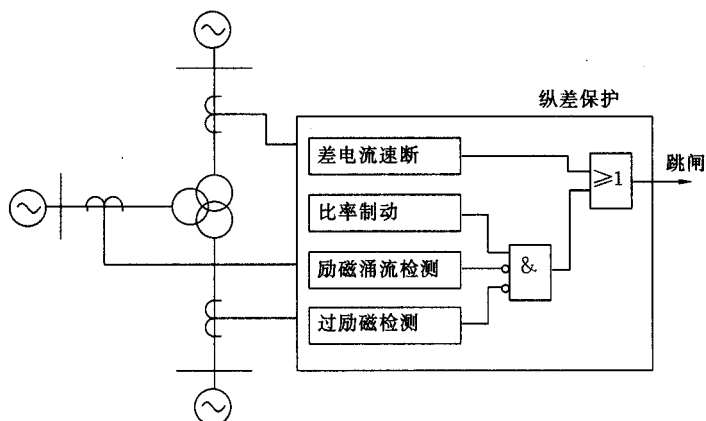


图 30 变压器纵差保护方框图

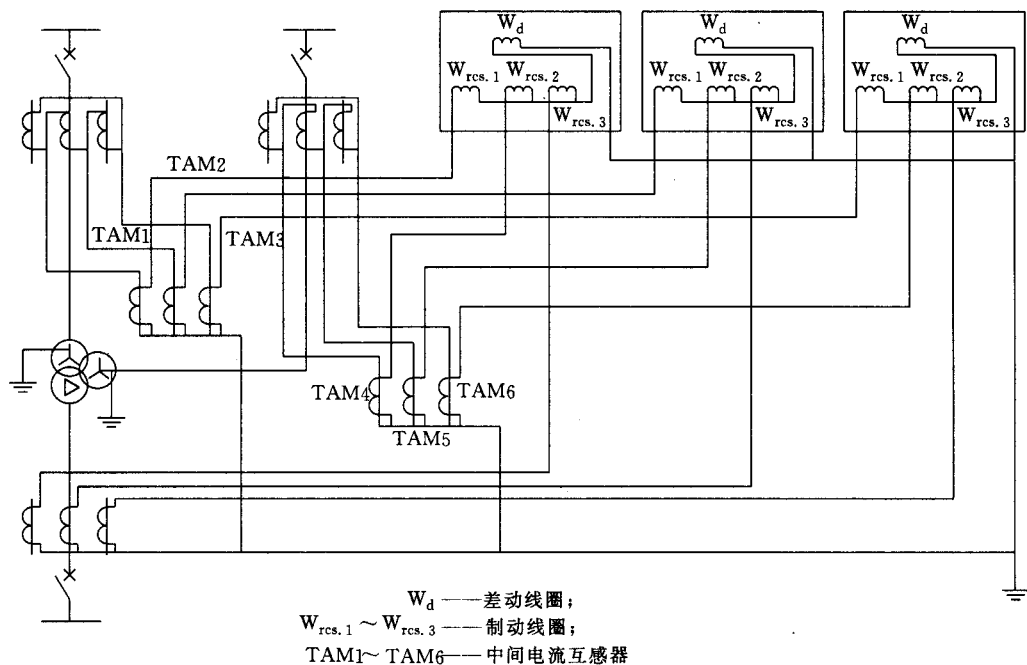


图 31 纵差保护原理接线示例图

变压器纵差保护方框图如图 30 所示，其原理接线示例如图 31 所示。

5.1.2 纵差保护整定计算内容

a) 与纵差保护有关的变压器参数计算，包括变压器的各侧额定电流，电流互感器和中间电流互感器的变比选择等。

b) 短路电流计算。

c) 纵差保护动作特性参数的整定。

d) 纵差保护灵敏系数的校验。

e) 其他辅助验算和经验数据的推荐, 包括谐波制动比 (对谐波制动原理的差动保护) 和闭锁角 (对间断角原理的差动保护) 的推荐。

5.1.3 纵差保护的整定计算

5.1.3.1 变压器参数计算

与纵差保护有关的变压器参数计算, 可按表 2 所列的公式和步骤进行。在表 2 中作了如下假定: 三绕组变压器; 额定容量 S_N ; 绕组接法为 $Y_N, Y_N, d11$; 如低压侧电流互感器的二次电流最小, 则选低压侧为基本侧; 电流互感器二次额定电流为 1A。

表 2 变压器参数计算表 (举例)

序号	名 称	各 侧 参 数		
		高压侧 (H)	中压侧 (M)	低压侧 (L)
1	额定电压 U_N	U_{Nh}	U_{Nm}	U_{NL}
2	额定电流 I_N	$I_{Nh} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{Nh}}$	$I_{Nm} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{Nm}}$	$I_{NL} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{NL}}$
3	各侧接线 ¹⁾	Y_N	Y_N	d11
4	各侧电流互感器二次接线	d	d	Y
5	电流互感器的计算变比 n_c	$n_{ch} = \frac{\sqrt{3} I_{Nh}}{1}$	$n_{cm} = \frac{\sqrt{3} I_{Nm}}{1}$	$n_{cl} = \frac{I_{NL}}{1}$
6	电流互感器实际选用变比 n_s	n_{sh}	n_{sm}	n_{sl}
7	各侧二次电流 i	$i_h = \frac{\sqrt{3} I_{Nh}}{n_{sh}}$	$i_m = \frac{\sqrt{3} I_{Nm}}{n_{sm}}$	$i_L = \frac{I_{NL}}{n_{sl}}$
8	基本侧的选择 ²⁾			✓
9	中间电流互感器的变比 n_m	$n_{mh} = \frac{i_h}{i_L}$	$n_{mm} = \frac{i_m}{i_L}$	

1) 对于通过软件实现电流相位和幅值补偿的微机型保护, 各侧电流互感器二次均可按 Y 接线。
2) 一般可选二次电流较小侧为基本侧。

5.1.3.2 短路电流计算

一般情况下, 为整定变压器纵差保护, 需作两种运行方式下的短路电流计算。一种是在系统最大运行方式下变压器外部短路时, 计算通过变压器纵差保护的最大穿越性短路电流 (通常是三相短路电流), 其目的是为计算差动保护的最大不平衡电流和最大制动电流。另一种是在系统最小运行方式下, 计算纵差保护区内最小短路电流 (两相或单相短路电流), 其目的是为计算差动保护的最小灵敏系数。

计算短路电流所采用的系统最大和最小运行方式, 对于运行整定用的应由系统调度部门提供; 对于设计过程中用于保护选型计算的, 应由系统设计专业提供。

5.1.3.3 纵差保护动作特性参数的计算

带比率制动特性的纵差保护的動作特性, 通常用直角坐标系上的一条折线表示。该坐标系纵轴为保护的動作电流 I_{op} ; 横轴为制动电流 I_{res} , 如图 32 所示。折线 ACD 的左上方为保护的動作区, 折线右下方为保护的制动区。

这一動作特性曲线由纵坐标 OA, 拐点的横坐标 OB, 折线 CD 的斜率 S 三个参数所确定。OA 表示无制动状态下的動作电流, 即保护的最小動作电流 $I_{op, min}$ 。OB 表示起始制动电流 $I_{res, 0}$ 。

動作特性三个参数, 目前在工程实用上有两种整定计

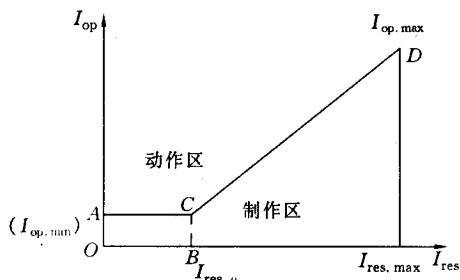


图 32 纵差保护动作特性曲线图

算方法，现分述如下。

a) 第一种整定法：

折线上任一点动作电流 I_{op} 与制动电流 I_{res} 之比 $I_{op}/I_{res}=K_{res}$ 称为纵差保护的制动系数。由图 32 中各参数之间的关系可导出，制动系数 K_{res} 与折线斜率 S 之间的关系如下式所示

$$S = \frac{K_{res} - I_{op, min}/I_{res}}{1 - I_{res, 0}/I_{res}} \quad (85)$$

$$K_{res} = S(1 - I_{res, 0}/I_{res}) + I_{op, min}/I_{res} \quad (86)$$

从图 32 可见，对动作特性具有一个折点的纵差保护，折线的斜率 S 是一个常数，而制动系数 K_{res} 则是随制动电流 I_{res} 而变化的。在实际应用中，是通过保护装置的参数调节整定折线的斜率来满足制动系数的要求。

1) 纵差保护最小动作电流的整定。最小动作电流应大于变压器额定负载时的不平衡电流，即

$$I_{op, min} = K_{rel}(K_{er} + \Delta U + \Delta m)I_N/n_a \quad (87)$$

式中： I_N ——变压器额定电流；

n_a ——电流互感器的变比；

K_{rel} ——可靠系数，取 1.3~1.5；

K_{er} ——电流互感器的比误差，10P 型取 0.03×2 ，5P 型和 TP 型取 0.01×2 ；

ΔU ——变压器调压引起的误差，取调压范围中偏离额定值的最大值（百分值）；

Δm ——由于电流互感器变比未完全匹配产生的误差，初设时取 0.05。

在工程实用整定计算中可选取 $I_{op, min} = (0.2 \sim 0.5) I_N/n_a$ 。一般工程宜采用不小于 $0.3 I_N/n_a$ 的整定值。根据实际情况（现场实测不平衡电流）确有必要时也可大于 $0.5 I_N/n_a$ 。

2) 起始制动电流 $I_{res, 0}$ 的整定。起始制动电流宜取

$$I_{res, 0} = (0.8 \sim 1.0) I_N/n_a。$$

3) 动作特性折线斜率 S 的整定。纵差保护的動作电流应大于外部短路时流过差动回路的不平衡电流。变压器种类不同，不平衡电流计算也有较大差别，下面给出普通双绕组和三绕组变压器差动保护回路最大不平衡电流 $I_{unb, max}$ 计算公式。

双绕组变压器

$$I_{unb, max} = (K_{ap}K_{cc}K_{er} + \Delta U + \Delta m)I_{k, max}/n_a \quad (88)$$

式中： K_{er} ， ΔU ， Δm ， n_a 的含意同式 (87)，但 $K_{er}=0.1$ ；

K_{cc} ——电流互感器的同型系数， $K_{cc}=1.0$ ；

$I_{k, max}$ ——外部短路时，最大穿越短路电流周期分量；

K_{ap} ——非周期分量系数，两侧同为 TP 级电流互感器取 1.0；两侧同为 P 级电流互感器取 1.5~2.0。

三绕组变压器（以低压侧外部短路为例说明之）

$$\begin{aligned} I_{unb, max} = & K_{ap}K_{cc}K_{er}I_{k, max}/n_a + \Delta U_h I_{k, h, max}/n_{a, h} \\ & + \Delta U_m I_{k, m, max}/n_{a, m} + \Delta m_l I_{k, l, max}/n_{a, l} \\ & + \Delta m_l I_{k, l, max}/n_{am} \end{aligned} \quad (89)$$

式中： K_{ap} ， K_{cc} ， K_{er} 含意同式 (88)；

ΔU_h ， ΔU_m ——变压器高、中压侧调压引起的相对误差（对 U_N 而言）取调压范围中偏离额定值的最大值；

$I_{k, max}$ ——低压侧外部短路时，流过靠近故障侧电流互感器的最大短路电流周期分量；

$I_{k, h, max}$ ， $I_{k, m, max}$ ——在所计算的外部短路时，流过高、中压侧电流互感器电流的周期分量；

$I_{k, l, max}$ ， $I_{k, l, max}$ ——在所计算的外部短路时，相应地流过非靠近故障点两侧电流互感器电流的周期分量；

n_a 、 $n_{a.h}$ 、 $n_{a.m}$ ——各侧电流互感器的变比；

Δm_1 、 Δm_2 ——由于电流互感器（包括中间互感器）的变比未完全匹配而产生的误差。

差动保护的動作电流

$$I_{op.max} = K_{rel} I_{unb.max} \quad (90)$$

最大制动系数

$$K_{res.max} = \frac{I_{op.max}}{I_{res.max}} \quad (91)$$

式(91)中最大制动电流 $I_{res.max}$ 的选取，因差动保护制动原理的不同以及制动线圈的接线方式不同而会有很大差别，在实际工程计算时应根据差动保护的工作原理和制动回路的接线方式而定。制动线圈的接线原则是使外部故障时制动电流最大，而内部故障时制动电流最小。当制动线圈数比变压器绕组少，不可能将每侧电流分别接入制动线圈时，可以将几个无源侧电流合并后接入制动线圈，但不应将几个有源侧电流合并接入制动线圈。

根据 $I_{op.min}$ 、 $I_{res.0}$ 、 $I_{res.max}$ 、 $K_{res.max}$ 按式(85)可计算出差动保护动作特性曲线中折线的斜率 S ，当 $I_{res.max} = I_{k.max}$ 时有

$$S = \frac{I_{op.max} - I_{op.min}}{\frac{I_{k.max}}{n_a} - I_{res.0}} \quad (92)$$

b) 第二种整定法：

此法不考虑负荷状态和外部短路时电流互感器误差 K_{er} 的不同，使不平衡电流完全与穿越性电流成正比变化，如图 33 所示，比率制动特性 CD 通过原点，从而制动系数 K_{res} 为常数；当 K_{res} 和 $I_{res.0}$ 确定后， $I_{op.min}$ 随之确定，不必另作计算。此法计算简单，安全可靠，但偏于保守。

1) 按下式计算制动系数 K_{res} ，即

$$K_{res} = K_{rel}(K_{ap}K_{cc}K_{er} + \Delta U + \Delta m) = S$$

式中： K_{rel} 、 K_{ap} 、 K_{cc} 、 K_{er} 、 ΔU 、 Δm 的含意及取值同式(87)但 $K_{er}=0.10$ 。

2) 画一条通过坐标原点斜率为 K_{res} 的直线 OD （见图 33），在横坐标上取 $OB = (0.8 \sim 1.0) I_N/n_a$ ，此即起始制动电流 $I_{res.0}$ 。

3) 在直线 OD 上对应 $I_{res.0}$ 的 C 点纵坐标值 OA 为最小动作电流 $I_{op.min}$ 。

折线 ACD 即为差动保护的動作特性曲线。

上述两种整定方法中，如果 $I_{op.min}$ 和折线 (CD) 斜率 S 的整定不是连续调节的，则 $I_{op.min}$ 和 S 的整定值应取继电器能整定的，并略大于计算值的数值。

5.1.3.4 灵敏系数的计算

纵差保护的灵敏系数应按最小运行方式下差动保护区内变压器引出线上两相金属性短路计算。图 34 为纵差保护灵敏系数计算说明图。根据计算最小短路电流 $I_{k.min}$ 和相应的制动电流 I_{res} ，在動作特性曲线上查得对应的動作电流 I'_{op} ，则灵敏系数为

$$K_{sen} = \frac{I_{k.min}}{I'_{op}} \quad (93)$$

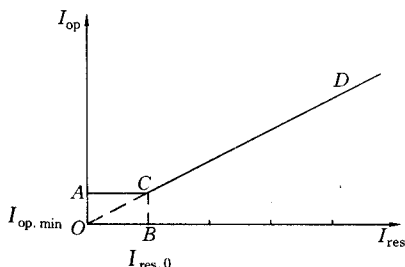


图 33 第一种整定法纵差保护動作特性曲线图

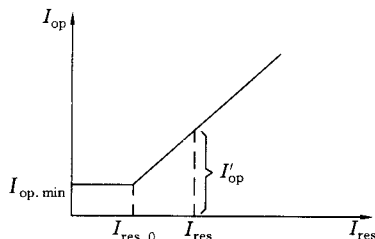


图 34 纵差保护灵敏系数计算说明图

要求 $K_{sen} \geq 2$ 。

5.1.3.5 纵差保护的其他辅助整定计算及经验数据的推荐

a) 差电流速断的整定。对 220~500kV 变压器, 差电流速断是纵差保护中的一个辅助保护。当内部故障电流很大时, 防止由于电流互感器饱和引起纵差保护延迟动作。差电流速断的整定值应按躲过变压器初始励磁涌流或外部短路最大不平衡电流整定, 一般取

$$I_{op} = KI_N/n_a \quad \text{或} \quad I_{op} = K_{rel}I_{unb. max}$$

式中: I_{op} ——差电流速断的动作电流;

I_N ——变压器的额定电流;

K ——倍数, 视变压器容量和系统电抗大小, K 推荐值如下:

6300kVA 及以下 7~12;

6300~31500kVA 4.5~7.0;

40000~120000kVA 3.0~6.0;

120000kVA 及以上 2.0~5.0;

容量越大, 系统电抗越大, K 取值越小。

按正常运行方式保护安装处二相短路计算灵敏系数, $K_{sen} \geq 1.2$ 。

$I_{unb. max}$ 见式 (88) 和式 (89)。

b) 二次谐波制动比的整定。在利用二次谐波制动来防止励磁涌流误动的纵差保护中, 谐波制动回路可以单独整定。整定值可用差电流中的二次谐波分量与基波分量的比值表示, 通常称这一比值为二次谐波制动比。根据经验, 二次谐波制动比可整定为 15%~20%。

3) 涌流间断角的推荐值。按鉴别涌流间断角原理构成的变压器差动保护, 根据运行经验, 闭锁角可取为 60°~70°。有时还采用涌流导数的最小间断角 θ_d 和最大波宽 θ_w , 其闭锁条件为

$$\theta_d \geq 65^\circ; \theta_w \leq 140^\circ$$

5.2 变压器分侧差动保护

分侧差动保护是将变压器的各侧绕组分别作为被保护对象, 在各绕组的两端装设电流互感器, 实现差动保护。这种分侧差动保护, 如同发电机定子绕组差动保护一样, 无须考虑绕组的励磁涌流、过励磁、调压等的影响。两侧电流互感器取相同变比并按星形接线。分侧差动保护接线简单、可靠, 对相间和单相短路灵敏度高, 但对匝间短路无保护作用。

5.2.1 分侧差动保护的整定计算

分侧差动保护应由比率制动式或标积制动式差动继电器构成, 其动作特性曲线为折线型, 整定计算原则同发电机纵差保护。

a) 最小动作电流 $I_{op. min}$ 的计算

$$I_{op. min} = K_{rel}I_{unb. 0} \quad \text{或} \quad I_{op. min} = K_{rel} \times 2 \times 0.03I_N/n_a \quad (94)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数, 取 1.5;

$I_{unb. 0}$ ——在变压器额定电流下, 差动回路中的不平衡电流实测值。

可取 $I_{op. min} = (0.1 \sim 0.3) I_N/n_a$, 一般宜取 $(0.1 \sim 0.2) I_N/n_a$, I_N 为变压器额定电流。

b) 起始制动电流 $I_{res. 0}$ 的整定

$$I_{res. 0} = (0.8 \sim 1.0) I_N/n_a \quad (95)$$

c) 动作特性折线斜率 S 的整定。首先计算最大制动系数 $K_{res. max}$, 即

$$K_{res. max} = K_{rel}K_{ap}K_{er}K_{cc} \quad (96)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数, 取 1.5;

K_{ap} ——非周期分量系数, TP 级电流互感器取 1.0, P 级电流互感器取 1.5~2.0;

K_{cc} ——同型系数, 取 0.5;

K_{er} ——电流互感器比误差, 取 0.1。

按式 (85) 或 (92) 计算 S 值。

可选用 $S=0.2\sim0.3$ 。

d) 灵敏系数计算。按最小运行方式下变压器绕组引出端两相金属性短路, 灵敏系数 $K_{\text{sen}} \geq 2$ 校验, 即

$$K_{\text{sen}} = \frac{I_{k.\min}}{I'_{\text{op}} n_a} \quad (97)$$

式中: $I_{k.\min}$ ——最小运行方式下, 绕组引出端二相金属性短路的短路电流值;

I'_{op} ——根据 $I_{k.\min}$ 在动作特性曲线上查得的动作电流。

5.3 变压器零序差动保护

220~500kV 变压器, 单相接地短路是主要故障型式之一。特别是单相变压器组, 变压器油箱内部相间短路不可能发生。变压器零序差动保护就是保护变压器单相接地短路而设置的。

零序差动保护各侧采用变比相同的电流互感器, 采用比率制动式或标积制动式差动继电器或差电流继电器。主要有两种接线方式, 图 35 (a) 为 Y_N, d 接线普通变压器零序差动保护, 图 35 (b) 为自耦变压器零序差动保护。

5.3.1 零序差动保护的整定计算

当采用比率制动型差动保护时, 其整定计算方法参见 5.1.3, 但诸公式中的 $\Delta U=0$ 。当采用不带比率制动特性的普通差电流保护时整定计算方法如下。

a) 按躲过外部单相接地短路时的不平衡电流整定

$$I_{\text{op}.0} = K_{\text{rel}} (K_{\text{ap}} K_{\text{cc}} K_{\text{er}} + \Delta m) 3I_{0.\max} / n_a \quad (98)$$

式中: $I_{\text{op}.0}$ ——零序差动保护动作电流;

K_{rel} ——可靠系数, 取 1.3~1.5;

K_{ap} ——非周期分量系数, TP 级电流互感器取 1.0, P 级电流互感器取 1.5~2;

K_{cc} ——电流互感器同型系数, 互感器同型时取 0.5, 不同型时取 1.0;

K_{er} ——电流互感器的比误差, 取 0.1;

Δm ——由于电流互感器 (包括中间电流互感器) 变比未完全匹配而产生的误差, 初设时取 0.05;

$3I_{0.\max}$ ——保护区外部最大单相或两相接地短路零序电流的三倍。

b) 按躲过外部三相短路时不平衡电流整定

$$I_{\text{op}.0} = K_{\text{rel}} K_{\text{ap}} K_{\text{cc}} K_{\text{er}} \times I_{k.\max} / n_a \quad (99)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数, 取 1.3~1.5;

K_{ap} ——非周期分量系数, TP 级电流互感器取 1.0, P 级电流互感器取 1.5~2;

K_{cc} ——电流互感器同型系数, 互感器同型时取 0.5, 不同型时取 1.0;

K_{er} ——电流互感器的比误差, 取 0.1;

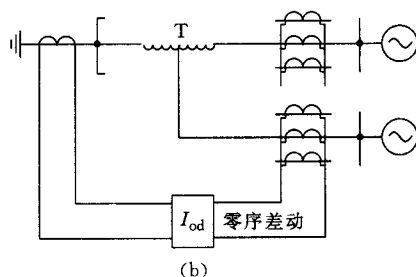
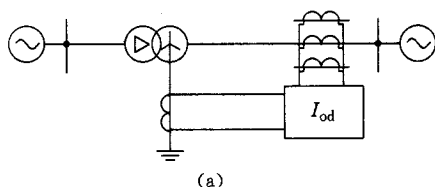
$I_{k.\max}$ ——外部最大三相短路电流。

c) 按躲过励磁涌流产生的零序不平衡电流整定。无论普通变压器或自耦变压器, 一次侧励磁涌流对零序差动保护而言都是穿越性电流, 但考虑互感器的非线性, 不可避免会在零序差动回路中产生不平衡电流。根据经验, 为躲过励磁涌流产生的不平衡电流, 零序差动保护整定值的参考值为

$$I_{\text{op}.0} = (0.3 \sim 0.4) I_N / n_a \quad (100)$$

取 (98) ~ (100) 三式中最大值作为 $I_{\text{op}.0}$ 的整定值。

d) 灵敏系数校验。按零序差动保护区内发生金属性接地短路校验灵敏系数, 要求不小于 2。在大电流接地系统中, 单



(a) Y_N, d 接线普通变压器零序差动保护;

(b) 自耦变压器零序差动保护

图 35 零序差动保护接线

相接地短路电流的大小主要取决于系统接线和中性点接地的变压器台数。在 220kV 电力系统，为保证系统中零序保护的灵敏度，正常运行情况下通过改变变压器中性点接地的台数和布局，使系统的单相接地短路电流水平维持在基本不变的情况。因此，在 220kV 系统校验零序差动保护灵敏系数所采用的系统运行方式，应为正常运行方式。500kV 系统变压器中性点直接接地或经小电抗接地，校验灵敏系数采用系统的最小运行方式。

5.4 变压器瓦斯保护

瓦斯保护是反应变压器油箱内各种故障的主保护。当油箱内故障产生轻微瓦斯或油面下降时，瓦斯保护应瞬时动作于信号；当产生大量瓦斯时，应瞬时动作于断开变压器各侧断路器。

瓦斯保护动作于信号的轻瓦斯部分，通常按产生气体的容积整定。对于容量 10MVA 以上的变压器，整定容积为 250~300ml。

瓦斯保护动作于跳闸的重瓦斯部分，通常按通过气体继电器的油流流速整定。流速的整定与变压器的容量、接气体继电器的导管直径、变压器冷却方式、气体继电器的型式等有关。表 3 为动作于跳闸的瓦斯保护油流流速整定表。

表 3 瓦斯保护油流动作流速整定表

变压器容量 kVA	气体继电器型式	连接导管内径 mm	冷却方式	动作流速整定值 m/s
1000 及以下	QJ-50	φ50	自冷或风冷	0.7~0.8
7000~7500	QJ-50	φ50	自冷或风冷	0.8~1.0
7500~10000	QJ-80	φ80	自冷或风冷	0.7~0.8
10000 以上	QJ-80	φ80	自冷或风冷	0.8~1.0
200000 以下	QJ-80	φ80	强迫油循环	1.0~1.2
200000 及以上	QJ-80	φ80	强迫油循环	1.2~1.3
500kV 变压器	QJ-80	φ80	强迫油循环	1.3~1.4
有载调压开关	QJ-25	φ25		1.0

5.5 变压器相间短路后备保护

5.5.1 过电流保护

过电流保护主要用于降压变压器，作为防御外部相间短路引起的变压器过电流和变压器内部相间短路后备保护。

a) 过电流保护的動作电流计算。为了保证选择性，过电流保护的動作电流应能躲过可能流过变压器的最大负荷电流，即

$$I_{op} = \frac{K_{rel}}{K_r n_a} I_{L.max} \quad (101)$$

式中： K_{rel} ——可靠系数，取 1.2~1.3；

K_r ——返回系数，取 0.85~0.95；

$I_{L.max}$ ——最大负荷电流。

最大负荷电流 $I_{L.max}$ 可按以下情况考虑并取其最大者：

1) 对并列运行的变压器，应考虑切除一台时，余下变压器所产生的过负荷电流，当各台变压器容量相等时，可按下式计算

$$I_{L.max} = \frac{m}{m-1} I_N \quad (102)$$

式中： m ——并联运行变压器的最少台数；

I_N ——每台变压器的额定电流。

当并联运行的变压器容量不等时，应考虑容量最大的一台变压器断开后引起的过负荷。

2) 当降压变压器低压侧接有大量异步电动机时，应考虑电动机的自启动电流，即

$$I_{L.max} = K_{ss} I'_{L.max} \quad (103)$$

式中: $I_{L.\max}$ ——正常运行时最大负荷电流;

K_{ss} ——电动机自起动系数, 其值与负荷的性质及与电源间的电气距离有关, 取 1.5~2; 特殊情况, 如接有大型电动机负荷的变压器, 应视具体情况而定。

3) 对两台分列运行的降压变压器, 在负荷侧母线分段断路器上装有备用电源自动投入装置时, 应考虑备用电源自动投入后负荷电流的增加。

$$I_{L.\max} = I_{1L.\max} + K_{ss}K_{rem}I_{1L.\max} \quad (104)$$

式中: $I_{1L.\max}$ ——所在母线段正常运行时的最大负荷电流;

$I_{1L.\max}$ ——另一母线段正常运行时的最大负荷电流;

K_{rem} ——剩余系数, 母线停电后切除不重要负荷, 保留下来的负荷与原负荷之比。

4) 与下一级过电流保护相配合, 则

$$I_{L.\max} = 1.1I'_{op} + I_{m.L.\max} \quad (105)$$

式中: I'_{op} ——分段断路器或与之相配合的馈线过电流保护的動作电流;

$I_{m.L.\max}$ ——本变压器所在母线段的正常运行最大负荷电流。

b) 灵敏系数校验。保护的灵敏系数可按下式校验

$$K_{sen} = \frac{I_{k.min}^{(2)}}{I_{op}n_a} \quad (106)$$

式中: $I_{k.min}^{(2)}$ ——后备保护区末端两相金属性短路时流过保护的最小短路电流。

要求 $K_{sen} \geq 1.3$ (近后备) 或 1.2 (远后备)。

5.5.2 低电压启动的过电流保护

对升压变压器或容量较大的降压变压器, 当过电流保护的灵敏度不够时, 可采用低电压启动的过电流保护。

a) 电流继电器的整定计算。电流继电器的動作电流应按躲过变压器的额定电流整定

$$I_{op} = \frac{K_{rel}}{K_r n_a} I_N \quad (107)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数, 取 1.2;

K_r ——返回系数, 取 0.85~0.95;

I_N ——变压器的额定电流。

b) 低电压启动元件的動作电压整定计算。低电压启动元件的整定应考虑以下情况:

1) 按躲过正常运行时可能出现的最低电压整定

$$U_{op} = \frac{U_{min}}{K_{rel} K_r n_v} \quad (108)$$

式中: U_{min} ——正常运行时可能出现的最低电压, 一般取 $U_{min} = 0.9U_N$ (U_N 为额定相电压或线电压);

K_{rel} ——可靠系数, 取 1.1~1.2;

K_r ——返回系数, 取 1.05~1.25;

n_v ——电压互感器变比。

2) 按躲过电动机自启动时的电压整定:

当低电压继电器由变压器低压侧电压互感器供电时

$$U_{op} = (0.5 \sim 0.6)U_N/n_v \quad (109)$$

当低电压继电器由变压器高压侧电压互感器供电时

$$U_{op} = 0.7U_N/n_v \quad (110)$$

c) 灵敏系数校验。电流继电器的灵敏系数校验与不带低电压闭锁的过电流保护相同。

低电压继电器的灵敏系数按下式校验

$$K_{sen} = \frac{U_{op}}{U_{r.\max}/n_v} \quad (111)$$

式中: $U_{r.\max}$ ——计算运行方式下, 灵敏系数校验点发生金属性相间短路时, 保护安装处的最高残压。

要求 $K_{\text{sen}} \geq 1.3$ (近后备) 或 1.2 (远后备)。

在校验电流继电器和低电压继电器的灵敏系数时, 应分别采用各自的不利正常系统运行方式和不利的短路类型。当低电压继电器灵敏系数不够时, 可在变压器各侧装设低电压继电器。

5.5.3 复合电压启动的过电流保护

复合电压启动的过电流保护宜用于升压变压器、系统联络变压器和过电流保护不能满足灵敏度要求的降压变压器。

a) 电流继电器的整定计算。电流继电器的动作电流应按躲过变压器的额定电流整定, 计算公式同式 (107)。

b) 接在相间电压上的低电压继电器动作电压整定计算。该低电压继电器应按躲过电动机自启动条件整定, 按式 (109) 或式 (110) 计算。对发电厂中的升压变压器, 当低电压继电器由发电机侧电压互感器供电时, 还应考虑躲过发电机失磁运行时出现的低电压, 取

$$U_{\text{op}} = (0.5 \sim 0.6) U_N / n_v \quad (112)$$

c) 负序电压继电器的动作电压整定计算。负序电压继电器应按躲过正常运行时出现的不平衡电压整定, 不平衡电压值可通过实测确定, 当无实测值时, 根据现行规程的规定取

$$U_{\text{op.2}} = (0.06 \sim 0.08) U_N / n_v \quad (113)$$

式中: U_N ——额定相间电压。

d) 灵敏系数校验。电流继电器的灵敏系数校验同式 (106); 接相间电压的低电压继电器的灵敏系数校验同式 (111)。

负序电压继电器的灵敏系数按下式计算

$$K_{\text{sen}} = \frac{U_{k.2.\min}}{U_{\text{op.2}} \times n_v} \quad (114)$$

式中: $U_{k.2.\min}$ ——后备保护区末端两相金属性短路时, 保护安装处的最小负序电压值。

要求 $K_{\text{sen}} \geq 2.0$ (近后备) 或 1.5 (远后备)。

5.5.4 负序过电流和单相式低电压启动过电流保护。

此保护由负序过电流继电器和单相式低电压启动过电流保护构成。由负序电流继电器反应两相短路, 由单相式低电压启动过电流保护反应三相短路。此保护通常用于 63MVA 及以上升压变压器。

a) 负序电流继电器动作电流的整定计算。由于负序过电流保护的整定计算较为复杂, 在实际工程中可以粗略选取 $I_{\text{op.2}} = (0.5 \sim 0.6) I_N / n_a$ 。如灵敏度不能满足要求时, 再作以下详细的灵敏度配合计算, 以降低负序电流保护的整定值。

负序电流继电器的整定应考虑以下条件:

1) 躲过变压器最大负荷电流时, 伴随系统频率变化, 负序滤波器输出的不平衡电流。根据电力系统允许的频率偏差, 这一不平衡电流一般不会超过变压器额定电流的 20%。

2) 当相间后备保护按远后备原则配置时, 应躲过被保护变压器所连接的线路发生一相断线时, 流过保护安装处的负序电流, 并与线路零序过电流保护的后备段在灵敏度上相配合, 防止负序过电流保护非选择性动作。

$$I_{\text{op.2}} = K_{\text{rel}} K_{\text{br.2}} \frac{I_L / n_a}{1 + \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}} + \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{0\Sigma}}} \quad (115)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数, 取 1.2;

$K_{\text{br.2}}$ ——负序电流分支系数, 其值等于流过保护安装处的负序电流与流过断线处的负序电流之比;

$Z_{1\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 、 $Z_{0\Sigma}$ ——由断线处看到的正序、负序、零序综合阻抗;

I_L ——断线前流过断线线路的最大负荷电流。

灵敏度与线路零序过电流保护的后备段相配合时,可按下式整定

$$I_{op.2} = K_{rel} K_{br.2} \cdot \frac{I_{l.op.0}}{3} \cdot \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}} \quad (116)$$

式中: K_{rel} 、 $K_{br.2}$ 、 $Z_{0\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 的含意同式(115);

$I_{l.op.0}$ ——断线线路零序过电流保护后备段的动作电流。

3) 灵敏度与被保护变压器相邻线路的接地后备保护相配合时,考虑单相接地短路与两相接地短路情况。

对于单相接地短路

$$I_{op.2} = K_{rel} \frac{K_{br.2}}{K_{br.0}} \cdot \frac{I_{l.op.0}}{3} \quad (117)$$

对于两相接地短路

$$I_{op.2} = K_{rel} \frac{K_{br.2}}{K_{br.0}} \cdot \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}} \cdot \frac{I_{l.op.0}}{3} \quad (118)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数,取 1.1~1.3;

$K_{br.2}$ ——负序电流分支系数;

$K_{br.0}$ ——零序电流分支系数;

$I_{l.op.0}$ ——线路零序保护后备段动作电流。

b) 负序过电流保护的灵敏系数校验

$$K_{sen} = \frac{I_{k.2.min}}{I_{op.2} n_a} \quad (119)$$

式中: $I_{k.2.min}$ ——在最小运行方式下,后备保护区末端不对称相间短路时,流经保护处的负序电流。

要求 $K_{sen} \geq 2.0$ (近后备) 或 1.5 (远后备)。

c) 单相式低电压启动过电流保护整定计算。单相式低电压启动过电流保护中的电流继电器可按式(107)整定;电压继电器可按式(108)整定。校验灵敏系数时,应按后备保护末端三相金属性短路校验。

5.5.5 相间故障后备保护方向元件的整定

a) 三侧有电源的三绕组升压变压器,相间故障后备保护为了满足选择性要求,在高压侧或中压侧要加功率方向元件,其方向通常指向该侧母线。

b) 高压及中压侧有电源或三侧均有电源的三绕组降压变压器和联络变压器,相间故障后备保护为了满足选择性要求,在高压或中压侧要加功率方向元件,其方向通常指向变压器,也可指向本侧母线。

5.5.6 相间故障后备保护动作时间的整定

a) 单侧电源的双绕组降压变压器,相间故障后备保护通常设一段时限,其值大于与之配合的保护动作时间一个时间阶段(Δt)断开变压器两侧断路器。当负荷侧无专用母线保护,且分段断路器装有备用电源自动投入装置时,相间故障后备保护可设两段时限。以第一段时限 t_1 断开分段断路器;以 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 断开变压器两侧断路器。

b) 单侧电源的三绕组降压变压器,相间故障后备保护一般在低压侧和电源侧。低压侧保护可设两段时限,以 $t_1 = t_0 + \Delta t$ 断开低压母线分段断路器(t_0 为与之配合的馈线保护动作时间);以 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 断开变压器低压侧断路器。

电源侧相间故障后备保护应设两段时限,以第一段时限 $t_3 = t_{01m} + \Delta t$ 断开中压侧断路器(t_{01m} 为与之配合的中压侧保护的動作时间);以第二段时限 $t_4 = t_3 + \Delta t$ 断开变压器各侧断路器。

c) 高压及中压侧均有电源的三绕组降压变压器,若只有一台变压器且高压侧为主电源侧,当相间后备保护设在高压及低压侧时,低压侧保护只带一个时限 $t_1 = t_0 + \Delta t$,断开本侧断路器。高压侧保护设带方向和不带方向两部分,带方向的指向变压器并以 $t_2 = t_{01m} + \Delta t$ 断开中压侧断路器;不带方向的以 $t_3 = t_2 + \Delta t$ 断开变压器各侧断路器。

当两台高压及中压侧均有电源的三绕组降压变压器并联运行且低压母线分段断路器断开时,可在三

侧装设相间故障后备保护。低压侧保护带两段时限,以 $t_1=t_0+\Delta t$ 断开低压侧断路器;以 $t_2=t_1+\Delta t$ 断开三侧断路器。方向指向变压器的中压侧方向保护以 $t_{1m}=t_{01h}+\Delta t$ 断开高压侧断路器(t_{01h} 为与之配合的高压侧馈线相间故障保护动作时间);以 $t_{2m}=t_{1m}+\Delta t$ 断开各侧断路器;高压侧带方向的保护(方向指向变压器)以 $t_{1h}=t_{01m}+\Delta t$ 断开中压侧分段断路器;以 $t_{2h}=t_{1h}+\Delta t$ 断开变压器中压侧断路器。高压和中压侧不带方向保护的動作时间应大于各侧带方向保护的動作时间,按选择性要求断开变压器各侧断路器。

d) 双绕组升压变压器,相间故障后备保护装在变压器的低压侧。设一段时限 $t_1=t_0+\Delta t$ (t_0 为与之配合的保护動作时间) 断开变压器的两侧断路器。

e) 中压侧无电源的三绕组升压变压器,相间故障后备保护装于低压侧和中压侧。中压侧保护只作为该侧母线及线路的相间故障后备保护,以 $t_1=t_0+\Delta t$ (t_0 为与之配合的线路保护的動作时间) 断开本侧断路器。低压侧保护作为变压器内部和高压侧外部相间故障后备保护。设两段时限,以 $t_2=t_{01h}+\Delta t$ 断开高压侧断路器(t_{01h} 为与之配合的高压侧保护動作时间);以 $t_3=t_2+\Delta t$ 断开变压器各侧断路器。

f) 三侧均有电源的三绕组升压变压器,相间故障后备保护装于低压侧及高压侧部分的方向指向本侧母线,以 $t_1=t_0+\Delta t$ (t_0 为与之配合的线路保护動作时间) 断开本侧断路器;不带方向部分以 $t_2=t_1+\Delta t$ 断开中压侧(或高压侧)断路器。低压侧保护以 $t_3=t_2+\Delta t$ 断开变压器各侧断路器。

5.5.7 低阻抗保护

当电流、电压保护不能满足灵敏度要求或根据网络保护间配合的要求,变压器的相间故障后备保护可采用阻抗保护。阻抗保护通常用于 330~500kV 大型升压变压器、联络变压器及降压变压器,作为变压器引线、母线、相邻线路相间故障后备保护。根据阻抗保护的配置及阻抗继电器特性的不同,可分别按以下几种情况进行整定计算。

a) 升压变压器低压侧全阻抗继电器的整定计算。

1) 按高压母线短路满足灵敏度要求的条件计算

$$Z_{op} = K_{sen} Z_t \quad (120)$$

式中: K_{sen} ——阻抗保护的灵敏系数,取 1.3;

Z_t ——变压器阻抗。

2) 按与之配合的高压侧引出线路距离保护段配合

$$Z_{op} = 0.7 Z_t + 0.8 K_{inf} Z \quad (121)$$

式中: K_{inf} ——助增系数,取各种运行方式下的最小值;

Z ——与之配合的高压侧引出线路距离保护段動作阻抗。

3) 灵敏系数校验。按高压母线三相短路校验

$$K_{sen} = \frac{Z_{op}}{Z_t} \quad (122)$$

要求 $K_{sen} \geq 1.3$ 。

b) 升压变压器 220~500kV 侧全阻抗继电器的整定计算。

1) 阻抗继电器的動作阻抗计算。在 220~500kV 变压器高压侧装设全阻抗继电器时,阻抗继电器的動作值与母线上与之配合的引出线阻抗保护段相配合,其值按下式计算

$$Z_{op} = K_{rel} K_{inf} Z \quad (123)$$

式中: K_{inf} , Z 同式 (121);

K_{rel} ——可靠系数,取 0.8。

2) 灵敏系数校验。按指定的保护区末端相间短路校验灵敏系数,如下式

$$K_{sen} = \frac{Z_{op}}{Z} \quad (124)$$

式中: Z ——与指定保护区对应的阻抗值。

要求 $K_{sen} \geq 1.3$ 。

c) 联络及降压变压器 220~500kV 侧, 装设带偏移特性的方向阻抗继电器, 正方向指向变压器时, 正方向阻抗动作值可按式 (120) 或式 (121) 计算。反向阻抗为正向阻抗的 5%~10%, 反向阻抗的整定值应小于本侧母线引出线最短线路阻抗保护 I 段的动作值。

d) 联络及降压变压器 220~500kV 侧, 装设带偏移特性的方向阻抗继电器, 正方向指向线路时, 正方向阻抗动作值可按式 (123) 计算。反向阻抗为正向阻抗的 5%~10%, 保护到变压器本侧的引线, 但不能作为变压器的相间故障后备保护。

e) 阻抗保护的動作時間整定。

1) 升压变压器低压侧阻抗保护设两段时限, 第一段大于与之配合的保护动作时间一个 Δt , $t_1 = t_0 + \Delta t$ (t_0 为与之配合保护动作时间) 动作于母线解列; 第二段以 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 动作于发电机解列灭磁。

2) 变压器高压侧阻抗保护带两段时限, 第一段时限 $t_1 = t_0 + \Delta t$, 当方向指向变压器时动作于断开中压或低压断路器, 当方向指向线路时断开本侧断路器。第二段时限 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 动作于断开变压器各侧断路器。

3) 当阻抗保护未装设振荡闭锁装置时, 上述各段动作时间均应保证在振荡过程中不误动作, 最小选用 1.5s 延时。

5.5.8 阻抗保护启动元件的整定

启动元件采用增量电流 ΔI , 其定值可取为 $(0.1 \sim 0.2) I_n / n_a$ 。

启动元件应按保护区末端非对称故障有足够灵敏度整定, 并保证在保护区末端发生三相短路时可靠启动, 其灵敏系数具体要求如下:

- 负序电流突变量启动元件在保护区末端发生两相金属性短路时, 灵敏系数大于 4。
- 相电流突变量启动元件在保护区末端发生各类金属性短路故障时, 灵敏系数大于 2。

5.6 变压器接地故障后备保护

变压器装设接地故障后备保护作为变压器绕组、引线、相邻元件接地故障的后备保护。变压器接地保护方式及其整定值的计算与变压器的型式、中性点接地方式及所连接系统的中性点接地方式密切相关。变压器接地保护要与线路的接地保护在灵敏度和动作时间上相配合。

5.6.1 中性点直接接地的普通变压器接地保护

中性点直接接地的普通变压器接地保护可由两段式零序过电流保护构成, 零序过电流继电器接在变压器接地中性点回路电流互感器二次侧, 其接线如图 36 所示。也可接在由三相套管式电流互感器构成的零序电流回路中。

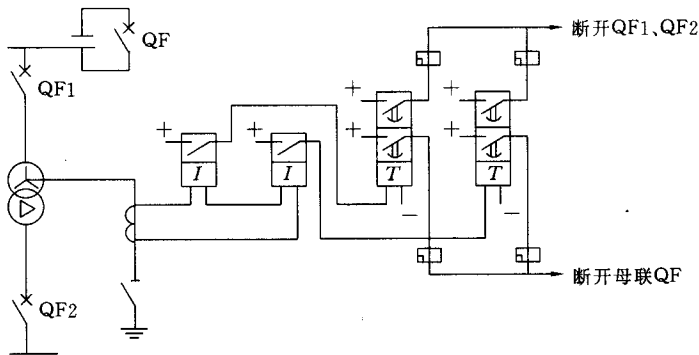


图 36 中性点直接接地变压器的接地保护原理图

对于高中压侧均直接接地的三绕组普通变压器, 高中压侧均应装设零序方向过电流保护, 方向指向本侧母线。

5.6.1.1 零序电流继电器的整定

- I 段零序过电流继电器的动作电流应与相邻线路零序过电流保护第 I 段或第 II 段或快速主保护相

配合。

$$I_{\text{op.0.I}} = K_{\text{rel}} K_{\text{br.I}} I_{\text{op.0.II}} \quad (125)$$

式中: $I_{\text{op.0.I}}$ —— I 段零序过电流保护动作电流;

$K_{\text{br.I}}$ —— 零序电流分支系数, 其值等于线路零序过电流保护 I 段保护区末端发生接地短路时, 流过本保护的零序电流与流过线路的零序电流之比, 取各种运行方式的最大值;

K_{rel} —— 可靠系数, 取 1.1;

$I_{\text{op.0.II}}$ —— 与之相配合的线路保护相关段动作电流。

110kV 及 220kV 变压器 I 段零序过电流保护以 $t_1 = t_0 + \Delta t$ (t_0 为线路保护配合段的动作时间) 断开母联或分段断路器; 以按系统配合要求整定的延时 t_2 断开变压器各侧断路器。330kV 及 500kV 变压器高压侧 I 段零序过电流保护只设一个时限, 即 $t_1 = t_0 + \Delta t$, 断开变压器本侧断路器。

b) II 段零序过电流继电器的动作电流应与相邻线路零序过电流保护的后备段相配合。

$$I_{\text{op.0.I}} = K_{\text{rel}} K_{\text{br.I}} I_{\text{op.0.II}} \quad (126)$$

式中: $I_{\text{op.0.I}}$ —— II 段零序过电流保护动作电流;

K_{rel} —— 可靠系数, 取 1.1;

$K_{\text{br.I}}$ —— 零序电流分支系数, 线路零序过电流保护后备段保护范围末端发生接地故障, 流过本保护的零序电流与流过线路的零序电流之比, 取各种运行方式的最大值;

$I_{\text{op.0.II}}$ —— 与之配合的线路零序过电流保护后备段的动作电流。

110kV 及 220kV 变压器 II 段零序过电流保护以 $t_3 = t_{1\text{max}} + \Delta t$ 断开母联或分段或本侧断路器, $t_{1\text{max}}$ 为线路零序过电流保护后备段或接地距离保护后备段的动作时间; 以 $t_4 = t_3 + \Delta t$ 断开变压器各侧断路器。330kV 及 500kV 变压器高压侧 II 段零序过电流保护只设一个时限, 即 $t_3 = t_{1\text{max}} + \Delta t$ 断开变压器各侧断路器。

II 段零序过电流保护必须满足母线接地故障 $K_{\text{sen}} \geq 1.5$ 的要求, 为此动作电流可不与线路接地距离后备段的动作阻抗相配合, 但在时间上必须互相配合。

5.6.1.2 灵敏系数校验

$$K_{\text{sen}} = \frac{3I_{\text{k.0.min}}}{I_{\text{op.0}} n_a} \quad (127)$$

式中: $I_{\text{k.0.min}}$ —— I 段 (或 II 段) 对端母线接地短路时流过保护安装处的最小零序电流;

$I_{\text{op.0}}$ —— I 段 (或 II 段) 零序过电流保护的動作电流。

要求 $K_{\text{sen}} \geq 1.5$ 。

5.6.2 中性点可能接地或不接地运行变压器的接地保护

对中性点可能接地或不接地运行的变压器, 应配置两种接地保护。一种接地保护用于变压器中性点接地运行状态, 通常采用二段式零序过流保护, 其整定值及灵敏系数计算与 5.6.1 所述完全相同。另一种接地保护用于变压器中性点不接地运行状态, 这种保护的配置、整定值计算、动作时间等与变压器的中性点绝缘水平、过电压保护方式以及并联运行的变压器台数有关, 分述如下。

a) 中性点全绝缘变压器。这种变压器的接地保护, 除了两段零序过电流保护外, 还应增设零序过电压保护, 用于变压器中性点不接地时, 所连接的系统发生单相接地故障同时又失去接地中性点的情况。发生此种故障对中性点直接接地系统的电气设备绝缘将构成威胁。因此, 靠零序过电压保护切除。其接线如图 37 所示。

过电压保护动作值按下式整定

$$U_{0.\text{max}} < U_{\text{op.0}} \leq U_{\text{sat}} \quad (128)$$

式中 $U_{\text{op.0}}$ —— 零序过电压保护动作值;

$U_{0.\text{max}}$ —— 在部分中性点接地的电网中发生单相接地时, 保护安装处可能出现的最大零序电压;

U_{sat} —— 用于中性点直接接地系统的电压互感器, 在失去接地中性点时发生单相接地, 开口三角绕组可能出现的最低电压。

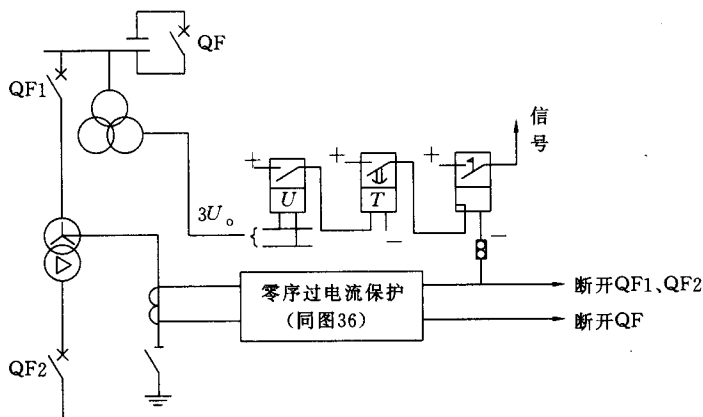


图 37 中性点可能接地或不接地变压器
(全绝缘) 的接地保护原理图

考虑到中性点直接接地系统 $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma} \leq 3$, 建议

$$U_{op.0} = 180V \quad (\text{高压系统电压互感器开口三角绕组每相额定电压 } 100V) \quad (129)$$

在电网发生单相接地, 中性点接地的变压器已全部断开的情况下, 零序过电压保护不需再与其他接地保护相配合, 故其动作时间只需躲过暂态过电压的时间, 取 0.3s。

b) 分级绝缘且中性点装放电间隙的变压器。此类变压器除了装设两段零序过电流保护用于变压器中性点直接接地运行情况以外, 还应增设反应零序电压和间隙放电电流的零序电压电流保护, 作为变压器中性点经放电间隙接地时的接地保护。其接线见图 38。

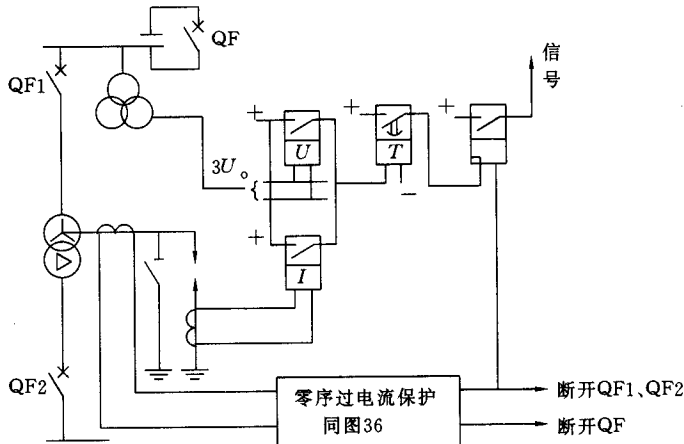


图 38 中性点经放电间隙接地的分级绝缘
变压器接地保护原理图

装在中性点直接接地回路的两段零序过电流保护的整定计算及灵敏系数校验与 5.6.1 所述相同。

装在放电间隙回路的零序过电流保护的動作电流与变压器的零序阻抗、间隙放电的电弧电阻等因素有关, 难以准确计算。根据经验, 保护的一次動作电流可取 100A。

零序过电压继电器的整定同式 (128) 和式 (129)。

用于中性点经放电间隙接地的零序电流、零序电压保护动作后经一较短延时 (躲过暂态过电压时间) 断开变压器各侧断路器, 这一延时可取为 0.3s。

c) 分级绝缘且中性点不装放电间隙的变压器。此类变压器装设两段零序过电流保护用于中性点直接接地运行情况。电流继电器的動作电流整定及灵敏系数的校验同 5.6.1 所述情况。

当有两组以上变压器并联运行时, 零序电流电压保护先切除中性点不接地的变压器, 后切除中性点直接接地的变压器。此方案不再推荐使用。

5.6.3 自耦变压器的接地保护

自耦变压器高、中压侧间有电的联系, 有共同的接地中性点, 并直接接地。当系统发生单相接地短路时, 零序电流可在高、中压电网间流动, 而流经接地中性点的零序电流数值及相位, 随系统的运行方式不同会有较大变化。故自耦变压器的零序过电流保护应分别在高压及中压侧配置, 并接在由本侧电流互感器组成的零序电流滤过器上。自耦变压器中性点回路装设的一段式零序过电流保护, 只在高压或中压侧断开、内部发生单相接地短路、未断开侧零序过电流保护的灵敏度不够时才用。

由于在高压或中压电网发生接地故障时, 零序电流可在自耦变压器的高、中压侧间流动, 为满足选择性的要求, 高压和中压侧的零序过电流保护应装设方向元件, 其方向指向本侧母线。作为变压器的接地后备保护还应装设不带方向的零序过电流保护。

a) 高、中压侧的方向零序过电流保护整定计算。高压侧和中压侧的方向零序过电流保护通常设二段。

第一段动作电流与本侧母线出线的零序过电流保护的第一段或快速主保护相配合, 动作电流的计算公式同式 (125)。220kV 自耦变压器保护动作后以时限 $t_1 = t_0 + \Delta t$ (t_0 为与之配合的线路零序过电流保护 I 段的动作时间) 断开本侧母联或分段断路器; 以 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 断开本侧断路器。对 330kV 及 500kV 自耦变压器高压侧 I 段零序过电流保护只设一个时限, 即 $t_1 = t_0 + \Delta t$, 断开本侧断路器。

第二段动作电流与本侧母线出线的零序过电流保护或接地距离保护的后备段配合, 动作电流的计算公式同式 (126)。220kV 自耦变压器保护动作后以时限 $t_3 = t_{1\max} + \Delta t$ ($t_{1\max}$ 为线路零序过电流保护或接地距离保护后备段的动作时间) 断开本侧断路器; 以 $t_4 = t_3 + \Delta t$ 断开变压器各侧断路器。对 330kV 及 500kV 自耦变压器高压侧 II 段零序过电流保护只设一个时限, 即 $t_3 = t_{1\max} + \Delta t$ 断开变压器各侧断路器。

I、II 段方向零序过电流保护的灵敏系数按式 (127) 计算。

b) 不带方向的高、中压侧零序过电流保护整定计算。零序过电流保护 (不带方向) 的动作电流与本侧及对侧母线上线路的零序过电流保护及接地距离保护后备段相配合, 必须满足母线接地短路的灵敏系数不小于 1.5。当灵敏系数不满足要求时, 动作电流可不与接地距离保护后备段配合, 但动作时间必须配合。动作时间应大于变压器高、中压侧方向零序过电流保护的動作时间。

作为变压器引出线的后备保护, 当对侧的零序过电流保护不满足灵敏系数要求时, 可校验由本侧母线电源供给本侧零序过电流保护灵敏系数是否满足 1.5。

c) 自耦变压器中性点零序过电流保护整定计算。当低压侧为 Δ 接线的自耦变压器高压侧或中压侧断开时, 该自耦变压器就变成为一台高压侧 (或中压侧) 中性点直接接地的 Y_N , d 接线的普通双绕组变压器。考虑到在未断开侧的线端装有零序过电流保护, 已完成线路及母线接地故障的后备保护, 故此时中性点过电流保护的作用只是作为变压器内部接地故障的后备。保护的動作电流 $I_{op.0}$ 按下式整定

$$I_{op.0} = K_{rel} I_{unb.0} / n_a \quad (130)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数, 取 1.5~2;

$I_{unb.0}$ ——正常运行情况 (包括最大负荷时) 可能在零序回路出现的最大不平衡电流。

灵敏系数 K_{sen} 按下式计算

$$K_{sen} = \frac{3I_{k0.min}}{I_{op.0} n_a} \quad (131)$$

式中: $I_{k0.min}$ ——自耦变压器断开侧出线端单相接地短路, 流过变压器中性点的最小零序电流。

保护的動作时间为

$$t = t_t + \Delta t \quad (132)$$

式中: t_t ——自耦变压器各侧零序过电流保护動作时间中的最长者。

5.7 变压器过负荷保护

根据变压器各侧绕组及自耦变压器的公共绕组可能出现过负荷情况, 应装设过负荷保护。大型变压

器的过负荷, 通常是对称过负荷, 故过负荷保护只接一相电流。

过负荷保护的動作电流应按躲过绕组的额定电流整定, 按下式计算

$$I_{op} = \frac{K_{rel}}{K_{rn}} I_N \quad (133)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数, 采用 1.05;

K_r ——返回系数, 0.85~0.95;

I_N ——被保护绕组的额定电流。

过负荷保护动作于信号。保护的動作时间应与变压器允许的过负荷时间相配合, 同时应大于相间故障后备保护的最大動作时间 (通常可大 2 个时间阶段)。

5.8 变压器过励磁保护

为防御变压器因过励磁损坏而装设的变压器过励磁保护, 要根据变压器允许的过励磁特性整定。在整定变压器过励磁保护时, 必须有变压器制造厂提供的变压器允许的过励磁能力曲线。变压器过励磁保护有定时限和反时限两种。

5.8.1 定时限变压器过励磁保护

定时限过励磁保护通常分二段, 第一段为信号段, 第二段为跳闸段。整定方法用图 39 为例说明如下。

图 39 中过励磁能力曲线 1 应由变压器制造厂提供。

过励磁保护的第一段動作值 N 一般可取为变压器额定励磁的 1.15~1.2 倍。 N 的含意如下式

$$N = B/B_N = \frac{U}{f} / \frac{U_N}{f_N} \quad (134)$$

式中: N ——过励磁倍数;

B, B_N ——变压器铁芯磁通密度的实际值和额定值;

U, U_N ——加在变压器绕组的实际电压和额定电压;

f, f_N ——实际频率和额定频率。

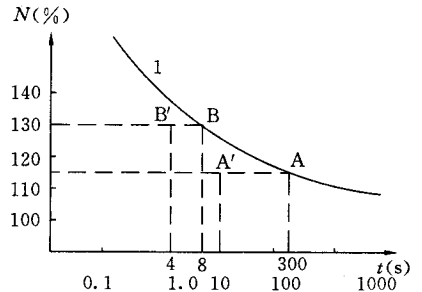
第一段的動作时间可根据允许的过励磁能力适当整定。

例如, 设 $N=1.15$, 从曲线 1 上查得对应的允许时间约 300s (A 点), 第一段的動作时间可整定为 10s (A' 点), 考虑从发信号到允许时间还有 290s, 使运行人员有足够时间处理变压器的过励磁。信号段的動作时间不宜太短, 防止在变压器短时过励磁时不必要的发信号。動作时间也不宜太长, 只要给运行人员有足够长的时间处理过励磁故障即可。

第二段为跳闸段, 可整定 $N=1.25 \sim 1.35$ 倍, 例如取 $N=1.3$, 从曲线 1 上查得允许的过励磁时间约 8s (B 点), 跳闸时间可整定为 4s (B' 点), 为保障变压器的安全, 可取跳闸时间小于实际允许的时间。在本例中, 如 $N=1.29 < 1.30$, 过励磁保护将延时 10s 才发信号, 所以定时限过励磁保护并不能充分保证变压器的安全。

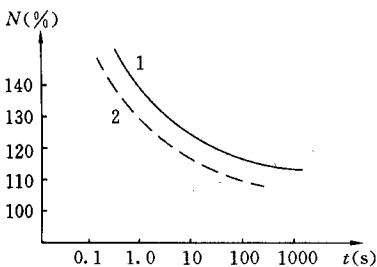
5.8.2 反时限变压器过励磁保护

反时限变压器过励磁保护的保護特性应与变压器的允许过励磁能力相配合, 如图 40 所示。图中曲线 1 为制造厂给出的变压器允许过励磁能力曲线; 2 为过励磁保护整定的動作特性曲线。



1—制造厂提供的允许过励磁曲线

图 39 定时限变压器过励磁保护整定图例



1—制造厂给出的变压器允许过励磁能力曲线; 2—过励磁保护整定的動作特性曲线

图 40 反时限变压器过励磁保护整定图例

6 发电机变压器组保护的整定计算

6.1 概述

发电机变压器组的保护与发电机和变压器单独工作时的保护类型选择及整定计算基本相同。但由于发电机与变压器组成一个单元,所以,发电机变压器组的保护与发电机、变压器单独工作时的保护相比,又有某些不同的特点。某些保护可以合并,例如,发电机变压器组公共差动保护、相间后备保护、过负荷保护等。

发电机变压器组的保护对象,除了发电机、变压器之外,还包括高压厂用变压器、励磁变压器等厂用分支。

为避免重复,在第4章和第5章中已经叙述过的内容,在本章中不再赘述。本章仅叙述发电机变压器组保护整定计算的特点。

6.2 发电机变压器组保护整定计算特点

6.2.1 差动保护

a) 根据 GB14285 的规定,对于 100MW 及以下发电机变压器组,不要求差动保护双重化,只设一套发电机变压器组公共差动保护。100MW 以上机组,除公共差动保护之外还应加发电机纵差保护。200MW 及以上大型机组要求发电机、变压器的纵差保护按双重化原则配置,除公共差动保护外,发电机和变压器还应装设单独的纵差保护,与公共的纵差保护一起实现快速保护的双重化。发一变组的公共差动保护采用变压器差动保护的原理,其整定计算方法见 5.1。

b) 当公共差动保护采用不完全接线(厂用高压变压器、励磁变压器不接入差动回路),公共差动保护的動作电流应躲过高压厂用变压器或励磁变压器低压侧短路时,流过差动保护的最大短路电流,即

$$I_{op} = K_{rel} I_{k.max} / n_a \quad (135)$$

式中: K_{rel} ——可靠系数,取 1.3;

$I_{k.max}$ ——高压厂用变压器(或励磁变压器)低压侧短路时,流过差动保护的最大电流;

n_a ——电流互感器变比。

c) 采用完全差动接线的发电机变压器组公共差动保护,一种做法是将高压厂用变压器低压侧接入公共差动回路,这样可省去厂用变压器高压侧大变比电流互感器,同时也扩大了差动保护的保護范围,使高压厂用变压器的速动保护也实现了双重化。另一种做法是将高压厂用变压器高压侧加装的电流互感器二次接入公共差动回路。当升压变压器高压侧为 $1\frac{1}{2}$ 断路器接线时公共差动保护要求有 4 或 5 侧制动。

d) 励磁变压器是一整流变压器,在装设差动保护时考虑到一次侧有较大的谐波分量,采用谐波制动原理的差动保护时应特别注意内部短路时的灵敏性。

6.2.2 相间故障后备保护

在设置发电机变压器组相间故障后备保护时,将发电机变压器组作为一个整体考虑。其相间故障后备保护既作为发一变组的后备,又作为高压母线相间故障的后备。

a) 对于中小型机组,相间故障后备保护装在发电机中性点侧。中性点侧的相间故障后备保护通常采用负序电流和单相式低电压过电流保护,其整定计算方法见 5.5.4。三绕组变压器高中压侧相间故障后备保护通常采用复合电压启动的过电流保护,其整定计算方法见 5.5.3。相间故障后备保护一般设两段时限,以较短时限断开变压器的本侧断路器,以较长时间断开各侧断路器并灭磁。

b) 根据 GB14285 的规定,自并励发电机宜采用低电压保持的过电流保护,或采用带电流记忆的低电压过电流保护,也可采用精确工作电流足够小的低阻抗保护。

低电压保持的过电流保护,电流元件的動作电流按下式整定

$$I_{op} = K_{rel} I_N / n_a \quad (136)$$

式中: I_{op} ——电流元件的動作电流;

K_{rel} ——可靠系数，取 1.3；

I_N ——发电机额定电流；

n_a ——电流互感器变比。

电压元件的动作电压按下式整定

$$U_{\text{op}} = K_{\text{rel}} U_{\text{min}} / n_v \quad (137)$$

式中： U_{op} ——电压元件动作电压；

K_{rel} ——可靠系数，取 0.8；

U_{min} ——发电机端最低运行电压；

n_v ——电压互感器变比。

灵敏系数计算

$$K_{\text{sen.l}} = \frac{I_K^{(2)} / n_a}{I_{\text{op}}} \quad (138)$$

$$K_{\text{sen.U}} = \frac{U_{\text{op}}}{U_{\text{r.max}} / n_v} \quad (139)$$

式中： $K_{\text{sen.l}}$ ——电流元件灵敏系数，要求 ≥ 1.3 ；

$K_{\text{sen.U}}$ ——电压元件灵敏系数，要求 ≥ 1.3 ；

$I_K^{(2)}$ ——升压变压器高压侧二相金属性短路时，流过保护的电流；

$U_{\text{r.max}}$ ——升压变压器高压侧三相金属性短路时，发电机端的最大残压。

低阻抗保护的整定方法见 5.5.7。

c) 支接高压厂用变压器的高压侧，可采用复合电压启动的过电流保护，作为高压厂用变压器差动保护的后备，设二段时限，以较短时限断开厂用变压器低压侧断路器，以较长时限动作于停机。其整定计算方法见 5.5.3。

d) 支接高压厂用变压器的低压侧带时限的电流速断和过电流保护。高压厂用变压器的低压侧(6kV)所接的母线通常不设专用的母线差动保护。在厂用变压器低压侧装设带时限的电流速断保护作为母线故障保护和馈线故障的后备保护，过电流保护作馈线过电流保护的后备。

电流速断保护的動作电流按下式整定

$$I_{\text{op}} = \frac{I_{\text{k.min}}^{(2)} / n_a}{K_{\text{sen}}} \quad (140)$$

式中： $I_{\text{k.min}}^{(2)}$ ——低压母线二相金属性短路时，流过变压器低压侧的最小短路电流；

K_{sen} ——灵敏系数，取 2；

n_a ——电流互感器变比。

按上述公式整定可保证在馈线出口短路时保护有不小于 2 的灵敏系数，保护的動作时间取 0.5s。

过电流保护的整定计算见 5.5.1。

6.2.3 接地故障后备保护

发电机变压器组的接地故障后备保护包括升压变压器高压侧接地保护，发电机电压回路接地保护和支接高压厂用变压器低压侧接地保护。

升压变压器高压侧接地保护的整定计算见 5.6。

发电机电压回路接地保护见 4.3。

高压厂用变压器低压侧的接地保护方式与厂用变压器低压侧中性点接地方式有关。当中性点经中阻抗接地时，厂用变压器低压侧应装二段式零序过电流保护，一段跳厂用变压器低压侧断路器，二段动作于全停。

发电机定子绕组对地电容，机端单相接地电容电流
及单相接地电流允许值

国产汽轮发电机定子对地电容及单相接地电容电流值见表 A1。

表 A1 国产汽轮发电机定子对地电容及单相接地电容电流值

容量 MW	电压 kV	每相对地电容 μF	单相接地电容电流 A
50	10.5	0.25	1.43
100	10.5	0.16	0.914
200	15.75	0.20	1.715
300	18.0	0.23~0.3	1.97~2.57

发电机定子绕组单相接地故障电流允许值见表 A2。

表 A2 发电机定子绕组单相接地故障电流允许值

发电机额定电压 kV	发电机额定容量 MW		故障电流允许值 A
6.3	≤50		4
10.5	汽轮发电机	50~100	3
	水轮发电机	10~100	
13.8~15.75	汽轮发电机	125~200	2 ¹⁾
	水轮发电机	40~225	
18~20	300~600		1
1) 对于氢冷发电机为 2.5A。			

本标准用语说明

B1 表示条文执行严格程度的用词

B 1.1 表示很严格，非这样不可的用词

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

B 1.2 表示严格，在正常情况下都应这样做的用词

正面词采用“应”，反面词采用“不应”，“不得”或“不允许”。

B 1.3 表示允许稍有选择，在条件允许时首先应这样做的用词

正面词采用“宜”或“可”，“允许”，反面词采用“不宜”。

B2 连词用法

“和”、“与”字，一般用于两个类型相同的词和词组的连接，表示并列关系。“及”字，一般用于前后不能颠倒过来的两个词或词组的连接。