

继电保护丛书

电力变压器保护

(第二版)

陈 曾 田

水利电力出版社

继电保护丛书

电力变压器保护

(第二版)

陈曾田

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是《继电保护丛书》之一，在原书的基础上进行了全面地修订，主要论述电力变压器的保护原理和装置。全书共分九章，全面地讨论了变压器的主保护和后备保护，重点分析了纵联差动保护的特殊问题，并对各种差动继电器的原理、特性和差动保护的整定计算方法作了较为详细的介绍；第六章专门探讨了自耦变压器的有关特性参数和保护方式。另外，书中还介绍了超高压变压器的过励磁保护、匝间短路保护、以及超高压电网并联电抗器的保护。最后，列举了变压器保护全图和大容量变压器保护的配置方案，以供参考。

本书主要供从事继电保护工作的人员阅读，并可供大专院校有关专业的师生参考。

继电保护丛书 电力变压器保护 (第二版) 陈 曾 田

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 15印张 330千字

1981年3月初版

1989年7月第二版 1989年7月北京第二次印刷

印数20121—27640册 定价7.60元

ISBN 7-120-00597-9/TM·158

前 言

电力变压器是发电厂和变电站中的主要电气设备，它对电力系统的安全运行有着重大的作用和影响，因此，应装设性能良好、动作可靠的继电保护装置。近代大型变压器对继电保护技术提出了更高的要求，促进了变压器继电保护技术的完善和发展。为此，根据《继电保护和安全自动装置技术规程》(SDJ6-83)和生产实际的具体情况，对《电力变压器保护》一书的1981年版本进行了修订。

经修订后，本书保留了目前国内仍普遍应用的保护技术，修改或删减了一些已不适用或陈旧的内容。同时，增加了近年来国内外研制成功的新型保护技术，例如：三相谐波制动电压综合后，对每一相制动的新型差动保护；变压器的过励磁保护；变压器的匝间短路保护以及低阻抗保护等。

500kV线路和变电站已在我国相继建成。为此，对500kV变压器和线路并联电抗器保护配置方案和保护装置也作了相应地介绍，以供参考。

本书由北京供电局苏玉林同志审稿，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于实践经验不多，加上水平所限，书中缺点错误在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1987年1月

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 变压器可能发生的故障和不正常运行方式	1
第二节 变压器保护装置装设的原则	3
第三节 变压器引出端发生短路时绕组中电流的分布	7
第二章 变压器的瓦斯保护装置	13
第一节 瓦斯保护的作用	13
第二节 瓦斯继电器的构造和动作原理	13
第三节 瓦斯继电器的安装	17
第四节 瓦斯保护的接线方式	19
第五节 瓦斯保护的运行	21
第六节 瓦斯保护的整定	28
第七节 冲击油压继电器	30
第三章 变压器的电流速断保护	33
第一节 电流速断保护装置原则	33
第二节 电流速断保护原理接线图	33
第三节 电流速断保护整定原则	33
第四章 变压器的纵联差动保护	36
第一节 变压器差动保护的基本原理	36
第二节 变压器差动保护的特点	39
第三节 变压器差动保护构成方式	74
第四节 三相三柱式全星形接线的变压器纵联差动保护 电流互感器的接线方式	229
第五节 500kV主变压器的纵差保护	236
第六节 变压器过电压对差动保护的影响	246

第五章 变压器相间故障和接地故障的后备保护	249
第一节 变压器的过电流保护装置	250
第二节 变压器带低电压起动的过电流保护装置	256
第三节 变压器复合电压起动的过电流保护装置	262
第四节 变压器的负序过电流保护装置	265
第五节 复合电压起动的过电流保护和负序过电流保护灵敏度的评价	277
第六节 阻抗保护	285
第七节 电流速断保护	296
第八节 变压器防止相间故障的后备保护配置原则	298
第九节 变压器的接地保护	309
第十节 500kV变压器中性点快速接地开关	319
第六章 自耦变压器的保护	321
第一节 自耦变压器在电力系统中的应用和特点	321
第二节 自耦变压器的阻抗计算和接地短路电流的分布	331
第三节 自耦变压器的运行方式和各侧传输容量	345
第四节 自耦变压器保护的配置方式	351
第七章 发电机-变压器组的保护	376
第一节 发电机-变压器组保护装置的特点及装设原则	376
第二节 发电机-变压器组纵联差动保护的配置原则	377
第三节 发电机-变压器组后备保护的特点	382
第四节 发电机-变压器组的发电机侧接地保护的特点	387
第八章 变压器的异常运行和其它保护	400
第一节 变压器的过负荷保护	400
第二节 变压器的过励磁保护	402
第三节 探测漏磁通变化的变压器匝间短路保护	411
第四节 变压器开关的非全相运行保护	418
第九章 并联电抗器的保护	421
第一节 并联电抗器保护装置的配置	421

第二节 零序电流补偿的方向零序电流保护	424
附录一 校验灵敏度时的二次侧电流与变压器接线 和电流互感器接线以及短路形式的关系	429
附录二 制动系数与动作电流和制动电流之间相角差的 关系	433
附录三 三绕组变压器制动线圈的接法	443
附录四 变压器保护装置接线全图	447
附录五 发电机变压器组保护配置方案	464

第一章 概 述

第一节 变压器可能发生的故障 和不正常运行方式

变压器在电力系统中广泛地用来升高或降低电压，是电力系统不可缺少的重要电气设备。现代生产的变压器，虽然在设计和材料方面有所改进，结构上比较可靠，相对于输电线路和发电机来说，变压器故障机会也比较少。但在实际运行中，仍有可能发生各种类型的故障和异常运行情况。为了保证电力系统安全连续地供电，并将故障和异常运行情况对电力系统的影响限制到最小范围，应根据变压器的容量等级和重要程度的不同，装设必要的、性能良好及动作可靠的继电保护装置。

变压器的故障可分为内部故障和外部故障。内部故障是指变压器油箱里面发生的故障，大致可分为两类。

一、电气故障

电气故障将对变压器立即产生严重的损伤作用。在这种情况下，可通过检测其不平衡的电流和电压进行分析。通常故障原因如下：

- (1) 高压或低压绕组相间短路；
- (2) 中性点直接接地侧的单相接地短路；
- (3) 高压或低压绕组的匝间短路；
- (4) 第三绕组上的接地故障或匝间短路。

内部短路故障产生的电弧，不仅会损坏绕组的绝缘、烧

毁铁芯，而且由于绝缘材料和变压器油因受热分解而产生大量的气体，有可能引起变压器油箱爆炸。同时，短路故障还将引起系统电压降低，如延长低电压的时间，能造成旋转电机之间失去同步，失步电机引起的过渡电流将造成其他继电器动作而误跳闸。因此，在变压器内部发生电气故障时，应迅速将变压器切除。

二、“初始”故障

“初始”故障即初始局部的故障。它将对变压器产生缓慢发展的损害作用，但一般不能检测其不平衡的电量。故障原因有：

(1) 导体之间电气连接接触不良或铁芯故障，在变压器油中可能产生间歇性电弧；

(2) 冷却媒介不足将使变压器油温升高，如油位过低或油路阻塞，容易在绕组上产生局部热点；

(3) 分接开关故障，并联运行变压器之间产生环流和负荷分配不合理，造成变压器的绕组过热。

这种故障在初始阶段是不严重的，不会对变压器立即产生损伤，但在发展过程中可能产生各种故障，扩大事故的范围，因此，应尽可能快地消除。

变压器最常见的外部故障，是油箱外部绝缘套管及引出线上的故障，可能导致引出线的相间短路或单相接地短路。

实践证明，变压器引出线上的相间短路，单相接地短路和绕组的匝间短路是比较常见的故障形式。三台单相变压器组成的变压器组，发生内部相间短路是不可能的，在三相变压器中发生内部相间短路的可能性也很小。

变压器的不正常工作状态主要是：由于外部短路和过负荷引起的过电流；中性点直接接地电力网中，外部接地短路

引起的过电流及中性点过电压；冷却系统故障；变压器的温度升高等。

变压器保护可以分为短路保护和异常运行保护两类。短路保护用以反应被保护范围内发生的各种类型的短路故障，作用于断路器跳闸。为了防止保护装置或断路器拒动，又有主保护和后备保护之分。异常运行保护用以反应各种可能给机组造成危害的异常工况，此保护作用于发信号。这类保护一般只装设一套专用继电器，不设后备保护。

第二节 变压器保护装置装设的原则

大型变压器的造价昂贵，一旦发生故障遭到损坏，其检修难度大、时间长，要造成很大的经济损失。特别是在单台容量占系统容量比例很大的情况下，发生故障后突然切除变压器，将给电力系统造成很大的扰动。因此，在考虑大型变压器继电保护的总体配置时，除了保证其安全运行外，还应最大限度地缩小故障影响范围，特别要防止保护装置误动作或拒绝动作。这样，不仅要求有性能良好的保护继电器，还要求在继电保护的总体配置上尽量做到完善、合理。对大型主变压器保护，根据加强主保护、简化后备保护的原则，其主保护除瓦斯保护以外，可实现快速保护双重化；后备保护除零序保护应与线路保护配合外，相间保护只保证对变压器各侧母线短路有灵敏度，允许不作为相邻线路故障的后备保护。

根据《继电保护和安全自动装置技术规程》的规定，变压器一般应装设下列继电保护装置：

- 一、反应变压器油箱内部故障和油面降低的瓦斯保护
容量为800kVA及以上的油浸式变压器和400kVA及以

上的车间内油浸式变压器,均应装设瓦斯保护。当油箱内部故障产生轻微瓦斯或油面下降时,保护装置应瞬时动作于信号;当产生大量瓦斯时,保护装置应动作于跳闸,断开变压器各侧的断路器。对于高压侧未装设断路器的线路-变压器组,当未采取使瓦斯保护能切除变压器内部故障的技术措施时,瓦斯保护可仅动作于信号。

二、反应变压器绕组、引出线的相间短路,中性点直接接地侧绕组、引出线和套管的接地短路,以及绕组匝间短路的电流速断保护或纵联差动保护

(1)对于6300kVA以下厂用工作变压器和并联运行的变压器,10000kVA以下厂用备用变压器和单独运行的变压器(通常是中、小型发电机组的配套设备),当后备保护的動作时限大于0.5s时,应装设电流速断保护。

(2)对于6300kVA及以上厂用工作变压器和并列运行的变压器,10000kVA及以上厂用备用变压器和单独运行的变压器(是大型发电机组配套设备),以及2000kVA及以上用电流速断保护灵敏度不符合要求($K_{lm} < 2$)的变压器,应装设纵联差动保护。

(3)对于高压侧电压为330kV及以上的变压器,可装设快速双重差动保护。

为满足电力系统稳定方面的要求,当变压器发生故障时,要求保护装置快速切除故障。通常变压器的瓦斯保护和纵差保护已构成了双重化快速保护,但对变压器外部引出线上的故障只有一套快速保护。当变压器故障差动保护拒动时,将由带延时的后备保护切除。为了保证在任何情况下都能快速切除故障,对高压侧电压为330kV及以上的变压器,应装设双重差动保护。

(4) 对于发电机变压器组, 当发电机与变压器之间有断路器时, 变压器应装设单独的纵联差动保护; 当发电机与变压器之间没有断路器时, 100000kW及以下的机组, 可只装设发电机变压器组共用的差动保护; 100000kW以上的机组, 除共用差动保护外, 发电机还应装设单独的差动保护; 对200000kW及以上的机组, 还应在变压器上增设单独的差动保护, 以实现完全双重化快速保护方式。

(5) 当变压器纵联差动保护对单相接地短路灵敏度不符合要求时, 可增设零序差动保护。

三、反应外部相间短路的过电流保护、复合电压起动的过电流保护、负序电流保护和阻抗保护

这些保护可作为变压器主保护的后备保护, 又可作相邻母线或线路保护的后备。

过电流保护宜用于降压变压器。对于升压变压器, 系统联络变压器和过电流保护不符合灵敏度要求 ($K_{lm} < 1.25$) 的降压变压器, 一般采用复合电压起动的过电流保护。对于63000kVA及以上的升压变压器, 采用负序电流和单相式低电压起动的过电流保护。

对于升压变压器和系统联络变压器, 当采用以上保护不能满足灵敏性和选择性要求时, 可采用阻抗保护。各项保护装置动作后, 应带时限动作于跳闸。

四、反应中性点直接接地的电力网中, 外部单相接地短路的零序电流保护

(1) 在中性点直接接地的电力网中 如变压器的中性点直接接地运行, 对外部单相接地引起的过电流, 应装设零序电流保护。

零序电流保护可由两段组成, 每段各设两个时限, 并均

以较短的时限动作于母线联络断路器，以较长的时限有选择性地动作于断开变压器各侧断路器。

(2)在中性点直接接地的电力网中 如低压侧有电源的变压器中性点可能接地运行或不接地运行时，对外部单相接地引起的过电流，以及对因失去接地中性点引起的电压升高，应按下列规定装设保护装置：

1) 全绝缘变压器。按规定装设零序电流保护。并增设零序过电压保护。当电力网发生单相接地短路且失去接地中性点时，零序过电压保护经延时动作于断开变压器各侧断路器。

2) 分级绝缘变压器。变压器中性点装设放电间隙时，装设零序电流保护，并增设反应零序电压和间隙放电电流的零序电流电压保护。当电力网发生单相接地短路且失去接地中性点时，零序电流电压保护经延时动作于断开变压器各侧断路器。

变压器中性点不装设放电间隙时，应装设两段零序电流保护和一套零序电流电压保护。零序电流保护以较短的时限断开母线联络断路器，以较长的时限动作于切除中性点接地的变压器。零序电流电压保护用于保护中性点不接地运行的变压器，应先切除中性点不接地变压器，后切除中性点接地变压器。

五、反应对称过负荷的保护

对于400kVA及以上变压器，当数台并列运行或单独运行并作为其他负荷的备用电源时，应装设过负荷保护。对自耦变压器和多绕组变压器，保护装置应能反应公共绕组及各侧过负荷的情况。过负荷保护经延时动作于信号。

六、作用于信号或动作于跳闸的装置

对变压器温度升高和冷却系统故障，应按现行电力变压

器标准的要求，装设可作用于信号或动作于跳闸的装置。

实践证明，变压器匝间短路是常见的故障形式。当短路匝数很少时，靠瓦斯保护和差动保护反应，不能满足灵敏度的要求，需要装设灵敏的匝间短路保护。如采用突发压力继电器或检测漏磁变化的变压器匝间短路保护。

第三节 变压器引出端发生短路时 绕组中电流的分布

变压器引出端发生短路时，短路电流在绕组中的分布情况与变压器绕组的连接方式和短路故障类型有关。图1-1所示为Y/△-11变压器的接线图，图中标示的各电流方向作为电流正方向。为了分析简便起见，假设变压器相间电压之比为1，即

$$n_B = \frac{|\dot{U}_{AB}|}{|\dot{U}_{ab}|} = 1 \quad (1-1)$$

而 $|\dot{U}_{AB}| = |\dot{U}_{A-X} - \dot{U}_{B-X}| = \sqrt{3} |\dot{U}_{A-X}|$
 $|\dot{U}_{ab}| = |\dot{U}_{a-x}| = |\dot{U}_{c-x}|$

式中 $\dot{U}_{A-X}$ 、 $\dot{U}_{B-X}$ ——Y侧的相电压；

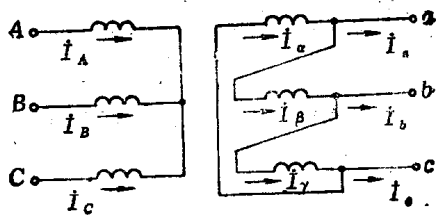


图 1-1 Y/△-11变压器接线图

$\dot{U}_{a-x}$ 、 $\dot{U}_{s-x}$ —— Δ 侧的相电压。

如Y侧绕组为 W_Y 匝， Δ 侧绕组为 W_Δ 匝，则

$$\frac{|\dot{U}_{AB}|}{|\dot{U}_{ab}|} = \frac{\sqrt{3} |\dot{U}_{A-x}|}{|\dot{U}_{a-x}|} = \sqrt{3} \frac{W_Y}{W_\Delta} = 1$$

故 $W_\Delta = \sqrt{3} W_Y$ (1-2)

三角形连接的各相绕组匝数为星形连接各相绕组匝数的 $\sqrt{3}$ 倍。

如果将变压器的励磁电流忽略不计，短路电流的分布情况可根据绕组磁势平衡的原理求出。

变压器一次绕组与二次绕组相电流的关系应为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_A \\ \dot{I}_s &= \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_B \\ \dot{I}_r &= \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_C \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

根据克希荷夫第一定律可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_A - \dot{I}_C = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B) \\ \dot{I}_s &= \dot{I}_B - \dot{I}_r = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_B - \dot{I}_C) \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_r - \dot{I}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_C - \dot{I}_A) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

由(1-4)式可得

$$\dot{I}_a - \dot{I}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C + \dot{I}_A)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} [3\dot{I}_A - (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)]$$

$$= \sqrt{3} \dot{I}_A$$

所以

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_c - \dot{I}_b) \\ \dot{I}_B &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_b - \dot{I}_c) \\ \dot{I}_C &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_c - \dot{I}_b) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

由以上分析可知，如果已知Y侧各相电流，可求得△侧各相电流；已知△侧各相电流，可相应求得Y侧各相电流。下面进一步分析，在不同类型的短路故障时，绕组中短路电流的分布情况。

一、当变压器三角形侧发生两相短路时

假设 a 、 b 两相短路，如略去负荷电流时

$$\dot{I}_c^{(2)} = 0$$

$$\dot{I}_b^{(2)} = -\dot{I}_a^{(2)}$$

将上述关系代入 (1-5) 式，求得Y侧的电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_c^{(2)} - \dot{I}_b^{(2)}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_a^{(2)} \\ \dot{I}_B^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_b^{(2)} - \dot{I}_c^{(2)}) = -\frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_a^{(2)} \\ \dot{I}_C^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_c^{(2)} - \dot{I}_b^{(2)}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_a^{(2)} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

当正序电抗等于负序电抗，即 $x_1 = x_2$ 时，则 $\dot{I}_a^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2}$

$\times \dot{I}_a^{(3)}$ ，代入 (1-6) 式得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{I}_a^{(3)} = \frac{1}{2} \dot{I}_a^{(3)} \\ \dot{I}_B^{(2)} &= -\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{I}_a^{(3)} = -\dot{I}_a^{(3)} \\ \dot{I}_C^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{I}_a^{(3)} = \frac{1}{2} \dot{I}_a^{(3)} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

二、当变压器星形侧发生两相短路时

假设A、B两相短路时

$$\dot{I}_C^{(2)} = 0$$

$$\dot{I}_B^{(2)} = -\dot{I}_A^{(2)}$$

代入(1-4)式, 可求得△侧的电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_A^{(2)} - \dot{I}_B^{(2)}) = \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_A^{(2)} = \dot{I}_A^{(3)} \\ \dot{I}_b^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_B^{(2)} - \dot{I}_C^{(2)}) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_A^{(2)} = -\frac{1}{2} \dot{I}_A^{(3)} \\ \dot{I}_c^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}_C^{(2)} - \dot{I}_A^{(2)}) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_A^{(2)} = -\frac{1}{2} \dot{I}_A^{(3)} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

三、当变压器星形侧发生单相接地短路时

假设A相单相接地短路, 此时

$$\dot{I}_A^{(1)} = \dot{I}_B^{(1)}$$

$$\dot{I}_B^{(1)} = \dot{I}_C^{(1)} = 0$$

代入(1-4)式, 可得