

继电保护丛书

# 发电机保护

陈 增 田

水利电力出版社

继电保护丛书

# 发 电 机 保 护

陈 增 田

水 利 电 力 出 版 社

## 内 容 提 要

本书是《继电保护丛书》的一个分册，共分九章，主要介绍大、中型发电机(包括发电机变压器组)的保护装置。较全面讨论了相间故障、匝间故障及接地故障保护，并对大型发电机-变压器组的后备保护配置原则作了较系统地介绍。书中重点介绍近年来新研制的整流型继电器，较详细分析了差动保护、100%定子接地保护、定子匝间短路保护、转子接地保护及失磁保护的工作原理、构成方法及各种运行工况下的动作特性。第九章介绍了同步调相机的运行特性、保护的装设原则和特点。书的最后列举了发电机组的保护全图。

本书主要作为从事继电保护工作的专业工人和技术人员的专业读物，也可作为大专院校的教学参考。

## 发 电 机 保 护

陈 增 田

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 12.625印张 280千字

1984年10月第一版 1984年10月北京第一次印刷

印数 00001—17720 册 定价 2.00 元

书号 15143·5444

## 前 言

发电机是电力系统中重要的电气设备之一。发电机的安全运行，对保证电力系统的稳定性和不间断地供电具有十分重要的意义。因此，必须根据发电机的型式、容量及发电机可能发生的故障和异常工作情况，装设各种性能良好、简单可靠的继电保护装置。

近年来，由于发电机组单机容量的不断增大，对继电保护装置提出了更高的技术要求，整流型保护继电器即为一种结构简单、性能良好、动作可靠的新型继电器。本书重点阐述新原理的差动保护、定子接地保护、转子接地保护、反时限电流保护、失磁保护、逆功率保护及失步保护。此外，本书在故障电量分析的基础上，较系统地介绍了大、中型发电机组短路故障的主保护和后备保护的配置原则、接线方案、整定原则以及各种工况下继电器的动作特性。由于实践经验不足，书中的缺点和错误在所难免，望读者批评指正。

本书经东北电力设计院侯炳蕴同志审稿，华东电管局继电保护科对编写工作给予了热情支持和帮助，在此一并表示感谢。

编 者

1983年10月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 概述</b> .....	1
第一节 发电机可能发生的故障和异常运行方式 .....	1
第二节 发电机保护装设的原则 .....	4
第三节 大型发电机组的特点及对继电保护的要求 .....	8
<b>第二章 发电机定子绕组的纵联差动保护和电流速断保护</b> .....	11
第一节 发电机纵联差动保护的原理 .....	11
第二节 由带助磁特性的BCH-2型差动继电器构成的发电机纵联差动保护 .....	24
第三节 比率制动式纵联差动保护 .....	30
第四节 发电机定子绕组的电流速断保护 .....	42
<b>第三章 发电机定子绕组的匝间短路保护</b> .....	45
第一节 发电机定子绕组的匝间故障 .....	45
第二节 发电机单元件式横联差动保护 .....	54
第三节 发电机零序电压原理的定子匝间短路保护 .....	63
第四节 转子二次谐波电流原理的匝间短路保护 .....	69
第五节 电压回路断线闭锁装置 .....	72
第六节 负序功率方向元件 .....	77
第七节 发电机匝间短路保护灵敏度的分析 .....	82
第八节 发电机绕组开焊故障时匝间短路保护的灵敏度 .....	86
<b>第四章 发电机定子绕组接地保护</b> .....	92
第一节 发电机定子绕组接地故障的分析 .....	92

第二节	发电机零序电压保护 .....	105
第三节	100%保护区的发电机定子接地保护 .....	110
第四节	发电机定子绕组接地故障的零序电流保护 .....	119
第五节	发电机定子接地保护灵敏度的评价 .....	134
<b>第五章</b>	<b>发电机的过电流保护 .....</b>	<b>141</b>
第一节	发电机低电压起动的过电流保护 .....	142
第二节	发电机复合电压起动的过电流保护 .....	145
第三节	发电机两段式负序过电流保护 .....	148
第四节	发电机反时限负序过电流保护 .....	156
第五节	发电机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 .....	177
第六节	自动发电机的后备保护 .....	185
第七节	大型发电机-变压器组后备保护配置的原则 .....	194
<b>第六章</b>	<b>发电机励磁回路的接地保护 .....</b>	<b>209</b>
第一节	发电机励磁回路接地故障 .....	209
第二节	发电机励磁回路一点接地保护的构成 .....	212
第三节	发电机励磁回路两点接地保护 .....	245
<b>第七章</b>	<b>发电机的失磁保护 .....</b>	<b>264</b>
第一节	发电机失去励磁的原因和影响 .....	264
第二节	失磁过程中发电机端测量阻抗的变化规律 .....	275
第三节	发电机失磁保护中的阻抗继电器 .....	296
第四节	发电机失磁保护装置的构成 .....	319
<b>第八章</b>	<b>发电机异常运行保护 .....</b>	<b>330</b>
第一节	发电机过电压保护 .....	330
第二节	发电机过负荷保护 .....	332
第三节	发电机逆功率保护 .....	344
第四节	发电机其他保护 .....	352
<b>第九章</b>	<b>同步调相机保护 .....</b>	<b>362</b>
第一节	同步调相机的运行特性 .....	362

第二节	同步调相机保护的装设原则和特点 .....	365
第三节	同步调相机失磁保护 .....	368
第四节	同步调相机保护接线图 .....	372
附录一	发电机保护接线全图 .....	376
附录二	发电机-变压器组继电保护配置方案（供 参考） .....	391

# 第一章 概 述

## 第一节 发电机可能发生的故障和异常运行方式

保证发电机组安全经济运行和防止其遭受严重破坏，对电力系统的稳定运行和对用户不间断供电起着决定性的作用。在近代电力系统中，大容量发电机组所占的比重不断增加。由于采用了比较复杂的冷却方式，故障率提高；由于有效材料利用率提高使体积相对缩小，热容量相对降低，使承受过负荷的能力显著下降。因此，要不断改进和完善继电保护的功能，采取较为完善的保护配置方案，最大限度地保证电力系统安全运行，并将故障和不正常运行方式对电力系统的影响限制到最小范围。

发电机的内部故障主要是由定子绕组和转子励磁绕组绝缘损坏所引起的，其具体故障形式有以下几种。

### 1. 定子绕组的相间短路

定子绕组的相间短路是危害发电机安全运行最严重的一种故障，短路点产生的电弧不但会损坏绝缘，而且可能烧坏定子铁芯和绕组，甚至引起火灾，给发电机的修复工作带来巨大的困难。

### 2. 定子绕组一相匝间短路

大型发电机组的定子绕组多为双分支或多分支并联，同槽同相的线棒数占相当大比例。在运行中这种故障发生的机会较少，但由于电磁力引起的振动使绝缘磨损，发生一相匝

间短路的可能性仍存在。一旦发生一相匝间短路，则由于故障点的电流较大，将导致绝缘进一步损坏，因而伴随产生单相接地故障，并可能发展成相间短路故障，使发电机遭受严重损伤。

### 3. 定子绕组的单相接地故障

接地点的故障电流是发电机及发电机电压网络连接元件的对地电容电流，当其大到一定程度并持续一定时间时，将损坏铁芯和绕组绝缘，甚至进一步引起匝间短路或相间短路。故应采取措施限制接地点的电流，并及时检测出定子绕组的接地故障。

### 4. 励磁回路一点接地或两点接地故障

大型发电机组的励磁电压较高，水内冷励磁绕组对地绝缘水平较低，则当励磁绕组和外部回路一点接地时，由于一侧轴承对地绝缘，没有电流通过故障点，故可以继续运行。从安全方面考虑，带接地点运行的时间应尽量缩短，并尽快转移负荷，积极安排停机。如果再出现另一点接地时，将造成励磁回路短路，可能烧坏绕组和转子。两点接地时，由于转子的磁通对称性遭到破坏，发电机组将剧烈地振动，其故障性质是严重的，不宜继续运行，故要求励磁回路一点接地时发信号，两点接地时停机。

发电机的异常工作状态主要有以下几种。

#### 1. 外部短路及系统振荡引起过电流

发电机外部发生短路故障或振荡时，将引起定子绕组过电流；不平衡负载或外部不对称短路，将引起发电机的负序过电流。负序电流产生的旋转磁场将在转子上产生感应电流，增加了转子的附加损耗，为此可能产生转子过热现象。

## 2. 定子绕组过负荷

正常运行时，如果负载电流超过了发电机的额定电流，将造成定子绕组的对称过负荷。

## 3. 励磁回路过负荷

励磁回路发生故障，或强行励磁时间过长，将引起励磁回路的过负荷。

## 4. 发电机失去励磁电流

励磁设备的故障，励磁绕组断线及自动灭磁开关误动作或误操作等原因，将造成失磁故障。这时，发电机将由系统中吸收大量无功功率，使系统电压降低，并有可能破坏系统的稳定运行。

## 5. 水轮发电机定子绕组过电压

系统突然甩负荷，励磁系统故障和自激引起发电机定子绕组电压异常升高。过电压将威胁发电机及其他电气设备绝缘的安全，使定子铁芯过饱和引起定子铁芯局部过热；使变压器过激磁引起铁芯过饱和而受到不良影响。

## 6. 发电机逆功率运行

汽轮机主汽门已关闭，而发电机出口断路器尚未断开时，发电机将从系统吸取功率变为电动机。发电机逆功率对发电机没有什么危害，但对汽轮机，由于鼓风损失使其叶片过热，过热时间过长叶片可能损坏。

## 7. 非全相运行

对于发电机-变压器组，其高压侧（如220千伏侧）断路器可能发生非全相合闸或非全相跳闸的情况。发电机非全相运行时将出现负序电流，直接危害发电机的安全运行，并可能引起相邻元件后备保护动作，导致扩大事故影响的范围。

## 第二节 发电机保护装设的原则

根据发电机组的类型、容量的大小及重要性，对其可能发生的故障及异常运行方式，应装设下列相应的保护装置。

1. 反应发电机定子绕组及其引出线相间短路的纵联差动保护

1兆瓦以上的发电机应装设纵联差动保护，作为发电机的主保护，以反应发电机定子绕组及其引出线间的短路。并应采取措施减轻不平衡电流对纵联差动保护的影响，以降低其动作电流的整定值。如差动保护的動作电流整定值大于额定电流时，应装设电流回路断线监视装置，断线后动作于信号；如差动保护的動作电流整定值小于额定电流时，宜装设电流回路断线闭锁装置，断线后将差动保护解除，并发出信号。

对发电机-变压器组：当发电机与变压器之间有断路器时，发电机装设单独的差动保护。二者之间没有断路器时，100兆瓦及以下的发电机，可只装设整组共用差动保护；100兆瓦以上的发电机，除整组共用差动保护外，发电机还应装设单独的差动保护。对于200兆瓦及以上的汽轮发电机，为提高保护的快速性，宜采用双重快速保护（机端装设复合电流速断保护，或在变压器上增设单独的差动保护）。

对1兆瓦及以下单独运行的发电机，如中性点有引出线，在中性点侧装设过电流保护；如中性点无引出线，在发电机端装设低电压保护，当发电机与系统并列运行时，应在发电机端装设电流速断保护，如果灵敏度不够，可装设差动保护。

## 2. 反应发电机定子绕组单相接地故障的零序电流和零序电压保护

与母线直接联接的发电机（不考虑补偿作用），当单相接地故障电流大于允许值时，装设作用于跳闸的零序电流保护。在未装设单相接地保护，或接地保护的灵敏度不符合要求时，可利用接于母线上的绝缘监视装置动作于信号。

为了在发电机与系统并列前检查发电机定子绕组有无接地故障，应在机端装设测量零序电压的电压表。

对发电机-变压器组，100兆瓦以下的发电机，应装设保护区不小于90%的定子接地保护，对100兆瓦及以上的发电机，应装设保护区为100%的定子接地保护。

## 3. 反应发电机定子绕组匝间短路的保护

定子绕组为星形联接，每相有并联分支，且中性点有引出端子的发电机，宜采用单继电器式横联差动保护。对于大型机组，由于结构限制而中性点侧各相只能引出一个出线端子时，也应装设专用的匝间短路保护，并作为定子绕组的开焊保护。

## 4. 发电机过电流保护

反应发电机外部相间短路故障和作为发电机主保护后备的过电流保护。目前宜装设如下两种保护装置：

- (1) 复合电压起动的过电流保护；
- (2) 负序电流保护和单元件低电压起动过电流保护。

1兆瓦及以下与系统并列运行的发电机，应装设过电流保护；

自并励发电机，宜采用低电压保持的过电流保护，也可采用低阻抗保护。

## 5. 反应发电机定子绕组过电压的保护

对于水轮发电机应装设过电压保护；对于 200 兆瓦及以上的汽轮发电机，宜装设过电压保护。

#### 6. 反应发电机定子绕组过负荷的保护

发电机过负荷保护主要反应对称过负荷，因此，保护装置接一相电流，并带时限动作于信号。

#### 7. 反应发电机转子表层过负荷的负序电流保护

50兆瓦及以上的发电机，应装设定时限负序电流保护，以反应发电机转子表层的过负荷；100兆瓦及以上的发电机，应装设由定时限和反时限两部分组成的过负荷保护以及反应转子表层的过负荷保护。

#### 8. 反应发电机励磁绕组的过负荷保护

200兆瓦以下的采用半导体励磁系统的发电机，可装设定时限励磁绕组过负荷保护；200兆瓦及以上的发电机，保护装置可由定时限和反时限两部分组成。

#### 9. 反应发电机励磁回路接地故障的接地保护或接地检测装置

水轮发电机应装设一点接地保护，小容量机组可采用定期检测装置。汽轮发电机，对一点接地故障，可采用定期检测装置，对两点接地故障，应装设两点接地保护装置。对转子水内冷的汽轮发电机和 100 兆瓦及以上的汽轮发电机，应装设励磁回路一点接地保护和两点接地保护。

#### 10. 反应发电机励磁电流异常下降或完全消失的失磁保护

100兆瓦以下不允许失磁运行的发电机，当采用直流励磁机时，在自动灭磁开关断开后，应联锁断开发电机断路器；当采用半导体励磁系统时，则应装设专用的失磁保护。100兆瓦以下但对电力系统有重大影响的发电机和100兆瓦及

以上的发电机，应装设专用的失磁保护。

#### 11. 逆功率保护

对发电机变为电动机运行的异常运行方式，蓄能式水轮发电机和 200 兆瓦及以上的汽轮发电机，宜装设逆功率保护。

#### 12. 断线保护

200 兆瓦及以上的发电机，其机端和中性点侧的电流互感器，宜装设断线保护。

为了快速消除发电机内部的故障，在保护装置动作于发电机跳闸的同时，还必须动作于灭磁开关，断开发电机的励磁回路。

根据发电机故障和异常运行方式的性质，各项保护装置动作可达到的目的有：

##### 1. 停机

断开发电机断路器，关闭汽轮发电机的主汽门，或关闭水轮发电机的导水翼。

##### 2. 解列

断开发电机断路器，原动机甩负荷。

##### 3. 解列灭磁

断开发电机断路器、灭磁、原动机甩负荷。

##### 4. 减出力

减少原动机的输出功率。

##### 5. 母线解列

对双母线系统，断开母线联络断路器，缩小故障影响范围。

##### 6. 发信号

发出声光信号或光信号。

### 第三节 大型发电机组的特点 及对继电保护的要求

我国在 125 兆瓦双水内冷发电机组出现之后，又相继制造出 200~300 兆瓦的大型发电机组，并且在电力系统中所占的比重不断增长。大型机组与一般中、小型机组相比有如下一些特点：

(1) 体积小，材料的有效利用率大大提高，因此使机组的热容量与铜损、铁损之比显著下降，使定子绕组承受对称过负荷的能力、转子励磁绕组承受过负荷的能力以及转子表面承受负序过电流的能力降低。

(2) 容易出现局部过热。一般由于大型机组端部的漏磁增加，而定子端部的冷却条件较差，将引起机组发热。此外，当线棒为内冷方式时，由于冷却通道阻塞也会引起线棒局部过热。

(3) 惯性常数、平均异步转矩、静态稳定储备系数，都有明显地下降，因此，大型机组的稳定运行容易遭到破坏而发生摇摆现象，甚至失步。

(4) 超瞬变电抗较大，机端发生短路故障时，使短路电流水平降低。

(5) 采用了较复杂的冷却方式，如双水内冷、氢气内冷等，绕组对地的绝缘有所下降，故障的机率提高。

(6) 采用了较复杂的半导体励磁系统，由于励磁系统设备的故障机率升高，造成发电机失磁或过电压的可能性增大。

(7) 均采用单元制接线。发电机与变压器之间或机端与厂用分支之间，一般不装设断路器，单元机组与电力系统之

间的联接电抗比较大。

(8) 价值昂贵, 检修的难度与工作量大, 故障停电将造成重大的经济损失。

根据大型机组对继电保护提出的新要求, 首先应提高保护装置的可靠性, 且保护配置应尽量完善、合理, 下面是为此而采取的措施。

(1) 发电机-变压器组的纵联差动保护实现完全双重化, 提高保护装置动作的可靠性。

(2) 大型机组的定子绕组多为双分支并联, 对于中性点三个引出端的发电机, 应装设完善的匝间保护:

- 1) 反应零序电压的匝间保护;
- 2) 反应转子回路二次谐波的匝间短路保护。

(3) 增加具有 100% 保护范围的定子绕组接地保护。

(4) 增加测量对地电导的转子一点接地保护。

(5) 增加低阻抗保护, 用以作为相邻元件的后备保护。

(6) 增加反应异常运行状态的保护, 包括:

- 1) 励磁回路过负荷保护;
- 2) 逆功率保护;
- 3) 断路器失灵保护;
- 4) 非全相运行保护。

(7) 辅助保护装置。

- 1) 电流回路断线保护;
- 2) 电压回路断线保护。

大型机组的出现, 对继电保护提出了更高的要求。而现代科学技术的发展, 又使发电机组安全经济运行和预防机组损坏的保护装置, 得以不断地完善。其主要措施有:

( 1 ) 为改进并提高保护的性 能，主要措施是研制新原理的保护、提高保护的灵敏度、缩小保护的死区、提高动作的可靠性等；

( 2 ) 发展和完备反应异常工况的保护，如失磁保护、失步保护、过激磁保护、低频率保护等；

( 3 ) 发展故障预测保护，其作用是在事故演变过程中，检测机组参数的异常变化、预告信号，以做到防患于未然；

( 4 ) 发展多功能的综合保护，以提高保护的可靠性，减小保护误动或拒动的机率，并使原有复杂的保护装置得到简化。另外，在保护系统中引入了计算技术，构成计算机继电器，并形成计算机继电保护系统，这已成为继电保护技术发展的趋势。