

大型火电机组运行维护培训教材

DAXING HUODIAN JIZU YUNXING WEIHU PEIXUN JIAOCAI



电气分册

王晓春 等编著



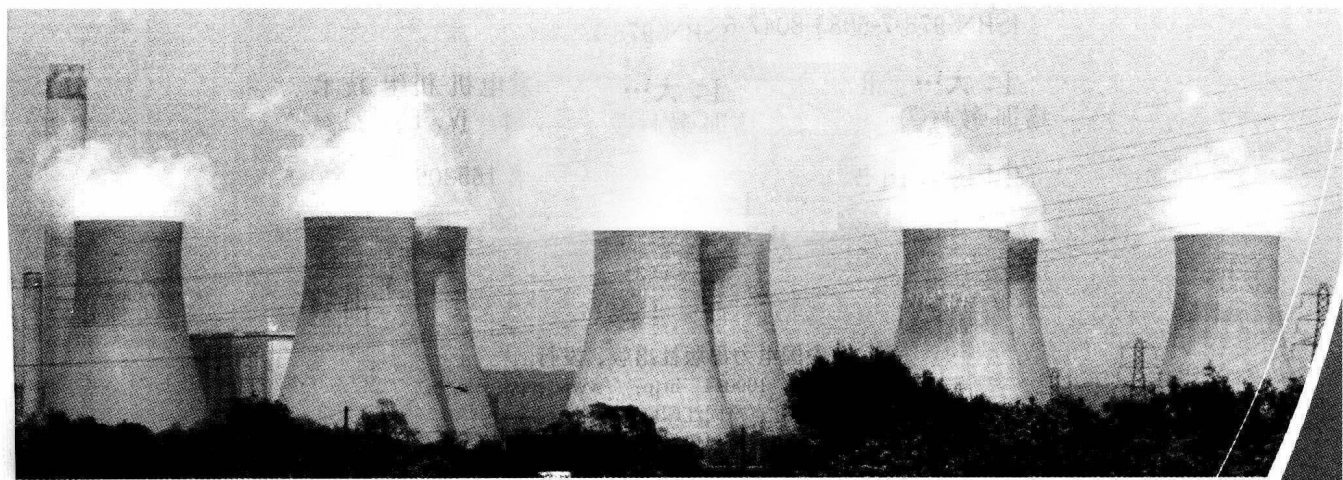
中国电力出版社

www.cepp.com.cn

大型火电机组运行维护培训教材
DAXING HUODIAN JIZU YUNXING WEIHU PEIXUN JIAOCAI

电气分册

王晓春 任效君 李 强 编著
郭希红 杨勇军 刘志青



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为《大型火电机组运行维护培训教材》之一, 本丛书按专业进行分册, 从汽轮机、锅炉、电气、热控、化学等方面较系统、完整的介绍了大型火电机组的工作原理、结构、启动、正常运行、异常运行、运行中的监视与调整、机组停运、事故处理等方面内容, 紧密结合现场实际。

本丛书的作者和审稿人均是长年工作在生产一线的技术人员, 有较好的理论基础以及丰富的实践经验和培训经验。

本册为《电气分册》主要包括大型火电汽轮发电机组电气设备概述; 大型汽轮发电机结构及其附属设备; 大型汽轮发电机励磁系统; 大型汽轮发电机的运行、维护及主要故障预防措施; 电力变压器; 变配电设备; 直流系统和直流设备; 大型汽轮发电机组继电保护; 厂用电动机等内容。

本书既可供从事大型火电机组运行维护工作的技术人员培训使用, 也可供电厂管理人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型火电机组运行维护培训教材. 电气分册/王晓春等编
著. —北京: 中国电力出版社, 2010
ISBN 978-7-5083-8047-6

I. 大… II. 王… III. ①火力发电-发电机-机组-技术培训-教材②火电厂-电气设备-技术培训-教材 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 165306 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn)
北京市同江印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2010 年 4 月第一版 2010 年 4 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.25 印张 496 千字
印数 0001—3000 册 定价 43.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

“2005-2010”

在电力工业快速持续发展的今天，积极发展清洁、高效的发电技术是国内外共同关注的问题，对于能源紧缺的我国更显得必要和迫切。在国家有关部、委的积极支持和推动下，我国大型火电机组的国产化及高效大型火电机组的应用逐步提高。我国现代化、高参数、大容量火电机组正在不断投运和筹建，其发电技术对我国社会经济发展具有非常重要的意义。因此，提高发电效率、节约能源、减少污染，是新建火电机组、改造在运发电机组的头等大事。

为帮助大型火电机组专业技术人员更快、更好地掌握新技术、新设备、新工艺，适应本职工作，了解、掌握高参数、大容量机组的结构、系统及运行知识，增强专业实践操作技能，提高处理异常、故障的应急能力，特组织专家编写本套丛书。希望广大技术人员通过本套丛书的学习，能够提高运行管理能力，做好设备的运行维护工作，从而更加有效地将这些新知识运用到实际的工作中。

本套丛书共分五册，分别为《汽轮机分册》、《锅炉分册》、《电气分册》、《热控分册》、《化学分册》，主要讲述大型火电机组的工作原理、结构、启动、正常运行、异常运行、运行中的监视与调整、机组停运、事故处理等方面内容。全书编写内容紧密结合现场实际，知识全面，数据充分。选材上注重新设备、新技术；内容上将基本理论与成功的实用技术和实际经验结合，有针对性和可操作性，突出“干什么学什么，缺什么补什么”的原则。

本丛书既可供从事大型火电机组运行维护工作的技术人员培训使用，也可供电厂管理人员和高等院校相关专业师生参考。

《电气分册》是本丛书的第三分册，本书由王晓春主编，其中，第一章、第二章、第九章由任效君编写，第三章、第八章由李强编写，第四章由王亮编写，第五章、第六章由郭希红编写，第七章由杨勇军编写，全书由王晓春统稿。本书在编写过程中，得到了很多电厂、科研院所及相关技术人员的支持和帮助，在此表示感谢。

由于编者的水平和所收集的资料有限，书中的缺点和谬误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2010年1月

目 录



前言

第一章 大型火电汽轮发电机组电气设备概述	1
第一节 电气设备主接线.....	1
第二节 厂用电系统接线及其运行方式.....	3
第三节 各级电压系统中性点接地方式.....	7
第二章 大型汽轮发电机结构及其附属设备	8
第一节 大型汽轮发电机概述.....	8
第二节 汽轮发电机主要技术参数及基本结构.....	9
第三节 大型汽轮发电机密封油系统	19
第四节 大型汽轮发电机氢气系统	22
第五节 大型汽轮发电机冷却水系统	26
第六节 大型汽轮发电机测温及监控设备	32
第七节 封闭母线	33
第三章 大型汽轮发电机励磁系统	38
第一节 大型汽轮发电机励磁系统的要求	38
第二节 机端静态励磁系统概述	39
第三节 大型汽轮发电机组励磁调节器	39
第四节 大型汽轮发电机转子过电压保护和灭磁	41
第五节 大型汽轮发电机励磁系统的运行维护	43
第四章 大型汽轮发电机的运行、维护及主要故障预防措施	45
第一节 发电机的技术性能	45
第二节 发电机运行特性	48
第三节 大型汽轮发电机运行、维护及试验	50
第四节 大型汽轮发电机的主要故障及预防措施	57
第五章 电力变压器	64
第一节 变压器基本原理	64
第二节 变压器基本构造	65
第三节 变压器额定数据	84
第四节 变压器运行维护	86
第五节 变压器试验	95

第六章 变配电设备	106
第一节 六氟化硫 (SF ₆) 断路器	106
第二节 高压隔离开关	113
第三节 少油断路器	117
第四节 真空断路器	120
第五节 低压断路器	126
第六节 互感器	142
第七节 高压架空电力线路、电力电缆	147
第八节 避雷器、电容器及接地装置	151
第七章 直流系统和直流设备	162
第一节 直流系统基本知识及运行维护	162
第二节 铅酸蓄电池基本结构及运行维护	169
第三节 碱性蓄电池基本结构及运行维护	180
第四节 阀控密封式蓄电池基本结构及运行维护	192
第五节 交流不间断电源基本结构及运行维护	202
第六节 硅整流充电装置基本结构及运行维护	211
第七节 高频开关电源基本结构及运行维护	215
第八章 大型汽轮发电机组继电保护	222
第一节 大型汽轮发电机—变压器组保护	222
第二节 大型汽轮发电机线路保护	263
第三节 大型汽轮发电机同步系统	270
第四节 低压厂用变压器及高压电动机保护	273
第五节 厂用电快速切换装置	278
第九章 厂用电动机	282
第一节 概述	282
第二节 异步电动机基本知识及运行维护	282
第三节 直流电动机基本知识及运行维护	299
附录 常用名词解释	310
参考文献	317

大型火电汽轮发电机组 电气设备概述

第一节 电气设备主接线

电气主接线是指在发电厂、变电站、电力系统中，用来输送电能并且表明高压电气设备之间相互连接关系的电路。大型火电汽轮发电机组一般采用单元线路组接线方式，称为发电机—变压器—线路组单元接线。所谓单元接线就是发电机出口直接经变压器升压接入高电压系统的接线。在发电厂发电机出口的升压变压器叫主变压器。

一、发电机—主变压器回路接线

发电机—主变压器回路接线是电厂主接线中的一部分。目前我国及许多国家的大容量机组（特别是 200MW 以上的机组）都采用单元接线，在单元接线中，发电机出线经过离相全连式封闭母线接入主变压器的低压侧，在主变压器高压侧接入系统前装设断路器、电流互感器、隔离开关、避雷器、电压互感器。主变压器高压侧、断路器、电流互感器、隔离开关、避雷器、电压互感器之间一般采用软母线连接，或者发电机出口通过封闭母线接入 GIS（SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器）系统。在发电机与主变压器的封闭母线上还并接有高压厂用变压器、避雷器、发电机电压互感器（也可接入脱硫变压器、励磁变压器）。高压厂用变压器为机组自用电提供能源，脱硫变压器为机组脱硫系统提供能源，当机组停运或启动时机组自用电由启动备用变压器提供能源。当励磁系统采用自并励方式，励磁变压器为励磁系统提供能源。这种方式当发电机停运时，单元机组从系统切出，机组厂用电倒为高压备用变压器运行方式。因此发电机出口一般不装设断路器。发电机出口不装设断路器的主要原因还有：主变压器采用双绕组变压器，主要作用是将发电机的电能升压后送入系统，若发电机停运主变压器亦可停运，没有装设断路器的必要；大容量发电机出口电流大，短路容量大，大电流发热问题与开断容量及断路器动作切断故障时的过电压问题不好解决，致使断路器制造困难，造价较高；不装设断路器可以使大电流的连接回路简化，减少元件，增加安全性，而且在发电机出口至主变压器之间采用离相封闭母线后，此段线路范围的故障可能性亦已降低。一般在发电机出口装设有可拆的连接片，以供发电机测试时用。当然，发电机出口也有装设断路器的，发电机出口装设断路器有以下好处：

（1）发电机组解、并列时，可减少主变压器高压侧断路器操作次数，特别是 500kV 或 220kV 为 3/2 接线时，能始终保持一串内的完整性。当电厂接线串数较少时，保持各串不断开（不致开环），对提高供电送电的可靠性有明显的作用。

（2）启停机组时，可用厂用高压工作变压器供厂用电，减少了厂用高压系统的倒闸操作，也简化了同期操作，从而提高了运行可靠性。当厂用工作变压器与厂用启动变压器之间的电气功角 δ 相差较大（一般大于 15° ）时，这种运行方式更为需要。

(3) 当发电机出口有断路器时, 厂用备用变压器的容量可与工作变压器容量相等, 且厂用高压备用变压器的台数可以减少。我国规程规定, 两台机组 (不设出口断路器) 要设置一台厂用备用变压器。

(4) 当发电机出口至主变压器高压侧开关之间发生故障时, 发电机出口断路器可迅速切断发电机侧提供的短路电流, 而不设出口断路器时, 发电机将一直提供短路电流, 直到发电机灭磁过程完成, 使故障设备损坏程度加剧。

发电机出口装设断路器所带来的主要缺点是: 在发电机回路增加了一个可能的事故点。

二、线路接线

如图 1-1 所示, 每两个元件 (出线或电源) 用三台断路器构成一串接至两组母线, 称为 3/2 接线。在一串中, 两个元件 (进线或出线) 各自经一台断路器接至不同母线, 两回路之间的断路器称为联络断路器。

在 600MW 机组的大容量电厂中, 广泛采用 3/2 接线。一般是机组和出线较少的情况, 如只有两台发电机和两回出线, 构成只有两串 3/2 接线。在此情况下, 电源 (进线) 和出线的接入点可采用两种方式: 一种是交叉接线, 如图 1-1 (a) 所示, 将两个同名元件 (电源或出线) 分别布置在不同串上, 并且分别靠近不同母线接入, 即电源 (变压器) 和出线相互交叉配置; 另一种是非交叉接线, 如图 1-1 (b) 所示, 它也将同名元件分别布置在不同串上, 但所有同名元件都靠近某一母线一侧 (进线都靠近一组母线, 出线都靠近另一组母线)。

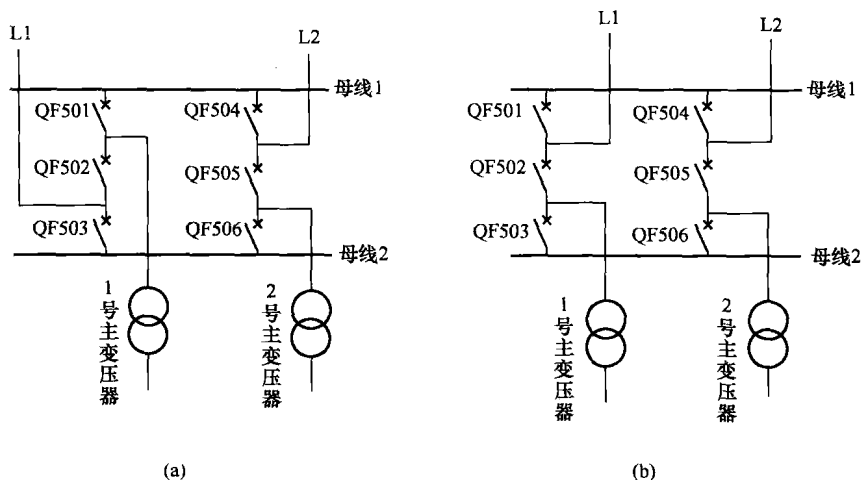


图 1-1 3/2 接线

(a) 交叉接线; (b) 非交叉接线

3/2 交叉接线比 3/2 非交叉接线具有更高的运行可靠性, 可减少特殊运行方式下事故扩大。例如图 1-1 所示一串中的联络断路器 (如 QF502) 在检修或停用, 当另一串的联络断路器发生异常跳闸或事故跳闸 (出线 L2 故障或进线 2 号主变压器回路故障) 时, 对非交叉接线将造成切除两个电源, 相应的两台发电机甩负荷至零, 电厂与系统完全解列; 而对交叉接线而言, 至少还有一个电源 (发电机—变压器组) 可向系统送电, L2 故障时 2 号主变压器向 L1 送电, 2 号主变压器故障时 1 号主变压器向 L2 送电, 仅是联络断路器 QF505 异常跳开, 不破坏两台发电机向系统送电。还有些特殊故障, 如当任一母线故障, 并发生与故障母线相连的两台断路器均拒动时, 除了由母差保护切除连接故障母线的各断路器外, 还要由拒

动的断路器启动相应的失灵保护,跳开这两串的中间两台联络断路器,这样仅切除一回电源进线和一回出线,而不至于切除相同两个电源进线或两回出线。但交叉接线的配电装置布置比较复杂,需增加一个间隔。

应当指出,当3/2接线的串数多于两串时,由于接线本身构成的闭环回路不止一个,一个串中的联络断路器检修或停用时,仍然还有闭环回路,因此不存在上述差异。3/2接线的主要优点是:

(1)运行时,两组母线和同一串的三台断路器都投入工作,称为完整串运行,形成多环路状供电,具有很高的供电可靠性。任何一台断路器故障,各回路按原方式运行。能避免由于母线故障引起的大量线路停电及电源中断。

(2)运行和调度灵活,一串中任何一台断路器退出或检修时的运行方式,称为不完整串运行,此时仍不影响任何元件的运行。

(3)这种接线运行方便、操作简单,隔离开关只在检修时作为隔离电器。

3/2接线的主要缺点是:

(1)从整个电网的角度来看,这种接线形式不能很好的形成一个合理而稳定的电网结构,因为一个合理的电网结构应该是外接电源适当分散,同时受端系统的联系应该加强,尤其是在事故情况下能对受端系统提供足够的电压支撑,能避免由于大负荷转移到相邻线路后引起的静态稳定被破坏,或受端电压大幅度下降而引起的电压崩溃。

(2)继电保护复杂。当一个电源进线或一回出线故障时,必须将该电源或出线与系统相连的两个断路器切除,设计保护逻辑时要充分考虑这一点。相应的失灵保护、重合闸逻辑也比较复杂。

(3)断路器多,投资较高。

三、启动备用变压器的引接

火力发电厂的启动备用变压器是为保证机组正常启动停机用电及厂用电源的备用电源而设置的电源系统。备用电源应具有独立性和足够的供电容量,最好能与电力系统紧密联系,在全厂停电下仍能从系统获得厂用电源。为了保证可靠性,当技术经济合理时,应由外部电网引接专用线路作备用电源。但从外部电网引接专线时投资较大,而且引接的电厂启动备用电源要按大工业用户收取基本电费和电度电费,运行费用也很高。因此,也可以根据就地实际条件进行合理的引接。

第二节 厂用电系统接线及其运行方式

一、厂用电系统电压等级选择

发电厂在启动、运转、停役、检修过程中,有大量以电动机拖动的机械设备,用以保证机组的主要设备和输煤、碎煤、除灰、除尘及水处理等辅助设备的正常运行。这些电动机以及全厂的运行、操作、试验、检修、照明等用电设备都属于厂用负荷,总的耗电量,统称为厂用电。厂用电的电量,一般由发电厂本身供给。其耗电量与电厂类型、机械化和自动化程度、燃料种类及其燃烧方式、蒸汽参数等因素有关。厂用电耗电量占发电厂全部发电量的百分数,称为厂用电率。厂用电率是发电厂运行的主要经济指标之一。

在我国发电厂厂用电高压部分电压等级有:3、6、10kV。低压部分一般选400V。厂



用电部分的接线大体为：发电机出口接高压厂用变压器，高压厂用变压器带高压配电母线。厂用电电压等级主要是根据厂用电动机容量来确定。电压等级选择太高，相同功率下虽然可以降低设备的额定电流值和短路电流值，但随着绝缘强度的提高投资也在提高。电压等级选择太小，设备的额定电流和短路电流值将增大，在启动大容量电动机时，母线电压降幅太大，影响设备的正常运行，甚至会发生低电压负荷掉闸。设备额定电流和短路电流的增大要求断路器的性能要提高，以满足运行要求。所以厂用电电压等级的选择一定要合理。如当给水泵电动机功率为 11 000kW。当厂用电采用 6kV 电压系统时，给水泵启动时的母线压降很大，会影响其他设备的正常运行，而采用 10kV 电压系统时就可以解决这个问题，所以高压厂用电电压选择 10kV。厂用电接线方式合理与否，对机、炉、电的辅机以及整个发电厂的工作可靠性有很大影响。厂用电的接线应保证厂用供电的连续性，使发电厂能安全满负荷发电，并满足运行安全可靠、灵活方便等要求。600MW 机组通常都为一机一炉单元式设置，采用机、炉、电为单元的控制方式，因此，厂用电系统也按单元设置，各台机组单元（包括机、炉、电）的厂用电系统必须是独立的，而且采用多段单母线供电。发电厂的厂用电源，必须供电可靠，且能满足电厂各种工作状态的要求，除应具有正常的工作电源外，还应设置备用电源、启动电源和事故保安电源。一般电厂中都以启动电源兼作备用电源。

二、10kV 厂用电系统接线及其运行方式

图 1-2 所示为某厂 600MW1 号机组厂用电系统部分接线图，并以此为例介绍一下厂用电系统运行方式。

600MW 机组采用发电机—变压器组单元接线，并采用分相封闭母线。机组厂用电源从发电机至主变压器之间的封闭母线引接，从发电机出口经变比为 20kV/10kV 的高压厂用变

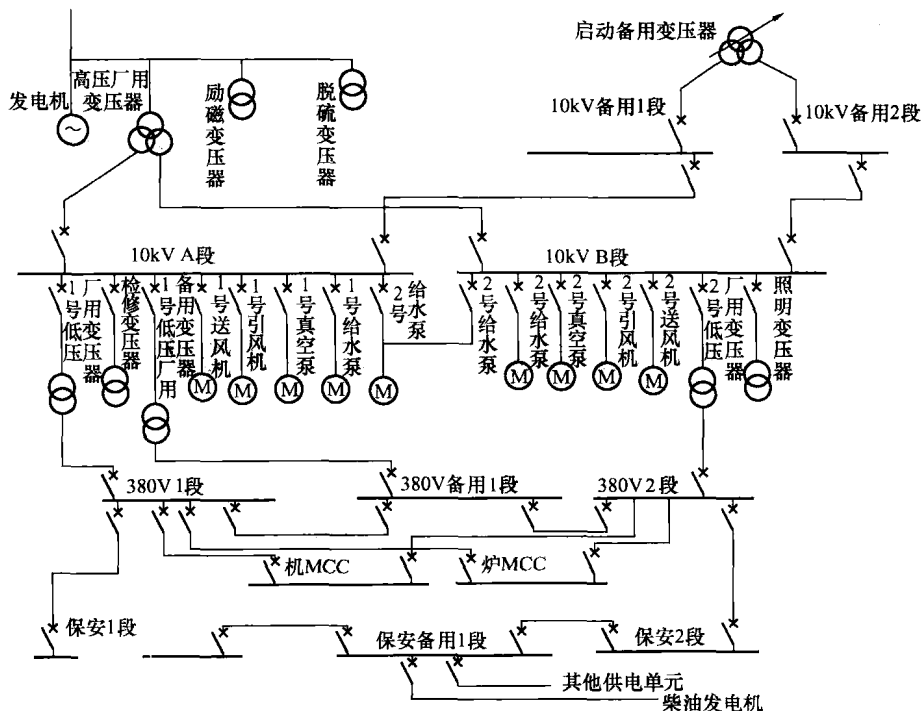


图 1-2 某厂 1 号机组厂用电系统部分接线图

压器将发电机出口电压 20kV 变为所要高压厂用电压 10kV。高压厂用变压器低压侧的两个分裂绕组各带一段 10kV 母线，即 10kV A 段和 10kV B 段。在 10kV 母线上除了高压厂用变压器提供电源外，还有高压厂用备用变压器提供一路电源，高压厂用变压器所带的电源叫工作电源，高压厂用备用变压器所带的电源叫备用电源。机组正常运行时，厂用 10kV A、B 段母线由 1 号机高压厂用变压器供电，而脱硫系统负荷由脱硫变压器供电。厂用 10kV 母线接带的负荷有给水泵、凝结水泵、引风机、送风机、一次风机、磨煤机等高压厂用电动机，低压厂用变压器等。由于 10kV 分为两段母线，所以要将负荷合理分配在两段母线上，保证两段母线在正常运行时负荷基本平衡，同类负荷要分别布置于不同的两段，如 1 号凝结泵接于 A 段，2 号凝结泵接于 B 段，这样当一段有故障或停电时，机组的其他设备还可以运行，增强运行可靠性。因为发电机出口未装设断路器，主变压器、高压厂用变压器都得随机组启停，因此在机组停运期间，包括启动初期和停机前落负荷到 30% 以后，这些厂用负荷都要倒为启动备用变压器带。机组正常运行中发生故障停机，厂用负荷也会由厂用电快速切换装置自动切换为启动备用变压器带。

三、400V 厂用电系统接线及其运行方式

400V 厂用电系统按布局一般分为主厂房和外围两部分。位于主厂房布置的 400V 配电系统所带负荷一般为机炉房设备或少量外围的重要设备，其工作电源由低厂用变压器带，其备用电源由低压厂用备用变压器带，一般一台机组设立一台低压厂用备用变压器，低压厂用备用变压器为主厂房内 400V 几段母线共用的备用电源如图 1-2 所示。

在外围布置的 400V 配电系统所带一般为公用系统，如输煤、污水处理、化学、空压机等系统。它们的工作电源取至不同的机组，每两段母线之间设置一台联络开关，通过联络开关两段母线实现互为备用。如图 1-3 所示，化学 1 段工作电源取至 1 号机组，化学 2 段工作电源取至 2 号机组，FQH00 作为化学 1、2 段母线的联络断路器。当 FQH11 退出运行时，FQH21 可通过合入 FQH00 串带化学 1 段。一般联络断路器不设自动投入，因为在正常情况下，外围 400V 配电系统单段所带设备可以满足机组正常运行。假如由于某种故障 1 段的工作电源失掉，联络断路器未自投，那么 2 段可以正常运行，确实查明 1 段母线没有问题可手动投入联络断路器，如果联络断路器合在故障点上，那么 2 段的工作电源亦有可能失掉，这就造成了两段母线全停的局面，严重影响机组的可靠运行，甚至会造成机组停运。

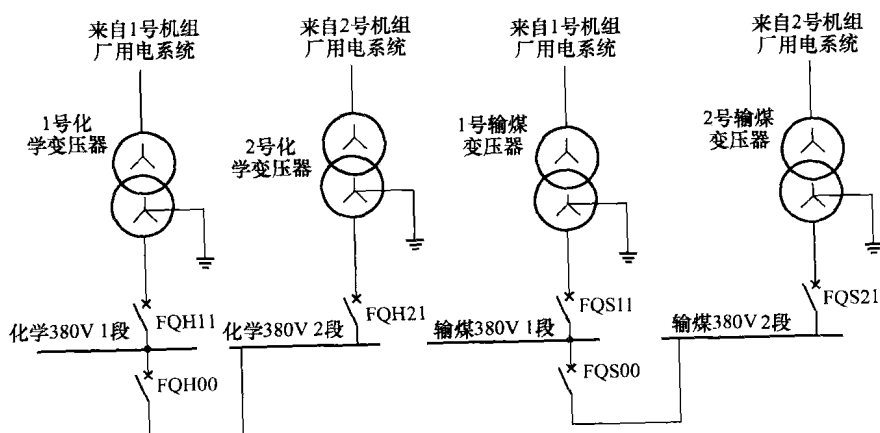


图 1-3 外围公用系统接线方式



在低压配电系统中,为了合理供电,减少投资,在负荷集中的地点一般设有 400V 专用盘,专用盘的负荷一般是容量较小的辅助设备。专用盘一般有两路电源供电,两路电源取至同一机组不同的 400V 配电盘。一路工作一路备用,根据需要两路电源可以实现联动。

厂用 400V 配电盘也叫动力中心 (Power Center),简称 PC 盘,就地所设专用盘也叫电动机控制中心 (Moter Control Center),简称 MCC 盘。

四、保安电源

在发电厂的设备中,有的设备不但在机组运行中不能停电,就是在机组停运后相当一段时间内也不能停止供电。保安电源用来满足机组停运后部分设备继续运转,起到保护机炉设备不致造成损坏和部分电气设备电源正常运转的作用。在采用单元接线方式的机组中保安段的工作电源取至机组厂用 400V 配电盘,其备用电源要从机组以外的其他系统引接,以确保保安段的可靠性。

1. 保安电源的特点

与一般低压厂用电源比较,保安电源有以下特点:

(1) 保安备用电源必须具有相对独立性。保安备用电源不能取自本发电机组;也不能取自受本机组运行方式影响大的电气系统,当发电机及其系统有故障时,保安备用电源应不受影响;也不能取自与机组的高压备用电源联系密切的系统。这样才能保证在发电机或备用电源故障时起到安全可靠供电作用。

(2) 保安备用电源要十分可靠。保安备用电源应能保证在任何情况下随时能投入运行,不得发生拒投现象。如果发生拒投,又在很短时间内无法修复,则将会导致严重的设备损坏,如发电机顶轴油泵、盘车电动机无法运转,会造成发电机大轴弯曲。

(3) 保安备用电源应具有快速投入的性能。当机组故障等原因造成保安段母线电源消失时,保安备用电源应快速投入,以便很快恢复保安段母线电压,维持设备运转。

2. 保安段供电的负荷类型

(1) 机组正常运行中、停机过程中、停机后一段时间内都要求能有可靠的电源,以避免设备损坏的机炉负荷,如给水泵润滑油泵、锅炉空气预热器等。

(2) 发电机停机过程中或停机后仍须运转的设备,如润滑油泵、顶轴油泵、盘车电动机、密封油泵等。

(3) 蓄电池组的充电设备。

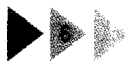
(4) 其他与运行有关的设备,如交流事故照明、电梯电源、部分热工电源等。

3. 接线及运行方式

如图 1-2 所示,该单元机组保安段共有三段,即保安 1 段、保安 2 段、保安备用段。保安 1、2 段的工作电源取自厂用 380V 1、2 段,备用电源取自保安备用段。保安备用段有两路电源供电,一路取自与本机组无关的其他供电单元,另一路取自柴油发电机。

保安段正常运行时由厂用 380V 段供电,当工作电源因故障跳闸时,备用电源立即投入运行,以保证供电可靠性。

保安备用段正常运行时由本机外的其他单元供电,当该电源有问题不能投入时,柴油发电机立即启动,向保安段供电。



第三节 各级电压系统中性点接地方式

一、电力系统中性点接地方式概述

电力系统中性点是指电力系统中星形联结的发电机或变压器的中性点。中性点运行方式主要有直接接地方式、不接地方式和经消弧线圈、中电阻或电感补偿并联高电阻的接地方式三种。

在中性点直接接地系统中,一旦发生单相接地故障,接地故障电流会很大,保护将立即作用于跳闸,断开故障设备,因此其供电可靠性比较差。这种接地方式的好处在于,一相接地时,非故障相电压不会升高到线电压,系统中所有设备的绝缘可以按照相电压来设计,节约设备造价。这一点对高电压系统非常重要,所以 110kV 及以上系统通常采用中性点直接接地运行方式。中性点不接地系统正好相反,发生单相接地故障时,流过故障点的电流为较小的电容性电流,且三相线电压仍基本平衡,当系统的单相接地电容电流小于 10A 时,一般允许继续运行,为处理故障争取了时间,相应地提高了供电可靠性,所以这种运行方式广泛应用于 35kV 以下电网系统。至于因此引起的绝缘造价提高,对这些电压较低的系统已经不是什么重要问题。

在中性点不接地系统中,若单相接地电容电流大于 10A 时,接地处的电弧(非金属性接地)不易自动消除,将产生较高的电弧接地过电压(可达额定相电压幅值的 3.5 倍),并容易发展为多相短路。对于发电机来说,电弧还可能灼伤铁芯,因此接地保护应动作于跳闸。所以,当单相接地电容电流小于 10A 时,可采用高电阻接地方式,也可采用不接地方式,而当接地电容电流大于 10A 时,可采用中电阻接地方式,也可采用电感补偿(消弧线圈)或电感补偿并联高电阻的接地方式。目前电厂的高压厂用电系统多采用中性点经电阻接地的方式,而发电机多采用中性点经二次侧为接地电阻的单相接地变压器接地。

二、发电厂各级电压系统中性点接地方式

中性点接地方式的选择要根据机组参数、系统参数、电压等级、运行可靠性等参数来确定。一般情况下:

- (1) 500kV 主变压器及启动备用变压器高压侧中性点为直接接地;
- (2) 220、110kV 系统中性点要根据调度要求选择接地方式;
- (3) 高压厂用配电系统为中性点不接地或经中电阻接地;
- (4) 主厂房低压厂用配电系统为中性点不接地或经高电阻接地,但为了方便 220V 电压的引接主厂房厂用配电系统也有选用中性点直接接地的;
- (5) 保安段为中性点不接地,交流事故照明变压器通过隔离变压器接在保安段,由中性点不接地方式变为中性点接地方式;
- (6) 外围及公用低压配电系统一般为中性点直接接地方式;
- (7) 发电机中性点一般经过消弧电抗器接地,或经二次侧接单相接地变压器接地,以减少接地故障电流对定子铁芯的损害和抑制故障暂态电压不超过额定相电压的 2.6 倍。

第二章

大型汽轮发电机结构及其
附属设备

第一节 大型汽轮发电机概述

随着电力事业的发展,单机容量越来越大,而且系统中单机大容量机组所占的比例也越来越大。目前,国外汽轮发电机的最大单机容量已达 1500MW,我国电网中也出现大量 600MW 机组,随着单机容量的提高,发电机在结构上有了如下新的特点。

(1) 大容量发电机转子成为细长的圆柱体。汽轮发电机的视在功率 (kVA) 可表达为

$$S = KA_1 B_s D_i L n_N \quad (2-1)$$

其中

$$A_1 = I_N N_c / T_1$$

式中 K ——系数,通常取 1.1;

A_1 ——定子绕组负荷, A/cm;

B_s ——气隙中的高斯磁通密度, Gs;

D_i ——定子膛的直径, cm;

L ——有效铁芯长度, cm;

n_N ——额定转速, r/min;

I_N ——定子额定电流, A;

N_c ——每槽有效导体数;

T_1 ——沿定子膛圆周的槽距, cm。

为了提高发电机的单机容量,必须增大式 (2-1) 中右边各量。由于受硅钢片材料磁饱和的限制,高斯磁通密度 B_s 变化不大。一般发电机采用的 B_s 为 9000~9500Gs。定子铁芯长度 L 受到铁路运输的限制。汽轮发电机转子中心孔处的切向应力约与转子本体直径的三次方成正比,两极汽轮发电机的转子本体直径达 1.25m 时,其中心孔的切向应力已接近目前锻件允许应力的极限。因此,一般应尽可能采用较小的直径,以降低中心孔应力。转子直径确定后,定子膛内 D_i 也就确定了。

转子长度 L_2 与转子直径 D_2 的比值由转子机械应力、临界转速振动、用铜量、损耗等一系列因素决定,并随容量增加而增大,大约是 $6.5 \geq L_2/D_2 \geq 3$, 125MW 及以下为 3, 200MW 为 4~4.9, 300MW 为 5~5.4。可见,大容量发电机转子已成为细长的圆柱体,这是大容量汽轮发电机结构的一个特点。一般要求定子铁芯长度小于转子长度,以降低定子漏磁及其引起的附加损耗。显然,细长转子的刚度、振动等将影响和限制汽轮发电机向更大容量发展。

(2) 大容量发电机采用直接冷却技术。由于额定转速不变,发电机容量的增加,主要依靠定子绕组负荷 A_1 的增加 (一般为 1000~2000A 以上),而定子尺寸受到限制,就只有增

加绕组的电流密度（定子电流密度为 $6 \sim 10 \text{ A/mm}^2$ ，转子电流密度为 $6 \sim 12 \text{ A/mm}^2$ 或 $9 \sim 15 \text{ A/mm}^2$ ）。绕组的电流密度越大，散出的热量越多，因此增大单机容量的关键是采用有效的措施，提高发电机的冷却效果。

大容量发电机几乎都采用先进的内冷技术，即直接冷却技术。首先采用的是氢气直接冷却转子绕组，目前，已制造出容量为几百兆瓦的采用氢气定、转子绕组双内冷的汽轮发电机。由于水的冷却能力比空气大 50 倍，因此采用水内冷可大大提高发电机的单机容量。目前，世界上特大容量的汽轮发电机，定子绕组主要是采用水内冷，而转子绕组基本上采用氢内冷。表 2-1 所示为发电机冷却介质（空气、氢气、变压器油、水）特性比较情况。

表 2-1 冷却介质特性比较（与空气比）

冷却介质 特 性	空 气	氢气 (0.2 MPa/cm^2)	变压器油	水
密度	1	0.21	848	1000
体积热容量	1	9.0	1400	3500
导热系数	1	7.0	5.3	23
消耗量	1	1.0	0.01	0.01
传热能力	1	3.0	21	50

直接冷却的大容量汽轮发电机，根据容量不同，其冷却系统可采用下列不同的组合方式。

1) 定子绕组和铁芯采用氢气表面冷却，转子绕组采用氢内冷（如国产 TQN-100-2 型，苏联 TB-120-2 型），此方式的单机容量可达 250MW。

2) 定、转子绕组采用氢内冷，定子铁芯采用氢表面冷却（如前苏联 TrB 系列，容量为 200~300MW）。此方式的单机容量可达 1000MW。

3) 定子绕组采用水内冷，定子铁芯采用氢表面冷却（如前苏联 TBB 系统，容量为 150~800MW）。此方式的单机容量可达 1200MW。

4) 定、转子绕组采用水内冷，定子铁芯采用空气冷却（如国产 QFS-50-2 型，QFS-75-2 型及 QFS-300-2 型）。

5) 定、转子采用水内冷，定子铁芯采用氢表面冷却（如前苏联 TrB-500 型）。

6) 定、转子绕组及定子铁芯均采用水内冷，单机容量可达 1500MW。

由于采用了氢、水等冷却介质直接冷却发电机，因而相应地增加了冷却介质的循环冷却、供给、监测、自动控制、保护等系统。

第二节 汽轮发电机主要技术参数及基本结构

现以最常用的 QFSN-600-2YHG 型汽轮发电机为例进行介绍。

一、QFSN-600-2YHG 型汽轮发电机主要技术参数（见表 2-2）

表 2-2 QFSN-600-2YHG 型汽轮发电机主要技术参数

序 号	名 称	单 位	设计值	备 注
1	规格型号			
	发电机型号		QFSN-600-2YHG	

续表

序 号	名 称	单 位	设计值	备 注
	额定容量	MVA	667.667	
	额定功率	MW	600	
	最大连续输出功率	MW	654	与汽轮机匹配
	定子额定电压	kV	20	
	定子额定电流	A	19 245	
	功率因数		0.9	
	额定频率	Hz	50	
	额定转速	r/min	3000	
	额定励磁电压	V	421.8	
	额定励磁电流	A	4128	
	定子绕组接线方式		YY	
	冷却方式		水氢氢	
	励磁方式		静止励磁	
	通风方式		转子绕组气隙取气 多路径向通风	
2	定子			
	定子槽数		42	
	定子每槽导体数		2	
	定子每相串联匝数	匝	7	
	定子绕组对地绝缘厚度	mm	5.5	
	定子绕组匝间最大电压	V	7143	
	定子绕组工频绝缘强度	V	$\geq 43\ 000$	
	定子绕组冲击绝缘强度	V	$\geq 72\ 000$	
	定子绕组每相对地电容 C_{ph}	μF	0.227	
3	转子			
	转子槽数		32	
	转子每槽匝数		8	1号槽为6
	转子导体总匝数		124	
	转子对地绝缘强度	mm	1.3	
	转子工频绝缘强度	V	$\geq 10U_{FN}$	
	转子绕组电感 L_F	H	0.739	
4	电阻和电抗			
	定子每相直流电阻 (75℃)	Ω	0.001 488	
	转子线圈直流电阻 (75℃)	Ω	0.097 444	
	直轴同步电抗 X_d	%	226.963	
	横轴同步电抗 X_q	%	220.928	
	直轴瞬变电抗 X'_d	%	22.710/30.353	饱和值/不饱和值
	横轴同步电抗 X'_q	%	39.195/44.540	饱和值/不饱和值
	直轴超瞬变电抗 X''_d	%	20.383/22.156	饱和值/不饱和值
	横轴超同步电抗 X''_q	%	19.840/21.566	饱和值/不饱和值
	零序电抗 X_0	%	9.568/10.072	饱和值/不饱和值
	负序电抗 X_2	%	20.112/21.861	饱和值/不饱和值
	定子绕组漏抗 X_L	%	15.761	

续表

序 号	名 称	单 位	设计值	备 注
	转子绕组漏抗 X_F	%	15.675	
	正序电阻	%	0.400	
	负序电阻	%	3.736	
	发电机波阻抗	Ω	74.793	
5	时间常数			
	直轴开路瞬变时间常数 T'_{do}	s	8.724	
	横轴开路瞬变时间常数 T'_{qo}	s	0.969	
	直轴短路瞬变时间常数 T'_d	s	1.027	
	横轴短路瞬变时间常数 T'_q	s	0.173	
	直轴开路超瞬变时间常数 T''_{do}	s	0.045	
	横轴开路超瞬变时间常数 T''_{qo}	s	0.069	
	直轴短路超瞬变时间常数 T''_d	s	0.035	
	横轴短路超瞬变时间常数 T''_q	s	0.035	
	直轴短路瞬变时间常数 T_d	s	1.027	
	电枢绕组短路电流直流分量时间常数	s	0.258	
6	突然短路电流			
	三相短路超瞬变电流初始值		5.341 939 053	标么值
	三相短路瞬变电流初始值		4.179 806 031	标么值
	三相短路非周期分量		6.938 201 258	标么值
	三相短路电流有效值初始值		8.756 423 33	标么值
	三相短路电流幅值初始值		14.492 843 92	标么值
	三相短路稳态电流		1.517 166 402	标么值
	两相短路超瞬变电流初始值		4.657 214 676	标么值
	两相短路瞬变电流初始值		4.129 910 908	标么值
	两相短路非周期分量		6.048 869 596	标么值
	两相短路电流有效值初始值		7.634 033 791	标么值
	两相短路电流幅值初始值		12.635 165 75	标么值
	两相短路稳态电流		2.413 904 605	标么值
	单相短路超瞬变电流初始值		6.524 863 295	标么值
	单相短路瞬变电流初始值		5.939 490 286	标么值
	单相短路非周期分量		8.474 603 374	标么值
	单相短路电流有效值初始值		10.695 454 33	标么值
	单相短路电流幅值初始值		17.702 153 54	标么值
	单相短路稳态电流		4.025 131 853	标么值
7	其他参数			
	短路比		0.52	
	稳态负序承载能力 I_2/I_N	%	8	最大稳态值
	暂态负序电流能力 $(I_2/I_N)^2/t$	s	≥ 10	最大暂态值
	电压谐波因数	%	1.4/1.5/0.3	线—线间/线—中性点间 /剩余 (开口三角形)
	电压波形正弦畸变率	%	0.258	
	发电机噪声水平	dB	≤ 90	
	定子绕组平均温升	K	22.1	