

水电厂 发电机励磁系统设计

SHUIDIANCHANG

FADIANJI LICI XITONG SHEJI

梁建行 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

水电厂 发电机励磁系统设计

SHUIDIANCHANG

FADIANJI LICI XITONG SHEJI

梁建行 梁 波 陈红君 邹来勇 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书阐述目前国内外水电厂常用的水轮发电机自并励励磁系统的工程设计技术,给出励磁系统工作参数及设备的选择计算方法。

全书共 9 章及 4 个附录,分别阐述了励磁系统总体技术要求及自并励励磁系统的特点;励磁变压器及功率整流器的技术要求及参数计算选择;励磁系统过电压保护的要求、工作原理、参数及整定值计算选择;励磁调节器功能、结构及数学模型,包括电力系统稳定器(PSS)工作原理及模型;发电机常用灭磁方式的工作原理、灭磁过程参数计算及磁场断路器和灭磁电阻参数的选择;励磁系统的操作及测量信号、电磁兼容、性能指标的技术要求;几种励磁控制方式下励磁系统的性能分析、磁场断路器产品性能参数、快速熔断器额定电压选择对转子电压的考虑及励磁系统常用的术语和缩略语。

本书可供从事发电机励磁系统设计、研究、制造、试验、运行及维护人员参考,并可作为大专院校电力专业师生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水电厂发电机励磁系统设计 / 梁建行等编著. —北京:中国电力出版社, 2015.10

ISBN 978-7-5123-6881-1

I. ①水… II. ①梁… III. ①水力发电站—发电机—励磁系统—系统设计 IV. ①TV734.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 290154 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 10 月第一版 2015 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 350 千字

印数 0001—2000 册 定价 48.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

励磁系统是发电机组的重要组成部分。励磁系统提供发电机运行所需的励磁，通过控制励磁维持发电机的机端电压和提高电力系统运行的稳定性。在发电机或发电机变压器组内部短路时，励磁系统的灭磁装置自动对发电机进行灭磁，快速消耗发电机转子中的储能，降低发电机定子的电动势，以防止事故扩大和减少设备损坏。发电机励磁系统的运行性能，直接关系着发电机和电力系统的安全可靠及稳定性运行。

发电机励磁系统通常由励磁功率源、励磁调节器及灭磁装置等设备组成。随着实际应用经验的积累及新技术的应用，发电机励磁系统技术在不断地改进与更新。较早期的励磁系统为直流励磁机及电磁型励磁调节器，当今的水轮发电机，基本上采用由可控晶闸管整流电源及微机调节器构成的高起始响应的励磁系统，以更好的性能满足电厂及电力系统的要求。本书从发电机励磁系统的工程设计及运行应用方面，阐述目前国内外水电厂常用的发电机自并励励磁系统的设计技术，包括励磁系统及其各个组成部分的工作原理、技术要求、参数及设备的选择计算方法等，并分别给出工程设计选择计算实例。

书中基于水电厂水轮发电机励磁系统设计的论述与计算，也可作为其他同步电机励磁系统设计和计算的参考。

本书由长江水利委员会长江勘测规划设计研究院梁建行、梁波、陈红君、邹来勇编写。其中梁建行编写第一章第一、二节，第三章第一、二、三节，第五章第三、四节，与梁波合编第三章第七节及第四章第一节，与邹来勇合编第四章第二、三节和附录 A；梁波编写第一章第三节，第二章，第三章第四、六节，第六章第三、四、五、九节，附录 B，与梁建行合编第三章第七节及第四章第一节；陈红君编写第四章第四节，第五章第一、二节，第六章第一、二节，第七章，附录 C；邹来勇编写第一章第四节，第三章第五节，第六章第六、七、八节，第八章，第九章，附录 D，与梁建行

合编第四章第二、三节和附录 A。全书由梁建行主编。长江水利委员会长江勘测规划设计研究院高光华、易先举参加了全书的编审工作，汪祖禄参加了部分章节的校审工作。

承蒙上海交通大学陈陈教授、水电水利规划总院叶钟黎教授级高级工程师、长江水利委员会长江勘测规划设计研究院邵建雄教授级高级工程师、中国科学院等离子体物理研究所李自淳及彭辉研究员、国网电力科学研究院南京南瑞集团公司电气控制分公司许其品总工程师、广州电器科学研究院熊巍教授级高级工程师、顺德电气有限公司刘燕总工程师、湖北电力调控中心孙建波教授级高级工程师对初稿的审阅，提出了很多宝贵意见和建议，在此深表感谢。

限于作者水平，书中不足之处，敬请读者批评指正。



目 录

前言

第一章 励磁系统的任务及要求	1
第一节 励磁系统的任务	1
第二节 励磁系统总体技术要求	2
第三节 自并励励磁方式的特点	4
第四节 发电机自并励励磁系统结构例	7
第二章 励磁变压器	10
第一节 励磁变压器的一般要求	10
第二节 励磁变压器的类型、接线组别、使用条件及温升限值	11
第三节 励磁变压器的低压绕组额定电压及额定容量的计算	15
第四节 励磁变压器的电流互感器配置及参数选择	18
第五节 励磁变压器及其辅助设备参数计算例	23
第三章 励磁功率整流器	29
第一节 励磁功率整流器的一般要求	29
第二节 晶闸管全控桥式整流器工作原理	30
第三节 晶闸管参数及选择计算	36
第四节 整流器晶闸管的快速熔断器保护	43
第五节 整流器的冷却方式	49
第六节 整流器交、直流侧电缆	53
第七节 励磁功率整流器参数计算及接线例	56
第四章 励磁系统过电压及保护	63
第一节 励磁系统过电压及过电压保护配置	63
第二节 晶闸管及整流器交流侧过电压保护	65
第三节 整流器直流侧过电压（转子过电压）保护	74
第四节 励磁系统过电压保护计算例	82
第五章 励磁调节器及励磁控制	86
第一节 励磁调节器的功能要求	86
第二节 励磁调节器结构	92
第三节 励磁控制方式及数学模型	93
第四节 电力系统稳定器（PSS）	98

第六章 发电机的灭磁系统	103
第一节 发电机灭磁系统的要求	103
第二节 自并励发电机常用的灭磁方式及选择	105
第三节 直流灭磁系统磁场断路器的选择计算	128
第四节 交流灭磁系统磁场断路器的选择计算	139
第五节 交直流灭磁系统磁场断路器的选择计算	144
第六节 灭磁过程及灭磁电阻容量的选择计算	146
第七节 灭磁电阻最高灭磁电压及整组性能常数的选择计算	153
第八节 发电机的逆变灭磁	156
第九节 灭磁过程参数及灭磁系统设备选择计算例	158
第七章 励磁系统的操作、测量及信号	169
第一节 励磁系统的运行操作	169
第二节 磁场断路器的操作	170
第三节 发电机的起励	172
第四节 机组开、停机过程的励磁系统控制	174
第五节 机组采用电气制动时的励磁系统及控制	176
第六节 励磁系统的电气测量、信号及与外部系统的接口	178
第八章 励磁系统的电磁兼容	182
第一节 励磁系统的电磁兼容性要求	182
第二节 与电磁兼容相关的电厂设计	184
第九章 励磁系统的性能指标	186
附录 A 几种励磁控制方式下（电压偏差、电力系统稳定器、强力调节）的励磁系统特性分析	189
附录 B 磁场断路器产品性能参数	202
附录 C 快速熔断器额定电压选择对转子电压的考虑	214
附录 D 术语及缩略语	218
参考文献	227



第一章

励磁系统的任务及要求

第一节 励磁系统的任务

励磁系统提供并控制发电机励磁，是发电机的重要组成部分。其主要任务如下：

1. 提供发电机在各种运行方式下所需要的励磁

发电机运行所需的励磁由励磁系统提供。发电机对励磁电压及电流的需要随运行方式改变而改变，励磁系统应能提供发电机在各种运行方式下要求的励磁，保证发电机的安全可靠运行。

2. 维持发电机机端电压

励磁系统按电厂及电力系统的要求，对发电机励磁进行调节与控制，使发电机机端电压维持在给定值运行，并具有满足要求的调节性能。电厂及电力系统的要求通常包括对机端电压给定值或电压变化范围、机端电压调差率等。维持机端电压的励磁调节及控制通常包括发电机正常运行的调节及对发电机励磁的限制（包括异常情况下的限制）。励磁系统的调节性能应满足有关标准规定的要求，包括电压响应时间、调压精度、对阶跃响应的超调量及振荡次数，以及无功功率在并列运行发电机间分配的稳定性等。

发电机机端的电压水平，关系着电厂及电网高压母线电压的维持，直接影响着供电的质量及电网运行的稳定性。因此，维持发电机机端电压在给定值运行是发电机励磁系统的基本任务。

3. 提高电力系统的稳定性

采用励磁控制提高电力系统稳定，是电力系统稳定措施中最为经济有效的措施。分析、试验及实际应用表明，在励磁系统中设置电力系统稳定控制单元，如电力系统稳定器（PSS，Power System Stability）或采用最优控制等，可提高电力系统的小干扰和大干扰稳定性，包括功角及电压稳定性^[1]。电力系统中的发电机，应根据电力系统的要求在励磁系统中设置电力系统稳定器或采用最优控制。

在电力系统发生短路、主输电线或大机组切除等大扰动时，分析及试验表明，发电机配置高起始电压响应励磁系统，可以提高电力系统大干扰稳定性，或改善电力系统大干扰下的稳定条件^[1]（如减少相关电厂的切机台数、避免装设复杂的稳定措施）。一般而言，较高顶值电压倍数及较高电压响应速度的励磁系统，更有利于电力系统大干扰稳定性的改善与提高。故电力系统出于大干扰稳定的需要，可能要求某些电厂的发电机励磁系统取较高的顶值电压倍数。

4. 对发电机进行快速灭磁及对发电机转子过电压进行保护

发电机或发电机变压器组内部短路或发电机误强励时，在继电保护动作跳发电机或发电机变压器组断路器后，短路点或误强励仍然存在，继续威胁着发电机或变压器设备的安全。此时，避免或限制事故扩大、减少设备损坏的仅有措施是切断发电机的励磁电源，快速消耗发电机转子中储存的磁场能量以迅速降低发电机定子的电动势，即对发电机进行快



速灭磁。按照我国标准 GB/T 7409.3《同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求》和 DL/T 583《大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件》的规定，大中型发电机的励磁系统均应具有灭磁功能并应装设灭磁装置。

在发电机失步、非全相、机端短路等故障，或在电力系统操作、雷击等情况下，发电机转子将出现过电压，过电压可能超过发电机转子绝缘和励磁系统功率整流器晶闸管的承受能力，进而威胁机组及励磁系统的安全。励磁系统需装设转子过电压保护，以抑制在发电机转子及励磁功率整流器直流侧出现的过电压，包括抑制正向与反向过电压和来自整流器侧与发电机转子的过电压。

第二节 励磁系统总体技术要求

为保证发电机及电力系统的安全可靠和稳定运行，发电机励磁系统应能在电力系统及电厂的各种运行方式和各种运行条件下，提供发电机所需的励磁并满足电力系统及电厂对发电机励磁的控制要求。具体的技术要求主要包括：

(1) 励磁系统应能在发电机规定的运行条件下，提供发电机需要的励磁，并应在励磁电流和电压不超过其 1.1 倍额定值条件下长期连续运行。发电机规定的运行条件，通常包括发电机的额定容量、规定的功率因数范围（迟相和进相）、额定频率和额定电压及其规定的偏差范围等。

(2) 励磁系统应满足发电机强励时的励磁顶值电压、顶值电流、顶值电流的持续时间和电压响应时间的要求。

发电机的励磁系统顶值电压要求通常由电力系统提供，包括励磁顶值电压倍数和励磁系统保证该倍数的电力系统及电厂的运行条件。按照 IEEE 421.1《关于同步电机励磁系统的定义》，励磁顶值电压是励磁系统在规定条件下可提供的最大直流电压。励磁顶值电压倍数是励磁系统顶值电压与发电机额定励磁电压之比。按照我国标准 GB/T 7409.3《同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求》的规定，对励磁电源取自发电机端电势源静止励磁系统，其励磁顶值电压倍数应按 80% 的发电机额定电压计算。故对采用自并励励磁方式的发电机（励磁变压器通常接于机端），发电机的励磁顶值电压倍数是指发电机端电压（通常指正序电压）下降到 80% 的发电机额定电压时，励磁系统可提供的最大直流电压与发电机额定励磁电压之比。励磁顶值电压倍数通常由电力系统相关部门根据电力系统稳定（通常为大于干扰稳定）的要求确定。

根据 IEEE 及我国的有关标准，发电机的励磁系统顶值电流是指励磁系统所能提供的最大励磁电流。通常指在规定的强励时间内，励磁系统可输出的最大直流电流。发电机的励磁系统顶值电流及其持续时间，通常应满足电力系统及电厂的要求，并取决于励磁系统设备或发电机转子回路的热承受能力。对于水轮发电机励磁系统，我国有关规程规定在输出顶值电流情况下，允许持续时间应不小于 20s。

励磁系统电压响应时间，根据 DL/T 583《大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件》的规定，是指从对励磁系统施加阶跃电压给定信号起，至励磁电压达到顶值电压与额定励磁电压差的 95% 瞬间的时间。按 DL/T 583 标准，将电压响应时间等于或小于 0.1s 的励磁系统定义为高起始响应励磁系统，并对水轮发电机励磁系统，规定其电压响应

时间应不大于 0.1s, 即水轮发电机应采用高起始响应的励磁系统。

(3) 励磁系统对发电机励磁的自动控制与调节, 应满足电力系统及电厂所要求的控制方式, 功能及性能指标应满足有关标准规定的要求, 并使发电机在安全稳定的范围内运行。按电力系统或有关规程规范的要求, 在励磁系统中设置电力系统稳定器或采用其他提高电力系统稳定的控制。

(4) 励磁系统应设置故障在线检测自诊断和保护与处理、系统参数在线显示和整定、现场调试和试验等功能, 以保证系统工作的正确和安全可靠, 并满足运行监视、维护和现场调试的要求。系统应根据有关标准的要求在结构上设置冗余。

(5) 励磁系统的灭磁装置, 在发电机任何需要灭磁的工况下应能可靠地对发电机进行灭磁, 灭磁时间应尽可能短。根据我国有关规程的规定, 发电机需要灭磁的工况应包括发电机误强励、机端或发电机—变压器组母线三相短路、发电机内部或发电机—变压器组的变压器内部短路等。

(6) 励磁系统应设置转子过电压保护, 以防止发电机及电力系统故障或异常运行和操作等过程中产生的过电压危及发电机转子及励磁系统。过电压保护应确保工作可靠, 保护装置的性能指标应满足有关标准的要求。

(7) 应满足机组及电厂运行对励磁系统操作、控制和监视的要求, 主要包括:

1) 接受开机命令及相关的信息, 完成机组开机过程中励磁系统的相关操作、控制和监视, 包括起励。

2) 接受正常停机命令及相关的信息, 完成机组停机过程中励磁系统的相关操作、控制及监视, 包括装设有电气制动的发电机停机制动的操作、控制和监视。

3) 接受事故停机灭磁命令及相关的信息, 对发电机进行灭磁并完成机组停机过程中励磁系统的相关操作、控制和监视。

4) 接受励磁系统外部的电压或无功给定, 对发电机电压或无功功率进行调节。

5) 提供电厂运行操作控制和监视所需的励磁系统信息, 包括励磁系统的正常运行状态数据信息、故障或事故等信息。

6) 提供继电保护所需的励磁系统信息, 如转子接地保护、失磁保护等所需的信息。

(8) 励磁系统应具有对电力系统及电厂发电机的各种故障运行或异常运行的适应性。在电力系统及电厂发电机的各种故障运行或异常运行工况下, 励磁系统应能正确工作, 如电力系统振荡或发电机失步、非全相、机端短路等励磁系统外部故障或异常, 以及励磁装置的电厂厂用电源在规定范围内的电压升高及频率升高等。励磁系统及其元部件应能承受发电机机端可能出现的电压及频率的异常升高而不影响其正确工作, 不影响系统性能及元部件的可用性, 如发电机过电压保护动作跳闸灭磁过程中机端的过电压和频率升高。

(9) 励磁系统应适用于电厂的电气工程和自然环境条件, 满足有关规程规定的电磁兼容性和使用环境条件的要求。与发电机转子回路电气上连接的设备或回路, 应具有与发电机转子相同的电气绝缘水平。

(10) 其他。根据电厂的具体情况可能出现的其他要求。如当电力系统要求电厂发电机对线路进行充电时, 发电机励磁系统应能在额定频率、额定电压和欠励情况下对线路充电, 使发电机的充电容量满足相应充电容量的要求, 此时发电机不应产生自励或不稳定现象。又如当发电机组停机采用电气制动时, 通常要求励磁系统提供发电机组停机制动所需的励



磁功率，并设置相关的控制。

(11) 励磁系统的可用性、可靠性和寿命应满足电厂及有关规程的要求。

第三节 自并励励磁方式的特点

发电机有多种励磁方式，目前主要有全静止励磁方式和有旋转部件的励磁机励磁方式^[2]。励磁机励磁方式又可分为直流励磁机励磁方式和交流励磁机带整流器励磁方式（也称他励方式），前者由直流励磁机输出提供发电机励磁，后者包括交流励磁机带静止整流器（无整流子励磁）及交流励磁机带旋转整流器（无刷励磁）两种励磁方式，整流器由交流励磁机供电，由整流器输出提供发电机励磁。全静止励磁（也称自励方式）采用静止整流电源，由整流器输出提供发电机励磁，又可分为自并励方式和自复励方式。自并励方式的励磁功率整流器采用励磁变压器供电，典型的接线为励磁变压器接于发电机机端；自复励方式的励磁功率整流器，由接于发电机端的变压器与串联于发电机定子回路的变流器联合供电，并有交流侧或直流侧的串联或并联的几种接线^[2]。

自并励励磁方式与其他励磁方式相比，有接线最为简单、无旋转部件、可靠性高、投资少、维护工作小及费用较低等优点，并可为采用励磁控制提高电力系统稳定性提供最好的平台。在励磁系统某些特性上，如某些运行方式下的强励电压特性、短路电流特性和机组开机起励特性，自并励励磁方式也有不及其他励磁方式之处，如下面所述。但正如下面的分析，自并励方式不及其他励磁方式之处，并不影响其实际的应用及其优点的存在。下面的分析及结论，早已为理论研究、试验和实际应用所证明。目前，大中型水轮发电机基本上都采用自并励励磁方式。

一、强励电压特性与电力系统稳定

在电力系统发生短路故障时，励磁系统通过对发电机进行快速强励，以提高或改善电力系统大干扰稳定性，是励磁系统的任务之一。由于自并励发电机励磁电源取自发电机机端，当电力系统短路影响到发电机机端电压时，特别在发电机近端发生三相短路使发电机端电压有较大幅度降低时，在短路持续期间，自并励励磁系统提供的强励励磁电压将低于采用其他励磁方式（在顶值电压相同时）。关于自并励励磁系统强励电压的这种特性对电力系统大干扰稳定性的影响，早年已进行了许多分析研究，结论是，自并励方式与其他励磁方式相比，对电力系统稳定的作用相当，不具有重要意义的差别^[1, 2]。因而水轮发电机采用自并励方式，与采用其他励磁方式一样，同样可满足电力系统稳定的要求。主要的论据可归纳为：

(1) 自并励励磁系统强励电压特性不及其他励磁方式，主要出现在发电机近端发生三相短路且短路未切除前。其他短路情况下，如远端和其他类型短路，由于机端有一定的电压，强励电压特性的差别较小或无差别。

(2) 励磁系统控制仅在转子电流变化使发电机电动势改变时，才能对电力系统的稳定性起作用。由于发电机转子具有较大的时间常数（若干秒），故在由主保护切除短路前的短路持续时间内（大型机组一般为 0.1s），励磁系统强励下的转子电流通常仅有很小的变化，强励对发电机电动势的影响十分有限。对他励晶闸管发电机的算例（顶值电压倍数 1.8）表明，在近机端三相短路后的 0.1s 期间，横轴同步电抗 X_q 后的发电机电动势 E_q 仅增加 2.84%。



此间自并励发电机（顶值电压为空载额定电压 7.0 倍）电动势仅低于他励晶闸管励磁方式的 3.3%^[1]，相差并不明显。故在由主保护切除的近机端三相短路持续期间，自并励发电机与其他励磁方式的发电机相比，对电力系统大干扰稳定性的作用差别不大。

(3) 当发生近端三相短路、主保护拒动由后备保护动作切除短路时（大型机组一般为 0.2~0.5s），此时短路的持续期间稍长，使自并励发电机电动势与采用其他励磁方式有稍大的差别。但在机端或近端的三相短路期间，发电功率基本上不能外送，此期间强励对发电机转矩的平衡、减少转子的摇摆作用不大，对电力系统大干扰稳定性的影响很小，特别对输电距离较远、与地区电网联系较弱的水力发电厂影响更小。

(4) 电力系统的三相短路几率很低（约占短路总数的 6%~7%），目前大型发电机及高压电网的保护均采用双重化，三相短路发生在发电机近端且主保护拒动的几率更低。

(5) 自并励发电机在短路切除后，机端电压恢复迅速^[1, 3]，发电机随之即具有与其他励磁方式相同的强励电压特性。

故发电机采用自并励与其他励磁方式相比，对电力系统大干扰稳定性的作用不具有重要意义的差别，水轮发电机采用自并励也可满足电力系统大干扰稳定的要求。一些水力发电厂接入系统的稳定计算也表明，发电机励磁采用自并励方式，与采用他励方式或自复励方式比较，电力系统需要采取的大干扰稳定措施基本相同。根据电厂在电力系统中地位的重要性，电力系统可能要求某些电厂发电机励磁系统的励磁顶值电压倍数取较高的数值以满足系统的大干扰稳定要求。一般而言，发电机不同励磁方式的选用，通常不会改变电力系统在高压电网中需要采取的大干扰稳定措施。

对电力系统小干扰稳定性，分析研究及实际应用表明，发电机采用自并励励磁系统，在配置了电力系统稳定装置后，可提高电力系统小干扰下的稳定性，其效果与其他励磁方式相同。相对于其他励磁方式，发电机励磁的自并励方式可为采用励磁控制提高电力系统稳定性提供最好的平台。

二、短路电流特性及发电机的后备保护

在包括机端在内的电厂或电力系统短路时，由下面的计算分析可见，自并励发电机提供的短路电流有与其他励磁方式不同的特性，并因此对发电机的后备保护有不同的要求。

（一）三相短路时的短路电流

1. 自并励发电机的三相短路电流

自并励发电机经外部电抗的三相短路电流周期分量（标幺值）可由下式计算^[2]

$$i_k = \left(\frac{1}{X''_{dw}} - \frac{1}{X'_{dw}} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{1}{X'_{dw}} e^{-\frac{t}{T_{dk}}} \quad (1-1)$$

$$X''_{dw} = X_w + X''_d$$

$$X'_{dw} = X_w + X'_d$$

式中： X_w 为发电机机端至短路点间的电抗（外部电抗）； X''_d 、 X'_d 分别为发电机的直轴次暂态及直轴暂态电抗，各电抗以标幺值表示； T'_d 为发电机直轴次暂态短路时间常数； T_{dk} 为自并励发电机三相短路时，励磁回路等效时间常数，也是定子短路电流暂态分量的衰减时间常数及转子暂态电流非周期分量衰减时间常数。忽略励磁功率整流器换相压降的影响时，发电机三相短路时的励磁回路等效时间常数 T_{dk} 由下式计算^[2]



$$T_{dk} = \frac{T'_{d0} X'_{dw} / X_{dw}}{1 - K_a X_w / X_{dw}} \quad (1-2)$$

$$X_{dw} = X_w + X_d$$

式中: T'_{d0} 为发电机直轴暂态开路时间常数(或称发电机定子开路时, 转子绕组时间常数); X_d 为发电机直轴同步电抗; K_a 为励磁系统顶值电压系数。

当采用三相全控桥式励磁功率整流器时, 励磁系统顶值电压系数 K_a 由下式计算^[2]

$$K_a = \frac{\cos \alpha_{\min}}{\cos \alpha_0} \quad (1-3)$$

式中: $\alpha_{\min}$ 、 α_0 分别为发电机强励及空载时, 励磁功率整流器的控制角。

根据式(1-2), 当 $(1 - K_a X_w / X_{dw}) = 0$ 时, 有 $T_{dk} = \infty$, 发电机提供的三相短路电流的暂态分量将不衰减而保持起始值。此时发电机的外部阻抗称为临界外电抗 $X_{w(lj)}$ 由下式计算

$$X_{w(lj)} = \frac{X_d}{K_a - 1} \quad (1-4)$$

在 $X_w < X_{w(lj)}$ 时, T_{dk} 为正值, 发电机提供衰减的无稳态值的三相短路电流; $X_w > X_{w(lj)}$ 时, T_{dk} 为负值, 发电机提供随短路持续时间增大的三相短路电流(发电机励磁电流也随短路持续时间增大, 直至受最大励磁电流限制)。

计及励磁功率整流器换相压降的 T_{dk} 值, 可取为式(1-2)计算值的 0.9~0.96(参见 DL/T 684《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》)。

2. 其他励磁方式的发电机三相短路电流

其他励磁方式的发电机三相短路电流周期分量(标么值)的计算式如下^[2]

$$i_k = \left(\frac{1}{X''_{dw}} - \frac{1}{X'_{dw}} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{X'_{dw}} - \frac{1}{X_{dw}} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{X_{dw}} \quad (1-5)$$

式中: T'_d 为发电机直轴暂态短路时间常数。

短路期间不调节励磁时, 式(1-5)最后一项 $(1/X_{dw}) = I_\infty$, 为短路电流的稳态值。

3. 自并励励磁式与其他励磁方式的发电机三相短路电流特性比较

由上述的短路电流计算式可见, 自并励励磁式相对于其他励磁方式, 发电机三相短路电流有不同的特性:

(1) 在发电机端经外部电抗短路时, 短路电流暂态分量有与其他励磁方式不相同的衰减时间常数, 次暂态分量的初始值及衰减时间常数与其他励磁方式相同。

(2) 发电机端经外部电抗的三相短路电流的暂态分量, 有随时间衰减、不衰减及增大三种情况, 存在一个临界外电抗。在外部电抗等于临界外电抗时, 短路电流的暂态分量不随短路持续时间衰减, 在外部电抗小于临界外电抗时, 短路电流的暂态分量随短路持续时间衰减, 在外部电抗大于临界外电阻时, 短路电流的暂态分量随短路持续时间增大。

(3) 发电机近端三相短路时 ($X_w < X_{w(lj)}$), 发电机提供衰减至零的无稳态值的短路电流, 其他励磁方式则有稳态值。

自并励发电机端及外部发生不对称短路时, 短路电流暂态分量也有与其他励磁方式不相同的衰减时间常数 $T_{dk}^{(n)}$ (忽略励磁功率整流器的换相压降的影响),^[2]

$$T_{dk}^{(n)} = \frac{T'_{d0} (X'_{dw} + X_{\Delta}^{(n)}) / (X_{dw} + X_{\Delta}^{(n)})}{1 - K_a (X_w + X_{\Delta}^{(n)}) / (X_{dw} + X_{\Delta}^{(n)})} \quad (1-6)$$

式中: $X_{\Delta}^{(n)}$ 为不对称短路计算用的额外电抗。

各种不对称短路情况下的 $X_{\Delta}^{(n)}$ 分别为: 两相短路时 $X_{\Delta}^{(2)}=X_{2\Sigma}$, 时间常数为 $T_{dk}^{(2)}$; 两相接地短路时 $X_{\Delta}^{(1,1)}=X_{2\Sigma}/X_{0\Sigma}$, 时间常数为 $T_{dk}^{(1,1)}$; 单相接地短路时 $X_{\Delta}^{(1)}=X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}$, 时间常数为 $T_{dk}^{(1)}$ 。其中 $X_{2\Sigma}$ 、 $X_{0\Sigma}$ 分别为短路点的负序、零序综合电抗。

(二) 自并励发电机的后备保护

发电机机端及外部电抗小于临界外电抗处发生三相短路时, 自并励发电机提供的短路电流将按衰减特性衰减至零, 而其他励磁方式则衰减至某一稳态值。自并励发电机这一特性要求发电机后备保护需采用相适应的措施, 以保证后备保护的正确动作。目前通常采用带电流记忆(保持)的低压过电流保护作后备保护。在短路发生时, 过电流动作并保持, 经保护延时后若短路仍存在(低电压仍动作), 则保护动作出口跳闸。

三、发电机的开机起励

自并励发电机励磁电源取自机端, 在发电机开机起动转速达额定转速后, 发电机机端为电压很低的残压。目前的励磁系统一般均具有发电机残压起励功能, 在机端残压不低于某一电压值时, 励磁系统可利用发电机的残压实现发电机的开机建压。但发电机的残压通常不够稳定, 残压值可能受发电机的检修、异常或故障运行方式等的影响而降低, 某些大型发电机的残压也相对较低, 使残压值不能满足励磁系统残压起励的要求。故按照我国有关标准的规定, 采用自并励的大中型水轮发电机除考虑残压起励外, 应设置采用外部电源的起励电源, 以使开机后的发电机能建立起满足励磁调节器正常工作的机端电压, 并由励磁调节器维持机端于额定电压(或给定电压)运行。详见第七章第三节。

第四节 发电机自并励励磁系统结构例

发电机的自并励励磁系统通常由励磁变压器、励磁功率整流器、调节器、灭磁系统设备(磁场断路器及灭磁电阻)、起励装置、过电压保护及其他辅助设备组成, 属于全静止励磁系统, 或称静止整流励磁系统。大型水轮发电机自并励励磁系统的结构示例见图 1-1。

励磁变压器通常接于发电机定子出线端与发电机断路器(若有)间的发电机母线。按我国 DL/T 583《大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件》的规定, 励磁变压器高压侧不应安装自动开关或快速熔断器, 一般均采用与发电机母线直接连接的接线方式。由于发电机必须带励磁变压器运行, 励磁变压器故障时, 励磁变压器的继电保护将动作发电机(或发变组)断路器跳闸、停机、灭磁。励磁变压器需按继电保护规程设置继电保护装置, 按电气测量规程装设电气测量装置, 相应地在励磁变压器的高压侧需装设保护及测量用的电流互感器。对大型或重要的发电机, 需要对励磁变压器采用差动保护时, 或所采用的励磁系统有要求时, 在励磁变压器低压侧也需相应的设置电流互感器。本例中, 励磁变压器采用两套差动保护, 且要求测量励磁变压器有功电量。

励磁功率整流器接于励磁变压器的低压侧, 水轮发电机通常采用由 2 个或多个并联整流桥组成的全控桥式三相整流器。本例整流器的每个整流桥的交流侧及直流侧不设置开关, 某一整流桥故障不能继续运行时, 由励磁系统使之退出并发出故障信号, 故障的整流桥在发电机停机后进行处理。当励磁功率整流器采用强迫风冷方式时, 励磁功率整流器需

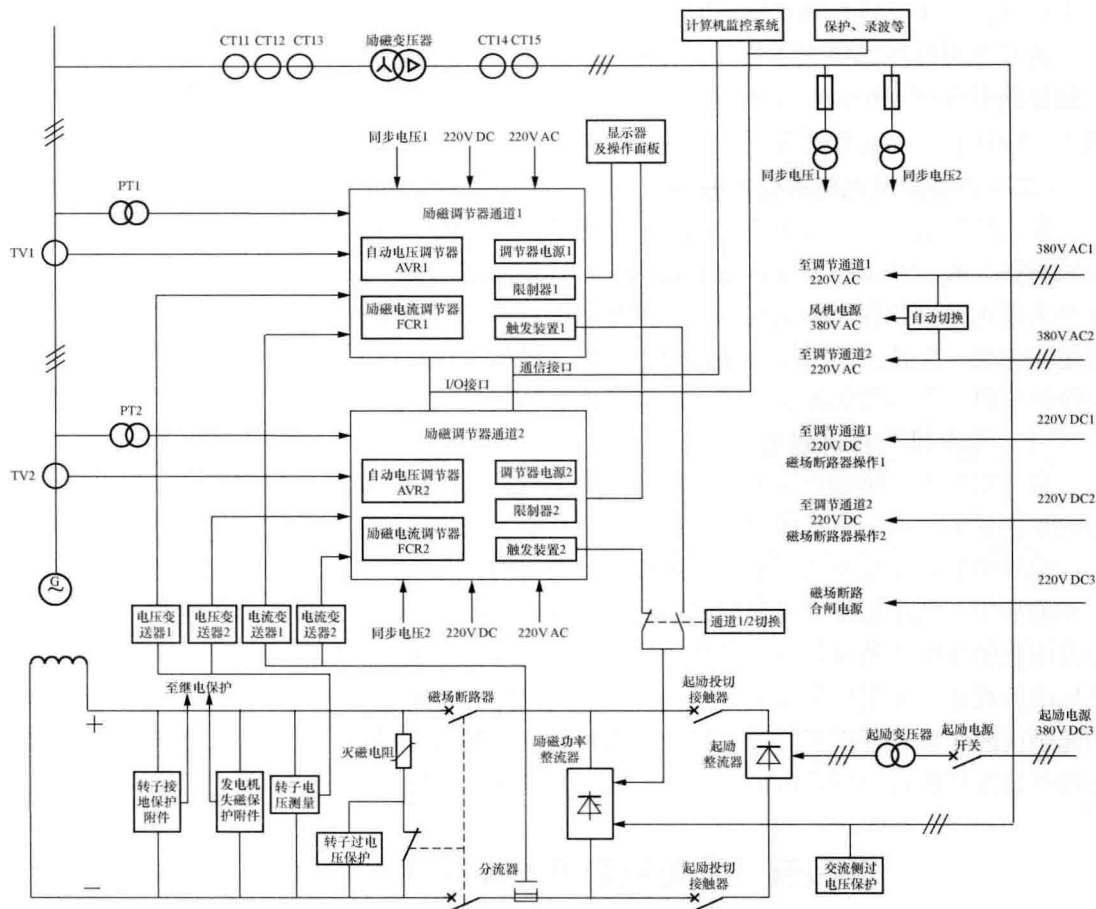


图 1-1 水轮发电机自并励励磁系统结构示例

配置冷却风机，冷却风机需采用两路互为备用的供电电源供电。本例的励磁功率整流器采用强迫风冷。

按 DL/T 583 规定，励磁调节器应设置互为热备用的两套独立的调节通道。可以是每套设一个自动电压调节通道（AVR）且其中至少有一套含励磁电流调节通道（FCR），也可以是一个自动电压调节通道和一个励磁电流调节通道。对大型或重要的发电机，每一套调节通道所需的发电机端电压及电流信号，通常取自不同的电压、电流互感器（或不同的绕组），所需的发电机转子电流及电压（若有）信号，通常也取自不同的电流、电压变送器，并各有自己的同步电压变压器。触发脉冲的输出经通道切换后送至整流器晶闸管的触发控制单元。两套调节通道应以一个公用的接口与外部系统联系，包括输入、输出（I/O）接口及通信接口，并通常配置带有共用显示器及键盘（或触摸屏）的人机接口。励磁调节器一般需要采用两路外部电源供电，并至少有一路为电厂蓄电池的直流控制电源供电。励磁调节器的内部结构随供应商的产品不同可有多种型式。本例调节器的两套调节通道采用相同结构，每个调节通道均设有自动电压调节通道及励磁电流调节通道。

按发电机选择的灭磁方式的不同，灭磁系统将有不同的结构。图 1-1 中采用直流磁场断路器及碳化硅（SiC）灭磁电阻，灭磁电阻采用磁场断路器常闭接点投入的灭磁方式。另



外还有直流磁场断路器及氧化锌 (ZnO) 灭磁电阻灭磁方式、交流磁场断路器及灭磁电阻灭磁方式 (交流灭磁)、交直流磁场断路器及灭磁电阻的灭磁方式, 灭磁电阻尚有采用专用开关 (包括电子开关) 投入方式, 详见第六章。本例采用双断口磁场断路器, 两断口分别布置在整流器至转子的+、-极回路。当选用单断口磁场断路器时, 对整流器与转子间未装设磁场断路器的连接回路, 可根据电厂的需要 (如为方便检修维护等) 设置检修用的隔离开关。

按照我国 DL/T 583 规程的规定, 大中型水轮发电机应装设转子过电压保护, 并须设置起励装置。在整流器的交流侧, 一般也设置过电压保护。图 1-1 中转子过电压保护与灭磁共用电阻, 转子及交流侧过电压保护尚有其他方案, 详见第四章。起励电源可以采用厂用控制直流电源或交流整流电源, 详见第七章。

对装设双重主保护的发电机, 磁场断路器通常有两个跳闸线圈, 跳闸回路需要采用两路由不同直流母线供电的直流控制电源, 可与励磁调节器的外部直流电源共用。磁场断路器合闸及相关回路, 通常采用外部提供的第三回直流电源供电。

励磁系统应设置有与电厂计算机监控系统现地控制单元的 I/O 接口, 接受电厂计算机监控系统的监控输入及向计算机监控系统输出励磁系统的运行信息, 如开/停机命令、发电机电压或无功的增/减、PSS 投/退及其他需要交换的监控信息, 包括励磁系统故障信息、励磁系统的电气测量等信息。这些接口应采用硬布线方式连接, 根据需要可再设置通信接口。

励磁系统与继电保护的 I/O 接口, 包括继电保护起动磁场断路器跳闸灭磁的输入信号、装于励磁系统的转子接地保护及发电机失磁保护附件的输出 (转子电压信号输出) 信号、作用于停机跳闸的励磁系统事故和转子过电压保护动作停机跳闸的输出等信号, 均应以硬布线方式直接与继电保护装置连接。

励磁系统控制所需的一些信号, 如机组转速信号 (投入起励)、发电机 (或发变组) 断路器位置信号等, 一般应以硬布线方式直接与相应的装置连接 (如直接接至调速器屏、断路器汇控柜或保护屏)。

根据电厂及励磁系统的具体情况, 在励磁系统结构中, 尚可能有其他的组成部分及不同的接线。如通常在磁场断路器跳闸灭磁时将起动故障录波装置, 需将发电机转子电压 (或电流) 接入录波装置, 结构中可能尚有与发电机电气制动相关的回路等。这些连接也应采用硬布线直接连接方式。

励磁系统与外部系统或设备的连接, 通常随电厂具体情况及励磁系统供应商的设备而有所不同。励磁系统中各部分具体设计时的考虑, 见下面的有关章节。

第二章

励磁变压器

第一节 励磁变压器的一般要求

采用自并励励磁方式的发电机，其励磁电源的励磁功率整流器由励磁变压器供电。励磁变压器的高压侧通常接于发电机机端母线，低压侧接晶闸管三相全控桥式整流器，励磁功率整流器的负载为有很大电感、对地绝缘的发电机转子，见图 1-1。励磁变压器负载及接线的特点，以及电网和电厂对发电机励磁系统的特定要求，使自并励的水轮发电机励磁变压器工作条件及技术要求与一般应用的电力变压器并不完全相同，主要包括如下方面。

(1) 励磁变压器绕组电流为非正弦电流，变压器的设计需要考虑绕组中谐波电流的影响。由于发电机转子时间常数通常为若干秒级，故励磁功率整流装置晶闸管电流及交流侧（即励磁变低压侧）线电流均可看作为矩形波（参见图 3-2），存在着基波分量和谐波分量，谐波电流将增加变压器的铜损和铁损，并使发电机端电压波形畸变。故励磁变压器设计与制造时需要考虑变压器绕组谐波电流的影响，包括变压器的铁芯磁密、容量、过负荷能力等均需要对谐波电流的影响进行考虑。谐波电流将可能引起变压器运行的谐波噪声，故在铁芯与绕组的结构及机械强度上，需要考虑降低谐波噪声的措施。

(2) 作为直接接到发电机机端的励磁变压器，需按发电机端电气设备的技术要求进行设计。按照 GB 1094.1《电力变压器 第 1 部分 总则》的要求，在发电机甩负载时，变压器与发电机相连的端子上，应能承受 1.4 倍额定电压，历时 5s。通常尚要求在发电机机端电压为 1.3 倍额定电压的过电压下运行 60s。励磁变压器应能在 110% 额定电压下长期连续运行。

(3) 励磁变压器低压绕组额定电压应按满足发电机强励时的励磁顶值电压要求进行设计选择。发电机强励时，对励磁功率整流器的输出电压有最高要求，为发电机励磁顶值电压。励磁顶值电压按发电机所在的电力系统要求选取。

(4) 变压器容量应能满足发电机长期连续运行所要求的励磁能力，在发电机励磁电流和电压为发电机额定负载下励磁电流和电压的 1.1 倍时，能长期连续运行。

(5) 励磁变压器的过载能力应能满足发电机强励的励磁容量及持续时间的要求。励磁变压器在发电机强励时，发电机在励磁顶值电压下运行，励磁电流的稳态值也为励磁顶值电流。此时励磁功率对励磁变压器的负载能力有最高要求。

(6) 励磁变压器高压、低压绕组间需设置静电隔离屏蔽并接地。在变压器投入和高压侧暂态过电压时，通过励磁变压器高压、低压绕组间的分布电容，在励磁变压器低压绕组上将产生过电压。为减少此时励磁变压器低压侧的过电压，在励磁变压器高压、低压绕组之间需设置静电屏蔽并与变压器铁芯一起接地，以避免过电压威胁励磁功率整流器的安全。静电屏蔽尚可减少变压器低压绕组的高次谐波及过电压对高压绕组及电网的影响，提高励磁变压器的电磁兼容性。