

中小型水电站运行与管理技术丛书

中小型水轮发电机

励磁装置

程远楚 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

中小型水电站运行与管理技术丛书

中小型水轮发电机 励磁装置

程远楚 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书主要讨论中小型同步发电机励磁设备的基本知识和运行方面的内容。全书共分八章,依次介绍了同步发电机励磁系统的构成、作用 and 基本要求,中小型水轮发电机组的典型励磁方式,重点介绍了自并励静止励磁系统的构成与工作特点;讨论了静止励磁系统的主回路选择;讲述了励磁调节器的基本工作原理,微机励磁调节器(包括 PLC 励磁调节器)的构成、原理和典型实现方案;讨论了开关式励磁调节器的特点与设计要点,以及励磁系统的调整试验和并列运行发电机间无功分配。

本书可作为水电站电气设备检修维护管理等生产人员的培训教材,也可供大专院校或高中职业院校有关专业的师生和调试人员学习参考。



图书在版编目 (CIP) 数据

中小型水轮发电机励磁装置/程远楚主编. —北京:
中国电力出版社, 2007

(中小型水电站运行与管理技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5083 - 4653 - 3

I. 中… II. 程… III. 水轮发电机 - 励磁系统
IV. TM312.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 107348 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

*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 12 印张 289 千字

印数 0001—3000 册 定价 20.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

中小型水电站运行与管理技术丛书

编 委 会

主 任：余卫国

副主任：谭少华 蔡维由 王贞伟 刘克兴

委 员：（以姓氏笔划为序）

王贞伟 毛慧和 付国锋 江小兵 刘克兴

刘金生 刘国刚 刘柄文 陈启卷 陈 涛

李学超 肖志怀 肖惠民 余卫国 张天明

张成平 罗仁彩 姬巧玲 职小前 程远楚

谭少华 蔡天富 蔡维由

中小型水电站运行与管理技术丛书

中小型水轮发电机励磁装置

前言

励磁系统是同步发电机重要的组成部分。在电力系统正常运行或事故运行中,同步发电机的励磁控制系统起着重要的作用。优良的励磁系统不仅可以保证发电机运行的可靠性和稳定性,提供合格的电能,而且还有效地提高发电机及其相连的电力系统的技术经济指标。

随着电力工业的发展和新技术的不断进步,近几十年来,发电机励磁系统无论是从理论研究还是装置的研制开发,均取得了长足的进步和飞速的发展。从调节技术看,数字式微机励磁装置已逐步取代模拟式励磁调节器成为同步发电机励磁调节器的主流;从励磁功率回路看,可控整流式励磁系统得到了大量的应用。而这些新技术、新器件的应用给电站运行人员和技术人员的培训带来了新的课题。

本书针对励磁系统的安装、调试、运行和维护人员而编写,力图尽量反映工程实际。但由于励磁系统的型式多样,励磁装置的生产厂家众多,型号规格繁杂,不可能一一涉及。因此,本书不以某一具体型号的励磁装置为对象展开,而是尽量介绍中小型水轮发电机励磁系统的基本原理和各种不同励磁装置的共性知识及典型实现方案。全书共分八章,第一章为概述,第二章介绍自并励静止励磁系统的构成与工作特点,第三章介绍谐波励磁系统 and 无刷励磁系统,第四章介绍中小型静止励磁系统的主回路,第五章介绍模拟式励磁控制装置,第六章介绍微机励磁调节器,第七章讨论开关式励磁系统的原理与工作特点,第八章介绍励磁系统的调整试验及试验运行中的不正常现象。

本书的编写重视实际应用,力求通俗易懂,实用性强。但由于本书涉及的知识面广、设备多,且同一型式的励磁装置在不同的厂家中有不同的实现方案。因此,需要搜集大量的资料和较强的实际工作经验。由于作者水平所限,再加之编写时间仓促,不妥之处恳请广大读者批评指正。

编者

2006年12月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 同步发电机励磁控制系统的作用和任务	1
第二节 水轮发电机组励磁系统的基本构成	9
第三节 电力系统对励磁系统的基本要求	10
第四节 中小型水轮发电机励磁系统主要型式	10
第二章 自并励静止励磁系统	18
第一节 自并励静止励磁系统的特点	18
第二节 自并励静止励磁系统的基本构成	19
第三节 自并励励磁系统的稳定工作点	23
第四节 自并励励磁系统的起励控制	24
第五节 自并励励磁系统中发电机的短路特性	26
第六节 自并励静止励磁系统对继电保护的影响	28
第三章 谐波励磁系统和无刷励磁系统	30
第一节 同步发电机的谐波励磁方式	30
第二节 谐波励磁绕组与三次谐波电动势	31
第三节 谐波励磁的自动电压调整	32
第四节 无刷励磁的构成与基本原理	33
第五节 无刷励磁同步发电机的励磁方式	34
第六节 无刷励磁系统的运行特点	35
第四章 中小型静止励磁系统的主回路	37
第一节 不可控整流电路	37
第二节 可控整流电路	44
第三节 晶闸管的触发回路	62
第四节 晶闸管元件的过电压及过电流保护	63
第五节 中小型水轮发电机的典型灭磁方式	65
第六节 转子绕组的过电压保护	69

第五章 励磁控制装置	72
第一节 励磁调节器的构成与基本原理	72
第二节 调差与测量回路	73
第三节 综合放大单元	84
第四节 同步移相触发回路	89
第五节 励磁装置的限制保护回路	105
第六节 模拟式励磁调节器实例	111
第六章 微机励磁调节器	116
第一节 概述	116
第二节 微机励磁调节器的实时测量技术	120
第三节 微机励磁调节器的控制算法	128
第四节 微机励磁调节器的数字移相与触发	133
第五节 开关量输入输出回路	135
第六节 人机接口	136
第七节 微机励磁调节器的调节方式	138
第八节 微机励磁调节器的限制保护功能	144
第九节 基于 PLC 的励磁调节器	145
第七章 开关式励磁系统	151
第一节 开关式励磁调节器的工作原理	151
第二节 直流励磁机开关式励磁的主回路	153
第三节 自并励开关式励磁的主回路	157
第四节 开关式励磁调节器的控制电路	159
第五节 开关式励磁调节器的整定计算	161
第八章 励磁系统的调整试验	163
第一节 调整试验的项目和要求	163
第二节 励磁系统的静态试验	165
第三节 励磁系统的空载试验	171
第四节 励磁系统的负荷试验	176
第五节 并列运行机组间的无功功率分配	180
第六节 试验运行中的不正常现象	182
参考文献	184

中小型水电站运行与管理技术丛书
中小型水轮发电机励磁装置

第一章

概 述

第一节 同步发电机励磁控制系统的作用和任务

在电力系统正常运行或事故运行中,同步发电机的励磁控制系统起着重要的作用。无论在稳定运行或受外界扰动后的暂态过程中,同步发电机和电力系统的正常运行状态以及事故情况下的运行特性,都和励磁系统的性能密切相关。优良的励磁控制系统不仅可以保证发电机运行的可靠性和稳定性,提供合格的电能,而且还可有效地提高发电机及其相联的电力系统的技术经济指标。

现代电力系统中,励磁系统的主要任务是:①维持发电机的端电压为给定值;②控制并列运行发电机间的无功功率分配;③提高同步发电机并列运行的稳定性;④提高继电保护动作的灵敏度;⑤快速灭磁;⑥改善电力系统的运行条件。

1. 维持发电机的端电压为给定值

在发电机正常运行工况下,励磁系统应维持发电机端电压(或升压变压器高压侧电压)在给定水平。电力系统在正常运行时,负荷总是经常波动的,同步发电机的功率也就相应变化。当发电机负荷改变时,在发电机空载电动势恒定的情况下,发电机端电压会随着负荷电流的改变而变化。为保证发电机端电压恒定,必须随发电机负荷电流的大小相应调整发电机的励磁电流。

为了表示励磁系统维持发电机端电压的能力,采用了调压精度的概念。所谓调压精度是指在自动励磁调节器投入运行,调差单元退出,电压给定值不进行人工调整的情况下,发电机负荷从零变化到视在功率额定值以及环境温度、频率、电源电压波动等在规定的范围内变化时,所引起的发电机端电压的最大变化,它常用发电机额定电压的百分数表示。

一般来说,发电机在运行中引起端电压变化的主要原因是负荷电流的变化。通常用发电机调压静差率 ε 来表示这种变化。调压静差率定义为自动励磁调节器的调差单元退出,电压给定值不变,负荷从额定视在功率减小到零时发电机端电压变化率,它可由式(1-1)计算为

$$\varepsilon = \frac{U_{\infty} - U_G}{U_{GN}} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中: U_{∞} 为发电机空载时的端电压; U_G 为发电机带额定视在功率时的端电压; U_{GN} 为发电机的额定定子电压。

通过发电机甩负荷试验可以测量发电机的调压静差率,它主要取决于励磁系统的稳态开

环放大倍数 K , K 越大, ϵ 便越小。

对于一个良好的励磁系统, 要求调压精度优于 0.5%, 即调压静差率小于 0.5%, 为此要求励磁系统的稳态开环放大倍数大于 200。

以上分析的是稳态过程。在电力系统的暂态过程中, 维持发电机的端电压恒定有利于维持电力系统的电压水平, 从而使电力系统的运行特性得到改善。如自动励磁调节器能使短路故障切除后, 电力系统的电压恢复加快, 从而使系统中的电动机自启动加速; 当电力系统中有大型电动机启动、同步发电机自同期并列、同步发电机因失磁而转入异步运行或重负荷线路合闸 (或重合闸) 时, 电力系统都可能造成大量无功缺额, 系统电压水平将下降, 自动励磁调节能减小这种下降, 使电力系统的运行特性得到改善。另一方面, 当系统中有重负荷跳闸或发电机发生甩负荷时, 自动励磁调节有助于降低此时可能产生的系统及发电机电压过分升高, 这一点对水轮发电机尤其重要。当水轮发电机发生甩负荷时, 由于机组惯性时间常数较大, 发电机会产生较严重的过速, 对采用同轴励磁机的发电机来说, 它的端电压正比于转速的三次甚至四次方。因此, 甩负荷可能造成发电机严重过电压。为防止这种过电压的产生, 要求励磁系统在这种情况下具备强行减磁 (强减) 功能。

2. 控制并列运行发电机间的无功功率分配

当发电机并入电力系统运行时, 它输出的有功功率决定于从原动机输入的功率, 而发电机输出的无功功率则和励磁电流有关。为分析方便起见, 假定发电机并联在无穷大母线运行, 即端电压 U_G 恒定。

设发电机从原动机输入的机械功率不变, 即发电机输出的有功功率 P 恒定, 则有

$$P = U_G I_G \cos \varphi = \frac{E_q U_G}{X_d} \sin \delta = \text{const} \quad (1-2)$$

式中: φ 为发电机的功率因数角; δ 为发电机的功率角。

U_G 恒定, P 恒定意味着 $I_G \cos \varphi$ 和 $E_q \sin \delta$ 均为常数。在发电机相量图上 (见图 1-1), $I_G \cos \varphi$ 表示发电机电流 I_G 的矢端轨迹为水平线 BB' , $E_q \sin \delta$ 表示空载电动势 E_q 的矢端轨迹为垂直线 AA' 。当改变发电机的励磁使空载电动势 E_q 变化时, 发电机的负荷电流 I_G 跟着变化, 但有功分量 $I_P = I_G \cos \varphi$ 恒定, 故变化的只是无功电流 I_Q 。所以说, 在发电机并入无穷大电网运行的情况下, 调节励磁电流将改变发电机输出的无功功率。

实际运行中, 发电机并联运行的母线不会是无穷大母线, 这时改变励磁将会使发电机的端电压和输出无功功率都发生改变。但一般来说, 发电机的端电压变化较小, 而输出的无功功率却会有较大的变化。保证并联运行的发电机组间合理的无功功率分配, 是励磁系统的重要功能。

在研究并联运行发电机组间的无功功率分配问题时所涉及的主要概念之一是发电机端电压调差率。所谓发电机端电压调差率是指在自动励磁调节器调差单元投入、电压给定值固定、发电机功率因数为零的情况下, 发电机的无功负荷从零变化到额定值时, 用发电机端电压百

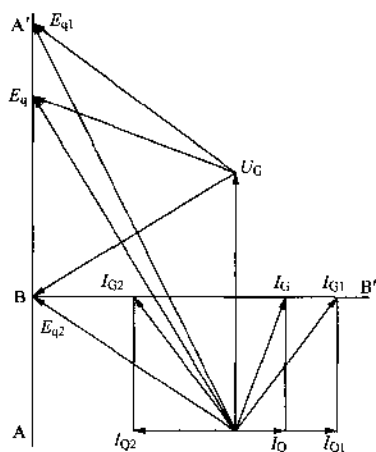


图 1-1 同步发电机与无穷大母线并联运行相量图

分数表示的发电机端电压调差率 D ，通常由式 (1-3) 计算为

$$D = \frac{U_{G0} - U_{GQ}}{U_{GN}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中： U_{G0} 为发电机空载时的端电压； U_{GQ} 为发电机带额定无功负荷时的端电压； U_{GN} 为发电机的额定定子电压。

发电机的端电压调差率反映了在自动励磁调节器的作用下，发电机端电压 U_G 随发电机输出无功的变化。自动励磁调节器调差单元的接法不同，发电机端电压 U_G 可能随发电机输出无功电流 I_Q 的加大而降低，这时称发电机有正的电压调差；也可能 U_G 随 I_Q 的加大而升高，这时则称发电机有负的电压调差；若发电机端电压 U_G 不随输出无功电流的变化而变化，则称发电机没有电压调差，或称调差率为零。图 1-2 表示了发电机的三种调差特性。

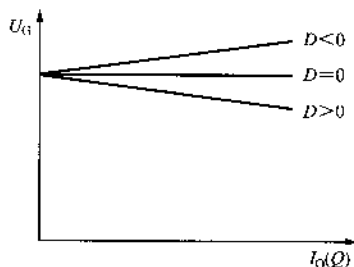


图 1-2 同步发电机的
三种调差特性

当多台发电机并列在一起运行时，为了保证并列运行发电机间的无功稳定分配，对并列点而言，调差必须为正。但由于发电机与系统的并列方式不同，以及发电机与系统间连接阻抗的存在，发电机端电压调差并不是计算到并列点的调差，视连接方式的不同，发电机可以在上述三种调差方式下运行。

对于扩大单元式接线，一般两台或两台以上的发电机机端直接并联在一起工作。此时，发电机端电压调差即是并列点的调差，为了并联机组间能有稳定的无功分配，这些发电机都必须有正的电压调差且要求调差率 $D = 3\% \sim 5\%$ 。若发电机是单元式接线，即它们是通过升压变压器在高压母线上并联，发电机端电压调差不等于并列点的调差，此时要求发电机有负的电压调差，以部分补偿无功电流在升压变压器上形成的压降，从而使电厂高压母线电压更加稳定。有些电厂为了减小系统电压波动所引起的发电机无功功率的波动，在单元式接线的情况下，常常不投入调差单元，这对电力系统的调压，即保持系统的电压水平是不利的。

3. 提高同步发电机并列运行的稳定性

电力系统可靠供电的首要要求，是使并入系统中的所有同步发电机保持同步运行。系统在运行中随时会遭受各种扰动，这样，伴随着励磁调节，系统将由一种平衡状态企图建立新的平衡状态。这种由一种平衡状态过渡到另一种平衡状态或平衡状态被破坏的过程叫暂态过程，这一过渡历程的时间叫暂态时间。在这个时间内系统是振荡的。如果振荡逐渐衰减，在有限的时间内系统稳定到新的平衡状态，则称系统是稳定的。电力系统稳定的主要标志是，在暂态时间末了，同步发电机维持或恢复同步运行。

通常把电力系统的稳定性问题分为两类，即暂态稳定和静稳定，又称大干扰稳定和小干扰稳定。

暂态稳定是指电力系统在受到大扰动时，例如高压输电网络中发生短路或一台主要发电机被切除，系统发生较强烈的振荡，一些同步发电机也可能失步。这种情况下的稳定问题，即在大干扰作用后系统能否在新的平衡状况下稳定工作，称为暂态稳定问题。

扰动的另一种形式是负荷随机地发生小的变化，即所谓小干扰，同步发电机在小干扰下的稳定问题，称为静稳定问题。静稳定问题有两类：①发电机在稳态运行时遭受到某种极其

微小的扰动后,在同步力矩作用下恢复稳定问题;②阻尼低频振荡的稳定性问题。

分析及实践表明,励磁系统对提高同步发电机并列运行的稳定性具有重要作用。下面分述励磁控制对各类稳定问题的影响。

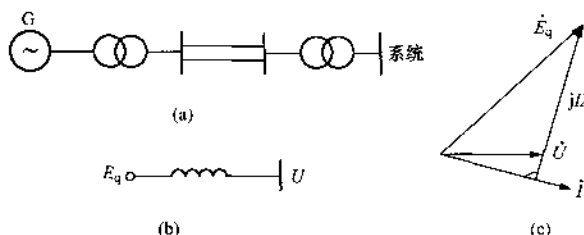


图 1-3 电力系统接线图

(a) 接线图; (b) 等效电路图; (c) 相量图

图 1-3 (a) 为一个简单的电力系统接线图,其中发电机 G 经升压变压器、输电线和降压变压器送到受端母线,发电机 G 也可以代表一个远方电厂。设受端母线上连接另一个大系统,母线电压 U 的大小认为是恒定不变的,并以 U 为电压参考相量。系统的等效电路如图 1-3 (b),相量图如图 1-3 (c) 所示。

当忽略发电机的凸极效应和定子电阻时,发电机送出的有功功率 P 为

$$P = \frac{E_q U}{X} \sin \delta \quad (1-4)$$

式中: E_q 为发电机励磁电动势; X 为系统总电抗,为发电机、变压器、线路电抗之和; δ 为 $\dot{E}_q$ 与电压 $\dot{U}$ 之间的相位角 (或称转子功率角)。

当 E_q 恒定 (即励磁不变) 时,发电机的有功功率 P 是功率角 δ 的正弦函数,其曲线如图 1-4 所示, P 和 δ 之间的这种正弦关系称为同步发电机的功率特性 (或功角特性)。

显然,当 $\delta < 90^\circ$ 时,即在功率特性的上升段运行时

(见图 1-4 中 a 点),有 $\frac{dP}{d\delta} > 0$ 。即当发电机受到干扰使

发电机输出的电磁力矩小于原动机 (水轮机) 输送给发电机的机械力矩时,发电机转子加速, δ 上升,发电机输出的电磁功率 P 增加,使发电机转子减速或不再加速,发电机回复到 a 点运行,或在一个新 δ 下稳定运行。也就是说,当 $\delta < 90^\circ$ 时是静态稳定的。当 $\delta > 90^\circ$ 时,即

在特性曲线的下降段运行 (见图 1-4 中 b 点) 时, $\frac{dP}{d\delta}$

< 0 。即当发电机受到干扰,使发电机输出的电磁力矩小

于原动机 (水轮机) 输送给发电机的机械力矩时,发电机转子加速, δ 上升,发电机输出的电磁功率 P 进一步减少,发电机转子继续加速,很快使稳定破坏。也就是说,当 $\delta > 90^\circ$ 时是不稳定的。因此,在励磁不调节的情况下,从静态稳定看,功率角极限为 $\delta = 90^\circ$,理想的

的传输功率极限 $P_m = \frac{E_q U}{X}$ 。实际上,为了运行可靠起见,应留有一定的裕度,运行点取得

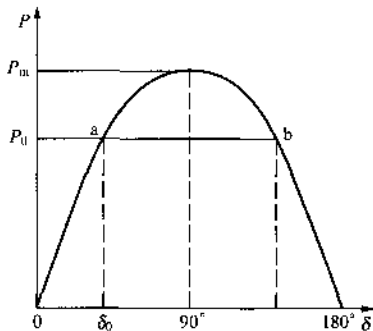


图 1-4 隐极式同步发电机功率特性

要比功率极限低些。设 P_0 为实际输送的功率, 通常将比值 $K_P = \frac{P_m - P_0}{P_0} \times 100\%$ 称为该运行工况下的静稳定储备系数。其值的选择, 不同的电力系统有不同的规定。例如, 我国某电力系统规定: 在正常工况下 K_P 应不低于 15%。

图 1-4 为励磁不变 (E_q 恒定) 的功率特性, 称为内功率特性曲线。如果励磁系统具有按电压偏差调节的励磁调节器, 并设发电机起始在功率特性曲线的 a 点运行。当角度 δ 增加, 由图 1-3 (c) 相量图可以看出, 发电机端电压要减小一些。这时励磁调节器将增加发电机的励磁, 于是 E_q 增大, 运行点将过渡到波幅较高的另一条内功率特性曲线上。同理, 当角度 δ 再增加, 励磁调节器又增加发电机的励磁, 运行点又将过渡到波幅更高的一条内功率特性曲线上。这样一来, 具有自动励磁调节时, 由波幅连续增高的一族内功率特性曲线上的各运行点构成了一条新的功率特性曲线 (见图 1-5 中的曲线 2)。图 1-5 中绘出了几条有代表性的功率特性曲线, 其中曲线 1 代表不调节励磁的功率特性; 曲线 2 代表具有比较灵敏、快速的励磁调节器, 能保持 E_q 恒定的功率特性; 曲线 3 代表具有理想灵敏度和快速性的励磁调节, 能保持发电机端电压恒定的功率特性, 它是一条理想的波幅最高的功率特性, 实际上只能做到接近这条曲线运行。因为要达到这条功率特性, 必须加大励磁调节器的放大倍数, 这会引起励磁系统自激振荡而不能运行。

图 1-5 表明, 采用自动调节励磁以后, 如果仍按功率 P_0 运行, 则提高了静稳定储备。如果按规定的静稳定储备系数运行, 则可增大输送功率。

由此可见, 质量优良的励磁系统, 改变了实际运行的功率特性, 提高了功率极限, 而且还可以扩大稳定区, 使同步发电机能在 $\delta > 90^\circ$ 的所谓人工稳定区稳定地运行。

半导体励磁系统, 尤其是微机励磁调节器的使用, 加快了励磁系统的响应速度。被调量一有变化, 加到发电机励磁绕组上的励磁电压便跟随变化, 响应很快。其功率特性曲线比图 1-5 的曲线 2 要高, 这对提高静稳定是非常有效的。另一方面, 灵敏快速的励磁调节, 相当于部分或全部补偿了发电机的内电抗, 从而提高机组运行的稳定性。

然而, 对于那些离系统较近 (指电气距离) 的发电厂来说, 系统电压突然升高 (如一条重负荷线路因事故突然跳闸), 发电机端电压会随之升高。发电机的自动励磁调节器为维持机端电压恒定, 会将励磁电流减得过低, 造成发电机进相以至失去静态稳定。为防止这种现象发生, 在发电机的自动励磁调节器中, 必须装设低励磁限制单元。当发电机的励磁过分降低, 以至危及它的静态稳定时, 低励磁限制单元动作, 阻止发电机励磁电流进一步降低, 保证发电机稳定运行。

如前所述, 为了提高电力系统的静稳定, 希望自动励磁调节器有较大的放大倍数。然而, 放大倍数的增大, 会减小系统的阻尼, 导致系统的动态特性恶化。当放大倍数较高时, 可能会引发励磁系统的自激振荡而不能运行。那么, 必须寻求一种合理的励磁控制策略, 既保证有较高的电压调节精度, 又能增强系统对外界干扰的阻尼。

设发电机工作于单机对无穷大母线系统 (见图 1-3), 当发电机相对于系统发生幅值不

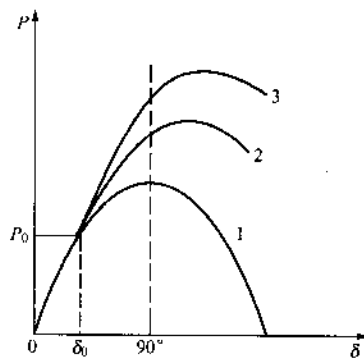


图 1-5 调节励磁对功率特性的影响

大的振荡时,有

$$\Delta\delta = \Delta\delta_m \sin rt \quad (1-5)$$

式中: $\Delta\delta$ 为对平衡点的角度偏移; $\Delta\delta_m$ 为角度振荡的偏值; r 为振荡角频率。

发电机转子运动方程为

$$H \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + D \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta P_T - \Delta P_G \quad (1-6)$$

式中: H 为发电机的惯性常数; D 为发电机的阻尼系数; ΔP_T 为由原动机输入的功率偏差; ΔP_G 为发电机输出有功功率偏差。

对于水轮发电机来说,由于其调速器的时间常数,故可近似认为振荡过程 $\Delta P_T = 0$, 则式 (1-6) 可写成

$$H \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + D \frac{d\Delta\delta}{dt} + \Delta P_G = 0 \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 可得

$$\Delta P_G = K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E_q \quad (1-8)$$

式中: $K_1 = \left. \frac{\partial \Delta P_G}{\partial \delta} \right|_{E_q = \text{const}}$; $K_2 = \left. \frac{\partial \Delta P_G}{\partial E_q} \right|_{\delta = \text{const}}$ 。

将式 (1-8) 代入式 (1-7) 可得

$$H \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + D \frac{d\Delta\delta}{dt} + K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E_q = 0 \quad (1-9)$$

当系统发生振荡时,所有的量都以相同的角频率变化。由于发电机励磁绕组及励磁机(若有的话)惯性的影响,在按电压偏差调节励磁的情况下,励磁电流变化的相位总是滞后于 $\Delta\delta$ 的变化相位,故空载电动势 ΔE_q 可表示为

$$\Delta E_q = \Delta E_{qm} \sin(rt - \alpha) \quad (1-10)$$

式中: ΔE_{qm} 为空载电动势的振荡幅值; α 为 ΔE_q 和 $\Delta\delta$ 之间的振荡相位差。

根据上述各式,经推导得

$$H \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + (D - K_2 K_4) \frac{d\Delta\delta}{dt} + (K_1 + K_2 K_3) \Delta\delta = 0 \quad (1-11)$$

式中: $K_3 = \frac{\Delta E_{qm} \cos \alpha}{\Delta \delta_m}$; $K_4 = \frac{\Delta E_{qm} \sin \alpha}{\Delta \delta_m \times r}$ 。

由式 (1-11) 可见,励磁电流的变化即 ΔE_q 的变化对发电机转子运动方程的影响有两个。其一是使自由项的系数由 K_1 变为 $(K_1 + K_2 K_3)$, 即产生了附加的自由项 $(K_2 K_3)$, 当忽略水轮发电机的凸极效应时,有

$$K_1 = \left. \frac{\partial \Delta P_G}{\partial \delta} \right|_{E_q = \text{const}} = \frac{E_q U}{X_d} \cos \delta \quad (1-12)$$

即 K_1 在 $\delta > 90^\circ$ 情况下为负,若无附加项 $K_2 K_3$, 系统稳定的极限角为 90° , 由 ΔE_q 变化(反映励磁调节的作用)引起的附加项 $K_2 K_3$ 使发电机的极限角可能大于 90° , 这和前面的分析是一致的。 ΔE_q 变化的另一个影响就是减小了系统的阻尼,将阻尼系数由 D 减小为 $(D - K_2 K_4)$, 这也就是通常所说的励磁调节的负阻尼作用。显然这对系统的动态稳定是不利的。

要在励磁调节时增加系统的阻尼, 必须使励磁电流的变化 (即 ΔE_q) 领先角度变化 (即 $\Delta\delta$) 一个角度, 即

$$\Delta E_q = \Delta E_{qm} \sin(rt + \alpha)$$

与前述推导过程相同, 有

$$\Delta E_q = K_3 \Delta\delta + K_4 \frac{d\Delta\delta}{dt}$$

$$H \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + (D + K_2 K_4) \frac{d\Delta\delta}{dt} + (K_1 + K_2 K_3) \Delta\delta = 0 \quad (1-13)$$

由式 (1-13) 即可看出, 这时励磁电流变化 (即 ΔE_q) 产生的附加项加大了系统的阻尼, 从而提高了电力系统的阻尼低频振荡的稳定性。

怎样才能使励磁电流的变化领先于角度的变化呢? 通常采用的办法是用反映角度微分的量 (角度的微分总是领先于角度的变化的), 如发电机的输出功率 P 、转速 n 、频率 f 等信号来调节励磁。采用这种方法调节励磁的调节器在前苏联及东欧称为强力式励磁调节器, 而在西方则称为电力系统稳定器 (PSS)。在我国, 以清华大学为主研制的电力系统最优励磁控制器 (EOC) 已在不少电站投入实际运行。目前, 非线性最优励磁控制也是一个热点。

(2) 励磁控制对暂态稳定的影响。当发电机受到大的扰动时, 能否继续保持同步运行, 这属于暂态稳定研究的问题。总的说来, 调节励磁对暂态稳定的影响没有对静态稳定那样显著。励磁系统对提高暂态稳定而言, 表现在快速励磁和强行励磁的作用上。以图 1-3 单机并到无穷大系统的情况为例, 当高压网络中发生短路故障, 在短路故障未切除的一个短暂时间内, 同步发电机的端电压和传输的功率都将显著降低, 而原动机的调速器在暂态期间 (例如 1s 以内) 尚来不及动作。这就要求励磁系统快速地动作, 并强行励磁到顶值, 使 E_q 增大, 传输功率不致过分降低, 并使发电机的功率特性曲线的加速面积减小, 制动面积增大, 以阻止发电机功率摇摆角 δ 过度增大, 从而提高暂态稳定。但由于发电机励磁回路时间常数的影响, 即使是快速响应和高顶值电压 (或称高顶值倍数) 的励磁系统, 对振荡的第一个周期, 功率 (摇摆) 角度通常只能降低几度, 或者说只能使发电机的动稳定功率极限少量提高。

然而, 快速励磁系统在下列两个方面是有效的。一方面减小第一个摇摆的振幅和使后继的摇摆都小于第一个摇摆, 特别是抑制第二个周期的角度摇摆。在短路故障切除后, 转子摇摆到最大角度, 受制动力矩作用又摆到最小角度, 在这个阶段往往容易失步。如果励磁系统在这个阶段发挥作用, 当转子加速, 向最大角度摆动时, 继续进行强励以增加制动作用; 当角度开始向回摆动时, 励磁系统快速减磁, 使励磁电流及制动作用急剧减小, 这样便减小了最初几个周期的摆幅。从而使振荡迅速平息下来, 并过渡到较高的事故后的功率特性曲线上运行, 提高了发电机的暂态稳定性能。

另一方面, 在系统发生短路故障期间, 具有高顶值电压的快速励磁系统, 能使发电机及时向系统提供大量的无功功率, 使系统电压得到一定程度的提高, 这就改善了在系统中的电动机的运行条件。

反应励磁系统强励性能的主要指标有:

1) 励磁顶值电压倍数。常称为电压强励倍数, 它指在强行励磁期间励磁功率单元可能提供的最高输出电压值与发电机额定励磁电压之比。对于采用静止励磁的水轮发电机来说,

励磁功率单元在强励期能提供的最高电压和发电机的运行状态有关(对自并励励磁系统,和发电机机端电压有关;对自复励励磁系统则和发电机端电压及端电流有关)。因对强励倍数作了如下规定:对于自并励系统,当发电机正序电压为额定值的 80% 时,励磁系统顶值电压倍数应予以保证。对大型水轮发电机的电压强励倍数,一般要求不小于 2,在特殊情况下可高于或低于 2,但不宜低于 1.8;对中小型水轮发电机,电压顶值倍数的要求可相应降低;对高压机组,可取为 1.5~1.8;对低压机组,可取为 1.3~1.5。

2) 励磁系统电压响应时间。它指从施加阶跃信号起至励磁电压达到最大励磁电压与额定电压之差的 95% 的时间。

励磁系统电压响应时间等于或小于 0.1s 的励磁系统称为高起始响应的励磁系统。水轮发电机的静止励磁系统属高起始响应的励磁系统。

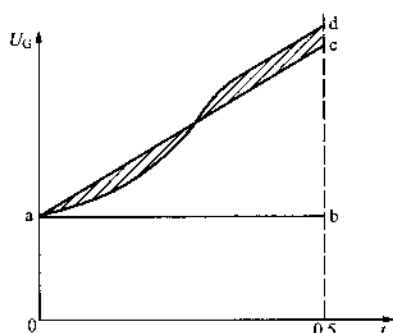


图 1-6 励磁电压响应比定义

对于非高起始响应的励磁系统,反映励磁系统强励性能的另一个指标是励磁电压响应比,它指励磁电压在强励作用后的最初 0.5s 内的平均上升速度(见图 1-6)。

图 1-6 中 Δabc 的面积等于曲线形 abd 的面积(即两块有阴影线的面积相等),设强励前发电机的励磁电压为额定励磁电压,即 $U_a = U_N$, 表示为

$$K_U = \frac{U_c - U_b}{0.5 U_a} = 2 \Delta U_{bc}^*$$

式中: K_U 为励磁电压响应比; ΔU_{bc}^* 为以额定励磁电压作基值的 U_c 和 U_b 之差。

对于高起始响应的励磁系统,影响电力系统暂态稳定的主要因素是电压强励倍数;而对非高起始响应的励磁系统,影响电力系统暂态稳定的主要因素是励磁电压响应比。因为在电力系统受大干扰作用后的暂态过程中,发电机功率角摆到第一个周期最大值的时间约为 0.4~0.7s。

4. 提高继电保护动作的灵敏度

当系统处于低负荷运行状态时,发电机的励磁电流不大,若系统此时发生短路故障,其短路电流较小,且随时间衰减,以致带时限的继电保护不能正确工作。励磁自动控制系统可以通过调节发电机励磁对发电机进行强励,不仅有利于提高电力系统稳定性,还因加大了电力系统的短路电流而使得继电保护动作的灵敏度得到提高。

5. 快速灭磁

当发电机或升压变压器(采用单元式接线)内部故障时,为了降低故障所造成的损害,要求发电机能快速灭磁。此外,当机组甩负荷时,发电机端电压会异常升高,为防止发电机端电压过分升高危及定子绝缘的程度,也要求励磁系统有快速灭磁能力。

6. 改善电力系统的运行条件

当电力系统由于种种原因,出现短时低电压时,励磁自动控制系统可以发挥其调节功能,即大幅度地增加励磁以提高系统电压;反之,当系统电压升高时,可自动减少励磁电流,抑制电压的上升。这在下述情况下可以改善系统的运行条件。

(1) 改善异步电动机的自启动条件。短路故障切除后,可以加速系统电压的恢复过程,改善异步电动机的自启动条件。电网发生短路等故障时,电网电压降低,使大多数用户的电

动机处于制动状态。故障切除后,由于电动机自启动时需要吸收大量无功功率,以致延缓了电网电压的恢复过程。发电机强行励磁的作用则可以加速电网电压的恢复,有效地改善电动机的运行条件。

(2) 为发电机异步运行创造条件。同步发电机失去励磁时,需要从系统中吸收大量无功功率,造成系统电压大幅度下降,严重时甚至危及系统的安全运行。在此情况下,如果系统中其他发电机组能提供足够的无功功率,以维持系统电压水平,则失磁的发电机还可以在一段时间内以异步运行方式维持运行,这不但可以确保系统安全运行,而且有利于火力机组热力设备的运行。

(3) 减少重负荷合闸时的电压下降。重负荷线路合闸(或重合闸)时,电力系统可能出现大量无功功率缺额,导致系统电压下降。自动励磁调节器能感受系统电压的下降,及时增加励磁电流,减小系统电压的下降水平,从而改善了电力系统的运行特性。

(4) 减少重负荷跳闸时系统电压的上升。当电力系统中有重负荷跳闸时,系统中可能出现较大的无功过剩,导致系统电压上升;此外,当水轮发电机组甩负荷时,储存在转子回路中的电磁能量会使发电机端电压迅速上升。励磁调节器的自动励磁调节将有助于降低此类情况的机端电压上升,改善电力设备的运行条件。

第二节 水轮发电机组励磁系统的基本构成

同步发电机的运行特性与它的空载电动势 E_q 值的大小有关,而 E_q 值是发电机励磁电流的函数,改变励磁电流,就可以影响同步发电机在电力系统中的运行特性。电力系统在正常运行时,发电机励磁电流的变化主要影响电网的电压水平和并联运行机组间无功功率的分配。在某些故障情况下,发电机端电压降低将导致电力系统稳定水平下降。为此,当系统发生故障时,要求发电机迅速增大励磁电流,以维持电网的电压水平及稳定性。

同步发电机的励磁系统是一种闭环控制系统,如图 1-7 所示,它由同步发电机、励磁功率单元、灭磁回路和励磁控制单元四个大的部分构成。

同步发电机是被控制对象,其他三部分构成了完整的励磁控制装置。

(1) 励磁功率单元。它向同步发电机的励磁绕组提供直流励磁电流,以建立直流磁场。励磁功率单元可能是另一台发电机,也可能是半导体整流器。

(2) 灭磁回路。灭磁回路一般由灭磁开关和灭磁电阻构成。其作用是当发电机内部故障时,在继电保护将发电机与系统解列的同时,迅速将发电机的转子磁场消灭,以保护发电机。

(3) 励磁控制单元。励磁控制部分主要由励磁调节器和励磁测量回路构成。测量回路由电压互感器(TV)和电流互感器(TA)构成,它用于测量发电机端电压和无功电流;励磁调节器根据由测量回路测得的发电机的运行状态,自动调节功率单元输出的励磁电流,以满足发电机运行的要求。

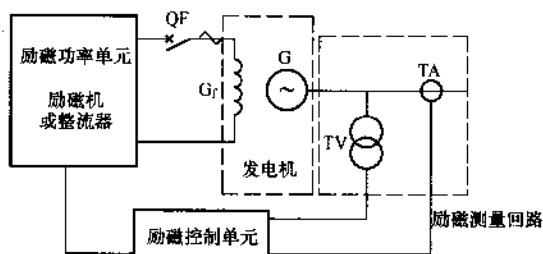


图 1-7 励磁系统构成简图

整个自动控制励磁系统是由励磁调节器、励磁功率单元和发电机构成的一个反馈控制系统。

第三节 电力系统对励磁系统的基本要求

如前所述,同步发电机励磁的自动控制在保证电能质量、无功功率的合理分配和提高电力系统运行的可靠性方面都起着十分重要的作用。要使励磁系统充分发挥以上各方面的作用,确保系统安全可靠地运行,励磁系统应满足如下几方面的要求。

1. 对励磁功率单元的要求

励磁功率单元受励磁调节器控制,对它的要求如下。

(1) 要求励磁功率单元有足够的可靠性并具有一定的调节容量。在电力系统运行中,发电机依靠励磁电流的变化进行系统电压和本身无功功率的控制。因此,励磁功率单元应具备足够的调节容量,并留有一定的裕量,以适应电力系统中各种运行工况的要求。

(2) 具有足够的励磁顶值电压和电压上升速度。前面已经提到,从改善电力系统运行条件和提高电力系统暂态稳定性来说,希望励磁功率单元具有较大的强励能力和快速的响应能力。因此,在励磁系统中励磁顶值电压和电压上升速度是两项重要的技术指标。

2. 对励磁调节器的要求

励磁调节器的主要任务是检测和综合系统运行状态的信息,以产生相应的控制信号,经放大后控制励磁功率单元以得到所要求的发电机励磁电流。对它的要求概括起来有如下几点。

(1) 系统正常运行时,励磁调节器应能反映发电机电压高低以维持发电机电压在给定水平,并有足够的电压调节范围。通常认为,自动励磁调节器应能保证同步发电机端电压静差率:①半导体型的小于1%;②电磁型的小于3%。

(2) 励磁调节器应能合理分配机组的无功功率。为此,励磁调节器应保证同步发电机端电压调差率可以在下列范围内进行调整:①半导体型的为 $\pm 10\%$;②电磁型的为 $\pm 5\%$;微机型的为 $\pm 15\%$,并能随系统的要求而改变。

(3) 对远距离输电的发电机组,为了能在人工稳定区域运行,要求励磁调节器没有失灵区。

(4) 励磁调节器应能迅速反应系统故障,具备强行励磁等控制功能,以提高暂态稳定和改善系统运行条件。

(5) 励磁调节器的时间常数应尽可能小,响应速度快,能迅速响应输入信息的变化。

(6) 励磁调节器应具有良好的静态特性和动态特性。

(7) 励磁调节器应具有高度的可靠性,并且运行稳定。这在电路设计、元件选择和装配工艺等方面应采取相应的措施。

(8) 励磁调节器应结构简单、检修方便,并应尽量做到系列化、标准化、通用化。

第四节 中小型水轮发电机励磁系统主要型式

励磁系统是同步发电机的的重要组成部分,励磁系统的特性对电力系统及同步发电机的运