

发电机励磁 及电力系统稳定

——方思立论文专辑

方思立 | 编著
中国电力科学研究院



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书收集了发电机励磁方面专家方思立的多篇优秀论文,详尽阐述了有关发电机励磁及电力系统稳定方面的相关内容。全书共分为五部分,即励磁参数试验和性能要求、自并励磁系统、灭磁及转子过电压整流装置、电力系统稳定器(PSS)和励磁系统事故统计及励磁要求。本书汇集了方思立老师多年的经典理论,为专业技术人员提供了有关励磁方面研究的第一手资料。

图书在版编目(CIP)数据

发电机励磁及电力系统稳定:方思立论文专辑/方思立编著. —北京:中国电力出版社,2010.10

ISBN 978-7-5123-0931-9

I. ①发… II. ①方… III. ①发电机-励磁-文集 ②发电机-电力系统稳定-文集 IV. ①TM31-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 194205 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>

印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 月第一版 2011 年 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 531 千字

印数 00001—00000 册 定价 0.00 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



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

电子图书



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

序 一

很荣幸为我国发电机励磁系统技术领域的主要开拓者和先驱方思立教授级高级工程师的文集作序。1965年我到电力科学研究院系统所工作时，方思立先生已经是电机研究室励磁组组长，是国内知名的电机励磁系统专家。他1952年毕业于北方交通大学电机系，分配到电力工业部技术改进局（中国电力科学院的前身）电机研究室工作，是新中国培养的第一代工程技术人员。

20世纪50年代中国的技术大多按照苏联的标准，发电机主要采用直流励磁机，调节器则是用电磁放大器一类的电磁元件构成，尽管今天看来它们的性能很差，但其结构原理及电路却很复杂；尤其励磁系统及其控制是一门跨学科的学问，从业人员要掌握电机学，电子学，控制理论以及电机、电力系统机电过渡过程等多方面知识。面对技术的挑战，方思立带领同事们开展了大量的试验研究和现场工作，掌握了复杂的励磁系统技术，满足了当时电力系统发展的需要。20世纪70年代以来，发电机励磁系统技术得到快速发展，从直流励磁机发展到交流励磁机，再发展到静态自并激系统，调节器也从电磁式发展到三极管—运算放大器式，进一步发展到微机式，再加上各式各样的限制保护功能，新的技术层出不穷，这就要求每个人不断更新自己的知识、不断接受新的事物。面对新的形势和任务，方思立及同事们独立自主地开展了研究和开发工作，研制了我国第一套自并励可控硅励磁系统、新型多功能励磁调节器、电力系统稳定器（PSS）等。多年来，伴随着大量的试验研究和现场工作，基于在励磁系统技术方面积累的大量理论和实践经验，在国内主导制订并及时更新了对励磁技术标准的要求。

方思立先生对新理论、新技术非常敏感，同时基于对我国电力系统的深刻理解，在科研工作中极为重视调查研究、理论联系实际，解决实际问题。1972年我国西北刘家峡水电厂至关中第一个330kV输电系统建成，运行中发生了几次系统振荡事故，基于当时的理论和分析手段，无法给出合理的理论解释和仿真再现，从而不能采取有针对性的解决措施。为此，当时电科院组织多专业科技人员研究攻关。方思立先生作为励磁系统专家参加工作。我作为电力系统研究人员也参与其中，第一次有幸与方思立先生近距离接触和工作。记得我们一起到当时国内最大的刘家峡水力发电厂实地调查发电机励磁系统的动作行为、实测励磁系统参数，并在其后用于励磁系统的数学建模和系统稳定计算分析，为正确分析

330kV 系统振荡事故作出了贡献。方思立先生当时作为比我们年长约 10 岁的专家和我们一起在现场工作，其深厚的理论功底，认真细致、一丝不苟的工作作风给我留下深刻印象。20 世纪 70 年代开始，方思立和同事们一道，在中国研究、推广先进的励磁控制电力系统稳定器 PSS。面对认为 PSS 已经落后、要用更先进的控制代替的质疑，方思立与刘增煌等同事连续发表了三篇文章，阐明了电力系统对励磁的基本要求以及 PSS 在理论和实践上的深厚基础，把握了正确的研究和应用方向。

方思立先生在科研工作中与高等院校、制造单位都有良好的合作关系。如在推动自并激励磁系统及其应用方面与清华大学的合作，取得了显著的成果。

方思立先生从事励磁控制研究的经历，在一定程度上反映了中国在这个领域的发展道路。相信这本文集的出版，能够使读者对这一学科在中国的历史发展和未来有一个较全面的了解。

周孝信

序 二

方思立高工（教授）是我国发电机励磁界的奠基者，是中国电力科学研究院系统所励磁系统与电力系统技术方向的带头人。他自 20 世纪 50 年代参加电力行业工作以来，随着我国电力系统规模和运行水平的飞速发展，对推进发电设备技术的科学决策和平稳发展作出了显著的贡献。

方思立高工注意吸取发达国家先进经验，推动我国励磁系统技术发展。引进美国 IEEE 关于励磁系统在电力系统稳定计算中的建模标准的前后版本，推动国内励磁系统建模的标准制订；应用自动控制理论消化吸收关于电力系统稳定器 PSS 的理论和实践，力主采用 PSS 抑制电力系统振荡；随着可控整流元件水平的发展，介绍推广发电机自并激静止励磁系统技术，大容量汽轮发电机励磁系统选型，扩大了汽轮发电机励磁系统选型的方案选择。

方思立高工长年与他所在的课题组专家以及各省试验研究单位合作，深入我国电力运行单位，分析解决工程实践中的励磁系统技术问题，对提高我国励磁系统运行水平起了推动作用。

方思立高工非常重视励磁系统曾发生的故障分析，重视掌握第一手资料，深入分析研究，为发电机励磁行业积累运行经验。

这本书汇集了方思立高工历来发表的学术论文，记录了他和同事们几十年来对励磁系统的研究成果，相当程度上代表了我国励磁系统运行方面的技术发展道路，值得我们从事发电机励磁系统技术工作的后辈研读和继承，学习他对工程问题的科学分析态度，推动励磁系统技术更进一步的发展。

上海交通大学

陈 陈

序 三

我是在 1959 年大学刚毕业时，认识方老师的，我那时是研究生，题目也是励磁，所以常向方老师学习请教，后来一起为推动励磁控制先进技术，携手合作了 50 年，所以算是亦师亦友。半个世纪对一个人来说，是漫长的日子，方老师一直坚持励磁的研究，在这个领域内，为中国励磁技术的进步，孜孜不倦的工作，是我国励磁界的元老，贡献巨大。

方老师长期以来，都是电力部门励磁方面的主要顾问，决定技术政策的参谋。中国励磁事业的发展，一路走来，遇到困难及挑战是不少的。方老师协助电力部把握大方向，排除了困难及干扰，保持了正确方向。今天励磁控制在大系统运行中起了那么重要的作用，人们也对励磁控制的作用有新的认识，这一切不是轻易得来的。许许多多的单位和个人都有过贡献，但方老师在这个过程中像是一幕大戏的导演，功不可没。

记得大约是 20 世纪 80 年代，方老师告诉我，电力部有关负责人要我们去汇报励磁方面的意见，我和方老师准备了 4 条意见：一是推广 PSS，二是多用自并激，三是大力开展励磁先进技术的培训，四是逐步将系统运行方式分析由恒定改为包括励磁的详尽模型。当时若能采用我们的意见，中国励磁技术的进步，应该提前 10 年。但我们的意见，未获采纳，事后我感到很失望，方老师倒好像早有准备，他决定先从普及先进技术的知识做起。

“文化大革命”中，大家都不看外文书，文革后翻开外文杂志，都看不懂了，记得有一次方老师对我说，IEEE 关于励磁的文章中的一些理论，你最好把它搞懂，再给大家介绍。我按照他的建议，花了不少工夫，啃懂了 PSS 的理论基础——同步及阻尼转矩，又在模拟计算机上证实 PSS 可达到线路功率极限，若不是有理论及实践的支持，谁会相信励磁那么小的东西，能起这么大的作用，经方老师的引介，电科院邀请我去介绍 PSS，那次电科院报告，引起了高度重视，方老师、曾庆禹、刘增煌等，一方面筹备举办励磁控制研讨班推广先进技术，另一方面研制硬件并进行了大量动模试验及现场试验，其中最值得提出的是，他们在广东、广西、湖南凤滩等进行的现场试验，证明了可使受事故后静态稳定性限制的功率极限提高很多，这在学术及工程上，意义重大，而国内外都无此报道。

1982 年，方老师在杭州主持举办研讨班，要求参加者都是励磁战线上的骨

干，他要求我去讲课。我当时工作很忙，准备拿讲稿去讲，方老师说不行，一定要有印好的讲义，因来的人对电机理论、控制理论可能都不熟，必须让他们课后有复习的依据。当时所剩时间不多了，我想跟方老师妥协一下，可他就是不松口，不得已，我只得日夜赶那份讲义，总算开班前，发到了大家手里。这份讲义就是 2007 年出版的“电力系统稳定性及发电机励磁控制”一书的最原始的雏型。以后又用在其他各地的培训班上，听说有的学员带回去，复印多份，给同事一人一份，可见在技术普及上起了一些作用。可是这一切，要没有方老师的督促，讲义及后来的书可能都不会出现。

关于自并激的应用，方老师较早就支持在水轮发电机上应用，为广泛采用自并激积累了经验。在火电机组上的应用，我想方老师持慎重态度，待到水轮机上运行有了成熟的经验，并且作了大量研究后，于 1997 年建议召开了自并激励磁技术研讨会，并由水电部生产协调司及科技司发文，为自并激在火电机组上的应用开了绿灯。方老师在把握自并激这项对系统有重大影响的技术上，是慎重而又积极的。

以上是我所了解方老师在励磁方面的贡献，肯定只是局部的甚至片面的。

方老师的这本论文集，反映了方老师在励磁控学方面的成就及贡献，也反映了中国励磁控制研究及发展的道路，对于今后的科研肯定有启发的作用。

仅以此文作为论文集背景的介绍。

刘取

前言

发电机励磁控制是发电机最重要的两个基本控制之一。发电机励磁控制系统包括发电机、励磁机（或励磁变压器）、自动电压调节器及其附加控制器、整流装置（或可控整流装置）、灭磁装置以及量测和信号装置等。这些装置的设计理念、制造质量、运行及维护水平直接影响发电机的安全运行和电能生产的质量。

随着电力生产的现代化、控制理论的发展、电网的不断扩大及愈加复杂，人们对发电机励磁控制系统的认识也在不断深化。发电机励磁对电力系统的稳定性有显著影响，它不再仅仅是对发电机本身的控制，而是成为整个电力系统稳定控制的重要组成部分。探索最合理的励磁调节控制规律，设计新型的励磁调节器，以及通过改进、优化现有的励磁控制设备，用于提高输电线的输送功率及电力系统的稳定性，一直是电力行业中的热门课题。

方思立先生是我国从事励磁控制和电力系统稳定研究的前辈，在半个多世纪的时间里，是我国励磁行业发展方向的主要引领者之一。我们编辑出版的这本论文集，收集了方思立先生及其合作者，在几十年里发表过的有关发电机励磁控制的学术论文，可供从事电力行业生产、科研的技术人员以及大专院校相关专业的师生参考。

目 录

序一
序二
序三
前言

第一部分 励磁参数试验和性能要求

大型发电机励磁系统电压响应比计算和强行励磁试验方法·····	3
大型发电机励磁系统强励倍数和响应比的要求·····	9
快速励磁系统对电力系统稳定的影响·····	15
大型汽轮发电机交流励磁机数学模型和参数·····	22
发电机励磁控制系统性能的评价·····	32
用频率法测定发电机励磁系统参数的改进·····	37
汽轮发电机最低励磁限制及其仿真研究·····	46
应用数字仿真设计、调整励磁系统参数·····	53
发电机励磁系统参数测量及优化·····	59
发电机励磁系统 PID 调节及其仿真试验·····	66
励磁系统参数测试及其分析·····	72
发电机励磁系统小干扰性能——发电机空载阶跃响应·····	77
励磁系统动态性能指标有关标准的分析·····	81
励磁系统典型数学模型及其参数选择·····	87
大型发电机调差率整定及调试·····	95
大型发电机自并励系统强励倍数计算·····	100

第二部分 自并励磁系统

大型汽轮发电机推广采用自并励励磁系统的一些问题·····	105
加拿大安大略电力系统励磁的特点·····	111
国产大容量汽轮发电机励磁系统的选择·····	117
大型汽轮发电机自并励励磁系统的应用条件·····	121
汽轮发电机自并励励磁系统的分析研究·····	125

第三部分 灭磁及转子过电压、整流装置

大型汽轮发电机转子过电压及其保护·····	135
-----------------------	-----

交流励磁机励磁系统灭磁回路的改进·····	141
提高发电机励磁系统整流装置的可靠性·····	150
汽轮发电机灭磁方式研究·····	154
从一些发电机组事故分析灭磁速度与发电机组损坏的关系·····	159

第四部分 电力系统稳定器(PSS)

电力系统稳定器对系统稳定的作用·····	167
台湾电力系统低频振荡及 PSS 的应用(1) ·····	177
电力系统稳定器(PSS)参数的选择 ·····	181
电力系统稳定器(PSS)在世界各地的使用情况 ·····	187
采用数字仿真确定电力系统稳定器的参数·····	193
台湾电力系统低频振荡及 PSS 的应用(2) ·····	199
提高 PSS 的投入率增强电力系统动态稳定 ·····	201
电力系统稳定器对电力系统动态稳定的作用及与其他控制方式的比较·····	206
带电力系统稳定器(PSS)的励磁调节器与最优励磁控制器(EOC)的比较 ·····	218
广西励磁系统及其电力系统稳定器数字仿真和现场试验研究·····	226
十三陵抽水蓄能电厂 200MW 机组励磁及 PSS 参数测试 ·····	232
114MW 水轮发电机数字式最优励磁控制器的试验分析 ·····	238
电力系统稳定器参数计算及调试方法·····	244
发电机阻尼与电力系统稳定器试验——发电机负载阶跃响应·····	249
日照电厂 350MW 励磁系统数学模型及 PSS 现场试验 ·····	255
电力系统稳定器配置、构成、参数计算及投运试验·····	261

第五部分 励磁系统事故统计及励磁要求

1977 年 1 月~1979 年 3 月发电机励磁系统事故分析及改进意见 ·····	273
发电机励磁系统事故分析及其预防措施·····	278
1982~1983 年大型发电机励磁系统的事故统计分析 ·····	289
1984~1988 年大型汽轮发电机整流励磁系统事故统计分析 ·····	294
励磁系统的作用及其要求·····	300
发电机励磁系统 PID 调节及其仿真试验 ·····	318
关于建立励磁系统数据库的几点建议·····	323

第一部分

励磁参数试验和性能要求

论文专辑

发电机励磁及电力系统稳定

发电机励磁及电力系统稳定

方思立
论文专辑

大型发电机励磁系统电压响应比计算 和强行励磁试验方法^①

电力科学研究院 方思立 朱 方 张桂芳

1 励磁系统电压响应比的计算方法

发电机励磁系统电压响应比（也称励磁系统电压上升速度）按 GB 755—1981《电机基本技术要求》附录定义为：“即第一个 0.5s 内励磁系统输出电压相对于发电机额定负载励磁电压的电压增长率，由励磁系统电压—时间反（响）应曲线决定”，如图 1 所示。

由图 1 可见，励磁电压响应比为

$$v = \frac{\overline{ce} - \overline{a0}}{0.5 \overline{a0}} \quad (1)$$

对于直流励磁机励磁系统，由于直流励磁机空载特性和负载特性近似，同时早期的励磁系统由发电机低电压继电器短路磁场变阻器进行强励，所以励磁电压上升速度可以用直流励磁机的空载特性来确定。对于交流励磁机—整流器励磁系统，由于交流励磁机电枢反应大，励磁机空载和负载特性差别很大，所以励磁电压响应比应在接入等值负载或接入实际发电机进行强行励磁试验确定。同时，现代大型发电机励磁系统均由自动励磁调节器（AVR）进行强励，因此规定励磁系统电压响应比包括 AVR 的响应在内。

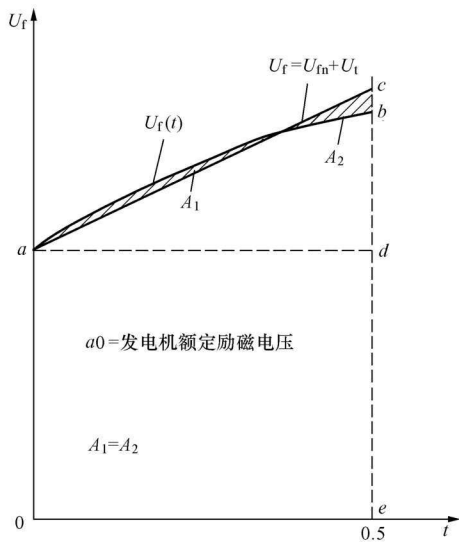


图 1 0.5s 平均励磁系统电压响应比

用 0.5s 转子电压的平均电压响应比来衡量励磁系统的性能是基于以下原因：

（1）在电力系统大干扰后第一摇摆周期达到最大功角的时间一般为 0.4~0.75s，在这个时间内要求进行强励，以抑制功角的增加。取 0.5s 作为一般要求强励的时间。

（2） U_f 在 0.5s 内的平均电压响应比相应于 E'_q 在 0.5s 时的增长。计算如下

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} + E'_q = E_{fd}$$

即

$$E'_q = \frac{1}{T'_{d0}} \left[\int E_{fd} dt - \int E_q dt \right] \quad (2)$$

① 该文发表于 1984 年 4 月《电力技术》。

其中:

$$E_q = I_f x_{ad}$$

$$E_{FD} = \frac{U_f}{R_f} x_{ad}$$

$$T'_{d0} = \frac{x_f}{R_f}$$

式中 E_q ——与励磁电流 I_f 成正比电势, 即空载电势, V;

E_{FD} ——由励磁电压 U_f 所决定的假想空载电势, V;

T'_{d0} ——励磁绕组本身的时间常数, s。

励磁系统的影响决定于 U_f 的变化。如果 0.5s 内 $\int u_f dt$ 值相等, 励磁对 E'_q 的影响也是相等的。

在 0.5s 内平均励磁电压响应比用 v 来表示, 则

$$\int_0^{0.5} U_f dt = \int_0^{0.5} (U_{f0} + v t) dt \quad (3)$$

以标么值表示并进行积分计算得

$$\int_0^{0.5} U_f dt = \int_0^{0.5} (1 + vt) dt = 0.5 + \frac{v}{8}$$

$$v = 8 \int_0^{0.5} U_f dt - 4$$

如果励磁电压按指数曲线上升, 强励倍数为 K_F , 即

$$U_f - 1 = (K_F - 1) (1 - e^{-\frac{t}{T_e}})$$

$$\text{代入上式} \quad v = 4(K_F - 1) - 8(K_F - 1)T_e (1 - e^{-\frac{0.5}{T_e}}) \quad (4)$$

按式 (1) 确定励磁电压响应比, 可使 0.5s 内 E'_q 的增长相同。

对提高暂态稳定来说, 主要是看在故障后达到最大功角 δ_m 以前, 增加励磁, 从而增加电磁转矩, 以抑制功角 δ 的增加。而 $\Delta\delta$ 与 $\Delta E'_q$ 的关系, 近似地可以用下式表示

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= \frac{\omega_0}{S} \Delta\omega \\ \Delta\omega &= \frac{-K_2}{D + MS} \Delta E'_q \approx \frac{-K_2}{MS} \Delta E'_q \\ \Delta\delta &= \frac{-K_2 \omega_0}{MS^2} \Delta E'_q \end{aligned} \quad (5)$$

以上式中, D, M, K_2 均为常数。从式 (5) 可见, 尽管 0.5s 内 $\Delta E'_q$ 的变化相同, 但如果 $\Delta E'_q$ 变化的规律不同, $\Delta\delta$ 就不同。例如 $\Delta E'_q$ 开始增加快, 将有较好的抑制功角增加的效果。定性说明如下:

设 U_f 有三种不同的变化情况。第一种为阶跃变化 $\Delta U_{f1} = A$, 即相当于快速励磁; 第二种为线性变化 $\Delta U_{f2} = Bt$, 相当于 $T_e > 0.5s$ 时的常规励磁; 第三种为平方变化 $\Delta U_{f3} = Ct^2$, 相当于励磁机具有正反馈的励磁系统。

在 0.5s 内平均电压上升速度 v 相等, 即

$$\frac{\int_0^{0.5} A dt}{0.5} = \frac{\int_0^{0.5} B t dt}{0.5} = \frac{\int_0^{0.5} C t^2 dt}{0.5}$$

设第一种快速励磁系统情况，由于故障后强行励磁使 δ_m 减小 $\Delta\delta_1$ ，相同 v 的第二种情况， δ_m 减小的值为 $\Delta\delta_2$ ，相同 v 的第三种情况， δ_m 减小的值为 $\Delta\delta_3$ 。计算可得

$$\Delta\delta_2 = \frac{1}{2} \Delta\delta_1$$

$$\Delta\delta_3 = \frac{3}{10} \Delta\delta_1$$

可见，虽然 0.5s 内励磁电压平均增长速度相等，快速励磁系统对抑制功角增长的效果是常规（慢速）励磁系统的两倍。对快速励磁时间常数 $T_e = 0.03s$ ，常规励磁系统 $T_e = 1.0s$ ，用一无限大系统进行了暂态稳定的对比计算，计算系统如图 2 所示。

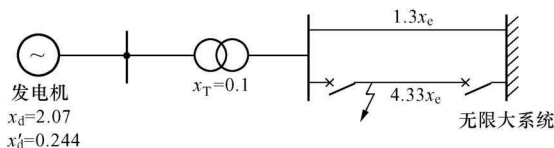


图 2 计算电力系统暂态稳定极限线路图

首端三相短路，0.1s 切除故障线路段，故障线路段切除后 x_e 增加 30%。

励磁系统模拟如图 3 所示。

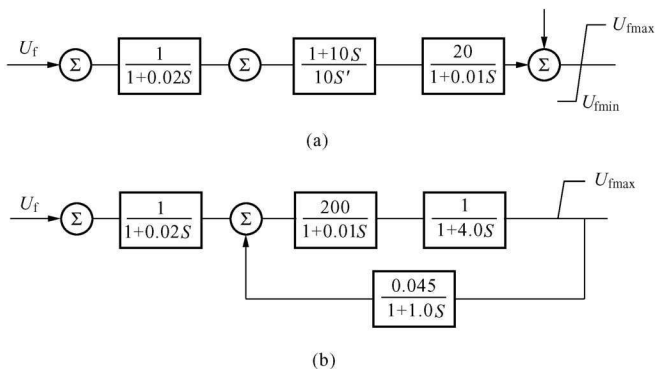


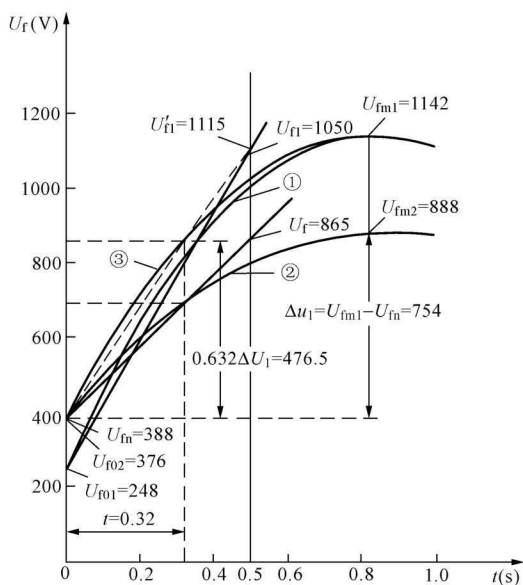
图 3 励磁系统模型

(a) 快速励磁系统；(b) 常规励磁系统

为额定励磁电压，否则就会产生较大误差。例如 QFQS-200-2 型汽轮发电机，额定励磁电压为 388V，第一次强行励磁试验时起始励磁电压 $U_{f01} = 248V$ ，强励倍数为 2.27，断开励磁调节器量测单元输入，使发电机强行励磁，强励过程的励磁电压变化如图 4 中曲线①所示。

表 1 相同响应比、快速励磁和常规励磁对系统暂态稳定极限值的差别

励磁时间常数	$T_e = 0.03s$	$T_e = 1.0s$
式 (1) 计算的响应比	$v = 1.84$	$v = 1.84$
式 (6) 计算的响应比	$v' = 25$	$v' = 1.4$
$x_e = 1.0$ 时功率极限	$P_m = 0.55$	$P_m = 0.52$
$x_e = 0.4$ 时功率极限	$P_m = 0.95$	$P_m = 0.93$



与不进行校正有较大差别。

第一次试验, 当 $T_p=0.32\text{s}$, $K_F=2.27$ 时, 如按式 (4) 进行计算 v

$$v=4 \times (2.27-1)-8 \times (2.27-1) \times 0.32 \times (1-e^{-\frac{0.5}{0.32}})=2.94(\text{倍/s})$$

如果式中的 K_F 采用最大电压与额定电压之比 K'_F 代入, 则 $K'_F = 1142/388 = 2.94$, $v = 3.8$ 。

第二次试验当 $T_e=0.327\text{s}$, $K_F=1.87$ 时,按式(4)计算,得 $v=1.72$,当采用 K'_F 时, $K'_F=888/388=2.29$, $v=2.55$ 。

以上可见, 强行励磁试验时如果起始电压不是额定, 按 0.5s 平均上升速度计算时必须进行校正。按式 (4) 计算 v 时应采用 K'_F 代替 K_F , 否则将有很大误差 (强行励磁倍数 K_F 的计算采用稳态强励电压值)。

既然励磁电压增长正比于电压差 $(U_{\text{fm}} - U_{\text{fn}})$, 反比于等值时间常数 T_e , 则用下式定义励磁电压响应比就更为合理和方便, 初始励磁系统电压响应比如图 5 所示。

按式 (1) 计算 v

$$v = \frac{1050 - 248}{0.5 \times 388} = 4.3 (\text{倍} / \text{s})$$

第二次强行励磁试验时, 起始电压接近额定, $U_{f02} = 376\text{V}$, 强励倍数为 1.87。强励过程的励磁电压变化如图 4 中曲线②所示。

按式 (1) 计算 v

$$v = \frac{865 - 376}{0.5 \times 388} = 2.52 (\text{倍} / \text{s})$$

从两次试验可见,以最大电压为稳态值,励磁电压增长的等值时间常数基本相同。设励磁系统等值时间常数为 0.32s , $K_F=2.27$ 时对曲线①进行修正得曲线③,按曲线③计算得 v

$$v = \frac{1115 - 388}{0.5 \times 388} = 3.75 (\text{倍} / \text{s})$$

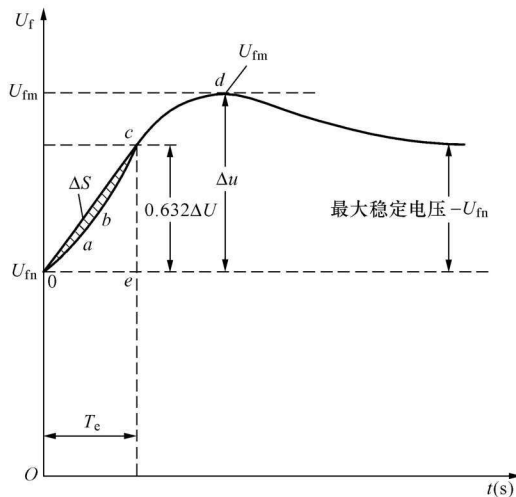


图 5 初始励磁系统电压响应比

$$\begin{aligned} v' &= 0.632 \frac{U_{\text{fm}} - U_{\text{fn}}}{T_e U_{\text{fn}}} \left(\frac{2\Delta S}{0e \times ce} \leq 0.2 \right) \\ v' &= 0.632 \frac{U_{\text{fm}} - U_{\text{fn}}}{(T_e \pm \Delta t) U_{\text{fn}}} \left(\frac{2\Delta S}{0e \times ce} > 0.2, \Delta t = \Delta S / \overline{ce} \right) \dots \end{aligned} \quad (6)$$