

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 7409.2—2008  
代替 GB/T 7409.2—1997

## 同步电机励磁系统 电力系统研究用模型

Excitation systems for synchronous machines—  
Models for power system studies

(IEC 60034-16-2:1991, Rotating electrical machines—  
Part 16: Excitation systems for synchronous machines—  
Chapter 2: Models for power system studies, MOD)

2008-06-18 发布

2009-03-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会

发布

## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 励磁功率单元分类——图示法及稳定性研究的数学模型 .....	1
3.1 直流励磁机励磁功率单元 .....	1
3.2 交流励磁机励磁功率单元 .....	1
3.3 电势源静止励磁功率单元 .....	3
3.4 复合源静止励磁功率单元 .....	4
3.5 控制功能的数学模型 .....	4
3.6 励磁系统模型 .....	8
4 专用语 .....	12
4.1 参数 .....	12
4.2 变量 .....	13
附录 A (规范性附录) 标么系统 .....	14
附录 B (规范性附录) 整流器调节特性 .....	15
附录 C (规范性附录) 饱和函数 .....	16
附录 D (规范性附录) 限幅表示法 .....	17
附录 E (资料性附录) 本部分章条编号与 IEC 60034-16-2:1991-02 章条编号对照 .....	18
附录 F (资料性附录) 本部分与 IEC 60034-16-2:1991-02 技术性差异及其原因 .....	19



## 前 言

GB/T 7409《同步电机励磁系统》分为三个部分：

- 第一部分：GB/T 7409.1《同步电机励磁系统 定义》；
- 第二部分：GB/T 7409.2《同步电机励磁系统 电力系统研究用模型》；
- 第三部分：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条件》。

本部分是 GB/T 7409《同步电机励磁系统》的第二部分，于 1987 年第一次制定，1997 年第一次修订，本次版本为第二次修订。

GB/T 7409.2—1997 等同采用 IEC 60034-16-2:1991《旋转电机 第 16 部分：同步电机励磁系统 第 2 章：电力系统研究用模型 (Rotating electrical machines—Part 16: Excitation systems for synchronous machines—Chapter 2: Models for power system studies)》。

本部分修改采用 IEC 60034-16-2:1991。本部分参考了国内现有发电机励磁系统实际模型，参考了国内现使用于电力系统稳定分析的发电机励磁系统计算模型，参考了 IEEE Std. 421.5:2005 标准，提出概括的、符合实际的、可以满足电力系统稳定分析要求的发电机励磁系统计算模型。

与 GB/T 7409.2—1997 比较，本部分主要变化如下：

- 对励磁系统模型作了具体描述，所建立的发电机励磁系统模型能够满足国内主要的发电机励磁系统进行电力系统稳定分析之用；
- 补充了校正环节、电力系统稳定器模型；
- 描述了限制器和电力系统稳定器作用于电压调节器的方式。

在附录 E 中给出了与 IEC 60034-16-2:1991-02 章条编号对照一览表，在附录 F 中给出了与 IEC 60034-16-2:1991-02 的技术性差异及其原因的一览表以供参考。

本部分的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D 为规范性附录，附录 E 和附录 F 为资料性附录。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国旋转电机标准化技术委员会归口。

本部分由浙江省电力试验研究院负责起草，中国电力科学研究院、哈尔滨电机厂有限责任公司、华北电力科学研究院有限责任公司、上海汽轮发电机有限公司、东方电机股份有限公司、国网南京自动化研究院、广州电器科学研究院、山东济南发电设备厂、北京北重汽轮电机有限责任公司、水电水利规划设计总院等单位参加起草。

本部分主要起草人：竺士章、刘增煌、李国良、苏为民、徐福安、吴涛、刘明行、汪大卫、吕宏水、许敬涛、尹国吉、张玉华、刘国阳、濮钧、陈新琪。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB 7409—1987；
- GB/T 7409.2—1997。

## 引 言

在电力系统稳定性研究中,当同步电机的运行状态已被准确地模拟,则电机的励磁系统也应建立适当的模型。由于受数据取得、编程和计算的限制,在允许情况下采用具有适当精度的简化模型是必要的。这些模型应适用于表现下述时间的励磁系统性能:

- 故障发生前的稳态条件期间;
- 从故障发生到故障清除期间;
- 故障清除后振荡期间。

假定在稳态研究中频率偏差在 $\pm 5\%$ 额定值内,励磁模型可以忽略频率偏差的影响。

励磁系统模型对于稳态条件和同步电机固有振荡频率应当是有效的。这个振荡频率的典型值不大于 3 Hz。

保护功能和灭磁及过电压抑制设备的动作不包括在模型使用范围内。

励磁系统建模方法和标准模型也可能用于与同步电机有关的其他动态问题,例如:失步运行、次同步共振或扭矩影响的研究,应当检查一下模型,以确定它是否适用。

在电力系统研究中,所涉及的各种励磁系统的部件在图 1 功能框图中给出。这些部件包括:

- 电压控制部件;
- 限制器;
- 电力系统稳定器(如果使用);
- 励磁功率单元。

励磁功率单元的主要区分特征是励磁功率提供与变换的方式。

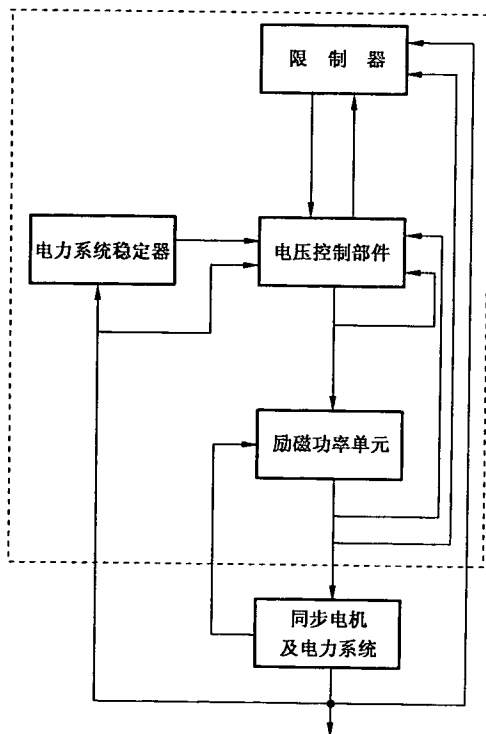


图 1 同步电机励磁系统(虚线框内部分)通用功能框图

## 同步电机励磁系统 电力系统研究用模型

### 1 范围

GB/T 7409 的本部分规定的励磁系统模拟简图及相应的数学模型,以及其中包括的参数和变量的术语定义适用于电力系统稳定性研究。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 7409 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 7409.1—2008 同步电机励磁系统 定义[IEC 60034-16-1:1991,MOD]

### 3 励磁功率单元分类——图示法及稳定性研究的数学模型

#### 3.1 直流励磁机励磁功率单元

近年来,虽然新机组已很少采用直流励磁机,但还有许多运行中的同步电机装有这类励磁机。图 2 就是一种采用它励绕组的直流励磁机励磁功率单元简图,图 3 表示该励磁功率单元的模型。模型中用术语  $K_E$  来描述有自励分量励磁机的特性。注意:采用它励励磁机时  $K_E=1$ 。

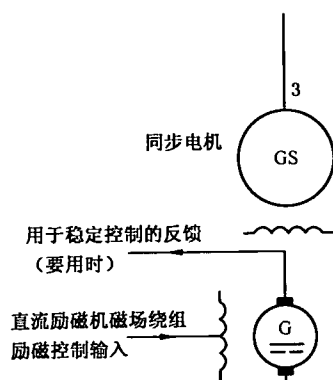


图 2 采用一个它励绕组的直流励磁机  
励磁功率单元

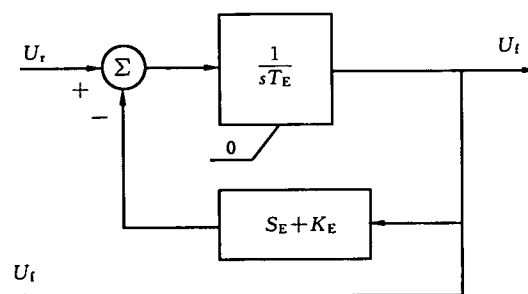


图 3 与图 2 相对应的模型

励磁控制采用机械式、电磁式和电子式控制装置。

考虑到采用直流励磁机的机组数量和重要程度的减小,对上述励磁控制形式,统一用图 3 的简图描述即可满足要求。

#### 3.2 交流励磁机励磁功率单元

交流励磁机励磁功率单元利用交流励磁机带静止或旋转整流器,给同步电机提供磁场电流。整流器可以是可控的或者是不可控的。采用不可控整流器时,可通过一个或多个交流励磁机磁场绕组产生控制作用。

分清提供交流励磁机磁场电流的电源,是模拟该励磁功率单元的基础。该电源可为副励磁机,也可为电压或复合静止电源。

图 4 表示交流励磁机带不可控静止整流器的励磁功率单元简图。由交流励磁机供给静止整流器电源,整流器的输出经电刷和滑环给同步发电机的磁场绕组。励磁机的旋转磁场绕组到励磁控制设备也是通过滑环和电刷进行电联接的。

图 5 表示交流励磁机(无刷励磁机)带不可控旋转整流器和永磁式副励磁机的简图,励磁控制设备的电源由永磁式副励磁机提供。整流器和交流励磁机的电枢与同步电机同轴旋转,旋转整流器的输出不需用滑环或电刷,而直接与同步电机的磁场绕组联接。

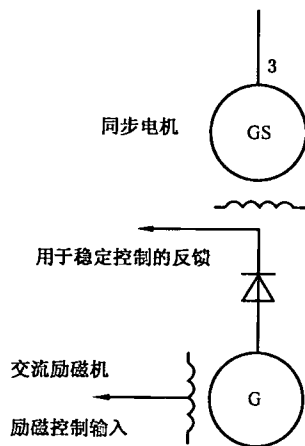


图 4 带不可控静止整流器的交流励磁机励磁功率单元

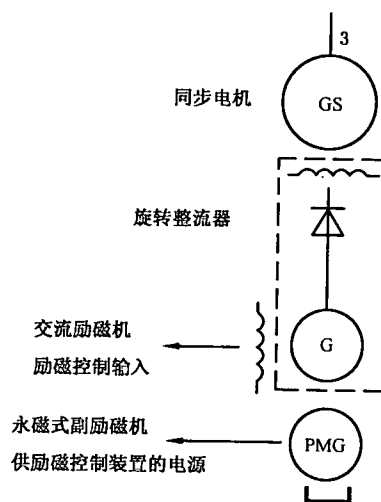


图 5 带不可控旋转整流器的旋转励磁功率单元(无刷励磁)

交流励磁机励磁功率单元的模型如图 6 所示。该模型用以描述励磁机带负载时的稳态和瞬态特性(在某些情况下考虑到瞬时负载影响,需用更详细的模型)。取决于励磁机数据完整程度,可以构成不表达换相作用励磁机励磁功率单元模型,即设  $X_E$  为零。

图 7 表示交流励磁机励磁功率单元的简化模型。虽然用负载的饱和曲线只能描述其稳态负载特性,但可以满足许多研究的要求。还应指出,不可能获得全部数据时可用简化模型。

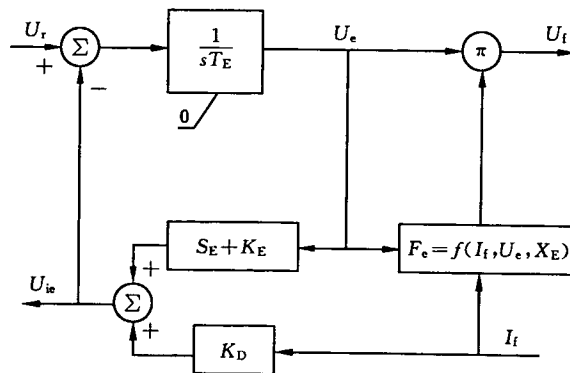


图 6 交流励磁机励磁功率单元详细模型

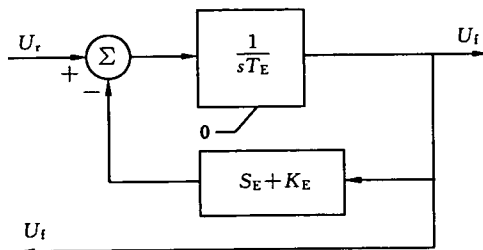


图 7 交流励磁机励磁功率单元简化模型图

### 3.3 电势源静止励磁功率单元

电势源静止励磁功率单元采用整流变压器,电源取自装在与同步电机同轴的辅助发电机、或取自与主发电机电压无关的辅助母线、或取自同步电机的输出端。后者称作自并励静止励磁功率单元,自并励静止励磁系统的性能和模型应考虑受电压变化的影响。电势源静止励磁功率单元如图 8 所示。电势源静止励磁功率单元数学模型可以表示为图 9 或者图 10。

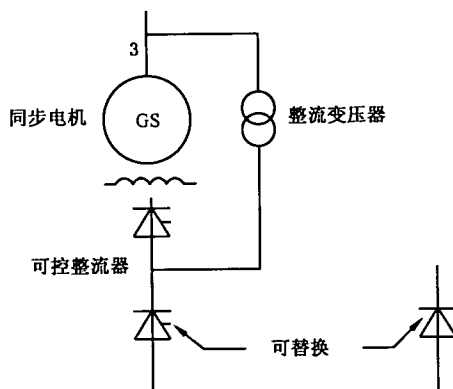


图 8 电势源静止励磁功率单元

可控整流装置采用全控桥,也可采用一半晶闸管、一半二极管的半控桥。常常通过控制触发角限制输出电压,用  $U_{p+}$  和  $U_{p-}$  来表示。半控桥线路不能逆变,  $U_{p-}$  的值等于零。

最常用的可控整流桥只允许正向励磁电流通过。若同步电机端部扰动引起负的磁场电流,图 9 的数学模型对此就不再是有效的了,在这种情况下,同步电机磁场绕组的电压不再受调节器的控制,而决定于其他因素,这不在本部分范围内论述。

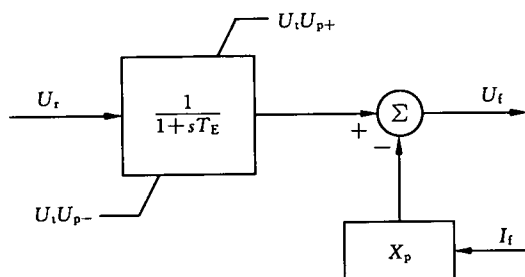


图 9 电势源励磁功率单元模型之一



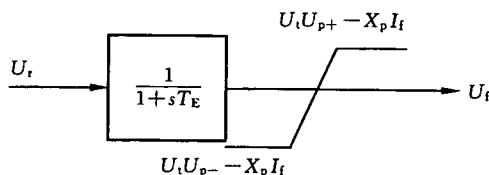


图 10 电势源励磁功率单元模型之二

只有在特殊情况下要求设备允许流过正向和负向励磁电流时,图 9 的数学模型才适用。

### 3.4 复合源静止励磁功率单元

复合源静止励磁功率单元采用电流源和电压源(取自同步电机)供电的两种整流变压器。设计的形式有电流源和电压源在直流侧并联、直流侧串联、交流侧并联和交流侧串联等多种形式。复合源静止励磁功率单元使用甚少,这里仅说明交流侧串联的复合源静止励磁功率单元。

图 11 给出了两个电源在整流器交流侧串联、电压相加的原理图。带有气隙的电抗器将电流源转换为电压源,也有采用带气隙的电流源变压器直接将电流源转换为电压源。图 12 给出相应的模型。

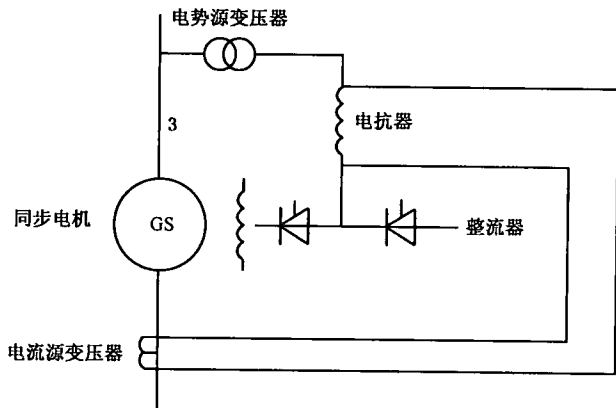


图 11 交流侧串联、电压相加的复合源静止励磁功率单元

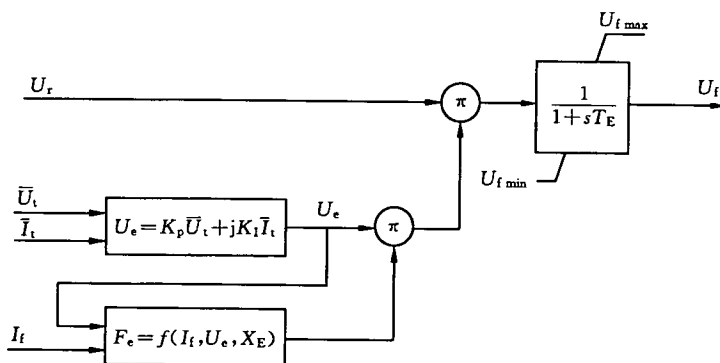


图 12 图 11 的模型

### 3.5 控制功能的数学模型

系统稳定性研究的大部分工作在于收集整理并确定与该系统研究有关的数学模型数据。对系统进行适当地简化会减少许多繁琐工作,但有时这种简化也会受到限制。例如,当要计算超过转子角第一次摆动以外的特性时,使用简化的模型会带来许多困难,因为现代电网的电力系统稳定性通常要经过数秒或数次振荡后方能确定。因此,在某种情况下,模型是不能简化的。

#### 3.5.1 电压测量和负载电流补偿单元模型

通常,模拟发电机端电压信号是所有电压调节器共用的。图 13 表示交流侧电压信号与负载电流补偿的合成。在此情况下,将输入变量(发电机电压和电流)进行相量相加,然后将合成信号整流。通常,负载电流的补偿采用下面的某一种形式:

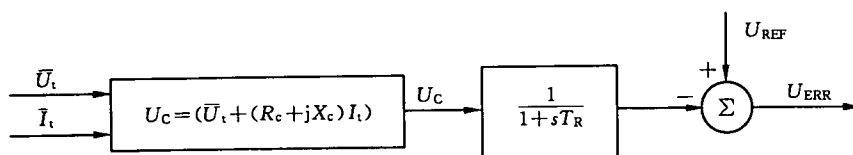


图 13 端电压信号及负载电流补偿

——当机组间未经阻抗直接并联时,采用电流补偿,造成一个人为的阻抗匹配,以使机组能合理地分担无功功率。这种情况下,  $X_c$  应为正值。

——当单一机组通过大的阻抗联到系统,或两台及多台机组通过各自变压器联到系统时可能要求调节发电机端外某点的电压。比如,可以补偿变压器的部分阻抗,在这些情况下,  $R_c$  和  $X_c$  取负值。

多数负载电流的补偿忽略  $R_c$  分量,而只要求  $X_c$  值,在此条件下,负载电流的影响可视为无功分量的影响,起该作用的部件称作无功电流补偿器。

不使用补偿器,而仅仅用于端电压整流后的滤波时,仍适用于图 13。另一方面,滤波环节可能是复杂的,为了模拟,可以简化为一阶惯性环节,在许多情况下此时间常数很小,可忽略不计。

加入负载补偿器影响滤波后的端电压信号与参考信号比较,参考信号表示端电压的理想整定值,选择等效电压调节器的参考信号  $U_{REF}$ ,以满足初始运行条件。

当使用补偿器时,应注意可能会在功率振荡的情况下附加上正的或负的阻尼。

### 3.5.2 校正环节模型

励磁控制的校正环节实现励磁调节和稳定控制功能。校正环节一般有以下几种类型:串联型 PID 校正环节、并联型 PID 校正环节、软反馈校正环节和励磁机时间常数补偿环节。也有几种校正环节组合的情况。

#### a) 串联型 PID 校正环节

串联型 PID 校正环节模型见图 14。  $K_V$  设置为 1 时校正环节由两级超前滞后环节组成。  $K_V$  设置为零时校正环节带纯积分环节,实现无差调节。

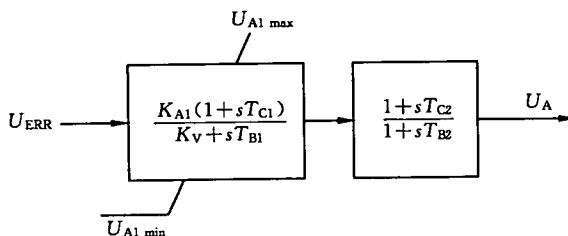


图 14 串联型 PID 校正环节

#### b) 并联型 PID 校正环节

并联型 PID 校正环节模型见图 15。

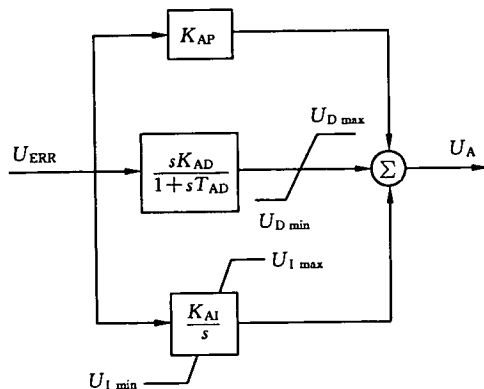


图 15 并联型 PID 校正环节

c) 软反馈校正环节

软反馈校正环节模型见图 16。软反馈环节输入信号在静止励磁系统中为调节器输出  $U_r$ ，在励磁机励磁系统中可以是励磁机磁场电流信号  $U_{ie}$ ，或者发电机磁场电压  $U_f$ 。软反馈环节输出信号加到电压相加点或者 PID 校正环节的输出。

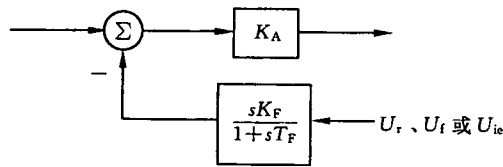


图 16 软反馈校正环节

d) 励磁机时间常数补偿环节

励磁机时间常数补偿环节用以减少励磁机等效时间常数。励磁机时间常数补偿环节的输入信号为发电机磁场电压或励磁机磁场电流信号，反馈到 PID 校正环节的输出，见图 17。

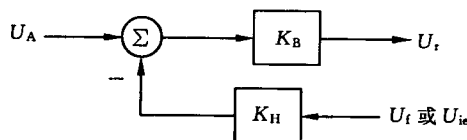


图 17 励磁机时间常数补偿环节

3.5.3 限幅环节

要注意区分内限幅和外限幅两种限幅环节。内限幅和外限幅的表达见附录 D。

3.5.4 电力系统稳定器模型

电力系统稳定器输入信号一般有发电机有功功率、机端电压的频率、发电机转速或它们的组合。电力系统稳定器可以用于发电机和电动机工况，但是参数需要分别整定。

电力系统稳定器输出信号一般叠加到电压调节器电压相加点上。叠加到电压相加点的电力系统稳定器输出量的基准值同发电机电压的基准值。叠加到其他点的电力系统稳定器输出量的基准值为叠加到电压相加点的电力系统稳定器输出量的基准值乘以需重点抑制的振荡频率下电压相加点到电力系统稳定器输出相加点的动态增益。电力系统稳定器输入量的基准值同发电机基准值。

a) 单输入信号电力系统稳定器模型——PSS1 型

PSS1 型单输入信号电力系统稳定器模型由信号测量环节、两级隔直环节、轴系扭振滤波器、三级超前滞后环节、增益调整环节和输出限幅环节组成，见图 18。输入信号可以是发电机有功功率、机端电压的频率或发电机转速。

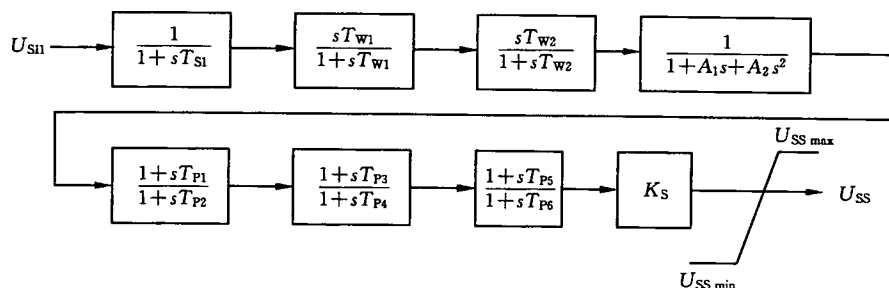


图 18 单输入信号电力系统稳定器模型——PSS1 型

b) 合成加速功率型电力系统稳定器模型——PSS2 型

PSS2 型合成加速功率型电力系统稳定器模型见图 19。PSS2 型模型采用发电机转速(或频率)和有功功率作为输入信号  $U_{S11}$  和  $U_{S12}$ ，经过运算产生机械功率变化量信号，该信号减去有功功率变化量信号即为加速功率变化量信号，以此作为电力系统稳定器校正信号输入到超前滞后环节、增益调整环节和限幅环节。

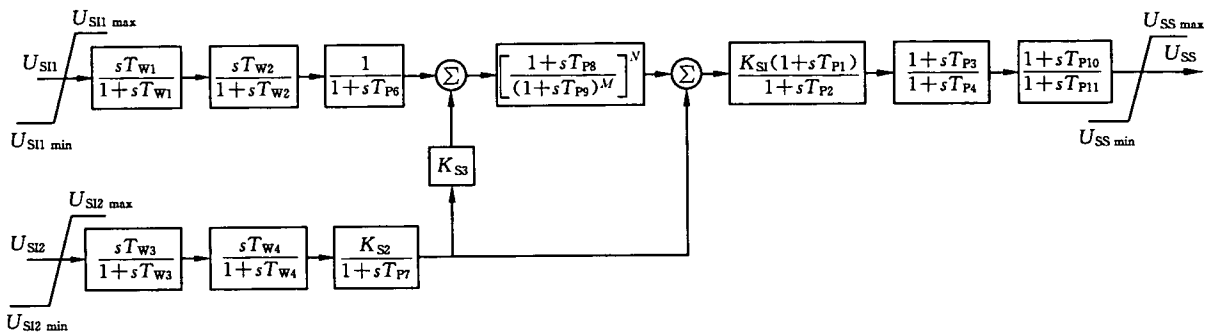


图 19 加速功率型电力系统稳定器模型——PSS2 型

c) 双输入信号电力系统稳定器模型——PSS3 型

PSS3 型双输入信号电力系统稳定器模型由两路信号测量环节带增益调整、两级隔直环节、三级超前滞后环节和输出限幅环节组成,见图 20。通常采用发电机有功功率和频率作为输入信号,在这种情况下可以不考虑扭振抑制环节。

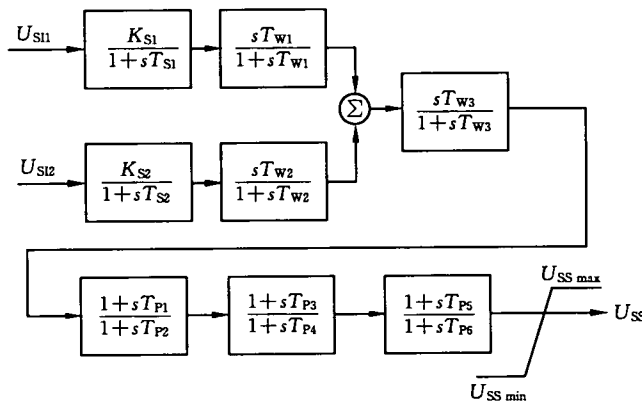


图 20 双输入信号电力系统稳定器模型——PSS3 型

3.5.5 限制器和电力系统稳定器作用于电压调节器的方式

限制器包括欠励限制器、过励限制器、过励瞬时限制器、定子电流限制器和 V/Hz 限制器等。

限制作用于电压调节器的方式可采用迭加方式或者比较门方式。迭加方式,限制动作后电压调节仍起作用。比较门方式,限制动作后电压调节被阻断,实现被限制量的闭环控制。

限制器和电力系统稳定器作用于电压调节器的方式有两种,限制后电力系统稳定器离线和在线。结合具体的电网,不同的作用方式对小扰动稳定性的影响不同,有时需要调整有关参数。

图 21 为欠励限制、过励瞬时限制和电力系统稳定器作用于电压调节器的一般方式。

励磁系统稳定计算模型可按照实际模型或者按照等效方式选择作用点和作用方式。

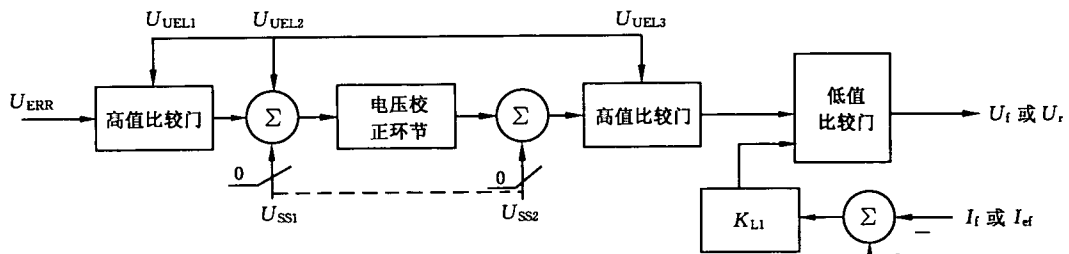


图 21 限制器和电力系统稳定器作用于电压调节器的一般方式

3.6 励磁系统模型

本部分提供的励磁系统模型对应多数在中国电网运行的、符合标准要求的发电机励磁系统,也包含了多数在中国应用于电力系统稳定性研究的励磁系统模型。当有需要时,按照 3.5.5 增添限制器。当所提供的模型不能满足应用时应建立新的、符合实际的励磁系统模型。

本部分所提供的励磁系统模型各个环节并非必须全部使用。当部分环节不使用时,可以采用设置参数等于模型的约定值使其不起作用。

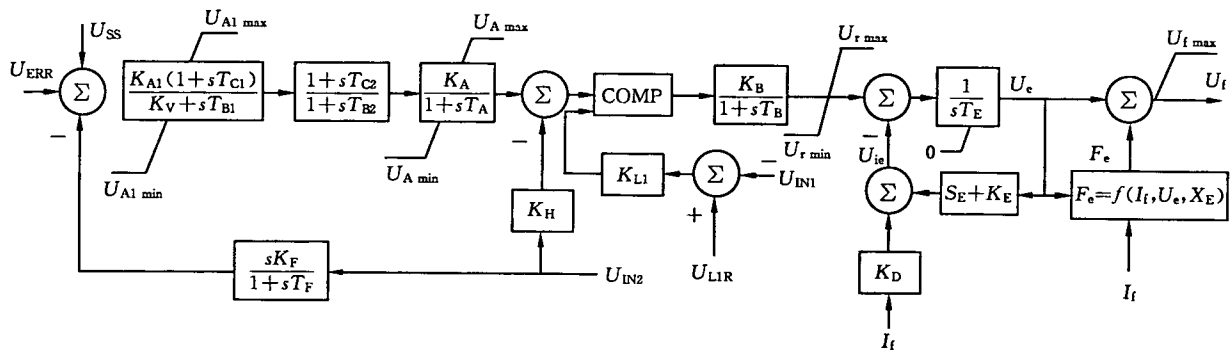
3.6.1 交流励磁机励磁系统模型

这类励磁系统由交流励磁机和静止整流器或者旋转整流器产生发电机磁场所需要的直流电流。模型考虑了发电机磁场电流对交流励磁机的去磁作用和整流器的换相压降作用。

a) EX1 型交流励磁机励磁系统模型

图 22 所示 EX1 型模型用来表示副励磁机向励磁调节器供电的不可控整流器交流励磁机励磁系统。

EX1 型模型有串联型 PID 校正和软反馈校正;有过励瞬时限制;有励磁系统输出电压最大值限制。按照反馈信号的来源分为 A、B 两型,A 型适用于无刷励磁系统,B 型适用于有刷或无刷励磁系统。COMP 为比较环节。

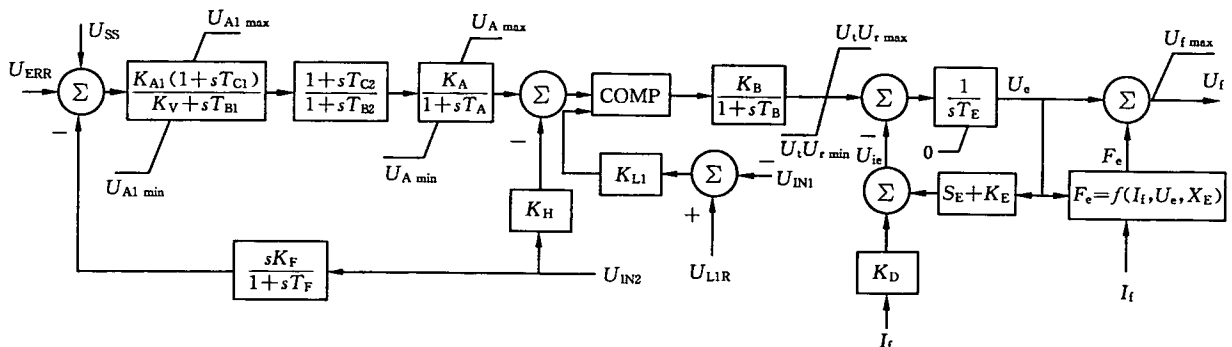


EX1-A 型:  $U_{IN1}$ 、 $U_{IN2}$  为  $U_{ie}$ 。EX1-B 型:  $U_{IN1}$  为  $I_f$ ,  $U_{IN2}$  为  $U_f$  或  $U_{ie}$ 。

图 22 EX1-A 和 EX1-B 型交流励磁机励磁系统模型

b) EX2 型交流励磁机励磁系统模型

图 23 所示的 EX2 型模型用来表示发电机机端变压器向励磁调节器供电的不可控整流器交流励磁机励磁系统。按照反馈信号的来源分为 A、B 两型,A 型适用于无刷励磁系统,B 型适用于有刷或无刷励磁系统。与 EX1 模型的差别仅仅在于调节器输出受发电机电压影响。励磁调节器的输出电压限幅值与发电机端电压成正比,为  $U_t \cdot U_{r,max}$  和  $U_t \cdot U_{r,min}$ 。EX2 型模型其他部分同 EX1 型。

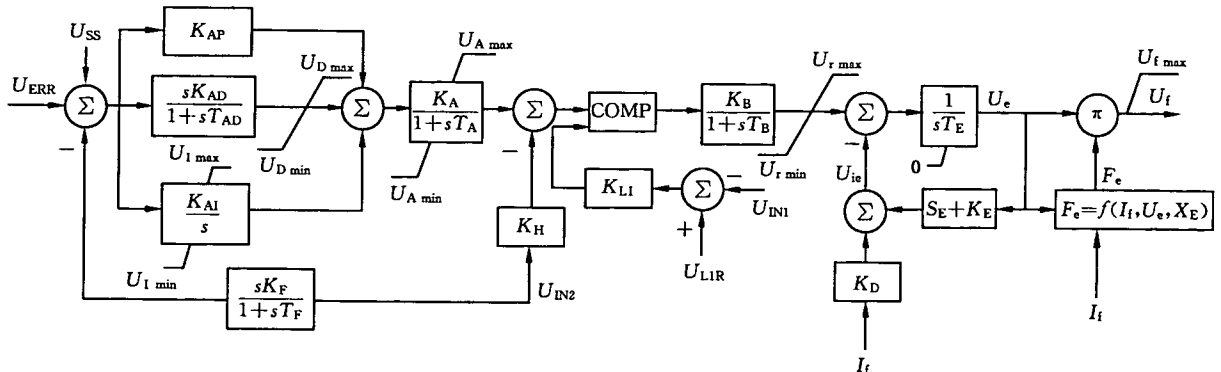


EX2-A 型:  $U_{IN1}$ 、 $U_{IN2}$  为  $U_{ie}$ 。EX2-B 型:  $U_{IN1}$  为  $I_f$ ,  $U_{IN2}$  为  $U_f$  或  $U_{ie}$ 。

图 23 EX2-A 和 EX2-B 型交流励磁机励磁系统模型

c) EX3 型交流励磁机励磁系统模型

EX3 型与 EX1 型模型的差别在于采用并联型 PID,其他与 EX1 型模型相同。EX3 型交流励磁机励磁系统模型见图 24。

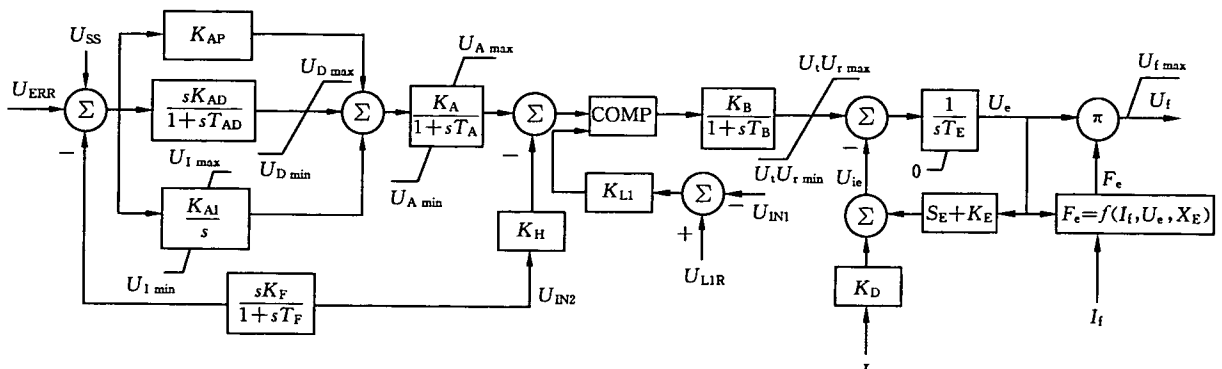


EX3-A型:  $U_{IN1}, U_{IN2}$  为  $U_{ie}$ 。EX3-B型:  $U_{IN1}$  为  $I_f$ ,  $U_{IN2}$  为  $U_f$  或  $U_{ie}$ 。

图 24 EX3-A 和 EX3-B 型交流励磁机励磁系统模型

d) EX4 型交流励磁机励磁系统模型

EX4 型与 EX3 型模型的差别在于励磁电源与发电机电压有关。EX4 型交流励磁机励磁系统模型见图 25。



EX4-A型:  $U_{IN1}, U_{IN2}$  为  $U_{ie}$ 。EX4-B型:  $U_{IN1}$  为  $I_f$ ,  $U_{IN2}$  为  $U_f$  或  $U_{ie}$ 。

图 25 EX4-A 和 EX4-B 型交流励磁机励磁系统模型

e) EX5 型交流励磁机励磁系统模型

图 26 所示的 EX5 型模型用来表示可控整流器交流励磁机励磁系统,也可以用来表示其他稳定的电源向可控整流器供电的可控整流器励磁系统。这个系统没有副励磁机,一般采用交流励磁机自励恒压系统。

EX5 型模型有串联型 PID 校正和软负反馈校正,软负反馈校正的输入来自调节器输出。

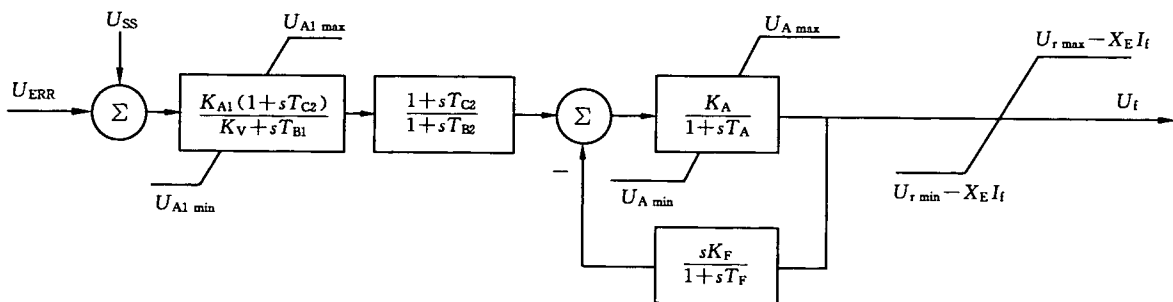


图 26 EX5 型励磁系统模型

f) EX6 型交流励磁机励磁系统模型

EX6 型与 EX5 型模型的差别在于采用并联型 PID,其他与 EX5 型模型相同。EX6 型交流励磁机励磁系统模型见图 27。

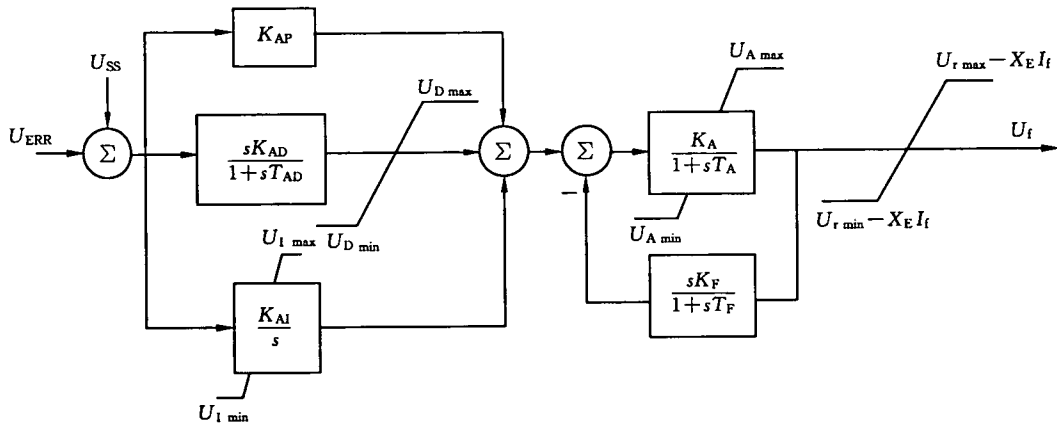


图 27 EX6 型励磁系统模型

3.6.2 直流励磁机励磁系统模型

直流励磁机励磁系统模型取不可控整流器交流励磁机励磁系统模型 EX1~EX4,一般将其  $K_C$  和  $K_D$  设为零即可,当直流励磁机的空载特性和负载特性有显著差别时, $K_D$  按直流励磁机的空载特性和负载特性确定。

3.6.3 静止励磁系统模型

a) ST1 型静止励磁系统模型

图 28 所示的 ST1 型励磁系统模型用来表示自并励静止励磁系统。自并励静止励磁系统通过励磁变压器由发电机机端取得励磁电源,经可控整流器输出励磁电压。调节器的输出电压,也就是发电机磁场电压。它的限幅值与发电机电压成正比,为  $U_t \cdot U_{r,max}$  和  $U_t \cdot U_{r,min}$ 。模型含过励电流瞬时限制。

ST1 模型有串联型 PID 校正、软负反馈校正和过励瞬时限制,软负反馈校正的输入来自调节器输出。

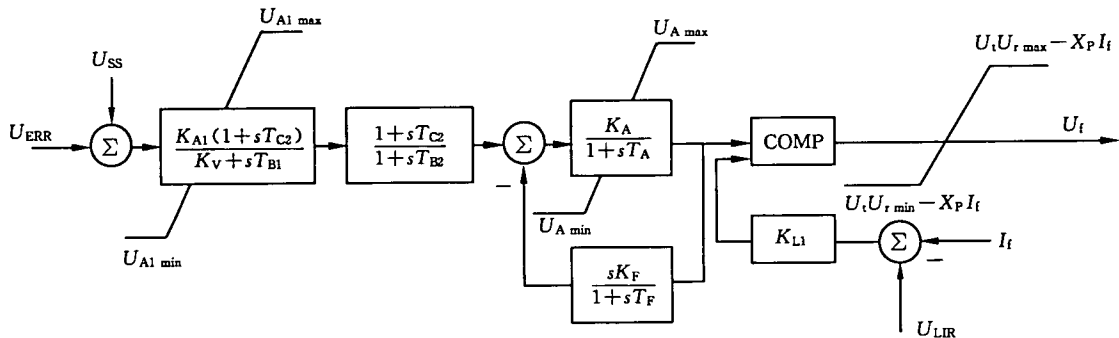


图 28 ST1 型静止励磁系统模型

b) ST2 型静止励磁系统模型

图 29 为 ST2 型静止励磁系统模型。ST2 型与 ST1 型模型的差别在于采用恒定励磁电源,其他与 ST1 型模型相同。

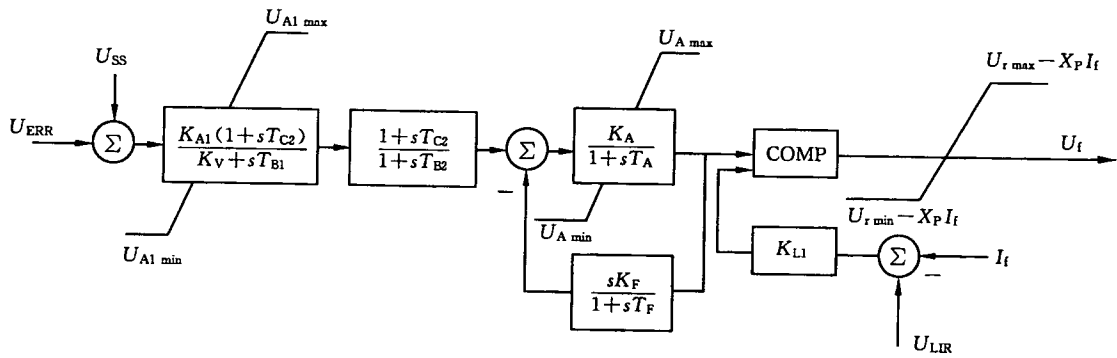


图 29 ST2 型静止励磁系统模型

c) ST3 型静止励磁系统模型

图 30 为 ST3 型静止励磁系统模型。ST3 型与 ST1 型模型的差别在于采用并联型 PID 校正,其他与 ST1 型模型相同。

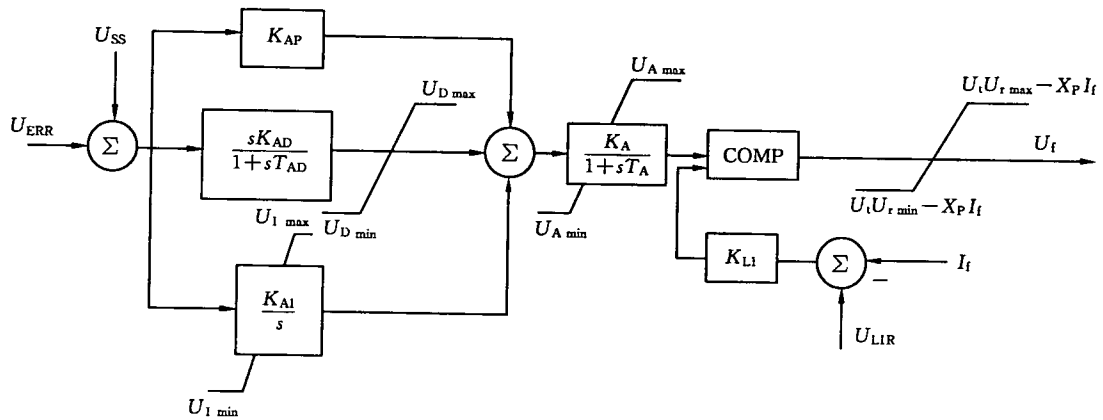


图 30 ST3 型静止励磁系统模型

d) ST4 型静止励磁系统模型

图 31 为 ST4 型静止励磁系统模型。ST4 型与 ST3 型模型的差别在于采用恒定励磁电源,其他与 ST3 型模型相同。

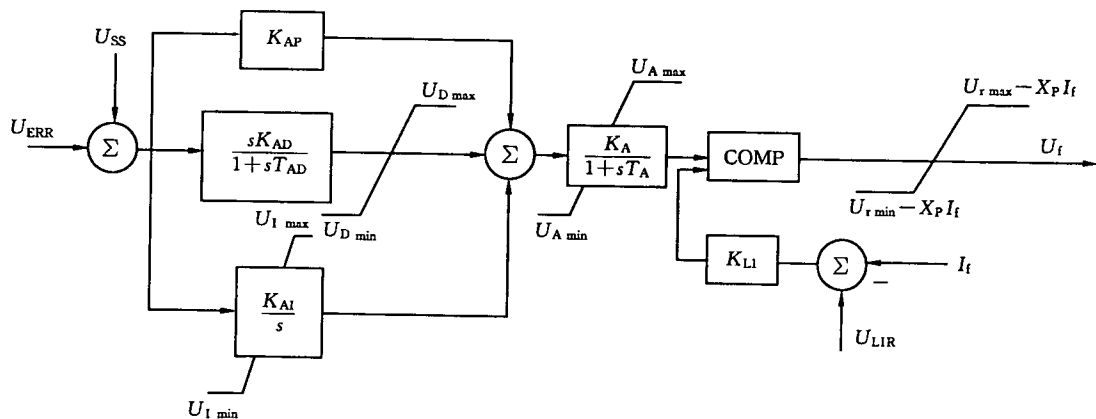


图 31 ST4 型静止励磁系统模型

e) ST5 型静止励磁系统模型

图 32 为 ST5 型静止励磁系统模型。ST5 型模型有励磁电压反馈和过励瞬时限制。



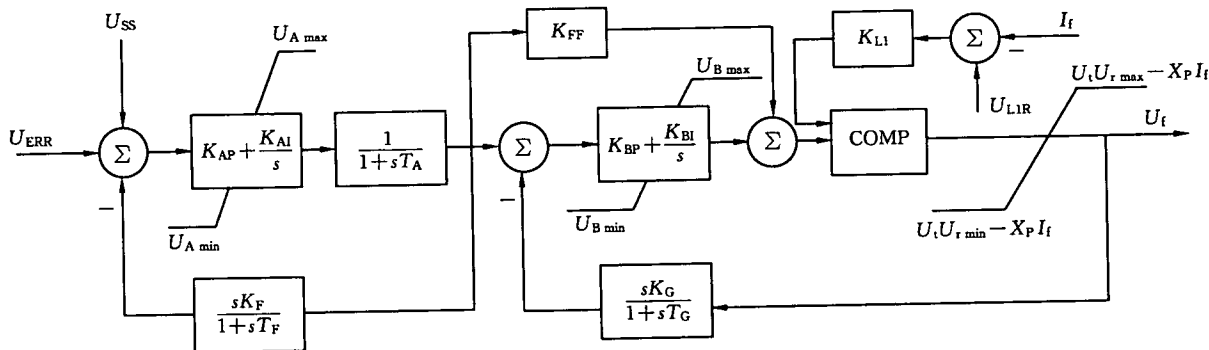


图 32 ST5 型带励磁电压反馈的静止励磁系统模型

4 专用语

4.1 参数

- $T_E$ ——旋转交、直流励磁机的时间常数；静止励磁功率单元机饱和和绕组的时间常数；可控整流桥控制等效时间常数。
- $S_E$ ——交、直流励磁机的饱和函数，见附录 C。
- $K_E$ ——交、直流励磁机自励磁场的常数，对于它励励磁机  $K_E=1$ 。
- $K_D$ ——去磁系数，交流励磁机电抗的函数。
- $X_E$ ——整流器负载系数，与电压源、电流源的换向电抗成正比，或与电压、电流源的合成等效换向电抗成正比。
- $F_c$ ——换向压降系数，见附录 B。
- $X_\gamma$ ——换向电抗。
- $K_I$ ——电流回路输入常数。
- $K_P$ ——电压回路输入常数。
- $U_{f\max}, U_{f\min}$ ——励磁系统输出最大、最小电压。
- $U_{r\max}, U_{r\min}$ ——调节器最大、最小输出。
- $U_{P+}, U_{P-}$ ——发电机额定电压时，电势源励磁功率单元的最大、最小空载输出电压。
- $K_G$ ——内环磁场调节器的反馈增益。
- $T_R$ ——端电压变换器、负载电流补偿器的时间常数。
- $X_P$ ——电势源变换器的整流器负载系数。
- $K_A, K_{A1}, K_{FF}, K_V, K_{AP}, K_{AD}, K_{AI}, K_B, K_{BP}, K_{BI}, K_F, K_H$ ——电压调节器增益常数。
- $T_{B1}, T_{B2}, T_{C1}, T_{C2}, T_A, T_B, T_F, T_{AD}, T_G$ ——电压调节器时间常数。
- $X_C, R_C$ ——电流和功率补偿器增益常数。
- $U_{A\max}, U_{A\min}, U_{A1\max}, U_{A1\min}, U_{B\max}, U_{B\min}, U_{D\max}, U_{D\min}, U_{I\max}, U_{I\min}$ ——电压调节器限幅值。
- $K_{L1}$ ——过励瞬时限制增益。
- $U_{L1R}$ ——过励瞬时设定值。
- $K_S, K_{S1}, K_{S2}, K_{S3}$ ——电力系统稳定器增益。
- $T_{S1}, T_{S2}$ ——电力系统稳定器信号测量环节时间常数。
- $T_{W1}, T_{W2}, T_{W3}, T_{W4}$ ——电力系统稳定器隔直环节时间常数。
- $T_{P1}, T_{P2}, T_{P3}, T_{P4}, T_{P5}, T_{P6}, T_{P7}, T_{P10}, T_{P11}$ ——电力系统稳定器时间常数。
- $A_1, A_2, M, N, T_{P8}, T_{P9}$ ——电力系统稳定器滤波器参数。
- $U_{SS\max}, U_{SS\min}$ ——电力系统稳定器输出限幅值。

$U_{S11 \max}$ 、 $U_{S11 \min}$ 、 $U_{S12 \max}$ 、 $U_{S12 \min}$ ——电力系统稳定器输入限幅值。

$U_{fB}$ 、 $I_{fB}$ 、 $R_{fB}$ 、 $U_{efB}$ 、 $I_{efB}$ 、 $R_{efB}$ ——分别为发电机磁场电压、磁场电流和磁场绕组电阻基准值，励磁机磁场电压、磁场电流和磁场绕组电阻基准值。

#### 4.2 变量

$U_r$ ——调节器输出。

$U_f$ ——发电机磁场电压、励磁系统输出(用发电机气隙磁场电压的标么值表示)。

$I_f$ ——发电机磁场电流(用发电机气隙磁场电流的标么值表示)。

$\bar{U}_t$ 、 $U_t$ ——发电机端电压的矢量及标量(用额定值的标么值表示)。

$\bar{I}_t$ 、 $I_t$ ——发电机定子电流的矢量及标量(用额定值的标么值表示)。

$I_{ef}$ ——励磁机磁场电流。

$U_e$ ——换向电抗后的励磁机电压(用发电机气隙磁场电压的标么值表示)。

$U_{REF}$ ——电压调节器设定值(按照满足初始条件确定)。

$U_{SS}$ ——电力系统稳定器输出。

$U_{ERR}$ ——电压控制通道的偏差信号。

$U_{ic}$ ——与励磁机磁场电流成比例的信号。

$U_C$ ——电压测量和补偿器输出。

$U_A$ ——电压校正环节的输出。

$U_{S11}$ 、 $U_{S12}$ ——电力系统稳定器输入信号。

$U_{UEL}$ ——欠励限制输出。

附 录 A  
(规范性附录)  
标 么 系 统

在电力系统研究中发电机和励磁机的电压和电流,以及调节器输入和输出量用标么值表示。

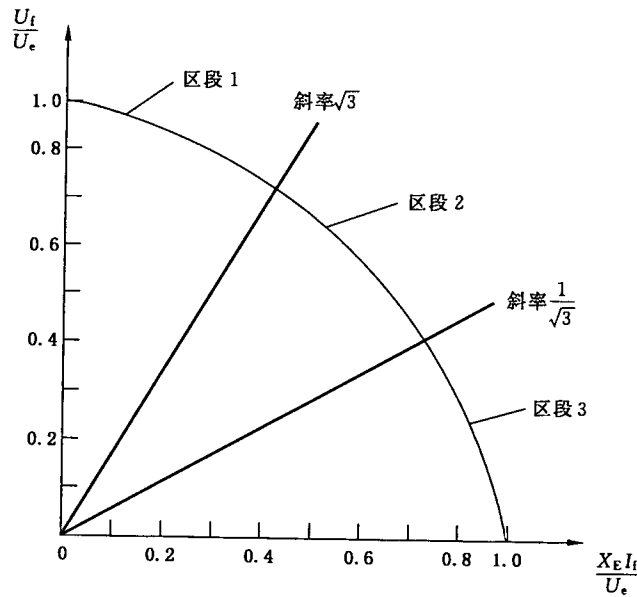
- a) 标么值等于实际值除以基准值。
- b) 发电机电压的基准值为发电机额定电压,发电机电流的基准值为发电机额定电流,发电机功率的基准值为发电机额定视在功率,发电机频率的基准值为发电机额定频率。
- c) 发电机磁场电流的基准值  $I_{fb}$  为发电机空载特性气隙线上产生额定电压所需的磁场电流,发电机磁场绕组电阻的基准值  $R_{fb}$  为发电机额定磁场电压除以发电机额定磁场电流,某些情况下需要考虑回路电阻的影响,发电机磁场电压的基准值  $U_{fb}$  为磁场电流的基准值乘以磁场绕组电阻的基准值。
- d) 励磁功率单元输出电流和电压的基准值分别取发电机磁场电流和电压的基准值。
- e) 励磁机磁场电流的基准值  $I_{fb}$  为在励磁机空载特性曲线气隙线上产生一个标么值发电机磁场电压所要求的励磁机磁场电流值,励磁机磁场绕组电阻的基准值  $R_{fb}$  为发电机额定工况下的励磁机励磁回路的电阻,励磁机磁场电压的基准值  $U_{fb}$  为励磁机磁场电流基准值乘以励磁机磁场绕组电阻基准值。
- f) 调节器的输入电压、电流和功率的基准值等于发电机电压、电流和功率的基准值。当控制发电机磁场电压时调节器输出电压基准值等于发电机磁场电压的基准值,当控制励磁机磁场电压时调节器输出电压基准值等于励磁机磁场电压的基准值。

**附录 B**  
(规范性附录)  
**整流器调节特性**

供给整流器电路的所有交流电源都有内部阻抗,主要是感性的,这个阻抗的作用改变了换向过程,当整流器负载电流增大时引起非线性地减小整流器平均输出电压。常采用的三相全波桥式电路有三个运行区段。根据整流器负载电流,用方程式表示这三个运行区段特性。

图 B.1 给出负载电压和负载电流的特性曲线及相应的方程。交流励磁机励磁功率单元整流器负载系数为  $X_E$ 。

$$X_E = \frac{3\sqrt{3}X_I I_B}{\pi U_B}$$



若  $\frac{X_E I_f}{U_c} < 0.433$ , 则  $F_c = 1 - 0.577 \left( \frac{X_E I_f}{U_c} \right)$

若  $0.433 < \frac{X_E I_f}{U_c} < 0.75$ , 则  $F_c = \sqrt{0.75 - \left( \frac{X_E I_f}{U_c} \right)^2}$

若  $\frac{X_E I_f}{U_c} > 0.75$ , 则  $F_c = 1.732 \left( 1 - \frac{X_E I_f}{U_c} \right)$

**图 B.1 整流器调节特性及相应的方程**

当  $X_E$  值很小时,只需模拟区段 1 即可,采用图 9 的模型。采用三相全控桥整流器的静止励磁功率单元在图 9 和图 10 的模型中的整流器负载系数为  $X_p$ 。

$$X_p = \frac{3X_I I_B}{\pi U_B}$$

附录 C  
(规范性附录)  
饱和函数

励磁机饱和函数  $S_E$  反映因励磁机饱和引起的励磁增加。在给定的励磁输出电压下,可在常电阻负载饱和曲线、气隙线、空载饱和曲线上分别得到产生此电压所需的励磁机磁场电流,从而确定 A, B, C 的量值(图 C.1)。

对于不单独模拟负载相关效应的交流励磁机励磁功率单元(图 7 模型),以及直流励磁机励磁功率单元(图 3 模型)应有

$$S_E = \frac{A-B}{B}$$

对于单独模拟同步电抗和换向电抗的负载相关效应的交流励磁机励磁功率单元(图 6 模型)应有

$$S_E = \frac{C-B}{B}$$

通常,有两点即可确定饱和函数,一般选励磁功率单元输出顶值电压的 1.0 倍和 0.75 倍两点。

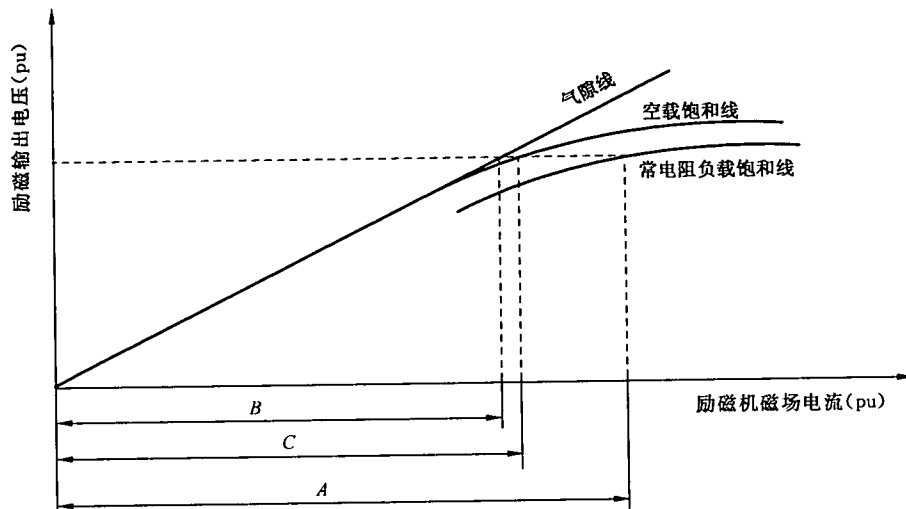
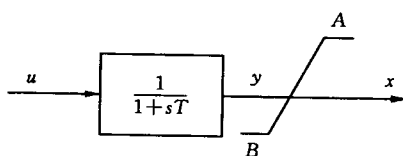


图 C.1 励磁机饱和特性

**附录 D**  
(规范性附录)  
**限幅表示法**

在控制电路和励磁功率单元模拟中有两种限幅必须考虑。外限幅允许输出  $Y$  超出此限制,但只允许参量  $X$  在限制值内变化(图 D.1)。内限幅(图 D.2)不允许量  $Y$  超出此限值,在硬件中,内限幅要求在其装置中有某种形式的反馈,内限幅的数学描述如图 D.2,图 D.2 不适于延时函数。

在较复杂的函数应用了内限幅,是否能简化还取决于函数本身。



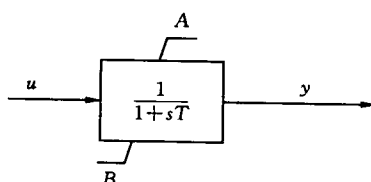
系统方程:  $dy/dt = (u - y) / T$

若  $B \leq y \leq A$ , 则  $x = y$

若  $y > A$ , 则  $x = A$

若  $y < B$ , 则  $x = B$

图 D.1 外限幅



系统方程:  $f = (u - y) T$

若  $y = A, f > 0$ , 则  $dy/dt$  置 0

若  $y = B, f < 0$ , 则  $dy/dt$  置 0

另外  $dy/dt = 1$

$B \leq y \leq A$

图 D.2 内限幅

附 录 E  
(资料性附录)

本部分章条编号与 IEC 60034-16-2:1991-02 章条编号对照

表 E.1 给出了本部分章条编号与 IEC 60034-16-2:1991-02 章条编号对照一览表。

表 E.1 本部分章条编号与 IEC 60034-16-2:1991-02 章条编号对照

本部分章条编号	对应的国际标准章条编号
1	1
2	—
3	2
3.1	2.1
3.2	2.2
3.3	2.3
3.4	2.4
3.5	2.5
3.5.1	2.5 第 7 段到第 11 段、第 13 段到第 14 段
3.5.2	—
3.5.3	—
3.5.4	—
3.5.5	—
3.6	—
3.6.1	—
3.6.2	—
3.6.3	—
4	3
4.1	3.1
4.2	3.2
附录 A	附录 A
附录 B	附录 B
附录 C	附录 C
附录 D	附录 D
附录 E	—
附录 F	—

附 录 F  
(资料性附录)

本部分与 IEC 60034-16-2:1991-02 技术性差异及其原因

表 F.1 给出了本部分与 IEC 60034-16-2:1991-02 的技术性差异及其原因的一览表。

表 F.1 本部分与 IEC 60034-16-2:1991-02 技术性差异及其原因

本部分章条编号	技术性差异	原 因
引言	代替“失步运行、次同步共振或扭矩影响的分析不包括在模型使用范围内”为“例如：失步运行、次同步共振或扭矩影响的研究，应当检查一下模型，以确定它是否适用。”	采用 IEEE Std. 421.5 标准
图 1	代替“励磁电源和励磁功率变换器”为“励磁功率单元”	与 GB/T 7409.1 一致
1	代替“术语定义在 IEC 60034-16-1 中给出”移至第 2 章规范性引用文件“GB/T 7409.1—2008”	转为中国国家标准格式
3.1	代替“励磁控制采用下列几种形式……”为“励磁控制采用机械式、电磁式和电子式控制装置”	直流励磁机数量减少，控制方式改进
3.2，第 5 段	增加“取决于励磁机数据完整程度，可以构成不表达换相作用励磁机模型，即设 $X_E$ 为零。”	实际应用需要
3.3 静止励磁功率单元	代替励磁系统为励磁功率单元	原文混淆了励磁系统和励磁功率单元的定义
图 9	删除电势源励磁系统简化模型	简化模型无使用性
图 9	代替 $U_i/U_{iN}$ 为 $U_i$	与第 3 条的定义一致
图 10	增加图 10，IEEE 的静止励磁功率单元模型	电力系统分析程序中常用模型
3.4	代替原文对直流侧并联、直流侧串联、交流侧并联复合源的叙述，修改为对交流侧串联复合源的叙述	采用我国实际运行的交流侧串联复合源模型
图 11、图 12	代替原图 11~15	采用我国实际运行的交流侧串联复合源模型
3.5 的原第 2、3、4、5、6 段	删除。相应删除原图 16、图 17、图 18	改用具体模型表达
3.5.1	增加。	陈述电压测量和电流补偿单元模型
3.5.1	删除原图 20、图 21 及相关内容。	结合我国实际电压测量和电流补偿单元用图 13 一种模型表示
图 14	即原图 21。代替 $U_i$ 为 $\bar{U}_i$	由电压和电流矢量求出功率
3.5.2	增加。	陈述校正环节
3.5.3	增加。	陈述限幅环节，与附录 D 对应
3.5.4	增加。	陈述电力系统稳定器



表 F.1 (续)

本部分章条编号	技术性差异	原因
3.5.5	增加	陈述限制器和电力系统稳定器作用于电压调节器的方式
3.6	增加。删除原附录 E“典型励磁系统工业计算机模型范例”	陈述具体的励磁系统模型
3.6.1	增加	陈述交流励磁机励磁系统模型
3.6.2	增加	陈述直流励磁机励磁系统模型
3.6.3	增加	陈述电势源静止励磁系统模型
4.1	删除“ $K_M$ 、 $T_M$ 、 $X_L$ 、 $U_{B\max}$ 、 $U_{C\max}$ 、 $U_{G\min}$ 、 $K_R$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 、 $T_2$ 、 $T_{F1}$ 、 $T_{F2}$ 、 $T_{R1}$ 、 $T_{R2}$ 、 $T_{R3}$ 、 $\alpha$ 、 $\alpha'$ 、 $\beta$ 、 $\beta'$ ”。 增加“ $X_T$ 、 $U_{I\min}$ 、 $K_{A1}$ 、 $K_{FF}$ 、 $K_V$ 、 $K_{AP}$ 、 $K_{AD}$ 、 $K_{A1}$ 、 $K_B$ 、 $K_{BP}$ 、 $K_{BI}$ 、 $K_H$ 、 $T_F$ 、 $T_B$ 、 $T_{AD}$ 、 $T_G$ 、 $X_C$ 、 $R_C$ 、 $U_{A\max}$ 、 $U_{A\min}$ 、 $U_{A1\max}$ 、 $U_{A1\min}$ 、 $U_{B\max}$ 、 $U_{B\min}$ 、 $U_{D\max}$ 、 $U_{D\min}$ 、 $U_{I\max}$ 、 $U_{I\min}$ 、 $K_{L1}$ 、 $U_{L1R}$ 、 $K_S$ 、 $K_{S1}$ 、 $K_{S2}$ 、 $K_{S3}$ 、 $T_{S1}$ 、 $T_{S2}$ 、 $T_{W1}$ 、 $T_{W2}$ 、 $T_{W3}$ 、 $T_{W4}$ 、 $T_{P1}$ 、 $T_{P2}$ 、 $T_{P3}$ 、 $T_{P4}$ 、 $T_{P6}$ 、 $T_{P7}$ 、 $T_{P10}$ 、 $T_{P11}$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $M$ 、 $N$ 、 $T_{P8}$ 、 $T_{P9}$ 、 $U_{SS\max}$ 、 $U_{SS\min}$ 、 $U_{S11\max}$ 、 $U_{S11\min}$ 、 $U_{S12\max}$ 、 $U_{S12\min}$ 、 $U_{IB}$ 、 $I_{IB}$ 、 $R_{IB}$ 、 $U_{efB}$ 、 $I_{efB}$ 、 $R_{efB}$ ”	因内容删除需要删除所及代号。 因内容增加需要增加所及代号
4.2	删除“ $U_B$ ”。 增加“ $I_{ef}$ 、 $U_C$ 、 $U_A$ 、 $U_{S11}$ 、 $U_{S12}$ 、 $U_{VEL}$ ”。	因内容删除需要删除所及代号。 因内容增加需要增加所及代号
4.2 $U_{ie}$	代替 $U_{ie}$ 的解释为“与励磁机磁场绕组电流成比例的信号”	采用 IEEE 定义
附录 A	代替原附录 A	定义发电机、励磁机和调节器输入和输出各变量的标么化基准值
附录 B	增加 $X_E$ 和 $X_P$ 的计算式	描述完整
附录 D, 第 2 段	删除“如图 16 的 PI—调节器, 具有内限幅作用, 并亦绘出调节器简图。由前部通道的比例部分, 增益 $K_R$ 和这部分反馈的外限幅可得出详细的模拟内限幅。”	因不采用原图 16 表示
附录 E	增加“本部分章条编号与 IEC 60034-16-2:1991-02 章条编号对照”	GB/T 20000.2—2001 要求
附录 F	增加“本部分与 IEC 60034-16-2:1991-02 技术性差异及其原因”	GB/T 20000.2—2001 要求

中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
同 步 电 机 励 磁 系 统  
电 力 系 统 研 究 用 模 型  
GB/T 7409.2—2008

\*

中国标准出版社出版发行  
北京复兴门外三里河北街16号  
邮政编码:100045

网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷  
各地新华书店经销

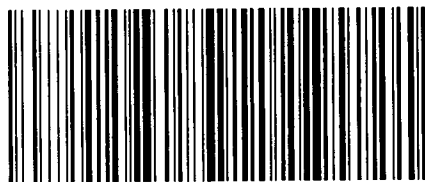
\*

开本 880×1230 1/16 印张 1.75 字数 42 千字  
2009年1月第一版 2009年1月第一次印刷

\*

书号: 155066·1-35298 定价 22.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换  
版权专有 侵权必究  
举报电话:(010)68533533



GB/T 7409.2—2008