



Y1785419

声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《独立电力系统异步电动机仿真与保护研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名: 张仲伟 日期: 2009.12.25

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

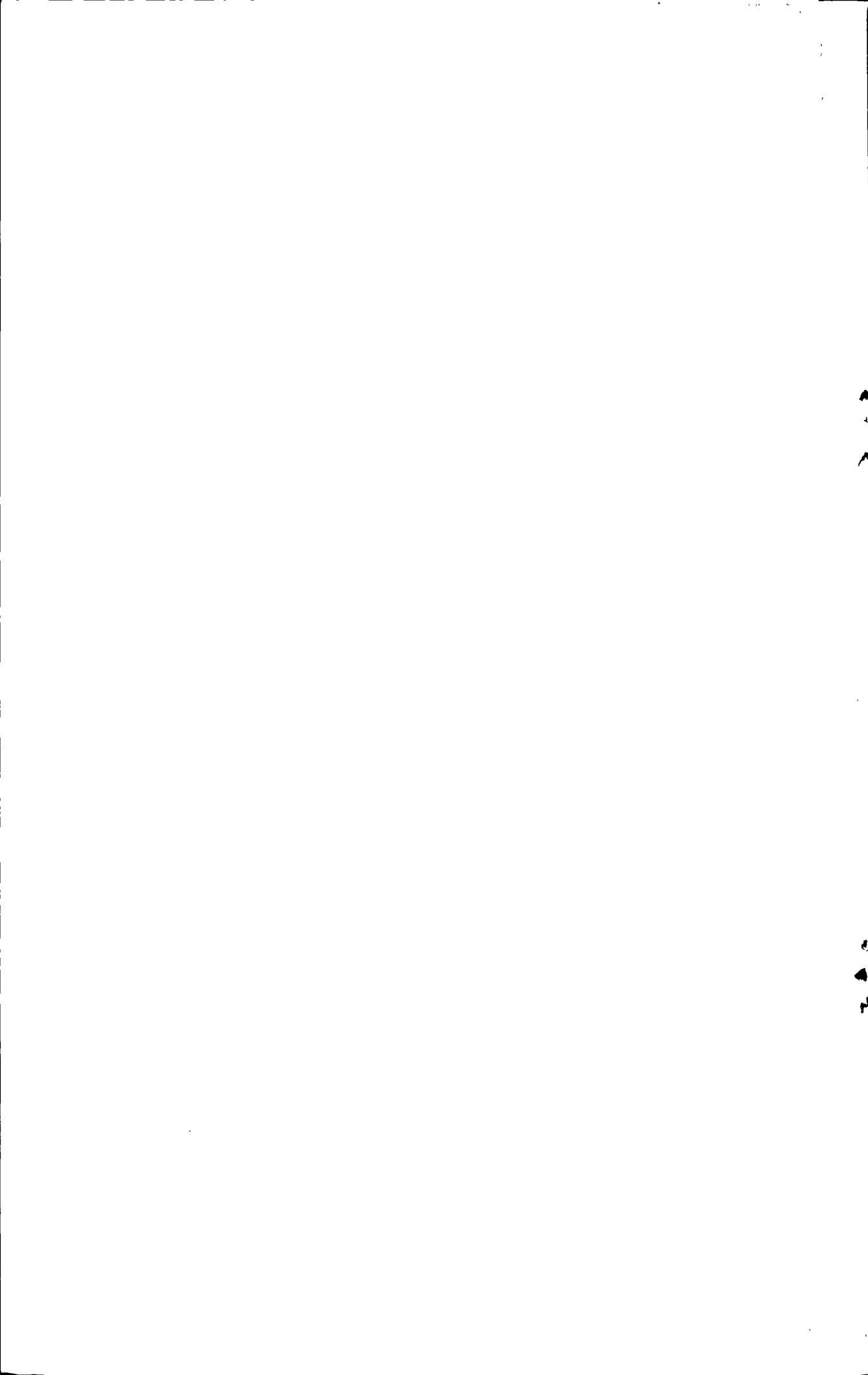
(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名: 张仲伟

导师签名: 任彦军

日 期: 2009.12.25

日 期: 2009.12.25



摘要

随着世界范围内的能源紧张，大力开发海上油气资源已经成为我国未来能源发展的必然趋势。异步电动机作为生产中的主要动力拖动设备在海洋石油平台系统中占有重要的地位。因此对海上石油平台独立电力系统中异步电动机仿真和保护进行研究具有重要意义。本文首先对异步电动机的数学模型进行了研究，推导出一种同时考虑铁损与磁饱和的异步电动机模型，并应用 MATLAB 中搭建的独立电力系统仿真模型对异步电动机的常见故障进行了仿真研究。基于前面的故障仿真以及对异步电动机保护的研究，提出了海洋石油平台独立电力系统中异步电动机保护的综合配置方案。最后通过对独立电力系统中异步电动机相间短路故障的仿真研究，提出了加装功率方向元件的定时限过电流保护的配置方案。

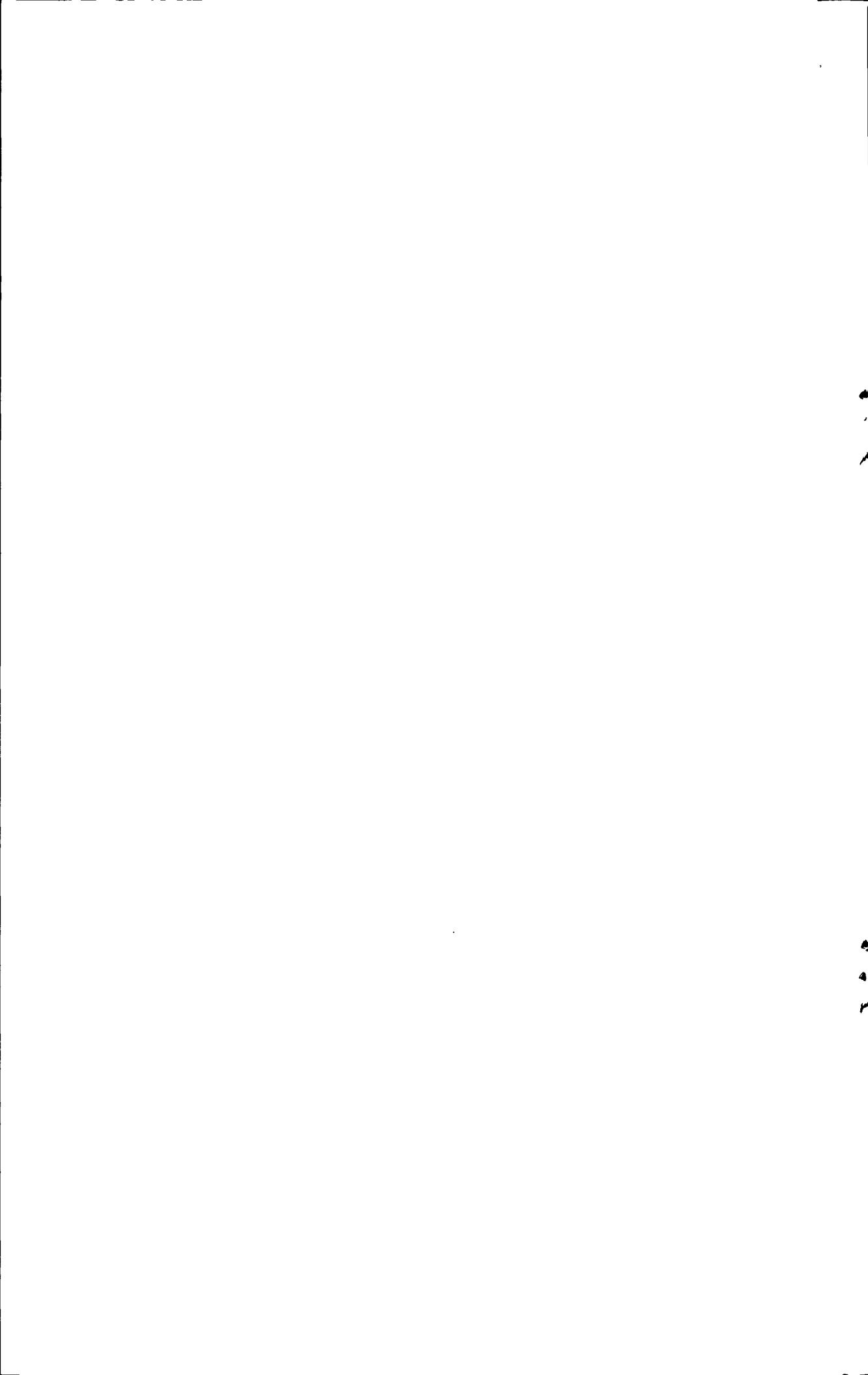
关键词：独立电力系统，异步电动机，仿真，保护

ABSTRACT

With the shortage of energy around the world, it is an inevitable trend in China's future energy development that great efforts will be made to exploit offshore oil and gas resources. As the main power drive equipment, induction motor plays an important role in the offshore oil platform system. So it is meaningful to study on simulation and protection of induction motor on the offshore oil platform independent power system. Firstly, the paper studies the mathematical model of induction motor, proposes a model of induction motor with the consideration of iron loss and magnetic saturation. Then the paper studies the simulation of common fault of induction motor depend on the independent power system simulation model which is established in MATLAB. Secondly, base on the study on fault simulation and protection of induction motor, the paper proposes a scheme of comprehensive protection configuration of induction motor on the offshore oil platform independent power system. Finally, with the study on simulation of interphase short circuit fault of induction motor on independent power system, the paper proposes a scheme of time overcurrent protection which has power directional element.

Zhang Zhong-wei (Power System and Its Automation)
Directed by Prof. Jiao Yan-jun

KEY WORDS: independent power system, induction motor, simulation, protection



目 录

中文摘要

英文摘要

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 异步电动机建模仿真研究现状	2
1.3 异步电动机保护的现状	2
1.4 本文的主要工作	4
第二章 异步电动机数学模型的研究	5
2.1 常用的异步电动机数学模型	5
2.1.1 静止坐标系下异步电动机的数学模型	5
2.1.2 d、q 坐标系下异步电动机的数学模型	7
2.1.3 任意转速旋转的通用坐标系下异步电动机的数学模型	8
2.2 同时考虑铁损与磁饱和的异步电动机模型	9
2.2.1 数学模型的建立	9
2.2.2 仿真实验	13
2.3 本章小结	15
第三章 独立电力系统中异步电动机故障仿真研究	16
3.1 异步电动机常见故障类型的划分	16
3.2 独立电力系统中异步电动机的故障仿真	17
3.2.1 相间短路故障	17
3.2.2 堵转故障	18
3.2.3 过载故障	19
3.2.4 接地故障	21
3.2.5 断相故障	22
3.2.6 不平衡故障	23
3.3 本章小结	25
第四章 独立电力系统中异步电动机保护配置研究	26
4.1 异步电动机故障原因及保护分类	26

4.2 独立电力系统综合保护配置方案	27
4.3 保护原理及其配置方案	28
4.3.1 纵联差动保护	28
4.3.2 定向接地保护	30
4.3.3 负序过电流保护	31
4.3.4 堵转保护	31
4.3.5 过热保护	32
4.3.6 低电压保护	35
4.4 本章小结	35
第五章 独立电力系统中异步电动机定时限过电流保护配置研究	37
5.1 独立电力系统中异步电动机相间短路故障特性	37
5.1.1 三相短路故障特性分析	37
5.1.2 两相短路故障特性分析	39
5.2 定时限过电流保护工作原理	40
5.3 定时限过电流保护的整定计算	42
5.3.1 功率方向元件	42
5.3.2 动作值整定	42
5.3.3 动作时间整定	43
5.4 本章小结	44
第六章 总结	45
参考文献	47
致 谢	50
在学期间发表的学术论文和参加科研情况	51

第一章 绪论

1.1 引言

石油天然气是不可再生的资源，作为世界上最主要的能源和战备物资，二十世纪以来，一直在各国政治、经济、军事生活中占据重要地位。随着我国经济的发展，特别是作为支柱产业的石油化工和汽车工业的快速发展，石油和天然气供应不足的矛盾日益突出。我国从 1993 年开始，原油供应量满足不了市场需求，因而从石油出口国变为石油进口国。2005 年我国的原油进口量已达到 9000 万吨，石油天然气已成为我国的稀缺能源。中央在“十一五”规划中明确指出要继续加强石油天然气资源的勘探和开采力度，保证后备储量^[1-2]。

鉴于陆上资源的日渐枯竭，资源开发向海洋、尤其是深海进军已成必然趋势。世界海洋石油资源总量占全球石油资源总量的 34%。据统计全球海洋石油蕴藏量约 1000 多亿吨，其中已探明储量约 80 亿吨。目前全球已有 50 多个国家在进行深海勘探。近 10 多年来，世界海洋石油和天然气产量稳步上升，2008 年海洋石油产量达到 20.57 亿吨，约占世界石油总产量的 36.3%。未来 10 年将是深海油气勘探的活跃期。我国拥有漫长的海岸线，海洋油气资源十分丰富。按第三次石油资源评价初步结果，目前全国石油资源量为 1072.7 亿吨，已探明储量 225.6 亿吨，探明率在 39% 左右，其中海洋石油资源量为 246 亿吨，占总量的 22.9%；天然气资源量为 54.54 万亿立方米，其中海洋为 15.79 万亿立方米，占 29.0%。未来我国海洋油气勘探开发将继续较快增长，投资不断增加，海上油气产量持续增长，勘探开采作业海域范围和水深不断扩大^[3-4]。

海上石油平台电力系统作为海洋油气资源开采作业系统的一个重要组成部分，在海上油气资源的勘探和开采过程中发挥着重要作用。它为整个海上石油开采系统提供能量和动力，即海洋石油平台上的各个生产环节和日常运行所需的电力。海洋石油平台上的各种电气设备构成了一种小型独立电力系统。与常规电力系统相比，海洋平台电力系统有其自身特点。具体表现在：系统规模小，网络为树状网络，电压等级较低，变频设备多，个别负荷的变化对系统影响大，输电线路用电缆的电阻不可忽略等等。异步电动机是海洋石油平台独立电力系统中的主要负荷，也是为各个生产环节提供动力的主要拖动设备。海洋石油平台独立电力系统的特点对系统中异步电动机的运行造成不同程度的影响，使异步电动机出现许多不同于陆地上的运行状况与故障特征，从而对异步电动机的保护配置提出了新的要求。

1.2 异步电动机建模仿真研究现状

对异步电动机的保护配置进行研究，不可能在实际生产中的设备上进行实验，这就要求我们搭建与实际工况相似的试验平台。构造由真实设备组成的物理试验平台进行分析研究，不但周期长、投资大，而且不宜于分析整个系统的各种性能。采用建模仿真的方法可以用较小的投资，在较短的时间内得到与实际工况十分接近的结果。数学模型是人们对客观对象或过程特性的一种表示形式，也是进行分析和控制的主要手段。从某种意义上说，只要构建足够精确的数学模型，建模仿真完全可以同真实系统相媲美^[5]。

构建异步电动机数学模型的难点就在于其电压方程中含有一些随转子位置角变化的时变电感，从而使方程成为变系数方程。需要采用变量变换的方法来减少方程的复杂程度，降低求解的难度。为了解决这个问题，在上个世纪学者们提出了很多变量变换的方法。从最早的将定子变量变换到固定于转子的参考系上和将转子变量变换到固定于定子参考系上；到将定、转子的变量同时变换到随旋转磁场同步旋转的参考系上；再到将定、转子变量同时变换到任意旋转速度下的参考系上，从而消除了时变电感。

近些年来，国内外的学者在异步电动机建模仿真方面又做了大量的工作，取得了一定的成果。随着计算机技术的发展，各种建模仿真软件（如 EMTP、EMTDC、MATLAB）的功能逐渐完善、强大，使得建模仿真具有了模块化、可重载、可封装、面向结构图编程及可视化等特点，大大提高了建模仿真的效率和可靠性，也使建模仿真变得直观便利^[6]。这些仿真软件的强大功能为学者们对异步电动机模型以及其它模型的研究提供了很好的平台，学者们搭建出了基于各种仿真软件的异步电动机模型。但是目前普遍使用的异步电动机模型存在着这样或那样的不足，有的模型过于简单，不能准确地反映异步电动机运行的动态过程；有的模型过于复杂，使用起来太不方便。因此对异步电动机的建模仿真作进一步的研究是十分有意义的。

1.3 异步电动机保护的现状

三相交流异步电动机广泛应用于工业生产当中。据统计，动力拖动负载占电网中总负载的 60%，而动力拖动负载中三相交流异步电动机占绝大部分^[7]。因此，为了保证异步电动机的正常运行和电力系统的安全，作好异步电动机的保护是十分重要的。

异步电动机的运行环境一般比较恶劣，长期处在高温、高压、高转速的工作状态之下，且异步电动机的种型号繁多，再加上由于内部电磁关系复杂造成各种故障特征分散、模糊、交叉或重叠，给故障分析和仿真带来了很大的难度。近些年来，异步电动机的故障仿真与保护配置一直是学者们研究的热点和难点。这一课题主要

包括两个方面：一方面是力求在保护理论上取得突破性进展，由定性分析向定量分析发展，加大对内部故障的分析研究等等；另一方面是保护装置的发展，由电磁型、电子型向微机型发展，由单一功能的保护向智能型综合保护发展等等。

我国的异步电动机保护主要有一下几种方式：

(1) 传统的电磁式保护方式

目前电网中仍有一部分异步电动机采用电磁继电器构成的保护。电磁式保护是以故障前后电流量的变化为判据的，但是这类保护往往要通过牺牲灵敏度来保证可靠性。为了使保护在异步电动机启动时可靠不动作，保护的定值都要躲过异步电动机的启动电流来整定，使得定值比异步电动机的额定电流大许多倍，从而降低了保护对匝间短路、堵转、断条等故障的灵敏度。

(2) 热继电器为主的组合保护方式

热继电器为主的组合保护方式由熔断器、接触器和热继电器组成，一般在中小型异步电动机中采用^[8]。它的优点是结构简单、成本低廉。缺点是保护的灵敏度比较低，时滞较长，可能造成异步电动机缺相运行扩大事故范围。

(3) 温度保护

温度保护是利用安装在异步电动机内部的温度传感器来实时测量绕组温度反映过负荷故障的。当绕组温度超过整定温度时，继电器动作切断异步电动机的供电电路。由于温度传感器安装在异步电动机内部，因此维护和检修都十分不方便。

(4) 电子式保护

电子式保护经历了由晶体管到集成电路两个阶段，它的工作原理是通过检测电流的大小以及是否缺相来反映各种故障。但是电子式保护对于故障初期不出现过流现象的局部故障缺乏保护能力，等到故障范围扩大，出现过流现象时为时已晚。

(5) 微机保护

由于电子计算机技术的飞速发展，微机型继电保护新原理、新装置不断出现，把继电保护技术带到了一个全新的境界。微机保护对比与其他保护有着性能优良、可靠性高、灵活性强和易获得附加保护功能等优点。过去由于成本过高，一般只在少数重要异步电动机上配备。近年来随着单片机和各种电子元器件的价格逐渐下降，微机保护正在逐步取代其它保护装置，广泛地应用于异步电动机保护。微机保护的发展趋势将是高速化、网络化、智能化、自适应以及保护、测量、控制、数据通信一体化^[9]。

由于海上石油平台独立电力系统的自动化程度越来越高，微机保护广泛的应用于异步电动机保护成为必然趋势。现代海上石油平台独立电力系统中异步电动机保护主要包括参数监测、逻辑判断、不正常状态的预警报警以及紧急保护的动作四部分。保护装置的优劣，不能只看硬件性能的高低，更应注重保护整体配置方案的合理性及其技术性能。合理的继电保护配置方案，可以使异步电动机中各种保护有机

的结合在一起，协调正确的发挥作用，从而提高异步电动机运行的安全性、可靠性，降低事故损失。因此这一课题的研究对海上石油平台独立电力系统中异步电动机的安全可靠运行具有重要意义。

1.4 本文的主要工作

本文通过对海洋石油平台独立电力系统中异步电动机运行状况的研究，建立了一种同时考虑铁损与磁饱和的异步电动机模型，并应用 MATLAB 仿真软件进行故障仿真分析，最后根据仿真分析的结果提出了可行的保护配置方案。其主要章节内容为：

第一章：综述了该课题领域内国内外的研究现状，指出了现状中的不足之处与未来的发展趋势。明确了研究该课题的理论意义与实际价值。

第二章：在现有异步电动机模型的基础上深入研究，建立了一种同时考虑铁损与磁饱和的异步电动机模型，并在 MATLAB 中做异步电动机启动过程的动态仿真，验证了模型的正确性。

第三章：基于在第二章中建立的异步电动机模型，搭建起一个小型独立电力系统的仿真模型，并在 MATLAB 中进行异步电动机各种故障的动态仿真，分析仿真结果。

第四章：基于对前面仿真以及目前国内异步电动机保护配置的研究，提出了海洋石油平台独立电力系统中异步电动机保护的综合配置，并详细介绍了各种保护的具体配置。

第五章：通过对海洋石油平台独立电力系统中异步电动机相间短路故障特性的分析，研究出一种加装功率方向元件的定时限过电流保护，并对其工作原理以及具体配置进行了详细说明。

第六章：总结全文并对后续工作做进一步的展望。

第二章 异步电动机数学模型的研究

2.1 常用的异步电动机数学模型

建立异步电动机的数学模型就是在一定合理必要的假设基础上, 利用电磁学和力学的基本定律来建立模型外部的输入、输出和模型内部的电磁、机电关系间的数学方程式, 也就是电动机的电压方程和转矩方程, 统称为异步电动机的运动方程。工程中大多用模型来代替实际电动机进行研究和分析, 因此建立异步电动机的模型是一件非常重要的工作。

异步电动机动态运行时, 内部的各个物理量(电压, 电流, 定、转子间互感, 电磁转矩, 转速等)是随时间变化的, 所以异步电动机的运动方程是以微分方程的形式表示的, 其中的各物理量都是瞬时值。异步电动机的动态数学模型是一个高阶次、非线性和强耦合的多变量系统, 分析起来十分复杂。在建立异步电动机的数学模型时为了方便分析, 通常假设异步电动机为“理想电机”。所谓“理想电机”就是对异步电动机做以下假设^[10]:

- (1) 电机的磁路为线性磁路, 铁芯中的磁滞和涡流损耗忽略不计。
- (2) 气隙磁场在空间中正弦分布, 磁场中的高次谐波忽略不计。
- (3) 假设定、转子表面光滑, 用卡氏系数来表示齿、槽的影响。
- (4) 对于三相交流异步电动机, 假设定子绕组三相对称。
- (5) 直轴气隙和交轴气隙可以不相等, 但气隙的比磁导可以用平均比磁导加上二次谐波比磁导来表示。

在建立异步电动机的数学模型时, 由于建模方法、变量选择、观察特性的角度不同, 同一异步电动机导出的运动方程可能具有不同的形式, 特别是当所选用的参考坐标系不同时。常用的参考坐标系有静止坐标系, 与转子一起旋转的旋转坐标系, 以及空间以任意转速旋转的通用坐标系三种。以下分别对在这三种参考坐标系下异步电动机的数学模型进行研究。

2.1.1 静止坐标系下异步电动机的数学模型

静止坐标系实际上是指定、转子坐标系分别固定于定、转子自身的坐标系。其中最典型是 ABC 坐标系, 它是建立三相绕组磁链方程和电压方程的三相自然坐标系。此外还有 $\alpha\beta0$ 坐标系, 120° 坐标系和空间向量坐标系。前两者是实数坐标系, 后两者是复数坐标系。

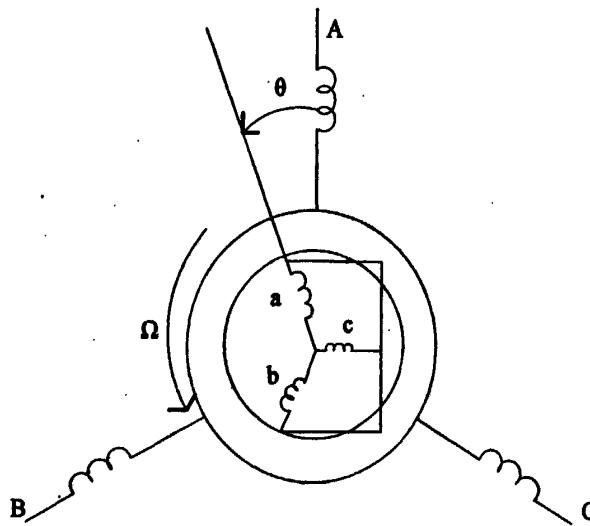


图 2-1 理想三相异步电动机定、转子示意图

图 2-1 为理想三相异步电动机的定、转子示意图，其中 A, B, C 表示定子绕组，a, b, c 表示转子绕组，定子绕组与转子绕组之间的夹角为电角 θ ，转子绕组以机械角速度 Ω 逆时针旋转。由图可推出静止坐标系下异步电动机的数学模型。

电压方程：

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

式中： u_s , u_r —一定、转子绕组端电压列矩阵；

R_s , R_r —一定、转子绕组电阻矩阵，且只有对角线上元素非 0；

i_s , i_r —一定、转子电流列矩阵；

P —时间的微分算子， $P=d/dt$ ；

L_s , L_r —一定、转子绕组的自感矩阵；当无零序电流时二者均为对角线矩阵；

M_{sr} , M_{rs} —一定、转子绕组的互感矩阵。

电磁转矩方程：

$$T_e = N_p i_s^T \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta} i_r \quad (2-2)$$

式中： T_e —电磁转矩；

N_p —极对数；

w —转子的机械角速度；

θ —电角度。

转矩方程：

$$T_e - T_L = \frac{J}{N_p} \cdot \frac{dw_r}{dt} + \frac{R_\Omega}{N_p} \cdot w_r \quad (2-3)$$

式中: T_L —负载转矩;

J —机组的转动惯量;

ω_r —转子的电气角速度;

R_n —机组的阻尼系数。

式(2-1)至(2-3)就构成了静止参考系下异步电动机的数学模型。由公式可见,由于静止参考系下异步电动机的数学模型是完全按照异步电动机的物理模型建立的,因此公式中的变量与物理模型中的变量一一对应,使得该数学模型通俗易懂。但是同时造成了模型的复杂程度较高,互感是时变的,求解起来困难等缺点。

2.1.2 d、q坐标系下异步电动机的数学模型

在静止坐标系下,当转子旋转时,定、转子绕组间的互感是时变的,所以定、转子的电压方程就成为含有时变系数的微分方程。为了消除磁链和电压方程中的时变系数,最常采用的方案就是通过d、q变换把转子量变换到定子坐标系上,d、q变换就是在静止坐标系的基础上转子的各个变量都乘以一个变换矩阵。

d、q变换的变换矩阵: $\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 。

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ \dots \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pM_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pM_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ pM_m & M_m p\theta & R_r + pL_r & L_r p\theta \\ -M_m p\theta & pM_m & -L_r p\theta & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \dots \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

式中: u_{sd} , u_{sq} , u_{rd} , u_{rq} —定、转子绕组的d, q轴电压;

i_{sd} , i_{sq} , i_{rd} , i_{rq} —定、转子绕组的d, q轴电流;

M_m —定、转子绕组间的互感矩阵,为常数阵。

如果考虑定、转子的零序分量,则可以加上一下独立的零序电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{s0} \\ u_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_{s0} & 0 \\ 0 & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s0} \\ i_{r0} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} N_p M_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (2-6)$$

转矩方程同式(2-3)。

经过d、q变换得到的异步电动机数学模型中,定子和转子的自感矩阵保持原来

的常数阵不变，而互感矩阵由原来的时变矩阵变为了常数阵，从而大大降低了方程的复杂程度。当设转子角速度 θ 为常数且不计磁饱和时，电压方程成为线性常系数微分方程，可用拉氏变换求解。

2.1.3 任意转速旋转的通用坐标系下异步电动机的数学模型

首先建立起一个以任意转速旋转的通用坐标系。设定子坐标系的坐标轴为 s_a 、 s_b ；转子坐标系的轴线为 r_a 、 r_b ； r_a 轴与静止的 s_a 轴成 θ 角；通用坐标系有两根相互垂直的轴线 x 和 y ； x 轴与静止的 s_a 轴成电角度 θ_k ；坐标轴的空间旋转角速度为 $w_k = d\theta_k/dt$ ，如图 2-2 所示：

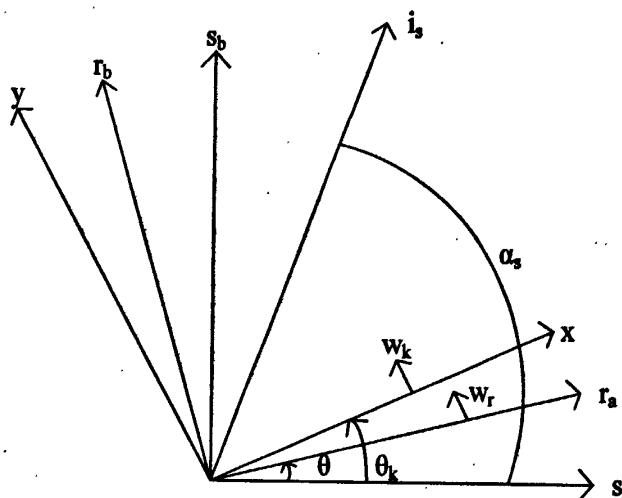


图 2-2 角速度为 w_k 的通用坐标系

由图 2-2 我们可以推导出在任意转速的通用坐标系中，用空间向量表示的异步电动机的运动方程。

电压方程：

$$\begin{aligned} u_{sk} &= R_s i_{sk} + (p + jw_k) \psi_{sk} = R_s i_{sk} + (p + jw_k)(L_s i_{sk} + M_m i_{rk}) \\ u_{rk} &= R_r i_{rk} + [p + j(w_k - w_r)] \psi_{rk} = R_r i_{rk} + [p + j(w_k - w_r)](M_m i_{sk} + L_r i_{rk}) \end{aligned} \quad (2-7)$$

式中： u_{sk} ， u_{rk} 一定、转子的空间电压向量；

i_{sk} ， i_{rk} 一定、转子的空间电流向量；

ψ_{sk} ， ψ_{rk} 一定、转子的空间磁链向量。

电磁转矩方程：

$$T_e = \frac{3}{2} N_p (L_s i_{sk} + M_m i_{rk}) \times i_{sk} = \frac{3}{2} N_p M_m i_{rk} \times i_{sk} \quad (2-8)$$

转矩方程同式 (2-3)。

选用任意转速的通用坐标系下用空间向量表示异步电动机的数学模型在某些情

况下具有明显的优点，例如应用在研究电机的矢量控制上。另外，采用任意转速的通用坐标系省去了矩阵变换和运算的麻烦，令 w_k 等于 0 或 w_r 就可以分别得到静止坐标系下和转子坐标系下的电压、磁链方程，转化起来十分方便。

2.2 同时考虑铁损与磁饱和的异步电动机模型

2.2.1 数学模型的建立

异步电动机的动态数学模型是一个高阶次、非线性和强耦合的多变量系统，分析起来十分复杂^[11]。前面介绍的异步电动机数学模型都是在忽略铁损以及主磁路饱和等条件下建立起来的简化的线性模型。但是铁损，磁饱和，集肤效应等非线性因素在异步电动机的实际运行中是确实存在的，它们使得一些参数不断变化，造成线性模型的准确度降低。铁损对异步电动机效率以及异步电动机传动系统等方面的研究产生很大影响，磁饱和现象对异步电动机暂态过程的研究产生很大影响。因此，忽略它们将会使仿真结果与真实情况产生很大误差。

铁损与异步电动机的铁心结构，电压频率，磁通密度等诸多因素有关，很难精确计算。若要在异步电动机动态模型中考虑铁损，可以按照异步电动机物理模型的思想，根据铁损产生的机理，把异步电动机的铁损用一个等效的纯电阻绕组的损耗来表示^[12-13]。如图 2-3 所示。

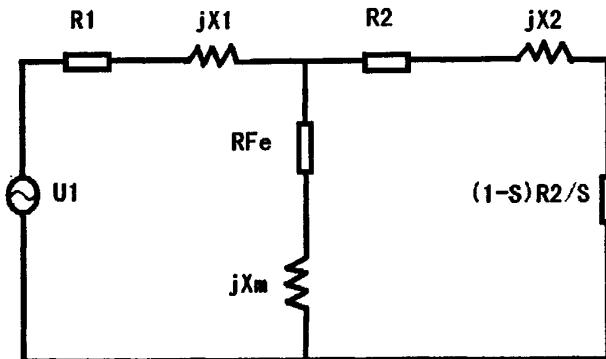


图 2-3 三相交流异步电动机物理模型

由图 2-3 可见，由于铁损主要产生于定子绕组的铁心中，因此这里在定子侧用一个等效的纯电阻绕组 R_{Fe} 来表示铁损，且当选择在 $dq0$ 坐标系下建立异步电动机的数学模型时只需要相应的增加 d 、 q 轴各一个等效铁损绕组的电压方程，推导出的电压和磁链方程如下。

电压方程：

$$\begin{aligned}
 U_{ds} &= R_s i_{ds} + p \psi_{ds} \\
 U_{qs} &= R_s i_{qs} + p \psi_{qs} \\
 U_{dr} &= R_r i_{dr} + p \psi_{dr} + w_r L_m i_{qs} - w_r L_r i_{qr} \\
 U_{qr} &= R_r i_{qr} + p \psi_{qr} - w_r L_m i_{ds} - w_r L_r i_{dr} \\
 0 &= R_{Fe} i_{dFe} + p \psi_{dm} - w_1 \psi_{qm} \\
 0 &= R_{Fe} i_{qFe} + p \psi_{qm} + w_1 \psi_{dm}
 \end{aligned} \tag{2-9}$$

磁链方程：

$$\begin{aligned}
 \psi_{ds} &= L_{ls} i_{ds} + \psi_{dm} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr} + i_{dFe}) \\
 \psi_{qs} &= L_{ls} i_{qs} + \psi_{qm} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr} + i_{qFe}) \\
 \psi_{dr} &= L_{lr} i_{dr} + \psi_{dm} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr} + i_{dFe}) \\
 \psi_{qr} &= L_{lr} i_{qr} + \psi_{qm} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr} + i_{qFe})
 \end{aligned} \tag{2-10}$$

式中： U_{ds} , U_{qs} , U_{dr} , U_{qr} —定、转子 d、q 轴电压；

R_1 , R_2 , R_{Fe} —定、转子绕组以及等效铁损绕组的电阻；

i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} —定、转子 d、q 轴电流；

i_{dFe} , i_{qFe} —等效铁损绕组 d、q 轴电流；

ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} , ψ_{qr} —定、转子 d、q 轴磁链；

ψ_{dm} , ψ_{qm} —d、q 轴主磁链；

w_r —转子的电气角速度；

w_1 —电机同步角速度；

L_m —定、转子绕组间的互感；

L_s , L_r —定、转子绕组自感；

L_{ls} , L_{lr} —定、转子绕组漏感。

相应的电磁转矩方程和电机的运动方程为：

$$\begin{aligned}
 T_e &= N_p \frac{L_m}{L_r} [\psi_{dr} (i_{qs} + i_{qFe}) - \psi_{qr} (i_{ds} + i_{dFe})] \\
 T_e - T_l &= \frac{J}{N_p} \cdot \frac{dw_r}{dt} + \frac{R_Q}{N_p} w_r
 \end{aligned} \tag{2-11}$$

在异步电动机的线性数学模型中，通常不考虑主磁路饱和现象，即认为 L_m 是固定不变的， E_m 与 L_m 成线性关系。考虑三相交流异步电动机主磁路饱和的数学模型称为瞬态饱和模型，它与线性模型、准饱和模型的不同在于对励磁电感 L_m 的计算方式不一样。如图 2-4 所示。

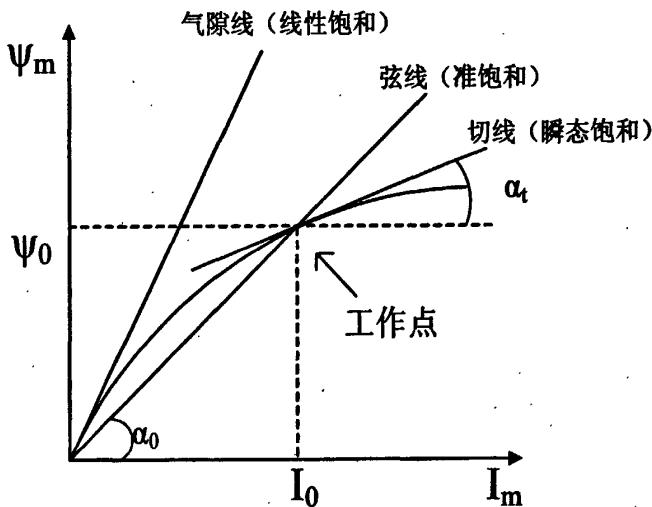


图 2-4 电机磁化曲线

图 2-4 就是电机的磁化曲线, 由图我们可以分别推出线性模型、准饱和模型和瞬态饱和模型中求取 L_m 的方法。线性模型中 L_m 为恒定不变的常数。准饱和模型也仅仅是将工作点的励磁电感稳态饱和值代入线性化模型中并保持不变, $L_m=tga_0$ 。瞬态饱和模型中则用一组变斜率的切线来代替 L_m , 即 $L_m=tga_t$, 因此 L_m 是一个时变系数。显然瞬态饱和模型中 L_m 的计算方法与磁化曲线最贴合, 瞬态饱和模型也更接近异步电动机的真实物理模型^[14-18]。

在搭建仿真模型, 进行仿真计算以前, 首先对异步电动机的磁化曲线进行多项式拟合的处理, 使其近似为一条平滑的曲线, 以便进行仿真计算时实时的求取励磁电感 L_m 。采用下面的多项式拟合磁化曲线并计算各个电感参数。需要说明的是: 多项式拟合得到的磁化曲线方程的阶数越高就越精确, 在实际中一般拟合到 5 阶方程。

$$\begin{aligned}
 E_m &= a_5 i_m^5 + a_4 i_m^4 + a_3 i_m^3 + a_2 i_m^2 + a_1 i_m + a_0 \\
 L_m &= \frac{E_m}{w i_m} \\
 L_s &= L_{ls} + L_m \\
 L_r &= L_{lr} + L_m
 \end{aligned} \tag{2-12}$$

式中: E_m —励磁电势;

i_m —励磁电流;

w —异步电动机角频率。

多项式拟合在 MATLAB 中采用 polyfit 函数来实现, 具体命令如下:

$E_m = [,,\dots,,];$

$i_m = [,,\dots,,];$ 输入磁化曲线中的数据

$p = \text{polyfit}(i_m, E_m, 5);$ 调用 polyfit 函数

$a_5=$, $a_4=$, $a_3=$, $a_2=$, $a_1=$, $a_0=$ 输出结果

这里选取一组真实异步电动机的磁化曲线数据来说明对磁化曲线进行多项式拟合的必要性, 磁化曲线数据如表 2-1 所示。

表 2-1 异步电动机磁化曲线数据表

E_1	I_m	E_1	I_m	E_1	I_m	E_1	I_m
0.0	0.0	124	1.11	211	2.50	261	5.83
24.3	0.23	134	1.24	222	2.89	270	6.87
41.4	0.39	145	1.33	231	3.30	279	8.21
61.8	0.54	160	1.51	236	3.59	282	8.90
81.6	0.68	173	1.66	244	4.23	286	9.74
99.6	0.88	193	2.01	250	4.67	293	11.5
116	1.04	201	2.16	256	5.31	324	20.0

在 MATLAB 中进行多项式拟合得到 5 阶的磁化曲线方程为: $E_m=0.052i^5-0.2532i^4+4.5453i^3-38.142i^2+158.2052i-9.0296$ 。进而在 MATLAB 中生成的多项式拟合前、后的磁化曲线如图 2-5 所示。

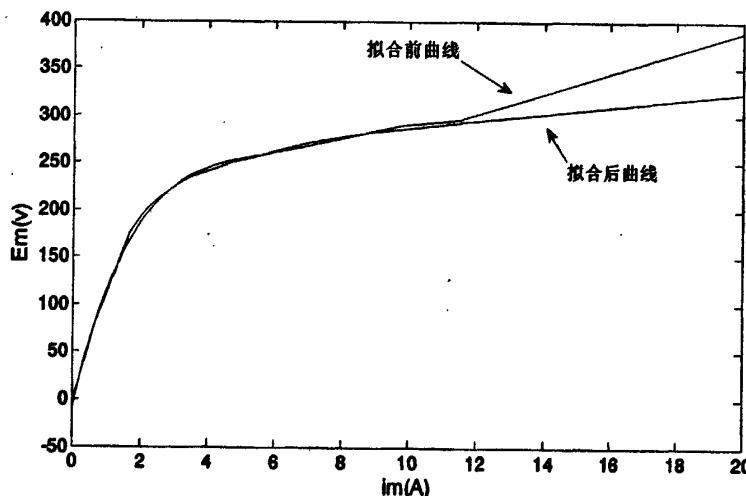


图 2-5 多项式拟合前、后磁化曲线对比图

由图 2-5 可见, 多项式拟合前的磁化曲线是由各个数据点连成的线段组成的不光滑曲线, 如果应用到仿真计算中肯定会造成很大的误差。经过多项式拟合后的磁化曲线成为了一条光滑的曲线, 它比拟合前的磁化曲线更接近真实的趋势, 应用到仿真计算中可以大大提高仿真的精确度, 因此进行多项式拟合是十分必要的。式 (2-9) 至 (2-12) 就构成了同时考虑铁损与主磁路饱和的三相交流异步电动机的动态数学模型。根据该模型就可以搭建其仿真模型并进行仿真研究。

2.2.2 仿真实验

这里我们采用 MATLAB 仿真软件进行仿真计算, MATLAB 语言是目前国际上流行的一种仿真工具语言, 它具有强大的矩阵分析和运算功能。建模仿真可视化功能 Simulink 是 MATLAB 五大通用功能之一, 它是基于 MATLAB 语言环境下实现动态系统建模、仿真的一个集成环境, 具有模块化、可重载、图形化编程、可视化及可封装等特点, 可大大提高系统仿真的效率和可靠性。Simulink 提供了丰富的模型库供系统仿真使用, 另外用户也可根据自己的需要开发所需的模型, 并通过封装扩充现有的模型库^[19]。本文采用 MATLAB7.0/Simulink 中提供的功能模块建立仿真模型。该方法的优点是仿真模型中的子模块与数学模型中的方程式相对应, 使仿真模型直观易懂, 且易于修改参数。易于实现添加干扰项的仿真, 如电机定子、转子回路串阻抗分级起动和调速、电机的电气制动以及电机在运行过程中定、转子电路发生故障等。缺点是模型结构比较复杂且不可避免的出现代数环, 使仿真速度略微变慢。

整个仿真模型由定子绕组 d、q 轴电流模块、转子绕组 d、q 轴电流模块、铁损等效绕组 d、q 轴电流模块、励磁电感 L_m 模块、电磁转矩 T_e 与转子转速 W_r 模块这 8 个模块组成。其中铁损等效绕组 d、q 轴电流模块与励磁电感 L_m 模块是线性仿真模型中没有的。将该模型做进一步的封装处理, 并实现信息量与电量之间的转换, 配合派克变换模块以及 Powersystem 模块中的电气元件搭建完整的仿真模型, 来进行三相交流异步电动机动态启动过程的仿真研究, 从而证明该模型的正确性。

试验参数的设置: 三相四极交流异步电动机, 2.2KW, 380V, 20A, 1430r/min, $R_s=3.35\Omega$, $R_r=2.27\Omega$, $R_{Fe}=1020\Omega$, $L_{d_s}=0.01197H$, $L_{q_s}=0.0152H$, $J=0.02064kgm^2$, $R_n=0.04436Nms/rad$, $T_L=0.08617wNm$, 磁化曲线数据如表 2-1。仿真得到的参数曲线如下图所示:

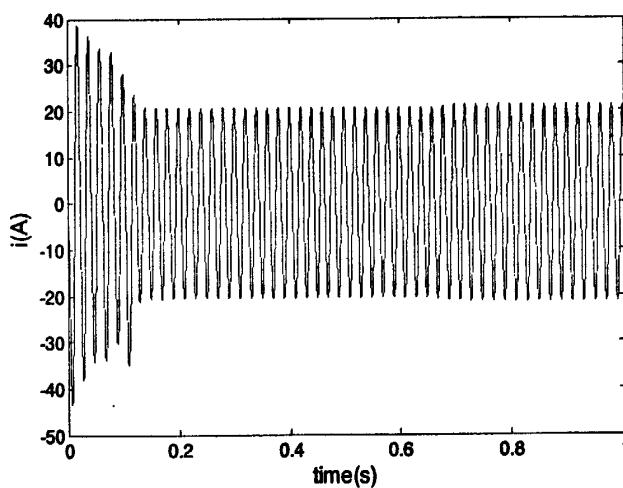


图 2-6 定子 A 相电流特性曲线

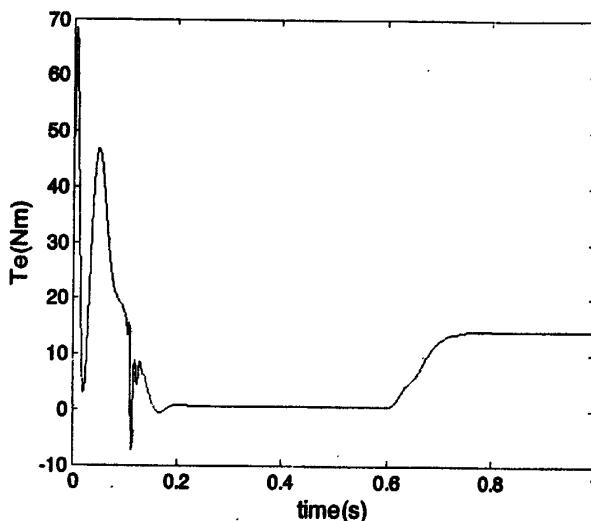


图 2-7 电磁转矩特性曲线

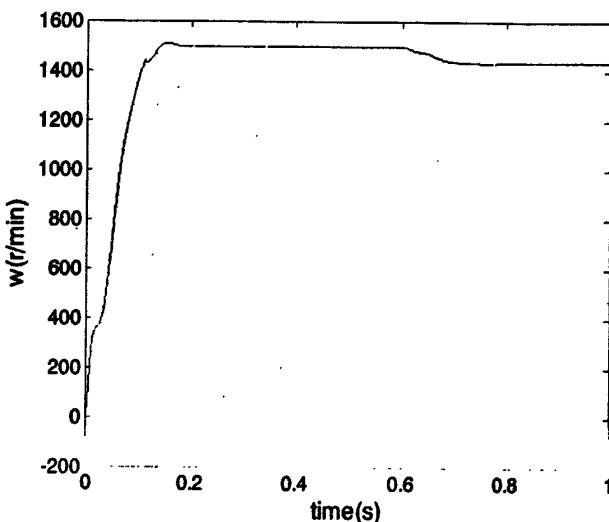


图 2-8 转子转速特性曲线

由图 2-6 至 2-8 的仿真结果可以看出, 所得到的各个参数曲线与异步电动机动态启动的各个参数趋势一致, 特别是当 0.6s 时给异步电动机突加负载转矩后仿真实验的结果也与预期的结果吻合, 这些都证明了该模型的正确性。另外该模型与传统的线性模型相比有很大改进。首先, 该模型考虑了铁损对异步电动机启动运行的影响, 因为铁损是实际存在的, 特别是在中小型异步电动机中铁损对电动机启动运行的影响非常明显, 而线性模型中完全忽略铁损显然是不精确的。其次, 该模型通过对具体电动机磁化曲线进行拟合得到随电压变化的定、转子间互感代入到方程之中, 这样就比线性模型中用固定不变的定、转子互感进行计算精确许多。综合以上两点, 我们可以认定该非线性数学模型比传统线性数学模型更加精确, 更加接近实际情况, 更能正确的描述异步电动机的启动、运行、故障等等各种不同状态的参数变化。

2.3 本章小结

本章首先研究总结了在静止坐标系、与转子一起旋转的旋转坐标系以及空间以任意转速旋转的通用坐标系三种坐标系下异步电动机的数学模型，并阐述了它们各自的优缺点。进而推导出一种基于与转子一起旋转的旋转坐标系下同时考虑铁损与主磁路饱和的三相交流异步电动机的动态数学模型。最后在 MATLAB/Simulink 中搭建了对应的仿真模型，结合坐标变换及电气元件模块进行了实例的仿真实验，验证了该模型的正确性。同时由于该模型考虑了铁损与主磁路饱和两个非线性因素，使模型与实际情况更加接近，且模型易于添加时变干扰项，使得模型更具有实用性。本章通过对异步电动机数学模型的深入研究，建立了实用的仿真模型，为后面章节中进行异步电动机故障仿真及保护配置方案的研究打下了基础。

第三章 独立电力系统中异步电动机故障仿真研究

3.1 异步电动机常见故障类型的划分

异步电动机的常见故障主要分为对称故障与不对称故障两大类。

对称故障主要包括：三相短路、堵转、过载、启动时间过长等。这类故障主要表现为流过电动机的电流幅值的显著变化，一般不会出现负序和零序分量。这类故障会给电动机带来很大损伤，甚至烧毁电动机。这是由流过电动机的电流激增所引起的热效应和产生的机械应力所造成的。对于这类故障一般通过检测电流的大小并取一定的延时来判断是否发生故障。当发生对称故障时流过电动机的三相电流仍然是对称的，并且同时出现过电流，过电流的大小由故障的位置与程度决定。

不对称故障又可分为接地故障与非接地故障。接地故障包括单相接地故障与两相接地故障。在我国，异步电动机一般采用中性点不接地的运行方式，当异步电动机正常运行或者发生非接地故障时，流过电动机的电流是没有零序分量的。因此出现零序分量是接地故障的主要故障特征和诊断依据。非接地故障包括断相、相间短路、不平衡运行等。这类故障一般不会出现零序电流，但会出现负序电流。因此出现负序分量是非接地故障的主要故障特征和诊断依据。由于不对称故障一般不会产生电流幅值的激增，因此它给电动机带来的危害不是使电动机过热，而是由于负序、零序电流的存在给电动机运行造成的隐患。这就要求我们在电动机运行状态检测方面做更大的努力^[20-24]。

表3-1^[25]列出了异步电动机的常见故障及其特征。其中单相故障设A相为故障相，两相故障设B、C相为故障相。 I_N 为异步电动机的额定电流， I_0 为故障发生前的电流幅值， $\Sigma I = I_a + I_b + I_c$ 。

表 3-1 异步电动机故障及其特征统计表

故障类型		过电流	负序电流	零序电流
对称故障	三相短路	(8~10) I_N	无	无
	堵转	(5~8) I_N	无	无
	过载	(1~5) I_N	无	无
不对称故障	单相接地	取决于故障位置	有	$\Sigma I/3$
	两相接地	取决于故障位置	有	$\Sigma I/3$
	相间短路	取决于故障位置	取决于故障位置	无
	断相	$\sqrt{3} I_0$	$I_N/\sqrt{3}$	无
	逆相	无	I_0	无
	不平衡	无	有	无

3.2 独立电力系统中异步电动机的故障仿真

这里我们采用 MATLAB7.0/Simulink/Simpower 来搭建独立电力系统中异步电动机的故障仿真模型。其中异步电动机模块采用上一章中自主搭建的模块，其他模块采用 Simpower 中自带的模块。仿真系统示意图如图 3-1 所示，仿真系统由并联运行的 2 台同步发电机以及 3 台异步电动机组成。假设 M_2 为故障电动机，其他两台电动机正常运行。

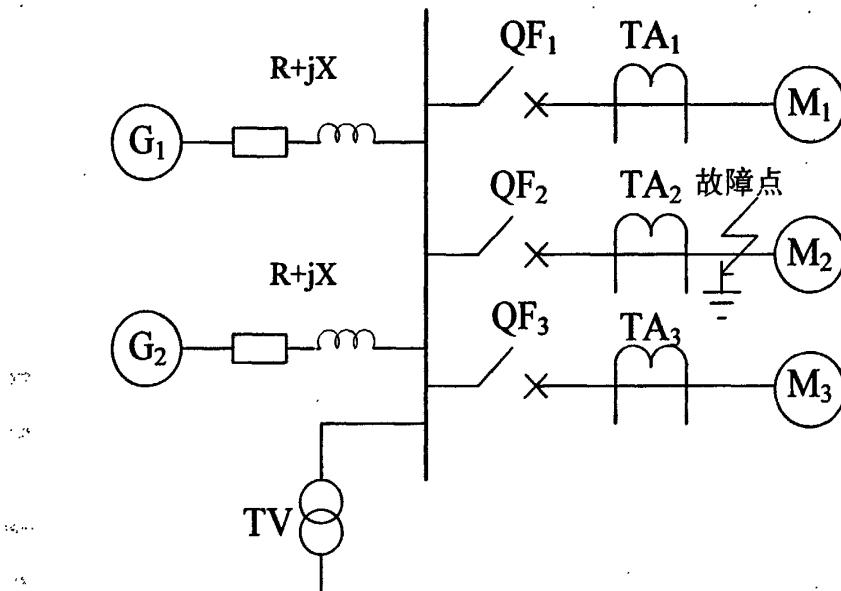


图 3-1 仿真系统示意图

3.2.1 相间短路故障

相间短路故障是异步电动机的常见故障之一，在实际中占异步电动机故障的很大比例^[26]。当发生三相短路故障时，流过异步电动机绕组的电流为额定电流的 8 至 10 倍。当发生两相短路故障时，流过异步电动机绕组的电流大小取决于故障发生的位置。无论是三相短路故障还是两相短路故障都会造成流过绕组的电流将急剧增大、绕组的温度急剧升高，对异步电动机的安全运行甚至整个海洋石油平台独立电力系统的安全运行形成很大威胁。以此，保护必须准确快速的切除故障。异步电动机发生三相短路时的电流、转速特性曲线如图 3-2、3-3 所示，两相短路情况相似，此处不再赘述。

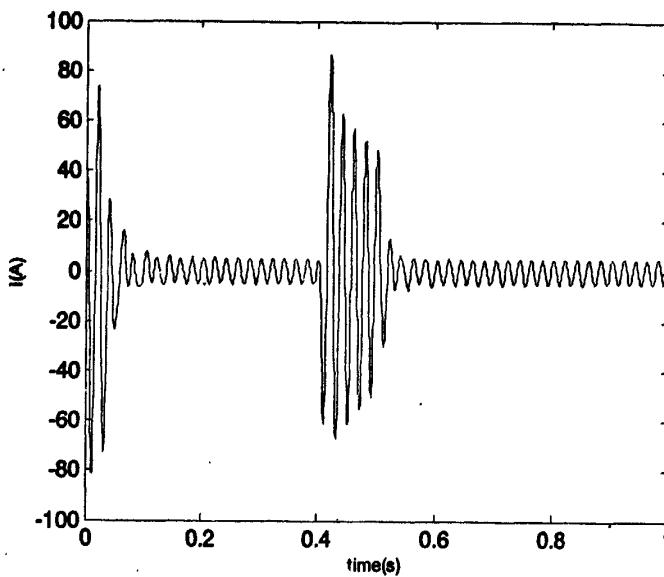


图 3-2 三相短路故障电流特性曲线

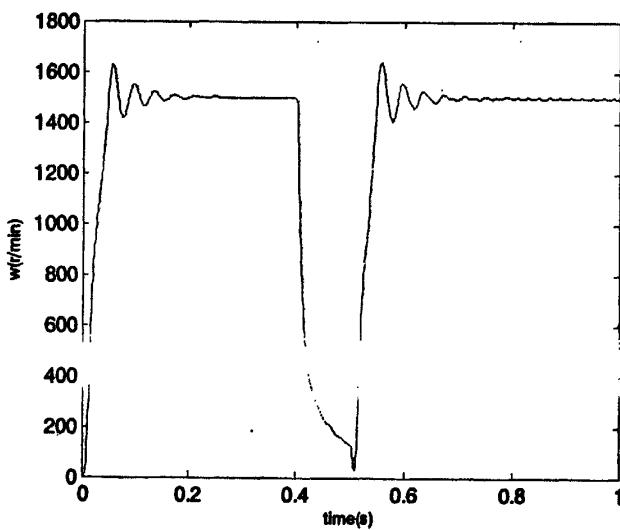


图 3-3 三相短路故障转速特性曲线

由图 3-2, 3-3 我们可以看出, 当异步电动机在 0.4 秒时发生三相短路故障后, 流过绕组的电流由额定的 8A 猛增到 70A 左右, 转速急剧的下降。直到 0.5 秒保护动作切除故障后, 异步电动机恢复正常运行状态。

3.2.2 堵转故障

在海上石油平台的日常作业中, 异步电动机所处的工况十分复杂, 经常会因为各种突发情况导致异步电动机发生堵转故障, 特别是带动各种泵类机械的异步电动机。当异步电动机正常运行时, 转差率 $s \approx 0.05$, 此时转子正常运转。异步电动机发生堵转故障后, 转子转速为零或者转速很低, 转差率 $s \approx 1$ 。这时如图 3-4 中的转子

等效电阻 R_2/s 就会减小约 20 倍, 如果此时给异步电动机加额定电压, 流过定、转子的电流将是额定电流的 4~8 倍, 这种给异步电动机加额定电压同时转子转速为零的运行状态如果持续时间过长, 很可能烧毁电动机^[27-28]。

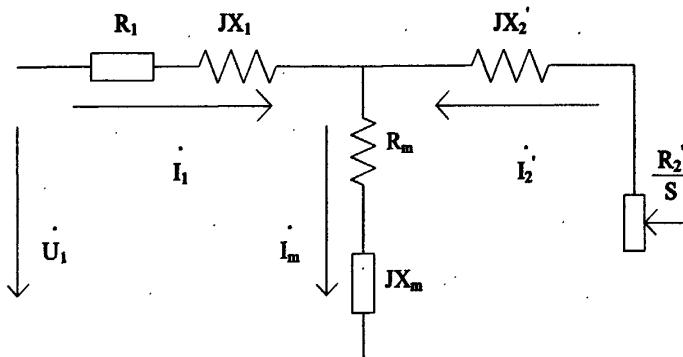


图 3-4 三相异步电动机 T 型等效电路

图 3-5 为异步电动机发生堵转故障时的故障电流特性曲线。由图可见, 故障电流的幅值一直保持在额定电流的 4 倍以上。如果长期处于这种运行状态将会对电动机造成很大的损伤, 甚至彻底烧毁电动机。因此堵转故障是十分严重的故障, 运行中应尽早诊断、尽早排除。

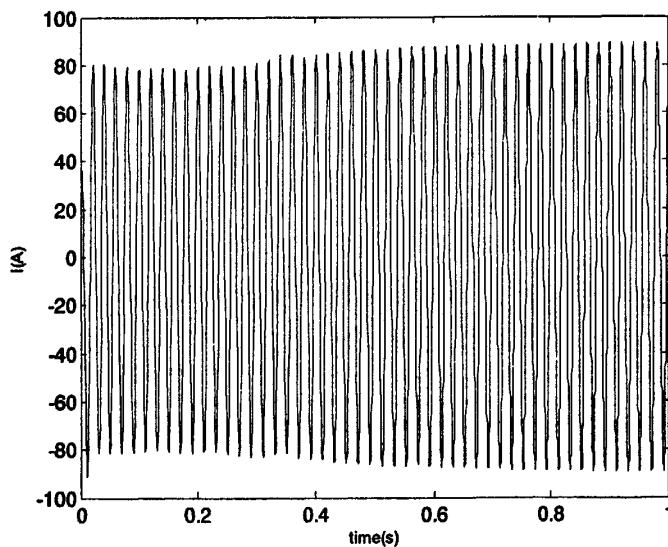


图 3-5 堵转故障故障电流特性曲线

3.2.3 过载故障

过载故障又称过负荷故障。在海上石油平台电力系统中, 供电网络的电压、频率以及异步电动机所带的负荷是经常变化的。当异步电动机机械部分所带负荷过大即负载转矩过大或者供电网络电压、频率下降导致转子转速下降时, 异步电动机就

会发生过载故障。

过载按照时间长短可以分为瞬时性过载和稳定性过载，其中只有稳定性过载对异步电动机产生危害^[29]。异步电动机发生过载故障时会产生1-5倍额定电流的过电流，异步电动机发热量增加，绕组温度升高。异步电动机长期运行在过载状态下会使绕组绝缘逐渐老化直至击穿，最终导致异步电动机烧毁。过载故障是异步电动机常见的严重故障之一，目前国内外通常用过电流的倍数与允许通过时间的关系来衡量电动机的过载能力，两者为反时限关系。

图3-6和图3-7分别为异步电动机发生过载故障时的电流和转速特性曲线。

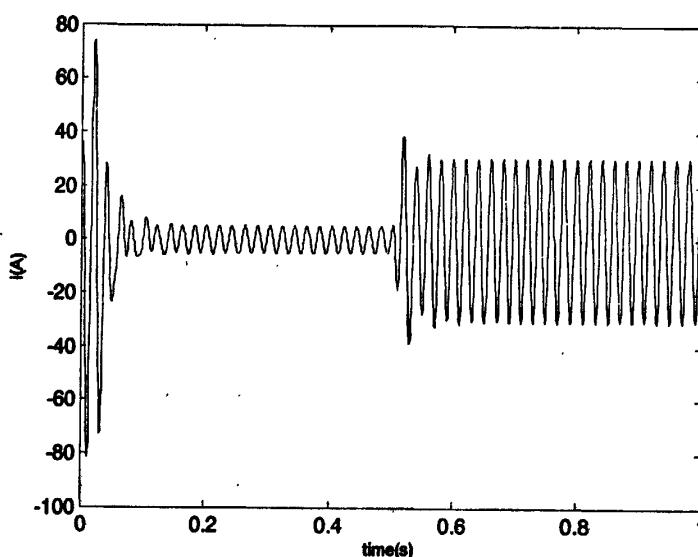


图3-6 过载故障故障电流特性曲线

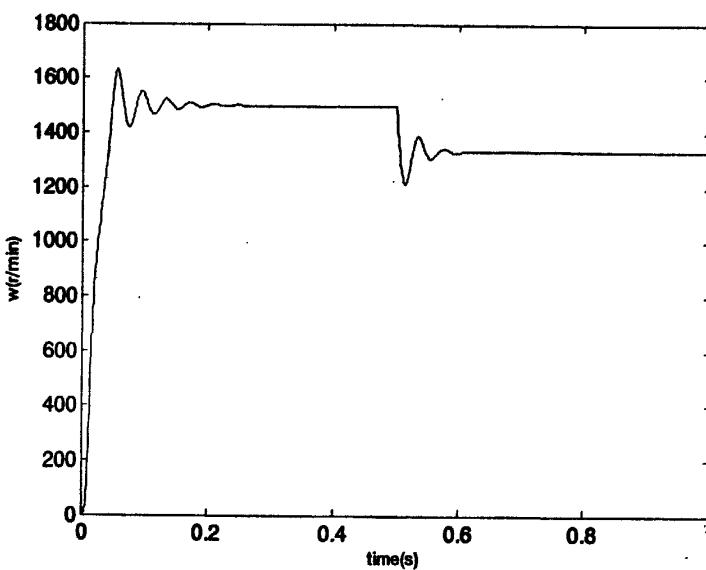


图3-7 过载故障转子转速特性曲线

由上图可见，当仿真进行到 0.5 秒时给异步电动机突加一个很大的负载，流过异步电动机的电流突变为额定电流的 4 倍左右，电磁转矩增大，转子转速下降。异步电动机运行于过载状态，实际中长时间在过载状态下运行会给异步电动机带来很大损伤。

3.2.4 接地故障

单相接地故障和两相接地故障可以统称为接地故障。若电网电压完全对称，异步电动机正常运行时，各相电流中是不存在零序分量的。当发生接地故障时，无论是金属性接地还是非金属性接地都会出现零序分量，其大小与故障程度即故障发生的位置、接地阻抗等有关。因此检测电流的零序分量是诊断接地故障的有效方法。实际运行中接地故障发生的概率很大，大概有 70% 左右。接地故障不仅产生故障电流流过定子铁芯，使铁芯过热威胁异步电动机的正常运行。更重要的是当异步电动机的绕组绝缘被破坏，绕组与外壳接触使异步电动机外壳带电，严重威胁到现场操作人员的人身安全。特别是在海洋潮湿的气候下，异步电动机的运行环境比较恶劣，绕组绝缘更加容易老化引发接地故障。

图 3-8 和图 3-9 为发生单相接地故障时零序电流和负序电流的幅值特性曲线。两相接地故障与单相接地故障的情况相似，此处就不再赘述。

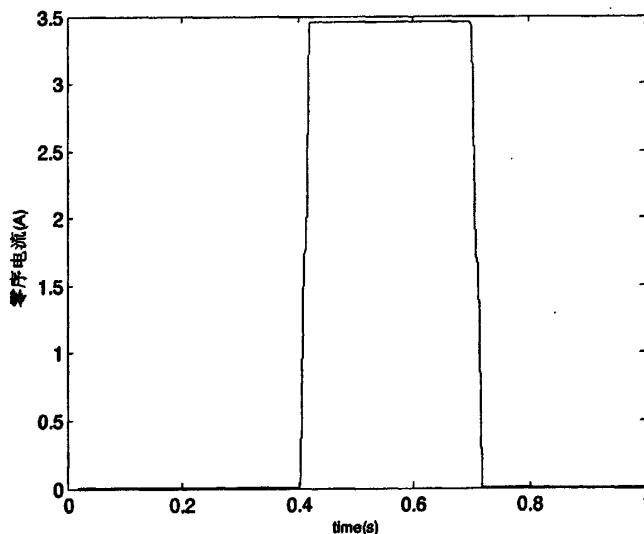


图 3-8 单相接地故障零序电流幅值特性曲线

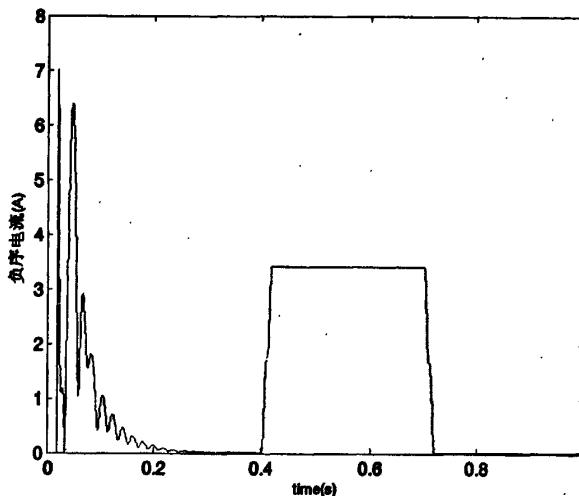


图 3-9 单相接地故障负序电流幅值特性曲线

仿真设置为 0.4 秒时异步电动机发生单相接地故障，0.7 秒时故障切除。由上图可见，当异步电动机启动后进入正常工作状态时，零序电流和负序电流均为零，0.4 秒时发生单相接地故障后零序电流和负序电流的幅值立刻变大并维持到故障被切除后。

3.2.5 断相故障

异步电动机断相故障是一种严重的电流不对称运行状态，也是异步电动机的常见故障之一，约占异步电动机故障的 10% 以上^[30]。一般使异步电动机出现断相故障的原因有：电动机绕组线圈焊接不良或脱焊；某一相的断路器、刀闸、接触器接触不良；电动机定子绕组某一相断线；变压器一次侧缺相，导致二次侧电压严重不对称等。断相故障发生以后，流过绕组的三相电流不再对称，将出现负序电流。

当异步电动机在启动过程中发生了断相故障时，异步电动机会发出很大的嗡嗡声，此时流过异步电动机的电流大小为 0.866 倍的启动电流。但是由于异步电动机的合成转矩为零，所以无法正常启动，如果不及时断开电源使异步电动机长时间运行在这个电流下很可能烧毁异步电动机。当正常运行中的异步电动机发生断相故障时，负序电流的出现使异步电动机的功率和效率下降，如果所带的负载不变，流过异步电动机的电流将增大到额定电流的两倍以上，给异步电动机的运行带来很大的危害。

图 3-10 和图 3-11 分别为异步电动机发生断相故障时的故障电流特性曲线和负序电流幅值特性曲线。

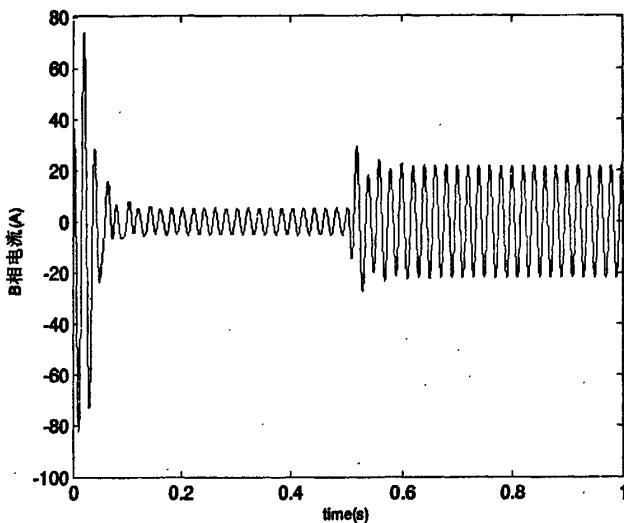


图 3-10 B 相电流特性曲线

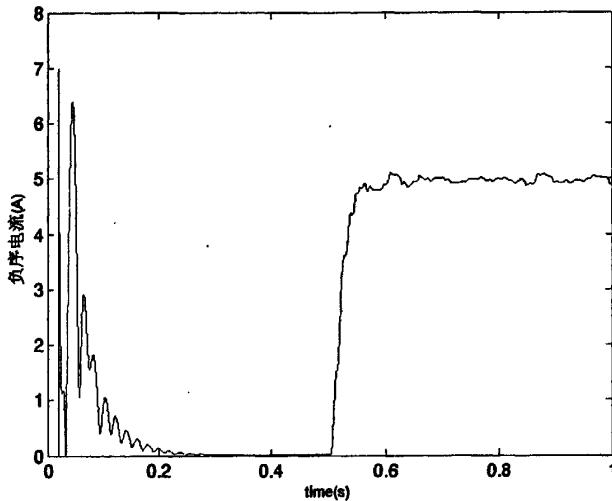


图 3-11 负序电流幅值特性曲线

仿真设置在 0.5 秒时 A 相发生断相故障, 由上图可见, B 相电流突变为正常时的数倍, C 相电流的情况类似。在初期启动过程结束以后, 负序电流分量逐渐衰减为零, 0.5 秒发生断相故障后又出现了一定数值的负序电流。

3.2.6 不平衡故障

在海洋石油平台电力系统这样的独立电力系统中, 由于系统规模小, 电压等级低, 个别大负荷的增减对系统电压的影响比较大。特别是石油平台上有很多单相负荷的设备, 它们的投入与退出会导致三相负荷的不平衡现象进而使系统的三相电压不平衡, 产生负序的电压电流。当系统的三相电压不平衡到一定程度时就会给异步电动机的运行带来很大的危害。具体表现为:

(1) 负序电压电流使异步电动机内产生反转的磁场与正转的磁场相互作用, 使异步电动机产生振动。

(2) 负序电压电流使异步电动机产生负序转矩, 负序转矩起制动作用, 降低了有效转矩以及轴功率的输出。从而导致异步电动机的最大转矩与过载能力大幅下降。

(3) 负序电压电流使异步电动机的铜损增加, 这主要是由于负序电流流过定、转子绕组造成的。特别是转子与负序反转磁场的转差率比较大, 集肤效应强烈使得铜损变得更大。

(4) 由于异步电动机的负序电抗一般很小, 因此很小的负序电压就能产生很大的负序电流, 负序电流与正序电流叠加流过定、转子绕组, 使得定、转子过热, 加速绝缘老化速度, 降低了异步电动机的寿命。

图 3-12 和图 3-13 分别为异步电动机不平衡运行时的电流特性曲线和转子转速特性曲线。

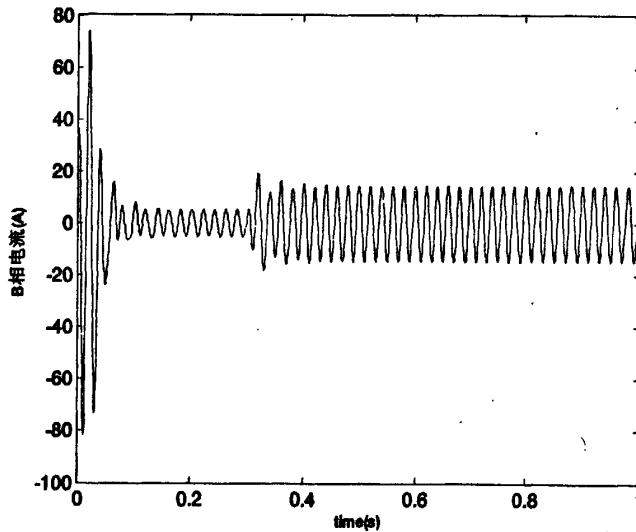


图 3-12 B 相电流特性曲线

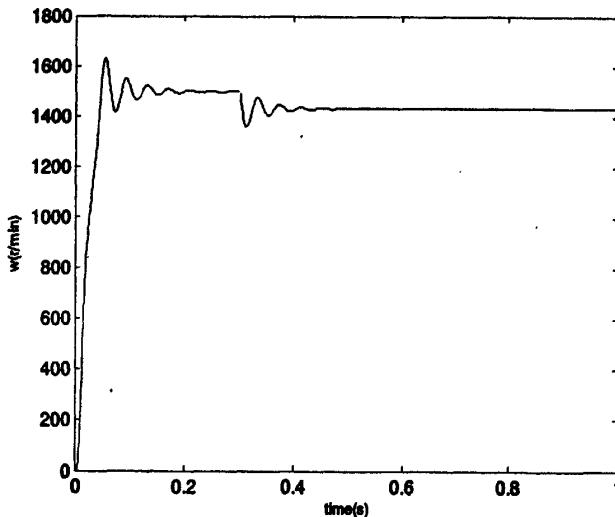


图 3-13 转子转速特性曲线

仿真设置为 0.3 秒时给 A 相突加单相负荷, 使 A 相电压降低三相电压不在对称。

由上图可见, B 相电流有明显的升高, 并且由于负序电流产生的负序反转磁场形成了反向转距起制动作用, 异步电动机的转子转速降低, 输出功率与工作效率下降。

3.3 本章小结

本章首先对异步电动机的故障类型进行了总结分类, 列举了短路故障、接地故障、堵转、过载、断相、不平衡等典型故障的故障特征。然后基于第二章中建立的同时考虑铁损与磁饱和的异步电动机模型, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了一个由两台同步发电机和三台异步电动机组成的小型独立电力系统仿真模型。进而在该模型中对异步电动机的各种典型故障进行了动态仿真, 并得到了各种故障典型故障特征的数据波形。通过对故障特征数据波形的分析, 明确了各种故障的判别依据与方法, 为异步电动机保护配置方案的研究提供了理论依据。此外验证了与预期波形的一致性, 从而证明了整个小型独立电力系统仿真模型的正确性与实用性。本章的工作以理论分析为主, 通过对异步电动机各种故障的仿真分析为后面章节的工作打下了良好的基础。

第四章 独立电力系统中异步电动机保护配置研究

4.1 异步电动机故障原因及保护分类

异步电动机作为海洋石油平台独立电力系统中用于生产的主要负载，承担着把电能转换为机械能从而驱动各种生产设备和装置的任务。异步电动机在由电动机、电源设备和控制装置构成的电气传动系统中占有重要的地位。通常在海洋石油平台独立电力系统中异步电动机的工作环境十分恶劣。太阳照射导致的高温，海风中携带的大量水分以及腐蚀性的元素使异步电动机很容易出现堵转、短路、断相、长期过负载使绝缘受损等故障，因此为异步电动机配置合理的保护装置是十分重要的。

要想做好异步电动机的保护，首先应该对异步电动机可能出现的故障进行分析，分析各种故障的特征并提出切实可行的保护配置方案。异步电动机的故障形式一般分为绕组损坏和轴承损坏两大方面。

其中导致异步电动机绕组损坏的主要原因有^[31]：

- (1) 由于电源电压太低使得电动机不能顺利启动或者短时间内重复启动造成电动机因长时间承受大启动电流而过热。
- (2) 长期受电、热、机械或化学作用，使绕组绝缘老化和损坏，形成相间或对地短路。
- (3) 轴承损坏造成偏心、扫膛以及因机械故障造成堵转。
- (4) 三相电源电压不平衡或波动太大，或者电动机断相运行，长期承受负序电流而烧毁。
- (5) 冷却系统故障或环境温度过高。

导致异步电动机轴承损坏的原因主要有：

- (1) 机械负荷过大或振动太大。
- (2) 使用润滑剂不合适、缺少润滑油甚至大油。
- (3) 环境恶劣，如多尘、腐蚀性气体等。
- (4) 绕组温度过高，热量传至轴承，致使轴承烧损

针对上面的故障分类和原因，异步电动机的保护配置可相应的分为绕组保护、轴承保护以及供电系统保护三大类。其中绕组保护包括：温度保护、热保护、过电流保护、纵差保护、电流速断保护以及零序电流接地保护。轴承保护主要考虑轴承受力、轴承温度以及润滑油的油位油压等方面对轴承正常运行的影响。供电系统保护包括低电压保护、断相保护以及不平衡运行保护^[32]。

4.2 独立电力系统综合保护配置方案

由于海洋石油平台独立电力系统中异步电动机的工况与陆地电网系统中的异步电动机相比有许多不同，因此其保护配置方案也有许多不同的地方。

第一，海上石油平台独立电力系统中采用纵联差动保护作为容量较大的电动机（如外输泵）的多相短路保护，并且一般都作为设备的主保护实现速断。采用定时限过电流保护作为纵联差动保护的后备保护。相比之下，在陆地电网规程中多以电流速断保护作为异步电动机的主保护。

第二，海上石油平台独立电力系统中采用定向延时接地保护作为异步电动机的接地保护。而在陆地电网规程中一般只装设单相接地保护。

第三，海上石油平台独立电力系统中采用过热保护取代陆地电网规程中的过负荷保护来反映异步电动机的温升。这样可以更加直接快捷的反应故障特征，提高保护的灵敏性和准确性。

第四，海上石油平台独立电力系统中一般不装设低电压保护，为了保证异步电动机的安全运行，应该加装低电压保护。

海洋石油平台独立电力系统与陆地电网规程中异步电动机保护配置的对比见表4-1^[33]。

表 4-1 海上石油平台独立电力系统异步电动机保护配置与陆地电网规程比较表

陆地电网规程	海上石油平台独立电力系统
电流速断保护	纵联差动保护
负序过电流保护	负序过电流保护
单相接地保护	定时限方向接地保护
过负荷保护	过热保护
低电压保护	定时限过电流保护
堵转保护	堵转保护

综合前面对海洋平台独立电力系统中异步电动机保护配置的研究，提出以下异步电动机的综合保护配置方案：

(1) 设置纵联差动保护为异步电动机的主保护，用于异步电动机内部定子绕组以及进线所发生的相间短路故障，由熔断器与真空接触器组成的组合开关实现。

(2) 设置定时限过电流保护为大容量异步电动机纵联差动保护的后备保护、小容量异步电动机的主保护，由熔断器与真空接触器组成的组合开关实现。

(3) 设置堵转保护作为异步电动机运行过程中短路保护的总后备保护。当保护装置在电机运行过程中检测到电流超过堵转电流整定值，并达到整定时限时，堵转保护动作，出口跳闸。堵转保护在电动机启动过程中闭锁，启动结束后自动投入。

(4) 设置定向接地保护来针对异步电动机运行过程中的各种接地故障。保护装置应装有方向元件以及闭锁延时元件,使保护装置能够正确的判定区内、区外故障,躲过异步电动机的启动电流。保证保护动作的正确性。

(5) 设置负序过电流保护针对电动机的各类非接地性不对称故障,如断相、逆相、三相不平衡和相间短路等。

(6) 设置过热保护代替过负荷保护来防止异步电动机长时间过负荷运行,定子部分过热而引起的损坏。过热保护要和时限过电流保护以及堵转保护互相配合。

(7) 设置低电压保护来保证重要异步电动机的正常运行,从而保证整个海洋石油平台独立电力系统的运行安全。

4.3 保护原理及其配置方案

4.3.1 纵联差动保护

在海洋石油平台独立电力系统中,纵联差动保护作为异步电动机内部相间短路的主保护应能快速而灵敏地切除异步电动机内部所发生的故障,并且在异步电动机正常运行及外部故障时,能够保证动作的选择性和工作的可靠性。在陆地电网中通常采用的是比率制动式差动保护,他的制动特性曲线如图 4-1 所示。

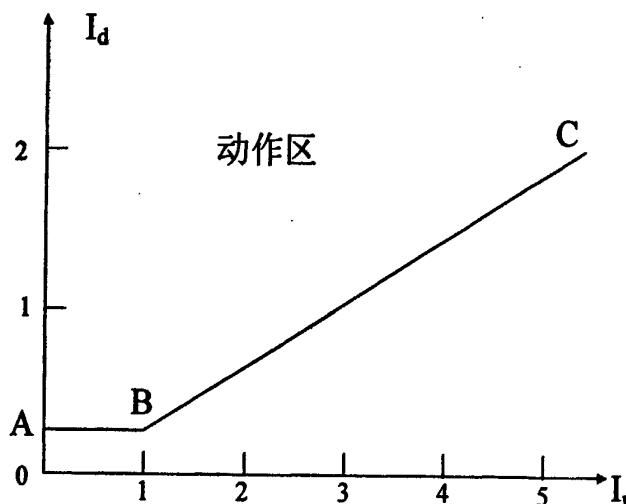


图 4-1 比率制动式差动保护制动特性曲线

海上石油平台独立电力系统中异步电动机的差动保护不同于陆地电网。由于海上石油平台独立电力系统中异步电动机两端的互感器型号不同,考虑到互感器的饱和问题,采用一种双斜率的比率制动式差动保护。其制动特性曲线如图 4-2 所示。

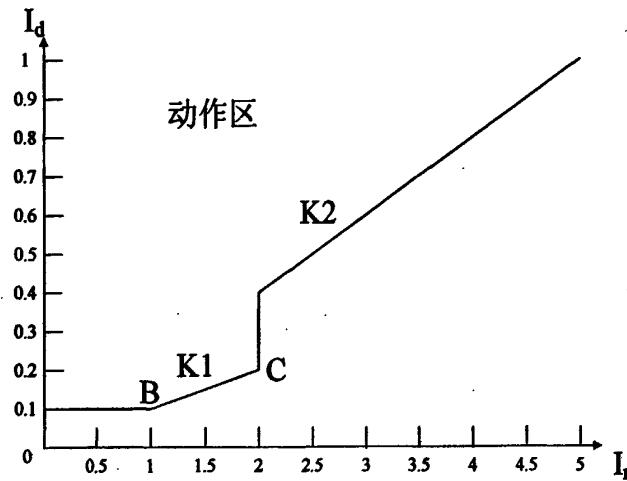


图 4-2 双斜率比率制动式差动保护

差动电流 I_d 和制动电流 I_r 计算公式如下：

$$I_d = \begin{cases} |I_A - I_a| & \text{for } I_r \leq 1.0 \\ |I_A| + |I_a| & \text{for } I_r > 1.0 \end{cases}$$

$$I_r = \frac{|I_A| + |I_a|}{2} \quad (4-1)$$

差动保护的最小动作电流按躲过最大负荷下差动回路的不平衡电流并且考虑二次回路断线时保护不误动整定。即

$$I_{act} = K_{rel} \times 2 \times 0.03 I_N \quad (4-2)$$

式中： K_{rel} —可靠系数，一般取 1.5~2；

I_N —异步电动机的额定电流。

由图 4-2 可见，制动特性曲线的两个拐点 B、C 分别取在制动电流等于一倍的额定电流和两倍的额定电流处。这是因为考虑到随着外部短路电流的增大和非周期暂态电流的影响，电流互感器趋于饱和，误差会逐渐增大，不平衡电流亦将变大。所以当故障电流较小（小于 2 倍额定电流）时，保护灵敏度设定较高，斜率取 0.1；而当故障电流较大时（大于 2 倍额定电流），斜率取 0.2。

异步电动机双斜率比率制动式差动保护的灵敏度校验按躲过系统最小运行方式下异步电动机出口发生两相短路计算：

$$K_{sen} = \frac{I_{k \min}^{(2)}}{I_{act}} \quad (4-3)$$

式中: $I^{(2)}_{k\min}$ —系统最小运行方式下异步电动机出口侧电流互感器测得的两相短路电流, I_{act} 为保护装置的定值。

在海洋石油平台独立电力系统中, 异步电动机的保护装置靠熔断器和真空接触器的组合开关实现, 纵联差动保护就是靠真空接触器的闭合、开断来实现其功能的。真空接触器的主触头被密封在以陶瓷为外壳的真空灭弧室中, 灭弧室中的真空度高达 1.33×10^{-4} Pa。当真空接触器分闸时, 真空灭弧室中的动、静触头快速开断。分闸过程中, 高温触头之间产生的金属蒸汽使电弧一直持续到电流第一次过零点。当电流过零点时, 金属蒸汽迅速凝结, 使动静触头之间重新建立起很高的电介质强度, 维持很高的瞬态恢复电压值, 实现电流的开断。海上石油平台独立电力系统中采用的真空接触器的额定开断电流一般在 4KA 以下, 而海上石油平台电力系统的短路瞬时冲击电流很大, 一般在 5KA 以上, 所以为了躲开最大冲击电流, 保证真空接触器的安全, 纵联差动保护延时 0.5s 动作跳闸^[34-36]。

4.3.2 定向接地保护

由于绕组与铁芯之间的绝缘被破坏造成绕组的接地故障是异步电动机很常见的一种故障。当发生接地故障时, 不仅是由于过电流以及零序电流的出现使绕组过热, 降低异步电动机的使用寿命, 更重要的是可能使异步电动机外壳带电, 危及现场人员的安全。因此安装接地保护是十分必要的^[37]。

由于我国的异步电动机供电系统一般为非直接接地系统, 即异步电动机中性点不接地或经高阻抗接地。当异步电动机发生接地故障时并不产生很大的故障电流, 仅为电网对地的电容电流^[38]。因此通常利用接地故障中出现零序电流的故障特征, 采用零序电流保护作为异步电动机的接地保护。

异步电动机接地保护的整定就是要确定零序互感器一次侧的零序动作电流值与保护动作时间。零序互感器一次侧的零序动作电流值按照不烧伤异步电动机定子铁芯的接地电流即安全接地电流来整定, 还可按照躲过异步电动机供电网络发生接地故障时异步电动机的最大接地电流来整定。国家规定额定电压为 6KV 和 10KV 的异步电动机的安全接地电流分别为 4A 和 3A, 因此为确保异步电动机的安全, 接地保护的动作电流均应小于上述安全电流, 即 $I_{op}=4A(3A)$ 。异步电动机接地保护的动作时间一般按照 3~5 秒整定, 作用于发信或跳闸。

常见的零序电流接地保护是没有方向性的, 因此很难满足选择性与准确性的要求, 应当在零序电流接地保护装置中加设方向元件。在中性点不接地或经高阻抗接地的供电网络中, 当发生异步电动机区外接地故障时, 流经保护安装处的故障电流为 3 倍于零序电流的故障电流, 故障电流的相位超前于零序电压 90°。当发生异步电动机区内接地故障时, 流过保护安装处的故障电流为系统对地等效电容电流(不含异步电动机本身) 和中性点接地电阻电流的相量和。故障电流的相位落后于零序

电压 90° 至 180° 。基于上述分析可将零序功率方向元件的最大灵敏角设为 135° ，从而保证了零序电流接地保护的选择性与正确性。此外，设置 50ms 延时开放方向元件，从而有效地防止发生接地故障时暂态过程对方向元件的影响，避免保护误动，提高工作的可靠性。

4.3.3 负序过电流保护

负序过电流保护是作用于异步电动机的各种相间不对称短路、断线、反相、匝间短路，转子开焊及不对称故障的。当异步电动机电流不对称，出现负序电流时，负序电流会在转子中产生 2 倍工频的电流，这个电流可能导致转子端部、护环内表面等电流密度很大的部位出现局部灼伤，甚至可能导致护环受热松脱，从而造成异步电动机的重大事故。

由于海洋石油平台独立电力系统的系统容量较小，为了简化异步电动机保护，负序过电流保护通常采用二段定时限保护，即负序过负荷保护与负序过电流保护。负序过负荷保护主要作用于发出信号，在考虑继电器返回系数的前提下其动作值按照躲过异步电动机长期允许的负序电流和最大负荷时负序滤过器的不平衡电流。由于一般异步电动机长期允许的负序电流为额定电流的 $10\% \sim 15\%$ ，并考虑到频率降低对负序滤过器的影响。

$$I_{act} = 0.2I_N \quad (4-4)$$

为了保证发生外部不对称故障时保护的选择性，保护动作时限设置为 $6\sim 9$ 秒。

负序过电流保护作用于跳闸，其动作值按照躲开自启动过程中的不平衡电流来整定。并且该动作值可以躲过三相电流互感器式滤过器一相断线时出现的不平衡电流。动作后经 0.5s 跳闸。

$$I_{act} = (0.6 \sim 1.2)I_N \quad (4-5)$$

此外，为了防止异步电动机电源系统中发生故障时异步电动机负序过电流保护误动，当异步电动机中的负序分量大于或者等于 1.2 倍的正序分量时，将负序过电流保护闭锁。

4.3.4 堵转保护

异步电动机在启动过程中由于机械故障、负荷过大、电压过低等原因，可能导致异步电动机的转子不能正常启动，处于静止状态，这时的转差率 $s=1$ ，这就是一般意义上的堵转^[39]。除此之外，正常运行中的异步电动机由于机械故障使转子被卡住、负荷急剧增加、电压突然失去等原因也可能使转子转速迅速下降，运行在一个很低的转速下甚至完全停下来，此时转差率 $s \approx 1$ 。这种使异步电动机运行在转速很低的状态下，而达不到设计的额定转速，也是一种堵转状态。在全电压下堵转的异步

电动机发热严重、散热条件差，流过的电流为额定电流的4~7倍，特别容易烧坏，因此应当装设堵转保护。其动作整定值如下：

(1) $I > I_{dz}$, I_{dz} 为异步电动机堵转保护电流整定值，一般按堵转电流的一半整定。堵转电流由厂家提供或者实验测得。 I 为异步电动机的相电流。

(2) $T > T_{dz}$, T_{dz} 为异步电动机堵转保护的延时定值，一般根据不同的电动机设置为3~60秒间可调。为了避免堵转保护在异步电动机的正常启动过程中误动，当异步电动机启动时，堵转保护元件自动退出，在时间经过1.5倍的启动时间以后，堵转保护元件自动投入。

4.3.5 过热保护

异步电动机的发热是影响其寿命的主要问题之一。异步电动机长时间处于过负荷运行状态或者在短时间内频繁的启动都会造成发热量增大，进而导致绝缘加速老化损坏，绝缘的老化损坏在异步电动机故障原因中占很大的比例^[40]。异步电动机中的绝缘材料同时受到温度、电磁、机械以及周围介质的作用，但绝缘材料的使用寿命受温度的影响最大，随着温度的升高，绝缘材料的使用寿命急剧下降。因此，要提高电机的使用寿命，就要设法使电机在最高允许温度以下运行。电机过热时，最易受到损坏的部分是绕组的绝缘。异步电动机中绝缘材料的等级与允许温度见表4-2^[41]。

表 4-2 异步电动机绝缘材料的等级和允许温度

绝缘材料等级	A	E	B	F	H
最高允许温度 (°C)	105	120	130	155	180
绕组允许温度 (°C)	60	75	80	100	125

异步电动机的发热过程是很复杂的，根据传热学，异步电动机的发热过程中其温度随时间的变化趋势如图4-3所示

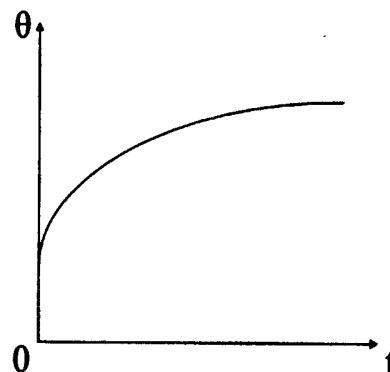


图 4-3 异步电动机温升特性曲线

由上图我们可以看出异步电动机发热过程中其温度与时间成指数关系变化，当时间 $t=0$ 即异步电动机启动时，温度与环境温度相同，这时异步电动机产生的全部损耗都用来提高自身温度，异步电动机温度上升很快。随着异步电动机温升的增加，它与周围环境的温差越来越大，散播到周围介质中的热量也逐渐增加，这时候温升就会逐渐变慢，直到散热量与发热量持平，异步电动机的温度就会保持住。从发热和温升的观点来看，可以允许异步电动机在短时间内过载运行，但是异步电动机长时间过载运行使温升超过允许值是不允许的，因为这可能造成烧毁异步电动机的严重后果。

异步电动机过载运行会导致过热，同时又有一定的过载能力，允许一定时限的低倍过载运行。过载电流数值越大，允许的运行时间越短，反之，允许的运行时间越长，因此异步电动机的过载特性是反时限特性。如果设置过热保护的动作时间与过载电流倍数成反比，同样整定为反时限动作特性，则过热保护就能较真实地反映异步电动机的发热情况，从而起到很好的保护作用。异步电动机的过载特性与过热保护的反时限动作特性如图 4-4 所示。

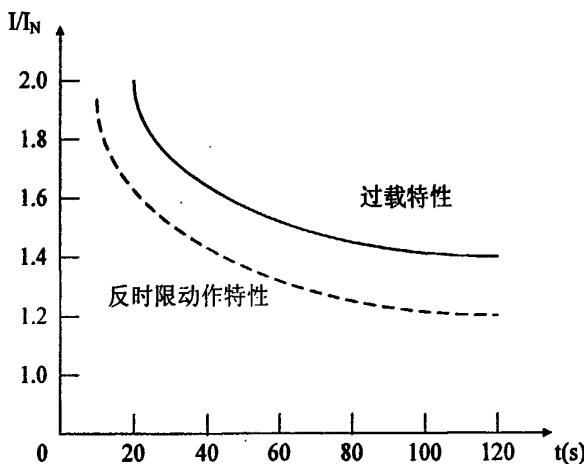


图 4-4 异步电动机过载特性曲线与过热保护反时限动作特性曲线

由上图可见，流经异步电动机的电流较大时，过热保护以较小的延时动作于跳闸或发信号，相反，流经异步电动机的电流较小时，则过热保护以较大的延时动作于跳闸或发信号，从而使保护的动作特性与异步电动机允许的过载特性曲线相匹配。微机保护还能模拟异步电动机的热积累过程，如果异步电动机发生过载，但是过载状态在保护动作之前结束，则保护不动作；而当转子热量尚未散失之前，如果出现过载的情况，则保护电路可以模拟再次过载时的热积累效应。从而保证了过热保护的准确性。

在海洋石油平台独立电力系统中，过热保护作为异步电动机热过载的主保护及定子绕组或引出线相间短路的后备保护。其等值发热电流的表达式如下：

$$I_{eq} = \sqrt{K_1 I_1^2 + K_2 I_2^2} \quad (4-6)$$

式中: I_{eq} —异步电动机的等值发热电流;

I_1, I_2 —异步电动机电流的正序分量和负序分量;

K_1 —异步电动机的正序电流发热系数, 为了防止异步电动机启动过程中过热保护误动, 在启动过程中一般设置为 0.5, 等到异步电动机启动完成后保护装置自动的将 K_1 设置为 1;

K_2 —异步电动机的负序电流发热系数, 一般取 6.

等值发热电流的公式不仅考虑了正序电流的效应, 而且考虑了负序电流的效应。这是因为异步电动机工作于额定转速时, 负序电流会引起转子发热量的显著增加。当负序电流流过定子绕组时, 将产生逆转子旋转方向的旋转磁场。在异步电动机额定转速下, 其速度接近于 2 倍的转子转速, 产生 2 倍于工频的感应电流, 这时转子电阻表现为交流电阻, 而正序电流的旋转磁场相对于转子转速近似为 0, 其感应电流频率很低, 转子电阻表现为直流电阻, 转子对负序电流和正序电流表现的电阻之比介于 1.25 至 6 之间。由于转子发热损耗与其电阻成正比, 所以数值相同的负序电流产生的发热量相当于正序电流发热量的 1.25 至 6 倍。所以为了模拟增强负序电流的发热效应, K_2 取 6.

过热保护的动作时限整定公式为:

$$t = \frac{Q \times \tau}{\left(\frac{I_{eq}}{I_N}\right)^2 - (1+\alpha)^2} \quad (4-7)$$

式中: t —异步电动机发热时间常数, 其值并不是固定不变的, 长期过负荷的发热时间常数比短时过负荷的发热时间常数大, 实际中一般按照厂家提供的相关数据由下式求取:

$$\tau = \frac{\theta_N K^2 T_N}{\theta_0} \quad (4-8)$$

其中 θ_N 为异步电动机的额定温升; K 为异步电动机启动电流倍数; T_N 为异步电动机额定启动时间; θ_0 为异步电动机启动时的温升。

Q —反时限时间系数;

I_N —相电流反时限电流定值;

α —与定子绕组温升特性、温升裕度等因素有关的修正系数, 通常取 0.05。

异步电动机启动以后, 热容量被实时的记录在一个寄存器中, 设定热容量的上限为 100%。每隔一个时间间隔 Δt 就计算一次等效发热电流的数值。当 $I_{eq} < 0.95$ 时,

异步电动机处于散热阶段，热容量降低；当 $I_{eq} > 1.05$ 时，异步电动机处于发热阶段，热容量增加；当 $0.95 < I_{eq} < 1.05$ 时，异步电动机处于热平衡阶段，热容量不变。过热保护的具体动作判据为：如果累积热容量大于 75%，过热保护发出告警信号；当过热保护的跳闸压板投运且累积热容量大于 90% 时，保护进入启动判别状态；累积热容量大于 100% 时，过热保护发出跳闸命令；跳闸成功后热容量清零。

4.3.6 低电压保护

对于海洋石油平台独立电力系统这种小型电力系统而言，由于某种原因导致供电母线电压突然消失或者显著降低的情况时有发生。若经过短时间（一般在 0.5~1.5s），母线电压因为电源故障排除或备用电源自动投入又恢复正常，在这期间异步电动机的转速未下降很多或者尚未停止，异步电动机就会从新加速，恢复到正常运行状态，这一过程称为异步电动机的自启动。

在异步电动机的自启动过程中，因为有大量的异步电动机同时参加自启动，从系统吸收大量的无功功率，启动电流很大，导致母线电压的恢复时间拖长甚至大幅下降。从而可能因为母线电压过低导致某些异步电动机的电磁转矩小于机械阻力转矩而无法启动；还可能因为启动时间过长而引起异步电动机过热，危及异步电动机的安全和寿命，甚至危及整个系统的安全运行以及生产的正常进行^[42]。因此为了保证自启动能够顺利进行，需要限制参加自启动的异步电动机数量，对不重要的异步电动机加装低电压保护装置。当装有低电压保护的异步电动机三相相间电压均小于低电压保护定值时，低电压保护动作，延时跳闸，使异步电动机与系统脱离，不参加自启动。并且低电压保护在异步电动机三相均无电流的情况下自动退出。低电压保护的整定值如下：

(1) 非重要异步电动机当 $U_{min} < 0.6\sim0.7U_N$ 时，延时 0.5S 动作于跳闸，其中 U_{min} 为三相相间电压的最小值。

(2) 根据生产工艺要求不允许或不需要自启动的异步电动机，当 $U_{min} < 0.6\sim0.7U_N$ 时，延时 0.5~1S 动作于跳闸。

4.4 本章小结

本章首先对日常生产中造成异步电动机故障的常见原因进行了分析，并针对这些原因对异步电动机的保护进行了大致的分类。然后对陆地电网规程中与海上石油平台独立电力系统中异步电动机保护的配置进行了比较分析，通过比较分析指出了现有的海上石油平台独立电力系统中异步电动机保护配置的不足，基于上面研究进而提出了海上石油平台独立电力系统中异步电动机保护的综合配置方案。最后对综合配置方案中的纵联差动保护、负序过电流保护、定向接地保护等各个保护的详细配置进行了研究。从各种保护的原理入手，分析了保护的动作判据，提出了保护动

作值的整定原则与整定公式，并且明确了各个保护动作时间的整定原则以及各个保护之间的配合关系。本章的工作主要应用于工程实践，具有一定的实用价值。

第五章 独立电力系统中异步电动机定时限过电流保护配置研究

5.1 独立电力系统中异步电动机相间短路故障特性

在海洋石油平台独立电力系统中，异步电动机都装设由熔断器和真空接触器组成的开关组合。当异步电动机发生三相短路故障时，短路电流很大，熔断器能够迅速、可靠的动作切除故障。但当发生两相短路故障时，短路电流较小，熔断器可能不能及时有效地切出故障。因此需要定时限过电流保护作为后备保护。

在陆地电网规程中，过电流保护一般是作为异步电动机的主保护当发生故障时实现速断功能，且不用装设方向元件。但是海洋石油平台独立电力系统与常规陆地电力系统相比有其自身特点，而这些自身特点会造成异步电动机的故障特性发生变化，从而导致保护的误动与拒动，所以进行针对海洋石油平台独立电力系统中异步电动机故障特性以及保护配置的研究是十分必要的。

这里仍采用第三章中图 3-1 所示的小型独立电力系统仿真模型进行仿真研究。仿真的模型参数如下：

两台同步发电机相同且主要参数为： $P_N=187000W$, $f=50Hz$, $U_N=2000V$, $N_p=20$, $R=0.0204\Omega$, $L=0.0008104$ 。三台异步电动机相同且定子绕组 Y 形连接，主要参数为： $P_N=37300W$, $f=50Hz$, $U_N=1500V$, $N_p=2$, $R_s=1.115\Omega$, $R_r=1.083\Omega$, $L_s=0.005974H$, $L_r=0.005974H$, $L_m=0.2037H$ 。

仿真时间设置为 1 秒，故障发生在 0.5 秒时，在 0.6 秒时由过电流保护切除。短路故障取金属性短路并引入一个 0.001Ω 的过渡电阻。

5.1.1 三相短路故障特性分析

首先进行三相短路故障的仿真研究。当异步电动机发生三相短路时，故障异步电动机与非故障异步电动机的电流曲线如图 5-1、5-2 所示。

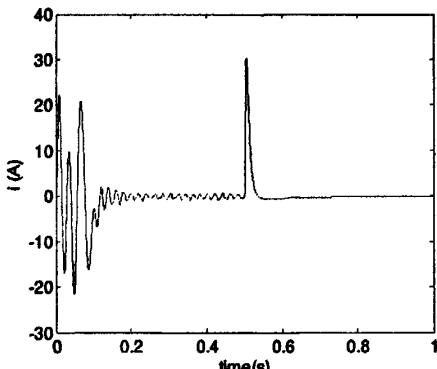


图 5-1 故障异步电动机电流曲线

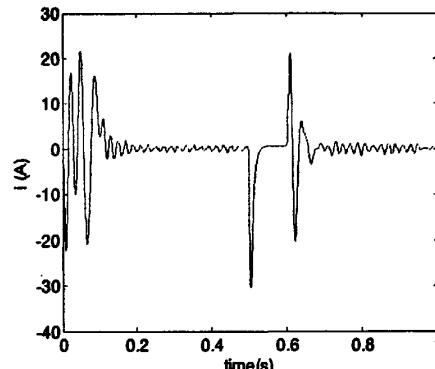


图 5-2 非故障异步电动机电流曲线

由故障异步电动机的电流曲线可见,当0.5s发生三相短路故障时,故障异步电动机流过很大的电流,故障电流可以达到正常运行时电流的几倍甚至十几倍,足以使过电流保护动作切除故障,此后故障异步电动机的电流逐渐变为零。与此同时我们可以从非故障异步电动机电流曲线中看到,当发生三相短路故障时,非故障异步电动机电流也会突然增大数倍。为了保证过电流保护的灵敏度,一般保护的动作设定值不会大于额定电流的四倍,因此电流的突然增大很可能引起非故障异步电动机的过电流保护误动,造成误跳闸,扩大事故的范围。

虽然故障异步电动机和非故障异步电动机的电流都会突然增大数倍,但是由它们各自的电流曲线可以看出,这两个电流的方向是相反的。假设异步电动机正常运行时的电流方向为正方向,即由母线流向线路。则发生故障时故障异步电动机的电流为正方向,非故障异步电动机的电流为反方向。这个故障特性就为我们研究合理的保护配置以避免故障发生时非故障异步电动机的过电流保护误动提供了依据。这种故障特性是由独立电力系统的自身特点造成的,由于独立电力系统的规模比较小,母线电压不能像无限大系统那样视为恒定,个别负荷的增减会对母线电压造成很大影响。异步电动机发生故障会导致母线电压的降低,这时候非故障异步电动机就会转变成发电机运行状态,向短路点输送短路功率。电流方向也由原来的母线流向线路变为由线路流向母线。由于异步电动机的储能有限,这个电流会很快的衰减,持续时间很短。

当0.6秒故障异步电动机的过电流保护动作切除故障以后,非故障异步电动机又重新由电源供电,重新回到了电动机运行状态。此时非故障异步电动机的电流又会突然增大,过电流保护也可能发生误动。这是由于从故障发生到切除这段时间内,非故障异步电动机工作在发电机运行状态,随着能量的释放转速大幅下降,故障切除后有一个重新启动的过程,这个突然增大的电流就是异步电动机的启动电流。

当异步电动机发生三相接地短路时,故障异步电动机与非故障异步电动机的转速曲线、电磁转矩曲线如图5-3至图5-6所示:

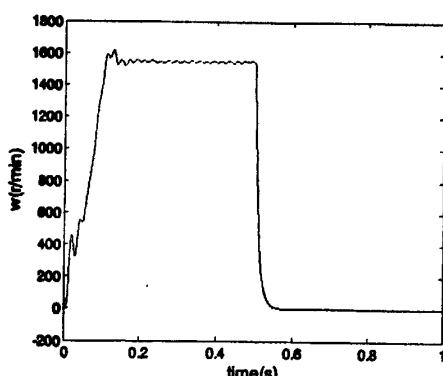


图 5-3 故障异步电动机转速曲线

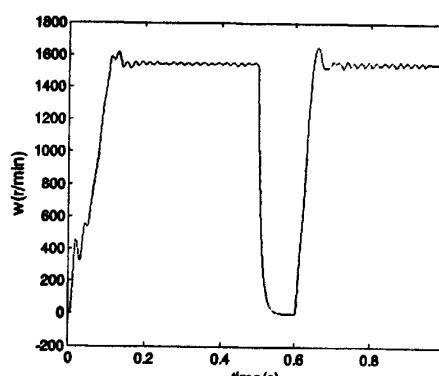


图 5-4 非故障异步电动机转速曲线

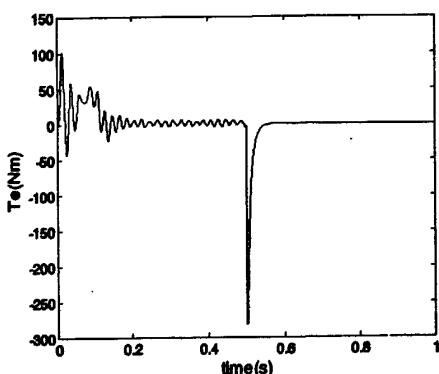


图 5-5 故障异步电动机电磁转矩曲线

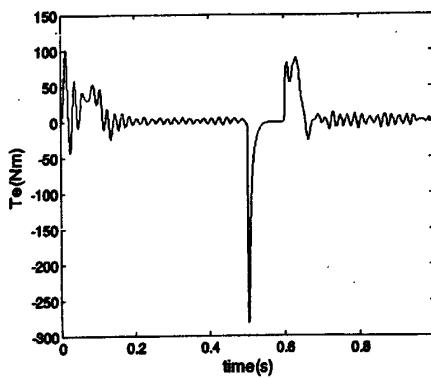


图 5-6 非故障电动机电磁转矩曲线

由图 5-3 和图 5-4 可见, 当三相短路故障发生时, 由于母线电压的降低, 故障异步电动机和非故障异步电动机的转速都大幅的下降, 故障异步电动机会逐渐的停转。而当故障切除后, 非故障异步电动机的转速会重新上升, 直到它的正常工作转速, 这就是前文中提到的非故障异步电动机的重启动过程。由图 5-5 和图 5-6 可见, 当故障发生时, 故障异步电动机和非故障异步电动机的电磁转矩会反向升高到很大的值, 这是因为它们工作在发电机状态, 向短路故障点输送短路功率, 但是这个电磁转矩不会持续很长的时间, 很快的衰减为零。当故障切除以后, 非故障异步电动机的电磁转矩又会出现波动, 这就对应了前文中提到的非故障异步电动机的重新启动过程。

5.1.2 两相短路故障特性分析

当异步电动机发生两相短路故障时, 故障异步电动机与非故障异步电动机的电流曲线、转速曲线、电磁转矩曲线如 5-7 至图 5-12 所示。

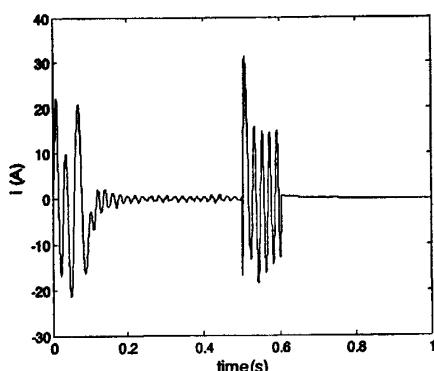


图 5-7 故障异步电动机的电流曲线

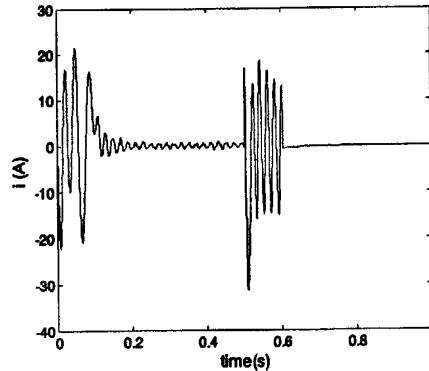


图 5-8 非故障异步电动机电流曲线

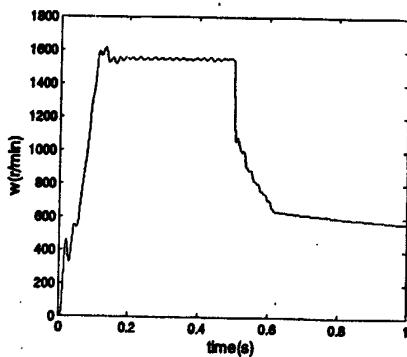


图 5-9 故障异步电动机转速曲线

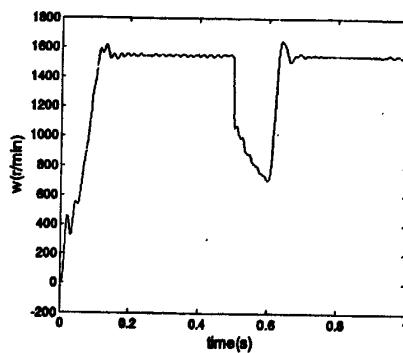


图 5-10 非故障异步电动机转速曲线

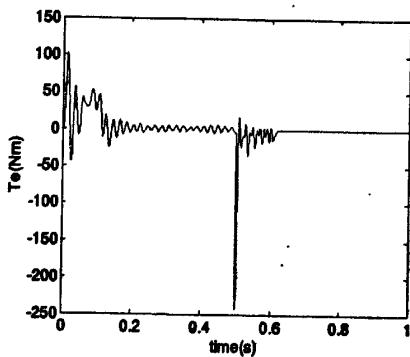


图 5-11 故障异步电动机电磁转矩曲线

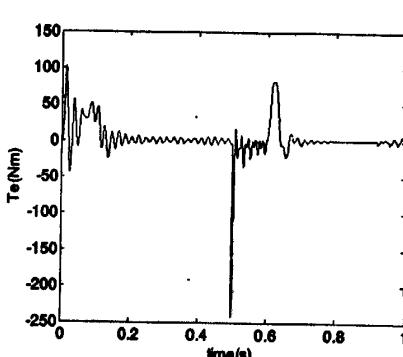


图 5-12 非故障异步电动机电磁转矩曲线

由图 5-7 至图 5-12 可见，两相短路故障发生后，流过故障异步电动机和非故障异步电动机的电流都增大到正常运行时电流的数倍，转速急剧的下降，电磁转矩反向增大数倍并且迅速衰减，异步电动机处于发电机运行状态，向短路故障点输送短路功率。故障切除后，故障异步电动机逐渐停机，非故障异步电动机重新储能进入重启动阶段，启动电流为额定电流的数倍，转速逐渐回升至额定转速，电磁转矩恢复正方向，异步电动机工作在电动机状态。由上述分析得出发生两相短路故障时，故障特征与三相短路故障时情况基本相同。只不过由于两相短路故障没有三相短路故障那么严重，发生故障以后异步电动机的暂态过程发展的相对缓慢，如故障电流衰减速度、转子转速的下降速度和故障电磁转矩的衰减速度都相对缓慢，非故障异步电动机的重启动过程没有三相短路故障时那么明显。但两种短路故障的故障特征的大体趋势是相同的，因此可以研究一种过电流保护同时防范这两种短路故障。

5.2 定时限过电流保护工作原理

通过上面的仿真分析我们可以得出结论：无论是三相短路故障还是两相短路故障，都很有可能导致作为海洋石油平台独立电力系统异步电动机相间短路后备保护的定时限过电流保护发生误动。因此，基于海洋石油平台独立电力系统中异步电动机的相间短路故障特性，定时限过电流保护必须加装功率方向判断元件来判别区

内、区外故障，避免保护误动扩大事故范围。加装功率方向判断元件的定时限过电流保护工作原理逻辑框图如图 5-13 所示。

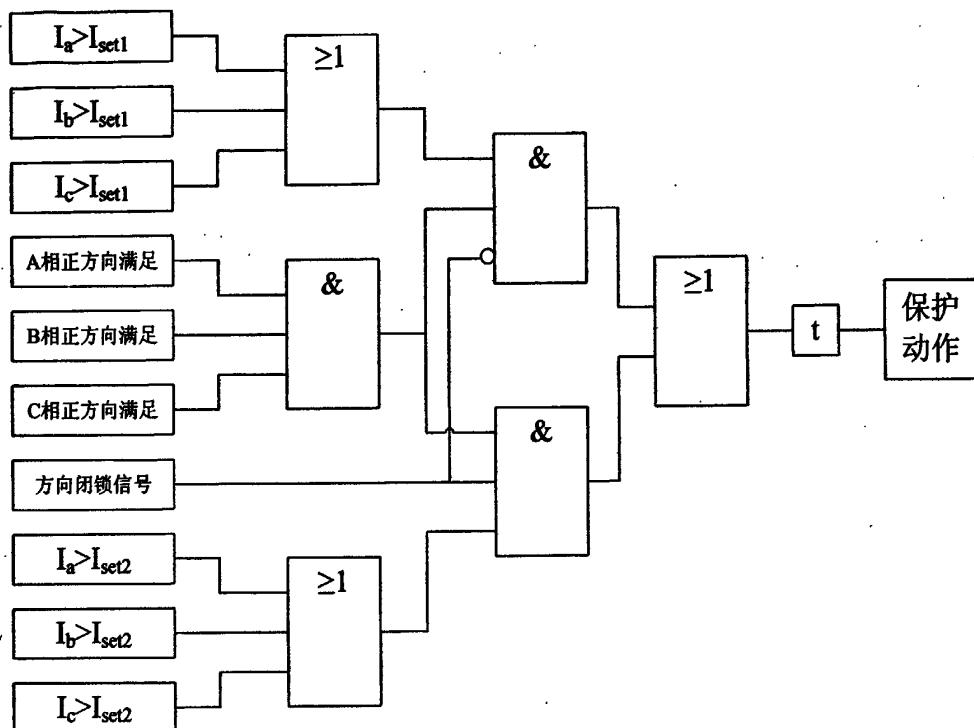


图 5-13 定时限过电流保护工作原理逻辑框图

由图 5-13 我们可以分析得出加装功率方向判断元件的定时限过电流保护工作原理如下：

(1) 当发生相间短路故障后，首先投入功率方向判断元件，如果判断到三相电流都满足正方向时则开放定时限过电流保护；如果判断到三相电流中至少有一相电流为不满足正方向，则闭锁定时限过电流保护，并发出方向闭锁信号。这样就避免了当发生区外相间短路故障时异步电动机定时限过电流保护的误动问题。

(2) 当异步电动机定时限过电流保护启动以后，首先判断是否接收到定时限过电流保护方向闭锁的信号。如果没有接收到方向闭锁信号，则当有一相电流的幅值超过异步电动机正常运行时的定时限过电流保护整定值 I_{set1} 时，保护经延时 t 动作于跳闸；如果接收到方向闭锁信号，则将定时限过电流保护的整定值切换到异步电动机启动时的整定值 I_{set2} ，同样当有一相电流的幅值超过 I_{set2} 时，保护经延时 t 动作于跳闸。 I_{set2} 的整定值要比 I_{set1} 的整定值大很多，并且按照避开异步电动机启动时的最大启动电流整定，这样就避免了非故障异步电动机重启动过程中定时限过电流保护的误动问题。

5.3 定时限过电流保护的整定计算

5.3.1 功率方向元件

方向判断元件参照继电保护的一般做法设置为 90° 接线方式。采用这种特性和接线方式的方向元件采用非故障相的相间电压作为电压的参考向量来判别故障相电流的相位，从而最大限度的消除了电压死区（电压参考向量为零），提高了方向元件动作的灵敏度^[43]。但当异步电动机正方向出口附近发生三相短路时，继电器还是存在很小的电压死区，可以采用电压记忆回路来消除电压死区。设置最大灵敏角 $\phi_{sen} = -30^\circ$ 。其动作特性如图 5-14 所示。

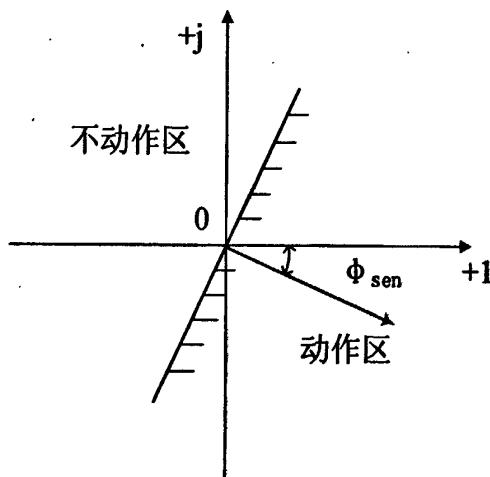


图 5-14 方向判断元件的动作特性

90° 接线方式的动作方程为：

$$90^\circ - \alpha \geq \arg \frac{U_r}{I_r} \geq -90^\circ - \alpha \quad (5-1)$$

5.3.2 动作值整定

定时限过电流保护的动作电流 I_{set1} 按照异步电动机额定负载下可靠返回的条件整定。具体公式如下：

$$I_{set1} = \frac{K_{rel}}{K_r} I_N \quad (5-2)$$

式中： K_{rel} —可靠系数，对于常用的感应式继电器一般取 1.3~1.5；

K_r —返回系数，一般取 0.85~0.95；

I_N —异步电动机正常运行时的额定电流。

定时限过电流保护的动作电流 I_{set2} 按照躲过异步电动机的最大启动电流（异步电动机加全电压空载启动并且转子启动电阻为零）和供电网发生故障时的冲击电流的原则整定。具体公式如下：

$$I_{set2} = K_{rel} I_{s \max} \quad (5-3)$$

式中： K_{rel} —可靠系数，对于常用的感应式继电器一般取 1.8~2；

$I_{s \max}$ —异步电动机的最大启动电流，一般由制造厂商提供或者通过实验实测得到。通常为4~8倍的 I_N 。也可以通过计算得出大概的数值即：

$$I_{s \max} = (4 \sim 8) \frac{S_N}{\sqrt{3} \cos \phi U_N} \quad (5-4)$$

式中： S_N —异步电动机的额定容量；

U_N —额定电压；

$\cos \phi$ —额定功率因数。

定时限过电流保护的灵敏度校验与纵联差动保护的灵敏度校验方法相同，也是按照躲过系统最小运行方式下异步电动机出口发生两相短路计算。如式5-5。

$$K_{sen} = \frac{I_{k \min}^{(2)}}{I_{act}} \quad (5-5)$$

式中： $I_{k \min}^{(2)}$ —系统最小运行方式下异步电动机出口侧电流互感器测得的两相短路电流， I_{act} 为保护装置的定值。

5.3.3 动作时间整定

海上石油平台独立电力系统能安全可靠地运行，不仅要有合理的保护配置及准确的保护整定，更重要的是各个保护之间配合，这其中不仅包括一个设备不同保护之间的配合，还包括不同设备的保护之间的配合。定时限过电流保护是海上石油平台独立电力系统中唯一要考虑所有设备配合关系的保护，就异步电动机自身而言，由于定时限过电流保护是作为纵联差动保护的后备保护，为了保证保护的选择性，避免越级误动跳闸的情况发生，要在纵联差动保护延时的基础上再加设0.3~0.5秒的延时。就整个海洋平台独立电力系统中各个设备而言，定时限过电流保护的动作时间要从系统最末端的电力设备开始逐级向上推导，直到首端的发电机为止。其具体配置如图5-15所示

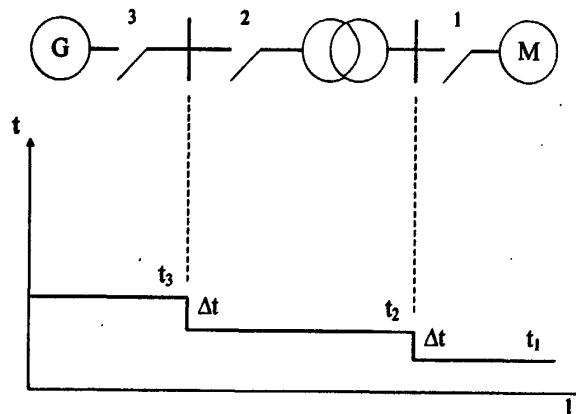


图 5-15 海上石油平台独立电力系统定时限过电流保护动作时限整定说明

由上图可以看出，海上石油平台独立电力系统各个设备的定时限过电流保护是通过动作时间的整定配合起来的。而作为系统最末端的异步电动机的定时限过电流保护的动作时限是最短的。由发电机侧向异步电动机侧，上一级（靠近发电机侧）设备定时限过电流保护的动作时限比下一级（靠近异步电动机侧）设备定时限过电流保护的动作时限多出一个 Δt 。一般海洋石油平台独立电力系统的级数较多，这就有可能导致靠近发电机侧的设备的定时限过电流保护动作时限过长。因此我们希望 Δt 尽量小，但也不能太小。 Δt 的整定原则是大于下一级保护断路器动作时间误差与本级保护断路器动作时间误差的差，并留有一定的裕度。在海洋石油平台独立电力系统中，平台之间的连接既有串联又有并联，可能出现同一台设备按两条线路计算到它这里的定时限过电流保护的动作时限不一样的情况。这时要取时限较高线路的动作时限为准，并以它为基准整定其它线路的动作时限，以此避免越级跳闸，保证保护之间的选择性，缩小故障范围。在实际中，海洋石油平台独立电力系统普遍采用微机型保护， Δt 一般取0.3秒。

5.4 本章小结

本章首先通过建模仿真研究分析了海洋石油平台独立电力系统中异步电动机相间短路故障的故障特性，找到了使非故障异步电动机定时限过电流保护发生误动的原因。基于上述分析，提出了一种加装功率方向元件的定时限过电流保护，并通过绘制其工作原理逻辑框图详细阐述了保护的动作逻辑设置以及它能够避免在发生区外故障时误动的原理。然后对定时限过电流保护功率方向元件的接线方式进行了研究，详细叙述了90°接线方式的原理以及优点。最后对定时限过电流保护的动作值、动作时间进行了整定。其中定时限过电流保护在不同阶段的两个动作值 I_{set1} 、 I_{set2} 的整定原则和方法不同。定时限过电流保护动作时间的整定不仅要考虑到与异步电动机自身其他保护的配合，同时还要考虑到与整个海洋石油平台独立电力系统中其他电气设备保护的配合。

第六章 总结

目前世界范围内的能源问题日益突出，各国的能源产量和消耗量逐年增加。我国作为能源大国，既是产能大国又是耗能大国。就目前我国的发展形势来看，仅仅依靠陆地上的石油开采产量是远远不能满足我国的经济发展和人民日常生活需要的，因此大力发展海洋油气资源的开采是今后很长一段时间内我国能源工作的重中之重。

海洋石油平台独立电力系统是整个石油平台系统的重要组成部分，它为油气资源的开采生产提供电力保障。与陆地常规电力系统相比，海洋石油平台独立电力系统有系统规模小，网络为树状网络，电压等级较低，变频设备多，个别负荷的变化对系统影响大，输电线路用电缆的电阻不可忽略等特点。异步电动机是海洋石油平台上主要的拖动设备，为各种生产机械提供动力，也是海洋石油平台独立电力系统中重要的电气设备。海洋石油平台独立电力系统的自身特点对异步电动机的运行造成了必然的影响，特别是当发生故障时，各种故障的故障特征与陆地电力系统相比发生了变化。所以对海洋石油平台独立电力系统中异步电动机的模型以及故障特征进行仿真研究，进而基于以上研究提出适合于海洋石油平台独立电力系统中异步电动机的保护配置方案是具有理论价值与实际意义的。

通过对该领域内大量国内外文献资料的阅览，本文对海洋石油平台独立电力系统中异步电动机的数学模型进行了研究，并在 MATLAB 中搭建起仿真模型进行动态仿真计算，验证了数学模型的正确性。进而对异步电动机的各种故障进行动态仿真计算并分析故障特征。最后基于上述分析研究，提出了针对海洋石油平台独立电力系统中异步电动机特殊的故障特征的保护配置方案。全文具体内容如下：

(1) 对目前常用的异步电动机的数学模型进行了深入的研究，分别分析了静止坐标系下、 $dq0$ 坐标系下以及任意转速坐标系下异步电动机数学模型的优、缺点。进而基于 $dq0$ 坐标系建立了一种同时考虑铁损与磁饱和的异步电动机数学模型。并根据建立的数学模型在 MATLAB 中搭建了仿真模型做异步电动机启动过程的动态仿真，通过对电流曲线、转速曲线以及电磁转矩曲线的分析研究，验证了数学模型的正确性。

(2) 应用建立的异步电动机仿真模型，在 MATLAB 中搭建起一个两台发电机带三台异步电动机的小型独立电力系统仿真模型，并进行异步电动机相间短路、接地、堵转、过负荷等各种故障的动态仿真，对仿真结果及其故障特征进行分析。

(3) 通过对故障仿真以及现有异步电动机保护配置的研究，提出了海洋石油平台独立电力系统中异步电动机保护的综合配置方案。并对各个保护的工作原理、具体配置以及保护参数的整定进行了深入的研究。

(4) 对海洋石油平台独立电力系统中异步电动机发生相间短路故障时的故障特征进行了深入的研究。通过故障动态仿真研究找到并详细阐述了使非故障异步电动机定时限过电流保护发生误动的原因。基于上述分析提出了一种加装功率方向元件的定时限过电流保护, 通过逻辑框图详细说明了保护的工作原理以及它可以避免误动的机理。最后对功率方向元件的接线方式、具体参数的整定以及保护之间的配合关系进行了研究。

在本文的基础上, 还有许多相关方面的研究工作有待于进一步开展。由于本人水平和时间有限, 所做的工作有很多不足之处, 恳请各位专家和老师批评指正, 本人一定虚心接受, 积极改正

参考文献

- [1] 金秋, 张国忠. 世界海洋油气开发现状及前景展望. 国际石油经济, 2005, 13(3): 43~44
- [2] 苏斌, 冯连勇, 王思聪, 等. 世界海洋石油工业现状和发展趋势. 中国石油企业, 2006, 4 (3): 138~141
- [3] 周守为. 中国石油开发战略与管理研究: [博士学位论文]. 南充: 西南石油大学, 2002
- [4] 王立忠. 论我国海洋石油工程技术的现状与发展. 中国海洋平台, 2006, 21 (4): 9~11
- [5] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计—MATLAB 语言及应用. 北京: 清华大学出版社, 1997. 5~6
- [6] 魏克新. MATLAB 语言与自动控制系统设计. 北京: 机械工业出版社, 1997. 8~9
- [7] 叶东. 电机学. 天津: 天津科学技术出版社, 1995. 284~285
- [8] 刘重轩. 论我国电机保护的现状和未来. 西北纺织工学院学报, 1998(1): 21~23
- [9] 林诗庄, 蔡泽祥. 大型电动机故障诊断与保护理论综述. 广东电力, 2001, 14(6): 12~14
- [10] 汤蕴璆, 张奕黄, 范瑜. 交流电动机动态分析. 北京: 机械工业出版社, 2004. 5~6
- [11] 周立求, 沈记全. 基于 MATLAB\Simulink 的异步电动机建模与仿真. 电机电器技术, 2003, 5(4): 32~36
- [12] Ying Li, Weiguo Shi. Research on General Simulation Model of Induction Motor. IPEMC, 97
- [13] Boldea I, Nasar S. Unified treatment of core losses and saturation in the orthogonal-axis model of electric machines. IEE Proc, Pt. B, Vol. 134, 1987, (6): 355~363
- [14] 卢贤良, 吴汉光. 考虑磁滞及饱和的交流电机非线性模型的研究. 电工技术学报, 2002, 17(6): 1~6
- [15] 汤宁平, 邱培基, 吴汉光. 考虑主磁路饱和时感应电机的综合矢量模型. 电机与控制学报, 2003, 6(1): 14~17
- [16] 邓建国. 考虑主磁路瞬态饱和时异步电机的仿真模型. 防爆电机, 2003, 6(2): 4~7
- [17] 黄海, 李白雅, 尹进田. 一种基于磁化曲线分析瞬态饱和的异步电机空间矢量的新方法. 防爆电机, 2006, 41(3): 19~21
- [18] Nicholas J Negel, Robert D Lorenz. Modeling of a saturated reluctance motor using an operating point analysis and the unsaturated torque equation. IEEE Trans Ind Applicat, 2000, 36(3): 714~722
- [19] 刘文良, 孙振环, 王杰. MATLAB 环境下异步电动机建模与仿真. 天津轻工业学院学报, 2001, 36(1): 40~42
- [20] 李璇华, 黄益庄, 唐晓泉. 电动机故障分析和综合保护配置. 继电器, 2001, 29(12): 30~33

- [21] Gaydon B G, Hargis C, Kamash K. The detection of rotor faults in induction motors, IEE Conference on Electrical Machines-Design and Applications, London (UK), 1982:216~220
- [22] Kilman G B, Stein J, Endicott R D, et al. Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors. IEEE Trans on Energy Conversion, 1988, 3 (4):873~879
- [23] 蔡泽祥, 焦振有. 异步电动机故障诊断及综合保护的研究. 东北电力学院学报, 1994, 14(2): 67~72
- [24] 孙嘉宁. 大中型异步电动机综合保护理论及实现. 继电器, 2000, 28(12): 20~23
- [25] 吴国沛, 任震, 管霖等. 鼠笼异步电动机常见故障的分析与诊断. 华南理工大学学报, 1999, 27(10): 520~57
- [26] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 北京: 中国电力出版社, 1996. 37~38
- [27] 雷奶华, 温韵光, 郑右非. 异步电动机的堵转及其保护研究. 天津理工大学学报, 2006, 22(5):73~75
- [28] 冯崇智, 李永丽. 异步电动机起动过程动态仿真及堵转判定方法. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (6): 22~25
- [29] 董国艳, 张春喜, 时献江. 笼型异步电动机转子故障诊断技术综述. 中小型电机, 2001, 28(1):35~37
- [30] 赵渝青. 对三相异步电动机断相运行的分析. 电机技术, 1998, (3): 15-21
- [31] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 (第二版). 北京: 中国电力出版社, 2002, 492~493
- [32] 王维俭, 王祥珩. 电器主设备保护专辑. 电力系统自动化, 1999, 23(11): 18~23
- [33] 毛锦庆. 电力系统继电保护规定汇编. 北京: 中国电力出版社, 2000, 47~76
- [34] 英莹. 海上石油平台电力系统保护的配置与研究:[硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2007
- [35] Booth C, Dudgeon G, Mc Donald J. R, Kinson A, Hill J. Protection of modern marine power systems: challenges and solutions, Developments in Power System Protection, Eighth IEE International Conference, 2004, Vol. (2): 825~828
- [36] Ericsen T, Hingorani N, Khersonsky Y. Power electronics and future marine electrical systems, Industry Applications, IEEE Transactions, 42 (1): 155~163
- [37] 樊庆. 异步电动机故障仿真与保护研究: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2008
- [38] Jun ji Tamura. Transient Stability Simulation of Power System Including Wind Generator by PSCAD/EMTDC. IEEE Porto Power Tech Conference, 2001. 10~13
- [39] 冯崇智, 李永丽. 异步电动机起动过程动态仿真及堵转判定方法. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (6): 22~25
- [40] 沈智健, 王利平, 练波. 累加定子电流的异步电动机反时限特性热保护. 电网技

术, 2000, 24 (11): 65~68

- [41] 冯崇智. 基于 DSP 的异步电动机保护装置的研制与开发: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2004
- [42] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理. 北京: 水利电力出版社, 1985, 178~180
- [43] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护. 北京: 中国电力出版社, 2005, 38~39

致 谢

本文是在恩师焦彦军教授的悉心指导下完成的，从选题、研究进展的每一步、论文的撰写到最后的定稿无不体现着恩师多年的精心指导和亲切关怀。恩师高尚的人格、宽广的胸襟、渊博的知识、严谨的治学作风、无私的奉献精神、对科学前沿的敏锐洞察力以及对科学事业的执著追求使学生深受熏陶，并将终生受益。借此论文完成之际，谨向恩师致以诚挚的敬意！

在论文的完成过程中，实验室的同学们也给予了我许多支持和帮助，在此一并表示感谢！此外论文还参阅了大量的文献资料，在此也向这些文献的原作者表示感谢！

还要特别地感谢我的家人，正是他们的全力支持和关心理解才使我的论文得以顺利完成！感谢所有曾给予我帮助、支持、关心、鼓励的老师、同学、朋友和亲人！最后，衷心地感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩会的各位专家、教授！

在学期间发表的学术论文和参加科研情况

- [1] 张仲玮, 焦彦军. 同时考虑铁损与磁饱和的异步电动机模型研究. 电力科学与工程, 2009, 9
- [2] 张仲玮, 焦彦军. 独立电力系统中异步电动机故障仿真及保护研究. 长沙第 25 界中国高校电力系统及其自动化年会. 2009, 10

