



北京交通大学

BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY

大型发电机转子匝间短路故障的研究进展

北京交通大学电气工程学院

郝亮亮



研究背景

◆ 转子绕组匝间短路故障的产生原因

- 设计不合理
- 加工工艺的不良
- 运行中各种机、电、热等作用的影响

◆ 故障危害

一般的轻微励磁绕组匝间短路对发电机运行不会产生严重影响。但如果继续发展→

- 励磁电流增大
- 输出无功减小
- 机组振动加剧
- 2 • 局部过热→转子接地→烧伤轴颈、轴瓦



故障发生案例

◆ 故障案例

- 仅中国广东省在2009-2011的三年中，就已经有十余台400MW~1000MW等级的发电机出现了励磁绕组匝间短路故障，在2010年就已确认发生了5起。
- 上世纪90年代我国某火电厂4台300MW发电机中就有3台因转子绕组匝间短路等原因最终导致大轴磁化，其中两台还烧坏护环。
- 2005年凤滩水电站6号发电机的转子绕组匝间短路故障还引起了主保护的動作。
-



转子匝间短路故障在线检测方法概述

1、传统检测方法

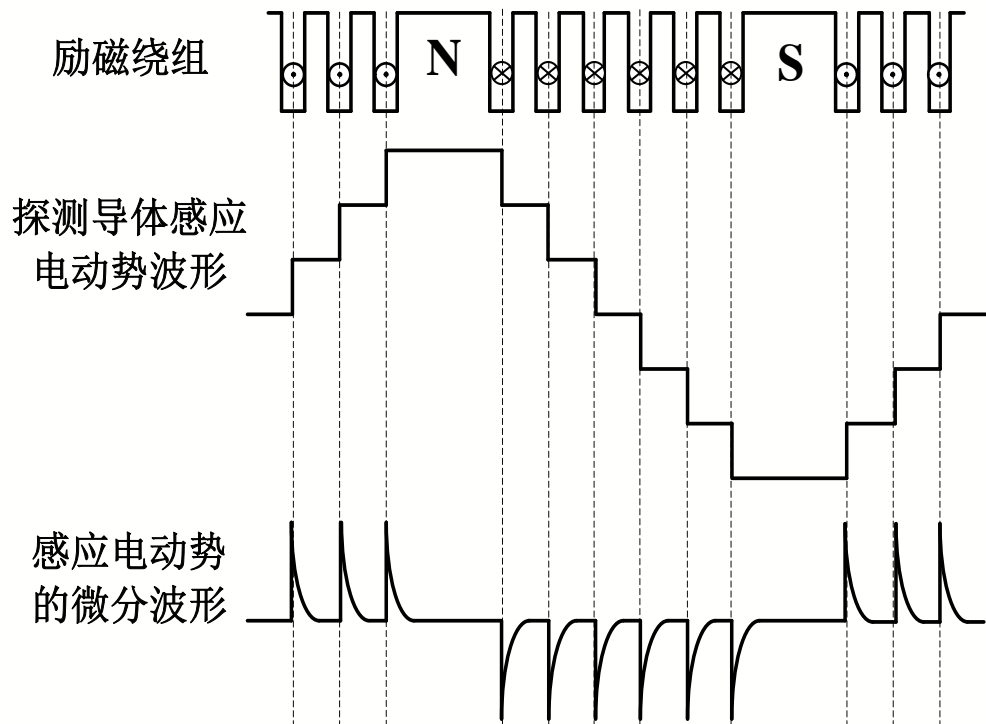
- ◆ 开口变压器法
- ◆ 交流阻抗和功率损耗法
- ◆ 直流阻抗法
- ◆ 空载及短路特性试验法
- ◆ 两极电压平衡实验
- ◆ 绕组分布电压测量.....

——已在现场应用多年，积累了很多经验，但这些方法受其它因素的**干扰很大**，而且都**不能在实际运行工况下检测**，应用效果往往很不理想。



转子匝间短路故障在线检测方法概述

2、基于磁场探测的故障检测方法



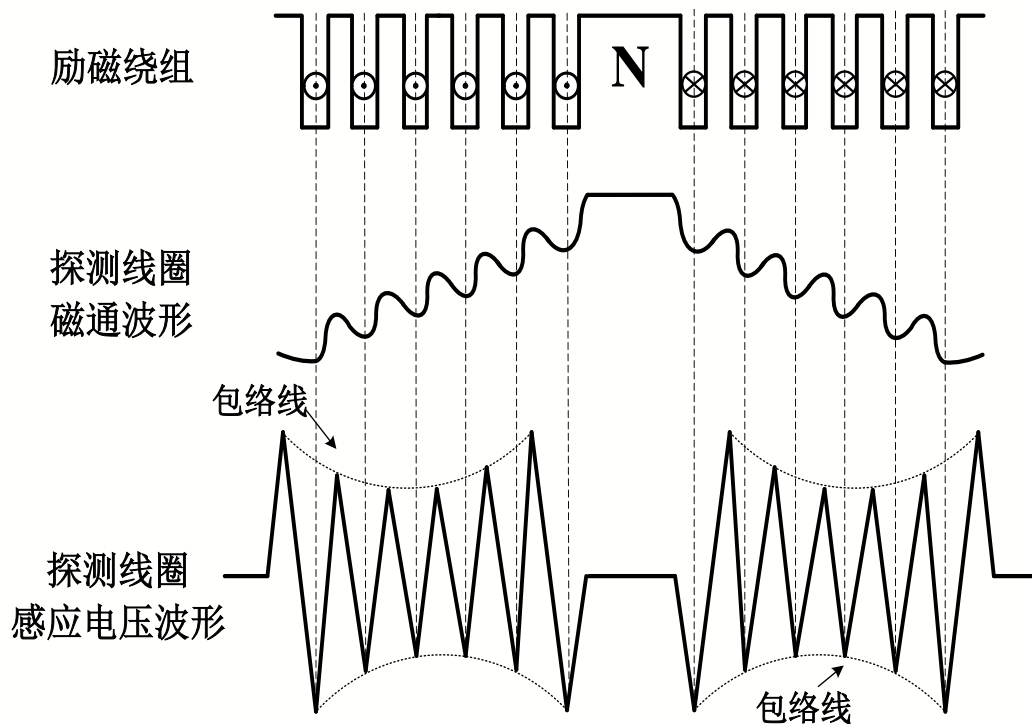
单导线微分法由我国哈尔滨大电机研究所于1972年提出，并试验成功。

该方法在发电机负载时会受到电枢反应的影响，使检测结果失效。因此单导线微分法不太适合负载时对励磁绕组匝间短路的检测。



转子匝间短路故障在线检测方法概述

2、基于磁场探测的故障检测方法



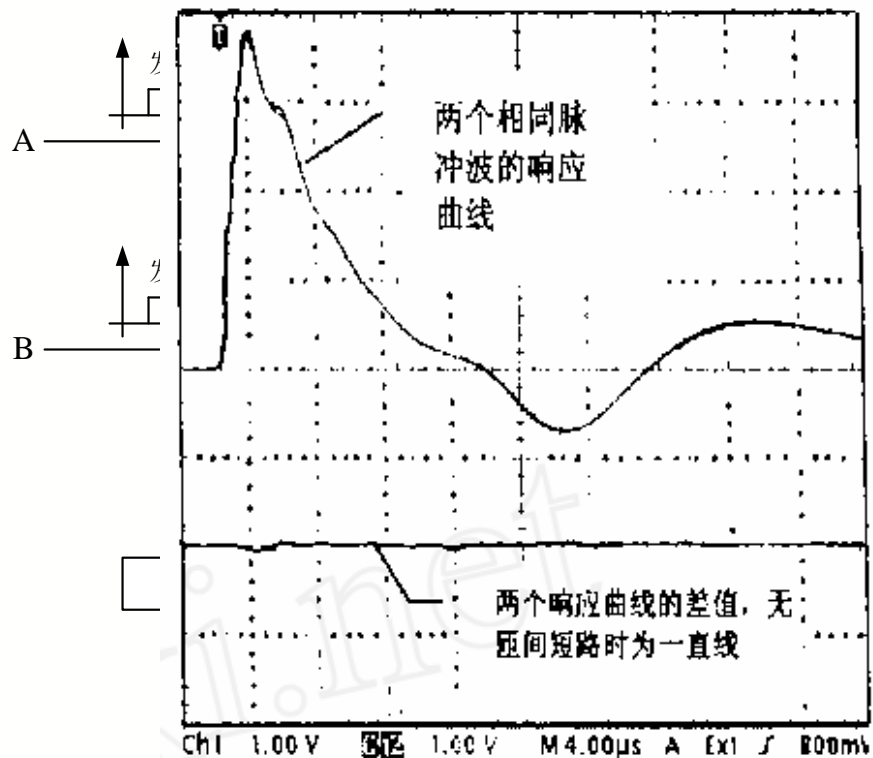
微分线圈动测法由英国学者Albright于1971年首先提出，是近年来国内外广泛采用的方法。

在一定程度上弥补了单导线微分法处理发电机负载情况时的局限性，但**大多数发电机均未装设探测线圈**，限制了该方法的应用。

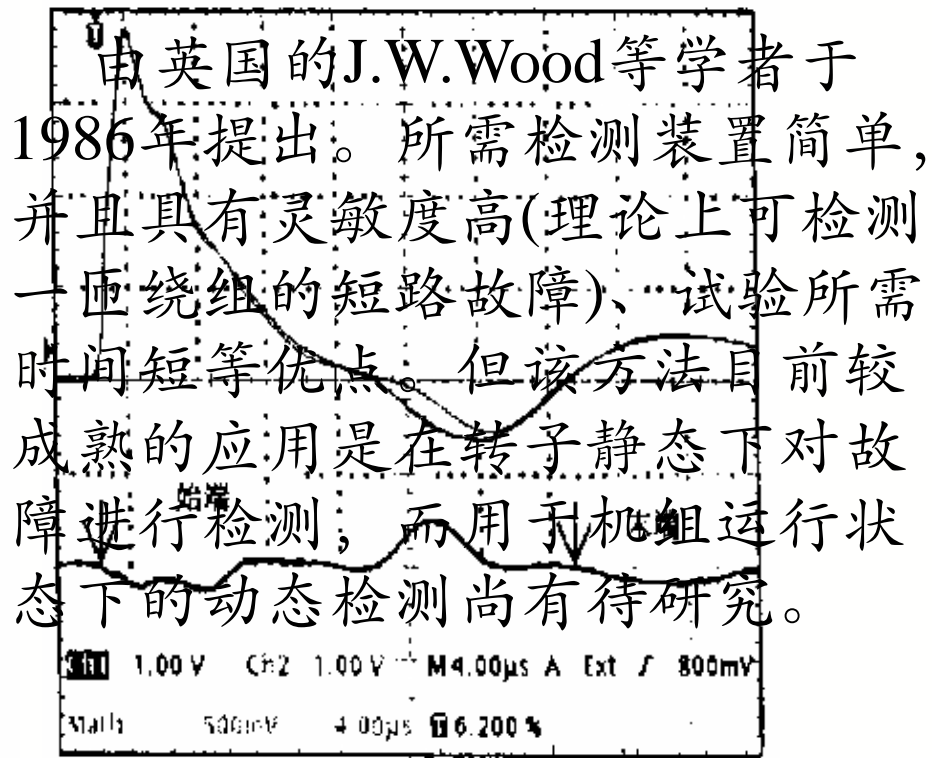


转子匝间短路故障在线检测方法概述

3、冲击脉冲法



励磁绕组正常时



励磁绕组故障时



转子匝间短路故障在线检测方法概述

④ 4、利用机组振动特性

机组的振动特性为解决发电机内部故障提供了一种崭新的思路，国外F.C.Trutt等学者对此进行了大量研究。国内有学者借鉴定子绕组内部故障时发电机径向振动的分析方法，分析了励磁绕组匝间短路对发电机定转子振动特性的影响。

但分析较为粗糙，特别是对多对极电机，定、转子电流谐波特性的分析不够准确，导致最后的结果可信度不高。另外，引起发电机振动的原因很多，无法单纯利用振动特性对故障进行检测。



转子匝间短路故障在线检测方法概述

⑤ 5、利用电机轴电压

也有学者利用电机轴电压进行故障检测。有文献以一台30KVA的两对极汽轮发电机为例，分析了励磁绕组匝间短路时发电机转子轴电压特性，得出故障发生后发电机将产生两倍频、四倍频、六倍频的轴电压。



转子匝间短路故障在线检测方法概述

6、利用运行中的电气量

利用运行中的电气量实现对转子匝间短路故障的在线监测不需对发电机一次侧进行改造，且针对性强，能发现运行中的动态短路，是目前的研究热点。

- 利用励磁电流
- 利用人工神经网络
- 利用定子并联支路环流

——仅有定性的理论分析与实验研究



国内外研究现状

◆ 发电机励磁绕组匝间短路故障的检测方法

- 传统检测方法 —— 无法在线检测
- 冲击脉冲法
- 单导线微分法 —— 需要对机组进行改造
- 微分线圈动测法
- 利用机组振动特性检测 —— 缺乏针对性
- 利用轴电压检测
- 利用定子绕组并联环流检测
- 利用励磁电流检测 —— 仅有定性的理论分析与实验研究

——瓶颈：无法准确计算故障后的电气量，缺乏设计
11 转子匝间短路监测的理论基础



研究思路和特点

◇ 第一阶段：电机转子故障的理论研究

- 定量计算

- 多回路分析法
- 实验验证

- ◎ 故障特征的理论分析

- 考虑定子绕组结构的影响
- 可由仿真或实验结果来检验

◇ 第二阶段：发电机转子匝间短路故障监测原理

- ◎ 原理：基于转子匝间短路所独有的故障特征

- ◎ 方法：利用主保护配置的电流互感器来提取定子分支的不平衡电流

- ◎ 最大限度地提取转子匝间短路故障特征
- ◎ 摒弃不平衡电流中的非故障特征分量

适用于无分支电流CT安装条件发电机的故障监测研究



◆ 暂态仿真

扩充的多回路数学模型

——考虑到故障引起的气隙磁场的各种空间谐波、定子相绕组内部不平衡电流和励磁绕组电路拓扑结构的改变

$$([M'] + [M_T])p[I'] + (p[M'] + [R'] + [R_T])[I'] = [E]$$

参数模型

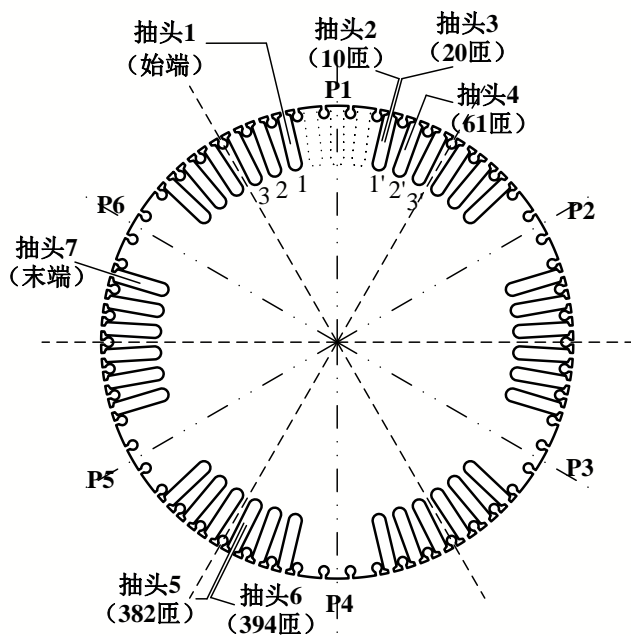
凸极电机的集中式励磁绕组

隐极电机的分布式励磁绕组

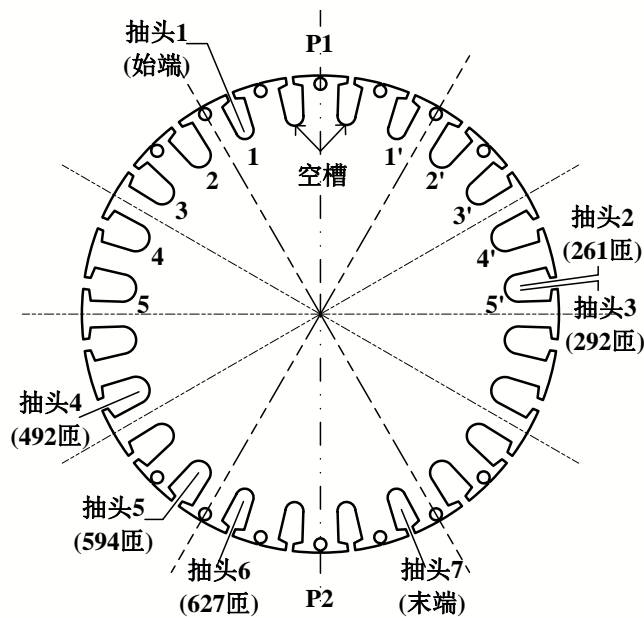
用数值方法求得故障整个过渡过程（包括稳态）中定、转子电流和电压



◆实验样机



3对极A1553实验样机

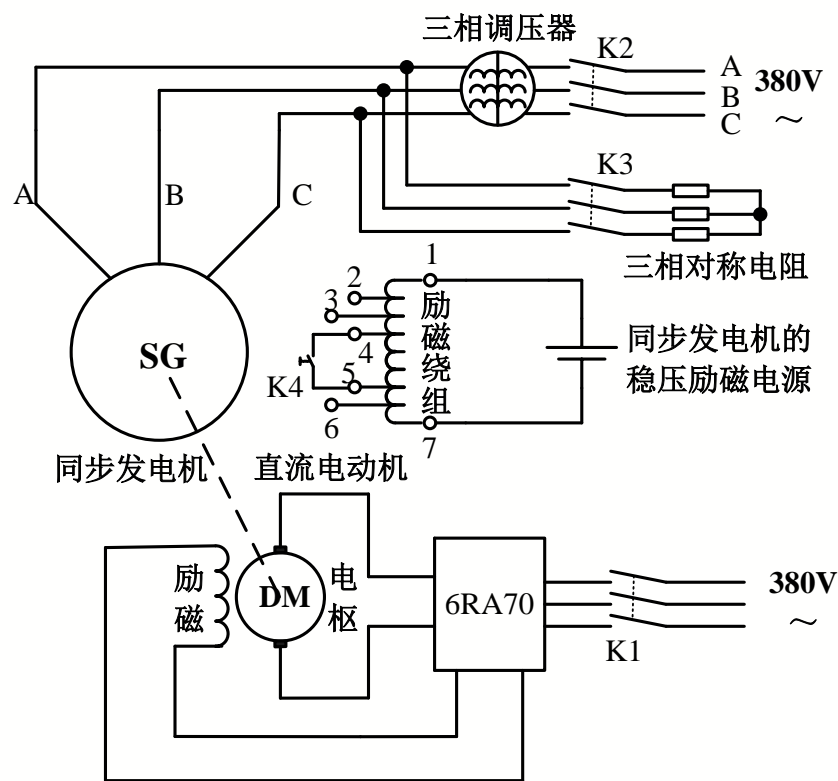


1对极A1552实验样机

实验样机的励磁绕组除首末端的2个抽头外，还在内部另外引出了5个抽头，这7个抽头分别与7个滑环相连再接到外部接线板的端子上，便于进行各抽头之间的短路实验。



◆实验平台与实验方法

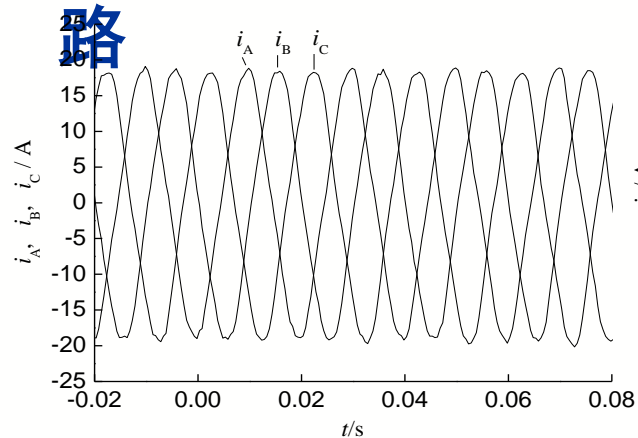


实验的原理接线图

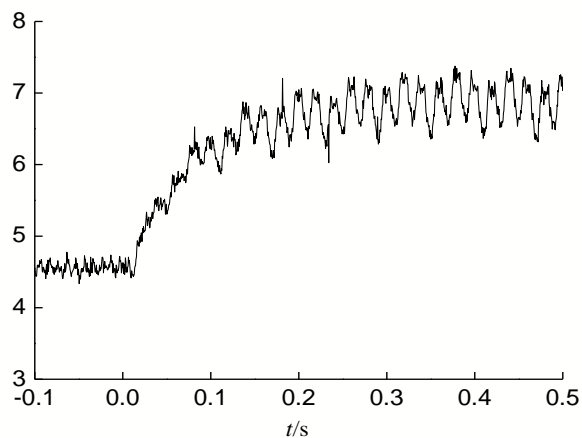


◆ 仿真与实验对比——A1553样机联网负载时的励磁绕组短路

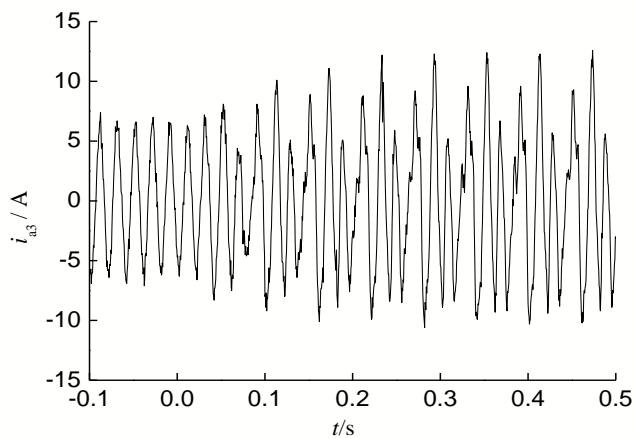
路



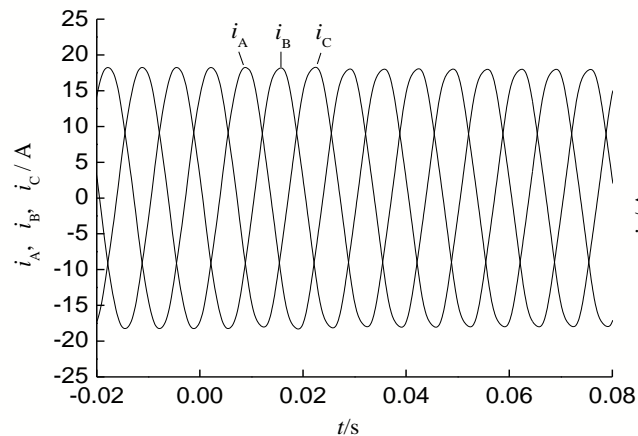
三相电流实验波形



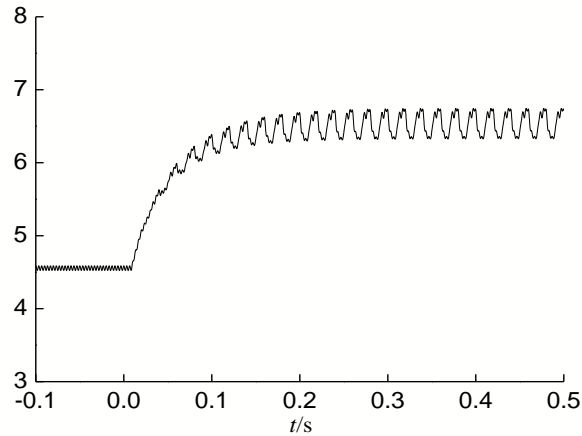
励磁电流实验波形



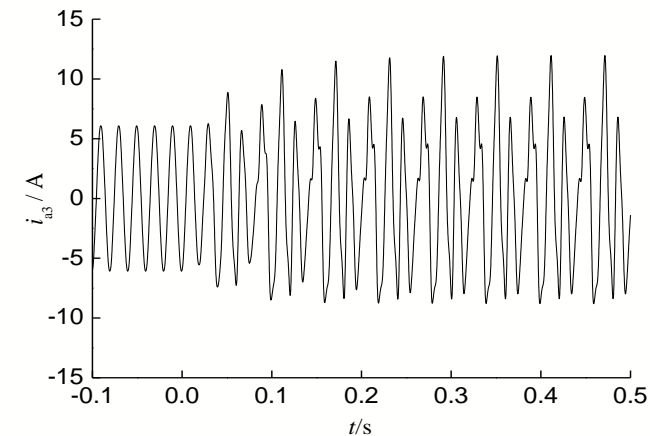
a3分支电流实验波形



三相电流仿真波形



励磁电流仿真波形



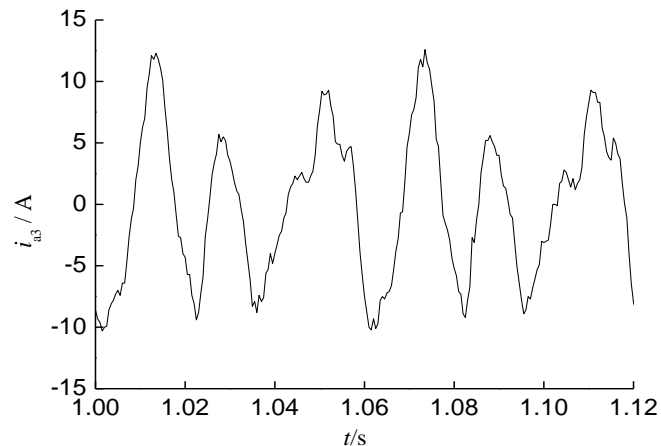
a3分支电流仿真波形



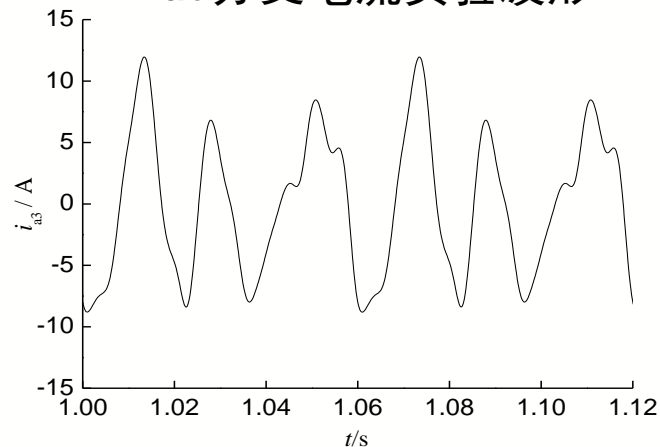
◆仿真与实验对比——A1553样机联网负载时的励磁绕组短路

A1553样机联网负载励磁绕组4-5抽头匝间短路时，稳态电流各次谐波分量

稳态电气量各次谐波分量		实验值/A		稳态故障的计算值/A	计算与实验的相对偏差/%
		故障前的正常稳态	故障后的稳态		
A相电流各次谐波的有效值	基波	12.86	12.82	12.86	0.31
	3次谐波	0.52	0.96	0	—
a3分支电流各次谐波的有效值	1/3次谐波	0.09	0.64	0.63	-1.56
	2/3次谐波	0.09	2.80	2.70	-3.57
	基波	4.35	4.27	4.29	0.47
	4/3次谐波	0.21	2.70	2.78	2.96
	5/3次谐波	0.04	0.97	1.04	7.22
	7/3次谐波	0.01	0.14	0.15	7.14
	8/3次谐波	0.05	0.68	0.75	10.29
	3次谐波	0.26	0.43	0	—



a3分支电流实验波形



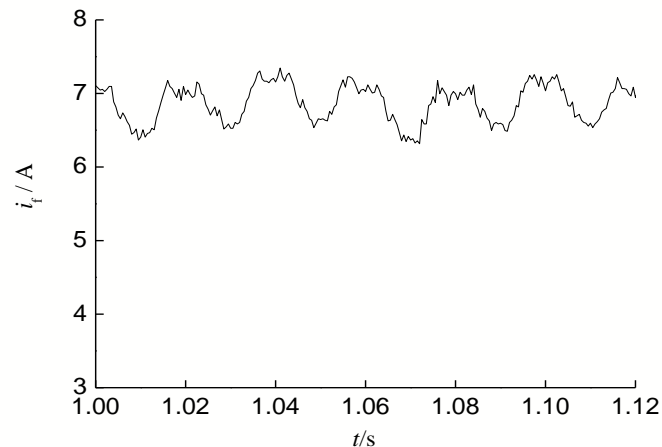
a3分支电流仿真波形



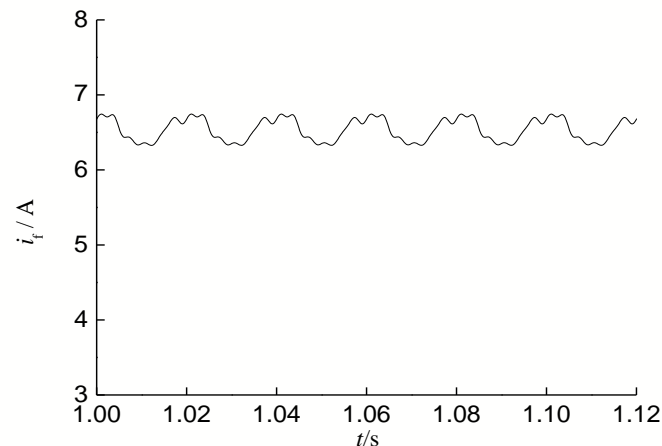
◆仿真与实验对比——A1553样机联网负载时的励磁绕组短路

A1553样机联网负载励磁绕组4-5抽头匝间短路时，稳态电流各次谐波分量

稳态电气量各次谐波分量	实验值/A		稳态故障的计算值/A	计算与实验的相对偏差/%	
	故障前的正常稳态	故障后的稳态			
直流分量	4.56	6.83	6.67	-2.34	
励磁电流	0	0.08	0	—	
各次谐波的有效值	基波	0.02	0.18	0.15	-16.67
	2次谐波	0.05	0.05	0.02	—
	3次谐波	0	0.05	0.04	—



励磁回路电流实验波形

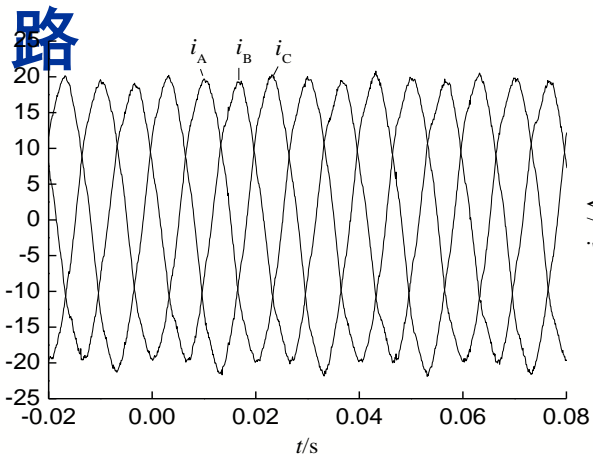


励磁回路电流仿真波形

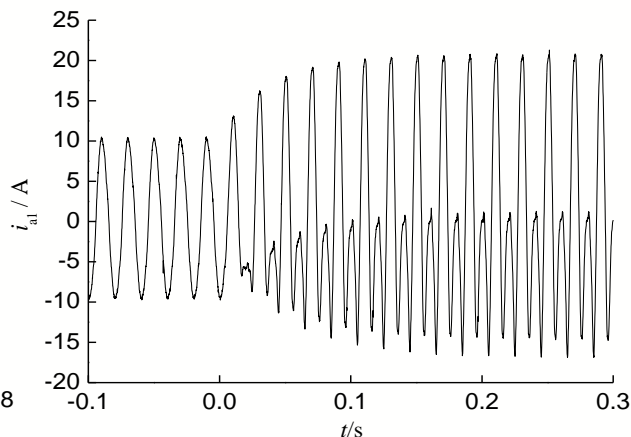


转子匝间短路故障的研究进展

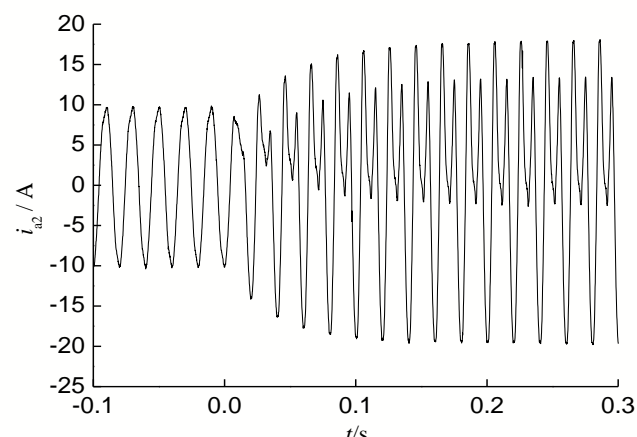
◆ 仿真与实验对比——A1552样机联网负载时的励磁绕组短路



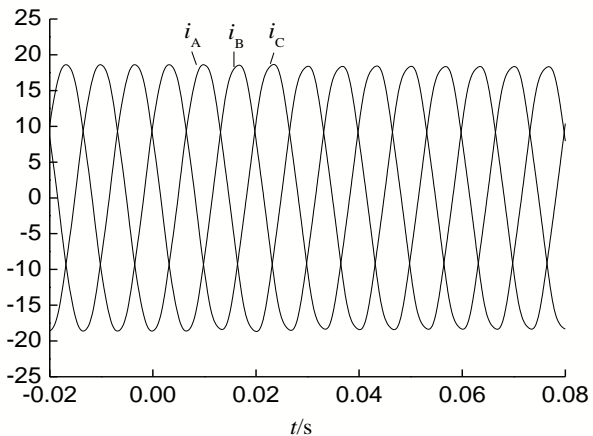
三相电流实验波形



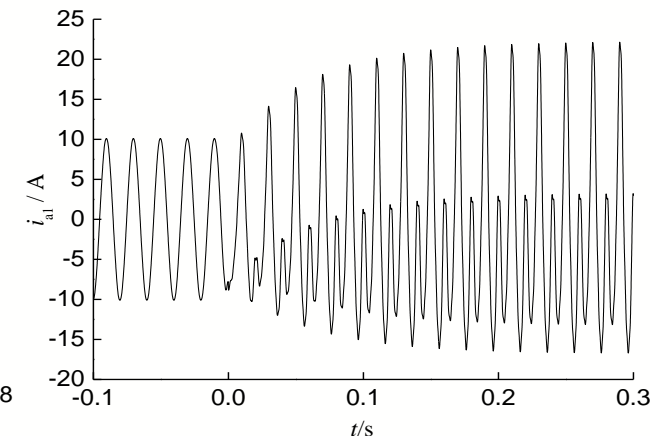
a1分支电流实验波形



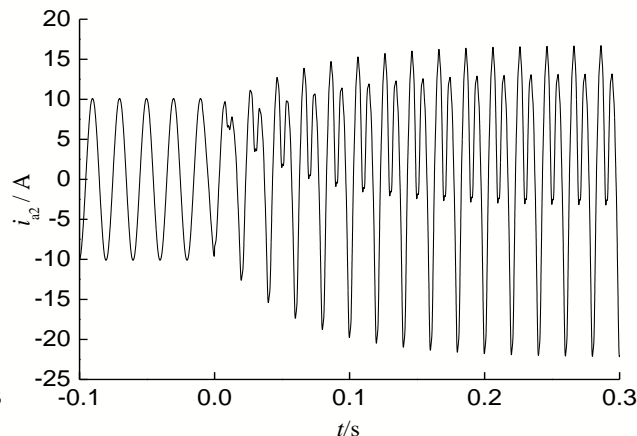
a2分支电流实验波形



三相电流仿真波形



a1分支电流仿真波形



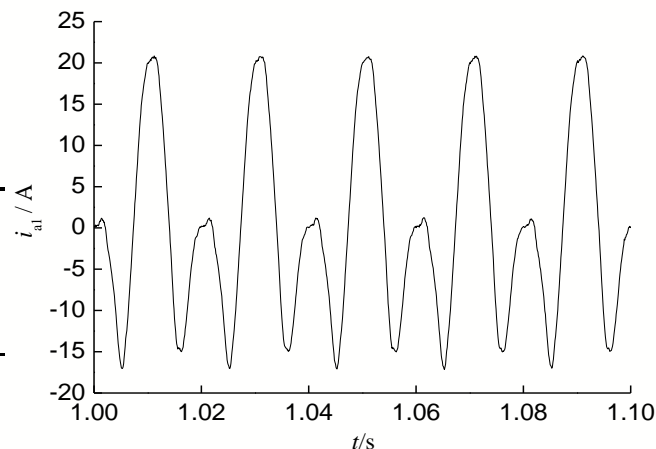
a2分支电流仿真波形



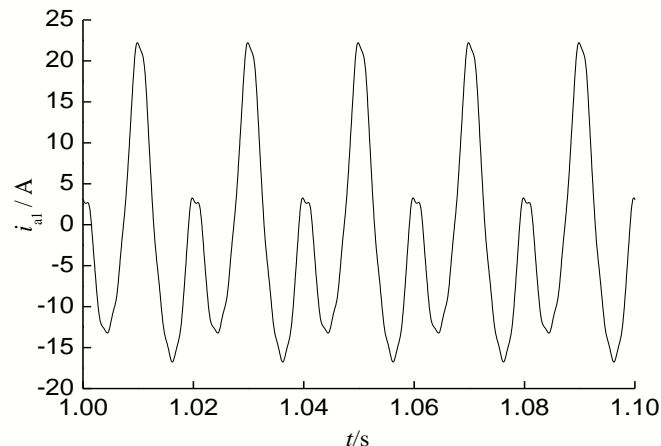
◆仿真与实验对比——A1552样机联网负载时的励磁绕组短路

A1552样机联网负载励磁绕组4-5抽头匝间短路时，稳态电流各次谐波分量

稳态电气量各次谐波分量	实验值/A		稳态故障的计算值/A	计算与实验的相对偏差/%	
	故障前的正常稳态	故障后的稳态			
a1 分支电流各次谐波的有效值	基波	7.04	7.12	6.85	-3.79
	2 次谐波	0.32	9.05	9.19	1.55
	3 次谐波	0.28	0.08	0	—
	4 次谐波	0.03	1.56	1.49	-4.49
A 相电流各次谐波的有效值	基波	13.67	13.55	13.71	1.18
	3 次谐波	0.22	0.25	0	—



a1分支电流实验波形



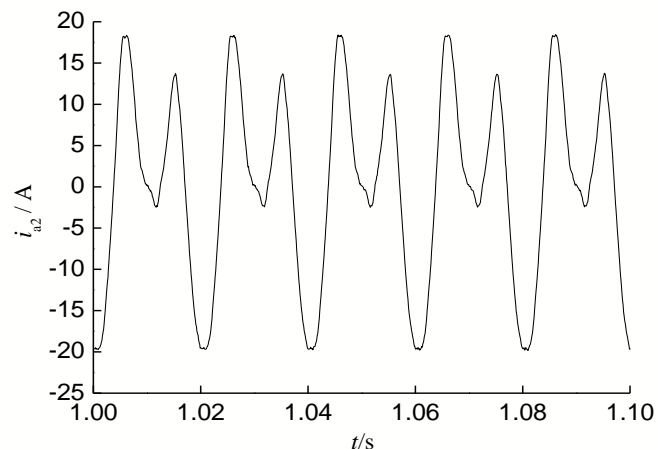
a1分支电流仿真波形



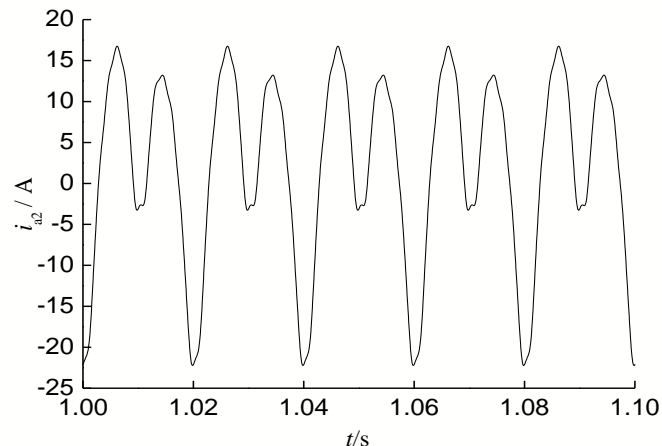
◆仿真与实验对比——A1552样机联网负载时的励磁绕组短路

A1552样机联网负载励磁绕组4-5抽头匝间短路时，稳态电流各次谐波分量

稳态电气量各次谐波分量	实验值/A		稳态故障的计算值/A	计算与实验的相对偏差/%	
	故障前的正常稳态	故障后的稳态			
a2 分支电流各次谐波的有效值	基波	7.11	6.94	6.85	-1.30
	2 次谐波	0.31	9.01	9.19	2.00
	3 次谐波	0.36	0.19	0	—
	4 次谐波	0.02	1.58	1.49	-5.70
励磁电流各次谐波的有效值	直流分量	5.29	6.32	6.32	0
	6 次谐波	0.02	0.07	0.03	—



a2分支电流实验波形



a2分支电流仿真波形



◆误差分析

- 实验样机制造偏差引起的正常运行时的固有环流
- 叠片磁极的阻尼作用
- 饱和对铁心磁阻的影响

◆通过实验和仿真得到实验样机的故障特征

- (1) 定子三相电压和电流基本不变，且以时间基波为主。
- (2) 定子同相分支间出现了较大的不平衡电流，且在两台不同极对数的样机上反映出的谐波特征不同。
- (3) 励磁电流直流分量有所增加，并且在两台实验样机上出现了不同的附加交流分量，但相比定子分支电流中的交流分量要小得多。
- (4) 短路位置对故障特征量的影响较大。



- ◆ 通过理论分析推导出定、转子电流的稳态电流谐波特征
 - 实验样机
 - 目前常见的分数槽绕组大型水轮发电机
 - ▲ 故障电流的谐波特征与电机的极对数、定子绕组的分布及联接方式等因素密切相关
 - ▲ 励磁绕组匝间短路的故障特征与机端外部短路、定子匝间短路和转子偏心等其他故障存在明显差异
 - 为基于稳态电流谐波特征的励磁绕组匝间短路故障在线监测与保护提供了理论依据



北京交通大学

BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY

转子匝间短路故障的研究进展

- ◆ 励磁绕组匝间短路的独有故障特征（监测对象的选取）
 - ◆ 监测对象需满足的两个要求：
 - ★ (a) 特征量不能太小，特征量太小必然会给监测带来难度（灵敏性降低）。
 - ★ (b) 需保证所选取监测对象的特征具有排它性，是励磁绕组匝间短路故障所独有。



◆ 励磁绕组匝间短路的独有故障特征

◆ 励磁绕组匝间短路故障特征小结：

- ★ (a) 汽轮发电机：定子相绕组内出现偶数次不平衡电流；励磁电流中除直流外，仅含6及6的倍数次交流分量。
- ★ (b) 水轮发电机：定子相绕组内将出现 $1/P$ 、 $2/P$ 等一系列的分数次不平衡电流，而不含偶数次谐波；励磁电流中还将出现与极对数及定子绕组联接方式有关的交流分量。
- ★ (c) 由于阻尼的存在，故障引起的转子故障成分主要分布在阻尼电流中，故障后的励磁电流交流分量十分小。

定子相绕组内部偶数次或与极对数有关的分数次谐波不平衡电流是励磁绕组匝间短路 **最显著的故障特征**。



◆ 励磁绕组匝间短路的独有故障特征

◆ 其他故障的电气特征

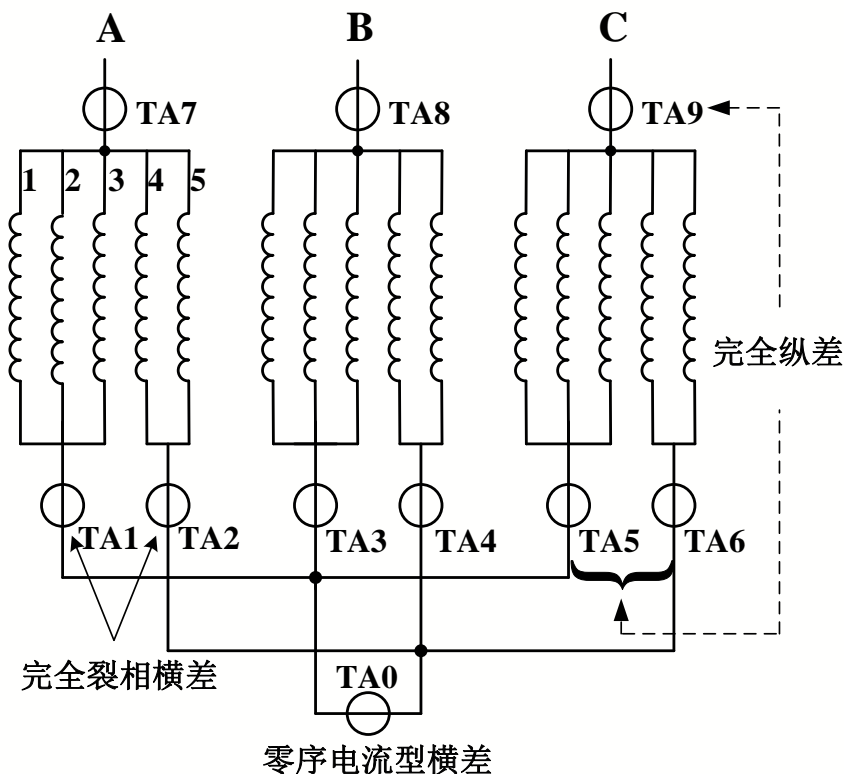
- ✓ (a) 机端外部短路——定子基波及奇数次谐波，转子偶次谐波
- ✓ (b) 定子内部短路——定子基波及奇数次谐波，转子偶次谐波
- ✓ (c) 定子分支开焊——定子基波及奇数次谐波，转子偶次谐波
- ✓ (d) 定子绕组接地——机端基波零序电压及3次谐波电压
- ✓ (e) 转子偏心故障——定子基波及奇数次谐波，转子偶次谐波
- ✓ (f) 转子一点接地——不会引起气隙磁场畸变，定转子电流无变化
- ☺ (g) 转子两点接地——与励磁绕组匝间短路故障本质相同。

◆ 系统振荡等异常工况——可能引起定子各分支及相电流的偶数及分数次谐波。但此时引起的定子电流在同相各分支是同相位的，不会导致相绕组内部不平衡电流的产生。



◆ 基于定子稳态不平衡电流总有效值的故障监测原理

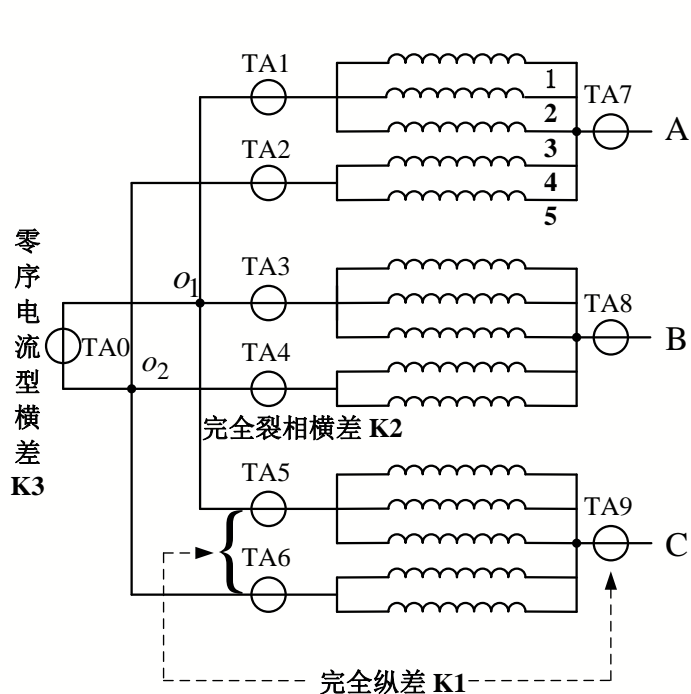
- ★ **基本原则：**尽量在不增加发电机现有保护用CT配置的基础上实现对励磁绕组匝间短路故障的在线监测。



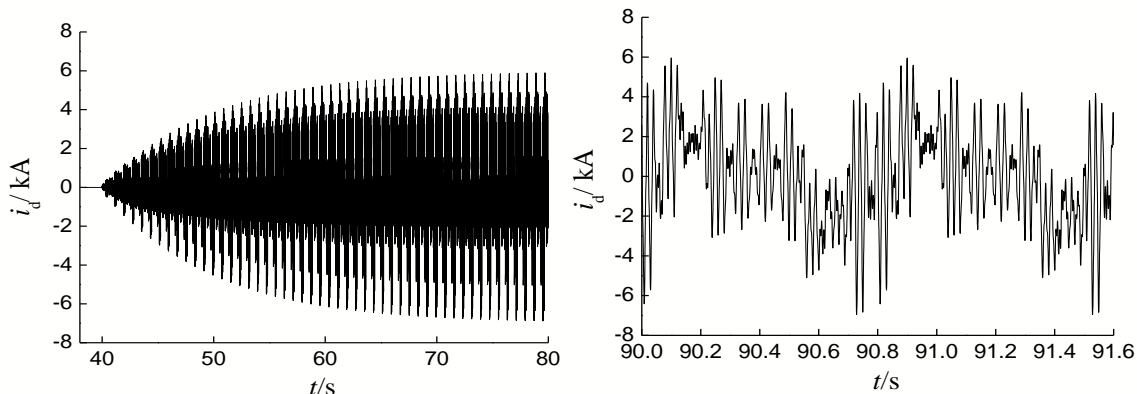
三峡VGS发电机的主保护



◆ 基于定子稳态不平衡电流有效值的故障监测原理



三峡VGS发电机主保护配置的
电流互感器



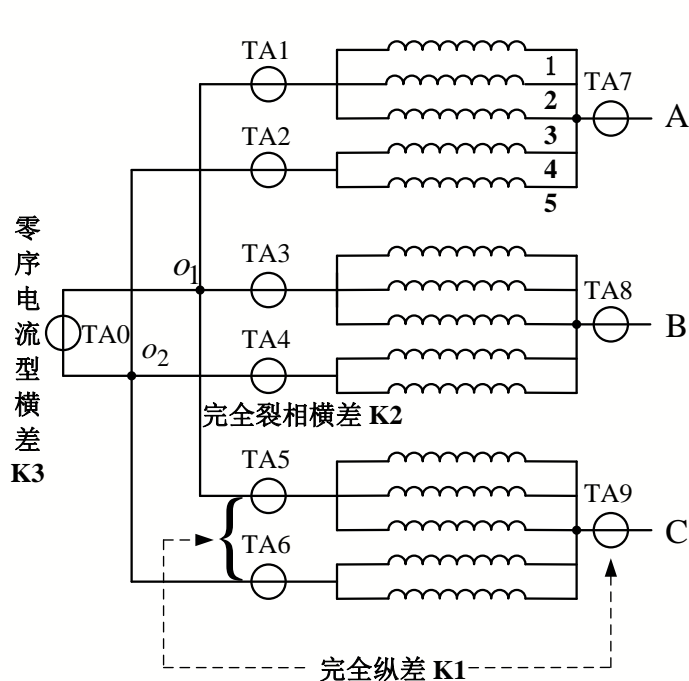
图：进入完全裂相横差保护的不平衡电流

表：进入完全裂相横差保护稳态不平衡电流的各次谐波有效值

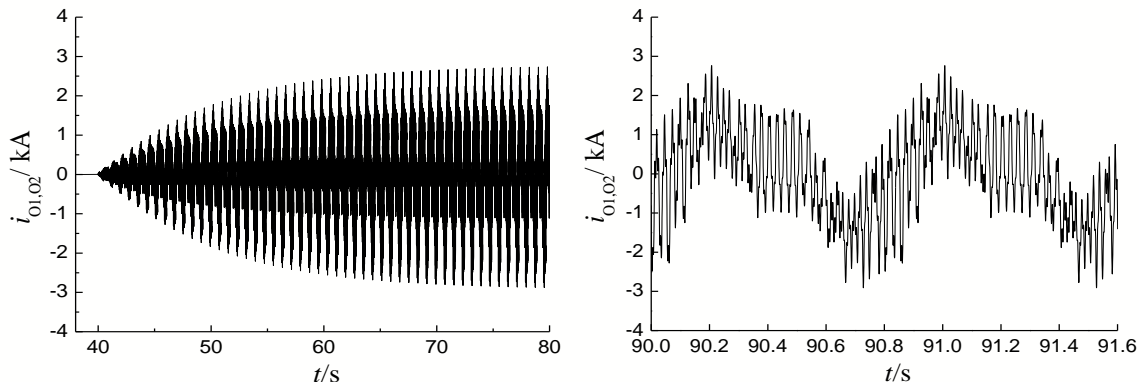
各次谐波	短路 5 匝/A	短路 10 匝/A	短路 1 极/A	短路 4 极/A
1/40 次	419.4	842.1	1142.2	184.8
2/40 次	183.3	368.1	498.5	161.7
3/40 次	134.1	269.3	366.2	176.6
38/40 次	141.1	283.2	392.8	1580.3
39/40 次	313.6	629.5	863.1	3537.5
基波	0	0	0	0
41/40 次	354.6	721.1	966.8	4003.9
42/40 次	183.3	277.8	388.9	1549.4



◆ 基于定子稳态不平衡电流有效值的故障监测原理



三峡VGS发电机主保护配置的
电流互感器



图：进入零序电流横差保护的
不平衡电流

表：进入零序电流横差保护稳态不平衡电流的各次谐波有效值

各次谐波	短路 5 匝/A	短路 10 匝/A	短路 1 极/A	短路 4 极/A
1/40 次	284.5	570.2	775.7	125.4
2/40 次	102.9	206.2	280.2	90.7
3/40 次	52.1	104.4	141.8	68.6
38/40 次	32.4	64.9	87.5	362.7
39/40 次	46.5	93.2	129.7	524.7
基波	0	0	0	0
41/40 次	67.3	134.9	179.6	760.1
42/40 次	53.7	107.7	156.9	601.7



北京交通大学

BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY

转子匝间短路故障的研究进展

进入主保护不平衡电流的特点：

☺ 进入主保护的稳态不平衡电流反映出了励磁绕组匝间短路故障的独有特征，可利用主保护所配CT反映该故障，在不增加硬件投资的基础上，实现对故障的监测。

? 当短路匝数较少时，由于故障励磁绕组产生的磁动势不会引起气隙磁场的明显畸变，且大型水轮发电机的极数一般都很多，使得发生在某一极绕组内的匝间短路较难通过不平衡电流的某次谐波来检测。



北京交通大学

BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY

转子匝间短路故障的研究进展

基于定子稳态不平衡电流有效值的故障监测原理：

——能够最大限度地提取励磁绕组匝间短路故障特征，并在一定程度上摒弃不平衡电流中的非故障特征分量，提高灵敏度与可靠性。

$$I_{o2,o1} = \sqrt{I_{1/40}^2 + I_{2/40}^2 + I_{3/40}^2 \cdots} = \sqrt{\sum_{k=1, k \neq 40, 80 \cdots}^{\infty} I_{k/40}^2}$$

实际采用的计算方法：

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$



△ 防误判措施及定值整定方法

采取监测延时出口的办法提高防误判性能，并且考虑对短路严重程度的区分，同时设了两段监测报警定值，报警I段为低定值段，报警II段为高定值段。

为使监测能可靠躲过正常运行时的不平衡电流，可将I段的低监测定值取为：

$$I_{\text{setI}} = k_{\text{relI}} I_{\text{unb.N}} \quad k_{\text{relI}} = 1.2 \sim 1.5$$

而将II段的高监测定值取为：

$$I_{\text{setII}} = k_{\text{relII}} I_{\text{unb.N}} \quad k_{\text{relII}} \geq 1.5$$



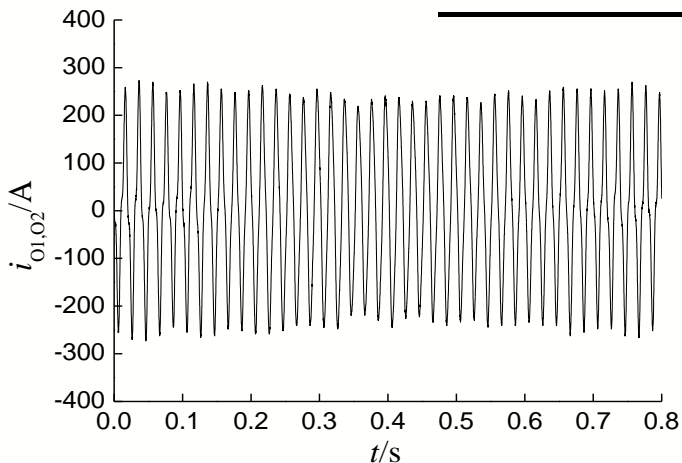
◆ 监测原理的灵敏性分析

★ **监测灵敏系数：**励磁绕组匝间短路故障时定子不平衡电流总有效值与监测定值的比值。当灵敏系数大于1.3时认为监测能灵敏报警。

不同匝数短路时进入零序电流CT的稳态不平衡电流有效值

短路匝数	1	2	3	4	5	6	7	8
不平衡电流有效值/A	121.1	241.8	360.2	481.1	600.4	721.1	841.4	962.5

有效值
154.2
A



三峡发电机正常运行时进入零序电流型横差保护的不平衡电流

短路2匝时（总匝数为1080，短路匝比为0.28%）的灵敏系数：

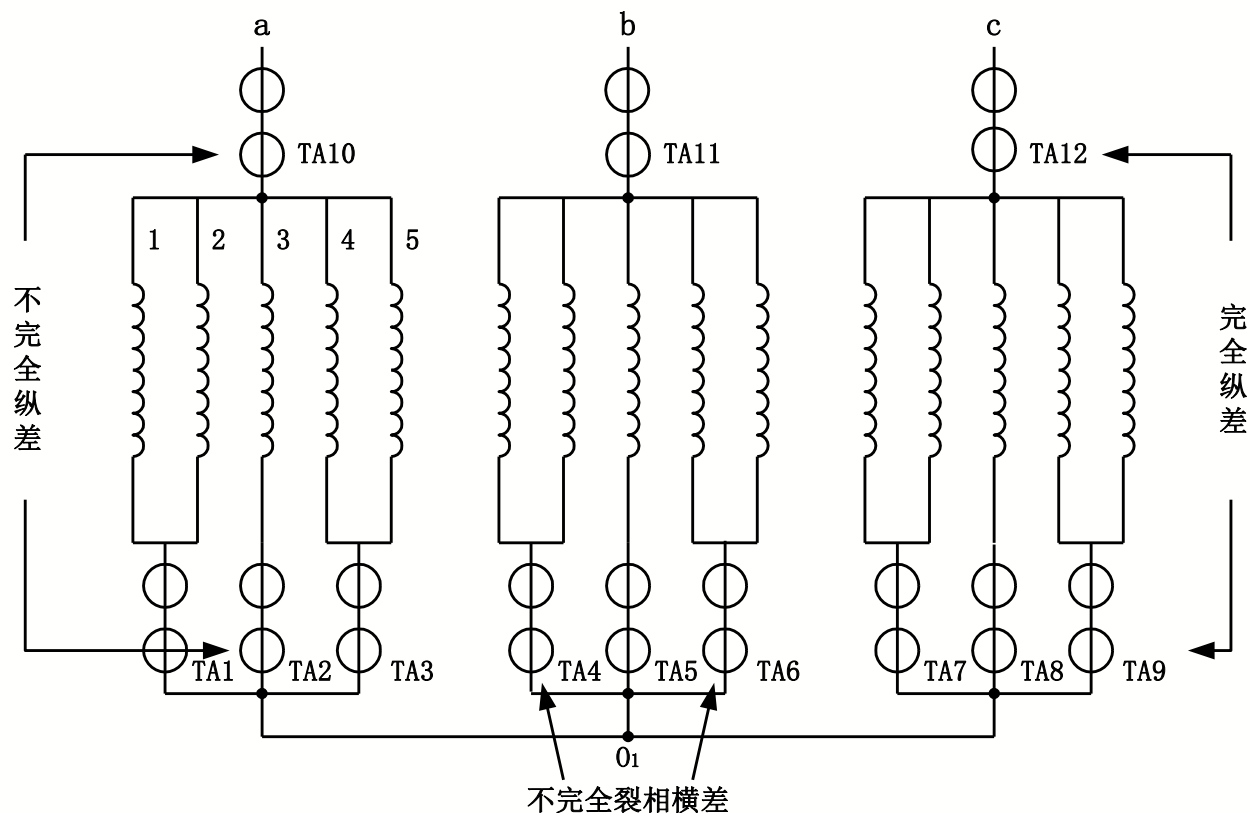
$$k_{sen} = 241.8 / (1.2 \times 154.2) = 1.31$$

灵敏性较好！



◆ 考虑固有不平衡电流影响的灵敏监测方案

▲ 彭水发电机：



彭水发电机主保护配置的电流互感器



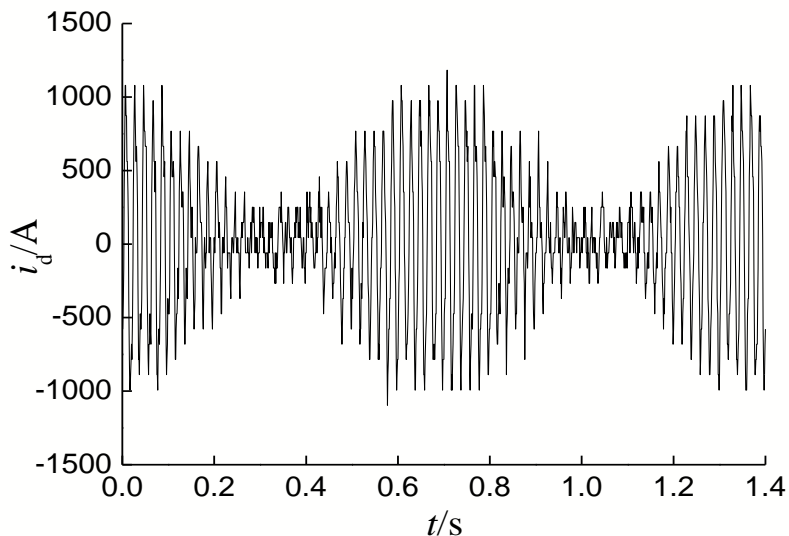
◆ 考虑固有不平衡电流影响的灵敏监测方案

不同匝数短路时进入完全裂相横差保护CT的稳态不平衡电流有效值

短路匝数	1	3	5	7	9	11	13	15
不平衡电流有效值/A	63.5	189.5	316.6	443.2	569.9	696.6	823.7	950.9

有效值
432.6

A



彭水发电机正常运行时进入不完全裂相横差保护的不平衡电流

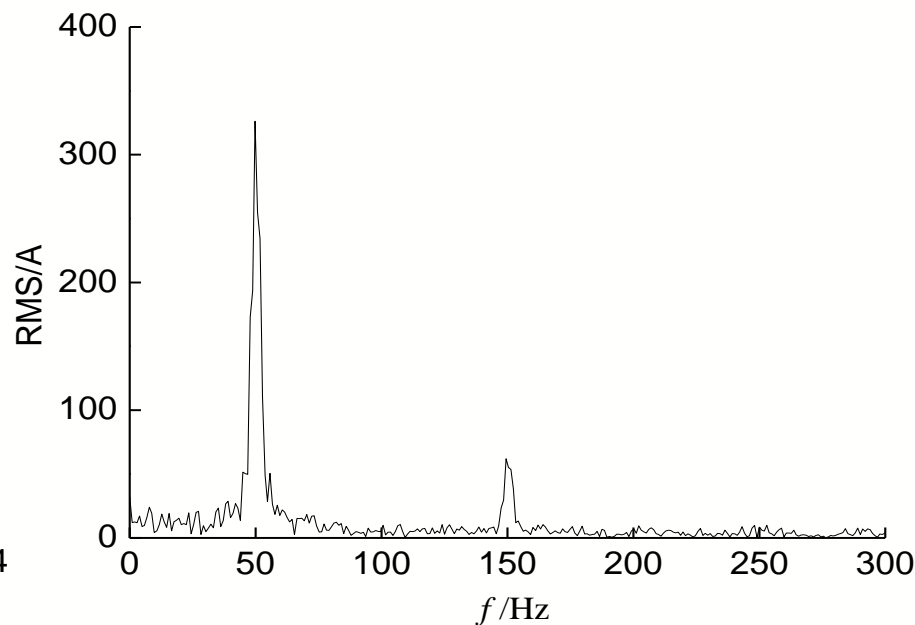
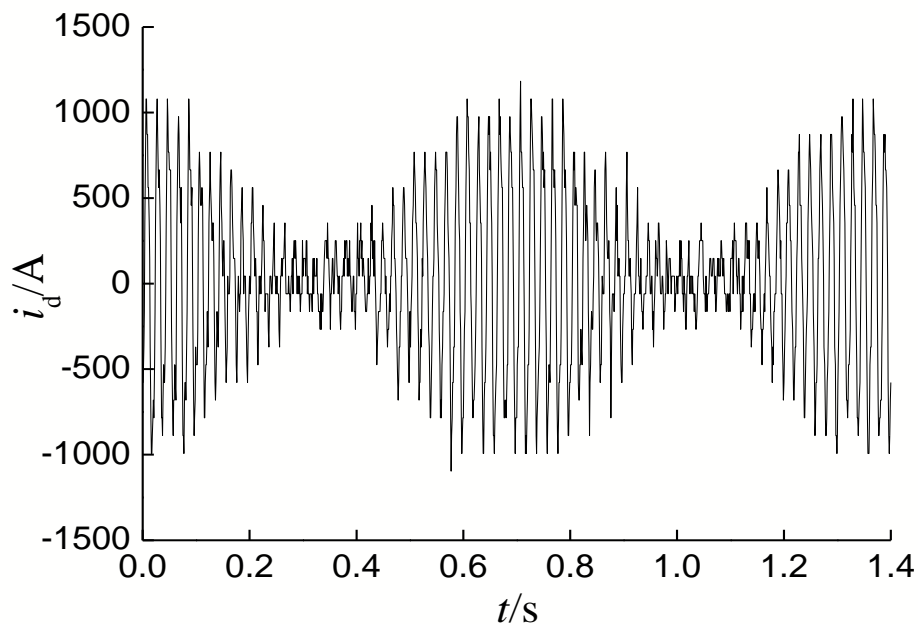
短路11匝时（总匝数为1190，
短路匝比为0.92%）的灵敏系数：

$$k_{\text{sen}} = 696.6 / (1.2 \times 432.6) = 1.34$$

灵敏性不理想！



◆ 监测原理的灵敏度分析



彭水发电机正常运行时进入不完全裂相横差保护的不平衡电流



◆ 考虑固有不平衡电流影响的灵敏监测方案

问题：如何抑制发电机正常运行时的基波不平衡电流，在基于不平衡电流有效值原理的基础上设计出高灵敏方案？？？

$$i_s = \sum_{k=1,3,\dots} I_{sk} \cos k(\omega_0 t + \varphi_{sk}) + \sum_{\substack{k=1/P, 2/P, \dots \\ k \neq 1, 3, \dots}} I_{sk} \cos k(\omega_0 t + \varphi_{sk})$$

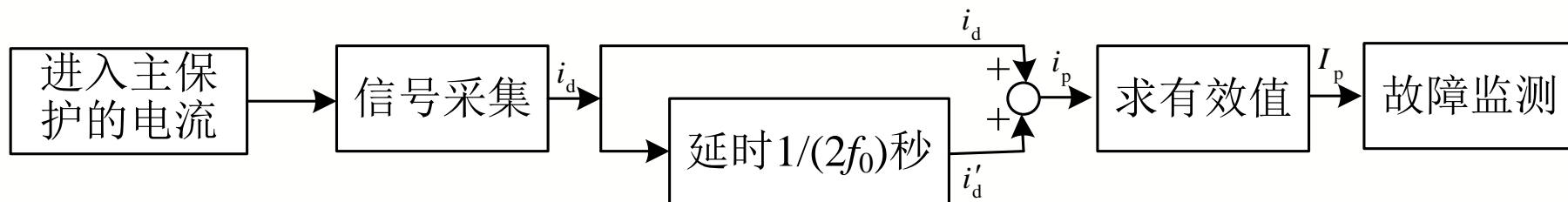
$$i'_s = \sum_{k=1,3,\dots} I_{sk} \cos k(\omega_0 t + \varphi_{sk} + \pi) + \sum_{\substack{k=1/P, 2/P, \dots \\ k \neq 1, 3, \dots}} I_{sk} \cos k(\omega_0 t + \varphi_{sk} + \pi)$$

$$\begin{aligned} i_p = i_s + i'_s &= \sum_{\substack{k=1/P, 2/P, \dots \\ k \neq 1, 3, \dots}} I_{sk} \cos k(\omega_0 t + \varphi_{sk}) + \sum_{\substack{k=1/P, 2/P, \dots \\ k \neq 1, 3, \dots}} I_{sk} \cos k(\omega_0 t + \varphi_{sk} + \pi) \\ &= \sum_{\substack{k=1/P, 2/P, \dots \\ k \neq 1, 3, \dots}} 2I_{sk} \cos(k\pi/2) \cdot \cos[k(\omega_0 t + \varphi_{sk}) + k\pi/2] \end{aligned}$$

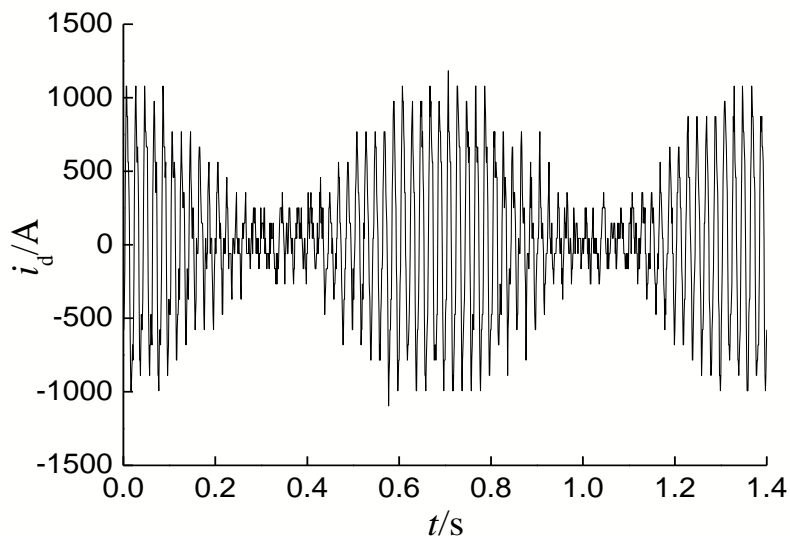
对正常运行时存在的基波及奇数次不平衡电流可**完全滤除**， i_p 中仅含故障分量。该方案对汽轮发电机（故障量为偶数次谐波）也有效！



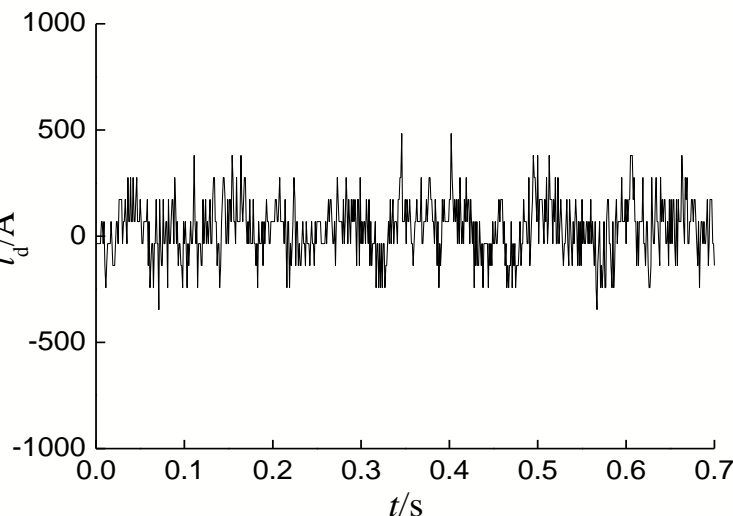
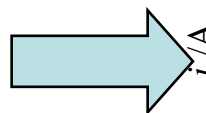
◆ 考虑固有不平衡电流影响的灵敏监测方案



▲ 彭水发电机:



有效值: **432.6A**



有效值: **116.5A**



◆ 考虑固有不平衡电流影响的灵敏监测方案

随短路匝数近似线性增加

彭水发电机励磁绕组不同匝数短路时，进入不完全裂相横差保护的
不平衡电流经移相叠加处理后的稳态有效值

短路匝数	1	2	3	4	5	6	7	8
不平衡电流有效值/A	52.6	107.5	163.4	219.8	271.5	326.6	380.2	436.0

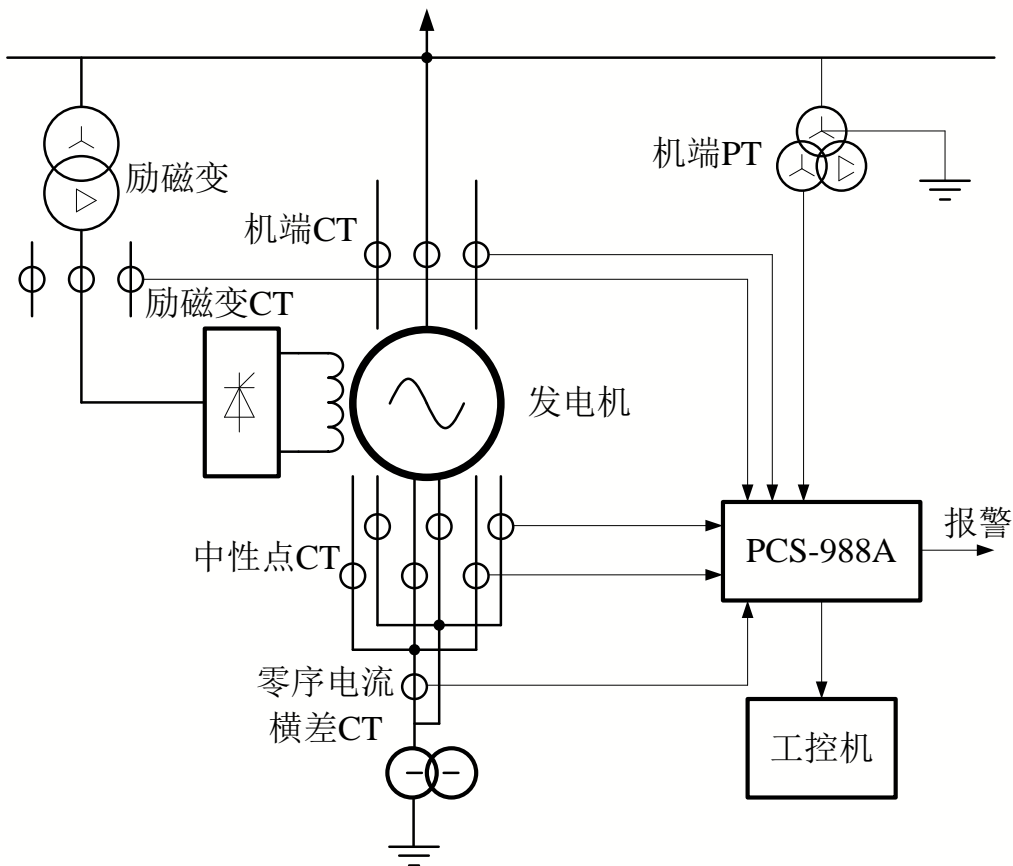
短路4匝时（总匝数为1190）的灵敏系数：

$$k_{sen} = 219.8 / (1.2 \times 116.5) = 1.57$$

相比移相叠加前能灵敏监测的**11匝**而言，监测范围得到了显著的提高。



◆ 监测装置的研发与测试



PCS-988A的产品部署视图

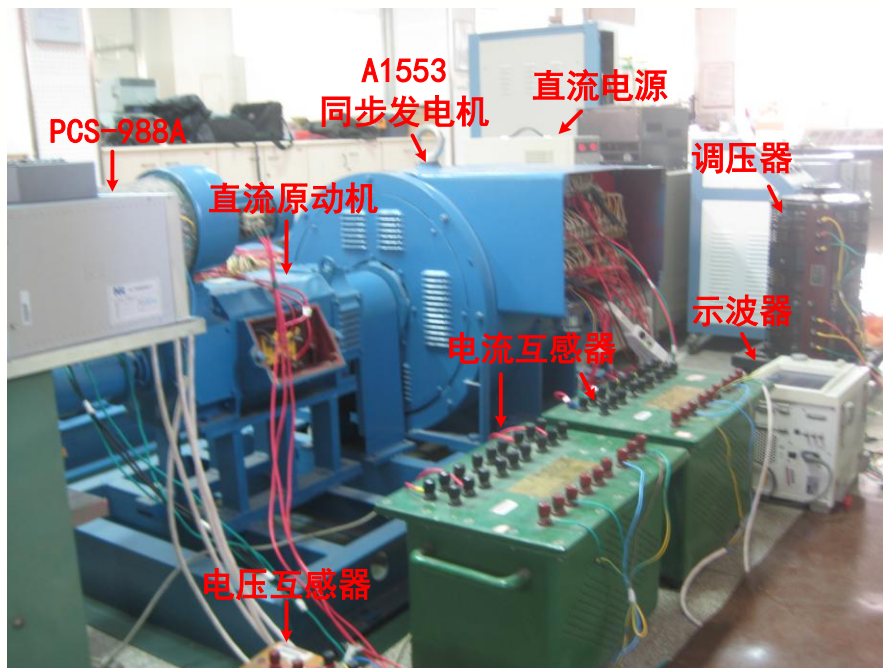
PCS-988A发电机励磁绕组匝间故障监测装置
检测发电机定子绕组分支（组）CT电流，通过计算定子不平衡电流的有效值，实现发电机励磁绕组匝间故障的监测。



北京交通大学
BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY

转子匝间短路故障的研究进展

◆ 监测装置的研发与测试



动模实验系统实物图



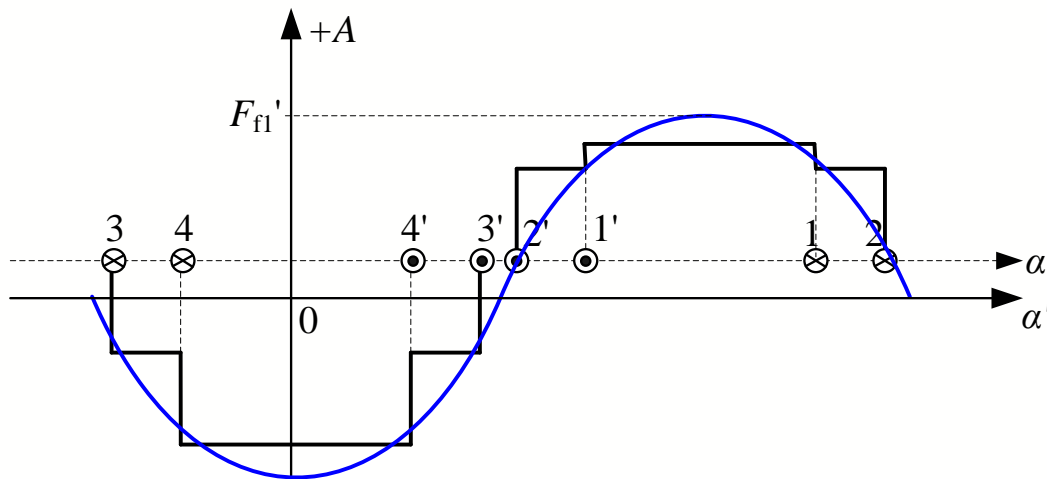
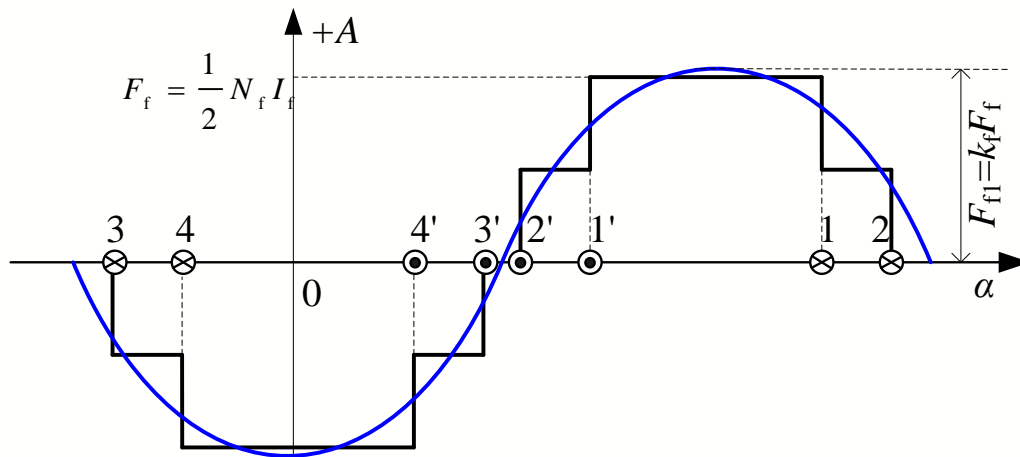
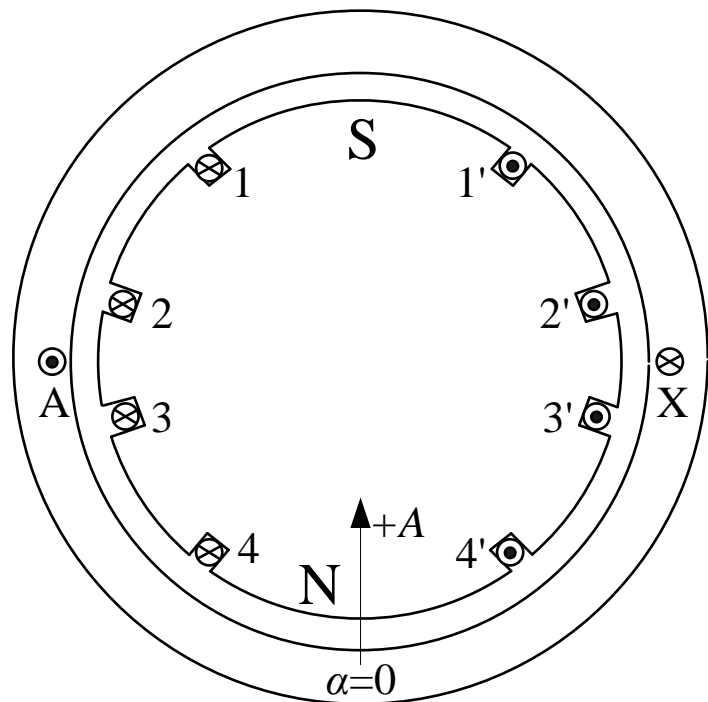
转子匝间短路故障的研究展望

- 如何实现对无分支电流互感器发电机的灵敏监测？
- 如何进一步提高监测的灵敏性？
- 如何实现基于在线监测实现故障的定位？



无分支（组）CT安装条件的发电机怎么办？

基于励磁磁势计算的同步发电机转子匝间短路故障监测方法



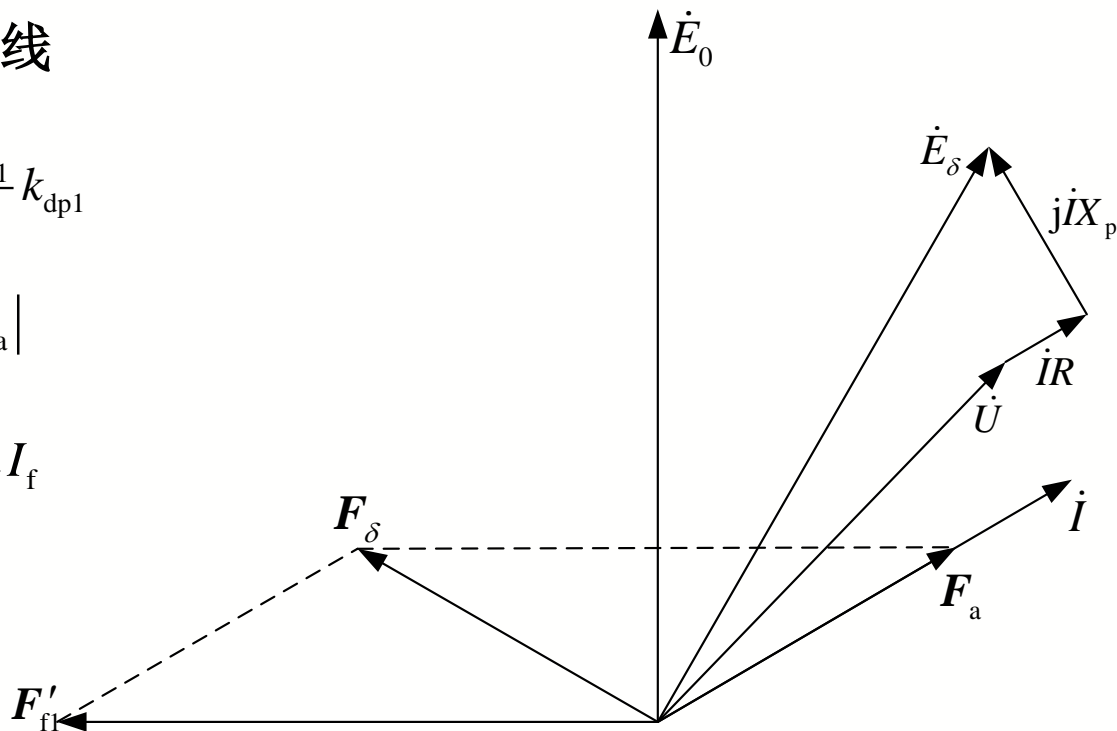
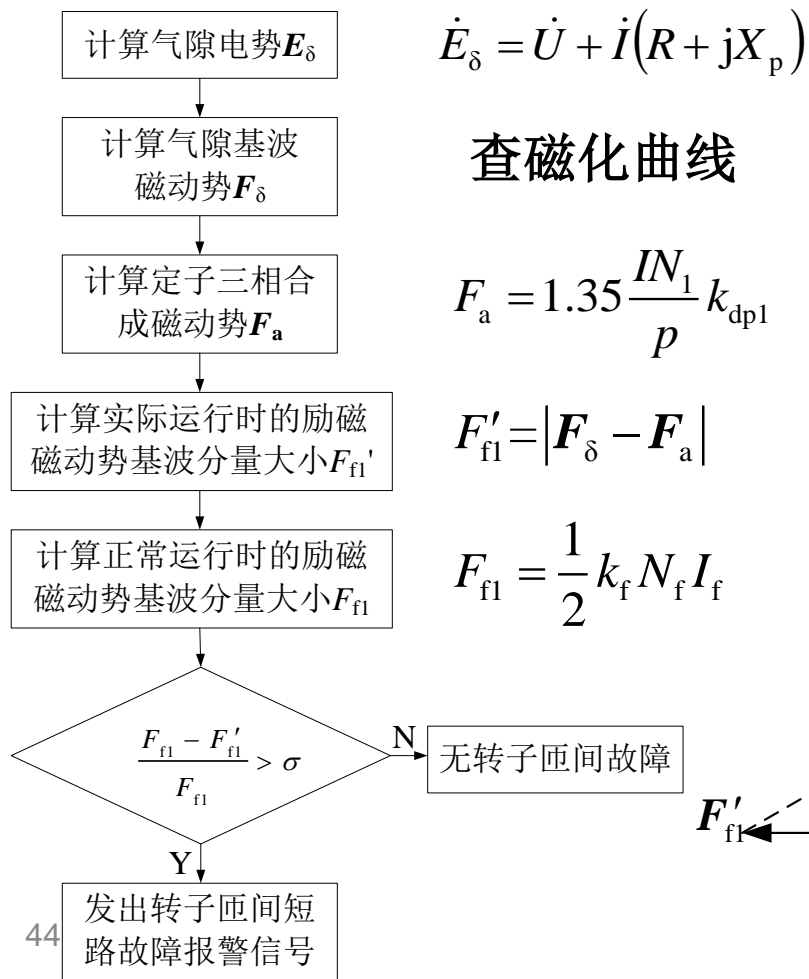
正常时: $F'_{fl} = F_{fl}$

故障时: $F'_{fl} < F_{fl} = \frac{1}{2} k_f N_f I_f$



无分支（组）CT安装条件的发电机怎么办？

基于励磁磁势计算的同步发电机转子匝间短路故障监测方法





无分支（组）CT安装条件的发电机怎么办？

基于励磁磁势计算的同步发电机转子匝间短路故障监测方法

表 1 A1552 样机转子匝间短路故障前后实验数据

工况	故障前正常运行				故障后			
	I_a/A	U_a/A	$\varphi/^\circ$	I_f/A	I_a/A	U_a/A	$\varphi/^\circ$	I_f/A
4-6 短路	13.67	183.16	68.18	5.29	13.55	183.0	69.06	6.32
2-4 短路	13.67	183.33	66.99	5.29	11.00	182.6	62.49	8.66

表 2 A1552 样机转子匝间短路故障前后励磁磁势的比较

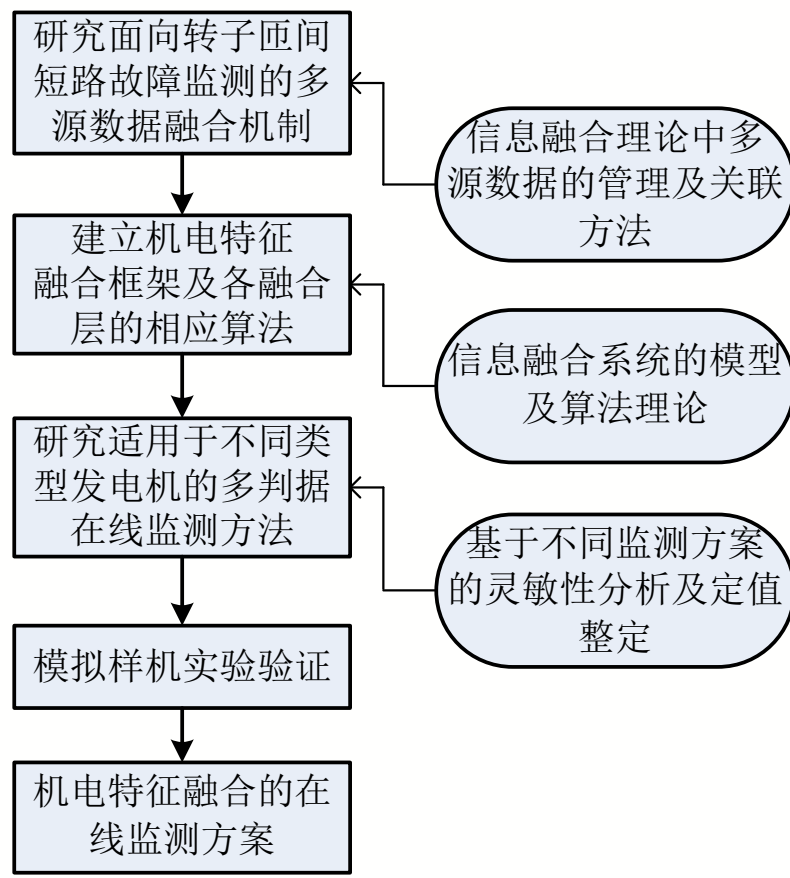
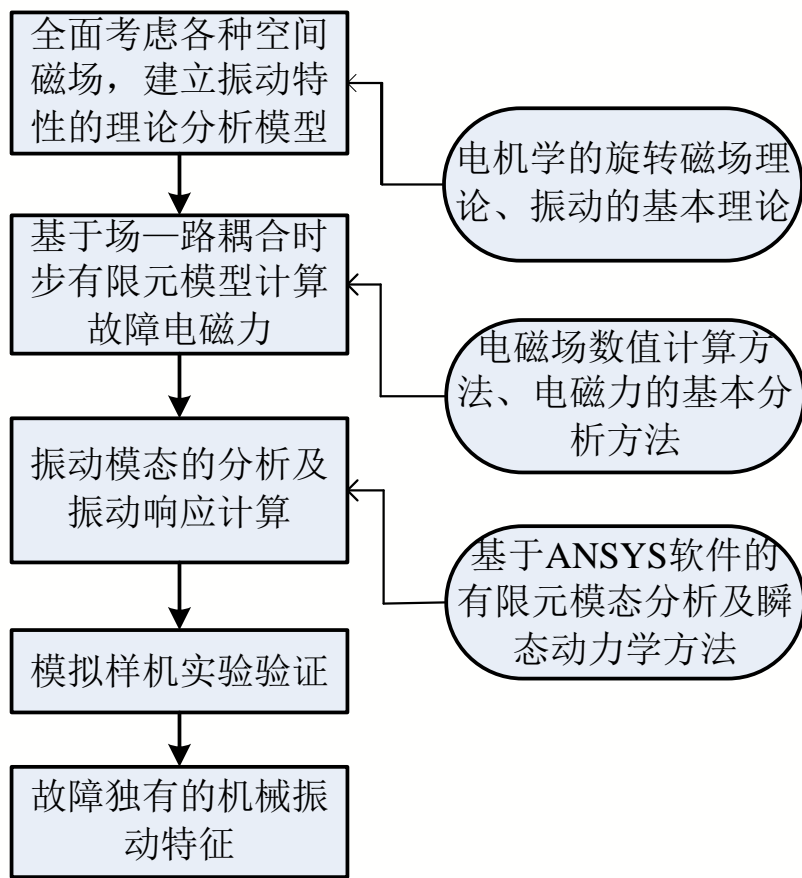
工况	故障前正常运行			故障后		
	$F_{f1}'/安匝$	$F_{f1}/安匝$	偏差/%	$F_{f1}'/安匝$	$F_{f1}/安匝$	偏差/%
4-6 短路	1735.2	1789.3	3.0	1731.8	2137.7	19.0
2-4 短路	1731.8	1789.3	3.2	1589.8	2929.2	45.7



如何提高在线监测的灵敏性？

目标：死区小、高灵敏、高可靠！

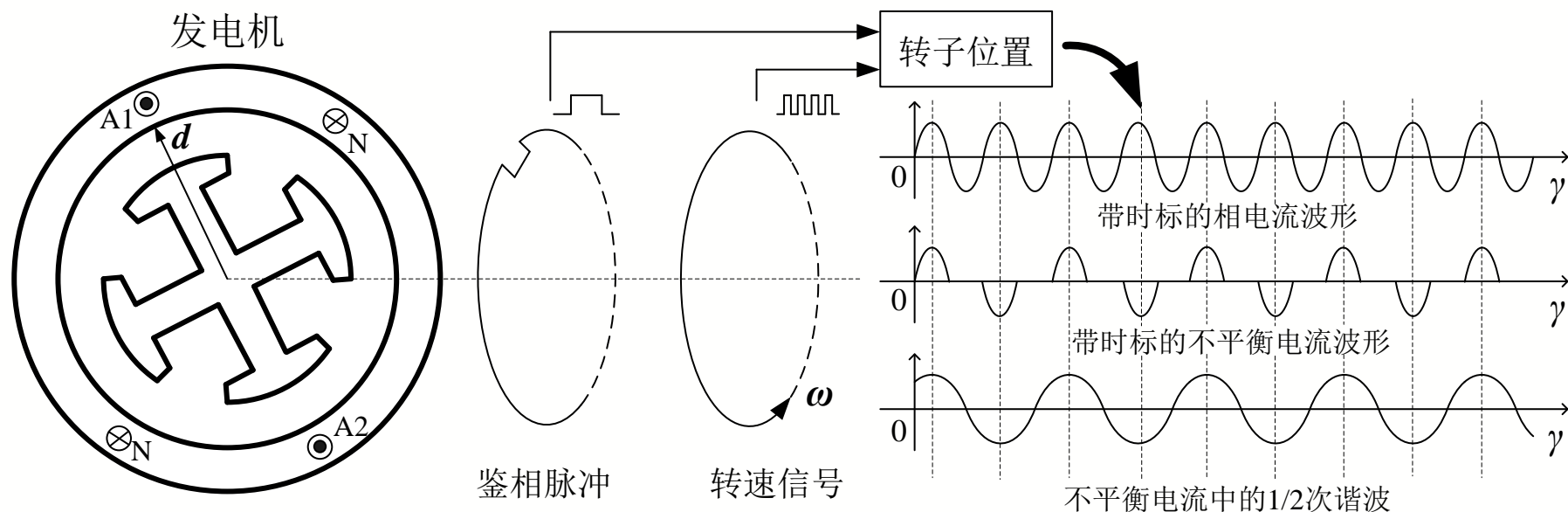
方案：机电特征融合的转子绕组匝间短路故障在线监测





如何实现故障的在线定位?

- 水轮发电机: 定磁极号
- 汽轮发电机: 定槽 (在有分支电流CT的条件下)





北京交通大学

BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY

欢迎提问!

手机: 13811267439

办公: 01051688443

邮箱: llhao@bjtu.edu.cn