



100MW及以下水轮发电机主保护 配置方案的优化设计

清华电机系大机组保护研究所

桂林，李荷婷，王祥珩

1 国内水电建设已进入又一个发展高潮：

- **3×150台**：据中国水力发电工程学会的统计，到2020年我国**700MW**水轮发电机的装机数将超过**150台**，**300MW**抽水蓄能机组的装机数也将超过**150台**，**3~6万kW**的**中小型机组**预计也有**150台**。

已建成和正在建设的大型水电站

电站名称	三峡	龙滩	拉西瓦	小湾	构皮滩	金安桥	锦屏一级和二级	糯扎渡	向家坝	溪洛渡	白鹤滩
装机数	32	9	6	6	5	4	14	9	8	18	16
单机容量 (MW)	700	700	700	700	600	600	600	650	800	770	1000

已建成和正在建设的大中型抽水蓄能电站（国产化）

电站名称	仙游	清远	仙居	洪屏	溧阳	琼中	绩溪	敦化	丰宁
装机数(台)	4	4	4	4	6	3	6	4	12
单机容量 MW)	300	320	375	300	250	200	300	350	300

十三大水电基地分布图

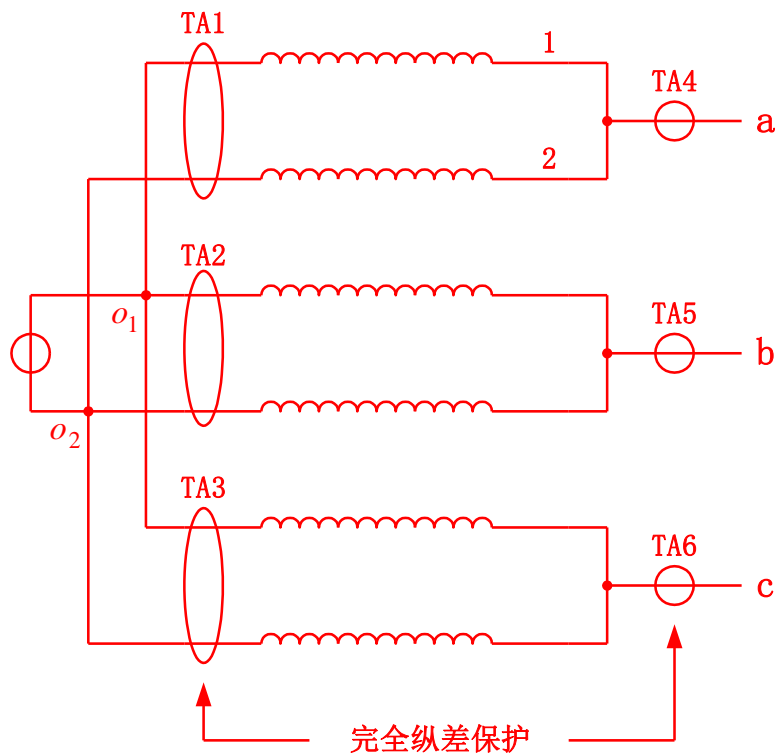


装机容量(总规模): 277960 MW

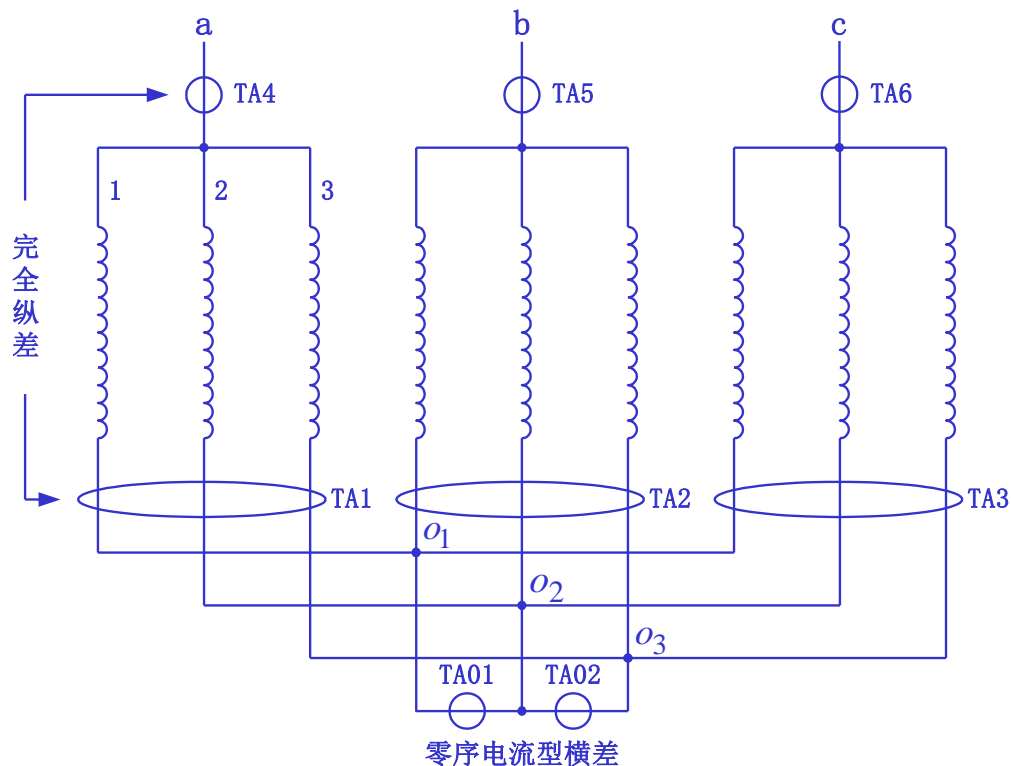
◆统计口径为大中型电站(装机容量50MW及以上)

2 大型水轮发电机主保护的傳統設計方法：

零序電流型橫差保護



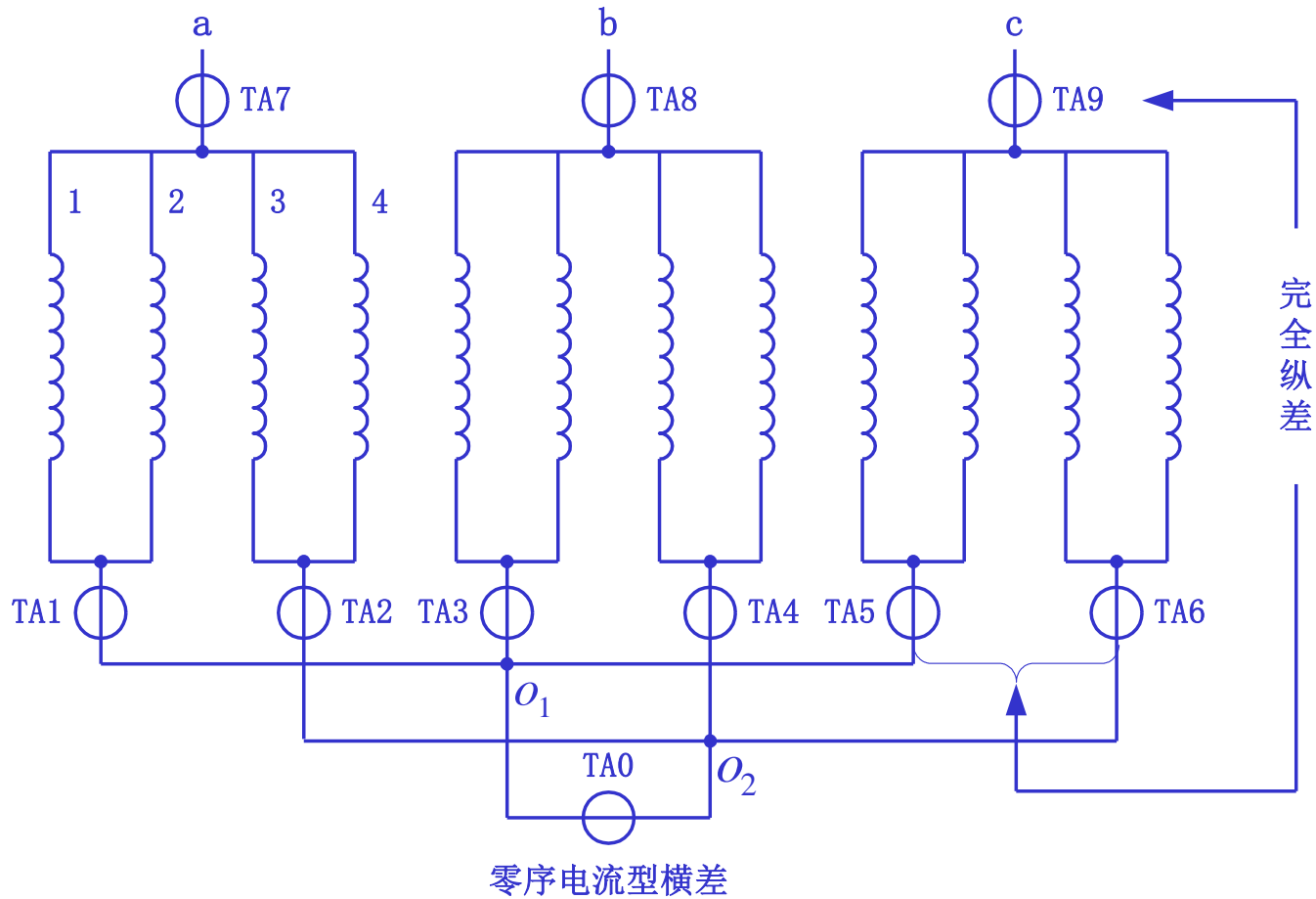
a=2



a=3

照搬相同容量或分支數發電機主保護方案的現象比比皆是！

每相4分支发电机主保护的傳統設計方法:



托口水电站 (4×200MW) 发电机主保护方案 (相邻连接, 12-34)

大型水轮发电机主保护的传统设计方法（续前）：

- 纵差保护

用机端金属性两相短路来校验纵差保护的灵敏度，这种校验工作**形同虚设**，因为灵敏系数 $K_{sen} \geq 1.5$ 总是满足。

- 横差保护

机端两相短路时理论上横差保护没有动作电流，根本**无法校验**其灵敏度 K_{sen} 。

无法给大型发电机组提供高质量的保护！

大型水轮发电机主保护的定量化设计——在全面的内部短路分析计算的基础上，经定量化的设计过程来完成：

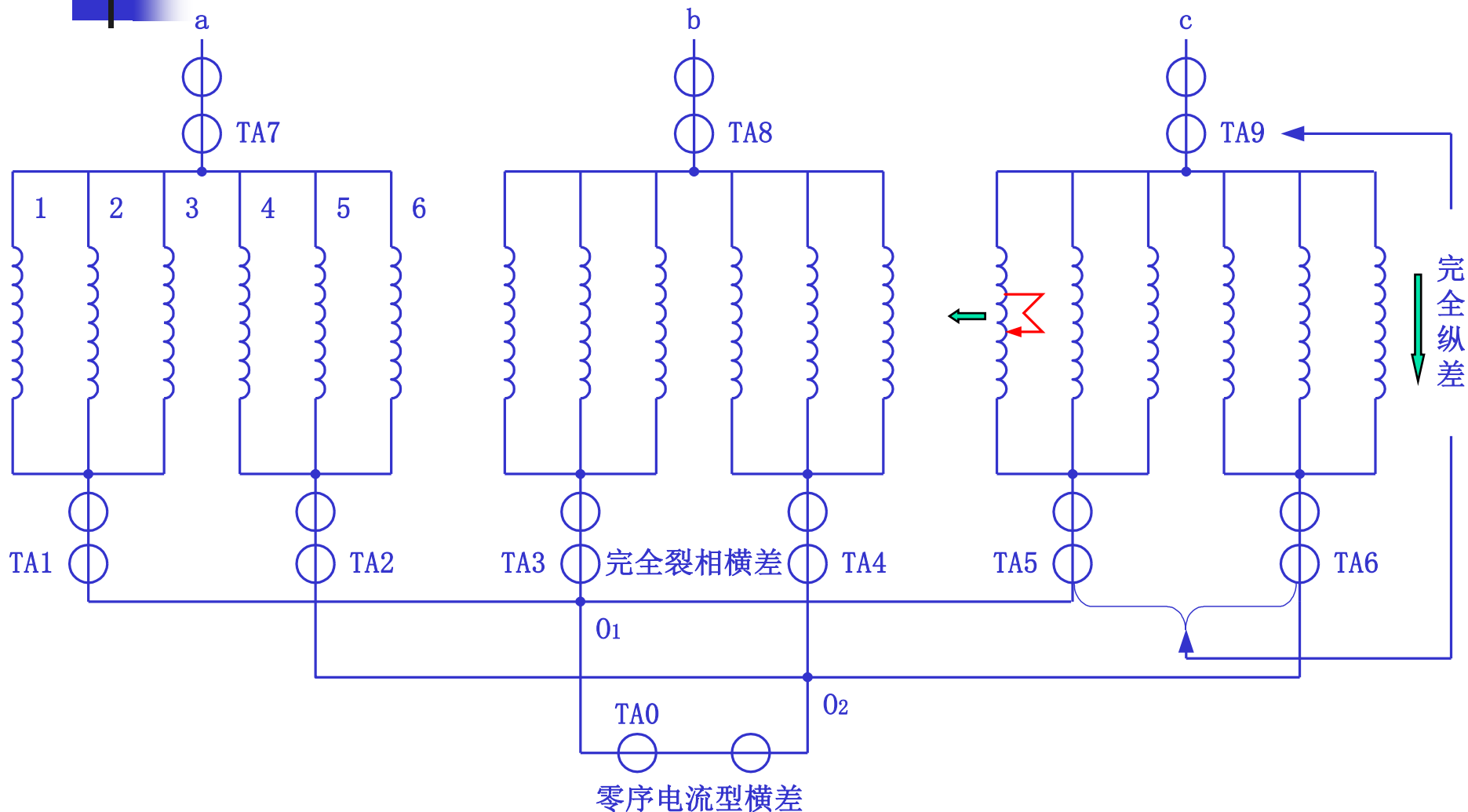
- 调查发电机的故障特点（发电机绕组形式不同，故障特点也各异）；
- 运用“多回路分析法”，通过全面的内部短路仿真计算，得到发电机故障时每一支路电流的大小和相位（包括两中性点间的零序电流的大小），在此基础上可以清楚认识各种主保护方案的性能；
- 以电气一次和二次专业共同关心的问题——发电机中性点如何引出？如何进行分支的分组和CT的配置？为突破口，在定量分析的基础上确定最终的主保护配置方案，且兼顾设计的科学性和实用性。



并在发电机定子绕组内部故障时灵敏动作：

- 某320MW水轮发电机轻微分支开焊时（2001年），某300MW水轮发电机定子绕组下端部匝间短路时（2002年），某300MW水轮发电机（消弧线圈接地）由定子单相接地故障（空气冷却器漏水）发展为相间短路故障时（2008年），
- 某36MW轴流转浆式水轮发电机（即将增容改造、消弧线圈接地）由定子单相接地故障发展为匝间短路故障时（2013年），
- 某340MW水轮发电机定子绕组上端部相间短路时（上导冷却水管路管接头崩裂，冷却水流出至转子上平面并飞溅至定子线棒，2013年），
- 某360MW水轮发电机定子绕组下端部相间短路时（空气冷却器排水管波纹管破裂喷水，2013年），
- 某800MW水轮发电机定子绕组匝间短路时（2012年）相关主保护均灵敏动作，**避免了故障的扩大，为发电机抢修和恢复供电赢得了时间。**

3 大型水轮发电机主保护定量化设计方案:



锦屏二级发电机内部故障主保护及全套TA配置推荐方案



4 100MW及以下水轮发电机主保护的优化设计：

- 随着中国水电“十二五规划”的逐步落实和中国水电“走出去”战略的加快实施，国内外水电领域出现了一批单机容量在100MW及以下的中小型机组，受各种客观条件的制约，其发电机主保护方案的设计无法都采用基于全面内部故障分析的定量化设计方法，发电机主保护的设计一般都沿用传统设计方案——完全纵差保护+零序电流型横差保护。

- 通过对高转速那邦发电机（600rpm）和低转速Soubre发电机（107rpm）

内部故障特点的分析和主保护定量化设计结果的对比，并结合已有的300多

台大中型水轮发电机主保护的设计经验，发现：



有选择性地沿用传统设计方案，无需进行定量化设计：

- 对于高转速中小型水轮发电机，无论其定子绕组是采用叠绕组还是波绕组，均可沿用传统设计方案，无需增设分支TA。
- 对于低转速中小型水轮发电机，若其定子绕组采用叠绕组，需在传统设计方案（完全纵差+零序电流型横差保护）的基础上增设裂相横差保护，以改善对于小匝数同相同分支匝间短路的灵敏性。



谢谢大家！



个人简介:

1974年出生，本、硕就读于合肥工业大学，1999年考入清华大学攻读博士学位（师从王维俭和王祥珩教授），2004年博士毕业后留电机系工作至今，现为电机系副教授。

研究方向为大机组保护及故障分析，先后对三峡、拉西瓦、小湾技改、向家坝、溪洛渡、锦屏一级/二级、糯扎渡、金安桥、梨园、观音岩等53座水电站的200多台发电机进行了内部故障的分析和主保护的设计，并完成了三峡右岸（ $12 \times 700\text{MW}$ ）、三峡左岸VGS机组技改（ $6 \times 700\text{MW}$ ）、二滩技改（ $6 \times 550\text{MW}$ ）、托克托（ $8 \times 600\text{MW}$ ）、广州抽水蓄能（ $8 \times 300\text{MW}$ ）、宁德核电（ $4 \times 1150\text{MW}$ ）等30个电厂150多台发变组保护定值的整定和审查工作。



联系方式:

桂林：北京市清华大学电机系（100084）

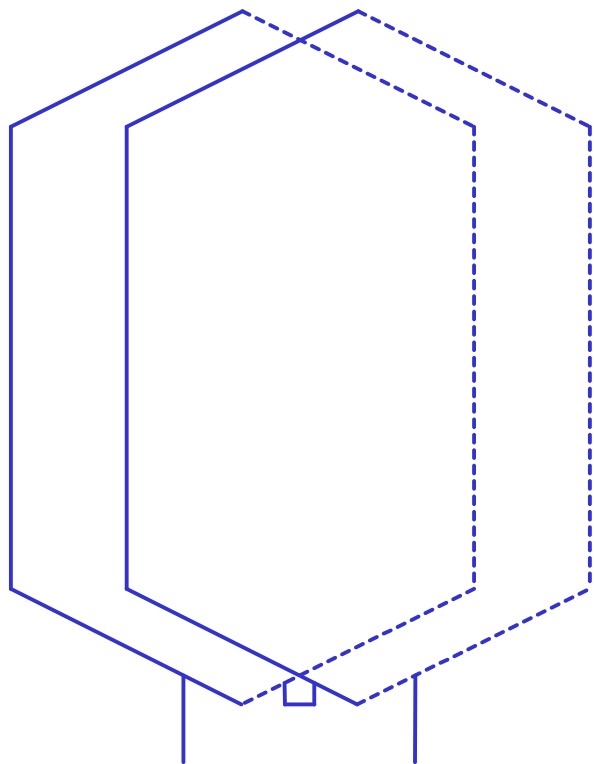
电话：010-62772340

手机：136-51238096

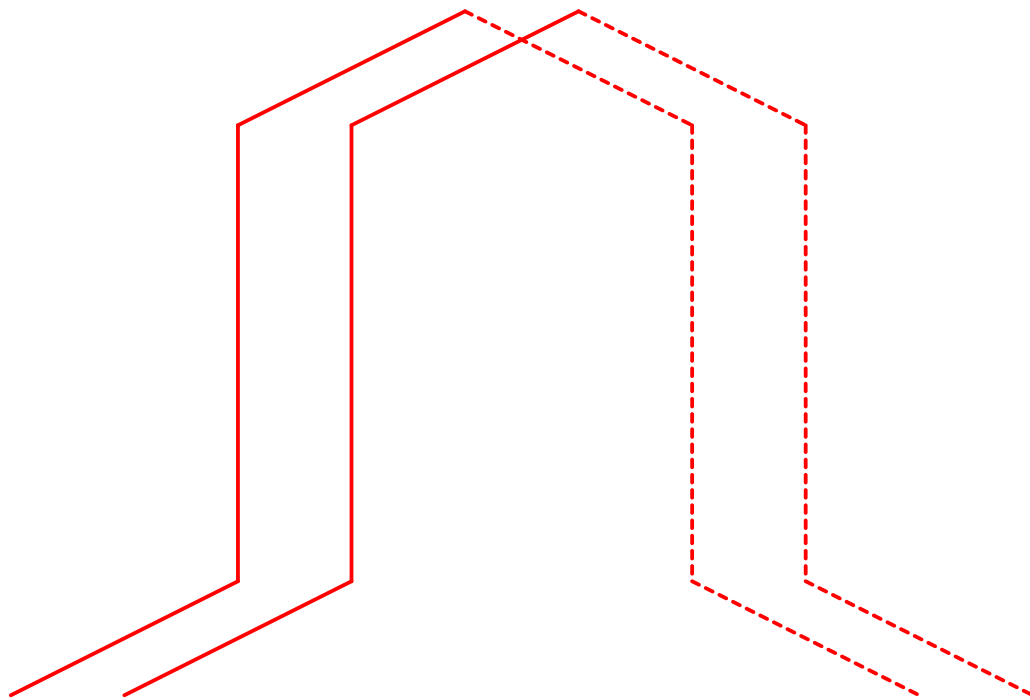
Email: guilin99@mails.tsinghua.edu.cn

guibinyu2010@163.com

大型发电机的定子绕组形式:

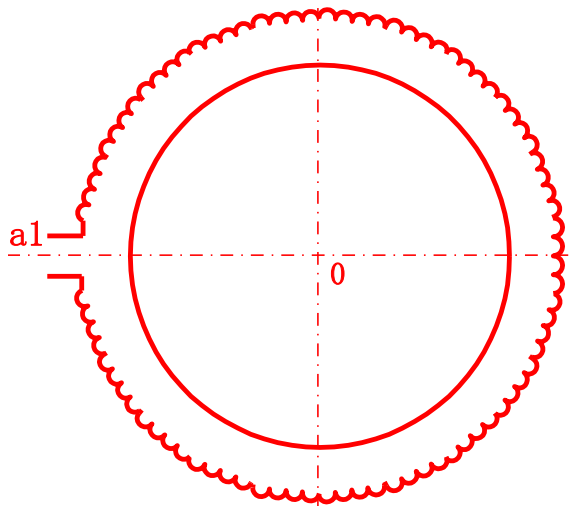


叠绕

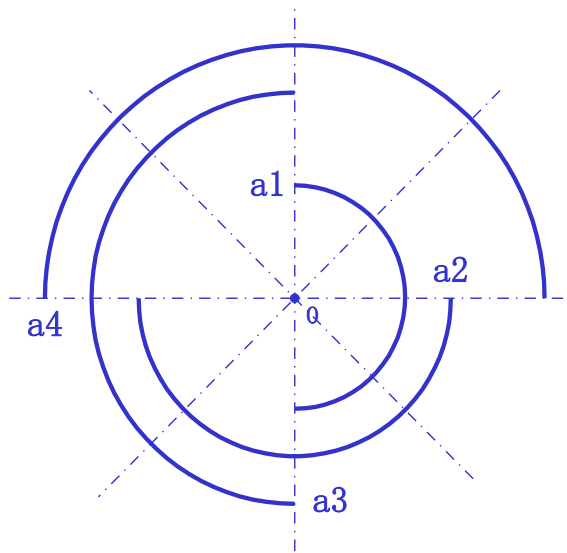


波绕

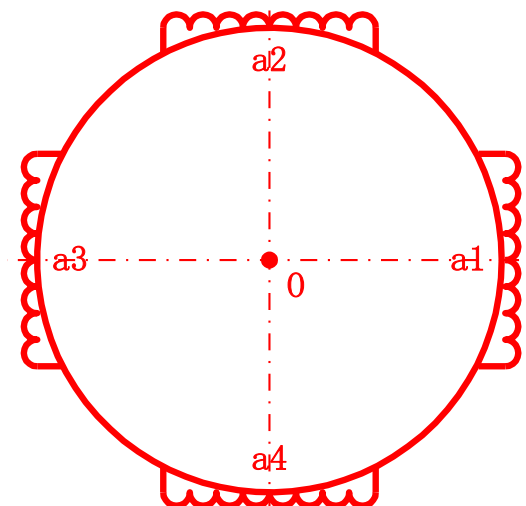
大型水轮发电机（以 $a=4$ 为例）并联支路布置示意图：



“全波绕组”

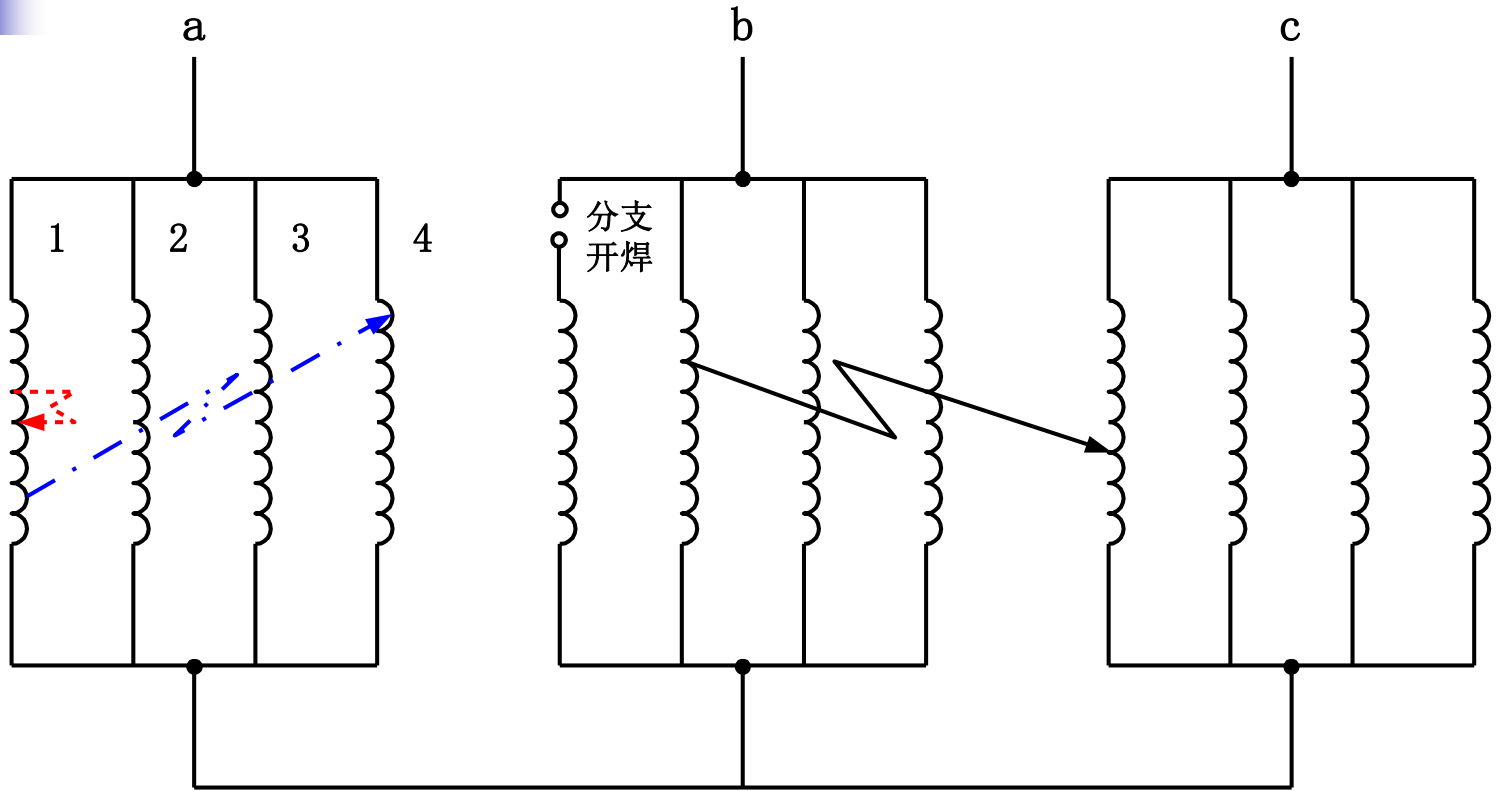


“半波绕组”



“叠绕组”

发电机定子绕组内部故障分类:



定子绕组内部故障可分为三类

- 匝间短路
 - 相间短路
 - 分支开焊
- 同相同分支
- 同相不同分支



主保护配置方案定量化设计的多目标体现在：

- 设计的科学性

各种主保护方案的取舍依据、主保护配置方案的性能（保护死区的大小、在一块屏上对多少种内部故障有两种及以上原理不同的主保护灵敏动作）等

- 设计的实用性

(1) 发电机中性点侧的引出方式及分支TA的数目和位置——电机设计制造的难度以及TA的安装条件；

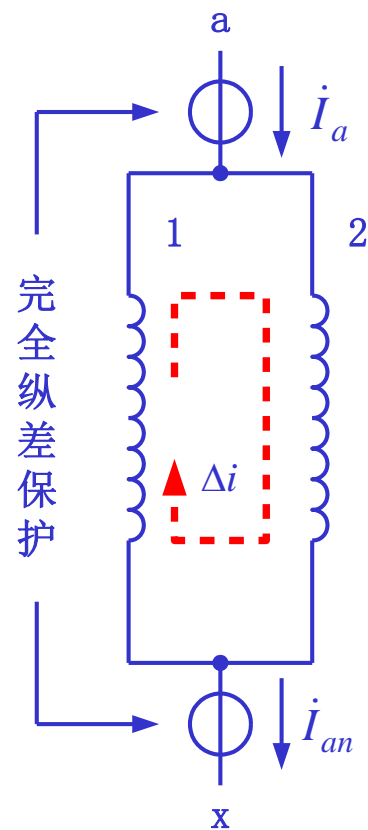
(2) 保护方案是否成熟并有丰富的运行经验；

(3) 保证电机制造和保护装置生产厂家后续工作的开展。

- 在完成相同的保护功能的前提下，应尽量减少主保护配置方案所需的硬件投资和保护方案的复杂程度！

“一纵一横”的基本格局：

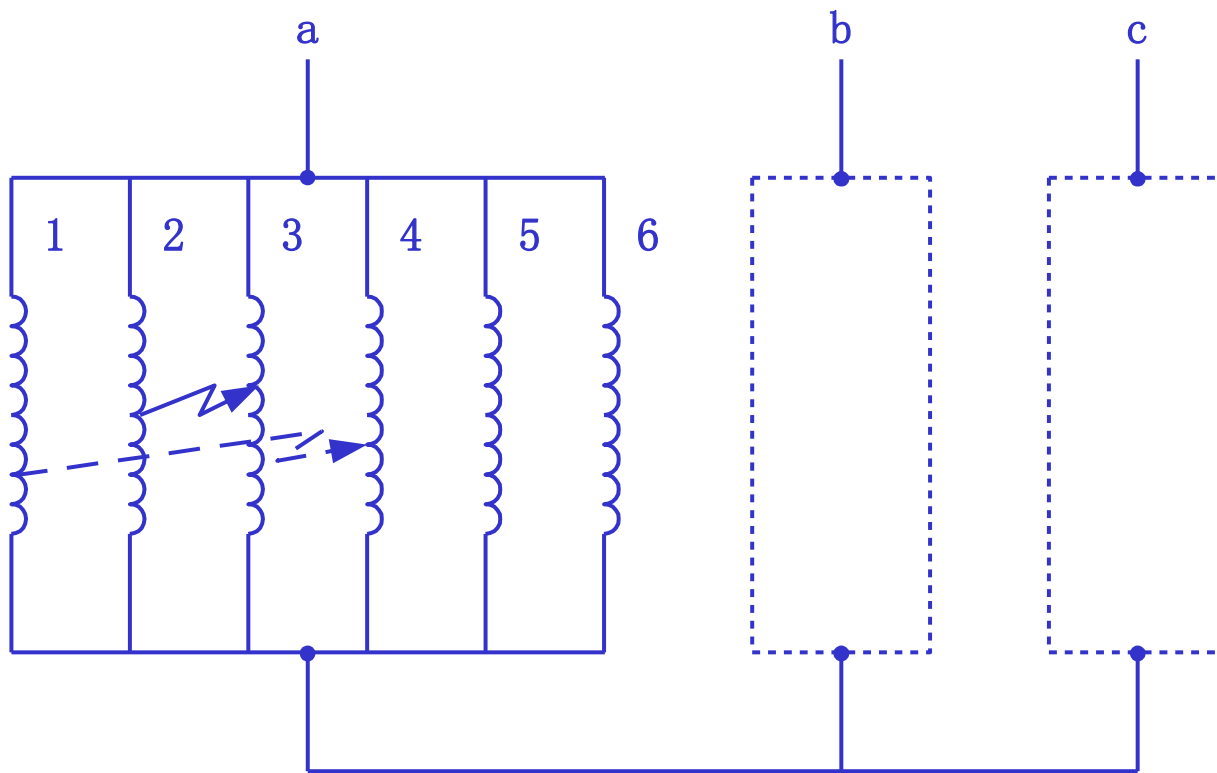
- 在主保护配置方案中保留一套完全纵差保护，**一方面面对所有的相间短路均能灵敏动作**，对于另一方面有助于叠绕组或“半波绕组”的水轮发电机由偏心振动引起事故的分析——**当机组状态监测装置显示上导轴承的摆度及气隙同心度等超标，横差保护动作完全而纵差保护未动作（不反应分支不平衡电流）时，则可判断事故为转子偏心振动引起，从而大大减少了故障检修的时间。**



- 差动电流： $I_d = \left| \dot{I}_a - \dot{I}_{an} \right|$

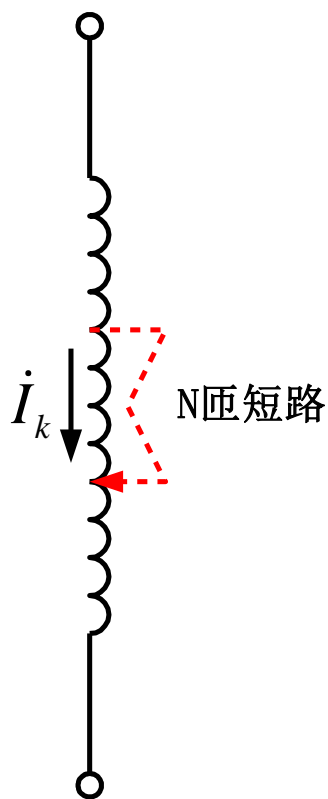
- 相近电位的同相不同分支匝间短路：

通过分支的合理分组将数值较大的短路回路电流引入差动回路中，以提高裂相横差保护的灵敏度。



• 小匝数同相同分支匝间短路（短路匝比小于5%）：

确实为各种主保护方案共同的保护死区（运行实践也已证明），并且短路匝比（短路匝数/每分支线圈数）越小，短路匝电流反而越大，对发电机的危害也越大，但其发生的几率也越低。



$$I_k \propto E / X$$

$$E \propto N$$

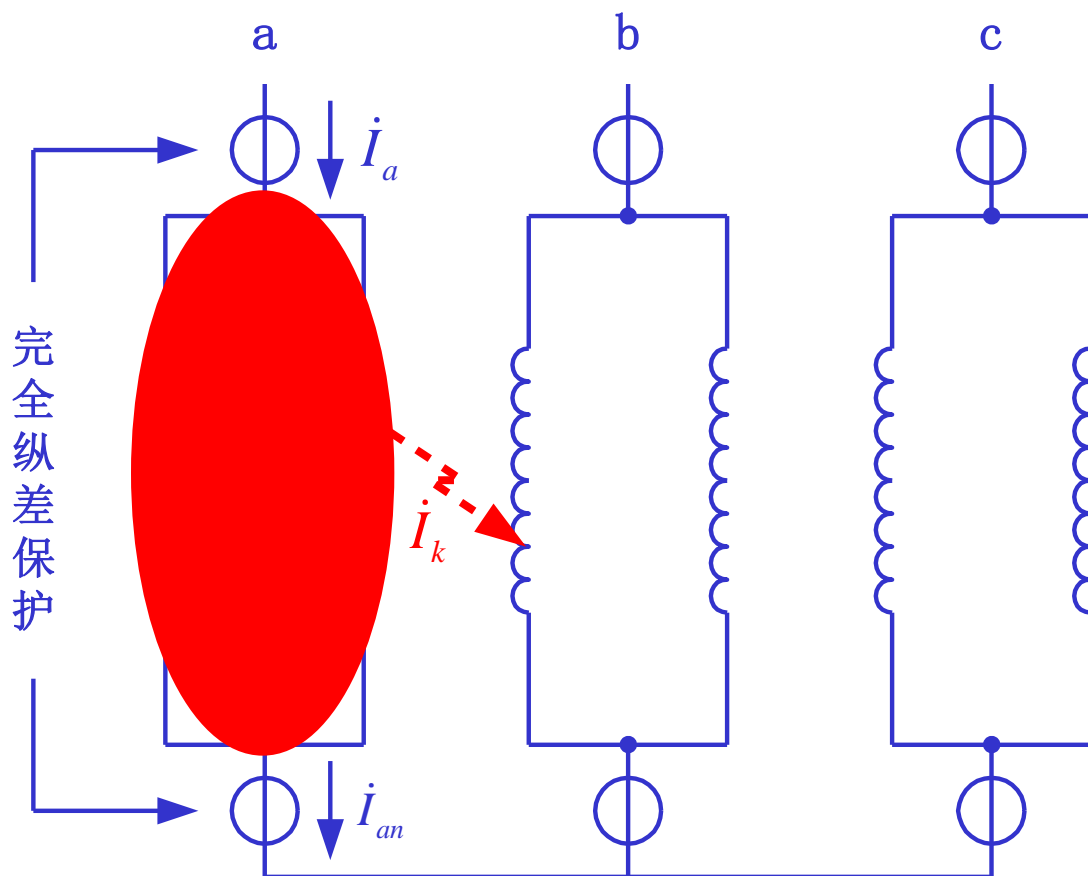
$$X \propto N^2$$

（集中的线圈）

$$\Rightarrow I_k \propto N / N^2 = 1 / N$$

- 在掌握了水轮发电机常用定子绕组形式（叠绕、半波和全波绕组）与内部故障特点关系的基础上，通过合理选择定子绕组形式，在绕组设计选型阶段就力求减少继电保护的動作死区。

纵联差动保护的构成（1908年出现了差动继电器）：



- 差动电流：

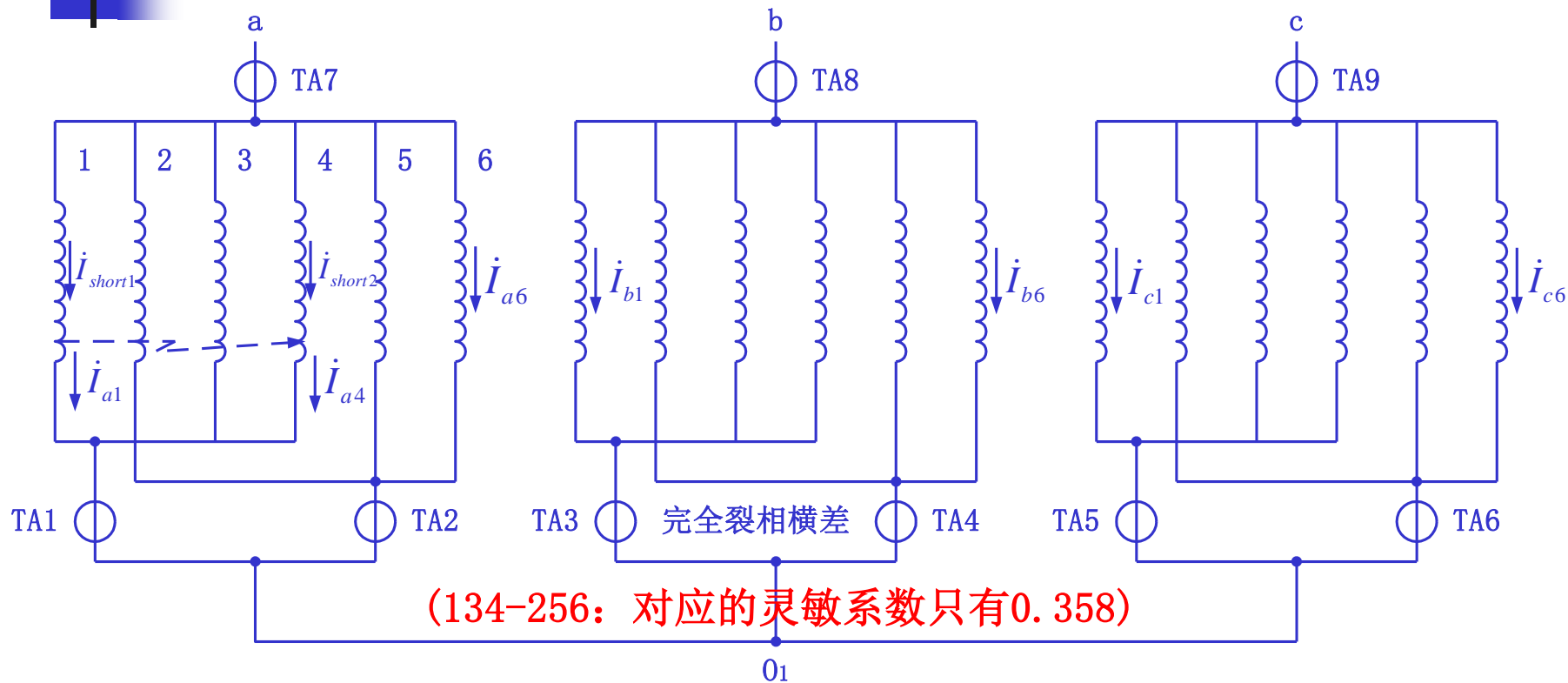
$$I_d = |\dot{I}_a - \dot{I}_{an}|$$

- 制动电流：

$$I_{res} = \frac{1}{2} |\dot{I}_a + \dot{I}_{an}|$$

灵敏、可靠、快速、选择性好！

a相第1支路第22号线圈的上层边和a相第4支路第22号线圈的下层边发生端部同相不同分支匝间短路，两短路点距中性点位置相同。



(134-256: 对应的灵敏系数只有0.358)

$$\dot{I}_{a1} = 11034.16 \angle -142.45^\circ$$

$$\dot{I}_{a2} = 510.89 \angle 35.21^\circ$$

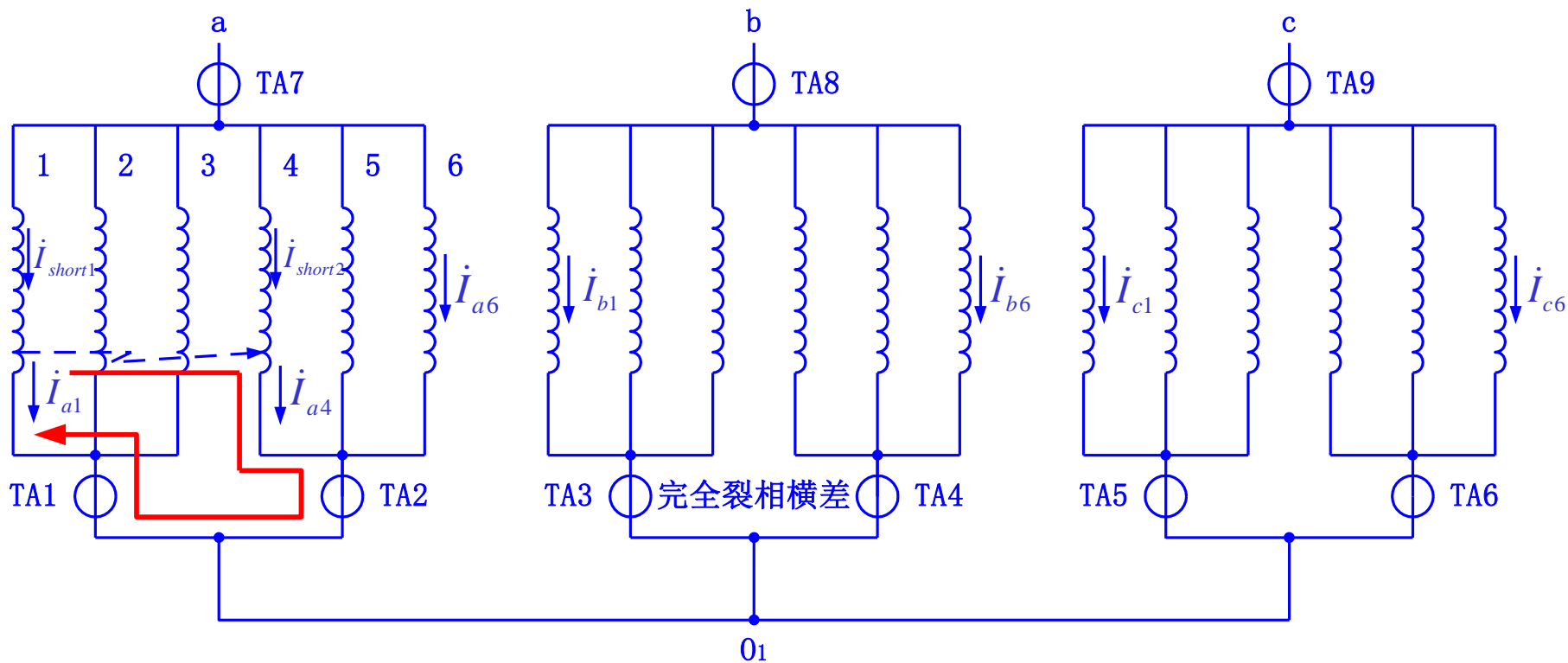
$$\dot{I}_{a3} = 324.18 \angle -127.32^\circ$$

$$\dot{I}_{a4} = 11103.19 \angle 38.06^\circ$$

$$\dot{I}_{a5} = 275.30 \angle 32.62^\circ$$

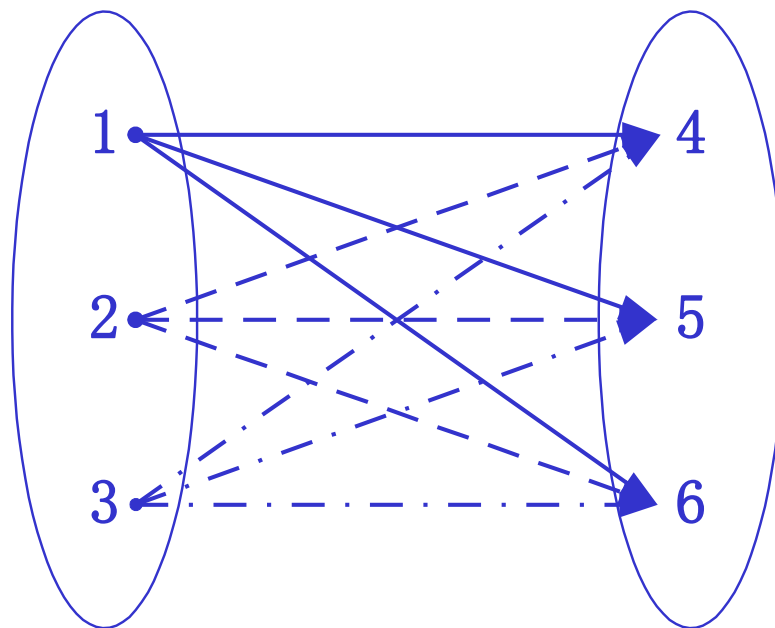
$$\dot{I}_{a6} = 548.56 \angle -131.57^\circ$$

将两个短路分支分在不同的支路组中：此时数值较大的短路回路电流被引入差动回路中。



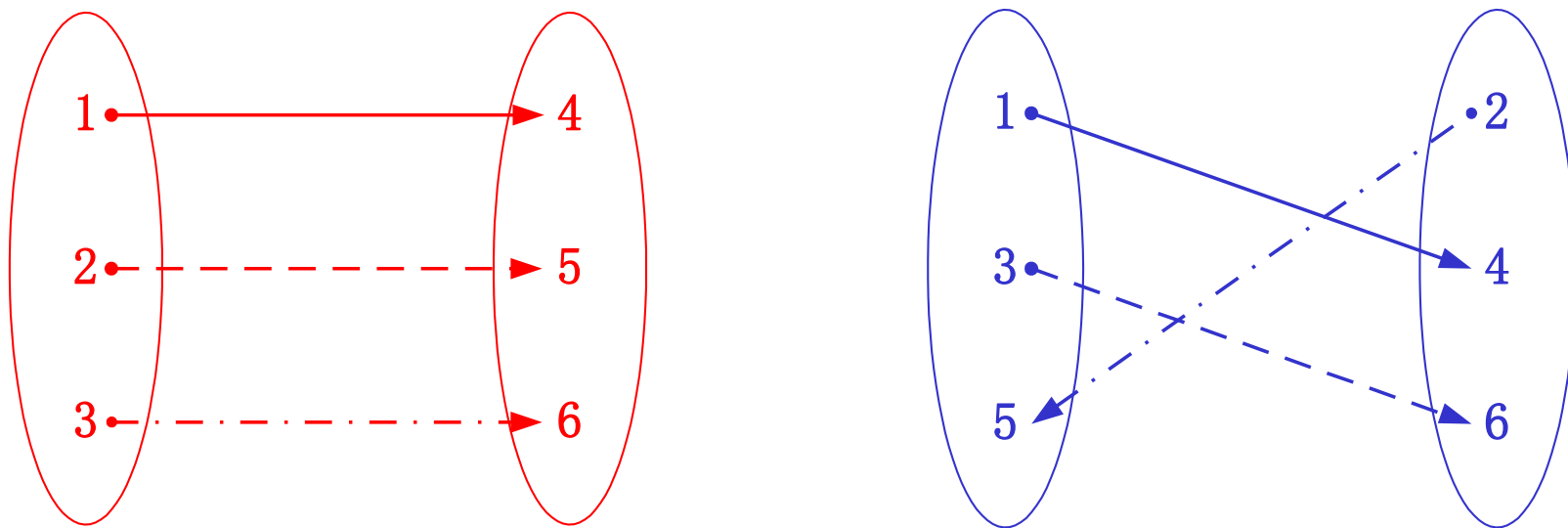
(123-456: 对应的灵敏系数高达15.017)

锦屏二级发电机发生在相近电位的同相不同分支匝间短路的分布特点：



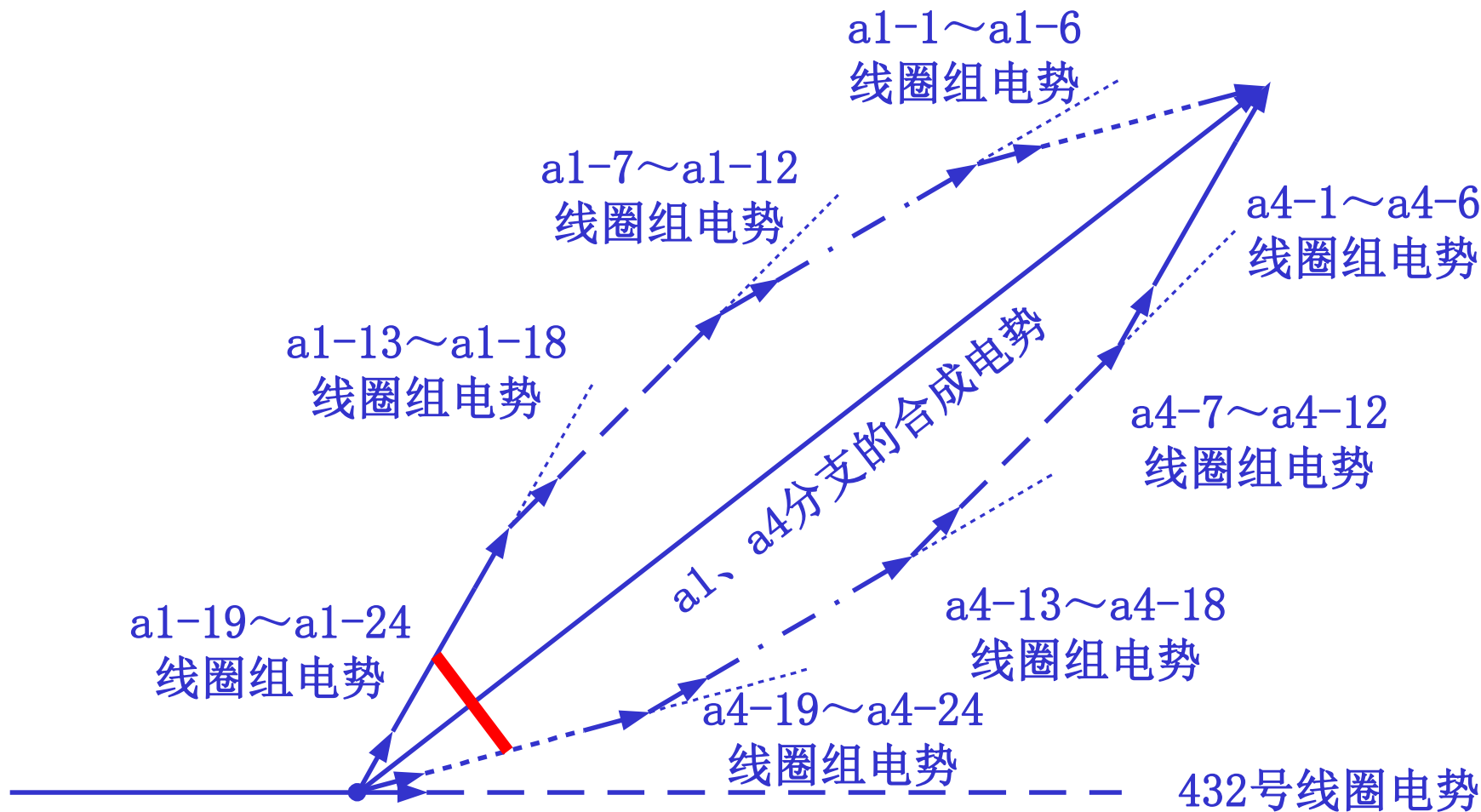
从上图可以看出，采用“123-456”这种分支引出方式时，发生在相近电位的同相不同分支匝间短路的两个故障分支始终被分在不同的支路组中，从而保证了对应的主保护方案能够灵敏动作，因为此时数值比较大的短路回路电流被引入差动回路中。

而采用其它分支引出方式时，无论是“相邻连接”还是“相隔连接”，均无法保证相近电位同相不同分支匝间短路的两个故障分支始终被分在不同的支路组中，所以说锦屏二级发电机实际可能发生的内部短路特点决定了采用“相邻连接（123-456）”的主保护配置方案的动作死区最小，这也与统计结果相吻合！



锦屏一级发电机端部故障中相近电位的同相不同分支匝间短路分布示意图

根据锦屏二级发电机的定子绕组连接图，a1和a4分支的线圈排列并不相同，这样一来上图所示两短路点之间就存在电动势差，如下图中红色粗体实线所示：



那邦发电机内部特点的分析：

60MW，10极，10.5kV，3770.45A，分数槽，半波绕组。

那邦发电机156种同槽故障

同相同分支 匝间短路	同相不同分支 匝间短路	相间短路 48 种	
		分支编号 相同	分支编号 不同
0	108	48	0

那邦发电机4524种端部故障

同相同分支匝间短路 630 种				同相	相间短路 3192 种	
短路 匝数	5 匝	6-21 匝	26 匝	不同分支 匝间短路	分支编 号相同	分支编 号不同
故障数	120	504	6	702	1572	1620

同槽和端部故障中均不存在小匝数同相同分支匝间短路！

Soubre发电机内部特点的分析:

90MW, 56极, 10.5kV, 5822A, 分数槽, 叠绕组。

Soubre发电机696种同槽故障

同相同分支匝间短路 420 种				同相	相间短路 240 种	
短路	2	3	4-7	不同分支	分支编	分支编
匝数	匝	匝	匝	匝间短路	号相同	号不同
故障数	88	68	264	36	120	120

Soubre发电机6429种端部故障

同相同分支匝间短路 948 种				同相	相间短路 5448 种	
短路	1	2-3	4-6	不同分支	分支编	分支编
匝数	匝	匝	匝	匝间短路	号相同	号不同
故障数	360	304	284	33	2720	2728

同槽和端部故障中小匝数匝间短路（短路匝比 $\leq 5\%$ ）所在比率高达11.5%!



大中型水轮发电机主保护定量化及优化设计经验：

- 采用叠绕组的高转速水轮发电机，譬如鲁德巴（ $2 \times 230\text{MW}$ ，20极）、瓦屋山（ $2 \times 130\text{MW}$ ，18极）、仙游抽蓄（ $4 \times 300\text{MW}$ ，14极）、清远抽蓄（ $4 \times 320\text{MW}$ ，14极）、仙居抽蓄（ $4 \times 375\text{MW}$ ，16极）、洪屏抽蓄（ $4 \times 300\text{MW}$ ，12极）和深圳抽蓄（ $4 \times 300\text{MW}$ ，14极）发电机，经定量化设计过程均取得了良好的保护性能，其主保护配置方案的不能动作故障率（不能动作故障数/内部故障总数）分别仅为0.27%、0.0%、0.08%、0.16%、0.27%、0.0%和0.17%。

大中型水轮发电机主保护定量化及优化设计经验（续前）：

- 采用波绕组的高转速水轮发电机也取得了良好的保护性能，譬如溧阳抽水蓄电站（ $6 \times 250\text{MW}$ ，20极）发电机主保护配置方案无保护死区。
- 采用叠绕组的低转速水轮发电机，即使采用与上述高转速水轮发电机相同的主保护配置方案，也难以取得良好的保护性能，譬如桥巩（ $4 \times 57\text{MW}$ ，72极，Alstom机组）、岩滩扩机工程（ $2 \times 300\text{MW}$ ，84极）和梨园（ $4 \times 600\text{MW}$ ，64极）发电机主保护配置方案的不能动作故障率分别高达15.48%、11.14%和9.70%，究其原因在于发电机定子绕组形式所决定的内部故障中小匝数同相同分支匝间短路所占比率太大。



发电机的定子绕组形式决定了内部故障特点：

对于叠绕组发电机而言，同槽故障中的同相同分支匝间短路只可能发生在相邻N、S极下的线圈间，从而导致同相同分支匝间短路的短路匝数不大；

端部故障中的同相同分支匝间短路则可能发生在同一极下的相邻线圈之间，对应的短路匝数更小；

而低转速发电机由于极数多，每分支线圈数反而很多（譬如Soubre发电机每分支由58个线圈串联而成），使得同相同分支匝间短路的短路匝比（短路匝数/每分支线圈数）很小，主保护灵敏度问题突出！