

# 大型汽轮发电机低励故障的仿真计算 及其保护的動作分析初探

湖北电力试验研究所 肖逸

## 摘 要

本文针对某系统中一台200MW汽轮发电机严重的低励失步故障进行了仿真分析，较好地说明了故障发生的起因及其过程，并就防止发生类似故障提出了继电保护改进措施。

## 引 言

低励失步是同步发电机常见的故障。据统计，低励失步和失磁故障占大型发电机各类故障的一半以上。1985年，一台容量为200MW的汽轮发电机因低励失步而严重超速，导致机组毁灭性损坏。鉴于近年还将有七、八十台同类机组投入运行，构成我国电力系统主力机组之一，有必要针对本事故进行电气量的仿真分析，为提高国产200MW汽轮发电机组的可靠性提供依据。

## 二 事故前运行工况及事故经过

事故前运行工况见图1。发电机变压器组经286公里长线及受端变压器接入大系统，机端带厂用电负荷，变压器高压侧带地区负荷，发电机总出力为 $140 + j49\text{MVA}$ 。

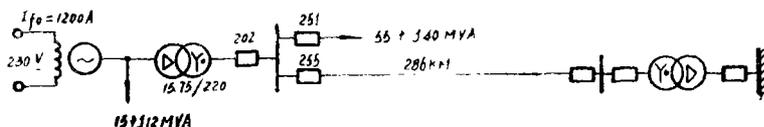
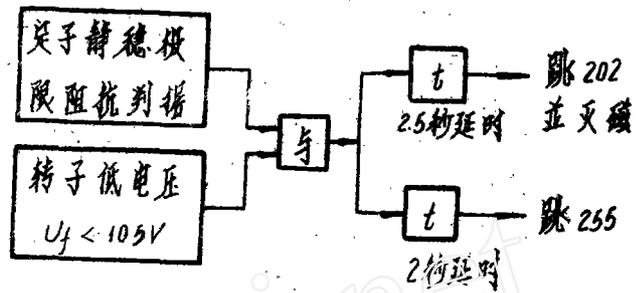


图1 事故前运行工况

## 参考文献：

1. 《平武500kV输变电工程》系统调试总结，第二篇（上），PP46—98
2. B·Φ拉楚金“对超高压输电线路继电保护波过程的研究”《继电器译丛》1984年第3期。
3. Dommel, H·W: “Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multi-phase Network” IEEE PAS—88, No. 4, April 1969, PP. 388—399.
4. 《电力系统过电压》，解广润主编，水利电力出版社，1985，PP139—145

事故前自动励磁调节装置因故停运，切换到手动位置，励磁电流为1200A，电压为230V。发电机超速保护因故停运。低励失步保护的逻辑框图见图2，保护动作须满足定子静稳极限阻抗判据及转子低电压判据与门条件，若仅满足其中一个判据，则发“装置故障”信号。



在上述工况下，将发电机有功出力由140MW增至170MW，增有功期间未对励磁作任何调节，最终使低励失步保护动作，255、202开关先后跳闸，发电机不断升速，以致大轴断为五截。

图2 低励失步保护逻辑框图

### 三 仿真计算数学模型

#### 1. 系统等值模型

为简化计算，将图1中厂用电负荷归并到变压器高压侧，并用恒定阻抗模拟之，略去长线靠近系统侧的等效电容见图3。

图3中， $Z_1 = Z_3 = jx_T$ ， $Z_2 = r_L + jx_L$ ， $Z_L = U_s^2 / (P_{Ls} - jQ_{Ls})$ 。经以上简化后的潮流计算结果与事故前运行报表结果吻合。

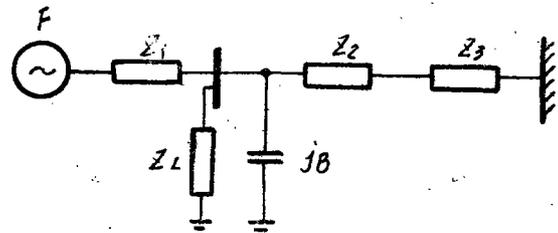


图3 等值网络

255及202开关跳闸后的等值电路可简化为发电机经等值负荷阻抗接地。

#### 2. 发电机数学模型

采用I. M. Canay提出的改进的发电机等值电路见图4。此电路除了考虑d轴各绕组通过主磁通 $\psi_{ad}$ 耦合外，还考虑了阻尼绕组D与励磁绕组f之间通过公共漏磁通 $\psi_{fD}$ 的耦合。这样较准确地反映了转子各绕组之间的磁耦合关系，从而使得转子各电气量的计算结果更准确。漏磁通 $\psi_{fD}$ 反映到等值电路上即为 $X_{rc}$ 。

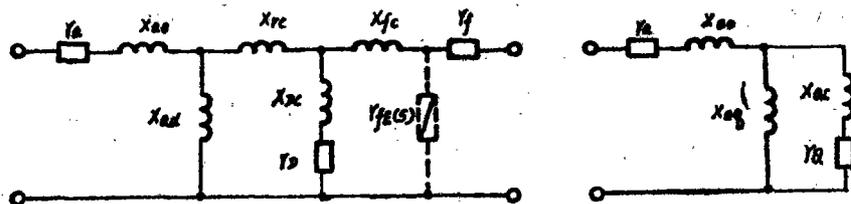


图4 改进的发电机等值电路

(1) 磁链方程:

$$\psi_d = -(X_{oo} + X_{ad})i_d + X_{ad}i_f + X_{ad}i_D \quad (1)$$

$$\psi_g = -(X_{oo} + X_{ag}) + X_{ag}i_Q \quad (2)$$

$$\psi_f = -X_{ad}i_d + (X_{ad} + X_{rc} + X_{fc})i_f + (X_{ad} + X_{rc})i_D \quad (3)$$

$$\psi_D = -X_{ad}i_d + (X_{ad} + X_{rc})i_f + (X_{ad} + X_{rc} + X_{Dc})i_D \quad (4)$$

$$X_Q = -X_{ag}i_g + (X_{ag} + X_{Qc})i_Q \quad (5)$$

(2) 电压方程

$$u_d = p\psi_d - \omega\psi_g - r_s i_d \quad (6)$$

$$u_g = p\psi_g + \omega\psi_d - r_s i_g \quad (7)$$

$$u_f = p\psi_f + r_f i_f \quad (8)$$

$$0 = p\psi_D + r_D i_D \quad (9)$$

$$0 = p\psi_Q + r_Q i_Q \quad (10)$$

(3) 转子运动方程

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (11)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (12)$$

$$T_e = (\psi_d i_g - \psi_g i_d) \quad (13)$$

图4等值电路还考虑了转子槽壁漏阻抗的影响, 槽壁阻抗

$$r_{fB}(s) = r_{fB}(1 + j\lambda) \sqrt{s} \quad (14)$$

对实心铸铁转子,  $r_{fB} \approx 154r_f$ , 本文考虑饱和影响取  $\lambda = 0.6$ ,  $s$  为转差率。  $r_{fB}(s)$  较  $r_f$  大许多, 因此一般情况下不计  $r_{fB}(s)$  的影响, 只是在可控硅整流桥反向截止时, 励磁电流才通过  $r_{fB}(s)$  形成回路。 整流桥反向截止时, 励磁绕组感应过电压

$$u_{fB} = p\psi_f = -r_{fB}(s)/s i_f \quad (15)$$

此时式(8)中  $r_f$  亦应由  $r_{fB}(s)/s$  代替之, 相应的  $u_f = 0$ 。

### 3. 原动机及调速器数学模型

考虑中间再热式汽轮机组蒸汽容积效应的传递函数框图见图5。

相应的功频液压调速器传递函数框图见图6。

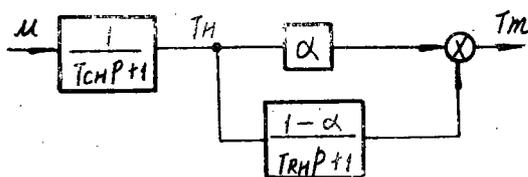


图5 原动机传递函数

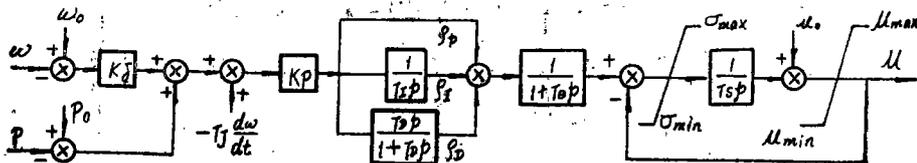


图6 功频液压调速器传递函数框图

综合以上各环节数学模型，发电机低励失步计算的总体框图为，

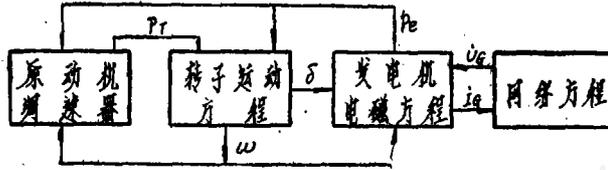


图7 计算总体框图

#### 四 仿真计算结果分析

##### 1. 低励计算分析

依据现场运行中短时间内将有功功率由14万千瓦增至17万千瓦这一事实，计算中采用了如下方式：（取开始增加有功的时刻为零，以后各过程的时间均以此为参考。）

- (1)  $t = 0$  秒时刻，将有功出力给定值由14万千瓦增至15万千瓦；
- (2)  $t = 30$  秒时刻，将有功出力给定值由15万千瓦增至16万千瓦；
- (3)  $t = 60$  秒时刻，将有功出力给定值由16万千瓦增至17万千瓦。

分以上三步增加负荷，观察其对发电机静稳定的影响（结果见附图1）。在不增加励磁条件下，将有功出力由14万千瓦增至16万千瓦，还不至于使发电机失去静稳定。但将有功出力增至17万千瓦后，发电机最终失去静稳定。在有功出力增大的过程中，发电机无功出力逐渐下降，以至于最后自系统吸收无功。以下说明低励失步的发展过程：

$t = 80$  秒时刻，发电机与系统间的角度已增至 $90^\circ$ ，达到静稳极限功角；

$t = 85$  秒，机端量测阻抗轨迹进入静稳极限阻抗继电器整定的动作区域内，低励失步保护装置发出“装置故障”信号。现场中首先出现的即是此信号；

$t = 90$  秒以前，发电机有功出力维持在16.7万千瓦以上， $t = 90$  秒后，发电机有功出力突然下降，亦与现场观察到的现象相符。

##### 2. 失步后计算分析

前已指出：在增加有功功率的全过程中，发电机励磁电压为 $u_f = 230$  V，高于转子低电压继电器动作整定值 $u_{f,z} = 103$  V，而现场中除了“失磁保护动作”信号外，无任何其它保护动作信号出现。分析其原因，极有可能是失步后的剧烈振动引起主励磁机励磁回路碳刷松脱，出现环火（事故现场有此迹象），导致发电机励磁电压低于转子低电压继电器动作整定值，最终满足低励失步保护动作条件而发出信号，经2.15秒延时后跳255开关。基于上述分析及计算机自动检测记录到255，202开关前后跳闸时间不超过2.56秒这一事实，按如下两方案进行了失步后的计算：

方案1：发电机异步振荡两周后（ $t = 92.73$  秒），交流励磁机电压完全消失，经2.15秒延时，255开关跳闸，2秒后，202开关跳闸。计算结果见附图2。

方案2：发电机异步振荡两周后，转子励磁电压降至100伏，经2.15秒延时，255开关跳闸，2秒后，202开关跳闸。计算结果见附图3。

以上两方案的计算结果表明，255开关跳闸后，地区感性负荷将使机端量测阻抗轨迹逸出静稳极限判据的动作整定区（附图5），低励失步保护装置不可能使202开关在255跳闸，现场观察到的两开关跳闸时间间隔大于0.5秒，因此，202开关跳闸原因待查。根据热力保护动作后无信号出现，它将立即关闭主汽门，经9秒延时后才跳202开关及灭磁开关的设计原则，同时依据现场中推力瓦严重磨损及关闭主汽门回路有不通的现象分析，我们认为，极有可能是因异步振荡中强烈的冲击使轴向位移保护（属热力保护范围）动作，因故未能及时关闭主汽门，但经9秒延时后启动202开关及灭磁开关跳闸。为此又按下述方案进行了计算：

方案3：发电机在异步振荡状态运行达5秒后（ $t = 97.36$ 秒），转子励磁电压突然消失，2.15秒后255开关跳闸，2秒后202开关跳闸。计算结果见附图4。

通过以上几种方案计算出的电压曲线可以看出，失步后的振荡中心落在机端附近。振荡过程中最大定子电压不超过0.8。202开关跳闸后电压变化趋势与本事故录波图基本一致。但在202开关跳闸前，该故障录波器（启动电压为0.7）为何未能启动录下具有振荡特性的波形，将有待于进一步分析。发电机的最小振荡周期分别为0.222秒（方案1.2），0.217秒（方案3），比较本次事故前同一机组曾发生完全失磁故障的振荡周期为0.28秒，本结果是可信的。从理论上分析，低励失步较全失磁失步后的振荡频率要高些。

因励磁电压略低于静稳极限要求值，在失步前发电机所维持的等有功过程比全失磁后的等有功过程长。但一旦失步后，由低励电压所产生的有功功率一次谐波分量很大，以致有功功率周期性地冲向负值，对发电机的危害很大。除此以外，由于转子不完全对称及异步运行中转子各回路差频电流产生的脉振磁场，使发电机有功功率中含有二次谐波分量。

失步后，转子励磁绕组相应地要感应出差频电流，当此差频电流幅值大于强制励磁电流分量 $u_f/r_f$ 时，将使励磁回路的三相整流桥反向截止，从而使励磁绕组产生较高的感应过电压。此过电压不仅对励磁绕组绝缘有危害，且对转子低电压继电器的正确动作亦有影响。

255开关跳闸前振荡过程的初始阶段，因转子惯性，发电机转速将逐渐上升。对振荡过程较长的方案3，因调速器作用使原动机出力减小，转速略有下降。255跳闸甩掉部分负荷后，转速将平稳上升，202跳闸再次甩负荷后，转速将进一步上升。

### 3. 厂用电动作分析

厂用电低电压保护分0.5秒、4.5秒、9秒三级时限，继电器启动电压均为0.7，返回电压为0.8。根据上面的计算结果及保护动作时限整定原则，发电机在失去静稳定后，0.5秒低电压将使1号、3号给水泵跳闸，2号给水泵自投后因电压低又复跳，导致锅炉汽包水位迅速下降。其它厂用负荷除因继电器毛病拒动外，均属正确动作无误。

## 五 继电保护改进措施

1. 整定值为恒定的转子低电压低励失步保护判据不能反映重负荷下的低励故障，

应采用整定值随有功自动变化的转子低电压判据。

2. 现代大型发电机组普遍采用交流整流桥式励磁, 相应的转子低电压继电器应有一短延时才能使之自动返回, 以躲过失步后的感应过电压。

3. 汽轮发电机低励失步保护动作后应首先作用于发信号、减负荷, 低负荷异步运行一段时间, 以便运行人员查明故障, 力争恢复正常励磁, 当此努力不成时不跳闸停机。

4. 汽轮发电机热工方面的保护应装设信号装置, 为故障分析提供依据。

### 参考文献

- [ 1 ] I.M.Canay: "Determination of model parameters of synchronous machines", IEE Proc. Vol.130 Pt.B No.2 1983
- [ 2 ] I.M.Canay: "Investigation of the rotor overvoltage in synchronous machines with rectifier excitation", Electric Machines and Electromechanics, Vol.3 No.1 1978
- [ 3 ] 西安交通大学等: 电力系统计算 水利电力出版社 1978
- [ 4 ] 王维俭、侯炳尧: 大型机组继电保护理论基础 水利电力出版社 1982
- [ 5 ] 赵建国、姚晴林: 整定值随有功功率自动变化的新型转子低电压失磁继电器的研究 电力系统自动化 1984年第4期

### 附录:

#### 1. 发电机参数

$$S_N = 235.3 \text{ MVA}, \quad U_N = 15.75 \text{ KV}, \quad I_N = 8625 \text{ A},$$
$$\cos\varphi_N = 0.85, \quad I_{f0} = 670 \text{ A}$$

(以下均以标么值表示)

$$r_a = 0.0026, \quad r_f = 0.0017186 \quad r_D = 0.010303$$
$$r_Q = 0.06985$$
$$X_d = 1.9956 \quad X_q = 1.953 \quad X_{d'} = 1.8639$$
$$X_{d''} = 1.8213 \quad X_f = 2.0251 \quad X_D = 1.982$$
$$X_Q = 1.8556 \quad X_{f'} = 0.0604$$
$$T_f = 5.46 \text{ 秒}$$

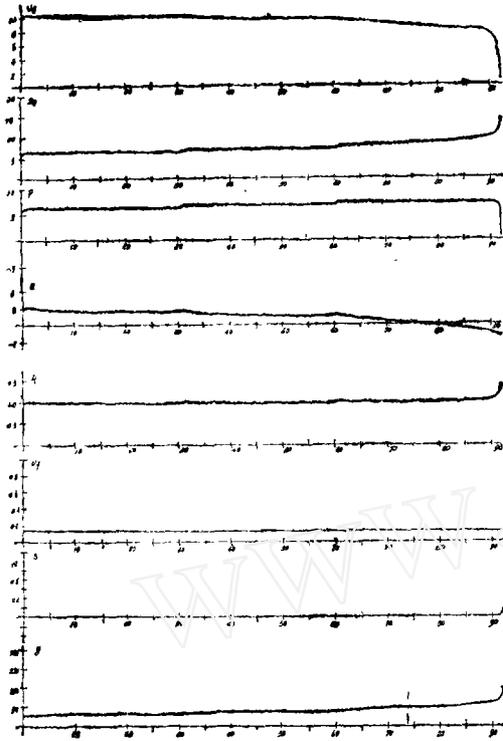
#### 2. 调速器、原动机参数:

$$K_s = 20, \quad K_F = 3.5, \quad T_f = 0.85, \quad T_D = 0.2$$
$$T_r = 0.05, \quad T_s = 0.3, \quad T_{CH} = 0.4, \quad T_{RH} = 9,$$
$$\alpha = 0.33$$

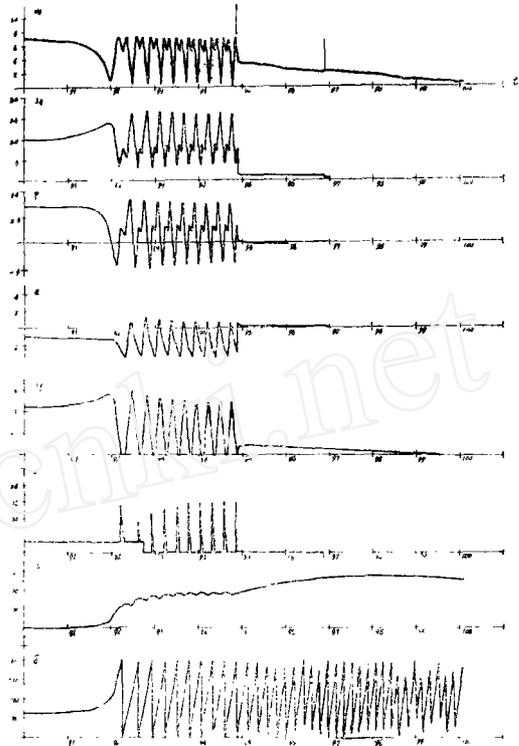
#### 3. 网络参数:

$$Z_1 = Z_2 = j0.137, \quad Z_3 = 0.04 + j0.352$$
$$jB = j0.12, \quad Z_L = 2.171 + j1.606$$

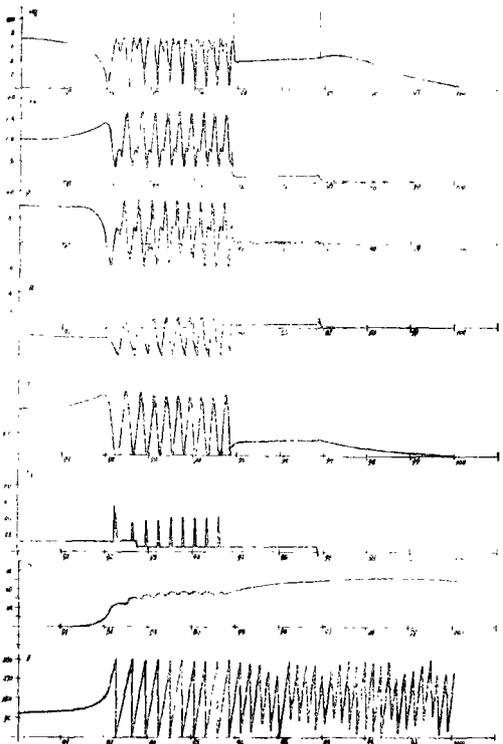
#### 4. 附计算曲线:



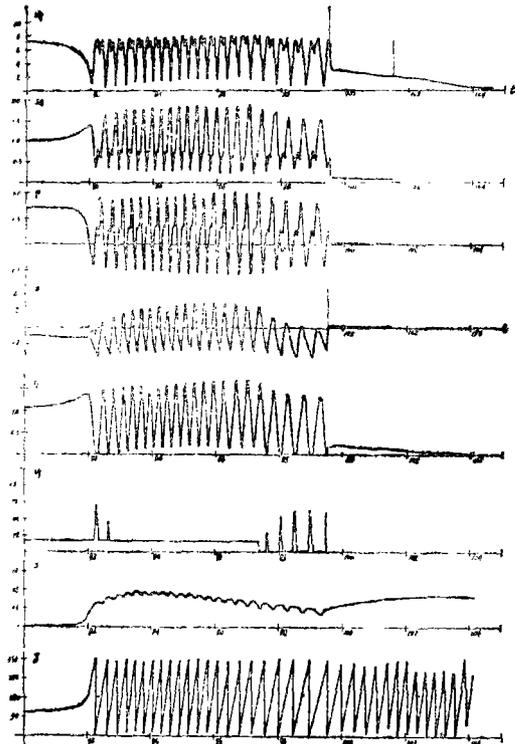
附图1 低励计算曲线



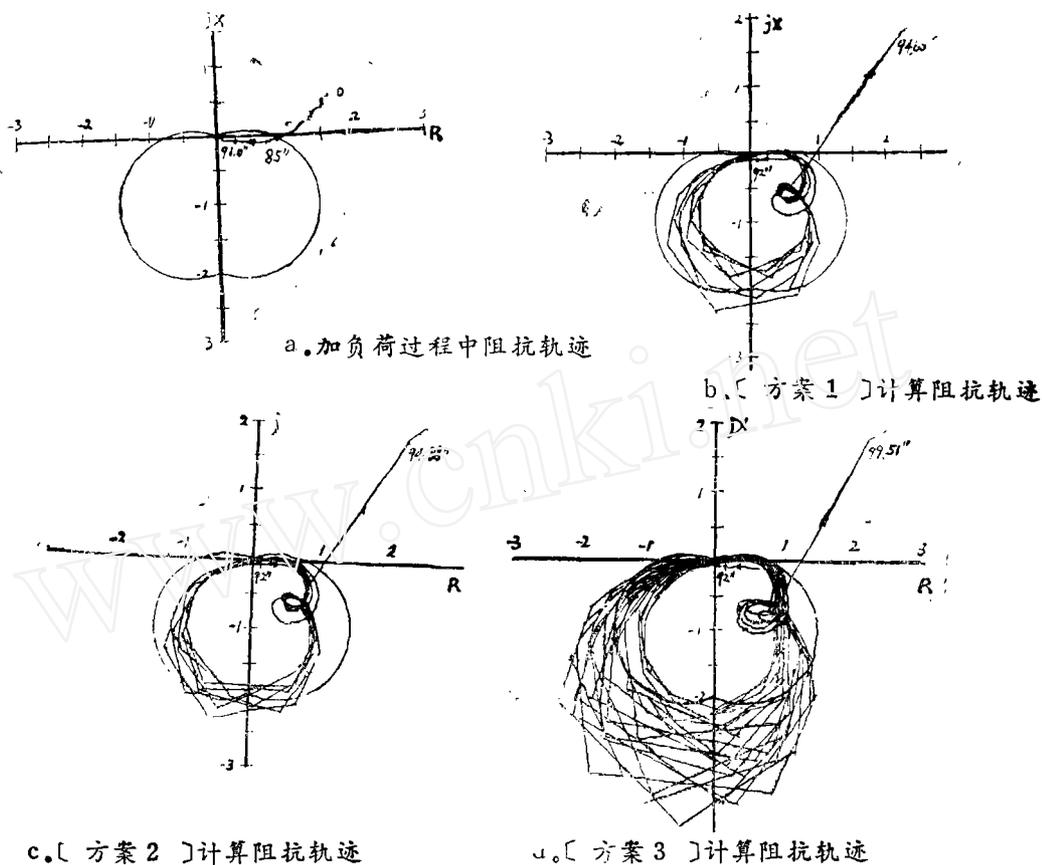
附图2 方案1计算曲线



附图3 方案2计算曲线



附图4 方案3计算曲线



附图5 低励失步过程中的阻抗轨迹

## 全国电力运动通信标准化技术委员会第二届年会

全国电力运动通信标准化技术委员会第二届年会于1988年1月7日至12日在广东省珠海市召开。

参加本届年会的有本技术委员会委员、顾问、特邀代表和标准起草人共40余人。年会总结了1987年技术委员会的工作，肯定了本技术委员会自1987年1月成立以来，在国家标准局的领导下，各位委员、顾问的支持下，努力开展工作，无论在组织建设，参与制订本专业国家标准，以及参加国际电工委员会活动，促进本专业领域的国际合作及增进相互了解等方面，都取得了一定的成绩。同时也看到，本委员会毕竟才步入轨道，许多工作还有待今后努力。

叶世勳主任委员报告了1987年9月在意大利罗马召开的IECTC—57国际会议情况。

大会讨论了“技术委员会秘书处工作细则”，和“技术委员会1988年工作计划”，同时还修订了“技术委员会章程”。

年会还分专业组对“远动名词术语”、“电量变送器”、“地区调度自动化系统”、“调度模拟屏及其设备”、“电站集控装置”、“远动复用调制解调器”、“远动通信电源设备”、“35kV载波机”等八个标准的征求意见稿进行了充分地讨论。(蒋秉权报导)