

# 电力系统非同期重合闸的计算与运行

罗源生

## 一、前言

电力系统采用非同期重合闸以提高供电的可靠性,特别对提高单回输电线联系的电力系统的供电可靠性,已被愈来愈多的运行实践所证实。

某电力系统在罗变与新电之间为双侧电源单回输电线联系之电网见图(1)。由以往的运行经验可知,采用检定同期的自动重合闸装置动作成功的或然率很低。经初步计算分析,该处采用非同期重合闸不论是冲击电流或再同期条件都是满足要求的。为了进一步探讨采用非同期重合闸的可能性和现实性,分别在69年12月底进行了三次非同期重合闸现场工业性试验。并于七三年底投入实际运行。经过一年半的运行,其动作州多次,证明使用效果良好,现将有关情况总结如下:

## 二、容许冲击电流的校核

冲击电流的计算中罗侧及新侧均按等值机考虑,电流电势均按1.05计,并不计它们之间电势相位的差别。最大冲击电流是在两侧等值机电势相位角相差 $180^\circ$ 时,因此在等值网络中施于2.1倍的标么电势即可测算出冲击电流。

非同期并列时,最大电流的周期分量不应超过下列规定:

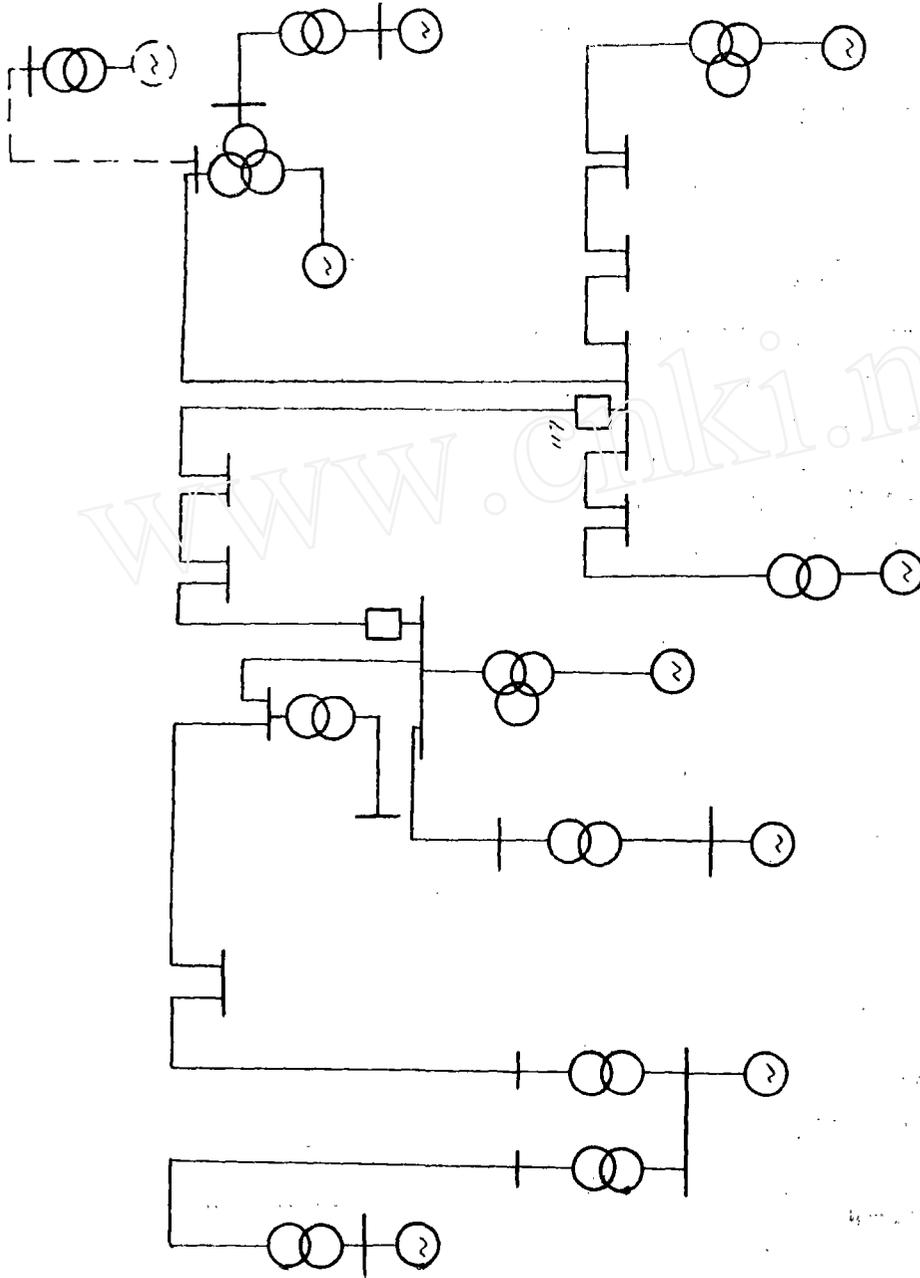
- 1) 汽轮发电机  $I_{HC}/I_H \leq 0.65/X''_d$
- 2) 有纵横阻尼回路的水轮发电机  $I_{HC}/I_H \leq 0.6/X''_d$
- 3) 无阻尼回路或阻尼回路不全的水轮发电机  $I_{HC}/I_H \leq 0.6/X'd$
- 4) 同期调相机  $I_{HC}/I_H \leq 0.84/X''_d$
- 5) 电力变压器  $I_{HC}/I_H \leq 100/ek\%$

当计算结果接近或大于上述规定时,则应考虑负荷的影响,此时负荷等值电抗  $X_H = 0.35$  等值电势  $E''_d = 0.9$ 。

在校核容许冲击电流时,系统运行方式是按一侧为最大运行方式,而另一侧为最小运行方式来计算。检修运行方式作为校核条件。计算结果列于附录一。由此可见在罗变至新电之间采用非同期重合闸均可满足冲击电流的条件,电压振荡中心位于离新电72公里或95公里处。

### 三、可靠再同期范围的确定

满足容许冲击电流及重合闸后能拖入同期的条件，是采用非同期重合闸的必要且充分的条件。而再同期条件的计算，以往是利用交流计算台采用分段计算法近似地进行计算，此种计算方法对于等值的一机联接至无穷大系统这种最简单的情况，计算过程都是相当繁复的，要花费较多的时间和人力。如果采用电子模拟计算机来计算，则可大大地缩短计算时间，同时有利于分析各种参数对再同期过程的影响。我们在水电部电科所的F M—8型电子模拟计



图(1)

计算机上, 结合某电力系统的实际情况, 按两机系统进行了模拟计算, 现将初步结果总结分析如下:

1) 系统模拟的一般方法

① 调速系统模拟

调速系统可近似地用如下方程表示:

$$\delta\eta = S \dots\dots\dots (1)$$

$$T_S \frac{d\rho}{dt} = \rho \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho = \eta - \beta\mu \dots\dots\dots (3)$$

式中:  $\sigma$  —— 调差系数, 一般  $0.03 \sim 0.05$

$\eta$  —— 飞摆套管位移, 位移与  $S$  有关无范围限制

$S$  —— 转差率  $S = -\frac{d\delta}{dt}$

$\delta$  —— 发电机转子轴线间相对角

$T_S$  —— 主接力器时间常数一般  $0.4'' \sim 1''$

$\mu$  —— 调速汽门开度 (滑阀位移)  $0 \leq \mu \leq 1$

空载为  $\mu_{xx}$ , 满载为  $\mu = 1$

$\rho$  —— 调速器控制阀位移  $-1 \leq \rho \leq 1$

正常情况平衡时  $\rho = 0$

$\beta$  —— 反馈系数  $0.8 \sim 1$  一般取 1

根据方程 (1) - (3) 可得调速系统模拟方框图 (2)

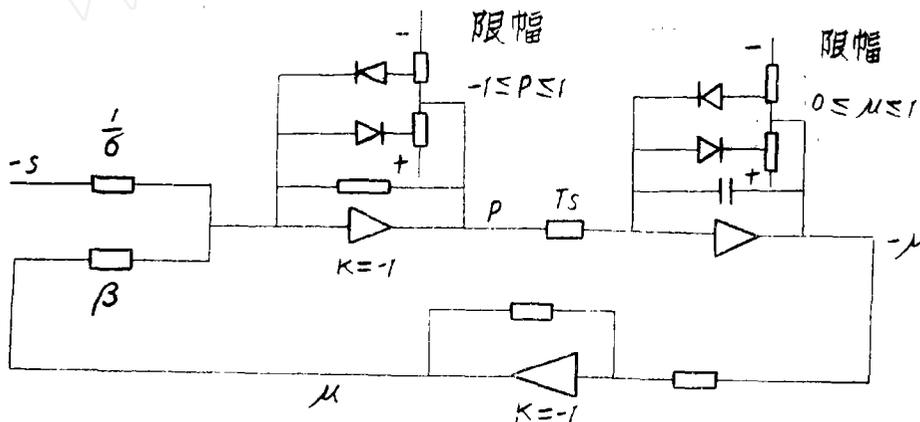


图 (2) 调速系统模拟方框图

② 原动机模拟

设调速器汽门开度和原动机转矩呈线性关系, 原动机方程可近似地表示为

$$M_T = \frac{M_{TH}}{S_B(1-\mu_{xx})} (\mu - \mu_{xx}) = \frac{M_{TH}}{90} (\mu - 0.1) \dots\dots\dots (4)$$

式中:  $M_T$  —— 原动机转矩

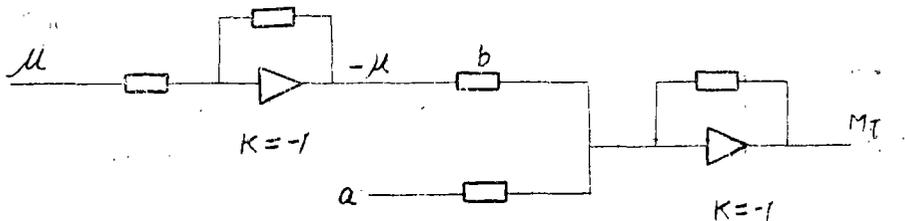
$M_{TH}$ ——原动机额定出力单位MW

$\mu_{xx}$  ——对应于空载时的汽门开度取0.1

$\mu$  ——调速汽门开度

$S_B$ ——基准功率取100MVA

根据方程(4)可得原动机模拟方框图(3)



图(3) 原动机模拟方框图

图(3)中  $a = \frac{0.1M_T}{90}$

$$b = \frac{M_T}{90}$$

### ③发电机模拟

同步发电机转子运动方程式为

$$T_M \frac{d^2\delta}{dt^2} + M_{11} + M_{12} + M_{ac}(S) = M_T \dots \dots \dots (5)$$

式中:  $T_M$ ——发电机惯性常数

$M_{11}$ ——自阻抗力矩(包括地方负载)

$$M_{11} = \frac{(E'd)^2}{Z'_{11}} \text{Sin}\alpha_{11}$$

$M_{12}$ ——相互力矩,与两机相对电势夹角 $\delta$ 有关

$$M_{12} = \frac{E'd_1 \cdot E'd_2}{Z'_{12}} \text{Sin}(\delta_{12} - \alpha_{12}) \dots \dots \dots (6)$$

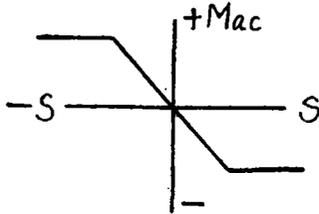
$M_{ac}$ ——发电机异步力矩,与两机相对转差S有关

$$M_{ac}(S) = \frac{U^2 (X_d - X'_d)}{2Z'^2_{12} (1 - \frac{X_d - X'_d}{Z_{11}} \text{Cos}\alpha_{11})} \times \frac{S T'_d}{1 + (S T'_d)^2}$$

$$\frac{U^2 (X'_d - X_d'')}{2Z'^2_{12} (1 - \frac{X'_d - X_d''}{Z_{11}} \text{Cos}\alpha_{11}) (1 - \frac{X_d - X_d''}{Z_{11}} \text{Cos}\alpha_{11})} \times \frac{S T_d''}{1 + (S T_d'')^2}$$

$$\frac{U^2 (X_g - X''_g)}{2Z^2_{12} \left(1 - \frac{X_g - X''_g}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \times \frac{S T''_g}{1 + (S T''_g)^2} \dots\dots\dots (7)$$

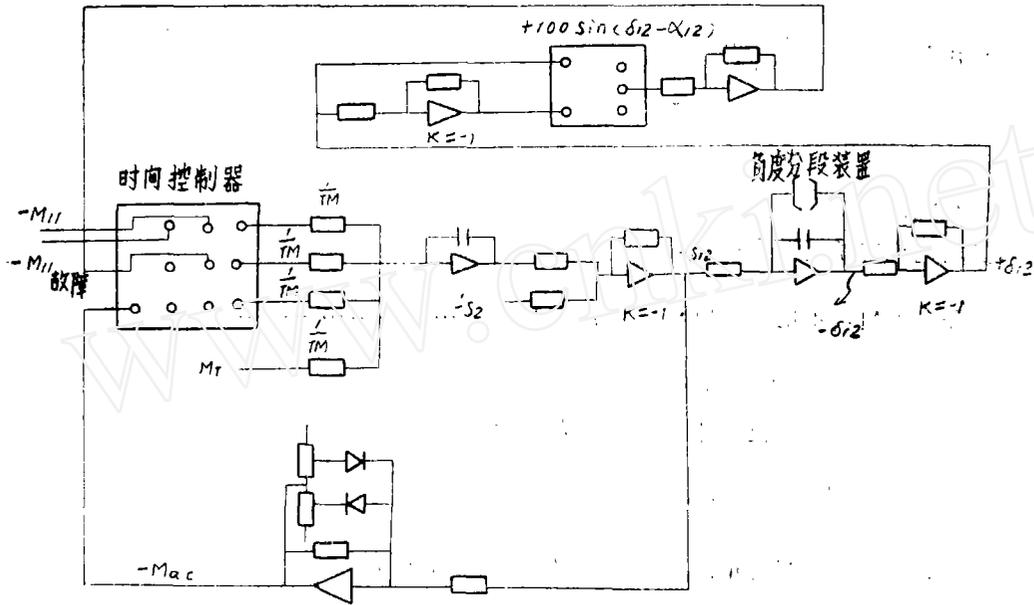
上述异步力矩可近似地认为由二段折线组成的特性曲线，即：



根据方程(5) — (7) 可得发电机模拟方框图(4)

当系统发生故障时  $M_{11}$  将与正常进行时的  $M_{11}$  不同，当故障切除，系统解列后， $M_{11}$  可近似地认为等于地方负载，当系统非同期重合后，近似地认为  $M_{11}$  恢复正常值。在地方负载较大的系统中为了简化计算，可认为发生故障时即时切除，因此  $M_{11}$  值始终不变。

为发生故障时即时切除，因此  $M_{11}$  值始终不变。



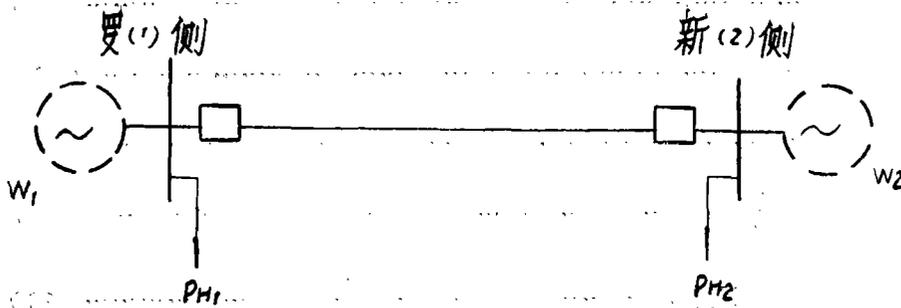
图(4) 同步发电机模拟方框图

2) 某电力系统等值两机系统的模拟

某电力系统若在罗变与新电间采用非同期重合闸，则可将系统简化如图(5)所示的等值两机系统。

若比例尺按如下选择：

- $K_s = 250$  伏/标么      —— 滑差比例尺
- $K_\delta = \frac{1}{3.6}$  伏/度      —— 角度比例尺
- $K_\mu = 50$  伏/标么      —— 调速汽门开度比例尺
- $K_\rho = 50$  伏/标么      —— 控制滑阀位移比例尺
- $K_\eta = 50$  伏/标么      —— 飞摆套管位移比例尺



图(5)

$K_M = 50$  伏/标么      — 转矩比例尺

$K_t = 2$                       — 时间比例尺

等值两机系统各方程(其参数计算见附录二至七)经比例尺折算后,可得模拟方程如下:

①最大运行方式

最大运行方式开机容量为  $W_1 = 156.7$  MW

$W_2 = 68.6$  MW

(1) 当功率由罗侧向新侧输送32MW时\*罗侧方程:

$$\eta_{10} = 4S_{10} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{d\mu_{10}}{dt_0} = \frac{1}{2T_{S1}} \rho_{10} = \frac{1}{2} \rho_{10} \text{ (取 } T_{S1} = 1 \text{)} \dots\dots\dots (9)$$

$$\rho_{10} = \eta_{10} - \mu_{10} \dots\dots\dots (10)$$

$$S_{10} = -\frac{1}{10} \frac{d\delta_{10}}{dt_0} \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{dS_{10}}{dt_0} = -0.163 \Sigma M_{10} \dots\dots\dots (12)$$

$$\Sigma M_{10} = M_{T10} - M_{110} - M_{120} - M_{ac10} \dots\dots\dots (13)$$

$$0.163 M_{T10} = 0.287 \mu_{10} - 1.43 \dots\dots\dots (14)$$

$$0.163 M_{110} = 8.97 \dots\dots\dots (15)$$

\*根据系统提出的要求,罗侧向新侧最大输送功率为32MW由新侧向罗侧最大输送功率为25MW

$$0.163 M_{120} = 0.05 \sin(\delta_{120} - 3.25^\circ) \dots\dots\dots (16)$$

$$0.163 M_{ac10} = \begin{cases} -0.783 S_{120} & \text{当 } |S_{120}| \leq 0.75 \text{ 伏} \\ 0.587 & \text{当 } |S_{120}| \geq 0.75 \text{ 伏} \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

考虑了负荷的频率效应  $K_H = 1.7$  得90%负载率时该环节的放大系数  $K_1 = \frac{8.97 \times 1.7}{250}$

$= 0.06$  (该放大系数与地方负荷的大小有关  $K_1 = \frac{M_{110} \times 1.7}{250}$ )

$$\Delta M_1 = K_1 \cdot S_{10} \dots\dots\dots (18)$$

新侧方程:

$$\eta_{20} = 4 S_{20} \dots\dots\dots (19)$$

$$\frac{d\mu_{20}}{dt_0} = \frac{1}{2} \rho_{20} \dots\dots\dots (20)$$

$$\rho_{20} = \eta_{20} - \mu_{20} \dots\dots\dots (21)$$

$$S_{20} = -\frac{1}{10} \frac{d\delta_{20}}{dt_0} \dots\dots\dots (22)$$

$$\frac{dS_{20}}{dt_0} = -0.456 \Sigma M_{20} \dots\dots\dots (23)$$

$$\Sigma M_{20} = M_{T20} - M_{220} - M_{210} - M_{ac20} \dots\dots\dots (24)$$

$$0.456 M_{T20} = 0.353 \mu_{20} - 1.76 \dots\dots\dots (25)$$

$$0.456 M_{220} = 21.4 \dots\dots\dots (26)$$

$$0.456 M_{210} \approx 0.142 \sin(\delta_{12} + 3.25^\circ) \dots\dots\dots (27)$$

$$0.456 M_{ac20} = \begin{cases} -4.38 S_{210} & \text{当 } |S_{210}| \leq 0.75 \text{伏时} \\ 3.33 & \text{当 } |S_{210}| \geq 0.75 \text{伏时} \end{cases} \dots\dots\dots (28)$$

考虑负载的频率效应

$$\Delta M_2 = K_2 \cdot S_{20} \dots\dots\dots (29)$$

$$K_2 = 0.145 \text{ (90\%负载率时)}$$

$$S_{120} = S_{10} - S_{20} \dots\dots\dots (30)$$

根据式(8)~(30)方程可得模拟计算方框图(6),其中各环节的放大系数或比例系数及运算的初始值由上述各方程给出。当故障切除至非同期重合闸前可认为 $M_{120} = 0$ ,  $M_{ac0} = 0$ ,为了简化计算可近似地认为 $M_{110}$ ( $M_{220}$ )=常数。由时间控制器控制它们的切除及接入,时间的长短根据非同期重合闸的时限来整定控制器的时间继电器动作值。其时间值需考虑所选时间比例尺。

(2)当功率由新侧向罗侧输送25MW时,仅引起计算结线图上某些环节放大系数及初始值的变化,其方程如下:

$$\eta_{10} = 4 S_{10} \dots\dots\dots (31)$$

$$\frac{d\mu_{10}}{dt_0} = \frac{1}{2} \rho_{10} \dots\dots\dots (32)$$

$$\rho_{10} = \eta_{10} - \mu_{10} \dots\dots\dots (33)$$

$$S_{10} = -\frac{1}{10} \frac{d\delta_{10}}{dt_0} \dots\dots\dots (34)$$

$$\frac{dS_{10}}{dt_0} = -0.163 \Sigma M_{10} \dots\dots\dots (35)$$

$$\Sigma M_{10} = M_{T10} - M_{110} - M_{120} - M_{ac10} \dots\dots\dots (36)$$

$$0.163 M_{T10} = 0.287 \mu_{10} - 1.43 \dots\dots\dots (37)$$

$$0.163 M_{110} = 13.6 \dots\dots\dots (38)$$

$$0.163 M_{120} = 0.0758 \sin(\delta_{21} + 8.1^\circ) \dots\dots\dots (39)$$

$$0.163M_{ac10} = \begin{cases} -1.11 S_{120} & \text{当 } |S_{120}| \leq 0.75 \text{ 伏} \\ 0.815 & |S_{120}| \geq 0.75 \text{ 伏} \end{cases} \dots\dots\dots (40)$$

$$\Delta M_1 = K_1 S_{10} \dots\dots\dots (41)$$

其中  $K_1 = 0.093$  (90% 负载率时)

$$\eta_{20} = 4 S_{20} \dots\dots\dots (42)$$

$$\frac{d\mu_{20}}{dt_0} = \frac{1}{2} \rho_{20} \dots\dots\dots (43)$$

$$\rho_{20} = \eta_{20} - \mu_{20} \dots\dots\dots (44)$$

$$S_{20} = -\frac{1}{10} \frac{d\delta_{20}}{dt_0} \dots\dots\dots (45)$$

$$\frac{dS_{20}}{dt_0} = -0.456 \Sigma M_{20} \dots\dots\dots (46)$$

$$\Sigma M_{20} = M_{T20} - M_{220} - M_{210} - M_{ac20} \dots\dots\dots (47)$$

$$0.456 M_{T20} = 0.353 \mu_2 - 1.76 \dots\dots\dots (48)$$

$$0.456 M_{220} = 8.44 \dots\dots\dots (49)$$

$$0.456 M_{210} = 0.217 \sin(\delta_{21} - 8.1^\circ) \dots\dots\dots (50)$$

$$0.456 M_{ac20} = \begin{cases} -7.1 S_{210} & |S_{210}| \leq 0.75 \text{ 伏} \\ 5.33 & |S_{210}| \geq 0.75 \text{ 伏} \end{cases} \dots\dots\dots (51)$$

$$\Delta M_2 = K_2 S_{20} \dots\dots\dots (52)$$

其中  $K_2 = 0.0575$  (90% 负载率时)

根据 (31) — (52) 可得类似如图 (6) 示的计算方框图。

从上面的结果可知, 不管开机的方式如何, 机组的负载率及输送功率的方向和大小如何变化, 其计算方框图始终不变, 仅其中某些环节的放大系数, 初始值及限幅数值发生变化。

计算方法是首先调好各元件的参数及初始值, 建立正常运行情况下的平衡状态, 然后利用时间控制器进行非同期重合闸时的模拟运算, 并用记录仪记录下所需测量的各运行参数, 经一定的比例尺折算后即可求得各运行参数随时间变化的真实过程, 从而判断该系统能否再同期。

### ② 中间运行方式

系统等值结线如图 (5)

开机容量  $W_1 = 96 \text{ MW}$

$W_2 = 59.6 \text{ MW}$

各环节参数及初始值的折算与最大运行方式时相似, 故从略。

### 3) 某系统非同期重合闸模拟计算结果及其分析

① 系统接线及模拟运算图如图 (5)、(6)

② 系统采用非同期重合闸的可靠再同期范围。(1) 最大运行方式时的可靠再同期范围

开机容量  $W_1 = 156.7 \text{ MW}$

$W_2 = 63.6 \text{ MW}$

重合时间  $t_{HAIB} = 2$  秒

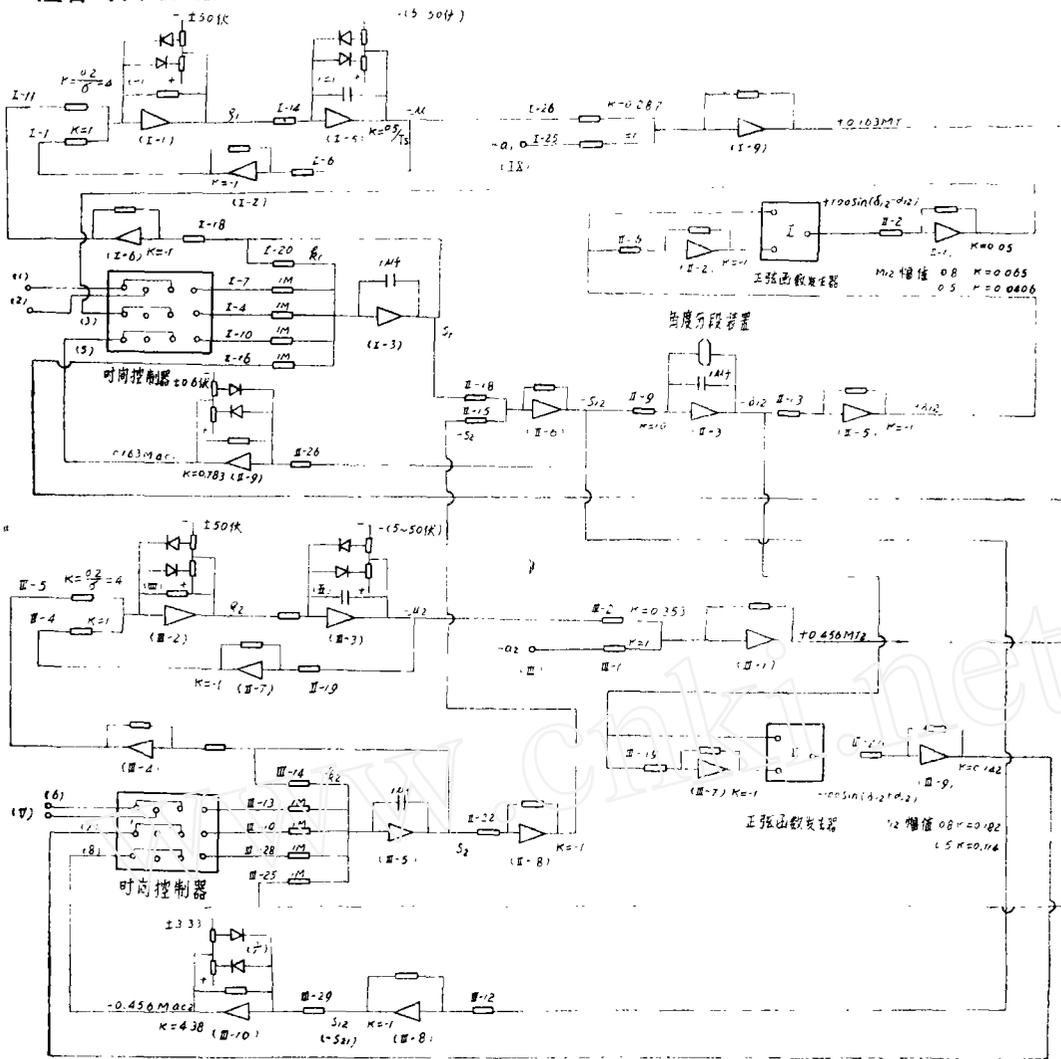


图 (6) 两机系统非同期重合闸模拟试验接线图

(一) 新侧向罗侧输送功率, 两侧机组均在满载运行时, 再同期的极限输送功率可达 30MW 而实际需要的最大传输功率为 25MW, 因此能满足要求, 其再同期过程见表 2 编号 4-5 所列。

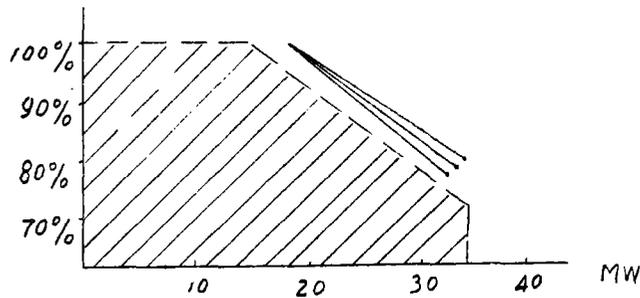


图 (7)

注：实线表示能再同期的极限边界，虚线表示能可靠再同期的边界。

(二) 罗侧向新侧输送功率，可靠再同期范围如图(7)阴影部分。传输容量与受端机组负载率有关，而送端机组负载率则影响甚小。再同期过程参见表2编号1—3，能再同期的极限边界值见表1所列。

表1

送端罗侧机组负载率	100 %			90 %			80 %		
	受端新侧机组负载率 %	100	90	80	100	90	80	100	90
极限输送功率(MW)	17	23	29	17	24	30	17	24	31

说明：1、当系统参数在以下范围内变化时，所进行的模拟试验表明，上述可靠再同期范围未发现明显的变化，仅对再同期的时间、滑差等有影响。

调差系数 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ ：0.02~0.05

调速器主接力器时间常数 $T_S$ ：0.5~1秒

机组惯性常数 $T_M$ 在正常值的 $\pm 10\%$ 内变

相互功率 $M_{12}$ 的幅值在0.5~0.8内变，正常值为0.625。

2、当重合时间 $t_{\text{HAPB}} = 1.5$ 秒时，经模拟试验表明，其可靠再同期范围比 $t_{\text{HAPB}} = 2$ 秒约增大1 MW。

(2) 中间运行方式时的可靠再同期范围

开机容量  $W_1 = 96 \text{ MW}$

$W_2 = 59.6 \text{ MW}$

重合时间 $t_{\text{HAPB}} = 2$ 秒

(一) 新侧向罗侧输送功率，两侧机组均在满载运行时，能再同期的极限输送功率为23 MW，比最大运行方式的数值减小7 MW，其再同期过程见表2编号7—8。

(二) 罗侧向新侧输送功率，两侧机组均在满载运行时，能再同期的极限输送功率为16 MW，比最大运行方式时的数值减小1 MW，其再同期过程见表2编号6、9、10。

### ③ 系统再同期过程分析

(1) 在图(7)阴影范围内(考虑了一定的可靠系数)，系统能可靠拉入同步，一般滑差最大值，再同期时间及振荡周期均较小，异步振荡次数亦较少。例：两侧负载率均为80%，罗侧向新侧输送功率28 MW。

$S_{12\text{max}} = 5.05\%$        $S_{1\text{max}} = -1.5\%$

$S_{2\text{max}} = 4.15\%$        $t_{\text{同期}} = 1$ 秒

$t_{\text{同步振荡周期}} = 1.2$ 秒

$t_{\text{异步振荡周期}} = 0.5$ 秒

异步振荡仅一次(见表2编号3)，其它情况见附表所列。

(2) 当超过图(7)阴影范围而在图(7)实线范围内运行时，系统的再同期过程较长，其滑差最大值、再同期时间及振荡周期均较大，异步振荡次数亦较多。若超出实线范

围, 则不能拉入同步, 系统将出现稳定的异步运行。

表 2 (1)最大运行方式

编 号	1	2	3	4	5
录 波 图 号	12	13	14	15	16
罗侧负载率%	80	80	80	90	90
新侧负载率%	70	80	80	90	90
输送功率 (MW)	1 侧→2 侧 2 侧→1 侧	25 10	28	10	25
$S_{12max}$ %	3.75	1.3	5.03	-1.01	-3
$S_1 max$ %	-1.25	-0.6	-1.5	0.3	1
$S_2 max$ %	2.6	1	4.15	-1.04	-2.75
$t_{同期}$ (秒)	0.24	0.1	1	0.1	0.3
$t_{同步振荡周期}$ (秒)	0.7	0.8	1.2	0.5	0.6
$t_{异步振荡周期}$ (秒)			0.5		
$\delta_{12}$ (合闸) (度)	0	72	-54	0	-99
异步振荡次数			1		

(2) 中间运行方式

编 号	6	7	8	9	10
录 波 图 号	17	18	19	20	21
罗侧负载率 %	80	80	80	80	80
新侧负载率 %	80	80	90	90	60
输送功率 (MW)	1 侧→2 侧 2 侧→1 侧	20 15	25	10	10
$S_{12max}$ %	4.5	-2.2	-1	2.4	1.9
$S_1 max$ %	-1.5	0.76	1.5	-0.95	-0.8
$S_2 max$ %	3	-1.76	-3	1.4	1.16
$t_{同期}$ (秒)	0.34	0.3	3	0.56	0.9
$t_{同步振荡周期}$ (秒)	0.8	0.5	0.9	0.64	0.76
$t_{异步振荡周期}$ (秒)			1.9		
$\delta_{12}$ (合闸) (度)	0	90	-54	180	126
异步振荡次数			2		1

表 2 中符号意义:

$S_{12max}$ 、 $S_{1max}$ 、 $S_{2max}$  均表示最大平均滑差。

$t_{同期}$  ——重合闸后至瞬时滑差  $S_{12}$  过零之时间。

$\delta_{12}$  (合闸) ——重合闸瞬间的  $\delta_{12}$  角度。

t<sub>同步振荡周期</sub>—— $S_{12}$ 过零后同步振荡的最大振荡周期。

t<sub>异步振荡周期</sub>——重合闸后进入异步振荡的最大振荡周期。

异步振荡次数——重合闸后至同步振荡前的振荡次数。

注1： $\delta_{12}$ 在 $180^\circ$ 以前重合经 $180^\circ$ 滑至 $360^\circ$ 即算一步异步振荡。

注2：录波图略。

#### 四、非同期重合闸现场试验结果及其分析

经初步计算分析，罗变与新电之间进行非同期重合闸，不论是冲击电流或再同期条件都是满足要求的。为了进一步探讨采用非同期重合闸的可能性和现实性，在某系统上进行了三次非同期重合闸试验，现将试验结果整理分析如下。

1) 试验接线图见图(1)非同期重合地点在罗变罗×线出线开关\*117及新电新×线出线开关\*119。

2) 试验运行方式如表(3)

电 厂 名 称	运 行 机 组	实际出力MW	备 注
1 电	*101至*104	10.7	罗侧总合
2 电	*201至*206加*208	73	110.7MW
3 电	*402	12	
4 电	*804至*805	15	
新 电	*301至*303	24	第三次试验7电
5 电	*501至*502	12	加*606增1M
6 电	*702	12	W, 新侧总合53
7 电	*601至*604	5	MW

3) 试验次数及说明见表(4)

编号	合闸地点	合闸角	合闸滑差	经重合闸开关的功率及方向	断合闸方式	机组负载率	能否再同期
1	新侧*119	约 $120^\circ$	0	0	人工解列手动合闸		能
2	罗侧*117	约 $130^\circ$	5.8	反向11MW	手动出口中间继电器跳闸后经2.5秒	受端约90%	能
3	罗侧*117	约 $300^\circ$	6.6	反向18MW	自动重合	受端约80%	能

功率方向： 新侧指向罗侧为正向 罗侧指向新侧为反向

4) 运行参数试验结果及其分析

实际的某电力系统在罗新之间并非纯粹用一条输电线联结，而是中间还支接有二个变电站。现场试验中在2电、新电、罗变及1变安排了共六台录波器进行运行参数的录取，其结果整理如下。

① 2电

表(5)

试验号	*8机定子电流 (K A)		6K V母线电 压(K V)		110K V母线 电压(K V)		*8机励磁机 电压(V)		强励动作 情 况
	实测	计算	实测	计算	实测	计 算	正常	最大	
1	5.6	4.7	4.9	5.03	78.3	77.5			动 作
2	(1.97)	(1.65)	(0.78)	(0.8)	(0.68)	(0.675)	160	254	
3	5.7 (2)	同上	4.9 (0.78)	同上	81.2 (0.7)	同 上	170	302	

说明：(1)表中电流实测值系指暂态过程中的最大值(不一定在合闸瞬间)；电压实测值系指暂态过程中的最小值。

(2)计算值系指两侧发电机电势角相差180°时合闸之值。

(3)括号中之值为相对发电机额定电流及母线电压之标么值。

## ②新电

表6

试验号	*3 定子电流 (K A)		6 K V 母 线 电 压 (K V)		110K V 母 线 电 压 (K V)		*3 机励磁机 电压(V)		强 励 动 作 情 况
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	正常	最大	
1	2.9	4.02 (3.04)	3.78	4.28 (0.68)			160	340	动 作
2	3.96	同上	3.5	同上	32.8	40 (0.35)	160	330	动 作
3	3.19	同上	3.88	同上	32.8	同上	160	302.5	动 作

## ③罗变

表7

试验号	罗 × 线 冲 击 电 流 (K A)		110K V 母 线 电 压 (K V)		110K V 母 线 负 序 电 压 (K V)	
	实 测	计 算	实 测	计 算	实 测	计 算
1	0.52	0.795	85	72	14.3	18
2	0.54	同 上	78.7	同 上		
3	0.448	同 上	75.6	同 上		

说明：另序电流出现时间极短，胶卷上未能看出具体数值。

④ 1 变

表 8

运行参数 试验号	× × 线冲击电流 (K A)		110K V 母线电压 (K V)		某6K V 出线电流	
	实 测	计 算	实 测	计 算	正 常	
1						
2	0.6	0.795	41.9	27.4	1	2.45
3	0.582	同 上	41.9	同 上	1	1.5

说明：重合前某 6 K V 出线负载电流为 1，重合后由于电动机自启动出现较大电流，其值以正常电流为基准。

⑤ 新分线冲击电流

表 9

试验号	实 测 值 (A)	罗新间非同期	新 7 间非同期
		重合时计算值 (A)	重合时计算值 (A)
1	133.5	122	334
2	120	同 上	同 上
3	120	同 上	同 上

说明：新 7 间异步振荡时，新分线冲击电流将远小于 334 A 到约在 120 A 左右。

⑥ 振荡次数及周期

表 10

试验号	罗 新 之 间								新 6 之 间								
	异 步 振 荡				同 步 振 荡				异 步 振 荡				同 步 振 荡				
	实 测		计 算		实 测		计 算		实 测		计 算		实 测		计 算		
	次数	周期	次数	周期	次数	周期	次数	周期	次数	周期	次数	周期	次数	周期	次数	周期	
1	0		0		2	0.6"			5 次以上					4	1.2"		
2	0		0		2	0.5"			40	0.84"				4	1.2"		
3	0		0		2	0.64"			0					4	1.5"		

说明：(1) 以上振荡周期为最大值。

(2) 第二次试验时新 6 之间异步振荡约维持 10 秒。

⑦机电暂态过程计算与试验结果

表11

项 目	结 果		模 拟 计 算 结 果		现 场 试 验 结 果	
开 机 容 量	$W_1 = 96\text{MW}$ $W_2 = 59.6\text{MW}$		$W_1 = 110.7\text{MW}$ $W_2 = 53\text{MW}$			
重 合 闸 时 间	$T = 2$ 秒		$T = 2.5$ 秒			
试 验 编 号	6	9	3	2		
录 波 图 号	17	20	10~15	4-9		
罗 侧 负 载 率	0.8	0.8	0.95以上	0.95		
新 侧 负 载 率	0.8	0.9	0.8	0.9		
输 送 功 率 1 侧 → 2 侧	20MW	10MW	18MW	11MW		
$S_{12}\text{max}\%$	4.5	2.4	6.6	5.8		
$S_1\text{max}\%$	-1.5	-0.95	-1.6	0.8		
$S_2\text{max}\%$	3	1.4	5	5		
T 同 期 (秒)	0.34	0.56	0.24	0.16		
T 同 步 振 荡 周 期 (秒)	0.8	0.64	0.64	0.5		
T 异 步 振 荡 周 期 (秒)	/	/	/	/		
$\delta_{12}$ (合 闸)	0	$180^\circ$	$300^\circ$	$130^\circ$		
异 步 振 荡 次 数	0	0	0	0		

## ⑧试验结果分析

(一) 以上之冲击电流计算值为最大可能值, 即在重合闸两侧机组电势相位角差 $180^\circ$ 时的冲击值, 而试验实测值则并非在此最严重情况, 从2电及新电的试验结果中可知〔见表(5)(6)〕, 实际冲击电流最大值会超过计算最大值, 这里由于强励的作用及罗新两侧的同侧各电厂间电机电势相对角发生相对摇摆的影响。从结果分析可知, 一般误差约在20%左右。

(二) 罗新闻线路中的冲击电流实测值一般不超过计算值〔见表(7)、(8)〕。 $\times\times$ 线冲击电流比罗 $\times$ 线冲击电流还大, 其原因可能是由于1变低压侧负载电动机自启动电流的影响, 以及测量误差所引起。

(三) 新6之间由于电气距离较远, 联系较薄弱及机组调速特性不完全配合, 以致在罗新闻非同期重合闸的扰动下引起稳定的破坏进入异步运行, 异步运行可长达10秒, 但经自动调节器作用最终仍能自动拖入同步。

(四) 新6间异步振荡时的冲击电流并不很大〔见表(9)〕, 对新6间发电机的电流冲击在允许范围内。冲击电流小的原因是因为6、7地区机组暂态电抗较大, 而异步振荡的参数是由此暂态参数所确定。

(五) 机电暂态过程的计算结果与试验结果〔见表(11)〕虽然两者运行条件不完全相同, 但较近似, 可作为对照的参考。从结果分析可得出这样结论: 计算结果基本上符合客观规律。

#### (六) 继电保护装置动作情况

第二次试验时×变6KV出线过流保护误动作跳闸( $I_{CP}=7$ 安,  $t_{CP}=0.8$ 秒,)自动重合闸成功。误动原因可能由于电动机的自启动引起。

第二、三次试验时,7电\*2主变低压过流保护误动作跳闸(整定40V 725A  $t_p=4.2$ 秒)。误动原因可能是继电器返回特性不符合要求而引起。

其余继电保护均正确动作

#### (七) 非同期重合闸对用户的影响

由于系统第一个振荡中心在×变附近,第二个振荡中心在7电110KV联络变压器内靠6KV母线侧,致使6、7地区、×变及1变之电压严重下降,造成欠压释放的用户大量甩负荷,此三处地区负荷都约甩掉50%,新电地区亦甩掉一小部分负荷,2电地区负荷影响较小。

#### (八) 冲击电流对发电机及其他电器的影响

本系统在罗新间采用非同期重合闸的冲击电流并不大(都在允许范围内),经实际现场试验证明对机组及其他电器并无损伤或变形的影响。

## 五、运行小结

### 1) 投入运行前继电保护装置的改进

#### ① 距离保护的改进

GH-11型距离保护装置为满足非同期重合闸的要求,振荡闭锁接线回路图应进行更改。如图8(a)。

由于本系统距离保护振荡闭锁在正常情况下均常启动,故在振荡闭锁的负序电压滤过器二次侧连接片(11)、(13)的位置上串联一个五次谐波滤过器(原连接片断开),以消除振荡闭锁装置误动而使非同期重合时引起误跳闸。

振荡闭锁接线回路图更改后,为改善重合于永久性三相短路保护动作时间过长的缺点,要增设带时限的后加速回路。因此增加一个9PB时间继电器,为了达到有故障使16PIY复归慢,没有故障复归快的目的,16PIY采用经由16PIIT常开接点自保持的方式,见图(8)。9PB整定时限为2秒。

GH-11型距离保护的振荡闭锁装置均不用重合闸后快速复归及切除故障后快速复归而采用慢速复归的方式。此外,凡采用重合闸后加速第I段的均需经振荡闭锁装置的接点。

#### ② 振荡解列装置的改进

系统进行非同期重合闸后,若系统不能自动拖入同期,为避免系统长期振荡对设备和用户造成危害,因此在功率分点附近装设振荡解列装置。

原在1变装置一套按振荡三周半解列的振荡解列装置。根据容许一定时间异步运行的条件,将该装置更换为按异步振荡时间解列的装置。接线如图(9)示。根据功率输送情况,解列点,根据调度员命令进行倒换。

#### ③ 用户继电保护的改进

由于在非同期重合后系统振荡造成用电设备欠压释放,因此系统内重要负载如果设备容

许,可解除欠压释放或增加延时欠压释放以提高供电的可靠性。

#### ④重合闸回路的更改及动作时限的整定。

要求重合闸直流回路中装设非同期重合闸压板(并接在无压与检定同期继电器接点回路)。自动重合闸回路由开关位置继电器接点直接启动。

非同期重合闸时间与无压检定重合闸的时间相同。

#### ⑤运行情况小结

某电力系统罗变与新电之间自73年底起,(除新电外)已陆续在各段上装设非同期重合闸装置并投入运行。根据74年运行统计,罗变与新电之间各段共发生短路故障29次,其中6次是发生在新×线上,因一侧未装非同期重合闸而未有重合成功外,其余23次均进行了重合闸,其中有13次重合闸成功,恢复了系统的正常供电,有10次因有永久性故障而未重合成功\*。75年上半年共发生3次线路故障,均重合成功。总之运行一年多来,效果较好。

\*永久性故障原因①人为将茅竹靠近电线而放电②架空地线断线引起多次故障③避雷针被风刮断掉在C相引起接地造成多次故障。这些故障原因消除后,75年HAIIB动作成功率已达100%

在多次重合闸中均未引起继电保护误动作,仅在75年5月12日××线故障时,两侧开关跳闸并重合成功\*。但在重合过程中引起××线×侧GH—11I段误动作跳闸。事后对该套距离保护进行了检查,发现振荡闭锁开放时间增长,至使重合闸后振荡时,引起距离保护误动作。

在多次非同期重合闸中,均未发现系统拖不入同步而产生长时间异步振荡,一般说来拖入同步还是非常快的。故未发现振荡解列装置动作。但是目前采用的按电流启动的振荡解列装置,由于系统间交换功率较大,而系统间异步振荡时的冲击电流相对线路中输送的负荷电流说来并不很大,致使振荡解列装置的整定产生一些困难,因此拟改用按异步振荡时阻抗特性变化原理而启动的振荡解列装置。

\*在线路上破口接一变压器,变压器两侧出线开关未装非同期重合闸,仅按无压检定投入运行。

由于近年来某电力系统的迅速发展,系统装机容量有了较多的增长,经过验算,一般采用的运行方式下,非同期重合闸时的冲击电流仍能满足电器设备的要求,而其可靠再同期的范围也将比计算或试验时扩大\*,因此系统非同期重合后的再同期能力有所加强,在多次重合中未引起罗新之间的长期振荡,也未引起新6之间的长期振荡,因此罗新之间所采用的非同期重合闸仍可继续使用。

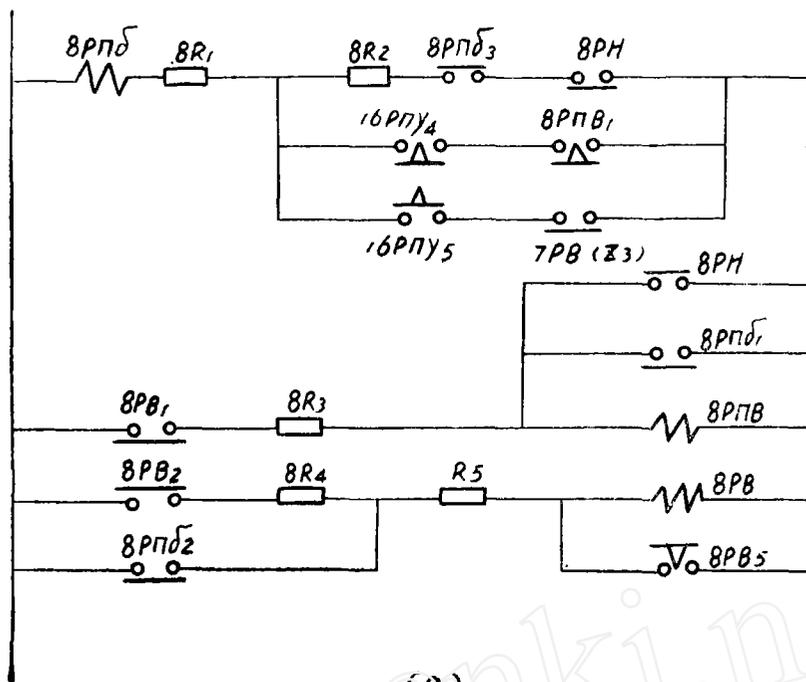
\*在输送40MW负荷下进行非同期重合闸均能拖入同期。

## 六、结束语

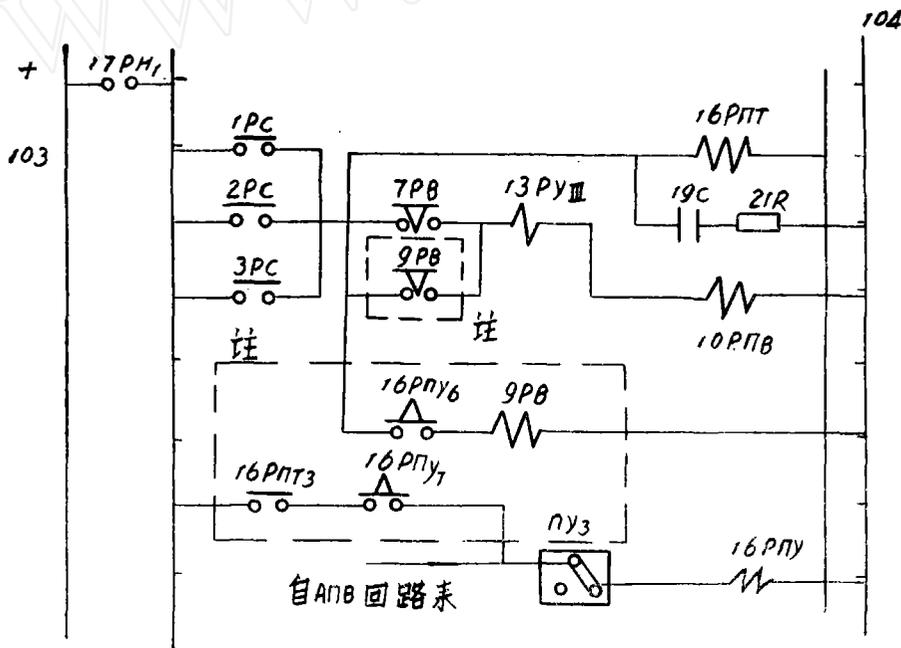
某电力系统在罗变到新电之间采用非同期重合闸,经过容许冲击电流计算及可靠再同期范围的模拟计算,并经过实际现场试验及一年半来的运行考验,证明两个系统间采用非同期重合闸是可行的,运行效果是良好的。本文中提供的模拟计算方法可作为两机系统非同期重合闸试验前的分析参考及作为运行时可靠再同期范围的确定之用。在冲击电流的计算及现场试验结果中可知:非同期重合闸的线路中冲击电流的实测值小于计算值;而发电机的冲击电

流实测值则有可能大于计算值，因此在编制容许运行方式时必须适当地加以考虑。  
由于作者水平有限，错误之处望读者批评指正。

www.cnki.net



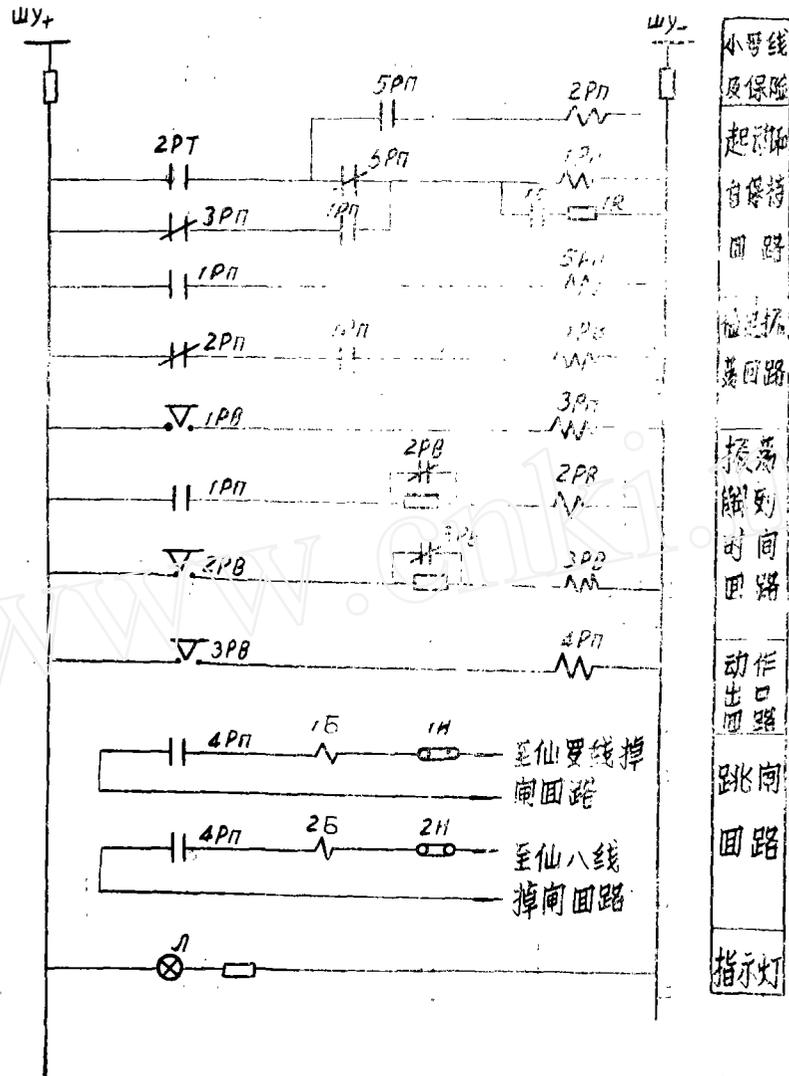
(a)



(b)

图(8)

注：振荡闭锁接线回路图更改以后为改善重合于永久性三相短路保护动作时间过长的缺点，要增加带延时限的后加速回路，因此增加一个时间继电器 9 P B，为了达到有故障复归快的目的，16 P II<sub>y</sub>采用经由16 P II<sub>T</sub>常开接点自保持的方式。9 P B可采用 D S—112 整定时间为 2 秒。



图(9) 振荡解列装置展开图

- ①启动电流继电器 1 P T、2 P T 分别接××线、××线 C T B 相。返回系数要求 0.9
- ② 1 P B 整定为 2 秒即可起到检定振荡的作用，在一般情况下振荡周期不会大于 2 秒。在继续存在振荡时 3 P II 不能起动使自保持回路复归。如振荡消失，2 秒后则 3 P II 起动使自保持回路复归，因而 2 P B 也复归，即不会解列。
- ③ 1 P T 直流回路暂不接入

附录一 罗新间重合时各机组最大冲击电流

厂名	机组	允许冲击电流	正常运行方式冲击电流	检修运行方式冲击电流
8	# 1	4.55	0.29	0.2
	# 2	2	0.65	0.46
	# 3	5.8	0.48	0.33
	# 4	4.55	0.7	0.48
2	# 1	4.9	1.06	0.52
	# 2	4.9	1.06	0.52
	# 3	5.63	1.25	0.61
	# 4	5.63	1.25	0.61
	# 5	5.34	1.18	0.57
	# 6	5.63	1.36	1.67
	# 7	5.15	1.94	1.69
	# 8	5.15	1.58	2.55
9	12MW	4.78	2.22	1.16
	6 MW	4.9	2.14	0.37
8	25MW	5.15	0.73	1.76
	12MW	4.78	2.53	1.8
7	# 1	3.25	2.4	1.39
	# 2	3.25	2.4	1.39
	# 3	3.25	1.9	1.11
	# 4		1.91	1.11
	# 5		1.91	1.11
	# 6		1.91	1.11
6	# 1	4.9	2	0.69
	# 2	4.78	2.17	0.83
10	25MW	5.15	2.32	1.75
5	8.8MW	3.03	2.32	2.55
新	# 1	5.32	3.84	3.67
	# 2	5.32	3.84	3.67
	# 3	5.32	2.2	2.94
4	7.5MW	2.72	2.45	2.98

说明：考虑了七种正常运行方式及八种检修运行方式。

## 附录二 等值机惯性常数计算

等值机惯性常数采用加权平均值

最大运行方式时:

罗侧等值机惯性常数

$$T_{M1} = \frac{6 \times 6 \times 8.68 + 6 \times 12 \times 9.33 + 2 \times 25 \times 11.04}{158} = 9.68 \text{秒}$$

新侧等值机惯性常数

$$T_{M2} = \frac{2 \times 8.8 \times 4.825 + 3 \times 6 \times 8.68 + 2 \times 12 \times 9.33 + 1 \times 9 \times 9}{68.6} = 7.97 \text{秒}$$

折算到基准容量

$$T_{M1} = 9.68 \frac{158}{100} = 15.3 \text{秒}$$

$$T_{M2} = 7.97 \frac{68.6}{100} = 5.48 \text{秒}$$

中间运行方式时:

$$T_{M1} = 9.5 \text{秒}$$

$$T_{M2} = 4.65 \text{秒}$$

汽轮(水轮)发电机组惯性常数表

机组额定容量(MW)	发电机组惯性常数(秒)
6	8.68
12	9.33
25	11.04
9	9
8.8	4.825 (水轮机组)

## 附录三 等值机电抗计算

发电机电抗参数

发电容量	X <sub>d</sub>	X <sub>q</sub>	X' <sub>d</sub>	X'' <sub>d</sub>
6 MW	2.09		0.182	0.1156
12 "	2.257		0.187	0.122
25 "	2.255		0.235	0.16
7.5 " (水轮机)	0.946	0.597	0.272	0.2013
8.8 " (水轮机)	1.014	0.649	0.294	0.215

最大运行方式:

罗侧等值机 (按  $6 \times 6 + 6 \times 12 + 2 \times 25$  机并联计算得)

$$\begin{aligned} X_{d1} &= 1.12 & X_{q1} &= 1.12 \\ X'_{d1} &= 0.1 \\ X''_{d1} &= 0.066 & X''_{q1} &= 0.06 \end{aligned}$$

新侧等值机 (按  $2 \times 8.8 + 3 \times 6 + 2 \times 12 + 1 \times 9$  台机并联计算)

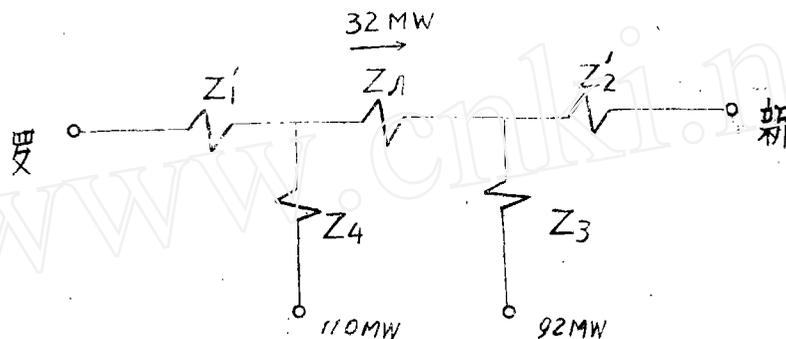
$$\begin{aligned} X_{d2} &= 2 & X_{q2} &= 2 \\ X'_{d2} &= 0.24 \\ X''_{d2} &= 0.16 & X''_{q2} &= 0.16 \end{aligned}$$

等值机时间常数:

$$\begin{aligned} \text{罗侧取: } T'_{d1} &= 0.6 \text{秒} & T''_{d1} &= 0.07 \text{秒} \\ \text{新侧取: } T'_{d2} &= 0.8 \text{秒} & T''_{d2} &= 0.05 \text{秒} \end{aligned}$$

## 附录四 系统阻抗计算

适当考虑负载阻抗对系统阻抗的影响, 等值图如下:



最大运行方式时:

$$Z'_{12} = 0.132 + j2.324 = 2.324 / 86.75^\circ$$

若在新侧母线及罗侧母线各带60MW负载计算, 则

$$Z'_{12} = -0.268 + j1.834 = 1.86 / 98.3^\circ$$

当新侧向罗侧输送25MW时, 则

$$Z'_{12} = 1.52 / 81.9^\circ$$

## 附录五 异步力矩计算

异步力矩可按式计算

$$M_{ac1}(S_{12}) = -\frac{U^2 (X_d - X'_d)}{2Z^2_{12} \left(1 - \frac{X_d - X'_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \times \frac{S T'd}{1 + (S T'd)^2}$$

$$-\frac{U^2 (X'_d - X''_d)}{2Z_{12} \left(1 - \frac{X_d - X'_d \cos\alpha_{11}}{Z_{11}}\right) \left(1 - \frac{X'_d - X''_d \cos\alpha_{11}}{Z_{11}}\right)} \times \frac{S T''_d}{1 + (S T''_d)^2}$$

$$-\frac{U^2 (X_q - X''_q)}{2Z_{12} \left(1 - \frac{X_q - X''_q \cos\alpha_{11}}{Z_{11}}\right)} \times \frac{S T''_q}{1 + (S T''_q)^2}$$

式中U用 $E'_d$ 代替，新侧(2侧)等值机电抗用 $X_{d2}$ 代替。

当计算 $M_{ac2}$ 时，则 $E'_{d1}$ 代替U，罗侧等值机电抗为 $X'_{d1}$ 。

异步力矩特性经实际数字计算，其特性可近似用两段折线代替，其折线交点滑差为0.003。

当罗侧向新侧输送32MW时

$$\text{罗侧 } M_{ac1} = \begin{cases} 24 S_{12} & |S_{12}| \leq 0.003 \\ 0.072 & |S_{12}| \geq 0.003 \end{cases}$$

$$\text{新侧 } M_{ac2} = \begin{cases} 48 S_{21} & |S_{21}| \leq 0.003 \\ 0.146 & |S_{21}| \geq 0.003 \end{cases}$$

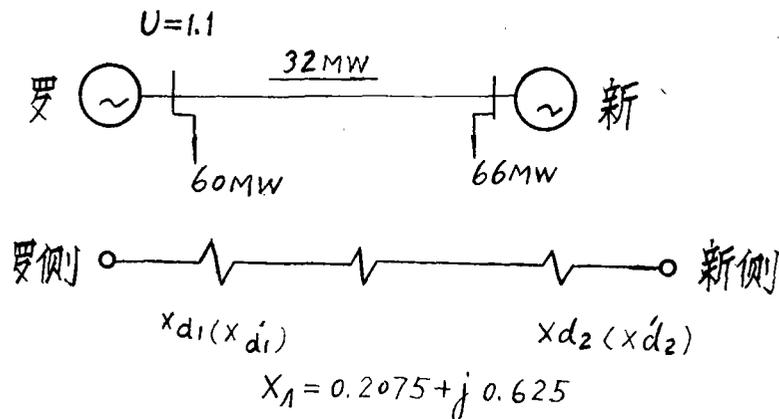
当新侧向罗侧输送25MW

$$\text{罗侧 } M_{ac1} = \begin{cases} 34 S_{21} & |S_{12}| \leq 0.003 \\ 0.102 & |S_{12}| \geq 0.003 \end{cases}$$

$$\text{新侧 } M_{ac2} = \begin{cases} 76 S_{21} & |S_{21}| \leq 0.003 \\ 0.234 & |S_{21}| \geq 0.003 \end{cases}$$

## 附录六 等值机电势计算

最大运行方式时系统等值图如下



当计算 $E_d$ 时电抗用 $X_d$ ；当计算 $E'_d$ 时电抗用 $X'_d$ 。

当功率分布如图所示，设罗变母线电压为1.1计算得：

$$E_{d1} = 2.08$$

$$E_{d2} = 1.78$$

$$U_{\text{新}} = 0.913$$

$$E'_{d1} = 1.33$$

$$E'_{d2} = 1.09$$

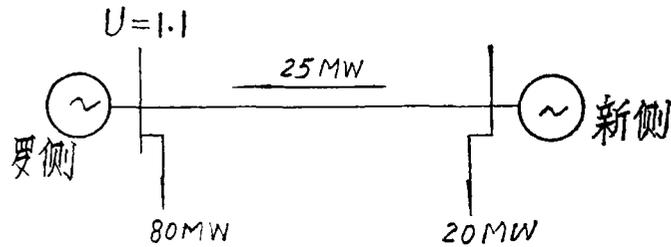
若新侧向罗侧输送功率25MW时得：

$$E_{d1} = 1.95$$

$$E_{d2} = 2.09$$

$$E'_{d1} = 1.25$$

$$E'_{d2} = 1.16$$



### 附录七 $M_{11}, M_{22}$ 的计算

最大运行方式时负载按0.9计

罗侧出力为  $158 \times 0.9 = 142 \text{ MW}$

当罗侧向新侧输送32 MW时

$$M_{11} = 142 - 32 = 110 \text{ MW} \quad \text{标么值 } M_{11} = \frac{110}{100} = 1.1$$

新侧出力为  $68.6 \times 0.9 = 62 \text{ MW}$

$$M_{22} = 62 + 32 = 92 \text{ MW} \quad \text{标么值 } M_{22} = \frac{92}{100} = 0.92$$

当新侧向罗侧输送功率25 MW时

$$M_{11} = 142 + 25 = 167 \text{ MW} \quad \text{标么值 } M_{11} = \frac{167}{100} = 1.67$$

$$M_{22} = 62 - 25 = 37 \text{ MW} \quad \text{标么值 } M_{22} = \frac{37}{100} = 0.37$$