

小接地电流网络断相闭锁继电器的研究

许昌继电器研究所 沈学斌 原克温

前 言

电压互感器回路断相故障是经常发生的。电压互感器断相后,接到互感器二次的一些继电器,因为失压或者电压突然降低,将造成误动作。例如负序电压继电器,正常时通过电压互感器供给三相正序电压,因此不动作;然而当互感器发生一相或二相断相时,就破坏了正常工作的平衡状态,将导致负序电压继电器误动作;又例如偏移阻抗继电器、全阻抗继电器当电压互感器断相时,失去制动电压而造成误动。正因为电压互感器断相时造成继电保护误动作,为此要求装设电压断相闭锁继电器,当电压互感器发生断相时(如熔断器熔断时),对保护进行可靠闭锁,防止保护误动作。然而,我国目前生产的LB-1型断相闭锁继电器,虽然广泛地应用于小接地电流网络,但它不能反映电压互感器一次断相情况,因此当电压互感器高压熔断器出现熔断的情况下,LB-1型断相闭锁继电器是无法反映的,这样将造成保护在这种运行情况下误动作。为了实现在电压互感器一次和二次断相时都能可靠地进行闭锁,有必要研制一种新型断相闭锁继电器,替代LB-1型断相闭锁继电器。为此我们研制了新型断相闭锁继电器,不仅性能能替代LB-1,而且能保证电压互感器一次断相时可靠闭锁。

一、电压互感器一次断相时LB—1型 断相闭锁继电器工作情况的分析

为了便于了解LB-1型断相闭锁继电器在原理上存在的一些缺陷,有必要分析在各种故障情况下,它的动作情况及电压变化规律。

图1示出了LB-1型断相闭锁继电器的原理接线图。正常运行时,三相电压对称,它们分别加到继电器绕组 W_2 、 W_3 、 W_4 上,而此时又不存在零序电压,因此磁通是平衡的,故次级绕组 W_5 上的感应电势等于零,执行元件不动作;当电力系统发生单相接地或两相接地时,电压互感器开口三角侧出现零序电压 $3u_0$,它加在继电器绕组 W_1 上,而零序电压 u_0 加在 W_2 、 W_3 、 W_4 上,而 W_1 绕组内电流产生的磁通与 W_2 、 W_3 、 W_4 绕组内产生的磁通互相抵消,合成磁通为零,因此绕组 W_5 仍然无感应电势,执行元件不动作。

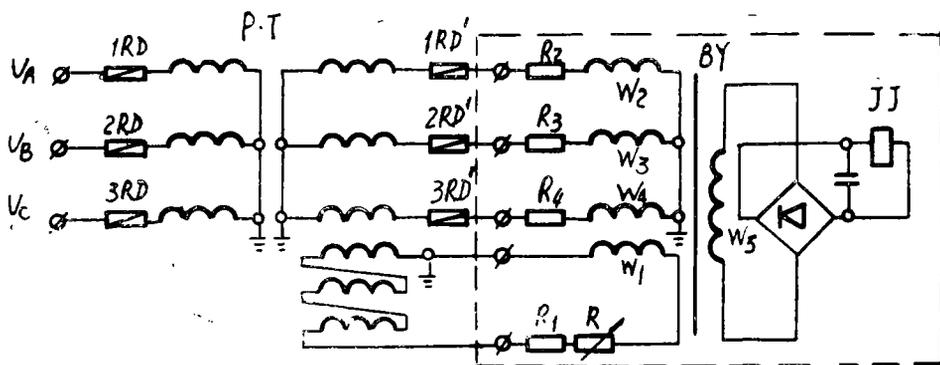


图1 LB-1 原理电路

当发生相间短路，假定BC相间短路，根据短路时的边界条件，电压互感器一次电压 $\dot{U}_{1.BC} = 0$ ，同样在电压互感器二次 $\dot{U}_{2.BC} = 0$ ，图2示出了电压互感器一次、二次电压的矢量图，从图中可以看出：

$$\dot{U}_{2.A} = \dot{U}_{2.B} + \dot{U}_{2.C} \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{即 } \dot{U}_{2.B} = \dot{U}_{2.C} = -\frac{j}{2} \dot{U}_{2.A} \quad \dots\dots (2)$$

上述三种电压分别加到 W_2 、 W_3 、 W_4 绕组上，根据克希荷夫定理：

$$\dot{U}_{2A} + \dot{U}_{2B} + \dot{U}_{2C} = \dot{U}_{2A} - \frac{1}{2} \dot{U}_{2A} - \frac{1}{2} \dot{U}_{2A} = 0 \quad \dots\dots (3)$$

从上式可知，在 W_2 、 W_3 、 W_4 绕组内电流所产生的合成磁通是平衡的，故 W_5 的感应电势为零，执行元件 JJ 不动作。

当电压互感器一次高压熔断器 1RD 熔断时，根据边界条件，电压互感器一次电压 $\dot{U}_{1.A} = 0$ ，电压互感器二次电压 $\dot{U}_{2.A} = 0$ ，图3示出了电压互感器一次、二次电压矢量图，从图中可以看出：

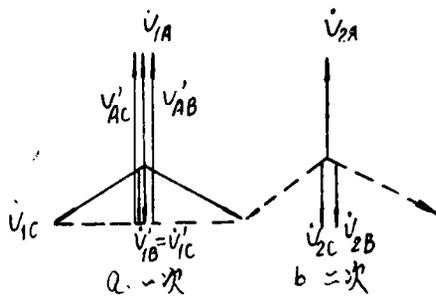


图2 BC短路电压矢量图

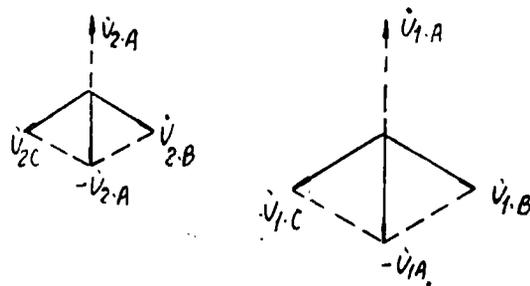


图3 RD熔断时电压矢量图

$$\dot{U}_{1A} + \dot{U}_{1B} + \dot{U}_{1C} = 0 + \alpha \dot{U}_{1A} + \alpha^2 \dot{U}_{1A} = -\dot{U}_{1A} \quad \dots\dots (4)$$

式中： α ——运算子 $\alpha = e^{j120^\circ}$

从(4)式可知, $-\dot{U}_{1A}$ 这样一个单相电压使电压互感器开口三角侧产生了零序电压加到继电器绕组 W_1 上, 同样地 $-\dot{U}_{1A}$ 这样一个单相电压使电压互感器二次产生电压, 从矢量图可以看出, $\dot{U}_{2A} = 0$, $\dot{U}_{2B} \neq 0$, $\dot{U}_{2C} \neq 0$, 因此绕组 W_3 、 W_4 施加了电压 \dot{U}_{2B} 和 \dot{U}_{2C} 而 W_3 、 W_4 绕组所加的综合电压为:

$$\dot{U}_{2A} + \dot{U}_{2B} + \dot{U}_{2C} = 0 + \alpha \dot{U}_{2A} + \alpha^2 \dot{U}_{2A} = -\dot{U}_{2A} \quad \dots\dots (5)$$

而 W_1 绕组上所加的电压为:

$$\frac{-\dot{U}_{1A}}{K} = -\dot{U}_{2A} \quad \dots\dots (6)$$

式中 K ——电压互感器的变比

比较(5)式和(6)式可以看出, \dot{U}_{2B} 、 \dot{U}_{2C} 在 W_3 、 W_4 绕组内电流产生的磁通与零序电压在 W_1 绕组内电流产生的磁通可以达到平衡, 故继电器二次绕组 W_2 内的感应电势为零, 因此执行元件 J 不动作, 不能实现闭锁。

通过以上分析可知, $LB-1$ 型断相闭锁继电器在电压互感器高压熔断器熔断时, 不能可靠地进行闭锁, 这是这种保护在原理上存在的一种无法克服的缺陷。

二、LB-4型断相闭锁继电器的动作原理

为了反映电压互感器高压熔断器熔断时, 断相闭锁继电器能可靠地进行闭锁, 故研制了 $LB-4$ 型断相闭锁继电器, 其原理电路图示于图4。该继电器由两组接在不同的电压互感器上的正序滤过器、隔离变压器、执行元件等构成。

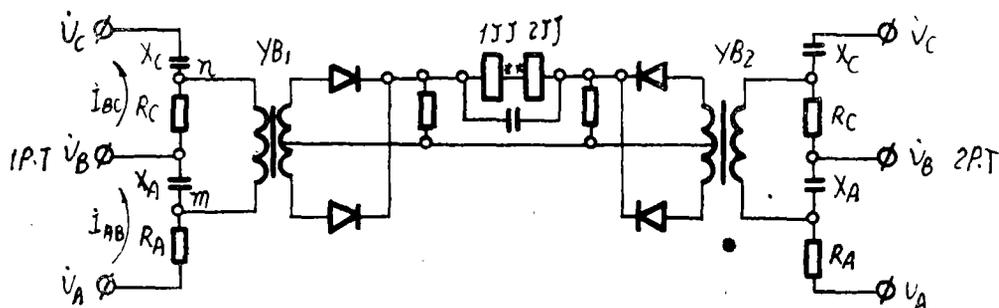


图4 LB-4原理电路

正常时, 由于正序滤过器分别接到不同的两组电压互感器上, 因此两组滤过器输出完全相等, 执行元件不动作。当系统发生故障时, 无论是接地故障还是相间故障, 两组正序电压滤过器一次电压完全一样, 因此其输出完全相等, 执行元件动作, 不闭锁保护。当任一组电压互感器一次或电压互感器二次熔断器熔断后, 接到故障电压互感器的正序电压滤过器输出电压降低, 而接到正常那组电压互感器的正序电压滤过器输出电压

保持不变，因此执行元件上有一个差电压作用，使执行元件1JJ或2JJ动作，对保护实现了可靠地闭锁功能。这样，新研制的继电器就克服了LB—1型断相闭锁继电器在原理上无法对电压互感器一次断相实现闭锁的缺陷。

三、LB—4型断相闭锁继电器在各种断相情况下灵敏度的分析

LB—4型断相闭锁继电器采用正序电压滤过器，而输出接到变压器YB的一次绕组，采用这样一种接线方式，当电压互感器A、B、C任意相发生断相，由于正序滤过器其内阻不一样，将有可能造成不同相断线时，断相闭锁继电器灵敏度有差异，其差异的大小完全取决于滤过器所接负载变压器的参数，如何选择变压器YB₁、YB₂一次压数的参数，使断相闭锁继电器做到在各种断相情况下，灵敏度比较接近，下面就着重分析一下LB—4型断相闭锁继电器的灵敏度。

正序电压滤过器的参数是这样选择的：

$$R_A = \frac{X_A}{\sqrt{3}}, \quad R_C = \sqrt{3} X_C \quad \dots\dots (7)$$

设AB回路电流为 \dot{I}_{AB} ，BC回路电流为 \dot{I}_{BC} ，因此，

$$\dot{U}_{AB} = \dot{I}_{AB} \cdot R_A + (-j \dot{I}_{AB} \cdot X_A) \quad \dots\dots (8)$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{I}_{BC} \cdot R_C + (-j \dot{I}_{BC} \cdot X_C) \quad \dots\dots (9)$$

滤过器空载输出电压：

$$\begin{aligned} \dot{U}_{m0} &= -j \dot{I}_{AB} X_A + \dot{I}_{BC} R_C \\ &= \frac{\dot{U}_{AB}}{R_A - jX_A} (-jX_A) + \frac{\dot{U}_{BC}}{R_C - jX_C} \cdot R_C \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{U}_{AB} e^{-j30^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{U}_{AB} e^{-j90^\circ} = 1.5 \dot{U}_{AB} e^{-j60^\circ} \quad \dots\dots (10) \end{aligned}$$

1：当A相断线时，其等值电路图示于图6，因此回路电流：

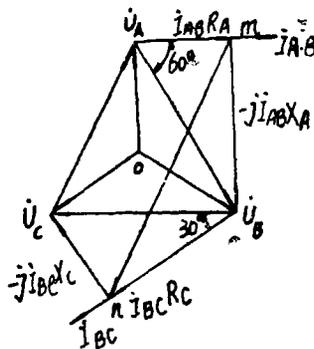


图5 正序滤过器向量图

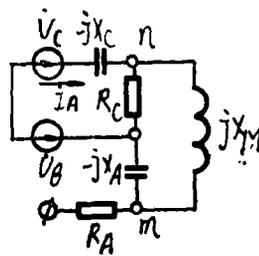


图6 A相断线等值电路

$$\dot{I}_A = \frac{-\sqrt{3}\dot{U}_A}{-jx_c + R_A + j(X_M - X_A)} \quad \dots\dots (11)$$

此时滤波器输出电压:

$$\dot{U}_{m\alpha} = \dot{I}_A \frac{R_C}{R_C + j(X_M - X_A)} \cdot jX_M \quad \dots\dots (12)$$

化简后,

$$\dot{U}_{m\alpha} = \frac{-\sqrt{3}\dot{U}_A \cdot R_C \cdot jX_M}{-jx_c R_C + x_c(x_M - x_A) + jR_C(x_M - x_A)} \quad \dots\dots (13)$$

式中: X_M —变压器的励磁阻抗

现在讨论两种极限情况,

a. 当 $X_M = X_A$ 时, 那么输出电压为:

$$\dot{U}_{m\alpha} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_A \cdot X_A}{X_C} \quad \dots\dots (14)$$

正序滤波器设计选取 $X_A = 2X_C$, 故正序滤波器的输出电压 $\dot{U}_{m\alpha} = 2 \cdot \sqrt{3}\dot{U}_A > 1.5\dot{U}_{AB}$, 比没有发生断相时电压要高一些, 假设线电压 $\dot{U}_{AB} = 100V$, 则在这种断相情况下, 滤波器输出电压 $\dot{U}_{m\alpha} = 200V > 150V$ 。

b. 当变压器励磁阻抗 $X_M \gg X_A$ 时, 滤波器输出电压为:

$$\dot{U}_{m\alpha} \approx \frac{-\sqrt{3}\dot{U}_A R_C}{R_C - jx_c} \quad \dots\dots (15)$$

又 $\because R_C = \sqrt{3}X_C$, 代入(15)式得:

$$\dot{U}_{m\alpha} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{3}\dot{U}_A e^{j30^\circ} < 1.5\dot{U}_{AB} \quad \dots\dots (16)$$

同样设线电压 $\dot{U}_{AB} = 100V$ 时, 则 $\dot{U}_{m\alpha} = 86.6V < 150V$, 在这种情况下, A相断线时, 滤波器输出电压 $\dot{U}_{m\alpha}$ 降低。

2. B相断线时, 其等值图示于图7, 同理:

$$\dot{I}_B = \frac{-\sqrt{3}\dot{U}_B}{R_A - jx_c + \frac{(R_C - jx_A) \cdot jX_M}{R_C + j(X_M - X_A)}} \quad \dots\dots (17)$$

$$\dot{U}_{m\alpha} = \dot{I}_B \cdot \frac{R_C - jx_A}{R_C + j(X_M - X_A)} \cdot jX_M \quad \dots\dots (18)$$

同样只讨论两种极限情况:

a. 当 $X_M = X_A$ 时, 滤波器输出电压:

$$\dot{U}_{m\alpha} = \frac{-\sqrt{3}\dot{U}_B}{1 + \frac{(R_A - jx_c) \cdot R_C}{(R_C - jx_A) \cdot jx_A}} \quad \dots\dots (19)$$

把 $X_A = 2x_c$, $R_C = \sqrt{3}X_C$, $R_A = \frac{X_A}{\sqrt{3}}$ 这些关系式代入(19)式化简可以得到:

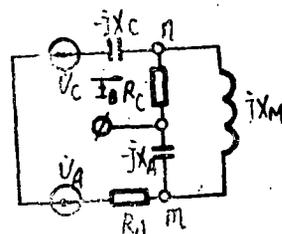


图7 B相断线等值电路

$$\dot{U}_{m.n} = -0.847 \cdot \sqrt{3} \dot{U}_B e^{i\varphi} \quad \dots\dots (20)$$

式中: φ —— 电压 $\dot{U}_{m.n}$ 与相电压 \dot{U}_B 之间的相位角

设线电压 $U_{AB} = 100V$, 那么滤过器的输出电压 $\dot{U}_{m.n} = 84.7V < 150V$, 在此种断相情况下, 正序电压滤过器输出是降低的。

b. 当励磁阻抗 $X_M \gg X_A$ 时, 滤过器输出电压为:

$$\dot{U}_{m.n} = \frac{-\sqrt{3} \dot{U}_B}{1 + \frac{R_A - jx_C}{R_C - jx_A}} \quad \dots\dots (21)$$

同样把 $R_C = \sqrt{3} X_C$, $R_A = \frac{X_A}{\sqrt{3}}$, $X_A = 2X_C$ 代入 (21) 式, 则获得:

$$\dot{U}_{m.n} \approx -0.63 \cdot \sqrt{3} \dot{U}_B e^{i\varphi} \quad \dots\dots (22)$$

当线电压 $\dot{U}_{AB} = 100V$, 则滤过器输出电压 $\dot{U}_{m.n} = 63V < 150V$; 在这种情况下 B 相发生断线, 正序电压滤过器的输出电压小于正常运行时滤过器输出电压。

3. 当 C 相断线时, 其等值图示于图 8, 同理:

$$\dot{I}_C = \frac{-\sqrt{3} \dot{U}_C}{R_A + \frac{(R_C + jx_M)(-jx_A)}{R_C + j(X_M - X_A)}} \quad \dots\dots (23)$$

$$\dot{U}_{m.n} = \dot{I}_C \cdot \frac{-jx_A}{R_C + j(X_M - X_A)} \cdot jx_M \quad \dots\dots (24)$$

如上所述, 只讨论两种极限情况:

a. 当励磁阻抗 $X_M = X_A$ 时,

$$\dot{U}_{m.n} = \frac{-\sqrt{3} \dot{U}_C \cdot X_A^2}{R_A R_C - jX_A(R_C + jx_A)} \quad \dots\dots (25)$$

同样, 把 $R_C = \sqrt{3} X_C$, $R_A = \frac{X_A}{\sqrt{3}}$, $X_A = 2X_C$ 关系代入 (25) 式, 化简后可以得到:

$$\dot{U}_{m.n} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{3} \dot{U}_C e^{j30^\circ} \quad \dots\dots (26)$$

设线电压 $\dot{U}_{AB} = 100V$, 则滤过器输出电压 $\dot{U}_{m.n} = 57.7V$, 在这种情况下发生 C 相断线, 其输出电压小于正常运行时滤过器输出电压。

b. 当励磁阻抗 $X_M \gg X_A$ 时,

$$\dot{U}_{m.n} \approx \frac{-\sqrt{3} \dot{U}_C}{1 + j \frac{R_A}{X_A}} \quad \dots\dots (27)$$

将 $R_A = \frac{X_A}{\sqrt{3}}$ 的关系代入 (27) 式, 则滤过器输出电压

$$\dot{U}_{m.n} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{3} \dot{U}_C e^{-j30^\circ} \quad \dots\dots (28)$$

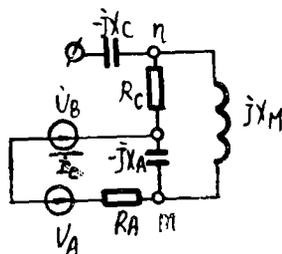


图 8 C 相断线的等值图

设线电压 $\dot{U}_{AB} = 100V$ ，那么滤波器的输出电压

$\dot{U}_{m.a} = 86.6V < 150V$ ，在这种情况下，C相发生断相故障，正序滤波器的输出电压小于正常运行时滤波器的输出电压。

通过以上对正序滤波器A、B、C三相分别发生断相故障的分析可以看出，正序电压滤波器的输出电压具有差异，也就是说LB—4型断相闭锁继电器灵敏度具有差异，其差异产生的原因主要是正序电压滤波器在不同相断相时，它对负载变压器而言，其内阻是发生变化的，因此导致正序电压滤波器的输出电压与它所连接的负载变压器阻抗有关系。

从分析计算结果可以看出，当负载变压器YB的励磁阻抗 $X_M = X_A$ 时，正序电压滤波器的输出电压见表1。表1所给出的数据为A、B、C分别断相时滤波器输出电压的计算值。

表1 $X_M = X_A$ 时正序滤波器输出电压

故障相	A	B	C
输出电压(V)	200	84.7	57.7

从表1可以看出，当变压器YB的励磁阻抗 $X_M = X_A$ 时，正序电压滤波器的输出电压变化很大，尤其当A相断线时，输出电压反应比正常运行时滤波器输出电压高，这样将造成运行人员对运行设备的判断错。假设本来是电压互感器 $P \cdot T_1$ A相发生断相故障，执行元件1JJ反而不动作，而有可能2JJ动作，由于2JJ的动作，使运行人员错误地判断为电压互感器 $P \cdot T_2$ 发生断相故障，从而有可能造成误操作，这在运行中是不允许的。其次在这种情况下，由于输出电压差异很大，这样就导致断相闭锁继电器可靠系数相差很悬殊，无法进行继电器的灵敏度的核算。

当变压器YB的励磁阻抗 $X_M \gg X_A$ 时，正序电压滤波器输出电压见表2。

表2 $X_M \gg X_A$ 时滤波器输出电压

故障相	A	B	C
输出电压(V)	86.6	63	86.6

从表2可以看出，当变压器YB的励磁阻抗 $X_M \gg X_A$ 时，正序电压滤波器的输出电压变化不是很大，因此在这种参数情况下，保证了断相闭锁继电器灵敏度基本上接近。

从上面分析结果可以看出，为了满足 $X_M \gg X_A$ 这样一个条件，要求YB₁、YB₂变压器一次匝数尽量多一些，这样，变压器励磁阻抗增加，满足了 $X_M \gg X_A$ 这一条件，使断相闭锁继电器灵敏度在不同相断线时一致。通过试验测定，当 $X_M \gg X_A$ 时，实测滤波器的输出电压与表2计算值是完全符合的。

四 结 论

通过对于LB—1型和LB—4型断相闭锁继电器的分析计算,表明新研制的LB—4型断相继电器不仅完全能替代LB—1型断相闭锁继电器,同时它具有下列特点:

1、新研制的LB—4型断相闭锁继电器,能用于小接地电流网络中,它不仅保证在电压互感器二次侧发生电压回路断线时,能可靠地给予闭锁,同时当电压互感器一次侧电压回路发生断线时,继电器也能可靠地进行闭锁。

2、新研制的断相闭锁继电器,在进行变压器YB参数设计时,选择YB一次绕组匝数较大的方案,这样满足了变压器的励磁阻抗 $X_M \gg X_A$ 的条件,从而克服正序滤波器在不同的相发生断相时,因滤波器的内阻变化而引起滤波器输出电压变化这样一个缺陷,因此保证了在不同相发生断相时,继电器灵敏度十分接近。

3、新研制的LB—4型断相闭锁继电器是反映两组正序电压滤波器的电压差而动作时,正常运行时执行元件1JJ、2JJ均承受一个较高的反向制动电压,使继电器可靠制动,而在发生断相故障时,执行元件中某一个元件所承受的制动电压小于工作电压而导致它迅速动作,由于动作过程中一直有一定的制动电压存在,无疑提高了返回系数,有利于与二次回路保护继电器进行配合。

机械工业部首次继电保护结构学术讨论会

机械工业部第一次继电保护结构学术讨论会于一九八二年十二月三日至七日在许昌举行。参加会议的有科研、设计、教学单位和继电保护行业制造厂等25个单位47名代表参加了会议。

会议宣读论文共十篇,对结构理论、结构科研和设计成果以及结构工艺、材料等方面的问题进行了交流。

结构方面的学术活动在机械工业部内,这还是第一次。结构是产品的一个重要组成部分,结构设计和产品设计互相交织,不可分割。随着科学和技术的进步,对产品结构的功能指标的要求也越来越高,结构的科研、设计、制造技术等,显而易见地重要起来。

这次学术讨论会,不仅在继电保护行业结构领域内进行了学术交流,而且与会成员一致呼吁各级各部门领导,应当重视产品结构的科研,设计和制造工作,大专院校应当培养结构科研设计人员;要求部、局领导成立隶属于电工学会电工、仪表行业的结构分会,开展电工、仪表产品的结构的科研,设计和生产的学术交流。为了便于继电保护行业的学术交流,决定成立继电保护行业结构学术活动网。

到会代表一致认为这次学术讨论会对继电保护结构科研和设计及电力工业的发展作出了一定的贡献。

(许昌继电器研究所 李瑞贻)