

电力系统继电保护和安全自动装置元件多重化的 可靠性效益和判据

电力工业部东北电力设计院 李元龙

大容量机组和超高压电网的发展,对继电保护的性能和质量要求可以说是更苛刻了,对继电保护的可靠性、选择性、灵敏度、快速性都提出了新的更严格的要求,但是在所有这些指标中,最重要的仍然是如何保证和提高其可靠性的问题。保护继电器可用不同的原理来构成,对于某个被保护元件,由于保护的配置和构成方式的不同,继电器选型的不同,会有许多方案可供选择。以往没有做可靠性水平的分析比较,因而在选择方案时,难免带有主观随意性。

近些年来,可靠性理论在实际应用方面有了长足的进展。一些工业先进国家已经把数理统计,概率论和可靠性理论应用于继电保护专业的分析研究工作中,以提高继电保护元件和设备的可靠性,提高保护运行的可靠性。可以期望,随着继电保护专业可靠性理论和实践的发展,能够对系统继电保护和安全自动装置的技术状态和运行可靠性作出令人满意的定量的评价。

继电保护装置的状态有:1.工作状态,或称运行状态;2.检修状态;3.故障状态;故障状态又分误动故障和拒动故障状态二种。可靠性工作着重研究工作状态,拒动故障状态和误动故障状态,而继电保护装置的维修则在其次。这个工作在基本概念,术语以及可靠性准则、数学模型,统计试验等方面可以借鉴其它技术部门的经验,但是不能照抄照搬。譬如和工业电子学方面的可靠性工作就有区别。电视机的电子元件如有损坏,不管它是开路故障还是短路故障,其后果都是“电视机故障”。而在继电保护中,电子元件是开路故障还是短路故障,引起继电保护误动还是拒动,则要仔细研究。因为动力系统继电保护的误动和拒动无论就其性质还是故障所引起的经济后果都有很大差别。

一个元件的保护系统有主保护和后备保护,并且是由多个保护继电器和复杂的接线构成的。一个晶体管继电器是由多个半导体器件组成的。为了提高保护系统或保护回路的可靠性,除了提高元件本身的可靠性之外,经常采用的措施就是元件附加冗余。本文将应用可靠性理论,讨论继电保护和安全自动装置回路(或系统)的可靠性计算方法和判据、元件多重化的各种接线方式的可靠性效益和计算结果。

一、几个元件并联的可靠度

继电保护装置有二类故障形式,即拒动和误动,本文误动包括无选择性动作,有些

候无选择性动作则要作为一种单独的故障类型进行讨论。讨论保护回路的可靠性就是分析它的开路故障概率（拒动）和短路故障概率（误动）。

如果一个元件开路故障概率为 r 、短路故障概率为 S ，并且开路故障和短路故障之间不存在相互依赖的关系，称作独立事件、依据概率论的迭加原理，则元件总的故障概率为 $q = r + S$ 式中：

$$\begin{aligned} 0 &\leq r \leq 1 \\ 0 &\leq S \leq 1 \\ 0 &\leq q \leq 1 \end{aligned}$$

大量的统计表明，保护继电器和半导体器件的失效规律符合指数分布，即这些元件经过严格的老化、筛选，并及时剔除了衰变的器件之后，它们工作在众所周知的浴盆曲线的“有效期寿命区间”。它们的开路故障率和短路故障率均为常数，若令其分别为 λ_r 和 λ_s ，则元件发生开路故障的概率为： $(1 - e^{-\lambda_r \cdot t})$

发生短路故障的概率为： $(1 - e^{-\lambda_s \cdot t})$

元件的不可靠度用 Q 表示，根据全概率定律、得：

$$Q = (1 - e^{-\lambda_r \cdot t}) + (1 - e^{-\lambda_s \cdot t}) - (1 - e^{-\lambda_r \cdot t})(1 - e^{-\lambda_s \cdot t})$$

上式第三项是阶小量，可以忽略不计，则元件发生故障的概率为：

$$\begin{aligned} Q &= (1 - e^{-\lambda_r \cdot t}) + (1 - e^{-\lambda_s \cdot t}) \\ &= 2 - e^{-\lambda_r \cdot t} - e^{-\lambda_s \cdot t} \end{aligned} \quad \dots\dots (1)$$

式中时间 t 的取值应使 $0 \leq Q \leq 1$ 。

元件的可靠度用 R 表示，则：

$$\begin{aligned} R &= 1 - Q \\ &= e^{-\lambda_r \cdot t} + e^{-\lambda_s \cdot t} - 1 \end{aligned} \quad \dots\dots (2)$$

式中时间 t 的取值应使 $0 \leq R \leq 1$

元件的可靠度和不可靠度都是时间的函数。在 $t = 0$ 时， $R = 1$ ， $Q = 0$ ，全部元件处在良好状态。元件一投入运行（从开始的时刻开始计时）损坏的概率就增大了，开路故障的概率和短路故障的概率同时增大，可靠度不断降低。任何元件都不具有永久性的寿命，当运行的时间足够长，元件必然损坏，其中一部分是开路故障，另一部分是短路故障。

设有几个元件，它们开路故障的概率为： r_1, r_2, \dots, r_n 。

它们的短路故障概率为： S_1, S_2, \dots, S_n 。

假若短路故障概率很小，可以忽略不计，即当 $S_1 = S_2 = \dots = S_n = 0$ 时， n 个元件并联总的故障概率 q_n 为：

$$q_n = \prod_{i=1}^n r_i = r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_n \quad \dots\dots (3)$$

这也就是并联回路发生拒动故障的概率。

当开路故障概率很小，可以忽略不计时， $r_1 = r_2 = \dots = r_n = 0$ 、 n 个元件并联总的故障概率为：

$$q_n = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - S_i) \quad \dots\dots (4)$$

这也就是并联回路发生误动故障的概率。

一般情况下，元件同时存在开路故障和短路故障的可能，（这是从统计观点出发，并不是说元件会同时发生开路故障和短路故障）。即 $r_i \neq 0$ ， $S_i \neq 0$ 。这样的 n 个元件并联，其回路总的故障概率为：

$$q_n = \prod_{i=1}^n r_i + 1 - \prod_{i=1}^n (1 - S_i) \quad \dots\dots (5)$$

如果并联回路是由 n 个同类元件构成的，且各元件具有相同的开路和短路故障概率

$$r_1 = r_2 = \dots = r_n = r$$

$$S_1 = S_2 = \dots = S_n = S$$

则这个并联回路故障的概率为：

$$q_n = r^n + 1 - (1 - S)^n \quad \dots\dots (6)$$

其可靠度为：

$$R_n = 1 - q_n \quad \dots\dots (7)$$

应当指出的是，以上所讨论的都是指继电保护设备的可靠性，仅讨论元件本身，而与继电保护运行的可靠性有所不同。例如保护回路发生短路故障，固然可以导致开关误跳闸，而开路故障则不等于开关的拒动。比如由于出口中间继电器断线，控制回路电源消失等原因造成跳闸回路失灵，但能否发生开关拒动的事故，还要看，在跳闸回路失灵故障消失之前，被保护元件是否同时发生了该保护回路应发跳闸脉冲的故障，只有保护回路的拒动故障和被保护元件的故障同时存在，才造成开关拒动事故。保护装置发生拒动故障只是一个必要条件，并不能等同于拒动事故。

二、几个元件串联的可靠度

设有 n 个元件，开路故障概率为： r_1, r_2, \dots, r_n 。短路故障概率为： S_1, S_2, \dots, S_n 。

假若短路故障概率很小，可以忽略不计时，即 $S_1 = S_2 = \dots = S_n = 0$ ， n 个元件串联的故障概率 q_n 为：

$$q_n = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - r_i) \quad \dots\dots (8)$$

这也就是串联回路发生拒动故障的概率。

当元件开路故障概率很小，可以忽略不计，即当 $r_1 = r_2 = \dots = r_n = 0$ 时， n 个元件串联总的故障概率为：

$$q_n = \prod_{i=1}^n S_i \quad \dots\dots (9)$$

这也就是串联回路发生误动故障的概率。

当 $r_i \neq 0$, $S_i \neq 0$ 的 n 个元件并联, 其回路的可靠度为:

$$q_n = \prod_{i=1}^n S_i + 1 - \prod_{i=1}^n (1 - r_i) \quad \dots\dots (10)$$

同样, 如 $r_1 = r_2 = \dots\dots = r_n = r$

$$S_1 = S_2 = \dots\dots = S_n = S$$

则 n 个元件串联回路总的故障概率 q_n 为:

$$q_n = S^n + 1 - (1 - r)^n \quad \dots\dots (11)$$

其可靠度为:

$$R_n = 1 - q_n \quad \dots\dots (12)$$

三、并联冗余的效益和判据

元件在输入端给定一个信号, 元件的输出端就发出一个信号。若这个元件发生了故障, 其输出端就不能给出信号, 元件在应当动作的条件下没能动作, 这是拒动故障。如果用同一个类性质的元件与其并联, 那么只有这二个元件同时发生故障, 才不会有输出信号, 显然拒动的机率下降了; 但是二个元件并联的结果却使误动的机率增加了——其中任一元件由于故障而误发信号, 在输出端就会有不必要的信号产生。

元件并联的结果总是使拒动的概率降低, 使误动的概率增加, 而回路并联后总的故障概率是增大还是缩小, 则可取决于元件拒动概率和误动概率的比值。

为了比较元件多重化的效果, 可以引用“效益系数”作判别量, 用以说明元件在各种连接方式下的可靠性效益。

效益系数可以定义为: 故障概率的变化量与原回路可靠度的比值。用符号 K 表示。

$$K_q = \frac{q_0 - q_n}{1 - q_0} \quad \dots\dots (13)$$

式中: q_0 为原回路的故障概率。

q_n 为元件多重化后新回路的故障概率

拒动故障概率效益系数定义为: 拒动概率的变化量与原回路不发生拒动故障的概率的比值。

$$K_j = \frac{r_0 - r_n}{1 - r_0} \quad \dots\dots (14)$$

误动概率效益系数定义为: 误动概率的变化量与原回路不发生误动故障的概率的比值。

$$K_w = \frac{S_0 - S_n}{1 - S_0} \quad \dots\dots (15)$$

式中: r_0 , S_0 分别为原回路拒动和误动的概率。

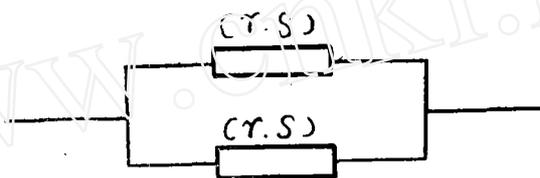
r_n , S_n 分别为元件多重化后新回路的拒动故障概率和误动故障概率。

K_j , K_w , 分别称为拒动概率效益系数和误动概率效益系数。

效益系数 K_i , K_w , K_q 的数值可为正, 可为负, 也可为“0”。为正值时, 说明元件附加冗余之后故障概率减小了, 真正收到了效益。效益系数为负值时, 说明故障概率较原来元件增大了。效益系数为“0”说明故障概率没有变化。元件多重化的目的总是希望效益系数 K_i , K_w , K_q , 具有较大数值, 但实际上也往往会出现这样的情况: 三个系数中有一个或二个较大, 而另外的系数则可能为负或较小。效益系数太小, 则说明元件多重化的效果不显著。效益系数究竟控制在多大为宜, 则要视具体的使用要求而定。

1. 二个同类元件并联的效益:

拒动故障概率为 r , 误动故障概率为 s 的二个同类元件并联时:



图一、二个同类元件并联

$$r_2 = r^2$$

$$S_2 = 1 - (1 - S)^2 = 2S - S^2$$

$$q_2 = r^2 + 2S - S^2$$

效益系数为:

$$K_i = \frac{r - r^2}{1 - r} = r \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$K_w = \frac{s - (2s - s^2)}{1 - s} = -s \quad \dots\dots\dots (17)$$

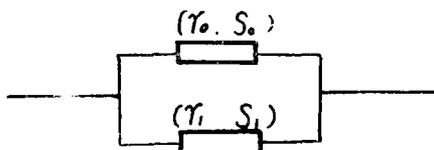
$$K_q = \frac{(r + s) - (r^2 + 2s - s^2)}{1 - (r + s)} = \frac{(r - s) [1 - (r + s)]}{1 - (r + s)} = (r - s) \quad \dots\dots\dots (18)$$

可见, 二个同类元件并联时, 效益系数与元件的故障概率是成线性关系。拒动概率效益系数恒为正, 误动概率效益系数恒为负。当 $r > s$ 时, 总的故障概率效益系数为正, 当 $r < s$ 时, 总的故障概率效益系数为负。

表一列出了二个同类元件并联时的效益系数。

2. 故障概率不同的二个元件并联时的效益:

具有不同故障概率的二个元件并联时的效益系数计算如下:



图二, 具有不同故障概率的二个元件并联连接

表一：二个同类元件并联时的效益系数

	S = 0.02			S = 0.05			S = 0.1			S = 0.2			S = 0.3			S = 0.4			
	K_j	K_w	K_q	K_j	K_w	K_q	K_j	K_w	K_q	K_j	K_w	K_q	K_j	K_w	K_q	K_j	K_w	K_q	
$r = 0.02$	0.02	0.02	0	0.02	0.05	-0.03	0.02	0.02	-0.1	-0.08	0.02	-0.2	-0.18	0.02	-0.3	-0.28	0.02	-0.4	-0.38
$r = 0.05$	0.05	"	0.03	0.05	"	0	0.05	"	-0.05	0.05	"	-0.15	0.05	"	-0.25	0.05	"	"	-0.35
$r = 0.1$	0.1	"	0.08	0.1	"	0.05	0.1	"	0	0.1	"	-0.10	0.1	"	-0.20	0.1	"	"	-0.30
$r = 0.2$	0.2	"	0.18	0.2	"	0.15	0.2	"	0.1	0.2	"	0	0.2	"	-0.10	0.2	"	"	-0.20
$r = 0.3$	0.3	"	0.28	0.3	"	0.25	0.3	"	0.2	0.3	"	0.1	0.3	"	0	0.3	"	"	-0.10
$r = 0.4$	0.4	"	0.38	0.4	"	0.35	0.4	"	0.3	0.4	"	0.2	0.4	"	0.1	0.4	"	"	0

设二个元件的拒动故障概率和误动故障概率分别为： r_0, s_0, r_1, s_1 。
 并联之后回路的故障概率为：

$$\begin{aligned} r_2 &= r_0 \cdot r_1 \\ s_2 &= 1 - (1 - s_0)(1 - s_1) \\ &= s_0 + s_1 - s_0 s_1 \\ q_2 &= r_0 r_1 + s_0 + s_1 - s_0 s_1 \end{aligned}$$

效益系数为：

$$K_j = \frac{r_0 - r_0 r_1}{(1 - r_0)} = \frac{r_0(1 - r_1)}{(1 - r_0)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\begin{aligned} K_w &= \frac{s_0 - (s_0 + s_1 - s_0 s_1)}{(1 - s_0)} \\ &= \frac{-s_1(1 - s_0)}{(1 - s_0)} = -s_1 \quad \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_q &= \frac{(r_0 + s_0) - (r_0 r_1 + s_0 + s_1 - s_0 s_1)}{1 - (r_0 + s_0)} \\ &= \frac{r_0(1 - r_1) - s_1(1 - s_0)}{1 - (r_0 + s_0)} \quad \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

表二列出了故障概率不等的二个元件并联时的效益系数的计算结果，这里仅计算了 $r_0 = s_0, r_1 = s_1$ 的各种情况。至于 $r_1 \neq s_1, r_0 \neq s_0$ 的情况可以同样作出计算。

由如上定义的效益系数为判据，二个元件并联时的可靠性效益具有下列一些特点：

(1)，元件并联时效益系数的大小、正负，反应了元件并联后的可靠性效果：系数为正，数值越大，说明效益越显著。系数为负，说明这个可靠性参量变坏了，绝对值越大，就越差。因此效益系数是代数量，如 $K_{j1} > K_{j2}$ ，则可以说前者的可靠性效益比后者显著，或者当其为负数时，则认为后者比前者更差。

(2)，元件并联时，效益系数 K_j 永远为正数，系数 K_w 永远为负数。说明元件并联的结果总是使拒动故障概率减小，误动故障概率增加。误动概率效益系数 K_w 随着待并元件误动概率的增加而变得更差。所以并联连接时总是希望元件具有较小的误动概率。

(3)，从计算公式和表二都可以看出，待并元件拒动故障概率越小，则能得到较大的效益系数。如原有元件故障概率为 ($r_0 = 0.2, s_0 = 0.2$)，当待并元件故障概率为 ($r_1 = 0.02, s_1 = 0.02$) 时， $K_j = 0.245$ ；当待并元件故障概率为 ($r_1 = 0.4, s_1 = 0.4$) 时， $K_j = 0.15$ ，前者比后者效益显著。具有相同故障概率的二个元件并联，其拒动故障概率越大效益越显著。如 $r = 0.4$ 时 $K_j = 0.4$ ；当 $r = 0.02$ 时， $K_j = 0.02$ 。前者比后者有较大的效益系数。由此可以推断元件可靠度越高，并联的效益系数越小，对于一个对可靠度有确定要求的系统，当效益系数小到一定程度之后，则可以认为这样的元件并联是不必要的。

此外，还可以看到元件并联，拒动概率效益系数的大小与元件的误动概率大小无关。误动概率效益系数的大小与元件的拒动概率大小无关。

表二: 故障概率不等的二个元件并联时的效益系数

	$r_1=0.02$ $S_1=0.02$		$r_1=0.05$ $S_1=0.05$		$r_1=0.1$ $S_1=0.1$		$r_1=0.2$ $S_1=0.2$		$r_1=0.3$ $S_1=0.3$		$r_1=0.4$ $S_1=0.4$							
	K_J	K_W	K_J	K_W	K_J	K_W	K_J	K_W	K_J	K_W	K_J	K_W						
$r_0=0.02$ $S_0=0.02$	0.02	-0.02	0	0.019	-0.05	0.031	0.018	-0.1	0.083	0.16	-0.2	0.188	0.014	-0.3	-0.29	0.012	-0.4	-0.40
$r_0=0.05$ $S_0=0.05$	0.052	"	0.033	0.05	"	0	0.047	"	-0.056	0.042	"	-0.17	0.037	"	-0.28	0.032	"	-0.39
$r_0=0.1$ $S_0=0.1$	0.109	"	0.1	0.106	"	0.063	0.1	"	0	0.089	"	-0.125	0.078	"	-0.25	0.067	"	0.375
$r_0=0.2$ $S_0=0.2$	0.245	"	0.3	0.24	"	0.25	0.23	"	0.17	0.2	"	0	0.11	"	-0.17	0.15	"	-0.333
$r_0=0.3$ $S_0=0.3$	0.42	"	0.7	0.41	"	0.625	0.39	"	0.50	0.34	"	0.25	0.3	"	0	0.26	"	0.25
$r_0=0.4$ $S_0=0.4$	0.65	"	1.9	0.63	"	1.75	0.6	"	"	0.53	"	1.50	0.47	"	0.50	0.4	"	0

(4), 并联回路总的故障概率 $q_2 = r_0 r_1 + s_0 + s_1 - s_0 s_1$ 的大小与原有元件和待并元件的拒动和误动故障概率都有关系。总的故障概率效益系数则可正, 可负。当具有相同故障概率的二个元件, 而且拒动故障概率和误动故障概率相等时, 即 $r_0 = s_0 = r_1 = s_1$ 时, 总的故障概率效益系数则为“0”。

四 串联冗余的效益



图三, 二个元件串联的接线

拒动故障概率分别为 r_0, r_1 , 误动故障概率分别为 s_0, s_1 的二个元件串联时, 这个回路的可靠性数学模型对于拒动故障来说是串联的, 对于误动来说是并联的。这个情况刚好和元件并联的情况相反。如前所述元件并联时的可靠性数学模型对于拒动故障来说是并联的, 对于误动故障来说是串联的。因此二个元件串联连接时, 可以很方便地写出串联回路的拒动故障概率、误动故障概率、总的故障概率及其效益系数。

$$\begin{aligned}
 r_2 &= 1 - (1 - r_1)(1 - r_0) \\
 &= r_1 + r_0 - r_1 r_0 \\
 s_2 &= s_0 \cdot s_1 \\
 q_2 &= s_0 \cdot s_1 + r_1 + r_0 - r_1 r_0 \\
 K_j &= \frac{r_0 - (r_1 + r_0 - r_1 r_0)}{1 - r_0} = -r_1 \quad \dots\dots\dots (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_w &= \frac{s_0 - s_0 \cdot s_1}{1 - s_0} \\
 &= \frac{s_0 (1 - s_1)}{(1 - s_0)} \quad \dots\dots\dots (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_q &= \frac{(r_0 + s_0) - (s_0 \cdot s_1 + r_0 + r_1 - r_0 r_1)}{1 - (r_0 + s_0)} \\
 &= \frac{s_0 (1 - s_1) - r_1 (1 - r_0)}{1 - (r_0 + s_0)} \quad \dots\dots\dots (24)
 \end{aligned}$$

表三列出了具有不同故障概率的二个元件串联时的效益系数。

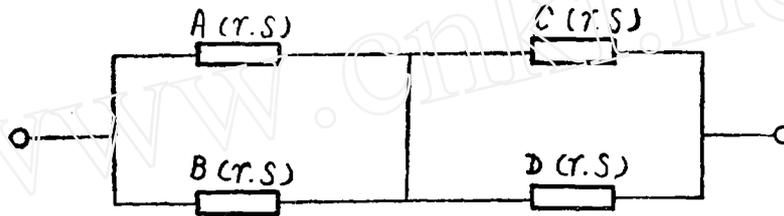
表三: 故障概率不等的二个元件串联时的效整系数

	$\tau_1=0.02$ $S_1=0.02$			$\tau_1=0.05$ $S_1=0.05$			$\tau_1=0.1$ $S_1=0.1$			$\tau_1=0.2$ $S_1=0.2$			$\tau_1=0.3$ $S_1=0.3$			$\tau_1=0.4$ $S_1=0.4$		
	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q
$\tau_0=0.02$	-0.05	0.02	0	-0.05	0.019	-0.031	-0.1	0.018	-0.083	-0.2	0.016	0.188	-0.3	0.014	-0.29	-0.4	0.012	-0.40
$S_0=0.02$	"	0.052	0.033	0.1	0.05	0	"	0.047	-0.056	"	0.042	-0.17	"	0.037	-0.28	"	0.032	0.39
$\tau_0=0.1$	"	0.109	0.1	"	0.106	0.063	"	0.1	0	"	0.089	-0.125	"	0.078	-0.25	"	0.067	-0.375
$S_0=0.1$	"	0.245	0.3	"	0.24	0.25	"	0.23	0.17	"	0.2	0	"	0.18	-0.17	"	0.15	-0.333
$\tau_0=0.2$	"	0.42	0.7	"	0.41	0.625	"	0.39	0.50	"	0.34	0.25	"	0.3	0	"	0.26	-0.25
$S_0=0.2$	"	0.65	1.9	"	0.63	1.75	"	0.6		"	0.53	1.50	"	0.47	0.50	"	0.4	0

五 先并后串接线的效益

元件单纯的并联或串联都不可能既使拒动故障概率降低又同时使误动故障概率降低。元件并串连接和串并连接时，在一定条件下，有可能使拒动故障概率和误动故障概率同时降低。

首先分析并串连接的情形：



图四，元件先并后串连接

假若元件A、B、C、D具有相同的拒动故障概率和误动故障概率，则整个回路的故障概率为：

$$\begin{aligned} r_A &= r^2 (2 - r^2) \\ s_A &= s^2 (2 - s)^2 \\ q_A &= r^2 (2 - r^2) + s^2 (2 - s)^2 \end{aligned}$$

故障概率效益系数为：

$$\begin{aligned} K_j &= \frac{r - r^2 (2 - r^2)}{1 - r} \\ &= \frac{r(r-1)(r^2+r-1)}{(1-r)} \\ &= r(1-r-r^2) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\begin{aligned} K_w &= \frac{s - (2-s)^2 \cdot s^2}{1-s} \\ &= \frac{s(1-s)(1-3s+s^2)}{(1-s)} \\ &= s \cdot (1-3s+s^2) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\begin{aligned} K_q &= \frac{(r+s) - r^2(2-r^2) - s^2(2-s)^2}{1-r-s} \\ &= \frac{r(1-r)(1-r-r^2) + s(1-s)(1-3s+s^2)}{(1-r-s)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (27)$$

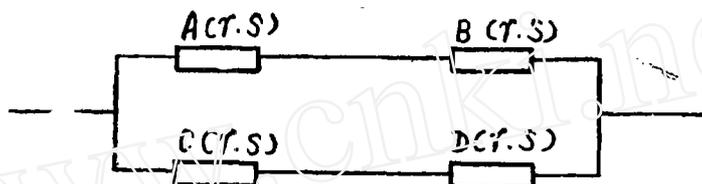
表四列出了元件先并后串连接时的效益系数：

表四: 元件先並后串连接时的效益系数

	S = 0.02			S = 0.05			S = 0.1			S = 0.2			S = 0.3			S = 0.4		
	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q
$r = 0.02$	0.196	0.019	0.039	0.0196	0.043	0.0637	0.0196	0.071	0.0944	0.0196	0.088	0.114	0.0196	0.057	0.0869	0.0196	0.016	0.017
$r = 0.05$	0.047	"	0.068	0.047	"	0.0944	0.047	"	0.128	0.047	"	0.153	0.047	"	0.130	0.047	"	0.064
$r = 0.1$	0.089	"	0.112	0.089	"	0.142	0.089	"	0.180	0.089	"	0.214	0.089	"	0.200	0.089	"	0.141
$r = 0.2$	0.152	"	0.179	0.152	"	0.215	0.152	"	0.266	0.152	"	0.319	0.152	"	0.323	0.152	"	0.282
$r = 0.3$	0.183	"	0.215	0.183	"	0.258	0.183	"	0.533	0.183	"	0.396	0.183	"	0.420	0.183	"	0.395
$r = 0.4$	0.176	"	0.214	0.176	"	0.264	0.176	"	0.339	0.176	"	0.439	0.176	"	0.485	0.176	"	0.480

六 先串后并接线的效益

图五是先串后并的连接，元件A、B、C、D具有相同的拒动故障概率和误动故障概率，分别为 r, s 。



图五，先串后并的连接

这个回路的拒动故障概率、误动故障概率和总的故障概率分别为：

$$r_A = r^2 (2 - r)^2$$

$$s_A = s^2 (2 - s^2)$$

$$q_A = r^2 (2 - r)^2 + s^2 (2 - s^2)$$

故障概率效益系数的计算和式25，式26，式27的类似，所以可以不经推导直接写出来：

$$K_j = r \cdot (1 - 3r + r^2) \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$K_w = s \cdot (1 - s - s^2) \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$K_q = \frac{r(1-r)(1-3r+r^2) + s(1-s)(1-s-s^2)}{(1-r-s)} \quad \dots\dots\dots (30)$$

表五列出了元件先串后并连接时的效益系数。

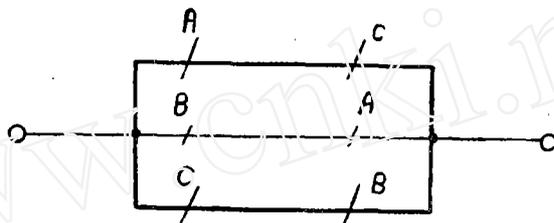
表五：元件先串后并联连接时的效益系数

	S = 0.02			S = 0.05			S = 0.1			S = 0.2			S = 0.3			S = 0.4		
	K_J	K_W	K_0	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q	K_J	K_W	K_q
$r = 0.02$	0.019	0.0196	0.039	0.019	0.047	0.068	0.019	0.089	0.112	0.019	0.152	0.179	0.019	0.183	0.215	0.019	0.176	0.214
$r = 0.05$	0.043	"	0.0637	0.043	"	0.094	0.043	"	0.142	0.043	"	0.215	0.043	"	0.258	0.043	"	0.264
$r = 0.1$	0.071	"	0.094	0.071	"	0.128	0.071	"	0.180	0.071	"	0.266	0.071	"	0.533	0.071	"	0.339
$r = 0.2$	0.088	"	0.114	0.088	"	0.153	0.088	"	0.214	0.088	"	0.319	0.088	"	0.396	0.088	"	0.439
$r = 0.3$	0.057	"	0.087	0.057	"	0.130	0.057	"	0.2	0.057	"	0.323	0.057	"	0.42	0.057	"	0.485
$r = 0.4$	-0.016	"	0.017	-0.016	"	0.064	-0.016	"	0.141	-0.016	"	0.282	-0.016	"	0.395	-0.016	"	0.48

七、按“三中取二”方式接线的效益

三中取二接线方式：

为了提高回路的可靠性，除了上面所述几种常用的接线方式之外，还有一种接线也是值得研究的，这就是三中取二的接线方式：



图六，三中取二的接线方式

如图所示， A ， B ， C 三个元件如以这样的接线作为输出回路，那么可以看出，无论是对拒动故障还是对误动故障来说，如果只有一个元件故障，而另外二个元件是好的，输出回路就不会误发信号（误动），也不会拒绝发出必要的信号（拒动）。如 A 元件误动， B ， C 元件没有误动，输出回路并不会产生误动信号。如 A 元件拒动， B 和 C 元件良好，那么 B 、 C 回路就可以发出必要的动作信号。

当元件有二个误动，或者三个同时误动，在输出端必然有错误的动作信号发生。当其中任意二个元件拒动，只有一个元件是好的，或者三个元件同时发生拒动故障，则输出端不会产生必要的动作信号，整个回路发生拒动故障。这就是三中取二接线的原理。

假定 A ， B ， C 三个元件具有相同的拒动故障概率 r 和误动故障概率 S ，可以计算出这样接线的故障概率和效益系数。

发生拒动故障的概率 r_3 和 K_j 为：

$$r_3 = r^3 + 3 \cdot (1-r)r^2 = r^2(3-2r)$$

$$K_j = \frac{r - r^2(3-2r)}{(1-r)} = \frac{r(1-3r+2r^2)}{(1-r)} = r(1-2r) \quad \dots\dots\dots 31$$

同理，误动故障的概率 S_3 为：

$$S_3 = S^2(3-2S)$$

$$K_w = S(1-2S) \quad \dots\dots\dots 32$$

总的故障概率和效益系数为：

$$q_3 = r^2(3-2r) + S^2(3-2S)$$

$$K_q = \frac{(r+S) - r^2(3-2r) - S^2(3-2S)}{(1-r-S)}$$

$$= \frac{r(1-r)(1-2r) + S(1-S)(1-2S)}{1-(r+S)} \quad \dots\dots\dots 33$$

表六列出了具有相同故障概率的三个元件按“三中取二”接线的效益系数。

表六：元件按“三中取二”接线时的效率系数

	S = 0.02			S = 0.05			S = 0.1			S = 0.2			S = 0.3			S = 0.4			
	K_q	K_w	K_T	K_q	K_w	K_T	K_q	K_w	K_T	K_q	K_w	K_T	K_q	K_w	K_T	K_q	K_w	K_T	
$r = 0.02$	0.019	0.019	0.039	0.045	0.045	0.066	0.045	0.045	0.019	0.08	0.103	0.019	0.12	0.147	0.019	0.151	0.019	0.08	0.115
$r = 0.05$	0.045	"	0.066	0.045	"	0.094	0.045	"	0.135	0.045	"	0.185	0.045	"	0.195	0.045	"	0.165	"
$r = 0.1$	0.08	"	0.103	0.08	"	0.135	0.08	"	0.18	0.08	"	0.24	0.08	"	0.26	0.08	"	0.24	"
$r = 0.2$	0.12	"	0.147	0.12	"	0.185	0.12	"	0.24	0.12	"	0.32	0.12	"	0.36	0.12	"	0.36	"
$r = 0.3$	0.12	"	0.151	0.12	"	0.195	0.12	"	0.26	0.12	"	0.36	0.12	"	0.42	0.12	"	0.44	"
$r = 0.4$	0.08	"	0.115	0.08	"	0.165	0.08	"	0.24	0.08	"	0.36	0.08	"	0.44	0.08	"	0.48	"

八、各种接线方式的比较

表一至表六分别列出了几种接线方式下元件多重化的可靠性效益系数。图七，图八，图九，系按着 $r=S$ 的假定条件绘制的拒动故障概率效益系数、误动故障概率效益系数和总的故障概率效益系数。图中：

曲线1为元件并联时的效益系数、见表一。

曲线3为元件串联时的效益系数，见表三。

曲线4为元件先并后串连接时的效益系数，见表四。

曲线5为元件先串后并连接时的效益系数、见表五。

曲线6为元件按“三中取二”接线时的效益系数、见表六。

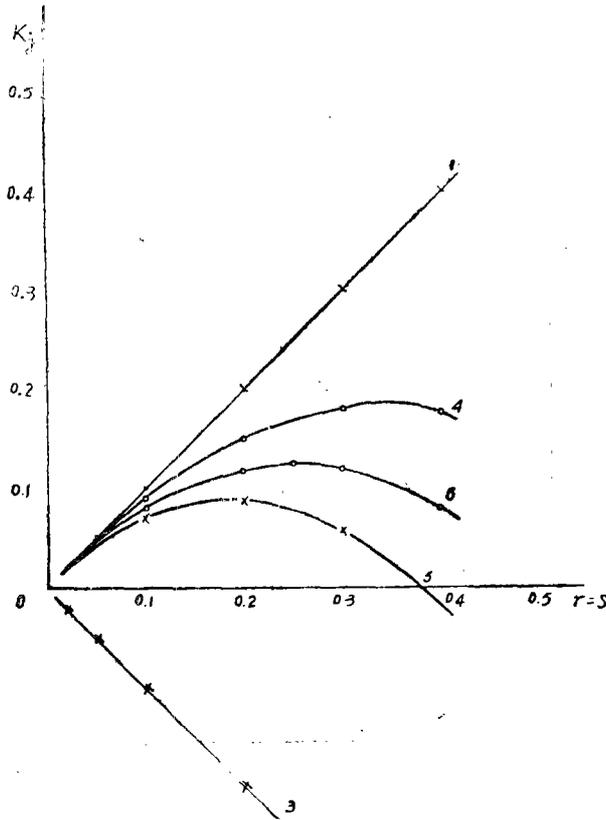
从图七~图九，可以看出：

1. 元件并联连接时，与其它几种接线方式比较，具有较高的拒动故障概率效益系数，而误动故障概率效益系数则为负值。

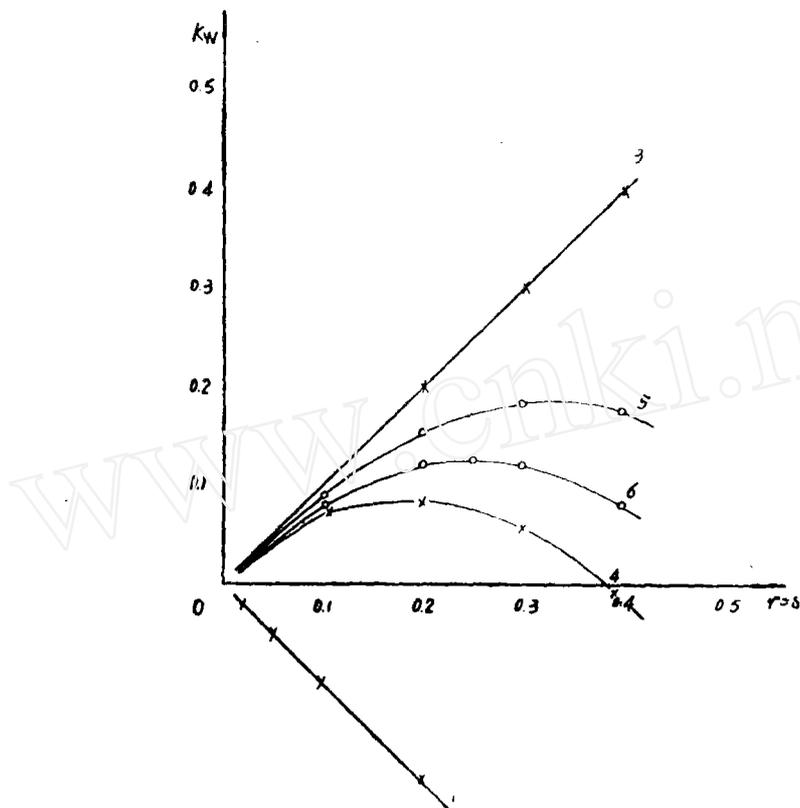
2. 元件串联连接时，具有较高的误动故障效益系数，而拒动故障效益系数则为负值。

3. 当元件拒动故障概率 r 和误动故障概率系数 S 相等时，单纯的并联连接或单纯的串联连接，总的故障概率效益系数为0，即对总的故障概率来说没有效果。

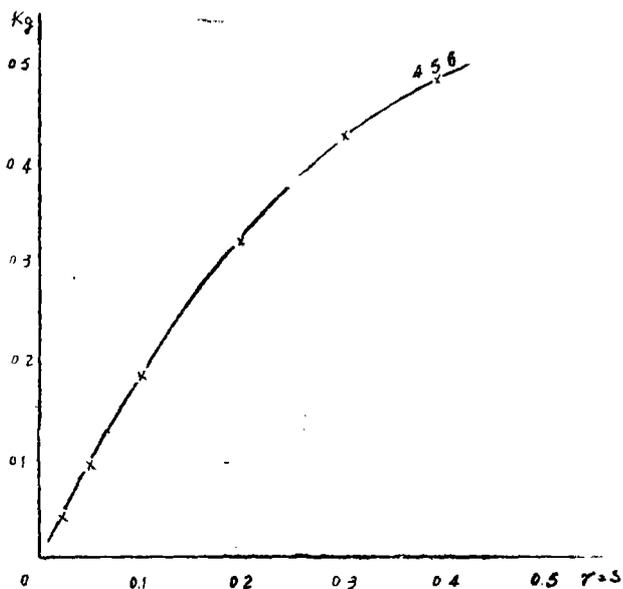
4. 元件先并后串连接，先串后并连接，和“三中取二”连接时，对于总的故障概率



图七，各种接线方式拒动故障概率效益系数曲线



图八，各种接线方式误动故障概率效益系数曲线



注：元件串联或并联当 $r=S$ 时 $k_g = 0$

图九，各种接线方式总的故障概率效益系数曲线

表七、电磁型继电保护和反事故自动装置的故障率（苏联）

继电保护和反事故自动装置 (P3A)的设备型号	故障率($\times 10^{-3}$ 1/年)			
	拒动	误动	并非误动的 不必要动作	不正确动作
凸Φ3—2型相差高频保护	3.21	9.99	18.9	32.1
Π3—162, Π3—164, Π3—164A型 滤过式高频方向保护	7.87	3.93	18.1	29.9
距离保护:				—
有高频闭锁的Π3—156, 157, 158	4.52	6.78	27.1	38.4
没有高频闭锁的Π3—156, 157, 158	3.98	7.73	7.29	19.0
“ Π3—151, 152, 153	2.40	0.74	1.84	4.98
110 ^{kV} 及以上的母线差动保护	4.66	4.24	11.0	19.9
失灵保护	2.76	2.76	2.76	8.28
变压器差动保护	0.69	1.38	5.59	7.66
变压器的动作于跳闸的瓦斯保护	0.042	4.39	0.93	5.36
发电机纵差保护	0	0.53	0.70	1.32
自动装置:				
110~330 ^{kV} 线路重合闸(三相一次重合闸)	9.48	—	—	9.48
变电所备用投入的变压器	12.40	7.00	—	19.4
按频率减载	0.28	1.66	2.5	4.44

表八、晶体管型继电保护的故障率（日本）

保 护 种 类	故障率($\times 10^{-6}$ /小时)		
	拒动故障	误动作故障	总故障
过电流 OC	0.120	0.040	0.160
低电压 UV	0.064	0.192	0.256
过电压 OV	0.327	0.490	0.817
接地过电压 OVG	0.074	0.074	0.147

续表八

保 护 种 类	故 障 率 ($\times 10^{-6}$ /小时)		
	拒动故障	误动作故障	总 故 障
短路距离方向 <i>DZ</i>	0.181	0.173	0.360
接地方向 <i>DG</i>	0.193	0.022	0.215
相位比较 <i>Ph</i>	0.146	0.583	0.729
周波保护 <i>UF</i>	0.804	0.0	0.804
电压平衡 <i>VB</i>	0.145	0.145	0.289
电压调整	0.588	0.375	0.963
同期合闸装置	0.249	0.125	0.374
时间保护 <i>TLR</i>	0.0251	0.024	0.0491
纵差保护 <i>PW</i>	0.0933	0.0	0.0933
母线保护 <i>BP</i>	0.215	0.154	0.369
配 电 线	0.418	0.0	0.418
逻辑系统	0.508	0.102	0.61
重 合 闸	0.710	0.395	1.105

来说效益是显著的。当 $r=S$ 并且在一定的区间,比如大约小于0.4时,则具有较好的拒动故障效益和误动故障效益。还可以看出适当的选择元件拒动故障概率和误动故障概率,可以得到最大的效益系数。

5.元件故障概率很小,比如小于0.1时,元件各种连接方式的效益系数较低。元件故障概率越小,效益系数越低。所以可以进一步说当元件故障概率非常小,再考虑到连接线本身的可靠性、元件多重化的效果不很显著。

结 论

1.电力系统继电保护和安全自动装置接线的可靠性,应用可靠性理论,可以作出定量的分析。由于继电保护和安全自动装置的可靠性问题具有某些特殊性要做专门的研究,而不能机械地照搬一般的可靠性理论。

2.元件多重化(附加冗余)可以提高回路的可靠性。应用可靠性效益系数 K_r , K_w , K_e 能够定量地评价元件多重化的效果,合理地选择接线方式。

3.本文所附的数据表格、曲线和一些统计资料可作为实际应用的参考。