

电网保护配置问题

东北电力设计院 梁 懋

前 言

电网继电保护用来保证在所有线路和母线等电力设备上发生各种类型故障时,以可能最短的时限、在可能最小的范围内将故障设备自电网中断开,以保证电网的安全运行和减轻故障设备损坏程度。它对保证电力系统安全发送电,保障国民经济的正常发展起着极为重要的作用。

继电保护为了起到上述作用,原则上要求电网的继电保护既不允许误动(包括非选择性动作)也不允许拒动,对超高压电网的保护更应这样要求。拒动和误动都会给电网安全运行带来严重后果。因此,在研制、保护配置、整定配合、调整试验及运行维护等各个环节,应特别重视保护的误动和拒动问题,并加以正确对待和处理。

本文就保护配置这一环节来探讨提高电网保护可靠性问题。

(一) 主保护双重化问题

为了确保系统安全运行,电网保护应保证在任何情况下切除被保护设备或线路范围内的各种故障,保护装置必须配置有主保护和后备保护。所谓主保护,系指对被保护设备和线路范围内所发生的各种故障,能有选择并能灵敏地切除的最快速的保护。后备保护则是当主保护拒动时代替主保护切除故障的保护。显然,对超高压电网而言,主保护是指能不附带时间而仅以装置固有动作时间有选择性地切除被保护线路或设备上所发生各种类型故障的保护。这种保护有各种类型的高频保护(包括微波保护和特高频保护)和纵联差动保护等。

配置有主保护和后备保护的线路或设备上,再增设一套主保护叫主保护装置双重化。对于超高压电网,全线速动主保护双重化(两套全线速动主保护),虽然已形成国内外继电保护工作者较为一致的看法,但双重主保护究竟带来多大好处,如何提高双重主保护的可靠性等问题,迄今尚未见到这方面的文献论述。为了进一步探讨,对主保护双重化问题,提出以下看法:

一、从系统保护的可靠性看

主保护双重化的采用,大大提高了线路主保护不拒动的可靠度,但在提高线路主保护不拒动可靠度的同时,却使线路主保护不误动的可靠度降低了。以下对具有相同后备保护条件下主保护双重化较不双重化所带来的好处进行分析。为了简化分析,全两套主保护每套保护拒动率均为 λ_j ,每套的误动作率(包括非选择性误动作和与系统故障无关的偶然误动作)均为 λ_w ,则装设一套主保护的情况下,不拒动的可靠度 R_{bj} 和不误动的可靠度 R_{bw} 分别为

$$\left. \begin{aligned} R_{bj} &= 1 - \lambda_j \\ R_{bw} &= 1 - \lambda_w \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

主保护双重化,即采用两套主保护情况下,双重主保护的拒动机率 λ'_j 和误动机率 λ'_w 分别由下式求出:

$$\left. \begin{aligned} \lambda'_j &= \lambda_j^2 \\ \lambda'_w &= 1 - (1 - \lambda_w)^2 = 2\lambda_w - \lambda_w^2 \approx 2\lambda_w \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

显然,从(1-2)式看出,主保护装置双重化后,主保护的拒动机率成平方减小,而误动机率增大了两倍。

由此可求出主保护双重化后,主保护不拒动可靠度 R'_{bj} 和不误动可靠度 R'_{bw} 分别为:

$$\left. \begin{aligned} R'_{bj} &= (1 - \lambda'_j) = (1 - \lambda_j^2) \\ R'_{bw} &= (1 - \lambda'_w) = (1 - 2\lambda_w) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

根据(1-1)和(1-3)式可求出主保护双重化后,主保护不拒动可靠度提高的倍数 K_{bj} 和不误动可靠度降低的倍数 K_{bw} :

$$K_{bj} = \frac{1 - \lambda_j^2}{1 - \lambda_j} = 1 + \lambda_j \quad (1-4)$$

$$K_{bw} = \frac{1 - \lambda_w}{1 - 2\lambda_w}$$

因 $2\lambda_w \ll 1$,故将上式中 $\frac{1}{1 - 2\lambda_w}$

按幂级数展开后,可略去二次及以上高次项,则误动可靠度降低的倍数 K_{bw} 可由下式求出:

$$K_{bw} = (1 - \lambda_w)(1 + 2\lambda_w) \approx 1 + \lambda_w \quad (1-5)$$

由(1-4)和(1-5)式可知,主保护双重化后,不拒动可靠度提高的倍数 K_{bj} 和不误动可靠度降低的倍数 K_{bw} 分别与主保护装置的拒动机率和误动机率有关。显然,主保护装置的误动机率愈小,因主保护双重化所引起不误动可靠度降低的倍数会小一些。由于保护拒动和误动所引起的后果是很不相同的,因此很难用不拒动可靠度提高多少,不误动可靠度降低多少来评价主保护双重化所带来的效果。所以本文中引入了主保护双重化后主保护减少的拒动机率值和增加的误动机率值这一概念。

设主保护双重化后,主保护减少的拒动机率值为 λ_{jj} ,增加的误动机率值为 λ_{zw} ,则考虑到一套主保护的拒动机率为 λ_j ,误动机率为 λ_w 时,根据(1-2)式可求出 λ_{jj}

和 λ_{zw} 值:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{j'} &= \lambda_j - \lambda_j' = \lambda_j - \lambda_j^2 \approx \lambda_j \\ \lambda_{zw} &= \lambda_w' - \lambda_w = 2\lambda_w - \lambda_w = \lambda_w \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

由此可知, 装设双套主保护后, 线路主保护减少的拒动机率值 $\lambda_{j'}$, 和增加的误动机率值 λ_{zw} , 恰恰分别等于只有一套主保护时的拒动机率 λ_j 和误动机率 λ_w 。

由于保护装置内部发生了拒动的故障, 还不能认为拒动必然发生, 还必须被保护线路有故障。因此拒动机率取决于两种事故同时发生: 一是保护装置本身发生了故障, 另外是被保护线路故障。因此拒动机率由下式求出:

$$\lambda_{j'} = \lambda_s \lambda_{cf} \quad (1-7)$$

式中:

λ_s —被保护线路故障的机率;

λ_{cf} —保护装置本身故障所引起拒动的机率。

继电保护误动作系保护非选择性误动作与系统故障无关的保护偶然误动作的和, 因此保护误动作的机率可由下式求出:

$$\lambda_w = \lambda_{ow} + \lambda_f \quad (1-8)$$

式中:

λ_{ow} —系统无故障, 保护装置本身一旦故障就会导致线路跳闸的偶然误动作;

λ_f —保护装置本身故障引起非选择性误动作的机率。

同样, 保护装置本身发生了能引起非选择性误动作的故障, 也不能认为非选择性误动作必然发生, 还必须被保护线路外部(即相邻元件)发生了故障, 因此, 保护非选择性误动作的机率由下式决定:

$$\lambda_f = \lambda_{cf} \lambda_{ch} \quad (1-9)$$

式中:

λ_{ch} —相邻元件故障录;

λ_{cf} —保护装置本身故障所引起非选择性误动作的机率。

实际上, $\lambda_{j'}$ 和 λ_w 值可以根据统计数据决定。

在某个时间间隔 T 内的误动作或拒动机率可以由下面的公式(见附录 1)标出:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_w &= 1 - e^{-n_w T} \\ \lambda_{j'} &= 1 - e^{-n_j T} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

因为(1-10)式中 $n_w T$ 及 $n_j T$ 都是比 1 小得多的数值, 故在 $e^{-n_w T}$ 及 $e^{-n_j T}$ 按幂级数展开后, 略去二次及以上次幂的项后变成:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_w &= n_w T \\ \lambda_{j'} &= n_j T \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

因此近似值 $\lambda_{j'}$ 和 λ_w 可分别直接用在时间 T 内拒动的装置数和误动装置数与总的保护装置数之比来确定。

间隔时间 T 取为一年, 则保护装置拒动机率和误动机率可近似由下式计算:

$$\lambda_{j'} = \frac{\text{每年保护装置拒动套数}}{\text{每年保护装置总套数}} \quad (1-12)$$

$$\lambda_w = \frac{\text{每年保护装置误动套数}}{\text{每年保护装置总套数}} \quad (1-13)$$

保护的要求动作率则由下式算出：

$$N = \frac{\text{每年保护装置正确动作套数}}{\text{每年保护装置总套数}} \quad (1-14)$$

根据统计数据确定出主保护的 λ_j 和 λ_w 后，即可根据 (1-6) 式得出主保护双重化后减少的拒动机率值 λ_{jj} 和增加的误动机率值 λ_{zw} 。

继电保护拒动和误动所造成的损失是很不相同的。它们所造成的损失和影响因被保护线路所处的地位不同而不同。设 S_j 为拒动所造成的损失； S_w 为误动所造成的损失，则主保护双重化所带来的效果，可用下面的关系式来衡量：

$$A = \lambda_{jj} S_j - \lambda_{zw} S_w \quad (1-15)$$

当 $A > 0$ 时，则主保护双重化使拒动减少所减少的损失大于使误动增加所增加的损失，显然，主保护双重化是有好处的。

$A < 0$ 时，则主保护双重化使拒动减少所减少的损失小于使误动增加所增加的损失，显然主保护双重化是没有好处的。

下面对拒动和误动所造成的损失进行概略的比较。

保护误动造成的经济损失和后果，国内外都有不少严重的教训，例如65年美国东北部和加拿大系统大停电事故就是由继电保护的误动作造成。该事故波及美国东部八个洲和加拿大一部分，系统容量4000万千瓦，停电容量2500万千瓦，停电负荷2100万千瓦，停电时间13小时32分。又例如国内1972年7月27日湖北系统瓦解事故也是由继电保护误动作引起。由此可见，保护误动作所引起的经济损失是巨大的，后果是极为严重的。

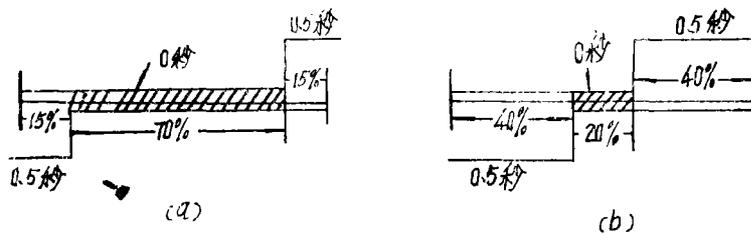


图 1-1 线路后备保护动作时间特性
a—相间距离； b—零序电流保护

主保护拒动，可由后备保护动作切除故障。对于各类相间故障，如图 1-1a 所示，其中有 70% 两侧均可瞬时动作，剩下的 30%，一侧瞬时动作，另一侧约带 0.5 秒时限动作。对于反应各种接地故障的阶段式零序电流保护，如图 1-1b 所示，只要两侧的瞬时段有重叠区，一般一侧瞬时动作后，另一侧的瞬时段也可相继动作，在不能相继动作的情况下，也只带约 0.5 秒时限动作。若用接地脱离反应接地故障，其动作时间特性与图 1-1a 相同，显然可得到改善。

表 1-1

线路名称	两侧保护总动作次数						各类保护各段动作次数与总次数比						各类保护相应动作次数和总次数比		
	零序电流保护			距离保护			零序电流保护			距离保护			一段	二段	三段
	一段	二段	三段	一段	二段	三段	一段	二段	三段	一段	二段	三段	一段	二段	三段
阜 鞍 线	4						1						1		
阜 营 线	19			5	1		0.76			0.2	0.04		0.96	0.04	
东 连 线	14	1		24	3		0.333	0.024		0.571	0.072		0.904	0.096	
李 鞍 线	4			4			0.5			0.5			1		
松 滨 线	2				2		0.5				0.5		0.5	0.5	
阜 锦 线	33	23	1	1	1	1	0.559	0.39	0.017	0.017		0.017	0.576	0.39	0.034
松 虎 线	3	1		1	1		0.5	0.167		0.167	0.166		0.667	0.333	
虎 浑、浑 鞍线	20	3		1	1		0.833	0.125		0.042			0.875	0.125	
云 卧 耿 首 线	1	1	2	1	1		0.167	0.167	0.333	0.167	0.166		0.334	0.333	0.333
松 李 线	2	1		1			0.5	0.259		0.25			0.75	0.25	
朝 西 线	2	1					0.667	0.333					0.667	0.333	
云 瓦 连 线	7	6	1				0.5	0.429	0.071				0.5	0.429	0.071
辽 李二 回 线	1	1		1			0.334	0.333		0.333			0.667	0.333	
水 东 线	1	1		2	2		0.167	0.167		0.333	0.333		0.5	0.5	
清 大 线	3			3			0.5			0.5			1		
桓 首 线	14			2			0.875			0.125			1		
松 长 线	23	3	1	1	1		0.793	0.103	0.035	0.035	0.034		0.828	0.137	
青 营 线	8	3			1		0.667	0.25			0.083		0.667	0.333	
长 红 农 前 线	5	2		1			0.625	0.25		0.125			0.75	0.25	
长 四 线	2						1						1		
李 虎 线	2						1						1		
总 计	170	47	5	48	12	1	0.601	0.166	0.018	0.170	0.042	0.003	0.771	0.208	0.021

我院1977年对东北系统220千伏主网送电线路的事故进行了调查，调查年限为1970—1977年9月，根据这份调查报告所统计的事故资料，列出了线路故障仅由零序保护及距离保护动作切除的动作情况表，如表1—1所示。

线路故障时，故障未由高频保护动作切除的主要原因有二，其一是系统中的90%以上为接地故障，零序电流保护第一段比高频保护动作快，高频保护来不及动作；其二是近年来由于高频收发讯机管子老化以及加工设备的故障使高频保护退出机会较多。

从表1—1可以清楚看出，在高频保护来不及动作或高频保护退出的情况下，故障的77%仍由零序电流保护第一段或距离保护第一段瞬时动作切除；故障的21%由零序电流保护或距离保护第二段时限切除；只有2%的故障方由零序电流或距离第三段动作。

根据上述统计资料，显然可推知，该系统中，如果线路全线速动主保护拒动，也并不是没有保护动作切除故障，而是在主保护拒动时，线路两侧中总有一侧也是瞬时动作的，另一侧也可能是瞬时动作，在不利情况下，也是一般带第二段时限动作。带第三段时限动作是极为少见的。显然，如果我们能改善后备保护性能，压低时间级差，则当主保护拒动时，后备保护动作切除故障的性能会更好。

因此，线路主保护拒动的后果就是线路的一侧有可能带第二段时限切除故障所造成的损失。到目前为止，尚未查到由于速动主保护拒动后带时限后备保护动作造成严重事故的情况。

由以上分析可知，主保护拒动所造成的经济损失和后果一般小于主保护误动所造成，即 $S_w > S_f$ 。如果主保护的误动机率和拒动机率相等，则减少的拒动机率值 λ_{r1} 与增加的误动机率值 λ_{zw} 相等。因此，根据(1—15)式求得的经济效果 A 为负值，也就是说，主保护双重化后，不但未得到好处，而将带来更大的损失。

根据统计数据得知，保护的误动机率往往大于其拒动机率。

表1—2

从表1—2所示为数不多的保护的运行统计数据看出，保护误动作机率大于拒动机率。

现继电保护运行领域中，对各类保护装置运行情况用正确动作率来表示，正确动作率由下式求出：

系统名称	保护类别	观察的年套数	故障率			
			要求动作率	误动作机率	拒动机率	
华东系统	BFG	6	0.33	0.167	0	
	晶体管高频相差	6	0.5	0.167	0.167	
	GCH—1	17	0.176	0	0	
北京系统	零序电流保护	Ic I	217.5	0.289	0.0023	0.0023
		Ic II	212.5	0.181	0.0047	0
		Ic III	201.5	0.114	0.00248	0
	距离保护	Z I	187.5	0.0933	0.0426	0
		Z II	187.5	0.0453	0.008	0
		Z III	136.5	0.0563	0.0161	0
苏联	凸Φ3—2	4349	1.5	0.034	0.0039	
	凸Φ3—500	122	2.7	0.115	0.049	

$$\text{正确动作率} = \frac{\text{正确动作次数}}{\text{正确动作次数} + \text{不正确动作次数 (包括拒动和误动)}} \quad (1-16)$$

各大区系统都积累有历年来各类保护正确动作率方面的统计资料。目前尚缺乏各类保护误动作机率和拒动机率方面的统计数据。

由于我们不是要标出减少或增加损失的具体数值，而仅仅是为了对主保护双重化的效果作一比较。我们仍然可以从现有运行领域中保护统计数据中算出运行中各类保护拒动率和误动率，为了与上述的加以区别，我们称之为拒动系数和误动系数，并把正确动作率称之为正确系数。保护的误动系数和拒动系数可分别由下式求出：

$$\text{误动系数} = \frac{\text{每年保护误动次数 (误动套数)}}{\text{每年保护动作总次数 (总动作套数)}} \quad (1-17)$$

$$\text{拒动系数} = \frac{\text{每年保护拒动次数 (拒动套数)}}{\text{每年保护动作总次数 (总动作套数)}} \quad (1-18)$$

为了利用拒动系数和误动系数来评价主保护双重化后所带来的效果，将(1-12)和(1-13)代入(1-15)式得：

$$A = \frac{1}{\text{每年保护装置总套数}} (S_j \times \text{每年保护拒动套数} - S_w \times \text{每年保护误动套数}) \quad (1-19)$$

将(1-17)和(1-18)关系代入(1-19)得：

$$A = \frac{\text{每年保护动作总套数}}{\text{每年保护装置总套数}} (S_j \times \text{拒动系数} - S_w \times \text{误动系数}) = K A' \quad (1-20)$$

式中：

$$A' = (S_j \times \text{拒动系数} - S_w \times \text{误动系数}) \quad (1-21)$$

$$K = \frac{\text{每年保护动作总套数}}{\text{每年保护装置总套数}} \quad (1-22)$$

由(1-21)式可看出，可以将现有系统中运行统计数据代入(1-21)式算出采用双重主保护是否带来好处，这是很方便的。

表1-3示出了我国三个主要220千伏电网中高频保护运行情况的部分统计资料。每个系统中高频保护的误动系数大于拒动系数。三个电网中高频相差保护的总误动系数为0.041，而拒动系数却只有0.0063，即误动为拒动的6.508倍。三个电网中高频闭锁距离的误动系数为0.0625，而拒动系数却为零。显而易见，在高频保护误动多于拒动的情况下，纵然拒动造成的损失大于误动造成的损失，主保护的双重化也可能不但没有好处而且有坏处。何况我们还未考虑由于采用双重主保护还会附加许多不利因素，如增加投资，造成通道频率拥挤，调试维护工作量增大等等。

因此，只有当保护装置拒动率大于误动率且拒动所造成的损失大于误动所造成的情况下，采用互为备用的双重主保护才会有好处。

表 1—3

系 统 名 称	日 期	相 差 保 护							高 频 闭 锁 距 离						
		总动 作 次数	正 确 次 数	误 动		拒 动		正 确 系 数	总动 作 次数	正 确 次 数	误 动		拒 动		正 确 系 数
				次 数	系 数	次 数	系 数				次 数	系 数	次 数	系 数	
东 北	59—66年	74	72	2	0.027	0	0	0.973							
220 千 伏 系 统	72年	23	23	0	0	0	0	1	22	22	0	0	0	0	1
	74年	20	20	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	1
主 网	77年	9	7	2	0.2222	0	0	0.7778							
	78年	16	15	1	0.0625	0	0	0.9375							
华 东 220 千 伏 电 网	70—75	119	110	8	0.0672	1	0.0084	0.92	5	4	1	0.2	0	0	0.8
	73	6	6	0	0	0	0	1							
	74	27	26	0	0	1	0.037	0.963	3	2	1	0.333	0	0	0.667
北 京 220千 伏 电 网	70—75	16	16	0	0	0	0	1							
	77—79	7	7	0	0	0	0	1							
总 计		317	302	13	0.041	2	0.0063	0.953	32	30	2	0.0625	0	0	0.938

上述结论虽在总结220千伏电网的运行统计数据得出，但仍可作为配置超高压线路主保护时参考。

二、提高超高压线路双重主保护可靠性问题

对于超高压电网，由于采用的继电保护比较复杂，要同时兼顾到不误动也不拒动是很困难的。防止误动和拒动的措施本身就是互相矛盾的，因此要恰当地解决两者的关系，必须根据实际系统的具体条件，特点和产生的后果来明确防止拒动和误动的主次关系，以便采取相应措施。东北技改局王梅义总工程师在“继电保护问题”一文作了精辟的阐述（文献1）。

我国的超高压电网处在形成和发展过程中，连系薄弱，电源不足，主要联络线的负荷很重，没有备用，系统稳定水平较低。对于这样的系统条件，防止继电保护误动是特别重要的。因此对这种系统的电源联络线和向重要工矿企业供电的线路，防止保护误动问题应加以强调和重视。因为这样的系统，继电保护一旦误动，将导致系统稳定破坏，甚至引起系统瓦解而造成严重损失。1972年7月27日，湖北系统由于丹江水电站——武汉一回220千伏线路保护误动作跳闸，使武汉地区严重缺电而导致整个湖北系

统瓦解。

资本主义国家的系统比较庞大，连系紧密，联络线多，各级超高压线路迭加环并行。但是就是这样的系统，也不能对保护的误动掉以轻心。由于资本主义国家自持系统强大，轻视继电保护的误动作，所以才有65年由于继电保护误动作所引起美国东部大停电事故。

因此，鉴于我国系统的具体条件，以及国内外保护误动造成严重后果的教训。继电保护工作者应从各个环节采取措施减少保护误动作机率。如上节所述，装设两套全线速动主保护后，线路主保护的拒动机率虽然大大减少了，但误动机率却比装设一套主保护时增加了一倍，显然是不允许的。

但是另外一方面，超高压的重负荷联络线，稳定问题特别严重，为了提高系统稳定，往往要求任何情况下都应有全线速动主保护。显然这种线路，装设两套主保护是必要的，否则通道问题（实际上往往由于通道问题使高频退出）以及装置本身在检修时，会使线路上没有全线速动主保护。但装设两套主保护却又使保护装置误动的机率增加，这也是不允许的。为了提高超高压线路所配置双套主保护的可靠性是一个很重要的问题。

上一节已分析出，在配置有主保护和后备保护的线路上，再增设一套主保护会使主保护误动机率增加，所增加的误动机率值与所增装置本身的误动机率有关。因此，减少所增设主保护的误动机率是提高双重主保护可靠性的重要环节。

1. 采用与后备保护相结合的闭锁式高频保护。

加装一套高频收发讯机，与距离保护第二段测量元件及零序电流第二段电流方向元件构成高频闭锁距离及零序电流保护，该保护作为第二套主保护可以提高双重主保护的可靠度。

为了分析增设高频闭锁部分所增加的误动机率，将增设的高频闭锁部分及原有距离、零序电流第二段跳闸部分原则逻辑图，用图 1—2 所示的接点逻辑图来表示。图中 GJ_0 、 LJ_0 分别为零序电流保护中零序功率方向元件及第二段零序电流元件， ZKJ 为距离保护中第二段测量元件， TXJ 为停讯继电器， SXJ 为受讯继电器。由图 1—2 看出， GJ_0 和 LJ_0 或 ZKJ 的接点闭合后，除分别经时间继电器 SJ_0 和 SJ 跳闸外，尚经停讯继电器 TXJ 的常开接点和受讯继电器 SXJ 的常闭接点去跳闸。

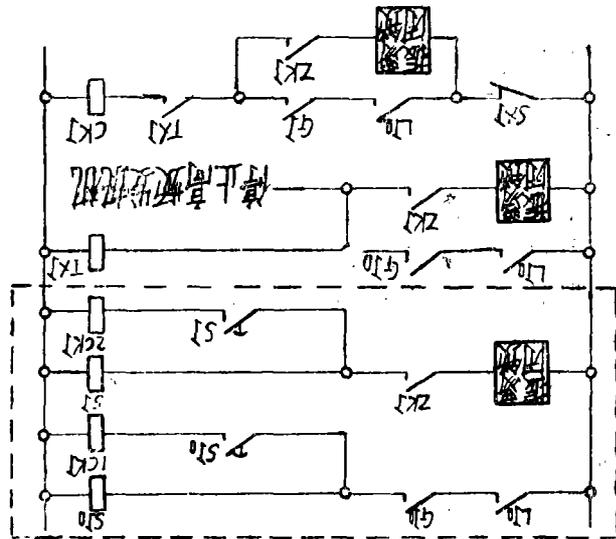


图 1—2 高频闭锁距离及零序电流保护的跳闸部分原则逻辑图

前面已介绍过了,保护误动包括两部分,一是与系统故障无关的偶然误动,另一部分则是被保护线路外部故障保护发生的非选择性误动作。因此要分析所增设高频闭锁距离和零序后所增加的误动机率,应按这两种情况分别加以讨论。

(1) 与系统故障无关的偶然误动作

从图 1—2 可以看出,一旦 ZKJ (或 GJ_0 、 LJ_0) 误动作,距离 (或零序) 第二段及高频闭锁距离 (或零序) 将都动作切除同一线路断路器,产生同一后果。在未装设高频闭锁距离和零序保护的情况下,这一后果和损失照样发生。同时,只要 ZKJ (或 GJ_0 、 LJ_0) 不误动作,增设的高频闭锁保护也不会产生偶然的误动作。因此,增设的高频闭锁距离和零序未导致线路保护误动中偶然误动机率的增加。

(2) 非选择性误动作

由于高频闭锁距离和零序保护是在距离保护和零序电流保护基础上增添高频设备构成的保护,所以增设高频闭锁保护后所增加的非选择性误动作机率的分析,应与原有距离保护和零序电流保护的非选择性误动作机率结合起来进行分析。距离保护和零序电流保护的非选择性误动作有两种情况,一种是正方向的非选择性误动作,另一种是反方向的非选择性误动作,以下分别加以分析:

1) 正方向保护区外发生故障,距离保护或零序电流保护非选择性误动作切除线路时,增设的高频闭锁保护也可能误动作也可能不误动,需视所见故障为外部一侧的发讯机能否送来外部故障的闭锁讯号,即是否使图 1—2 中受信继电器 SXJ 的常闭接点打开而定。纵然所增设的高频闭锁保护也误动,但其误动所产生的后果与距离保护或零序保护非选择性误动作所造成的相同,也就是说,无论高频闭锁保护误动与否,这一后果必然要发生。

2) 保护区外反方向发生故障,距离保护或零序电流保护发生非选择性误动作时,高频闭锁保护是否误动,需视所见故障为外部一侧的 ZKJ 或 GJ_0 、 LJ_0 是否会误动作以及该侧是否能发出闭锁保护动作的信号而定,如果 ZKJ 或 GJ_0 、 LJ_0 失去方向性误动以及不能发出闭锁保护动作讯号时,高频闭锁保护将会误动作,但其误动作所产生的后果与距离保护或零序保护误动作所产生的后果相同。

从上面两点可以看出,保护区外故障,高频闭锁保护是否发生非选择性误动作的关键在于所见故障为反方向一侧的 ZKJ 及 GJ_0 、 LJ_0 是否会失去方向性而误动作,以及该侧是否能发出闭锁保护动作的高频讯号。为此,要提高高频闭锁保护的可靠度,减少高频闭锁保护的误动机率,主要应从以下几方面努力:

① 靠近故障侧 (所见为反方向故障侧) 的高频发讯机一定要可靠起动,以保证区外故障时能可靠发出闭锁保护动作的讯号,为满足此要求。现有高频闭锁保护中,除采用比方向判别元件 ZKJ 及 GJ_0 、 LJ_0 更灵敏的元件起动发讯机外,又都采用了远方起动高频发讯机的措施。因此一般说来,现有高频闭锁保护是能保证在区外故障可靠起动发讯机。一般高频发讯机的起动回路可用方块图表示如下:

设发讯机起动元件的拒动机率为 λ_{QJ} ，远方起动部分的拒动机率为 λ_{LJ} ，则增设远方起动发讯机回路后，发讯机不能起动发讯的机率 λ_{FJ} 为：

$$\lambda_{FJ} = \lambda_{QJ} \lambda_{LJ}$$

因此增设远方起动发讯回路后，所减少的发讯机不能起动的机率 λ'_{FJ} 为：

$$\lambda'_{FJ} = \lambda_{QJ} - \lambda_{FJ} = \lambda_{QJ} (1 - \lambda_{LJ}) \approx \lambda_{QJ}$$

由此看来，增设远方起动发讯机的措施后，对未采取远方起动发讯时的发讯机不能起动的机率 λ_{QJ} 而言，可近似认为基本上消除了发讯机不能起动的情况，可大大提高高频闭锁保护的可靠性。

②通道及收发讯机故障时，如果发生区外故障，由于没有高频闭锁讯号，高频闭锁保护也会误动作。但是由于运行过程中每天都要检查高频通道的运行情况，一旦高频通道出故障，就应及时将高频闭锁保护解除动作。因此高频通道故障引起保护误动的机率是极为稀有的。

③区外故障，保证靠近故障侧（所见故障为反方向两侧）的方向判别元件 ZKJ 及 GJ_0 、 LJ_0 的可靠不误动作，即不失去方向性，是提高高频保护不误动的可靠度的关键环节。为保证 ZKJ 及 GJ_0 、 LJ_0 等元件在反方向故障时不误动作，国内继电保护工作者在研制高频闭锁保护时作了大量的工作，基本上已消除了各种目前所能预见到的失去方向性的可能性。但毕竟这些元件太重要了，它关系到高频闭锁保护误动机率的大小，这部分是否需要考虑不同原理的双重判别元件，是值得加以深入研究的。

距离保护中的 ZKJ 或零序电流保护中的 GJ_0 、 LJ_0 失去方向性会导致高频闭锁保护误动作，然而，如果不增设高频闭锁，这些元件失去方向性也有可能引起距离保护或零序保护误动，只不过它们是带时间动作，其误动机率比瞬时动作的高频闭锁距离和零序电流保护小一些而已。

综上所述，在距离保护和零序电流保护基础上增设高频收发讯机和加工设备构成高频闭锁保护后，如果将距离和高频闭锁距离保护以及零序和高频闭锁零序保护分别看成两个整体，并分别与未附加高频部分时的距离和零序保护相比较，则根据上述有关误动作的分析看出，距离和零序分别增设高频闭锁保护后，只不过仅在原有距离及零序保护的非选择性误动作机率部分有可能增大，而与系统故障无关的偶然误动机率与高频闭锁部分是否增设无关。显然，在原来距离保护和零序电流保护的基础上增设高频闭锁保护所增加的误动机率小于另外再增设一套主保护时所增加的误动机率。所以线路上需要装设两套主保护时，其中一套最好在原有距离保护及零序电流保护基础上构成高频闭锁保护。

2、采取措施减少主保护误动机率

减少主保护误动机率的可行办法，是保护的跳闸回路采用两种不同原理的判别元件，构成与门出口，如图 1—4 所示。

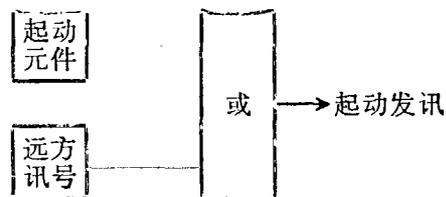


图 1—3 高频发讯机起动方块图

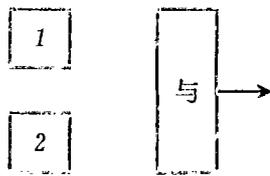


图 1—4 保护跳闸回路采用双重判别元件

图 1—4 中方框 1、2 分别为两种不同原理的跳闸判别元件。设出口只采用任一种判别元件时保护的误动机率为 λ_w ，拒动机率为 λ_j ，则保护跳闸回路采用图 1—4 所示方案后的误动机率 λ_{w1} 和拒动机率 λ_{j1} 可近似由下式求出：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{w1} &= \lambda_w^2 \\ \lambda_{j1} &= 2\lambda_j \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

如采用按图 1—4 方式构成的保护作双重主保护，则此时主保护可用图 1—5 所示方块图表示。

图 1—5 所示保护的误动机率 λ_{w2} 和拒动机率 λ_{j2} 可由下式求出：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{w2} &= [1 - (1 - \lambda_{w1})^2] \approx 2\lambda_{w1} \\ \lambda_{j2} &= (\lambda_{j1})^2 = \lambda_j^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

将 (1—23) 代入上式得

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{w2} &\approx 2\lambda_w^2 \\ \lambda_{j2} &\approx 4\lambda_j^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

设主保护双重化后，主保护减少的拒动机率为 λ_{j1} ，增加的误动机率为 λ_{zw} ，则考虑主保护只采用一种跳闸判别元件时的拒动机率为 λ_j ，误动机率为 λ_w 后，根据 (1—25) 式可求出 λ_{j1} 和 λ_{zw} 值：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{j1} &= \lambda_j - \lambda_{j2} = \lambda_j - 4\lambda_j^2 \approx \lambda_j \\ \lambda_{zw} &= 2\lambda_w^2 - \lambda_w \approx -\lambda_w \end{aligned} \right\} \quad (1-26)$$

由 (1—26) 式可看出，采用图 1—5 配置方式后，增加的误动机率是负值，即采用图 1—4 所示主保护来构成双重主保护后，误动机率也是减少。因此用两套其跳闸回路为双重判别元件的保护构成线路双重主保护，主保护的误动机率和拒动机率都大大减小了，所减少的误动机率和拒动机率均约等于主保护用一种跳闸判别元件时的误动机率和拒动机率。因此对未装设双重判别元件的保护的误动机率 λ_w 和拒动机率 λ_j 而言，可近似认为基本消除了误动和拒动，因而这样配置的双重主保护是最可靠的。

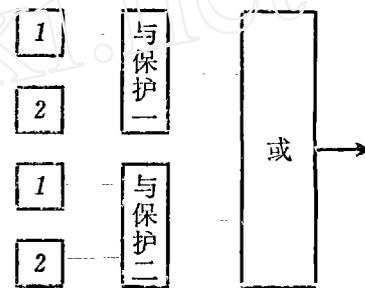


图 1—5 采用按图 1—4 方式构成的保护来构成双重主保护

三、结 论

1. 可用公式 $A' = S_j$ 乘拒动系数减 S_w 乘误动系数来评价主保护双重化所取得的效果。拒动系数和误动系数与所选用的保护装置有关； S_j 和 S_w 则与系统具体条件和线路在系统中所处的地位有关。当 $A' > 0$ ，则主保护双重化由于拒动减少所减少的损失大于误动增加所增加损失，此时主保护双重化有好处；当 $A' < 0$ ，则主保护双重化由于拒动减少所减少的损失小于误动增加所增加损失，此时主保护双重化不但无好处而有坏处。

2. 超高压线路主保护不应毫无例外的都采用双重化。在配置有主保护和后备保护

的情况下，是否再增设一套主保护构成双重主保护，要在总结 220 千伏高压电网保护运行的基础上，根据超高压电网的具体条件、具体线路情况、所采用的保护的拒动系数（或拒动机率）和误动系数（或误动机率）以及拒动和误动所产生的严重后果，综合考虑。

对于超高压重负荷线路，稳定要求特别严重，为了提高稳定，要求任何情况下都需要有全线速动主保护而需要装设双重主保护时，应对所装设的主保护，采取必要的减少其误动机率的措施，如采用双重跳闸判别回路或在原有后备保护基础上构成高频闭锁保护等。

（二）后备保护问题

在配置线路和设备的保护装置时，必须考虑到线路和设备的保护以及断路器均有拒绝动作的可能性，当发生这种情况时，如不设法将短路故障切除，则可能将事故扩大引起非常严重的后果。为此，线路和设备除应装设主保护外，尚应装设后备保护。

目前后备保护的实现方式有两种：

1. 远后备——当主保护或断路器拒绝动作时，由相邻设备或线路的保护实现后备。这种后备保护配置方式，一般用于 110 千伏及以下线路。

2. 近后备——当主保护拒绝动作时，由本设备或线路的后备保护实现后备，当断路器拒绝动作时，由断路器失灵保护实现后备。一般这种后备方式用于 220 千伏及以上线路。

后备保护方式如何配置得合理，可靠度更高，有必要进一步探讨。

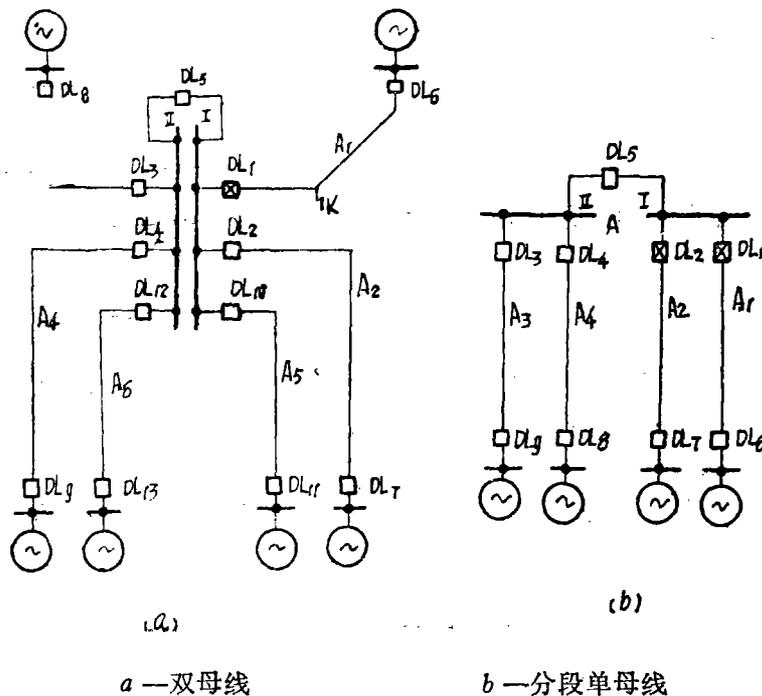


图 2-1 远后备可能引起变电所停电示意图

一、远后备方式

远后备保护方式的优点为简单，容易实现。但这种后备方式用于较为复杂的电网时，由于助增电流的影响，使得相邻元件保护区末端故障有灵敏度的后备段动作时间过长，甚至起不到相邻元件后备保护的作用。所以远后备方式一般用于110千伏及以下电网。

远后备方式尚有一个未引起重视的严重缺点。如图2—1所示，实现远后备的线路末端为双母线或分段单母线时，则母线连接元件上的保护或断路器拒绝动作，如图2—1中断路器 DL_1 上的保护或 DL_1 断路器拒绝动作，则断路器 DL_7 — DL_6 及断路器 DL_{11} ， DL_{13} 上的远后备保护均将动作，以切除故障。于是变电站A的两组母线都会停电。采用近后备保护方式，虽然至少可以保证II组母线照常投入运行，但近后备保护方式太复杂，一般不适合用于110千伏及以下线路。

为了消除远后备方式情况下，双母线或分段单母线全部停电的缺点，可在母联断路器 DL_5 上装设反应两组母线出线故障的母联解列保护，该保护与母线出线上的保护相配合整定，以便在母线出线上发生故障而只有在出线上的断路器或保护拒动的情况下，母联解列保护动作将母联断路器断开。母线出线对侧的保护原则上应与母联解列保护相配合整定，以达到全部消除目前远后备方式所存在将非故障元件所在母线上连接元件也切除的可能性。但如果某些线路按与母联解列保护相配合整定会恶化其灵敏度时，可仍按与母线出线上保护配合而不与母联解列保护相配合整定。应指出，即使不与母联解列保护相配合整定，装设母联解列保护也比不装设时的可靠性高。我们可以图2—1a所示系统

为例来说明。设图2—1a中线路 A_3 上的断路器 DL_3 上保护的保护区最小，在未装设母联解列保护的情况下， A_1 线路上 DL_6 上保护应与 DL_3 上保护相配合整定，装设母联解列保护后， DL_6 上保护则应按与 DL_5 上解列保护相配合，如果这样配合整定使

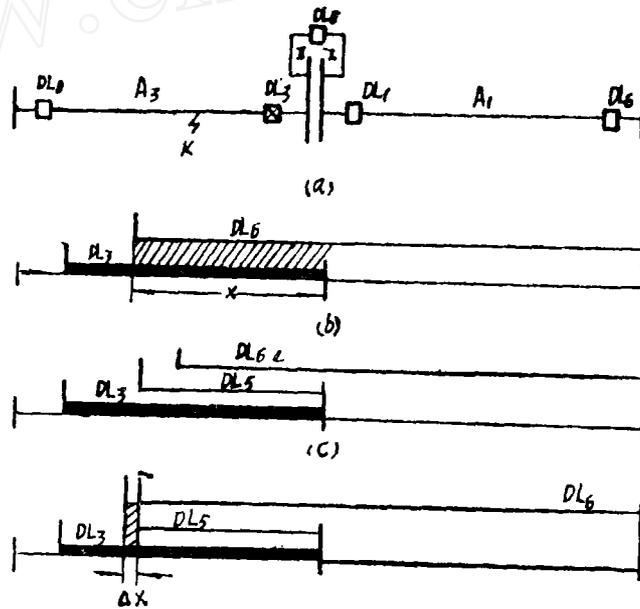


图2—2 DL_3 断路器或其上第一段保护拒绝动作时的各有关动作特性

注：a—系统图；b— DL_5 上未装解列保护时；c— DL_5 上装有解列保护且 DL_6 上保护与 DL_5 上解列保护配合整定时；d— DL_5 上装有解列保护但 DL_6 上保护仍与 DL_3 上保护配合整定时。

DL_6 上保护灵敏度恶化, DL_6 上保护可仍按与 DL_3 上保护配合整定。以与 DL_3 上保护的第一段相配合的时间特性为例来比较各种情况下的可靠性, 各种情况下的时间特性示于图2-2。图2-2示出 A_3 线路故障 DL_3 断路器或其上保护拒绝动作时的各种情况下的各有关保护动作特性。图中拒动用黑粗线表示, 非选择性动作范围用斜条线表示。

从图2-2可以看出, DL_6 上保护第一段或 DL_3 断路器拒绝动作时, 非故障出线所在母线I上出线对侧保护(例如图2-2 a中 DL_6 上保护)是否非选择性动作与 DL_6 上是否装有母联解列保护有关。当母联未装解列保护时, 如图2-2 b所示, DL_6 可能非选择性动作的范围为 x ; 当 DL_6 上装有解列保护且 DL_6 上保护与母联解列保护配合整定时, DL_6 上保护的非选择性动作的可能性可以彻底消除, 如图2-2 c所示; 当 DL_6 上装有母联解列保护, 但 DL_6 上保护不与解列保护配合而仍按与 DL_3 上保护配合整定时, DL_6 上保护可能非选择性动作的范围为 Δx , 如图2-2 d所示, 但 Δx 的大小与母联不装解列保护时的非选择性动作范围 x 相比较(与图2-2 b相比较), 非选择性动作范围大大缩小了。由此可知, 母联断路器上装设解列保护后, 即使线路保护不与母联解列保护相配合整定(即不改变原有保护整定值)的情况下, 非选择性动作的范围也能大大缩小。何况实际上有些线路与母联解列保护配合仍能满足灵敏度要求。因此装设母联解列保护有利于提高电网保护可靠性。

母联解列保护第一段和第二段的动作时间分别由下式决定:

$$t_{DL_{S.I}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (2-1)$$

$$t_{DL_{S.I}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_{P.I} \quad (2-2)$$

式中:

t_1 —故障线路断路器的跳闸时间(即从接受跳闸脉冲起到主触头断开并且电弧熄灭的时间);

t_2 —时间继电器提前动作的负误差时间;

t_3 —保护返回时间;

t_4 —裕度时间;

t_5 —时间继电器滞后动作的正误差时间;

$t_{P.I}$ —欲与之配合的母线上连接元件保护第二段动作时间。

$t_{DL_{S.I}}$ 约选0.25~0.3秒。 $t_{DL_{S.I}} \approx 0.3 \sim 0.35 + t_{P.I}$ 。

此时, 双母线或分段单母线所接线路对侧的保护的第二段及第三段时限应与母联断路器上的解列保护相配合。

双母线或分段单母线的母联断路器上所装设的解列保护, 实际上也是一组母线对另一组母线的连接元件的远后备保护, 它又可以大大改善电网后备保护的性能。其理如下:

1. 例如图2-1 a中, A_1 线路故障, DL_1 断路器或其上保护拒绝动作时, DL_5 上的解列保护起着 DL_8 , DL_9 , DL_{13} 上远后备保护的作用, I组或II组母线上连接元件故障, 一旦断路器或保护拒绝动作, DL_5 上解列保护动作将母联断路器断开, 这

不但保证了切除应切部分流过故障元件的短路电流，而且避免了非故障元件所在母线的停电，这对保证电网安全供电有很大的优点。

2. 由于 I 组或 II 组母线上连接元件故障，其断路器或保护拒绝动作时，母联上的解列保护将母联断路器断开后，减少了大量的助增电流，将大大改善故障元件所在母线上的线路或设备的远后备保护的性能。

双母线或分段单母线的母联断路器上所装设的反应母线出线故障的解列保护，可以为电流保护、电流电压保护、起动元件及测量元件为全阻抗继电器的距离保护和零序电流保护（大接地电流系统中方用零序电流保护）。为了使母联解列保护在母联断路器代替线路断路器期间代替线路保护以简化母联上的保护配置，可以在母联解列保护屏上装设相应的方向元件及方向元件接点的连接端子，以便代替线路保护期间能按系统的需要将方向元件接入。

二、近后备方式

在复杂的高压电网中，被保护线路或设备上的保护或断路器拒动情况下靠相邻设备或线路的保护来切除故障，往往满足不了选择性、灵敏性和电力系统稳定的要求，所以一般 110 千伏以上的电网一般采用近后备，或者采用远近相接合的后备方式（即接地保护能实现远后备时亦尽量采用远后备）。

采用近后备方式时，保护的動作程序也可用图 2—1 来说明。当图 2—1 a 中 Δ^1 线路上 K 点故障， DL_1 断路器拒绝动作时，则断路器失灵保护动作，首先将母联断路器 DL_0 断开，然后由断路器失灵保护动作将 DL_2 、 DL_{10} 断开或由 DL_7 、 DL_{11} 上的保护动作断开 DL_7 、 DL_{11} 以将故障切除。断路器失灵保护动作应首先断开母联断路器，以避免切除非故障元件所在母线的连接元件，这对减少停电范围，保证系统安全运行是非常必要的。上面谈的是断路器拒动时的動作程序，当 K 点故障，主保护（如高频保护）拒动时，则由后备保护第一段或第二段将断路器 DL_1 断开以切除故障。

为改善近后备方式，本文提出以下建议：

1. 如远后备方式一节所述，母联断路器上装设反应两组母线出线上故障的解列保护，不但能起到部分线路的远后备保护作用，而且还能改善部分保护，例如零序电流保护的远后备性能。因为，对于较复杂的电网，断开母联断路器后，一般相邻元件的零序电流保护完全有可能有灵敏度。因此它又有利于在 220 千伏电网中实现远近相接合的后备。

鉴于以上所述，且考虑到 220 千伏及以上线路约 90% 为接地性故障，建议在 220 千伏及以上电网的母联断路器配置反应母线出线故障的零序电流解列保护，保护的段数至少应两段，它应保证母线出线所有线路保护区末端接地故障有足够灵敏度。对于相间故障，也可以考虑装设起动元件及测量元件为全阻抗的距离保护。为了简化母联上的保护设备，在母联解列保护屏上增设相应方向元件和跨线端子，以使母联解列保护能代替线路保护。

由于 220 千伏以上电网采用近后备保护方式，因此线路保护不必按与母联解列保护

不产生任何副作用。鉴于以上所述，建议系统中线路保护第二段的动作时限与断路器失灵保护断开母联断路器的时间配合，即保护第二段动作时限可选择0.75—0.8秒。

三、结 论

1. 双母线或分段单母线的联络断路器上装设反应两组母线连接元件上故障的阶段式母联解列保护，可以避免远后备保护非选择性切除非故障元件所连接的母线上的元件；

2. 双母线或分段单母线的联络断路器上装设的阶段式解列保护，既能起到远后备作用，而且还能改善故障元件所在母线上连接元件的后备保护性能。对于较复杂的电网，断开母联断路器后，一般相邻元件的零序电流保护有可能有灵敏度，因此又有利于实现远近接合的后备保护。

3. 线路第二段保护时限按与母联断路器断开的时限配合，可以使线路带时限段的保护降低约0.2~0.25秒，但并不影响保护的选择性。

附录1 在某个时间间隔 T 内保护的拒动和误动机率
设：

ΔN ——表示在任意时刻 t 发生拒动和误动的保护装置套数；

N_s —— t 时刻未发生拒动和误动的保护装置套数；

N_T —— t 时刻保护装置投入运行的套数。

则 t 时刻保护装置正确动作（不误动和不拒动）的可靠度由下式求出：

$$R(t) = \frac{N_s}{N_T} \quad (\text{附—1})$$

因 t 时刻未发生拒动及误动的保护装置套数等于投入运行的保护装置总套数减去误动和拒动套数 ΔN ，所以（附—1）式可改写成：

$$R(t) = \frac{N_s}{N_T} = \frac{N_T - \Delta N}{N_T} = 1 - \frac{\Delta N}{N_T} \quad (\text{附—2})$$

保护拒动和误动的套数随时间增长而增加，对（附—2）求导数得：

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{d\left(1 - \frac{\Delta N}{N_T}\right)}{dt} = -\frac{1}{N_T} \frac{d\Delta N}{dt} \quad (\text{附—3})$$

由上式又得

$$\frac{1}{N_T} \frac{d\Delta N}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{附—4})$$

（附—4）式中， $d\Delta N/dt$ 为投入保护装置套数 N_T 不变时，保护拒动和误动率，如用 N_T/N_s 乘（附—4）式两边，便可求出一套保护装置的瞬时误动和拒动机率：

$$n = \frac{1}{N_s} \frac{d\Delta N}{dt} = -\frac{N_T}{N_s} \frac{dR(t)}{dt}$$

将（附—1）式代入上式得：

$$n = -\frac{1}{R} \frac{dR(t)}{dt}$$

$$\text{或 } n dt = - \frac{dR(t)}{dt}$$

在 T 时间间隔内取积分得(因 $t = 0$ 时, $R(t) = 1$; $t = T$ 时 $R(t) = R(T)$),

$$\int_0^T n dt = - \int_1^R \frac{dR(t)}{R} = - \left[\ln R \right]_1^R = - \ln R(T)$$

对 R 求解得:

$$R = e^{- \int_0^T n dt} \quad (\text{附-5})$$

n 为常数时, 则上式为:

$$R(T) = e^{- n T} \quad (\text{附-6})$$

故时间间隔 T 内保护误动和拒动几率为:

$$F(T) = 1 - R(T) = 1 - e^{- n T} \quad (\text{附-7})$$

参 考 文 献

1. 电网的继电保护问题

东北技改局 北义

“继电器” 1978年 No 3 许昌继电器研究所

2. 东北主网220千伏送电线路运行事故调查报告

东北电力设计院1979年

3. В. Л. ф АБРИКАНТ

ОПРММЕННН ТЕОРНН НАГЧЕЖНОСТН

КОЦЕНКЕ УСТРОНСТВ РЕАЛЕЙНОЙ ЗАЦНТЫ

“ЭЛЕКТРНЧЕСТВО” 1965. No. 9

4. 可靠性数学

B. L. 阿姆斯特特 科学出版社

5. 可靠性初级教程

(日) 可靠性研究委员会编

人民邮电出版社