

73.226
XJG
2

73.226
XJG
2

过电压及其保护

下 册

高电压技术教研组编

西安交通大学

1961. 11



第五章

§ 5-1		347
§ 5-2	 綫时作用于綫路絕緣的大气过电压.....	351
§ 5-3	架空避雷綫架設的几个問題.....	359
§ 5-4	利用架空地綫进行綫路防雷时, 比开断数的确定, 塔杆 接地电阻数值的选择.....	364
§ 5-5	利用架空地綫进行綫路防雷的运行經驗, 計算綫路遮断 数的新的概念.....	366
§ 5-6	充分利用木質絕緣来提高綫路的耐雷性.....	369
§ 5-7	利用AΠB来代替架空地綫的問題.....	374
§ 5-8	交叉跨越綫路的防雷保护.....	376
§ 5-9	大跨越綫路的防雷保护.....	380
§ 5-10	架空避雷綫經火花間隙接地.....	381
§ 5-11	不同电压等級輸电綫路防雷保护的具体措施.....	384
参考文献		385

第六章 变电所防雷保护

§ 1-1	概論.....	237
§ 2-2	发变电所的直击雷保护.....	387
§ 3-3	避雷器动作时被保护設備上的过电压.....	391
§ 4-4	变电所进綫保护原理.....	396
§ 5-5	变电所危險波曲綫与耐雷指标.....	398
§ 6-6	35—220 仟伏及以上电压 等級的变电所行波保护.....	403
§ 7-7	35仟伏及以上电压等級变电所內 3—10仟伏配电裝置的 保护.....	411
§ 8-8	配电系統的防雷保护.....	414
参考文献		419

第七章 旋轉电机防雷保护

§7-1 概論.....	421
§7-2 发电机匝間絕緣及中性点.....	424
§7-3 发电机的感应过电压保护.....	426
§7-4 进綫段为架空綫时的发电机.....	431
§7-5 当发电机經一段电纜与架空綫.....	434
§7-6 低压旋轉电机的防雷.....	441
§7-7 发电机直机直配綫防保护时的若干問題.....	442
参考文献.....	445

第八章 电力系统中的内部过电压及工頻电压升高

概論.....	447
---------	-----

第一部分 中点絕緣系統一相接地时的过电压, 中点接地方式

§8-1-1 中点絕緣系統一相接地时的过电压.....	449
§8-1-2 电力系統中点經消弧綫圈接地时的一些問題.....	458
§8-1-3 电力系統的中点接地方式.....	461
参考文献.....	470

第二部分 几种操作过电压

§8-2-1 开断电容器或空载路时的过电压.....	471
§8-2-2 限制切断空载綫过电压的措施.....	497
参考文献.....	519
§8-2-3 合閘空载綫路过电压.....	520
参考文献.....	529
§8-2-4 开断电感电流时的过电压的一般概念.....	529
§8-2-5 开断变压器与电抗器的激磁电流时的过电压.....	531
§8-2-6 开断兩相短路时的过电压.....	512
参考文献.....	

第三部分 工頻电压升高

§ 8-3-1 序言.....	546
§ 8-3-2 引起工頻电压升高的原因.....	
§ 8-3-3 降低工頻电压升高的一些措施.....	559
参考文献.....	562

第四部分 电力系统中的諧振过电压，有串联补偿时的过电压

§ 8-4-1 概論.....	563
§ 8-4-2 綫性諧振.....	564
§ 8-4-3 非綫性（有鉄心）电感的特性.....	575
§ 8-4-4 基頻时的鉄磁諧振.....	585
§ 8-4-5 中点位移过电压.....	592
§ 8-4-6 分析鉄磁諧振問題的方法，小参数法.....	598
§ 8-4-7 二次諧波諧振.....	602
§ 8-4-8 次諧波諧振.....	609
§ 8-4-9 有串联补偿（УПК）系统中的过电压.....	619
§ 8-4-10 无全阻尼水輪机系统中不对称短路过电压.....	630
参考文献.....	637

第九章 电力系統的絕緣配合及升压运行

§ 9-1 概論.....	638
---------------	-----

第一部分 輸电綫路的絕緣配合

§ 9-2 概論.....	640
§ 9-3 絕緣子鏈的抗电强度.....	642
§ 9-4 运行条件下，内部过电压作用时絕緣子鏈的抗电强度 MPЭ	647
§ 9-5 絕緣子个数的决定.....	648
§ 9-6 导綫至塔体，相間距离的确定	651
§ 9-7 木杆綫路絕緣水平的确定.....	660

第二部分 变电所絕緣配合

§ 9-8 概論.....	662
---------------	-----

§ 9-9 PB 动作后, 被保护设备上的过电压	669
§ 9-10 变电所絕緣特性	664
§ 9-11 根据大气过电压来决定变压器的絕緣水平	671
§ 9-12 变压器的工頻試驗电压的决定	676
§ 9-13 降低变压器絕緣水平的問題	678
§ 9-14 套管, 支持絕緣子絕緣水平的决定	692
§ 0-15 純空气間隙絕緣水平的决定	694
§ 0-16 变电所各个设备的絕緣水平間的相互关系	699

第三部分 現有电力系統的升压运行

§ 0-17 概論	799
§ 9-18 升压后系統配电设备的改装問題, 电量損失問題	704
参考文献	707

第五章 輸電綫路防雷保护

§5-1. 概 論

輸電綫路防雷的問題在電力系統的防雷中有巨大的意義。因為綫路的長度大，受到雷擊的機會多，在電力系統的雷害事故中，綫路的雷害事故佔據最大的比例。見下表。

表 5-1 電力系統中 1953-1959 年雷害事故分析統計表(參 3)

年 份	系統 雷害 事故 總數	發 電 機			發 變 電 所			20-220 仟伏綫路		
		次 數	佔該 年事 故總 數的 %	以53年事 故為 100 %，各年 事故的变化 百分數	次 數	佔該 年事 故總 數的 %	以53年事 故為 100 %，各年 事故的变化 百分數	次 數	佔該 年事 故總 數的 %	以53年事 故為 100 %，各年 事故的变化 百分數
53	323	2	0.6	100	123	41	100	189	58.4	100
54	234	2	0.8	100	82	35	62	150	64.2	79
55	221	0	0	0	56	25.3	42.5	165	74.7	87
56	201	4	1.98	200	34	18.5	23	160	79.6	84
57	107	0	0	0	26	24.2	19.6	81	75.8	43
58	85	0	0	0	17	20	12.9	68	80	36
59	95	4	4.2	200	25	26.3	18.9	66	69.5	34.8

由表 5-1 的統計結果可見，在七年來，輸電綫路的雷害事故在電力系統的总的雷害事故中所佔百分比的平均數高達 72%。另外，當綫路上出現大氣過電壓波時，它將沿導綫運動至變電所，在無可靠的保護措施時將危及變電所的絕緣，因此必須特別注意綫路的防雷問題。

在長期的實踐中，人們逐步地明確了輸電綫路防雷的任務及其基本措施。這些任務與措施是：

(1) 利用架空接地綫使導綫不受直擊雷，

(2) 避免逆閃絡，当架空地綫受到雷击时，在雷击点仍有极高的电位，一数百万伏，这个电位足可以使实际中所遇到的任何絕緣发生閃絡。因此只用架空地綫还不能避免雷害事故，还需要采取其它的措施，例如降低塔杆的接地电阻，保証架空地綫与导綫在搖距中央有一定的距离，利用管型避雷器，或加强綫路絕緣等等。

(3) 避免产生稳定的工頻电弧，因为冲击波所引起的絕緣閃絡并不是在任何情况下均可轉变为工頻电弧引起綫路的开断。故可利用木絕緣来减少工頻电場强度，避免形成工頻电弧减少綫路的开断数。

又因为雷击往往只发生在一相的导綫上，引起二相接地的事故，故可利用消弧綫圈避免产生稳定的工頻电弧避免綫路开断。在木杆綫路中，因为对地絕緣超过相間絕緣，为了避免橫担劈裂及发挥消弧綫圈的作用，我們利用木間隙来避免相間短路等等。

(4) 保証供电的不間断，短時間地去掉工頻电源有利于电弧的熄灭（即消除接地的故障），又不会对負荷（如电动机）有很大的影响，特别是应用按相重合閘时，对系统的稳定也无很大影响，故可以利用自动重合閘（АВР, ОАВР）作为綫路的防雷措施之一。

但是这些任务与措施并不是很快就被認識的，例如在 1929—1930 年前，人們认为雷直击的于导綫的可能性較少，同时这种过电压也无法限制。当时认为雷云的电場在发生放电的瞬时就消失了，故而有很高的感应过电压，因此綫路的防雷主要是限制感应过电压。故而运用了悬挂得距导綫較近的架空地綫，架空地綫的数目較多（有时超过二根）且有时放在导綫下面。对架空地綫的接地电阻也未給予充份的重視。

在 1932—1934 年才确定，放电时雷云的电場不是瞬时消失的。故感应过电压的数值不会很高，一些額定电压較高的綫路（如 110—220KV）的絕緣不应在感应过电压的作用下发生放电。同时又发现一些正确使用架空地綫的綫路（悬挂在导綫上面，有較小的接地电阻）的开断数要少得多。

在多年实际工作的基础上，Fortescue 肯定了輸电綫路的雷害事故是由于直击雷引起的，而不是由感应过电压引起的。这个意見逐漸地得到了一致同意。

在以后，各个国家的研究工作才集中于如何估算輸电綫路的耐雷性，防雷措施的参数与特性的研究，雷电参数的研究等方面。

为了估計輸电綫路的耐雷性就必须确定雷击点的电位。目前常用的計

算方法有兩種：

(1) 假定一电压波或电流波沿雷电通道波阻抗运动至雷击点后，发生多次的折反射，故可用波网络的方法计算被击点的电位。

(2) 用集中参数的等值迴路来代替架空地线、塔杆、接地电阻等等来计算雷击点的电位。

在本章中我們只用第二种方法来计算雷击点的电位。

线路防雷問題是一个經濟問題，显然我們不希望线路有过多的事故，引起供电中断、設備损坏，但同时也不希望运用过份的防雷措施，使得投資增加，维护与运行复杂化。因之必須使线路又經濟又有相当的耐雷性。

我們要求电压等級不同的輸电线路有不同的耐雷水平与单位遮断率。其意义如下：

(1) 线路（导线或架空地线）受到雷击后不引起絕緣閃絡的最大雷电流为线路的耐雷水平，其单位为千安。

(2) 单位遮断率。线路长度較大，雷电活动較强时，因雷害而发生的事（即停电——其中包括永久性的故障与暂时性的，即利用АПБ可以消除的故障所引起的停电数）次数也就愈多。我国現在进行統計时所用的单位遮断率是指 40 个雷电日，100 公里长的线路因雷害而引起的开关动作数。

我国过电压保护規程（參第 58 条）規定：当线路所經地区土壤电阻率 $\rho \leq 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 时，有架空地线的线路耐雷水平不应低于下列数值。

线路額定电压	KB	110	154	220
线路耐雷水平	ka	120	150	200

由上述可見，电压愈高的线路其耐雷水平就愈高，这是很显然的，电压等級較高的线路的重要性更大，线路絕緣較强，如其耐雷水平愈高，雷击时超过耐雷水平引起的开断数也就愈少。

过去对耐雷水平的計算十分注意，但事实上它只能說明线路本身的结构（有无架空地线，塔杆型式及高度，絕緣子数目的多少，搖距长短，接地电阻的大小）对线路耐雷性的影响，此外还可用来决定为达到一定耐雷水平时塔杆必需的接地电阻（見后述），但事实上接地电阻的选擇問題也不能完全根据所要求的耐雷水平来决定。因为在个别高 ρ 地区，如果一定要作很小的接地电阻，經濟上是不适宜的。在低 ρ 地区，則所費不多，也可以得到很小的接地电阻，因此耐雷水平現在只有定性地判断线路防雷程度的作用。

对线路防雷性的一个较好的判据是单位遮断数，但不同电压等级，不同结构的线路容许的单位遮断数究竟是多少，还极难肯定，为了便于分析问题，将我国35—220KV线路的运行经验统计资料列于表5-2，(参3，表5)，为了便于比较，我们也列出苏联同一电压等级、杆型的运行资料(参6)。

表 5-2 我国及苏联 35—220 千伏线路防雷保护运行经验的统计资料(註)

額定電 壓 千 伏	線 路 杆 型		換算為40個雷電日 統計的公里一年數		40 雷電日100 公里 長線路單位遮斷率	
			中 國	蘇 聯	中 國	蘇 聯
220	帶有架空地線，金屬杆		8548	12633	0.135	0.04
110	有架空地線金屬，水泥杆		1574	8220	0.98	0.648
	无架空地線，木杆木担		1380	24250	9.57	0.74
	无架空地線，木杆鉄担		232	—	10.3	—
60	有架空地線，金屬水泥杆		7351	—	1.55	—
	无架空地線，木杆木担		1904	—	1.37	—
	无架空地線，木杆鉄担 (鉄担未接地)		168	—	4.75	—
	无架空地線，金屬杆		2433		2.28	
35	无架空地線 木杆木担	相距 ≥ 2.5 米	3709		1.32	
		相距 ≤ 2.5 米	1187		2.8	
	无架空地線，金屬，水泥杆		2398	1795	4.22	2.4
	有架空地線，金屬杆		3770	2675	2.25	2.2

(註：苏联的运行资料是以每年30个雷电小时为基础进行计算的，为了便于比较，令30个雷电小时等于20个雷电日，之后再换算到40雷电日)。

§5-2 有、无架空地线时作用于线路绝缘的大气过电压。

由表5-2可见,有架空地线的较高等级之输电线路(如110KV,220KV)的耐雷性是比较好的。为了说明此问题,我们首先来分析在有、无架空地线时作用于线路绝缘的过电压。

在无架空地线时,假定全部雷击均作用在导线上,如果令导线波阻抗 $Z = 400\Omega$ 时,那么被击物体的波阻抗将为 $\frac{Z}{2} = 200\Omega$, 见图5-1, 根据第三章关于雷电流的基本概念可知,当被击物体阻抗为 $0-50\Omega$ 时雷电流 i_x 将为:

$$i_x = \frac{I_x}{2}(1 - \cos \omega t)$$

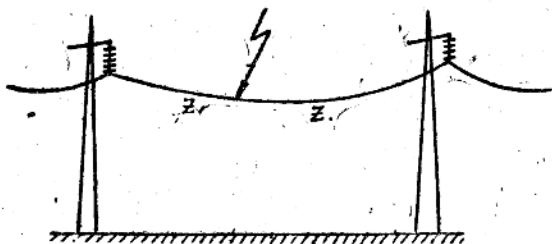


图 5-1

如果被击物体阻抗较大时, (如上述的 $\frac{Z}{2} = 200\Omega$), 那么雷电流减半, 即此时通过被击阻抗的雷电流将为:

$$\frac{1}{2}i_x = \frac{I_x}{4}(1 - \cos \omega t)$$

此时导线上的过电压,亦即线路对地绝缘上的过电压的最大值(即当 $\omega t = \pi$ 时)将为:

$$u_{\text{max}} = \frac{I_x}{2} \cdot \frac{Z_{\text{np}}}{2} = 100I_x. \quad (5-1)$$

在有架空地线时,雷击将可能发生在塔顶及架空地线的任意一点上,为了便于分析问题,我们假定50%的雷击击于塔顶,另外50%的雷击于档距中央的架空接地线上。在这两种情况下,导线对地绝缘(绝缘子串,在档

距中央导、地线间的空气间隙)均承受过电压,由理论分析与运行经验可知,在后一种情况下,导线对地(即架空地线)的绝缘发生闪络的机会是绝无仅有的,而在雷击有架空地线的塔顶时,绝缘却有机会闪络。因此我们在下面先分析这一情况。

在有架空地线时,雷击也有可能越过架空地线而直接击中在导线上,此时线路对绝缘的过电压可由(5-1)式来进行计算。

雷击于有架空地线的塔顶,在略去导线上的工频电压时,线路绝缘上所受到的过电压有以下几个分量。

(1) 塔杆中的雷电流 i_{on} , 在其接地阻 R (冲击接地电阻) 上产生的压降 $i_{on} R$ 。

(2) 塔杆及雷电通道中的雷电流所产生的感应过电压的电磁分量 $u_{ind\omega}$ 。

(3) 考虑架空地线的影响后的感应过电压的静电分量 $u_{ind\sigma}$ 。

(4) 架空地线中有雷电流流过时,在导线上产生的感应电压。

A. 有架空地线时导线上感应过电压的静电分量。

有架空地线时,导线上感应过电压的静电分量将减少的物理概念是很清楚的。

(1) 由于它对导线的屏蔽,减少了在先导放电阶段导线上的感应电荷。

(2) 它加大了导线的对地电容。

这两个效应均使 $u_{ind\sigma}$ 下降,这里我们来进行定量的分析:

首先假定架空地线也是对地绝缘的,再假定主放电发展时架空地线与导线的对地电场强度完全一样,那么当导线上的感应过电压之静电分量为 $u_{ind\sigma}$ 时,“绝缘”的架空地线上的感应过电压之静电分量则为:

$$u_{ind\sigma} \frac{h_{TP}}{h_{OP}}.$$

事实上架空地线是接地的,其感应过电压之静电分量应为零,这相当于架空地线上有一负的感应过电压 $u_{ind\sigma} \frac{h_{TP}}{h_{OP}}$,如果令架空地线与导线间的传递系数为 K 时,则在有架空地线时,导线上的感应过电压的静电分量将为:

$$u'_{ind\sigma}(t) = u_{ind\sigma}(t) \left(1 - K \frac{h_{TP}}{h_{OP}} \right). \quad (5-2)$$

其中 $u_{\text{HTP}}(t)$ 由第三章中的公式所决定。

Б) 由于 $i_{\text{on}}R$ 与交变电磁场决定的架空地线中的雷电流 i_{TP} 。

显然为了决定架空地线中有雷电流流过时，在导线上产生的感应电压，必须首先来决定这个雷电流即 i_{TP} 。

假定只是与被击塔杆相接的兩檔架空地线中有雷电流，并且假定被击塔杆左右的两个塔杆的波阻抗与架空地线波阻抗相等，略去这两个塔杆的接地电阻的话，（参看图 5-2）那么决定 i_{TP} 的等值迴路将如图 5-3 所示。

在图 5-3 中，我們略去架空地线的对地电容，故而将它用一集中的电感来代替。在图 5-3 中 $i_{\text{M}}(t)$ 为整个雷电通运中的雷电流，其中作用的几个电势为：

(1) 如果架空地线与塔杆分离，那么由于塔杆中的雷电流，雷电通道

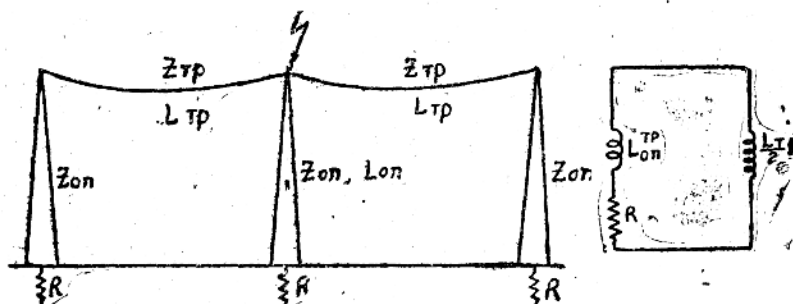


图 5-2

中的雷电流将在塔杆，架空地线間产生一感应电压。但事实上塔杆与架空地线是连接的，其間不应有电位差，故而在架空地线中将有一电流，这个电流与假想的感应电压 u_{HTP} 相平衡。当雷电流为斜角波即 $i_{\text{M}} = at$ 时。

$$u_{\text{HTP}} = aL_{\text{он}}^{\text{TP}} + aM^{\text{TP}}(t) \quad (5-3)$$

(5-3)中：

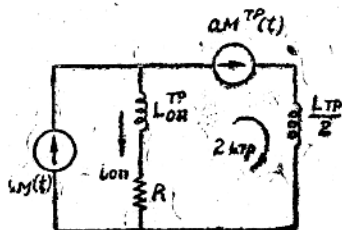


图 5-3

$$L_{\text{он}}^{\text{TP}} = 0.2h_{\text{TP}} \left[\ln \frac{2H}{r_0} + \frac{4h}{2h_{\text{TP}}} \ln \frac{H}{4h} - 1 \right] \quad (5-3a)$$

$$M^{TP}(t) = 0.2h_{TP} \left[\ln \frac{vt + H}{(1+\beta)H} - \frac{\Delta h}{2h_{TP}} \ln \frac{H}{\Delta h} + 1 \right] \quad (5-36)$$

其中 $H = h_{TP} + h_{on} = 2h_{on}$, $\Delta h = h_{on} - h_{TP} = 0$.

除了这个电势之外，还有 $i_{on}R$ ，考虑到这几个电势，则不难得出图 5-3 所示的等值迴路。

根据图 5-3 来决定 i_{TP} 将遇到一些困难，因为 Z_{TP} 在考虑冲击电量等对波阻抗的影响时，其本身也是 i_{TP} 的函数，但这个影响是不太大的，可以预先假定 Z_{TP} 的数值，例如对一根架空地线来说，可假定 $Z_{TP} \cong 400$ 欧，在有些情况下，可能用两根架空地线，此时需考虑其间之互波阻抗的影响，此时 $Z_{TP} \cong 250$ 欧。

如果已知 Z_{TP} ，那么

$$L_{TP} = l \frac{Z_{TP}}{v}$$

其中 l 为档距。

通常，在两根架空地线时， $L_{TP} = 0.42l(M)\mu H$ 。
一根架空地线时， $L_{TP} = 0.67l(M)\mu H$ 。 } (5-4)

在不同的主放电速度时 $M^{TP}(t)$ 如图 5-4 所示。

由图 5-3 不难写出当电流为斜角波时的方程式：

$$R2i_{TP} + 2\left(\frac{L_{TP}}{2} + L_{on}^{TP}\right) \frac{di_{TP}}{dt} = aL_{on}^{TP} + aRt + aM^{TP}(t) \quad (5-5)$$

可以先假定 (5-5) 式中之右边各项之总和为 1，即单位电压，之后再利用

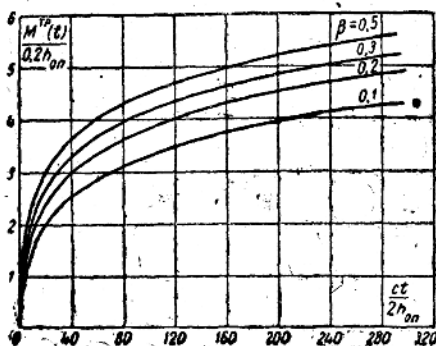


图 5-4

丢莫积分。当单位电压时：

$$R i_{rp} + \left(\frac{L_{rp}}{2} + L_{on}^{rp} \right) \frac{di_{rp}}{dt} = \frac{1}{2} \quad (5-6)$$

其解为：

$$2i_{rp} = \frac{1}{R} (1 - e^{-at}), \quad a = -\frac{R}{\frac{L_{rp}}{2} + L_{on}^{rp}}$$

当所加电压为(5-5)式右边各项时，其解是较为复杂的。这里我们只给出最后的结果。

$$2i_{rp}(t) \approx at - \frac{a}{\alpha} \left[1 - \frac{L_{on}^{rp} + M^{rp}(t)}{\frac{L_{rp}}{2} + L_{on}^{rp}} \right] (1 - e^{-at}) - \frac{0.2a^2 h_{rp}}{R} at e^{-at} \quad (5-7)$$

在通常情况下，(5-7)式最后一项是很小的，因此可以略去，此时

$$2i_{rp}(t) \approx at - \left[1 - \frac{L_{on}^{rp} + M^{rp}(t)}{\frac{L_{rp}}{2} + L_{on}^{rp}} \right] \frac{a}{\alpha} (1 - e^{-at}) \quad (5-8)$$

因为：

$$i_{on} + 2i_{rp} = i_M = at$$

故而塔杆中的电流 i_{on} 为：

$$i_{on} \approx a \left[1 - \frac{L_{on}^{rp} + M^{rp}(t)}{\frac{L_{rp}}{2} + L_{on}^{rp}} \right] \frac{(1 - e^{-at})}{\alpha} \quad (5-9)$$

其随时间的变化速度是：

$$\frac{di_{on}}{dt} \approx a \left[1 - \frac{L_{on}^{rp} + M^{rp}(t)}{\frac{L_{rp}}{2} + L_{on}^{rp}} \right] e^{-at} \quad (5-10)$$

(B) 作用于绝缘的感应过电压的电磁分量。

参看第三章可见，因为只有一部分电流流过塔杆，故而

$$u_{\pi n d o n}(t) = L_{on}^{rp} \frac{di_{on}}{dt} + a M^{rp}(t) \quad (5-11)$$

(Г) 由于在架空地线中有电流流动，在导线上产生的感应电压将为：

$$K u_{rp}(t)$$

K 为架空地线与导线间的耦合系数，而 $u_{\tau p}(t)$ 显然为(参看图5-3)。

$$u_{\tau p}(t) = i_{on}R + L_{on}^{rp} \frac{di_{on}}{dt} + aM^{\tau p}(t)。 \quad (5-12)$$

根据(5-3a), (5-36), (5-9), (5-10)不难求出 $u_{\tau p}(t)$ 及 $Ku_{\tau p}(t)$ 。必须注意 $Ku_{\tau p}$ 是与其它几个电压反号的。

(Д) 作用于线路绝缘的总的过电压，由(5-11), (5-2), (5-12)可见：

$$\begin{aligned} u_{\kappa 3}(t) &= i_{on}R + L_{on}^{rp} \frac{di_{on}}{dt} + aM^{\tau p}(t) + u_{\kappa \text{нд}3}(t) \left(1 - K \frac{h_{\tau p}}{h_{on}}\right) - Ku_{\tau p}(t) \\ &= u_{\tau p}(t)(1-K) + u_{\kappa \text{нд}3}(t) \left(1 - K \frac{h_{\tau p}}{h_{on}}\right)。 \end{aligned}$$

令 $h_{\tau p} \approx h_{on}$ ，则

$$u_{\kappa 3}(t) = [u_{\tau p}(t) + u_{\kappa \text{нд}3}(t)](1-K) \quad (5-13)$$

必须注意，(5-13)式只适合于计算雷电流为无穷长斜角波时，作用于线路绝缘的过电压，但事实上雷电流只是在 $t=0-\tau_{\phi}$ 时才增加的，当 $t > \tau_{\phi}$ 后，雷电流不可能再增加，在 $t > \tau_{\phi}$ 时，可假定再叠加一个电流源

$$i = -a(t - \tau_{\phi})。$$

因此线路绝缘所受的过电压将为

$$u_{\kappa 3}(t) = [u_{\tau p}(t) + u_{\kappa \text{нд}3}(t) - u_{\tau p}(t - \tau_{\phi}) - u_{\kappa \text{нд}3}(t - \tau_{\phi})](1-K) \quad (5-4)$$

(5-14)式较过电压保护规程[参2]对线路绝缘所受的过电压的计算要精确得多，例如对感应过电压的静电分量的计算，电磁分量的计算[(5-14)式考虑了 $aM^{\tau p}(t)$ ，而在规程中就未加考虑]，均较为精确，但存在的缺点是过于繁杂，因此有必要简述规程中对塔顶电位及线路绝缘所受过电压的计算方法。

规程中进行计算时所用的等值回路如图5-5，为了便于与上述计算方法相比较，我们在图5-5的回路中也给出图5-3中所用的一些相应的符号。

此时作用于线路绝缘的过电压有3个分量

$$(1) \quad i_{on}R(1-K)。$$

$$(2) \quad L_1 \frac{di_{on}}{dt}(1-K)。$$

$$(3) \quad u_{\kappa \text{нд}3}(1-K)。$$

其中第一、第三两个分量之最大值出现的时间几乎与雷电流的最大值出现的时间相同，因为规程中对雷电流的波形采用半余弦波，即

$$i_x = \frac{I_m}{2}(1 - \cos \omega t).$$

故而第二个分量的最大值出现的时间在波头的中间，即 $t = \frac{\tau_\phi}{2}$ 时有最大值。由于第二个分量的存在，作用于线路绝缘的过电压的最大值出现的时间小于 τ_ϕ 。这三个分量随时间的变化见图5-6。

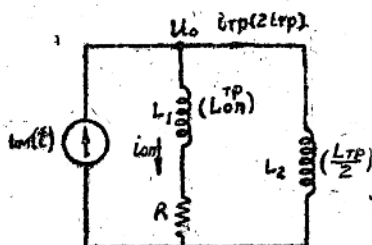


图 5-5

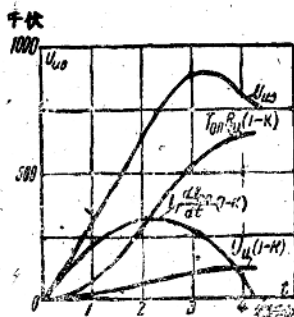


图 5-6

规程中提出，在塔杆高度不大 R 又较小时，第二个分量只佔 u_{n3} 的最大值之20%左右，考虑到它与第一、第三两个分量并不同时出现。因此 u_{n3} 的最大值可近似地按下式来进行计算，即

$$u_{n3} = (I_{0n}R + u_{n3d})(1-K) \quad (5-15)$$

(5-15)中

$$I_{0n} = I_m \frac{1}{1 + \frac{L_1}{L_2} + \frac{\pi R_i}{2\omega L_2}} = I_m \cdot m_0 \quad (5-16)$$

(5-16)式是用下述的简化办法求得的，显然塔顶电位 u_0 将为：

$$u_0 = L_1 \frac{di_{0n}}{dt} + i_{0n}R_i \quad (a)$$

$$i_x = \frac{I_m}{2}(1 - \cos \omega t) = i_{0n} + i_{rR} \quad (b)$$

$$L_2 \frac{di_{rR}}{dt} = u_0 \quad (B)$$

将(6)代入(5)可得:

$$L_2 \frac{di_m}{dt} = (L_1 + L_2) \frac{di_{on}}{dt} + i_{on} R_1$$

将上式积分可得:

$$i_m = \left(1 + \frac{L_1}{L_2} i_{on} + \frac{R_1}{L_2} \int_0^t i_{on} dt \right) \quad (7)$$

因为 R_1 远小于 L_2 所决定的阻抗, 故

$$i_m \approx \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) i_{on} \quad (8)$$

将(8)再代入(7)可得:

$$\begin{aligned} i_m &= \left(1 + \frac{L_1}{L_2} i_{on} + \frac{R_1}{\left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) L_2} \int i_m dt \right) \\ &= \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) i_{on} + \frac{R_1}{\left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) L_2} \frac{I_m}{2\omega} (\omega t - \sin \omega t) \end{aligned}$$

考虑到(8)式, 则

$$\begin{aligned} i_m &= \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) i_{on} + \frac{R_1}{L_1 + L_2} \frac{I_m}{2\omega} (\omega t - \sin \omega t) \\ &= \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) i_{on} + i_{on} \frac{R_1}{\omega L_2} \frac{\omega t - \sin \omega t}{1 - \cos \omega t} \quad (9) \end{aligned}$$

我們感兴趣的是 i_{on} 的最大值, 令 $\omega t = \pi$, 那么

$$i_m = \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) i_{on} + i_{on} \frac{R_1 \pi}{2\omega L_2}$$

故

$$i_{on} = i_m \frac{1}{1 + \frac{L_1}{L_2} + \frac{\pi R_1}{2\omega L_2}}$$

而

$$u_{mBP} = a h_{BP} \quad (5-17)$$

h_{BP} 导线平均对地高度 米,

a 随雷电流幅值而变的系数 千伏/米,

a 的数值如表 5-3 所示,