

高压架空输电线路的 分相检修

苏联 И. А. 綏罗米雅特尼柯夫著
常 蔭 集譯 黃 世 說校訂

電力工業出版社

序 言

为了爭取提前完成国民經济計劃而开展的全民运动，大大地提高了动力工作人員为爭取可靠的和不間断的供应动能的責任心。

从事动力事業的工作人員以創造性的思想堅毅頑強地尋覓解决这一問題的新途徑。电網工作人員在这方面获得了重大的成就。

在苏联动力事業中已經得到广泛推行的高压綫路的分相控制和單相自动重合閘(ОАПВ)裝置，使提高工業企業供电的可靠性和不間断性向前大大地迈进了一步。凱密罗夫电業局的工作人員們在这方面表现了極有价值的首創精神，他們是在苏联首先实现高压綫路分相控制和單相自动重合閘的創造者。他們也首先实现了二次动作單相自动重合閘。

凱密罗夫电業局在过去五年間对綫路分相檢修方面所积累的經驗充分表明，用这种工作方法可以在不間断供电的情况下进行广泛的工作項目，直至掉換导綫工作。

經驗也証實了分相檢修的工作方法是十分安全的。

特別应当指出，分相檢修法的工艺技术手續和綫路一般停电檢修几乎没有什么区别，因而也就可能使檢修班很快地掌握这一工作方法。

分相檢修的基本措施在于遵守綫路断开相綫的特殊接地条件来保証檢修人員的安全。

在制訂分相檢修規程之前，凱密罗夫电業局曾对这問題

进行了理論上和实际上的研究。在本書中 叙述工程师 B. H. 亞司尼柯夫所做的分相檢修安全問題的研究、分相 檢修的規程和导則，以及凱密罗夫电業局五年来采用分相檢修的經驗。

本書的目的是使从事动力事業的工作人員熟悉分相檢修的理論和实际。

苏联电站部技术司副司長

И. А. 綏罗米雅特尼柯夫

目 录

序言

第一章	分相控制的高压输电线路	5
第二章	在三相架空线路断开的一相导线上 發生的电气現象	12
第三章	接地线間的許可距离	26
第四章	装設接地线的特殊方法	31
第五章	接地装置是否符合“安全工作规程” 要求的檢查	37
第六章	分相检修时，在线路上同时工作的 工作班数	40
第七章	输电线路分相检修的施工組織	41
第八章	线路分相检修工作中所用的設備	52
第九章	不改裝油开关而可使线路相线断开进行 检修的临时措施	56
第十章	分相检修工作項目	57
第十一章	分相检修作業須知	60
(甲)	高压架空输电线路分相检修保安須知 (又称“分相检修安全工作规程”)	60
(乙)	用分相检修方法在 110 千伏线路木質电杆上进行 登杆檢查的規程	71
(丙)	用分相检修方法在 110 千伏输电线路路上安裝及 更換連接器的工作規程	75
(丁)	用分相检修方法更換絕緣子串和个别絕緣子	

	的工作規程	79
附件 1	允許參加架空輸電綫路分相檢修工作 的許證明書格式	83
附件 2	對於架空輸電綫路分相檢修工作用 安全腰帶的要求	83
附件 3	用分相檢修方法進行綫路檢查工作 所用設備及工具清單	84
附件 4	用分相檢修方法安裝和更換連接器 用的設備及工具清單	85
附件 5	用分相檢修方法掉換絕緣子串或個別 絕緣子用的設備及工具清單	86

第一章 分相控制的高压输电线路

第1节 分相控制线路的优点

直到目前为止，高压输电线路都是三相联同控制的，就是说，或者线路的三根导线在全工作电压下合闸，或者三根导线全部断开。当一相发生故障时，整个线路就被断开，因此在中性点接地的系统里，就不能利用其他两根导线来保持供电了。

凯密罗夫电业局、火力发电设计局和电站部技术司的工作人员绥罗米雅特尼柯夫、亚司尼柯夫、罗潺别格、聶布拉特和婁薩柯夫斯基等在1942—1943年間首先对这一问题所进行的研究工作指出，在许多情况下，中性点接地系统里，输电线路三相中的一相断开时，当发电机所产生的电流不对称度和在用户处所产生的电压不对称度不超出允许限度时，是可以保证发电机、变压器和用电设备的正常运行的。这样就能在苏联首先建设两相长时间运行的高压(110 千伏)远距离输电线路。

各相分别有控制设备，并且允许单独一相断开而非三相同时断开的输电线路，比一般的线路有相当多的优点。当一相短路时，发生故障的一相就自动的从两端断开，而其余两相仍旧运行，保持送电不致间断。当两相间不接地短路时，只有一根短路的导线断开，这样就可排除线路的短路故障，而用其余两相保持供电。根据很多次的统计资料，输电线路的故障大多数属于单相短路和两相不接地短路性质。因此，有分相控制设备和分相自动重合闸装置的输电线路是最可靠

的綫路。凱米羅夫電業局、莫斯科電業局和其他電力系統中對於這種綫路的運行經驗，充分証實了這個結論。在首先研究並實現了分相控制高壓綫路的凱米羅夫電業局的電力系統中，也採用一次動作的和二次動作的單相自動重合閘裝置，以及在發生兩相不接地的短路故障時，斷開綫路的一相的保護裝置。

有分相控制的綫路允許比較廣泛地、事實上是不受限制地採用自動重合閘裝置，其中包括按動態穩定極限運行的電力系統，以及用以聯絡發電廠與發電廠的單回路綫路在內。由於斷開綫路的一相而非三相，所以大大地提高了發電廠並列運行的穩定性。在綫路上採用分相控制和單相自動重合閘裝置，可以作為是提高電力系統的動態穩定性的措施之一。

當綫路是分相控制時，不把輸電綫路全部停電而用分相檢修的方法來進行綫路和各种設備的檢查和檢修的工作項目，就能夠大大的擴大。

第2節 高壓架空綫路兩相運行時， 電力系統各元件的狀態

關於具有不對稱綫路的電力系統中的發電機、變壓器和用電設備的狀態的問題，特別是當綫路斷開一相運行時各元件的狀態的問題，在其他書籍中有所敘述，不是本書的主題。但是，綫路兩相運行的一般問題的解釋是和分相檢修有密切關係的，因此，在下面就對這方面的某些知識加以闡述。

綫路的兩相運行本質上不同於三相運行。和兩相-大地制，即將綫路兩端變壓器的一根出綫接入大地，來代替斷開的導綫(圖1)，也有着本質上的區別。

斷開綫路的一相，就使電流和電壓的對稱度遭受破壞。

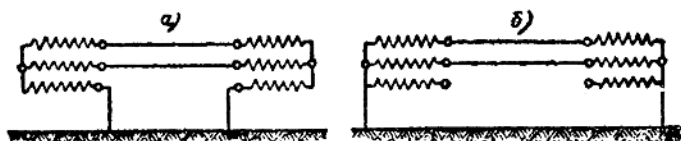


圖 1 綫路底非全相运行結綫圖

a)兩相·大地制(ΠΠЗ)接綫圖; б)断开一相的結綫圖。

因而就需要考虑到逆序电流的产生，因为变压器的中性点接地的关系，又得考虑到零序电流的产生。因此，在为了兩相長時間运行而要把綫路改为分相控制之前，应当預先对这种措施是否可行加以分析。

在許多情况下，当断开一相来进行綫路長時間运行不合适时，为了加强电力系统运行的可靠性和在不間断綫路的送电状态下排除短路现象，在綫路上使用單相自动重合閘装置来实行分相控制仍然是适宜的。这对于联络各独立发电厂或联络各独立电力系统的綫路以及对于那些單独綫路是特别重要的。單独綫路使用單相自动重合閘装置对于有同步电动机的用戶來說，可以减少負荷的驟然下降。

兩相运行的輸电綫路是各綫电阻不相等的不对称三相綫路的个别情况。在这里一根导綫的电阻等于無限大。因而，对于这种綫路，所有已知的那些非对称电路的計算方法，特别是对称分量法一般都是可以应用的。

为了确定断开一相而長時間运行的可能性，在这类非对称輸电綫路計算結果中，应决定下列各量：

(1)綫路各相的电流：按导綫的發热来檢查导綫的过負荷情况。如果有了过負荷，則綫路的輸送容量应予适当降低。

(2)变压器各綫圈中的电流：按照变压器的可能过电流条件来确定变压器的長時間非对称荷載的可能性。同时，也

應該訂出必要時降低過負荷的必要措施(例如把備用變壓器投入運行，壓低總負荷等等)。

(3)地中電流：為了檢查接地保護裝置；並借以確定為保護通訊綫路不受非對稱輸電綫路干擾影響而採取的必要措施。

(4)發電機電流的不對稱度：以便肯定三相非對稱運轉確是在容許程度以內；並在必要時決定減小不對稱程度的措施。

(5)電動机电流及其端子電壓的不對稱度：以便確定它們的正常運行、啓動等等的可能性。

為了解決輸電綫路是否容許長時間的用兩相來運行的問題，下述兩種情況也有重大作用：

(1)發電廠將有多大負荷由這條非對稱運行的綫路輸送。

(2)綫路兩端的中性點接地還是不接地。

發電機 根據蘇聯“電力工業技術管理法規”的規定，發電機三相電流差不應超過10%。當發電機與斷開一相的非對稱綫路連接運行，而且這條綫路是擔當輸送發電機全部出力的時候，則發電機內三相電流的不對稱度，即逆序電流與正序電流的比值將超過允許限度。

如果裝在綫路兩端的變壓器的中性點是不接地的，則不對稱度將等於100%。如果中性點是接地的，不對稱度可以是不同數值，它和綫路的長度、接地零點的數量有關，可由30%到50%。因此，通過非對稱運行的綫路輸送發電機的全部出力，而不把其中一部分由其他三相對稱的回路輸送是不容許的。當把一部分出力經由其他三相對稱的綫路輸送，或者把一部分出力用發電機電壓直接使用時，則發電機三相電

流的不对称度就可大为降低。

通过非对称线路输送电力时，发电机三相电流的不对称容许限度是和发电机的构造大有关系的。汽轮发电机的不对称容许限度比较水轮发电机的要小得多。

有实体转子的汽轮发电机，由于逆序电流而产生的耗损要比水轮发电机的大得多。汽轮发电机转子实体部分所产生的损耗，大大地影响安装在绕组（嵌在转子实体中的）里的励磁绕组的温度。

水轮发电机转子实体部分所产生的损耗，对于励磁绕组的发热作用是比较小的，因为这些绕组是装在转子实体部分的外面，并有冷却空气直接冷却着。应当指出，由于逆序磁场在励磁绕组中所产生的电流对于绕组所生的热是很小的，因而可以略去不计。任何运行方式都可以认为是发电机的容许非对称运行方式，只要励磁绕组的温度不超过发电机全负荷三相对称方式运行下的温度，并且没有局部发热现象。在由于减少发电机励磁电流而使发电机负荷降低时，可以容许由于逆序电流所生的较高的热，因此，可以加大不对称度的容许限度。当有必要不按照标准运行的时候，应进行必要的试验，并得到电站部技术司相应的许可。

变压器 当把线路的一相断开时，在中性点接地的电网中，变压器的另外两相的电流大约增加 $\sqrt{3}$ 倍。因此，在这种方式之下，变压器是否可以长时间运行，必须预先加以检查。如果变压器高低压绕组接法是 Y_0/Δ 式的，那就不必担心过热的危险。在这种情况下，三相变压器高压绕组中由于零序电流所引起的磁通，将被低压闭口三角形绕组中由于零序电流所引起的磁通所抵消。单相变压器中由于零序电流所引起的磁通，将直接经过铁芯而成闭路，因此，也不会引起

任何危险的过热。如果变压器的高低压绕圈的接法是 Y_0/Δ 式的，在三相变压器中，由于零序电流所引起的磁通就不能抵销，而将经过空气和外壳钢皮构成闭路，因而就将在外壳钢皮上产生不可容许的热量。在接法为 $Y_0/\Delta/\Delta$ 的三绕组变压器，当把 Y_0 侧的一相断开时，变压器就如同在中性点接地的电网中运行一样；当把 Δ 侧的一相断开时，变压器就如同在中性点不接地的电网中运行一样。这样，许可线路长时间断开一相运行的条件之一，是线路两端所装变压器中性点接地，并且这些变压器的二次绕组之一是三角形接法的。

对于中性点不接地的系统，只有当线路是双回平行，或者成为环形回路的时候，才允许断开其中的一回路的一相，就是说，当断开的这一相的总电阻不等于无限大的时候才可以。对于这种运行方式的可能性，必须事先经过计算加以检查。

第3节 异步电动机

在中性线不接地的电网中，断开线路的一相，对于电动机来说，等于它的定子绕组一相开路运行，因此就使得转差加大并使电动机发生电流过载。对于满载运行的电动机，它的过载程度将是很大的。

为了避免对定子绕组的不容许的过热，就应把电动机断开电源。

因此，在中性点不接地的电网中，异步电动机在断开一相的情形下运行是不许可的。在中性线接地的电网中，当断开一相运行时，对于异步电动机所引起的三相不对称度是比较小的。在电动机的两相中的电流大约增加30%。实际上，一般电动机的负载率不超过0.8—0.9，因此，在大多数情形

下，電動機的過載還在許可範圍之內。蘇聯許多電力系統在最近5—7年間，在綫路用分相控制運行所積累的經驗指出，實際上在中性綫接地的電網中，長時間的斷開一相運行是不會破壞異步電動機的運行的。在這種情況下，電動機的啓動也是正常的。

第4節 通訊綫路

當輸電綫路斷開一相運行的時候，由於靜電感應和電磁感應的關係可能對通訊綫路發生很大的影響，引起干擾。靜電影響隨着通訊綫路離開輸電綫路的距離而顯著的減小。當通訊綫路與輸電綫路的接觸距離大於100公尺的時候，靜電感應小到可以不予考慮。至於電磁影響，雖然接近距離很大，也有顯著的影響。在一定的條件之下，由於電磁感應的干擾，可以完全破壞通訊綫路的運行。首先，這將涉及導綫有比規定高的縱向的和橫向的不对称度的通訊綫路。甚至在通訊綫路的各導綫中所產生的電動勢相等的時候，電話回路的不对称度也能使電話機端頭發生電位差和干擾的均衡電流。當通訊綫路沿着不对称輸電綫路架設時，通訊綫路本身的完全對稱是保證它正常運行的基本措施。經驗證明，當不对称高壓輸電綫路的負荷比較不大時，這種措施是足夠的。但是，當輸送的容量大時，並且通訊綫路的長度大和接近距離小的時候，就必須用特別的措施來保護了。在許多機關中，如蘇聯“電信部科學研究所”和蘇聯“電站部技術改進局”等，所進行的研究證明，在這種情況下，可以通過一系列的措施而使干擾減輕到許可的數值。其中特別是以下幾種措施：

在兩綫式的通訊綫路上——採用洩流綫圈，絕緣變壓器，閉鎖綫圈；在單綫式的通訊綫路上——採用1:1的電話

变压器，把它和中点接地的零流线圈一样同线路串联；在电报线路上采用共振分流器或者洩流线圈。在采取特殊措施的同时，采用导线换位和均衡导线的电阻及其绝缘，仍旧是使线路达到完全对称的基本措施。舍弃这些基本措施，采用任何特别措施都是不能得到应有的效果的。

第二章 在三相架空线路断开的一相导线上发生的电气现象

高压输电线路进行分相检修时，检修人员的工作条件是在线路全部停电的情况下的检修工作条件根本不同的。断开的一相导线是邻近另外两条带着工作电压和负荷电流的导线。

由于上述情况，断开的导线是处于另外两线的静电影响和电磁影响范围之内；因此，在这条断开的导线上就产生了电位和大量的电荷。在 110 千伏的输电线路，三相导线是水平排列着的时候，在断开而未接地的导线上所产生的电位可达 10—11 千伏，在 35 千伏线路上可达 2.5—3 千伏。因此，断开而未接地的导线是不允许接触的。平常在断开的导线上装设和拆除接地线的方法在这里不能使用，这是因为在导线上有着大量电荷，特别是长距离的 110 千伏线路，在装设和拆除接地线的时候要发生电弧。因此，在分相检修工作中，装设和拆除接地线时应有特殊工具。

当把断开的导线接地时，电荷即流入地中，由静电感应而产生的电位即等于零。但是，由于存在有另外两相未断开的导线中电流流过的电磁感应，断开的导线上仍旧带有电压。

由于上述情况，分相檢修工作应按照“分相檢修安全工作規程”的规定来进行。

第1节 导綫由兩端断开，但不接地

上面已經說过，由于静电影响在被断开的导綫上产生相当大的电位。

現在来研究一下导綫是水平排列和具有正常换位的情况。

在断开的导綫上所产生的电位 V_c 可按下列公式确定：

$$V_c = U_\phi \frac{a_{12}}{a_{11} + a_{12}} = k_1 U_\phi;$$

式中 U_ϕ ——綫路的相电压；

a_{11} 和 a_{12} ——电位系数，它們相应地等于

$$a_{11} = 4.6 \lg \frac{2h}{r};$$

$$a_{12} = 4.6 \lg \frac{s_{cp}}{D_{cp}};$$

h ——导綫在地面上的平均高度；

r ——导綫的半径；

D_{cp} ——导綫間的几何均距， $D_{cp} = 1.26D$ ；

s_{cp} ——到綫路的其他两根导綫鏡面倒影的平均距离。

$$s_{cp} = \sqrt[3]{s_1^2 s_2}.$$

在确定 h 值时，不应取到地表面的距离，而应取到大地导电層，即到地下水平面的距离。在一般情况下，这要把 h 值增加約 30 公分，但是在个别情况下，如在岩石地層中， h 值的增加可能是很大的。对于各种不同的綫路，系数 k_1 的值

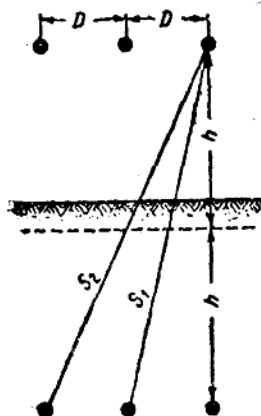


圖 2 計算示意圖

見表 1。

靜電感應電位沿着綫路均勻地分佈，與綫路的長度無關。

在斷開的導綫上，由於電磁感應所產生的電位是和感應電流、綫段的長度以及互感係數有關的。當感應電流值恆定不變時，由於電磁感應所產生的電位將沿着綫路按直綫方式分佈（圖 3）。

導綫始端的電位 V_N 和終端電位 V_K 相等，但是符號相反。

縱向電動勢

$$E = V_N - (-V_K) = V_N + V_K = j\omega M I l,$$

式中 I ——感應電流值，

M ——互感係數。

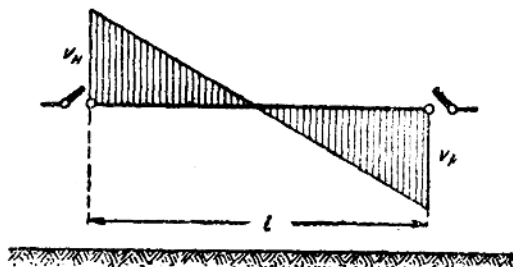


圖 3 電磁感應電位沿綫路長度的分佈

由圖 3 可以看出，在導綫上的電位隨着離開始端的距離而降低，到綫段的中點，電位等於零，而後又重新增大，但符號相反。

如果在綫路上流過的感應電流值是不恆定的，在導綫中

的电位分佈特性曲綫也变化不定。当綫路空載的时候，由于兩条导綫中有电容电流流过，在断开的导綫中所产生的縱向电动势就比由于流过和它电流值相同但是恆定的感应电流所产生的电动势要小一半。在这种情况下，导綫末端的电位將較其始端的电位小。

在分相檢修工作中，人身安全的决定因素是另外兩条在运行中的导綫的短路电流，这电流要比空載时的电容电流大得很多。因此，空載电流对于断开的导綫的感应电动势的影响可以略去不計。

当在运行中的另外兩条未断开的导綫中流着負荷电流时，感应电流由兩导綫中流着的电流之和来确定，就是：

$$i = i_1 + i_2.$$

电流 I_1 和 I_2 向量間的角度由逆序阻抗及零序阻抗的比例关系来决定。

由于負荷电流而产生的縱向电动势可能是很大的。如在某条長 93 公里、110 千伏的綫路中，当其相电流只有 15 安的时候，縱向电动势已經等于 1000 伏。

当运行中的兩导綫之一發生短路时，由于影响电流的增大，在断开的导綫中所产生的縱向电动势也就随着增高。电位特性曲綫性質不变，但它的傾斜角則增大。特性曲綫的傾斜表示导綫上电位随着离开零电位点的距离而增漲的程度：

$$\operatorname{tg} \alpha = \omega M I \text{ 伏/公里.}$$

第 2 节 导綫断开并在一点經电阻 R_0 接地

当导綫接地时，靜电电位即在整个导綫中消失。在这种情况下，經过接地裝置有电流 I' 流过，这一电流决定于导綫間存在的局部的电容以及运行中的兩根导綫中流过工作电

流所产生的电磁影响。

$$I' = I_C + I_M,$$

式中 I_C ——决定于相间电容 C_{12} 的电容电流;

I_M ——电磁感应电流。

$$I_C = \omega C_{12} U_{\phi l} = k_2 U_{\phi l},$$

式中 C_{12} (对于换位线路) 等于

$$C_{12} = \frac{1}{9 \times 10^6} \cdot \frac{a_{12}}{a_{11}^2 + a_{11} \times a_{12} - 2a_{12}^2} \text{ 法/公里.}$$

对于导线水平排列的线路, 系数 $k_2 = \omega C_{12}$ 的值见表 1。

对于 110 千伏线路, 当其线间距离为 4 公尺时, 电容电流 I_C 的大小和导线牌号有关, 其值在 0.017 至 0.028 安/公里之间。

电磁感应电流 I_M 底大小是和纵向电动势 E 、导线对地的局部电容 (C_{11}) 和所装设的接地装置的电阻有关:

$$I_M = \frac{E}{2 \sqrt{\left(\frac{1}{\omega C_{11} l} \right)^2 + R_0^2}}.$$

流经接地装置的总电流为

$$I' = \sqrt{I_C^2 + I_M^2 + 2I_C I_M \cos \varphi},$$

式中的 $\cos \varphi$ ——线路负荷的功率因数。当计算流经接地装置的电流时, 由于电流 I_M 为量不大, 一般可略去不计。只有对于很多距离的和负荷很重的线路才予计算。电容 C_{11} 是通过上述的电位系数来确定的:

$$C_{11} = \frac{1}{9 \cdot 10^6} \times \frac{1}{a_{11} + 2a_{12}}.$$

对于长的线路, 由于有大量的电容电流 I_C 存在, 在装设、特别是拆除接地线时, 必然随着产生大的电弧。