

246125



交流线路式开 电输距离远超

苏联 Н. Ф. 拉庫席夫著

傅敬熙译



水利电力出版社

內 容 提 要

本書介紹開式交流超距離輸電綫路的理論基礎和電氣計算。還討論
傳輸容量自1,000至2,000兆瓦,輸電距離為2,300~2,500公里的400、
500、550和600千伏開式綫路的主要技術經濟指標。

本書可供大學電機工程和動力工程系的學生以及從事超距離輸電研
究工作的工程技術人員和科學工作者參考。

Н. Ф. РАКУШЕВ
СВЕРХДАЛЬНЯЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ
ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ ПО РАЗОМКНУТЫМ ЛИНИЯМ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1957

開式綫路交流超距離輸電

根據蘇聯國立動力出版社1957年莫斯科版翻譯

傅 敬 熙譯

*

1346D383

水利電力出版社出版(北京西郊科學路二里溝)

北京市書刊出版業營業許可證出字第195號

水利電力出版社印刷廠排印 新華書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 開本*4 $\frac{3}{4}$ 印張*105千字

1959年5月北京第1版

1959年5月北京第1次印刷(0001—5,180冊)

統一書號:15143·1082. 定價(第10類)0.67元

序 言

在最近的将来(1957~1970年),苏联动力工作者的最重要的任务是要建立苏维埃社会主义共和国联盟的統一的高压电力网,而这一任务,如不广泛利用苏联的各种动力资源是不可能完成的。因而,在苏联的欧洲和亚洲部分各主要河流上,建筑一系列大容量水力发电站的問題將具有头等重要的意义。

如所周知,这些水电站在各自单独的、与苏联其他部分不相連的电力网內分散地运行是不利的。水力发电站正是最需要彼此互相联系,并与火力发电站相連結,以便調节发电量的季节性不均匀和保持枯水年的正常运行。但是,所有水能蘊藏量极其丰富的河流,如鄂毕、叶尼塞、安加拉和其他等河流,却都位于距离苏联主要工业中心十分遙远的地方。建筑在这些河流上的各个水电站之間的相互距离就不止100或甚至1,000千米。因此,要想把它們联合成为全苏联的高压动力系统,就需要將大量电能作远距离和超远距离的輸送。

随着伏尔加河上的容量分别为210和230万千瓦的古比雪夫和斯大林格勒水电站的投入运行,將有很好的条件来从理論上研究和在运行中考查所有有关远距离輸电的問題了。实际上这里所談的是要將100~120万千瓦的功率送往1,000~1,200千米距离以內的地方的問題,而这將使苏联欧洲部分的水力资源有可能得到很好的利用。

苏联共产党第二十次代表大会指示,要將苏联的动力工

业提高到新的、更高的水平。目前正在大规模开发西伯利亚的巨大水力资源，这些水力资源分布在从贝加尔湖至鄂毕和额尔齐斯河的广大区域之内，其容量估计达几千万瓩。因此，苏联在电工技术方面必须解决一些牵涉面极其广的问题。西伯利亚的水电站容量将比现在正在建筑的伏尔加河上的水电站大得多。正如苏联共产党第二十次代表大会的指示〔文献1〕所指出的，在第六个五年计划内将要建筑世界上最大的、最终容量各为320万瓩^①的克拉斯诺雅尔斯克和布拉茨克水电站，它们将是中西伯利亚动力系统的骨干。在第六个五年计划之后，还将要出现更宏伟的建设规模。将要兴建：容量达500万瓩的叶尼塞水电站，此水电站将与中西伯利亚系统的其他电站一起向乌拉尔送电，每年将由此送出300至400亿度电能；下鄂毕水电站，由此发出的电能将送往列宁格勒、莫斯科和乌拉尔。随即还将要建成自贝加尔湖至苏联西部边境的全苏统一高压电力网。最后，在比较遥远的未来，还可能伸展到中华人民共和国与黄河的动力系统相连；该系统的容量约达2,000万瓩。需要以双回路输送200至400万瓩的容量，而输电距离达2,100~2,500千米。

这里我们将进入超远距离输电的范畴，并且照例会考虑到采用直流输电的，因为在这方面它是占有显著地位的。虽然直流输电的经济和技术上的优点是大家公认的，而且它就是在超远距离输电上显得更加突出，但是，除直流之外，研究用运行上具有无比灵活和机动性的交流来解决这问题的方法也是完全有必要的。

从理论的观点来看，除了将线路调谐到长度等于零或调

^① 根据目前的报道，克拉斯诺雅尔斯克水电站的容量将增加到400万瓩，而布拉茨克水电站将增加到360万瓩。——译者

諸到半个波長來輸電外，現代的電工技術對此尚不能提供任何其他的方法。如所周知，要想消除任一電路中電感的影響，只有將該電路調整到電壓諧振或電流諧振才可能。這兩種情況即相當於上面所指的兩種變相線路。從工程上的觀點來看，最重要的是在實踐上如何對超遠距離輸電實現這種調諧的問題，而且首先需要解決的問題是在上述仅有的兩種調諧方法中何者最為完善。

本文要討論的是利用所謂交流開式線路^①，也就是長度為零的一種變相線路來實現超遠距離輸電的問題。應當指出，早在1930~1932年，И.И. 索洛維也夫就曾首次對此問題進行了研究。以後，A.A. 符爾夫也曾研究過此問題，這在他們著的書中〔文獻10〕有簡短的敘述，此外，還有X.Φ. 法塞洛夫也對此問題研究過。但是所有上述的研究者都得出了否定的結果，而且他們的著作都未曾發表過。這是因為他們沒有發現開式線路所適用的條件，而且尤其是对并聯補償的意義估計不足，而這種型式的輸電線和所有很長的交流輸電線一樣，沒有并聯補償是不可能滿意運行的。

下文將對開式線路的理論基礎和工程上的計算方法加以系統地敘述（據我們所知，這在世界文獻中還是第一次）。但決不妄想說本文已經對此題目有了完善的闡明。相反地，這僅僅是在這方面走了第一步。這一問題牽涉面之廣和複雜，要想以一個人的能力來全面研究它是根本不可能的，只有在許多人的共同努力下才能做到。這一集體的研究工作應該同時從理論上（研究各種專門的問題：如繼電保護的問題，過渡過程、非對稱和非全相運行的細節問題，以及其他等）和

① 應該譯作開斷的線路，但為了簡化和讀得順口起見，特譯作開式線路。——譯者

4

实验性线路上进行。在编写本书时，作者当然应该考虑到来自这两方面代表人物的可能的质询，因此，作者认为完全有必要对作为开式线路运行根据的最主要的理论上的推断加以阐明，与此同时，还要指出它们的电气计算方法，这些方法适用于工程上经常遇到的情况。

应当指出，自1956~1957学年起，已经将远距离输电这门课程列入电工高等学校的教学计划之内。这门课程作者已在古比雪夫工业大学讲授了好几年。本书即以该课程的某些章节为基础，因此它对大学生也是有用处的。此外，作者还考虑了在各种科学会议上讨论作者关于用开式线路输电的几次报告时提出的一些意见和建議。作者尽量将所有的资料都收集在这里，并加以适当的说明，以便使读者能够对开式线路超远距离输电的远景及其在苏联动力工业中可能应用的范围有较全面而充分根据的概念，因为我们苏联，比起世界上任何其他国家更为需要將大量电能送往极远距离的地方。

最后，作者趁此机会，对A. II. 巴諾夫、A. V. 貝尔什金和B. A. 米助諸同志在研究超远距离输电的技术经济指标时，所給予我的重大帮助表示感謝。

作者 1956年6月

目 录

第一章 調諧了的輸电綫路	7
§1 長度为零的綫路	7
§2 半波長的綫路	10
第二章 开式綫路輸电	14
§3 問題的提出	14
§4 主要方程的推导	15
§5 主要方程的解	18
§6 开式綫路全补偿的条件	20
§7 开式綫路自补偿方程的分析	25
§8 自补偿方程的物理实质	30
第三章 开式綫路的主要特性	34
§9 自感和互感	34
§10 电容和互电容	40
§11 开式綫路中的电压降	42
§12 极限傳輸容量	49
第四章 开式綫路的导綫截面	52
§13 开式綫路的平均电流和均方根电流	52
§14 导綫截面的再分配	56
§15 导綫开头一半和末了一半的均方根电流	58
§16 截面再分配的方法	60
§17 导綫的經濟截面	63
第五章 并列运行的稳定性	66
§18 静态稳定	66
§19 电导和它的影响	71
§20 动态稳定	75

第六章 并联补偿	79
§21 补偿装置的最低容量	79
§22 开式线路的谐振特性	80
§23 开式线路的固有频率	84
§24 并联补偿对自补偿长度的影响	86
§25 并联补偿对电压和电流分布的影响	90
第七章 开式线路的特殊运行方式	94
§26 穿越性短路和相内短路	94
§27 一根导线对地短路	97
§28 开式线路的带电压合闸	100
§29 开式线路的中間功率抽取站	101
第八章 150万瓩容量輸送2,500千米距离	105
§30 一般的电气计算	105
§31 并联补偿	111
§32 并列运行的静态稳定	113
§33 线路中点故障时輸电特性的计算	115
§34 运行于无限大容量的受电系統时的动态稳定	123
第九章 开式线路的主要技术经济指标	130
§35 总的評價	130
§36 600千伏、300万瓩超远距离輸电	132
§37 600千伏、400万瓩超远距离輸电	136
附录1 开式线路的方程式的推导	145
附录2 均方根电流方程式的推导	150
参考文献	152

第一章 調諧了的輸電綫路

§1 長度為零的綫路

我們可寫出長綫路方程式的一般形式：

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} ka + I_2 Z \operatorname{sh} ka;$$

$$I_1 = \frac{1}{Z} U_2 \operatorname{sh} ka + I_2 \operatorname{ch} ka.$$

乘積 $ka = \lambda$ 稱為綫路的波長。

式中 Z ——波阻抗；

a ——綫路長度，千米；

k ——波的傳播係數：

$$k^2 = (r + j\omega l)(g + j\omega c).$$

指標 1 和 2 表示相對於綫路起端或終端的電壓和電流值。

上面的式子可縮寫成：

$$U_1 = AU_2 + BI_2;$$

$$I_1 = CU_2 + DI_2.$$

現在我們要求，在任何負荷下，都應滿足下列條件：

$$U_1 = U_2;$$

$$I_1 = I_2.$$

要滿足此條件，必須使方程式的常數有如下的數值：

$$A = D = 1; B = C = 0.$$

顯然，必須在綫路中人為地造成使其能滿足上述條件 ($A = D = 1$ 和 $B = C = 0$ ——譯注) 的運行方式。現在讓我們來討論常數 A ：

$$A = \operatorname{ch} ka = \operatorname{ch} a \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)}.$$

为了使得 $A=1$ ，必須有以下的关系：

$$ka = a \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} = 0.$$

因为在远距离输电的情况下，綫路的实际长度不可能等于零，因此，必須使傳播系数 k 变为零方能滿足此要求。这只能近似地做到这一点，而且我們必須弄清楚能滿足此要求的条件。

显然，如果綫路长度不等于零，則电阻 $r \approx 0$ 。因此 $r + j\omega l \approx 0$ 。与此相反，通常总可以認為，漏泄 $g = 0$ 。因而，如果能使电容性电納变为零，則 $k = 0$ 的条件可以实现。即当 $j\omega c = 0$ 时， $k = 0$ 。

为此必須以人为的方法来补偿綫路的电容性电納。如果能做到这一点，那末我們可以得出：

$$A = 1; D = 1.$$

現在我們轉到常数 $B = Z \operatorname{sh} ka$ 上。

初看起来似乎若能簡單地假定 $ka = 0$ ，則即可得出 $\operatorname{sh} ka = 0$ ，亦即 B 变为零。但是这样的推論是不能容許的。因为問題在于波阻抗是傳播系数 k 的函数：

$$\frac{1}{Z} = \frac{k}{r + j\omega l}.$$

于是：

$$B = \frac{r + j\omega l}{k} \operatorname{sh} ka.$$

現在如再假定 $k = 0$ ，我們將得出不定式

$$B = \infty 0.$$

我們来將此不定式展开。取分子和分母的 k 的微商之比：

$$\frac{(\operatorname{sh} ka)'}{\left(\frac{r + j\omega l}{k}\right)'} = \frac{a(r + j\omega l)k' \operatorname{ch} ka}{k'} = a(r + j\omega l) \operatorname{ch} ka.$$

现在在这里可以假定 $k=0$ 了。于是:

$$B_{k=0} = a(r + j\omega l).$$

电阻 r 可以用加大导线截面的方法,使其小得可以当作 $r \approx 0$ 。

如果我们要想使常数 B 变为零,则显然,还必须将线路的感抗 $a j\omega l$ 完全补偿。为此需要在线路内接入串联电容器,以便将线路调整为电压谐振,此时

$$a\omega l = \frac{1}{a\omega c_k}.$$

余下的是常数 C :

$$C = \frac{1}{Z} \operatorname{sh} ka.$$

如果 $k=0$,则亦即 $C=0$,由此可见,为了使常数 C 变为零,也只有将线路的电容性电纳完全补偿的一法。因而,如果 $j\omega l=0$ 和 $j\omega c=0$,则 $A=D=1$; $B=C=0$ 的条件就得以实现了。

在此情况下,线路必须有完全的并联电感补偿和串联电容补偿。尽管线路的几何长度 $a \neq 0$,但在电气的意义上来说,因为 $r \approx 0$ 和 $g \approx 0$,所以线路的长度也就没有了,其波长 λ 也就等于零。这种以补偿的方法来达到的结果,我们称它为“导致零的长度”或“调整到长度为零”。要指出的是由于满足了 $j\omega c=0$ 的条件,所以我们获得的是简单的电压谐振的要求:

$$a\omega l = \frac{1}{a\omega c_k}.$$

因此,要使线路调整到长度等于零,需要同时有双重的补偿:并联电感以抵消电容性电纳和串联电容以消除感抗。

长度被化为零以后的经补偿的线路将在电压谐振的情况下运行。图1表示这种补偿方式的一相的网络图。在实践中

为了降低造价，不是全部线路都被调整到长度等于零的，而只是它的一部分，即足以保证要

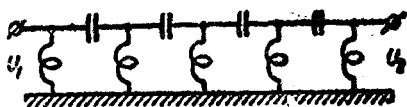


图 1

求的输电运行条件。在比较短的线路中——电容性电纳不大时——并联电感补偿可能是不必要的。

§2 半波长的线路

在文献中〔文献 8 和 10〕介绍的研究半波长线路的一般方法，对判断这种线路用于超远距离输电是否有实用价值方面有重大意义的某些运行特性未曾加以讨论。如果研究的是无损失的线路（线路损失的影响在下文将谈到），那末在半

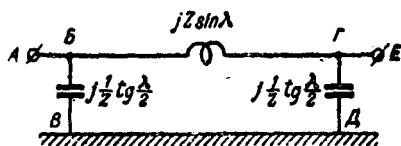


图 2

波长的输电线路中所经历的物理过程的实质是非常明显的。如所周知，长线路可以当作是一四端网络，例如有如图 2 所示的 Π -形等效网络。

图 2 的电路，对 AE 两端来说，在一定条件下，可以调整为电流谐振，因为它系由下列两并联支路组成：电感性的 $B\Gamma$ 和电容性的 $EB\Gamma$ 。电流谐振的条件与电压谐振条件同时满足，即相当于回路 $EB\Gamma$ 的感抗和容抗相等。

在我们的例子中，感抗等于：

$$Z \sin \lambda.$$

两串联的电容器的电容性电纳等于：

$$\frac{1}{2Z} \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}.$$

因此
$$Z \sin \lambda = \frac{1}{\frac{1}{2Z} \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}}$$

或
$$\sin^2 \frac{\lambda}{2} = 1.$$

由此可見， $\lambda = \pi$ 。相当于此的无損失綫路的最小長度 $a = 3,000$ 千米，亦即是頻率為 50 赫芝的交流電的半個波長。

當導綫中存在有功損失時，將使電磁波的傳播速度下降和波長增加到 h 倍。實際上，如考慮損失，則新的波長〔文獻 7〕為：

$$\lambda_n = \lambda \left(1 + \frac{1}{8\rho^2} \right) = \lambda h,$$

式中 $\rho = \frac{\alpha}{r}$ —— 每千米的阻抗比。

對長綫路來說， $\rho \geq 5$ 。因此，波長的变化是十分小的。例如，對古比雪夫—莫斯科 400 千伏輸電綫來說（ $\rho = 13$ ），如考慮損失，得 $h = 1.0007$ 。甚至是 220 千伏的綫路（ $\rho = 5$ ），其相應的 h 值為 1.005〔文獻 2〕。

由此可見，在研究將長綫路調到長度為零或半波長時，其有功損失可以略去不計。長度為零的綫路與半波長的綫路，其差別在於前者系在電壓諧振的情況下運行，而後者則在電流諧振的情況下運行。這將造成綫路中電流顯著增大，於是，導綫中的有功損失也將與其平方成比例地增加。半波長綫路的優點是只要用一種補償裝置即可，或者是串聯電抗器，或者是並聯電容器。

現在我們來確定某些重要的數量關係。我們可寫出無損失長綫路的電流的式子，並取自然功率的電流 $I_n = \frac{U}{Z}$ 作為基準值。於是，以標么值表示時：

$$i_1 = i_2 \cos \lambda + j \sin \lambda.$$

空載時($i_2=0$)，綫路流过电容电流，這同時也就是上面所指的諧振电流。它与綫路的負荷无关，且由于具有分布常数，故它也是波長的函数。我們現在來求綫路長度為 λ_0 的這一电流的平均值，綫路是用連續串聯补偿的方法調到半波長度的。顯然此平均值為：

$$i_{cp} = \frac{1}{\lambda_0} \int_0^{\pi} \sin \lambda d\lambda = \frac{2}{\lambda_0}.$$

此电流將引起附加的有效功率損失，它与諧振电流均方根值的平方有关。后者可由下列关系來确定：

$$i_{\lambda, s}^2 = \frac{1}{\lambda_0} \int_0^{\pi} \sin^2 \lambda d\lambda = \frac{\pi}{2\lambda_0}.$$

現在我們來看一看兩長度同為 λ_0 的輸送自然功率的綫路，但其中之一調到 $\lambda=0$ ，另一調到 $\lambda=\pi$ 。前者流过的只有有功电流，它所造成的有功損失為：

$$\Delta P_0 = i_2^2 R,$$

式中 R ——綫路的电阻。

第二種情况的損失將要大些：

$$\Delta P_{\pi} = i_2^2 R + i_{\lambda, s}^2 R.$$

为了使這兩種綫路有相同的損失，必須將半波長輸電綫的導綫截面隨損失的增長而成比例地增加。導綫的金屬總耗量增加到 δP 倍，而且

$$\delta P = \frac{\Delta P_{\pi}}{\Delta P_0} = 1 + \frac{i_{\lambda, s}^2}{i_2^2}.$$

在輸送自然功率 $i_2=1$ 時，則：

$$\delta P = 1 + i_{\lambda, s}^2.$$

將前面求得的 i_{k0}^2 值代入此处，則可得：

$$\delta P = 1 + \frac{\pi}{2\lambda_0},$$

式中 λ_0 ——以弧度表示。

上述的关系可以画成如图 3 所示的随長度 λ_0 而变的曲线。由此可見，調諧的綫路愈短，則導綫所增加的金屬耗量愈大。

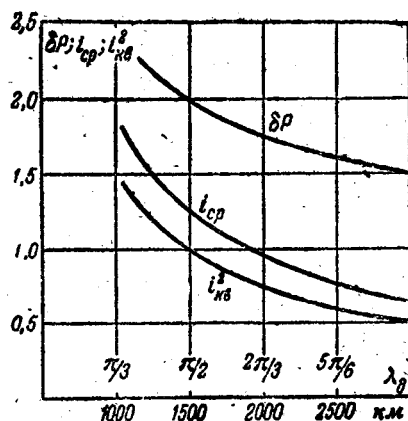


图 3

在同样的导綫截面下，半波長的綫路运行效率將显著降低，特别是在負荷曲綫消落的时候。这可以用提高相对負荷 ($i_2 > 1$) 的方法，即减小 $\frac{i_{k0}^2}{i_2^2}$ 的比值来使其改善。但是在此情况下，將使綫路中間各点的电压調整帶來很大的困难。实际上，无損失長綫路的电压，以标么值表示时 ($U_2 = 1$; $I_{0as} = I_n$) 为：

$$u_1 = \cos \lambda + j i_2 \sin \lambda.$$

調諧到半波長 $\lambda = \pi$ 时，綫路中点的电压为：

$$u_1 = j i_2 \sin \frac{\lambda}{2} = j i_2.$$

当傳輸容量有波动时，这里的电压將从零（空載， $i_2 = 0$ ）至超过正常电压几倍的数值（过負荷和特別是有穿越性短路时）之間变化。

根据上述，可以得出如下的結論。半波長的綫路將有过大的損失和极低的效率。在过負荷和短路时，在靠近綫路的中央將出現过电压，而且在綫路起点的短路电流等于零时也有可能在这些地方产生过电压〔文献10〕。因此，甚至是系統中性点直接接地时，也不能肯定說不会在綫路內出現有如中性点不接地的系統所常見的情况。

在非对称状态下，將在电路內产生零序阻抗，这就使問題更为复杂化，以致很难估計其后果。从所有这些理由来看，可以認為，利用調諧到半波長的綫路来輸电的希望是不大的，并且在实践上也未必是有利的。因此，交流超远距离輸电只能利用一种調諧綫路，那就是調諧到長度为零的綫路。

可是在远距离輸电中，系采用集中电容的串联电容器来实现这种調諧的，这种調諧方法是在綫路的几点接入串联电容器，而在超远距离輸电中則可以推荐其他的方法，这种方法可以根本不需要这种电容器。

第二章 开式綫路輸电

§3 問題的提出

在前一章里曾經指出过，本身具有很大的并联电容和串联电感的長距离綫路，在調諧到長度为零时，需要同时用电容和电感的双重补偿，而其連接則与綫路固有的相反：即电容器串联，而电抗器并联。

結果造成这样奇特的情况：綫路中同时存在着多余的电容和电感，但是，尽管如此，仍必須再在导綫中接入附加的电容和附加的电感，其唯一的原因是，不这样就不能免除綫

路固有的电容和电感的影响。于是，产生了这样的问题：线路的这种装备能否实现，在怎样的条件下，此两数值方能彼此相互补偿？

要想完全达到此目的，当然是不可能的。因为最不利的是线路的串联电感，所以首先必须将其消除。这可利用两并列敷设的导线之间所形成的分布电容来达到此目的。我们可以假定超远距离线路的每相系由两根并排架设的导线组成（如图4所示）。一根导线接在升压变压器的引出线端上，另一根接在受电变电所的汇流排上。当线路十分长时，两导线之间形成的互电容电纳可以将线路的固有电感完全补偿，但在此情况下，还必须将两并列导线之间的互感也考虑在内。

与采用集中电容的点补偿不同，我们现在有了沿线路全线的连续补偿法。此时，分布的固有电感和互感的作用为两导线之间的分布电容所补偿。因此，这种线路的运行方式与用集中电容器来补偿的输电线路的运行方式有本质上的不同。利用开式线路输电时，其每相有两根导线彼此并排敷设，因而形成了串联电容器，这样便得出上面所指的所谓开式线路的输电方法。

为了解决线路的这种运行方法是否合适，必须弄清楚在怎样的条件下，两根相导线的电容和电感的作用方能相互补偿。这里的问题归纳起来是解电报方程式，这种方程式在文献中[文献3、4和5]有十分详细的讨论。需要考虑的只是—些由此问题的实质所引起的附加条件而已。

§4 主要方程的推导

设有两根相同的单根导线，彼此并列敷设（图4），且每单位长度有同样的电容 c 、电感 l 、互电容 c_1 和互感 M 。