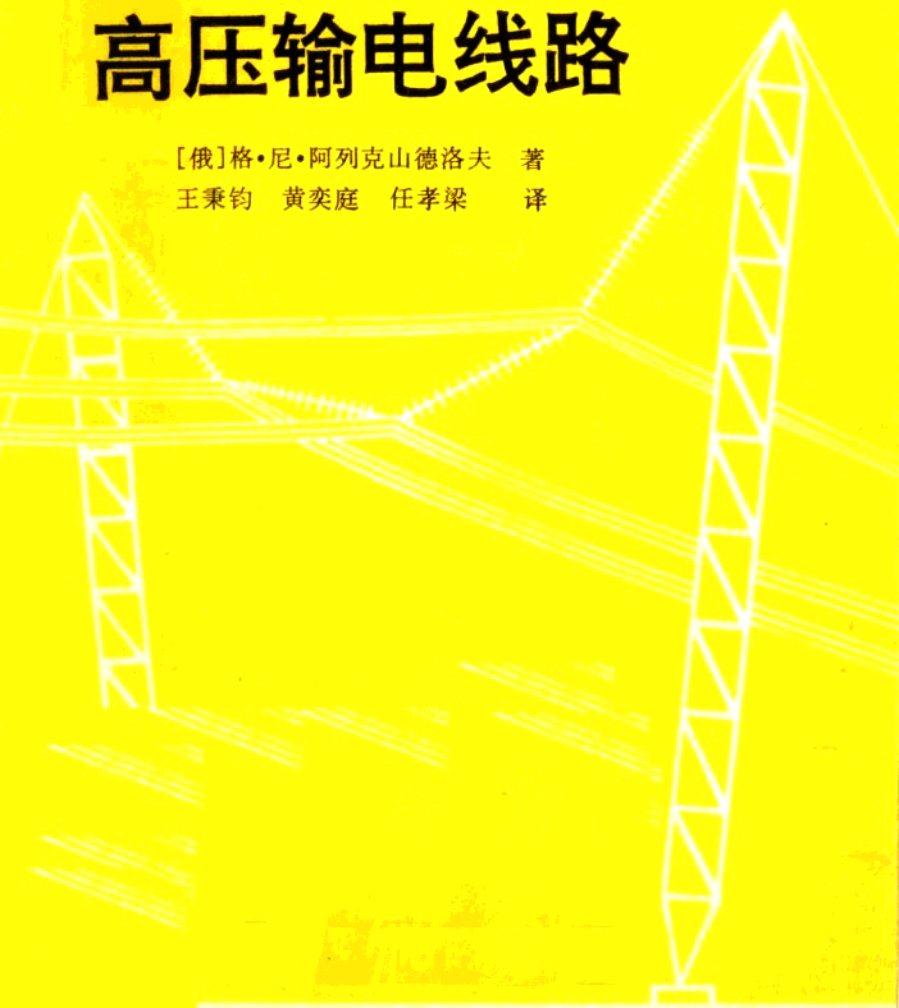


紧凑型 高压输电线路

[俄]格·尼·阿列克山德洛夫 著
王秉钧 黄奕庭 任孝梁 译



西安交通大学出版社

紧凑型高压输电线路

[俄]格·尼·阿列克山德洛夫 著

王秉钧 黄奕庭 任孝梁 译

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书全面阐述了紧凑型交流输电线路的理论及实施方法。全书共分五章,分别讨论了交流传输电能的特点;交流架空输电线路的参数;输电线路的运行状态;架空输电线路结构参数的优化;输电系统的经济技术指标等问题。书中着重介绍的通过架空线路结构参数的优化提高传输容量的方法,对我国电力事业的发展有较大的参考意义。本书可供系统设计、运行人员及高等学校的师生阅读参考。

(陕)新登字 007 号

紧凑型高压输电线路

[俄]格·尼·阿列克山德洛夫 著

王秉钧 黄奕庭 任孝梁 译

责任编辑 甘梦云

*

西安交通大学出版社出版

邮政编码 710049

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/32 印张 6.25 字数: 126 千字

1992 年 9 月第 1 版 1992 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1 1000

ISBN7-5605-0489-2/IM·23 定价: 7.50 元

前 言

在过去的数十年内,电能传输技术专门人材的培育都是根据两个学派的教学科研成就进行的,即列宁格勒工业大学的 А. А. Горев 教授学派与莫斯科动力学院的 В. А. Веников 教授学派。

电能传输现代观念的建立应归功于这两个学派。在这些观念中既有许多优点,也有重大的缺点。这些缺点表现在理论性的前提与电能传输的设计和运行的日益脱节。电能传输技术的发展濒临绝境就是这一脱节所导致的后果。这一危殆的停滞状态的征兆在列宁格勒工业大学 А. М. Залесский 教授的一名作中已可见端倪^[5],书中只在 500kV 的水平上来讨论远距离输电的特点,由此得到在远距离输电中功率损耗极大(每千公里传输过程中的损耗约为传输功率的 10%)的结果。这些数字未作修正就出现在 В. А. Веников 学派的一些著作^[3,4]之中,对远距离输电的一些重要特点造成了误解。

与电力系统构成的实践相反,在上述两个学派的所有著作中,对远距离输电的两种情况,即两线段间接有中间系统与两线段间接有补偿剩余无功(或发出所缺无功)的装置,在分析时均未作区分。这种不加区分进行分析的后果是,在许多有关远距离输电工作状态的特点等概念上,如电压状态、电能传输状态的存在条件、稳定性等与电力传输的实际工作条件相脱离,以致形成在远距离输送电能时,调度其工作状态极其复杂的印象,需要采用极为复杂、造价昂贵的措施(如补偿线路电感的串联电容补偿,或将输电系统调整在半波长的工作状

态)等。由于上述两种措施与动力系统的实际工作条件是根本不相容的,因此,不再用交流进行远距离输电——例如建立直流输电来取代它——的意见就得以广为流传。

遗憾的是,这些概念及由此而得出的结果,不加批判分析地多次刊行(参看文献[13])。

考虑到上述情况,出版一本根据现代科学与技术成就来阐明电能传输理论基础的书是适宜的。这些科技成就中最基本的、并能给电能传输工作条件带来最大影响的是:无限地增加架空线自然功率的原理^[2],以及大功率可控电抗器结构原理的分析研究^[14]。这些新的研究工作的明显优点及电力系统内的一些专家对它们的消极态度促使作者从事此书的写作。本书的一些基本原理,作者曾在苏联及国外的多次讲学中,在为发表它们的准备工作中以及在参加讨论中引用过。

作者对为改进本书赐寄的意见及愿望表示感谢。

Г · Н · АЛЕКСАНДРОВ

中译本前言

电能传输技术的发展始于欧洲及北美的一些工业发达国家,中俄两国的电气化起步远较它们为迟。因此,虽此两国有其固有的特点,但迄今为止,两国专家仍采用西欧及美国所用的主要技术措施。

中国与苏联*的疆域辽阔,能源与居民在国土上分布很不均匀,因此有必要建立长达数百、数千公里的远距离输电;而西欧国家,由于国土面积相对较小,就无此必要;至于美国,由于其能源、居民及相应的工业分布较均匀,有与西欧类似的情况。

考虑到这些自然和社会条件的差异,中苏两国需要在全新的基础上确立发展电力动能技术的概念。这一概念是,形成极其巨大的、全国性的电力动能联合系统,借助于长达数千公里的输电线路,高度灵活地将电能由能源基地输送到工业发达的地区。

按照美国及西欧国家所用的技术措施,在建立这一全国性的电力动能联合系统时,将会遇到一些困难。这就促使人们考虑直流输电的问题,而直流输电在西欧仅只用来解决极其局部性的问题,其中包括不同频率的电网的联接及海峡输电等。

* 本书为前苏联 Ленинград ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1990 版,此处及后述出现的苏联均指前苏联——译者。

在中国,为了提高输电系统的传输容量,曾广泛地采用了串联电容补偿措施。这一措施的技术效益并不大,却引起了许多复杂的、与系统工作状态有关的问题。

在呈献给中国专家的本书中,对电能传输技术的发展提出了新的方向,其技术基础是本世纪 20 年代,在 Рюденберг领导下于柏林形成的。由于 30 年代的政治事变,导致了这一天才的集体解体,Рюденберг 本人也移居美国,故未实现。此外,在本书中,还使本世纪上半叶,在列宁格勒工业大学工作的 В·Х·Миткович 奇院士的大胆设想得到了进一步的发展。书中还介绍了现代电工技术的新成就,特别是可控并联电抗器的应用,以及由列宁格勒工业大学超高压实验室所建立的有关架空输电线路的结构、提高其传输容量可能性等许多新概念。

作者在 1988 年,应邀访问了中国的一些单位。在与中国专家会面的基础上,对本书的内容又进行了推敲,期望本书能有助于在中国的电力动能技术的发展中形成新的概念。

作者对西安电力机械制造公司及其代表、教授级高级工程师黄奕庭,西安交通大学王秉钧教授主持翻译出版本书表示深切的谢意,亦向其他有关同志致谢。

Г·Н·АЛЕКСАНДРОВ

序 言

电能的产生基本上是借助原动机-发电机组将机械能转换为电磁能。为此,既可以用交流发电机,也可以用直流发电机。

由于发电机的结构特点,其额定电压不允许太高,一般大型发电机的额定电压不超过 30kV(有效值)。为了经济地将电能传输数十、数百、甚至数千公里的距离,必须用很高的电压:数百甚至数百万伏。

在电流高达数千安培的情况下,提高电压只能利用至少有两个有电磁耦合绕组(高压与低压)的变压器中的电磁感应现象。因此,为使输电电压超过发电机的电压,就必须用交流发电机来产生电能。

通常,电能是在相对较低的电压(数百或数千伏)下使用的。因此,在输电系统的受端也必须用变压器。

由于以上两个原因,电能的生产、升压、传输、降压及使用等整个环节通常在交流电下进行。

也可以有另外的方案,在升至高压后,将交流电整流为直流,进行远距离的电能传输,然后将直流逆变为交流以便降压。这一方案需要特殊的设备:整流器及逆变器。它们价格昂贵而且运行复杂,因此,只是在直流输电的技术经济指标远优于交流方案;或者当直流输电可以解决一个国家联网时交流输电不能解决的一系列问题时,采用直流输电才是适宜的。

为了回答这些问题,必须仔细研究在大型电力网络中交流输电系统的工作情况,本书的目的即在于此。本书与传统的

叙述是有差别的。分析输电系统工作情况的基础是输电线路中电磁场的物理过程,因为正是这个物理过程决定了对线路电磁场剩余的无功功率补偿装置的要求。

输电线路中电磁场物理过程的分析也是决定线路等值参数及线路在不同工作状态运行特点的基础。输电线路工作状态的分析,一般分为传输功率小于自然功率 P_n 及大于自然功率两种情况进行。

根据线路工作的物理条件的特点,第一种状态($P < P_n$)属于自然的;而第二种($P > P_n$)状态,则属于人工的。应当指出,在确定交流输电的运行方式时所遇到的许多困难都与希望使输电系统工作在超过自然功率的人工区域有关。作者撰写此书的目的在于使专家们,首先是从事实际工作的人们注意利用一些可行的工程措施去解决全部电能传输问题的可能性,从而保证在现有科技基础上,以最小的费用,取得优越的技术经济指标。

作者感谢在正式与非正式场合众多的评论者,他们的讨论有助于确定本书内容叙述的逻辑与结构。

目 录

前 言

中译本前言

序 言

第一章 交流传输电能的特点

- 1.1 电能传输状态参数间的基本关系…………… (1)
- 1.2 长度小于极限值 ($l < l_{cr}$) 输电线路的相角
差特性…………… (18)
- 1.3 有损耗线路的电压状况…………… (23)
- 1.4 沿输电线路的无功潮流…………… (29)

第二章 交流架空输电线路的参数

- 2.1 架空输电线路的物理参数…………… (43)
- 2.2 远距离输电线路的等值参数…………… (48)
- 2.3 架空输电线路的等值回路…………… (58)
- 2.4 并联电抗器及变压器的参数…………… (64)
- 2.5 高压输电线路中的电压状态及功率损耗…………… (71)

第三章 输电线路的运行状态

- 3.1 交流输电系统的传输能力…………… (79)
- 3.2 线路传输能力自然运行状态的特性…………… (83)
- 3.3 线路传输能力人工状态的特性…………… (99)
- 3.4 线路在人工传输能力极限状态下的特性 …… (105)
- 3.5 根据最小功率损耗准则的电能最优传输
状态 …… (114)

3.6	交流线路空载状态时的功率损耗	(119)
第四章	架空输电线路结构参数的优化	
4.1	导线结构参数间的基本关系	(124)
4.2	圆形分裂半径的优化	(128)
4.3	导线在空间排列的优化	(132)
4.4	架空线杆塔结构的优化	(135)
第五章	输电系统的技术经济指标	
5.1	输电系统的技术经济效益指标	(142)
5.2	架空线导线结构的优化	(147)
5.3	输电系统额定电压的优化	(150)
5.4	交流输电并联回路的优化	(158)
5.5	交直流输电系统的经济效益比较	(166)
结束语		(175)
附 录		(177)
文献目录		(186)

第一章 交流传输电能的特点

1.1 电能传输状态参数间的基本关系

架空输电线路是一个伸长的、可产生电场与磁场的载流导体。当线路的工作条件变化时,由于电压的变化范围有限,线路的静电场在一昼夜、一周甚至一年内的变化是不大的。但随线路中电流的变化,导线周围的磁场会在很大的范围内变化。这一情况就决定了交流输电的工作特点及其相应的调控线路工作状况的措施。

另一个特点是当线路的长度较大时,电压和电流的相位将沿线变化。沿线路的相位的变化取决于电磁波的传播速度 v_0 ,它与线路参数间的关系式是

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.1)$$

式中 L 与 C 分别为线路单位长度的电感与电容。在线路首端的某一相位将在经过时延 $\Delta t = x/v_0$ 后达到距首端距离为 x 的一点。由此可见,电能沿导线的传输过程具有波动特性,因而在研究输电线路的工作状态时,必须分析其波过程。

对地电压为 U_0 的一相导线在一个周期内单位长度的平均电场能量为

$$W_{\text{电}} = CU^2 \quad (1.2)$$

相应地,长度为 l 的三相线路的电场功率为

$$Q_{\text{电}} = 3\omega W_{\text{电}}l = 3\omega CU^2l \quad (1.3)$$

一相导线当流过的电流为 I 时,在一个周期内单位长度的平均磁场能量为

$$W_{\text{磁}} = LI^2 \quad (1.4)$$

长度为 l 的三相线路的磁场功率为

$$Q_{\text{磁}} = 3\omega W_{\text{磁}}l = 3\omega LI^2l \quad (1.5)$$

电场、磁场功率的差值决定了线路的无功功率

$$\begin{aligned} Q &= Q_{\text{电}} - Q_{\text{磁}} = 3\omega l(CU^2 - LI^2) \\ &= 3\omega lCU^2\left(1 - \frac{L}{C} \frac{I^2}{U^2}\right) \end{aligned} \quad (1.6)$$

在线路的电场、磁场功率相等的情况下,其无功功率为零,此时由式(1.6)得

$$I = U \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} = I_0 \quad (1.7)$$

根据与电路的相似性

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = z_0 \quad (1.8)$$

称为线路的波阻抗,而此时流过线路的电流为自然电流 I_0 ,因为它与一接在电压源的无穷长导线——只有前行波、无反射波——中的电流相符。当线路虽为有限长,但其末端只有有功负载,且其等值电阻与 z_0 相等时,也有类似的情况。上述的线路工作状态称为自然的。这是一个无功功率的平衡状态,线路既不产生、也不吸收无功功率。

如线路中的电流 I 与自然电流不相等,设 $I = kI_0$ (k 为任

意数), 则式(1.6)可改写成

$$Q = 3\omega l \frac{U_0^2}{v_* z_*} \left(1 - z_*^2 \frac{k^2 I_*^2}{U_0^2} \right) \\ = P_* \lambda (1 - k^2) = P_* \lambda \left[1 - \left(\frac{P}{P_*} \right)^2 \right] \quad (1.9)$$

式中 P_*, λ 分别为线路的自然功率与波长

$$P_* = \frac{3U_0^2}{z_*} \\ \lambda = \frac{\omega l}{v_*} \quad (1.10)$$

$k = I/I_* \approx P/P_*$, P/P_* 为传输功率对自然功率的比值。在写出式(1.9)时, 我们利用了式(1.1)与(1.8)的相互关系, 亦即

$$z_* = \frac{1}{v_* C} = v_* L \quad (1.11)$$

由式(1.9)可见, 当 $k < 1 (I < I_*)$, 线路上有多余的无功功率; 当 $k = 0$, 它达到极大值

$$Q = P_* \lambda = Q_{*} \quad (1.12)$$

这一多余的无功功率应由电力系统来吸收。

相反, 当 $k > 1 (I > I_*)$, 线路将需要无功功率, 其值将随 k 的增加而急剧增加(见图 1.1), 可超出 $k = 0$ 时线路能发出的最大无功功率许多倍。此时, 对电压源来说, 线路好像是一个大功率电抗器, 其所需的无功功率可由式(1.9)来计算(符号为负)。

在任一电力系统中, 当负载由最大变至零(空载)时, 都应保证线路工作的可能性。当轻负载时, 线路应将其多余的无功功率转给作为“消费者”的并联电抗器吸收。线路一部分多余的无功功率可能被与之相连接的系统所吸收, 因为根据负载特性它们通常是缺无功的。因此, 在一般情况下, 并联电抗器

的容量应按式(1.12)决定

$$Q_0 = P_n \lambda \quad (1.13)$$

这样,交流输电的物理条件就决定了必须考虑下述的两个极为重要的情况:

——在线路所有的工作状态下都必须保证整个输电系统的无功平衡;

——补偿设备沿线路的分布应该保证输电运行状态参数的变化在规程限定的范围之内。

不考虑上述两个要求而

对输电工作状态特性进行抽象的分析是没有意义的。因此,以下对交流输电工作条件的分析必须考虑这些要求。

将发电机接入线路时,沿线路将有电磁波传播。在输电系统的稳态运行情况下,通常沿线路有自电压源发出的前行波及由负载发出的即线路末端反射的反行波。前行波与反行波中,电压、电流最大值之比与输电系统的运行状态有关。在线路传输自然功率的条件下,不存在由线路末端发出的反射波。

根据这些概念,可以求出距线路末端为 x 点上的电压、电流与末端电压、电流间的关系(图 1.2)。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_x &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 x + \dot{I}_2 \operatorname{sh} \gamma_0 x \\ \dot{I}_x &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 x + \frac{\dot{U}_2}{Z_n} \operatorname{sh} \gamma_0 x \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

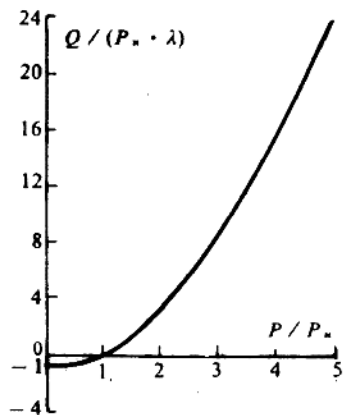


图 1.1 线路无功功率 Q 与 $P_n \lambda$ 之比与 P/P_n 的关系曲线

式中 $\gamma_0 = \beta_0 + j\omega/v_0$ 。

为电磁波的复传播系

数； $\beta_0 = \rho\omega/(2v_0LF)$

$= \rho\omega/(2Fz_0)$ 为阻尼

系数； ρ, F 分别为导

线的电阻系数与有效

截面； ω/v_0 为相位系

数；线路的波阻抗为

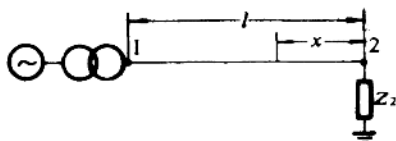


图 1.2 电压、电流沿线分布的计算

$$\dot{z}_* = \sqrt{\frac{R_0 + jX_0}{G_0 + jY_0}} \quad (1.15)$$

R_0, X_0, G_0, Y_0 分别为单位长度的电阻、感抗、电导与导纳。

在线路首端($x=l$)有

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 l + \dot{I}_2 \dot{z}_* \operatorname{sh} \gamma_0 l \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 l + \frac{\dot{U}_2}{\dot{z}_*} \operatorname{sh} \gamma_0 l \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

当线路末端除有功负载 P 外,还有无功功率 Q_2 ,或有容量相等的无功补偿装置时,线路末端的电流为

$$\dot{I}_2 = \frac{P - jQ_2}{3\dot{U}_2} \quad (1.17)$$

将它代入式(1.16)可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 l + \frac{P \dot{z}_*}{3\dot{U}_2} \operatorname{sh} \gamma_0 l - j \frac{Q_2 \dot{z}_*}{3\dot{U}_2} \operatorname{sh} \gamma_0 l \\ \dot{I}_1 &= \frac{P - jQ_2}{3\dot{U}_2} \operatorname{ch} \gamma_0 l + \frac{\dot{U}_2}{\dot{z}_*} \operatorname{sh} \gamma_0 l \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

如果忽略线路的电阻(即 $\beta_0=0$)与电导,则输电线路的特性有更明晰的表达,此时

$$\operatorname{sh} \dot{\gamma}_0 x = \operatorname{sh} j \frac{\omega x}{v_s} = j \sin \frac{\omega x}{v_s} = j \sin \lambda_x;$$

$$\operatorname{ch} \dot{\gamma}_0 x = \operatorname{ch} j \frac{\omega x}{v_s} = \cos \frac{\omega x}{v_s} = \cos \lambda_x;$$

$$\dot{z}_s = \sqrt{\frac{X_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{\omega L}{\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = z_s$$

这里 $\lambda_x = \omega x / v_s$ 为线段 x 的波长(当 $x=l$ 时为全线路的波长 λ)。

将上述的关系式代入式(1.14),并考虑到式(1.17),则当线路末端电压向量与实轴重合时,可得

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= U_2 \cos \lambda_x + j z_s I_2 \sin \lambda_x \\ &= U_2 \cos \lambda_x + \frac{Q_2 z_s}{3U_2} \sin \lambda_x + j \frac{P z_s}{3U_2} \sin \lambda_x \\ &= U_2 \left(\cos \lambda_x + \frac{Q_2 z_s}{3U_2^2} \sin \lambda_x + j \frac{P z_s}{3U_2^2} \sin \lambda_x \right) \\ &= U_2 \left[\cos \lambda_x + \frac{Q_2}{P_s} \left(\frac{U_{\Phi s}}{U_2} \right)^2 \sin \lambda_x + j \frac{P}{P_s} \left(\frac{U_{\Phi s}}{U_2} \right)^2 \sin \lambda_x \right] \quad (1.19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_s &= \dot{I}_2 \cos \lambda_x + j \frac{\dot{U}_2}{z_s} \sin \lambda_x \\ &= \frac{P}{3U_2} \cos \lambda_x - j \frac{Q_2}{3U_2} \cos \lambda_x + j \frac{U_2}{z_s} \sin \lambda_x \\ &= \frac{U_2}{z_s} \left\{ \frac{P}{P_s} \left(\frac{U_{\Phi s}}{U_2} \right)^2 \cos \lambda_x + j \left[\sin \lambda_x - \frac{Q_2}{P_s} \left(\frac{U_{\Phi s}}{U_2} \right)^2 \cos \lambda_x \right] \right\} \\ &= I_s \frac{U_2}{U_{\Phi s}} \left\{ \frac{P}{P_s} \left(\frac{U_{\Phi s}}{U_2} \right)^2 \cos \lambda_x + j \left[\sin \lambda_x - \frac{Q_2}{P_s} \left(\frac{U_{\Phi s}}{U_2} \right)^2 \cos \lambda_x \right] \right\} \quad (1.20) \end{aligned}$$