

电力工业学校教材

电力系统

保定电力学校 卢文鹏 编

China Electric Power Press

中国电力出版社

TM7-43

L82

电力工业学校教材

电力系统

保定电力学校 卢文鹏 编



A0934319

中国电力出版社

内 容 提 要

全书共分三章内容,具体是:交流远距离输电、直流输电、大电网技术。书中着重介绍了交流远距离输电的输电方程、自然功率、参数补偿,直流输电中整流和逆变的工作原理及其控制调节,大电网中的典型故障分析、大机组运行、电网结构、电压调节及系统稳定等内容。

本书作为电力工业学校发电厂及电力系统专业教材,也可作为相近专业的教材,以及有关技术人员的参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统/卢文鹏编. —北京:中国电力出版社,
2000.5
电力工业学校教材
ISBN 7-5083-0284-2

I. 电… II. 卢… III. 电力系统-专业学校-教材
IV. TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第06117号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市白帆印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2000年6月第一版 2000年6月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 5.75印张 124千字
印数 0001—4000册 定价9.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本教材主要依据电力工业学校发电厂及电力系统专业四、五套办教学计划中四年制、五年制的教学大纲，以及当前我国电力工业的发展情况而编写的。

该书共分三章，主要讲述了两方面的问题：一方面是远距离输电的内容，其中又分为两部分，一是交流远距离输电，二是直流输电；另一方面是大电网技术。

本书编写过程中，注重教材的特点，注意到知识的系统性和学生学习的连续性，书中以定性的分析论述为主，尽可能减少定量的分析和计算。本书由保定电力学校卢文鹏编写，河北省保定高级技工学校李花枝同志参加部分编写，并绘制部分章节插图；全书由成都水力发电学校罗建华同志审定。

由于编者水平有限，书中不可避免的出现一些缺点和错误，诚恳希望读者提出宝贵意见，以便改进和完善。

编 者

2000年5月

绪 论

一、我国电力工业发展简况及现状

我国改革开放以来, 各行各业的发展突飞猛进, 电力工业作为国民经济发展的先行军更是日新月异。下面简要介绍一下我国电力工业的基本情况和目前需要解决的问题。

1. 电力、电量的发展

解放初期: 装机容量 184.86 万 kW, 发电量 43.1 万 kWh/a, 世界排名第 25 位。

1987 年底: 装机容量 10192.65 万 kW, 发电量 4960 亿 kWh/a, 世界排名第 6、5 位。

1997 年底: 装机容量 2.54 亿 kW, 发电量 1.35 万亿 kWh/a, 世界排名第 2 位。

2. 输电、配电的现状

输电网络在 80~90 年代发展较快, 超高压输电网络已环绕了大城市及负荷中心, 但与配电网络的衔接还存在“卡脖”现象。

目前配电网络的装备及技术水平还比较落后, 有些还是解放初期的建设。到 1997 年底整体水平相当于西欧、日本 60 年代末、70 年代初的水平。

3. 发、输、配电发展不均衡

(1) 我国发电、输电、配电的投资比例长期失调, 我国与日本、美国、法国在发、输、配电投资比例的比较如表 0-1 所示。

表 0-1 各国发、输、配电投资比例

项 目 国 家	发 电	输 电	配 电	项 目 国 家	发 电	输 电	配 电
中 国	1	0.21	0.12	美 国	1	0.43	0.70
日 本	1	0.47	0.68	法 国	1	0.45	0.78

(2) 电力系统有“送不进”、“用不上”的现象。“送不进”是指输电网络落后, 发的电送不进电网; “用不上”是指配电网络落后, 用户的用电不能保证。

4. 供电可靠性水平

1996 年我国 238 个供电局向可靠性中心上报了 10kV 用户供电可靠性数据, 其平均值为 99.264% (用户平均每年停电 64.63h)。西欧一些先进国家的可靠性水平可达 99.98750% (用户平均每年停电 1.095h)。1991~1996 年我国的 RS1 共增加了 0.366%, 平均每年增加 0.0732%。若能保持此发展速度, 那么至少需要 10 年才能达到西欧先进水平, 而据有关专家估计 10 年内还达不到, 因为可靠性水平越高、其发展速度就越慢。

5. 输电线路的线损

由于我国电网中无功补偿不足, 调节手段还比较落后, 使电网运行的电压偏低、线路

损耗较大。1995年全国线损率为8.7%，通过努力1997年达到8.2%，2000年的目标是7.8%。而一些发达国家（如日本、德国、法国等）的线损率为5%~6%，比我国少2%~3%，相当于我国每年多损耗180亿kWh电量；相当于一座360万kW火力发电厂的年发电量，而此规模发电厂一年要排放煤粉300万t、排放二氧化硫15万t。

6. 电力工业目前的主要问题及近期的发展

我国电力的发展已不是目前的主要矛盾，因为现在的装机容量和年发电量均占世界第二位，发电量基本已满足用户的需求。例如1997年计划发电量1.45万亿kWh，但实际发电量是1.35万亿kWh。

目前电力工业主要问题是：①电力网络结构薄弱、联系不紧密；②供电网络供电能力不足；③城市高压电网建设迟缓、配电网建设标准低；④配电网络不灵活，用户用电受约束；⑤电力通信、计量、计费系统急需发展；⑥电力网络管理水平落后；⑦全国电力工业发展水平不平衡。

我国电力工业近期发展目标是：①到2010年城市高压网络的主要技术指标达到或接近世界先进水平，同时在近期内，投资数千亿元资金进行城市电网、农村电网的建设和改造。②电力满足市场需求，提高供电可靠性，降损节能。③城市110kV及以下变电所70%以上无人值班。

要解决以上问题和达到近期发展目标，就应加大输、配电的投资比例，借鉴科学的先进技术、提高电网管理水平。对电网的运行、管理、通信、计量实现自动化。

1998年3月19日原电力工业部通知，停止执行原水利电力部、原能源部，制定的若干限制用电的规定，这标志着我国多年缺电局面基本结束。所以，我国要加强发、用电的联系，合理利用电力系统的潜力，为国民经济发展出力。

二、学习远距离输电和大电网技术的意义

由以上我国电力工业发展及现状以及需要解决的问题说明，必须要加大输电部分的投资和建设。远距离输电具有以下现实意义：

- (1) 增大电网的地理分布和系统容量，充分发挥联合电力系统的优越性。
- (2) 解决不同地区的电力发展不平衡。
- (3) 提高供电的可靠性，降低电网的电能损耗。
- (4) 合理利用现有的能源，使电网的运行更合理、更经济。
- (5) 更好的发挥电力工业在国民经济中的重要作用。

现代的电力系统，在电能的输送方面，交流比直流更有其运行的灵活性；直流又具有许多交流无法比拟的优越性。

发展电力系统是电力工业的客观规律，是世界各国电力工业所走的共同道路。例如，前苏联已基本实现了全国统一的电力系统；美国电力工业管理虽然比较分散，但各电力系统在发展过程中也相互联网，并组成电力可靠协调委员会，协调各系统之间的规划、运行和调度；日本本土的九家私营电力公司，也互联成联合电力系统；西欧各国的电力系统也相互联网，形成了西欧十一国的互联系统。我国电力系统已由以省为主，发展到跨省的大区域电力系统，它们之间也开始实现互联。

对大电网技术的学习和研究具有以下意义：

- (1) 有利于全国电力工业的合理开发与建设。
- (2) 解决日益增大电力系统中出现的新问题，保证大电网的安全运行。
- (3) 更好的协调电网的调度管理。
- (4) 有利于大机组、超高压的使用。
- (5) 致力于电力工业更好的服务于各个领域。

第一章 交流远距离输电

第一节 远距离输电的基本知识

一、远距离输电产生的背景和发展简史

自18世纪后期,人们成功地将发电厂的电能经一定距离输送到用户并加以利用,电能的输送被充分重视。在世界各地,由于能源的分布往往与用电负荷中心有较长的距离,对于一次能源(水利、煤炭、天然气等)的输送远不如电能方便,所以各国、各地区一般将一次能源转化为二次能源——电能进行远距离输送,即形成远距离输电。

随着现代电力系统的容量和所跨区域越来越大,为了更好地对水利、煤炭等不同资源的合理使用,需要将原来小的系统进行联系,这也必须通过远距离的电能输送,如大区域网的形成、跨国电网的形成等等。远距离输电在人类发电和用电的过程中自然而然地产生了。

1831年法拉第的电磁感应定律,从本质上解释了电与磁之间的关系,为电力工业的发展奠定了理论基础。从此形成了发电到用电的体系,远距离的输电也就随之产生了。

早期有线电报的发明,实现了对电流的距离输送。1882年法国人德普勒将慕尼黑郊外57km水电厂的电能输送到慕尼黑,是世界上最早的输电工程,但它属直流输电;1891年俄国人多里沃·多勃沃列斯基成功地将拉芬镇水电厂的交流电输送到175km法兰克福城,这是现在交流输电的理论基础。

前苏联在50年代建成了500kV线路,70年代建成了750kV线路,80年代建成了世界第一条1150kV特高压输电线路(乌拉尔—西伯利亚)。其他国家也相继建立了高电压、远距离输电线路。

我国的第一条330kV输电线路于1972年投入运行,第一条500kV线路于1981年投入运行(平顶山—武汉凤凰山)。目前500kV超高压输电线路已经成为我国区域大电网的骨架。

现在人们对电能的需求,不仅仅是电量的满足,而且要求有更高的供电可靠性,这样则必须有大量容量的电力系统。电能的输送已经向着大容量、远距离、超高压方面发展,世界各国的远距离超高压输电工程都已经建立和形成。随着社会的发展,远距离输电也会不断发展和壮大。

二、远距离输电的概念

电力工业发展初期的电能输送,从距离上仅仅在几十千米到几百千米的范围,仅能称为是原始的远距离输电。而现在的远距离输电一般是指几百千米或几千千米的输送距离,即现代的远距离输电。现在学习、研究、讨论的远距离输电均指现代的远距离输电。

现在输送的电能大都是三相正弦交流电,就输送距离而言,一般将超过电磁波波长的5%的线路距离,称为远距离输电。当输送距离较短时,电压、电流等量仅看成是时间的函

数，即与 $\sin(\omega t + \varphi)$ 成正比；当输送距离较长时，电压、电流等量不仅是时间的函数，而且是输送距离 x 的函数。对于 50Hz 交流电，在不考虑损耗的情况下，电磁波的传播速度大约为 30 万 km/s，其波长大约为 6000km，波长的 5% 为 300km（电缆线路大约为 100km），故一般认为输电距离超过 300km 时的架空线路，称为远距离输电。需要指出，300km 的距离仅作为一个参考界限，远距离输电并不是以线路的实际距离作为标准的。因为线路的实际距离仅是一个空间距离，输电距离却是一个电气距离，二者不是一个概念。

总之，远距离输电是指线路输送电能的容量较大、距离较远，电压、电流等电气参数不仅随时间变化，而且受距离影响的输电过程。

当然，远距离输电除了交流以外，那就是近几十年又兴起的直流输电。直流输电与交流相比，在投资、运行等方面都有较大的差异。对于直流远距离输电在本书后面章节中还要详细讨论。

三、输电的远距离与超高压

远距离输电由于输送距离较远，电能损耗也随之增大。为了减少电能损耗，最基本的方法是提高电压等级，所以出现了超高压、特高压输电。一般是电力输送距离越远，线路的电压等级越高。

超高压现阶段是指 275~1000kV（不含 1000kV），1000kV 及以上称为特高压。

输电线路的距离越远，一般线路的电压等级也越高。由于现在的发电、用电电压等级较低（相对而言），所以较高的电压等级也只是用于远距离输电。

下面通过表 1-1~表 1-4 可看出输电线路电压等级、输送距离、输送容量之间的关系。

表 1-1 超高压线路的输电距离与输送能力的关系

线路电压 (kV)	距离 (km)	自然功率 (MW)	输送能力 (MW)	
			按发热	按稳定
330	200~300	350	760	800
500	300~400	900	1740	1350
750	400~500	2100	4600	2500
1150	400~500	5300	11000	4500

注 500~750kV 决定于稳定；1150kV 决定于发热。

表 1-2 国外各电压等级线路输送容量与距离的关系

电压 (kV)	输送容量 (MW)	距离 (km)	电压 (kV)	输送容量 (MW)	距离 (km)
220~230	150~250		735（加拿大）	1500	1310
330~345	300~600		1150（前苏联）	5000~5500	1170
500	900~1200		1150	9000~14000	
500（美国）	1800	1400	±750（前苏联）	6000	2414
735~765	1500~2500				

表 1-3

中国目前各级电压线路输送容量与距离的关系

电 压 (kV)	输 送 容 量 (MW)	距 离 (km)	电 压 (kV)	输 送 容 量 (MW)	距 离 (km)
10	0.2~2	6~20	220	100~200	200~300
35	2~10	20~50	330	400~600	300~400
110	10~50	50~150	500	600~1000	400~600

表 1-4

各国发展特高压概况

国 别	拟用特高压等级 (kV)	预计输送功率 (MW)	预计输送距离 (km)	预计输送地区	预计建成年份
美国 AEP BPA	1500 1200	>5000 3000~6000	>480		1990年后 2000年
意大利	1050	5000~10000	300~400	南部核电站-北部工业 区	2000年
前苏联	1150 2000	5000~5500 20000	1170	西伯利亚-哈萨克斯坦- 乌拉尔	1984年 —
日本	1000	8000	250	新潟柏崎-山梨	1993年
加拿大	800~1200	10000	1200	勒格朗德河-蒙特利尔	—

四、远距离输电的意义

远距离输电存在一个产生、发展的过程，可以说它永远不会完善。随着电力工业的发展，科学技术的进步，它始终是一个发展、改进的过程。

远距离输电在现在的电力系统中主要有以下作用：

- (1) 将大容量电厂接于强大的电力系统。
- (2) 向没有或不宜建设大容量电源的负荷集中地区供电。
- (3) 作为电力系统的内部联络线，可以为正常状态下实现最经济的运行方式和在事故条件下调动备用容量提供巨大的机动性，而且能促进系统本身的发展。
- (4) 连接两个电力系统以适应它们的进一步发展和提高共同的经济性。

总之，利用远距离输电形成联合电力系统，可以提高供电的可靠性和电能质量，改善电力系统运行的灵活性，合理利用动力资源，从而提高电力系统的经济效益。

现代的电力系统，从发电、变电、输电、配电、用电等方面，仍然以交流为主。在电力输送方面，交流比直流更有其运行的灵活性。以前学习的主要是距离较短、电压等级相对较低的交流输电，本章则将讨论输电距离较长、电压等级较高、输送容量较大时的情况。交流远距离输电，对于线路的参数、等值电路、电压电流的传输、运行的稳定等方面都有其特殊性。

第二节 交流远距离输电线路的输电方程

一、线路的基本方程

设有长度为 l 的输电线路，其参数沿线均匀分布，单位长度的阻抗和导纳分别为

$$z_0 = r_0 + j\omega L_0 = r_0 + jx_0$$

$$y_0 = g_0 + j\omega C_0 = g_0 + jb_0$$

在距末端 x 处取一微分段 dx , 可作出等值电路如图 1-1 所示。

在正弦电压作用下, 电流 I 在 dx 微段阻抗中的压降为

$$d\dot{U} = \dot{I} (r_0 + j\omega L_0) dx$$

$$\text{或} \quad \frac{d\dot{U}}{dx} = \dot{I} (r_0 + j\omega L_0) \quad (1-1)$$

流入 dx 微段并联导纳中的电流为

$$d\dot{I} = (\dot{U} + d\dot{U})(g_0 + j\omega C_0) dx$$

略去二阶微小量, 得

$$\frac{d\dot{I}}{dx} = \dot{U} (g_0 + j\omega C_0) \quad (1-2)$$

式 (1-1) 对 x 求导, 并将式 (1-2) 代入, 得

$$\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} = (g_0 + j\omega C_0)(r_0 + j\omega L_0)\dot{U} \quad (1-3)$$

上式为二阶常系数齐次微分方程式, 其通解为

$$\dot{U} = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (1-4)$$

将式 (1-4) 代入式 (1-1), 得

$$\dot{I} = \frac{A_1}{Z_c} e^{\gamma x} - \frac{A_2}{Z_c} e^{-\gamma x} \quad (1-5)$$

式中 A_1 、 A_2 ——积分常数, 由边界条件确定。

式 (1-4) 与式 (1-5) 即为交流远距离输电线路的输电方程。其中

$$\gamma = \sqrt{(g_0 + j\omega C_0)(r_0 + j\omega L_0)} = \beta + j\alpha \quad (1-6)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} = R_c + jX_c = Z_c e^{j\theta} \quad (1-7)$$

式中 γ 称为线路的传播常数, 因为 z_0 和 y_0 的辐角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内, 故 γ 的辐角也在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 由此可知 β 和 α 都是正的。 Z_c 称为线路的波阻抗 (或特性阻抗)。 γ 和 Z_c 都是只与线路的参数和频率有关而与电压和电流无关的物理量。

1. 以线路末端电压、电流表示的输电方程

线路末端电压、电流分别为 \dot{U}_2 、 \dot{I}_2 , 并以此为边界条件求出积分常数 A_1 、 A_2 , 得到以线路末端电压、电流表示的输电方程

$$\dot{U} = \frac{1}{2}(\dot{U}_2 + \sqrt{3}\dot{I}_2 Z_c) e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_2 - \sqrt{3}\dot{I}_2 Z_c) e^{-\gamma x} \quad (1-8)$$

$$\dot{I} = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} + \dot{I}_2 \right) e^{\gamma x} - \frac{1}{2} \left(\dot{I}_2 - \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \right) e^{-\gamma x} \quad (1-9)$$

式中 \dot{U} 、 \dot{I} ——距离线路末端 x km 处的线电压、线电流;

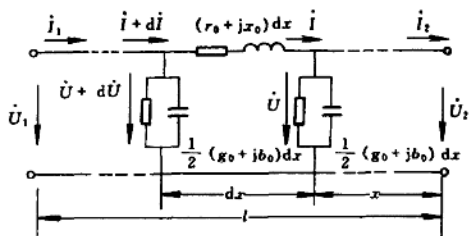


图 1-1 交流远距离输电线路的等值电路

\dot{U}_2 、 \dot{I}_2 ——线路末端的线电压、线电流。

2. 以线路首端电压、电流表示的输电方程

线路首端电压、电流分别为 \dot{U}_1 、 \dot{I}_1 ，仿照以上分析，得到以线路首端电压、电流表示的输电方程

$$\dot{U} = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \sqrt{3}\dot{I}_1 Z_c)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \sqrt{3}\dot{I}_1 Z_c)e^{\gamma x} \quad (1-10)$$

$$\dot{I} = \frac{1}{2}\left(\frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3}Z_c} + \dot{I}_1\right)e^{-\gamma x} - \frac{1}{2}\left(\dot{I}_1 - \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3}Z_c}\right)e^{-\gamma x} \quad (1-11)$$

式中 \dot{U} 、 \dot{I} ——距离线路首端 x km 处的线电压、线电流；

\dot{U}_1 、 \dot{I}_1 ——线路首端的线电压、线电流。

二、线路中电压电流的波过程

1. 电压电流的波动性

对电压电流波动性的分析，以式 (1-10) 和式 (1-11) 为例。线路首端电压、电流分别为 \dot{U}_1 、 \dot{I}_1 ，距离线路首端 x km 处的电压电流分别为 \dot{U} 、 \dot{I} 。

由上述线路的输电方程式 (1-10) 和式 (1-11) 说明，线路上任一处的电压和电流都是由两个分量组成

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_i \quad (1-12)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_r - \dot{I}_i \quad (1-13)$$

其中

$$\dot{U}_r = A_1 e^{-\gamma x} = A_1 e^{-\beta x} e^{-j\alpha x} \quad (1-14)$$

$$\dot{U}_i = A_2 e^{\gamma x} = A_2 e^{\beta x} e^{j\alpha x}$$

$$\dot{I}_r = \dot{U}_r / Z_c \quad (1-15)$$

$$\dot{I}_i = \dot{U}_i / Z_c$$

由此可见，长线路上的电压和电流是距离 x 的函数，它们沿着导线传播，形成一种行波。 \dot{U}_r 和 \dot{I}_r 分别称为电压和电流的正向行波，一般称为入射波； \dot{U}_i 和 \dot{I}_i 则称为电压和电流的反向行波，简称反射波。随着时间的增加正向行波向着 x 增加的方向行进，而反向行波则向 x 减小的方向行进。

在式 (1-10)、式 (1-11) 中， $\frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \sqrt{3}\dot{I}_1 Z_c)$ 和 $-\frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \sqrt{3}\dot{I}_1 Z_c)$ 代表两个用复数表示的电压，可以令

$$\frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \sqrt{3}\dot{I}_1 Z_c) = \dot{U}_r = U_r e^{j\psi_r} \quad (1-16)$$

$$\frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \sqrt{3}\dot{I}_1 Z_c) = \dot{U}_i = U_r e^{j\psi_i} \quad (1-17)$$

$$Z_c = Z_c e^{j\theta}$$

$$\gamma = \beta + j\alpha$$

将上述关系式代入式 (1-10) 与式 (1-11), 则有

$$\dot{U} = U_r e^{-\beta x} e^{j(\Psi_r - \alpha x)} + U_t e^{\beta x} e^{j(\Psi_t + \alpha x)} \quad (1-18)$$

$$\dot{I} = \frac{U_r}{\sqrt{3} Z_c} e^{-\beta x} e^{j(\Psi_r - \alpha x - \theta)} - \frac{U_t}{\sqrt{3} Z_c} e^{\beta x} e^{j(\Psi_t + \alpha x - \theta)} \quad (1-19)$$

根据符号法的原则, 分别将上列电压电流相量表示式改写为电压电流的瞬时表达式

$$u = \sqrt{2} U_r e^{-\beta x} \sin(\omega t - \alpha x + \Psi_r) + \sqrt{2} U_t e^{\beta x} \sin(\omega t + \alpha x + \Psi_t) \quad (1-20)$$

$$i = \frac{\sqrt{2} U_r}{\sqrt{3} Z_c} e^{-\beta x} \sin(\omega t - \alpha x + \Psi_r - \theta) - \frac{\sqrt{2} U_t}{\sqrt{3} Z_c} e^{\beta x} \sin(\omega t + \alpha x + \Psi_t - \theta) \quad (1-21)$$

式 (1-20) 与式 (1-21) 中, 等号右边每一项都是随时间 t 及距离 x 而变的正弦函数。这个函数可以看作是沿一定方向 (x 增加方向或 x 减少方向) 运动的行波。显然, 上述方程表示了输电线路电压与电流的波动过程。

由于随着距离 x 的增加 $u_r(x, t)$ 的振幅在衰减, 所以称 $u_r(x, t)$ 为减幅入射波电压。如上分析, 称式 (1-20) 第二项所表示的为减幅反射波电压; 称式 (1-21) 第一项为减幅入射波电流; 称式 (1-21) 第二项为减幅反射波电流。

电压入射波和反射波的波形如图 1-2 所示。

行波的基本性质由传播常数决定。

2. 波的传播常数和波阻抗

对于高压架空输电线 $G_0 \approx 0, r_0 \ll \omega L_0$

$$\gamma = \beta + j\alpha \approx \sqrt{j\omega C_0 (r_0 + j\omega L_0)} \approx \frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + j\omega \sqrt{L_0 C_0} \quad (1-22)$$

$$Z_c = R_c + jX_c \approx \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{j\omega C_0}} \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} - j \frac{1}{2} \frac{r_0}{\omega \sqrt{L_0 C_0}} \quad (1-23)$$

由上两式可见, 架空线的波阻抗接近于纯电阻, 而略呈容性。略去电阻和电导时, $X_c = 0$ 和 $\beta = 0$, 有

$$\gamma = j\alpha = j\omega \sqrt{L_0 C_0} \quad (1-24)$$

$$Z_c = R_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1-25)$$

传播常数的实部 β 表示行波振幅衰减的特性, 称为行波的衰减常数。行波每前进单位长度, 其振幅都要减小到原振幅的 $1/e^\beta$ 。当 $r_0 = 0$ 和 $g_0 = 0$ 时, $\beta = 0$, 所以行波振幅衰减是

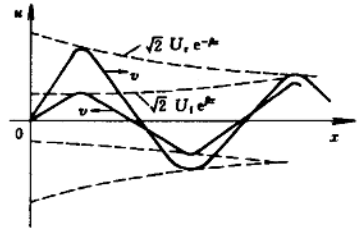


图 1-2 电压入射波形与反射波形

由于线路上的功率损失引起的。而行波沿线路的相位变动是由于线路上存在电感和电容的缘故。

单导线架空线的波阻抗约为 $370 \sim 410 \Omega$ ；分裂导线的则为 $270 \sim 310 \Omega$ 。电缆线路由于其 C_0 较大而 L_0 又较小，波阻抗约为 $30 \sim 50 \Omega$ 。

3. 波的波长和波速

传播常数的虚部 α 表示行波相位变化的特性，称为行波的相位常数。 α 的数值代表沿着行波的传播方向相距单位长度的前方处行波在相位上滞后的弧度数。

行波的相位相差为 2π 的两点间的距离称为波长，通常用 λ 表示。

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{f \sqrt{L_0 C_0}} \quad (1-26)$$

行波的传播速度，亦称相位速度，记为

$$v_w = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (1-27)$$

对于架空线路相位速度接近于光速，即 $v_w \approx 3 \times 10^8 \text{ km/s}$ 。当 $f = 50 \text{ Hz}$ 时， $\lambda \approx 6000 \text{ km}$ 。电缆线路的相位常数较架空线路为大，行波在电缆中的传播速度也较小，一般只有光速的 $1/2 \sim 1/4$ 左右。

一条线路的电气长度，常用它的实际几何长度同波长之比来衡量。若线路的长度为 l ，则它对于波长的相对长度为

$$l_e = \frac{l}{\lambda} = \frac{\alpha l}{2\pi} \quad (1-28)$$

若 $l_e = 1$ ，便是全波长线路； $l_e = 1/2$ 则为半波长线路。习惯上也常用全线的总相位常数来说明线路的电气长度。若 $\alpha l = 2\pi$ 便称为全波长线路； $\alpha l = \pi$ 则称为半波长线路。

三、长线路的等值电路

长线路方程稳态解式 (1-4) 和式 (1-5) 中的积分常数 A_1 和 A_2 可由线路的边界条件确定。当 $x=0$ 时， $\dot{U} = \dot{U}_2$ 和 $\dot{I} = \dot{I}_2$ ，由式 (1-4) 和式 (1-5) 可得

$$\dot{U}_2 = A_1 + A_2, \quad \dot{I}_2 = \frac{1}{Z_c}(A_1 - A_2)$$

由此可以解出

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2}(\dot{U}_2 + Z_c \dot{I}_2) \\ A_2 &= \frac{1}{2}(\dot{U}_2 - Z_c \dot{I}_2) \end{aligned} \right\} \quad (1-29)$$

将 A_1 和 A_2 代入式 (1-4) 和式 (1-5) 可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= \frac{1}{2}(\dot{U}_2 + Z_c \dot{I}_2)e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_2 - Z_c \dot{I}_2)e^{-\gamma x} \\ \dot{I} &= \frac{1}{2Z_c}(\dot{U}_2 + Z_c \dot{I}_2)e^{\gamma x} - \frac{1}{2Z_c}(\dot{U}_2 - Z_c \dot{I}_2)e^{-\gamma x} \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

上式可利用双曲线函数写成

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma l \\ \dot{I} &= \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma l + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$

当 $x=l$ 时, 可得到线路首端电压和电流与线路末端电压和电流的关系如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma l \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma l + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l \end{aligned} \right\} \quad (1-32)$$

将上述方程同四端网络的通用方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{A} \dot{U}_2 + \dot{B} \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{C} \dot{U}_2 + \dot{D} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-33)$$

相比较, 若取 $\dot{A} = \dot{D} = \operatorname{ch} \gamma l$, $\dot{B} = Z_c \operatorname{sh} \gamma l$ 和 $\dot{C} = \operatorname{sh} \gamma l / Z_c$, 输电线就是对称的无源四端网络, 并可用对称的等值电路来表示, 如图 1-3 所示。

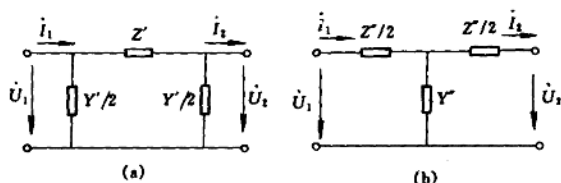


图 1-3 远距离输电线路的集中参数等值电路

(a) Π 型等值电路; (b) T 型等值电路

图 1-3 所示的 Π 型和 T 型等值电路均可作为输电线的等值电路, 但是 T 型等值电路多一个结点, 增加了计算工作量, 故通常多采用 Π 型电路代表输电线。

Π 型等值电路的参数由下式确定

$$\left. \begin{aligned} Z' &= \dot{B} = Z_c \operatorname{sh} \gamma l \\ Y' &= \frac{2(\dot{A} - 1)}{\dot{B}} = \frac{2(\operatorname{ch} \gamma l - 1)}{Z_c \operatorname{sh} \gamma l} \end{aligned} \right\} \quad (1-34)$$

令 $Z = (r_0 + jx_0) l$ 和 $Y = (g_0 + jb_0) l$, 分别代表全线的总阻抗和总导纳, 将式 (1-34) 改写为

$$\left. \begin{aligned} Z' &= K_Z Z \\ Y' &= K_Y Y \end{aligned} \right\} \quad (1-35)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} K_Z &= \frac{\operatorname{sh} \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} \\ K_Y &= \frac{2 \operatorname{th} \frac{\sqrt{ZY}}{2}}{\sqrt{ZY}} \end{aligned} \right\} \quad (1-36)$$

由此可见,将全线的总阻抗 Z 和总导纳 Y 分别乘以修正系数 K_z 和 K_Y ,便可求得II型等值电路的精确参数。

利用双曲线函数的幂级数展开式

$$\operatorname{th}\theta = \theta - \frac{1}{3}\theta^3 + \frac{2}{15}\theta^5 - \dots$$

$$\operatorname{sh}\theta = \theta + \frac{1}{3!}\theta^3 + \frac{1}{5!}\theta^5 + \dots$$

将式(1-36)的右端展开,并取其前两项,可得

$$\left. \begin{aligned} K_z &= 1 + \frac{1}{6}ZY \\ K_Y &= 1 - \frac{1}{12}ZY \end{aligned} \right\} \quad (1-37)$$

如果略去输电线的电导,再利用修正系数的简化公式,便可得到

$$\left. \begin{aligned} Z' &\approx k_r r_0 l + jk_x x_0 l \\ Y' &\approx jk_b b_0 l \end{aligned} \right\} \quad (1-38)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} k_r &= 1 - \frac{1}{3}x_0 b_0 l^2 \\ k_x &= 1 - \frac{1}{6}\left(x_0 b_0 - r_0^2 \frac{b_0}{x_0}\right)l^2 \\ k_b &= 1 + \frac{1}{12}x_0 b_0 l^2 \approx \frac{3 + k_r}{2(1 + k_r)} \end{aligned} \right\} \quad (1-39)$$

由式(1-39)可见,修正系数 k_r 、 k_x 和 k_b 不仅同线路参数有关,也同线路长度有关。当线路不太长时(300km以内), $k_r \approx 1$ 、 $k_x \approx 1$ 和 $k_b \approx 1$,II型等值电路的总阻抗和导纳可直接由线路的总阻抗和总导纳确定。对于较长线路则需进行参数修正,或者把线路分成若干段,每段用一个II型等值电路代表,再将它们串级连接组成整条线路的等值电路。

当不需要详细了解沿线的电流和电压分布时,用集中参数等值电路代表长线可以方便地研究线路两端的电压和功率的关系。

【例 1-1】 有一额定电压为500kV的输电线路,长为700km。每相采用三分列导线,次导线为LGJQ-400,正三角形排列,次导线间距为40cm。三相水平排列,线间距离为11m。晴天不会发生电晕,试作出等值电路,并求各参数。

解 根据已知条件,求出线路原参数

$$r_0 = \frac{0.08}{3} = 0.027(\Omega/\text{km})$$

$$r_{ds} = \sqrt[n]{r_d c_i^{n-1}} = \sqrt[3]{1.36 \times 40^2} = 12.958(\text{cm})$$

$$D_{ij} = 1.26 \times 1100 = 1386(\text{cm})$$

$$x_0 = 0.1445 \lg \frac{D_{ij}}{r_{ds}} + \frac{0.0157}{n} = 0.1445 \lg \frac{1386}{12.958} + \frac{0.0157}{3} = 0.298(\Omega/\text{km})$$

$$b_0 = \frac{7.58 \times 10^{-6}}{\lg \frac{D_{ij}}{r_{ds}}} = \frac{7.58 \times 10^{-6}}{\lg \frac{1386}{12.958}} = 3.736 \times 10^{-6} (\text{S/km})$$

(1) 不考虑参数修正系数时

$$R = r_0 l = 0.027 \times 700 = 18.9 (\Omega)$$

$$x = x_0 l = 0.298 \times 700 = 208.6 (\Omega)$$

$$B = b_0 l = 3.736 \times 10^{-6} \times 700 = 2.615 \times 10^{-3} (\text{S})$$

(2) 采用参数修正系数近似值修正时, 参数修正系数近似值为

$$k_r = 1 - \frac{1}{3} x_0 b_0 = 1 - \frac{700^2}{3}$$

$$\times 0.298 \times 3.736 \times 10^{-6} = 0.8182$$

$$k_x = 1 - \frac{l^2}{6} \left(x_0 b_0 - r_0^2 \frac{b_0}{x_0} \right)$$

$$= 1 - \frac{700^2}{6} \left(0.298 \times 3.736 \times 10^{-6} - 0.0272 \times \frac{3.736 \times 10^{-6}}{0.298} \right)$$

$$= 0.9098$$

$$k_b = \frac{3 + k_r}{2(1 + k_r)} = \frac{3 + 0.8182}{2(1 + 0.8182)} = 1.05$$

所以

$$R' = k_r R = 0.8182 \times 18.9 = 15.464 (\Omega)$$

$$X' = k_x X = 0.9098 \times 208.6 = 189.78 (\Omega)$$

$$B' = k_b B = 1.05 \times 2.615 \times 10^{-3} = 2.746 \times 10^{-3} (\text{S})$$

(3) 采用参数修正系数精确值修正时

$$Z = R + jX = 18.9 + j208.6 = 209.45 \angle 84.82^\circ (\Omega)$$

$$Y = G + jB = j2.615 \times 10^{-3} = 2.615 \times 10^{-3} \angle 90^\circ (\text{S})$$

$$\sqrt{ZY} = \sqrt{209.45 \angle 84.82^\circ \times 2.615 \times 10^{-3} \angle 90^\circ}$$

$$= 0.74 \angle 87.41^\circ = 0.033 + j0.739$$

$$\text{sh} \sqrt{ZY} = \text{sh}(0.033 + j0.739)$$

$$= \text{sh}0.033 \cos(0.739 \times 57.3) + j \text{ch}0.033 \sin(0.739 \times 57.3)$$

$$= 0.034 \times 0.739 + j1.001 \times 0.674 = 0.025 + j0.675$$

$$= 0.675 \angle 87.88^\circ$$

$$\text{ch} \sqrt{ZY} = \text{ch}(0.033 + j0.739)$$

$$= \text{ch}0.033 \cos(0.739 \times 57.3) + j \text{sh}0.033 \sin(0.739 \times 57.3)$$

$$= 1.001 \times 0.739 + j0.034 \times 0.674 = 0.74 + j0.023$$

$$= 0.74 \angle 1.78^\circ$$

修正系数精确值