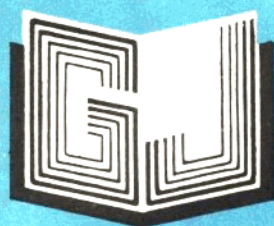


969163

TM726.1
7422



高等学校教材

超高压电网稳态计算

武汉水利电力大学 陈维贤 编

26.1
2



909163

TM726.1
7422

TM726.1
7422

高等学校教材

8-19

超高压电网稳态计算

武汉水利电力大学 陈维贤 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

高等学校教材

超高压电网稳态计算

武汉水利电力大学 陈维贤 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京樱花印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 8印张 174千字

1993年10月第一版 1993年10月北京第一次印刷

印数0001—2960册

ISBN7-120-01821-3/TM·483

定价3.80元

内 容 提 要

本书在对电源系统和长线方程进行等效处理的基础上,叙述了超高压长线路中的工频过电压、工频谐振、不对称开断后的感应电压、潜供电流以及并联电抗器的功能和选择等问题,详细介绍了数学模型、计算公式和典型的计算图表,揭示了主要的物理概念,可以作为高电压技术专业研究生的教材和高电压技术、电力系统及其自动化专业本科学生的选修教材,并可供有关科研、运行和设计人员阅读参考。

前 言

超高压电网在我国的迅猛发展,要求我们不断完善和掌握新的各类计算方法,以便满足越来越高的设计上和运行上的需要。从专业教学的角度来说,有关电网的稳定和潮流计算归属于电力系统及其自动化专业的范围,而在故障和操作情况下发生在长线路中的暂态和稳态过程及其计算,则习惯地归属于高电压技术专业的范围,后者乃是目前高电压技术专业研究生的一门学位课程,其部分内容也作为高电压技术和电力系统及其自动化专业本科学生的选修教材。

就长线计算的内容来说,稳态计算要比暂态计算广泛一些,因为前者除考虑到过电压问题之外,还要涉及潜供电弧及其恢复电压的计算、谐振条件的确定、并联补偿装置的选择及其功能研究等。对于这些方面,多年来作者进行了较多的研究工作,提出了一些新的计算分析方法和计算结果,并收集了若干文献资料,其主要内容曾编写成讲义,并对高校学生和在国内多次高电压研讨班上进行了讲授。本教材是在该讲义的基础上进一步整理和补充而成的。

华中理工大学招誉颐教授对本书进行了全面的审阅,并提出了许多宝贵的意见;华中电管局的白来庆高级工程师仔细阅读了本书第七章,并提出了重要的改进建议;能源部的刘继高级工程师、华东电力设计院的欧阳应川高级工程师、华东电管局的孙煦高级工程师和华中电力试验研究所的李健生高级工程师均提供了许多文献资料和意见,谨此表示深切的谢忱。

作者期望并感谢读者能对本书提出多方面的批评和补充意见。

作 者

1992年9月

6A01103

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 长线方程的处理	2
第一节 长线双口网络	2
第二节 相模变换	5
第三节 三相换位线路的相模变换	10
第四节 二次模变换	14
第二章 等效电源和长线入口阻抗	19
第一节 低压线路两侧变压器具有不同变比时的等效归算阻抗	19
第二节 工频等效电源	21
第三节 入口阻抗	23
第三章 工频电压升高	27
第一节 正常运行状态下换位线路中的工频电压升高	28
第二节 无补偿无故障换位空线中的电容效应	31
第三节 无补偿无故障的未换位空线中的电容效应	37
第四节 并联电抗器接在换位空线末端时的工频过电压	39
第五节 并联电抗器接在换位空线中间时的工频过电压	40
第六节 并联电抗器接在换位空线中间和两侧时的工频过电压	42
第七节 无故障换位空线中工频电压的计算示例	46
第八节 换位空线的不对称接地	48
第四章 长线路分相开断后的工频谐振	57
第一节 联网系统中长线单相开断后谐振条件的数学模型	57
第二节 不对称切合空线后谐振条件的数学模型	64
第三节 谐振条件的数值计算	67
第五章 长线路不对称开断后的感应电压	70
第一节 基本概念	70
第二节 计算感应电压的数学模型	75
第三节 无补偿运行线路单相开断后的感应电压	79
第四节 有补偿运行线路单相开断后的感应电压	84
第五节 分相切合空线后的感应电压	88
第六节 感应电压的抑制	92
第六章 潜供电流	96
第一节 概述	96
第二节 计算潜供电流的数学模型	97

第三节	潜供电流的数值计算	99
第四节	潜供电流的限制	102
第七章	并联电抗器的功能和选择	104
第一节	概述	104
第二节	均压效应	104
第三节	对过电压及其限制措施参数选择的影响	106
第四节	无功补偿	107
第五节	抑制自励磁	111
第六节	电抗器中性点和小电抗的绝缘水平	113
参考文献		119

绪 论

330kV和500kV的电力网已在我国形成。在最近9年内,我国共建成500kV线路54条,总长5443km。目前,许多国家已经建立了735、750kV或765kV超高压电力网,苏联1150kV的特高压线路已经运行多年,我国对特高压输电线路的前期研究工作也已开始进行。这些电力网的特点首先在于输电距离很长,达到350~1000km以上,因而无论对于长线的稳态计算或者暂态计算均需精确考虑导线的分布参数,而不能局限于进行传统的近似分析。

有关长线的暂态计算,目前已有若干文献作了比较详细的介绍,而稳态计算的报导则所见甚少。事实上,稳态计算乃是所有各类计算的基础,而现有电力网的拓扑结构十分复杂,对于长线的运行方式、无功功率的补偿、工频谐振现象的产生和抑制等,无不需要进行仔细的稳态计算。与此同时,这些计算往往牵涉到不对称故障和断路器的不对称切合,其边界条件与长线方程的联解过程显得十分繁琐,需要借助于计算机进行数值求解。

由于主要的计算均围绕着长线进行,故第一章首先对长线方程进行概括的数学处理,提出了一种二次模变换方法,使得计算过程得到了很大程度的简化。第二章首先将长线端部连接的复杂系统简化为用T型集中参数和两个电动势所表示的等效电源,进而介绍了长线入口阻抗的一般表达式。

长线的重要特点在于其电容效应和所引起的工频电压升高。对于不同的并联电抗器补偿状况和不对称接地方式,第三章分别以简洁的形式叙述了沿线的电压分布规律和计算方法。运行线路的单相分闸和非同期切合均会形成工频谐振,第四章详细分析了长线分相开断后的谐振条件及一些重要的性质。

长线不对称开断后的感应电压和潜供电流分别在第五章、第六章内加以讨论,所列举的计算曲线可使我们深入了解这些不对称运行方式的许多重要特点。所需指出的是,这里所推导出的数学模型具有一定的普遍意义,可以据此编制出通用计算程序,进行对称和不对称运行方式下的稳态数值计算。

鉴于并联电抗器已在超高压线路中普遍使用,概括地叙述它的主要功能和选择方法是必要的,这就是第七章的内容,其中同时讨论了电抗器中性点和小电抗的绝缘水平问题。

我国的超高压电力网已经积累了许多运行经验,在此基础上进行深入一步的理论探讨,并且不间断地相互交流以及提供新的见解和工作成就乃是十分必要的,从这一观点出发,本书内容可能会对掌握超高压线路的许多重要特征和促进今后研究工作的持续开展有所裨益。

第一章 长线方程的处理

计算长线中的暂态和稳态过程乃是长线方程连同长线中的不对称点及端部（边界）条件的联解过程。这里的关键步骤及其复杂之处乃是对具有分布参数的长线的概括和等效处理。为使后面的分析叙述臻于简明扼要，我们先来讨论表征长线特点的若干重要参数及其数学变换形态。

第一节 长线双口网络

图1-1为 l km长的单根长线（距离 x 从右侧终端开始算起），计算稳态过程的两个基本微分方程具有如下形式

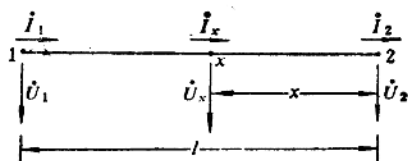


图 1-1 单根长线示意图

$$\frac{d^2 \dot{U}_x}{dx^2} = \gamma^2 \dot{U}_x$$

$$\dot{I}_x = \frac{1}{\gamma Z} \cdot \frac{d \dot{U}_x}{dx}$$

式中 γ 和 Z 分别为导线的传播系数和波阻。令 R' 、 L' 和 C' 分别为每千米导线的电阻、电感和电容（忽略对地导纳）， ω 为工频角频率， Q 为导线的品质因数， z_0 为无损导线的波阻， v 为波速(km/ms)，则

$$Q = \frac{\omega L'}{R'}, \quad z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}, \quad v = \frac{10^{-8}}{\sqrt{L' C'}}$$

于是
$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')j\omega C'} = j\omega \sqrt{L' C'} \times \sqrt{1 + \frac{R'}{j\omega L'}}$$

$$= \frac{j\omega}{v \times 10^3} \sqrt{1 - \frac{j}{Q}} = \frac{j\lambda}{l} \times \frac{e^{-j\frac{\alpha_R}{2}}}{\sqrt{\cos \alpha_R}}$$

$$= \frac{j\lambda}{l} (a_R - jb_R)$$

$$z = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{j\omega C'}} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \times \sqrt{1 + \frac{R'}{j\omega L'}} = z_0 (a_R - jb_R)$$

式中

$$\alpha_R = \text{tg}^{-1} \frac{1}{Q}$$

$$a_R = \frac{\cos \frac{\alpha_R}{2}}{\sqrt{\cos \alpha_R}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\cos \alpha_R} \right)}$$

$$= \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}}}{2}} \approx \sqrt{\frac{2 + \frac{1}{2Q^2}}{2}}$$

$$\approx 1 + \frac{1}{8Q^2}$$

$$b_R = \frac{\sin \frac{\alpha_R}{2}}{\sqrt{\cos \alpha_R}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\cos \alpha_R} - 1 \right)} = \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}} - 1}{2}}$$

$$\approx \frac{1}{2Q}$$

$$\lambda = \omega T_l = \frac{\omega l}{v \times 10^3} = \frac{100\pi l}{v \times 10^3} = \frac{0.1\pi l}{v} \quad (\text{rad}) = \frac{18^\circ l}{v} \quad (1-1)$$

这里 $T_l = \frac{l}{v \times 10^3}$ 为波从导线一侧到达另一侧的传播时间(s), 故 λ 为导线长度的工频电角度; 对于三相换位线路, 其正序波速接近于光速 300km/ms, 故每百公里导线的正序电角度约为 0.1rad 或者 6° 。

上述长线方程的解答形式为

$$\dot{U}_x = F \cosh \gamma x + N \sinh \gamma x$$

$$\dot{I}_x = \frac{1}{Z} (F \sinh \gamma x + N \cosh \gamma x)$$

引入末端边界条件: $x=0$ 时, $\dot{U}_x = \dot{U}_1$, $\dot{I}_x = \dot{I}_1$, 故有 $F = \dot{U}_1$, $N = \dot{I}_1 Z$, 上式可以写成

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & B_x \\ C_x & A_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

$$A_x = \cosh \gamma x, \quad B_x = Z \sinh \gamma x, \quad C_x = \frac{\sinh \gamma x}{Z}$$

$$A_x - B_x C_x = 1$$

这里 $\begin{bmatrix} A_x & B_x \\ C_x & A_x \end{bmatrix}$ 为 “x, 2” 点间的传输矩阵。

对于首端有

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_l & B_l \\ C_l & A_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

式中 $A_l = \cosh \gamma l = \cos \alpha_R \lambda \cosh b_R \lambda + j \sin \alpha_R \lambda \sinh b_R \lambda$

$$B_l = Z \sinh \gamma l = j z_c (\alpha_R \sin \alpha_R \lambda \cosh b_R \lambda - b_R \cos \alpha_R \lambda \sinh b_R \lambda) + z_c (\alpha_R \cos \alpha_R \lambda \sinh b_R \lambda + b_R \sin \alpha_R \lambda \cosh b_R \lambda)$$

$$C_1 = \frac{\text{sh} \gamma l}{Z} = \frac{\cos \alpha_R}{z_c} [j(a_R \sin \alpha_R \lambda \text{ch} b_R \lambda + b_R \cos \alpha_R \lambda \text{sh} b_R \lambda) + (a_R \cos \alpha_R \lambda \text{sh} b_R \lambda - b_R \sin \alpha_R \lambda \text{ch} b_R \lambda)]$$

$$A_1^2 - B_1 C_1 = 1$$

系数 A_s 、 B_s 和 C_s 的复数展开式与 A_1 、 B_1 和 C_1 的相仿，只需将 λ 代以 λ_s 即可，而

$$\lambda_s = \lambda \frac{x}{l}$$

如果忽略导线电阻，则 $\frac{1}{Q} = 0$ ，以上各式可以简化为

$$\gamma l = j\lambda, \quad Z = z_c, \quad \alpha_R = 0, \quad a_R = 1, \quad b_R = 0$$

$$A_1 = \cos \lambda, \quad B_1 = jz_c \sin \lambda, \quad C_1 = \frac{j \sin \lambda}{z_c}$$

这样一来，可以画出仅仅反映两点之间电压和电流关系的双口网络，如图 1-2 所示。

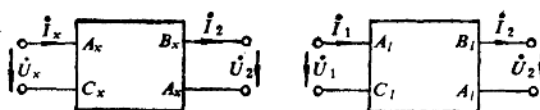


图 1-2 双口网络

电力网中的集中参数同样可以化成双口网络。在图 1-3(a) 中， Z_{11} 为长线中的串联阻抗，可以写出

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{11} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

在图 1-3(b) 中， Z_{11} 为长线

中的并联阻抗，则有

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{Z_{11}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

作为一个例子，图 1-3(c) 表示两个线段 l_1 和 l_2 ，中间接有串、并联阻抗 Z_{11} 和 Z_{22} ，把它们分为四段，并将各段的双口网络依次串联而形成图 1-3(d) 所示的集中参数的等效电路，就可写出下列首、末端的关系式

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} \\ C_{11} & A_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{21} & B_{21} \\ C_{21} & A_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{31} & B_{31} \\ C_{31} & A_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{41} & B_{41} \\ C_{41} & A_{41} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} \\ C_{11} & A_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_{11} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{Z_{22}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{12} & B_{12} \\ C_{12} & A_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} \\ C_{11} & D_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

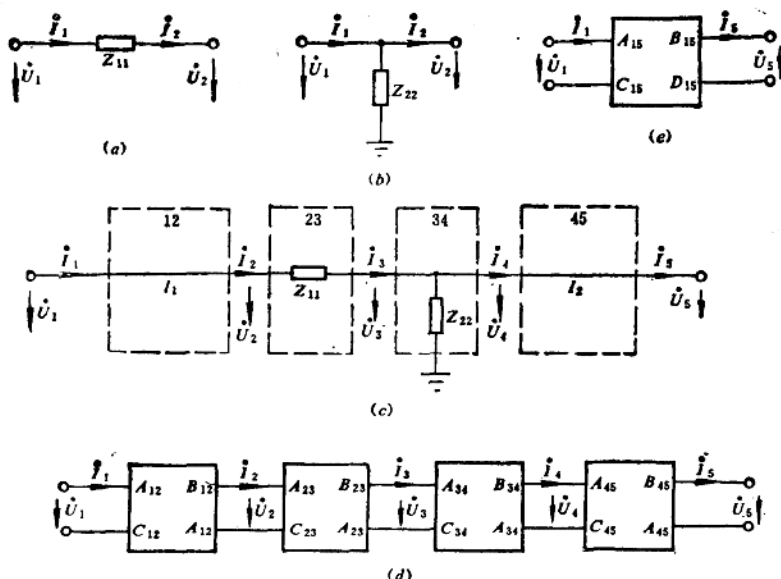


图 1-3 带有集中参数长线的双口网络

(a)长线中的串联阻抗; (b)长线中的并联阻抗; (c)含有串、并联阻抗的长线; (d)用双口网络表示的长线; (e)长线的等效双口网络

图1-3(e)为相应的等效电路。上式与边界条件联解, 可以求出端部的电压和电流, 然后依次求出各个节点的电压和电流, 并按式(1-2)计算沿两个线段 l_1 和 l_2 的电压和电流分布。

附带指出, 对于 Z_{11} 和 Z_{22} 本身来说, 因这些集中参数两侧呈对称形式, 故仍可满足关系式 $A_{23} - B_{23}C_{23} = 1$ 和 $A_{34} - B_{34}C_{34} = 1$ 。然而, 当此两个阻抗合并后就不再满足对称条件, 它们的传输矩阵变成

$$\begin{bmatrix} A_{24} & B_{24} \\ C_{24} & D_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{11} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{22}} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_{11}}{Z_{22}} & Z_{11} \\ \frac{1}{Z_{22}} & 1 \end{bmatrix}$$

这里 $A_{24} \neq D_{24}$, 但是仍然有 $A_{24}D_{24} - B_{24}C_{24} = 1$ 。同样, 在图1-3(e)中, $A_{15} \neq D_{15}$, $A_{15}D_{15} - B_{15}C_{15} = 1$ 。

第二节 相 模 变 换

在三相换位对称的输电线路中, 稳态过程可以分相求解; 如果线路中的初始值不存在负序和零序分量, 则对称操作时, 暂态过程的计算亦可分相进行, 在任何时刻, 线路上任何一点的三相电压和电流中都只有正序分量。然而, 在不换位或不对称操作的线路中, 三相之间的电压和电流联系十分复杂, 需要借助于相模变换来进行稳态和暂态计算。

设 L'_a 、 L'_b 和 L'_c 为每公里导线的三相自感， M'_{ab} 、 M'_{bc} 和 M'_{ca} 为其相间互感， C'_{ab} 、 C'_{bc} 和 C'_{ca} 为每公里导线的对地电容， C'_{aa} 、 C'_{bb} 和 C'_{cc} 为其相间电容，并令距离 x 从线路的末端算起， x 点的三相稳态电压为 $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 和 $\dot{U}_c$ ，三相稳态电流为 $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$ 和 $\dot{I}_c$ ， $p=j\omega$ ，则无损长线方程为

$$\begin{aligned}\frac{d\dot{U}_a}{dx} &= pL'_a\dot{I}_a + pM'_{ab}\dot{I}_b + pM'_{ca}\dot{I}_c \\ \frac{d\dot{U}_b}{dx} &= pM'_{ba}\dot{I}_a + pL'_b\dot{I}_b + pM'_{bc}\dot{I}_c \\ \frac{d\dot{U}_c}{dx} &= pM'_{cb}\dot{I}_a + pM'_{bc}\dot{I}_b + pL'_c\dot{I}_c \\ \frac{d\dot{I}_a}{dx} &= pC'_{aa}\dot{U}_a + pC'_{ab}(\dot{U}_a - \dot{U}_b) + pC'_{ac}(\dot{U}_a - \dot{U}_c) \\ &= p(C'_{aa} + C'_{ab} + C'_{ac})\dot{U}_a - pC'_{ab}\dot{U}_b - pC'_{ac}\dot{U}_c \\ \frac{d\dot{I}_b}{dx} &= -pC'_{ba}\dot{U}_b + p(C'_{ba} + C'_{ab} + C'_{bc})\dot{U}_b - pC'_{bc}\dot{U}_c \\ \frac{d\dot{I}_c}{dx} &= -pC'_{ca}\dot{U}_c - pC'_{bc}\dot{U}_b + p(C'_{ca} + C'_{bc} + C'_{cb})\dot{U}_c\end{aligned}$$

令电压列向量为 $\dot{U}$ ，电流列向量为 $\dot{I}$ ，则可写成下列矩阵形式

$$\left. \begin{aligned}\frac{d\dot{U}}{dx} &= pL_i \dot{I} \\ \frac{d\dot{I}}{dx} &= pC_i \dot{U}\end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中 $\dot{U} = [\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c]^T$

$\dot{I} = [\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c]^T$

$$L_i = \begin{bmatrix} L'_a & M'_{ab} & M'_{ca} \\ M'_{ba} & L'_b & M'_{bc} \\ M'_{cb} & M'_{bc} & L'_c \end{bmatrix}$$

$$C_i = \begin{bmatrix} C'_{aa} + C'_{ab} + C'_{ac} & -C'_{ab} & -C'_{ac} \\ -C'_{ba} & C'_{ba} + C'_{ab} + C'_{bc} & -C'_{bc} \\ -C'_{ca} & -C'_{bc} & C'_{ca} + C'_{bc} + C'_{cb} \end{bmatrix}$$

可以看出， L_i 和 C_i 为实对称矩阵。合并以上两式得

$$\left. \begin{aligned}\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} &= p^2 L_i C_i \dot{U} \\ \frac{d^2\dot{I}}{dx^2} &= p^2 C_i L_i \dot{I}\end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

① 如令电压和电流为瞬时值， p 为拉氏算子，则本章相模变换的结果同样适用于暂态计算。

式中 $L_j C_j$ 和 $C_j L_j$ 为满矩阵, 反映了紧密的相间联系; 同时, $L_j C_j$ 和 $C_j L_j$ 为非对称矩阵, 但有 $L_j C_j = L_j^T C_j^T = (C_j L_j)^T$, 因而两者具有相同的特征值 D_1 、 D_2 和 D_3 。对于未换位线路, $D_1 \approx D_2 \approx D_3$ 。

以上各式均为三相电压和电流的长线方程, 称为相域方程。复杂的相间联系给不换位和不对称操作后的长线计算造成困难。为此, 人们通过线性变换, 将相域中的 $\dot{U}$ 和 $\dot{I}$ 转化为另一系统 (称为模域系统) 的 $\dot{U}_m$ 和 $\dot{I}_m$ 的列向量 (脚注 “m” 表示模), 其目的是使后者的三个分量相互独立, 从而可以极大地简化计算过程。相模变换的具体形式为

$$\begin{cases} \dot{U} = T_u \dot{U}_m \\ \dot{I} = T_i \dot{I}_m \end{cases} \quad (1-6)$$

这里 T_u 和 T_i 为电压和电流的三阶变换方阵。模电压和模电流的列向量为

$$\begin{aligned} \dot{U}_m &= [\dot{U}_{m1}, \dot{U}_{m2}, \dot{U}_{m3}]^T \\ \dot{I}_m &= [\dot{I}_{m1}, \dot{I}_{m2}, \dot{I}_{m3}]^T \end{aligned}$$

将式(1-6)代入式(1-4)和式(1-5), 可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{U}_m}{dx} &= p T_u^{-1} L_j T_i \dot{I}_m = p L_m \dot{I}_m \\ -\frac{d\dot{I}_m}{dx} &= p T_i^{-1} C_j T_u \dot{U}_m = p C_m \dot{U}_m \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_m}{dx^2} &= p^2 T_u^{-1} L_j C_j T_u \dot{U}_m = p^2 L_m C_m \dot{U}_m \\ \frac{d^2 \dot{I}_m}{dx^2} &= p^2 T_i^{-1} C_j L_j T_i \dot{I}_m = p^2 C_m L_m \dot{I}_m \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 $L_m = T_u^{-1} L_j T_i$, $C_m = T_i^{-1} C_j T_u$ 。

式(1-8)表明, 如果 $T_u^{-1} L_j C_j T_u$ 和 $T_i^{-1} C_j L_j T_i$ 均为对角矩阵, 则各个模电压分量之间和模电流分量之间彼此独立。

为此, 我们来看任一满元方阵, 例如三阶方阵 S , 由它组成三阶线性方程组

$$(S - \alpha I_{03})x = 0,$$

或者

$$Sx = \alpha x$$

式中 α 为常数, x 为三维列向量, I_{03} 为三阶单位矩阵; 0 为零值列向量。为使 x 有非零解, 显然应有

$$|S - \alpha I_{03}| = 0$$

由此求出 α 的三个根 α_1 、 α_2 和 α_3 , 称为 S 的特征根, 它们分别对应的三个特征向量为

$$x_1 = [x_{11}, x_{12}, x_{13}]^T, x_2 = [x_{21}, x_{22}, x_{23}]^T$$

以及 $x_3 = [x_{31}, x_{32}, x_{33}]^T$, 即 $Sx_1 = \alpha_1 x_1$, $Sx_2 = \alpha_2 x_2$ 和 $Sx_3 = \alpha_3 x_3$ 。今将此三个特征

向量构成矩阵 T_A

$$T_A = [x_1, x_2, x_3]$$

则以上三式可合并写成

$$\begin{aligned} ST_A &= [Sx_1, Sx_2, Sx_3] = [\alpha_1 x_1, \alpha_2 x_2, \alpha_3 x_3] \\ &= [x_1, x_2, x_3] \begin{bmatrix} \alpha_1 & & \\ & \alpha_2 & \\ & & \alpha_3 \end{bmatrix} = T_A \alpha \end{aligned}$$

式中, $\alpha = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ 。由此得

$$T_A^{-1} ST_A = \alpha$$

故矩阵 S 被对角化, 对角化后的三个对角元素就是 S 的三个特征根。

因此, 取 T_s 和 T_i 分别为由 $L_i C_i$ 和 $C_i L_i$ 的三个特征向量组成的变换矩阵, 则有

$$T_s^{-1} L_i C_i T_s = L_m C_m = T_i^{-1} C_i L_i T_i = C_m L_m = \text{diag}(D_1, D_2, D_3) = D_m$$

式 (1-8) 改写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx^1} \begin{bmatrix} \dot{U}_{m1} \\ \dot{U}_{m2} \\ \dot{U}_{m3} \end{bmatrix} &= p^1 D_m \dot{U}_m = r_m^1 \dot{U}_m = \begin{bmatrix} p^1 D_1 \dot{U}_{m1} \\ p^1 D_2 \dot{U}_{m2} \\ p^1 D_3 \dot{U}_{m3} \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dx^1} \begin{bmatrix} \dot{I}_{m1} \\ \dot{I}_{m2} \\ \dot{I}_{m3} \end{bmatrix} &= p^1 D_m \dot{I}_m = r_m^1 \dot{I}_m = \begin{bmatrix} p^1 D_1 \dot{I}_{m1} \\ p^1 D_2 \dot{I}_{m2} \\ p^1 D_3 \dot{I}_{m3} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中 $r_m = p\sqrt{D_m}$, 为模的传播系数。由此可知, 在模域中, 三个模电压分量之间彼此独立, 不再象式 (1-5) 那样相互关联, 三个模电流分量之间的关系亦如此。

所需指出的是, 变换矩阵 T_s 和 T_i 的各个元素取决于 L_i 和 C_i 的具体参数。

现在来看矩阵 L_m 和 C_m 。

已知 $D_m = L_m C_m = C_m L_m = \text{diag}(D_1, D_2, D_3)$, 故有

$$C_m = L_m^{-1} D_m = D_m L_m^{-1}$$

将 L_m^{-1} 写成下列形式

$$L_m^{-1} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix}$$

则有

$$L_m^{-1} D_m = \begin{bmatrix} L_{11} D_1 & L_{12} D_2 & L_{13} D_3 \\ L_{21} D_1 & L_{22} D_2 & L_{23} D_3 \\ L_{31} D_1 & L_{32} D_2 & L_{33} D_3 \end{bmatrix} = D_m L_m^{-1} \begin{bmatrix} L_{11} D_1 & L_{12} D_2 & L_{13} D_3 \\ L_{21} D_1 & L_{22} D_2 & L_{23} D_3 \\ L_{31} D_1 & L_{32} D_2 & L_{33} D_3 \end{bmatrix}$$

前已指出, 未换位线路的 $D_1 \neq D_2 \neq D_3$, 根据上式, 除对角元 L_{11} 、 L_{22} 和 L_{33} 外, 所有非对

角元均等于零，因而 L_m 和 C_m 为对角矩阵，并可写成

$$L_m = \text{diag}(L_{m1}, L_{m2}, L_{m3})$$

$$C_m = \text{diag}(C_{m1}, C_{m2}, C_{m3})$$

L_m 和 C_m 的对角元分别称为模电感和模电容。

这样一来，式(1-7)就可展开为如下形式

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_{m1} \\ \dot{U}_{m2} \\ \dot{U}_{m3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} pL_{m1} \dot{I}_{m1} \\ pL_{m2} \dot{I}_{m2} \\ pL_{m3} \dot{I}_{m3} \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{I}_{m1} \\ \dot{I}_{m2} \\ \dot{I}_{m3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} pC_{m1} \dot{U}_{m1} \\ pC_{m2} \dot{U}_{m2} \\ pC_{m3} \dot{U}_{m3} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式(1-10)表明，引入 T_v 和 T_i 的变换矩阵后，任一模电压分量只与同一模电流分量有关，这一格局显然将使精确的稳态和暂态计算大为简化。

现在可以写出模的传播系数 γ_m 、波速 v_m 和波阻 z_{cm} 为

$$\gamma_m = \text{diag}(\gamma_{m1}, \gamma_{m2}, \gamma_{m3}) = p\sqrt{D_m} = p\sqrt{L_m C_m} = pv_m^{-1}$$

$$v_m = \text{diag}(v_{m1}, v_{m2}, v_{m3}) = \sqrt{L_m^{-1} C_m^{-1}}$$

$$z_{cm} = \text{diag}(z_{cm1}, z_{cm2}, z_{cm3}) = \sqrt{L_m C_m^{-1}}$$

最后应当指出，在考虑导线电阻的情况下，式(1-4)中的第一式写成

$$\frac{d\dot{U}}{dx} = (pL_l + R_l)\dot{I}$$

式中 R_l 为每公里导线电阻的对称矩阵，它接近于平衡矩阵，经相模变换后，上式可写成

$$\frac{d\dot{U}_m}{dx} = (pL_m + R_m)\dot{I}_m$$

$$R_m = T_v^{-1} R_l T_i$$

显然，这里 R_m 为满矩阵。但是，实际的计算表明，在通常情况下， R_m 的非对角元要比对角元小一个数量级以上，因而非对角元可予忽略，对角元也就成了电阻的三个模分量，并据此进行长线的稳态和暂态计算。

以某500kV线路为例，其电感(mH)、电容(nF)和电阻(Ω)矩阵为

$$L_l = \begin{bmatrix} 1.709 & 0.863 & 0.732 \\ 0.863 & 1.709 & 0.863 \\ 0.732 & 0.863 & 1.709 \end{bmatrix}$$

$$C_l = \begin{bmatrix} 13.99 & -1.98 & -0.54 \\ -1.98 & 15.73 & -1.98 \\ -0.54 & -1.98 & 13.99 \end{bmatrix}$$

$$R_l = \begin{bmatrix} 0.074 & 0.047 & 0.047 \\ 0.047 & 0.074 & 0.047 \\ 0.047 & 0.047 & 0.074 \end{bmatrix}$$

电压和电流的变换矩阵为

$$T_u = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1.07297 & 0.00183 & -1.76593 \\ 1 & -1.00207 & 1.01427 \end{bmatrix}$$

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1.14059 & 0.00193 & -1.87720 \\ 1 & -1.00205 & 1.01424 \end{bmatrix}$$

据此求出各个参数的模矩阵为

$$L_m = \begin{bmatrix} 3.42533 & 0.00002 & 0.00005 \\ 0 & 0.97700 & -0.00102 \\ 0 & 0.00015 & 0.83237 \end{bmatrix}$$

$$C_m = \begin{bmatrix} 11.32552 & -0.00001 & -0.00008 \\ 0 & 14.53007 & 0.01628 \\ 0 & -0.00257 & 16.92213 \end{bmatrix}$$

$$R_m = \begin{bmatrix} 0.17144 & 0 & 0.00521 \\ 0.00002 & 0.02700 & 0.00001 \\ 0.00314 & 0 & 0.02822 \end{bmatrix}$$

可以看出, 上述参数的非对角元极小(有计算误差, 实际为零), 可以忽略, 因而成为三个模参数的对角矩阵, 它们依次相应于零序、正序和负序参数。

现在可以写出波阻、波速和品质因数的三个模分量为

$$z_m = \text{diag}(549.90856, 259.30590, 221.78360)$$

$$v_m = \text{diag}(160.55350, 265.41160, 266.44980)$$

$$Q_m = \text{diag}(6.28022, 11.36751, 9.26612)$$

第三节 三相换位线路的相模变换

对于较长的超高压线路, 三相均经换位, 虽然每段线路的三相参数是不平衡的, 但从全线来说, 可近似取用三相参数的平均值, 因而有 $L'_1 = L'_2 = L'_3$, $M'_{12} = M'_{23} = M'_{31} = M'$, $C'_1 = C'_2 = C'_3 = C'_0$, $C'_{12} = C'_{23} = C'_{31} = C'_{10}$ 。此时 L_1 、 C_1 、 $L_1 C_1$ 和 $C_1 L_1$ 均为平衡矩阵, 即矩阵的三个对角元相等, 全部非对角元亦相等; 同时有 $L_1 C_1 = C_1 L_1$, 故它们的变换矩阵亦相等, 即

$$T_u = T_i = T$$

我们已经熟知对称分量法, 现在利用此法先来讨论三相换位线路的参数特征。

假定线路中施加正序(或负序)电压, 通过正序(或负序)电流, 则有 $\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 0$, $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$; 根据式(1-4), a 相的长线方程可以写成