

电力系统稳态计算

华智明 编



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书系高等学校电力专业“电力系统稳态分析”课程的辅助教材。全书共分七章,内容包括:电力网等值电路参数计算;电力系统稳态性能和经济性能计算;电力系统潮流的计算机计算;电力系统频率调整和电压调整计算;以及电力系统规划设计有关计算。

本书对各部分的基本概念和方法只作归纳综述省去繁琐的推导(扩充内容例外),通过对75个有关问题的详细讨论和分析,使“电力系统稳态分析”课程的内容得以加深和拓宽,并附习题100个(备答案)、思考题110个,是该课程较为理想的参考书。

本书可供高等院校电力类专业师生使用,也可供同类专业职大、中专教师以及从事电力系统工作的工程技术人员参考。

电力系统稳态计算

李智明 编

责任编辑 黄开植

*

重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆建筑大学印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数:293千
1991年2月第1版 1996年5月第2版 1996年5月第2次印刷
印数:3001—7000

ISBN 7-5642-0262-0/TM·19 定价:9.60元

(川)新登字020号

再版说明

本书第一版于1991年2月发行之后,受到读者好评。普遍反映:这是“电力系统稳态分析”课程一本很好的参考教材,对学生牢固掌握和深入学习该课程内容,提高学生分析和解算问题的能力确有较大帮助。本书适用面广,高校电力类专业各层次学生都可选用,教师在教学中使用也很方便。为满足广大读者的要求,现经修订再版发行。

为使本书再版后其内容更能结合电力系统实际和满足教学的要求,作者进行了全面的修订、补充和改写,并适当增加了部分内容。此外,刻意对书中有关的专业术语注上英文名词,使之对学生学习专业英语有所帮助。

为感谢读者对本书的厚爱,作者力图通过再版日臻完善,但受水平和时间之限,不妥乃至谬误之处在所难免,企望读者指教、更正。

第一版岳湖山曾参加该书1~4章的部分编写工作,提供了1~4章习题答案。此次未参加本版修订工作,特此说明。

华智明

1995年11月于重庆大学

前 言

电力系统稳态分析是电力系统运行及规划设计中的一个重要内容,它涉及各种有关的计算,这些计算反映了电力系统最基本的性能及其特征。有关电力系统稳态分析的教材,已有较多的版本,为了帮助学生深入理解、牢固掌握稳态分析课程的内容,提高学生的自学能力和分析解算问题的能力,特编写本书作为“电力系统稳态分析”课程的辅助教材。

本书是在参阅大量中外文有关书籍及文献资料的基础上编写的。首先对电力系统稳态分析的基本内容进行归纳综述,而后对相应的各种类型的问题进行了详细的讨论和分析,使学生加深对基本概念和各种计算方法的理解,从而帮助学生灵活运用,以提高学生分析和解决工程实际问题的能力,并拓宽和深化“电力系统稳态分析”课程的内容。每一章都附有大量习题和思考题,供读者练习,并在附录中给出答案供参考。

本书在正式出版前,曾在多届本科、专科学生及研究生中使用,实践证明,它对提高学生的分析和解算能力大有裨益,受到很多读者的欢迎。现经《电力系统稳态分析》(水利电力出版社)的作者陈珩教授郑重推荐出版,以满足广大读者的需要。

限于编者水平,书中难免有不当甚至错误之处,恳望读者批评、指正。

作者在编写过程中,得到秦翼鸿教授的大力支持,并亲自审稿,提出了许多宝贵意见,同时得到徐国禹教授的指导和支持,谨此致以衷心的感谢。陈珩教授不吝赐教,帮助本书得以出版,在此致以深切的谢意。

华智明

1989年10月于重庆大学

目 录

第一章 电力网及其元件等值电路的参数计算	(1)
一、电力线路的等值电路和等值参数	(1)
二、变压器的等值电路和等值参数	(4)
三、电力网络的等值电路和等值参数	(6)
四、问题与讨论	(7)
五、习题	(23)
六、思考题	(25)
第二章 电力网络稳态性能的计算	(27)
一、区域性开式网络的计算	(27)
二、区域性闭式网络潮流的计算	(29)
三、地方电力网络的计算	(30)
四、闭式网络循环功率的计算	(31)
五、电力网络的简化	(32)
六、问题与讨论	(32)
七、习题	(59)
八、思考题	(66)
第三章 电力系统潮流的计算机计算	(68)
一、计算模型	(68)
二、计算方法	(73)
三、问题与讨论	(79)
四、习题	(86)
五、思考题	(91)
第四章 电力系统运行经济性能的计算	(95)
一、电能损耗的计算	(95)
二、闭式网络中有功损耗最小的功率分布	(98)
三、变压器的经济运行	(99)
四、电力系统有功负荷的经济分配	(100)
五、电力系统无功功率的经济分布	(103)
六、问题与讨论	(104)
七、习题	(122)
八、思考题	(127)

第五章 电力系统频率调整的计算	(129)
一、频率的一次调整	(129)
二、频率的二次调整	(131)
三、互联系统频率的调整	(132)
四、问题与讨论	(133)
五、习题	(138)
六、思考题	(140)
第六章 电力系统电压调整的计算	(141)
一、概述	(141)
二、变压器变比的计算	(142)
三、并联补偿容量的计算	(143)
四、串联补偿参数的计算	(144)
五、问题与讨论	(145)
六、习题	(152)
七、思考题	(153)
第七章 电力系统规划设计的计算	(155)
一、电力系统有功功率平衡的计算	(155)
二、电力系统无功功率平衡的计算	(156)
三、电力线路导线截面积的选择	(159)
四、规划方案的经济比较法	(163)
五、问题与讨论	(164)
六、习题	(172)
七、思考题	(174)
附录(习题参考答案)	(175)
参考书目	(180)

第一章 电力网及其元件等值电路的参数计算

电力网络是由各种电压等级的电力线路(架空线路和电缆线路),装设于变电所中的各种变压器(双绕组变压器、三绕组变压器、自耦变压器等)和其它一些元件构成的。各元件和等值电路及其参数的计算是电力网络运行特性计算和分析的基础。

电力系统稳态计算,即是电力系统正常的三相对称状态下运行特性的计算。因此,本章将有针对性地简述电力网络各主要元件参数的计算及其等值电路和电力网络等值电路的构成方法。

一、电力线路的等值电路和等值参数

电力线路的参数有电阻、电抗、电导和电纳,它们都是沿线均匀分布的,其等值电路如图 1-1(a)所示。显然这种电路的分析计算较为复杂。实际上,大多数的电力线路不是太长,参数分布性影响不大。因此,可以用一个集中参数的 π 型等值电路(有时可用 T 型等值电路)来表示电力线路,如图 1-1(b)所示。即使是线路较长,当只需计算线路端点状态时,也可以采用类似的电路,只是对集中参数进行近似的或精确的修正,以便计及参数分布性的影响,如图 1-1(c)所示。 Z' 和 Y' 便是修正后的等值参数。对于 35kV 及以下电压等级的线路电纳影响不大, π 型电路就简化为一串联阻抗 Z 电路。

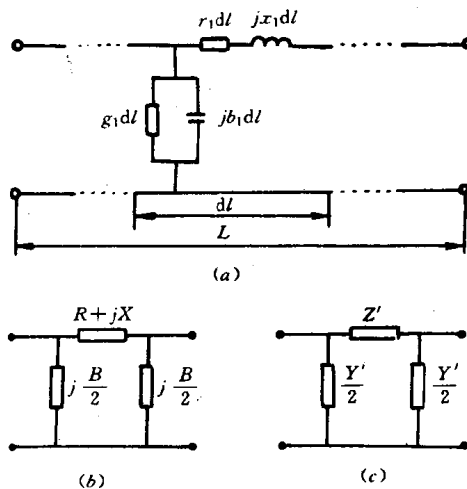


图 1-1 电力线路等值电路
(a)分布参数电路 (b)集中参数 π 型电路
(c)修正的集中参数 π 型电路

图 1-1(a)中 r_1 、 x_1 、 g_1 和 b_1 是电力线路单位长度的等值参数。一般它们与导线的材料、截面积、结构以及三相导线的空间排列方式、气象条件、地理环境等因素

有关。目前,我国多采用非导磁材料的导线,其单位长度(每千米)的等值参数可由下列公式计算^{[1]、[2]}

$$r_1 = \frac{\rho}{S} = \frac{1000}{\nu S} \quad \Omega/\text{km} \quad (1-1 \cdot a)$$

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_{GMD}}{0.5d} + 0.0157 \quad \Omega/\text{km} \quad (1-1 \cdot b)$$

$$g_1 \approx 0 \text{ S/km} \quad (1-1 \cdot c)$$

$$b_1 = 7.58 \times 10^{-6} / \lg \frac{D_{GMD}}{0.5d} \text{ S/km} \quad (1-1 \cdot d)$$

式中 r_1 ——线路每千米电阻 (resistance per kilometer) Ω/km ;
 x_1 ——线路每千米电抗 (reactance per kilometer) Ω/km ;
 g_1 ——线路每千米电导 (conductance per kilometer) S/km ;
 b_1 ——线路每千米电纳 (susceptance per kilometer) S/km ;
 ρ ——导线的电阻率(resistivity) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$;
 ν ——导线的电导率(conductivity) $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$;
 S ——导线的标称截面积 mm^2 ;
 d ——导线的计算直径 mm ;
 D_{GMD} ——三相导线间几何平均距离(geometric mean distance) mm 。

D_{GMD} 与三相导线在杆塔上的布置有关(见图 1-2),一般

$$D_{GMD} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}} \quad (1-2)$$

导线水平布置时

$$D_{GMD} \approx 1.26D$$

导线等边三角形布置时

$$D_{GMD} = D$$

D_{AB} 、 D_{BC} 、 D_{CA} 和 D 的意义见图 1-2。应该说明:式(1-1)中 D_{GMD} 和 d 的单位只要相同即可。

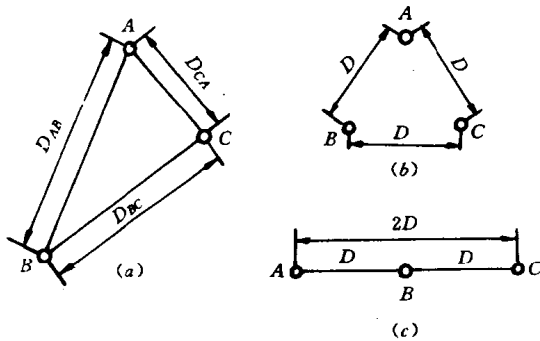


图 1-2 三相导线的空间布置

(a) 不对称布置 (b) 等边三角形布置 (c) 等距水平布置
 电纳的计算公式如下

$$x_1 = 0.1445 \lg [D_{GMD} / (0.5d_{eq})] + 0.0157/n \quad (1-3 \cdot a)$$

$$b_1 = 7.58 \times 10^{-6} / \lg [D_{GMD} / (0.5d_{eq})] \quad (1-3 \cdot b)$$

式中 n ——每相的分裂导线数

d_{eq} ——每相导线的等值直径,且 $d_{eq} = \sqrt[2^{n-1}d \cdot \prod_{i=2}^n a_{1i}]{} 其中:$

d ——一相中每根导体的直径

Π ——连乘运算符号

a_{1i} ——一相中,第 1 根与第 i 根导体间的距离, $i=2, 3, \dots, n$

当线路长度超过 200~300km 时,就应考虑参数均匀分布特性的影响。这时,分析计算是在长线方程(long-line equation)基础上进行的。即

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{xP} \\ \dot{I}_{xP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma x & Z_c \sinh \gamma x \\ \sinh \gamma x / Z_c & \cosh \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{2P} \\ \dot{I}_{2P} \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

式中 $\dot{V}_{2P}, \dot{I}_{2P}$ ——线路受端相电压和相电流

$\dot{V}_{xP}, \dot{I}_{xP}$ ——线路距受端 x 处的相电压和相电流

Z_c ——线路的特性阻抗或波阻抗(surge impedance) Ω , 且

$$Z_c = \sqrt{z_1/y_1}$$

γ ——线路的传播常数(propagation constant) 1/km, 且

$$\gamma = \sqrt{z_1 y_1}$$

z_1, y_1 ——线路的单位长度阻抗和导纳, 且 $z_1 = r_1 + jx_1, y_1 = g_1 + jb_1$

当要求计算线路送端相电压和相电流(即 \dot{V}_{1P} 和 \dot{I}_{1P})时, 令 $x=l$ 即可, l 为线路的长度(km)。当线路不特别长时, 可对集中参数 Z_L 和 Y_L 作如下的修正⁽¹⁾

$$\begin{aligned} R'_L &= k_r r_1 l \\ X'_L &= k_x x_1 l \\ B'_L &= k_b b_1 l \end{aligned} \quad (1-5)$$

其中 k_r, k_x 和 k_b 分别为 R_L, X_L 和 B_L 的近似修正系数, 分别由下列公式计算

$$\begin{aligned} k_r &= 1 - \frac{1}{3} x_1 b_1 l^2 \\ k_x &= 1 - \frac{1}{6} x_1 b_1 (1 - r_1^2/x_1^2) l^2 \\ k_b &= 0.5(3 + k_r)/(1 + k_r) \approx 1 + \frac{1}{12} x_1 b_1 l^2 \end{aligned} \quad (1-6)$$

对线路的阻抗和导纳(Z_L 和 Y_L)的精确修正系数(复数)分别为

$$\begin{aligned} k_z &= \sinh \gamma l / (\gamma l) \\ k_y &= 2(\cosh \gamma l - 1) / (\gamma l \sinh \gamma l) \end{aligned} \quad (1-7)$$

注意: 式(1-6)和式(1-7)中的 $k_z \neq k_r + jk_x, k_y \neq k_g + jk_b$ 。

通常可按线性无源网络来计算输电线路。例如, 可写出如下形式的传输方程

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{1P} \\ \dot{I}_{1P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{2P} \\ \dot{I}_{2P} \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

式中 A, B, C 和 D 为网络方程的系数。当采用 π 型等值电路时, 上述系数分别为

$$\begin{aligned} A &= D = 1 + Z_L Y_L / 2 \\ B &= Z_L \\ C &= (1 + Z_L Y_L / 4) Y_L \end{aligned} \quad (1-9)$$

对于长线路(见式(1-4))

$$\begin{aligned} A &= D = \cosh \gamma l \\ B &= Z_c \sinh \gamma l \\ C &= \sinh \gamma l / Z_c \end{aligned} \quad (1-10)$$

二、变压器的等值电路和等值参数

1. 双绕组变压器(two-winding transformer)

双绕组变压器的等值电路可以近似地用图 1-3 所示的电路表示。

双绕组变压器等值参数按下列公式计算^{(1)、(2)}

$$R_T = \frac{P_s V_N^2}{1000 S_N^2} \quad (1-11 \cdot a)$$

$$X_T = \frac{V_s \% V_N^2}{100 S_N} \quad (1-11 \cdot b)$$

$$G_T = \frac{P_0}{1000 V_N^2} \quad (1-11 \cdot c)$$

$$B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 V_N^2} \quad (1-11 \cdot d)$$

$$\Delta P_0 = \frac{P_0}{1000} \quad (1-11 \cdot e)$$

$$\Delta Q_0 = \frac{I_0 \% S_N}{100} \quad (1-11 \cdot f)$$

式中 S_N ——变压器三相额定容量
MVA;

V_N ——变压器额定线电压
kV;

P_s ——变压器三相短路(或阻
抗)损耗 kW;

$V_s \%$ ——变压器短路(或阻
抗)电压百分值;

P_0 ——变压器三相开路(或空
载)损耗 kW;

$I_0 \%$ ——变压器开路(或空载)电流百分值;

R_T, X_T ——变压器高低压绕组的总电阻和总漏电抗 Ω ;

G_T, B_T ——变压器励磁电导和励磁电纳 S;

$\Delta P_0, \Delta Q_0$ ——变压器励磁支路功率(空载损耗) MW 和 MVar。

在使用上列公式时,必须注意各物理量的单位。 P_s 和 $V_s \%$ 、 P_0 和 $I_0 \%$ 均可从产品目录中(或设备铭牌上)查得。

当运行电压可以用变压器额定电压近似地代替时, n 台相同型号的变压器并联运行时的功率损耗为

$$\Delta P_T \approx \frac{1}{n} \frac{P_s}{1000} \left(\frac{S_D}{S_N} \right)^2 + \frac{n P_0}{1000} \quad (1-12 \cdot a)$$

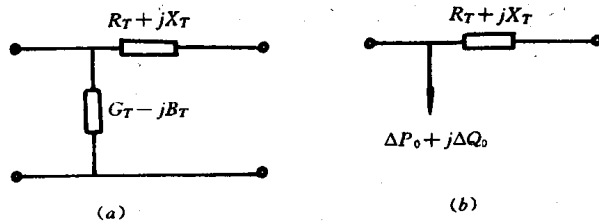


图 1-3 双绕组变压器等值电路

$$\Delta Q_T \approx \frac{1}{n} \frac{V_s \% S_N}{100} \left(\frac{S_D}{S_N} \right)^2 + n \frac{I_0 \% S_N}{100} \quad (1-12 \cdot b)$$

式中 ΔP_T —— n 台变压器并联运行时的总有功功率损耗 MW；
 ΔQ_T —— n 台变压器并联运行时的总无功功率损耗 MVar；
 S_D —— n 台变压器并联运行时的总负荷视在功率 MVA，且

$$S_D = \sqrt{P_D^2 + Q_D^2}$$

P_D, Q_D ——复功率 \check{S}_D 的有功分量和无功分量 MW 和 MVar。

2. 三绕组变压器 (three-winding transformer)

三绕组变压器的等值电路采用每一绕组用一个等值阻抗表示的星形电路，如图 1-4 所示。显然，三绕组变压器与双绕组变压器的等值参数计算不同的地方仅在于绕组的电阻和电抗。

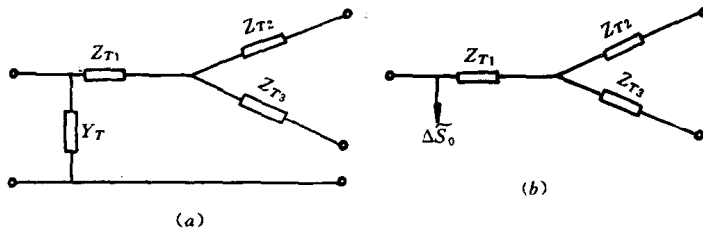


图 1-4 三绕组变压器等值电路

三绕组变压器等值电阻和等值电抗可按下列公式计算^{(1),(2)}

$$P_{s1} = \frac{1}{2} [P_{s(1-2)} + P_{s(3-1)} - P_{s(2-3)}]$$

$$P_{s2} = \frac{1}{2} [P_{s(2-3)} + P_{s(1-2)} - P_{s(3-1)}] \quad (1-13)$$

$$P_{s3} = \frac{1}{2} [P_{s(3-1)} + P_{s(2-3)} - P_{s(1-2)}]$$

$$R_{Ti} = \frac{P_{si} V_N^2}{1000 S_N^2} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1-14)$$

$$V_{s1} \% = \frac{1}{2} [V_{s(1-2)} \% + V_{s(3-1)} \% - V_{s(2-3)} \%]$$

$$V_{s2} \% = \frac{1}{2} [V_{s(2-3)} \% + V_{s(1-2)} \% - V_{s(3-1)} \%] \quad (1-15)$$

$$V_{s3} \% = \frac{1}{2} [V_{s(3-1)} \% + V_{s(2-3)} \% - V_{s(1-2)} \%]$$

$$X_{Ti} = \frac{V_{si} \% V_N^2}{100 S_N} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1-16)$$

式中 R_{T1}, R_{T2}, R_{T3} ——分别为变压器高、中、低压绕组电阻 Ω ；
 X_{T1}, X_{T2}, X_{T3} ——分别为变压器高、中、低压绕组电抗 Ω ；
 P_{s1}, P_{s2}, P_{s3} ——分别为变压器高、中、低压绕组等值短路损耗 kW；
 $P_{s(1-2)}, P_{s(2-3)}, P_{s(3-1)}$ ——分别为变压器高-中、中-低、高-低压绕组的三相短路损耗 kW；

$V_{s1}\%$ 、 $V_{s2}\%$ 、 $V_{s3}\%$ ——分别为变压器高、中、低压绕组等值短路电压百分数；

$V_{s(1-2)\%}$ 、 $V_{s(2-3)\%}$ 、 $V_{s(3-1)\%}$ ——分别为变压器高-中、中-低、高-低压绕组的短路电压百分数；

S_N ——三绕组变压器三相额定容量 MVA；

V_N ——三绕组变压器额定线电压 kV。

必须注意：当三绕组变压器的第二或第三绕组的额定容量不等于 S_N 时，给定的高-中和中-低压绕组的短路损耗 $P'_{s(1-2)}$ 和 $P'_{s(2-3)}$ 或高-低和中-低压绕组的短路损耗 $P'_{s(3-1)}$ 和 $P'_{s(2-3)}$ 就必须归算到以 S_N 为基准的值，即当 $S_{N2} \neq S_N$ 时

$$P_{s(1-2)} = \alpha_2^2 P'_{s(1-2)} \quad P_{s(2-3)} = \alpha_2^2 P'_{s(2-3)} \quad (1-17 \cdot a)$$

$$\alpha_2 = S_N / S_{N2} \quad (1-17 \cdot b)$$

当 $S_{N3} \neq S_N$ 时

$$P_{s(3-1)} = \alpha_3^2 P'_{s(3-1)} \quad P_{s(2-3)} = \alpha_3^2 P'_{s(2-3)} \quad (1-18 \cdot a)$$

$$\alpha_3 = S_N / S_{N3} \quad (1-18 \cdot b)$$

一般，短路电压百分数不用归算，若需要归算，这时只乘 α_2 或 α_3 即可。

有时给定的是最大短路损耗 P_{smax} ，这时根据电阻与容量成反比的基本关系可导出相应的电阻计算公式⁽¹⁾，即 $R_{T[100]} = \frac{1}{2} \frac{P_{smax} V_N^2}{1000 S_N^2}$ ， $R_{T[50]} = 2R_{T[100]}$ ，分别是容量为 S_N 的 100% 和 50% 绕组的电阻计算式。

3. 自耦变压器 (autotransformer)

自耦变压器的等值电路和等值参数的计算与普通变压器相同。只是带第三绕组的自耦变压器的短路电压百分数也常需归算，且仅有 $V'_{s(3-1)\%}$ 和 $V'_{s(2-3)\%}$ 需要归算：

$$V_{s(3-1)\%} = \alpha_3 V'_{s(3-1)\%} \quad V_{s(2-3)\%} = \alpha_3 V'_{s(2-3)\%} \quad (1-19)$$

无论是三绕组变压器还是自耦变压器，其励磁导纳或励磁功率均与双绕组变压器相同。

三绕组变压器或带第三绕组的自耦变压器的功率损耗近似为

$$\Delta P_T \approx \left[P_{s1} \left(\frac{S_{D1}}{S_N} \right)^2 + P_{s2} \left(\frac{S_{D2}}{S_N} \right)^2 + P_{s3} \left(\frac{S_{D3}}{S_N} \right)^2 + P_0 \right] \times 10^{-3} \quad (1-20 \cdot a)$$

$$\Delta Q_T \approx \left[V_{s1}\% \left(\frac{S_{D1}}{S_N} \right)^2 + V_{s2}\% \left(\frac{S_{D2}}{S_N} \right)^2 + V_{s3}\% \left(\frac{S_{D3}}{S_N} \right)^2 + I_0\% \right] S_N \times 10^{-2} \quad (1-20 \cdot b)$$

式中 S_{D1} 、 S_{D2} 和 S_{D3} 分别为三个绕组的负荷功率值 (MVA)。

三、电力网络的等值电路和等值参数

将电力网中各元件的等值电路按照它们的电气连接关系互连起来，便构成了电力网络的等值电路。但这时有一个电压级的归算问题，因为一个元件在不同电压级中所呈现的电气参数值是不同的，所以不同电压级的等值电路不能直接连接起来进行分析计算，必须经过归算。

归算的原则是：归算前后保持各点的功率和各支路中的功率损耗不变。故可按下列公式归

算:

$$\begin{aligned}R &= R' (k_1 k_2 \cdots k_n)^2 \\X &= X' (k_1 k_2 \cdots k_n)^2 \\G &= G' (k_1 k_2 \cdots k_n)^{-2} \\B &= B' (k_1 k_2 \cdots k_n)^{-2} \\V &= V' (k_1 k_2 \cdots k_n) \\I &= I' (k_1 k_2 \cdots k_n)^{-1}\end{aligned}\tag{1-21}$$

式中 R', X', G', B', V', I' —— 归算前的值;

R, X, G, B, V, I —— 归算后的值;

k_1, k_2, \dots, k_n —— 基本级与待归算级之间所有变压器的变比;

n —— 待归算级与基本级间的变压级数。

定义: 变比 = (变压器向着基本级侧的额定电压) / (变压器向着待归算级侧的额定电压)。

在计算网络特性时, 可以用恒功率、恒阻抗(或恒导纳)、电压静态特性($P = f_p(V)$ 和 $Q = f_q(V)$)来表示变电所负荷, 这取决于分析计算的要求。为了计算的简化, 往往将变电所低压侧的负荷功率、为改善功率因数而设置的无功电源功率、变压器的功率损耗以及与高压母线连接的输电线的充电功率的一半合并, 作为变压所的额定负荷, 称之为变电所的运算(计算)负荷。

必须特别指出: 上述各元件的等值参数和等值电路以及电力网络的等值参数和等值电路都是一相电路。即是说, 电力系统稳态计算是在一相参数和一相等值电路基础上进行三相电路的计算。

四、问题与讨论

问题 1-1 一条由截面积为 10mm^2 的铜芯电缆敷设的、长 4km 的 6kV 线路。求其单位长度的参数, 并计算该线路等值电路的参数。

解 查设计手册得到给定截面的电缆参数为 $r_1 = 2.1\Omega/\text{km}$, $x_1 = 0.1\Omega/\text{km}$, $b_1 = 60 \times 10^{-6}\text{S}/\text{km}$ 。由此, 可得等值电路(全线路)参数

$$\begin{aligned}R_L &= r_1 l = 2.1 \times 4 = 8.4 \quad \Omega \\X_L &= x_1 l = 0.1 \times 4 = 0.4 \quad \Omega \\B_L &= b_1 l = 60 \times 10^{-6} \times 4 = 240 \times 10^{-6} \text{S}\end{aligned}$$

为估计在等值电路中计入电容电纳的影响, 计算这一线路的充电功率

$$\begin{aligned}Q_c &\approx B_L V_N^2 = 240 \times 10^{-6} \times 6^2 = 8640 \times 10^{-6} \text{MVar} \\&= 8.64 \text{kVar}\end{aligned}$$

查“设计手册”得该电缆的载流容量为 55A , 与此电流对应的视在功率

$$S_{\max} \approx \sqrt{3} V_N I_{\max} = \sqrt{3} \times 6 \times 55 = 571.58 \text{kVA}$$

从而

$$\frac{Q_c}{S_{\max}} = \frac{8.64}{571.58} \times 100\% \approx 1.512\%$$

显然,其充电功率对传输功率的影响是不明显的。因此,在线路短和电压低的情况下,计算时充电功率或电容电纳可以忽略。

对于电抗,由于

$$\frac{X_L}{R_L} = \frac{0.4}{8.4} \times 100\% = 4.76\%$$

所以,等值电路中的电抗也可忽略不计。由上述分析说明:该电缆线路可表示为仅具有电阻 $R_L = 8.4\Omega$ 的等值电路。

问题 1-2 有一条 6kV 架空输电线,长 4km,由 LJ-25 导线,相间按 1.5m 的等间隔架设在单杆上,如图 1-5 所示。求该线路每千米的参数,并计算等值电路的参数。

解 查设计手册得导线的计算直径 $d = 6.3\text{mm}$,按式(1-1)计算,得每千米电阻

$$r_1 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.5}{25} = 1.26 \Omega/\text{km}$$

每千米电抗

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_{GMD}}{0.5d} + 0.0157 = 0.1445 \lg \frac{1500}{0.5 \times 6.3} + 0.0157$$

$$= 0.402 \Omega/\text{km}$$

每千米电纳

$$b_1 = 7.58 \times 10^{-6} / \lg \frac{D_{GMD}}{0.5d} = 7.58 \times 10^{-6} / \lg \frac{1500}{0.5 \times 6.3}$$

$$= 2.83 \times 10^{-5} \text{ S}/\text{km}$$

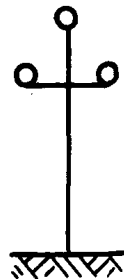


图 1-5 单杆架设的 6kV 线路

此架空线路的电纳值比相同额定电压的电缆线路的电纳小得多,只有 $2.83 \times 10^{-5} / 60 \times 10^{-6} = 1/21.2$ (见问题 1-1),所以计算时可以忽略,相应的充电功率的影响也略而不计。

由于 $\frac{x_1}{r_1} = \frac{0.402}{1.26} \times 100\% = 31.9\%$,因此,在等值电

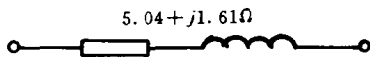


图 1-6 6kV 输电线等值电路

路中必须计入电抗,如图 1-6 所示。其中

$$R_L = r_1 l = 1.26 \times 4 = 5.04 \Omega$$

$$X_L = x_1 l = 0.402 \times 4 = 1.61 \Omega$$

问题 1-3 有一条由 LGJ-150 导线按水平排列架设的 110kV 架空输电线路,相间距离 4m,如图 1-7 所示。求单回线每千米参数;并计算长度为 100km 的两回并列运行时等值电路参数。

解 线间几何平均距离(按式(1-2)计算)

$$D_{GMD} = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot (2D)} \approx 1.26D = 5.04 \text{ m}$$

查设计手册得每千米参数如下

$$r_1 = 0.21 \Omega/\text{km}$$

$$x_1 = 0.416 \Omega/\text{km}$$

$$b_1 = 2.74 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$$

对于 100km 的双回输电线路,其等值参数:

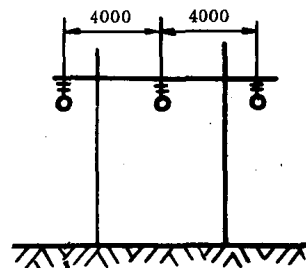


图 1-7 问题 1-3 图

$$R_L = \frac{1}{2} r_1 l = \frac{1}{2} \times 0.21 \times 100 = 10.5 \Omega$$

$$X_L = \frac{1}{2} x_1 l = \frac{1}{2} \times 0.416 \times 100 = 20.8 \Omega$$

$$B_L = 2b_1 l = 2 \times 2.74 \times 10^{-6} \times 100 = 5.48 \times 10^{-4} \text{ S}$$

该线路的充电功率

$$Q_c \approx B_L V_N^2 = 5.48 \times 10^{-4} \times 110^2 = 6.631 \text{ MVar}$$

这样大的充电功率在计算线路特性时必须加以考虑。因为 110kV 的输电能力约为 10~50MW (一回线路), 这就是为什么所讨论的线路的等值电路必须包含电阻、电抗和电纳的原因 (见图 1-8)。

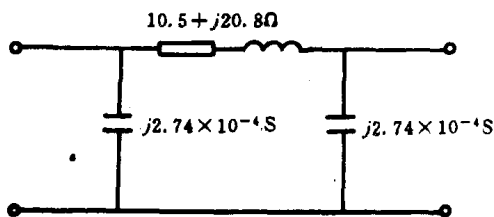


图 1-8 双回 110kV 线路等值电路

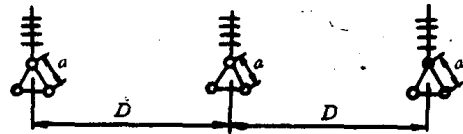


图 1-9 水平排列的三分裂输电线路

问题 1-4 有一条由 LGJQ-3×500 导线 (三分裂导线) 架设的 500kV 输电线路, 在铁塔上按水平方式排列, 水平间距 $D=12\text{m}$, 每相分裂间距 $a=400\text{mm}$, 见图 1-9, 求该线路每千米参数。

解 查设计手册得到 LGJQ-500 导线的计算直径 $d=30.2\text{mm}$, 输电线每相分裂数 $n=3$, 按式 (1-3) 有分裂导线的等值直径

$$d_{eq} = \sqrt[3]{2^{n-1} d \prod_{i=2}^n a_{i1}} = \sqrt[3]{2^2 \times 30.2 \times 400^2} = 268.4 \text{ mm}$$

$a_{12}=a_{13}=400\text{mm}$ 。且相间几何均距

$$D_{GMD} = 1.26D = 1.26 \times 12000 = 15120 \text{ mm}$$

所以, 该分裂导线的每千米参数为

$$r_1 = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho}{S} = \frac{1}{3} \frac{31.5}{500} = 0.021 \Omega/\text{km}$$

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_{GMD}}{0.5 d_{eq}} + \frac{1}{n} 0.0157$$

$$= 0.1445 \lg \frac{15120}{0.5 \times 268.4} + \frac{1}{3} \times 0.0157 = 0.302 \Omega/\text{km}$$

$$b_1 = 7.58 \times 10^{-6} / \lg \frac{D_{GMD}}{0.5 d_{eq}} = 7.58 \times 10^{-6} / \lg \frac{15120}{0.5 \times 268.4}$$

$$= 3.68 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

与 6kV 和 110kV 输电线路 (见问题 1-2 和问题 1-3) 不同的是, 500kV 输电线的电抗远远大于电阻, 在必要的时候可以忽略电阻不计。下列比值能说明这一点

$$\frac{x_1}{r_1} = \frac{0.302}{0.021} = 14.38 \gg 1$$

问题 1-5 建立一条电压为 500kV、长 500km 的输电线路的等值电路；并计算其单回线路的参数。该等值电路必须能计算线路始端、末端和中点的运行特性。这条输电线的每千米参数同问题 1-4。

解 将线路从中点分为两段，每一段均用一集中参数的 π 型等值电路表示，这样全线的等值电路就为两个串联的等值电路组成，见图 1-10。每一段的参数均相同，且

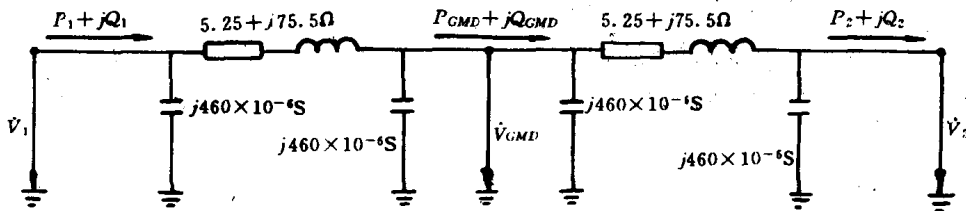


图 1-10 500kV 输电线路等值电路

$$R_{L1} = R_{L2} = r_1 \frac{l}{2} = 0.021 \times \frac{500}{2} = 5.25 \Omega$$

$$X_{L1} = X_{L2} = x_1 \frac{l}{2} = 0.302 \times \frac{500}{2} = 75.5 \Omega$$

$$B_{L1}/2 = B_{L2}/2 = \frac{1}{2} b_1 \frac{l}{2} = \frac{1}{2} \times 3.68 \times 10^{-6} \times \frac{500}{2} = 460 \times 10^{-6} \text{ S}$$

对于本问题是否要考虑参数的分布特性呢？我们把这一问题留给读者做练习时去解答。另外，这样一个串联的集中参数电路很粗略地计入了参数分布特性。

问题 1-6 同问题 1-4。试用修正系数(近似和精确的)求它的 π 型等值电路参数和传输方程的系数。线路长 500km。

解 当线路长度超过 200~300km 时，应计及其参数的分布特性。在本问题中近似修正系数(见式(1-6))

$$k_r = 1 - \frac{l^2}{3} x_1 b_1 = 1 - \frac{500^2}{3} \times 0.302 \times 3.68 \times 10^{-6} = 0.907$$

$$k_x = 1 - \frac{l^2}{6} x_1 b_1 \left(1 - \frac{r_1^2}{x_1^2} \right)$$

$$= 1 - \frac{500^2}{6} \times 0.302 \times 3.68 \times 10^{-6} \times \left(1 - \frac{0.021^2}{0.302^2} \right) = 0.954$$

$$k_b = \frac{1}{2} \frac{3 + k_r}{1 + k_r} = \frac{1}{2} \frac{3 + 0.907}{1 + 0.907} = 1.02$$

所以，等值电路参数为

$$R_L = k_r r_1 l = 0.907 \times 0.021 \times 500 = 9.52 \Omega$$

$$X_L = k_x x_1 l = 0.94 \times 50.302 \times 500 = 144 \Omega$$

$$B_L = k_b b_1 l = 1.02 \times 3.68 \times 10^{-6} \times 500 = 1.88 \times 10^{-3} \text{ S}$$

相应的传输方程的系数为(见式(1-9))

$$A = D = 1 + \frac{1}{2} Z_L Y_L = 1 + \frac{1}{2} (9.52 + j144)(j1.88 \times 10^{-3}) = 0.865 \angle 0.59^\circ$$

$$B = Z_L = 9.52 + j144 = 144 \angle 86.2^\circ \Omega$$

$$\begin{aligned}
 C &= \left(1 + \frac{1}{4} Z_L Y_L\right) Y_L \\
 &= \left[1 + \frac{1}{4} (9.52 + j144)(j1.88 \times 10^{-3})\right] \times (j1.88 \times 10^{-3}) \\
 &= 1.75 \times 10^{-3} \angle 90.3^\circ \text{ S}
 \end{aligned}$$

精确修正系数为(见式(1-7))

$$k_z = \sinh \gamma l / (\gamma l) \quad k_y = 2(\cosh \gamma l - 1) / (\gamma l \sinh \gamma l)$$

其中

$$\begin{aligned}
 \gamma l &= \sqrt{z_1 y_1} l = \sqrt{(0.021 + j0.302)(j3.68 \times 10^{-6})} \times 500 \\
 &= 0.0183 + j0.527 = 0.527 \angle 88.0^\circ \quad (= \beta + ja)
 \end{aligned}$$

$$\sinh \gamma l = \sinh \beta \cos a + j \cosh \beta \sin a$$

$$\cosh \gamma l = \cosh \beta \cos a + j \sinh \beta \sin a$$

而
$$\sinh \beta = \frac{e^\beta - e^{-\beta}}{2} = \frac{e^{0.0183} - e^{-0.0183}}{2} = \frac{1}{2}(1.018 - 0.982) = 0.018$$

$$\cosh \beta = \frac{e^\beta + e^{-\beta}}{2} = \frac{1}{2}(1.018 + 0.982) = 1.0$$

$$\sinh \gamma l = 0.018 \cos 0.527(\text{rad}) + j1.0 \sin 0.527(\text{rad})$$

$$= 0.0156 + j0.503 = 0.503 \angle 88.2^\circ$$

$$\cosh \gamma l = 1.0 \cos 0.527(\text{rad}) + j0.018 \sin 0.527(\text{rad})$$

$$= 0.864 + j9.05 \times 10^{-3} = 0.864 \angle 0.6^\circ$$

因此

$$k_z = 0.503 \angle 88.2^\circ / 0.527 \angle 88.0^\circ = 0.954 \angle 0.2^\circ$$

$$\begin{aligned}
 k_y &= 2 \times (0.864 + j9.05 \times 10^{-3} - 1) / (0.527 \angle 88.0^\circ \times 0.503 \angle 88.2^\circ) \\
 &= 1.08 \angle 0^\circ
 \end{aligned}$$

这时等值电路参数为

$$Z_L = k_z z_1 l = 0.954 \angle 0.2^\circ (0.021 + j0.302) \times 500 = 9.51 + j144 \Omega$$

$$jB_L = k_y (j b_1) l = 1.08 \times (j3.68 \times 10^{-6}) \times 500 = j1.99 \times 10^{-3} \text{ S}$$

如果将近似修正的参数与这一结果相比较,就会发现它们是十分接近的。因此当线路不太长时,用近似修正系数修正参数是足够的了,而且计算量小得多。

这条输电线的特性阻抗为

$$Z_c = \sqrt{\frac{z_1}{y_1}} = \sqrt{\frac{0.021 + j0.302}{j3.68 \times 10^{-6}}} = 287 \angle -1.99^\circ \Omega$$

所以传输方程系数为(见式(1-10))

$$A = D = \cosh \gamma l = 0.864 \angle 0.6^\circ$$

$$B = Z_c \sinh \gamma l = 287 \angle -1.99^\circ \times 0.503 \angle 88.2^\circ = 144 \angle 86.2^\circ \Omega$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l = \frac{0.503 \angle 88.2^\circ}{287 \angle -1.99^\circ} = 1.75 \times 10^{-3} \angle 90.2^\circ \text{ S}$$

问题 1-7 在某变电站中装有两台降压变压器,它们的额定容量均为 10MVA,额定变比均为 110/11kV。已知: $P_0 = 18\text{kW}$, $P_s = 60\text{kW}$, $V_s\% = 10.5$, $I_0\% = 0.9$ 。求两台变压器并联运行时的等值参数,并计算负荷 $\tilde{S}_L = 12 + j7.2\text{MVA}$ 时的功率损耗。图 1-11 为两台变压器并联示