

电网内部过电压原理和抑制

——陈维贤文集

湖北科学技术出版社

《电网内部过电压原理和抑制——陈维贤文集》 编辑委员会

主 任 邬 雄

副 主 任 李澍森 陈柏超

委 员 倪学锋 易贤杰 王冬梅 李健生

鲁铁成 周文俊 文习山 张元芳

郑盛琼 田翠华 王定华 傅知兰

陈鹏云 平绍勋 赵 刚 陈 禾

内 容 提 要

长时期来,作者对电网内部过电压的原理、抑制和相关内容进行了广泛研究,其中包括长线方程的数值变换、工频和铁磁谐振、暂态和传递过电压、潜供电流及其抑制、并联电抗器的功能和调节等等,并以专著、高校教材和论文的形式陆续公布。本书针对上述内容进行了选择和缩编,作为单独文集出版,以供相关专业的科技工作人员和高校师生的阅读参考。

序



陈维贤教授,博士生导师,我国著名的高电压技术专家,1929年9月24日出生于上海市崇明县,一生致力于电力工程学科的高教事业和科研工作。他毕业于东北工学院(现东北大学)和苏联列宁格勒工学院(现俄罗斯圣彼得堡工程大学)研究生院,先后任职于哈尔滨工业大学、北京电力学院(现华北电力大学)、武汉水利电力学院(后更名武汉水利电力大学)和武汉大学。在1981~1982两年中,作为高级访问学者,在法国电力公司(EDF)研究院和里昂中央大学(ECL)从事研究工作和完成两项研究报告。先后兼任国家教委科技委电工学科组成员,校学术委员会主任,校学报编委会副主任和副主编,第五届湖北省人大代表,英国剑桥国际传记中心(IBC)副主席,美国传记研究院(ABI)顾问等职。陈教授的部分事迹收录于1997年的《湖北科技精英》一书中,传略载英国剑桥版、香港版和其他诸多《世界名人录》。陈教授系国务院政府特殊津贴获得者,1988年获中国电机工程学会“电机工程优秀科技工作者”称号,1989年被授予“全国优秀教师”称号。

在46年的教研究生涯中,除为本科专业学生授课外,陈教授培养了硕士、博士和博士后研究生30多名,今天他们大多数已成为有贡献的高电压专家。他先后举办和参与各类研训班20多次,足迹遍及全国。他的研究团队完成自然科学基金、博士点基金和部级科研基金等研究课题约20项,四次获电力部科技进步奖,并获国家发明专利和实用新型专利6项。

陈教授撰写和出版了多部高电压工程的专著和高校教材。

1965年中国工业出版社出版《电力系统的内部过电压》一书,这是我国第一部关于内部过电压的专著。

1981年水利电力出版社出版《内部过电压基础》专著,1986年重印。

1993年水利电力出版社出版《超高压电网稳态计算》专著。

1996年中国电力出版社出版了其主编的《电网过电压教程》一书,系全国第二轮的高校专业教材,1999年重印。

独译和合译出版了俄语科技书籍4部。

1995年任《中国电力百科全书》输配电卷编委和分支副主编,撰写了相关条文。

陈教授先后在学术刊物上公布论文百篇。

1999年,在陈教授70华诞之际,同行和学生们汇集了他的主要论文和研究成果,编辑了《电网内部过电压和可控感性补偿——陈维贤论文集》一书,2000年湖北科学技术出版社出版。

陈教授在1998年退休后并未中止研究工作,他指导自动调整消弧线圈和高漏抗电抗器的设计制作和试验运行,研究新的过电压课题,撰写和公布了20多篇学术论文,从而扩展了上述《论文集》所涵盖的文章的深度和广度。

陈教授的诸多研究成果在颇大程度上具有独创性质,概念清晰和具有实用意义。长线方程的宏观处理(入口阻抗、传递系数等的引入),二次相模变换的提出与论证,大大简化了长线路繁琐的不对称运算历程和显示了清晰的物理概念。研究了空线合闸、空变分闸和特殊限制措施、自励磁、配网和高压电网中各种不同形态的铁磁谐振的产生机理和抑制新方法、配网线路的零序电流分布和绕组间的电压传递、配网单相灭弧和自动切线新方法、计算超、特高压线路中潜供电流和高速接地开关电流的电桥电路、消弧线圈和并联电抗器中性点小电抗的缺陷及其改进方法,等等。

鉴于《电网内部过电压和可控感性补偿——陈维贤论文集》一书目前已无余册,我们在整理、遴选前书著作的基础上,特别融入了若干新的文章和研究成果,编辑一本主要关于电网内部过电压的新的《电网内部过电压原理和抑制——陈维贤文集》。我们预期,这一新书的出版,将会有利于广大有关工程技术人员和高校专业师生的阅读参考和实际应用。

《电网内部过电压原理和抑制——陈维贤文集》编辑委员会

2012年5月于武昌

目 录

1. 长线运算入口阻抗、传递系数和参数的等效归算	(1)
2. 长线路中的工频过电压和工频谐振	(10)
3. 超高压长线路分相开断后的工频谐振	(36)
4. 长线路电感模拟	(48)
5. 空载线路合闸过电压	(53)
6. 操作过电压的限制问题	(70)
7. 采用内过电压避雷器时的沿线电压分布	(74)
8. Влияние шунтирующего реактора на выбор величины сопротивления защитного разрядника	(87)
9. 空载变压器分闸过电压	(95)
10. 用特殊稳压电路大幅度限制切空变过电压	(103)
11. 大幅度抑制双铁芯电炉变压器的分闸过电压	(108)
12. 铁磁谐振原理	(113)
13. 基波谐振过电压	(121)
14. 分频谐振过电压	(135)
15. 电网中的异常铁谐振	(150)
16. 配网互感器谐振及抑制	(156)
17. 配网互感器的铁磁谐振及抑制新方法	(160)
18. 配网断线谐振及抑制	(164)
19. 串补线路中的铁磁谐振	(170)
20. 工频传递过电压	(173)
21. 同步电机自励磁过电压	(179)
22. 110、220kV 变电所中的互感器谐振和稳压消谐	(190)
23. 抑制 110、220kV 互感器谐振的新型装置	(196)
24. 110、220kV 变电所中互感器引起的铁磁谐振及吸能消谐	(201)
25. 配网中性点位移现象	(206)
26. 配网中性点电位的作图分析	(210)
27. 利用可控振荡法测量配网电容电流	(213)
28. 利用高速响应可控消弧线圈测量配网电容电流	(220)
29. 配电线路的零序电流和故障选线	(224)
30. 配网互感器消谐、单相灭弧和故障切线新方法	(229)
31. 高速响应新型可控电抗器	(235)
32. 多并联支路型可控电抗器的支撑导通法	(241)
33. 一次和二次相模变换	(244)
34. 长线路不对称开断后的感应电压	(257)
35. 潜供电流	(284)
36. DOUBLE COMPENSATION	(292)

37. 并联电抗器的功能和选择	(303)
38. 可控并联电抗器的功能和调节	(313)
39. 并联电抗器的可控调节	(318)
40. 并联电抗器中性点小电抗的选择	(323)
41. 并联电抗器中性点和小电抗的绝缘水平	(327)
42. 潜供电流的电路分析和计算	(333)
43. 高速接地开关抑制潜供电流的研究	(341)
44. 相间并联电抗器在超、特高压输电线路中的应用和谐振抑制	(345)

1. 长线运算入口阻抗、传递系数和参数等效归算

1 入口阻抗和传递系数*

在具有分布参数的长线路中,运算入口阻抗和传递系数可按如下长线方程求解:

$$u(p, \eta) = A \operatorname{ch} \gamma \eta + B \operatorname{sh} \gamma \eta, i(p, \eta) = \frac{P}{\gamma Z} (A \operatorname{sh} \gamma \eta + B \operatorname{ch} \gamma \eta) \quad (1-1)$$

式中, $\gamma = \sqrt{P^2 + 2aP}$;

$p = \frac{d}{d\tau}$ ——拉氏算子; $\tau = \omega t$ ——同步时间; 在计算工频稳态时, p 代以 j ;

$a = \frac{R_1}{2X_1} = \frac{1}{2Q}$; $Q = \frac{X_1}{R_1}$ ——导线品质因数;

$R_1, X_1 = \omega L_1, X_{c1} = \frac{1}{\omega C_1}$ ——每千米长导线的损耗电阻、工频感抗和容抗;

$\eta = \frac{\omega x}{v}$;

x ——从导线终端算起的某一点的距离坐标;

$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ ——电磁波的传播速度;

$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ ——导线波阻;

A, B ——决定于边界条件的常数(是 P 的函数)。

上述符号均代表正序值,在作零序计算时,式中的 γ, η 和 Z 应分别代以 $\gamma_0 = \sqrt{P^2 + 2a_0 P}$ 、 $\eta_0 = \frac{\omega x}{v_0}$ 和零序波阻 Z_0 , 这里 v_0 为电磁波的零序传波速度, $a_0 = \frac{R_0}{2X_0}$, R_0 和 X_0 为单位长度导线的零序损耗电阻和工频零序感抗。

假定长线终端接有阻抗 Z_H , 该点边界条件应为 $u(p, 0) = i(p, 0)Z_H(p)$, 由式(1-1)得 $A = \frac{Bp}{\gamma} \cdot \frac{Z_H(p)}{Z}$, 可以写成

$$u(p, \eta) = B \left[\frac{p}{\gamma} \cdot \frac{Z_H(p)}{Z} \operatorname{ch} \gamma \eta + \operatorname{sh} \gamma \eta \right], i(p, \eta) = \frac{Bp}{\gamma Z} \left[\frac{p}{\gamma} \cdot \frac{Z_H(p)}{Z} \operatorname{sh} \gamma \eta + \operatorname{ch} \gamma \eta \right]$$

因此,从线路首端看出去的正序运算入口阻抗等于

$$Z(p) = \frac{u(p, \gamma)}{i(p, \gamma)} = Z \cdot \frac{\gamma \operatorname{sh} \gamma \lambda + \frac{p}{\gamma} \frac{Z_H(p)}{Z} \operatorname{ch} \gamma \lambda}{p \operatorname{ch} \gamma \lambda + \frac{p}{\gamma} \frac{Z_H(p)}{Z} \operatorname{sh} \gamma \lambda} \quad (1-2)$$

* 修改节录《电力系统的内部过电压》一书,中国工业出版社,1965年。

式中, $\lambda = \frac{\omega l}{v}$ ——导线的电波长(以弧度计), 即电磁波在距离 l 千米内所需走的同步时间。如将 λ 用度数表示, 则有

$$\lambda = \frac{\omega l}{v} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{100\pi l 180^\circ}{3 \times 10^5 \pi} = 0.06^\circ l \quad (1-3)$$

同样, 离终端距离 x_1 点和 x_2 点的电压的比值(对应于 $\lambda_1 = \frac{\omega x_1}{v}$, $\lambda_2 = \frac{\omega x_2}{v}$), 即 x_1 点对 x_2 点的正序运算电压的传递系数 ε 为

$$\varepsilon(p) = \frac{u(p, \lambda_1)}{u(p, \lambda_2)} = \frac{\text{sh}\gamma\lambda_1 + \frac{p}{\gamma} \frac{Z_H(p)}{Z} \text{ch}\gamma\lambda_1}{\text{sh}\gamma\lambda_2 + \frac{p}{\gamma} \frac{Z_H(p)}{Z} \text{ch}\gamma\lambda_2} \quad (1-4)$$

在工频稳态情况下, 假定线路无损, 则 $\gamma = p = j$, $Z_H = jX_H$, 故

$$Z_1 = jZ \frac{\sin\lambda + \frac{X_H}{Z} \cos\lambda}{\cos\lambda - \frac{X_H}{Z} \sin\lambda} = jZ \text{tg}(\lambda + \varphi) \quad (1-5)$$

$$\varepsilon = \frac{\sin(\lambda_1 + \varphi)}{\sin(\lambda_2 + \varphi)} \quad (1-6)$$

式中, $\text{tg}\varphi = \frac{X_H}{Z}$ 。

2 线路两侧变压器具有不同变比时的等效归算阻抗*

图 1-1(a) 所示为某一较低电压等级(以 220kV 为例)的长线, 其两侧变压器的变比通常是不相等的, 即 $K_{12} = N_1/N_2 \neq K'_{12} = N'_1/N'_2$, 这使该长线的参数不能直接按照变比关系归算到超高压侧(以 500kV 为例), 因而等效电源的计算趋于复杂, 现在讨论归算方法。

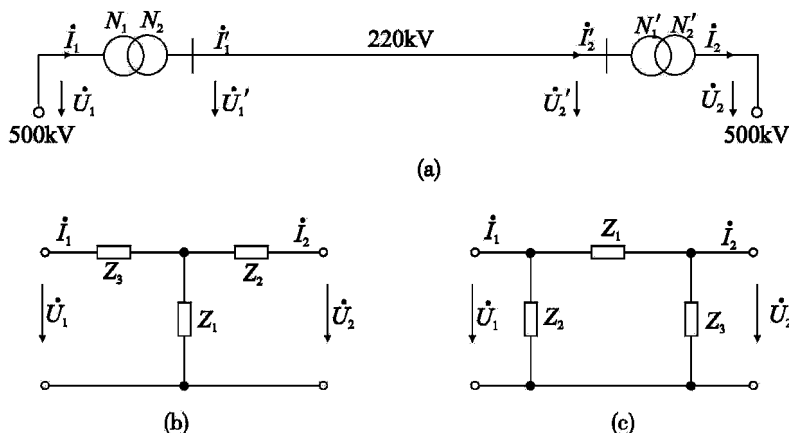


图 1-1 220kV 线路及其归算到 500kV 侧后的等效电路

(a) 220kV 线路 (b) 归算到 500kV 侧后的 T 形等效电路 (c) 归算到 500kV 侧后的 II 形等效电路

* 修改摘录《超高压电网稳态计量》一书, 水利电力出版社, 1993 年。

220kV 线路的端部方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1' \\ \dot{I}_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & A' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2' \\ \dot{I}_2' \end{bmatrix}$$

考虑到变比关系,可以写出

$$\begin{aligned} \dot{U}_1' &= \frac{\dot{U}_1'}{K_{12}}, I_1' = K_{12} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2' &= \frac{\dot{U}_2'}{K_{12}}, I_2' = K_{12} \dot{I}_2 \end{aligned}$$

故有

$$\begin{bmatrix} \frac{\dot{U}_1'}{K_{12}} \\ K_{12} \dot{I}_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & A' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\dot{U}_2'}{K_{12}} \\ K_{12} \dot{I}_2' \end{bmatrix}$$

将上式展开整理后,端部方程可重新写成下列形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A' K_{12}}{K_{12}} & B' K_{12} K_{12}' \\ \frac{K_{12} K_{12}'}{K_{12}} & \frac{A' K_{12}'}{K_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

这里有 $(A')^2 - B'C' = 1, AD - BC = 1$ 。

对于图 1-1(b) 所示的 T 形等效电路,端部方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_2}{Z_1} & Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_1} \\ \frac{1}{Z_1} & 1 + \frac{Z_3}{Z_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

比较式(1-7)和式(1-8)得

$$Z_1 = \frac{K_{12} K_{12}'}{C'} \quad (1-9)$$

$$Z_2 = Z_1 \left(\frac{A' K_{12}}{K_{12}'} - 1 \right) \quad (1-10)$$

$$Z_3 = Z_1 \left(\frac{A' K_{12}'}{K_{12}} - 1 \right) \quad (1-11)$$

根据这些关系式,220kV 线路就可转化为 500kV 侧的 T 形等效电路。

附带指出,如将 T 形等效电路改换为图 1-1(c) 中 500kV 侧的 II 形等效电路,则有

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_3} & Z_1 \\ \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_2 + Z_3} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$Z_1 = B' K_{12} K_{12}' \quad (1-12)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1}{\frac{A'K_{12}}{K_{12}} - 1} \quad (1-13)$$

$$Z_3 = \frac{Z_1}{\frac{A'K_{12}}{K_{12}} - 1} \quad (1-14)$$

根据以上公式,可分别计算零序和正序的归算阻抗。

3 工频等效电源

图 1-2 为 l 千米长的被操作线路,其两端连至复杂的电网。根据叠加原理,将图中首、末端的三相断路器 DL_1 和 DL_2 打开, P 、 Q 两点的母线电压就是所求的等效电源的电动势 $\dot{E}'$ 有 $\dot{E}''$,而从母线往外看去的入口阻抗就是等值电源的内阻抗,它可用图 1-2(b) 所示的最简单的 T 形等效电路来表示,亦可用图 1-2(c) 所示的 Π 形等效电路来表示。显然,当线路首、末两端的电网互不相连,而各自接至独立的地区电网时,则有 $Z_m = 0, Z'_m \rightarrow \infty$,同时 $Z_P = Z'_P, Z_Q = Z'_Q$,它们分别为从首、末端向外看出去的入口阻抗。

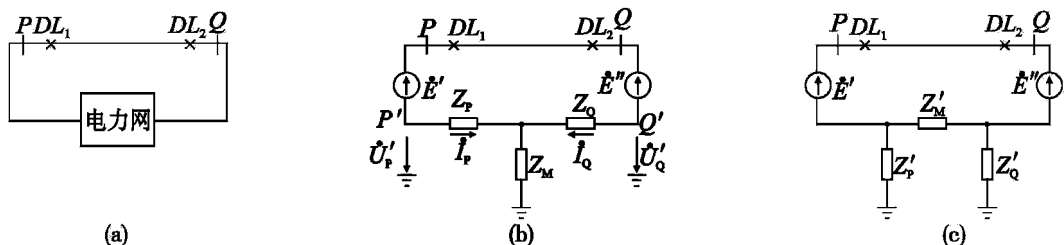


图 1-2 导线两端的电网及其等效电路

(a) 长线与电力网连接示意图 (b) 用 T 形等效电路表示 (c) 用 Π 形等效电路表示

下面采用 T 形等效电路,讨论首、末端电网的参数。

为了求解等效电源的内阻抗,打开 DL_1 和 DL_2 ,令图 1-2(b) 中的 P' 点的注入电流 $\dot{I}_P = 1A$, Q' 点的注入电流 $\dot{I}_Q = 0$,并设此时 Q' 点电压为 $\dot{U}_{Q1}$,显然有

$$Z_M = \dot{U}_{Q1} \quad (1-15)$$

再令 $\dot{I}_P = -\dot{I}_Q = 1A$,此时 P' 、 Q' 点的电压为 $\dot{U}_{P2}$ 和 $\dot{U}_{Q2}$,则

$$Z_P = \dot{U}_{P2} \quad (1-16)$$

$$Z_Q = -\dot{U}_{Q2} \quad (1-17)$$

仍看图 1-2(a) 所示的电网。打开 DL_1 和 DL_2 ,将较低电压等级的电网全部归算到超高压侧,假定共有 N 个节点,第 $N-1$ 个节点为 P 点,第 N 个节点为 Q 点,即

$$\dot{U}_{N-1} = \dot{E}', \dot{U}_N = \dot{E}''$$

同时,将所有电压源转化为电流源 $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_N$,则可写出节点矩阵方程为

$$Y \dot{U} = \dot{I}$$

$$\dot{\mathbf{U}} = [\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_{N-2}, \dot{E}', \dot{E}'']^T$$

$$\dot{\mathbf{I}} = [\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_{N-2}, \dot{I}_{N-1}, \dot{I}_N]^T$$

式中, Y 为节点导纳矩阵。

建立增广矩阵 $[y\dot{\mathbf{I}}]$, 按照 Gauss 消去法, 就可直接求出等效电源的电动势 $\dot{E}'$ 和 $\dot{E}''$ 。

现在将全部电源电动势置零(此时 P 点即 P' 点, Q 点即 Q' 点), P 、 Q 点的注入电流为 $\dot{I}_P$ 和 $\dot{I}_Q$, 并令第 i 次消元后的系数用上角注“ i ”表示, P 、 Q 点的电压用 $\dot{U}_P$ 和 $\dot{U}_Q$ 表示, 则经 $N-2$ 和 $N-1$ 次消元后, 矩阵方程分别为:

$$\begin{bmatrix} \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ A_2 & B_2 \\ B_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{U}_P \\ \dot{U}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{I}_P \\ \dot{I}_Q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ A_2 & B_2 \\ D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{U}_P \\ \dot{U}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{I}_P \\ \dot{I}_Q - \dot{I}_P \frac{B_2}{A_2} \end{bmatrix}$$

式中, $A_2 = Y_{N-1, N-1}^{N-2}$, $B_2 = Y_{N-1, N}^{N-2}$, $D_1 = Y_{N, N}^{N-1}$ 。

如前所述, 令 $\dot{I}_P = 1A$, $\dot{I}_Q = 0$, $\dot{U}_Q = \dot{U}_{Q1}$, 由矩阵方程得:

$$D_1 \dot{U}_{Q1} = D_1 Z_M = -\frac{B_2}{A_2}$$

即

$$Z_M = -\frac{B_2}{A_2 D_1} \quad (1-18)$$

再令 $\dot{I}_P = -\dot{I}_Q = 1A$, $\dot{U}_P = \dot{U}_{P2}$, $\dot{U}_Q = \dot{U}_{Q2}$,

写出 $D_1 \dot{U}_{Q2} = -D_1 Z_Q = -1 - \frac{B_2}{A_2} = -1 + D_1 Z_M$

故有

$$Z_Q = \frac{1}{D_1} - Z_M \quad (1-19)$$

同时

$$A_2 \dot{U}_{P2} + B_2 \dot{U}_{Q2} = A_2 Z_P - B_2 Z_Q = 1$$

由此得

$$Z_P = \frac{1 + B_2 Z_Q}{A_2} \quad (1-20)$$

由于 A_2 、 B_2 和 D_1 等系数已在计算 $\dot{E}'$ 和 $\dot{E}''$ 的过程中贮存起来, 故 Z_P 、 Z_Q 和 Z_M 可以从中顺便求出, 而不需另行求解。

如果采用部分主元法或全主元法,则需对 $\dot{I}_P = 1\text{A}$, $\dot{I}_Q = 0$ 和 $\dot{I}_P = -\dot{I}_Q = 1\text{A}$ 两种情况分别进行 Gauss 消元,借以求出 $\dot{U}_{Q1}$ 、 $\dot{U}_{P2}$ 和 $\dot{U}_{Q2}$,并按式(1-15)~(1-17)求出入口阻抗。

分别用正序和零序的参数代入式(1-15)~(1-17)中,并用脚注"1"、"0"来表示,即可求出正序入口阻抗 Z_{P1} 、 Z_{Q1} 和 Z_{M1} 以及零序入口阻抗 Z_{P0} 、 Z_{Q0} 和 Z_{M0} 。

4 入口阻抗

作为一种通用情况,我们来看图 1-3 中从首端电动势 $\dot{E}$ 的两端看出去的入口阻抗 Z_{LP} 。

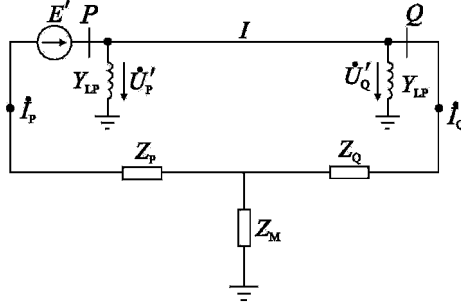


图 1-3 导线两端电网的 T 形等效电路

令导线 l 的首、末端的传输矩阵为 $\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_2 & A_1 \end{bmatrix}$,则包括并联电抗器导纳 Y_{LP} 和 Y_{LQ} 在内的 P 、 Q

两点间的传输矩阵可以写成:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{LP} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_2 & A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{LQ} & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A_1 + B_1 Y_{LP} & B_1 \\ C_1 + A_1(Y_{LP} + Y_{LQ}) + B_1 Y_L P Y_{LQ} & A_1 + B_1 Y_{LQ} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1-21)$$

列出如下方程:

$$\begin{aligned} \dot{U}_P &= A\dot{U}_Q + B\dot{I}_Q - \dot{I}_P = C\dot{U}_Q + D\dot{I}_Q \\ \dot{U}_P &= \dot{E} + \dot{I}_P(Z_P + Z_M) + \dot{I}_Q Z_M \\ \dot{U}_Q &= \dot{I}_P Z_M + \dot{I}_Q(Z_Q + Z_M) \end{aligned}$$

联解以上四式,可得入口阻抗 Z_{rP} 和首、末端的互阻抗 Z_{rM} (电动势与末端电流之比) 为

$$Z_{rP} = \frac{\dot{E}}{-\dot{I}_P} = \frac{H}{D + C(Z_Q + Z_M)} \quad (1-22)$$

$$Z_{rM} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_Q} = \frac{H}{1 + CZ_M} \quad (1-23)$$

式中, $H = A(Z_Q + Z_M) + B + C(Z_P Z_Q + Z_P Z_M + Z_Q Z_M) + D(Z_P + Z_M) - 2Z_M$

顺便指出,如将电源电动势 $\dot{E}$ 放在图 1-3 所示导线的末端,则仿照式(1-22),从此电势两端看出去的入口阻抗为

$$Z_{rQ} = \frac{H}{A + C(Z_P + Z_M)} \quad (1-24)$$

互阻抗 Z_{rM} 则与式(1-23) 相同。

将式(1-22) ~ (1-24) 中的所有参数用零序值或正序值代入,即可分别求出零序和正序的入口阻抗和互阻抗。

现在讨论三种最简单的接线方式时的入口阻抗。

(1) 长线末端开路

图 1-4(a) 所示导线末端开路时, $y_{LP} = y_{LQ} = 0$, $A = D = A_1$, $Z_P = Z_M = 0$, $Z_Q \rightarrow \infty$, 由式(1-22) 得 ①

$$Z_{rp} = Z_{rk} = \frac{A_1}{C_1} = Z_c \operatorname{th} \lambda l \quad (1-25)$$

式中, Z 为导线波阻。在忽略导线损耗的情况下, Z 用 Z_c 表示, 并有 $\gamma_1 = j\lambda$, 式(1-25) 变为

$$Z_{rk} = -Z_c \operatorname{ctg} \lambda l \quad (1-26)$$

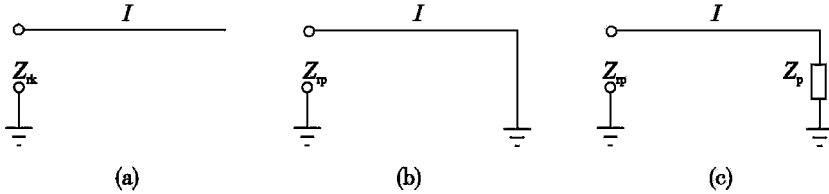


图 1-4 长线末端的三种接线方式

(a) 末端开路 (b) 末端短路 (c) 末端接阻抗

通常, $\lambda < 90^\circ$, 故 Z_{rk} 为容抗。如 $\lambda = 90^\circ$, $Z_{rk} = 0$, 相当于串联谐振(短路); 如取 v 为光速,

此时 $l = \frac{\gamma v}{\omega} = \frac{\frac{\pi}{2} \times 3 \times 10^5}{100\pi} = 1500 \text{ km}$ 。在短线路中, $\operatorname{ctg} \lambda \approx \frac{1}{\lambda}$, 故

$$Z_{rk} \approx -j \frac{Z_c}{\lambda} = -j \frac{\sqrt{\frac{L'}{C'}}}{\omega l \sqrt{L' C'}} = \frac{1}{j\omega l C'}$$

这种情况相当于忽略导线电感。

(2) 长线末端短路

图 1-4(b) 与图 1-4(a) 所示接线的区别在于, 前者的 $Z_Q = 0$, 入口阻抗为

$$Z_{rp} = Z_{rd} = \frac{B_1}{A_1} = Z \operatorname{th} \gamma l \quad (1-27)$$

当导线无损时, 得

$$Z_{rd} = jZ_c \operatorname{tg} \lambda \quad (1-28)$$

故通常 Z_{rd} 为感抗。如 $\lambda = 90^\circ$, $Z_{rd} \rightarrow \infty$, 相当于并联谐振(开路)。对于短线路, 则有

$$Z_{rd} \approx jZ_c \lambda = j \sqrt{\frac{L'}{C'}} \times \omega l \sqrt{L' C'} = j\omega l L' \quad (1-29)$$

① Z_{rk} 可直接按传输矩阵求出。当长线首、末两端用脚注“1”、“2”表示和末端开路时, 有

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & A_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{U}_2 \\ 0 \end{vmatrix}, \text{ 故 } Z_{rp} = -Z_{rk} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{A_1}{C_1}$$

末端短路的情况与此类同。

这种情况相当于忽略导线电容。

根据式(1-25)和式(1-27),可以求出

$$Z = \sqrt{Z_{rk} Z_{rd}}$$

$$\gamma l = \text{Arth} \sqrt{\frac{Z_{rd}}{Z_{rk}}} = \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{Z_{rk}} + \sqrt{Z_{rd}}}{\sqrt{Z_{rk}} - \sqrt{Z_{rd}}}$$

在作近似计算而忽略导线电阻时,由式(1-26)和式(1-28)得

$$Z_c = \sqrt{Z_{rk} Z_{rd}}$$

$$\lambda = \text{Arctg} \sqrt{\frac{Z_{rd}}{Z_{rk}}}$$

(3) 长线末端接阻抗

图1-4(c)所示接线的阻抗 Z_s 接在导线末端,与图1-4(a)的差别在于,这里 $Z_0 = Z_s$ 。根据式(1-22)写出

$$Z_{rp} = \frac{AZ_s + B}{A + CZ_s} = \frac{Z_s \text{ch}\gamma l + Z \text{sh}\gamma l}{\text{ch}\gamma l + \frac{Z_s \text{sh}\gamma l}{Z}}$$

$$= Z \times \frac{\frac{Z_s}{Z} \text{ch}\gamma l + \text{sh}\gamma l}{\text{ch}\gamma l + \frac{Z_s}{Z} \text{sh}\gamma l} = Z \text{th}(\gamma l + \varepsilon) \quad (1-30)$$

式中, $\text{th}\varepsilon = \frac{Z_s}{Z}$ 。

设 $Z_s = jx_s$,忽略导线电阻,令 $\varepsilon = j\varphi$,则有

$$\text{tg}\varphi = \frac{x_s}{Z_c}$$

$$Z_{rp} = jZ_c \text{tg}(\lambda + \varphi) = -jZ_c \text{ctg}(\lambda - \beta) \quad (1-31)$$

$$\beta = 90^\circ - \varphi$$

式(1-31)表明,如 $\lambda = \beta$,则 $Z_{rp} \rightarrow \infty$,相当于并联谐振(开路)。据此,参看图1-5(a),导线上取一点 M ,使从 M 点到末端导线长度的电角度 $\lambda' = \beta$,故从 M 点向末端看去的入口阻抗 $Z_{rM} \rightarrow \infty$,这样一来,对 M 点至首端的线段来说, λ' 段可以抛弃,如图1-5(b)所示。这是一段空线,电角度为 $\lambda - \beta$,根据式(1-26),入口阻抗就可直接写成式(1-31)的形式。因此,如果无损线路的末端接有并联电抗器,我们可用抛弃 β 段的方法来简化接线和进行稳态计算。

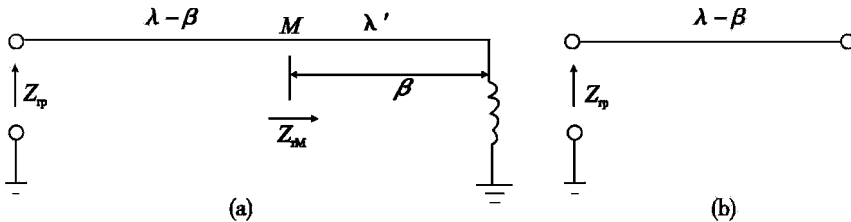


图1-5 无损导线末端接有电抗器时计算入口阻抗的等效图

(a) 末端接有电抗器的长线 (b) 图(a)抛弃 β 段后导线图的等效长线

必需指出,既然末端并联电抗器所补偿的正是线路中 β 段的正序电容,而补偿度 T_k 是预知的,则在计算空线工频电压分布时,可以直接取 $\beta = T_k \lambda$ (导线参数的分布性对此影响很小),而毋需对 β 单独求解,即补偿后的空线长度从 l 减为前段的 $l(1 - T_k)$,计算大为简化。

2. 长线路中的工频过电压和工频谐振^{*}

长线路中的电容效应是产生工频过电压和工频谐振的主要原因。

操作(暂态)过电压是在工频电压升高的基础之上震荡产生,避雷器额定电压的选择则决定于其端部可能产生的最大工频过电压,因此工频电压升高对于操作过电压幅值和电网绝缘水平起着相当决定性的作用。

长线路中的线性工频谐振是指不计线路损耗电阻情况下的某一个自振频率等于工频频率,此时线路各点电压趋于无穷大。损耗电阻的存在改变了线路的自振频率,过电压相应下降。长线路中的电容是导线的对地和相间电容,电感是导线的自感、互感和电源漏感,空线单侧供电时的容抗大于感抗,自振频率大于工频,电容电压(线路对地电压)高于电源电压而形成过电压,线路愈长,电压愈高,直至趋于谐振,故而这种电压升高(电容效应)实际上是一种谐振现象,在某些西方文献中称为工频谐振过电压,需要设置并补电抗器加以补偿和抑制。

1 正常运行状态下换位线路中的工频电压升高

在正常运行情况下,母线电压 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ (图2-1)被调节到电网的额定电压。根据无损

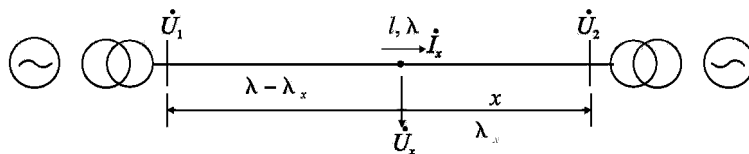


图2-1 运行线路

导线端部的传输矩阵方程,写出离末端 x 千米处的电压 $\dot{U}_x$ 和电流 $\dot{I}_x$ 为

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_1' \sin \lambda_x + \dot{U}_2 \sin(\lambda - \lambda_x)}{\sin \lambda} \quad (2-1)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_1' \cos \lambda_x - \dot{U}_2 \cos(\lambda - \lambda_x)}{jZ_{C1} \sin \lambda} \quad (2-2)$$

式中, Z_{C1} 为导线的正序波阻, $\lambda = \frac{\omega l}{v}$, $\lambda_x = \frac{\omega x}{v}$, v 为正序波速(3×10^5 km/s)。由此可知, $\lambda = \pi$ 时发生工频谐振,沿线各点电压和电流趋于无穷大,谐振时的导线长度 l_r 为

$$l_r = l = \frac{\lambda v}{\omega} = \frac{\pi v}{100\pi} = \frac{v}{100} = 3000 \text{ (km)} \quad (2-3)$$

工频波长为 $v/f = 3 \times 10^5 / 50 = 6000$ (km),故上述情况称为半波工频谐振。显然,这样长的线路是不现实的。

^{*} 修改节录《超高压电网稳态计算》一书,水利电力出版社,1993年。