

第 3 章 输电线路的电容

3.1 简介

电容与电导一起构成一条电力传输线的并联导纳。如前所述,电导是电流沿着绝缘子表面泄露的结果,是可以忽略不计的。当交流电压施加到电力传输线上时,线路电容将引起一个正弦电流,它被称为充电电流,即使该传输线路远端开路也会产生。线路电容正比于电力线路的长度,当输电线路长度小于 100km 时,充电电流是可以忽略不计的。但对于更长的输电线路,线路电容的影响则变得越来越重要,必须考虑。

3.2 长直导线的电场

先考虑这样一种情况:一个远离其他导体(包括地球)的无限长的直导线,携带着 q 库仑/米的均匀电荷。根据对称性,其产生的等位面将是一系列与导线同轴的圆柱面,而且静电力线将沿着径向方向。在距导体的轴线 y 处的电场强度是

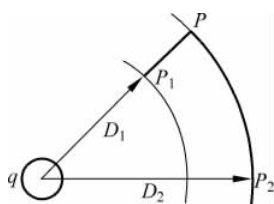


图 3.1 长直导线的电场

$$\epsilon = \frac{q}{2\pi k y} \text{ V/m}$$

这里, k 是相关介电常数(在国际单位制中,真空的介电常数是 $k_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$,空气的相关介电常数是 $k_r = k/k_0 = 1$)。

如图 3.1 所示, p_1 点和 p_2 点距导体轴线的距离分别是 D_1 和 D_2 。 p_1 点和 p_2 之间的电势差 V_{12} 为

$$V_{12} = \oint \epsilon dy = \oint \frac{q}{2\pi k y} dy \text{ V}$$

由于电位差与路径无关,所以我们选择图 3.1 中粗线所示的积分路径 P_1PP_2 。由于 PP_2 线路是等势的,所以 V_{12} 沿线路 P_1P 作积分就可以获得,即

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi k y} dy = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{D_2}{D_1} \text{ V} \quad (3.1)$$

3.3 一组平行导线中两根平行导体的电位差

图 3.2 表示了一组平行的带电导体,并假设满足:其中任意两根导体远离地面,并且彼此之间相距足够远,即满足导体的半径远远地小于它们之间的距离。架空线的间距就始终满足这些假设。另外,这些假设意味着每个导体沿圆柱体表面和导体长度方向的分布电荷是一致的。基于上述假设,这组平行导线中的任意两个导体之间的电势差可以通过应用单独带电导体的电势式(3.1)来获取。所以,导体 a 和

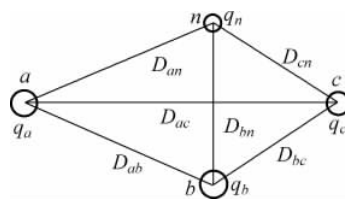


图 3.2 一组平行带电导线

导体 b 的电势差(电势从 a 降到 b)可以表示为

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_a \ln \frac{D_{ab}}{r_a} + q_b \ln \frac{r_b}{D_{ba}} + q_c \ln \frac{D_{cb}}{D_{ca}} + \cdots + q_n \ln \frac{D_{nb}}{D_{na}} \right) \text{V} \quad (3.2)$$

可以看出: 式(3.2)中的每一项从 a 到 b 的电压降都是由平行导线中的一条导线的电荷引起的。组中的其他任何两个导体之间的电压降都可以用类似的表达式来表达。

如果电荷正弦变化, 则电压也正弦变化(这针对 AC 输电线路情况), 式(3.2)对按长度分布的电荷和向量电压仍然适用。式(3.2)对瞬时量和正弦量也有效, 其中全电荷和电压要取相量。

3.4 双线线路的电容

一个单相电源供电的双线电力线路布列情况如图 3.3 所示, 单相线路包含两根实心的长直圆导体, 两个导体携带的大小相等、方向相反的正弦电荷用相量表示为 q_a 和 q_b , 且 $q_a = -q_b$ 。

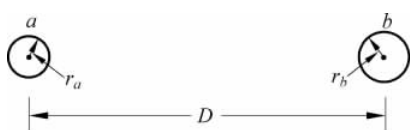


图 3.3 双线线路的剖视图

电势差 V_{ab} 可以利用式(3.2)和 q_a 、 q_b 可以得出, 具体如下

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_a \ln \frac{D}{r_a} + q_b \ln \frac{r_b}{D} \right) \quad (3.3)$$

又因为 $q_a = -q_b$, 所以有

$$V_{ab} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \frac{D^2}{r_a r_b}$$

对应的线路电容 C_{ab} 为

$$C_{ab} = \frac{q_a}{V_{ab}} = \frac{\pi k}{\ln(D/(r_a r_b)^{1/2})} \text{F/m} \quad (3.4a)$$

或

$$C_{ab} = \frac{0.0121}{\log(D/(r_a r_b)^{1/2})} \mu\text{F/km} \quad (3.4b)$$

如果 $r_a = r_b = r$, 可简化为

$$C_{ab} = \frac{0.0121}{\log(D/r)} \mu\text{F/km} \quad (3.4c)$$

对应的充电电流为

$$I_c = j\omega C_{ab} V_{ab} \text{A/km} \quad (3.5)$$

如图 3.4(a)和图 3.4(b)所示, 线-线间的电容可以等效地视为两个相等的电容的串联。由图 3.4 可以看出: 整个线路间的电压在两个电容之间均分, 如此看来, 中性点 n 可以视作地电位。每根导线到中性点的电容由下式给出

$$C_n = C_{an} = C_{bn} = 2C_{ab} = \frac{0.0242}{\log(D/r)} \mu\text{F/km} \quad (3.6)$$

在上面的推导中, 其实是基于下述假设的:

(1) 假定每个导体表面上的电荷都是均匀分布的, 严格来说, 这是不正确。如果电荷是非均匀分布, 那么

$$C_n = \frac{0.0242}{\log\left(\frac{D}{2r} + \left(\frac{D^2}{4r^2} - 1\right)^{1/2}\right)} \mu\text{F/km} \quad (3.7)$$

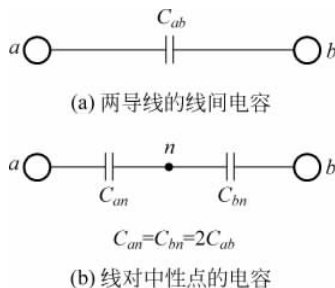


图 3.4

如果 $D/2r \gg 1$, 上面的表达式可以简化成式(3.6), 此时假定电荷均匀分布而导致偏差是可忽略的。

(2) 假定两个导体的横截面均为圆形, 而在实际应用中使用的是多股绞线。此时, 绞合导线的外接圆半径造成偏差也是微不足道的。

3.5 等间距三相输电线路的电容

如图 3.5 所示, 半径为 r 的三个相同导体, 呈等边三角形布列构成三相输电线路。利用式(3.2), 我们可以写出 V_{ab} 和 V_{ac} 的表达式

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} + q_c \ln \frac{D}{D} \right) \quad (3.8)$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{D}{D} + q_c \ln \frac{r}{D} \right) \quad (3.9)$$

将式(3.8)和式(3.9)相加, 可以得到

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} \left[2q_a \ln \frac{D}{r} + (q_b + q_c) \ln \frac{r}{D} \right] \quad (3.10)$$

因为附近没有其他电荷, 所以三根导线的电荷总和为 0, 即应该有 $q_b + q_c = -q_a$, 将其带入式(3.10), 得

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{3q_a}{2\pi k} \ln \frac{D}{r} \quad (3.11)$$

若在输电线路施加的是三相平衡电压, 我们绘制向量图 3.6, 并根据向量图可以得出

$$V_{ab} + V_{ac} = 3V_{an} \quad (3.12)$$

将式(3.12)代入式(3.11), 可以得到

$$V_{an} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \frac{D}{r} \quad (3.13)$$

A 相线路与中性点之间的电容为

$$C_n = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi k}{\ln(D/r)} \quad (3.14a)$$

考虑到 A 相线路与中性点之间媒介为空气, 空气媒介 $K_r = 1$, 上式变为

$$C_n = \frac{0.0242}{\log(D/r)} \mu\text{F/km} \quad (3.14b)$$

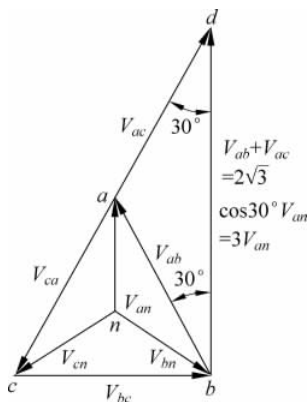


图 3.6 三相平衡电压的向量图

A 相线路的线路充电电流为

$$I_a(\text{线路充入}) = j\omega C_n V_{an} \quad (3.15)$$

3.6 非对称间距三相线路的电容

三相电力线路非对称布置图如图 3.7 所示。三相线路均采用半径为 r 的相同导体, 各导体间为非对称间距。假定三相线路经过了完全换位。

根据导体在整个换位周期内三个区段的不同位置(导体在每个换位周期内, 周期性地在这

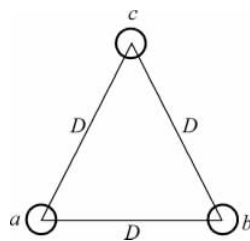


图 3.5 等间距三相电力线的横截面

三个区段变换位置), 我们可以写出 V_{ab} 相应的三个表达式, 这些表达式是:

对应换位周期的第一个区段

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_{a1} \ln \frac{D_{12}}{r} + q_{b1} \ln \frac{r}{D_{12}} + q_{c1} \ln \frac{D_{23}}{D_{31}} \right) \quad (3.16a)$$

对应换位周期的第二个区段

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_{a2} \ln \frac{D_{23}}{r} + q_{b2} \ln \frac{r}{D_{23}} + q_{c2} \ln \frac{D_{31}}{D_{12}} \right) \quad (3.16b)$$

对应换位周期的第三个区段

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_{a3} \ln \frac{D_{31}}{r} + q_{b3} \ln \frac{r}{D_{31}} + q_{c3} \ln \frac{D_{12}}{D_{23}} \right) \quad (3.16c)$$

如果线路电压降可以忽略, 那么在每个换位周期 V_{ab} 都是相同的。与此类似, 可以根据 $V_{bc} = V_{ab} \angle -120^\circ$, 列写出三个类似的方程。根据在换位周期的每个区段, 注入三相系统的总电荷为 0 可以再列写出三个方程。通过联立求解这 9 个(独立的)方程, 有可能确定 9 个未知的电荷。这种精确解法虽然可行, 但求解过程可能很复杂。

通常, 我们通过对导体的间距分析, 也可以得到足够精确的解。首先假设:

$$q_{a1} = q_{a2} = q_{a3} = q_a; \quad q_{b1} = q_{b2} = q_{b3} = q_b; \quad q_{c1} = q_{c2} = q_{c3} = q_c \quad (3.17)$$

即假设在换位周期的三个阶段满足电荷相等, 并假设线路为单位长度。此外, 做如下简化处理: V_{ab} 取在三个换位区段中三个电压 V_{ab1} 、 V_{ab2} 和 V_{ab3} 的平均值, 即

$$V_{ab(\text{avg})} = \frac{1}{3} (V_{ab1} + V_{ab2} + V_{ab3})$$

或

$$\begin{aligned} V_{ab} &= \frac{1}{6\pi k} \left[q_a \ln \left(\frac{D_{12} D_{23} D_{31}}{r^3} \right) + q_b \ln \left(\frac{r^3}{D_{12} D_{23} D_{31}} \right) + q_c \ln \left(\frac{D_{12} D_{23} D_{31}}{D_{12} D_{23} D_{31}} \right) \right] \\ &= \frac{1}{2\pi k} \left(q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{eq}} \right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

这里

$$D_{eq} = (D_{12} D_{23} D_{31})^{1/3}$$

同理, 可以有 V_{ac} 的简化表达式

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_c \ln \frac{r}{D_{eq}} \right) \quad (3.19)$$

将式(3.18)和式(3.19)相加, 得到

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + (q_b + q_c) \ln \frac{r}{D_{eq}} \right) \quad (3.20)$$

三相平衡电压时, 根据式(3.12), 有

$$V_{ab} + V_{ac} = 3V_{an}$$

$$\text{以及 } (q_b + q_c) = -q_a$$

将它们代入式(3.20), 整理后, 得

$$V_{an} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \frac{D_{eq}}{r} \quad (3.21)$$

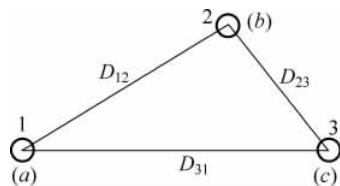


图 3.7 非对称间距(完全换位)三相电力线路截面图

电力传输线的 A 相线路对中性点的电容为

$$C_n = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi k}{\ln(D_{eq}/r)} \text{F/m} \quad (3.22a)$$

因为电力线和中性点间的介质为空气,以及对空气媒介来说 $k_r=1$,有

$$C_n = \frac{0.0242}{\log(D_{eq}/r)} \mu\text{F/km} \quad (3.22b)$$

很明显,若 $D_{eq}=D$,则式(3.22b)与等边间距计算公式相同,上面的(近似)公式可以得到与前面所说的那种精确结果接近的值。

三相线中,线路充电电流的向量形式是

$$I_{a'} = j\omega C_n V_{an} \text{A/km} \quad (3.23)$$

3.7 大地对输电线路电容的影响

在本章前面的章节中,在计算输电线上的电容时,都忽略了大地的影响。使用图像法来考虑大地对电容的影响会比较方便。

3.7.1 镜像法

输电线导体的电场必然要穿过大地。因为大地水平面本身就像一个等势面一样,是一个无限延伸的完全导电的横板。

两个平行长直、每单位长度为 $+q$ 和 $-q$ 库伦电荷的导体形成的电场,如图 3.8 所示,零电势平面位于图示的两个导体的正中间。如果将一张无限大的导电片放置在零电势平面,电场会仍旧保持原状。如果现在去掉承载 $-q$ 电荷的导体,则导电片上方的电场会保留完好,其下方的电场则会消失。使用这个现象的反向结果,我们可以构想这样一个等价情况:在地表下存在一个虚拟带电导体,它与地表上方的架空线电荷电量相等、极性相反,这个虚构的导体就被称为架空线的镜像(mirror image)。这种方法被称为镜像法,它最初由开尔文提出。

单相电力线路的电容 让我们来考虑一下如图 3.9 所示的单相线路,并运用镜像法来计算及大地存在时的线路电容。在使用镜像法计算电压降 V_{ab} 时,除了前述的两个带电导体 a 和 b ,还要考虑它们的镜像导体 a' 和 b' ,电压降 V_{ab} 由 4 根导体共同决定,此时电压降 V_{ab} 可以表示为

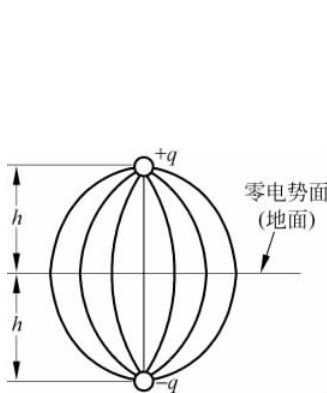


图 3.8 两个长直平行、带相反电荷的导体之间的电场

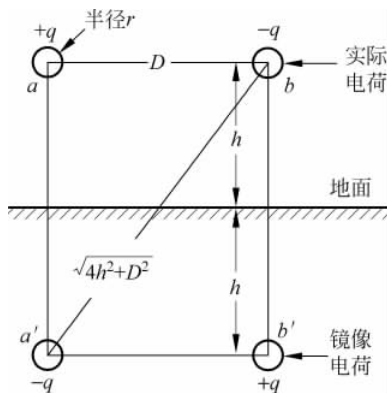


图 3.9 单相传输线路及镜像

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} + q_{a'} \ln \frac{(4h^2 + D^2)^{1/2}}{2h} + q_{b'} \ln \frac{2h}{(4h^2 + D^2)^{1/2}} \right] \quad (3.24)$$

代入不同电荷值并化简整理,得

$$V_{ab} = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{2hD}{r(4h^2 + D^2)^{1/2}} \quad (3.25)$$

所以有

$$C_{ab} = \frac{\pi k}{\ln \frac{D}{r(1 + (D^2/4h^2))^{1/2}}} \text{F/m} \quad (3.26a)$$

和

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln \frac{D}{r(1 + (D^2/4h^2))^{1/2}}} \text{F/m} \quad (3.26b)$$

观察上面的公式可以看出:因大地的存在,改变导体半径从 r 变到了 $r(1 + (D^2/4h^2))^{1/2}$ 。当 h 远远大于 D 时(通常电力线路都满足此条件),大地对输电线路电容的影响可以忽略不计。

三相电力线路的电容 同样,镜像法也可以应用于计算考虑大地影响时三相电力线路的电容。如图 3.10 所示,假设该三相线路满足完全换位,导体 a 、 b 、 c 分别带电荷 q_a 、 q_b 和 q_c ,在换位周期的第一区段,它们分别占据的位置是 1、2 和 3。大地的影响是通过分别带电荷 $-q_a$ 、 $-q_b$ 和 $-q_c$ 的镜像导线来模拟的,具体如图 3.10 所示。

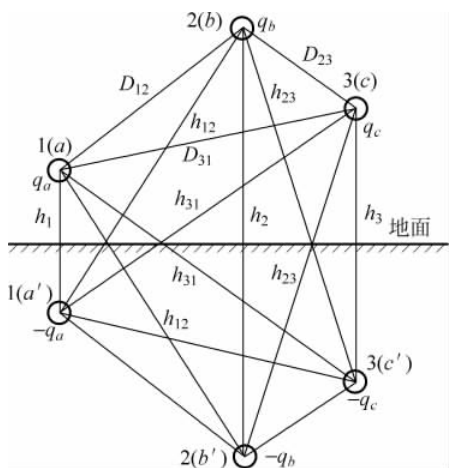


图 3.10 三相电力线路和它的镜像

根据导体在整个换位周期内三个区段的不同位置,写出 V_{ab} 相应的三个表达式,电压降 V_{ab} 是由三个带电导体和它们的镜像导体共同决定。当导体 a 在位置 1,导体 b 在位置 2,导体 c 在位置 3 时,有

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \left(\ln \frac{D_{12}}{r} - \ln \frac{h_{12}}{h_1} \right) + q_b \left(\ln \frac{r}{D_{12}} - \ln \frac{h_2}{h_{12}} \right) + q_c \left(\ln \frac{D_{23}}{D_{31}} - \ln \frac{h_{23}}{h_{31}} \right) \right] \quad (3.27)$$

V_{ab} 在换位周期的第二和第三分区段的方程与此类似。如果在整个换位周期内,在满足准确性的前提下,都可以假设单位长度的导体带有恒定的电荷,那么 V_{ab} 在换位周期的三个区段的平均值可由下式给出

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \left(\ln \frac{D_{eq}}{r} - \ln \frac{(h_{12}h_{23}h_{31})^{1/3}}{(h_1h_2h_3)^{1/3}} \right) + q_b \left(\ln \frac{r}{D_{eq}} - \ln \frac{(h_1h_2h_3)^{1/3}}{(h_{12}h_{23}h_{31})^{1/3}} \right) \right] \quad (3.28)$$

其中

$$D_{eq} = (D_{12}D_{23}D_{31})^{1/3}$$

类似地,可以得到矢量形式的 V_{ac} 的平均值表达式。再利用 3.6 节的 $V_{ab} + V_{ac} = 3V_{an}$ 和 $q_a + q_b + q_c = 0$,最终可以得到中性点电容的表达式,如下

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln \frac{D_{eq}}{r} - \ln \left(\frac{(h_{12}h_{23}h_{31})^{1/3}}{(h_1h_2h_3)^{1/3}} \right)} \text{F/m} \quad \text{到中性点} \quad (3.29a)$$

或

$$C_n = \frac{0.0242}{\log \frac{D_{eq}}{r} - \log \frac{(h_{12}h_{23}h_{31})^{1/3}}{(h_1h_2h_3)^{1/3}}} \mu\text{F/km} \quad \text{到中性点} \quad (3.29b)$$

比较式(3.22a)和式(3.29a),可以很明显看出:大地的影响使线路电容增加了。如果导体距离地面的高度比导线间距大很多,大地对三相线路的电容的影响可以忽略不计。

例 3.1 计算由两根单导线组成的单相线路,每千米线路对中性点的电容。已知导线半径 $r=0.328\text{cm}$,导线彼此相隔 3m ,距地面距离是 7.5m 。并比较由式(3.6)、式(3.7)和式(3.26b)计算的结果。

解:

(1) 忽略大地的存在[式(3.6)]

$$C_n = \frac{0.0242}{\log \frac{D}{r}} \mu\text{F/km} = \frac{0.0242}{\log \frac{300}{0.328}} = 0.00817 \mu\text{F/km}$$

考虑严格的关系[式(3.7)]

$$C_n = \frac{0.0242}{\log \left(\frac{D}{2r} + \left(\frac{D^2}{4r^2} - 1 \right)^{1/2} \right)} \mu\text{F/km}$$

因为 $D/r=915$,所以电荷分布不均匀性的影响可以忽略

$$C_n = 0.00817 \mu\text{F/km}$$

(2) 考虑大地的影响,并忽略电荷分布的非均匀性的影响[式(3.26b)]

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{0.0242}{\log \frac{D}{r(1 + (D^2/4h^2))^{1/2}}} \\ \frac{D}{r \sqrt{1.04}} &= \frac{300}{0.328 \sqrt{1.04}} = 897 \\ C_n &= \frac{0.0242}{2.953} = 0.0082 \mu\text{F/km} \end{aligned}$$

注:大地的存在增加了约 $3/800$ 的电容。

例 3.2 三相 50Hz 电力传输线,在同一水平面的相邻导体之间的水平间距为 3.5m 。导线是型号为 No. 2/0 的冷拔七铜芯(导体外直径 $=1.05\text{cm}$)电缆。线路电压为 110kV 。计算每公里的线路对中线点的电容和充电电流。

解:

$$\begin{aligned} D_{eq} &= (3.5 \times 3.5 \times 7)^{1/3} = 4.4\text{m} \\ C_n &= \frac{0.0242}{\log(D_{eq}/r)} = \frac{0.0242}{\log(440/0.525)} = 0.00826 \mu\text{F/km} \\ X_n &= \frac{1}{\omega C_n} = \frac{10^6}{314 \times 0.00826} = 0.384 \times 10^6 \Omega/\text{km} \quad \text{到中性点} \\ \text{充电电流} &= \frac{V_n}{X_n} = \frac{(110/\sqrt{3}) \times 1000}{0.384 \times 10^6} = 0.17\text{A/km} \end{aligned}$$

例 3.3 双回路三相电力线的 6 个导体的半径都是 0.00865m ,位置关系如图 3.11 所示。在线路电压 110kV 频率 50Hz 情况下,计算每千米导体的中性点容抗和充电电流。

解: 如 3.6 节一样, 假设在整个换位周期内, 每相中每个导体的电荷都是相等的。则对于换位周期的第一个分段,

$$V_{ab}(\text{I}) = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \left(\ln \frac{i}{r} + \ln \frac{g}{f} \right) + q_b \left(\ln \frac{r}{i} + \ln \frac{d}{g} \right) + q_c \left(\ln \frac{i}{j} + \ln \frac{g}{h} \right) \right] \quad (3.30)$$

对于换位周期的第二个分段

$$V_{ab}(\text{II}) = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \left(\ln \frac{i}{r} + \ln \frac{g}{d} \right) + q_b \left(\ln \frac{r}{i} + \ln \frac{f}{g} \right) + q_c \left(\ln \frac{j}{i} + \ln \frac{h}{g} \right) \right] \quad (3.31)$$

对于换位周期第三个分段

$$V_{ab}(\text{III}) = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \left(\ln \frac{j}{r} + \ln \frac{h}{f} \right) + q_b \left(\ln \frac{r}{j} + \ln \frac{f}{h} \right) + q_c \left(\ln \frac{i}{j} + \ln \frac{g}{g} \right) \right] \quad (3.32)$$

所以, 换位周期内的 V_{ab} 平均值为

$$V_{ab}(\text{avg}) = \frac{1}{6\pi k} \left[q_a \ln \left(\frac{ig}{rf} \frac{ig}{rd} \frac{jh}{rf} \right) + q_b \ln \left(\frac{rd}{ig} \frac{rf}{ig} \frac{rf}{jh} \right) \right] = \frac{1}{2\pi k} (q_a - q_b) \ln \left(\frac{i^2 g^2 jh}{r^3 f^2 d} \right)^{1/3} \quad (3.33)$$

同理, 有

$$V_{ac}(\text{avg}) = \frac{1}{2\pi k} (q_a - q_c) \ln \left(\frac{i^2 g^2 jh}{r^3 f^2 d} \right)^{1/3} \quad (3.34)$$

合并式(3.33)和式(3.34), 有

$$V_{ab} + V_{ac} = 3V_{an} = \frac{1}{2\pi k} (2q_a - q_b - q_c) \ln \left(\frac{i^2 g^2 jh}{r^3 f^2 d} \right)^{1/3}$$

$$3V_{an} = \frac{3q_a}{2\pi k} \ln \left(\frac{i^2 g^2 jh}{r^3 f^2 d} \right)^{1/3} \quad (3.35)$$

$$\text{每个导体的中性点电容} = \frac{2\pi k}{\ln \left(\frac{i^2 g^2 jh}{r^3 f^2 d} \right)^{1/3}} \quad (3.36)$$

两个平行导线对中性点的总电容为

$$C_n = \frac{4\pi k}{\ln \left(\frac{i^2 g^2 jh}{r^3 f^2 d} \right)^{1/3}} \text{F/m} \quad (3.37)$$

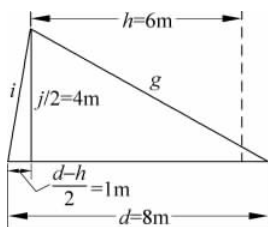


图 3.12

由题目已知有: $h=6\text{m}$ 、 $d=8\text{m}$ 、 $j=8\text{m}$, 并绘制图 3.12。由图 3.12 可以得出

$$i = \left[\left(\frac{j}{2} \right)^2 + \left(\frac{d-h}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = \sqrt{17}\text{m}$$

$$f = (j^2 + h^2)^{1/2} = 10\text{m}$$

$$g = (7^2 + 4^2)^{1/2} = \sqrt{65}\text{m}$$

又因为导体半径(全部) $=0.00865\text{m}$

代入各种距离的值, 有

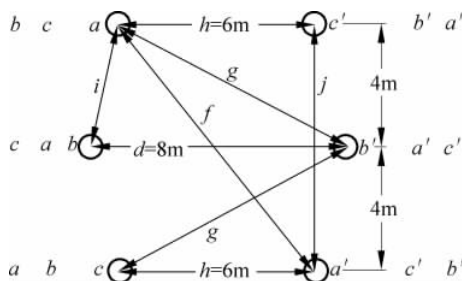


图 3.11 双回三相电力线路的剖面图

$$C_n = \frac{4\pi \times 1 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 10^6 \times 1000}{\ln \left[\frac{17 \times 65 \times 8 \times 6}{100 \times 8} \left(\frac{100}{0.865} \right)^3 \right]^{1/3}} = 0.0181 \mu\text{F/km}$$

$$\omega C_n = 314 \times 0.0181 \times 10^{-6} = 5.68 \times 10^{-6} \Omega/\text{km}$$

$$\text{充电电流/每相} = \frac{110 \times 1000}{\sqrt{3}} \times 5.68 \times 10^{-6} = 0.361 \text{ A/km}$$

所以,每个导体的充电电流 $=0.361/2=0.1805 \text{ A/km}$ 。

例 3.4 遵循基本原理,求不对称间距的三相架空线线路,求每千米的中性点电容值。假设三相电力线路已经完全换位。

解: 假定在换位周期的不同区段及位置,单位长度导线的电荷量保持一致。在该假定条件下, q_a, q_b, q_c 有相同的幅值,但是相位互差 120° 。

$$q_a = q_a \angle 0^\circ; \quad q_b = q_a \angle 120^\circ; \quad q_c = q_a \angle 120^\circ$$

参照图 3.13,求 a 和 b 之间的电势差。

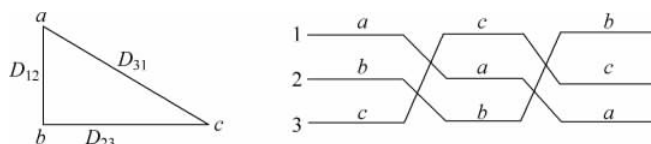


图 3.13 线路 a, b, c 的换位周期

当 a 在位置 1、 b 在位置 2、 c 在位置 3 时

$$(V_{ab})_1 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{12}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{12}} + q_c \ln \frac{D_{23}}{D_{31}} \right] \quad (3.38)$$

当 a 在位置 2、 b 在位置 3、 c 在位置 1 时

$$(V_{ab})_2 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{23}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{23}} + q_c \ln \frac{D_{31}}{D_{12}} \right] \quad (3.39)$$

当 a 在位置 3、 b 在位置 1 和 c 在位置 2 时

$$(V_{ab})_3 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{31}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{31}} + q_c \ln \frac{D_{12}}{D_{23}} \right] \quad (3.40)$$

在换位周期三个位置 a 和 b 之间的电势差的平均值为

$$\begin{aligned} V_{ab} &= \frac{1}{3} [(V_{ab})_1 + (V_{ab})_2 + (V_{ab})_3] \\ V_{ab} &= \frac{1}{3} \times \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{12} D_{23} D_{31}}{r^3} + q_b \ln \frac{r^3}{D_{12} D_{23} D_{31}} + q_c \ln \frac{D_{12} D_{23} D_{31}}{D_{12} D_{23} D_{31}} \right] \\ &= \frac{1}{6\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_m^3}{r^3} + q_b \ln \frac{r^3}{D_m^3} \right] = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_m}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_m} \right] \end{aligned} \quad (3.41)$$

这里, $D_m = (D_{12} D_{23} D_{31})^{1/3}$, 是两相间的互几何均距(互 GMD)。同理,可以得到 a 和 c 之间的平均电势差

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_m}{r} + q_c \ln \frac{r}{D_m} \right] \quad (3.42)$$

并考虑到存在

$$V_{ab} + V_{ac} = 3V_{an}$$

故将式(3.41)和式(3.42)相加,并整理后得到

$$3V_{an} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[2q_a \ln \frac{D_m}{r} + (q_b + q_c) \ln \frac{r}{D_m} \right]$$

因为在三相三线制系统中有 $q_a + q_b + q_c = 0$, 所以

$$3V_{an} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[2q_a \ln \frac{D_m}{r} + (-q_a) \ln \frac{r}{D_m} \right]$$

或

$$3V_{an} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[2q_a \ln \frac{D_m}{r} - q_a \ln \frac{r}{D_m} \right]$$

或

$$3V_{an} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left| 2q_a \ln \frac{D_m}{r} + q_a \ln \frac{D_m}{r} \right| = \frac{3q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_m}{r}$$

或

$$3V_{an} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_m}{r}$$

因此, 电力线与中性点间的电容为

$$C_n = \frac{q_n}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D_m}{r}} \text{F/m} = \frac{2\pi\epsilon}{10^{-3} \ln \frac{D_m}{r}} \text{F/km}$$

例 3.5 某三相电力传输线路, 电压 110kV, 工作频率 50Hz。相邻导线的水平间距为 3.5m, 如图 3.14 所示。导线的直径是 1.05cm。计算每千米该电力线路的中性点电容和充电电流。假设该电力线路满足完全换位。

解: 等值间距

$$D_{eq} = (3.5 \times 3.5 \times 7)^{1/3} = 4.5 \text{m}$$

导线的半径

$$r = \frac{1}{2} \times 1.05 \times 10^{-2} = 5.23 \times 10^{-3} \text{m}$$

中性点的电容

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D_m}{r}}$$

已知, ϵ = 绝对介电常数 = $\epsilon_0 \epsilon_r$; ϵ_0 = 空间介电常数 = $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$; ϵ_r = 相对介电常数 = 1(空气); D_m = 相与相之间的互几何均距 = $D_{eq} = 4.5 \text{m}$ 。

代入上式, 得

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{D_m}{r}} = \frac{2\pi \times 8.854 \times 10^{-12}}{\ln \frac{4.5}{5.23 \times 10^{-3}}} = 8.26 \times 10^{-12} \text{F/m} \\ &= 8.26 \times 10^9 \text{F/km} = 8.26 \times 10^3 \mu\text{F/km} \end{aligned}$$

中性点容抗为

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_n} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 8.26 \times 10^{-9}} \Omega/\text{km} = 3.853 \times 10^5 \Omega/\text{km}$$

充电电流为

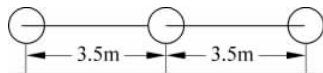


图 3.14

$$I_c = \frac{V_m}{X_c} = \frac{110 \times 10^3 / \sqrt{3}}{3.853 \times 10^5} = 0.1648 \text{ A/km}$$

$$\text{由线路产生的无功} = \frac{(V_L)^2}{X_c} = \frac{(110 \times 10^3)^2}{3.853 \times 10^5} = 31\,399 \text{ VAR} = 31.399 \text{ kVAR}$$

3.8 GMD 方法(改进)

通过对输电线路的电感和电容的各种公式的比较[例如式(2.22b)和式(3.6)],发现两者的不同是在于:在计算电力线路电感的公式中,我们必须使用伪导体半径 $r' = 0.7788r$;在计算电力线路电容的公式中,使用的是实际导体半径 r 。这一事实表明:GMD(几何平均距离,简称几何均距)法同样适用于电容的计算,只是要通过使用外部导体半径来求取 D_s ——自几何均距。

下面,通过使用 GMD 方法来求解例 3.3,读者会发现 GMD 法可以方便地解决例 3.3 的问题。

求换位周期第一区段的互几何均距(互 GMD)

$$D_{ab} = ((ig)(ig))^{1/4} = (ig)^{1/2}$$

$$D_{bc} = (ig)^{1/2}$$

$$D_{ca} = (jh)^{1/2}$$

$$D_{eq} = (D_{ab}D_{bc}D_{ca})^{1/3} = [(i^2g^2jh)^{1/3}]^{1/2}$$

求换位周期第一区段的自 GMD

$$D_{sa} = (rfrf)^{1/4} = (rf)^{1/2}$$

$$D_{sb} = (rd)^{1/2}$$

$$D_{sc} = (rf)^{1/2}$$

$$D_s = (D_{sa}D_{sb}D_{sc})^{1/3} = [(r^3f^2d)^{1/3}]^{1/2}$$

运用公式,有

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln \frac{D_{eq}}{D_s}} = \frac{2\pi k}{\ln \left[\left(\frac{i^2g^2jh}{r^3f^2d} \right)^{1/3} \right]^{1/2}} = \frac{4\pi k}{\ln \left(\frac{i^2g^2jh}{r^3f^2d} \right)^{1/3}} \text{ F/m}$$

很明显,这一结果与例 3.3 推导出的表达式相一致。

3.9 分裂导线

某采用分裂导线的三相电力线路位置图如图 3.15 所示。图中,任何一根导线之间都是彼此平行的。假设电荷在每组分裂导体之间也是等分的,且有 $D_{12} \gg d$ 以及 $D_{12} - d \approx D_{12} + d \approx D_{12}$ 。在实际电力工程中,这些距离关系是完全满足的,所以利用这些假设得到的计算结果还是相当准确的。根据假设有:如果 a 相的电荷为 q_a ,则导体 a 和 a' 各具有 $0.5q_a$ 的电荷; b 相和 c 相同样,电荷也是平分的。

此时,从导线 a 到导线 b 的电压表达式可以表示为

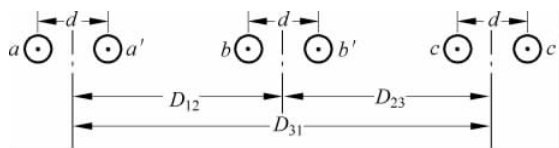


图 3.15 三相分裂电力传输线的剖面图

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left[0.5q_a \left(\ln \frac{D_{12}}{r} + \ln \frac{D_{12}}{d} \right) + 0.5q_b \left(\ln \frac{r}{D_{12}} + \ln \frac{d}{D_{12}} \right) + 0.5q_c \left(\ln \frac{D_{23}}{D_{31}} + \ln \frac{D_{23}}{D_{31}} \right) \right] \quad (3.43)$$

或

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \ln \frac{D_{12}}{\sqrt{rd}} + q_b \ln \frac{\sqrt{rd}}{D_{12}} + q_c \ln \frac{D_{23}}{D_{31}} \right] \quad (3.44)$$

考虑电力线路按照常规会进行线路的完整换位,所以最终结果为

$$C_n = \frac{0.0242}{\log(D_{eq}/\sqrt{rd})} \mu\text{F/km} \quad (3.45)$$

这里

$$D_{eq} = (D_{12} D_{23} D_{31})^{1/3}$$

显然,从式(2.42)得到的改进 GMD 方法在这种情况下也同样适用。

3.10 静电感应

第2章中曾提到电力传输线会建立两个物理场:磁场和电场。电场也会影响位于电力线附近的物体。电场大小与传输线的电压有关,电场是引起汽车、建筑和类似尺寸的物体产生静电感应的主要原因。在这些物体静电放电时,会对人体产生不利的影响。已有的观测还表明:人处于电场中时,在人体内的电流密度比由磁场诱导的人体电流密度高得多。

3.11 总结

在本章中,介绍了电力传输线路的主要并联(分流)参数——电容,并透彻地讨论了包括大地、分裂导线和静电感应的影响及相关处理方法。

思考题

3.1 非换位三相电力线路布置图如图 P3T1 所示。线路电压是三相平衡电压,频率 50Hz。取 a 相电压为基准值。所有的导体都有相同的半径。推导体 a 每米长度的电荷的表达式。计算 a 相的充电电流。忽略大地的影响。

3.2 一个三相双回路输电线路的布置图如图 P3T2 所示,每个导体的直径是 2.0cm。电力线路经过完整移位,并且带平衡负载。计算每相的中性点电容。

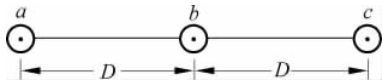


图 P3T1

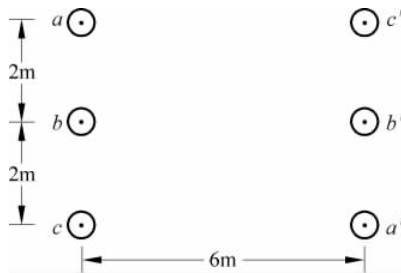


图 P3T2

3.3 三相 50Hz 的架空线,定期换位,导线等边间距 4m,如此布置时这种架空线的电容是 $0.01\mu\text{F}/\text{km}$ 。若将架空线导体都改布置在同一个水平面上,彼此间距是 4m,并且定期换位,试计算新线路每千米的中性点电容。

3.4 500kV 三相分裂电力线路如图 P2T9 所示。计算该线路 50Hz 时的中性点电容,单位 Ω/km 。

3.5 某三相电力线路水平布置,相邻导体之间的水平间距是 2m。每个导体的半径都是 0.25cm。在某一瞬间,位于中间位置的导体的电荷与一个外导体的电荷是相同的,并且此时中心导体和那个外导体之间的电压降为 775V。疏忽大地的影响,计算在此指定的时刻,那个相导体的电荷值,单位为库仑/千米。

3.6 计算如图 P3T6 所示的双回路三相电力线路,在 50Hz 时的每千米对地电纳。已知 $D=7\text{m}$,六个导体的半径都是 1.38cm。

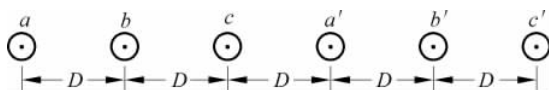


图 P3T6 等间距双回路三相线

3.7 单芯电力电缆使用 2 号实芯铜(半径 $=0.328\text{cm}$)。导体纸绝缘隔离,从与铜芯同心的铅护套算起,厚度为 2.5mm,且相对介电常数是 3.8。铅护套的厚度为 2mm。计算每千米长度的内导体与铅护套之间的容抗。

3.8 三相电力线路,导体直径是 2cm,三角形放置,间距分别为 5m、6m 和 7m。假设该线完全换位且带有平衡负载。计算每千米的每相对地电容。

3.9 导线的半径是 r ,两根平行导线轴线间的距离是 D ,并已知 D 远远大于 r ,绝缘介质是空气。推导在两根长直平行导线之间每米的电容表达式。如果在导线之间的电场强度不超过 $25\text{kV}/\text{cm}$, r 是 0.3cm, D 是 35cm,计算两根导体之间的最大电势差。

选择题

- 3.1 如果考虑大地的影响,架空线路会出现()情况。
(a) 电容增大 (b) 电容减小 (c) 电感增大 (d) 电感减小
- 3.2 自 GMD 用于计算()。
(a) 电容 (b) 电感 (c) 电感和电容 (d) 电阻
- 3.3 大地的存在,导致输电线电容()。
(a) 增加 12% (b) 减少 12% (c) 增加 0.2% (d) 都不是
- 3.4 如果增大相间导体的水平距离,则输电线电容()。
(a) 减少 (b) 增加 (c) 不变 (d) 没影响
- 3.5 如果增加输电线的长度,则充电电流()。
(a) 减少 (b) 增加 (c) 不变 (d) 没影响
- 3.6 当交流电压施加于输电线上时,线电容会造成()。
(a) 超前的正弦电流 (b) 滞后的正弦电流
(c) 电流和电压同相位 (d) 都不是
- 3.7 必须考虑电容影响的是()。
(a) 短传输线 (b) 中等长度传输线
(c) a 和 b (d) 长传输线

3.8 一个无限长的横直导体每米带均匀电荷 q , 如果 k 是媒介常数, 两个点分别距离导体轴线 D_1 和 D_2 。这两点之间的电势差为()。

(a) $V_{12} = \frac{q}{\pi k} \ln D_2 / D_1$

(b) $V_{12} = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{D_1}{D_2}$

(c) $V_{12} = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{D_2}{D_1}$

(d) $V_{12} = \frac{q}{2\pi k} \log_{10} D_2 / D_1$

3.9 考虑在图 P3T9 中所示的双线单相电力线路, 单相电源供电。线路电容 C_{ab} 是()。

(a) $C_{ab} = \frac{0.0121}{\log(r/D)} \mu\text{F/km}$

(b) $C_{ab} = \frac{0.0121}{\log(D/r)} \mu\text{F/km}$

(c) $C_{ab} = 0.0121 \log(D/r) \mu\text{F/km}$

(d) $C_{ab} = \frac{0.0121}{\log(D/r)} \text{F/km}$

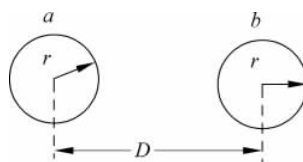


图 P3T9

3.10 开尔文首先提出的镜像法可用于()。

(a) 电感的计算

(b) 电阻的计算

(c) 大地对线路电容的影响

(d) 都不是

参考文献

1. Stevenson, W D, *Elements of Power System Analysis*, 4th edn, McGraw-Hill, New York, 1982.
2. Cotton, H and H Barber, *The Transmission and Distribution of Electrical Energy*, 3rd edn, Hodder and Stoughton, 1970.
3. Starr, A T, *Generation, Transmission and Utilisation of Electric Power*, Pitman, 1962.
4. Parton, J E and A Wright, 'Electric Stresses Associated with Bundle Conductors', *International Journal of Electrical Engineering Education*, 1965, 3 : 357.
5. Stevens, R A and D M German, 'The Capacitance and Inductance of Overhead Transmission Lines', *ibid*, 2:71.