

变压器线圈波过程

上海交通大学 张嘉祥



水利电力出版社

内 容 提 要

本书对国内外关于变压器线圈波过程理论和实际计算方法的研究成果作了系统的阐述和分析,其内容包括:变压器线圈的振荡过电压;变压器线圈之间的感应过电压;影响感应过电压的各种因素和限制这种过电压的方法;变压器线圈波过程的模拟方法和测量方法;应用电子计算机计算变压器波过程和线圈参数的方法;变压器雷电冲击试验方法;波形调整原理和截波线路等。

本书可作为高等院校“高电压技术”专业、“电机制造”专业和“发电厂、电力网及电力系统”专业的选修课教材,也可供从事变压器设计制造和电力系统运行的工程技术人员参考。

变 压 器 线 圈 波 过 程

上海交通大学 张嘉祥

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 10.5印张 281千字

1982年12月第一版 1982年12月北京第一次印刷

印数0001—9410册 定价1.30元

科技新书目: 34—158

书号15143·5007

前 言

本书共分六章。

第一、二章着重以物理概念说明变压器线圈波过程的基本特性。第一章叙述变压器线圈的振荡过电压，第二章叙述变压器线圈的感应过电压。第二章结合近十几年来变压器在运行和冲击电压试验中发生的绝缘击穿事故，深入地分析了220千伏变压器的高压线圈对低压线圈的感应过电压和配电变压器的低压线圈对高压线圈的感应过电压（又称正、反变换过电压），分析了影响感应过电压的各种因素，诸如线圈结构、线圈连接方式、变比、变压器容量、接地电阻和低压侧线路的长度等，阐明了绝缘击穿事故的主要原因，并对限制这种过电压的方法进行了讨论。所有这些内容不仅丰富了变压器线圈感应过电压的理论，而且有利于指导变压器的设计制造和运行维护。

第三、四章系统地介绍了应用电子计算机计算变压器线圈波过程和线圈参数的一些方法。第三章介绍了变压器网络的割集分析方法，通过这种方法可对复杂的变压器网络作有规则的处理，讨论了变压器网络的支路电感矩阵、割集电容矩阵和割集电感矩阵的性质，推导了变压器网络的微分方程组，讨论了解微分方程组的两个解析方法。第四章介绍了两种计算变压器电感参数的模型和方法，以及各种变压器线圈的电感计算公式。为了便于读者阅读本书的有关计算部分，书中给出了主要数学公式的推导过程，并编写了“贝塞尔函数之应用”和“格林函数之应用”两段与本文紧密联系的数学内容。

电子计算机的应用使变压器线圈的参数和波过程的精确计算成为可能。目前，电子计算机已成为分析变压器线圈的过电压、研究变压器的过电压保护措施和变压器的绝缘结构等方面的有力

工具。十多年来，国内外发表了多种利用电子计算机计算的方法，本书介绍的方法在计算精度和速度方面都是比较先进的。

第五章介绍变压器线圈波过程的模拟方法和测量方法，其中包括变压器电磁模拟以及冲击波发生器（全波和截波）、梯度仪和保护间隙模拟的电子线路。

第六章介绍变压器的雷电冲击电压试验方法，着重介绍波形调整原理、截波线路、试验方法和故障判断。

本书引用了国内外在变压器线圈波过程研究方面的许多新成果，其中包括上海交通大学高电压技术教研组和作者在这方面的研究成果。

本书由清华大学吴维韩、朱德恒同志审阅。西安变压器电炉厂和水利电力部武汉高压研究所的同志也审阅了原稿。他们对书稿提出了很多宝贵的意见。在此一并致以深切的谢意。

本书可作为高等院校高电压技术专业、电机制造专业和电力系统专业的教学参考书，也可供从事变压器设计制造和电力系统运行的工程技术人员参考。

作者水平有限，书中一定存在不少缺点或错误。恳请读者批评指正。

一九八二年四月

目 录

前 言

第一章 变压器线圈的振荡过电压	1
第一节 单线圈变压器的振荡过电压	1
第二节 电流谐波和阻抗	12
第三节 冲击电压波形对振荡电压幅值的影响	14
第四节 梯度电压	18
第五节 自耦变压器和有载调压变压器波过程的特点	25
第六节 多层圆筒式变压器的波过程	36
第七节 三相变压器的波过程	38
第八节 变压器线圈的内部保护	40
第二章 变压器线圈之间的感应过电压	46
第一节 变压器线圈之间的静电感应和电磁感应	47
第二节 高压线圈对低压线圈的感应过电压	54
第三节 Y/Y_0-12 配电变压器的感应过电压	60
第四节 Δ/Y_0-11 配电变压器的感应过电压	73
第五节 Y/Z_0-11 配电变压器的感应过电压	84
第三章 变压器网络的割集分析	91
第一节 网络的割集分析	91
第二节 变压器起始电位分布的计算方法	116
第三节 变压器等值网络的微分方程组	128
第四节 支路电感矩阵的性质	135
第五节 割集电容矩阵和割集倒电感矩阵的性质	141
第六节 应用系数矩阵的广义特征值和特征向量解变压器网络的微分方程组	147
第七节 应用一般特征值和特征向量解变压器网络的微分方程组	153
第八节 变压器线圈波过程计算实例	168
第四章 变压器参数计算	187

第一节	用富氏级数计算变压器的电感·····	187
第二节	用富氏变换计算变压器的电感·····	214
第三节	电感矩阵的修正·····	250
第四节	变压器线圈的等值电容·····	252
第五章	电磁模拟和过渡现象分析仪·····	269
第一节	电磁模拟·····	269
第二节	电磁模拟的准确度分析·····	276
第三节	全波发生器·····	286
第四节	截波发生器·····	290
第五节	梯度仪·····	294
第六节	保护间隙的模拟·····	296
第六章	变压器的冲击电压试验·····	299
第一节	试验波形·····	299
第二节	波形调整原理·····	302
第三节	截波线路·····	310
第四节	试验方法·····	319
第五节	故障判断·····	328
参考文献	·····	331

第一章

变压器线圈的振荡过电压

变压器线圈在冲击电压作用下产生的过电压，主要是由线圈内部的自由振荡过程和线圈之间的静电或电磁感应过程所引起的。这两个过程，我们统称为变压器线圈中的波过程。一般情况下，两个过程同时发生，但总是其中一个为主。在某些情况下，前一个过程起主要作用，而在另一些情况下，后一个过程起主要作用，这和变压器线圈的结构、布置和接线方式等有关。

当输入电压的波形和幅值一定时，自由振荡电压的幅值主要决定于变压器线圈的最终电压分布和起始电压分布之差。改善起始电压分布，使它尽量接近于最终电压分布，是降低自由振荡电压幅值的主要方法。而线圈之间的感应电压则不同，静电感应电压的幅值主要决定于线圈的对地电容和线圈之间的电容；电磁感应电压的幅值主要决定于线圈的匝数比。

变压器线圈的振荡过电压和感应过电压的原理不同，分析方法也不同，因此，把这两种过电压分开讨论是合适的。本书第一章讨论变压器线圈的振荡过电压，第二章讨论线圈之间的感应过电压。

第一节 单线圈变压器的振荡过电压

一、线圈各点的电压方程式

单线圈变压器的振荡过程比较简单，可以用一个简单的数学公式来表示，物理概念比较清楚，同时又具有变压器线圈振荡过程的基本特征，很有代表性。因此，人们常常把对单线圈变压器

振荡过程所作的分析和结论，作为（定性地）分析各种实际变压器振荡过电压的基础。

为了简化计算，我们不考虑变压器的损耗和线圈各部分之间的互感，同时假定线圈的电感、纵向电容和对地电容都是均匀分布参数。

设 L_0 、 K_0 、 C_0 分别表示线圈单位长度的电感、纵向电容和对地电容， L 、 K 、 C 分别表示线圈的总电感、总的纵向电容和总的对地电容， l 代表线圈的长度，则有

$$\begin{aligned} L &= L_0 l, \\ K &= K_0 / l, \\ C &= C_0 l. \end{aligned}$$

图1-1为单线圈变压器的电路图。 u 、 i 表示在线圈 x 点上的电压和电流， $u + \partial u$ 、 $i + \partial i$ 表示在线圈 $x + dx$ 点上的电压和电流。 x 节点用 A 表示， $x + dx$ 的节点用 B 表示。 A 、 B 两个节点之间的阻抗 Z_{AB} 和 B 点的对地导纳 Y_B 可用算子表示如下：

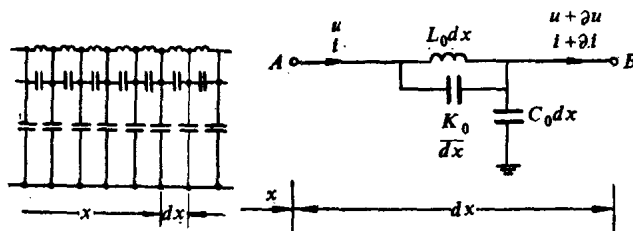


图 1-1 单线圈变压器电路

$$Z_{AB} = \frac{L_0 p dx}{1 + L_0 K_0 p^2},$$

$$Y_B = C_0 p dx.$$

式中， p 为算子。由此得

$$-\partial u = i Z_{AB} = i \frac{L_0 p dx}{1 + L_0 K_0 p^2}, \quad (1-1)$$

$$-\partial i = (u + \partial u) Y_B \approx C_0 p u dx. \quad (1-2)$$

消去电流 i 得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \gamma^2 u, \quad (1-3)$$

$$\gamma^2 = \frac{L_0 C_0 p^2}{1 + L_0 K_0 p^2}. \quad (1-4)$$

(1-3)式的通解为

$$u(x, p) = u_1 e^{-\gamma x} + u_2 e^{\gamma x}. \quad (1-5)$$

u_1 、 u_2 为由边界条件确定的常数。假设输入电压为幅值等于 u_0 的无穷长直角波，作用于变压器线圈的首端。当中性点接地时，边界条件为：

$$\begin{aligned} x = 0, & \quad u = u_0, \\ x = l, & \quad u = 0. \end{aligned}$$

代入(1-5)式得

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{-u_0 e^{\gamma l}}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}}, \\ u_2 &= \frac{u_0 e^{-\gamma l}}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}}, \\ u(x, p) &= u_0 \frac{e^{\gamma(x-l)} - e^{-\gamma(x-l)}}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}} = \frac{u_0 \operatorname{sh} \gamma(l-x)}{\operatorname{sh} \gamma l}. \end{aligned} \quad (1-6)$$

中性点绝缘时，边界条件为：

$$\begin{aligned} x = 0, & \quad u = u_0, \\ x = l, & \quad i = 0. \end{aligned}$$

由(1-1)式知， $x = l$ ， $i = 0$ 的边界条件，即为 $x = l$ ， $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ 的条件。将边界条件代入(1-5)式得：

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{u_0 e^{\gamma l}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}, \\ u_2 &= \frac{u_0 e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}, \\ u(x, p) &= u_0 \frac{e^{\gamma(1-x)} + e^{-\gamma(1-x)}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}} = \frac{u_0 \operatorname{ch} \gamma(l-x)}{\operatorname{ch} \gamma l}. \end{aligned} \quad (1-7)$$

(1-6)、(1-7)两式即为用算子表示的线圈各点的电压方程式。

二、起始电压分布

根据算子运算，当变压器线圈突然受到直角电压波作用时，相当于算子 $p = \infty$ 。所以当 $t = 0$ 时，线圈各点的电压方程式的解是令 (1-4) 式中 $p \rightarrow \infty$ ，这时得到的电压分布叫起始电压分布。故

$$\gamma^2 \Big|_{p \rightarrow \infty} = \frac{L_0 C_0 p^2}{1 + L_0 K_0 p^2} \Big|_{p \rightarrow \infty} = \frac{C_0}{K_0}。$$

$$\text{令 } \alpha^2 = \frac{C_0}{K_0}。$$

α 称为变压器线圈的空间因数。将 $\gamma = \alpha$ 代入 (1-6)、(1-7) 式，得到起始电压分布公式为：

$$\text{中性点接地时} \quad u = \frac{u_0 \operatorname{sh} \alpha l \left(1 - \frac{x}{l} \right)}{\operatorname{sh} \alpha l}, \quad (1-8)$$

$$\text{中性点绝缘时} \quad u = \frac{u_0 \operatorname{ch} \alpha l \left(1 - \frac{x}{l} \right)}{\operatorname{ch} \alpha l}。 \quad (1-9)$$

$$\text{式中} \quad \alpha l = \left(\sqrt{\frac{C_0}{K_0}} \right) l = \sqrt{\frac{C}{K}}。 \quad (1-10)$$

[例 1-1] 有一台变压器，高压线圈对地的总电容 $C = 1920$ 微微法，总的纵向电容 $K = 24$ 微微法，假定幅值为 100 千伏的直角波作用于线圈首端，试求其起始电压分布。

$$\text{解：} \quad \alpha l = \sqrt{\frac{C}{K}} = \sqrt{\frac{1920}{24}} \approx 9。$$

代入 (1-8) 和 (1-9) 式，得到起始电压分布：

$$\text{中性点接地时} \quad u = \frac{100 \operatorname{sh} 9 \left(1 - \frac{x}{l} \right)}{\operatorname{sh} 9} \quad \text{千伏，}$$

$$\text{中性点绝缘时} \quad u = \frac{100 \operatorname{ch} 9 \left(1 - \frac{x}{l} \right)}{\operatorname{ch} 9} \quad \text{千伏。}$$

当 $al > 3$ 时, $shal \approx chal$ 。此时, 上两式实际相等, 即

$$u=100 e^{-\alpha l \frac{x}{l}}。 \tag{1-11}$$

起始电压分布的趋势如表 1-1 所示。随着 x 的增加, 电压下降很快。图 1-2 画出了中性点接地的起始电压分布曲线。 al 取五个不同的值: 0, 1, 2, 5 和 10。可以看出, al 越大, 起始电压分布曲线下降越快。还可以看出, 电压刚作用于线圈时, 大部分降落在线圈首端附近。在这些地方, 电位梯度最大。

表 1-1 起 始 电 压 分 布				
x/l	0.01	0.1	0.2	0.5
$e^{-\alpha l \frac{x}{l}}$	0.913	0.406	0.165	0.011
u 千 伏	91.3	40.6	16.5	1.1

$$\left. \frac{du}{dx} \right|_{x=0} = -\alpha u_0 e^{-\alpha x} \Big|_{x=0} = -\alpha u_0 = -al \left(\frac{u_0}{l} \right)。 \tag{1-12}$$

式中, u_0 为直角电压波的幅值, u_0/l 为变压器线圈的平均电位梯度, 负号表示线圈各点的电压随 x 增加而减小。上式表明, 线圈首端的电位梯度比平均梯度大 al 倍。 al 等于线圈的最大梯度和平均梯度的比值。 al 越小, 则最大梯度越小, 梯度分布越均匀, 线圈的冲击性能越好。因此, al 是反映线圈的冲击性能好坏的一个物理量。一般连续式线圈的 al 在 5 ~ 15 的范围内, 电压等级低的取大值;

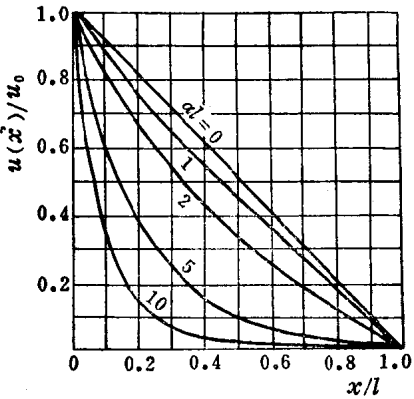


图 1-2 中性点接地的
起始电压分布

220 千伏纠结式线圈的 αl 一般在 3 左右。

变压器线圈在 $t = 0$ 时的特性是由线圈纵向电容和对地电容组成的电容链决定的，此电容链可用一个等值电容代替，叫做入口电容 C_e 。入口电容是等值于整个电容链的，因此它在 u_0 作用下所吸取的电荷应当等于首端线饼的纵向电容所吸取的电荷。即

$$C_e = \frac{Q_{x=0}}{u_0} = \frac{\left| \left(K_0 \frac{du}{dx} \right)_{x=0} \right|}{u_0} = K_0 \alpha = \sqrt{CK} \quad (1-13)$$

入口电容值一般在 500~5000 微微法之间。

三、最终电压分布

变压器线圈在无穷长直角波 u_0 作用下的最终状态，发生于电磁振荡过程均告结束的时候，即 $\frac{du}{dt} = 0$ 和 $\frac{di}{dt} = 0$ 时。它相当于算子 $p = 0$ 。由 (1-4) 式得

$$\gamma = 0。$$

代入 (1-6)、(1-7) 式，得到最终电压分布为：

中性点接地时

$$u = \lim_{\gamma \rightarrow 0} u(x, p) = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{u_0 \frac{d \operatorname{sh} \gamma(l-x)}{d \gamma}}{\frac{d \operatorname{sh} \gamma l}{d \gamma}} = \left(1 - \frac{x}{l} \right) u_0, \quad (1-14)$$

中性点绝缘时

$$u = \lim_{\gamma \rightarrow 0} u(x, p) = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{u_0 \operatorname{ch} \gamma(l-x)}{\operatorname{ch} \gamma l} = u_0. \quad (1-15)$$

四、自由振荡过程

知道了电压的起始分布和最终分布，也就知道了它们之间的差。这个差（用 $f(x)$ 符号表示）就是振荡过程的自由分量。用数学式子可表示如下：

中性点接地时

$$f(x) = u_0 \left[\left(1 - \frac{x}{l} \right) - \frac{\text{sh}\alpha(l-x)}{\text{sh}\alpha} \right],$$

中性点绝缘时

$$f(x) = u_0 \left[1 - \frac{\text{ch}\alpha(l-x)}{\text{chal}} \right].$$

图1-3表示中性点接地时, 变压器线圈的起始电压分布、最终电压分布和自由振荡分量; 图1-4表示中性点绝缘时, 变压器线圈的起始电压分布、最终电压分布和自由振荡分量。 A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示1、2、3次电压谐波的振幅。起始分布和最终分布相差越大, 则自由振荡分量越大, 振荡越强烈, 由此产生的对地电位和梯度电压也越大。

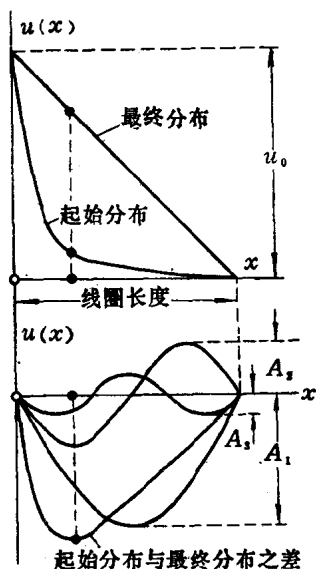


图 1-3 中点接地的电压分布

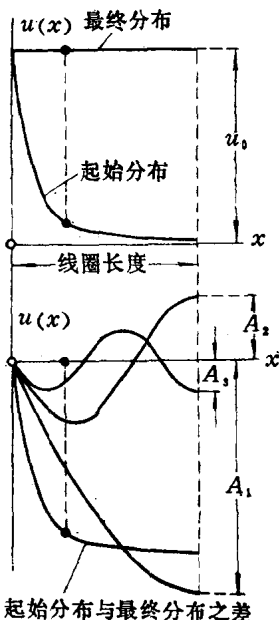


图 1-4 中点绝缘的电压分布

图1-5表示变压器线圈各点的对地电位, 从 $t=0$ 开始, 由起始分布经过振荡而达到最终分布的过程。图上表示出了 $t=0, t_1, t_2, t_3, t_4$ 和 $t=\infty$ 等各个时刻的对地电位分布曲线。由图可见, 线圈上各点电压是时间和空间的函数。即在某一固定时间 t , 有一条电压随线圈各点位置而变化的曲线, 而对于一个固定点, 其

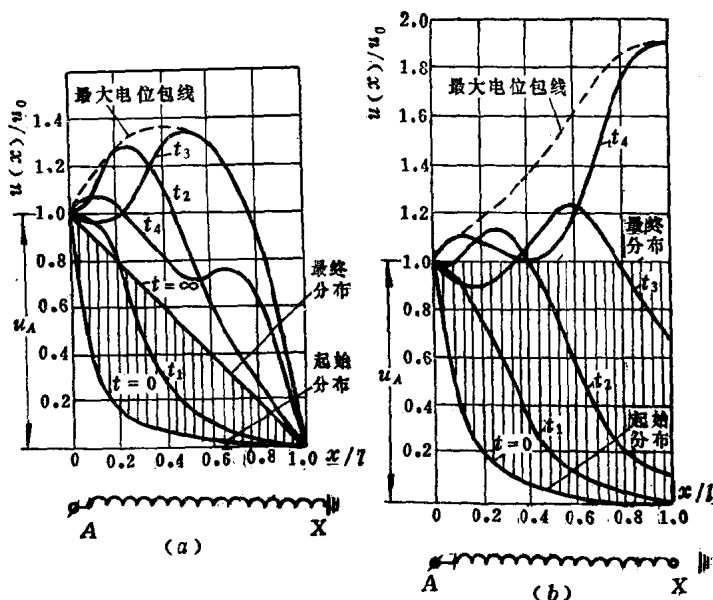


图 1-5 不同时间的电压分布

电压则随时间而变化。

根据线圈各点电压随时间变化的曲线，可以找出各点的最大电位，然后在坐标系上把各点的最大电位连接起来，如图 1-5 的虚线，就是线圈的最大电位包线。由图可见，中性点接地的最大电位比中性点绝缘的小。前者可达 1.4 倍外加电压，出现的地点在线圈中部；后者可达 2.0 倍外加电压，出现的地点在线圈末端。由于变压器有损耗，实际的最大值低于上述数值。

上面定性地说明了线圈各点电位振荡变化的情形，下面进一步作数量分析。在振荡过程中，作为时间空间函数的线圈各点电位的方程式已经列出，是算子方程的形式，如方程 (1-6)、(1-7) 所示。因此求线圈各点电位的问题已经变为求解这两个方程式的原函数的问题。

利用展开定理，求中性点接地时的电压方程式：

$$u(x, p) = u_0 \frac{\text{sh} \gamma(l-x)}{\text{sh} \gamma l} = u_0 \left[\frac{H(p)}{F(p)} \right]$$

$$\doteq u_0 \left[\frac{H(0)}{F(0)} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{H(p_k) e^{p_k l}}{p_k F'(p_k)} \right]. \quad (1-16)$$

显然, $H(p) = \text{sh} \gamma(l-x)$, $F(p) = \text{sh} \gamma l$ 。 p_k 是 $F(p) = 0$ 的根。

由 (1-4) 式知, $p \rightarrow 0$ 时, $\gamma \rightarrow 0$, 因此

$$\frac{H(0)}{F(0)} = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\text{sh} \gamma(l-x)}{\text{sh} \gamma l} = \frac{l-x}{l}. \quad (1-17)$$

求 p_k : 因为 p_k 是 $F(p) = \text{sh} \gamma l = 0$ 的根, 所以由 p_k 求出的 $\gamma_k l$ 必须使 $\text{sh} \gamma l = 0$ 。

由于 $\text{sh} jk\pi = j \text{sink}\pi = 0$, $k = 1, 2, 3, \dots$,

故 $\gamma_k l = jk\pi$, $\gamma_k^2 l^2 = -k^2 \pi^2$ 。

代入 (1-4) 式得

$$\frac{L_0 C_0 p_k^2 l^2}{1 + L_0 K_0 p_k^2} = -k^2 \pi^2, \quad p_k = \pm \frac{jk\pi}{l \sqrt{L_0 C_0 + L_0 K_0 \left(\frac{k\pi}{l} \right)^2}}. \quad (1-18)$$

求 $H(p_k)$: 因为 $H(p_k) = \text{sh} \gamma_k(l-x) = \text{sh} \gamma_k l \text{ch} \gamma_k x - \text{ch} \gamma_k l \times \text{sh} \gamma_k x$,

已知 $\text{sh} \gamma_k l = 0$,

故 $H(p_k) = -\text{ch} \gamma_k l \text{sh} \gamma_k x$ 。

求 $F'(p_k)$: 因为 $F(p) = \text{sh} \gamma l$, $F'(p) = l \text{ch} \gamma l \frac{d\gamma}{dp}$,

故 $F'(p_k) = l \text{ch} \gamma_k l \left(\frac{d\gamma}{dp} \right)_{p=p_k}$ 。

由此得

$$\frac{H(p_k)}{p_k F'(p_k)} = - \frac{\text{sh} \gamma_k x}{p_k l \left(\frac{d\gamma}{dp} \right)_{p=p_k}}.$$

式中, $\left(\frac{d\gamma}{dp} \right)_{p=p_k} = \frac{\sqrt{L_0 C_0}}{(1 + L_0 K_0 p_k^2)^{3/2}}$ 。

将 (1-18) 式的 p_k 值代入上式

$$\left(\frac{d\gamma}{dp}\right)_{p=p_k} = \sqrt{L_0 C_0} \left[1 + \frac{K_0}{C_0} \left(\frac{k\pi}{l} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$p_k l \left(\frac{d\gamma}{dp} \right)_{p=p_k} = j k \pi \left[1 + \frac{K_0}{C_0} \left(\frac{k\pi}{l} \right)^2 \right]。$$

$$\begin{aligned} \text{故 } \frac{H(p_k)}{p_k F'(p_k)} &= - \frac{\operatorname{sh}\left(j \frac{k\pi}{l} x\right)}{j k \pi \left[1 + \frac{K_0}{C_0} \left(\frac{k\pi}{l} \right)^2 \right]} \\ &= \frac{-\sin \frac{k\pi x}{l}}{k \pi \left[1 + \frac{K}{C} (k\pi)^2 \right]}。 \end{aligned}$$

$$\text{设 } \omega_k = \frac{k\pi}{\sqrt{LC \left[1 + \frac{K}{C} (k\pi)^2 \right]}}, \quad (1-19)$$

$$\text{则 } e^{p_k t} + e^{-p_k t} = e^{j\omega_k t} + e^{-j\omega_k t} = 2\cos\omega_k t。$$

将以上结果代入(1-16)式得

$$u(x, t) = u_0 \left[\left(1 - \frac{x}{l} \right) - \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin \frac{k\pi}{l} x \cos \omega_k t \right], \quad (1-20)$$

$$A_k = \frac{2}{\pi} \frac{1}{k \left[1 + \frac{K}{C} (k\pi)^2 \right]}, \quad k = 1, 2, 3, \dots。 \quad (1-21)$$

用同样的方法，可求得中性点绝缘时的电压方程式：

$$u(x, t) = u_0 \left[1 - \sum_{k=1}^{\infty} A'_k \sin \frac{(2k-1)\pi x}{2l} \cos \omega'_k t \right], \quad (1-22)$$

$$A'_k = \frac{4}{\pi} \frac{1}{(2k-1) \left[1 + \frac{(2k-1)^2 \pi^2}{4} \frac{K}{C} \right]}, \quad (1-23)$$

$$\omega'_k = \frac{(2k-1)\pi}{2 \sqrt{LC \left[1 + \frac{(2k-1)^2 \pi^2}{4} \frac{K}{C} \right]}},$$

$$k=1,2,3,\dots\quad (1-24)$$

上面的分析表明:

1. 线圈各点的电压都是由两个分量组成的。一个是稳态分量, 它和空间位置有关, 而和时间无关。中性点接地时, 它等于 $u_0\left(1 - \frac{x}{l}\right)$; 中性点绝缘时, 等于 u_0 。它是线圈各点电压振荡的轴。另一个是振荡分量, 它是空间和时间的函数。中性点接地时, 等于

$$-u_0 \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) \cos \omega_k t.$$

它是时间的余弦函数, 角频率为 ω_k , 它的振幅在空间上按正弦函数

$$u_0 A_k \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right)$$

而分布。

2. 无论中性点是接地还是绝缘, 空间谐波的振幅 A_k 都随着谐波次数 k 的增加而迅速减小。应用公式 (1-21)、(1-23) 可以算出, 当 $al=5$ 和 10 时, 各次谐波与基波幅值之比, 如表 1-2 所示。

表 1-2 谐波幅值与基波幅值之比

工作方式	al	A_2/A_1	A_3/A_1	A_4/A_1	A_5/A_1
中性点接地	5	0.271	0.102	0.0505	0.0257
	10	0.394	0.194	0.107	0.0635
中性点绝缘	5	0.194	0.0317	0.0269	0.0136
	10	0.279	0.127	0.0662	0.038

3. 中性点接地时, 空间谐波的基波沿线圈按半个正弦波分布, 波腹在线圈的中部; 第 k 次空间谐波沿线圈按 k 个 $1/2$ 正弦波分布。中性点绝缘时, 空间谐波的基波沿线圈按 $1/4$ 个正弦波分布, 波腹在中性点, 第 k 次空间谐波沿线圈按 $(2k-1)$ 个 $1/4$