

高等学校教学用书

电 机 学

特 殊 部 分

第 三 册

M. II. 柯斯秦珂著

高等教育出版社

高等学校教学用书



电 机 学

特殊部分

第三册

M. II. 柯斯秦珂 著
浙江大学电机教研组译

高等教育出版社

本書系根据苏联国立动力出版社 (Госэнергоиздат) 出版的柯斯泰珂 (М. П. Костенко) 院士著的“电机学, 特殊部分” (Электрические машины—специальная часть) 1949 年版譯出的, 原書經苏联高等教育部审定为动力系及电工系、动力高等学校及电工高等学校用的教学参考書。

本書研究对于許多不同型式的电机而言其本質是共同的复杂过程和运轉状态。本書計十四篇, 共五十章。中譯本分三册出版。第三册包括第九篇至十四篇: 第九篇講述变压器及电机中的高頻振荡和过电压; 第十篇講述电机及变压器中的附加力矩和应力; 第十一篇講述电机及变压器中的附加損耗; 第十二篇講述电机的發热、冷却和通風; 第十三篇講述运算微积应用于电机和变压器的过渡过程的研究; 第十四篇講述整流器。

本書可供上述高等学校电机專業的高年級学生研究电机学特殊部分时之用, 对在电机方面願求深造的科学工作者和电气工程师也可供参考之用。

本書是由浙江大学电机教研組翻譯, 交通大学电机原理教研組校訂的。

电 机 学

特 殊 部 分

第 三 册

M. П. 柯斯泰珂著

浙江大学电机教研組譯

高等教育出版社出版北京宣武門內承恩寺 7 号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号)

京华印書局印刷 新华書店發行

統一書号 15010·565 開本 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印張 12 $\frac{2}{3}$
字數 279,000 印數 0001—4,000 定價 (10) 元 1.50
1958 年 12 月第 1 版 1958 年 12 月北京第 1 次印刷

主要符号

A_e —磁通位能
 A_m —动能
 B_p —磁感应的脉振幅
 B_{ZD} —在轉子表面由齿磁場所生磁感应
 B_v — v 次諧波磁感应
 b_n —槽寬
 b_s —槽口寬
 C —綫路單位長度的电容; 繞組單位長度的对地电容
 c —比热
 F —机械力
 F_v — v 次諧波磁势振幅
 G —物体質量
 H —磁化力
 H —气体静压力
 H_d —气体动压力
 h_k —导体临界高度
 h_n —槽或齿的高度
 h_a —压力損失
 I_1, I_a, I_s —电流諧波分量
 I_g —整流后的电流
 I_e —电流的等效值
 i_q —定子电流橫軸分量
 K —繞組單位長度的匝間电容
 k —导热系数
 k_F —挤流引起的电阻增加系数
 k_a —压力損失系数
 L_1, L_2 —变压器原繞組和副繞組的自感系数
 l_n —半匝的槽內部分長度
 l_s —繞組端接部分長度
 M_h —磁滯力矩
 M_r —反应力矩
 M_s —整步力矩系数
 M_e —电磁力矩
 m_a —非周期性电流分量所生力矩的瞬时值
 O —物体表面积
 P_g —整流器直流方面的功率
 p_d —附加損耗
 p_m —表面損耗
 p_p —脉振損耗
 p_v —通風損耗
 Q —單位時間內的热能量(热流)
 R —半徑
 R —热阻
 R_t —絕緣的热阻

S —物体表面积
 S_l —进入一个槽內的繞組端接部分总截面
 S_n —进入一个槽內的繞組槽內部分总截面
 s —繞組导体橫截面
 T —發热时间常数
 T_0 —自然振蕩周期
 λ —波前長度
 V —消費風量
 v —冷却空气的速率
 v —过电压波的傳播速率
 v_μ — μ 次諧波的圓周速率
 W —热流密度
 W_e —电磁能量
 W_m —彈性能量
 z_w —綫路或繞組的波阻抗
 α —表面散热系数
 α —电阻的溫度系数
 β —絕緣厚度
 γ —比重
 γ —气体密度
 Δ —鋼片厚度
 Δ_t —絕緣厚度
 $\Delta\tau$ —由于各种損耗造成的溫升分量
 η_0 —吹風系数
 η_{st} —風扇的靜效率
 η_v —風扇的机械效率
 θ —溫度
 θ_0 —无激磁时的空載溫度
 θ_E —有激磁时的空載溫度
 θ_k —短路时的溫度
 θ_a —空气溫度
 θ_{Cu} —繞組銅的溫度
 θ_{Fe} —鉄心溫度
 λ —热导
 λ —絕緣的热导
 μ —空間諧波序次
 ν_g —齿諧波序次
 ξ —气体动力常数
 σ_f —渦流損耗系数
 τ —溫升
 τ_0 —初始溫升
 τ_m —極限溫升
 τ_l —槽絕緣溫度降落
 Φ_k —短路时磁通
 Ω_r —轉子角速率

第三册目录

主要符号

第九編 变压器及电机中的高频振荡和过电压

第三十四章 变压器及电机中的高频振荡.....	407	§ 153. 变压器中的过电压.....	414
§ 150. 过电压的一般特征.....	407	§ 154. 变压器的过电压保护.....	418
§ 151. 当不同频率时变压器及电机的等值电路.....	407	§ 155. 电机中的过电压.....	420
§ 152. 在变压器及电机中高频振荡的产生.....	409	§ 156. 电机及变压器的振荡回路对于断路器触头间 电压恢复过程的影响.....	425
第三十五章 变压器及电机中的过电压.....	414		

第十編 电机及变压器中的附加力矩和应力

第三十六章 高次谐波磁势在鼠笼轉子异步电动 机中所引起的力矩	430	§ 161. 突然短路时附加力矩形成的一般情景.....	441
§ 157. 概述.....	430	§ 162. 当突然短路时力矩的基本方程式.....	444
§ 158. 高次谐波磁势的异步力矩.....	430	§ 163. 計及激磁电路瞬变电流的影响下同步电机振 荡时的整步和阻尼力矩系数.....	450
§ 159. 高次谐波磁势的同步力矩.....	435	§ 164. 同步电机静过载能力和动过载能力的比較.....	454
§ 160. 振动的幅向力.....	439	第三十八章 短路时繞組中的机械应力	456
第三十七章 在运行的过渡状态下同步电机的附 加力矩	441	§ 165. 短路时变压器繞組中的应力.....	456
		§ 166. 当突然短路时同步电机繞組中的机械应力.....	458

第十一編 电机及变压器中的附加損耗

第三十九章 繞組中的附加損耗	464	§ 170. 当具有屏蔽作用时鋼片中的渦流損耗.....	471
§ 167. 交流电机电樞繞組中的渦流損耗.....	464	§ 171. 極掌表面的損耗.....	473
§ 168. 直流电机电樞繞組中的渦流損耗.....	467	§ 172. 齿內脉振損耗.....	475
§ 169. 变压器繞組中的渦流損耗.....	469	§ 173. 負載时在电机整塊金屬部分中的附加損耗.....	477
第四十章 鋼中的附加損耗	471	§ 174. 轉子中磁滯和渦流的力矩以及异步机的附加 損耗.....	479

第十二編 电机的發热、冷却和通風

第四十一章 电机的發热和冷却过程	482	§ 181. 溫度在电樞繞組和鉄中分布的計算.....	497
§ 175. 理想固体的發热过程.....	482	§ 182. 由發热試驗求得个别的温升分量.....	501
§ 176. 理想固体的冷却过程.....	485	§ 183. 温升的疊加法.....	502
§ 177. 由發热曲綫或冷却曲綫的一段来决定最后溫 度.....	487	第四十三章 电机的通風.....	504
§ 178. 短时和間歇运行情况的發热过程.....	488	§ 184. 概述.....	504
§ 179. 計算电机發热的等值热路.....	492	§ 185. 用空气冷却电机.....	504
第四十二章 在稳定运行情况下电机繞組中和鉄 中的溫度分布	494	§ 186. 电机的通風系統.....	505
§ 180. 稳定热流方程式.....	494	§ 187. 通風計算基础.....	508
		§ 188. 用特殊气体冷却电机.....	512
		§ 189. 用液体冷却电机.....	514

第十三編 运算微积应用于电机和变压器的过渡过程的研究

第四十四章 在研究过渡过程时应用运算微积的 若干說明	515	运算微积公式.....	515
§ 190. 概述.....	515	第四十五章 副边短路的空气变压器合閘时的过 渡过程	519
§ 191. 解电机和变压器中过渡过程方程式时所应用的		§ 192. 变压器接入恒定电势的網絡时的过渡过程.....	519

第九編 变压器及电机中的高频振荡和过电压

[参考文献 497, 772, 789, 791, 813, 818]

第三十四章 变压器及电机中的高频振荡

§ 150. 过电压的一般特征

人們把所有超过額定值的电压升高,不論它的久暫,都称为过电压;但通常这一名詞不了解为長期的电压升高,例如,饋电給某一电力系統的發电机超速时所产生的情况,而是指很短暫的过程,具有个别短时冲击的或高频振荡的特征,它們在一定的条件下产生并在电力系統中傳布。因此,按照产生过电压的原因是否位于电力系統之內或在系統之外而区别为內部的及外部的过电压。

內部的过电压發生于当系統运行状态剧烈变更时,例如,当負載接入、切除以及突然变更时,随着这些情况系統中儲藏的电能和磁能有所改变;这种过电压称为操作过电压。属于內部的过电压还有那些發生于系統事故状态下的,例如,在切断无載綫路、短路、切除短路、重复电弧接地时,等等。

外部的过电压系由于各种大气中电的現象而产生,这些現象是: 1) 雷电直接击中輸电綫, 2) 云層放电时綫路中的电磁感应現象, 3) 充电云層的靜电感应現象, 4) 由于風中带有微粒如灰塵、雪等等而使導綫带电。

正如观察指出,操作过电压的数值通常不超过 $3-4.5 U_{\phi N}$, 且其振幅愈高时則重复發生愈为稀少。至于雷电过电压,其数值可超过 $10-15 U_N$ 。过电压的波(脉冲)在大部分中均带来高次諧波振荡,有时整个过电压的过程即是高频振荡。且通常波前的陡度随着振幅的增加而增加,这就更增加了这种波的危險性。

如所周知,过电压波以速率 $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 沿綫路傳播,其中 L 和 C 为綫路單位長度的电感和电

容;对于在空气中的綫路該速率接近光的傳播速率。綫路的主要特征之一为其波阻抗 $z = \sqrt{\frac{L}{C}}$; 对于空气中的綫路 $z \approx 500-600 \Omega$; 对于電纜綫路,由于电容很大, $z \approx 50 \Omega$; 与此相反,对于变压器其波阻抗比之空气中綫路将大出若干倍,且对于所有的冲击波和振荡皆非恒值。对于电机波阻抗較不确定,其值在 $200-2000 \Omega$ 的範圍內。

§ 151. 当不同頻率时变压器及电机的等值电路

各种过电压沿着电力系統傳播达到了接在系統上的变压器和电机的繞組以后,将在其中激起如下所述的复杂的电磁过程。在研究这种过程时,主要的概念是变压器和电机繞組对于过电压波的“等值电路”(不可和作为电磁器具的变压器或电机的等值电路相混淆, § 64)。所有問題

的分析归结为当不同波形和频率的脉冲和振荡作用在这一“等值电路”时，对其特性的研究。显然，要对这些现象作完整的研究，必须考虑所有变压器和电机绕组的组合以及知道当过电压波袭击时这些绕组的详细情况，也就是要考虑到那些绕组开路、那些有负载、那些被接地以及如何接地等等。

当变压器和电机在额定频率下运行时，其等值电路由绕组的电抗和电阻的集中常值所组成。在此情况下，通过绝缘的有功电流和电容电流皆非常小因此不加考虑。如果在变压器和电机中进行的过程、和相当于很高频率的振荡的短时过程有关时，则通过绝缘的电容电流，无论通向机壳或界于匝间，都达到和通过绕组的电流同一级大小，因此电容耦合应加以注意。此时电机的等值电路已不能用集中参数表示而需用分布参数表示了，这提供了同时考虑传导电流和位移电流的可能性。

当单相变压器运行在高频率时其完全等值电路具有极复杂的形式，如图 444, a 所示。其中 $A-X$ 表示高压绕组，绕组单位长度的每一元件具有电感 L_1 、电阻 R_1 、电容 K_1 和介于元件两端间的绝缘的有效电导 G_1 ，元件电容 C_1 以及对于机壳的绝缘电导 g_1 。同样地，低压绕组元件具有参数 L_2 、 R_2 、 K_2 、 G_2 、 C_2 和 g_2 。此外在等值电路中应当考虑界于高低压绕组元件间的互感 M_{12} 、电容 C_{12} 和绝缘电导 g_{12} 。

完全的等值电路(图 444, a)是如此复杂以致使分析相当困难。因此在解实际问题时必须寻求简化的方法。例如，在一些场合中，可仅研究在一个高压绕组中的现象，再部分地考虑到低压绕组的影响，这样可以得到图 444, b 的等值电路，其中电容 C_1 、 C_2 和 C_{12} 被等效电容 C' 替代，电导 g_1 、 g_2 和 g_{12} 被电导 g' 替代，而常数 L_2 、 K_2 、 R_2 和 M_{12} 从线路中取消。

不难证明，当 A 端对地之间的电振荡的频率在量的方面变更时，这种线路的特性将受到本质

上的变化。当频率等于零时，即相当于直流时，外加电压完全均匀地分布在整个绕组上。在低频率的交流电流的场合将发生同样情形，这时电压的分布主要地将由电感 L_1 决定。但当频率增加时电容 K_1 和 C_1 开始逐渐增加其影响。如对图 445 的线路元件加

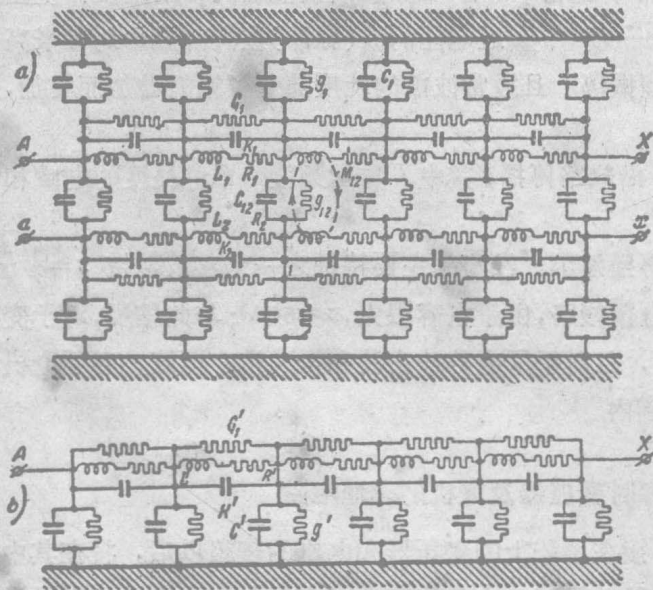


圖 444. 在高频率条件下变压器的线路: a) 完全的等值电路, b) 简化的等值电路。

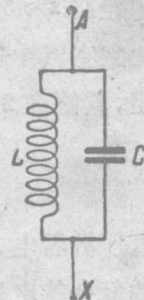


圖 445. 并联的电感及电容的线路。

以研究,这将是明显的。线路中电感 $L=1$ 亨和电容 $C=0.01$ 微法并联。当振荡频率 $f=50$ 赫兹时则介于 A 和 X 端点间接有并联连接的电感电抗 $x_L=2\pi fL=314\Omega$ 和电容电抗

$$x_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1 \times 10^6}{314 \times 0.01} = 320000\Omega,$$

而当频率 $f=50 \times 10^3$ 赫兹时电抗相应地为 $x_L=314000\Omega$ 及 $x_c=520\Omega$ 。

在单匝线圈的电机中,匝间电容 K 比之对地电容 C 小去很多。因此这种电机的绕组实际上可以看作具有分布参数的有限长的线路,具有某一足够确定的波阻抗 $z=\sqrt{\frac{L}{C}}$,而在变压器中由于匝间电容 K 相当大,过程比较更为复杂。

§ 152. 在变压器及电机中高频振荡的产生

在变压器和电机中,由于电感和电容元件耦合关系的存在,在某些条件下给予在其中产生振荡回路的可能。该回路具有一定的自然振荡的角频率,等于:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

因为电容 C 和电感 L 的乘积很小,于是从而可得,自然振荡频率较高,通常在 10^4 — 10^5 赫兹的范围内。

在变压器和电机中形成高频振荡的最有表征性的情况之一,为借断路器来切除电路和输电线的短路部分时在断路器接触点间的电压恢复过程,该电路或输电线系由发电机的母线经过变压器和限流电抗器来供电的。我们试考虑最简单的情况,其中断路器将短路的电抗器从无穷容

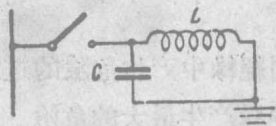


图 446. 切除短路的电抗器的线路。

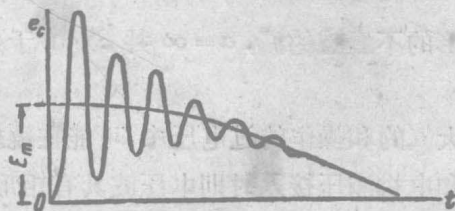


图 447. 当正弦电压接通时电容端电压变化的曲线。

量电网中切除,电抗器的电路可仅为等值的 L 和 C 并联的电路(图 446)。在此场合电路的电阻 R 和它的电感电抗相比为值甚小,因此电路中的电流滞后于发电机的电势 90° 。当断路器的接触点分开时其間有电弧形成,该电弧系由儲藏在电感电路中的电磁能 $\frac{1}{2}Li^2$ 来维持的。当电流通过零时电弧熄灭,此时电磁能为零。由于电流滞后于电势 90° ,于是当电流等于零时按 $E_m \cos \omega t$ 规律变化的发电机电势将等于最大值。这样,在电弧熄灭时电容被电压 E_m 充电,随即开始向 L 和 R 的电路放电,而电容上的电压(参考文献 1079, 第 331 页)将依下列规律变化。

$$e'_c = E_m \cos \omega_0 t \cdot e^{-\frac{R}{2L}t}.$$

此时断路器接触点间的电压 e_s 将等于电网电压 $E_m \cos \omega t$ 与电容器上的电压 e'_c 之差:

$$e_s = E_m (\cos \omega t - \cos \omega_0 t \cdot e^{-\frac{R}{2L}t}), \quad (1170)$$

也就等于[参考文献 1079, 第 342 頁]在 R, L 和 C 串联的电路, 当正弦电压通过其最大值时将該电压接通后电容上的电压(圖 447)。

由于强制频率 f 比綫路的自然频率 f_0 小很多倍, 那么可以認為 $f \approx 0$, 而(1170)式得到下列形式:

$$e_s = E_m(1 - \cos \omega_0 t \cdot e^{-\frac{Rt}{2L}}). \tag{1171}$$

如果略去电路的衰减, 令 $R=0$, 則

$$e_s = E_m(1 - \cos \omega_0 t). \tag{1172}$$

在繞組中产生高频振荡的另一原因是受行波的作用。

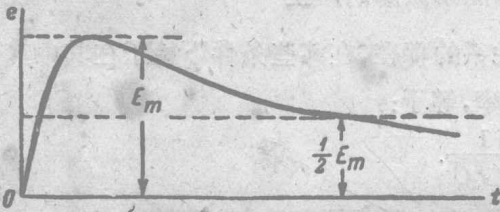


圖 448. 具有短时的非周期性的雷电放电特征的曲线。

雷电的放电通常产生短时的非周期性的具有很大幅度的脉冲, 其特性曲线表示在圖 448 中。由于大气原因而产生的行波, 它的特性是用系統上被作用的一点的电压由零上升到 $E_{\max}$ 及由 $E_{\max}$ 下降到 $\frac{1}{2} E_{\max}$ 的时间来表示。通常电压用千伏、时间用微秒为單位。电压从 0 增长到 $E_{\max}$ 的时间表示出波前的陡度。用数学

表示行波襲击到系統某一点上的过程时, 波可以用下列形式的时间函数表示:

$$e = -E_{\max} e^{-\alpha t} + E_{\max} e^{-\beta t} = E_{\max}(-e^{-\alpha t} + e^{-\beta t}). \tag{1173}$$

在 $\alpha = \infty$ 的情况下, 波具有矩形的波前, 于是

$$e = E_{\max} e^{-\beta t}. \tag{1174}$$

对于矩形的不衰减的波, $\alpha = \infty$ 并 $\beta = 0$, 于是

$$e = E_{\max}. \tag{1175}$$

在大气的和操作的过电压中, 可能在繞組对机壳絕緣或匝間絕緣中产生危险的过电压, 而当变压器和电机滿压接入时則电压波具有矩形的特征, 对于匝間絕緣产生最大的危险。

我們进而研究, 当有陡波前的行波加在变压器繞組上时所产生的振荡的主要景象。

在正弦波中, 在波增加的开始一段上, 可以認為正弦值与用弧度表示的角度成正比。因此在这种正弦波的开始一段波前的陡度可由比值

$$\left[\frac{\omega E_m \sin \omega t}{\omega t} \right]_{t=0} = \omega E_m$$

决定, 亦即波前的陡度等于角频率乘以电压的振幅 E_m 。相反地如果已知波前的陡度为同样的最大电压 E_m 对时间 t 之比, 在这时间中电压按直线上升而达到 E_m , 那末对应的正弦振荡的等效频率可从下式求得:

$$\omega E_m = \frac{E_m}{t},$$

从而

$$f = \frac{1}{2\pi t} = \frac{0.159}{t} = \frac{159 \times 10^3}{t_{\text{微秒}}}.$$

例如, 如果波前的长度已被决定, 在 1.5 微秒时间内电压升高到最大值, 則正弦振荡的等效频率

等于

$$f = \frac{159 \times 10^3}{1.5} \approx 106000 \text{ 赫兹}.$$

假设有一矩形波前的波加在变压器的绕组上。在这一情况, $t \approx 0$ 和 $f \approx \infty$, 因此在开始的瞬间对于这种波来说, 电感将成为无限大的电抗, 变压器的等值电路变成一个串联和并联的电容系统(图 449)。矩形波在极短促的瞬间中, 总共只有几十分之一微秒, 进行电容的充电, 而由于匝间电容的存在, 从电容链的始端到末端电压降的分布将不均匀。

观察总共由四个环节组成的电容链(图 450), 并在 1、2、3、4 和 5 各点上加以对地的电压 u_1, u_2, u_3, u_4 和 u_5 , 上节所述情况可在这一特殊的情形下, 其中 $C_1 = K_1 = C$, 很明显地得到证明。此时为了肯定起见假设零点 X 是绝缘的, 并假设组成电路的所有电容的电荷的瞬时值在图 450 中用 $q = q_1, q_2, q_3, q_4, q', q''$ 和 q''' 表示。

利用了这些符号, 根据众所周知的电荷、电容和电压间的关系, 可得下列关系:

$$q_1 = q; \quad q_2 = 2q_1; \quad q' = q_2 + q_1 = 3q;$$

$$q_3 = q' + q_2 = 5q; \quad q'' = q_3 + q' = 8q;$$

$$q_4 = q'' + q_3 = 13q; \quad q''' = q_4 + q'' = 21q;$$

$$u_1 = \frac{q_1}{C} = \frac{q}{C}; \quad u_2 = \frac{q_2}{C} = 2 \frac{q}{C}; \quad u_3 = \frac{q_3}{C} = 5 \frac{q}{C};$$

$$u_4 = \frac{q_4}{C} = 13 \frac{q}{C}; \quad u_5 = \frac{q_4}{C} + \frac{q'''}{C} = (21 + 13) \frac{q}{C} = 34 \frac{q}{C}.$$

根据上述, 电位 u_5 等于 E_m 。那么 1、2、3、4 和 5 各点对地的电位相互成 1:2:5:13:34 之比。画出(图 450)这样的电压沿绕组的分布后, 我们可以看出电压 E_m 的主要部分是在靠近起点 A 的环节上。

在稳定的状态下沿系统的电容链各环节的电位分布应当是均匀的, 因为这种状态相当于通过直流电流的情况。当中点接地时电容链中每个环节上的电压降将等于 $\frac{E_m}{n}$, 其中 n 为电容链的环节数, 但当中点不接地时电容链的所有环节将得到同样的电位, 等于电容链的进入环节上的电位 E_m 。

由于最终的电位分布并不与初始的分布相对应, 于是从初始状态向最终状态的过渡将以向着最后分布的振荡方式来完成, 这振荡具有类似于弦的振荡驻波的形式。这时在绝缘的中点上

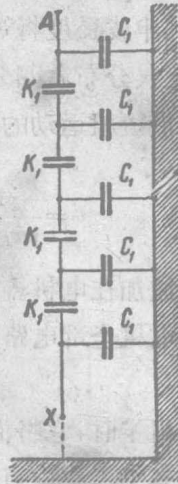


图 449. 在很高频率时表示变压器等值电路的串联和并联电容的系统。

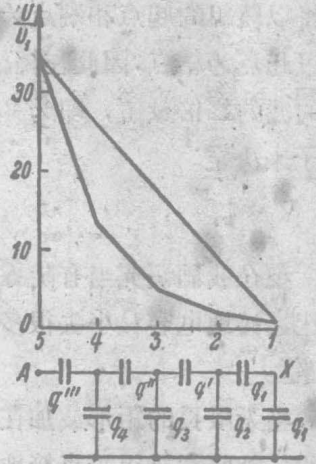


图 450. 当过电压的矩形波进入变压器时, 在其绕组环节上近似的电压初始分布。

的对地电压的数值可能为 $2E_m$ ，而匝間电压比稳定状态时要大出很多。这些振荡不論是在沿繞組的空間上的，或在時間上的，均可以分成基波和高次諧波的振荡，而且自由振荡的頻率将等于

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}, \quad (1176)$$

其中 L_1 和 C_1 表示对于某一諧波的集中的等效自感和电容系数。当中点接地时振荡的空間基波将以繞組的起点和端点为結点，其半波長度将等于繞組的長度，而当中点不接地時空間基波仅仅以起点为結点，因此在繞組長度上仅分布着四分之一的波，繞組末端的电位将升高到加在繞組上的波的二倍数值，即为 $2E_m$ 。波沿繞組运动的条件速度可利用与具有分布参数的綫路同样的式子来决定。

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}. \quad (1177)$$

現在我們研究当有陡聲波前的波加在电机繞組上时产生振荡的原理，在这場合中匝間电容 K 比之接地电容 C 小去很多，因此电机全部电路可比拟为一支有限長度而有分布参数 L 和 C 的綫路。

当无限長的矩形波加在这种繞組上时，它将沿着繞組移动，从繞組的两端反射回来，这时振荡的特性将与繞組端点接地的方法有关。在中点直接接地的場合中，当每次波达到繞組末端时，即产生从末端反射回来的波，該波具有和入射波相反的符号而向繞組起端傳播，然后这种过程将不断地重复。在中点絕緣的場合中，从末端反射回来的波将有和入射波相同的符号，因此电压被提高到 $2E_m$ ，然后从起端产生波的反射，电压又重新降低为 E_m 。在从中点第二次反射之后电压变成等于零，而过程重新开始。

由于在具有分布参数的綫路上的波的过程中，儲藏在每一个單位長度的环节中的能量，一半藏在磁場里 $\left(\frac{1}{2}LI^2\right)$ 而另一半藏在电場里 $\left(\frac{1}{2}CE^2\right)$ ，于是

$$\frac{P}{2} = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}CE^2,$$

$$\text{从而} \quad \frac{E}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}} = z_w, \quad (1178)$$

其中 z_w 为綫路的波阻抗，具有通常电阻的因次。

如果用示波器攝取繞組上点与地之間的电位差，这些点离开繞組起端的距离等于 $x=0$, $x=0.25$, $x=0.50$ 及 $x=0.75$ ，則当中点接地时示波圖有如圖 451 所示的形状，而对于絕緣的中点則有如圖 452 所示的形状。很明显的由这些示波圖可以看出波的进行的特性有高频脉振的形式。

如用 l 表示繞組長度，則当中点接地时振荡的整个周期由下式决定

$$T_0 = \frac{2l}{v} = 2l\sqrt{LC}, \quad (1179)$$

从而自然振荡的頻率等于

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2l\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C'}},$$

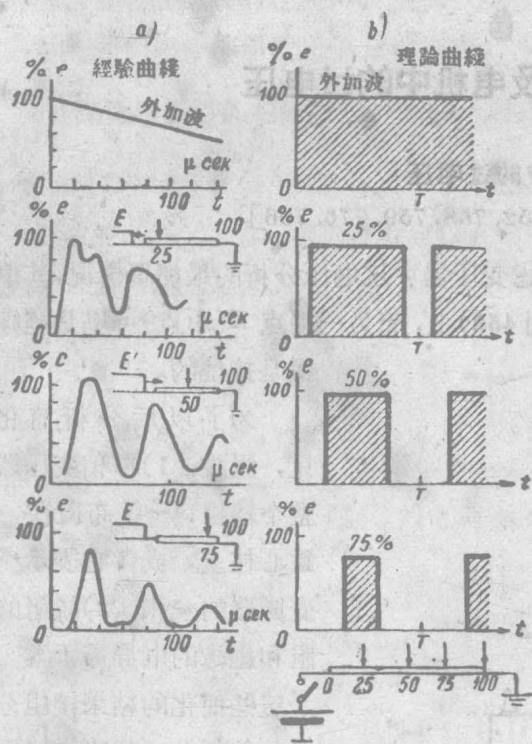


圖 451. 当中点接地时同步电机繞組不同各点对地电位的示波圖及理論曲綫。

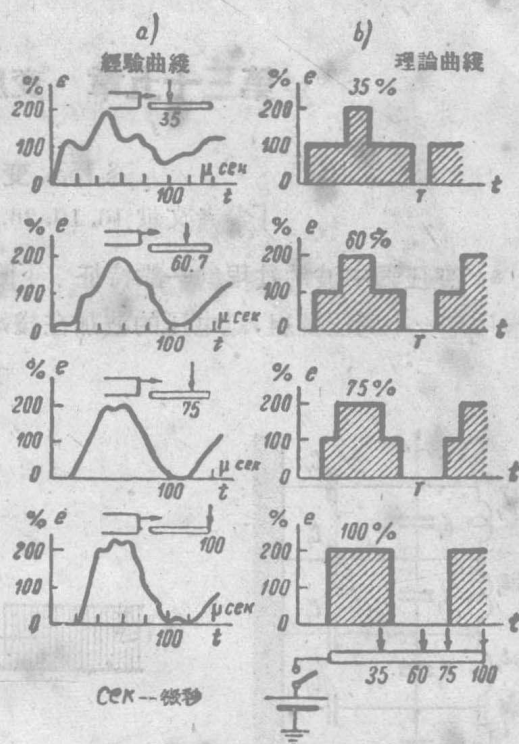


圖 452. 当中点絕緣时同步电机繞組不同各点对地电位的示波圖及理論曲綫。

其中

$$L' = \frac{Ll}{\pi}$$

又

$$C' = \frac{Cl}{\pi}$$

如果繞組末端經過一电阻接地, 这电阻等于波阻抗

$$R_z = z_w = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

則在这場合中当波达到繞組末端后它将向电阻 R_z 傳送功率

$$I^2 R_z = I^2 \sqrt{\frac{L}{C}} = I^2 \frac{E}{I} = IE = P.$$

由于所有傳送到繞組末端的功率 P 将完全消耗在接地电阻中, 于是从繞組的末端将不产生任何波的反射, 因而, 波沿繞組的进行将不带来任何振蕩。

第三十五章 变压器及电机中的过电压

§ 153. 变压器中的过电压

[参考文献 16, 19, 26, 749, 752, 758, 759, 776, 796]

a) 变压器中波的过程的一般特征 下面将考虑变压器中过电压分析的最简单情况, 其中变压器只有一个高压绕组, 过电压的波加在线端 A (圖 453) 上, 而另一端点 X (中点) 可以是絕緣的或是接地的。

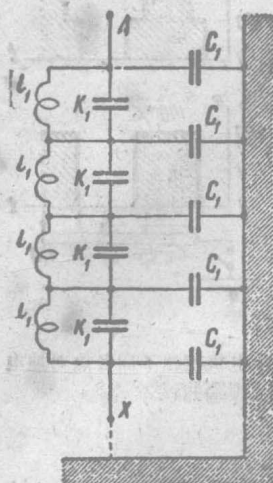


圖 453. 对于波的过程的变压器高压绕组的等值电路。

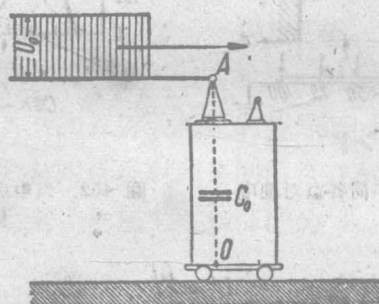


圖 454. 有陡变波前的过电压波进入具有等值电容 C_0 的变压器绕组的近似线路。

为了以后分析简化起见, 假设: 1) 单相变压器的整个绕组 $A-X$ 布置在一个铁心柱上, 或者它表示三相变压器的一相; 2) 绕组的电阻和絕緣的电导等于零。由于这些简化的结果绕组分为单独的部分 (线匝, 线圈等等); 每一部分有电感 L_1 (并考虑到这一部分与其余部分的互感), 这一部分对于相邻部分的电容 K_1 以及对地的电容 C_1 。

在很高的频率和短时的脉冲中, 圖 453 的电路可代替圖 449 的电路来进行对于波通过的初始瞬间的分析; 绕组宛如被分割为它的组成部分, 在此场合中仅分为电容 K_1 和 C_1 。对于高频振荡或脉冲的变压器绕组“等值电路”内所有这些电容的组合, 可以用某一等值电容 C_0 代替, 这电容称为变压器的入口电容 (圖 454)。可以证明, $C_0 = \sqrt{CK}$, 其中 $C = nC_1$, 而 $K = \frac{1}{n}K_1$, n 为在研究过电压现象时绕组所分成的部分 (元件) 的数目, 这样 C 即为整个绕组对地的电容, 而 K 为联在线端 A 的第一个元件和最末一个元件间的电容。

从过电压波进入时开始在变压器中进行的极短时的过程, 将不但和变压器的参数有关, 也和波的参数有关。在分析中最简单的情况是具有矩形波前的无限长的波 U_0 。具有别种形式的脉冲现象的分析可以化成这一基本情况, 这将在下面述及。可以证明, 所产生的现象可以看作三个过程的合成, 其中两个直接地相互重合, 而第三个是它们的结果。这些过程是: 1) 在变压器进入端的电位逐渐从零升高到约为 U_0 的二倍数值, 2) 这一上升的电位沿变压器绕组分布, 由于这分布的结果, 绕组每一部分获得对地以及对绕组相邻部分的一定的电位, 3) 这样, 绕组失去它的电平衡状态, 并成为复杂的空间的电容组合 (在 1) 和 2) 项以后的较长的过程中也是电感的组

合),它仅能经过振荡的过程再回复到平衡的状态。由于绕组的电阻及绝缘电导的作用振荡逐渐衰减。我们简短地研究上述三种过程。

6) 在变压器进入端的电位的增加 过电压波经过具有波阻抗 $z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 的线路进入到变压器上(圖 454), $z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 中的 L 和 C 为线路单位长度的自感和电容。令进入波的电压等于 U_0 , 而反射波的电压为 U'_0 。根据反射定律在电容 C_0 上的电压的瞬时值为 $u_c = U_0 + U'_0$, 而通过 C_0 的电流根据同样的定律为 $i_c = i_0 - i'_0$, 其中 i_0 为进入波的电流, 而 i'_0 为反射波的电流。将后一等式乘以 z , 得:

$$i_c z = i_0 z - i'_0 z = U_0 - U'_0.$$

从而

$$U'_0 = U_0 - i_c z,$$

因此

$$u_c = U_0 + U_0 - i_c z = 2U_0 - i_c z. \quad (1180)$$

另一方面,电压 u_c 可以用电容 C_0 的电荷 q_c 对该电容之比表示,得:

$$u_c = \frac{q_c}{C_0} = \frac{1}{C_0} \int i_c dt. \quad (1181)$$

使(1180)和(1181)式相等,可得:

$$2U_0 - i_c z = \frac{1}{C_0} \int i_c dt, \quad (1182)$$

上式经微分后可得微分方程式

$$-z \frac{di_c}{dt} = \frac{i_c}{C_0}.$$

将上式微分得

$$i_c = \text{const} \cdot e^{-\frac{t}{zC_0}}. \quad (1183)$$

当 $t=0$ 时从(1182)和(1183)式可得

$$\text{const} = \frac{2U_0}{z}.$$

最后

$$i_c = \frac{2U_0}{z} \cdot e^{-\frac{t}{zC_0}}, \quad (1184)$$

而

$$u_c = 2U_0(1 - e^{-\frac{t}{zC_0}}). \quad (1185)$$

在进入端 A 上电压依照指数函数增加(圖 455)。当时间经过 $t = 3zC_0$ 秒后, $u_c = 1.95U_0$, 即电压几乎达到最终(二倍的)数值。作为一个例子, 如取 $z = 500\Omega$ 及 $C_0 = 5 \times 10^{-10}$ 法, 则 $t = 3zC_0 = 3 \times 500 \times 5 \times 10^{-10} = 0.75 \times 10^{-6}$ 秒。这样, 从波进入时到变压器入口端的电压成为二倍值时止, 其中时间约经过一个微秒。

Б) 沿变压器绕组电压初始分布的概念 我们重新注意初始电容链(圖 449)的入口电容 C_0 。加在这种电容链上的线端 A 和 X 之间的电压 U_0 将不能沿着其长度作均匀的分布, 因为由于电容 C_1 的存在破坏了匀称性。详细的分析指出, 沿着替代绕组的电容链上的电压是按照双曲线函数分布的, 而在绕组任何一点 x , 对地的电压 u_x 在中点接地的情况表示为

$$u_x = \frac{U_0 \operatorname{sh} \frac{\alpha x}{l_1}}{\operatorname{sh} \alpha}, \quad (1186)$$

在中点絕緣的情况表示为

$$u_x = \frac{U_0 \operatorname{ch} \frac{\alpha x}{l_1}}{\operatorname{ch} \alpha}. \quad (1187)$$

在这里 $\alpha = l_1 \sqrt{\frac{C_1}{K_1}}$, 距离 x 系从繞組的末端向它的起始端計算, 而 l_1 表示变压器繞組的全長。(1186)和(1187)式給出电压沿繞組的初始分布的規律。由于在近代的变压器中 $\alpha = 5-15$, 对于所述的二种情况, 无论是中点接地的(圖 456, a)或中点絕緣的(圖 456, b), (1186)式和(1187)式均給出大致相同的电压初始分布圖形。

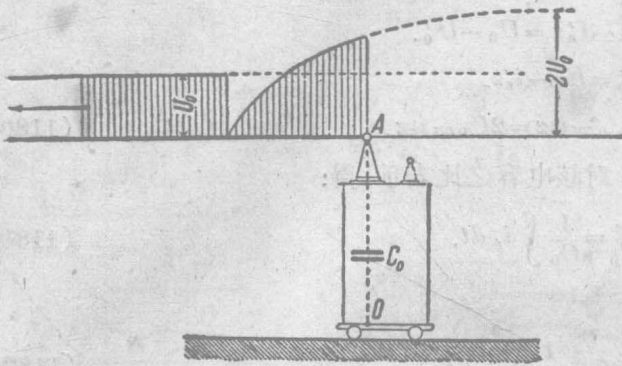


圖 455. 当有陡壁波前的波加到变压器上时在其繞組端的电压升高圖。

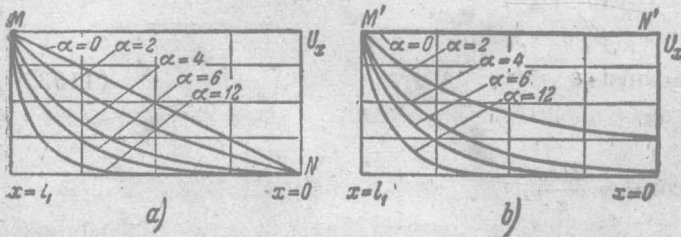


圖 456. 当过电压波进入变压器繞組时电压沿繞組的初始分布曲线: a) 中点接地和 b) 中点絕緣。

从(1186)和(1187)式决定上述的导数值并考虑到在 $\alpha > 3$ 时, $\operatorname{cth} \alpha \approx \operatorname{th} \alpha \approx 1$, 則在两种情况下我們得到

$$\left[\frac{\partial u_x}{\partial x} \right]_{x=l_1} = \frac{U_0}{l_1} \alpha. \quad (1188)$$

第一个乘数給出当电压均匀分布时的电压坡度值, 而第二个乘数表示与此均匀性相差的程度。考虑到上述的 α 值, 可以見到准确分析指出电压沿变压器繞組初始分布的很大不均匀性, 而且靠近起始点 A 的繞組元件显然需要更强的絕緣。

г) 关于变压器繞組中电压最終分布及振蕩的概念 显然, 在无限長的波和中点接地的情况下, 經過足够的時間后, 波沿着繞組作均匀分布。在圖 456, a 中波的最終分布用斜綫 MN 表示。在同样的波和当中点絕緣的情况下, 經過足够的時間后所有繞組将获得同样的电位 $2U_0$, 而电压

的最終分布用圖 456, *b* 中的 $M'N'$ 綫表示。正如上述, 从电压的初始分布到最終分布的过渡是由按時間和空間而进行的振蕩来完成的。在这一阶段的現象的分析是相当复杂的, 因为必須考虑繞組各部分間的电磁关系的影响, 这样的关系是不能用任何簡單的規則来表示的。

依照对于上述关系所作的种种簡化, 得到在变压器繞組中电压振蕩进行規律的种种表示式。这些所得到的表示式皆为偏导数微分方程的解(在最簡單的假定中亦不低于四級); 比較准确的分析将导致积分——微分方程。这些方程式的解答, 給出下列結果: *a*) 在繞組中进行的过程是周期性的并按指数規律衰减; 电压在空間依 x 坐标即繞組長度而改变并在繞組的每一点上依時間而改变 (由于过程是周期性的, 于是通常可把它表示为諧波之和, 以便于分析); *b*) 电压的最終分布曲綫圖 456, *a* 中的 MN 綫及圖 456, *b* 中的 $M'N'$ 綫可以看做一根軸, 繞組各点的电压在这軸的上下振蕩着; 可能的振蕩界限位于画有直綫的区域中 (圖 457, *a* 对应于中点接地, 圖 457, *b* 对应于中点絕緣的); *B*) 应用諧波分析的方法, 可以把最終及初始分布的差分解为正弦的(或, 相应地, 余弦的)級数, 亦即基波和高次諧波的綜合 (圖 457, *a* 和 457, *b*) 而且对于每一諧波所有参数均可以决定。然后考察每一諧波对時間的上述变化并将結果加起来, 我們即可以研究繞組任何部分过电压随時間变化的所有过程。

現象是有这样的特征, 即不同級数的电压諧波以不同速率沿繞組傳播, 因此进入繞組的波不断地改变形状。对于中点接地的圖 458, *a* 以及对于中点絕緣的圖 458, *b* 为有关过程随時間进行的一些表达, 其中在曲綫上的数字为从建立电压初始分布的瞬間算起的、以振蕩周期的分数表示的时间。詳細分析的另一个有趣的結果指出, 变压器繞組的波阻抗不是常数而是諧波級数的函数。在最后两方面, 变压器和輸电綫有很大的区别, 在輸电綫中波的傳播几乎是不变形的, 而且輸电綫对于所有的波或脉冲有不变的波阻抗。

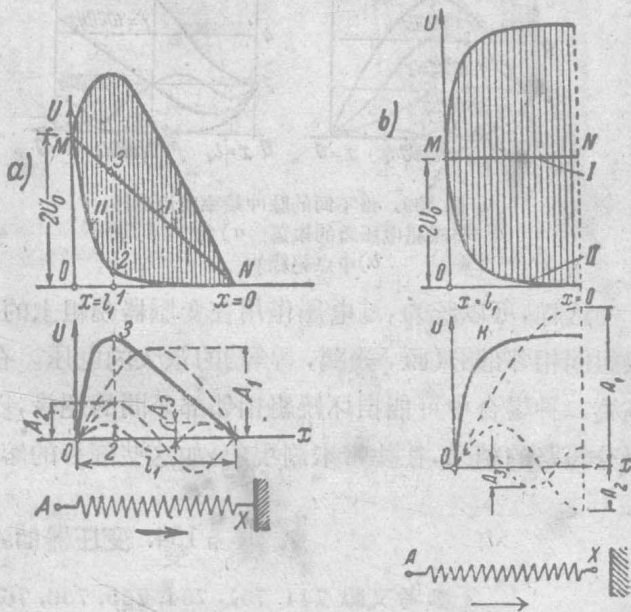


圖 457. 当过电压进入变压器时, 分解最終和初始分布間的电压差为諧波的状态: *a*) 当中点接地时和 *b*) 当中点絕緣时。

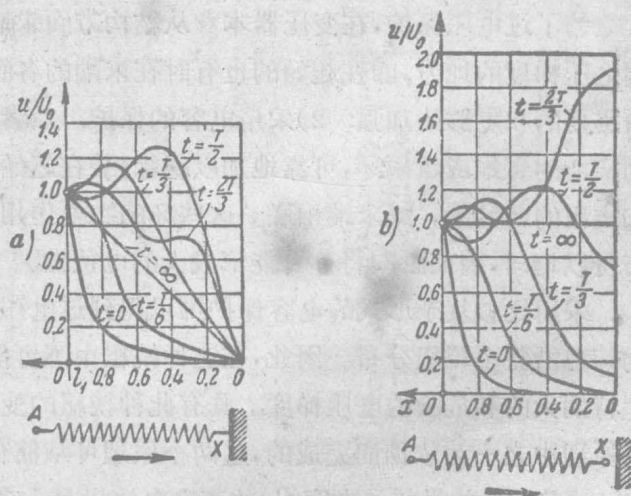


圖 458. 过电压进入变压器时, 在不同瞬間的最終分布和初始分布間电压差的曲綫: *a*) 当中点接地时和 *b*) 当中点絕緣时。