

高等学校教学用书



电 机 学

特殊部分

第三册

M. II. 柯斯泰珂著
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) 出版的柯斯奈珂 (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频振荡和过电压; 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。

DS43/07

电 机 学

特殊部分

第三册

M. П. 柯斯奈珂著

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 1/16 印張12 3/8

字數279,000 印數0001—4,000 定價(10) 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_c —磁通位能	S —物体表面积
A_m —动能	S_1 —进入一个槽内的绕组端接部分总截面
B_p —磁感应的脉振幅	S_n —进入一个槽内的绕组槽内部分总截面
B_{ZL} —在转子表面由齿磁场所生磁感应	s —绕组导体横截面
B_ν — ν 次谐波磁感应	T —发热时间常数
b_n —槽宽	T_0 —自然振荡周期
b_s —槽口宽	t_a —波前长度
C —线路单位长度的电容; 绕组单位长度的对地电容	V —消费风量
c —比热	v —冷却空气的速率
F —机械力	v —过电压波的传播速率
F_ν — ν 次谐波磁势振幅	v_n — n 次谐波的圆周速率
G —物体质量	W —热流密度
H —磁化力	W_e —电磁能量
H —气体静压力	W_m —弹性能量
H_d —气体动压力	z_w —线路或绕组的波阻抗
h_k —导体临界高度	α —表面散热系数
h_n —槽或齿的高度	α —电阻的温度系数
h_α —压力损失	β —绝缘厚度
I_1, I_2, I_3, \dots —电流谐波分量	γ —比重
I_g —整流后的电流	γ —气体密度
I_e —电流的等效值	Δ —铜片厚度
i_q —定子电流横轴分量	Δ_i —绝缘厚度
K —绕组单位长度的匝间电容	$\Delta\tau$ —由于各种损耗造成的温升分量
k —导热系数	η_0 —吹风系数
k_F —挤流引起的电阻增加系数	η_{st} —风扇的静效率
k_α —压力损失系数	η_m —风扇的机械效率
L_1, L_2 —变压器原绕组和副绕组的自感系数	ϑ —温度
l_n —半匝的槽内部分长度	ϑ_0 —无激磁时的空载温度
l_s —绕组端接部分长度	ϑ_B —有激磁时的空载温度
M_h —磁滞力矩	ϑ_k —短路时的温度
M_r —反应力矩	ϑ_a —空气温度
M_s —整步力矩系数	ϑ_{Cu} —绕组铜的温度
M_ψ —电磁力矩	ϑ_{Fe} —铁心温度
m_a —非周期性电流分量所生力矩的瞬时值	λ —热导
O —物体表面积	λ —绝缘的热导
P_g —整流器直流方面的功率	μ —空载谐波序次
p_d —附加损耗	ν_z —齿谐波序次
p_m —表面损耗	ξ —气体动力常数
p_p —脉振损耗	σ_f —混流损耗系数
p_v —通风损耗	τ —温升
Q —单位时间内的热能量(热流)	τ_0 —初始温升
R —半径	τ_m —极限温升
R —热阻	τ_i —槽绝缘温度降落
R_t —绝缘的热阻	Φ_k —短路时磁通
	Ω_r —转子角速率

第三册目录

主要符号 v

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转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. 计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较.....454
§ 160. 振动的辐向力.....439	第三十八章 短路时绕组中的机械应力.....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. 短路时变压器绕组中的应力.....456
	§ 166. 当突然短路时同步电机绕组中的机械应力.....458

第十一編 电机及变压器中的附加损耗

第三十九章 绕组中的附加损耗.....464	§ 170. 当具有屏蔽作用时钢片中的涡流损耗.....471
§ 167. 交流电机电枢绕组中的涡流损耗.....464	§ 171. 极掌表面的损耗.....473
§ 168. 直流电机电枢绕组中的涡流损耗.....467	§ 172. 齿内脉振损耗.....475
§ 169. 变压器绕组中的涡流损耗.....469	§ 173. 负载时在电机整地金属部分中的附加损耗.....477
第四十章 钢中的附加损耗.....471	§ 174. 转子中磁滞和涡流的力矩以及异步机的附加损耗.....479

第十二編 电机的发热、冷却和通风

第四十一章 电机的发热和冷却过程.....482	§ 181. 温度在电枢绕组和铁中分布的计算.....497
§ 175. 理想固体的发热过程.....482	§ 182. 由发热试验求得个别的温升分量.....501
§ 176. 理想固体的冷却过程.....485	§ 183. 温升的叠加法.....502
§ 177. 由发热曲线或冷却曲线的一段来决定最后温度.....487	第四十三章 电机的通风.....504
§ 178. 短时和间歇运行情况的发热过程.....488	§ 184. 概述.....504
§ 179. 计算电机发热的等值热路.....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绕组中和铁中的温度分布.....494	§ 186. 电机的通风系统.....505
§ 180. 稳定热流方程式.....494	§ 187. 通风计算基础.....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说明.....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闸时的过渡过程.....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网络时的过渡过程.....519

§ 193. 变压器接入正弦变化电势的网络时的过渡过程.....	520
第四十六章 交流电机在过渡状态时的算子方程式.....	521
§ 194. 双馈电机的一般方程式.....	521
§ 195. 恒定转速下的鼠笼式异步电动机.....	524
§ 196. 沿转子纵轴具有一个绕组的凸极同步电机.....	528
§ 197. 沿转子纵轴有两个电路的凸极同步电机.....	532
§ 198. 同步电机突然短路时, 周期性分量电流衰减的时间常数.....	538
§ 199. 同步电机在短路情况下定子电路开路时电压	

第十四編 整流器

第四十九章 整流器的基本类型及变压器的连接方式.....	559
§ 206. 整流原理.....	559
§ 207. 整流器类型及整流的基本线路图.....	560
§ 208. 各基本整流线路中变压器的容量及利用系数.....	564
§ 209. 电流和电压的脉振.....	566
§ 210. 机械整流器.....	566
§ 211. 离子或气体整流器.....	569
§ 212. 直流电流中的汞弧.....	570
§ 213. 汞弧整流器的作用原理.....	571
§ 214. 玻璃整流器.....	572

的恢复.....	540
第四十七章 发电机和变压器回路切斩时断路器触头上电压的高频振荡.....	540
§ 200. 概述.....	540
§ 201. 一个频率的振荡回路.....	541
§ 202. 具有自行振荡的双频振荡回路.....	542
§ 203. 具有互联系振荡的双频振荡回路.....	542
第四十八章 变压器绕组中的自由振荡.....	545
§ 204. 矩形波的电压加于变压器绕组上时, 在变压器绕组中的自由振荡.....	545
§ 205. 切断短路时变压器绕组中的自由振荡.....	552

整流器

§ 215. 金属整流器.....	57
§ 216. 汞弧整流器的外特性.....	57
§ 217. 控制栅.....	57
§ 218. 电流的逆变.....	57
§ 219. 引燃管.....	57
§ 220. 充气管和闌流管.....	57
第五十章 在带有相间绕组的六相线路运行的整流器中的电磁过程.....	578
§ 221. 基本方程.....	578
§ 222. 交流电压和电流的谐波.....	598

第九編 變壓器及電機中的高頻振蕩和過電壓

[參考文獻 497, 772, 789, 791, 813, 818]

第三十四章 變壓器及電機中的高頻振蕩

§ 150. 過電壓的一般特征

人們把所有超過額定值的電壓升高，不論它的久暫，都稱為過電壓；但通常這一名詞不了解為長期的電壓升高，例如，饋電給某一電力系統的發電機超速時所產生的情況，而是指很短暫的過程，具有個別短時沖擊的或高頻振蕩的特征，它們在一定的條件下產生並在電力系統中傳播。因此，按照產生過電壓的原因是否位於電力系統之內或在系統之外而區別為內部的及外部的過電壓。

內部的過電壓發生於當系統運行狀態劇烈變更時，例如，當負載接入、切除以及突然變更時，隨着這些情況系統中儲藏的電能和磁能有所改變；這種過電壓稱為操作過電壓。屬於內部的過電壓還有那些發生於系統事故狀態下的，例如，在切斷無載線路、短路、切除短路、重復電弧接地時、等等。

外部的過電壓係由於各種大氣中電的現象而產生，這些現象是：1) 雷電直接擊中輸電線，2) 雲層放電時電線中的電磁感應現象，3) 充電雲層的靜電感應現象，4) 由於風中帶有微粒如灰塵、雪等等而使導線帶電。

正如觀察指出，操作過電壓的數值通常不超過 $3-4.5 U_{0N}$ ，且其振幅愈高時則重復發生愈為稀少。至於雷電過電壓，其數值可超過 $10-15 U_N$ 。過電壓的波（脈沖）在大部分中均帶來高次諧波振蕩，有時整個過電壓的過程即是高頻振蕩。且通常波前的陡度隨着振幅的增加而增加，這就更增加了這種波的危險性。

如所周知，過電壓波以速率 $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 沿線路傳播，其中 L 和 C 為線路單位長度的電感和電容；對於在空氣中的線路該速率接近光的傳播速率。線路的主要特征之一為其波阻抗 $z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ；對於空氣中的線路 $z \approx 500-600 \Omega$ ；對於電纜線路，由於電容很大， $z \approx 50 \Omega$ ；與此相反，對於變壓器其波阻抗比之空氣中線路將大出若干倍，且對於所有的沖擊波和振蕩皆非恒值。對於電機波阻抗較不確定，其值在 $200-2000 \Omega$ 的範圍內。

§ 151. 當不同頻率時變壓器及電機的等值電路

各種過電壓沿著電力系統傳播達到了接在系統上的變壓器和電機的繞組以後，將在其中激起如下所述的複雜的電磁過程。在研究這種過程時，主要的概念是變壓器和電機繞組對於過電壓波的“等值電路”（不可和作為電磁器具的變壓器或電機的等值電路相混淆，§ 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

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

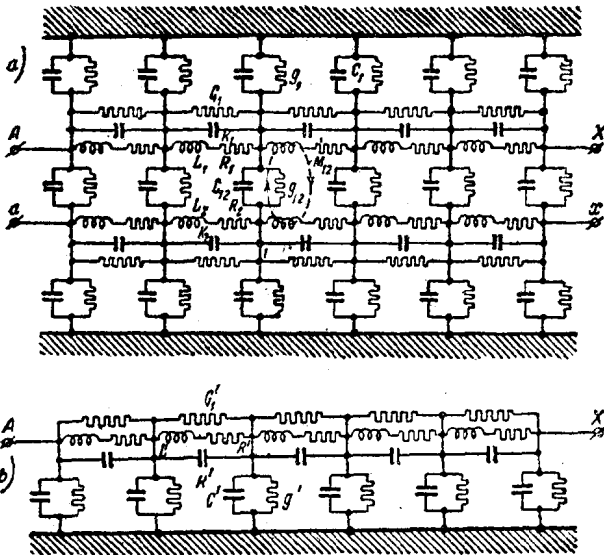


图 444. 在高频率条件下变压器的线路: a) 完全的等值电路, b) 简化的等值电路。

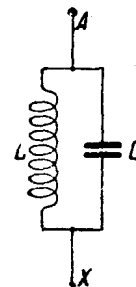


图 445. 并联的电感及电容的线路。

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

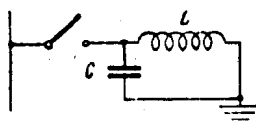


图 446. 切除短路的电抗器的线路。

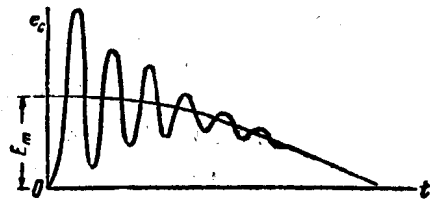


图 447. 当正弦电压接通时电容端电压变化的曲线。

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间有电弧形成,该电弧系由储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 比线路的自然频率 f_0 小很多倍, 那么可以认为 $f \approx 0$, 而(1170)式得到下列形式:

$$e_e = E_m(1 - \cos \omega_0 t \cdot \varepsilon^{-\frac{Rt}{2L}}). \quad (1171)$$

如果略去电路的衰减, 令 $R=0$, 則

$$e_e = E_m(1 - \cos \omega_0 t). \quad (1172)$$

在繞組中产生高频振荡的另一原因是受行波的作用。

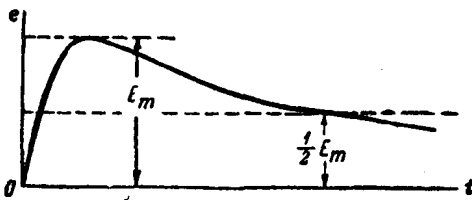


圖 448. 具有短时的非周期性的雷电放电特征的曲线。

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

表示行波袭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:

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

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

$$e = E_{\max} \varepsilon^{-\beta t}. \quad (1174)$$

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

$$e = E_{\max}. \quad (1175)$$

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, 而当变压器和电机满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, 可以认为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 对時間 t 之比, 在这時間中电压按直綫上升而达到 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

$$f = \frac{1}{2\pi t} = \frac{0.159}{t} = \frac{159 \times 10^3}{t_{\mu s}}$$

例如, 如果波前的长度已被决定, 在 1.5 微秒時間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

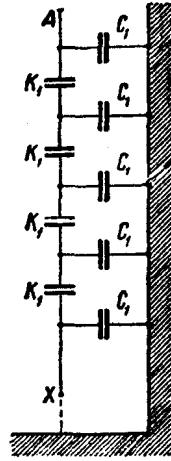


图 449. 在很高频率时表示变压器等值电路的串联和并联电容的系统。

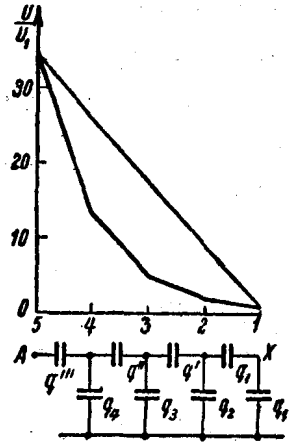


图 450. 当过电压的矩形波进入变压器时, 在其绕组环节上近似的电压初始分布。

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

的对地电压的数值可能为 $2E_m$ ，而匝间电压比稳定状态时要大出很多。这些振荡不论是在沿绕组的空間上的，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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \quad (1176)$$

其中 L_0 和 C_0 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绕组的起点和端点为結点，其半波長度将等于绕组的長度，而当中心不接地时空間基波仅仅以起点为結点，因此在绕组長度上仅分布着四分之一的波，绕组末端的电位将升高到加在绕组上的波的二倍数值，即为 $2E_m$ 。波沿绕组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聳波前的波加在电机绕组上时产生振荡的原理，在这場合中匝间电容 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绕组上时，它将沿着绕组移动，从绕组的两端反射回来，这时振荡的特性将和绕组端点接地的方法有关。在中点直接接地的場合中，当每次波达到绕组末端时，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绕组起端傳播，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。

如果用示波器攝取绕组上点与地之間电位差，这些点离开绕组起端的距离等于 $x=0$ ， $x=0.25$ ， $x=0.50$ 及 $x=0.75$ ，则当中点接地时示波圖有如图 451 所示的形状，而对于絕緣的中点則有如图 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 表示绕组長度，则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

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

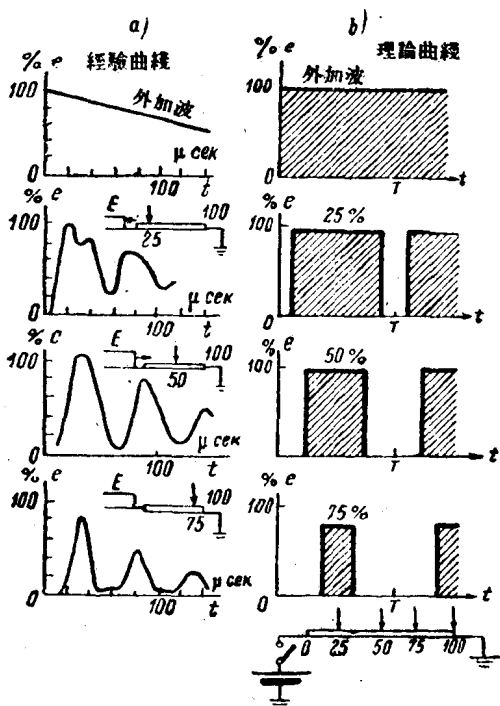


圖 451. 当中点接地时同步电机繞組不同各点对地电位的示波圖及理論曲綫。

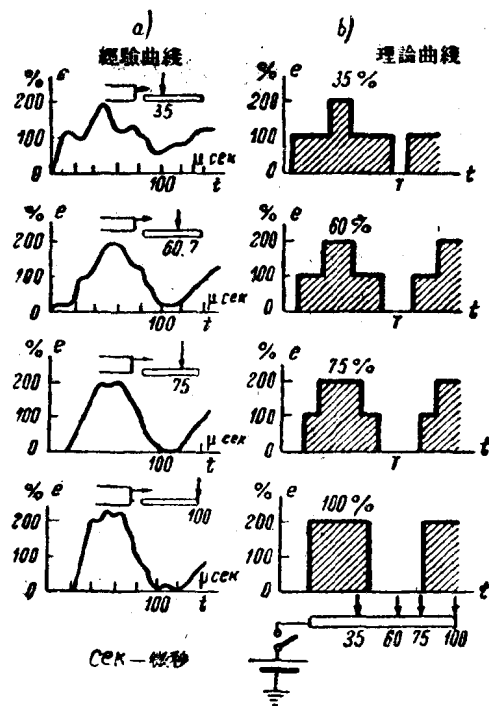


圖 452. 当中点絕緣时同步电机繞組不同各点对地电位的示波圖及理論曲綫。

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荡。

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。

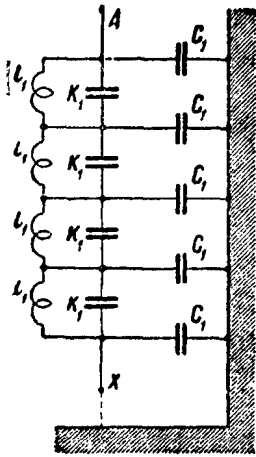


圖 453. 对于波的过程的变压器高压绕组的等值电路。

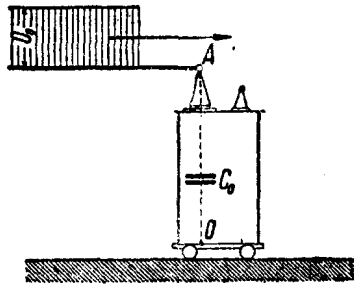


圖 454. 有陡壁波前的过电压波进入具有等值电容 C_0 的变压器绕组的近似线路。

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是三个过程的合成, 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

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 。

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

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

当 $t=0$ 时从(1182)和(1183)式可得

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

最后

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

而

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

在进入端 A 上电压依照指数函数增加(圖 455)。当时間经过 $t = 3zC_0$ 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,其中時間約经过一个微秒。

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 的存在破坏了对称性。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

$$u_x = \frac{U_0 \operatorname{sh} \frac{\alpha x}{l_1}}{\operatorname{sh} \alpha}, \tag{1186}$$

在中点絕緣的情况表示为

$$u_x = \frac{U_0 \operatorname{ch} \frac{\alpha x}{l_1}}{\operatorname{ch} \alpha}. \tag{1187}$$

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。

应当考虑到, (1186)和(1187)式給出繞組任一点对地的电压数值。但对于繞組的电气强度的計算来說, 知道下列各項也是同样重要的: 1)知道怎样的电压将作用在繞組的两相邻部分(元件)之間或者作用在它的單位長度上, 亦即应当知道第一导数 $\frac{\partial u_x}{\partial x}$ 的数值, 2)知道相应于这一导数为最大值的繞組上的一点。从圖 456, a 和 b 的形式显明地可以知道, 这一最大值将發生在繞組的起始端, 即开始几匝, 亦即当 $x = l_1$ 时。

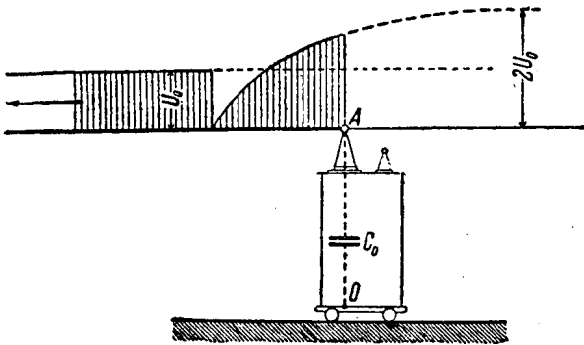


圖 455. 当有陡變波前的波加到变压器上时在其繞組端的电压升高圖。

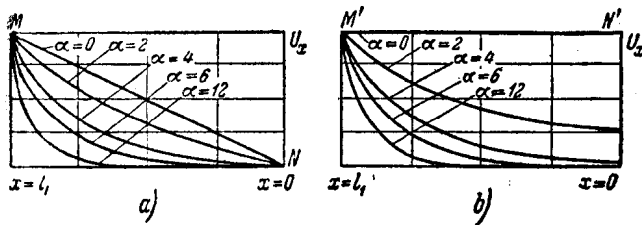


圖 456. 当过电压波进入变压器繞組时电压沿繞組的初始分布曲线: a)中点接地和b)中点絕緣。

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

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

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。

⌈) 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时间和空间而进行的振荡来完成的。在这一阶段的现象的分析是相当复杂的, 因为必须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荡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) 在繞組中进行的過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); 6) 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荡着; 可能的振荡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、以振荡周期的分数表示的時間。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。

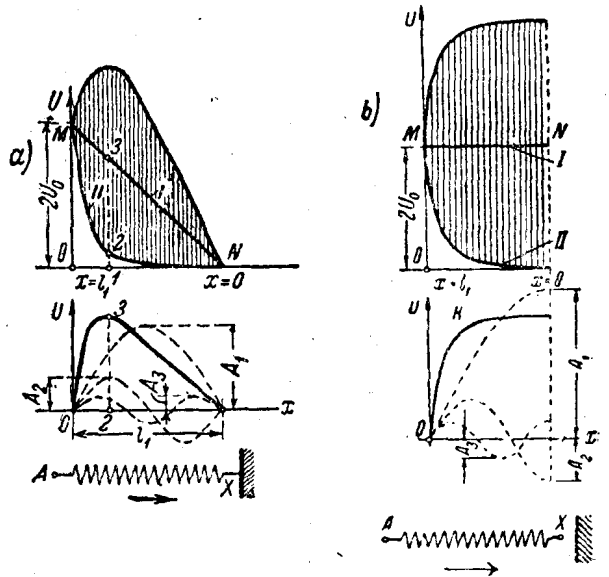


圖 457. 当过电压波进入变压器时, 分解最終和初始分布間的电压差为諧波的状态: a) 当中点接地时和 b) 当中点絕緣时。

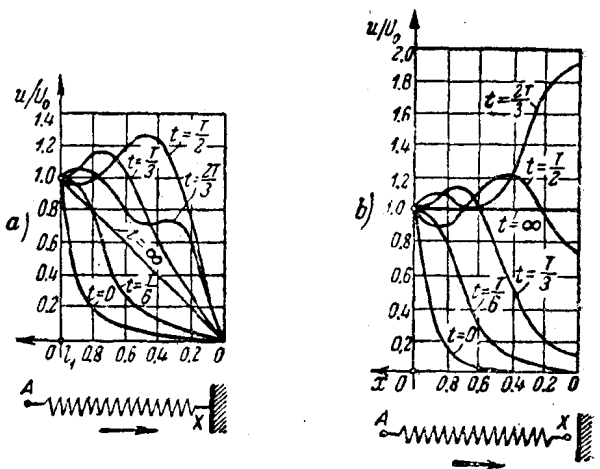


圖 458. 过电压波进入变压器时, 在不同瞬間的最終分布和初始分布間电压差的曲綫: a) 当中点接地时和 b) 当中点絕緣时。

用同样的方法可进行考虑当任何形式的非周期性脉冲加在变压器上时的更复杂的现象。如果脉冲有高频振荡的特征,对脉冲的某一級諧波的频率则有产生諧振的危险,在繞組的任一部分中电压可能和这些諧波振荡(圖 459, a 为对应于中点接地的,圖 459, b 对应于中点絕緣的)。

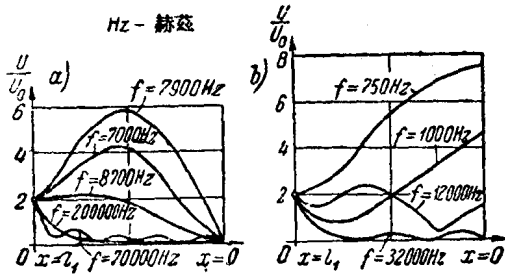


圖 459. 当不同的脉冲频率时沿变压器繞組电压差的振荡: a) 接地的和 b) 中点絕緣的。

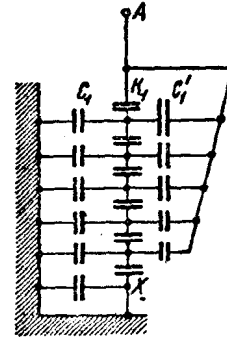


圖 460. 当过电压波进入变压器时利用附加电容使电压沿繞組的起始分布变成均匀的变压器等值电路。

这样,可以认为,过电压作用在变压器繞組上的结果可能在变压器各部分产生繞組对地或者繞組間相邻部分(匝,綫圈,等等)的很大的电压。在第一种場合中可能损坏繞組对地的絕緣,而在第二种場合中可能损坏繞組相邻部分間的絕緣,以致对于在工作电压下的繞組,由于繞組邻近部分短路的結果,往往带来副现象,如这些部分的熔断甚至燃燒,繞組的机械变形等等。

§ 154. 变压器的过电压保护

[参考文献 744, 751, 754, 755, 756, 761, 767, 786, 799, 800, 803, 810]

在电力系统中的变压器具有保护整个系統装置形式的过电压保护,如接地电纜,直接接地的中点,各种放电器,以及整个系統的絕緣配合,使得变压器繞組的絕緣在整个系統中最强的。

为了过电压保护,在变压器本身从結構方面采取措施,应该注意到: 1) 在所有可能出现危险的电压梯度的地方,即在起始的也有时在末端的各匝和綫圈,在繞組的出綫处等等的地点,絕緣須必要的和足够的加强; 2) 采用电容的保护。后者的最簡單形式是所謂屏蔽环。这是带有切縫的实心的青銅或黃銅环,可靠地加以絕緣,装在起始的,也有时在末端的几个綫圈上,同时相应地和繞組的起始端,或末端相联。这些环的主要作用在于使靠近环的几个綫圈沿匝間的过电压分布得以均匀,因而匝間将不可能形成大的电位差。

采用比較复杂形式的电容保护可以得到过电压的脉冲实际上立刻按照最終分布的規律,即均匀地沿整个繞組分布。因此,在这种繞組中不可能产生强烈的振荡过程,亦不可能在絕緣中产生特别大的和危险的电压梯度。具有此种繞組的变压器称为不諧振的。其中电容的保护是以两个原理中之一为依据而完成的,这两个原理可从簡化綫路的特性中直接得出(圖 449)。

事实上,如果給予电容 C_1 的充电电流以另一条繞过电容 K_1 的支路,則在 K_1 上将沒有如圖 456, a 和 b 所示的向繞組起始端急剧增加的电压。电容的充电电流将被导向通过附加电容 C_1 (圖 460), 这些电容根据特殊的計算来选择。圖 461 为柏魯也夫所創議的这种保护的結構布置。