

接触式变流机

苏联 Ю. Г. 托尔斯托夫著

樊元武译

水利电力出版社

目 录

緒論	(3)
----	-------

第一章 三相橋式整流电路的基本关系	(8)
-------------------	-------

1. 控制角和換相角 (8)
2. 換相过程 (12)
3. 整流电压 (15)
4. 变压器的相电流。整流器的电流。变压器的标准功率 (18)
5. 反向电压 (23)

第二章 接有飽和抗流綫圈的接触式变流机的工作 理論基础	(26)
--------------------------------	--------

1. 当飽和抗流綫圈具有理想磁化特性时, 接触式变流机的工作情况 (26)
2. 阶段的計算长度 (36)
3. 接触式变流机的負載变化范围和可靠性 (37)
4. 触点开断后, 接触式变流机中所进行的过程 (42)
5. 对反向电压增长的最小延迟角度的選擇 (51)

第三章 当考虑磁化曲綫的实际特性时, 接有飽和 抗流綫圈的接触式變流机的工作情况	(53)
---	--------

1. 实际磁化特性 (54)
2. 接有实际飽和抗流綫圈的接触式变流机的基本关系 (55)
3. 接触式变流机的負載变化范围 (58)
4. 續定負載值的确定 (61)
5. 飽和抗流綫圈 (63)

第四章 接触式變流机工作时的电压損失.....(72)

1. 感抗电压損失的計算..... (72)
2. 有功电压損失的計算..... (76)
3. 接触式变流机的外特性..... (79)
4. 附加磁化对接触式变流机外特性的影响..... (80)
5. 接触式变流机的功率因数..... (83)

第五章 接触式變流机的調整.....(85)

1. 触点开断瞬間开断相饱和抗流綫圈中的磁感应的确定..... (85)
2. 当重叠角的数值恒定不变时, 接触式变流机的工作情况..... (89)
3. 无载可靠性恒定不变时的控制特性..... (92)

第六章 三抗流綫圈电路的接触式变流机的工作特点.....(93)

1. 在三抗流綫圈电路的情况下临界負載的計算..... (94)
2. 最适宜的阶段长度的选择..... (103)
3. 接触式变流机的最大可能过载能力..... (106)
4. 当負載大於临界值时接触式变流机中的过程..... (108)

第七章 閉合抗流綫圈.....(108)

1. 閉合抗流綫圈的作用原理..... (109)
2. 磁滯迴綫的寬度对閉合电流的影响..... (113)
3. 脈冲的附加磁化作用..... (115)

第八章 接触式變流机的构件.....(117)

1. 接触机构..... (117)
2. 接触式变流机的触点..... (123)
3. 饱和抗流綫圈..... (124)

緒 論

制造在低压下（不超过 400—500 伏）能将交流變換为直流、且具有高效率的大型變流机，曾經是一个长时期沒有解决的問題，是多次研究的对象。

电压低的强大电流首先在化学工业及电冶金工业的电解过程中应用。从安全技术的观点出发，在这些生产部門中採用高电压是不容許的。需要强大的电流是由于电解生产的产量系与通过电解槽的电量（安培小时数）成正比，因此电解企业的生产率实际上决定于电流值。

到最近十年为止，电解企业中或者採用迴轉變流机来變流，或者採用电动发电机来變流，电动发电机是由同步电动机和低压直流发电机組成的机組，同步电动机与低压直流发电机之間系由公用軸連結起来。靜止變流器（水銀整流器、引燃管等）仅在电压較高的情况下（超过千伏时）才具有高的效率。因此，在容許如此高的电压的場合下（例如在电解鋁时），才採用靜止變流器。

在直流电压低的情况下，旋轉變流机所具的效率为 96—97%，而到目前為止，它們仍能滿足运行要求。但是由于电解企业生产量的增长，出現了增大电流的必要性。从一台旋轉變流机可以得到的电流值受其整流子-电刷系統所限制。甚至在 1000—2000 安的机器中，整流子就已經非常笨重，而且是最可能发生故障的地方。这种机器的整流子需特加保护，以防腐蝕。因为在电解生产部門的空气中通常存在有足

以产生腐蝕作用的大量活潑的電解產物，所以這種機器必須加以密封，並且必須用預先淨化的空氣來冷卻它們。

為了獲得強大的電流，必須同時安裝相當數量的旋轉變流機，由於這個緣故，電解企業的變流站就非常龐大和複雜，就需要大量的維護人員。當功率很大時（4—5萬瓩），96—97%的效率已不能令人滿意了。

由於這些原因，最近對尋求沒有上述缺點的、能將交流變換為直流的其他方法的工作甚為注意。對上述目的而言，接觸式變流機是一種具有使用前途的變流機。

因為接觸式變流機的內阻很小（從而功率損失也很小），所以可以預料到：接觸式變流機的效率將比其他變流機高得多。為了在接觸式變流機中實現整流過程，必須使變壓器的相應相閉合和開斷；相應相的閉合和開斷系利用負載與相應相之間的金屬觸點的直接接觸來實現，這同樣只會引起很小的內部功率損失。

但是，當製造大型接觸式變流機時，在實現無火花換相方面發生了困難。為了使正在開斷的觸點之間避免發生電弧起見，必須在變壓器的該相電流經過零值的瞬間開斷觸點。

如果觸點的開斷較此瞬間稍微早一些或者稍微遲一些，那末觸點之間不可避免地會發生電弧，電弧就會引起觸點的損壞，並使變流機的整流作用終止。

甚至於當觸點準確地在電流經過零值的瞬間開斷的情況下，電弧仍舊可能發生，因為一俟觸點開斷後，反向電壓在觸點處就立刻開始迅速地增長了。如果此項電壓的增長率很大，則在任何瞬間它都將大於分離觸點間的击穿電壓，那末就會發生所謂的逆弧，逆弧會引起觸點的損壞、整流作用的終止以及電源變壓器諸相的短路。在觸點間隙處並聯以強大

电容，可使反向电压的增长率降低少许，但是，由于下列原因，触点准确地在此电流经过零值的瞬间开断是很困难的：

- 1) 由于触点的驱动机构本身的不精确性，触点开断的瞬间在改变着；
- 2) 由于接触表面逐渐磨损，开断瞬间经常移动；
- 3) 由于触点因接触式变流机的冷却状况及负载不稳定而引起的热膨胀，开断瞬间也会移动；
- 4) 当负载变动时，电流经过零值的瞬间就会移动；
- 5) 当供电网络的电压变动时，供给电压经过零值的瞬间也会移动。

所有这些原因曾经在长时期内妨碍着电流大于10—20安的接触式变流机的制造工作。此类电器过去没有任何重大的工业意义。

从1940—1941年开始，在接触式变流机的发展方面有了转变，这种转变系由磁性合金方面的研究成果所引起。冶金工作者已能制造磁化特性曲线自未饱和部分过渡到饱和部分时会发生显著变化的磁性合金。

当线圈的芯子系由上述合金制成时，则线圈在芯子处于未饱和状态的情况下具有很大的电感，若芯子饱和时，则其电感接近于零值。

佛·柯彼耳曼在1941年发表了多篇关于采用此类饱和抗流线圈以改善接触式变流机换相条件的著作。

虽然柯彼耳曼在其理论性研究著作中所叙述的某些原则是错误的，但是，采用饱和抗流线圈以改善变流机换相条件的观念是绝对正确的，而在实际应用中甚有成效。

利用饱和抗流线圈，实际上能够获得无火花换相，从而能够完成电压在500伏以下、电流为几万安培的接触式变流

机的設計。

接触式變流机的运行証明：它們无疑是一种較旋轉變流机（电动发电机或迴轉變流机）更为完善的机器。

接触式變流机是比較简单和可靠的机器，同时它們所具的效率为 99.5%。

接触式變流机的严重缺点是：它們消耗交流供电網路中的无功功率（电动发电机及迴轉變流机能够发出无功功率，因而可使它們工作的交流網路的 $\cos \varphi$ 改善）。

所以，如果現有电解企业中已裝置着具有同步电动机的机组，則当此类企业扩建时，採用接触式變流机是适宜的。在其他採用接触式變流机的情况下，为了补偿无功功率的不足，应当裝置同步补偿机。

虽然接触式變流机具有自己的特点（系由饱和抗流綫圈的存在所引起），但是这种變流机在作用原理方面系与閥性變流器（水銀整流器或其他變流器）相类似。

饱和抗流綫圈使交變电流的形状如此地改變：电流不像在正弦律电流變化特性情况下那样仅在一点變为等于零值，而是在整段时间間隔 τ 內等于零值（或接近于零值），时间間隔 τ 称为阶段长度。在这个时间間隔內，可以容許一定程度的触点“遊隙”、电网电压的變動、負載的變動等等。

此外，在开断触点移动的时间內，饱和抗流綫圈可以延緩反向电压的增长（使增长率減小），而在任何瞬間使其保持在低于触点間隙击穿电压的水平。

这样，就可以防止逆弧以及保証接触式變流机必要的工作可靠性。利用饱和抗流綫圈可在一定的程度內調整整流电压值。

三相橋式綫路图是接触式變流机最通用的綫路图。在此

种整流线路的情况下，变压器受利用的程度比在三相线路的情况下为高，而整流电压的脉动情况和六相线路中的一样。此外，在三相桥式线路中，饱和抗流线圈（变流机最贵重的部分）可以得到更好的利用。

由于这些原因，将在后面研究适用于三相桥式整流线路的变流机的计算和工作情况，而三相桥式整流线路的工作原理（与变流机器的型式无关）则在第一章中说明。

计算其他整流线路并无任何原则上的困难，而可以很容易地根据整流理论中的某些关系式来进行计算。

第一章 三相桥式整流电路的基本关系

1. 控制角和换相角

图1系三相桥式整流电路。

在所有以后的计算中，我们将认为平波抗流线圈的电感量是无穷大，即认为整流后电流 I_g 完全平直。

为了更加明确起见，假定整流器 a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 系采用控制式离子整流器（闸流管或水银灯泡）。如后所示，此种离子整流器的特性和接触式变流机的特性极为相近。

栅极控制式离子整流器只有在下列两个条件下才能点燃：

1) 当整流器的阳极（图1上三角形的底边）对阴极（通过三角形顶点而与底边平行的短线）有正电位时；

2) 当整流器的栅极开放时。

祇有当通过整流器的电流自然地经过零值时，才能熄灭整流器。用栅极闭塞法来截断通过整流器的电流是不可能的，因而，假使整流器已经点燃，则在点燃之后，不管是否将有闭塞电压送到栅极上，当电流未经过零值时，它是不会熄灭的。当整流器燃着时，栅极无闭塞作用。

但是一俟整流器熄灭后，栅极的闭塞作用就立刻恢复了，而祇有在上述的两个条件实现时，整流器才能重新点燃。图2系变压器诸相 A 、 B 及 C 的电动势 e_A 、 e_B 及 e_C 的正弦曲线。

假定整流器 a_1 及 c_2 在所考虑的瞬间内燃弧。

假使将整流器内部的电压降略去不计，则可认为：当整流器燃着时，其阳极与阴极具有同一电位。

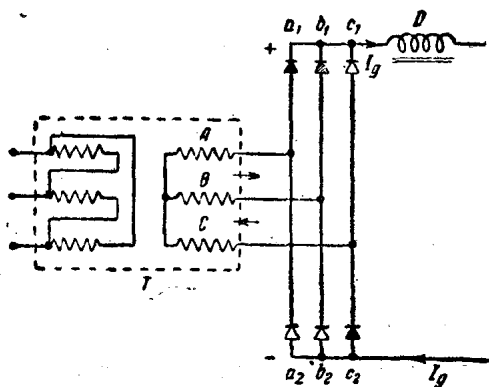


图1 三相桥式整流电路

T —三相电力变压器，其初级绕组通常接成三角形，而次级绕组通常接成星形； A 、 B 、 C —变压器次级绕组诸相； a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 —整流器； D —平波抗流线圈，用以减弱整流后电流的脉动； I_g —整流后电流。

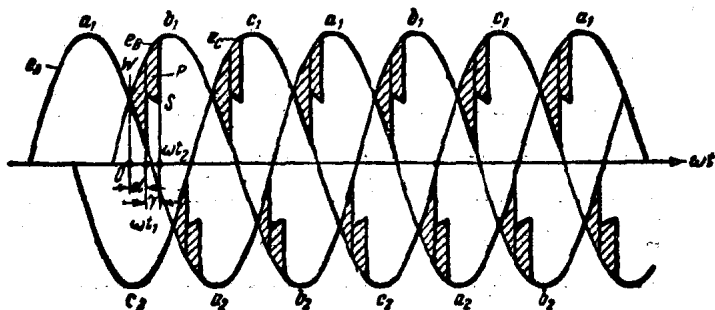


图2 变压器诸相电动势的正弦曲线

因此，当上述整流器燃着时，整流器 a_1 的阳极和阴极具有和 A 相电动势相等的电位 e_A ，而整流器 c_1 的阳极和阴极则具有和 C 相电动势相等的电位 e_C 。

至于说到未燃着的整流器，则它们的阴极和阳极的电位

不相等。例如，整流器 b_1 的阳极具有和 B 相电动势相等的电位 e_B ，而阴极则经过燃着的整流器 a_1 与 A 相连接，因此，具有和 A 相电动势相等的电位 e_A 。从图 2 中可以看出：在 W 点（相电动势 e_A 及 e_B 的正弦曲线的交点）之左，整流器 b_1 的阳极电位低于其阴极电位，因此，在此点之左，即使开放整流器 b_1 的栅极，它也不能点燃，然而在 W 点之右，此整流器的阳极电位就变为高于阴极电位，因此，点燃整流器所必要的第一个条件是具备了。

由专门装置将正的控制脉冲周期地送到整流器的栅极上，以开放经常为栅极上负偏压所闭塞的整流器。每週内有一次脉冲送到每只整流器上。

送到相邻整流器上（例如上面一组整流器）的脉冲之间的相位移，和变压器相电动势的相位移一样，为 120° 。送到第二组整流器上（即下面一组整流器。——译者）的脉冲相互之间的相位移也为 120° ，而它们对第一组同一相上的脉冲的相位移则为 180° 。

这样，脉冲电压就形成六相系统。脉冲间的相位系严格固定，并在正常运行过程中不应变动。

但是整个脉冲系统的相位对变压器相电动势的关系可用手动移相器来改变，或可自动地改变。其中包括调整过程。这样，调定控制脉冲的相应相位，就可如愿地在任何瞬间用栅极开放整流器。

我们假定：栅极的开放不发生在 W 点，而发生在稍右于 W 点的瞬间 t_1 ，即相当于某一相位 $\alpha_1 = \omega t_1$ 之时（式中 $\omega = 2\pi f$ ——整流器交流电源的角频率）。那末整流器 b_1 将在 t_1 的瞬间起燃。

从线电压经过零值的瞬间（相当于 W 点）起以电角度计

量的角 α 称为整流器的控制角或起燃角。若變压器 A 、 B 、 C 諸相的綫捲不具有电感，則在 t_1 的瞬間电流会立刻从 A 相轉移到具有較高电位的 B 相上去，而整流器 a_1 一俟整流器 b_1 点燃时就会立刻熄灭。

但是，變压器常具有漏感，因此，电流不可能立刻降到零。当整流器 b_1 点燃时，整流器 a_1 在某段時間內仍在燃着，並且从图 1 中可以看出，在此燃着時間內，變压器的 A 相和 B 相短路。 A 相中的电流此时开始迅速下降，而 B 相中的电流则开始增大，使这些电流的总和，在任意瞬間，将等于整流后电流（由于平波抗流綫圈的电感为无穷大，整流后电流是不会變化的）。

最后， A 相中的电流于某一瞬間 t_1 降至零值，而整流器 a_1 熄灭。电流从變压器一相轉移到另一相的过程称为換相过程，而相当于此过程持續時間的角度采用 γ 表示，称为換相角。由图 1 可知，当整流器 a_1 燃着时，整流电流正导綫的电位将等于 A 相的电动势，亦即 e_A ，当 b_1 燃着时，則等于 B 相的电动势……等等，因为各有关相經過整流器和正导綫相連接。当整流器 a_1 和 b_1 同时燃着时（在換相時間內），正导綫的电位将为 A 相电动势和 B 相电动势間的某一平均值。这种电位的数值将在后面确定。在图 2 上， PS 部分表示正导綫的电位在換相時間內的變化。

正导綫对變压器零点的电位的全部曲綫系用粗綫（位于横坐标軸之上）描繪于图 2 上。

在第二組整流器（ a_2 、 b_2 、 c_2 ）中进行着完全类似的过程，这些整流器分別使變压器的各相应相和負导綫相連接。

負导綫的电位變化曲綫也用粗綫（位于横坐标軸之下）描繪于图 2 上。

正負導綫之間的電位差，亦即圖 2 中上、下曲綫在任意瞬間的縱坐標之差，為整流器整流電壓的瞬時值。

2. 換相過程

現在我們來更詳細地研究電流從變壓器的一相轉移到另一相的過程。

我們來研究 A 相及 B 相的換相過程。

若時間系從相電動勢 e_A 及 e_B 的正弦曲綫相交之瞬間算起，則這些電動勢可寫成下式：

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin(150^\circ + \omega t), \\ e_B &= E_m \sin(30^\circ + \omega t). \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

這裡 E_m ——相電動勢的振幅值。

在整流器 b_1 點燃的時候，可用圖 3 上所繪的等效電路圖來代替圖 1 的電路圖。

此處用 L 表示變壓器及供電網路折合到變壓器次級繞卷側的漏感。

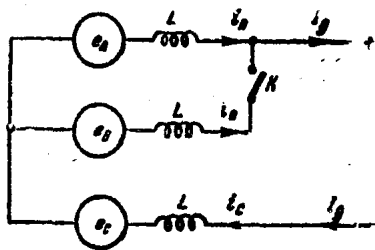


圖 3 三相橋式整流電路的等效電路圖

閘刀開關 K 閉合的瞬間相當於整流器 b_1 點燃的瞬間。對圖 3 上的電路而言，在閘刀開關 K 閉合的瞬間所開始的過程，可用下列聯立方程式來述明：

$$\left. \begin{aligned} e_A - e_B &= L \frac{di_A}{dt} - L \frac{di_B}{dt}, \\ i_A + i_B &= I_g. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

大家也知道：閘刀開關的閉合（即整流器 b_1 的點燃）系在 $\alpha = \omega t_1$ 之時發生，此時， $i_{A0} = I_g$ 以及 $i_{B0} = 0$ 。

將 i_3 值 $i_B = I_g - i_A$ 代入聯立方程式 (1.2) 的第一式中, 得:

$$e_A - e_B = 2L \frac{di_A}{dt} \quad (1.2a)$$

或將聯立方程式 (1.1) 中的 e_A 及 e_B 值代入, 則得:

$$\begin{aligned} e_A - e_B &= E_m [\sin(150^\circ + \omega t) - \sin(30^\circ + \omega t)] = \\ &= 2E_m \cos(90^\circ + \omega t) \cdot \sin 60^\circ = \sqrt{3} E_m \cos(90^\circ + \omega t) = \\ &= -\sqrt{3} E_m \sin \omega t. \end{aligned}$$

因此,

$$-\sqrt{3} E_m \sin \omega t = 2L \frac{di_A}{dt}. \quad (1.3)$$

將此方程式的兩部分各乘以 dt , 並予積分, 積分限為:
左面部分——自 $\omega t_1 = \alpha$ 至 ωt ; 右面部分——相應地自 I_g 至 i_A , 則

$$\frac{\sqrt{3}}{\omega} E_m (\cos \alpha - \cos \omega t) = 2L(I_g - i_A),$$

由此,

$$i_A = I_g - \frac{\sqrt{3} E_m}{2L\omega} (\cos \alpha - \cos \omega t). \quad (1.4)$$

相應地:

$$i_B = \frac{\sqrt{3} E_m}{2L\omega} (\cos \alpha - \cos \omega t). \quad (1.5)$$

必須注意, (1.4) 及 (1.5) 兩式祇在 $\omega t > \alpha$ 的情況下才是正確的, 因為換相過程不是在 $t=0$ 的時間開始的, 而是在 $\omega t = \alpha$ 的時間開始的。

這樣, (1.4) 及 (1.5) 兩式就表示出: 在換相時間內, A 相及 B 相中的電流是按正弦律變化的。

在圖 4 上繪有這些相的電流在換相時間內的變化曲線。

由方程式 (1.4) 或 (1.5) 可以很容易地確定換相角 γ ,

因为已经知道：在 $\omega t = \alpha + \gamma$ 时，电流 $i_A = 0$ 及 $i_B = i_g$ 。

将这些值代入上述方程式之一，我们得到：

$$I_g = \frac{\sqrt{3} E_m}{2 L \omega} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)].$$

因为 $L\omega = x$ ——实际上就是变压器折合到次级线圈侧的相漏抗，那末，

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2 I_g x}{\sqrt{3} E_m}. \quad (1.6)$$

用联立方程式 (1.2) 的第一式，不难求出正导线在换相时间内的电位。实际上，我们已确定了在图 2 上的对变压器次级线圈零点的全部电位。

从图 3 中可以看出，正导线对变压器零点的电位 u_g 在换相时间内将为：

$$u_g^+ = e_A - L \frac{di_A}{dt} = e_B - L \frac{di_B}{dt}.$$

根据公式 (1.2a)

$$L \frac{di_A}{dt} = \frac{e_A - e_B}{2}.$$

因此，

$$u_g^+ = e_A - \frac{e_A - e_B}{2} = \frac{e_A + e_B}{2}, \quad (1.7)$$

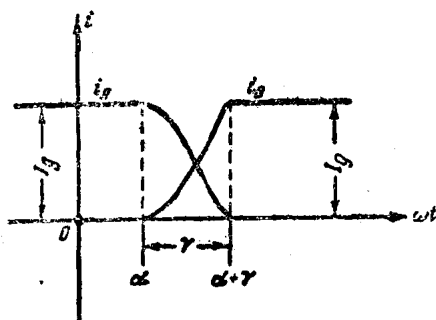


图4 A相及B相中的电流在换相时间内的变化曲线

即在換相時間內，正導綫（或負導綫）的電位等于兩相導綫的電動勢的算術平均值。

3. 整 流 電 壓

現在我們要求出按三相橋式電路連接的整流器的整流電壓平均值。

圖 5 上繪有整流電壓曲綫的一部分。從圖中可以看出：位於橫坐標軸上面的部分曲綫具有和橫坐標軸下面的部分曲綫完全一樣的形狀。這些曲綫之間的相位移為 $\pi/3$ ，並且它們具有相反的符號（即正負相反。——譯者）。但是在確定平均值時，相位移是沒有任何意義的。所以，祇要確定一根曲綫（例如上面一根曲綫）的平均值，再將結果乘以 2，就足够了。

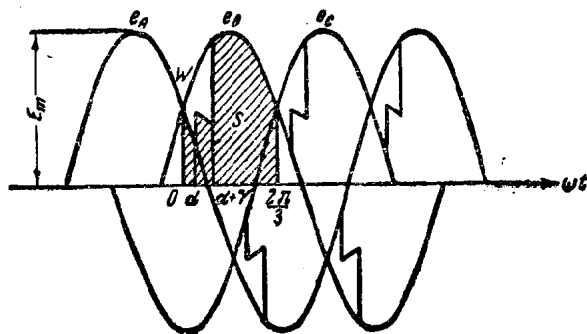


圖 5 整流電壓曲綫的一部分

整流電壓曲綫的每個半波是週期性的，並具有 $2\pi/3$ 的週期。因此，整流電壓在一週內的平均值將為：

$$U_d = 2 \frac{1}{2\pi/3} \int_0^{2\pi/3} u_d d\vartheta = \frac{3}{\pi} \int_0^{2\pi/3} u_d d\vartheta. \quad (1.8)$$

這裡, $\vartheta = \omega t$

关系式 (1.8) 右面部分中的积分式, 就是图5上画有斜綫的面积 S 。不难看出, 电压 u_g 系由电动势曲綫的三个部分所組成: 在 0 至 α 的区段內, 电压值 $u_g = e_A$, 在 α 至 $\alpha + \gamma$ 的区段內, $u_g = \frac{e_A + e_B}{2}$, 以及在 $\alpha + \gamma$ 至 $2\pi/3$ 的区段內,

$u_g = e_B$ 。

因此

$$U_g = \frac{3}{\pi} \left(\int_0^{\alpha} e_A d\vartheta + \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \frac{e_A + e_B}{2} d\vartheta + \int_{\alpha+\gamma}^{2\pi/3} e_B d\vartheta \right). \quad (1.9)$$

但是, 根据图 5

$$e_A = E_m \sin(150^\circ + \vartheta),$$

$$e_B = E_m \sin(30^\circ + \vartheta).$$

因此

$$\frac{e_A + e_B}{2} = \frac{1}{2} E_m [\sin(150^\circ + \vartheta) + \sin(30^\circ + \vartheta)]$$

$$= E_m \sin(90^\circ + \vartheta) \cos 60^\circ = \frac{1}{2} E_m \cos \vartheta.$$

代入 (1.9) 中, 得:

$$U_g = \frac{3}{\pi} \left[\int_0^{\alpha} E_m \sin(150^\circ + \vartheta) d\vartheta + \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \frac{1}{2} E_m \cos \vartheta d\vartheta + \int_{\alpha+\gamma}^{2\pi/3} E_m \sin(30^\circ + \vartheta) d\vartheta \right].$$

进行积分並將限值代入, 得: