

〔苏联〕И. М. 薩多夫斯基著

感应电动机的协调旋轉

科学技術出版社

內 容 提 要

在本書中研討了感應電動機的協調旋轉綫路(或者稱做“電軸”綫路)的理論和特性曲綫的計算,研討了在各種結綫情況下帶有兩台電動機和帶有數台電動機的裝置的運轉,特別注意了這類裝置的穩定性問題。

本書可供高等學校學生和電動機工程技術人員閱讀及參考

感應電動機的協調旋轉

(電 軸)

СОГЛАСОВАННОЕ ВРАЩЕНИЕ
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

原 著 者 [蘇聯] И. М. Садовский

原出版者 Госэнергоиздат. 1948年版

譯 者 馬 成 業

校 者 李 華 天

*

科學技術出版社出版

(上海建國西路336弄1號)

上海市書刊出版營業許可証出〇七九號

上海新華印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

*

統一書號: 15119·397

開本 787×1092 1/32 · 印張 4 9/16 · 字數 99,000

一九五七年一月第一版

一九五七年一月第一次印刷 印數 1—7,000

定價: (10) 八 角

原 序

在本書中研討了又被叫做“电軸”的感应电动机的協調旋轉綫路图。这样的綫路图应用在各种工业部門中，以保証多电动机电力拖动裝置里的一些独立机組的联合運轉。

本書的产生是作者在全苏电工研究所对協調運轉問題进行研究的結果。作者关于这一問題的学位論文的原稿便作为本書的基础，并縮減和改写成适合于印刷条件的形式。

本書的主要內容是，帶有感应电机的电軸裝置中所发生的过程的理論研究。在闡述这些問題时特別注意到要获得用簡單的和便于实际运用的形式表示出来的特性曲綫、計算公式和图表。研討了協調旋轉裝置的靜态稳定性和动态稳定性，以及它在異常条件下的運轉。

为了縮減篇幅起見，在本書中沒有列出研究电軸的参考文献来源的一覽表。当提及別的研究时，在学位論文的原文中給出参考文献来源的索引，其余的著作則在本書的末尾表明为参考文献目录的形式。此外为了使敘述更加簡明扼要起見，把一部分材料，主要是数学結論移到附录中去。

作 者

目 录

原 序

緒 論	I
第一章 “电軸”的一般綫路图	3
第二章 帶有兩台电机的电軸裝置	17
第三章 电軸綫路的穩定性	37
第四章 帶有兩台平衡电机的綫路	57
第五章 电軸裝置的異常狀態	74
第六章 單相联結	83
第七章 确定帶有平衡电机的綫路的工作狀態	97
第八章 确定在轉子电路內帶有共用变阻器的綫路 的工作狀態	109
結 論	124
附 录	130
所用参考文献的索引	138

緒 論

在許多場合下，電力拖动裝置都需要使得兩台或者兩台以上的帶有不同負載的電動機以同樣的（或成比例的）速度旋轉或者轉動同樣的（或成比例的）角度，而在它們中間却不需用任何機械傳動裝置來聯系；這些電動機拖着拖动裝置的各個獨立部分，並且有時它們彼此之間還相隔得很遠。這樣的裝置在現代越來越廣泛地推廣了。

對於不同的電力拖动裝置來說，這時向電動機的轉速或轉角相互對應的精確度所提出的要求也是不一樣的，因此就採用不同的方法來保證這種對應性。如果祇是要求轉速近似地相等，那麼有時候根本不需要採用任何的特殊綫路。例如，在採用鼠籠式感應電動機的軋鋼機軋道的多電動機拖动裝置中，改變供電網絡的頻率就可以改變所有電動機的速度，並且甚至在不同的負載下，這些速度彼此之間也僅僅只有很小的差別（相當於各個電動機滑率的差別），根據這個拖动裝置的條件來說，這樣的差別是容許的。

但是也有大批工業用的拖动裝置對它們的電動機聯合運轉的精確度提出更嚴格的要求。在這些拖动裝置中除了轉速相等之外也還要求各拖动軸的轉角相等，這時在各軸之間只容許有不大的失調角，這個失調角與同步電動機在各種不同負載下其轉子之間的角度相類似。屬於這一類拖动裝置的，有提升式橋梁、閘門的閘板、某些旋轉式印刷機、傳送帶、門型吊車、感應式

调节器和各种工业部門中的許多其它設備的多电动机拖动裝置。这样的拖动裝置叫做具有“协调”旋轉或者“同步”旋轉的电动机的拖动裝置；又因为在各电动机之間的电气联系与利用机械軸的联系相类似，所以也叫做“帶有电軸的拖动裝置”。

在类似前述的工业用拖动裝置中，推行最广的协调旋轉綫路图是应用感应电机的綫路图；感应电机比其它型式的电机更为簡單可靠。在图 1 中以一般形式示出这类綫路图的某些方案。同类似这样的感应电动机协调旋轉綫路图的运轉和計算相联系

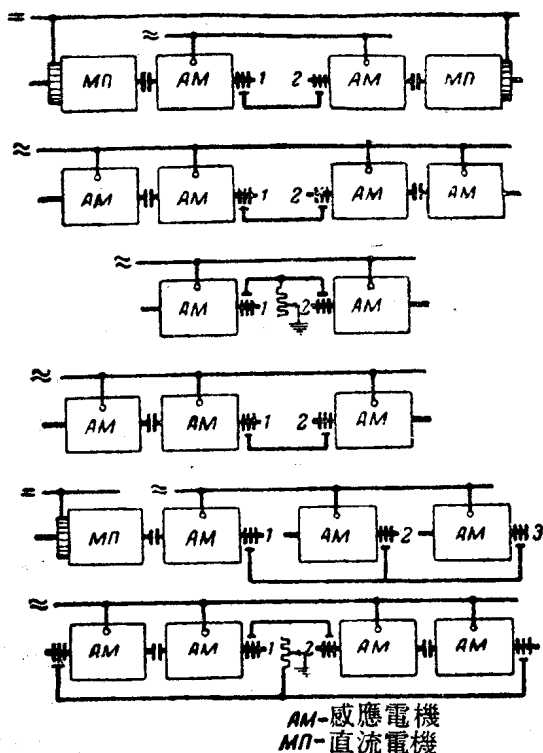


图 1

的問題也正是本書的主要內容。

拖动裝置在許多場合下向協調旋轉裝置提出的要求還要更加嚴格。例如，有時候要求在協調旋轉的某一根軸上只有很小的轉矩值，這根軸被當做其餘各軸的“主軸”；或者是要求協調旋轉裝置的軸能夠在 360° 轉角範圍內的任一位置上都具有自整步的性能，而這種性能在普通的由電動機到該軸是減速的機械傳動機構的情況下，就歸結為需要電動機轉子的轉角在超過 360° 數倍的範圍內，還具有自整步的性能，以及諸如此類的要求。在類似這樣的場合下，感應電動機的協調旋轉綫路圖已經不能滿足所提出的要求了，而必須把裝置複雜化 and 應用所謂“隨動拖动裝置”的綫路圖，在這類綫路里包含有各種放大的設備。類似于這樣的“隨動”綫路的特征是在裝置的工作軸與其控制部分之間具有一般所說的“反饋”，這類綫路的研究是一般調整理論的任務，而在本書中並不加以討論。

第一章 “电軸”的一般綫路图

电軸裝置可以依据拖动裝置的条件，按照不同的綫路和由不同數量的、参与綫路的電動機來構成。

我們來研究表示在圖 2 中的由任意數目 n 個繞綫式感應電動機 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 組成的电軸綫路圖。在一般情況下，這些電動機軸上的負載是變化的而且彼此不同。所有参与綫路的 n 台電動機轉子都聯結在共同的外部電阻上，這個電阻在裝置的全部工作時間內都不切除。因此不論各電動機的負載相同與否，所有轉子滑環上的電壓由於它們聯結在一起的緣故，而彼此都被強制地相等了。這就好象是負載大的電動機（其轉子電流大的）

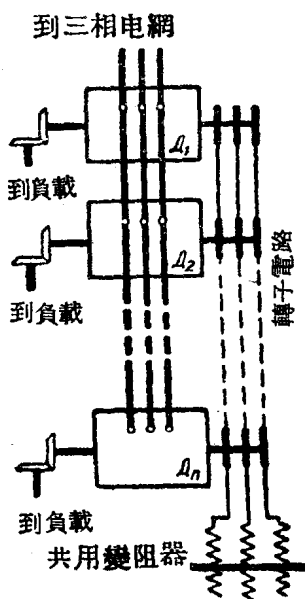


圖 2

轉子電阻減小而負載小的電動機的轉子電阻增大一樣，于是就迫使所有的電動機都以相同的速度運轉。在以后將指出，圖 2 的線路圖乃是所研討的帶有感應電機的电軸線路的一種普遍情況。

為了求得電動機原級電路和副級電路的電流起見，茲列出電軸裝置的等值電路圖。採用的標注符號是：

$\dot{U}$ ——網絡電壓；

I_k 和 i'_k *——第 k 台電動機的定子電流和轉子電流
($k = 1, 2, 3, \dots, n$)；

r_1, x_1 ——定子的電阻和漏

抗；

r'_2, x'_2 ——轉子的電阻和漏抗；

x_0 ——有效磁通的電抗；

R' ——外加的副級電阻；

s ——滑率（所有的阻抗和電流都是每相值，並且已經折算到定子側了）。

圖 2 的裝置的等值電路圖在這些符號下具有如圖 3 所示的形式。于等值電路圖中應當考慮到，在不同的負載下各電動

* 對於轉子電流的實效值選用符號 i' ，以便使得所有的公式不致因為有過多的下標而繁雜起來。

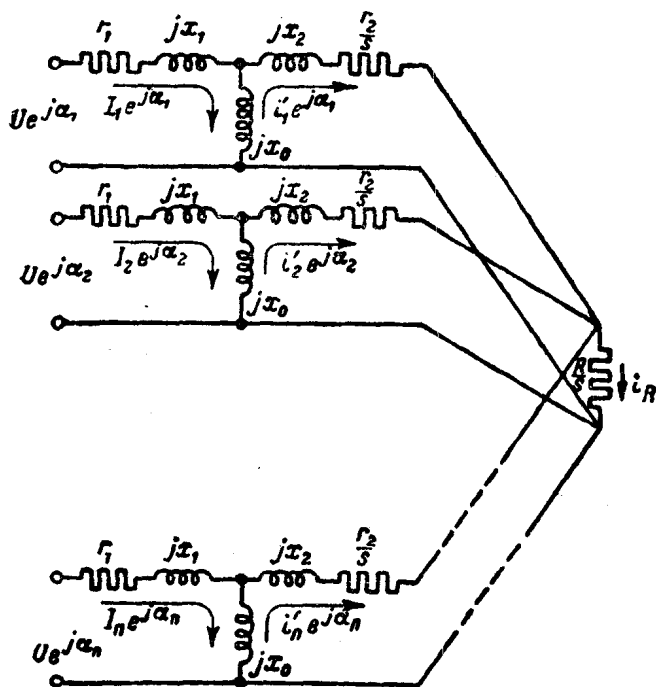


图 3

机的轉子以彼此相差某一个依赖于負載的失調角来旋轉. 为此, 加在电动机定子繞組上的网络电压 $\hat{U}$ 应该乘以 $e^{j\alpha_k}$, 其中 α_k —第 k 台电机轉子对于与电軸裝置电动机協調旋轉的某个假想軸的失調角, 用电气弧度来表示, 而 $j = \sqrt{-1}$. 这样的記載方法对于使公式具有最大的对称性質来说是必要的. 我們也可以研討所有电动机轉子, 譬如說, 对于第一台电动机轉子的失調角 (为此使 $\alpha_1 = 0$ 就足够了). 但是在这种情况下, 这个第一台电动机的公式同其它电动机的公式的形式便不一样了, 因而也是不合适的. 在列等值电路图时, 拿相应电机的定子繞組端电压的

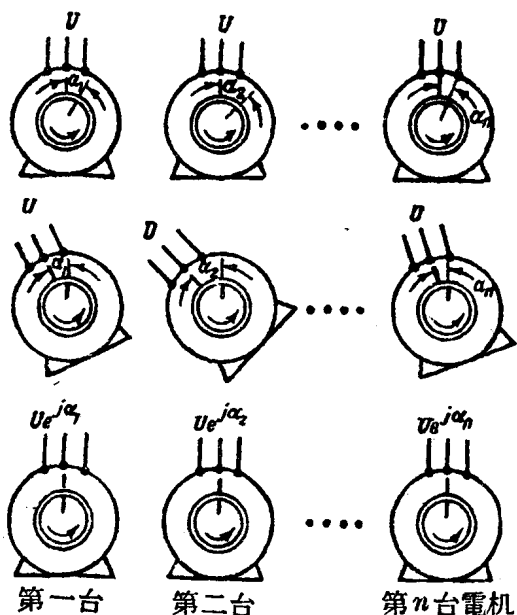


图 4

相角差,来代替轉子角差而引用的代換的物理意义,闡明在图 4 上. 在該图的上部給出 n 台电机, 它們的轉子对于与其協調旋轉的假想軸的失調角是 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$. 在图 4 上表明的瞬間是相当于假想軸与电机的对称垂直軸相符合的情况. 如果把這些电机的定子分別向相反的方向轉动 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 的角度, 那么在綫路中電的方面沒有任何的改变, 所有的轉矩和电流都仍然保持原先的数值. 但是这时如同图 4 中間所表示的那樣, 电机的轉子之間已經不复再有相角差了. 每台电机定子的空間移相角也可以用与之等效的电机旋轉磁場的同样的移相角来代替 (也就是把外加电压的相角改变这样一个角度), 就象图 4 下边所表示的那樣. 图 4 中的电机假定为两极机. 对于两极机來說, 其电

气角度与机械角度在量上是一致的;但是显然可見,对于多极电机來說,全部結論也都仍然是有效的。

第 k 台电动机所有电流的相位角都是对于加在其定子繞組上的端电压来討論的。因此在給該电压乘以 $e^{j\alpha_k}$ 的同时,也应当用同样的乘数去乘电动机的所有电流(參看图 3 的綫路)。

如果用

$$z_1 = r_1 + j(x_0 + x_1),$$

$$z_2 = r'_2/s + j(x_0 + x'_2)$$

表示电机在滑率为 s 时的原級全阻抗和副級全阻抗,那么第 k 台电机的定子电路和轉子电路的电压方程式就具有如下形式(电流的方向根据图 3 所采用的方向):

$$\dot{U} = \dot{I}_k z_1 - \dot{i}'_k j x_0, \quad (1)$$

$$(\dot{I}_k j x_0 - \dot{i}'_k z_2) e^{j\alpha_k} = \frac{R'}{S} \sum_{k=1}^n \dot{i}'_k e^{j\alpha_k}. \quad (2)$$

表明这些方程式的向量图示于图 5 上。以后为了簡化書写起見,將在各处省略点在字母上面表示复数量的点以及标志折算到定子側的符号'。

方程式(1)和(2)当 $k=1, 2, 3, \dots, n$ 时便代表帶有 $2n$ 个未知电流 $I_1, I_2, \dots, I_n, i_1, i_2, \dots, i_n$ 的 $2n$ 个方程式組,其中 n 为任意整数。这样方程式組的解的普遍形式,也就是預先并不知道 n 值,只是可以用人工技巧的方法来获得。茲导出这一解如下。

由方程式(1)求出 I_k 值并且將其代入方程式(2),則得

$$U j x_0 e^{j\alpha_k} - (x_0^2 + z_1 z_2) i_k e^{j\alpha_k} = \frac{R'}{S} z_1 \sum_{h=1}^n i_h e^{j\alpha_h}. \quad (3)$$

給出下标值 k 等于 $1, 2, 3, \dots, n$ 并且把这时得到的諸等

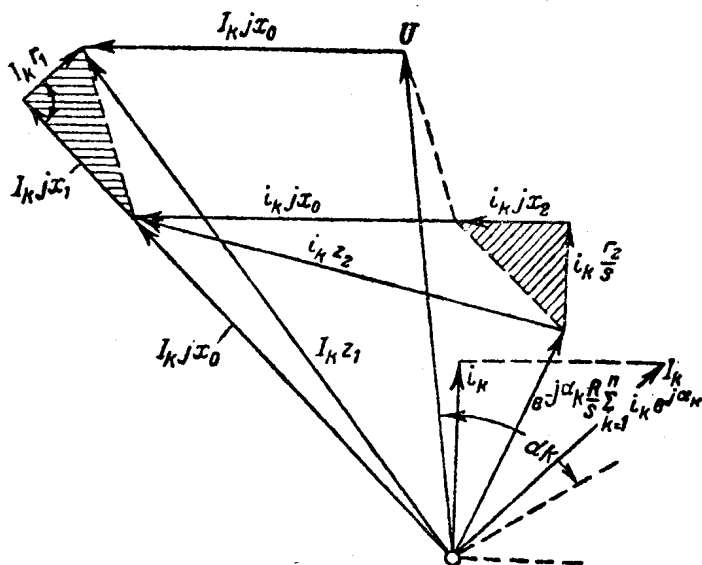


图 5

式相加, 则求出

$$\begin{aligned}
 U j x_0 \sum_{k=1}^n e^{j\alpha_k} - (x_0^2 + z_1 z_2) \sum_{k=1}^n i_k e^{j\alpha_k} &= \\
 &= \frac{R}{S} z_1 n \sum_{k=1}^n i_k e^{j\alpha_k}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

于是

$$\sum_{k=1}^n i_k e^{j\alpha_k} = \frac{U j x_0 \sum_{k=1}^n e^{j\alpha_k}}{x_0^2 + z_1 \left(z_2 + n \frac{R}{S} \right)}$$

把这一和的值代入等式(3), 然后对 i_k 解所得到的方程式,

則得

$$i_k = \frac{jx_0 \left\{ x_0^2 + z_1 \left[z_2 + \frac{R}{s} \left(n - \sum_{l=1}^n e^{j(a_l - a_k)} \right) \right] \right\}}{\left[x_0^2 + z_1 \left(z_2 + n \frac{R}{s} \right) \right] (x_0^2 + z_1 z_2)} U. \quad (5)$$

其次根据方程式(1)

$$I_k = \frac{U}{z_1} + \frac{jx_0}{z_1} i_k. \quad (6)$$

把(5)式中的 i_k 代入这一等式, 則得

$$I_k = \frac{x_0^2 \left[z_2 + \frac{R}{s} \sum_{l=1}^n e^{j(a_l - a_k)} \right] + z_1 z_2 \left(z_2 + n \frac{R}{s} \right)}{\left[x_0^2 + z_1 \left(z_2 + n \frac{R}{s} \right) \right] (x_0^2 + z_1 z_2)} U. \quad (7)$$

在公式(5)中改变了对之取和的下标(用字母 l 代替字母 k). 这一点是必要的, 因为当得到这个和时, 需要进行如下形式的变换

$$\frac{1}{e^{ja_k}} \sum_{k=1}^n e^{ja_k} = e^{-ja_k} \sum_{l=1}^n e^{ja_l} = \sum_{l=1}^n e^{j(a_l - a_k)}.$$

不这样改变下标, 求和是不可能的。

在线路的共用变阻器中流过的电流 $i_R = \sum_{k=1}^n i_k e^{ja_k}$, 根据(5)

式求出为如下形式:

$$i_R = \frac{U j x_0 \sum_{l=1}^n e^{ja_l}}{x_0^2 + z_1 \left(z_2 + n \frac{R}{s} \right)}. \quad (8)$$

有时, 用一台电机在普通运转情况下作为感应电动机使用时的电流, 来表示电轴线路中的电流是方便的. 在我们所用符号的情况下, 当滑率为 s 时普通运转的感应电动机的转子电

流

$$i = \frac{jx_0 U}{x_0^2 + z_1 z_2}. \quad (9)$$

(參看本文末尾的附录 1, 其中給出用本文中符号的主要公式的推导.)

如果电动机不是短接在一起, 而是接在外部电阻 nR 上的話, 那么显然可見它的电流

$$i_0 = \frac{jx_0 U}{x_0^2 + z_1 \left(z_2 + n \frac{R}{s} \right)}. \quad (10)$$

把由等式(5)所决定的电流 i_k 表示为如下形式:

$$i_k = C_1 i + C_2 i_0, \quad (11)$$

式中 C_1 和 C_2 ——某些系数. 为了求出这些系数的值, 把(9)式和(10)式的 i 和 i_0 的值以及等式(5)的 i_k 值代入(11)式中. 在消去共同的因子以后則得:

$$\begin{aligned} x_0^2 + z_1 z_2 + z_1 \frac{R}{s} \left(n - \sum_{l=1}^n e^{j(a_l - a_k)} \right) &= \\ &= C_1 n \frac{R}{s} z_1 + (C_1 + C_2)(x_0^2 + z_1 z_2). \end{aligned}$$

因为这一等式在任意 R 值下都同样地应当滿足, 所以帶 R 的各項与不帶 R 的各項都应当分別地相等, 于是可以得出如下結論:

$$C_1 = 1 - C_2$$

和

$$C_2 = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n e^{j(a_l - a_k)}.$$

把这些值代入(11)式以后,則最終得到

$$i_k = i - \frac{i - i_0}{n} \sum_{l=1}^n e^{j(\alpha_l - \alpha_k)}, \quad (12)$$

导出空載电流 $I_0 = \frac{U}{z_1}$ 以后,則由等式(6)可以求出原級电

流

$$I_k = I_0 + \frac{jx_0}{z_1} i_k. \quad (13)$$

最后对于变阻器中的电流 i_R 則有〔参看公式(8)〕:

$$i_R = i_0 \sum_{l=1}^n e^{j\alpha_l}. \quad (14)$$

如果在定子阻抗 $z_1 = r_1 + j(x_0 + x_1)$ 中与 $x_0 + x_1$ 之和相比而略去电阻 r_1 值并且認為 $z_1 \approx j(x_0 + x_1) = jx_0\sigma_1$ 的話,其中 $\sigma_1 = \frac{x_0 + x_1}{x_0}$ ——高普金松 (Гопкинсон) 的原級漏洩系数,那么各个电流的关系式便可以大大地簡化. 但是在等式(5), (7), (8) 等諸式中为了达到这样的簡化目的,簡單地进行 $z_1 = jx_0\sigma_1$ 的代換是不行的. 實質上在这些关系式里碰到如下形式的和:

$$x_0^2 + z_1 z_2 = z_1 (z_2 - jx_0) + jx_0 (z_1 - jx_0) = [r_1 + j(x_0 + x_1)] \times \left(\frac{r_2}{s} + jx_2 \right) + jx_0 (r_1 + jx_1),$$

在只是同 $x_0 + x_1$ 之和比較才能忽略式中的 r_1 的情况下,等式右边的第二項里的阻抗 $r_1 + jx_1$ 里还应当保留这个 r_1 值. 考虑到这种情况,并且用 $z = r_1 + jx_1 + \sigma_1 \left(\frac{r_2}{s} + jx_2 \right)$ 或者 $z = r_1 + \frac{r_2}{s} \sigma_1 + jx$ 来表示,其中 $x = x_1 + x_2 \sigma_1$, 所以有 $x_0^2 + z_1 z_2 \approx jx_0 z$ 等等,

因此由式(5), (13)和(8)就得到

$$i_h = \frac{z + \frac{R\sigma_1}{s} \left(n - \sum_{i=1}^n e^{j(\alpha_i - \alpha_h)} \right)}{z \left(z + n \frac{R\sigma_1}{s} \right)} U,$$

$$I_h = I_0 + \frac{1}{\sigma_1} i_h, \quad \text{式中} \quad I_0 = \frac{U}{jx_0\sigma_1}, \quad (15)$$

$$i_R = \frac{\sum_{i=1}^n e^{j\alpha_i}}{z + n \frac{R\sigma_1}{s}} U.$$

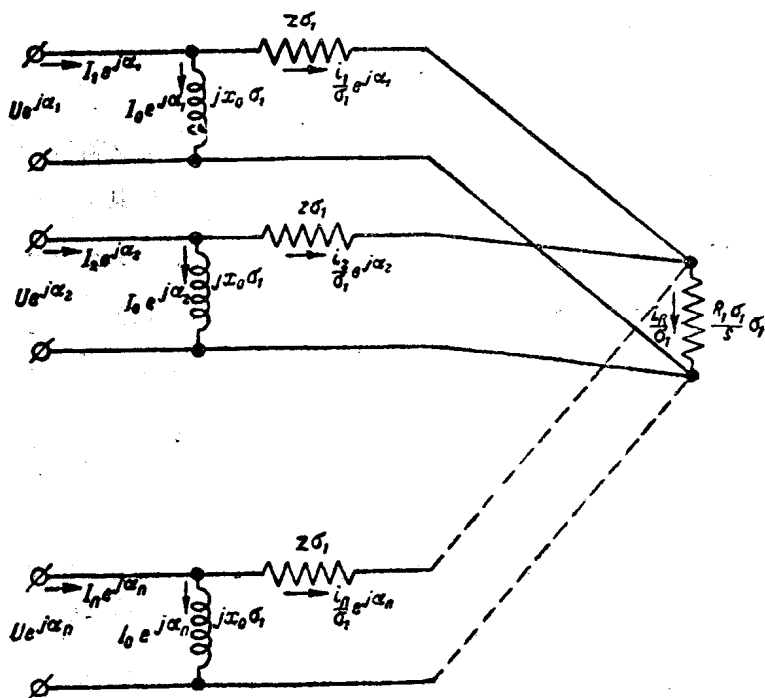


图 6

实际上这样的关系式对于全部的計算說来也是足够的了。等式(15)所表示的等值电路图示于图 6*上。

电动机所产生的轉矩特性曲綫是分析电軸綫路运轉的主要关系式。如果在計算轉矩时也做出一般的假定 $r_1=0$ ，那么第 k 台电动机的轉矩用同步瓦表示的普遍公式(每相值)便是

$$M_k = \frac{I_k + I'_k}{2} U, \quad (16)$$

式中 I'_k ——与 I_k 共軛的复数。把由(15)式得出的 I_k 值代入并且考虑到 $I_0 + I'_0 = 0$ ，于是得

$$M_k = \frac{U}{2\sigma_1} (i_k + i'_k). \quad (17)$$

其次再把电流 i_k 表示成如下形式[参看(15)式中的第一个等式]：

$$\begin{aligned} i_k &= \frac{z + n \frac{R\sigma_1}{s} - \frac{1}{n} \left[\left(z + n \frac{R\sigma_1}{s} \right) - z \right] \sum_{l=1}^n e^{j(\alpha_l - \alpha_k)}}{z \left(z + n \frac{R\sigma_1}{s} \right)} U = \\ &= \frac{U}{n} \left[\frac{n - \sum_{l=1}^n e^{j(\alpha_l - \alpha_k)}}{z} + \frac{\sum_{l=1}^n e^{j(\alpha_l - \alpha_k)}}{z + n \frac{R\sigma_1}{s}} \right], \end{aligned}$$

將这一 i_k 值及其共軛值

$$i'_k = \frac{U}{n} \left[\frac{n - \sum_{l=1}^n e^{-j(\alpha_l - \alpha_k)}}{z'} + \frac{\sum_{l=1}^n e^{-j(\alpha_l - \alpha_k)}}{z' + n \frac{R\sigma_1}{s}} \right]$$

* 关于等值电路变换成类似現在的形式的问题，請参看 М. П. Костенко 教授的論文：Круговая диаграмма и соответствующая ей эквивалентная схема асинхронной машины, “Вестник электротехники”, 1930 年第 4 期。