

感應電動機 運行方式

蘇聯 伊·阿·賽羅米亞特尼科夫著

燃料工業出版社

感應電動機運行方式

蘇聯 伊·阿·賽羅米亞特尼科夫著

范懋源翻譯 吳大榕校訂

燃料工業出版社

內 容 提 要

本書敘述感應電動機的主要特性，其範圍限於有關電動機性能在過渡狀態時必須解決的實際問題。提供了簡單的、毋需用圓圖的分析方法來求出隨着滑差而變化的電動機的主要參數。研究電動機在短時或長期過載時繞組的發熱。敘述電動機在啟動和惰行期間的性能。提供了簡單的方法，以求電動機在不同條件下的啟動時間。詳盡地敘述了按自己啟動條件求不被切斷的電動機的容量問題，以及許多其他問題。

本書讀者對象為從事於感應電動機運行的工程技術人員，特別是在發電廠中管理發電廠自用設備的工程技術人員。

* *
*

感應電動機運行方式

РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

根據蘇聯國立動力出版社(ГОСЭНЕРГОИЗДАТ)

1950年莫斯科俄文第一版翻譯

蘇聯 И. А. СЫРОМЯТНИКОВ 著

范懋源翻譯 吳大榕校訂

燃料工業出版社出版

社址：北京東單安街經界工總部
北京市書刊出版業營業許可證出字第012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：顧維源 校對：唐寶珊

書號474 電 205

850 × 1092 1/16 開本 * 7 1/2 印張 * 4 插頁 * 207 千字 * 定價(8) 一元四角二分

一九五五年七月北京第一版第一次印刷(1—3, 100冊)

原 序

雖然在所有工業部門中電力驅動已被廣泛地採用了許多年，但是直到現在，在充分使用電力驅動的可能性方面，仍受到許多限制。在實踐中，對電動機的自己啓動和啓動的條件還有許多不必要的限制，使啓動、控制和保護裝置線路圖不適當地複雜化。這種限制的原因大部分是由於對發生於電動機中的過程以及運行特性，有着不正確的和陳腐的概念，過低地估計了電動機使用的可能性。

結果，這就引起了生產技術過程中的可靠性的降低，不必要的延擱，以及不應有的生產過程的中斷。

本書是作者對於提高廠用電動機和用戶用電動機可靠性的問題，對於電動機啓動線路圖的簡化，用試驗方法求電動機參數等問題作研究工作的結果。

本書主要為運行工作者所用，因此在分析材料的時候，作者力圖把所研究的電動機的特性與其實際運用相聯繫起來，不局限於不加選擇地〔一般化〕，而給予具體的計算方法，以利於在實踐中直接應用。

在書中對於感應電動機主要特性的分析，與大多數關於此類問題的參考書不同，用不需圓圖的方法進行了分析。作者的意見是用分析方法畫感應電動機的運行特性較用圓圖法更為合適，特別是在必須計算電機參數隨滑差和飽和而變化的情況，以及研究在不正常狀況下（週率的偏差和電壓對標準值的偏差等）電動機性能的時候。

本書列舉了大量的例題。

作者認為有義務對科學技術碩士爾·格·瑪米康揚茲表示謝意，他校閱了原稿，提供了極有價值的意見，以及編寫了關於電動機轉子斷開一相時的性能一節。

作者對工程師格·普·米尼努在原稿付印前的很仔細的整理工作也致以謝意。

目 錄

原 序	
緒 論	5
第一章 感应電動机的主要特性	7
1-1. 感应電動机的等值錢路圖	7
1-2. 電動勢	8
1-3. 轉矩	9
1-4. 起始力矩	15
1-5. 變阻器電阻对轉矩的影响	15
1-6. 額定力矩	16
1-7. 定子電流	17
1-8. 轉子的額定換算電流	18
1-9. 電動机的阻抗	18
1-10. 無功功率	22
1-11. 無載電流的求法	24
第二章 轉矩曲綫的畫法	25
2-1. 深槽式電動机	26
2-2. 繞綫轉子式電動机	35
2-3. 双鼠籠式電動机	39
2-4. 飽和的影响	39
第三章 感应電動机效率的求法	41
3-1. 求效率的普遍表示式	41
3-2. 万用圖解	43
3-3. 調節變阻器的電阻的計算	48
3-4. 調節週率時效率的變化	50
第四章 当週率、电压和負載与額定值有偏差時感应電動机的運行	52
4-1. 一般概念	52
4-2. 週率和电压的變化对感应電動机主要參數的影响	54

4-3.	当以星形接法代替三角形接法時電動机的運行	64
4-4.	負載對轉子和定子電流的影响	69
4-5.	在週率爲額定而電壓變化時電動机的運行	72
4-6.	在週率變化而電壓爲額定時電動机的運行	74
4-7.	轉子電阻的影响	77
第五章	發熱特性	80
5-1.	均質物体的發熱理論	80
5-2.	發熱時間常數的求法	85
5-3.	在短時过载時繞組溫昇的求法	89
5-4.	在穩定狀況下的溫昇	91
5-5.	用試驗方法取發熱特性	92
5-6.	短時过载對縮短電動机絕緣壽命的影响	102
第六章	機械特性	110
6-1.	阻力力矩	112
6-2.	具有恒定阻力力矩的機械	114
6-3.	具有通風機式阻力力矩的機械	114
6-4.	離心泵	114
6-5.	開動時的起始阻力力矩的求法	120
6-6.	按啓動條件求電動机的力矩	122
6-7.	機械生產率的調節	123
第七章	電動机在啓動和惰行時的性能	123
7-1.	動力學概要	127
7-2.	惰行曲綫	129
7-3.	逸轉或惰行時間的求法	129
7-4.	在啓動時電動机繞組中所發出的熱量的求法	131
7-5.	啓動時電流的有效值的求法	133
7-6.	機械時間常數和阻力力矩特性的求法	138
第八章	電動机的啓動及根據啓動條件求電動机的極限 功率	143
8-1.	由無限大容量電源供電	145
8-2.	根據啓動條件求電動机的極限容許功率	148
8-3.	啓動電流比數的影响	155

8-4.	根據試驗數據，電壓對啓動時間長短和繞組發熱的影響	160
8-5.	由容量與電動機容量相差不多的發電機供電	162
8-6.	網絡阻抗對鼠籠式感應電動機的起始力矩的影響	169
8-7.	同步補償機和同步電動機的感應啓動	171
第九章 按自己啓動的條件，不被切斷的電動機的容量的求法		
	求法	180
9-1.	問題的一般提出	180
9-2.	短路持續時間的影響	183
9-3.	自無窮大容量的網絡供電	184
9-4.	對於具有通風機阻力力矩的機械在自己啓動時電動機容量的求法	189
9-5.	由發電機供電	199
9-6.	保證重要電動機自己啓動的實際措施。繼電保護裝置	202
第十章 電動機的不对称運行情況		
10-1.	定子繞組的一相斷開	204
10-2.	定子繞組兩相短路	211
10-3.	單相短路	213
10-4.	轉子的一相斷開	217
第十一章 電動機的驗收和運行試驗		
11-1.	電動機的試驗步驟	226
11-2.	歐姆電阻的測定	227
11-3.	絕緣電阻的測定	227
11-4.	昇壓試驗	228
11-5.	短路試驗	229
11-6.	無載試驗	231
11-7.	由試驗計算電動機阻抗的誤差	231
11-8.	啓動時間的求法	233
11-9.	惰行曲綫的取法	234
11-10.	滑差的求法	234

緒 論

力能系統的可靠運行，對於蘇聯的國民經濟具有極為重大的意義。用戶供電的任何中斷，會影響產品數量的減少；而對於某些生產部門會引起技術過程的完全破壞，此種技術過程的恢復有時需要好幾小時。

蘇聯工程師對於提高力能系統運行可靠性的問題，經常寄予很大的注意。他們擬訂了並運用了一系列的極為有效的措施，由此力能系統並聯運行的穩定性顯著地提高了。必須指出，在擬訂出措施來改良系統運行的問題中，蘇聯力能工作者在很多問題中找到了比較在國外所採用的來得有利的解答。

利用頂值勵磁的同步機的自動勵磁調節的大量運用，是極為有效的措施。絕大多數發電機和同步補償機配備有這些裝置，因此終止了由於所謂電壓崩潰而引起的系統並聯運行穩定性的破壞。

根據週率而自動卸去負載是同等重要的措施。當在系統中由於切斷發出的功率而引起週率下降時，可把一部分用戶切斷。沒有根據週率而自動負載卸除，則當由切斷發出的功率而引起顯著的功率不足時，將導致系統中嚴重的事故。

快動作保護裝置的運用具有重大的意義，這在高压網絡中特別重要。

除了這些措施以外，尚可提出廠用電備用電源的自動合閘，輸電綫的自動重合閘，廠用電動機繼電保護裝置的改裝等等。

但是，在力能系統中僅只實行一種措施，在短路時或在當自動重合閘時饋電中斷時，不可能保證用戶的可靠運行。在電動機上應用瞬時低電壓保護裝置以及不正確地整定過電流保護裝置，當由短路而引起電壓降低時，將導致重要電動機的大量切斷。

工業企業應當利用已有的據以保證電廠廠用電動機自己啓動

的莫大經驗^①。自己啓動的問題具有極大的實用意義。雖然電動機的自己啓動對於廠用電設備已被廣泛地採用了好多年，且在個別的先進工業企業中也有採用自己啓動的經驗；但直到現在為止，不僅個別專家方面，而且以運用新的技術於工業企業中爲生命的某些機關方面，也存在着毫無根據的顧慮，他們反對這一極爲簡單的措施的廣泛運用。對運用自己啓動的主要反對意見歸結爲繞線轉子式電動機的繞組動力損壞的危險性，以及由於啓動電流而引起的電動機繞組、變壓器和其他設備的不容許過熱。當仔細研究這一問題時，發現當自己啓動時對於電動機和其他設備實際上並沒有任何危險，而所有的反對意見是建立在過分謹慎的基礎上面的。

必須注意到按自己啓動條件正確地決定不被切斷的電動機的容量的必要性，因爲當以太大的功率接至電動機的電源時，電壓將爲不足，且因此產生所有電動機的切斷。所以，爲了使最重要的電動機保持運行，按自己啓動條件來正確地決定不被切斷的電動機的容量是極爲重要的。

現時關於自己啓動問題的所有計算方法，已被足夠完備地擬定，電動機自己啓動的安全性已被證明，因此在工業企業中最廣泛地應用自己啓動是具有一切理由的。

① 這時重要的繞線轉子式感應電動機沒有啓動設備而自己啓動。

第一章 感應電動機的主要特性

在解決許多有關感應電動機的啓動問題，在短路時和在電壓恢復時自己啓動性能的問題以及有關選擇繼電保護裝置及類似問題的時候，必須對於三相感應電動機的主要性能有明確的概念。

感應電動機所有主要參數是用分析幾個最簡單公式的方法來求得的，毋需劃任何曲線圖表。蘇聯地區發電廠及綫路改進局，中央工業研究院，阿捷爾拜疆動力局和中央科學電工實驗所以及其他機關多年實際應用分析方法的結果，證明這種方法是完全合適的。

1-1. 感應電動機的等值綫路圖

圖 1-1 是感應電動機的等值綫路圖及其向量圖。我們將利用它們作以後的推論。

在圖 1-1 中， $Z_1 = R_1 + jx_1$ 表示定子的總阻抗； $Z'_2 = \frac{R'_2}{s} + jx'_2$ 表示在規定滑差 s 下的轉子總阻抗換算至定子方面之值； $Z_0 = R_0 + jx_0$

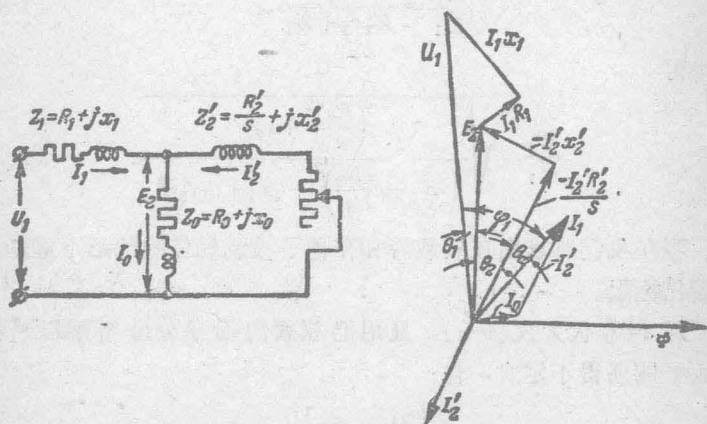


圖 1-1 感應電動機的等值綫路圖和向量圖

$R_0 + jx_0$ 磁化分路總阻抗。定子電流為 I_1 ；轉子的換算電流為 I'_2 及磁化電流為 I_0 。

感應電動機等值線路圖的理論根據，因係大家都知道的，不再列舉。

感應電動機的所有主要參數決定於滑差。

1-2. 電 動 勢

電動勢(э. д. с.)的數值，以及與其成比例的磁通的數值，在滑差發生變化的時候並不是保持不變的，而是變化很大。

實際上，利用感應電動機的等值線路圖，可寫成下式：

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2 = \dot{E}_2 \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z'_2} \right), \quad (1-1)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_2 + \dot{I}_1 Z_1 = \dot{E}_2 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{Z_1}{Z'_2} \right). \quad (1-2)$$

假設

$$1 + \frac{Z_1}{Z_0} \approx 1 + \frac{x_1}{x_0} = c_1. \quad (1-3)$$

於是

$$\frac{\dot{E}_2}{\dot{U}_1} = \frac{Z'_2}{Z'_2 c_1 + Z_1}, \quad (1-4)$$

由此得

$$\frac{E_2}{U_1} = \sqrt{\frac{\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_2'^2}{\left(R_1 + c_1 \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}. \quad (1-5)$$

現在我們將求出在無載時和在轉子被制動住的情形下電動勢的變化極限。

以 $s=0$ 代入式(1-5)，且用把根式內分子分母各乘以 s^2 的方法展開所得不定式，得：

$$\frac{E_{2x.x}}{U_1} = \frac{1}{c_1},$$

由此

$$c_1 = \frac{U_1}{E_{2x.x}} \quad (1-6)$$

對於容量大的電動機，
端電壓對無載電動勢之比接
近於單位值，因此 $c_1 \approx 1$ 。

對於對稱等值線路圖，
當轉子被制動住的時候 ($s = 1$)，
即當 $R_1 = R'_2$ 及 $x_1 = x'_2$
時 (通常都是這樣的)，得：

$$\frac{E_{2x}}{U_1} = \frac{1}{1+c_1} \approx 0.5 \quad (1-7)$$

從上述關係式中可看出，當滑差自 0 變至 1 的時候，電動勢
的變化範圍自 $E_{2x.x} \approx U_1$ 至 $E_{2x} \approx 0.5U_1$ (圖 1-2)。

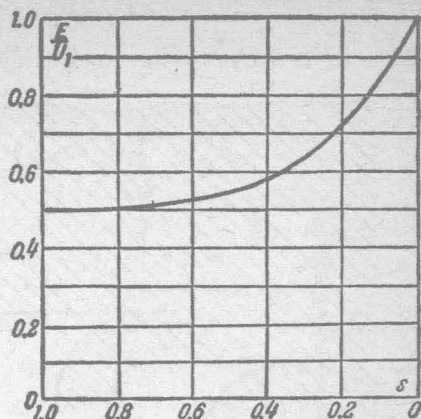


圖 1-2 感應電動機的電動勢對滑差的
關係曲線

1-3. 轉 矩

轉矩是感應電動機的重要參數之一。

轉矩與定子輸給轉子的電磁功率 P_a 成正比：

$$M = \frac{P_a}{g\omega_1} = \frac{P_a p}{g2\pi f_1} \quad (1-8)$$

式中 g ——重力加速率；

ω_1 ——角速率；

f_1 ——網絡週率；

p ——極對數。

電磁功率 P_a 的物理意義可以由圖 1-3 所示的感應電動機的能量圖來說明。

在此圖中， P_1 ——網絡所供給的功率：

$$P_1 = 3I_1 U_1 \cos \varphi_1,$$

式中 U_1 和 I_1 ——定子電壓和定子電流的每相值。

自定子輸給轉子的功率：

$$P_a = P_1 - \Delta P_1, \quad (1-9)$$

式中 $\Delta P_1 = \Delta P_{1M} + \Delta P_{1c}$ —— 定子的鐵耗和銅耗。

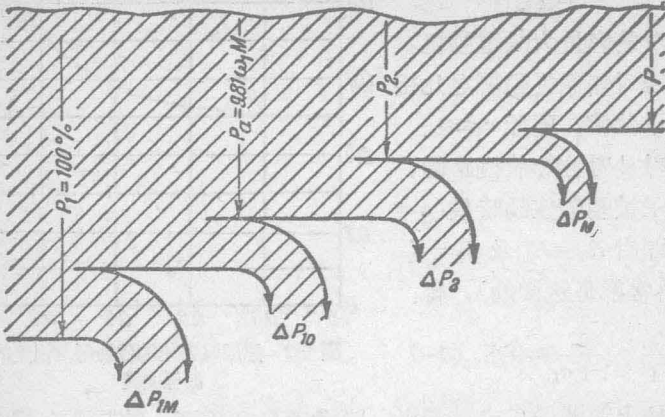


圖 1-3 感應電動机的能量圖

机軸功率

$$P_2 = P_a - \Delta P_2 = P_1 - \Delta P_1 - \Delta P_2, \quad (1-10)$$

式中 ΔP_2 —— 轉子損耗。

机軸有效功率

$$P = P_2 - \Delta P_m = P_1 - \Delta P_1 - \Delta P_2 - \Delta P_m, \quad (1-11)$$

式中 ΔP_m —— 軸承和通風的機械損耗。

額定有效功率表明於電動机的銘牌上。

利用等值線路圖，定子傳輸於轉子的功率可以表示為：

$$P_a = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s}. \quad (1-12)$$

我們將以電動机端電壓 U_1 表示轉子的換算電流：

$$i_2' = \frac{\dot{U}_1 Z_n}{\left(Z_1 + \frac{Z_0 Z_2'}{Z_0 + Z_2'} \right) (Z_0 + Z_2')} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + c_1 Z_2'}, \quad (1-13)$$

式中

$$c_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_0}. \quad (1-14)$$

以轉子換算電流值代入公式(1-12), 得:

$$P_a = \frac{3U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + c_1 \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2} \quad (1-15)$$

在某種滑差時輸送給轉子的功率及轉矩將達到最大數值。取 P_a 對 s 的一次微分 $\frac{dP_a}{ds}$ 並使之等於零, 求得滑差 s_k 。在這種滑差下, 傳輸至轉子上的功率及轉矩將達最大值:

$$s_k = \frac{c_1 R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2}} \quad (1-16)$$

這種滑差值稱為臨界滑差。在臨界滑差值時, 將自公式(1-15)求得的傳輸至轉子的最大功率代入 $s = s_k$:

$$P_{a.m} = \frac{3U_1^2}{2c_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2}]} \quad (1-17)$$

在實際計算時, 以標 \angle 值表示轉矩較為便利。

為此, 把式(1-15)用式(1-17)來除, 得:

$$\frac{P_a}{P_{a.m}} = \frac{M}{M_m} = \frac{2c_1 R'_2 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2}]}{s \left[\left(R_1 + \frac{c_1 R'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2 \right]} \quad (1-18)$$

因為自公式(1-16)

$$\sqrt{R_1^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2} = \frac{c_1 R'_2}{s_k} \quad (1-19)$$

則

$$\frac{P_a}{P_{a.m}} = \frac{M}{M_m} = \frac{2c_1 R'_2 \left(R_1 + \frac{c_1 R'_2}{s_k}\right)}{s \left[\frac{c_1^2 R_2'^2}{s_k^2} + \frac{c_1^2 R_2'^2}{s^2} + \frac{2R_1 c_1 R'_2}{s} \right]} \quad (1-20)$$

在分子中, 與 $\frac{c_1 R'_2}{s_k}$ 相較, 定子電阻可略而不計, 則得:

$$\frac{P_a}{P_{a.m}} = \frac{M}{M_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + \frac{2R_1 s_k}{c_1 R'_2}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (1-21)$$

式中 $\frac{2R_1 s_k}{c_1 R_2'}$ 項可以略去，因為通常 s_k 很小(約 0.1)，而當 s_k 值較大時，例如繞綫轉子式電動機在轉子綫路中引入電阻後， $c_1 R_2' \gg R_1$ 。

以符號 b 表示最大力矩對額定力矩的比數

$$\frac{M_M}{M_n} = b, \quad (1-22)$$

將得：

$$\frac{M}{M_n} = \frac{2b}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (1-23)$$

在圖 1-4 中，列舉了在不同臨界滑差時滑差對力矩的關係曲綫。

考慮到了式(1-17)，最大力矩比數為：

$$b = \frac{3U_1^2}{2c_1 P_{a.n} [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}]}, \quad (1-24)$$

式中 $P_{a.n}$ ——在額定負載下自定子傳輸給轉子的功率。

將下式代入

$$P_{a.n} = \frac{(P_n + \Delta P_M)}{1 - s_n}, \quad (1-25)$$

得：

$$b = \frac{3U_1^2(1 - s_n)}{2c_1(P_n + \Delta P_M)[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}]}. \quad (1-26)$$

在額定電壓下的最大力矩比數

$$b_n = \frac{3U_{1n}^2(1 - s_n)}{2c_1(P_n + \Delta P_M)(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_n^2})} \approx \frac{3U_{1n}^2(1 - s_n)}{2c_1(P_n + \Delta P_M)x_n}, \quad (1-27)$$

假如已知無載電流(I_0)和在額定電壓下的啓動電流(I_n)，則可以求得係數 c_1 。

因為在電動機被制動時定子繞組的總阻抗實際上等於轉子繞組的總阻抗，即

$$Z_1 \approx Z_2', \quad (1-28)$$

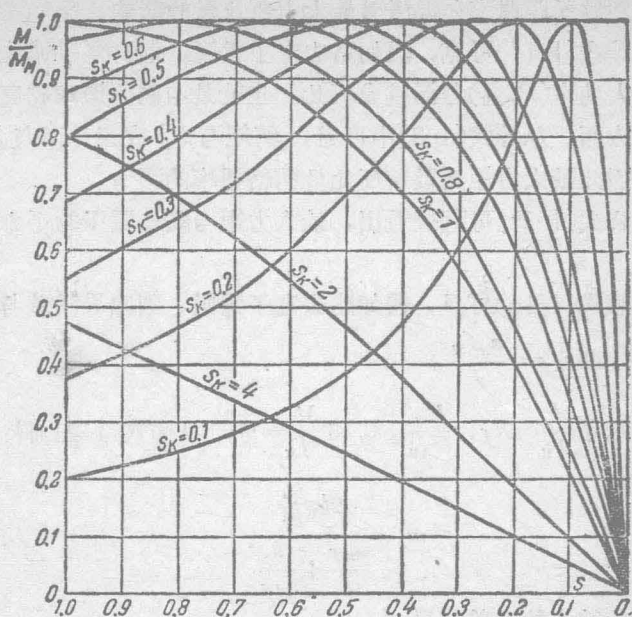


圖 1-4 在不同的邊界滑差數值時感應電動機轉矩對滑差的關係曲線

則

$$Z_1 \approx \frac{Z_K}{2}, \quad (1-29)$$

於是

$$c_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_0} \approx 1 + \frac{Z_K}{2Z_0} \approx 1 + \frac{I_0}{2I_K}. \quad (1-30)$$

以無載電流和啓動電流的平均值 $I_0 = 0.3I_N$ 和 $I_K = 5I_N$ 代入，得：

$$c_1 = 1 + \frac{0.3}{2 \cdot 5} = 1.03,$$

即係數 c_1 通常接近於單位值。

從公式(1-26)中可見，決定最大力矩比數的主要數值是定子和轉子的漏抗(x_1, x_2')。因此漏抗愈小，則啓動電流比數愈大，而最大力矩比數也愈大。不可能要求小的啓動電流而同時要求大的最大力矩比數。

我們將說明週率和電壓對最大力矩比數的影響。

從等式(1-17)可見，假如略去定子電阻，則自定子傳輸至轉子的最大功率($P_{a.m}$)與漏抗成反比，也就是與網絡週率成反比。在另一方面，從等式(1-8)中可見，轉矩與 P_a 成正比而與 f_1 成反比，因此最大力矩比數將反比於網絡週率的平方。

從公式(1-27)可直接看出，最大力矩與網絡電壓的平方成正比。

從等式(1-16)可見，假如略去定子電阻，則臨界滑差與週率成反比，即 $s_{kf} = \frac{s_k f_n}{f}$ 。

表示了 $\frac{f}{f_n} = k_f$ ， $\frac{U_1}{U_{1n}} = k_u$ 和 $\frac{M}{M_n} = m_c$ ，從等式(1-23)得：

$$m_c = \frac{2b_n \frac{k_u^2}{k_f^2}}{\frac{s_{kf}}{s} + \frac{s}{s_{kf}}} \quad (1-31)$$

解此等式的滑差，得：

$$s = \frac{s_k f}{\frac{b_n k_u^2}{m_c k_f^2} + \sqrt{\left(\frac{b_n k_u^2}{m_c k_f^2}\right)^2 - 1}} \quad (1-32)$$

對於額定狀況

$$s_n = \frac{s_k}{b_n + \sqrt{b_n^2 - 1}} \quad (1-33)$$

在週率為 f 時的臨界滑差

$$s_{kf} = \frac{s_k f_n}{f} = \frac{s_k}{k_f} \quad (1-34)$$

當數值 $b_n \geq 1.6$ 時，

$$s_n \approx \frac{s_k}{2b_n} \quad (1-35)$$

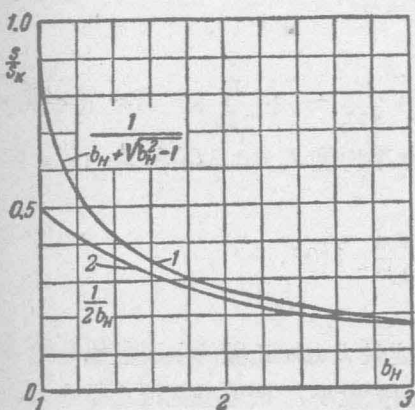


圖 1-5 額定滑差對過載力矩比數的關係曲線
1—按準確的公式；2—按近似公式。

為了舉例說明起見，圖 1-5 中列示了額定滑差對 b_n