

高等学校教学用书

黑色冶金电炉

下册

H. B. 奥柯罗柯夫著

北京钢铁学院电冶金教研组译



中国工业出版社

PDF

下 冊 目 錄

第三部分 電弧爐的電氣設備

第一章 交流理論中的複數	261
第二章 電弧爐設備的圓圖及工作特性	267
無分流電路的圓圖	267
有分流電路的圓圖	276
計及電爐熱損失的圓圖	278
電弧爐設備的電氣特性曲線的作圖法	283
電爐設備特性的實驗記錄	292
第三章 短網	296
電阻計算	296
感抗的計算	307
相的抵消	319
鋼體中的損失	322
第四章 電弧	327
非正弦電流	337
第五章 電弧的控制和金屬的攪拌	348
第六章 電弧爐的電路聯接	348
第七章 聯接設備	353
第八章 爐用變壓器和兼用線圈	364
爐用變壓器線圈的構造和工作情況	369
變壓器線圈的聯接法和電壓的調整	375
變壓器的過載和電壓的調整	381
塞流線圈	384
變換相數的電路	386
自耦變壓器	388
第九章 電壓互感器	389
電壓互感器	389

電流互感器	391
第十章 保護器和電氣信號器	393
電流繼電器	395
電壓繼電器	398
氣體繼電器和其他類型繼電器	399
預防過電壓的保護器	402
第十一章 電弧爐的自動調節器	404
調節器依照工作原理的分類	404
對自動調節器應提出的各項要求	406
XOM3 式調節系統	411
差動式調節器	422
穩定電流調節器	423
保持電弧長度的差動調節器	430
放大機調節器	432
液壓式調節器	435
調節器和電爐裝置的聯接方法	436
第十二章 電爐變電所	438

第四部分 感應電爐

第一編 鐵心感應電爐	457
第一章 鐵心感應電爐的理論與工作原理	457
感應電爐的向量圖	458
電動效應	460
壓縮效應	460
旋轉效應	461
第二章 鐵心感應電爐的構造	462
槽為開頂式爐	462
槽為封閉式爐	462
第二編 無鐵心感應電爐	466
第一章 無心感應電爐的理論與工作原理	466
單相無心感應電爐的理論	467
第二章 無心感應電爐的計算	483
計算公式	483

無心感應電爐的設計舉例	493
第三章 無心感應電爐的電氣設備	497
靜電容器	498
高頻和中頻發電機	504
高頻測量設備	515
設備的電氣線路	517
自動調節器	519
第四章 無心感應電爐的構造元件	519
感應電爐的傾動機構	527
導流體	528
爐襯	528
第五章 新型無心感應電爐的構造	532
單相坩堝爐	532
三相坩堝爐	534
球形熔槽三相感應電爐	535
兩種頻率的感應電爐	537
能預熱爐渣的感應電爐	538
真空感應電爐	538
第六章 熱平衡和爐的維護	539
熱平衡和操作指標	539
爐子工作的強化	540
對爐的觀察和維護	546

第五部分 電阻電爐

附錄:	555
1. 電弧煉鋼電爐的安裝、驗收試驗與維護	555
2. 蘇聯電弧煉鋼爐的技術數據	561
3. 煉鋼電爐的熱平衡	562
4. 無心感應爐的熱平衡	565
5. 蘇聯爐子的技術數據	566
參考書目	567

第三部分 電弧爐的電氣設備

第一章 交流理論中的複數

對於交流電路的計算，在用向量圖之外，還可採用一種稱為符號法的更準確的解析方法。符號法是由院士 B. Ф. 米德凱維奇提供到祖國科學上來的。

這種方法使我們能够把用向量的幾何運算變為用複數的純代數運算，從而可獲得計算所需要的任何準確性。

符號法對於複雜的交流電路的計算，如不對稱的三相電路的計算，尤為方便。

在求解交流理論中的各種問題時，將電壓、電流強度和其他的電學量，以及阻抗都用複數表示。嚴格地說來，阻抗並不是一個名符其實的向量，但將它表成複數形式却有其方便的地方，因為電阻、感抗和容抗間的某種關係就可以確定相應的電的向量（電壓、電流）的相位；此外，阻抗三角形並與電壓三角形相似（當電流強度^①等於1時，各部分阻抗^②在數值上便與各部分電壓相等）。

在用複數表示阻抗時，可採用下面的規則：電阻總是置於實數軸的正的一邊，感抗置於虛數軸的正的一邊，容抗也置於虛數軸上，但在負的一邊。

① 譯者註：電流強度——此處即指電流而言。

② 譯者註：阻抗——即電阻、電抗之總稱。

這些規則是由下列事實而來的：

1) 電壓的有功分量 Ir 與 I 同相，也就是說以 r 乘 I ，僅將 I 增加到 r 倍但不改變其方向。而沿實軸取 r ，就可以得到這個結果。

2) 電壓的感應分量 $I\omega L$ 超前 $I 90^\circ$ ，也就是說，用 ωL 乘 I 時，數量 I 不但增加 ωL 倍，並將被旋轉 $+90^\circ$ ，因此其乘積應表示成 $jI\omega L$ 。

3) 以符號 $Z_c = -j\frac{1}{\omega C}$ 來表示容抗也是基於同樣的方法。

因此，圖 88 上所示電路的阻抗可表成複數式如下：

$$1) Z_1 = 4 + 3j = 5(\cos 36^\circ 50' + j \sin 36^\circ 50') = 5e^{+j0.205\pi};$$

$$2) Z_2 = 3 - 4j = 5(\cos 53^\circ 10' - j \sin 53^\circ 10') = 5e^{-j0.296\pi};$$

$$3) Z_3 = 6 + j(10 - 2) = 6 + 8j = 10(\cos 53^\circ 10' + j \sin 53^\circ 10') = 10e^{+j0.296\pi}.$$

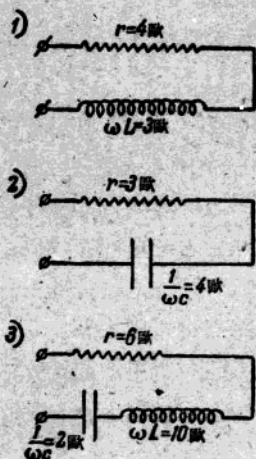


圖 88. 交流電路。

上述用複數表示阻抗的法則，是一般性的，在所有的情形下阻抗都是這樣表示，在多相制中也是這樣表示，而與該阻抗所在何相無關。

在表示其餘各電學量時（電流、電壓），可採用下列法則：從諸向量中取一個向量，令與實數軸或虛數軸相合，而將所有其餘的量表成複數時，應使得這些複數能完全正確地反映這些向量彼此之間的相位差，以及對於開始向量的相位差。

電路的功率等於用複數表示的電壓與電流的乘積，並且兩個因子中的一個應代以它的共軛式；通常將電壓用它的共軛式代替。在功率式中將出現 $\cos \varphi$ 和 $\sin \varphi$ ，其

中 φ 是電壓與電流間的夾角，亦即電壓向量和電流向量分別與實數軸形成的兩相角的差。如果直接將電壓複數式乘以電流複數式，則按照複數乘法規則，在乘積中得到的是此兩角的和而其結果便將不正確。

此外，功率還以與電路的電流和電壓不同的另一頻率而變化（當電流和電壓為正弦波形時，功率就以兩倍於電流和電壓的頻率而變化）。

假令電路的電壓和電流表成下面的形式：

$$\dot{U} = A + jB; \quad \dot{I} = C - jD;$$

$$\begin{aligned} \text{則 } \dot{S} = \dot{U} \dot{I}_1^* &= (A + jB)(C + jD) = (AC - BD) + j(AD + BC) = \\ &= P_a + jQ = Se^{+j\varphi}; \end{aligned} \quad (141)$$

$$\begin{aligned} \dot{S} = \dot{U} \dot{I} &= (A - jB)(C - jD) = (AC - BD) - j(AD + BC) = \\ &= P_a - jQ = Se^{-j\varphi}. \end{aligned} \quad (142)$$

$P_a = (AC - BD)$ 是用瓦特表示的有功功率；

$Q = (AD + BC)$ 是用伏安表示的無功功率；

S 是用伏安表示的視在功率，等於複數 $\dot{S}$ 的模數：

$$S = \sqrt{(AC - BD)^2 + (AD + BC)^2} = \sqrt{P_a^2 + Q^2}. \quad (143)$$

比較等式 (141) 和 (142) 便可看出，依照兩複數中被其共軛數所代替的是 $\dot{U}$ 還是 $\dot{I}$ ，所改變的只是虛數部分的符號而已。

因為功率是由兩個係數的絕對值所確定，故在這兩複數中，何者 ($\dot{U}$ 或 $\dot{I}$) 為其共軛式所代換皆無什麼區別。

無功功率的性質（電感性或電容性），可以按照電抗的性質來決定。

由幾個相聯電路所組成的系統的功率，可照下列規則決定之：

a) 系統的有功功率等於各電路的有功功率的算術和（有功功

① $\dot{I}$ 和 $\dot{U}$ 表示複數， $\dot{I}^*$ 和 $\dot{U}^*$ 則表示相應的共軛數。

率永遠是+號)。

6) 系統的無功功率等於無功功率的代數和, 其中所有電感性功率附以一種符號, 電容性功率——為相反的符號。

複數可以使得計算不對稱的三相電路變得很容易(在電爐實際應用中時常發生的情形)。

因此可將各相的阻抗和電壓表成複數式, 並利用節點電壓與

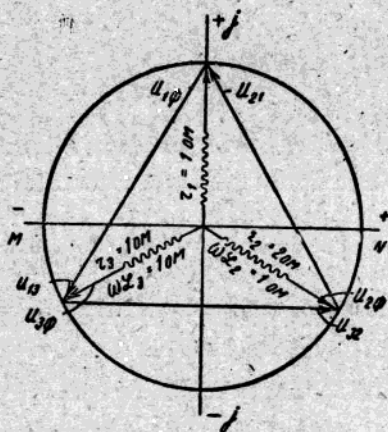


圖 89. 不對稱的三相電路。

電流的方法來構成一組數目和未知數數目相等的等式, 然後再用普通的代數方法來解這些等式。

例題: 已知一三相電路如圖 89 所示:

$$U_{21} = U_{32} = U_{13} = U_x = 220 \text{ 伏。}$$

試求各相的電流和功率。

解: 我們先將各相

阻抗照下面的方式表示出來:

$$Z_1 = 1; Z_2 = 2 + j; Z_3 = 1 + j, \quad (a)$$

而與其相對應的導率為:

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} = 1; Y_2 = \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{2+j} = \frac{2-j}{4+1} = \frac{2}{5} - \frac{j}{5};$$

$$Y_3 = \frac{1}{Z_3} = \frac{1}{1+j} = \frac{1-j}{2} = \frac{1}{2} - \frac{j}{2}. \quad (b)$$

我們認為線電壓與相電流無關, 因此它們可以構成一等邊三角形。若將坐標繪出, 就可用下面的式子表示出線電壓(圖 89):

$$\dot{U}_{21} = -110 + 190j; \dot{U}_{32} = +220; \dot{U}_{13} = -110 - 190j. \quad (b)$$

如果要解此問題，可依節點電流法組成等式。

$$\text{於是我們有} \quad \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0. \quad (\Gamma)$$

或用相電壓和導率表示電流：

$$\dot{U}_{1\Phi} Y_1 + \dot{U}_{2\Phi} Y_2 + \dot{U}_{3\Phi} Y_3 = 0. \quad (\Lambda)$$

因為(參看圖 89)

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2\Phi} &= \dot{U}_{1\Phi} - \dot{U}_{21} \\ \dot{U}_{3\Phi} &= \dot{U}_{1\Phi} + \dot{U}_{13} \end{aligned} \right\}, \quad (\epsilon)$$

則將(e)中的 $\dot{U}_{2\Phi}$ 和 $\dot{U}_{3\Phi}$ 代入(Λ)以後即得

$$\dot{U}_{1\Phi}(Y_1 + Y_2 + Y_3) = \dot{U}_{21} Y_2 - \dot{U}_{13} Y_3, \quad (\kappa)$$

由此得

$$\dot{U}_{1\Phi} = \frac{\dot{U}_{21} Y_2 - \dot{U}_{13} Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3}. \quad (\delta)$$

同樣我們可以得到下列公式：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2\Phi} &= \frac{\dot{U}_{32} Y_3 - \dot{U}_{21} Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \\ \dot{U}_{3\Phi} &= \frac{\dot{U}_{13} Y_1 - \dot{U}_{32} Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \end{aligned} \right\}. \quad (\Pi)$$

求得 $\dot{U}_{1\Phi}$, $\dot{U}_{2\Phi}$ 和 $\dot{U}_{3\Phi}$ 以後就可確定 $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ 和 $\dot{I}_3$ 爲：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U}_{1\Phi} Y_1 = \frac{\dot{U}_{1\Phi}}{Z_1} \\ \dot{I}_2 &= \dot{U}_{2\Phi} Y_2 = \frac{\dot{U}_{2\Phi}}{Z_2} \\ \dot{I}_3 &= \dot{U}_{3\Phi} Y_3 = \frac{\dot{U}_{3\Phi}}{Z_3} \end{aligned} \right\}. \quad (\kappa)$$

知道電流也就容易確定功率爲：

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_1 &= \dot{U}_{1\Phi} \dot{I}_1^* \\ \dot{S}_2 &= \dot{U}_{2\Phi} \dot{I}_2^* \\ \dot{S}_3 &= \dot{U}_{3\Phi} \dot{I}_3^* \end{aligned} \right\}. \quad (\lambda)$$

對於例題中所予的數據我們有：

$$Y_1 + Y_2 + Y_3 = \frac{19 - 7j}{10},$$

$$\dot{U}_{1\phi} = \frac{\left[\frac{(-110+190j)(2-j)}{5} - \frac{(-110-190j)(1-j)}{2} \right] 10}{19-7j} = 43.2+88.6j;$$

$$\dot{U}_{2\phi} = \frac{\left[220 \cdot \frac{1-j}{2} - (-110+190j) \cdot 1 \right] \cdot 10}{19-7j} = 153.2-101.4j;$$

$$\dot{U}_{3\phi} = \frac{\left[(-110-190j) \cdot 1 - \frac{220(2-j)}{5} \right] \cdot 10}{19-7j} = -66.8-101.4j;$$

$$\dot{I}_1 = (43.2+88.6j) \cdot 1 = 43.2+88.6j;$$

$$\dot{I}_2 = (153.2-101.4j) \cdot \frac{2-j}{5} = 41-71.2j;$$

$$\dot{I}_3 = (-66.8-101.4j) \cdot \frac{1-j}{2} = -84.1-17.3j.$$

如要檢查數學演算是否正確，可將電流的值代入等式(r)：

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 43.2+88.6j + 41-71.2j - 84.1-17.3j = 0.1+0.1j.$$

得到的值比 0 稍大的事實是由於計算上的不準確的緣故。

功率則為下面的數值：

$$\dot{S}_1 = (43.2+88.6j)(43.2-88.6j) = 9700;$$

$$\dot{S}_2 = (153.2-101.4j)(41+71.2j) = 13480+6740j;$$

$$\dot{S}_3 = (-66.8-101.4j)(-84.1+17.3j) = 7380+7380j.$$

三相的總有功功率為：

$$P_a = 9700 + 13480 + 7380 = 30560 \text{ 瓦}.$$

三相的無功功率為：

$$Q = 6740 + 7380 = 14120 \text{ 伏安}.$$

無功功率為同一符號，乃因在該兩相中(2 和 3)無功功率都是電感性的。

第二章 電弧爐設備的圓圖和工作特性

如要獲得電爐設備的高度生產指標，必須保證合理的供電情況，不合理的供電情況不僅可使生產指標極劇烈地惡化，甚至還可使電弧爐完全不能操作，如像某些原始的大型礦熱爐所發生的情形一樣。

在這些電爐的短網中的感抗和其相應的感抗電壓降往往很大，以致電弧中的功率太小而不能充分地保證爐子滿意的操作。因此對於每一輸入功率數值和每一級爐用變壓器的副電壓選擇一合理的供電情況，乃是電爐設備的設計和操作中的最重大的課題之一。

因此我們必需綜合地研究各種不同的供電情況，以確定我們欲知的電氣量的變化特性。如同確定表示欲知的向量終點的幾何位置的方法來解答這些問題，那是再好不過了。

無分流電路的圓圖^①

欲用圓圖來研究電的情況，具有三或六電極的電弧爐可視為三或六個單獨的單相電弧爐的集合體，然後畫出其中某一電路的圓圖。如要求得整個電弧爐的功率（三或六相），可將一相的功率相應地乘以3或6。

電弧爐某一相的電路經過適當的改變後可用下列線路圖中之一來代替。

- a) 圖 90 a 為不計及爐用變壓器零載電流的簡略線路；
- b) 圖 90 b 為計及變壓器零載電流的比較準確的線路；

① 圓圖作圖的理論基礎書裏假定已從理論電工學一書中[28]知道了。

表 34. 電爐的基本電量

量 名	無分支的電路(圖 90 a)	有分支的電路(圖 90 б)
總有功功率 (瓦)	$P_a = I^2(r+R) =$ $= \frac{U^2(r+R)}{(r+R)^2 + x^2} =$ $= I\sqrt{U^2 - I^2 x^2} \quad (144)$	$P_a = I^2(r+R) + I_0^2 r_0 =$ $= \frac{U^2(r+R)}{(r+R)^2 + x^2} + I_0^2 r_0 =$ $= I\sqrt{U^2 - I^2 x^2} + I_0^2 r_0 \quad (148)$
電弧功率 (或實效電 功率) (瓦)	$P_R = I^2 R =$ $= \frac{U^2 R}{(r+R)^2 + x^2} =$ $= I\sqrt{U^2 - I^2 x^2} - I^2 r \quad (145)$	$P_R = I^2 R =$ $= \frac{U^2 R}{(r+R)^2 + x^2} =$ $= I\sqrt{U^2 - I^2 x^2} - I^2 r \quad (149)$
電 效 率	$\eta_{0.1} = \frac{P_R}{P_a} = \frac{I^2 R}{I^2(r+R)} =$ $= \frac{R}{r+R} =$ $= \frac{\sqrt{U^2 - I^2 x^2} - Ir}{\sqrt{U^2 - I^2 x^2}} \quad (146)$	$\eta_{0.1} = \frac{P_R}{P_a} =$ $= \frac{I^2 R}{I^2(r+R) + I_0^2 r_0} =$ $= \frac{I\sqrt{U^2 - I^2 x^2} - I^2 r}{I\sqrt{U^2 - I^2 x^2} + I_0^2 r_0} \quad (150)$
功率因數①	$\cos \varphi = \frac{r+R}{z} =$ $= \frac{r+R}{\sqrt{(r+R)^2 + x^2}} =$ $= \frac{P_a}{S} = \frac{\sqrt{U^2 - I^2 x^2}}{U} \quad (147)$	$\cos \varphi = \frac{r+R}{z} =$ $= \frac{r+R}{\sqrt{(r+R)^2 + x^2}} =$ $= \frac{\sqrt{U^2 - I^2 x^2}}{U}; \quad (151)$ $\cos \varphi_0 = \frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + x_0^2}}; \quad (152)$ $\cos \varphi_1 = I \frac{\sqrt{U^2 - I^2 x^2}}{U_1 I_1} +$ $+ \frac{I_0^2 r_0}{U_1 I_1} \quad (153)$

① S——視在功率,以伏安計。

圖上和本書以後採用的符號：

r 和 $\omega L = x$ ——一相的電阻和感抗，我們把它當作常數，以歐計；

R ——實效電阻（電弧的電阻），可從 0 變到無窮大，以歐計；

$\bar{U}$ ——相電壓，以伏計；

$\bar{I}$ ——電弧電流，以安培計；

r_0 和 $\omega L_0 = x_0$ ——爐用變壓器的零載等值電阻和感抗，以歐計；

$\bar{I}_0$ ——爐用變壓器的零載電流，以安培計。

圓圖的用途為探索基本量的變化：總有功功率 P_a ，電弧功率 P_a ，電效率 η_{ax} 和功率因數 $\cos \varphi$ 。兩線路中的這些量都可照下面方式表示（參看向量圖，圖 90 θ 和 ι 及表 34）。

我們可以下列基本條件為出發點來作圓圖：指定電路的電壓在此電路的電的情況的一切變化下皆應保持恆定。若將圓圖應用所憑藉的公式稍加考慮，則此一條件也不難理解。任意電路中的電流我們可用下式表示：

$$\bar{I} = \bar{U} \cdot Y. \quad (154)$$

當 $\bar{U}$ = 常數並與實數軸重合時，電流可以表為：

$$\bar{I} = CY. \quad (155)$$

電路的視在功率則為：

$$\dot{S} = \bar{U} \bar{I}^* = U^2 \cdot Y. \quad (156)$$

在 $\bar{U}$ = 常數的條件下，公式(156)可寫成下面的形式：

$$\dot{S} = C' \cdot Y. \quad (157)$$

從公式(155)和(157)中得到一個很重要的結論：在 $\bar{U}$ = 常數的條件下，電流和視在功率都與電路的導率成正比，因此如用某線段表示導率，則可認為此線段也表示電流和視在功率，但只是比例尺度不同而已。

假若 $\bar{U} = \text{常數}$ 的條件不能維持，則這個規律顯然是不正確的。

由此得出一個結論：僅僅只有在可以認為 $\bar{U} = \text{常數}$ 而與該電路的電的情況的變化無關的電路區段中，圓圖才能有正確的結果。

適用於圖 90 a 中迴路的圓圖的運用和圓圖本身的作圖可照下面的方式進行。選擇按任意比例尺度從某點 O 向上引出的電壓向量 $\bar{U}$ 作為開始向量（圖 90 d）。為了更便於利用圓圖起見我們把 $\bar{U}$ 放在垂直的位置（ U 以實數來表示）。然後通過 Q 點按任何比例尺度作阻抗三角形。從 O 點向右引線段 OB ，用以表示電抗 $x = \omega L$ ；從 B 點垂直向上引線段 $BD = r$ 。則線段 OD 就是所謂對應於 $R = 0$ 的短路阻抗

$$z_k = \sqrt{r^2 + x^2}, \text{ 歐}, \quad (158)$$

再從 D 點沿 r 的方向並按（與 r ）同一尺度向上引出一線段，令它等於電阻 R ，隨着 R 的增減，總阻抗向量 $\bar{z}$ 的端點將在直線 DE 上移動；向量 $OD_1; OD_2; OD_3 \dots$ 就表示各種不同數值的 z 。總阻抗的模數則用下式表示之：

$$z = \sqrt{(r + R)^2 + x^2}, \text{ 歐}。 \quad (159)$$

根據圖的觀察，可以看到向量 $\bar{z}$ 是放在原應放置導率 $\bar{y}$ 對於 $\bar{U}$ 的相關位置上；此種放置基於在圖上 $\bar{z}$ 和 $\bar{y}$ 可以公用同一位置的可能性，而它的採用也是為了運用圓圖的方便起見。

因為向量 $\bar{z}$ 在不通過旋轉中心（以原點 O 為旋轉中心）的直線 BDE 上移動，所以倒數向量 $\bar{y}$ 就將在一圓周上移動，此圓周通過 O 點而其中心在直線 BE 的垂線上（即在直線 OS 上的 T 點）。向量 OC_1, OC_2, OC 等就表示電導。

電導的比例尺度可用下法決定，假設阻抗的比例尺度是 1 厘米 = m 歐，而電導的比例尺度為 1 厘米 = n 歐，則

$$\begin{aligned} x &= OB \cdot m; \quad y = OS \cdot n; \\ xy &= OB \cdot m \cdot OS \cdot n = 1, \end{aligned}$$

$$n = \frac{1}{OB \cdot m \cdot OS} = \frac{1}{x \cdot OS}.$$

當 $U = \text{常數}$ 時，向量 OC_1, OC_2 等也應當按照某一尺度表示相應的線路電流和視在功率，因此問題就歸結到來確定圓周的半徑以及電導、電流和功率的比例尺度了。

圓周的半徑可以任意選擇，但為了能使電流具有合適的比例尺度起見，最好是依照下列方式來進行。

令電路的電阻 $(r+R)$ 等於 0，則總阻抗 $Z = jx$ ；電壓和電流中間的相位差等於 90° ，直徑 OS 就表示在這種情況下的電導和電流，由此不難確定所需要的比例尺度。先將 $Z = jx$ 時的電流算出：

$$I_{TK3} = \frac{U}{x}. \quad (160)$$

此電流^①應以圓周的直徑表示之，由此得到計算比例尺度的公式：

$$I_{TK3} = d \cdot m. \quad (161)$$

其中 $d = \text{圓周的直徑}$ ，以厘米計， m —以安培/厘米計的比例尺度。

電導 y 的比例尺度則可由下式來決定：

$$\frac{1}{x} = d \cdot n, \text{ 姆歐}; \quad (162)$$

功率的比例尺度 (m') 可從下式推出：

$$U \cdot I_{TK3} = d \cdot m', \text{ 伏安}. \quad (163)$$

知道了相應的比例尺度後，則我們可很容易地在圖上找出對於任何數值的 z 和 R 的 P, I 和 y 的數值。

UOC_2, UOC_3 等都表示電壓和電流中間的相角差，因為對於其中的每一角，下列等式都是正確的：

$$\cos \varphi = \frac{r+R}{z}. \quad (164)$$

從電流向量的端點引向直徑 OS 上的垂線就是以所採取的尺度表示的，對應於這些電流的有功分量電流和有功功率。

$$\left. \begin{aligned} \text{誠然} \quad Cn &= OC \cdot \cos \varphi = I \cos \varphi, \\ C_1 n_1 &= OC_1 \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (165)$$

同樣 OC, OC_1 等線段的水平射影也就是電流的無功分量和無功功率，因為：

$$\left. \begin{aligned} On_2 &= OC_2 \cdot \sin \varphi_2 = I \sin \varphi_2; \\ On &= OC \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (166)$$

直線 OC 把垂直線段 $C_1 n_1, C_2 n_2$ 中的每一線段都分為二部分，

$$\text{例如：} \quad C_1 n_1 = C_1 m_1 + m_1 n_1. \quad (167)$$

在直線 OC 以上的線段表示電弧的功率(實效電功率) $P_R = I^2 R$ ，而在直線 OC 以下的線段則代表耗損功率 $P_n = I^2 r$ 。實際上從相似三角形 $OC_1 m_1$ 和 $OD_1 D$ 中我們得到：

$$\frac{Om_1}{OD} = \frac{C_1 m_1}{DD_1}. \quad (168)$$

由相似三角形 $Om_1 n_1$ 和 ODB 中得：

$$\frac{Om_1}{OD} = \frac{m_1 n_1}{DD_1}. \quad (169)$$

使公式 (169) 和 (168) 的右邊部分相等並將比例中項對調則得：

$$\frac{C_1 m_1}{m_1 n_1} = \frac{DD_1}{DB} = \frac{R}{r} = \frac{I^2 R}{I^2 r} = \frac{P_R}{P_n}. \quad (170)$$

在所有表示有功功率的線段中，等於圓周半徑的線段 $C_1 n_1$ 為值最大。三角形 $OC_1 n_1$ 和 $OD_1 B$ 是相似的，並且三角形 $OC_1 n_1$ 是等腰三角形，因為 On_1 和 $C_1 n_1$ 都是圓周的半徑，由此得 $OB = BD_1$ ，因此當 R 的值滿足下列條件時，就得到最大總有功功率 P_a ：

$$x = r + R, \quad (171)$$

這個關係也可以由解析方法推出。當 R 的值由下式決定時，就

$$\frac{dP_A}{dR} = \frac{d}{dR} \left[\frac{U^2(r+R)}{(r+R)^2 + x^2} \right] = 0. \quad (172)$$

(171)式即為上式的解答，當 $R=0$ (短路) 和 $R=\infty$ (開路) 時電弧功率 P_A 等於零 (參看表 34)。因此， P_A 既為一實數正量，則至少應有一個最大值，此值在 r , R 和 x 間有某一定的關係存在時得到，這個關係可由下式決定：

$$\frac{dP_A}{dR} = \frac{d}{dR} \left[\frac{U^2 R}{(r+R)^2 + x^2} \right] = 0, \quad (173)$$

解之得：
$$R = \sqrt{r^2 + x^2} = z_K. \quad (174)$$

因此當 R 的值等於短路阻抗時就得到電弧功率的最大值。

在圖圖上的 C_2 點就相當於 P_A 等於極大值時的情況， C_2 點是這樣得到的：從圓周中心作一垂直於代表短路電流的弦 OC 的直線 C_2m_1 ，此直線與圓弧的交點即為 C_2 點。

從圖圖上可以得到電效率的比例式：

$$\frac{C_1m_1}{C_1n_1}; \frac{C_2m_2}{C_2n_2} \text{ 等等。}$$

但我們也可以直接求得效率的數值，以避免多餘的計算。為了這點我們將直線 OC 向左延長到原點以外，再將直線 OU 向下延長，然後在離 O 點任意距離處引直線 pk ，使它平行於直徑 OS 。將此直線分為一百等分，令 p 點為零， k 點為 100%。如要得到任何電流 OC_2 時的效率，只要將 OC_2 延長到與直線 pk 相交於 f 點。則相當於 f 點的分度就直接指出電效率的分數，因為

$$\frac{pf}{pk} = \frac{C_2m_2}{C_2n_2} = \eta_{\text{эл}}. \quad (175)$$

這個等式可由兩對三角形的相似而證明之：

$$\triangle OC_2n_2 \sim \triangle fOk \text{ 和 } \triangle Om_2n_2 \sim \triangle pOk.$$

在圖圖上可以立刻得到相當於某一電流的 $\cos \varphi$ 的值，同樣也可以得到組成電壓 U 的有功和無功分量。