

高等学校教学用书



# 普通电工学

中 册

E. B. 基泰耶夫, H. Ф. 格列夫切夫著

413

人民教育出版社

高等学校教学用书



# 普通电工学

中册

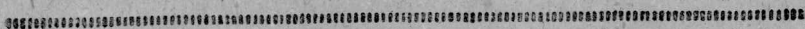
E. B. 基泰耶夫, H. D. 格列夫切夫著

黄正中 刘守全 柳焯 译

俞大光 秦曾煌 余砚 译



人民教育出版社



本书系根据苏联国立动力出版社(Государственное энергетическое издательство)出版的基泰耶夫(Е. В. Китаев)和格列夫切夫(Н. Ф. Гревцев)合著“普通电工学”(Курс общей электротехники)1950年第四版(修訂版)譯出的。原书經苏联高等教育部审定为高等学校教学参考书。

本书譯本共分三册出版:上册内容包括緒論,直流,电場,电磁,交流及量电仪表等;中册内容是变压器及电机;下册内容包括电子与离子仪器,电热电照,电力网络及发电站等。

参加本书中册翻譯和校訂工作的为哈尔滨工业大学黄正中、刘守全、柳焯、俞大光、秦曾煌、余硯蘭等同志。本书的翻譯,得到苏联专家沙闊洛夫(Е. П. Соколов)教授热心的帮助。

## 普通电工学

中 册

E. B. 基泰耶夫等著

黄正中译

人民教育出版社出版 高等学校教学用书編輯部  
北京宣武門内承恩寺7号

(北京市书刊出版业营业許可証出字第2号)

商务印书館上海厂印装  
新华书店上海发行所发行  
各地新华书店經售

統一书号 15010·386 开本 850×1168 1/32 印張 8 10/16  
字数 193,000 印数 12,501—14,500 定价(1) 1.00

1953年9月龙門联合书局初版

1957年3月新1版 1961年9月上海第6次印刷

# 目 錄

第七章 變壓器 .....	335
7-1. 變壓電路 .....	335
7-2. 變壓器的作用原理 .....	335
7-3. 變壓器的構造 .....	340
7-4. 變壓器的空載 .....	341
7-5. 有負載時變壓器線捲的磁勢 .....	343
7-6. 將變壓器的副線捲折算至原線捲 .....	345
7-7. 變壓器有負載時的向量圖 .....	346
7-8. 變壓器的簡化向量圖 .....	348
7-9. 變壓器的等效線路圖 .....	350
7-10. 變壓器的短路試驗 .....	352
7-11. 副線捲電壓變化的確定 .....	355
7-12. 三相變壓器 .....	358
7-13. 變壓器的效率 .....	363
7-14. 變壓器的並聯運用 .....	366
7-15. 自耦變壓器 .....	371
7-16. 儀表用互感器 .....	373
7-17. 變壓器的發熱與冷卻 .....	384
7-18. 高頻變壓器 .....	386
附錄 .....	388
第八章 感應電動機 .....	389
8-1. 三相感應電動機的作用原理與構造 .....	389
8-2. 多利沃-多勃羅沃利斯基——三相感應電動機的發明者 .....	393
8-3. 交流電機的繞組 .....	394
8-4. 繞組因數 .....	401
8-5. 轉差率 .....	404
8-6. 轉子轉速 .....	405
8-7. 轉子電流的頻率 .....	406
8-8. 旋轉磁通所感應的電勢 .....	406
8-9. 漏磁通所感應的漏磁電勢 .....	408
8-10. 轉子電流 .....	408
8-11. 磁勢圖 .....	409
8-12. 等效線路圖 .....	411

8-13.	感應電動機的向量圖 .....	413
8-14.	感應電動機的能置圖 .....	414
8-15.	三相感應電動機的轉矩 .....	416
8-16.	感應電動機的運用特性曲線及其效率 .....	426
8-17.	感應電動機的圓圖 .....	428
8-18.	繞線式(滑環式)電動機的啓動 .....	440
8-19.	鼠籠式電動機的啓動 .....	442
8-20.	鼠籠式三相感應電動機的特殊構造 .....	444
8-21.	感應電動機轉速的調節 .....	447
8-22.	感應電動機功率因數的提高 .....	449
8-23.	感應調整器 .....	451
8-24.	單相感應電動機的作用原理與基本特性 .....	452
8-25.	高頻感應電動機 .....	458
8-26.	感應發電機和電磁掣動機 .....	459
<b>第九章</b>	<b>同步電機 .....</b>	<b>462</b>
9-1.	同步發電機的主要部分 .....	462
9-2.	同步發電機的作用原理及其電勢 .....	467
9-3.	電樞反應 .....	469
9-4.	向量圖 .....	473
9-5.	同步發電機的特性曲線 .....	476
9-6.	電磁轉矩, 電功率及電磁功率 .....	480
9-7.	同步發電機的並聯運用 .....	484
9-8.	同步發電機並聯運用時純功及無功功率的分配 .....	492
9-9.	高頻發電機 .....	495
9-10.	同步電動機的作用原理 .....	501
9-11.	同步電動機的啓動與停止 .....	505
9-12.	同步電動機的電樞反應及向量圖 .....	508
9-13.	激磁電流的變化對同步電動機運用的影響 .....	510
9-14.	同步電動機的運用特性曲線及其與感應電動機的比較 .....	513
9-15.	反應式同步電動機 .....	516
9-16.	同步電機的損失與效率 .....	517
<b>第十章</b>	<b>直流電機 .....</b>	<b>518</b>
10-1.	換向器的基本概念及其構造原理 .....	518
10-2.	直流電機的主要部件 .....	521
10-3.	直流電機的繞組 .....	524
10-4.	直流電機的電勢 .....	531
10-5.	直流電機磁系統的計算原理 .....	532

---

10-6. 電樞反應 .....	534
10-7. 換向 .....	538
10-8. 發電機的反抗轉矩、電磁功率及電功率 .....	549
10-9. 直流發電機按其激磁方法的分類 .....	551
10-10. 他激發電機的特性曲線 .....	553
10-11. 並激發電機的特性曲線 .....	558
10-12. 串激與複激發電機的特性曲線 .....	560
10-13. 並激發電機的並聯運用 .....	562
10-14. 直流電動機的作用原理 .....	565
10-15. 電動機的啓動 .....	566
10-16. 轉速與旋轉方向的改變 .....	567
10-17. 轉矩 .....	568
10-18. 並激電動機 .....	571
10-19. 串激電動機 .....	582
10-20. 複激電動機 .....	585
10-21. 損失與效率 .....	587
10-22. 電機的發熱 .....	591
10-23. 蘇聯的電機製造業 .....	593

## 索引

# 第七章

## 變壓器

### 7-1. 變壓電路

當電能由發電站送往受電方面時，流經導線的電流大小具有重大意義，因為電線的橫截面、重量和價值都是由電流的大小決定的（見第十四章“電力網絡”）。

由交變電流的功率公式  $UI \cos \varphi$  知道：在同一輸出功率及同一  $\cos \varphi$  時，如電能送往用戶方面所用的電壓  $U$  愈高，則電流  $I$  愈小，因而導線所需要的截面也愈小，其重量與價值也就降低。

在“電力網絡”一章中將知：導線的橫截面與電壓的平方成反比。因而當輸送電能至遠處時，採用高壓是有利的。但大部分的交流發電機所發的電壓不超過 11 仟伏，當電能輸送到相當遠的地方時，這個電壓是不夠的，因此需要用昇壓變壓器將電壓加以提高。

輸送電壓所用的高壓，通常不能直接使用，因為大部分的負載（如白熾燈、電動機等）需要在低壓（120—400 伏）下工作。因此，在電能用戶方面，要藉降壓變壓器將電壓加以降低。

### 7-2. 變壓器的作用原理

用電磁的方法將電能由一個電路傳至另一電路的靜止的器具叫做變壓器。

按照相的數目，變壓器可分為單相和多相（普通為三相）。

交流電的變換應歸功於俄羅斯的科學家巴·尼·亞勃羅契闊

夫。他在供電給自己的電燭（亞勃羅契闊夫燭，爲了分光之用。）的時候，初次實現了交變電流的變換。在他的裝置中（圖 7-1），於發電機的電路裏，串聯着若干感應線圈的原線捲，而電燭則聯於這些線圈的副線捲上，并以副線捲所生的電流來供給之。當這種裝置由直流發電機來供電時，則用開閉器。

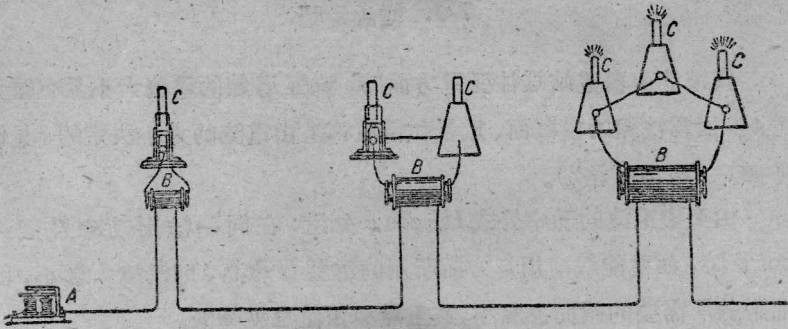


圖 7-1. 亞勃羅契闊夫線路圖——利用變壓器來分散電光。

A—開閉器； B—變壓器； C—“燭”的支持器。

這樣，交流電的變換是由亞勃羅契闊夫首先提出並實際完成的。

根據亞勃羅契闊夫的變壓原理，伊·菲·烏沙根（Иван Филиппович Усагин）（圖 7-2）作成了世界上第一部變壓器。

烏沙根所發明的變壓器於 1882 年 8 月 28 日在莫斯科全俄羅斯的工業展覽會上作了第一次公開試驗。在 1882 年以後，變壓器的原理與構造便很快地發展起來。

變壓器構造的基本線路圖如圖 7-3 所示。此處，爲了明顯起見，將變壓器的原線捲和副線捲描繪在兩個鐵柱上，實際上此兩線捲都是放在一個鐵柱上的。如果電能由交流網絡引到某線捲，則此線捲叫做原線捲；如電能由某線捲引到負載，則此線捲叫做副線捲。所有與原線捲有關的數值都註以指標 1（例如： $P_1, U_1, I_1, r_1$ , 等），所有與副線





圖 7-2. 變壓器的發明者伊非·烏沙根  
(1855—1919)。

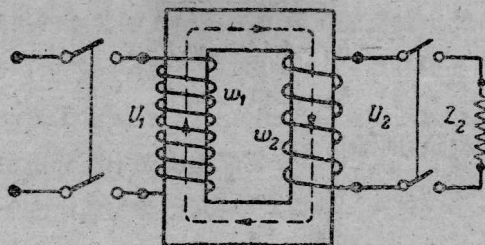


圖 7-3. 變壓器的基本線路圖。

捲有關的數值都註以指標 2 (例如:  $P_2, U_2$  等)。

在一般情況下, 副線捲電壓不等於原線捲電壓。副線捲電壓低於原線捲電壓的變壓器叫做降壓變壓器; 副線捲電壓高於原線捲電壓的變壓器叫做昇壓變壓器。接於較高電壓網絡的線捲叫做高壓線捲; 接於較低電壓網絡的線捲叫做低壓線捲。

假設在副線捲開斷的時候，向原線捲的接頭  $AX$  上引以正弦波形交變電壓，那末在這個線捲中將有交變電流通過，此交變電流將產生在鐵心中的交變磁通；按電磁感應定律，此磁通將在變壓器的兩個線捲中產生電勢。如原線捲及副線捲被同一磁通穿過，則在此兩線捲中電勢的瞬時值可以寫作：

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7-1)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7-2)$$

式中， $w_1$  和  $w_2$  為原線捲及副線捲的匝數； $\Phi$  為穿過線捲的磁通的瞬時值，以伏-秒計算。

因為電勢  $e_1$  及  $e_2$  由同一磁通  $\Phi$  的交變所感應產生，而變壓器的原線捲和一個帶鐵心的線圈沒有甚麼不同，所以如加於原線捲接頭的電壓是正弦波形的，則線捲電壓的有效值可用與公式 (4-146) 相似的公式來表示：

$$E_1 = 4.44 \Phi_m w_1 f \quad (7-3)$$

$$E_2 = 4.44 \Phi_m w_2 f. \quad (7-4)$$

如將此兩式相除，則得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = K. \quad (7-5)$$

這樣，變壓器線捲電勢之比等於其匝數之比。

$K$  這一數叫做變壓器的變壓比。當副線捲開斷時，在原線捲中所感應的電勢幾乎完全與加在這個線捲上的電壓相等，即  $E_1 \approx U_1$ ，而副線捲中所感應的電勢等於在副線捲開斷時其接頭上的電壓，所以變壓器的變壓比可近似地用變壓器空載時的電壓比來代表。

按照蘇聯國家標準 (ГОСТ) 401—41 所述，變壓器的變壓比是在變

壓器空載時原線捲與副線捲的電壓之比。

直到這裏我們所假設的是：由原線捲的電流所產生的磁通  $\Phi$  與原線捲及副線捲所有的線圈都鏈結。實際上，並不是所有原線捲所產生的磁通都經過鐵心，其一部分以漏磁通  $\Phi_{p1}$  的形式進入空中，只包圍着原線捲的線匝（圖 7-4）。假如副線捲與負載聯接，並在其中有電流  $I_2$  通過，則此電流所產生的磁通同樣也只是一部分經過鐵心，另一部分進入空中，形成只包圍着副線捲線匝的漏磁通  $\Phi_{p2}$ 。

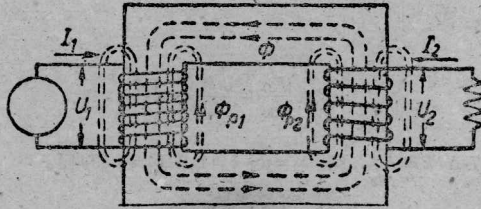


圖 7-4. 變壓器的磁通。

因為副線捲的磁勢的方向差不多與原線捲的磁勢的方向相反，所以由這兩磁勢所產生的磁通，也將彼此反向，而在鐵心中形成某一合成磁通，此磁通叫做工作磁通。工作磁通在鏈結原線捲與副線捲所有線匝的同時，在這兩線捲中感應出電勢  $E_1$  及  $E_2$ 。當漏磁通隨時間交變時，在線捲中感應出漏磁電勢，可用下列各式表示：

$$E_{p1} = 2\pi \cdot f L_{p1} I_1, \quad (7-6)$$

$$E_{p2} = 2\pi \cdot f I_{p2} L_2, \quad (7-7)$$

式中， $L_{p1}$  和  $I_{p2}$  為原線捲與副線捲的電感，由漏磁通來決定。

$I_1$  和  $I_2$  為線捲中的電流。

如用  $x_1$  及  $x_2$  分別表示乘積  $2\pi f L_{p1}$  和  $2\pi f L_{p2}$ ，並稱之為原線捲和副線捲的感抗，則得

及

$$\dot{E}_{p1} = -j\dot{I}_1 x_1 \quad (7-8)$$

$$\dot{E}_{p2} = -j\dot{I}_2 x_2 \quad (7-9)$$

因為漏磁通主要是經過空氣而閉合，所以與產生他們的電流成正比例。因此，可以認為漏磁通與產生他們的電流同相。顯然，漏磁電勢滯後於產生他們的磁通，因此也滯後於其相對應的電流 90 度，而以符號  $-j$  表示之。

例 7-1. 變壓器的原線捲接於電壓為 3300 伏的交流線路上，伏特計接於無負載（即空載）的副線捲的接頭上；如副線捲含有 120 匝，伏特計的讀數為 220 伏，則變壓器的變壓比及原線捲的匝數各為若干？

解：

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{3300}{220} = 15;$$

然後依公式 (7-5)  $k = \frac{w_1}{w_2}$ ，得  $w_1 = w_2 \cdot k = 120 \cdot 15 = 1800$  匝。

### 7-3. 變壓器的構造

單相變壓器的磁路可以作成各種形式。

如圖 7-5 所示磁路的變壓器叫做鐵心式變壓器；如線捲在中間而用鐵包圍者（圖 7-6），則叫做鐵殼式變壓器。

同樣三相變壓器也可以作成鐵殼式或鐵心式。現在所製造的變壓器差不多全用鐵心式。

變壓器的導磁部分需用厚為 0.35—0.5 毫米的矽鋼（含有矽的合金）片疊成。兩塊疊片之間用極薄的紙或漆絕緣。欲使渦流損失最小，矽鋼片應具有良好的磁導和比較大的電阻係數；欲使磁滯損失不大，矽鋼片應具有很小的矯頑磁力。

低壓線捲通常靠近鐵心，高壓線捲同心地放在它的外面，這種線捲叫做同心線捲。

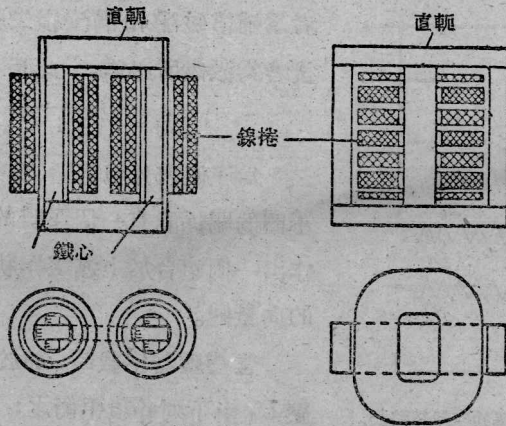


圖 7-5. 鐵心式變壓器。

圖 7-3. 鐵殼式變壓器。

當變壓器裝置於配電網絡的不同場所時，由於網絡中的電壓降落，在這些場所的電壓可能不同，並且這些電壓也不能符合於當變壓器副線捲電壓為額定值時的原線捲電壓。

因此容量達 5 600 仟伏安和電壓達 35 仟伏的變壓器備有兩個抽頭，此兩抽頭能使變壓器原線捲的額定電壓在  $\pm 5\%$  內變化，用其中之一（即接上高壓線捲的一種或另一種匝數），即可變更變壓器的變壓比並且在副線捲中得到等於或近於額定值的電壓。

#### 7-4. 變壓器的空載

當在原線捲上加一電壓而副線捲開斷的時候，（圖 7-7）變壓器的工作狀態叫做變壓器的空載。

此時，副線捲中沒有電流，而在原線捲中電流也非常的小（只有額定值的 5—8%）。在此情況下，在原線捲中流過的電流叫做空載電流，以符號  $I_0$  表示。此電流可分為兩個分量，即純功分量和無功分量，前

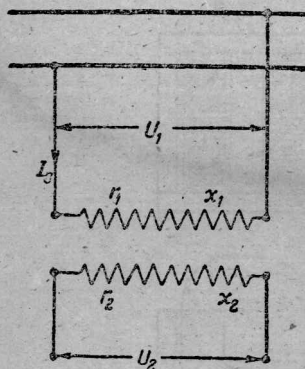


圖 7-7. 變壓器的空載線路圖。 壓  $U_1$  由下列各項平衡之：

(1) 工作磁通  $\Phi$  在原線捲中感應的電勢  $\dot{E}_1$ ;

(2) 漏磁場在原線捲中感應的漏磁電勢  $\dot{E}_{p1} = -j\dot{I}_0 x_1$ ;

(3) 在原線捲有效電阻  $r_1$  中的電壓降落，其值為  $\dot{I}_0 r_1$ 。

為了作在空載時的變壓器向量圖(圖 7-8)，由  $O$  點取一變壓器的工作磁通的向量  $\dot{\Phi}_m$ ，使其方向和橫軸的正向一致【註】。在滯後於向量  $\dot{\Phi}_m$  90 度的地方，截取原線捲電勢  $\dot{E}_1$  的向量及副線捲的電勢  $\dot{E}_2$  的向量(為便利起見，設變壓器的變壓比近於一)。向量  $\dot{E}_2$  同時也是副電壓向量  $\dot{U}_2$ ，因為副線捲中無電流時，就沒有電壓降落。

者為補償磁滯和渦流損失所不可缺少，後者為激磁所必需。此時，空載電流為

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_m^2}.$$

為了使對外施電壓、電勢和電流大小間的關係能有一個顯明的概念，可以作出一個適合於上述工作狀態的變壓器的向量圖。

當變壓器空載時，加於原線捲的電

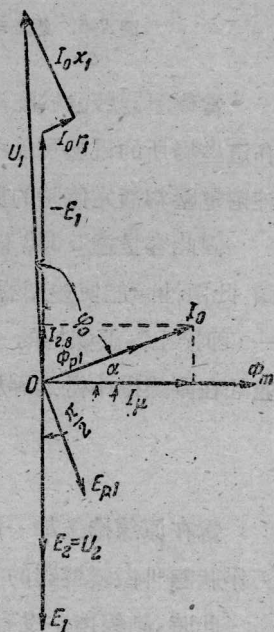


圖 7-8. 變壓器空載向量圖。

【註】因為變壓器的磁通隨時間按正弦波形變化，所以在向量圖上，它可以用向量來表示。

然後再在對磁通向量超前鐵損角  $\alpha$  的地方，截取空載電流  $I_0$  的向量。此向量分為純功與無功兩分量，前者 ( $I_a$ ) 補償磁滯損失和渦流損失，後者 ( $I_w$ ) 用以產生磁通。沿電流  $I_0$  的向量方向截取與它同相的漏磁通  $\Phi_{p1}$ ，並在滯後  $\Phi_{p1}$  90 度的方向作漏磁電勢  $\dot{E}_{p1}$ 。

為了作出電壓  $U_1$  的向量，截取向量  $-\dot{E}_1$ ，也就是原電壓中用來平衡電勢  $\dot{E}_1$  的分量。由向量  $-\dot{E}_1$  的末端平行於電流向量引出線捲有效電阻中電壓降落  $I_0 r_1$  的向量，再垂直於向量  $I_0 r_1$  的末端作電感電壓降落  $I_0 x_1$  的向量，此向量與  $\dot{E}_{p1}$  相等，但方向相反。連接  $O$  點與向量  $I_0 x_1$  的端頂便得電壓  $U_1$  的向量，在此電壓下，在原線捲中流過的電流為  $I_0$ 。

由圖知，空載電流  $I_0$  滯後於電壓 ( $U_1$ )  $\varphi_0$  度。 $\varphi_0$  角近於 90 度，因為  $\alpha$  角通常很小 (5—6 度)，並且  $\sin \alpha \approx \cos \varphi_0$ 。在圖 7—8 中， $\alpha$  角取得較大，那僅是爲了作圖明顯而已。由於  $\varphi_0$  角較大的結果，在變壓器空載時功率因數  $\cos \varphi_0$  是在 0.2 到 0.3 之間。

在變壓器空載時，引向變壓器的功率消耗於由磁滯和渦流所產生的鐵損及原線捲的銅損上。但原線捲的銅損  $I_0^2 r_1$  爲量甚小，因為對電力變壓器來說，電流  $I_0$  只有額定電流的 5—8%。因此，當變壓器空載時，可以近似地認爲只有所謂鐵損 (即磁滯損失和渦流損失) 存在。

### 7-5. 有負載時變壓器線捲的磁勢

變壓器的線捲電壓降落很小 (2—3%)，如將它略去不計，則外施電壓  $U_1$  只用來平衡變壓器的反電勢  $E_1$ ，於是可得出下列等式：

$$U_1 \sim -E_1 \sim 4.44 \cdot w_1 \cdot \Phi_m f.$$

因此，當  $U_1 = \text{常數}$  時， $\Phi_m \sim \text{常數}$ 。

因爲當負載變化時，(在可能允許的範圍內)，磁通保持不變，所以

在任何負載下，爲了產生此固定磁通，需要一固定磁勢，此磁勢等於原  
 線捲磁勢與副線捲磁勢的向量和。

這樣，原線捲的磁勢 ( $\vec{F}_1 = \dot{I}_1 w_1$ ) 與副線捲的磁勢 ( $\vec{F}_2 = \dot{I}_2 w_2$ ) 的向  
 量和便等於空載磁勢 ( $\vec{F}_0 = \dot{I}_0 w_1$ )，即

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_0$$

或

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1, \quad (7-10)$$

由此得

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}. \quad (7-11)$$

由上式可以推出，當變壓器空載時（即當  $I_2 = 0$  時），在它的磁路中  
 只有原線捲的磁勢發生作用。當變壓器有負載時，即當其副線捲接上  
 任一阻抗時，副線捲的電流在磁路中就立即產生此磁通，此磁通使磁路  
 中的總磁通減少，於是與原線捲的外施電壓平衡的反電勢亦將減少。  
 因而在原線捲中的電流即增加（因為  $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1 + \dot{E}_1}{Z_1}$ ）；此電流一直增加  
 到使原線捲的磁勢能補償副線捲的去磁作用爲止。在此以後，磁通又

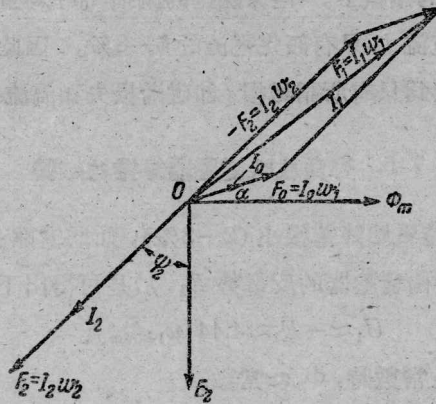


圖 7-0. 變壓器的電流向量圖及磁勢向量圖。



變到差不多等於空載時的磁通。

由(7-10)及(7-11)兩式看來，線捲磁勢的總和是用幾何方法來求得的(圖7-9)。

### 7-6. 將變壓器的副線捲折算至原線捲

在作變壓器向量圖時，曾經假設變壓器的變壓比近於一，也就是說，原線捲和副線捲的匝數差不多相等。實際上，變壓器的變壓比很少等於一，這便造成了在作向量圖時很大的不便。

爲了能夠比較和計算在變壓比大於一的變壓器中所發生的過程，必須將所有表示副線捲特性的數量都折算到原線捲方面，或者簡單地說，就是將副線捲折算至原線捲方面〔註〕。在折算時，必須使功率損耗以及各電量間的相位差與實際線捲中的情況一樣，因此，在副線捲中電壓降落的比值  $\frac{I_2 r_2}{E_2}$  在折算前後也應一樣。

我們規定折算後副線捲的一些數量的符號和折算前相同，但在其右上方加有(')形的記號。如  $E'_2$ ,  $I'_2$ ,  $\omega'_2$  等。

現在來確定副線捲中各量的真正數值和折算後的數值間的關係。

由公式(7-4)推知，每匝中的電勢爲

$$\frac{E_2}{w_2} = 4.44 f \Phi_m.$$

那末，折算後的電勢  $E'_2$  爲

$$E'_2 = E_2 \cdot \frac{w_1}{w_2} = 4.44 f w_1 \Phi_m = E_1 = E_2 k. \quad (7-12)$$

因此，如要將副線捲的電勢折算到原線捲方面，則副電勢必須乘以變壓比。

〔註〕 用一具有與原線捲匝數  $w_1$  相同的某種等值線捲代替副線捲。