

138971

基本馆藏

高等学校教学用书

电力铁道机车车辆

第三卷 下册

Б. Н. 齐赫梅聶夫
Л. М. 特拉賀特曼

合著



人民铁道出版社

1112

0044

12

高等学校教学用书

电力铁道机车车辆

第三卷 下册

Б. Н. 齐赫梅斯夫 合著
Л. М. 特拉贺特曼
唐山铁道学院杜庆萱等译

人民铁道出版社

一九五七年·北京

本冊系根據蘇聯國家鐵路運輸出版社一九五一年出版之 В.Н. 齊赫梅森夫及 Л.М. 特拉赫特曼所著之「電力鐵道機車車輛」第三卷第二編譯出，本卷譯本分上下兩冊出版，其他各卷譯本將陸續分冊出版。原書共分三卷，並經蘇聯高等教育部批准為高等學校之教材參考書。

本冊系交流電力鐵道機車車輛部分，內容敘述整流子電動機的電力機車和摩托車輛，單相-直流變流器的電力機車和異步電動機的電力機車的構造、原理、電路，以及其附屬設備等。

本冊可供高等學校電氣運輸系之教材，電氣化鐵道工程師、技術員及從事礦山電力鐵道的技術人員之業務參考。

本冊系由唐山鐵道學院電氣運輸系杜慶堂、趙玖、何高篆、榮德善等合譯。

電力鐵道機車車輛 第三卷 下冊

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В.Н. ТИХМЕНЕВ 合著
Л.М. ТРАХТМАН

蘇聯國家鐵路運輸出版社（一九五一年莫斯科俄文版）

ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ Москва 1951

唐山鐵道學院杜慶堂等譯

責任編輯 周士鍾

人民鐵道出版社（北京市霞公府17號）

北京市書刊出版業營業許可証出字第010號

新華書店發行

人民鐵道出版社印刷廠印

（北京市建國門外七聖廟）

書號：868 開本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印張6 $\frac{1}{4}$ 字數143千

1957年12月第1版

1957年12月第1版第1次印刷

印數0001—1,000冊 定價（10）0.95元

目 錄

第二編 交流電力鐵道機車車輛

第七章 具有整流子電動機的電力機車和摩托車輛

I. 開動和速度調節	4
§ 1. 串激整流子電動機的向量圖和開動特性	4
§ 2. 變壓器分級的決定	8
II. 電壓調節綫路	10
§ 3. 具有轉換變阻器的綫路	11
§ 4. 具有分壓綫圈的綫路	13
§ 5. 具有昇壓變壓器的綫路	18
§ 6. 高電壓邊的控制	21
III. 電氣制動	22
§ 7. 變阻制動	22
§ 8. 再生制動	25
IV. 控制系統	33
§ 9. 具有直接傳動的系統	33
§ 10. 個別接觸器的控制綫路	36
§ 11. 組合控制系統	38
V. 保護器械	42
§ 12. 保護系統	42
§ 13. 油斷路器	43
§ 14. 空氣斷路器	44
§ 15. 膨脹式斷路器	45
§ 16. 高壓保安斷路器	46
§ 17. 接地接觸器和受電弓架繼電器	46
VI. 變壓器	47
§ 18. 油變壓器	47
§ 19. 干式變壓器（無油的變壓器）	49
VII. 輔助電路	50
§ 20. 輔助電機	50

§21. 採暖	52
§22. 照明	53

第八章 具有單相 直流變流器的電力機車

I. 具有電動-發電機的電力機車	54
§ 1. 概論	54
§ 2. 電動-發電機車的線路和速度調節	55
§ 3. 電動-發電機車的主線路和制動線路	59
II. 具有靜止變流器的電力機車	62
§ 4. 概論	62
§ 5. 水銀整流器的單相整流	63
§ 6. 水銀整流器電壓的調節	66
§ 7. 脈動電壓下牽引電動機的工作	73
§ 8. 電氣制動	74
§ 9. 柵極控制線路	76
§10. 具有水銀整流器的試驗電力機車的線路	78

第九章 具有異步電動機的電力機車

§ 1. 概論	81
I. 具有異步電動機的電力機車的開動和速度調節	82
§ 2. 變阻開動	82
§ 3. 開動變阻器	86
§ 4. 電動機串級聯接	88
§ 5. 極數的轉換	89
II. 換相機	94
§ 6. 分相機	94
§ 7. 匈牙利鐵道電力機車上的換相機	100
§ 8. 具有換相機的匈牙利鐵道電力機車	108

第二編 交流電力鐵道機車車輛

蘇聯電力鐵道上所採用的直流系統的特点是高度的運轉可靠性與良好的牽引特性。

除此以外，它對於時常開動並具有很高加速度的摩托車輛來說也是最安全的與經濟的。因此，就極易解決幹線與市郊運輸的電氣化區段上規定單一的電流與電壓系統的問題。

蘇聯直流電力機車車輛的線路圖與構造是在蘇維埃科學家與設計者的無比的力量下創造出來的。祖國直流電力機車車輛的高度運轉質量，通過蘇聯鐵路電氣化區段在各種不同的氣候條件和在很高的運輸強度下安全運行的長期經驗而得到了驗證。

直流系統的缺點是：電網電壓比較低，因而必需設置密集的牽引變電所與沉重的接觸網設備，以及因牽引電動機採用變阻開動而使速度的經濟調節範圍受到限制。

在個別外國國家鐵路電氣化區段採用交流供電系統。交流系統允許採用較高的接觸導線電壓（實用上可達到22千伏）並可在廣闊的範圍內對電動機利用經濟的（變壓器的）速度調節。

但現已掌握的交流系統都具有主要的缺點，由於這些缺點在蘇聯寧願採用直流系統而不採用交流系統。

在電力機車上具有整流子電動機的單相低頻交流系統得到了最廣泛的應用。

後面將要談到採用 $16\frac{2}{3}$ 或25赫芝的低頻率以代替50赫芝的標準工業頻率就必須需要限制交流整流子牽引電動機的重量與尺寸並簡化其構造。

但是為了得到低頻率需要建立變換電站，而牽引負荷與一般工業負荷由一個供電系統來供電亦有困難。除此之外，就牽引電動機的整流穩定性來說，這種系統亦比直流系統遜色。

鐵路電氣化區段最簡單的供電系統，是接觸導線採用單相標準頻率交流電。

由於具有很好技術經濟指標的，和在整流方面簡單可靠的標準頻率的牽引電動機制作上的困難，這種系統的發展現在已經滯緩了。

蘇聯科學研究院通訊院士M. M. 克斯琴科和O. B. 別涅特克特教授的工作在這方

面开辟了一定的远景。

由标准频率单相交流供电的电力机车可以配合采用直流电动机。直流电动机的整流特性比交流电动机的整流特性要好些，而且和运行速度没有多大的关系。

电力机车上从交流到直流的转换可以借水银整流器或电动发电机组来实现。

由于电力机车上变流装置复杂及成本昂贵，单相直流系统到现在还没有获得大大的推广。

苏联近年来在离子变流器技术方面的发展，为制造高度技术经济指标的单相-直流干线电力机车，创造了必要的先决条件，因而展开了在苏联采用标准频率交流电的远景。

在前一世纪的末叶，由于 M.O. 多里沃-多布罗夫斯基发明了三相电动机，三相交流电系统开始发展起来。

三相异步电动机构造简单，运用十分可靠，单位功率的重量较小，而且转换到再生状态非常简便，就这几方面来说这种电动机作牵引之用，是非常合适的。

但直到现在，由于速度调节上的困难和电机的特性曲线较硬（作牵引之用就不很方便）使这种电动机在电力机车上广泛采用受到阻碍。

此外，三相电动机直接由电网供电需要装有两根接触导线的设备，它使电力铁道的供电复杂化，成本提高，并且还限制了电网的容许电压，这样就不可能充份利用交流电的优点。

虽然三相交流系统采用标准频率是可能的，但大多数现有的铁路线均采用由特殊电站供给的低频电流。

在三相系统发展的初期，采用低频是企图减少电网中的电抗电压降，并在电力机车上采用低速电动机直接用连桿传动。此时，通常在电力机车上装置了一部或两部由组合传动和电力机车轮轴相联的电动机。

由于上述缺点，三相接触网系统在技术上已经是过时的，从前已有的三相系统也被其他更近代化的电流和电压系统所代替。例如在意大利三相系统最初已得到很大推广，但以后逐渐为电压3000伏的直流系统所代替。

为了在利用三相牵引电动机时，消除双导线交流电网设备上的不便，拟制了各种型式的单相-三相电力机车，将接触导线上的标准频率单相电流转变为三相电流以供牵引电动机。

这种变换可以借分相机或换相机来实现。

在匈牙利的电力铁道上，当接触导线内为标准频率的单相电流时，毫无例外地采用了带有肯都系统换相机的电力机车。现有的单相-三相电力机车的缺点是必须在电力机车上装置复杂的旋转变流机。

在电力机车上转换单相电流为三相电流或两相电流也可以按照科学院士 B.C. 庫列巴金於1934年所建議的系统用靜定的电容器来实现。但对于巨型电力机车来说这种系统的技术经济指标还没有充分的予以研究。

在頻率調節下變單相電流為三相電流（三相電流供給電動機）的電子變流器已經給採用三相電動機的系統展開了廣闊的遠景。

應當指出 標準頻率單相系統的共同缺點是：交流對通信線路與自動閉塞的影響，因而它們必須要有特殊的保護；以及單相牽引負載所造成的初級三相電網負載的不對稱引起配電網，變壓器及發電機內的額外損失。

以上所述，說明目前已掌握各種交流系統在決定性的技術經濟優越性方面，並沒有超過蘇聯所採用的十分現代化而且又安全可靠電壓3000伏的直流系統，故標準頻率交流系統的運用只有在製造出新型的電力機車和摩托車輛的基礎上才有可能。

除了研究直流電力機車車輛，同時再研究現有的交流電力機車車輛電氣設備的構造和線路圖，對於如何解決這個重要問題是會有很大幫助的。

第七章 具有整流子电动机的电力 機車和摩托車輛

I. 开动和速度調節

§1. 串激整流子电动机的向量圖和开动特性

加在單相串激整流子电动机兩端的电压 U (圖 391) 是被电动机繞組中下列的电动势和电压降的几何总和所平衡的:

- (1) 由於电樞导体切割激磁磁通 Φ_a 在电樞繞組中感应的旋轉反电动势 E_a ;
- (2) 电动机繞組中的有效电压降

$$I(r_a + r_n),$$

式中: r_a ——激磁繞組 B 的有效电阻;

r_n ——电樞繞組, 补偿繞組 K 以及附加極繞組的有效电阻;

- (3) 在激磁繞組中由於磁通 Φ_a 的脈动所感应的自感电动势 E_s ;

- (4) 电动机繞組的漏磁所引起的电抗电压降,

$$I(x_s + x_n),$$

式中: x_s ——激磁繞組的电抗;

x_n ——电樞繞組, 附加極繞組和补偿繞組的电抗。

圖 392 表示电动机的向量圖。在作該向量圖时假定电动机的鉄耗和整流損耗等於零, 因此激磁磁通 Φ_a 和电流 I 同相^①。

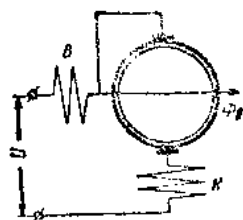


圖 391

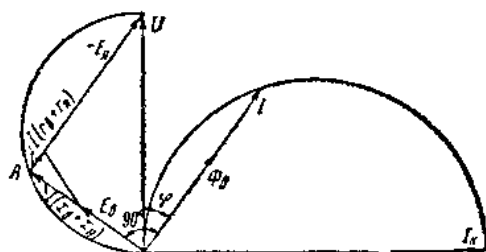


圖 392

在激磁繞組中由於磁通 Φ_a 的脈动所感应的电动势 E_s 在相位上是滯 Φ_a 后 90° ;

① 为了使向量圖簡化, 在以後所有的叙述过程中照例都採用这个假定。

电抗电压降 $I(x_a + x_r)$ 是超电流向量前 90° ；有效电压降 $I(r_a + r_r)$ 是和电流向量同相，而旋转电动势 E_a 是滞激磁磁通 Φ_a 之后 180° 。

在向量图中作出了 E_a 与 E_r 的负值，也就是给出了用来克服这些反电动势的电压 U 的分量。上列向量的几何总和在数值和相位上都正等于电动机的端压。

在固定的电动机端压下，向量图随速度的改变而按照圆图变化。如速度增加则旋转电动势 E_a 随之增加，但向量 $-E_a + I(r_a + r_r)$ 和向量 $-E_a + I(x_a + x_r)$ 间的角度始终保持等于 90° 。因此这时 A 点是沿着以向量 U 为直径的圆弧而滑动。

电流 I 的向量是与电动机中的电抗电压降向量 $-E_a + I(x_a + x_r)$ 成正比变化的（如果电动机是在磁化曲线的直线部份上工作），但在相位上仍滞后电抗电压降 90° ，即当转速改变时向量 I 的端点的轨迹为一圆周，这个圆周的直径是向量 I_k 。向量 I_k 滞后 $U 90^\circ$ 且等于：

$$I_k = \frac{U}{X_a + x_a + x_r}, \quad (217)$$

式中： $X_a = \frac{E_a}{I}$ — 主磁通 Φ_a 所引起的激磁绕组的电抗。

由圆图可知，旋转电动势 E_a 随着电流的增加而减少。

电动机的转速

$$n = c \frac{E_a}{\Phi_a}, \quad (218)$$

因此当电动机电流增加时转速就降低，因为在此同时 E_a 减少而 Φ_a 增加。反之电流减少，则转速增加，而当 $I = 0$ 时速度就成为无穷大，因为此时 $\Phi_a = 0$ 。

由此可见，单相串激整流子电动机的速度特性曲线是和直流串激电动机的速度特性曲线相似的。这两种电动机的转矩特性曲线也是相类似的

$$M \propto I \Phi_a, \quad (219)$$

而对于具有不饱和磁系统的电动机来说

$$M \propto I^2. \quad (220)$$

图392中的圆图将 E_a 、 Φ_a 和 I 等数值有规律地彼此联系起来。这些数值决定电动机的转速 n 和转矩 M 或者说归根到底最后决定电力机车（或摩托车辆）的速度和牵引力。

按照不同的规律（由线路上列车控制的条件决定）改变牵引力与速度是借电动机端压的调节来实现的。

这种调节方法也用在列车加速与起动时，这时速度增加而牵引力必须保持差不多固定不变并足够使列车能以低加速度运转。

因为激磁磁通的数值决定于电动机电流 I ，所以根据方程式（219）就可以做出结论，那就是为了要保持固定的转矩，因之也就是固定的牵引力，必要而且充分的条件是使 $I = \text{常数}$ 。为了达到这个要求，在速度增加时必须不断地提高电动机的

流 $I90^\circ$ ，而和电动机的轉速無关。

现在已知的补偿这些电动势的各种方法都仅能在规定的电动机轉速下当 e_s 和 e_t 有一定的比例时达到补偿的目的。这些方法在牵引电动机上用得最广泛的一种是用欧姆电阻来將附加極分路（圖394）。

当採用了分路电阻后，在附加極中的电流 I_k 就滯后电动机电流 I 某一个角度（圖395），因而在整流地帶內产生了一个和电流 I_k 同相的磁通 Φ_k 。当电樞轉动时在整流圈內就感应出一个整流电动势 e_k ，整流电动势分解为 e_{ks} 和 e_{kt} 两个分量。分量 e_{kt} 和变压器电动势相位上相反而分量 e_{ks} 和电抗电动势反相。

在一定的电动机轉速情况下，可以这样来选择磁通 Φ_k 使分量 e_{kt} 和 e_{ks} 在数值上与 e_t 和 e_s 相等，也就是說將它們完全补偿。电动势 e_s 和 e_{ks} 都是与速度成正比而变化的，因而这也就是說当任何轉速时电抗电动势都能够被补偿。分量 e_{kt} 也与速度成正比，但是 e_t 却与速度無关並在指定的电动机負載下保持固定不变。

圖396表示当負載不变时（ $I = \text{常数}$ ）这些电动势对速度的关系圖。电动势 e_{kt} 仅在速度为 v_1 时才和 e_t 相等；当 $v < v_1$ 时 $e_{kt} < e_t$ 因而就不能完全补偿变压器电动势；当 $v > v_1$ 时， $e_{kt} > e_t$ ，也就是过补偿了。很明显的， e_t 与 e_{kt} 之差（ $e_t - e_{kt} = \Delta e_t$ ）的绝对值愈大，整流条件就愈困难。

当启动时 $v = 0$ ， $\Delta e_t = e_t$ 即此时变压器电动势不能被补偿。这个情况就迫使我們在設計电动机时要使 e_t 在启动时不超过某一个最大值，但根据整流子和电刷的工作条件在短時間內还是許可的。

变压器电动势的大小可用以下公式来表示

$$e_t = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_k \Phi_s 10^{-8},$$

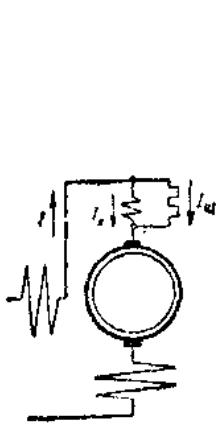


圖 394

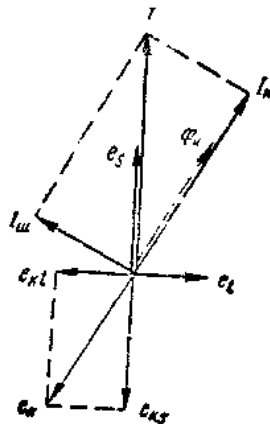


圖 395

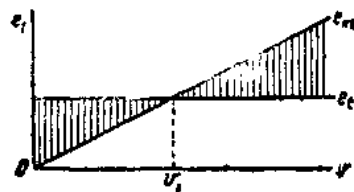


圖 396

式中 f ——交流電流的頻率；

w_k ——整流元件的匝數。

因此可以用降低交流電流頻率的方法來減少 c_r 。

既然 c_r 和電動機一個磁極的磁通數值成正比，那末在一定的頻率下就可以用增加磁極的數目或者電動機轉速的方法來減少 c_r 。在近代的電動機中是兩種方法混合使用的。在變壓器的高壓級上提高轉速就使電力機車在小時牽引力情況下的速度大大提高；當最大電動機端壓時，小時情況的速度可達電力機車最大速度的 0.8 ~ 0.9。

通常對於電力機車來說是習慣將小時情況的額定功率歸算到 $v = 0.7v_{max}$ 的速度上。如所週知，直流電力機車小時情況的速度當滿磁場時 0.5 ~ 0.6 v_{max} 而若用削弱磁場的方法來提高速度的話那末同時也就相應地減少了小時情況的牽引力。

上述速度的關係是具有單相整流子電動機的電力機車的極重要的優點，因為它能提高運行速度，特別是在上坡的時候。

單相整流子電動機除了極數較多，構造複雜外，它的特点是開動時或低速範圍內整流不能令人滿意，這就迫使我們要限制起動的時間也即從電力機車接通時起到機車起步後止（在較大的開動牽引力時為 5 ~ 10 秒）的時間，以及限制在低速範圍運行的時間。這是單相整流子電動機的電力機車的主要缺點，特別是對於貨運電力機車來說尤其顯著。

有時為了改善整流，開動時利用磁場的削弱。這時為了得到足夠的開動牽引力，磁場的削弱是以電流相應的加大來補償的。

§2. 變壓器分級的決定

只有根據圖 393 的開動圖在連續而又均勻地調節電壓的條件下才可能得到電動机电流不變的開動情況。雖然這種要求是十分可能而且在某些電力機車上實際上已經做到了，然而最常見的還是較簡單的分級電壓調節。將電動機換接到變壓器分成段的次級繞組的不同出頭上即可做到這種調整。這種控制方法的最簡單的線路表示在圖 397 上。

當採用電壓分級調節時，變壓器各分級應根據開動電流在選定的 I_{max} 和 I_{min} 範圍內擺動（如同在直流電動機變阻開動時一樣）的原則來計算。

圖 398 表示決定變壓器各分級的向量圖。 $\triangle AOB$ 是當電動機沒有轉動而電流為 I_{min} 時的電壓向量圖，而 $\triangle COD$ 是同樣情況下而電流為 I_{max} 時的電壓向量圖。如果在電壓作均勻調節而電流 I_{min} 不變的情況下進行開動，那末向量 U 的端點應該是沿着直線 BE 而滑動，而在電流為 I_{max} 時就沿着直線 DE 移動。將電壓 U_1 加在一個還沒有轉動的電動機上，在起始瞬間就確定了電流 I_{max} ，此後電動機開始旋轉而在它的電樞內就產生了旋轉電動勢 E_a 。 E_a 隨着速度的增長而增加，而電流就減少；此時向量 U 的端點沿着 CG 弧而移動。用向量 U 畫出來的圓弧與直線 BE 相交在

G点上,这就表示电流已减少到 I_{min} 。随后就必须提高一些电压使电流重新增加到 I_{max} 。向量 $I(X_g + x_R + x_g)$ 和 $-E_g + I(r_g + r_R)$ 此时就随着电流增加而正比例地增加,而新的电压向量同就用 ΔDOH 表示。这个三角形的 OH 边就是新的电压值 $U = U_g$ 也即变压器第二分级的电压,而 ΔU_2 是从第一级转换到第二级时的电压增量。当速度继续增加时第二级电压向量的端点就沿着新的圆弧 HK 而移动,并在 K 点

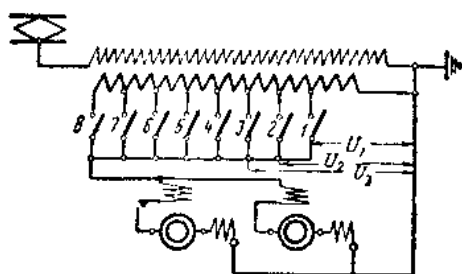


图 397

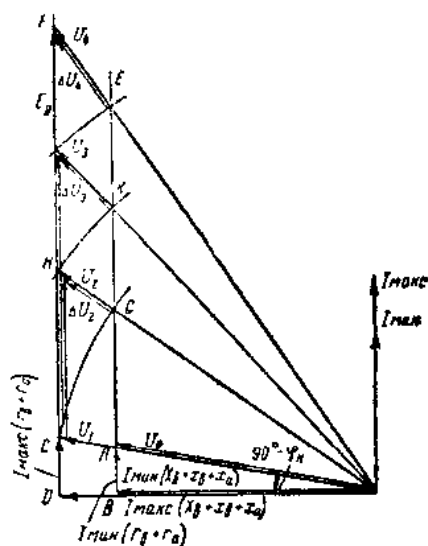


图 398

上电流又重新减少到 I_{min} ,再往后又必须转换到变压器的下一个第三级电压 U_3 上依此类推,直到 U 达到最大值。

为了要画出开动图,必须要知道电动机全部绕组的总阻抗 Z_K 和电动机短路时的 $\cos \varphi_K$ 。如果这些数值为已知,那末 ΔDOG 就可以根据数值

$$U_1 = I_{max} Z_K$$

和 φ_K 角而画出,然后就可以画出直线 DF 。直线 BF 可任意由 A 点或 B 点来决定。 A 点是向量 $U_0 = I_{min} Z_K$ 的端点。 U_2, U_3 等可由前面已经说明了的几何图形中找到。

图 398 上的向量图只有在电动机磁化曲线的直线部份才是正确的,这时激磁磁通 Φ_g 和电流成正比。实际上开动通常总是在磁化曲线弯曲部分的范围内进行的,这时电流和磁通间的关系就不是正比的关系。除此之外,在这种负载的范围,激磁绕组的电抗数值 X_g 也是不固定的。实际上,自感电动势:

$$IX_g = 4.44 f w_g \Phi_g \cdot 10^{-8},$$

由此可得:

$$X_g = 4.44 f w_g \frac{\Phi_g}{I} \cdot 10^{-8}, \quad (221)$$

也就是说在磁化曲线的弯曲部分范围内 X_g 减少,因为由于饱和的关系使比例 $\frac{\Phi_g}{I}$ 减少。

因此,在这种情况下电流 I_{min} 和 I_{max} 的短路三角形将不是相似的。为了要画出开动图就必须知道在两个电流值 I_{min} 和 I_{max} 时的 Z_K 和 $\cos \varphi_K$ 。根据这些数值就可以画

出短路三角形: $\triangle AOB$ —电流为 I_{min} ; $\triangle COD$ —电流为 I_{max} (圖399), 同时也可画出电动机端压为 U_k 时同样这两个电流数值的向量圖, 設在端压为 U_k 时的电动机的速度特性曲綫 (圖400) 为已知, 綫段 CF 就以适当的比例尺表示当电流为 I_{max} 和根据速度特性曲綫速度为 v_1 时的旋轉电动势 E_g , 而綫段 AE 是表示当电流为 I_{min} 和根据同一特性曲綫速度为 v_2 时的 E_g .

电流为 I_{min} 和速度为 v_1 时的旋轉电动势等於

$$E_g^* = E_g \frac{v_1}{v_2}$$

並在向量圖上它是用下面的綫段来表示的

$$AG = AE \frac{v_1}{v_2}$$

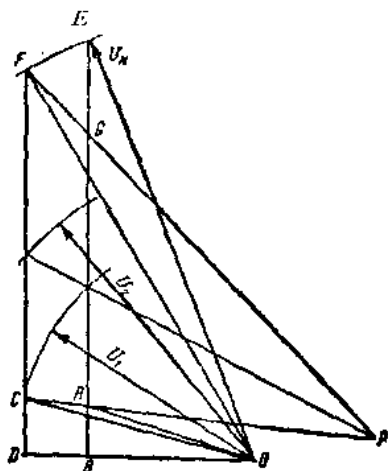


圖 399

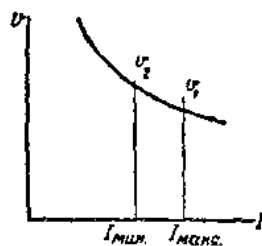


圖 400

因此在向量圖上可以找得綫段 CF 和 AG , 它們表示在同一速度下兩個电流極限值的旋轉电动势。显然, 任何別的速度下的旋轉电动势將可用与 CF 和 AG 綫段成正比的綫段来表示。如果經過 F , G 点和 C , A 点画直綫而在 P 点相交, 那末任何經過 P 点的直綫將在直綫 CF 和 AE 上截取出綫段而這些綫段是和 CF 与 AG 成正比的。因此在繪制开动圖时根据电流为 I_{min} 时已知的 E_g 数值利用 P 点可找得电流为 I_{max} 时的 E_g 。繪开动圖的步驟可以由圖399中很明显地看出。

可以遵循選擇直流电力机車車輛和摩托車輛調車級的同样的原理来選擇調車級 (參閱上册第31頁)。

从圖398中可看出, 开动时电流固定在 I_{min} 和 I_{max} 的範圍內需要用許多不均匀的电压分級, 各分級間的电压差应隨着速度的增加而增大。制造这种变压器会遇到構造上的困难, 因为变压器的次級繞組匝数不多。因此通常就制造各分段中有相同的匝数而电压級均匀的变压器。在这种情况下, 开动过程中电流的摆动減少。

II. 电压調节綫路

最簡單的电压分級調节綫路 (圖397) 在实际应用方面是行不通的, 因为在这

也即

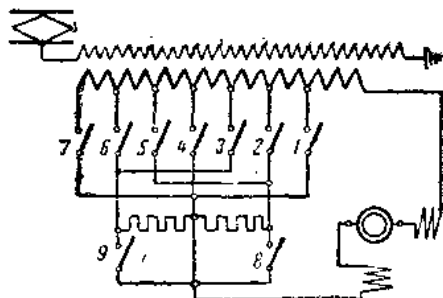
$$\tau = \frac{\Delta E_a}{I_{max}}$$

式中 ΔE_a ——在 U_2 电压級上开动时旋轉电动势的增量，那末在第二轉換級上电流仍保持 I_{max} 的数值。当 $\tau < -\frac{\Delta E_a}{I_{max}}$ 时就有某些电流的冲击，但不会超过 I_{max} ，因为电流仅在 $\tau = 0$ 时才能达到 I_{max} 。当 $\tau > -\frac{\Delta E_a}{I_{max}}$ 时，在轉換級上电流就减少而低於 I_{max} 。因此为了保证使轉換时电流不减少和牽引力不降低，就必须使

$$\tau \leq \frac{\Delta E_a}{I_{max}}$$

从圖 398 中可以很清楚地看出，不同分級的 ΔE_a 是各不相同的，因而 τ 的数值应根据最小的 ΔE_a 值来选择。

圖 403 是具有轉換电阻的摩托車轉綫路圖。綫路的工作可由接触器閉合表来说明。



变压器級	接 触 器								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	2	-	-	-	-	-	8	-
3	-	-	3	-	-	-	-	-	9
4	-	-	-	4	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	5	-	-	8	-
6	-	-	-	-	-	6	-	-	9
7	-	-	-	-	-	-	7	-	-

圖 403

电阻的轉換也可应用在具有支架式分級轉換开关（有滑动接触）的特殊控制系統中。在这种系統中当从变压器的一級轉換到另一級时电流的开断是用特殊的接触器系統来进行的，而这些接触器为了电流的开断裝有灭弧箱和电磁灭弧裝置。由於这些，变压器的分級轉換工作就可以用沒有灭弧設備的接触器或者是用最簡單的操作器械如具有滑动接触的支架式轉換开关来完成。

圖 404 就是具有支架式轉換开关的简化綫路圖。

支架式轉換开关是由一系列的接触片 1 和两个电刷組成，接触片是和变压器次級繞組的出头相联，而两个电刷就是：根据長时期通过电流而設計的很宽的主电刷 2 和輔助电刷 3。借螺桿 4 电刷可沿着接触片移动而使电动机和变压器不同出头相联接。电刷是在沒有电流之下与接触片相触或离开的，而电流的切断或接通则是用两个接触器 7 和 8 来执行，这两个接触器接在每个电刷的电路內，並且受到裝在电刷进給螺桿一端的凸輪的机械作用。器械的动作应設計成这样：使任何一个电刷的电路都要在电刷接触到下一个接触片以后才用相应的接触器来接通，相反地要在它离开接触片之前用接触器将电路打开。

当由一級轉換到另一級时，最初由輔助电刷 3 和下一个接触片接触，然后，接触器 7 閉合，同时变压器的一下个分段就並联一个电阻 r 。然后，主电刷电路內的接触器 8 被打开，在这以后电刷才离开前一个接触片。此时电动机已經接到变压器