

电業工人
學習文选

4



陈 維 敬編著

直流电机电刷的 維護和处理

电力工业出版社

序 言

在工厂企业和日常生活中，我们能够接触到很多种类的电气设备和电气用具。其中也包括各种具有整流子和电刷的旋转电机，如电扇、吹风机、汽车发电机、电车电动机以及数万瓩巨型发电机的励磁机等。

具有整流子和电刷的电机，特别是直流电机和其它许多电气设备一样，担负着十分重要的任务，就拿发电厂中的励磁机来说吧，它是供给同步发电机励磁电流的一种直流发电机，具有整流子和电刷的装置。其它如在同步发电机的转子上也装置有这种滑环和电刷。要保证发电机的运行安全，必须要求它的各种附属设备不出毛病。这些设备中就包括有整流子、滑环和电刷。如果整流子、滑环和电刷能维护得好，不出事故，这对发电机的安全运转有着重大作用。但是目前我国许多发电厂由于对励磁机电刷的处理不当或维护不周所造成的发电机停机事故还经常发生。为了交流经验，所以特地把这个问题提出来谈一谈。首先应当说明，近代构造的直流电机在正常运行的情况下，是不会发生整流困难的。像励磁机一类的直流发电机，它基本上能够保证同步发电机长期的安全运行。但也需要了解直流电机的整流工作是很容易发生问题的，它依靠运行人员经常维护和处理的地方，要比其它电气设备多一些。直流电机的整流理论虽然并不深奥难懂，但是因为各方面影响它的因素较多，牵涉的面又广，相

互之間的影响互相交錯，至今还不能够用簡單完整的叙述来加以說明。介紹苏联学者对这方面的研究分析所闡明的整流过程的本質、整流困难的基本原因和改善整流的基本措施，对我們了解这个問題会有很大帮助。另外，書中还对电刷的維護及应当注意的若干問題，电刷在运行上容易發生的不正常情况及其处理方法都談到一些。作者希望本書出版以后对电机維護工人，尤其是电厂的运行工人提高技术水平能稍有帮助。

作 者

1957 年 3 月 19 日

目录

序 言

第一章 直流电机的整流作用	4
第一节 直流电机的整流	4
第二节 改善电机整流的方法	13
第二章 电刷的特性	18
第一节 电刷的种类	18
第二节 电刷的电阻	19
第三节 电刷的接触电压降	21
第四节 电刷的摩擦系数	26
第五节 电刷的电流密度	28
第三章 电刷的安装	29
第一节 电刷安装前的检查	29
第二节 刷架的安装	30
第三节 电刷的安装与研磨	36
第四章 电刷产生不正常现象的原因和解决方法	37
第一节 运行情况的检查和判断	37
第二节 各种不正常情况和处理方法	38
第三节 磁场故障	49
第四节 电枢故障	50
附表 1 苏联电刷技术特性表	51
附表 2 民主德国电刷技术特性表	53
附表 3 美国毛根拿厂电刷技术特性表	55

第一章 直流电机的整流作用

第一节 直流电机的整流

一、概述

我們經常碰到的直流發電機，實質上就是具有整流子的交流發電機，在發電機電樞繞卷的導線中所感應產生的電勢本是交流電勢，它依靠整流子和電刷的作用把交流電勢改變成直流電勢，這樣才能產生出相應的直流電流來供給負荷。這種把交流電改變為直流電的過程，我們稱它為整流過程或換向過程。

在直流電機的運行上最容易碰到的問題就是整流不良，它的外表現象就是在電刷下發生火花。當電刷下的火花超過一定限度時，就會引起整流子和電刷的損壞，最後導致電機不能繼續運行，因此電刷下無火花運行是直流電機安全運行的一個很重要的條件。設計正確的直流電機，在很嚴重的整流情況下維護得當，也不致發生火花。從運行的觀點來看，直流電機整流不良的主要原因是維護不當。如果在運行中發生電氣方面和機械方面的缺陷，也會使電刷下發生火花。但是直流電機的整流問題是一個很複雜的問題，要想解決直流電機電刷下發生火花的問題，必須首先找出產生火花的原因，同時還不能單從某一方面下手，而必須從各方面觀察，把觀察的結果加以分析後，才能得出正確的結論，找到適當的處理方法。

二、直流電機的整流原理

要想知道整流問題的本質，首先必須了解整流的原理。

下面想对这方面作简单的说明。

在普通电工学中，我们知道当一根导线在磁场内移动时，这导线中就会感应产生电势，产生电流。假定移动的方向不变，电流的方向就由磁力线的方向所决定。一根导线不断的切割着不同极性的磁力线时，就会感应出方向不断变更的电流来，也就是会感应出交流电来。

为了使大家容易了解整流的作用起见，我们特把环型电枢直流发电机作为例子来说明。图1是一台四极直流发电机，电枢的每一个线圈都和相对应的整流片相连接。在整流子上共有四块电刷 A_1 A_2 和 B_1 B_2 ，电刷 A_1 A_2 带正电， B_1 B_2 带负电，同极的电刷相互连接起来，向外送电。

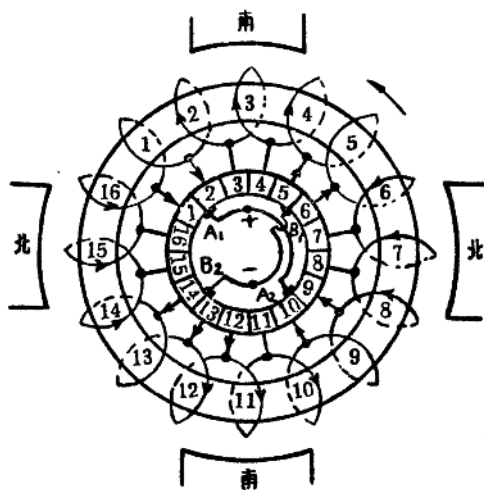


图 1 环型电枢直流电机

从图1中，我们可以看到，各线圈在不同的磁场下感应

出来的电流方向是不同的(見圖 1 中电流流通方向),在北極下的綫卷所感应出来的电流方向和在南極下的綫卷所感应出来的电流方向完全相反。电机在轉动时,每一綫卷都不断地經過南極和北極,切割着磁場的磁力綫,因此所感应出来的电流方向也就不断的变更。由此可見,直流电机所感应出来的电流原是交流电流。

現在我們来研究一下在电刷下面整流子上的电流情况。譬如,在某一瞬間整流片 5 和 6 同电刷 B_1 接触, 整流片 6 和綫卷 5、6 連接, 整流片 5 又和綫卷 4、5 連接, 綫卷 4 和 6 所感应出来的电流方向是相同的,都是由电刷流向綫卷。同样,綫卷 12 和 14 的电流也都是从电刷 B_2 流向綫卷。我們把电刷 B_1 和 B_2 連接起来, 电流就从外界流向綫卷, 故称为負極; 同样,綫卷 16 和 2 同 8 和 10 所感应出来的电流都是从綫卷流向电刷 A_1 和 A_2 , 故称为正極, 因此,在任何時間內, 流过电刷 $A_1 A_2$ 和 $B_1 B_2$ 的电流方向是不变的。这样, 直流发电机的电流經過整流子和电刷的作用就把交流电改变为直流电了。

三、直流电机的整流过程

为了进一步研究整流子的电流情况, 我們把圖 1 上的电刷 A_2 和整流片 9 和 10 画成像圖 2 的样子。圖 2 甲、乙和丙是表示电刷在三个不同位置时的电流分佈情况。假定电刷的宽度和整流片的宽度相同(实际上, 电刷的宽度約有 2—3 个整流片的宽度), 圖中左边的箭头表示整流子运动的方向, 每个綫卷所感应出来的电流是 i_a , 从圖 1 中我們就可以看到綫卷中电流的方向是不同的。当电刷全部在整流片 9 时 (如圖 2 甲), 綫卷 8 和 9 所感应出来的电流 i_a 均流向整流片 9,

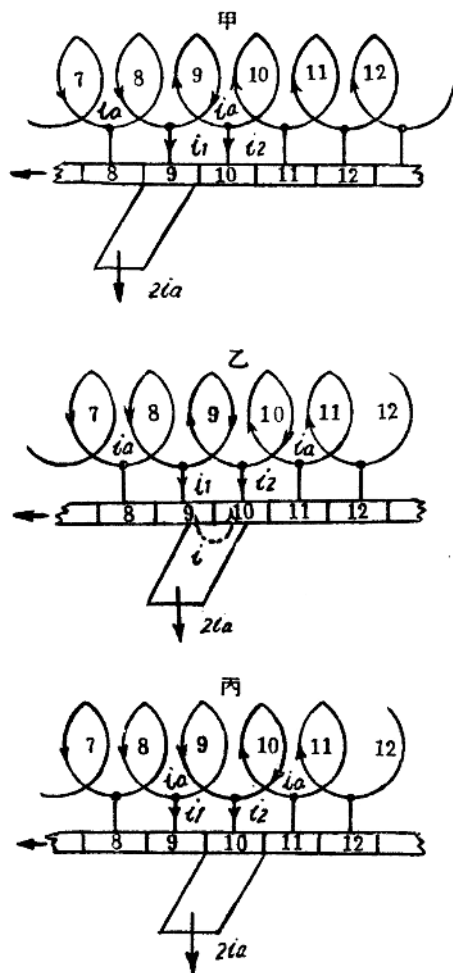


圖 2 电刷在三个不同位置时的电流分佈情况

因此：

$$i_1 = i_a + i_a = 2i_a$$

$$i_2 = 0.$$

經過一个瞬时后，整流片 10 移动到电 刷 下 面（如圖 2 丙），繞卷 9 和 10 的电流 i_a 均流向整流片 10 和电 刷， $i_2 = i_a + i_a = 2i_a$ ，而 $i_1 = 0$ 。但是当电刷在整流片 9 和 10 之間时（如圖 2 乙），繞卷 9 就被电刷短路。这就是說，繞卷 9，整流片 9、10 和电刷成为一个短路回路，因此，流經电刷的电流除了 $2i_a$ 外，还有短路电流 i 流过。这电流的大小对于电机电刷下会不会發生火花有很大关系。

从圖 2 中我們可以看到繞卷 9 中的电流方向在圖 2 甲和丙中是相反的，这就是說，当整流片在电刷下从 9 移到 10 时，繞卷 9 中的电流从 $+i_a$ 变成为 $-i_a$ 。电刷在整流片 9 和 10 之間的时候，就是电流改变方向的时候。电流方向改变的过程，称为整流过程。

四、直流电机的理想整流

电刷与整流子作相对运动时，在各个瞬时，假定兩者之間的接触电阻并不發生变化，則电刷从一整流片移动到次一整流片上时，电刷与整流片間的接触电阻是和兩者之間的接触面积成反比例改变的。再假定电樞繞卷本身和从繞卷接到整流片导綫的电阻非常小，可以忽略不計，因此整流回路內的电阻可当作只有电刷和整流片間的接触电阻。根据上述假定，流过电刷的电流 i_1 和 i_2 （見圖 2 乙）將随电刷和整流片間的接触面积而改变。因为接触面积大，接触电阻就小，所以流过的电流也就大。当电刷和整流片間的接触面积減小时，由于接触电阻随接触面积的減小而成比例的增大，流过

的电流也就成比例地減小了。由此可見，在电刷下的电流密度会是处处相等的，电刷在整流片上的电压降也就会处处相同了。因此，在整流回路內，当电流由 $+i_a$ 改变为 $-i_a$ 时，在电刷下不会有短路电流产生，就是說，在整流时电刷下面不会發生火花。这种整流情况，我們称他为理想的整流情况。

上述的理想整流情况，除了所作过的假定外，还没有考虑到整流回路綫卷的自感作用。我們知道，直流电机的电樞綫卷是埋在轉子鉄芯的槽內的，和变压器的綫卷相类似，它具有很大的电感量。当綫卷中的电流由某一值 $+i_a$ 改变成 $-i_a$ 时，这一电路中的磁通量就从某一值 $+\Phi$ 改变为 $-\Phi$ ，綫卷內就会感应生成一电动势。我們从普通电工学中知道，电动势的大小和磁通量变化的速率是成正比例的，而它的方向則是企图生成另一电流，以抵消綫卷中电流改变的方向。除非綫卷中的电流从 $+i_a$ 改变到 $-i_a$ 所经历的时间非常長，那末綫圈中就不可避免地会生成感应电势。感应电势通过电刷的短路即形成短路电流，这一短路电流叫做增生电流。增生电流的方向企图抵消綫卷中电流变化的方向，由圖 2 可知。当电刷由整流片 9 移到整流片 10 时，电流 i_2 不断地增加而电流 i_1 不断地減小，則增生电流 i 的方向与 i_2 相反而与 i_1 相同。增生电流和整流电流重疊的結果造成了电刷下整流片 9 处的电流是 $i_1 = i_a + i$ ，而整流片 10 处的电流是 $i_2 = i_a - i$ 。虽然經過电刷的总电流

$$I = i_1 + i_2 = i_a + i + i_a - i = 2i_a$$

其数值沒有改变，但是在电刷的滑入側(或称前刷边)即处在整流片 10 上这一部分电刷下的电流密度減小，而在电刷滑出側(或称后刷边)即处在整流片 9 上这一部分电刷下的电流

密度增加。如果感应电势足够大时，就会在电刷的滑出側生成火花。

从上述的討論中可以知道，理想的整流情况只能在电机的旋轉速度非常小时，即电刷由一整流片移到另一整流片上所需的时间非常大时才能实现，因为只有这样才能避免电樞中因感应电势的生成而生成增生电流。这种略去电感作用只就电阻回路来研究整流条件的情况，称为电阻整流情况。实际上直流电机在运行时电樞是以一定的轉速運轉的，所以电阻整流亦即理想的整流情况并不可能存在，但是能帮助我們分析复杂的整流情况，所以我們还是加以研究。

五、直流电机的实际整流过程

直流电机在运行时电樞的旋轉，除了在电刷下进行整流的綫圈中由于綫卷自感作用会生成增生电流外，这綫卷还会由于割切外界磁場(如果存在的话)的磁力綫而产生感应电势。綫卷割切磁力綫所产生的电势和切割磁力綫的速率成正比，在电机作等速旋轉时則和磁力綫的数目(也就是綫卷当时所在空間中的磁場强度)成比例。感应电势的方向是由右手定則决定的。当电机旋轉的方向一定时，則电势的方向决定于空間中磁場的方向，这就是說，在电刷下进行整流的綫卷，由于外界磁場的感应作用所生成的感应电势，其大小和方向全由外界磁場的大小和方向来决定。如果当时綫卷所在的空气隙間沒有磁力綫，即磁場强度为零的时候，則綫卷不会因外界磁場作用而生成电势，这时綫卷中仅有由于自感作用而生成的增生电流。如果綫卷在进行整流时，綫卷所在的空气隙間存在外界磁場，在綫卷中則由于自感作用和外界磁場作用感应生成的两个电势互相重疊，这时整流回路內的增

生电流就要由重叠成的总电势来决定。如果外界磁场生成的电势与自感作用生成的电势方向相同，则两者相加结果造成增生电流的增加。如果外界磁场生成的电势与自感电势生成的电势方向相反，则两者相减，结果造成增生电流的减少。我们已讨论过，当没有增生电流时，电刷滑入侧和滑出侧的电流密度相等，相当于理想整流情况，这是我们所期望能够达到的。由于自感作用而生成的增生电流的方向，有促使电刷滑出侧电流密度增加的倾向，有可能造成电刷滑出侧生成火花，而延迟了整流过程，故称为延迟整流情况。如果外界磁场作用生成的电势抵消自感作用生成的电势而有余，则造成一与上述情况方向相反的增生电流，这一电流有促使电刷滑入侧电流密度增加的倾向，使电刷滑出侧的电流密度减小，而提前了整流过程，故称为超越整流情况。在超越整流情况下，如果剩余电势很大，即增生电流很大，就会在电刷滑入侧生成火花。

上述讨论可以帮助我们對整流过程有一明确的認識，使我们对电机电刷下發生火花的基本原因有所了解，并且也容易根据它来寻找出消除电刷下冒火花的办法。但是，电刷下的整流情况并不像假定中那样簡單，电刷与整流片間的接触事实上不会是全部表面完全接触，因此电刷下的接触电阻并不绝对与接触面积成反比，而且接触电阻恒定不变的假定中也没有充分考虑到电刷在整流中所起的作用，以及滑动触点上在进行过程中所起的变化。另外，电刷下氧化銅薄膜在起着半导体的作用，电刷在不同的極性下在进行着电解作用，整流子与电刷間的高速相对运动，以及温度所产生的影响等。各种因素形成了机械、电磁、电气化学、电热上复杂交

錯的問題，使得整流問題的实际研究趋向于复杂。

六、火花

直流电机电刷在运行的时候，往往是多少有些火花的。火花一般發生在电刷的滑出端(也有整塊电刷下面都有火花的)，而且电刷下發生的火花在程度上是有差别的，在輕微的火花下是允許电机运行的，因为它对电机沒有危險，但是严重的火花，就会使电机被迫停止运行，因此需要加以檢查糾正。苏联国家标准 183-41 就是对电刷發生火花的情况，并根据火花的程度分別成各种等級来加以註解的。

1 級——無火花；

1 $\frac{1}{4}$ 級——小部分电刷有火花，大約是全部电刷的 $\frac{1}{4}$ 下面有微弱的火星；

1 $\frac{1}{2}$ 級——約全部电刷的一半下面有微弱的火花，并且在額定工作方式运行以后，整流子上不应有燒焦的痕跡；

2 級——大多数电刷或全部电刷的很大一部分下面有火花。在長期运行时，整流子面上有發黑的痕跡，电刷上也有燒灼現象，这类情况在短时期过負荷、冲动或反向时是允許的；

3 級——这是一种危險的火花，全部电刷下面都發生相当大的火花，在長期的均匀負荷下会使整流子面發黑，并使电刷燒焦和损坏。

除了上述的火花情况外，直流电机还可能發生环火現象。所謂环火是指火花不仅在电刷下發生，而在全部整流子面上發生，形成了+-極的短路。环火現象会造成电机的严重故障，所以应視為直流电机中最危險的一种故障情况。

七、火花發生的原因

电刷下的火花生成的原因，大致可以分为两种类型：电磁的和机械的。但是由于运行条件的复杂，它們互相影响，有时可能有两种火花类型同时出现，因此造成更复杂的情况，使得一时不容易判断火花造成的原因，故必须经过仔细观察、研究和分析，才能找出原因。

由于电磁原因在电刷下发生火花时，通常称为整流性火花。这时，火花的颜色通常是蓝白色的，火花均匀的分佈在电刷下面，并且在电刷的滑出侧数量较多。当电流降低时，火花就会减弱或完全消失；增加压力时，电刷的火花反而剧烈。产生这种火花的原因基本上是由于增生电流过大，如电刷中性位置不对，电刷种类使用不当，或磁场和整流极的故障等。

当电刷由于机械性的原因而发生火花时，火花的颜色是黄的且较长，并且向外飞出，即使负载电流降低，火花也不会显著减小或消失。当增加电刷压力时，火花可能减弱或消失。造成机械性火花的原因是：机械振动，整流子不圆，电刷压力不够，刷架角度不对等。

环火现象在负载变动剧烈及经常变换方向的直流电机上容易发生，这是因为整流片间电位差很大，引起火花长时流通，不易熄灭，因此融合而成电弧，造成异性电刷间的短路现象。环火也可能由于整流片间存有导电性尘粒或整流片间绝缘不良等原因引起。

第二节 改善电机整流的方法

一、概述

要改善电机的整流情况，使电机运行时电刷下不发生

大的火花，基本問題在于減小電刷下的增生電流。从前面的討論中可以看出，增生電流是由在進行整流中的繞圈的自感作用以及割切外界磁場生成的電勢之和所促成的，而增生電流是在電刷和整流片所形成的短路回路內流通。因此，用減少電勢之和與加大整流回路內的電阻這兩個方法都可以減少增生電流。事實上在直流電機的設計和運行方面，一直都是採用這兩個方法來改善電機的整流情況的。減少電勢的方法，對近代的電機來說，主要是從電機的構造上着眼，而增加整流回路的電阻則主要是依靠選擇適當的電刷和對整流面的養護工作。關於電刷的選擇和運行維護問題，將在第二章中詳細講述，現在我們先談談減少電勢的方法。

要減少自感電勢和外界感應電勢之和，可以設法使用減少自感電勢的方法，也可設法使兩個電勢恰相抵消，使它們之和的值很小。后面的辦法在一些直流電機中是由移動電刷位置的方法來達到目的的，但在比較新式的直流電機中則採用附加磁極（稱為整流極）的辦法，下面就分別來進行討論。

二、電刷從中性綫移動位置

設想有一隻兩極的直流電機，當主磁極被勵磁時，主磁極產生磁力綫由南極穿過電樞止於北極。磁力綫在磁極下的分佈情況是，在磁極中心綫的地方最密，而離開中心綫向兩邊逐漸減少。沿圓周距兩極中心相等位置的空隙間磁力綫最稀，而在其等分綫上磁力綫為零。這是因為磁極和電樞在構造上是对稱的緣故，所以上面講的磁力綫為零的等分綫就是電機磁極的幾何等分綫。這一等分綫在電機上稱為幾何中性綫。由於在幾何中性綫附近的空氣間隙中沒有磁力綫，也就是說此處空氣間隙中磁場強度為零，可以設想如果在進行整

流中的綫卷，恰好处在这一部分空气間隙中，就不会割切磁力綫，也就不会由于切割外界磁場而产生电动势了。

上面所講的情况只是考虑到由磁極所产生的磁力綫在空气間隙中的分佈情况，但当电机在帶負載运行时，电樞中就有电流流通，这时，根据电樞中电流的情况来看，整个电樞好像是一个具有鉄心的大綫卷，电樞中的电流同样会在空气間隙中生成一磁場。这时，主磁極由于磁極綫卷中流过电流造成的磁势与电樞电流在电樞綫卷中造成磁势的相互作用的结果，使得空气間隙中磁力綫的分佈情况改变。在电机学上，我們把电樞磁势对主磁極磁势生成的影响称为电樞反应。

电樞反应使空气間隙中的磁通分佈形状改变了，因此在几何中性綫区域中磁力綫分佈不再为零。对發电机來說，在有电樞反应时，合成磁場为零的区域是由几何中性綫区域向电樞旋轉方向前移了一些，这一中性綫区域我們称它为物理中性綫区。对电动机來說，在有电樞反应时，它的物理中性綫是由几何中性綫逆电樞旋轉方向移动了一些。

由此可見，一台沒有整流極的直流电机，在空載时，因为电樞中沒有負載电流，不会生成电樞反应，所以空气間隙中磁場为零的区域是在几何中性綫上。当有負載时，电樞反应产生的影响，使中性綫区的位置改变到物理中性綫上。

沒有整流極的直流电机在运行时，如果使进行整流的綫圈位于物理中性綫上，这也就是說，使电刷位于物理中性綫上，綫卷不受到外界磁場的影响，这时綫卷还是有由于自感作用产生的电势而促使增生电流流通。为了能够产生一外界磁場生成的电势来抵消自感电势，还必须把电刷的位置移动一些，使綫卷能够切割到磁力綫。因为中性綫兩边空气間隙中

磁場的方向是相反的，所以綫卷偏向前邊和綫圈偏向後邊時切割磁力綫所生的電勢方向也正好相反。在整流時，整流綫卷中的電流是由 $+i_a$ 不斷的改變至 $-i_a$ 。由自感作用生成的感應電勢的方向是一定不變的，所以要想使綫卷切割外界磁力綫生成電勢的方向恰好與上述電勢互相抵消，就必須在發電機上把電刷從中性綫順着電機旋轉的方向向前移動一些，在電動機方面也把電刷從中性綫上逆電機旋轉的方向移動一些。

用移動電刷位置來改善整流情況的這一辦法，當電機的負載恆定不變時是很有效的。在運行中，一般沒有整流極的電機都可以移動電刷位置直到電刷下火花減到最小。但是，當負載變動時，由於電樞中電流跟着變動，電樞反應生成的磁勢也隨着改變，因此空氣間隙中合成磁通的分佈也就改變形狀，使物理中性綫位置變動了。如果這時電刷仍留在原來的位置上，則由於切割外界磁場生成的電勢發生了變動，不能抵消自感電勢，因此增生電流會增大到使電刷發生火花。對於沒有整流極的電機來說，移動電刷位置固然可以改善整流情況，但是負載變動時就必須將電刷再作相應的變動，才能維持良好的運行狀況。這樣做是很不方便的，只有在很老式的直流電機上還保留着這種改善整流的方法，而在較新式的直流電機上都已採用整流磁極的辦法了。

三、具有整流極的直流機

如果在電機的幾何中性綫上加裝一對附加磁極，把附加磁極上所繞的綫卷和電樞綫卷串聯起來，就稱它為具有整流極的電機。因為附加磁極是專為改善整流情況而增設的，所以又稱為整流極。當直流電機作為發電機運行時，整流極的