

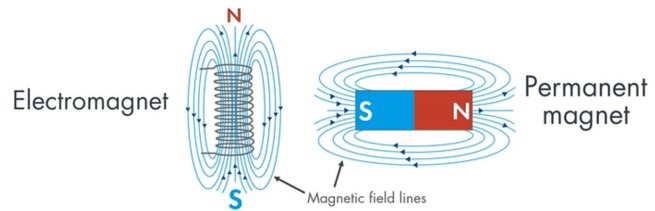
无刷直流电机控制简介

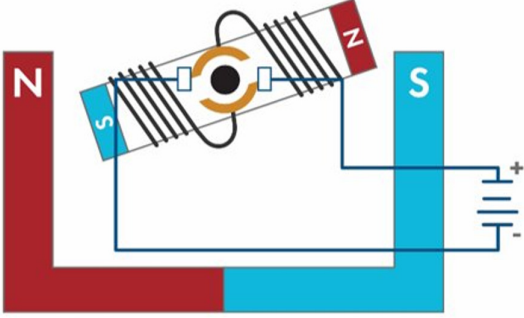
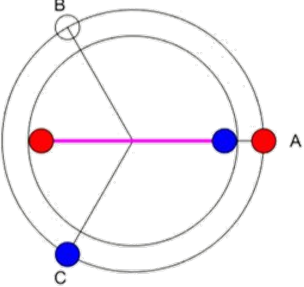
概述

从简单的钻机到复杂的工业机器人，许多机器设备都使用无刷直流电机将电能转换为旋转运动。

无刷直流电机也称为 **BLDC 电机**，相比有刷直流电机具备诸多优势。BLDC 电机更高效，所需的维护更少，因而已在许多应用中取代了有刷电机。

两类电机的运行原理相似，均由永磁体和电磁体的磁极吸引和排斥产生旋转运动。但这些电机的控制方式却大不相同。BLDC 需要复杂的控制器才能将单个直流电源转换为三相电压，而有刷电机可以通过调节直流电压来控制。

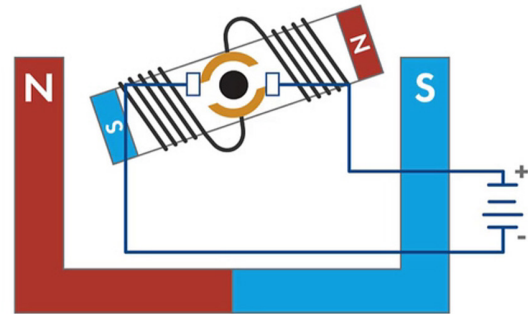


刷直流电机	无刷直流电机 (BLDC)
<ul style="list-style-type: none"> • 由于电刷磨损，导致维护频率高 • 效率低 • 易于控制（直流电压） 	<ul style="list-style-type: none"> • 维护少 • 效率高 • 控制复杂（直流转交流） 

直流电机的类型

传统有刷直流电机

如动画所示，在有刷直流电机中，直流电流通过转子的线圈绕组，使电磁体产生极性。这些转子的磁极与固定永磁体（称为定子）的磁极相互作用，从而使转子旋转。



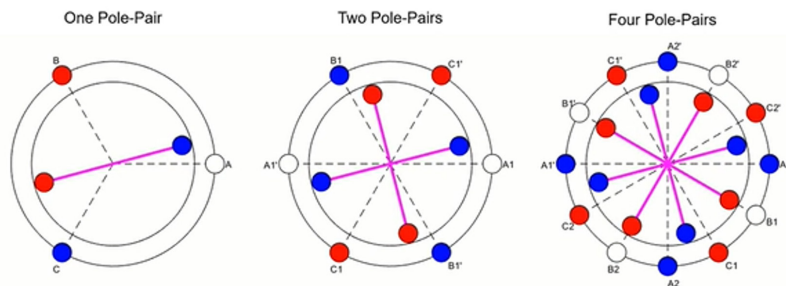
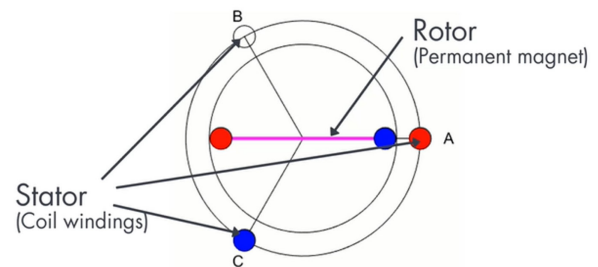
- 转子每转动半圈之后，需要切换线圈绕组中的电流极性，以对调转子磁极，使电机保持旋转状态。
- 这种电流极性的切换被称为换相。
- 换相通过机械方式实现：转子旋转的每个半圈中，电触头（称为电刷）与转子上的换相器连成一个回路。
- 这种物理接触会导致电刷随着时间推移而磨损，从而导致电机无法工作。

无刷直流电机

BLDC 电机采用电子换相来代替机械换相，克服了有刷电机的上述缺陷。为了更好地理解这一点，有必要进一步了解 BLDC 电机结构。

BLDC 电机与有刷电机构造相反，其永磁体安装在转子中，而线圈绕组则成为定子。

电机的磁体布局不尽相同，定子可能具有不同数量的绕组，而转子可能具有多个极对，如以下动画所示。



永磁同步电机 (PMSM) 有着与此相似的结构。下一章将讨论 BLDC 和 PMSM 电机之间的区别，以及操作这些电机所需的控制算法类型。

仿真 BLDC 电机以观察反电动势曲线

BLDC 电机和 PMSM 的结构类似，其永磁体均置于转子，并被定义为同步电机。在同步电机中，转子与定子磁场同步，即转子的旋转速度与定子磁场相同。

它们的主要区别在于其反电动势（反 EMF）的形状。电机在旋转时充当发电机。也就是说，定子中产生感应电压，与电机的驱动电压反向。反电动势是电机的重要特征，因为其形状决定了对电机进行最优控制所需的算法。

BLDC 电机的设计使其**反电动势呈梯形**，因此一般采用梯形换相控制。

BLDC

梯形反电动势

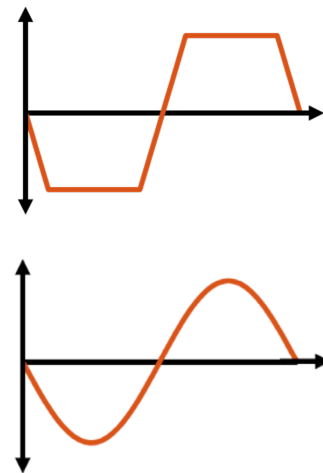
采用梯形换相控制

PMSM 的反电动势呈**正弦波形**，因此采用磁场定向控制。

PMSM

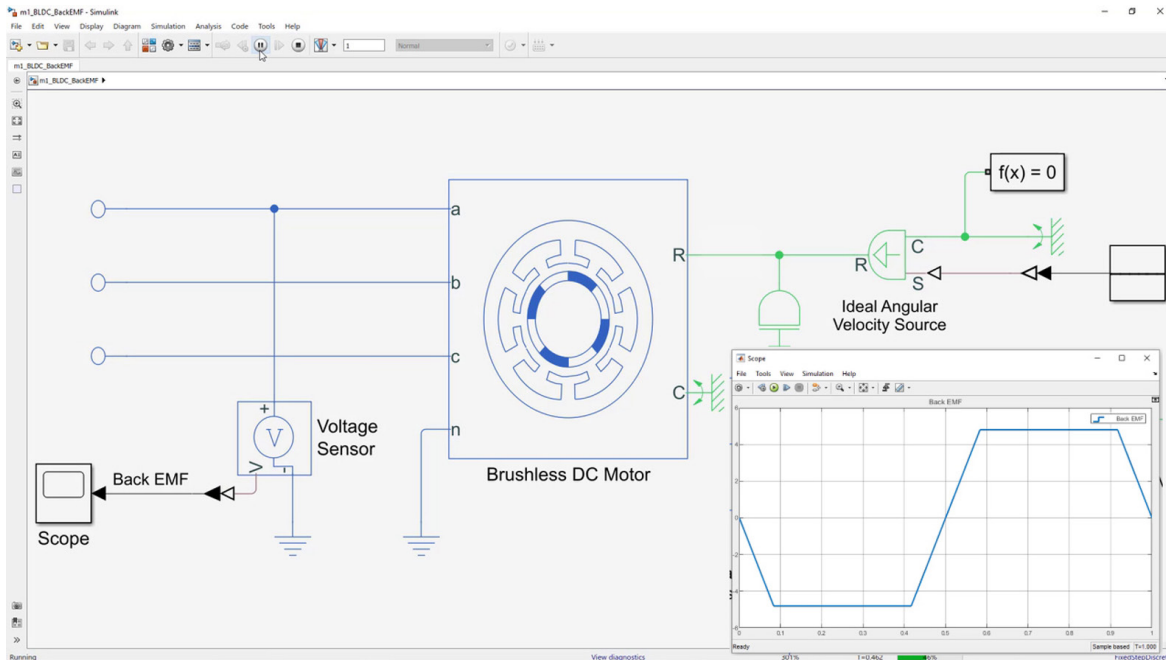
正弦反电动势

采用磁场定向控制



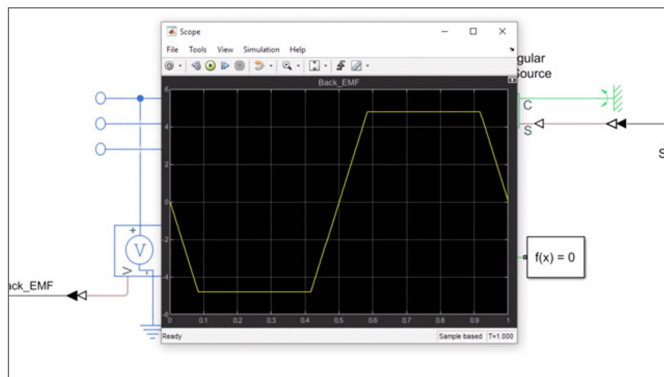
在电机控制领域，PMSM 和 BLDC 这两个术语有时会被混用，这可能导致对其反电动势曲线的混淆。此处将 BLDC 电机严格限定为具有梯形反电动势的电机。

对于采用 Simscape Electric™ 建模的电机，要观察其反电动势形状，只需对电机进行仿真即可。



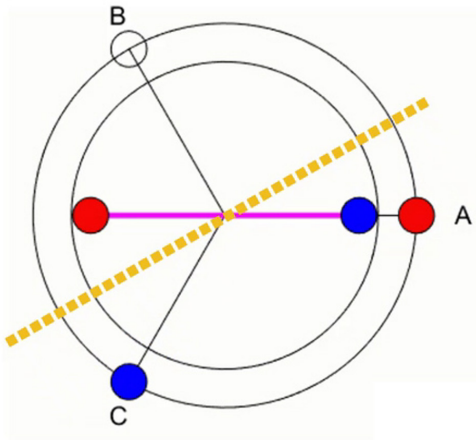
图中仿真的是带开路端子的单极对 BLDC，即线圈中没有电流通过。如果施加扭矩带动转子，电机将充当发电机。您可以测量 A 相电压随时间变化的情况，从而观察电机的反电动势形状。电压波形显示 BLDC 电机的反电动势呈梯形，其中部分区域电压持平。

查看以下教程，了解如何像上图那样使用 Simscape Electrical 对 BLDC 电机进行建模和仿真。



第 1 部分: 对 BLDC 电机的反电动势电压进行仿真 (3:33)

六步换相

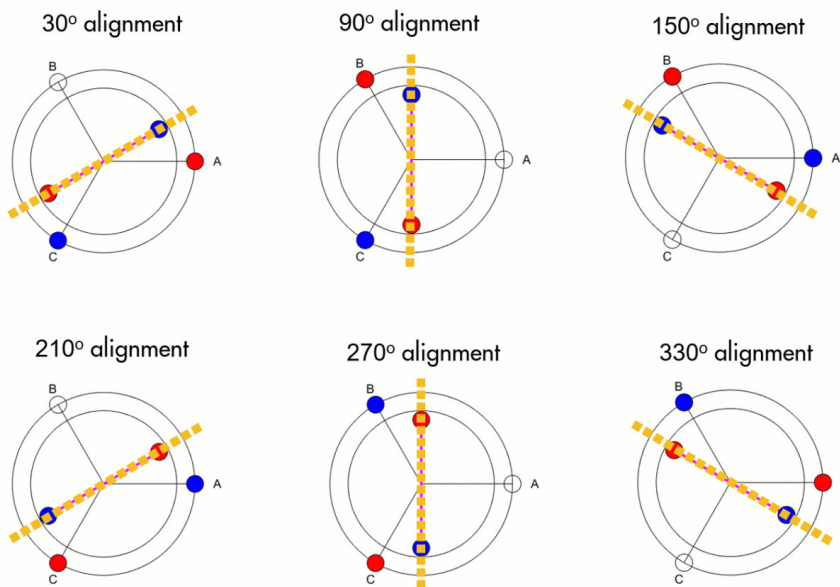


Stator magnetic field is generated along the dashed line

为了更好地理解施加外部电压时 BLDC 电机的行为，我们将使用前面介绍的配置，其中转子由单极对组成，而定子由夹角为 120 度的三个线圈组成。让电流通过线圈，给线圈（此处称为 A 相、B 相和 C 相）通电。转子的北极用红色表示，南极用蓝色表示。

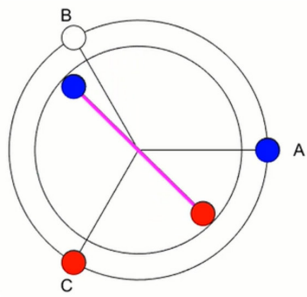
一开始，线圈没有通电，转子处于静止状态。在 A 相与 C 相之间施加电压（如动画所示），即会沿虚线产生复合磁场。这使转子开始旋转，从而与定子磁场对齐。

线圈对共有六种通电方法，如下所示。每次换相后，定子磁场相应旋转，从而带动转子，使之旋转至图示位置。在下面的动画中，转子角度是相对于水平轴而言的，转子共有六种对齐方式，两两相差 60 度。

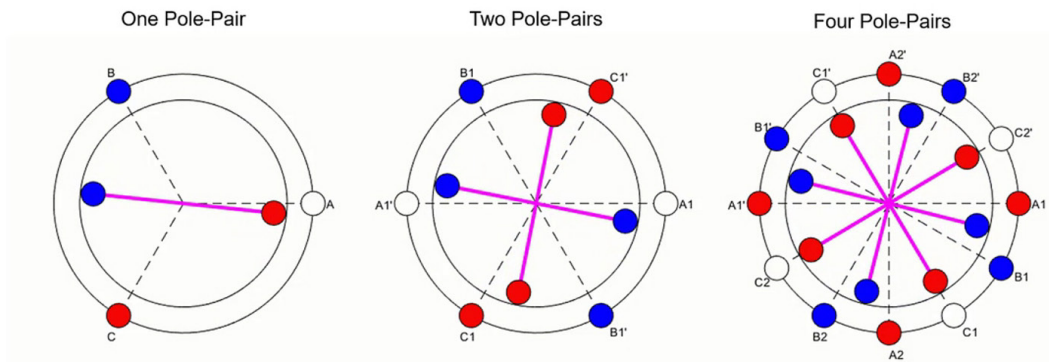


也就是说，如果每 60 度以正确的相位执行一次换相，电机将连续旋转，如以下动画所示。此类控制被称为**六步换相或梯形控制**。

此类电机可以包含更多极对, 但这就要求更为频繁地换相。为了在合适的时机以正确的相位执行电机换相, 控制器需要时刻掌握转子的确切位置, 对此通常使用霍尔传感器进行测量。



Six Step Commutation (Trapezoidal control)



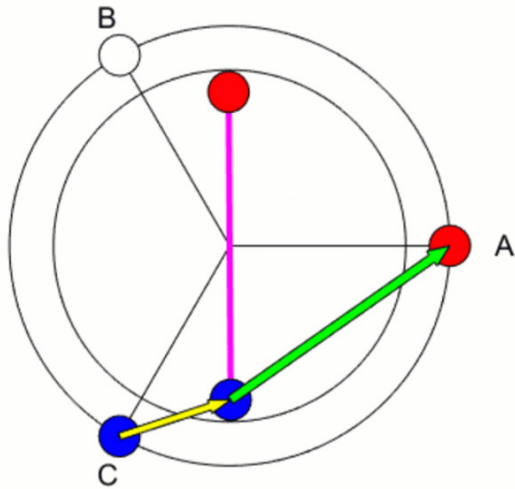
With 1 pole-pair commutation occurs every **60°**

With 2 pole-pairs commutation occurs every **30°**

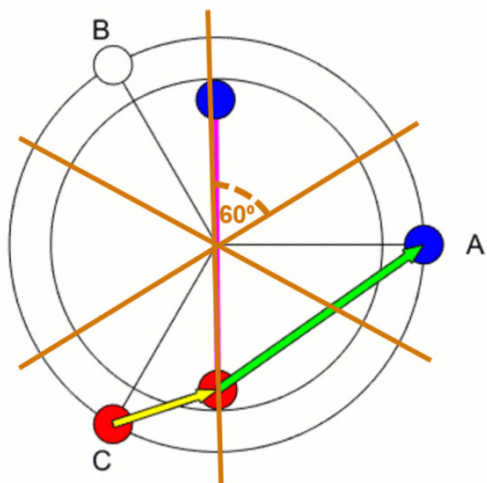
With 4 pole-pairs commutation occurs every **15°**

电机和扭矩产生

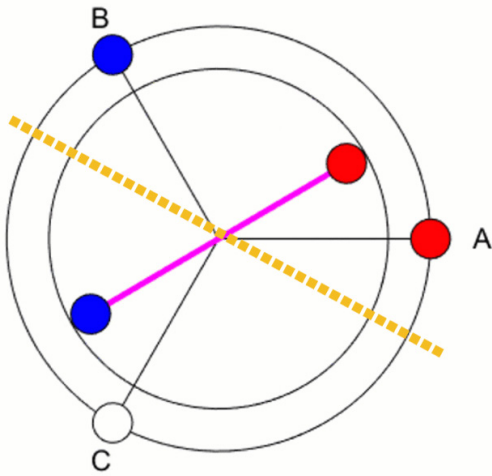
将鼠标悬停在动画上, 可查看**两极如何相互作用**。箭头表示相对磁力, 箭头粗细表示场强。相同磁极相互排斥, 从而使转子逆时针旋转。同时, 相反磁极相互吸引, 从而在同一方向增加扭矩。



转子完成 60 度旋转后, 发生下一次换相。

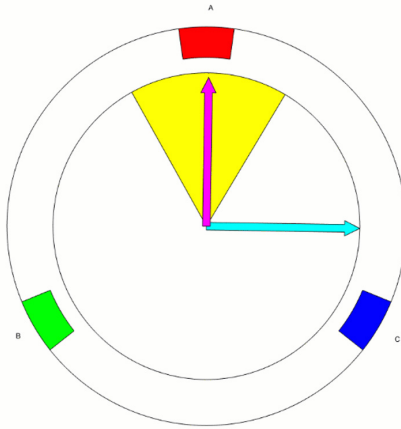


将先前讨论的定子磁场叠加到动画中, 可以很明显地看出, 在这种换相方式中, **转子从不对齐定子磁场** (图中的黄色虚线), 而是一直在追赶定子磁场。



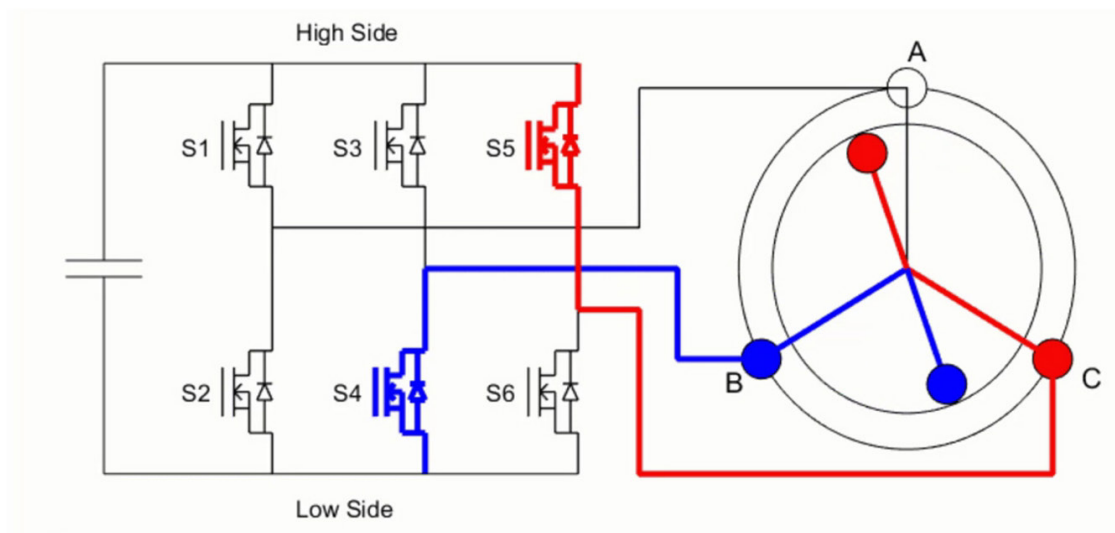
在 BLDC 电机中采用这种方式换相有两个原因。首先，如果允许转子和定子磁场完全对齐，此时产生的扭矩为零，这不利于旋转。其次，磁场夹角为 90 度时可产生最大扭矩。因此，目标是使该夹角接近 90 度。

但在 BLDC 电机中，采用六步换相无法让夹角始终保持 90 度，夹角将在 60 度和 120 度之间波动，如以下动画所示。这是因为梯形控制的性质相对简单。磁场定向控制等更先进的方法可实现定子与转子磁场间 90 度夹角，以此产生更大的扭矩，该方法常用于之前提到的 PMSM 控制。



三相逆变器的的工作原理

为了在六步换相过程中控制相位,可使用三相逆变器将直流电引导到三个相,从而在正(红)负(蓝)电流之间切换。为了向其中一个相供应正电流,需要打开连接到该相的高端开关,要供应负电流,则需要打开低端开关。



当转子与定子磁场夹角在 60 至 120 度之间时,按上述模式执行此操作,三相逆变器可使电机保持匀速旋转。**要改变电机速度,可以调节施加的电压。**要在不改变电源电压的前提下控制电机速度,则可以采用脉宽调制 (PWM)。

了解有关脉宽调制的更多信息。

学习如何设计电机控制器

» [观看视频](#)