

# 永磁无刷直流电动机的电枢反应

周元芳

(广西大学 南宁 530004)

**摘要** 讨论了稀土永磁无刷直流电动机的直轴电枢反应和交轴电枢反应的计算及其对电机的影响,并对负载时的磁通进行了分析。

**关键词** 稀土永磁 无刷直流电动机 电枢反应 磁通

稀土永磁无刷直流电动机性能优越,运行可靠,近年来发展迅速。我国钕铁硼永磁材料的研制成功并大量生产,为永磁无刷直流电动机的研制和生产创造了有利的条件。

永磁无刷直流电动机的定子多为三相对称绕组,有些无刷直流电动机采用三相桥式

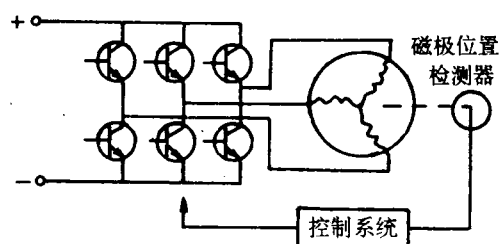


图1 无刷直流电动机原理图

晶体管逆变器供电,如图1所示。磁极为永久磁钢,装在转子上,电机装有磁极位置检测器,用它输出的信号去控制逆变电路,使各晶体管按一定的规律导通与截止,从而定子三相绕组也按一定的规律通电或断电,使转子获得一个平均力矩而不断旋转。永磁无刷直流电动机本质上是一台三相永磁同步电动机,但结构上又有别于一般的永磁同步电动机,有些无刷直流电动机的磁极极弧接近 $180^\circ$ ,磁通密度分布为矩形波或梯形波,因此电枢反电势就不会是正弦波,除了基波电势外,还有很强的三次谐波。为了减少附加损

耗,一般采用星形接法。当电机采用星形接法时,任何时候均为两相串联,并通过晶体管与直流电源相连,因此有效相数为两相。电枢各相绕组按一定规律通断电,产生一个跳跃式的旋转磁势,电枢反应磁势有时落后于转子磁场,有时超前于转子磁场。电枢磁势对转子磁场的影响与同步电动机不同,与普通的直流电动机也不相同。电机的电枢反应对电机设计和电机运行性能都有重要影响,因此有必要对其进行认真的研究和分析。

## 1 直轴电枢反应

转子磁场是永磁无刷直流电动机的主磁场。电枢有电流时便会产生电枢磁势,电枢磁势对气隙磁场的影响称为电枢反应。当电刷放在几何中性线上时,普通直流电机的电枢反应磁势与主磁场正交,只有交轴电枢反应,不存在直轴电枢反应。无刷直流电动机的电枢反应比较复杂,下面以“星接三相六状态”为例对无刷直流电动机的电枢反应进行分析,这种情况下的状态角 $\alpha_2$ 为 $60^\circ$ 。

电动机定子三相绕组为A、B、C,电动机运行过程中通电顺序为AB—AC—BC—BA—CA—CB(两个字母连写,第一个字母代表的相,电流从首端进入;第二个字母代表

的相,电流从末端进入),从而形成跳跃式旋转磁势。在图 2(a)中定子磁势用  $F_s$  表示,转子磁场用  $B_m$  表示,当转子磁场处于状态角  $\alpha_2$  范围内,电枢磁势方向保持不变。AB 相的合成磁势正好与 C 相线圈的轴线垂直,图 2(a)位置 I 和位置 II 为磁状态角的边界。当转子磁场轴线由位置 I 转过  $\alpha_2$  角到达位置 II 时,转子位置检测器立即发出信号,通过电子换向开关将 B 相绕组断电和使 C 相绕组通电,这时合成磁势跳过  $\alpha_2$  角,如图 2(b)所示,图中转子位置为 C 相通电之初瞬位置。

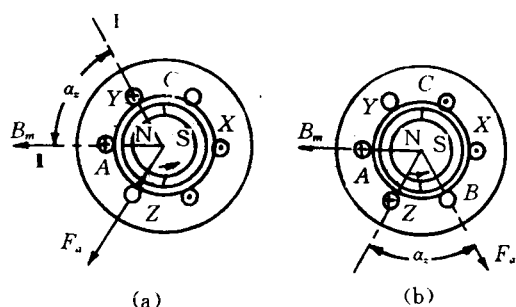


图 2 电枢磁势与转子磁场的关系

从图 2 可知,转子处于位置 I 时,电枢磁势对转子磁场有最大的去磁作用;转子处于位置 II 时,电枢磁势对转子磁场有最大的增磁作用。对于一个状态角来说,电枢反应开始是去磁的,随着角度增加去磁作用逐渐减少,达到  $\frac{1}{2}\alpha_2$  时只有交磁作用,之后电枢反应变为增磁,角度增加,增磁作用加强。直轴电枢反应磁势可采用文献 2 提出的方法进行计算,直轴电枢反应磁势的最大值为

$$F_{adm} = F_a \sin(\alpha_2/2) \quad (1)$$

式中  $F_a$  为电枢反应磁势,两相磁势相加得合成磁势。

$$F_a = (\sqrt{3} IW_\phi)/2P \quad (2)$$

式中  $I$ ——电枢电流, A;

$W_\phi$ ——每相匝数;

$P$ ——极对数。

把式(2)代入式(1)得直轴电枢反应磁势的最大值

$$\begin{aligned} F_{adm} &= [(\sqrt{3} IW_\phi)/2P] \sin(\alpha_2/2) \\ &= [(\sqrt{3} IW_\phi)/2P] \sin(60^\circ/2) \\ &= (\sqrt{3}/4P) IW_\phi \end{aligned} \quad (3)$$

对于正弦波磁势,上面的计算是准确的,对于矩形波或阶梯波磁势就不够准确了。

## 2 交轴电枢反应

从图 2 可见,当转子磁场  $B_m$  处于状态角的中间位置时,电枢磁势  $F_a$  与转子轴线成正交,出现纯交轴电枢反应,与普通直流电机电刷放在几何中性线时产生的交轴电枢反应相似。实际上交轴电枢反应磁势是矩形波或阶梯波,其最大值为

$$F_{aq} = (I \times 2W_\phi)/2P = IW_\phi/P \quad (4)$$

磁极处在其它位置时,电枢反应磁势既有交轴分量又有直轴分量。普通直流电机交轴电枢反应会使磁场发生畸变,磁路饱和时有去磁作用,使每极磁通减少。永磁无刷直流电机的交轴电枢反应会有些什么影响呢?

当采用稀土永磁材料(如 NdFeB)做磁极时,磁极的磁阻很大。以桂林稀土磁性材料厂生产的钕铁硼磁性材料 GLRH-30-H 为例,其剩磁  $B_r = 1.15\text{T}$ ,矫顽力  $H_c = -844\text{kA/m}$ ,退磁曲线为直线,与回复线重合,磁导率  $\mu = B_r/(-H_c) = 1.3 \times 10^{-6}\text{H/m}$ 。空气的磁导率  $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}\text{H/m}$ ,这说明它的磁阻与空气相差不多,磁路不饱和。和普通直流电动机一样,交轴电枢反应使得一半磁极增磁一半磁极去磁,但由于磁路不饱和和增磁与去磁的效果相当,所以每极磁通基本上不变。我们用二维有限元法软件

“MAGNET”计算了一台永磁无刷直流电动机,该机为四极 15 槽、额定转矩  $3\text{N} \cdot \text{m}$ ,转子处于状态角中间位置时算得其空载磁密分布和负载磁密分布如图 3、图 4 所示。空载每

极磁通为  $0.157 \times 10^{-2} \text{Wb}$ ,负载时每极磁通为  $0.154 \times 10^{-2} \text{Wb}$ ,说明永磁无刷直流电机磁路不饱和时交轴电枢反应只使磁场发生畸变,而无明显的去磁作用。

现在讨论交轴电枢反应对磁场畸变的影响。

若采用瓦形磁极,由于磁钢很薄,只有几毫米厚,交轴电枢反应磁通绝大部分穿过磁极后经转子轭而返回,横穿磁极的磁通甚微,可略去不计(见图 5)。

对于瓦形磁极,我们认为交轴电枢反应磁通在磁钢中与磁钢的磁化方向一致或相反。由图 5 可知,在磁极中心线的一侧电枢反应起去磁作用,另一侧起增磁作用,最大去磁作用发生在磁极的最外侧。当电动机起动、堵转或突然反转时,磁极外侧的工作点有可能下滑,造成磁极外侧发生不可逆去磁,严重时极性甚至倒转。但磁极极性倒转有时是可以恢复的,只要磁极中的磁场强度绝对值  $|H|$  小于临界磁场强度绝对值  $|H_k|$ ,即使电枢反应使磁极极性倒转了,去磁磁势减少后极性仍可恢复,即为可逆去磁。当磁场强度的绝对值大于临界磁场强度的绝对值时,便会出现不可逆去磁,如图 6 所示。

本征退磁曲线上磁化强度  $J$  开始急剧下降点对应的磁场强度称为临界磁场强度。维持产生可逆去磁,电枢允许的最大电流可用下式估计<sup>[3]</sup>:

$$I_m = \frac{P |F_m| B_r |H_k - H_c| d}{W_\phi B_m H_c} + \frac{P |H_k| d}{W_\phi} \quad (5)$$

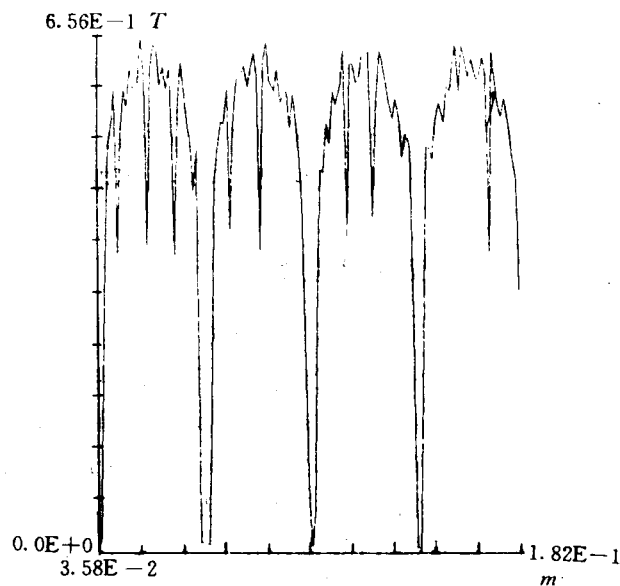


图 3 空载气隙磁密分布

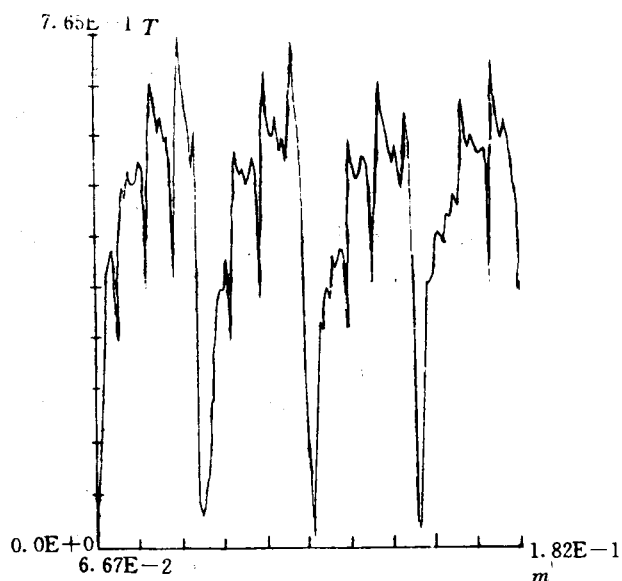


图 4 负载气隙磁密分布

式中  $I_m$  ——最大电枢电流, A;

$F_m$  ——磁极空载磁势, A。  $F_m = H_m d$  ( $H_m$  为空载时磁极的磁场强度, A/m;  $d$  为磁钢厚, m);

$B_r$  ——磁钢的剩磁磁密, T;

$H_k$  ——磁钢的临界磁场强度, A/m;

$H_c$  ——磁钢的矫顽力, A/m;

$B_m$  ——空载时磁钢的磁密, T。

电动机运行时,任何情况下电枢电流都应比  $I_m$  小,为了安全,设计电机时电流要留有一定的裕度。式(5)亦可以用来估计磁钢的最小厚度。

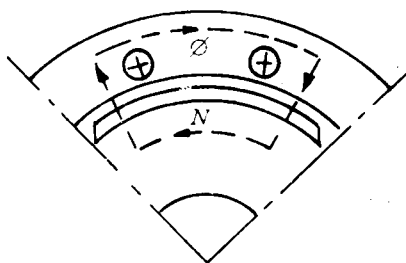


图5 交轴电枢反应磁路

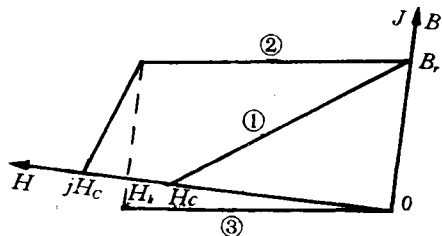


图6 发生不可逆去磁的情况

①退磁曲线;②本征退磁曲线;③ $H=H_k$ 时的回复直线。

### 3 负载时的每极磁通

负载时每极磁通的变化会影响电势、电磁转矩和转速。因此,准确地求出负载时的每极磁通,对电机设计有极重要的意义。永磁无刷直流电机是一种新型的电机,设计方法有

待进一步完善,文献(2)求磁路额定工作点步骤如下:先求电机的空载特性。把每极磁路分为定子轭、定子齿、气隙和转子轭四段。设不同的气隙磁密  $B_g$ , 求出气隙每极磁通  $\Phi_g$  和磁路各段磁势之和  $\sum F_i$ , 便可得出空载特性  $\Phi_g = f(\sum F_i)$ 。根据磁性材料的退磁曲线  $B_m = f(H_m)$  和磁极的尺寸,把  $B_m$  转换成  $\Phi_g$ , 把  $H_m$  转换成磁极磁势  $F_m$ , 从而得出一条新的退磁曲线  $\Phi_g = f(H_m)$ 。把它和空载特性画在同一坐标平面上,如图7所示。

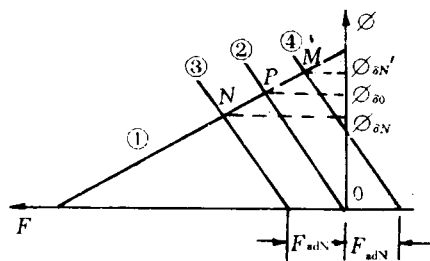


图7 磁钢工作图

图7中曲线①为退磁曲线,曲线②为空载特性,交点P即为电机的空载工作点,空载每极气隙磁通为  $\Phi_{g0}$ 。电机电枢有额定电流时,用式(3)算出最大直轴电枢反应磁势  $F_{adN} = F_{adm}$ , 即

$$F_{adN} = \sqrt{3} INW_\phi / (4P) \quad (6)$$

考虑电枢反应的去磁作用,把图7中的空载特性向左移  $F_{adN}$  距离,得到曲线③,它与曲线①交于N点,N点即为额定工作点。额定负载时的每极磁通为  $\Phi_{gN}$ 。由图可见负载后气隙磁通明显地减少了。

笔者认为上述求额定工作点的方法不尽合理。前面已论及永磁无刷直流电动机的直轴电枢反应磁势在一个状态角范围内不是一个常数,用减去一个最大直轴去磁安匝的方法求负载时的工作点是不合理的。实际上直

轴电枢反应有时去磁,最大去磁时把图 7 的曲线①移到曲线③处;有时增磁,增磁最大时又把曲线①向右移  $F_{adN}$  得到曲线④。负载时每极磁通在  $\Phi_{\delta N}'$  和  $\Phi_{\delta N}$  之间变动,磁路不饱和时,其平均值仍为  $\Phi_{\delta N}$ 。所以负载后每极磁通不会明显下降,基本上和空载时一样。

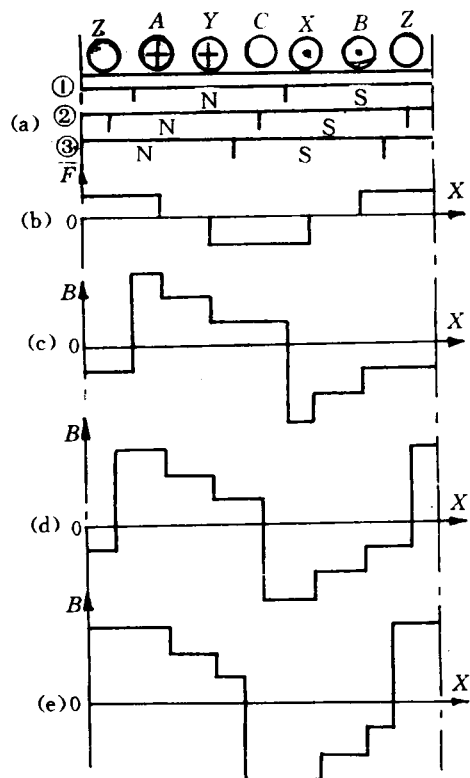


图 8 气隙磁密分布图

- (a) 磁极的位置;
- (b) 电枢反应磁势波;
- (c) 对应于图(a)①位置的合成磁密;
- (d) 对应于图(a)②位置的合成磁密;
- (e) 对应于图(a)③位置的合成磁密。

下面再从另一个角度去分析负载后每极磁通为什么基本上和空载时相同。本文所讨论的永磁无刷直流电动机任何瞬间只有两相通电,总有一相不工作。图 8 显示了电枢导体和磁极有不同的相对位置时,电动机气隙的磁密分布情况。为了简单起见,设磁极产生的

磁场为矩形波,电枢反应磁势为矩形波,磁密分布也为矩形波。设磁路不饱和,可利用叠加原理求出电机气隙磁场波形如图 8 所示。仔细观察磁密分布曲线所包围的面积,我们发现(e)图每极包围的面积最大,(d)图次之,(c)图最小。再一次证明电枢反应开始是去磁的中间位置是纯交磁的,然后是增磁的。我们同时发现(c)、(d)、(e)图通电导体所处的位置磁密始终不变,因此电机的转矩、转速、电势也不会变。根据文献(3)电磁转矩为

$$T = (PN/1.5\pi)\Phi_{\delta}I \quad (7)$$

式中  $T$ ——电磁转矩,  $N \cdot m$ ;  
 $N$ ——电机导体总数;  
 $\Phi_{\delta}$ ——每极气隙磁通,  $Wb$ ;  
 $I$ ——导体电流,  $A$ 。

电势为

$$E = (PN/45)\Phi_{\delta}n \quad (8)$$

式中  $E$ ——电枢反电势,  $V$ ;  
 $n$ ——转速,  $r/min$ 。

如果  $n$  不变,磁密不变,根据电磁感应定律,电势就不变,即  $E$  不变,由式 8 可知  $\Phi_{\delta}$  不变。电机负载后,在两相有效导体范围内的磁通和空载时是相同的(磁路不饱和),为了与实际磁通相区别,我们把空载时有效两相导体范围内的磁通称为有效磁通,虽然在一个状态角范围内每极实际磁通有减有增,由于有效导体处的磁密始终不变,因此有效磁通始终不变,磁密发生变化的地方正好是不工作导体所在的位置,对电机运行性能没有影响,从总的效果来看,相当于每极磁通不发生变化。

## 4 结束语

正确认识永磁无刷直流电动机的电枢反应对永磁无刷直流电动机的设计有着重要的

# 加强信息管理 提高电网安全经济运行水平

冯大千

唐能敏

(广西电力工业局 南宁 530023)

(广西电力工业局中调所 南宁 530023)

## 1 电网现代化的主要特点

电网的历史性演变表现在供电范围逐渐扩大、供电对象增多和电力需求,(即用电负荷)不断增长以及与此相适应的电厂由小到大、机组由少到多、单机容量逐步加大、供电电压逐步升高和操作控制自动化水平的不断提高。一般将现代电网概括为逐步具备大机组、大电厂、高电压、高度自动化等主要特点。

## 2 现代化电网对管理的要求

电网管理者的主要任务是在电网现有条件下最大限度地满足全网用户,尤其是重要用户对数量足够、质量优良、价格合理和不任意间断供应的电能的要求。为了完成这一任务,在日常工作中除了维护好发、供电各个环节的设备外,还需要努力抓好运行调度、继电保护和通信调度自动化这三个环节。

运行调度人员的职责是在既定的电网运行方式下使全网的发电设备可调出力和供电设备的输送容量能最佳地满足各供电区域的用电需要。他们的注意力要放在保持电网运行稳定状态上,随时掌握电网负荷的变化、监控频率波动范围和电网中枢纽点的电压水平,并在发、供、用电设备故障引起电网运行状况扰动时,根据故障影响范围,指挥所辖运行单位的有关值班人员进行必要的倒闸操作,及时调整运行方式,使电网达到新条件下的稳定状态。

电网是由一批发电厂、若干条输配电线路若干个变电站和高低压配电设备组成并联合在一起共同运行。每一时刻都有数以十、百或千计的值班运行人员按照统一的节奏、原则上统一的活动方式对身旁的各种设备进行观察、监测,并按照统一的时间把现场必须记录的数据和情况——也就是信息,分别向上一级值班运行人员,即本级电网值班调度员报告。或备供本单位行政领导和技术人员查阅、整理分析,使有关部门对每一时刻电网的运行状况有所了解并据此进行工作。

电网形成之初,机组不大,数量不多,一般在运行中具有相当大的旋转备用容量;另一方面,多数用户对供电可靠性要求不很高。因此,在客观上允许按每小时正点收集负荷情况,在故障或预警状态下来不及分别向有关发电厂、变电站逐个了解故障或异常现象,并依次指挥各岗位人员手动就地倒闸操作,以恢复电网在容许频率和电压水平范围内正常运行。

随着电网规模的扩大,机组数量增加、设备参数提高,特别是负荷增长,用户对供电可靠性要求越来越严格,调度对象越来越多,运行方式或稳定条件的变化也更加频繁。在这种情况下,依靠简单的通讯手段进行人工口传信息已不能满足及时掌握电网运行动态和采取调度指挥行动的基本要求,必须代之以能在越短越好的时间内传递所需要的各种准确数据、信号和指令等各种信息的手段,而使其在不同程度上扩大和加强运行调度人员