

电励磁双凸极电机与开关磁阻电机的对比研究

熊春雷,陈世元,伍连明

华南理工大学电力学院,广东广州(510640)

摘要 分析了开关磁阻电机的结构和性能特点,设计出自己的结构—米字结构,然后分析了电励磁双凸极电机和开关磁阻电机的工作性能,并将两者的差异进行了对比研究,得出自己的结论。

关键词 电励磁双凸极电机;开关磁阻电机;结构;输出转矩

中图分类号 TM352 **文献标识码** A **文章编号** 1008-7281(2009)04-0001-04

Comparative Research on Doubly-Salient Excitation Motor and SRM

Xiong Chunlei, Chen Shiyuan, and Wu Lianming

Abstract The characteristics of structure and performance of SRM is analyzed, the structure of my own is designed, and then the working performance of this two kinds of motors is analyzed. By comparative research on the difference of them, the conclusions of my own is reached.

Key words Doubly-salient excitation motor; SRM; structure; output torque

0 引言

双凸极电机的得名主要是指该类电机定转子冲片的结构形状是双凸极型。作为双凸极电机的典型代表—双凸极变磁阻电机,也叫开关磁阻电机^[1-2](SRM)。1998年南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室设计了一种以电励磁绕组为励磁源的双凸极电机^[3](DSEM),并申请了国家发明专利。DSEM在交通运输、航空航天等众多领域有广阔的应用前景,是近年来电机及其控制领域又一新的研究方向。国内的东南大学和华南理工大学在这方面的研究重点放在永磁式双凸极电机上,主要包括永磁式双凸极电机的自感互感特性、弱磁升速、电机设计、变结构等效磁路建模、无位置传感器技术、变PI参数控制等方面。南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室对永磁式、电励磁式以及混合励磁式双凸极电机的结构原理、控制规律和电机设计都做了比较详细的研究^[4,5]。电励磁双凸极电机(DSEM)的构思直接来源于开关磁阻电机(SRM),DSEM与SRM相比较前者在定子齿槽增加了励磁线圈,使得电机由变磁阻的开关磁阻电机转换为电励磁开关磁阻电机,但电机特性和运行原理却发生了根本的变化。DSEM主要继承了SRM在结构上的简单性,包括双凸极结构和集中绕组形式,继承了SRM控制上的灵活性。

综上所述,电励磁双凸极电机来源于开关磁阻电机,同时又具有自身独特的运行特性。研究和开发电励磁双凸极电机驱动系统,就必须从开关磁阻电机驱动系统分析出发,建立起双凸极电机基本理论后开发电励磁双凸极电机系统。

1 开关磁阻电机结构与工作原理

1.1 开关磁阻电机基本结构形式

SRM系统的工作原理不同于传统的电机,这得益于它的定转子双凸极齿槽结构。开关磁阻电机的结构形式是多种多样的,有普通的内转子式的,也有外转子式的,还有盘式的开关磁阻电机。外转子式10/8极四相开关磁阻电机截面图如图1所示。



图1 外转子式10/8极开关磁阻电机截面图

一般性地,双凸极电机定子和转子极数、相数的选择要遵循如下规则^[6]

$$\begin{cases} p_s = 2mk \\ p_r = p_s \pm 2k \end{cases} \quad (1)$$

式中, m —电动机相数; p_s —一定子极数; p_r —一转子极数; k —正整数。从一般规律来说,增加定转子极数

可以减小双凸极电机的转矩脉动,但是定转子极都是磁通路径,增加极数会增加损耗,导致电机发热和效率下降。因此在选取上要采用折中的方法,也是考虑减小损耗,一般取转子极数小于定子极数,且为了保证转子的动平衡,取转子极数为偶数。

同样,增加电机的相数可以减小电动机的转矩脉动,但是相数增多会大大提高控制系统的成本和复杂度,因此相数选取上要尽量少。但如果电机的相数小于三相,电机就存在转矩死区,需要有辅助启动的措施,所以相数的选择一般取三相以上。为了保证电机在任意转子位置均具有能够连续地正转或反转运行的能力,其本质上就是要求任何时候都要保证两相邻相电感曲线在上升或下降区有一定的重叠。这就要求我们合理选择双凸极电机的定转子极弧。设 θ 为一个运转周期内的转子位移角, N_r 为转子极数。所以各相之间的相位差为 $\theta_c m^{-1}$, m 为相数。如图2所示。

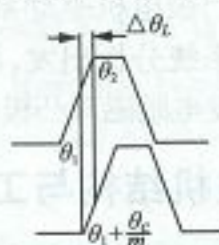


图2 相邻相永磁磁链重叠角示意图

$$\text{可得 } \theta_c = 2\pi N_r^{-1} \quad (2)$$

相邻两相电感曲线重叠角

$$\Delta\theta_L = \theta_2 - \theta_1 - \theta_c m^{-1} \quad (3)$$

设定子极弧宽为 β_s , 转子极弧为 β_r ,

$$\Delta\theta_L = \beta_s - \theta_c m^{-1} \quad (4)$$

$$\Delta\theta_L = \beta_r - \theta_c m^{-1} \quad (4)$$

为了满足重叠角不为零

$$\min(\beta_s, \beta_r) \geq 2\pi(mN_r)^{-1} \quad (5)$$

$$\beta_s + \beta_r \leq 2\pi(N_r)^{-1} \quad (5)$$

1.2 开关磁阻电机工作原理

开关磁阻电机有两个基本特征:(1)开关性—电机工作在一种连续的开关模式,电机中通电绕组在不同相之间切换,对于每相绕组来说控制信号是一个连续的脉冲信号;(2)磁阻性—随着定转子之间的相对运动,定、转子之间具有可变磁阻回路,磁通遵循磁阻最小原理形成闭合路径。图3为8/6极四相开关磁阻电机及一相的驱动电路,定子极上装有集中绕组,两个径向相对极串联

绕组为一相,图中给出A相绕组,转子上没有绕组。当A相绕组电流控制开关S1、S2闭合时,A相通电,所产生的磁通通过气隙进入转子极,再经过转子极和定子极形成闭合磁路。当转子极1-1'与定子极A-A'接近时,在磁阻转矩的作用下,转子将转动并趋向使转子极1-1'与定子极A-A'的中心线重合。当这一过程结束时,适时切换导通相并完成相似的过程,这样电机在磁阻转矩的作用下就连续地朝某个方向旋转。若以图中所示转子位置为起点,按D-A-B-C的导通顺序通电,那么电机转子就顺时针旋转。若按B-A-D-C通电,则转子逆时针旋转。

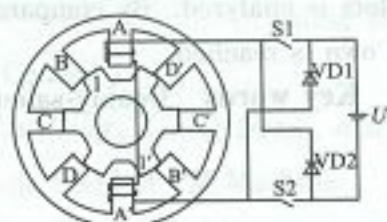


图3 开关磁阻电机一相绕组主电路

在电机处于电动运行状态下,若在定转子极中心线相离开的趋势下,依次给各相通电,则电机就会产生制动转矩。从简化的线性模型进行分析,不计电机磁路饱和的影响,假定相绕组的电感与电流的大小无关,且不考虑磁场边缘效应,相绕组电感随转子位置角 θ 周期性变化的曲线如图4所示。

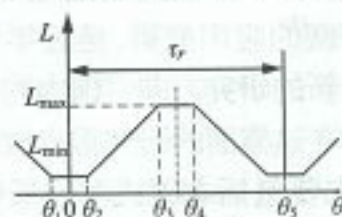


图4 开关磁阻电机绕组电感曲线

2 电励磁双凸极电机的结构设计

由于电励磁双凸极电机(DSEM)与SRM在工作原理上有很相似之处,只是在定子槽增加了励磁线圈,它继承了SRM上的结构简单,控制灵活性等特点,所以本节直接给出自己的电励磁双凸极电机结构,然后简述此电机的工作原理。电励磁双凸极电机的结构见图5。按相数分,双凸极电机有单相6/4极、12/8极;按极对数分,双凸极电机有三相6/4极、12/8极和四项8/6极等。以一台8/12极结构电励磁双凸极电机为例,此电机为外转子(槽数为8),内定子(槽数为12)。如图5所示。



图5 电励磁双凸极电机结构示意图

电励磁双凸极电机的基本结构与开关磁阻电机相似,定、转子均为凸极齿槽结构,并由硅钢片叠压而成,转子无绕组。与之不同的是,电励磁双凸极电机在定子上除了安装三相电枢绕组外,还安装了励磁绕组,各绕组均为集中绕组。相差 90° 机械角的两个电枢绕组相互串联形成一相。为了保证电流换向,采用定子极弧稍大于转子极弧。设计定子极弧为定子齿距的 $1/2$,这样可保证所有极下的转子齿和定子齿的重叠角之和恒等于一个定子极弧长度,而与转子位置无关,从而使得合成气隙磁导为一常数。电励磁双凸极电机继承了开关磁阻电机结构简单,可在高速和恶劣的条件下运行的优点。由于增加了励磁绕组使得双凸极电机相对开关磁阻电机,所以在电机磁路、运行原理和控制方法上都有较大的不同。为讨论方便,常忽略电机的磁路饱和及边缘效应的影响,也就是近似认为电感与电流无关,这种简化所得电感模型为分段线性电感模型,如图6所示。

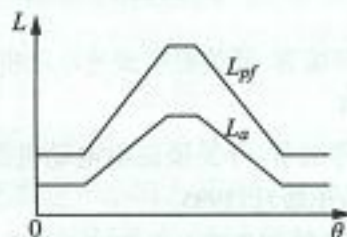


图6 分段线性电感模型

励磁电感自感为

$$L_f = N_f^2 (G_f // G_a) \quad (6)$$

由于 N_f 为匝数,合成气隙磁导 G_a 为一常数;励磁磁导 G_f 也为一常数。所以励磁电感自感 L_f 也为一常数。

3 两种电机的工作原理对比

3.1 两种电机驱动系统的对比

实际上由于SRM的双凸极结构,其磁场存在较强的边缘效应与局部饱和,电感 L 又是电流 i 的非线性函数,因而难以得到磁阻转矩的精确值。

在线性模型假设下,忽略电枢绕组电阻压降,每相绕组电压方程式近似为

$$\pm U_i = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (7)$$

此时,该相绕组功率平衡方程式近似为

$$p_e = u_i i = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} = \frac{dw_e}{dt} + T_e \omega \quad (8)$$

由于储能对时间的导数为0,所以开关磁阻电机在线性模型下一相绕组瞬时电磁转矩表达式

$$T = \frac{dp_e}{d\omega} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial^2 L}{\partial \theta^2} \quad (9)$$

可得,开关磁阻电机电磁转矩与相绕组电感变化率成正比,与绕组电流大小的平方成正比。转矩方向与电流方向无关,而取决于电感的变化斜率。对于电励磁双凸极电机而言,以A相为例,电励磁双凸极电机的输出转矩方程为

$$T_o = T_m + T_{em} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + i_a i_f \times \frac{dL_{af}}{d\theta} \quad (10)$$

式中, T_m —磁阻转矩,它产生原理与开关磁阻电机磁阻转矩的产生原理类似,是电枢绕组随转子位置角的不同而发生变化,由相绕组自感变化而产生的; T_{em} —励磁转矩,是相绕组随着转子位置角的不同而变化,电枢绕组与励磁绕组的互感发生变化而产生的。

分析励磁绕组的能量关系,当只有励磁线圈通电时,励磁绕组的电压方程为

$$U_f = i_f R_f + \frac{d\Psi_f}{dt} = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dL_f}{dt} \quad (11)$$

由式(10)可得输入功率为

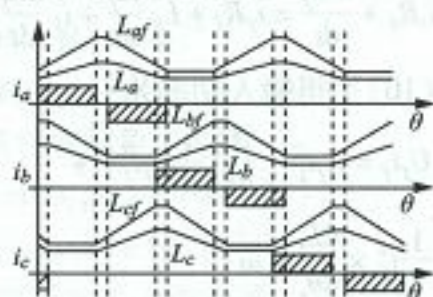
$$P_m = U_f i_f = R_f i_f^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_f i_f^2 \right) + \frac{1}{2} i_f^2 \times \frac{dL_f}{d\theta} \times \omega \quad (12)$$

式中, $R_f i_f^2$ —励磁铜损; $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_f i_f^2 \right)$ —励磁绕组储能; $\frac{1}{2} i_f^2 \times \frac{dL_f}{d\theta} \times \omega$ —机械能。由于定转子重叠角不随转子位置变化而变化,电机的合成气隙磁导不随转子位置变化而变化。由式(6)可知,励磁绕组自感 L_f 不随转子位置变化而变化,所以只加励磁电流时电能不转换为机械能,因而不产生转矩。由式(10)可知,电励磁双凸极电机的输出转

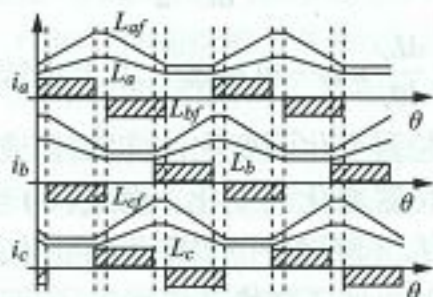
矩分磁阻转矩和励磁转矩两部分。其中磁阻转矩表达式中电流是平方项,因此其正负只与相绕组自感变化率有关,与电流的方向无关;而励磁转矩正负不仅与相绕组和励磁绕组的互感变化率有关,还和相电流的正负有关。

3.2 两种电机的工作模式

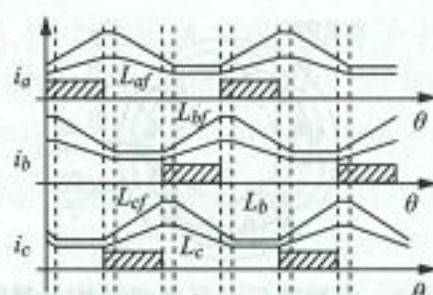
在工作模式方面,开关磁阻电机一般工作在单拍模式,如果工作在双拍模式或者半周期模式下,开关磁阻的功率密度会很低,一般不宜采用。而电励磁双凸极电机可以工作在上述的三种模式,后两种模式对于控制方面来说是更加的灵活。电励磁双凸极电机在电枢绕组和励磁绕组的互感上升区间对电枢绕组通正向电流将输出正励磁转矩;同理,在互感下降区间对电枢绕组通负向电流也输出正励磁转矩。因此电励磁双凸极电机可以工作在单拍模式、双拍模式和半周模式。单拍模式和双拍模式在电感上升区间通正电流,在电感下降区间通负电流,不同的是单拍模式各相依次轮流工作,双拍模式两相同时工作。双拍工作模式下同时工作的两相的磁阻转矩方向相反,基本相互抵消,电机转矩输出主要为两相励磁转矩的叠加,因此其输出平均转矩较单拍模式大,而转矩脉动较单拍模式小。半周模式在电感上升区间通正电流,在电感下降区间不通电。这种工作方式下,电机在电感上升区间同时输出正的励磁转矩和磁阻转矩,在电感下降区间不输出转矩。上述几种工作模式的对比图见图7。



(a) 单拍模式电枢电流示意图



(b) 双拍模式电枢电流示意图



(c) 半周模式电枢电流示意图

图7 电励磁双凸极电机工作模型比较

4 两种电机的对比研究结论

(1) 电励磁双凸极电机与开关磁阻电机在结构上相似。在转矩特性方面电励磁双凸极电机的磁阻转矩方向与电流方向无关,而取决于电感的变化斜率,这点与开关磁阻电机相似。

(2) 电励磁双凸极电机在只加励磁电流时电能不转换为机械能,不产生转矩。电励磁双凸极电机的输出转矩分磁阻转矩和励磁转矩两部分。励磁转矩正负不仅与相绕组和励磁绕组的互感变化率有关,还和相电流的正负有关。

(3) 电励磁双凸极电机的输出转矩有两部分组成,即励磁转矩和磁阻转矩。因此较开关磁阻电机而言,显著提高了功率密度。由于有励磁电流存在,所以增加了控制的灵活性。

参考文献

- [1] 刘迪吉等编著. 开关磁阻调速电动机. 北京:机械工业出版社,1994.
- [2] 王宏华等编著. 开关型磁阻电动机调速控制技术. 北京:机械工业出版社,1995.
- [3] 张乐. 电励磁双凸极电机调速系统非线性建模与控制[硕士学位论文]. 南京航空航天大学,2004.
- [4] 杨振浩,周波. 电励磁双凸极电机调速系统的原理与实现[J]. 南京航空航天大学学报. 2003,35(2):132-136.
- [5] 周波,任立立,韦海荣. 基于等效电感方法的电励磁双凸极电机系统简化控制模型[J]. 中国电机工程学报. 2005,25(14):109-114.
- [6] 吴建华. 开关磁阻电机的设计与应用. 北京:机械工业出版社,2000.6.

作者简介:熊春雷 男 1977年生;华南理工大学电力学院研究生,主要研究方向为电机的智能控制、DSP控制电机等。

收稿日期:2009-03-17