

# 逆变器供电永磁无刷直流电动机 传动系统的能量分析

贵州工学院电工系 吴浩烈

**摘要** 以典型实例研究用能量法分析逆变器供电的永磁无刷直流电动机传动系统中能量的储存、释放与传递关系,从而获得系统中主要元件的电压、电流波形系数以及恒转矩负载下转速与开关管占空比的关系。

**Abstract** Adopted a typical instance, a store of energy, release and transfer function is described in this paper in permanent magnet BLDCM drive system with offering electricity by inverter. Voltage and current wave parameters of principal components in system is obtained and in torque constant load, the transfer function of speed and thyristor pulse duration ratio is derived and analysed.

**关键词** 永磁无刷直流电动机 逆变器 开关管 占空比

## 1. 系统简介

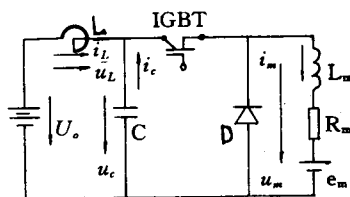
永磁无刷直流电动机传动系统主要包括电动机本体、转子位置检测器及变频电源装置三部分。电动机本体的定子与三相同步电动机定子一样,设置三相对称绕组,由位置检测器给出信号,使每相绕组在一个周波的供电周期中正向导通  $120^\circ$  时间电角度,断电  $60^\circ$ ,再反向导通  $120^\circ$ ,断电  $60^\circ$ ,任一时刻都有两相绕组通电产生定子磁场,与转子磁场相作用,产生电磁转矩,定子磁场是步进式的,每步前进  $60^\circ$  空间电角度,转子则匀速旋转,位置检测器等时间间隔发出信号,定子磁场匀速步进,形成自同步运行状态。

这种传动系统以位置检测器和变频电源装

置取代了传统直流电动机的换向器和电刷,克服了传统直流电动机的诸多缺点,却具有与传统直流电动机传动系统同样的调速特性。转子磁极采用稀土永磁,简化结构,减少能耗,提高效率。如采用交—直—交变频装置供电,可用作数控机床或其它无级调速的伺服系统。如用蓄池—逆变器供电,则可作为电动车辆理想的驱动系统。后者具有强大的生命力,是当前研究的重要课题。本文提出用能量法分析系统中能量的储存、释放与传递关系。

## 2. 系统等值电路

逆变器电源主电路由蓄电池、扼流电感  $L$ 、电容器  $C$ 、开关管 IGBT 及续流二极管  $D$  组成,其等效负载为带有反电势  $e_m$  的阻感串联电路  $R_m$ 、 $L_m$  等值电路,如图 1 所示。



$L_m$  —— 电机定子两相绕组的串联电感  $R_m$  —— 电机定子两相绕组的串联电阻  $e_m$  —— 电机定子两相绕组的串联电势 (设该电势在绕组导通时为平顶波  $e_m$  —— 平顶波幅值)  $U_0$  —— 蓄电池空载电压  $U_c$  —— 电容器电压  $U_L$  —— 扼流电感电压  $U_m$  —— 电机定子绕组线电压  $i_L$  —— 蓄电池供电电流  $i_c$  —— 电容器放电电流  $i_m$  —— 电机定子绕组线电流

图 1

## 3. 典型例题分析

设  $U_0=240\text{V}$ ,  $L=50\mu\text{H}$ ,  $C=5000\mu\text{F}$ ,  $L_m=100\mu\text{H}$ ,  $R_m=0.01\Omega$ , 电机转速  $n=3000\text{r/min}$  时电机反电势  $e_m=119\text{V}$ 。忽略蓄电池、扼流电感、电容器及开关管的内阻,分析各元件电压、

收稿日期: 1994-09-06

《机械与电子》1995 (2)

电流的波形以及能量传递规律。

设定开关管的开关频率为 10kHz, 电机绕组电流的平均值控制在 100A 左右, 并设开关管的占空比为 0.5。开关管的工作周期

$$T_2 = \frac{1}{f} = \frac{1}{10 \times 10^3} = 0.1 \times 10^{-3} \text{s}$$

式中  $f$  —— 开关管的开关频率

电机绕组的时间常数

$$T_1 = \frac{L_m}{R_m} = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{0.01} = 10 \times 10^{-3} \text{s}$$

电机定子为四极绕组, 电机转速为 3000r/min 时定子电势交变频率为 100Hz, 一个周波供电周期为

$$T_3 = \frac{1}{100} = 10 \times 10^{-3} \text{s}$$

每相绕组正向导通  $120^\circ$  时间 电角度所对应时间为  $T_4$ , 则可得

$$T_4 = \frac{T_3}{3} = \frac{10 \times 10^{-3}}{3} = 3.33 \times 10^{-3} \text{s}$$

每相绕组导通期间, 开关管需连续对该相绕组供电  $33.3$  个  $T_2$  的周期。除前面几个周期以外, 电机绕组中的电流  $i_m$  为稳定的锯齿波电流波形。开关管导通时,  $u_m = u_c \approx U_0$ ,  $U_0 > e_m$ , 蓄电池及电容器向电机供电,  $i_m$  按指数规律上升。开关管关断时, 续流二极管维持  $i_m$  的方向不变, 大小按指数规律下降。由于开关管的工作周期  $T_2$  远小于电机绕组的时间常数  $T_1$ , 所以在一个  $T_2$  周期内, 电流  $i_m$  的波形如图 2 所示。

现分析图 2 所示稳定锯齿波电流时的能量传递规律:

(1) 开关管导通的前半个周期 当电容  $C$  足够大时, 电压关系为

$$u_m = u_c = U_0$$

电流关系式

$$i_m = i_L + i_C$$

电流  $i_m$  应该满足下列方程式

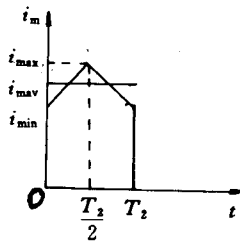


图 2

$$i_m = i_{\min} = \frac{u_m - e_m - i_{\min} R_m}{R_m} (1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$$

上式之定义域及边界条件为

$$\begin{cases} t=0 & i_m = i_{\min} \\ t = \frac{T_2}{2} & i_m = i_{\max} \end{cases}$$

将边界条件及有关数据代入上面的方程式, 可以解得下面的方程式

$$i_{\max} - 0.995 i_{\min} = 60.35 \bar{A} \quad (1)$$

(2) 开关管关断时 忽略续流管内阻时可得  $u_m = 0$ 。电流  $i_m$  应该满足下列方程式

$$i_m = i_{\max} - \frac{e_m + i_{\min} R_m}{R_m} (1 - e^{-\frac{t - \frac{T_2}{2}}{T_1}})$$

上式之定义域及边界条件为

$$\begin{cases} t = \frac{T_2}{2} & i_m = i_{\max} \\ t = T_2 & i_m = i_{\min} \end{cases}$$

将边界条件及有关数据代入可以解得

$$0.995 i_{\max} - i_{\min} = 59.35 \text{A} \quad (2)$$

联立求解方程式 (1) 和 (2), 可得

$$i_{\max} = 130 \text{A}$$

$$i_{\min} = 170 \text{A}$$

电机绕组的平均电流

$$i_{\text{mav}} = \frac{i_{\max} + i_{\min}}{2} = \frac{130 + 70}{2} = 100 \text{A}$$

电机稳定在此锯齿波电流下运行时的输出功率近似值

$$P_2 = e_m i_{\text{mav}} = 119 \times 100 \times 10^{-3} = 11.9 \text{kW}$$

(3) 开关管导通时电机在  $\frac{T_2}{2}$  时间内输入的总能量

$$W = u_m i_{\text{mav}} \frac{T_2}{2} = 240 \times 100 \times \frac{0.1 \times 10^{-3}}{2} = 1.2 \text{ J}$$

其中由于电流上升电机电感储藏能量的增量

$$\begin{aligned} \Delta W_{Lm} &= \frac{1}{2} L_m (i_{\max}^2 - i_{\min}^2) \\ &= \frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-5} (130^2 - 70^2) \\ &= 0.6 \text{ J} \end{aligned}$$

在  $\frac{T_2}{2}$  时间内电机电磁功率对应的能量

$$W_m = e_m i_{\text{mav}} \frac{T_2}{2} = 119 \times 100 \times \frac{0.1 \times 10^{-3}}{2} = 0.595 \text{ J}$$

在  $\frac{T_2}{2}$  时间内绕组铜损耗对应的能量为

$$W_{cu} \approx i_{\text{mav}}^2 R_m \frac{T_2}{2} = 100^2 \times 0.01 \times \frac{0.1 \times 10^{-3}}{2} = 0.005 \text{ J}$$

由上面的计算数据可以看出：①在开关管导通的  $\frac{T_2}{2}$  时间内  $\Delta W_{Lm} + W_m + W_{cu} = W$ ，符合能量守恒定律。②占空比为 0.5 时  $\Delta W_{Lm} = W_m + W_{cu}$ 。说明电机在开关管关断的  $\frac{T_2}{2}$  时间内，电流由  $i_{\text{max}}$  下降为  $i_{\text{min}}$ ，电机电感  $L_m$  释放的能量  $\Delta W_{Lm}$  刚好满足在此期间电机电磁功率及铜耗所需的能量。

(4) 扼流电感量足够大时  $i_L$  可视为常量 蓄电池提供的总能量为  $U_0 i_L T_2$  应等于电机在  $\frac{T_2}{2}$  时间内所吸收的总能量  $W = u_m i_{\text{mav}} \frac{T_2}{2}$ ，由于  $U_0 = u_m$ ，故可解得：

$$i_L = \frac{i_{\text{mav}}}{2} = \frac{100}{2} = 50 \text{ A}$$

开关管导通时  $i_L$  直接送到电机，此时  $i_L < i_m$ ，其差值由电容器放电电流补充，在开关管关断时  $i_L$  作为电容器的充电电流，以补偿电容器放电时损失的电量。

(5) 电容器电流的变化 开关管开始导通瞬间，即  $t=0$  时， $i_c = i_{\text{min}} - \frac{i_{\text{mav}}}{2}$ ；当  $t = \frac{T_2}{2}$  时， $i_c = i_{\text{max}} - \frac{i_{\text{mav}}}{2}$ ；开关管关断时， $i_c = -i_L$ 。  $i_L$  与  $i_c$  的波形如图 3 所示。

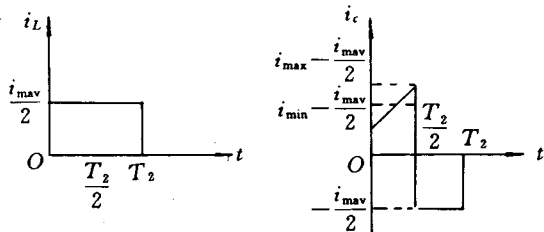


图 3

#### 4. 各主要元件电压、电流波动计算

(1) 电容器上的电压波动 通过分析计算，电压波动率为

$$\frac{\Delta u_{\text{cmax}}}{2U_0} = \frac{0.5}{2 \times 240} \times 100\% = 0.104\%$$

电容器电压波动将主要影响电机运转的稳定性以及产生电容器高频附加损耗。

(2) 扼流电感上的电压波动 分析计算表明，电流波动率为

$$\frac{\Delta i_L}{2i_L} = \frac{0.25}{2 \times 50} \times 100\% = 0.25\%$$

扼流电感中电流的波动将主要影响蓄电池供电电压的平稳性以及脉动放电电流时蓄电池的寿命问题。

#### 5. 转速与开关管占空比 $\alpha$ 的关系

通过计算分析表明，开关管占空比  $\alpha$  变化时，可将本系统近似看成是一个  $U = \alpha U_0$  的等效传统直流电动机的调压调速系统，所以具有与传统直流调压调速系统同样优良的调速性能。

#### 6. 结论

将一个开关频率周期  $T_2$  分成  $\alpha T_2$  与  $(1-\alpha) T_2$  两个时间段，用能量法分析各元件在这两段时间内能量的储存、释放与传递，可以获得相关的电压、电流波形参数以及恒转矩负载下转速与开关管占空比  $\alpha$  之间的正比关系，这对于系统中电动机本体的设计、电感和电容器参数的选择，IGBT 控制电路的设计等都有重要意义，是研究该系统设计计算方法的一个组成部分。

#### 参考文献

- 1 黄俊. 半导体变流技术. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- 2 何冠英. 电子逆变器技术及交流电动机调速系统. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- 3 刘宗富等. 现代电力电子器件及交流传动. 中国自动化学会电气自动化专委会, 1990.
- 4 马玉林. 今日无刷调速电机系统的设计与应用. 中国交流电机调速传动学术会议文集 (第一届), 1989.