

电动汽车用永磁同步电动机 功率特性及弱磁扩速能力研究(一)

——恒转矩控制及弱磁控制时的功率特性

徐衍亮

(250061 山东省济南市 山东大学电气工程学院)
(100083 北京市 北京航空航天大学宇航学院)

摘 要 采用 d 、 q 坐标系下的相量分析方法,研究永磁同步电动机(PMSM)、特别是电动汽车用 PMSM. 详细分析了不同弱磁率、不同凸极率对电机电压、电流相量变化轨迹的影响,及由此引起的电机的功率特性及弱磁扩速能力的差异. 推导出以弱磁率和凸极率为变量的 PMSM 的弱磁扩速倍数表达式,由此得出提高 PMSM 弱磁扩速能力的根本途径,比较了不同磁路结构 PMSM 弱磁扩速能力的大小.

关键词 功率特性;弱磁;相量分析/电动汽车;永磁同步电动机

中图分类号 TM41 **文献标识码**:A

文章编号:1000-5323(2002)05-0401-05

STUDY ON POWER CAPABILITY AND FLUX-WEAKENING LEVEL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR IN ELECTRIC VEHICLE APPLICATION ()

—POWER CAPABILITY WHEN CONSTANT TORQUE AND FLUX-WEAKENING CONTROL

XU Yan-liang

(School of Elect. Eng., Shandong Univ., Jianan City, Shandong Province 250061, China)
(Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing City 100083, China)

ABSTRACT The phasor method is adopted for the first time to analyze the influence of the demagnetizing coefficient, saliency ratio on the loci of voltage and current and then on the power capability and flux-weakening level of permanent magnet synchronous motor (PMSM) especially in electric vehicle (EV) application. The description of the PMSM's flux-weakening adjusting speed capability is worked out and expressed with the demagnetizing coefficient and saliency ratio, by which the radical methods to enhance the PMSM's flux-weakening capability are concluded, and the flux-weakening capability of PMSM with different magnet structures is compared.

KEY WORDS Power capability; Flux-weakening; Phasor analysis/ Electric vehicle (EV); Permanent magnet synchronous motor (PMSM)

0 引言

永磁同步电动机具有尽可能宽广的弱磁调速范围对电动汽车驱动有特别重要的意义,能够在电机最大功率(即逆变器容量)不变的条件下提高电动汽车的起动加速能力^[1]及低速爬坡能力,或者说在保持电动汽车起动加速及低速爬坡能力不变的前提下降低电机的最大功率,从而降低逆变器的容量.因此对电动汽车驱动用 PMSM 功率特性(功率转速特性)及弱磁扩速能力的分析具有更为重要的意义.

目前,分散地选取几组电机参数(永磁磁链和交直流轴电感)进行功率特性曲线比较是永磁同步电动机功率特性分析的通用方法^[2~7].然而这一方法不但分析结论缺乏普遍性,而且无法对电机参数变化引起的功率特性曲线的差异原因进行研究和探讨.实际上,永磁同步电动机的不同参数产生电机不同的功率特性,原因在于不同电机参数引起电机电压电流相量不同的变化轨迹.因此本文采用永磁同步电动机 d 、 q 坐标系下的相量分析方法,以弱磁率和凸极率为电机参数,从电机调速过程中电压电流相量的变化轨迹出发,考虑到电动汽车用电机运行的实际,研究永磁同步电动机的功率特性,对电机的凸极率和弱磁率变化所引起的电机功率特性差异进行综合分析.

本论文由两部分组成,第一部分采用永磁同步电动机 d 、 q 坐标系下的相量分析方法,以凸极率和弱磁率为电机参数,分析了永磁同步电动机恒转矩控制及普通弱磁控制时的电压电流相量的变化轨迹及功率特性的变化规律;第二部分在第一部分的基础上分析了最大输入功率弱磁控制的电压电流相量的变化轨迹及功率特性,提出最大输入功率弱磁控制的等效电流控制策略,推导出以弱磁率和凸极率为变量的 PMSM 的弱磁扩速倍数的数学表达式,提出提高 PMSM 弱磁扩速能力的根本措施,分析了损耗、饱和等因素对 PMSM 功率特性及弱磁扩速倍数的影响.

1 电动汽车驱动用永磁同步电动机电流控制策略及其相量分析方法

电动汽车驱动用永磁同步电动机与一般驱动用永磁同步电动机的区别在于,前者需更大的短时和瞬时大电流,使其不但拥有恒转矩控制和普通弱磁控制,还具备最大输入功率弱磁控制的条件.

1.1 永磁同步电动机电流控制策略

由于永磁同步电动机的功率特性及弱磁扩速能力不但决定于电机本身的参数,还与逆变器容量及直流母线电压大小有关,因此以下分析是以电机的凸极率 和弱磁率 为参数,分别定义为:

$$= \frac{L_q}{L_d} \quad (1)$$

$$= \frac{L_d i_s}{f} \quad (2)$$

其中: L_d 、 L_q —— 直交轴电感

f —— d 、 q 坐标系下永磁磁链

电动汽车用永磁同步电动机的电流控制策略有三种即^[2~4]:

- 1) 恒转矩控制: $i_s = i_{lim}, u \leq u_{lim}$;
- 2) 普通弱磁控制: $i_s = i_{lim}, u = u_{lim}$;
- 3) 最大输入功率弱磁控制: $i_s \leq i_{lim}, u = u_{lim}$;

其中: i_s 、 u_s 分别为 d 、 q 坐标系下电机电流和电压, i_{lim} 、 u_{lim} 分别为 d 、 q 坐标系下电机的极限电流和极限电压.

对这三种电流控制策略,其中恒转矩控制和普通弱磁控制是必须存在的,最大输入功率弱磁控制只有在 > 1 时才有可能存在.电流控制策略的详细内容请见有关文献.

1.2 调速永磁同步电动机功率特性相量分析方法

图 1 为调速永磁同步电动机 d 、 q 坐标系下的相量图,其中角 、 分别为电压电流相量与 q 轴的夹角, 为功率因数角,在不计各种损耗的假定下,电机的功率可表示为:

$$P_{em} = u_s i_s \cos \quad (3)$$

为使分析更具普遍性,永磁同步电动机功率特

性的分析以标么值形式进行,功率及电角速度的基值 P_c 、 ω_c 分别定义为:

$$P_c = P_{emN} = u_{lim} i_{limN}$$

(4)

$$\omega_c = \frac{u_{lim}}{f}$$

(5)

其中, $i_{limN} = \omega_c / L_d$
可以看出,基值功率是弱磁率为 1 时电机的最大功率,基值电角速度为电机理想空载时的转折电角速度.

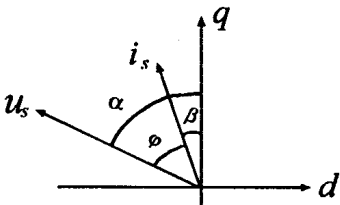


图 1 永磁同步电动机电压电流相量
Fig. 1 Phasors of voltage and current of PMSM

2 永磁同步电动机恒转矩控制和普通弱磁控制时的功率特性

2.1 电压电流相量变化轨迹

根据前述电流控制策略,永磁同步电动机在恒转矩控制及普通弱磁控制下,电压、电流相量角 α 、 β 满足下式:

$$\alpha = \begin{cases} \tan^{-1} [\cos \beta / (1/\xi - \sin \beta)] & \xi < 1/\sin \beta \\ 180^\circ - \tan^{-1} [\cos \beta / (\sin \beta - 1/\xi)] & \xi > 1/\sin \beta \\ 90^\circ & \xi = 1/\sin \beta \end{cases}$$

(6)

因此,永磁同步电动机在整个恒转矩控制区和普通弱磁控制区具有如图 2 所示的电压、电流相量变化

轨迹,可以看出:

1) 在恒转矩控制区,电流相量保持为 OA_i 不变,其相角 β_1 可表示为下式:

$$\beta_1 = \begin{cases} 0^\circ & \xi = 1 \\ \sin^{-1} \frac{1/\xi + \sqrt{(1/\xi)^2 + 8(1/\xi - 1)^2}}{4(1/\xi - 1)} & \xi > 1 \end{cases}$$

(7)

电压相量相角为 α_1 ,幅值由 0 增加到其极限电压 u_{lim} .

2) 在普通弱磁控制区,电流相量由 OA_i 变化到 OB_i ,即幅值不变,相位由 β_1 到 90° ;电压相量幅值不变,但相位由 α_1 开始根据弱磁率的不同而具有不同的变化规律.

$\xi = 1$ 时,随电流相量由 OA_i 变化到 OB_i ,电压相量由 OA_u 变化到 OB_u ,即随电流相位由 β_1 到 90° ,电压相位也由 α_1 到 90° ,如图 2a 所示.

$\xi < 1$ 时,在整个弱磁区,电压相量相角先由 α_1 增大到某一最大值 α_z ,然后再减少到 0,变化轨迹如图 2b 所示,即电压相量由 OA_u 变化到 OB_u ,然后反变化到 OC_u . 而且电压相角为 α_z (即电压相量转折)时的电流相角 β_z 只与弱磁率 ξ 有关,而与凸极率无关, β_z 满足下式:

$$\sin \beta_z = \xi$$

(8)

$\xi > 1$ 时,在整个弱磁过程,电压相角由 α_1 一直增大到 180° ,如图 2c 所示. 而且 β_z 达 90° 时的电流相角 β_p 也与 ξ 无关 (由于 β_1 可能大于 90° ,此时该点为假想点),且满足下式

$$\sin \beta_p = \frac{1}{\xi}$$

(9)

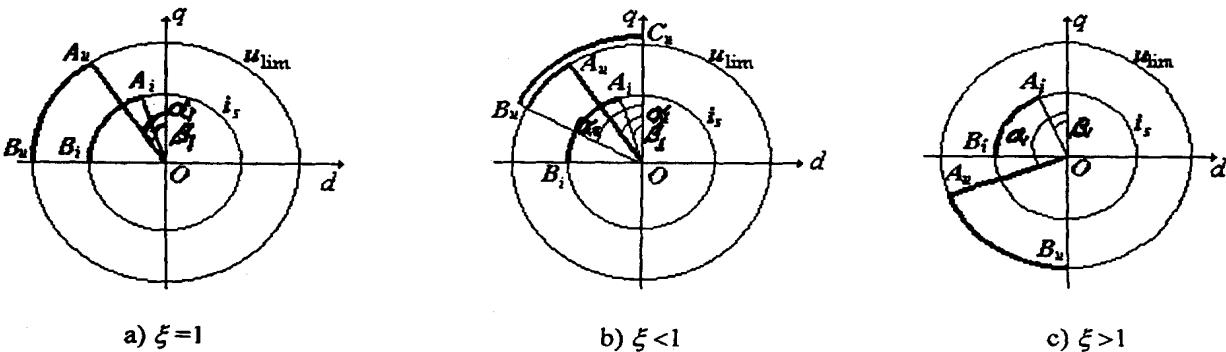


图 2 恒转矩控制及普通弱磁控制时电压电流相量变化轨迹

Fig. 2 Loci of voltage and current phasors of PMSM with constant torque control and ordinary flux-weakening control

2.2 功率与电角速度之间的关系

在普通弱磁控制下,电机电角速度与电流相量角之间的关系为:

$$\frac{P_{em}}{P_{emN}} = \frac{u_{lim}}{\sqrt{(L_q i_q)^2 + (\omega_f + L_d i_d)^2}} = \frac{u_{lim}}{\sqrt{(L_q i_s \cos \alpha)^2 + (\omega_f - L_d i_s \sin \alpha)^2}} \tag{10}$$

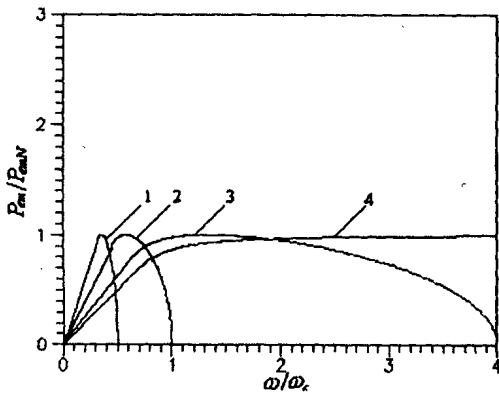
以标么值形式表示式(10)为:

$$\frac{P_{em}}{P_{emN}} = \frac{1}{\sqrt{(\cos \alpha)^2 + (1 - \sin \alpha)^2}} \tag{11}$$

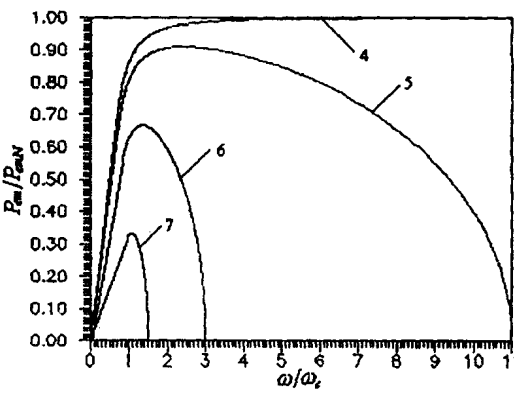
此时功率标么值为:

$$P_{em}^* = P_{em} / P_{emN} = \cos \alpha \tag{12}$$

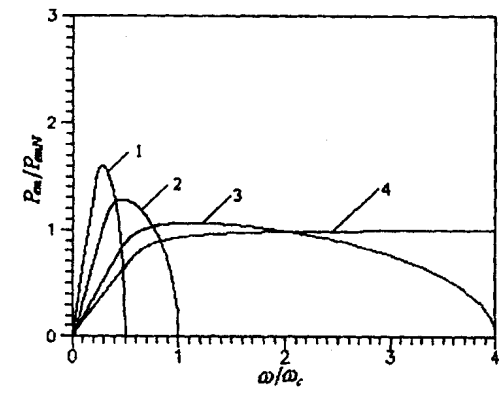
计及恒转矩运行时功率的变化特征,可得 $P_{em} / P_{emN} = f(\alpha)$ 的变化曲线如图 3 所示.



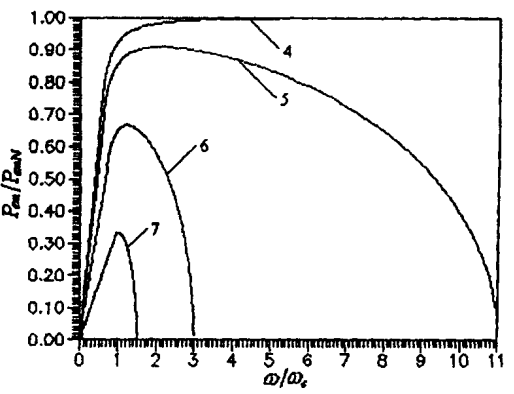
a) $\rho=1$



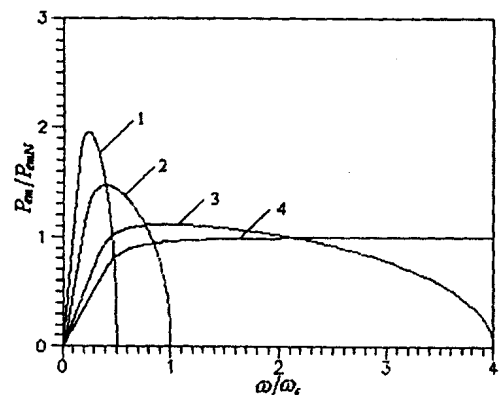
a°) $\rho=1$



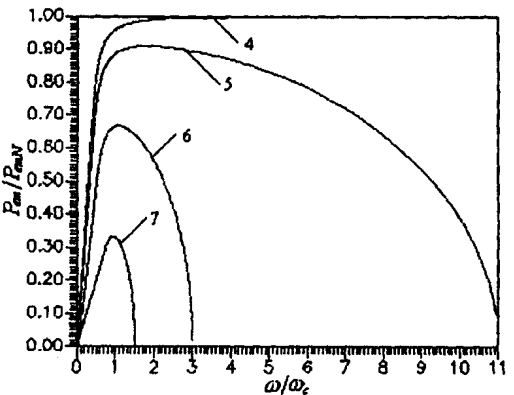
b) $\rho=2$



b°) $\rho=2$



c) $\rho=3$



c°) $\rho=3$

1 — = 3 2 — = 2 3 — = 1.25 4 — = 1 5 — = 0.909 6 — = 0.667 7 — = 0.333

图 3 电磁功率与电角速度之间的关系

Fig. 3 Characteristics of power versus electric angle velocity

并且可以推得最高转速 n_{\max}^* 、最高转速时的功率 $P_{em}^*(\omega = \omega_{\max})$ 和最大功率 $P_{em\max}^*$ 分别为:

$$n_{\max}^* = \begin{cases} \frac{1}{|1 - \lambda|} & \lambda < 1 \\ 1 & \lambda = 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{em}^*(\omega = \omega_{\max}) = \begin{cases} 0 & \lambda < 1 \\ 1 & \lambda = 1 \end{cases} \quad (14)$$

$$P_{em\max}^* = \begin{cases} \leq 1 & \lambda \leq 1 \\ > 1 & \lambda > 1 \end{cases} \quad (15)$$

1) $\lambda \leq 1$ 时,电机的最高转速、最高转速时的功率及最大功率仅决定于 λ ,与 λ 无关。因此,相同 λ 下,电机功率特性曲线基本相同^[5]。凸极率仅对产生最大功率时的转速值有影响, λ 增大时该转速值降低,有利于提高电机的低速特性。但当 λ 较小时(即永磁磁链比直轴磁链大很多), λ 对功率特性曲线影响很弱,这是由于磁阻功率比永磁功率更强地决定于电机电流的大小^[4]。所以在 λ 较小时,有无凸极性对电机的功率特性影响可忽略不计。

同时可以看出,增大弱磁率 λ ,不但线性增加了最大功率,而且增加了电机的最高转速,在 $\lambda = 1$ 时具有理想的最高转速。因此拥有尽可能大的凸极率和弱磁率,且采用最大转矩电流控制同普通弱磁控制相结合的电流控制策略的永磁同步电动机,具有良好的功率特性。

2) $\lambda > 1$ 时,首先,最高转速随 λ 的增大而降低,且电机在相同 λ 下的功率特性受凸极率影响。其次最大功率与通入电流不再是线性关系,增加电机电流(即增加 i_q)并不能线性地增加电机的最大功率,功率的增加程度决定于 λ 的大小。

$\lambda = 1$ 时功率表示为:

$$P_{em} = \omega i_q = \frac{u_{\lim} \omega / L}{\sqrt{1 + ((1/\lambda - \sin \alpha) / \cos \alpha)^2}} \quad (16)$$

可以看出在 $\sin \alpha = 1/\lambda$ 时获得最大电磁功率,表示为:

$$P_{em\max} = u_{\lim} \omega / L = u_{\lim} i_{sN} = P_{emN} \quad (17)$$

此时增加电流,最大功率不变。

所以在 $\lambda > 1$ 时,增大电流不但使调速范围变小,而且得不到与电流相应大小的最大功率。因此

当 $\lambda > 1$ 时不宜采用普通弱磁控制。但在 $\lambda > 1$ 时,增大 λ ,不但最大功率增加(尽管不是线性增加),而且发生最大功率时的转速降低,因此有利于提高电机的低速转矩。

参 考 文 献

- [1] Mehrdad Ehsani, Khwaja M, Hamid A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles [J]. IEEE Trans. Ind. Electronics, 1997, 44(1): 19 ~ 27.
- [2] Morimoto S, Takeda Y, Hirasaka T, Taniguchi K. Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity [J]. IEEE Trans. on Ind. Application, 1990, 26(5): 886 ~ 871.
- [3] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- [4] 郭振宏. 宽恒功率调速范围主轴永磁同步电动机及其传动系统的研究 [D]. [博士学位论文], 沈阳:沈阳工业大学, 1999.
- [5] Morimoto S, Sanada M, Takeda Y. Inverter-driven synchronous motor for constant power [J]. IEEE Trans. Ind. Magazine, 1996, 19 ~ 24.
- [6] Schiferl R F, Lipo T A. Power capability of salient pole permanent magnet synchronous motor in variable speed drive applications [J]. IEEE Trans. Ind. Application, 1990, 26(1): 115 ~ 123.
- [7] Chalmers B J, Musaba L, Gosden D F. Variable-frequency synchronous motor drives for electric vehicles [J]. IEEE Trans. Ind. Application, 1996, 32(4): 898 ~ 903.



徐衍亮 博士

作者简介:徐衍亮,男,1966年12月生,博士,副教授。1989年、1994年、2001年分别在山东工业大学、沈阳工业大学获得工学学士、工学硕士、工学博士学位,现在北京航空航天大学博士后流动站工作,主要研究方向:特种电机及其控制。