

变速永磁同步发电系统功率分析

冯海波，胡继胜

(大连交通大学 电气信息工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 针对内燃机车永磁同步发电系统电机运行效率和功率因数较低的问题, 应用最大转矩电流比(MTPA)控制策略来控制牵引变流器, 并分析电压极限椭圆限制下的MTPA控制, 与单位功率因数控制和 $i_d=0$ 控制策略下的功角、功率因数和效率进行对比。仿真对比分析表明: $i_d=0$ 控制调速范围较窄, 单位功率因数控制高转速下运行不稳定, MTPA控制可以在全速范围内稳定运行, 并且提高了永磁同步发电机的功率因数和效率, 增加了系统的稳定性。

关键词: 永磁同步发电机; 弱磁控制; 最大转矩电流比; 单位功率因数

中图分类号: TM 313 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0064-07

doi: 10.12177/emca.2020.006

Power Analysis of Variable Speed Permanent Magnet Synchronous Power Generation System

FENG Haibo, HU Jisheng

(School of Electronics and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and low power factor of the motor in the permanent magnet synchronous power generation system of diesel locomotive, the maximum torque per ampere (MTPA) control strategy is adopted to control the traction converter, and the MTPA control under the limitation of voltage limit ellipse is analyzed. The power angle, power factor and efficiency are compared under the unity power factor control and $i_d=0$ control strategies. The simulation and comparison analysis shows that the speed regulation range of the $i_d=0$ control is very narrow, the unity power factor control is unstable at high speeds, while the MTPA control can run stably in the full speed range. Furthermore, the power factor and efficiency of the permanent magnet synchronous generator are improved with MTPA control, and the stability of the system is improved.

Key words: permanent magnet synchronous generator (PMSG); field weakening control; maximum torque per ampere (MTPA); unity power factor

0 引言

永磁同步发电机(PMSG)具有体积小、质量轻、功率密度高、效率高等特点。内燃机车牵引发电系统采用PMSG可以节约空间, 由永磁体提供气隙磁场可以省去励磁控制系统, 使控制系统更简单。PMSG在轨道交通领域处于起步阶段, 具有一定的研究意义^[1]。

传统永磁同步发电系统大多采用不可控整流

系统, 功率因数不可控, 增大谐波电流, 使得电机产生损耗加大、转矩脉动、电压无法调节等问题^[4]。文献[3]采用脉宽调制(PWM)控制的永磁同步发电系统, 控制发电机 $i_d=0$, 满载时发电机将吸收大量无功, 使功率因数降低, 从而增加变流器的容量。文献[4]在风力发电系统中采用单位功率因数控制策略, 但并未研究该控制策略的适用范围。文献[5]研究了中间直流环节稳压控制策略, 但并未分析PMSG功率与稳定运行范围。

收稿日期: 2020-01-06; 收到修改稿日期: 2020-02-28

作者简介: 冯海波(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道车辆运行控制及自动化。

本文主要研究内燃机车永磁同步牵发电系统,以中间直流环节电压稳定为目标,应用最大转矩电流比(MTPA)控制策略,与*i_d*=0控制、单位功率因数控制进行了仿真对比计算,分析了PMSG的功率因数、稳定性以及运行范围,验证了所提控制策略的有效性。

1 PMSG 功角特性分析

PMSG 功角是电机空载反电动势 E_0 与端电压 U 之间的相角差,对电机的稳定运行和功率分析具有重要意义。内置式 PMSG 由于磁路不对称,存在凸极电磁功率,则 PMSG 电磁功率可表示为

$$P_{\text{em}} = m \frac{UE_0}{X_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin 2\delta \quad (1)$$

式中: P_{em} 为电磁功率; m 为电机相数; U 为相电压; E_0 为反电动势; X_d 为 d 轴同步电抗; δ 为功角; X_q 为 q 轴同步电抗。

图 1 所示为内置式 PMSG 功角特性关系。电机功率由磁阻功率和电磁功率组成,由于磁阻功率的影响,最大电磁功率出现在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间, δ_m 为最大功率 P_{max} 下的角度。图 2 所示为不同转速条件下的功角特性。当电机转速超过基速以后,随着电机转速的升高,凸极功率影响变小,电机功率下降。

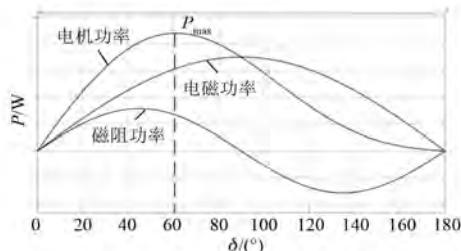


图 1 内置式 PMSG 功角特性关系

内燃机车永磁发电系统由柴油机提供原动

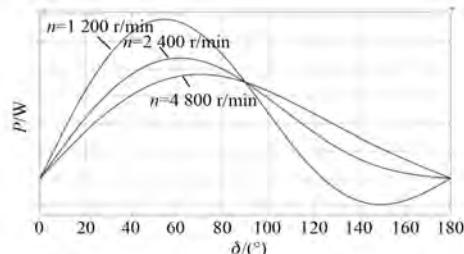


图 2 不同转速下的功角特性

力,向发电机输入机械功率,可以通过提高柴油机转速来增大柴油机的输入功率,当输入功率大于当前转速最大功率时,发电机将无法提供系统所需功率,在设计永磁同步发电系统时柴油机功率和转速应与 PMSG 相匹配并且满足系统设计要求。

2 PMSG 功率分析

为了更直观地分析三相 PMSG 电压和功率方程,引入简化后的三相永磁同步电机(PMSM)的电压等效电路图,如图 3 所示。

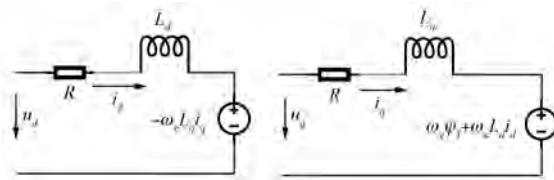


图 3 三相 PMSM 的电压等效电路

定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (\Psi_f + L_d i_d) \end{cases} \quad (2)$$

在同步旋转坐标系下,经过相电压幅值相同的矢量变换,PMSM 输出功率为

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_q i_d - u_d i_q) \end{cases} \quad (3)$$

忽略定子电阻时,代入电机方程,式(3)可简化为

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2}\omega_e [\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ Q_s = \frac{3}{2}\omega_e (L_d i_d^2 + \Psi_f i_d + L_q i_q^2) \end{cases} \quad (4)$$

转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2}pi_q [i_d(L_d - L_q) + \Psi_f] \quad (5)$$

由式(4)有功功率方程和式(5)电机转矩方程可以看出:

$$P_s = \omega_e \frac{T_e}{p} = T_e \omega_r \quad (6)$$

式中: u_q 、 u_d 为定子电压的d、q轴分量; i_d 、 i_q 为定子电流的d、q轴分量; ω_e 为电角速度; Ψ_f 为永磁体磁链; P_s 定子输出端有功功率; Q_s 定子输出端无功功率; T_e 为电磁转矩; p 极对数; ω_r 为机械角速度。

由式(6)可知,要想控制永磁同步发电系统的功率输出,就要对发电机的输出转矩和电机的机械角速度进行控制,系统正常工作下,电气参数变化远小于机械参数变化,又因为永磁同步发电系统是一个大惯性系统,所以在短时间内,电机机械角速度不变,要想改变发电机输出功率,可以通过调节电机的输出转矩,来调整永磁同步发电系统功率输出。

本文研究的永磁同步发电系统主要应用于内燃机车牵引发电系统,以维持中间直流环节电压稳定为目标,需要平衡发电机输出功率与负载消耗功率。本文PMSG采用矢量控制,以中间直流环节电压的稳定为目标,使用电压外环,采用PI调节得到输出力矩,从而实现系统功率平衡。为了提高系统稳定性,在矢量控制系统中加入电流内环。

3 PMSG 控制策略

PMSG应用矢量控制,通过电压外环的PI调节得到输出力矩,在已知输出力矩的前提下,通过控制旋转坐标系下 i_q 、 i_d 电流满足发电系统的输出力矩要求。常用的电流控制策略有: $i_d=0$ 控制、单位功率因数控制、MTPA控制等。为了分析3种控制策略的不同点引入发电机稳态向量图,如图4所示。

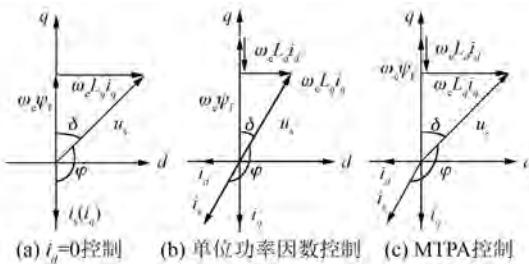


图4 发电机稳态向量图

图4中, i_s 为定子电流; u_s 为定子电压; φ 为定子功率因数角。

由图4可知,采用不同控制策略,控制d、q轴电流 i_q 、 i_d 的大小可以改变发电机功角与发电机功

率因数的大小。根据d、q轴电压电流超前、滞后关系可以求出发电机输出无功功率是感性还是容性。

电机容性无功功率(电流超前电压)方程为

$$Q_c = \frac{3}{2} u_q i_d = \frac{3}{2} \omega_e (\Psi_f + L_d i_d) i_d \quad (7)$$

电机感性无功功率(电压超前电流)方程为

$$Q_L = \frac{3}{2} u_d i_q = \frac{3}{2} \omega_e L_q i_q^2 \quad (8)$$

3.1 $i_d=0$ 控制

$i_d=0$ 控制,控制简单,定子电流中只含q轴分量,不会产生去磁效应,因此不会出现去磁导致电机性能变差的问题,受电机电感参数影响小。 $i_d=0$ 控制下d、q轴电流给定原理图如图5所示。由于控制简单可以通过电压外环经过PI调节直接得到电流内环的控制电流大小。

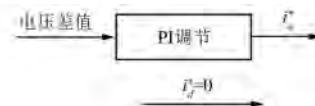


图5 $i_d=0$ 控制下d、q轴电流给定原理图

由于采用转子磁场定向的矢量控制,由图4(a)可知,发电机的空载感应电动势与电流同相位,从定子输出端看,电压与电流存在一定相位差,因此牵引变流器会有一定的无功损耗。在保证系统有功功率的前提下,牵引变流器的视在功率就会增加,牵引变流器容量就要提高。

电机输出端 Q_s 为

$$Q_s = Q_c - Q_L \quad (9)$$

$i_d=0$ 控制时, $Q_c=0$, $Q_s=-Q_L$,变流器流过感性无功。

3.2 单位功率因数控制

为了降低牵引变流器的功率等级,提高利用率,可以通过控制d轴电流的大小,改变定子电流方向,使得发电机定子端电压电流相位相同,如图4(b),使得 $Q_s=0$,发电机输出端功率因数 $\cos\varphi=1$ 。

由式(4)可知, $Q_s=0$ 是一个过原点和M点的椭圆,单位功率因数椭圆只与电机的参数有关,电机稳态工作点在单位功率因数椭圆上时,电机输出端 $Q_s=0$,在已知发电机输出转矩时,可以画出发电机在旋转坐标系下力矩曲线,力矩曲线与单

位功率因数椭圆的交点为电机的稳态工作点。旋转坐标系下电压极限椭圆与电流极限圆限制曲线的电流轨迹相平面图如图 6 所示。

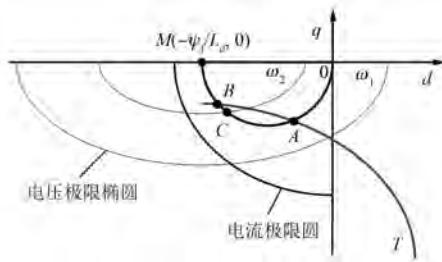


图 6 电流轨迹相平面图

在电机转速为 ω_1 时, 正常工况下电机稳态工作点为 A 点, 解方程组式(10)可以求出电机的工作电流:

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \Psi_f] \\ Q_s = \frac{3}{2} \omega_e (L_d i_d^2 + \Psi_f i_d + L_q i_q^2) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

当电机工作在高转速 ω_2 时, 电机输出力矩为 T 时, 受电压极限椭圆的影响, 而稳态工作点应在电压极限椭圆和电流极限圆内工作, 因此电机的稳态工作点应为 B 点。图 7 所示为经过电压外环得到电机输出力矩之后, 解方程组得到 d, q 轴的控制电流的示意图。

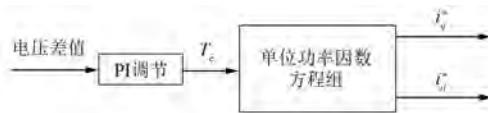


图 7 单位功率因数控制下 d, q 轴电流给定原理图

3.3 MTPA 控制

由于受到电压极限圆的影响, $i_d = 0$ 控制策略只能在低转速范围运行, 并且随着电机功率提高, 由式(8)可知, 电机的感性无功增加, 使得电机功率因数低。由图 6 可知, 电机的单位功率因数椭圆在电流极限圆内, 单位功率因数控制下电机的最大输出力矩为单位功率因数椭圆与力矩曲线的切点, 没有能够实现发电机的最大功率输出, 同时单位功率因数控制去磁电流大, 导致电机性能差。

为了提高 PMSG 的输出功率, 并在全速范围内运行, 将 MTPA 应用于 PMSG 控制中, MTPA 曲

线是描述转矩与最小电流之间的关系。图 8 所示为 MTPA 控制下 d, q 轴电流给定原理图。在已知电机输出力矩时, 求出 d, q 轴的给定电流的示意图。

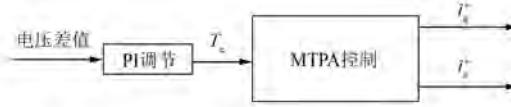


图 8 MTPA 控制下 d, q 轴电流给定原理图

4 MTPA 控制实现过程

4.1 MTPA 控制原理

MTPA 控制时 d, q 轴电流关系式为

$$i_d = \frac{-\Psi_f + \sqrt{\Psi_f^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2}}{2(L_d - L_q)} \quad (11)$$

$$i_b = \frac{\Psi_f}{L_q - L_d} \quad (12)$$

将式(11)变形为

$$\left(i_d - \frac{i_b}{2}\right)^2 - i_q^2 = \left(\frac{i_b}{2}\right)^2 \quad (13)$$

可以看出, 在 i_d, i_q 相平面上 MPTA 曲线为一条过原点的双曲线。

为了简化计算, 对电机模型进行标幺化计算, 记转矩基值为 $T_b = 1.5p\Psi_f i_b$, 电流基值为 i_b , 可得电磁转矩的方程为

$$T_e^* = \sqrt{i_d^* (i_d^* - 1)^3} \quad (14)$$

可以找出 d, q 轴电流与电磁转矩的关系式:

$$i_d^* = f_1(T_e^*) \quad (15)$$

$$i_q^* = f_2(T_e^*) \quad (16)$$

将电压外环经过 PI 调节转化为电机力矩, 实现在给定转速一定, 满足系统功率需要时, 电机电流幅值最小, 线路损耗最低。

4.2 电压极限椭圆限制下的 MTPA 控制

随着发电机输入转速升高电机的稳态工作点受电压极限椭圆限制, 随着发电机定子电压 u_s 增大, 要保证牵引变流器正常工作, 就要满足中间直流环节电压 $U_{dc} \geq \sqrt{3} u_s$, 通过增大去磁电流来减小定子电压 u_s , 保证中间直流环节电压与牵引变流器正常工作。

定子电压方程(电压极限椭圆方程)为

$$u_s = \sqrt{(-\omega_e L_q i_q)^2 + (\omega_e \Psi_f + \omega_e L_d i_d)^2} \quad (17)$$

图 9 所示为 MTPA 控制下电压和电流极限圆限制曲线。随着功率提高发电机转速增大, 电压极限椭圆不断缩小, 假设电机需要力矩为 T_2 时, 在 MTPA 曲线上, 电机工作点为 B 点, 当电机的电角速度提高到 ω_2 时, 电机将不能稳定工作, 需要在电压极限椭圆内寻找满足力矩曲线的稳态工作点, 是因为原点到力矩曲线最小值点为 MTPA 曲线, MTPA 曲线左侧力矩曲线上到圆点 O 的距离(即定子电流幅值)为单调函数, 在电压极限椭圆限制下新的最小电流工作点应为力矩曲线上最靠近 MTPA 曲线的 C 点, 同时也是相同条件下去磁电流最小值点。

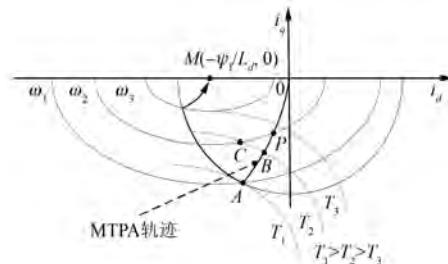


图 9 MTPA 控制下电压和电流极限圆限制曲线

最小电流工作点 C 点可以由定子电压方程式(17)与转矩方程组求出。

力矩-电压方程组为

$$\begin{cases} u_s^2 = (-\omega_e L_q i_q)^2 + (\omega_e \Psi_f + \omega_e L_d i_d)^2 \\ T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \Psi_f] \end{cases} \quad (18)$$

求解力矩-电压方程组可以得到唯一符合的定子电流工作点, 从而使电机电流幅值最小。

5 仿真对比分析

在 MATLAB/Simulink 中建立永磁同步发电系统, 为了保证中间直流环节电压, 使用电压外环和电流内环控制, 对比 3 种控制策略下的功率, 进行仿真分析。仿真系统用 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数

参数名称	参数值
负载功率 P/kW	480
直流环节电压 U/V	750
极对数 p	4
定子电阻 R_s/Ω	0.001 3
磁链 Ψ_f/Wb	0.259
d 轴电感 L_d/mH	0.12
q 轴电感 L_q/mH	0.26

图 10 所示为在 MATLAB/Simulink 中建立的永磁同步发电系统矢量控制原理图以及电压外环的 PI 调节和电流轨迹分配示意图。

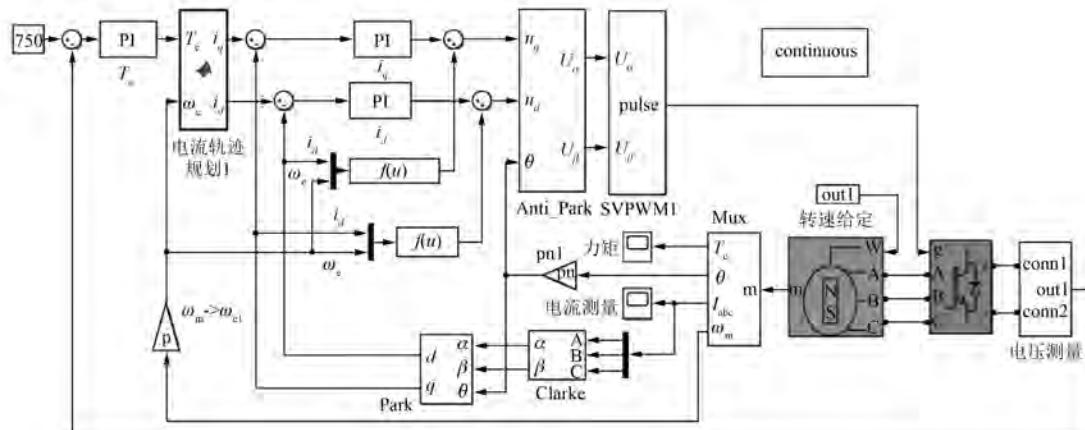


图 10 矢量控制系统结构图

5.1 仿真结果分析

永磁同步发电系统的控制目标为中间直流环节电压稳定。图 11 所示为中间直流环节电压输出, 在 0.5 s 加载, 系统功率变化时, 经过电压外环的调节电压也能稳定在 750 V。

MTPA 控制下, 发电机输出功率随转速变化如图 12 所示。发电机输出转矩如图 13 所示。

由图 12 可以看出, MTPA 控制下, 当电机转速达到 1 000 r/min 时电机输出功率就可以满足系统输出功率要求。由图 13 可知, 发电机输出功

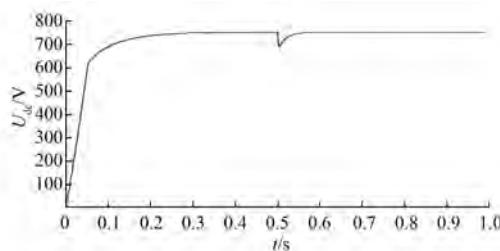


图 11 中间直流环节电压

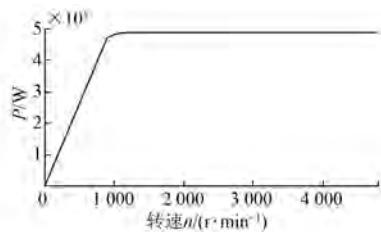


图 12 MTPA 控制下发电机输出功率

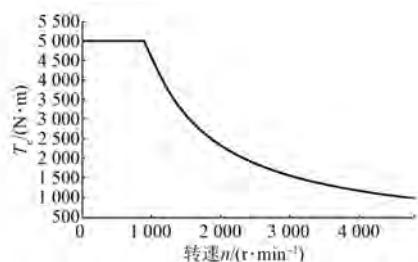


图 13 发电机输出转矩

率保持不变时,提高电机转速,电机的输出转矩会减小。

图 14 所示为 MTPA 控制下电流轨迹,随着发电机输出力矩减小,发电机定子电流幅值减小向圆点靠近,当电机转速过高时,受电压极限椭圆影响,出现拐点,电流轨迹由电压极限椭圆和转矩曲线交点决定,实现了 MTPA 控制的平滑过渡。

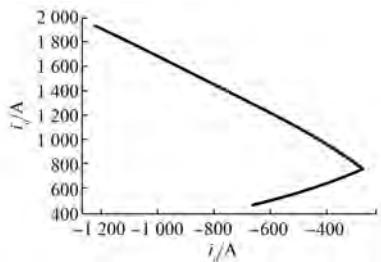


图 14 MTPA 控制下电流轨迹

单位功率因数控制下,电机输出功率随转速变化如图 15 所示。电流轨迹如图 16 所示。

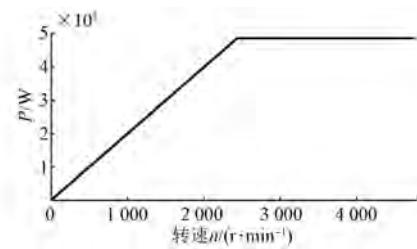


图 15 单位功率因数控制下发电机输出功率

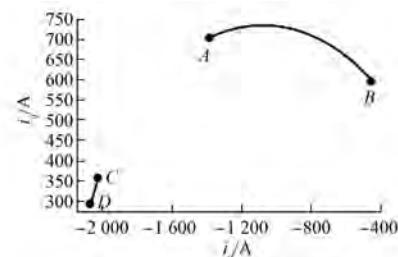
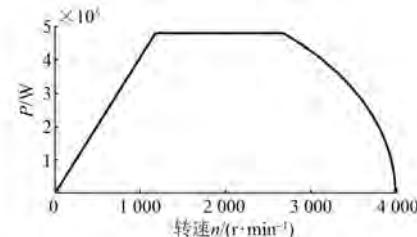


图 16 单位功率因数控制下电流轨迹

由图 15 可以看出,单位功率因数控制下,当电机转速达到 2 400 r/min 时电机输出功率可以满足系统输出功率要求。由于单位功率因数椭圆的限制,电机输出力矩较小。由图 16 可以看出,电流轨迹为一椭圆弧,其中旋转坐标系中 A 点 (-1 374.7, 705) 为单位功率因数控制的最大力矩点,最大力矩为 1 910 N·m,与 MTPA 控制相同,在保证功率不变时,发电机输出力矩随速度增加而减小,同时电机稳态工作点在单位功率曲线上由 A 点向 B 点移动,当电机转速过高时,受电压极限圆的影响,电机稳态工作点由 B 点跳到 C 点,由 C 点向 D 点移动,满足发电机电磁转矩输出要求。

$i_d=0$ 控制下,电机输出功率随转速变化,如图 17 所示。

图 17 $i_d=0$ 控制电机输出功率

由图 17 可知, $i_d=0$ 控制下,当电机转速达到

1 200 r/min 时电机输出功率可以满足系统输出功率要求,当电机转速大于 2 700 r/min 时,受电压极椭圆的影响,发电机所能发出的最大功率开始下降,发电机变速运行的范围较小。

对比 3 种控制策略的仿真结果可知,在电流极限圆限制下,MTPA 控制下发电机的起动转矩更大,可以快速地达到系统功率需求,同时在满足功率需求时,调速范围更广,过渡更平滑。单位功率因数控制电机输出力矩小,当系统负载变化过大时,更依赖于发电机输入转速的提高。 $i_d=0$ 控制下调速范围较窄,当电机转速波动大时,发电系统输出功率降低。

5.2 3 种控制策略功率分析

为了更具体地分析 3 种控制策略的功率,选取 2 个特定工作点的数值。低转速下运行结果如表 2 所示。高转速下运行结果如表 3 所示。

表 2 转速为 2 400 r/min 时 3 种控制策略下功率分析

参数名称	$i_d=0$	单位功率 因数控制	MTPA 控制
	控制	因数控制	控制
电机输入有功功率 P_{em}/kW	482	480	480
整流器输入有功功率 P_s/kW	479.0	475.4	478.0
整流器输入无功功率 Q_s/kW	589.0	0	256.6
电机输出容性无功功率 Q_{em}/kW	0	195.0	134.3
电机输出感性无功功率 Q_L/kW	589.0	195.0	390.9
整流器功率因数 $\cos\varphi$	0.633	1.000	0.882
功角 $\delta/(^\circ)$	51.10	62.85	51.40
发电机效率 η	0.989 142	0.982 809	0.991 481
相电流 i_m/A	1 229	1 545	1 087
相电压 u_s/V	413	207	334

表 3 转速为 4 800 r/min 时不同控制策略功率分析

参数名称	单位功率因数控制	MTPA 控制
电机输入有功功率 P_{em}/kW	484	480
整流器输入有功功率 P_s/kW	476.0	478.5
整流器输入无功功率 Q_s/kW	0	-184
电机输出容性无功功率 Q_{em}/kW	68.9	349.0
电机输出感性无功功率 Q_L/kW	68.9	164.0
整流器功率因数 $\cos\varphi$	1.000	0.933
功角 $\delta/(^\circ)$	81.8	33.7
发电机效率 η	0.969 006	0.995 305
相电流 i_m/A	2 086	800
相电压 u_s/V	155	427

通过对比电机输入功率与整流器输入功率可以看出,MTPA 控制有功功率损失最少。通过对

比发电机相电流幅值可以看出,MTPA 控制相电流幅值最小,线路损耗最小,同时发电机效率最高。对比发电机功角,MTPA 控制稳定性更好。与 $i_d=0$ 控制相比,MTPA 控制功率因数更高,视在功率更小,可以减小牵引变流器的容量。

当电机出现高转速时,受中间直流环节电压影响, $i_d=0$ 控制不能维持系统稳定。分析高转速下另外 2 种控制策略的功率。

虽然单位功率因数控制能够满足发电系统功率和功率因数要求,但发电机的电流过大、效率低、稳定性差,严重影响电机的运行,且不适合高转速运行。MTPA 控制能较好地在高转速运行,同时发电机电流小、效率高、功率因数满足系统要求等优点,同时相电压更接近 $U_{dc} \geq \sqrt{3} u_s$,电压利用率更高。

6 结语

在内燃机车永磁同步发电系统中,通过控制发电机输出力矩改变发电机输出功率,实现中间直流环节电压稳定。MTPA 控制策略可以在全速范围内调节发电机输出功率,通过控制牵引变流器的 d 、 q 轴电流来改变 PMSM 的功率因数和功角,提高稳定性和效率。对比分析 3 种控制策略,对于电机和牵引变流器的选型有一定的实用意义。

【参考文献】

- [1] 盛义发,喻寿益,桂卫华,等.轨道车辆用永磁同步电机系统弱磁控制策略[J].中国电机工程学报,2010,30(9): 74.
- [2] 邹白苏,刘永江,何良,等.HX_N6 型大功率混合动力内燃机车牵引变流器[J].机车电传动,2017(6): 32.
- [3] 林立,何洋,周建华,等.直驱永磁同步风力发电机侧系统建模及仿真[J].电气传动,2020,50(2): 73.
- [4] 李慧,范新桥,范梦杨.改进的双 PWM 型直驱永磁风电机组并网控制策略[J].电机与控制应用,2018,45(8): 98.
- [5] 甘志伟,王云冲,缪冬敏,等.不同负载下变速永磁同步发电机系统稳压控制的研究[J].电机与控制学报,2020,24(2): 72.

(下转第 76 页)

的力矩波动,修正理想状态设计值,使得设计值更接近实测值。

(2) 低力矩波动需要配备优秀的驱动控制器、高分辨率位置传感器,提供更优质的位置信号反馈和电流品质,提升三相电流的正弦性、对称性,能有效抑制电流引起力矩波动。

(3) 绕线过程,需保证各相绕组线圈一致性,可通过采用自动化绕线机进行绕线,可有效控制匝数、电阻差异引起力矩波动。

【参考文献】

- [1] 唐先全.基于 Maxwell 2D 的永磁同步电动机磁极优化设计[J].微电机,2018,51(5):22.
- [2] 宋金龙.抑制表贴式永磁同步电机转矩脉动的优化设计[D].成都:电子科技大学,2017.
- [3] 冯小军,范雪蕾.一种超低脉动无刷力矩电动机的设计[J].微电机,2018,51(5):67.
- [4] 王成元,王贵子,夏加宽.机床转台直接驱动力矩电机的转矩优化设计[J].沈阳工业大学学报,2008,

(上接第 63 页)

- [4] 国家发展和改革委员会资源节约与环境保护司,工业和信息化部节能与综合利用司.高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级:GB 30254—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [5] 李贤明,王同章,周平.大功率高速电动机高效率低噪声离心风扇的研究与设计[J].防爆电机,2005,40(1): 9.
- [6] 王天煜,王凤翔.大型异步电动机定子振动与模态分析[J].中国电机工程学报,2007,27(12): 41.

(上接第 70 页)

- [6] 姚骏,廖勇,李辉,等.直驱永磁同步风力发电机单位功率因数控制[J].电机与控制学报,2010,14(6): 13.
- [7] 吕广强,倪俊杰,沈婷婷.基于 SVPWM 的永磁同步电机弱磁控制[J].微电机,2016,49(10): 41.
- [8] 万佳,赵魁,柴凤.弱磁型永磁同步电机研究综述

30(1):6.

- [5] 陈思儒.力矩电机的电磁设计及应力场分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.
- [6] 王栋梁,陈维.从转矩波动角度探讨集中绕组永磁电机电磁设计[J].电动工具,2017(4):15.
- [7] CHAPMAN P L, SUDHOFF S D, WHITCOMB C A. Optimal current control strategies for surface-mounted permanent-magnet synchronous machine drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4):1043.
- [8] 洪南生,刘元江.永磁无刷直流电机转矩波动分析与降低方法研究[J].福建电力与电工,1997(3):8.
- [9] 刘亚清,邓惟滔.基于迭代学习控制的永磁同步电机转矩波动抑制策略[J].现代计算机(专业版),2018(22):14.
- [10] 陈鸣.解决无刷直流电机转矩波动的一种方法[J].微电机,2002,35(5):11.
- [11] 谭建成.永磁无刷直流电机技术[M].北京:机械工业出版社,2011.

- [7] 苏湘君.电动机轴承异常分析及处理[J].华电技术,2009,31(1): 47.
- [8] 汪书萍,赵争鸣,冯垚径.YKK355-630 系列高压三相异步电动机高效风扇的设计[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(1): 9.
- [9] 郑国丽,周黎民,邓尧强,等.高效电机风路结构设计参数优化[J].电机与控制应用,2015,42(4): 62.

[J].微电机,2014,47(1): 1.

- [9] 冯江华.轨道交通永磁同步牵引系统研究[J].机车电传动,2010(5): 15.
- [10] 袁登科,徐延东,李秀涛,等.永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M].北京:机械工业出版社,2015.