

内燃机车异步发电系统分析

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: 针对内燃机车牵引发电系统中异步发电机稳态工作时电机功率因数和效率低的问题, 采用无功功率为零和最大转矩电流比控制方法, 分析了异步电机旋转坐标系下电磁关系, 分别完成无功功率为零和最大转矩电流比 (MTPA) 控制的方程解析式的解读; 在中间直流环节限制下, 分析异步发电机的弱磁曲线, 寻找最小电流工作点, 完成电流轨迹规划; 在保证牵引发电系统稳定运行的前提下, 提高电机与逆变器的工作效率, 并利用 Simulink 仿真软件对系统进行分析。

关键词: 内燃机车; 异步电动机; 单位功率因数; MTPA; 弱磁控制; 仿真

中图分类号: U262.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2021)01-0104-06

Analysis on Asynchronous Power Generation System for Diesel Locomotive

FENG Haibo, HU Jisheng

(College of Electrical and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China)

Abstract: Aiming at the problem of low power factor and efficiency of the asynchronous motor in the steady-state operation of the asynchronous generator in the traction power generation system of the diesel locomotive, the zero reactive power and the maximum torque-current ratio control method was adopted. Firstly, the electromagnetic relation of the induction motor in the rotating coordinate system was analyzed, and the equations of zero reactive power and maximum torque current ratio(MTPA) control were discussed. Secondly, under the limitation of the intermediate DC link, the field weakening curve of the asynchronous generator was analyzed, the minimum current operating point was found, and the current trajectory planning was completed. On the premise of ensuring the stable operation of the traction power generation system, the working efficiency of the motor and the inverter was improved. Finally, simulation of system was taken out with Simulink software.

Keywords: diesel locomotive; asynchronous motor; unit power factor; MTPA; field weakening control; simulation

0 引言

异步电机具有体积小、重量轻、运行可靠、维护方便、成本低等特点, 异步电机的控制技术相对成熟, 控制简单无需励磁系统, 比较适合轨道交通领域应用^[1]。目前, 在内燃机车电传动系统中牵引发电系统多采用同步发电机, 结构复杂, 需要增加励磁控制系统, 维护成本较高^[2], 而采用异步电机发电系统可以节约成本, 系统控制简单, 但存在文献[3]指出的异步电机在空载或轻载时, 电机效率和功率因数都很低的缺点。为提

高异步发电系统的功率因数和效率, 本文分析了异步电机的功率特性, 采用无功功率为零和与最大转矩电流比控制策略, 并进行仿真对比计算, 验证控制策略的有效性。

1 异步电机数学模型

三相异步电机矢量控制是按转子磁场定向, 以转子磁场方向为 M 轴, 垂直于转子磁场方向为 T 轴, 旋转坐标系下电压相对于电流的方程组为

$$\begin{pmatrix} u_{sM} \\ u_{sT} \\ u_{rM} \\ u_{rT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + L_s p & -\omega_s L_s & L_m p & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s p & \omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & -\omega_s L_m & R_r + L_r p & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & L_m p & \omega_r L_r & R_r + L_r p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sM} \\ i_{sT} \\ i_{rM} \\ i_{rT} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: u_{sM} , u_{sT} 为定子 M 轴和 T 轴的电压; u_{rM} , u_{rT} 为转子 M 轴和 T 轴的电压; i_{sM} , i_{sT} 为定子 M 轴和 T 轴的电流; i_{rM} , i_{rT} 为转子 M 轴和 T 轴的电流; ω_s 为转子磁链 ψ_r 的电角速度; ω_r 为相对转子的转差角速度; R_s 是定子等效电阻; R_r 为转子等效电阻; L_m 为互感; L_s 为转子电感; p 为微分算子。

对三相异步电机按转子磁场方向解耦, 转子磁链有 $\psi_{rM} = \psi_r$ 和 $\psi_{rT} = 0$, 磁链方程组为

$$\begin{cases} \psi_{sM} = L_s i_{sM} + L_m i_{rM} \\ \psi_{sT} = L_s i_{sT} + L_m i_{rT} \\ \psi_{rM} = L_m i_{sM} + L_r i_{rM} = \psi_r \\ \psi_{rT} = L_m i_{sT} + L_r i_{rT} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由于鼠笼式异步电动机内部采用导条, 故转子电压为 0。由式 (1) 和式 (2) 可知, 鼠笼式异步电机电压方程为

$$\begin{pmatrix} u_{sM} \\ u_{sT} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + L_s p & -\omega_s L_s & L_m p & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s p & \omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & 0 & R_r + L_r p & 0 \\ \omega_r L_m & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sM} \\ i_{sT} \\ i_{rM} \\ i_{rT} \end{pmatrix} \quad (3)$$

由式 (2) 和式 (3) 可以求出转子电流与转子磁链的关系:

$$i_{rM} = -\frac{p}{R_r} \psi_r \quad (4)$$

$$i_{rT} = -\frac{\omega_r}{R_r} \psi_r \quad (5)$$

将转子电流代入式 (2), 可以求出定子电流与转子磁链的关系:

$$i_{sM} = \frac{1 + T_r p}{L_m} \psi_r \quad (6)$$

$$i_{sT} = \omega_r \frac{T_r}{L_m} \psi_r \quad (7)$$

式中: T_r 为转子时间常数, $T_r = L_r / R_r$ 。

转矩 T_e 为

$$T_e = 1.5 p_n \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sT} \quad (8)$$

式中: p_n 为电机极对数。

由式 (6) 可知, 当转子磁链稳定时, $\psi_r = i_{sM} L_m$, 故转矩方程为

$$T_e = 1.5 p_n \frac{L_m^2}{L_r} i_{sM} i_{sT} \quad (9)$$

根据以上公式, 可得转差方程为

$$\omega_r = \frac{1}{T_r} \cdot \frac{L_m}{\psi_r} \cdot i_{sT} = \frac{1}{T_r} \cdot \frac{i_{sT}}{i_{sM}} \quad (10)$$

对式 (3) 进行简化, 可以求得定子电压方程组如下:

$$\begin{cases} u_{sM} = R_s i_{sM} + \sigma L_s p i_{sM} + \frac{L_m}{L_r} p \psi_r - \omega_s \sigma L_s i_{sT} \\ u_{sT} = R_s i_{sT} + \sigma L_s p i_{sT} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_r + \omega_s \sigma L_s i_{sM} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ 。

当电机处于稳态时, 忽略定子电阻的影响, 综合式 (6) 和式 (11), 定子电压方程组可简化为:

$$\begin{cases} u_{sM} = -\omega_s \sigma L_s i_{sT} \\ u_{sT} = \omega_s L_s i_{sM} \end{cases} \quad (12)$$

在机车交直交牵引系统中, 中间直流环节电压保持在一定的范围内, 同时牵引变流器输出电压和输出电流等级也保持在一定的范围内, 因此有:

$$i_{sM}^2 + i_{sT}^2 \leq I_{s \max}^2 \quad (13)$$

$$u_{sM}^2 + u_{sT}^2 \leq u_{s \max}^2 \quad (14)$$

将式 (12) 代入式 (14), 可得

$$(\omega_s \sigma L_s i_{sT})^2 + (\omega_s L_s i_{sM})^2 = u_{s \max}^2 \quad (15)$$

式中: $I_{s \max}$ 为异步电机能通过的最大电流; $u_{s \max}$ 为电压空间矢量调制的最大相电压, $u_{s \max} = \frac{u_{dc}}{\sqrt{3}}$ 。

在旋转坐标系, 式 (13) 称为电流极限圆, 式 (15) 称为电压极限椭圆。

2 异步电机功率分析

交流异步电机用途广泛, 耗电量大, 在发电运行中功率因数偏低, 增加了电网的无功损耗, 因此对异步电机进行功率分析, 对提高交流异步电机的发电效率有一定意义。为了分析发电机的功率方程, 引入发电机稳态向量图, 如图 1 所示。

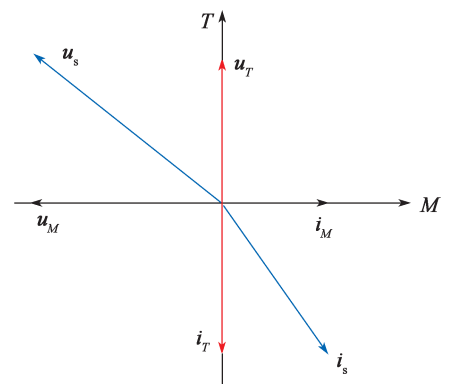


图 1 发电机稳态向量图

Fig. 1 Steady state vector diagram of generator

在同步旋转坐标系下, 采用相电压幅值相同的矢量变换, 异步电机端电压输出功率为:

$$\begin{cases} P_s = -1.5(u_{sM}i_{sM} + u_{sT}i_{sT}) \\ Q_s = -1.5(u_{sM}i_{sT} + u_{sT}i_{sM}) \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_s 为发电机输出有功功率; Q_s 为发电机输出的无功功率。

电机处于稳态时, 忽略定子电阻的影响, 将式 (15) 代入式 (16), 可得:

$$\begin{cases} P_s = -1.5 \left[\left(\omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_r + \omega_s \sigma L_s i_{sM} \right) i_{sT} - \omega_s \sigma L_s i_{sT} \cdot i_{sM} \right] \\ Q_s = -1.5 \left[\left(\omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_r + \omega_s \sigma L_s i_{sM} \right) i_{sM} - \omega_s \sigma L_s i_{sT} \cdot i_{sM} \right] \end{cases} \quad (17)$$

联立式 (8) 和式 (17), 可得

$$P_s = 1.5 \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sT} = \omega_s \frac{T_c}{p_n} = T_c \omega_r \quad (18)$$

由式 (18) 可知, 控制异步发电系统的功率输出需要对发电机的输出力矩和电机的机械角速度进行控制。系统正常工作时, 电气参数变化远小于机械参数变化, 同时异步发电系统是一个大惯性系统, 因此在短时间内电机机械角速度不会发生变化。要想改变发电机输出功率, 可以通过调节电机的输出转矩, 达到调整异步发电系统功率输出的目的。

本文研究的异步发电系统主要为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。因此对异步发电机采用矢量控制, 以中间直流环节电压稳定为目标, 使用电压外环, 采用 PI 调节得到输出力矩, 实现系统功率平衡; 同时为提高系统稳定性, 在矢量控制系统中加入电流内环。

3 异步发电机控制策略

异步发电机应用矢量控制, 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电流 i_{sM} 和 i_{sT} 的大小满足发电系统的输出力矩要求。

3.1 “ $Q_s=0$ ” 控制

为提高牵引变流器的利用率, 改善电机的功率因数, 在旋转坐标系下通过改变定子电流的大小和方向使得无功功率 Q_s 接近 0, 电机输出端功率因数接近 1。

由式 (6) 可知, 当转子磁链稳定时, $\psi_r = i_{sM} L_m$, 式 (17) 可以进一步简化, 同时联立式 (9), 可得:

$$\begin{cases} Q_s = -1.5(\omega_s L_s i_{sM}^2 - \omega_s \sigma L_s i_{sT}^2) \\ T_c = 1.5 p_n \frac{L_m^2}{L_r} i_{sM} i_{sT} \end{cases} \quad (19)$$

由式 (19) 可知, “ $Q_s=0$ ” 直线是一条过原点的直线, 其转差频率为一定值。通过对式 (19) 求解, 可以得到发电机电流内环控制的稳态工作点。图 2 为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。

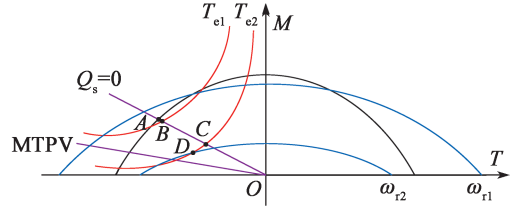


图 2 $Q_s=0$ 控制下电流轨迹相平面图

Fig. 2 Phase plane diagram of current trajectory under $Q_s=0$ control

在电流极限圆限制下, 电机 “ $Q_s=0$ ” 直线的最大力矩工作点为 A 点; 当电机转速恒定时, 电机需要输出力矩为 T_{e1} 时, 电机的稳态工作点为 B 点; 随着原动机电机转速的增加, 当电机转速达到 ω_{r2} 时, 所需电机转矩为 T_{e2} , 受中间直流环节电压限制, 电机在 C 点不能稳定运行, 需要进行弱磁控制; 在电压极限椭圆限制下, 电机的稳态工作点由 C 点移动到 D 点。

3.2 最大转矩电流比控制

最大转矩电流比 (MPTA) 控制就是力矩与最小电流之间的关系, 在发电机转速一定时, 发电机功率由力矩决定, 当系统功率稳定时, 力矩一定, 利用最大转矩电流比控制, 定子电流最小, 线路损耗降低。为提高异步发电机输出功率, 将最大转矩电流比应用于异步发电机控制中。根据式 (9) 可知, 在电流极限圆的限制下, 只有当 $i_{sM} = i_{sT}$ 时, 转矩 T_c 为最大值。

将 $i_{sM} = i_{sT}$ 代入式 (9), 可以得到

$$T_c = 1.5 p_n \frac{L_m^2}{L_r} i_{sT}^2 \quad (20)$$

最大转矩电流比控制也是一条过原点的直线, 通过求解式 (20) 可以求出电机稳态工作点。

如图 3 所示, 与 “ $Q_s=0$ ” 控制类似, A 点为电机输出的最大力矩工作点, 在转速一定时, 最大转矩电流比控制比 “ $Q_s=0$ ” 控制输出的最大功率更高; B 点为

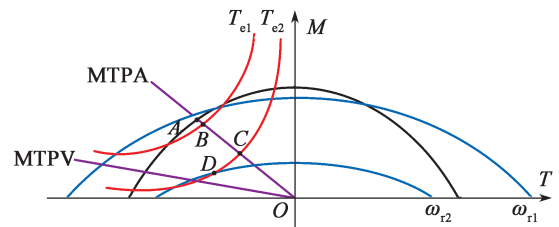


图 3 MTPA 控制下电流轨迹相平面图

Fig. 3 Phase plane diagram of current trajectory under MTPA control

图 5 矢量控制系统结构图

Fig. 5 Vector control system structure diagram

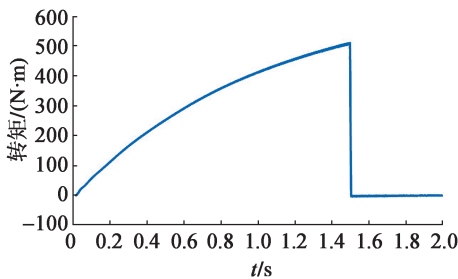


图 6 异步发电机转矩
Fig. 6 Torque of asynchronous generator

在图 4 中，当内燃机车柴油机怠速运行时，经预充电环节将中间直流环节电压充到 400 V；在空载条件下，将中间直流环节电压提高至 750 V 并保持稳定运行。

4.2 加载

当系统达到额定负载消耗功率时，发电机的输出功率如图 7 所示。

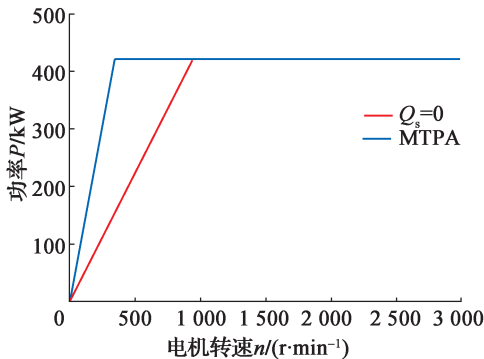


图 7 发电机输出功率
Fig. 7 Generator output power

由图 7 可知，在已知发电机转速和输出功率时，可以求出 MTPA 控制的启动转矩为 11 300 N·m，“ $Q_s=0$ ”时控制启动转矩为 4 269 N·m，MTPA 控制可以快速地满足系统功率需求。

图 8 代表不同控制策略下的电流轨迹，红色实线代表在电流极限圆和 MTPV 限制下的电机最大运行能力；蓝色实线代表“ $Q_s=0$ ”控制下电流轨迹；紫色实线为 MTPA 控制下电流轨迹。由图 8 可知，随着电机转速升高，MTPA 控制下电机的稳态工作点由 A 点移动到 C 点，当电机转速进一步提高时，受电压极限椭圆影响，电流轨迹由 C 点移动到 E 点；“ $Q_s=0$ ”控制下电机的稳态工作点由 B 点移动到 D 点，随着电机转速提高，受电压极限椭圆的影响，“ $Q_s=0$ ”控制不能满足系统需要，电机稳态工作点过渡到电压极限椭圆限制下的 MTPA 控制，电机的稳态工作点由 D 点移动到 E 点。

在图 9 中红色实线代表“ $Q_s=0$ ”控制下定子相电流曲线，蓝色实线代表 MTPA 控制下定子相电流曲线。从图 9 可以看出，采用 MTPA 控制的定子电流相比 “

$Q_s=0$ ”控制的定子电流更小，电机运行效率更高，并且“ $Q_s=0$ ”控制在额定负载内的调速范围很窄，转速范围为 940~1 927 r/min，当电机转速波动大时，系统输出功率不能满足负载消耗。

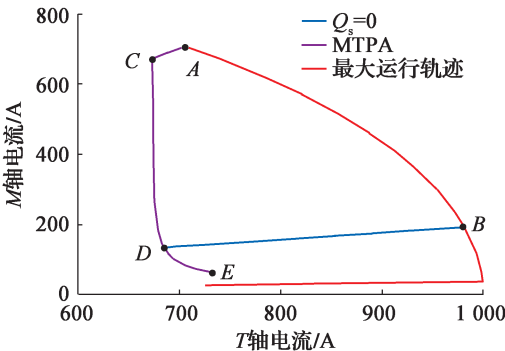


图 8 不同控制策略电流轨迹
Fig. 8 Current trajectories of different control strategies

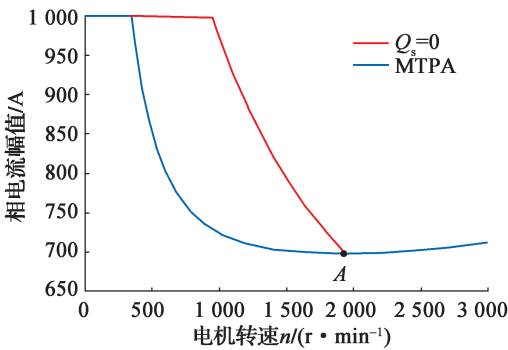


图 9 相电流幅值
Fig. 9 Phase current amplitude

4.3 2 种控制策略功率分析

为了更具体地分析 2 种控制策略导致的输出功率的差异，选取特定工作点进行比较，具体数据如表 1 所示。

表 1 不同控制策略下功率分析 ($n=1\ 400\ \text{r/min}$)
Table 1 Power analysis under different control strategies ($n=1\ 400\ \text{r/min}$)

参数	“ $Q_s=0$ ”控制	MTPA 控制
电机输出有功功率 P_s/kW	417.3	417.2
电机功率因数 $\cos\varphi$	0.970	0.959
转差角速度 $\omega_r/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	5.03	3.96
相电流幅值 i_s/A	850	772
相电压幅值 u_s/V	356	393
发电机效率 $\eta/\%$	94.626	95.470

通过分析表 1 可以发现，采用 MTPA 控制策略的发电机相电流小，电机效率更高，但电机功率因数偏低；采用“ $Q_s=0$ ”控制策略的发电机功率因数高，转差角速度更高，但电机的稳定性不如前者。

5 结语

本文提出一种应用于内燃机车异步牵引发电系统的异步电机电流轨迹规划的方法, 通过理论分析电机的功率方程找出无功功率为零 ($Q_s=0$) 的稳态工作点, 提高功率因数, 并在此基础上提出中间直流环节限制下的最大转矩电流比 (MTPA) 控制策略, 采用最大转矩电流比控制提高发电机效率, 并实现了发电机电流的平滑过渡。

参考文献:

[1] 丁辉, 胡协和. 交流异步电动机调速系统控制策略综述 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2011, 45(1): 50-58.
DING Hui, HU Xiehe. Review of AC asynchronous motor speed control strategy[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(1): 50-58.

[2] 胡汉春. 机车电传动与控制 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
HU Hanchun. Locomotive Electric Drive and Control[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.

[3] 刘硕, 杜庆楠. 异步电动机最佳压频比控制策略的研究 [J].

电子测量技术, 2017, 40(1): 42-46.
LIU Shuo, DU Qingnan. Research on the best voltage frequency ratio control strategy of asynchronous motor[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(1): 42-46.

[4] 程启明, 程尹曼, 王映斐, 等. 交流电机控制策略的发展综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 145-154.
CHENG Qiming, CHENG Yinman, WANG Yingfei, et al. Overview of control strategy for AC motor[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 145-154.

[5] 张文元. 全变速鼠笼异步风力发电机的双 PWM 变流器控制策略研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.
ZHANG Wenyuan. Research on control strategy of double PWM converter for full speed squirrel cage asynchronous wind power generator[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.

[5] 黄文新, 胡育文. 笼型异步发电机的电力电子控制技术 [J]. 电工技术杂志, 2001(3): 1-4.
HUANG Wenxin, HU Yuwen. Overview on control technique of cage induction generator -power electronic converter association[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2001(3): 1-4.

动态消息

《机车电传动》不接受
电子邮件投稿的通知

我刊于2016年开始使用采编系统收稿,稿件全部从《机

车电传动》网站的在线投稿系统中登记,不再接受电子邮件投稿。请投稿作者到我刊官网 (<http://edl.csrzic.com/>) 进行注册账号后再按照要求投稿。如遇网站异常,可与编辑部联系 (0731-28498221, 28498141), 我们会尽快为您处理。如果给您带来不便, 敬请谅解。

《机车电传动》编辑部