

高转速比异步变频电机电磁设计及温升研究^{*}

李梦启, 王伟光

(哈尔滨电气动力装备有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 高转速比异步变频电机电磁设计,既要满足高速弱磁区转矩不足,又要克服低速时磁路过饱和。以 1 600 kW 异步变频电机为例分析了等效电路参数变动特点,绘制了高低转速下转矩、效率、电压、电流和功率因数曲线;并得出了磁密、磁导率分布图,计算了不同工况下损耗的时间分布图。经电机型式试验测试,设计方案满足技术要求。

关键词: 高转速比;异步变频电机;电磁设计;温升;等效电路

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0079-05

Research on Electromagnetic Design and Temperature Rise of High Speed Ratio Asynchronous Frequency Conversion Motor^{*}

LI Mengqi, WANG Weiguang

(Harbin Electric Power Equipment Company Limited, Harbin 150040, China)

Abstract: The electromagnetic design of the high speed ratio asynchronous motor, that was, to meet the high speed weak magnetic area torque, but also to overcome the low speed when the magnetic passing through saturation. 1 600 kW asynchronous motor as an example, analysis of the equivalent circuit parameters change characteristics, the low speed torque, efficiency, voltage, current and power factor curve drawing, and the magnetic flux density, magnetic permeability distribution, distribution and temperature rise time loss under different conditions were calculated by the motor type test. The design met the technical requirements.

Key words: high speed ratio; asynchronous frequency conversion motor; electromagnetic design; temperature rise; equivalent circuit

0 引 言

核电、冶金、风洞测试等领域需要转速比较高的拖动电机,高转速比一般为高速与低速比在 2~5 之间,在这个变速比区间对转矩均会有较高的要求,同时必须拥有较快的速度响应^[1]。某 1 600 kW 拖动电机使用 SIEMENS 的 SM150 交流变频系统,要求过载能力为 115% 连续运行,175% 1 min(低速),150% 1 min(高速)。在 100% 负荷时温升最大 80 K,在 115% 负荷及过载时最大 110 K。此拖动电机转速比达到 4,即低速 350 r/min,高速 1 400 r/min。

电磁设计方面,既要满足高速弱磁时转矩不

足的问题,又要克服低速时磁路过饱和的问题。选择合适的槽配合、气隙和接线形式,使电磁力频率避开机座共振点,可以降低电磁方面的噪声和振动^[2-4]。相比传统双绕组异步电机调速方案^[5-6],异步变频电机转速比越大,电机体积越大,电磁方案越难实现。

1 电磁设计

高转速比电机的电磁设计要兼顾多个变频点的电磁性能,一般要考虑三个工作点,即最低转速工作点、最高转速工作点和恒转矩向恒功率转变工作点。异步变频电机可以使用矢量控制、转矩

^{*} 基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX06002002-21)

作者简介: 李梦启(1966—),男,研究员级高级工程师,研究方向为核电站特种电机研究。

王伟光(1981—),男,高级工程师,研究方向为核电站大型电机设计。

控制或 U/f 控制等方式^[7-12], 负载起动电流较小, 不需要特别关注起动电流^[13]。

此拖动电机为 1 600 kW 异步电机, 极数为 6 极, 额定电压 2 500 V/3 300 V, 额定电流 456 A/331 A, 额定转速 350 r/min/1 400 r/min, 接线方式 3-Y, 运行频率 17.7 Hz/70.5 Hz, 电机效率 95.6%/95.1%, 功率因数 0.849/0.906, 最大转矩倍数 3.67/1.72, 防护形式 IP54, 冷却方式 IC86W。

1.1 谐波分析

此 6 极电机采用中心高 800 mm, 定转子间气隙 4 mm, 定转子槽配合为 72/88, 绕组节距 1-11。经过定子谐波计算^[2], 谐波含量较低, 具备较低的电磁噪声和谐波转矩, 如图 1 所示。高压定子开口槽电机中转子槽数与定子槽数比尽量不超过 1.2, 这样可以避免过大空载附加损耗; 当转子与

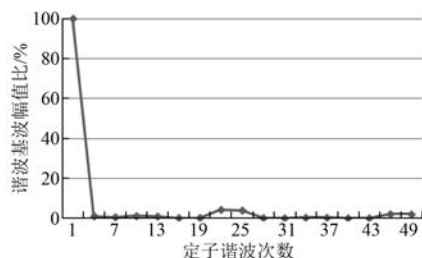


图1 定子谐波分析

定子槽数比超过 1.4 时, 空载附加损耗将会明显增加, 鼠笼温度上升明显。

1.2 等效电路参数

异步变频电机工作在不同工作点时, 等效电路参数会有变动。定子电阻和转子电阻没有变化, 转子电感会有微小变动, 互感也会有微小变动, 如图 2 所示。在对异步变频电机进行控制时, 应该考虑不同工作点电机等效电路差异对控制精度及效果的影响。

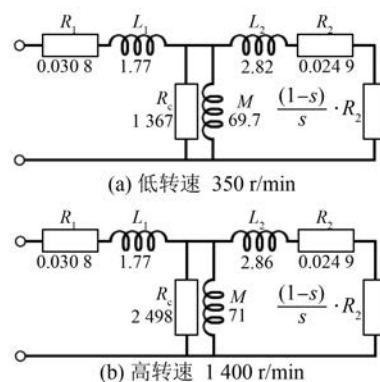


图2 不同转速等效电路参数

1.3 工作曲线

此异步变频电机在低频 17.7 Hz 及高频 70.5 Hz 下各参数工作曲线如图 3 所示。

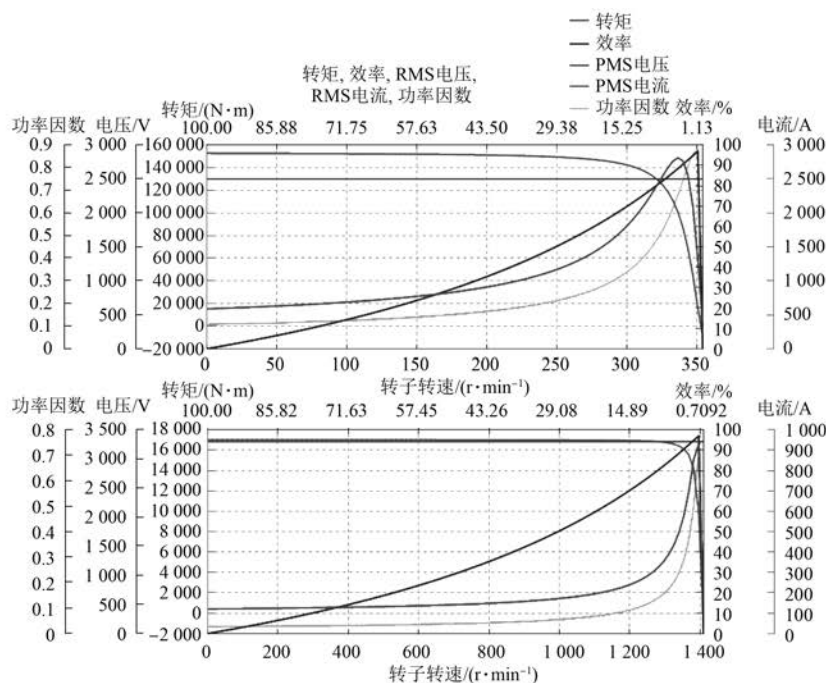


图3 低频、高频工作曲线

1.4 磁密、电密、热负荷

高转速比异步电机,一般使用磁密饱和点相对高的无取向硅钢片,本方案电机采用 50W620 冲片。这样可以提高功率密度,缩小电机整体体积。拖动系统使用的交直交变频器输出波形为非正弦波,应适当地考虑电势有效值会在低转速时造成磁路的过度饱和。50W620 冲片在 1.83 T 开始接近饱和,齿磁密选择建议不超过 1.8 T,磁路法计算电磁参数如表 1 所示。

表 1 磁密与热负荷

转速/ (r·min ⁻¹)	定子 齿/T	定子 轭/T	转子 齿/T	转子 轭/T	气隙/ T	热负荷
350	1.69	1.65	1.79	1.33	0.83	2 202
465	1.69	1.65	1.78	1.33	0.83	1 408
1 400	0.6	0.54	0.64	0.43	0.30	1 164

本设计电机采用空水冷方案,经计算在高低转速下不同部分电密值如表 2 所示。

表 2 电密

转速/ (r·min ⁻¹)	定子电密/ (A·mm ⁻²)	转子铜条电密/ (A·mm ⁻²)	转子端环电密/ (A·mm ⁻²)
350	3.48	1.53	3.67
1 400	2.53	1.23	2.95

2 二维电磁场分析

二维电磁场计算时,忽略铁心磁导率在铁心方向的各向异性,对于各向同性的媒介质,有关场量之间的关系可以表示成媒介质的成分方程^[15]:

$$D = \epsilon E, B = \mu H, J = \sigma [E + E^{(e)}]$$

式中: ϵ ——媒介质的介电常数;

μ ——导磁系数;

σ ——导电系数;

$E^{(e)}$ ——外力产生的电磁强度。

2.1 磁力线及导体电密分析

低速和高速二维场磁力线及导体电密分布如图 4、图 5 所示。可见,磁力线在低速工况比高速工况密集,低速时,磁通更大,定子铜线和转子铜条在低速工况时的电密比高速工况时的电密高,低速时电机的热负荷更大。

2.2 磁场密度分布

低速和高速二维场磁场密度分布如图 6、图 7

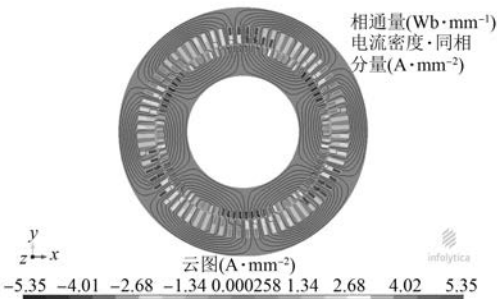


图 4 低速二维磁力线及导体电密分布

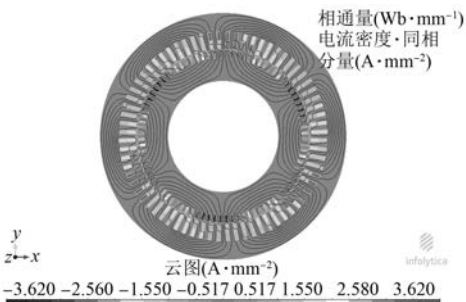


图 5 高速二维磁力线及导体电密分布

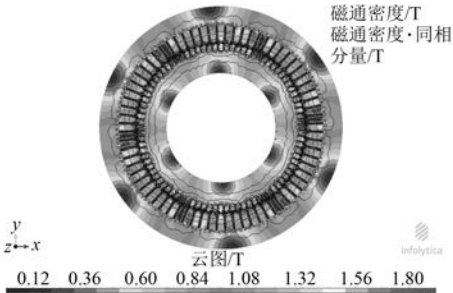


图 6 低速二维场磁场密度分布

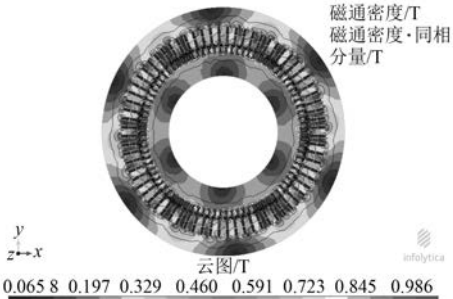


图 7 高速二维场磁场密度分布

所示。可见,低速工况下定、转子的磁场密度较高,转子齿局部点高达 1.92 T,相比磁路法,磁场法能更好地反映局部的磁场饱和现象;高速工况

下定、转子磁场密度角度,最大点磁密仅为 1.05 T,说明高速磁通较小,转矩出力降低。

2.3 相对磁导率分布

低速和高速相对磁导率分布如图 8、图 9 所示。可见,低速工况下,定子齿部、转子齿部的局部区域已经出现了明显的磁饱和,对应部分的磁导率迅速下降,因此在探讨电机控制时,需要关注低速区间磁导率的明显变化,才能更为准确地计算定转子自感和互感。高速工况下,定子齿部、定子轭部、转子齿部和转子轭部磁导率均分布在 6 000 左右,说明此时不存在局部磁场过饱和,铁心整体磁导率比较一致。

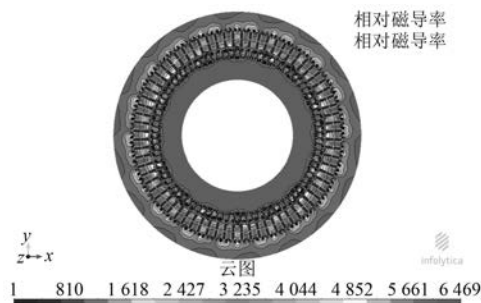


图 8 低速二维场相对磁导率分布

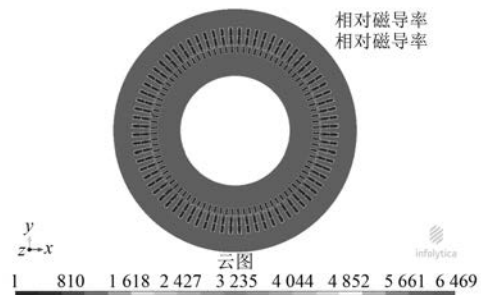


图 9 高速二维场相对磁导率分布

本文采用热路法^[22]分析各部分损耗,计算了长期在低速、高速两种工况下的损耗,如表 3 所示。并估算了两种工况的等效热阻,低速时铁心等效热阻为 0.003 78 ℃/W,高速时特新等效热阻为 0.003 62 ℃/W,可见等效热阻变化不大,在温度场计算时,等效热阻变化可以忽略不计。

表 3 低频、高频损耗值

损耗项	低速 350 r/min	高速 1400 r/min
定子绕组/kW	34.8	18
转子鼠笼/kW	23.7	13.2
定子铁心/kW	4.14	3.57
定子轭/kW	2.94	2.45
定子齿/kW	1.19	1.12
转子铁心/kW	0.006 15	0.002 27
转子齿/kW	0.001 84	0.000 892
摩擦/kW	0.6	0.6
杂散/kW	11.3	10.2
总损耗	74.6	45.6

3 损耗分析

3.1 损耗估算

目前较为精确的损耗分析往往采用三维温度场计算^[16-17]。先进行三维电磁场计算损耗,再通过三维流场分析温度的边界条件^[18-19],进行温度场、电磁场多场耦合计算^[20-21],计算过程较为复杂,需要较多计算资源和计算时间,不太适合工程领域快速设计和投标演算。

3.2 损耗时间分布

电机为 S9 工作制,工作 15 min 停机 5 min 交替进行,计算损耗分布如图 10、图 11 所示。

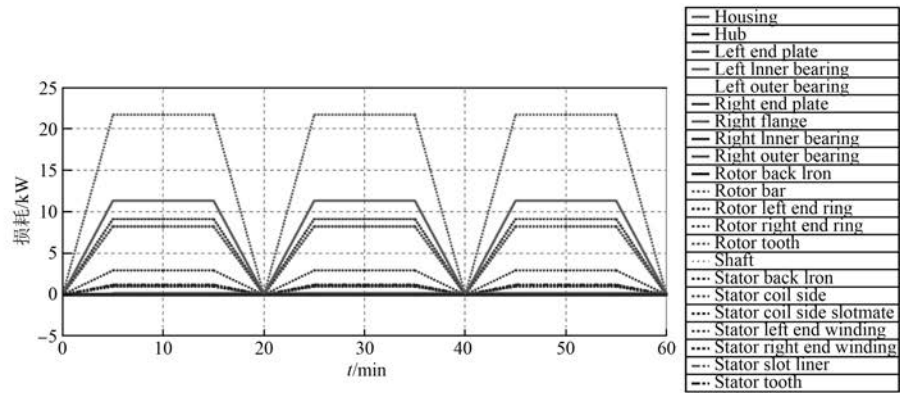


图 10 低速损耗时间分布

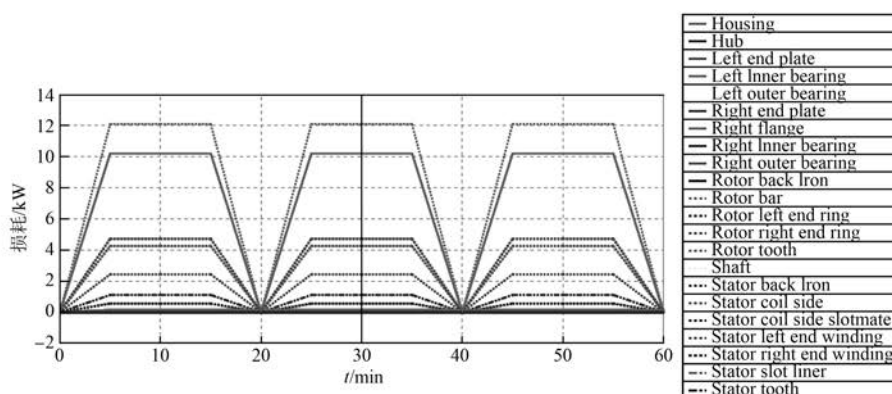


图 11 高速损耗时间分布

4 试验分析

异步变频电机试验关注两个问题,低速工况下温升,高速工况下最大转矩。低速工况下的热负荷最大,电机在做温升试验时,难以按图 10 和图 11 加载真实的损耗边界条件,核电、冶金等行业用电机一般采用保守法测试,即按在最低速 S1 工作制进行温升叠频考核试验^[23]。

1 600 kW 异步变频电机在低速时热负荷设计值为 $2\,202 \times 10^8 \text{ A}^2/\text{m}^3$,在低速下做等效负载温升试验,测得定子铁心温升试验 58.1 K,低于设计保证值 80 K,测得定子绕组温升试验 64 K,低于设计保证值 80 K。此电机在低速工况下进行了 8 h 等效负载温升试验,定子绕组温升值稳定在 64 K,为频繁切换速度的 S9 工作制提供了很好的热稳定保证。

5 结 语

经过对高转速比异步变频电机进行研究分析,得出如下结论:

- (1) 6 极异步电机定、转子槽配合为 72/88,谐波含量较少;
- (2) 低速、高速两个工况下电机等效电路自感与互感存在变化;
- (3) 低速磁场接近饱和,高速磁场磁通较小,低速各部分电密较高;
- (4) 低速磁导率铁心大部分减小,高速磁导率铁心各部分基本一致;
- (5) 得出了 S9 工作制下电机各部分损耗随时间变化的规律;

(6) 高转速比在低速等效负载温升试验,温升值符合技术要求,低于 80 K。

【参考文献】

- [1] 王伟光,刁立民.高转速比大型冷轧卷曲电机的设计[J].上海大中型电机,2013(2): 47-52.
- [2] 刘佳男.变频供电下异步电机电磁振动的特性分析[D].沈阳: 沈阳工业大学,2016.
- [3] 刘海龙,韦文武,何海波.变频异步电机振动试验研究[J].船电技术,2016,36(8): 24-27.
- [4] 艾程柳,黄元峰,王海峰,等.潜液式液化天然气泵用变频低温异步电机的关键参数设计[J].中国电机工程学报,2015,35(20): 5317-5326.
- [5] 卜飞飞,胡育文,黄文新,等.带感性和容性负载的定子双绕组异步电机变频交流发电系统动态性能[J].电工技术学报,2014,29(9): 54-63.
- [6] 卜飞飞,胡育文,黄文新,等.定子双绕组异步电机变频交流发电系统辅助励磁电容和滤波电感的优化设计[J].电工技术学报,2014,29(11): 68-77.
- [7] 张金龙,郭兴,漆汉宏,等.基于小波调制的异步电机变频控制技术[J].电力电子技术,2016,50(9): 54-57.
- [8] 李瑾.基于 SVPWM 的异步电机变频调速系统[J].冶金设备,2016(4): 14-16.
- [9] 高素玲,段德功,杨军平,等.异步电机的数字式变频调速系统设计及仿真[J].黑龙江大学自然科学学报,2015,32(5): 693-696.
- [10] 胡瑶,卜世杰.异步电机直接转矩控制变频调速系统的设计[J].自动化与仪器仪表,2015(10): 30-32.
- [11] 马良河.交流异步电机变频调速系统性能实验的比较研究[J].电气传动,2014,44(7): 9-11.

(下转第 90 页)