

“汽电双驱”系统电机瞬态性能仿真研究

闫鑫洋¹, 徐余法¹, 孙明伦², 彭大华²

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 200240;

2. 上海电气集团上海电机厂有限公司, 上海 200240)

摘要: 以上海电机厂有限公司“汽电双驱”项目中三相异步电动机/发电机为依据, 基于以 Ansoft 软件, 利用场路耦合法对系统中异步电机的瞬态性能进行分析。该电机为 6 800 kW, 750 r/min。针对其 3 种不同的工况, 即空载起动、风机负载起动、大负载起动, 分别进行分析计算, 模拟系统中电机由电动机状态切换成发电机状态的过程, 获得该三相异步电机在不同状态下的瞬时起动电流、电磁转矩、气隙磁密等电气参数, 进而分析该异步电机的瞬态性能和相应的电磁场分布。

关键词: 三相异步电机-发电机; 场路耦合; 瞬态分析

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)09-0112-05

Simulation Study on Motor Transient Performance Steam-Electric Double Drive System

YAN Xinyang¹, XU Yufa¹, SUN Minglun², PENG Dahua²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Electric Group Shanghai Motor Factory Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: For the three-phase asynchronous motor-generator of a “steam-electric double-drive” system of Shanghai Motor Factory Co., Ltd., which was 6 800 kW, 750 r/min, the transient performance was analyzed based on Ansoft software using field-circuit coupling method. Analyses and calculations were carried out for three different conditions: no-load start, fan load start, and big load start. The process of the motor being switched from the state of motor to the state of generator was simulated. Instantaneous starting current, electromagnetic torque, the air gap flux density and other electrical parameters of the three-phase asynchronous motor-generator in different states were obtained. The transient performance of the asynchronous motor and the corresponding electromagnetic field distribution were analyzed.

Key words: three-phase asynchronous motor-generator; field-circuit coupling; transient analysis

0 引 言

汽电双驱机组布置方式旨在减少电厂能耗, 增加机组净供电量, 提高能源利用率。异步电机在整个汽电双驱系统中的作用为保持机械能和电能的相互平衡及动态调节, 可提高系统效率, 使系统始终保持高效节能运行状态^[1]。大容量鼠笼感应电机在起动、电源电压变化或者负载力矩加大

运行工况下, 由于电磁暂态引起的起动冲击电流和瞬时转矩幅值的突变, 使电机本身受损^[2]。Ansoft Maxwell 作为当前先进的电磁场有限元仿真分析软件, 可为电机的优化设计提供比较可信的依据。通过分析研究文献[3]介绍的 Maxwell 2D/3D 的操作建模方法流程, 文献[4]采用 Ansoft RMxpert 和 Maxwell 2D 进行耦合仿真, 再将 2 种仿真结果的精确性进行对比, 确认结果没

作者简介: 闫鑫洋(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机优化设计。

徐余法(1964—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电机故障诊断、智能算法。

孙明伦(1970—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为自动控制。

有大的差别。文献[5]采用 Ansoft/Maxwell 2D 和 Ansoft/Simplorer 软件,对异步电动机联合仿真的方法进行研究,使仿真结果更加接近真实值,但该方法花费时间较长。本文通过改进,直接在 Maxwell 2D 中进行外电路搭建模拟,减轻了工作强度,基于 Ansoft 软件利用场路耦合法增加外电路,仿真出汽电双驱系统在不同工况下电机的瞬态参数,为汽电双驱系统的稳定性优化提供基础理论依据。

1 有限元模型的建立

1.1 异步电动机/发电机的相关参数

仿真所用电机为三相异步电动机/发电机:额定功率为 6 800 kW,额定电压为 6 kV,8P,额定频率为 50 Hz,额定转速为 750 r/min,实际的转速为 747 r/min,铁心长度为 1 320 mm,定子线圈采用双层叠绕形式,并联支路数为 8,转子导条为鼠笼式结构。其结构尺寸及参数如表 1 所示。

表 1 电机相关尺寸及参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	6 800
额定转速/(r·min ⁻¹)	750
定子外径/mm	1 500
定子内径/mm	1 130
转子外径/mm	1 123.6
转子内径/mm	800
转子槽数/个	123
定子槽数/个	96

1.2 异步电动机/发电机有限元建模

选择 Maxwell 2D,通过精确计算电机的参数,对电机进行建模仿真。电机的定、转子铁心均采用 50W470 号硅钢板,定子绕组采用铜线,转子导条采用铜条,且转子轴设置为非导磁,并对电机的不同区域设置不同的剖分精度,对于鼠笼条、气隙等区域进行细致的剖分,对于电机的定子铁心进行粗略剖分,这样既保证了计算精度,也减少了计算时间,如图 1 所示。

1.3 利用场路耦合法建立外电路

采用瞬态场计算有限元电势时,根据 Maxwell 瞬态场理论分析可知,二维场建模不能考虑端部漏感与绕组电阻,而有限元计算出来的电势是包

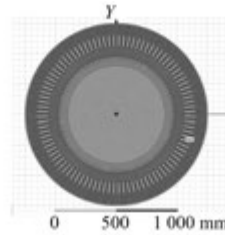


图 1 电机有限元剖分模型

含定子端部漏抗 X 上的压降以及定子绕组的压降的。由于定子绕组电阻值较小,可忽略不计,故在计算端电压时只需要减去端部漏抗上的压降。通过场路耦合法,在外电路中运用等效阻抗法来模拟额定负载工况,并将端部漏感加载到外电路中。通过外加电路给电机提供三相交流电压来模拟电机在实际工况中的起动过程。使用 Ansoft 自带的软件 Circuit Editor 搭建外接电路再与电机模型进行耦合,如图 2 所示。

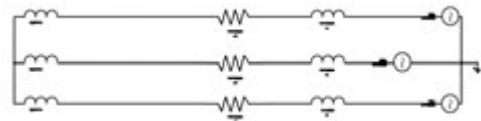


图 2 外电路

电机的端部漏抗与绕组电阻可用以下公式计算求得^[7-9]。

端部漏抗为

$$L_B = (N_s q)^2 \mu_0 (0.67 l_B - 0.43 \tau) \quad (1)$$

$$X_B = 2\pi f 2p L_B \quad (2)$$

式中: L_B ——每极每相线圈组的端部漏感;

N_s ——每槽串联导体数;

q ——每极每相槽数;

μ_0 ——真空磁导率, $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6}$ H/m;

l_B ——半匝线圈的端部长度;

τ ——极距;

X_B ——每项端部漏抗;

p ——极对数。

定子绕组每相电阻为

$$R_1 = K'_f \rho_w \frac{2N_1 l_0}{A_{01} a_1} \quad (3)$$

式中: K'_f ——集肤效应系数;

ρ_w ——基准工作温度时导体的电阻率;

N_1 ——每项线圈串联匝数;

l_0 ——线圈半匝平均长度;

A_{01} ——导体的截面面积;
 a_1 ——相绕组并联支路数。

将外电路中的电机绕组与二维有限元模型连接,从而实现电磁场与电路的耦合。

2 仿真与结果分析

分别对电机空载起动、风机负载起动和大负载起动 3 种起动工况方式进行模拟仿真,同时也对电机从电动机状态切换到发电机状态进行模拟仿真^[10-12]。在仿真电机的各种起动状态时,电机转子的初始转速均设置为零,并通过电机转子质量、半径设置电机的转动惯量和摩擦阻尼因数^[13]。

2.1 电机空载起动

电机空载起动时,设置电机负载转矩为零^[14-15]。接通三相交流电压源后电机的起动性能仿真曲线如图 3 所示。

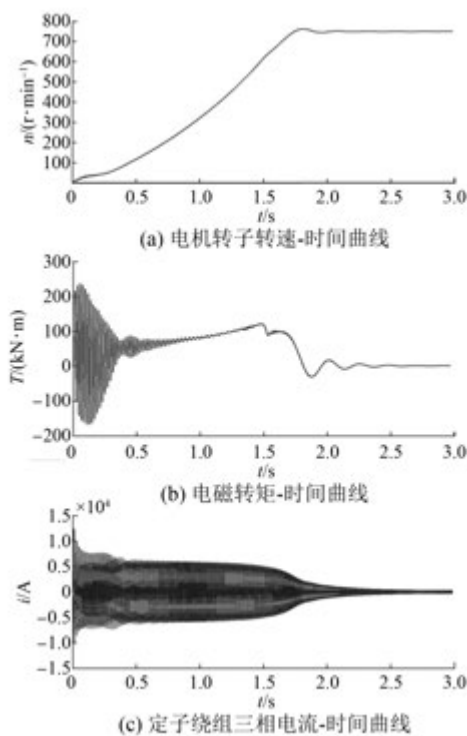


图 3 电机空载起动特性曲线

图 3(a)所示为电机转子转速-时间曲线,在起动大约 2 s 后达到运行稳定状态并始终维持额定转速运行。图 3(b)所示为电磁转矩-时间曲线,当电机从静止状态开始加速时电磁转矩振荡幅度非常大,并且电磁转矩的峰值可以达到 250 kN·m。随着转速的逐步稳定上升,电磁转矩

的振荡幅度逐渐减小。在起动约 1.65 s 后,电机的电磁转矩达到了最大值约为 100 kN·m。图 3(c)显示出对应的定子绕组电流,其波形与电磁转矩波形相对应。

当电机转速到达稳定状态 747 r/min 时,由于转差率非常小,电机的定子绕组电流、电磁转矩也都随着转差率相应降低并趋近于零。

2.2 电机风机负载起动

由于“汽电双驱”系统中异步电动机带动小汽轮机工作,而小汽轮机的转速和负载转矩是二次方关系,所以此处电机可以看成是加载风机负载。因此在仿真中模拟加载的负载可以设置为一个二次函数:

$$T_L = -K \cdot \text{Speed}^2 \quad (4)$$

式中: K ——负载系数,用来控制转矩上升的速率;

Speed——在转矩中输入的转子速率表达式;

“-”——所加转矩与电机转子旋转方向相反。

故当转子速度上升到额定转速或者恒定转速时,电机上加载的负载也变为恒定值。

由式(4)可知,当 K 的值越大,电机到达额定速度时的负载也越大,电机负载上升的曲线斜率也越陡。随机设置 2 个负载转矩系数,得出相应的负载曲线特性,结果如图 4(a)所示。

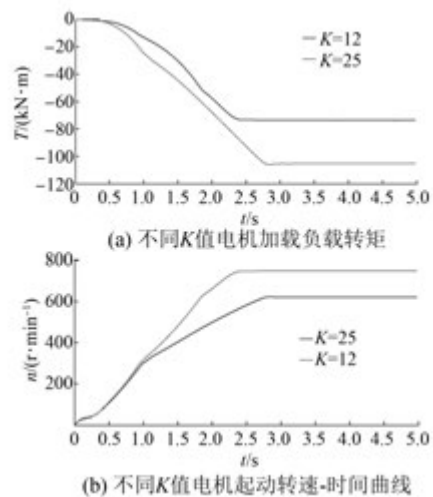


图 4 不同 K 值电机转速、转矩特性

图 4(a)中,2 条曲线分别为 K 为 12 和 25 时的负载转矩曲线。 K 值为 25 相比 K 值为 12,曲

线延迟约 0.5 s 进入稳定状态,且稳定后负载转矩相差约 $40 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。这是由于 K 值为 25 时,电机在稳定状态的转速明显低于额定转速,如图 4(b) 所示,电机转速恒定在 $600 \text{ r}/\text{min}$,此时电机已经达到最大负载转矩。由此可推导出,电机在额定转速时 K 的最大取值约为 22。

取 $K=12$,分析电机在风机负载状态下的瞬态起动过程。接通电压源后,电机的起动特性如图 5 所示。

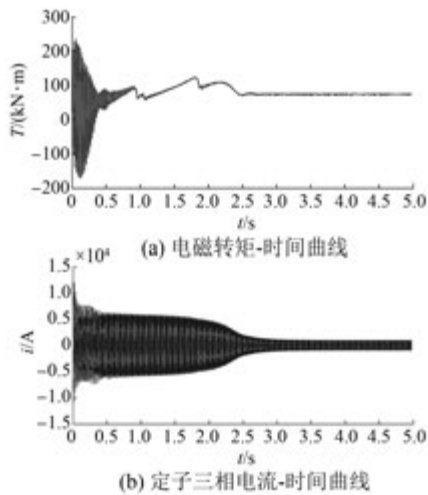


图 5 风机负载时电机起动特性曲线

电机在刚起动时与空载起动时的情形类似:电磁转矩、定子电流振荡幅度和数值都非常大。2.25 s 时电机转速接近额定转速,电磁转矩、定子电流都急剧下降。随后电磁转矩缓慢上升并且一直与负载转矩大小相等,电磁转矩接近 $60 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。空载起动与风机负载起动时相比,风机负载时转子转速增长速率略小于空载起动时的增长速率,但电磁振荡的时间略大于空载起动时的振荡时间。 K 的数值越大,起动时间和电磁振荡时间也越长。

2.3 大负载起动

设置电机的负载转矩为 $-43 \text{ kN}\cdot\text{m}$,接通外电压源后,电机的起动性能曲线如图 6 所示。

与空载起动和风机负载起动不同,大负载起动时系统需要 7.5 s 才能达到稳定转速。随着时间的增加电磁转矩也逐步升高,当电磁转矩超过负载转矩时,电机转速逐步增加。当电机的转速上升到额定转速时,电机的电磁转矩与负载转矩

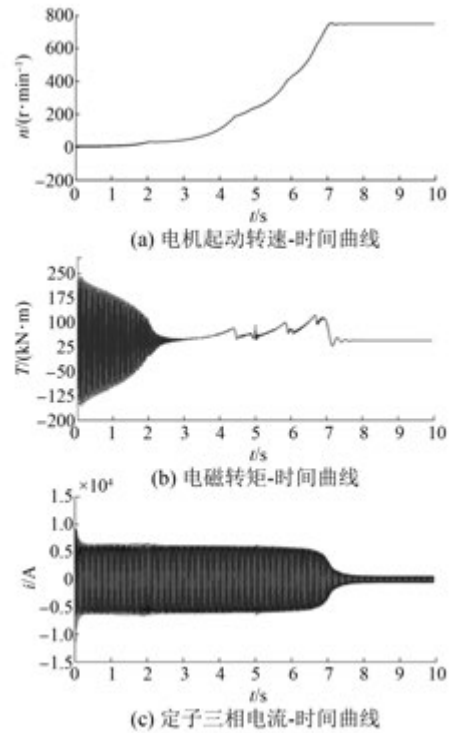


图 6 大负载起动性能曲线

大小相等。

当电机的负载转矩超过 $44 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,电机就无法正常起动,虽然负载转矩的数值远小于电机的最大转矩。由此可知,电机在起动阶段能承受的负载远小于电机的最大负载值。

2.4 电机发电状态仿真

当“汽电双驱”系统中汽轮机正常工作时,多余蒸汽使小汽轮机带动已经处于稳定运行状态的电动机做功,使异步电机转速超过同步转速从而开始发电。

仿真电机从电动机状态切换到发电机状态的瞬态,设置负载转矩方向与电机旋转方向相同,电机初始速度结合实际工况设置为 $747 \text{ r}/\text{min}$ 。在瞬时加载负载后发电机性能曲线如图 7 所示。

电机从 $747 \text{ r}/\text{min}$ 经历了 1 s 的振荡逐步平稳到 $753 \text{ r}/\text{min}$ 。相应的电磁转矩和瞬态电流也出现比较大的振荡。但是相比较电机起动状态所带来的振荡,此次的振荡持续时间明显小于起动状态,振荡初期绕组电流的峰值与电机起动时的绕组电流峰值无较大差异。电磁转矩的峰值与电机起动时的转矩峰值刚好方向相反。电机在 0.6 s 后稳定,并持续输出电能达到节能作用。

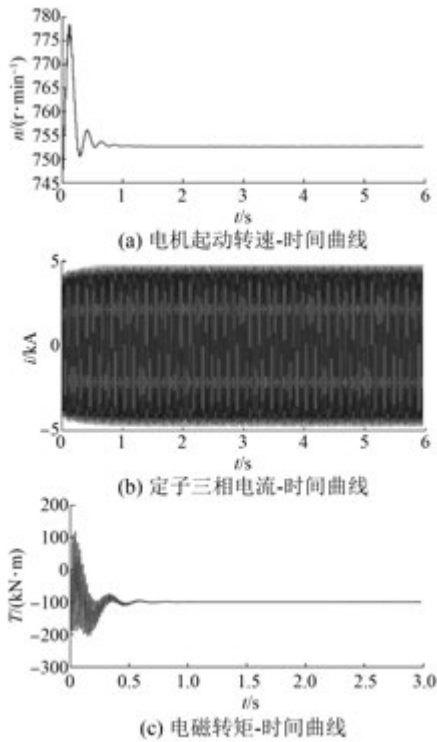


图7 发电机状态特性曲线

3 结 语

本文建立了“汽电双驱”系统电动机/发电机状态下的异步电机模型。基于 Ansoft 软件和其自带的 Circuit Editor 软件,利用场路耦合法编辑外电路,对电机的 3 种瞬态起动状态和电机瞬时切换发电状态进行仿真和分析。分析结果如下。

(1) 确定了该电机 3 种不同工况下的起动电流、电磁转矩和转速的关系。电机在起动过程中电磁转矩的振荡幅度大、振荡持续时间长;电机空载比电机满载要提前 5 s 进入稳定状态,即电机振荡时间随着负载转矩的增加而持续更久。

(2) 电机在电动机状态切换至发电机状态时也有较大的电磁振荡,比起动阶段持续时间短,但对发电时电能质量有一定的影响。

【参考文献】

[1] 李洪森,李小丽,苗青豪,等.汽电双驱高压大容量三相异步电机的研制[J].防爆电机,2017,52(2): 15-18.

[2] 刘石生,谢文,邝伟明,等.10 kV 异步电动机启动冲击的对策[J].南方电网技术,2014,8(3): 91-94.

[3] 赵博,张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[4] 王东,邹会权.基于 Ansoft RMxpirt 的三相异步电机有限元分析[J].能源研究与管理,2010(4): 69-71.

[5] 张立荣,樊馨月,张晓斌.基于 Ansoft 的异步电动机仿真方法研究[J].微特电机,2013,41(11): 38-41.

[6] 陈世坤.电机设计[M].北京:机械工业出版社,2000.

[7] 杨洋.基于 Ansoft 的交流鼠笼式异步电动机电磁场的有限元分析[J].船电技术,2007,27(4): 201-203.

[8] 杨凯辰,杨文焕,王峰,等.RMxpirt 在三相异步电动机中的 2D 电磁场分析[J].电子科技,2015,28(10): 158-159.

[9] 阎治安,崔新艺,苏少平,等.电机学[M].西安:西安交通大学出版社,2006.

[10] 乔鸣忠,梁京辉,张晓锋,等.多相感应电机场路耦合时步有限元分析[J].中国电机工程学报,2010,30(24): 75-80.

[11] 周剑明,邵可然,周克定.异步电机场路耦合数值模拟方法[J].大电机技术,1995(2): 28-33.

[12] 梁得亮,陈世坤.用时步有限元法分析实心转子异步电机的瞬态特性[J].中小型电机,1995,22(5): 3-6.

[13] DEMERDASH N A, BAMGURA J F, ARKADAN A A. A time-stepping coupled finite element-state space model for induction motor drives-part 1: model formulation and machine parameter computation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1465-1471.

[14] 唐政,黄大贵.基于场路耦合的永磁电机瞬态特性研究[J].微计算机信息,2009(1): 235-236.

[15] HO S L, FU W N. A comprehensive approach to the solution of direct-coupled multislice model of skewed rotor induction motors using time-stepping eddy-current finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(3): 2265-2273.

收稿日期: 2018-04-25

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

追踪行业最新动态