

井下涡轮发电机系统特性分析与实验

黄晓凡¹, 林恩怀¹, 干昌明²

(1. 北京市普利门电子科技有限公司, 北京 100041; 2. 中国航天科技集团九院 13 所, 北京 100854)

摘 要: 为了详细了解无线随钻测量仪器中磁耦合器传递扭矩式井下涡轮发电机系统的工作特性, 首先分析了其结构及工作原理, 基于 MATLAB 的 Simulink 仿真环境, 给出了井下涡轮发电机系统各组成部分的数学方程, 建立了井下涡轮发电机系统的仿真模型。仿真了井下涡轮发电机系统空载和负载 2 种工作状态下的发电机转速、磁耦合器输出扭矩等各输出量的典型动态响应波形, 分析了引起磁耦合器滑脱(失步)的 2 种情况(钻井液排量超过上限值或者发电机电磁扭矩与阻尼扭矩之和超过给定值)及其预防措施。空载时发电机整流输出电压随钻井液排量变化的实验数据与仿真结果基本吻合, 验证了井下涡轮发电机系统仿真模型的正确性。井下涡轮发电机仿真模型为进一步分析磁耦合器传递扭矩式井下涡轮发电机系统的性能提供了很好的平台。

关键词: 随钻测量 涡轮发电机 仿真模型 动态响应 磁耦合器 滑脱

中图分类号: TE927+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)06-0104-006

Performance Analysis of Downhole Turbine Alternator System and Its Experimental Verification

Huang Xiaofan¹, Lin Enhuai¹, Gan Changming²

(1. Beijing Pulimen Electronic Science & Technology Co. Ltd., Beijing, 100041, China; 2. The 13th Institute of China Aerospace Science and Technology Corporation 9th Academy, Beijing, 100854, China)

Abstract: To get a clear understanding of the operating performance of downhole turbine alternator system through magnetic coupling used in the measurement while drilling(MWD)instrument, its structure and operating principle were analyzed firstly, and then the mathematic equation of turbine generator was proposed, a simulation model of the entire system was built based on the simulation environment of Simulink in MATLAB. The simulation results gave the typical dynamic response waveforms of the output parameters such as RPM of alternator, output torque of magnetic coupling and so on in two operating modes (no-load on alternator and load on alternator) of the system, and two cases of asynchronous slip in magnetic coupling (mud flow rate exceeds the upper limit or the sum of electromagnetic torque and damping torque exceeds the rated value) and their prevention measures were analyzed. The experiment data change of rectified output DC voltage and mud flow rate in no-load on alternator coincided basically, which proved the correctness of the simulation model. The simulation model provides a good basis for further analyzing the downhole turbine generator system that through magnetic coupling the torque transmitted.

Key words: measurement while drilling; turbine electric generator; simulation model; dynamic response; magnetic coupler; slippage

在无线随钻测量(MWD)仪器中, 一般都需要给井下电子测量总成及钻井液脉冲发生器执行机构提供电能, 提供电能的方式有锂电池和井下涡轮发电机 2 种。由于利用锂电池供电存在着安全性差等诸多缺点, 于是无线随钻测量仪器越来越多地利用井下涡轮发电机供电^[1]。涡轮与发电机转轴之间传

收稿日期: 2012-02-14; **改回日期:** 2012-10-12。

作者简介: 黄晓凡(1976—), 男, 河南桐柏人, 1999 年毕业于湖南大学电机电器及其控制专业, 2002 年获航天科技集团一院 13 所电机电器及其控制专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事无线随钻测斜仪、旋转导向系统用发电机、电动机、电磁阀的设计及其控制方面的研究。

联系方式: huangxiaoxiaofan@126.com。

递扭矩的方式有硬连接和磁耦合器 2 种。硬连接方式需要在涡轮和发电机转轴之间安装旋转动密封,存在着容易泄露及动密封易磨坏等问题。而磁耦合器传递扭矩式涡轮发电机的涡轮通过磁耦合与发电机转轴连接,省去了旋转动密封^[2],可有效避免该类问题,在无线随钻测量仪器中得到了广泛应用。文献[1-3]分别对磁耦合器传递扭矩式涡轮发电机系统中的涡轮、磁耦合器及发电机部分的性能单独进行了分析,而对包括三者在内的整个涡轮发电机系统的性能分析,目前还很少有文献提及。因此,笔者建立了整个涡轮发电机系统的仿真模型,并分析了发电机空载和负载 2 种主要工作状态下的特性。

1 涡轮发电机系统组成及工作原理

磁耦合器传递扭矩式涡轮发电机系统主要由涡轮、磁耦合器和三相永磁同步发电机组成。磁耦合器由外磁钢组件和内磁钢组件组成,外磁钢组件和涡轮相连,内磁钢组件和发电机转轴相连。外磁钢组件和内磁钢组件之间通过隔离套隔离钻井液,使发电机处于空气或液压油中,不再需要旋转动密封连接涡轮和发电机转轴。井下循环钻井液带动涡轮旋转,通过磁耦合器的外磁钢组件和内磁钢组件之间的磁耦合作用带动发电机转轴旋转发电。图 1 为磁耦合器部分的横剖面, xOy 坐标系为在钻铤横剖面上的静止坐标系,涡轮、磁耦合器等在 xOy 坐标系中做旋转运动,外磁钢组件中的磁钢中心线与 y 轴夹角为 θ_1 ,内磁钢组件中的磁钢中心线与 y 轴夹角为 θ_2 ,设定逆时针转动时角度增大。

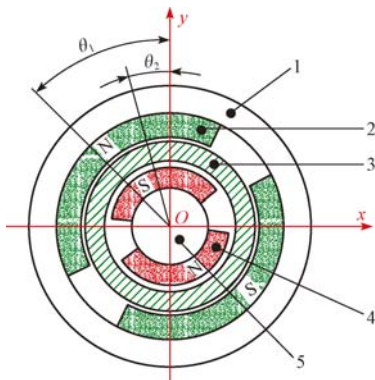


图 1 磁耦合器部分的横剖面

Fig. 1 Cross section of magnetic coupler

1. 涡轮; 2. 外磁钢组件; 3. 隔离套; 4. 内磁钢组件; 5. 发电机转轴

2 数学方程及 Simulink 仿真模型

2.1 涡轮部分

对于给定参数(叶片内、外径,叶片螺旋角和叶片数等)的涡轮,根据流体力学可得其扭矩特性方程为:

$$T_1 = T_0 - k_1 \omega_1 \quad (1)$$

$$T_0 = k_p Q^2 = k_2 Q^2 \quad (2)$$

运动方程为:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = T_1 - T_2 - B_1 \omega_1 \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1 \quad (4)$$

式中: T_0 为涡轮的堵转力矩, $N \cdot m$; T_1 为涡轮的输出力矩, $N \cdot m$; ω_1 为涡轮的角速度, rad/s ; ρ 为钻井液密度, kg/L ; Q 为钻井液排量, L/s ; T_2 为涡轮的负载扭矩(等于磁耦合器的输出扭矩,即磁耦合器内、外磁钢组件之间产生的扭矩 T_c), $N \cdot m$; J_1 为涡轮(含外磁钢组件)的转动惯量, $kg \cdot m^2$; k , k_1 和 k_2 为系数; B_1 为涡轮部分等效阻尼系数。

所研究涡轮部分的参数分别为: $k_1 = 0.075$, $k_2 = 0.015$, $J_1 = 1.65 \times 10^{-3} kg \cdot m^2$, $B_1 = 0.003 N \cdot m \cdot s/rad$ 。

式(1)、式(3)和式(4)经拉氏变换得涡轮运动方程的传递函数为:

$$\theta_1(s) = \frac{1}{(0.00165 s^2 + 0.078 s)} [T_0(s) - T_2(s)] \quad (5)$$

由式(2)和(5)可得涡轮部分的 Simulink 仿真模型,如图 2 所示^[4]。3 个排量 Q 信号输入组合可以模拟不同的排量,作为涡轮模块的一路输入信号,另外接收来自磁耦合器模块输出的负载扭矩 T_2 作为另一路输入信号, θ_1 则作为输出信号,将 θ_1 微分并乘以系数 $\frac{60}{2\pi}$ 即得到涡轮转速 n_1 。

2.2 磁耦合器部分

由图 1,根据文献[5]知磁耦合器产生的扭矩 T_c (即提供给发电机转轴的扭矩)可近似为:

$$T_c = T_{c \max} \sin[p_{nc}(\theta_1 - \theta_2)] \quad (6)$$

式中: p_{nc} 为磁耦合器内外磁钢的极对数(内、外磁钢极对数必须相同); $T_{c \max}$ 为磁耦合器最大输出扭矩, $N \cdot m$ 。

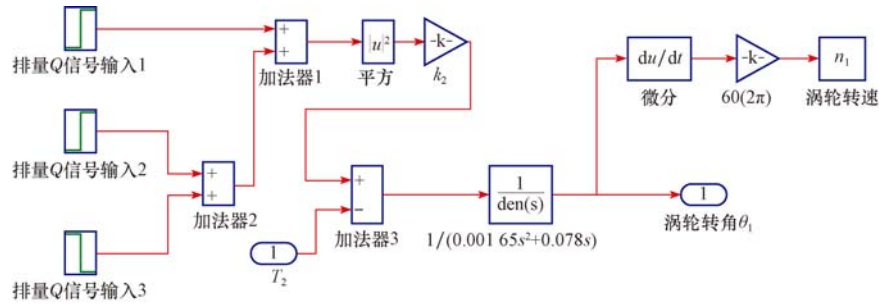


图2 涡轮 Simulink 仿真模型

Fig. 2 Simulink simulation model of turbine

所研究的磁耦合器采用 1 对极磁钢,最大输出扭矩为 $4 \text{ N} \cdot \text{m}$,故有:

$$T_c = 4 \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (7)$$

仿真计算时令初始值 $\theta_1 = \theta_2 = 0 \text{ rad}$ 。

由式(7)可得磁耦合器部分的 Simulink 仿真模型,如图 3 所示。

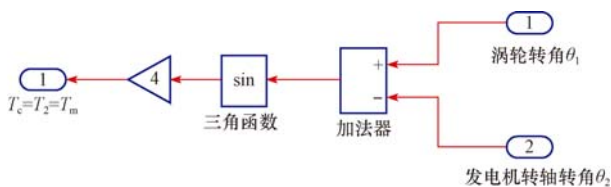


图3 磁耦合器 Simulink 仿真模型

Fig. 3 Simulink simulation model of magnetic coupler

输入信号为 θ_1 和 θ_2 ,输出信号为 T_c (即 T_2 及 $-T_m$)。

2.3 发电机部分

发电机部分利用 Simulink 中 Sympowersystems 模块库中标准的永磁同步电机模型即可^[6-7]。标准永磁同步电机模型是建立在 $d-q$ 轴数学模型基础上的^[8],只需要输入发电机直轴电感 L_d 、交轴电感 L_q 、极对数 p_n 、相电阻 R 、转子磁链 ψ_m 、发电机转轴转动惯量 J_2 和发电机部分等效阻尼系数 B_2 。输出量为发电机转轴转角 θ_2 ,三相反电势 e_a, e_b 和 e_c 等。限于篇幅,发电机的数学方程不再赘述。所研究发电机的参数为: $L_d = L_q = 1 \text{ mH}$, $p_n = 3$, $R = 3 \Omega$, $\psi_m = 0.067 2 \text{ Wb}$, $J_2 = 0.000 28 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $B_2 = 0.003 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$ 。

图 4 为带整流桥的三相永磁同步发电机 Simulink 仿真模型^[6],图 5 为其电路示意图。需要说明的是,利用永磁同步电机标准模型时,要将输入扭矩 T_m 设为负值,并假定发电机转轴逆时针转动,这样永磁同步电机才处于发电状态,得出的转轴角度才

满足逆时针转动时角度增加的条件。

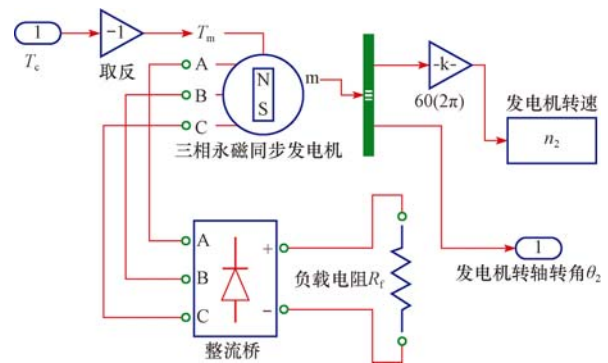


图4 带整流桥发电机部分 Simulink 仿真模型

Fig. 4 Simulink simulation model of bridge rectifier generator

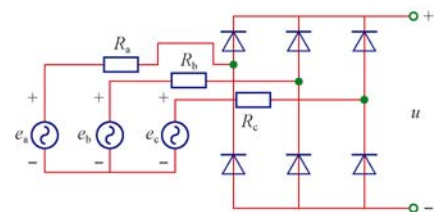


图5 带整流桥发电机电路示意

Fig. 5 Electric circuit of bridge rectifier generator

图 5 中, e_a 为发电机 A 相反电势, e_b 为 B 相反电势, e_c 为 C 相反电势, R_a, R_b 和 R_c 为三相内阻(即 R)。发电机 3 个线反电势 $e_{ab} = e_a - e_b$, $e_{bc} = e_b - e_c$, $e_{ca} = e_c - e_a$ 。

2.4 整个系统

将图 2、图 3 和图 4 综合在一起即得到包括涡轮、磁耦合器及发电机(带整流桥)整个系统的 Simulink 仿真模型。笔者研究的整个系统额定工作点为:额定排量 $Q_N = 40 \text{ L/s}$,发电机额定空载转速 $n_N = 3 000 \text{ r/min}$,发电机额定空载整流输出电压 $u_N = 100 \text{ V}$,额定输出功率 $P_{ON} = 300 \text{ W}$ 。

3 仿真结果与分析

3.1 发电机空载

钻井液排量 Q 的变化规律为: 时间 $t=0$ s 时排量为 40 L/s; $t=0.5$ s 时排量从 40 L/s 增至 60 L/s; $t=1$ s 时排量从 60 L/s 降至 40 L/s。

图 6 为发电机整流输出电压 u 曲线(即发电机 3 个线反电势 e_{ab} , e_{bc} 和 e_{ca} 的整流输出曲线)。从图 6 可以看出: 发电机整流输出电压 u 从 0 s 经过约 0.3 s 的过渡时间达到额定电压 100 V; 在 0.5 s 时, 由于排量增至 60 L/s, 发电机转速跟不上涡轮转速(见图 7), 磁耦合器开始滑脱(失步), 发电机整流输出电压 u 在 0.8 s 时基本变为 0。

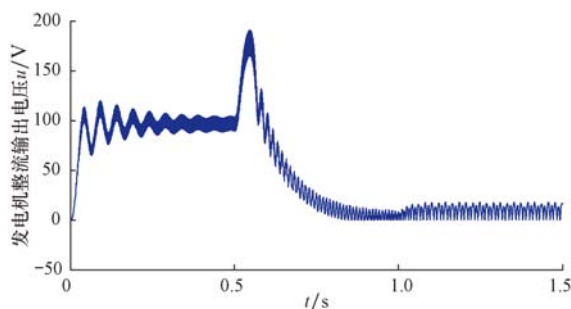


图 6 空载时发电机整流输出电压 u 曲线

Fig. 6 Curve of rectified output voltage u with no-load on alternator

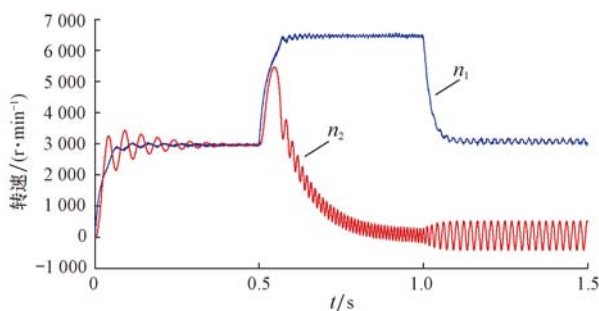


图 7 空载时涡轮转速 n_1 及发电机转速 n_2 曲线

Fig. 7 Curves of turbine speed n_1 and alternator speed n_2 with no-load on alternator

从图 7 可以看出, 涡轮发电机起动过程中(0~0.3 s), 涡轮转速 n_1 和发电机转速 n_2 不完全同步(时而 $n_1 > n_2$, 时而 $n_2 > n_1$), 但是磁耦合器并未滑脱(失步)。

图 8 为发电机空载时涡轮转角与发电机转角曲线。从图 8 可以看出, 当磁耦合器滑脱(失步)后, 发电机转轴转角 θ_2 基本上不变, 结合图 7 可知此时发

电机转轴处于小幅振荡的准静止状态(注意此时发电机转速并不为 0)。

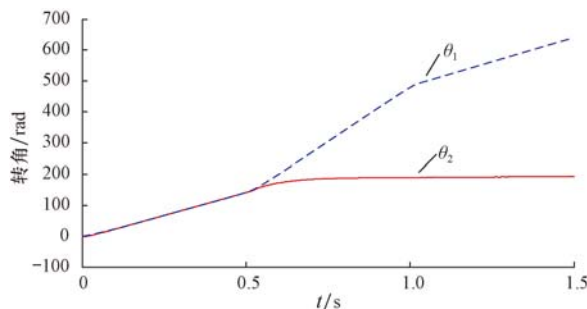


图 8 空载时涡轮转角 θ_1 及发电机转轴转角曲线

Fig. 8 Curves of turbine rotation angle θ_1 and alternator rotation angle θ_2 with no-load on alternator

图 9 为磁耦合器输出扭矩 T_c 曲线。从图 9 可看出, 在 0.5 s 时, 磁耦合器开始滑脱(失步), 磁耦合器滑脱(失步)后输出扭矩 T_c 表现为大幅振荡(幅值等于磁耦合器正负最大输出扭矩, 即 ± 4 N·m)。

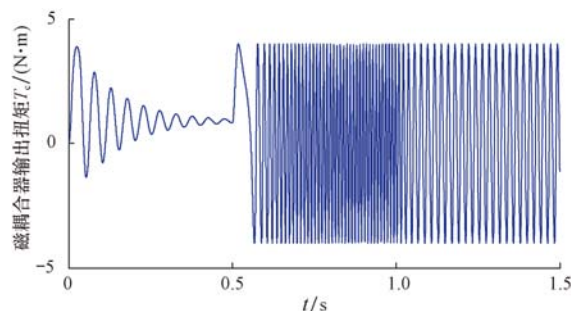


图 9 空载时磁耦合器输出扭矩 T_c 曲线

Fig. 9 Curve of output torque T_c of magnetic coupling with no-load on alternator

综上所述, 磁耦合器滑脱(失步)的表现: 发电机整流输出电压基本为 0, 发电机转轴处于小幅振荡的准静止状态, 磁耦合器输出扭矩处于大幅振荡状态。通过改变排量, 经过一系列仿真可知, 如果排量在额定排量 Q_N 基础上增大 ΔQ , 涡轮发电机系统就会处于磁耦合器滑脱(失步)状态, 系统就不能正常工作。或者说, 要适用于较高排量, 必须更换不同型号的涡轮。对于某一涡轮发电机系统具体的上限排量 $Q_N + \Delta Q$ 可以通过仿真模型仿真得到。对于笔者所研究的系统, $Q_N + \Delta Q = 58$ L/s。

3.2 发电机负载

外接负载电阻变化规律为: $t=0$ s 时开路, 发电机空载起动; $t=0.5$ s 突加负载电阻 $R_l = 10 \Omega$; $t=1$ s 时负载电阻 $R_l = 3 \Omega$ 。按时间过程分析如下:

1) $t=0\sim 0.5$ s时,各种曲线的波形与发电机空载时相同。

2) $t=0.5$ s时,突加 $R_f=10\ \Omega$ 负载电阻后,发电机转速从 3 000 r/min 降为 2 750 r/min(见图 10)。于是可知发电机线反电势将降至 91 V。因为发电机线内阻为 $R_{ab}=2R=6\ \Omega$,而且发电机电感较小(1 mH),电枢反应可以忽略,于是发电机整流输出电压 u 从 100 V 减小为 56 V(见图 11)。由电机学理论可知^[8-9],发电机电磁功率 $P_e=517$ W,电磁扭矩 $T_e=1.8\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。而发电机在 2 750 r/min 转速下的阻尼扭矩为 $0.8\ \text{N}\cdot\text{m}$,于是发电机电磁扭矩及阻尼扭矩之和为 $2.6\ \text{N}\cdot\text{m}$,正好等于磁耦合器输出扭矩(见图 12)。

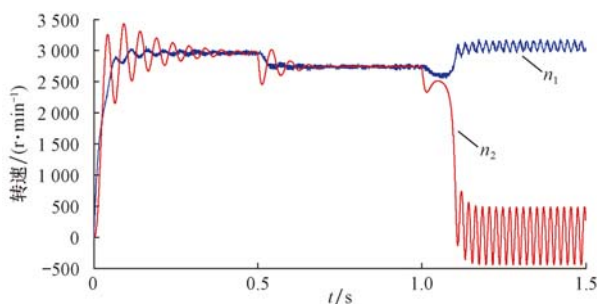


图 10 负载时涡轮转速 n_1 及发电机转速 n_2 曲线

Fig. 10 Curves of turbine speed n_1 and alternator speed n_2 with load on alternator

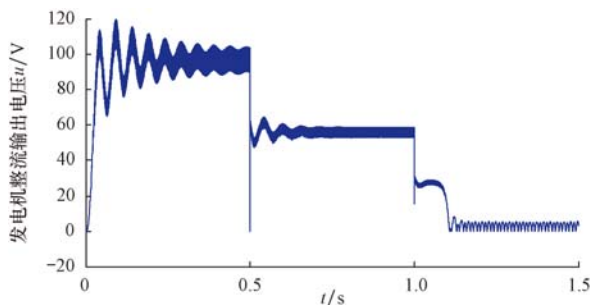


图 11 负载时发电机整流输出电压 u 曲线

Fig. 11 Curve of output DC voltage of alternator with load

3) $t=1.0$ s时, R_f 从 $10\ \Omega$ 减小为 $3\ \Omega$ 。在 $1.0\sim 1.1$ s 时间内,发电机转速 n_2 从 2 750 r/min 降至 2 500 r/min(见图 10),发电机电磁功率为 729 W,电磁扭矩为 $2.70\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。发电机在 2 500 r/min 转速下的阻尼扭矩为 $0.75\ \text{N}\cdot\text{m}$,发电机电磁扭矩及阻尼扭矩之和为 $3.45\ \text{N}\cdot\text{m}$,此值已经很接近磁耦合器最大输出扭矩($4\ \text{N}\cdot\text{m}$),因此也导致了磁耦合器在 1.1 s 之后开始滑脱(失步)(见图 12 和图 13)。

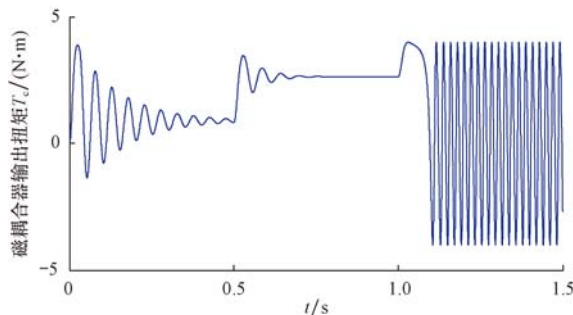


图 12 负载时磁耦合器输出扭矩 T_c 曲线

Fig. 12 Curve of output torque T_c of magnetic coupling with load on alternator

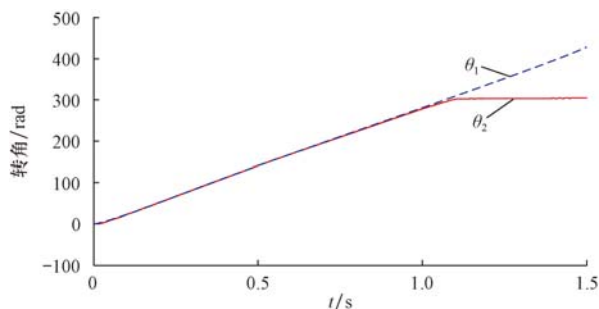


图 13 负载时涡轮转角 θ_1 及发电机转轴转角 θ_2 曲线

Fig. 13 Curves of turbine rotation angle θ_1 and alternator rotation angle θ_2 with load on alternator

类比同步电机静态过载倍数的定义^[9],将发电机电磁扭矩及阻尼扭矩之和记为 T_f ,定义 $k_f = \frac{T_{c\max}}{T_f}$ 。仿真及经验表明, $k_f \geq 2$ 时磁耦合器一般比较稳定,不会滑脱(失步)。笔者所研究系统允许的最大 T_f 为 $3\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。当然每个涡轮发电机系统的最大 T_f 不一样(取决于涡轮的转动惯量 J_1 、发电机转轴转动惯量 J_2 等参数),但是总可以利用仿真模型仿真得到系统稳定工作允许的最大 T_f 。

4 实验验证及结果

将涡轮发电机下井,测试了发电机空载时整流输出电压 u 随钻井液排量 Q 的变化情况,结果见表 1。从表 1 可以看出:钻井液排量为 40 L/s 时,发电机空载输出电压 97 V;而仿真得到的结果是,钻井液排量为 40 L/s 时,发电机空载输出电压为 100 V。二者基本一致。整个发电机系统在钻井液排量为 35~45 L/s 时输出电压正常,当钻井液排量增至 60 L/s 时已经滑脱(失步)(注意,此时还有 20 V 左右整流输出电压,因为如前所述,发电机转轴还有小幅振荡转速 n_2)。考虑到建模参数误差及实验误

差,实验数据和仿真数据基本一致。另外,从室内实验现象观察到,当磁耦合器滑脱(失步)时,发电机转轴处于小幅振荡的准静止状态,也与前面仿真结果一致。实验结果基本证明了仿真模型的正确性。

表 1 发电机空载时整流输出电压 u 与钻井液排量 Q 的关系
Table 1 Relationship of no load output DC voltage u of alternator and mud flow rate Q

钻井液排量/(L·s ⁻¹)	输出电压/V	
	实验	仿真
35	75	72
38	82	86
40	97	100
42	109	105
45	125	120
60	27	20

5 结 论

1) 井下涡轮发电机系统仿真及实验结果表明,只要钻井液排量不超过排量上限,发电机电磁扭矩及阻尼扭矩之和不超过一个定值,磁耦合器就不会滑脱(失步),涡轮发电机系统就能稳定工作。

2) 引起磁耦合器滑脱(失步)的原因,除了钻井液排量过大、发电机电磁扭矩及阻尼扭矩之和过大之外,还有其他原因,比如钻井液排量的周期性波动或者发电机电磁扭矩的周期性波动都有可能造成系统共振,此时即使钻井液排量、发电机电磁扭矩及阻尼扭矩之和没有超过上限,也有可能造成磁耦合器滑脱(失步),这需要进行进一步的仿真分析。

3) 井下涡轮发电机系统下井作业前,可以利用仿真模型进行性能分析,以确定钻井液排量上限、发电机电磁扭矩上限等参数,为井下涡轮发电机正常工作提供理论指导。

参 考 文 献

References

[1] 张先勇,冯进,罗海兵,等. 井下涡轮式发电机水力性能研究

[J]. 机械研究与应用,2006,19(6):44-45.

Zhang Xianyong, Feng Jin, Luo Haibing, et al. Hydraulic behavior research of under-well turbine generator[J]. Mechanical Research & Application, 2006, 19(6): 44-45.

[2] 菅志军,王智明,贺麦红,等. 连续波钻井液脉冲发生器用磁力耦合器设计[J]. 石油机械,2008,36(11):35-36.

Jian Zhijun, Wang Zhiming, He Maihong, et al. Design of magnetic coupler of continuous wave drilling fluid pulse generator[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(11): 35-36.

[3] 李林,张连成,魏志刚,等. 随钻测量中井下大功率发电技术的研究与试验[J]. 石油钻探技术,2008,36(5):24-27.

Li Lin, Zhang Liancheng, Wei Zhigang, et al. Research and experiment of downhole powerful generator for measurement while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(5): 24-27.

[4] 王忠礼,段慧达,高玉峰. MATLAB 应用技术:在电气工程与自动化专业中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2007:50-55.

Wang Zhongli, Duan Huida, Gao Yufeng. Application of MATLAB technology: its use in electrical engineering and automation specialty[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 50-55.

[5] 赵克中. 磁力驱动技术与设备[M]. 北京:化学工业出版社,2004:21-22.

Zhao Kezhong. Magnetic drive technology and device[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 21-22.

[6] 王晨,庄劲武. 带整流负载同步发电机的 MATLAB 仿真与实验研究[J]. 电机与控制应用,2005,32(7):10-13.

Wang Chen, Zhuang Jinwu. Research on experiment and MATLAB simulation of synchronous generator with rectified loads[J]. Electric Machines & Control Application, 2005, 32(7): 10-13.

[7] 周渊深. 交直流调速系统与 MATLAB 仿真[M]. 北京:中国电力出版社,2007:13-17.

Zhou Yuanshen. AC and DC speed control system and MATLAB simulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 13-17.

[8] 陈世元. 电机学[M]. 北京:中国电力出版社,2004:321-325.

Chen Shiyuan. Electric machinery[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 321-325.

[9] 许实章. 电机学:下册[M]. 北京:机械工业出版社,1990:210-220.

Xu Shizhang. Electric machinery: part II [M]. Beijing: China Machine Press, 1990: 210-220.