

飞机开关磁阻发电系统故障推理模型研究

李 宁, 雷洪利, 韩建定, 朱喜华
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:开关磁阻发电系统是飞机供电系统的核心部分,为了研究飞机供电系统健康管理技术,减少故障推理模型的检测参数,满足飞机可靠性方面的要求,利用 MATLAB 软件对开关磁阻发电机典型电气故障进行了仿真分析,并引入记忆模块解决以往仿真过程中产生的代数环问题。然后将发电机输出电压信号利用 EMD 算法进行分解,将其分解后的各层频率信号的标准差作为特征量训练神经网络,得出开关磁阻发电系统的故障推理模型,本模型只需测量输出电压一个参数,减少了检测参数的数量,为开关磁阻发电系统故障预测模型及飞机整个供电系统健康管理系统的开发奠定了基础。

关键词:开关磁阻发电机;EMD;MATLAB/simulink;神经网络;故障

中图分类号:TM 31

文献标识码:A

文章编号:1002-087X(2011)05-0563-04

Fault deducing model research of switched reluctance power system of airplane based on PHM

LI Ning, LEI Hong-li, HAN Jian-ding, ZHU Xi-hua

(Engineering College, Air-force Engineering University, Xi'an Shanxi 710038, China)

Abstract: The switched reluctance power system is the core of airplane power system. In order to research the application of PHM in the power system of airplane, reduce the measure parameters of the fault deducing model, and satisfy the requirements of airplane dependability, the typical electric faults of SRG was carefully analyzed in this paper with MATLAB, and the memory module was used to solve the algebraic loop problem. The SRG voltage signal with EMD was analyzed, and the decomposed signal as character data was used to train the neural network and gain the fault concluding model of SRG main electrical power system. Only one parameter of the output voltage was needed to be measured with this model, which reduced the number of the measured parameters and was meaningful to the research of the prognostic model and PHM system of power system.

Key words: switched reluctance generator; EMD; MATLAB/simulink; artificial neural network; fault

健康管理系统的應用為飛機供電系統的可靠性、維護的高效性、故障診斷及容錯能力的提高提供了有力的保障,其中故障推理模型、故障預測模型的建立是健康管理系統的關鍵技術^[1],但是檢測參數過多健康管理系统研究的一大課題。特別是航空領域,多參數測量所需的大量設備會降低系統的可靠性。

開關磁阻發電系統是一種新的飛機電源系統,它是伴隨著多電飛機對電源系統性能所提出的更高要求而產生並迅速發展起來的一項新技術,具有發電容量大、效率高、起動和發電組合容易等優點^[2-5]。

本文對其典型電氣故障進行了分析,借助 MATLAB 軟件對其故障進行了仿真,為了減少特徵參數的個數,選擇開關磁阻發電機輸出電壓信號為特徵信號,利用 EMD 算法對其按頻率高低進行分解,利用分解後不同頻率信號的標準差來

訓練神經網絡,最後建立開關磁阻發電系統的故障推理模型。

1 開關磁阻發電系統的基本原理

本文研究的三相 6-4 結構的開關磁阻發電系統原理如圖 1 所示,開關磁阻發電機發電過程分為勵磁階段和發電階段,每相由兩個 IGBT 作為開關器件,控制每相繞組的兩個功率開關管導通,SRG 處於勵磁階段;控制每相繞組的兩個功率開關管均斷,該相通過續流二極管釋放能量,SRG 處於發電階段,發電機輸出的電功率是發電階段的發電功率與勵磁階段消耗功率之差^[6]。

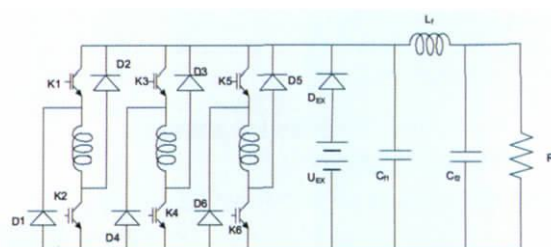


图 1 开关磁阻发电系统原理

收稿日期:2011-03-02

基金项目:陕西省自然科学基金(SJ08F05)

作者简介:李宁(1985—),男,宁夏回族自治区人,博士生,主要研究方向为电能监控与处理。

2 开关磁阻发电机故障及仿真分析

主电源分系统是飞机整个供电系统的核心部分,根据电源系统结构功能和测试性设计准则,可将其分为开关磁阻发电机、功率变换器和发电机控制器三部分^[7],为了方便后文研究,本文现对开关磁阻发电机的电气故障、故障编号确定如下:定子绕组开路,0001;绕组短路,0010;绕组匝间短路,0011;绕组正端输出接地,0100;功率管开路,0101;功率管短路,0110;功率管输出接地,0111;正常状态的编号为1000。

2.1 开关磁阻发电机的仿真模型

2.1.1 相电压方程式

若相绕组电流不为0,且电机工作在 $\partial L/\partial \theta < 0$,电磁转矩为负,要使电机转动需外加正机械力矩,此时电机工作在发电状态,忽略功率器件饱和压降及相间互感,在发电模式下的相电压平衡方程式为^[8]:

$$u = R_s i + L \frac{di}{dt} + \frac{dL}{d\theta} \omega i \quad (1)$$

式中: u 为相绕组电压; R_s 为相绕组电阻; i 为相绕组电流; L 为该相绕组自感; ω 为转子的角速度。

2.1.2 相绕组电感的模型

本文 SRG 的各项参数代码为: R 为转子半径; D 为转子轴长度; g 为定转子凸极对齐时气隙长度; N 为每相绕组串联总匝数; β_s 为定子极弧; β_r 为转子极弧; μ_0 为气隙磁导率; α 为定子凸极和转子凸极对齐部分的弧度。

假设转子铁心的磁导率为无穷大,忽略漏磁通、边缘磁通和相间互感,相绕组的电感表示为^[9]:

$$L = \frac{N^2 \mu_0 \alpha R D}{2 g} \quad (2)$$

根据图2的SRG相绕组电感线性模型,可得SRG的电感表达式为:

$$L(\theta_i) = \begin{cases} L_{\min} & \theta_0 \leq \theta_i < \theta_1 \\ K(\theta_i - \theta_1) + L_{\min} & \theta_1 \leq \theta_i < \theta_2 \\ L_{\max} & \theta_2 \leq \theta_i < \theta_3 \\ L_{\max} - K(\theta_i - \theta_3) & \theta_3 \leq \theta_i < \theta_4 \\ L_{\min} & \theta_4 \leq \theta_i < \theta_5 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k = (L_{\max} - L_{\min})/\beta_s$, $L_{\max} = N^2 \mu_0 \beta_s R D / 2 g$, L_{\min} 为绕组电感的最大、最小值^[10]。

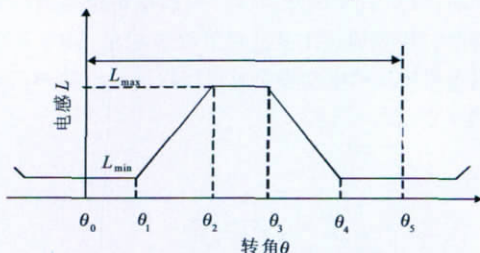


图2 SRG相绕组电感线性模型

2.2 仿真模型及结果分析

利用 MATLAB/Simulink 中的电力系统工具箱 PSB 搭建系统仿真模型如图3,主要仿真参数为:相电阻 0.1 Ω,导通角 28°,关断角 55°,转速 7 500 rad/s,负载电阻 114 Ω,输出电

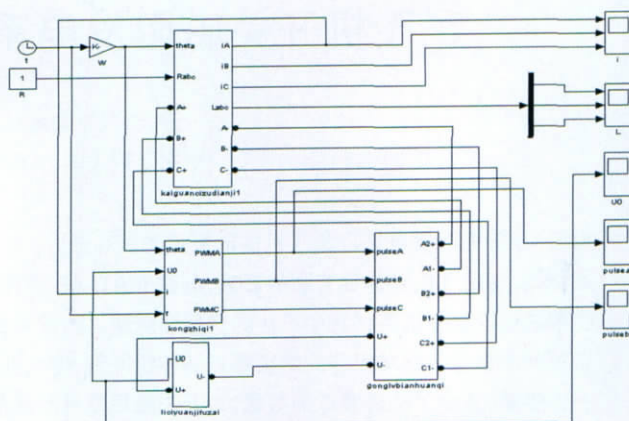


图3 SRG仿真模型

容 2 F, PID 参数, $K_p=36$, $K_i=5$, $K_d=0$, 转子极弧 0.534 rad, 定子极弧 0.581 rad, 单边气隙长度 0.3×10^{-3} m, 仿真时间 0.015 s, 方针算法 ode23tb, 其中绕组开路故障通过切除本相开关管的驱动信号来实现, 故障设定时间为 0.009 5 s, 控制电路检测本相绕组电流值, 当其超过额定值时, 控制切除本相绕组, 典型故障的仿真结果如图4、图5所示, 由于本文故障推理模型以输出电压为特征量, 所以仿真只给出典型故障下的电压图。另外针对仿真产生的代数环问题, 文献[1]引入极点来消除代数环, 本文在此基础上利用 MATLAB/Simulink 中的 Memory 模块很好地解决了这一问题。

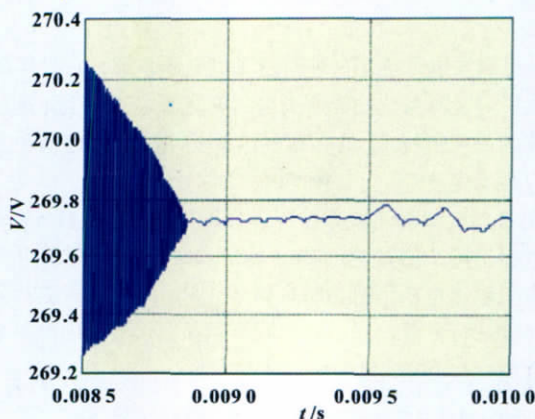
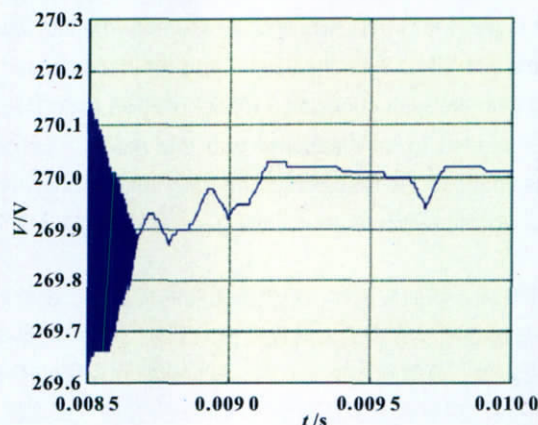


图4 功率管开路、短路电压

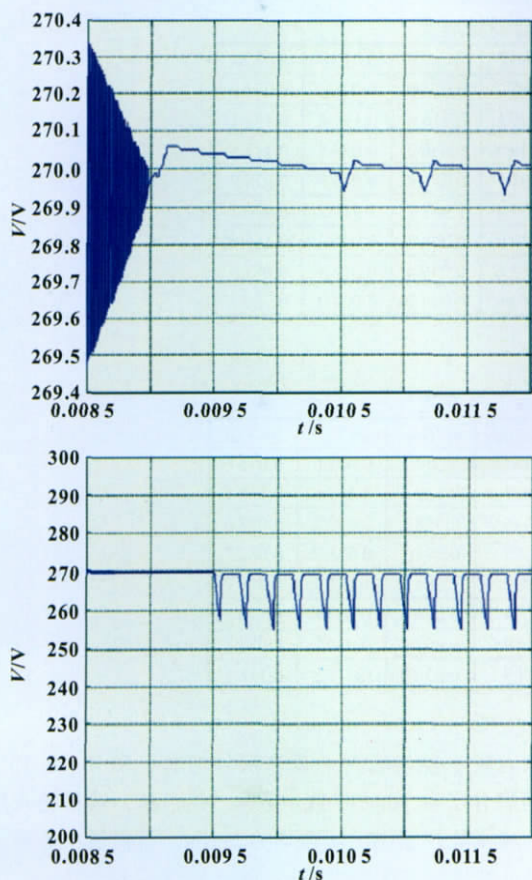


图5 绕组开路、接地故障电压

3 基于 EMD 算法的开关磁阻发电机故障特征提取研究

3.1 EMD 算法的基本原理

Norden E.Huang 提出的经验模式分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 是一种新的自适应时频分析方法, 它根据被分析信号的内在结构特征, 将信号分解为若干个基本模式分量 (IMF), 实现了信号自适应的频带划分, 不同的基本模式分量包含有不同的故障信息^[10]。其经验模式分解原理如下:

(1) 假设原始信号为 $x(t)$, 用三次样条连接所有的局部极值点得到上下包络线, 上下包络线的均值为 $m_{11}(t)$, $x(t)$ 与 $m_{11}(t)$ 的差值定义为 $h_{11}(t)$, 则

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \quad (4)$$

(2) 判断 $h_{11}(t)$ 是否为基本模式分量, 若 $h_{11}(t)$ 不满足基本模式分量的两个条件, 则将视为“新的原始信号”, 重复以上步骤, 直到满足两个条件为止。此时记 $c_1(t) = h_{11}(t)$, 则 $c_1(t)$ 为信号 $x(t)$ 的第一个基本模式分量, 它代表信号 $x(t)$ 的最高频率分量。

(3) 将 $c_1(t)$ 从信号 $x(t)$ 中分离出来, 得到一个去掉高频分量的差信号, 有:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (5)$$

将 $r_1(t)$ 视为新的原始时间序列, 重复以上步骤, 得到第二个基本模式分量 $c_2(t)$ 。

(4) 重复以上步骤, 得到 $c_3(t), \dots, c_n(t)$, 此时 $x_n(t)$ 变成一个

单调序列, 其中不再包含任何模式的信息, 这就是原始信号的余项 $r_n(t) = x_n(t)$ 。

这样, 原始信号 $x(t)$ 被分解成个基本模式分量 $c_i(t)$ 和一个余项残差 $r_n(t)$ 之和, 即有:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (6)$$

3.2 基于 EMD 算法的开关磁阻发电机特征提取

利用 EMD 算法对正常情况及典型故障下输出电压的仿真结果进行分解如图 6, 并以分解后每层信号的标准差为特征值如表 1 和表 2, 其中分解后频率最高层为第一层, 依次到第八层。

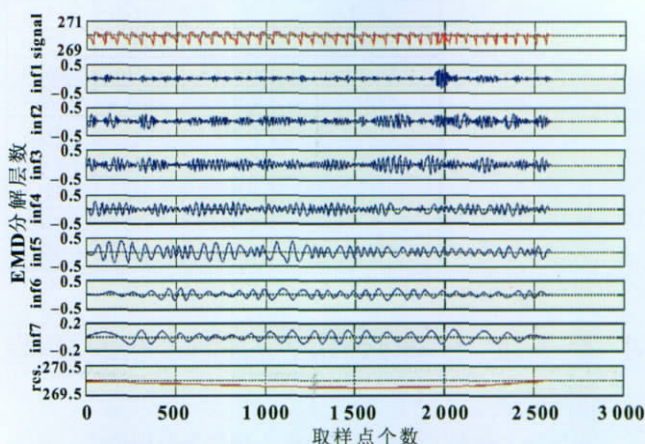


图6(1) 正常情况

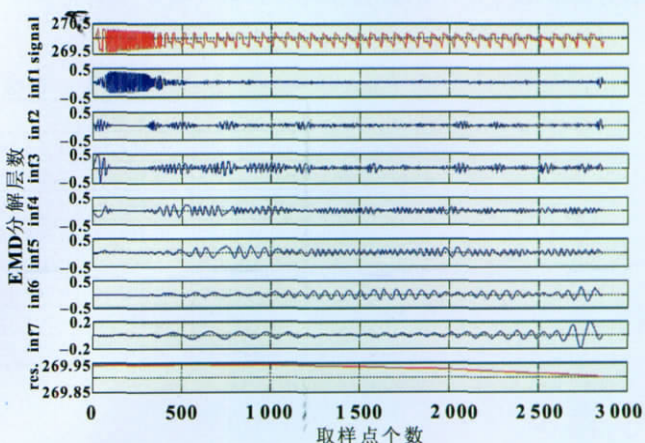


图6(2) 绕组短路

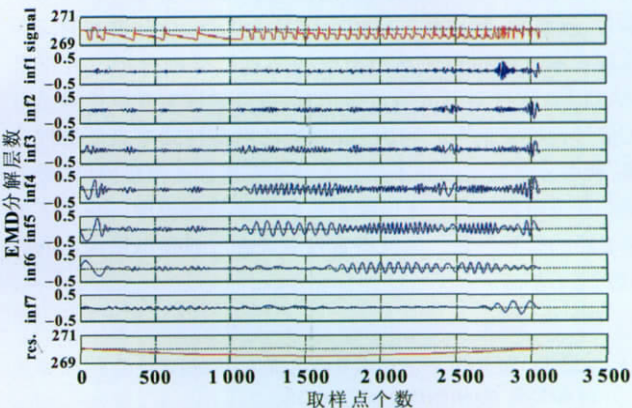


图6(3) 功率管开路

表 1 0.009~0.012 s 信号分解后的标准差

标准差	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层	第 7 层	第 8 层
正常状态	0.040 3	0.063 1	0.068 3	0.061 5	0.087 7	0.055 0	0.028 1	0.071 9
绕组开路	0.036 4	0.058 7	0.060 0	0.069 9	0.099 1	0.116 4	0.119 8	0.134 1
绕组短路	0.070 2	0.035 9	0.062 8	0.049 5	0.049 5	0.056 3	0.029 8	0.112 6
匝间短路	0.036 7	0.063 9	0.065 8	0.061 5	0.091 7	0.086 8	0.033 6	0.079 9
绕组接地	0.485 6	0.433 2	0.296 3	1.989 3	1.993 4	1.983 2	1.914 5	0.486 1
功率管开路	0.040 4	0.074 9	0.077 9	0.080 0	0.088 9	0.068 3	0.042 3	0.165 6
功率管短路	0.038 7	0.057 1	0.085 3	0.099 2	0.082 6	0.049 4	0.016 8	0.085 9
功率管输出接地	0.033 5	0.056 8	0.082 8	0.082 2	0.092 8	0.054 2	0.021 2	0.120 1

表 2 0.012~0.015 s 信号分解后的标准差

标准差	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层	第 7 层	第 8 层
正常状态	0.041 8	0.062 8	0.071 9	0.062 4	0.087 3	0.054 4	0.021 9	0.073 5
绕组开路	0.038 1	0.056 6	0.062 4	0.073 0	0.097 3	0.120 6	0.117 6	0.138 5
绕组短路	0.074 3	0.038 8	0.060 3	0.051 7	0.046 9	0.058 2	0.032 4	0.092 6
匝间短路	0.038 3	0.062 7	0.071 4	0.058 6	0.089 1	0.084 2	0.039 7	0.082 7
绕组接地	0.486 4	0.437 9	0.293 8	1.990 5	1.990 8	1.985 4	1.912 1	0.489 9
功率管开路	0.041 8	0.076 1	0.081 1	0.085 6	0.095 6	0.070 4	0.039 8	0.170 8
功率管短路	0.040 3	0.053 2	0.080 2	0.095 7	0.088 6	0.053 6	0.019 7	0.083 7
功率管输出接地	0.036 8	0.058 9	0.086 9	0.087 3	0.089 1	0.050 9	0.017 8	0.118 1

4 基于 B-P 神经网络的故障推理模型研究

利用表 1 和表 2 的两组数据作为特征量分别训练、验证神经网络,根据信号分解后的层数及故障的编号,选择神经网络

的输入层 8,输出层为 4,隐含层分别取 6、8、10、12、15、20,可得当隐含层取 10 时收敛步数最小为 166,选择输入层函数、传递函数及输出层函数均为 tansig,可得最小收敛步数 118,验证结果如表 3。

表 3 神经网络验证结果

实际输出				期望输出			
0.751 360	0.551 55	0.553 040	-0.196 960	1	0	0	0
-0.011 667	0.105 03	0.068 9550	0.998 700	0	0	0	1
-0.108 960	-0.138 96	0.979 350	-0.385 590	0	0	1	0
-0.176 320	0.317 94	0.768 460	0.860 350	0	0	1	1
-0.019 718	1.000 00	0.048 876	-0.118 560	0	1	0	0
0.112 010	0.999 14	0.002 977 7	0.998 750	0	1	0	1
0.063 632	0.956 33	0.901 650	-0.008 509 2	0	1	1	0
-0.084 209	0.995 03	0.813 550	0.873 680	0	1	1	1

5 结论

作为新的飞机电源系统,开关磁阻发电系统具有发电容量大、效率高,起动和发电组合容易等优点,具有很大的应用前景,本文通过对其典型电气故障进行详细分析,并借助 MATLAB 软件对其故障进行仿真,以开关磁阻发电机输出电压信号为特征信号,利用 EMD 算法对其按频率高低进行分解,利用分解后不同频率信号的标准差来训练神经网络,最后建立开关磁阻发电机主电源系统的故障推理模型,减少了故障诊断的检测参数,为健康管理系统在飞机供电系统中的应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 巩建英,刘卫国.开关磁阻发电系统仿真与稳定性分析[J].系统仿真学报,2009,21(20): 6634-6638.
- [2] 方天治,赵德安.开关磁阻发电机的控制模式及仿真研究[J].计算机仿真,2004,21(4): 51-53.
- [3] 刘震,林辉,司利云.开关磁阻发电系统故障分析与仿真[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(5): 7-11.
- [4] 刘震,林辉,徐敏.多电机开关磁阻发电系统的数字仿真研究[J].系统仿真学报,2005,17(12): 3070-3073.
- [5] 张慧.开关磁阻发电机系统的研究[D].浙江:浙江大学,2003.
- [6] 陈东锁.开关磁阻电机驱动系统的动态模型及仿真[D].太原:太原理工大学,2002.
- [7] 顾明磊.开关磁阻电机发电控制系统研究[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [8] 张慧.开关磁阻发电机系统的研究[D].杭州:浙江大学,2003.
- [9] FAIZ J, MOAYED-ZADEH K. Design of switched reluctance machine for starter/generator of hybrid electric vehicle [J]. Electric Power Systems Research (S0378-7796), 2005, 75(2): 153-160.
- [10] ZHANG J H, ARTHUR V R. A new method to measure the switched reluctance motor's flux [J]. IEEE Transaction on Industry Applications (S0093-9994), 2006, 42(5): 1171-1176.