

基于 EMD 航空发电机定子绕组故障检测方法^{*}

韩建群¹ 石旭东²

(1. 渤海大学工学院 锦州 121000; 2. 中国民航大学航空自动化学院 天津 300300)

摘要:航空发电机工作的可靠性关系到航空运输的安全性,针对航空发电机定子绕组内部故障诊断问题,提出了基于经验模式分解算法的检测方法。在介绍经验模式分解算法基本原理和同步发电机内部回路电路仿真方法的基础上,对航空发电机的定子电流信号进行了分析,提取了瞬时频率、幅值等瞬时故障特征,确定了故障发生时刻,并给出了诊断结果,仿真结果表明本文方法有效。

关键词:经验模式分解;故障诊断;航空发电机;仿真

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Detection method for the internal stator winding fault in aircraft generator based on EMD

Han Jianqun¹ Shi Xudong²

(1. College of Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, China; 2. Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The working reliability of aircraft generator is related to air transport security. Aimed at the problem of fault detection of the internal stator winding in aircraft generator, a detection method based on the empirical mode decomposition (EMD) algorithm was proposed. By using the theory of EMD and the multi-loop analysis method, the stator current signal of aircraft generator was analyzed in this paper. The features of instantaneous frequency and amplitude were extracted. The time of fault was recorded. The simulation results showed that EMD can detect the internal stator winding fault.

Keywords: EMD; fault diagnosis; aircraft generator; simulation

1 引言

随着航空领域科学技术的飞速发展,航空发电机作为一种重要的机电类产品,在航空领域中得到了广泛应用。它是实现发动机能量转换为电能的重要装置,其能否正常工作对保证飞机安全和正常运行有至关重要的作用。因为在飞机飞行过程中,航空发电机等电源系统工作在高速、低温、低压的条件下,并且还经常受到各种飞行操作变化的恶劣工况冲击,所以航空发电机经常会有多种故障现象出现,严重影响飞行安全。故障检测诊断技术能够实时监测发电机的运行状态并及时准确地预测出发电机未来的工作状态,因此能够及时发现故障并采取保护措施避免事故进一步扩大。另外,在对发电机的维修方式改进中,能够将维修方式由目前定期维修和视情维修向预知维修

转换^[1]。准确地提取故障特征是进行故障诊断的前提。

机电设备发生故障时信号特征往往是非平稳的,仅仅依靠时域或频域分析是达不到准确可靠的结果的,因此时频联合分析成为针对非平稳信号的有力分析工具。时频分析方法包括短时 Fourier 变换、Wigner-Ville 分布和小波变换等。短时 Fourier 变换特点是整体地刻画一段时间内信号的频率特性,不能给出信号的局部频率信息^[2]。Wigner-Ville 分布分析多分量信号时会产生严重的交叉项干扰^[3]。小波分析虽然具有多分辨率特性,但是在小波分析中小波基的选择对分析结果影响较大^[4]。

Norden E. Huang 提出的经验模态分解 (Empirical mode decomposition, EMD) 是一种新的自适应时频分析方法,该方法是根据数据自身的时间尺度特征进行信号分解,无需预先设定任何基函数。这一点优于傅里叶分解与

收稿日期:2016-05

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(51277011)资助

小波分解,所以EMD方法在理论上可以应用于任何类型的信号的分解,适合于分析非线性、非平稳信号序列^[5-6]。因此本文运用EMD算法对航空主发电机的定子绕组匝间短路故障进行了检测诊断研究。

2 EMD算法基本原理

EMD方法假设任何信号都由不同的本征模态函数(IMF)组成,IMF分量必须满足以下条件:

- 1)极值点和过零点相同或最多相差一个;
- 2)上下包络关于时间轴局部对称。

EMD算法基本原理如下^[7]:

设原始信号 $x(t)$ 的 Hilbert-Huang 变换为:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (1)$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

式中, $r_n(t)$ 为EMD算法残余函数,表示信号 $x(t)$ 变化的平均趋势。 $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$ 为EMD本征模态函数IMF,表示信号 $x(t)$ 不同频率段的成分。

由于最低频率IMF分量通常情况下代表原始信号的趋势或均值,因此EMD方法可以有效地提取一个信号的趋势或去掉该信号的均值。EMD是提取信号趋势或均值的较好方法,进行EMD可以得到IMF各自的瞬时振幅和瞬时频率。对每个IMF进行HHT变换可以得到:

$$x(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\omega_i(t)} = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i dt} \quad (3)$$

因为有用的信息一般在小能量的高频部分。因此,在推导过程中,将余项 $r_n(t)$ 省略。

从信号处理的角度看,EMD分解是一个不断从高频滤波到低频滤波的过程,体现了多分辨分析的滤波过程。根据时空滤波分析可知,若去掉高频分量相当于低通滤波,去掉低频分量相当于高通滤波;同时去掉若干高频和低频分量为带通滤波。而且由于EMD是从信号本身的特征时间尺度出发对信号进行分解,是自适应的,所以对 these 分量作HHT计算出的瞬时频率具有清晰的物理意义,能够表征信号的局部特征。

EMD分解算法的具体计算步骤如下:

步骤1:找到信号 $x(t)$ 全部的极大值和极小值点,然后利用三次样条函数把 $x(t)$ 的极大值点拟合成上包络线 $u_0(t)$,把极小值点拟合成下包络线 $v_0(t)$ 。

步骤2:计算 $u_0(t)$ 和 $v_0(t)$ 的均值 $m_0(t)$:

$$m_0(t) = \frac{(u_0(t) + v_0(t))}{2} \quad (4)$$

用 $x(t)$ 减去均值 $m_0(t)$,得到一个去掉低频的新分量为:

$$h_0(t) = x(t) - m_0(t) \quad (5)$$

步骤3:重复上述过程 k 次,直至第 k 次的 $h_k(t)$ 为IMF分量,记为 $c_1(t)$ 。

步骤4:设 $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ 为新分量,重复步骤1~步骤3,确定其他IMF。最终得到余项 $r_n(t)$ 和 n 个IMF $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$,它分别包含了信号不同时间特征尺度大小的成份,其尺度依次由小到大。因此,各分量也就相应地包含了从高到低不同频率段的成份,每一个频率段所包含的频率成份都是不同的,且随信号本身的变化而变化。

3 发电机数学模型

航空交流发电机采用12磁极凸极发电机结构,额定工作电压115V,额定频率400Hz。本文基于多回路分析对凸极同步电机建立数学仿真模型^[8-9],模型主要包括定子回路和转子回路方程。

以4极2并联支路电机定子回路为例,建立定子回路方程,回路如图1所示。其同步发电机多回路数学模型为:

$$p\mathbf{I}' = -\mathbf{L}'^{-1}\mathbf{R}'\mathbf{I}' + \mathbf{L}'^{-1}(\mathbf{U}' - \mathbf{H}\mathbf{B}') = \mathbf{A}\mathbf{I}' + \mathbf{B} \quad (6)$$

式中: \mathbf{I}' 、 \mathbf{U}' 为定、转子回路电流、电压向量; $\mathbf{A} = -\mathbf{L}'^{-1}\mathbf{R}'$; $\mathbf{B} = \mathbf{L}'^{-1}\mathbf{U}' - \mathbf{L}'^{-1}\mathbf{H}\mathbf{B}'$ 。 \mathbf{H} 为回路变换阵, \mathbf{L}' 为回路电感矩阵, \mathbf{B}' 为发电机侧电压向量;式(6)中的回路参数可以通过式(7)的支路参数求取。

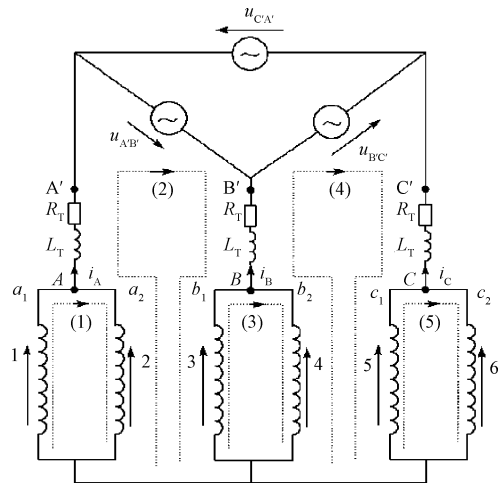


图1 定子回路

$$\begin{cases} \mathbf{I}' = \mathbf{H}^T \mathbf{I} \\ \mathbf{L}' = \mathbf{H}\mathbf{L}\mathbf{H}^T \\ \mathbf{R}' = p\mathbf{L}' + \mathbf{H}\mathbf{R}\mathbf{H}^T \\ \mathbf{U}' = \mathbf{H}\mathbf{U} \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{I} 、 \mathbf{U} 为定、转子支路电流、电压向量; \mathbf{L} 为支路电感矩阵; \mathbf{R} 为支路电阻矩阵; p 为微分算子;求解式(6)可得发电机回路电流值。

式(6)和(7)中定转子支路电压通过式(8)和(9)确定。

$$u_Q = p \left[-\sum_{s=1}^N M_{Q,s} i_s + M_{Q,fd} i_{fd} \right] - r_Q i_Q \quad (8)$$

式中: i_s, i_Q, i_{fd} 分别为定子 S 支路、 Q 支路电流、励磁回路

电流; $M_{Q,S}$ 为定子S支路和Q支路的互感系数; r_Q 为Q支路电阻; N 为定子内部的支路总数。

$$u_{fd} = p \left[- \sum_{s=1}^N M_{s,fd} i_s + L_{fd} i_{fd} \right] + r_{fd} i_{fd} \quad (9)$$

式中: $M_{s,fd}$ 为定子S回路励磁回路的互感系数, L_{fd} 为

励磁回路的自感系数, r_{fd} 为励磁回路电阻。

根据式(8)和(9)图1中电路的多回路方程如式(10)所示。

$$\begin{bmatrix} u_{A1} \\ u_{A2} \\ u_{B1} \\ u_{B2} \\ u_{C1} \\ u_{C2} \\ u_{fd} \\ u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = p \left\{ \begin{bmatrix} L_{A1} & M_{A1,A2} & M_{A1,B1} & M_{A1,B2} & M_{A1,C1} & M_{A1,C2} & M_{A1,fd} & 0 & 0 & 0 \\ M_{A2,A1} & L_{A2} & M_{A2,B1} & M_{A2,B2} & M_{A2,C1} & M_{A2,C2} & M_{A2,fd} & 0 & 0 & 0 \\ M_{B1,A1} & M_{B1,A2} & L_{B1} & M_{B1,B2} & M_{B1,C1} & M_{B1,C2} & M_{B1,fd} & 0 & 0 & 0 \\ M_{B2,A1} & M_{B2,A2} & M_{B2,B1} & L_{B2} & M_{B2,C1} & M_{B2,C2} & M_{B2,fd} & 0 & 0 & 0 \\ M_{C1,A1} & M_{C1,A2} & M_{C1,B1} & M_{C1,B2} & L_{C1} & M_{C1,C2} & M_{C1,fd} & 0 & 0 & 0 \\ M_{C2,A1} & M_{C2,A2} & M_{C2,B1} & M_{C2,B2} & M_{C2,C1} & L_{C2} & M_{C2,fd} & 0 & 0 & 0 \\ M_{fd,A1} & M_{fd,A2} & M_{fd,B1} & M_{fd,B2} & M_{fd,C1} & M_{fd,C2} & L_{fd} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{A2} \\ i_{B1} \\ i_{B2} \\ i_{C1} \\ i_{C2} \\ i_{fd} \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} r_{A1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{A2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{B1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{B2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{C1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{C2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{fd} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{A2} \\ i_{B1} \\ i_{B2} \\ i_{C1} \\ i_{C2} \\ i_{fd} \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{A'} \\ u_{B'} \\ u_{C'} \end{bmatrix} \quad (10)$$

4 基于 EMD 算法同步发电机故障诊断

定子绕组匝间短路故障是由于绕组中相邻两匝或数匝线圈之间的绝缘遭到破坏而引起的。该类故障是同步电机的一个主要故障类别^[10-15], 占其故障种类的 15%。下面以定子绕组匝间短路故障为例, 应用 EMD 算法对电子电流信号信号进行分析, 以有效提取同步电机的故障特征。

本文以一台 30 kVA 航空交流发电机为例, 其额定频率 $f=400$ Hz, 额定电压 $U_n=115$ V, Y 接, 转子极对数为 6, 定子绕组为双层波绕组, 并联支路数为 6。采用多回路分析法建立仿真数学算法并检测发电机内部故障。其算法仿真流程如图 2 所示。如图 3 所示给出了检测结果, 这里横轴为采样时间, 纵轴为定子电流值。第一层是原始信号, 最后一层是残差, 即趋势项, 中间各层为本征模函数 IMF。从图 3 中的 IMF2 和 IMF3 可以看出故障发生的时刻为 0.1 s, 因为从 0.1 s 开始, IMF2 和 IMF3 的震荡幅值开始变大, 即故障发生。

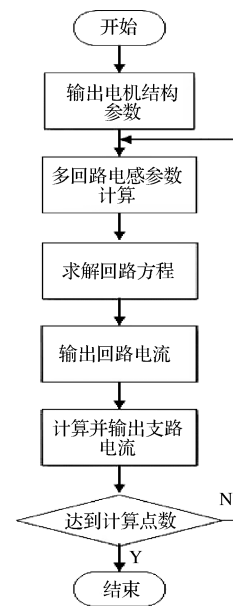


图 2 同步发电机仿真程序流程

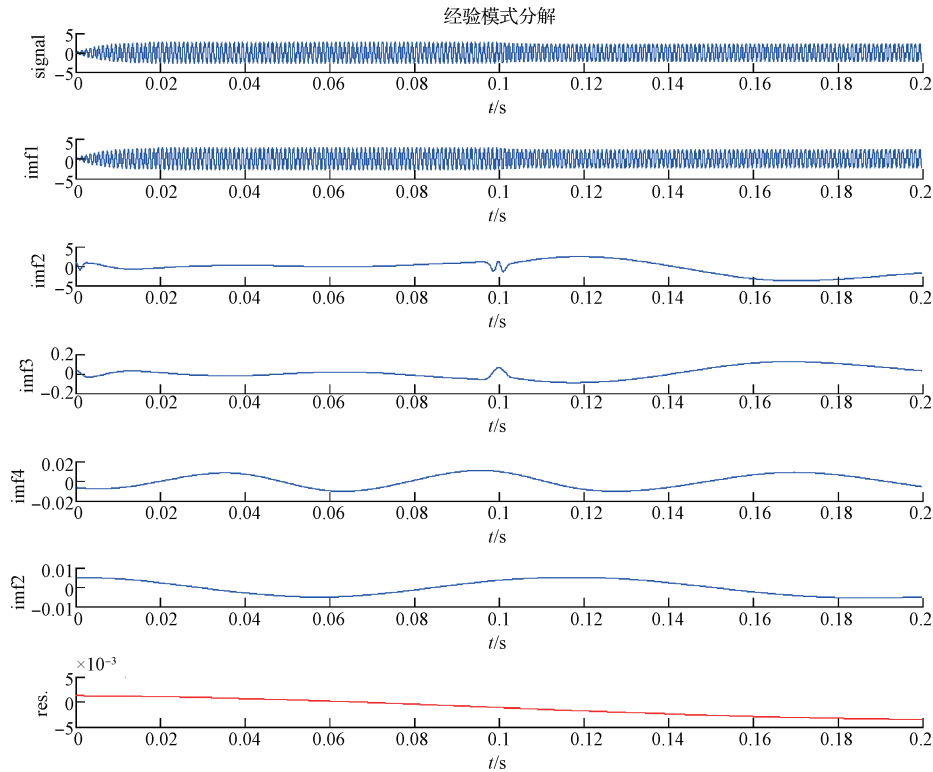


图3 同步电机定子电流信号 EMD 分解

5 结论

本文从 EMD 算法出发对其在航空发电机匝间短路的故障诊断和预测上的应用进行了研究。给出了分析仿真的结果。该方法能准确捕捉电机早期匝间短路的信息,为航空发电机的故障诊断和预测提供准确的参考依据。

参考文献

- [1] 刘海港,董芷岑. 航空发电机综合故障诊断技术研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3):125-127.
- [2] 张雄希,刘振兴. 基于分数阶傅里叶变换的变频调速异步电机故障诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2010, 37(4):59-62.
- [3] 郭奇,刘卜瑜,史立波,李波. 基于二次 EEMD 的 Wigner-Ville 分布旋转机械故障信号分析及试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(13):129-133.
- [4] 闫晓玲,董世运,徐滨士. 基于最优小波包 Shannon 熵的再制造电机转子缺陷诊断技术[J]. 机械工程学报, 2016, 52(4):7-12.
- [5] 张兴,李孝全,谢一静. 基于 EMD 分解的感应电机转子断条故障诊断[J]. 大电机技术, 2011(5): 21-23.
- [6] 杨存祥,朱琛,全战营. 基于 EMD 神经网络的电动机转子故障诊断方法研究[J]. 微电机, 2011,44(4): 82-85.
- [7] 朱喜华,李颖晖,周飞帆,等. 基于改进 EMD 算法的永磁同步电机故障特征提取[J]. 微电机, 2011, 44(2):65-69.
- [8] 张超,夏立,吴正国,等. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征规律分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6):1506-1512.
- [9] HU M Q, TU L M, LIN H Y, et al. Simulation and investigation of the internal armature winding faults of the hydro-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5):3-8.
- [10] LI Y G, LI H M, ZHU H. Fault identification method of rotor inter-turn short-circuit using stator winding detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2):107-112.
- [11] 李永刚,赵艳军,陈雷,等. 基于并联支路环流特征的转子匝间短路故障识别[J]. 高电压技术, 2009, 35(5):1014-1019.
- [12] 武玉才,李和明,李永刚,等. 在线检测发电机转子绕组匝间短路的新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2698-2703.
- [13] 刘念,谢驰,陈实,等. 基于小波分析的发电机转子匝间短路故障诊断方法研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 49-51.

(下转第 49 页)