

基于 Duffing 系统和扩展 Prony 算法的异步电动机转子断条故障检测

许伯强, 王志远

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:针对异步电动机经常发生的转子断条故障,提出一种 Duffing 系统与扩展 Prony 算法相结合的检测方法。利用 Duffing 系统对初始参数的敏感性准确提取定子电流信号中的故障特征分量,但 Duffing 系统无法对故障特征分量幅值进行有效估计。为解决该问题,提出利用扩展 Prony 算法确定各故障特征分量的幅值和初相角。仿真和实验结果表明所提方法切实可行,且算法简单、结果直观。

关键词:异步电动机; Duffing 系统; 扩展 Prony 算法; 转子断条故障; 检测

中图分类号: TM 307+.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.027

0 引言

异步电动机以其结构简单、制造、使用和维护方便,运行可靠,成本较低等优点,被广泛地运用到生活以及生产中。所以,异步电动机故障将会对生产产生重大影响。在异步电动机所发生的故障中,转子断条是较常出现的一种故障。发生转子断条故障的异步电动机出力下降,严重时会出现“扫膛”,损坏定子铁芯、绝缘,加剧电机损坏程度。

文献[1-3]指出,发生转子断条故障的异步电动机的定子电流中会出现特征分量—— $(1 \pm 2s)f_1$ 频率分量(s 为转差率, f_1 为供电频率)。该分量常被称为边频分量,即主频分量。所以,通过分析定子电流信号、提取定子电流信号中的特征频率分量实现异步电动机转子断条故障的检测是工程上一直在使用的经典非侵入式检测方法。如文献[4-5]中所提到的异步电动机转子故障检测方法都是在频域方面提取特征故障分量,文献[6]利用 Park 矢量法检测异步电动机转子断条,文献[7]中引入的复杂度分析方法只是在早期故障的检测中效果较好。

本文提出利用 Duffing 系统在时域上对信号进行对应频率信号检测,结果直观、计算过程简单、运行时间短,在时域方面丰富了异步电动机转子故障检测的方法。由于边频分量的幅值较小,若用快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)直接对定子电流进行频谱分析,边频分量很容易淹没在主频分量以及各种有色噪声中。本文提出的 Duffing 系统对所需检测的边频分量具有良好的敏感性,同时对边频分量外的噪声信号具有较强的免疫力^[8-9]。当 Duffing 系统处于对信号频率进行高精度识别的条件下时,其对信号幅值的估算精度将会大幅度降低,

然而边频分量的幅值对于转子断条故障程度的判断是至关重要的因素^[10]。基于此,针对信号幅值的估算需要,提出将扩展 Prony 算法与 Duffing 系统相结合,利用扩展 Prony 算法求出特征分量的幅值和初相角^[11-12]。

本文先以定子电流仿真信号检验所提方法的性能,取得了较理想的估算结果;然后在一台 Y100L-2 型 3 kW 笼型异步电动机上完成了相关的物理试验,试验结果表明, Duffing 系统和扩展 Prony 算法在异步电动机转子断条故障检测中的应用是可行的。

1 Duffing 系统检测特征信号原理

传统的 Holmes-Duffing 混沌检测模型^[13]为:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = A \cos(\omega t) \quad (1)$$

其中, k 为阻尼比; $-x + x^3$ 为非线性恢复力项; A 为内策动力幅值; ω 为内策动力频率。

式(1)对应的仿真模型为:

$$\begin{cases} \dot{y} = \dot{x} \\ \dot{y} = x - x^3 - ky + A \cos(\omega t) + u(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $u(t)$ 为外界输入信号,一般 $u(t) = \gamma \cos(\omega t) + n(t)$, γ 为待检测目标频率信号的幅值, $n(t)$ 为除目标频率信号以外的背景噪声。

Duffing 系统检测特征信号的原理如下:将 Duffing 系统的内策动力幅值参数设置在混沌临界值,使 Duffing 系统处于混沌临界态,将时域待测信号作为 Duffing 系统的摄动输入 Duffing 系统当中。如果外部摄动信号中有与内策动力相同频率的信号,则 Duffing 系统由混沌临界态进入大尺度周期态。所以,将内策动力频率设置为与待检测的边频分量相同的频率,通过观察输入外部摄动信号后的 Duffing 系统的相图是否由混沌临界态转变为大尺度周期态来判断待检测信号中是否含有边频分量信号^[14]。

收稿日期:2017-06-19;修回日期:2018-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277077)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277077)

2 Duffing 系统的改进

经过仿真发现,传统的 Holmes-Duffing 系统检测模型对于低频率信号具有良好的检测性能,即当待测信号的频率 ω 为 1 rad/s 左右时检测性能最好,而对于高频率信号的检测能力较差。针对该问题,本文采用一种改进的 Duffing 系统^[14-16],通过广义的时间尺度变换,得到了可以检测任意频率信号的 Duffing 系统,具体变换过程如下。

令 $t = \omega\tau$, 则有:

$$x(t) = x(\omega\tau) \quad (3)$$

$$x'(t) = \frac{1}{\omega} x'(\omega\tau) \quad (4)$$

$$x''(t) = \frac{1}{\omega^2} x''(\omega\tau) \quad (5)$$

将上述转换代入式(2)中得:

$$x''(\tau) + k\omega x'(\tau) - \omega^2 x^3(\tau) = \omega^2 A \cos(\omega\tau) \quad (6)$$

重新建立仿真模型为:

$$\begin{cases} \dot{y} = \frac{1}{\omega} \dot{x} \\ \dot{y} = \omega [x - x^3 - ky + A \cos(\omega t)] + u(t) \end{cases} \quad (7)$$

对比式(2)、(7)可以发现,式(7)只是在原来的基础上扩大了 ω 倍,并没有改变 Duffing 系统的性质,所以传统的 Holmes-Duffing 系统的优良性质没有改变,同时改进后的 Duffing 系统可以检测任意频率的外部摄动信号,并且可以更好地区分内策动力信号与外部摄动信号,防止误判的情况发生。

3 扩展 Prony 算法的幅值和相角估计原理

根据 Prony 算法,本文提出利用复指数函数的线性组合来描述等间隔采样数据的数学模型(常称为 Prony 模型),并给出了线性化的近似求解算法。通过对 Prony 模型进行适当扩展后对有理式功率谱密度进行估计。经典的扩展 Prony 算法采用的数学模型为 1 组 p 个具有任意幅值、相位、频率和衰减因子的指数函数。

令衰减因子 $\alpha = 0$, 则其离散时间的函数形式为:

$$x(n) = \hat{x}(n) + v(n) = \sum_{i=2}^M b_i z_i^n + v(n) \quad (8)$$

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^M b_i z_i^n$$

其中, $\hat{x}(n)$ 为 $x(n)$ 的近似表示,由 M 个复正弦信号组成; $b_i = A_i \exp(j\varphi)$, $z_i = \exp(j2\pi f_i T_s)$, A_i 为频率分量的幅值, f_i 为第 i 次谐波分量的频率, T_s 为采样周期。

在 Duffing 系统检测出异步电动机转子断条故障特征分量及其他分量的频率值的基础上, M 和

Prony 极点 z_i 就成了已知量。此时有 $M = 2p$, 且 z_i 满足式(9)。

$$1 + a_1 z_i^{-1} + a_2 z_i^{-2} + \cdots + a_p z_i^{-p} = 0 \quad (9)$$

代入 p 个 z_i 的值,得到 p 线性方程组,通过求解可得 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \cdots, a_p)$ 。

同时有 $\hat{x}(n)$ 满足递推的差分方程:

$$\hat{x}(n) = -\sum_{i=1}^p a_i \hat{x}(n-i) \quad n = p, p+1, \cdots, N \quad (10)$$

其中, N 为数据 $x(n)$ 的采样长度,且 $\hat{x}(0) = x(0)$, 然后可以计算得到 $\hat{x}(n)$ 。令:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_M \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中,指数模型可以表示为:

$$\mathbf{Z}\mathbf{b} = \hat{\mathbf{x}} \quad (12)$$

通过总体最小二乘估计得:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H \hat{\mathbf{x}} \quad (13)$$

则信号中各频率分量的相位、幅值为:

$$\begin{cases} \varphi_i = \arctan \frac{\text{Im}(b_i)}{\text{Re}(b_i)} \\ A_i = 2 |b_i| \end{cases} \quad (14)$$

4 仿真信号分析

当异步电动机发生转子断条故障时,可以采用式(15)模拟定子电流信号。

$$i_s = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + A_2 \cos[2\pi(1-2s)f_1 t + \theta_2] + A_3 \cos[2\pi(1+2s)f_1 t + \theta_3] + e(t) \quad (15)$$

其中, $s = 1.8\%$ 。取 $T_s = 0.001$ s, $N = 1001$, $f_1 = 50$ Hz。

首先利用模拟定子电流信号检测 Duffing 系统和扩展 Prony 算法在异步电动机转子断条故障检测中应用的可行性,结果如图 1 和表 1 所示。

对比图 1(c)、(d) 和图 1(e)、(f) 可以清楚地看出,当发生转子断条故障时,相图由复杂没有规律的混沌临界态转变为了有规律的大尺度周期态,表明异步电动机的定子电流信号中存在 $(1+2s)f_1$ 和 $(1-2s)f_1$ 故障特征分量,说明异步电动机已经发生了转子断条故障。

由图 1 与表 1 可知,采样信号为短时间(1 s)内的时域信号, Duffing 系统对于频率的识别是很敏感的,相图变化明显,易于判定待检测信号中是否存在异步电动机转子断条故障特征分量,然后利用扩展 Prony 算法精确地计算故障特征分量的幅值。将多次调整定子电流模拟信号的各个参数值进行代入验证,验证结果表明将 Duffing 系统和扩展 Prony 算法

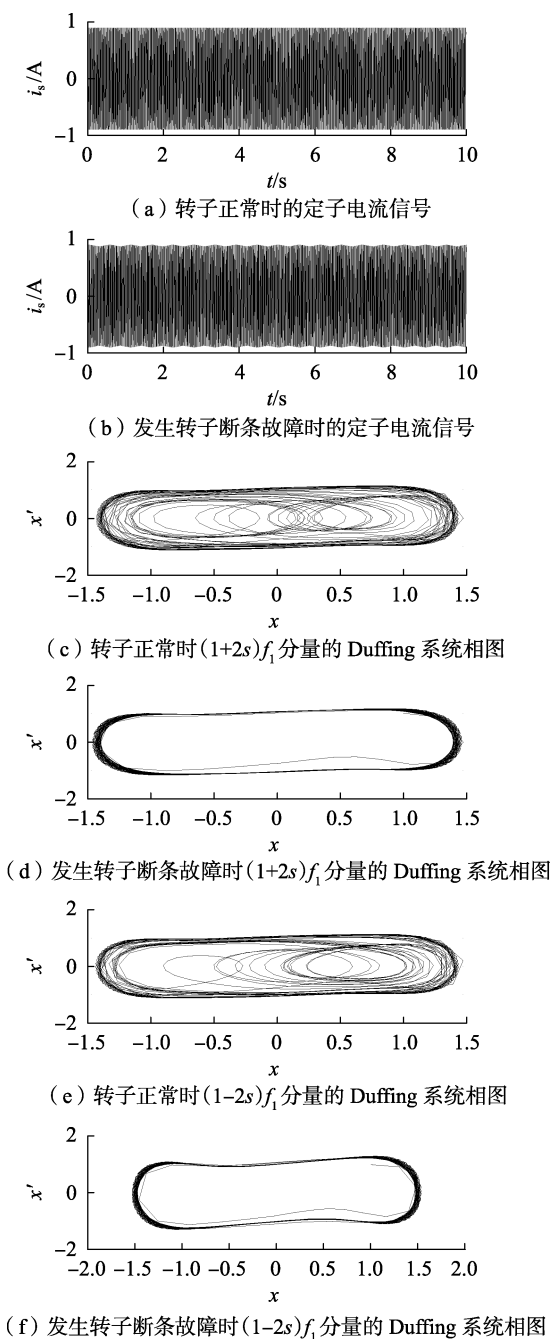


图1 定子电流信号和 Duffing 系统相图

Fig.1 Stator current signals and phase diagram of Duffing system

表1 基于 Duffing 系统和扩展 Prony 算法的计算结果

Table 1 Calculative results based on Duffing system and expansion Prony algorithm

参数	真值	计算值
f_1/Hz	50	50.000 0
A_1/A	0.900 0	0.899 9
θ_1/rad	0.523 6	0.524 0
$(1-2s)f_1/\text{Hz}$	48.2	48.2
A_2/A	0.009 0	0.008 9
θ_2/rad	1.047 2	1.047 0
$(1+2s)f_1/\text{Hz}$	51.8	51.8
A_3/A	0.005 0	0.005 1
θ_3/rad	0.314 2	0.314 1

引入异步电动机转子断条故障检测是确实可行的。对于负荷波动、噪声等需要短时采样信号的情况,本文方法可取得较为理想的结果。

5 实际检测异步电动机转子断条故障

5.1 基本步骤

将 Duffing 系统和扩展 Prony 算法应用到异步电动机转子故障检测中,其基本步骤如下:

a. 采集定子电流信号 i_s (采样频率设置为 1 006 Hz,采样时长设置为 10 s);

b. 对 i_s 进行有效值变化趋势分析,提取其中较为稳定的一段数据(时间为 1 s),尽量减少负荷波动造成的影响,将该段数据记为 i'_s ;

c. 对 i'_s 进行奇异值滤波处理,得到滤波后的信号 i''_s ;

d. 将 i''_s 输入 Duffing 系统,利用 Duffing 系统相图的变化判断是否存在边频分量;

e. 根据 Duffing 系统的检测结果,应用扩展 Prony 算法估计边频分量的幅值;

f. 根据边频分量与主频分量的幅值之比以及样本参数等因素判断异步电动机是否发生了转子断条故障^[10]。

5.2 实验

利用实验对本文方法和自适应滤波细化 FFT 法^[15](下文简称 FFT(10 s)法)进行对比分析。实验接线如图 3 所示。实验采用的三相异步电动机为 Y100L-2 型,额定容量为 3 kW,额定电压为 380 V,额定电流为 6.12 A,频率为 50 Hz。人为设置转子断条故障,导条断裂由钻孔形成。频谱分析在一台 HP pavilion g4 笔记本电脑(CPU 为 Intel 2.53 GHz,内存为 8 GB)上进行。

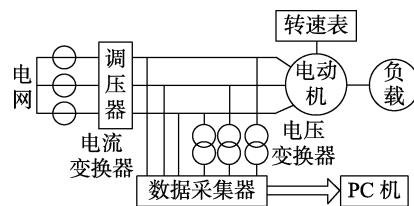


图3 实验接线图

Fig.3 Wiring connection of experiment

实验电动机处于半载状态时的定子 a 相电流、Duffing 系统相图和频谱分析结果如图 4 所示,实验数据如表 2 所示,此时的转差率 $s = 1.8\%$,工频分量 $f_1 = 50.03 \text{ Hz}$ 。

实验电动机处于空载状态时的定子 a 相电流、Duffing 系统相图和频谱分析结果如图 5 所示,实验数据如表 3 所示,此时的转差率 $s = 0.3\%$,工频分量 $f_1 = 50.03 \text{ Hz}$ 。

通过对比本文算法与 FFT(10 s)法的实验结果与数据可知:

a. 本文方法检测特征频率的精度更高, 避免了因为噪音产生误判断的情况;

b. 利用本文方法估算的特征频率分量幅值更接近真值。

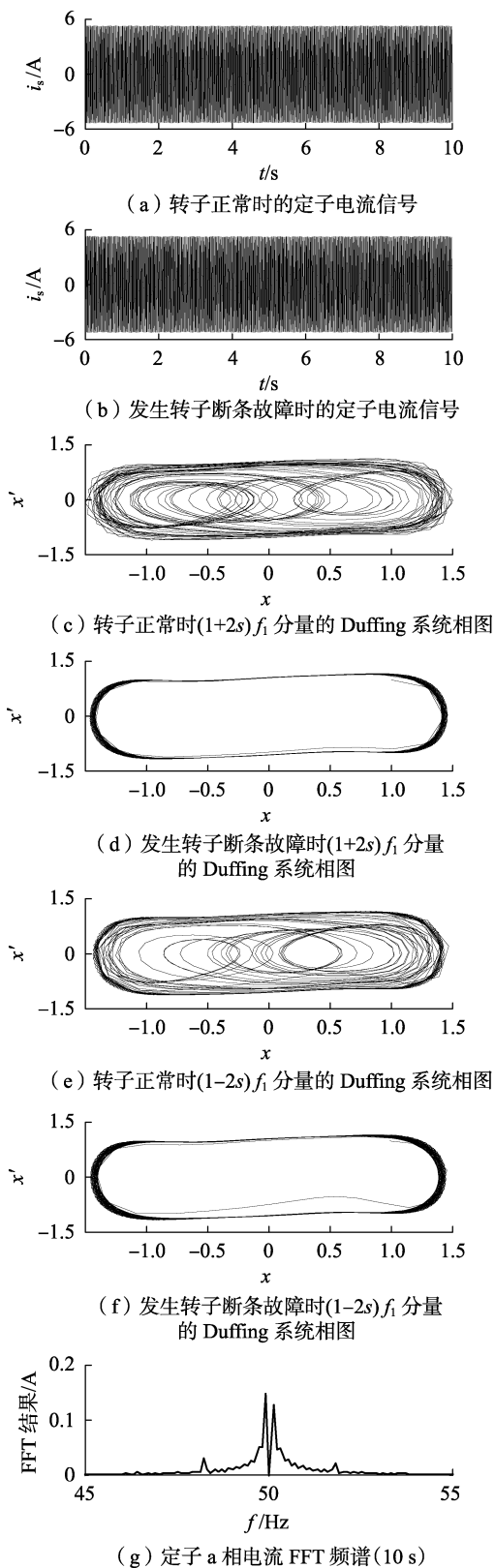


图 4 实验电动机半载情况下的实验结果

Fig.4 Experimental results under half load condition

表 2 实验电动机半载情况下的实验数据

Table 2 Experimental data under half load condition

参数	计算值	
	FFT(10 s) 法	本文方法(1 s)
$(1-2s)f_1/\text{Hz}$	48.26	48.20
$(1+2s)f_1/\text{Hz}$	51.81	51.83
$(1-2s)f_1$ 分量幅值/A	0.031 0	0.032 0
$(1+2s)f_1$ 分量幅值/A	0.023 0	0.021 9
运行时间/s	—	2.2

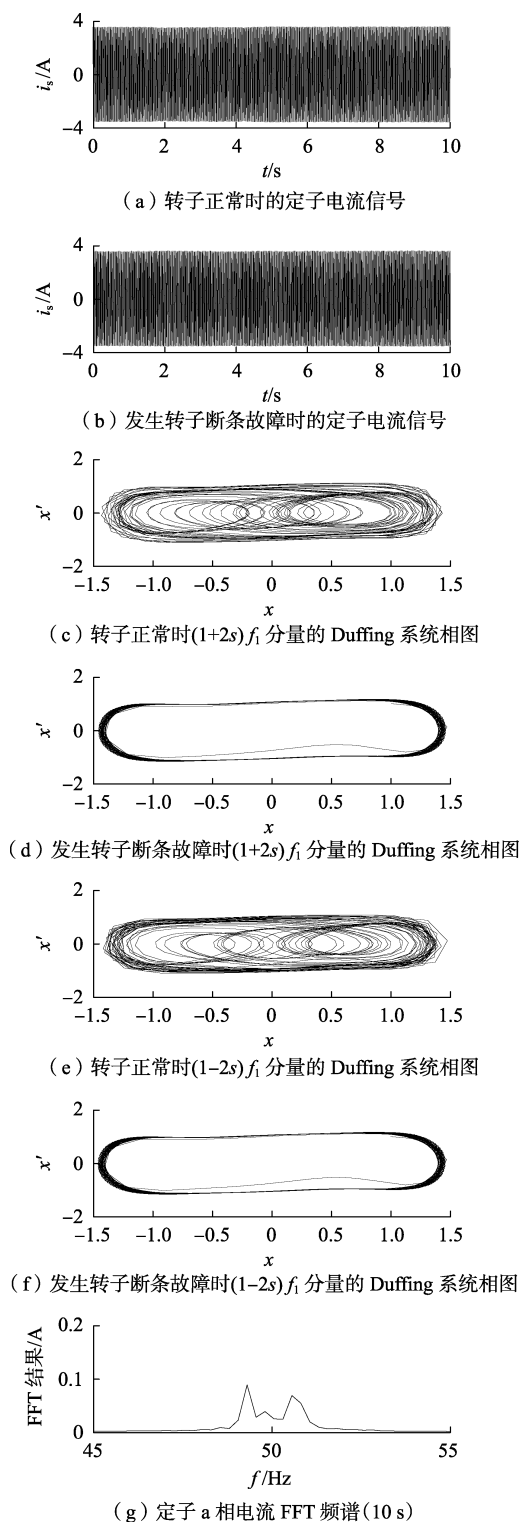


图 5 实验电动机空载情况下的实验结果

Fig.5 Experimental results under no load condition

表3 实验电动机空载情况下的实验数据

Table 3 Experimental data under no load condition

参数	计算值	
	FFT(10 s)法	本文方法(1 s)
$(1-2s)f_1/\text{Hz}$	—	49.89
$(1+2s)f_1/\text{Hz}$	—	50.18
$(1-2s)f_1$ 分量幅值/A	—	0.012 4
$(1+2s)f_1$ 分量幅值/A	—	0.009 8
运行时间/s	—	2.4

综上所述,本文方法的异步电动机转子故障诊断能力优于 FFT(10 s)法。

6 结论

本文将 Duffing 系统与扩展 Prony 算法结合应用于异步电动机转子断条故障检测,得出了如下结论:

- 通过仿真模拟异步电动机转子断条故障的定子电流信号检验了本文算法的性能,结果表明,本文方法既具有 Duffing 系统对于噪声的免疫能力,同时又具有高频率分辨率,且可有效估计边频分量幅值;
- 利用本文算法对 1 台 Y100L-2 型 3 kW 笼型异步电动机进行转子断条故障检测实验,实验结果表明,Duffing 系统和扩展 Prony 算法可用于实际的异步电动机转子断条故障检测。

本文方法在时域上丰富了异步电动机转子断条故障检测的方法,其运算简单、结果直观的优点也为其进行在线应用奠定了相应的基础。

参考文献:

- [1] 马宏忠,胡虔生,黄允凯,等. 感应电机转子绕组故障仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):107-112.
MA Hongzhong, HU Qiansheng, HUANG Yunkai, et al. Simulation and experimental research on rotor winding faults of induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 107-112.
- [2] DELEROI W. Broken bar in a squirrel-cage rotor of an induction motor[J]. Archiv Für Elektrotechnik, 1984, 67(3): 141-149.
- [3] THOMSON W T, FENGER M. Current signature analysis to detect induction motor faults[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7(4): 26-34.
- [4] 许伯强,朱明飞. 基于精简四阶累积量 MUSIC 与混合遗传算法的笼型异步电动机转子断条故障检测新方法[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(7): 73-80.
XU Boqiang, ZHU Mingfei. A new method for detecting broken rotor bars of cage induction motors based on simplified four order cumulants MUSIC and hybrid genetic algorithm[J]. Motor Control and Application, 2016, 43(7): 73-80.
- [5] ABD-EL-MALEK M, ABDELSALAM A K, HASSAN O E. Induction motor broken rotor bar fault location detection through envelope analysis of start-up current using Hilbert transform[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 93: 332-350.
- [6] GYFTAKIS K N, CARDOSO A J M, ANTONINO-DAVIAU J A. Introducing the filtered Park's and filtered extended Park's vector approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 93: 30-50.

- [7] 杨定新,胡芑庆,张朝众. 基于复杂度分析的电机转子-轴承系统早期故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 126-129.
YANG Dingxin, HU Niaoqing, ZHANG Chaozhong. Early fault detection method for rotor bearing system of motor based on complexity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 126-129.
- [8] 王冠宇,陶国良. 混沌振子在强噪声背景信号检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 1997, 18(2): 209-212.
WANG Guanyu, TAO Guoliang. Application of chaotic oscillator to detection of strong noise background signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1997, 18(2): 209-212.
- [9] 刘秉正,彭建华. 非线性动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004: 36-42.
- [10] 许伯强,李和明,孙丽玲,等. 笼型异步电动机转子断条数目诊断新判据[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 105-110.
XU Boqiang, LI Heming, SUN Liling, et al. New criteria for diagnosing the number of broken rotor bars in squirrel cage induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 105-110.
- [11] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002: 119-125, 138-150.
- [12] 夏向阳,罗安,罗时武,等. 基于改进扩展 Prony 谱估计法的谐波电流检测[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 7-11.
XIA Xiangyang, LUO An, LUO Shiwu, et al. Harmonic current detection based on improved extended Prony spectral estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 7-11.
- [13] 尚秋峰,尹成群,李士林,等. 基于 Duffing 振子的微弱正弦信号检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 66-70.
SHANG Qiufeng, YIN Chengqun, LI Shilin, et al. Study of weak sinusoidal signal detection method based on Duffing oscillator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 66-70.
- [14] 胡芑庆. 转子碰摩非线性行为与故障辨识的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2001.
HU Niaoqing. Research on nonlinear behavior and fault identification of rotor rub impact[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001.
- [15] 范剑,赵文礼,王万强. 基于 Duffing 振子的微弱周期信号混沌检测性能研究[J]. 物理学报, 2013, 62(18): 180502-1-180502-6.
FAN Jian, ZHAO Wenli, WANG Wanqiang. Research on chaotic detection performance of weak periodic signals based on Duffing oscillator[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(18): 180502-1-180502-6.
- [16] 王永生,姜文志,赵建军,等. 一种 Duffing 弱信号检测新方法 & 仿真研究[J]. 物理学报, 2008, 57(4): 2053-2059.
WANG Yongsheng, JIANG Wenzhi, ZHAO Jianjun, et al. A new method and simulation for Duffing weak signal detection[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(4): 2053-2059.

作者简介:



许伯强

许伯强(1972—),男,河北保定人,教授,博士,主要研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断(E-mail:xbq_ncepu@126.com);

王志远(1991—),男,河北石家庄人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向大型电机的状态监测与故障诊断(E-mail:995025584@qq.com)。

(下转第 197 页 continued on page 197)

Transformer maintenance scheduling method considering node importance of power grid

ZHANG Hongzhi¹, XIONG Weihong², XIE Zhicheng³, HAN Xionghui⁴, LI Zhengtian¹, LIN Xiangning¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China;

2. Central China Electric Power Company, Wuhan 430077, China; 3. Extra-High Voltage Transmission Company of CSG,

Guangzhou 510663, China; 4. Meizhou Power Supply Bureau of Guangdong Electric Power Company, Meizhou 514021, China)

Abstract: The operating state level of transformer is evaluated by using the health index theory. The power grid topology model is established by the complex network theory, and the impact of the operating status of the power transformer on the power grid is represented by node importance index. Combined with the importance of nodes, the transformer state assessment results are modified and the maintenance sequence of all equipments in power grid is worked out. The feasibility and validity of the proposed method are verified by the actual data of some power grid.

Key words: power transformers; state assessment; health index theory; complex network; node importance; maintenance sequence

.....
(上接第 191 页 continued from page 191)

Detection of broken rotor bar fault of asynchronous motor based on Duffing system and extended Prony algorithm

XU Boqiang, WANG Zhiyuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A method combining with Duffing system and extended Prony algorithm is proposed for the BRB (Broken Rotor Bar) fault detection of asynchronous motors. The Duffing system is sensitive to the initial parameters, which can be used to accurately extract the fault feature components in stator current signal, however, it cannot effectively estimate the amplitude of fault feature components. In order to solve this problem, the extended Prony algorithm is proposed to determine the amplitudes and initial phase angles of fault feature components. Simulative and experimental results show that the proposed method is practicable, effective and simple, and the detecting results are intuitive.

Key words: asynchronous motors; Duffing system; extended Prony algorithm; broken rotor bar fault; detection