

电机转子系统早期故障可视化检测的差分振子法

李楠¹, 赵东成², 李虹波¹, 李天云¹

(1. 东北电力大学 信息工程学院, 吉林 吉林 132012;

2. 河北省电力勘测设计研究院, 河北 石家庄 050031)

摘要: 在对提取电机转子微弱故障信号方面作了深入研究的基础上, 提出了电机转子系统早期故障可视化检测的差分振子法。该方法是在差分方程的基础上构造检测器, 确定系统激励频率 f_e 及检测频率 f_d , 当被测信号中含有 f_d 这一频率成分时, 系统即刻产生共振来抑制噪声, 其相图发生明显的变化, 由相图的变化判断系统是否发生故障, 从而实现了早期故障的可视化检测。将该方法应用于同步发电机转子匝间短路及转子碰摩故障的识别中, 实例仿真证明了该方法的有效性。

关键词: 差分振子; 转子系统; 早期故障; 可视化检测

中图分类号: TM 31; TM 307^{+.1} **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)06-0074-04

电机转子系统工作正常与否直接影响到整个机械系统的工作状态。故障发生早期, 由于故障信号非常微弱, 常被强烈的背景噪声所淹没。早期故障检测实际上就是实现在强噪声背景下微弱信号的检测。长期以来, 国内外学者在微弱信号检测领域做了大量的工作, 并提出了一些分析实验方法。其中, 频谱分析和小波分析方法比较常用^[1-4]。但是, 这 2 种方法所能检测到的信噪比有限, 当信噪比较低时, 它们不能很好地完成信号检测任务。

近年来, 随着非线性理论不断发展, 利用非线性系统特有性质检测出信噪比较低的故障信号成为可能。微弱信号检测方法主要有随机共振法^[5-9]、混沌振子法^[10-12]、差分振子法^[13]。其中, 混沌振子法及差分振子法具有极好的噪声抑制能力并对激励频率的幅值变化非常敏感。由于混沌振子法需要解一个非线性微分方程, 必须进行大量的数值积分运算, 因此妨碍了它在在线监测中的应用。差分振子法是基于差分方程构造检测器, 确定系统激励频率 f_e 及检测频率 f_d , 当被测信号中含有 f_d 这一频率成分时, 则系统产生共振, 其相图随即发生变化, 通过观察系统的相图变化判断系统是否发生故障, 从而实现了早期故障的可视化检测。该检测快速、准确、直观、有效。

1 差分振子基本原理

1.1 数学模型

以二维离散线性系统作为数学模型:

$$x_{k+1} = ax_k + by_k, \quad y_{k+1} = cx_k + dy_k \quad (1)$$

令:

$$\alpha = -(a+d), \quad \beta = ad-bc \quad (2)$$

则:

$$x_{k+1} + \alpha x_k + \beta x_{k-1} = 0 \quad (3)$$

当

$$\beta > 0 \text{ 且 } |\alpha(1+\beta)/(4\beta)| < 1 \quad (4)$$

系统固有振动频率 ω_0 可以通过下式估计:

$$\omega_0 = \arccos[-\alpha(1+\beta)/(4\beta)] \text{ 定义域: } [0, \pi] \quad (5)$$

振动频率 f_0 和 ω_0 的关系:

$$f_0 = \omega_0 f_s / (2\pi) \text{ 或 } \omega_0 = 2\pi f_0 / f_s \quad (6)$$

式中 f_s 为采样频率。

1.2 参数选择

差分振子的相图对参数变化非常敏感, 参数的微小变化将会导致 X-Y 相图明显的变化。下面以式(3)中的参数变化进行讨论。

固定系数 $\beta=0.98$, 选择系统初值 $x_0=6.0, y_0=6.0$ 。图 1 为 $\alpha=0.1, 0.5, 0.95, 1.2, 1.8, 2.0$ 时的系统相图。图 2 为 α 由 0.1 变化到 1.0 的系统三维相图。图 3 为 α 由 1.0 变化到 2.0 的系统三维相图。

由图 2、图 3 可以清楚地看到, 在 $0 < \alpha < 1.0$ 时, 随着 α 的增大, 相图逐渐变得简单清晰, 最终收敛于稳定的极点, 如图 1(c) 所示。在 $\alpha > 1.0$ 时相图开始收

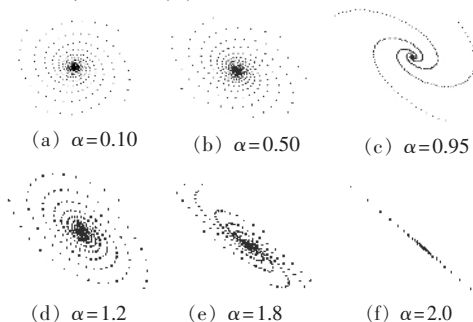


图 1 参数 $\beta=0.98, \alpha=0.1, 0.5, 0.95, 1.2, 1.8, 2.0$ 时系统相图

Fig.1 System phase figures with $\beta=0.98$ and $\alpha=0.1, 0.5, 0.95, 1.2, 1.8, 2.0$

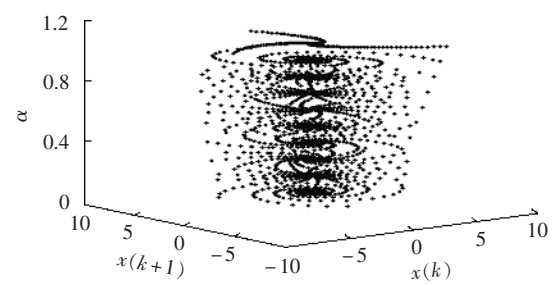


图 2 参数 $\alpha < 1.0$ 时,系统的三维相图
Fig.2 Three-dimensional system phase figure with $\alpha < 1.0$

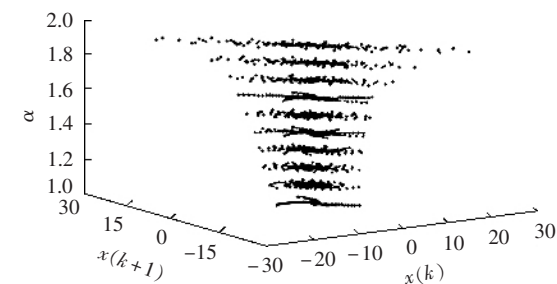


图 3 参数 $\alpha > 1.0$ 时,系统的三维相图
Fig.3 Three-dimensional system phase figure with $\alpha > 1.0$

敛极点,然后逐渐趋向于复杂,在 $\alpha > 2\sqrt{\beta}$ 时相图会变得发散,如图 1(f)所示。

固定参数 α ,参数 β 变化会得到类似的结果。
选择参数 α 、 β 和振动频率 ω_0 的基本出发点是为了得到一个简单清晰的相图。因此 α 、 β 选择在 $[0.95, 1.0]$ 区间构造差分振子较合适。

2 构造检测器

为检测出微弱的故障信号,必须以差分振子为基础,构造合适的检测器。具体形式如下:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= ax_k + by_k \\ y_{k+1} &= cx_k + dy_k + p\cos(2k\pi f_e + 2k\pi f_d/f_s)T(k) \end{aligned} \tag{7}$$

式中 f_s 为被测信号 $T(k)$ 的采样频率; f_e 为系统的激励频率; p 为强化系数; f_d 为检测频率。

2.1 激励频率 f_e 的选择

当激励或强迫频率 f_e 加到系统中时,系统相图同未加激励频率时的相图相比会有明显变化,并且易于辨认。图 4 为 α 分别取 0.1、0.5、0.95 并加入激励频率时的相图。步长或采样频率为 1。

将图 1(a)(b)(c)与图 4(a)(b)(c)作比较,相图有明显变化,其中图 4(c)最简单清晰,并且收敛速度快。

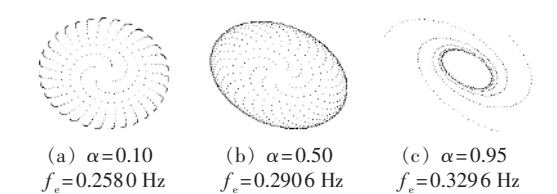


图 4 加入激励频率后的相图($\beta=0.98$)
Fig.4 Phase figures with excitation frequency added

下面考虑系统有相同的振子参数($a=0.05, b=1.03, c=-1, d=-1$)时,加入不同的激励频率相图的变化情况,如图 5 所示。

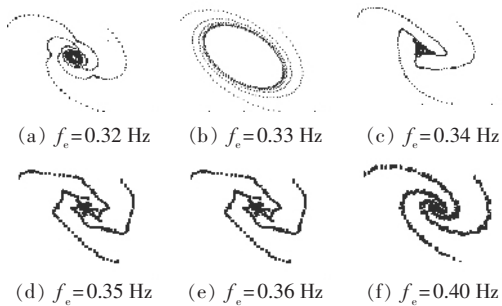


图 5 激励频率 $f_e=0.32, 0.33, 0.34, 0.35, 0.36, 0.40$ Hz 时相图
Fig.5 Phase figures with $f_e=0.32, 0.33, 0.34, 0.35, 0.36, 0.40$ Hz

当系统加入不同激励频率 f_e 时,相图的形状和激励频率大小有关,当后者恰好等于系统的振动频率 f_0 ($\omega_0=2\pi f_0$)时,相图将最终收敛于椭圆轨道(见图 5(b))。当激励频率 f_e 稍大或者略小于振动频率 f_0 时,椭圆会消失,相图最终收敛于极点。

2.2 噪声的影响

在实测信号中故障信号常被大量噪声淹没。在信噪比较低情况下,传统检测方法失效,但差分振子法具有极好的抑制噪声能力,能在强噪声背景下检测出微弱故障信号。图 6(a)为系统未加激励频率但加入白噪声时的系统相图,图 6(b)为系统加入激励频率和白噪声(信噪比 -47.9 dB)时的系统相图。

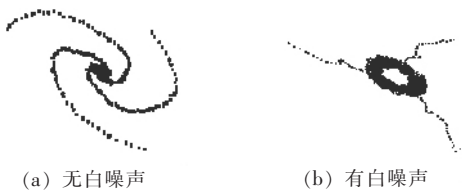


图 6 噪声对相图的影响
Fig.6 Effect of noise on phase figure

从图中可以看出,系统未加激励频率但有噪声加入,相图最终仍收敛于极点,可见噪声对系统的相图没有影响。而系统有激励频率和外部噪声加入,且所加入激励频率 f_e 与振动频率近似时,相图仍然收敛于极限环,噪声的加入不会使椭圆消失,由此可见差分振子具有噪声免疫力。

2.3 参数 p 的选择

系数 p 值大小影响检测器的灵敏度,当共振发生时它控制椭圆的大小及差分振子的收敛速度。

选取振子参数 $a=0.03, b=1.0, c=-1, d=-1.0$; 频率参数 $f_e=0.333$ Hz, $f_d=16.67$ Hz, $f_s=1000$ Hz 构造检测器, p 分别取 0.5、4、8、15 得到系统相图,如图 7 所示。待测信号中包含 16.67 Hz、50 Hz 的频率成分及白噪声,信噪比为 -47.9 dB。

从图中可知,系数 p 应该选择合适的大小,过大会放大噪声影响,使偏离椭圆的点增多;过小则不易判断出共振发生。

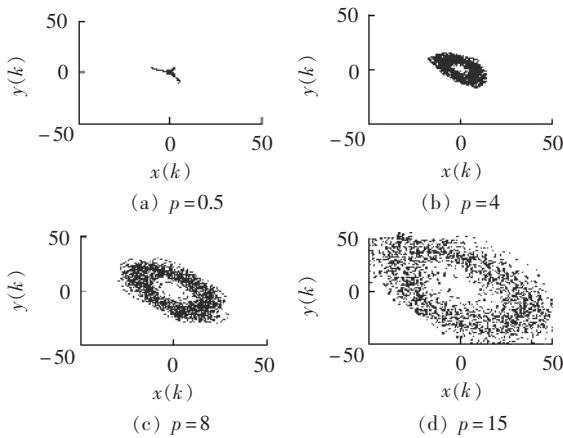


图 7 p 取不同值时系统的相图

Fig.7 System phase figures with different values of p

3 仿真

3.1 数字仿真

差分振子法检测模型如图 8 所示。



图 8 差分振子法检测模型

Fig.8 Test model of differential resonator method

构造仿真信号为

$s(k) = \sin(2\pi k \times 0.05) + \cos(2\pi k \times 178.58) + N_n$
式中 N_n 为噪声。

检测器参数: $\alpha=0.97, \beta=0.97; f_e=0.3319\text{ Hz}; f_s=1000\text{ Hz}; p=1$ 。系统初值: $x(1)=10.0; x(2)=10.0$ 。当 $f_d=0.05\text{ Hz}$ 时,即被测信号 s 中含待检测频率时,相图收敛为极限环,如图 9(a)所示;当 $f_d=0.04\text{ Hz}$ 时,即被测信号 s 中不含所检测的频率时,相图收敛于极点,如图 9(b)所示。

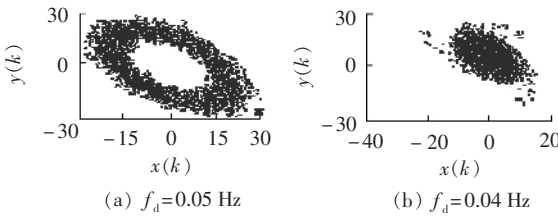


图 9 被测信号 s 的相图

Fig.9 Phase figures of detected signal s

3.2 实例仿真

3.2.1 算例 1 同步发电机转子匝间短路故障

发电机正常运行时,电枢反应磁场与转子同步旋转,转子绕组不会感应附加谐波电流。当发电机发生转子匝间短路故障时,气隙主磁场出现谐波,励磁回路中会感应出 $f_r=16.67\text{ Hz}$ 及 2 倍、5 倍、7 倍和 8 倍附加谐波电流^[14]。通过分析励磁电流的频率特性,检测是否有转子绕组匝间短路故障存在。以动模实验室 MJF-30-6 型发电机为分析对象,额定容量为 $30\text{ kV}\cdot\text{A}$;额定转速 $n_N=1000\text{ r/min}$;由 Z2-91 型直流电动机拖动。极对数 $P=3$;相数为 3;定子

槽数为 54,定子绕组为分布短距绕组,双 Y 接线,每相 2 个并联支路;转子槽数为分度槽 42。表 1 给出了转子匝间短路时实测的励磁电流中各谐波电流幅值,总励磁电流 $I_2=1.43\text{ A}$ 。

表 1 实测谐波电流

Tab.1 Measured harmonic currents						A
运行状态	I_{r1}	I_{r2}	I_{r5}	I_{r7}	I_{r8}	
正常运行	0	0	0	0	0	
短路 1 %	0.0124	0.0020	0.0010	0.0024	0.0010	
短路 2 %	0.0210	0.0046	0.0010	0.0032	0.0022	
短路 7.5 %	0.0360	0.0138	0.0016	0.0040	0.0110	
短路 10 %	0.0380	0.0175	0.0016	0.0040	0.0170	

选择差分振子参数: $\alpha=0.95, \beta=0.98$ 。构造检测器:激励频率 $f_e=0.33\text{ Hz}$;采样频率 $f_s=1000\text{ Hz}$; $p=5$;被检测频率 $f_d=16.67\text{ Hz}$ 。系统初值: $x(1)=5.0, x(2)=5.0$ 。

图 10 为发电机正常运行时,转子电流信号经差分方程计算后的系统相图。由于正常运行时励磁电流中不包含反映转子匝间短路故障的特征频率,相图收敛于坐标原点(极点)。

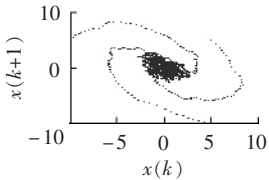


图 10 发电机正常运行时励磁电流相图

Fig.10 Phase figure of excitation current under normal operation

图 11 分别为转子绕组存在不同短路情况下的系统相图。可以清楚地看到,各相图收敛于极限环,并且短路故障越严重,相图收敛于极限环的速度越快。这就表明被测信号中存在 16.67 Hz 的故障特征频率,发电机存在转子匝间短路故障。

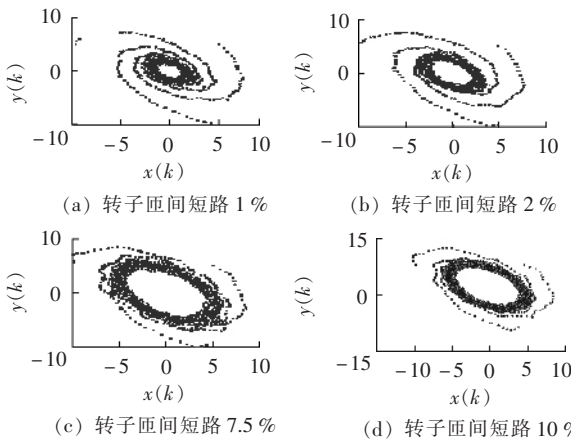


图 11 发电机转子匝间短路时励磁电流相图

Fig.11 Phase figures of excitation current under rotor winding inter-turn short-circuit fault

3.2.2 算例 2 转子碰摩故障

通过模拟转子系统碰摩故障实验,总结出转子系统发生早期碰摩时有 $1/3, 2/3$ 工频分量稳定存在这一特征^[15],其幅值较微弱,在实际工作环境中很难将其检测出来。针对工频为 50 Hz 的转子信号,要检测其中是否含有 $1/3$ 分频信号,可用差分振子方程:

$$x_{k+1}=ax_k+by_k, \quad y_{k+1}=cx_k+dy_k$$

构造检测器

$$x_{k+1}=ax_k+by_k$$

$$y_{k+1}=cx_k+dy_k+p\cos(2\pi kf_e+2\pi kf_d/f_s)T(k)$$

式中 $T(k)$ 为待检信号。

选取振子参数:

$$a=0.03, b=0.1, c=-1, d=-1, p=20, f_s=2000 \text{ Hz}$$

$$f_d=50/3 \text{ Hz}, f_e=0.3319 \text{ Hz}, x(1)=6.0, y(1)=6.0$$

利用所构造的检测器对 1/3 分频信号进行检测,从而判断转子系统是否出现早期碰摩故障。由实验数据画出转子电流的波形图并进行频谱分析,如图 12 所示(纵坐标 I_m 为电流幅值, A 为其频谱幅值)。由于故障信号较微弱,并且旋转机械运行时会产生大量的噪声,所以从频谱图中看不到故障频率的存在。将转子电流信号送入差分系统后观察系统相图变化,如图 13 所示。(a) 图为未发生碰摩故障时系统的相图,最后收敛于原点; (b) 图为发生碰摩故障后系统的相图,收敛于极限环,可判断出转子系统发生了早期碰摩故障。

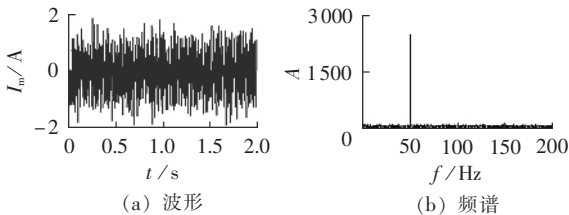


图 12 发生故障后转子电流波形及频谱图

Fig.12 Rotor winding current waveform and frequency spectrum with fault

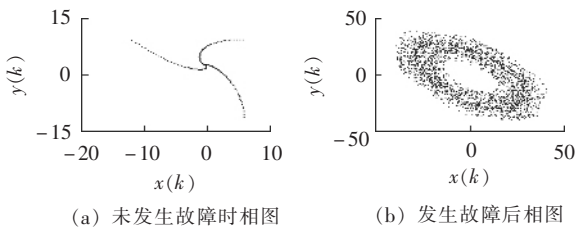


图 13 差分振子系统相图

Fig.13 Phase figures of differential resonator system

4 结论

基于差分振子理论,提出了一种强噪声背景下微弱信号检测的可视化新方法。将该方法应用于同步发电机转子匝间短路及转子碰摩故障的识别中。仿真结果证明了该方法具有快速、准确、高效、直观的特点,为工程技术人员进行早期故障信号的检测提供了一个新手段。

参考文献:

- [1] STASZEWSKI D. Wavelet based compression and feature selection for vibration analysis[J]. Sound Vibration, 1998, 21(5): 735-760.
- [2] 任震,张征平,黄雯莹,等. 基于最优小波包基的电动机故障信号的消噪与检测[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 53-57.

- REN Zhen, ZHANG Zheng-ping, HUANG Wen-ying, et al. Denoising and detection of faulted motor signal based on best wavelet packet basis[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 53-57.
- [3] 胡国胜,郭晓玉,任震,等. 基于半正交小波包的电机故障信号处理方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(3): 1-4.
- HU Guo-sheng, GUO Xiao-yu, REN Zhen, et al. Semi-orthogonal wavelet packet-based processing method of fault signal processing of electric power system[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(3): 1-4.
- [4] 李一兵,岳欣,杨莘元. 多重自相关函数在微弱正弦信号检测中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(4): 525-528.
- LI Yi-bing, YUE Xin, YANG Xin-yuan. Estimation of sinusoidal parameters in powerful noise by multi-layer autocorrelation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(4): 525-528.
- [5] XU B H, DUAN F B, BAO R H, et al. Stochastic resonance with tuning system parameters: the application of bistable systems in signal processing[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2002, 13(4): 633-644.
- [6] 祝恒江,李蓉,温孝东. 利用随机共振在强噪声下提取信息信号[J]. 物理学报, 2003, 52(10): 2404-2408.
- ZHU Heng-jiang, LI Rong, WEN Xiao-dong. Extracting information signal under noise by stochastic resonance[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(10): 2404-2408.
- [7] 杨祥龙,江波,吴为麟,等. 小信号检测中的自适应随机共振检测技术[J]. 信号处理, 2003, 19(2): 182-184.
- YANG Xiang-long, JIANG Bo, WU Wei-lin. Adaptive stochastic resonance technology in detecting weak signal[J]. Signal Processing, 2003, 19(2): 182-184.
- [8] 李楠,赵妍,李天云. 基于随机共振理论的异步电动机转子断条检测新方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 99-102.
- LI Nan, ZHAO Yan, LI Tian-yun. New method for early fault diagnosis of squirrel-cage induction motors based on stochastic resonance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 99-102.
- [9] 冷永刚,王太勇,李瑞欣,等. 变尺度随机共振用于电机故障的监测诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 111-115.
- LENG Yong-gang, WANG Tai-yong, LI Rui-xin, et al. Scale transformation stochastic resonance for the monitoring and diagnosis of electromotor faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 111-115.
- [10] WANG Guan-yu, CHEN Da-jun. The application of chaotic oscillators to weak signal detection[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1999, 46(2): 440-444.
- [11] 曾庆勇. 微弱信号检测[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.
- [12] 李月,杨宝俊,石要武,等. 混沌振子用于强噪声下微弱正弦信号的检测[J]. 吉林大学自然科学学报, 2001(1): 75-77.
- LI Yue, YANG Bao-jun, SHI Yao-wu, et al. The application of the chaotic oscillator to the weak sine signal detection in strong noise based[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Jilinensis, 2001(1): 75-77.
- [13] QU Liang-sheng, LIN Jing. A difference resonator for detecting weak signals[J]. Measurement, 1999, 26(1): 69-77.
- [14] 万书亭,李和明,李永刚,等. 同步发电机转子匝间短路故障时励磁电流谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 64-67.
- WAN Shu-ting, LI He-ming, LI Yong-gang, et al. Analysis of generator excitation current harmonics on rotor winding inter-turn short circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 64-67.
- [15] 胡芑庆,温熙森. 转子碰摩故障振动特征的数值分析与辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 70-73.
- HU Niao-qing, WEN Xi-sen. Analysis and identification methods for vibration characteristics of rotor rub-impact fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 70-73.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

李楠(1973-),女,吉林白城人,讲师,硕士,主要研究

方向为非线性在信号处理方面的应用(E-mail:jllinan@163.com);

赵东成(1979-),男,河北保定人,助理工程师,硕士,主要研究方向为非线性系统在电力系统中的应用。

Differential resonator method for early fault
visual detection of generator rotor system

LI Nan¹,ZHAO Dong-cheng²,LI Hong-bo¹,LI Tian-yun¹
(1. Northeast Dianli University,Jilin 132012,China;

2. Hebei Electric Power Design & Research Institute,Shijiazhuang 050031,China)

Abstract: Differential resonator method for early fault visual detection of generator rotor system is proposed based on the deep research of its weak fault signal extraction. A detector is designed based on differential function to determine the excitation frequency f_e and the detection frequency f_d . When the detected signal includes the f_d component,system immediately produces resonance to suppress noise,causing the phase figure changed obviously. The early system fault can be visually detected according to the phase figure change. Applications in generator rotor winding inter-turn short-circuit fault and rub-impact fault detections verify its validity.

Key words: differential resonator; rotor system; early fault; visual detection