

基于 PSO-ADMMF 和 WPE 的 发电机转子匝间短路故障诊断

王 莉, 张丹旭, 刘 进

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

摘要 针对常规的数学形态滤波器对定子电流信号滤波效果不理想, 提出粒子群算法改进的数学形态滤波器。引用粒子群算法寻找最优的数学形态滤波器中开-闭和闭-开运算的权系数, 建立自适应数学形态滤波器模型, 对定子电流信号进行滤波处理。结合小波包理论和信息熵理论, 提出小波包熵作为故障特征的故障诊断方法。仿真实验对比了 PSO 算法改进的自适应数学形态滤波器和常规数学形态滤波器的滤波效果, 计算了滤波后的不同状态信号的小波包熵, 并以此进行了转子匝间短路故障诊断, 仿真验证表明本方法是有效的。

关键词 自适应数学形态滤波器; 粒子群算法; 转子匝间短路; 小波包熵

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.03.014

中图分类号 TN81 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)03-0057-04

Fault Diagnosis for Rotor Inter-turn Short Circuit Based on PSO-ADMMF and Wavelet Packet Entropy

WANG Li, ZHANG Dan-xu, LIU Jin

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Rotor inter-turn short circuit fault is hard to be diagnosed because mathematical morphology filter process stator current is not ideal. The method of PSO-adaptive mathematical morphology filtering is used to wipe out the noise interference. Firstly, the best weight coefficient of open-close and close-open operation is found by using PSO, and the best de-noise mathematical morphology filtering is built. Secondly, a fault diagnosis method of taking the wavelet packet entropy as a fault character is proposed combined with wavelet packet analysis and information entropy. Finally, the filtering effectiveness of the de-noise result of PSO-ADMMF and that of the conventional mathematical morphology are compared, and the wavelet entropy after de-noise is figured out. The result shows that the method is useful and effective.

Key words: adaptive mathematical morphology filter; particle swarm optimization; rotor inter-turn short circuit fault; wavelet packet entropy

转子绕组匝间短路故障轻微时并不影响发电机的正常运行, 但是如果故障继续发展, 将会使转子

收稿日期: 2013-06-27

作者简介: 王莉(1958-), 女, 陕西合阳人, 教授, 主要从事地空导弹电力系统自动化与监控技术研究. E-mail: kjgcdxwl@163.com

引用格式: 王莉, 张丹旭, 刘进. 基于 PSO-ADMMF 和 WPE 的发电机转子匝间短路故障诊断[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(3): 57-60. WANG Li, LIU Jin, ZHANG Danxu. Fault diagnosis for rotor inter-turn short circuit based on PSO-ADMMF and wavelet packet entropy[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(3): 57-60.

励磁电流显著增加,绕组温度升高,无功功率下降,机组振动加剧,严重时可能导致接地故障等恶性事故发生^[1,2]。因此,很有必要研究发电机转子匝间短路故障机理,进行转子匝间短路故障诊断研究。

当前进行转子绕组匝间短路故障诊断的方法有:计算转子绕组的交直流电阻,但是交直流电阻值对轻微故障时不敏感^[3];文献[4]指出可以通过分析定子电流信号谐波特性进行故障诊断研究,但是故障后定子电流中会包含强烈的噪声干扰。因此,必须对信号进行滤波处理。

常见的滤波方法对于白噪声的处理不够理想,滤波可应用性不高^[5]。G.Matheron 和 J.Serra 等人在数学形态基础上提出了数学形态滤波理论(Mathematical Morphology Filter, MMF),其具有计算简单,运行速度快等优点^[6,8]。

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)具有很强的搜索能力,而且易于实现^[9,10]。因此,本文提出 PSO 算法优化数学形态滤波器方法。

1 转子匝间短路故障分析

同步发电机转子发生匝间短路故障后,励磁绕组分为正常励磁回路和短路励磁回路,后者产生短路电流 i_d , 电流方向与正常状态下的励磁电流方向相反,在励磁磁场中起去磁作用。

假设电机磁场未饱和,故障后的励磁磁动势等效成正常励磁回路产生的磁动势与故障回路产生的磁动势的叠加。不考虑故障后定子电枢反应磁动势引起的励磁绕组和阻尼绕组的附加谐波电流,正常励磁回路产生的磁动势性质与故障前相同,不会在定子支路感应分数次谐波电流。因此,只需分析励磁故障回路产生的磁动势即可完成故障后励磁磁动势的分析。

设 N 是各极下励磁线圈数, p 为磁极对数,则发电机励磁磁势的表达式为:

$$F(x) = \sum_{n=1}^{2p} \sum_{k=1}^N \sum_{\substack{p, 2p, \dots}} A_{kni} \cos k(x - (n-1)\pi) \quad (1)$$

本文研究的某型同步发电机极对数 $p=2$, 将式(1)进行傅里叶分解得:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \sum_k \frac{2}{2k\pi} \omega_{f1i} i_{fd} \sin\left(\frac{k\beta_{f1i}}{2}\right) \cos kx - \frac{2}{2k\pi} \omega_{f2i} i_{fd} \sin\left(\frac{k\beta_{f2i}}{2}\right) \cos(kx - k\pi) + \frac{2}{2k\pi} \omega_{f3i} i_{fd} \sin\left(\frac{k\beta_{f3i}}{2}\right) \cos(kx - 2k\pi) -$$

$$\frac{2}{2k\pi} \omega_{f4i} i_{fd} \sin\left(\frac{k\beta_{f4i}}{2}\right) \cos(kx - 3k\pi) \quad (2)$$

式中: β_{fni} 为第 n 极下第 i 个转子绕组的短距比; ω_{fni} 为第 n 极下第 i 个转子绕组的实际匝数。

当同步发电机发生转子绕组匝间短路故障后,以第 1 极下的绕组发生匝间短路为例,此时有 $\omega_{f1i} < \omega_{fni}$, $n=2, 3, 4$, 可以将励磁磁动势化简为:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots}^N \frac{1}{k\pi} (\omega_{f1i} - \omega_{f3i}) i_{fd} \sin\left(\frac{k\beta_{f1i}\pi}{2}\right) \cos kx + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1, 3, \dots}^N \frac{1}{k\pi} (\omega_{f1i} + 3\omega_{f3i}) i_{fd} \sin\left(\frac{k\beta_{f1i}\pi}{2}\right) \cos kx + \sum_{i=1}^N \sum_{k=2, 4, \dots}^N \frac{1}{k\pi} (\omega_{f1i} - \omega_{f3i}) i_{fd} \sin\left(\frac{k\beta_{f1i}\pi}{2}\right) \cos kx \quad (3)$$

从式(3)可以看出,发生匝间短路故障后励磁磁动势中的奇数次谐波幅值减少,同时出现了 2、4 等偶数次谐波和 1/2、3/2 同 5/2 等分数次谐波分量。由此可知在转子匝间短路后空载磁场中除了含有奇数次谐波外还含有偶数次和 1/2、3/2、5/2 等分数次谐波^[12]。

故障后气隙磁场中会产生相应的谐波磁势,因此,会在定子绕组中感应出相应的谐波电势,当发电机接通负载后,定子绕组中出现相应的谐波电流。因此,可以通过检测定子电流中的偶数次和相应的分数次谐波分量诊断转子绕组匝间短路故障。

研究表明故障后定子电流中含有较多的噪声干扰,故障特征分量易被噪声淹没,直接对定子电流信号进行分析,诊断结果的可靠性不足。因此,要准确的诊断故障必须对信号进行降噪处理。

2 粒子群优化的自适应数学形态滤波

2.1 常规数学形态滤波

设 $f(n)$ 、 $g(n)$ 是定义在 $D_f = \{0, 1, \dots, N\}$, $D_g = \{0, 1, \dots, M\}$ 上的一维离散函数,且 $M < N$, $f(n)$ 为输入序列, $g(n)$ 为结构元素,则 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的膨胀定义为:

$$(f \oplus g)(n) = \max_{\substack{m=0, 1, \dots, M-1 \\ n-m \in D_f, m \in D_g}} \{f(n-m) + g(m)\} \quad (4)$$

腐蚀定义为:

$$(f \ominus g)(n) = \min_{\substack{m=0, 1, \dots, M-1 \\ n+m \in D_f, m \in D_g}} \{f(n+m) - g(m)\} \quad (5)$$

结合式(4)和式(5),定义开运算和闭运算为:

$$(f \circ g)(n) = [(f \ominus g) \oplus g](n) \\ (f \bullet g)(n) = [(f \oplus g) \ominus g](n) \quad (6)$$

开运算可以削去信号中的尖峰,闭运算可以填

平信号中的凹谷,因此,可以采用开运算和闭运算组合的形式去除信号中的噪声。

Maragos 采用开、闭运算的级联组合形式,定义的开-闭(OC)和闭-开(CO)滤波组合器为:

$$\begin{aligned} \text{oc}(f(n)) &= (f \circ g \bullet g)(n) \\ \text{co}(f(n)) &= (f \bullet g \circ g)(n) \end{aligned} \quad (7)$$

利用广义开-闭和闭-开运算的线性组合,不但能够消除标准形态算子产生的偏差,而且保持了形态学的形状控制特性。常见的组合滤波器为:

$$y(n) = [\text{oc}(f(n)) + \text{co}(f(n))]/2 \quad (8)$$

从式(8)可以看出组合滤波器中的权系数均为 0.5,不能根据滤波对象自适应改变权重,导致滤波效果受到限制。本文引用 PSO 全局优化的性能,全局寻找最优权系数,建立 PSO 自适应数学形态滤波器,以提高滤波效果。

2.2 PSO 自适应数学形态滤波器

在 PSO 算法中每个粒子都是解空间(n 维)中具有一定速度的一个点,不同粒子具有对应于与目标函数相关的个体适应度,在每一次迭代中粒子通过跟踪局部极值 $pbest$ 和全局极值 $gbest$ 来更新自己,在跟踪过程中粒子通过如下 2 个公式来更新自己的速度和位置:

$$\begin{aligned} v_{id}^{k+1} &= \omega v_{id}^k + c_1 r_1^k (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + \\ & c_2 r_2^k (gbest_d - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} &= x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: r_1 和 r_2 为(0,1)之间的随机数,通常学习因子 $c_1 = c_2 = 2$; ω 是加权系数,范围 0.1~0.9 之间; x_{id}^k 为粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 维的当前位置; $pbest_{id}^k$ 为粒子 i 在第 d 维的局部极值点的位置(即坐标); $gbest_d^k$ 为粒子 i 在第 d 维全局极值点位置。

在定义的自适应广义形态滤波中,需要寻找广义开-闭和闭-开 2 个权系数,因此,本文尝试建立 PSO 算法寻找最优权系数。

由于研究对象为发电机定子电流信号,理想状态下故障后电机定子电流为基波分量和相应的偶数次和分数次谐波分量组成, $f(t) = a \sin(100\pi t) + \sum b \sin(2\pi f_i t)$ 。设滤波处理后的信号为 $y(t)$,定义

$$\text{误差 } E = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y(n) - f(n))^2 \right]^{1/2}$$

首先初始化开-闭和闭-开 2 个运算的权系数和 PSO 算法的各个参数,然后利用 PSO 算法的全局搜索能力寻找最优权系数,2 个 PSO 算法分别进行寻优,利用每运算一次得到的结果建立滤波模型进行滤波处理,计算误差 E ,在迭代范围内寻找误差最小的权系数即为所求结果。

3 仿真分析

研究表明形态滤波效果与所采用的结构元素有关,一般只有与结构元素尺寸和形状相匹配的信号才能够被保留,因此,根据形态变换的特点所选结构元素应尽可能少,并且其结构要尽可能接近待分析信号的图形特点。一般情况下定子电流信号为正弦波形,因此,本文采用与之形状相似的三角形和半圆形的结构元素处理含有噪声的电流信号。

图 1 为理想故障状态下信号和采集到的故障状态下电机定子电流信号。

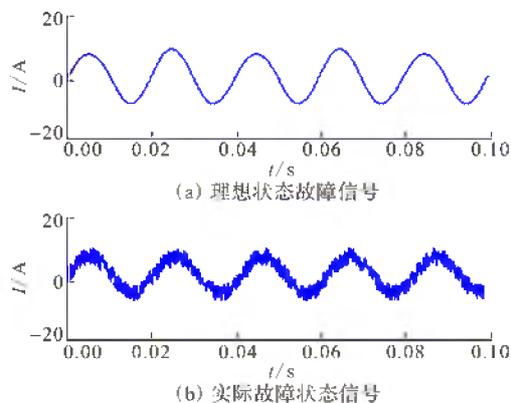


图 1 未滤波信号波形图

Fig. 1 No filtering signal waveform

计算实际故障信号与理想状态下故障信号的差值,按照 PSO 算法寻找最优的形态滤波权系数,针对定子电流信号,在迭代次数为 200 次的条件下,找到的最优开-闭运算权系数为 0.3,闭-开运算权系数为 0.8,以此为依据建立改进自适应数学形态滤波器,对定子电流信号进行滤波处理后得到的波形和常规数学形态滤波后效果见图 2。

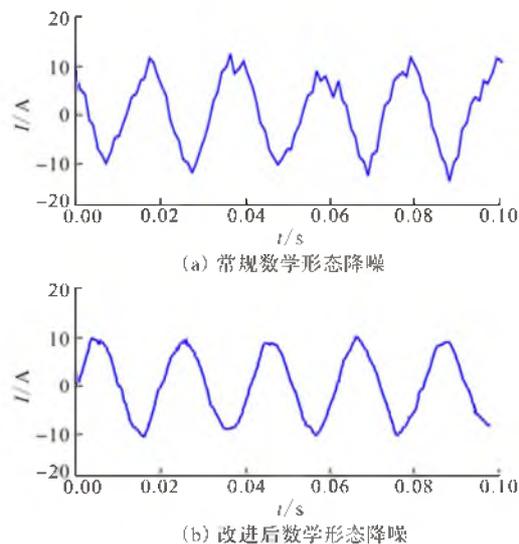


图 2 降噪效果图

Fig. 2 Filtering signal waveform

对比图 1 和图 2 可以看出采用改进后的数学形态滤波器滤波,信号中的尖点和凹谷明显比常规的数学形态滤波器处理后的信号中的要少。证明改进后的数学形态滤波器滤波效果要比常规的数学形态滤波器滤波效果好。

采用小波包分解技术分别对 PSO 改进的自适应数学形态滤波器和常规数学形态滤波器降噪后的正常状态和故障状态信号进行 3 层分解,由于故障特征分量存在于低频段,引用信息熵理论计算低频段信号熵值,见表 1。

表 1 信息熵

Tab. 1 Information entropy

降噪方法	故障状态			正常状态		
	(3,0)	(3,1)	(3,3)	(3,0)	(3,1)	(3,3)
常规数学形态降噪	503.97	255.92	131.87	500.12	245.38	122.19
PSO 自适应数学形态降噪	353.79	169.80	86.59	501.02	251.17	130.44

常规的数学形态滤波器降噪后,信号中还含有相当部分的噪声,导致信号能量分布的比较均匀,故障谐波分量表现不明显,致使信号熵值较大。采用 PSO 改进的自适应数学形态降噪处理后,噪声成分大大减少,相应的故障特征分量表现明显,信号能量集中在几个频段内,熵值变小。同时其信息熵值差别较大,可以进行故障诊断。利用 PSO 改进后的自适应数学形态降噪后,故障状态与正常状态范数熵值区别明显,可作为故障诊断依据。进而证明改进后的数学形态滤波方法降噪效果显著。

4 结论

本文采用 PSO 算法寻找数学形态滤波器权系数,建立 PSO 自适应数学形态滤波器。对发电机转子绕组故障后定子电流信号进行滤波处理,结合小波包和信息熵理论进行故障诊断,得到以下结论:

1) 通过 PSO 寻找最优权系数,建立的 PSO 自适应数学形态滤波器能有效消除噪声干扰,滤波效果比常规的数学形态滤波器滤波效果好。

2) 对滤波后信号进行小波包分解,计算得到的信息熵值能够区别正常状态和故障状态,可以作为故障表征量。

参考文献(References):

[1] 张超. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征传递规律[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 52-57.
ZHANG Chao. Transfer law of fault characteristics of inter-

turn short circuit in synchronous generator rotor winding[J]. Power system protection and control, 2011, 39(14): 52-57. (in Chinese)

- [2] 李永刚. 基于多回路理论的转子匝间短路时定子并联支路环流分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 71-75.
LI Yonggang. Characteristic analysis of circular current in generator stator short-circuit of rotor windings occurs based on multi-loop theory[J]. Automation of electric power systems, 2009, 33(17): 71-75. (in Chinese)
- [3] 唐芳轩. 隐极同步发电机转子匝间短路的分布电压诊断法[J]. 高电压技术, 2005, 41(1): 72-76.
TANG Fangxuan. Using voltage distribution method to diagnose the short-circuit existing in the rotor windings of concealed poles synchronization generator[J]. High voltage apparatus, 2005, 41(1): 72-76. (in Chinese)
- [4] Penman J, Jiang H. The detection of stator and rotor winding short circuits in synchronous generators by analyzing excitation current harmonics[C]//Opportunities and advances in international power generation conference publication No.419 IEE.[S.l.]: IEE press, 1996: 137-142.
- [5] 谭向宇. 新型自适应广义形态滤波在 MOA 在线监测数据处理中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 25-29.
TAN Xiangyu. Application of novel self-adaptive generalized morphological filter to MOA on line monitoring data processing[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 25-29. (in Chinese)
- [6] 杜必强. 旋转机械振动信号形态滤波器的设计与分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9): 79-81.
DU Biqiang. Design and analysis of morphological filter for vibration signals of a rotating machinery[J]. Journal of vibration and shock, 2009, 28(9): 79-81. (in Chinese)
- [7] 沈路. 广义数学形态滤波器的旋转机械振动信号降噪[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9): 70-73.
SHEN Lu. De-noising for vibration signals of a rotating machinery based on generalized mathematical morphological filter[J]. Journal of vibration and shock, 2009, 28(9): 70-73. (in Chinese)
- [8] Maragos P, Schafer R W. Morphological filters part I: their set theoretic analysis and relations to linear shift invariant filters [J]. IEEE trans on acoustics speech and signal processing, 1987, 35(8): 1153-1169.
- [9] Brits R. Locating multiple optima using particle swarm optimization[J]. Applied mathematics and computation, 2007, 189(2): 1859-1883.
- [10] Shi Y, Eberhart R. Modified particle swarms optimizer[C]//The 1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. Anchorage, Alas, USA: IEEE world congress on computational intelligence, 1998: 69-73.

(编辑:田新华)