

利用微粒群算法提取的正负序相量检测感应电机定子故障

王攀攀,史丽萍

(中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:针对感应电机电流中转子断条故障特征分量、谐波和噪声影响定子故障诊断结果的问题,提出一种利用骨干微粒群优化(BBPSO)算法提取基波正、负序相量的故障检测方法。该方法利用 BBPSO 算法提取出三相定子电流的基波幅值和相位,进而直接计算出总的负序电流。由于在实际电机中,供电电压不平衡、电机先天不平衡和负载的变化等都会影响负序电流的大小,因此通过等效负序阻抗和支持向量机来消除这些非故障因素的影响,从而得到仅与定子故障相对应的残余负序电流,实现感应电机的定子故障诊断。实际电机实验结果表明,采用所提方法提取的残余负序电流能够更加可靠地诊断感应电机定子故障。

关键词:感应电机;定子;定子故障;骨干微粒群优化算法;负序电流;故障检测;支持向量机

中图分类号: TM 343

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.015

0 引言

定子绕组匝间短路是感应电动机最常见的故障之一,约占电机故障的 30%~40%^[1],并且此类故障往往会导致相间短路、对地短路等严重故障,因此对电机定子进行早期检测和诊断具有重要意义。

近年来,随着信号处理技术、人工智能和计算机等技术的发展,已涌现出许多各具特色的检测方法。文献[2-3]以定子负序视在阻抗(即负序电压与负序电流的比值)作为故障特征量对电机定子匝间短路故障进行检测,消除了电源电压不平衡的影响,但是这一比值随着负载的变化而变化。文献[4]利用瞬时功率分解算法获得电压、电流信号中的负序分量,并通过参数辨识从总的负序电流中分离出与故障相关的部分,但是辨识参数较多,计算较繁琐。文献[5]将对角递归神经网络应用于定子故障严重程度的估算,确定绕组短路匝数,但是该方法需要大量数据进行训练学习,在实际工程中较难满足。文献[6]以电机断电后定子感应电压的 3 次谐波作为故障特征,消除了负序电压的影响,但是不能实现在线实时监测。文献[7]通过检测频率近似为 $\frac{1}{p}f_1$ 、 $\frac{2}{p}f_1$ 、 $\frac{3}{p}f_1$ 、...

(p 为极对数, f_1 为电源频率)的定子电流谐波或某些齿槽谐波,来实现匝间短路故障诊断。文献[8]将多参考系理论应用于定子匝间短路故障检测,取得了较好效果。文献[9-10]通过对感应电机的参数识别进行故障检测,但是由于感应电机模型比较复杂,参数很难得到准确的识别。文献[11]以三相电流的相位变化作为特征量对定子故障进行检测,但是该方法容易受负序电压的影响^[3]。

文献[12]采用负序电流对定子故障进行诊断,并取得了较好的效果。但是传统的基波负序电流提取方法容易受转子断条故障特征分量、谐波和噪声的影响^[13-14],并且所得负序电流相量,除了由定子故障引起的负序电流相量外,还包括由负序电压产生的负序电流相量和电机先天不平衡产生的负序电流相量^[12]。

为此,本文首先提出一种基于骨干微粒群 BBPSO (Bare-Bones Particle Swarm Optimization) 算法的基波正、负序相量提取方法,用以消除转子断条故障特征分量、谐波和噪声的影响,并且避开了文献[14]所提方法需要搜索确定基波频率的问题。然后,根据感应电机 T 型等效电路,通过负序电压和负序等效阻抗来求取与之对应的负序电流相量;而对于电机先天不平衡的影响,考虑到其主要与负载大小有关,可以认为是正序电压和正序电流的复杂函数,因此采用支持向量机 SVM(Support Vector Machine)计算与之相关的负序电流相量。最后,从总的负序电流相量中减去负序电压和电机先天不平衡引起的负序电流分量,分离出只与定子故障相关的负序相量,并以此作为故障特征量进行感应电机定子故障检测。

1 微粒群优化算法

微粒群优化 PSO(Particle Swarm Optimization) 算法^[15]是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 最先提出的一种模拟自然生物群体行为的全局优化技术。PSO 算法因其具有结构简单、参数较少、全局搜索能力强等特点,得到了广泛的应用^[15-20]。在 PSO 算法中每个微粒就是解空间中的一个解,它根据自己的飞行经验(微粒目前所处位置 x_i 和到目前为止自己发现的最好位置 p_i)和同伴的飞行经验(到目前为止领域中所有微粒发现的最好位置 p_g)来调整自己的飞行轨迹。Clerc 和 Kennedy 于 2002 年分析了微粒的运动轨迹,

收稿日期:2014-02-18;修回日期:2014-12-09

基金项目:教育部科学技术研究重大项目(311021)

Project supported by the Key Project of the Ministry of Education in China(311021)

证明了在标准 PSO 算法中每个微粒 i 向它的个体历史极值和全局极值的加权平均值 G_i 收敛^[21],即:

$$G_{i,j} = \frac{c_{1,j}p_{i,j} + c_{2,j}p_{g,j}}{c_{1,j} + c_{2,j}} \quad (1)$$

其中, $c_{1,j}$ 和 $c_{2,j}$ 为在 $[0,1]$ 之间的随机数, $j=1,2,\dots$, D (D 为决策变量维数)。当迭代次数趋于无穷时所有微粒将收敛到同一点。

依据这种思想, Kennedy 于 2003 年提出了 BBPSO 算法^[22]。BBPSO 算法利用一个关于微粒全局极值点 p_g 和个体极值点 p_i 的高斯分布完成微粒位置的更新:

$$x_{i,j}(t+1) = N(\mu_{i,j}(t), \sigma_{i,j}^2(t)) \quad (2)$$

其中, $\mu_{i,j}(t) = (p_{i,j}(t) + p_{g,j}(t))/2$ 为高斯分布的均值; $\sigma_{i,j}^2(t) = |p_{i,j}(t) - p_{g,j}(t)|$ 为高斯分布的方差。与标准 PSO 算法相比, BBPSO 算法的最大优点就是无需设置惯性权重和学习因子等控制参数, 更适合工程实际应用。

2 基于 BBPSO 算法的正、负序相量提取方法

对于一台正常的感应电机, 理论上定子电流中只有基波分量, 但是由于电机结构上的固有不对称等因素, 仍会存在一定的谐波成分。加之电网中原本就存在一些谐波分量, 因此在感应电机定子电流中的谐波成分是比较丰富的, 其电流表达式如式(3)所示。

$$\begin{cases} i_a(t) = \sum_{k=1}^N I_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k) + n(t) \\ i_b(t) = \sum_{k=1}^N I_k \cos[(k\omega_1 t - 2\pi/3) + \varphi_k] + n(t) \\ i_c(t) = \sum_{k=1}^N I_k \cos[(k\omega_1 t + 2\pi/3) + \varphi_k] + n(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中, ω_1 为基波角频率; I_k, φ_k 分别为基波与各次谐波的幅值和初相位, $k=1,2,\dots,N$; $n(t)$ 为均值为零的白噪声。在不考虑谐波的情况下, 可以直接采用传统的对称分量法来求取三相电流中的正序、负序和零序。但是如果电机已经存在转子断条故障或电流中含有大量谐波成分, 则都会使得传统负序计算方法无法得到准确的结果^[13-14]。

为此, 本文提出一种基于 BBPSO 算法的基波正、负序相量计算方法。该方法通过内积最大准则, 准确提取出基波分量的幅值和相位, 然后再计算出基波负序相量。在此过程中, 最关键的步骤就是求内积过程。而内积实质上是一种衡量 2 个信号相似度的手段, 2 个信号越相似, 它们的内积值就越大。由于在电机定子电流信号中主要包含余弦量(以 $i_a(t)$ 为例), 如式(3)所示, 且其中基波分量的幅值最大, 因此在式(4)定义的单位余弦基函数集 $\{\psi_n(t)\}$ 中, 与基波分量最相似的基函数(即与基波分量同频率且同相位)与信号 $i_a(t)$ 的内积值将是最大的。

$$\psi_n(t) = C_n \cos(\omega_n t + \varphi_n) \quad (4)$$

其中, C_n 为归一化系数; ω_n 为角频率; φ_n 为初相位。

根据内积的本质和上述分析, 基波分量的波形参数(频率和相位)可以通过优化算法在 $\{\psi_n(t)\}$ 中搜索与信号 $i_a(t)$ 内积最大的基函数来实现。这就将基波参数的辨识问题转换为优化问题, 即式(3)中参数 ω_1 和 φ_1 可由最大化式(5)的适应度函数得到。

$$\langle i_a(t), \tilde{\psi}(t) \rangle = \max |\langle i_a(t), \psi_n(t) \rangle| \quad (5)$$

如果 $\|\tilde{\psi}(t)\| = 1$, 则 $a_1 = \langle i_a(t), \tilde{\psi}(t) \rangle$ 为基波分量的幅值。根据基元函数 $\tilde{\psi}(t)$ 的相位和 a_1 , 就可以准确地构造出基波的相量表达式, 进而直接计算出正、负序相量。

由于电流信号含有多个频率成分, 式(5)是一个多峰优化问题。为了提高优化问题的精度和收敛速度, 本文选择 BBPSO 算法计算式(5)的相关参数。

综上所述, 基于 BBPSO 算法的正、负序相量提取方法的具体步骤如下。

a. 对式(4)中 ω_n, φ_n 进行实数编码形成种群微粒, 并选择信号 $i_a(t)$ 与基元函数 $\psi_n(t)$ 内积作为适应度评价函数。

b. 通过 BBPSO 算法在可行域内进行搜索, 找到 $\tilde{\psi}(t)$ 。

c. 计算 $a_1 = \langle i_a(t), \tilde{\psi}(t) \rangle$ 。

d. 利用 $\tilde{\psi}(t)$ 中的 $\tilde{\varphi}_n$ 和 a_1 构造 a 相基波电流相量 I_a 。

e. 重复步骤 a—d, 获得定子 b、c 相电流相量 I_b, I_c 。

f. 根据式(6)计算定子电流负序相量 I_2 。

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_a + e^{j4\pi/3} I_b + e^{j2\pi/3} I_c) \quad (6)$$

如果用式(7)代替式(6), 则可以求出定子电流的正序相量 I_1 。

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_a + e^{j2\pi/3} I_b + e^{j4\pi/3} I_c) \quad (7)$$

同理, 电压的正、负序相量也可按以上步骤求出。

3 计算定子故障负序电流

根据文献[12], 总的负序电流由三部分构成, 如式(8)所示。

$$I^- = U^- / Z^- + I_r^- + I_f^- \quad (8)$$

其中, I^- 为总的负序电流; U^- 为电源负序电压; Z^- 为电机等效负序阻抗; I_r^- 为电机先天不平衡引起的负序电流; I_f^- 为定子故障引起的负序电流。

感应电机 T 型负序等效电路如图 1 所示。图中, r_1 和 jx_1 分别为定子每相绕组的电阻和漏电抗; r_2 和 jx_2 分别为折算到定子侧的转子每相绕组的电阻和

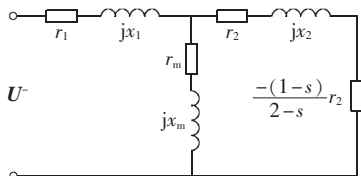


图 1 负序阻抗等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of negative sequence impedance
漏电抗; r_m 为反映电机铁芯磁滞和涡流的等效相电阻; x_m 为激磁相电抗; $\frac{-(1-s)}{2-s}r_2$ 为机械负载等效电阻; s 为转差率。从该图可以看出,电机从空载到额定负载 $r_2+\frac{-(1-s)}{2-s}r_2=\frac{r_2}{2-s}$ 的变化很小,因此可以认为 Z^- 大小基本不随负载变化。

根据电机原理和文献[12]的分析,当电机空载时正序电流较小,电机先天不平衡产生的负序电流 I_r^- 也较小,此时可以忽略 I_r^- 的影响,因此,如果是一台完好电机,空载时的总负序电流主要由负序电压产生,即 $I^- = U^- / Z^-$ 。将上式变换可得: $Z^- = U^- / I^-$,即通过计算完好电机空载时的负序电压和负序电流,便可求出感应电机等效负序阻抗。

对于式(8)中第 2 部分的负序电流 I_r^- ,主要由制造和装配误差等原因造成的先天不平衡引起,它会随着负载的增加而增加^[12],呈现出非线性关系。因此可以认为 I_r^- 是正序电压和电流的复杂函数:

$$I_r^- = f(U^+, I^+) \quad (9)$$

SVM 是一种基于统计学习理论的机器学习方法,在解决小样本问题中表现出独特的优势和良好的应用前景,并具有优良的泛化能力。因此本文选择 SVM 来拟合函数 $f(U^+, I^+)$ 。具体做法:①对完好电机在各种负载下进行实验,记录电压和电流数据;②计算出电压和电流的正、负序相量,并利用空载时的负序相量计算出 Z^- ;③从总的负序电流中减去 U^- / Z^- 和 I_r^- 得出 I_r^- ;④以 U^+ 和 I^+ 为输入、 I_r^- 为输出,通过 SVM 进行学习,并将学习好的模型保存下来。

依据上述分析,对故障电机进行诊断时,首先将采集到的数据通过第 2 节方法计算出电压和电流的正、负序相量;然后将电压和电流的正序相量输入 SVM,计算出相应运行情况下由电机先天不平衡引起的负序电流相量 I_r^- ;最后,从总的负序电流中减去 I_r^- 和 U^- / Z^- ,就得到仅由定子故障引起的负序电流 I_f^- ,根据 I_f^- 的模值大小即可判断故障的严重程度。整个流程如图 2 所示。

4 诊断实例分析

4.1 正、负序相量提取方法验证分析

为了验证 BBPSO 算法提取正、负序相量的有效性,并考虑到实际电机情况和仿真的简便性,选择式

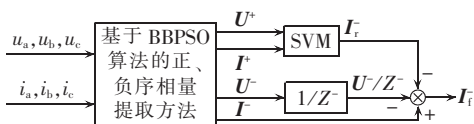


图 2 故障负序电流的计算流程

Fig.2 Flowchart of fault negative sequence current calculation

(10)作为计算正、负序相量的模拟信号。

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12 \cos(100 \pi t) \\ 10 \cos\left(100 \pi t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 9 \cos\left(100 \pi t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5 \cos(99 \pi t) \\ 0.5 \cos\left(99 \pi t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0.5 \cos\left(99 \pi t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5 \cos(101 \pi t) \\ 0.5 \cos\left(101 \pi t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0.5 \cos\left(101 \pi t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.7 \cos\left[5(100 \pi t) + \frac{\pi}{2}\right] \\ 0.7 \cos\left[5\left(100 \pi t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\pi}{2}\right] \\ 0.7 \cos\left[5\left(100 \pi t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\pi}{2}\right] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.4 \cos[7(100 \pi t) + \pi] \\ 0.4 \cos\left[7\left(100 \pi t + \frac{2\pi}{3}\right) + \pi\right] \\ 0.4 \cos\left[7\left(100 \pi t - \frac{2\pi}{3}\right) + \pi\right] \end{bmatrix} + n(t) \quad (10)$$

其中, $n(t)$ 为在 $[-0.2, 0.2]$ 之间服从均匀分布的随机干扰信号。

式(10)根据文献[13-14],已充分考虑了转子断条故障特征分量、谐波和噪声的影响。该模拟电流信号的采样间隔为 0.5 ms,采样长度为 2000,时域波形如图 3 所示(为了使波形清晰,只显示了前 100 个采样点)。

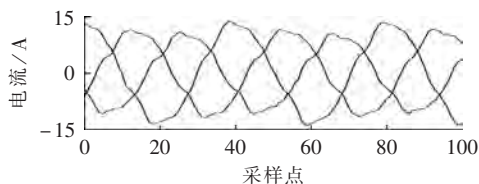


图 3 三相模拟电流信号

Fig.3 Simulative three-phase currents

分别用对称分量法和第 2 节所提方法对模拟电流信号进行正、负序电流计算,其中 BBPSO 算法中,种群规模设为 20,最大迭代次数设为 100。

对称分量法求取负序相量,须先按式(11)计算出负序电流的离散值。

$$i_2(k)=\frac{1}{3}\left[i_a\left(k+\frac{N}{3}\right)+i_b(k)+i_c\left(k+\frac{2N}{3}\right)\right]$$
 (11)

其中, $k=0,1,\cdots,N-1$; N 为一个基波周期内的采样次数。然后根据下式求得负序电流有效值:

$$I_2=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}i_2^2(k)}$$
 (12)

同理,即可通过对称分量法计算出正序电流模值。表 1 直观地展示了 2 种方法对模拟电流信号正、负序相量模值的计算结果。从表中可以看出,对称分量法由于转子断条故障特征分量、谐波和噪声的影响,其计算结果要大于实际值,特别是负序电流模值,比实际值大将近 18%;而第 2 节所提方法,由于先用 BBPSO 算法提取出基波信息,再进行正、负序相量的计算,从而克服了非基波分量的影响,获得了更准确的结果。这很好地证明了基于 BBPSO 算法的正、负序相量提取方法的准确性和有效性。

表 1 正、负序电流计算结果
Table 1 Calculated positive and negative sequence currents

正/负序电流	对称分量法	BBPSO 算法	实际值
正序电流模值	8.179	7.310	7.307
负序电流模值	0.736	0.620	0.624

4.2 故障诊断步骤

实验电机为专门定制的感应电动机,其主要参数如下:额定功率为 1.1 kW,额定电压为 380 V,额定电流为 2.6 A,额定转速为 1 425 r/min,定子线圈匝数为 464,转子导条根数为 28。

在实验平台中,将一台负载可调的直流发电机作为电机负载,整个实验系统的结构如图 4 所示。

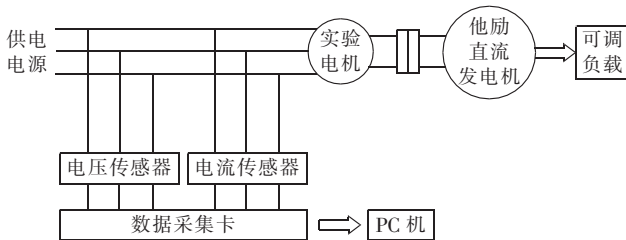


图 4 实验系统结构图
Fig.4 Diagram of experimental system

在空载、半载和满载下,分别对下列 3 种情况的电机进行实验:定转子完好;定子 18 匝短路、转子 1 根断条(故障 1);定子 29 匝短路、转子 1 根断条(故障 2)。

电压和电流的采样间隔为 0.7 ms,采样长度为 2 000。数据的处理和分析都在 MATLAB 中进行, BBPSO 算法的参数设置与第 4.1 节一致。

实验时,先记录多组定转子完好电机在空载、半载和满载时的三相电压和电流数据。通过第 2 节方法求出各种负载下电压和电流的正、负序相量;接着,利用空载时的负序电压和负序电流计算 Z^- ,并将其

保存;然后,根据 Z^- 和第 3 节方法计算出各种负载下的 I_r^- ,进而将多组 $U^+、I^+$ 和 I_r^- 相量数据作为 SVM 的输入输出进行训练,得到实验电机先天不平衡引起的负序相量 I_r^- 的 SVM 模型,将其保存。

将实验电机定子 a 相分别短路 18 匝和 29 匝,并换入带有 1 根断条的转子,来模拟转子断条情况下定子故障的不同严重程度,采集这 2 种故障在不同负载下的三相电压、电流数据。图 5 给出了电机满载下定子三相电流的波形(为了使波形清晰,只显示了前 100 个采样点),图中从上至下依次为定转子完好电流信号,定子 18 匝短路、转子 1 根断条电流信号和定子 29 匝短路、转子 1 根断条电流信号。

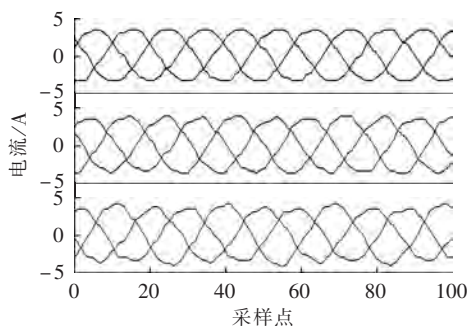


图 5 三相电流信号原始波形
Fig.5 Original waveform of three-phase currents

根据第 2 节方法计算出电压和电流的正、负序相量,其中电机总的负序电流模值如图 6 所示(P 为功率)。

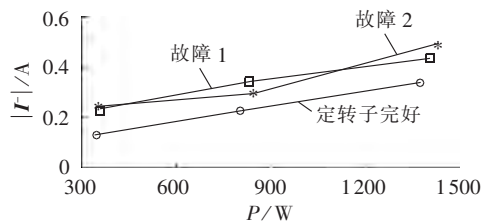


图 6 电机总的负序电流
Fig.6 Total negative sequence current of motor

从图 6 可以看出,由于电源电压不平衡和电机先天不平衡的影响,在半载情况下,18 匝短路故障总负序电流比 29 匝短路故障的要大,不符合故障实际情况。因此需要通过第 3 节方法消除负序电压和电机先天不平衡的影响,计算出仅由定子故障引起的负序电流,其模值如图 7 所示。

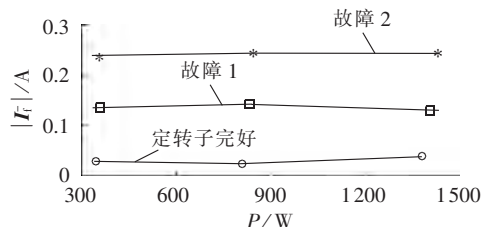


图 7 仅由定子故障引起的负序电流
Fig.7 Residual negative sequence current caused by stator fault alone

由图7可见,仅与定子故障相关的负序电流大小随着故障严重程度增加而增加,且基本不受负载波动的影响,因此采用 $|I_{-}|$ 作为故障特征量可以更准确地检测定子绕组故障。

5 结论

本文首先提出了一种基于BBPSO算法的正、负序相量提取方法,有效地消除了转子断条故障特征分量、谐波和噪声的影响,与传统的对称分量法相比,可以得到更准确的计算结果。然后,利用电机T型等效电路和SVM技术,将总的负序电流中由负序电压和电机先天不平衡产生的负序分量分离出来,从而得到仅与电机定子故障相关的残余负序电流。实际电机实验结果表明,这一残余负序电流可以更加可靠地诊断电机定子故障。

参考文献:

- [1] NANDI S, TOLYIAT H A. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines: a review[C]//Conference Record of IEEE Industry Application Society Annual Meeting. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 1999: 197-204.
- [2] KOHLER J L, SOTTILE J, TRUTT F C. Alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(5): 1109-1117.
- [3] 许伯强, 李和明, 孙丽玲, 等. 异步电动机定子绕组匝间故障检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 177-182.
XU Boqiang, LI Heming, SUN Liling, et al. Detection of stator winding inter-turn short circuit in induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 177-182.
- [4] 侯新国, 吴正国, 夏立, 等. 瞬时功率分解算法在感应电机定子故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 110-115.
HOU Xinguo, WU Zhengguo, XIA Li, et al. Application of instantaneous power decomposition technique in induction motors stator fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 110-115.
- [5] 王旭红, 何怡刚. 基于对角递归神经网络的异步电动机定子绕组匝间故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 60-63.
WANG Xuhong, HE Yigang. Inter-turn fault detection of asynchronous motor stator winding based on diagonal recurrent neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 60-63.
- [6] NANDI S. Detection of stator faults in induction machines using residual saturation harmonics[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(5): 1201-1208.
- [7] ANDREAS S, HOWARD G S, JAMES P. Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(1): 32-37.
- [8] SÉRGIO M A, CRUZ A J, MARQUES C. Multiple reference frames theory: a new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(4): 871-882.
- [9] STOCKS M, MEDVEDEV A. On-line estimation of all electrical parameters in induction machines subject to stator fault[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications. Singapore: IEEE, 2007: 527-532.
- [10] BACHIR S, TNANI S, TRIGEASSOU J C, et al. Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(3): 963-973.
- [11] 董建园, 段志善, 熊万里. 异步电动机定子绕组故障分析及其诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 26-30.
DONG Jianyuan, DUAN Zhishan, XIONG Wanli. Researching on the stator winding fault of a synchronous motor and its diagnostic method[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 26-30.
- [12] KLIMAN G B, PREMERLANI W J, KOEGL R A, et al. A new approach to on-line turn fault detection in AC motors[C]//Proceedings of IEEE Conference on Industry Applications Society Annual Meeting. San Diego, GA, USA: IEEE, 1996: 2406-2411.
- [13] 许伯强, 孙丽玲, 李和明. 异步电动机定子故障检测的交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 104-109.
XU Boqiang, SUN Liling, LI Heming. Inter-influence on stator and rotor fault detection in induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 104-109.
- [14] 方芳, 杨士元, 侯新国, 等. 一种计算负序电流的新方法[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 33(5): 872-875.
FANG Fang, YANG Shiyuan, HOU Xinguo, et al. A novel method of calculating negative sequence current[J]. Transportation Science and Engineering Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 33(5): 872-875.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [16] 关龙, 刘志刚, 何士玉, 等. 离散二进制粒子群算法在基于模型配电网故障诊断中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 89-93.
GUAN Long, LIU Zhigang, HE Shiyu, et al. Application of BPSO algorithm in model-based fault diagnosis of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 89-93.
- [17] 李鹏, 李涛, 张双乐, 等. 基于混沌二进制粒子群算法的独立微网系统微电源组合优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 33-38.
LI Peng, LI Tao, ZHANG Shuang, et al. Combinatorial optimization of micro-sources in standalone microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 33-38.
- [18] 姜文, 程叶霞, 严正, 等. 考虑可靠性约束的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 27-33.
JIANG Wen, CHENG Yexia, YAN Zheng, et al. Reliability-constrained dynamic economic dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 27-33.
- [19] 周冬旭, 李晓明. 面向电力市场的含风电机组配电网无功优化模型及其求解算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 24-29.
ZHOU Dongxu, LI Xiaoming. Reactive power optimization model and its algorithms for distribution system with wind farm in electricity market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 24-29.
- [20] 徐茹枝, 王宇飞. 粒子群优化的支持向量回归机计算配电网理论

线损方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 86-89.

XU Ruzhi, WANG Yufei. Theoretical line loss calculation based on SVR and PSO for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 86-89.

[21] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.

[22] KENNEDY J. Bare bones particle swarms[C]//Proceedings of IEEE Swarm Intelligence Symposium. Indiana, USA: IEEE, 2003: 80-87.

作者简介:



王攀攀

王攀攀(1982—), 男, 浙江东阳人, 讲师, 博士, 主要从事感应电机故障诊断及智能优化研究(E-mail: wpp2011@126.com);

史丽萍(1964—), 女, 江苏溧阳人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电气设备故障诊断、智能优化及人工智能研究。

Positive and negative sequence phasor extraction by particle swarm optimization algorithm for induction motor stator fault detection

WANG Panpan, SHI Liping

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: As the fault characteristic components of broken rotor bar, harmonics and noise in stator current influence the fault diagnosis of induction motor stator, a fault detection method is proposed, which applies BBPSO(Bare-Bones Particle Swarm Optimization) algorithm to extract the positive and negative sequence phasors. The total negative sequence current is calculated directly according to the fundamental amplitude and phase of three phase stator currents extracted by BBPSO. As the negative sequence currents of an actual motor are normally effected by the unbalanced power supply voltages, inherent asymmetry and load variation, equivalent negative sequence impedance and support vector machine are applied to remove these influencing factors and the obtained residual negative sequence current caused by the stator fault alone is used for fault detection. The results of laboratory experiments demonstrate that, the proposed method applying the extracted residual negative sequence current for stator fault detection is more accurate.

Key words: induction motors; stators; stator fault; bare-bones particle swarm optimization algorithm; negative sequence current; fault detection; support vector machines

(上接第 79 页 continued from page 79)

[16] 熊桥坡, 罗安, 马伏军, 等. 考虑负序补偿的角型链式 SVG 指令电流提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 12-19.

XIONG Qiaopo, LUO An, MA Fujun, et al. A reference current detection method of delta-connected cascaded SVG considering unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 12-19.

[17] YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DU Yan, et al. Research on master-slave control strategy of capacitor voltage for cascade STATCOM [C]//DRPT2008. Nanjing, China: [s.n.], 2008: 1620-1624.

作者简介:



熊桥坡

熊桥坡(1988—), 男, 江西南昌人, 博士, 主要从事 FACTS 技术研究和电力电子装置的研制(E-mail: xiongqiaopo@sina.com);

罗安(1957—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事谐波治理和无功补偿关键技术、大型工业企业电气节能新技术等方面的教学与科研工作(E-mail: an_luo@126.com)。

Derivation of zero-sequence circulating current and detection of reference current for cascaded SVG with delta configuration

XIONG Qiaopo, LUO An, HE Zhixing, MA Fujun

(National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The zero-sequence circulating current of cascaded SVG(Static Var Generator) with delta configuration is derived from the premise that the negative-sequence component of line current is known and its calculation method based on the instantaneous power theory is then proposed. As it is difficult to acquire the reference phase current of cascaded SVG with delta configuration, a method is proposed to generate it by superposing the zero-sequence circulating current on the reference line current. The zero-sequence circulating current and reference line current are calculated based on the instantaneous power theory. Combined with the existing control strategy of single-phase cascaded SVG, the proposed method can be applied to achieve the comprehensive compensation of cascaded SVG with delta configuration. A cascaded SVG model is built in PSIM simulation environment and the simulative results show that, the comprehensive compensation of cascaded SVG with delta configuration is realized by the proposed method, with quicker response to load change.

Key words: SVG; cascaded SVG; delta-configuration; zero-sequence circulating current; phasor analysis; reference current detection method; compensation; instantaneous power theory