

变频供电异步电动机转子断条状态下 变频器一次侧特征电流分析

许伯强, 宋佳伟, 孙丽玲

(华北电力大学电气与工程学院, 河北省 保定市 071003)

Analysis on the Power Supply Current Feature Associated With Broken Rotor Bar in Induction Motor Powered by a Converter

XU Bo-qiang, SONG Jia-wei, SUN Li-ling

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Induction motor variable frequency drive system has already been used in a wide variety of industry applications. It is very significant to carry out fault diagnosis of broken rotor bar in induction motor powered by a converter in variable frequency drive system. Up to now, the most published fault diagnosis approaches of broken rotor bar are usually based stator current signal spectrum analysis. However, the convenient acquisition signal is the secondary current of cubicle switchboard, namely power supply current (converter input current) in induction motor variable frequency drive system. This paper analyzes thoroughly the impact to power supply current caused by broken rotor bar fault, and then, completed spectrum analysis for power supply current and stator current (converter output current) signal. Simulation and experimental instances demonstrate that there exists broken rotor bar fault feature in power supply current signal, and thus, fault diagnosis of broken rotor bar in induction motor power supplied by a converter can be achieved.

KEY WORDS: induction motor; variable frequency drive system; broken rotor bar; fault diagnosis; power supply current; converter

摘要: 异步电动机变频调速系统已经广泛应用于工业生产之中。实现变频调速异步电动机转子断条故障的诊断, 对保障安全生产、提高生产效率有十分重要的意义。目前, 已经提出的转子断条故障诊断方法多是针对定子电流信号做频谱分析。然而, 在变频调速异步电动机运行过程中易于测取的多是开关柜二次侧电流信号, 即供电电流(变频器输入侧电流)信号。该文分析了异步电动机转子断条故障特征分量穿

越变频器对供电电流信号的影响, 基于定子电流频谱分析方法, 分别对定子电流(变频器输出侧电流)和供电电流做频谱分析。仿真和实验结果显示, 在供电电流信号中存在转子断条故障特征分量, 进而可以据此实现变频供电异步电动机转子断条故障诊断。

关键词: 异步电动机; 变频调速系统; 转子断条; 故障诊断; 供电电流; 变频器

0 引言

异步电动机转子断条作为常发故障之一, 事故发生率约为 10%^[1-3]。随着“节能减排”政策大力提倡、实行, 变频调速系统广泛地应用于工业生产中的异步电动机, 因此变频电源供电下异步电动机转子断条故障的诊断尤为重要。

异步电动机转子断条后, 会在定子侧产生 $(1 \pm 2s)f_1$ 频率的感应电动势(s 为转差率, f_1 为定子电流基波频率), 从而在定子电流中出现该频率的附加电流分量, 此附加电流分量可以作为转子断条故障特征^[4]。以往转子断条故障诊断研究大多是针对恒频供电情况下的异步电动机, 典型的方法是对异步电动机定子电流做频谱分析, 通过检测频谱中是否存在相关特征分量来判断故障与否^[5-16]。在变频调速系统中, 异步电动机定子电流不便测取, 而供电电流更容易获得, 这就要求分析供电电流以确定是否含有故障特征分量、能否实现故障诊断。

本文依据 PWM 电压型变频调速系统等效电路^[17-19], 分析了转子断条故障分量对供电电流的影响, 并对仿真和实验中供电电流和定子电流信号做频谱分析, 对比结果发现, 供电电流中存在转子断

基金项目: 国家自然科学基金项目(50407016)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50407016).

条故障特征分量，据此能够判断变频电源供电异步电动机转子断条故障。

1 转子断条故障分量对供电电流的影响

异步电动机转子断条后，会在定子侧产生 $(1 \pm 2s)f_1$ 频率的感应电动势，将其看作电压源，分别记为 $e_{A(1 \pm 2s)}$ 、 $e_{B(1 \pm 2s)}$ 、 $e_{C(1 \pm 2s)}$ 。因此，计及转子断条故障感应电动势的调速系统等效电路如图 1 所示。

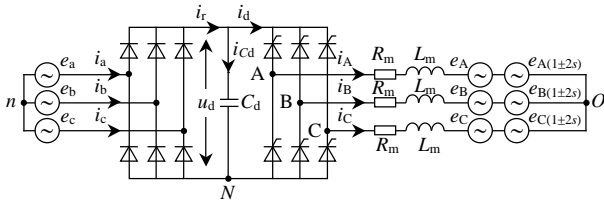


图 1 计及转子断条故障感应电动势的 PWM 电压型变频调速系统等效图

Fig. 1 Equivalent diagram of the PWM VSI-fed adjustable speed drive including the EMF caused by broken rotor bar

依据图 1，由电力电子器件的开关性质，直流环节电压 u_d 可以表示为

$$u_d = e_a S_a + e_b S_b + e_c S_c \quad (1)$$

式中 S_a 、 S_b 、 S_c 为整流桥开关变量。同样，逆变侧输出相电压可以表示为

$$u_{AN} = S_A u_d; u_{BN} = S_B u_d; u_{CN} = S_C u_d \quad (2)$$

式中： S_A 、 S_B 、 S_C 为逆变侧开关变量； N 为变频器输出相电压参考零电位点。

假设系统电压为理想三相对称电压，系统阻抗为 0，那么变频器输出端到异步电动机定子中性点三相电压 u_{AO} 、 u_{BO} 、 u_{CO} 也是对称的，则有

$$u_{AO} + u_{BO} + u_{CO} = 0 \quad (3)$$

其中，

$$\begin{cases} u_{AO} = u_{AN} - u_{ON} \\ u_{BO} = u_{BN} - u_{ON} \\ u_{CO} = u_{CN} - u_{ON} \end{cases} \quad (4)$$

式中 u_{ON} 为异步电动机定子中性点到变频器输出中性点 N 的电压。由式(3)、(4)可得

$$u_{ON} = (u_{AN} + u_{BN} + u_{CN})/3 \quad (5)$$

因此，可以得到

$$\begin{cases} u_{AO} = 2u_{AN}/3 - (u_{BN} + u_{CN})/3 \\ u_{BO} = 2u_{BN}/3 - (u_{CN} + u_{AN})/3 \\ u_{CO} = 2u_{CN}/3 - (u_{AN} + u_{BN})/3 \end{cases} \quad (6)$$

而逆变侧输出电流为

$$\begin{cases} i_A = [u_{AO} - (e_A + e_{A(1 \pm 2s)})]/Z_m \\ i_B = [u_{BO} - (e_B + e_{B(1 \pm 2s)})]/Z_m \\ i_C = [u_{CO} - (e_C + e_{C(1 \pm 2s)})]/Z_m \end{cases} \quad (7)$$

式中： e_A 、 e_B 、 e_C 为异步电动机三相等效反电动势； $e_{A(1 \pm 2s)}$ 、 $e_{B(1 \pm 2s)}$ 、 $e_{C(1 \pm 2s)}$ 为断条故障感应等效电动势； $Z_m = R_m + jX_m$ 为变频器输出端到异步电动机中性点的等效阻抗。

假设逆变开关过程是理想状态，由能量守恒可得

$$u_d i_d = u_{AO} i_A + u_{BO} i_B + u_{CO} i_C \quad (8)$$

将式(1)、(6)代入式(8)得

$$i_d = u_{AO} i_A / u_d + u_{BO} i_B / u_d + u_{CO} i_C / u_d \quad (9)$$

直流环节平波电容电流 i_{Cd} 为

$$i_{Cd} = C_d du_d / dt \quad (10)$$

显然，整流输出电流 i_r 可以表示为

$$i_r = i_d + i_{Cd} \quad (11)$$

而变频器供电电流 i_a 、 i_b 、 i_c 可以由 i_r 经整流开关调制得到

$$i_a = S_a i_r; i_b = S_b i_r; i_c = S_c i_r \quad (12)$$

对 i_a 、 i_b 、 i_c 任意相电流做频谱分析，可以观察到转子断条故障特征分量，即 $f_{in} \pm 2sf_{out}$ (f_{in} 、 f_{out} 分别为变频器输入、输出频率)频率分量电流。

2 转子断条故障仿真结果

基于 Matlab/Simulink 模块搭建 PWM 电压型变频调速系统，如图 2 所示。为了模拟转子断条故障，使用一台绕线式异步电动机(50 Hp、460 V、50 Hz、1 对极)代替笼型异步电动机，在转子 a 相回路中添加

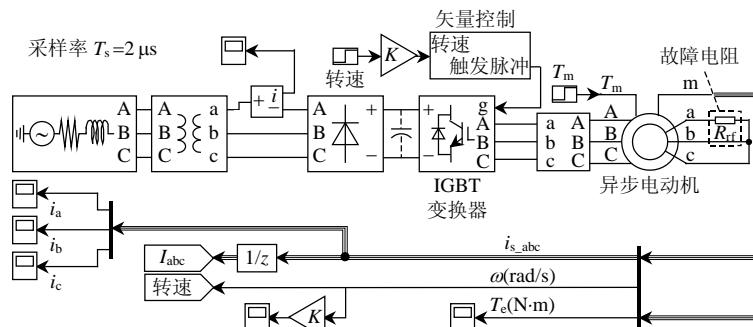
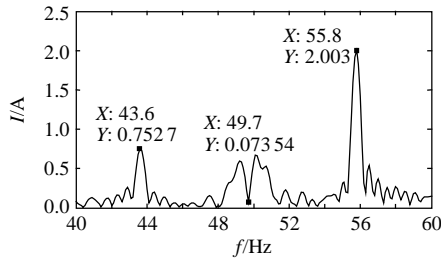


图 2 PWM 电压型变频调速系统仿真图

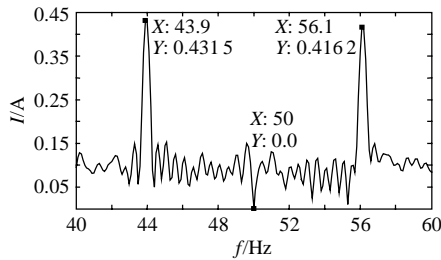
Fig. 2 Simulation diagram of the PWM VSI-fed adjustable speed drive

加故障电阻 $R_{rf}=0.1R_r$ (R_r 为异步电动机转子电阻) 模拟转子断条故障。该方法简单易行, 是模拟转子断条故障的常规方法^[20]。当然, 亦可采用多回路方法模拟转子故障, 参阅文献[11-12]。图 3~4 是异步电动机在转子断条故障时不同运行频率下的定子电流和供电电流自适应滤波细化频谱图^[10]。

对比图 3 和 4 可知, 和电动机定子电流频谱一致, 在供电电流频谱中基频附近出现对称频率附加电流分量, 且调制频率值在变频器两侧保持不变, 为 $2sf_{out}$ (f_{out} 为变频器输出频率, 即为定子电流频

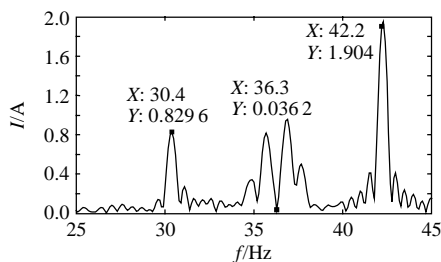


(a) 定子电流

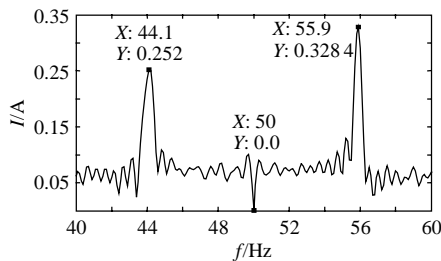


(b) 供电电流

图 3 电流频谱图, 输出频率 49.7 Hz, 负载 84%
Fig. 3 Current spectrum, output frequency: 49.7 Hz, load: 84%



(a) 定子电流



(b) 供电电流

图 4 电流频谱图, 输出频率 36.3 Hz, 负载 84%
Fig. 4 Current spectrum, output frequency: 36.3 Hz, load: 84%

率), 其表现为定子电流频谱中出现 $(1\pm 2s)f_{out}$ 频率分量, 供电电流频谱中出现 $f_{in}\pm 2sf_{out}$ 频率分量。因变频器直流环节平波电容的影响, 使供电电流中故障分量幅值之和要比定子电流中的小一些, 对比结果如表 1 所示。表 1 表明异步电动机转子断条后供电电流中存在转子断条故障分量, 据此对供电电流做频谱分析可以判断异步电动机转子断条故障。

表 1 仿真分析结果

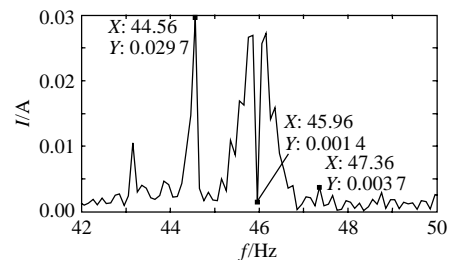
Tab. 1 Analysis results of the simulation

输出频率/Hz	定子电流			
	f_{1-2s} /Hz	f_{1+2s} /Hz	$2sf$ /Hz	$(I_{1-2s}+I_{1+2s})/I$
49.7	43.6	55.8	6.1	3.05%
36.3	30.4	42.2	5.9	3.16%
输出频率/Hz	供电电流			
	f_{1-2s} /Hz	f_{1+2s} /Hz	$2sf$ /Hz	$(I_{1-2s}+I_{1+2s})/I$
49.7	43.9	56.1	6.1	1.08%
36.3	44.1	55.9	5.9	1.07%

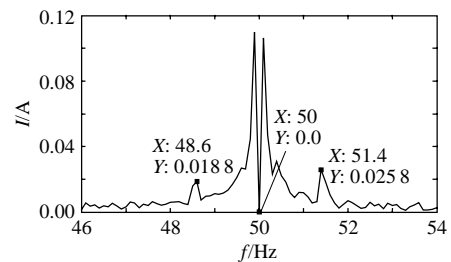
3 转子断条故障实验结果

实验采用一台 Y100L-2(3 kW、380 V、50 Hz、1 对极)型三相异步电动机和一台 Delta VDF-460 V43 A 型调速器(3.7 kW、5 Hp、460 V)。实验电机除正常转子外, 另行配备一个故障转子, 通过对转子导条钻孔来模拟断条故障。

图 5 为实验电机半载且故障情况下定子电流和供电电流的自适应滤波连续细化频谱图。实验对比分析结果如表 2 所示。分析可知, 实验结果与仿真结果基本一致。



(a) 定子电流



(b) 供电电流

图 5 电流频谱图, 输出频率 45.96 Hz, 半载, 导条断裂
Fig. 5 Current spectrum, output frequency: 45.96 Hz, half load, one broke rotor bar

表 2 实验分析结果

Tab. 2 Analysis results of the experiment

输出频率/Hz	定子电流			
	f_{1-2s}/Hz	f_{1+2s}/Hz	$2sf/\text{Hz}$	$(I_{1-2s}+I_{1+2s})/I$
45.96	44.56	47.36	1.4	0.87%
输出频率/Hz	供电电流			
	f_{1-2s}/Hz	f_{1+2s}/Hz	$2sf/\text{Hz}$	$(I_{1-2s}+I_{1+2s})/I$
45.96	48.6	51.4	1.4	1.16%

4 结论

对于变频调速异步电动机转子断条故障诊断, 如何通过易于测取的变频器一次侧供电电流信号而予以实施, 是一个具有工程实际意义的课题。本文给出了转子断条故障情况下异步电动机变频调速系统等效电路, 在理论上分析了转子断条故障特征电流分量穿越变频器对一次侧供电电流所产生的影响, 指出在供电电流中存在转子断条故障特征分量, 并通过仿真和实验验证了其真实存在性。据此可诊断变频供电异步电动机的转子断条故障。

参考文献

- [1] IAS Motor Reliability Working Group. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part I-II[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 21(4): 853-872.
- [2] IAS Motor Reliability Working Group. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part III[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, 23(1): 153-158.
- [3] Thorsen O V, Dalva M. A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(5): 1186-1196.
- [4] Filippetti F, Franceschini G, Tassoni C, et al. AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(1): 98-108.
- [5] Williamson S, Smith A. Steady-state analysis of 3-phase motors with rotor bar and end-ring faults[J]. Proc. IEE, 1982, 129(3): 93-100.
- [6] Kilman GB, Stein J, Endicott R D, et al. Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1988, 3(4): 873-879.
- [7] Kliman GB, Stein J. Methods of motor current signature analysis[J]. Electric Machines & Power Systems, 1992, 20(5): 463-474.
- [8] Hirvonen R. On-line condition monitoring of defects in squirrel cage motors[C]. 1994 International Conference on Electrical Machines, Paris(France), 1994.
- [9] 邱阿瑞. 用启动电流的时变频谱诊断鼠笼异步电机转子故障[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(4): 267-273.
Qiu Arui. Diagnosis of rotor fault in squirrel-cage induction motors using time-varying frequency spectrum of starting stator current[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(4): 267-273(in Chinese).
- [10] 姜建国, 汪庆生, 杨秉寿, 等. 用自适应方法提取鼠笼式异步电动机转子断条的特征分量[J]. 电工技术学报, 1996, 11(4): 176-179.
Jiang Jianguo, Wang Qingsheng, Yang Bingshou, et al. Applying the adaptive noise cancellation to extract the features of squirrel cage induction motor with rotor defects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996, 11(4): 176-179(in Chinese).
- [11] 马宏忠, 胡茂生, 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. Simulating and experiment studying on rotor winding fault of induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 107-112(in Chinese).
- [12] 许伯强, 李和明, 孙丽玲, 等. 笼型异步电动机转子断条故障检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 115-119.
Xu Boqiang, Li Heming, Sun Liling, et al. A novel detection method for broken rotor bars in induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 115-119(in Chinese).
- [13] 黄进, 牛发亮, 杨家强. 基于双 PQ 变换的感应电机转子故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 135-139.
Huang Jin, Niu Faliang, Yang Jiaqiang. Rotor faults diagnosis for induction motors based on the double PQ transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 135-139(in Chinese).
- [14] 黄进, 牛发亮, 杨家强. 考虑负荷及惯量影响的感应电机转子故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 120-125.
Huang Jin, Niu Faliang, Yang Jiaqiang. Rotor faults diagnosis for induction motors considering effects of the load and inertia[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 120-125(in Chinese).
- [15] Gaëtan Didier, Eric Ternisien, Olivier Caspary, et al. Fault detection of broken rotor bars in induction motor using a global fault index[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(1): 79-88.
- [16] Mirafzal B, Demerdash N A O. On innovative methods of induction motor interturn and broken-bar fault diagnostics[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(2): 405-414.
- [17] Chang G W, Chen S K. Characterizing harmonic and interharmonic currents generated by the VSI-fed and adjustable speed drives[C]. 2004 International Conference on Power System Technology, Singapore, 2004.
- [18] 胡伟, 查晓明. PWM-VSI 变频调速系统谐波分析模型的构建[J]. 电气应用, 2006, 25(5): 59-60.
Hu wei, Zha Xiaoming. Harmonic modeling of PWM-VSI variable frequency drives[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(5): 59-60(in Chinese).
- [19] Chang G W, Chen S K. An analytical approach for characterizing harmonic and interharmonic currents generated by VSI-Fed adjustable speed drives[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2585-2592.
- [20] Filippetti F, Martelli M, Franceschini G, et al. Development of expert system knowledge base to on-line diagnosis of rotor electrical faults of induction motors[C]. IEEE Industry Applications Society 1992 Annual Meeting, Houston, USA, 1992.



许伯强

收稿日期: 2010-01-05.

作者简介:

许伯强(1972—), 男, 硕士生导师, 副教授, 主要研究方向为大型电机状态监测与故障诊断, xqbqllxtz@163.net;

宋佳伟(1985—), 男, 硕士研究生, 专业为电力电子与电力传动。

(责任编辑 王剑乔)