

PENGEMBANGAN SISTEM PEMANTAUAN KONDISI UNTUK KESELAMATAN ROTATING MACHINE DI PWR DENGAN *MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS*

Syaiful Bakhri
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) – BATAN
Email : bakhri@batan.go.id

Diterima editor 9 April 2013
Disetujui untuk publikasi 15 Mei 2013

Abstrak

PENGEMBANGAN SISTEM PEMANTAUAN KONDISI UNTUK KESELAMATAN ROTATING MACHINE DI PWR DENGAN *MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS*. Pemantauan kondisi *rotating machine* sangat diperlukan untuk menjamin keselamatan operasi sekaligus untuk meningkatkan efisiensi operasi di PWR. Salah satu teknik pemantauan kondisi terbaik yang dewasa ini dipilih karena mudah, *non-invasive* dan murah dalam implementasinya adalah *Motor Current Signature Analysis* (MCSA). Namun sayangnya penelitian aplikasi teknik ini untuk perangkat keras yang *compact, low cost*, berkelas industri dan layak untuk aplikasi pembangkit daya bertenaga nuklir sangat terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode pemantauan kondisi berbasis MCSA dengan perangkat keras berkelas industri yang kompak untuk pembangkit daya tenaga nuklir. Penelitian meliputi aspek pengembangan perangkat keras *real-time* berbasis FPGA-CompactRIO, pembuatan modul untuk penampil *early warning*, pengujian unjuk kerja algoritma perangkat kerasnya, analisis spektrum berbagai kerusakan komponen motor elektrik, serta pengujian kinerjanya dalam mendeteksi berbagai kerusakan. Sistem pemantauan mampu mengeksekusi dengan total waktu eksekusi berkisar 164 ms, berhasil mendeteksi spektrum frekuensi berbagai kerusakan di motor induksi seperti *stator shorted turn* berkisar 75%, *rotor broken bar* 95%, *eccentricity* 65%, dan *mechanical misalignment* 85%, termasuk gangguan catu daya *voltage unbalance* 100%. Berdasarkan unjuk kerja perangkatnya, sistem pemantauan kondisi *rotating machine* ini menjadi salah satu alternatif terbaik untuk sistem pemantauan berbagai perangkat pemantauan di reaktor nuklir.

Kata kunci : Pemantauan kondisi, *rotating machine*, *Motor Current Signature Analysis* (MCSA), *Field Programmable Gate Array* (FPGA)

ABSTRACT

THE DEVELOPMENT OF CONDITION MONITORING FOR THE SAFETY OF ROTATING MACHINE IN PWR USING *MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS*. Condition monitoring of *rotating machine* is essential to guarantee the safety operation as well as to improve the efficiency of nuclear power plants operations. One of the promising condition monitoring techniques which has been preferred currently since it is simple, *non-invasive* and inexpensive is *Motor Stator Signature Analysis* (MCSA). However, the investigation of the MCSA technique using a compact, low cost, and having industrial class hardware which is capable for nuclear power plant applications has been limited. The research is aimed to develop condition monitoring method based on MCSA utilizing a compact industrial class for nuclear power plant. The investigation includes development of condition monitoring based on real-time FPGA-CompatRIO hardware, development of a custom built display module for early warning system, testing of the monitoring hardware, fault frequency analysis of electric motors including the performances of fault detections. The condition monitoring system is able to execute a fault detection task around 164 ms, to recognize accurately fault frequencies of *stator shorted turn* for about 75%, *broken rotor bar* around 95%, *eccentricity* 65%, *mechanical misalignment* 85%, including supply voltage unbalances 100%. The condition monitoring system based on its performance assessments could become a suitable alternative not only for *rotating machines* but also condition monitoring for other nuclear reactor components.

Key words : Condition monitoring, *rotating machine*, *Motor Current Signature Analysis* (MCSA), *Field Programmable Gate Array* (FPGA)

PENDAHULUAN

Rotating machine menjadi salah satu perangkat yang krusial untuk menjaga keselamatan operasi

TEORI

Motor Current Signature Analysis menggunakan informasi arus stator catu daya ke mesin elektrik dari sensor sederhana berbentuk klem transformer (*clamp transformer-CT*). Sensor ini akan mengukur arus bolak balik tanpa perlu merusak dan dapat dilakukan disepanjang kabel suplai daya ke komponen. Arus *stator* ini akan membawa informasi harmonik dari arus listrik sebagai fungsi perilaku gaya magnetomotif dan gelombang *permeancedi gap* hasil interaksi antarastator dan rotor yang merepresentasikan kondisi cacat atau ketidak-idealan yang terjadi didalamnya[11]. Berbeda dengan teknik lainnya, informasi harmonik ini tidak terpengaruh oleh teknik pengontrolan motor elektrik maupun penggerak motor tersebut.

MCSA mampu mendeteksi berbagai jenis kerusakan yang terjadi pada motor elektrik, seperti yang berhubungan dengan *bearing* [12], kerusakan *rotor*[13], kerusakan lilitan pada *stator (shorted turn fault)* [14], perbedaan titik tengah poros stator dan rotor (*eccentricity*) antara rotor dengan stator[15] dan termasuk beberapa kerusakan yang berhubungan dengan karakteristik mekaniknya. Berbagai kerusakan ini dapat dikenali dari harmonik frekuensi tertentu yang dibangkitkannya selama rotasi perputaran rotor terhadap stator dengan menggunakan teknik pemrosesan sinyal tertentu seperti *Fast Fourier Transform (FFT)*. Berikut ini diberikan beberapa pola frekuensi penanda yang dimaksud berikut kerusakannya pada motor induksi.

Frekuensi Kerusakan Bearing

Karakteristik kerusakan pada *bearing* dapat dikenali pada beberapa frekuensi seperti,

$$F_{CF} = \frac{1}{2}(1-s)F_R \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_p} \right) \quad (1)$$

$$F_{ORF} = \frac{N_B}{2}(1-s)F_R \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_p} \right) \quad (2)$$

$$F_{IRF} = \frac{1}{2}(1-s)F_R \left(1 + \frac{D_B \cos(\theta)}{D_p} \right) \quad (3)$$

$$F_{BF} = \frac{D_p}{2D_B}(1-s)F_R \left(1 - \frac{D_B^2 \cos^2(\theta)}{D_p^2} \right) \quad (4)$$

dimana F_{CF} adalah kerusakan frekuensi rumah dari *bearing*, F_{ORF} adalah kerusakan sisi laluan bagian luar (*outer race bearing*), F_{IRF} adalah kerusakan sisi laluan bagian dalam (*inner race*), F_{BF} adalah frekuensi bola-bola *bearing*, F_R adalah frekuensi rotor atau porosnya, D_B adalah diameter bola-bola *bearing*, D_p adalah diameter *bearing* antara titik tengah bola *bearing* yang berseberangan (*pitch*), N_B adalah jumlah bola-bola *bearing*, dan θ adalah sudut kontak bola-bola *bearing*.

Persamaan di atas dapat disederhanakan untuk *bearing* dengan jumlah bola *bearing* antara 6 sampai 12 bola menjadi[16]

$$F_{ORF} = 0.4 * N_B * (1-s)F_R \quad (5)$$

$$F_{IRF} = 0.6 * N_B * (1-s)F_R \quad (6)$$

$$F_{Bearing} = (0.4n_1 + 0.6n_2) * (1-s)F_R \quad (7)$$

dimana n_1 dan n_2 adalah bilangan bulat (1,2,3,...). Slip dari motor, s dapat dihitung dengan persamaan,

$$s = \frac{N_S - N_R}{N_R} \quad (8)$$

dimana N_R adalah kecepatan rotor dan N_S adalah kecepatan sinkron (*synchronous speed*) dari motor elektrik. Dalam aplikasi MCSA, frekuensi *bearing* ini dapat dikenali sebagai sepasang frekuensi yang mengapit frekuensi fundamental tegangan catu daya (*sideband frequency*) seperti persamaan, [17].

$$F_{CF} = |F_L \pm mF_V| \quad (9)$$

dimana F_L adalah frekuensi catu daya, m adalah bilangan bulat (1,2,3, ...), dan F_V adalah salah satu frekuensi dari karakteristik kerusakan *bearing* yang didapat dari persamaan (1- 4).

Frekuensi Kerusakan Stator

Kerusakan yang diakibatkan oleh stator dapat dideteksi dengan kehadiran frekuensi [18]:

$$F_{SF} = F_L \left(\frac{n(1-s)}{p} \pm k \right) \quad (10)$$

dimana n dan k adalah bilangan bulat ($n = 1,2,3,\dots$ $k = 1,2,3,\dots$), dan p adalah jumlah pasangan *pole* dari motor.

Frekuensi Kerusakan Rotor

Kerusakan rotor dapat ditentukan dari frekuensi *side band* terendah dari persamaan (11)[19] dan (12)[20].

$$F_{BRB} = (1 \pm 2s)F_L \quad (11)$$

$$F_{BRB} = (1 \pm 2ks)F_L \quad k = 1,2,3,\dots \quad (12)$$

Selain itu persamaan (13) [19, 21] juga dapat diacu untuk menentukan frekuensi kerusakan rotor

$$F_{BRB} = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm s \right] F_L \quad (13)$$

Dimana k adalah harmonik index ($k=1,2,3,\dots$).

Frekuensi Kerusakan Eccentricity

Frekuensi kerusakan karena *eccentricity* dapat diamati dengan keberadaan puncak-puncak [22]:

$$F_{ECC} = F_L \left[(kR \pm n_{ecc}) \frac{(1-s)}{p} \pm n_{ws} \right] \quad (14)$$

dimana k adalah indek harmonik ($k=1,2,3,\dots$), n_{ecc} adalah klasifikasi dengan "0" untuk *eccentricity* statis, "1" untuk *eccentricity* dinamis, n_{ws} adalah frekuensi harmonik dari catu daya ($n_{ws} = 1,3,5,7,\dots$), dan R adalah jumlah slot dari rotor.

Jika dua tipe *eccentricity* diasumsikan terjadi (statis dan dinamis), frekuensi kerusakan dapat ditunjukkan dengan,

$$F_{ECC} = (F_L \pm kF_R) \quad (15)$$

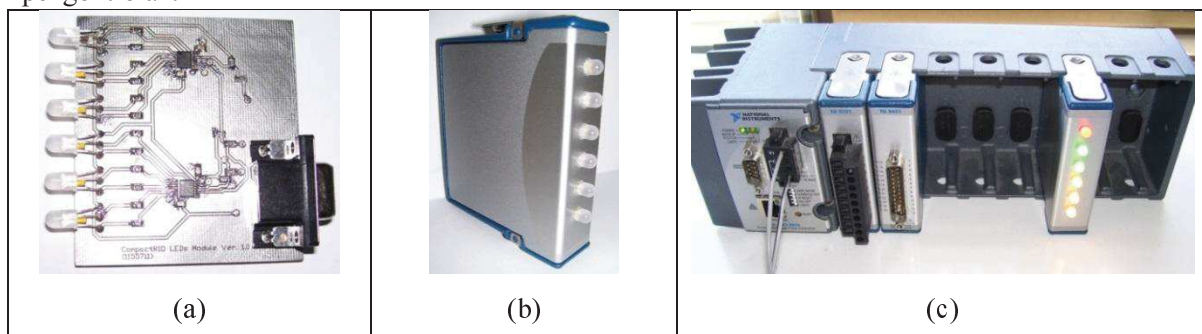
Frekuensi Kerusakan Lainnya

Bentuk kerusakan lain dalam motor induksi beserta frekuensi kerusakannya juga bisa diakibatkan cacat selama instalasi. Salah satu contoh adalah ketidak sejajaran poros antara motor dan pompa (*misalignment*) $F_{MA} = (F_L \pm kF_R)$ yang ditandai dengan timbulnya harmonik yang sangat kaya. Perilaku cacat karena catu daya bisa diamati dengan kehadiran harmonik ketiga dari frekuensi catu daya yang sangat dominan.

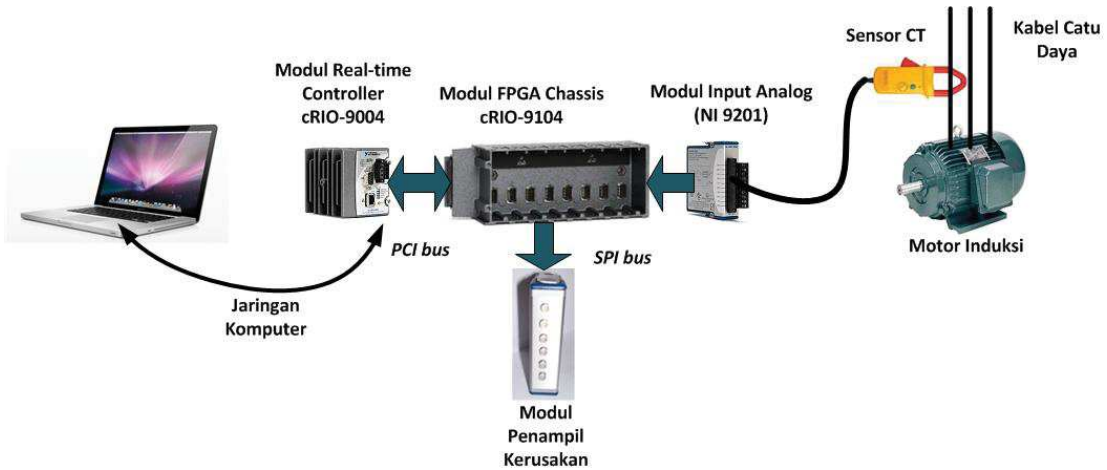
TATA KERJA

Penelitian ini menggunakan arsitektur perangkat keras CompactRIO FPGA National Instrument™ yang terdiri dari sebuah unit utama yaitu modul kontrol *real-time* (cRIO-9004 dengan 512 Mb memori penyimpanan *nonvolatile*, 64 Mb RAM and 200 MHz Pentium processor) dan *FPGA chassis* (cRIO-9104, Xilinx Virtex II XC2V3000-4FG676I, 3 juta gerbang logika, dan 8 I/O slot untuk modul tambahan dengan kemampuan *hot insertion*). Sebuah modul input analog (C-series, NI 9201, 8-channel, 12 bit SAR ADC, 500 kS/s) juga digunakan untuk membaca sinyal berbentuk tegangan dari sensor, menguatkan dan mengkonversinya menjadi digital. Modul ini mempunyai proteksi isolasi tiap kanal ke pentanahan (*channel-to-earth ground*) sampai 100 V, *isolated* ADC, dan sistem kekebalan derau (*noise*), yang sangat penting agar sinyal terukur relatif bersih. CompactRIO dipilih karena kemampuannya yang mudah dikonfigurasi ulang, mengakomodasi pemrograman perangkat keras, mampu mengeksekusi secara *real-time*, kompak dan berkelas industri. Selain itu, platform sistem CompactRIO-FPGA juga dapat diimplementasikan untuk aplikasi bersendirian terintegrasi (*stand alone embedded*) atau aplikasi-aplikasi terdistribusi yang memungkinkan pengembangan lebih lanjut pada sistem pemantauan beberapa motor dan pompa dalam satu sistem secara terintegrasi via jaringan computer. Dibanding platform lainnya, CompactRIO FPGA memberikan keunggulan kecepatan proses yang sangat tinggi karena sifat alami dari eksekusinya bisa dilakukan paralel di atas sirkuit perangkat keras dan tidak di atas sistem operasi seperti di PC[23].

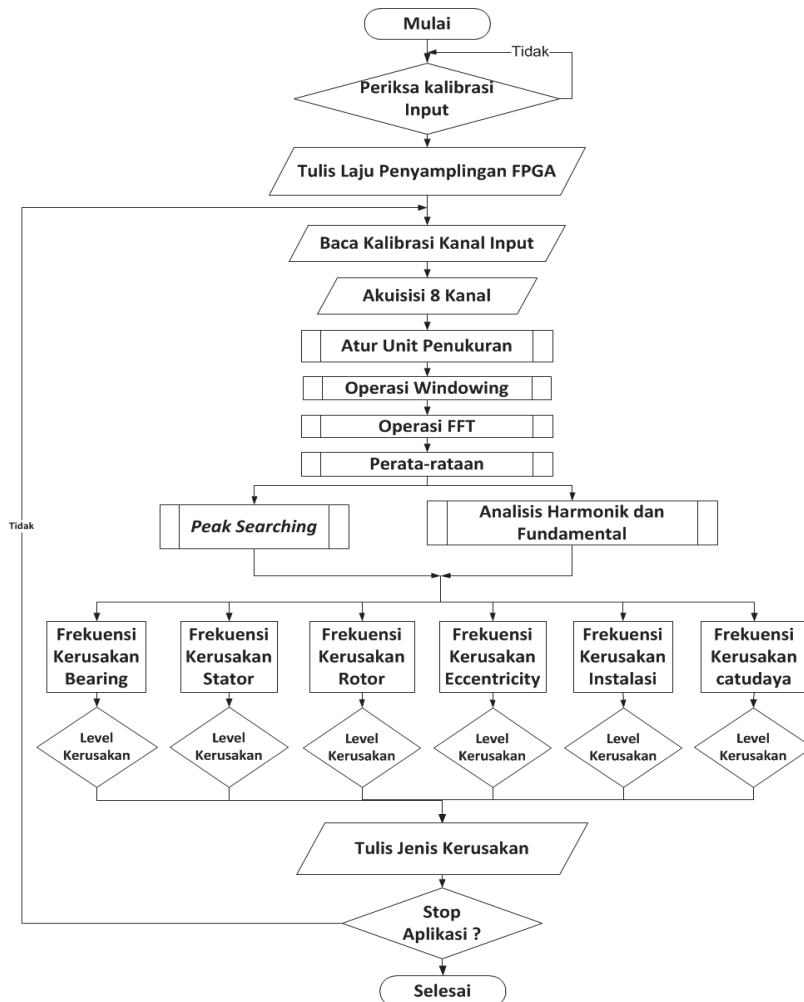
Dalam penelitian ini dibuat sebuah modul indikator jenis kerusakan berikut level kerusakannya (lihat Gambar 1 (a) dan (b)) yang mengadopsi deteksi berdasar enam katagori kerusakan yang sering terjadi pada komponen motor induksi seperti kerusakan *bearing*, *stator*, *rotor*, *eccentricity*, *mechanical misalignment*, dan masalah yang berhubungan dengan catu daya (*voltage unbalance*). Gambar 1 (a) memperlihatkan detail sirkuit modul indikator yang dibuat menggunakan dua IC LED driver berjenis komponen *Surface Mount Devices* (SMD) dan enam buah LED tiga warna yang akan bertransisi warnanya dari hijau-kuning-merah tergantung dari level kesehatan motor induksi. Unit lengkap dari perangkat monitoring dapat dilihat di Gambar 1 (b) dengan sebuah modul output digital untuk aplikasi pengontrolan.



Gambar 1.(a) Sirkuit *custom built* CompactRIO indikator, (b) Modul indikator *CompactRIO* dilengkapi dengan LED tiga warna sesuai tingkat kerusakan dan jenis kerusakan motor, dan (c) Modul CompactRIO indikator dimasukkan dalam *CompactRIO base unit*



Gambar 2. Sistem pemantauan kondisi keselamatan *rotating machine* terdiri dari CompactRIO unit, sensor *Clamp Transformer* (CT), dan *workstation* untuk pembuatan perangkat keras



Gambar 3. Diagram alir program pemantauan kondisi berbasis MCSA

Gambar 2 menunjukkan konfigurasi lengkap dari system pemantauan kondisi. CT sensor membaca salah satu fase dari kabel catu daya motor induksi dengan konversi arus listrik 500mV/Amp. Analog input akan membaca informasi ini dan mengkonversikannya menjadi digital untuk dibaca oleh FPGA sesuai dengan perintah eksekusi baca. FPGA kemudian mengkonversi sinyal dalam domain waktu menjadi frekuensi dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) setelah sebelumnya perbaikan

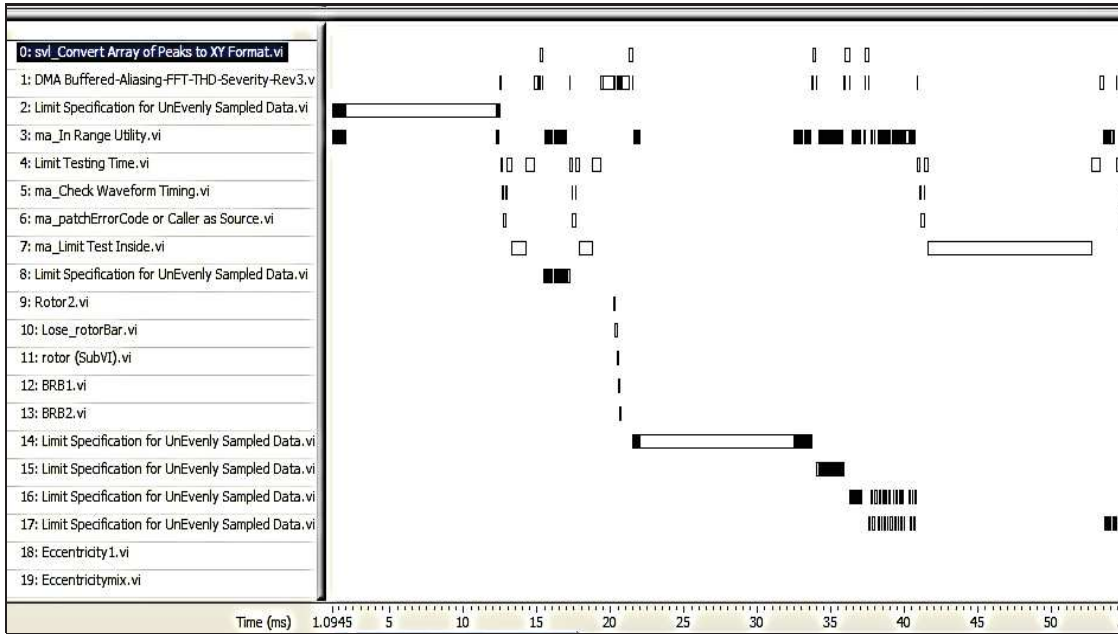
spektrum (seperti minimalisasi *spectral leakage* dan peningkatan resolusi) dilakukan dengan metode *Blackman-Harris Window*. Perataan sinyal (*signal averaging*) untuk meningkatkan akurasi dilakukan dengan metode *rms* sebanyak 5 kali. Informasi puncak-puncak ini dideteksi dengan *set-point* dilevel batas (*threshold*) tertentu sesuai dengan basis data puncak-puncak frekuensi kerusakan. Informasi puncak-puncak inilah berikut tingkat kerusakannya yang akan dikirim kembali ke indikator modul (lewat *SPI bus*) untuk menyalakan LED tiga warna dengan tegangan tertentu yang merepresentasikan kerusakan komponen motor yang terjadi. Detail dari program dapat dilihat di diagram alir Gambar 3. Perlu dicatat bahwa Laptop/PC di Gambar 2 yang terkoneksi lewat kabel jaringan dengan CompactRIO hanya digunakan untuk membuat program serta meng-*compile* (merubah Vi Labview menjadi bahasa pemrograman VHDL kemudian mengunggah *bit* filenya ke FPGA). Setelah *bit file* diunggah selesai maka CompactRIO berikut sistem di dalamnya dapat berjalan secara otomatis setiap kali dinyalakan, sedangkan datanya bisa diakses lewat jaringan dan ditampilkan lewat sebuah program layanan berbasis *web*.

Simulasi untuk mendeteksi kerusakan komponen motor dilakukan terhadap motor induksi 2.2 kW, 50 Hz, 415 V, 4,9 A, 4 *pole*. Motor induksi ini dilengkapi dengan fasilitas modifikasi kerusakan pada *rotor*, *stator*, *eccentricity*, dan *misalignment*. Motor induksi juga dihubungkan dengan tahanan di salah satu kabel tegangan catu dayanya untuk mensimulasikan *voltage unbalance*. Selama uji, frekuensi sampeldiatur pada 2 kHz, 4096 jumlah sampel, atau dengan resolusi frekuensi 0,244 Hz. Berbagai tipe kerusakan di simulasikan untuk melihat kemampuan sistem monitoring berbasis CompactRIO.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Unjuk Kerja Sistem Pemantauan Berbasis CompactRIO FPGA

Karakterisasi dan pengujian unjuk kerja sistem pemantauan kondisi berbasis CompactRIO dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama adalah analisis kecepatan eksekusi sistem pemantauan kondisi dilakukan menggunakan Execution Trace Toolkit™ dari National Instruments Inc., yang salah satu contohnya seperti ditunjukkan di Gambar 4. Dalam pengujian ini delapan kanal input analog digunakan secara simultan walaupun pada prakteknya paling tidak cukup dua atau tiga kanal yang digunakan (satu kanal untuk pengukuran arus listrik dan satu kanal digunakan untuk sensor vibrasi dan atau satu kanal digunakan untuk sensor bocoran fluks magnetik). Perlu dicatat bahwa sensor vibrasi digunakan untuk membaca frekuensi rotor (F_R) dan sensor bocoran fluks magnetik digunakan untuk membaca frekuensi *slip* dari motor induksi. Contoh hasil pengukuran eksekusi algoritma di tampilkan *screen capture*-nya di Gambar 4 dan Tabel 1.

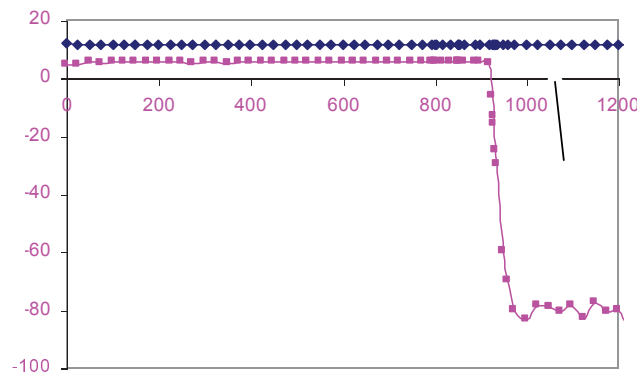


Gambar 4. Contoh hasil *screen capture* analisis Execution Trace Tool™ dari beberapa algoritma

Tabel 1. Rata-rata waktu eksekusi dari berbagai algoritma dalam sistem pemantauan kondisi

Algoritma	Waktu eksekusi
<i>Engineering unit adjustment</i>	0.3 ms
<i>Windowing</i>	8 ms
FFT	6 ms
<i>Averaging</i>	5 ms
<i>Peak searching</i>	3 ms
Analisis frekuensi harmonik dan fundamental	2 ms
Perhitungan model frekuensi kerusakan <i>bearing, set-up, stator, rotor, eccentricities, cacat catu daya</i>	2 ms
Deteksi kerusakan dengan analisis <i>threshold</i>	25 ms

Tabel 1 diperoleh dengan merata-rata hasil eksekusi beberapa fungsi utama di kolom bagian kiri seperti ditunjukkan dengan Gambar 4. Tabel 1 juga menunjukkan bahwa deteksi kerusakan dengan pengujian limit (*thresholding*) membutuhkan waktu terlama (25 ms) dibandingkan dengan algoritma lainnya yang berkisar dibawah 10 ms. Hal ini dimungkinkan karena kalkulasi *thresholding* dilakukan di modul kontroler *real-time* bukan di modul FPGA. Pengujian juga menunjukkan total waktu eksekusi untuk pemantaun 8 kanal untuk seluruh algoritma berkisar 164 ms. Total eksekusi ini lebih singkat dibandingkan jika menjumlah seluruh waktu operasi dan memperhitungkannya untuk seluruh kanal. Ini dapat dicapai karena aplikasi *pipe lining* algoritma-algoritma di atas pada delapan kanal sekaligus sehingga beberapa fungsi berbeda bisa dieksekusi dalam urutan yang hampir paralel. Meskipun waktu eksekusi ini relatif singkat namun peningkatannya masih dapat dilakukan misalkan dengan mengaplikasikan algoritma deteksi frekuensi berbasis interpolasi.

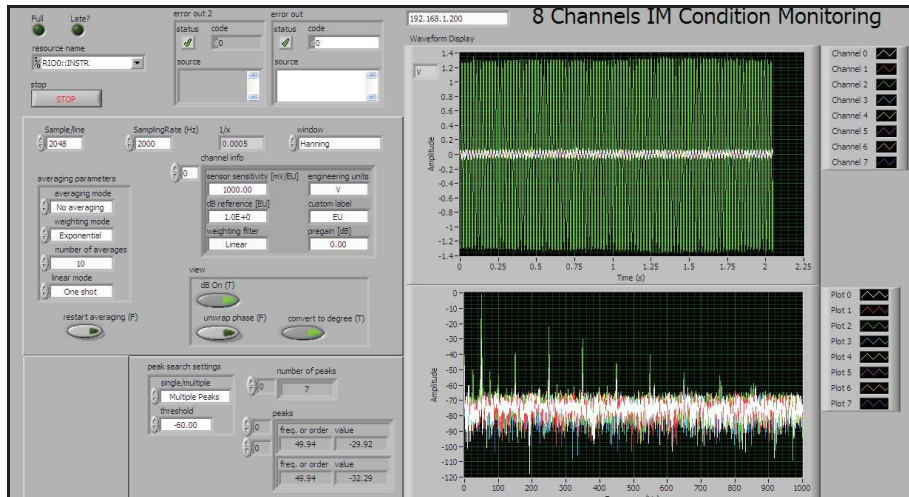


Gambar 5. Respon frekuensi dari sistem monitoring dengan dan tanpa filter

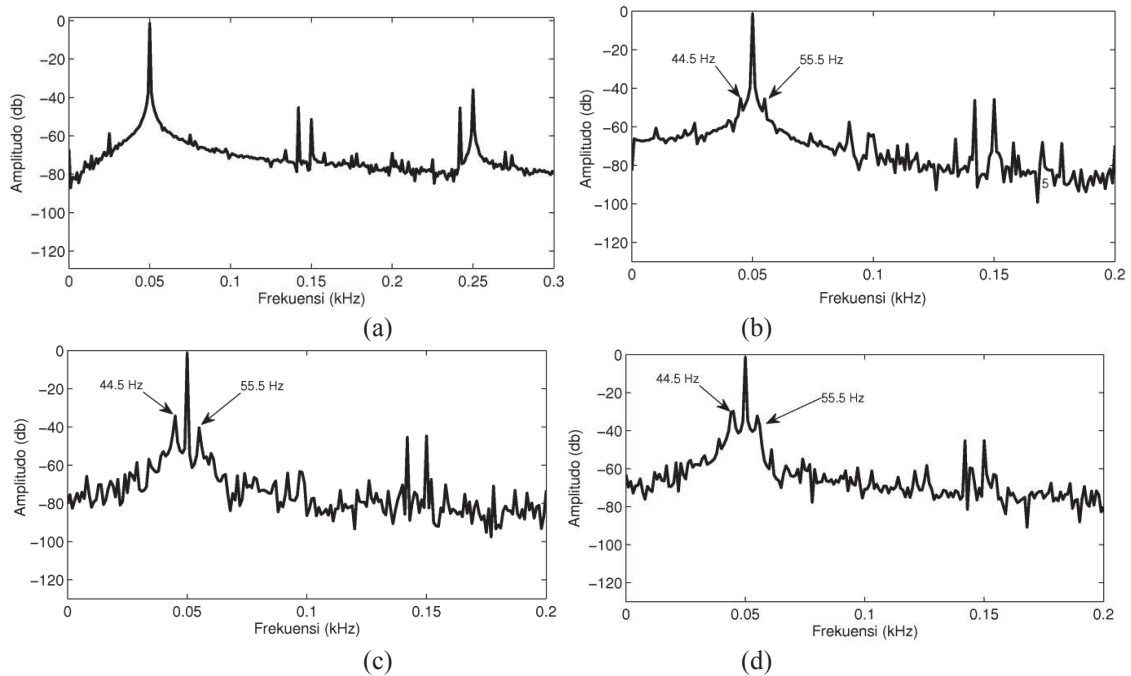
Pengujian selanjutnya dengan melihat respon sistem terhadap sinyal input yang sudah diketahui saat disampling dengan frekuensi 2000 Hz. Sinyal 150 Hz diukur dengan menggunakan system pemantauan sebelum dan setelah dilakukan *filtering*. Gambar 5 menunjukkan frekuensi *pass-band* relatif flat dan semua frekuensi lebih dari tepi *stop band* akan dipotong (*cut-off*). Sebagai tambahan, tepi dari frekuensi *stop band* berkisar 920 Hz karena *sub sampling*, dengan *band* transisi yang relatif tajam sekitar 20 Hz dan amplitudo berkisar pada -80 db. Pengujian juga menunjukkan sedikit atenuasi yang ditunjukkan oleh amplitudo sinyal sebelum dan sesudah pengujian. Atenuasi ini boleh jadi disebabkan oleh desain filter bertipe *fixed-point* dari filter *Butterworth low pass* di FPGA, walaupun fakta hasil test komparasinya dengan desain filter *floating* dari tipe filter sejenis menggunakan NI *Digital Filter Toolkit*TM, memberikan karakteristik yang relatif sama. Pada prakteknya atenuasi ini tidaklah memberikan pengaruh signifikan setelah normalisasi dilakukan terhadap semua rentang sinyal terakuisisi. Pengujian sederhana ini menunjukkan bahwa pemrosesan sinyal sangat layak untuk diplikasikan meskipun untuk penyempurnaan lebih lanjut tetap dibutuhkan untuk tujuan komersialisasi.

Analisis Frekuensi Untuk Identifikasi Kerusakan Dengan MCSA

Bagian ini menjelaskan analisis frekuensi dengan metode pemantauan MCSA berdasarkan berbagai model persamaan frekuensi kerusakan di bagian dasar teori, sekaligus hasil pengujian unjuk kerja sistem pemantauan dalam mendeteksi berbagai jenis kerusakan. Analisis frekuensi dapat diketahui dari antar muka utama LabVIEW dari sistem pemantauan kondisi *CompactRIO* yang dapat diakses secara *remote* dari *workstation development* seperti terlihat di Gambar 6. Gambar ini mendemonstrasikan salah satu fase dari arus listrik stator yang ditampilkan dalam domain waktu (grafik atas) dan frekuensi spektrum (grafik bawah) setelah dinormalisasi dengan frekuensi fundamental catu daya. Dari informasi frekuensi spektrum inilah, beberapa jenis kerusakan berhasil dideteksi dan dibaca laporannya via jaringan, seperti ditampilkan dalam beberapa grafik berikut ini. Perlu dicatat, bahwa penelitian ini fokus pada puncak-puncak frekuensi yang lebih dapat diamati, atau pada puncak-puncak utama yang paling sering muncul dan cukup layak untuk mendemonstrasikan performa dari *CompactRIO*. Detil komparasi seluruh perhitungan dan hasil eksperimen akan ditunjukkan dalam hasil makalah selanjutnya.



Gambar 6. Front panel CompactRIO pemantauan kondisi

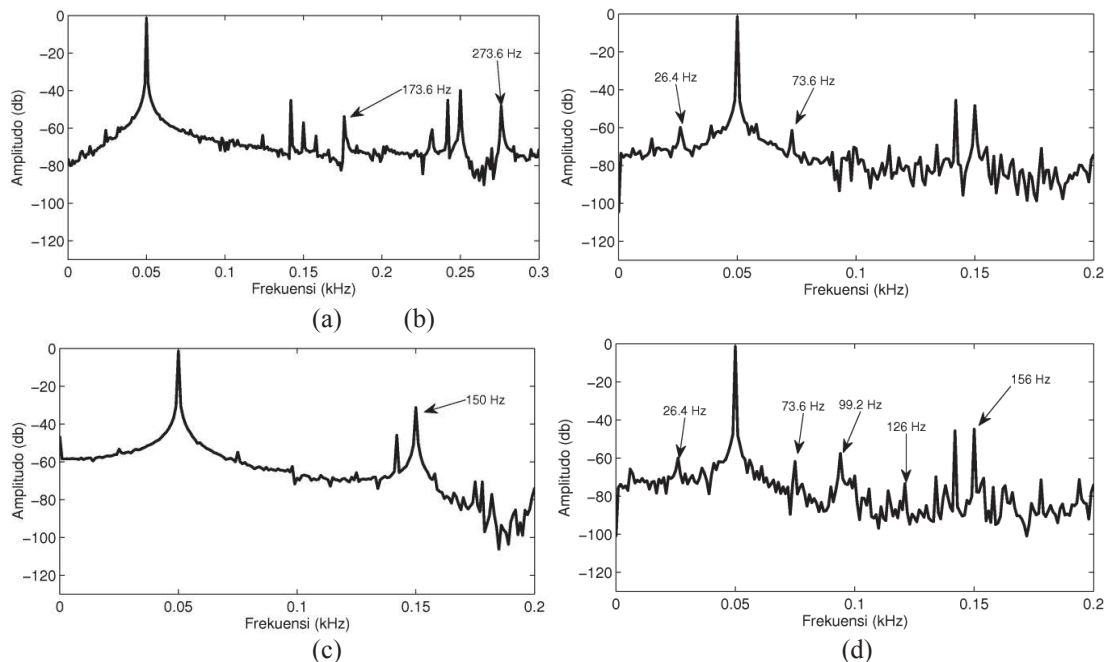


Gambar 7. Perbesaran spektrum frekuensi menunjukkan (a) motor dalam kondisi sehat dan pembebanan penuh (*full-load*), (b) kerusakan 1 rotor bar, (c) kerusakan 2 rotor bar, (d) kerusakan 4 rotor bar

Gambar 7 menunjukkan beberapa kerusakan akibat kerusakan *rotor bar* berikut komparasinya dengan motor dalam keadaan sehat. Gambar 7 (a) memperlihatkan spektrum frekuensi motor dalam keadaan sehat dengan pembebanan penuh pada rentang frekuensi 0 - 300 Hz (perbesaran rentang frekuensi dari Gambar 6) yang relatif bersih dari berbagai macam frekuensi harmonik. Perlu dicatat bahwa puncak-puncak frekuensi yg muncul seperti 50 Hz berikut puncak-puncak harmonik lainnya (145 Hz, 150 Hz, 250 Hz dan lain sebagainya) adalah karakteristik khas dari catu daya atau karakteristik khas dari motor induksi yang tidak berarti merepresentasikan jenis kerusakan tertentu. Berbeda dengan kondisi sehat, kerusakan yang diakibatkan kerusakan *rotor bar* memberikan frekuensi yang unik sesuai dengan prediksi hasil kalkulasi menurut persamaan (11) dan (12) dengan kemungkinan pada $k = \pm 1$ seperti ditunjukkan pada Gambar 7 (b) sampai (d). Selain itu, gambar ini menunjukkan kecenderungan bahwa frekuensi *sideband* 44,5 Hz dan 55,5 Hz ini juga bervariasi

amplitudonya tergantung level kerusakan komponen rotor dari motor induksi, misalkan untuk kerusakan satu *rotor bar* berkisar -48 db, kerusakan dua *rotor bar* berkisar -35 db, dan kerusakan empat *bar* berkisar -30 db.

Gambar 8 menunjukkan jenis spektrum frekuensi kerusakan lainnya, yaitu kerusakan *shorted turn*, *eccentricity*, *voltage unbalance* dan *mechanical misalignment*. Akibat *shorted turn* antara *stator winding*, ketidaksimetrian diantara tiga fase lilitan *stator* membangkitkan spektrum frekuensi sesuai dengan persamaan (10), yang ditandai dengan frekuensi 173,6 Hz pada $k = 3$ dan frekuensi 273,6 Hz pada $k=5$ dengan *slip* pada beban penuh berkisar 0,055. Untuk dicatat bahwa perhitungan *slip* pada pembebanan penuh menggunakan sensor *flux leakage* yang juga terkoneksi pada modul pemantauan ini terdeteksi pada frekuensi 2,75 Hz.



Gambar 8. Perbesaran spektrum frekuensi akibat kerusakan (a) 5 lilitan stator (*turn-to-turn stator winding*), (b) *eccentricity* (-0.2 mm di DE dan 0.1 mm di NDE) pada motor dan (c) *voltage unbalance* 5.3 % VUF (d) *mechanical misalignment* (-0.2 mm antara motor dengan beban)

Gambar 8 (b) mendemonstrasikan perilaku spektrum frekuensi yang ditunjukkan oleh frekuensi sisi-sisi pengapit dari frekuensi fundamental (*sideband*) 26,4 Hz dan 73,6 Hz. Dua frekuensi ini diakibatkan oleh cacat yang ditimbulkan dari asumsi kombinasi kerusakan *eccentricity* statis dan dinamis antara stator dan rotor sebanyak 0,2 mm di bagian *Drive End* (DE) motor 0,1 mm di bagian *Non-Drive End* (NDE) motor menurut perhitungan di persamaan (17). Perlu diketahui bahwa dalam kalkulasi ini, frekuensi rotor $F_R = 23,58$ Hz diprediksi juga dengan menggunakan sensor vibrasi. Contoh hasil analisis jenis kerusakan lain yang diakibatkan oleh ketidaksetimbangan tiga fase catu daya (*voltage unbalance*) ditunjukkan dengan detail di Gambar 8 (c). Grafik menunjukkan harmonik frekuensi 150 Hz yang lebih dominan karena ketidaksimetrian tiga fase dari catu daya dengan 5.3% *Voltage Unbalance Factor* (VUF). Berbeda dengan penyebab kerusakan karena eletrikal, salah satu jenis kerusakan mekanis karena ketidaksimetrian poros motor dengan beban (*mechanical misalignment*) ditunjukkan di Gambar 8 (d). Gambar ini menampilkan ciri khas kombinasi berbagai macam harmonik (26,4 Hz, 73,6 Hz, 99,2 Hz, 126 Hz dan 156 Hz) yang terjadi karena poros rotor (*shaft*) yang terhubung dengan kopling antara motor elektrik dan beban atau pompa tidak benar-benar dalam satu koordinat yang lurus.

Tabel 2. Kinerja dengan deteksi puncak dengan dua puluh kali pengukuran berurutan

Kerusakan	Deteksi
<i>Shorted turn stator</i> (5 turn)	75 %
<i>Rotor broken bar</i> (4 bar)	95 %
<i>Eccentricity</i> (-0,2 mm di DE dan 0,1 mm di NDE)	65 %
<i>Mechanical misalignment</i> (-0,2 mm)	85 %
<i>Voltage unbalance</i> (VUF 5,3%)	100 %

Penelitian ini juga melakukan pengujian yang dilakukan untuk mengamati kemampuan sistem monitoring untuk berkali-kali mendeteksi puncak-puncak spektrum frekuensi akibat sebuah kerusakan komponen yang dikenal dengan *repeatability test*. Perlu dicatat dalam penelitian ini pengujian terhadap kerusakan *bearing* tidak dilakukan mengingat berbagai keterbatasan non teknis. Teknik deteksi puncak-puncak spectrum frekuensi dalam penelitian ini hanya dilakukan dengan *threshold* sederhana dan dengan derajat kerusakan (*severity level*) yang cukup signifikan, atau dengan kata lain analisis terhadap sinyal/frekuensi yang minimum mampu terdeteksi oleh sistem pemantauan dapat diabaikan.

Walaupun hasil di Tabel 2 menunjukkan hasil kinerja sistem yang sangat menjanjikan, akan tetapi menyandarkan seluruh analisis kemampuan sistem pemantauan kondisi pada hasil ini tidaklah cukup. Oleh karena itu, riset lebih lanjut dibutuhkan tidak hanya untuk meningkatkan teknik pendeteksian terhadap spektrum frekuensi akan tetapi juga dengan mengembangkan teknik pemantauan sekaligus implementasinya di berbagai tipe pembangkit daya reaktor nuklir berbasis CompactRIO.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil menunjukkan secara komprehensif metode pemantauan kondisi perangkat *rotating machine* berbasis *Motor Current Signature Analysis* MCSA mulai dari desain perangkat, investigasi metode dengan berbagai macam jenis kerusakan, pengujian kinerja perangkat, dan pengujian kemampuan mendeteksi kerusakan. Dari pembahasan dapat disimpulkan bahwa platform perangkat keras berkelas industri yang berkemampuan eksekusi *real-time* diatas FPGA (dengan CompactRIO) memberikan unjuk kerja kecepatan eksekusi dan akurasi yang sangat menjanjikan untuk diaplikasikan di pembangkit daya reaktor nuklir. Hasil evaluasi sistem pemantauan menunjukkan respon frekuensi untuk *cut off* filter untuk mencegah *aliasing* layak diterima dan kecepatan eksekusi total pendeteksian 8 kanal secara simultan untuk beberapa kasus kerusakan berbeda relatif sangat cepat berkisar pada 164 ms. Beberapa jenis kerusakan komponen *rotating machine* (dalam hal ini motor induksi) dapat dideteksi dengan baik seperti kerusakan karena *shorted turn winding* (5 *turn-to-turn*) 75%, kerusakan di *rotor broken bar* (4 bar) 95%, kerusakan karena *eccentricity*(-0.2 mm di DE dan 0.1 mm di NDE dari motor listrik) 65%, *mechanical misalignment* (-0.2 mm) 85% berikut potensi kerusakannya yang ditimbulkan karena gangguan *voltage unbalance*(VUF 5.3%) dengan sangat akurat 100%.

DAFTAR PUSTAKA

1. Jung J-C, Chang YW, Seong P-H. Application of an integrated power line signal analysis methodology to the detection of major rotating machine abnormalities in nuclear power plants. Nuclear Engineering and Design. 2004;229(2-3):307-15.
2. Agency IAE. On-line monitoring for improving performance of nuclear power plants part 1 : Instrument Channel Monitoring International Atomic Energy Agency; 2008.

3. Agency IAE. On-line monitoring for improving performance of nuclear power plants part 2 : Process and Component Condition Monitoring and Diagnostics: International Atomic Energy Agency; 2008.
4. Agency IAE. Modern instrumentation and control for nuclear power plants: A Guidebook: International Atomic Energy Agency; 1999.
5. Pereira LA, Da Silva Gazzana D, editors. Rotor broken bar detection and diagnosis in induction motors using stator Current Signature Analysis and Fuzzy Logic. IECON 2004 - 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, November 2, 2004 - November 6, 2004; 2004; Busan, Korea, Republic of: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.
6. Pereira LA, Da Silva Gazzana D, Pereira LFA, editors. Motor current signature analysis and fuzzy logic applied to the diagnosis of short-circuit faults in induction motors. IECON 2005: 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, November 6, 2005 - November 10, 2005; 2005; Raleigh, NC, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.
7. Cabal-Yepez E, Osornio-Rios RA, Romero-Troncoso RJ, Razo-Hernandez JR, Lopez-Garcia R, editors. FPGA-based online induction motor multiple-fault detection with fused FFT and wavelet analysis. 2009 International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs, ReConFig'09, December 9, 2009 - December 11, 2009; 2009; Cancun, Mexico: IEEE Computer Society.
8. Akin E, Aydin I, Karakose M, editors. FPGA based intelligent condition monitoring of induction motors: Detection, diagnosis, and prognosis. 2011 IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2011, March 14, 2011 - March 16, 2011; 2011; Auburn, AL, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
9. Cabal-Yepez E, Romero-Troncoso RJ, Garcia-Perez A, Osornio-Rios RA, Alvarez-Salas R, editors. Multiple fault detection through information entropy analysis in ASD-fed induction motors. 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2011, September 5, 2011 - September 8, 2011; 2011; Bologna, Italy: IEEE Computer Society.
10. Jingtao H, editor. In-service motor monitoring and energy management system based on wireless sensor networks. 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008, October 17, 2008 - October 20, 2008; 2008; Wuhan, China: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.
11. Jung J-H, Lee J-J, Kwon B-H. Online diagnosis of induction motors using MCSA. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006;53(6):1842-52.
12. Eren L, Devaney MJ. Bearing damage detection via wavelet packet decomposition of the stator current. IEEE Trans Instrum Meas. 2004;53(2):431-6.
13. Akar M, Cankaya I. Broken rotor bar fault detection in inverter-fed squirrel cage induction motors using stator current analysis and fuzzy logic. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2012;20(SUPPL.1):1077-89.
14. Sharifi R, Ebrahimi M. Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring. ISA Transactions. 2011;50(1):14-20.
15. Rajalakshmi Samaga BL, Vittal KP. Comprehensive study of mixed eccentricity fault diagnosis in induction motors using signature analysis. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2012;35(1):180-5.
16. Schiltz RL. Forcing frequency identification of rolling element bearings. Sound and Vibration Magazine. 1990 May:16-9.
17. Schoen RR, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartheld. Motor bearing damage detection using stator current monitoring. IEEE TransInd Appl. 1995 Nov./Dec. 1995.;31(6):1274-9.

18. Thomson WT, and M. Fenger. Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Ind Appl Mag.* 2001 Jul./Aug.:26–34.
19. Kliman GB, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, and M.W. Madden. Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors. *IEEE Trans Energy Conversion.* 1988 Dec.;3(4):873–9.
20. Elkasabgy NM, A. R. Eastham, and G. E. Dawson. Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine. *IEEE Trans Ind Applicaton.* 1992;28:165–71.
21. Filippetti F, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas. AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect. *IEEE Trans Ind Applicat.* 1998;34:98–108.
22. Thomson WT, and A. Barbour. On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three-phase induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 1998 December;13(4).
23. Mathur N. NI CompactRIO – reconfigurable control and acquisition system. *National Instrument*; 2006; Available from: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2856>.