
METODE KALIBRASI *ONLINE* UNTUK PEMANTAUAN KONDISI PERANGKAT INSTRUMENTASI REAKTOR NUKLIR BERBASIS *ELECTRICAL SIGNATURE ANALYSIS*

Syaiful Bakhri

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) – BATAN

Email: bakhrisy@batan.go.id

Diterima editor 5 Agustus 2013

Disetujui untuk publikasi 19 September 2013

ABSTRAK

METODE KALIBRASI *ONLINE* UNTUK PEMANTAUAN KONDISI PERANGKAT INSTRUMENTASI REAKTOR NUKLIR BERBASIS *ELECTRICAL SIGNATURE ANALYSIS*.

Metode *electrical signature analysis* dewasa ini menjadi alternatif dalam pemantauan kondisidid pembangkit daya reaktor nuklir tidak hanya bagi komponen stationer seperti sensor, untai instrumentasi dan komponen-komponennya, tetapi juga untuk perangkat dinamis seperti motor, pompa, generator dan berbagai jenis aktuator. Untuk menjamin akurasi hasilnya, kalibrasi sistim pemantauan adalah sebuah keharusan yang pada prakteknya biasanya dilakukan secara *offline*, sangat dibatasi dengan jadwal waktu tertentu dan prosedur keselamatan tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk memperkenalkan teknik kalibrasi secara *online* pada pemantauan kondisi berbasis *electrical signature analisis* agar perangkat pengukuran dan instrumentasi bisa dijamin akurasinya secara kontinu yang akhirnya juga akan berimplikasi pada keselamatan reaktor secara keseluruhan. Penelitian ini dilakukan secara detil dan bertahap, mulai dari menganalisis teknik kalibrasi secara konvensional, kalibrasi *online* berdasarkan informasi *baseline* dan teknik kalibrasi berdasarkan pengaturan perbedaan gain. Teknik kalibrasi secara *online* berdasarkan pengaturan *differential gain* dibanding dengan teknik kalibrasi lainnya memberikan hasil terbaik meskipun diberi perbedaan gain yang ekstrim dan kemungkinan pengganggu eksternal seperti catu daya.

Kata kunci : pemantauan kondisi, kalibrasi *online*, *electrical signature analysis*

ABSTRACT

ONLINE CALIBRATION METHOD FOR CONDITION MONITORING OF NUCLEAR REACTOR INSTRUMENTATIONS BASED ON ELECTRICAL SIGNATURE ANALYSIS. *Electrical signature analysis currently becomes an alternative in condition monitoring in nuclear power plants not only for stationary components such as sensors, measurement and instrumentation channels, and other components but also for dynamic components such as electric motors, pumps, generator or actuators. In order to guarantee the accuracy, the calibration of monitoring systems is necessary which practically is performed offline, under limited schedules and certain tight procedures. This research aims to introduce online calibration technique for electrical signature condition monitoring in order that the accuracy can be maintained continuously which in turn increases the reactor safety as a whole. The research was performed step by step in detail from the conventional technique, online calibration using baseline information and online calibration using differential gain adjustment. Online calibration based on differential gain adjustment provides better results than other techniques even though under extreme gain insertion as well as external disturbances such as supply voltages.*

Key words : condition monitoring, online calibration, *electrical signature analysis*

PENDAHULUAN

Pemantauan kondisi secara *online* dewasa ini banyak dipilih untuk meningkatkan keselamatan sekaligus meningkatkan unjuk kerja dan efisiensi pengoperasian reaktor nuklir. Untuk sistem instrumentasi dan kendali reaktor nuklir, aplikasi pemantauan kondisi secara *online* memberikan alternatif terbaik bagi operator untuk senantiasa secara proaktif mengawasi sekaligus menjaga kinerja reaktor nuklir[1].

Electrical signature analysis menjadi topik yang populer untuk aplikasi pemantauan kondisi pada reaktor nuklir[2]. *Electrical signature analysis* dapat diaplikasikan baik untuk analisis komponen stasioner (seperti kabel, kanal instrumentasi dan sirkuit elektrik) maupun untuk perangkat dinamis (motor, pompa, generator dan aktuator). Teknik ini pada dasarnya adalah menentukan degradasi ataupun kerusakan komponen tanpa merusak dan tanpa menghentikan operasional sebuah komponen dengan menganalisa pengaruh perubahan karakteristik suplai arus elektrik yang ditimbulkannya. Dengan kata lain, disamping menampilkan informasi karakteristik arus listrik catu daya, informasi arus listrik yang diakibatkan oleh kerusakan alat dan lingkungan dapat ditentukan.

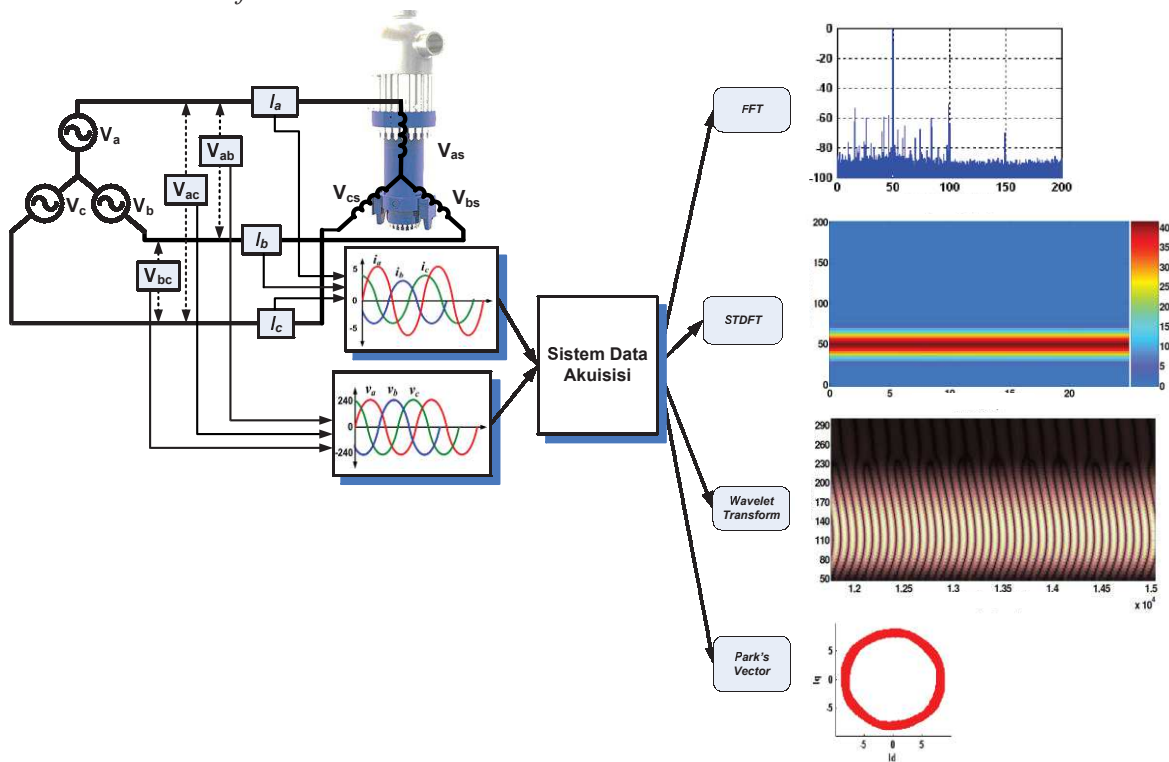
Untuk menjamin akurasi hasil pemantauan kondisi, kalibrasi kanal instrumentasi menjadi sebuah keniscayaan. Secara konvensional, teknik kalibrasi menyeluruh (*full calibration*) terhadap seluruh perangkat dalam untai pengukuran umumnya dilakukan secara periodik saat pengisian ulang bahan bakar nuklir. Diantara waktu tersebut kalibrasi tanpa melibatkan sensor, dikenal dengan nama *surveillance tests* atau dikenal juga sebagai tes trip set point dapat dilakukan untuk memverifikasi kanal instrumentasi sekaligus menguji *set trip point*. Beberapa pengalaman menunjukkan bahwa 77 % sensor, mengalami pergeseran kalibrasi seiring dengan penuaannya[3], yang akan mungkin sangat terlambat untuk diantisipasi jika rekalisasi menyeluruh harus menunggu waktu jeda saat pengisian ulang bahan bakar. Terlebih lagi, untuk aplikasi *electrical signature analysis* akurasi sinyal akan sangat dipengaruhi oleh ketidakidealan catu daya yang mungkin tidak diperhitungkan saat kalibrasi. Selain itu, walaupun metode *electrical signature analysis* telah berkembang pesat namun umumnya kalibrasinya dilakukan secara *offline* dan tinjauan pustaka yang secara khusus membahas kalibrasinya secara *online* sangatlah terbatas. Beberapa kenyataan ini menunjukkan pentingnya penelitian untuk mengelaborasi metode kalibrasi secara *online* untuk meningkatkan akurasi pemantauan kondisi berbasis *electrical signature analysis*.

Makalah ini bertujuan untuk mendemonstrasikan metode kalibrasi *online* untuk pemantauan kondisisistem instrumentasi dan kendali di reaktor nuklir berbasis *electrical signature analysis*. Untuk memberikan pemahaman yang komprehensif, pengertian dasar kalibrasi,untai sistem pengukuran, analisis kalibrasi konvensional dan dua metode kalibrasi *online* berdasarkan eksperimen akan didiskusikan. Teknik kalibrasi *online* juga mempertimbangkan bagaimana mengurangi ketidak idealan dari catu daya dan karakteristik inheren dari perangkat pengukuran. Sebagai obyek pengukuran dari sistem pemantauan, sebuah motor induksi dengan *power rating* relatif kecil yang mensimulasikan motor sistem pendingin pada reaktor nuklir digunakan. Teknik kalibrasi *online* ini diharapkan akan memberikan peningkatan akurasi hasil pengukuran sekaligus menjadi sarana pemantauan kondisi kelayakan sebuah sistem instrumentasi dan kendali untuk diimplementasikan direaktor nuklir.

TEORI

Electrical Signature Analysis

Electrical signature analysis memanfaatkan arus listrik terukur untuk mengidentifikasi sedari dini cacat atau kerusakan sebuah komponen. Gambar 1 menunjukkan salah satu aplikasi metode ini pada motor listrik, dikenal dengan nama *Motor Current Signature Analysis* (MCSA), dilakukan dengan cara mengukur arus satu, dua atau tiga fase dari catu daya menggunakan sensor *Clamp Transformer* (CT) atau sensor *Hall Effect*, dan tegangan catu daya menggunakan sensor *differential isolation voltage*. Informasi sinyal arus ini selanjutnya diekstraksi menggunakan berbagai metode pemrosesan sinyal menjadi informasi yang mudah dimengerti dan dapat dikategorikan satu dengan lainnya[4]. Teknik ini dapat digunakan untuk mengenali berbagai kerusakan di motor dengan relative akurat seperti misalkan kerusakan komponen motor (*stator shorted turn*, *broken rotor bar*, dan berbagai macam bentuk motor *eccentricity*), sekaligus juga ketidak idealan catu daya (*voltage unbalance* dan *harmonics*). Gambar 1 juga memberikan ilustrasi beberapa implementasi teknik *signal processing* untuk mendiagnosis kondisi sebuah komponen seperti *Fast Fourier Transform* (FFT), *Short Time Fourier Transform* (STFT), *Short Time Discrete Fourier Transform* (STDFT), dan *Wavelet Transform*.



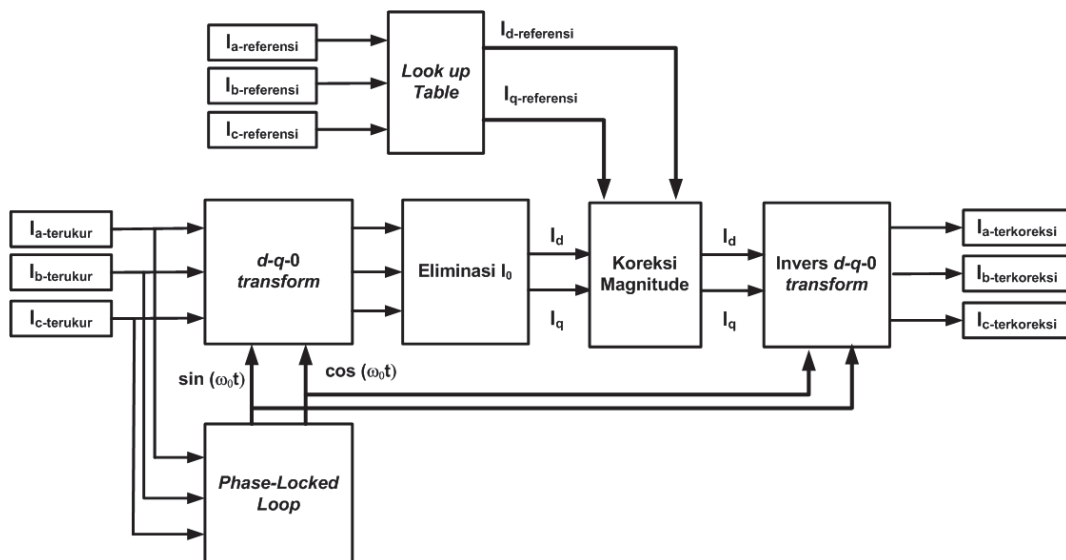
Gambar 1. Skema aplikasi *electrical signature analysis* pada motor pompa pendingin AP1000 tipe RUV

Kalibrasi

Kalibrasi akan menentukan seberapa akurat interpretasi dari arus listrik terukur dibanding nilai sebenarnya. Sebagaimana ditunjukkan di Gambar 1, kalibrasi sebaiknya dilakukan pada seluruh kanal secara independen. Walaupun dalam aplikasi *electrical signature analysis* hanya membutuhkan paling tidak informasi dari satu kanal, tetapi data yang terbebas dari pengaruh gangguan tegangan catudaya akan diperoleh secara lebih komprehensif dengan analisis simultan tiga kanal catu daya.

Dalam kalibrasi tiga fase seperti ditunjukkan pada Gambar 1, kesesuaian antar fase sangat penting untuk menghindari kesalahan interpretasi yang boleh jadi akan memberikan sinyal yang mirip seperti cacat pada komponen terukur. Deviasi ini bisa diakibatkan oleh faktor diluar sistem

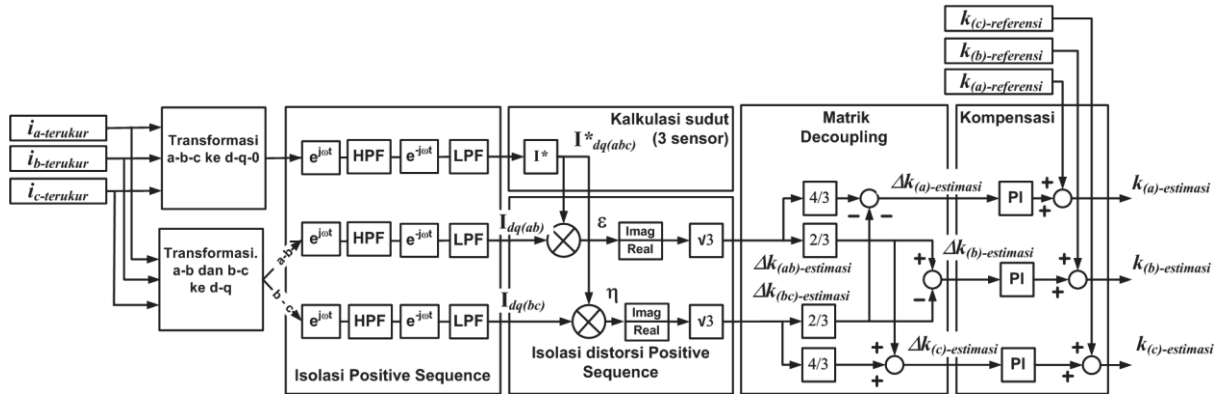
pengukuran (*voltage unbalance, noise*) atau faktor internal dari sistem pengukuran (penuaan, toleransi perangkat, dan pergeseran pengukuran akibat temperatur). Deviasi kalibrasi dapat berbentuk *differential gain error* antar masing-masing fase, *mean gain error* antara satu fase dibanding reratanya, dan *offset error*. Deviasi dan *offset* ini dapat diatasi dengan kalibrasi konvensional secara *offline*. Namun hal ini berarti kalibrasi tersebut berlaku hanya untuk satu titik waktu dan tidak akan sensitif terhadap pergeseran kalibrasi karena berbagai sebab. Keterbatasan kalibrasi konvensional ini pula yang memberikan keunggulan implementasi kalibrasi secara *online*.



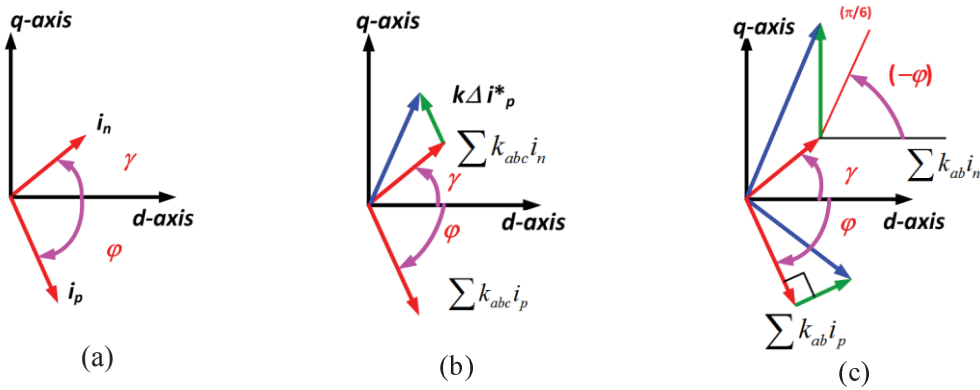
Gambar 2. Sistem kalibrasi *online* dengan *baseline* database pada kanal arus listrik

Pada dasarnya kalibrasi *online* pada *electrical signature analysis* dapat dilakukan dengan mengeliminasi deviasi berbagai *error gain* dan *offset*. Teknik ini secara praktis ditunjukkan di Gambar 2. Pertama, tiga fase arus terukur (i_a , i_b dan i_c) dalam koordinat *abc-frame* dikonversi agar lebih sederhana dan lebih mudah dipahami ke dalam bentuk koordinat *qd0-frame*. Sebagai catatan arus terukur ini (i_a , i_b dan i_c) sudah dikonversi menjadi komponen fasor (I_a , I_b , I_c) seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Perlu dicatat juga i_0 dieliminasi mengingat konfigurasi *three wiresystem*. Selanjutnya, i_q dan i_d terukur diatur berdasarkan informasi *baseline database* dengan *look up table* agar bersesuaian dengan target *gain* kalibrasi yang dikehendaki. Teknik *baseline calibration* ini walaupun sangat praktis masih sangat mungkin mengandung ketidaksesuaian mengingat ketergantungannya dengan keakuratan informasi basis data.

Metode lebih lanjut untuk mengeliminasi deviasi dengan cara kompensasi *differential gain* secara berkesinambungan seperti ditunjukkan di Gambar 3. Beberapa beberapa teknik koreksi *gain* dan *offset* terhadap tegangan sudah dilakukan untuk berbagai tujuan [5-8], namun ternyata pengembangan untuk *electrical signature analysis* untuk aplikasi pemantauan kondisi di reaktor nuklir tidak ditemukan. Metode ini ide dasarnya adalah, pertama, bagaimana mengisolasi *differential gain* dari ketidaksesuaian yang tidak diharapkan (misalkan dari faktor eksternal *noise* catu daya). Selanjutnya *differential gain* dihitung dengan matriks *decoupling* yang dilanjutkan dengan estimasi *gain* setelah regulator (PI) memperkecil *differential gain* hasil perhitungan.



Gambar 3. Sistem estimasi differential gain untuk kalibrasi online



Gambar 4. Analisis fasor metode kompensasi differential gain menunjukkan (a) komponen arus listrik terdiri dari positif sequence (i_p) dan negative sequence (i_n) (b) differential gain hasil akumulasi dari tiga sensor (c) differential gain hasil akumulasi dari dua sensor

Metode kedua ini tetap menggunakan model kalibrasi persamaan konvensional seperti ditunjukkan di persamaan (1) (untuk satu kanal pengukuran) dan persamaan (2) (untuk tiga kanal pengukuran). Sedikit berbeda dengan teknik sebelumnya, sistem estimasi differential gain ini juga menggunakan prinsip konversi tiga fase arus dari abc -frame menjadi dq -frame dalam format fasor positive sequence-nya (\mathbf{I}_p) dan fasor negative sequence-nya (\mathbf{I}_n) seperti ditunjukkan lebih di persamaan (3)[9] dan Gambar 4 (a).

$$i_{a-m} = (k_{a-m}) i_a + i_0 \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} i_{a-m} \\ i_{b-m} \\ i_{c-m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{a-m} & 0 & 0 \\ 0 & k_{b-m} & 0 \\ 0 & 0 & k_{c-m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_{dq} = \mathbf{I}_p + \mathbf{I}_n \quad (3)$$

dengan,

- $i_{a-m}, i_{b-m}, i_{c-m}$ = arus keluaran hasil pengukuran fase a, b atau c;
- $i_{a,b,c}$ = arus masukan hasil pengukuran fase a, b atau c;
- k_a, k_b, k_c = gain hasil pengukuran fase a, b atau c;
- i_0 = offset hasil pengukuran;
- \mathbf{I}_p = arus listrik positive sequence;
- \mathbf{I}_n = arus listrik negative sequence;

$$\mathbf{I}_p = |i_p| e^{j(\omega t - \varphi)} \quad \text{dan} \quad \mathbf{I}_n = |i_n| e^{j(-\omega t + \gamma)}$$

Gambar 3 juga menunjukkan, tiga sensor arus listrik dari koordinat abc ditransformasikan ke dalam koordinat $dq0$, diikuti dengan implementasi *first order low-pass* (LF) dan *high-pass* (HP). *Butter worth filter* untuk mengisolasi/mengekstraksi komponen *positive sequence* dari komponen *negative sequence*. Selanjutnya, *complex conjugate positive sequence* dalam koordinat $dq0$ digunakan untuk menentukan sudut komponen *positive sequence* yang detail phasornya ditunjukkan dalam Gambar 4 (b). Gambar ini mengilustrasikan resultan arus di sumbu dq terdiri dari rerata *gain* dari tiga kanal sensor ($\sum k_{abc}$), deviasi vektor *gain* (Δk), sudut *positive sequence* (φ), sudut *negative sequence* (γ) dan *complex conjugate* dari *positive sequence* (\mathbf{I}_p^*) seperti ditunjukkan di persamaan (4)[9].

$$\mathbf{I}_{dq-abc} = \sum k_{abc} \mathbf{I}_p + \sum k_{abc} \mathbf{I}_n + k \Delta \mathbf{I}_p^* \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_{dq-ab} = \sum k_{ab} \mathbf{I}_p + \frac{\sqrt{3}}{3} \Delta k_{ab} \mathbf{I}_p e^{j\zeta} + \sum k_{ab} \mathbf{I}_n + \frac{2\sqrt{3}}{3} \Delta k_{ab} \mathbf{I}_p^* e^{j\phi} \quad (5)$$

dengan,

$$\Delta k = -\frac{1}{2} \left[\Delta k_u + j \frac{\sqrt{3}}{3} (\Delta k_u - \Delta k_w) \right] \quad (6)$$

$$\sum k_{abc} = \frac{k_a + k_b + k_c}{3}, \quad \sum k_{ab} = \frac{k_a + k_b}{2}, \quad \sum k_{bc} = \frac{k_b + k_c}{2}, \quad \Delta k_{ab} = \frac{k_a - k_b}{2},$$

$$\Delta k_{bc} = \frac{k_b - k_c}{2} \quad (7)$$

Untuk menghasilkan *differential error* dari komponen arus *positive sequence* yang sudah berhasil diisolasi, kombinasi dua kanal pengukuran, ab and bc dalam koordinat- dq digunakan. Gambar 4 (c) menunjukkan tambahan fasor yang berasal dari *differential gain* pada fase ab untuk arus *positive sequenced* dan komponen *negative sequence* seperti persamaan (5). Pada *positive sequence*, *differential gain* berupa fasor hijau dengan arah tegak lurus terhadap arus hasil pengukuran (sebagai contoh pada $\xi = \pi/2$) dan pada *negative sequence* diperoleh dengan memutar *complex conjugate* dari *positive sequence* tergantung nilai pengukuran (sebagai contoh $\phi = \pi/6$). Selanjutnya ralat distorsi dari dua buah *positive sequence gain* ab dan bc , yang dilambangkan dengan parameter vektor ϵ dan η , dilakukan perhitungan. Gambar 3 menunjukkan teknik isolasi dari kanal a dan b (Δk_{ab}) dan antara kanal b dan c (Δk_{bc}) dengan mengalikan $\sqrt{3}$ dengan rasio komponen *imaginer* dan komponen *real* dari persamaan (6) dan (7).

Selanjutnya matrik *decoupling* melakukan konversi dua matrik diferensial berbasis dua sensor menjadi deviasi berbasis matrik berbasis tiga sensor. Selanjutnya *differential error gain* ($\Delta k_a, \Delta k_b$ and Δk_c) dikompensasi untuk mengarahkan estimasi *differential gain* dari tiga sensor ini semakin mendekati nol menggunakan regulator *Integral* (I) atau *Proportional-Integral* (PI). Pilihan regulator PI akan memberikan *error* pada kondisi *steady state* yang stabil sedangkan regulator *Integral* (I) lebih sederhana dalam pengaturannya [6]. Berdasarkan informasi ($k_{a-(referensi)}$, $k_{b-(referensi)}$, $k_{c-(referensi)}$) dari parameter desain, estimasi terakhir ($k_{a-(est)}$, $k_{b-(est)}$, $k_{c-(est)}$) dapat ditentukan dengan persamaan,

$$k_{(a)-estimasi} = k_{(a)-referensi} + \Delta k_{(a)-estimasi} \quad (8)$$

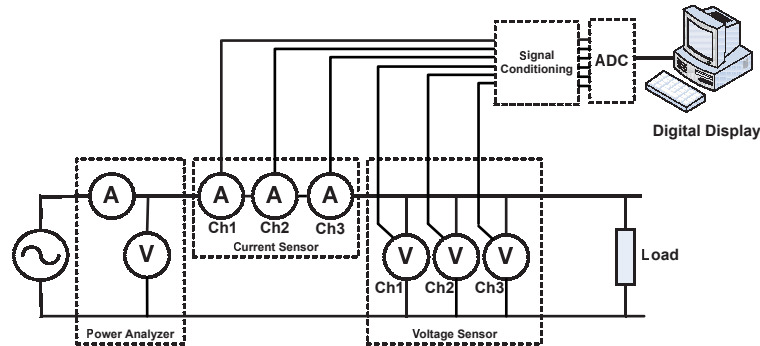
Gain hasil estimasi inilah yang selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai sebenarnya dari arus listrik terukur ditunjukkan dengan persamaan (9)

$$i_{a-terukur} = \frac{k_{(a)-sebenarnya}}{k_{(a)-estimasi}} i_{a-sebenarnya} \quad (9)$$

Teknik sederhana estimasi *differential gain* ini akan mampu mengatasi berbagai bentuk ketidak idealan, baik itu akibat catudaya ataupun sekaligus karakteristik bawaan sensor.

TATA KERJA

Penelitian ini dilakukan dengan eksperimen secara detil dengan melewati beberapa tahap. Pada eksperimen pertama, kalibrasi konvensional terhadap seluruh sistem dilakukan dengan memanfaatkan komponen resistor sebagai beban (lihat Gambar 5) untuk mengetahui karakteristik ketidaksesuaian dalam kalibrasi. Tiga buah sensor arus dan tegangan dengan spesifikasi seperti ditunjukkan di Tabel 1 diberi tegangan catu daya yang sama dan sebuah *power analyzer* digunakan sebagai kalibrator referensi arus dan tegangan.



Gambar 5. Konfigurasi perangkat untuk kalibrasi

Tabel 1. Parameter sensor.

Kuantitas	Type sensor	Model Sensor	Rentang Input	Tegangan Output
Arus	<i>Hall Effect Sensor</i>	LEM LTA 50P/SP1 1:1000	0 to ±50 A	500mV/Amp
Tegangan	<i>Differential isolation voltage amplifiers</i>	ISO122P <i>isolation voltage Amplifier</i>	0 to ± 600V	10mV/V

Hasil kalibrasi konvensional ini selanjutnya dianalisis ketidaksesuaian *magnitude* dan sudut-sudutnya serta kemungkinan mengkoreksinya. Selanjutnya mengingat sebuah motor induksi berkapasitas 2.2 KW (*name plate* lihat Tabel 2) yang sehat diberi suplai tegangan secara langsung dan digunakan sebagai obyek pengukuran untuk menganalisa metode kalibrasi secara *online* untuk pemantauan kondisi berbasis *electrical signature analysis*.

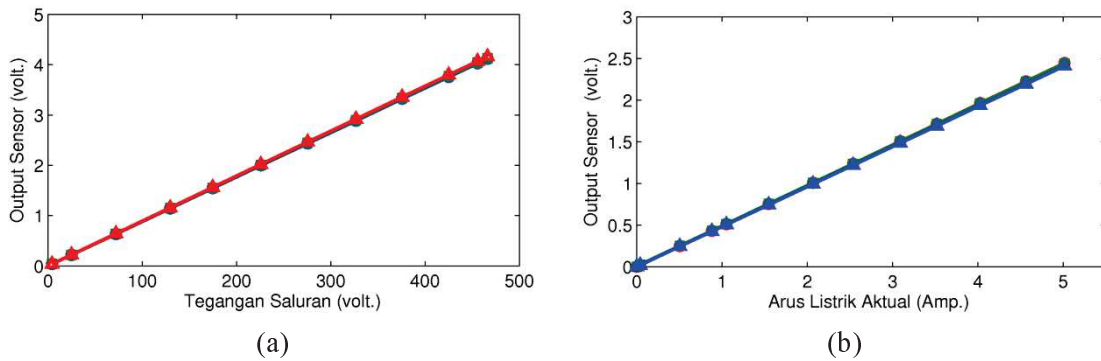
Tabel 2. Data *name plate* dari motor uji dengan koneksi tipe Y.

Output daya	2200 W	Kecepatan nominal	1415 rpm
Frekuensi	50 Hz	Cos φ	0.8
Tegangan saluran	415 V	Jumlah <i>pole</i>	4
Arus nominal	4.9 A	Jumlah lilitan/fase	282 lilitan
Inersia rotor	0.05 kg m ²		

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi Konvensional

Hasil kalibrasi konvensional tiga fase kanal tegangan dan arus untuk seluruh kanal ditunjukkan pada Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan tegangan dan arus listrik sebagai prediktor *input* dan tegangan terukur dari sistim pengukuran sebagai respon dari kalibrasinya.



Gambar 6. Kalibrasi penuh (a) kanal tegangan dan (b) arus

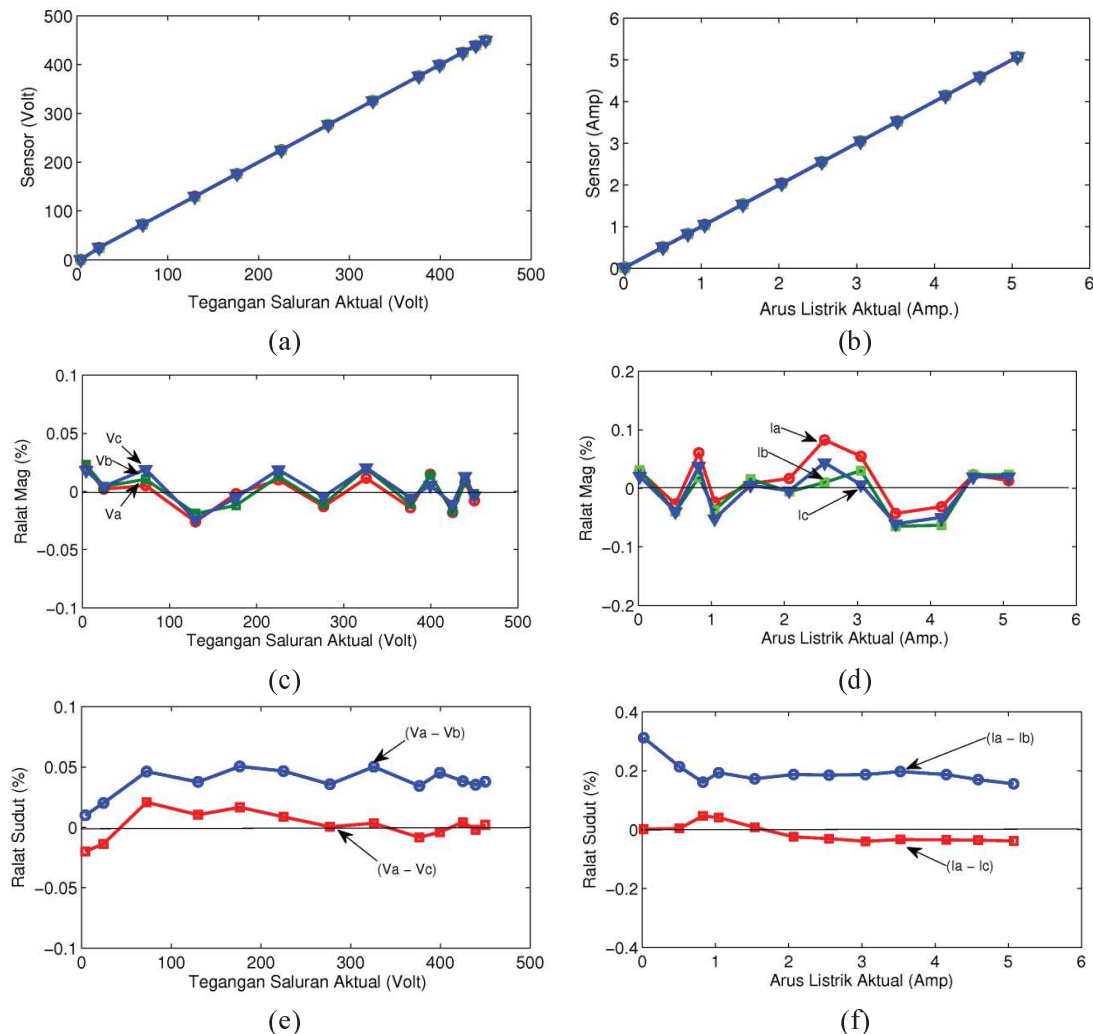
Secara visual tiga kanal tegangan dan tiga kanal arus identik satu dengan yang lainnya. Selain itu, grafik ini juga memberikan informasi bahwa *intercept* kalibrasi bisa dianggap nol atau *offset* pengukuran bisa diabaikan. Persamaan kalibrasi dari grafik ini ditunjukkan di Tabel 3.

Tabel 3. Persamaan kalibrasi kanal tegangan dan arus

Parameter	Kanal A	Kanal B	Kanal C
Tegangan	$y = 2.4e^{-5} + 8.84e^{-3}x$	$y = 1.06e^{-3} + 8.88e^{-3}x$	$y = 4.56e^{-4} + 8.93e^{-3}x$
Arus	$y = -4.93e^{-5} + 0.489x$	$y = -8.19e^{-4} + 0.49x$	$y = -1.07e^{-4} + 0.488x$

Uji validasi terhadap koefisien-koefisien kalibrasi *regressi linear* juga menunjukkan kelayakan persamaan kalibrasi untuk diaplikasikan pada pengukuran. Sebagai contoh, pada kanal pengukuran A, validasi menggunakan uji hipotesis “t” dari *slope* (kemiringan). Koefisien t dari kemiringan ($8,84e^{-3}$) adalah $t = 1915,5$ lebih besar dari nilai probabilitas $t_{10,0.05} = 1,812$ (pada 95% *confidence interval* untuk observasi 12 sampel, dan 2 parameter yg diestimasi) yang sama dengan 0 ($P \approx 0$). Probabilitas ini berarti bahwa model garis lurus yang dimaksud layak dipakai dan variable x dan y mempunyai hubungan yang sangat erat. Selain itu, hasil uji koefisien t terhadap intersep juga menunjukkan bahwa hipotesis perpotongannya sama dengan nol, sehingga dapat diterima. Sebagai contoh, untuk koefisien intersep $2,4e^{-5}$, maka $t = 0,0177$ dan dengan hipotesis $t_{10,0.05}$, maka probabilitas yang besar ($P = 0,986$) menunjukkan bahwa intersep sama dengan nol tidak bisa ditolak. Tiga parameter lainnya juga menunjukkan diterimanya model regresi secara statistik, contohnya, *residual mean error* ($\hat{\sigma}^2$) bisa dianggap nol ($6.5e^{-6}$), koefisien determinasi (R^2) mendekati satu (0,99), dan derajat kebebasan (R^2) juga mendekati 1. Dari beberapa parameter ini dapat disimpulkan bahwa sistim pengukuran memberikan respon linier terhadap tegangan saluran (*line voltage*) sebagaimana juga terhadap arus listrik.

Kalibrasi juga bisa divalidasi secara eksperimen dengan tes residual atau perbedaan antara nilai aktual dan nilai responnya seperti ditunjukkan secara visual di Gambar 7. Tes dilakukan dengan membandingkan nilai sebenarnya dari referensi tiga fase tegangan (*power analyzer*) dan arus listrik terhadap hasil pengukuran dari sistim setelah terkalibrasi.



Gambar 7. Analisis respon dari nilai aktual dan sinyal keluaran terkalibrasi: (a) pengukuran tegangan, (b) pengukuran arus, (c) ralat magnitudo dalam pengukuran tegangan, (d) ralat magnitudo dalam pengukuran arus, (e) ralat relatif sudut dari pengukuran tegangan, (f) ralat relatif sudut dari pengukuran arus

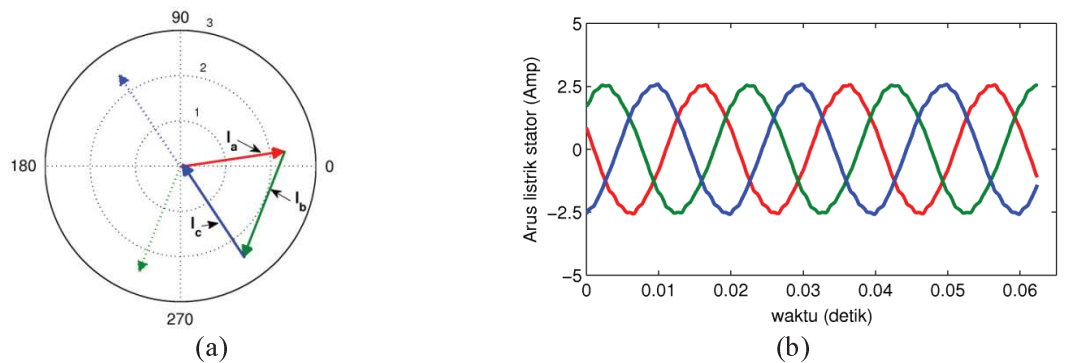
Gambar 7(a) dan (b) menunjukkan komparasi magnitudo fasor dari nilai terukur dan tegangan dan arus listrik dengan referensinya. Selanjutnya persentase ralat residual dihitung dengan menghitung rasio ralat dan skala penuh dari maksimum pembacaan output. Gambar 7 (b) dan (c) menunjukkan untuk tegangan saluran (*line voltage*), persentase ralat sangat kecil (kurang dari 0,1 % atau 0,12 V dari tegangan fase nominal), dan kurang dari 0.1% atau 0.0049 A dari arus nominal. Nilai yang sangat kecil ini dapat dianggap diterima dan cukup akurat untuk aplikasi monitoring berbasis *electrical signature analysis*. Analisis ralat juga menunjukkan persentase ralat yang acak di berbagai titik pengukuran. Hal ini semakin menjustifikasi persamaan model regresi tidak membutuhkan koefisien atau variabel tambahan untuk merepresentasikan sistem pengukuran agar lebih akurat.

Gambar 7 (e) dan (f) menunjukkan analisis sudut fasor dari tegangan dan arus. Analisis sudut dihitung berdasarkan perbedaan dua fase, yaitu antara $V_a - V_b$ dan $V_a - V_c$. Kanal tegangan memberikan perbedaan yang lebih kecil dengan kondisi idealnya dibanding kanal arus listrik. Fase di kanal a dan kanal c mempunyai perbedaan perbedaan yang relatif konstant, berbeda $0,05^0$ di kanal tegangan dan berbeda $0,2^0$ di kanal arus listrik. Meskipun ralat ini sangat kecil, namun perbedaan yang relatif sistemik ini dapat dikompensasi dengan cara mengurangi selisih ini dengan

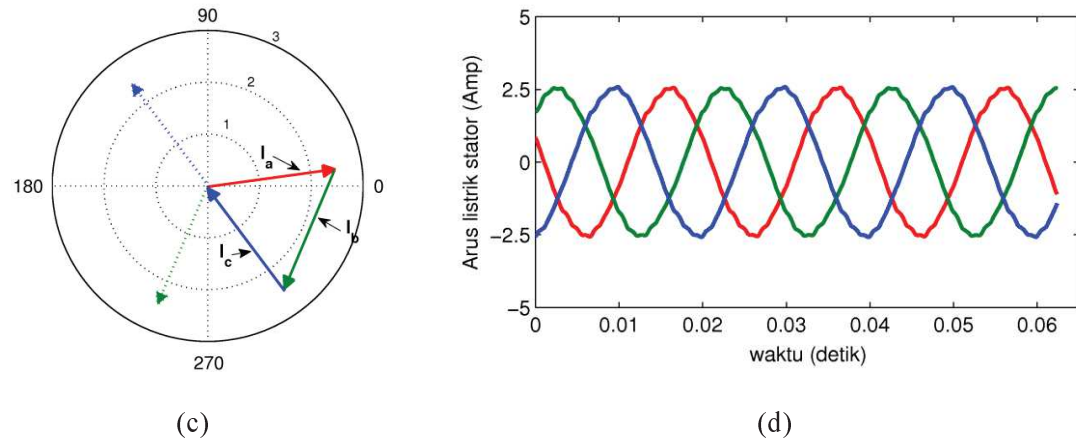
perbedaan pada titik nominal tegangan maupun arusnya. Efek kompensasi ini akan meningkatkan akurasi hasil pengukuran dikarenakan analisis sudut yang lebih baik.

Kalibrasi Online

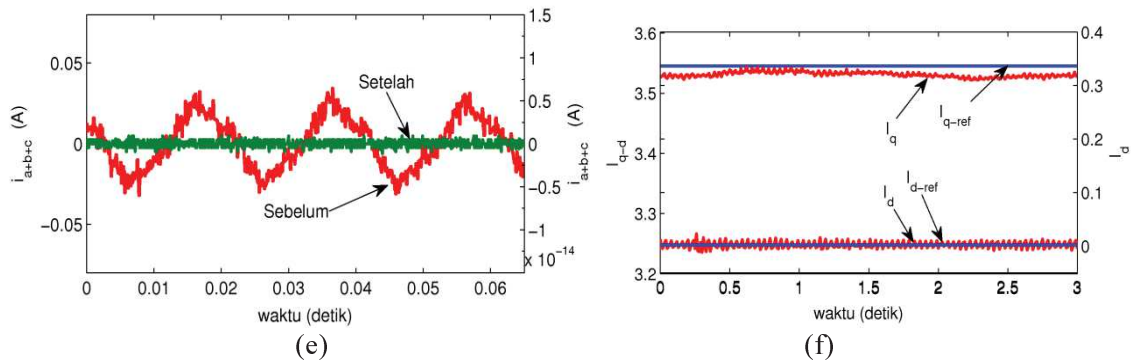
Berbeda dengan kalibrasi konvensional (*offline*) yang mensyaratkan perlakuan koreksi sudut setelah sebuah plot lengkap dari beberapa titik kondisi pengukuran diperoleh, kalibrasi *online* bisa dilakukan saat sistem berjalan normal dan tanpa membutuhkan manipulasi input. Hasil kalibrasi *online* menggunakan metode seperti di Gambar 2 ditunjukkan di grafik-grafik berikut ini termasuk hasil koreksinya dalam koordinat *dq*. Teknik ini bertujuan untuk menyesuaikan hasil *online* kalibrasi dengan basis *databeline* kalibrasi yang memungkinkan dihilangkannya efek distorsi dan gangguan catu daya itu sendiri sekaligus efek ketidakidealan dari perangkat pengukuran sekaligus obyek yg diukur (dalam tes ini menggunakan motor induksi sebagai obyek).



Sebelum : $I_a = 2.499 \angle 7.497^0$, $I_b = 2.520 \angle 246.77^0$, $I_c = 2.496 \angle 126.610^0$
 Sebelum: $I_a + I_b + I_c = 0.0147 \angle 109.147^0$



Setelah: $I_a = 2.500 \angle 7.389^0$, $I_b = 2.524 \angle 246.848^0$, $I_c = 2.491 \angle 126.644^0$
 Setelah: $I_a + I_b + I_c = 0.0000558 \angle -75.188^0$

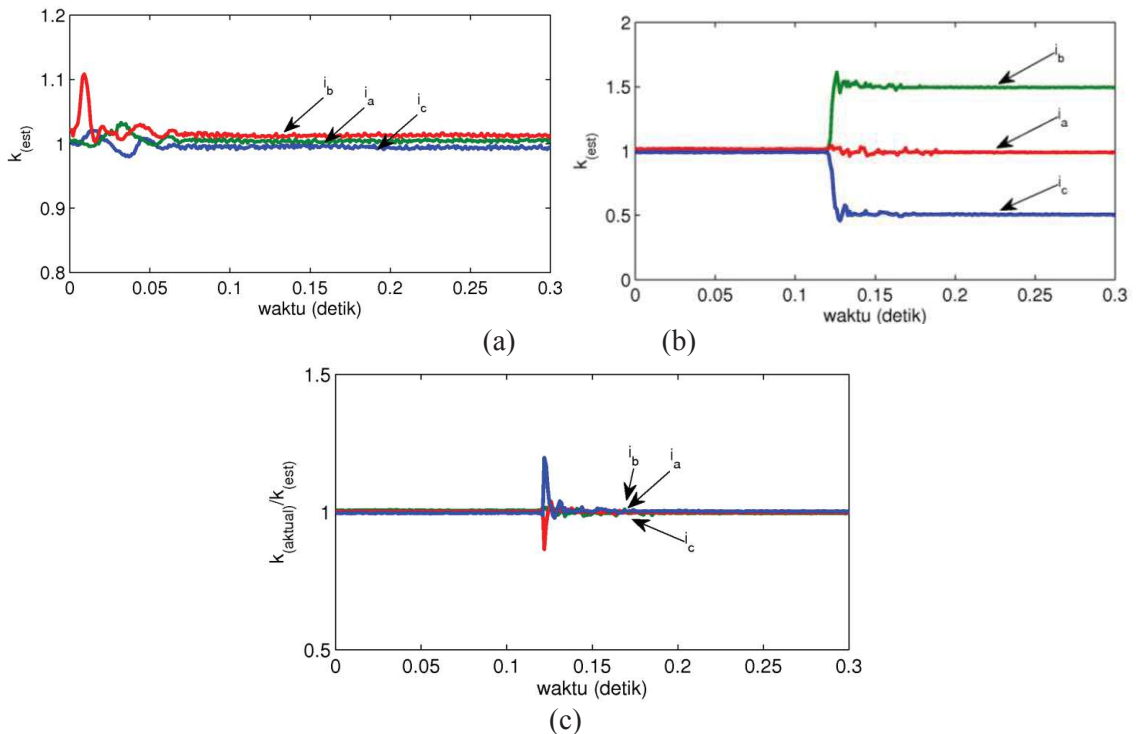


Gambar 8. Tahapan langkah per langkah kalibrasi online menunjukkan (a) fasor arus catu daya terukur (stator current) termasuk (b) gelombang tiga fasenya, kemudian (c) fasor diagram setelah kalibrasi termasuk (d) gelombangnya, (e) arus resultan ($i_a+i_b+i_c$) sebelum dan sesudah eliminasi zero sequence dan (f) arus terukur i_q dan i_d dibanding dengan nilai referensinya

Gambar 8 mendemonstrasikan magnitudo dan sudut fasor arus listrik terukur dapat dikoreksi dengan membandingkannya dengan signal basis data referensi (i_q and i_d) pada berbagai kondisi pembebanan motor induksi. Gambar 8 (a) dan (b) mengilustrasikan diagram fasor dan tiga fase gelombang arus listrik hasil pengukuran aktual. Dalam kondisi yang ideal jumlahan dari tiga fase fasor ($I_a+I_b+I_c$) harus menghasilkan nilai resultan yang 0. Namun hasil pengukuran menunjukkan, walaupun sudah dikalibrasi secara konvensional resultan fasornya adalah $0.0147 \angle 109.147^\circ$. Resultan fasor ini, dengan kata lain komponen *zero sequence*-nya (grafik 8 (e)), menunjukkan sebelum koreksi terjadi variasi antara -0.025 dan +0.025 A. Selanjutnya grafik di Gambar 8(f) ditampilkan untuk membandingkan i_q dan i_d terukur dan nilai referensinya. Perbedaan nilai i_q dan i_d inilah yang digunakan untuk mengoreksi sinyal terukur dalam kalibrasi *online*. Hasil setelah koreksi ditampilkan pada Gambar 8 (c) serta 7 (e) yang menampilkan eliminasi *zero sequenced* resultan fasornya (plot berwarna hijau) setelah implementasi teknik kalibrasi *online*. Hasil ini memberikan konfirmasi bahwa informasi berbasis *baseline* hasil pengukuran dari database telah berhasil diimplementasikan dalam kalibrasi *online*.

Namun perlu dicatat bahwa walaupun kalibrasi *online* berhasil dilakukan, akan tetapi magnitudo dari fase-fase hasil pengukuran tidaklah sama dan bersesuaian seperti fasor hasil pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 8(c). Ini artinya koreksi gain sangat dibutuhkan agar dari arus tiga fase secara sempurna bersimetri satu dengan lainnya pada *gain* yang diharapkan. Oleh karena itu kalibrasi *online* dengan teknik kedua seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4 dilakukan. Eksperimen pertama dilakukan dengan menggunakan nilai *gain* yang sama 1A/500 mV untuk semua sensor. *Gain* referensi diatur pada nilai 1A/500 mV dan gain sistem pengukuran ditetapkan pada 1 A/A.

Unjuk kerja dari system estimasi *differential gain* didemonstrasikan secara sederhana di Gambar 9. Gambar 9 (a) menunjukkan perbedaan *gain* terestimasi dari tiga buah sensor berikut sistem pengukurannya berkisar 2,2% setelah *steady state*. Hal ini mengkonfirmasi ketidaksesuaian magnitudo yang sebelumnya diamati di Gambar 8 (c).



Gambar 9. Test eksperimen dari kalibrasi online mengilustrasikan (a) estimasi gain dari hasil pengukuran (b) respon dari estimasi gain ketika perbedaan pengukuran dinisiasi dan (c) rasio dari gain sebenarnya dan terestimasi

Untuk melihat seberapa kinerja kalibrasi *online* ini, kasus yang sangat ekstrem diimplementasikan pada tiga sensor ini, masing-masing dengan 1A/500 mV, 1A/750 mV dan 1A/250 mV serta *gain* referensi tetap diset pada 1A/500 mV. Input arus listrik yang sama (dengan asumsi 1A/A diaplikasikan pada ketiga sensor). Tiga amplifikasi *gain* berbeda ini diinisiasi secara bersamaan kurang lebih pada 0,125 detik seperti ditunjukkan pada plot grafik estimasi *gain* di Gambar 9 (b) ($k_{(a)-estimasi} = 1.0$, $k_{(b)-estimasi} = 1,5$ dan $k_{(c)-est} = 0,5$) setelah sebelumnya mempunyai nilai *gain* yang sama. Hasil ini juga menunjukkan bahwa estimasi *gain* terbaru dapat dihitung segera sesaat setelah *gain* berbeda teridentifikasi. Estimasi *gain* terbaru kemudian diatur menurut target referensi *gain* yang diharapkan, sampai keluaran terukur sama dengan input. Komparasi dengan *gain* pengukuran (1 A/A) diberikan di Gambar 9 (c) bisa mengindikasikan bahwa model bisa merespon perubahan dengan cepat kurang dari 0,02 detik selama eksperimen.

Hasil respon waktu dan penyesuaian akurasi yang sangat cepat secara online dan kontinyu ini memberikan kontribusi yang sangat signifikan dibanding dengan sistem konvensional, yang harus melepas sensor dan membahayakan radiasi pekerja perawatan reaktor. Selain itu sebagai perbandingan respon waktu berbagai jenis sensor di PWR[10] yang berkisar antara 0,05 sampai 2,5 detik, memberikan keyakinan tentang unjuk kerja sistem kalibrasi *online* ini untuk mengkompensasi atau mengoreksi anomali yang terjadi dalam sebuah untai pengukuran dengan cepat. Analisis pendahuluan ini menunjukkan kalibrasi *online* ini dapat diimplementasikan pada contoh kasus motor sistem pendingin seperti di PWR untuk menjaga keselamatan operasinya dengan cara menjamin akurasi sistem pemantauan kondisi yang terpasang. Namun terlepas dari keberhasilan pengujian yang sudah didemonstrasikan pada penelitian ini, investigasi lebih lanjut sangat diperlukan untuk mengetahui unjuk kerjanya pada aplikasi-aplikasi lain yang lebih riil dalam reaktor nuklir.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini berhasil didemonstrasikan metode kalibrasi *online* untuk pemantauan kondisi perangkat instrumentasi reaktor nuklir berbasis *electrical signature analysis*. Untuk itu, tiga teknik kalibrasi dibandingkan secara detil: dengan teknik kalibrasi konvensional (*offline*), kalibrasi *online* dengan *baseline data base*, dan teknik kalibrasi *online* dengan *differential gain*. Dapat disimpulkan penelitian ini menunjukkan perbedaan unjuk kerja tiga teknik metode kalibrasi ini. Pertama, kalibrasi konvensional (*offline*) tidaklah menjamin akurasi jika diimplementasikan pada tiga fasa pengukuran atau tiga buah sensor yang diharapkan kesesuaiannya. Kedua, kalibrasi *online* berdasarkan informasi *baseline data base* yang pernah terekam oleh sistem instrumentasi sangat mudah diimplementasikan, namun belum tentu menjamin keakuratan deteksi magnitudo dan sudut fasor dari sinyal terukur. Sedangkan teknik ketiga, kalibrasi *online* dengan kompensasi *differential gain* mendemonstrasikan unjuk kerja yang sangat menjanjikan, dimana hasil analisis pendahuluan menunjukkan bahwa secara akurat dan relatif cepat perbedaan *gain* mampu dikoreksi. Berdasarkan hal ini maka sistem kalibrasi *online* menggunakan *differential gain* ini selanjutnya siap diuji pada aplikasi riil di pembangkit daya bertenaga nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

1. Hashemian HM. Aging management of instrumentation control sensors in nuclear power plants. Nuclear Engineering and Design. 2010;240(11):3781-90.
2. 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.
3. Agency IAE. On-Line Monitoring for Improving Performance of Nuclear Power Plants Part 1 : Instrument Channel Monitoring International Atomic Energy Agency; 2008.
4. Benbouzid MEH. Review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2000;47(5):984-93.
5. Harke MC, Lorenz RD. The Spatial Effect and Compensation of Current Sensor Differential Gains for Three-Phase Three-Wire Systems. IEEE Transactions on Industry Applications. 2008;44(4):1181-9.
6. Younghoon C, LaBella T, Jih-Sheng L. A Three-Phase Current Reconstruction Strategy With Online Current Offset Compensation Using a Single Current Sensor. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012;59(7): 2924-33.
7. Won-Sang I, Seon-Hwan H, Jang-Mok K, Jeho C, editors. Analysis and compensation of current measurement errors in a doubly fed induction generator. Energy Conversion Congress and Exposition, 2009 IEEE ECCE 2009; 2009.
8. Han-Su J, Seon-Hwan H, Jang-Mok K, Cheul UK, Cheol C. Diminution of Current-Measurement Error for Vector-Controlled AC Motor Drives. IEEE Transactions on Industry Applications. 2006;42(5):1249-56.
9. Harke MC, Lorenz RD, editors. The spatial effect and compensation of current sensor gain deviation for three-phase three-wire systems. Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE; 2007.
10. Coble J, Hashemian H, Meyer R, Shumaker B, Ramuhalli P, Cummins D, et al. A review of sensor calibration monitoring for calibration interval extension in nuclear power plants 2012: Available from: <http://www.ntis.gov/search/product.aspx?ABBR=DE20131061413>.