

DETEKSI DAN SEGMENTASI GANGGUAN PADA JARINGAN TRANSMISI LISTRIK BERBASIS HILBERT TRANSFORM

Mustarum Musaruddin¹

¹ Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

Email: mustarum@uho.ac.id

Abstract — The aim of this paper is to develop a technique for detection and segmentation of power system disturbance based on the Hilbert transform. The fault detection and segmentation is essential pre-processing stage required for automated fault and disturbance analysis on transmission networks. The proposed technique has been tested using practical disturbance records for transmission system modelling with different types of fault, fault resistance and fault location. The results show that the Hilbert fault detection and segmentation technique achieve reliable detection of three-phase current and voltage signals in pre-fault, fault and fault-cleared stationary signal segments with a good level of accuracy.

Keyword — Fault detection, Hilbert Transform, Signal segmentation.

Abstrak — Tujuan dari paper ini ialah untuk mengembangkan sebuah tehnik untuk deteksi dan segmentasi gangguan pada sistem transmisi listrik berdasarkan teknik transformasi Hilbert. Deteksi dan segmentasi gangguan merupakan tahap pra-pemrosesan penting yang diperlukan untuk analisis otomatis pada saluran transmisi. Teknik yang diusulkan telah diuji dengan menggunakan data gangguan praktis untuk pemodelan sistem transmisi dengan berbagai jenis gangguan, resistansi gangguan, dan lokasi gangguan. Hasilnya menunjukkan bahwa teknik deteksi dan segmentasi gangguan Hilbert mencapai deteksi yang dapat diandalkan untuk sinyal arus dan tegangan tiga fasa pada segmen sinyal stasioner pra-gangguan, gangguan, dan setelah gangguan dengan tingkat akurasi yang baik.

I. PENDAHULUAN

Dengan meningkatnya permintaan pasokan listrik dan deregulasi dibanyak negara, sistem tenaga listrik telah beroperasi dibawah kondisi yang penuh tekanan. Banyak upaya telah dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem daya. Namun, gangguan pada sistem tenaga listrik tidak dapat dihindari karena faktor-faktor seperti kegagalan peralatan dan sambaran petir. Meskipun jaringan listrik dapat bekerja secara otomatis untuk sebagian besar waktu, operator manusia masih perlu berada dalam lingkaran untuk mengontrol operasi normal jaringan listrik dan mengatasi kejadian tak terduga yang tidak dapat dikelola oleh kontrol otomatis [1]. Dengan cara ini, analisis kesalahan dan gangguan akan diperlukan untuk memberikan kesadaran situasional yang baik kepada teknisi proteksi dan membantu mereka memutuskan bagaimana menyelesaikan masalah operasional yang tak terhindarkan. Akibatnya, tugas analisis gangguan dan gangguan otomatis menjadi semakin

kompleks dan membutuhkan teknik yang lebih canggih. Analisis ini didasarkan pada sinyal yang dilaporkan selama kesalahan dan gangguan [2]. Tahap pertama dalam analisis sinyal gangguan non-stasioner tersebut adalah deteksi dan segmentasi perubahan mendadak. Informasi ini digunakan untuk mensegmentasi sinyal di bagian yang tidak stasioner untuk analisis lebih lanjut [2]. Komponen stasioner ini sesuai dengan status sistem, seperti pra-gangguan, gangguan, pemutus sirkuit terbuka dan pemutus sirkuit tertutup, dll.

Pendekatan klasik dalam deteksi dan segmentasi gangguan didasarkan pada dekomposisi dengan memproyeksikan sinyal ke serangkaian fungsi dasar yang telah ditentukan sebelumnya. Fungsi dasar ini dapat berupa trigonometri, polynomial, atau Wavelet. Transformasi Wavelet telah menarik banyak perhatian dari para ilmuwan dan insinyur selama bertahun-tahun karena kemampuannya untuk mengekstrak informasi waktu dan frekuensi sinyal secara bersamaan. Transformasi Wavelet dan implementasinya dalam deteksi dan analisis gangguan telah didokumentasikan dalam [3-9]. Disarankan dalam [10] bahwa segmentasi berbasis deteksi perubahan mendadak merupakan langkah pra-pemrosesan penting yang diperlukan dalam keberhasilan implementasi analisis gangguan otomatis dan digunakan untuk menentukan: waktu permulaan gangguan, durasi gangguan, waktu pengoperasian pemutus, waktu pengoperasian elemen proteksi, dll. Seperti yang diusulkan dalam [10], hasil deteksi dan segmentasi gangguan dapat digunakan untuk mengekstrak data yang diperlukan untuk evaluasi kinerja sistem proteksi dan untuk menyinkronkan catatan gangguan dari alat perekam yang berbeda, yang dipicu oleh gangguan yang sama.

Walaupun bebrapa tehnik deteksi dan segmentasi data gangguan telah didokumentasikan oleh bebrapa peneliti sebelumnya namun penerapan teknik pemrosesan sinyal dengan transformasi Hilbert untuk deteksi dan klasifikasi gangguan pada jaringan transmisi listrik masih kurang diteliti sehingga metode Hilbert untuk deteksi dan klasifikasi gangguan ini diusulkan untuk diimplementasikan dalam penelitian ini sehingga dapat melengkapi teknik transformasi Wavelet dalam malakukan deteksi dan segmentasi sinyal gangguan. Perbedaan utama dalam metode yang diusulkan adalah bahwa fungsi basis tidak

ditentukan dan ditetapkan terlebih dahulu, tetapi berbasis data, yaitu dibatasi selama proses dekomposisi.

II. HILBERT TRANSFORM

Metode transformasi Hilbert adalah teknik adaptif berbasis data untuk menganalisis data dari sistem non-linear dan non-stasioner, yang awalnya diperkenalkan pada tahun 1998 oleh N. E. Huang dkk. [11]. Berbagai macam aplikasi dari transformasi Hilbert bervariasi mulai dari menganalisis deteksi kesalahan bantalan pada mesin induksi, analisis segmentasi dan deteksi puncak pola suara jantung, dan studi analisis kualitas daya [12-20]. Bagian penting dari transformasi ini adalah Empirical Mode Decomposition (EMD) yang diikuti oleh transformasi Hilbert. EMD merefleksikan sinyal sebagai perpanjangan dari fitur fundamental yang bergantung pada sinyal dan diestimasi melalui proses berulang yang disebut pergeseran [18]. EMD bertujuan untuk menguraikan deret waktu menjadi sejumlah berhingga Intrinsic Mode Function (IMF) ditambah dengan residual yang biasanya disebut sebagai tren deret waktu [11]. Dijelaskan dalam [19] bahwa IMF adalah fungsi yang memenuhi dua kondisi:

Jumlah titik ekstrem dan persilangan nol dari fungsi di sepanjang bidang minat harus sama dengan atau tidak lebih dari satu; rata-rata di titik mana pun di area yang ditentukan oleh maksimum lokal dan minimum lokal harus nol [19]. Misalkan $x(t)$ adalah sebuah deret waktu yang didefinisikan pada interval $[0, T]$. Kita ingin menguraikan $x(t)$ menjadi L IMF elementer $d(i)$, $1 \leq i \leq L$, yang secara matematis dijelaskan sebagai berikut:

$$x(t) = \sum_{i=1}^L d^{(i)}(t) + r(t) \quad (1)$$

di mana $r(t)$ adalah fungsi residual yang merupakan fungsi dengan rata-rata bukan nol, fungsi yang bervariasi secara perlahan dengan hanya beberapa titik ekstrem. Masing-masing $d(i)$ IMF diestimasi dengan dukungan proses berulang, yang disebut penyaringan, yang diterapkan pada sinyal multi-komponen residual menengah:

$$x^i(t) = \begin{cases} x(t), & i = 1, \\ x(t) - \sum_{j=1}^{i-1} d^j(t), & i \geq 2. \end{cases} \quad (2)$$

Proses penyaringan sinyal yang diberikan dapat diilustrasikan sebagai berikut [20]:

Pertama, identifikasi titik ekstrem lokal, dan hasilkan dua fungsi yang dinamakan amplop atas dan bawah dengan menginterpolasi maksima dan minima lokal. Kedua, ambil rata-ratanya, yang akan menghasilkan komponen frekuensi yang lebih rendah. Ketiga, dengan mengurangi rata-rata amplitudo dari sinyal, gelombang yang beresilasi akan dipisahkan.

Huang dkk.[11] telah mendefinisikan sebuah gelombang beresilasi sebagai IMF jika memenuhi dua kondisi yang ditetapkan di atas. Jika kondisi untuk IMF tidak terpenuhi,

proses yang sama harus diterapkan secara berulang pada sinyal residual sampai sifat IMF terpenuhi. Proses berulang ini disebut penyaringan. Selain proses penyaringan berulang, Transformasi Hilbert diterapkan untuk menghitung frekuensi sesaat yang bermakna secara fisik dari IMF [11]. Transformasi Hilbert mengubah sinyal dari domain waktu menjadi sinyal analitik atau kompleks yang disebut $a(t)e^{j\theta(t)}$, dimana $a(t)$ adalah amplitudo sesaat dan $\theta(t)$ adalah sudut fasa sesaat. Frekuensi sesaat dapat dihitung sebagai:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3)$$

Dapat dilihat dari penjelasan di atas bahwa metode umum dari transformasi Hilbert membutuhkan dua langkah [20]. Langkah pertama adalah melakukan pra-pemrosesan data dengan proses penyaringan berulang, dimana data diuraikan menjadi beberapa IMF. Langkah selanjutnya adalah melakukan transformasi Hilbert terhadap IMF dan membuat distribusi waktu-frekuensi-energi yang dikenal sebagai spektrum Hilbert yang darinya waktu kejadian akan terdeteksi.

III. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, metode deteksi dan segmentasi gangguan untuk evaluasi data gangguan dikembangkan berdasarkan transformasi Wavelet dan Hilbert. Dalam implementasi deteksi dan segmentasi gangguan menggunakan transformasi Wavelet, sinyal gangguan asli diuraikan menjadi skala Wavelet yang lebih halus dan diikuti dengan pencarian progresif untuk koefisien Wavelet terbesar pada skala tersebut. Koefisien Wavelet yang tinggi yang dikolokasi pada berbagai skala waktu memberikan estimasi muatan dalam parameter sinyal [3]. Perubahan waktu segmentasi dapat diperkirakan dengan mendeteksi kesalahan waktu ketika koefisien Wavelet melebihi ambang batas perkiraan orde pertama. Deskripsi matematis dari transformasi Wavelet dapat ditemukan dari referensi [21-25]. Wavelet Daubechies 1 ($db1$) dan 4 ($db4$) dipilih daripada pilihan lain sebagai mother Wavelet karena mereka adalah Wavelet yang didukung secara kompak dengan fase eksternal dan jumlah momen yang hilang paling besar untuk lebar dukungan yang ditentukan. Algoritma deteksi perubahan mendadak [26] dikembangkan dengan menggunakan dekomposisi sinyal Wavelet dan teknik bank filter cermin kuadratur. Metode ini menguraikan sinyal yang direkam menjadi bagian-bagian yang halus dan terperinci (terlokalisasi) yang diwakili oleh koefisien Wavelet. Deteksi gangguan perubahan mendadak dapat diperkirakan oleh saat-saat ketika koefisien Wavelet melebihi ambang batas yang ditentukan. Metode ambang batas universal [27] digunakan dalam penelitian ini dan dapat ditulis sebagai:

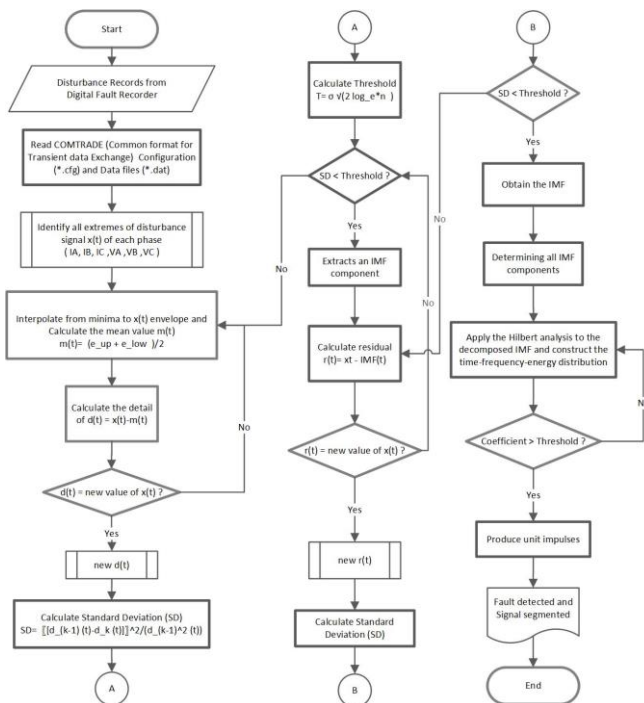
$$T = \sigma \sqrt{2 \log_e n} \quad (4)$$

dimana σ dapat berupa deviasi absolut median dari koefisien Wavelet atau deviasi standar, dan n adalah jumlah sampel koefisien Wavelet.

Tidak seperti teknik dekomposisi standar seperti Wavelet yang melakukan studi dengan memproyeksikan vektor dasar, transformasi Hilbert merefleksikan sinyal sebagai perpanjangan dari fitur fundamental yang bergantung pada sinyal dan diperkirakan melalui proses berulang yang disebut pergeseran. Standar deviasi dari dua hasil penyaringan yang berurutan diberikan oleh:

$$SD = \frac{[d_{k-1}(t) - d_k(t)]^2}{d_{k-1}^2(t)} \quad (5)$$

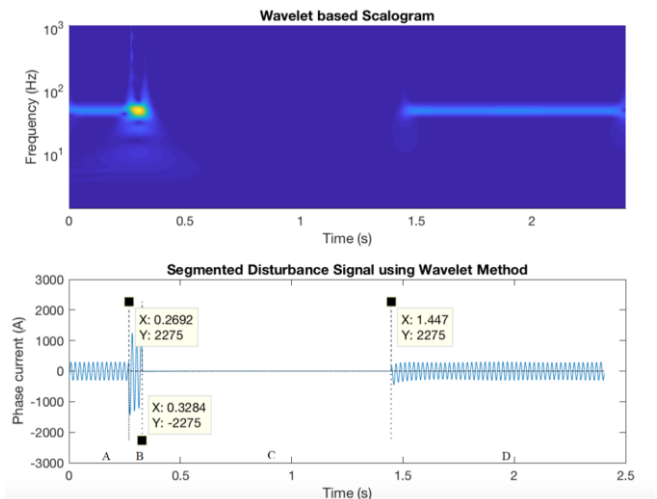
Metode ambang batas (*threshold*) yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada *Universal Threshold* seperti dalam [27], di mana σ dapat berupa deviasi absolut median dari koefisien IMF atau deviasi standar, dan n adalah jumlah sampel koefisien IMF. Analisis Hilbert digunakan untuk IMF yang telah didekomposisi dan membangun distribusi waktu-frekuensi-energi, yang disebut sebagai spektrum Hilbert, yang darinya lokasi waktu kejadian akan dipertahankan. Setelah menentukan segmen waktu ketika koefisien IMF dari sinyal gangguan melebihi ambang batas, kami menggunakan impuls satuan untuk menandainya, yang menunjukkan segmen waktu yang berubah secara tiba-tiba. Gambar 1 menunjukkan algoritma deteksi dan segmentasi gangguan dengan menggunakan teknik transformasi Hilbert.



Gambar 1. Algoritma deteksi dan segmentasi gangguan berdasarkan Hilbert transform

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

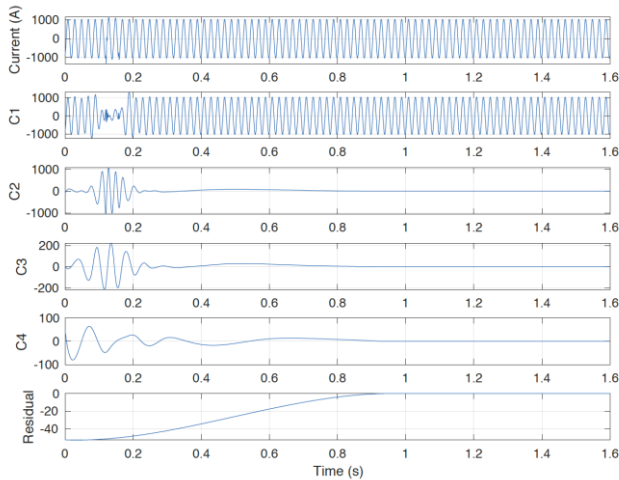
Pada penelitian ini, digunakan data gangguan dari gardu induk dan data gangguan hasil simulasi model sistem tenaga PSCAD/EMTDC [28]. Frekuensi sampling yang digunakan di gardu induk adalah 2500 Hz dan frekuensi fundamental 50 Hz. Untuk data gangguan dari gardu induk selama gangguan satu fasa ke tanah digunakan. Gambar 2 menampilkan scalogram berbasis Wavelet dan sinyal arus fasa tersegmentasi menggunakan metode Wavelet. Dapat dilihat dari Gambar 2 bahwa deteksi pertama, kedua dan ketiga masing-masing adalah 0.2692 detik, 0.3284 detik dan 1.447 detik. Segmen sinyal yang berbeda yang disebabkan oleh peristiwa yang berbeda selama gangguan ditunjukkan pada Gambar 2. Sebagai contoh, segmen A menunjukkan bagian pra-gangguan dan munculnya gangguan, segmen B adalah bagian gangguan, sedangkan segmen C menunjukkan pembukaan circuit breaker, dan segmen D menunjukkan penutupan otomatis pemutus sirkuit dan pemulihan sistem. Perbandingan nilai parameter sinyal segmen A dan D menunjukkan bahwa gangguan telah benar-benar hilang. Dalam kasus ini diperoleh bahwa durasi gangguan terjadi selama 0,0592 detik.



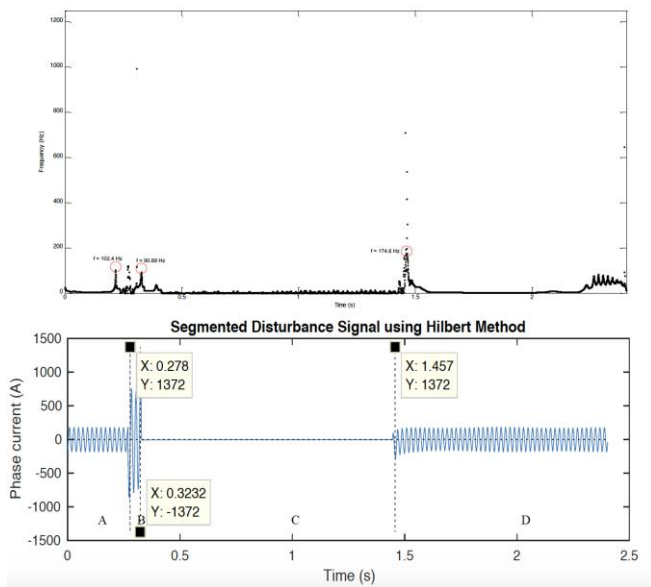
Gambar 2. Skalogram berbasis Wavelet dan sinyal arus fasa tersegmentasi menggunakan metode Wavelet

Sinyal arus fasa dan hasil dari proses penyaringan menggunakan transformasi Hilbert dimana sinyal gangguan asli diuraikan menjadi komponen IMF (C1 hingga C4) dan residu dapat dilihat pada Gambar 3. Puncak-puncak dalam spektrum ini, yang ditunjukkan oleh lingkaran, adalah perubahan mendadak. Perubahan mendadak pada sinyal, yang terdeteksi oleh algoritma segmentasi, ditunjukkan oleh garis putus-putus vertikal. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, deteksi pertama kali adalah 0.278 detik, deteksi kedua adalah 0.3232 dan deteksi ketiga adalah 1.457 detik. Segmen A menunjukkan bagian sebelum gangguan, segmen B adalah bagian gangguan, segmen C menunjukkan aktivasi pemutus arus dan segmen D menunjukkan penutupan otomatis pemutus arus dan perbaikan jaringan. Ketika proses segmentasi selesai, kita dapat menentukan waktu

permulaan gangguan, waktu operasi pemutus, waktu operasi elemen perlindungan, dan beberapa parameter penting lainnya. Dalam kasus ini, kami menemukan bahwa durasi gangguan (segmen B) adalah 0,0452 detik.



Gambar 3. Data Disturbance, IMF components (C1 to C4) dan Residual



Gambar 4. Spektrum Hilbert dan sinyal arus fasa tersegmentasi menggunakan metode Hilbert

Untuk menguji algoritma deteksi dan segmentasi gangguan antara metode Wavelet dan Hilbert transform, dibuat model saluran transmisi 230-kV dengan total panjang saluran transmisi 100 km, beberapa skenario gangguan disimulasikan dengan menggunakan model sistem tenaga listrik PSCAD/EMTDC [28]. Beberapa jenis gangguan hubung singkat gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, fasa ke fasa, dan gangguan tiga fasa seimbang disimulasikan. Jenis gangguan yang berbeda, lokasi gangguan, dan nilai resistansi gangguan digunakan dalam simulasi ini.

4.1 Kasus 1: Gangguan satu fasa ke tanah.

Pada kasus ini, beberapa lokasi gangguan bervariasi dari 10 hingga 90%. Deteksi waktu pertama, dalam hal ini, berarti waktu ketika algoritme mendeteksi perubahan atau gangguan yang pertama kali terjadi. Deteksi waktu kedua berarti waktu ketika algoritme mendeteksi perubahan mendadak berikutnya atau pembersihan gangguan. Gambar 3 memberikan contoh data gangguan, komponen IMF dan residu pada gangguan satu fasa ke tanah dengan resistansi gangguan (RF) sebesar 0,001 Ohm dan lokasi gangguan sebesar 20 persen.

Tabel 1 menunjukkan perbandingan waktu deteksi menggunakan metode Wavelet dan transformasi Hilbert pada gangguan satu fasa ke tanah. Dapat dilihat dari Tabel 1 bahwa waktu deteksi menggunakan transformasi Wavelet adalah 0.1204 detik untuk deteksi pertama dan 0.1564 detik untuk deteksi kedua. Sedangkan waktu deteksi menggunakan transformasi Hilbert adalah 0.1208 detik untuk deteksi pertama dan 0.1540 detik untuk deteksi kedua. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, pada durasi gangguan aktual gangguan AG adalah 0.02 detik, kami menemukan bahwa durasi gangguan untuk segmentasi Wavelet dan metode segmentasi Hilbert adalah 0.0360 detik dan 0.0332 detik, dan tetap stabil untuk kedua metode pada lokasi gangguan yang berbeda.

Tabel 1. Segmentasi gangguan berbasis Wavelet and Hilbert transform (tipe gangguan AG), lokasi 10 sd 90%

Waktu deteksi Wavelet (detik)		Waktu deteksi Hilbert (detik)	
mulai	selesai	mulai	selesai
0.1204	0.1564	0.1208	0.154

4.2 Kasus 2: Gangguan dua fasa ke tanah.

Untuk melihat kinerja algoritma segmentasi sinyal berdasarkan metode Wavelet dan Hilbert telah diuji dengan memvariasikan lokasi gangguan dari 20 hingga 80 persen. Tabel 2 menunjukkan estimasi waktu segmentasi antara metode Wavelet dan Hilbert pada gangguan dua fasa ke tanah (tipe gangguan ABG) dengan resistansi gangguan sebesar 0,001 Ohm. Dari hasil simulasi dan analisis diperoleh bahwa estimasi waktu segmentasi berdasarkan metode Wavelet dan Hilbert adalah konstan

Tabel 2. Segmentasi gangguan dengan Wavelet and Hilbert transform (tipe gangguan ABG), Lokasi gangguan 20 sd 80%

Waktu deteksi Wavelet (detik)				Waktu deteksi Hilbert (detik)			
Phasa A		Phasa B		Phasa A		Phasa B	
mulai	selesai	mulai	selesai	mulai	selesai	mulai	selesai
0.1004	0.1548	0.1004	0.1556	0.1012	0.1532	0.1056	0.1524

4.3. Kasus 3: Gangguan tiga fasa.

Dalam kasus ini, berbagai resistansi gangguan dari 20 hingga 100 Ohm digunakan pada gangguan tiga fasa. Perkiraan waktu segmentasi antara metode Wavelet dan transformasi Hilbert dapat dilihat pada Tabel 3. Jenis

gangguan yang digunakan adalah gangguan tiga fasa (gangguan ABC) dimana lokasi gangguan yang digunakan pada simulasi adalah 50 persen dari Gardu Induk B. Hasil yang didapatkan adalah waktu deteksi menggunakan metode Wavelet dan Hilbert tetap stabil untuk resistansi gangguan yang berbeda pada semua fasa.

Tabel 3. Segmentasi gangguan 3 fasa (tipe gangguan ABC) untuk variasi fault resistance (RF) dari 20 sd 100 Ohm dan lokasi gangguan 50%.

Waktu deteksi Wavelet (detik)						Waktu deteksi Hilbert (detik)					
Fasa A		Fasa B		Fasa C		Fasa A		Fasa B		Fasa C	
mulai	selesai	mulai	selesai	mulai	selesai	mulai	selesai	mulai	selesai	mulai	selesai
0.1004	0.1564	0.1004	0.1556	0.1004	0.1572	0.1012	0.1536	0.1052	0.1516	0.1008	0.1552

V. KESIMPULAN

Sebuah tehnik deteksi dan segmentasi otomatis untuk aplikasi analisis data gangguan otomatis pada jaringan transmisi listrik telah dikembangkan dalam penelitian ini. Diharapkan bahwa dengan mengembangkan tehnik deteksi dan segmentasi gangguan pada saluran transmisi, dapat meningkatkan keandalan jaringan transmisi, dan penelitian ini menyajikan sebuah upaya dalam pengembangan tehnik analisis tersebut. Algoritma yang diusulkan diuji dengan menggunakan data gangguan dari gardu induk dan data gangguan simulasi yang diperoleh dari PSCAD/EMTDC untuk pemodelan sistem transmisi. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode transformasi Hilbert bekerja dengan tingkat akurasi yang baik dan sebanding dengan tehnik yang didasarkan pada transformasi Wavelet. Karena dekomposisi pada fungsi basis yang tidak tetap, algoritma segmentasi berbasis Hilbert yang diusulkan lebih fleksibel daripada metode berbasis Wavelet.

DAFTAR ACUAN

[1] M. Musaruddin and R. Zivanovic, "Web Services for Fault Analysis in Smart Grid Applications," Australian Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 8(2), pp. 93-104, 2011.

[2] M. Musaruddin and R. Zivanovic, "Signal Segmentation of Fault Records based on Empirical Mode Decomposition," IEEE International Technological Conference, IEEE TENCON, 2011.

[3] A. Ukil and R. Zivanovic, "Abrupt Change Detection in Power System Fault Analysis using Adaptive Whitening Filter and Wavelet Transform," Electric Power System Research, vol. 76, pp. 815-823, 2006

[4] A. Ukil and R. Zivanovic, "Application of Abrupt Change Detection in Power Systems Disturbance Analysis and Relay Performance Monitoring," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22(1), pp. 59-66, 2007.

[5] T.M. Lai, L.A. Snider, E. Lo and D. Sutanto, "High-impedance Fault Detection using Discrete Wavelet Transform and Frequency range and RMS conversion," IEEE Transactions on Power Delivery, vol 20, pp. 397-407, 2005.

[6] K.M. Silva, B.A. Souza and N.S.D. Brito, "Fault Detection and Classification in Transmission Lines based on Wavelet Transform and ANN," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21(4), pp. 2058-2063, 2006.

[7] Z. He, L. Fu, S. Lin and Z. Bo, "Fault Detection and Classification in EHV Transmission Line based on Wavelet singular entropy," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 25(4), 2010.

[8] J. Liang, S. Elangovan and J. B. X. Devotta, "A Wavelet Multiresolution Analysis Approach to Fault Detection and Classification in Transmission Lines," Electrical Power and Energy Systems, vol. 20(5), pp. 327-332, 1998.

[9] A. G. Shaik and R. R. V. Pulipaka, "A New Wavelet-based Fault Detection, Classification and Location in Transmission Lines," Electrical Power and Energy Systems, vol. 64, pp. 35-40, 2015.

[10] A. Ukil and R. Zivanovic, "Adjusted Haar Wavelet for Application in the Power Systems Disturbance Analysis," Digital Signal Processing, vol. 18, pp. 103-115, 2008.

[11] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C.Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert spectrum for Nonlinear and Non-steady Time Series Analysis," Proc. R.Soc. London, Ser. A vol. 454, pp. 903-995, 1998.

[12] E. Elbouchiki, V. Choqueuse, Y. Amirat, M.E.H. Benbouzid and S. Turri, "An Efficient Hilbert-Huang Transform-Based Bearing Fault Detection in Induction Machines," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32(2), 2017.

[13] S. Sun, Z. Jiang, H. Wang and Y. Fang, "Automatic Moment Segmentation and Peak Detection Analysis of Heart Pattern via Short-time Modified Hilbert Transform," Computer Methods and Programs in Biomedicine, vol. 114, pp. 219-230, 2014.

[14] R. Yan and R. Gao, "Hilbert-Huang Transform-based Vibration Signal Analysis for Machine Health Monitoring," IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 55, pp. 2320-2329, 2006.

[15] Z. K. Peng, Peter W. Tse and F.L.Chu, "A Comparison Study of Improved Hilbert-Huang Transform and Wavelet Transform: Application to Fault Diagnosis for Rolling Bearing," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 19, pp. 974-988, 2005.

- [16] N. C. F. Tse, John Y. C. Chan, W.H. Lau and L. L. Lai, "Hybrid Wavelet and Hilbert Transform with Frequency-shifting Decomposition for Power Quality Analysis," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 61(12), 2012.
- [17] Y. Kopsinis, S. McLaughlin, "Development of EMD-based Denoising Methods Inspired by Wavelet Thresholding," *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 57(4), pp. 1351-1362, 2009.
- [18] M. Manjula, S. Mishra and A.V.R.S. Sarma, "Empirical Mode Decomposition with Hilbert Transform for Classification of Voltage sag causes using Probabilistic Neural Network," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, pp. 597-603, 2013.
- [19] N. E. Huang and S. S. P. Shen, "Hilbert Huang Transform and Its Applications: 2nd Edition," World Scientific Publishing Company, 2014.
- [20] N. E. Huang and N. O. Attoh-Okine, "The Hilbert-Huang Transform in Engineering," CRC Press, 2005.
- [21] C.K. Chui, "Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications," Academic Press, New York, 1992.
- [22] Y. Meyer and L. Ondelettes, "Wavelets: Algorithms and Applications," Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1993.
- [23] Z. Peng, F. Chu, Y. He, "Vibration Signal Analysis and Feature Extraction based on Reassigned Wavelet Scalogram," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 253, pp. 1087-1100, 2002.
- [24] G. Strang and T. Nguyen, "Wavelets and Filter Banks," Wellesley-Cambridge Press, 1996.
- [25] S. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intelligence*, vol. 11(7), pp. 674-693, 1989.
- [26] A. Ukil and R. Zivanovic, "Automatic signal segmentation based on abrupt change detection for power systems applications," in the 2nd International Symposium on Communication, Control and Signal Processing ISCCSP. Marrakech, Marocco, 2006.
- [27] D. L. Donoho and I. M. Johnstone, "Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage," *Biometrika*, vol. 81(3), pp. 425-455, 1994.
- [28] PSCAD/EMTDC User's Manual, Manitoba HVDC Research Center, Winnipeg MB, Canada, 2002.