

Estimasi Lokasi Gangguan Hubung Singkat pada Saluran Transmisi Tenaga Listrik

(Short Circuit Fault Location Estimation on Power Transmission Lines)

RAMADONI SYAHPUTRA

ABSTRACT

In this paper, a method for short circuit fault location estimation which uses data from both ends of overhead transmission line and which does not require the data to be synchronized is described. The method fully utilizes the advantages of digital technology and numerical relaying which are available today and can easily be applied for off-line analysis. The described scheme does not require real-time communications, only off-line post-fault analysis. The method allows for accurate estimation of fault location irrespective of fault types, fault resistance, load currents, and source impedances. The simulation for single line to ground fault and symmetrical three phase fault with the variation of fault resistance of 0 ohm, 10 ohms, 30 ohms, 50 ohms, 70 ohms, and 100 ohms, respectively. The simulation has been done by using Matlab software. The simulation results of estimation error are 0.296% for single line to ground fault and 0.112% for symmetrical three phase fault, respectively. The results have shown that the method can accurately estimate the location of short circuit fault on power transmission lines.

Keywords: Two terminal fault location algorithm, transmission line, unsynchronized sampling, fault analysis.

PENDAHULUAN

Gangguan hubung singkat sering terjadi pada saluran transmisi udara. Jika gangguan terjadi, maka harus diusahakan untuk memulihkan daya secepat mungkin. Pemulihan pelayanan yang cepat akan mengurangi keluhan pelanggan, waktu berhenti sistem (outage time), kerugian pendapatan, dan ongkos perbaikan. Faktor-faktor itu semakin penting bagi perusahaan penyedia energi listrik menghadapi tantangan pasar saat ini. Guna membantu dalam pemulihan pelayanan secara cepat dan efisien, perlu dikembangkan algoritma untuk memberikan estimasi lokasi gangguan secara akurat.

Penentuan lokasi gangguan hubung singkat pada saluran transmisi tenaga listrik umumnya berdasarkan metode yang menggunakan hasil pengukuran arus dan tegangan frekuensi sistem pada terminal yang terhubung dengan saluran transmisi yang mengalami gangguan. Algoritma lokasi gangguan telah dikembangkan pada bermacam prinsip informasi yang digunakan dalam gardu induk.

Algoritma yang memanfaatkan data lokal itu telah diimplementasikan dalam piranti tersendiri, dan tergabung dalam rele numerik. Beberapa algoritma penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi telah dipublikasikan menggunakan bermacam metode (Izykowski et al., 2007). Metode-metode tersebut dapat dibedakan atas dua jenis, yaitu metode Lokasi Gangguan Satu Terminal (OTFLA) dan metode Lokasi Gangguan Dua Terminal (TTFLA). Walaupun algoritma satu-terminal bermanfaat memberikan hasil yang akurat, beberapa kesalahan (*errors*) tetap ada disebabkan asumsi yang dibutuhkan dalam algoritma itu. Nilai impedans sumber dibutuhkan jika kesalahan yang dibuat oleh resistans gangguan menjadi sepenuhnya dikompensasi (Eriksson et al., 1985; Sachdev dan Agarwal, 1988). Untuk menghindari pengaruh nilai untuk impedans sumber, beberapa asumsi perlu digunakan, yang membawa kepada solusi aproksimasi. Kecuali bila asumsi itu benar untuk sistem tertentu, algoritma itu mungkin mempunyai kesalahan yang besar dalam perhitungan lokasi gangguan (Girgis et al., 1992).

Sebuah pendekatan untuk mempertimbangkan penggunaan data dari kedua ujung saluran transmisi dan beberapa teknik lokasi gangguan dua-terminal telah diusulkan oleh peneliti terdahulu (Kezunovic et al., 1994; Novosel et al., 1996; Syahputra, 2010; Syahputra, 2013). Sebuah makalah telah disajikan menggunakan estimasi fasor pra-gangguan untuk algoritma lokasi gangguan dua-terminal (Djuric et al., 1998). Fasor pra-gangguan dibandingkan untuk menentukan kesalahan sinkronisasi kedua ujung. Dengan menggunakan kesalahan sinkronisasi, lokasi gangguan dihitung secara langsung. Pendekatan ini memerlukan pengguna untuk secara manual menentukan data pra-gangguan, menghitung kesalahan sinkronisasi, dan kemudian menghitung lokasi gangguan. Pendekatan ini juga tidak dapat dipakai untuk gangguan tanpa beban pra-gangguan, misalnya penutupan kembali ke dalam gangguan. Pendekatan lain memanfaatkan fasor pasca-gangguan dalam penyelesaian untuk lokasi gangguan (Brahma, 2005). Persamaan jatuh tegangan diselesaikan menggunakan koordinat kartesian, menghasilkan persamaan kuadrat untuk kesalahan sinkronisasi yang tidak diketahui. Setelah menggunakan persamaan kuadrat untuk menyelesaikan kesalahan sinkronisasi, lokasi gangguan dapat diestimasi. Akan tetapi, tipe gangguan dibutuhkan untuk menghitung lokasi gangguan. Hal ini dapat mengakibatkan kesalahan dalam klasifikasi tipe gangguan disebabkan berkembangnya gangguan. Penggunaan fasor yang disinkronkan dan yang tidak disinkronkan telah dikemukakan dalam acuan (Novosel et al., 1996). Algoritma itu memodelkan saluran menggunakan matriks impedans tiga fasa dan juga kesalahan sinkronisasi. Lokasi gangguan yang tidak diketahui dan kesalahan sinkronisasi diperoleh dalam bentuk matriks, dan persamaan diselesaikan menggunakan teknik akar terkecil (akar terkecil non-linear jika kesalahan sinkronisasi dimasukkan). Sebuah teknik yang menggunakan fasor disinkronkan disajikan dalam acuan (Syahputra, 2010). Dalam acuan itu pengukuran yang disinkronkan untuk menyelesaikan lokasi gangguan menggunakan teknik kawasan waktu. Algoritma ini tidak tergantung pada tipe gangguan, tetapi penulisnya menyatakan metode ini dipengaruhi oleh interval pencuplikan dan metode numerik yang dipilih. Dalam perkembangannya, metode estimasi lokasi gangguan hubung singkat pada saluran transmisi juga

mengadopsi metode berbasis kecerdasan buatan, seperti yang dilakukan oleh Syahputra (2013). Aplikasi algoritma berbasis kecerdasan buatan telah banyak membantu dalam bidang sistem tenaga listrik (Syahputra, 2012; Syahputra et al., 2012; Syahputra et al., 2014a; Syahputra et al., 2014b)

Dalam metode yang diusulkan pada penelitian ini, tidak dibutuhkan komunikasi secara *real-time*. Ketika dibutuhkan data yang ditunjukkan dengan akurat, seluruh analisis dapat dikerjakan secara off-line.

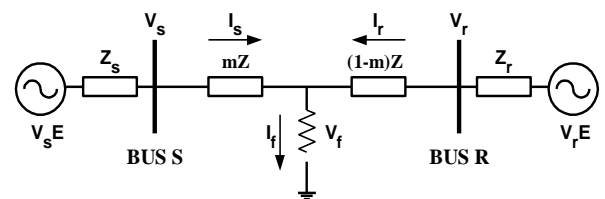
FUNDAMENTAL

Algoritma Hubung Singkat

Analisis hubung singkat dapat diselesaikan dengan metode impedans bus melalui inversi matriks admitans bus. Parameter yang digunakan diantaranya impedans saluran transmisi, kapasitans shunt saluran, impedans sumber, resistans gangguan, dan beban yang dianggap sebagai impedans konstan (Saadat, 1999).

Algoritma Lokasi Gangguan

Algoritma lokasi gangguan yang disajikan menggunakan pendekatan dua terminal untuk sistem yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Kapasitans shunt akan diabaikan untuk awal diskusi.



GAMBAR 1. Saluran transmisi yang mengalami gangguan hubung singkat

Metode ini memperkirakan lokasi gangguan 'm' pada saluran transmisi. Fasor tegangan dan arus dari dua terminal saluran yang diproteksi dibutuhkan dalam metode ini, tetapi tidak disinkronkan.

Tegangan pada lokasi gangguan V_f dapat ditentukan melalui rumusan sebagai berikut:

$$V_f = V_s - mZ \times I_s \quad (1)$$

$$V_f = V_r - (1-m)Z \times I_r \quad (2)$$

dengan Z adalah impedans saluran, V_s dan I_s masing-masing adalah tegangan dan arus pada

sisi pengirim, V_r dan I_r masing-masing adalah tegangan dan arus pada sisi penerima. Dengan menguraikan persamaan (1) dan (2) dan disusun kembali persamaan, maka:

$$V_s - V_r + Z \times I_r = m \times Z \times (I_s + I_r) \quad (3)$$

Pengukuran pada bus S dan R tidak disinkronkan dan sinkronisasi sudut antar fasor yang berhubungan adalah δ . Sebagai contoh, tegangan pada S dan R yang akan memenuhi persamaan (3) dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_s = V_s \langle \alpha_m + \delta \rangle; \quad V_r = V_r \langle \beta_m \rangle \quad (4)$$

dengan α_m dan β_m adalah sudut terukur. Maka, δ adalah sudut yang diperlukan untuk menyinkronkan fasor pada bus S terhadap fasor pada bus R. Persamaan yang sama dapat ditulis untuk arus. Maka persamaan (3) menjadi:

$$V_s \times e^{j\delta} - V_r + Z \times I_r = mZ (I_s \times e^{j\delta} + I_r) \quad (5)$$

Komponen yang tidak diketahui pada persamaan (5) adalah lokasi gangguan m dan nilai kompleks $\delta = e^{j\delta}$. Persamaan (5) dapat dipisahkan menjadi bagian riil dan imajiner untuk membentuk dua persamaan. Pada mulanya impedans saluran dinyatakan sebagai $Z = R + jX$. Tetapi jika sudut tidak diketahui, dinyatakan dalam bentuk polar: $\delta = \cos\delta + j \sin\delta$. Komponen riil dan imajiner dari persamaan itu dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(V_s)\sin\delta + \operatorname{Im}(V_s)\cos\delta - \operatorname{Im}(V_r) + C_4 \\ = m(C_1 \sin\delta + C_2 \cos\delta + C_4) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(V_s)\cos\delta - \operatorname{Im}(V_s)\sin\delta - \operatorname{Re}(V_r) + C_3 \\ = m(C_1 \cos\delta - C_2 \sin\delta + C_3) \end{aligned} \quad (7)$$

Koefisien C_1 , C_2 , C_3 , dan C_4 pada persamaan (6) dan (7) didefinisikan sebagai:

$$C_1 = R \times \operatorname{Re}(I_s) - X \times \operatorname{Im}(I_s) \quad (8)$$

$$C_2 = R \times \operatorname{Im}(I_s) + X \times \operatorname{Re}(I_s) \quad (9)$$

$$C_3 = R \times \operatorname{Re}(I_r) - X \times \operatorname{Im}(I_r) \quad (10)$$

$$C_4 = R \times \operatorname{Im}(I_r) + X \times \operatorname{Re}(I_r) \quad (11)$$

Langkah berikutnya membagi persamaan (6) dengan persamaan (7) untuk membentuk persamaan dengan sudut δ yang tidak diketahui. Setelah disusun kembali persamaan

ini dan membatalkan beberapa bagiannya, maka dihasilkan persamaan:

$$a \sin \delta + b \cos \delta + c = 0 \quad (12)$$

dengan,

$$\begin{aligned} a = -C_3 \operatorname{Re}(V_s) - C_4 \operatorname{Im}(V_s) - C_1 \operatorname{Re}(V_r) \\ - C_2 \operatorname{Im}(V_r) + C_1 C_3 + C_2 C_4 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} b = C_4 \operatorname{Re}(V_s) - C_3 \operatorname{Im}(V_s) - C_2 \operatorname{Re}(V_r) \\ + C_1 \operatorname{Im}(V_r) + C_2 C_3 - C_1 C_4 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} c = C_2 \operatorname{Re}(V_s) - C_1 \operatorname{Im}(V_s) - C_4 \operatorname{Re}(V_r) \\ + C_3 \operatorname{Im}(V_r) \end{aligned} \quad (15)$$

Persamaan (12) mempunyai sudut δ yang tidak diketahui (sudut sinkronisasi) dan dapat diselesaikan dengan metode Newton Raphson iteratif. Persamaan untuk perhitungan iteratif dari sudut δ (radian) adalah:

$$\delta_{k+1} = \delta_k - \frac{F(\delta_k)}{F'(\delta_k)} \quad (16)$$

$$F(\delta_k) = b \cos \delta_k + a \sin \delta_k + c \quad (17)$$

$$F'(\delta_k) = -a \cos \delta_k - b \sin \delta_k \quad (18)$$

Prosedur iteratif berhenti pada saat perbedaan antara 2 perhitungan terakhir lebih kecil dari batas yang ditetapkan sebelumnya, misalnya $\delta_{k+1} - \delta_k < 10^{-4}$. Metode ini mempunyai konvergensi kuadrat dan diperlukan taksiran awal, tetapi hal ini tidak dipertimbangkan dalam masalah praktis. Jika sudut tegangan dari kedua ujung ditetapkan nol, sudut δ menjadi sudut semu antar tegangan dan tidak tergantung kepada kesalahan sinkronisasi. Dalam prakteknya, sudut ini berada dalam sebuah kekangan terbatas sekitar nol. Jadi dengan membuat sudut awal sama dengan nol, sudut sinkronisasi dapat ditemukan dengan cepat. Setelah sudut sinkronisasi diketahui, lokasi gangguan dapat dihitung dari persamaan (6) atau (7). Berdasarkan persamaan (6):

$$m = \frac{\operatorname{Re}(V_s)\sin\delta + \operatorname{Im}(V_s)\cos\delta - \operatorname{Im}(V_r) + C_4}{C_1 \sin\delta + C_2 \cos\delta + C_4} \quad (19)$$

Jika persamaan (7) digunakan, m dapat dihitung melalui persamaan:

$$m = \frac{\operatorname{Re}(V_s)\cos\delta - \operatorname{Im}(V_s)\sin\delta - \operatorname{Re}(V_r) + C_3}{C_1 \cos\delta - C_2 \sin\delta + C_3} \quad (20)$$

Persamaan di atas dapat digunakan untuk seluruh tipe gangguan shunt dan dapat

diterapkan untuk kasus multi-fasa. Jumlah fasa yang bersesuaian dapat digunakan. Sebagai contoh dalam kasus gangguan fasa A ke tanah, tegangan dan arus fasa A pada kedua terminal dapat digunakan dalam persamaan itu. Akan tetapi arus gangguan perlu dikompensasi dengan arus urutan nol, yang akan memunculkan pengaruh urutan nol yang tidak diinginkan (impedans urutan nol tidak diketahui dengan akurat dan kopling bersama dari saluran paralel akan mempengaruhi keakuratan). Selanjutnya dibutuhkan seleksi tipe gangguan. Jadi, pendekatan ini tidak dianjurkan. Dengan menggunakan tegangan urutan positif, negatif, atau nol, persamaan (8) sampai (11) dan (13) sampai (15) dapat dituliskan sebagai:

$$(C1)_i = R_i \times \text{Re}(I_s)_i - X_i \times \text{Im}(I_s)_i \quad (21)$$

$$(C2)_i = R_i \times \text{Im}(I_s)_i + X_i \times \text{Re}(I_s)_i \quad (22)$$

$$(C3)_i = R_i \times \text{Re}(I_r)_i - X_i \times \text{Im}(I_r)_i \quad (23)$$

$$(C4)_i = R_i \times \text{Im}(I_r)_i + X_i \times \text{Re}(I_r)_i \quad (24)$$

$$a_i = -(C3)_i \text{Re}(V_s)_i - (C4)_i \text{Im}(V_s)_i - (C1)_i \text{Re}(V_r)_i - (C2)_i \text{Im}(V_r)_i + (C1)_i (C3)_i + (C2)_i (C4)_i \quad (25)$$

$$b_i = (C4)_i \text{Re}(V_s)_i - (C3)_i \text{Im}(V_s)_i - (C2)_i \text{Re}(V_r)_i + (C1)_i \text{Im}(V_r)_i + (C2)_i (C3)_i - (C1)_i (C4)_i \quad (26)$$

$$c_i = (C2)_i \text{Re}(V_s)_i - (C1)_i \text{Im}(V_s)_i - (C4)_i \text{Re}(V_r)_i + (C3)_i \text{Im}(V_r)_i \quad (27)$$

Lokasi gangguan m dapat ditentukan melalui:

$$m = \frac{\text{Re}(V_s)_i \sin \delta + \text{Im}(V_s)_i \cos \delta - \text{Im}(V_r)_i + (C4)_i}{(C1)_i \sin \delta + (C2)_i \cos \delta + (C4)_i} \quad (28)$$

dengan $i = 0,1,2$. Guna menghindarkan pengaruh urutan nol dan ketidakpastian dalam parameter urutan nol, perhitungan urutan nol tidak disarankan. Jika tegangan dan arus urutan positif digunakan, seleksi tipe gangguan tidak dibutuhkan. Tegangan dan arus urutan negatif dapat digunakan untuk seluruh gangguan tidak seimbang. Untuk gangguan tiga fasa seimbang hanya nilai urutan positif yang dapat digunakan. Masalah sensitifitas lebih kecil untuk besaran urutan negatif (beban urutan negatif seringkali diabaikan untuk saluran transmisi) dan penggunaan besaran itu diinginkan untuk seluruh gangguan tak seimbang. Tetapi pendekatan ini membutuhkan deteksi tipe gangguan tiga fasa. Kesimpulannya, untuk menghindarkan deteksi tipe gangguan, implementasi besaran urutan

positif (dapat dipakai untuk seluruh tipe gangguan) mungkin pilihan yang lebih disukai.

Pengaruh Kapasitans Shunt Saluran

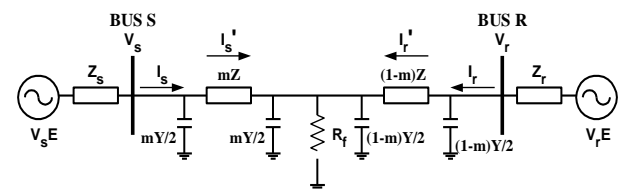
Jika algoritma lokasi gangguan tidak mengkompensasi untuk admitans shunt, kesalahan dapat muncul untuk saluran yang lebih panjang pada tingkat tegangan yang lebih tinggi. Kompensasi dilakukan dengan cara mengganti arus terukur pada terminal S dan R yaitu I_s dan I_r dengan arus I_s' dan I_r' seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Kapasitans shunt yang paralel dengan resistans gangguan dikompensasi oleh algoritma dan tidak mempengaruhi keakuratan (Sachdev et al., 1999).

Untuk aplikasi saluran panjang, model saluran terdistribusi dapat juga digunakan. Model saluran pi mungkin sesuai untuk model ABCD terdistribusi melalui persamaan berikut untuk impedans seri (29) dan admitans shunt (30),

$$Z_{ld} = Z_l \frac{\sinh(v \times l \times m)}{v \times l \times m} \quad (29)$$

$$\frac{Y_d}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\tanh \frac{v \times l \times m}{2}}{\frac{v \times l \times m}{2}} \quad (30)$$

dengan, $v = \sqrt{zy}$ adalah konstanta propagasi; $l = x/m$ adalah panjang saluran; z adalah impedans seri dalam ohm per mil; dan y adalah admitans shunt dalam mho per km. Persamaan (29) dan (30) dapat digunakan untuk model pi pada kedua sisi dari gangguan seperti dalam Gambar 2 agar model parameter terdistribusinya benar.



GAMBAR 2. Diagram satu garis sistem yang terganggu dengan kapasitans shunt

Koefisien $C1$, $C2$, $C3$, dan $C4$ dihitung sebagaimana sebelumnya, kemudian estimasi baru lokasi gangguan m diperoleh. Sebuah nilai awal lokasi gangguan m perlu diestimasi menggunakan algoritma tanpa kompensasi.

Estimasi itu dapat secara kontinu diperbaharui menggunakan sebuah prosedur iteratif, sampai perbedaan antara dua estimasi terakhir lebih kecil dari batas yang ditetapkan sebelumnya, misalnya $m_{k+1} - m_k < 10^{-3}$. Kemudian perhitungan error lokasi gangguan didasarkan pada persamaan:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{lokasi aktual} - \text{lokasi hasil estimasi}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\% \quad (31)$$

Analisis gangguan

Algoritma dua-terminal mengestimasi lokasi gangguan tanpa mengklasifikasi tipe gangguan, sehingga pengguna dapat menentukan tipe gangguan dari analisis dua-terminal. Setelah kesalahan sinkronisasi dan jarak gangguan ditentukan, maka perhitungan untuk menentukan parameter gangguan pada lokasi gangguan dapat dilakukan guna analisis gangguan. Tujuannya untuk menggunakan sudut sinkronisasi δ dalam menempatkan fasor pada acuan waktu yang lazim. Untuk model saluran pi dan menggunakan jaringan urutan, tegangan dan arus dari bus S dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$(V_{fs})_i = 1 + m^2 Z_{li} \frac{Y_i}{2} V_{si} [mZ_{li}] I_{si} \quad (32)$$

$$(I_{fs})_i = I_{si} - mV_{si} \frac{Y_i}{2} - m \frac{Y_i}{2} (V_{fs})_i \quad (33)$$

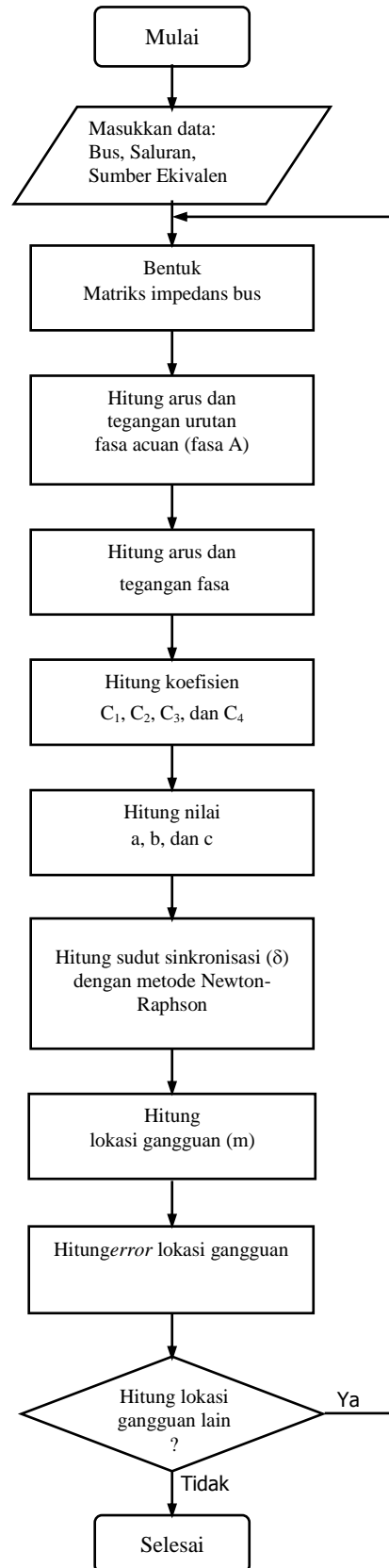
dengan $i = 0,1,2$. Arus dari bus R dapat ditentukan sebagai berikut:

$$(I_{fr})_i = I_{ri} - (1 - m)V_{ri} \frac{Y_i}{2} - (1 - m) \frac{Y_i}{2} (V_{fs})_i \quad (34)$$

Arus total pada lokasi gangguan dapat diperoleh dengan menambahkan sumbangan sinkronisasi dari masing-masing ujung. Tegangan pada lokasi gangguan dapat ditentukan secara langsung dari salah satu ujung, tetapi ujung terdekat akan memberikan hasil yang lebih baik.

METODOLOGI

Pelaksanaan penelitian ini sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3. Dalam penelitian ini dilakukan uji estimasi lokasi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dan gangguan hubung singkat tiga fasa simetris.



GAMBAR 3. Diagram alir estimasi lokasi gangguan hubung singkat pascasaluran transmisi tenaga listrik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data-data saluran transmisi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari data yang digunakan oleh Sachdev dan Agarwal (1988). Saluran transmisi 150 km, 500 kV dengan parameter saluran yang terdiri dari impedans saluran $Z_1=Z_2=53,090\angle 86,07^\circ$ ohm, $Z_0=173,683\angle 72,96^\circ$ ohm dan admitans saluran $Y_1=Y_2=42,628\angle 90^\circ$ mho dan $Y_0=33,423\angle 90^\circ$ mho. Saluran transmisi disuplai oleh dua sumber ekivalen dengan nilai impedansnya $Z_{s1}=4,001\angle 89,03^\circ$ ohm, $Z_{s2}=3,501\angle 88,90^\circ$ ohm, $Z_{s0}=1,414\angle 45^\circ$ ohm, dan $Z_{r1}=100,020\angle 88,85^\circ$ ohm, $Z_{r2}=75,027\angle 88,47^\circ$ ohm, $Z_{r0}=25,072\angle 85,65^\circ$ ohm.

Estimasi Lokasi Gangguan Hubung Singkat Satu Fase ke Tanah

Hasil penelitian untuk gangguan hubung singkat fase ke tanah disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 4. Tabel 1 menunjukkan hasil estimasi lokasi gangguan untuk gangguan satu

fase ke tanah dengan variasi resistans gangguan 0 ohm, 10 ohm, 30 ohm, 50 ohm, 70 ohm, dan 100 ohm.

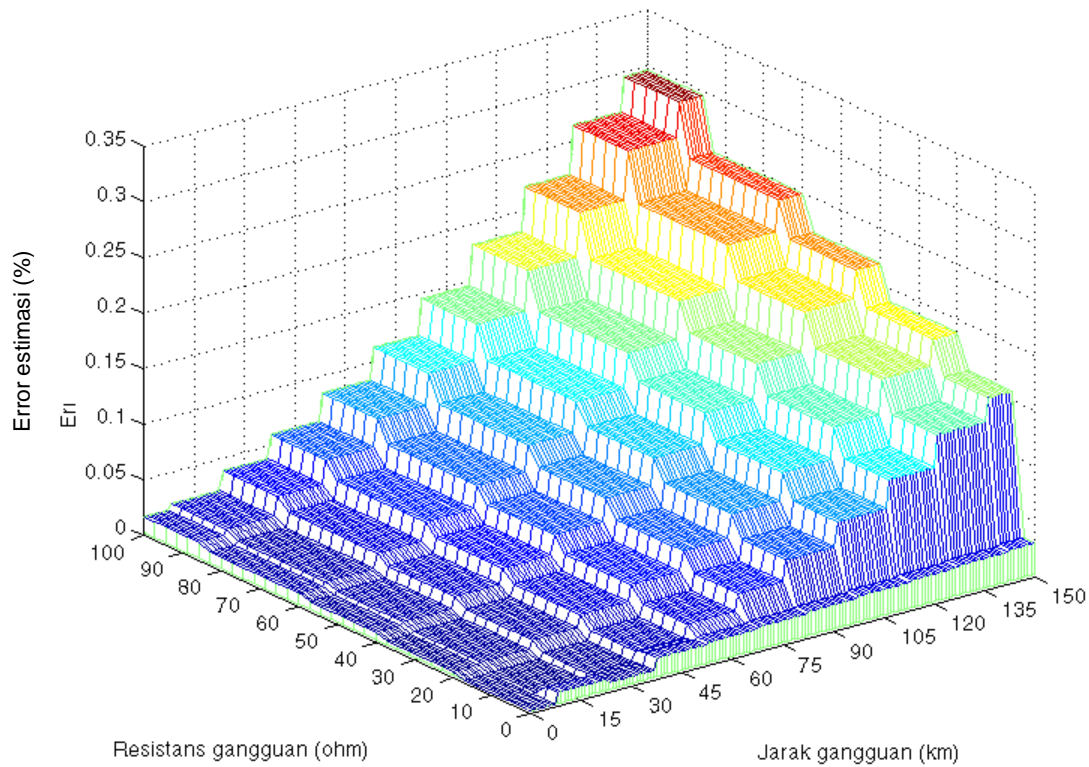
Dari data hasil penelitian pada Tabel 1 dapat dibuat grafik 3 dimensi yang menampilkan grafik error estimasi lokasi gangguan sebagai fungsi dari jarak gangguan dan resistans gangguan seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.

Grafik pada Gambar 4 menunjukkan fluktuasi error estimasi lokasi gangguan terhadap jarak gangguan untuk jenis gangguan satu fase ke tanah menggunakan metode lokasi gangguan tanpa memperhatikan jenis gangguan dengan variasi resistans gangguan 0 ohm, 10 ohm, 30 ohm, 50 ohm, 70 ohm, dan 100 ohm. Error terkecil yang didapat pada penelitian ini yaitu sebesar 0,0027183 % pada gangguan dengan resistans gangguan 0 ohm pada jarak 0 km, sedang error terbesar diperoleh pada gangguan dengan resistans gangguan 100 ohm pada jarak 150 km yaitu sebesar 0,2962510 %.

TABEL 1. Estimasi lokasi gangguan untuk gangguan satu fase ke tanah

Jarak Sebenarnya (km)	Error hasil estimasi (%)					
	untuk $R_f = 0$ ohm	untuk $R_f = 10$ ohm	untuk $R_f = 30$ ohm	untuk $R_f = 50$ ohm	untuk $R_f = 70$ ohm	untuk $R_f = 100$ ohm
0	0,0027183	0,0024771	0,0059877	0,0093352	0,0125356	0,0170958
15	0,0125956	0,0033028	0,0076911	0,0119279	0,0160275	0,0219511
30	0,0090500	0,0080960	0,0151580	0,0221115	0,0289671	0,0390903
45	0,0195715	0,0163435	0,0261390	0,0358773	0,0455664	0,0600260
60	0,0211366	0,0280220	0,0406132	0,0532048	0,0658031	0,0847273
75	0,0227297	0,0431110	0,0585645	0,0740820	0,0896686	0,1131887
90	0,0243211	0,0615933	0,0799810	0,0985028	0,1171625	0,1454183
105	0,0258992	0,0834552	0,1048555	0,1264669	0,1482919	0,1814347
120	0,0274970	0,1086872	0,1331862	0,1579806	0,1830718	0,2212671
135	0,0291193	0,1372857	0,1649777	0,1930578	0,2215261	0,2649561
150	0,0307341	0,1582224	0,1881003	0,2184332	0,2492204	0,2962510

Grafik Error Estimasi Sebagai Fungsi dari Jarak Gangguan dan Resistans Gangguan



GAMBAR 4. Grafik *error* estimasi lokasi gangguan sebagai fungsi dari jarak gangguan dan resistans gangguan untuk gangguan satu fase ke tanah.

Jika dibandingkan dengan hasil estimasi yang dilakukan oleh Sachdev dan Agarwal (1988), maka hasil estimasi dalam penelitian ini mempunyai ketelitian yang lebih baik. Terlihat bahwa error estimasi yang dihasilkan oleh Sachdev dan Agarwal lebih besar dari yang dihasilkan dalam penelitian ini. Perlu diperhatikan juga bahwa Sachdev dan Agarwal mengestimasi jarak gangguan dengan resistans gangguan sebesar 10 ohm, dengan kecenderungan semakin besar resistans gangguan maka akan memperbesar error estimasi. Sedang dalam penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan resistans gangguan dari 0 ohm sampai 100 ohm, dengan error terbesarnya pada jarak gangguan 150 km pada simulasi dengan resistans gangguan 100 ohm yaitu sebesar 0,2962510 %. Hasil ini masih lebih kecil jika dibandingkan dengan error terbesar yang dihasilkan oleh Sachdev dan Agarwal yaitu 1,14 % pada jarak 135 km.

Estimasi Lokasi Gangguan Hubung Singkat Tiga Fase Simetris

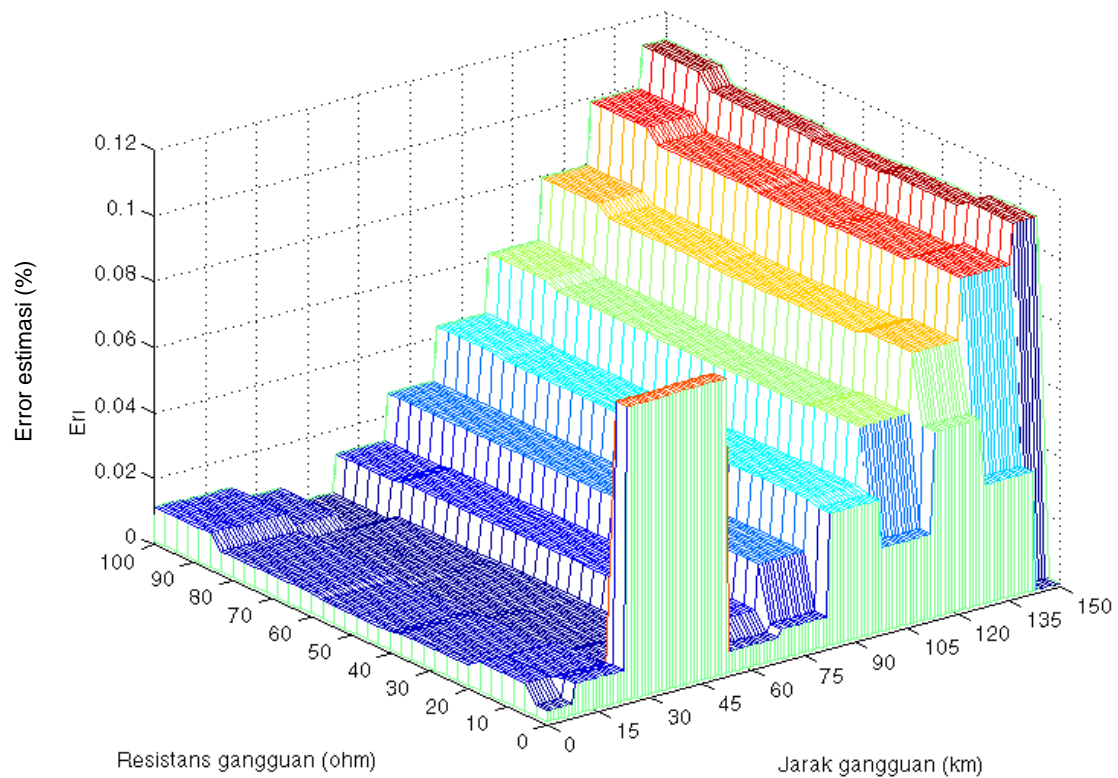
Hasil penelitian untuk gangguan hubung singkat tiga fase simetris disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 5. Tabel 2 menunjukkan hasil estimasi lokasi gangguan untuk gangguan hubung singkat tiga fase simetris dengan variasi resistans gangguan 0 ohm, 10 ohm, 30 ohm, 50 ohm, 70 ohm, dan 100 ohm.

Berdasarkan data hasil penelitian dari tabel 2 dapat dibuat grafik 3 dimensi yang menunjukkan hubungan antara jarak gangguan dan resistans gangguan terhadap error hasil estimasi lokasi gangguan, yaitu pada Gambar 5.

TABEL 2. Estimasi lokasi gangguan untuk gangguan tiga fasa simetris

Jarak Sebenarnya (km)	Error hasil estimasi (%)					
	untuk $R_f = 0 \text{ ohm}$	untuk $R_f = 10 \text{ ohm}$	untuk $R_f = 30 \text{ ohm}$	untuk $R_f = 50 \text{ ohm}$	untuk $R_f = 70 \text{ ohm}$	untuk $R_f = 100 \text{ ohm}$
0	0,0045339	0,0097932	0,0073832	0,0065761	0,0073692	0,0115446
15	0,0105090	0,0095008	0,0072804	0,0065375	0,0072696	0,0111201
30	0,0905016	0,0056904	0,0040304	0,0034752	0,0040228	0,0069021
45	0,0909294	0,0020423	0,0031525	0,0035264	0,0031652	0,0012518
60	0,0076920	0,0130904	0,0136595	0,0138570	0,0136835	0,0127311
75	0,0101045	0,0268544	0,0268890	0,0269138	0,0269286	0,0269325
90	0,0413744	0,0427413	0,0422460	0,0421003	0,0423035	0,0432592
105	0,0266615	0,0601627	0,0591403	0,0588251	0,0592160	0,0611195
120	0,0576173	0,0785344	0,0769857	0,0765008	0,0770780	0,0799255
135	0,0373711	0,0972748	0,0951986	0,0945426	0,0953042	0,0990920
150	0,0010761	0,1096868	0,1072574	0,1064858	0,1073690	0,1117819

Grafik Error Estimasi Sebagai Fungsi dari Jarak Gangguan dan Resistans Gangguan



GAMBAR 5. Grafik error estimasi lokasi gangguan sebagai fungsi dari jarak gangguan dan resistans gangguan untuk gangguan tiga fase simetris

Grafik pada Gambar 5 menunjukkan fluktuasi error estimasi lokasi gangguan terhadap jarak gangguan untuk jenis gangguan tiga fase simetris menggunakan metode lokasi gangguan tanpa memperhatikan jenis gangguan dengan variasi resistans gangguan 0 ohm, 10 ohm, 30 ohm, 50 ohm, 70 ohm, dan 100 ohm. Error terkecil yang didapat pada penelitian ini yaitu sebesar 0,0010761 % pada gangguan dengan resistans gangguan 0 ohm pada jarak 150 km, sedang error terbesar diperoleh pada gangguan dengan resistans gangguan 100 ohm pada jarak 150 km yaitu sebesar 0,1117819 %. Secara umum terlihat pada grafik tersebut bahwa semakin besar jarak gangguan yang disimulasikan maka error estimasinya semakin besar, dan peningkatan nilai resistans gangguan menyebabkan semakin besarnya error estimasi.

Berdasarkan data hasil penelitian dengan metode lokasi gangguan ini terlihat bahwa untuk kasus gangguan hubung singkat tiga fase simetris, jarak gangguan hasil estimasi yang diperoleh sudah mendekati nilai yang sebenarnya. Hal ini dapat dilihat dari besarnya error yang bernilai kurang dari 0,2 %, seperti yang terlihat pada Gambar 5, sehingga sehingga dapat dikatakan bahwa metode ini sangat akurat.

KESIMPULAN

Makalah ini menyajikan algoritma pendekatan dua-terminal untuk penentuan lokasi gangguan menggunakan fasor-fasor pasca-gangguan yang tidak disinkronkan. Error hasil estimasi terbesar yang dihasilkan untuk uji kasus gangguan satu fase ke tanah adalah gangguan dengan resistans gangguan 100 ohm pada jarak 150 km yaitu sebesar 0,296 %, sedangkan untuk uji kasus gangguan tiga fase simetris adalah gangguan dengan resistans gangguan 100 ohm pada jarak 150 km yaitu sebesar 0,112 %. Estimasi lokasi gangguan menggunakan metode lokasi gangguan dipengaruhi oleh nilai resistans gangguan, jarak gangguan, dan jenis gangguan, yaitu semakin besar nilai resistans gangguan akan memperbesar error estimasi dan semakin jauh jarak gangguan menyebabkan error estimasinya membesar.

DAFTAR PUSTAKA

- A.A. Girgis, Hart, D.G., Peterson, W.L., 1992, "A New Fault Location Technique for Two and Three Terminal Lines", *IEEE Trans. on PWRD*, 7(1), 98-107.
- Djuric, M.B., Radojevic, Z.M., Terzija, V.V., 1998, "Distance Protection and Fault Location Utilizing Only Fase Current Phasor", *IEEE Trans. on PWRD*, 13(4), 1020-1026.
- D. Novosel, Hart, D.G., Udren, E., Garitty, J., 1996, "Unsynchronized Two Terminal Fault Location Estimation", *IEEE Trans. on PWRD*, 11(1), 130-138.
- H. Saadat, 1999, "Power System Analysis", International ed., pp. 399-441, The McGraw-Hill Companies, Inc., Singapore.
- J. Izykowski, E. Rosolowski, M.M. Saha, M. Fulczyk and P. Balcerak, "A fault location method for application with current differential relays of three terminal lines", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp. 2099-2107, October 2007.
- L. Eriksson, Saha, M.M., Rockefeller, G.D., 1985, "An Accurate Fault Locator With Compensation for Apparent Reactance in The Fault Resistance Resulting from Remote-End Infeed", *IEEE Trans. on PAS*, 104(2), 424-435.
- M. Kezunovic, Mrkic, J., Perunicic, B., 1994, "An Accurate Fault Location Algorithm Using Synchronized Sampling", *Electric Power System Research*, 29, 161-169.
- M.S. Sachdev, Agarwal, R., 1988, "A Technique for Estimating Transmission Line Fault Locations from Digital Impedance Relay Measurements", *IEEE Trans. on PWRD*, 3(1), 121-129.
- R. Syahputra, 2010, "Fault Distance Estimation of Two-Terminal Transmission Lines", *Proceedings of International Conference of APTECS 2010*.
- R. Syahputra, 2012, "Fuzzy Multi-Objective Approach for the Improvement of Distribution Network Efficiency by Considering DG", *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)* Vol 4, No 2, pp. 57-68, April 2012.
- R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, 2012, "Reconfiguration of Distribution Network with DG Using Fuzzy Multi-objective

- Method”, *International Conference on Innovation, Management and Technology Research (ICIMTR)*, May 21-22, 2012, Melacca, Malaysia.
- R. Syahputra, 2013, “A Neuro-Fuzzy Approach for the Fault Location Estimation of Unsynchronized Two-Terminal Transmission Lines”, *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)* Vol 5, No 1, February 2013, pp. 23-37.
- R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, 2014a, “Optimization of Distribution Network Configuration with Integration of Distributed Energy Resources Using Extended Fuzzy Multi-objective Method”, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 9, no. 3, 2014. pp. 629-639.
- R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, 2014b, “Performance Analysis of Wind Turbine as a Distributed Generation Unit in Distribution System”, *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)* Vol 6, No 3, pp. 39-56, June 2014.
- Sachdev et al., 1999, “IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines”, *IEEE Std C37.113-1999*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York.
- S.M. Brahma, “Fault Location Scheme for a Multi-Terminal Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp. 1325–1331, April 2005.

PENULIS:

Ramadoni Syahputra, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Ringroad Barat Tamantirto, Kasihan, Yogyakarta 55183, INDONESIA.

E-mail: ramadoni@umy.ac.id