

# Diagnosis Gangguan pada Sistem Transmisi Daya Listrik menggunakan Metode Pengukuran untuk Area yang Luas

Herman Syaibi<sup>1)</sup>, Azriyenni Azhari Zakri<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro <sup>2)</sup>Dosen Program Studi Teknik Elektro  
Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik Universitas Riau  
Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam  
Pekanbaru 28293  
Email: [herman.syaibi22@gmail.com](mailto:herman.syaibi22@gmail.com)

## ABSTRACT

*This research has proposed a wide area measurement method used for the fault diagnosis of a short circuit in the electric power transmission system that combining the functions of a phasor measurement device. Phasor Measurement Unit (PMU) is a technology that makes Electric Power Systems has synchronous phasor measurement devices that are continuously updated of real-time. The PMU provides a measurement of the current phasor value and voltage phasor value to the control center. Therefore, in this study measurement method model is designed to measure the wide area to using PMU on the IEEE 9-Bus System by Matlab/Simulink R2016a. The short circuit simulation is operated with variation of location each transmission line in the IEEE 9-Bus System. The results of wide area measurement method using PMU produce a diagnosis of fault. The achieved results by determining the fault location point through diagnosis of fault location with calculation highest percentage error is 0,481208%.*

**Keywords:** fault diagnosis, PMU, short circuit, transmission line, wide area.

## I. PENDAHULUAN

Sistem Transmisi merupakan suatu bagian utama pada proses penyaluran energi listrik. Tanpa adanya saluran transmisi, penyaluran energi listrik tidak akan berjalan secara semestinya. Terjadinya gangguan pada saluran transmisi dapat menimbulkan terputusnya suplai energi listrik menuju beban sehingga mengakibatkan kerugian bagi konsumen. Oleh karena itu, perlunya peningkatan dalam melakukan diagnosis gangguan pada saluran transmisi untuk penyaluran tenaga listrik kepada konsumen, maka diperkenalkan metode pengukuran untuk area yang luas yang terkait tentang, pemantauan terhadap keadaan sistem dalam daerah geografis yang luas.

Gangguan yang sering terjadi pada saluran transmisi yaitu gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat yang terjadi dapat berupa asimetris dan simetris. Gangguan asimetris terdiri dari gangguan satu fasa ke tanah, fasa ke fasa dan dua fasa ke tanah. Sedangkan gangguan simetris yakni gangguan tiga fasa.

Sistem pengukuran untuk area yang luas digunakan untuk pemantauan, pengendalian, dan perlindungan dengan menggabungkan fungsi perangkat pengukuran fasor. *Phasor Measurement*

*Unit* (PMU) merupakan suatu teknologi yang menjadikan sistem tenaga listrik memiliki peralatan pengukur fasor yang sinkron dan diperbaharui secara terus menerus dan bersifat *real-time*. PMU merupakan bagian dari pengukuran nilai fasor yang memberikan pengukuran nilai fasor arus dan nilai fasor tegangan ke pusat kendali (Rihan, Ahmad and Beg, 2013).

R. A. Reyes dan J. L. Guardado, 2015 dalam penelitian ini, dilakukan pemodelan PMU menggunakan perangkat lunak ATP / EMPT untuk melakukan pemantauan sistem baik dalam keadaan normal maupun dalam keadaan terjadi gangguan dan mengamati keadaan sistem tenaga secara akurat, dimana keluaran dari PMU berupa nilai fasor arus dan nilai fasor tegangan. Pemodelan PMU menggunakan perangkat lunak ATP / EMPT ini dapat memberikan keadaan sistem secara terus menerus (Reyes and Guardado, 2015).

B. Malikarjuna dkk., 2016 telah melakukan optimaslisai penempatan PMU pada sistem tenaga listrik di negara India. Pentingnya sistem pengukuran nilai fasor menggunakan PMU untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan pemantauan. Menggunakan *Simulated Annealing* (SA) untuk optimalisasi penempatan PMU hasilnya penempatan PMU hanya dibutuhkan 25% dari total

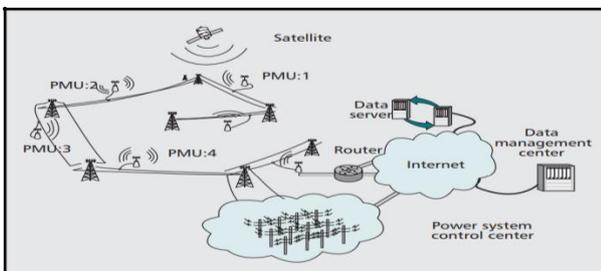
jumlah bus yang ada dalam sistem tenaga listrik di negara India (Mallikarjuna et al., 2016).

Selanjutnya Mohammed Mahdi, V. M., 2017 dalam penelitian ini mengusulkan tentang prediksi kestabilan sistem tenaga, menggunakan data dari keluaran PMU. Dilakukan pengamatan sistem pada saat sebelum terjadi gangguan, saat terjadi gangguan dan keadaan setelah terjadi gangguan, dan mengumpulkan data tegangan sebagai masukan dalam proses prediksi kestabilan sistem. Kestabilan sistem tenaga listrik dinyatakan dalam keadaan aman atau tidak aman ketika keadaan sebelum gangguan, saat terjadi gangguan, dan setelah terjadi gangguan menggunakan teknik cerdas Jaringan Saraf Tiruan (JST) untuk melakukan prediksi kestabilan sistem (Mohammed Mahdi, 2017).

Dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan pemodelan PMU, optimalisasi penempatan PMU pada sistem area yang luas, dan pemanfaatan data keluaran PMU untuk prediksi kestabilan sistem tenaga listrik. Maka penelitian ini akan melakukan pemodelan sistem tenaga listrik dengan penerapan metode pengukuran untuk area yang luas menggunakan PMU via Matlab/Simulink, kemudian dilakukan perhitungan diagnosis gangguan dalam menentukan lokasi gangguan hubung singkat pada saluran transmisi daya listrik memanfaatkan data keluaran dari PMU.

### Metode Pengukuran untuk Area yang Luas menggunakan PMU

Terdapat tiga fungsi utama yang terlibat dalam pengukuran untuk area yang luas. Ini adalah akuisisi data, transmisi data dan pengolahan data. Operasi ini dikelola oleh sistem pengukuran, sistem komunikasi dan manajemen sistem energi itu masing-masing (Qiu et al., 2012).



**Gambar 1.** Arsitektur pengukuran area yang luas menggunakan PMU (Qiu et al., 2012)

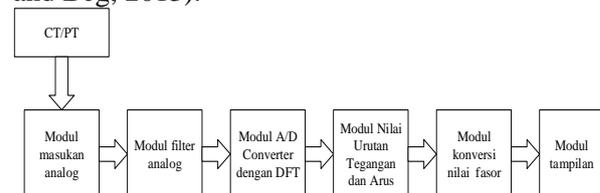
Pengukuran untuk area yang luas menggunakan PMU dapat didefinisikan sebagai sistem yang melakukan pengukuran di jaringan

listrik dengan tingkat akurasi yang tinggi, cakupan daerah lebih luas dan besar, dan lebih baik dari sistem pengukuran untuk pemantauan konvensional. Kemudian hasil pengukuran tersebut digunakan untuk meningkatkan kestabilan jaringan pada saat keadaan normal maupun untuk analisa lanjutan pada saat terjadi gangguan. Salah satu hal penting dari pengukuran untuk area yang luas adalah menggunakan pengukuran yang disinkronkan, tingkat pengambilan sampel yang tinggi (Bobba et al., 2011).

Sistem pemantauan yang *real time*, cepat, dan akurat di seluruh sistem merupakan hal yang paling penting dalam perkembangan sistem tenaga saat ini. PMU dapat digunakan dalam jaringan listrik untuk memenuhi tantangan tersebut. PMU adalah alat yang mengukur nilai magnitud dan sudut tegangan dan arus (Shahraeini and Javidi, 2012).

### Phasor Measurement Unit (PMU)

PMU merupakan suatu teknologi yang menjadikan sistem tenaga listrik memiliki peralatan pengukur fasor yang selaras dan diperbaharui secara terus menerus (*real-time*) (Dobackshari, 2013) PMU mampu mengukur fasor arus dan tegangan pada bus yang dipasang PMU. Hasil pengukuran diberikan secara terus menerus kemampuan tersebut menjadikan PMU sebagai peralatan yang dibutuhkan dalam sistem kelistrikan (Rihan, Ahmad and Beg, 2013).



**Gambar 2.** Blok diagram pemodelan PMU (Waqar et al., 2018)

PMU adalah perangkat berbasis mikroprosesor yang menggunakan kemampuan prosesor sinyal digital untuk mengukur 50 / 60 Hz bentuk gelombang AC tegangan dan arus. Untuk melakukan ini, pertama, bentuk gelombang AC analog disampel secara acak oleh *A/D converter* untuk setiap fasa. Untuk menyediakan waktu sinkron pada seluruh sistem maka, waktu dari satelit GPS digunakan sebagai input untuk *phase-lock oscillator* dan dengan demikian, bentuk gelombang dari seluruh sistem diambil sampelnya dengan akurasi 1 mikrodetik. Pada langkah selanjutnya, PMU menggunakan teknik proses pengolahan sinyal digital untuk menghitung fasor tegangan dan fasor arus di setiap bus. (EPG &

CERTS, 2006). Suatu gelombang *sinusoidal* dapat direpresentasikan dengan suatu bilangan kompleks yang bisa disebut sebagai fasor (Amrulloh, Wibowo and Anam, 2013).

### Perhitungan Lokasi Gangguan Menggunakan Data Hasil Keluaran PMU

Perhitungan diagnosis gangguan menggunakan data keluaran PMU dengan cara perhitungan *simple reactance*, impedansi dengan tinjauan satu terminal ini membandingkan impedansi saluran terukur ( $Z_{1L}$ ) dan impedansi yang dihitung ketika gangguan ( $V_s / I_s$ ) untuk menentukan lokasi gangguan. Dimana dengan asumsi bahwa nilai resistansi gangguan sama dengan nol. Keakuratan perhitungan *simple reactance* ini tergantung pada sudut  $I_s$  sama dengan  $I_f$ . Untuk menghitung lokasi gangguan didefinisikan (Zimmerman and David Costello, 2005)

$$V_s = m \cdot Z_{1L} \cdot I_s + R_f \cdot I_f \quad (1)$$

Untuk setiap jenis gangguan gangguan dapat diselesaikan dengan persamaan pada table 1 (Yin, 2010).

**Tabel 1.** Persamaan impedansi setiap jenis gangguan hubung singkat

Jenis Gangguan	Impedansi Urutan Positif ( $mZ_{1L}$ )
A-G	$V_a / (I_a + 3kI_0)$
B-G	$V_b / (I_b + 3kI_0)$
C-G	$V_c / (I_c + 3kI_0)$
A-B dan A-B-G	$V_{ab} / I_{ab}$
B-C dan B-C-G	$V_{bc} / I_{bc}$
C-A dan C-A-G	$V_{ca} / I_{ca}$
A-B-C	$V_{ab} / I_{ab}$ atau $V_{bc} / I_{bc}$ atau $V_{ca} / I_{ca}$

$$k \left| \frac{Z_0 - Z_1}{3 \cdot Z_1} \right| \quad (2)$$

Hal ini bertujuan untuk meminimalisir efek dari persamaan dengan  $I_s$  ( $I$  yang diukur pada lokasi gangguan) dan memperkecil persamaan ( $R_f \cdot I_f / I_s$ ). Untuk melakukan ini, menggunakan bagian imajiner dan menyelesaikannya dengan persamaan (Zimmerman and David Costello, 2005).

$$\text{Im} \left( \frac{V_s}{I_s} \right) = \text{Im} (m \cdot Z_{1L}) = m \cdot X_{1L} \quad (3)$$

$$m = \frac{\text{Im} \left( \frac{V_s}{I_s} \right)}{X_{1L}} \quad (4)$$

### Persentase Kesalahan (Error)

Persentase kesalahan pada estimasi lokasi gangguan yang terjadi pada saluran transmisi dapat menggunakan persamaan 2.39 (Dash, Pradhan and Panda, 2000).

$$E_{\text{lokasi}}(\%) = \frac{|\text{jarak sebenarnya} - \text{jarak prediksi}|}{\text{panjang saluran}} \times 100 \quad (5)$$

### Root Mean Square Error dan Mean Absolute Error

RMSE dan MAE biasanya digunakan dalam studi evaluasi model. RMSE adalah aturan penskalaan kuadrat yang juga mengukur besar kesalahan rata-rata. Yaitu akar kuadrat dari rata-rata perbedaan kuadrat antara nilai aktual dan prediksi. Sedangkan MAE mengukur besarnya rata-rata kesalahan dalam satu set prediksi, tanpa mempertimbangkan arahnya. Yaitu rata-rata pada sampel uji dari perbedaan mutlak antara nilai aktual dan prediksi dimana semua perbedaan tiap data memiliki bobot yang sama. Rumus persamaan RMSE dan MAE dari jumlah data sebanyak dapat dilihat dibawah ini (Chai and Draxler, 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i| \quad (7)$$

Dimana :

$y_i$  = Nilai target sebenarnya

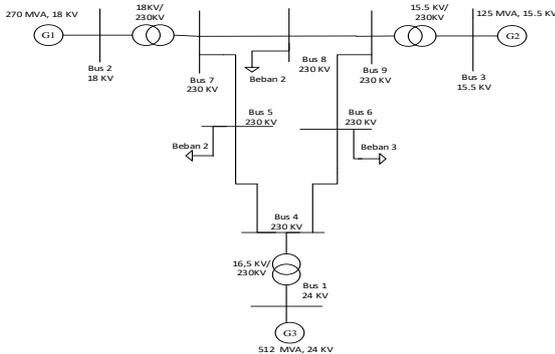
$y'_i$  = Nilai keluaran prediksi

$n$  = Jumlah data

## II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah mengumpulkan data dari penelitian terdahulu, kemudian melakukan pemodelan sistem transmisi daya listrik 9-bus IEEE pada Matlab/Simulink. Melakukan pemodelan PMU dalam Matlab/Simulink. Pada model tersebut diterapkan metode pengukuran untuk area yang luas menggunakan PMU dan dilakukan simulasi hubung singkat tiga fasa dengan variasi jarak gangguan 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90% diujikan pada setiap saluran transmisi daya listrik. Selanjutnya, data-data yang diperoleh dari simulasi hubung singkat tiga fasa digunakan sebagai masukan dalam perhitungan diagnosis untuk menentukan lokasi gangguan terhadap hasil simulasi. Sedangkan objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah model rangkaian segaris sistem 9-bus IEEE 230 kV terdapat tiga generator, tiga

transformator, 6 saluran transmisi daya listrik dan 3 beban.



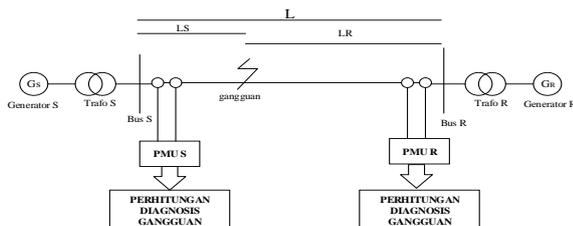
**Gambar 3.** Rangkaian segaris sistem 9-bus IEEE.

Gambar 3 adalah rangkaian segaris sistem 9-bus IEEE yang digunakan dalam objek penelitian. Kemudian, sistem tersebut akan dimodelkan dalam Matlab/Simulink.

### Penerapan Metode Pengukuran untuk Area yang Luas dengan PMU

Pada bagian ini dijelaskan pemodelan sistem transmisi dengan metode pengukuran untuk area yang luas menggunakan PMU. Sistem tenaga listrik harus dapat diandalkan dan aman untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dengan pasokan energi listrik yang berkelanjutan. Kemungkinan pemadaman listrik terjadi terus meningkat dengan permasalahan sistem tenaga listrik yang semakin kompleks. Jadi, dibutuhkan suatu sistem pengukuran yang efisien untuk membuat sistem daya lebih aman, efisien dan dapat diandalkan untuk pemantauan, perlindungan, dan sistem kontrol.

PMU adalah bagian terintegrasi dari pemantauan, perlindungan dan sistem kontrol yang dapat diterapkan pada area yang luas. PMU memberi sinkronisasi pengukuran fasor tegangan dan arus dan dapat dengan mudah dan dikendalikan bahkan gangguan kecil dalam sistem tenaga listrik dapat dipantau untuk melindungi sistem tenaga listrik dari pemadaman listrik yang akan terjadi (Waqar et al., 2018).



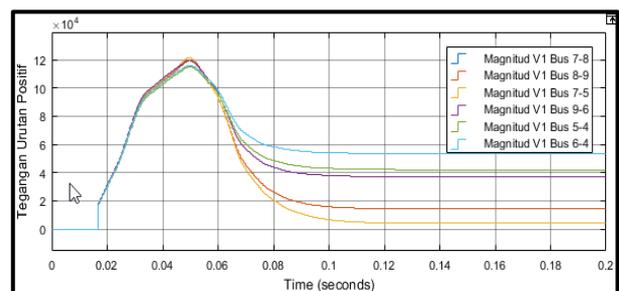
**Gambar 4.** Pemodelan sistem untuk perhitungan Diagnosis gangguan

Gambar 4 menjelaskan, ketika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada saluran transmisi daya listrik maka PMU pada bus-S dan PMU pada bus-R akan menampilkan pembacaan pengukuran nilai fasor arus dan nilai fasor tegangan pada bus-S dan bus-R Hasil keluaran tersebut akan digunakan sebagai masukan dalam perhitungan diagnosis gangguan untuk menentukan lokasi gangguan.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

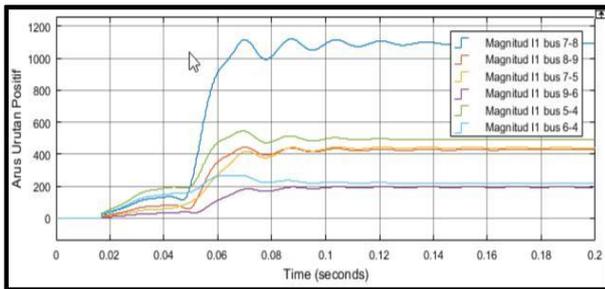
Dari hasil simulasi ketika gangguan hubung singkat tiga fasa, yang disimulasikan pada semua saluran di sistem transmisi 9-bus IEEE dengan variasi jarak 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%. Kemudian Hasil simulasi ini, akan dijadikan masukan dalam perhitungan diagnosis gangguan untuk menentukan lokasi gangguan hubung singkat tiga fasa di saluran transmisi daya listrik pada sistem 9-bus IEEE.

Setelah dilakukan perhitungan diagnosis gangguan, selanjutnya menghitung persen kesalahan, RMSE, dan MAE dari perhitungan diagnosis gangguan hubung singkat tiga fasa di setiap saluran pada sistem 9-bus IEEE dengan variasi jarak yang telah ditentukan. Pada saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa PMU yang terpasang pada setiap bus akan memberikan pengukuran nilai fasor arus an nilai fasor tegangan seperti pada gambar 5 dibawah ini.



**Gambar 5.** Sinyal tegangan urutan positif ketika gangguan hubung singkat tiga fasa

Gambar 5 adalah bentuk sinyal nilai tegangan urutan positif pada setiap bus dalam sistem 9-bus IEEE saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa dari bus-7 ke bus-8 pada jarak 10 % dari bus-7. Dari sinyal tegangan urutan positif diatas dapat diketahui terjadi penurunan tegangan pada saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa. Sedangkan untuk bentuk sinyal arus urutan positif pada saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa seperti pada gambar 6.

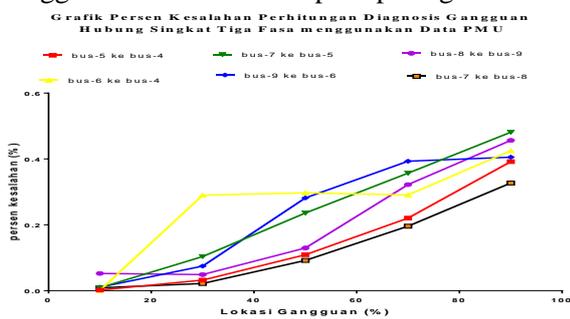


**Gambar 6.** Sinyal arus urutan positif ketika gangguan hubung singkat tiga fasa

Pada gambar 6 dengan menggunakan PMU yang terpasang pada setiap bus, dapat dilihat sinyal arus urutan positif pada setiap bus dalam sistem 9-bus IEEE saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa dari bus-7 ke bus-8 dengan jarak gangguan 10% dari bus-7. Dari sinyal arus urutan positif diatas dapat diketahui terjadi kenaikan nilai magnitud arus urutan positif pada saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa.

### Hasil Perhitungan Diagnosis Gangguan Hubung Singkat Tiga fasa menggunakan Data Keluaran PMU

Pada gambar 7 akan menampilkan hasil Persen kesalahan perhitungan diagnosis gangguan hubung singkat tiga fasa menggunakan metode pengukuran untuk area yang luas dengan PMU untuk menentukan lokasi gangguan. Gangguan hubung singkat tiga fasa disimulasikan pada semua saluran transmisi daya listrik di sistem 9-bus IEEE dengan variasi jarak 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90% dan diperoleh persen kesalahan perhitungan diagnosis gangguan hubung singkat tiga fasa menggunakan data PMU seperti pada gambar 7.



**Gambar 7.** Hasil persen kesalahan perhitungan diagnosis gangguan

Gambar 7. menampilkan grafik hasil persen kesalahan perhitungan diagnosis gangguan hubung singkat tiga fasa menggunakan data keluaran PMU untuk menentukan lokasi gangguan. Perhitungan

diagnosis gangguan dilakukan pada setiap saluran transmisi daya listrik di sistem 9-bus IEEE untuk menentukan titik lokasi gangguan hubung singkat tiga fasa dengan variasi jarak 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%.

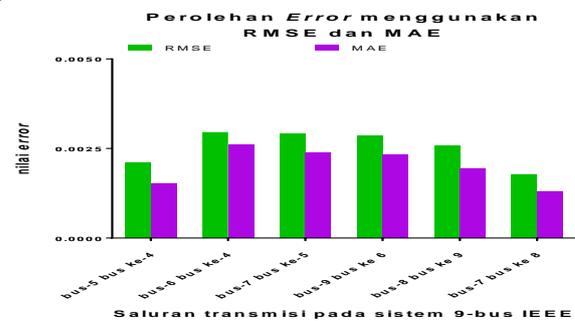
### Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Error (MAE)

Untuk nilai rata-rata perolehan nilai RMSE dan MAE perhitungan diagnosis gangguan hubung singkat tiga fasa dalam menentukan lokasi gangguan dengan metode pengukuran area yang luas menggunakan data PMU pada tabel 2.

**Tabel 2.** Nilai RMSE dan MAE di setiap saluran pada sistem 9-bus IEEE

Saluran	RMSE	MAE
Dari bus-5 ke bus-4	0,002094	0,001522
Dari bus-6 ke bus-4	0,002957	0,002606
Dari bus-7 ke bus-5	0,002917	0,002373
Dari bus-9 ke bus-6	0,002842	0,002331
Dari bus-8 ke bus-9	0,002574	0,001924
Dari bus-7 ke bus-8	0,001756	0,001290

Tabel 2 menampilkan nilai RMSE dan MAE setiap saluran pada sistem 9-bus IEEE sehingga grafik perolehan error dapat dilihat pada gambar 8.



**Gambar 8.** Grafik perolehan error menggunakan RMSE dan MAE

Gambar 8 menampilkan grafik perbandingan error menggunakan RMSE dan MAE pada saluran transmisi di sistem 9-bus IEEE, yang disimulasikan gangguan hubung singkat tiga fasa menggunakan metode pengukuran untuk area yang luas.

## IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi gangguan hubung singkat tiga fasa dengan metode pengukuran area yang luas menggunakan PMU dilakukan perhitungan diagnosis gangguan dalam mentukan lokasi gangguan

di saluran transmisi pada sistem 9-bus IEEE. Perancangan metode pengukuran untuk area yang luas menggunakan PMU dapat menampilkan nilai fasor arus dan fasor tegangan pada setiap bus yang digunakan sebagai pemantauan sistem. Pada keadaan terjadi gangguan PMU arus dan PMU tegangan yang dipasang pada setiap bus akan membaca nilai fasor arus dan nilai fasor tegangan pada setiap Bus. Setelah dilakukan simulasi pada setiap saluran pada sistem 9-bus IEEE dengan variasi jarak 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%. Maka didapat *error* paling besar pada saluran bus-7 ke bus-5 dengan jarak lokasi gangguan 90% dari bus-7 yaitu sebesar 0,481208%, RMSE 0,002917, dan MAE 0,002373. Sedangkan *error* paling kecil pada saluran bus-6 ke bus-4 dengan jarak lokasi gangguan 10% dari bus-6 yaitu sebesar 0,000628%, RMSE 0,002957, dan MAE 0,001522.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Amrulloh, Y.H., Wibowo, R.S. and Anam, S., 2013. Penempatan Optimal Phasor Measurement Unit ( PMU ) dengan Integer Programming. 2.
- Bobba, B.R.B., Dagle, J., Heine, E., Khurana, H., Sanders, W.H., Sauer, P. and Yardley, T., 2011. Enhancing Grid Measurements. pp.67–73.
- Chai, T. and Draxler, R.R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), pp.1247–1250.
- Dash, P.K., Pradhan, A.K. and Panda, G., 2000. A novel fuzzy neural network based distance relaying scheme. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(3), pp.902–907.
- Dobackhshari, A.S., 2013. Transmission Grid Fault Diagnosis by Wide Area Measurement System. *IEEE*, pp.1–7.
- EPG & CERTS, (2006). Phasor Technology and Real Time Dynamics Monitoring System (RTDMS) frequently asked question (FAQs), Electric Power Group and CERTS
- Mallikarjuna, B., Reddy, M.J.B. and Mohanta, D.K., 2016. A Case Study on Optimal Phasor Measurement Unit Placement for Emerging Indian National Smart Grid. *IEEE*, pp.1956–1960.
- Mohammed Mahdi, V.M., 2017. Artificial Neural Network Based Algorithm for Early Prediction of Transient Stability Using Wide Area Measurements. *IEEE*, pp.1–5.
- Qiu, M., Su, H., Chen, M. and Ming, Z., 2012. Balance of Security Strength and Energy for a PMU Monitoring System in Smart Grid. (May), pp.142–149.
- Reyes, R.A. and Guardado, J.L., 2015. Transactions on Power Delivery A PMU Model for Wide Area Protection in ATP / EMTP. *IEEE*, pp.1–6.
- Rihan, M., Ahmad, M. and Beg, M.S., 2013. Vulnerability Analysis of Wide Area Measurement System in the Smart Grid. pp.1–7.
- Shahraeini, M. and Javidi, M.H., 2012. Wide Area Measurement Systems. In: *Advanced Topics in Measurements*. pp.304–321.
- Waqar, A., Khurshid, Z., Ahmad, J., Aamir, M., Yaqoob, M. and Alam, I., 2018. Modeling and Simulation of Phasor Measurement Unit (PMU) for Early Fault Detection in Interconnected Two-Area Network. *2018 1<sup>st</sup> International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG)*, pp.1–6.
- Yin, H., 2010. PMU data-based fault location techniques. *IEEE*.
- Zimmerman, K. and David Costello, 2005. Impedance-Based Fault Location Experience. *SEL Journal of Reliable Power*, 1(1), pp.1–27