

IDENTIFIKASI LOKASI GANGGUAN BERBASIS PMU PADA SISTEM 20 KV BAWAH LAUT PULAU PISANG

Eddy Prayitno¹, Khairudin², Misfa Susanto³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung; Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1, Bandar Lampung; Telp +62 721 701609 .

Keywords:

PMU, Gangguan, SKLTM, *Traveling Wave*, Sistem 20 kV

Correspondent Email:

eddyprayitno31@gmail.com

Abstrak. Identifikasi lokasi gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan aspek penting dalam menjaga keandalan penyaluran energi listrik, khususnya pada sistem Saluran Kabel Laut Tegangan Menengah (SKLTM). Penelitian ini membahas metode identifikasi lokasi gangguan berbasis *Phasor Measurement Unit* (PMU) pada sistem 20 kV bawah laut Pulau Pisang. PMU digunakan untuk mengukur parameter listrik seperti tegangan, arus, dan sudut fasa secara real-time dan tersinkronisasi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode perbandingan impedansi dan metode *Traveling Wave* (gelombang berjalan). Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink untuk menganalisis perubahan gelombang sebelum dan sesudah gangguan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa gangguan menyebabkan perubahan signifikan pada amplitudo tegangan, lonjakan arus, serta ketidakstabilan sudut fasa. Metode *Traveling Wave* memberikan respon yang lebih cepat dalam menentukan lokasi gangguan dibandingkan metode impedansi. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan PMU dapat meningkatkan kecepatan dan akurasi dalam identifikasi lokasi gangguan pada sistem kelistrikan bawah laut.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. *Fault location identification in power systems is crucial for maintaining reliability, especially in Medium Voltage Submarine Cable Systems. This study discusses PMU-based fault location identification in a 20 kV subsea system at Pulau Pisang. Two methods are applied: impedance-based method and Traveling Wave method. Simulations are conducted using MATLAB/Simulink to analyze waveform behavior before and after faults. Results show significant voltage drops, current surges, and phase instability during faults. The Traveling Wave method provides faster and more accurate fault detection. This study demonstrates that PMU implementation enhances the speed and accuracy of fault location identification in subsea power systems. Faults in the 20 kV subsea system can cause a loss of power supply to Pulau Pisang. Therefore, it is important to be able to identify the fault location quickly and accurately so that it can be repaired immediately. Pulau Pisang is a strategic location that requires a reliable electrical infrastructure, especially since it is located under the sea. Fault location identification based on PMU in the 20 kV system aims to improve efficiency, accuracy, and reliability in detecting and isolating faults that occur in the electrical network.*

1. PENDAHULUAN

Pulau Pisang merupakan wilayah yang bergantung pada sistem distribusi listrik melalui

Saluran Kabel Laut Tegangan Menengah (SKLTM) 20 kV yang menghubungkan Gardu Hubung Tebakak dengan Gardu Distribusi

Pulau Pisang. Sistem ini memiliki tantangan tersendiri karena berada di lingkungan bawah laut yang sulit dijangkau, sehingga proses deteksi dan perbaikan gangguan menjadi lebih kompleks. Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat menyebabkan terganggunya kontinuitas penyaluran energi listrik serta menurunkan keandalan sistem secara keseluruhan [3].

Dalam sistem tenaga listrik, fenomena gangguan sangat berkaitan dengan transien elektromagnetik yang menyebabkan perubahan cepat pada tegangan dan arus [1]. Selain itu, analisis gangguan juga dapat dijelaskan menggunakan teori komponen simetris untuk memahami ketidakseimbangan sistem saat terjadi fault [2]. Oleh karena itu, diperlukan metode identifikasi lokasi gangguan yang cepat dan akurat.

Salah satu teknologi yang dapat digunakan adalah Phasor Measurement Unit (PMU), yang mampu melakukan pengukuran parameter listrik seperti tegangan, arus, dan sudut fasa secara real-time dengan sinkronisasi waktu berbasis GPS [9], [10]. Dengan memanfaatkan data dari PMU, operator dapat memantau kondisi sistem secara menyeluruh dan mendeteksi gangguan dengan lebih cepat dan akurat.

Selain itu, metode analisis gangguan seperti metode impedansi dan Traveling Wave juga banyak digunakan dalam menentukan lokasi gangguan pada sistem tenaga listrik. Metode impedansi memanfaatkan hubungan antara tegangan dan arus untuk menentukan posisi gangguan [4], [14], sedangkan metode Traveling Wave memanfaatkan gelombang transien yang muncul saat gangguan terjadi sehingga memiliki kecepatan deteksi yang lebih tinggi [7], [13], [16].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis identifikasi lokasi gangguan berbasis PMU menggunakan metode impedansi dan Traveling Wave pada sistem 20 kV bawah laut Pulau Pisang, serta membandingkan performa kedua metode dalam hal kecepatan dan akurasi deteksi gangguan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Phasor Measurement Unit (PMU)

PMU merupakan perangkat yang digunakan untuk mengukur fasor tegangan dan arus secara real-time dengan akurasi tinggi. Pengukuran

dilakukan dengan sinkronisasi waktu menggunakan GPS sehingga memungkinkan analisis sistem tenaga listrik secara luas dan terintegrasi [9], [10].

2.2 Saluran Kabel Laut Tegangan Menengah (SKLTM)

SKLTM digunakan untuk menyalurkan energi listrik antar wilayah yang dipisahkan oleh laut. Sistem ini memiliki keunggulan dalam keandalan penyaluran energi, namun memiliki keterbatasan dalam hal akses perbaikan serta deteksi gangguan [3].

2.3 Metode Identifikasi Gangguan

Metode identifikasi gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan. Metode impedansi menggunakan perubahan tegangan dan arus untuk menentukan lokasi gangguan berdasarkan parameter sistem [5]. Sementara itu, metode Traveling Wave memanfaatkan waktu rambat gelombang transien untuk menentukan posisi gangguan secara lebih cepat dan akurat [7], [11].

2.4 Analisis Transien pada Sistem Tenaga Listrik

Transien dalam sistem tenaga listrik merupakan fenomena perubahan cepat pada parameter listrik seperti tegangan dan arus akibat gangguan atau perubahan kondisi sistem secara tiba-tiba. Fenomena ini sangat penting dalam analisis gangguan karena menjadi indikator awal terjadinya fault pada sistem tenaga listrik [1].

Ketika terjadi gangguan hubung singkat, sistem akan mengalami perubahan kondisi dari steady-state menuju kondisi transien. Pada kondisi ini, tegangan dan arus tidak lagi berbentuk sinusoidal murni, melainkan mengalami distorsi serta munculnya lonjakan awal (transient spike). Fenomena ini terjadi akibat pelepasan energi elektromagnetik yang tersimpan dalam elemen induktif dan kapasitif pada sistem.

Menurut Greenwood [1], analisis transien sangat penting dalam memahami respon sistem

terhadap gangguan, terutama dalam sistem kabel panjang seperti SKLTM. Gelombang transien yang muncul dapat merambat sepanjang saluran dan membawa informasi terkait lokasi gangguan.

Selain itu, analisis gangguan juga dapat dilakukan menggunakan teori komponen simetris untuk memisahkan sistem menjadi komponen urutan positif, negatif, dan nol [2]. Pendekatan ini mempermudah analisis gangguan tidak seimbang pada sistem tiga fasa.

Dengan memahami karakteristik transien, metode Traveling Wave dapat dimanfaatkan secara optimal untuk mendeteksi lokasi gangguan dengan akurasi tinggi.

2.5 Prinsip Metode Impedansi dalam Penentuan Lokasi Gangguan

Metode impedansi merupakan salah satu metode klasik yang banyak digunakan dalam sistem proteksi tenaga listrik untuk menentukan lokasi gangguan. Metode ini bekerja berdasarkan perhitungan impedansi antara titik pengukuran dan titik gangguan dengan menggunakan data tegangan dan arus [4], [14].

Pada kondisi normal, nilai impedansi sistem relatif konstan sesuai dengan karakteristik saluran. Namun ketika terjadi gangguan, nilai impedansi yang terukur akan berubah secara signifikan akibat perubahan tegangan dan arus.

Metode ini memiliki keunggulan dalam kemudahan implementasi dan tidak memerlukan perangkat tambahan yang kompleks. Namun demikian, metode ini memiliki keterbatasan, terutama pada kondisi resistansi gangguan tinggi yang dapat menyebabkan kesalahan estimasi lokasi gangguan [6], [15].

Dalam sistem kabel laut, metode impedansi tetap dapat digunakan, namun akurasinya dapat menurun akibat pengaruh parameter saluran yang kompleks seperti kapasitansi dan induktansi distribusi.

2.6 Prinsip Metode Traveling Wave

Metode Traveling Wave merupakan metode modern dalam penentuan lokasi gangguan yang memanfaatkan fenomena gelombang transien yang merambat sepanjang saluran akibat gangguan [7], [13], [16].

Ketika gangguan terjadi, akan muncul gelombang tegangan dan arus yang merambat dari titik gangguan menuju kedua ujung saluran. Gelombang ini kemudian dipantulkan kembali saat mencapai ujung saluran atau titik perubahan impedansi.

Dengan mengukur waktu kedatangan gelombang datang dan gelombang pantul menggunakan PMU, lokasi gangguan dapat dihitung dengan sangat akurat. Kecepatan rambat gelombang dipengaruhi oleh parameter saluran seperti induktansi dan kapasitansi.

Menurut Borghetti et al. [16], metode Traveling Wave memiliki keunggulan dalam hal kecepatan dan akurasi dibandingkan metode konvensional, terutama pada sistem saluran panjang seperti kabel laut.

Selain itu, metode ini tidak terlalu dipengaruhi oleh resistansi gangguan, sehingga lebih stabil dalam berbagai kondisi sistem.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengkaji berbagai referensi yang berkaitan dengan Phasor Measurement Unit (PMU), Saluran Kabel Laut Tegangan Menengah (SKLTM), serta metode identifikasi gangguan pada sistem tenaga Listrik [3], [9]. Referensi diperoleh dari jurnal ilmiah, buku, dan penelitian terdahulu yang relevan. Hasil studi literatur digunakan sebagai dasar dalam pemodelan sistem serta analisis hasil simulasi.

3.2 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem dilakukan menggunakan software MATLAB/Simulink dengan merepresentasikan sistem distribusi tenaga listrik 20 kV bawah laut yang menghubungkan Gardu Hubung Tebakak dengan Gardu

Distribusi Pulau Pisang. Pendekatan simulasi berbasis pemodelan matematis ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan metode persamaan untuk analisis sistem tenaga listrik secara dinamis [12].

Model sistem terdiri dari:

- Sumber tegangan 3 fasa
- Saluran kabel laut (SKLTM)
- Beban sistem
- Blok gangguan (three-phase fault)
- Phasor Measurement Unit (PMU)

PMU digunakan untuk mengukur parameter listrik secara real-time sebagai dasar analisis gangguan [10].

3.2 Skenario Simulasi

Simulasi dilakukan dalam dua kondisi utama, yaitu:

1. **Kondisi Normal (Tanpa Gangguan)**
Sistem beroperasi tanpa adanya gangguan untuk mengetahui kondisi steady-state.
2. **Kondisi Gangguan (Fault Condition)**
Gangguan disimulasikan menggunakan blok *three-phase fault* dengan parameter:
 - Jenis gangguan: hubung singkat 3 fasa
 - Waktu gangguan: ditentukan pada interval tertentu
 - Lokasi gangguan: pada titik tertentu di saluran

Perubahan parameter tegangan, arus, dan sudut fasa diamati sebelum dan sesudah gangguan terjadi. Gangguan yang disimulasikan berupa hubung singkat tiga fasa pada titik tertentu di saluran, yang bertujuan untuk mengamati respon sistem terhadap gangguan [3].

3.4 Metode Analisis

3.4.1 Metode Impedansi

Metode impedansi digunakan untuk menentukan lokasi gangguan dengan menghitung nilai impedansi antara titik pengukuran dan titik gangguan berdasarkan perubahan tegangan dan arus [4], [5], [14].

Persamaan dasar:

$$Z_f = V / I$$

Jarak gangguan:

$$d = (Z_f / Z_{line}) \times L$$

Metode ini bekerja dengan memanfaatkan perubahan parameter listrik saat terjadi

gangguan, dimana tegangan mengalami penurunan signifikan dan arus meningkat tajam. Nilai impedansi yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan impedansi total saluran untuk menentukan posisi gangguan.

Namun metode ini memiliki keterbatasan, terutama pada kondisi resistansi gangguan tinggi dan ketidakpastian parameter sistem [6], [15].

3.4.2 Metode Traveling Wave (TW)

Metode Traveling Wave menggunakan prinsip rambatan gelombang transien akibat gangguan [7], [13], [16].

Persamaan:

$$x = v t / 2$$

Kecepatan rambat:

$$v = 1 / \sqrt{LC}$$

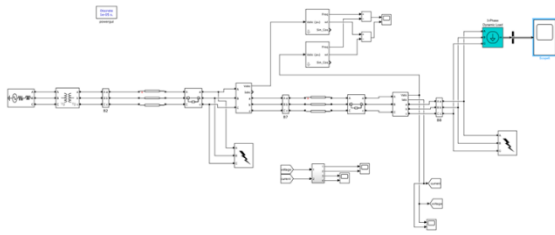
Metode ini memanfaatkan waktu datang gelombang dan gelombang pantul untuk menentukan lokasi gangguan dengan akurasi tinggi. Keunggulan utama metode ini adalah kecepatan deteksi yang sangat tinggi dan tidak terlalu dipengaruhi resistansi gangguan.

3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi:

1. Studi literatur
2. Pemodelan sistem menggunakan MATLAB/Simulink
3. Penentuan skenario simulasi (normal dan gangguan)
4. Pengambilan data hasil simulasi
5. Analisis menggunakan metode impedansi dan Traveling Wave
6. Penarikan kesimpulan

Pemodelan simulink berdasarkan impedansi saluran dan arus ditunjukkan pada gambar model berikut :



Gambar 1. Permodelan Simulink PMU menggunakan impedansi saluran dan arus

Gambar 1 menunjukkan pemodelan Simulink untuk identifikasi gangguan menggunakan metode impedansi berbasis PMU.

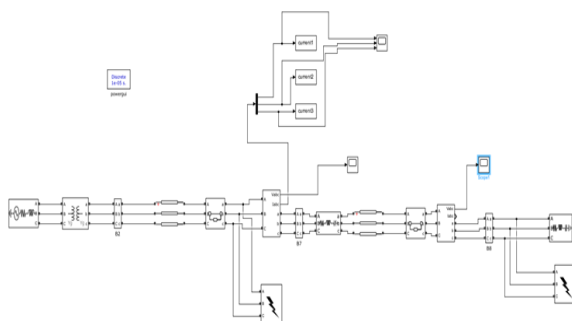
Model terdiri dari:

- Sumber tegangan 3 fasa
- Saluran SKLTM (R, L, C)
- Beban
- Three-phase fault block
- PMU

PMU mengukur tegangan dan arus secara real-time. Saat gangguan terjadi, terjadi penurunan tegangan dan kenaikan arus yang signifikan. Data ini digunakan untuk menghitung impedansi gangguan.

Metode ini sangat bergantung pada akurasi pengukuran PMU dan parameter saluran, sehingga sensitif terhadap resistansi gangguan.

Permodelan simulink berdasarkan Algoritma Traveling Wave ditunjukkan pada gambar model berikut :



Gambar 2. Permodelan Simulink PMU menggunakan Algoritma Traveling Wave

Gambar 2 menunjukkan model Simulink metode Traveling Wave.

Saat gangguan terjadi:

1. Muncul gelombang transien
2. Gelombang merambat sepanjang saluran
3. Terjadi refleksi
4. PMU mendeteksi waktu kedatangan

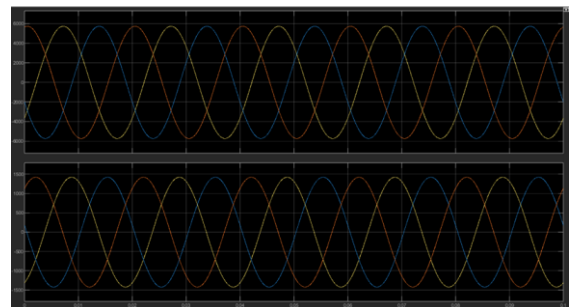
Selisih waktu digunakan untuk menentukan lokasi gangguan.

Metode ini lebih cepat dan lebih akurat dibanding metode impedansi, terutama pada sistem kabel laut panjang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada kondisi normal, tegangan dan arus berbentuk sinusoidal stabil dengan pergeseran fasa 120° . Sistem berada dalam kondisi steady-state tanpa gangguan.

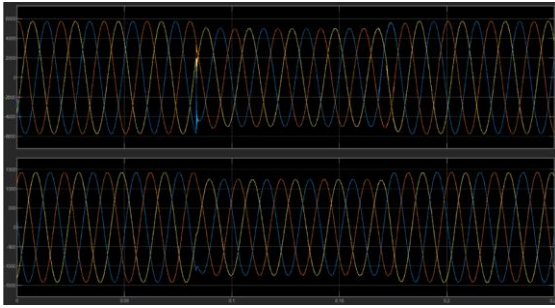
Hasil simulasi menggunakan impedansi saluran dan arus sebelum gangguan terjadi pada bentuk gelombang gambar 3.



Gambar 3. Bentuk Gelombang Tegangan Dan Arus Sebelum Terjadi Gangguan

Sebelum Gangguan

Gelombang tegangan dan arus berada dalam kondisi stabil dengan amplitudo konstan serta sudut fasa yang tidak berubah secara signifikan. Hal ini menunjukkan sistem berada dalam kondisi normal (steady-state).



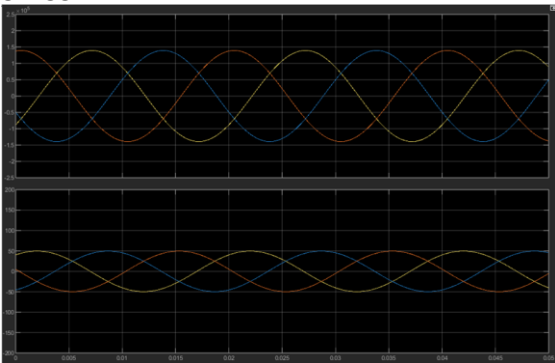
Gambar 4. Bentuk Gelombang Tegangan Dan Arus Setelah Terjadi Gangguan

Setelah Gangguan

Setelah terjadi gangguan hubung singkat, terjadi perubahan signifikan pada parameter sistem, yaitu:

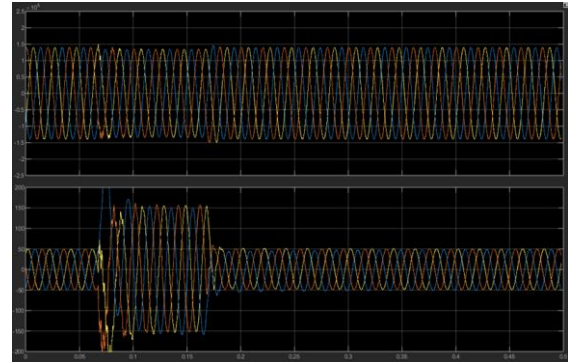
- Penurunan tegangan secara drastis (voltage drop)
- Kenaikan arus secara tiba-tiba (fault current)
- Perubahan sudut fasa yang tidak stabil

Pada metode impedansi, perubahan ini digunakan untuk menghitung selisih tegangan dan arus untuk menentukan lokasi gangguan.



Gambar 5. Bentuk Gelombang Tegangan Dan Arus Sebelum Terjadi Gangguan

Pada metode Traveling Wave, gangguan menghasilkan gelombang transien yang merambat sepanjang saluran. Waktu datang gelombang ini digunakan untuk menentukan lokasi gangguan dengan lebih cepat dibanding metode impedansi.



Gambar 6. Bentuk Gelombang Tegangan Dan Arus Setelah Terjadi Gangguan

Analisis Gelombang Setelah Gangguan

Setelah gangguan:

- Tegangan turun drastis (voltage sag)
- Arus meningkat tajam (fault current)
- Sudut fasa berubah
- Muncul transien awal

Fenomena ini sesuai dengan teori transien sistem tenaga listrik [1].

Analisis Metode Impedansi

Metode ini menggunakan perubahan V/I untuk menentukan lokasi gangguan.

Kelemahan:

- Sensitif terhadap resistansi gangguan
- Dipengaruhi parameter sistem

Analisis Metode Traveling Wave

Metode ini memanfaatkan gelombang transien:

- Lebih cepat (orde milidetik)
- Lebih akurat
- Tidak dipengaruhi resistansi

Analisis Tambahan (PMU Sensitivity)

Penggunaan PMU sangat dipengaruhi oleh kualitas pengukuran dan lokasi pemasangan.

Berdasarkan penelitian Barella et al. [8], sensitivitas PMU terhadap perubahan parameter sistem sangat berpengaruh terhadap akurasi deteksi gangguan.

5. KESIMPULAN

- PMU mampu mendeteksi gangguan secara real-time
- Metode impedansi dapat menentukan lokasi gangguan namun lebih lambat
- Metode Traveling Wave lebih cepat dan akurat
- Gelombang tegangan dan arus menjadi indikator utama gangguan
- Metode Traveling Wave lebih efektif untuk sistem kabel laut 20 kV

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Greenwood, A., "Electrical Transients in Power Systems," 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1991..
- [2] Wagner, C.F., et al., "Symmetrical Components," McGraw-Hill, 1933.
- [3] Anderson, P.M., "Analysis of Faulted Power Systems," IEEE Press, 1995.
- [4] Pai, M.A., "Computer Techniques in Power System Analysis," McGraw-Hill, 1979..
- [5] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines," IEEE Std C37.114-2004.
- [6] J. Klimstra, Hotakainen, and Markus, Smart Power Generation. Avain Publishers , Helsinki., 2011.
- [7] P. Gopakumar, M. J. B. Reddy, and D. K. Mohanta, "Transmission line fault detection and localisation methodology using pmu measurements," IET Generation, Transmission Distribution, vol. 9, no. 11, pp. 1033– 1042, 2015.
- [8] R. Barella, D. Nguyen, R. Winter, K. Lu, S. Wallace, X. Zhao, and E. Cotilla-Sanchez, "A sensitivity study of pmu-based fault detection on smart grid," in 2015 International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS), pp. 1–8, May 2015.
- [9] A. G. Phadke and J. S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications (Power Electronics and Power Systems). Springer, 2008
- [10] A. Monti, C. Muscas, and F. Ponci, Phasor Measurement Units and Wide Area Monitoring Systems. ACADEMIC PRESS, 2016.
- [11] C. W. Liu, K. P. Lien, C. S. Chen, and J. A. Jiang, "A universal fault location technique for n-terminal(N 3)transmission lines," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, pp. 1366–1373, July 2008.
- [12] Wahyuni, Mila & Wiryajati, I & Satiawan, Wahyu, "Analisis Dan Simulasi Boost Converter Berbasis Kontroler Konvensional Dengan Metode Persamaan Garis", JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan, Vol. 13 No. 1, 2025.
- [13] P. Rajaraman, N. A. Sundaravaran, B. Mallikarjuna, J. B. M. Reddy and D. K. Mohanta, "Robust fault analysis in transmission lines using Synchrophasor measurements," Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 3,no. 14,pp. 1-13, 2018.
- [14] S. M. Brahma, "Fault location using PMU measurements in power systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2545–2553, Oct. 2011.
- [15] M. Kezunovic, "Smart fault location for smart grids using synchrophasor measurements," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 11–22, Mar. 2011.
- [16] A. Borghetti, C. Nucci, M. Paolone, and G. Ciappi, "Traveling wave-based fault location techniques: Theory and application," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 662–670, Apr. 2008.