

ABSTRAK

Sistem tenaga terus berkembang, baik dalam hal besar daya pembangkitan, maupun kompleksitas jaringan. Hal ini berimplikasi pada kelaziman penggunaan saluran transmisi dua-atau tiga-terminal yang pada gilirannya, melahirkan tingkat kerumitan yang semakin tinggi dalam sistem proteksinya [1]. Sekitar lima puluh persen gangguan yang terjadi pada sistem tenaga adalah terjadi di komponen yang berupa saluran transmisi udara. Salah satu jenis dari gangguan tersebut adalah gangguan simetris atau gangguan tiga-fase. Biasanya, gangguan ini akan menghasilkan magnitudo arus hubung singkat terbesar, dibanding dengan tipe gangguan yang lain. Sebagai konsekuensinya, dituntut sistem proteksi yang baik atau andal, agar gangguan tersebut dapat terdeteksi dengan cepat dan tepat, sehingga akan cepat “dibuang” dari sistem. Relai arah merupakan salah satu jenis relai yang biasa digunakan untuk memproteksi saluran transmisi udara dua-terminal. Ia memiliki performa yang lebih baik daripada relai nonarah, karena kemampuannya “mengetahui” arah arus gangguan. Arah aliran arus (arah gangguan) di saluran dapat diketahui dengan “melihat” sudut fase antara arus dan tegangan di lokasi relai, saat terjadinya gangguan. Penelitian ini menyajikan visualisasi performa relai-arrah yang memproteksi saluran transmisi udara dua-terminal. Perangkat-lunak *Matlab 5.3* digunakan untuk menyimulasikan arus dan tegangan gangguan tiga-fase pada sistem tenaga serta performa relainya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa relai ini mempunyai sensitivitas yang baik bagi gangguan internal dan sekaligus tingkat imunitas yang tinggi terhadap gangguan eksternal.

Kata kunci: Saluran transmisi, gangguan simetris, relai arah, beda-fase, Matlab 5.3., gangguan internal, gangguan eksternal.

I. PENDAHULUAN

Menurut statistik gangguan, setengah dari jumlah total keterjadian gangguan pada sistem tenaga, terjadi pada elemen yang berupa saluran transmisi udara [2]. Oleh karenanya, sistem proteksi saluran transmisi menuntut perhatian lebih, dalam pendesainan sistem proteksinya. Sistem proteksi saluran transmisi yang baik, akan menunjang keandalan saluran transmisi dalam menyalurkan energi dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban.

Relai merupakan bagian terpenting dari suatu sistem proteksi. Relai ini berfungsi sebagai "otak" dari sistem tersebut. Pemutus-daya sebagai bagian lain dari sistem proteksi akan memutuskan atau tidak suatu saluran, adalah atas dasar sinyal dari relai.

Pada awalnya, sistem proteksi saluran hanya menggunakan relai arus lebih (*overcurrent relay*). Relai ini hanya mampu mendeteksi magnitudo arus gangguan. Oleh karenanya, seiring dengan bertambahnya kompleksitas jaringan, maka relai ini menjadi semakin "tertinggal". Karena pada jaringan yang kompleks (saluran dengan dua atau lebih terminal), arah arus gangguan berubah-ubah sesuai dengan lokasi gangguannya. Dalam kondisi yang demikian, dibutuhkanlah relai-arrah, sehingga arah arus gangguan dapat terdeteksi.

Dari segi teknologi konstruksi dan operasi relai, telah terjadi perkembangan yang amat ekstrem. Pada awalnya, relai yang digunakan adalah ber bentuk elektro-mekanis; lalu bergeser ke rangkaian elektronika analog akibat kemajuan teknologi transistor; dan terakhir, sejak sekitar lima belas tahun silam, ketika teknologi prosesor-mikro semakin murah dan andal, masuklah ke teknologi digital [7].

II. GANGGUAN PADA SISTEM TENAGA

2.1 Tipe Gangguan pada Sistem Tenaga

Menurut [11], tipe gangguan dalam sistem tenaga biasanya berupa gangguan tiga-fase, dua-fase, dua-fase ke tanah, atau satu-fase ke tanah. Probabilitas kejadiannya dapat dilihat pada Tabel 1.

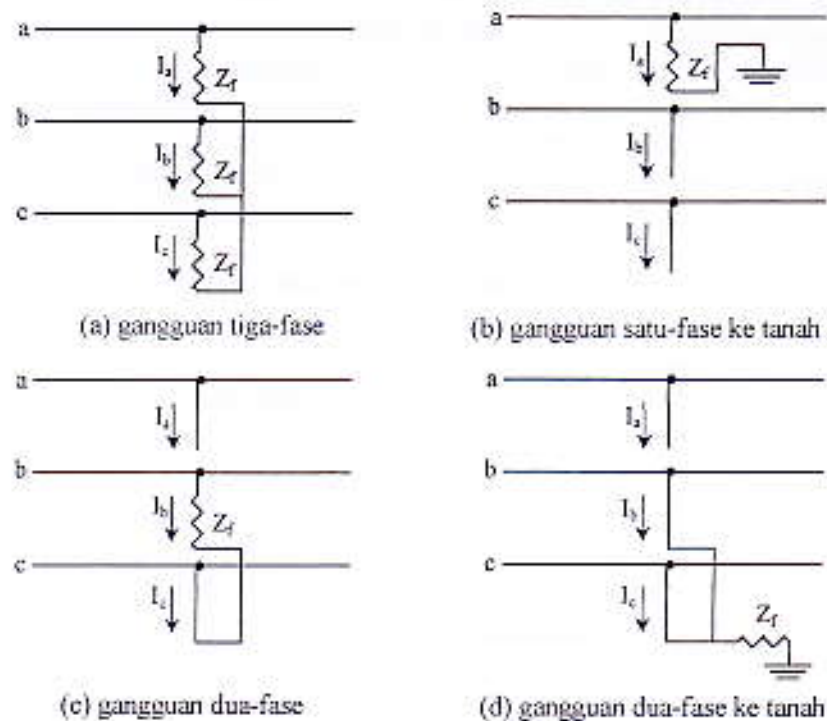
Tabel 1. Frekuensi keterjadian dari tipe gangguan berbeda pada saluran transmisi udara [12]

No.	Tipe Gangguan	Keterjadian (%)
1	Satu-fase ke tanah	85
2	Dua-fase	8
3	Dua-fase ke tanah	5
4	Tiga-fase	2 atau kurang

Bocoran (*breakdown*) isolasi antara ketiga fase dikenal sebagai gangguan tiga-fase, bocoran isolasi antara dua-fase dikenal sebagai gangguan dua-fase, bocoran isolasi antara dua-fase dengan tanah dikenal sebagai gangguan dua-fase ke tanah, serta bocoran isolasi antara satu-fase dengan tanah dikenal sebagai gangguan satu-fase ke tanah [12]. Gangguan yang disebut pertama yakni tiga-fase, adalah gangguan simetris atau seimbang. Tiga gangguan terakhir yang tersebut di atas, adalah gangguan taksimetris atau takseimbang [13]. Gangguan simetris menghasilkan arus dan tegangan sama besar antara ketiga fasenya, dan masing-masing terpisah

sejauh 120° listrik. Biasanya, gangguan ini akan menghasilkan magnitudo arus gangguan terbesar dibanding dengan ketiga gangguan yang lainnya.

Representasi gangguan-gangguan tersebut terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Representasi tipe gangguan pada saluran transmisi [14]

Dalam pelaksanaan studi-gangguan, dapat dilakukan penyederhanaan-penyederhanaan - termasuk ketika menggunakan program komputer digital- dengan jalan mengabaikan semua beban statis, semua resistans, kapasitans saluran transmisi, dan arus magnetisasi trafo [14]. Akibat penyederhanaan tersebut, jaringan yang mengalami gangguan dimisalkan tidak berbeban sebelum mengalami gangguan [14, 15, 16]. Hal ini berarti, tidak ada arus yang mengalir sebelum gangguan dan semua tegangan jaringan adalah sama yaitu V_f . Biasanya, nilai V_f adalah $1 \angle 0^\circ$ per unit.

Menurut [6], pada umumnya jika gangguan tidak diputuskan dengan baik, maka akan terjadi hal-hal seperti berikut.

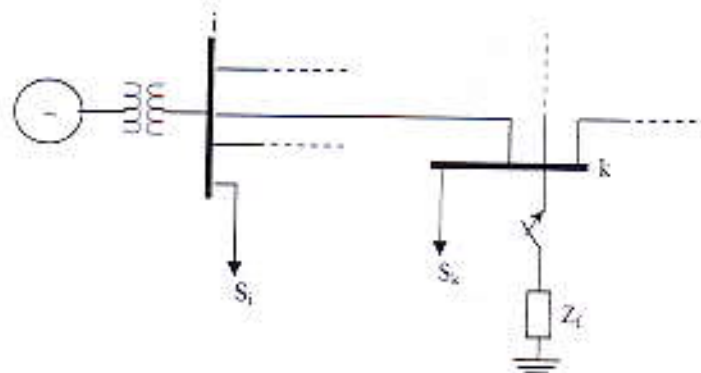
1. Generator, trafo, rel, dan peralatan lain, akan rusak akibat pemanasan lebih (*overheating*) dan gaya mekanis tiba-tiba yang terjadi.
2. Bahaya kebakaran dan kerusakan peralatan secara permanen. Kebakaran dapat juga meluas dalam gardu, kecuali kalau arus gangguan dieliminir oleh peralatan relai dan pemutus-daya yang tepat.
3. Gangguan dapat mengurangi profil tegangan pada seluruh sistem, dan karena itu, mempengaruhi beban. Jatuh frekuensi bisa menuju ke ketakstabilan di antara generator yang terinterkoneksi.

4. Gangguan taksimetris menghasilkan tegangan takseimbang dan menyebabkan arus-urutan negatif, yang mana akan menghasilkan pemanasan lebih.

Studi-gangguan akan menghasilkan data arus dan tegangan sistem tenaga selama kondisi gangguan. Informasi ini dibutuhkan dalam rangka mendesain sistem proteksi yang memadai serta menentukan kapasitas pemutus-daya pada setiap lokasi penyaklaran (*switching*). Sistem relai harus "mengenal" keberadaan gangguan dan memulai pembukaan pemutus-daya untuk mengisolir bagian yang terganggu. Aksi ini dibutuhkan untuk meminimalkan gangguan pelayanan kelistrikan serta membatasi kerusakan pada peralatan yang terganggu. Arus dan tegangan yang dihasilkan oleh berbagai tipe gangguan yang terjadi pada berbagai lokasi di sistem tenaga, harus dihitung guna menyediakan data yang cukup, untuk merancang suatu sistem relai dan penyaklaran yang efektif [17].

2.2. Analisis Gangguan dengan Menggunakan Matriks Impedans Rel

Menurut [16] metode ini cocok untuk jaringan sistem tenaga yang besar. Arus gangguan serta tegangan rel selama gangguan dapat diperoleh dengan mudah menggunakan elemen-elemen matriks impedans rel, bila menggunakan metode matriks impedans rel ini.



Gambar 2. Rel tipikal dari suatu sistem tenaga

Suatu contoh rel tipikal dari suatu jaringan sistem tenaga dengan n rel diperlihatkan pada Gambar 2. Sistem tersebut diasumsikan beroperasi dalam kondisi seimbang dan suatu model rangkaian per fase digunakan. Suatu gangguan tiga-fase seimbang disimulasikan pada rel k melalui impedans gangguan (Z_f). Tegangan rel pragangguan diperoleh dari solusi aliran daya dan direpresentasikan oleh vektor kolom

$$V_{rel}(0) = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Arus gangguan jauh lebih besar daripada nilai arus beban (normal), sehingga arus beban dapat diabaikan kelak. Akan tetapi, suatu pendekatan yang baik yakni merepresentasikan beban rel dengan suatu impedans konstan, yaitu

$$Z_{ii} = \frac{|V_i(0)|^2}{S_i^*} \quad (2)$$

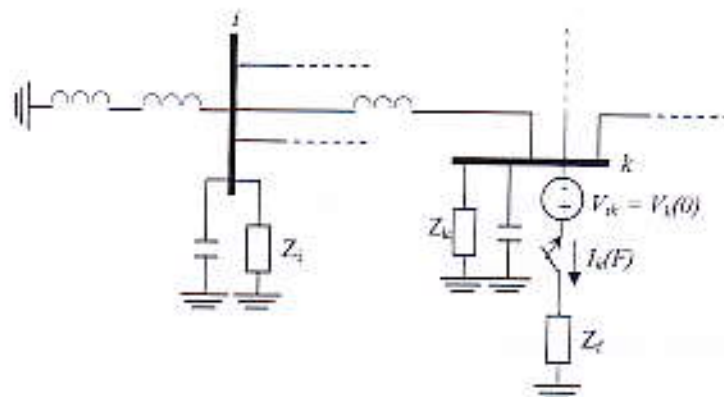
dengan $V_i(0)$ adalah tegangan rel pragangguan dan S_i^* adalah konjugasi dari daya nyata beban.

Perubahan tegangan jaringan yang disebabkan oleh gangguan dengan impedans Z_f adalah ekuivalen dengan penambahan tegangan $V_k(0)$ dengan semua sumber terhubung singkat. Menolkan semua sumber tegangan dan merepresentasikan semua komponen dengan impedansinya yang sepadan, akan menghasilkan rangkaian Thevenin seperti Gambar 3. Perubahan tegangan rel yang disebabkan oleh gangguan dalam rangkaian ini direpresentasikan oleh vektor kolom

$$\Delta V_{rel} = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Berdasarkan teorema Thevenin, tegangan rel selama gangguan adalah diperoleh dengan superposisi dari tegangan rel pragangguan dengan perubahan tegangan rel, yakni

$$V_{rel}(F) = V_{rel}(0) + \Delta V_{rel} \quad (4)$$



Gambar 3. Rangkaian Thevenin Gambar 2

Terlihat pada rangkaian Thevenin Gambar 3, arus yang memasuki setiap rel adalah nol kecuali rel yang terganggu. Arus pada rel yang terganggu meninggalkan rel, karena itu arusnya diambil sebagai arus negatif yang memasuki rel k . Persamaan simpul yang diterapkan ke rangkaian Thevenin pada Gambar 3 menjadi

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1k} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{k1} & \dots & Y_{kk} & \dots & Y_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nk} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

atau

$$I_{rel}(F) = Y_{rel} \Delta V_{rel} \quad (6)$$

Menyelesaikan persamaan (6) untuk ΔV_{rel} , diperoleh

$$\Delta V_{rel} = Z_{rel} I_{rel}(F) \quad (7)$$

Menyubstitusikan persamaan (7) ke (4) akan menyebabkan vektor tegangan rel selama gangguan, menjadi

$$V_{rel}(F) = V_{rel}(0) + Z_{rel} I_{rel}(F) \quad (8)$$

Bila persamaan (8) dituliskan dalam bentuk elemen-elemennya, akan menjadi

$$\begin{bmatrix} V_1(F) \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ V_n(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.3. Studi-Gangguan Tiga-Fase

Tipe gangguan ini direpresentasikan oleh Gambar 1(a). Komponen simetris yang ada pada tipe ini, hanyalah komponen urutan-positif. Arus gangguan untuk gangguan di rel k , dengan demikian, adalah

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \quad (10)$$

dengan

- $I_k(F)$ adalah arus gangguan di rel k ;
- k adalah nomor rel terganggu;
- $V_k(0)$ adalah tegangan pragangguan di rel k ;
- Z_{kk} adalah elemen kk matriks impedans rel;
- Z_f adalah impedans gangguan.

Suatu gangguan di rel k , karena itu, hanya membutuhkan elemen Z_{kk} dari matriks impedans rel, yang sejatinya merupakan impedans Thevenin dilihat dari rel yang terganggu. Tegangan rel i saat gangguan adalah

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(F) \quad (11)$$

atau

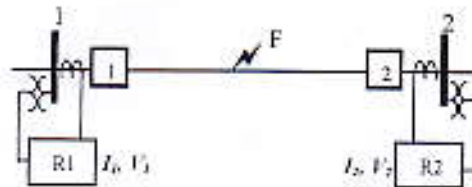
$$V_i(F) = V_i(0) - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk} + Z_f} V_k(0) \quad (12)$$

dengan $V_i(F)$ adalah tegangan rel i saat gangguan, $V_i(0)$, tegangan pragangguan di rel i , dan Z_{ik} adalah elemen ik matriks impedans rel.

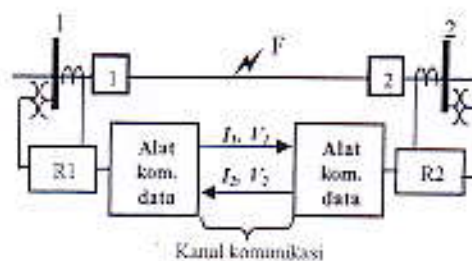
III. PROTEKSI SALURAN

Relai untuk memproteksi saluran transmisi pada prinsipnya dikategorikan atas dua: relai nonunit dan relai unit [3]. Relai nonunit adalah relai yang beroperasi secara sendiri-sendiri, tanpa bantuan relai lain (Gambar 4). Dalam kategori ini, termasuk relai arus-lebih, relai arah, relai jarak. Keunggulannya adalah relatif murah dan sederhana. Relai unit adalah relai yang

harus beroperasi secara berpasangan (Gambar 5). Oleh karena itu, relai ini membutuhkan sistem komunikasi antara relai satu dengan pasangannya. Dengan demikian, keandalan relainya juga bergantung pada sistem komunikasinya. Dalam kategori ini, relai pilot perbandingan-arah adalah contohnya.



Gambar 4. Prinsip dasar relai nonunit



Gambar 5. Prinsip dasar relai unit [4]

3.1. Relai Arah

Relai arah adalah suatu relai yang merespon posisi fase-relatif arus terhadap arus lain atau tegangan yang menjadi besaran acuan/polarisasi [11]. Jadi, relai arah dapat membedakan antara aliran arus satu dengan yang lainnya dalam rangkaian arus bolak-balik, dengan mengenali perbedaan sudut-fase antara arus dengan tegangan polarisasi. Kemampuan untuk membedakan antara arah arus satu dengan lainnya, bergantung pada pilihan besaran polarisasi dan sudut torsi maksimum relai [5].

Suatu relai arah pada dasarnya membutuhkan piranti (*device*) yang sensitif fase dan memenuhi kriteria (kerja) sebagai berikut [6]:

$$-(90^\circ - \tau) < \arg\left(\frac{I_r}{V_r}\right) < (90^\circ + \tau) \quad (13)$$

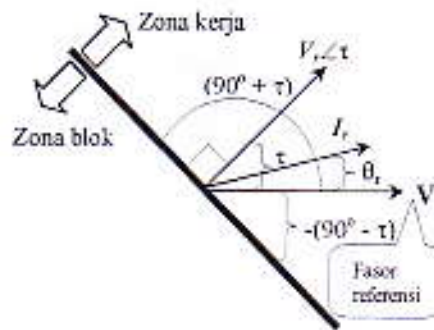
dengan

- τ = sudut torsi maksimum;
- I_r = arus pada lokasi relai;
- V_r = tegangan pada lokasi relai;

$$\arg\left(\frac{I_r}{V_r}\right) = \theta_r = \text{sudut antara } I_r \text{ dan } V_r$$

Koneksi relai arah yang mampu memberikan performa terbaik yaitu koneksi 90 derajat. Relai pada fase-A akan dipolarisasi oleh tegangan antar-fase BC. Koneksi ini akan menyebabkan

relai bekerja dengan baik untuk semua jenis gangguan kecuali untuk gangguan tiga-fase *close-up* yang menyebabkan tegangan pada semua fase menjadi sangat kecil. Jenis ini akan menghasilkan torsi maksimum pada saat arus relai mendahului tegangannya sebesar 45 derajat [2].



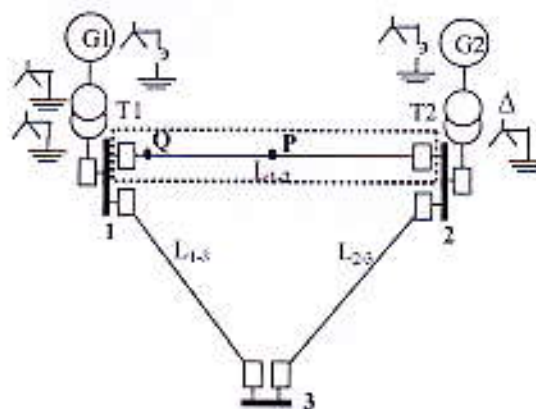
Gambar 6. Karakteristik kerja relai arah [8]

Karakteristik relai pada bidang kompleks tersebut terbagi atas dua zona: zona kerja dan zona blok (Gambar 6). Fasor arus dan tegangan relai yang jatuh ke "zona kerja" akan mengindikasikan arah-arus *ke depan* atau *masuk*. Sebaliknya, fasor arus dan tegangan yang jatuh ke "zona blok" akan mengindikasikan arah-arus *ke belakang* atau *keluar*.

IV. HASIL DAN ANALISA

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah diagram segaris seperti terlihat pada Gambar 7. Sistem tersebut terdiri atas 2 generator yakni G1 dan G2, 2 trafo yakni T1 dan T2 serta 3 rel: rel-1, -2, dan -3. Ketiga rel tersebut dihubungkan oleh 3 saluran transmisi masing-masing: $L_{1,2}$, $L_{1,3}$ serta $L_{2,3}$. Nilai-nilai setiap komponen disajikan dalam Tabel 2.

Zona proteksi relai adalah saluran $L_{1,2}$ yakni bagian sistem yang dikelilingi oleh garis putus-putus pada Gambar 7. Arus dan tegangan gangguan satu-fase ke tanah beserta relainya disimulasikan dengan menggunakan perangkat-lunak *Matlab 5.3*.



Gambar 7. Diagram segaris suatu sistem tiga rel [8]

Tabel 2. Data numeris untuk Gambar 7 dengan dasar 100 MVA

No.	Komponen	Tegangan Nominal	$X' = X''$ (p.u.)	X^0 (p.u.)	X^a (p.u.)
1	G1	20kV	0,15	0,05	0,25/3
2	G2	20kV	0,15	0,05	0,25/3
3	T1	20/220kV	0,10	0,10	-
4	T2	20/220kV	0,10	0,10	-
5	L ₁₋₂	220kV	0,125	0,30	-
6	L ₁₋₃	220kV	0,15	0,35	-
7	L ₂₋₃	220kV	0,25	0,7125	-

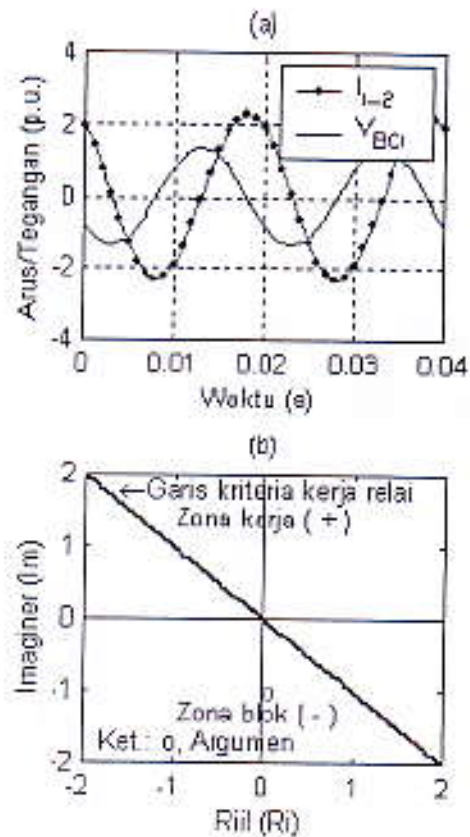
Pengujian performa relai dibedakan atas dua: pengujian terhadap gangguan eksternal dan gangguan internal. Gangguan eksternal disimulasikan pada satu titik/lokasi gangguan yakni di rel-1 (titik 1). Rel-1 berbatasan dengan ujung L_{1,2}, yang merupakan zona eksternal terdekat, tepat berada di belakang relai-1 (R1). Gangguan internal disimulasikan pada dua titik berbeda: titik 'P' dan titik 'Q'. Titik P tepat berada di pertengahan L_{1,2}, sementara titik Q berjarak 5% panjang L_{1,2} terlihat dari rel-1. Keduanya, baik eksternal maupun internal dianggap mencakupi impedans gangguan (Z_f) sebesar 0,1 per unit.

4.1. Respon terhadap Gangguan Eksternal

Saat gangguan di rel-1, arus dan tegangan yang "dirasakan" oleh R1 disajikan dalam Tabel 3. Gambar 5a dan b masing-masing memperlihatkan bentuk gelombang serta beda-fase antara (argumen) arus dan tegangan yang terdeteksi oleh R1 (I_{R1} dan V_{R1}) adalah sedemikian hingga, berada pada "zona blok" dari karakteristik relai. Hal ini menandakan arah-arus yang "terlihat" oleh R1 adalah *keluar* dari saluran. Arah-arus yang terdeteksi keluar menyebabkan relai "berkesimpulan" bahwa gangguan di rel-1 adalah **eksternal**, yang sejatinya memang berada di luar zona proteksi. Respon (akhir) relai adalah memblok (dapat dilihat dalam Tabel 4) pembukaan *CB* di rel-1. Arah-arus deteksian serta respon relai untuk ketiga titik gangguan disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 3. Arus dan tegangan yang terbaca oleh R1 untuk tiga titik gangguan

No.	Titik Gangguan	Pembacaan Relai	
		Arus Fase-A (p.u.)	Tegangan Fase-BC (p.u.)
1	1	1,6351 $\angle 122^\circ$	0,9833 $\angle -145^\circ$
2	P	2,4257 $\angle -57^\circ$	0,9782 $\angle -130^\circ$
3	Q	3,3490 $\angle -56^\circ$	0,9744 $\angle -143^\circ$

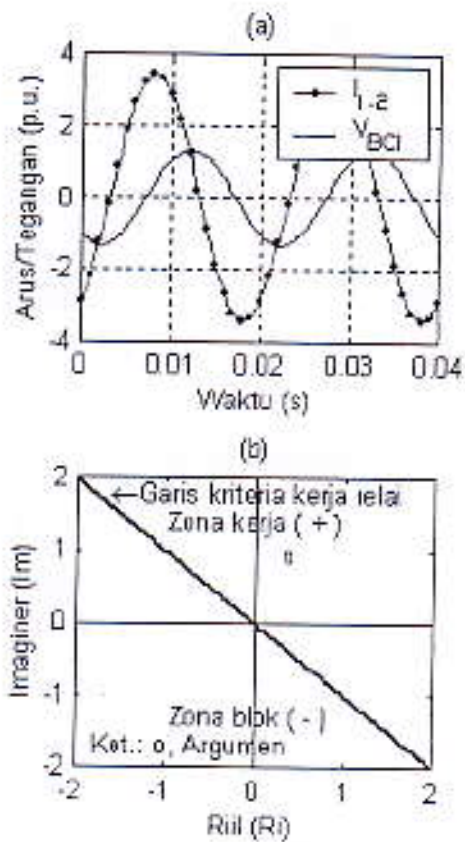


Gambar 5. Arah-arus deteksi relai terhadap gangguan di rel-1 adalah arah keluar.

4.2. Respon terhadap Gangguan Internal

Gangguan di titik 'P' terjadi di pertengahan saluran 1-2. Arus dan tegangan yang terdeteksi oleh R1 disajikan dalam Tabel 3. Gambar 6a dan b masing-masing memperlihatkan bentuk gelombang serta argumen arus dan tegangan R1 adalah sedemikian hingga, berada pada "zona kerja" dari karakteristik relai. Hal ini berarti arah-arus yang terlihat oleh R1 adalah *masuk* dari saluran. Arah-arus yang *masuk* pada kedua ujung saluran tersebut menandakan bahwa gangguan di titik P adalah **internal**, yang sejatinya memang demikian. Respon relai, kemudian, adalah *men-trip* kedua CB di rel-1 dengan kecepatan tinggi.

Gangguan di titik Q juga adalah internal. Arus dan tegangan yang terdeteksi oleh R1 disajikan dalam Tabel 3. Sama dengan kasus gangguan di titik P, argumen relai (terlihat pada Gambar 7b) adalah sedemikian hingga arah-arus yang terdeteksi, *masuk* ke zona proteksi. Hal yang mengindikasikan gangguan **internal** (dapat dilihat dalam Tabel 4), sehingga relai *men-trip* CB.



Gambar 6. Arah-arus deteksian relai terhadap gangguan di titik-P adalah arah masuk

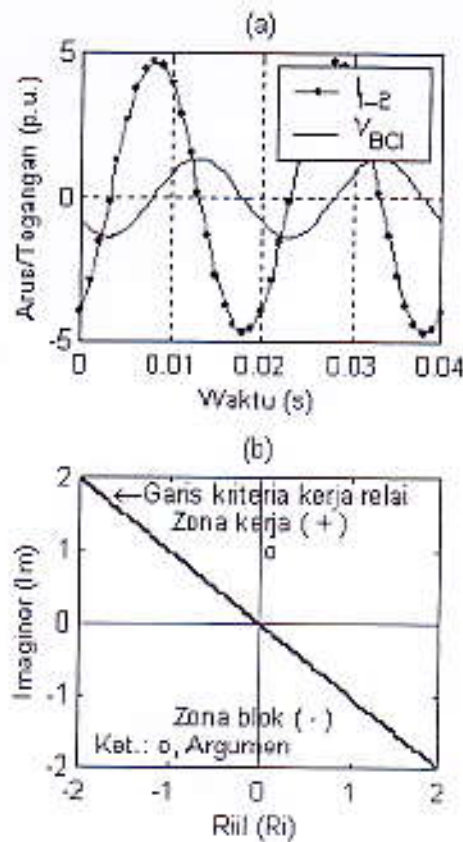
Tabel 4. Arah-arus deteksian Relai beserta responnya untuk tiga titik (lokasi) gangguan berbeda

No.	Titik Gangguan	Arah-Arus Deteksi-an Relai	Respon Relai	Kete-rangan
1	I	K	Blok	Rel-1
2	P	M	<i>Trip</i>	50% $L_{1,2}$
3	Q	M	<i>Trip</i>	5% $L_{1,2}$

Keterangan:

M = arah-arus, masuk ke saluran

K = arah-arus, keluar dari saluran



Gambar 7. Arah-arus deteksian relai terhadap gangguan di titik-Q adalah arah *masuk*

V. KESIMPULAN

Makalah ini telah menyajikan performa relai-arrah yang memproteksi saluran transmisi dua-terminal dari gangguan simetris. Hasil simulasi pada tiga lokasi gangguan berbeda (1 eksternal dan 2 internal) telah menunjukkan bahwa relai mampu mendeteksi semua lokasi gangguan dengan benar. Relai ini telah menunjukkan tingkat sensitivitas yang sangat baik terhadap gangguan internal dan sekaligus tingkat keimunan yang tinggi terhadap gangguan eksternal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Universitas Andalas atas dukungan finansial yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A T. Johns, and S. K. Salman, "*Digital Protection for Power System*", London, IEE 1995.
- [2] B. Ram and D. N. Vishwakarma, "*Power System Protection and Switchgear*", McGraw Hill, New Delhi, 1995.
- [3] Z. Q. Bo, "A New Non-communication Protection Technique for Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No.4, pp. 1090-1099, 1998.
- [4] H. Y. Li, E. P. Southern, P. A. Crossley, S. Potts, S.D.A. Pickering, B. R. J. Counce, and G. C. Weller, "A New Type of Differential Feeder Protection Relay Using the Global Positioning System for Data Synchronization", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No.3, pp. 1090-1099, 1997.
- [5] C. R. Mason, "*The Art and Science of Protective Relaying*", Wiley Eastern Limited, New Delhi, 1979.
- [6] Y. G. Paithankar, "*Transmission Network Protection*", Marcell Dekker, New York, 1998 .
- [7] B. Kasztenny and E. Rosolowski, "A Digital Protective Relay as a Real-Time Microprocessor System", *IEEE*, pp. 460-466, 1998.
- [8] H. Saadat, "*Power System Analysis*", McGraw-Hill, Singapore, 1999.
- [9] ANSI/IEEE Std. 100, 1984, "*IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Term*", IEEE, New York.
- [10] L. Wang and E. Price, "New High-Speed Microprocessor Distance Relaying for Transmission Lines", *IEEE*, pp. 1143-1147, 1998.
- [11] Anderson, P.M., 1999, "*Power System Protection*", McGraw-Hill, New York.
- [12] Ravindranath, B. and Chander, M., 1977, "*Power System Protection and Switchgear*", Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- [13] Wadhwa, C. L., 1986, "*Electrical Power Systems*", Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- [14] Stevenson J.R., W.D., 1990, "*Analisis Sistem Tenaga Listrik*", Edisi ke empat, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [15] Grainger, J.J. and Stevenson, Jr. W. D., 1994, "*Power System Analysis*", McGraw-Hill, New York.
- [16] Saadat, H., 1999, "*Power System Analysis*", McGraw-Hill, Singapore.
- [17] Stagg, G. W., El-Abiad, A., 1968, "*Computer Methods in Power System Analysis*", McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo.