

PEMBUATAN MODUL PRAKTIKUM RELE PROTEKSI ARUS URUTAN NEGATIF DENGAN SEPAM 1000⁺

Tri Hutomo^{*)}, Mochammad Facta, and Karnoto

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

Email : tri3hut@yahoo.com

Abstrak

Adanya gangguan dalam sistem tenaga listrik merupakan masalah yang harus dihilangkan karena dapat menyebabkan ketidakseimbangan pada tegangan dan arus. Sistem tiga fasa yang tak seimbang pada arus dan tegangannya memiliki komponen urutan positif, negatif dan nol. Adanya komponen urutan negatif ini memiliki efek buruk terutama pada mesin listrik yaitu dapat mengakibatkan pemanasan yang mempengaruhi kekuatan isolasi sehingga mengurangi umur dari mesin listrik. Dalam upaya untuk mempelajari gangguan arus urutan negatif dan kinerja peralatan proteksi yang melindungi dari gangguan tersebut maka diperlukan sebuah prototipe sistem tenaga listrik yang dapat mensimulasikan gangguan tidak seimbang dan arus urutan negatif. Berdasarkan hasil yang didapatkan pada simulasi program, maka nilai arus urutan negatif terbesar terjadi pada gangguan hubung singkat fasa ke fasa yakni sebesar 0.307 A dan nilai arus gangguan terkecil pada gangguan beban tak seimbang yakni 0.043 A. Gangguan satu fasa terbuka dan dua fasa terbuka memiliki nilai arus urutan negatif yang sama besar yaitu 0.045 A. Arus gangguan ini diukur pada sisi sekunder CT ideal dengan setting rasio 200:1. Kurva pemutusan rele SEPAM yang tepat untuk melindungi motor induksi tiga fasa 10 HP dari arus urutan negatif adalah tipe definite dengan waktu pemutusan 0.6 detik.

Kata Kunci : proteksi , gangguan tak seimbang, arus urutan negatif

Abstract

Faults in power systems are problems that must be cleared because several types of faults lead to unbalance of voltages and currents. Unbalanced three-phase system has positive, negative and zero sequence in the voltages and currents. Negative sequence has destructive effect especially to electric machine because it produces heat and reduces the quality of isolation and consequently it will shorten the lifetime of machine. In the effort to study the negative sequence currents fault and the performance of protection devices , a prototype of power system that can simulate unbalanced fault and negative sequence currents is required. Several results are obtained after program simulation. The highest negative sequence currents is obtained during phase to phase short circuit fault at 0.307 Ampere and the lowest one is unbalance load at 0.043 Ampere. One phase and two phase open faults have the same negative sequence currents magnitude at 0.045 Ampere. The fault currents are measured on secondary side of ideal CT with ratios setting 200:1. The definite curve of SEPAM relay is the most suitable tripping curve to protect 10 HP three-phase induction motor from the negative sequence currents with tripping time at 0.6s.

Keywords : protection, unbalance fault, negative sequence current

1. Pendahuluan

Adanya gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan masalah yang harus dihilangkan. Sistem proteksi yang dapat mengamankan peralatan-peralatan sistem tenaga listrik dari gangguan yang mungkin timbul diperlukan untuk menjamin keandalan dan keamanan dari operasi sistem tenaga listrik.

Pada keadaan tak seimbang arus dan tegangan pada sistem memiliki komponen urutan positif, negatif dan nol.

Adanya komponen tegangan dan arus urutan negatif yang dihasilkan oleh gangguan tak seimbang memiliki efek buruk terhadap sistem terutama pada mesin berputar yaitu generator dan motor yang dapat mengakibatkan pemanasan yang mempengaruhi kekuatan isolasi sehingga mengurangi umur dari mesin listrik [13].

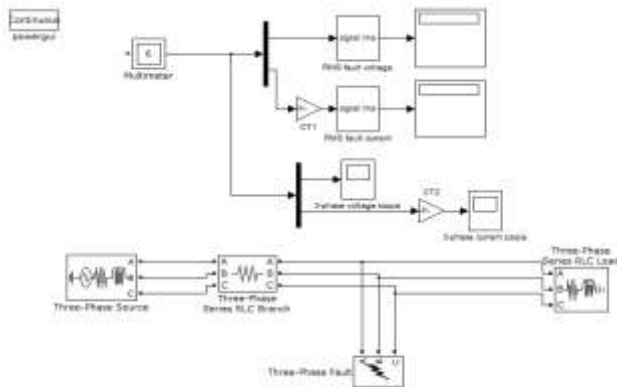
Guna memahami lebih dalam mengenai karakteristik dari gangguan arus urutan negatif dan kinerja sistem proteksi dalam melindungi peralatan maka diperlukan sebuah prototipe dari sistem tenaga listrik yang akan diterapkan

gangguan tak seimbang untuk menghasilkan arus urutan negatif. Prototipe yang akan dibuat berupa modul praktikum yang merepresentasikan sisi sekunder trafo saluran distribusi 3 fasa 4 kawat dilengkapi rele proteksi arus urutan negatif. Gangguan seri dan paralel serta pembebanan tak seimbang dihasilkan dengan membuat rangkaian ekuivalen yang akan menimbulkan ketidakseimbangan pada modul menyerupai yang terjadi di lapangan.

2. Metode

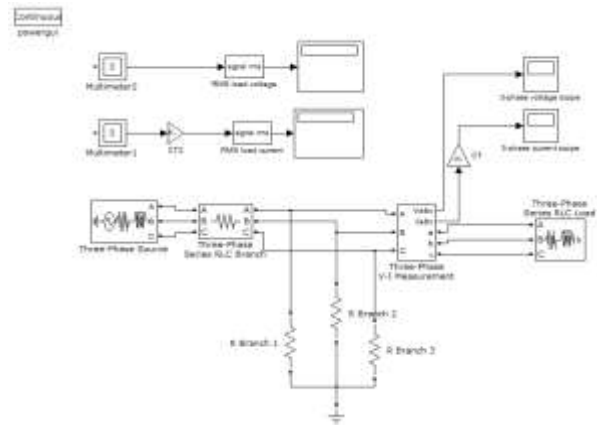
2.1 Pembuatan Program Simulasi Gangguan

Sebelum tahap pembuatan modul maka terlebih dahulu dibuat simulasi yang akan menjadi referensi untuk nilai-nilai arus gangguan yang akan direalisasikan pada modul. *Software* yang digunakan untuk mensimulasikan gangguan-gangguan adalah *Matlab Simulink simpowersystem*. Program ini dipilih karena cukup sederhana tanpa memerlukan parameter-parameter yang detail serta dapat mensimulasikan gangguan-gangguan transien seperti hubung singkat.



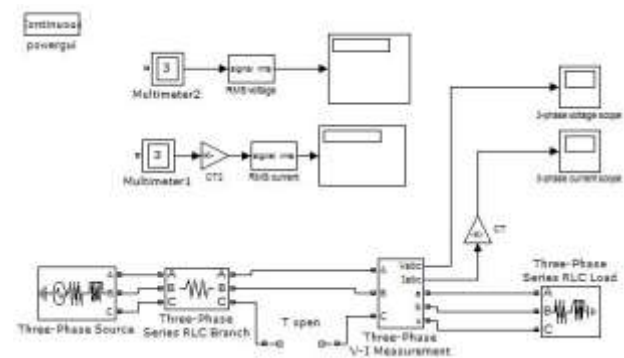
Gambar 1. Tampilan simulasi untuk sistem dalam gangguan hubung singkat

Gambar 1 menunjukkan program simulasi gangguan hubung singkat. Blok *Three-Phase Fault* berfungsi untuk menghasilkan gangguan hubung singkat pada sistem. Blok ini dapat mengaktifkan gangguan hubung singkat fasa ke tanah, fasa ke fasa atau kombinasi keduanya. Dalam simulasi ini nilai Z_f ditentukan sebesar 1Ω dan Z_g sebesar 2Ω .



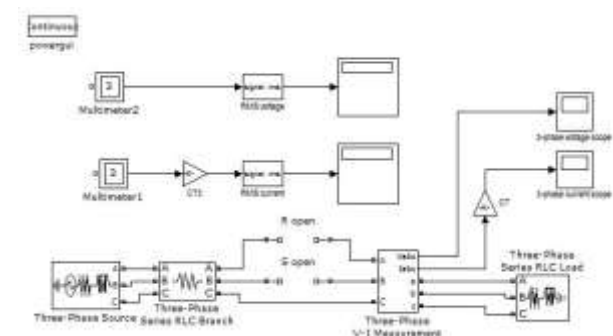
Gambar 2. Tampilan simulasi untuk sistem dalam gangguan beban tak seimbang

Gambar 2 menunjukkan program simulasi gangguan beban tak seimbang. Blok *R Branch* berfungsi sebagai representasi dari pembebanan tiga fasa tak seimbang. Ketidakseimbangan dihasilkan dengan memvariasikan nilai resistansi pada ketiga blok ini.



Gambar 3. Tampilan simulasi untuk sistem dalam gangguan satu fasa terbuka (Fasa T)

Gambar 3 menunjukkan program simulasi gangguan satu fasa terbuka. Blok *T open* berfungsi untuk membuat rangkaian *open circuit* pada satu fasa sistem.



Gambar 4. Tampilan simulasi untuk sistem dalam gangguan dua fasa terbuka (Fasa R dan S)

Gambar 4 menunjukkan program simulasi gangguan dua fasa terbuka. Blok *R open* dan *S open* berfungsi untuk membuat rangkaian *open circuit* di kedua fasa pada sistem.

Tabel 1. Spesifikasi Peralatan Pada Simulasi [3],[7]

No.	Blok Simulasi	Rating
1.	Three-Phase Source	Trafo 3 Fasa, VAsc 3.6 MVA, X/R 3.24, V _{L-L sekunder} 400V, 50 Hz
2.	Three-Phase Series RLC Branch	Kabel NYY 2.5 mm ² , 110 m, 7.41 Ω/Km
3.	Three-Phase Series RLC Load	Motor Induksi 3-fasa 10 HP, 50 Hz
4.	Gain	Trafo Arus Ideal 200:1

Tabel 1 menunjukkan data-data spesifikasi peralatan yang akan dimasukkan pada blok-blok simulasi.

2.1.2 Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan untuk kondisi normal, gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, fasa ke fasa, gangguan satu fasa terbuka, dua fasa terbuka serta gangguan beban tak seimbang. Nilai arus pada simulasi adalah nilai pada sisi sekunder CT.

Tabel 2. Hasil simulasi saat kondisi normal atau beban seimbang setelah melalui CT

No.	Gangguan	Fasa	I _{RMS} (A)	V _{L-N RMS} (V)	I _i (A)
1.	Kondisi Normal	A	0.1355	219.6	0.0000333
2.		B	0.1355	219.5	
3.		C	0.1354	219.7	

Pada Tabel 2 nilai arus untuk kondisi normal dihasilkan nilai yang seimbang sebesar sekitar 0.135 A dan nilai arus urutan negatif (I_i) yang sangat kecil mendekati nol.

Tabel 3. Hasil simulasi gangguan satu fasa ke tanah setelah melalui CT

No.	Gangguan	Fasa	I _{RMS} (A)	V _{L-N RMS} (V)	I _i (A)
1.	A-tanah	A	0.2938	58.76	0.098
		B	0	291.7	
		C	0	296.1	
2.	B-tanah	A	0	296.3	0.098
		B	0.2938	58.76	
		C	0	291.5	
3.	C-tanah	A	0	291.7	0.098
		B	0	295.8	
		C	0.294	58.8	

Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa nilai arus urutan negatif (I_i) untuk ketiga variasi gangguan satu fasa ke tanah menghasilkan nilai yang sama yaitu sebesar 0.098 A .

Tabel 4. Hasil simulasi gangguan dua fasa ke tanah

No.	Gangguan	Fasa	I _{RMS} (A)	V _{L-N RMS} (V)	I _i (A)
1.	A&B-tanah	A	0.5448	109	0.18

2.	B&C-tanah	B	0.5369	107.4	0.18
		C	0	294.5	
		A	0	294.7	
3.	A&C-tanah	B	0.5456	109.1	0.18
		C	0.5379	107.6	
		A	0.5374	107.5	
		C	0.5453	109.1	

Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa nilai arus urutan negatif (I_i) untuk ketiga variasi gangguan dua fasa ke tanah menghasilkan nilai yang sama yaitu sebesar 0.18 A.

Tabel 5. Hasil simulasi gangguan fasa ke fasa

No.	Gangguan	Fasa	I _{RMS} (A)	V _{L-N RMS} (V)	I _i (A)
1.	Fasa A ke B	A	0.5325	106.5	0.307
		B	-0.5322	106.4	
		C	0	327.7	
2.	Fasa B ke C	A	0	327.7	0.307
		B	0.5325	106.5	
		C	-0.5322	106.4	
3.	Fasa A ke C	A	0.5322	106.4	0.307
		B	0	327.7	
		C	-0.5325	106.5	

Pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa nilai arus urutan negatif (I_i) untuk ketiga variasi gangguan fasa ke fasa menghasilkan nilai yang sama yaitu sebesar 0.307 A.

Tabel 6. Hasil simulasi gangguan beban tak seimbang dan satu fasa putus

No.	Fasa	Beban (Ω)	I _{RMS} (A)	V _{L-N RMS} (V)	I _i (A)	U _r (%)
1.	A	10.4	0.126	204.5	0.043	53.49
	B	31.2	0.132	214.2		
	C	O.C	0	0		
2.	A	O.C	0	0	0.0429	54.08
	B	31.2	0.132	214.2		
	C	9.5	0.125	203		
3.	A	166	0.1346	218.6	0.043	56.51
	B	8.1	0.1235	200.5		
	C	O.C	0	0		

Pada Tabel 6 dapat dilihat bahwa nilai arus urutan negatif (I_i) yang dihasilkan untuk ketiga variasi ketidakseimbangan memiliki nilai yang hampir sama sedangkan nilai rasio ketidakseimbangannya (U_r) sedikit berbeda.

Tabel 7. Hasil simulasi gangguan satu fasa terbuka

No.	Gangguan	Fasa	I _{RMS} (A)	V _{L-N RMS} (V)	I _i (A)
1.	A terbuka	A	0	0	0.045
		B	0.1352	219.7	
		C	0.1352	219.7	
2.	B terbuka	A	0.1353	219.7	0.045
		B	0	0	
		C	0.1352	219.8	
3.	C terbuka	A	0.1352	219.7	0.045
		B	0.1352	219.7	
		C	0	0	

Tabel 8. Hasil simulasi gangguan dua fasa terbuka

No.	Gangguan	Fasa	I _{RMS} (A)	V _{L-N RMS} (V)	I _i (A)
1.	A&B terbuka	A	0	0	0.045
		B	0	0	
		C	0.135	220.3	
2.	B&C terbuka	A	0.1352	220.1	0.045
		B	0	0	
		C	0	0	
3.	A&C terbuka	A	0	0	0.045
		B	0.1354	220	
		C	0	0	

Pada Tabel 7 dan 8 dapat dilihat bahwa nilai arus urutan negatif untuk gangguan putus satu fasa dan gangguan putus dua fasa memiliki nilai arus urutan negatif (I_i) yang sama yaitu sebesar 0.045 A .

2.2 Spesifikasi Modul

Modul rele proteksi arus urutan negatif dirancang dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Tegangan suplai rangkaian kontrol adalah tegangan DC 12 V.
2. Tegangan pada rangkaian daya modul adalah tegangan AC 3 fasa 4.5 V.
3. Gangguan yang dapat dihasilkan dari modul ini adalah gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, dan fasa ke fasa. Kemudian gangguan satu fasa terbuka, dua fasa terbuka dan terakhir adalah gangguan beban tak seimbang.
4. Gangguan hubung singkat dilakukan sebelum beban.
5. Rangkaian daya dalam kondisi normal maupun gangguan dibuat melalui koordinasi rele bantu.
6. Arus gangguan hubung singkat yang dihasilkan dibawah 1 A.
7. Z_f direpresentasikan oleh resistor yang ukurannya disesuaikan dengan nilai arus gangguan yang akan dihasilkan.
8. Jumlah rele proteksi yang dapat dikoneksikan pada modul ini sebanyak 1 buah.
9. Fungsi CB pada modul ini direpresentasikan oleh rele bantu yang koilnya telah terhubung pada output rele SEPAM.
10. Rele SEPAM dan *Timer* H5CX-A, terpisah dengan modul dan dihubungkan dengan modul melalui terminal-terminal yang tersedia pada modul.

2.2.1 Spesifikasi Rele SEPAM 1000⁺[10]

Rele SEPAM 1000⁺ merupakan rele proteksi yang bertipe numerik. Pada rele ini terdapat bermacam-macam fungsi proteksi salah satunya adalah fungsi proteksi arus urutan negatif atau disebut *negative sequence* dengan kode ANSI 46.

Operasi dari proteksi *negative sequence* atau *unbalance* adalah:

- *Pick up* saat komponen urutan negatif dari arus fasa lebih besar dari nilai *set point* yaitu 10% arus nominal.

- Memiliki waktu *delay*. *Delay* waktu bisa *definite* atau *IDMT*.

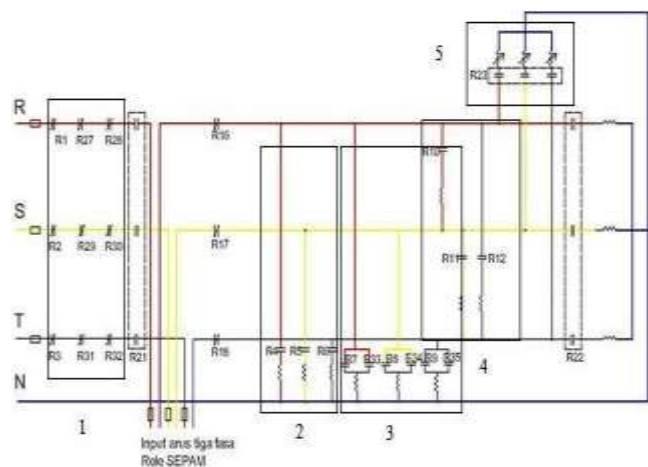
Nilai arus urutan negatif (I_i) dihitung dari arus-arus 3 fasa :

$$\vec{I}_i = \frac{1}{3} \times (\vec{I}_1 + a^2 \vec{I}_2 + a \vec{I}_3) \quad (1)$$

dimana $a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$

2.2.2 Rancangan Rangkaian Modul Praktikum Rele Proteksi Arus Urutan Negatif

Gambar 5 menunjukkan rangkaian modul disertai posisi-posisi gangguannya.



Gambar 5. Posisi gangguan pada modul praktikum rele proteksi arus urutan negatif

Keterangan :

- 1 : Gangguan satu fasa dan dua fasa terbuka
- 2 : Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah
- 3 : Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah
- 4 : Gangguan hubung singkat fasa ke fasa
- 5 : Gangguan beban tak seimbang

Dalam kondisi normal, semua rele gangguan dalam keadaan NO dan dapat diaktifkan melalui saklar-saklar pada panel kontrol gangguan. Rele untuk gangguan satu fasa terbuka adalah R1, R2 dan R3. Rele untuk gangguan dua fasa terbuka adalah R27, R28, R29, R30, R31 dan R32.

Rele untuk gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah adalah R4, R5 dan R6. Rele untuk gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah adalah R7, R8, R9, R33, R34 dan R35 dan terakhir rele untuk gangguan hubung singkat fasa ke fasa adalah R10, R11 dan R12. R21 berfungsi sebagai *Circuit Breaker*. R22 berfungsi untuk menghubungkan suplai ke beban seimbang sedangkan R23 menghubungkan ke beban tak seimbang.

2.3 Rancangan Setting Rele Proteksi Arus Urutan Negatif

Setting dari rele perlu untuk ditentukan guna menghasilkan proteksi yang dapat melindungi peralatan dari gangguan. Standar ketidakseimbangan yang digunakan mengacu pada batas toleransi ketidakseimbangan dari motor SIEMENS dimana batas arus ketidakseimbangan yang diperbolehkan adalah 8% selama 15 detik [6] namun untuk gangguan hubung singkat *delay* yang akan diberikan adalah sesingkat mungkin agar tidak merusak motor dan peralatan lain. *Ibase* dari peralatan adalah sebesar 27 A berdasarkan pada arus nominal motor induksi 3 fasa kapasitas 10 HP namun karena SEPAM hanya memiliki range *Ibase* minimum adalah 80A maka nilai *Ibase* yang dimasukkan pada rele SEPAM adalah 80A dengan rasio CT 200:1. Berikut adalah rancangan *setting* rele SEPAM dalam kurva *definite* dan *IDMT*:

2.3.1 Setting Definite

Untuk $I_i > I_s$, waktu *delay* adalah *definite* (tidak tergantung besar I_i) dan sama besar dengan T.

Tabel 9. Rancangan *setting* kurva *definite*

No.	Gangguan	U_r	I_i/I_b	$U_r \text{ Max}$	T (s)
1.	A-tanah	2	0.245	2	0.6
	B-tanah				
	C-tanah				
2.	A&B-tanah	0.51	0.45		
	B&C-tanah				
	A&C-tanah				
3.	A terbuka	0.5	0.1125		
	B terbuka				
	C terbuka				
4.	A&B terbuka	2	0.1125		
	B&C terbuka				
	A&C terbuka				
5.	Fasa B ke C	0.5	0.7675		
	Fasa A ke C				
6.	U_r 53.49%	0.535	0.1075		
7.	U_r 54.08%	0.54	0.107		
8.	U_r 56.51%	0.56	0.1075		

Pada Tabel 9 dapat dilihat nilai rasio ketidakseimbangan yang terbesar adalah pada gangguan dua fasa terbuka dan hubung singkat satu fasa ke tanah maka nilai *setting* arus urutan negatif diatur pada rasio ketidakseimbangan maksimum. Waktu *t* didapat dari standar :

$$t = \frac{\text{Presentase unbalance Standar}}{\text{presentase unbalance gangguan max}} \times 15 \text{ s}$$

$$= \frac{8}{200} \times 15 \text{ s}$$

$$= 0.6 \text{ s}$$

2.3.2 Setting IDMT

- Untuk $I_s/I_b \leq I_i/I_b \leq 0,5$

$$t = \frac{3,19}{(I_i/I_b)^{1,5}} \cdot T \quad (2)$$

- Untuk $0,5 \leq I_i/I_b \leq 5$

$$t = \frac{4,64}{(I_i/I_b)^{0,96}} \cdot T \quad (3)$$

- Untuk $I_i/I_b > 5$

$$t = T \quad (4)$$

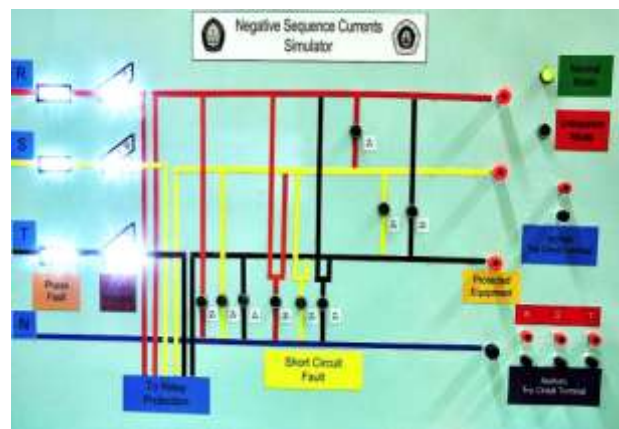
Tabel 10. Rancangan *setting* untuk kurva *IDMT*

No.	Gangguan	Ur	I_i/I_b	T (s)	t (s)
1.	A-tanah	2	0.245	0.1	2.65
	B-tanah				
	C-tanah				
2.	A&B-tanah	0.51	0.45	0.1	1.06
	B&C-tanah				
	A&C-tanah				
3.	A terbuka	0.5	0.1125	0.1	8.62
	B terbuka				
	C terbuka				
4.	A&B terbuka	2	0.1125	0.1	8.62
	B&C terbuka				
	A&C terbuka				
5.	Fasa A ke B	0.5	0.7675	0.1	0.598
	Fasa A ke C				
6.	U_r 53.49%	0.535	0.1075	0.1	9.11
7.	U_r 54.08%	0.54	0.107	0.1	9.11
8.	U_r 56.51%	0.56	0.1075	0.1	9.11

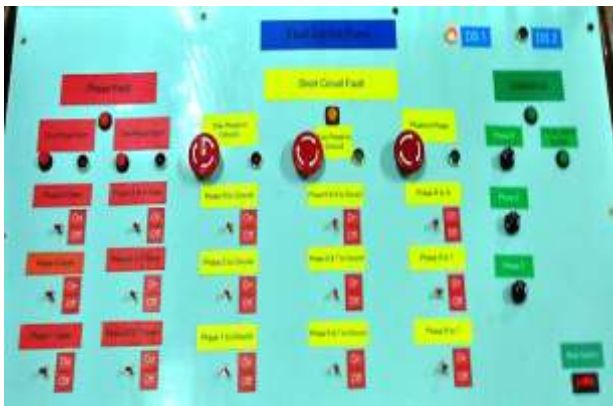
Nilai T pada Tabel 10 diset pada rele SEPAM sebesar 0.1 dan merupakan nilai yang minimum agar didapatkan nilai *t* kerja untuk *tripping* secepat mungkin.

3. Hasil dan Analisa

Gambar 6 menunjukkan tampilan dari papan utama modul praktikum rele proteksi arus urutan negatif sedangkan Gambar 7 adalah tampilan dari panel kontrol gangguan modul.



Gambar 6. Tampilan papan utama modul praktikum rele proteksi arus urutan negatif



Gambar 7. Tampilan panel kontrol gangguan modul praktikum rele proteksi arus urutan negatif

3.1 Analisis Setting Rele Proteksi Arus Urutan Negatif

Tabel 11 menunjukkan perbandingan *setting* antara dua kurva pemutusan yaitu *definite* dan *IDMT* hasil pengujian dengan standar waktu yang diperbolehkan pada motor pabrikan SIEMENS.

Tabel 11. Perbandingan waktu pemutusan tipe *definite* dengan standar *unbalance current* motor SIEMENS

No.	Gangguan	t SEPAM Definite	t Standar Siemens	Ket.
1.	A-tanah	0.601 s	0.6 s	Sesuai
	B-tanah	0.601 s	0.6 s	Sesuai
	C-tanah	0.597 s	0.6 s	Sesuai
2.	A&B-tanah	0.597 s	2.35 s	Sesuai
	B&C-tanah	0.589 s	2.35 s	Sesuai
	A&C-tanah	0.589 s	2.35 s	Sesuai
3.	A terbuka	0.617 s	2.4 s	Sesuai
	B terbuka	0.629 s	2.4 s	Sesuai
	C terbuka	0.629 s	2.4 s	Sesuai
4.	A&B terbuka	0.621 s	0.6 s	Sesuai
	B&C terbuka	0.641 s	0.6 s	Sesuai
	A&C terbuka	0.629 s	0.6 s	Sesuai
5.	Fasa A ke B	0.589 s	2.4 s	Sesuai
	Fasa A ke C	0.585 s	2.4 s	Sesuai
6.	U_r 53.49%	0.74 s	2.24 s	Sesuai
7.	U_r 54.08%	0.64 s	2.21 s	Sesuai
8.	U_r 56.51%	0.78 s	2.12 s	Sesuai

Pada Tabel 11 terlihat bahwa untuk *setting* proteksi *definite* waktu pemutusan masih lebih cepat dibanding dengan standar yang ditetapkan oleh motor SIEMENS.

Tabel 12. Perbandingan waktu pemutusan tipe *IDMT* dengan standar *unbalance current* motor SIEMENS

No.	Gangguan	t SEPAM IDMT	t Standar Siemens	Ket.
1.	A-tanah	2.13 s	0.6 s	Tak sesuai
	B-tanah	1.93 s	0.6 s	Tak sesuai

2.	C-tanah	2.17 s	0.6 s	Tak sesuai
	A&B-tanah	0.9 s	2.35 s	Sesuai
	B&C-tanah	0.9 s	2.35 s	Sesuai
3.	A&C-tanah	1.01 s	2.35 s	Sesuai
	A terbuka	8.545 s	2.4 s	Tak sesuai
	B terbuka	7.75 s	2.4 s	Tak sesuai
4.	C terbuka	7.38 s	2.4 s	Tak sesuai
	A&B terbuka	7.43 s	0.6 s	Tak sesuai
	B&C terbuka	8.28 s	0.6 s	Tak sesuai
5.	A&C terbuka	7.08 s	0.6 s	Tak sesuai
	Fasa A ke B	0.58 s	2.4 s	Sesuai
	Fasa B ke C	0.6 s	2.4 s	Sesuai
6.	Fasa A ke C	0.66 s	2.4 s	Sesuai
	U_r 53.49%	10.18 s	2.24 s	Tak sesuai
	U_r 54.08%	10.28 s	2.21 s	Tak sesuai
8.	U_r 56.51%	10.67 s	2.12 s	Tak sesuai

Pada Tabel 12 *setting* proteksi *IDMT* hanya pada gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dan hubung singkat fasa ke fasa yang lebih cepat dibanding dengan standar dari SIEMENS. Waktu pemutusan yang lebih lama menunjukkan rele SEPAM dengan tipe kurva *IDMT* tidak dapat melindungi motor dari gangguan tak seimbang sesuai dengan standar dari SIEMENS.

Gangguan hubung singkat yang diterapkan memiliki nilai arus yang besar dan dapat berdampak pada kenaikan suhu pada kabel dan dapat merusak kualitas kabel. Tiap-tiap kabel memiliki batas ketahanan terhadap arus hubung singkat yang terjadi. Standar untuk kapasitas arus hubung singkat pada kabel jenis NYY dengan diameter 2.5 mm² ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13 menunjukkan perbandingan antara nilai arus hubung singkat yang terjadi dan waktu pemutusan rele dengan standar kapasitas arus hubung singkat pada kabel [3].

Tabel 13. Perbandingan arus gangguan dan waktu pemutusan kurva *definite* dengan kapasitas hubung singkat pada kabel jenis NYY ukuran 2.5 mm².

No.	Gangguan	I _r Max(A)	t Def. (s)	Kap. I _{sc} (kA)			Ket.
				1.12	0.5	3.6	
1.	1 fasa ke tanah	74.6	0.6				Sesuai
2.	2 fasa ke tanah	129	0.6	0.1 s	0.5 s	1 s	Sesuai
3.	Fasa ke fasa	119	0.6				Sesuai

Dapat dilihat pada Tabel 13 waktu pemutusan yang telah di *setting* pada rele dengan kurva *definite* masih lebih cepat dibanding waktu arus hubung singkat yang boleh dilalui pada kabel NYY.

Tabel 14. Perbandingan arus gangguan dan waktu pemutusan kurva IDMT dengan kapasitas hubung singkat pada kabel jenis NYY ukuran 2.5 mm².

No.	Gangguan	I _f max (A)	t IDMT (s)	Kap. I _{sc} (kA)			Ket.
				1.12	0.5	3.6	
1.	1 fasa ke tanah	74.6	1.93				Sesuai
2.	2 fasa ke tanah	129	0.9	0.1 s	0.5 s	1 s	Sesuai
3.	Fasa ke fasa	119	0.58				Sesuai

Dapat dilihat pada Tabel 14, waktu pemutusan yang telah di *setting* pada rele dengan kurva *IDMT* masih lebih cepat dibanding waktu arus hubung singkat yang boleh dilalui pada kabel NYY. Pada gangguan satu fasa ke tanah nilai arus yang dihasilkan masih jauh lebih kecil dibandingkan dengan standar pada kabel NYY sehingga durasi gangguan yang diperbolehkan juga bisa lebih lama.

Kapasitas hubung singkat pada kabel dengan jenis *hard drawn copper* [1] juga dapat dihitung dengan persamaan :

$$I = \frac{152.1 S}{\sqrt{t}} \quad (6)$$

dengan $\theta = 160^{\circ}\text{C}$

dimana,

I = Arus (A)

θ = Kenaikan suhu ($^{\circ}\text{C}$)

S = Penampang penghantar (mm²)

t = Waktu pembebanan arus (detik)

Persamaan diatas adalah dengan asumsi radiasi panas tidak terjadi dalam waktu kurang dari 2-3 detik dan suhu penghantar permulaan adalah 40 $^{\circ}\text{C}$.

Tabel 15 menunjukkan perbandingan antara hasil perhitungan untuk waktu hubung singkat maksimum yang boleh dilalui kabel dengan waktu pemutusan kurva *definite*.

Tabel 15. Perbandingan antara waktu pemutusan kurva *definite* dengan perhitungan waktu hubung singkat maksimum pada kabel *hard drawn copper* ukuran 2.5 mm².

No.	Gangguan	t <i>definite</i>	t I _{sc} Max	Ket.
1.	1 fasa ke tanah	0.6 s	26 s	Sesuai
2.	2 fasa ke tanah	0.6 s	8.6 s	Sesuai
3.	Fasa ke fasa	0.6 s	10.2 s	Sesuai

Pada Tabel 15 terlihat bahwa waktu pemutusan untuk kurva *definite* masih jauh lebih cepat dibanding waktu hubung singkat maksimum yang diperbolehkan pada kabel.

Tabel 16. Perbandingan antara waktu pemutusan kurva IDMT dengan perhitungan waktu hubung singkat maksimum pada kabel *hard drawn copper* ukuran 2.5 mm².

No.	Gangguan	t IDMT	t I _{sc} Max	Ket.
1.	1 fasa ke tanah	1.93 s	26 s	Sesuai
2.	2 fasa ke tanah	0.9 s	8.6 s	Sesuai
3.	Fasa ke fasa	0.58 s	10.2 s	Sesuai

Pada Tabel 16 terlihat bahwa waktu pemutusan untuk kurva *IDMT* masih lebih cepat dibanding waktu hubung singkat maksimum yang diperbolehkan pada kabel.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan modul praktikum yang telah dibuat dapat mensimulasikan gangguan-gangguan yang menghasilkan arus urutan negatif yaitu gangguan satu fasa dan dua fasa terbuka, gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, dan fasa ke fasa serta gangguan beban tak seimbang. Kurva pemutusan pada rele SEPAM yang sesuai untuk melindungi motor induksi tiga fasa 10 HP dari gangguan arus urutan negatif adalah tipe kurva *definite* dengan waktu pemutusan 0.6 detik. Waktu perhitungan hubung singkat maksimum yang diperbolehkan pada kabel jenis *hard drawn copper* dengan diameter 2.5 mm² untuk jenis gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah adalah selama 26 detik, hubung singkat dua fasa ke tanah selama 8.6 detik dan hubung singkat fasa ke fasa 10.2 detik. Studi lebih lanjut bisa dilakukan dengan menerapkan gangguan simultan, menggunakan program simulasi selain SIMULINK, menggunakan rele proteksi selain SEPAM dan terakhir pemodelan motor disertai komponen induktif.

Referensi

- [1]. Arismunandar, Artono. "Teknik Tegangan Tinggi, Jilid II : Saluran Transmisi", Pradnya Paramita, Jakarta. 1984.
- [2]. Calero, Fernando, *Rebirth Of Negative-Sequence Quantities In Protective Relaying With Microprocessor-Based Relays*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Bolivia, 2008.
- [3]. -----, "Datasheet Kabelindo NYY Cable". PT.KABELINDO MURNI Tbk. 2010
- [4]. D. Stevenson, Jr., William, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, Erlangga: Jakarta,1993.
- [5]. Gosbell, Vic J., *Voltage Unbalance*, University of Wollongong. Australia, 2002.
- [6]. -----, "Manual Induction Motors/Generators Types CGG, NCGG, CAZ SIEMENS". Siemens Industry, Inc. OH. 2010

- [7]. -----, "Manual Three Phase Induction Motor Super Line J Series Mitsubishi Electric. Mitsubishi Electric Automation Co., Ltd.
- [8]. Gonen, Turan, *Modern Power System Analysis*, California State University. California, 1988.
- [9]. Iskandar, Adi, "Pembuatan Modul Praktikum Arus Lebih", Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia. 2007.
- [10]. -----, "Manual SEPAM 1000+ Merlin Gerin". Schneider Electric Industries. SA. 2000.
- [11]. -----, "Modul Pembelajaran Proteksi Sistem Tenaga Listrik". Depdiknas. 2003.
- [12]. Paithankar, S.r Bhide. *Fundamental of Power System Protection*. Prentice Hall of India. 2003.
- [13]. Plummer, Isaac, *Asymmetry In Distribution Systems: Causes Harmful Effects And Remedies*, Louisiana State University. Louisiana, 2011.
- [14]. Saadat, Hadi, *Power System Analysis*, Milwaukee School of Engineering. Milwaukee, 1999.
- [15]. -----, "Manual OMRON Digital Timer H5CX-A". OMRON Corp. 2008.
- [16]. -----, "Auxiliary relay JZC-21F (T70) Datasheet". Ningbo Forward Relay Corp. Ltd.
- [17]. -----, "Auxiliary relay HH52, 53, 54 Datasheet". Fuji Electric Components & Systems CO., Ltd.
- [18]. -----, "Auxiliary relay HRM1 Datasheet". <http://www.mantech.co.za/datasheets/products/HRMH.pdf>.
- [19]. -----, "Auxiliary relay HJR-3FF Datasheet". Ningbo Tianbo Gaglian Electronics Co., Ltd. 2004.
- [20]. -----, "Instrument Transformers GEH-230 Instructions". General Electric.
- [21]. -----, "Current Transformer Principles of Operation". Meters USA.
- [22]. Muljadi,E, Butterfield, C.P., Batan, T., and Yildirim D., *Understanding the Unbalanced-Voltage Problem in Wind Turbine Generation*. National Renewable Energy Laboratory. Colorado. 2000.
- [23]. Rao, Madhava T.S, *Power System Protection Static Relays*, University of Roorke. Roorke, 1979.
- [24]. -----, "Matlab Simulink Simpowersystem help". The MathWorks, Inc. 2008.
- [25]. Mahadanaarachchi, V.P, *Fault Analysis and Protection of Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Farms*, University of Moratuwa. Katubedda, 2004.