

PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI DAN MONITORING UNTUK GENERATOR SINKRON TIGA FASE BERBASIS ARDUINO MEGA 2560 *Design of Protection and Monitoring Systems for Three-Phase Synchronous Generator Based On Arduino Mega 2560*

Surya Hidayat¹*, I Made Ari Nrartha²*, Ida Bagus Fery Citarsa³†

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat

Email: nrartha@unram.ac.id (Corresponding Author)†; ferycitarsa@unram.ac.id

ABSTRAK

Generator sinkron tiga fase adalah komponen utama pada sistem tenaga, sehingga perlu adanya sistem proteksi dari gangguan-gangguan dan sistem monitoring untuk memastikan operasi sistem aman. Gangguan-gangguan generator sinkron tiga fase seperti gangguan tegangan berlebih, tegangan kurang, tegangan tidak seimbang, kehilangan eksitasi, arus tidak seimbang, arus lebih, gangguan satu fase ke tanah, gangguan dua fase ke tanah, gangguan tiga fase, panas berlebih, dan kecepatan lebih tidak merusak generator dengan melepas generator dari sistem melalui pemutus daya. Setelah pemutus daya generator ke sistem off, penggerak utama generator dan sumber arus eksitasi di-off-kan secara bersamaan. Sistem proteksi dan monitoring untuk generator dirancang menggunakan sensor-sensor seperti sensor arus ACS712-20A-T, sensor tegangan ZMPT101B, sensor suhu LM35 dan sensor kecepatan (tacho generator). Arduino Mega 2560 digunakan sebagai ADC untuk membaca sensor, kalibrasi sensor, dan mengirimkan informasi sensor ke LCD dan Personal Computer (PC). Antarmuka pada PC berupa Graphical User Interface menggunakan Matlab 2013a. Hasilnya pengukuran sensor untuk monitoring, menunjukkan, kesalahan pengukuran sensor arus adalah 1,7%, 1,3%, 1,7%, dan 1,7% untuk arus pada fase a, b, c, dan eksitasi. Kesalahan pengukuran sensor tegangan masing-masing adalah 1,31%, 1,29%, dan 1,05% untuk tegangan fase a, b, dan fase c. Kesalahan pengukuran sensor suhu LM35 adalah 0,464%. Kesalahan pengukuran kecepatan dari tacho generator adalah 0,378%. MATLAB GUI berhasil menampilkan kondisi operasi dan indikator-indikator operasi generator sinkron tiga fase pada kondisi normal atau gangguan. Kerja relai mengalami keterlambatan rata-rata sebesar 0,697 detik dari seting waktu yang diberikan apabila generator mengalami gangguan.

Keywords: Generator, protection, monitoring, Arduino Mega 2560, GUI Matlab

ABSTRACT

Three-phase synchronous generator is the main part in the power system, so needs protection and monitoring systems to ensure the safe operation. Three-phase synchronous generator faults such as overvoltage, low voltage, unbalanced voltage, excitation loss, unbalanced current, over current, single line to ground fault, double line to ground fault, three-phase fault, over heat and over speed protected by removing the generator from the system through a power breaker. After power breaker open, the prime mover and the excitation current supply are turned off, respectively. The protection and monitoring system are designed using sensors such as ACS712-20A-T current sensor, ZMPT101B voltage sensor, LM35 temperature sensor and tacho generator speed sensor. Arduino Mega 2560 is used as an ADC for sensor reading, calibrate the sensors, and sending sensors information to LCD and a Personal Computer (PC) by serial communication. Interface on PC uses Graphical User Interface on Matlab 2013a. The results show, measurement error of current sensors are 1.7%, 1.3%, 1.7%, and 1.7% for currents of phase a, b, c, and excitation, respectively. Measurement error of voltage sensors are 1.31%, 1.29%, and 1.05% for voltages of phase a, b, dan phase c, respectively. Measurement error of LM35 temperature sensor is 0.464%. Measurement error of tacho generator is 0.378%. MATLAB GUI's shows operation condition and indicator of three phase synchronous generator on normal or fault condition. Average delay time of relay to isolate generator from system if faults occur is 0.697 seconds.

Keywords: Generator, protection, monitoring, Arduino Mega 2560, GUI Matlab

PENDAHULUAN

Generator sinkron merupakan mesin listrik arus bolak-balik yang berfungsi mengubah energi mekanis berupa putaran menjadi energi listrik arus bolak-balik. Generator sinkron mempunyai dua bagian utama, yaitu stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang berputar). Untuk menghasilkan listrik, rotor diberikan arus medan DC bisa dari sumber luar atau darisumber sendiri dari sisi jangkar (kumparan pada stator) generator yang telah disearahkan.

Generator dapat mengalami kerusakan akibat gangguan. Gangguan - gangguan tersebut seperti : gangguan tegangan lebih (TL), tegangan kurang (TK), tegangan tak seimbang (TTS), panas lebih (PL), kecepatan putaran lebih (KPL), hilangnya medan eksitasi (HME), arus tidak seimbang (ATS), beban lebih (BL), hubung singkat satu fase ke tanah (HS1T), hubung singkat dua fase ke tanah (HS2T) dan hubung singkat tiga fase (HS3). Untuk melindungi generator dari kerusakan, sistem proteksi dan monitoring diperlukan untuk menjamin operasi yang aman.

Proteksi dilakukan dengan melepas generator dari sistem. Pelepasan generator dengan cara membuka pemutus daya yang menghubungkan generator dengan sistem. Pelepasan pemutus daya diikuti dengan pengurangan kecepatan penggerak mula dan medan eksitasi secara berturut-turut untuk menghindari kecepatan lebih pada rotor generator. Pelepasan pemutus daya oleh sistem proteksi berdasarkan kondisi-kondisi operasi generator.

Perancangan sistem proteksi dan monitoring pada mesin listrik seperti merancang sistem proteksi dan monitoring untuk motor sinkron tiga fase [1,2]. Pada [1] variabel-variabel motor seperti tegangan, arus beban dan arus starting, dimonitor sebagai informasi atau dasar untuk bekerjanya sistem proteksi motor. Monitoring motor dan kerja sistem proteksi [2] dipantau dengan *Personal Computer* (PC) menggunakan Visual Studio 2008 berbasis bahasa pemrograman C++. Sistem proteksi yang dirancang untuk mengamankan motor dari gangguan TL, TK, arus lebih, BL, tegangan fase hilang, kecepatan lebih, dan PL.

Sistem proteksi dan monitoring dirancang untuk motor induksi tiga fase [3,4]. Komponen utama sistem proteksi dan monitoring motor induksi pada [3] berbasis mikrokontroler ATmega 8535. Sistem monitoring berupa GUI yang dibangun menggunakan MATLAB R2009a. Pada [4] pengaman motor yang

dirancang untuk gangguan TTS dan BL. Sistem monitoringnya menggunakan LCD.

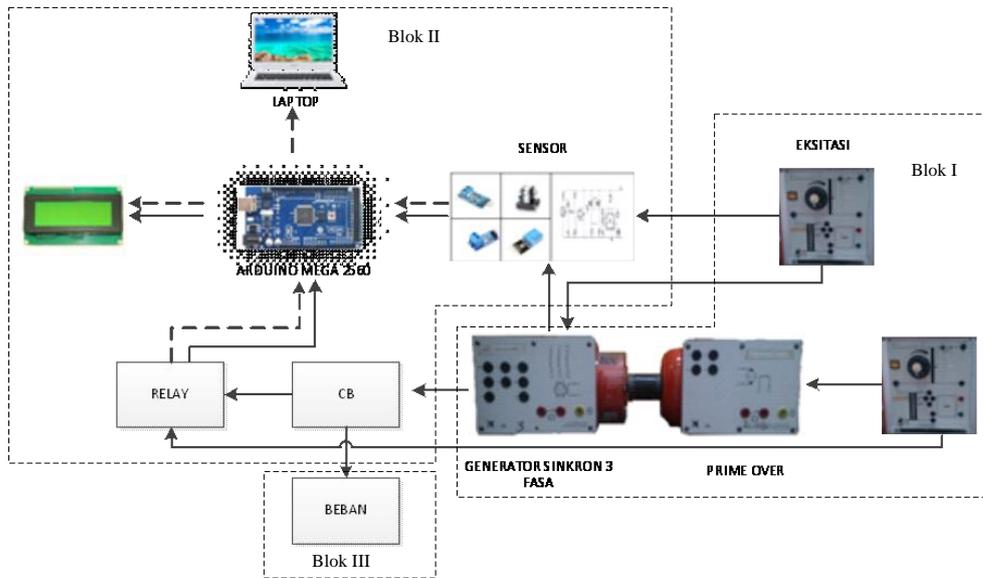
Perancangan skema sistem proteksi untuk generator menggunakan mikrokontroler sebagai sistem proteksi dan monitoring [5]. Penelitian tersebut menghasilkan sebuah skema penempatan sistem proteksi pada generator dengan mikrokontroler sebagai perangkat pengendali dan triac sebagai sistem pemutus menggantikan circuit breaker. Penelitian ini merancang sistem proteksi dan monitoring untuk generator. Generator yang menjadi objek penelitian yaitu generator sinkron tiga fase dengan kapasitas 1 kVA, 220/380 volt, dan kecepatan 1500 rpm. Penggerak mula generator adalah motor DC shunt dengan kapasitas 2 kW, 220 volt, dan kecepatan 3000 rpm. Mikrokontroler untuk pusat kendali dan monitoring adalah Arduino Mega 2560. Pemutus menggunakan relay kapasitas 10 Ampere AC.

Hasil penelitian pada artikel ini disajikan sebagai berikut : Metodologi Penelitian pada bagian II. Berikutnya, Hasil dan Pembahasan dijelaskan pada bagian III. Dan pada bagian akhir/bagian IV diberikan kesimpulan.

METODOLOGI PENELITIAN

Blok diagram rancangan sistem proteksi dan monitoring untuk generator sinkron berbasis Arduino Mega 2560 ditunjukkan pada Gambar 1. Rancangan terdiri dari tiga blok utama yaitu generator dengan sistem eksitasi dan penggerak mula pada blok I, sistem proteksi dan monitoring (arduino mega, sensor-sensor, LCD, dan Laptop) pada blok II, dan beban pada blok III. Sistem proteksi dan monitoring pada blok II, proteksi dilakukan oleh relay dengan perintah mikrokontroler. Mikrokontroler memberikan perintah relay berdasarkan hasil pengukuran dari sensor yang mengindikasikan ada gangguan. Hasil pengukuran sensor juga ditampilkan pada LCD dan PC.

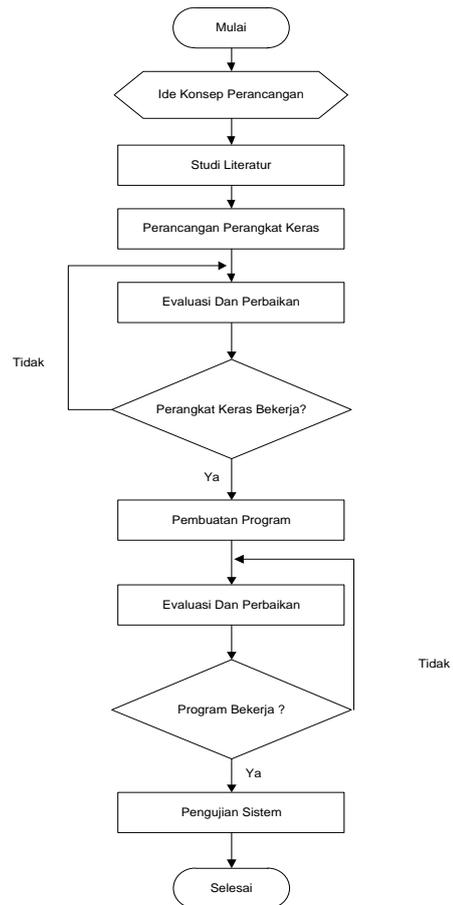
Sensor-sensor pada penelitian ini adalah empat sensor arus untuk mendeteksi besar arus pada fase a, b, c dan arus eksitasi generator. Tiga sensor tegangan untuk mendeteksi tegangan fase a, b dan c. Satu sensor suhu LM35 yang diletakkan pada badan generator. Sensor kecepatan berupa tacho generator yang dikopel langsung pada rotor generator. Relay dan *Circuit Breaker* (CB) yang digunakan sebagai pemutus daya pada rangkaian mempunyai kapasitas pemutusan sebesar 10 Ampere.



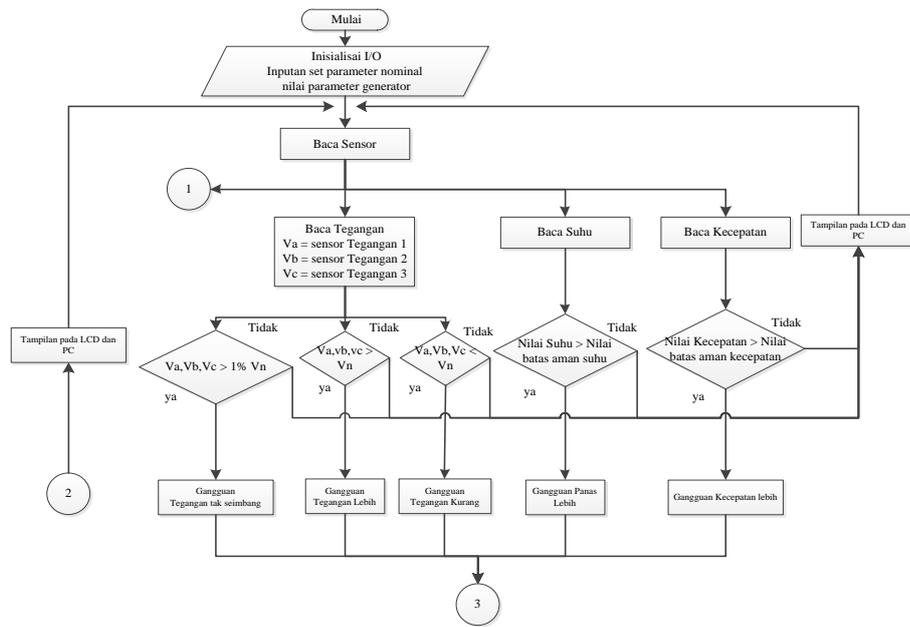
Gambar 1. Blok rancangan sistem proteksi dan monitoring

Menggunakan lima pemutus daya yaitu untuk memisahkan generator dari beban pada fase a, b dan c, memutuskan satu daya motor DC sebagai penggerak muda, dan satu daya DC ke sistem eksitasi. LCD yang digunakan untuk monitoring kondisi operasi dan kondisi gangguan pada generator adalah LCD 20x4. LCD ditempatkan pada sistem proteksi. Personal Computer (PC) / Laptop sebagai media untuk monitoring kondisi operasi dan kondisi gangguan dari jarak jauh. Komunikasi antara PC dan Arduino Mega 2560 adalah komunikasi serial dengan baud rate 115200 bps. Pada PC dibangun interface untuk monitoring berupa GUI menggunakan program MATLAB. Beban listrik pada penelitian ini adalah beban resistor dan induktor.

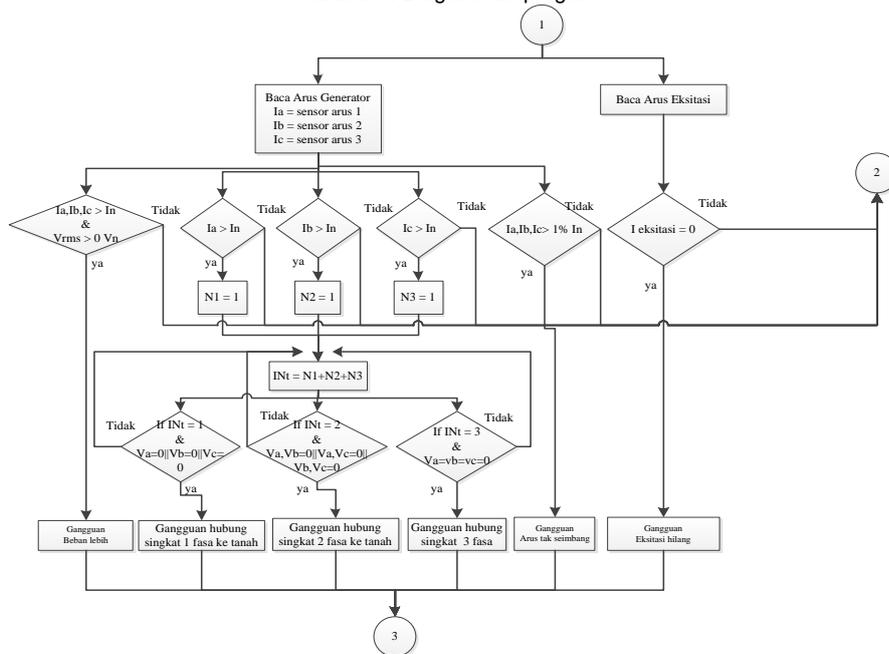
Tahapan penelitian perancangan sistem proteksi dan monitoring untuk generator sinkron tiga fase ditunjukkan pada diagram alir Gambar 2. Tahapan tersebut dibagi dalam dua tahapan yaitu tahapan pembuatan perangkat keras dan tahapan pembuatan perangkat lunak/program. Pada setiap tahapan dilakukan pengujian dan kalibrasi, untuk menjamin sistem proteksi dan monitoring yang dilakukan tidak merusak generator.



Gambar 2. Diagram alir perancangan system



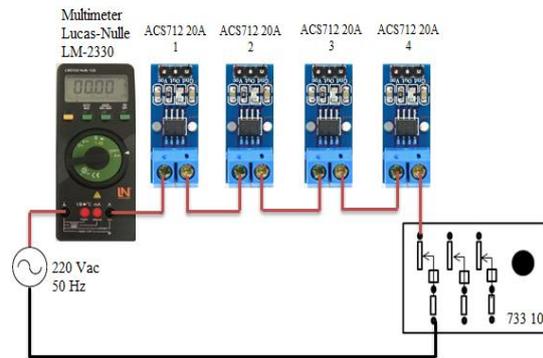
Gambar 6. Diagram alir program I



Gambar 7 Diagram alir program II

Antar muka pada Laptop / PC

Antar muka yang dibangun berupa GUI pada MATLAB. MATLAB yang digunakan adalah versi R2013a. Hasil sensing sensor dikirimmoleh Mega 2560 ke port serial PC dan diterima oleh program MATLAB. Data diolah pada MATLAB sebelum ditampilkan. Data-data grafis dalam bentuk fungsi arus dan tegangan fase a fungsi waktu, kecepatan fungsi waktu dan kondisi-kondisi operasi, seperti: nilai-nilai RMS arus dan tegangan setiap fase, nilai RMS arus eksitasi, kecepatan rotor generator dan temperatur generator.



Gambar 8 Rangkaian pengujian sensor arus

Hasil dan Pembahasan Pengujian dan kalibrasi sensor

Pengujian sensor bertujuan untuk menjamin sensor dapat bekerja dalam rentang pengukuran yang direncanakan. Kalibrasi sensor bertujuan mendapatkan kesalahan pengukuran relatif kecil. Untuk pengukuran pada panel listrik, berdasarkan standar IEC No. 13B-23, sensor harus mempunyai kesalahan pengukuran kurang dari 2.5%.

Sensor Arus

Empat sensor arus diuji secara seri. Sensor diberikan sumber 220 Volt AC dan beban yang resistif yang divariasi. Arus beban diukur dengan multimeter Lucas-Nulle LM-2330 seperti pada Gambar9. Tegangan DC pada output sensor diukur untuk variasi beban resistor ditunjukkan pada Table 1. Table 1. Menunjukkan untuk arus yang sama, sensor memberikan tegangan DC yang relatif sama. Arus ke beban meningkat diikuti oleh peningkatan tegangan DC pada output sensor.

Tabel 1. Hasil uji Sensor

Input Sensor (A)	Output Sensor (Volt DC)			
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
0.00	2.462	2.472	2.462	2.463
0.25	2.488	2.489	2.488	2.488
0.50	2.511	2.519	2.511	2.511
0.75	2.538	2.533	2.537	2.538
1.00	2.561	2.565	2.561	2.564
1.25	2.587	2.591	2.587	2.582
1.50	2.612	2.618	2.612	2.617
1.75	2.636	2.640	2.636	2.636
2.00	2.663	2.666	2.663	2.664

Hasil perubahan arus terhadap perubahan tegangan output sensor digunakan sebagai dasar untuk kalibrasi sensor. Kalibrasi menggunakan pendekatan linear dari data Table 1. Table 2. menampilkan hasil kalibrasi. Alat ukur pembanding adalah multimeter Lucas-Nulle LM-2330. Hasil kalibrasi menunjukkan hasil sensing empat sensor arus tersebut memiliki rerata selisih minimum sebesar 1.3%, maksimum 1.7%, sehingga layak sebagai alat ukur panel listrik.

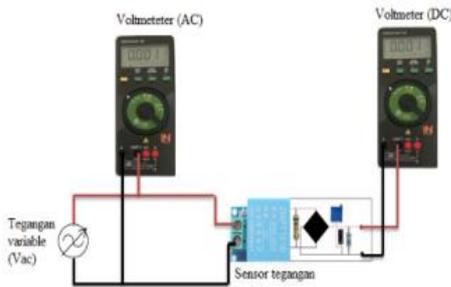
Table 2. Hasil Kalibrasi Sensor Arus

LM-2330 (A)	Sensor Arus (A)				Selisih (%)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	0.25	0.26	0.25	0.25	0.00	3.80	0.00	0.00
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00
0.75	0.74	0.75	0.75	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	3.80	0.00	3.80	3.80
1.25	1.24	1.24	1.24	1.24	3.80	3.80	3.80	3.80
1.50	1.49	1.50	1.49	1.49	3.80	0.00	3.80	3.80
1.75	1.74	1.75	1.74	1.74	3.80	3.80	3.80	3.80
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Minimum					0.00	0.00	0.00	0.00
Maksimum					3.80	3.80	3.80	3.80
Rerata					1.70	1.30	1.70	1.70

Sensor tegangan

Rangkaian pengujian sensor tegangan ditunjukkan pada Gambar10. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi tegangan input AC pada sensor dan tegangan output DC diukur dengan multimeter Lucas-Nulle LM-2330. Hasil pengukuran input dan output

sensor menggunakan dua multimeter Lucas-Nulle LM-2330 ditunjukkan pada Table 3. Table 3. menunjukkan tiga sensor tegangan mempunyai output yang relatif sama untuk tegangan input yang sama. Kenaikan tegangan input pada sensor menghasilkan kenaikan tegangan pada output sensor. Kalibrasi sensor menggunakan pendekatan linear. Hasil kalibrasi yang ditampilkan pada LCD dibandingkan dengan hasil pengukuran dari multimeter Lucas-Nulle LM-2330, ditunjukkan pada Table 4.



Gambar 9. Pengujian sensor tegangan

Tabel 3 Hasil Uji Sensor Tegangan

Input Sensor (Volt AC)	Output Sensor (Volt DC)		
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
100	1.870	1.871	1.870
120	2.271	2.270	2.271
140	2.721	2.720	2.721
160	3.168	3.168	3.168
180	3.600	3.600	3.600
200	4.010	4.011	4.010
220	4.460	4.460	4.460
240	4.900	4.900	4.900

Table 4. menunjukkan hasil sensing tiga sensor tegangan memiliki rerata selisih minimum sebesar 1.05% dan maksimum 1.31%, hasil ini menunjukkan sensor tegangan layak untuk pengukuran pada panel listrik.

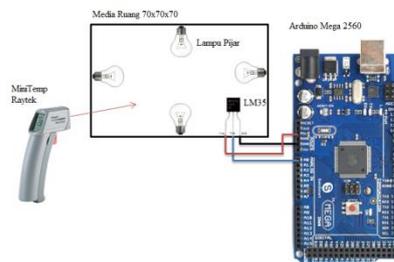
Sensor suhu

Pengujian sensor suhu LM35 yang ditempatkan pada badan generator, dengan simulasi pemberian panas yang berasal dari lampu pijar seperti pada Gambar11. Suhu diukur dengan MINITEMP dan output sensor suhu

Tabel 4 Hasil Kalibrasi Sensor Tegangan

LM - 2330 (V)	Sensor Tegangan (V)			Selisih (%)		
	1	2	3	1	2	3
100	96.75	96.34	95.66	3.25	3.66	4.34
120	118.2	118.7	119.0	1.46	1.03	0.78
140	138.7	138.8	137.9	0.87	0.80	1.46
160	161.1	161.6	159.6	0.70	1.05	0.21
180	183.6	182.5	180.3	2.01	1.41	0.17
200	203.2	204.1	201.7	1.64	2.06	0.87
220	220.1	220.4	219.7	0.07	0.21	0.12
240	238.8	239.7	238.8	0.49	0.10	0.48
Minimum				1.31	1.29	1.05
Maksimum				3.25	3.66	4.34
Rerata				1.31	1.29	1.05

berupa tegangan DC diukur dengan multimeter Lucas-Nulle LM-2330. Hasil pengujian sensor suhu ditunjukkan pada Table 5. Hasil pengujian pada Tabel 5., untuk kenaikan suhu 2^o C, tegangan output DC sensor naik sebesar 0.02 V atau 20 mV. Hasil pengujian menunjukkan kesesuaian dengan spesifikasi dari sensor suhu LM35 yaitu perubahan suhu 1^oC menghasilkan perubahan tegangan 10 mV. Kalibrasi sensor menggunakan pendekatan linear. Hasil perbandingan suhu yang ditunjukkan oleh MINITEMP dengan suhu yang ditampilkan pada LCD ditunjukkan pada Table. 6.



Gambar 10. Pengujian sensor suhu

Table 4. Hasil Uji Senor Suhu

MINITEMP (°C)	Output Sensor (Volt DC)
30	0.3
32	0.32
34	0.34
36	0.36
38	0.38
40	0.40
42	0.42
44	0.44
46	0.46
48	0.48
50	0.52

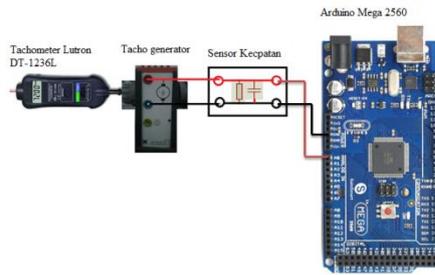
Tabel 5 Hasil Kalibrasi Sensor Suhu

Suhu (°C)		Selisih (%)
MINITEMP	LM35	
36	36.29	0.806
38	38.05	0.131
40	40.11	0.275
42	42.21	0.500
44	44.22	0.500
46	46.31	0.674
48	48.06	0.125
50	50.15	0.300
Minimum		0.031
Maksimum		1.000
Rerata		0.464

Table 4 menunjukkan hasil kalibrasi memiliki rerata selisih 0.464% dari alat ukur suhu MINITEMP. Berdasarkan standar IEC No. 13B-23, hasil pengukuran sensor suhu layak untuk pengukuran suhu, sensor suhu mempunyai presisi cukup tinggi.

Sensor kecepatan

Tacho generator untuk sensor kecepatan, dikopel langsung pada rotor generator. Gambar 12 menunjukkan rangkaian untuk menguji tacho generator. Tachometer DT-1236L sebagai alat ukur pembanding, untuk mengukur kecepatan rotor generator dalam satuan rpm. Hasil uji sensor kecepatan ditunjukkan pada Table 7.



Gambar 11. Rangkaian pengujian sensor kecepatan

Table 6. Hasil Uji Sesnor Kecepatan

DT-1236L (rpm)	Output Sensor (Volt DC)
466	0.410
620	0.562
805	0.737
1004	0.943
1205	1.148
1409	1.342
1602	1.536

Tabel 7. Hasil Kalibrasi Sensor Kecepatan

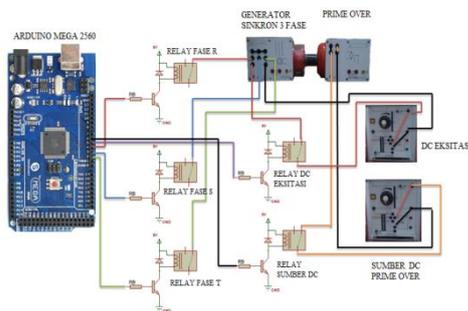
Kecepatan (rpm)		Selisih (%)
DT-1236L	Thaco generator	
468	464	0.854
630	633	0.476
804	801	0.373
1002	999	0.299
1203	1199	0.332
1402	1402	0
1603	1598	0.312
Minimum		0
Maksimum		0.854
Rerata		0.378

Hasil uji sensor kecepatan menunjukkan penambahan kecepatan menghasilkan kenaikan tegangan output DC sensor. Untuk kenaikan satu (1) rpm, tegangan output sensor naik rerata sebesar 0,99 mV DC. Kalibrasi menggunakan pendekatan linear. Hasil kalibrasi ditunjukkan pada Table 8. Kualitas sensor kecepatan dengan DT-1236L sebagai alat ukur referensi, menunjukkan sensor kecepatan layak untuk alat ukur panel listrik.

Rangkaian pemutus daya

Generator dilindungi dengan pemutus daya apabila terjadi gangguan. Gambar13. menunjukkan posisi pemutus daya pada sistem

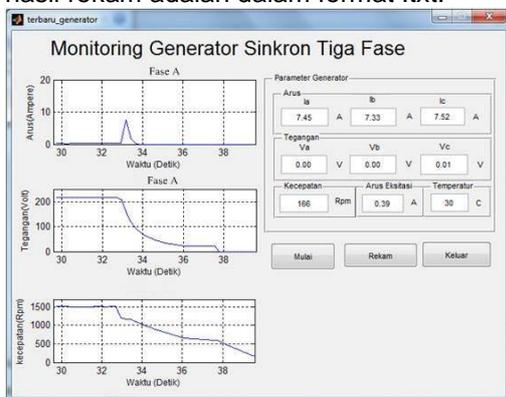
proteksi. Tiga pemutus daya, masing-masing pada fase a, b dan c, untuk melindungi generator dari gangguan external seperti ; gangguan tegangan lebih, gangguan tegangan kurang, gangguan tegangan tak seimbang, gangguan arus tidak seimbang, gangguan beban lebih, dan gangguan hubung singkat. Dua pemutus daya, masing-masing pada sisi eksitasi dan penggerak mula, untuk melindungi generator dari gangguan internal seperti : gangguan kecepatan putaran lebih dan gangguan hilangnya medan eksitasi.



Gambar 12. Rangkaian pemutus daya

Antar muka pada laptop/PC

Salah satu contoh hasil yang ditampilkan oleh GUI pada MATLAB pada Gambar 14. Gambar 14. menampilkan kondisi generator pada saat gangguan tiga fase. Hasil tersebut menunjukkan perubahan arus dan tegangan fase afungsi waktu, dan kecepatan generator fungsi waktu secara real time. Untuk variabel generator yang lain dalam besaran RMS. Data kondisi operasi dan kondisi gangguan dapat disimpan dengan menekan tombol Rekam. Data hasil rekam adalah dalam format .txt.



Gambar 13. Hasil monitoring gangguan hubung singkat tiga fase

Sistem proteksi dan monitoring

Pemutus daya fase a, b dan c bekerja pertama kali secara bersamaan apabila terjadi gangguan. Setelah ketiga pemutus daya tersebut off, pemutus daya untuk suplai penggerak mula dan sistem eksitasi ikut off secara berurutan, yaitu pemutus daya penggerak mula off kemudian diikuti off oleh pemutus daya sistem eksitasi.

Gangguan tegangan lebih

Simulasi gangguan tegangan lebih dengan menaikkan tegangan generator secara bertahap dengan cara menaikkan arus eksitasi. Hasil simulasi ditunjukkan pada Table 9.

Tabel 8 Hasil Proteksi dan Monitoring Tegangan Lebih

Set. Trip (V)	Monitoring (V)			Kondisi	Delay (s)
	Va	Vb	Vc		
232	229.66	231.92	231.97	Aman	-
232	229.56	230.38	230.78	Aman	-
232	229.14	230.43	230.88	Aman	-
232	227.95	230.21	230.89	Aman	-
232	229.86	231.05	230.97	Aman	-
232	232.06	232.04	232.27	Trip	0.443
232	231.99	232.12	232.21	Trip	0.444
232	232.45	232.56	232.89	Trip	0.441
232	233.79	235.05	235.11	Trip	0.444
232	233.92	235.21	235.64	Trip	0.443

Table 9 menunjukkan generator trip / pemutus daya off apabila tegangan setiap fase generator lebih besar dari 232 V. Waktu trip pemutus daya mengalami keterlambatan / delay 0.443 detik dari seting waktu yang diberikan (3 detik).

Gangguan tegangan kurang

Simulasi gangguan tegangan kurang dengan menurunkan tegangan generator dengan cara menurunkan arus eksitasi. Hasil simulasi ditunjukkan pada Table 10.

Seperti pada gangguan tegangan lebih, sistem proteksi berhasil memerintah pemutus daya untuk off apabila tegangan yang disensing oleh sensor tegangan lebih kecil dari seting trip. Pemutus daya mengalami delay pemutusan yaitu 0.442 detik

Tabel 9 Hasil Proteksi dan Monitoring Tegangan Kurang

Set. Trip (V)	Monitoring (V)			Kondisi	Delay (s)
	Va	Vb	Vc		
198	195.78	197.96	197.87	Aman	-
198	195.82	196.89	197.81	Aman	-
198	195.01	195.66	196.43	Aman	-
198	193.23	195.95	195.11	Aman	-
198	194.87	197.02	197.65	Aman	-
198	198.22	198.04	198.90	Trip	0.441
198	198.89	198.24	198.19	Trip	0.440
198	198.98	198.43	198.28	Trip	0.443
198	198.45	199.21	200.10	Trip	0.442
198	198.77	200.31	200.42	Trip	0.443

Gangguan tegangan tak seimbang

Simulasi tegangan tidak seimbang untuk mengetahui keberhasilan sistem proteksi adalah dengan cara: membebani setiap fase dengan beban yang berbeda. Perbedaan beban setiap fase menghasilkan ketidakseimbangan tegangan. Table 11 menunjukkan simulasi setting tidak seimbang (STS) dari 1% sampai 5%. Sistem proteksi berhasil bekerja apabila prosentase ketidakseimbangan (TS) melebihi dari seting yang diberikan. Delay waktu untuk trip rerata sebesar 0.4398 detik.

Gangguan kecepatan lebih

Simulasi gangguan kecepatan lebih untuk mengetahui keberhasilan sistem proteksi adalah dengan menambahkan kecepatan rotor generator. Kecepatan rotor generator dapat ditambah dengan menaikkan kecepatan penggerak mula. Hasil sistem proteksi untuk gangguan ini ditunjukkan pada Table 12. Sistem proteksi berhasil mengamankan generator apabila kecepatan rotor generator melebihi dari seting kecepatan lebih. Delay waktu untuk trip/pemutus daya *off* rerata sebesar 0.4505 detik.

Gangguan panas lebih

Simulasi kenaikan suhu dilakukan dengan bantuan lampu pijar yang dinyalakan di sekitar generator. Badan generator akan menghasilkan panas yang diakibatkan oleh beban dan suhu

ruangan. Seting suhu pada simulasi ini adalah 50°C. Pada suhu dibawah 50°C generator masih beroperasi memberikan daya ke beban. Tetapi pada suhu lebih besar dari 50°C, sistem proteksi berhasil trip dengan *off*-nya lima pemutus daya secara berurutan dari tiga pemutus daya pada setiap fase diikuti oleh pemutus daya penggerak mula dan diakhiri oleh pemutus daya sistem eksitasi

Tabel 10. Hasil Proteksi dan Monitoring Kecepatan Lebih

Seting Kecepatan Lebih (rpm)	Kecepatan Rotor Generator (rpm)	Kondisi	Delay (s)
1522.5	1500	Aman	-
1522.5	1523	Trip	0.452
1522.5	1520	Aman	-
1522.5	1525	Trip	0.449
1522.5	1521	Aman	-

Table 11 Hasil Proteksi dan Monitoring Kecepatan Lebih

Seting Suhu (°C)	Suhu Badan Generator (°C)	Kondisi	Delay (s)
50	49.23	Aman	-
50	48.86	Aman	-
50	50.08	Trip	0.501
50	50.19	Trip	0.452
50	50.28	Trip	0.443
50	50.91	Trip	0.446

Gangguan hilangnya medan eksitasi

Gangguan hilangnya medan eksitasi terjadi apabila arus eksitasi generator dibawah seting trip arus eksitasi. Hilangnya medan eksitasi dapat menyebabkan generator mengalami gangguan kecepatan lebih. Simulasi gangguan hilangnya medan eksitasi dengan cara merubah seting proteksi arus eksitasi. Table 14. menunjukkan perubahan seting trip eskitasi untuk arus eksitasi pada generator tetap. Generator beroperasi dalam kondisi aman apabila seting trip eksitasi lebih kecil dari arus eksitasi generator. Apabila seting trip lebih besar dari arus eksitasi maka generator akan trip, pemutus daya pada penggerak mula terbuka, sehingga generator berhenti berputar dan suplai daya ke beban terhenti. Delay waktu untuk trip rerata sebesar 0.4676 detik.

Table 12 Hasil Proteksi dan Monitoring Tegangan kurang

STS (%)	Monitoring (V)			TS (%)	Kondisi	Delay (s)
	Va	Vb	Vc			
1	220.12	220.08	214.22	0.91	Aman	-
1	220.12	215.43	218.11	1.02	Trip	0.440
1	220.23	225.98	225.19	0.97	Aman	-
1	220.12	212.76	220.14	1.13	Trip	0.438
3	220.43	201.88	220.12	2.94	Aman	-
3	230.82	215.21	226.03	3.04	Trip	0.436
3	200.91	220.57	220.65	3.09	Trip	0.443
5	220.51	189.26	220.45	4.97	Aman	-
5	190.43	220.76	220.66	4.82	Aman	-
5	220.31	188.67	220.35	5.04	Trip	0.442

Gangguan arus tidak seimbang

Seperti pada gangguan tegangan tidak seimbang, simulasi untuk gangguan arus tidak seimbang, generator diberikan besar beban yang berbeda untuk setiap fasenya. Table 15. menunjukkan hasil sistem proteksi dan monitoring gangguan arus tidak seimbang. Sistem proteksi berhasil mendeteksi ketidakseimbangan arus dan memerintah pemutus daya *off* apabila ketidakseimbangan arus beban melebihi seting yang ditetapkan (STS dalam persen dari 1% sampai dengan 5%). Delay waktu untuk trip rerata sebesar 0.4426%.

Gangguan beban lebih

Keterbatasan kemampuan generator menyebabkan generator diamankan dari gangguan beban lebih. Simulasi gangguan beban lebih dilakukan dengan cara menaikkan beban sehingga arus beban melebihi dari seting proteksi arus lebih. Table 15 menunjukkan trip pada generator terjadi apabila arus setiap fase dari beban melebihi seting gangguan arus lebih. Delay waktu pemutus daya untuk mengamankan generator dari gangguan ini sebesar 0.8822 detik

Table 13 Hasil Proteksi dan Monitoring Tegangan tak seimbang

STS (%)	Monitoring (A)			TS (%)	Kondisi	Delay (s)
	Ia	Ib	Ic			
1	0.50	0.51	0.51	0.66	Aman	-
1	0.51	0.52	0.51	1.30	Trip	0.443
1	1.50	1.48	1.5	0.89	Aman	-
1	1.50	1.5	1.45	1.12	Trip	0.440
3	0.83	0.83	0.76	2.89	Aman	-
3	0.76	0.84	0.84	3.28	Trip	0.442
3	0.85	0.92	0.91	2.99	Aman	-
5	0.91	0.78	0.91	5.00	Trip	0.444
5	1.00	0.94	0.9	4.93	Aman	-
5	1.00	1.00	0.92	5.48	Trip	0.444

Tabel 14 Hasil Proteksi dan Monitoring Hilangnya Medan Eksitasi

Seting Trip Eksitasi (A)	Arus Eksitasi Generator (A)	Kondisi	Delay (s)
0.99	1.05	Aman	-
1.44	1.05	Aman	-
1.22	1.05	Aman	-
0.99	1.05	Aman	-
1.04	1.05	Aman	-
1.51	1.05	Trip	0.502
1.66	1.05	Trip	0.467
1.74	1.05	Trip	0.456
1.82	1.05	Trip	0.471
1.91	1.05	Trip	0.442

Gangguan hubung singkat satu fase ke tanah

Simulasi gangguan hubung singkat satu fase ke tanah pada terminal generator dilakukan pada saat generator beroperasi melayani beban. Seting trip arus untuk gangguan satu fase ke tanah adalah 5 Ampere. Table XVII. menunjukkan hasil proteksi dan monitoring gagguan. Pada fase yang terganggu (fase a) arus gagguan cukup besar melebihi

seting trip gangguan sedangkan fase yang tidak terganggu arus gangguan mendekati nol. Untuk tegangan, tegangan pada fase terganggu, tegangan sama dengan tegangan tanah (0 Volt) dan tegangan fase lain relatif turun dari kondisi operasi normal (220 Volt, tegangan fase ke netral). Simulasi ini untuk netral generator ditanahkan langsung. Hasil ini sesuai dengan kondisi sistem untuk gangguan satu fase ke tanah.

Tabel 15 Hasil Proteksi dan Monitoring Beban Lebih

Set. Trip (A)	Monitoring (A)			Kondisi	Delay (s)
	la	lb	lc		
3.00	2.94	2.96	2.97	Aman	-
3.00	2.92	2.93	2.90	Aman	-
3.00	2.89	2.85	2.89	Aman	-
3.00	2.82	2.84	2.85	Aman	-
3.00	2.73	2.78	2.77	Aman	-
3.00	3.05	3.03	3.02	Trip	0.883
3.00	3.11	3.11	3.11	Trip	0.880
3.00	3.19	3.20	3.18	Trip	0.883
3.00	3.38	3.36	3.39	Trip	0.882
3.00	3.58	3.54	3.57	Trip	0.883

Gangguan hubung singkat dua fase ke tanah

Seperti pada gangguan hubung singkat satu fase ke tanah, gangguan hubung singkat dua fase ke tanah pada generator yang beroperasi pada kondisi normal, 220 V, frekuensi 50 Hz. Dua fase generator (fase a dan fase b) tiba-tiba terhubung ke tanah, arus gangguan pada kedua fase ini sama sedangkan arus pada fase yang tidak terganggu sama dengan nol. Untuk tegangan, tegangan pada fase terganggu sama dengan tegangan tanah (0 V), dan tegangan pada fase tidak terganggu turun dari tegangan semula sebelum gangguan. Hasil ini ditunjukkan pada Table 18.

Gangguan hubung singkat tiga fase

Generator beroperasi pada kondisi normal. Tiba-tiba terminal setiap fase dihubungkan singkatkan sehingga generator trip karena gangguan tiga fase. Hasil proteksi dan

Table 16 Hasil Proteksi dan Monitoring Gangguan Hubung Singkat Dua Fase ke Tanah

Monitoring Arus (A)			Monitoring Tegangan (V)			Kondisi	Delay (s)
la	lb	lc	Va	Vb	Vc		
12.3 1	12.2 3	0.00	0.0 0	0.0 0	86.2 1	Trip	0.663

monitoring untuk kejadian gangguan tiga fase ini ditunjukkan pada Table 19. Arus gangguan pada setiap fase hampir sama dan tegangan setiap fase mendekati nol. Hal ini sesuai dengan kondisi sistem yang terganggu oleh gangguan tiga fase.

Tabel 17 Hasil Proteksi dan Monitoring Gangguan Hubung Singkat Satu Fase ke Tanah

Monitoring Arus (A)			Monitoring Tegangan (V)			Kondisi	Delay (s)
la	lb	lc	Va	Vb	Vc		
13.4	0.18	0.1 3	0.0 0	86. 4	84.4	Trip	0.684

Tabel 18 Hasil Proteksi dan Monitoring Gangguan Hubung Singkat Dua Fase ke Tanah

Monitoring Arus (A)			Monitoring Tegangan (V)			Kondisi	Delay (s)
la	lb	lc	Va	Vb	Vc		
7.45	7.33	7.52	0.0 0	0.0 0	0.01	Trip	0.663

Kesimpulan

Proteksi dan monitoring generator sinkron tiga fase berbasis Arduino Mega 2560 didukung oleh kualitas sensor yang mempunyai kepresisian pengukuran cukup untuk alat ukur panel listrik menurut standar IEC No. 13B-23. Sensor tegangan mempunyai kesalahan rerata sebesar 1.31%, 1.29%, dan 1.05%, untuk fase a, b, dan c. Sensor arus mempunyai kesalahan rerata sebesar 1.7%, 1.3%, 1.7%, 1.7%, untuk fase a, b, c dan eksitasi. Kesalahan rerata pengukuran sensor suhu sebesar 0.464%, dan sensor kecepatan sebesar 0.378%. Interface berbasis GUI MATLAB berhasil menampilkan besaran listrik (nilai RMS dan nilai sesaat), dan indikator kondisi operasi generator real time. Hasil simulasi menunjukkan sistem proteksi generator berhasil mengamankan generator dari gangguan eksternal maupun internal. Pemutus daya berhasil trip untuk setiap gangguan tersebut dengan delay waktu pemutusan rerata sebesar 0.697 detik.

Referensi

- [1] Prabowo, G., Purwanto, E., Darmawan, A., 2012, Rancang Bangun Sistem Pengaman dan Monitoring Motor Sinkron Tiga Fasa (Hardware). Tersedia di: http://repo.pens.ac.id/1368/1/makalah_7308030043.pdf
- [2] Prabowo, G., Purwanto, E., Ulumudin, A., 2012, Rancang Bangun Sistem Pengaman dan Monitoring Motor Sinkron Tiga Fasa (Software). Tersedia di: <https://studylibid.com/doc/732500/rancang-bangun-sistem-pengaman-dan-monitoring-motor-sinkron>.
- [3] Ashari, S., Sukmadana, I.M.B., Citarsa, I.B.F. 2015, Rancang Bangun Sistem Monitoring Dan Pengaman Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Mikrokontroler ATMega 8535, Jurnal Dielektrika, Vol. 2., No. 2, pp. 123 – 130.
- [4] Sudiarta, I.P, Wijaya Arta, I.W., Raka Agung, I.G.A.P., 2015, Rancang Bangun Pengaman Motor Induksi 3 Fasa Terhadap Unbalance Voltage Dan Overload Dengan Sistem Monitoring, E-Journal SPEKTRUM, Vol. 2, No. 1, pp. 13-18.
- [5] Rokonzaman, M.D., Haider, M.H.E., 2014, "Design of microcontroller Based Generator Protection Scheme". Electronic and Communication Engineering Department Military Institute of Science and Technology, Dhaka, Bangladesh.
- [6] Allegro, 2017. "ACS712-Datasheet." Allegro MicroSystems, LLC.