

KOORDINASI RELAY ARUS LEBIH DAN RECLOSER PADA TRAFU 60 MVA GARDU INDUK PANDEAN LAMPER SEMARANG DENGAN SIMULASI ETAP 11.1.1

Bambang Nugrahadi P^{*)}, Juningtyastuti, and Mochammad Facta

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

^{*)}Email : bambangnugrahadi@gmail.com

Abstrak

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik ke konsumen. Terdapat beberapa macam gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik. Salah satu gangguan yang sering terjadi adalah gangguan hubung singkat antar fasa dan gangguan fasa dengan tanah. Peralatan proteksi dibutuhkan untuk mengatasi adanya gangguan hubung singkat, seperti relay arus lebih dan recloser. Agar peralatan proteksi dapat bekerja dengan baik, dibutuhkan koordinasi sistem proteksi. Pada Tugas Akhir ini akan mempelajari tentang koordinasi peralatan proteksi dari relay arus lebih dan recloser pada penyulang trafo 60 MVA GI Pandean Lamper Semarang. Koordinasi sistem proteksi diperoleh berdasarkan setting antara relay arus lebih dan recloser baik pengaturan OCR maupun GFR. Arus setting pada masing-masing peralatan proteksi diatur sesuai dengan masing-masing besar arus gangguan hubung singkat. Hasil koordinasi sistem proteksi akan diuji sesuai dengan waktu ketahanan konduktor dan pengujian selektivitas peralatan proteksi terhadap peristiwa tripping palsu / sympathetic trip. Berdasarkan hasil dari analisis, diperoleh besar gangguan hubung singkat minimal 1015,76 ampere dan maksimum sebesar 12111,74 ampere. Sedangkan waktu kerja peralatan proteksi minimum adalah 0,114 detik pada recloser dan maksimum adalah 4,85 pada relay arus lebih. maksimum. Waktu kerja peralatan proteksi yang didapat minimal 3 kali lebih cepat dari waktu ketahanan konduktor pada penyulang. Pada saat terjadi gangguan fasa dengan tanah, tidak ada peralatan proteksi yang mengalami tripping palsu.

Kata Kunci : sistem distribusi, gangguan hubung singkat, relay arus lebih, recloser

Abstract

The distribution system is part of a power system to distribute electrical energy to the consumer. There are several faults that occur in distribution system. One of the most common faults are short circuit, either phase to phase and phase to ground. Protection equipment is needed to overcome any short circuit, such as overcurrent relay and recloser. The protection equipment can work properly with coordination of protection system. In this final project will learn about the coordination of protection equipment between overcurrent relays and recloser in outgoing feeder transformer 60 MVA GI Pandean Lamper Semarang. Coordination of protection system can be obtained by the setting between overcurrent relay and recloser, such as OCR and GFR. The value of setting current on each equipment according to short circuit fault current value. Coordination of protection system will be tested according to the time of conductor resistances and selectivity test of protection equipment against false tripping / sympathetic trip. Based on the result of the analysis, obtained the minimum of short circuit fault is 1015,76 amperes and the maximum is 12111,74 amperes. While the minimum of working protection equipment is 0,114 second at recloser and the maximum is 4,85 second at over current relay. The working time of protection equipment obtained at least 3 times more faster than the time of conductor resistances on the feeder. During a phase to ground short circuit, there are no protection equipments are false trip.

Keywords : distributed system, short circuit fault, over current relay, recloser

1. Pendahuluan

Sistem distribusi tenaga listrik adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan listrik ke konsumen. Sistem distribusi terdiri dari jaringan tegangan

menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR). Jaringan tegangan menengah dan jaringan tegangan rendah umumnya beroperasi secara radial.

Salah satu bentuk gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik adalah gangguan hubung singkat

baik gangguan tiga fasa, antar fasa maupun gangguan fasa ke tanah. Banyak peralatan proteksi yang digunakan pada sistem proteksi jaringan distribusi tenaga listrik, diantaranya adalah relay arus lebih dan recloser. Koordinasi peralatan proteksi yang baik dapat diperoleh melalui pengaturan / setting peralatan proteksi berdasarkan perhitungan arus gangguan hubung singkat.

Pada penelitian akan dibahas koordinasi antara relay arus lebih dengan recloser pada outgoing feeder Trafo 60 MVA Gardu Induk Pandean Lamper. Berdasarkan data di lapangan, penulis menganalisis bahwa penyulang pada keluaran trafo tersebut memiliki panjang dan jumlah beban listrik yang bervariasi sehingga dibutuhkan koordinasi pengamanan yang baik sesuai dengan besar arus gangguan hubung singkat yang terjadi pada masing-masing penyulang.

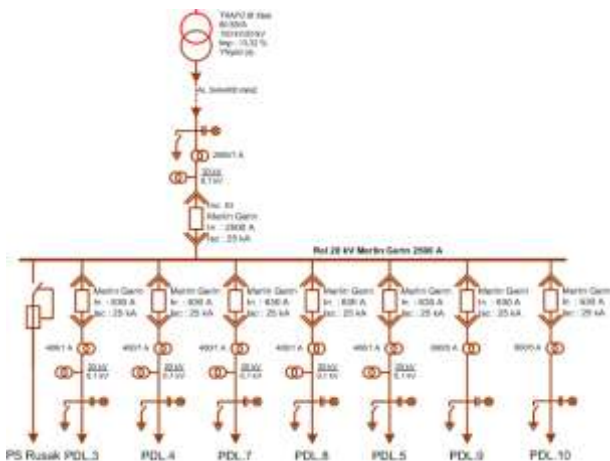
2. Metode

2.1. Langkah Penelitian

Pada tugas akhir ini terdapat beberapa metode yang diterapkan sebagai dasar metodologi penelitian dalam melakukan penelitian tugas akhir. Metodologi penelitian tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 2

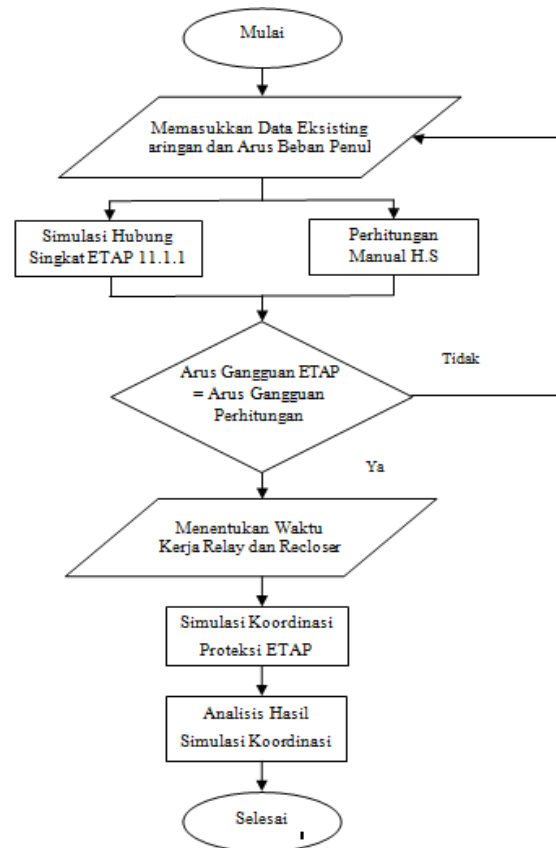
2.2. Data Sistem

Pada Trafo 60 MVA Gardu Induk Pandean Lamper Semarang terdapat 7 penyulang yang menyalurkan energi listrik menuju beban seperti pada Gambar 1



Gambar 1. Diagram Satu Garis Jaringan Distribusi 20 kV Trafo 60 MVA GI Pandean Lamper Semarang

Secara umum langkah penelitian yang dilakukan sebagaimana terlihat pada Gambar 2



Gambar 2. Langkah penelitian analisis koordinasi relay arus lebih dan recloser

Adapun data yang digunakan untuk analisis ini adalah seperti pada Tabel 1 hingga Tabel 5.

Tabel 1. Data Trafo Tenaga

Data Trafo Tenaga		
Tipe	=	SFZ-60000/150
Daya	=	60 MVA
Arus HS	=	6120,345 MVA
Tegangan	=	150 / 20
Impedansi Z %	=	13,32 %
Frekuensi	=	50 Hz
Vektor Grup	=	YNyn0 (d)

Tabel 2. Data Relay Arus Lebih

	OCR Incoming	OCR Outgoing
type	Areva P121	SELL 551
karakteristik	Standart invers	Standart invers
Rasio CT	2000/1	400/1

Tabel 3. Data Recloser

Data Recloser	
Type	OVR-3 221x
Karakteristik	Standart invers
Arus Pemutusan (A)	12,500

Tabel 4. Data Outgoing Feeder

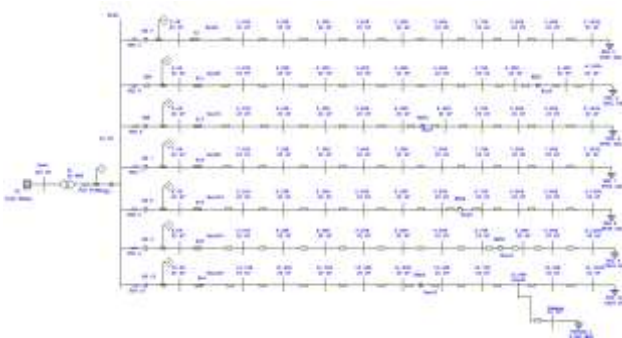
Penyulang	Panjang (km)	Arus (Ampere)	Beban (MVA)
PDL 3	6,526	275	9526,55
PDL 4	5,930	192	6651,26
PDL 5	4,364	284,6	9859,11
PDL 7	0,940	173	5993,07
PDL 8	6,380	280	9699,76
PDL 9	5,933	246,5	8539,25
PDL 10	8,470	270,5	6426,09

Tabel 5. Data Teknis Kabel AAAC mm²

Kabel AAAC	Data per Km (ohm)	
	R	jX
Z1/Km (240 mm ²)	0,1344	0,3158
Z2/Km (240 mm ²)	0,1344	0,3158
Z0/Km (150mm ²)	0,3441	1,618

2.3. Pemodelan

Berdasarkan pada data eksisting jaringan yang diperoleh maka dapat dibuat pemodelan diagram satu garis menggunakan program ETAP 11.1.1 seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Pemodelan Diagram Satu Garis Jaringan Distribusi dengan ETAP 11.1.1

3. Hasil dan Analisa

3.1. Analisis Hubung Singkat

Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis hubung singkat dengan 2 metode yaitu melalui simulasi menggunakan program bantu ETAP 11.1.1 dan juga dengan perhitungan secara manual.

3.1.1. Perhitungan Hubung Singkat Manual

Menghitung impedansi penyulang PDL 3

$$Z_{1,2} = (0,1344 + j0,3158) \times 6,526 \text{ km} = 0,8771 + j2,0609 \text{ ohm}$$

$$Z_0 = (0,3411 + j1,618) \times 6,526 \text{ km} = 2,369 + j10,599 \text{ ohm}$$

Menghitung impedansi sumber

$$X_s = \frac{kV (\text{sisi primer trafo})^2}{MVA \text{ hubung singkat sisi primer}} = \frac{150^2}{6120,345} = 3,676 \text{ j ohm}$$

$$\text{Pada sisi } 20 \text{ kV} = \frac{20^2}{150^2} \times 3,676 = 0,0654 \text{ j ohm}$$

Menghitung reaktansi trafo

$$X_t = \frac{kV^2}{MVA \text{ trafo}} \times \% \text{ trafo} = \frac{20^2}{30} \times 13,32\% = 0,888 \text{ j ohm}$$

Menghitung arus base dan z base

$$I_{\text{base}} = \frac{MVA}{\sqrt{3} \times V_{\text{base}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 20} = 2,887 \text{ kA}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}} \div \sqrt{3}}{I_{\text{base}}} = \frac{20 \div \sqrt{3}}{2,887 \text{ kA}} = 4 \text{ ohm}$$

Sehingga didapat nilai R dan X dalam per unit (pu) 10%

$$Z_{\text{eq}} = R + X + X_s + X_t = 0,0877 + 0,2061j + 0,0654j + 0,888j = 0,0877 + 1,1595j \text{ ohm}$$

$$R_{\text{pu}} = \frac{R}{Z_{\text{base}}} = \frac{0,0887}{4} = 0,0221 \text{ pu}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{X}{Z_{\text{base}}} = \frac{1,1595}{4} = 0,2898 \text{ pu}$$

Contoh perhitungan arus hubung singkat pada titik 10% =

Rumus gangguan hubung singkat 3 fasa

$$I_{3\text{fasa}} (\text{pu}) = \frac{V_{\text{ps}}}{Z_{1\text{eq}}} = \frac{E_a}{Z_{1\text{eq}}} = \frac{1}{\sqrt{(0,0221^2 + 0,2898^2)}} = 3,44 \text{ pu}$$

$$I_{3\text{fasa}} (\text{A}) = I_{3\text{fasa}} (\text{pu}) \times I_{\text{base}} = 3,44 \times 2,887 \text{ kA} = 9930,5 \text{ A}$$

Rumus arus gangguan hubung singkat 2 fasa

$$I_{2\text{fasa}} (\text{pu}) = \frac{V_{\text{ph-ph}}}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}}} = \frac{E_a}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{\text{hs } 3\text{ fasa}}$$

$$= \frac{\sqrt{3} \times 1}{2 \times (\sqrt{(0,0221^2 + 0,2898^2)})} = 2,979 \text{ pu}$$

$$I_{2\text{fasa}} (\text{A}) = I_{2\text{fasa}} (\text{pu}) \times I_{\text{base}} = 2,979 \times 2,887 \text{ kA} = 8600,98 \text{ A}$$

Rumus arus gangguan hubung singkat 2 fasa tanah

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_{1\text{eq}} + \frac{Z_{2\text{eq}} \times Z_{0\text{eq}}}{Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}}}} = \frac{1}{0,2906 \angle 85,7 + \frac{0,2906 \angle 85,7 \times 0,5057 \angle 83,2}{0,2906 \angle 85,7 + 0,5057 \angle 83,2}}$$

$$= 2,1 \angle -85,32$$

$$I_{a0} = - \left(\frac{E_a - Z_{1\text{eq}} I_{a1}}{Z_0} \right) = - \left(\frac{1 - (0,2906 \angle 85,7 \times 2,1 \angle -85,32)}{0,5057 \angle 83,27} \right)$$

$$= 0,7702 \angle 96,18$$

$$I_{2\text{fasa tanah}} (\text{pu}) = 3 \times I_{a0} = 3 \times 0,7702 = 2,31 \text{ pu}$$

$$I_{2\text{fasa tanah}} (\text{A}) = I_{2\text{fasa}} (\text{pu}) \times I_{\text{base}} = 2,31 \times 2,887 \text{ kA} = 6670,24 \text{ A}$$

Rumus arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

$$I_{1\text{fasa-tanah}} (\text{pu}) = \frac{3 \times V_{\text{ph}}}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}}} = \frac{3 \times E_a}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}}}$$

$$= \frac{3 \times 1}{((2 \times \sqrt{0,0219^2 + 0,289^2}) + (\sqrt{0,059^2 + 0,502^2}))}$$

$$= 2,759 \text{ pu}$$

$$I_{1 \text{ fasa-tanah (A)}} = I_{1 \text{ fasa-tanah (pu)}} \times I_{\text{base}}$$

$$= 2,759 \times 2,887 \text{ kA} = 7964,4 \text{ A}$$

Sehingga dengan cara yang sama dapat diperoleh besar arus gangguan hubung singkat pada titik 0%, 20% hingga 100% di tiap penyulang seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6 hingga Tabel 12

Tabel 6. Perhitungan Manual Hubung Singkat PDL 3

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa (A)	2fasa (A)	2fasa tanah (A)	1fasa tanah (A)
0%	0,000	12111,74	10489,37	12086,95	12111,74
10%	0,653	9930,51	8600,32	6670,29	7965,68
20%	1,305	8386,94	7263,51	4556,79	5916,27
40%	2,610	6372,38	5518,80	2795,23	3897,85
60%	3,916	5126,79	4440,06	2038,19	2903,48
80%	5,221	4284,48	3710,57	1592,25	2312,46
100%	6,526	3678,16	3185,47	1305,04	1921,02

Tabel 7. Perhitungan Manual Hubung Singkat PDL 4

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa (A)	2fasa (A)	2fasa tanah (A)	1fasa tanah (A)
0%	0,000	12111,74	10489,37	12086,95	12111,74
10%	0,593	10098,60	8745,89	6936,59	8224,76
20%	1,186	8633,59	7477,12	4828,66	6208,78
40%	2,372	6666,65	5773,65	3017,86	4157,46
60%	3,558	5417,70	4692,00	2206,19	3121,87
80%	4,744	4558,43	3947,82	1718,02	2498,31
Recloser	4,935	4444,63	3849,27	1652,88	2420,39
100%	5,930	3932,46	3405,70	1422,68	2081,98

Tabel 8. Perhitungan Manual Hubung Singkat PDL 5

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa (A)	2fasa (A)	2fasa tanah (A)	1fasa tanah (A)
0%	0,000	12111,74	10489,37	12086,95	12111,74
10%	0,436	10566,77	9151,35	7840,98	8991,69
20%	0,873	9352,88	8100,06	5779,02	7133,78
40%	1,746	7582,62	6566,93	3775,83	5037,77
Recloser	2,183	6918,91	5992,12	3225,86	4388,55
60%	2,618	6362,94	5510,62	2812,39	3889,70
80%	3,491	5475,68	4742,21	2219,01	3166,34
100%	4,364	4802,86	4159,52	1844,68	2669,21

Tabel 9. Perhitungan Manual Hubung Singkat PDL 7

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa (A)	2fasa (A)	2fasa tanah (A)	1fasa tanah (A)
0%	0,000	12111,74	10489,37	12086,95	12111,74
10%	0,094	11745,03	10171,78	10844,48	11275,37
20%	0,188	11398,15	9871,37	9812,34	10543,50

Tabel 9. (lanjutan)

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa (A)	2fasa (A)	2fasa tanah (A)	1fasa tanah (A)
40%	0,376	10758,35	9317,27	8223,45	9326,34
60%	0,564	10182,33	8818,41	7101,78	8356,91
80%	0,752	9661,63	8367,46	6232,21	7567,64
100%	0,940	9189,11	7958,23	5547,61	6913,07

Tabel 10. Perhitungan Manual Hubung Singkat PDL 8

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa (A)	2fasa (A)	2fasa tanah (A)	1fasa tanah (A)
0%	0,000	12111,74	10489,37	12086,95	12111,74
10%	0,638	9971,20	8635,56	6385,02	8027,65
20%	1,276	8446,10	7314,75	4637,18	5985,37
40%	2,552	6442,09	5599,17	2859,28	3958,42
60%	3,828	5195,17	4499,28	2061,25	2954,11
Recloser	4,380	4792,05	4150,16	1833,32	2661,55
80%	5,104	4348,53	3766,04	1606,51	2355,39
100%	6,380	3737,39	3236,77	1335,81	1958,11

Tabel 11. Perhitungan Manual Hubung Singkat PDL 9

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa (A)	2fasa (A)	2fasa tanah (A)	1fasa tanah (A)
0%	0,000	12111,74	10489,37	12086,95	12111,74
10%	0,593	10097,74	8745,15	6933,77	8223,41
20%	1,187	8632,31	7476,02	4825,96	6207,24
40%	2,373	6665,10	5772,31	3015,70	4156,07
60%	3,560	5416,15	4690,66	2204,42	3120,69
Recloser	4,423	4763,23	4125,19	1828,55	2641,17
80%	4,746	4556,96	3946,56	1716,52	2497,30
100%	5,933	3931,09	3404,52	1421,38	2081,10

Tabel 12. Perhitungan Manual Hubung Singkat PDL 10

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa (A)	2fasa (A)	2fasa tanah (A)	1fasa tanah (A)
0%	0,000	12111,7	10489,3	12086,9	12111,7
10%	0,847	9417,24	8155,80	5854,29	7222,27
20%	1,694	7669,06	6641,79	3853,06	5127,07
40%	3,388	5567,70	4821,90	2271,87	3237,59
Recloser	4,550	4680,06	4053,17	1792,63	2582,74
60%	5,082	4360,80	3776,67	1618,64	2363,65
80%	6,776	3580,97	3101,30	1263,18	1860,66
Cabang 1	6,976	3506,81	3037,07	1220,14	1815,04
100%	8,470	3036,57	2629,82	1015,76	1533,97

3.1.2. Validasi Hubung Singkat Dengan Simulasi Program ETAP 11.1.1

Pada program ETAP 11.1.1 digunakan untuk analisis besar arus gangguan hubung singkat dengan menggunakan simulasi "Short Circuit Analysis". Sehingga dapat diketahui besar arus gangguan hubung singkat pada titik 0%, 20% hingga 100% di tiap penyulang seperti yang ditunjukkan pada Tabel 13 hingga Tabel 19.

Tabel 13. Hasil Simulasi Hubung Singkat PDL 3

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa	2fasa	2fasa tanah	1fasa tanah
		(A)	(A)	(A)	(A)
0%	0,000	12112	10489	12690	12395
10%	0,653	9875	8552	6690	7974
20%	1,305	8336	7219	4540	5876
40%	2,610	6354	5503	2760	3850
60%	3,916	5134	4446	1980	2862
80%	5,221	4306	3729	1550	2278
100%	6,526	3709	3212	1270	1892

Tabel 14. Hasil Simulasi Hubung Singkat PDL 4

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa	2fasa	2fasa tanah	1fasa tanah
		(A)	(A)	(A)	(A)
0%	0,000	12112	10489	12690	12395
10%	0,593	10046	8700	6990	8245
20%	1,186	8525	7432	4820	6175
40%	2,372	6644	5754	2970	4110
60%	3,558	5421	4694	2150	3080
80%	4,744	4577	3964	1680	2463
Recloser	4,935	4466	3867	1630	2386
100%	5,930	3961	3431	1380	2052

Tabel 15. Hasil Simulasi Hubung Singkat PDL 5

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa	2fasa	2fasa tanah	1fasa tanah
		(A)	(A)	(A)	(A)
0%	0,000	12112	10489	12690	12395
10%	0,436	10521	9111	7930	9047
20%	0,873	9299	8053	5770	7122
40%	1,746	7546	6535	3730	4995
Recloser	2,183	6877	5956	3160	4328
60%	2,618	6334	5486	2430	3833
80%	3,491	5469	4736	1980	3118
100%	4,364	4812	4167	12690	2628

Tabel 16. Hasil Simulasi Hubung Singkat PDL 7

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa	2fasa	2fasa tanah	1fasa tanah
		(A)	(A)	(A)	(A)
0%	0,000	12112	10489	12690	12395
10%	0,094	11730	10158	11240	11480
20%	0,188	11371	9847	10090	10690
40%	0,376	10715	9276	8370	9397
60%	0,564	10130	8773	7150	8382
80%	0,752	9606	8319	6240	7565
100%	0,940	9134	7910	5530	6893

Tabel 17. Hasil Simulasi Hubung Singkat PDL 8

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa	2fasa	2fasa tanah	1fasa tanah
		(A)	(A)	(A)	(A)
0%	0,000	12112	10489	12690	12395
10%	0,638	9917	8589	6760	8040
20%	1,276	8396	7271	4600	5948
40%	2,552	6424	5564	2810	3912
60%	3,828	5202	4505	2020	2914
Recloser	4,380	4807	4163	1800	2624
80%	5,104	4371	3785	1580	2322
100%	6,380	3769	3264	1300	1929

Tabel 18. Hasil Simulasi Hubung Singkat PDL 9

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa	2fasa	2fasa tanah	1fasa tanah
		(A)	(A)	(A)	(A)
0%	0,000	12112	10489	12690	12395
10%	0,593	10046	8700	6990	8245
20%	1,187	8582	7432	4820	6175
40%	2,373	5421	4694	2150	3080
60%	3,560	4577	3964	1680	2463
Recloser	4,423	4780	3431	1380	2052
80%	4,746	12112	10489	12690	12395
100%	5,933	10046	8700	6990	8245

Tabel 19. Hasil Simulasi Hubung Singkat PDL 10

Jarak (%)	Jarak (Km)	3 fasa	2fasa	2fasa tanah	1fasa tanah
		(A)	(A)	(A)	(A)
0%	0,000	12112	10489	12690	12395
10%	0,847	9362	8107	5860	7210
20%	1,694	7629	6607	3810	5082
40%	3,388	5568	4822	2240	3195
Recloser	4,550	4697	4068	1750	2546
60%	5,082	4383	3796	1590	1788
80%	6,776	3614	3130	1230	1511
Cabang 1	6,976	3541	3066	1200	1833
100%	8,470	3075	2663	1000	2330

3.2. Perhitungan Setting Relay dan Recloser

3.2.1. Setting Relay Outgoing

Hasil perhitungan setting koordinasi proteksi relay outgoing dengan jenis setting *Standard Inverse Time* secara lengkap dan jelas dapat dilihat pada Tabel 20 menggunakan Persamaan 1.

$$t = \frac{0,14}{\left[\frac{I_{hs}}{I_{set}}\right]^{0,02} - 1} \times TMS \quad (1)$$

dimana

t = waktu kerja *relay* (detik)

I_{hs} = arus hubung singkat (ampere)

I_{set} = arus setelan *relay* (ampere)

TMS = Time Multiple Setting

Tabel 20. Setting Relay Outgoing

Penyulang	Hasil Perhitungan Setting Relay Outgoing Feeder		
	Setting	OCR	GFR
PDL 3	TMS	0,186	0,179
	Top (s)	0,35	0,4
	I set (A)	330	576,31
PDL 4	TMS	0,206	0,174
	Top (s)	0,35	0,4
	I set (A)	230,4	624,59
PDL 5	TMS	0,184	0,159
	Top (s)	0,35	0,4
	I set (A)	341,52	800,76
PDL 7	TMS	0,211	0,174
	Top (s)	0,35	0,4
	I set (A)	207,6	622,18
PDL 8	TMS	0,185	0,178
	Top (s)	0,35	0,4
	I set (A)	336	587,43
PDL 9	TMS	0,192	0,174
	Top (s)	0,35	0,4
	I set (A)	295,8	624,33
PDL 10	TMS	0,187	0,193
	Top (s)	0,35	0,4
	I set (A)	342,6	460,19

Untuk setelan *relay* yang terpasang di penyulang, besar arus *setting* pada OCR sebesar 1,05 sampai 1,2 kali dari arus beban maksimalnya sedangkan untuk GFR adalah 0,12 hingga 0,4 kali dari arus gangguan fasa ke tanah terkecil. Persyaratan lain yang harus di penuhi yaitu untuk penyetelan waktu minimum *relay* terutama di penyulang tidak boleh lebih kecil dari 0,3.

3.2.2. Setting Relay Incoming

Hasil perhitungan setting koordinasi proteksi relay incoming dengan jenis setting *Standard Inverse Time* secara lengkap dan jelas dapat dilihat pada Tabel 21.

Tabel 21. Setting Relay Incoming

Hasil Perhitungan Setting Relay Incoming		
Setting	OCR	GFR
TMS	0,235	0,351
Top (s)	0,85	0,8
I set (A)	1807,68	613,58

Untuk setelan *relay* yang terpasang di sisi incoming, besar arus *setting* pada OCR sebesar 1,05 sampai 1,2 kali dari arus beban maksimalnya sedangkan untuk GFR adalah 0,12 hingga 0,4 kali dari arus gangguan fasa ke tanah terkecil. Persyaratan lain yang harus di penuhi yaitu untuk penyetelan waktu kerja *relay* pada sisi incoming memiliki *gradding time* lebih besar kurang lebih 0,4 detik dari relay outgoing.

3.2.3. Setting Recloser

Hasil perhitungan setting koordinasi proteksi recloser pada jaringan distribusi 20 kV dengan jenis setting *Standard Inverse Time* secara lengkap dan jelas dapat dilihat pada Tabel 22

Tabel 22. Setting Recloser

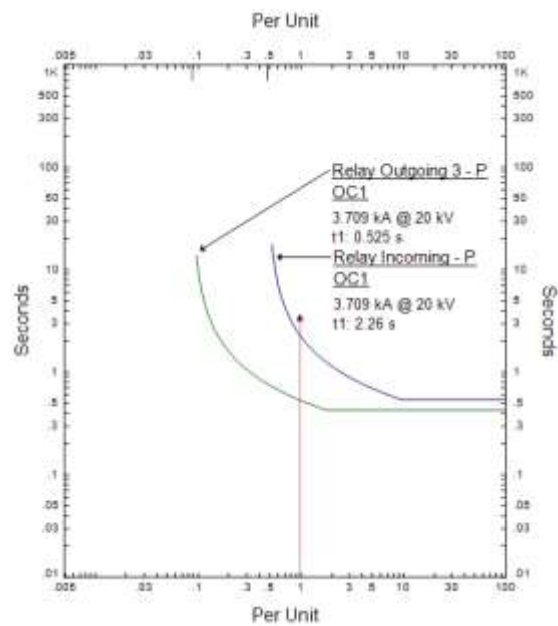
Penyulang	Setting	OCR		GFR	
		Fast	Delay	Fast	Delay
PDL 4	TMS	0,05	0,074	0,05	0,056
	Top (s)	0,114	0,17	0,155	0,175
	I set (A)	230,4	230,4	249,8	249,8
PDL 5	TMS	0,05	0,075	0,05	0,065
	Top (s)	0,117	0,175	0,135	0,175
	I set (A)	341,52	341,52	320,31	320,31
PDL 8	TMS	0,05	0,066	0,05	0,06
	Top (s)	0,133	0,175	0,145	0,175
	I set (A)	336	336	234,97	234,97
PDL 9	TMS	0,05	0,069	0,05	0,058
	Top (s)	0,127	0,175	0,149	0,175
	I set (A)	295,8	295,8	249,73	249,73
PDL 10	TMS	0,05	0,066	0,05	0,065
	Top (s)	0,132	0,175	0,134	0,175
	I set (A)	324,6	324,6	184,08	184,08

Untuk setelan *recloser* yang terpasang di penyulang, besar arus *setting* pada OCR sebesar 1,05 sampai 1,2 kali dari arus beban maksimalnya sedangkan untuk GFR adalah

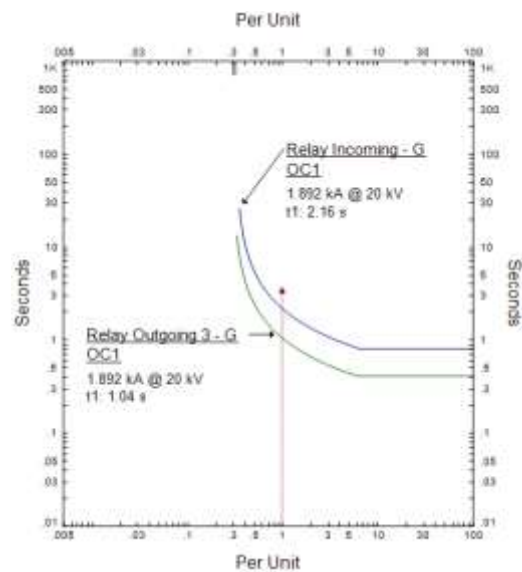
0,12 hingga 0,4 kali dari arus gangguan fasa ke tanah terkecil. Besar *Time Multiple Set* (TMS) pada siklus kerja cepat / *fast recloser* dibuat seminimal mungkin dengan tujuan gangguan hubung singkat yang bersifat sementara dapat segera dihilangkan.

3.4.3. Analisis Koordinasi Relay dan Recloser

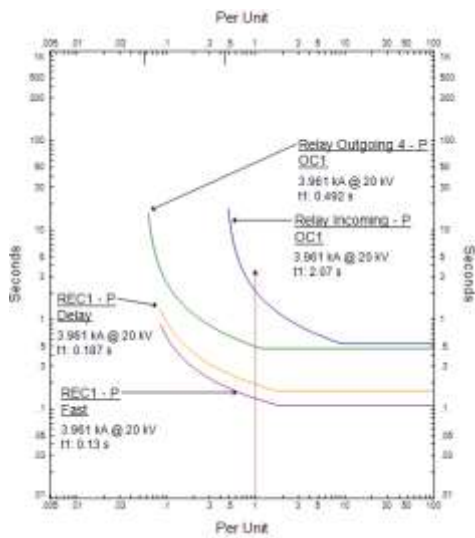
Analisis koordinasi setting relay dan recloser dapat diketahui dengan menggunakan program ETAP 11.1.1 melalui simulasi *Star –Protective Device Coordination* . Melalui kurva TCC (*Time Current Curve*) dapat diketahui apakah relay dan recloser dapat beroperasi dengan baik saat terjadi simulasi gangguan hubung singkat.



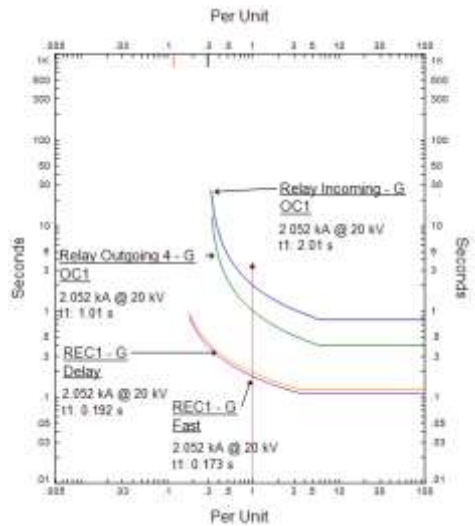
Gambar 4. Kurva TCC OCR PDL 3



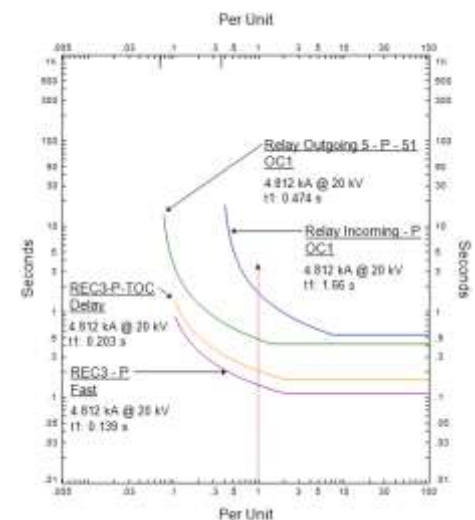
Gambar 5. Kurva TCC GFR PDL 3



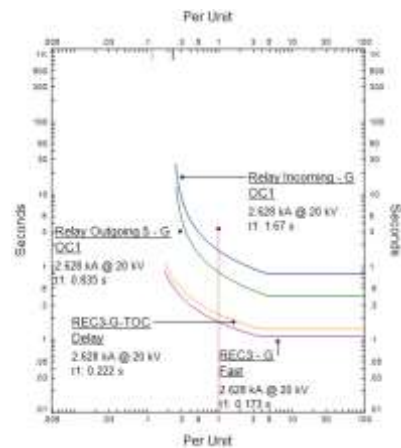
Gambar 6. Kurva TCC OCR PDL 4



Gambar 7. Kurva TCC GFR PDL 4



Gambar 8. Kurva TCC OCR PDL 5



Gambar 9. Kurva TCC GFR PDL 5

Berdasarkan hasil kurva arus terhadap waktu pada masing-masing sistem proteksi tiap penyulang menunjukkan tidak terdapat perpotongan antara kurva operasi peralatan proteksi. Hal ini dapat dikatakan koordinasi sistem proteksi yang dihasilkan berjalan baik.

3.3. Analisis Gangguan Sympathetic Tripping

Untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam sistem proteksi yaitu kemampuan memilih (selectivity) antara daerah / jaringan yang mengalami gangguan dengan yang tidak mengalami gangguan. Maka hasil koordinasi setting proteksi diuji dengan adanya gangguan *Sympathetic Tripping*. Dimana gangguan tersebut dipengaruhi oleh besarnya arus kapasitif dalam jaringan dapat dicari dengan Persamaan 2 dan Persamaan 3.

$$X'o = \frac{12,3}{f} \log_{10} 2h \quad (2)$$

$$I_{CI} = \frac{3 \times V}{X'o \times \sqrt{3}} P \quad (3)$$

dimana

$X'o$ = faktor reaktansi kapasitif seri ($M\Omega$)

f = frekuensi (50 Hz)

h = tinggi penghantar terhadap permukaan tanah (ft)

I_{CI} = arus kapasitif pada penyulang (ampere)

V = tegangan fasa-netral pada penyulang (V)

P = panjang penyulang (km)

Sehingga didapat besar arus kapasitif tiap penyulang sesuai pada Tabel 23.

Tabel 23. Besar Arus Kapasitif Tiap Penyulang

Penyulang	Panjang (km)	Arus Kapasitif (ampere)
PDL 3	6,526	I_{c1} 0,4839
PDL 4	5,93	I_{c2} 0,4403
PDL 5	4,364	I_{c3} 0,3240
PDL 7	0,94	I_{c4} 0,0698
PDL 8	6,38	I_{c5} 0,4738
PDL 9	5,933	I_{c6} 0,4406
PDL 10	8,47	I_{c7} 0,6290

Besar arus gangguan hubung singkat fasa dengan tanah akibat pengaruh adanya arus kapasitif pada jaringan dapat dicari dengan Persamaan 4.

$$I_f' = \sqrt{(I_f)^2 + (\sum I_{c_n})^2} \quad (4)$$

dimana

I_f' = arus hubung singkat sesudah penambahan (ampere)

I_f = arus hubung singkat sebelum penambahan (ampere)

I_{c_n} = arus kapasitif pada penyulang sehat (ampere)

Pada selektivitas akan dilakukan perhitungan waktu kerja operasi relay tanah (GFR) pada tiap outgoing feeder terhadap besar resultan dari jumlah gangguan arus hubung singkat fasa tanah dengan arus kapasitif tiap penyulang. Perhitungan waktu operasi relay menggunakan persamaan karakteristik standart invers sesuai Persamaan 1, sehingga hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 24.

Tabel 24. Hasil Perhitungan Waktu Kerja Relay pada gangguan *Sympathetic Tripping*

PDL	Letak Gangguan	Waktu Kerja Relay Tanah / GFR (detik)				
		20%	40%	60%	80%	100%
3	PDL 3	0,52	0,64	0,76	0,89	1,04
	Lain	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
4	PDL 4	0,51	0,63	0,75	0,87	1,01
	Lain	-0,18	-0,19	-0,18	-0,18	-0,18
5	PDL 5	0,48	0,57	0,65	0,74	0,83
	Lain	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15
7	PDL 7	0,41	0,43	0,49	0,47	0,49
	Lain	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
8	PDL 8	0,52	0,64	0,76	0,89	1,03
	Lain	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18
9	PDL 9	0,51	0,63	0,75	0,87	1,01
	Lain	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18
10	PDL 10	0,54	0,68	0,81	0,96	1,12
	Lain	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21

tanda (-) = relay tidak bekerja

Dapat dilihat pada Tabel 21 bahwa relay gangguan tanah pada penyulang terganggu bekerja pada saat terjadi gangguan sedangkan pada penyulang lain yang sehat relay tidak bekerja.

3.4. Analisis Ketahanan Konduktor Terhadap Arus Hubung Singkat

Setelah mendapat setting relay arus lebih dan recloser pada tiap penyulang, kita harus memeriksa waktu ketahanan peralatan terhadap besar arus gangguan hubung singkat yang dapat dicari menggunakan Persamaan 5.

$$I = \frac{79,25 \times S}{\sqrt{t}} \quad (5)$$

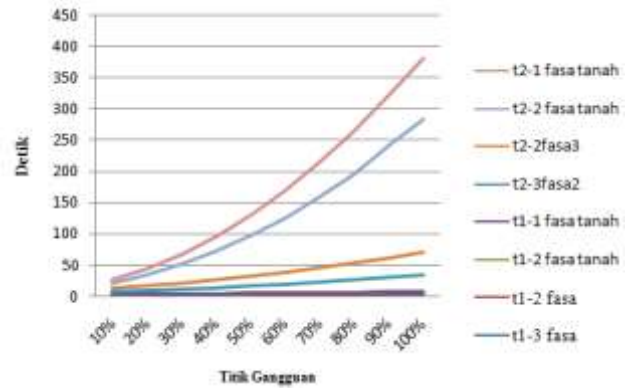
dimana

I = arus gangguan yang terjadi (ampere)

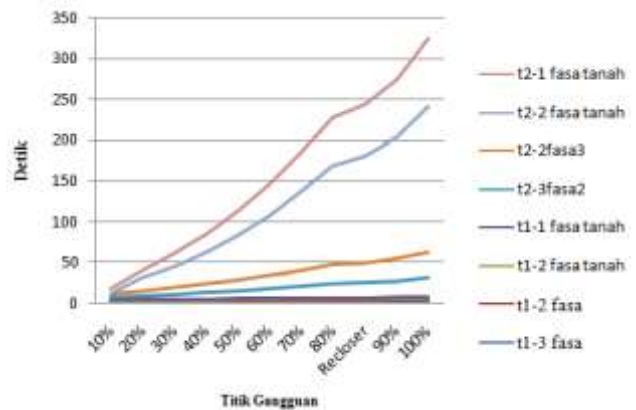
S = luas penampang konduktor (mm^2)

t = waktu ketahanan pembebanan arus (detik)

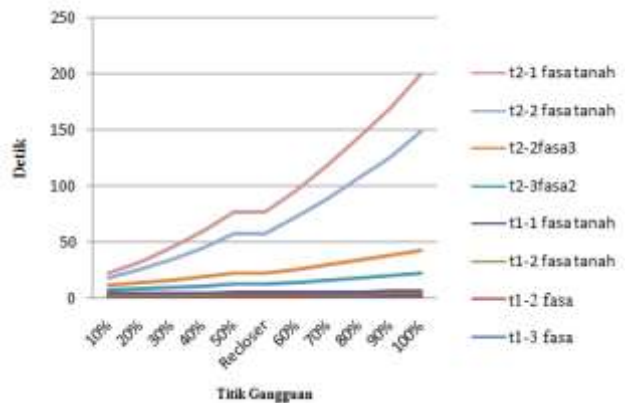
Hasil dari perhitungan waktu ketahanan konduktor terhadap arus gangguan hubung singkat akan dibandingkan dengan waktu kerja relay incoming seperti yang ditampilkan pada Gambar 11 hingga 17.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Waktu Ketahanan Konduktor Dengan Waktu Kerja Relay Incoming PDL 3



Gambar 11. Grafik Perbandingan Waktu Ketahanan Konduktor Dengan Waktu Kerja Relay Incoming PDL 4



Gambar 12. Grafik Perbandingan Waktu Ketahanan Konduktor Dengan Waktu Kerja Relay Incoming PDL 5

Berdasarkan pada Gambar 11 hingga Gambar 17 menunjukkan bahwa waktu ketahanan konduktor (t_2) pada tiap penyulang lebih besar dari waktu kerja relay incoming (t_2) pada masing-masing penyulang. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat terjadi gangguan hubung singkat, relay incoming akan bekerja sebelum konduktor pada penyulang mengalami kerusakan akibat besarnya arus hubung singkat.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari analisis, diperoleh besar gangguan hubung singkat minimal 1015,76 ampere dan maksimum sebesar 12111,74 ampere. Sedangkan waktu kerja peralatan proteksi minimum adalah 0,114 detik pada recloser dan maksimum adalah 4,85 pada relay arus lebih maksimum. Hasil analisis koordinasi antara peralatan proteksi relay arus lebih dengan recloser sudah berjalan dengan baik. Hal ini dibuktikan sesuai dengan kurva karakteristik waktu terhadap arus (TCC curve) sistem proteksi pada masing-masing penyulang yang dapat dilihat pada Gambar 4 hingga Gambar 10. Pada gambar tersebut terlihat bahwa masing-masing kurva peralatan proteksi tidak saling memotong. Pada hasil analisis pengujian selektivitas koordinasi sistem proteksi sudah terpenuhi / tidak terjadi peristiwa symphathetic tripping. Hal ini dapat dibuktikan pada Tabel 24 bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat 1 fasa terhadap tanah, relay gangguan tanah pada penyulang terganggu bekerja pada saat terjadi gangguan sedangkan relay pada penyulang yang sehat tidak bekerja. Sedangkan berdasarkan hasil analisis ketahanan peralatan sistem tenaga listrik terhadap arus gangguan hubung singkat, diperoleh koordinasi setting peralatan proteksi sudah berjalan dengan baik. Berdasarkan pada Gambar 11 hingga Gambar 17 menunjukkan bahwa waktu ketahanan konduktor pada tiap penyulang lebih besar dari waktu kerja relay incoming pada masing-masing penyulang.

Referensi

[1]. Suhadi, SMK Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid I, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Umum Dirjen Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional,

[2]. Sarimun, Wahyudi. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Garamod. 2012.

[3]. Saadat, Hadi. *Power System Analysis*. McGraw Hill. 1999.

[4]. Stevenson, William D. 1983. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Erlangga. 1996.

[5]. Drs. Daryanto. 2012. *Teknik Listrik Lanjutan*. Satu Nusa. Bandung.

[6]. Sulasno, Ir. 2001. *Teknik dan Sistem Distribusi dan Tenaga Listrik*. Badan Penerbit Universitas Diponegoro. Semarang.

[7]. Gonen, Turan. 1986. *Electric Power Distribution System Engineering*. McGraw-Hill Book Company. University of Missouri Columbia.

[8]. Arisunandar, Artono. *Teknik Tegangan Tinggi, Jilid II : Saluran Transmisi*, Pradnya Paramita, Jakarta. 1984.

[9]. Perhitungan Arus gangguan Hubung Singkat dan Penyetelan Relai. Standar Perhitungan PT. PLN (Persero) Unit Bisnis Jakarta Raya dan Tangerang.

[10]. Perusahaan Umum Listrik Negara. "SPLN 52-3 : 1983, Pola Pengamanan Sistem, Bagian Tiga : Sistem Distribusi 6 kV dan 20 kV". Indonesia. 1983.

[11]. Perusahaan Umum Listrik Negara. "SPLN 64 : 1985, Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah". Indonesia. 1985.

[12]. Warsito, Adhi. 2013 "Analisis Evaluasi Setting Relay OCR Sebagai Proteksi Pada Jaringan Distribusi Dengan Pembangkitan Terdistribusi (Studi Kasus Pada Penyulang BSB 4, Kendal – Jawa Tengah)" Teknik Elektro Universitas Diponegoro.

[13]. Hidayatulloh, Rachmat. 2012 "Analisa Gangguan Hubung Singkat Pada Jaringan SUTT 150 kV Jalur Kebasen – Balapulang – Bumiayu Menggunakan Program ETAP" Teknik Elektro Universitas Diponegoro.

[14]. Setiajje, Prayoga. 2014 "Evaluasi Setting Relay Arus Lebih dan Setting Relay Gangguan Tanah Pada Gardu Induk Spondol" Teknik Elektro Universitas Diponegoro.

[15]. Rino, Adi Putra. 2015 "Koordinasi Relay Arus Lebih dan Recloser Pada Jaringan Tegangan Menengah Gardu Induk Spondol" Teknik Elektro Universitas Diponegoro.

[16]. Kurniawati, Amanah. 2001 "Evaluasi Koordinasi Rele Proteksi Pada Feeder Distribusi Terhadap Kemungkinan Gangguan Symphathetic Tripping Pada Gangguan Satu Saluran Ke Tanah" Teknik Elektro Universitas Diponegoro.