



Penentuan *Personal Protective Equipment* (PPE) Berdasarkan Koordinasi *Over Current Relay* (OCR) pada Sistem Distribusi

Firilia Filiana^{1*}, Yun Tonce Kusuma Priyanto², Muhammad Zarkasyi Efendy³

^{1*} Teknik Elektro, Faculty, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan. Email: firilia.filiana@lecturer.itk.ac.id

² Teknik Elektro, Faculty, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan. Email: yuntonce@lecturer.itk.ac.id

³ Teknik Elektro, Faculty, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan. Email: 04151035@itk.ac.id

Abstract

Fault in the power system can pose a hazard not only to the equipment but also to the people working near it. Disturbances that can arise range from a short circuit that causes a spark, to a short circuit that can cause an arc flash. The arc hazard level can be estimated to determine the Personal Protective Equipment (PPE) that must be used by humans when working in electrified areas. In addition to the PPE level, arc current values can also be used to determine the safe distance between equipment and people. This research collects data on a distribution system of 65 buses which are the main distributors near the load, so their reliability must be high. System protection uses over current relay (OCR) and ground fault relay (GFR) to protect the system from 3-phase and 1-phase short circuit fault. The simulation results show that OCR and GFR can protect the system from short circuit disturbances that are close to the relay location. The higher the proximity to the source, the higher the PPE level and the safe distance between humans and electrical equipment.

Keywords: Arc Flash, Distribution System, Ground Fault Relay (GFR), Over Current Relay (OCR), Personal Protective Equipment (PPE).

Abstrak

Gangguan pada sistem tenaga listrik bisa menimbulkan bahaya bukan hanya untuk peralatan tetapi juga manusia yang bekerja didekatnya. Gangguan yang dapat muncul mulai dari konslet yang menyebabkan percikan api, hingga hubung singkat yang dapat menyebabkan busur api. Tingkat bahaya busur api dapat diperkirakan untuk menentukan Personal Protective Equipment (PPE) yang harus digunakan oleh manusia jika bekerja di daerah beraliran listrik. Selain level PPE, nilai arus busur api juga dapat digunakan untuk menentukan jarak aman antara peralatan dan manusia. Penelitian ini mengambil data pada sistem distribusi 65 bus yang menjadi penyalur utama dekat beban, sehingga keandalannya harus tinggi. Pengaman sistem menggunakan over current relay (OCR) dan ground fault relay (GFR) untuk melindungi sistem dari gangguan hubung singkat 3 fasa dan 1 fasa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa OCR dan GFR dapat melindungi sistem dari gangguan hubung singkat yang dekat dengan lokasi relay. Semakin tinggi dekat dengan sumber, semakin tinggi pula level PPE dan jarak aman antara manusia dan peralatan listrik.

Kata Kunci: Busur Api, Ground Fault Relay (GFR), Over Current Relay (OCR), Personal Protective Equipment (PPE), Sistem Distribusi.

1. Pendahuluan

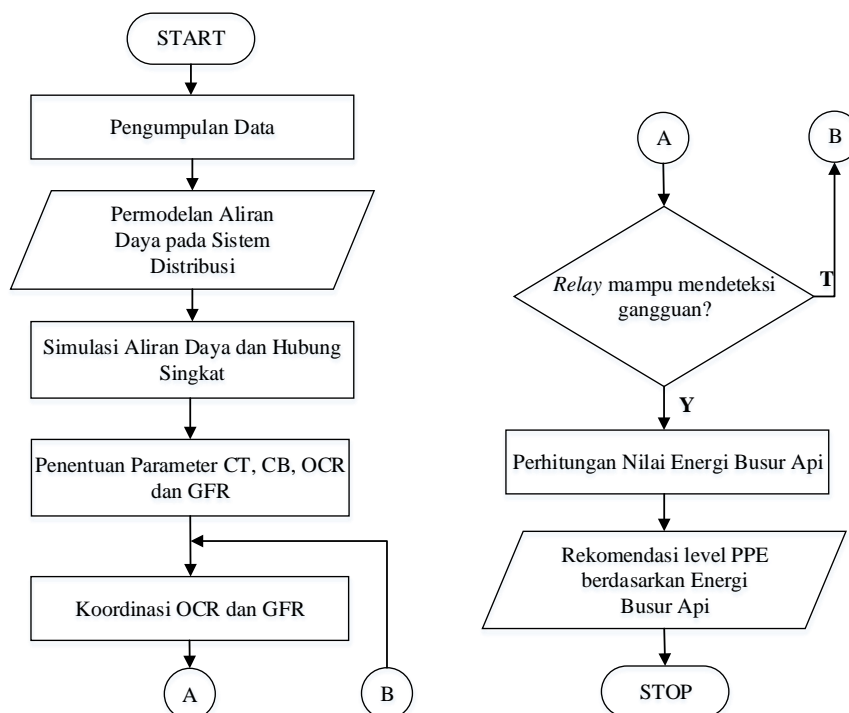
Perlindungan pada sistem tenaga listrik bukan hanya melindungi peralatan dari kemungkinan gangguan tetapi juga keselamatan manusia. Kehidupan manusia yang saat ini sangat bergantung pada listrik juga

meningkatkan resiko bahaya akibat gangguan yang ditimbulkan oleh listrik. Penggunaan teknologi dengan energi terbarukan, teknologi medis, maupun *gadget* yang diketahui punya potensi bahaya listrik meningkatkan kesadaran untuk lebih peduli mengenai bahaya listrik (Gammon, T. 2019) (Kou, G. 2019) (White, J. 2020). Bahaya yang ditimbulkan oleh listrik bukan hanya dari sisi pengguna tetapi juga dari sisi penyedia. Di Indonesia, listrik disediakan oleh perusahaan penyedia melalui sistem distribusi.

Sistem distribusi terdiri dari komponen listrik yang punya resiko bahaya bagi peralatan itu sendiri maupun manusia yang bekerja didekatnya. Gangguan dengan bahaya terbesar adalah gangguan akibat arus lebih misalnya hubung singkat. Gangguan ini akan menyebabkan arus yang lebih tinggi dari nilai normal mengalir ke lokasi gangguan dan lebih lanjut dapat menyebabkan percikan api. Dalam skala sistem distribusi, percikan api yang ditimbulkan dapat menyebabkan busur api. Banyak kerugian yang muncul dari kejadian ini, mulai dari kerusakan peralatan listrik, keselamatan pekerja yang terancam, hingga kerugian pelanggan akibat sistem penyaluran yang tidak handal (Jabr, R. A. 2015) (Gammon, T. 2015). Sistem distribusi yang diteliti memiliki dua level tegangan, yaitu tegangan 20 kV dan 400 V. Pada level tegangan rendah, gangguan busur api lebih acak dan bervariasi. Karena arus gangguan awal mungkin kecil dan tidak merusak, sulit dideteksi dengan cepat oleh peralatan proteksi, tetapi menyebabkan kerusakan berkelanjutan pada peralatan (Zhang, Z. 2018) (Eblen, M. L. 2018). Sementara pada tegangan tinggi, nilai arus lebih yang muncul sangat tinggi sehingga energi yang dihasilkan juga sangat tinggi.

Ada tiga faktor terpenting yang secara langsung mempengaruhi energi busur api, yaitu arus hubung singkat, celah antar konduktor dan durasi busur api. Durasi dari busur api inilah yang ditentukan oleh waktu kerja peralatan pengaman. Semakin cepat peralatan pengaman bekerja, maka semakin sedikit energi yang dihasilkan busur api (Marroquin, A. 2020) (Liang, X. 2016). Proteksi yang dilakukan dari sisi peralatan dan manusia. Untuk melindungi peralatan dari bahaya arus lebih, digunakan *over current relay* (OCR) dan *ground fault relay* (GFR). *Relay* ini, masing – masing akan melindungi peralatan dari arus lebih akibat gangguan tiga fasa dan satu fasa (Majd, A. 2017). Setelah sistem diamankan dari gangguan, akan dihitung kemungkinan energi yang ditimbulkan akibat dari busur api. Energi yang dihasilkan dari kejadian busur api inilah yang menjadi dasar penentuan level *personal protective equipment* (PPE) bagi pekerja yang bekerja di sekitar peralatan.

2. Metode



Gambar 1: Diagram Alir Penelitian
Sumber: Penulis, 2023

Langkah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Data yang dibutuhkan untuk pembuatan *Single Line Diagram* (SLD) sistem distribusi adalah tegangan, arus, impedansi dan grounding. Sementara untuk perhitungan busur api berdasarkan Standar IEEE 1584-2002, dibutuhkan data jarak antar konduktor. Selanjutnya data yang sudah diperoleh akan digunakan untuk tahap selanjutnya dengan penjelasan sebagai berikut.

2.1. Simulasi Aliran Daya dan Hubung Singkat

Data yang telah diperoleh sebelumnya digunakan untuk membuat SLD untuk analisis aliran daya dan hubung singkat. Simulasi aliran daya dilakukan untuk mendapatkan kondisi normal dari sistem distribusi. Kondisi normal ini dipenuhi jika daya yang dibutuhkan oleh beban dapat disuplai sepenuhnya oleh sumber, dan semua tegangan pada bus harus berada pada nilai 95 – 105 %. Pada sistem distribusi yang diteliti, terdapat satu *grid* sebesar 60 MVA pada bus 1 yang menyuplai sistem. Tegangan yang digunakan pada sistem adalah 20 kV pada 26 bus, dan 0,4 kV pada 35 bus. Bus yang memiliki tegangan 20 kV adalah bus 1 – 14, 25, 26, 30, 36 – 41, 45, 48, dan 55.

Simulasi aliran daya menggunakan metode *Newton Raphson* dengan nilai *error* yang sebesar 0,0001. Metode *Newton Raphson* dipilih karena metode ini cocok digunakan pada sistem yang besar seperti sistem distribusi (Saadat, H. 2011). Hasil analisis aliran daya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1: Hasil Simulasi Aliran Daya

Bus ID	% Mag.	Ang.	Bus ID	MW	Mvar	Bus ID	% Mag.	Ang.	Bus ID	MW	Mvar
Bus1	100,00	0,0	Bus2	3,886	2,495	Bus26	99,23	0,0	Bus25	-0,152	-0,096
			Bus61	2,016	1,372				Bus28	0,098	0,062
Bus2	99,86	0,0	Bus3	3,822	2,455				Bus27	0,055	0,034
			Bus1	-3,880	-2,492	Bus27	100,18	-0,3	Bus26	-0,054	-0,034
			Bus60	0,059	0,037	Bus28	99,53	-0,5	Bus26	-0,096	-0,060
Bus3	99,71	0,0	Bus4	3,774	2,426	Bus29	98,48	-0,4	Bus25	-0,170	-0,105
			Bus2	-3,816	-2,452	Bus30	99,24	0,0	Bus8	-0,145	-0,091
			Bus59	0,041	0,026				Bus31	0,145	0,091
Bus4	99,57	0,0	Bus5	2,265	1,470	Bus31	100,43	-0,3	Bus30	-0,144	-0,089
			Bus3	-3,769	-2,423	Bus32	100,12	-0,4	Bus8	-0,089	-0,055
			Bus36	1,437	0,910	Bus33	98,15	-0,3	Bus7	-0,107	-0,066
			Bus58	0,067	0,042	Bus34	99,30	0,0	Bus6	-0,005	-0,003
Bus5	99,49	0,0	Bus6	2,204	1,433	Bus35	99,09	-0,1	Bus5	-0,059	-0,036
			Bus4	-2,263	-1,469	Bus36	99,56	0,0	Bus4	-1,437	-0,910
			Bus35	0,059	0,037				Bus37	1,279	0,811
Bus6	99,41	0,0	Bus7	2,197	1,429				Bus55	0,025	0,016
			Bus5	-2,202	-1,432				Bus57	0,133	0,084
			Bus34	0,005	0,003	Bus37	99,55	0,0	Bus36	-1,279	-0,810
Bus7	99,33	0,0	Bus8	2,087	1,360				Bus38	1,268	0,804
			Bus6	-2,195	-1,428				Bus54	0,011	0,007
			Bus33	0,108	0,068	Bus38	99,54	0,0	Bus37	-1,268	-0,804
Bus8	99,25	0,0	Bus7	-2,085	-1,359				Bus39	0,895	0,568
			Bus25	0,323	0,204				Bus52	0,109	0,069
			Bus30	0,145	0,091				Bus51	0,146	0,093
			Bus9	1,526	1,007				Bus53	0,118	0,075
			Bus32	0,090	0,057	Bus39	99,53	0,0	Bus38	-0,895	-0,568
Bus9	99,19	0,0	Bus10	1,522	1,004				Bus45	0,098	0,062
			Bus8	-1,525	-1,007				Bus40	0,603	0,383
			Bus24	0,003	0,002				Bus48	0,137	0,087

<i>Bus ID</i>	% Mag.	Ang.	<i>Bus ID</i>	MW	Mvar	<i>Bus ID</i>	% Mag.	Ang.	<i>Bus ID</i>	MW	Mvar
<i>Bus10</i>	99,13	0,0	<i>Bus11</i>	1,407	0,931				<i>Bus50</i>	0,057	0,036
			<i>Bus9</i>	-1,521	-1,004	<i>Bus40</i>	99,52	0,0	<i>Bus39</i>	-0,603	-0,383
			<i>Bus23</i>	0,114	0,073				<i>Bus41</i>	0,306	0,194
<i>Bus11</i>	99,07	0,1	<i>Bus10</i>	-1,406	-0,931				<i>Bus44</i>	0,138	0,088
			<i>Bus12</i>	0,242	0,153				<i>Bus43</i>	0,159	0,101
			<i>Bus21</i>	1,067	0,717	<i>Bus41</i>	99,52	0,0	<i>Bus40</i>	-0,306	-0,194
			<i>Bus22</i>	0,097	0,061				<i>Bus42</i>	0,306	0,194
<i>Bus12</i>	99,06	0,1	<i>Bus11</i>	-0,242	-0,152	<i>Bus42</i>	99,85	-0,5	<i>Bus41</i>	-0,301	-0,187
			<i>Bus13</i>	0,207	0,131	<i>Bus43</i>	99,17	-0,7	<i>Bus40</i>	-0,156	-0,097
			<i>Bus20</i>	0,011	0,007	<i>Bus44</i>	99,55	-0,6	<i>Bus40</i>	-0,136	-0,084
			<i>Bus19</i>	0,024	0,015	<i>Bus45</i>	99,53	0,0	<i>Bus39</i>	-0,098	-0,062
<i>Bus13</i>	99,05	0,1	<i>Bus12</i>	-0,207	-0,130				<i>Bus47</i>	0,085	0,053
			<i>Bus14</i>	0,104	0,066				<i>Bus46</i>	0,013	0,008
			<i>Bus17</i>	0,060	0,038	<i>Bus46</i>	98,95	-0,1	<i>Bus45</i>	-0,013	-0,008
			<i>Bus18</i>	0,043	0,027	<i>Bus47</i>	100,14	-0,5	<i>Bus45</i>	-0,083	-0,052
<i>Bus14</i>	99,04	0,1	<i>Bus13</i>	-0,104	-0,066	<i>Bus48</i>	99,53	0,0	<i>Bus39</i>	-0,137	-0,087
			<i>Bus16</i>	0,078	0,049				<i>Bus49</i>	0,137	0,087
			<i>Bus15</i>	0,025	0,016	<i>Bus49</i>	98,97	-0,8	<i>Bus48</i>	-0,134	-0,083
<i>Bus15</i>	99,24	-0,5	<i>Bus14</i>	-0,025	-0,016	<i>Bus50</i>	98,54	-0,2	<i>Bus39</i>	-0,057	-0,035
<i>Bus16</i>	99,77	-0,4	<i>Bus14</i>	-0,077	-0,048	<i>Bus51</i>	99,43	-0,6	<i>Bus38</i>	-0,143	-0,089
<i>Bus17</i>	100,18	-0,3	<i>Bus13</i>	-0,060	-0,037	<i>Bus52</i>	98,36	-0,3	<i>Bus38</i>	-0,108	-0,067
<i>Bus18</i>	99,61	-0,4	<i>Bus13</i>	-0,042	-0,026	<i>Bus53</i>	99,41	-0,6	<i>Bus38</i>	-0,115	-0,071
<i>Bus19</i>	100,45	-0,2	<i>Bus12</i>	-0,024	-0,015	<i>Bus54</i>	99,26	-0,1	<i>Bus37</i>	-0,011	-0,007
<i>Bus20</i>	98,59	-0,1	<i>Bus12</i>	-0,011	-0,007	<i>Bus55</i>	99,56	0,0	<i>Bus36</i>	-0,025	-0,016
<i>Bus21</i>	98,18	-2,1	<i>Bus11</i>	-1,057	-0,655				<i>Bus56</i>	0,025	0,016
<i>Bus22</i>	99,39	-0,5	<i>Bus11</i>	-0,095	-0,059	<i>Bus56</i>	98,88	-0,2	<i>Bus55</i>	-0,025	-0,015
<i>Bus23</i>	99,06	-0,6	<i>Bus10</i>	-0,112	-0,070	<i>Bus57</i>	98,12	-0,4	<i>Bus36</i>	-0,132	-0,082
<i>Bus24</i>	99,12	0,0	<i>Bus9</i>	-0,003	-0,002	<i>Bus58</i>	100,22	-0,4	<i>Bus4</i>	-0,066	-0,041
<i>Bus25</i>	99,23	0,0	<i>Bus8</i>	-0,323	-0,204	<i>Bus59</i>	98,60	-0,3	<i>Bus3</i>	-0,041	-0,025
			<i>Bus26</i>	0,152	0,096	<i>Bus60</i>	98,27	-0,4	<i>Bus2</i>	-0,058	-0,036
			<i>Bus29</i>	0,171	0,107	<i>Bus61</i>	98,56	-2,5	<i>Bus1</i>	-1,993	-1,235

Dari analisis hubung singkat, akan diperoleh juga arus nominal dan maksimal yang masuk ke peralatan listrik. Selanjutnya arus gangguan diperoleh dari simulasi hubung singkat. Simulasi ini dilakukan pada semua bus baik bus beban maupun bus generator. Jenis hubung singkat yang disimulasikan adalah hubung singkat 3 fasa untuk input OCR dan hubung singkat 1 fasa untuk input GFR.

2.2. Penentuan Parameter Peralatan Proteksi

Peralatan proteksi yang ditambahkan pada sistem adalah *current transformer* (CT), *circuit breaker* (CB) dan *relay*. CT akan membaca nilai arus di komponen dan memberikan ke *relay* sebagai input. Jika *relay* mendeteksi bahwa arus yang masuk ke komponen adalah arus gangguan dan waktu tunda telah tercapai, *relay* akan memberikan perintah ke CB untuk *trip*. Pemutusan ini dilakukan untuk memisahkan bagian yang bermasalah dari sistem agar tidak mengganggu sistem lain yang masih normal. OCR dan GFR memiliki *setting* yang terpisah karena mengamankan gangguan yang berbeda. Pemasangan *relay* dilakukan pada setiap titik komponen yang digunakan yaitu, saluran, transformator, dan beban.

2.2.1. Penentuan Paramater OCR

Ada dua *setting relay* untuk OCR yaitu *setting inverse* dan *instantaneous*. Pada *setting inverse*, semakin besar arus maka semakin kecil pula waktu tunda *relay*, dan sebaliknya. Sementara pada *instantaneous*, *relay* memiliki waktu tunda dan arus minimum yang pasti. Jika arus minimum telah terpenuhi selama waktu tunda, maka *relay* akan memberikan perintah ke CB untuk *trip*. Persamaan (1) dan (2) menunjukkan persamaan untuk *setting inverse* dan *instantaneous*, sementara persamaan (3) adalah persamaan waktu untuk *setting inverse*.

$$1,05 I_{FLA} \leq I_{set} \leq 1,4 I_{FLA} \quad (1)$$

$$1,5 I_{FLA} \leq I_{set} \leq I_{SC \min} \quad (2)$$

$$t_d = \frac{k \times T}{\beta \times \left[\left(\frac{I_{SC \max}}{I_{set}} \right)^\alpha - 1 \right]} \quad (3)$$

I_{FLA} adalah arus maksimum dari peralatan listrik yang diperoleh dari simulasi *load flow*, $I_{SC \min}$ dan $I_{SC \max}$ masing – masing adalah arus hubung singkat minimum dan maksimum, yang diperoleh dari simulasi hubung singkat, dan I_{set} adalah *setting* arus pada *relay* dimana jika ada arus sebesar I_{set} akan dinilai sebagai arus gangguan. Koefisien α , β , dan k ditentukan berdasarkan jenis kurva *relay* dimana dalam penelitian ini menggunakan *standard inverse*. T adalah *time dial* dari *relay* dan t_d adalah waktu kerja *relay* (Setiawati, N. E. 2016).

2.2.2. Penentuan Parameter GFR

Setting pada GFR juga ada dua seperti OCR yaitu *setting* arus dan waktu. Untuk *setting* arus dibutuhkan arus hubung singkat 1 fasa dari simulasi hubung singkat. Arus *setting* diambil 10 – 50 % dari arus hubung singkat 1 fasa. Pada GFR diperlukan CT tersendiri yaitu CT *ground* yang akan mendeteksi gangguan 1 fasa.

2.3. Koordinasi OCR dan GFR

Koordinasi yang dimaksud adalah mengatur waktu antar *relay* untuk memastikan bahwa *relay* dapat mendeteksi gangguan yang paling dekat dengannya dan ada *relay back up* yang bekerja jika gangguan masih ada meskipun *relay* pertama sudah *trip*. Karena ada banyak komponen dan bus dalam sistem, akan di ambil daerah *typical* sebagai acuan. Jika bagian *typical* telah selesai di *setting*, maka *relay* lain di sistem akan di *setting*. Tahap akhir dari koordinasi OCR dan GFR adalah simulasi gangguan untuk memastikan *relay* yang bekerja adalah *relay* dekat gangguan sesuai dengan jenis gangguan (Kilickiran, H. C. 2018).

2.4. Perhitungan Nilai Energi Busur Api dan PPE

Perhitungan nilai energi busur api menggunakan persamaan dari standar IEEE 1584-2002 seperti pada persamaan (4) dan (5)

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011 G \quad (4)$$

$$E = 4.184 C_f 10^{\lg E_n} \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (5)$$

Dimana:

E_n = energi insiden normal untuk waktu dan jarak (J/cm^2)

K_1 = Konstanta (-0,792 untuk konfigurasi terbuka dan -0,555 untuk konfigurasi dalam ruang)

K_2 = Konstanta (0 untuk *ungrounded* dan HRG; -0,113 untuk *grounded system*)

G = jarak antar konduktor (mm)

E = energi insiden (J/cm^2)

C_f = faktor perhitungan (1,0 untuk tegangan dibawah 1 kV dan 1,5 untuk tegangan diatas atau sama dengan 1 kV)

E_n = Energi insiden normal

t = waktu terjadinya busur api (detik)

D = jarak dari titik busur api ke manusia (mm)

x = eksponen jarak

Nilai energi yang didapatkan akan menentukan level energi dalam satuan cal/cm^2 berdasarkan standar IEEE 1584-2002. Penanganan level bahaya *incident energy* ditentukan berdasarkan standar NFPA 70 E yang terdapat pada tabel 2 dengan penjelasan sebagai berikut:

- Level Maksimum: rentang energi lebih besar dari 40 cal/cm^2 .
- Level 4 rentang energi dari lebih besar dari 25 cal/cm^2 sampai 40 cal/cm^2 .
- Level 3 rentang energi dari lebih besar dari 8 cal/cm^2 sampai 25 cal/cm^2 .
- Level 2 rentang energi dari lebih besar dari 5 cal/cm^2 sampai 8 cal/cm^2 .
- Level 1 rentang energi dari lebih besar dari $1,2 \text{ cal/cm}^2$ sampai 5 cal/cm^2 .
- Level 0 rentang energi dari $0 - 1,2 \text{ cal/cm}^2$

Tabel 2: Pakaian Pelindung berdasarkan level PPE

Level PPE	Pakaian Pelindung	Peralatan Pelindung
Level Maksimum	Belum dapat ditentukan	Belum dapat ditentukan
Level 4	Kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahanapi, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan, jaket, dan <i>parka</i> busur listrik	Helm pelindung, kacamatapelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek
Level 3	Kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahanapi, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan, jaket dan <i>parka</i> busur listrik	Helm pelindung, kacamatapelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek
Level 2	Kemeja lengan panjang, celana panjang, atau baju terusan yang tahanapi, jaket dan celana busur listrik, pelindung wajah dan <i>balaclava</i> atau tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik	Helm pelindung, kacamatapelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek
Level 1	Kemeja lengan panjang dan celanapanjang atau baju terusan tahan apijaket, pelindung wajah atau tudungwajah busur listrik, jaket tahan api.	Helm pelindung, kacamatapelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek

*) NFPA 70 E (2015)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Simulasi Koordinasi OCR dan GFR

Sistem proteksi OCR dan GFR pada *typical* dari sumber ke beban menggunakan OCR dan GFR sebanyak 15 buah, dimana pemilihan *typical* dilakukan karena beban terletak paling jauh dari sumber. Penentuan *relay* lain akan mengikuti *typical* ini, dimana masing – masing *relay* bertugas melindungi setiap zona yang ditentukan. Adapun pemasangan *relay* dilakukan disetiap *bus* percabangan, trafo dan beban.

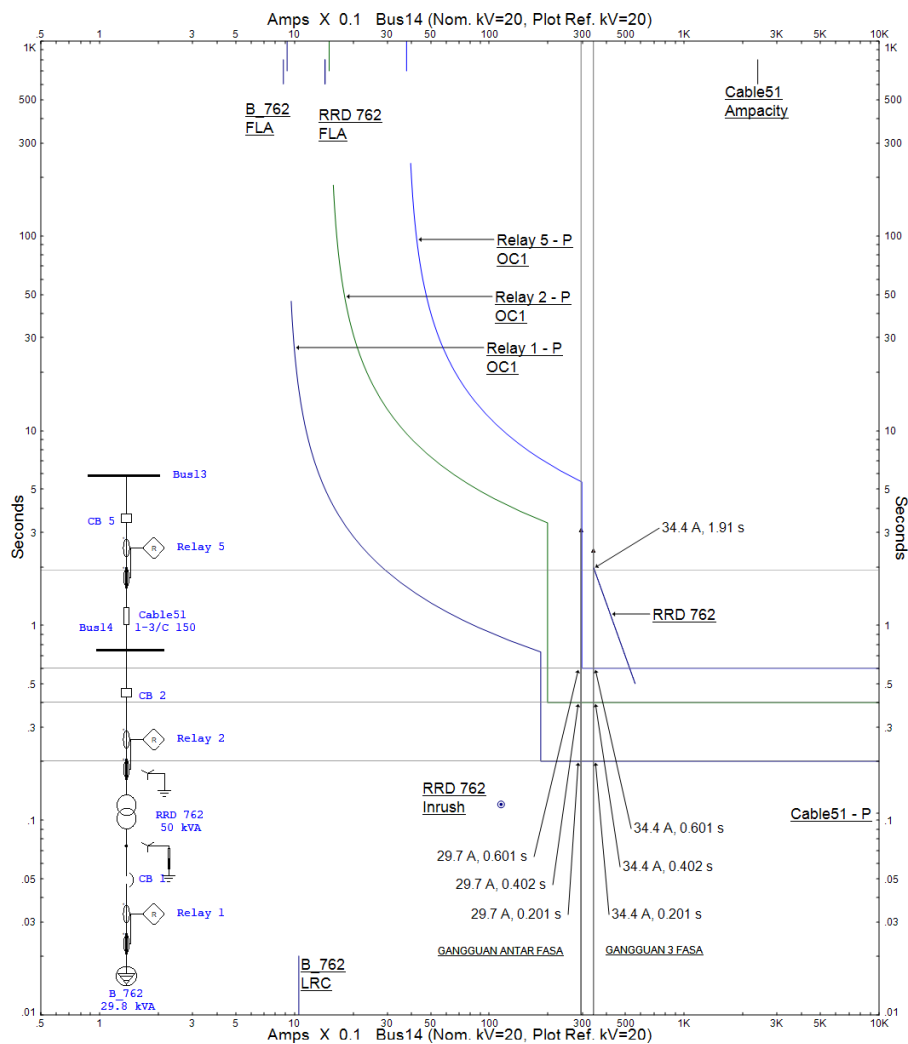
3.1.1. Hasil Simulasi Koordinasi OCR

Setting OCR dilakukan dengan mempertimbangkan beban. Pemilihan tipe kurva dipilih kurva standard inverse karena beban pada sistem penyulang I.8 adalah beban residensial. Gambar 2 memperlihatkan koordinasi OCR pada bagian paling dekat dengan beban. Gambar 2: menunjukkan bahwa kurva ketahanan transformator berada sebelah kanan kurva rele 1 dan rele 2 dan tidak berpotongan. Jika transformator mengalami gangguan, maka *relay* akan bekerja sebelum trafo mengalami kerusakan. *Relay* juga bekerja di luar arus *inrush* trafo sehingga tidak akan mengganggu kerja transformator. Urutan simulasi pemadaman pada gambar ditunjukkan dengan mengambil nilai gangguan maksimum yang terbaca pada rele 1, ketika terjadi gangguan tersebut, rele akan mendeteksi gangguan, jika telah melebihi waktu tunda yang ditentukan, maka rele 1 akan memerintah CB 1 untuk memutus gangguan. Jika pada

rele 1 terjadi kegagalan proteksi maka rele 2 sebagai cadangan harus bekerja dengan waktu tunda yang ditentukan.

Besar gangguan dari beban dengan menggunakan besar gangguan 3 fasa sebagai gangguan maksimum dan gangguan antar fasa sebagai gangguan minimum. Pada gambar 2 terjadi gangguan maksimum sebesar 1.718 A berpotongan dengan rele 1 pada saat 0,2 detik, maka rele 1 bekerja. Jika rele 1 gagal memutus gangguan maka rele 2 sebagai cadangan dari rele 1, rele 2 akan bekerja saat berpotongan dengan gangguan pada saat 0,4 detik. Ketika gangguan tidak berhasil diputus oleh rele 2, maka rele 3 sebagai cadangan diharapkan bekerja disaat gangguan berpotongan dengan waktu tunda 0,6 detik. Jika gangguan tidak berhasil dipadamkan maka berdasar pada gambar 4.1 menunjukkan gangguan berpotongan dengan kurva ketahanan transformator pada waktu 1,9 detik. Hal ini menunjukkan transformator akan rusak.

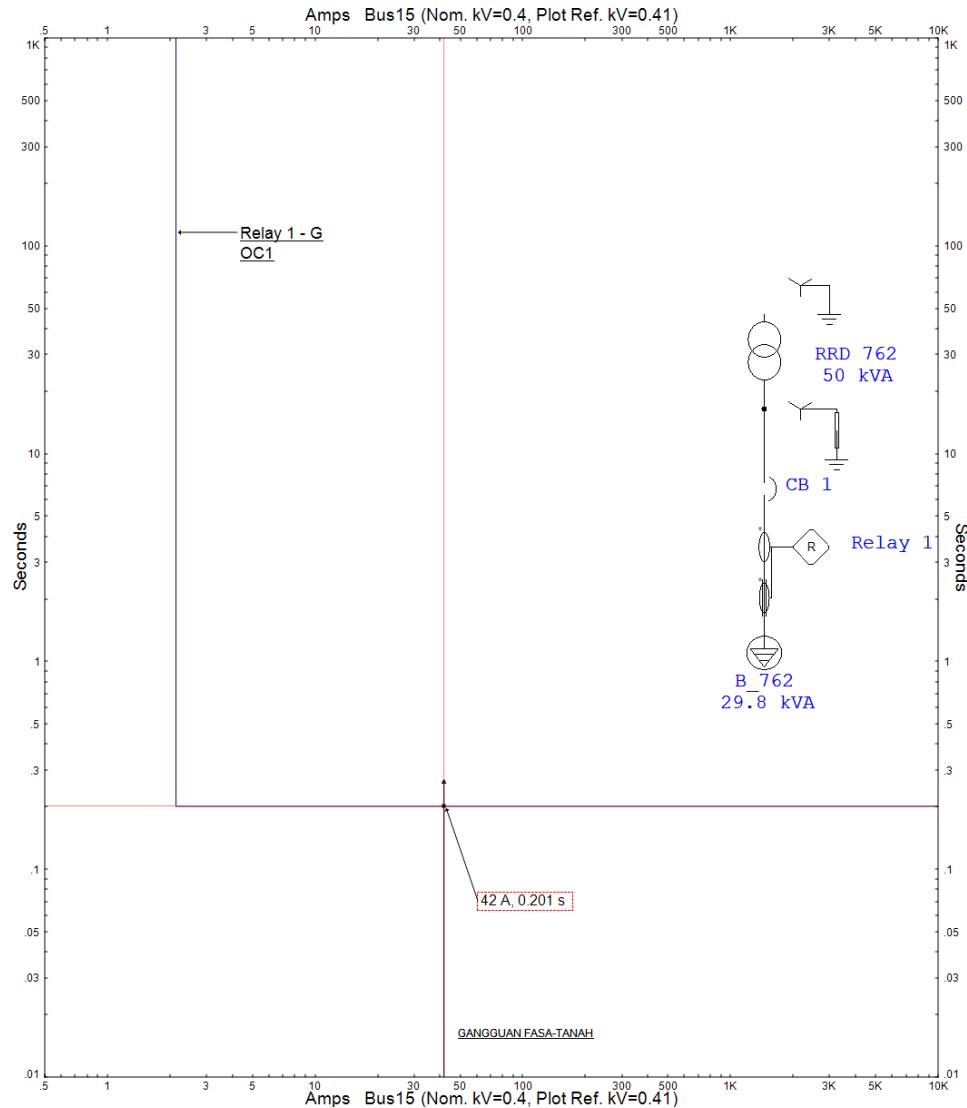
Nilai gangguan minimum, terjadi besar gangguan sebesar 1.487 A. Hal yang sama terjadi pada kerja rele dimana saat berpotongan dengan rele 1 pada saat 0,2 detik, maka rele 1 bekerja. Jika rele 1 gagal memutus gangguan maka rele 2 sebagai cadangan dari rele 1, rele 2 akan bekerja saat berpotongan dengan gangguan pada saat 0,4 detik. Ketika gangguan tidak berhasil diputus oleh rele 2, maka rele 3 sebagai cadangan diharapkan bekerja disaat gangguan berpotongan dengan waktu tunda 0,6 detik. Besar gangguan tidak berpotongan dengan kurva ketahanan transformator yang menunjukkan jika rele 3 gagal memutus gangguan maka gangguan akan terus berlanjut namun tidak menyebabkan kerusakan pada transformator.



Gambar 2: Kurva Koordinasi OCR pada Beban

3.1.2. Hasil Simulasi Koordinasi GFR

Pada *setting* GFR, sistem terbagi menjadi 2 zona yaitu, zona 1 yang merupakan zona dari sekunder trafo, dan zona 2 merupakan zona dari sumber pada penyulang hingga primer trafo. Sistem distribusi PLN, berdasarkan pada SPLN 3: 1978, dipilih sistem pentanahan transformator dengan dilengkapi dengan NGR (*Neutral Grounding Resistance*). Adapun nilai resistansi yang dipasang dipilih sebesar 5 Ω . Arus gangguan fasa-tanah, data yang digunakan adalah gangguan dari fasa –tanah. Pada sistem gangguan fasa-tanah, pembagian zona dipilih karena perbedaan level tegangan. Gambar 3 memperlihatkan koordinasi GFR pada daerah sekunder trafo.



Gambar 3: Kurva Koordinasi GFR pada Daerah Sekunder Trafo

3.2. Hasil Perhitungan Nilai Energi Busur Api

Perhitungan energi busur api dilakukan pada setiap *bus*, dan pada zona *typical* memiliki 14 *bus* saluran hingga beban dan 1 *bus* sebagai penyulang utama. Adapun untuk *bus* 15 didapatkan arus busur api sebesar 1,404 kA. *Bus* 15 merupakan *bus* yang terhubung beban dimana pada ketika terjadi gangguan pada *bus* dilindungi CB diatasnya yaitu CB 2 yang diampu *relay* 2. Pada saat ketika gangguan di sisi sekunder trafo disisi primer mendeteksi dengan arus yang berbanding dengan mengikuti rasio transformator.

Dengan besar gangguan sebesar 0,028 kA pada rele 2 membutuhkan waktu untuk memutus selama 0,4 detik dan 0,01 detik untuk waktu kerja CB, sehingga waktu *Fault Clearing Time* (FCT) sebesar 0,41 detik, kemudian penentuan *incident energy normalized* dengan persamaan (4). Terakhir, diperoleh nilai

energi busur api menggunakan persamaan (5). Lalu nilai tersebut diubah menjadi satuan untuk PPE yaitu cal/cm² dimana didapatkan nilai sebesar 1,28 cal/cm².

3.3. Penentuan Level PPE berdasarkan Nilai Energi Busur Api

Besar energi busur api yang telah diperoleh sebelumnya akan digunakan untuk penentuan pakaian dan bahan tambahan yang perlu digunakan. Pada bus 15 masuk di golongan level 0. Nilai energi busur api menjadi acuan untuk penentuan *arc flash boundary* seperti pada persamaan (6). Nilai *arc flash boundary* diubah dalam satuan kaki dan didapatkan sebesar 2,07 ft atau merupakan jarak aman bagi pekerja bekerja saat bertegangan di daerah bus tersebut.

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (6)$$

Keterangan:

D_B = batas jarak dari titik busur api (mm)

C_f = faktor perhitungan (1.0 untuk tegangan di atas 1 kV, 1.5 untuk tegangan di bawah atau sama dengan 1 kV)

E_n = energi insiden normal

E_B = energi insiden dalam J/cm² pada batas jarak

t = waktu (detik)

x = eksponen jarak (Lihat Tabel 2.4)

I_{bf} = *bolted fault current* (kA)

Hasil perhitungan energi busur api dan level PPE pada bagian typical dapat dilihat pada tabel 3. Semakin dekat dengan sumber, semakin tinggi pula nilai energi busur api, dan semakin tinggi pula level PPE. Jarak aman saat bekerja dengan peralatan juga semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena nilai arus gangguan yang semakin tinggi jika mendekati beban.

Tabel 3: Nilai Energi Busur Api pada Bus Typical

Bus ID	Relay ID	I _{bf} (kA)	FCT (s)	E (cal/cm ²)	Db (mm)	PPE Level
2	93	1,89	3,01	70,74	22,93	Level Maksimum
3	90	1,87	2,81	65,21	22,01	Level Maksimum
4	87	1,84	2,61	59,76	21,07	Level Maksimum
5	49	1,82	2,41	54,43	20,11	Level Maksimum
6	46	1,80	2,21	49,25	19,13	Level Maksimum
7	43	1,77	2,01	44,17	18,12	Level Maksimum
8	40	1,75	1,81	39,24	17,08	Level 4
9	26	1,72	1,61	34,42	15,99	Level 4
10	23	1,70	1,41	29,74	14,87	Level 4
11	20	1,67	1,21	25,09	13,65	Level 4
12	15	1,64	1,01	20,57	12,36	Level 3
13	10	1,61	0,81	16,20	10,97	Level 3
14	5	1,58	0,61	11,99	9,44	Level 3
15	2	1,72	0,41	1,28	1,93	Level 0

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh, dapat ditarik kesimpulan bahwa OCR dan GFR dapat melindungi sistem dari hubung singkat 3 fasa dan 1 fasa secara bersamaan. Penyusunan OCR dilakukan dengan menggunakan *grading time* sebesar 0,2 detik, dan GFR dilakukan dengan menggunakan *grading time* sebesar 0,1 detik. Pada 15 relay di bagian *typical*, diperoleh waktu tunda tercepat yaitu pada rele 1 yang

terpasang pada beban sebesar 0,2 detik. Sedangkan waktu tunda terbesar yaitu pada rele 93 yang terpasang pada bus sumber dengan waktu 3 detik.

Daerah *typical* memiliki 14 bus beban dan 1 bus sumber, nilai energi busur api yang terbesar didapatkan pada bus 2 dengan besar 70,74 cal/mm². Sementara nilai energi busur api yang terkecil didapatkan pada bus 15 dengan besar 1,28 cal/mm². Dari nilai energi busur api, terlihat bahwa 6 bus yang termasuk pada level maksimum, 4 bus termasuk dalam level 4, 3 bus yang berada pada level 3, dan 1 bus yang berada dalam level bahaya level 0. Level PPE dari sistem juga semakin tinggi jika manusia bekerja dekat sumber.

Referensi

- Eblen, M. L., & Short, T. A. (2018). Low Voltage ARC Sustainability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(3), 2934–2946.
- Gammon, T., Lee, W.-J., Zhang, Z., & Johnson, B. C. (2015). “Arc Flash” Hazards, Incident Energy, PPE Ratings, and Thermal Burn Injury—A Deeper Look. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(5), 4275–4283.
- Gammon, T., Vigstol, D., & Campbell, R. (2019). Workers at Risk of Fatal and Nonfatal Electrical Injuries. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1–1.
- IEEE 1584-2002 “IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations”, New York, hal 9-13.
- Jabr, R. A., & Dzafic, I. (2015). A Fortescue Approach for Real-Time Short Circuit Computation in Multiphase Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(6), 3276–3285.
- Kilickiran, H. C., Sengor, I., Akdemir, H., Kekezoglu, B., Erdinc, O., Paterakis, N. G. (2018) Power system protection with digital over current relays: A review of nonstandard.
- Kou, G., Deverick, J., Phelps, K., Nguyen, T., & Velez-Cedeno, F. (2019). Impact of Distributed Energy Resources on Arc Flash Incident Energy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1–1.
- Liang, X., Bagen, B., & Gao, D. W. (2016). An Effective Approach to Reducing Arc Flash Hazards in Power Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(1), 67–75
- Majd, A., & Luo, R. (2017). An Improved Arc Flash Energy Calculation Method and Its Application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(5), 5062–5067.
- Marroquin, A., Rehman, A., & Madani, A. (2020). High-Voltage Arc Flash Assessment and Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 2205–2215.
- NFPA 70 E, (2015), “Standard for Electrical Safety in the Workplace 2015 Edition”, Quincy, hal 40
- Saadat, H. (2011). *Power System Analysis*. The McGraw-Hill. New York.
- Setiawati, N. E., Pujiantara, M., Anam, S. (2016). Koordinasi Proteksi Directional Over Current Relay dengan Mempertimbangkan Gangguan Arah Arus di Pabrik PT. Petrokimia Gresik, *Jurnal Teknik ITS*, Vol.5., No.2, hal.B-437-B-442
- White, J., & Jamil, S. (2020). Electrical Incidents and How They Relate to NFPA 70E/CSA Z462. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1–1.
- Zhang, Z., Nie, Y., & Lee, W.-J. (2018). Approach of Voltage Characteristics Modeling for Medium-Low Voltage Arc Fault in Short Gaps. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1–1.