

Pengembangan Metode Penentuan *Interrupting Capacity* Pemutus Tenaga Pada Suatu Sistem Tenaga Listrik

Al Imran¹, Syarifuddin Kasim²

¹ Jurusan Pendidikan Teknik Elektro Universitas Negeri Makassar, al.imran@unm.ac.id

² Jurusan Pendidikan Teknik Elektro Universitas Negeri Makassar, syarifuddinkasim@unm.ac.id

Abstrak— Penentuan *interrupting capacity* suatu pemutus tenaga listrik (PMT) atau *circuit breaker* yang akan dipasang pada suatu sistem tenaga listrik, merupakan hal yang sangat penting terutama untuk perencanaan, perancangan serta perluasan sistem tenaga listrik, disamping *momentary capacity* dan jenis PMT-nya. Penelitian ini mengusulkan suatu metode untuk menentukan kapasitas pemutusan atau *interrupting capacity* PMT pada suatu sistem tenaga listrik, berdasarkan arus gangguan hubung singkat terbesar yang dapat terjadi pada semua bagian sistem tenaga listrik. Empat tipe gangguan hubung singkat, dihitung untuk mencari yang mana menghasilkan arus gangguan total terbesar pada suatu bus. Perhitungan arus gangguan hubung singkat dilakukan dengan metode matriks impedansi bus dengan menggunakan reaktansi transien (X') urutan positif, urutan negatif dan urutan nol dari generator, dan reaktansi bocor trafo, serta resistansi dan reaktansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol saluran transmisi. Pada penelitian ini, perhitungan menggunakan daya dasar 100 MVA dengan tegangan dasar sesuai dengan tegangan kerja masing-masing bus. Reaktansi transien beban motor-motor listrik dan beban lain diabaikan, sehingga tegangan pragangguan dianggap 1 per unit. Metode yang digunakan diterapkan pada sistem tenaga listrik 11 bus 14 saluran dan dengan menggunakan bahasa pemrograman MATLAB untuk membantu perhitungan matematis. Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa metode penentuan *interrupting capacity* yang dilakukan dengan mengambil arus gangguan total terbesar setelah menghitung 4 jenis gangguan hubung singkat, yaitu hubung singkat 3 fase seimbang, 1 fase ke tanah, fase ke fase, dan 2 fase ke tanah lebih baik dibanding jika hanya menggunakan arus gangguan dari analisis hubung singkat 3 fase seimbang saja.

Keywords: *Interrupting Capacity*, Pemutus Tenaga Listrik (PMT), Gangguan Hubung Singkat

BAB I PENDAHULUAN

Di dalam suatu sistem tenaga listrik, studi arus hubung singkat merupakan hal yang penting terutama untuk perencanaan, perancangan serta perluasan sistem tenaga listrik. Data yang diperoleh dari perhitungan ini akan digunakan untuk menentukan kapasitas MVA *busbar*, *interrupting capacity*, dan *momentary capacity* pemutus tenaga (*circuit breaker*). Pemilihan pemutus tenaga untuk sistem tenaga listrik tidak hanya tergantung pada arus yang mengalir pada pemutus tenaga dalam keadaan kerja normal saja tetapi juga pada arus maksimum yang mungkin mengalirinya beberapa waktu dan pada arus yang mungkin harus diputuskannya pada tegangan saluran dimana pemutus itu ditempatkan. Arus maksimum yang dapat diputuskan dengan selamat oleh pemutus

tenaga inilah disebut sebagai *interrupting capacity* [1][2]. Pemilihan *interrupting capacity* suatu pemutus tenaga yang akan dipakai pada sistem tenaga listrik, harus betul-betul

tepat dan akurat karena dapat mempengaruhi keamanan dan kontinuitas penyaluran daya listrik.

Penentuan *interrupting capacity* yang banyak dilakukan adalah dengan mengacu pada besar arus gangguan hubung singkat tiga fase seimbang terbesar yang dapat mengalir atau terjadi pada bagian sistem yang akan ditempatkan PMT [3][4], padahal bisa saja arus terbesar yang dapat mengalir pada bagian tersebut adalah arus gangguan hubung singkat 1 fase ke tanah, antar fase, atau 2 fase ke tanah. Oleh karena itu dirasa perlu melakukan penelitian untuk menentukan *interrupting capacity* pemutus tenaga suatu sistem tenaga listrik, berdasarkan arus gangguan hubung singkat terbesar yang dapat terjadi pada semua bagian sistem tenaga listrik. Metode penentuan *interrupting capacity*, diawali dengan analisis gangguan hubung singkat pada suatu sistem tenaga. Data yang diperoleh dari studi ini akan digunakan untuk menentukan kapasitas MVA *busbar*, *momentary capacity* dan *interrupting capacity* pemutus tenaga listrik. Pemilihan kemampuan pemutus tenaga dan *busbar* yang tidak tepat akan menyebabkan keandalan sistem tenaga listrik akan

berkurang, bahkan bisa mengakibatkan penyaluran daya listrik berhenti total (*blackout*) [5][6].

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan suatu metode untuk menentukan kapasitas pemutus atau *interrupting capacity* pemutus tenaga pada suatu sistem tenaga listrik, berdasarkan arus gangguan hubung singkat terbesar yang dapat terjadi pada semua bagian sistem tenaga listrik. Empat tipe gangguan hubung singkat, dihitung untuk mencari yang mana menghasilkan arus gangguan total terbesar pada suatu bus dengan menggunakan matriks impedansi bus [Z_{bus}] [3][7][8][12]. Keempat tipe gangguan tersebut adalah hubung singkat 3 fase seimbang, 1 fase ke tanah, fase ke fase, dan 2 fase ke tanah. Perhitungan besar arus gangguan hubung singkat ini juga dapat dilakukan dengan menggunakan *software Power World Simulator* seperti yang dikembangkan pada [9].

Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa *Interrupting Capacity* adalah arus total terbesar (AC dan DC) yang dapat diputuskan dengan selamat jika terjadi gangguan. Besar arus ini tergantung dari waktu terbukanya alat pemutus tenaga itu. Karena komponen DC sulit dihitung, maka untuk mengikutsertakan komponen DC ini, arus gangguan simetris (AC) dikalikan dengan suatu faktor pengali (k). Faktor tersebut tergantung dari waktu membukanya pemutus tenaga, seperti diperlihatkan pada Tabel 1 [1].

Berdasarkan definisi di atas, maka besar *interrupting capacity* suatu pemutus tenaga adalah,

$$I_{ic} = k \cdot I_f \cdot I_{dasar} \quad (1)$$

Dengan I_{dasar} adalah arus dasar pada bagian sistem tenaga tempat pemutus tenaga akan dipasang, dalam kA.

Tabel 1. Faktor pengali alat pemutus daya

Waktu Membuka Alat Pemutus Daya	Faktor Pengali
≥ 8 cycle	1,0
5 cycle	1,1
3 cycle	1,2
2 cycle	1,4
<i>Instantaneous</i>	1,6

BAB II METODE PENELITIAN

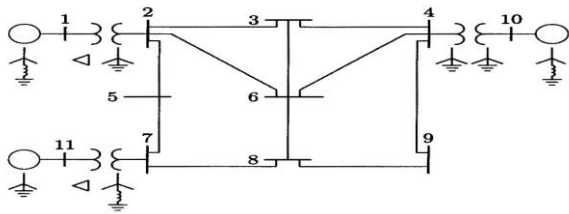
Pada penelitian ini, analisis dilakukan dengan menggunakan program komputer bahasa pemrograman

MATLAB yang dimodifikasi dari [7], kemudian dikembangkan untuk analisis penentuan *interrupting capacity* PMT. Seluruh proses perhitungan dimasukkan ke dalam program komputer. Langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

1. Membuat diagram reaktansi jaringan urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol dari sistem tenaga.
2. Membentuk matriks admitansi bus (Y_{Bus}) urutan positif, urutan negatif dan urutan nol.
3. Membentuk matriks impedansi bus (Z_{Bus}) urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol.
4. Menghitung arus gangguan hubung singkat tiga fase seimbang, arus gangguan 1 fase ke tanah, arus gangguan fase ke fase, dan arus gangguan 2 fase ke tanah pada bus k , dimana $k = 1, 2, 3, \dots, m$ pada sistem tenaga listrik dengan m buah bus.
5. Menghitung tegangan bus lain (misal bus n) selain bus gangguan (bus k) setelah gangguan terjadi.
6. Menghitung arus hubung singkat yang mengalir pada saluran $i - j$, dengan $i, j = 1, 2, 3, \dots, m$.
7. Menghitung *interrupting capacity* pemutus tenaga dengan menggunakan persamaan (1).

Penelitian ini diawali dengan melakukan analisis gangguan hubung singkat dari 4 jenis hubung singkat dengan metode matriks impedansi bus, yaitu hubung singkat 3 fase seimbang, hubung singkat 1 fase ke tanah, hubung singkat fase ke fase, dan hubung singkat 2 fase ke tanah. Untuk analisis ini diperlukan data-data: (1) reaktansi transien urutan positif (X_1), reaktansi transien urutan nol (X_0), dan reaktansi pentanahan generator (X_n). Reaktansi transien urutan negatif generator (X_2) dianggap sama dengan reaktansi urutan positifnya [10], (2) Reaktansi urutan positif, reaktansi urutan negatif, dan reaktansi urutan nol saluran dan trafo. Reaktansi urutan negatif saluran dan trafo dianggap sama dengan reaktansi urutan positifnya. Data-data ini dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2. Pada analisis hubung singkat dalam penelitian ini, beban diabaikan, sehingga tegangan tiap bus sebelum gangguan dianggap 1 per unit (pu). Pada penelitian ini, perhitungan menggunakan daya dasar 100 MVA dengan tegangan dasar sesuai dengan tegangan kerja masing-masing bus.

Interrupting capacity diperoleh setelah mengalikan arus gangguan total terbesar yang didapat dari analisis gangguan hubung singkat dengan suatu faktor pengali k (besarnya tergantung tipe PMT yang digunakan) dan arus dasar dimana PMT akan dipasang. Metode yang digunakan diterapkan pada sistem tenaga listrik 11 bus 14 saluran [7], yang diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 (Diagram satu garis sistem tenaga listrik 11 bus 14 saluran)

Tabel 1

Reaktansi transien generator sistem 11 bus 14 saluran

Generator/trafo pada bus:	X_1	X_0	X_n
1	0,20	0,06	0,05
10	0,15	0,04	0,05
11	0,25	0,08	0,00
7	-	-	0,08

Tabel 2

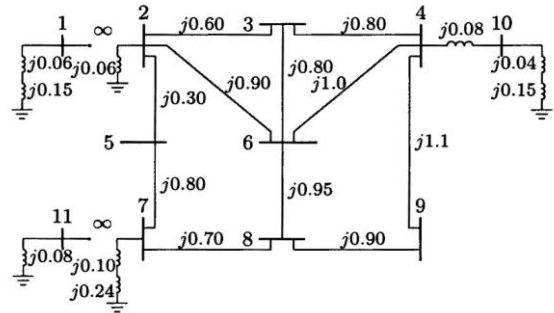
Reaktansi urutan positif dan reaktansi urutan nol saluran dan transformator

No. Bus	No. Bus	X_1 (pu)	X_0 (pu)
1	2	0,06	0,06
2	3	0,30	0,60
2	5	0,15	0,30
2	6	0,45	0,90
3	4	0,40	0,80
3	6	0,40	0,80
4	6	0,60	1,00
4	9	0,70	1,10
4	10	0,08	0,08
5	7	0,43	0,80
6	8	0,48	0,95
7	8	0,35	0,70
7	11	0,10	0,10
8	9	0,48	0,90

BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan diagram satu garis dan reaktansi urutan positif, negatif dan nol generator, transformator, dan saluran dibuatlah diagram reaktansi urutan positif, negatif dan nol jaringan sistem 11 bus 14 saluran. Diagram reaktansi urutan nolnya diperlihatkan pada Gambar 2. Diagram ini digunakan dalam analisis gangguan hubung singkat tidak seimbang, yaitu satu fase ke tanah, fase ke fase, dan 2 fase ke tanah.

Diagram urutan nol sangat menentukan nilai matriks impedansi bus urutan nol dari jaringan sistem tenaga.



Gambar 2 Diagram urutan nol sistem tenaga 11 bus 14 saluran

Matrik impedansi bus urutan positif (Z_{bus1}), urutan negatif (Z_{bus2}), dan urutan nol (Z_{bus0}) diperoleh dari invers matriks admitansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol jaringan sistem tenaga, yang dibentuk dari reaktansi-reaktansi primitif urutan positif, urutan negatif dan urutan nol dari generator, transformator dan saluran.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis gangguan dari 4 jenis gangguan hubung singkat, seperti yang telah dijelaskan. Analisis dilakukan pada tiap bus pada sistem tenaga 11 bus 14 saluran. Dari hasil analisis pada tiap bus, diperoleh: (1) arus gangguan total di bus tersebut dari 4 jenis tipe hubung singkat jika terjadi hubung singkat di bus itu, (2) tegangan tiap bus selain bus gangguan setelah gangguan terjadi dari 4 jenis gangguan, dan (3) arus yang mengalir pada semua saluran dari 4 jenis gangguan jika terjadi gangguan di bus gangguan.

Tabel 3

Arus gangguan total dan tegangan tiap bus selama gangguan yang ditampilkan dari hasil program komputer jika terjadi gangguan 1 fase ke tanah pada bus 2

Single line to-ground fault at bus No. 2

Total fault current = 8.3721 per unit

Bus Voltages during the fault in per unit

Bus No.	Phase a	Phase b	Phase c
1	0.3476	0.8833	0.8833
2	0.0000	0.8955	0.8955
3	0.3048	0.9165	0.9165
4	0.6653	0.9491	0.9491
5	0.1566	0.9045	0.9045
6	0.3508	0.9190	0.9190
7	0.5994	0.9387	0.9387
8	0.5200	0.9326	0.9326

9	0.5800	0.9388	0.9388
10	0.7798	0.9665	0.9665
11	0.7436	0.9425	0.9420

Tabel 3 adalah hasil program komputer yang memperlihatkan arus gangguan total pada bus 2 dan tegangan bus-bus lain setelah gangguan jika terjadi gangguan hubung singkat satu fase ke tanah di bus 2. Sedangkan pada Tabel 4 diperlihatkan arus yang mengalir pada semua saluran jika terjadi gangguan yang sama di bus 2. Hasil-hasil perhitungan dari tipe gangguan hubung singkat yang lain, dan hasil-hasil perhitungan pada bus-bus lain tidak ditampilkan di sini.

Tabel 4

Arus gangguan yang mengalir pada saluran yang ditampilkan dari hasil program komputer jika terjadi gangguan 1 fase ke tanah pada bus 2

Line currents for fault at bus No. 2

From Bus	To Bus	Line Current Magnitude		
		Phase a	Phase b	Phase c
1	2	3.2622	1.6311	1.6311
2	F	8.3721	0.0000	0.0000
3	2	0.9269	0.3297	0.3297
4	3	0.8248	0.2977	0.2977
4	6	0.4902	0.1686	0.1686
5	2	0.9436	0.3216	0.3216
6	2	0.7088	0.2482	0.2482
6	3	0.1022	0.0320	0.0320
7	5	0.9436	0.3216	0.3216
7	8	0.2045	0.0687	0.0687
8	6	0.3207	0.1117	0.1117
8	9	0.1162	0.0430	0.0430
9	4	0.1162	0.0430	0.0430
10	4	1.4312	0.5092	0.5092
11	7	1.0256	0.5128	0.5128

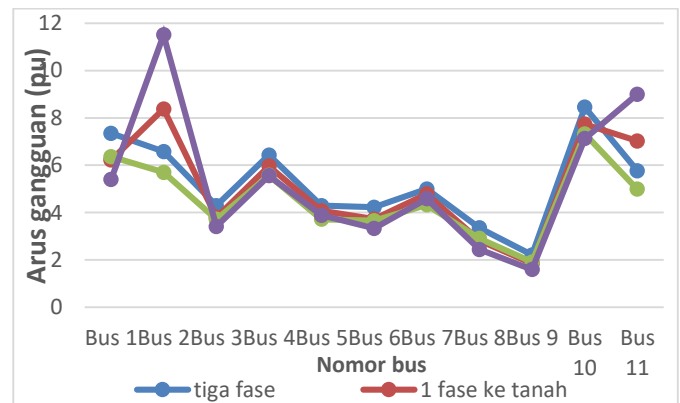
Arus gangguan total pada tiap bus dari 4 jenis tipe gangguan yang diperoleh, kemudian dibandingkan (Tabel 5). Gambar 3 memperlihatkan perbandingan keempat arus gangguan total pada tiap bus. Dari Tabel 5 terlihat bahwa arus gangguan total terbesar umumnya dihasilkan oleh gangguan tiga fase seimbang, kecuali pada bus 2 dan bus 11 yang dihasilkan oleh gangguan 2 fase ke tanah. Hal ini dapat disebabkan karena pada bus 2 dan bus 11, trafo yang menghubungkan bus-bus tersebut dengan generator, hubungan belitannya $\Delta - Y$ ditanahkan, sehingga hubungan arus tanah ke generator terputus. Artinya jika terjadi gangguan pada bus-bus itu, arus hubung singkat dari generator semuanya mengalir lewat penghantar ke bus-bus tersebut tanpa melalui tanah. Secara matematis, putusnya hubungan lewat tanah antara bus 2 atau bus 11 dengan generator, dapat mengurangi nilai matriks impedansi diri urutan nol antara bus-bus tersebut dengan netral. Akibatnya arus gangguan yang ditimbulkan jika

terjadi hubung singkat 2 fase ke tanah di bus-bus tersebut lebih besar.

Tabel 5

Tabel perbandingan besar arus gangguan total pada tiap bus sistem 11 bus 14 saluran dari 4 jenis gangguan

No. bus	Level tegangan (kV)	Arus gangguan total pada bus (pu)			
		Tiga fase	1 fase ke tanah	2 fase ke tanah	3 fase ke tanah
1	11	7.3490	6.2222	6.3644	5.3950
2	150	6.5805	8.3721	5.6989	11.5040
3	150	4.2919	3.8031	3.7169	3.4142
4	150	6.4318	5.9625	5.5701	5.5571
5	150	4.2960	4.0799	3.7204	3.8845
6	150	4.2244	3.7280	3.6584	3.3360
7	150	4.9986	4.7839	4.3289	4.5869
8	150	3.3556	2.8285	2.9060	2.4446
9	150	2.2117	1.8566	1.9154	1.5998
10	11	8.4528	7.7305	7.3204	7.1219
11	11	5.7638	7.0258	4.9916	8.9956



Gambar 3 (Grafik perbandingan besar arus gangguan total pada tiap bus dari 4 jenis gangguan)

Tabel 6

Besar *Interrupting Capacity* pemutus tenaga listrik (PMT) pada sistem 11 bus 14 saluran

No. bus	Arus gangguan total (pu)	Level tegangan (kV)	Arus dasar (kA)	<i>Interrupting Capacity</i> (kA)				PMT ($k=$)
				PM T ≥ 8 (k=1,0)	PM T 5 (k=1,1)	PM T 3 (k=1,2)	PM T 2 (k=1,4)	
1	7,34	11	52	385	424	462	540	617
2	90		48	71	28	85	00	14

2	11,5	150	38	442	487	531	619	708
	040		5	8	1	3	9	4
3	4,29	150	38	165	181	198	231	264
	19		5	2	7	2	3	3
4	6,43	150	38	247	272	297	346	396
	18		5	6	3	1	6	1
5	4,29	150	38	165	181	198	231	264
	60		5	3	9	4	5	6
6	4,22	150	38	162	178	195	227	260
	44		5	6	9	1	6	1
7	4,99	150	38	192	211	230	269	307
	86		5	4	6	9	3	8
8	3,35	150	38	129	142	155	180	206
	56		5	2	1	0	8	6
9	2,21	150	38	851	936	102	119	136
	17		5			2	2	2
1	8,45	11	52	443	488	532	621	709
	0	28	48	64	01	37	10	83
1	8,99	11	52	472	519	566	660	755
	1	56	48	13	35	56	99	41

Asumsi:

- Daya dasar = 100 MVA
- Tegangan dasar = 11 kV (bus 1, bus 10, dan bus 11)
- Tegangan dasar = 150 kV (bus 2, bus 3, bus 4, bus 5, bus 6, bus 7, bus 8, dan bus 9)

Pada penelitian ini, metode penentuan *interrupting capacity* PMT yang dipasang pada bus, menggunakan arus gangguan total terbesar pada tiap bus jika gangguan terjadi pada bus itu. Nilai *interrupting capacity* ini didapat dengan mengalikan arus gangguan total terbesar tersebut dengan arus dasarnya dan sebuah faktor pengali k yang besarnya bergantung pada tipe pemutus tenaga (PMT) yang akan digunakan (Tabel 6). Nilai *interrupting capacity* yang diperoleh merupakan rating pemutusan minimal setiap PMT yang akan dipasang pada bus tersebut. Berdasarkan Tabel 6 juga terlihat bahwa *interrupting capacity* juga semakin besar jika PMT itu dipasang pada bus dengan arus dasar yang lebih tinggi, seperti pada bus 1, bus 10 dan bus 11. Meskipun gangguan di bus 2 menghasilkan arus gangguan total terbesar pada bus tersebut, namun *interrupting capacity* PMT di bus tersebut masih lebih kecil dari bus 1, bus 10 dan bus 11, karena level tegangan kerja bus 2 jauh lebih tinggi (150 kV) atau arus dasar pada bus 2 lebih rendah dibanding bus-bus 1, 10 dan 11. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode penentuan *interrupting capacity* yang dilakukan dengan mengambil arus gangguan total terbesar setelah menghitung 4 jenis gangguan hubung singkat, yaitu hubung singkat 3 fase seimbang, 1 fase ke tanah, fase ke fase, dan 2 fase ke tanah lebih baik dibanding jika hanya menggunakan arus gangguan

dari analisis hubung singkat 3 fase seimbang saja. Pemilihan PMT yang akan dipasang pada suatu bus pada sistem tenaga harus memperhatikan jenis PMT dan *interrupting capacity*-nya, disamping *rated momentary current* dari PMT tersebut. Penelitian tentang metode penentuan *rated momentary current* suatu PMT telah dilakukan pada [11].

BAB IV PENUTUP

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode penentuan *interrupting capacity* suatu PMT yang akan dipakai pada bus suatu sistem tenaga ditentukan melalui analisis gangguan hubung singkat dari berbagai tipe hubung singkat untuk menentukan arus gangguan terbesar yang dapat terjadi pada suatu bus, tidak cukup dengan analisis hubung singkat 3 fase seimbang saja, karena peluang untuk menghasilkan arus gangguan terbesar bisa saja dihasilkan jika terjadi gangguan hubung singkat 1 fase ke tanah atau 2 fase ke tanah.
2. Besar *interrupting capacity* suatu PMT yang akan digunakan pada suatu bus sistem tenaga, sangat tergantung dari arus gangguan terbesar yang dapat terjadi pada bus tersebut, jenis PMT yang akan digunakan, dan level tegangan kerja bus tempat PMT akan dipasang. Teknik menghias kain, ini berarti bahwa dominan mahasiswa pada kelompok kelas eksperimen merespon baik media pembelajaran video tutorial dalam perkuliahan teknik menghias kain khususnya pada pembuatan teknik aplikasi busana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hutaeruk, T.S. 1983. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jilid 1. Sistem-Sistem yang Seimbang. Diktat Kuliah. Bandung: Jurusan Elektroteknik, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.
- [2] Cooper Bussmann, 2005. *Interrupting Rating Vs. Interrupting Capacity*, Texas, USA: EATON (http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/bussmann/Electrical/Resources/solution-center/technical_library/BUS_Ele_Tech_Lib Interrupting_Capacity_vs_Interrupting_Rating.pdf, diakses 20 agustus 2019)
- [3] Stevenson, W.D., 1983. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Terjemahan oleh Ir. Kamal Idris. 1996. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [4] Ari Sulistiono, 2010. *Metode Pemilihan Breaking Capacity LV Breaker (IEC 947-2)*

(<http://www.arisulistiono.com/2010/06/metode-pemilihan-breaking-capacity-lv.html>, diakses tanggal 28 agustus 2019)

- [5] Grigsby, Leonard L., 2012. *The Electric Power Engineering Handbook: Power Systems*. Third Edition. New York: CRC Press.
- [6] Dobson, Ian, S. Greene, et al., 2001. *Electric Power Transfer Capability: Concepts, Applications, Sensitivity and Uncertainty*, Power Systems Engineering Research Center.
- [7] Saadat, Hadi, 2002. *Power System Analysis*, 2nd edition, Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- [8] Tleis, Nasser D., 2008. *Power Systems Modelling and Fault Analysis, Theory and Practice*. Hungary: Elsevier Ltd.
- [9] Glover, J. Duncan, M.S. Sarma, & T.J. Overbye, 2012. *Power System Analysis And Design*. 5th edition, Toronto: Thomson Learning, Thomson Corp.
- [10] Das, J.C., 2002. *Power System Analysis, Short-Circuit Load Flow and Harmonics*. USA: Marcel Dekker, Inc.
- [11] Al Imran, 2012. *Analisis Penentuan Short Circuit Capacity Bus dan Momentary Duty Pemutus Tenaga Pada Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan dan Barat*. Makassar: Lembaga Penelitian UNM.
- [12] Grainger, J. J., and W. D. Stevenson, 1994. *Power System Analysis*, Singapore: McGraw-Hill, Inc.