

# Pemodelan dan Analisis *Fault Current Limiter* sebagai Pembatas Arus Hubung Singkat pada GI Sengkaling Malang

Eko Kuncoro, Hadi Suyono, Rini Nur Hasanah dan Hazlie Mokhlis

**Abstrak**— Perkembangan penduduk dan peningkatan ekonomi masyarakat menjadi salah satu penyebab peningkatan kebutuhan energi listrik. Konsekuensinya, ketersediaan sumber dan prasarana penyaluran energi harus dapat memastikan kualitas catu daya listrik kepada pelanggan. Unjuk kerja sistem daya listrik harus memenuhi standar teknis dan ekonomis yang menjamin keandalan dan penanggulangan gangguan, misalnya hubung singkat, yang mungkin terjadi. Beberapa peralatan yang dikenal dapat digunakan untuk menangani arus gangguan hubung singkat antara lain reaktor berinti udara, sekring, dan pemutus rangkaian. Peralatan-peralatan proteksi tersebut pada umumnya hanya dapat merespon setelah dua atau tiga siklus dari saat terjadinya arus gangguan hubung singkat. Pada artikel ini dibahas pemodelan dan analisis unjuk kerja suatu peralatan yang dapat merespon arus gangguan dalam waktu kurang dari dua siklus, yaitu *fault current limiter* (FCL). Contoh penerapan alat ini disimulasikan pada sistem nyata Gardu Induk Sengkaling Malang. Pada kejadian gangguan satu fasa dan tiga fasa, terbukti alat ini dapat membatasi arus gangguan hubung singkat yang melewati saluran dalam setengah siklus awal.

**Kata kunci**—*Fault Current Limiter*, sistem distribusi, gangguan satu fasa, gangguan tiga fasa.

## I. PENDAHULUAN

TERJADINYA peningkatan jumlah penduduk dan peningkatan ekonomi masyarakat menyebabkan kebutuhan energi listrik juga meningkat. Ketersediaan sumber dan infrastruktur penyaluran harus dapat memastikan catu daya listrik dapat sampai dengan kualitas baik kepada pelanggan. Unjuk kerja sistem daya listrik harus memenuhi standar teknis dan ekonomis untuk menjamin keandalan dan penanggulangan gangguan yang mungkin terjadi. Gangguan dalam sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik antara lain disebabkan oleh sambaran petir pada saluran transmisi, pohon tumbang atau adanya hubung

singkat antar fasa ke tanah. Gangguan akan menimbulkan suatu lonjakan arus pada sistem tenaga listrik dan dapat menyebabkan kerusakan serius pada peralatan jaringan [1] dan luasnya daerah pemadaman total. Lonjakan arus akibat gangguan dikenal sebagai arus gangguan [2].

Arus gangguan adalah arus peralihan yang mengalir dalam sistem tenaga listrik ketika hubung singkat terjadi. Sebagian besar arus gangguan terjadi pada sistem transmisi 3-fasa dengan satu dari tiga fasa terhubung singkat [3]. Ketika hubung singkat terjadi pada sistem tenaga listrik, besar arus gangguan dapat meningkat hingga 10 kali lebih besar dari arus beban [4].

Gardu Induk (GI) Sengkaling Malang merupakan bagian dari sistem distribusi yang berada di wilayah PT. PLN (Persero) APP Malang. Pemakaian energi listrik pada GI Sengkaling cenderung meningkat setiap tahunnya karena pesatnya pembangunan di wilayah Malang Raya. Dapat dipastikan permasalahan pada pengoperasian gardu induk dan peralatan-peralatannya akan terus bertambah seiring dengan bertambahnya gangguan yang akan terjadi, khususnya gangguan hubung singkat.

Beberapa peralatan yang telah digunakan untuk menangani arus gangguan hubung singkat antara lain reaktor *air-core*, *fuse* dan *circuit breaker* [3]. Peralatan-peralatan tersebut umumnya dapat merespon setelah dua atau tiga siklus dari saat terjadinya arus gangguan hubung singkat. Diperlukan suatu peralatan yang mampu membatasi arus gangguan hubung singkat kurang dari dua siklus awal. *Fault current limiter* (FCL) dapat membatasi arus gangguan hubung singkat yang melewati saluran dalam setengah siklus awal [5][6]. Dalam paper ini diuraikan pemodelan FCL yang sesuai dengan standar pemutusan arus pada jaringan sistem distribusi dan dikaji unjuk kerjanya melalui simulasi penerapannya pada sistem distribusi saat terjadi gangguan. Pemodelan dan analisis penggunaan FCL sebagai pembatas arus gangguan hubung singkat pada jaringan sistem distribusi GI Sengkaling Malang dilakukan dengan menggunakan program simulasi PSCAD 4.2.0.

## II. FAULT CURRENT LIMITER

*Fault current limiter* (FCL), baik menggunakan superkonduktor atau tidak, sebenarnya merupakan impedansi variabel dihubungkan seri dengan pemutus

Eko Kuncoro, Mahasiswa Program Magister Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (e-mail: [ekokuncoro68@gmail.com](mailto:ekokuncoro68@gmail.com)).

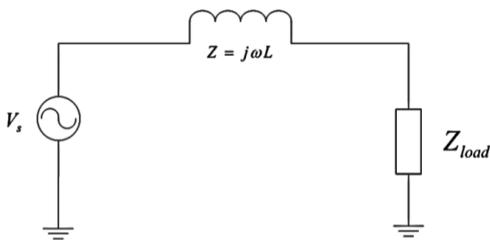
Hadi Suyono, Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Telp. 0341-554166; e-mail: [hadis@ub.ac.id](mailto:hadis@ub.ac.id)).

Rini Nur Nurhasanah, Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Telp. 0341-554166; e-mail: [rini.hasanah@ub.ac.id](mailto:rini.hasanah@ub.ac.id)).

Hazlie Mokhlis, Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universiti of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia (Telp. +603-79675238; e-mail: [fazli@um.edu.my](mailto:hazli@um.edu.my)).

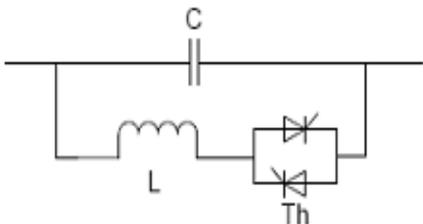
rangkaian/circuit breaker untuk membatasi arus gangguan hubung singkat pada gardu induk [3]. FCL dapat digunakan baik pada jaringan tegangan tinggi maupun tegangan menengah. Alat ini berfungsi untuk membatasi tingkat arus gangguan yang muncul ke suatu nilai yang dapat diatasi tanpa adanya pengaruh yang signifikan pada sistem distribusi. Sebuah FCL harus memiliki impedansi tinggi pada kondisi gangguan hubung singkat [6].

Dikenal tiga kategori FCL [7], yaitu FCL Pasif, FCL *solid-state*, dan FCL Hibrid. FCL pasif tidak memerlukan pemicu dari luar (*external trigger*) untuk mengaktifkannya. Pembatasan arus dilakukan oleh komponen FCL pasif itu sendiri, yang berupa induktor [8]. Contoh rangkaian sederhana FCL pasif yang berupa induktor dihubungkan seri dengan beban dan sumber ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian FCL pasif [7]

FCL *solidstate* menggunakan kombinasi induktor, kapasitor dan *thyristor* atau *gate turn-off thyristor* (GTO) [9], seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Model rangkaian ini diusulkan oleh Karady pada tahun 1992 [10]. Dalam tipe pembatas arus ini, sebuah kapasitor dihubungkan dengan induktor dan sepasang thyristor.



Gambar 2. Rangkaian FCL *solidstate* tipe resonan [10]

Pada kondisi normal (*steady state*), thyristor akan *off* dan semua arus mengalir melalui kapasitor C, sehingga:

$$Z_{FCL(NORMAL)} = -\frac{j}{\omega C} \quad (1)$$

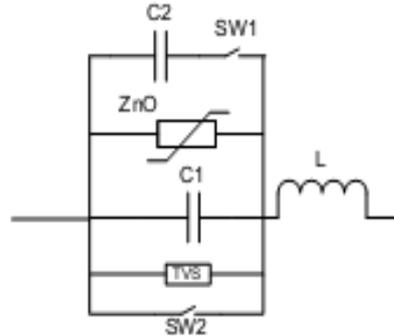
Pada saat terjadi gangguan, thyristor akan *on* dan semua arus mengalir pada cabang kapasitor C dan induktor L, sehingga:

$$Z_{FCL(FAULT)} = \frac{j\omega L}{1-\omega^2 LC} \quad (2)$$

FCL Hibrid merupakan penggabungan antara *fault current limiter* pasif dan *solid-state*. FCL hibrid menggunakan kombinasi saklar mekanik, FCL *solid-state*, *superconducting* dan teknologi lainnya untuk mewujudkan *current mitigation* [7]. Model rangkaian FCL hibrid diberikan pada Gambar 3.

Pada kondisi *steady state*, TVS dan SW2 akan *off*, SW2 dengan cepat akan menutup kontak dengan *delay*

3-10 ms. Ketika gangguan terjadi, sinyal *trigger* dilewatkan melalui TVS dan SW2 dengan *bypass* kapasitor C1, sehingga reaktor L akan membatasi arus gangguan dengan segera. Arestor ZnO digunakan untuk proteksi tegangan lebih. Kapasitor C2 dan SW1 diset sebagai kompensator seri konvensional [11].



Gambar 3. *Triggered Vacuum Switch Based Hybrid Limiter* [7]

### III. METODE PENELITIAN

Untuk melakukan pemodelan FCL pada sistem nyata yang dijadikan objek kasus, data lapangan berupa *single line diagram*, data transformator, data beban, dan data arus hubung singkat. Data lapangan dimodelkan dan disimulasikan dengan menggunakan program simulasi PSCAD 4.2.0. Selanjutnya dilakukan analisis aliran daya untuk mengetahui *magnitude* tegangan dan arus pada masing-masing bus.

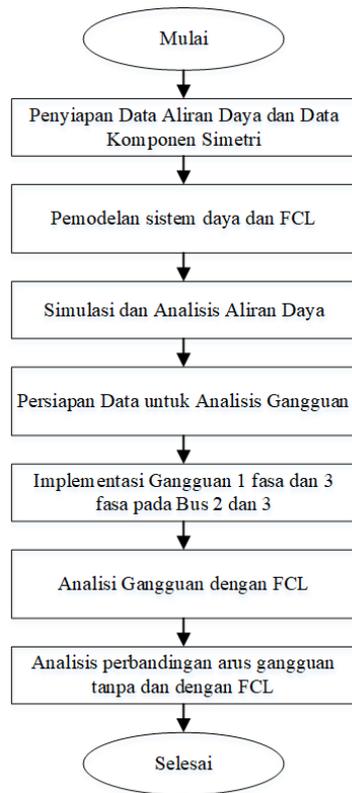
Pada pemodelan *single line diagram* sistem distribusi GI Sengkaling, adanya gangguan hubung singkat disimulasikan sesuai data gangguan. Selanjutnya dilakukan analisis gangguan sebelum pemasangan FCL. Pada bus-bus yang mengalami gangguan ditempatkan model komponen FCL dan disimulasikan unjuk kerjanya. Analisis juga dilakukan terhadap hasil simulasi setelah pemasangan FCL. Secara menyeluruh, urutan metode yang ditempuh diberikan pada diagram alir Gambar 4.

### IV. PEMODELAN FCL DAN GI SENGKALING

Model FCL yang digunakan adalah rangkaian FCL *solid-state* tipe resonan [10]. Model ini dipilih dengan pertimbangan tidak diperlukannya *tuning* komponen L dan C. Impedansi FCL yang digunakan adalah 20 % (0,2 pu) sesuai dengan IEC 60289 tentang FCL *Reactors* [12-13]. Parameter pemodelan FCL dan GI Sengkaling yang digunakan dalam simulasi untuk sistem sebelum dan sesudah pada Bus 2 dan Bus 3 ditunjukkan pada Tabel 1.

Rangkaian FCL untuk fasa A, fasa B, dan fasa C ditunjukkan pada Gambar 5. Simulasi *single line* GI Sengkaling dengan PSCAD 4.2.0 dilakukan dengan beberapa skenario. Skenario simulasi yang akan diujikan adalah sebagai berikut: a) Sistem dengan gangguan pada Bus 2 (20 kV) dan FCL; dan b) Sistem dengan gangguan pada Bus 3 (20 kV) dan FCL. Pemodelan *single line diagram* GI Sengkaling sistem sebelum gangguan, sistem dengan gangguan pada Bus 2

dan Bus 3 dan sistem dengan FCL ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 4. Urutan pemodelan dan analisis unjuk kerja FCL

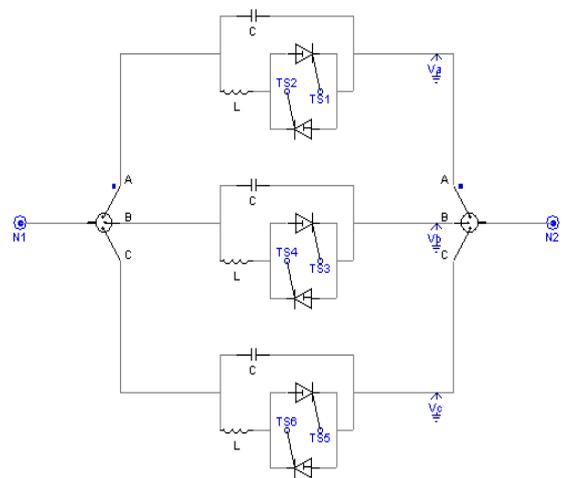
TABEL I  
PARAMETER SIMULASI

Parameter	Sistem Sebelum Gangguan	Sistem dengan Gangguan Pada Bus 2
Infinite Bus	150V. L-L RMS 50Hz	-
Arus Hubung Singkat	-	2529,44 MVA
Sumber	-	150V L-L RMS 50Hz $Z_S = 8,895 \Omega$
Data FCL	-	$Z_{FCL} = 20 \%$ $= 2,67 \Omega$ $C = 10 \mu F$ $L = 0,00858 H$

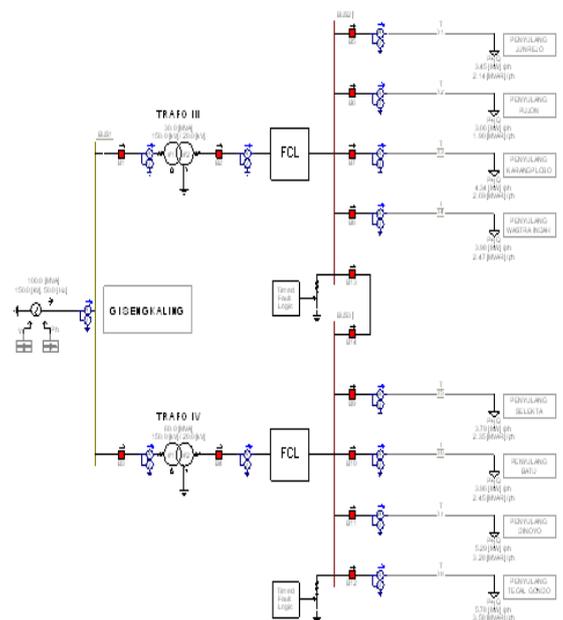
I. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Sistem

Data yang digunakan dalam artikel ilmiah ini berupa data sekunder yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) APP Malang dan Area Malang. GI Sengkaling memiliki dua Trafo distribusi yaitu: Trafo III Unindo 150/20 kV kapasitas 30 MVA/866A, dan Trafo IV Shandong 150/20 kV kapasitas 60 MVA/1732 A. Trafo III melayani 4 penyulang, yaitu: Junrejo, Pujon, Karangploso, dan Wastra Indah, dengan arus beban masing-masing sebesar 320 Ampere. Trafo IV melayani 4 penyulang, yaitu: Seleкта, Batu, Dinoyo, dan Tegalgondo dengan arus beban masing-masing sebesar 400 Ampere.



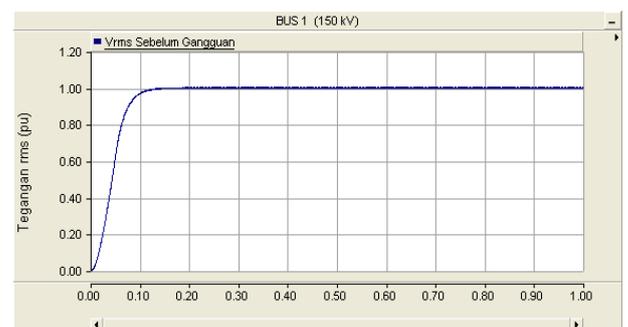
Gambar 5. Rangkaian FCL pada fasa A, fasa B dan fasa C



Gambar 6. Pemodelan single line diagram GI Sengkaling sistem sebelum gangguan, sistem dengan gangguan pada Bus 2 dan Bus 3 dan sistem dengan FCL

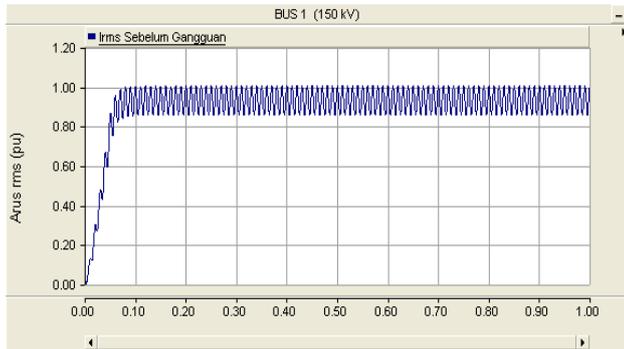
B. Performansi Sistem Sebelum Gangguan

Bentuk gelombang magnitude tegangan rms dalam kV dan p.u. pada Bus 1 pada sistem sebelum gangguan hubung singkat ditunjukkan pada Gambar 7.



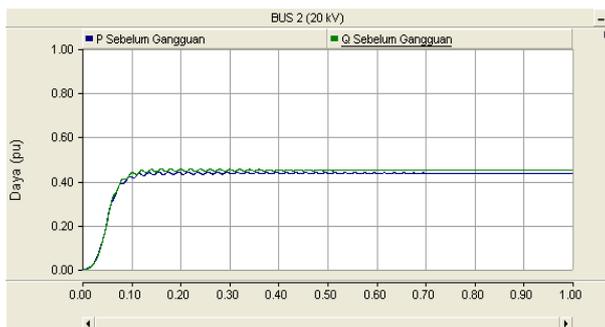
Gambar 7. Respon tegangan rms sebelum gangguan pada Bus 1

Hasil simulasi pada Gambar 7 menunjukkan bahwa *magnitude* tegangan rms pada Bus 1 sebelum gangguan  $V_{rms} = 1$  pu atau  $V_{rms} = 150,049$  kV. Bentuk gelombang *magnitude* arus rms pada Bus 1 sistem sebelum gangguan hubung singkat ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Reponse arus rms sebelum gangguan pada Bus 1

Hasil simulasi pada Gambar 8, menunjukkan bahwa *magnitude* arus rms pada Bus 1 sebelum gangguan  $I_{rms} = 1$  pu atau  $I_{rms} = 0,137133$  kA. Bentuk gelombang daya aktif dan daya reaktif pada Bus 1 sistem sebelum gangguan hubung singkat ditunjukkan pada Gambar 9.



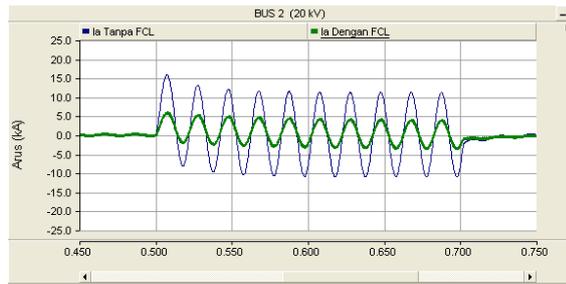
Gambar 9. Response daya aktif dan reaktif sebelum gangguan pada Bus 1

Hasil simulasi pada Gambar 9 menunjukkan bahwa daya aktif dan reaktif pada Bus 1 sebelum gangguan  $P = 0,921266$  p.u. atau  $P = 23,9345$  MW dan  $Q = 0,885826$  p.u. atau  $Q = 23,0138$  MVAR.

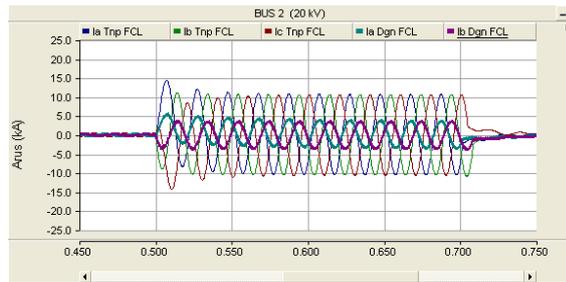
C. Hasil Simulasi Arus Gangguan Bus 2 (20 kV)

Bentuk gelombang arus gangguan pada Bus 2 tanpa FCL dan dengan FCL untuk hubung singkat satu fasa ke tanah (L-G) dan tiga fasa ke tanah (L-L-L-G) ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.

Hasil simulasi pada Gambar 11 menunjukkan bahwa arus gangguan pada Bus 2 dengan FCL mengalami penurunan pada setengah siklus awal dan pada *steady state* seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Arus gangguan satu fasa ke tanah (L-G) dan tiga fasa ke tanah yang dapat dihasilkan dengan tanpa adanya implemmentasi FCL adalah sebesar 15,84 pu, dan 14,36 pu. Sedangkan arus gangguan setelah menggunakan FCL adalah 5,95 pu untuk gangguan (L-G) dan 5,55 pu untuk gangguan (L-L-L-G). Arus gangguan dengan FCL akan mengalami penurunan sebesar 62,44% untuk gangguan (L-G) dan 61,35% untuk gangguan (L-L-L-G).



Gambar 10. Bentuk gelombang arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (L-G) pada Bus 2, tanpa FCL dan dengan FCL



Gambar 11. Bentuk gelombang arus gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah (L-L-L-G) pada Bus 2, tanpa FCL dan dengan FCL

TABEL II  
ARUS GANGGUAN BUS 2 TANPA FCL DAN DENGAN FCL PADA SETENGAH SIKLUS AWAL

TIPE GANGGUAN	$I_{rms}$ (pu) TANPA FCL	$I_{rms}$ (pu) DGN FCL	PENURUNAN (pu)	% PENURUNAN
L-G	15,84	5,95	9,89	62,44
L-L-L-G	14,36	5,55	8,81	61,35

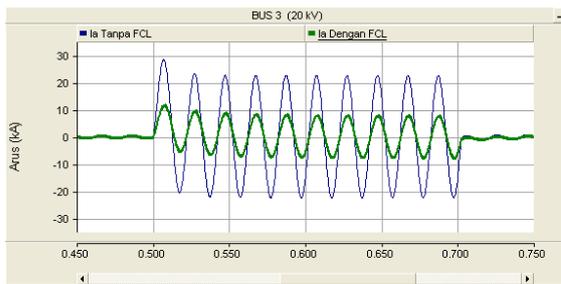
TABEL III  
ARUS GANGGUAN BUS 2 TANPA FCL DAN DENGAN FCL PADA STEADY STATE

TIPE GANGGUAN	$I_{rms}$ (pu) TANPA FCL	$I_{rms}$ (pu) DGN FCL	PENURUNAN (pu)	% PENURUNAN
L-G	11,56	4,39	7,17	62,02
L-L-L-G	10,86	4,09	6,77	62,34

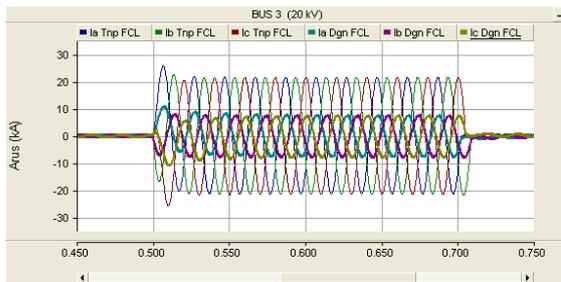
D. Hasil Simulasi Arus Gangguan Bus 3 (20 kV)

Bentuk gelombang arus gangguan pada Bus 3 tanpa FCL dan dengan FCL untuk hubung singkat satu fasa ke tanah (L-G) dan tiga fasa ke tanah (L-L-L-G) ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13.

Hasil simulasi pada Gambar 12 dan Gambar 13, menunjukkan arus gangguan pada Bus 3 dengan FCL mengalami penurunan pada setengah siklus awal dan pada *steady state*, seperti ditunjukkan pada Tabel IV dan Tabel V. Penggunaan FCL pada sisi terima Bus 3 sistem distribusi GI Sengkaling Malang dapat menurunkan arus gangguan pada setengah siklus pertama untuk gangguan satu fasa ke tanah (L-G) dari 28,42 kA menjadi 11,83 kA (penurunan 58,37 %), dan untuk gangguan tiga fasa ke tanah (L-L-L-G) dari 25,62 kA menjadi 11,08 kA (penurunan 56,75 %).



**Gambar 12.** Bentuk gelombang arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (L-G) pada Bus 3, tanpa FCL dan dengan FCL.



**Gambar 13.** Bentuk gelombang arus gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah (L-L-L-G) pada Bus 3, tanpa FCL dan dengan FCL.

TABELIV  
ARUS GANGGUAN BUS 3 TANPA FCL DAN DENGAN FCL  
PADA SETENGAH SIKLUS AWAL

TIPE GANGGUAN	$I_{rms}$ (pu) TANPA FCL	$I_{rms}$ (pu) DGN FCL	PENURUNAN (pu)	% PENURUNAN
L-G	28,42	11,83	16,59	58,37
L-L-L-G	25,62	11,08	14,54	56,75

TABELV  
ARUS GANGGUAN BUS 3 TANPA FCL DAN DENGAN FCL  
PADA STEADY STATE

TIPE GANGGUAN	$I_{rms}$ (pu) TANPA FCL	$I_{rms}$ (pu) DGN FCL	PENURUNAN (pu)	% PENURUNAN
L-G	22,59	8,79	13,80	61,09
L-L-L-G	20,72	7,98	12,74	61,49

## II. KESIMPULAN

Pemodelan dan analisis dari sistem *Fault Current Limiter* (FCL) dilakukan pada penilaian ini. Sistem daya yang digunakan adalah sistem distribusi pada GI Sengkaling Malang. Model FCL yang digunakan adalah rangkaian FCL *solid state* tipe resonan dimana rangkaian ini tidak memerlukan tuning komponen L dan C untuk  $Z = 0$  pada keadaan saat *steady state*. Spesifikasi model FCL yang digunakan adalah  $Z_{FCL} = 20\% = 0,2$  pu; FCL pada Bus 2,  $Z_{FCL} = 2,67 \Omega$ ,  $C = 10 \mu F$  dan  $L = 0,00858$  H; dan FCL pada Bus 3,  $Z_{FCL} = 1,34 \Omega$ ,  $C = 10 \mu F$  dan  $L = 0,00429$  H.

Penggunaan FCL pada sisi terima (*incoming*) Bus 2 sistem distribusi GI Sengkaling Malang dapat menurunkan arus gangguan pada setengah siklus pertama untuk gangguan satu fasa ke tanah (L-G) dari 15,84 kA menjadi 5,95 kA (penurunan 62,44 %), dan untuk gangguan tiga fasa ke tanah (L-L-L-G) dari 14,36 kA menjadi 5,55 kA (penurunan 61,35 %).

Penggunaan FCL pada sisi terima (*incoming*) Bus 3 sistem distribusi GI Sengkaling Malang dapat menurunkan arus gangguan pada setengah siklus pertama untuk gangguan satu fasa ke tanah (L-G) dari 28,42 kA menjadi 11,83 kA (penurunan 58,37 %), dan untuk gangguan tiga fasa ke tanah (L-L-L-G) dari 25,62 kA menjadi 11,08 kA (penurunan 56,75 %).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kovalsky, L. , Yuan, X. , Tekletsadik, K. , Keri, A. , Bock, J. and Breuer, F. 2004. *Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power transmission Systems*, IEEE Transactions.
- [2] Xin, Y. , Gong, W. , Niu, X. , Cao, Z. , Xi, H. , Zhang, J. , Wang, Y., Tian, B. and Hou, B. 2006. *Development of Superconducting Fault Current Limiters*. IEEE Transactions.
- [3] Giese, R.F. 1995. *Fault Current Limiters - A Second Look*, Argonne National Laboratory.
- [4] Matsuzaki, J. 1996. *Current Limiting Characteristics with 6.6kV/2kA Superconducting Fault Limiter*, IEE of Japan Static Electricity Equipment Research SA-96. Meeting, Vol. 58-1, pp. 95-98.
- [5] Schmitt, H. 2006. *Fault Current Limiters Report on the Activities of Cigre WG A3.16*, IEEE Transactions.
- [6] Leung, E. , Rodriguez, A. and Albert, G. 1996. *Superconducting Fault Current Limiter for Utility Applications*, in Proc. American Power Conf., 58<sup>th</sup> Annual Limiter, IEEE Transactions on Applied Superconductivity.
- [7] Tang, G. and Iravani, M.R. 2005. *Application of a Fault Current Limiter to Minimize Distributed Generation Impact on Coordinated Relay Protection*, Montreal, Canada: International Conference on Power Systems Transients (IPST'05).
- [8] Rowley, A.T. 1995. *Superconducting Fault Current Limiters*, The Institution of Electrical Engineers.
- [9] Verma, M. 2009. *A Comprehensive Overview, Behavioral Model and Simulation of a Fault Current Limiter*, Master Thesis, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [10] Karady, G.G. 1992. *Principles of Fault Current Limitation by a Resonant LC Circuit*, Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings C, Vol. 139, pp. 1-6.
- [11] Shi, J. , Zou, J. , and He, J. 2000. *Triggered-Vacuum Switch-Based Fault-Current Limiter*, Power Engineering Review, IEEE, Vol. 20, pp. 51-53.
- [12] CIGRE WG A3.16. 2008. *Technical Brochure No. 339: Guideline on the Impacts of Fault Current Limiting Devices on Protection Systems*, Tokyo.
- [13] Anaya-Lara, O. and Acha, E. 2002. *Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 1.