

TUGAS AKHIR - EE234899

INVESTIGASI DAN MITIGASI PADA PERFORMANSI TEGANGAN SISTEM KELISTRIKAN PV ON GRID KETIKA TERJADI GANGGUAN

Dzacky Aulia Dieza
NRP 5022201093

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.
NIP 19650901 199103 2002
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
NIP 19630817 199003 1001

Program Studi Sarjana Teknik Elektro
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
Tahun 2024



TUGAS AKHIR - EE234899

INVESTIGASI DAN MITIGASI PADA PERFORMANSI TEGANGAN SISTEM KELISTRIKAN PV ON GRID KETIKA TERJADI GANGGUAN

Dzacky Aulia Dieza
NRP 5022201093

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.
NIP 19650901 199103 2002
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
NIP 19630817 199003 1001

Program Studi Sarjana Teknik Elektro
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
Tahun 2024



FINAL PROJECT - EE234899

***INVESTIGATION DAN MITIGATION OF ON-GRID PV
ELECTRICITY SYSTEM VOLTAGE PERFORMANCE
DURING DISTURBANCES***

Dzacky Aulia Dieza
NRP 5022201093

Advisor

Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

NIP 19650901 199103 2002

Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.

NIP 19630817 199003 1001

Electrical Engineering Undergraduate Program

Department of Electrical Engineering

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

Year 2024

LEMBAR PENGESAHAN

INVESTIGASI DAN MITIGASI PADA PERFORMANSI TEGANGAN SISTEM KELISTRIKAN PV ON GRID KETIKA TERJADI GANGGUAN

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi Sarjana Teknik Elektro
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **DZACKY AULIA DIEZA**
NRP. 5022201093

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.
2. Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, M.T.
3. Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
4. Dr. Dimas Fajar Uman, S.T., M.T.
5. Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

Pembimbing

Ko-pembimbing

Penguji

Penguji

Penguji

SURABAYA
Oktober, 2024

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Dzacky Aulia Dieza
Program studi : Teknik Elektro
Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT. / 19650901 199103 2002

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Investigasi dan Mitigasi Pada Performansi Tegangan Sistem Kelistrikan PV on Grid Ketika Terjadi Gangguan” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

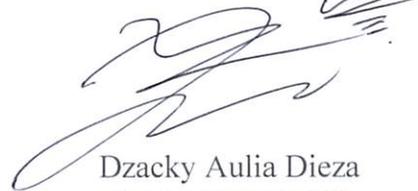
Surabaya, 12 Oktober 2024

Mengetahui,
Dosen Pembimbing



Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.
NIP. 19650901 199103 2002

Mahasiswa



Dzacky Aulia Dieza
NRP. 5022201093

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRAK

INVESTIGASI PADA PERFORMANSI TEGANGAN SISTEM KELISTRIKAN PV ON GRID KETIKA TERJADI GANGGUAN

Nama Mahasiswa / NRP : Dzacky Aulia Dieza / 5022201093
Departemen : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.
2. Prof.Dr.Ir. Imam Robandi, MT.

Abstrak

Tren integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan jaring listrik 3 fasa menimbulkan masalah krusial selama gangguan hubung singkat. Ketika hubung singkat terjadi, hal itu mengakibatkan arus pada bus AC dan tegangan lebih pada bus DC, yang dapat menyebabkan pemutusan sistem tenaga surya dari jaringan. Oleh karena itu, penelitian ini membuat perbaikan penting untuk memenuhi tuntutan regulasi jaringan sistem tenaga. Implementasi strategi kontrol *Low Voltage Ride-Through* (LVRT) untuk memastikan keandalan sistem fotovoltaik yang terhubung ke jaringan harus disesuaikan dengan kode jaringan masing-masing negara, namun implementasi LVRT yang kompatibel dengan kode jaringan Indonesia masih terbatas. Penelitian ini menyajikan strategi kontrol LVRT yang dimodifikasi berdasarkan kode jaringan Indonesia untuk diimplementasikan dalam sistem yang terhubung ke jaring listrik 25 kV. Modifikasi strategi kontrol LVRT terdiri dari merancang deteksi penurunan tegangan ketika terjadi hubung singkat sebagai referensi injeksi arus reaktif yang sesuai dengan persyaratan kode jaringan Indonesia, dan menggunakan *Direct Current Brake Chopper* (DC-BC) untuk melindungi DC-link dari tegangan DC berlebihan yang dapat membahayakan inverter.

Kata kunci: *PLTS, LVRT, DC-BC, Hubung Singkat.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRACT

INVESTIGATION OF ON-GRID PV ELECTRICITY SYSTEM VOLTAGE PERFORMANCE DURING DISTURBANCES

Student Name / NRP : Dzacky Aulia Dieza / 5022201093
Department : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Advisor : 1. Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.
2. Prof.Dr.Ir. Imam Robandi, MT.

Abstract

The trend of integrating solar power plants with a 3-phase electrical grid poses crucial problems during short circuit disturbances. When a short circuit occurs, it causes overcurrent on the AC bus and overvoltage on the DC bus, which can lead to the disconnection of the solar power system from the grid. Therefore, this research makes crucial improvements to meet the demands of the power system network regulations. Low Voltage Ride-Through (LVRT) control strategy implementation for ensuring the reliability of grid connected photovoltaic system should be adjusted with the grid code of each nation, however the LVRT implementation that compatible with Indonesian grid code is still limited. This paper presents the modified LVRT control strategy based on Indonesian grid code to be implemented in 25 kV grid connected system. The modification of LVRT control strategy consists of designing the voltage sag detection when short-circuit occurred as the reactive current injection reference that suitable with Indonesia grid code requirements and dispatching the Direct Current Brake Chopper (DC-BC) to protect the DC link from excessive DC voltage that can endanger the inverter.

Keywords: *Solar Power Plants, LVRT, DC-BC, Short Circuit.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “*Investigasi dan Mitigasi Pada Performansi Tegangan Sistem Kelistrikan PV on Grid Ketika Terjadi Gangguan*” yang disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan jenjang Pendidikan S1 pada bidang Studi Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Pada kesempatan kali ini penulis ingin berterima kasih yang tulus kepada semua pihak yang turut serta membantu kelancaran proses pembuatan Tugas Akhir. Oleh karena itu penulis menyadari terselesaikannya Tugas Akhir tidak lepas dari bantuan banyak pihak. Maka pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberi rahmat dan karunia-Nya yang selalu mengiringi langkah penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan laporan Tugas Akhir dengan baik dan lancar.
2. Rasulullah Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia dari zaman kegelapan menuju zaman yang penuh dengan ilmu pengetahuan, dan menjadi teladan yang baik bagi penulis untuk selalu menuntut ilmu pengetahuan dengan penuh semangat.
3. Kedua orang tua penulis, yaitu Yan Edi Indra dan Rizayeni, serta saudara kandung penulis, Mahira Hulwaliya Dieza dan Faiq Athallah Dieza yang selalu memberikan dukungan setiap waktu dan telah mengusahakan segala kebersamaan dalam kehidupan penulis. Penulis berharap agar Allah SWT senantiasa memberikan perlindungan, umur yang panjang dan berkah, serta kebahagiaan di dunia dan akhirat. Aamiin.
4. Ibu Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT. selaku dosen pembimbing 1 dan merupakan sosok ibu bagi saya, membantu saya dalam menghadapi masa studi saya di ITS, dan menjadi alasan saya untuk tetap melanjutkan masa studi saya. Bapak Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, M.T. selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan bimbingan, saran, dan arahan kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir.
5. Mas M. Almas Prakasa selaku mahasiswa S3 dan teman-teman dari lab PSOC yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir.
6. Andrew, Alvero, Giri, Fiona, Mutiara, Ilham, Samuel, Ariq, Anya, Laora, Wanda, Alfito, Ari, dan teman-teman volunteer ITS GE S12 lainnya yang telah menjadi sosok keluarga yang mewarnai hidup penulis selama masa studi di ITS.
7. Gibran, Akrom, Michael, Aryo, Fahmi, dan teman-teman e60 lainnya yang telah memberikan banyak dukungan kepada saya selama masa studi di ITS.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Selain itu, penulis meminta maaf jika dalam penelitian Tugas Akhir ini terdapat kekurangan. Besar harapan penulis menerima segala kritik dan saran sebagai pengembangan ilmu pengetahuan untuk perbaikan Tugas Akhir ini. Terima kasih.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	5
2.1.1 <i>Photovoltaic (PV)</i>	5
2.1.2 Instalasi PV	5
2.2 DC-AC Three Phase Inverter	5
2.3 DC-DC Converter	6
2.3.1 Boost Converter	6
2.4 Hubung Singkat pada Sistem Kelistrikan	6
2.4.1 Hubung Singkat 3 Fasa (L L L Fault)	7
2.5 Voltage Sags sebagai Gangguan Kualitas Daya	7
2.5.1 Tegangan Berlebih Akibat Voltage Sags pada Sistem PLTS	8
2.6 <i>Low Voltage Ride-Through (LVRT)</i>	9
BAB 3 METODOLOGI	11
3.1 Metode yang digunakan	11
3.1.1 Injeksi arus reaktif (I_q) dan metode deteksi dari voltage sag	11
3.1.2 <i>Direct Current Brake Chopper</i>	14
3.2 Bahan dan peralatan yang digunakan	15
3.3 Sistem PLTS 100	15

3.4	Urutan pelaksanaan penelitian	19
BAB 4	Hasil dan Pembahasan.....	21
4.1	Sistem PLTS Dalam Kondisi Tidak Terjadi Gangguan Pada Jaring Listrik.....	21
4.2	Sistem PLTS Dalam Kondisi Terjadi Gangguan Pada Jaring Listrik.....	23
4.2.1	Simulasi Hubung Singkat Sebelum dan Sesudah Penyesuaian Injeksi Arus Reaktif Disesuaikan dengan Aturan Jaring Listrik Indonesia Menggunakan Metode Deteksi Tegangan Sag.....	23
4.2.2	Simulasi Hubung Singkat Sebelum dan Sesudah Penggunaan <i>Direct Current Brake Chopper</i>	34
BAB 5	Kesimpulan dan Saran.....	45
5.1	Kesimpulan	45
5.2	Saran.....	45
	DAFTAR PUSTAKA.....	47
	BIODATA PENULIS.....	49
	LAMPIRAN.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Boost Converter (da Silva & Elbuluk, 2013).....	6
Gambar 2.2 LVRT dari aturan jaring listrik Indonesia berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 20 Tahun 2020	9
Gambar 3.1 Grafik Perbandingan Injeksi Arus Reaktif yang Diberikan	13
Gambar 3.2 Peletakkan Direct Current Brake Chopper.....	14
Gambar 3.3 Skema Sistem PLTS 100 kW.....	15
Gambar 3.4 Sistem PLTS 100 kW.....	15
Gambar 3.5 Blok Injeksi Arus Reaktif Sesuai Peraturan Jaring Listrik Indonesia.....	18
Gambar 3.6 Urutan Pelaksanaan Penelitian.....	19
Gambar 4.1 Simulasi Kondisi Normal dari Sistem PLTS	21
Gambar 4.2 Level Tegangan Drop yang Diujikan Pada Sistem PLTS dengan Hubung Singkat Terjadi Pada Grid	22
Gambar 4.3 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 86%	24
Gambar 4.4 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 86%	25
Gambar 4.5 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 86%	25
Gambar 4.6 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 69%	27
Gambar 4.7 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 69%	27
Gambar 4.8 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 69%	28
Gambar 4.9 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 49%	29
Gambar 4.10 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 49%	30
Gambar 4.11 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 49%	30
Gambar 4.12 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 25%	32
Gambar 4.13 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 25%	32

Gambar 4.14	Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 25%	33
Gambar 4.15	Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 86%	35
Gambar 4.16	Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 86%	35
Gambar 4.17	Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 86%	36
Gambar 4.18	Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 69%	37
Gambar 4.19	Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 69%	37
Gambar 4.20	Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 69%	38
Gambar 4.21	Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 49%	39
Gambar 4.22	Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 49%	39
Gambar 4.23	Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 49%	40
Gambar 4.24	Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 25%	41
Gambar 4.25	Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 25%	41
Gambar 4.26	Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 25%	42
Gambar 4.27	Tegangan Pada DC link Sesudah Penggunaan DC-BC.....	43

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Arus Reaktif yang Diberikan Sesuai Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Indonesia (Peraturan Menteri ESDM No 20 Tahun 2020)	13
Tabel 3.2 Data Solar Panel.....	16
Tabel 3.3 Data Boost Converter.....	16
Tabel 3.4 Data DC link Capacitor	16
Tabel 3.5 Data Inverter	16
Tabel 3.6 Data Kontrol VSC.....	17
Tabel 3.7 Data RLC Filter	17
Tabel 3.8 Data Transformer Sistem PLTS.....	17
Tabel 4.1 Nilai Parameter Dari Sistem PLTS Dalam Kondisi Normal	21
Tabel 4.2 Data Nilai Injeksi Arus Reaktif Referensi dengan Penggunaan Metode Deteksi Tegangan Sag.....	23
Tabel 4.3 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi Pada Jatuh Tegangan Drop 86%	23
Tabel 4.4 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi Pada Jatuh Tegangan Drop 69%	26
Tabel 4.5 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi Pada Jatuh Tegangan Drop 49%	28
Tabel 4.6 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi Pada Jatuh Tegangan Drop 25%	31
Tabel 4.7 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Penggunaan <i>Direct Current Brake Chopper</i> Pada Jatuh Tegangan Drop 86%	34
Tabel 4.8 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Penggunaan <i>Direct Current Brake Chopper</i> Pada Jatuh Tegangan Drop 69%	36
Tabel 4.9 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Penggunaan <i>Direct Current Brake Chopper</i> Pada Jatuh Tegangan Drop 49%	38
Tabel 4.10 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Penggunaan <i>Direct Current Brake Chopper</i> Pada Jatuh Tegangan Drop 25%	40

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tren integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan jaring listrik mendapatkan perhatian khusus sebagai sumber Energi Baru dan Terbarukan (EBT) karena merupakan salah satu solusi alternatif dalam menangani isu pemanasan global dan perubahan iklim. PLTS memanfaatkan energi radiasi matahari dengan sumber energi tidak terbatas (Hasanah et al., 2018). Salah satu teknologi yang telah marak digunakan sebagai PLTS adalah teknologi fotovoltaik (*photovoltaic*, PV). Potensi EBT surya memiliki prospek yang perlu dikembangkan untuk mendukung implementasi surya sebagai sumber listrik. Rekonstruksi dan pembangunan potensi EBT serta investasi multilateral dari industri memberikan jaminan pemasokan energi yang andal dan berkelanjutan untuk meningkatkan kapasitas tenaga listrik yang terpasang. PLTS juga mudah dalam menjangkau tempat yang sulit sehingga menjadi sebuah keunggulan tersendiri untuk daerah yang memiliki rasio elektrifikasi yang rendah dan mampu membantu meningkatkan performansi jaring listrik (Sianipar, 2014). Akan tetapi, PLTS juga membuat sistem mitigasi ketika terjadi gangguan menjadi semakin rumit, khususnya ketika gangguan terjadi (Al-Shetwi *et al.*, 2019).

Salah satu mitigasi gangguan pada sistem tenaga listrik adalah berhubungan erat dengan strategi *Low Voltage Ride-Through* (LVRT), yang merupakan strategi pada sistem tenaga listrik supaya tetap terhubung dengan jaring listrik ketika terjadi gangguan selama periode tertentu. Salah satunya adalah ketika hubung singkat terjadi, sistem harus mampu menyediakan daya reaktif pada tingkat tertentu supaya PLTS dapat tetap terhubung dengan jaring listrik. Penyediaan daya reaktif ini berhubungan erat dengan injeksi arus reaktif yang harus diberikan sesuai dengan aturan jaring listrik (*grid code*). Aturan injeksi arus reaktif harus disesuaikan dengan level drop tegangan sebagai fenomena terukur ketika terjadi hubung singkat. Oleh sebab itu, telah banyak penelitian untuk mengimplementasikan deteksi tegangan drop sebagai referensi injeksi arus reaktif yang sesuai dengan aturan jaring listrik. Negara yang diketahui memiliki peraturan dalam pemberian injeksi arus reaktif referensi antara lain Jerman, Spanyol, dan Malaysia (Al-Shetwi & Sujod, 2018).

Setelah dilakukan investigasi lebih lanjut, gangguan hubung singkat juga mengakibatkan kenaikan tegangan pada DC link di sistem PLTS dan kenaikan arus pada bus AC jaring listrik. Terlebih, injeksi arus reaktif pada PLTS terhubung grid juga memperparah kenaikan arus pada bus AC jaring listrik. Kenaikan tegangan dan arus ini dapat merusak sistem PLTS yang terhubung grid jika tidak di mitigasi dengan baik. Oleh sebab itu, penelitian yang dilakukan Mohammed dalam strategi LVRT, mengimplementasikan DC brake chopper untuk mengatasi tegangan berlebih pada DC-link dan arus berlebih pada bus AC jaring listrik. Pengimplementasian dc brake chopper ini telah terbukti untuk memenuhi aturan UL1741 tentang tegangan DC pada PLTS yang terhubung grid (Mohamed *et al.*, 2019).

Injeksi arus reaktif merupakan salah satu bentuk strategi *Low Voltage Ride-Through* (LVRT). Penggunaan injeksi arus reaktif bertujuan untuk menyetabilkan tegangan ketika terjadi hubung singkat pada saluran. Penelitian dilakukan pada hubung singkat tidak seimbang (*unbalanced*) (Chen et al., 2017). Pada penelitian lain, kontrol Pengatur Sumber Tegangan (*Voltage Source Controller*, VSC) dengan mempertimbangkan kemampuan dari inverter dalam memberi nilai daya aktif dan reaktif ketika terjadinya hubung singkat. Injeksi arus reaktif menjadi salah satu cara yang dilakukan agar sistem tetap terhubung dengan saluran jaring 3 fasa

(Song et al., 2023). Pemberian nilai daya reaktif yang akan dilakukan pada penelitian ini akan menggunakan injeksi arus reaktif berupa arus reaktif referensi yang akan dilakukan pada kontrol VSC dari inverter DC-AC. Strategi injeksi arus reaktif adalah dengan cara menggunakan metode deteksi drop tegangan (*Voltage Sags Detection Method*). Penggunaan strategi ini merupakan salah satu cara efektif dalam memenuhi permintaan dari aturan jaring listrik.

Selain itu, penggunaan DC-BC merupakan salah satu strategi LVRT yang berfungsi untuk mengatasi masalah tegangan dan arus berlebih. penggunaan strategi LVRT dilakukan dengan menggunakan pelepasan atau penghindaran penggunaan MPPT (*Avoiding Operation of MPPT, A-MPPT*) melalui kontrol MPPT dengan output yang mengendalikan *switch* dari konverter DC-DC *boost* dan mengkomparasikannya dengan *Direct Current Brake Chopper* (DC-BC) (Mohammedsaeed & Jia, 2017). Penggunaan *Neutral Connected Braking Resistor* (NCBR) yang dipasangkan dengan *Direct Current Brake Chopper* (DC-BC) sebagai strategi LVRT (Mohamed et al., 2019). Penggunaan *Direct Current Brake Chopper* (DC-BC) diusulkan untuk memperbaiki tegangan dan arus berlebih ketika terjadi hubung singkat. Investigasi dilakukan pada tegangan dan arus sebagai bentuk bahwa strategi yang diusulkan juga mampu memperbaiki arus dan tegangan yang berlebih. Dari studi literatur lain, strategi LVRT tentang injeksi arus reaktif dan implementasi *Direct Current Brake Chopper* (DC-BC) adalah saling berhubungan erat (Khan & Kim, 2023).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan, beberapa masalah krusial yang menjadi motivasi penulisan tugas akhir ini, antara lain:

1. Ketidaksihesuaian injeksi arus reaktif referensi yang dilakukan kontrol *voltage source controller*(VSC) ketika terjadi hubung singkat sesuai dengan aturan jaringan listrik Indonesia yaitu Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2020 Tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (*Grid Code*)
2. Terjadinya tegangan berlebih pada DC-link sistem PLTS dan arus berlebih pada bus AC jaring listrik ketika terjadi hubung singkat

1.3 Batasan Masalah

Batasan penelitian yang ditentukan dalam pengerjaan penelitian ini antara lain yaitu:

1. Seluruh komponen dianggap dalam kondisi ideal (mencakup iradiasi, suhu PV, dan *shading*)
2. Beban yang digunakan merupakan beban statis
3. Penelitian dilakukan ketika sistem PLTS dalam keadaan *steady-state*
4. Analisa dilakukan pada saat sistem PLTS mengalami hubung singkat
5. Hubung singkat pada yang dilakukan yaitu hubung singkat simetris 3 fasa
6. Injeksi arus reaktif tidak dilakukan dengan menambahkan sumber eksternal, akan tetapi injeksi arus reaktif dilakukan dengan memberikan referensi pada VSC

1.4 Tujuan

Tujuan yang hendak dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini yaitu:

1. Menggunakan metode deteksi voltage sag agar injeksi arus reaktif sesuai dengan aturan jaringan listrik Indonesia
2. Mengimplementasikan DC-BC untuk mengatasi tegangan dan arus berlebih sebagai masalah yang tersisa setelah penerapan injeksi arus reaktif

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian yang diharapkan mampu diberikan dalam pengerjaan tugas akhir ini yaitu:

1. Dapat memberikan usulan strategi LVRT pada sistem PLTS yang terhubung dengan jaring listrik 3 fasa ketika terjadi hubung singkat pada saluran
2. Dapat memberikan analisa melalui investigasi ketika sebelum dan sesudah penerapan strategi LVRT pada sistem PLTS

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

2.1.1 Photovoltaic (PV)

PV merupakan alat yang mampu mengkonversi sinar matahari melalui bentuk foton menjadi energi listrik. Foton dari sinar matahari yang mengenai permukaan PV akan mengeksitasi elektron dan menghasilkan aliran listrik. Terdapat 2 jenis panel surya yang umumnya digunakan dalam pasar, yaitu jenis monokristalin dan polikristalin. Monokristalin memiliki keunggulan yaitu mampu menghasilkan energi lebih baik dari pada jenis polikristalin karena memiliki efisiensi yang lebih baik, tetapi memiliki kelemahan yaitu ketika terdapat bayangan atau *shading*, drop tegangan pada monokristalin lebih besar dari pada polikristalin. Daya maksimum yang dihasilkan dari PV dapat diketahui melalui karakteristik kurva arus tegangan ketika tercapai titik MPP atau *Maximum Power Point* (Rahmaniar *et al*, 2023).

Kinerja dari PV dipengaruhi oleh 2 faktor utama yaitu suhu dan iradiasi sehingga dibutuhkan kalkulasi dalam penempatan instalasi dari PV. Semakin besar kenaikan suhu pada PV dan semakin kecil nilai iradiasi yang didapatkan PV, maka semakin rendah daya output yang dihasilkan sehingga agar mampu menghasilkan daya output yang maksimum, dibutuhkan sebuah *tracking* atau yang dikenal sebagai MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) (Soedibyo, 2015).

2.1.2 Instalasi PV

Dalam penggunaan PV sebagai pengasil daya, terdapat 3 jenis instalasi yang digunakan antara lain yaitu off grid (tidak terhubung dengan grid), on grid (terhubung dengan grid), dan *hybrid*. Off grid umumnya digunakan pada rumah atau sistem yang membutuhkan daya berskala kecil. Dibutuhkan *charge controller* agar mampu menghasilkan daya yang optimal dari PV. Selain itu instalasi off grid membutuhkan baterai sebagai cadangan energi Ketika PV tidak lagi optimal menghasilkan daya seperti pada saat malam hari atau terjadi *shading* pada PV. Instalasi on grid merupakan bentuk instalasi PV yang terhubung langsung dengan pembangkit atau jaringan listrik. Sistem ini bekerja tanpa menggunakan betarai sebagai media penyimpan energi, karena bentuk instalasi ini umumnya mampu memberikan energi secara baik melalui kontrol inverternya. Instalasi *hybrid* pada PV umumnya digunakan pada industri yang membutuhkan daya yang besar dan ingin meningkatkan faktor ekonomis dari industri tersebut. PV yang terpasang akan tetap terhubung ke jaringan listrik ketika kebutuhan industri tersebut terpenuhi dan akan bertindak sebagai pembangkit cadangan ketika terjadi suatu masalah atau gangguan dari pihak produsen listrik (Soedibyo, 2015).

2.2 DC-AC Three Phase Inverter

Inverter merupakan rangkaian elektronik yang mampu mengubah tegangan DC seperti baterai dan *solar cells* menjadi tegangan AC yang idealnya tanpa adanya perubahan (pengurangan atau penambahan) daya yang teralirkan akibat prosesnya. Inverter tiga fasa dibentuk dengan menggunakan inverter satu fasa yang berjumlah tiga buah dan di rangkai menjadi satu rangkaian dengan satu sumber DC yang sama serta dilakukan pengaturan pada duty cycle mereka agar terbentuk perbedaan sudut fasa dengan nilai 120° pada setiap inverter 1 fasa tersebut. Tiga output yang terbentuk dari inverter dapat dihubungkan dengan bentuk wye (Y) atau delta (Δ). Berikut adalah bentuk rangkaian inverter tiga fasa (da Silva & Elbuluk, 2013).

2.3 DC-DC Converter

DC-DC converter merupakan rangkaian elektronik yang mampu mengubah level dari tegangan DC ke suatu level tertentu sehingga dapat digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan, atau untuk mengubah polaritas tegangan, serta secara ideal tidak mengubah nilai daya yang disalurkan. Melalui nilai input tegangan yang diketahui, nilai tegangan output didapatkan melalui proses *switching* hidup (t_{on}) dan mati (t_{off}) dengan durasi tertentu antara keduanya. Salah satu metode untuk mengontrol tegangan output adalah dengan menetapkan nilai frekuensi dan menyesuaikan durasi *switching* dalam mengontrol nilai tegangan rata-rata. Metode tersebut dikenal dengan PWM *switching* atau *pulse width modulation switching*. Rangkaian ini bekerja dengan cara mengontrol saklar yang durasi *switch* akan ditentukan melalui perbandingan nilai error dengan nilai yang diharapkan. Nilai *duty cycle* dari converter dapat ditentukan dengan formulasi sebagai berikut.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.1)$$

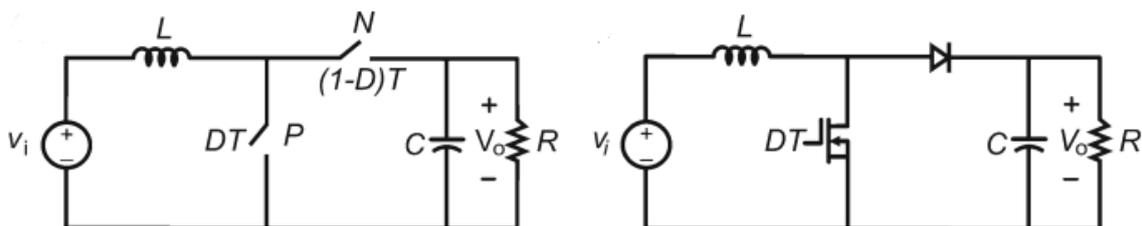
Dengan t_{on} merupakan durasi saklar akan hidup atau tersambung dan T merupakan satu siklus kerja converter (da Silva & Elbuluk, 2013).

2.3.1 Boost Converter

Boost converter atau step-up converter adalah jenis konverter *switching* DC-DC yang mampu menaikkan besar tegangan input menjadi level tegangan output yang lebih tinggi. Boost converter bekerja dengan menggunakan induktor untuk menyimpan energi dan kemudian melepaskannya ke beban dan diatur dengan *switch* serta dibutuhkan kapasitor sebagai filter akibat kecepatan *switching* yang sangat tinggi. Karakteristik dari boost converter dapat diformulasikan menggunakan persamaan berikut.

$$V_{avg} = \frac{V_i}{D} \quad (2.2)$$

Dengan nilai D merupakan siklus kerja/*duty cycle*, dan V_i merupakan tegangan output. Selama nilai D kurang daripada 1, maka nilai tegangan output akan selalu lebih besar dari nilai tegangan input. Berikut adalah bentuk rangkaian dari boost converter (Mohamed et al., 2019) (da Silva & Elbuluk, 2013).



Gambar 2.1 Skema Boost Converter (da Silva & Elbuluk, 2013)

2.4 Hubung Singkat pada Sistem Kelistrikan

Hubung singkat adalah bentuk anomali dari sistem kelistrikan akibat ketidakseimbangan aliran listrik yang biasa dapat ditemukan pada sistem tiga fasa. Anomali tersebut umum terjadi di luar prediksi dan dapat ditemukan pada impedansi rendah antara dua titik yang memiliki besar potensial berbeda. Kejadian ini dapat dikatakan gangguan, gangguan tersebut dapat berasal dari faktor internal dan eksternal sistem. Gangguan akibat faktor internal dari dalam

jaringan antara lain yaitu kegagalan fungsi dari peralatan listrik sedangkan dari faktor eksternal seperti terjadinya sambaran petir ke jaringan listrik dan adanya kontak antara jaringan terhadap benda dengan impedansi rendah seperti kontak dengan tumbuhan ataupun hewan (Penangsang et al., 2017). Hubung singkat dalam sistem kelistrikan merupakan gangguan yang mampu menghambat aliran dari penyaluran energi listrik dari suatu sistem ke sistem yang lain. Hal tersebut akan menyebabkan kerugian khususnya pada beban atau konsumen listrik yang dapat mempengaruhi kerusakan sistem yang dapat menghambat kegiatan produktivitas dari konsumen listrik seperti gangguan pada peralatan dan mengganggu waktu produksi (Sampeallo et al., 2019).

Besar arus hubung singkat pada jaringan dapat terpengaruh oleh besar dan kapasitas yang disuplai oleh peralatan pembangkit seperti generator dan motor, semakin besar kapasitas yang mampu dibangkitkan oleh peralatan pembangkit maka akan semakin besar pula nilai arus hubung singkat yang terjadi pada sistem. Besar dari gangguan hubung singkat yang terjadi dapat menghasilkan panas yang bernilai pangkat dua dari besar arus gangguan yang direpresentasikan sebagai berikut.

$$P = I_f^2 \times R \quad (2.3)$$

Dengan R merupakan besar hambatan akibat beban dan P merupakan daya yang direpresentasikan sebagai panas, sehingga semakin besar arus gangguan yang ada, maka semakin besar panas yang dihasilkan pada suatu hambatan tertentu yang tidak lain merupakan peralatan listrik. Apabila hal tersebut tidak dapat diantisipasi, maka kerusakan peralatan pada sistem akibat *overheat*, tidak mampu terhindarkan. Besar nilai dan durasi dari gangguan hubung singkat dapat terpengaruh oleh jenis gangguan yang terjadi, arus hubung singkat yang terjadi, dan perbedaan nilai impedansi di antara dua titik yaitu pembangkit dan lokasi gangguan. Arus gangguan hubung singkat juga sebanding dengan nilai tegangan RMS yang dapat direpresentasikan dalam bentuk berikut.

$$I = \frac{E}{Z} \quad (2.4)$$

Dengan E merupakan tegangan RMS pada titik terjadi gangguan dan Z merupakan nilai impedansi sepanjang jalur arus gangguan (IEEE Std 3002.3, 2018).

2.4.1 Hubung Singkat 3 Fasa (L L L Fault)

Hubung singkat 3 fasa merupakan jenis gangguan hubung singkat dengan arus hubung singkat paling besar di antara bentuk jenis gangguan hubung singkat lainnya. Terjadi ketika ketiga penghantar fasa saling bersentuhan. Merupakan bentuk gangguan simetri dan kemungkinan dari hal ini terjadi pada sistem yaitu sebesar 5%. Arus hubung singkat 3 fasa yang terjadi pada sebuah bus m (dalam satuan per unit) dapat direpresentasikan sebagai berikut (Penangsang et al., 2017).

$$I_m(F) = \frac{V_m(0)}{Z_{mm} + Z_f} \quad (2.5)$$

2.5 Voltage Sags sebagai Gangguan Kualitas Daya

Kualitas daya listrik yang baik membutuhkan pemeliharaan stabilitas jaringan listrik agar mampu memenuhi kebutuhan daya yang stabil bagi konsumen listrik sehingga diperlukan

pengaturan yang mampu menjaga nilai standar kualitas daya. Kualitas daya yang baik dapat diketahui dengan bentuk nilai tegangan sumber yang stabil dengan fluktuasi frekuensi dan tegangan yang minimum. Voltage sags merupakan salah satu masalah kualitas daya listrik. Terjadi dengan waktu singkat dan umumnya diakibatkan adanya gangguan hubung singkat atau penambahan beban yang dilakukan secara tiba-tiba (Deshmukh & Chandrakar, 2021). Semakin sebuah peralatan dekat dengan titik hubung singkat, maka semakin besar nilai voltage sags pada peralatan tersebut dan akan semakin besar juga bahaya yang diterima oleh peralatan tersebut. Voltage sags memiliki akibat buruk terhadap peralatan yang bekerja dengan sensitivitas tinggi. Kegagalan yang terjadi pada suatu sistem akan memberi pengaruh terhadap nilai ekonomis. Karakteristik dari pada voltage sags meliputi amplitudo, durasi, frekuensi hubung singkat, dan perubahan fasa tegangan. Karakteristik tersebut dapat direpresentasikan sebagai berikut dengan ΔU merupakan perubahan atau penurunan pada tegangan dan Δt merupakan durasi terjadinya voltage sags (Han et al., 2019).

2.5.1 Tegangan Berlebih Akibat Voltage Sags pada Sistem PLTS

Daya yang terbangkit dari sistem PLTS dan yang tersalurkan ke jaring listrik dapat diketahui melalui persamaan berikut.

$$P_{PV} = P_{DCL} + P_{ig} \quad (2.6)$$

Dengan P_{PV} merupakan daya yang terbangkitkan oleh solar PV, P_{DCL} merupakan daya pada DC link, dan P_{ig} merupakan daya yang tersalurkan dari inverter ke jaring listrik. Dalam keadaan kondisi normal, daya yang tersalurkan ke jaring listrik dapat diketahui sebagai berikut.

$$P_{PV} = P_{ig} = 3V_{ig}I_{ig} \quad (2.7)$$

Dengan V_{ig} dan I_{ig} merupakan nilai RMS dari tegangan dan arus yang tersalurkan pada jaring listrik. Rugi daya akibat konverter DC-DC *boost* diabaikan, maka daya yang tersalurkan ke jaring listrik dapat ditinjau pada persamaan (2.7). Di samping itu, dengan menjaga nilai daya yang terbangkitkan oleh PV (P_{PV}) dan daya yang tersalurkan ke jaring listrik dari inverter (P_{ig}), maka perbedaan nilai dari tegangan pada DC-link dapat terjaga. Ketika voltage sags, terjadi ketidakseimbangan antara daya yang dihasilkan oleh PV dan daya yang tersalurkan ke jaring listrik, sehingga konverter DC-DC *boost* melalui kontrol MPPT akan berusaha untuk mengatasi ketidakseimbangan dengan menaikkan tegangan pada DC-link. Dalam keadaan voltage sags pada sistem PLTS, dapat dinyatakan dalam persamaan (2.8).

$$(P_{PV} - P_{ig})\Delta T = P_{DCL}\Delta T = \frac{1}{2}C_{DC}(V_{DCL}^2 - V_{DCL}^2) \quad (2.8)$$

Dengan P_{ig} merupakan daya yang tersalurkan pada jaring listrik ketika terjadi gangguan, ΔT merupakan periode gangguan, C_{DC} merupakan nilai kapasitansi pada DC link, dan V_{DCL} merupakan tegangan pada DC link dalam periode gangguan. Nilai dari tegangan DC link dapat diketahui sebagai berikut.

$$V_{DCL} = \sqrt{\frac{2(P_{PV} - 3V_{ig}I_{ig})\Delta T}{C_{DC}} + V_{DCL}^2} \quad (2.9)$$

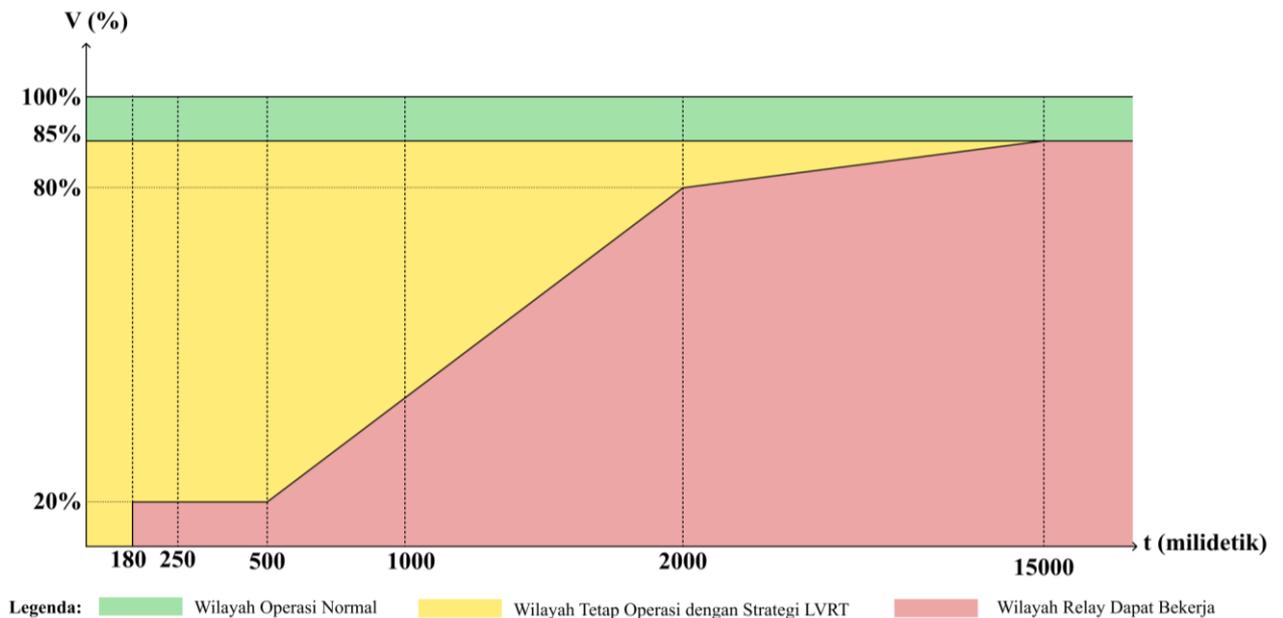
Pada persamaan (2.9), nilai dari tegangan DC link bergantung pada besar voltage sags yang terjadi pada saluran dan periode waktu gangguan. Semakin besar drop tegangan yang terjadi dan semakin panjang durasi gangguan, maka semakin tinggi kenaikan nilai dari tegangan pada

DC link. Tanpa adanya proteksi atau skema tertentu, hal ini akan membahayakan peralatan listrik termasuk inverter (Mohamed *et al*, 2019).

2.6 Low Voltage Ride-Through (LVRT)

Gangguan dalam kelistrikan merupakan fenomena yang tidak terhindarkan sehingga dibutuhkan mekanisme pertahanan atau yang disebut sebagai sistem proteksi khususnya untuk pembangkit listrik. Salah satu gangguan dalam kelistrikan adalah gangguan hubung singkat. Indikasi tampak dari adanya gangguan hubung singkat pada jaring listrik 3 fasa yaitu arus dari suatu titik dekat gangguan akan mengalami kenaikan dan tegangan mengalami penurunan atau dikenal sebagai drop tegangan. Untuk menghadapi fenomena drop tegangan tersebut, aturan jaring listrik dibuat untuk menyikapi kejadian akibat hubung singkat yang terjadi pada jaring listrik, dikenal sebagai *Low Voltage Ride-Through (LVRT)*. LVRT merupakan aturan yang menyatakan bahwa sebuah pembangkit harus memiliki sistem agar pembangkit tetap bertahan dalam waktu tertentu tanpa pengaktifan relay dan pemutus jaringan (PMT) berdasarkan drop tegangan nya (Al-Shetwi & Sujod, 2018). Maka dari itu, mekanisme untuk memenuhi LVRT tersebut dikenal sebagai strategi LVRT.

Berdasarkan gambar 2.2, dapat diketahui wilayah operasi ketika terjadi drop tegangan untuk sistem pembangkit listrik. Pada wilayah hijau, pembangkit dapat bekerja dengan normal tanpa adanya bantuan dari strategi LVRT. Wilayah kuning adalah wilayah pembangkit harus tetap bekerja dan terhubung dengan jaring listrik tanpa adanya pemutusan oleh sistem proteksi. Wilayah merah adalah wilayah pembangkit mampu melepaskan diri dari jaring listrik atau wilayah pembangkit diperbolehkan mengaktifkan sistem proteksi.



Gambar 2.2 LVRT dari aturan jaring listrik Indonesia berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 20 Tahun 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Metode yang digunakan

Pada penelitian ini strategi dalam menghadapi LVRT atau *low voltage ride-through* diusulkan untuk perbaikan akibat terjadinya hubung singkat yang terjadi pada jaring listrik 3 fasa terhadap sistem PLTS. Gangguan hubung singkat mengakibatkan kedip tegangan pada pembangkitan listrik. Terjadinya kedip tegangan pada saluran merupakan sebuah fenomena kualitas daya yang umum terjadi pada saluran distribusi ataupun saluran transmisi. Perbedaan jarak dari titik terjadinya hubung singkat ke titik peralatan listrik akan mempengaruhi nilai besar dampak yang didapatkan terhadap suatu peralatan listrik dan besar nilai drop tegangan pada peralatan. Ketika terjadi hubung singkat, nilai tegangan akan mengalami penurunan nilai efektifnya dengan nilai tegangan nominalnya selama selang waktu periode gangguan. Umumnya, suatu sistem dikatakan mengalami kedip tegangan apabila sistem yang terdampak mengalami tegangan drop 10% hingga 90% dari tegangan nominalnya dengan durasi waktu nya dari 0,5 cycles (pada frekuensi 50 Hz adalah 10 ms) hingga 1 menit. Simulasi hubung singkat yang dilakukan berupa 3 phase to phase dengan variasi drop tegangan yang terjadi pada sistem pembangkit.

Gangguan hubung singkat yang menyebabkan kedip tegangan dapat dihilangkan melalui penggunaan pemutus tenaga atau *circuit breaker* sebagai bentuk proteksi dari suatu peralatan. Pemutus tenaga dapat menghilangkan kedip tegangan dengan memutus jaringan yang terhubung dengan peralatan listrik terkait, tetapi sebelum pemutus tenaga bekerja, terdapat selang waktu yang harus dipenuhi agar PMT dapat bekerja dan hal tersebut tercantum pada kode grid. Selain itu juga, dalam kurun waktu tersebut juga, tanpa PMT, sebuah pembangkit diharuskan tetap terhubung dengan saluran dengan syarat tertentu yang mampu dipenuhi oleh pembangkit. Hubung singkat yang dilakukan pada penelitian ini yaitu sebesar 0,1 detik (Al-Shetwi & Sujod, 2018).

Pengaturan untuk memberikan nilai daya reaktif melalui injeksi arus reaktif berupa arus reaktif referensi yang akan dilakukan pada kontrol VSC dari inverter DC-AC dengan penyertaan metode deteksi terhadap voltage sag pada sistem PLTS dilakukan. Injeksi tersebut dilakukan agar sistem tetap terhubung dengan jaring listrik 3 fasa saat terjadi hubung singkat. Selain itu, penggunaan komponen DC-BC yang digunakan pada DC link sistem PLTS dilakukan untuk memperbaiki tegangan dan arus berlebih. Strategi ini akan ditinjau penggunaannya terhadap pemenuhan kode grid di Indonesia dan meninjau faktor keamanan pada peralatan.

3.1.1 Injeksi arus reaktif (I_q) dan metode deteksi dari voltage sag

Penggunaan dari injeksi arus I_q bertujuan untuk memenuhi permintaan dari aturan jaring listrik (*grid code*) dari suatu negara. Dalam kasus ini, tujuannya adalah untuk mengantisipasi terjadi gangguan yang terjadi ketika sistem terkena gangguan hubung singkat. Pada strategi injeksi arus reaktif ini, "q" dari I_q merupakan sebuah komponen yang didapatkan dengan menggunakan transformasi park atau yang dikenal juga sebagai transformasi *direct quadrature zero* (dq0) (Li *et al*, 2018). Transformasi park yang memodelkan dari grid inverter dapat dirumuskan pada persamaan (3.1) dan (3.2).

$$V_{d_1} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d + V_{d_2} \quad (3.1)$$

$$V_{q_1} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + V_{q_2} \quad (3.2)$$

Nilai V_{d_1} dan V_{q_1} mengacu pada tegangan input yaitu pada sisi input inverter sedangkan V_{d_2} dan V_{q_2} mengacu pada nilai dari sisi saluran. Penggunaan dari transformasi park ini bertujuan karena sistem yang ditinjau dalam bentuk kelistrikan AC tiga fasa, sedangkan sistem yang digunakan sebagai pembangkit merupakan sistem DC. Sistem dalam penelitian ini membutuhkan transformasi park karena sistem PLTS ini terhubung dengan sistem distribusi tiga fasa. Penggunaan dari transformasi ini ditujukan untuk penyederhanaan perhitungan dari inverter yang terhubung di antara sistem PLTS dan jaringan distribusi AC tiga fasa. Inverter yang digunakan terhubung dengan kontrol VSC sehingga nilai output dari tegangan AC dapat dikendalikan agar tetap sama. Cara kerja dari kontrol tersebut adalah dengan menggunakan nilai output AC dari inverter yang terhubung dengan grid distribusi 25 kV, dijadikan nilai acuan atau referensi terhadap nilai tegangan dan arus DC dari sistem PLTS (sebagai nilai input) sehingga kontrol *switching* dari inverter dapat dilakukan perbandingan antara output AC sistem distribusi dengan input DC PLTS. Oleh karena itu penggunaan dari transformasi park ditujukan agar sistem kelistrikan DC dari PLTS yang terhubung dengan inverter dapat melakukan komunikasi kontrol dengan sistem distribusi AC yang nilainya menjadi referensi terhadap *switching* kelistrikan DC PLTS pada kontrol VSC.

Metode kontrol ini memiliki keuntungan yaitu proses sinyal tegangan dan arus dilakukan dalam dua sistem yang terkoordinasi. Sinyal tegangan yang diubah mendeteksi fasa dan frekuensi jaring listrik, sementara sinyal arus yang diubah memantau arus jaringan. Akibatnya, variabel kontrol menjadi nilai dc, dan penyaringan serta kontrol menjadi lebih mudah. Dalam hal ini, ketika diintegrasikan dengan pengendali PI, transformasi ini menghilangkan kesalahan keadaan steady-state. Persamaan tegangan dalam referensi sinkron d-q dapat dinyatakan persamaan (3.3) dan (3.4) (Alrulmayh *et al*, 2023):

$$V_d = V_{sd} - R_f i_d - L_f \frac{di_d}{dt} + \omega L_f i_q \quad (3.3)$$

$$0 = V_{sq} - R_f i_q - L_f \frac{di_q}{dt} - \omega L_f i_d \quad (3.4)$$

R_f dan L_f merupakan nilai filter resistansi dan induktansi output, ω merupakan nilai angular frekuensi dari jaring listrik.

Injeksi arus I_q hanya dilakukan ketika sistem mengalami gangguan hubung singkat. Besar nilai I_q (dalam satuan pu) yang diinjeksikan didasarkan seberapa drop tegangan yang terjadi pada sisi AC sistem PLTS. Pada persamaan (3.5) yang mengacu pada sistem injeksi arus reaktif negara Jerman dapat diketahui kondisi yang dibentuk untuk penginjeksian arus reaktif referensi kepada sistem melalui kontrol VSC inverter (Al-Shetwi & Sujod, 2018).

$$\begin{aligned} I_{q_{ref}} &= 0, & V_{sag} &> 0.9 \\ I_{q_{ref}} &= -2V_{sag} + 2, & 0.5 &< V_{sag} \leq 0.9 \\ I_{q_{ref}} &= 1 & V_{sag} &\leq 0.5 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Agar arus injeksi bekerja hanya saat terjadi hubung singkat, maka dibutuhkan pendeteksian hubung singkat. Pendektesian ini akan menggunakan metode pendeteksian yang dikenal

sebagai *sag detection methods*. Metode ini menjadikan nilai tegangan output AC dari PLTS sebagai nilai referensi sehingga untuk mengetahui nilai V_{sag} dapat mengacu pada rumus (3.6).

$$V_{sag} = \frac{V_{gs}}{V_{gn}} \quad (3.6)$$

Nilai V_{gs} mengacu pada tegangan saluran ketika terjadi gangguan hubug singkat dan V_{gn} mengacu pada tegangan saluran ketika dalam keadaan normal. Untuk mengetahui nilai V_{gs} , maka nilai tersebut perlu diacukan pada transformasi dq0 sehingga nilai dari V_{gs} dapat diketahui melalui persamaan (3.7).

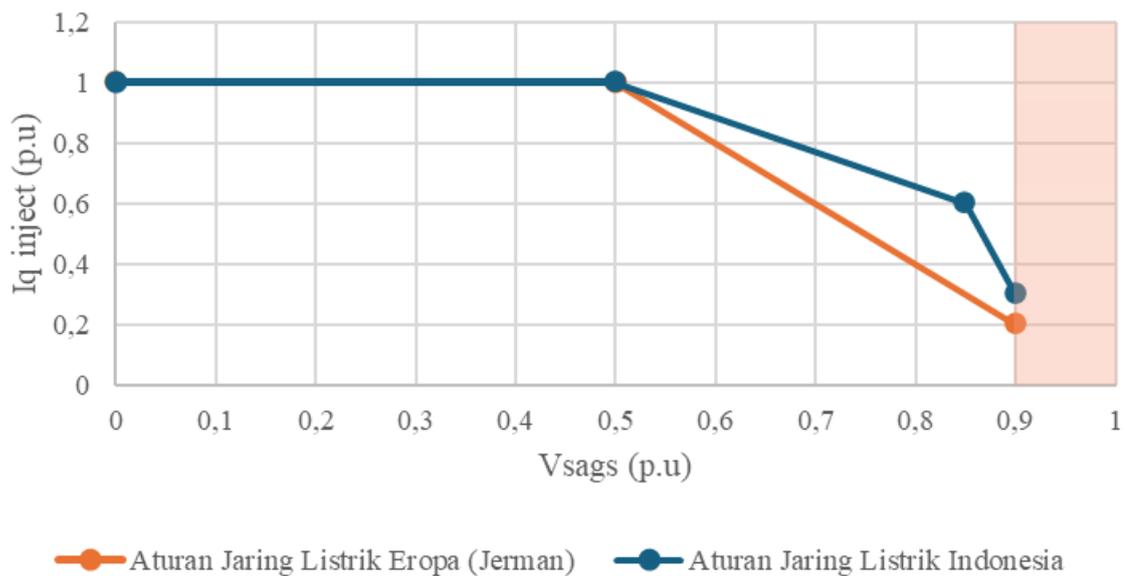
$$V_{gs} = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (3.7)$$

Setiap negara memiliki peraturan dalam melakukan injeksi arus reaktif referensi termasuk Indonesia. Injeksi arus reakti referensi yang dilakukan pada kontrol VSC sesuai aturan jaring listrik Indonesia terdapat pada Tabel 3.1 (Kementerian ESDM, 2020).

Tabel 3.1 Data Arus Reaktif yang Diberikan Sesuai Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Indonesia (Peraturan Menteri ESDM No 20 Tahun 2020)

V_{sags} (p.u)	Arus Reaktif Minimum (p.u)
0	1.0
0.5	0.9
0.85	0.6
0.9	0.3

Melalui tabel 3.1, maka dapat dilakukan perbandingan antara arus reaktif referensi yang digunakan saat ini dan yang disesuaikan dengan permintaan grid code Indonesia adalah sebagai berikut.



Gambar 3.1 Grafik Perbandingan Injeksi Arus Reaktif yang Diberikan

Berdasarkan grafik tersebut, pada nilai voltage sags lebih dari sama dengan 0.9 dan lebih dari 0.6, injeksi arus reaktif belum sesuai dan memenuhi permintaan grid code Indonesia. Maka dari itu, agar sistem mampu memenuhi permintaan grid code Indonesia dengan tetap mempertimbangkan sistem sebelumnya, perumusan yang digunakan pada injeksi arus reaktif adalah sesuai persamaan (3.8).

$$\begin{aligned}
I_{q_{ref}} &= 0, & V_{sag} &> 0.9 \\
I_{q_{ref}} &= -6V_{sag} + 5.7, & 0.85 < V_{sag} &\leq 0.9 \\
I_{q_{rev}} &= -0.857V_{sag} + 1.329, & 0.5 < V_{sag} &\leq 0.85 \\
I_{q_{ref}} &= 1 & V_{sag} &\leq 0.5
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Adanya nilai i_q , nilai daya reaktif akan ada. Nilai daya reaktif yang ada pada pembangkit didapatkan melalui rumus sebagai berikut.

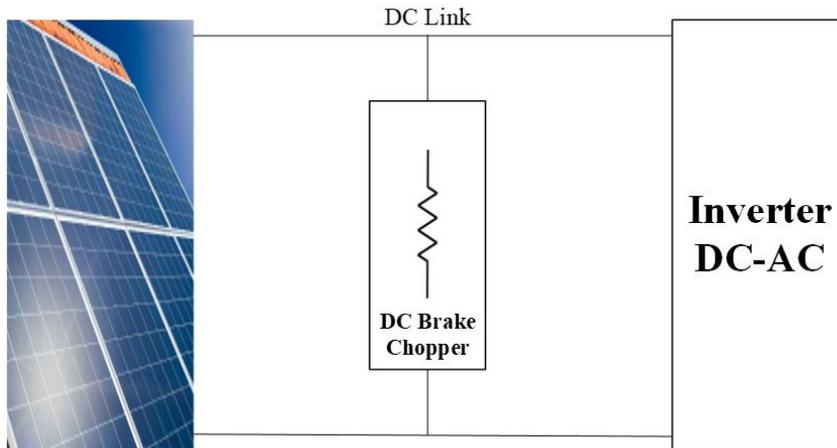
$$P = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \tag{3.9}$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_q I_d - V_d I_q) \tag{3.10}$$

Melaui rumus tersebut, nilai dari P dan Q dalam bentuk transformasi dq0 bergantung juga pada besar nilai injeksi arus reaktif referensi dan reaksi sistem untuuk menghasilkan nilai arus reaktif sesuai dengan nilai refrensi diperlukan melalui kontrol VSC dari inverter.

3.1.2 Direct Current Brake Chopper

Penggunaan dari DC brake chopper bertujuan untuk memotong arus berlebihan ketika terjadi hubung singkat dan melindungi inverter dari tegangan berlebih atas konsekuensi terjadinya hubung singkat. DC brake chopper diletakkan secara paralel pada bagian DC link dari sistem PLTS. Terdapat 2 komponen yang berperan penting yaitu resistor yang berfungsi menyerap energi dari PV ketika terjadi hubung singkat dan switch sebagai alat yang akan menentukan keadaan yang mengharuskan sebuah energi harus dibuang untuk menjaga peralatan khususnya inverter. Energi yang dibuang tersebut akan dibuang menjadi panas. Pemicu aktifnya DC brake chopper adalah ketika tegangan aktual melebihi nilai tegangan yang telah ditentukan yang bertujuan untuk melindungi peralatan. Peletakkan dari PLTS dapat ditinjau pada di bawah ini.



Gambar 3.2 Peletakkan Direct Current Brake Chopper

Penentuan nilai resistor ini ditentukan sesuai perumusan (3.11).

$$R_c = \frac{V_{dc}^2}{P_{dc}} \tag{3.11}$$

Dengan V_{dc} merupakan nilai tegangan DC dari DC link, P_{dc} adalah nilai Daya aktif yang dihasilkan oleh seluruh kejumlahan *photovoltaic*, dan R_c merupakan nilai resistor dari DC brake chopper. Melalui rumus tersebut maka ditentukan bahwa nilai resistor yang digunakan

adalah 2.5Ω . Nilai V_{dc} yang digunakan sebagai referensi dari ON/OFF saklar ditentukan berdasarkan standard UL1741 yaitu batas aman nilai input V_{dc} ke inverter sebesar 1.35 dari nilai tegangan normal yang pada sistem ini adalah sebesar 500 V. Perumusan ketika DC brake chopper dalam keadaan ON dapat diketahui melalui persamaan (3.12) (Mohamed *et al*, 2019).

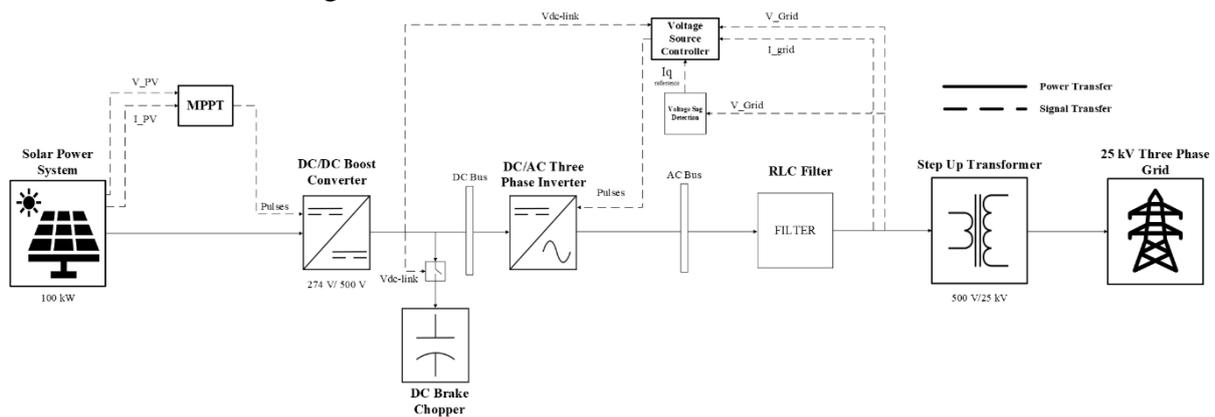
$$P_{PV} = P_{DC-BC} + P_{ig} \quad (3.12)$$

3.2 Bahan dan peralatan yang digunakan

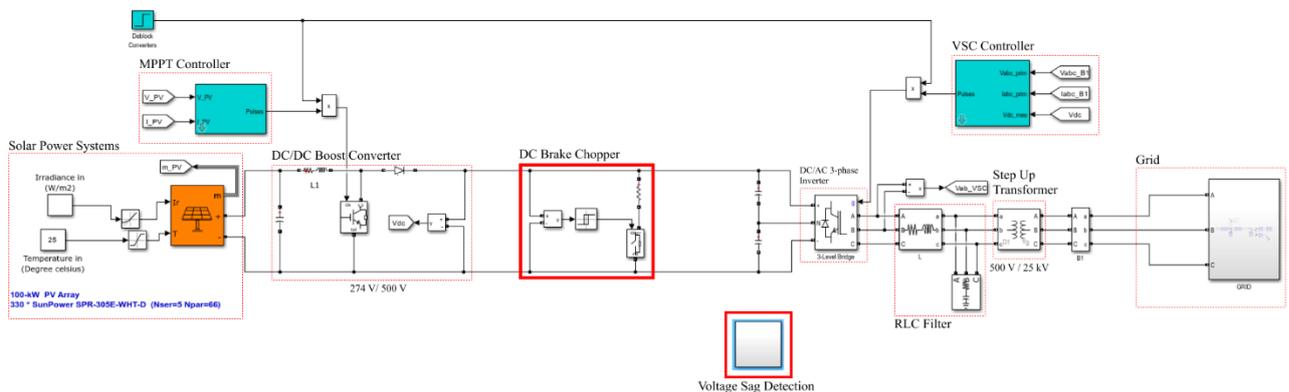
Pada penelitian yang dilakukan, bahan dan peralatan yang digunakan adalah perangkat lunak antara lain yaitu Microsoft Excel sebagai pengolah data, Microsoft Word sebagai media tulis, dan Matlab/Simulink R2023b sebagai tempat pemodelan serta simulasi dari sistem kelistrikan daripada model pembangkit listrik.

3.3 Sistem PLTS 100

Penggunaan sistem yang dilakukan dan ditinjau pada tugas akhir akan memiliki rangkaian dalam bentuk blok diagram berikut:



Gambar 3.3 Skema Sistem PLTS 100 kW



Gambar 3.4 Sistem PLTS 100 kW

Gambar 3.3 dan 3.4 merupakan sistem PLTS yang diujikan. Setelah sistem didapatkan, pendataan dari setiap peralatan listrik dari PLTS dilakukan. Melalui sistem tersebut, dilakukan simulasi strategi LVRT sebagai tindakan mitigasi terhadap gangguan yang terjadi pada grid. Berikut adalah data dari setiap peralatan listrik dari sistem PLTS.

Tabel 3.2 Data Solar Panel

Solar Panel		
Module model	SunPower SPR-305E-WHT-D	
Parallel Strings	66	
Series-connected modules per string	5	
Maximum power (Pmax)	305	Watt
Maximum power voltage (Vmp)	54,7	V
Maximum power current (Imp)	5,58	A
Open circuit voltage (Voc)	64,2	V
Open circuit current (Ioc)	5,96	A
Cell number per module (Ncell)	96	
Temperature coefficient of Isc	0,06	%/K
Temperature coefficient of power	-0,38	%/K
Temperature coefficient of Voltage	-0,173	V/K

Tabel 3.3 Data Boost Converter

Boost Converter		
Dioda		
Resistance (Ron)	0,0004	Ω
Inductance (Lon)	0	H
Forward voltage (Vf)	0	V
Snubber resistance (Rs)	inf	Ω
Snubber inductance (Cs)	inf	F
Switch		
Resistance (Ron)	0,001	Ω
Inductance (Lon)	0	H
Forward voltage (Vf)	0	V
Snubber resistance (Rs)	100	k Ω
Snubber inductance (Cs)	inf	F
Resistor		
Resistance	0,005	Ω
Inductor		
Inductance	5	mH
Capacitor		
Capacitance	0,1	mF

Tabel 3.4 Data DC link Capacitor

DC link capacitor		
Capacitor 1		
Capacitance	12	mF
Capacitor 2		
Capacitance	12	mF

Tabel 3.5 Data Inverter

Three-level bridge	
Number of bridge arms	3

Snubber resistance (Rs)	100	kΩ
Snubber capacitance (Cs)	inf	F
Power electronic device	IGBT/Diodes	
Internal resistance (Ron)	0,2	mΩ
Forward voltages		
Devices (Vf)	0	V
Diode (Vfd)	0	V

Tabel 3.6 Data Kontrol VSC

VSC control		
Nominal Power	100	kVA
Frequency	50	Hz
Nominal primary voltages	25	kV
Nominal secondary voltages	260	V
Nominal DC bus voltage	500	V
Total transformer leakage impedance (pu/Pnom)		
Rxf0	0,002	Ω
Lxf	0,06	Ω
Choke impedance		
R	0,002	Ω
Lxf	0,25	mH
VDC regulator gains		
Kp	7	
Ki	800	
Current regulator gains		
Kp	0,3	
Ki	20	

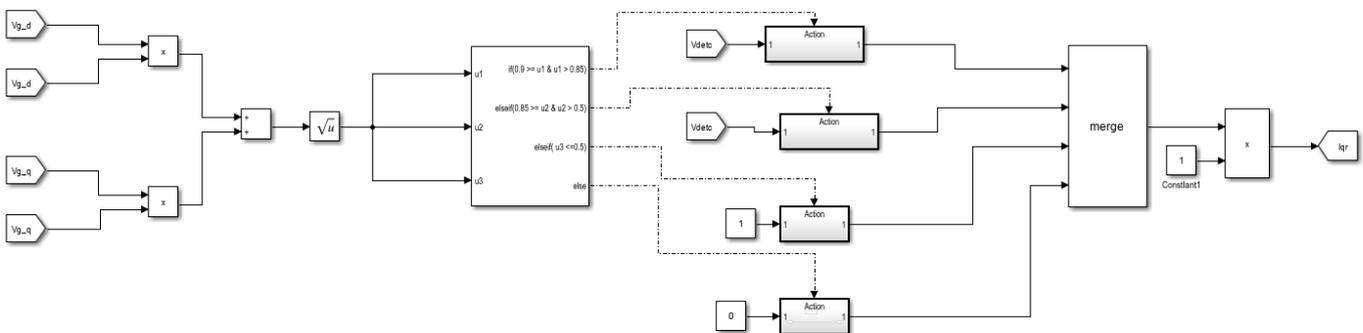
Tabel 3.7 Data RLC Filter

RLC Filter		
Capacitor		
Configuration	Yg	
Nominal phase-to-phase voltage (Vrms)	240	V
Active Power (P)	10	W
Inductive reactive power (QL)	0	VAR
Capacitive reactive power (QC)	10	kVAR
RLC Branch		
Branch type	RL	
Resistance	0,001885	Ω
Inductance	0,00025	H

Tabel 3.8 Data Transformer Sistem PLTS

Transformer Sistem PLTS

Configuration		
Primary winding connection	Delta	
Secondary winding connection	Yg	
Core	Three single-phase transformers	
Parameters		
Nominal power (VA)	100	kVA
Frequency (Hz)	50	Hz
Primary winding		
Voltage Ph-Ph (Vrms)	260	V
Resistance	0,001	pu
Inductance	0,03	pu
Secondary winding		
Voltage Ph-Ph (Vrms)	25	kV
Resistance	0,001	pu
Inductance	0,03	pu
Magnetization resistance	500	pu
Magnetization inductance	500	pu



Gambar 3.5 Blok Injeksi Arus Reaktif Sesuai Peraturan Jaring Listrik Indonesia

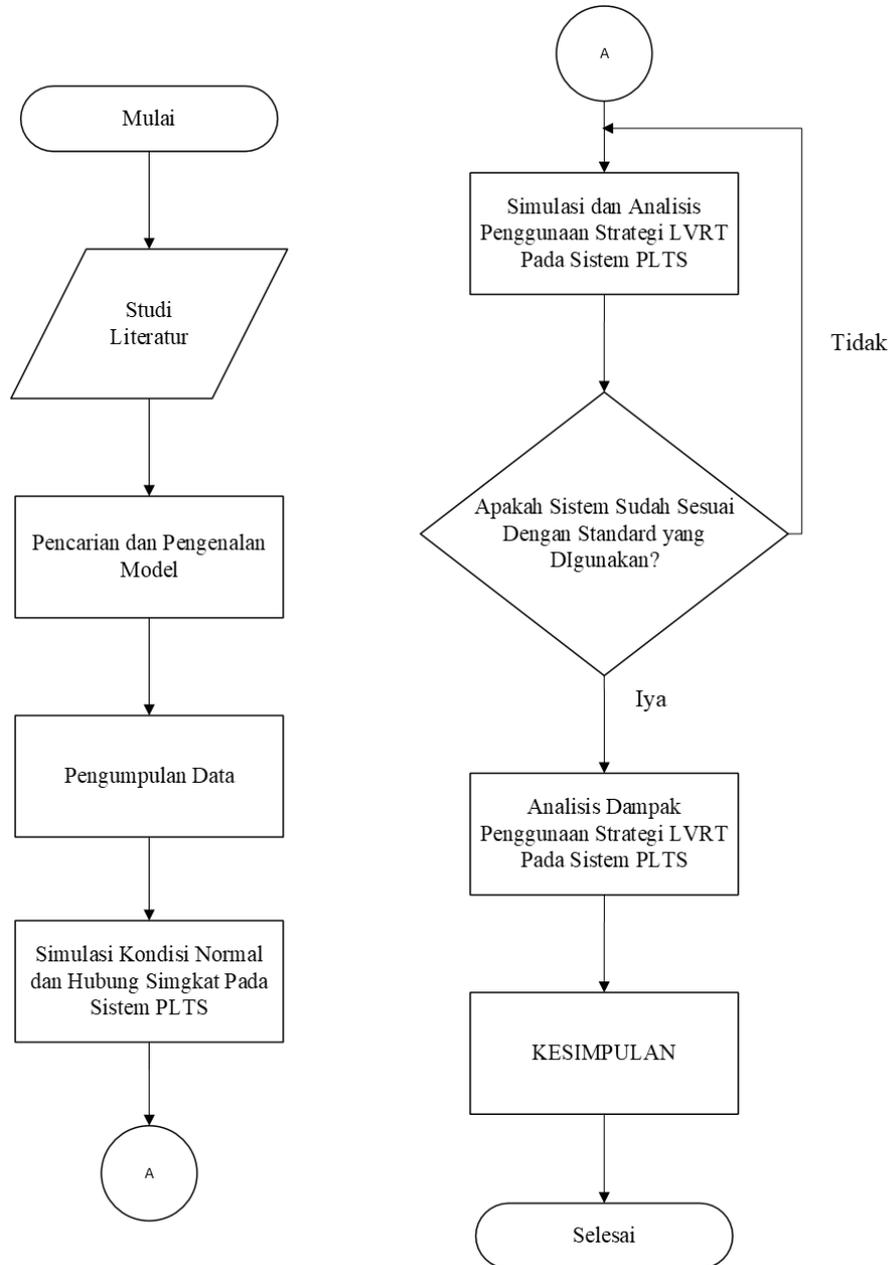
Gambar 3.5 merupakan representasi deteksi tegangan sag dalam bentuk blok matlab/simulink yang diatur agar mampu memberikan injeksi arus reaktif sesuai dengan peraturan jaring listrik Indonesia.

Model yang akan di analisis, dapat di jelaskan sebagai berikut:

1. Model dari PLTS merupakan model double stage PV yaitu sistem yang menggunakan DC/DC converter dan akan menggunakan kontrol MPPT, lalu akan terhubung DC/AC inverter agar mampu terhubung dengan jaringan listrik 3 fasa yang nantinya akan dilakukan penaikan tegangan oleh step-up transformer
2. Sistem PV terhubung dengan jaringan distribusi 25 kV yang jaringan tersebut juga terhubung dengan jaringan transmisi 125 kV

3. PV yang digunakan dalam penelitian adalah tipe SunPower SPR-305E-WHT-D
4. Gangguan yang akan diujikan pada penelitian adalah gangguan simetri tiga fasa (LLL)

3.4 Urutan pelaksanaan penelitian



Gambar 3.6 Urutan Pelaksanaan Penelitian

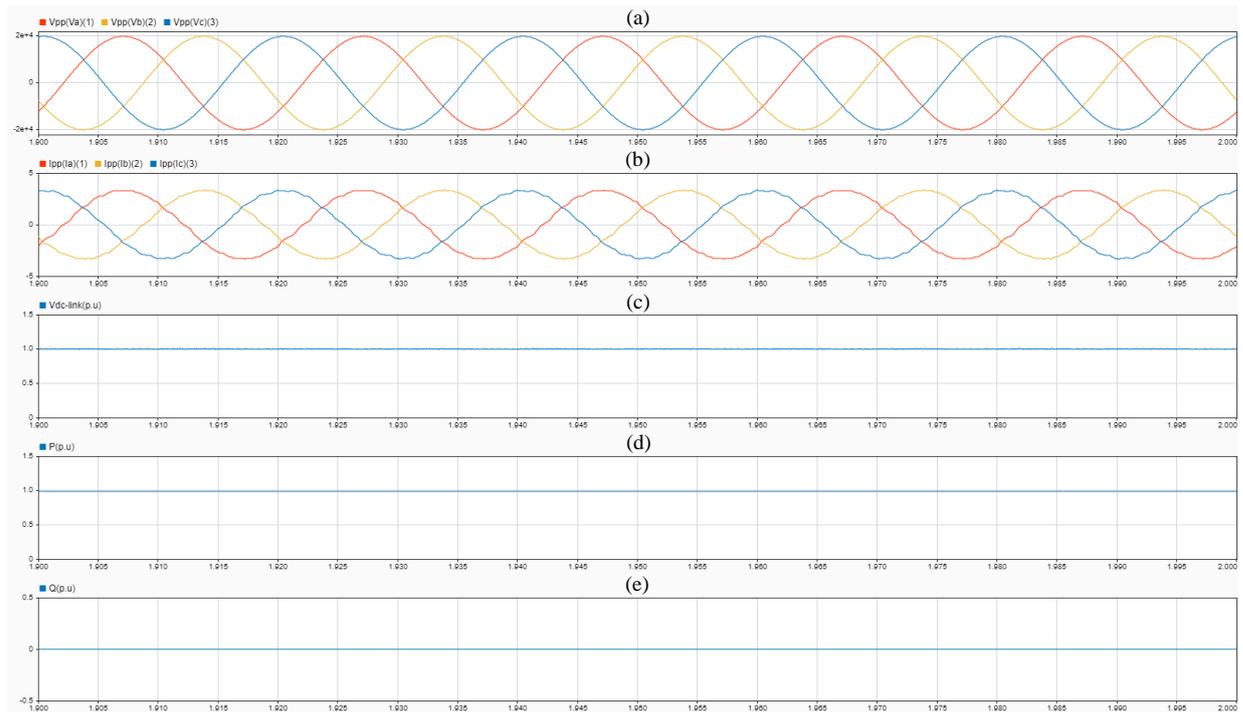
- Langkah 1 : Studi literatur terkait strategi LVRT dilakukan untuk menemukan cara yang tepat dan mampu diimplementasikan pada sistem PLTS dan juga dilakukan studi terkait karakteristik dari hubung singkat 3 fasa simetris
- Langkah 2 : Pencarian model dan melakukan pengenalan model dilakukan untuk mengetahui model yang digunakan sebagai objek uji dari penelitian tugas akhir dan melakukan penyesuaian terhadap beberapa parameter seperti frekuensi kerja pada sistem PLTS, software matlab 2023b digunakan sebagai alat penelitian

- Langkah 3 : Pengumpulan data dari sistem PLTS dilakukan untuk kompilasi nilai parameter seperti nilai beban pada jaring listrik, peralatan pembangkit yang digunakan, besar nilai tegangan, arus, daya, dan daya reaktif yang digunakan dan mampu dihasilkan pembangkit, dan lain-lain
- Langkah 4 : Simulasi kondisi normal dan hubung singkat dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari sistem PLTS dalam keadaan sebelum dan sesudah diberikan gangguan yang terjadi pada saluran
- Langkah 5 : Penggunaan strategi LVRT diterapkan pada sistem PLTS secara bertahap, strategi yang digunakan yaitu penginjeksian arus reaktif referensi pada kontrol VSC dari inverter dan penggunaan *Direct Current Brake Chopper* pada sistem PLTS
- Langkah 6 : Setelah penerapan strategi LVRT diterapkan pada sistem PLTS, dilakukan validasi bahwa sistem dapat memenuhi kesesuaian dengan standard yaitu permintaan dari kode grid Indonesia dan UL1741
- Langkah 7 : Analisis setelah penggunaan strategi LVRT dilakukan untuk mengetahui dampak pada sistem PLTS ketika setelah penerapan strategi LVRT melalui perbandingan ketika sistem PLTS belum menggunakan strategi yang diusulkan
- Langkah 8 : Setelah analisis dilakukan, penarikan kesimpulan dilakukan untuk menjawab permasalahan dan tujuan dari topik tugas akhir

BAB 4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Sistem PLTS Dalam Kondisi Tidak Terjadi Gangguan Pada Jaring Listrik

Simulasi dilakukan dengan meninjau sistem PLTS yang terhubung dengan grid pada saat sistem dalam keadaan normal dan terjadi hubung singkat pada grid. Simulasi dalam keadaan normal merupakan simulasi tahap awal untuk meninjau sistem PLTS berjalan tanpa adanya gangguan yang terhubung dengan saluran distribusi 25 kV. Proses peninjauan dari penelitian ini yaitu ketika sistem dalam keadaan *steady-state*. Berikut adalah simulasi uji yang ditinjau pada penelitian ketika dalam keadaan normal.



Gambar 4.1 Simulasi Kondisi Normal dari Sistem PLTS (a) Tegangan peak-peak (V_{pp}) (b) Arus peak-peak (I_{pp}) (c) Tegangan pada DC link (d) Daya Aktif (e) Daya Reaktif

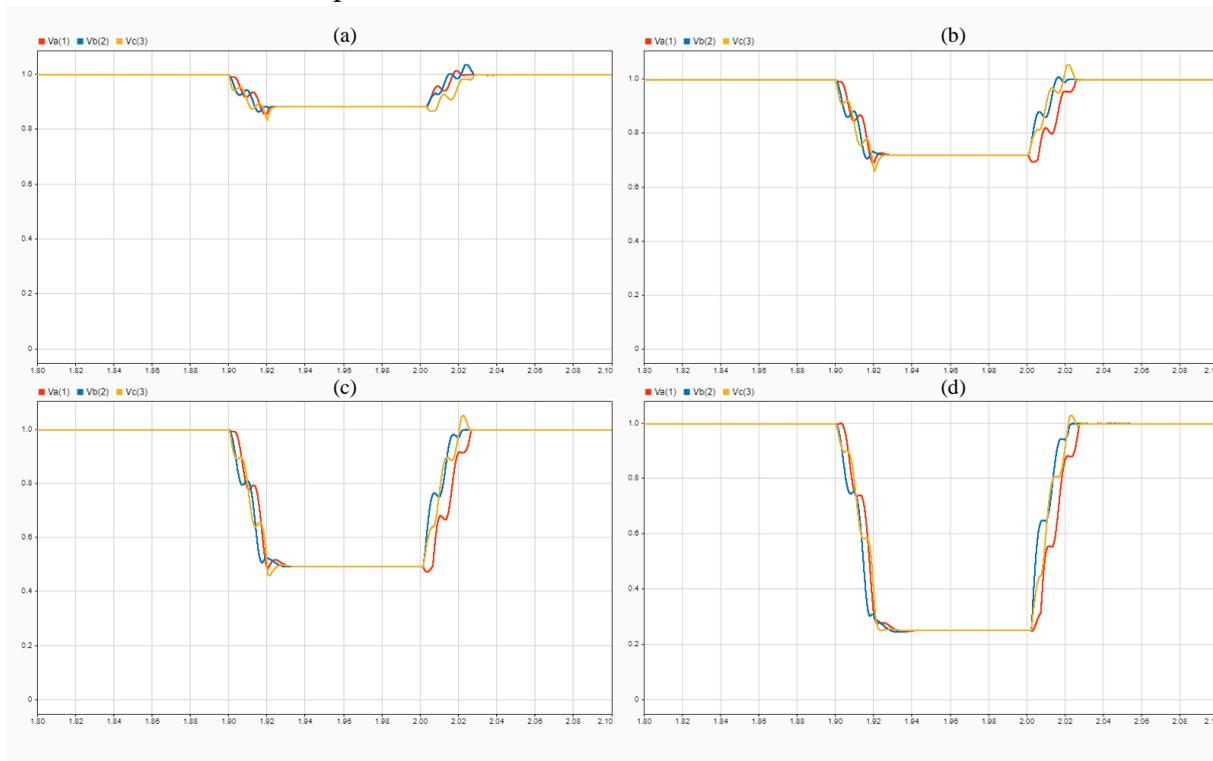
Sistem kelistrikan dari saluran distribusi ini penggunaan frekuensinya yaitu 50 Hz. Pada saat sistem PLTS dalam keadaan normal ini, nilai parameter dari sistem PLTS yang terhubung ke saluran distribusi 25 kV antara lain yaitu.

Tabel 4.1 Nilai Parameter Dari Sistem PLTS Dalam Kondisi Normal

Vpp	Phase A	19,9	V
	Phase B	19,9	
	Phase C	19,9	
Vrms	Phase A	14,07	V
	Phase B	14,06	
	Phase C	14,07	
Ipp	Phase A	3,3	A
	Phase B	3,3	
	Phase C	3,3	

Irms	Phase A	2,36	A
	Phase B	2,34	
	Phase C	2,34	
Vdc-link		500	V
P		99.05	kW
Q		0	kVAR

Pada kondisi normal, nilai tegangan rms pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan yaitu 14,07 kV, 14,06 kV, dan 14,07 kV. Arus rms pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan yaitu 2,36 A, 2,34 A, dan 2,34 A. Daya aktif output dari pembangkitan secara keseluruhan yaitu sebesar 99,05 kW dengan nilai 1 p.u sebesar 100 kW. Hal ini dikarenakan adanya rugi-rugi daya yang terjadi sebelum daya disalurkan ke jaring listrik. Nilai daya reaktif output sebesar 0 kVAR. Nilai 1 p.u dari daya reaktif yaitu sebesar -50 kVAR. Tegangan pada sisi DC link secara stabil pada nilai 500 V.



Gambar 4.2 Level Tegangan Drop yang Diujikan Pada Sistem PLTS dengan Hubung Singkat Terjadi Pada Grid (a) Tegangan Drop 86% (b) Tegangan Drop 69% (c) Tegangan Drop 49% (d) Tegangan Drop 25%

Simulasi hubung singkat tanpa penggunaan strategi LVRT dilakukan sebagai uji respon pada sistem PLTS sehingga selanjutnya dapat dibandingkan ketika sistem telah menggunakan strategi LVRT yang diusulkan. Simulasi hubung singkat yang diterapkan pada sistem PLTS yaitu dilakukan pemberian hubung singkat simetris 3 phase-to-phase pada bus PLTS dengan nilai *Break Time Short Circuit Duration* yaitu 0,1 detik dan level drop tegangan pada titik pengujian yaitu sebesar 86%, 69%, 49%, dan 25% dari tegangan nominal. Perlakuan hubung singkat dilakukan pada detik ke 1.9 detik hingga 2 detik.

4.2 Sistem PLTS Dalam Kondisi Terjadi Gangguan Pada Jaring Listrik

4.2.1 Simulasi Hubung Singkat Sebelum dan Sesudah Penyesuaian Injeksi Arus Reaktif Disesuaikan dengan Aturan Jaring Listrik Indonesia Menggunakan Metode Deteksi Tegangan Sag

Tabel 4.2 Data Nilai Injeksi Arus Reaktif Referensi dengan Penggunaan Metode Deteksi Tegangan Sag

Besar Injeksi Arus Reaktif Referensi(p.u)			
Drop Tegangan	Penerapan Strategi LVRT		
	Sebelum Penerapan	Penerapan Injeksi Arus Reaktif non-Indonesia	Penerapan Injeksi Arus Reaktif Indonesia
86%	0	0,28	0,54
69%	0	0,6	0,73
49%	0	1	1
25%	0	1	1

- Case 1 : Hubung singkat 3 fasa dengan jatuh drop tegangan 86%

Tabel 4.3 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi Pada Jatuh Tegangan Drop 86%

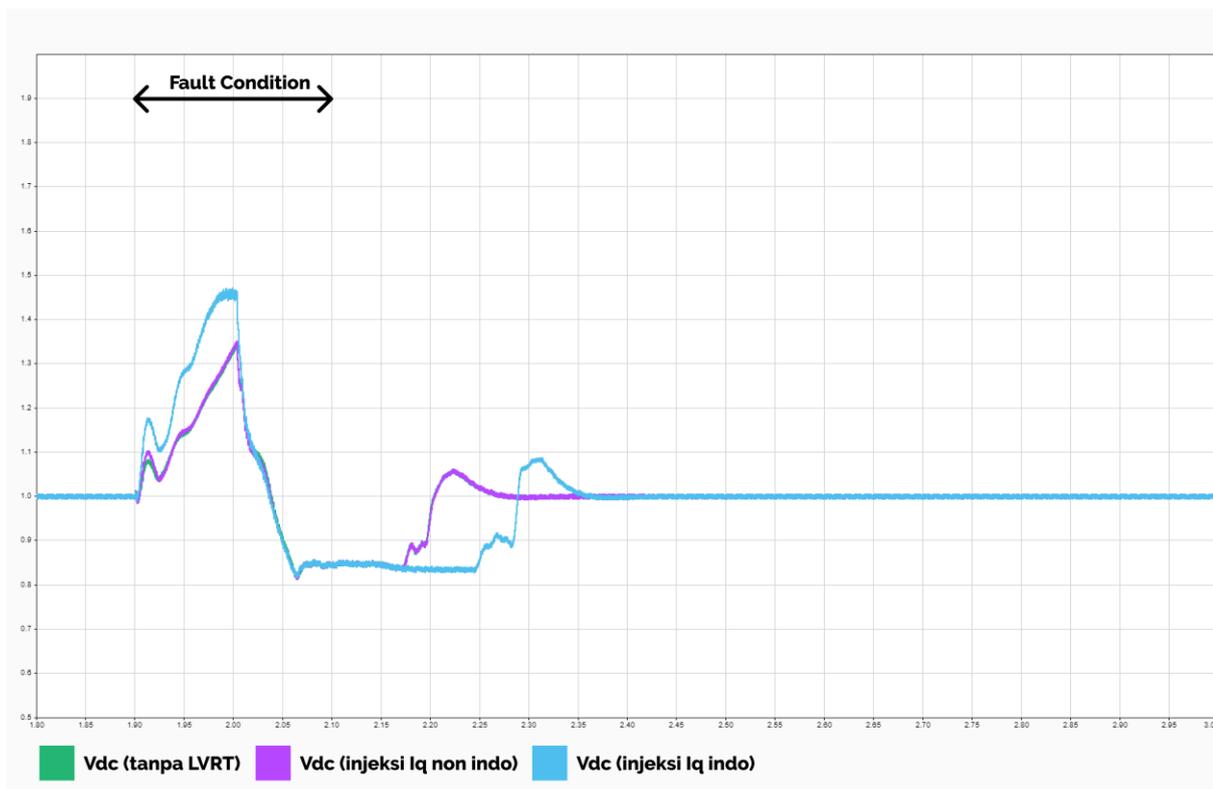
Penerapan LVRT	Arus Maksimum RMS(p.u)			Daya Aktif Minimum(p.u)	Daya Reaktif (p.u)	Tegangan DC-link maksimum (p.u)
	Ia	Ib	Ic			
Sebelum Penerapan LVRT	1,3	1,3	1,3	0,91	0,1	1,34
Injeksi Arus Reaktif Sebelum Penyesuaian Aturan Indonesia(Iq)	1,5	1,4	1,4	0,91	0,5	1,35
Injeksi Arus Reaktif Setelah Penyesuaian Aturan Indonesia(Iq)	1,56	1,5	1,45	0,8	1,1	1,46

Pada hubung singkat yang menyebabkan tegangan drop sebesar 86%, Sebelum dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif dengan metode deteksi tegangan sag, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 1,3 p.u, 1,3 p.u, dan 1,3 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,34 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0,91 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem

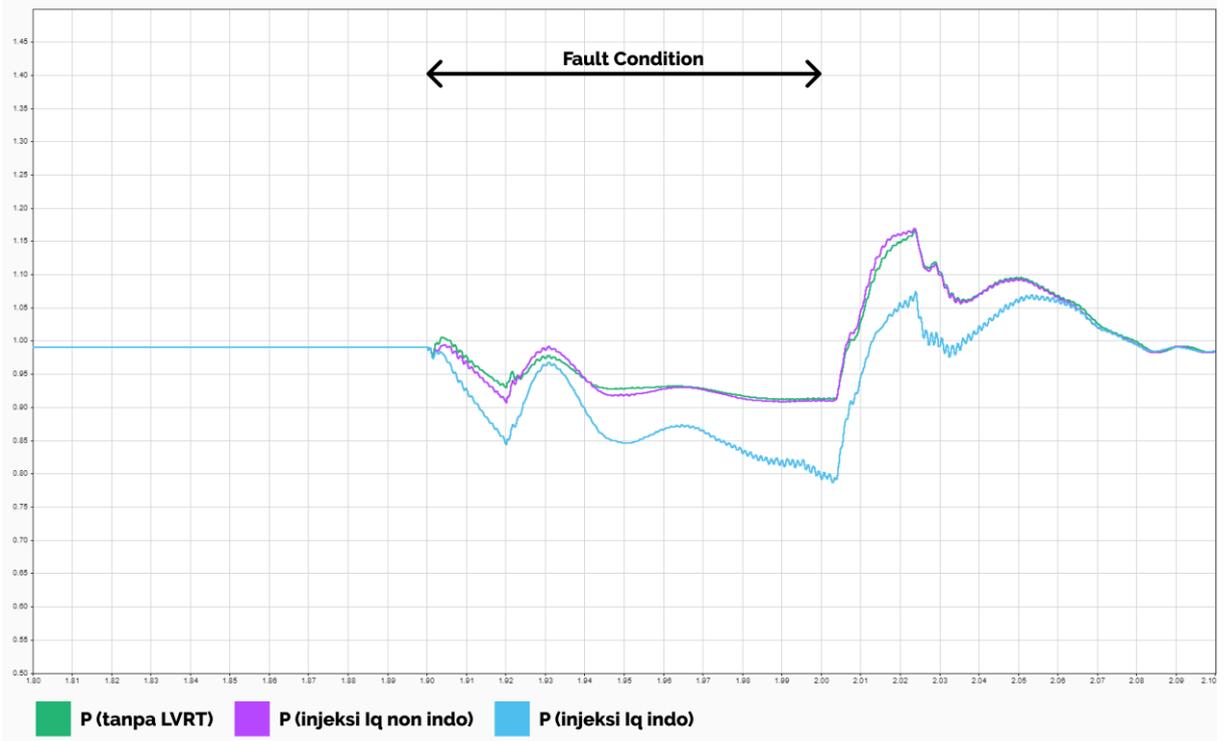
mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 0,1 p.u.

Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif tetapi belum sesuai dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 1,5 p.u, 1,4 p.u, dan 1,4 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,35 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0,91 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 0,5 p.u.

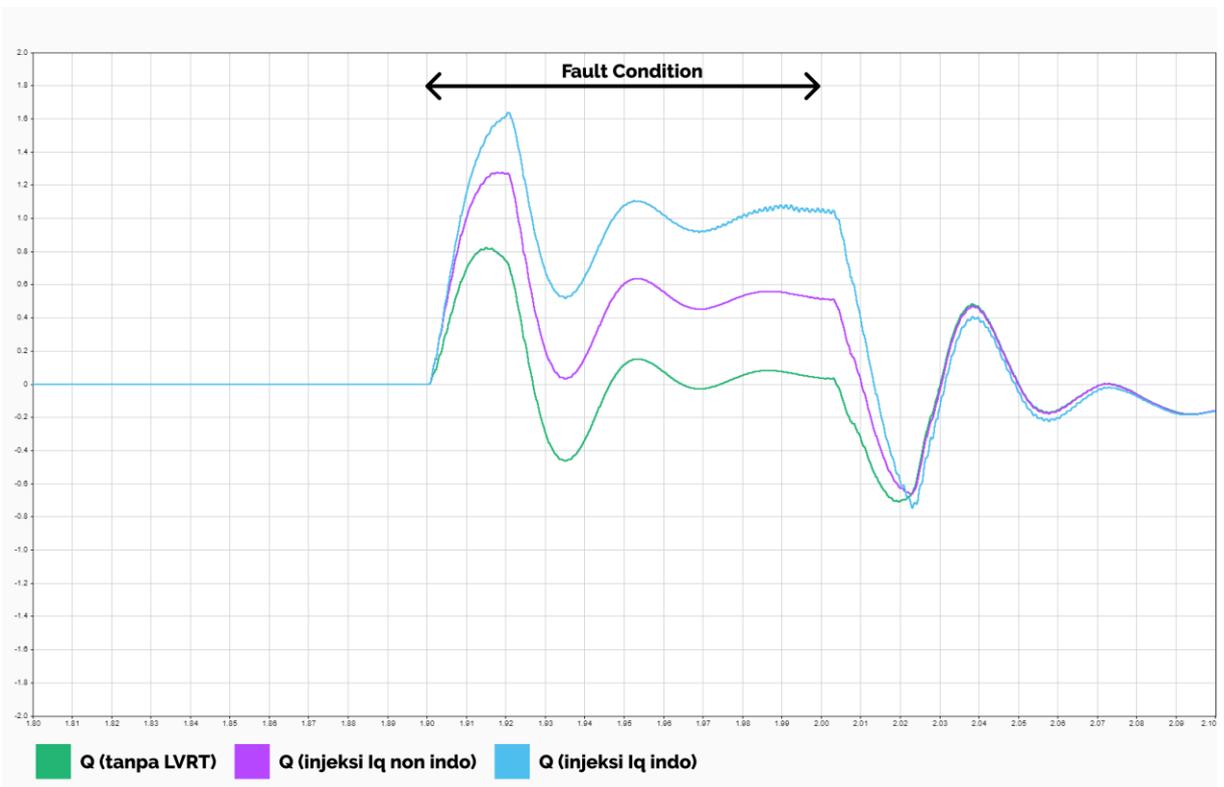
Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 1,56 p.u, 1,5 p.u, dan 1,45 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,46 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0,8 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 1,1 p.u.



Gambar 4.3 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 86%



Gambar 4.4 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 86%



Gambar 4.5 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 86%

- Case 2 : Hubung singkat 3 fasa dengan jatuh drop tegangan 69%

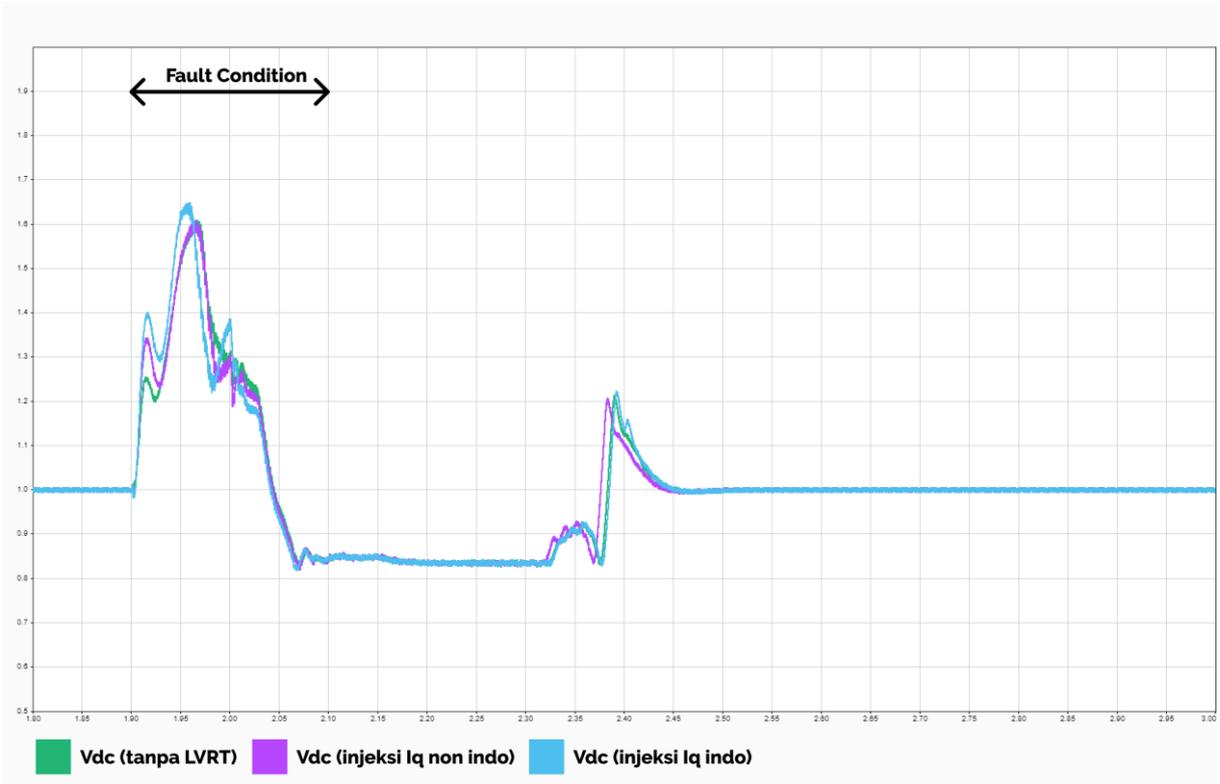
Tabel 4.4 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi Pada Jatuh Tegangan Drop 69%

Penerapan LVRT	Arus Maksimum RMS(p.u)			Daya Aktif Minimum(p.u)	Daya Reaktif (p.u)	Tegangan DC-link maksimum (p.u)
	Ia	Ib	Ic			
Sebelum Penerapan LVRT	2,1	2,2	2,5	0,5	0,1	1,61
Injeksi Arus Reaktif Sebelum Penyesuaian Aturan Indonesia(Iq)	2,2	2,5	2,5	0,5	0,9	1,6
Injeksi Arus Reaktif Setelah Penyesuaian Aturan Indonesia(Iq)	2,4	2,5	2,8	0,4	1,1	1,64

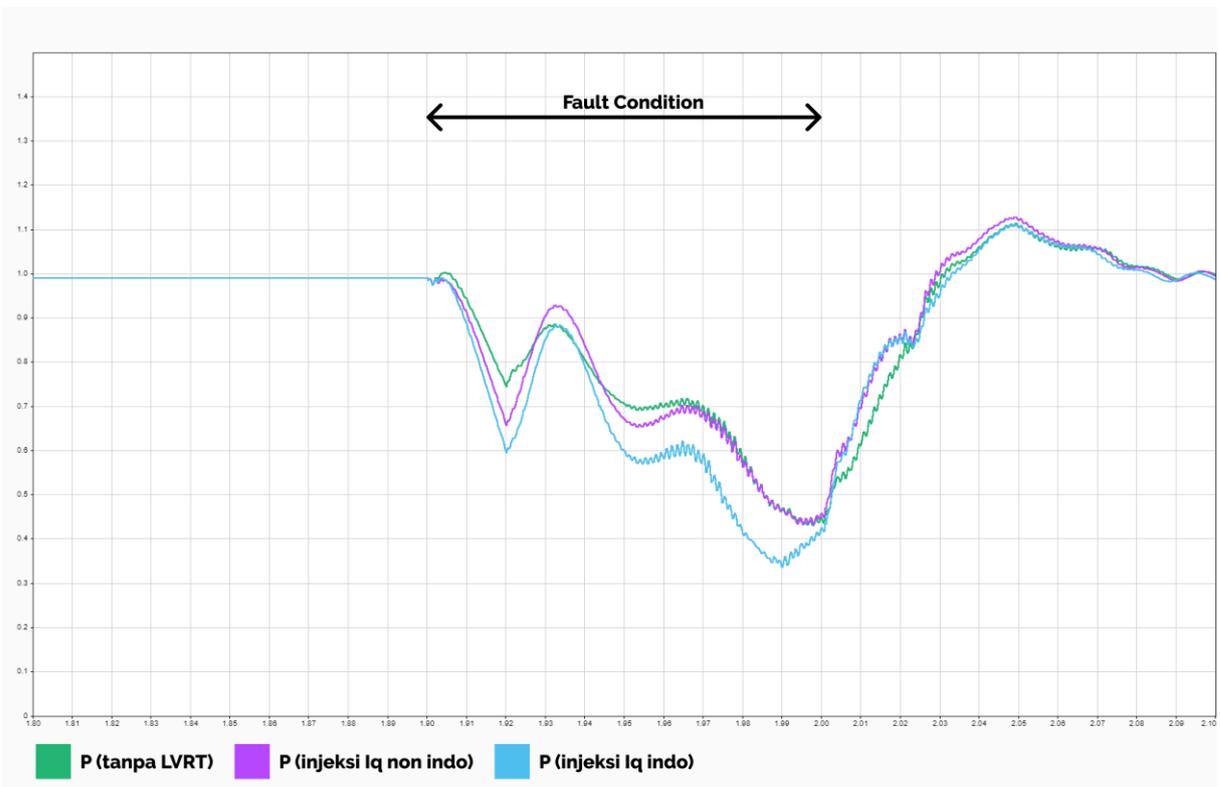
Pada hubung singkat yang menyebabkan tegangan drop sebesar 69%, Sebelum dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif dengan metode deteksi tegangan sag, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,1 p.u, 2,2 p.u, dan 2,5 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,61 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0,5 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 0,1 p.u.

Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif tetapi belum sesuai dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,2 p.u, 2,5 p.u, dan 2,5 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,6 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0,5 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 0,9 p.u.

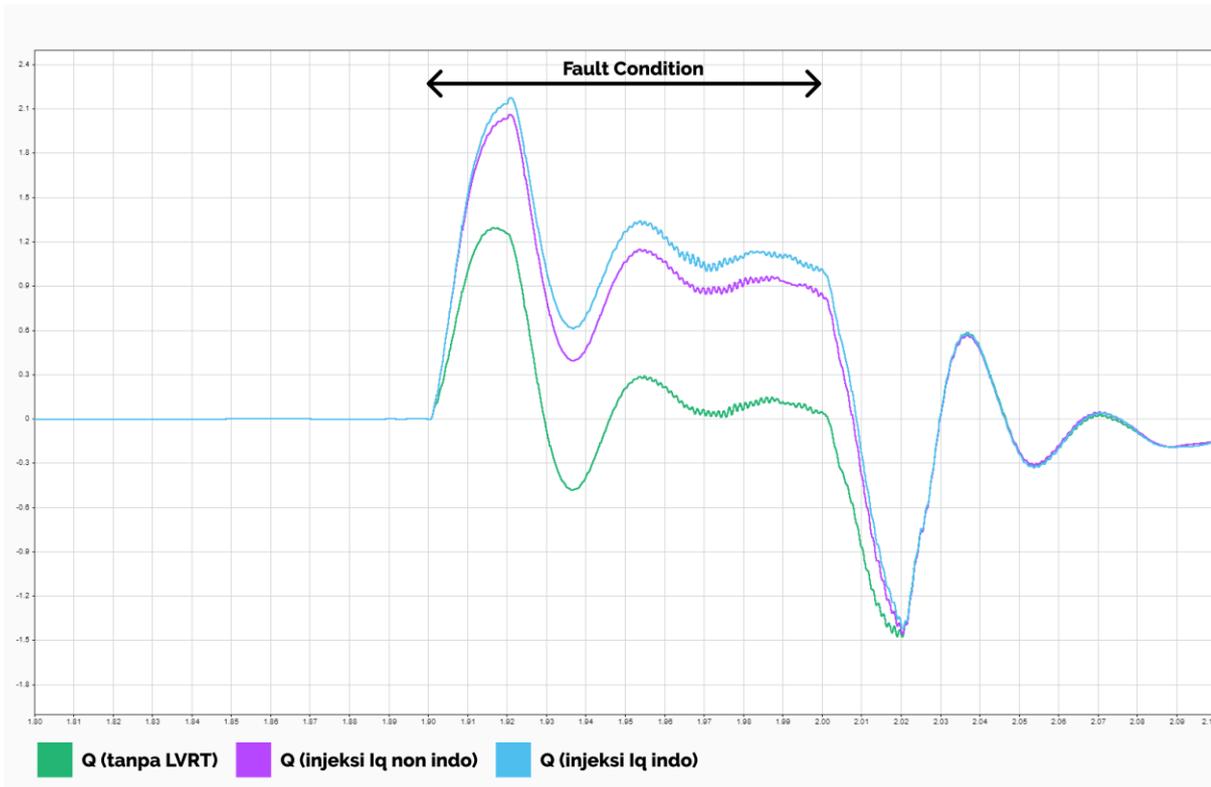
Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,4 p.u, 2,5 p.u, dan 2,8 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,64 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0,4 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 1,1 p.u.



Gambar 4.6 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 69%



Gambar 4.7 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 69%



Gambar 4.8 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 69%

- Case 3 : Hubung singkat 3 fasa dengan jatuh drop tegangan 49%

Tabel 4.5 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi Pada Jatuh Tegangan Drop 49%

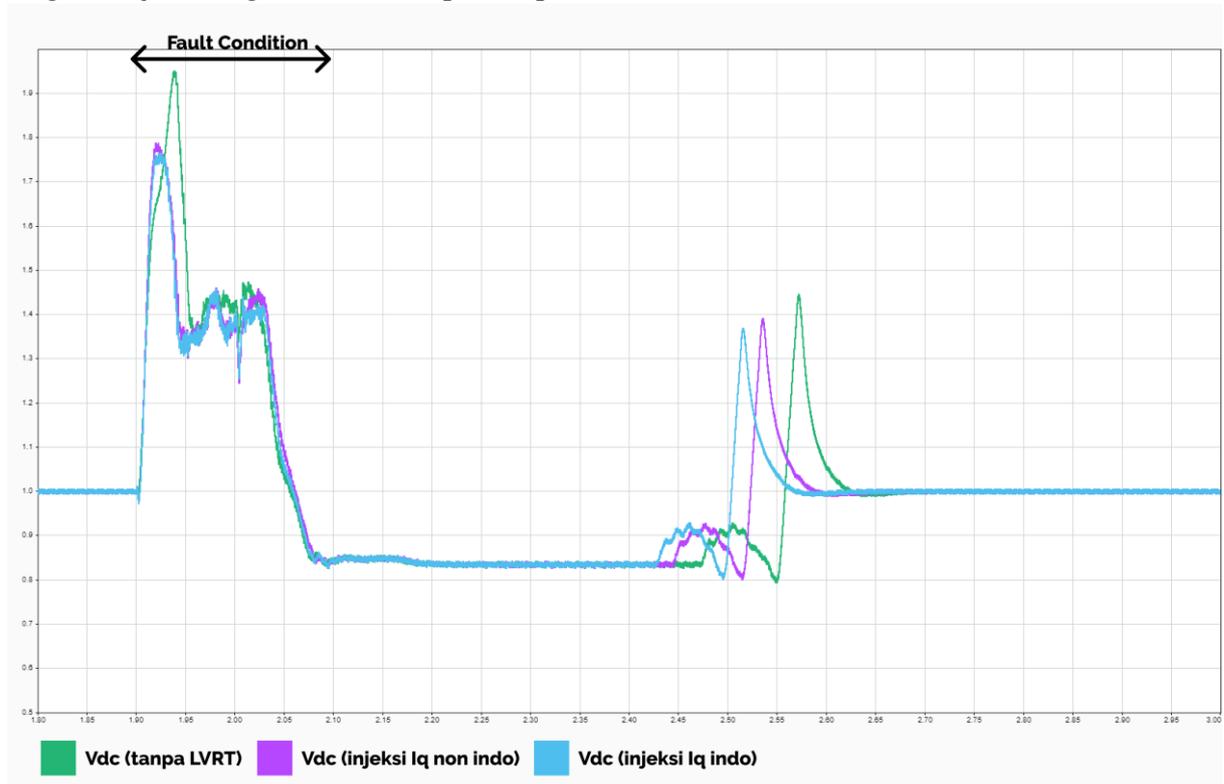
Penerapan LVRT	Arus Maksimum RMS(p.u)			Daya Aktif Minimum(p.u)	Daya Reaktif (p.u)	Tegangan DC-link maksimum (p.u)
	Ia	Ib	Ic			
Sebelum Penerapan LVRT	4,3	3,2	2,7	0	0	1,95
Injeksi Arus Reaktif Sebelum Penyesuaian Aturan Indonesia(Iq)	2,4	3,6	3,7	0	1	1,78
Injeksi Arus Reaktif Setelah Penyesuaian Aturan Indonesia(Iq)	2,4	3,4	3,8	0	1	1,75

Pada hubung singkat yang menyebabkan tegangan drop sebesar 49%, Sebelum dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif dengan metode deteksi tegangan sag, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 4,3 p.u, 3,2 p.u, dan 2,7 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,95 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0 p.u

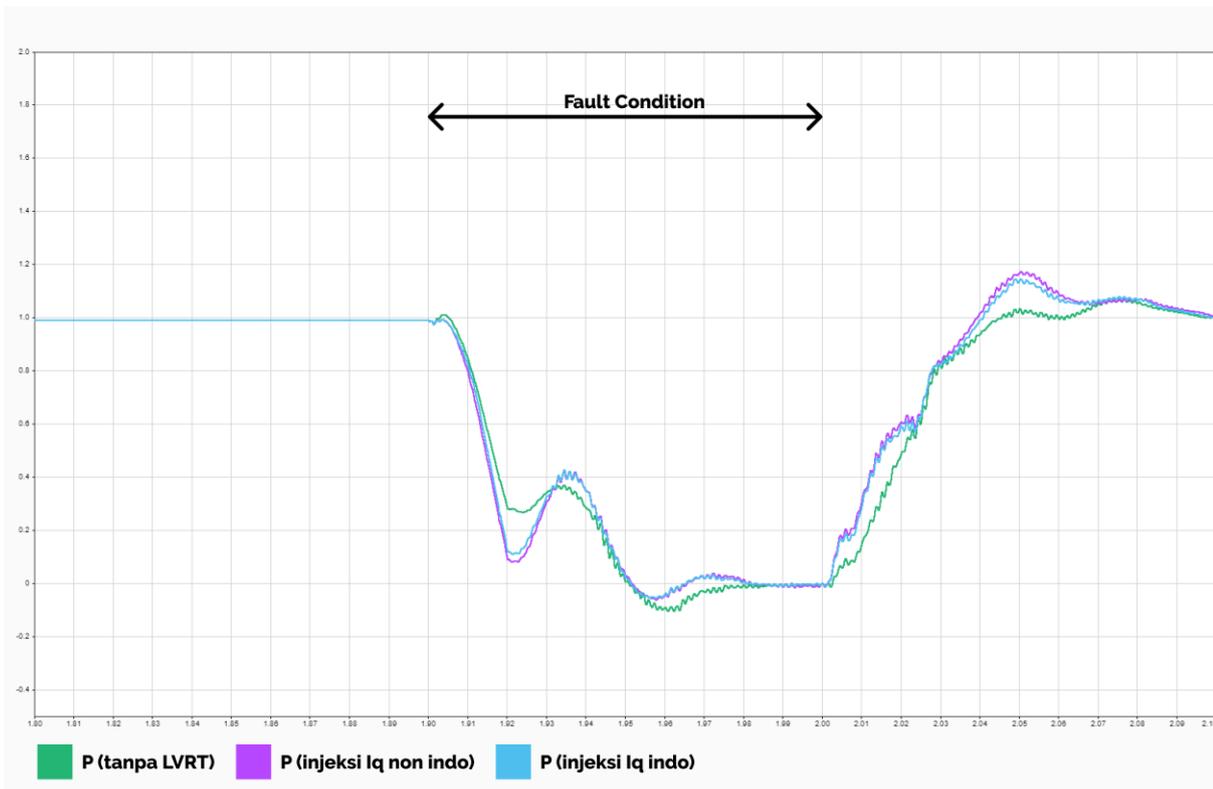
dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 0 p.u.

Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif tetapi belum sesuai dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,4 p.u, 3,6 p.u, dan 3,7 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,78 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 1 p.u.

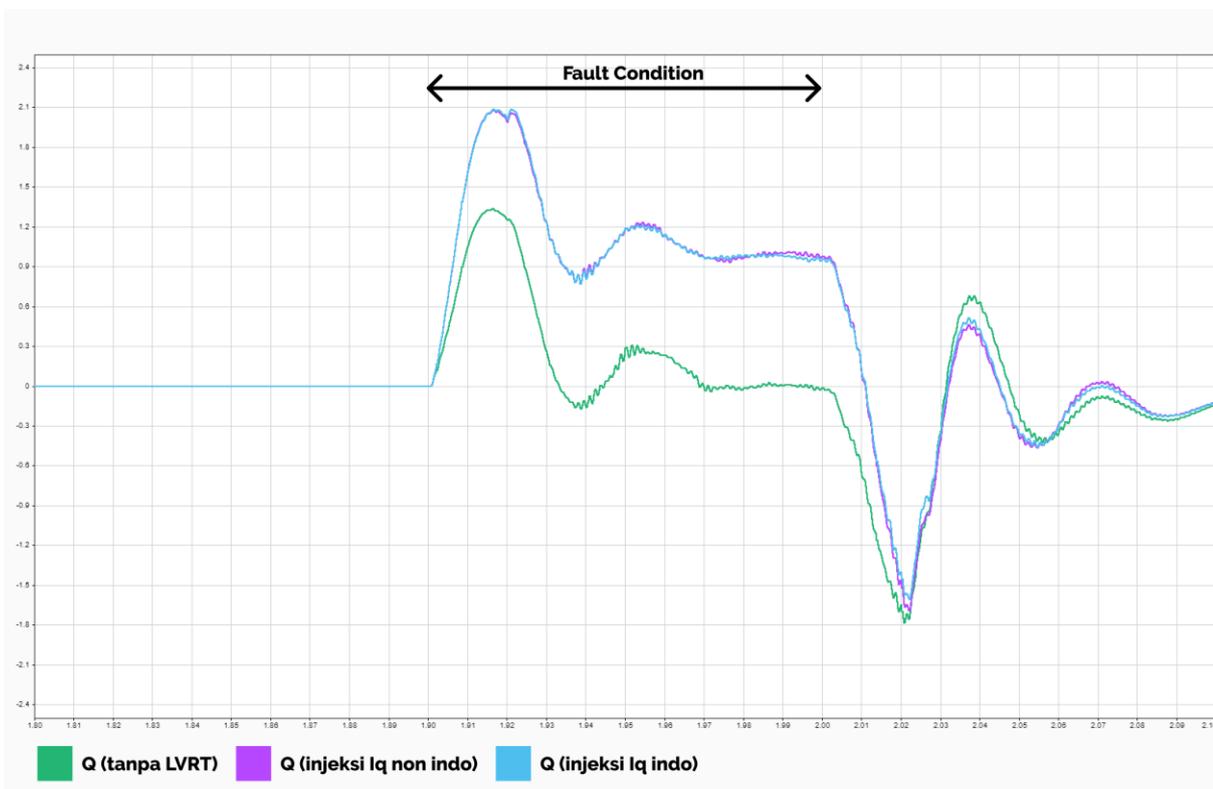
Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,4 p.u, 3,4 p.u, dan 3,8 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,75 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 1 p.u.



Gambar 4.9 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 49%



Gambar 4.10 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 49%



Gambar 4.11 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 49%

- Case 4 : Hubung singkat 3 fasa dengan jatuh drop tegangan 25%

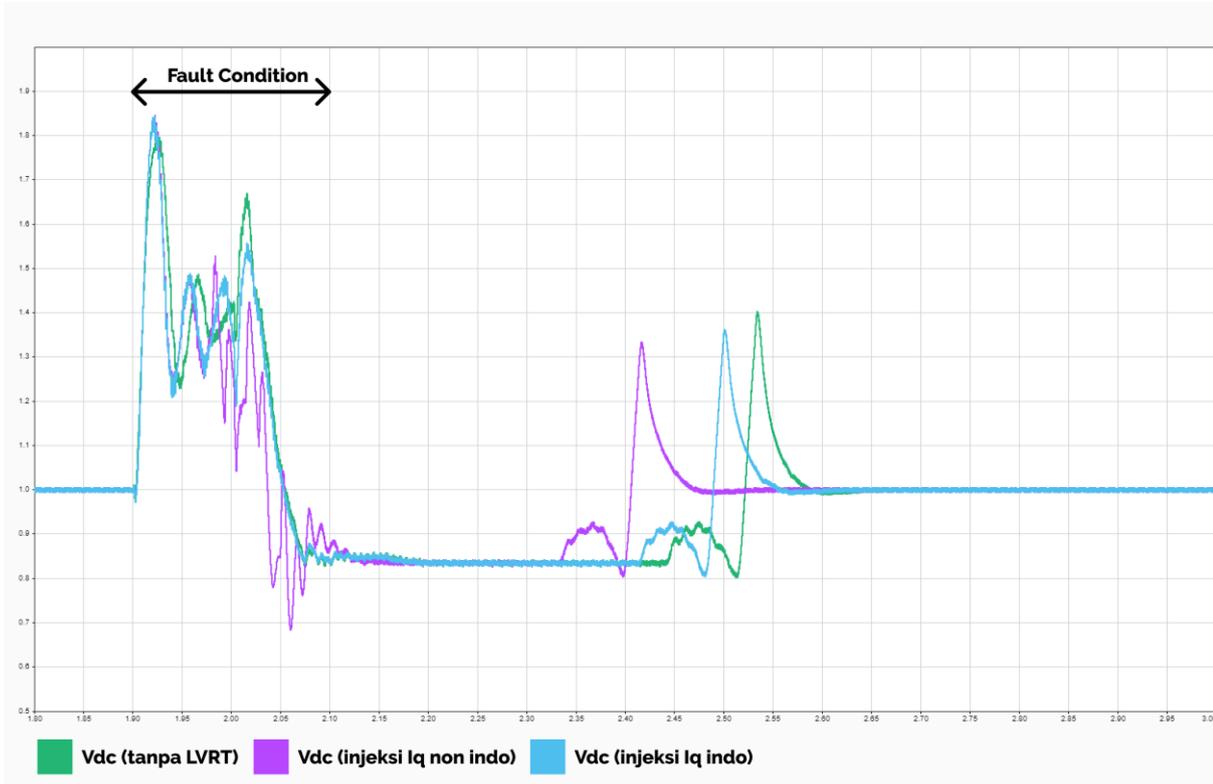
Tabel 4.6 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi Pada Jatuh Tegangan Drop 25%

Penerapan LVRT	Arus Maksimum RMS(p.u)			Daya Aktif Minimum(p.u)	Daya Reaktif (p.u)	Tegangan DC-link maksimum (p.u)
	Ia	Ib	Ic			
Sebelum Penerapan LVRT	2,36	3,73	3,37	0	0	1,8
Injeksi Arus Reaktif Sebelum Penyesuaian Aturan Indonesia(Iq)	2,94	3,73	3,4	0	0,53	1,84
Injeksi Arus Reaktif Setelah Penyesuaian Aturan Indonesia(Iq)	2,94	3,68	3,39	0	0,53	1,84

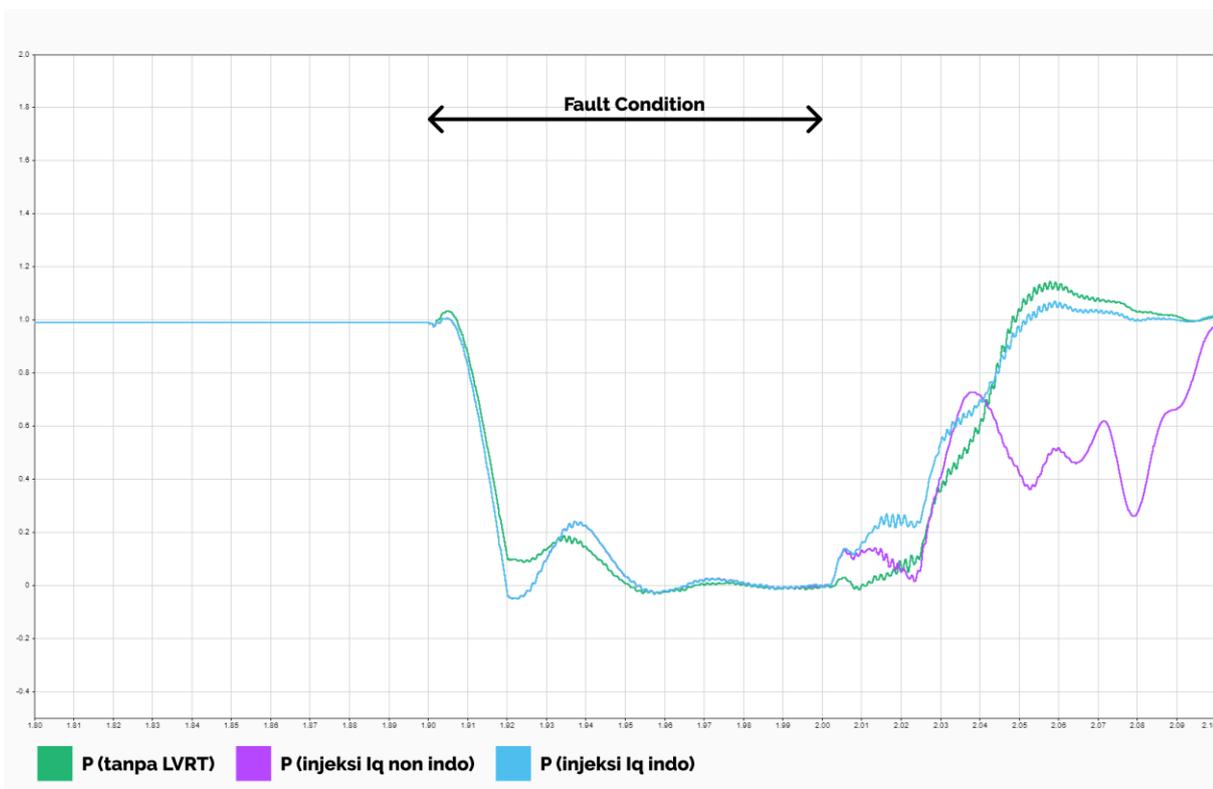
Pada hubung singkat yang menyebabkan tegangan drop sebesar 25%, Sebelum dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif dengan metode deteksi tegangan sag, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,36 p.u, 3,73 p.u, dan 3,37 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,8 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 0 p.u.

Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif tetapi belu sesuai dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,94 p.u, 3,73 p.u, dan 3,4 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,84 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 0,53 p.u.

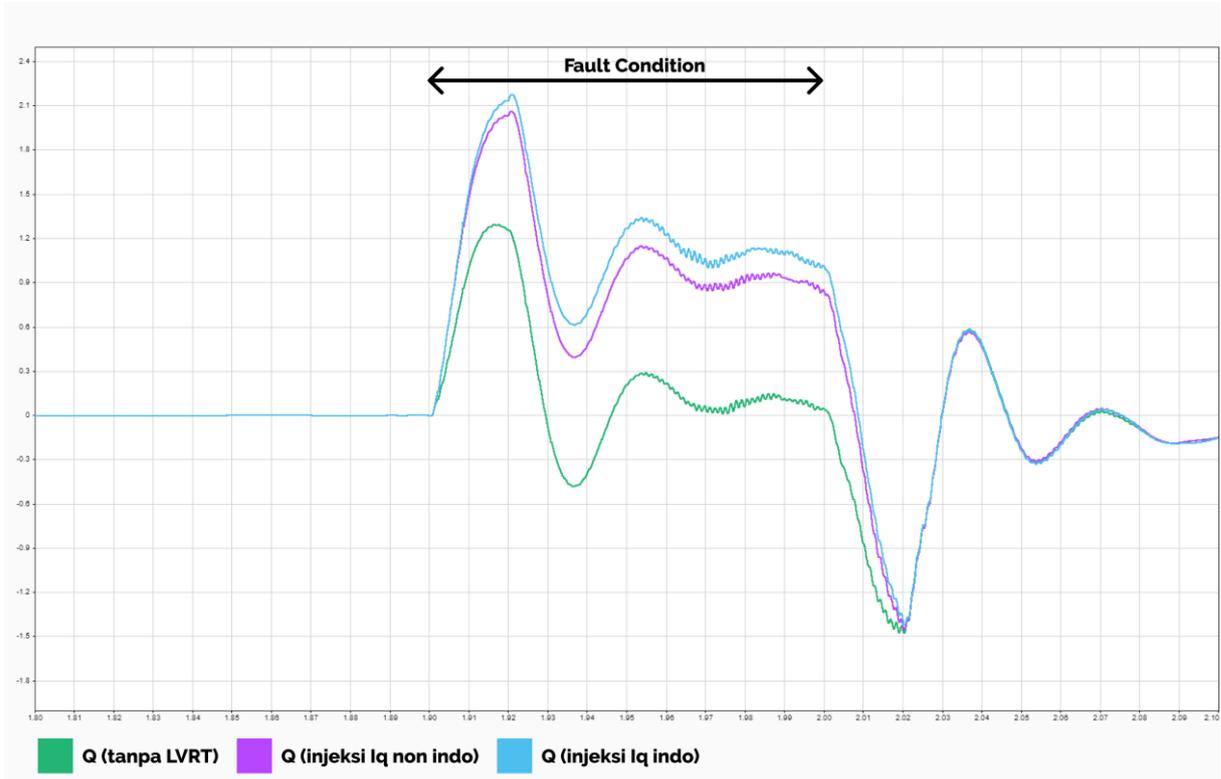
Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,94 p.u, 3,68 p.u, dan 3,39 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,84 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 0,53 p.u.



Gambar 4.12 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 25%



Gambar 4.13 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 25%



Gambar 4.14 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Injeksi Arus Reaktif Referensi pada tegangan drop 25%

Melalui data yang telah didapatkan, dapat diketahui bahwa semakin besar nilai injeksi arus reaktif referensi yang diberikan, nilai tegangan DC link akan semakin besar. Selain itu juga semakin besar nilai injeksi arus reaktif yang diberikan, maka nilai daya reaktif output semakin besar. Nilai daya output minimum berbanding terbalik dengan besar nilai injeksi arus reaktif referensi, semakin tinggi nilai injeksi arus reaktif maka daya output semakin rendah. Injeksi arus reaktif referensi juga cenderung mampu meningkatkan nilai arus maksimum RMS yang masuk ke jaring listrik.

Setelah penginjeksian arus referensi reaktif pada kontrol VSC, nilai Q atau VAR pada sistem PLTS dapat dihasilkan. Pada pengujian 4.2.1 dapat diketahui bahwa sistem ketika mengalami gangguan, mencoba untuk menghasilkan nilai VAR dalam selang waktu 0.02 detik dan mengalami penurunan selanjutnya. Hal itu terjadi karena sistem pada kontrol VSC belum memiliki nilai referensi sebagai kontrol nilai dari VAR sehingga nilai natural dari arus reaktif tidak mampu bertahan dalam periode gangguan. Injeksi arus reaktif referensi memperbolehkan sistem untuk tetap memberikan nilai daya reaktif dalam periode gangguan.

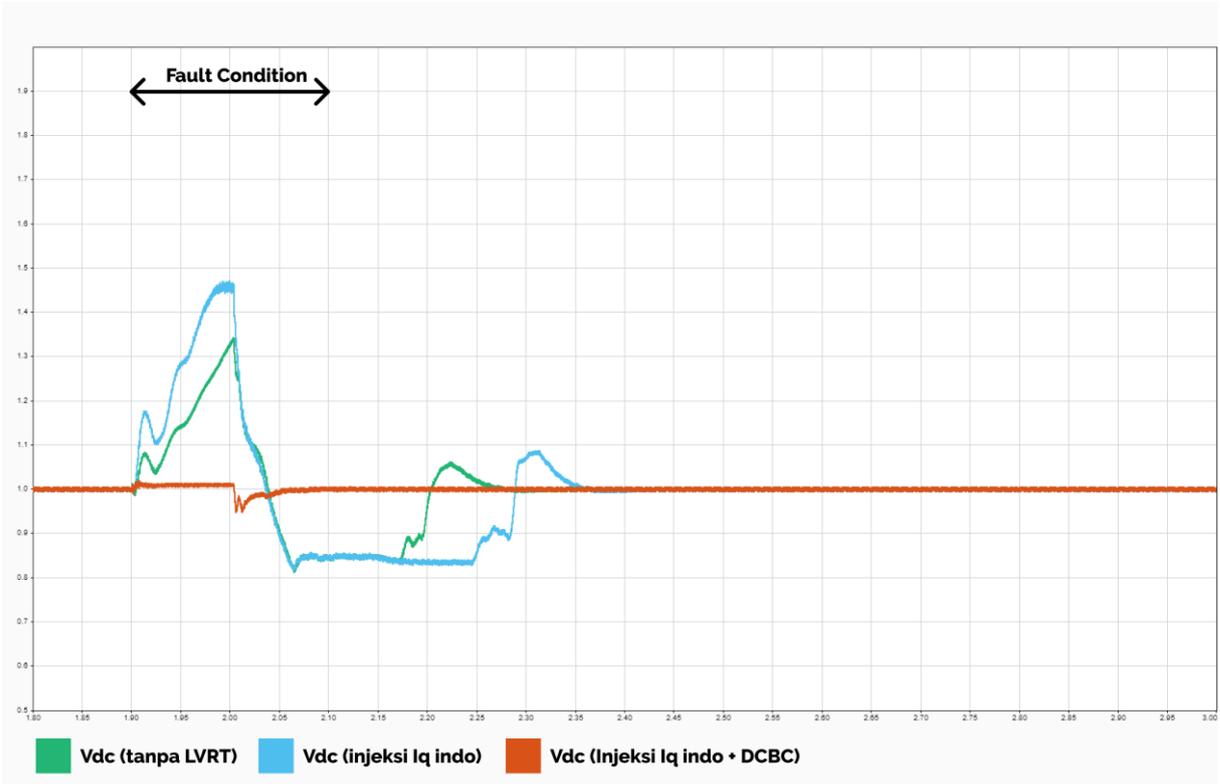
4.2.2 Simulasi Hubung Singkat Sebelum dan Sesudah Penggunaan *Direct Current Brake Chopper*

- Case 1 : Hubung singkat 3 fasa dengan jatuh drop tegangan 86%

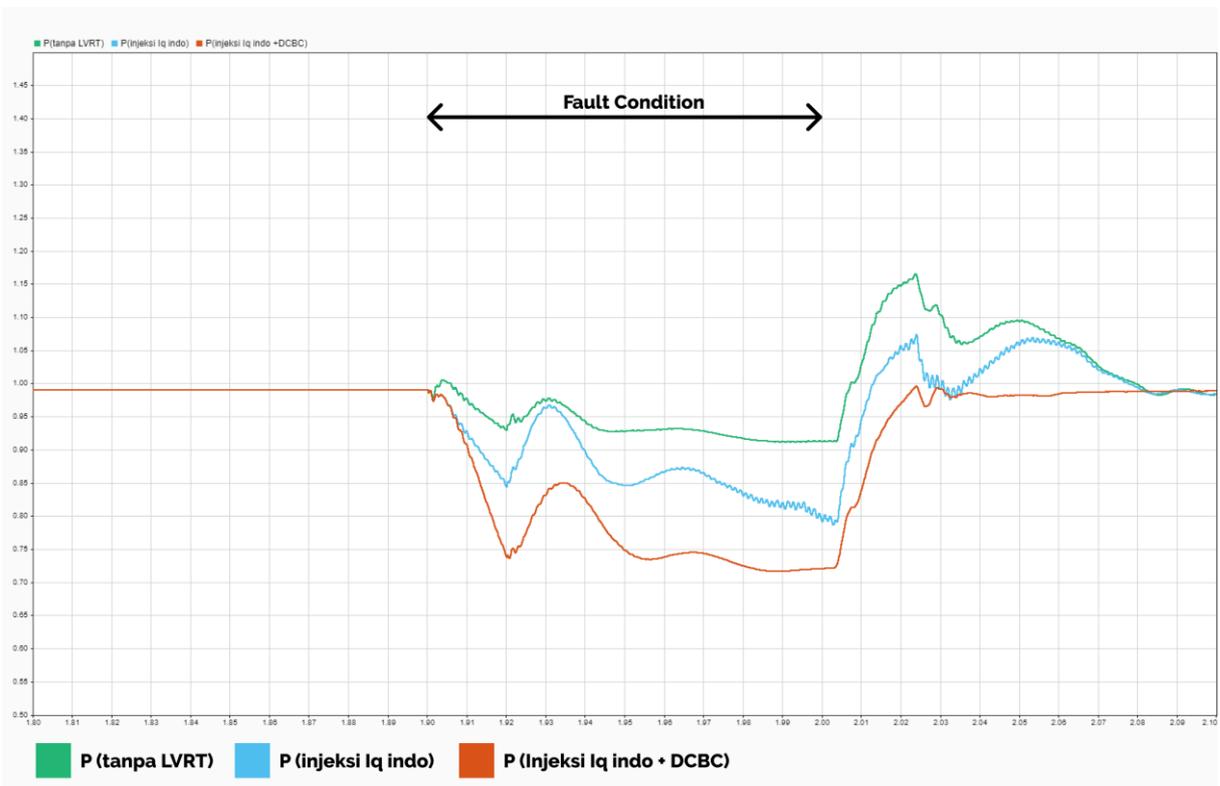
Tabel 4.7 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Penggunaan *Direct Current Brake Chopper* Pada Jatuh Tegangan Drop 86%

Penerapan LVRT	Arus Maksimum RMS(p.u)			Daya Aktif Minimum(p.u)	Daya Reaktif (p.u)	Tegangan DC-link maksimum (p.u)
	Ia	Ib	Ic			
Sebelum Penerapan LVRT	1,3	1,3	1,3	0,91	0,1	1,34
Setelah Penerapan LVRT	1,5	1,4	1,4	0,72	0,9	1,01

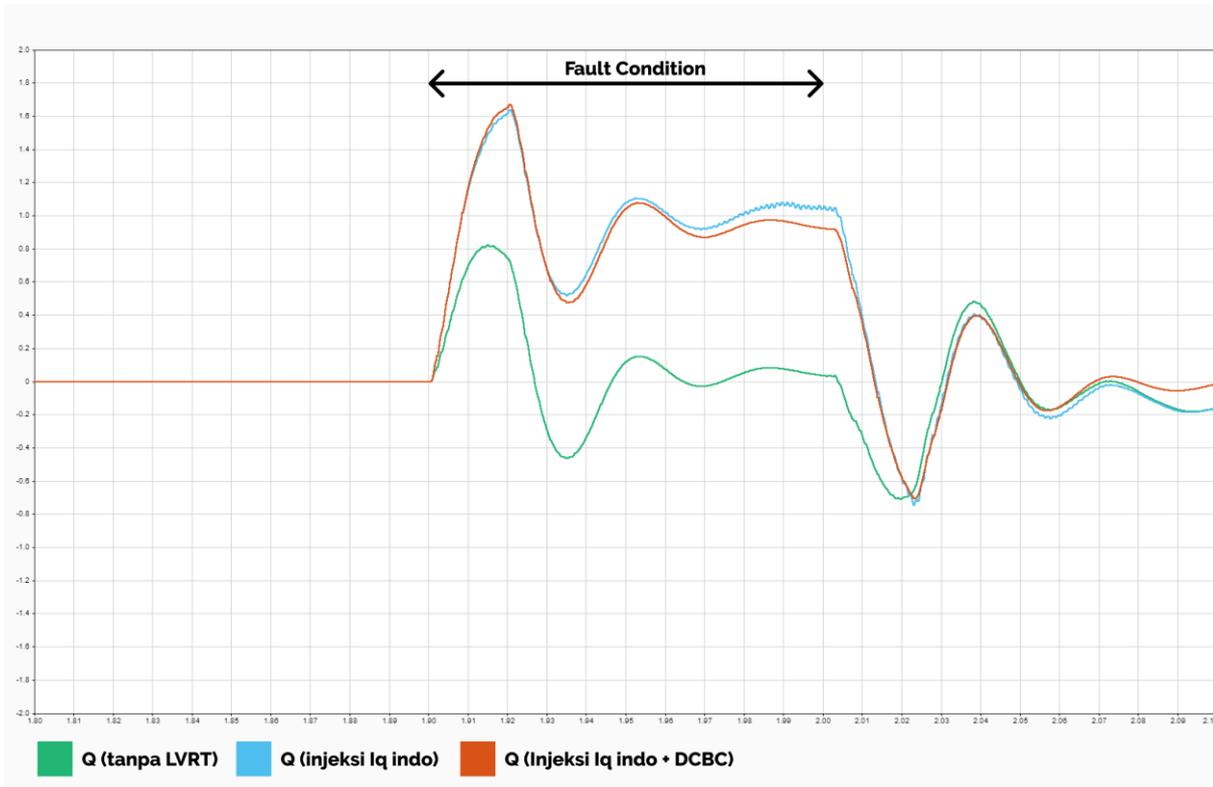
Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia dan penggunaan DC Brake Chopper pada DC-link yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 1,5 p.u, 1,4 p.u, dan 1,4 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,01 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 0,9 p.u.



Gambar 4.15 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 86%



Gambar 4.16 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 86%



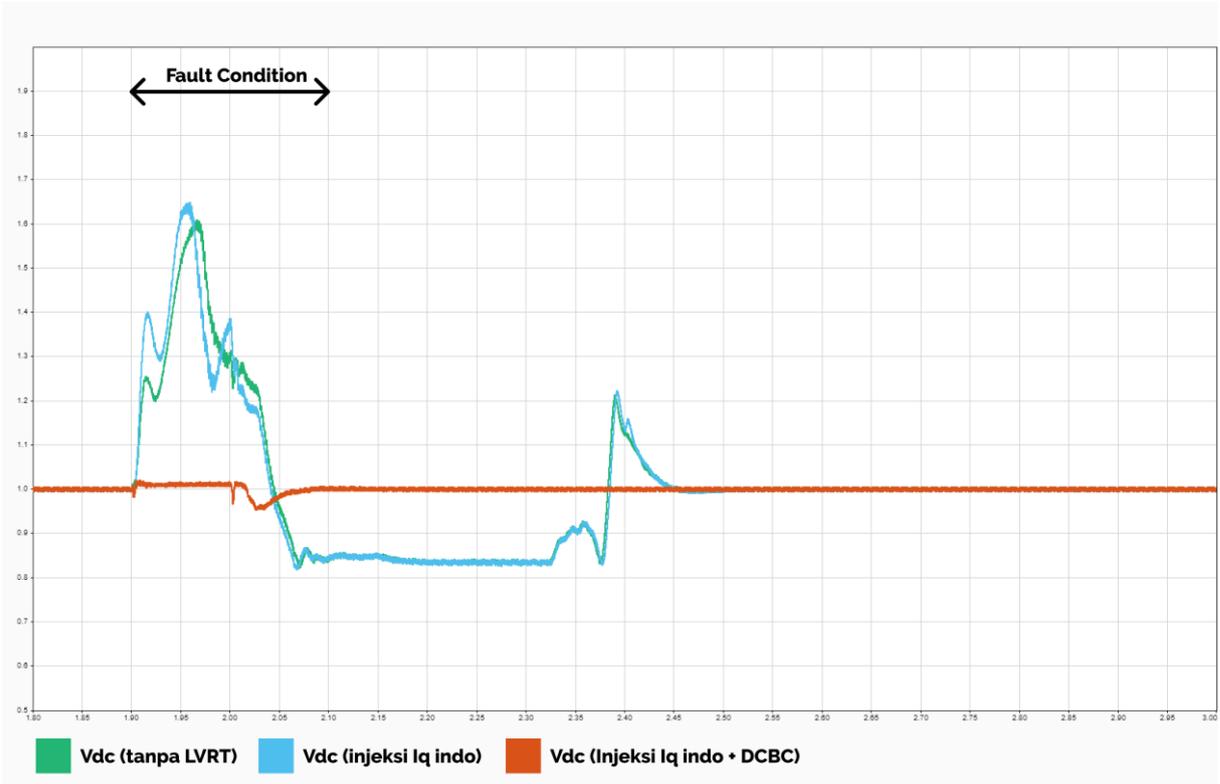
Gambar 4.17 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 86%

- Case 2 : Hubung singkat 3 fasa dengan jatuh drop tegangan 69%

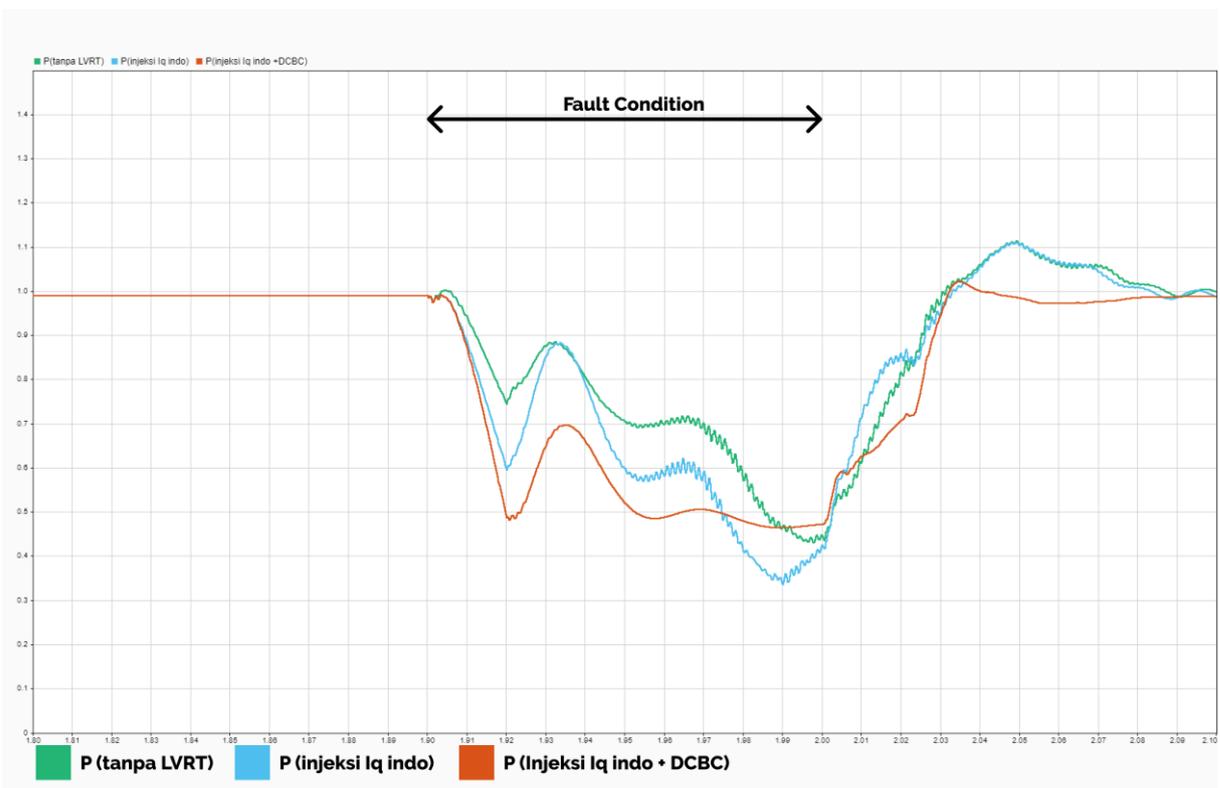
Tabel 4.8 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Penggunaan *Direct Current Brake Chopper* Pada Jatuh Tegangan Drop 69%

Penerapan LVRT	Arus Maksimum RMS(p.u)			Daya Aktif Minimum(p.u)	Daya Reaktif (p.u)	Tegangan DC-link maksimum (p.u)
	Ia	Ib	Ic			
Sebelum Penerapan LVRT	2,1	2,2	2,5	0,5	0,1	1,61
Setelah Penerapan LVRT	2	1,9	1,9	0,47	1,1	1,01

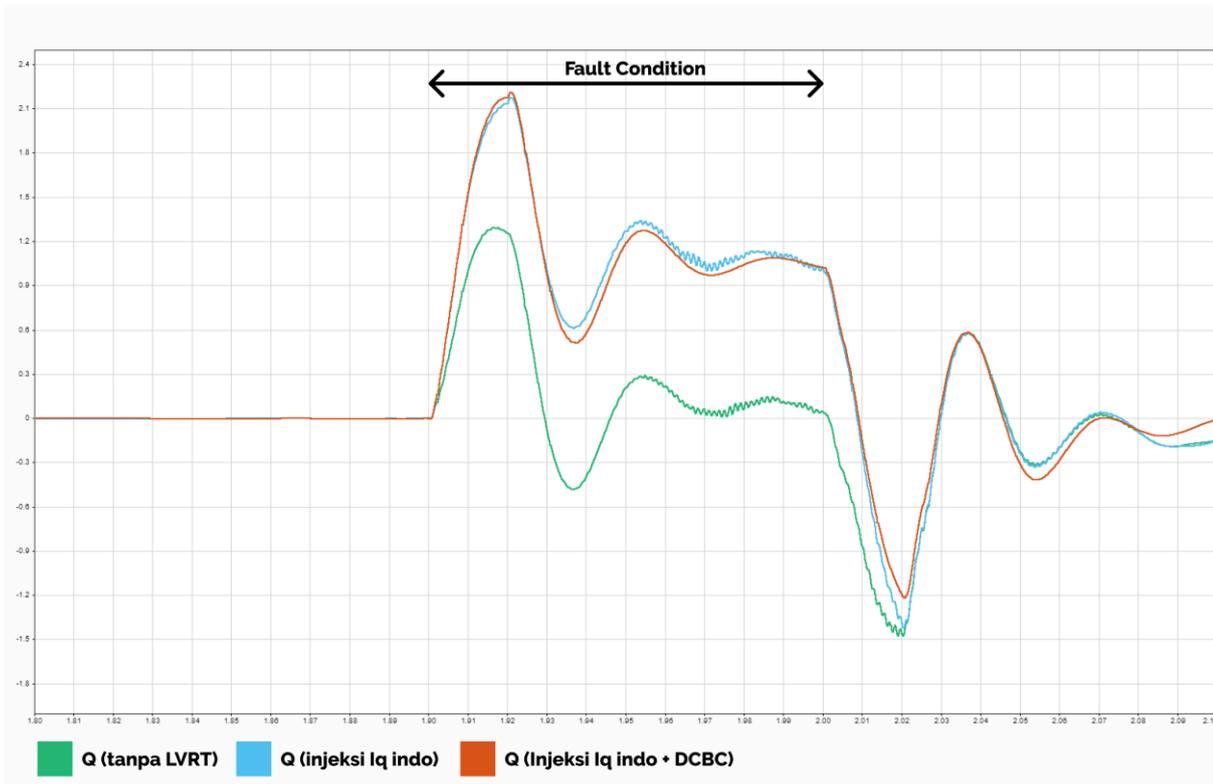
Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia dan penggunaan DC Brake Chopper pada DC-link yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2 p.u, 1,9 p.u, dan 1,9 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,01 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0,47 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 1,1 p.u.



Gambar 4.18 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 69%



Gambar 4.19 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 69%



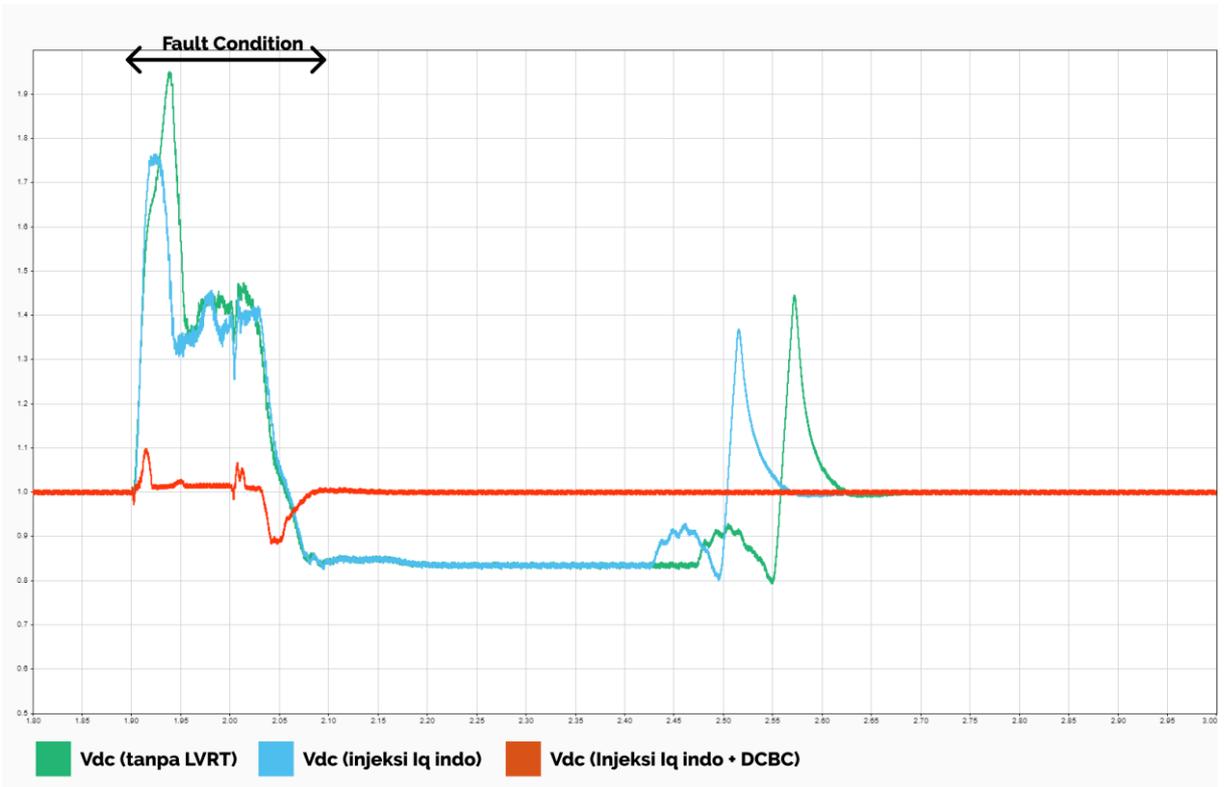
Gambar 4.20 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 69%

- Case 3 : Hubung singkat 3 fasa dengan jatuh drop tegangan 49%

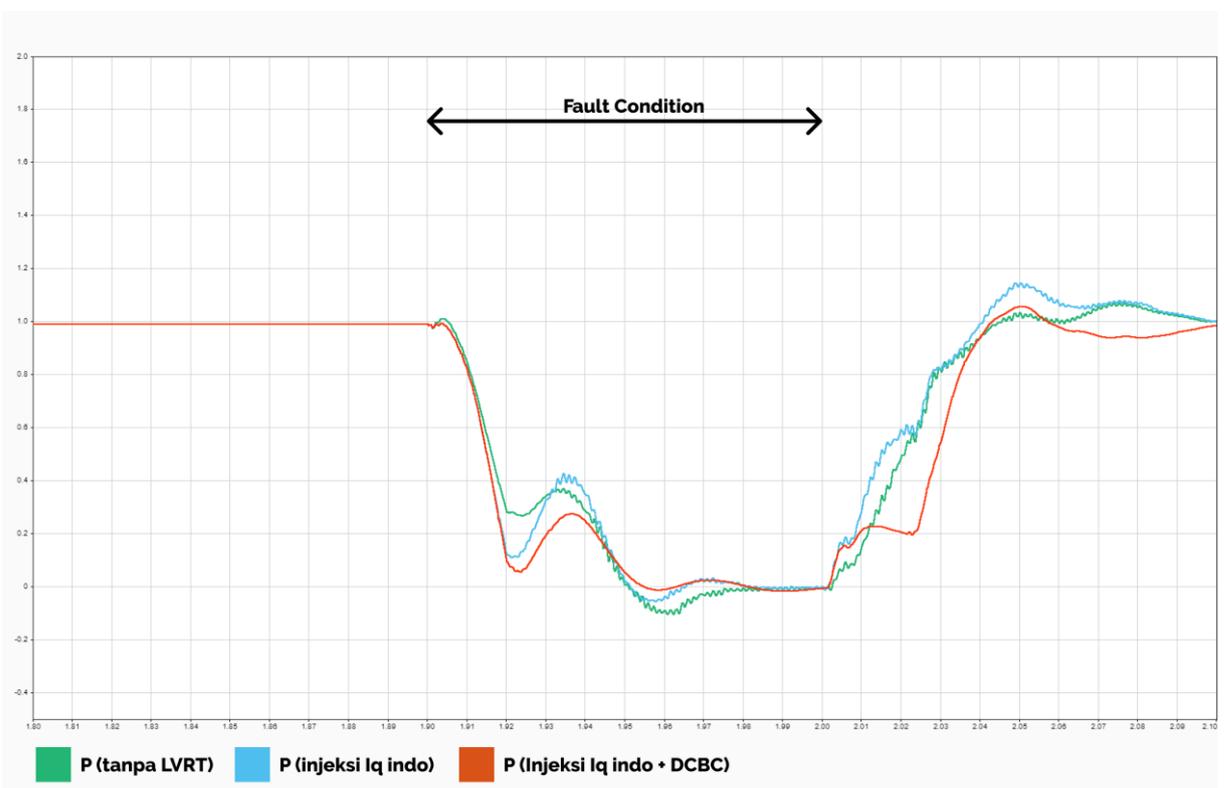
Tabel 4.9 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Penggunaan *Direct Current Brake Chopper* Pada Jatuh Tegangan Drop 49%

Penerapan LVRT	Arus Maksimum RMS(p.u)			Daya Aktif Minimum(p.u)	Daya Reaktif (p.u)	Tegangan DC-link maksimum (p.u)
	Ia	Ib	Ic			
Sebelum Penerapan LVRT	4,3	3,2	2,7	0	0	1,95
Setelah Penerapan LVRT	2,4	2,4	2,4	0	1	1,09

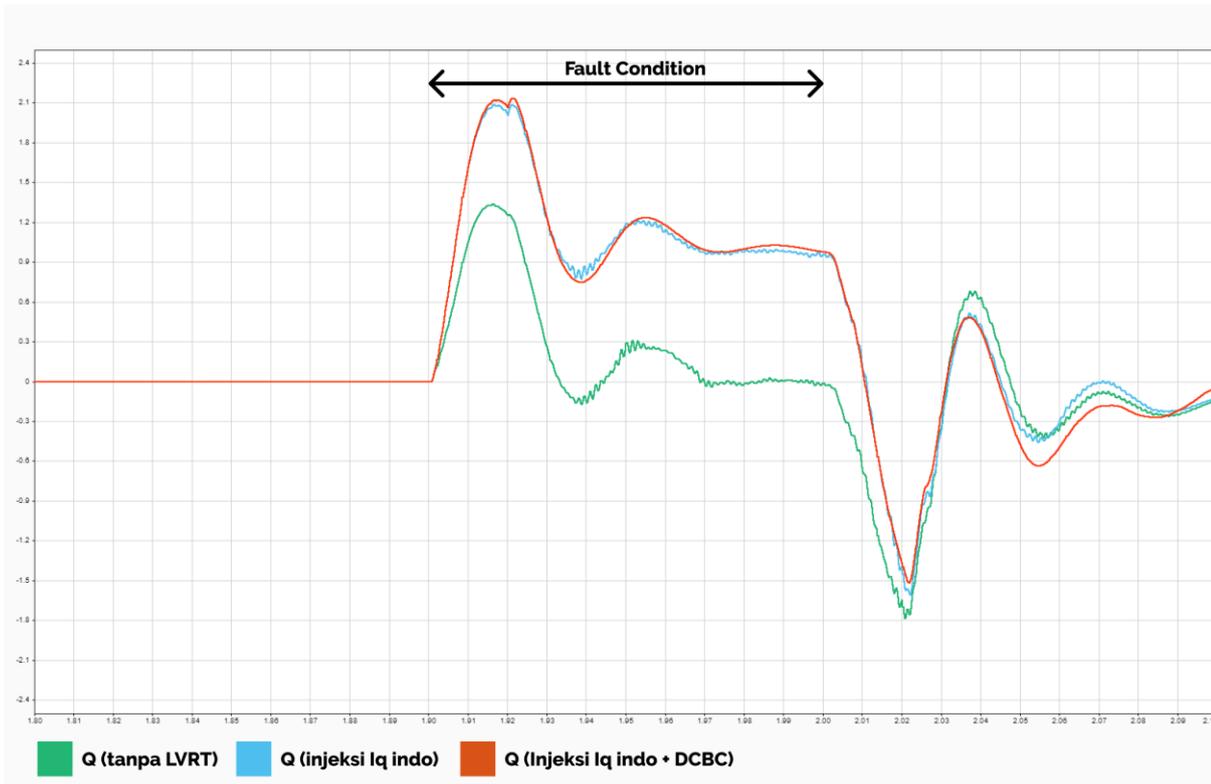
Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia dan penggunaan DC Brake Chopper pada DC-link yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,4 p.u, 2,4 p.u, dan 2,4 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,09 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 1 p.u.



Gambar 4.21 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 49%



Gambar 4.22 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 49%



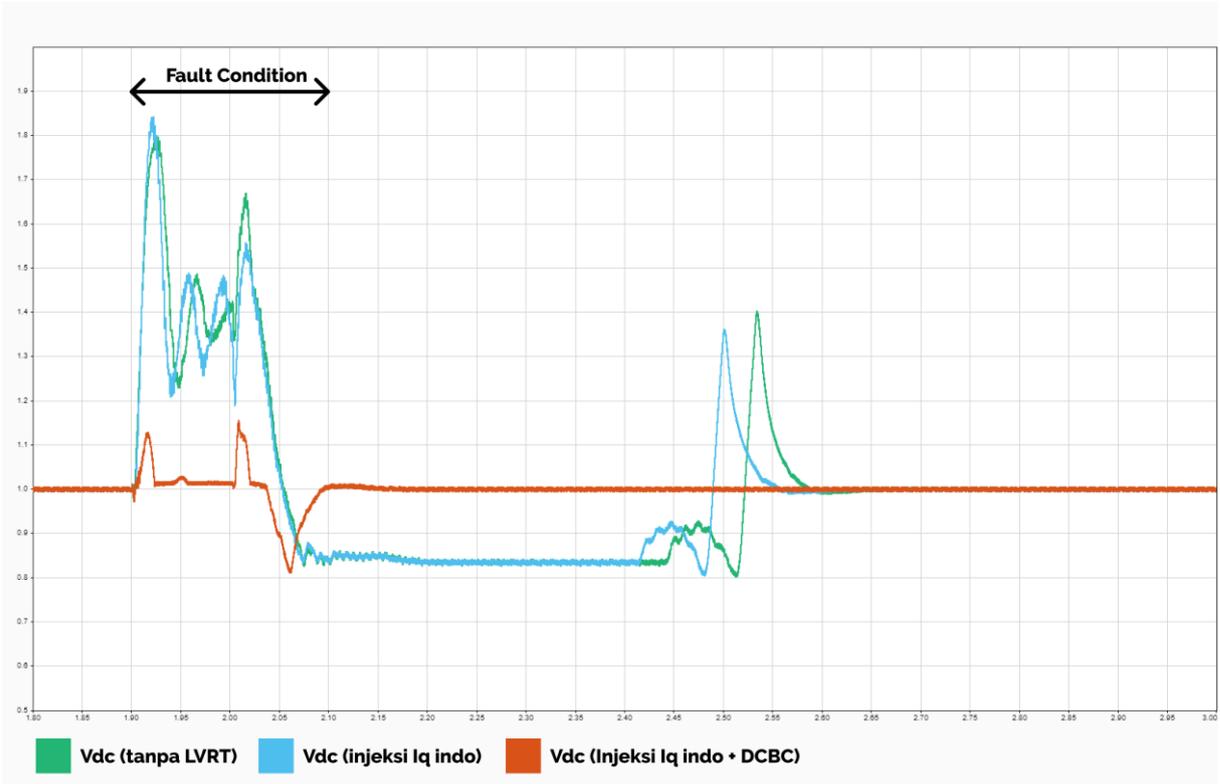
Gambar 4.23 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 49%

- Case 4 : Hubung singkat 3 fasa dengan jatuh drop tegangan 25%

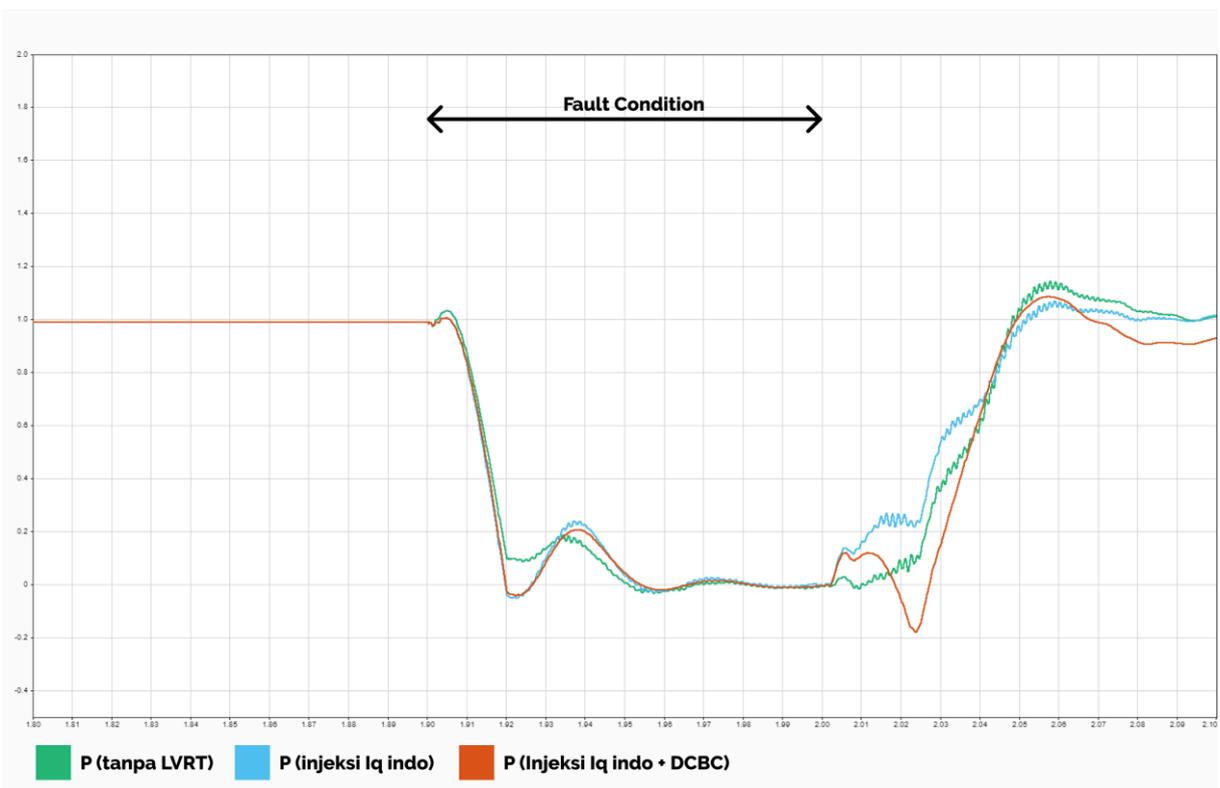
Tabel 4.10 Hasil Data Simulasi Sebelum dan Sesudah Penggunaan *Direct Current Brake Chopper* Pada Jatuh Tegangan Drop 25%

Penerapan LVRT	Arus Maksimum RMS(p.u)			Daya Aktif Minimum(p.u)	Daya Reaktif (p.u)	Tegangan DC-link maksimum (p.u)
	Ia	Ib	Ic			
Sebelum Penerapan LVRT	2,36	3,73	3,37	0	0	1,8
Setelah Penerapan LVRT	2,94	2,75	2,75	0	0,52	1,13

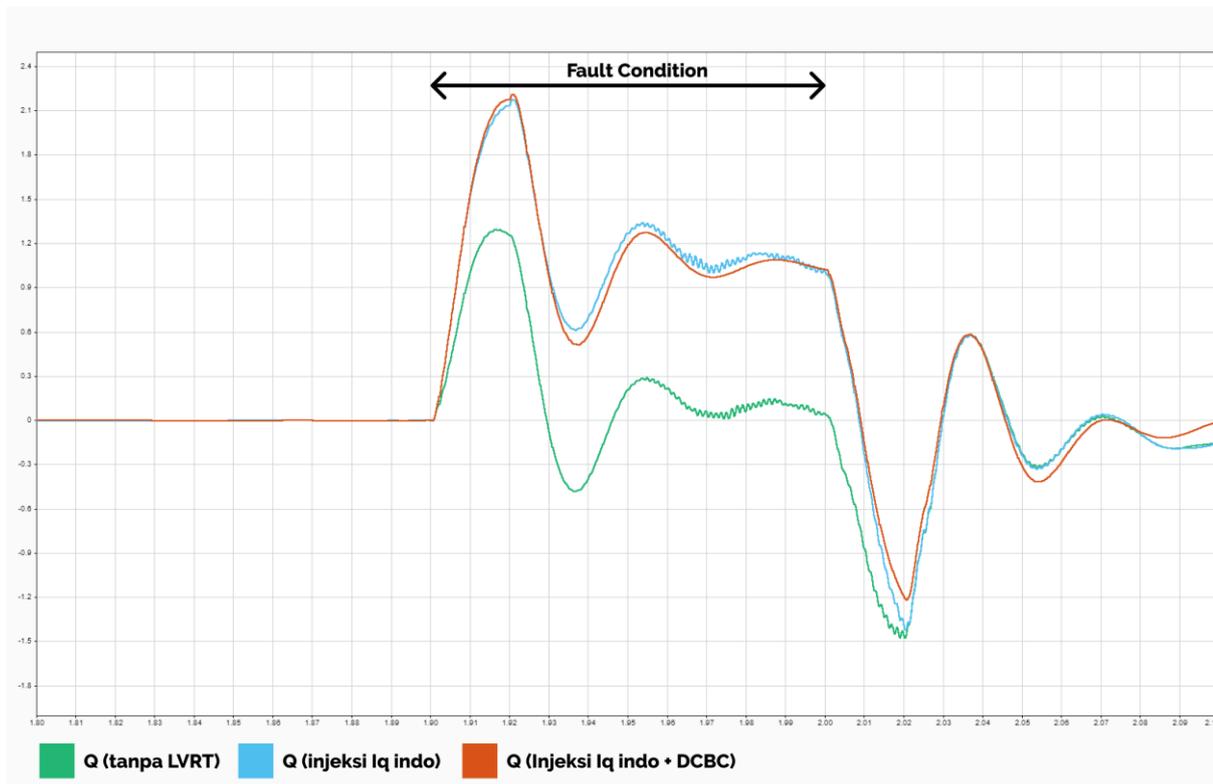
Setelah dilakukan penerapan strategi LVRT dalam bentuk injeksi arus reaktif yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia dan penggunaan DC Brake Chopper pada DC-link yang telah disesuaikan dengan aturan Indonesia, Irms maksimum pada fasa A, fasa B, dan fasa C secara berurutan adalah 2,94 p.u, 2,75 p.u, dan 2,75 p.u. Tegangan pada dc-link mengalami kenaikan selama hubung singkat dengan nilai maksimum nya sebesar 1,09 p.u. Daya aktif mengalami penyusutan nilai terendah hingga 0 p.u dari daya yang terbangkitkan selama hubung singkat berlangsung. Daya reaktif pada sistem mengalami fluktuatif ketika awal dan akhir hubung singkat terjadi dengan nilai stabil pada 1 p.u.



Gambar 4.24 Perbandingan Tegangan Pada DC-link Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 25%



Gambar 4.25 Perbandingan Daya Aktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 25%



Gambar 4.26 Perbandingan Daya Reaktif Output Sebelum dan Sesudah Penggunaan DC-BC pada tegangan drop 25%

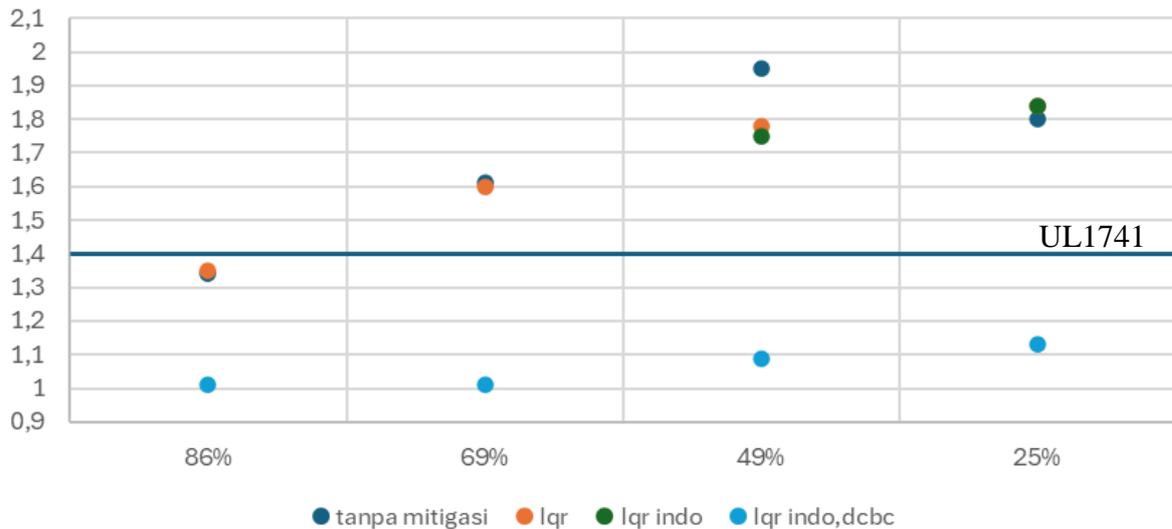
Setelah melakukan penyesuaian injeksi arus reaktif dengan permintaan kode grid Indonesia dan adanya nilai daya reaktif, injeksi arus reaktif pada sistem PLTS menyebabkan kenaikan nilai arus maksimum RMS dibandingkan ketika sistem belum diberikan injeksi arus reaktif referensi ketika periode gangguan. Strategi injeksi yang bertujuan untuk memenuhi permintaan kode grid perlu disandingkan dengan metode lain untuk mengatasi lonjakan arus maksimum RMS. Perlu dipertimbangkan bahwa ketika gangguan terjadi, lonjakan tegangan pada DC link sudah tidak sesuai dengan standar dari tegangan input dari inverter yaitu UL1741. Standard UL1741 memperbolehkan input tegangan pada inverter dengan nilai 135% dari tegangan nominalnya. Berdasarkan data yang telah didapatkan, berikut adalah keadaan tegangan pada DC link dari sistem PLTS ketika periode gangguan.

Berdasarkan pengujian pada sistem ketika tanpa mitigasi DC-BC tidak memenuhi standard UL1741. Pada gambar 4.27, dapat dijelaskan bahwa ketika terjadi gangguan, PLTS beroperasi dengan nilai tegangan DC yang tidak sesuai dengan standar. Terjadinya kenaikan tegangan DC link disebabkan kontrol MPPT yang menyesuaikan agar daya yang tersalurkan tetap pada nilai nominalnya sehingga tegangan diberikan *boost* dan mengakibatkan kenaikan tegangan DC link.

Penggunaan DC-BC dilakukan pada sisi DC link agar tegangan berlebih dapat diatasi. Pemasangan ini bertujuan ketika dalam periode gangguan, tegangan DC link terjaga pada nilai nominalnya yaitu dengan cara menyalurkan sebagian energi akibat lonjakan tegangan berlebih ke *brake resistor*.

Pada gambar 4.27, setelah penerapan DC-BC dilakukan, tegangan berlebih dapat diatasi dan secara bersamaan arus berlebih pada sisi AC juga teratasi. Hal tersebut karena sebagian energi yang muncul akibat gangguan teralirkan ke DC-BC sehingga pada pengujian pada strategi DC-BC, lonjakan arus maksimum RMS berkurang secara signifikan pada waktu 0.02

detik pada saat gangguan terjadi. Hal ini juga bisa menjadi cara untuk menjaga peralatan listrik pada sistem PLTS ketika terjadi gangguan pada hubung singkat. Di lain sisi, dari penggunaan DC-BC adalah daya aktif dari PLTS harus mengalami penurunan sebagai kompensasi adanya energi yang tersalurkan ke DC-BC tetapi melalui penggunaannya juga daya aktif yang tersalurkan lebih stabil dibandingkan sebelum penggunaan DC-BC pada sistem PLTS. Penerapan strategi LVRT dengan menggunakan DC-BC dirasa perlu dan dapat digabungkan dengan strategi injeksi arus reaktif pada kontrol VSC. Setelah digunakan startegi LVRT, sistem PLTS dapat bekerja sesuai dengan permintaan kode grid Indonesia dan sesuai standard UL1741.



Gambar 4.27 Tegangan Pada DC link Sesudah Penggunaan DC-BC

Pada case 1, nilai tegangan DC-link mengalami perbaikan sebesar 0,33 setelah menggunakan strategi LVRT. Penggunaan LVRT dapat mengembalikan nilai nominal tegangan dalam waktu 55 ms sedangkan tanpa adanya strategi LVRT dibutuhkan waktu 276 ms. Pada case 2, nilai arus RMS maksimum fasa 'a', 'b', dan 'c' secara berurutan mengalami perbaikan sebesar 0,1 p.u, 0,3 p.u, dan 0,6 p.u. Tegangan DC-link mengalami perbaikan sebesar 0,6 p.u setelah menggunakan strategi LVRT. Penggunaan LVRT dapat mengembalikan nilai nominal tegangan dalam waktu 77 ms sedangkan tanpa adanya strategi LVRT dibutuhkan waktu 435 ms. Pada case 3, nilai arus RMS maksimum fasa 'a', 'b', dan 'c' secara berurutan mengalami perbaikan sebesar 1,9 p.u, 0,8 p.u, dan 0,3 p.u. Tegangan DC-link mengalami perbaikan sebesar 0,86 setelah menggunakan strategi LVRT. Penggunaan LVRT dapat mengembalikan nilai nominal tegangan dalam waktu 89 ms sedangkan tanpa adanya strategi LVRT dibutuhkan waktu 625 ms. Pada case 4, nilai arus RMS maksimum fasa 'b' dan 'c' secara berurutan mengalami perbaikan sebesar 0,98 p.u dan 0,62 p.u. Tegangan DC-link mengalami perbaikan sebesar 0,67 p.u setelah menggunakan strategi LVRT. Penggunaan LVRT dapat mengembalikan nilai nominal tegangan dalam waktu 100 ms sedangkan tanpa adanya strategi LVRT dibutuhkan waktu 473 ms.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Dari hasil tugas akhir yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Strategi LVRT melalui penggunaan arus reaktif referensi dilakukan agar memenuhi permintaan dari kode grid. Ketika sistem PLTS yang tidak dapat memberikan nilai daya reaktif selama durasi gangguan, penerapan strategi LVRT mampu memberikan nilai daya reaktif output melalui injeksi arus reaktif referensi.
2. Penggunaan DC-BC sebagai strategi LVRT berhasil dilakukan dan mampu mengatasi tegangan dan arus berlebih selama periode gangguan. Penerapan dilakukan untuk memenuhi standard tegangan input maksimum dari inverter (UL1741) yang mengharuskan bahwa lonjakan tegangan input inverter maksimum adalah 135% dari nilai tegangan nominal DC.
3. Tegangan berlebih tersebut mengalami perbaikan sebesar 33%, 60%, 86%, dan 67% dan waktu yang dibutuhkan sistem agar nilai tegangan input kembali ke kondisi *steady state* setelah penggunaan strategi LVRT mengalami peningkatan atau lebih cepat sebesar 221 ms, 358 ms, 536 ms, dan 373 ms secara berurutan dari case 1 hingga case 4.
4. Melalui tegangan input DC tersebut, lonjakan arus pada sisi AC input grid mengalami penurunan setelah 0.02 s sesaat terjadi gangguan.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian yang telah dilakukan terhadap sistem PLTS yang terhubung dengan jaring listrik sebagai berikut:

1. Strategi LVRT khususnya pada sistem PLTS mampu dikolaborasikan dengan strategi LVRT lain. Kontrol lebih modern memungkinkan digunakan agar sistem PLTS dapat bertahan selama periode gangguan melalui kontrol dari MPPT atau VSC. Penggunaan peralatan eksternal dibutuhkan untuk dapat mengembalikan nilai tegangan nominal.
2. Sistem LVRT yang digunakan masih memerlukan delay selama kurang lebih 0.02 detik sehingga arus maksimum RMS akibat gangguan belum mampu sepenuhnya teratasi. Diperlukan sebuah kontrol yang lebih baik sehingga sistem dapat mengatasi permasalahan dalam durasi delay tersebut.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Alrumayh, O., Sayed, K., & Almutairi, A. (2023). LVRT and reactive power/voltage support of utility-scale PV power plants during disturbance conditions. *Energies*, *16*(7), 3245.
- Al-Shetwi, A. Q., & Sujod, M. Z. (2018). Grid-connected photovoltaic power plants: A review of the recent integration requirements in modern grid codes. *International Journal of Energy Research*, *42*(5), 1849-1865.
- Al-Shetwi, A. Q., & Sujod, M. Z. (2018). Modeling and design of photovoltaic power plant connected to the MV side of Malaysian grid with TNB technical regulation compatibility. *Electrical Engineering*, *100*, 2407-2419.
- Al-Shetwi, A. Q., & Sujod, M. Z. (2018). Modeling and control of grid-connected photovoltaic power plant with fault ride-through capability. *Journal of Solar Energy Engineering*, *140*(2), 021001.
- Al-Shetwi, A. Q., Sujod, M. Z., Blaabjerg, F., & Yang, Y. (2019). Fault ride-through control of grid-connected photovoltaic power plants: A review. *Solar Energy*, *180*, 340-350.
- Al-Shetwi, A. Q., & Sujod, M. Z. (2019). Voltage sag detection in grid-connected photovoltaic power plant for low voltage ride-through control. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*, *12*(4), 384-392.
- Chen, X., Cui, Y., Wang, X., & Li, S. (2017, October). Research of low voltage ride through control strategy in photovoltaic (PV) grid. In 2017 Chinese Automation Congress (CAC) (pp. 5146-5150). IEEE.
- Da Silva, E. R., & Elbuluk, M. E. (2013). Fundamentals of power electronics. In *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems: A Sourcebook of Topologies, Control and Integration* (pp. 7-59). London: Springer London.
- Deshmukh, A. N., & Chandrakar, V. K. (2021, January). Power quality issues and their mitigation techniques in grid tied Solar Photovoltaic Systems-A review. In 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI) (pp. 1-6). IEEE.
- Han, Y., Feng, Y., Yang, P., Xu, L., Xu, Y., & Blaabjerg, F. (2019). Cause, classification of voltage sag, and voltage sag emulators and applications: A comprehensive overview. *IEEE Access*, *8*, 1922-1934.
- Hasanah, A. W., Koerniawan, T., & Yuliansyah, Y. (2018). Kajian Kualitas Daya Listrik PLTS Sistem Off-Grid Di STT-PLN. *Energi & Kelistrikan*, *10*(2), 93-101.
- IEEE Std 3002.3. (2016). Recommended Practice for Conduction Short-Circuit Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power System
- Khan, M. A., & Kim, J. (2023). Smart Sag Detection and Reactive Current Injection Control for a PV Microgrid under Voltage Faults. *Energies*, *16*(19), 6776.

- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. 2020. Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (*Grid Code*). Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral. Indonesia.
- Li, L., Zhou, H., Luo, F., Lin, X., & Han, Y. (2018, December). Control strategy for low voltage ride through (LVRT) operation of two-stage photovoltaic power generation system. In *2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Mohamed, S. R., Jeyanthi, P. A., Devaraj, D., & Bouzguenda, M. (2019, April). Performance comparison of active and passive LVRT strategies for grid connected PV systems. In *2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Mohamed, S. R., Jeyanthi, P. A., & Devaraj, D. (2019, December). Low Voltage Ride-Through Capability Enhancement of Grid-Connected Photovoltaic Systems-A Hybrid Control Approach. In *2019 IEEE International Conference on Clean Energy and Energy Efficient Electronics Circuit for Sustainable Development (INCCES)* (pp. 1-6). IEEE.
- Mohamed, S. R., Jeyanthi, P. A., Devaraj, D., Shwehdi, M. H., & Aldalbahi, A. (2019). DC-link voltage control of a grid-connected solar photovoltaic system for fault ride-through capability enhancement. *Applied Sciences*, 9(5), 952.
- Mohammedsaeed, E. K., & Jia, K. (2017, October). Comparison of some low voltage ride-through strategies. In *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 152-157). IEEE.
- Penangsang, O., & Aryani, N. K. (2017). Penentuan Lokasi Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Tegalsari Surabaya dengan Metode Impedansi Berbasis GIS (Geographic Information System). *Jurnal Teknik ITS*, 6(1), B66-B71.
- Rahmaniar, R., Khairul, K., Junaidi, A., & Sari, D. K. (2023). Model and Analysis of Photovoltaic Modules with Irradiation and Temperature Variations using Simulation Technology. *Procedia of Engineering and Life Science*, 4.
- Ramadhana, R. R., Iqbal, M., Hafid, A., & Adriani, A. (2022). Analisis PLTS On Grid. *Vertex Elektro*, 14(1), 12-25.
- Sampeallo, A. S., Nursalim, N., & Fischer, P. J. (2019). Analisis Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Pemakaian Sendiri Pltu Bolok PT. Smse (Ipp) Unit 3 dan 4 Menggunakan Software Etap 12.6. 0. *Jurnal Media Elektro*, 76-85.
- Sianipar, R. (2014). Dasar Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya. *Jetri: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*.
- Soedibyo. 2015. *Pembangkitan Tenaga Listrik*. Surabaya: ITS Press.
- Song, J., Cheah-Mane, M., Prieto-Araujo, E., & Gomis-Bellmunt, O. (2023). Short-circuit analysis of grid-connected PV power plants considering inverter limits. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 149, 109045.

BIODATA PENULIS



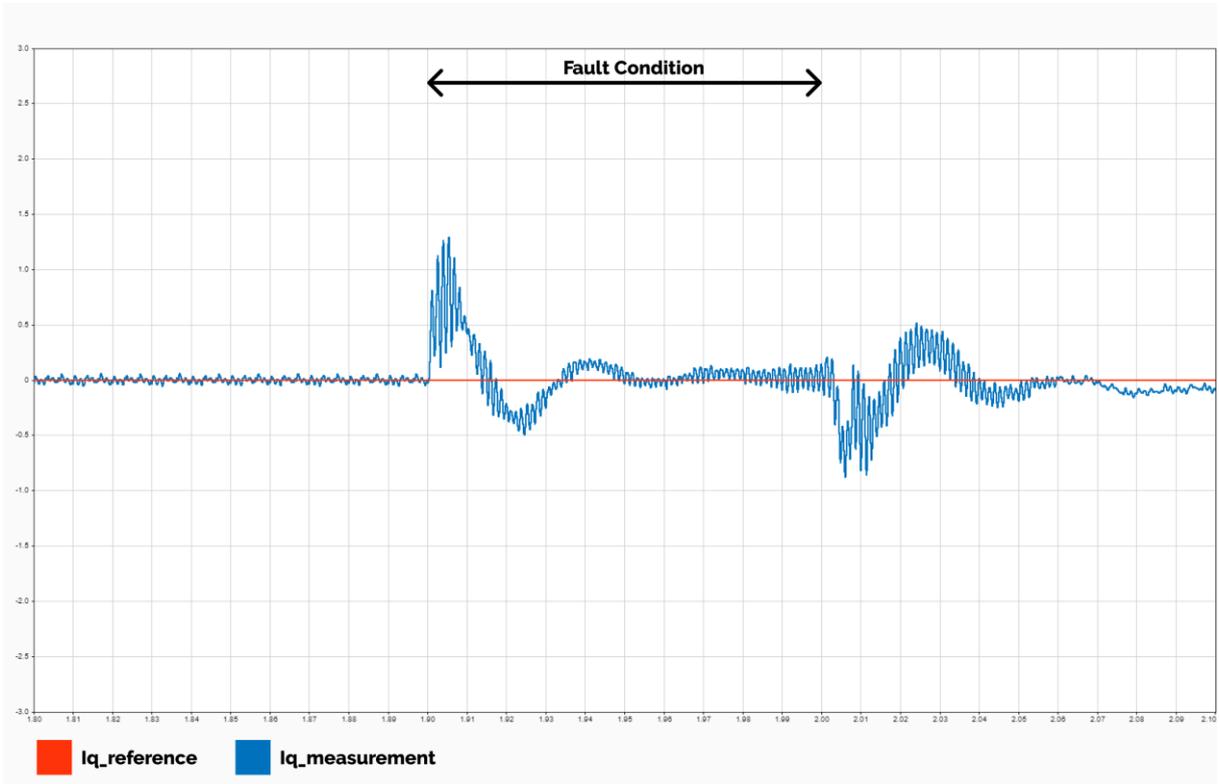
Penulis dilahirkan di Bekasi, 17 Januari 2003, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDIT An-Nur, SMPIT Al-Kausar Sukabumi, dan SMA PU Al Bayan Cibadak, Sukabumi. Setelah lulus dari SMA PU Al Bayan, penulis melanjutkan perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan diterima di Departemen Teknik Elektro terdaftar NRP 5022201093. Pada masa perkuliahan, selain kegiatan akademik, penulis sempat aktif pada kegiatan volunteering di ITS Global Engagement pada divisi media dan informasi. Selain itu juga penulis sempat mengikuti kegiatan internasional yaitu Engineers in Action dengan mahasiswa NTUST Taiwan di Indonesia, kegiatan *short program* “Summer Program 2023 by Faculty of Engineering” di NCHU Taiwan, kegiatan pertukaran pelajar di UMP Malaysia, dan kegiatan magang dari departemen Teknik Elektro ITS di Jepang.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

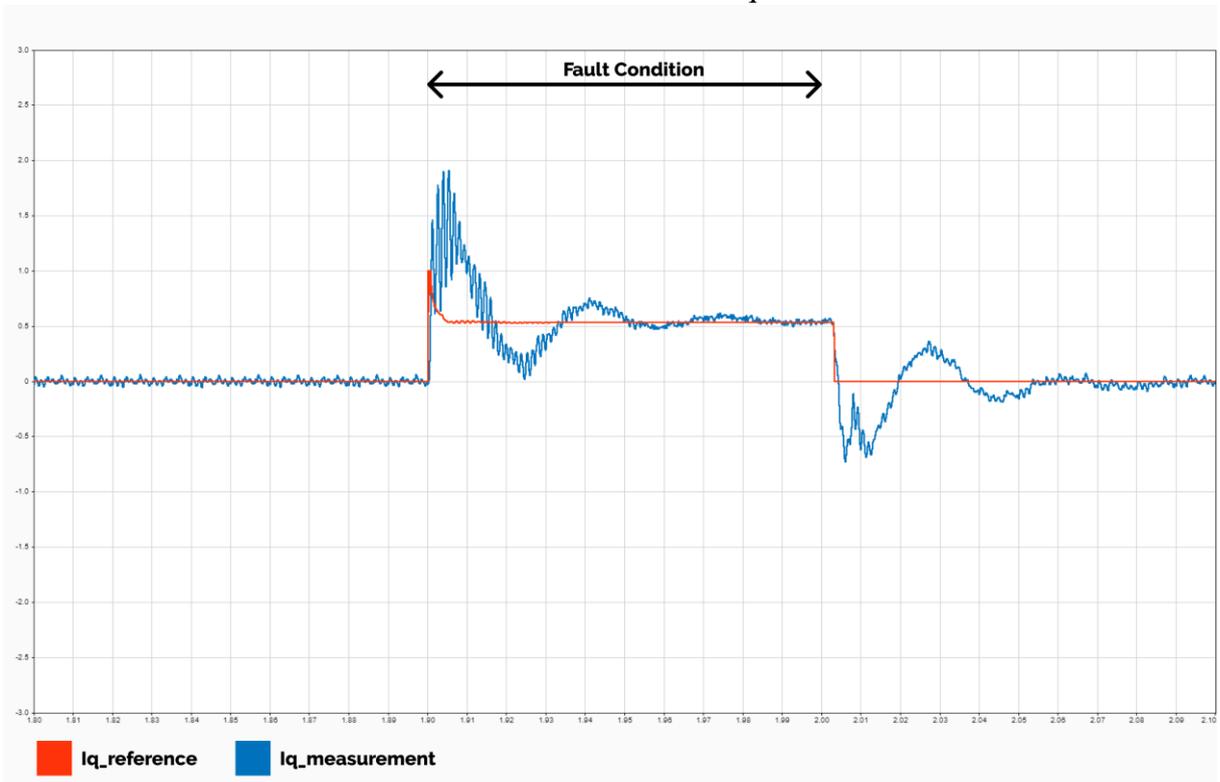
LAMPIRAN

Iq_real dan Iq_reference

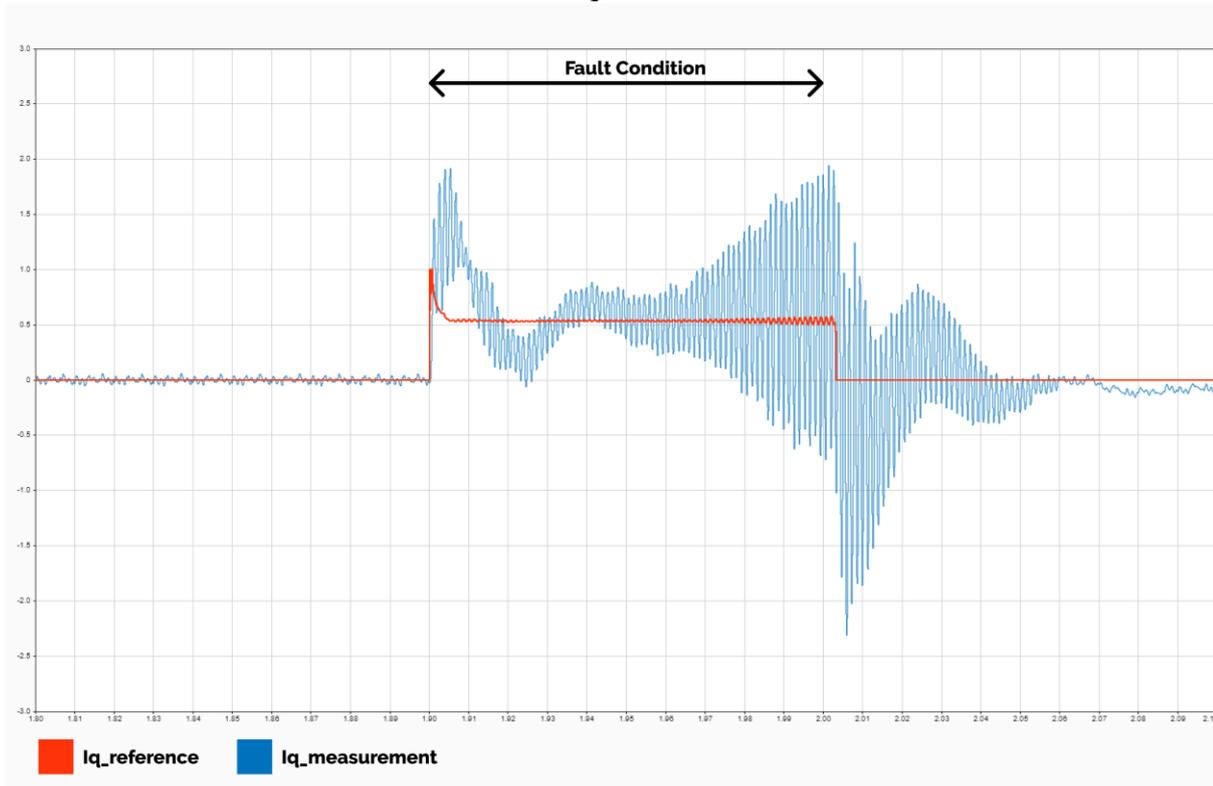
- 86%



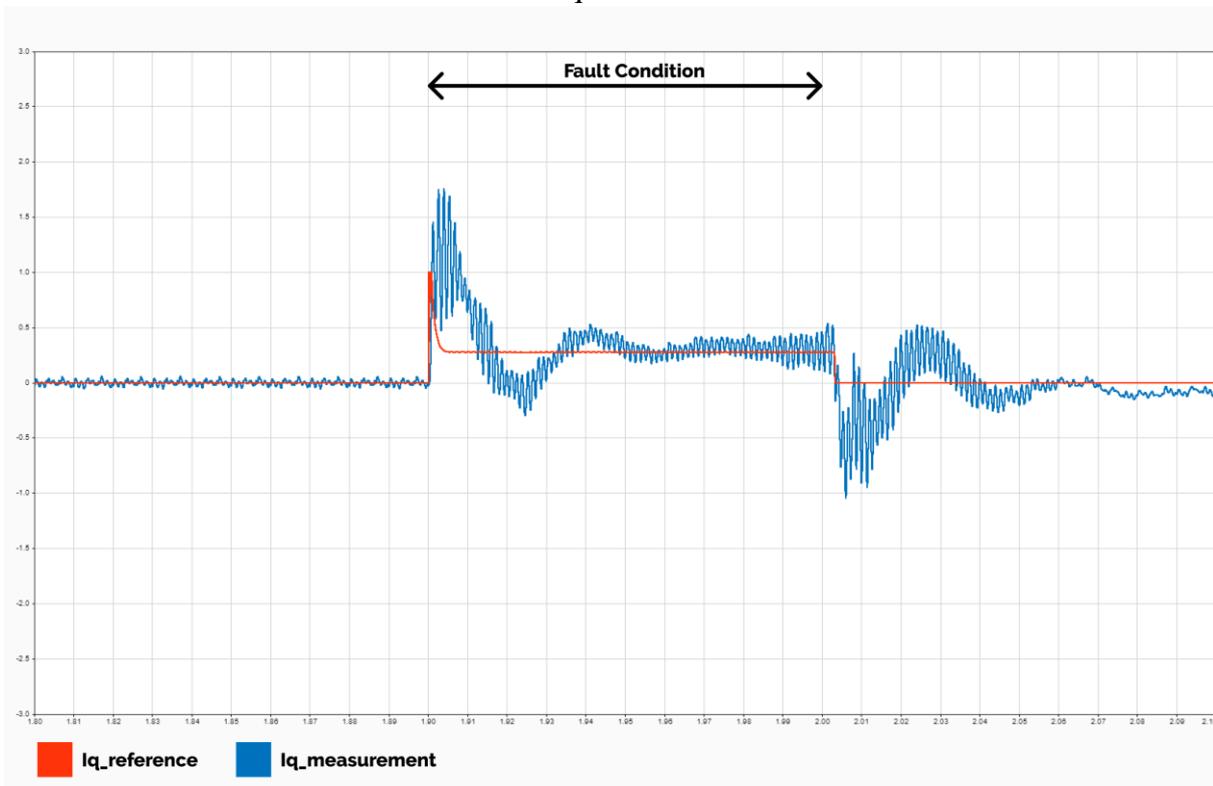
Sebelum Pemberian Iq



Pemberian Iq Aturan Jerman

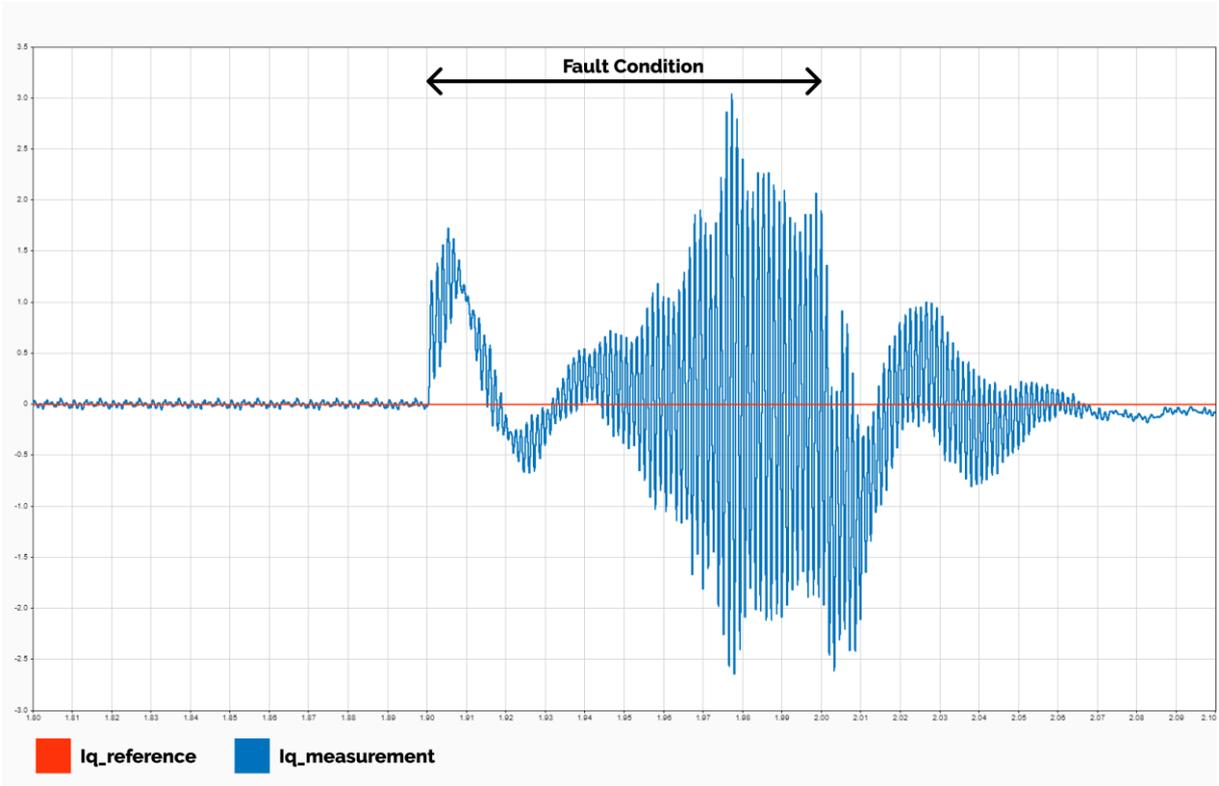


Pemberian Iq Aturan Indonesia

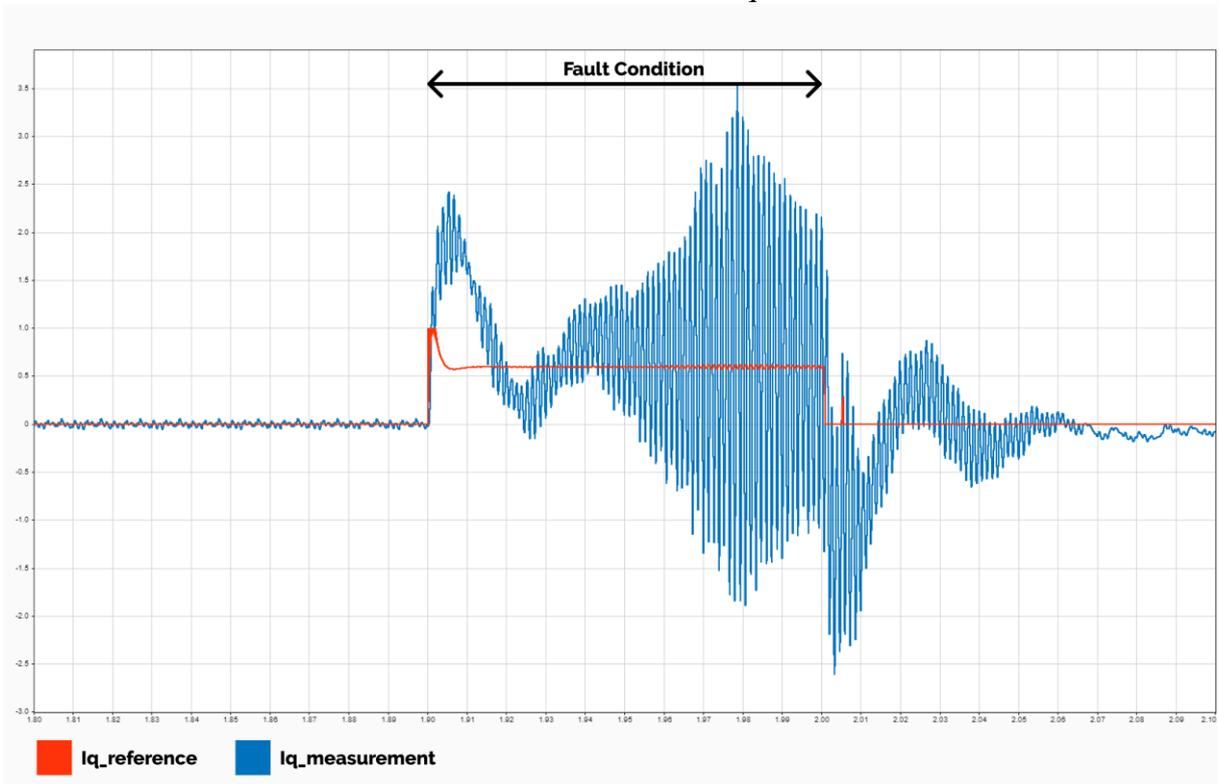


Pemberian Iq Aturan Indonesia + DCBC

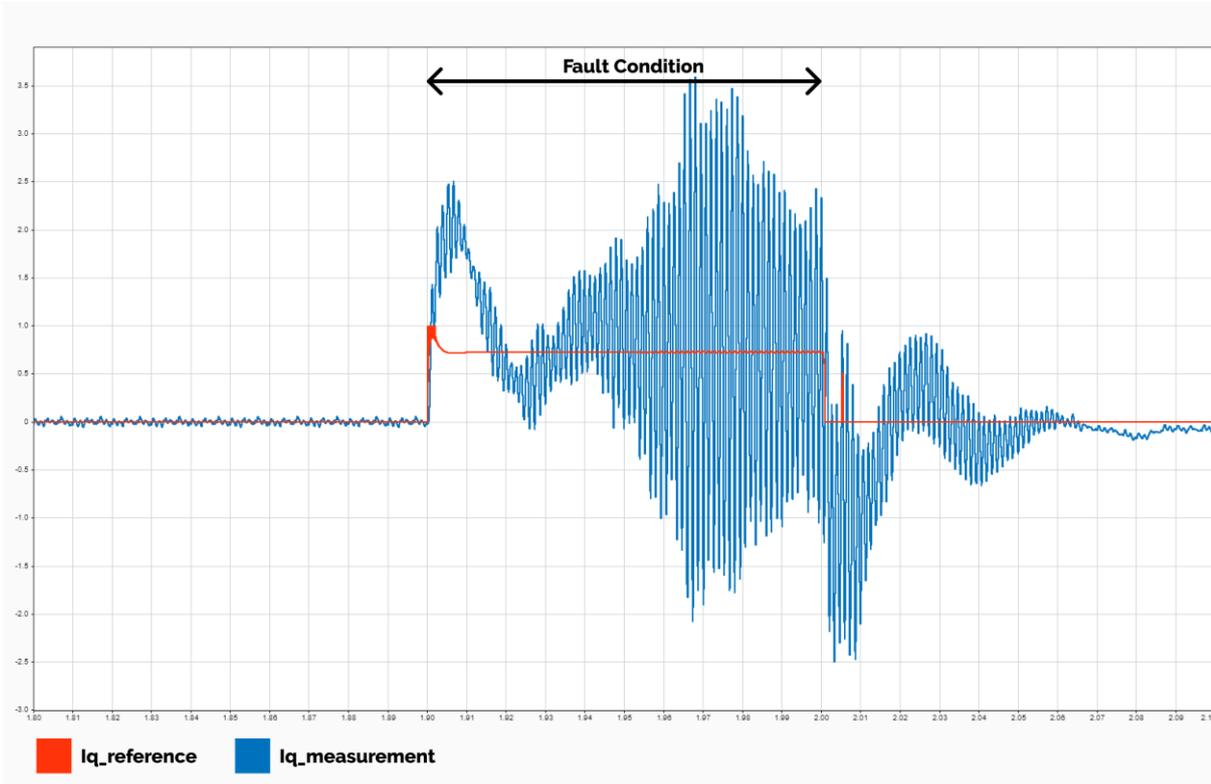
- 69%



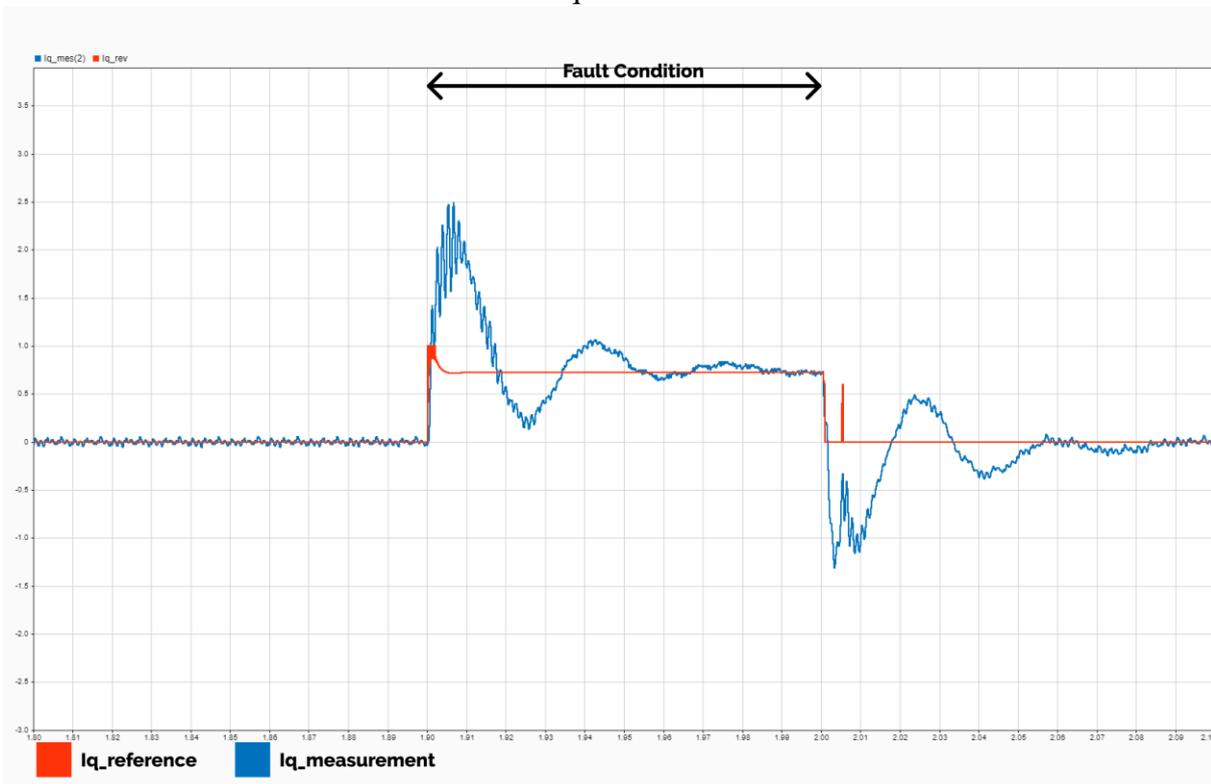
Sebelum Pemberian i_q



Pemberian i_q Aturan Jerman

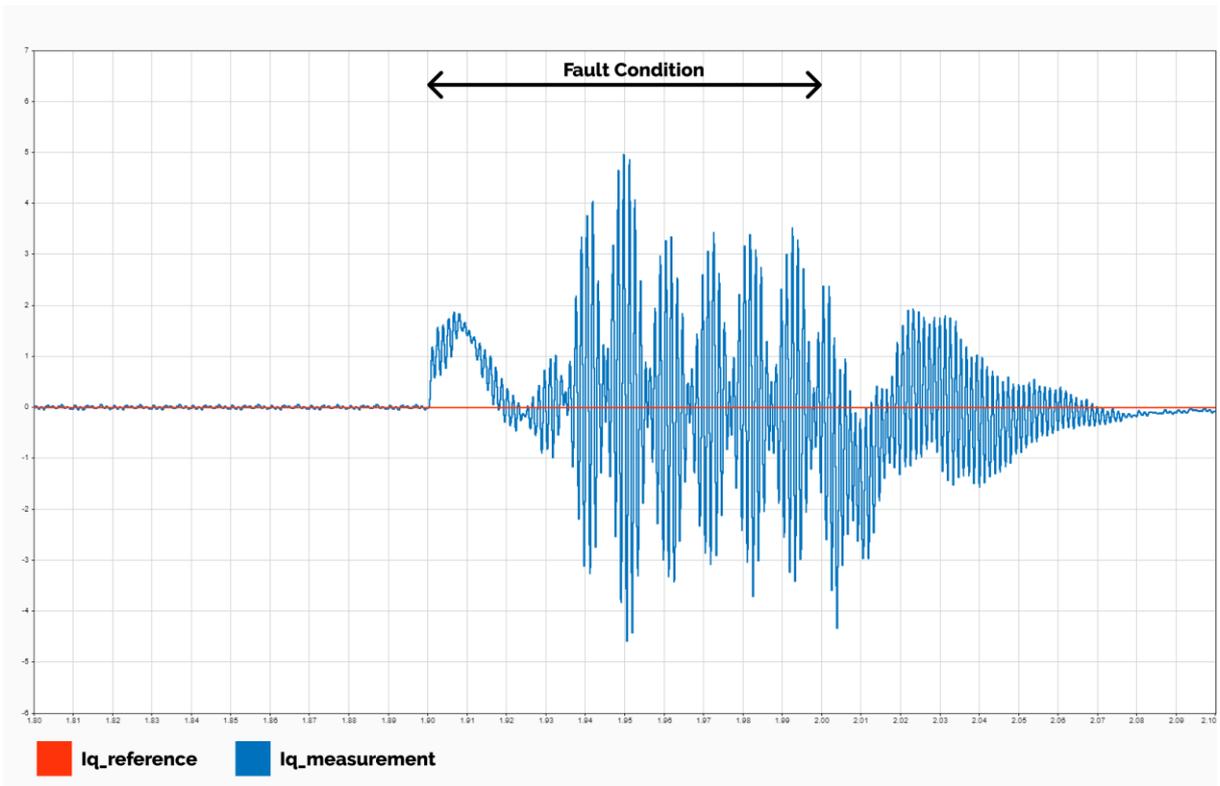


Pemberian Iq Aturan Indonesia

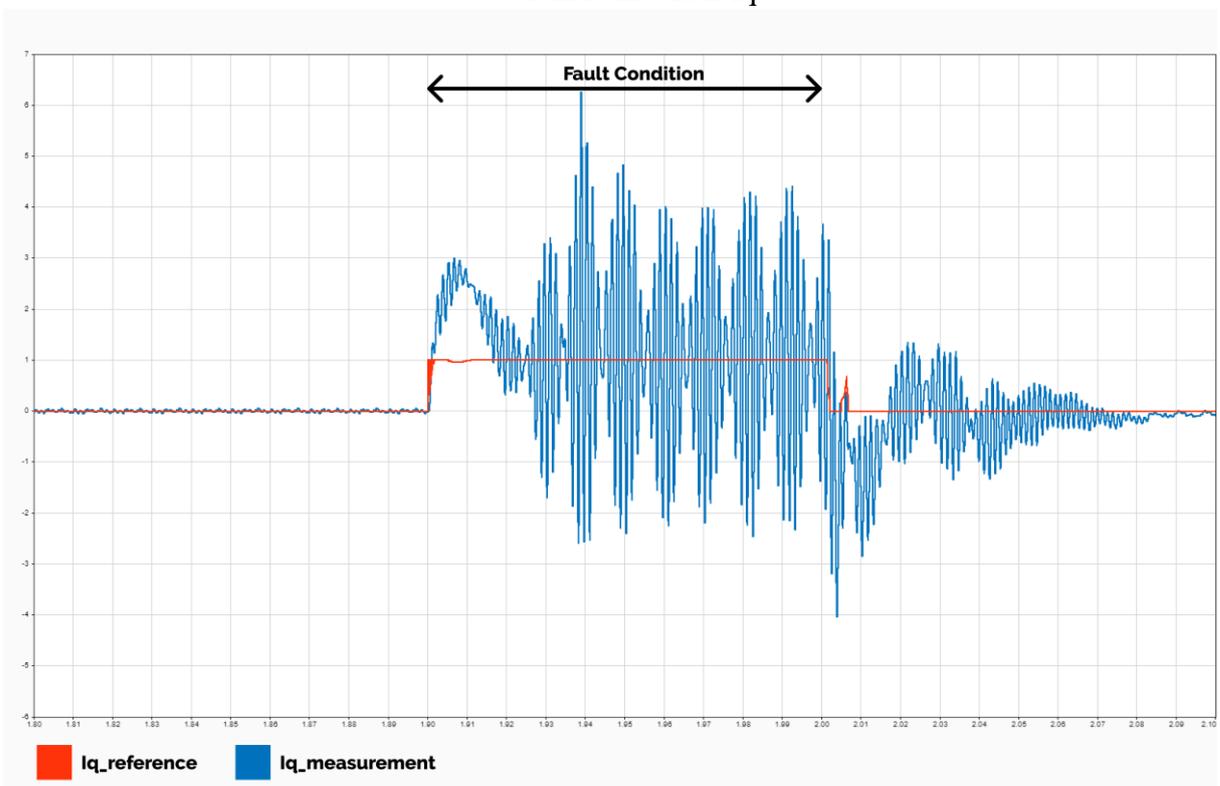


Pemberian Iq Aturan Indonesia + DCBC

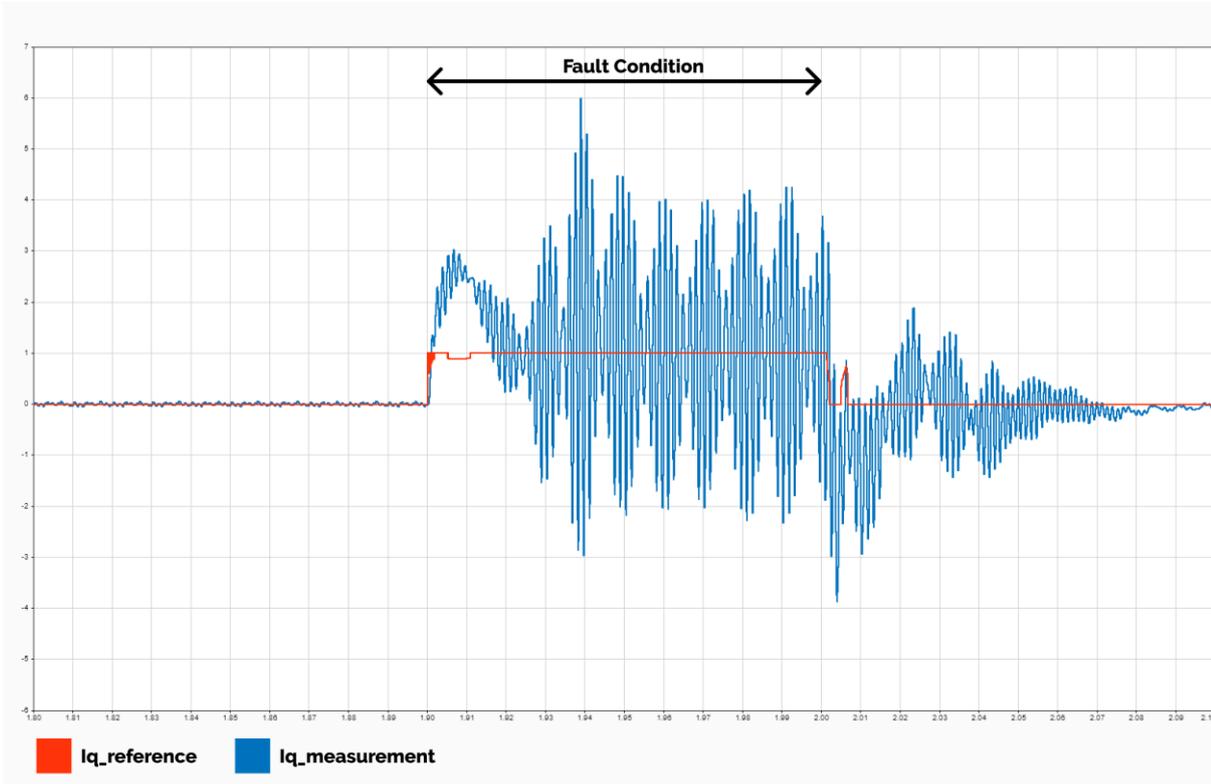
- 49%



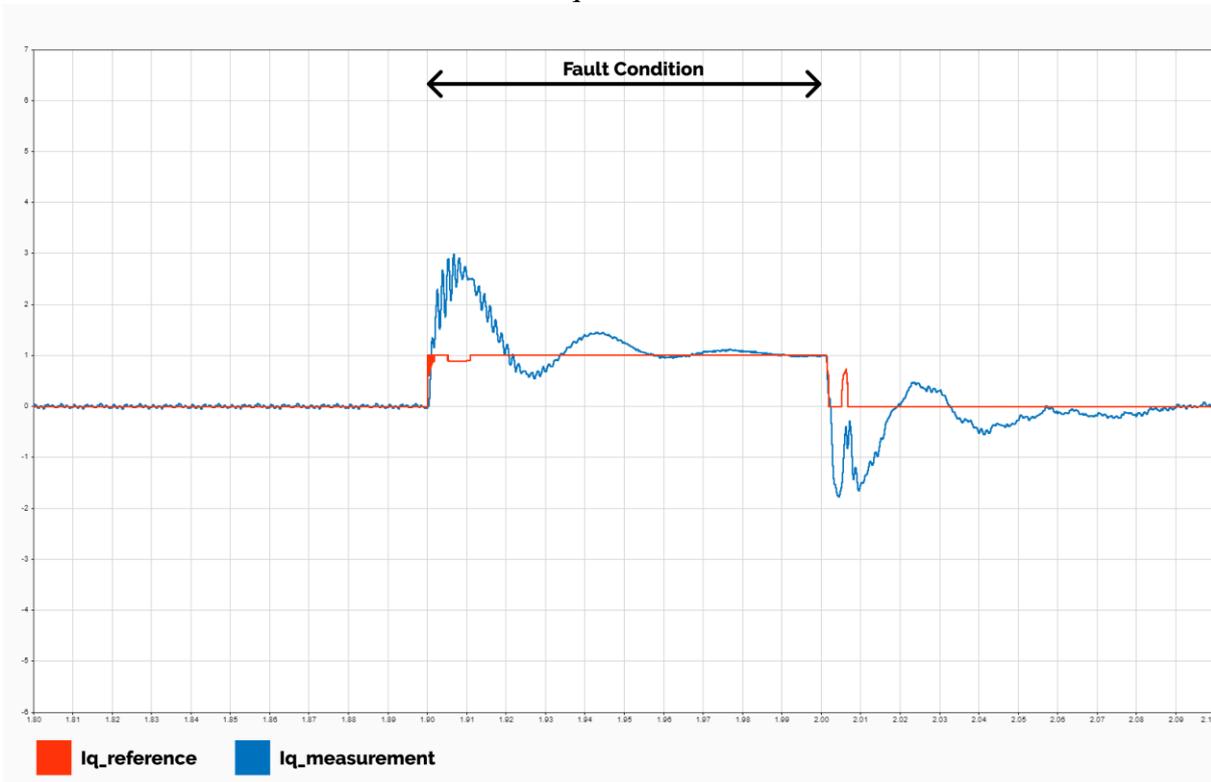
Sebelum Pemberian I_q



Pemberian I_q Aturan Jerman

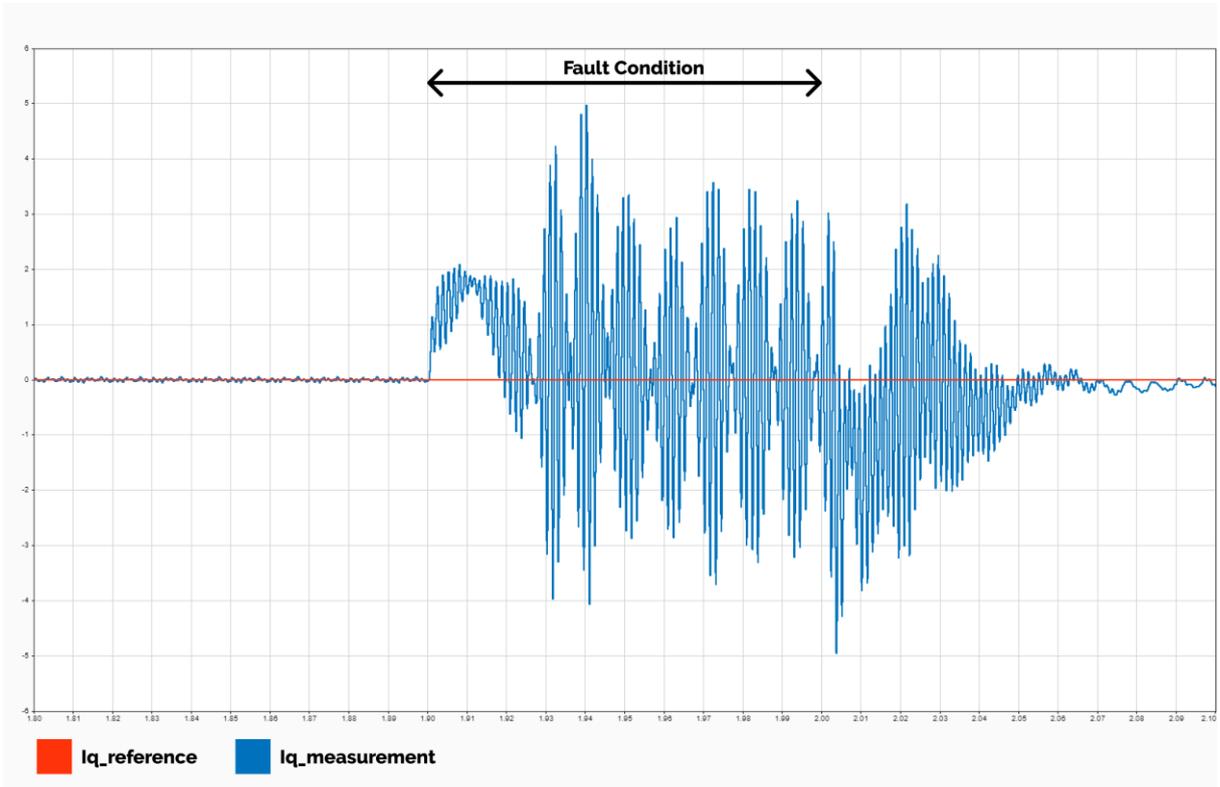


Pemberian Iq Aturan Indonesia

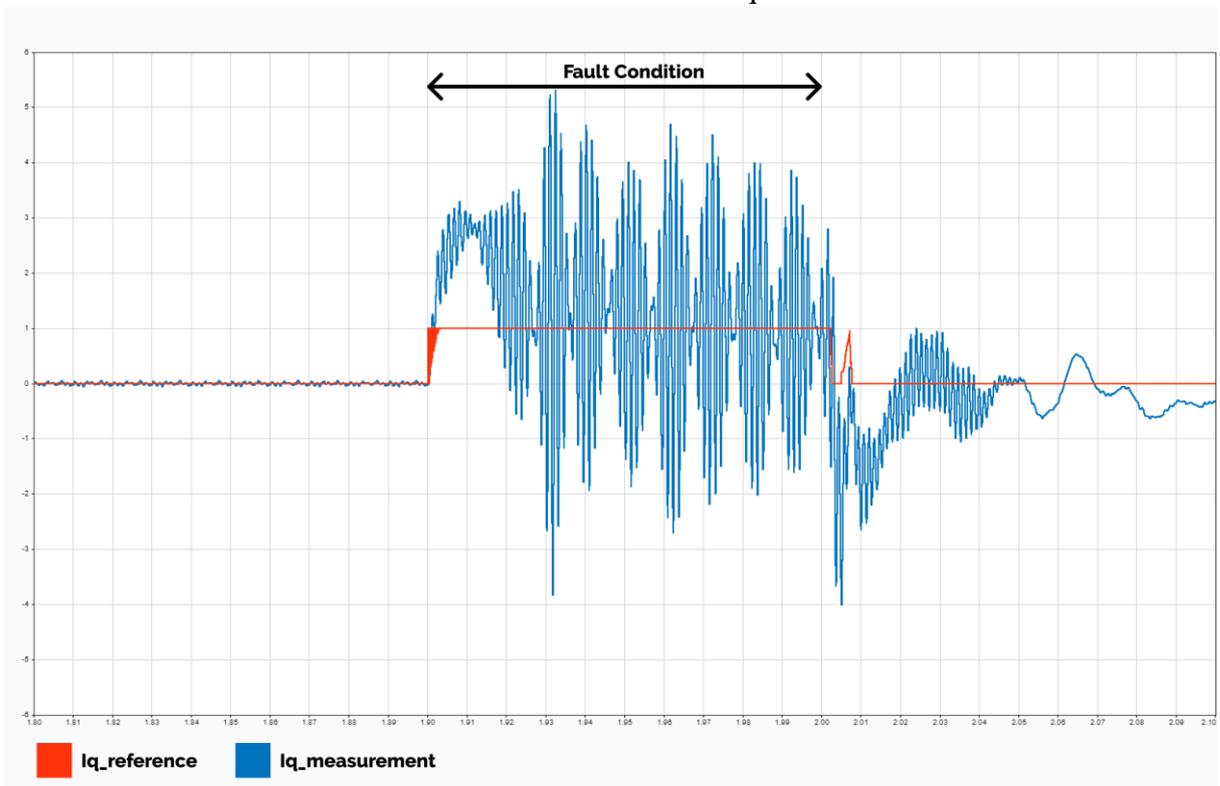


Pemberian Iq Aturan Indonesia + DCBC

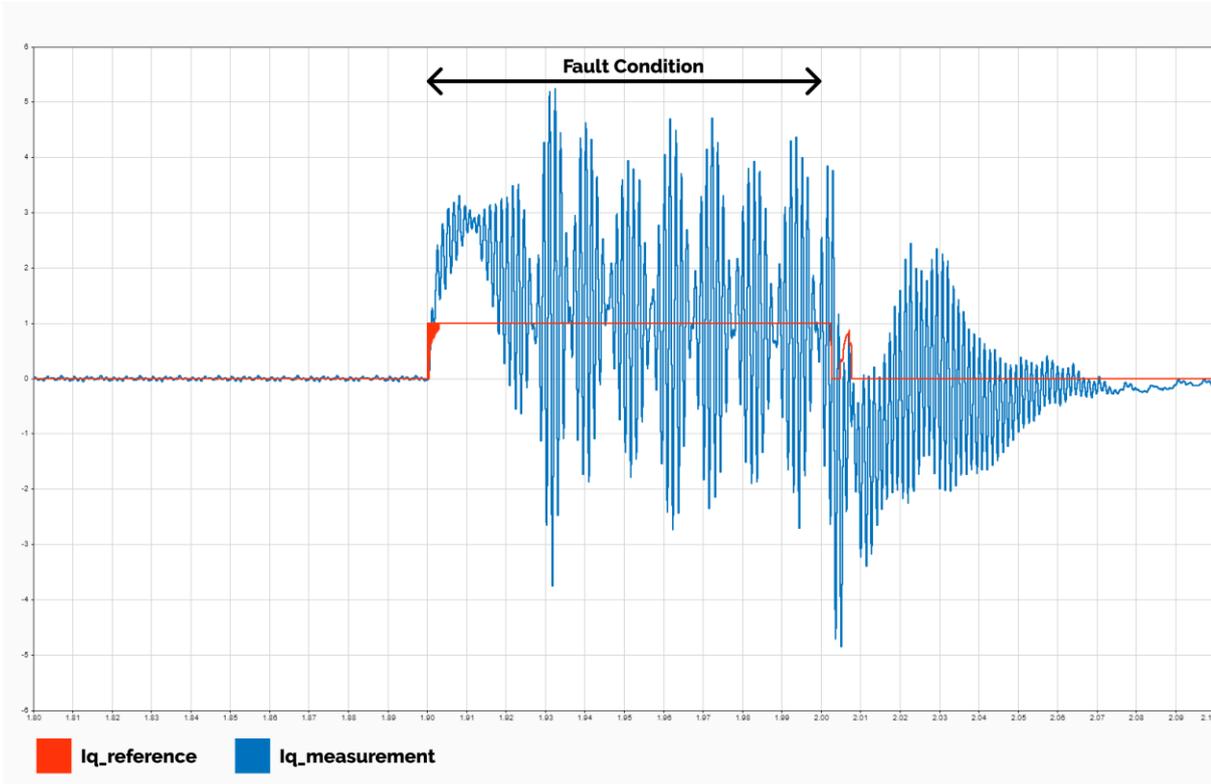
- 25%



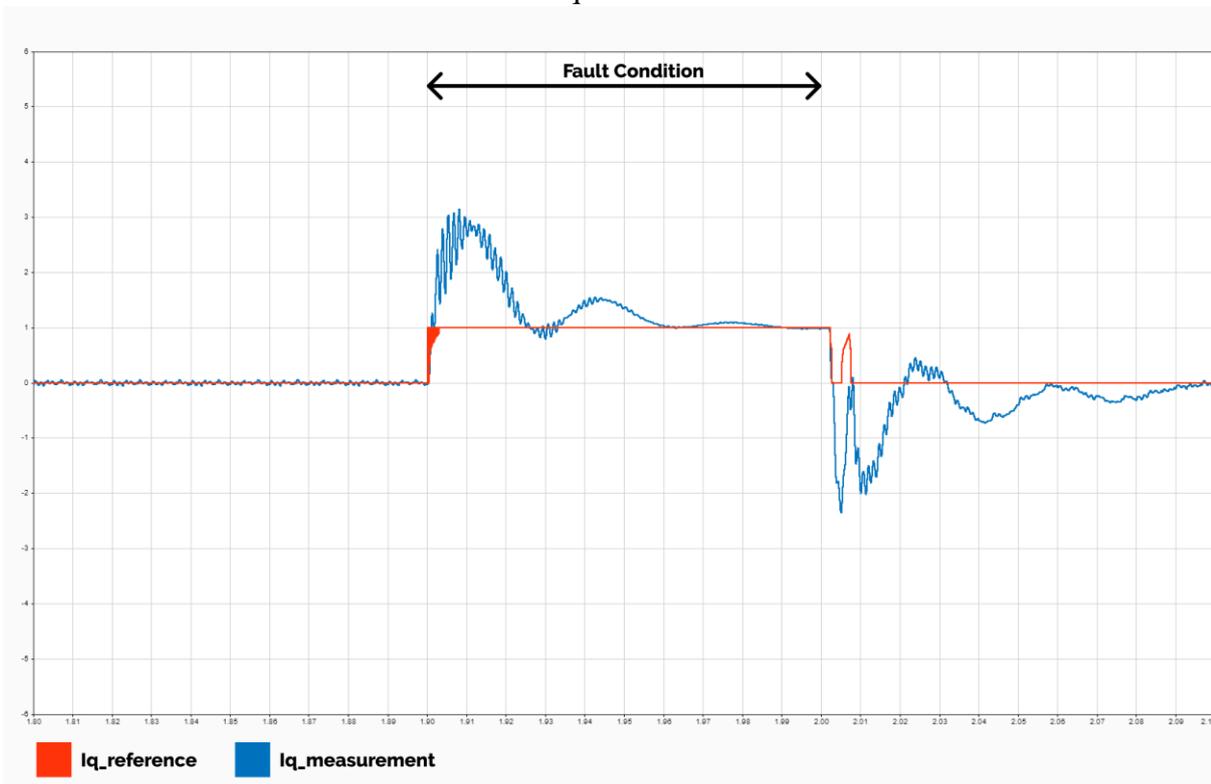
Sebelum Pemberian I_q



Pemberian I_q Aturan Jerman



Pemberian Iq Aturan Indonesia



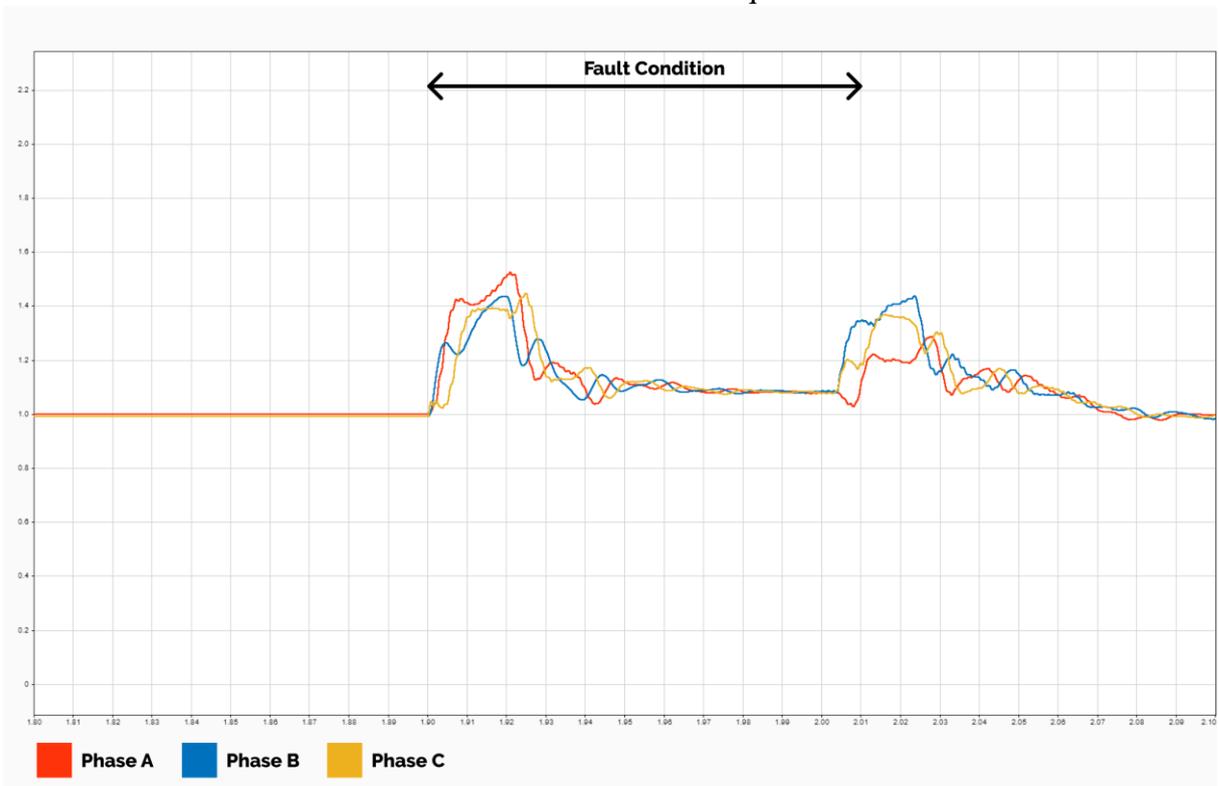
Pemberian Iq Aturan Indonesia + DCBC

Arus

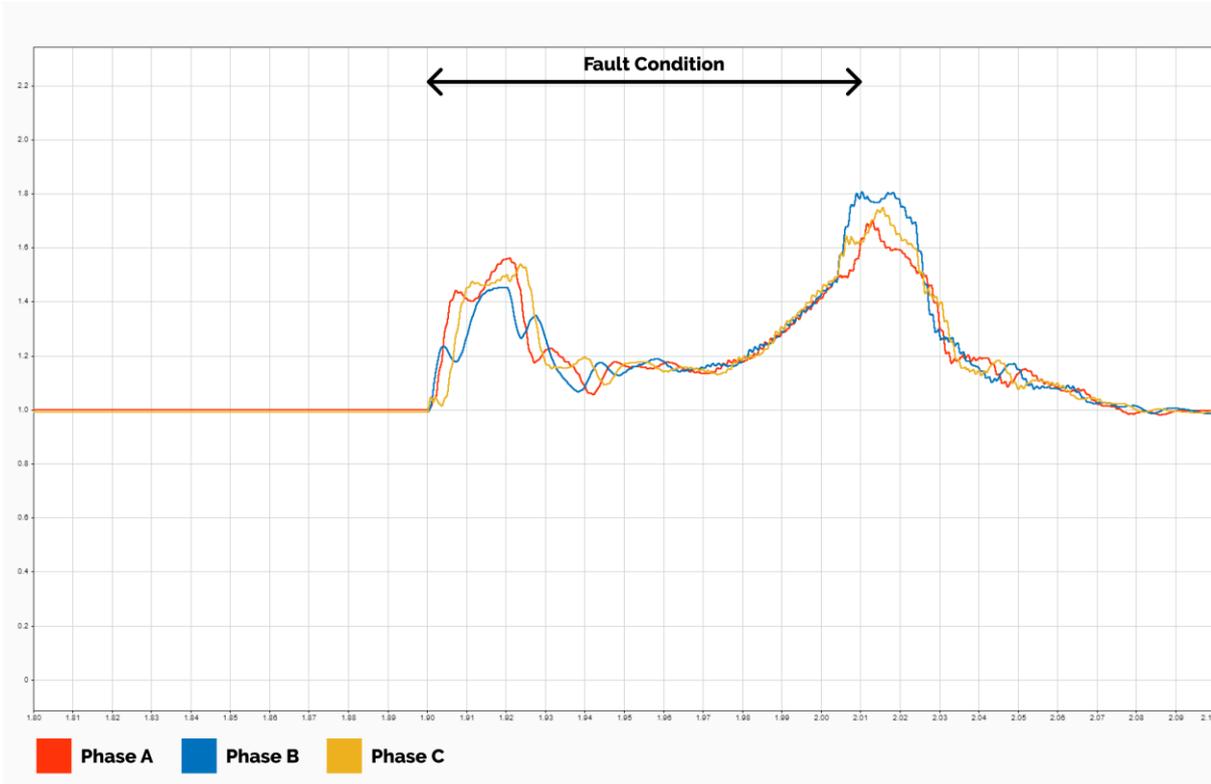
- 86%



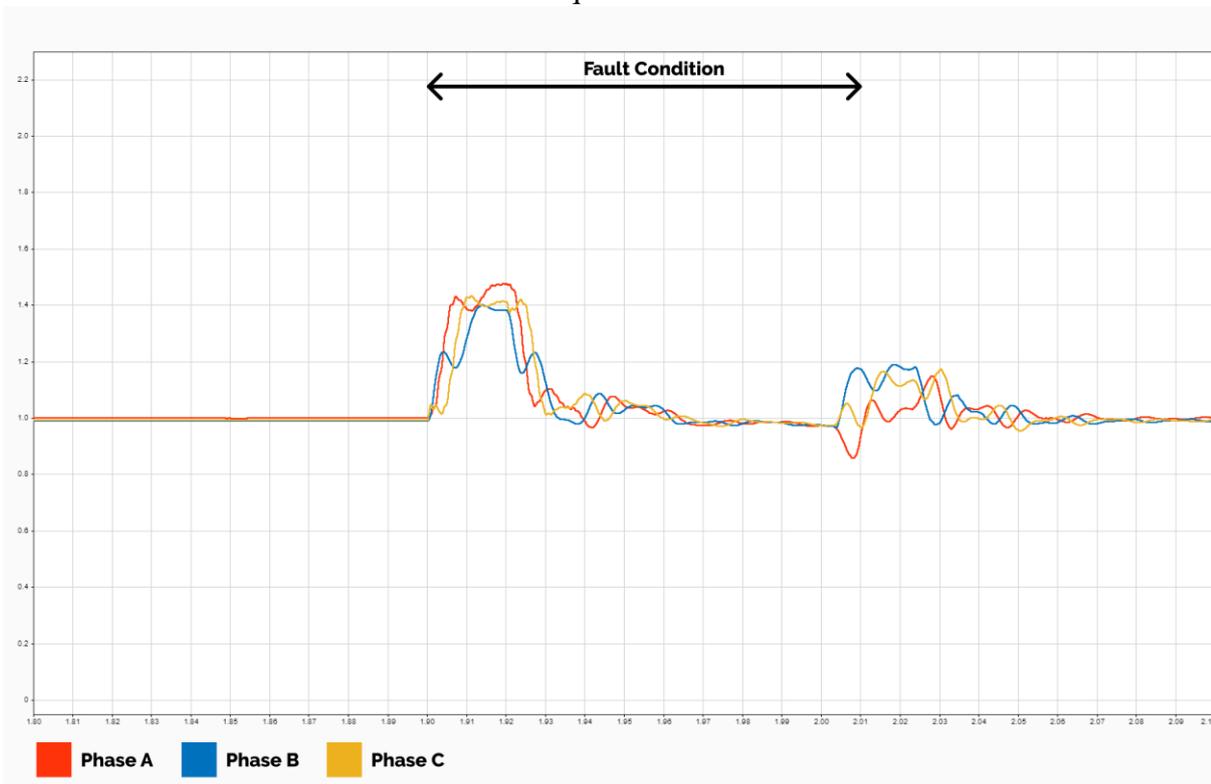
Sebelum Pemberian Iq



Pemberian Iq Aturan Jerman

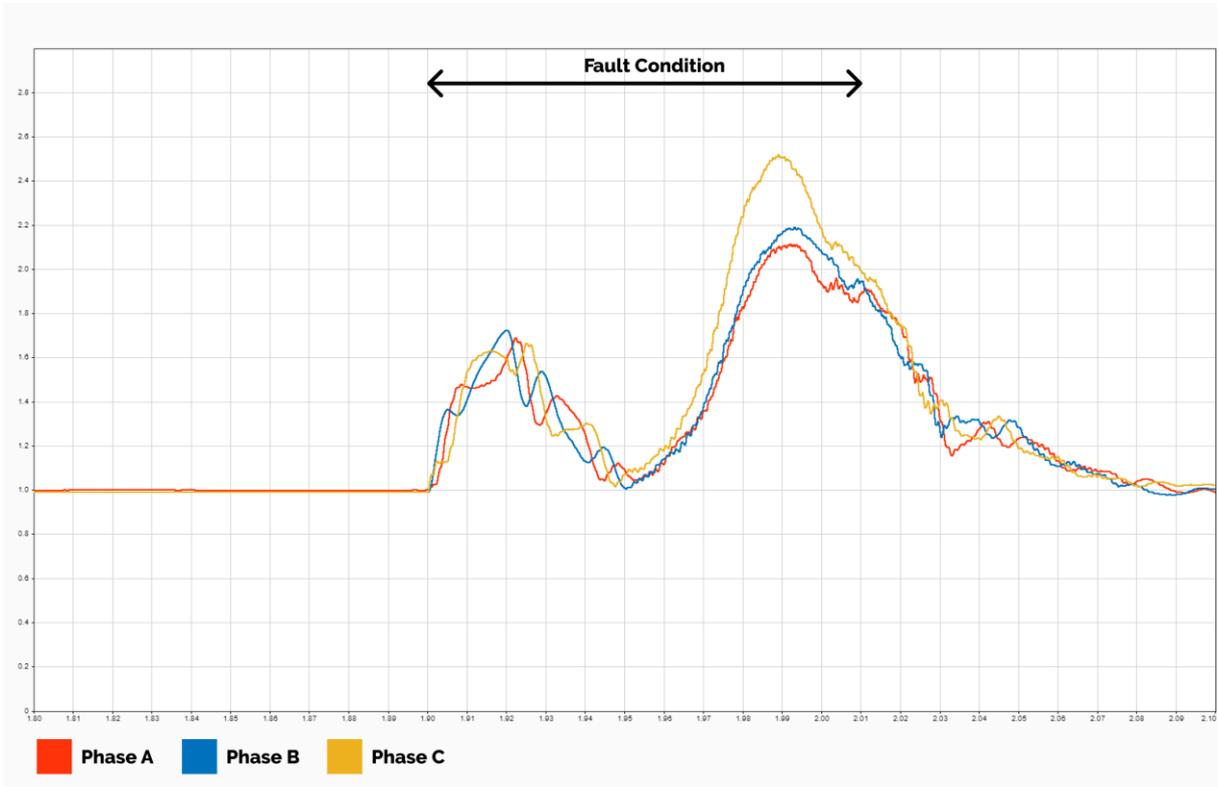


Pemberian Iq Aturan Indonesia

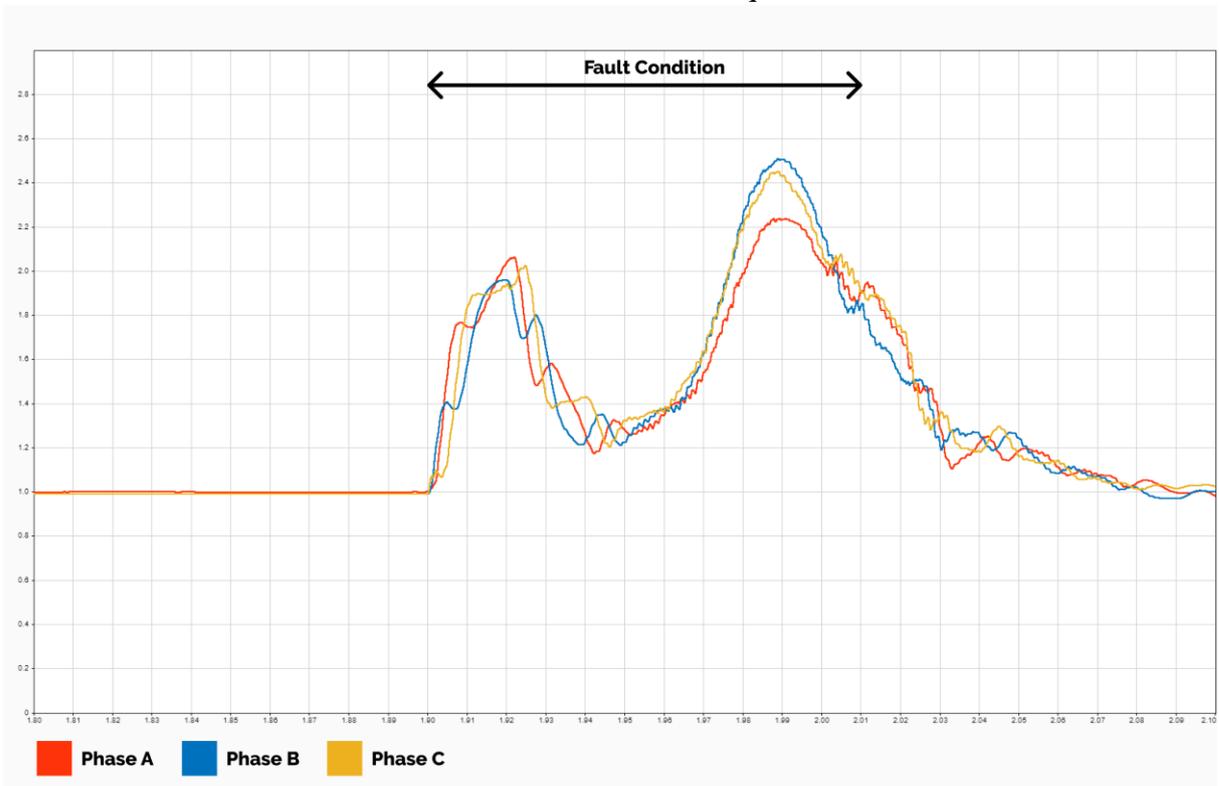


Pemberian Iq Aturan Indonesia + DCBC

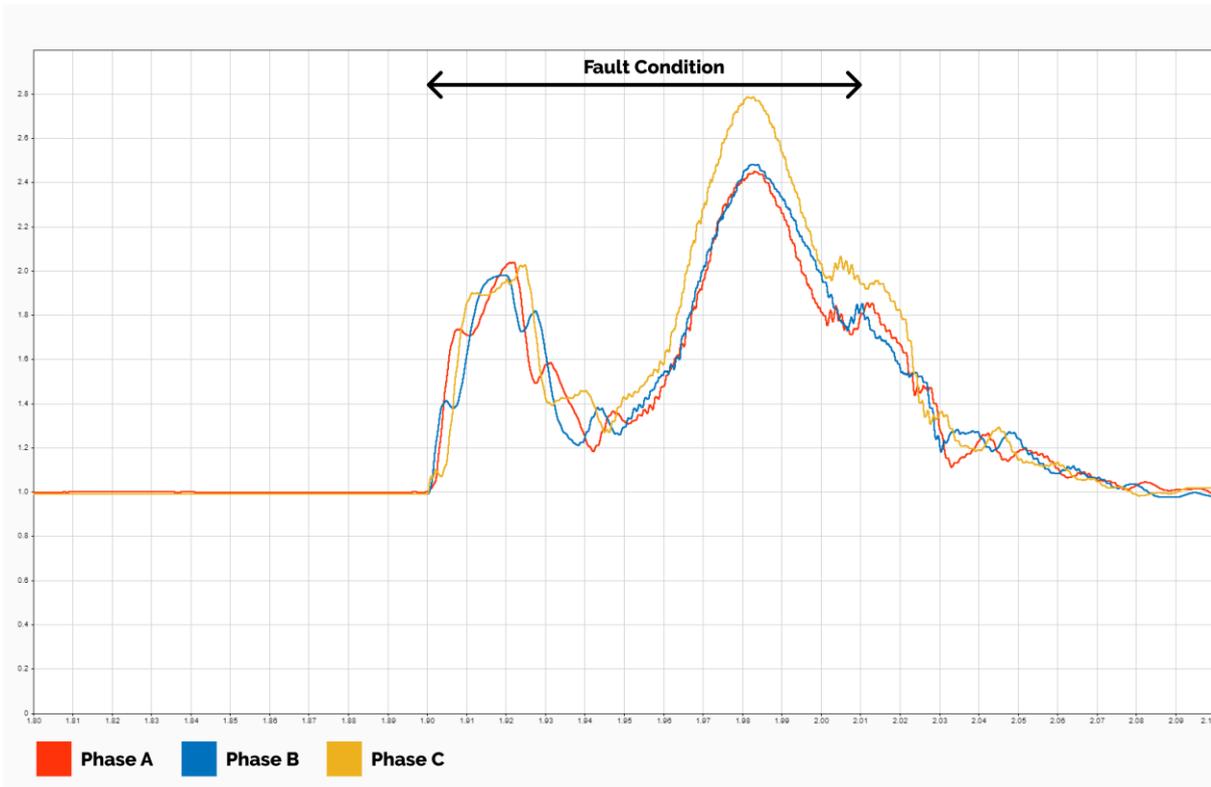
- 69%



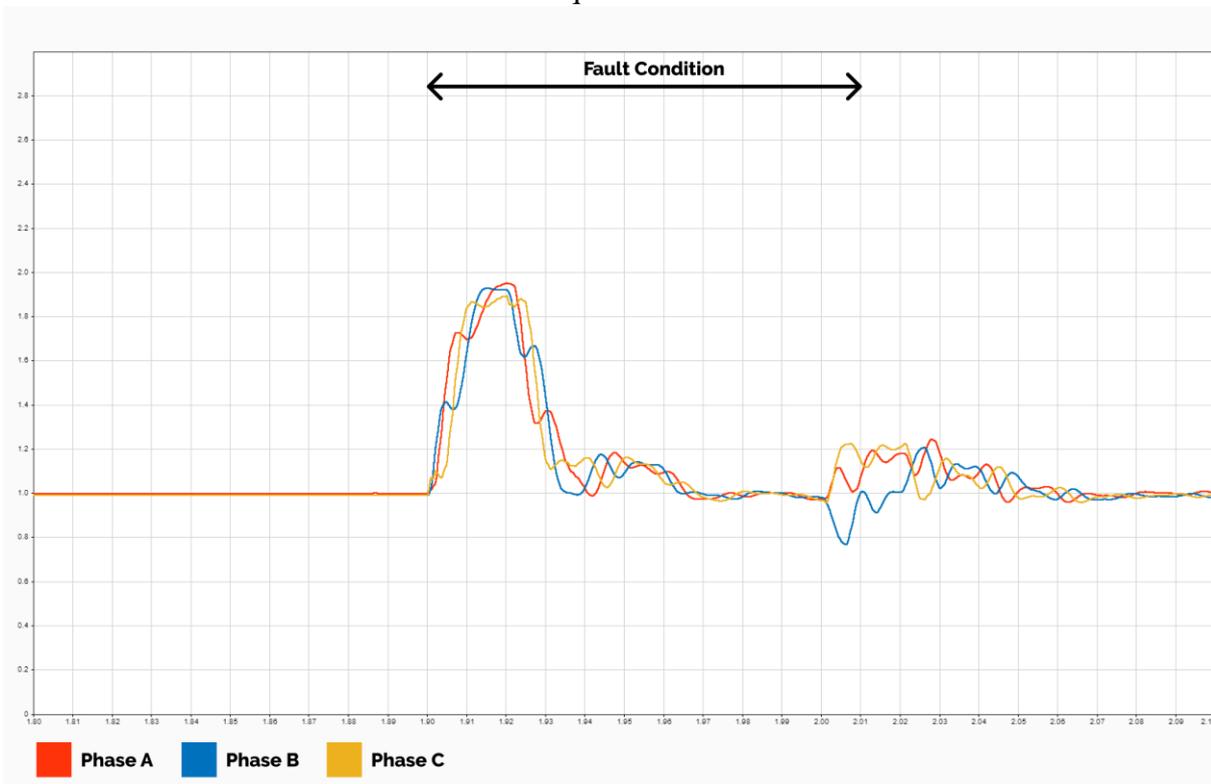
Sebelum Pemberian Iq



Pemberian Iq Aturan Jerman

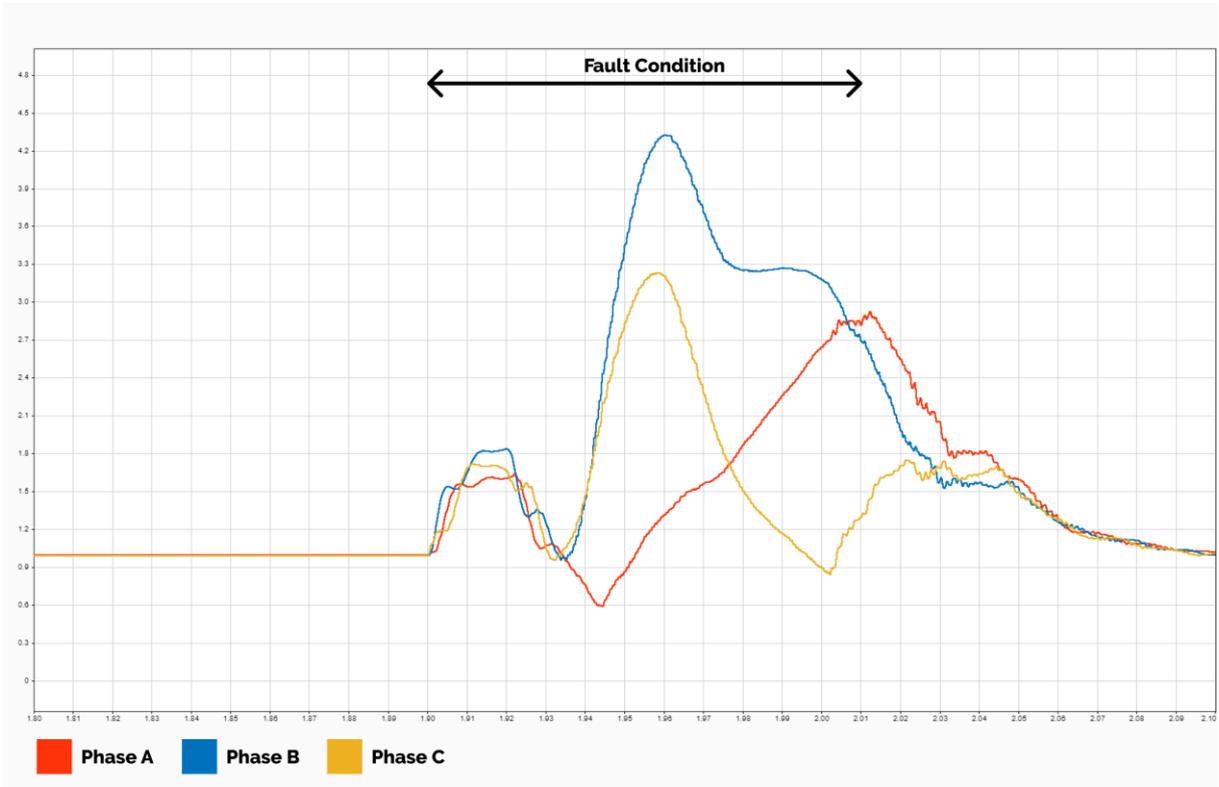


Pemberian Iq Aturan Indonesia

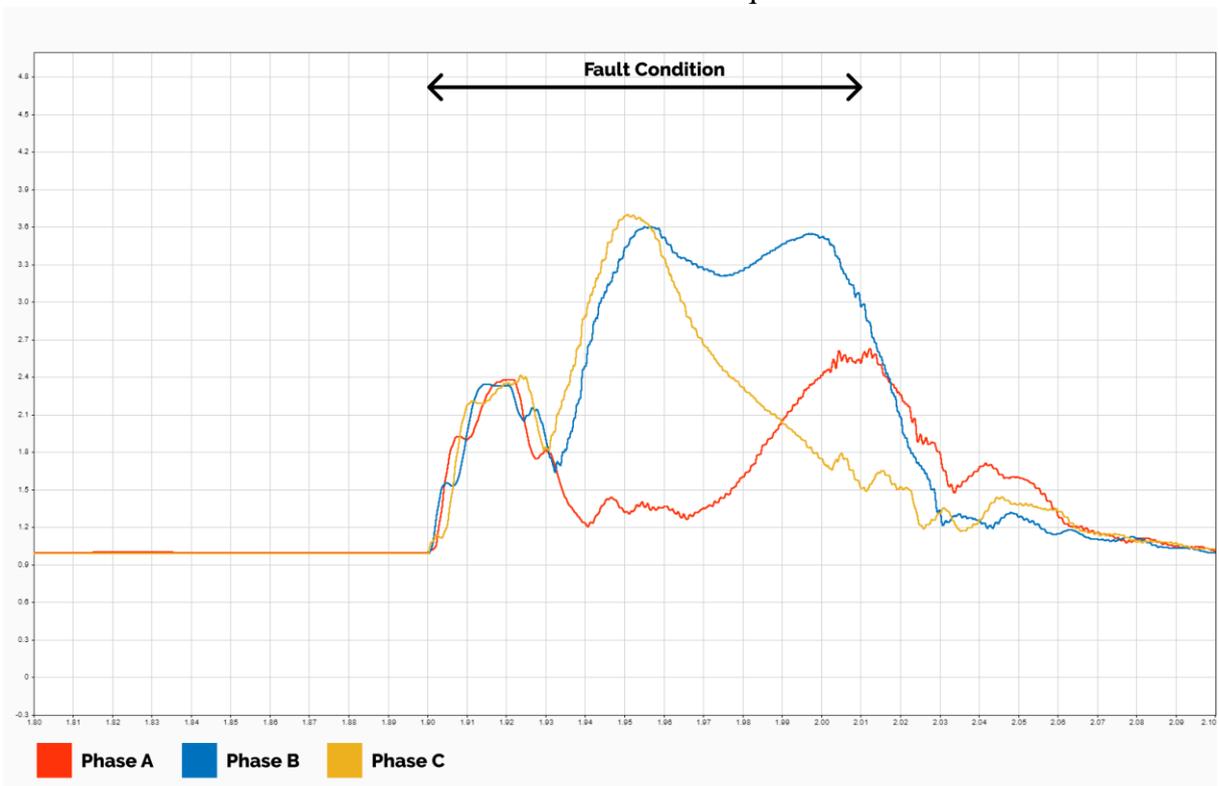


Pemberian Iq Aturan Indonesia + DCBC

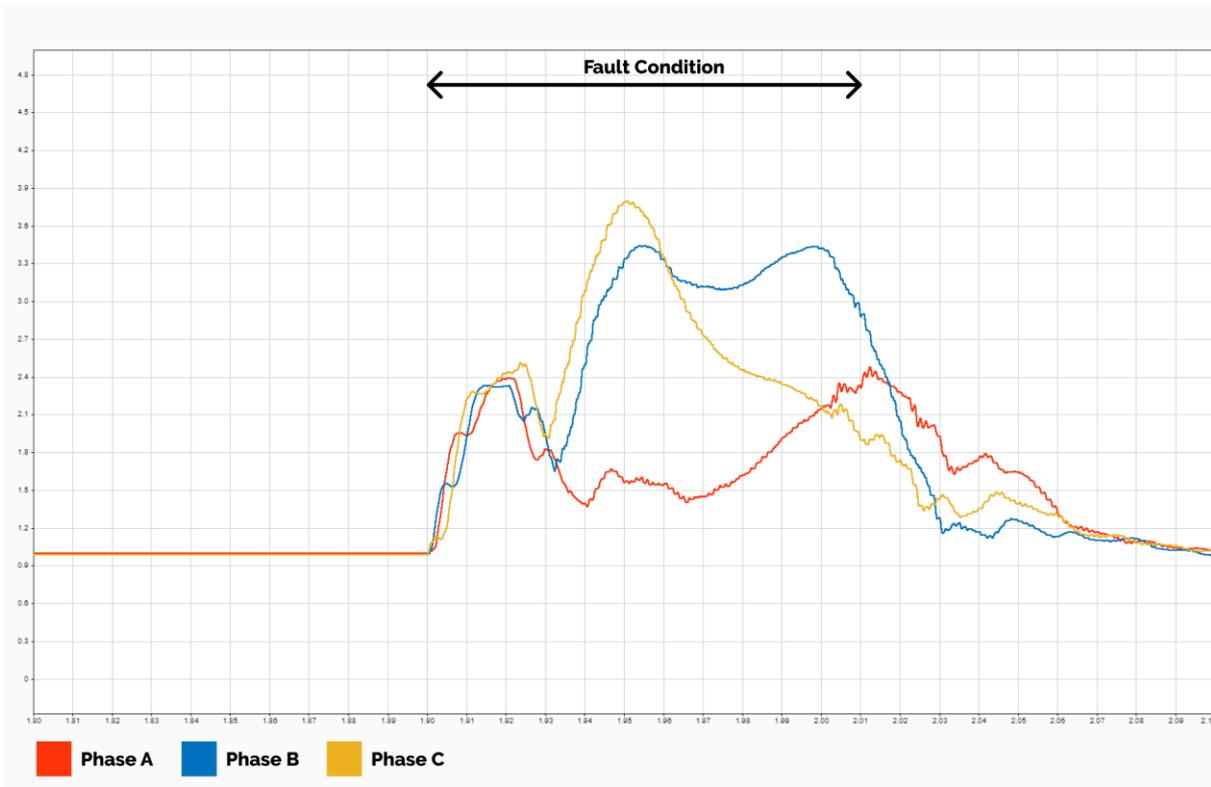
- 49%



Sebelum Pemberian Iq



Pemberian Iq Aturan Jerman

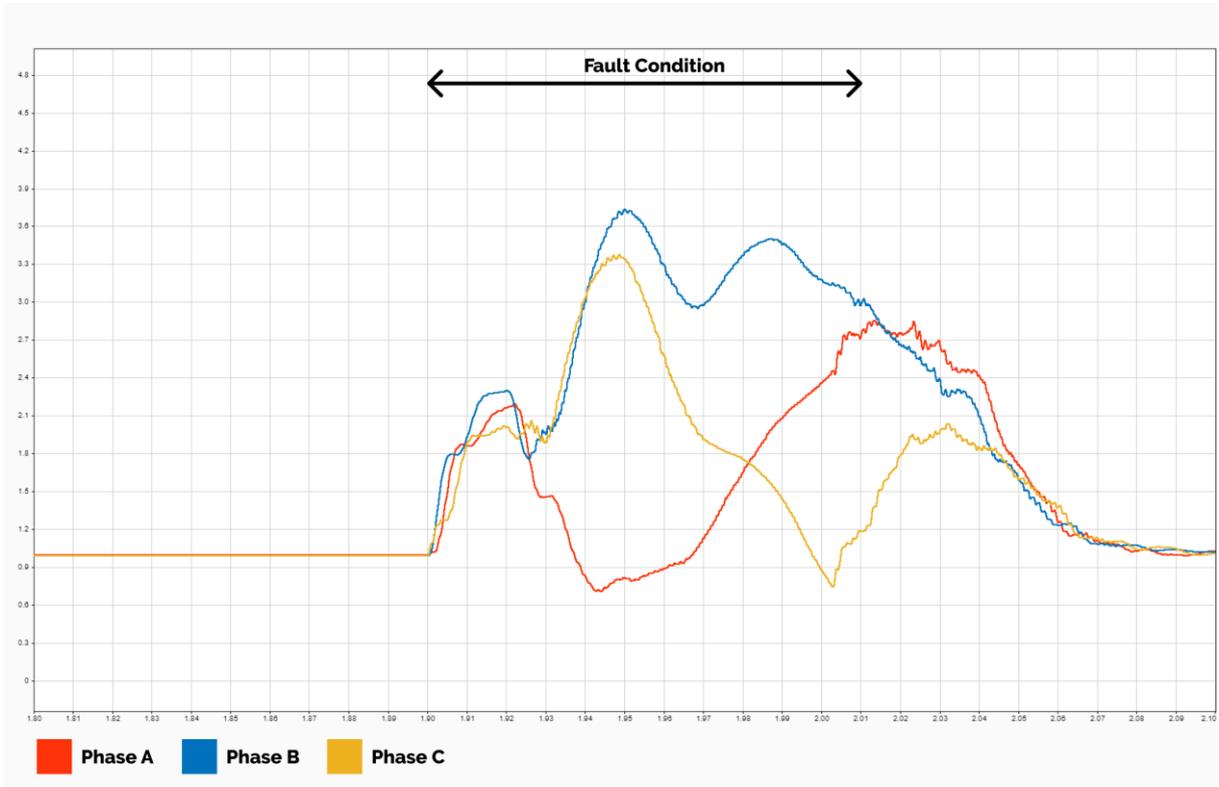


Pemberian Iq Aturan Indonesia

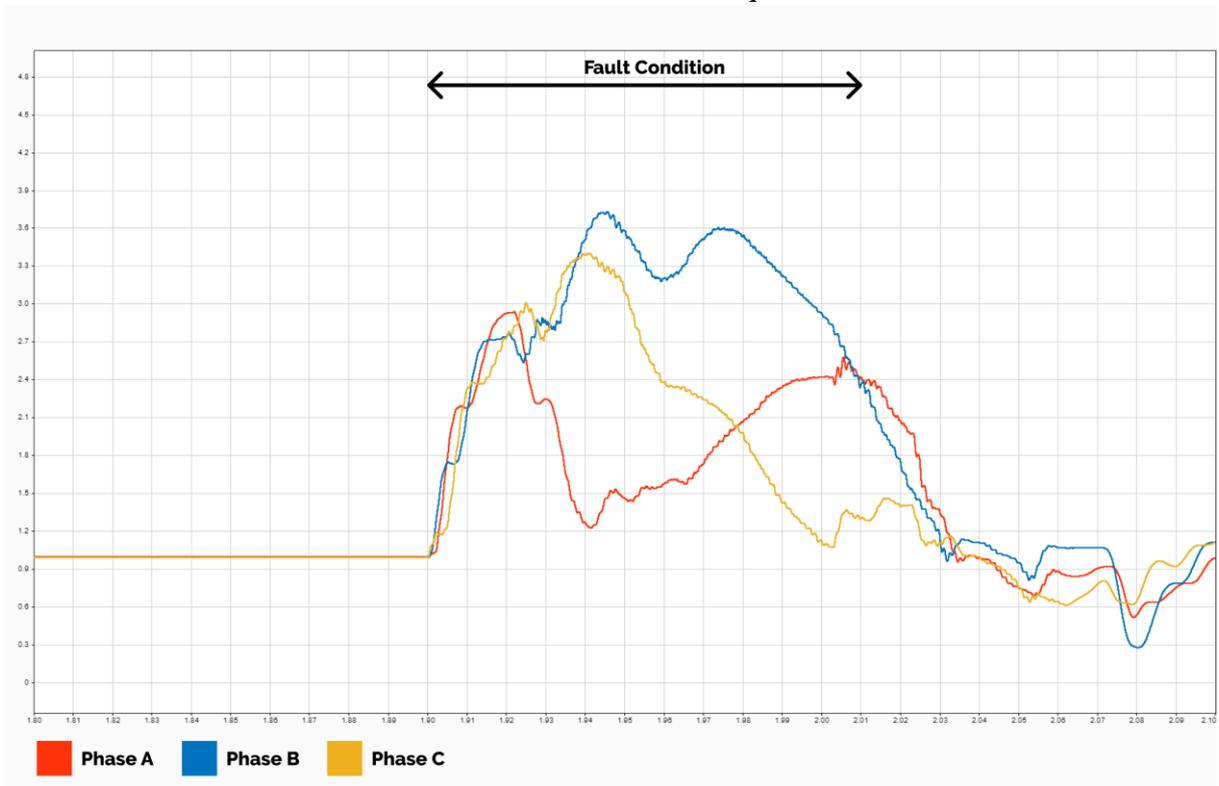


Pemberian Iq Aturan Indonesia + DCBC

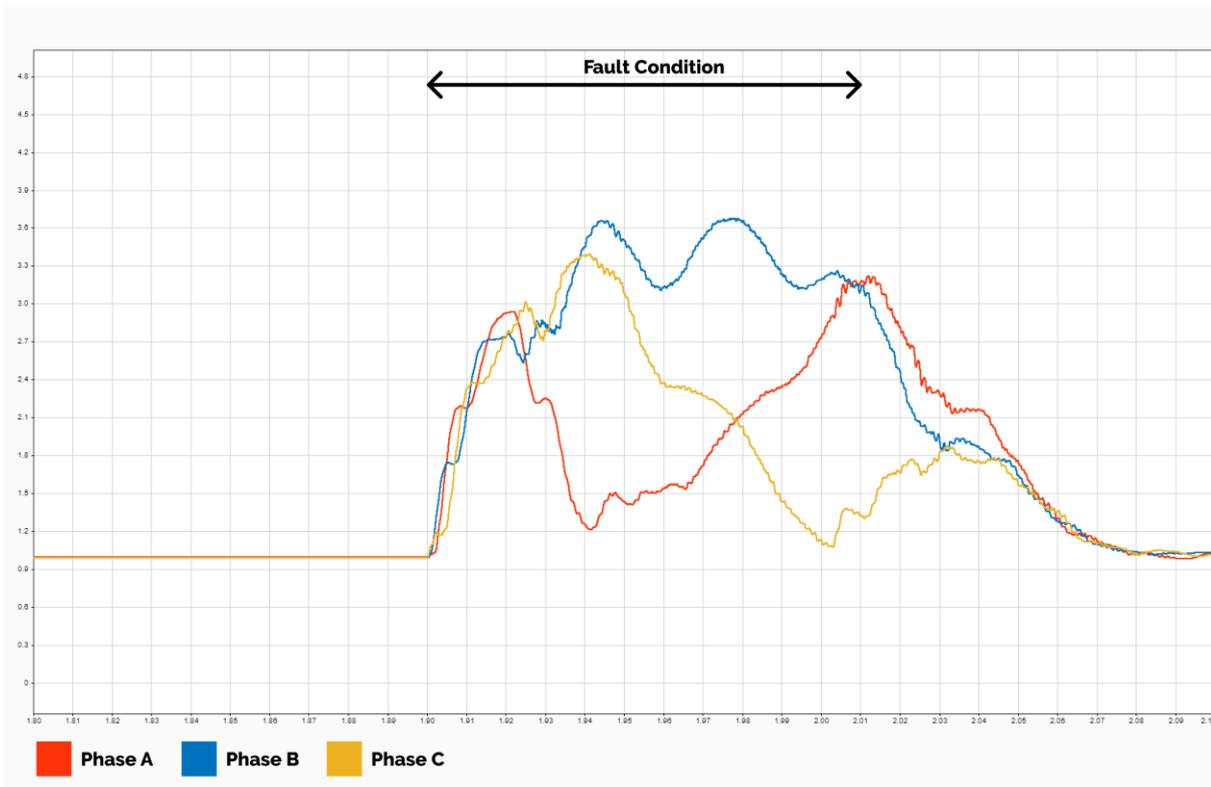
- 25%



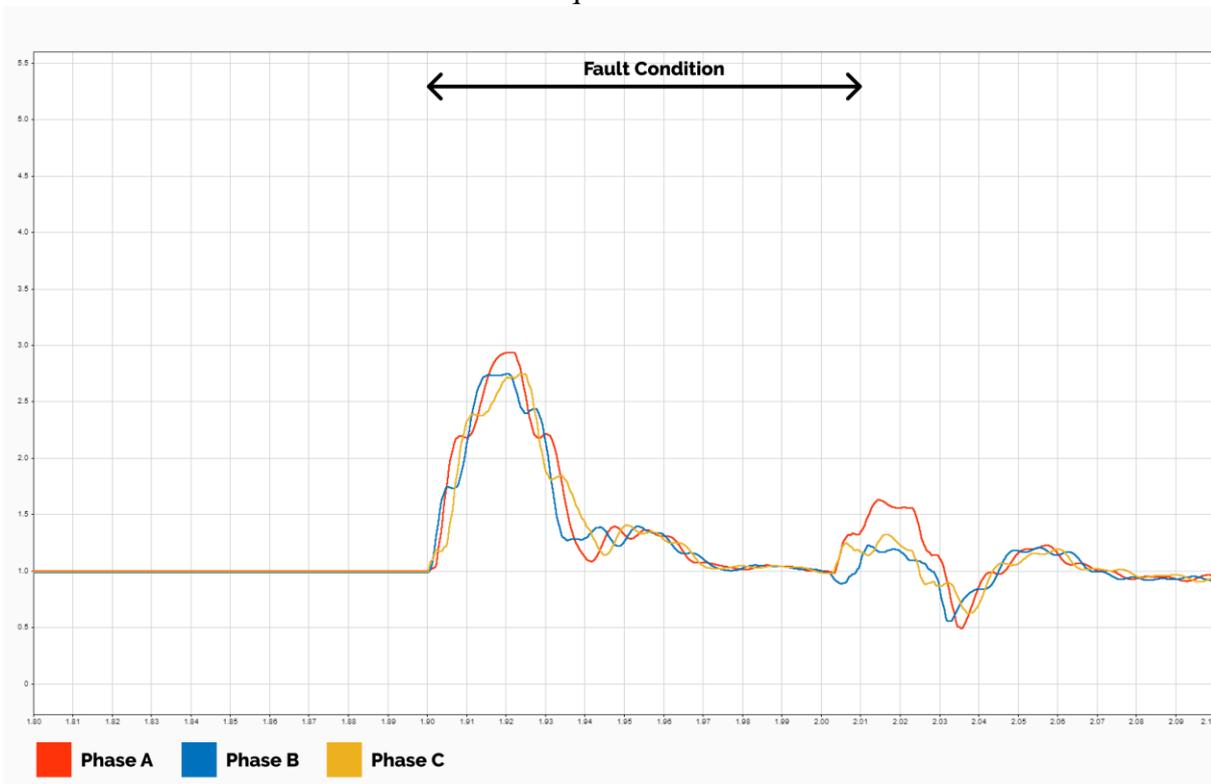
Sebelum Pemberian Iq



Pemberian Iq Aturan Jerman



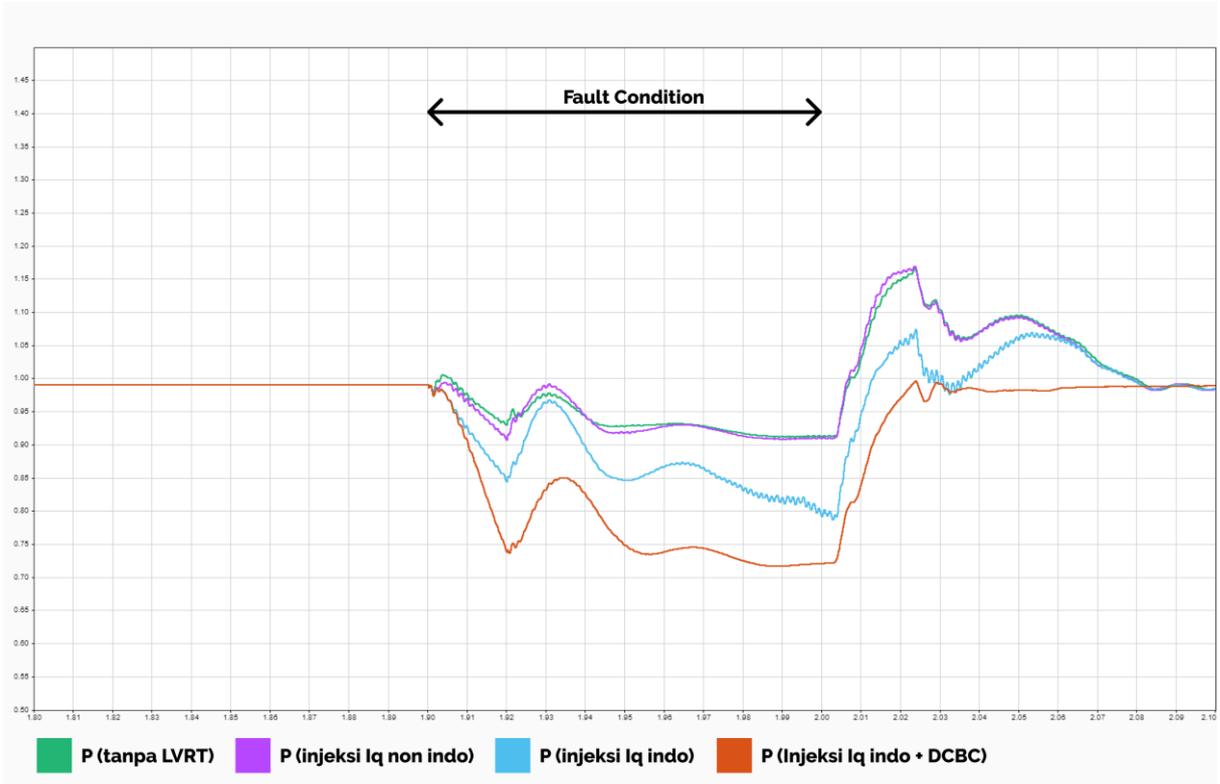
Pemberian Iq Aturan Indonesia



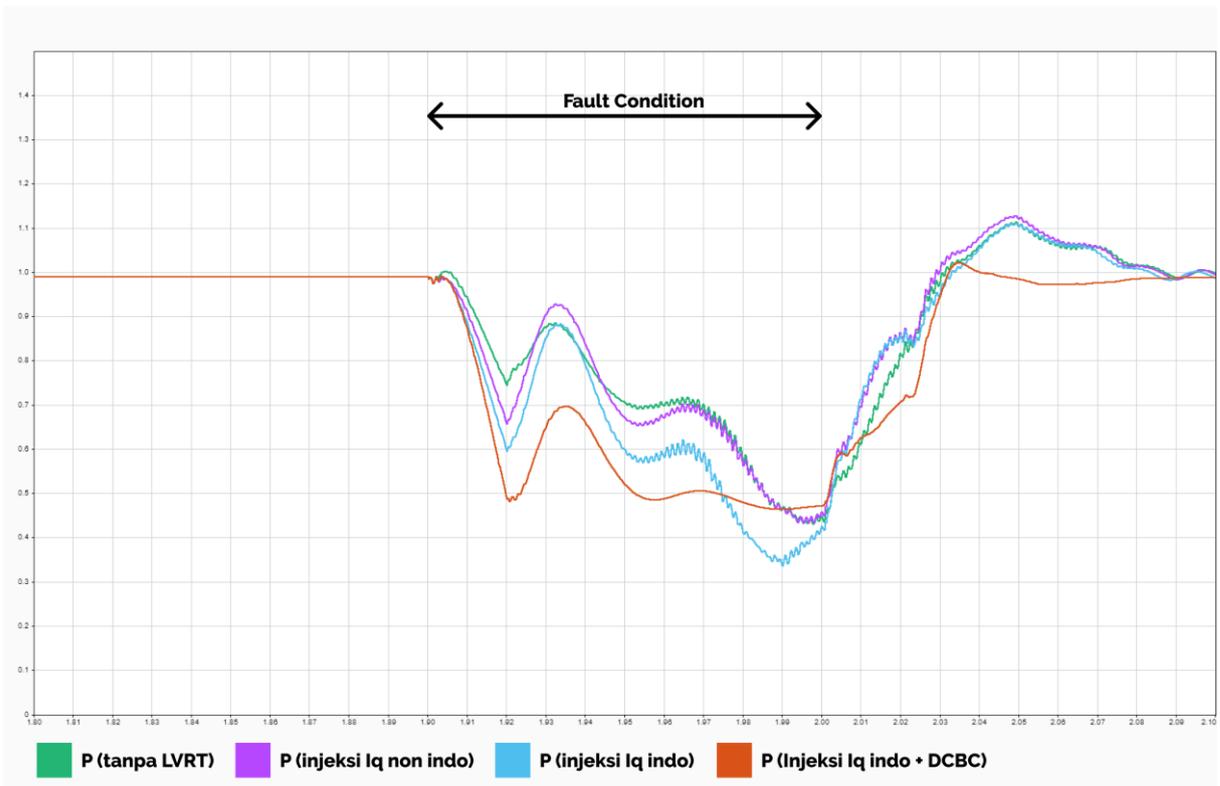
Pemberian Iq Aturan Indonesia + DCBC

Perbandingan Keseluruhan

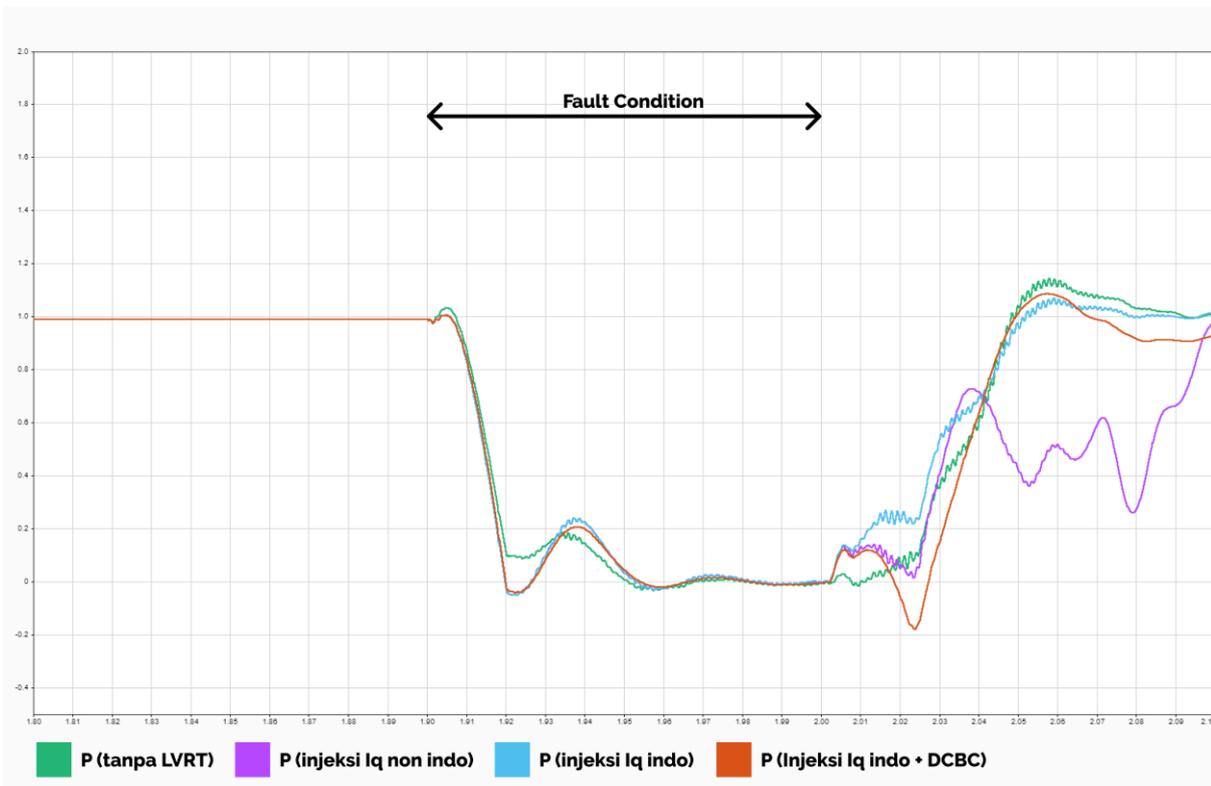
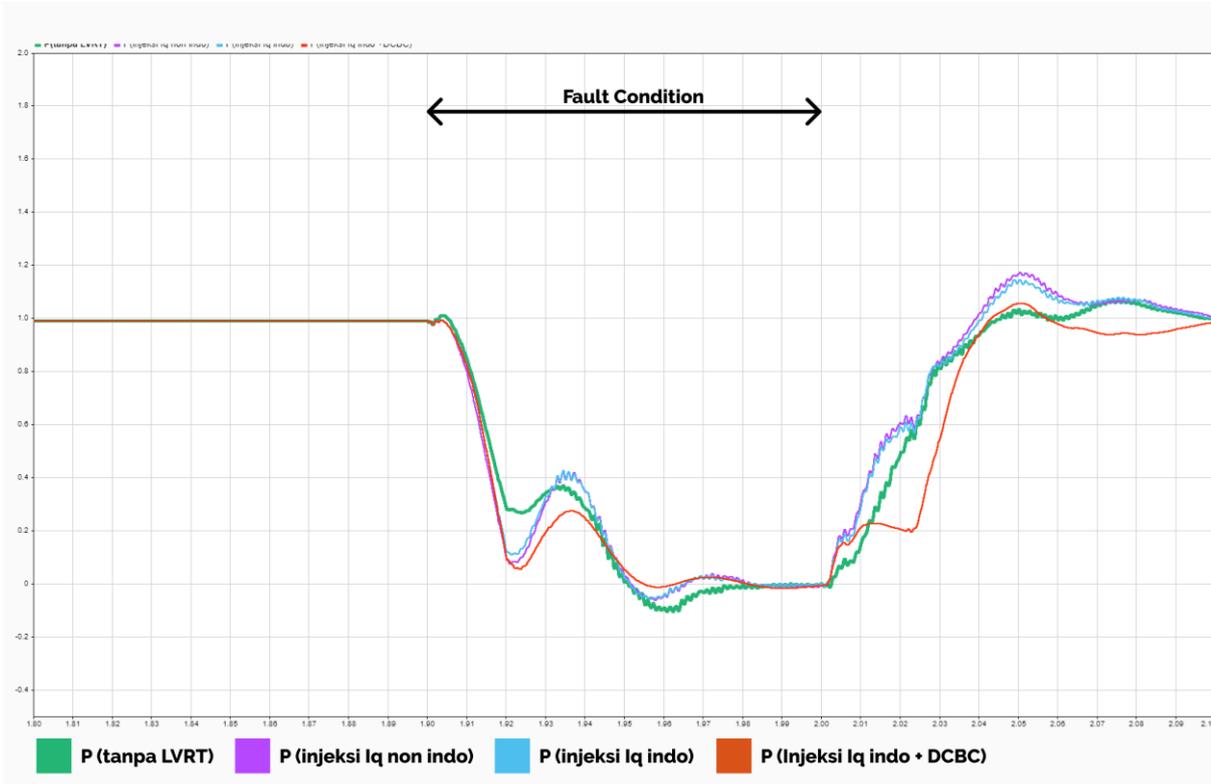
- Nilai Daya Aktif



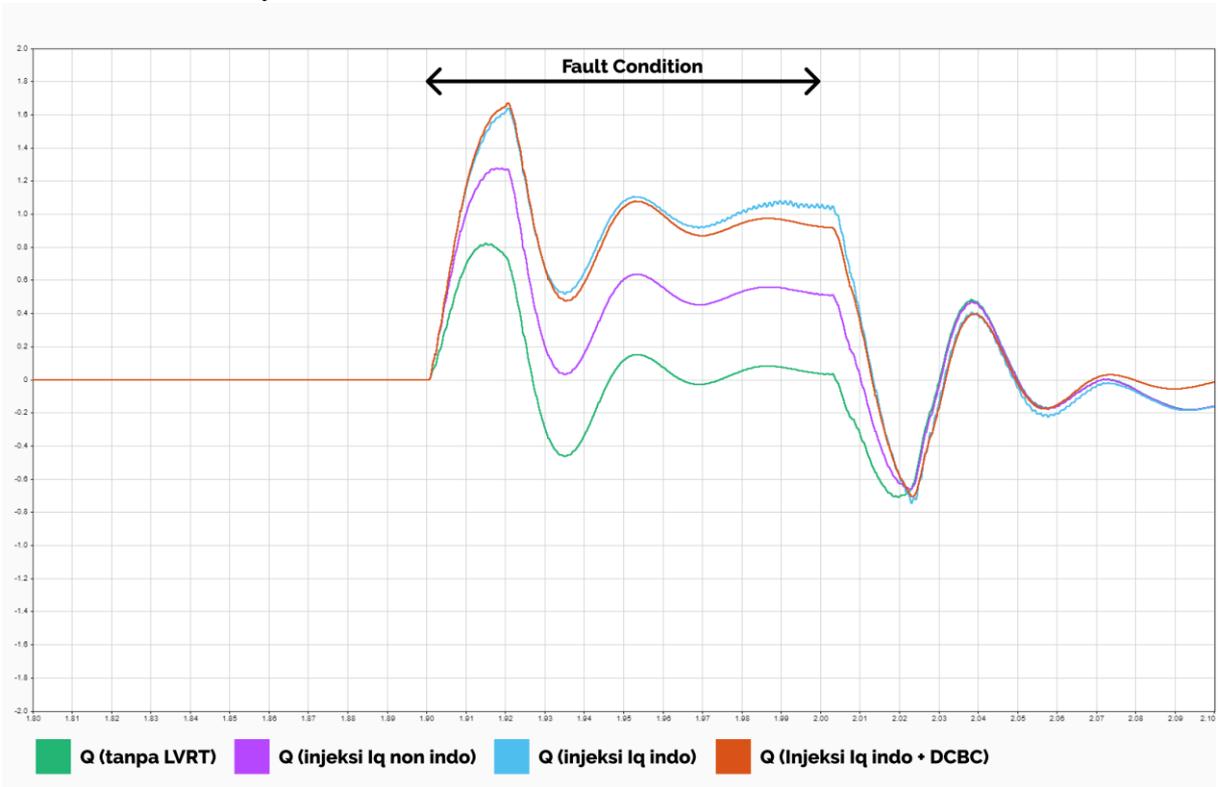
86%



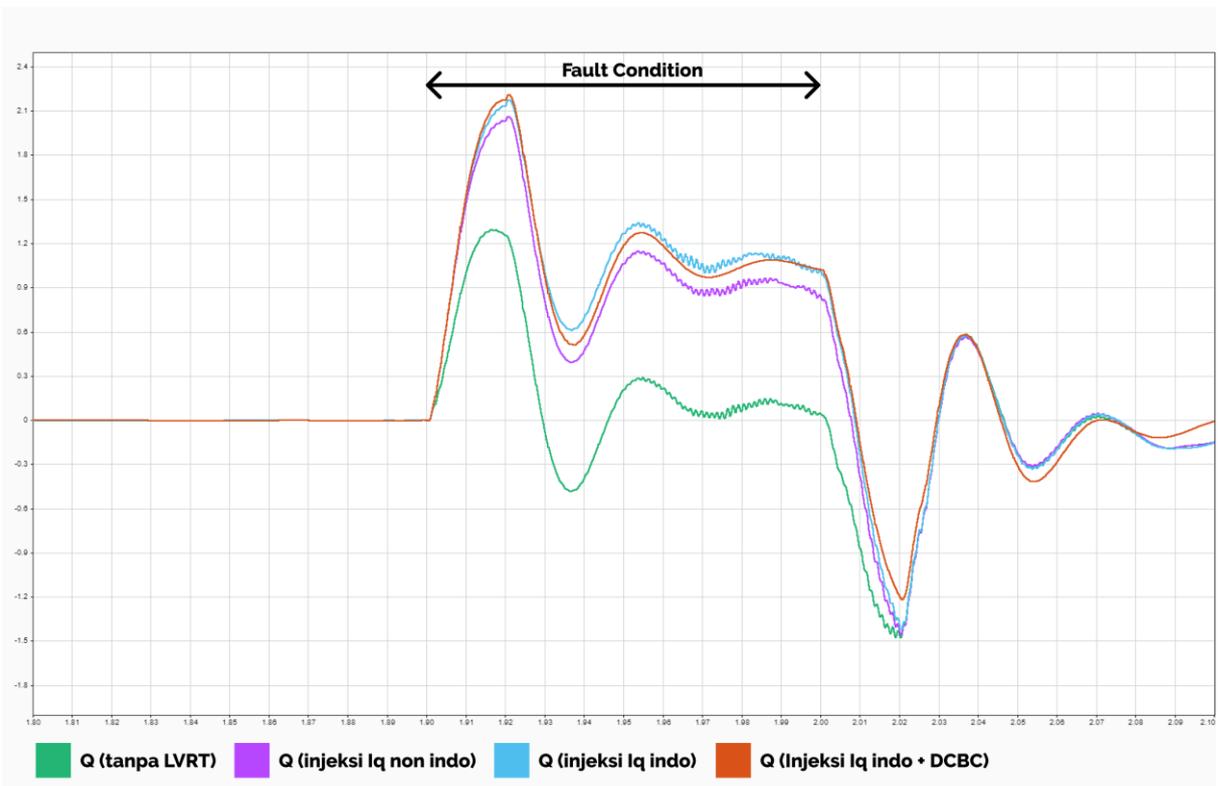
69%



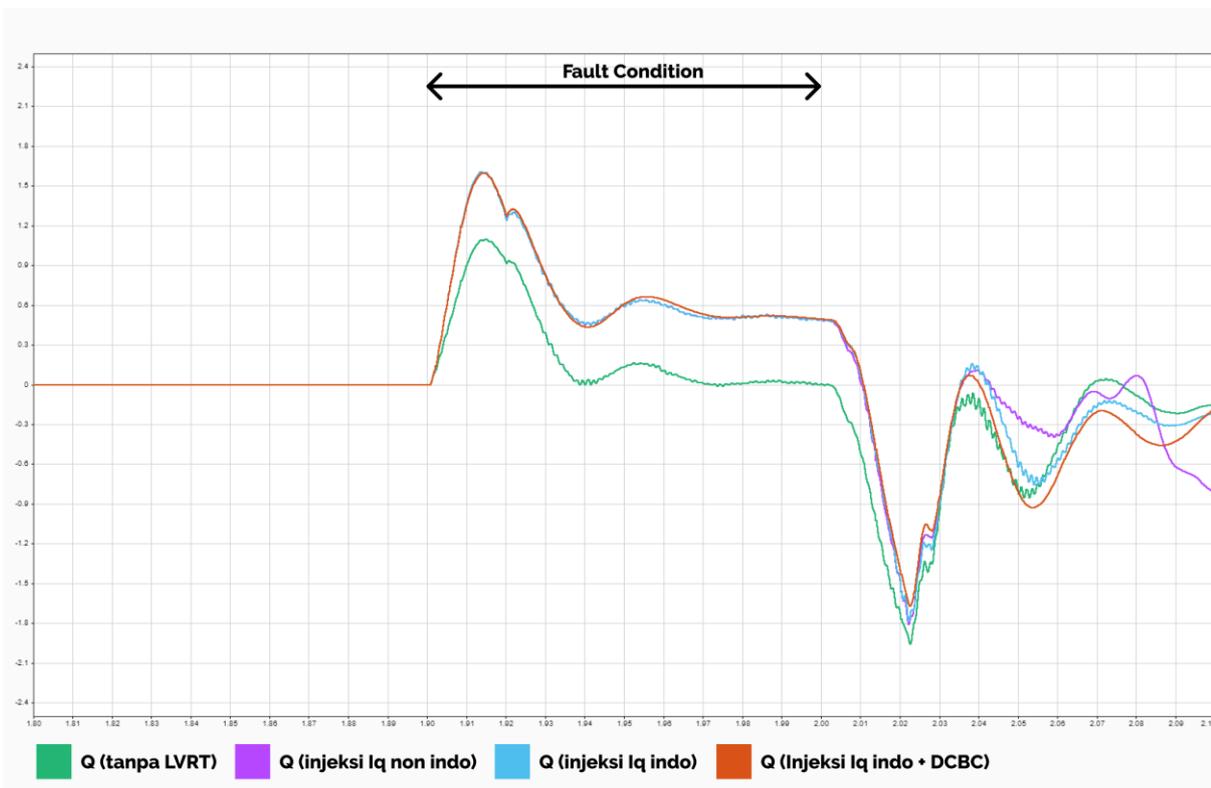
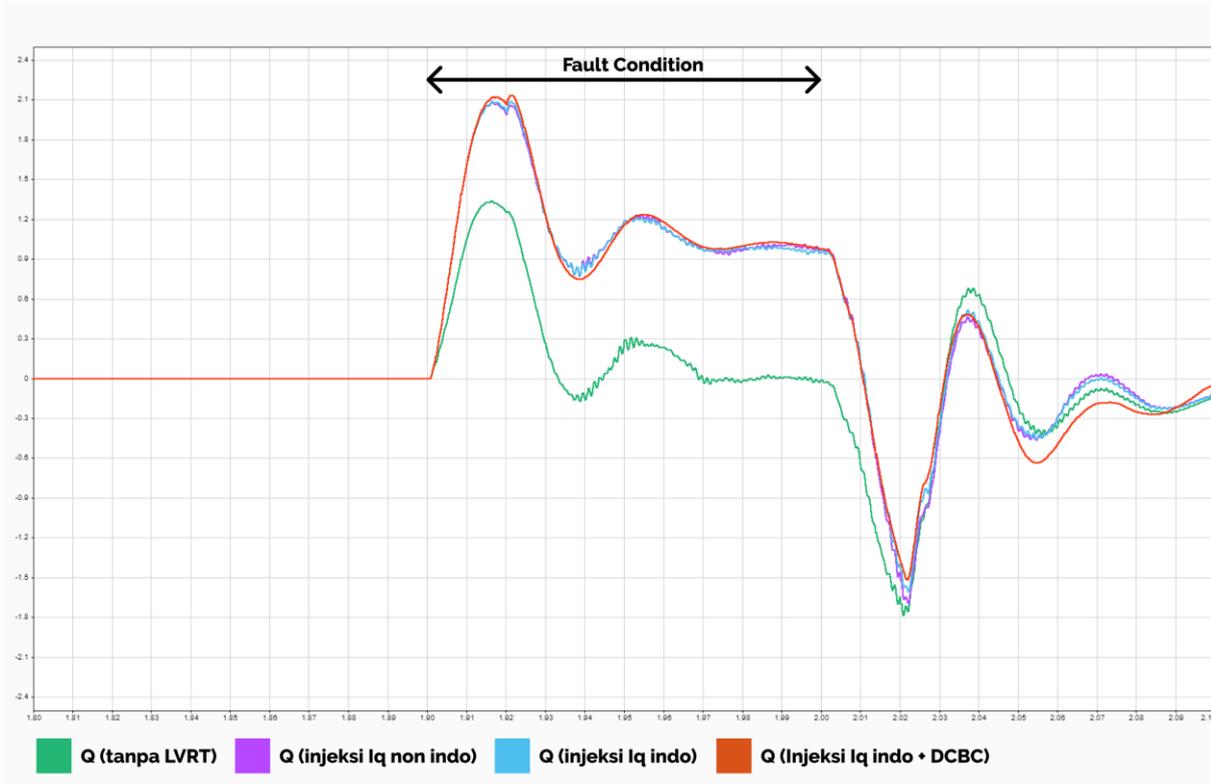
- Nilai Daya Reaktif



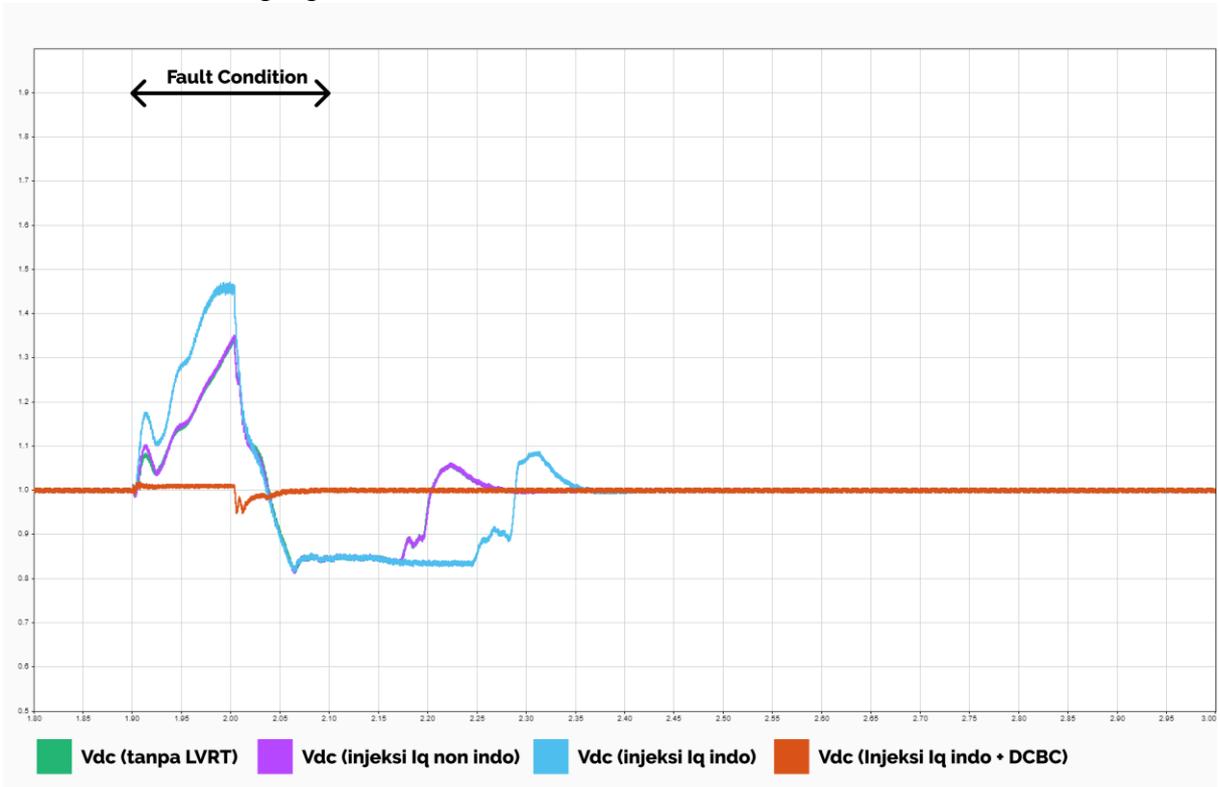
86%



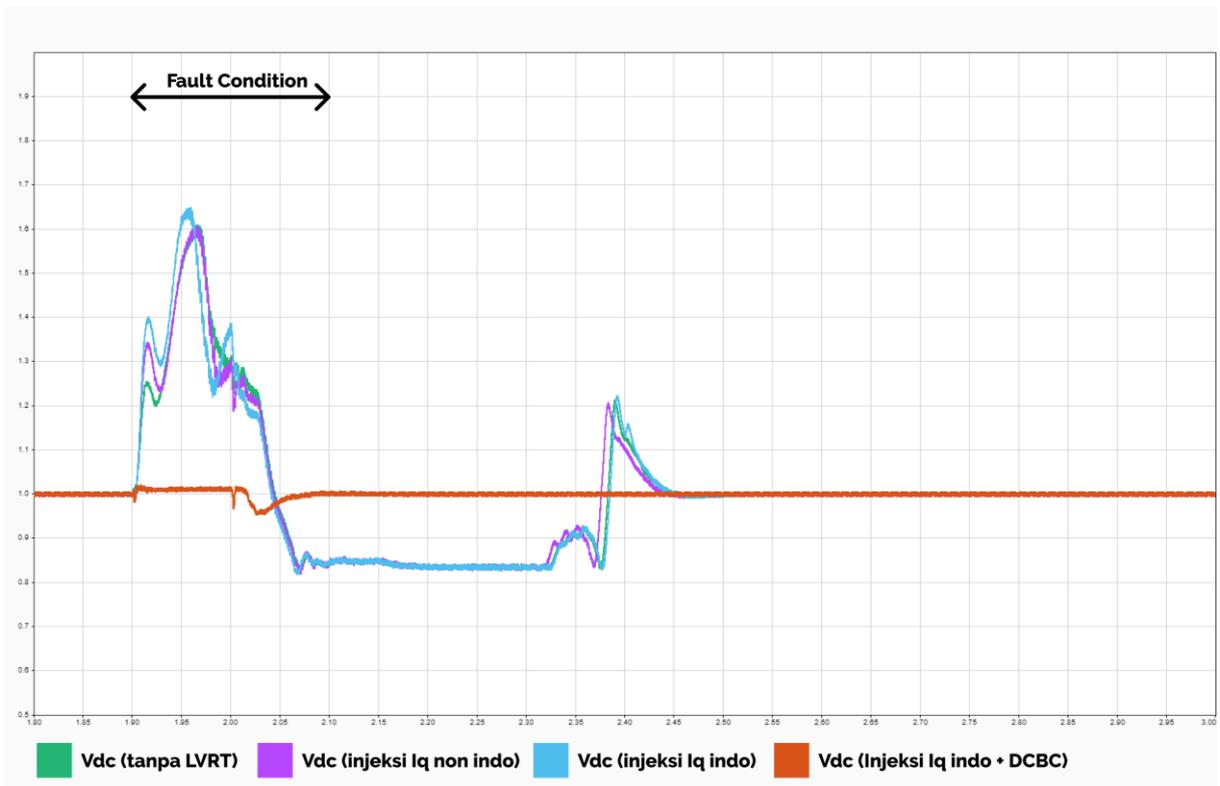
69%



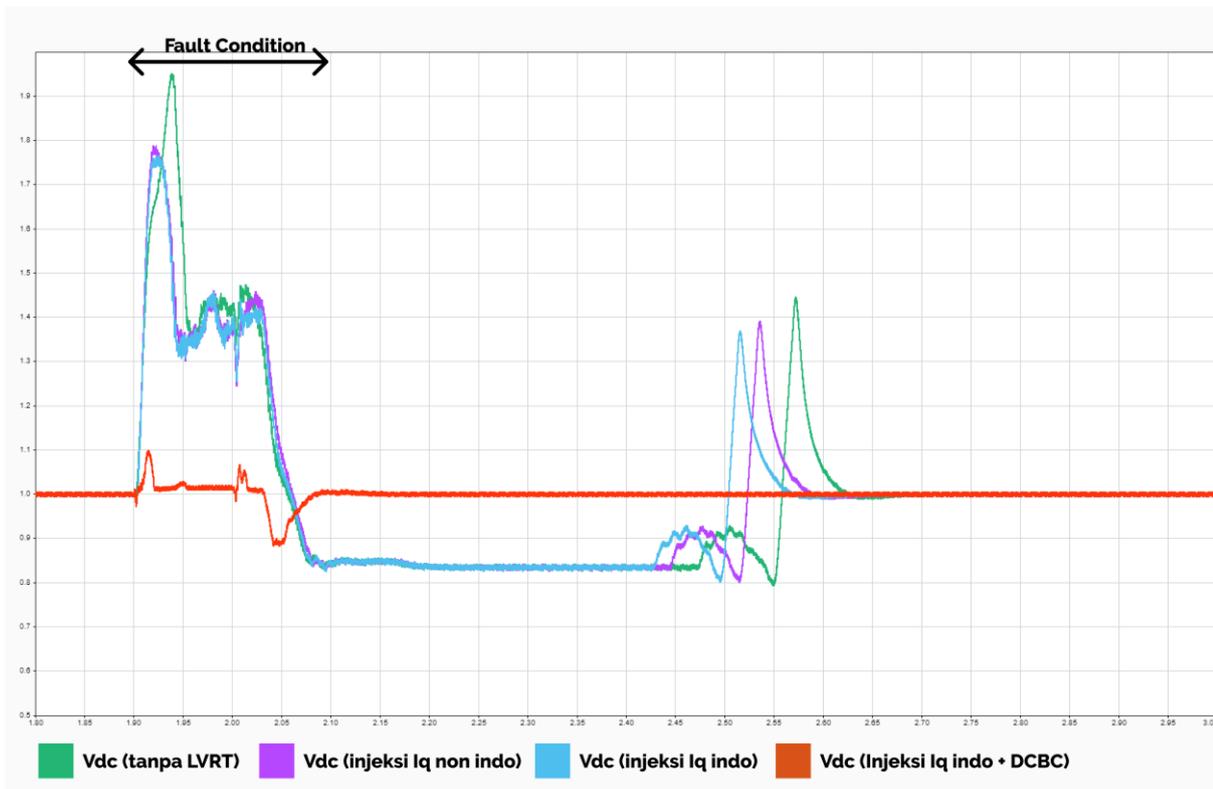
- Nilai Tegangan DC link



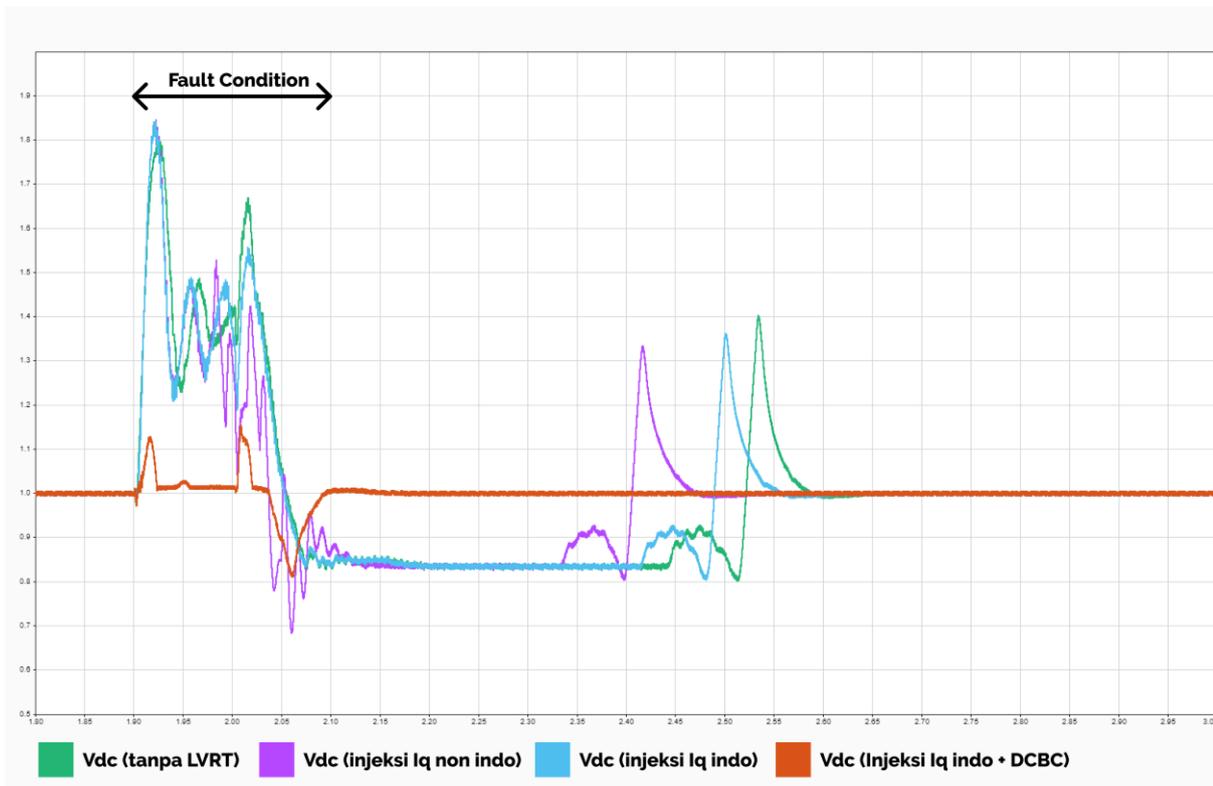
86%



69%



49%



25%