

Multi DVR Untuk Meningkatkan Kualitas Daya Pada Sistem Tiga Phasa Menggunakan Kendali PI

¹Erika Putri Pulmalasari, ^{2*}Amirullah,

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Surabaya, Surabaya

¹erikaputri3397@gmail.com, ^{2*}amirullah@ubhara.ac.id

Article Info

Keyword:

Multi-DVR
Total Harmonic Distortion
Proportional Integral

Copyright © 2025 -SNTE
All rights reserved

ABSTRACT

Tujuan penelitian adalah melakukan implementasi model multi-DVR untuk meningkatkan kualitas daya tegangan beban pada saluran distribusi tegangan rendah tiga phasa 380 V-50 Hz. Sistem multi-DVR terdiri dari tiga buah rangkaian DVR yang disusun secara seri menggunakan kendali proporsional integral (PI). Model kombinasi rangkaian DVR digunakan untuk mengatasi kegagalan kerja pada salah satu satu/dua dan ketidakmampuan sistem pada satu/dua rangkaian DVR dalam mengatasi gangguan akibat tegangan sag, swell, interupsi, dan distorsi harmonisa tegangan sumber. Kombinasi rangkaian multi-DVR meliputi: tanpa DVR-PV, 1 DVR, 2 DVR, dan 3 DVR dengan enam kasus gangguan tegangan disisi sumber. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tiga kombinasi DVR mampu mengatasi kegagalan kerja pada salah satu satu/dua rangkaian DVR dalam mengatasi gangguan akibat tegangan sag, swell, dan interupsi disisi sumber. Tiga kombinasi DVR mampu menghasilkan *total harmonic distortion* (THD) V_L dibawah 5% sehingga sudah memenuhi Standar IEEE-519. Kombinasi rangkaian 3 DVR juga mampu menghasilkan THD V_L lebih besar dibandingkan 1 DVR dan 2 DVR. Penelitian dilakukan dengan bantuan simulasi Matlab Simulink.

Corresponding Author:

Amirullah

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Surabaya, Surabaya

Jalan Ahmad Yani No.114, Ketintang, Kecamatan Gayungan, Surabaya

Email: amirullah@ubhara.ac.id

I. PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah beban sensitif dan kritis pada pelanggan listrik akibat penggunaan peralatan sensitif tegangan pada beberapa decade terakhir, telah memberikan dampak terhadap memburuknya kualitas daya listrik (PQ) pada sistem distribusi tegangan rendah. Sejumlah masalah kualitas daya khususnya masalah yang berhubungan dengan mitigasi tegangan juga semakin penting dari keberadaan beban sensitif dari sudut pandang pelanggan. Masalah kualitas daya yang berhubungan dengan tegangan yang mengemuka saat ini adalah: gelombang tegangan sag/swell, harmonisa, fluktuasi, interupsi, dan ketidakseimbangan tegangan. Sesuai dengan Standar IEEE 1346 [1] dan IEEE 1159 [2], definisi tegangan sag adalah tegangan AC RMS (root mean square) yang turun sebesar 10% s/d 90% dari nominal tegangan pada frekuensi daya dengan durasi 0,5 siklus hingga satu menit. Penurunan tegangan disebabkan oleh hubungan pendek satu phasa ke tanah pada sistem sumber listrik, dimulai pada motor induksi berkapasitas besar dan perubahan mendadak pada sistem terhubung menjadi besar beban [3]. Dynamic voltage restorer (DVR) adalah peralatan

elektronika daya yang mampu melakukan mitigasi pada gangguan tegangan sumber antara-lain: sag, swell, harmonisa, fluktuasi, interupsi, dan ketidakseimbangan tegangan. Ditinjau dari jumlah fasa sistem, DVR terdiri dari DVR satu fasa dan DVR tiga fasa. DVR tiga fasa dapat dihubungkan dalam bentuk sistem 3 kawat 3 fasa-3 phase 3 wire (3P3W) atau 3 kawat 4 fasa-3 phase 4 wire (3P4W).

Simulasi DVR satu fasa tegangan rendah berdasarkan inverter bertingkat untuk melindungi beban sensitif telah diterapkan pada [4]. Model yang diusulkan mampu mengkompensasi tegangan sag dan meningkatkan kualitas daya disisi beban menggunakan pulsa langsung bertingkat dengan modulasi lebar pulsa (PWM) konverter ac-ac telah diusulkan dalam [5]. Dalam skema ini, sel satuan dari konverter bertingkat terdiri dari ac-ac satu fasa konverter PWM menggunakan struktur switching cell (SC) yang dipasangkan dengan induktor teknik pergeseran fasa yang dilakukan PWM, mampu secara signifikan mengurangi ukuran filter keluaran induktor. Skema kontrol DVR satu dan tiga phase menggunakan PSCAD/EMTDC telah diamati pada [6]. Sistem yang diusulkan mampu mengkompensasi jumlah variasi tegangan sag dan menjaga beban tegangan konstan. Skema kontrol DVR dengan konverter ac-ac, berdasarkan karakterisasi jatuh tegangan yang dimilikinya telah diselidiki pada [7] untuk mengurangi penurunan tegangan dengan lompatan fasa. Keunggulan kendali yang diusulkan dengan skema ini kemudian divalidasi pada topologi interfase konverter ac-ac satu fasa berbasis vector. Kontrol DVR menggunakan sinkron kerangka acuan (SRF) yang ditingkatkan telah diusulkan pada [8]. Analisis vektor yang digunakan dalam metode pengendalian ini selama periode tegangan mampu memberikan besaran dan phase tegangan injeksi.

Metode pengendalian untuk mengurangi tegangan sag menggunakan kendali logika fuzzy (FLC) yang terhubung dengan beban sensitif [9] dan pembangkitan terdistribusi (DG) [10] telah diusulkan. Kendali FLC digunakan untuk membangkitkan pulsa dengan teknik modulasi lebar pulsa sinusoidal (SPWM) pada keluaran rangkaian filter aktif. Dibandingkan dengan kontrol proporsional-integral (PI), kendali FLC mampu menyediakan kinerja yang lebih baik selama tegangan sag karena lebih memiliki banyak keuntungan dalam hal ketahanan terhadap variasi parameter dan eksekusi sistem. DVR dengan kendali FLC yang terhubung dengan DG juga mampu meningkatkan profil variasi tegangan, kualitas daya, dan keandalan. DVR satu fasa dan DVR tiga fasa menggunakan sumber AC satu phase ke konverter matriks AC untuk menggantikan inverter sumber tegangan (VSI), telah diselidiki oleh Matlab di [11, 12], dan di PSCAD [13], dengan beberapa variasi tegangan sumber (sag, flicker, dan tidak seimbang). DVR fasa tunggal telah disimulasikan dalam [14] dan sebuah metode deteksi tegangan khusus untuk DVR fasa tunggal telah diperkenalkan pada [15]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa DVR mampu mempertahankan tegangan beban nominal, meskipun ada gangguan dan kondisi abnormal lainnya dari sisi sumber. Metode deteksi khusus menggunakan loop tertutup ganda dengan pengontrol resonansi proporsional juga mampu untuk memberikan kinerja unggul dalam deteksi dan kompensasi tegangan.

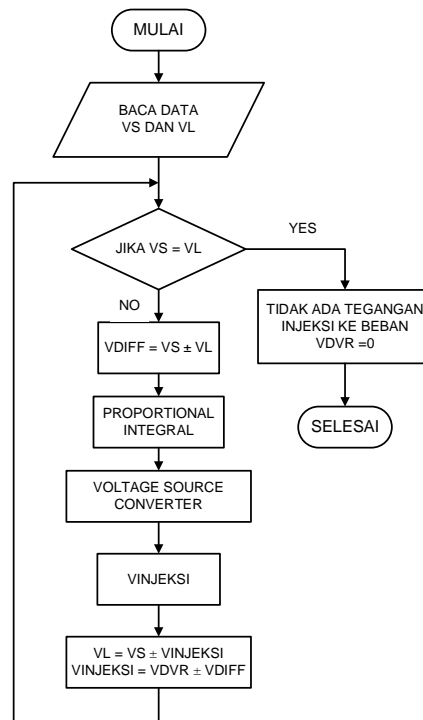
Penelitian mengusulkan implementasi model multi-DVR untuk meningkatkan kualitas daya tegangan beban pada saluran distribusi tegangan rendah 380 V-50 Hz. Sistem multi-DVR terdiri dari tiga buah rangkaian DVR yang disusun secara seri menggunakan kendali PI. Model kombinasi rangkaian DVR digunakan untuk mengatasi kegagalan kerja pada salah satu satu/dua dan ketidakmampuan sistem pada satu/dua rangkaian DVR dalam mengatasi gangguan akibat tegangan sag, swell, interupsi, dan distorsi harmonisa tegangan sumber.

II. METODE PENELITIAN

A. *Dynamic Voltage Restorer*

Dynamic Voltage Restorer (DVR) adalah dipasang pada saluran distribusi sistem tenaga listrik untuk mengamankan beban-beban sensitif dari tegangan dip (voltage sag). Sistem DVR terdiri dari beberapa bagian yaitu: inverter, filter output inverter, sumber tegangan dc dari energy storage, transformator injeksi tegangan dan rangkaian kendali. Rangkaian filter pada sistem DVR dipasang untuk tujuan menghilangkan noise swiching frekuensi tinggi yang disebabkan oleh swiching rangkaian inverter. Rangkaian filter terdiri dari induktor, resistansi induktor dan kapasitor. Rangkaian filter yang dipasang tersebut akan menyebabkan timbul resonansi frekuensi tinggi disekitar frekuensi cutoff filter. Pada beban nonlinier yang menimbulkan arus harmonisa frekuensi tinggi disekitar frekuensi cutoff filter akan menyebabkan juga resonansi frekuensi

tinggi secara kontinu pada tegangan DVR. Gambar 1 menunjukkan diagram alir mekanisme kerja DVR. Gambar 1 menunjukkan bagan alir mekanisme kerja DVR.

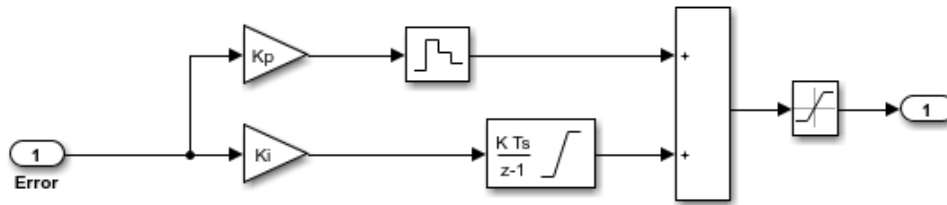


Gbr. 1 Bagan Alir Mekanisme Kerja DVR

Gambar 1 dimulai dari pembacaan data parameter masukan meliputi data tegangan sumber (V_s), dan tegangan beban (V_L). Jika tidak ada gangguan pada sisi sumber, maka nilai tegangan sumber (V_s), sama dengan tegangan beban (V_L), sehingga tidak muncul tegangan injeksi DVR (V_{DVR}). Sebaliknya jika terjadi gangguan pada sisi sumber berupa tegangan sag, tegangan swell, atau tegangan interupsi, maka akan muncul kenaikan atau penurunan tegangan beban (V_L) terhadap tegangan sumber (V_s), sehingga akan menimbulkan selisih tegangan (V_{diff}). Dengan menggunakan kendali PI, selanjutnya selisih tegangan (V_{diff}) akan menjadi input bagi rangkaian voltage source converter (VSC) untuk menentukan parameter output berupa tegangan injeksi (V_{inj}) kepada sisi beban.

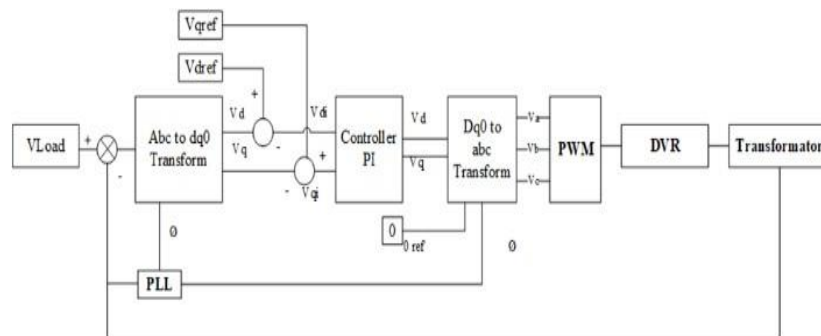
B. Desain Kendali Rangkaian DVR

Karakteristik kendali PI sangat dipengaruhi oleh kontribusi parameter P, I dan D. Penyetelan konstanta K_p , K_i dan K_d akan mengakibatkan keutamaan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat disetel lebih menonjol dibanding konstanta yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan. Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing pengontrol P, I dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi pengontrol proporsional plus integral plus diferensial (pengontrol PI). Elemen-elemen pengontrol P, I masing-masing secara keseluruhan bertujuan mempercepat reaksi sebuah sistem mencapai nilai set point, menghilangkan offset, menghasilkan perubahan awal yang besar dan mengurangi overshoot. **Gambar 2** menunjukkan blok diagram kendali PI menggunakan Matlab.



Gbr. 2 Blok diagram kendali PI menggunakan Matlab

Gambar 3 menunjukkan blok diagram kendali DVR tunggal. Konfigurasi sistem terdiri dari dua bagian utama, yaitu sebuah bagian rangkaian distribusi dan sebuah bagian sub-sistem DVR. Bagian rangkaian distribusi berfungsi untuk jalur jaringan listrik, sedangkan bagian Sub-sistem DVR berfungsi untuk mendeteksi nilai tegangan yang mengalir dan ketika gangguan tegangan muncul pada sumber. Tegangan gangguan terjadi pada sisi sumber antara-lain: tegangan sag, swell, atau interruption. Ketika terjadi gangguan disisi sumber, DVR akan menginjeksikan tegangan kompensasi melalui transformator ke beban supaya nilainya mendekati tegangan sumber.



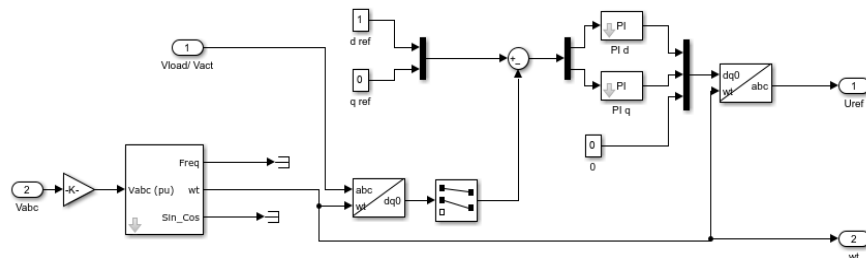
Gbr 3. Blok diagram kendali DVR tunggal

Penentuan nilai tegangan jatuh pada beban 3 fasa dilakukan untuk menentukan nilai tegangan injeksi DVR. Metode space vector control digunakan untuk merubah sistem tegangan 3 fasa dimensi abc menjadi tegangan 2 dimensi direct-quadrature (dq0). Tujuan penggunaan sistem tegangan dq0 adalah untuk memudahkan kendali transformasi abc-dq0 merubah sistem 3 fasa menjadi 2 fasa sehingga variable yang diatur hanya dua, pengaturan salah satu variable memberikan perubahan yang sama pada tegangan 3 fasa. Secara matematis model abc dikonversi ke model dq0 menggunakan transformasi Park untuk mengubah sinyal 3 fasa (abc) menjadi kerangka acuan berputar dq0. Posisi sudut kerangka berputar diberikan oleh input ωt , dalam radian. **Persamaan 1** menunjukkan transformasi persamaan model abc ke model dq0. **Persamaan 2** menunjukkan transformasi persamaan model dq0 kembali ke model abc.

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{2}{3} (V_a \sin(\omega t) + V_b \sin(\omega t - 2\pi/3) + V_c \sin(\omega t + 2\pi/3)) \\ V_q &= \frac{2}{3} (V_a \cos(\omega t) + V_b \cos(\omega t - 2\pi/3) + V_c \cos(\omega t + 2\pi/3)) \\ V_0 &= \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_a &= V_d \sin(\omega t) + V_q \cos(\omega t) + V_0 \\ V_b &= V_d \sin(\omega t - 2\pi/3) + V_q \cos(\omega t - 2\pi/3) + V_0 \\ V_c &= V_d \sin(\omega t + 2\pi/3) + V_q \cos(\omega t + 2\pi/3) + V_0 \end{aligned} \quad (2)$$

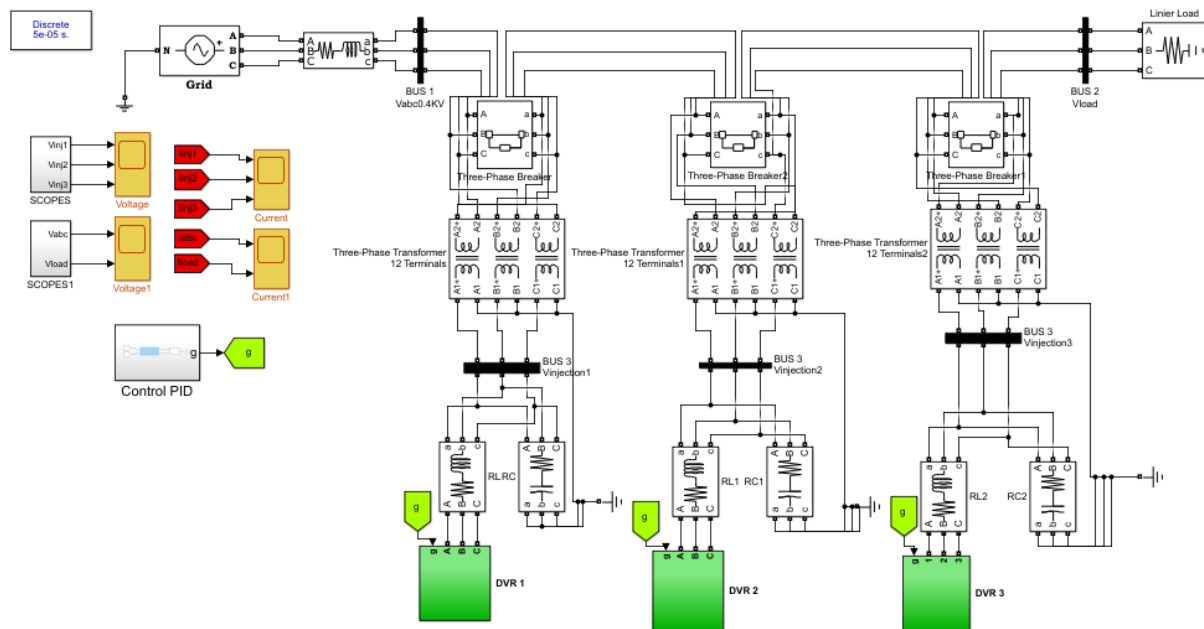
Gambar 4 menunjukkan model simulink transformasi abc-dq0 dan dq0-abc menggunakan kendali PI pada tegangan.



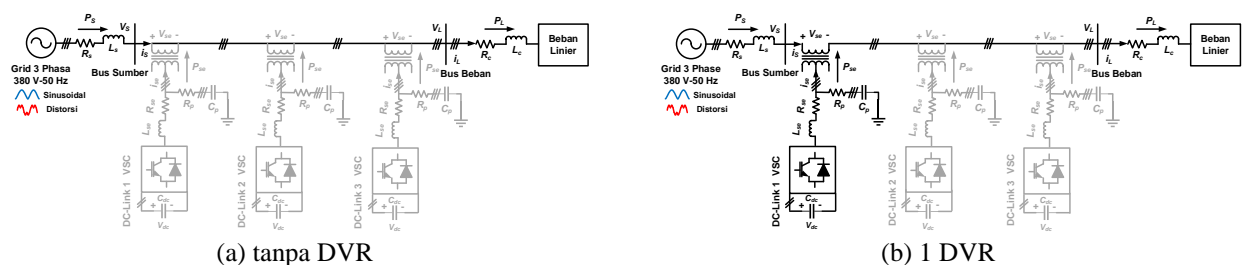
Gbr 4. Model simulink transformasi abc-dq menggunakan kendali PI pada tegangan

C. Desain Konfigurasi Rangkaian Multi DVR

Gambar 5 menunjukkan model rangkaian simulink multi DVR menggunakan tiga rangkaian DVR. Gambar 6 menunjukkan kombinasi model rangkaian multi DVR tiga fasa masing-masing tanpa rangkaian DVR, menggunakan rangkaian 1 DVR, 2 DVR, dan 3 DVR.

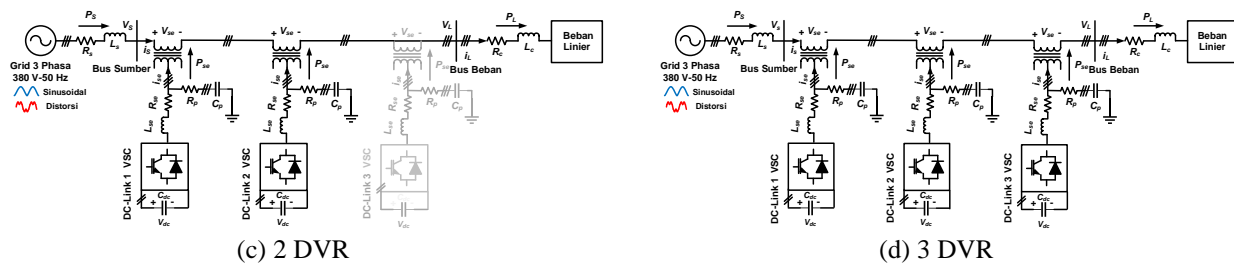


Gbr. 5 Model rangkaian simulink multi DVR



(a) tanpa DVR

(b) 1 DVR



Gbr 6. Kombinasi model rangkaian multi DVR tiga fase

Gambar 5 menunjukkan rangkaian simulink multi DVR menggunakan tiga DVR. Sistem distribusi grid tiga fase tiga kawat tegangan 330 volt-50 Hz-terhubung ke beban linier melalui sistem multi DVR tiga fase. Rangkaian VSC berfungsi menentukan nilai duty-cycle tegangan input untuk menghasilkan tegangan output sesuai dengan tegangan DC-link. Metode kendali PI digunakan sebagai kendali output tegangan referensi d dan q berdasarkan input perubahan error tegangan d dan error tegangan q yang selanjutnya akan dikonversi menjaga tegangan referensi beban tiga fase. Metode PI selanjutnya akan mengendalikan tegangan referensi supaya mampu menjaga tegangan beban supaya tetap konstan dan menurunkan harmonisa tegangan beban pada gangguan tegangan di sisi sumber (PLN).

Tabel 1. Parameter simulasi model

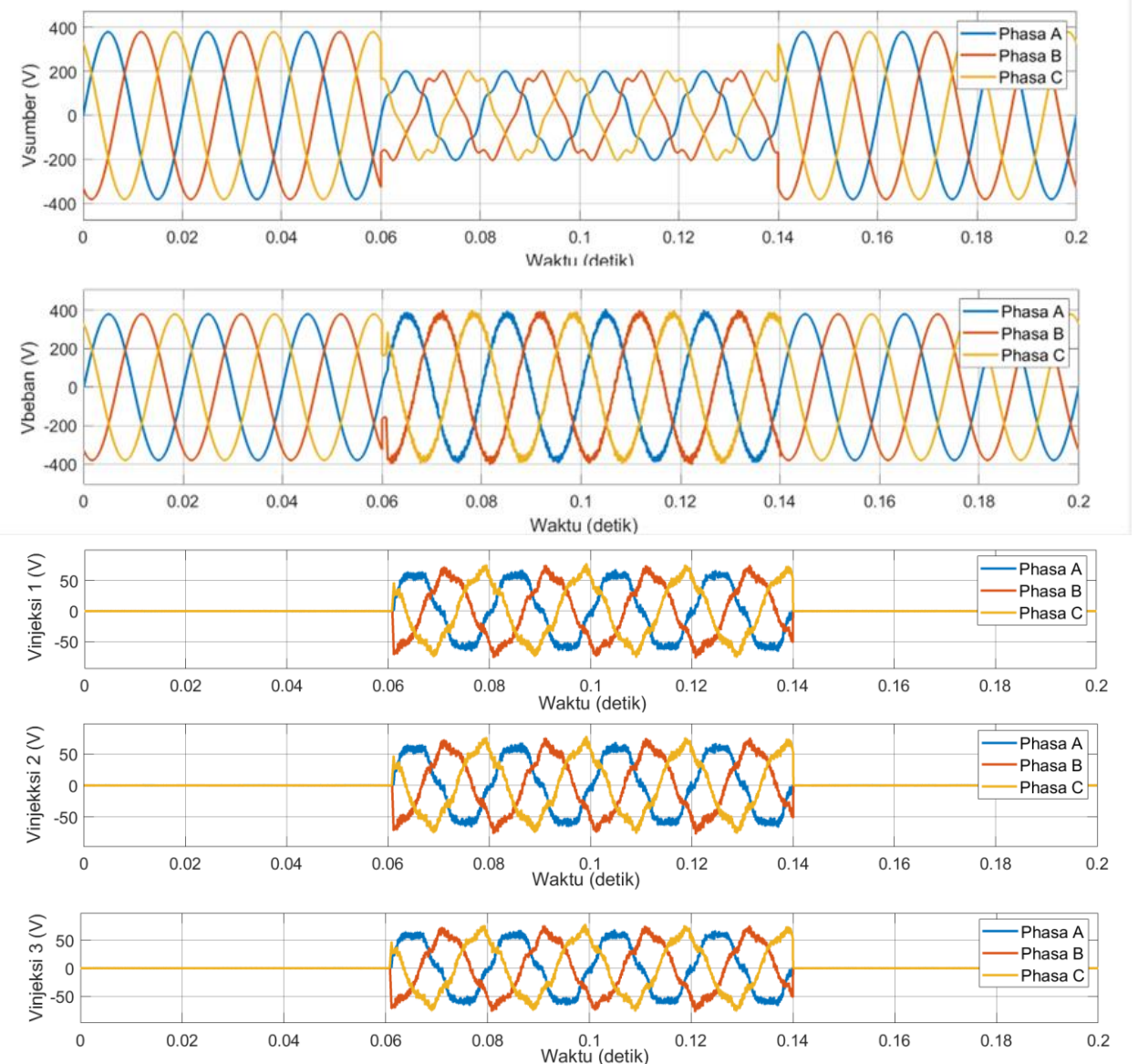
Peralatan	Parameter	Nilai Desain
Grid Tiga Fase	Tegangan RMS Frekuensi Impedansi Saluran	380 volt (L-L) 50 Hz $R_s = 0.1 \text{ Ohm}$ $L_s = 0,1 \text{ mH}$
Filter Aktif Seri	Induktansi Seri	$L_{se} = 0.015 \text{ mH}$
Impedansi Beban	Resistansi Induktansi	$R_c = 1 \text{ Ohm}$ $L_c = 0,01 \text{ mH}$
Beban Sensitif	Resistansi (R_L) Induktansi (L_L) Kapacitansi (C_L)	$R_L = 60 \text{ Ohm}$ $L_L = 0.1 \text{ mH}$ $C_L = 100 \mu\text{F}$
Transformator Seri	Rating kVA Frequency N_1/N_2	10 kVA, 50 Hz 1:1
DC Link	Tegangan DC Kapasitansi	$V_{DC} = 650 \text{ Volt}$ $C_{DC} = 3000 \mu\text{F}$
Model Kendali	Proportional Integral	Proportional Integral
Variabel Input	Proportional Integral Error tegangan referensi d (delta tegangan d) Kontranta Proporsional (K_p) Kontranta Integral (K_i) Proportional Integral Error tegangan referensi q (delta tegangan q) Kontranta Proporsional (K_p) Kontranta Integral (K_i)	$K_p = 40$ $K_i = 154$ $K_p = 25$ $K_i = 260$
Variabel Output	Error tegangan referensi dq0 (delta tegangan dq0)	constant [0,1]

Model kombinasi rangkaian sistem multi-DVR tiga fase ditunjukkan pada Gambar 6 meliputi kondisi: tanpa DVR, 1 DVR, 2 DVR, dan 3 DVR. Skenario gangguan tegangan dari sisi sumber (PLN) berupa tegangan sinusoidal (Sin), tegangan terdistorsi (Dis), Sag 50%, Swell 50%, dan Interupsi (Inter) 100%. Gangguan berjumlah enam kasus antara lain: (1) Sin-Sag-Beban Linier (LL), (2) Sin-Swell-LL, (3)

Sin-Inter-LL, (4) Dis-Sag-LL, (5) Dis-Swell-LL (6) Dis-Inter-LL. Analisis peningkatan kualitas daya menggunakan Multi DVR tiga fase disuplai oleh sistem PV dilakukan pada sejumlah parameter, antara lain: magnitudo tegangan sumber, magnitudo tegangan beban, THD tegangan sumber, THD tegangan beban sesuai Standar IEEE 519. Penelitian menggunakan Matlab/Simulink. **Tabel 1** menunjukkan parameter simulasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data dilakukan dengan melalui simulasi terhadap tiga kombinasi DVR dan enam kasus gangguan tegangan disisi sumber. Simulasi penelitian dilakukan selama 0.2 detik dengan durasi gangguan dan operasi kerja CB masing-masing pada tiga kombinasi DVR antara 0.06-0.14 detik. Pada penelitian dilakukan simulasi gangguan kasus 4 yaitu Dis-Sag-Beban Linier pada sisi sumber. Gangguan adalah tegangan sag 50% yaitu penurunan tegangan sumber tiga fase (V_s) sebesar 190 volt dengan kombinasi 1 rangkaian DVR menggunakan kendali PI. Sumber tegangan mengalami distorsi pada harmonisa ke-5 dan ke-7 masing-masing sebesar 5% dan 2%. **Gambar 7** menunjukkan performansi tegangan sumber (V_s), tegangan beban (V_L), dan tegangan injeksi (V_{inj}) pada kondisi operasi 1 DVR.



Gbr. 7 Performansi V_s , V_L , dan V_{inj} pada kondisi operasi 3 DVR

Gambar 7 menunjukkan pada kasus 4 dan durasi 0,06-0,14 detik tegangan sumber fase A (V_{S-PhA}) turun menjadi 189,8 V. Dengan menggunakan kendali PI kemudian DVR 1, DVR 2, dan DVR3 menginjeksikan tegangan pada fase A ($V_{Inj-PhA}$) masing-masing sebesar 62.95, 62.95, dan 62.86, sehingga tegangan beban fase A (V_{S-PhA}) kembali naik menjadi 378.6 V. Pada kombinasi 3 DVR, tegangan injeksi ke bus beban semuanya dipikul secara merata masing-masing oleh DVR ke-1, DVR ke-2, dan DVR ke-3. Tiga DVR mampu meninjeksikan tegangan ke bus beban karena CB_1 , CB_2 dan CB_3 semuanya beroperasi normal (membuka selama durasi gangguan). Dengan prosedur serupa selanjutnya nilai tegangan sumber, tegangan beban, dan tegangan injeksi DVR pada kombinasi, fase, dan kasus lainnya diperoleh dan hasilnya disajikan pada **Tabel 2, 3, dan 4**.

Tabel 2. Hasil simulasi tegangan sistem menggunakan satu DVR

No	Kasus	V_s (V)			V_L (V)			$V_{injeksi\ 1}$ (V)			$V_{injeksi\ 2}$ (V)			$V_{injeksi\ 3}$ (V)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	Sin-Sag-LL	189.8	189.8	189.8	379.8	380	380.5	190.1	190.3	190.8	0	0	0	0	0	0
2	Sin-Swell-LL	569.8	569.8	569.8	376.1	376.6	377	193.7	193.3	192.8	0	0	0	0	0	0
3	Sin-Inter-LL	0	0	0	380.4	381.8	381.4	381.2	382.1	381.6	0	0	0	0	0	0
4	Dis-Sag-LL	189.8	189.8	189.8	380.2	380.8	380.6	190.5	191.1	190.8	0	0	0	0	0	0
5	Dis-Swell-LL	569.8	569.8	569.8	379.6	379	378.7	190.2	190.8	191.1	0	0	0	0	0	0
6	Dis-Inter-LL	0	0	0	380.4	381.8	381.4	380.6	382	381.6	0	0	0	0	0	0

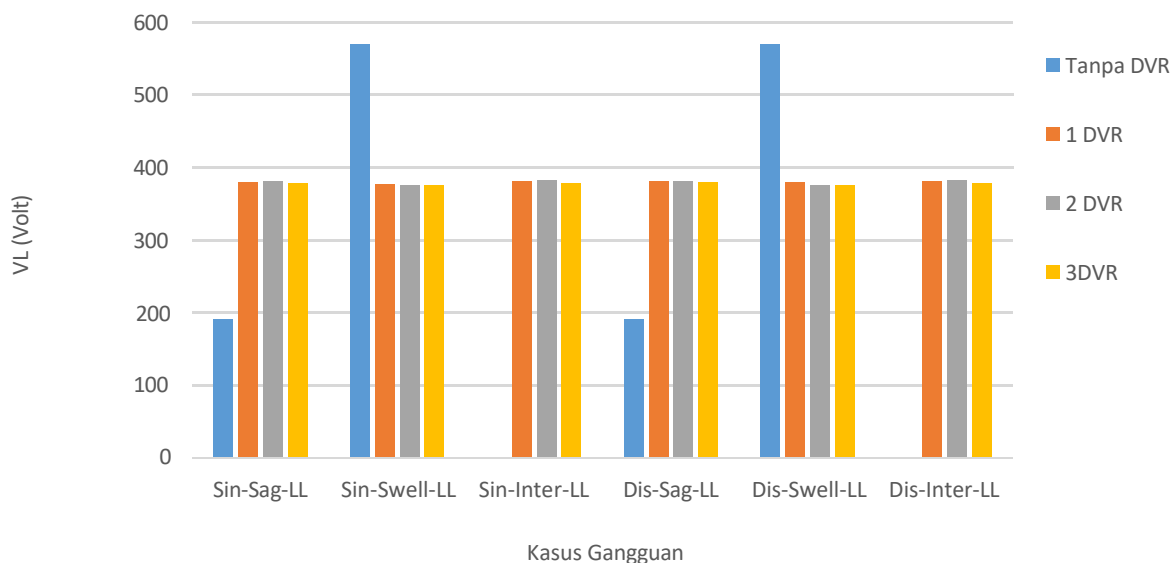
Tabel 3. Hasil simulasi tegangan sistem menggunakan dua DVR

No	Kasus	V_s (V)			V_L (V)			$V_{injeksi\ 1}$ (V)			$V_{injeksi\ 2}$ (V)			$V_{injeksi\ 3}$ (V)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	Sin-Sag-LL	189.8	189.8	189.8	379.9	380.6	380.7	95.11	95.44	95.5	95.11	95.44	95.5	0	0	0
2	Sin-Swell-LL	569.8	569.8	569.8	375.1	375.9	376.3	97.39	96.97	96.77	97.39	96.97	96.77	0	0	0
3	Sin-Inter-LL	0	0	0	381.6	381.3	381.9	190.9	190.8	191	190.9	190.8	191	0	0	0
4	Dis-Sag-LL	189.8	189.8	189.8	380.7	380.7	380.3	95.51	95.49	95.29	95.51	95.49	95.29	0	0	0
5	Dis-Swell-LL	569.8	569.8	569.8	374.9	375.5	376.1	97.49	97.2	96.86	97.49	97.2	96.86	0	0	0
6	Dis-Inter-LL	0	0	0	381.9	381.6	381.5	191.1	190.9	190.8	191.1	190.9	190.8	0	0	0

Tabel 4. Hasil simulasi tegangan sistem menggunakan tiga DVR

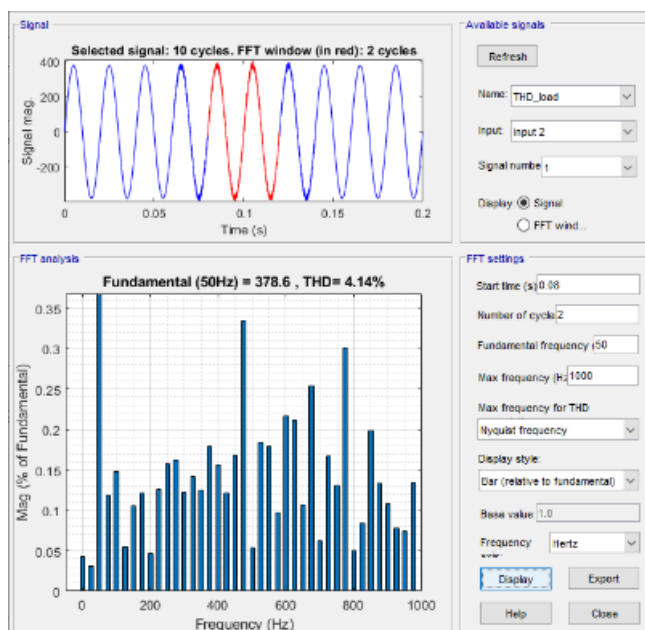
No	Kasus	V_s (V)			V_L (V)			$V_{injeksi\ 1}$ (V)			$V_{injeksi\ 2}$ (V)			$V_{injeksi\ 3}$ (V)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	Sin-Sag-LL	189.8	189.8	189.8	378.4	378.3	378.6	62.91	62.88	62.97	62.91	62.88	62.97	62.91	62.88	62.97
2	Sin-Swell-LL	569.8	569.8	569.8	375	374.6	374.5	65	65.14	65.15	65	65.14	65.15	65	65.14	65.15
3	Sin-Inter-LL	0	0	0	378.4	378.8	378.6	126.2	126.4	126.3	126.2	126.4	126.3	126.2	126.4	126.3
4	Dis-Sag-LL	189.8	189.8	189.8	378.6	378.3	378.4	62.95	62.86	62.91	62.95	62.86	62.91	62.95	62.86	62.91
5	Dis-Swell-LL	569.8	569.8	569.8	374.2	374.9	374.8	65.29	65.03	65.08	65.29	65.03	65.08	65.29	65.03	65.08
6	Dis-Inter-LL	0	0	0	378.4	378.9	378.3	126.2	126.4	126.2	126.2	126.4	126.2	126.2	126.4	126.2

Gambar 8 menunjukkan perbandingan tegangan V_L fase A pada 6 kasus gangguan tegangan sumber.



Gbr. 8 Perbandingan V_L Fase A pada 6 kasus gangguan tegangan sumber

Gambar 8 menunjukkan bahwa pada 6 kasus gangguan tegangan disisi sumber, kombinasi rangkaian 1 DVR, 2 DVR, dan 3 DVR tiga fase mampu mempertahankan tegangan beban (V_L) fase A diatas 374 V. Dengan demikian tiga kombinasi DVR mampu mengatasi kegagalan kerja pada salah satu satu/dua rangkaian DVR dalam mengatasi gangguan akibat tegangan sag, swell, dan interupsi di sisi sumber. **Gambar 9** menunjukkan performasi nilai THD tegangan beban (V_L) fase A pada kasus 4 dan kondisi operasi 3 DVR.



Gbr. 5 Performasi nilai THD V_L pada fase A pada kasus 4 dan kondisi operasi 3 DVR

Gambar 5 menunjukkan bahwa pada kasus 4 dan kondisi operasi 3 DVR mampu menghasilkan nilai THD V_L pada fase A sebesar 4.14%. Dengan prosedur serupa selanjutnya nilai THD V_L pada fase A kombinasi, kasus, dan fase, lainnya diperoleh dan hasilnya disajikan pada Tabel 5, 6, 7, dan 8.

Tabel 5. Hasil simulasi nilai THD sistem tanpa menggunakan DVR

No	Kasus	THD V_s (V)			THD V_L (V)			THD $V_{injeksi\ 1}$ (V)			THD $V_{injeksi\ 2}$ (V)			THD $V_{injeksi\ 3}$ (V)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	Sin-Sag-LL	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Sin-Swell-LL	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Sin-Inter-LL	16.03	15.62	15.85	5.25	5.25	5.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Dis-Sag-LL	10.77	10.77	10.77	10.76	10.77	10.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Dis-Swell-LL	3.59	3.59	3.59	3.59	3.59	3.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Dis-Inter-LL	7.740	6.885	3.714	5.225	5.257	5.224	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 6. Hasil simulasi nilai THD menggunakan satu DVR

No	Kasus	THD V_s (V)			THD V_L (V)			THD $V_{injeksi\ 1}$ (V)			THD $V_{injeksi\ 2}$ (V)			THD $V_{injeksi\ 3}$ (V)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	Sin-Sag-LL	0.19	0.19	0.19	3.49	3.53	3.72	7.06	7.14	7.49	0	0	0	0	0	0
2	Sin-Swell-LL	0.06	0.06	0.06	3.33	3.28	3.68	6.55	6.48	7.28	0	0	0	0	0	0
3	Sin-Inter-LL	139.51	143.12	137.64	3.49	3.69	3.78	3.54	3.75	3.53	0	0	0	0	0	0
4	Dis-Sag-LL	10.78	10.79	10.79	3.40	3.47	3.44	12.45	12.34	12.33	0	0	0	0	0	0
5	Dis-Swell-LL	3.59	3.59	3.59	3.43	3.55	3.45	12.47	12.13	12.37	0	0	0	0	0	0
6	Dis-Inter-LL	8161	8157	8131	3.49	3.69	3.78	6.25	6.34	6.43	0	0	0	0	0	0

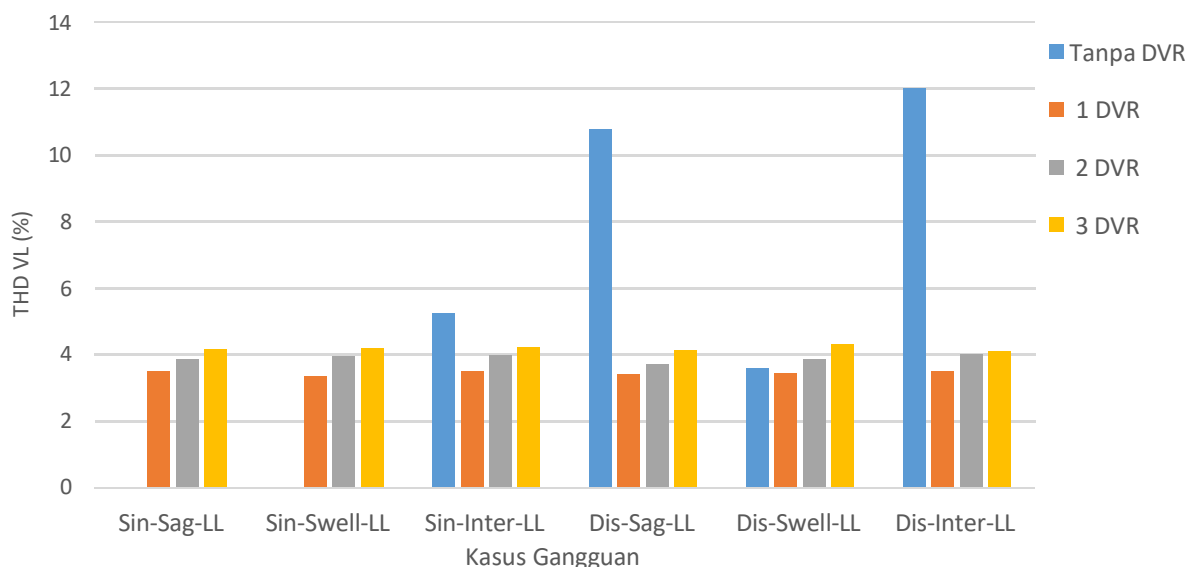
Tabel 7. Hasil simulasi nilai THD sistem menggunakan dua DVR

No	Kasus	THD V_s (V)			THD V_L (V)			THD $V_{injeksi\ 1}$ (V)			THD $V_{injeksi\ 2}$ (V)			THD $V_{injeksi\ 3}$ (V)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	Sin-Sag-LL	0.24	0.25	0.24	3.85	3.91	3.85	7.89	8.01	7.88	7.89	8.01	7.88	0	0	0
2	Sin-Swell-LL	0.08	0.08	0.08	3.95	3.61	3.74	7.83	7.24	7.52	7.83	7.24	7.52	0	0	0
3	Sin-Inter-LL	190.16	184.65	183.99	3.99	3.83	3.87	4.10	3.94	3.97	4.10	3.94	3.97	0	0	0
4	Dis-Sag-LL	10.79	10.79	10.79	3.72	3.80	3.72	12.87	13.21	12.88	12.87	13.21	12.88	0	0	0
5	Dis-Swell-LL	3.59	3.59	3.59	3.85	3.82	3.96	12.81	12.76	13.05	12.81	12.76	13.05	0	0	0
6	Dis-Inter-LL	8123	8135	8168	4	3.78	3.89	6.51	6.62	6.64	6.51	6.62	6.64	0	0	0

Tabel 8. Hasil simulasi nilai THD sistem menggunakan tiga DVR

No	Kondisi	THD V_s (V)			THD V_L (V)			THD $V_{injeksi\ 1}$ (V)			THD $V_{injeksi\ 2}$ (V)			THD $V_{injeksi\ 3}$ (V)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	Sin-Sag-LL	0.27	0.27	0.278	4.16	4.14	4.23	8.68	8.64	8.81	8.68	8.65	8.81	8.68	8.65	8.81
2	Sin-Swell-LL	0.09	0.09	0.09	4.18	4.21	4.26	8.37	8.42	8.50	8.37	8.42	8.50	8.37	8.42	8.50
3	Sin-Inter-LL	209.09	204.11	207.99	4.23	4.13	4.14	4.39	4.29	4.31	4.39	4.29	4.31	4.39	4.29	4.31
4	Dis-Sag-LL	10.79	10.79	10.79	4.14	4.01	4.23	13.65	13.57	13.87	13.65	13.57	13.87	13.65	13.57	13.87
5	Dis-Swell-LL	3.59	3.59	3.59	4.31	4.40	4.18	13.53	13.42	13.27	13.53	13.42	13.27	13.53	13.42	13.27
6	Dis-Inter-LL	8225	8207	8233	4.10	3.97	4.16	6.78	6.74	6.84	6.78	6.74	6.84	6.78	6.74	6.84

Gambar 9 menunjukkan perbandingan THD tegangan beban pada (V_L) fasa A pada 6 kasus gangguan tegangan disisi sumber.



Gbr. 9 Perbandingan THD V_L fase A pada 6 kasus gangguan tegangan disisi sumber

Gambar 9 menunjukkan bahwa pada enam kasus gangguan tegangan disisi sumber, kombinasi rangkaian 1 DVR, 2 DVR, dan 3 DVR tiga fase dengan sumber tegangan sinus dan terdistorsi menghasilkan THD tegangan beban (V_L) fase A maksimum sebesar 4,31%. Dengan demikian tiga kombinasi DVR mampu menghasilkan THD V_L dibawah 5% dan sudah memenuhi Standar IEEE-519. Kombinasi rangkaian 3 DVR tiga fase juga menghasilkan THD V_L lebih besar dibandingkan rangkaian 1 DVR dan 2 DVR.

IV. PENUTUP

Model multi-DVR untuk meningkatkan kualitas daya tegangan beban pada saluran distribusi tegangan rendah 380 V-50 Hz sudah diimplemntasikan. Sistem multi-DVR terdiri dari tiga buah rangkaian DVR yang disusun secara seri menggunakan kendali PI. Model kombinasi rangkaian DVR digunakan untuk mengatasi kegagalan kerja pada salah satu satu/dua dan ketidakmampuan sistem pada satu/dua rangkaian DVR dalam mengatasi gangguan akibat tegangan sag, swell, interupsi, dan distorsi harmonisa tegangan sumber. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tiga kombinasi DVR mampu mengatasi kegagalan kerja pada salah satu satu/dua rangkaian DVR dalam mengatasi gangguan akibat tegangan sag, swell, dan interupsi disisi sumber. Tiga kombinasi DVR sudah mampu menghasilkan THD V_L dibawah 5% sehingga sudah memenuhi Standar IEEE-519. Kombinasi rangkaian 3 DVR juga mampu menghasilkan THD V_L lebih besar dibandingkan 1 DVR dan 2 DVR.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Bhayangkara Surabaya atas pendanaan pada publikasi makalah ini.

REFERENSI

- [1] IEEE Std. 1346, "IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment", 1998.
- [2] IEEE Std. 1159, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", 1995.
- [3] M. Farhadi-Kangarlu, E. Babaei, and F. Blaabjerg, "A Comprehensive Review of Dynamic Voltage Restorers", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 92, pp. 136–155. 2017.
- [4] V.V. Ghatge and A.V. Naik, "Implementation of Multilevel Inverter", In: *Proc. of 2nd International Conference on Computing Methodologies and Communication*, Erode India, pp. 856-859, 2018.
- [5] S. Kim, H-G. Kim, and H. Cha, "Dynamic Voltage Restorer Using Switching Cell Structured Multilevel AC-AC Converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, Issue. 11, pp. 1-13, 2017.

-
- [6] A.K. Gupta and P. Gupta, "A Novel Control Scheme for Single and Three phase Dynamic Voltage Restorer Using PSCAD/EMTDC", In: *Proc. of International Conference on Smart Electric Drives and Power System*, Nagpur, India, pp. 44-49, 2018.
- [7] S. Jothibas and M.K. Mishra, "A Control Scheme for Storageless DVR Based on Characterization of Voltage Sags", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, Issue. 5, pp. 1-9, 2014.
- [8] D. N. Katole, M. B. Daigavane, S. P. Gawande, and P. M. Daigavane, "Vector Based Analysis for Design of Single Phase SRF Controller in Dynamic Voltage Restorer", In: *Proc. of IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, Chennai, India, pp.1-6, 2018.
- [9] P. Narnaware and V.A. Huchche, "Control Methods to Mitigate Voltage Sag Using Dynamic Voltage Restorer", In: *Proc. of International Conference on Smart Electric Drives and Power System*, Nagpur, India, pp. 147-150, 2018.
- [10] M.T. Hagh, A.Shaker, F. Sohrabi, and I.S. Gungel, "Fuzzy-Based Controller for DVR in The Presence of DG", In: *Proc. of 9th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perception*, Budapest, Hungary, pp. 684-690, 2017.
- [11] E. D. Rosli, M. N. Hidayat, S. Z. Mohammad Noor, and N. Hamzah, "Investigation on Single Phase AC-AC Dynamic Voltage Restorer Towards Mitigate Voltage Sag", In: *Proc. of IEEE Symposium on Computers & Informatics*, Langkawi, Malaysia, pp. 206-211, 2013.
- [12] E. Diyana binti Rosli, M. Nabil bin Hidayat, Rahimi bin Baharom, "Single Phase AC-AC Dynamic Voltage Restorer", In: *Proc. of International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Kitakyushu, Japan, pp. 1257-1262, 2013.
- [13] A. Zargar and S.M. Barakati, "A New Dynamic Voltage Restorer Structure Based on Three-Phase to Single-Phase AC/AC Matrix Converter", In: *Proc. of The 20th Iranian Electrical Power Distribution Conference*, Zahedan, Iran, pp.234-238, 2015.
- [14] B.L.S. Shraddha, Sonicka R, S.J. Pillai, and S. Modi "Simulation and Analysis of Dynamic Voltage Restorer", In: *Proc. of 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology*, Bangalore, India, pp. 1388-1393, 2018.
- [15] K. Gai, K. Bi, S. Fan, and L. Sun, "A Method of Voltage Detection Specific to Single-Phase Dynamic Voltage Restorer", In: *Proc. of IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific*, Harbin, China, pp. 1-4, 2017.