

KOMBINASI *FEED BACK* DAN *FEED FORWARD* KONTROLLER PI SEBAGAI KENDALI DYNAMIC VOLTAGE RESTORER (DVR) UNTUK MEMULIHKAN VOLTAGE SAG DAN INTERRUPTION

Dimas Anton A, Imron Rosyadi, Mochamad Ashari, Heri Suryoatmojo
Jurusan Teknik Elektro-FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS, Keputih-Sukolilo, Surabaya-60111
anton@ee.its.ac.id

Abstract

Dynamic voltage restorer (DVR) is one of equipments to protect sensitive load from voltage drop. DVR is installed series with line feeder by serial transformer which injecting voltage when under voltage occurs. This research is investigate the capability of DVR, which controlled by combination of feed back and feed forward PI, to handle voltage sag and interruption. DVR controls have been designed and implemented in DVR prototype. As a result, in simulation, DVR can maintain voltage in range 90% - 105% nominal voltage. Voltage at load side can be restored to 1 pu and 0.79 pu when voltage sag and interruption respectively. Furthermore, DVR prototype can restore 0.95 pu when voltage sag and 0.54 pu when interruption.

Keyword : PI controller, Voltage sag, Interruption, DVR, Prototype

Abstrak

Dynamic voltage restorer (DVR) adalah salah satu peralatan untuk melindungi beban sensitif terhadap penurunan tegangan sesaat. DVR dipasang melalui trafo seri diantara penyulang dan beban sensitif untuk menyuntikkan tegangan pada saat gangguan. Penelitian ini membahas kemampuan DVR dengan menggunakan kombinasi feed back dan feed forward controller PI untuk mengatasi voltage sag dan interruption. Kontrol DVR yang direncanakan juga diimplementasikan ke prototype DVR. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan beban dapat dijaga pada range yang diijinkan yaitu 90% s.d 105% dari tegangan nominal. Pada saat voltage sag, tegangan beban dijaga pada nilai 1 pu dan saat terjadi interruption tegangan beban dapat dipulihkan hingga mencapai 0.97 pu. Sedangkan hasil pengujian prototype menunjukkan bahwa pada saat voltage sag terjadi, tegangan beban dapat dipulihkan hingga 0.95 pu. Sedangkan ketika terjadi interruption, prototype mampu memulihkan tegangan beban sebesar 0.54 pu.

Kata Kunci : Cotroller PI, Voltage sag, Interruption, DVR, Prototype

1. PENDAHULUAN

Kualitas daya listrik merupakan salah satu faktor penting dalam sistem kelistrikan di industri maupun konsumen lain. Hal ini dikarenakan semakin jelek kualitas daya listrik dari suatu sistem kelistrikan, biaya yang harus dikeluarkan untuk mengatasi permasalahan-permasalahan yang ditimbulkan juga semakin besar. Faktor utama dari kualitas suplai tegangan listrik adalah magnitudo, bentuk gelombang dan frekuensi tegangan [1].

Interruption dan *voltage sag* merupakan fenomena penurunan tegangan yang sangat berpengaruh pada proses operasional industri atau konsumen lainnya. Pihak konsumen dan industri sering merasa dirugikan akibat kualitas tenaga listrik yang tidak memenuhi persyaratan untuk menjalankan proses produksi. *Interruption* di ukur ketika magnitude tegangan kurang dari 10% dari tegangan nominal. Pada beberapa kasus, *interruption* bisa di dahului oleh *voltage sag* jika terjadi gangguan pada sumber. *Voltage sag* terjadi diantara waktu terjadinya gangguan sampai peralatan proteksi bekerja. Sedangkan pada sisi beban akan mengalami *voltage sag*

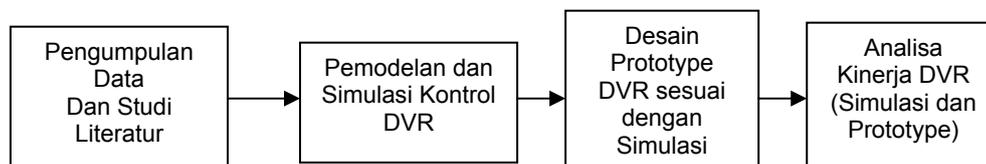
dan langsung diikuti *interruption*. Lamanya *interruption* pada beban tergantung pada kemampuan recloser bekerja [6].

Dari studi yang telah dilakukan, ditunjukkan bahwa *voltage sag* dan *interruption* dapat disebabkan oleh berbagai macam kejadian di sistem tenaga seperti gangguan hubungan singkat, perubahan beban yang cukup besar secara tiba-tiba, *energizing* trafo dan karakteristik pembebanan kosumen. *Voltage sag* dan *interruption* bisa berpengaruh fatal pada mesin-mesin produksi. Ketika terjadi *voltage sag* dan *interruption*, mesin sinkron bisa kehilangan sinkronisasi, motor induksi bisa mengalami penurunan kecepatan dan *programmable logic control* bisa mengalami *shut off* [1][2].

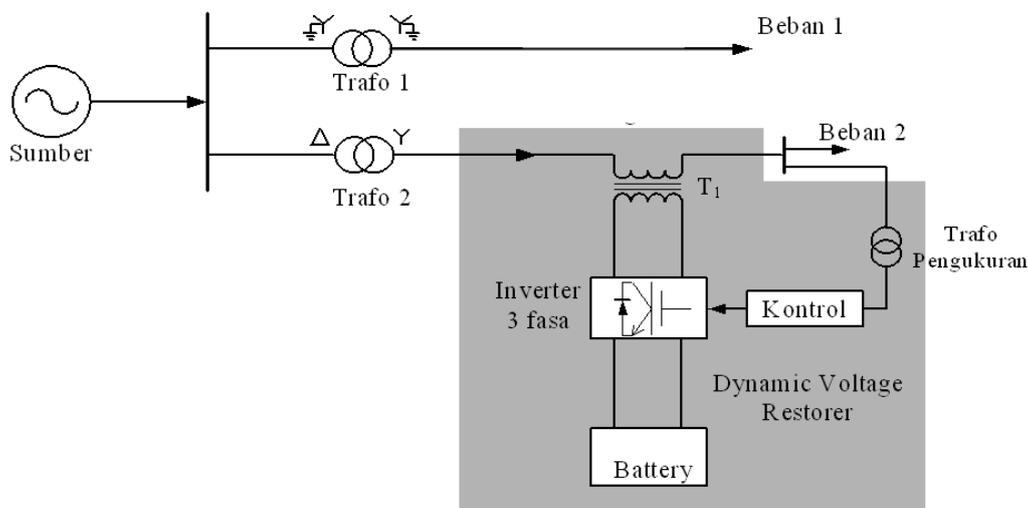
Untuk mengatasi permasalahan perubahan tegangan tersebut, dipasang suatu peralatan yang bisa menjaga kualitas mutu tegangan di beban. *Dynamic Voltage Restorer (DVR)* merupakan salah satu peralatan yang bisa mengkompensasi tegangan yang hilang sewaktu *voltage sag* dan *interruption*. DVR dipasang diantara sumber dan beban yang bertujuan memperbaiki mutu tegangan di beban dengan cara menginjeksi tegangan yang dibutuhkan ketika terjadi gangguan. DVR harus bisa mendeteksi terjadinya *voltage sag* dan *interruption* dengan tepat, jika tegangan beban berfluktuasi pada range yang diijinkan sistem yaitu -10% s.d +5% dari tegangan nominal, maka DVR akan tidak melakukan apa-apa. Hal ini sangat penting bagi *energy storage* yang digunakan DVR [4][5].

2. METODE PENELITIAN

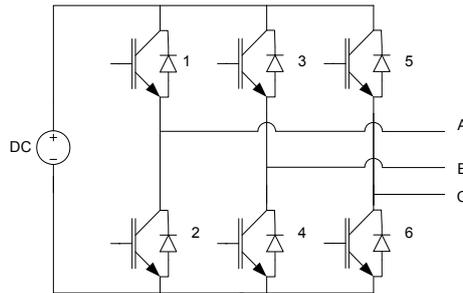
Pada penelitian ini telah dibuat prototype DVR dan untuk pertimbangan desain, simulasi DVR juga telah dibuat. Alur penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. DVR dipasang diantara beban dan *point of common coupling (PCC)* secara seri melalui suatu trafo seri (*booster transformer*). DVR tersusun atas beberapa komponen yaitu inverter sumber tegangan, rangkaian kontrol, trafo seri dan *energy storage*. Gambar 2 adalah sketsa pemasangan DVR dalam suatu kelistrikan industri.



Gambar 1. Alur penelitian



Gambar 2. Sistem Kelistrikan Dengan DVR



Gambar 3. Rangkaian Voltage Source Inverter tiga fasa

2.1 Inverter

Inverter yang digunakan pada DVR adalah jenis inverter sumber tegangan karena DVR membutuhkan injeksi tegangan. Inverter yang digunakan pada pemodelan adalah inverter PWM dengan alasan inverter PWM memiliki output arus sinusoidal, selain itu untuk mengatur frekuensi dan magnitudonya cukup mengontrol inverternya saja dengan tegangan sumber yang konstan. Dalam perancangan DVR ini, digunakan inverter sumber tegangan yang menggunakan enam buah MOSFET sebagai switch untuk tiap fasanya. Rangkaian inverter untuk tiap fasanya dapat dilihat pada Gambar 3. Besarnya tegangan output dari inverter PWM dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{LL} \cong 0.612m_a V_{dc} \tag{1}$$

dimana m_a adalah indek modulasi yang dihasilkan SPWM.

2.2 Sumber DC

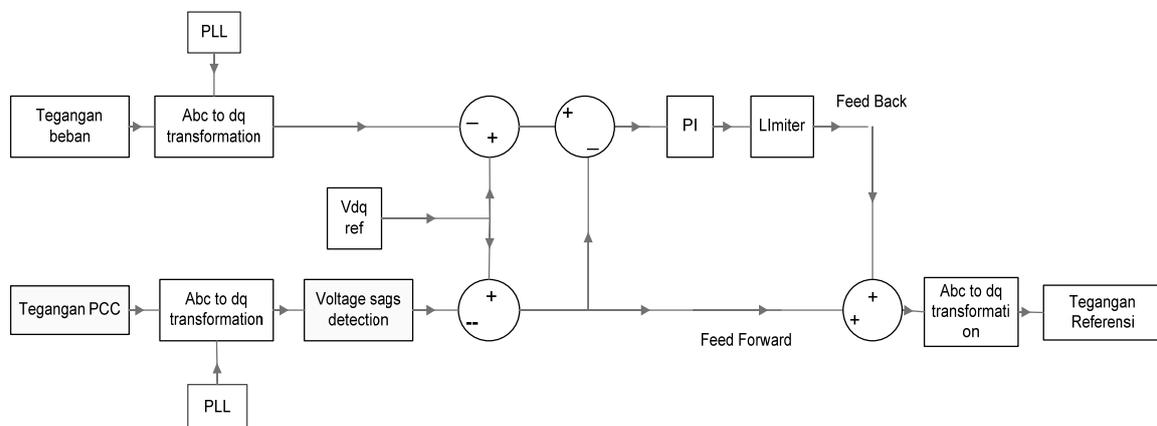
Sumber DC merupakan elemen yang sangat penting bagi DVR. Sumber DC ini nantinya akan diubah oleh inverter menjadi tegangan AC yang disuntikkan ke saluran. Besarnya sumber DC akan berpengaruh pada besarnya tegangan yang dihasilkan. Karena tegangan primer pada trafo seri adalah 110 V line to line, maka menurut persamaan (1) maka besarnya sumber DC yang diperlukan adalah

$$V_{dc} = 110 / (0.612 * m_a)$$

jika nilai m_a maksimum adalah 1, maka:

$$V_{dc} = 110 / 0.612$$

$$V_{dc} = 180 \text{ V}$$



Gambar 4. Blok diagram kontrol tegangan

2.3 Rangkaian Kontrol

Pada saat sinyal analog yang disensor dibaca oleh rangkaian kontrol, maka sinyal tegangan akan ditransformasikan ke sistem dq0. Jika nilai tegangan V_d dan V_q melebihi batas yang diijinkan pada *voltage sag detection*, maka timbul perbedaan besaran sinyal V_d dan V_q yang disensing dengan tegangan referensi yang ditentukan sebelumnya.

Perbedaan tegangan ini akan diteruskan ke controller untuk diolah sedemikian rupa sehingga tegangan output yang dihasilkan controller adalah referensi bagi *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) untuk menginjeksikan tegangan yang dibutuhkan agar tegangan beban menjadi normal kembali. Gambar 4 adalah blok rangkaian kontrol yang direncanakan.

2.3.1 Transformasi abc to dq

Adapun tujuan dari transformasi abc ke referensi dq adalah untuk memudahkan pemrosesan sinyal dimana tegangan sistem 3 phasa diubah menjadi 2 komponen V_d dan V_q . Transformasi sistem abc ke sistem dq disajikan dalam dua tingkat matriks, yaitu transformasi Clarke dan dilanjutkan transformasi Park. Transformasi Clarke,

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Transformasi Park,

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

dimana sudut θ adalah sudut radian dengan frekuensi sistem jala-jala yang diperoleh dari *phase locked loop* (PLL).

2.3.2 Voltage sag detection

Jika tegangan sumber bervariasi antara 0.9-1.05 pu, maka DVR akan tetap menginjeksikan tegangan untuk menuju kondisi seimbang sesuai tegangan referensi yaitu 1 pu. Oleh karena itu DVR menggunakan *energy storage system* untuk menyeimbangkan daya input-output. Jika tegangan sumber berada pada kondisi di atas dalam waktu cukup lama, maka akan muncul masalah pada *energy storage system*. Untuk mengatasi masalah ini, maka dilakukan penyempurnaan sistem kontrol dengan menggunakan *voltage sag detection*. Dengan adanya *voltage sag detection*, DVR tidak akan menyuntikkan tegangan ketika tegangan beban bervariasi pada range di atas. Metode yang digunakan berdasarkan error tegangan rms terhadap tegangan referensi yang mendeteksi adanya gangguan simetri maupun asimetri. Deteksi gangguan yang direncanakan menggunakan rumus berikut :

$$|U_{error,dq}| \geq U_{threshold} \quad (4)$$

dengan

$$|U_{error,dq}| = \sqrt{(U_{ref,d} - U_{supply,d})^2 + (U_{ref,q} - U_{supply,q})^2} \quad (5)$$

dimana $U_{threshold}$ adalah nilai referensi untuk menentukan apakah DVR menyuntikkan tegangan atau dalam keadaan standby.

2.4 DVR

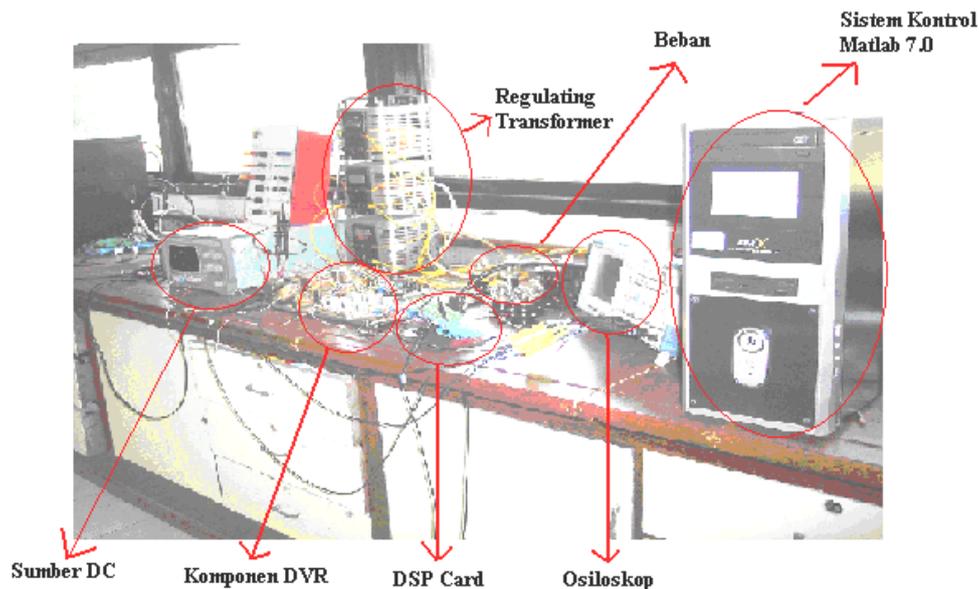
Prinsip dasar DVR adalah menginjeksi tegangan dinamik terkontrol yang dihasilkan oleh inverter secara seri pada bus tegangan dengan suatu trafo seri (*booster transformer*). Pada saat terjadi penurunan tegangan pada bus akibat gangguan, secara otomatis DVR

bekerja menginjeksikan tegangan dinamik terkontrol untuk mengurangi pengaruh bus yang mengalami penurunan tegangan. Mula-mula saat terjadi penurunan tegangan, sensor deteksi gangguan akan memonitoring level tegangan pada bus. Hasil monitoring tersebut akan dikirimkan sebagai sinyal input pada rangkaian kontrol DVR. Sinyal tersebut diolah sedemikian rupa pada rangkaian kontrol sehingga menjadi sinyal referensi bagi *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) untuk mengatur besarnya tegangan yang harus diinjeksikan oleh inverter.

Prinsip injeksi tegangan adalah apabila sumber tegangan dengan frekuensi tertentu dihubungkan seri dengan sumber tegangan yang lain dengan frekuensi sama, maka akan dihasilkan tegangan yang besarnya sama dengan penjumlahan kedua sumber tegangan tersebut. Sebagai contoh diketahui amplitudo masing-masing tegangan V_s dan V_i dengan frekuensi (f) yang sama, yaitu $V_s=200$ V dengan frekuensi 50 Hz dan V_i adalah 100 V. Dari persamaan:

$$V_L = V_s \sin \theta + V_i \sin \theta \quad (6)$$

maka harga V_L merupakan hasil dari penjumlahan antara gelombang sinusoidal V_s dan V_i yaitu 300 V. Karena V_s dan V_i memiliki sudut fasa yang sama, maka tidak ada beda fasa antara kedua tegangan tersebut



Gambar 5. *Prototype DVR*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini telah dibuat simulasi dan *prototype* DVR. Bagian *prototype* terdiri dari dua bagian yaitu komponen dasar DVR dan sistem kontrol. Komponen dasar terdiri dari inverter tiga fasa, trafo seri, sensing transformer, optokopler dan sumber DC. PC digunakan sebagai sistem kontrol *Prototype* dengan metode interfacing menggunakan *interface DSP card Adventech PCI 1710HG* dan sistem kontrolnya dibuat menggunakan software Simulink Matlab 7.0.

3.1. Simulasi DVR

Dari Gambar 2, dibuat simulasi dengan Matlab 7.0 dengan nilai parameter seperti pada Tabel 1. Simulasi gangguan yang dilakukan terdiri dari *voltage sag* satu fasa, *voltage sag* dua fasa, *voltage sag* tiga fasa dan *interruption*. *Voltage sag* disebabkan adanya hubung singkat pada beban 1 dan *interruption* disebabkan oleh terputusnya sumber. Hal-hal yang dianalisa adalah bentuk gelombang tegangan beban, regulasi tegangan, tegangan referensi injeksi dan daya yang disuntikkan inverter.

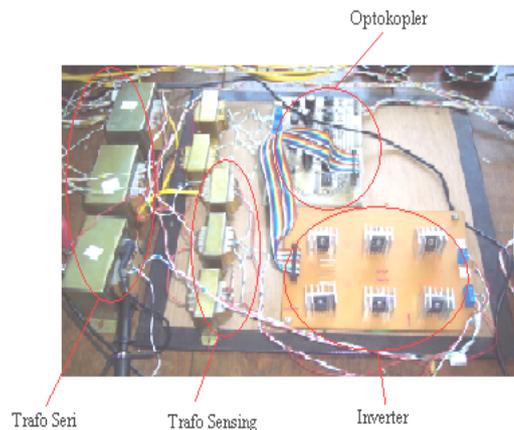
Tabel 1. Parameter Simulasi

Parameter	Nilai
Tegangan sumber 3 fasa (Vs)	6.1 kV
Tegangan beban	380 V
Frekuensi sistem	50Hz
Trafo distribusi	0.5MVA;6.1kV/380V
Beban 1	2000 W; 500 VAR
Beban 2	1500 W; 150 VAR
Tegangan base	6.1 kV untuk tegangan menengah 380 V untuk tegangan rendah
Trafo seri	3 kVA ; 110 / 380 V
Sumber DC	180 Volt.

3.2 Prototype DVR

Selain komponen utama di atas *prototype* ini juga memerlukan komponen tambahan yaitu *regulating transformer*, beban tiga fasa dan osiloskop sebagai alat ukur. Pengujian *voltage sag* dan *interruption* yang dilakukan tidak berasal dari adanya gangguan pada sistem, melainkan didapatkan dengan cara mengatur nilai keluaran dari *regulating transformer*. *Regulating transformer* adalah transformator 1 x 3 fasa yang dihubungkan dengan sumber tegangan PLN 220 Volt pada sisi primernya dan sisi sekundernya bisa menghasilkan tegangan yang bervariasi antar 0-430 Volt. *Regulating transformer* ini digunakan sebagai sumber bagi beban dan simulator terjadinya gangguan. Spesifikasi *regulating transformer* yang digunakan adalah 3 KVA; 50-60 Hz Input 380 V (line to line); Output 0-430 Volt; I = 4 A.

Komponen dasar *prototype* DVR terdiri dari inverter tiga fasa, trafo seri, trafo sensing, optokopler dan sumber DC. Inverter disusun seperti pada Gambar 3 dengan menggunakan MOSFET tipe 6N60. Untuk dapat mengoperasikan MOSFET sebagai saklar pada inverter, tegangan gerbang atau arus basis harus diberikan untuk membuat MOSFET bekerja. Pada penerapannya, tegangan terminal penghasil pulsa tidak dapat langsung dihubungkan dengan tegangan gerbang, oleh karena itu diperlukan suatu rangkaian yang menghubungkan keduanya. Pada inverter, digunakan optokopler sebagai isolasi antara drive basis dan gerbang pada MOSFET. Sumber DC sebagai input inverter didapatkan dengan menggunakan alat *Regulated DC Power Supply 6P-1503 DU* dengan besar tegangan 11 volt.

Gambar 6. Komponen Dasar *Prototype* DVR

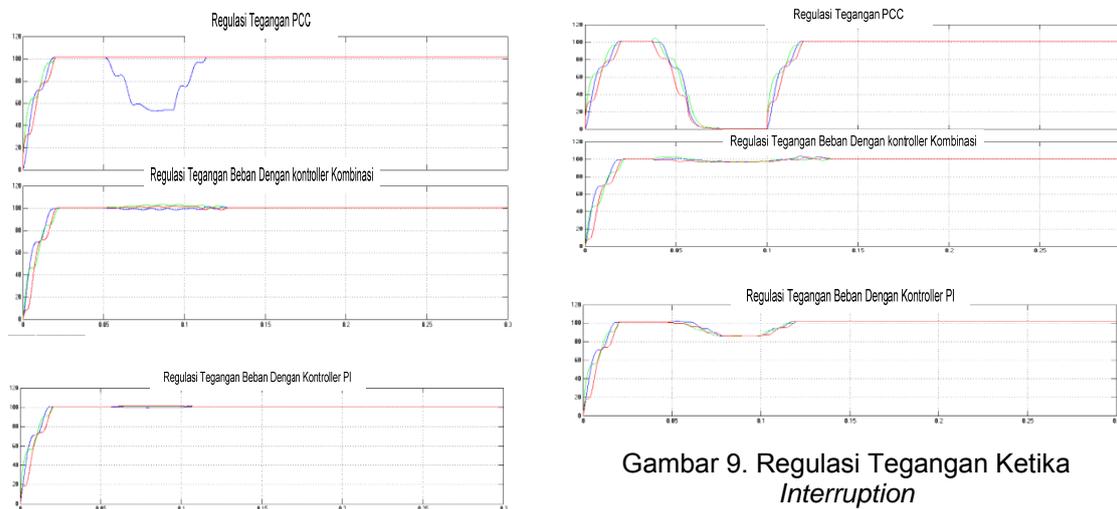
3.3. Simulasi dan Pengujian

Dari hasil simulasi yang dilakukan, dapat dibuat tabel magnitudo tegangan beban seperti Tabel 2. Dari Tabel 2, dapat dilihat bahwa kemampuan DVR dengan kombinasi *feed back* dan *feed forward* kontroller PI mempunyai performa yang sama bagusnya dengan kontroller *feed back* PI dalam memulihkan tegangan beban menjadi 1 pu ketika terjadi *voltage sag*, tetapi ketika terjadi *interruption* DVR dengan kombinasi *feed back* dan *feed forward*

kontroller PI mampu memulihkan tegangan beban sampai 0.97 pu dan DVR dengan kontroller feedback PI mampu memulihkan tegangan beban sebesar 0.88 pu.

Tabel 2. Perbandingan Magnitudo Tegangan Beban

Jenis Gangguan	Tegangan PCC (%)			Injeksi DVR Kontroller Kombinasi (%)			Injeksi DVR Kontroller PI (%)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
<i>Voltage sag</i> satu fasa 50%	55.2	99.8	99.8	100	100.1	99.9	100	99.8	100.1
<i>Voltage sag</i> satu fasa 70%	71.3	99.7	101	102	97.8	100.1	98.5	103	99.8
<i>Voltage sag</i> dua fasa 50%	76.2	53.8	99.9	97.6	98.7	100	98.9	98.1	99.9
<i>Voltage sag</i> dua fasa 70%	70.1	86.3	99.9	99.8	98.4	100.3	100	99.9	100
<i>Voltage sag</i> tiga fasa 50%	50.1	50.3	50.6	99.8	99.9	99.7	100	99.8	99.4
<i>Voltage sag</i> tiga fasa 70%	71.2	71.3	70.9	100	99.2	100.2	99.3	98.8	100.1
Interruption	0.1	0.1	0.2	97.5	97.2	97.6	87.5	88.1	87.7



Gambar 8. Regulasi Tegangan Ketika *Voltage sag* Satu Fasa 50%

Gambar 9. Regulasi Tegangan Ketika *Interruption*

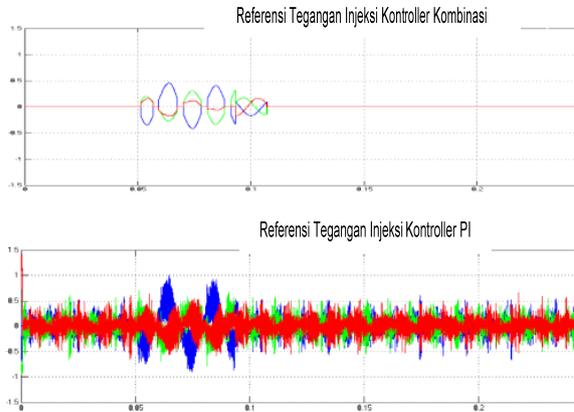
3.4. Regulasi Tegangan

Dari Gambar 7 dapat dilihat, studi kasus *voltage sag* 50% ditandai dengan adanya penurunan tegangan sumber (PCC) dari detik ke 0,05-0,1 dan dengan DVR, tegangan bus beban dapat dipulihkan mendekati 100%. Sedangkan pada Gambar 8 terlihat tegangan PCC mengalami penurunan sampai dengan 0%, ini mewakili gangguan *interruption*. Jika dilihat hasilnya, secara umum dapat disimpulkan bahwa regulasi yang dihasilkan DVR dengan kombinasi *feed back* dan *feed forward* kontroller PI berfluktuasi pada range -10% s.d. +5% dari tegangan nominal. Tetapi hal ini dalam praktek masih diperbolehkan, karena biasanya beban sensitif di desain bisa mentolerir fluktuasi tegangan pada range tersebut. Adapun penyebab harga regulasi yang berfluktuatif adalah bentuk tegangan yang disuntikkan DVR ke sistem tidak berbentuk sinusoidal murni.

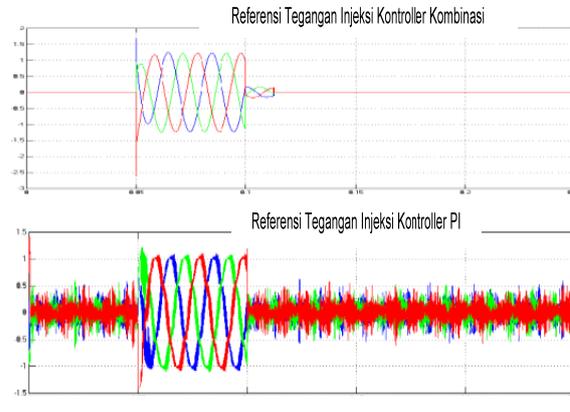
Referensi Tegangan Injeksi

Dari Gambar 9 - 10, terlihat bahwa pada DVR dengan kombinasi *feed back* dan *feed forward* kontroller PI, DVR hanya akan menginjeksi tegangan ketika terjadi gangguan yaitu pada detik ke 0.05- 0.1, sedangkan ketika tegangan sistem normal, DVR tidak akan menginjeksi

tegangan karena pulsa yang dihasilkan SPWM tidak akan menyalakan gate inverter. Hal ini sangat penting dalam praktek karena sumber DC tidak digunakan terus menerus dan tidak akan cepat habis. Sedangkan pada controller *feed back* PI, SPWM akan selalu menghasilkan pulsa untuk menyalakan inverter meskipun sistem sudah normal kembali.



Gambar 9. Referensi Tegangan Injeksi Ketika Voltage sag Satu Fasa 50%



Gambar 10. Referensi Tegangan Injeksi Ketika Interruption

Daya Aktif DVR

Untuk mengkompensasi tegangan ketika terjadi gangguan maka inverter menyuntikkan daya aktif sebagai pengkompensasi daya yang hilang. Besarnya daya yang disuntikkan tergantung jenis gangguan dan juga faktor daya beban. Besarnya daya aktif yang disuntikkan DVR ketika terjadi gangguan adalah seperti berikut:

$$P = \left(1 - \frac{V(\cos(\phi + \psi))}{\cos \phi} \right) \tag{7}$$

Dimana P adalah daya aktif yang disuntikkan tiap fasa, V adalah tegangan sag (pu), ϕ adalah sudut daya beban dan ψ adalah sudut *phase jump*. Maka daya total yang disuntikkan ke saluran ketika terjadi gangguan sama dengan jumlah total daya yang disuntikkan ke saluran.

$$P_{tot} = P_a + P_b + P_c \tag{8}$$

Tabel berikut merupakan perhitungan daya injeksi DVR dengan mengabaikan sudut *phase jump*.

Tabel 3. Daya Injeksi Inverter

Daya Beban	Gangguan tegangan	Daya DVR (Watt)
1500 Watt	Voltage sag 1 fasa (50%)	950
150 VAR	Voltage sag 2 fasa (50%)	1700
per fasa	Voltage sag 3 fasa (50%)	2550
	Interruption	4900

Dari Tabel 3, dapat kita lihat bahwa besarnya daya injeksi paling besar terjadi saat *interruption*. Hal ini wajar karena pada saat *interruption*, semua suplai daya beban disuplai oleh DVR. Sedangkan pada saat terjadi *voltage sag*, daya injeksi terbesar ketika terjadi *voltage sag* tiga fasa.

3.5 Hasil Pengujian *Prototype*

Parameter selama pengujian *prototype* menggunakan tegangan suplai = 110 volt, beban 5 watt/220 volt dan sumber DC 11 volt. Pengujian yang dilakukan pada *prototype* meliputi *voltage sag* tiga fasa 70%, *voltage sag* tiga fasa 50% dan *interruption*. Hasil yang didapatkan adalah tegangan pada fasa C dari sumber dan beban. Hasil pengukuran pada salah satu fasa sudah mewakili fasa yang lain karena gangguan yang diuji adalah gangguan seimbang.

– *Voltage sag* tiga fasa 70%

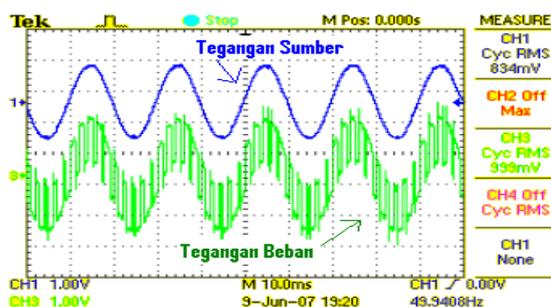
Gambar 11 adalah hasil pengujian *prototype* ketika *voltage sag* tiga fasa 70%. Dari Gambar 11 terlihat bahwa ketika tegangan sumber menjadi 83 Volt, tegangan beban dipulihkan hingga 95 Volt.

– *Voltage sag* tiga fasa 50%

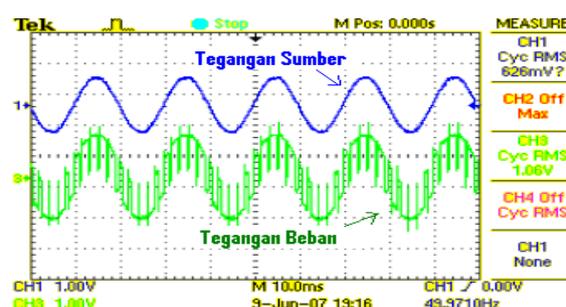
Gambar 12 adalah hasil pengujian *prototype* ketika *voltage sag* tiga fasa 50%. Dari Gambar terlihat bahwa ketika tegangan sumber menjadi 62 Volt, tegangan beban dipulihkan hingga 97 Volt.

– *Interruption*

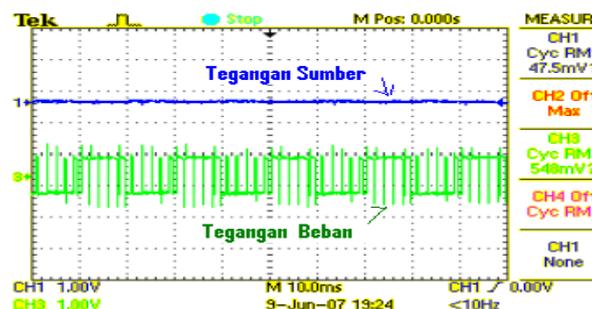
Gambar 13 adalah hasil pengujian *prototype* ketika *interruption*. Dari Gambar 13 terlihat bahwa, tegangan beban dipulihkan hingga 54 Volt.



Gambar 11. Bentuk Gelombang Tegangan *Prototype* Ketika *Voltage sag* tiga fasa 70%



Gambar 12. Bentuk Gelombang Tegangan *Prototype* Ketika *Voltage sag* tiga fasa 50%



Gambar 13. Bentuk Gelombang Tegangan *Prototype* Ketika *Interruption*

3.6 Analisa Perbandingan Simulasi dengan *Prototype*

Setelah dilakukan pengujian pada *prototype* dan simulasi *voltage sag* tiga fasa dan *interruption*, dapat dibuat perbandingan nilai tegangan pada beban setelah ada injeksi tegangan

dari DVR. Tabel 4 menunjukkan perbandingan tegangan beban hasil simulasi dengan *prototype* DVR (dalam pu). Tegangan base *prototype* yang digunakan di beban adalah 100 volt.

Tabel 4. Perbandingan Tegangan *Prototype* dengan Simulasi

Jenis Gangguan	Simulasi	<i>Prototype</i>	Error %
	V _{Beban} (pu)	V _{Beban} (pu)	
<i>Voltage sag</i> 70%	0.99	0.95	4
<i>Voltage sag</i> 50%	0.99	0.97	2
<i>Interruption</i>	0.97	0,54	43

Dari data di atas, *prototype* dapat memulihkan tegangan mencapai 0.95 pu ketika terjadi *voltage sag* 70% dan 0.97 pu ketika terjadi *voltage sag* 50%. Tegangan beban pada *prototype* tidak bisa mencapai 1 pu dikarenakan adanya drop tegangan pada trafo seri. Sedangkan ketika terjadi *interruption* tegangan beban hanya mampu dipulihkan sebesar 0.54 pu. Dengan menggunakan persamaan (1), maka tegangan maksimal yang dihasilkan DVR dengan sumber DC 11 Volt adalah 6.71 Volt dan akan dinaikkan menjadi 54 Volt oleh trafo seri. Seharusnya untuk mendapatkan tegangan maksimal 110 Volt, maka sumber DC yang digunakan adalah 18 Volt. Tetapi hal ini tidak dilakukan karena adanya keterbatasan pada *DSP card* yang inputnya dibatasi maksimal 5 Volt. Pemasangan sumber DC 18 Volt akan merusak *DSP card*.

Perbedaan lain yang terlihat dari simulasi dan *prototype* adalah bentuk gelombang tegangan pada beban. Pada simulasi, gelombang tegangan menghasilkan harmonisa yang kecil sedangkan pada *prototype*, bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan mengandung harmonisa yang besar.

4. SIMPULAN

DVR dengan menggunakan kontroller kombinasi *feed back* dan *feed forward* kontroller PI memiliki performansi yang sama bagusnya dengan kontroller *feed back* PI dalam mengembalikan bentuk gelombang tegangan pada beban menjadi 1 pu ketika terjadi *voltage sag*. Ketika terjadi *interruption*, kontroller kombinasi *feed back* dan *feed forward* kontroller PI mampu memulihkan tegangan beban sebesar 0.97 pu. Sedangkan DVR dengan kontroller *feed back* PI mampu memulihkan tegangan beban sebesar 0.88 pu.

DVR dengan kontroller kombinasi *feed back* dan *feed forward* kontroller PI memiliki kelebihan dalam hal menghemat *energy storage*. DVR akan menyuntikkan daya paling besar ketika terjadi *interruption* jika dibandingkan dengan *voltage sag*. *Prototype* mampu memulihkan tegangan beban ketika terjadi *voltage sag*. Pada saat *voltage sag* 70% tegangan beban mampu dipulihkan hingga 0.95 pu dan pada saat *voltage sag* 50% tegangan beban mampu dipulihkan hingga 0.97 pu. Pada saat *interruption*, *prototype* mampu memulihkan tegangan beban mencapai 0.54 pu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Math H.J.Bollen, "Understanding Power Quality Problem", New York: IEEE, 2000.
- [2]. George Karady "Effect of Voltage sags on Load in a Distribution System", Power System Engineering Research Centre, October 2005.
- [3]. M.H Rashid, "Power Electronics Circuit, Devices, And Applications", third edition, United States of America, 2004.
- [4]. J.G. Nielsen, Michael Newman, "Control strategy for dynamic voltage restorer at medium voltage level", IEEE transaction on power electronics, Vol 19 no 13, Mei 2004.
- [5]. M Ashari, H Suryoatmojo, M Pujiantara, "Pemulih Tegangan Kedip (Dynamic Voltage Restorer) Menggunakan Tegangan Referensi Virtual Dalam Koordinat D-Q", Prosiding Seminar Nasional XIII - FTI-ITS 2007, 6-7 Maret 2007, Surabaya
- [6]. IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.