

PENGGUNAAN FUZZY LOGIC CONTROLLER SEBAGAI KENDALI DYNAMIC VOLTAGE RESTORER UNTUK PEMULIHAN KEDIP TEGANGAN

Bambang Prio Hartono

Abstrak: *Dynamic voltage restorer* digunakan untuk memperbaiki kualitas tegangan akibat tegangan kedip yang dapat mengganggu kinerja dari peralatan-peralatan yang kritis atau peka. Performansi DVR ditunjukkan saat terjadi gangguan berupa tegangan kedip yang diakibatkan oleh satu atau beberapa gangguan pada sistem tenaga listrik. Permasalahan yang timbul adalah bagaimana pengaturan tegangan injeksi dari DVR dan pemulihan kedip tegangan (*voltage sag*). Penelitian menggunakan metode injeksi tegangan *Dynamic Voltage Restorer* (DVR) dan penggunaan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) sebagai sistem kendali dari DVR. Diharapkan dengan DVR, mampu memulihkan kedip tegangan baik itu kedip tegangan seimbang maupun kedip tegangan tak seimbang. Tegangan beban yang mengalami kedip setelah diinjeksi menggunakan DVR dengan control FLC rata-rata mencapai 0.993 pu, meskipun pemulihan tidak mencapai 1 pu tetapi kedip tegangan setelah pemulihan masih dalam range yang diijinkan (<5%).

Kata Kunci: *Dynamic voltage restorer (DVR), tegangan kedip, FLC*

Perkembangan ilmu dan teknologi yang cukup cepat dalam bidang industri kelistrikan dewasa ini adalah dalam perbaikan kualitas daya listrik. Hal ini disebabkan karena semakin beragamnya peralatan listrik yang membutuhkan sumber listrik dengan kualitas baik. Diantara gangguan yang membuat kualitas daya listrik menjadi jelek adalah kedip tegangan dan pemadaman. Proses produksi secara otomatis sangat sensitif terhadap perubahan magnitudo dan fasa tegangan sumber. Meskipun gangguan tegangan tersebut berlangsung hanya dalam beberapa detik, hal itu cukup untuk membuat seluruh lini produksi terhenti sehingga membuat kerugian ekonomi yang besar, seperti membahayakan peralatan-peralatan seperti komputer, rele, penggerak motor listrik, PLC (*programable logic controller*), dan sebagainya, sangat peka terhadap perubahan tegangan yang diakibatkan oleh gangguan yang terjadi pada bagian lain pada sistem.

Kebutuhan penyimpanan energi listrik untuk beban sensitif berdaya besar menggunakan *uninterruptible power supply* (UPS) akan membutuhkan biaya yang sangat besar. Penggunaan DVR dapat diimplementasikan untuk membuat biaya yang dikeluarkan menjadi lebih efektif (Nielsen, 2004). Tegangan kedip (*voltage sag*) merupakan salah satu faktor penyebab berkurangnya kualitas sumber listrik, namun hal ini tidak mungkin untuk dihindari karena saat terjadinya gangguan tidak bisa diketahui dengan pasti (Blaabjerg, 2005). Oleh sebab itu dilakukan antisipasi apabila terjadi tegangan kedip pada sisi sumber, tidak akan menyebabkan terganggunya tegangan sisi beban.

Salah satu cara mengantisipasinya adalah dengan menggunakan *dynamic voltage restorer* (DVR). Penelitian yang dilakukan adalah untuk menyelesaikan permasalahan tegangan kedip dengan menggunakan DVR. Terjadinya tegangan kedip dapat berbeda-beda tergantung lokasi

sumber gangguan dan jenis gangguan. Hal ini menyebabkan terjadinya perbedaan dalam menganalisa metode kontrol untuk mengendalikan DVR.

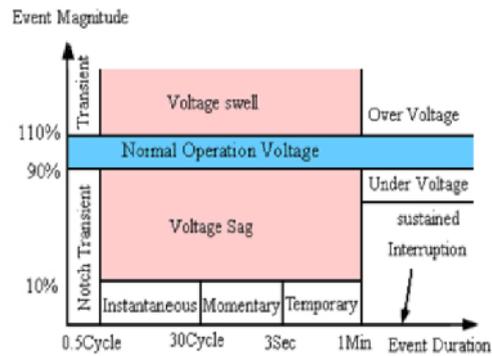
Besarnya jatuh tegangan dan durasi yang termasuk dalam kategori tegangan kedip adalah 0.1 sampai 0.9 per-unit (pu) selama 0.5 siklus sampai 1 menit berdasarkan standart IEEE 1195 1995 (IEEE, 1995). Kondisi ini menyebabkan pengendali untuk DVR harus dapat bekerja dengan baik pada selang waktu yang sangat singkat.

Pengendalian DVR menggunakan metode pengendali jaringan saraf tiruan. Nama L2 menunjukkan perbaikan tegangan kedip tanpa adanya lonjakan tegangan transien. Desain algoritma untuk pengendalian *dynamic voltage restorer* (DVR) yang diusulkan adalah dengan menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) karena dengan metode ini dapat melakukan proses iterasi, pelatihan dan respon lebih cepat. Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB.

Fenomena Tegangan Kedip

Tegangan Kedip (*sags voltage*) ataupun *dips voltage* merupakan salah satu indeks mutu tenaga listrik (*Power Quality*). Berbeda dengan harmonisa yang bersifat kontinyu, tegangan kedip terjadi secara random dan berdampak sangat besar terutama terhadap konsumen industri yang menggunakan peralatan *flicker sensitive*.

Menurut IEEE Std. 1159-1995, seperti pada Gambar 1, kedip tegangan (*voltage sag / dip*) adalah suatu penurunan nilai rms tegangan yang bernilai antara 0,1 sampai 0,9 pu dari tegangan normal dengan durasi 0,5 cycle (10 ms) sampai 1 menit. Kedip tegangan sering disebut dengan *voltage sag* atau *voltage dip*, kedua istilah ini merupakan fenomena yang sama.



Gambar 1. Voltage Reduction Standard of IEEE Std. 1159-1995.

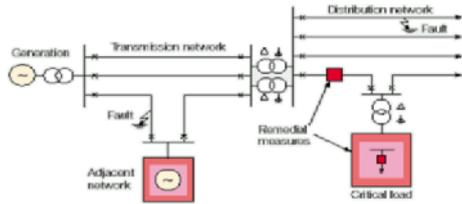
Definisi ANSI std. 1100-1992, voltage sag adalah reduksi tegangan rms tegangan AC, pada frekuensi daya, dengan durasi dari 0,5 cycle sampai beberapa detik, tegangan dapat turun dibawah level normal selama beberapa cycle dan dapat mempengaruhi beban kritis yang menyebabkan trip.

Difinisi IEC 61000-2-8 2000 (*International Electrothechnic Commision*), *voltage sags* (tegangan kedip) adalah reduksi tegangan secara mendadak terutama pada sistem suplai kelistrikan dibawah ambang kedip yang terjadi dengan interval pemulihan yang singkat.

Mengenai kedalaman kedip tegangan (*voltage dips*) tidak dijamin oleh PLN, karena kedalaman *Voltage Dips* tergantung pada jarak lokasi gangguan penyebab kedip, kekuatan (kapasitas) pasokan daya, hubungan trafo, jenis gangguan, sistem pentanahan, tegangan pra gangguan. Sedangkan mengenai durasi terjadinya *voltage dips* yang dijamin oleh PLN (Perse-ro), diatur direksi PLN No.12.E/012/DIR/2000 tanggal 25 April 2000.

Kedip tegangan didefinisikan fenomena penurunan amplitudo tegangan terhadap harga normalnya selama interval waktu t (0.5 – 30 cycle), Dengan kata lain, gangguan tegangan kedip adalah perbedaan nilai efektif tegangan dengan tegangan nominal selama selang waktu tertentu. Perbedaan nilai tegangan tersebut berkisar antara 10%-100% tegangan

nominalnya, dan lamanya (interval waktu) berkisar antara 10 milidetik sampai dengan ratusan milidetik. Terjadinya tegangan kedip akibat fault diilustrasikan pada Gambar 2.

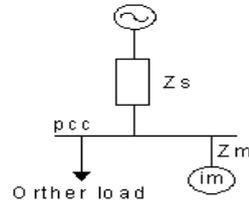


Gambar 2. Terjadinya Voltage Sag

Gangguan tegangan kedip akan hilang dengan segera setelah bekerjanya pemutus tegangan (PMT). Sedangkan yang disebut pemadaman sesaat adalah gangguan tegangan kedip 100% tegangan nominal, umumnya berlangsung selama interval waktu antara 1 detik sampai 1 menit. Fluktuasi tegangan yang mengakibatkan terjadinya kedip tegangan akan menjadi masalah serius bila tingkat fluktuasinya berkisar 0.3 – 1%.

Pada kasus starting motor induksi, tegangan kedip terjadi karena arus starting motor induksi dapat mencapai 5-6 kali arus normal motor. Sebagai contoh, motor dengan kapasitas daya 1 hp membutuhkan kira-kira 1 kVA pada operasi normalnya, maka kVA yang dibutuhkan pada saat startingnya 5 sampai dengan 7 kVA. Seandainya kapasitas motor 5% dari kapasitas trafo pada penyulang, maka kVA yang diserap oleh motor ketika start akan mencapai 25% sampai 35% dari rating trafo. Drop tegangan sebesar ini sudah berpengaruh pada nyala lampu, sehingga sering sekali kedip tegangan yang secara visual dapat disaksikan dari kedip nyala lampu tersebut dan akan sangat mengganggu pandangan mata. Durasi kedip tegangan yang disebabkan starting motor tergantung pada parameter dari motor.

Dari Gambar 3 kedip tegangan akibat starting motor induksi dinyatakan dengan persamaan dibawah ini:



Gambar 3. Rangkaian ekivalen kedip tegangan akibat starting motor

$$V_{sag} = \frac{Z_M}{Z_S + Z_M} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan Z_S = impedansi sumber

$$=Z_S = \frac{Vn^2}{S_{source}} \dots\dots\dots(2)$$

Z_M = impedansi motor saat starting

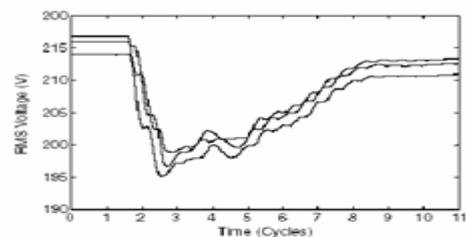
$$= Z_M = \frac{Vn^2}{\beta S_{source}} \dots\dots\dots(3)$$

β = ratio antara arus starting dan arus nominal

Jadi persamaan (1) dinyatakan sebagai:

$$V_{sag} = \frac{S_{source}}{S_{source} + \beta S_{source}} \dots\dots\dots(4)$$

Grafik *voltage sag* karena starting motor induksi dapat dilihat pada Gambar 4



Gambar 4 *Voltage sag* akibat starting motor induksi

Estimasi Karakteristik Gangguan

Secara kualitatif, kedip tegangan (*voltage dip*) tidak dapat diramalkan kapan terjadinya, sehingga kita tidak dapat menghindarinya, hanya saja kita dapat mengantisipasi terjadinya *voltage sag* (*dip*) ini.

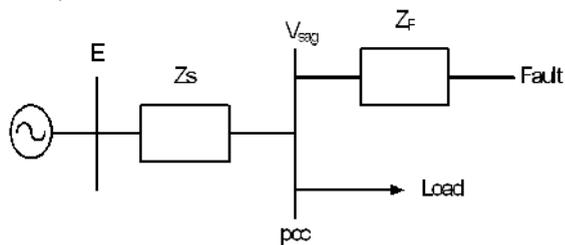
Secara kuantitatif, karakteristik gangguan ditentukan oleh beberapa parameter, antara lain variasi amplitude tegangan dan perubahan bentuk gelombang.

Sensitifitas dan Karakteristik Peralatan Industri

Standar sensitifitas peralatan adalah kurva CBEMA (*Computer Business Manufacturers Association*). Kurva tersebut menunjukkan sensitifitas beban sangat tergantung pada durasi dari tegangan kedip. Tegangan kedip yang diperbolehkan berkisar antara 0% (0.5 cycle)–87% tegangan (30 cycles)

TEGANGAN KEDIP

Tegangan kedip biasanya disebabkan oleh arus hubung singkat yang mengalir ke gangguan pada saluran transmisi atau distribusi dengan gangguan yang dapat berupa sime-tris maupun asimetris. Hal ini dapat terlihat pada Gambar 5 (Chung, 2002).



Gambar 5. Diagram Segaris Simulasi Tegangan Kedip

Dari Gambar 5 diatas dilihat adanya 2 impedansi yaitu Z_s (impedansi sumber pada titik kopling bersama) dan Z_f (impedansi antara titik kopling bersama dan gangguan). Titik kopling bersama (*point of common coupling* atau *pcc*) adalah titik dimana cabang-cabang arus beban dalam posisi off dari arus gangguan. Magnitudo dan fasa dari tegangan V_{sag} selama terjadi tegangan kedip pada *point of common coupling* (PCC) ditentukan oleh besarnya impedansi:

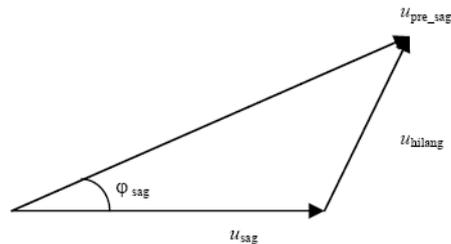
$$V_{sags} = \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} \dots\dots\dots(5)$$

Menurut (Meyer and Romaus, 2005), perbedanaan V_{sag} dengan tegangan sebelum gangguan $V_{pre-sag}$ sebesar V_{hilang} dapat ditulis secara matematika sebagai $V_{sag} = V_{pre-sag} - V_{hilang}$, dan dapat dilihat pada Gambar 6.

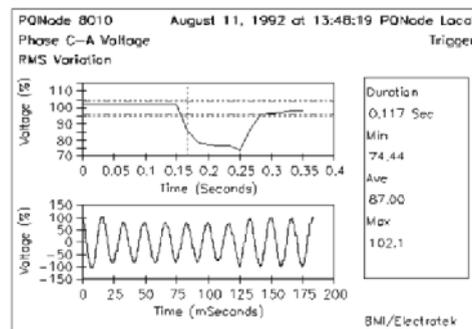
$$V_{pre-sag} = V_L, V_{Sag} = V_S \text{ and } V_{DVR} = V_{inj}$$

$$|V_{inj}| = |V_{pre-sag}| - |V_{Sag}|$$

$$\theta_{inj} = \tan^{-1} \left(\frac{V_{pre-sag} \sin(\theta_{pre-sag})}{V_{pre-sag} \cos(\theta_{pre-sag}) - V_{Sag} \cos(\theta_{Sag})} \right)$$



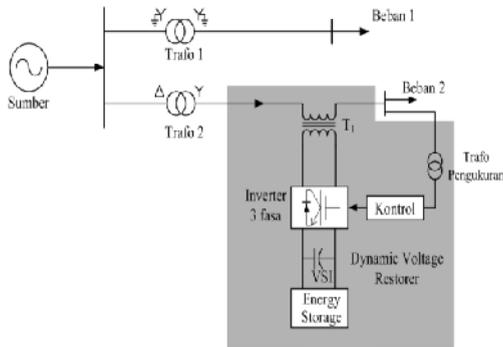
Gambar 6. Diagram Vektor dari Tegangan Kedip



Gambar 7. Gelombang Terjadinya Tegangan Kedip

Perbedaan magnitudo dan pergeseran fasa sag dapat terjadi saat tegangan kedip berlangsung. Kedua besaran itu merupakan bagian dari tegangan kedip. Bentuk gelombang saat terjadi tegangan kedip dapat dilihat pada Gambar 7 (Mark,1993). Prinsip kerja DVR dapat dilihat pada

Gambar 8. Dengan menginjeksikan tegangan $u_{DVR}=u_{hilang}$, yang terhubung seri dengan sumber untuk mengkompensasi tegangan kedip sehingga tegangan pada beban sensitif tidak mengalami gangguan.



Gambar 8. Konfigurasi Dasar DVR

METODE

Pemodelan Sistem

Pada Gambar 8 terlihat bahwa sistem kelistrikan industri tersebut terdiri 2 beban. Daya diambil dari feeder penyulang 70 kV kemudian tegangan diturunkan menjadi 11kV dengan transformator step-down setelah itu didistribusikan ke beban. Beban disuplai dari transformator yang berbeda tetapi dengan feeder penyulang yang sama, beban 1 sebesar 32 MVA dengan tegangan line-line sebesar 11kV sedangkan beban 2 sebesar 25 MVA. Beban 2 merupakan beban yang sensitif terhadap gangguan kedip tegangan sehingga di dalam pengoperasiannya ditambahkan pemulih tegangan.

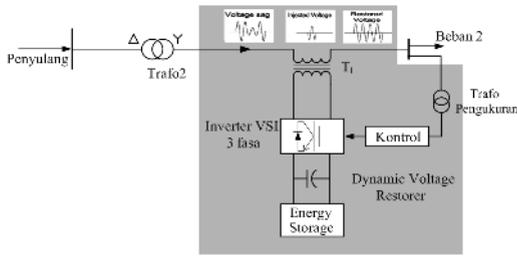
Dynamic Voltage Restorer sebagai pemulih tegangan yang akan digunakan pada kasus ini dipasang seri melalui trafo booster diantara beban 2 dengan penyulang (trafo 2). Gangguan kedip tegangan diakibatkan oleh Hubung Singkat yang terjadi pada beban 1. Bila terjadi hubung singkat pada beban 1 akan menyebabkan tegangan sumber akan ikut turun sehing-

ga tegangan supply ke beban 2 juga ikut turun, maka pada kondisi saat gangguan diharapkan DVR mampu memberikan injeksi tegangan yang besarnya sama dengan drop tegangan yang terjadi dengan waktu yang tepat. Komponen DVR secara umum adalah rangkaian pendeteksi gangguan kedip tegangan, rangkaian inverter, kontrol tegangan, dan booster transformator. Rangkaian inverter disini menggunakan peralatan semikonduktor yaitu *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)*, dikarenakan disamping frekuensi *switching*nya tinggi daya yang disalurkan IGBT mencapai 1 MVA. Untuk teknik *switching* inverter menggunakan teknik *switching space vector PWM* yang dapat mereduksi harmonisa kelipatan tiga dan index modulasi dapat men-capai 1.15.

Kedip tegangan yang disimulasikan akibat hubung singkat 1 fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, dan tiga fasa ke tanah. Dalam simulasi ini DVR hanya mengkompensasi urutan positif dan negatif sedangkan urutan nol diabaikan, sehingga untuk menghilangkan pengaruh urutan nol, trafo yang digunakan memakai hubungan *delta wye*.

Pemodelan Dynamic Voltage Restorer

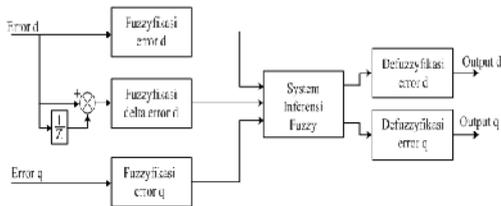
Pada prinsipnya *dynamic voltage restorer* merupakan peralatan elektronika daya yang dipakai didalam penginjeksian tegangan pada saat terjadi gangguan *voltage sag*, yang dipasang seri antara penyulang dan beban. Untuk mendapat pemulihan tegangan yang tepat, ada beberapa bagian yang harus dimiliki oleh DVR, yaitu: sensor deteksi gangguan, inverter 3 fasa, regulator tegangan, *booster transformer*, *switching device*, *storage energy*. Ilustrasi dari DVR ditunjukkan dengan Gambar 9.



Gambar 9. Konfigurasi dasar DVR

Kontrol

Pengendalian DVR yang diusulkan dengan menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) terlihat pada Gambar 10



Gambar 10. Pemodelan Fuzzy Logic Controller

Algoritma FLC yang digunakan adalah:

1. Penentuan Kuantitas Variabel Linguistik Masukan dan Keluaran.

Fungsi input:

Variabel yang digunakan:

Fungsi input:

1. error d, range : [-0.5 1]
2. error q, range : [-0.5 0.5]
3. delta error d, range : [1 0.5]

Fungsi output:

1. Vd, range : [-0.5 -3.15]
2. Vq, range : [-2 0.27]

Untuk variabel linguistik input error d terdiri dari 8 fungsi keanggotaan (*membership function*) yang terdiri dari 2 fungsi keanggotaan berbentuk bahu dan yang lain berbentuk segitiga.

Range error d :

$$[-0.5 \quad 1]$$

Negatif (N) :

$$[-0.005 \quad -0.131]$$

Zero (Z) :

$$[-0.005 \quad 0 \quad 0.005]$$

Kecil Positif (KP):

$$[0.005 \quad 0.079 \quad 0.149]$$

Agak Kecil Positif (AKP):

$$[0.056 \quad 0.179 \quad 0.303]$$

Sedang Positif (SP):

$$[0.149 \quad 0.306 \quad 0.463]$$

Agak Besar Positif (ABP) :

$$[0.303 \quad 0.446 \quad 0.589]$$

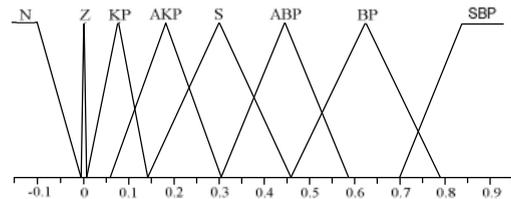
Besar Positif (BP) :

$$[0.463 \quad 0.623 \quad 0.783]$$

Sangat Besar Positif (SBP) :

$$[0.7 \quad 0 \quad 0.813]$$

8 variabel linguistik diatas dapat digambarkan sebagai bentuk himpunan *fuzzy* seperti Gambar 11



Gambar 11 Variabel linguistik dari input error d

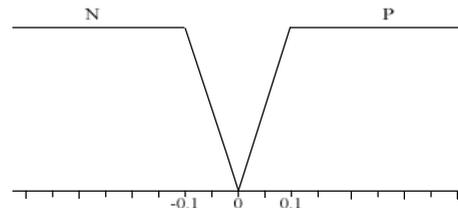
Untuk variabel linguistik delta error d terdiri dari 2 fungsi keanggotaan (*membership function*) yang semua fungsi keanggotaan berbentuk bahu.

Range delta error d : [-0.5 0.5]

Negatif (N) : [-0.1 0]

Positif (P) : [0 0.1]

2 variabel linguistik diatas dapat digambarkan sebagai bentuk himpunan *fuzzy* seperti Gambar 12



Gambar 12. Variabel linguistik dari input delta error d

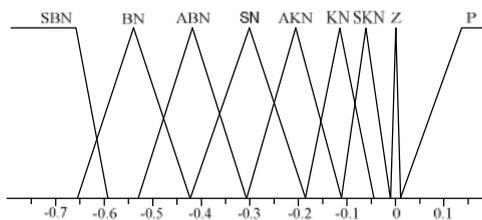
Untuk variabel linguistik error d terdiri dari 9 fungsi keanggotaan (member-

ship function) yang terdiri dari 2 fungsi keanggotaan berbentuk bahu dan yang lain berbentuk segitiga.

Range error q :

- $[-1 \quad 0.5 \quad]$
- Sangat Besar Negatif (SBN) :
 $[-0.692 \quad -0.592 \quad]$
- Besar Negatif (BN) :
 $[-0.654 \quad -0.538 \quad -0.422 \quad]$
- Agak Besar Negatif (ABN)
 $[-0.53 \quad -0.418 \quad -0.306 \quad]$
- Sedang Negatif (SN)
 $[-0.422 \quad -0.304 \quad -0.186 \quad]$
- Agak Kecil Negatif (AKN)
 $[-0.306 \quad -0.209 \quad -0.112 \quad]$
- Kecil Negatif (KP)
 $[-0.186 \quad -0.1164 \quad -0.0468]$
- Sangat Kecil Negatif (SKN)
 $[-0.112 \quad -0.061 \quad -0.0085]$
- Zero (Z)
 $[-0.0085 \quad 0 \quad 0.0085 \quad]$
- Positif (P)
 $[0.0085 \quad 0.14 \quad]$

9 variabel linguistik diatas dapat digambarkan sebagai bentuk himpunan fuzzy seperti Gambar 13



Gambar 13. Variabel linguistik dari input error q

Untuk variabel linguistik output d terdiri dari 13 fungsi keanggotaan (membership function) yang semua fungsi keanggotaan berbentuk segitiga.

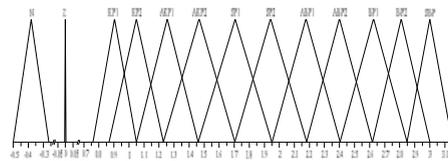
Range error d:

- $[-0.5 \quad 3.148]$
- Negatif (N) :
 $[-0.5 \quad -0.375 \quad -0.25 \quad]$
- Zero (Z) :
 $[-0.004 \quad 0 \quad 0.004]$

Kecil Positif 1 (KP1) :

- $[0.752 \quad 0.9 \quad 1.048]$
- Kecil Positif 2 (KP2) :
 $[0.868 \quad 1.048 \quad 1.228]$
- Agak Kecil Positif 1 (AKP1) :
 $[1.048 \quad 1.255 \quad 1.462]$
- Agak Kecil Positif 2 (AKP2) :
 $[1.228 \quad 1.467 \quad 1.706]$
- Sedang Positif 1 (SP1) :
 $[1.462 \quad 1.706 \quad 1.95 \quad]$
- Sedang Positif 2 (SP2) :
 $[1.706 \quad 1.94 \quad 2.174]$
- Agak Besar Positif 1 (ABP1) :
 $[1.95 \quad 2.177 \quad 2.404]$
- Agak Besar Positif 2 (ABP2):
 $[2.174 \quad 2.395 \quad 2.616]$
- Besar Positif 1 (BP1) :
 $[2.404 \quad 2.628 \quad 2.852]$
- Besar Positif 2 (BP2) :
 $[2.616 \quad 2.808 \quad 3 \quad]$
- Sangat Besar Positif :
 $[2.852 \quad 3 \quad 3.148]$

13 variabel linguistik diatas dapat digambarkan sebagai bentuk himpunan fuzzy seperti Gambar 14



Gambar 14 Variabel linguistik dari output d

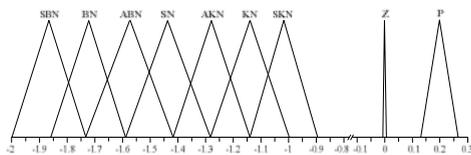
Untuk variabel linguistik output q terdiri dari 9 fungsi keanggotaan yang semua fungsi keanggotaan berbentuk segitiga.

Range error d :

- $[-2 \quad 0.27 \quad]$
- Sangat Besar Negatif (SBN) :
 $[-2 \quad -1.866 \quad -1.73 \quad]$
- Besar Negatif (BN) :
 $[-1.855 \quad -1.722 \quad -1.589]$
- Agak Besar Negatif (ABN) :
 $[-1.73 \quad -1.575 \quad -1.42 \quad]$
- Sedang Negatif (SN) :
 $[-1.589 \quad -1.437 \quad -1.285]$
- Agak Kecil Negatif (AKN) :
 $[-1.42 \quad -1.28 \quad -1.14 \quad]$

Kecil Negatif (KP) :
 [-1.285 -1.14 -0.995]
 Sangat Kecil Negatif (SBN) :
 [-1.14 -1.023 -0.906]
 Zero (Z) :
 [-0.007 0 0.007]
 Positif (P) :
 [0.15 0.21 0.27]

9 variabel linguistik diatas dapat digambarkan sebagai bentuk himpunan fuzzy seperti Gambar 15



Gambar 15 Variabel linguistik dari ouput q

2. Penentuan Aturan Dasar (*RuleB-base*)
 Input Output

Rule base merupakan sekelompok aturan dalam fuzzy yang merupakan bentuk relasi antara variabel input dengan variabel output. Aturan-aturan dasar berisi tentang keputusan-keputusan yang akan diambil oleh FLC tersebut, sehingga pada umumnya rule base akan bersisi dua komponen yang dihubungkan dengan relasi sebab (*anteseden*) akibat (*konsekuen*).

Banyaknya jumlah kelompok rule base yang dibuat sesuai dengan banyaknya kondisi pada signal masukan. Jika sinyal masukan terdapat dua macam yaitu error memiliki 7 himpunan fuzzy dan delta error memiliki 2 himpunan fuzzy maka rule base yang akan dibuat adalah $7 \times 2 = 14$ aturan dasar.

Kinerja yang lebih baik dapat diperoleh dengan pembagian himpunan fuzzy yang lebih banyak (tidak mutlak), namun terkadang untuk permasalahan tertentu dengan hanya menggunakan sistem fuzzy yang sedikit saja hasil respon sudah baik sekali.

Pada permasalahan kali ini akan dibentuk dua buah rule base, dengan langkah sebagai berikut:

1. Rule Base untuk ouput d

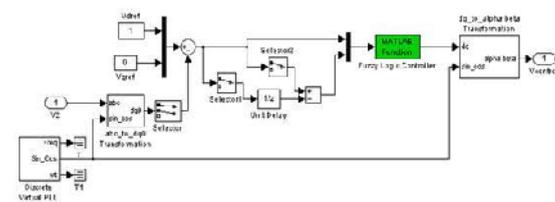
Sesuai penjelasan dari bab sebelumnya bahwa untuk output d menggunakan 2 inputan yaitu error d dengan 8 himpunan fuzzy dan delta error dengan 2 himpunan fuzzy yang tiap parameter inputan bisa dibaca pada subbab sebelumnya. Maka akan dibentuk rule base untuk output d sebanyak $8 \times 2 = 16$ aturan kontrol yang isi dari rule base ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rule Base output d

error	N	Z	KP	AKP	SP	ABP	BP	SBP
delta error	N	Z	KP1	AKP1	SP1	ABP1	BP1	SBP1
	P	Z	KP2	AKP2	SP2	ABP2	BP2	SBP2

2. Fuzzyfikasi
3. Penentuan Aturan Dasar (*RuleBbase*)
 Input Output
4. Defuzzifikasi
5. Pemodelan untuk inverter sumber tegangan 3 fasa.
6. Pemodelan regulator tegangan

Tegangan injeksi yang tepat baik itu besar maupun waktunya, didalam pemulihan kedip tegangan diperlukannya suatu kontrol yang mampu menagatasi permasalahan tersebut dengan respon yang cepat.



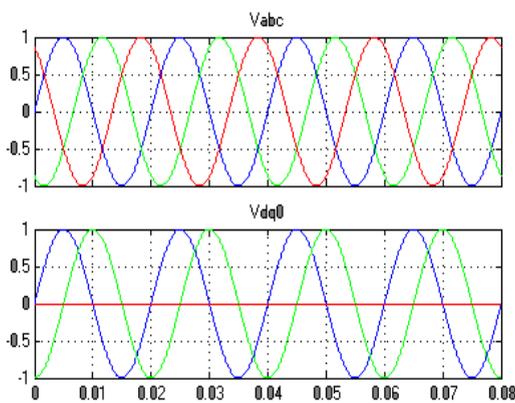
Gambar 16. Pemodelan Regulator Tegangan

Didalam analisa penentuan nilai drop tegangan dari sistem 3 fasa yang nantinya akan menentukan besarnya tegangan injeksi DVR, digunakan metode space vector control yang merubah sistem tegangan 3 dimensi abc menjadi sistem 2 dimensi *direct-quadrature* (dq).

7. Formulasi yang merubah Vabc menjadi Vdq0 dengan nilai yang tetap

Transformasi Vabc ke Vdq0

Bahwa Space vector merepresentasikan magnitudo dan sudut fase dari sebuah besaran 3 fase simetri sebagai fungsi waktu. Space vector dapat dibayangkan sebagai vector medan putar yang ditimbulkan oleh kumparan-kumparan stator dari mesin arus AC 3 . Space vector disini lebih dikenal dengan sistem dq0. Besarnya sistem dq0 ditunjukkan pada persamaan 7. Transformasikan V_{abc} menjadi V_{dq0}, diperoleh V_d berbentuk sinus dan V_q, V_d yang digeser sebesar -90° (seperti tampak pada Gambar 17).



Gambar 17. Bentuk gelombang abc dan dq0

Dengan bentuk tegangan Vdq0 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12 akan mempersulit di dalam sisi kontrolnya, karena berubah terhadap waktu maka untuk mengurangi permasalahan tersebut dibuat sebuah formulasi yang merubah Vabc menjadi Vdq0 dengan nilai yang tetap, sehingga dengan keadaan tersebut dapat mempermudah didalam sistem kontrol, persamaan (7)

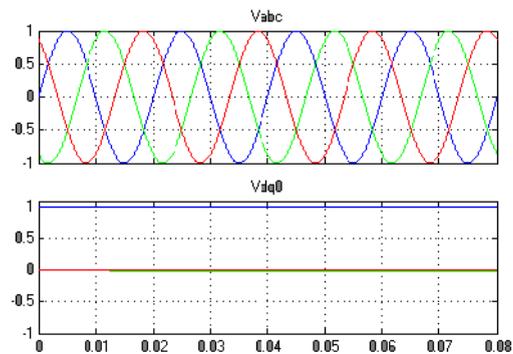
$$V_d = \frac{2}{3} \left(V_a(t) \sin(\omega t + \theta) + V_b(t) \sin\left(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi\right) + V_c(t) \sin\left(\omega t + \theta - \frac{4}{3}\pi\right) \right)$$

$$V_q = \frac{2}{3} \left(V_a(t) \cos(\omega t + \theta) + V_b(t) \cos\left(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi\right) + V_c(t) \cos\left(\omega t + \theta - \frac{4}{3}\pi\right) \right)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a(t) + V_b(t) + V_c(t)) \dots\dots\dots(7)$$

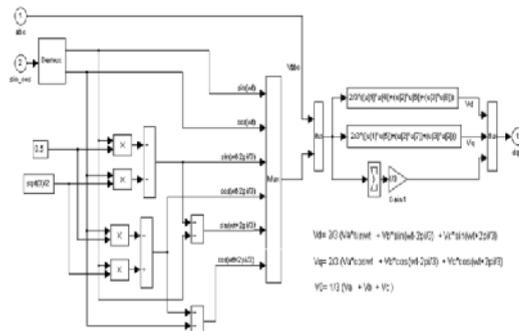
8. Pemodelan transformasi abc to dq0

Persamaan (7) dengan tegangan V_{abc} yang sama didapatkan tegangan V_{dq0} seperti Gambar 18 (tetap):



Gambar 18. Bentuk gelombang abc dan dq0 konstan

Untuk mendapatkan bentuk transformasi dq seperti Gambar 18 diperlukan peralatan tambahan yaitu *phase locked loop* (PLL). Gambar 19. menunjukkan bentuk simulasi dari transformasi dq di matlab.

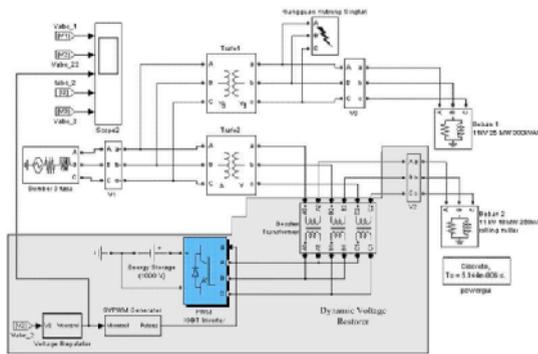


Gambar 19. Bentuk pemodelan transformasi abc to dq0

9. Tentukan tegangan referensi dan error
10. Untuk mendapatkan respon injeksi yang tepat dan cepat diperlukan error kompensator, di dalam masalah ini

Fuzzy Logic Controller dipilih sebagai error kompensator. Error dihasilkan dengan membandingkan tegangan referensi dan tegangan pengukuran (aktual).

11. Bentuk simulasi prinsip kerja DVR yang diusulkan

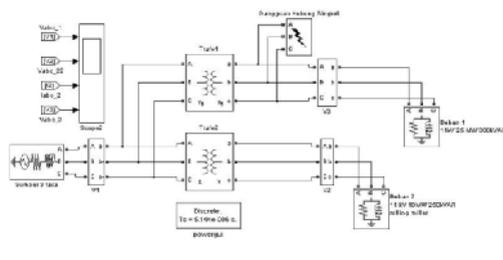


Gambar 20. Simulasi sistem tenaga listrik industri tanpa dynamic voltage restorer (DVR) yang diusulkan

- 12. Simulasi gangguan kedip tegangan pada sistem tenaga listrik industri tanpa pemulih tegangan.
- 13. Simulasi gangguan kedip tegangan pada sistem tenaga listrik industri dengan pemulih tegangan *DVR*.

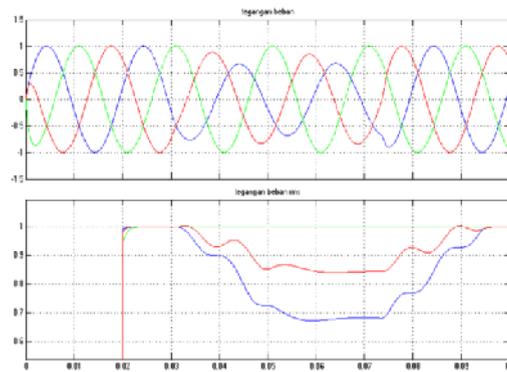
HASIL

Simulasi Sistem tanpa Dynamic Voltage Restorer



Gambar 21. Simulasi sistem tenaga listrik industri tanpa dynamic voltage restorer (DVR) dalam matlab

- 1. Kedip tegangan akibat gangguan hubung singkat 1 fasa ketanah dengan kedip tegangan (voltage sag) 70 %

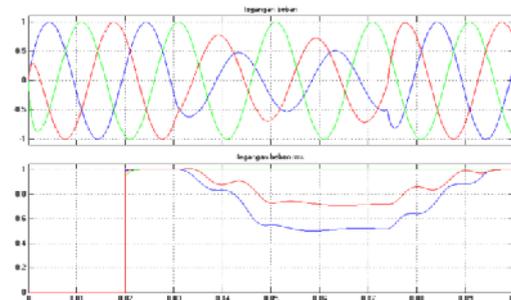


Gambar 22. Voltage Sag 70 %

Dari Gambar 22 terlihat bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah dibeban 1 (fasa a) menyebabkan kedip tegangan pada beban 2. Terlihat bahwa nilai kedip tegangan untuk tiap fasa berbeda untuk fasa a mencapai 70,28%, fasa b tidak mengalami kedip tegangan 100,1% dan untuk fasa c sebesar 84,67%.

2. Kedip tegangan (Voltage Sag) 50 %

Dari Gambar 23 terlihat bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat 1 fasa ketanah dibeban 1 (fasa a) menyebabkan kedip tegangan pada beban 2. Terlihat ada dua fasa yang mengalami kedip tegangan (fasa a dan fasa c) dan satu fasa lain (fasa b) tidak mengalami kedip tegangan, sedangkan nilai dari kedip tegangan untuk tiap fasa berbeda. Fasa a mencapai nilai kedip tegangan paling rendah 49,95%, fasa b tidak mengalami kedip tegangan 100,1% dan untuk fasa c sebesar 71,64%.



Gambar 23. Voltage Sage 50 %

Tabel 2. Kedip Tegangan (Voltage Sag) di Beban 1 (pu)

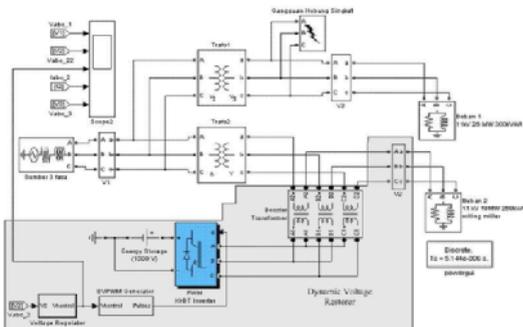
Jenis gangguan	Persentase kedip tegangan (%)	Tegangan fase a (pu)	Tegangan fase b (pu)	Tegangan fase c (pu)
1 fasa ke tanah	70	0.7028	1.001	0.8167
	50	0.4995	1.001	0.7164
2 fasa ke tanah	70	0.8792	0.6998	0.8318
	50	0.7433	0.4991	0.7771
3 fasa ke tanah	70	0.7056	0.6995	0.7019
	50	0.5007	0.5157	0.507

Tegangan base = 11 kV

Dari Tabel 2, untuk kedip tegangan untuk gangguan 1 fasa ke tanah (fasa a) dan 2 fasa ke tanah (fasa bc), terlihat bahwa tegangan yang turun pada beban1 tidak hanya fasa a saja dan fasa bc saja, namun tegangan pada beban 1 untuk semua fasa ikut turun, hal ini dikarenakan oleh belitan trafo yang digunakan untuk menyuplai beban1 memiliki konfigurasi *delta wye*, sehingga tegangan yang terdapat pada beban 1 akan mengalami pergeseran fasa, sehingga bentuk dari tegangan beban 1 saat gangguan kedip tegangan tidak seimbang maka tegangan berbeda dengan sumber.

Simulasi Sistem dengan *Dynamic Voltage Restorer*

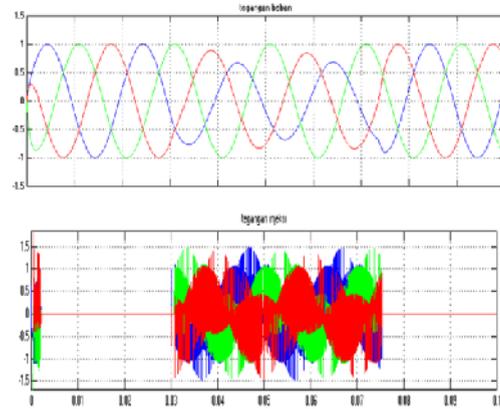
Dalam Gambar 24 simulasi ditambahkan pemulih tegangan DVR pada sistem kelistrikan industri di beban 2, sehingga diharapkan pada saat terjadi gangguan kedip tegangan, DVR mampu untuk menginjeksi tegangan sebesar drop tegangan yang timbul.



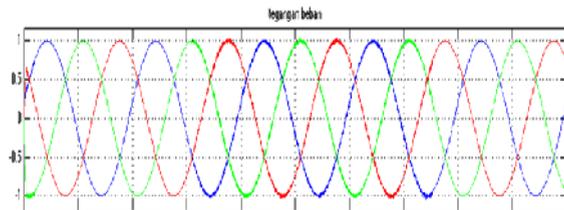
Gambar 24. Simulasi Sistem Kelistrikan Industri dengan *Dynamic Voltage Restorer* (DVR) dalam Matlab

Tegangan Beban Saat Gangguan Hubung Singkat 1 fasa ke Tanah. Ada dua tingkat kedip tegangan yang disimulasikan yaitu:

1. Kedip tegangan 70%

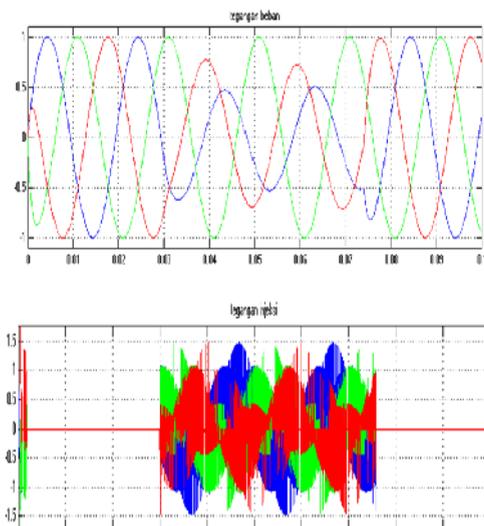


Gambar 25. Tegangan beban saat gangguan dan tegangan referensi injeksi DVR FLC

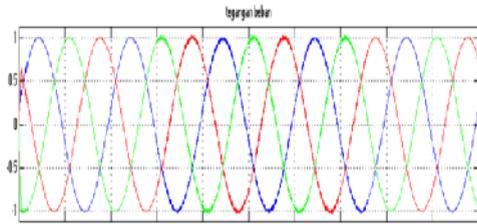


Gambar 26. Tegangan beban setelah diinjeksi dengan DVR kendali FLC

2. Kedip Tegangan 50 %



Gambar 27. Tegangan beban saat gangguan, tegangan referensi injeksi DVR FLC



Gambar 28. Tegangan beban setelah diinjeksi dengan DVR kendali FLC

PEMBAHASAN

Tabel 3. Perbandingan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi untuk gangguan hubung singkat 1 fasa ketanah

Kedip tegangan	Sebelum injeksi (pu)			Injeksi DVR FLC (pu)		
	A	B	C	A	B	C
70%	0,702	1,001	0,846	0,995	1,002	1,003
50%	0,499	1,001	0,716	0,989	1,003	1,001

Tabel 4. Perbandingan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi untuk Kedip Tegangan 1 cycle

Kedip tegangan	Sebelum injeksi (pu)			Injeksi DVR FLC (pu)		
	A	B	C	A	B	C
20%	0.2	0.2	0.2	0.988	0.988	0.988
10%	0.1	0.1	0.1	0.983	0.983	0.983

Tampak pada Tabel 4. bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa ketanah, tegangan beban setelah diinjeksi menggunakan DVR kendali FLC tegangan fasa a tidak mencapai 1 pu. Namun drop tegangan dari tegangan beban setelah pemulihan masih dalam range yang diijinkan, kurang dari 5% yaitu 0,2-0,7%. Sesuai dengan standart IEEE 1195 1995 (IEEE, 1995).

Tabel 5. Perbandingan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi untuk kedip tegangan 3 cycle

Kedip tegangan	Sebelum injeksi (pu)			Injeksi DVR FLC (pu)		
	A	B	C	A	B	C
20%	0.2	0.2	0.2	0.988	0.988	0.988
10%	0.1	0.1	0.1	0.984	0.984	0.984

Tampak pada Tabel 5. bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa ketanah, tegangan beban setelah diinjeksi menggunakan DVR kendali FLC tegangan fasa a tidak mencapai 1 pu. Namun drop tegangan dari tegangan beban setelah pemulihan masih dalam range yang diijinkan, kurang dari 5% yaitu 0,2-0,7%. Sesuai dengan standart IEEE 1195 1995 (IEEE, 1995).

Tabel 6. Perbandingan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi untuk kedip tegangan 5 cycle

Kedip tegangan	Sebelum injeksi (pu)			Injeksi DVR FLC (pu)		
	A	B	C	A	B	C
20%	0.2	0.2	0.2	0.989	0.988	0.988
10%	0.1	0.1	0.1	0.984	0.984	0.984

Tampak pada Tabel 6 bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah, tegangan beban se-telah diinjeksi menggunakan DVR kendali FLC tegangan fasa a tidak mencapai 1 pu. Namun drop tegangan dari tegangan beban setelah pemulihan masih dalam range yang diijinkan, kurang dari 5% yaitu 0,2-0,7%. Sesuai dengan standart IEEE 1195 1995 (IEEE,1995).

KESIMPULAN

Dari ketiga macam gangguan yang disimulasikan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

Pertama, pada level kedip 70% baik yang disebabkan karena gangguan hubung singkat 1 fasa, 2 fasa maupun 3 fasa, DVR dengan kontrol FLC mampu memulihkan kedip tegangan rata-rata hingga 0.995 pu.

Kedua, pada level kedip 50% baik yang disebabkan karena gangguan hubung singkat 1 fasa, 2 fasa maupun 3 fasa, DVR dengan kontrol FLC mampu memulihkan kedip tegangan rata-rata hingga 0.993 pu.

Ketiga, pada level kedip 20% yang disebabkan karena gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah, DVR dengan control FLC mampu memulihkan kedip tegangan rata-rata hingga 0.988 pu.

Keempat, pada level kedip 10% yang disebabkan karena gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah, DVR dengan control FLC mampu memulihkan kedip tegangan rata-rata hingga 0.983 pu .

Berdasarkan kesimpulan hasil penelitian tersebut disarankan adanya studi pemakaian DVR didalam pemulihan kedip tegangan, nantinya ada yang mau mengembangkan sebuah metode baru sehingga DVR selain mampu mengkompensasi tegangan urutan positif, urutan negatif tetapi juga mampu mengkompensasi urutan nol. Diharapkan juga pada penelitian selanjutnya metode penentuan paramter dari FLC menggunakan metode lain seperti menggunakan tuning genetik algoritma dsb.

DAFTAR RUJUKAN

- Demuth H., Beale M., 2007. Hagan M., "Neural Network Toolbox 5 User Guide", September.
- IEEE.1995. *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality IEEE Std 1159* 1995.
- Il-Yop Chung., Sang-Young Park., Dong-Jun Won, Seung-Il Moon., Jong-Keun Park., Byung-Moon Han., 2002. "The Analysis of Zero Sequence Components in Dynamic Voltage Restorer System", *Trans KIEE* Vol 51A.
- Jurado, F., 2004, "Neural Network Control For Dynamic Voltage Restorer", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol.51, No.3, pp. 727-729.
- Math H.J. Bolen, 2000. "Understanding Power Quality Problem", New York IEEE.
- Fransisco Jurado, manuel Valverde, 2003. "Voltage Correction By Dynamic Voltage Restorer Based on Fuzzy Logic Controller": *IEE Transaction on Industrial Electronic*, may
- Mark F. McGranaghan, David R. Mueller, Marek J. Samotyj, 1993. "Voltage Sags in Industrial Systems", *IEEE transactions on industry applications*, vol. 29, no. 2.
- Mangindaan Glanny, Ashari Mohammad, Purnomo Mauridhi. 2008, "Kendali Dynamic Voltage Restorer menggunakan Jaringan Saraf Tiruan Counter-propagation", Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SANTI 2008).
- Nielsen, J. G., Newman, M., Nielsen, H., and Blaabjerg, F., (2004), "Control and Testing of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) at Medium Voltage Level", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol.19, No.3, pp.806-513.
- Nielsen, J. G. and Blaabjerg, F., (2005), "A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.41, No.5, pp.1272-1280.
- Purnomo, M. H. dan Kurniawan, A., (2006), "Supervised Neural Networks dan aplikasinya", Edisi pertama, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Zaki Mubarok, 2004. "Simulasi dan Analisis Dynamic Voltage Restorer untuk Kompensasi Sag Tegangan dengan Phase Jump" Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS.
- Zhang, Lidong, Math H.J. Bollen, 2004. "Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power System", *IEEE Transaction on Industrial Electronic*