

ANALISIS KOMPENSASI TEGANGAN SAG DENGAN KONTROL HYSTERESIS DAN ANN PADA GI SENGKALING PENYULANG PUJON

Arief Trisno Eko Suryo^{1*)}, Wijono², dan Bambang Siswojo³

¹²³Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya Malang
Jl. Veteran, Malang 65145 Indonesia

^{*)}E-mail: arieftrisnoes@gmail.com

Abstrak

Makalah ini mendiskusikan tentang analisis kompensasi tegangan *sag*. Tegangan *sag* disebabkan oleh gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah. Gangguan tersebut memiliki dampak besar terhadap kerusakan pada saluran beban Penyulang Pujon. Tegangan *sag* dapat diatasi dengan kompensasi menggunakan *Dynamic Voltage Restorer* (DVR), yang mana DVR merupakan salah satu dari *custom power device* yang paling efektif. *Hysteresis* dan ANN diusulkan untuk mengatur kompensasi tegangan *sag* dari DVR. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol *Hysteresis* mampu mengkompensasi tegangan beban rata-rata sebesar 95.9 %, dan ANN 104.3%. Kontrol *Hysteresis* lebih baik dibandingkan dengan kontrol ANN dalam mengkompensasi tegangan beban, yang mana tidak melebihi tegangan beban normal pada saat kompensasi tegangan *sag*.

Kata kunci : tegangan *sag*, kompensasi tegangan *sag*, gangguan hubung singkat, *Dynamic Voltage Restorer*, kontrol *Hysteresis*, kontrol ANN

Abstract

This paper discuss about the Voltage sag compensation analysis. Voltage sag is caused by 3-phase short circuit to ground disturbance. The disturbance has a major impact on damage the Pujon feeder load. Voltage sag can be overcome by compensation using Dynamic Voltage Restorer (DVR), where DVR is one of the most effective types of custom devices. Hysteresis and ANN are proposed to regulate voltage sag compensation from the DVR. Simulation results show that the Hysteresis control is able to compensate for an average load voltage of 95.9%, and ANN 104.3%. Hysteresis control is better than ANN control in compensating the load voltage, which does not exceed the normal load voltage when voltage sag compensation.

Keywords: Voltage Sag, compensation voltage sag, short circuit, Dynamic Voltage Restorer, Hysteresis control, ANN control

1. Pendahuluan

Penelitian ini membahas tentang permasalahan tegangan *sag*. Tegangan *sag* merupakan masalah kualitas daya yang krusial dan sering terjadi pada jaringan sistem distribusi tenaga listrik. Tegangan *sag* mengakibatkan lonjakan arus tinggi dalam waktu singkat [1]. Tegangan *sag* disebabkan oleh berbagai hal seperti gangguan hubung singkat, kelebihan beban dan *starting* motor listrik [2]. Tegangan *sag* mempunyai dampak kerusakan yang besar terhadap beban industri pada sistem distribusi GI Sengkaling Penyulang Pujon [3]. Tegangan *sag* yang terjadi pada penyulang Pujon sering disebabkan oleh gangguan hubung singkat, sehingga berakibat fatal terhadap peralatan beban sistem distribusi [4]. Walaupun gangguan hubung singkat terjadi pada saluran sistem yang tidak diketahui kapan terjadinya dan letak

dimana, hal ini dapat diatasi dengan menggunakan kompensasi tegangan *sag* [5].

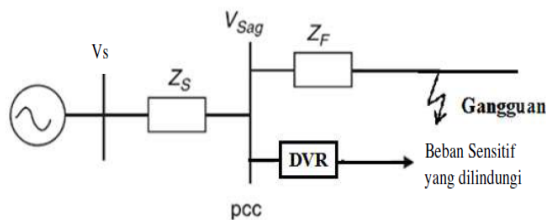
Kompensasi tegangan *sag* dapat dicapai dengan memasang perangkat daya khusus (*Custom Power Device*) untuk mengurangi penurunan tegangan pada beban. *Custom Power Device* memiliki berbagai macam jenis dengan kelebihan dan kekurangan [6]. *Custom Power Device* yang paling efektif dalam mengatasi permasalahan tegangan *sag* adalah *Dynamic Voltage Restorer* (DVR) [7]. DVR memiliki kinerja berdasarkan pada *controller* untuk mendeteksi tegangan *sag* yang terjadi untuk mengkompensasi tegangan beban. *Controller* harus memiliki respon yang cepat dan akurat, agar supaya dapat mengkompensasi tegangan beban [8]. *Controller* mengatur seberapa besar tegangan kompensasi yang diperlukan pada saat terjadi tegangan *sag*.

Penelitian ini mendiskusikan tentang kompensasi tegangan *sag* yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah. Tegangan *sag* menghasilkan besar penurunan tegangan beban dan waktu penurunan tegangan beban tidak dapat diprediksi, sehingga kompensasi tegangan sulit dicapai. Oleh karena itu, dibutuhkan *controller* untuk mendeteksi dan mengatur kompensasi tegangan *sag* dengan menggunakan DVR. Metode Hysteresis dan *Artificial Neural Network* (ANN) diusulkan untuk mengatur kompensasi tegangan *sag*. Hysteresis digunakan karena dapat secara cepat mendeteksi besarnya penurunan tegangan beban [9][10], sedangkan ANN memiliki kecepatan respon waktu yang tinggi untuk mendeteksi penurunan tegangan beban [11][12].

2. Metode

Metode Hysteresis dan ANN diusulkan untuk mengatasi tegangan *sag*. DVR digunakan sebagai kompensasi tegangan beban. Hysteresis dan ANN digunakan untuk mendeteksi tegangan *sag* dan untuk mengatur kompensasi tegangan *sag*. Matlab-Simulink R2018b digunakan untuk memvalidasi simulasi sistem distribusi Penyulang Pujon GI sengkaling, yang mana saluran Penyulang Pujon diberi gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah.

Gambar 1 menjelaskan tentang tegangan *sag* yang terjadi dari gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah pada sistem. Penurunan tegangan beban diperoleh dari tegangan *sag* pada sistem dengan model rangkaian pembagi tegangan.



Gambar 1. Sistem Pembagi Tegangan [13]

Gangguan hubung singkat dialami saluran jaringan distribusi berada di Z_F . Persamaan rangkaian pembagi tegangan digunakan untuk menentukan tegangan *sag* pada titik *Point-of-Common Coupling* (PCC) selama proses gangguan terjadi pada saluran sistem.

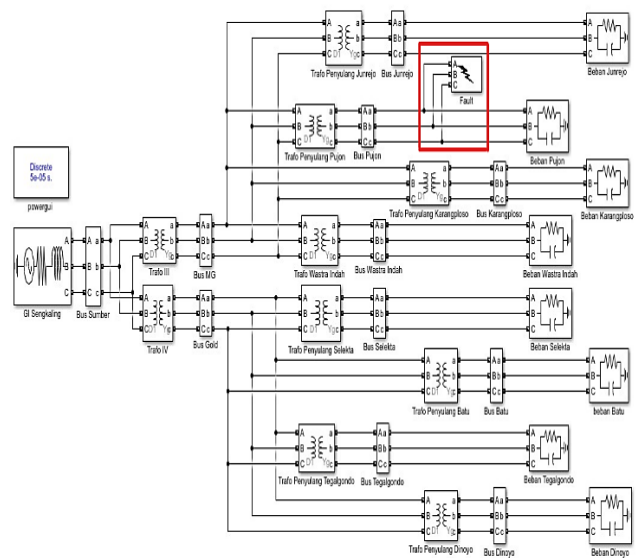
$$V_{sag} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_S} V_S \quad (1)$$

Dimana V_{sag} merupakan tegangan *sag* yang diakibatkan oleh gangguan hubung singkat. V_S mewakili tegangan sumber, Z_F merupakan sebagai impedansi gangguan dan Z_S mewakili impedansi sumber yang dirumuskan sebagai berikut.

$$Z_S = R_S + jX_S \text{ dan } Z_F = R_F + jX_F \quad (2)$$

Dimana R_S merupakan resistansi sumber, X_S mewakili reaktansi sumber, R_F merupakan resistansi gangguan dan X_F mewakili reaktansi gangguan. Selain itu, jenis transformator juga berpengaruh pada beban yang terhubung yang memberikan perubahan besaran tegangan berbeda-beda pada tegangan *sag* yang terjadi [14].

Implementasi tegangan *sag* disimulasikan pada saluran penyulang Pujon, yang mana *single line diagram* disimulasikan dari sistem distribusi GI sengkaling dengan terjadinya gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah yang dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan Sistem Distribusi GI Sengkaling

Sistem distribusi GI Sengkaling terdapat 8 beban. Tegangan yang disuplai dari sumber sebesar 150 kV, kemudian tegangan disalurkan pada transformator 3 dan 4 dengan besar tegangan 20 kV. Transformator 3 dan 4 masing-masing mendistribusikan daya ke setiap 4 penyulang beban pada tiap saluran antara lain seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Daya Peyulang Sistem Distribusi GI Sengkaling

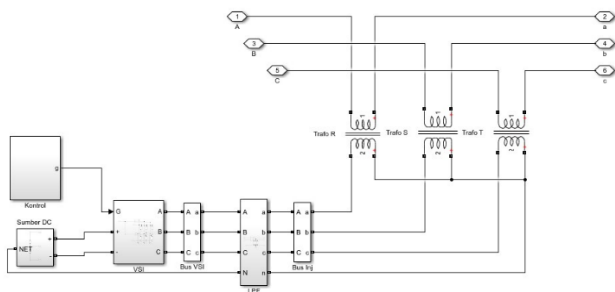
Transformator III (150/20 kV, 30 MVA)		Transformator IV (150/20 kV, 60 MVA)	
Penyulang	MW	Penyulang	MW
Junrejo	5.9	Selekta	6.5
Pujon	5.29	Batu	6.85
Karangploso	7.5	Tegalondo	9.9
Wastra Indah	6.88	Dinoyo	9.1

Daya disuplai dari sumber ke setiap Penyulang beban dari Junrejo sampai Dinoyo. Penyulang Pujon merupakan salah

satu bagian dari sistem distribusi GI Sengkaling, yang mana memiliki banyak peralatan beban yang sensitif terhadap tegangan *sag*, sehingga DVR diusulkan untuk mengkompensasi tegangan *sag* yang terjadi pada sistem tersebut.

2.1. Kompensasi Tegangan Sag Menggunakan Dynamic Voltage Restorer (DVR)

Dynamic Voltage Restorer (DVR) diletakkan secara seri antara saluran Penyulang dan beban Pujon. DVR bekerja dengan mengkompensasi tegangan beban ketika tegangan *sag* terjadi pada saluran beban Pujon. Gambar 3 menunjukkan diagram simulasi yang merepresentasikan DVR terhubung secara seri pada saluran Penyulang Pujon.



Gambar 3. Pemodelan DVR pada Saluran Penyulang Pujon

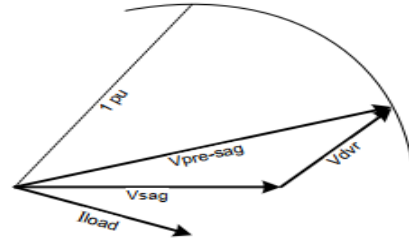
Komponen yang dimiliki DVR agar dapat mengkompensasi tegangan *sag* antara lain yaitu sumber DC, Voltage Source Inverter (VSI) yang digunakan sistem full bridge IGBT, rangkaian kontrol untuk mengatur kompensasi, low-pass filter untuk mengatasi harmonisa dari VSI, dan transformator step-up untuk menyamakan tegangan DVR dengan tegangan sistem distribusi. Parameter dalam DVR akan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter tiap bagian DVR

Parameter	Nilai
Transformator Step-up	30 MVA, 5/20kV, 50 Hz
Filter	0.1 Ω, 50e-3 F, dan 33e-6 C
Tegangan DC	5 kV
IGBT (Resistansi Ron)	0.001 Ω
Snubber Resistance	0.001 m Ω
Jumlah IGBT	6-buah
waktu transisi	0.3 sampai 0.8 detik
Frekuensi saluran	50 Hz

Salah satu teknik kompensasi pada DVR yang digunakan untuk mengatasi tegangan *sag* yaitu dengan teknik *pre-sag* seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Teknik *pre-sag* berfungsi dengan mengkompensasi perbedaan antara tegangan *sag* dan tegangan *pre-sag*, yang mana menyimpan data besaran tegangan secara terus-menerus dari fasa dan

magnitude yang sama sebagai tegangan nominal dalam kondisi tanpa gangguan [6].



Gambar 4. Teknik Kompensasi Pre-sag [15]

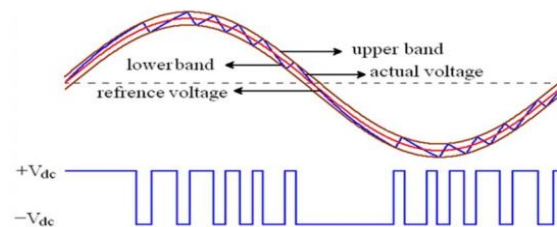
Tegangan DVR (V_{dvr}) merupakan tegangan injeksi yang dihasilkan oleh DVR. Tegangan DVR dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$V_{inj-DVR} = V_{pre-sag} - V_{sag} \tag{3}$$

DVR membutuhkan sebuah kontrol untuk mengatur kompensasi pada besar penurunan tegangan dan waktu penurunan tegangan yang tepat. Metode kontrol Hysteresis dan ANN diusulkan agar dapat mendeteksi tegangan *sag* yang terjadi pada saluran distribusi Penyulang Pujon.

2.2. Deteksi Tegangan Sag Menggunakan Kontrol Hysteresis

Deteksi tegangan *sag* yang digunakan kontrol Hysteresis berdasarkan pada tegangan *error* yang dihasilkan oleh perbedaan antara tegangan referensi (V_{ref}) dan tegangan aktual (V_s) sistem distribusi. Tegangan *error* akan menuju Upper Hysteresis Band (UHB) dan Lower Hysteresis Band (LHB) untuk menghasilkan sinyal pulsa untuk masuk ke setiap gate IGBT dalam VSI [10]. Apabila tegangan *error* mencapai batas atas UHB atau batas bawah LHB, maka akan membenturkan sinyal pulsa sesuai besaran tegangan *sag* yang terjadi pada sistem untuk mengatur kompesasi tegangan *sag* pada DVR. Sehingga konsep dari hysteresis pada UHB dan LHB yang akan menghasilkan tegangan pulsa adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



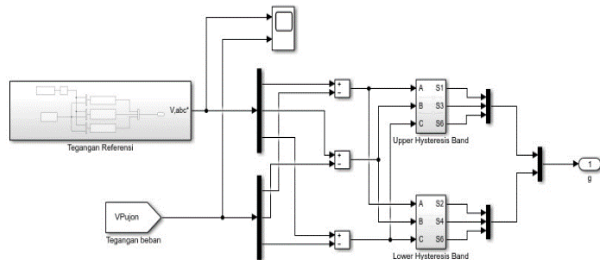
Gambar 5. UHB dan LHB pada Kontrol Hysteresis.

Persamaan dari tegangan *error* didapatkan sebagai:

$$e(t) = \frac{1}{2}V_{Load} - V_{Ref} \quad (4)$$

V_{Ref} merupakan tegangan referensi yang diperoleh dari persamaan berikut:

$$V_{Ref} = \frac{1}{2}V_S \quad (5)$$



Gambar 6. Blok Diagram kontrol Hysteresis.

Gambar 6 menunjukkan blok diagram dari kontrol Hysteresis dalam DVR. Kontrol Hysteresis diletakkan dalam VSI dengan mendeteksi tegangan beban sistem untuk mengatur kompensasi DVR pada saat tegangan *sag* terjadi. Kontrol Hysteresis dalam sistem ini menghasilkan sinyal keluaran terhadap VSI dari tegangan sistem dengan batas atas UHB sebesar $1.35e-3$ dan batas bawah LHB sebesar $-1.35e-3$.

2.3. Deteksi Tegangan *Sag* Menggunakan Kontrol Artificial Neural Network (ANN)

Deteksi tegangan *sag* menggunakan kontrol ANN, yang mana ANN digunakan untuk menentukan kompensasi tegangan beban dari deteksi tegangan *sag* secara *real time* yang sesuai dengan tegangan maksimal beban dari setiap penurunan tegangan input yang diberikan [16]. ANN menggunakan data dari hasil perbandingan antara tegangan referensi dengan tegangan keluaran pada transformasi *park* untuk digunakan sebagai pelatihan kontrol ANN. Data *input* sistem dan *output* target yang digunakan sebagai pelatihan terdiri dari 20.000 data. Kemudian proses data dibagi menjadi dua sub. Sub pertama 70% dari sampel yang digunakan untuk melatih ANN, dan sub kedua 30% digunakan untuk menguji dan memvalidasi jaringan sistem, sehingga dihasilkan model yang diinginkan untuk mengkompensasi tegangan *sag* pada beban. Kinerja ANN sendiri akan diukur dengan menghitung *mean-square error* (MSE) dari proses pelatihan yang terdapat pada persamaan (6) dan (7).

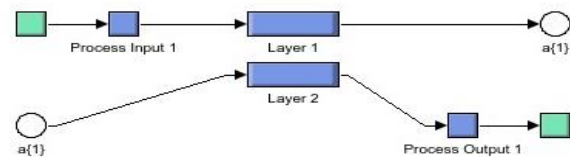
$$v_d = \frac{2}{3}(v_a \sin(\theta) + v_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + v_c \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}))$$

$$v_q = \frac{2}{3}(v_a \cos(\theta) + v_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + v_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}))$$

$$v_0 = \frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c) \quad (6)$$

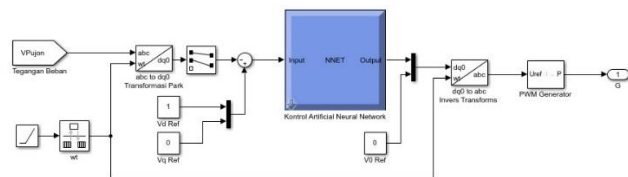
$$e = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \|y^{(i)} - v^{(i)}\|^2 \quad (7)$$

Dijelaskan bahwa p merupakan jumlah input dari data pelatihan, y mewakili vektor keluaran dari kontrol ANN, v merupakan *output* yang diinginkan. Gambar 7 menunjukkan proses simulasi dengan menggunakan kontrol ANN.



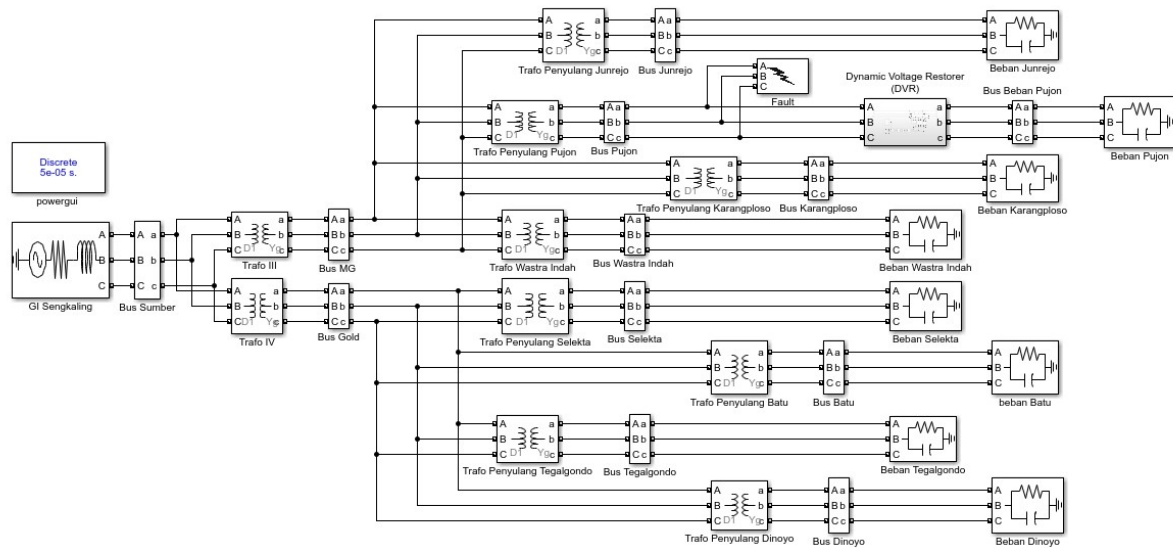
Gambar 7. Pemodelan Kontrol dalam ANN.

Kontrol ANN memiliki 2 *input* dengan 20 *hidden layer* dan 2 *output*, yang mana pelatihan menggunakan algoritma *Levenberg-Marquardt* untuk meningkatkan akurasi dan konvergensi yang tinggi. Gambar 8 berikutnya akan memperlihatkan blok diagram MATLAB-Simulink dari hasil model kontrol ANN dalam DVR.



Gambar 8. Pemodelan Peralihan dari Kontrol ANN.

Sistem kontrol ANN terdiri dari tegangan referensi dan tegangan *output* dari transformasi *park*. Kemudian tegangan tersebut dibandingkan untuk mendapatkan nilai tegangan *error*, yang mana tegangan *error* akan muncul apabila terjadi tegangan *sag* pada sistem. Hasil perbandingan nilai tegangan *error* tersebut yang akan dikontrol ANN untuk mendeteksi tegangan *sag*, yang selanjutnya akan dikembalikan dengan *invers transform park*. Hasil *invers transform* sistem menghasilkan besaran tegangan beban yang turun dan perlu



Gambar 9. Simulasi Tegangan Sag dari Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa pada Sistem Distribusi Penyulang Pujon GI Sengkaling

dikompensasi DVR. Tegangan error akan dikonversi ke sinyal pulsa untuk mengatur *gate* VSI dengan menggunakan *Pulse Width Modulation* (PWM) agar DVR dapat mengkompensasi tegangan *sag* pada beban.

3. Hasil dan Pembahasan

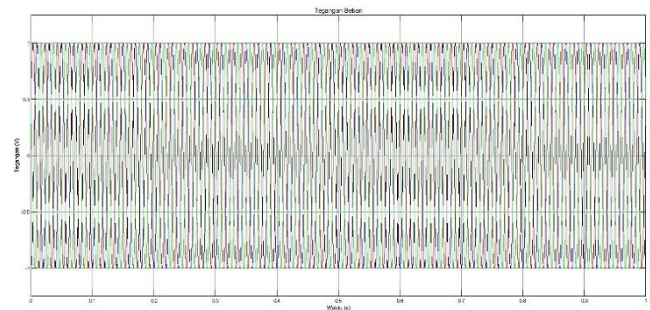
Simulasi gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah diterapkan pada saluran Penyulang Pujon. Gambar 9 menampilkan simulasi sistem distribusi GI Sengkaling dengan gangguan terjadi pada saluran Penyulang dan DVR yang diletakkan pada beban Pujon. Sistem distribusi GI sengkaling disimulasikan mengalami tegangan *sag* pada saluran penyulang Pujon. DVR dipasang pada beban Pujon sebagai kompensasi tegangan *sag*. Selanjutnya tegangan beban akan dianalisis dan divalidasi terhadap kompesasi sebelum dan sesudah adanya DVR.

3.1. Sistem Distribusi Penyulang Pujon pada Kondisi tanpa Gangguan

Sistem distribusi penyulang Pujon pada saat kondisi tanpa gangguan disimulasikan pada sistem. Gambar 10 menampilkan tegangan beban Pujon pada kondisi tegangan normal.

Sistem distribusi GI Sengkaling berfungsi normal tanpa adanya gangguan dengan mensuplai daya secara penuh terhadap beban. Tegangan 1 pu memberikan gambaran bahwa tegangan yang disalurkan dari sumber menuju ke

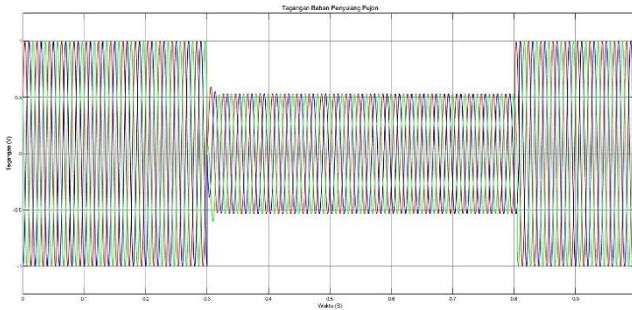
beban dalam keadaan normal tanpa adanya gangguan ataupun penurunan tegangan.



Gambar 10. Tegangan Beban Penyulang Pujon dalam Kondisi Normal.

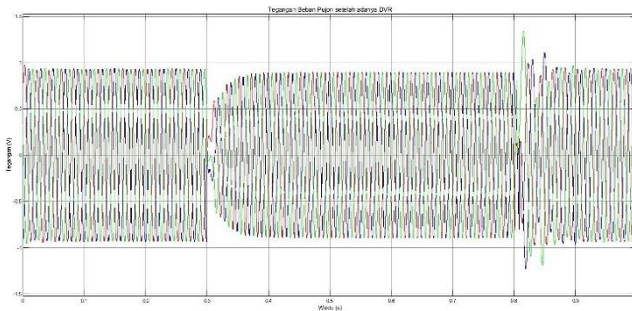
3.2. Kompensasi Tegangan Sag Menggunakan DVR dengan Kontrol Hysteresis

Tegangan *sag* yang terbentuk dari gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah pada saluran penyulang Pujon sebelum adanya DVR. Nilai impedansi gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah diberikan sebesar 2.8Ω dan interval waktu terjadinya selama 0.5 detik. Gangguan tersebut dibuat antara periode waktu 0.3 hingga 0.8 detik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa beban mengalami penurunan pada tiap fasanya sebesar 50% dengan tegangan *sag* yang terjadi pada sistem sebesar 0.532 pu seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Tegangan sag yang terjadi dari gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah pada beban Pujon.

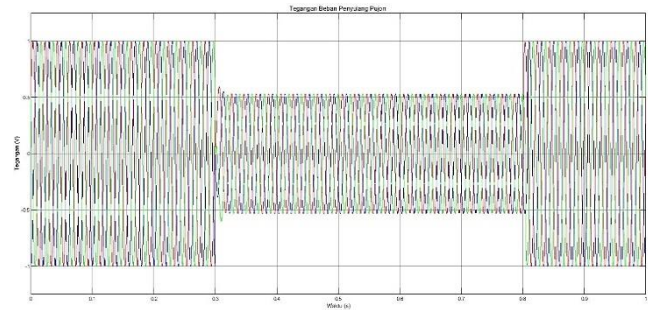
Gambar 12 menunjukkan kompensasi tegangan *sag* menggunakan DVR dengan kontrol Hysteresis. Hasil simulasi terlihat bahwa DVR mampu mengkompensasi tegangan *sag*, sehingga tegangan beban kembali pulih sebesar 0.945 pu (94.5%). DVR menggunakan kontrol Hysteresis mengalami penundaan tegangan kompensasi pada awal dan akhir sebesar 0.05 detik dan stabil pada 0.35 detik terhadap kompensasi tegangan *sag*, yang mana merupakan waktu untuk mengkompensasi yang masih dapat diterima sistem. Nilai kompensasi tegangan kurang dari 1 pu dikategorikan normal, yang mana tidak melebihi nilai ambang batas tegangan maksimal $\pm 10\%$ dari beban sistem dalam kondisi normal.



Gambar 12. Tegangan Beban Penyulang Pujon setelah dikompensasi dengan DVR menggunakan Kontrol Hysteresis.

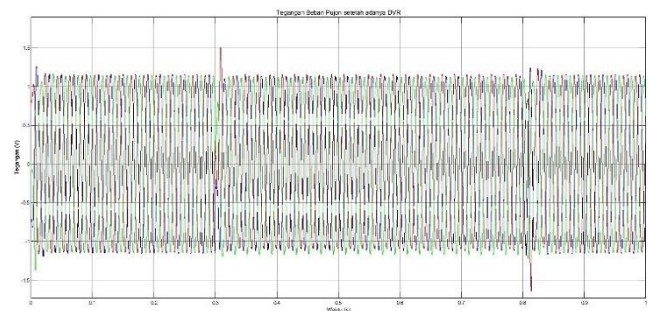
3.3. Kompensasi Tegangan *sag* Menggunakan DVR dengan Kontrol Artificial Neural Network (ANN)

Tegangan *sag* yang terbentuk dari gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah pada saluran penyulang Pujon sebelum adanya DVR. Nilai impedansi gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah diberikan sebesar 2.8Ω dan interval waktu terjadinya selama 0.5 detik. Gangguan tersebut dibuat antara periode waktu 0.3 hingga 0.8 detik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa beban mengalami penurunan pada tiap fasanya sebesar 50% dengan tegangan *sag* yang terjadi pada sistem sebesar 0.532 pu seperti ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Tegangan *Sag* yang terjadi pada Beban Penyulang Pujon.

Gambar 14 menunjukkan kompensasi tegangan *sag* menggunakan DVR dengan kontrol ANN. Hasil simulasi terlihat bahwa DVR mampu mengkompensasi tegangan *sag*, sehingga tegangan beban kembali pulih sebesar 1.021 pu (102.1%). DVR menggunakan kontrol ANN tidak mengalami penundaan pada awal dan akhir kompensasi tegangan *sag*, walaupun ada ketidakseimbangan 0.05 detik pada saat tersebut dikarenakan efek penyesuaian dari kontrol ANN dalam mengkompensasi tegangan *sag* yang masih diterima oleh sistem distribusi. Nilai kompensasi tegangan lebih dari 1 pu dikategorikan tidak normal, dikarenakan melebihi nilai ambang batas tegangan maksimum dari beban dalam kondisi normal dan dapat menimbulkan dampak kerusakan lain pada peralatan beban.



Gambar 14. Beban Penyulang Pujon setelah dipulihkan dengan DVR menggunakan Kontrol ANN

3.4. Perbandingan Kompensasi Tegangan *Sag* Menggunakan Kontrol Hysteresis dan ANN

Perbandingan kompensasi tegangan *sag* menggunakan DVR dengan kontrol Hysteresis dan ANN dari gangguan hubung singkat 3 fasa yang terjadi pada beban dengan impedansi gangguan tersebut dibuat dari 2.8Ω sampai 6Ω . Tegangan *sag* yang terjadi bervariasi mulai dari 50%-80% pada beban Penyulang Pujon. DVR dengan kontrol Hysteresis menghasilkan kompensasi tegangan beban rata-rata 95.9%, dan kontrol ANN menghasilkan kompensasi tegangan beban

rata-rata 104.3%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol Hysteresis lebih baik dibandingkan kontrol ANN. Karena kontrol Hysteresis tidak melebihi batas tegangan 1 pu sistem. Hasil simulasi kompensasi tegangan sag dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Kompensasi Tegangan Sag Menggunakan DVR dengan Kontrol Hysteresis dan Kontrol ANN

Tegangan Sag terjadi pada beban	Kompensasi Tegangan Sag dengan Kontrol Hysteresis pada beban	Kompensasi Tegangan Sag dengan Kontrol ANN pada beban
50%	94.5%	102.1%
60%	95.2%	103.2%
70%	96.7%	105.8%
80%	97.0%	106.1%
Rata-rata	95.9%	104.3%

4. Kesimpulan

Analisis kompensasi tegangan sag pada sistem distribusi Penyulang Pujon GI Sengkaling menggunakan DVR. DVR disebut sebagai perangkat *custom device* yang paling efektif untuk mengkompensasi tegangan sag. Tegangan sag terjadi disebabkan oleh gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah pada saluran Penyulang Pujon. Gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah memiliki dampak kerusakan pada beban Pujon. Hysteresis dan ANN diusulkan untuk mengatur kompensasi tegangan sag pada beban. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol Hysteresis mampu mengkompensasi tegangan beban rata-rata sebesar 95.9 %, dan ANN 104.3%. Kontrol Hysteresis lebih baik dibandingkan dengan kontrol ANN dalam mengkompensasi tegangan beban, karena kontrol Hysteresis tidak melebihi ambang batas tegangan normal 1 pu sistem.

Referensi

[1] S. Sabir Hussain Bukhari, S. Atiq, dan B. Kwon, "A Sag Compensator That Eliminates the Possibility of Inrush Current While Powering Transformer-Coupled Loads," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 2, hlm. 891–900, Jun 2017.

[2] R. Pal dan Dr. S. Gupta, "Simulation of dynamic voltage restorer (DVR) to mitigate voltage sag during three-phase fault," dalam *Electrical Power and Energy Systems*, Bhopal, India, 2016.

[3] S. M. Deckmann dan A. A. Ferreira, "About voltage sags and swells analysis," *10th Int. Conf. Harmon. Qual. Power Proc. Cat No02EX630*, vol. 02, agustus 2003.

[4] T. Tran Duy, D. V. T. Radomir Gono, dan Z. Leonowicz, "Mitigating Voltage Sags due to short circuits using Dynamic Voltage Restorer," dalam *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, Italy, 2016.

[5] M. H. J. Bollen, "Voltage sags in three-phase systems," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 21, no. 9, hlm. 8–11, 15, Sep 2001.

[6] M. A. A. Mahmoud Abdel Aziz, "Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer in Power System," *Journal, Azhar University, Cairo*, 2012.

[7] C. Benachaiba dan B. Ferdi, "Voltage Quality Improvement Using DVR," no. 1, hlm. 8, 2008.

[8] A. K. Sadigh dan K. M. Smedley, "Fast and precise voltage sag detection method for dynamic voltage restorer (DVR) application," *Elsevier BV*, vol. 130, hlm. 192–207, Jan 2016.

[9] S. K. Singh dan S. K. Srivastava, "Enhancement in power quality using dynamic voltage restorer (DVR) in distribution network," dalam *2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, Coimbatore, 2017, hlm. 1–5.

[10] F. Zare dan A. Nami, "A New Random Current Control Technique for a Single-Phase Inverter with Bipolar and Unipolar Modulations," dalam *2007 Power Conversion Conference - Nagoya*, Nagoya, Japan, 2007.

[11] P. Kumar, "DYNAMIC VOLTAGE RESTORER FOR VOLTAGE QUALITY IMPROVEMENT," vol. 3, no. 1, hlm. 12, 2017.

[12] Md. S. Haque Sunny, E. Hossain, M. Ahmed, dan F. Un-Noor, "Artificial Neural Network Based Dynamic Voltage Restorer for Improvement of Power Quality," dalam *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, 2018, hlm. 5565–5572.

[13] L. Zhan dan M. H. J. Bollen, "Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power Systems," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 2, hlm. 891–900, Okt 1998.

[14] M. H. J. Bollen, "Characterization of voltage sags experienced by threephase adjustable-speed drives.pdf," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 4, hlm. 1666–1671, Okt 1997.

[15] J. Shaikh dan P. Khamparia, "A Comprehensive Review of Dynamic Voltage Restorer," *Int. J. Eng. Appl. Sci. IJEAS*, vol. 2, no. 3, hlm. 87–90, Mar 2015.

[16] C. Vimalarani, M. Muthuramalingam, dan A. R. Jemimah, "Ann Controller Based Photovoltaic Source Injected DVR," *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 11, no. 4, hlm. 107–115, 2018.