

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian ini mengenai "Pengembangan Kompensasi Ketidakseimbangan Beban dan Jatuh Tegangan pada Kereta Api Diesel Menggunakan *Dynamic Voltage Restorer*" sangat bergantung pada temuan-temuan penelitian sebelumnya sebagai landasan teoritis.

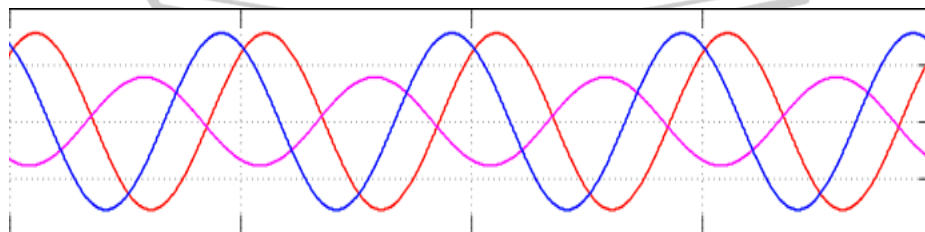
Dari penelitian yang berjudul "Studi Arus, Tegangan, dan Daya pada Instalasi Listrik Kereta Api Turangga" menjelaskan tentang sebab dan akibat mengenai apa yang menjadi faktor *unbalance* dan *drop voltage* terjadi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi *drop voltage* sebesar 5,49% dari keseluruhan gerbong yang berjumlah 7. Penelitian ini menunjukkan bahwa panjang kabel adalah faktor faktor yang paling mempengaruhi terjadinya *drop voltage*. Sedangkan dalam penelitian lainnya "*Power Quality Phenomena in Electric Railway Power Supply Systems: An Exhaustive Framework and Classification*" didalamnya dibahas juga mengenai apa yang dibahas pada penelitian yang sebelumnya, namun penelitian ini memberikan saran apa yang bisa menjadi solusi terkait masalah kualitas daya termasuk didalamnya adalah *unbalance* dan *drop voltage fault*. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan solusi yang efektif. Salah satu teknologi yang menjanjikan adalah *Dynamic Voltage Restorer* (DVR). DVR merupakan perangkat yang dapat menyuntikkan tegangan dengan fasa dan magnitudo yang sesuai untuk memperbaiki profil tegangan pada titik beban. Dengan demikian, DVR dapat meminimalkan dampak negatif tegangan jatuh tak seimbang dan meningkatkan kualitas daya. Argumen tersebut dapat didukung dengan penelitian terkait, yaitu "*Optimized Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Stabilizing Unbalanced Loads in Power System*." Penelitian ini melakukan simulasi pada sebuah sistem tenaga listrik untuk melihat efektivitas DVR dalam mengatasi ketidakseimbangan beban. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan menggunakan DVR, kinerja dalam menyeimbangkan beban dapat ditingkatkan secara signifikan.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya implementasi DVR dalam *power quality improvement* dari permasalahan mengenai *drop voltage* dan *unbalance* pada kereta api pembahasannya masih cenderung minim dan masih banyak hal yang bisa dilakukan pengembangannya guna meningkatkan efisiensi kerja sistem kereta api. Sehingga penelitian **“Pengembangan Kompensasi Ketidakseimbangan Beban dan Jatuh Tegangan pada Kereta Api Diesel Menggunakan *Dynamic Voltage Restorer*”** diusulkan sebagai referensi lanjutan. Penelitiann ini dilakukan dengan simulasi menggunakan matlab R2022b.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Unbalance Voltage

Dalam sistem tenaga listrik tiga fasa yang ideal, tegangan pada setiap fasa memiliki besar yang sama dan sudut fasa yang berselisih  $120^\circ$ . Namun, dalam kondisi sebenarnya, seringkali terjadi ketidakseimbangan pada tegangan ini. Kondisi di mana besar atau sudut fasa dari tegangan tiga fasa tidak sama disebut dengan tegangan tak seimbang. Ketidakseimbangan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti beban tak seimbang dimana adanya sistem dengan pembagian beban yang tidak merata pada setiap fasa dapat menyebabkan ketidakseimbangan arus, yang pada gilirannya menyebabkan tegangan tak seimbang. Gangguan sistem seperti *short circuit*, putus fasa, atau ketidakseimbangan impedansi pada jaringan distribusi juga dapat menyebabkan tegangan tak seimbang. Ketidakseimbangan sumber tegangan pada generator atau *transformator* yang tidak sempurna juga dapat menjadi sumber tegangan tak seimbang. Gambar 2.1 adalah fenomena tegangan pada kondisi *balanced* dan *unbalanced*.



**Gambar 2.1** Kondisi Tegangan *Balanced* dan *Unbalanced*

(Sumber: Zhang, S., Zhao, Z., Zhao, J., Jin, L., Wang, H., Sun, H., ... & Yang, B. 2019)

Tegangan tak seimbang memiliki dampak yang cukup signifikan terhadap sistem tenaga listrik dan peralatan yang terhubung di dalamnya. Peningkatan arus, tegangan tak seimbang akan menyebabkan peningkatan arus pada salah satu atau dua fasa. Hal ini dapat menyebabkan pemanasan yang berlebihan pada konduktor, isolasi, dan peralatan listrik lainnya, sehingga memperpendek umur pakai peralatan. Peningkatan harmonic, tegangan tak seimbang dapat menghasilkan harmonik yang lebih tinggi, yang dapat mengganggu operasi peralatan elektronik dan komunikasi. Getaran dan kebisingan, pada motor listrik, tegangan tak seimbang dapat menyebabkan timbulnya gaya elektromagnetik yang tidak seimbang, sehingga menghasilkan getaran dan kebisingan yang berlebihan. Efisiensi yang menurun, tegangan tak seimbang dapat menurunkan efisiensi operasi motor listrik dan peralatan listrik lainnya. Kerusakan isolasi, panas yang berlebihan akibat arus yang tidak seimbang dapat merusak isolasi pada peralatan listrik, sehingga meningkatkan risiko terjadinya *short circuit*. Ketidakstabilan sistem, dalam kondisi yang parah, tegangan tak seimbang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem tenaga listrik, seperti peningkatan kerugian daya dan terjadinya trip pada pemutus sirkit atau bahkan black out.

Secara umum, *unbalance voltage* harus dijaga dalam batas yang sangat rendah untuk memastikan kinerja optimal dan keamanan sistem kelistrikan kereta api. Batas toleransi yang umum berkisar antara 1-3% dari tegangan nominal. EN-50160 menetapkan batas ketidakseimbangan tegangan maksimal sebesar 2% dan ANSI C84.1 menetapkan batas ketidakseimbangan tegangan maksimum sebesar 3% saat diukur pada meteran listrik dalam kondisi tanpa beban

Untuk mengukur tingkat ketidakseimbangan dalam sistem tenaga listrik, biasanya digunakan parameter yang disebut sebagai tingkat ketidakseimbangan positif-negatif (*Positive Sequence-Negative Sequence Voltage Unbalance Factor*). Parameter ini menunjukkan perbandingan antara komponen negatif dengan komponen positif dari tegangan.

$$\%Unbalance Voltage : \frac{100\% * Max.Voltage Deviation}{Voltage Mean} \quad (2.1)$$

*Unbalance voltage* dianggap sebagai indikator utama untuk tingkat kualitas daya (PQ), karena hal ini tidak dapat dihindari dalam pasokan listrik. *Unbalance voltage* dapat dikarakterisasi dengan menghitung beberapa indikator yang disediakan oleh komunitas lokal seperti *International Electrotechnical Commission* (IEC), *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), dan *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) atau oleh para ilmuwan lainnya seperti metode *unbalance voltage* yang digunakan dalam menyatakan bahwa metode faktor ketidakseimbangan tegangan kompleks memberikan hasil yang paling akurat.

### ***NEMA Definition***

NEMA mendefinisikan *unbalance voltage* didefinisikan sebagai rasio antara deviasi tegangan maksimum dari tegangan garis rata-rata terhadap tegangan garis rata-rata seperti yang ditunjukkan dalam persamaan dibawah ini. Definisi ini hanya mempertimbangkan besarnya tegangan.

$$NUVR = \frac{MVDALV}{ALV} \quad (2.2)$$

Dengan:

*NUVR* = *NEMA Unbalance voltage Ratio (VUR)*,

*MVDALV* = *Maximum Voltage Deviation from the Average Line Voltage*

*ALV* = *Average Line Voltage*.

### ***Proposed Definition of Phase Unbalance***

Metode ini menghitung VUR dalam kasus penyimpangan sudut dari 120° normal [29]. Hal ini didefinisikan sebagai rasio penyimpangan sudut maksimum terhadap nilai referensi 120°, seperti ditunjukkan dalam persamaan dibawah ini.

Metode ini hanya mempertimbangkan variasi sudut tegangan tetapi mengabaikan variasi besarnya tegangan selain komponen sekuen nol. Jika ada fluktuasi besarnya

$$PHUB = \frac{\text{Max} \begin{bmatrix} |\angle ab - \angle 0^\circ| \\ |\angle bc - \angle 240^\circ| \\ |\angle ca - \angle 120^\circ| \end{bmatrix}}{\angle 120^\circ} \quad (2.3)$$

$$VUR\% = \frac{V_2}{V_1}$$

### **IEEE Definition**

IEEE 3004-5 [31] mendefinisikan VUF sebagai rasio deviasi tegangan fasa maksimum dari tegangan fasa rata-rata terhadap tegangan fasa rata-rata, seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut. Definisi ini hanya mempertimbangkan magnitudo tegangann.

$$IUVR = \frac{MVDAPV}{APV} \quad (2.4)$$

Dengan:

$IUVR$  = IEEE Unbalance Voltage Ratio,  
 $MVDAPV$  = Maximum Voltage Deviation from the Average Phase Voltage  
 $APV$  = Average Phase Voltage.

Menurut IEEE 112 [32], VUF dapat ditentukan secara langsung dengan rasio pengurangan nilai rms tegangan fasa maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata antara semua nilai rms tegangan fasa, seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut. Nilai ini hanya bergantung pada besarnya saja.

$$IUVR_2 = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{avg}} \quad (2.5)$$

Dengan:

$IUVR_2$  = IEEE Unbalance Voltage Ratio 2<sup>nd</sup> Definition  
 $V_{max}$  = Maximum Phase Voltage Between Three Phase  
 $V_{min}$  = Minimum Phase Voltage Between Three Phase

$V_{avg}$  = Average Phase Voltage

### **Complex Unbalance Voltage Definition**

Metode ini mempertimbangkan efek dari variasi sudut untuk komponen tegangan positif dan negatif, seperti yang ditunjukkan pada persamaan dibawah.

$$CUVF = \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \quad (2.6)$$

Dengan:

$\bar{V}_1$  = vektor kompleks dari komponen tegangan positif, dan

$\bar{V}_2$  = vektor kompleks dari komponen tegangan negatif.

Metode ini tidak sama dengan metode IEC-60034-26, karena memperhitungkan besarnya tegangan selain variasi sudut. Akurasi metode ini tidak memuaskan dalam sistem tiga fasa, empat kawat karena mengabaikan komponen sekuen nol.

### **Alternative Unbalance Voltage Factor**

Metode AUVF menghitung UVR (Voltage Unbalance Rate) dengan mempertimbangkan komponen sekuen nol, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan:

$$AUVF = \frac{\sqrt{|V_2^2| + |V_0^2|}}{|V_1^2|} \quad (2.7)$$

Dengan:

$V_0$  = sekuen fasa nol tegangan.

$V_1$  = sekuen fasa positif tegangan.

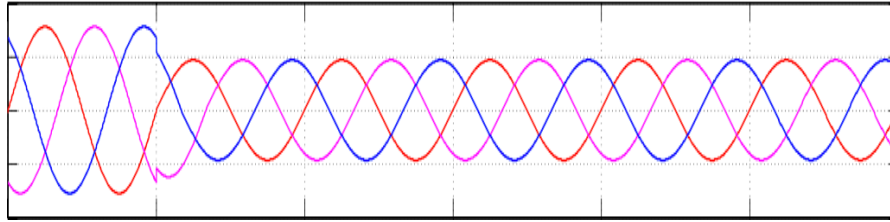
$V_2$  = sekuen fasa negatif tegangan.

Metode ini mempertimbangkan besarnya tegangan komponen sekuen positif, negatif, dan nol, sementara mengabaikan penyimpangan sudutnya. Ini dapat dianggap sebagai salah satu metode penyelesaian terbaik, tetapi belum tentu dalam semua kasus.

Ada beberapa cara untuk mengatasi masalah tegangan tak seimbang, antara lain Penyeimbangan beban dengan mendistribusikan beban secara merata pada setiap fasa. Penggunaan transformator khusus yang dirancang khusus untuk mengatasi masalah tegangan tak seimbang. Kompensator daya reaktif statis (*Static VAR Compensator*) yang dapat digunakan untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi harmonik. *Dynamic Voltage Restorer* (DVR) yang dapat digunakan untuk memperbaiki kualitas tegangan secara cepat dan efektif.

### **2.2.2 Drop Voltage**

Tegangan jatuh adalah penurunan tegangan yang terjadi sepanjang suatu rangkaian listrik akibat adanya impedansi (hambatan, reaktansi) pada konduktor. Semakin panjang konduktor dan semakin besar arus, drop voltage yang terjadi akan semakin besar. Penyebab Terjadinya *drop voltage* diantaranya, hambatan pada konduktor, setiap konduktor memiliki hambatan listrik, meskipun kecil. Semakin panjang konduktor dan semakin kecil luas penampangnya, maka hambatannya akan semakin besar. Hambatan ini menyebabkan sebagian energi listrik terbuang dalam bentuk panas, sehingga tegangan di ujung beban menjadi lebih rendah. Beban induktif dan kapasitif, beban-beban seperti motor listrik dan kapasitor dapat menyebabkan penurunan tegangan reaktif, yang juga berkontribusi pada drop voltage. Sambungan dan kontak, sambungan dan kontak yang buruk dapat meningkatkan hambatan dalam rangkaian, sehingga menyebabkan *drop voltage*. Gangguan pada sistem, Gangguan seperti korsleting atau beban lebih dapat menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan.



**Gambar 2.2** Ilustrasi *Drop Voltage*

(Sumber: Zhang, S., Zhao, Z., Zhao, J., Jin, L., Wang, H., Sun, H., ... & Yang, B. 2019)

Secara umum, *drop voltage* harus dijaga dalam batas yang sangat rendah untuk memastikan kinerja optimal dan keamanan sistem kelistrikan kereta api. Menurut SPLN No. 72, 1987, nilai drop tegangan yang diizinkan tidak melebihi 5%. Menurut peraturan PUIL 2011, nilai tegangan jatuh yang diperbolehkan yaitu tidak lebih dari 4%. FPN merekomendasikan agar konduktor sirkuit cabang berukuran untuk mencegah penurunan tegangan maksimum sebesar 3%. Kode Listrik Nasional menyatakan bahwa penurunan tegangan sebesar 5% pada stopkontak terjauh di sirkuit kabel cabang dapat diterima untuk efisiensi normal. Menurut regulasi IEEE B23, penurunan tegangan antara asal instalasi dan peralatan pengguna arus tetap tidak melebihi 5 persen dari tegangan normal pasokan.

Beberapa dampak *drop voltage* diantaranya kinerja peralatan listrik menurun, peralatan listrik dirancang untuk beroperasi pada tegangan tertentu. Jika tegangan terlalu rendah, kinerja peralatan dapat menurun, bahkan dapat mengalami kerusakan. Rugi-rugi daya, *drop voltage* menyebabkan sebagian energi listrik terbuang sia-sia dalam bentuk panas pada konduktor. Panas berlebih, panas yang dihasilkan akibat *drop voltage* dapat merusak isolasi konduktor dan komponen listrik lainnya. Efisiensi sistem menurun, *drop voltage* yang tinggi dapat mengurangi efisiensi keseluruhan sistem tenaga listrik.

Perhitungan *drop voltage* sangat penting dalam perancangan sistem tenaga listrik untuk menentukan ukuran konduktor yang tepat, pemilihan peralatan listrik, dan tata letak jaringan distribusi. Pemeliharaan sistem, pengukuran dan pemantauan *drop voltage* secara berkala dapat membantu dalam mendeteksi kerusakan pada sistem dan melakukan pemeliharaan yang diperlukan. Analisis kualitas daya, *drop*



*voltage* merupakan salah satu parameter krusial dalam analisis kualitas daya. Efisiensi energi, pengurangan *drop voltage* dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik.

$$Vd = C * I * R * S * Cos \emptyset \quad (2.8)$$

\*Keterangan:

$Vd$  = *Drop Voltage*

$C$  = Koefisien (2 = 1 Fasa,  $\sqrt{3}$  = 3 Fasa)

$R$  = Resistansi ( $\Omega$ )

$S$  = Panjang Kabel (km)

$Cos \emptyset$  = Faktor daya

Penurunan tegangan menggambarkan bagaimana energi yang disuplai oleh sumber tegangan berkurang saat arus listrik bergerak melalui elemen pasif suatu rangkaian listrik. Penurunan tegangan pada konduktor, kontak, transformator, dan konektor tidak diinginkan. Sesuai dengan definisi penurunan tegangan, model matematisnya dapat diwakili oleh

$$V_D = V_{D\text{Source}} + \sum V_{D\text{Abnormal Condition}} \quad (2.9)$$

Persentase drop voltage dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\%V_D = \frac{\sum V_{D\text{Abnormal Condition}}}{V_S} \times 100\% \quad (2.10)$$

Dengan:

$V_S$  = Tegangan referensi.

Cara mengatasi *drop voltage* dapat dilakukan dengan memperbesar penampang konduktor, dengan memperbesar penampang konduktor, hambatan listrik dapat dikurangi, sehingga *drop voltage* juga berkurang. Mempendek jarak sumber tegangan dan beban dapat mengurangi *drop voltage*. Menggunakan

konduktor dengan resistivitas rendah seperti tembaga atau aluminium, dapat mengurangi *drop voltage*. Untuk lebih efektifnya lagi dapat menggunakan *regulator* tegangan dapat digunakan untuk menjaga tegangan pada beban tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban atau tegangan sumber. Menggunakan kompensator daya reaktif dapat digunakan untuk memperbaiki faktor daya dan mengurangi *drop voltage* yang disebabkan oleh beban induktif atau kapasitif.

### 2.2.3 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkronisasi dan keseimbangan setelah mengalami gangguan atau perubahan beban. Dengan kata lain, sistem dikatakan stabil jika semua generator dalam sistem terus berputar secara sinkron dan daya yang dihasilkan seimbang dengan daya yang diserap.

Sistem dapat dikatakan stabil apabila dapat mengatasi berbagai macam gangguan transien, dinamis, dan tetap bisa berada pada kondisi *steady state*. Stabilitas transien, kemampuan sistem untuk mempertahankan sinkronisasi segera setelah terjadi gangguan besar, seperti hubung singkat tiga fasa. Stabilitas dinamis, kemampuan sistem untuk mempertahankan sinkronisasi setelah gangguan besar, melibatkan respon sistem kontrol seperti *Automatic Voltage Regulator (AVR)*. *Steady state*, kemampuan sistem untuk mempertahankan keseimbangan daya aktif dan reaktif setelah sistem mencapai kondisi tunak baru setelah gangguan.

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Stabilitas Sistem:

- a. Karakteristik Generator: Inersia, tegangan nominal, reaktansi sinkron, dan karakteristik sistem eksitasi.
- b. Karakteristik Beban: Jenis beban (induktif, kapasitif), variasi beban, dan sensitivitas terhadap perubahan tegangan.
- c. Sistem Transmisi: Panjang saluran transmisi, reaktansi saluran, dan konfigurasi jaringan.
- d. Sistem Kontrol: Pengaturan tegangan otomatis (AVR), pengatur kecepatan (governor), dan sistem perlindungan.

- e. Gangguan Sistem: Jenis gangguan (hubung singkat, putus beban), lokasi gangguan, dan durasi gangguan.

Stabilitas sistem memiliki peranan yang sangat penting. Sistem yang stabil akan menghasilkan kualitas daya yang lebih baik bagi konsumen. Memperpanjang umur peralatan, operasi sistem yang stabil akan mengurangi stres pada peralatan listrik dan memperpanjang umur pakainya.

#### 2.2.4 Kualitas Daya Listrik

Kualitas daya listrik adalah suatu gambaran mengenai baik atau buruknya mutu tenaga listrik yang disuplai ke konsumen. Istilah ini mengacu pada segala jenis penyimpangan tegangan, arus, atau frekuensi yang dapat mengganggu kinerja peralatan listrik dan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Ruang lingkup kualitas daya listrik sangat luas dan mencakup berbagai aspek.

- a. Tegangan yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat merusak peralatan listrik. Harmonik tegangan, adanya komponen frekuensi tinggi (harmonik) dalam tegangan dapat menyebabkan pemanasan pada peralatan listrik, gangguan komunikasi, dan interferensi pada peralatan elektronik. *Flicker*, fluktuasi tegangan yang lambat dapat menyebabkan gangguan pada penerangan dan mengganggu proses produksi.
- b. Arus yang tidak ada pada kondisi yang normal akan memberikan dampak negatif pada kualitas daya yang dihasilkan, misalnya arus yang tinggi dapat menyebabkan pemanasan pada peralatan listrik dan meningkatkan kerugian energi.
- c. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal dapat mengganggu kinerja motor listrik dan peralatan elektronik.
- d. Transient, gangguan sementara seperti lonjakan tegangan (*surge*), *drop*, dan interupsi dapat merusak peralatan listrik yang sensitif.
- e. *Unbalance*, tegangan tak seimbang atau kondisi di mana besar atau fase dari ketiga fasa tegangan tidak sama dapat menyebabkan pemanasan pada motor listrik dan peralatan listrik lainnya.

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kualitas daya listrik, beban non-linear seperti peralatan elektronik (komputer, TV, inverter) dan peralatan listrik dengan motor induksi dapat menghasilkan harmonik yang mengganggu kualitas daya. Sistem tenaga listrik, kondisi sistem tenaga listrik seperti gangguan, pemeliharaan, dan perubahan beban dapat mempengaruhi kualitas daya. Lingkungan, gangguan eksternal seperti petir, gangguan elektromagnetik, dan gangguan dari sistem komunikasi dapat mempengaruhi kualitas daya.

Kualitas daya yang buruk dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti kerusakan peralatan listrik atau umur pakai menjadi lebih pendek. Proses produksi dapat terganggu akibat gangguan pada peralatan listrik. Peningkatan biaya operasional, kualitas daya yang buruk dapat meningkatkan biaya pemeliharaan dan penggantian peralatan listrik. Gangguan komunikasi, kualitas daya yang buruk dapat mengganggu sistem komunikasi.

Tiga indeks tambahan diusulkan untuk mengevaluasi kondisi kualitas daya dalam istilah statistik, indeks-indeks ini adalah:

- (1) daya aktif non-fundamental,
- (2) daya distorsi, dan
- (3) daya distorsi ternormalisasi.

$$P_{NF} = \sum_{k \neq f} V_k I_k \cos(\alpha_k - \beta_k) \quad (2.11)$$

$$D = [S^2 - P^2 - Q_f^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

$$D_N = \frac{[S^2 - P^2 - Q_f^2]^{\frac{1}{2}}}{S} \quad (2.13)$$

Dalam kesimpulan, kualitas daya listrik merupakan faktor yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Dengan menjaga kualitas daya listrik yang baik, maka kinerja peralatan listrik dapat dioptimalkan, umur pakai peralatan dapat diperpanjang, dan biaya operasional dapat ditekan.

### 2.2.5 Dynamic Voltage Restorer (DVR)

*Dynamic Voltage Restorer* (DVR) adalah sebuah perangkat berbasis daya yang dirancang untuk memperbaiki kualitas tegangan listrik pada sistem tenaga listrik. Perangkat ini sangat efektif dalam mengatasi berbagai gangguan kualitas daya yang dapat merusak peralatan listrik dan mengganggu proses produksi.

DVR bekerja dengan cara menyuntikkan tegangan bolak-balik (AC) ke dalam sistem distribusi listrik untuk mengkompensasi tegangan *sag*, *swell*, *drop* atau ketidakseimbangan yang terjadi. DVR tersusun atas beberapa sistem yang diintegrasikan menjadi satu kesatuan untuk dapat melakukan kompensasi yang optimal. Terdapat inverter yang mengubah daya DC menjadi daya AC dengan frekuensi dan tegangan yang dapat diatur. Transformer yang menyesuaikan impedansi dan level tegangan. Filter dapat memisahkan harmonik dan komponen frekuensi tinggi yang tidak diinginkan. Kontroler yang mengatur operasi DVR berdasarkan sinyal kesalahan yang diukur. Secara matematis, DVR dapat diwakili oleh persamaan berikut:

$$V_{DVR} = V_{Load} + Z_d I_{Load} - V_d \quad (2.14)$$

Dengan:

$V_{DVR}$  = tegangan yang disuntikkan ke jaringan,

$V_{Load}$  = tegangan beban nominal,

$Z_d$  = impedansi beban, dan

$V_d$  = tegangan sistem selama gangguan.

Arus beban  $I_{Load}$  diberikan oleh persamaan berikut:

$$I_{Load} = \frac{[P_{Load} + j Q_{Load}]}{V} \quad (2.15)$$

Daya aktif DVR diberikan sebagai berikut:

$$P_{DVR} = I_{Load} (V_{Load} \cos\theta_{Load} - V_S \cos\theta_S) \quad (2.16)$$

Daya semu DVR diberikan sebagai berikut:

$$S_{DVR} = I_{Load} * V_{DVR} \quad (2.17)$$

$$S_{DVR} = I_{Load} [V_{Load}^2 + V_S^2 - 2 V_{Load} V_S \cos(\theta_{Load} - \theta_S)] \quad (2.18)$$

Injeksi daya kompleks DVR diajukan seperti yang ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$S_{DVR} = I_{Load} * V_{DVR} \quad (2.19)$$

Komponen-komponen utama DVR memiliki fungsi spesifik masing-masing. Trafo injeksi berfungsi untuk mengatur tegangan pada saluran distribusi listrik saat terjadi ketidakstabilan. Inverter sumber tegangan menghasilkan tegangan bolak-balik yang sesuai dengan kebutuhan sistem. Unit penyimpanan energi seperti baterai atau kapasitor menyediakan daya tambahan saat terjadi gangguan. Filter LC digunakan untuk meredam komponen harmonik yang tidak diinginkan dari inverter.

### **DC Source**

*DC source* adalah suatu perangkat atau sistem yang menghasilkan aliran listrik dengan arah arus yang konstan dan tidak berubah-ubah seiring waktu. Berbeda dengan *AC source* (sumber tegangan bolak-balik) yang arusnya berganti-ganti arah secara periodik, *DC source* menghasilkan arus yang mengalir hanya dalam satu arah.

Karakteristik supply tegangan ini bisa dilihat pada tegangan dan arus konstan yang dihasilkan. Arus listrik yang dihasilkan selalu mengalir dari kutub

positif ke kutub negatif. Besarnya tegangan yang dihasilkan cenderung stabil dan tidak berubah-ubah secara signifikan.

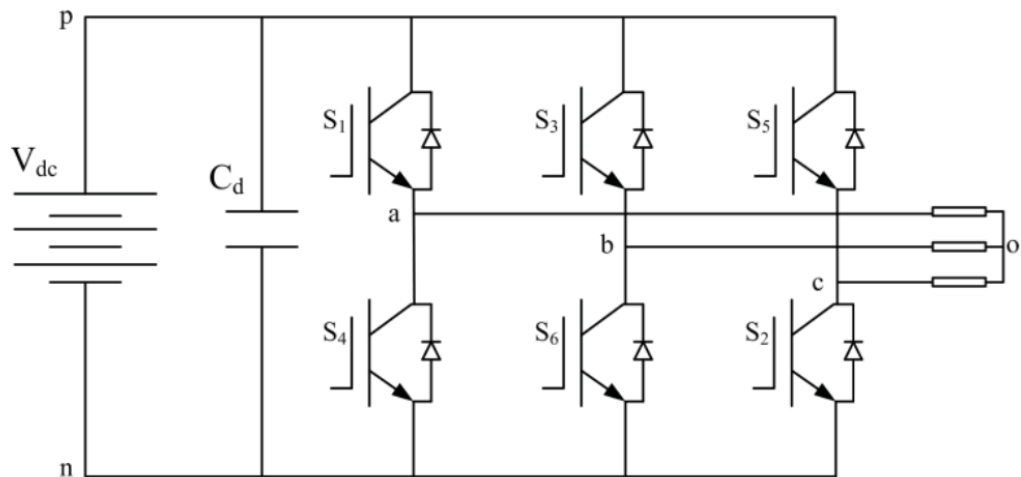
Jenis-Jenis DC Source:

- a. Baterai: Merupakan sumber DC yang paling umum. Baterai mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Contoh: baterai AA, baterai mobil.
- b. Aki: Mirip dengan baterai, tetapi memiliki kapasitas energi yang lebih besar. Aki digunakan untuk menyimpan energi listrik dalam jumlah yang lebih banyak. Contoh: aki mobil, aki motor.
- c. Adaptor: Merupakan perangkat yang mengubah arus AC menjadi DC.
- d. Generator DC: Menghasilkan listrik DC melalui proses induksi elektromagnetik.

### ***Two Level Converter***

*Two-level converter* adalah jenis inverter yang paling sederhana dan umum digunakan dalam sistem konversi daya. Perangkat ini mengubah bentuk tegangan DC (*Direct Current*) menjadi AC (*Alternating Current*) dengan dua level tegangan output yang berbeda, yaitu tegangan positif dan negatif.

Cara kerja *two-level converter* dapat disederhanakan dengan cara kerja saklar yang bekerja secara kontinu yang disesuaikan. Perangkat ini menggunakan saklar elektronik (seperti transistor atau IGBT) untuk menghubungkan dan memutuskan sambungan sumber DC dengan beban secara bergantian. Pembentukan gelombang dengan mengatur pola penghubungan dan pemutusan saklar, dihasilkan gelombang tegangan AC pada beban. Level tegangan, karena hanya ada dua keadaan saklar (on atau off), maka tegangan output hanya memiliki dua level, yaitu ketika semua saklar terhubung ke kutub positif sumber DC (tegangan positif maksimum) dan ketika semua saklar terhubung ke kutub negatif sumber DC (tegangan negatif maksimum).



**Gambar 2.3** *Two Level Converter*

(Sumber: Ahmed, I., & Borghate, V. B. 2020)

Fungsi utama converter ini dapat melakukan inversi tegangan, mengubah tegangan DC menjadi AC. Kontrol tegangan dan frekuensi dengan mengatur pola penghubungan saklar, dapat dilakukan pengaturan terhadap besarnya tegangan dan frekuensi output. Modulasi lebar pulsa (PWM) digunakan untuk menghasilkan tegangan AC dengan nilai efektif yang dapat diatur secara halus.

PWM generator 2 level adalah suatu teknik modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation/PWM*) yang digunakan untuk menghasilkan sinyal listrik bolak-balik (AC) dari sumber listrik searah (DC). Konsep dasarnya adalah dengan membandingkan sinyal referensi (biasanya berupa gelombang sinus) dengan sinyal pembawa (biasanya berupa gelombang segitiga). Hasil perbandingan ini akan menghasilkan sinyal PWM yang lebar pulsanya bervariasi sesuai dengan besarnya sinyal referensi. Ekspresi indeks modulasi amplitudo diberikan di bawah ini.

$$m_a = \frac{\hat{V}}{\hat{V}_{cr}} \quad (2.20)$$

Di mana  $\hat{V}$  dan  $\hat{V}_{cr}$  adalah nilai puncak dari gelombang pemodulasi dan gelombang pembawa masing-masing. Indeks modulasi amplitudo  $m_a$  biasanya disesuaikan dengan mengubah  $\hat{V}$  sambil menjaga  $\hat{V}_{cr}$  tetap.



Disebut two level dikarenakan berada pada 2 keadaan. Setiap *switch* dalam inverter yang menggunakan teknik ini hanya memiliki dua keadaan, yaitu ON atau OFF. Dua tegangan tingkat, dimana tegangan output inverter hanya memiliki dua tingkat, yaitu sama dengan tegangan DC input atau nol.

Two-level converter memiliki aplikasi yang sangat luas, antara lain:

- a. Driver motor, mengendalikan kecepatan dan torsi motor listrik AC.
- b. Konversi daya, mengubah tegangan DC menjadi AC untuk memasok beban AC.
- c. Sistem tenaga surya, mengubah energi DC dari panel surya menjadi AC untuk disalurkan ke jaringan listrik.
- d. UPS (*Uninterruptible Power Supply*), menyediakan daya AC yang stabil saat terjadi gangguan listrik.
- e. Pengisi daya baterai, mengatur arus pengisian baterai secara efisien.
- f. Inverter untuk peralatan elektronik, mengubah tegangan DC dari baterai menjadi AC untuk peralatan elektronik portabel.
- g. Konverter DC-DC, mengubah tegangan DC menjadi tegangan DC lainnya dengan nilai yang berbeda.

Kelebihan dari converter ini sederhana dan mudah diimplementasikan dengan biaya produksi relatif rendah. Efisiensi tinggi pada beban ringan hingga sedang. *Two-level converter* merupakan komponen penting dalam sistem konversi daya. Maka dari itu converter ini banyak digunakan karena kesederhanaan dan efisiensi yang ditawarkan.

### ***Filter***

Dalam konteks DVR, filter daya listrik merupakan komponen penting yang berfungsi untuk menyaring harmonisa dan komponen frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh inverter dari sistem DC ke AC. Harmonisa ini dapat mengganggu kinerja peralatan listrik lainnya dan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Fungsi filter daya listrik pada DVR:

- a. Menekan Harmonisa: Filter ini meredam komponen harmonisa yang dihasilkan oleh inverter, sehingga kualitas tegangan yang diinjeksikan ke sistem distribusi menjadi lebih baik dan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.
- b. Melindungi Peralatan Listrik: Dengan mengurangi harmonisa, filter juga melindungi peralatan listrik lainnya dari gangguan yang dapat merusak, seperti pemanasan berlebih atau kerusakan isolasi.
- c. Meningkatkan Kualitas Daya: Filter membantu meningkatkan kualitas daya listrik secara keseluruhan dengan mengurangi distorsi tegangan dan arus.

Kinerja filter ini dapat mengatasi atenuasi harmonisa dengan kemampuan filter dalam meredam harmonisa pada berbagai frekuensi, *Total Harmonic Distortion* (THD) yaitu Indikator tingkat distorsi harmonisa dalam tegangan atau arus. Rugi-rugi daya yang terbuang akibat adanya filter.

Desain filter daya listrik pada DVR harus dilakukan dengan cermat untuk mencapai kinerja yang optimal. Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam desain filter antara lain:

- a. Karakteristik beban: Jenis beban yang akan disuplai oleh DVR akan mempengaruhi pemilihan jenis dan topologi filter.
- b. Standar harmonisa: Filter harus memenuhi standar harmonisa yang berlaku di suatu negara atau wilayah.
- c. Biaya: Biaya pembuatan dan perawatan filter harus dipertimbangkan.
- d. Ruang yang tersedia: Ukuran filter harus sesuai dengan ruang yang tersedia pada sistem DVR.

Filter daya listrik merupakan komponen yang sangat penting dalam sistem DVR. Fungsi utama filter adalah untuk meningkatkan kualitas daya listrik yang dihasilkan oleh DVR dengan cara meredam harmonisa. Desain filter yang tepat akan sangat berpengaruh terhadap kinerja keseluruhan sistem DVR.

## ***ANN Controller***

*Neural Network* adalah sistem komputasi yang terinspirasi oleh struktur dan fungsi otak manusia. *Neural network* terdiri dari sejumlah unit pemrosesan sederhana yang saling terhubung dan bekerja secara paralel untuk menyelesaikan masalah. Dalam konteks sistem tenaga listrik, *neural network* digunakan untuk memodelkan sistem yang kompleks, melakukan pengenalan pola, dan membuat keputusan.

Kualitas daya listrik sangat penting untuk kinerja peralatan listrik. Gangguan kualitas daya seperti harmonisa, tegangan *sag* dan *swell*, *drop*, dan *unbalance* dapat merusak peralatan dan mengurangi efisiensi sistem. *Neural network* dapat digunakan untuk:

- Deteksi Gangguan:
  1. Pengenalan Pola: *neural network* mampu belajar mengenali pola gangguan yang unik pada sinyal listrik. Dengan melatih *neural network* dengan data gangguan yang bervariasi, *neural network* dapat mendeteksi jenis gangguan dengan akurasi tinggi.
  2. Klasifikasi: Setelah mendeteksi gangguan, *neural network* dapat mengklasifikasikan jenis gangguan tersebut, seperti harmonisa orde rendah, harmonisa orde tinggi, tegangan *sag*, atau *swell*.
- Prediksi Gangguan:

Analisis Data Historis: *neural network* dapat menganalisis data historis kualitas daya untuk memprediksi terjadinya gangguan di masa depan. Dengan mengetahui pola terjadinya gangguan, tindakan pencegahan dapat dilakukan lebih awal.
- Perbaikan Kualitas Daya:

Kontrol Aktif: *neural network* dapat digunakan untuk mengontrol perangkat kompensasi daya secara aktif, seperti filter aktif atau *Static VAR Compensator* (SVC). Dengan demikian, gangguan kualitas daya dapat diredam dan kualitas daya listrik dapat diperbaiki secara *real-time*.

Keunggulan penggunaan *neural network* mampu mencapai akurasi yang sangat tinggi dalam mendeteksi dan mengklasifikasi gangguan kualitas daya.

Kemampuan adaptasi, neural network dapat belajar dan beradaptasi dengan perubahan kondisi sistem. Pemrosesan data real-time, neural network dapat memproses data dengan kecepatan tinggi, sehingga memungkinkan deteksi dan perbaikan gangguan secara *real-time*. Fleksibilitas, *neural network* dapat diterapkan pada berbagai jenis gangguan kualitas daya dan sistem tenaga listrik.

Alasan dipilihnya ANN sebagai metode optimasi pada *controller* yang ada pada *dynamic voltage restorer* yaitu kemampuan beradaptasi yang sangat baik, sehingga dapat merespon berbagai kondisi gangguan tegangan yang kompleks dan berubah-ubah. Banyak fenomena dalam sistem tenaga listrik yang bersifat non-linear. ANN sangat cocok untuk memodelkan sistem non-linear ini. Hal itu bisa diatasi oleh kecepatan ANN yang dapat melakukan perhitungan yang sangat cepat, sehingga dapat merespon gangguan tegangan dengan waktu yang sangat singkat.

*Controller* ANN menawarkan solusi yang sangat menarik untuk meningkatkan kinerja DVR dalam memperbaiki kualitas daya listrik. Kemampuan adaptasi, non-linearitas, dan kecepatan ANN menjadikannya pilihan yang sangat baik untuk mengatasi berbagai tantangan dalam sistem tenaga listrik. Dengan kemampuannya dalam mengenali pola, memprediksi, dan mengontrol, neural network dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik.

### ***Boost Transformer***

*Boost transformer* adalah jenis transformator yang digunakan untuk meningkatkan tegangan listrik pada sisi sekundernya dibandingkan dengan sisi primernya. Dalam konteks DVR, *boost transformer* memiliki peran yang sangat krusial dalam meningkatkan tegangan dari inverter sehingga dapat menyuplai tegangan yang sesuai untuk memperbaiki kualitas tegangan pada sistem tenaga listrik.

Fungsi *boost transformer* dalam DVR dapat meningkatkan tegangan inverter. Inverter pada DVR menghasilkan tegangan bolak-balik dengan amplitudo yang terbatas. *Boost transformer* berfungsi untuk meningkatkan amplitudo tegangan ini sehingga dapat mengatasi gangguan tegangan seperti *sag*, *swell*, atau distorsi harmonik yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Menyesuaikan impedansi, *boost transformer* juga berfungsi untuk menyesuaikan impedansi antara inverter

dan sistem tenaga listrik. Hal ini penting untuk menjaga stabilitas sistem dan meminimalkan dampak gangguan pada inverter. Isolasi galvanis, *boost transformer* memberikan isolasi galvanis antara inverter dan sistem tenaga listrik. Isolasi ini berfungsi untuk melindungi peralatan dan personel dari sengatan listrik.

*Boost transformer* dapat meningkatkan kualitas tegangan dengan memperbaiki berbagai jenis gangguan tegangan seperti *sag*, *swell*, distorsi harmonik, *drop*, dan *unbalance*. Peningkatan keandalan system dapat meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik dengan melindungi peralatan dari kerusakan akibat gangguan tegangan. Penghematan energi, *boost transformer* dapat membantu menghemat energi dengan mengurangi konsumsi daya reaktif dan meningkatkan efisiensi peralatan.

*Boost transformer* merupakan komponen penting dalam DVR yang berfungsi untuk meningkatkan tegangan inverter dan menyesuaikan impedansi. DVR dengan *boost transformer* memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga kualitas tegangan pada sistem tenaga listrik dan melindungi peralatan yang sensitif terhadap gangguan tegangan.

#### **2.2.6 MATLAB**

MATLAB (singkatan dari *Matrix Laboratory*) adalah sebuah perangkat lunak komputasi numerik yang sangat populer di kalangan para ilmuwan, insinyur, dan peneliti. MATLAB menyediakan lingkungan yang interaktif untuk melakukan berbagai macam tugas, mulai dari perhitungan sederhana hingga pemodelan sistem kompleks dan visualisasi data. Fitur utama yang ada di MATLAB memiliki sintaks yang mirip dengan bahasa pemrograman matematika, sehingga mudah dipelajari dan digunakan. Matriks sebagai elemen dasar, dirancang dengan matriks sebagai elemen datanya. Hal ini membuatnya sangat efisien untuk melakukan operasi aljabar linear. Visualisasi data, menyediakan berbagai macam fungsi untuk membuat plot 2D dan 3D yang berkualitas tinggi, sehingga memudahkan dalam menganalisis data. Toolbox, dilengkapi dengan berbagai *toolbox* yang berisi fungsi-fungsi khusus untuk bidang-bidang tertentu, seperti pengolahan sinyal, pengolahan gambar, statistik, dan kecerdasan buatan. Integrasi dengan bahasa lain, dapat

diintegrasikan dengan bahasa pemrograman lain seperti C, C++, dan Java, sehingga memungkinkan pengguna untuk mengembangkan aplikasi yang lebih kompleks.

### **Aplikasi MATLAB**

- a. Matematika dan Komputasi Numerik.
- b. Pengembangan dan Algoritma.
- c. Pemrograman *modelling*, simulasi, serta pembuatan *prototype*.
- d. Pengolahan Sinyal.
- e. Pengolahan Gambar.
- f. Kecerdasan Buatan.
- g. Pemodelan dan Simulasi.
- h. Rekayasa Sistem
- i. Analisa data.
- j. Analisis numerik dan statistik.
- k. Pengembangan dari aplikasi teknik

### **Simulink**

Simulink adalah sebuah lingkungan simulasi grafis yang terintegrasi dengan MATLAB. Simulink memungkinkan pengguna untuk membuat model sistem dinamis menggunakan blok-blok yang dapat dihubungkan. Beberapa fitur utama simulink diantaranya, pemodelan grafis menggunakan antarmuka grafis yang intuitif untuk membangun model sistem. Simulasi multidomain dapat digunakan untuk memodelkan sistem yang melibatkan berbagai domain, seperti mekanik, listrik, dan kontrol. Kode generasi yang menghasilkan kode C atau C++ dari model yang telah dibuat, sehingga model dapat diimplementasikan pada perangkat keras.

Simulink sangat populer untuk mendesain dan menganalisis sistem kontrol. Pemodelan sistem fisik yang dapat digunakan untuk memodelkan sistem fisik, seperti mobil, pesawat terbang, dan proses kimia. Desain sistem embedded yang dapat digunakan untuk mendesain sistem *embedded*, seperti mikrokontroler.