BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tranformator Daya[1]

Transformator Daya adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan jantung dari transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal (kalau bias secara terus menerus tanpa berhenti). Berdasarkan tegangan operasinya dapat dibedakan menjadi tranformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut *Interbus Transformer* (IBT). Transformator 150/20 kV dan 70/20 kV disebut juga trafo distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan unutk system pengamanan/proteksi, sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung disisi netral 20 kV nya.

Gambar 2.1 Transformator daya

[1] Sigi Syah Wibowo, B.Tech., M.T., *Analisa Sistem Tenaga*, (Malang : Polinema Press, 2016), hlm. 30 - 31

2.1.1. Prinsip Kerja[2]

Transformator merupakan suatu alat listrik statis yang digunakan untuk memindahkan daya dari suatu rangkaian ke rangkaian lain, dengan mengubah tegangan tanpa mengubah frekuensi. Dalam bentuknya yang paling sederhana transformator terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi mutual. Kumparan 10 primer adalah kumparan yang menerima daya sedangkan kumparan sekunder tersambung pada beban. Kedua kumparan dililit pada satu inti yang tcrdiri atas material magnetik berlaminasi.

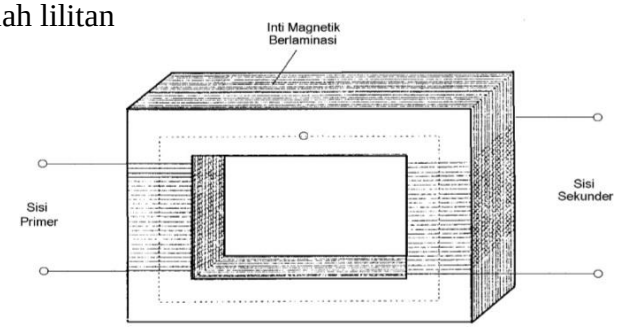
Landasan fisik transformator adalah induktasi mutual (timbal balik) antara kedua rangkaian yang dihubungkan oleh suatu fluks magnetik bersama yang melewati suatu jalur dengan relaktansi rendah (gambar 2.4.) kedua kumparan memiliki induktansi mutual yang tinggi. Jika satu kumparan disambung pada suatu sumber tegangan bolak-balik, maka suatu fluks bolak balik terjadi di dalam inti berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya. Dan didalamnya akan terinduksi suatu gaya gerak listrik (ggl) yang sesuai dengan hukum induksi elektromagnetik faraday, yaitu:

$$e = -N\frac{d\emptyset}{dt} \quad \text{.....(2.1)}$$

Dimana :

e = Gaya Gerak Listrik yang diinduksikan

N = Jumlah lilitan



Gambar 2.2 Prinsip Trafo serta Kumparan primer dan Sekunder

[2] Mochtar, W. ” *Dasar-dasar Mesin listrik*”, (Jakarta: Penerbit, Djambatan, 2001), hlm. 60

Bilamana rangkaian sekunder ditutup, maka akan mengalir arus, dan dengan demikian maka energi listrik dipindah sepenuhnya secara magnetik dari kumparan primer ke kumparan sekunder.

2.1.2. Rumus Tranformator

Transformator dikatakan ideal, apabila tidak da energi yang terbuang menjadi panas saat energi listrik dihantarkan dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Hubungan antar daya listrik, tegangan listrik dan arus listrik dapat dituliskan dengan persamaan:

$$\frac{Np}{Ns} = \frac{Vp}{Vs} = \frac{Is}{Ip} \quad \text{.....(2.2)}$$

Dimana :

Np = jumlah belitan primer

Ns = jumlah belitan sekunder

Vp = tegangan primer (Volt)

Vs = tegangan sekunder (Volt)

Ip = arus primer (Ampere)

Is = arus sekunder (Ampere)

2.1.3. Rugi – rugi pada Transformator

Terdapat dua rugi – rugi pada tranformator, yaitu:

a. Rugi Tanpa Beban (*No load loss*)

Rugi tanpa beban disebabkan oleh arus magnetesi yang diperlukan untuk memberi energi pada inti tranformator, dan tidak bervariasi sesuai

dengan beban pada tranformator. Rugi tanpa beban dapat dikategorikan ke dalam lima komponen:

1. kerugian arus eddy pada laminasi inti
2. kerugian arus eddy yang menyimpang pada klem inti
3. kerugian hysteresis pada laminasi inti
4. kerugian baut dan komponen lainnya, dan
5. kerugian dielektrik

kerugian histeresis dan kerugian arus eddy berkontribusi lebih dari 99% dari rugi tanpa beban, sedangkan arus eddy tersesat (*stray eddy current*), kerugian dielektrik, dan kerugian I^2R karena arus tanpa beban adalah kecil akibatnya sering diabaikan.

b. Rugi Beban (*load loss)*

Rugi terhadap beban bervariasi, sesuai dengan beban yang terpasang pada setiap transformator yang dipasang. Rugi pada transformator disebabkan oleh arus beban yang mengalir pada kawat tembaga $P_{cu} = I^2R$, adapun rugi tembaga pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan rumus persamaan.

$$P_{t2} = \left(\frac{S2}{S1}\right)^2 \text{ x } P_{t2} \quad \text{.....(2.3)}$$

Keterangan :

P_{t2} = Rugi – Rugi Tembaga pada saat pembebanan tertentu (watt)

P_{t1} = Rugi – Rugi Tembaga beban penuh (watt)

S_2 = Beban yang dioperasikan (VA)

S_1 = Nilai pengenal/tersedia (VA)

Jumlah Rugi - Rugi Pada Tranformator adalah :

P_{rugi} total = Rugi – rugi Cu + Rugi inti .....(2.4)

2.1.4. Efisiensi pada Transformator

Efisiensi transformator adalah perhitungan antara daya keluaran dan daya masukan atau hasil bagi antara energi sekunder dan energi primer, efesiensi trafo dinatakan dengan η. Sebuah transformator yang ideal akan memiliki harga efisiensi 100%, ini berarti bahwa semua daya yang diberikan pada kumparan primer dipindahkan kekumparan sekunder tanpa adanya kerugian. Sebuah transformator yang *real* memiliki harga efesiensi dibawah 100%. Untuk transformator yang bekerja pada tegangan dan frekuensi yang konstan, harga efesiensinya dapat mencapai 98%, dan besar harga efisiensi trafo dapat dirumuskan, sebagi berikut:

$$\eta = \frac{Daya\ Keluaran}{Daya\ Masukan} \text{ x } 100\% \quad \text{.....(2.5)}$$

$$\eta = \frac{Daya\ Masukan - Rugi\ total}{Daya\ Masukan} \text{ x } 100\% \quad \text{.....(2.6)}$$

$$\eta = \frac{Ns\ x\ Is}{Np\ x\ Ip} \text{ x } 100\% \quad \text{.....(2.7)}$$

Dimana :

Np = jumlah belitan primer

Ns = jumlah belitan sekunder

Ip = arus primer (Ampere)

Is = arus sekunder (Ampere)

Efesisensi maksimum transformator untuk beban tertentu terjadi ketiga rugi tembaga = rugi inti. Untuk menentukan besarnya beban yang dioperasikan pada saat efesiensi maksimum, sebagai berikut:

$$W_{ef\ maks} = \sqrt{\frac{Rugi - Rugi\ besi}{Rugi - Rugi\ Tembaga}} \text{ x Beban Penuh} \quad \text{.....(2.8)}$$

2.2. Resistansi Saluran

Saluran transmisi listrik mempunyai dua parameter yang mempengaruhi kemampuannya untuk berfungsi sebagai dari suatu sistem tenaga. Resistansi (R) dirumuskan sebagai :

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ ohm} \quad \text{.....(2.9)}$$

Dimana :

R = Resistansi

ρ = Resistivitas penghantar

l = Panjang Penghantar

A = Luas penampang penghantar

2.3. Tegangan Jatuh[3]

Tegangan Jatuh (Voltage Drop) Maksimum merupakan drop tegangan tertinggi yang diperbolehkan timbul sepanjang kabel yang dialiri oleh arus listrik. Bila drop tegangan yang timbul melebih batas maksimum, maka ukuran kabel yang lebih besar harus dipilih.Tegangan Jatuh (Voltage Drop) disepanjang kabel lebih ditentukan karenabeban konsumen (misalnya peralatan) sehingga tegangan yang sampai diinputperalatan tidak melebihi batas toleransi. Ini berarti, jika tegangan pada alat tersebut lebih rendah dari tegangan minimum , maka alat tidakdapat beroperasi dengan benar .Secara umum, sebagian besar peralatan listrik akan beroperasi normal padategangan serendah 80 % dari tegangan nominal. Sebagai contoh, jikategangan nominal adalah 230VAC, maka sebagian besar peralatan dapat dijalankan pada > 184VAC. Pemilihan ukuran untuk kabel penghantar yang baik adalah ukuran yang hanya mengalami drop tegangan sebesar kisaran 5 - 10% pada beban penuh . Untuk sistem suplay tegangan AC , metode menghitung jatuh tegangan

[3] Admin pratama, Perhitungan Voltage Drop (Tegangan Jatuh) pada Kabel, (kompasiana.com : 17 Juni 2015)

(voltage drop) adalah dengan berdasarkan faktor beban dengan mempertimbangkan arus beban penuh pada suatu sistim. Tetapi jika beban memiliki arus startup tinggi (misalnya motor) , maka tegangan drop dihitung dengan berdasarkan pada arus start up motor tersebut serta faktor daya . Untuk sistem DC :

$$V_{dc} = \frac{[2\ I\ Rc\ L]}{1000} \quad \text{.....(2.10)}$$

Dimana :

V_{dc} = Tegangan Jatuh (Voltage Drop) Tegangan DC

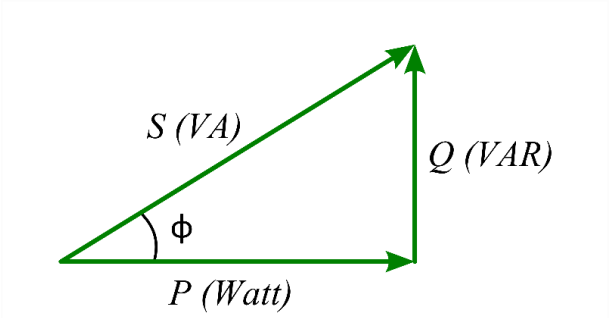
I = Arus beban penuh atau arus nominal atau arus start (A)

R_c = Resistansi kabel DC (Ω / km)

L = Panjang Kabel (m)

2.4. Segitiga daya[4]

Daya listrik merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan baik atau tidaknya kualitas dari suatu sistem kelistrikan dalam memenuhi kebutuhan konsumen. Dalam suatu sistem tenaga listrik, daya listrik dibedakan menjadi 3 jenis daya, seperti gambar 2.5



Gambar 2.3 Segitiga Daya

Keterangan :

S = Daya semu (VA)

P = Daya aktif (W)

Q = Daya reaktif (VAR).

[4] Cekmas Cekdin dan Taufik Berlian, Rangkaian Listrik (Palembang: ANDI, 2013) hal.74

Dimana :

$S_2 = P_2 + Q_2$ .....(2.11)

$P = S \times \text{Cos } \varphi$.....(2.12)

$Q = S \times \text{Sin } \varphi$.....(2.13)

2.4.1. Daya Aktif

Daya aktif adalah daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya, dimana dalam persamaannya dapat ditulis sebagai berikut :

$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \varphi$..... (2.14)

Dimana :

Cos φ = Faktor kerja (^{o})

V = Tegangan phasa (V)

P = Daya Aktif (W)

2.4.2. Daya semu

Daya semu adalah daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi, dimana daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dibawah ini :

$S = \sqrt{3} \times V \times I$..... (2.15)

Dimana :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan phasa (V)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (A)

2.4.3. Daya Reaktif

Daya reaktif adalah selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, yang manam daya

ini terpakai untuk daya mekanik dan panas. Daya reaktif ini adalah hasil dari besarnya arus dikalikan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor kerja sin (sin φ).

Daya reaktif ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

$$Q = \sqrt{3} \text{ x } V \text{ x } I \text{ x } \sin \varphi \quad \text{..... (2.16)}$$

Dimana :

Q = Daya reaktif (VAR)

Sin φ = Faktor kerja (^{o})

V = Tegangan phasa (V)

I = Arus (A)

2.5. Faktor Daya

Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu/daya total (VA), atau *cosinus* sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total. Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu. Secara teoritis, jika seluruh beban daya yang dipasok oleh perusahaan listrik memiliki faktor daya satu, maka daya maksimum yang ditransfer setara dengan kapasitas sistim pendistribusian.

Sehingga, dengan beban yang terinduksi dan jika faktor daya berkisar dari 0,2 hingga 0,5, maka kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi tertekan. Jadi, daya reaktif (VAR) harus serendah mungkin untuk keluaran kW yang sama dalam rangka meminimalkan kebutuhan daya total (VA).Faktor Daya/Faktor kerja menggambarkan sudut phasa antara daya aktif dan daya semu. Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi.

2.6. Hubungan Daya dan Usaha[5]

Daya didefinisikan sebagai kecepatan melakukan usaha atau kemampuan untuk melakukan usaha tiap satuan waktu. Usaha belum dapatmmemberikan penjelasan lengkap tentang perpindahan benda akibat pengaruh gaya. untuk membedakan waktu yang diperlukan benda dalam melakukan usaha digunakan rumus daya. Secara matematis dituliskan sebagai berikut :

$$P = \frac{w}{t} \quad \text{(2.17)}$$

Dimana :

P = Daya (Watt)

W = Usaha (Joule)

t = Waktu (s)

2.7. Kapasitas Gardu Traksi[6]

dinyatakan oleh (Dwiatmoko,2016) perhitungan kapasitas daya listrik pada gardu traksi dengan menggunakan pendekatan empiris dengan rumus yang akan digunakan adalah:

- **Rumus beban maksimum satu jam (Dwitmoko,2016)**

  $Y=C\times D\times(60/H)\times N\times P\times(W/1000)(kW)$ ..... (2.18)

  Keterangan:

  Y = Beban maksimum satu jam

  C = Susunan rangkaian (set)

  D = jarak pengisian gardu traksi (km)

  H = Headway (menit)

[5] Reaven, Hubungan Usaha, Energi dan Daya, (myrightspot.com : 17 Juli 2017)

[6] Anggraeni, D. (2017*). Perhitungan Kapasitas Daya Gardu Listrik pada Gardu Traksi Tanah Abang baru guna persiapan pengoperasian KA Bandara Soekarno – Hatta*, dalam Hermanto Dwiatmoko, *Pengujian Fasilitas Operasi Kereta Api*, (Jakarta:2016)

N = Jenis track 2 (double track), 1 (single track)

P = Rasio konsumsi kereta (50 KwH/1000 ton km)

W = Berat total Kereta + Penumpang dengan rata - rata berat 70 kg

α = Rasio pembagian arus, akan dipakai 0,08 (untuk arus DC)

Im = Arus maksimum Kereta (ampere)

- **Rumus Kapasitas Daya Berdasarkan Headway (Dwiatmoko, 2016)**

$$Z1 = Y + Cm\sqrt{y}\,(kw) \quad \text{.....(2.19)}$$

- **Rumus Kapasitas Daya Berdasarkan Arus Maksimum (Dwiatmoko, 2016)**

$$Z2 = 1{,}5kV \times 2\,lm\,(1\alpha) \quad \text{.....(2.20)}$$

- **Rumus Kapasitas yang Dibutuhkan (Dwiatmoko,2016)**

$$Zn = Z1/2{,}5 \text{ jika } Z1 > Z2 \text{ ; atau} \quad \text{.....(2.21)}$$

$$Zn = Z2/2{,}5 \text{ jika } Z2 > Z1 \quad \text{.....(2.22)}$$

Keterangan:

Z1 = Kapasitas daya berdasarkan headway (KW)

Z2 = Kapasitas daya berdasarkan beban arus maksimum (KW)

Cm = Faktor untuk elektrifikasi DC $1.7\sqrt{Im}$

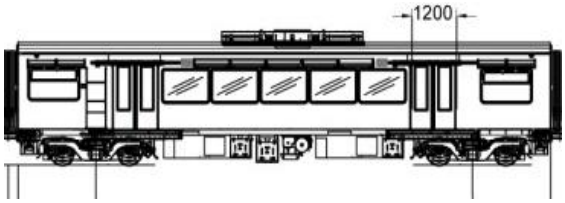
A = Rasio pembagian arus, akan dipakai 0,08

Im = Arus maksimum Kereta (ampere)

2.8. Kereta LRT sumsel

Kereta LRT Sumsel atau kereta lintas rel terpadu adalah kereta yang menggunakan tenaga listrik sebagai sumber daya penggeraknya. Dimana operasional LRT bersifat mandiri tidak memerlukan lokomotif penarik

sebagai penggeraknya. Untuk sember catu daya listriknya berasal dari sistem rel ketiga yang disuplai melalui gardu tarksi disetiap wilayah yang dilewati kereta LRT.

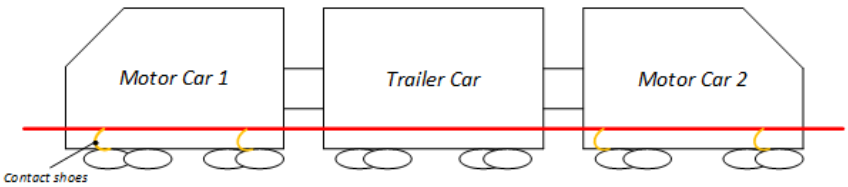


Gambar 2.4 Kereta LRT Sumsel

Untuk menyalurkan sumber listrik ke kereta LRT sumsel digunakan '*contact shoes'* yang menyentuh bagian bawah rel ketiga untuk mendapatkan suplai listrik sehingga bisa membuat motor traksi bergerak.

Kereta LRT Sumsel sendiri terdapat beberapa jenis kereta yang beroprasi dengan stamformasi. Stamformasi adalah banyaknya jumlah kereta yang tersambung dalam satu set atau keseluruhan rangkaian kereta, diantaranya:

1. *Motor Cars* (MC) = Kereta dengan kabin masinis dan penggerak motor traksi.
2. *Trailer Car* (T) = kereta gandeng (tanpa penggerak)



Gambar 2.5 Rangkaian Kereta LRT Sumsel

Pada gambar 2.5 merupakan rangkaian kereta LRT Sumsel yang terdiri dari dua kereta penggerak motor traksi (MC) beserta kabin masinis dan satu kabin tanpa penggerak (T). PT. Kereta Api Indonesia (Persero) sendiri mempunyai 8 set kereta LRT untuk operasional akan tetapi hanya 6 set kereta yang dioperasikan saat ini.

2.9. Sistem Kelistrikan LRT Sumsel[7]

Sistem kelistrikan pada LRT Sumsel teridiri dari gardu traksi dan rel ketiga yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari sumber ke beban, yaitu kereta LRT sehinggan membuat kereta bisa bergerak.

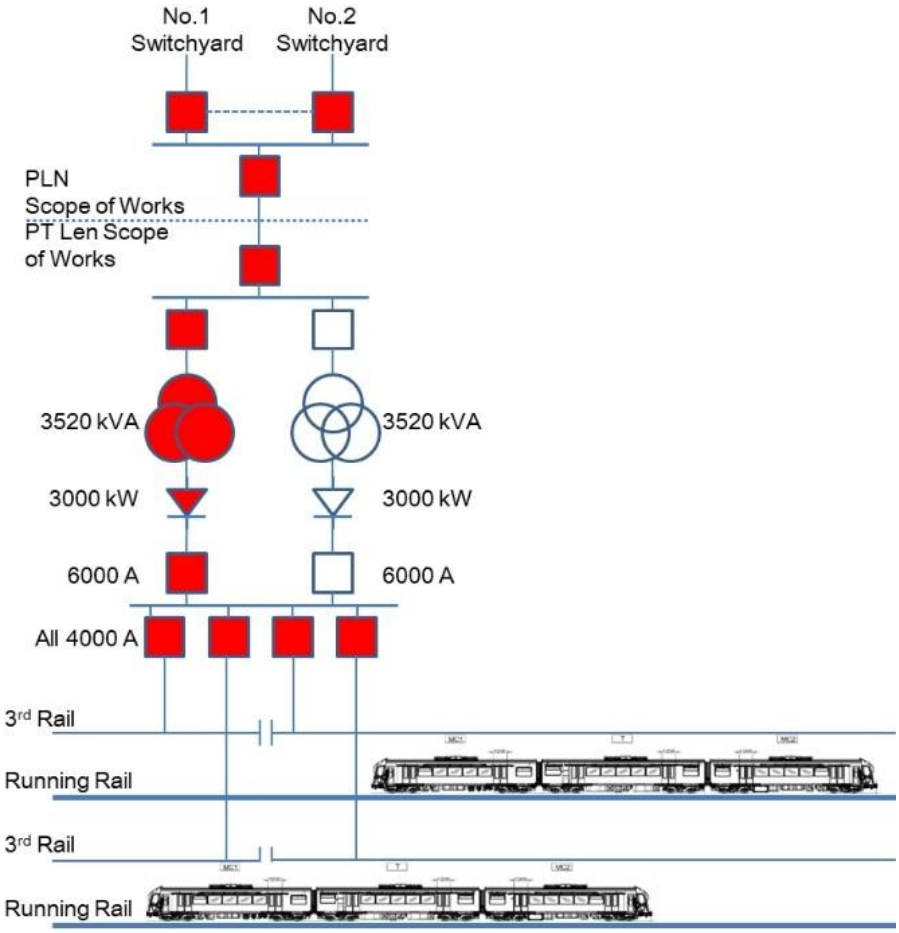
Gardu traksi merupakan instalasi pendistribusian listrik yang berada di LRT Sumsel. Gardu traksi berfungsi menyuplai daya dengan tegangan nominal 750 VDC sebagai sumber tenaga kereta. Dimana sumber daya utama berasal dari suplai daya PLN 20 kV AC yang kemudian disearahkan dengan menggunakan *silicon rectifier* pada gardu traksi. Ouput dari gardu traksi berupa tegangan 750 VDC kemudian disalurkan melalui rel ketiga yang terhubung langsung dengan kereta LRT Sumsel.

Sistem penyuplai daya untuk fasilitas penunjang operasi kereta disuplai dari sisi. Sistem ini menyuplai daya kereta LRT Sumsel dengan menggunakan dua gardu traksi yang bersebelahan dalam satu petak jalan atau petak jalan lain yang terhubung dengan interkoneksi secara pararel. Sehingga diperoleh total kapasitas daya yang sesuai dengan kebutuhan kereta LRT Sumsel.

[7] Power System Profile PT. Kereta Api Indonesia (Persero), slide 1-3.

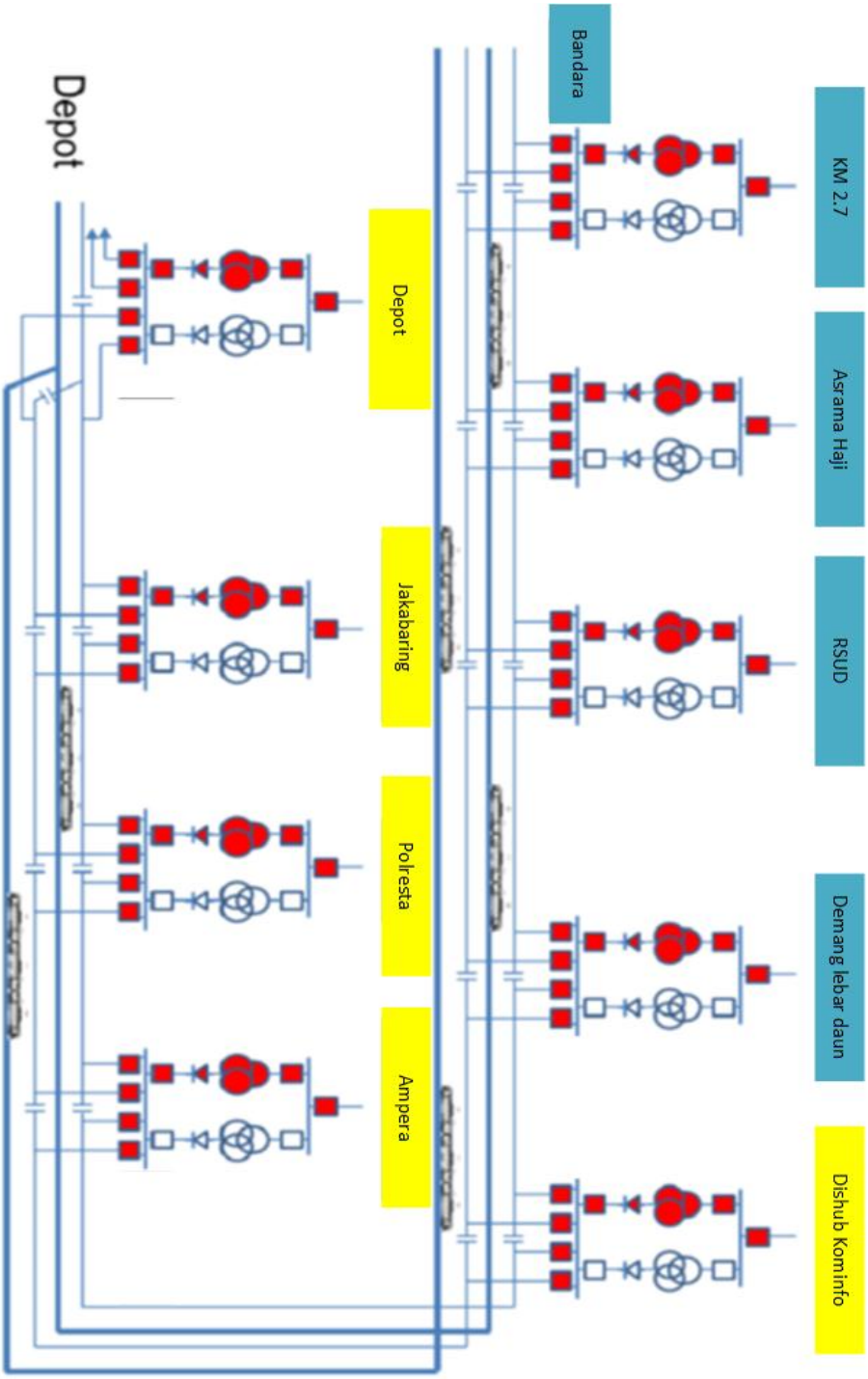
2.9.1 *Single Line Diagram* Gardu Traksi[7]

Adapun gambar *Single Line Diagram* gardu traksi yang ada pada LRT Sumsel dapatkan dari buku panduan milik PT. KAI.



Gambar 2.6 *Single Line Diagram Gardu Traksi* (GT)

2.9.2 *Single Line Diagram* penempatan setiap gardu traksi



Gambar 2.7 *Single Line Diagram* semua gardu traksi

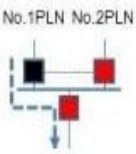
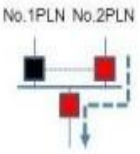
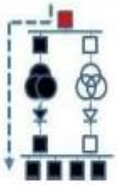
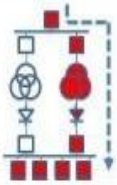
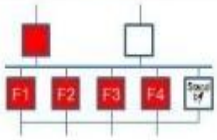
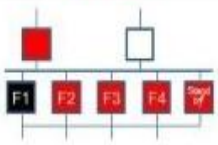
2.10. Kegagalan Tunggal dan ganda[8]

gardu traksi di LRT Sumsel harus terus menerus mensuplai daya pada kereta dan *auxiliary*. Namun terkadang terjadi gangguan yang harus bisa ditanggulangi. Untuk kondisi *single failure* atau kegagalan tunggal merupakan kondisi dimana terjadi gangguan hanya di 1 baik di sisi PLN maupun gardu. Pada kondisi *single failure*, peralatan di LRT Palembang harus tetap menjamin mensuplai daya ke kereta. Oleh karena itu, setiap peralatan di PLN dan di gardu traksi memiliki 1 peralatan back up yang dapat dijelaskan sebagai berikut :

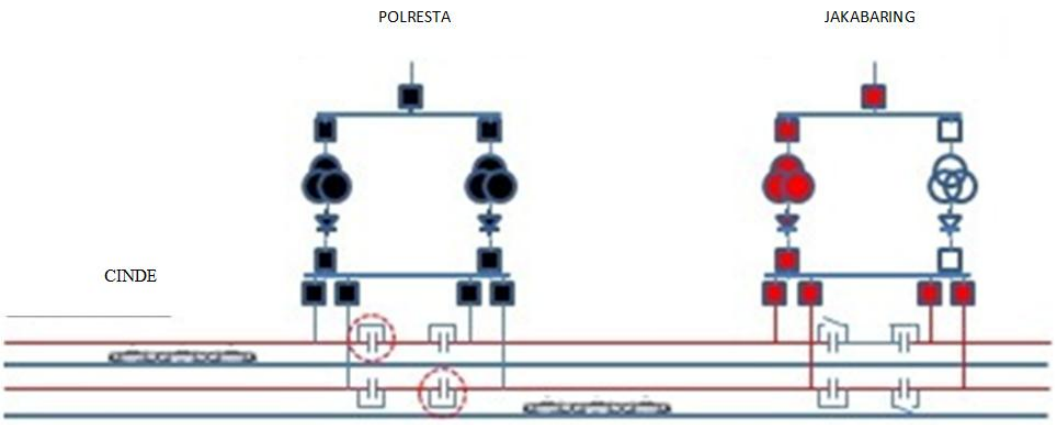
a) Pada sisi PLN, PLN memiliki gardu induk yang memiliki 2 CB sehingga saat 1 CB terbuka karena gangguan, maka 1 CB akan membackup untuk mensuplai ke gardu traksi.
b) Pada sisi peralatan AC di gardu traksi, jika 1 RTR, ATR dan/atau *rectifier* terganggu, maka aliran daya akan pindah ke RTR, ATR dan/atau *rectifier* disebelahnya.
c) Pada sisi peralatan DC 750 V, jika salah 1 HSCB *feeder* terganggu,maka 1 HSCB cadangan akan menggantikan HSCB yang mengalami gangguan.

[8] Edo Sumageka, *Detail Design Power Supply System LRT Palembang*, (Palembang : PT.LEN Industries, 2017), hlm. 60

Tabel 2.1 *Single Failure Mode*

Single Failure	Failure Mode	Redundancy Mode
1 Kabel PLN terganggu		
1 RTR dan/atau 1 Rectifier terganggu		
1 kabel feeder HSCB terganggu		

Untuk kondisi *Double failure* atau kegagalan ganda merupakan kondisi dimana peralatan utama dan backup yang dijelaskan pada kondisi *single failure* sama-sama mengalami gangguan. Kondisi ini juga identik dengan kondisi 1 gardu traksi mengalami gangguan. Pada kondisi ini, *Disconnecting Switch* yang ada di DC *Switchgear* akan berperan menyalurkan daya dari gardu lain ke gardu yang mengalami gangguan. Performa dari gardu traksi akan mengalami penurunan karena adanya *drop* tegangan sehingga akan menaikkan *headway* yang menyebabkan jarak kedatangan kereta menjadi lama. Walaupun terjadi penurunan peforma karena *drop voltage*, namun nilai *drop voltage* masih masuk dalam kondisi wajar



Gambar 2.8 Kondisi *Double Fail*

2.11. *Mainline*

Mainline Atau petak jalan adalah bagian dari lintas kereta antar stasiun yang berurutan atau berdekatan. Dimana di *mainline* tersebut terdapat peralatan *power system* yang dirancang untuk mensuplai tegangan ke sarana penggerak LRT dan mengamankan peralatan di mainline tersebut.

2.12. *Headway* (waktu antara)

Headway adalah waktu antara dua sarana angkutan untuk melewati suatu titik/tempat perhentian bus/stasiun kereta api. Semakin kecil waktu antara semakin tinggi kapasitas dari prasarana. Waktu antara digunakan dalam rekayasa lalu lintas di jalan dalam kaitannya dengan kapasitas jalan dan dalam pengoperasian kereta api.

Waktu antara saat dimana bagian depan kereta api melalui titik (stasiun) sampai dengan saat bagian depan kereta api berikutnya melalui satu titik (stasiun) yang sama dengan satuan menit/ KA.

Untuk di LRT Sumsel sendiri selisih waktu antara kereta yaitu 18 menit, dengan waktu tempuh 49 menit dari Stasiun DJKA – Bandara dan 46 menit dari Stasiun Bandara – DJKA.