

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian ini penulis memaparkan beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan permasalahan yang akan di teliti tentang profil tegangan dan *losses* daya.

Menurut jurnal EECCIS *Vol. 7, No. 2, Desember 2013* Perbaikan profil tegangan untuk pengurangan susut energi (*losses*) pada suatu sistem tenaga listrik dimaksudkan untuk meningkatkan *performance* dari sistem tersebut. Semakin baik profil tegangan pada suatu sistem, maka susut energi (*losses*) yang terjadi pada sistem tersebut akan semakin kecil. Pada sistem tenaga listrik, sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke beban atau konsumen. Sistem distribusi dibagi atas dua bagian yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder. Kedua sistem distribusi ini dibedakan atas tegangan kerjanya. Sesuai standar perusahaan listrik negara (SPLN), tegangan kerja untuk sistem untuk sistem distribusi primer adalah 6 kV, 12 kV, dan 20 kV, sedangkan tegangan kerja untuk sistem distribusi sekunder adalah 220/380 Volt.

Pada penelitian ini drop tegangan dilakkukan dengan pemasangan peralatan pengatur tegangan yaitu *Automatic voltage regulator (AVR)*, kapasitor bank, dan peralatan *Flexible AC Transmission System (FACTS)* yaitu *Static VAR Compensator (SVC)*. Dengan pemasangan peralatan tersebut diharapkan profil tegangan akan lebih baik dan *losses* daya dapat berkurang.

Analisis aliran daya (*load flow*) adalah suatu analisis yang dilakukan untuk menghitung tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu saluran tenaga listrik pada keadaan operasi normal. Hal yang dapat diperoleh dari analisis aliran daya adalah besar dan sudut fasa tegangan setiap bus, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran. Selain itu, analisis aliran daya (*load flow*) sangat dibutuhkan untuk mengevaluasi unjuk kerja dari sistem tenaga listrik, mendapatkan informasi mengenai beban saluran distribusi, rugi-rugi saluran, dan menganalisis kondisi pembangkitan dan

pembebanan. Oleh sebab itu studi aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan serta pengembangan sistem di masa yang akan datang.

Menurut jurnal publikasi skripsi Hadi Suyono, ST.,MT.,Ph.D dan Dr. Rini Nur Hasanah, ST.,MT.,M.Sc (2014) salah satu upaya teknis untuk mengurangi penurunan tegangan dan rugi – rugi daya pada sistem, yaitu dengan membangun pembangkit tersebar (*Distributed Generation*) bersifat *renewable energy* di titik – titik yang jauh dari pusat pembangkitan dan dekat dengan pusat pembebanan. Berdasarkan uraian tersebut pada penelitian ini akan menganalisis pengaruh injeksi unit pembangkit tersebar.

Studi aliran daya di dalam sistem tenaga merupakan studi yang mengungkapkan kinerja dan aliran daya (nyata dan reaktif) untuk keadaan tertentu ketika sistem bekerja saat tunak (*steady state*). Tujuan utama studi aliran daya adalah untuk menentukan magnitudo tegangan, sudut/vektor tegangan, aliran daya aktif dan daya reaktif pada saluran, serta rugi-rugi daya yang muncul dalam sistem tenaga. Setiap titik/bus pada suatu sistem tenaga listrik terdapat daya aktif P, daya reaktif Q, tegangan E, dan sudut fasa tegangan δ . Jadi pada setiap bus terdapat empat besaran yaitu P, Q, E dan δ . Di dalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui, dan dua yang lain perlu dicari. Berdasarkan hal tersebut diatas, bus - bus dibedakan menjadi tiga jenis yaitu bus beban, bus generator, dan bus berayun (*slack bus*). (Grainger dan Stevenson, 1994 : 332) [3]

1. Bus beban (P-Q bus) Pada bus ini, selisih daya antara daya yang dibangkitkan oleh generator dan daya yang diserap oleh beban diketahui nilainya.

2. Bus generator (P-V bus)

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan daya aktif P, sedangkan yang tidak diketahui adalah sudut fasa tegangan dan daya reaktif Q.

3. Bus berayun (*Slack bus*)

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan sudut fasa, sedangkan yang tidak diketahui adalah daya aktif P dan daya reaktif Q. Umumnya dalam studi aliran daya hanya terdapat satu bus berayun.

Berkaitan dengan judul penelitian ini, maka metode yang akan digunakan adalah Analisis Aliran Daya metode “Newton-Raphson”.

Dari kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian sebelumnya penulis ingin menerapkan perbaikan profil tegangan dengan PLTS yang berada di Desa Kalipucang, Kecamatan Tukur, Kabupaten Pauruan sudah untuk mengurangi *losses* daya. Jika peneliti sebelumnya mengurangi *losses* daya dengan menggunakan peralatan *AVR*, *Bank Capacitor* dan menggunakan pembangkit tersebar maka penulis hanya membahas dampak profil dan *losses* daya sebelum dan sesudah diinjeksikan PLTS Kalipucang dengan penyulang Ngembal rayon Sukorejo Kabupaten Pasuruan.



2.2 Profil Tegangan Dan *Losses* Daya

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memiliki nilai tegangan yang tidak melebihi batas toleransi serta rugi – rugi daya yang kecil.

Menurut E-jurnal Teknik Elektro dan Komputer (2015), ISSN. 2301-8402 ketidak seimbangan pada suatu sistem jaringan distribusi tenaga listrik selalu terjadi, dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah pada pengaturan beban – beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut muncul arus pada netral trafo. Arus yang mengalir pada netral trafo ini menyebabkan terjadinya losses (rugi – rugi daya), yaitu losses akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo penyaluran energi listrik pada sistem distribusi dimana susut tegangan akan mempengaruhi penyaluran energi listrik kepada konsumen dimana jika terjadi susut tegangan pada sistem distribusi maka energi listrik yang akan disalurkan kepada konsumen akan menjadi tidak standar lagi sesuai SPLN no. 72 tahun 1987, dimana jatuh tegangan yang di perbolehkan dalam penyaluran distribusi hanya sebesar 5% untuk jaringan udara SKTM sebesar 2% maka itu perlu adanya penelitian untuk masalah jatuh tegangan, sehingga dalam penyampaian aliran listrik terhadap konsumen menjadi terpenuhi sesuai standar yang telah ditetapkan.

Kehilangan energi perlu diprediksi dan diantisipasi agar terjadi dalam batas normal dan wajar. Apabila pembangkit tenaga listrik sangat jauh dari konsumen, maka digunakan sistem transmisi dan distribusi untuk dapat menyalurkan daya listrik ke konsumen. Rugi – rugi daya atau jatuh tegangan itu sendiri adalah energi yang hilang karena ada tekanan atau resistansi dari sistem jaringan dan transformator. Jatuh tegangan merupakan kehilangan energi yang sama sekali tidak mungkin dihindari.

2.3 Studi Aliran Daya

Cekdin Cekmas.(2007).Sistem Tenaga Listrik.Yogyakarta:ANDI. Studi aliran daya adalah studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya atau tegangan sistem dalam kondisi operasi tunak. Informasi ini sangat dibutuhkan guna mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkit maupun pembebanan. Analisis ini juga memerlukan informasi-informasi aliran daya dalam kondisi normal maupun darurat.

Masalah aliran daya mencakup perhitungan aliran dan tegangan sistem pada terminal tertentu atau bus tertentu. Representasi fasa tunggal selalu dilakukan karena sistem dianggap seimbang. Di dalam studi aliran daya, bus-bus dibagi dalam 3 macam, yaitu:

1. Slack bus atau swing bus atau bus referensi
2. Voltage controlled bus atau bus generator
3. Load bus atau bus beban

Pada tiap-tiap bus terdapat 4 besaran, yaitu:

1. Daya real atau daya aktif P
2. Daya reaktif Q
3. Harga skalar tegangan $|V|$
3. Sudut fasa tegangan θ

Pada tiap-tiap bus hanya ada 2 macam besaran yang ditentukan sedangkan kedua besaran yang lain merupakan hasil akhir dari perhitungan. Besaran-besaran yang ditentukan itu adalah:

1. Slack bus; harga skalar $|V|$ dan sudut fasanya θ
2. Voltage controlled bus; daya real P dan harga skalar tegangan $|V|$
3. Load bus; daya real P dan daya reaktif Q

2.3.1 Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang dibutuhkan untuk melakukan energi sebenarnya satuannya (watt). Secara umum daya aktif dinyatakan oleh persamaan :

$$P1 \text{ Fasa} = V \cdot If \cos \varphi \dots\dots\dots (2-1)$$

$$P3 \text{ Fasa} = \sqrt{3} VL \cdot IL \cos \varphi \dots\dots\dots (2-2)$$

Keterangan:

- VL = tegangan antar-fasa (Volt)
- Vf = tegangan fasa-netral (Volt)
- IL = arus antar fasa (Amper)
- If = arus fasa-netral (Amper)
- P = daya aktif (Watt)

2.3.2 Daya Reaktif

Daya reaktif adalah daya yang timbul karena adanya pembentukan medan magnet pada beban-beban induktif (VAR). Persamaan daya reaktif adalah:

$$Q_{1Fasa} = V_f \cdot I_f \sin \varphi \dots\dots\dots (2-3)$$

$$Q_{3Fasa} = \sqrt{3} \cdot I_L \sin \varphi \dots\dots\dots (2-4)$$

Keterangan:

V_L = tegangan antar-fasa (Volt)

V_f = tegangan fasa-netral (Volt)

I_L = arus antar fasa (Amper)

I_f = arus fasa-netral (Amper)

Q = daya reaktif (VAR)

2.3.3 Daya Semu

Daya semu merupakan penjumlahan secara vektoris antara daya aktif dan daya reaktif.

$$S = P + jQ \dots\dots\dots (2-5)$$

Keterangan :

P = daya aktif (Watt)

Q = daya reaktif (VAR)

S = daya semu (VA)

2.3.4 Faktor Daya

Faktor daya didefinisikan sebagai perbandingan antara daya nyata (P) dan daya semu (S), dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\text{Faktor Daya} = \frac{\text{daya nyata (W)}}{\text{daya semu (VA)}} \dots\dots\dots (2-6)$$

Untuk daya sendiri dibentuk oleh dua komponen, daya nyata (P) dan komponen daya reaktif (Q). Hubungan ini dapat digambarkan dalam diagram vektor seperti yang terlihat pada gambar segitiga daya pada Gambar 2.1. Dari persamaan (2-6) dijabarkan menjadi:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{P+jQ} = \frac{W}{VA} \dots\dots\dots (2-7)$$

$$W = VA \cos \varphi$$

$$VAR = VA \sin \varphi$$

$$\tan \varphi = \frac{VAR}{W} \dots\dots\dots(2-8)$$

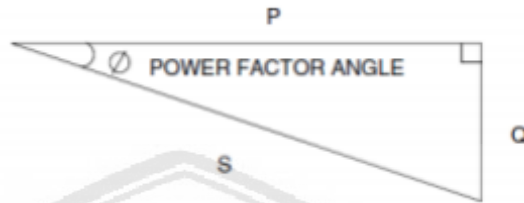
Keterangan :

$\cos \varphi$ = faktor daya

P = daya nyata (Watt)

S = daya semu (VA)

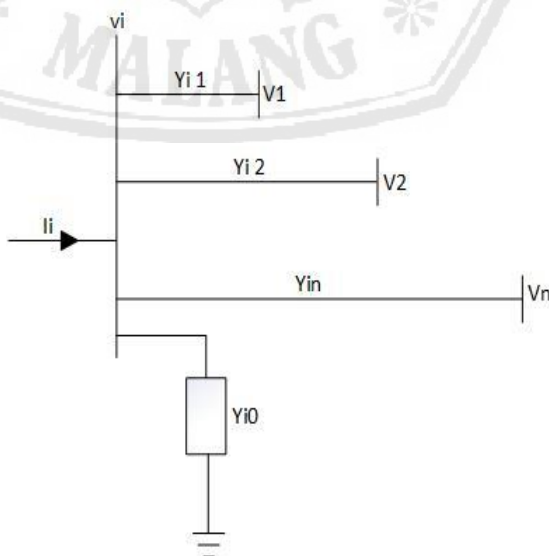
Q = daya reaktif (VAR)



Gambar 2.1 Segitiga Daya

2.4 Metode Newton Raphson

Cekdin Cekmas.(2007).Sistem Tenaga Listrik.Yogyakarta:ANDI. Metode Newton-Raphson memiliki perhitungan lebih baik dari pada metode gauss-seidel bila untuk sistem tenaga yang besar karena lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang di butuhkan untuk memperoleh pemecahan ditentukan berdasarkan ukuran sistem. Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Dari gambar 2.2 arus yang memasuki bus i dapat dicari dengan persamaan (2-7). Persamaan tersebut dapat ditulis ulang menjadi :



Gambar 2.2 Tipikal bus dari sistem tenaga

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \dots\dots\dots(2-9)$$

Persamaan di atas bila ditulisdalam bentuk polar adalah:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2-10)$$

Daya kompleks pada bus i adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i * I_i \dots\dots\dots(2-11)$$

Substitusi dari persamaan (2-10) untuk Ii ke dalam persamaan menghasilkan:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2-12)$$

Pisahkan bagian real dan emaginer :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2-13)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2-14)$$

Persamaan (2-13) dan (2-14) membentuk persamaan aljabar non linier dengan variabel sendiri. Besar nya setiap variabel dinyatakan dalam satuan per unit dan untuk sudut fasa dinyatakan dalam satuan radian. Persamaan (2-13) dan (2-14) dikembangkan dari deret taylor seperti persamaan berikut ini:

$$\begin{matrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \end{matrix} \begin{bmatrix} \frac{\delta P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\delta P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\delta P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\delta P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\delta P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\delta P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{matrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \end{matrix} \\ \\ \begin{matrix} \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{matrix} \begin{bmatrix} \frac{\delta Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\delta Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\delta Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\delta Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\delta Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\delta Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{matrix} \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{matrix} \dots\dots\dots(2-15)$$

Dalam hal ini bus 1 diumpamakan *slack bus*. Matriks Jacobian memberikan perbandingan linier antara perubahan pada sudut tegangan $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dengan sedikit perubahan pada daya aktif ($\Delta |P_i^{(k)}|$) dan daya reaktif ($\Delta |Q_i^{(k)}|$). Dalam bentuk singkat dapat di tulis seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j1 & j2 \\ j3 & j4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2-16)$$

Banyak elemen matrik Jacobian dari persamaan (2-16) ditentukan dengan $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$ dengan n adalah banyaknya bus pada sistem, sedangkan m adalah banyaknya *voltage -controled buses* pada sistem. J1 diperoleh dari $(n-1) \times$

(n-1), j2 diperoleh dari (n-1) x (n-1-m), j3 diperoleh dari (n-1-m) x (n-1) dan j4 diperoleh dari (n-1-m) x (n-1-m).

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk j1 adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2-17)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \dots\dots\dots(2-18)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk j2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2-19)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \dots\dots\dots(2-20)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk j3 adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2-21)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \dots\dots\dots(2-22)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk j4 adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2-23)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \dots\dots\dots(2-24)$$

Harga dari $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ berbeda antara terjadwal dengan nilai perhitungan, dan ini disebut sisa daya (*Power residuals*) yang diberikan tegangan dengan :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \dots\dots\dots(2-25)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \dots\dots\dots(2-26)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \dots\dots\dots(2-27)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \dots\dots\dots(2-28)$$

2.5 Standar Performasi Jaringan

Menurut Permen ESDM no.3 (2007) Standar performasi jaringan digunakan untuk mengetahui keadaan pada saat unjuk kerja melayani beban. Standar digunakan agar kualitas daya yang diterima oleh pemakai jaringan dapat terpenuhi pada saat jaringan berada dalam kondisi dinamik. Beberapa parameter standar yang digunakan meliputi;

Frekuensi nominal 50 Hz diusahakan untuk tidak lebih rendah dari 45.5 Hz atau lebih tinggi dari 50.5 Hz dan selama waktu keadaan darurat atau terjadi gangguan. Frekuensi system diizinkan turun hingga 47.5 Hz atau naik hingga 52.0 Hz sebelum unit pembangkit diizinkan keluar operasi. Tegangan sistem harus dipertahankan dalam kondisi. Seperti tabel dibawah ini:

Tabel 2.1 tegangan sistem

Tegangan Nominal (kV)	Kondisi Normal
500	+5%, -5%
150	+5%, -10%
70	+5%, -10%
20	+5%, -10%

Distorsi harmonic total maksimum pada setiap titik sambungan dalam kondisi normal dimana pada kondisi kondisi keluar terencana maupun tidak terencana harus memenuhi. Seperti tabel dibawah ini:

tabel 2.2 distorsi harmonic

Tegangan Nominal (kV)	Kondisi Normal
500	Tidak termasuk
150	3 %
70	3 %
20	3 %

Komponen urutan negative maksimum dan tegangan fasa dalam jaringan tidak boleh melebihi 1% pada kondisi operasi normal dan terencana, serta tidak melebihi 2% selama kejadian tegangan impuls sesaat.

Fluktuasi tegangan pada suatu titik sambungan dengan beban berfluktuasi, harus tidak melebihi batasan. 2 % dari tingkat tegangan untuk setiap perubahan step, yang dapat terjadi bedang. Setiap kejadian ekskursi tegangan yang besar diluar perubahan step dapat diizinkan hingga 3% asalkan tidak menimbulkan resiko terhadap jaringan transmisi, atau instalasi pemakai jaringan. Kedip tegangan hingga 5% saat menjalankan motor listrik yang tidak sering terjadi dapat ditolerir.

Kedip tegangan (*Flicker*) jangka pendek 1.0 unit dan jangka panjang 0.8 unit yang terukur dengan *flicker* meter sesuai dengan spesifikasi IEC-868. Factor daya (cos phi) di titik sambung antara instalasi pemakai jaringan minimum sebesar 0.85 lagging.

Waktu pemutusan gangguan untuk gangguan di sisi pemakai jaringan yang terhubung langsung dengan jaringan transmisi, mulai dari saat terjadinya gangguan hingga padamnya busur listrik oleh terbukanya PMT, harus kurang dari atau sama dengan. Ditunjukkan pada tabel dibawah ini:

Tabel 2.3 waktu pemutusan gangguan

Tegangan (kV)	Waktu (ms)
500	90
150	120
70	150
20	400

2.6 Transformator (Trafo) 3 Fasa

Transformator adalah alat yang digunakan untuk mengubah tegangan bolak balik (ac) dari suatu nilai tertentu ke nilai yang kita inginkan terdiri dari kumparan primer dan sekunder.

Menurut jurnal Rizky 15energy15nd an Eddy Warman Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara (USU). Transformator merupakan suatu alat listrik yang mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandengan

magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi-elektromagnet. Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Penggunaan transformator yang sederhana dan handal memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan serta merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. Di dalam suatu sistem distribusi tenaga listrik, transformator distribusi dipergunakan untuk menurunkan tegangan penyulang utama (primary feeder) menjadi tegangan rendah (sekunder) yang langsung digunakan oleh para pemakai tenaga listrik (konsumen).

Transformator distribusi dihubungkan langsung dengan beban melalui jaringan sekunder dan lokasi pemasangannya tersebar di banyak tempat dengan jarak beberapa ratus meter atau sampai beberapa kilometer, tergantung pada kapasitas transformator dan besar beban yang dilayani.

Menurut standar NEMA (The National Electrical Manufacturers Association), transformator dengan 3 kVA sampai dengan 500 kVA diklasifikasikan:

1. Untuk transformator distribusi 1 θ : rating dari 3 kVA sd 500 kVA
2. Untuk transformator distribusi 3 θ : rating dari 9 kVA sd 1600 kVA
3. Untuk transformator –transformator yang ratingnya lebih besar dari 1600 kVA, diklasifikasikan sebagai transformator tenaga.

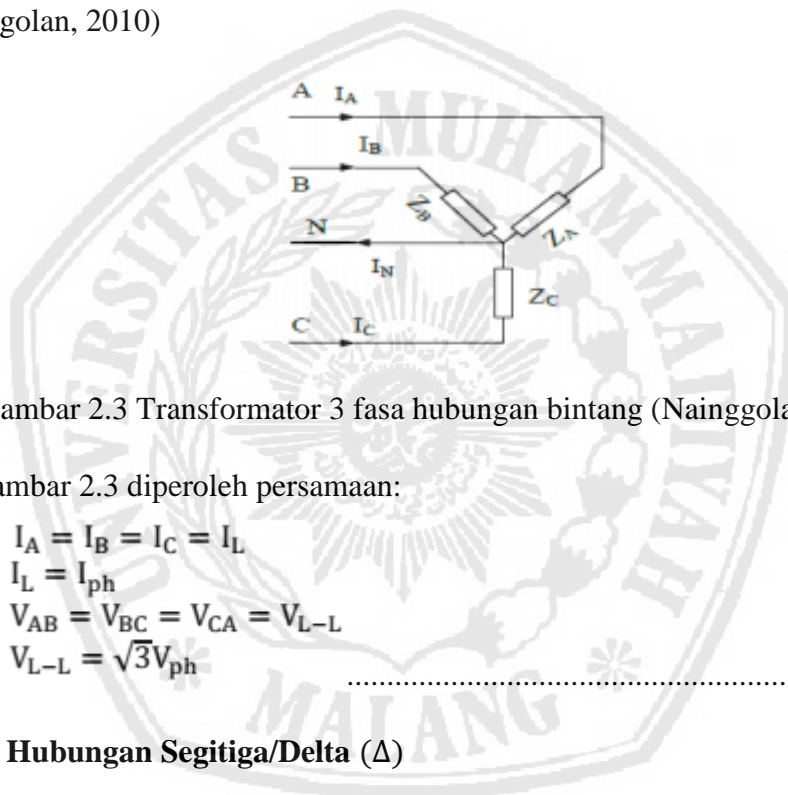
Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalir arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalir arus sekunder jika

rangkaian sekunder dibebani, sehingga 17nergy listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

Secara umum ada 2 macam jenis hubungan pada transformator tiga fasa yaitu:

2.6.1. Hubungan Bintang (Y)

Hubungan bintang ialah hubungan transformator tiga fasa, dimana ujung-ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujung-ujung lilitan merupakan titik netral. Arus transformator tiga phasa dengan kumparan yang dihubungkan bintang yaitu; masing-masing berbeda 120°. (Nainggolan, 2010)



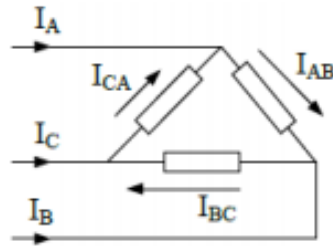
Gambar 2.3 Transformator 3 fasa hubungan bintang (Nainggolan, 2010)

Dari gambar 2.3 diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_B = I_C = I_L \\
 I_L &= I_{ph} \\
 V_{AB} &= V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \\
 V_{L-L} &= \sqrt{3}V_{ph}
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots(2-29)$$

2.6.2. Hubungan Segitiga/Delta (Δ)

Hubungan segitiga adalah suatu hubungan transformator tiga fasa, dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama. Tegangan transformator tiga phasa dengan kumparan yang dihubungkan segitiga yaitu; V_A, V_B, V_C masing-masing berbeda 120°. (Nainggolan, 2010)



Gambar 2.4 Transformator tiga fasa hubungan segitiga/delta (Nainggolan, 2010)

Dari gambar 2.4 diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_B = I_C = I_L \\
 I_L &= \sqrt{3}I_{ph} \\
 V_{AB} &= V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \\
 V_{L-L} &= V_{ph}
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots(2-30)$$

2.7. Jenis – Jenis Hubungan Trafo 3 Fasa

Dalam pelaksanaanya, tiga buah lilitan fasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam-macam hubungan, seperti bintang dan segitiga, dengan kombinasi Y-Y, Y-Δ, Δ-Y, Δ-Δ. Di bawah ini pembahasan hubungan transformator tiga fasa secara umum : (Nainggolan, 2010)

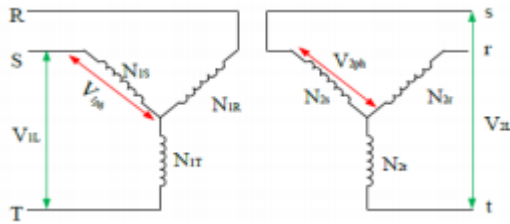
2.7.1 Hubungan Wye – Wye (Y-Y)

Pada hubungan bintang-bintang, rasio tegangan fasa-fasa (L-L) pada primer dan sekunder adalah sama dengan rasio setiap trafo. Sehingga, terjadi pergeseran fasa sebesar 30° antara tegangan fasa-netral (LN) dan tegangan fasa-fasa (L-L) pada sisi primer dan sekundernya. Hubungan Y-Y pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 2.5 Pada hubungan Y-Y, tegangan masing-masing primer fasa adalah :

$$V_{phP} = \frac{V_{LP}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2-31)$$

Tegangan fasa primer sebanding dengan tegangan fasa sekunder dan perbandingan belitan transformator maka, perbandingan antara tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan Y-Y adalah :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{phP}}{\sqrt{3}V_{phS}} = a \dots\dots\dots(2-32)$$

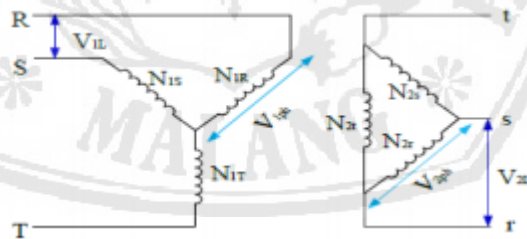


Gambar 2.5 Transformator tiga fasa hubungan Y-Y (Nainggolan, 2010)

2.7.2 Hubungan Wye – Delta (Y - Δ)

Transformator hubungan Y-Δ, digunakan pada saluran transmisi sebagai penaik tegangan. Rasio antara sekunder dan primer tegangan fasa-fasa adalah $1/\sqrt{3}$ kali rasio setiap trafo. Terjadi sudut 30° antara tegangan fasa-fasa antara primer dan sekunder yang berarti bahwa trafo Y-Δ tidak bisa diparalelkan dengan trafo Y-Y atau trafo Δ-Δ. Hubungan transformator Y-Δ dapat dilihat pada Gambar 2.6 Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sebanding dengan tegangan fasa primer ($V_{LP} = \sqrt{3}V_{phP}$) dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fasa ($V_{LS} = V_{phS}$), sehingga diperoleh perbandingan tegangan pada hubungan Y-Δ adalah :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{phP}}{V_{phS}} = \sqrt{3}a \quad \dots\dots\dots(2-33)$$

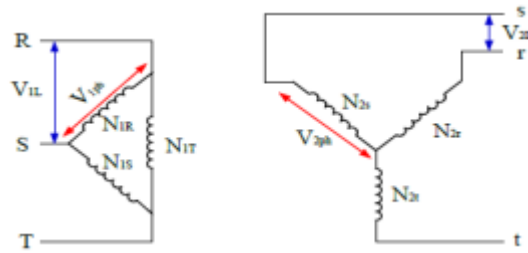


Gambar 2.6 Transformator tiga fasa hubungan Y-Δ (Nainggolan, 2010)

2.7.3 Hubungan Delta – Wye (Δ - Y)

Transformator hubungan Δ-Y, digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan transmisi ke tegangan rendah. Transformator hubungan Δ-Y dapat dilihat pada Gambar 2.7 Pada hubungan Δ-Y, tegangan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan fasa primer ($V_{LP} = V_{phP}$), dan tegangan sisi sekundernya ($V_{LS} = \sqrt{3}V_{phS}$), maka perbandingan tegangan pada hubungan Δ-Y adalah :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{phP}}{\sqrt{3}V_{phS}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2-34)$$



Gambar 2.7 Transformator tiga fasa hubungan Δ-Y (Nainggolan, 2010)

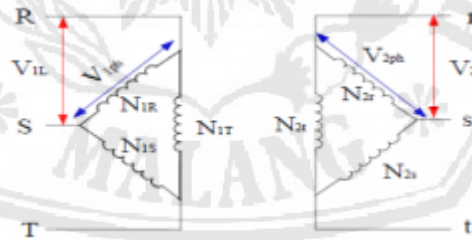
2.7.4 Hubungan Delta – Delta (Δ - Δ)

Pada transformator hubungan Δ-Δ, tegangan kawat ke kawat dan tegangan fasa sama untuk sisi primer dan sekunder transformator ($V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_{LN}$), maka perbandingan tegangannya adalah :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{phP}}{V_{phS}} = a \dots\dots\dots(2-35)$$

Sedangkan arus pada transformator hubungan Δ-Δ adalah :

$$I_L = \sqrt{3}I_P \dots\dots\dots(2-36)$$



Gambar 2.8 Transformator tiga fasa hubungan Δ-Δ (Nainggolan, 2010)