

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Literature Review*

Pada tahun 2018 penelitian yang dilakukan oleh I Made Yulistya Negara (Hernanda & dkk, 2018) yang berjudul “Analisis Karakteristik Arus dan Tegangan pada Inisiasi Feroresonansi Transformator Tegangan Rendah“. Hasil percobaan menunjukkan bahwa semakin besar tegangan sumber menyebabkan respon feroresonance terlihat lebih jelas. Itu ditunjukkan oleh gelombang yang lebih terdistorsi, semakin tinggi amplitudo frekuensi harmonik aneh terutama untuk 150 Hz, dan THD yang lebih besar. Berdasarkan spektrum harmonik dan periode gelombang, respons feroresonansi diidentifikasi sebagai *mode fundamental* Efek dari kondisi awal, seperti sisa fluks transformator besar. Berdasarkan spektrum harmonik dan periode gelombang, respons feroresonansi diidentifikasi sebagai dan muatan kapasitor, juga terlihat pada puncak gelombang terdistorsi selama kondisi transien. Selain itu, perbedaan bentuk gelombang antara kondisi normal dan feroresonansi dapat lebih mudah diamati pada tegangan daripada arus. Bentuk gelombang arus dan tegangan selama percobaan telah diverifikasi dengan menggunakan simulasi.

Pada tahun 2013 penelitian yang dilakukan oleh Zulkurnain Abdul-Malek, Kamyar Mehranzim, Behnam Salami, Hadi Nabipour Afrouzi dan Saeed Vahabi Mashak, (Abdul-Malek, 2013) yang berjudul “*Investigation of feroresonansi Mitigation Techniques in Voltage Transformer Using ATP-EMTP Simulation*“. menjelaskan bahwa feroresonansi adalah fenomena listrik *non linier* yang kompleks yang dapat menyebabkan masalah dielektrik dan termal untuk peralatan listrik. Sistem kelistrikan dengan perilaku feroresonansi adalah sistem dinamik *non linier*. Fenomena feroresonansi dapat terjadi ketika inti dari perangkat induktif menjadi jenuh, dan karakteristik fluks saat ini menjadi *non linier*. Sementara dalam kasus sirkuit resonansi *linier* frekuensi resonansi di definisikan dengan baik, dalam kasus sirkuit *nonlinear*, osilasi dapat ada pada berbagai frekuensi, tergantung pada banyak faktor dari kasus tertentu.

Sistem transmisi dapat dibedakan menjadi sistem transmisi tegangan tinggi (*high Voltage*), sistem transmisi tegangan ekstra tinggi (*extra high Voltage*), dan sistem transmisi ultra tinggi (*ultra high Voltage*). Besaran tegangan nominal saluran transmisi tegangan tinggi ataupun ekstra tinggi berbeda-beda untuk setiap negara atau perusahaan listrik di negara tersebut, tergantung kepada kemajuan tekniknya masing-masing. Di Indonesia tegangan tinggi yang digunakan adalah 150 kV dan tegangan ekstra tinggi adalah tegangan 500 kV yang terinterkoneksi antara Jawa dan Bali. Sistem interkoneksi ekstra tinggi ini merupakan bagian terpenting dari penyaluran daya di Indonesia sehingga kelangsungan dan keandalan sistem ini harus selalu dijaga. (Aslimeri & dkk, 2008)

Proses penyaluran energi listrik dari pusat listrik ke pusat beban disalurkan melalui saluran transmisi tegangan tinggi 150 kV atau tegangan 500 kV, kemudian di gardu induk tegangan diturunkan menjadi tegangan distribusi primer 20 kV. Pada gardu induk distribusi yang tersebar di pusat-pusat beban tegangan diubah oleh transformator distribusi, menjadi tegangan rendah 380 V, untuk fasa-fasa dan 220 V untuk fasa-netral. (Aribowo, 2016)

Feroresonansi dikenal pertama kali di tahun 1920 sebagai sebuah fenomena osilasi yang melibatkan induktans nonlinier, kapasitans, sumber tegangan sinusoidal, dan rugi-rugi yang rendah. Pada umumnya, kemunculan osilasi ini di lapangan dipicu oleh gangguan transien yang mampu menyebabkan inti transformator bersaturasi. Respons feroresonansi ditandai oleh gelombang arus dan tegangan abnormal, seperti tingkat harmonik, nilai puncak, ataupun nilai efektif. Dengan adanya efek tersebut, feroresonansi memberikan tekanan dielektrik dan termal yang mampu merusak peralatan listrik dan berujung pada pemadaman listrik (*black out*). Di samping itu, kemunculan fenomena ini tidak dapat diprediksi secara pasti dan relay proteksi pun dapat bekerja secara tidak tepat ketika feroresonansi terjadi. Hal inilah yang menjadikan fenomena feroresonansi, terutama karakteristik fisiknya, masih mendapatkan perhatian khusus dalam sistem tenaga listrik hingga saat ini. (Hernanda & dkk, 2018)

Pada kenyataannya, terdapat fenomena transien yang dinamakan dengan fenomena feroresonansi. Feroresonansi merupakan fenomena dimana nilai

induktansi berubah-ubah terhadap waktu dan pada saat tertentu ketika mendapat sebuah *trigger* berupa *switching*, sambaran petir, atau gangguan hubung singkat, nilai induktansi menjadi berpadanan dengan nilai kapasitansi. Kondisi seperti itulah yang dinamakan dengan fenomena feroresonansi. Feroresonansi dapat menyebabkan osilasi dalam interval waktu yang cukup lama. Feroresonansi juga dapat menyebabkan keadaan abnormal seperti *overVoltage*, *overcurrent*, ataupun harmonisa. Hal ini dapat mengganggu kinerja dan bahkan merusak transformator. Oleh karena itu, dibutuhkan deteksi peluang feroresonansi pada transformator tiga fasa dengan nilai kapasitansi yang bervariasi. (Andarini, 2017)

Fenomena feroresonansi yang terjadi dalam sistem konduksi energi menunjukkan dirinya sebagai kelebihan tegangan atau arus yang terjadi di sistem. Arus atau tegangan tinggi ini terjadi sebagai akibat dari kegagalan dalam sistem menyebabkan kerusakan yang tidak dapat diperbaiki di *Windows* jaringan dalam waktu singkat karena bentuk gelombang dan amplitudo dan mengarah ke materi yang sangat besar dan kerugian tenaga kerja. Feroresonansi adalah salah satu masalah kelistrikan yang paling serius sistem tenaga. Meskipun telah dikutip untuk waktu yang lama, kami belum mendapatkan seluruh tubuh informasi tentang pencegahan arus dan tegangan amplitudo tinggi yang merusak ini. Bagi sejumlah ilmuwan, fenomena feroresonansi masih merupakan masalah yang rumit menyimpan misterinya. Alasan untuk misteri ini adalah pelabuhan peralatan sistem tenaga terlalu banyak elemen mulai dari transformator, elemen linier dan non-linier hingga resistif, yang induktif dan kapasitif. Dalam terjadinya feroresonansi, khususnya elemen yang bersifat magnetis non-linear memiliki dampak besar pada inti dan kapasitas transformator. (Akinici & dkk, 2009)

Feroresonansi atau resonansi non-linier merupakan fenomena kelistrikan kompleks *nonlinear* yang dapat mengakibatkan tegangan lebih pada sistem tenaga sehingga membahayakan sistem transmisi, sistem proteksi, peralatan listrik maupun operator. Apabila terdapat gangguan pada sistem dan tidak dapat dijelaskan secara spesifik jenis gangguannya, kemungkinan hal tersebut merupakan gejala dari feroresonansi. Rangkaian resonansi seri digunakan untuk lebih memudahkan memahami feroresonansi. Pada rangkaian resonansi penggunaan induktor diganti

menjadi induktor *nonlinear* sebagai pemodelan dari inti trafo sehingga rangkaianannya berubah menjadi rangkaian feroresonansi. Sama halnya dengan resonansi yang terjadi pada rangkaian resonansi seri, rangkaian feroresonansi ketika mengalami resonansi, impedansi akan sangat kecil sehingga arus pada rangkaian akan naik. Arus yang naik menyebabkan rapat fluks juga akan naik mencapai titik saturasi dan tidak lagi menjadi linear. Ketika nilai arus yang naik pada inti trafo yang bersifat feromagnetik melalui titik saturasinya maka induktansi akan berubah sangat cepat (menjadi *nonlinear*). Sehingga ketika terjadi interaksi antara kapasitor dan inti besi induktor akan menghasilkan tegangan dan arus yang tidak biasa. Hal ini akan sangat berbahaya bagi sistem dan peralatan listrik. (Simamora. & dkk, 2015)

ATP-EMTP adalah sebuah program, yang dimana program ini mampu memperkirakan hasil dari variabel tertentu (tegangan dan arus) pada sebuah rangkaian listrik dalam fungsi waktu. Digunakan secara luas untuk studi analisa *switching* dan surja petir, koordinasi isolasi, harmonisa dan keandalan sistem tenaga listrik. (Rohman, 2010)

2.2. Teori Pendukung

Pada bagian ini disajikan teori-teori yang berhubungan dengan penelitian yang dilakukan adalah:

2.2.1. Transmisi Tenaga Listrik

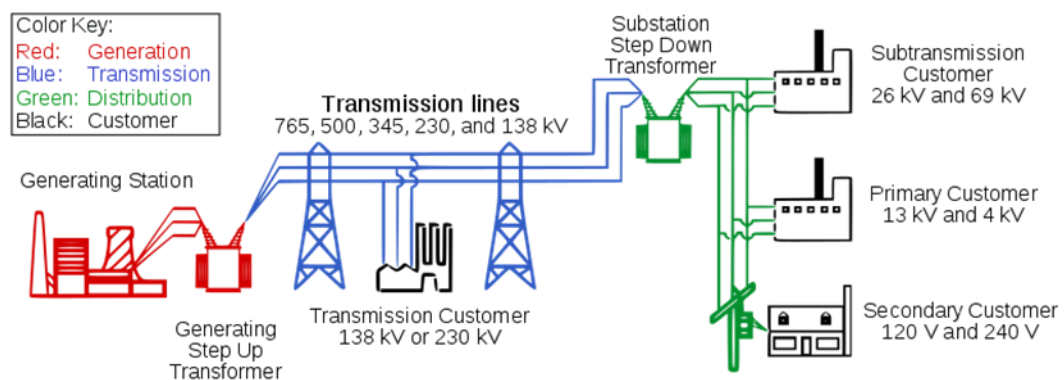
Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*Power Plant*) hingga *substation distribution* sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik melalui suatu bahan konduktor.

Saluran Transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari *Generator Station*/Pembangkit Listrik sampai *distribution station* hingga sampai pada konsumen pengguna listrik. Tenaga listrik di transmisikan oleh suatu bahan konduktor yang mengalirkan tipe Saluran Transmisi Listrik. (Stevenson, 1984)

Saluran transmisi membawa tenaga listrik dari pusat-pusat pembangkitan ke pusat-pusat beban melalui saluran tegangan tinggi 150 kV atau melalui saluran transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV. Trafo penurun akan merendahkan tegangan ini menjadi tegangan subtransmisi 70 kV yang kemudian di gardu induk diturunkan lagi menjadi tegangan distribusi primer 20 kV. Pada gardu induk distribusi yang tersebar di pusat-pusat beban tegangan diubah oleh trafo distribusi menjadi tegangan rendah 220/380 V (Dwinugraha, 2016)

Menurut (Warwick, 2000) Sistem Tenaga Listrik digambarkan dalam suatu diagram tenaga listrik. Gambar 2.1 menunjukkan skema diagram sistem tenaga listrik yang terbagi menjadi empat subsistem yaitu:

1. Pembangkit
2. Transmisi
3. Distribusi
4. Konsumen



Gambar 2.1. Diagram Sistem Tenaga Listrik
(Lawrance, 1965)

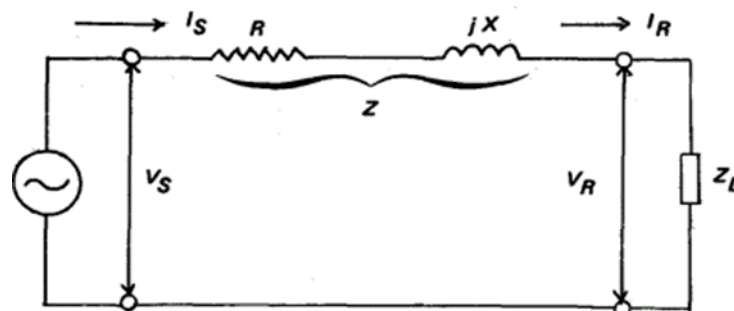
Setelah melewati saluran transmisi, maka tenaga listrik perlu diturunkan tegangannya sebelum disalurkan kepada konsumen. Terdapat beberapa tahap penurunan tegangan yang dilakukan setelah tenaga listrik melalui sistem saluran transmisi. Penurunan tegangan yang pertama kali dilakukan berada di Gardu Induk (GI) dengan menurunkan tegangan dari 500 kV ke 150 kV ataupun 150 kV ke 70 kV. Setelah itu, masih perlu adanya penurunan tegangan yang kedua yaitu 150 kV

ke 20 kV ataupun 70 kV ke 20 kV pada Gardu Distribusi. Setelah tenaga listrik melewati Gardu Distribusi, untuk menyalurkan tenaga listrik ke konsumen rumah tangga, perlu adanya penurunan tegangan lagi yang dilakukan oleh transformator distribusi hingga level tegangan 380/220 V.

2.2.2. Representasi Saluran Transmisi

a. Saluran Transmisi Pendek

Pada saluran transmisi pendek merupakan jenis saluran transmisi yang memiliki panjang saluran kurang dari 50 mil atau kurang dari 80 km. pada saluran transmisi pendek, nilai kapasitansi penghantar dapat diabaikan sehingga penghantar dimodelkan dengan impedansi (R dan jX), maka saluran transmisi dimodelkan sebagai berikut:



Gambar 2.2. Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Pendek

(Novendro, 2016)

Untuk saluran transmisi pendek berlaku hubungan:

$$V_S = V_R + Z \cdot I_R \quad (2.1)$$

$$I_S = I_R \quad (2.2)$$

Dimana:

V_S = Tegangan pada ujung kirim (Volt)

I_S = Arus pada ujung kirim (Ampere)

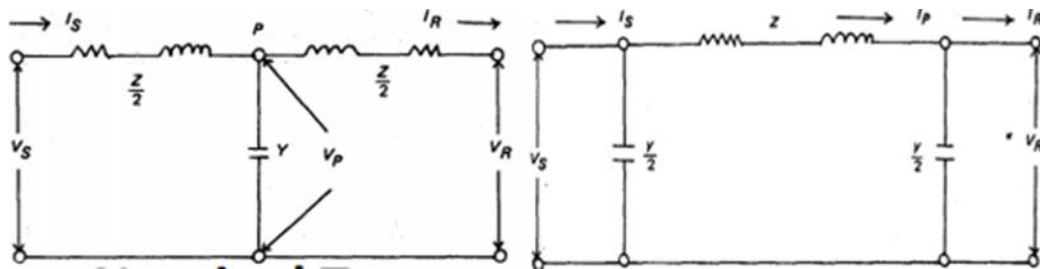
V_R = Tegangan pada ujung terima (Volt)

I_R = Arus pada ujung terima (Ampere)

$Z = R + jX$ = Impedansi saluran

b. Saluran Transmisi Menengah

Pada saluran transmisi menengah merupakan jenis saluran transmisi yang memiliki panjang saluran antara 50 mil sampai 150 mil atau 80 km sampai 240 km. pada saluran transmisi menengah, nilai kapasitansi penghantar tidak dapat diabaikan sehingga penghantar dimodelkan dengan impedansi (R dan XL), dan kapasitansi yang dapat dimodelkan dalam bentuk nominal T dan II sebagai berikut:



Gambar 2.3. Rangkaian Ekuivalen Saluran Tranmisi Menengah

(Novendro, 2016)

Untuk saluran transmisi pendek berlaku hubungan:

Nominal T

$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_R + \left(Z + \frac{Z^2 Y}{4}\right) I_R \quad (2.3)$$

$$V_S = Y V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_R \quad (2.4)$$

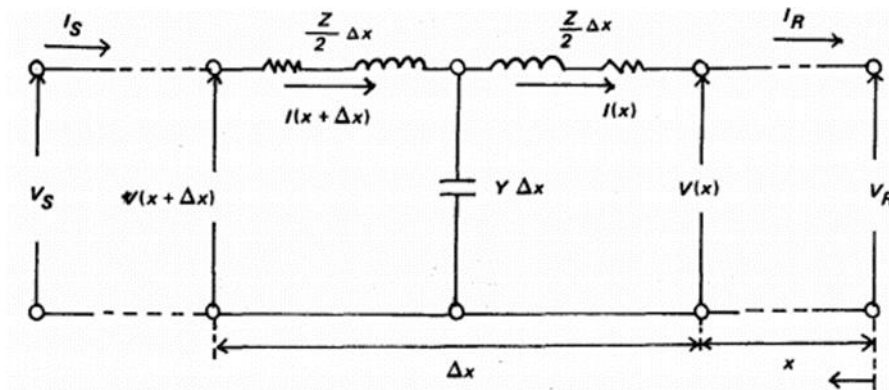
Nominal II

$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_R + Z I_R \quad (2.5)$$

$$I_S = \left(Y + \frac{ZY^2}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_R \quad (2.6)$$

c. Saluran Transmisi Panjang

Pada saluran transmisi menengah merupakan jenis saluran transmisi yang memiliki panjang saluran antara 150 mil sampai 150 mil atau lebih dari 240 km. pada saluran transmisi panjang, nilai kapasitansi dan impedansi penghantar (R dan XL) diasumsikan terdapat pada sepanjang penghantar hingga batas tak hingga. Untuk itu dilakukan metoda pendekatan per elemen panjang sebagai berikut:



Gambar 2.4. Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Panjang

(Novendro, 2016)

Untuk saluran transmisi panjang berlaku hubungan:

Z = Impedansi per satuan panjang (ohm)

Y = Admitansi shunt persatuan panjang

l = Panjang saluran (km)

Maka:

$$V_S = V_R \cosh \sqrt{ZY}l + Z_k I_R \sinh \sqrt{ZY}l \quad (2.7)$$

$$I_S = I_R \cosh \sqrt{ZY}l + V_R/Z_k \sinh \sqrt{ZY}l \quad (2.8)$$

$$V_R = V_S \cosh \sqrt{ZY}l - I_S Z_k \sinh \sqrt{ZY}l \quad (2.9)$$

$$I_R = I_S \cosh \sqrt{ZY}l - V_S/Z_k \sinh \sqrt{ZY}l \quad (2.10)$$

Dimana:

$$\sqrt{\frac{Z}{Y}} = Z_k \quad (2.11)$$

2.2.3. Parameter Saluran Transmisi

Parameter yang mempengaruhi dari sistem kerja suatu saluran terdapat pada resistansi, kapasitansi, induktansi serta konduktansi yang terdapat pada saluran transmisi tersebut. (Munandar, 1980)

a. Resistansi

Tiap konduktor listrik memberi perlawanan atau tahanan terhadap mengalirnya arus listrik dan hal ini dinamakan resistansi. Resistansi dari penghantar saluran transmisi adalah penyebab yang terpenting dari rugi daya (*power loss*) pada saluran transmisi.

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2.12)$$

Dimana:

ρ = Resistivitas penghantar (Ohm m)

ℓ = Panjang (m)

A = Luas penampang (m²)

Untuk menghitung besaran resistansi pada kawat penghantar digunakan persamaan diatas. Semakin besar resistivitas penghantarnya serta semakin panjang dari kawat penghantar tersebut didapatkan resistansi yang besar pula. Akan tetapi ketika arus bolak balik mengalir pada konduktor, kerapatan arus pada konduktor terdistribusi secara tidak merata karena cenderung menuju ke bagian luar penampang.

b. Kapasitansi

Kapasitansi suatu saluran transmisi adalah akibat beda potensial antara penghantar (konduktor), kapasitansi menyebabkan penghantar tersebut bermuatan seperti terjadi pada plat kapasitor bila terjadi beda potensial diantaranya. Kapasitansi antara penghantar adalah muatan per-unit beda potensial. Kapasitansi antara penghantar sejajar adalah suatu konstanta yang tergantung pada ukuran dan jarak pemisah antara penghantar. Untuk saluran daya yang panjangnya lebih dari 80 km (50 mil), pengaruh kapasitansinya besar dan biasanya tidak dapat diabaikan. Untuk saluran-saluran yang lebih panjang dengan tegangan yang lebih tinggi, kapasitansi menjadi bertambah penting.

$$C = \frac{0,02413}{\log \frac{2h}{r}} \mu F / km \quad (2.13)$$

Dimana:

h = Jarak antara kawat penghantar dengan tanah (m)

r = Radius konduktor (cm)

c. Induktansi

Induktansi saluran yang terdiri dari penghantar pada keadaan yang sama semua serat adalah identik yang membagi arus rata yang mengatur didalamnya. Metode ini dapat diperluas, sehingga berlaku untuk jenis penghantar yang berisi serat-serat dengan ukuran yang berbeda-beda. Pada suatu kawat penghantar yang dialirkan arus yang berubah-ubah terhadap waktu maka akan timbul medan magnet, saat medan magnet dengan permeabilitas yang konstan maka fluks magnet akan berbanding lurus dengan arus sehingga tegangan pada induktansi berbanding lurus dengan perubahan arus terhadap waktu.

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \quad (2.14)$$

Dimana:

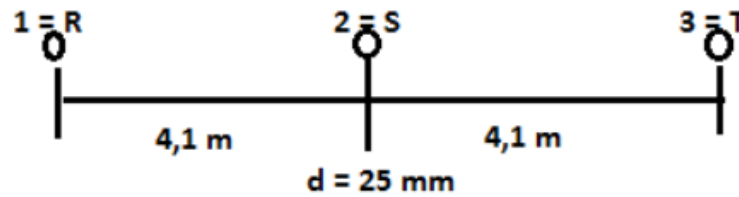
L = Induktansi rangkaian (H)

GMD = *Geometric mean radius* (m)

GMR = *Geometric mean distance* (m)

d. GMD (*Geometric Mean Distance*)

GMD (*Geometric Mean Distance*) merupakan suatu nilai yang menggantikan konfigurasi asli konduktor-konduktor dengan sebuah jarak rata-rata hipotesis (*hypothetical mean distance*). GMD juga adalah jarak antar fasa di tower saluran transmisi.



Gambar 2.5. Jarak Antar Konduktor ACSR
(Novendro,2016)

2.3. Transformator

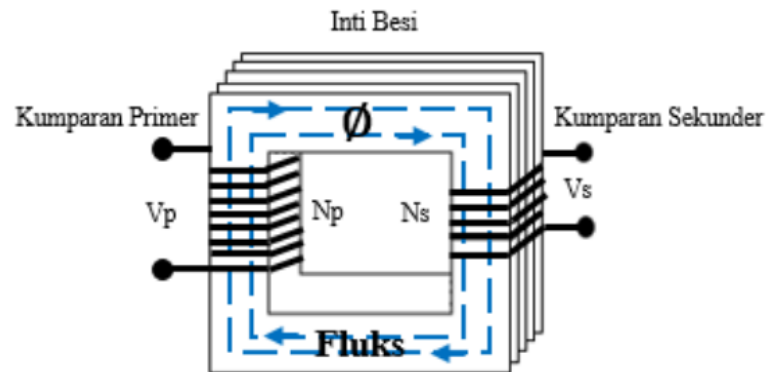
Transformator merupakan sebuah peralatan tenaga listrik yang mengubah sumber tegangan AC dengan tingkat tegangan tertentu menuju sumber tegangan AC dengan tingkat tegangan tertentu dengan melalui penerapan dari medan magnet. Transformator tersebut terdiri dari dua atau lebih kumparan yang mengelilingi sebuah inti dengan berbahan feromagnetik. Kumparan tersebut tidak terhubung langsung satu sama lain. (Bonggas, 2003)

Kegunaan dari transformator sangatlah penting untuk penyaluran daya listrik pada suatu sistem tenaga listrik. Dalam sistem tenaga listrik seperti transmisi, distribusi juga pada gardu induk membutuhkan transformator. Dengan fungsi utama dari transformator untuk mengubah tingkat tegangan tertentu menjadi ke tingkat tegangan tertentu sesuai yang diinginkan.

2.3.1. Konstruksi Transformator

Transformator yang berintikan besi tersebut mempunyai dua jenis konstruksi yang umumnya digunakan dalam sistem kelistrikan, yaitu transformator dengan tipe inti (*core-form*) dan transformator dengan tipe cangkang (*shell-form*). Pada transformator dengan tipe inti (*core-form*), belitan yang mengelilingi inti berada pada kedua lengan dari sebuah inti besi yang berbentuk seperti segi empat. Belitan tersebut terdiri dari 2 bagian, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder yang berada pada tiap sisi lengan transformator. Sementara belitan yang mengelilingi bagian lengan tengah dari sebuah inti besi yang mempunyai tiga lengan merupakan transformator dengan konstruksi yang bertipe cangkang (*shell-form*). Pada konstruksi dengan tipe cangkang, kumparan primer dan kumparan

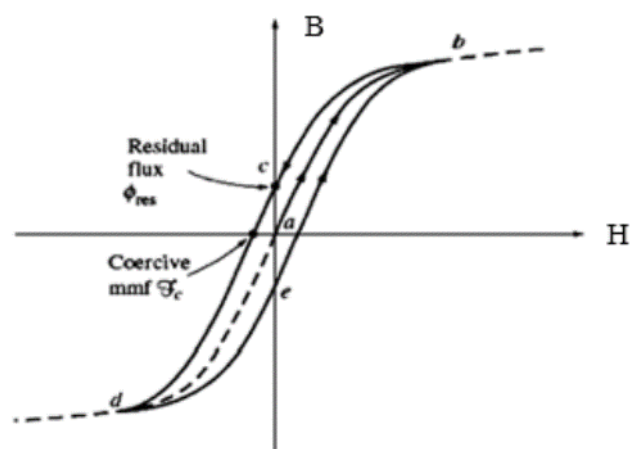
sekunder mengelilingi inti besi yang berada pada tengah lengan dari inti besi. (Kiramindyo, 2017)



Gambar 2.6. Kontruksi Transformator
(Kiramindyo, 2017)

2.3.2. Kurva Histerisis

Di dalam sebuah transformator terdapat sebuah inti besi yang memiliki kurva kerjanya dikarenakan dari bahan inti besi tersebut yang mempengaruhi kurva kinerjanya. Dalam kurvanya dilihat pada kerapatan fluks terhadap intensitas medan magnet. Beberapa fenomena fisis dapat digambarkan dengan kurva histerisis adalah pegas, tekanan, dan torsi. Contoh lainnya adalah ketika dalam pengukuran bahan ferromagnetic terutama pada material transformator yang mempunyai inti besi sebagai bahan *ferromagnetic*.



Gambar 2.7. Kurva Magnetisasi Transformator
(Simamora, 2015)

Kurva magnetisasi menggambarkan karakteristik dari sebuah transformator yang menunjukkan hubungan antara kerapatan *magnetic* yang disimbolkan sebagai B dengan intensitas medan magnetik yang disimbolkan sebagai H . Kurva magnetisasi merepresentasikan inti dari sebuah transformator. Berdasarkan Gambar 2.7 jalur a-b merupakan kondisi awal transformator pada saat diberikan arus. Kerapatan fluks akan meningkat hingga mencapai titik saturasinya. Ketika nilai arus menurun, nilai fluks juga akan menurun melalui jalur b-c-d. Hal ini dikarenakan adanya faktor fluks sisa. Untuk memaksa fluks mencapai nilai nol, maka sejumlah *magnetomotive force* dibutuhkan dan dikenal dengan istilah *coercive magnetomotive force*. Ketika nilai arus meningkat, nilai fluks juga akan meningkat melalui jalur d-e-b. Hal ini juga dikarenakan adanya faktor fluks sisa.

Ketika intensitas medan magnet sudah mencapai titik nol, kerapatan fluks tidak mencapai titik nol karena adanya fluks sisa. Fluks sisa tersebut dipengaruhi oleh permeabilitas inti transformator. Dan hal ini dipengaruhi oleh pemilihan bahan material inti transformator. Semakin baik jenis material inti trafo yang digunakan maka kurva histerisis akan semakin lurus atau semakin cenderung linear. Dan begitu juga sebaliknya apabila material inti trafo yang digunakan kurang baik maka kurva histerisis akan cenderung semakin lebar. (Simamora, 2015)

2.4. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT)

Saluran Udara Tegangan Tinggi merupakan salah satu jenis saluran tenaga listrik yang digunakan untuk keperluan transmisi tenaga listrik dalam jarak yang sangat jauh dari pusat pembangkit energi listrik ke pusat beban. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) menggunakan tegangan 150 kV dalam proses penyaluran tenaga listrik ke pusat beban dari stasiun pembangkit energi listrik. Jenis konstruksi saluran transmisi tegangan tinggi (SUTT) adalah konstruksi tower besi baja yang paling banyak digunakan di jaringan PLN, karena mudah dirakit terutama untuk pemasangan di daerah pegunungan dan jauh dari jalan raya, harganya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan penggunaan saluran bawah tanah serta pemeliharaannya yang mudah. (Prmono, 2010)

Saluran transmisi akan mengalami rugi-rugi tenaga, maka untuk mengatasi hal tersebut tenaga yang akan dikirim dari pusat pembangkit ke pusat beban harus ditransmisikan dengan tegangan tinggi maupun tegangan ekstra tinggi (*Extra High Voltage*). Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antar menara atau tiang transmisi. Komponen-komponen utama saluran udara terdiri dari:

1. Menara transmisi atau tiang transmisi berfungsi menopang konduktor yang menyalurkan energi listrik. Jenis-jenis dari bangunan penopang adalah menara-menara baja, tiang-tiang baja, tiang-tiang beton bertulang dan tiang-tiang kayu. Daerah yang peka terhadap petir digunakan kawat petir.
2. Isolator adalah media penyekat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan dan berfungsi untuk mengisolir kawat fasa dengan tower. Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Menurut penggunaan dan konstruksi, jenis isolator diklasifikasikan antara lain: isolator pasak (*pin insulator*, *pin post insulator*, *line post insulator*), isolator tarik (pos-saluran) dan isolator gantung. Isolator dipasang atau digantung pada travers (*cross-arm*) menara atau tiang transmisi.
3. Kawat Konduktor digunakan untuk menghantarkan listrik yang ditransmisikan. Jenis kawat penghantar yang digunakan untuk adalah tembaga dengan konduktivitas 100%, tembaga dengan konduktivitas 97.5% atau aluminium dengan konduktivitas 61%. Kawat Penghantar aluminium terdiri dari: AAC (*All-Aluminium Conductor*) yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium. AAAC (*All-Aluminium-Alloy Conductor*) yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium. ACSR (*Aluminium Conductor Steel-Reinforced*) yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja. ACAR (*Aluminium Conductor Alloy-Reinforced*) yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran. Untuk saluran transmisi tegangan tinggi, di mana jarak antara dua tiang atau

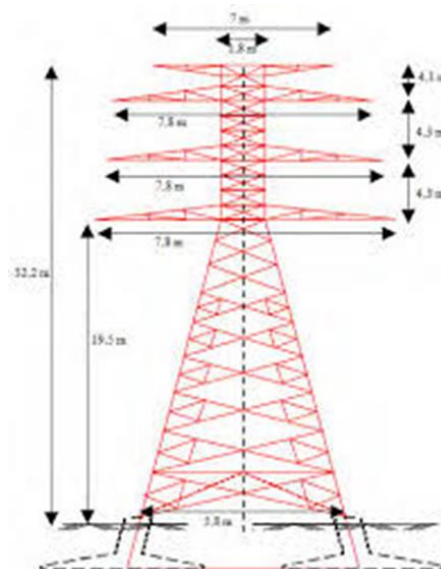
menara (jaraknya ratusan meter), dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi. Untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.

2.4.1. Tower Saluran Transmisi Listrik 150 kV

Tenaga listrik yang disalurkan lewat sistem transmisi umumnya menggunakan kawat telanjang sehingga mengandalkan udara sebagai media isolasi antara kawat penghantar tersebut dengan benda sekelilingnya. Tower adalah konstruksi bangunan yang kokoh, berfungsi untuk menyangga/merentang kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang cukup agar aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya. Antara tower dan kawat penghantar disekat oleh isolator (W. Lukmantono & dkk, 2013)

Konstruksi tower merupakan jenis konstruksi SUTT/SUTET yang paling banyak digunakan di jaringan PLN karena mudah dirakit terutama untuk pemasangan di daerah pegunungan dan jauh dari jalan raya. Namun demikian perlu pengawasan yang intensif karena besi-besinya rawan terhadap pencurian.

Jenis menara yang digunakan di Indonesia adalah tower Lattice. Pada sistem arus putar, keluaran dari generator berupa tiga fasa, setiap fasa mempunyai sudut pergerseran fasa 120° sehingga konstruksi menara tersebut adalah urutan fasa secara vertikal, dimana fasa R berada di atas diikuti fasa S dan fasa T.



Gambar 2.8. Menara Saluran Transmisi Tipe Lattice
(Lukmantono, 2006)

Menurut susunan atau konfigurasi kawat fasa, menara listrik dikelompokkan atas:

1. Jenis delta, digunakan pada konfigurasi horizontal atau mendatar.
2. Jenis piramida, digunakan pada konfigurasi vertikal atau tegak.
3. Jenis Zig-zag, yaitu kawat fasa tidak berada pada satu sisi lengan menara.

Dari menara yang digunakan pada transmisi tegangan tinggi masing-masing memiliki fungsi tersendiri berdasarkan tipe menara Lattice pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Data Spesifikasi Menara Transmisi 150 kV

| | |
|------------------------|--------------------------------|
| Tinggi Menara | 37,7 m |
| Tinggi Kawat Tanah | 37,7 m |
| Jumlah Kawat Tanah | 2 buah |
| Voltage | 150 KV |
| Number Of Circuit | 2 |
| Horizotal Angle | 0 ⁰ -3 ⁰ |
| Loading Span | Besaran (m) |
| Bask Span | 300 m |
| Weight Span | Normal : 700 m |
| | Broken : 400 m |
| Wind Span | Normal : 500 m |
| | Broken : 400 m |
| Power Conductor | Besaran (m) |
| Kind and Size | ACSR 340 mm ² |
| Diameter | 25 mm |
| Weight | 1,18 Kg/m |
| R DC 20° | 0,0851 Ohm/Km |
| Ground Wire | Besaran (m) |
| Kind and Size | AW 55 mm ² |
| Diameter | 9,6 mm |
| Weight | 0,44 Kg |
| Max Working Tension | 1,5 Kg |
| Wind Pressure | Besaran (m) |
| Menara | 120 Kg/m ² |
| Wire (Cont and GW) | 40 Kg/m ² |
| Insulator String | 60 Kg / 2 String |

PT. PLN (Persero) P3B Region Jawa Barat

Tabel 2.2. Data Struktur Menara Transmisi 150 kV

| Parameter Menara | Besaran (m) |
|---|-----------------|
| Panjang Lengan Menara | |
| Panjang Lengan Menara I | 7 m |
| Panjang Lengan Menara II | 7 m |
| Panjang Lengan Menara III | 7 m |
| Panjang Lengan Menara Kawat Tanah A | 2,1 m |
| Panjang Lengan Menara Kawat Tanah A' | 2,1 m |
| Panjang Lengan Menara Kawat Tanah A, A' | 2,6 m |
| Panjang Lengan Menara Kawat Tanah B, B' | 2,6 m |
| Panjang Lengan Menara Kawat Tanah C, C' | 2,6 m |
| Jarak Puncak Menara Ke Konduktor | |
| Lengan Menara I | 4 m |
| Lengan Menara II | 8,1 m |
| Lengan Menara III | 12,2 m |
| Jarak Konduktor Terhadap Tanah | |
| Tinggi Kawat Konduktor A | 33,7 m |
| Tinggi Kawat Konduktor B | 29,6 m |
| Tinggi Kawat Konduktor C | 25,5 m |
| Tinggi Kawat Konduktor A' | 25,5 m |
| Tinggi Kawat Konduktor B' | 29,6 m |
| Tinggi Kawat Konduktor C' | 33,7 m |
| Sudut Perlindungan | 15 ⁰ |

PT. PLN (Persero) P3B Region Jawa Barat

2.4.2. Konduktor Pada Saluran Transmisi

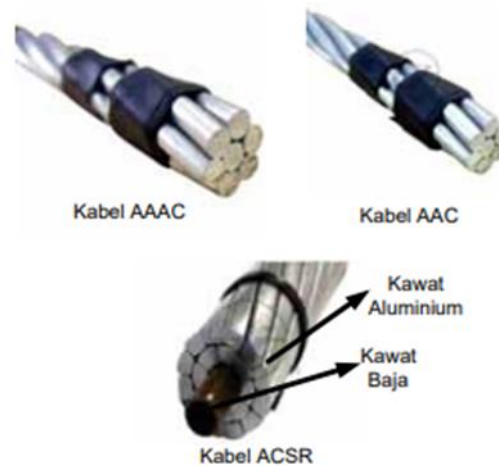
Konduktor adalah media yang digunakan untuk mengalirkan arus listrik dari pembangkit energi listrik dari pembangkit energi listrik ke beban (Gardu Induk) atau dari GI ke GI lainnya, yang terlentang pada tower-tower. Konduktor pada tower suspension dipegang oleh *suspension clamp*, namun pada tower tension dipegang oleh *tension clamp*. Dibelakang clamp tersebut dipasang rencengan isolator yang terhubung ke tower, namun kawat tanah atau *ground wire* (kawat petir atau kawat tanah) adalah media untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir.

Kawat ini dipasang di atas kawat fasa dengan sudut perlindungan yang sekecil mungkin, karena dianggap petir menyambar dari atas kawat (Irawan, 2017)

Penampang dan jumlah konduktor disesuaikan dengan kapasitas daya yang akan disalurkan, sedangkan jarak antar kawat fasa maupun kawat berkas disesuaikan dengan tegangan operasinya. Jika kawat terlalu kecil maka kawat akan panas dan rugi transmisi akan besar. Pada tegangan yang tinggi (SUTT) penampang kawat, jumlah kawat maupun jarak antara kawat berkas mempengaruhi besarnya korona dengan bunyi desis atau berisik. Jarak kawat antar fasa SUTT adalah 6 meter, hal ini karena menghindari terjadinya efek ayunan yang dapat menimbulkan *flashover* antar fasa.

Jumlah Kawat Tanah paling tidak ada satu buah diatas kawat fasa, namun umumnya di setiap menara dipasang dua buah. Pemasangan yang hanya satu buah untuk dua penghantar akan membuat sudut perlindungan menjadi besar sehingga kawat fasa mudah tersambar petir. Jarak antara kawat tanah (*ground wire*) dengan kawat fasa di menara adalah sebesar jarak antar kawat fasa, namun pada daerah tengah gawangan dapat mencapai 120% dari jarak tersebut.

Pada umumnya SUTT menggunakan ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*). Bagian dalam kawat berupa *steel* yang mempunyai kuat mekanik tinggi, sedangkan bagian luarnya mempunyai konduktivitas tinggi. Karena sifat elektron lebih menyukai bagian luar kawat daripada bagian sebelah dalam kawat maka ACSR cocok dipakai pada SUTT. Untuk daerah yang udaranya mengandung kadar belerang tinggi dipakai jenis ACSR/AS, yaitu kawat steelnya dilapisi dengan aluminium. Pada saluran transmisi yang perlu dinaikkan kapasitas penyalurannya namun SUTT tersebut berada didaerah yang rawan longsor, maka dipasang konduktor jenis TACSR (*Thermal Aluminium Conductor Steel Reinforced*) yang mempunyai kapasitas besar tetapi berat kawat tidak mengalami perubahan yang banyak. Konduktor pada SUTT merupakan kawat berkas (*stranded*) atau serabut yang dipilin, agar mempunyai kapasitas yang lebih besar dibanding kawat pejal (Irawan, 2017)



Gambar 2.9. Jenis-jenis Kawat Transmisi Listrik
(Zamrudi, 2010)

2.4.3. Isolator Saluran Transmisi Listrik

Isolator merupakan pemisah antara daerah yang bertegangan dan yang tidak bertegangan. Isolator dapat memisahkan secara elektrik dua buah atau lebih penghantar listrik bertegangan yang berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, lompatan api (*flashover*), ataupun percikan api (*sparkover*). Isolator memiliki kemampuan untuk menahan tegangan disebut dengan kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik dari isolator sangat penting dalam penentuan kualitas isolator. Semakin tinggi kekuatan dielektrik bahan isolasi, semakin baik kualitasnya. (Pratama & dkk, 2017)

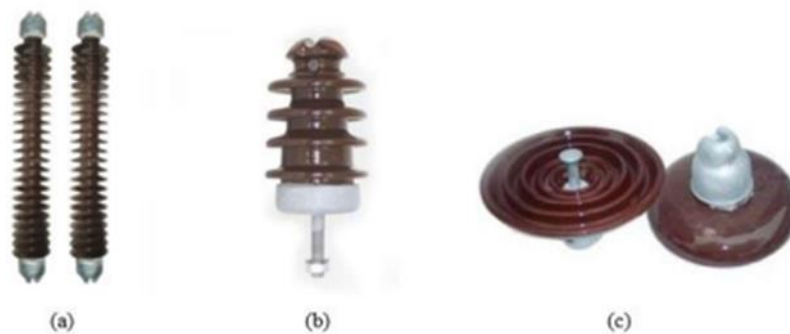
Isolator memiliki kemampuan untuk menahan tegangan disebut dengan kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik dari isolator sangat penting dalam penentuan kualitas isolator. Semakin tinggi kekuatan dielektrik bahan isolasi, semakin baik kualitasnya. Berdasarkan konstruksi bahannya, bahan isolasi dapat digolongkan menjadi:

1. Penyangga/penggantung (*solid support*) yaitu bahan dari isolator yang berbentuk padat. (Contoh: keramik, polimer, kayu).
2. Bahan pengisi (*filling media*) yaitu bahan isolasi yang berbentuk cair atau gas (Contoh: minyak, bitumen, aneka gas dan udara).

3. Bahan penutup (*covering material*) yaitu bahan isolasi yang terletak pada bagian luar, berupa bahan padat atau cair (Contoh: mika, pernis atau enamel).

Bahan isolasi yang baik adalah bahan yang mempunyai resistansi isolasi tinggi, dan kekuatan dielektrik yang baik sehingga sifat hantarannya dapat diminimalkan. Berdasarkan bentuk dan fungsinya, isolator yang digunakan pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik dapat diklasifikasikan dalam tiga macam, yaitu:

1. Isolator Jenis Long Rod
2. Isolator Jenis Pos
3. Isolator Jenis Piring



Gambar 2.10. Isolator Long Rod (a) Isolator Pos (b) Isolator Piring (c)

(Irawan, 2016).

2.5. *Switching*

Switching adalah proses pelepasan beban dari suatu sistem tenaga listrik akibat adanya pembebanan lebih sehingga terjadi operasi pembukaan atau penutupan saklar. Pelepasan beban akan menyebabkan tegangan lebih apabila terjadinya gangguan. Selain oleh proses *switching*, gangguan yang terjadi pada saluran transmisi dan distribusi salah satunya disebabkan oleh sambaran petir yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Sambaran petir yang terjadi pada gardu induk akan menyebabkan kenaikan tegangan lebih yang besar pada peralatan di gardu induk. Tegangan lebih ini dapat merusak isolasi peralatan apabila melewati batas isolasi peralatan (BIL) yang diizinkan, sehingga diperlukan perlindungan peralatan.

Pada kenyataannya dilapangan *switching* ini diaplikasikan pada peralatan listrik yaitu *recloser*. *Recloser* adalah rangkaian listrik yang terdiri pemutus tenaga yang dilengkapi kotak kontrol elektronik (*Electronic Kontrol Box*) *recloser*, yaitu suatu peralatan elektronik sebagai kelengkapan *recloser* dimana peralatan ini tidak berhubungan dengan tegangan menengah dan pada peralatan ini *recloser* dapat dikendalikan cara pelepasannya. Dari dalam kotak kontrol inilah pengaturan (*setting*) *recloser* dapat ditentukan.

Alat pengaman ini bekerja secara otomatis guna mengamankan suatu sistem dari arus lebih yang diakibatkan adanya gangguan hubung singkat. Cara bekerjanya adalah untuk menutup balik dan membuka secara otomatis yang dapat diatur selang waktunya, dimana pada sebuah gangguan temporer, *recloser* tidak membuka tetap (*lock out*), kemudian *recloser* akan menutup kembali setelah gangguan itu hilang. Apabila gangguan bersifat permanen, maka setelah membuka atau menutup balik sebanyak *setting* yang telah ditentukan kemudian *recloser* akan membuka tetap (*lock out*). (Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik In, 2016)

2.5.1. Surja Hubung

Surja hubung dapat diartikan sebagai gejala tegangan lebih transien yang disebabkan oleh proses surja hubung pada sepanjang saluran transmisi yang mempunyai amplitudo lebih besar dari nilai puncak tegangan nominalnya atau dapat dijelaskan yaitu gejala transien yang disebabkan oleh pemasukan energi (*energization*), pemutusan energi (*de-energization*) dan pemutusan disertai pemasukan kembali energi (*re-energization*) dari suatu rangkaian listrik. Salah satu sumber tegangan lebih surja hubung adalah peristiwa pembukaan dan penutupan pemutus tenaga. Proses pensaklaran dilakukan oleh saklar atau circuit breaker berupa operasi penutupan (*closing*), pembukaan (*opening*), dan penutupan kembali (*reclosing*). Operasi-operasi tersebut dikenal dengan istilah operasi *switching*. Kenaikan tegangan yang terjadi karena surja hubung harus diperhatikan jangan sampai menyebabkan kerusakan koordinasi isolasi peralatan pada sistem.

Beberapa kemungkinan penyebab terjadinya surja *switching* pada sistem tenaga:

1. Pengisian saluran transmisi dan kabel.
 - Pengisian saluran yang sisi jauhnya terbuka.
 - Pengisian saluran yang memiliki terminal trafo pada keadaan tak berbeban.
 - Pengisian saluran melalui sisi tegangan rendah trafo.
2. Pengisian kembali saluran.
 - Pengisian saluran transmisi ketika digunakan *recloser* kecepatan tinggi.
3. *Load rejection*. Ini dipengaruhi oleh pembukaan circuit breaker pada ujung saluran yang jauh. Ini dapat juga diikuti pembukaan saluran pada ujung sisi kirim.
4. Proses *switching “on-off”* dari peralatan. Semua operasi *switching* pada elemen jaringan transmisi akan menghasilkan surja, terutama pengoperasian peralatan berikut:
 - *Switching reactor* tegangan tinggi.
 - *Switching* trafo yang dibebani oleh reactor pada belitan tersiernya.
 - *Switching* pada trafo tak berbeban.
 - Pada saat terjadi kegagalan atau pemutusan sistem yang mengalami kegagalan.

Bentuk gelombang surja hubung dapat didefinisikan sebagai tegangan impuls yaitu, tegangan yang naik dalam waktu singkat sekali disusul dengan penurunan yang lambat menuju nol, yang dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$V = V_o (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2.15)$$

Dimana:

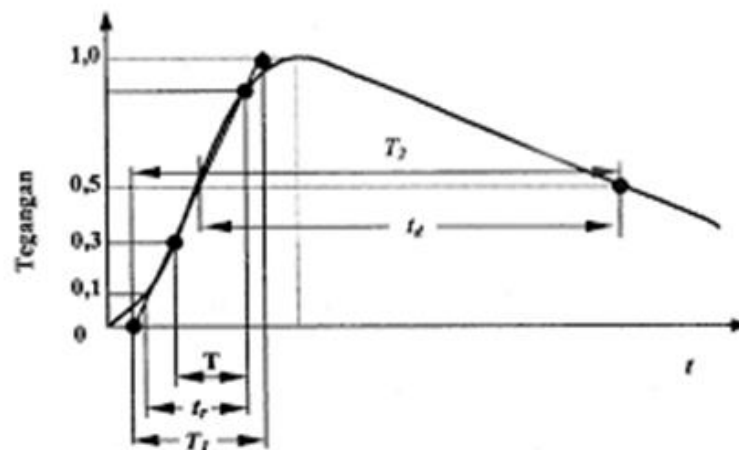
V = tegangan osilasi

V_o = tegangan sistem

a dan b = konstanta yang diperoleh dari rangkaian

Muka gelombang didefinisikan sebagai bagian dari gelombang yang dimulai dari titik nol nominal sampai ke titik puncak, sedangkan sisanya disebut ekor gelombang. Setengah puncak gelombang adalah titik-titik pada muka dan ekor dimana tegangannya adalah setengah puncak (titik 0.5). Waktu sampai puncak setengah puncak dari ekor gelombang didefinisikan sebagai waktu dari titik nol nominal sampai setengah puncak pada ekor. Kecuraman muka gelombang adalah kecepatan naiknya tegangan pada muka gelombang.

Kecuraman muka rata-rata untuk mudahnya dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan puncak dan lamanya muka gelombang. Gelombang penuh adalah gelombang yang tidak terputus karena lompatan api atau tembusan, mempunyai waktu mukagelombang T_{cr} (μs). Gelombang ini dinyatakan dengan huruf: + ($T_{cr} \times T_2$) μs dengan polaritasnya. Besaran waktu standar untuk tegangan impuls surja hubung menurut IEC adalah 250/2500 μs . Dengan $T_{cr} = T_1 = 250 \mu s + 20\%$ dan $T_2 = 2500 \mu s + 60\%$. Bentuk standarisasi gelombang tegangan impuls surja hubung dapat ditunjukkan pada Gambar 2.11.

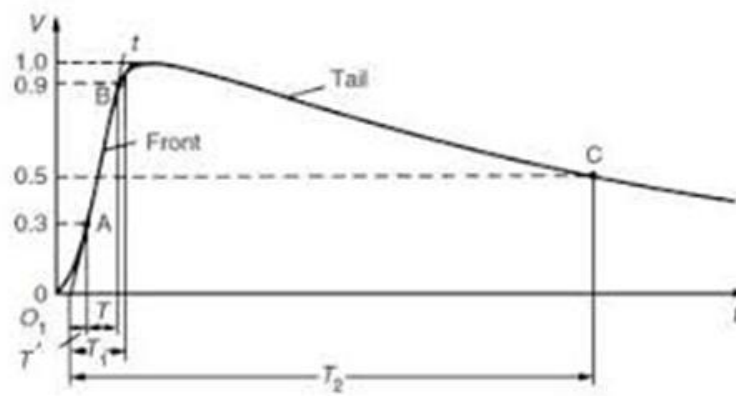


Gambar 2.11. Standar Tegangan Impuls *Switching*

(Anugrah, 2010)

Waktu ke puncak T_{cr} diperoleh dari rentang waktu antara awal impuls dan tercapainya nilai puncak. Osilasi frekuensi tinggi saat pembangkitan tegangan

impuls masih ada akan tetapi hal ini tidak berpengaruh karena konstanta waktu tegangan impuls surja hubung jauh lebih besar dari osilasi ini. Waktu punggong T_2 , adalah waktu antara mulainya tegangan impuls sampai dengan 50% nilai tegangan pada punggong impuls. Toleransi nilai puncak tegangan impuls surja hubung harus tetap 3%. Permasalahan penentuan nilai puncak seperti pada tegangan impuls surja hubung tidak ditemui karena proses osilasi telah hilang saat mencapai nilai puncak. Besaran lain yang biasa melengkapi besaran tegangan impuls kontak adalah waktu puncak (T_d) yang didefinisikan sebagai rentang waktu dimana nilai tegangan lebih besar dari 90%. Besarnya (amplitudo) osilasi frekuensi tinggi (v') pada muka gelombang menurut standar IEC harus kurang dari 5% dari harga puncak disekitar puncak yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Bentuk Tegangan Impuls
(Anugrah, 2010)

Dimana:

- t = Tegangan puncak
- T_2 = Ekor gelombang
- T_1 = Muka gelombang
- Tail = Kelebihan tegangan $\pm 0,05 \times v_s$

Besarnya surja hubung dinyatakan oleh suatu faktor tegangan lebih yang sesuai persamaan:

$$k_{ft} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{E_{maks}}{E} \quad (2.16)$$

Dimana:

k_{ft} = Faktor tegangan lebih fasa ke tanah

E_{maks} = Tegangan maksimum setelah *switching*

E = Tegangan sistem fasa ke fasa sebelum operasi *switching*

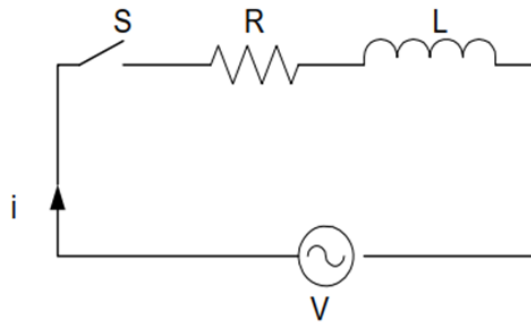
2.6. *Transient*

Transien adalah perwujudan dari perubahan yang mendadak karena terjadi pembukaan dan penutupan saklar atau adanya gangguan pada suatu sistem. Transien berlangsung dalam waktu yang sangat singkat dan magnetudanya sangat berpengaruh terhadap komponen-komponennya yang ada dalam satu sistem. Saat terjadi transien komponen-komponen mengalami tekanan yang sangat besar berupa tegangan dan arus, yang keadaan paling buruk dapat menyebabkan kerusakan peralatan pada sistem dimana transien itu terjadi. (Dewi, 2006)

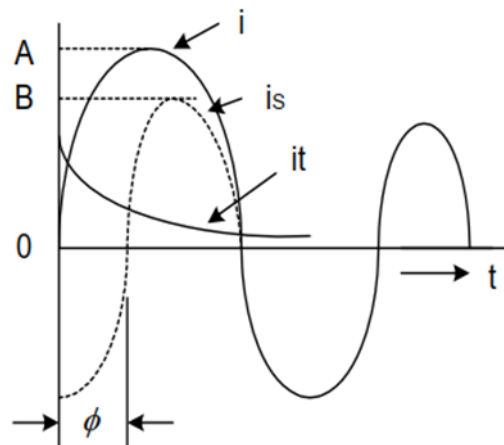
Gejala peralihan atau *transient* merupakan perubahan nilai tegangan atau arus maupun keduanya baik sesaat maupu dalam jangka waktu tertentu (dalam orde mikro detik) dari kondisi tunaknya (*steady state*). Penyebabnya adalah dapat dari lingkungan atau faktor eksternal seperti petir, dan dapat juga akibat perlakuan terhadap sistem itu sendiri atau faktor internal seperti pensaklaran.

Tegangan lebih *transient* yang disebabkan karena sambaran petir disebut surja petir sedang tegangan lebih *transient* yang disebabkan oleh operasi pensaklaran disebut surja hubung. Surja hubung salah satunya disebabkan oleh proses pemberian tenaga (*energized*), yaitu proses mengalir sebuah saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban dengan sumber tegangan, melalui operasi penutupan saklar.

Transien terjadi pada saat penukaran saklar maka akan terjadi perubahan pada arus dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.13. Rangkaian Ekivalen R-L
(Dewi, 2006)



Gambar 2.14. Bentuk Gelombang Arus untuk Rangkaian R-L
(Dewi, 2006)

Dimana:

- i = Arus awal (*Ampere*)
- V = Tegangan (*Volt*)
- R = Tahanan (*ohm*)
- L = Induktansi (*Henry*)
- i_s = Arus keadaan steady state (*Ampere*)
- i_t = Arus transien (*Ampere*)
- t = waktu (*detik*)

Dari Gambar 2.13 dan 2.14 didapatkan persamaan differensial tegangan sebagai berikut:

$$V = L \frac{di}{dt} + iR \quad (2.17)$$

Maka persamaan transiennya adalah:

$$L \frac{di}{dt} + iR = 0 \quad (2.18)$$

Misal: $i_1 = Ae^{pt}$

Dimana:

$$L \frac{d}{dt}(Ae^{pt}) + R \cdot Ae^{pt} = 0$$

$$L A p e^{pt} + R \cdot Ae^{pt} = 0$$

$$L p + R = 0$$

Sehingga:

$$i_t = Ae^{-\frac{R}{L}t} \quad (2.19)$$

Dimana:

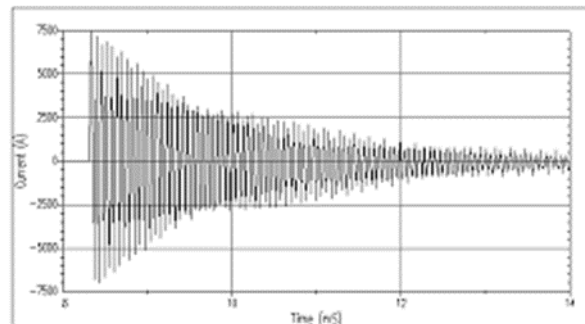
i_t = arus transien (*Ampere*)

A = konstanta

R = tahanan (ohm)

L = induktansi (henry)

Pada gejala feroresonansi dalam kasus ini, terjadi keadaan transien karena proses pensaklaran dengan tipe transien osilasi (*Oscillatory Transient*). Transien osilasi adalah respon lonjakan sesaat dari karakteristik arus atau tegangan tanpa mengubah frekuensi dari kondisi *steady state* dengan bentuk gelombang yang memiliki polaritas bolak-balik (positif atau negatif). Transien osilasi ini dapat terjadi karena adanya gangguan (*fault*) atau karena operasi pensaklaran (*switching*). (Febrianto, 2008)



Gambar 2.15. Transien Osilasi pada Kondisi Pensaklaran
(Suryani, 2016)

2.7. Feroresonansi

Feroresonansi adalah suatu gejala kelistrikan yang muncul setelah terjadi gangguan transien, dimana kondisi nilai dari komponen R dan C konstan tetapi nilai komponen L berubah-ubah sepanjang waktu mengikuti kurva magnetisasi. Kurva magnetisasi pada gangguan feroresonansi bersifat non linier hal ini disebabkan karena bahan feromagnetik pada trafo yang menyebabkan ketidaklinieran pada induktansi yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi.

Penyebab utama dari fenomena ini adalah munculnya lebih dari satu respon *steady state* yang stabil pada parameter jaringan yang sama. Gejala *transient*, *lightning overVoltage*, pengisian tenaga transformator atau beban, kemunculan atau penghilangan gangguan, memungkinkan sebagai penyebab feroresonansi. Responnya dapat berubah secara tiba-tiba dari respon *steady state* normal (sinusoida pada frekuensi yang sama sebagai sumber) ke respon *steady state* feroresonansi yang ditandai dengan level harmonisa dan *overVoltage* yang tinggi, yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik (Ferraci P. , 1998)

2.7.1. Resonansi

Resonansi merupakan sebuah fenomena yang dapat terjadi pada sebuah sistem kelistrikan di semua tingkat tegangan. Hal ini yang mendasari agar dapat memahami fenomena feroresonansi. Pada sebuah rangkaian listrik yang terdapat unsur elemen kapasitor (C) dan induktor (L) dapat terjadi fenomena resonansi

tersebut. Resonansi terbagi menjadi dua tipe yaitu resonansi seri dan resonansi paralel.

Resonansi seri terdapat pada rangkaian listrik dimana kapasitor (C) dan induktornya dihubungkan secara seri sedangkan resonansi paralel terdapat pada rangkaian listrik dimana kapasitor (C) dan induktor (I) dihubungkan secara parallel (Kiramindyo, 2017).

$$X_L = X_C \quad (2.20)$$

Dimana:

X_L = Reaktansi Induktif

X_C = Reaktansi Kapasitif

$$X_L = \omega L \quad (2.21)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2.22)$$

$$\omega = 2 \pi f \quad (2.23)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (2.24)$$

Dimana:

ω = Omega

L = Induktansi

C = Kapasitansi

Maka syarat terjadinya sebuah resonansi seperti persamaan berikut:

$$LC\omega_n^2 = 1 \quad (2.25)$$

Dimana:

L = Induktor (Henry)

C = Kapasitor (Farad)

ω_n = Kecepatan Sudut (Rad/s)

Sehingga apabila resonansi terjadi, maka nilai reaktansi akan menjadi nol, nilai impedansi rangkaian listriknya akan mencapai nilai minimumnya (murni resistif) seperti persamaan:

$$Z = R + jX \quad (2.26)$$

Dimana:

Z = Impedansi

R = Resistansi

X = Reaktansi

Frekuensi resonansi pada rangkaian seri RLC sanggup dihitung dengan menggunakan rumus dibawah ini:

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.27)$$

$$(2\pi f)^2 LC = 1 \quad (2.28)$$

$$(2\pi)^2 f^2 LC = 1 \quad (2.29)$$

$$(2\pi)^2 f^2 = \frac{1}{LC} \quad (2.30)$$

$$f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC} \quad (2.31)$$

$$f = \sqrt{\frac{1}{(2\pi)^2 LC}} \quad (2.32)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.33)$$

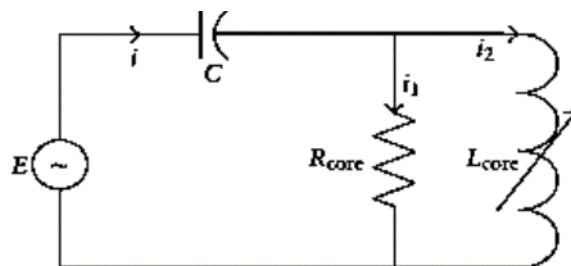
2.7.2. Perbedaan Feroresonansi dan Resonansi

Resonansi *linear* terjadi pada rangkaian seri yang terdiri dari komponen resistor, induktor, dan kapasitor. Sebuah resonansi baru akan terjadi pada satu frekuensi, sesuai dengan frekuensi sumber. Respon dari resonansi adalah tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada satu keadaan *steady-state*. (Sakarung & dkk, 2007)

Persamaan untuk mencari frekuensi resonansi adalah sebagai berikut:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.34)$$

Sedangkan feroresonansi sederhana terdiri dari elemen resistor, kapasitor, dan induktansi nonlinear (material feromagnetik). Elemen tersebut merupakan pemodelan dari sifat kapasitif dan induktif yang diperoleh dari penggunaan peralatan listrik dalam sistem tenaga listrik. Feroresonansi terjadi pada frekuensi tertentu, ketika induktansi non-linier sesuai dengan kapasitansi sistem. Tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada beberapa keadaan *steady-state* (Sakarung & dkk, 2007)



Gambar 2.16. Rangkaian Feroresonansi Sederhana
(Bunyagul, 2016)

Untuk memudahkan dalam memahami feroresonansi pendekatan dengan menggunakan rangkaian resonansi seri. Pada rangkaian resonansi seri penggunaan induktor diganti menjadi induktor nonlinier sebagai pemodelan dari inti trafo sehingga rangkaian berubah dari rangkaian resonansi seri menjadi rangkaian feroresonansi. Fenomena yang terjadi pada rangkaian feroresonansi sama dengan pada rangkaian resonansi seri yang menimbulkan kenaikan arus yang sangat besar dikarenakan impedansi rangkaian yang kecil yang berakibat dari nilai reaktansi

pada kapasitor sama dengan nilai reaktansi pada induktor nonlinier. Ketika arus yang naik menyebabkan rapat fluks yang juga akan naik mencapai titik saturasi dan tidak lagi linear. Saat nilai arus yang naik pada inti trafo yang bersifat feromagnetik melalui titik saturasinya maka induktansi akan berubah sangat cepat sehingga terjadi interaksi antara kapasitor dan inti besi induktor akan menghasilkan tegangan dan arus yang tidak biasa.

Bahan feromagnetik yang terdapat pada inti transformator yang menyebabkan timbulnya ketidaklinieran pada induktansi yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi. Munculnya lebih dari satu respon *steady state* pada parameter jaringan yang sama menjadi penyebab utama dari feroresonansi. Respon yang berubah cepat dari suatu respon *steady state* normal menjadi respon *steady state* feroresonansi yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik (Kiramindyo, 2017)

2.7.3. Munculnya Gejala Feroresonansi

Beberapa gejala yang timbul yang menunjukkan kehadiran feroresonansi pada sistem tenaga listrik antara lain:

1. Penyimpangan yang besar untuk nilai tegangan lebih dan arus lebih.
2. Pemanasan berlebih dan suara bising pada transformator.
3. Munculnya frekuensi-frekuensi harmonisa.

Gejala-gejala pada sistem tenaga listrik tersebut bisa berakibat dari pengisian daya trafo, lightning *overVoltage*, *switching*, gangguan transien lainnya dapat memicu fenomena feroresonansi.

Feroresonansi yang terjadi pada sistem kelistrikan umumnya muncul akibat dari sistem yang tidak seimbang. Misalnya pada *switching* yang menyebabkan sebuah komponen kapasitif terhubung seri dengan impedansi magnetisasi transformator. Kondisi ini menyebabkan tegangan lebih yang berpengaruh besar terjadinya gangguan pada transformator, kabel, maupun arrester. *OverVoltage* yang muncul pada rangkaian pemodelan disebabkan oleh adanya hubungan rangkaian feroresonansi paralel pada *grading capacitance* dengan induktansi nonlinier

sedangkan *switching* yang terjadi merupakan gejala *abnormal switching* dimana dapat disebabkan oleh hal-hal berikut ini:

1. Kesalahan pada operator dimana saat *switching* menarik sebuah siku konektor secara manual.
2. Pengoperasian fuse ketika ada gangguan, yang menyebabkan switch terbuka.
3. *Switching* kabel manual untuk rekonfigurasi sebuah rangkaian kabel pada saat kondisi darurat.

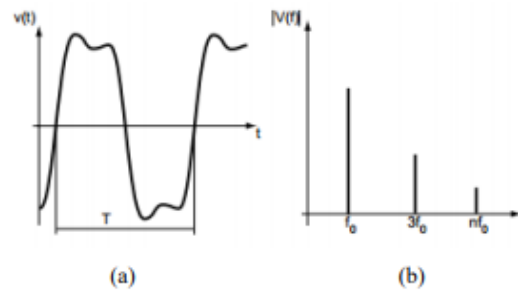
Pada saat terjadi gangguan feroresonansi, rangkaian feroresonansi sama dengan pada rangkaian resonansi seri yang menimbulkan kenaikan arus yang sangat besar dikarenakan impedansi rangkaian yang kecil yang berakibat dari nilai reaktansi pada kapasitor sama dengan nilai reaktansi pada induktor nonlinier. Ketika arus yang naik menyebabkan rapat fluks yang juga akan naik mencapai titik saturasi dan tidak lagi linear. Saat nilai arus yang naik pada inti trafo yang bersifat feromagnetik melalui titik saturasinya maka induktansi akan berubah sangat cepat sehingga terjadi interaksi antara kapasitor dan inti besi induktor akan menghasilkan tegangan dan arus yang tidak biasa. Bahan feromagnetik yang terdapat pada inti transformator yang menyebabkan timbulnya ketidaklinieran pada induktansi yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi. Munculnya lebih dari satu respon *steady state* pada parameter jaringan yang sama menjadi penyebab utama dari feroresonansi. Respon yang berubah cepat dari suatu respon *steady state* normal menjadi respon *steady state* feroresonansi yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik.

2.7.4. Karakteristik Feroresonansi

Hasil dari simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi akan menunjukkan karakteristik dari feroresonansi (Price, 2013) Terdapat empat karakteristik dari feroresonansi. Berikut adalah karakteristik dari fenomena feroresonansi:

a. *Fundamental Ferroresonance*

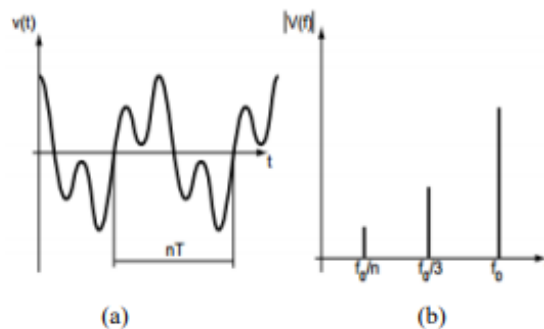
Respon tegangan dan arus dari karakteristik ini memiliki nilai periodik yang sama dengan nilai sistem. Spektrum sinyal terdiri atas frekuensi fundamental sistem sebagai respon yang dominan dan diikuti oleh harmonisa ke- 3, 5, 7, dan harmonisa ganjil.



Gambar 2.17. *Fundamental Ferroresonance* (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal
(Price, 2013)

b. *Subharmonic Ferroresonance*

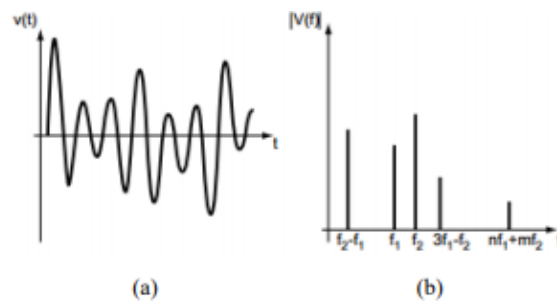
Sinyal feroresonansi tipe ini memiliki periode kelipatan nT dari periode sumbernya. Fundamental mode dari suatu feroresonansi biasanya dituliskan dengan feroresonansi periode-1 ($f_0/1$ Hz) dan feroresonansi dengan periode sub-kelipatan dari frekuensi sistem disebut feroresonansi periode- n (f_0/n Hz).



Gambar 2.18. *Subharmonic Ferroresonance* (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal
(Price, 2013)

c. *Quasi-Periodic Ferroresonance*

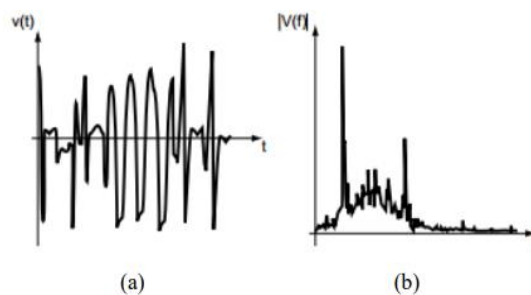
Sinyal ferroresonansi jenis ini tidak periodik. Spektrum sinyalnya merupakan diskontinyu, didefinisikan sebagai nf_1+mf_2 (n dan m adalah integer dan f_1/f_2 merupakan nilai real irasional)



Gambar 2.19. *Quasi-Periodic Ferroresonance* (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal
(Price, 2013)

d. *Chaotic Ferroresonance*

Ferroresonansi jenis ini memiliki spektrum sinyal non-periodik dan kontinyu. Sinyal ini tidak dapat diinterupsi oleh frekuensi apapun dan berbentuk tidak teratur (chaos).



Gambar 2.20. *Chaotic Ferroresonance* (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal
(Price, 2013)

Berdasarkan Gambar 2.17, 2.18, 2.19, dan 2.20 bentuk gelombang yang muncul pada saat terjadi ferroresonansi berbeda-beda sesuai dengan karakteristik dari setiap respon ferroresonansi. Pada penelitian kali ini penulis mencoba menjelaskan tentang bentuk gelombang sinusoida dengan parameter tegangan dan

arus, karena penelitian berfokus pada kenaikan tegangan dan arus dilihat dari kurva gelombang yang muncul.

2.7.5. Tegangan Sinusoida

Tegangan yang disalurkan oleh PLN kepada pelanggan pada dasarnya berbentuk gelombang sinusoida, yang akan berubah pada perioda yang tetap. Gelombang sinusoida bisa berbentuk gelombang fungsi sinus atau gelombang fungsi kosinus. Kedua gelombang tersebut pada dasarnya identik, hanya saja memiliki perbedaan sudut sebesar 90° . Untuk model tegangan sinusoida secara matematis adalah sebagai berikut:

$$V(t) = V_{max}\sin(\omega t + q) \quad (2.35)$$

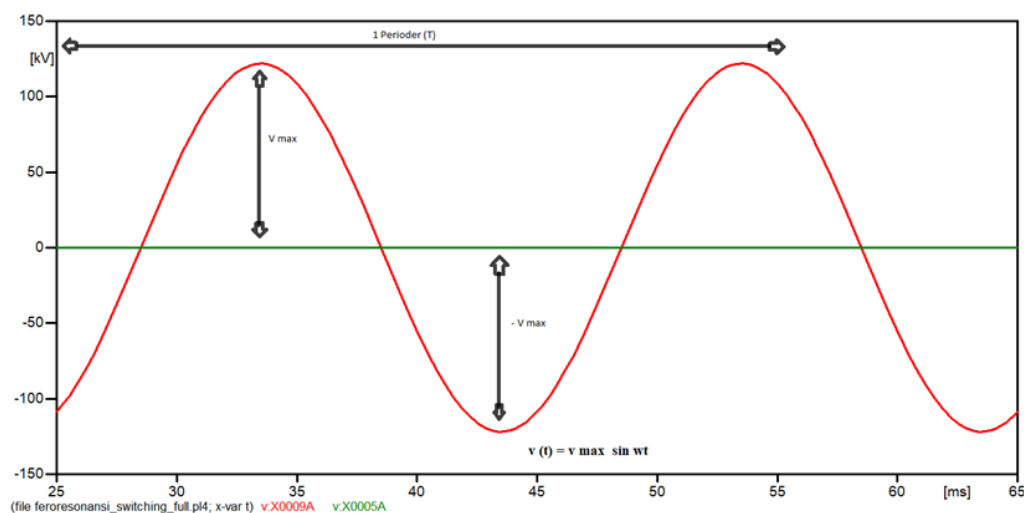
Dimana:

V_{max} = Amplitude maksimum dari tegangan.

ω = Kecepatan sudut dalam radian per detik (rad/s).

ω = Argument dari gelombang sinusoida

q = Sudut fasa



Gambar 2.21. Bentuk Gelombang Sinusoida Fungsi Sinus

Berdasar gambar 2.21 Sumbu X merupakan variable derajat atau waktu, sedangkan sumbu Y mewakili amplitude dari tegangan sinusoida. terdapat beberapa parameter yang harus anda pahami:

1. Tegangan Maksimum $[(V)]_{max}$

V_{max} adalah tegangan puncak pada saat gelombang sinusoida pada posisi positif dan juga untuk $-V_{max}$ adalah tegangan puncak pada saat gelombang sinusoida pada posisi negative. Tegangan maksimum atau tegangan puncak sangat berpengaruh dalam menentukan besarnya tegangan efektif dari sumber tegangan bolak-balik. Semakin besar amplitude tegangan, maka tegangan efektifnya akan semakin tinggi.

2. Tegangan Efektif $[(V)]_{rms}$

Istilah tegangan efektif atau tegangan RMS muncul karena tegangan dan arus rata-rata tidak banyak membantu dalam perhitungan daya dan energy tegangan bolak-balik AC. Seperti dibahas pada materi sebelumnya tentang menghitung nilai rata-rata, ternyata nilai rata-rata fungsi sinusoida adalah nol. Hal ini tentu saja tidak banyak membantu kita dalam menghitung besarnya daya yang digunakan pada kurun waktu tertentu. Untuk membantu memecahkan masalah tersebut, maka diperkenalkan istilah tegangan efektif atau tegangan RMS.

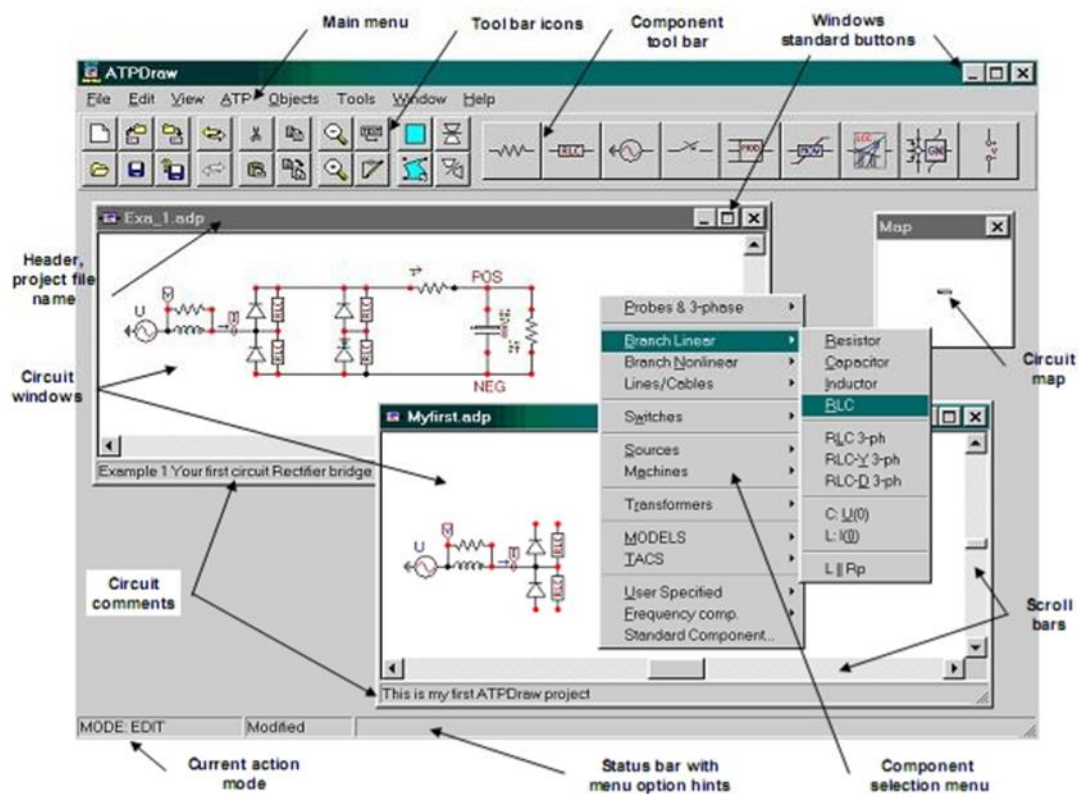
2.8. ATPDraw

Penelitian ini dilakukan dengan perhitungan untuk menghitung nilai variabel yang akan dimasukkan pada simulasi dan selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan *software Alternative Transient Program (ATP)*, ATP merupakan sistem program universal yang digunakan untuk simulasi digital terhadap gejala fenomena transien serta sifat elektromekanis dalam sistem tenaga elektrik.

Dengan program digital ini, jaringan yang kompleks dan sistem kontrol dapat disimulasikan. *Software ATP* dipilih untuk penelitian ini karena ATP memiliki fitur-fitur yang lengkap untuk simulasi tegangan lebih transien, namun dengan sistem operasi user yang tidak terlalu kompleks dan data yang dimasukkan

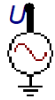
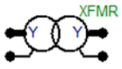
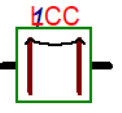


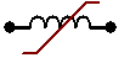
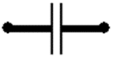

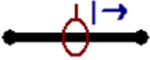
dalam program simulasi dapat menggunakan data yang real sehingga hasil yang didapat akan lebih mendekati keadaan yang sebenarnya.

ATP memiliki kemampuan pemodelan yang luas dan fitur penting tambahan selain perhitungan transien. ATP memprediksi variabel kepentingan dalam jaringan tenaga listrik sebagai fungsi waktu, biasanya dimulai oleh beberapa gangguan. ATP memiliki banyak model termasuk motorm transformator, surja arrester, saluran transmisi dan kabel. Serta digunakan secara luas untuk studi analisa *switching* dan surja petir, koordinasi isolasi, harmonisa dan keandalan sistem tenaga listrik, dsb. (Rohman, 2010)



Gambar 2.22. Tampilan Layar pada Aplikasi ATPDraw

Tabel 2.3. Komponen pada ATPDraw beserta Identitasnya

| No | Gambar Komponen | Nama Komponen | Keterangan |
|----|---|----------------|---|
| 1 |  | AC3PH | Sumber 3 fase |
| 2 |  | Transformator | Model transformator dengan implementasi inti yang benar secara topologi. Kebocoran induktansi similat ke BCTRAN, opsional opsional berliku resistansi, kapasitansi, dan model inti berdasarkan persamaan Frolich yang diperluas. Termasuk pas untuk menguji data laporan. |
| 3 |  | LCC | Sebagai parameter untuk memilih jumlah kabel pada saluran transmisi. Serta menampilkan jalur antar tower ke tower sesuai jarak yang diinginkan. |
| 4 |  | SWIT_3XT | Sebagai parameter sakelar yang bias di atur terhadap waktu pada saat terbuka atau tertutup |
| 5 |  | RLC_3 3-fase | Sebagai parameter nilai resistansi 3 fase pada saluran transmisi. |
| 6 |  | NLININD | Sebagai parameter induktansi nonlinier pada saluran transmisi. |
| 7 |  | RLC_3 3-fase | Sebagai parameter nilai kapasitansi 3 fase pada saluran transmisi. |
| 8 |  | Probe tegangan | Probe adalah komponen untuk output tegangan, arus cabang, nilai TACS dan variabel MODEL global, dan ditangani secara berbeda dari komponen lain yang Anda buka |
| 9 |  | Probe arus | Probe adalah komponen untuk output tegangan, arus cabang, nilai TACS dan variabel MODEL global, dan ditangani secara berbeda dari komponen lain yang Anda buka |