

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian ini berdasar pada beberapa kajian sebelumnya yang berkaitan dengan pembangkitan tegangan tinggi berbasis transformator flyback, rangkaian Zero Voltage Switching, dan variasi parameter belita, penulis menemukan beberapa referensi kemiripan dengan judul Tugas Akhir sebagai berikut:

1. Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan Pembangkitan Tegangan Tinggi DC Menggunakan Transformator Flyback”[6] yang disusun oleh Yogi Hendra Saragi dari Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang sistem pembangkit tegangan tinggi berbasis transformator flyback untuk menghasilkan tegangan DC tinggi secara efisien. Pada perancangannya digunakan rangkaian flyback converter dengan pengendalian switching serta transformator tegangan tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan tegangan hingga beberapa kilovolt dengan kestabilan yang cukup baik, serta menunjukkan bahwa rasio lilitan transformator sangat berpengaruh terhadap besarnya tegangan keluaran yang dihasilkan.
2. Tugas akhir yang berjudul “Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Menggunakan Flyback Converter Berbasis ZVS”[5] yang disusun oleh Irpan Logitra Purba dari Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang sistem pembangkit tegangan tinggi dengan memanfaatkan metode Zero Voltage Switching (ZVS) untuk meningkatkan efisiensi sistem. Pada perancangannya digunakan rangkaian ZVS driver yang dihubungkan dengan transformator flyback untuk menghasilkan tegangan tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan metode ZVS mampu mengurangi rugi switching serta meningkatkan efisiensi sistem dibandingkan metode switching konvensional, serta menghasilkan tegangan output yang lebih stabil

3. Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh Frekuensi Switching Terhadap Tegangan Keluaran Konverter Flyback Tegangan Tinggi”[8] yang disusun oleh Wibowo dari Universitas Andalas. Tujuan dari penelitian ini Adalah menganalisis pengaruh perubahan frekuensi switching driver terhadap karakteristik tegangan keluaran pada converter flyback tegangan tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa frekuensi switching berpengaruh signifikan terhadap nilai tegangan keluaran, di mana peningkatan frekuensi cenderung menurunkan tegangan keluaran akibat berkurangnya waktu penyimpanan energi pada inti ferit.

2.2 Teori Dasar

Pada sub bab ini akan diuraikan teori dasar yang berkaitan dengan Tugas Akhir. Uraian tersebut digunakan sebagai referensi dan dasar pemahaman dalam proses perancangan serta pembuatan alat yang dikembangkan.

2.2.1 Pembangkit Tegangan Tinggi

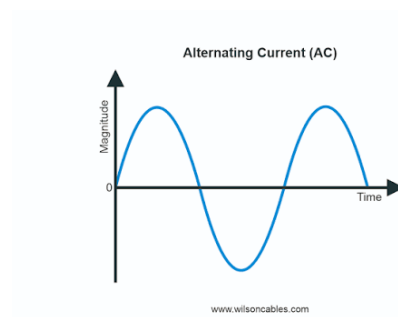
Pembangkit tegangan tinggi adalah suatu perangkat atau sistem yang digunakan untuk menghasilkan tegangan listrik dengan nilai jauh di atas tegangan standar yang digunakan dalam sistem tenaga listrik pada umumnya. Dalam dunia kelistrikan, suatu tegangan dapat dikategorikan sebagai tegangan tinggi apabila nilainya melebihi 1.000 V pada tegangan AC maupun DC. Namun di setiap negara, pengelompokan tegangan tinggi dapat sedikit berbeda tergantung pada kemajuan sistem tenaga listriknya [8]. Secara umum, tegangan tinggi dibagi menjadi beberapa golongan sebagai berikut:

1. Tegangan Tinggi (*High Voltage*), dengan nilai tegangan 1 kV sampai 35 kV.
2. Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*), dengan nilai tegangan 35 kV sampai 245 kV.
3. Tegangan Ultra Tinggi (*Ultra High Voltage*), dengan nilai tegangan di atas 245 kV.

2.2.1.1 Pembangkit Tegangan Tinggi AC (*alternating current*)

Pembangkitan tegangan tinggi AC umumnya dilakukan menggunakan transformator, khususnya transformator uji. Transformator jenis ini dirancang untuk menghasilkan tegangan tinggi dengan rating tegangan yang besar, meskipun

memiliki kapasitas daya (kVA) yang relatif rendah. Pada umumnya, transformator uji yang digunakan merupakan transformator satu fasa karena proses pengujian tegangan tinggi dilakukan pada setiap fasa secara terpisah. Selain itu, sistem isolasi pada transformator uji dirancang berdasarkan tegangan uji maksimum yang akan diterapkan, sehingga konstruksi lilitan beserta material isolasinya harus mampu menghasilkan distribusi gradien tegangan (dv/dt) yang seragam guna menjaga keandalan dan keamanan selama proses pengujian[8]. Bentuk gelombang AC ditunjukkan pada gambar 2.1.

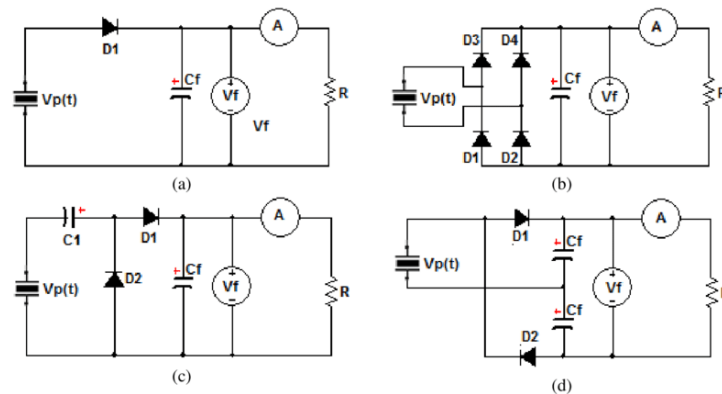


Gambar 2. 1 Gelombang AC[23]

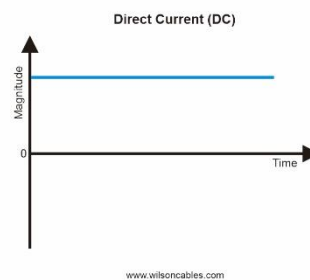
2.2.1.2 Pembangkit Tegangan Tinggi DC (*direct current*)

Tegangan tinggi DC merupakan tegangan listrik yang memiliki besar dan polaritas tetap terhadap waktu. Tegangan jenis ini banyak dimanfaatkan pada sistem tenaga listrik, peralatan gardu induk, serta berbagai kebutuhan pengujian tegangan tinggi. Dalam penerapannya, sumber tegangan DC diharuskan memiliki Tingkat kestabilan dan keandalan yang tinggi karena berfungsi sebagai catu daya bagi sistem control dan peralatan bertegangan tinggi. Umumnya, tegangan tinggi DC tidak dihasilkan secara langsung dari jaringan listrik, tetapi diperoleh melalui proses konversi tegangan AC menggunakan transformator, rangkaian penyearah, dan filter untuk menghasilkan keluaran yang lebih stabil. Untuk mencapai level tegangan yang lebih besar, digunakan converter atau rangkaian pengali tegangan yang bekerja secara bertahap. Dengan demikian, kualitas tegangan tinggi DC yang dihasilkan sangat bergantung pada kinerja rangkaian konversi, stabilitas sumber daya, dan mutu komponen yang digunakan sehingga dapat menghasilkan tegangan yang

sesuai kebutuhan serta andal dalam pengoperasiannya.[9], Berikut rangkaian DC dan bentuk Gelombang DC ditunjukkan pada gambar 2.2 dan 2.3.



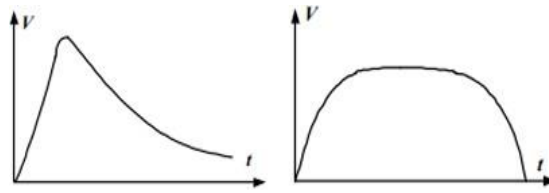
Gambar 2. 2 (a) Half-wave rectifier (b) Full-wave bridge rectifier, (c) Greinacher Voltage Doubler and (d) Delon Voltage Doubler.[24]



Gambar 2. 3 Gelombang DC[23]

2.2.1.3 Pembangkit Tegangan Tinggi Implus

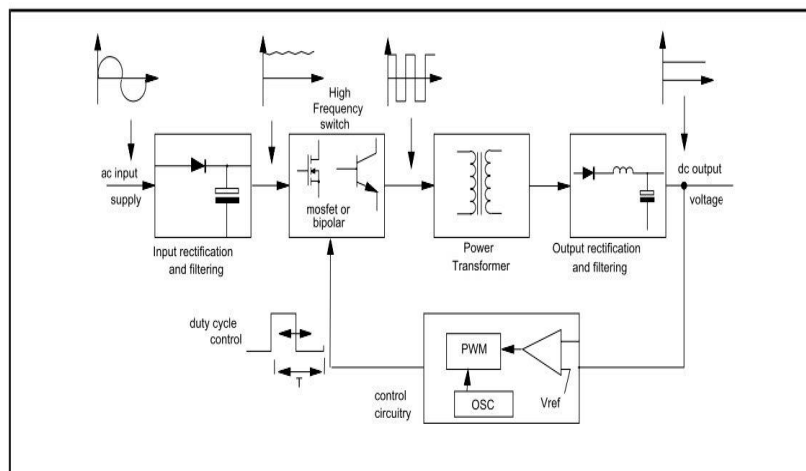
Tegangan tinggi impuls adalah tegangan tinggi yang berbentuk pulsa unipolar dengan waktu naik (*rise time*) yang sangat singkat dan waktu turun (*tail time*) yang lebih panjang, diikuti dengan penurunan tegangan kembali ke nol. Tegangan tinggi impuls digunakan untuk mensimulasikan kondisi tegangan lebih yang terjadi secara alami, seperti sambaran petir (*lightning impulse*) maupun tegangan lebih akibat operasi pembukaan/penutupan sakelar (*switching impulse*) pada sistem tenaga listrik [4]. Berikut bentuk gelombang dari tegangan impuls yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Gelombang (a) implus petir, (b) impuls hubung buka[25]

2.2.2 Switch Mode Power Supply (SMPS)

SMPS merupakan catu daya elektronik yang menggunakan *switching* (saklar elektronik) guna mengatr tegangan. Sistem ini berkerja dengan cara menyearahkan (*rectify*) dan menyaring (*filter*) input tegangan AC menjadi tegangan DC. Tegangan DC tersebut kemudian diswitch ON-OFF pada frekuensi tinggi menggunakan rangkaian *switching*, sehingga menghasilkan arus AC frekuensi tinggi yang dapat dilewatkan melalui transformator[10]. Secara sistem kerja, SMPS memiliki diagram blok yang ditunjukkan pada gamabar 2.5.



Gambar 2. 5 Diagram blok rangkain SMPS[26]

Pada gambar tersebut menunjukan bahwa SMPS ini memiliki bagian-bagian dasar yaitu[11]:

1. Bagian Penyearah

Bagian ini berfungsi mengubah tegangan masukan AC yang berbentuk gelombang sinusoidal menjadi tegangan DC dengan menggunakan rangkaian diode bridge sebagai penyearah. Selanjutnya, *elco* digunakan

sebagai filter untuk mengurangi sisa riak (*ripple*) tegangan yang masih muncul setelah proses penyearahan.

2. Bagian Pencacah

Bagian pencacah merupakan rangkaian *power switching* yang berfungsi untuk mencacah tegangan DC melalui proses pensaklaran (*switching*) ON dan OFF, sehingga menghasilkan pulsa-pulsa tegangan DC dengan frekuensi tinggi.

3. SMPS Controller Driver

Controller driver berfungsi sebagai pembangkit sinyal PWM yang dilengkapi dengan rangkaian osilator untuk menghasilkan pulsa-pulsa pensaklaran.

4. Trafo Switching

Trafo *switching* berfungsi guna mengatur output dari tegangan DC yang telah dicacah.

5. Penyearah dan Filtering

Bagian penyearah dan *filtering* berfungsi untuk menyearahkan kembali tegangan keluaran dari transformator *switching* yang masih berbentuk pulsa-pulsa berfrekuensi tinggi menjadi tegangan DC yang lebih stabil.

6. Loop Umpan Balik

Rangkaian *loop* umpan balik berfungsi untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran dengan mengirimkan sinyal umpan balik dari sisi keluaran ke sisi primer, sekaligus digunakan sebagai sinyal pengendali PWM.

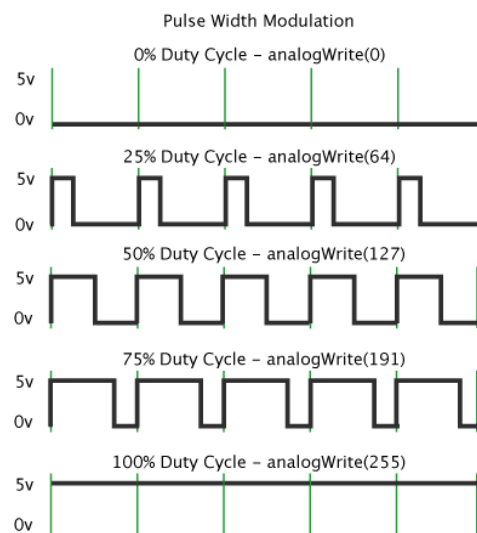
7. Rangkaian Komparator

Rangkaian komparator berfungsi untuk mendeteksi perubahan tegangan keluaran dengan membandingkan nilai tegangan tersebut terhadap tegangan referensi, yang umumnya berasal dari dioda Zener sebesar 6,8 V.

2.2.3 Power Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan suatu metode untuk mengatur lebar pulsa dalam satu periode sehingga diperoleh nilai tegangan rata-rata yang diinginkan. Teknik ini dilakukan dengan memanipulasi durasi pulsa tanpa mengubah amplitudo sinyal, sehingga besar tegangan atau daya yang diberikan ke

beban dapat dikendalikan secara efektif. PWM banyak diterapkan pada berbagai bidang, seperti modulasi data pada sistem telekomunikasi, pengendalian daya atau tegangan pada beban, regulator tegangan, penguat dan efek audio, serta berbagai aplikasi elektronika lainnya. Dalam sistem berbasis mikrokontroler, PWM umumnya digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor DC, mengatur posisi motor servo, serta mengontrol tingkat kecerahan LED. Oleh karena itu, pemahaman mengenai konsep dasar PWM sangat diperlukan agar sistem kendali dapat bekerja secara optimal[12]. Berikut gambar bentuk gelombang PWM ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Gelombang *duty cycle* PWM[27]

Berdasarkan pengaturan frekuensi dan *duty cycle*-nya, maka dapat diketahui lebar pulsa (*pulse width*) dan besar tegangan keluaran dari sinyal PWM dengan rumus persamaan di bawah ini[13]:

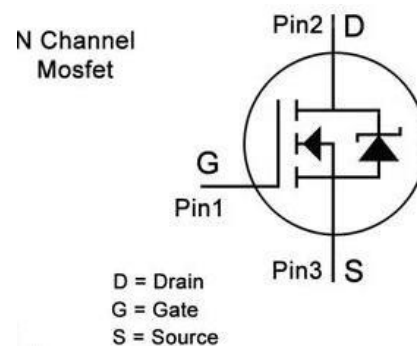
Untuk menghitung tegangan keluaran:

$$V_{\text{out}} = \text{Duty cycle} \times V_{\text{in}}$$

2.2.4 Modul Dual MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) merupakan salah satu jenis *Field-Effect Transistor* yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi elektronika. MOSFET dibuat melalui proses oksidasi silikon yang terkontrol sehingga memiliki kinerja yang andal serta perkembangan teknologi

yang semakin maju. Komponen ini banyak dimanfaatkan sebagai saklar (*switch*) maupun penguat (*amplifier*) pada rangkaian elektronika karena memiliki kecepatan pensaklaran yang tinggi dan efisiensi yang baik. Secara umum, MOSFET dibedakan menjadi dua jenis, yaitu N-Channel MOSFET (NMOS) dan P-Channel MOSFET (PMOS). Kedua jenis MOSFET tersebut memiliki karakteristik dan fungsi yang berbeda, namun sama-sama berperan penting serta memberikan fleksibilitas yang tinggi dalam perancangan berbagai rangkaian elektronika[14]. Berikut gambar konfigurasi pin MOSFET ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Konfigurasi pin MOSFET[28]

Pada MOSFET tipe N-channel, arus listrik akan mengalir dari terminal Drain menuju Source ketika pada terminal Gate–Source (V_{GS}) diberikan tegangan bias yang melebihi tegangan ambang (*threshold voltage*, V_{TH}). Besarnya tegangan bias tersebut menentukan kondisi operasi MOSFET, sehingga komponen ini dapat berfungsi sebagai saklar maupun pengendali aliran arus.

1. Kondisi MOSFET Pada daerah Saturasi

MOSFET berada pada daerah saturasi apabila tegangan Gate–Source (V_{GS}) lebih besar daripada tegangan ambang V_{TH} . Pada kondisi ini terbentuk kanal konduksi antara terminal Drain dan Source dengan nilai resistansi yang rendah, sehingga arus listrik dapat mengalir melalui kedua terminal tersebut.

2. Kondisi MOSFET Pada daerah *Cut-Off*

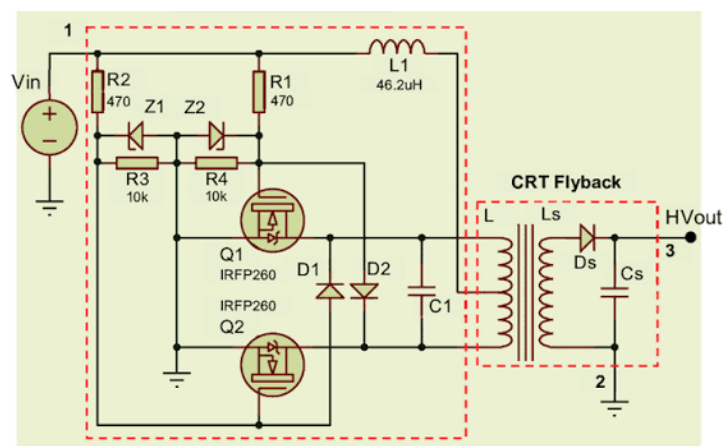
MOSFET berada pada daerah *cut-off* apabila tegangan Gate–Source (V_{GS}) lebih kecil daripada tegangan ambang V_{TH} . Dalam kondisi ini, kanal konduksi tidak terbentuk sehingga resistansi antara terminal Drain dan

Source menjadi sangat tinggi. Akibatnya, arus listrik tidak dapat mengalir melalui MOSFET sehingga komponen berada dalam keadaan tidak aktif [15].

2.2.5 Zero Voltage Switching (ZVS)

Zero Voltage Switching merupakan teknik pensaklaran daya yang termasuk ke dalam metode *soft switching*, yang bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi daya selama proses pensaklaran transistor daya, seperti MOSFET dan IGBT. Pada metode *hard switching*, proses pensaklaran berlangsung ketika tegangan atau arus pada saklar masih berada pada nilai yang tinggi sehingga menyebabkan rugi-rugi switching dan disipasi panas yang besar. Sebaliknya, pada metode ZVS, proses pensaklaran dilakukan saat tegangan pada saklar mendekati nol, sehingga rugi-rugi daya dan peningkatan temperatur komponen dapat dikurangi secara signifikan [16].

ZVS bekerja dengan memastikan bahwa proses penyalaan (turn-on) saklar terjadi ketika tegangan pada saklar berada pada kondisi mendekati nol. Dengan kondisi tersebut, energi yang umumnya hilang selama proses pensaklaran akibat masih adanya tegangan dapat diminimalkan. Oleh karena itu, penerapan metode ZVS mampu meningkatkan efisiensi sistem sekaligus mengurangi emisi interferensi elektromagnetik. berikut gambar rangkaian dari ZVS ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Diagram blok rangkaian ZVS[29]

2.2.6 Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk memindahkan sekaligus mengubah energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya melalui kopling magnet berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, tanpa mengubah frekuensi sumber listrik. Pada dasarnya, transformator tersusun atas sebuah inti yang terbuat dari lembaran-lembaran besi berlapis serta dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kedua kumparan tersebut umumnya dibuat dari kawat tembaga yang dililitkan pada bagian kaki inti transformator[17]. Berdasarkan konstruksinya, transformator dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu:

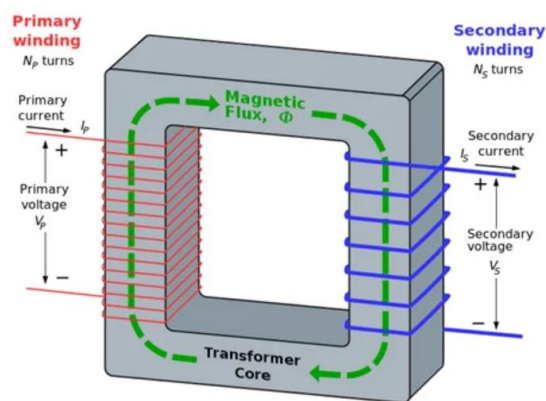
2.2.6.1 Transformator Daya

Transformator daya merupakan salah satu peralatan listrik yang digunakan untuk memindahkan daya listrik dari suatu rangkaian ke rangkaian lainnya dengan tingkat tegangan yang berbeda. Proses pemindahan daya tersebut berlangsung melalui prinsip induksi elektromagnetik antara belitan primer dan belitan sekunder. Transformator daya umumnya memiliki ukuran dan kapasitas yang lebih besar dibandingkan transformator pada umumnya karena digunakan untuk menyalurkan daya dalam jumlah besar pada sistem tenaga listrik. Selain itu, transformator daya memiliki sistem isolasi yang dirancang dengan kemampuan tinggi untuk menjaga keamanan dan keandalan saat beroperasi pada tegangan yang tinggi. Dalam sistem tenaga listrik, transformator daya berperan penting dalam proses penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit menuju gardu induk maupun bagian sistem tenaga lainnya. Berdasarkan perubahan tingkat tegangannya, transformator daya dapat dibedakan menjadi transformator *step-up* dan transformator *step-down*.

Transformator *step-up* digunakan untuk meningkatkan tegangan dari tingkat yang lebih rendah menjadi tingkat yang lebih tinggi, sedangkan transformator *step-down* berfungsi menurunkan tegangan dari tingkat yang lebih tinggi menjadi tingkat yang lebih rendah. Pada sisi pembangkit, transformator daya umumnya digunakan sebagai *step-up* untuk menaikkan tegangan sebelum energi listrik disalurkan melalui jaringan transmisi. Peningkatan tegangan tersebut bertujuan untuk mengurangi besar arus yang mengalir pada saluran transmisi. Setelah sampai pada gardu induk atau lokasi yang membutuhkan tegangan lebih rendah, transformator

step-down digunakan untuk menyesuaikan tingkat tegangan dengan kebutuhan sistem. Selain kedua jenis tersebut, terdapat pula transformator isolasi yang digunakan untuk memisahkan sisi primer dan sekunder secara elektris tanpa mengubah tingkat tegangannya secara signifikan.

Prinsip kerja transformator daya diawali dengan pemberian tegangan bolak-balik pada belitan primer. Tegangan tersebut menghasilkan arus yang kemudian membentuk fluks magnet bolak-balik pada inti transformator. Fluks magnet yang terbentuk akan menghubungkan belitan primer dengan belitan sekunder sehingga menimbulkan gaya gerak listrik atau tegangan induksi pada belitan sekunder. Besarnya tegangan yang dihasilkan dipengaruhi oleh perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sisi sekunder. Pada proses transmisi tenaga listrik jarak jauh, tegangan dinaikkan terlebih dahulu untuk memperoleh arus yang lebih kecil pada daya yang sama. Dengan arus yang lebih kecil, rugi-rugi daya pada penghantar akibat resistansi dapat dikurangi sehingga proses penyaluran energi menjadi lebih efisien. Selanjutnya, tegangan tersebut diturunkan kembali menggunakan transformator pada gardu induk agar sesuai dengan tingkat tegangan yang dibutuhkan oleh sistem distribusi dan beban[18]. Berikut merupakan gambar dari prinsip kerja yang ditunjukkan pada gambar 2.9.



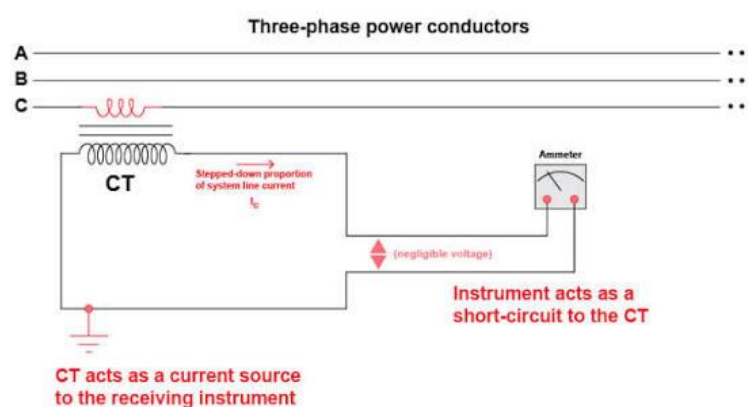
Gambar 2. 9 Prinsip kerja transformator[30]

2.2.6.2 Transformator Instrumen

Transformator instrumen merupakan jenis transformator yang dirancang untuk menurunkan besaran tegangan maupun arus bolak-balik (AC) yang bernilai tinggi menjadi besaran yang lebih rendah dan aman, sehingga dapat digunakan untuk proses pengukuran, pengendalian, maupun proteksi pada sistem tenaga Listrik[19]. Adapun jenis transformator instrument dibagi menjadi dua yaitu:

1. Transformator Arus (Current Transformer)

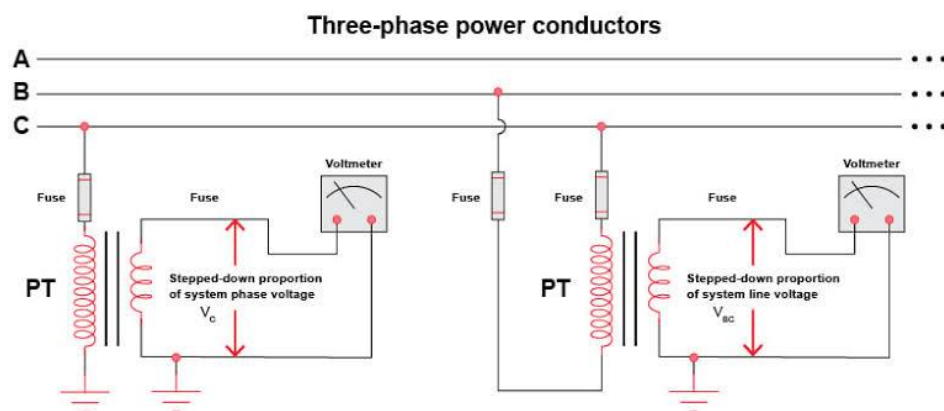
Trafo arus (Current Transformer/CT) merupakan transformator yang digunakan untuk menurunkan arus bolak-balik (AC) yang bernilai besar, mulai dari puluhan hingga ribuan ampere pada sisi primer, menjadi arus standar yang lebih kecil, umumnya sebesar 1 A atau 5 A pada sisi sekunder. Arus pada sisi sekunder tersebut kemudian digunakan sebagai masukan bagi berbagai instrumen pengukuran maupun sistem proteksi. Melalui perbandingan rasio lilitan antara sisi primer dan sekunder, nilai arus yang sebenarnya pada sistem dapat dihitung dengan akurat. Oleh karena itu, trafo arus banyak dimanfaatkan dalam sistem tenaga listrik untuk keperluan pengukuran, pemantauan, dan perlindungan peralatan terhadap kondisi gangguan seperti arus lebih maupun hubung singkat. Berikut merupakan gambar dari prinsip kerja *current transformer* ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Prinsip kerja *current transformer*[19]

2. Transformator Potensial (*Potential Transformer*)

Trafo potensial merupakan transformator yang digunakan untuk menurunkan tegangan bolak-balik (AC) yang bernilai tinggi, mulai dari ribuan hingga puluhan ribu volt, menjadi tegangan yang lebih rendah pada sisi sekunder, biasanya hanya puluhan atau ratusan volt. Penurunan tegangan ini bertujuan agar proses pengukuran dan sistem proteksi dapat dilakukan dengan aman serta sesuai dengan kapasitas alat ukur. Sama halnya dengan trafo arus, trafo potensial banyak digunakan pada sistem tenaga listrik sebagai peralatan pengukuran dan perlindungan. Trafo ini umumnya dipasang pada gardu induk, pembangkit listrik, maupun sistem transmisi untuk mendukung kerja instrumen pengukuran seperti voltmeter serta perangkat proteksi lainnya. Berikut merupakan gambar dari prinsip kerja *potential transformer* ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Prinsip kerja *potential transformer*[19]

2.2.6.3 Tranformator Isolasi

Transformator isolasi merupakan transformator yang digunakan untuk memisahkan hubungan listrik secara langsung antara rangkaian primer dan sekunder. Transformator ini umumnya memiliki perbandingan jumlah lilitan primer dan sekunder sebesar 1:1 sehingga tegangan pada sisi sekunder relatif sama dengan tegangan pada sisi primer. Fungsi utama transformator isolasi adalah memberikan isolasi listrik (*electrical isolation*) antara kedua rangkaian sekaligus membantu mengurangi pengaruh gangguan listrik seperti tegangan transien dan gangguan

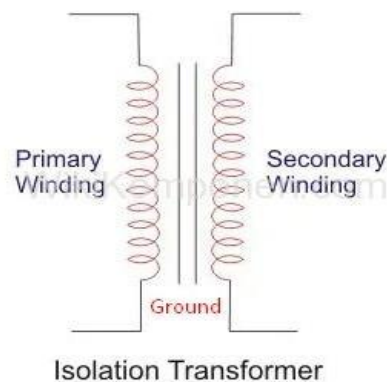
elektromagnetik (*EMI/RFI*). Dengan adanya pemisahan tersebut, transformator isolasi dapat digunakan untuk meningkatkan keamanan serta melindungi peralatan listrik dan elektronika yang terhubung pada sisi sekunder.

Prinsip kerja transformator isolasi pada dasarnya sama dengan transformator pada umumnya, yaitu berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ketika tegangan bolak-balik diberikan pada belitan primer, arus yang mengalir menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah pada inti transformator. Perubahan fluks magnet tersebut kemudian menginduksikan tegangan pada belitan sekunder tanpa adanya hubungan konduktif secara langsung antara kedua belitan. Dengan demikian, energi listrik dapat dipindahkan dari sisi primer menuju sisi sekunder melalui kopling magnetik. Pada konstruksi tertentu, transformator isolasi juga dilengkapi dengan perisai atau *shield* di antara belitan primer dan sekunder untuk mengurangi perpindahan gangguan frekuensi tinggi dan tegangan transien menuju rangkaian sekunder.

Penggunaan transformator isolasi memiliki peranan penting dalam meningkatkan keselamatan pada rangkaian listrik, terutama ketika digunakan untuk proses pengujian, perbaikan, dan pemeliharaan peralatan. Pemisahan secara elektrik antara sisi primer dan sekunder dapat mencegah terbentuknya jalur arus langsung terhadap tanah ketika terjadi kontak dengan salah satu terminal sekunder. Namun, kondisi tersebut tidak berarti bahwa sisi sekunder sepenuhnya bebas dari bahaya listrik. Kontak secara bersamaan dengan kedua terminal sekunder tetap dapat menyebabkan arus mengalir melalui tubuh karena membentuk rangkaian tertutup. Oleh karena itu, penggunaan transformator isolasi tetap harus disertai dengan penerapan prosedur keselamatan dan sistem proteksi yang sesuai.

Dalam penerapannya, transformator isolasi banyak digunakan untuk melindungi peralatan yang sensitif terhadap gangguan listrik, seperti peralatan laboratorium, sistem instrumentasi, perangkat komputer, peralatan medis, dan peralatan elektronika. Transformator isolasi juga dapat digunakan pada proses servis dan pengujian untuk mengurangi risiko gangguan akibat hubungan antara rangkaian listrik dengan sistem pembumian. Selain memberikan isolasi galvanis, penggunaan perisai elektrostatik pada konstruksi transformator dapat membantu

mengurangi gangguan *noise* dan tegangan transien berfrekuensi tinggi. Oleh karena itu, transformator isolasi dapat menjadi salah satu komponen pendukung dalam meningkatkan keamanan dan keandalan sistem kelistrikan, khususnya pada rangkaian yang membutuhkan pemisahan antara sumber listrik dan beban[20]. Berikut merupakan gambar dari prinsip kerja transformator isolasi ditunjukkan pada gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Prinsip kerja tranformator isolasi[31]

2.2.6.4 Transformator Uji

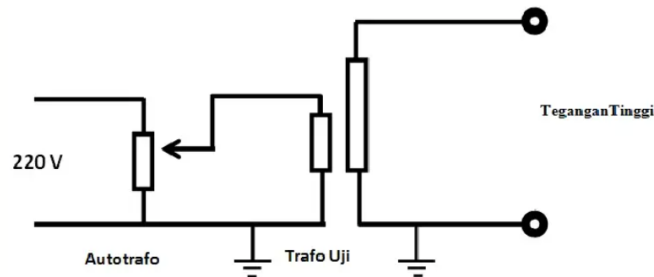
Transformator penguji atau trafo uji merupakan salah satu peralatan yang digunakan dalam sistem pengujian tegangan tinggi untuk menghasilkan tegangan uji yang diperlukan pada peralatan listrik. Pengujian tegangan tinggi dilakukan untuk mengetahui kemampuan isolasi suatu peralatan dalam menahan tegangan kerja maupun tegangan lebih yang mungkin terjadi selama pengoperasian. Kegagalan isolasi dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti usia pemakaian, kerusakan mekanis, penurunan kekuatan dielektrik, maupun pengaruh tegangan tinggi secara berulang. Oleh karena itu, pengujian tegangan tinggi diperlukan untuk mengetahui kondisi isolasi serta memastikan bahwa peralatan listrik memiliki kemampuan isolasi yang sesuai dengan tingkat tegangan operasinya.

Pada pengujian tegangan tinggi bolak-balik, transformator penguji umumnya menggunakan konstruksi satu fasa dengan perbandingan jumlah lilitan primer dan sekunder yang tinggi. Sisi primer transformator dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik bertegangan rendah, sedangkan sisi sekundernya

menghasilkan tegangan tinggi yang digunakan sebagai tegangan pengujian. Tegangan keluaran transformator penguji dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengujian menggunakan pengaturan pada sisi primer, misalnya melalui autotransformator. Dengan pengaturan tersebut, besarnya tegangan yang diberikan kepada objek uji dapat dinaikkan secara bertahap sesuai dengan jenis pengujian dan tegangan nominal peralatan yang diuji.

Transformator penguji memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan transformator daya. Perbandingan lilitan pada transformator penguji dibuat lebih besar karena diperlukan tegangan keluaran yang tinggi dari sumber tegangan primer yang relatif rendah. Selain itu, kapasitas daya transformator penguji umumnya lebih kecil karena kebutuhan utama dalam pengujian tegangan tinggi adalah menghasilkan tegangan yang tinggi, sedangkan arus yang diperlukan relatif kecil. Transformator penguji juga umumnya digunakan dalam waktu yang terbatas selama proses pengujian dan dilengkapi dengan sistem pembumian pada bagian tertentu untuk meningkatkan aspek keselamatan. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa konstruksi transformator penguji lebih diarahkan pada kemampuan menghasilkan tegangan tinggi dibandingkan kemampuan menyalurkan daya secara kontinu.

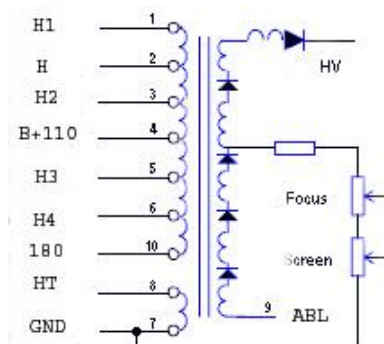
Dalam pengoperasiannya, tegangan keluaran transformator penguji tidak hanya dipengaruhi oleh perbandingan jumlah lilitan primer dan sekunder, tetapi juga oleh karakteristik kapasitif pada transformator dan objek yang diuji. Kapasitansi belitan tegangan tinggi serta kapasitansi objek uji dapat memengaruhi arus pemuat (*charging current*) dan menyebabkan tegangan keluaran berbeda dari nilai yang diperkirakan berdasarkan rasio lilitan. Oleh karena itu, pengukuran tegangan keluaran pada transformator penguji perlu dilakukan secara langsung menggunakan peralatan ukur tegangan tinggi yang sesuai. Pemahaman terhadap karakteristik tersebut penting dalam pengujian tegangan tinggi karena nilai tegangan yang diterapkan pada objek uji harus dapat diketahui secara akurat untuk memastikan proses pengujian berlangsung sesuai dengan kebutuhan dan batas keselamatan yang ditentukan[21]. Berikut gambar dari transformator uji ditunjukkan pada gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Transformator uji[21]

2.2.7 Transformator *Flyback*

Transformator *flyback* merupakan transformator *step-up* tegangan tinggi yang digunakan sebagai komponen utama dalam proses pensaklaran pada konverter *flyback*. Transformator yang digunakan umumnya berasal dari monitor CRT karena mampu menghasilkan tegangan keluaran yang tinggi. Prinsip kerja konverter *flyback* dimulai ketika saklar berada pada kondisi ON, sehingga tegangan sumber mengalir melalui induktansi magnetisasi transformator (L_m) yang menyebabkan arus magnetisasi (i_{Lm}) meningkat secara linier, sementara dioda pada sisi keluaran berada pada kondisi *reverse bias*. Sebaliknya, ketika saklar berada pada kondisi OFF, energi yang tersimpan pada induktansi magnetisasi akan dilepaskan melalui kumparan transformator menuju sisi keluaran. Pada kondisi ini, dioda menjadi *forward bias* sehingga arus dapat mengalir ke beban dan menghasilkan tegangan keluaran[9], seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Transformator *flyback*[32]

Secara umum, transformator *step-up* konvensional memiliki perbedaan karakteristik dengan transformator *flyback*, meskipun keduanya bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Prinsip tersebut memanfaatkan medan magnet yang terbentuk pada belitan primer untuk mentransfer energi ke belitan sekunder secara berkesinambungan (*continuous*). Proses induksi elektromagnetik dipengaruhi oleh perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sekunder serta besarnya tegangan yang diberikan pada belitan primer. Hubungan antara jumlah lilitan dan tegangan pada sisi primer maupun sekunder dapat dinyatakan melalui persamaan berikut[23]:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Keterangan:

V_p = Tegangan Primer

V_s = Tegangan Sekunder

N_p = Lilitan Primer

N_s = Lilitan Sekunder

I_s = Arus Sekunder

I_p = Arus Primer