PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA PADA SISTEM HIBRID DI TEKNIK ELEKTRO ITN MALANG

SKRIPSI

Disusun Oleh:

YULIANUS FERI KRISMANTO

NIM : 09.12.004

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S-1

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

2013

LEMBAR PERSETUJUAN

PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA PADA SISTEM HIBRID DI TEKNIK ELEKTRO ITN MALANG

SKRIPSI

Disusun dan diajukan untuk melengkapi dan memenuhi persyaratan guna mencapai gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

YULIANUS FERI KRISMANTO
NIM : 09.12.004

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Elektro S-1

M.Ibrahim Ashari,ST,MT
NIP.Y. 1030100358

Diperiksa dan Disetujui,

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Ir. Abdul Hamid, MT	**Awan Uji Krismanto, ST, MT**
NIP.Y.1018800188	**NIP.198003012005011002**

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

2013

ABSTRAK

PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA PADA SISTEM *HYBRID* DI TEKNIK ELEKTRO ITN MALANG

Yulianus Feri Krismanto NIM 09.12.004
Dosen Pembimbing : Ir.M.Abdul Hamid,MT dan
Awan Uji Krismanto, ST, MT

Abstrak

Pengaruh perubahan iklim mengakibatkan terjadinya pemanasan global, hal ini mendorong berbagai negara untuk mengembangkan energi terbarukan. Ketersediaan energi radiasi matahari yang sangat melimpah dapat dijadikan sumber energi terbarukan, dengan merubah radiasi matahari melalui *solar cell* menjadi energi listrik. *Solar cell* saat ini telah banyak dikembangkan, menjadi sistem yang terinkoneksi dengan sistem lain. Hal ini dinamakan sistem hibrid, yaitu sistem yang menggambungkan beberapa pembangkit untuk melayani kebutuhan beban listrik. Dalam hal ini perlu adanya suatu pemodelan yang dapat digunakan untuk melihat performa dari *solar cell*, atau dapat digunakan untuk pengembangan *solar cell* tanpa harus menggunakan *solar cell* tersebut. Dalam penelitian ini akan dibuat pemodelan dari *solar cell* tipe ST-50 W (P). Dari hasil pemodelan yang telah dibuat di dapat karakteristik perbandingan arus dan daya yang dihasilkan *solar cell* melalui pengukuran dan hasil pemodelan serta hasil simulasi di dapat jumlah kesalahan model yaitu untuk daya 6.95 %, arus 6.69 %.

Kata kunci : energi terbarukan,*solar cell*,sistem *hibrid*,pemodelan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kepada Yesus Kristus atas berkat dan bimbinganNya, penyusun dapat menyelesaikan Laporan Skripsi ini yang berjudul ***"PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA PADA SISTEM HIBRID DI TEKNIK ELEKTRO ITN MALANG"*** dapat terselesaikan.

Adapun maksud dan tujuan dari penulisan laporan ini merupakan salah satu syarat untuk dapat menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar Sarjana Jurusan Teknik Elektro S-1, Konsentrasi Teknik Energi Listrik ITN Malang.

Sebagai penulis sangat menyadari tanpa adanya kemauan dan usaha serta bantuan dari berbagai pihak, maka laporan ini tidak dapat diselesaikan dengan baik. Oleh sebab itu, penyusun mengucapkan terima kasih kepada yang terhormat:

1. Ir. Soeparno Djiwo, MT selaku Rektor Institut Teknologi Nasional Malang.
2. Ir. Anang Subardi, MT selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Nasional Malang.
3. M.Ibrahim Ashari,ST, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1 Institut Teknologi Nasional Malang.
4. Ir, Abdul Hamid, MT selaku Dosen Pembimbing satu Tugas Skripsi.
5. Awan Uji Krismanto, ST, MT selaku Dosen Pembimbing dua Tugas Skripsi.
6. Sahabat-sahabat dan rekan-rekan yang tidak kami sebutkan satu-persatu, kami ucapkan banyak terima kasih atas bantuannya dalam proses pembuatan Skripsi yang telah saya kerjakan, begitu juga dengan penyelesaian laporan ini.

Usaha telah kami lakukan semaksimal mungkin, namun jika ada kekurangan dan kejanggalan dalam penyusunan, kami mohon saran dan kritik yang sifatnya membangun. Yang diperlukan untuk menambah kesempurnaan laporan ini dan dapat bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa pada khususnya dan pembaca pada umumnya.

Malang, 14 Maret 2013

Penyusun

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN i
ABSTRAK ii
KATA PENGANTAR iii
DAFTAR ISI iv
DAFTAR GAMBAR vi
DAFTAR TABEL vii

BAB I PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 2
1.3. Tujuan Pembahasan 2
1.4. Batasan Masalah 2
1.5. Manfaat Penelitian 2
1.6. Metodologi Penelitian 3
1.7. Sistematika Penulisan 3

BAB II LANDASAN TEORI 5
2.1. Sistem Hibrid 5
2.2. Radiasi Matahari di Permukaan Bumi 6
2.3. Sejarah Sel Surya 8
2.4. Sel Surya 8
2.4.1. Faktor Perancangan dan Pengoperasian Sel Surya 11
2.4.2. Komponen Pembentuk Sel Surya 11
2.4.3. Pemasangan Sel Surya 12
2.5. Karakteristik Sel Surya 12
2.6. Energi Listrik dalam Sel Surya 15
2.7. Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya 16
2.8. Pemodelan Sistem 18
2.9. Definisi Matlab 19
2.10. Penggunaan Simulink dalam Matlab 20

BAB III PEMODELAN *SOLAR PHOTOVOLTAIC* DENGAN SIMULINK DI MATLAB 22

3.1. Data Sel Surya 22

3.1.1. Data *Sheet* Sel Surya 22

3.1.2. Data pengukuran Sel Surya 22

3.2. Rangkaian Pemodelan Sel Surya 25

3.3. Alur Penelitian 27

3.4. Flowchart Simulasi Pemodelan 28

BAB IV HASIL DAN ANALISA HASIL 29

4.1. Model Sel Surya 29

4.2. Hasil Perbandingan Simulasi dan Pengukuran Solar Photovoltaic 30

4.3. Hasil Simulasi *Solar Photovoltaic* 32

4.4. Perhitungan Nilai *Error* 33

BAB V PENUTUP 35

5.1. Kesimpulan 35

5.2 Saran 35

DAFTAR PUSTAKA 36

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema sistem hybrid 5
Gambar 2.2. Peta penyebaran potensi radiasi matahari di Indonesia (sumber.LAPAN)..... 7
Gambar 2.3 Struktur sel surya 9
Gambar 2.4 Prinsip kerja sel surya 10
Gambar 2.5. Transisi radiasi matahari pada sel surya 10
Gambar 2.6 Karakteristik sel surya 12
Gambar 2.7 Rangkaian ekivalen sel surya 13
Gambar 2.8 *Solar Charger Control* 16
Gambar 2.9 Aki (accumulator) 17
Gambar 2.10 Inverter 17
Gambar 2.11 Tampilan model *solar photovoltaic* pada Simulink 19
Gambar 2.12 Tampilan Utama Matlab 7.7.0 (R2008b) 20
Gambar 2.13 Tampilan *source* pada *Simulink Library Browser* 21
Gambar 3.1 Data parameter pada model *solar photovoltaic* 25
Gambar 3.2 Rangkaian untuk pemodelan Vt,Iph.dan 25
Gambar 3.3 Rangkaian untuk pemodelan Is, Ish dan Id..... 26
Gambar 3.4 Rangkaian untuk pemodelan I dan P..... 26
Gambar 4.1 Model rangkaian *solar photovoltaic* pada Matlab..... 29
Gambar 4.2 Grafik V-I hasil pengukuran dan simulasi pemodelan *solar photovoltaic* 30
Gambar 4.3 Grafik P-V hasil pengukuran dan simulasi pemodelan *solar photovoltaic* 30
Gambar 4.4 Grafik P dan I hasil simulasi *solar photovoltaic*..... 31
Gambar 4.5 Grafik P dan I hasil pengukuran *solar photovoltaic*..... 31
Gambar 4.6 Hasil simulasi pemodelan sel surya..... 32

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data *sheet solar photovoltaic* 22
Tabel 3.2. Data pengukuran *solar photovoltaic* 29 November 2012 23
Tabel 3.3 Data pengukuran *solar photovoltaic* 12 Desember 2012..... 24
Tabel 4.1 Perbandingan hasil pengukuran dan simulasi 33
Tabel 4.2 Perhitungan perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran
..... 34

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan berkurangnya pasokan energi fosil seperti minyak bumi, batu bara, yang mengakibatkan melonjaknya harga minyak mentah dunia, serta pemanasan global (*global warming*), dan kerusakan ekosistem yang diakibatkan hasil pembuangan limbah pabrik maupun hasil pembuangan dari kendaraan. Atas dasar tersebut banyak negara mengembangkan sumber energi terbarukan (*renewable energy*). Energi terbarukan yaitu sumber energi alternatif yang tidak mempunyai dampak buruk/polusi bagi lingkungan sekitar atau dapat dikatakan energi yang berasal alam seperti angin, radiasi matahari gelombang air laut, panas bumi dan lain-lain.

Salah satu energi terbarukan yang telah banyak digunakan radiasi matahri yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga surya atau lebih dikenal *solar photovoltaic*. *Solar photovoltaic* banyak digunakan karena ketersediaan akan energi radiasi matahari (sinar matahari) sangat berlimpah, terlebih bagi negara yang berada di garis khatulistiwa yang mempunyai intensitas energi radiasi matahari lebih besar dari negara lain yang berada jauh dari garis khatulistiwa. Pemerintah dalam hal ini mengembangkan sumber energi terbarukan agar nantinya dapat di gunakan di pulau – pulau kecil yang kesulitan mendapat pasokan listrik. Terdorong dari gagasan tersebut Teknik Elektro ITN mengembangkan sistem hibrid yang terdiri dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ,Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin (PLTB) ,baterai, dan diesel. *Sistem hibrid* yaitu gabungan dari beberapa pembangkit yang *output*nya digabung menjadi satu untuk melayani beban listrik.

Sebelum *sistem hibrid* dijalanakan perlu adanya simulasi untuk melihat keadaan atau perubahan apabila terjadi suatu permasalahan nantinya. Untuk *solar photovoltaic* akan dibuat suatu bentuk pemodelan berdasarkan karakteristik *solar photovoltaic*, dimana pemodelan ini nantinya dapat digunakan untuk perancangan *sistem hibrid*, modifikasi sistem *solar photovoltaic*, dan untuk pengembangan sistem solar PV.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah dalam skripsi ini yaitu, bagaimana membuat suatu simulasi pemodelan dari *solar photovoltaic* tipe ST-50 W (P) yang berada pada sistem hibrid di Teknik Elektro ITN Malang. Dari permasalahan tersebut maka judul pada penelitian ini adalah :

"PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA PADA SISTEM HIBRID DI TEKNIK ELEKTRO ITN MALANG"

1.3 Tujuan Pembahasan

Adapun tujuan dalam skripsi ini adalah untuk membuat pemodelan *solar photovoltaic* berdasarkan karakteristik dari *solar photovoltaic* tipe ST-50 W (P) yang berada pada sistem hibrid di Teknik Elektro ITN Malang.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, peneliti memberikan batasan masalah agar pembahasan tidak meluas. Berikut batasan masalah penelitian :

1. Skripsi ini hanya membahas mengenai studi teoritis dan simulasi sistem PLTS yang dimodelkan dalam Simulink – Matlab R2008b.
2. Studi dilakukan pada PLTS di Teknik Elektro ITN Malang.
3. Validasi model menggunakan *solar photovoltaic* (PV) tipe ST-50 W (P).

1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian yang dilakukan, diharapkan memberi manfaat, antara lain :

1. Memberikan pengetahuan mengenai pemodelan sistem, khususnya tentang sel surya.
2. Mengetahui karakteristik sel surya dari hasil pengukuran dan pemodelan.
3. Dapat dijadikan bahan pembelajaran untuk pengembangan sel surya.

1.6 Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan metode penelitian sebagai berikut :

1. Studi *literature*, yaitu kajian pustaka untuk mempelajari teori-teori yang terkait melalui literature yang ada, yang berhubungan dengan permasalahan. Studi *literature* ini meliputi hal-hal sebagai berikut :
   - Data-data yang berasal dari internet yang menunjang penelitian ini.
   - Buku-buku terkait yang terkait bentuk pemodelan menggunakan Simulink di Matlab.
   - Jurnal – jurnal ilmiah yang terkait dengan pemodelan *solar photovoltaic*.
2. Pengumpulan data parameter yang berkaitan dengan pemodelan *solar photovoltaic*.
3. Menganalisa dan membandingkan karakteristik *photovoltaic* (PV) dengan pemodelan yang telah dibuat.

1.7 Sistematika Penulisan

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, manfaat penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Pada bab ini akan dibahas mengenai sel surya (sejarah, pengertian, prinsip kerja,karakteristik dan komponen *solar photovolatic*, definisi pemodelan dan sistem , serta simulink pada Matlab (penjelasan, prinsip kerja).

BAB III PEMODELAN SOLAR PV DENGAN SIMULINK DI MATLAB

Pada bab ini berisi data parameter, pemodelan PLTS pada Simulink-Matlab R2008b.

BAB IV HASIL DAN ANALISA HASIL

Pada bab ini berisi analisa data dan hasil pemodelan serta grafik keluran dari pemodelan PLTS.

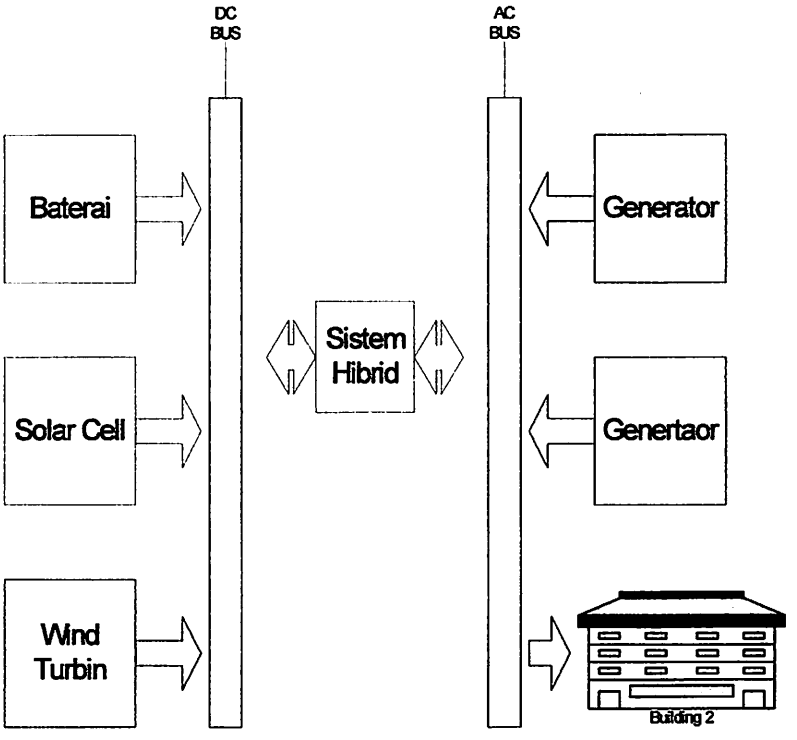
BAB V PENUTUP

Pada bab ini berisi kesimpulan dan saran.

BAB II
LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Hibrid

Pengertian secara umum dari sistem hibrid, yaitu sistem yang terdiri dari kombinasi beberapa sumber energi, misalnya sistem hibrid PV/diesel, PV/angin, PV/angin/diesel, dan angin/diesel dilakukan untuk meningkatkan efisiensi sumber energi.



Gambar 2.1
Skema sistem hibrid

Sistem hibrid apabila dilihat dari skema sistem merupakan sistem yang terpusat, yakni beberapa pembangkit terdapat di beberapa lokasi, kemudian di gabung menjadi satu untuk melayani beban listrik. Oleh karena itu system ini memiliki keuntungan dari sisi ekonomis, yakni apabila tidak ada angin, PLTBayu tidak dapat beroperasi, sehingga sumber listrik dapat disuplai dari sumber lain seperti dari panel surya, atau sumber lain yang dihibridkan. Sehingga dapat

dikatakan hibrid yang merupakan suatu sistem yang terpusat, dan terdapat beberapa manfaat sebagai berikut :

1. Optimasi sistem pembangkit listrik.
2. Meningkatkan efisiensi.
3. Memberikan pelayanan untuk daerah yang belum terdapat pasokan listrik.

2.2 Radiasi Matahari di Permukaan Bumi

Matahari merupakan pusat dari tata surya, dan pusat dari energi terbesar di muka bumi ini. Dalam beberapa periode tertentu matahari melepaskan energinya dalam jumlah besar berbentuk radiasi elektromagnetik. Radiasi ini memiliki dua sifat yakni sebagai gelombang dan partikel. Sebagai partikel radiasi matahari beriteraksi dengan materi, hal ini disebut foton. Foton ini digunakan untuk keperluan pembangkitan pada sel surya.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ialah pembangkit listrik yang menggunakan energi radiasi matahari sebagai sumber energi utama untuk menghasilkan listrik. Sehingga dapat disimpulkan PLTS ini merubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik. "Berdasarkan data penyinaran matahari yang dihimpun dari 18 lokasi di Indonesia, radiasi surya di Indonesia dapat diklasifikasikan berturut-turut sebagai berikut: untuk kawasan barat dan timur Indonesia dengan distribusi penyinaran di Kawasan Barat Indonesia (KBI) sekitar 4,5 kWh/m^2 /hari dengan variasi bulanan sekitar 10%; dan di Kawasan Timur Indonesia (KTI) sekitar 5,1 kWh/m^2 /hari dengan variasi bulanan sekitar 9%. Dengan demikian, potesi angin rata-rata Indonesia sekitar 4,8 kWh/m^2 /hari dengan variasi bulanan sekitar 9%. Catatan : pada tengah hari yang cerah radiasi matahari di bumi mampu mencapai nilai 1000 W/m^2= 1 KW/m^2 = 1 mW/cm^2" (artikel Kementrian ESDM pemanfaatan energi surya di Indonesia).

Gambar 2.2.
Peta penyebaran potensi radiasi matahari di Indonesia (sumber. LAPAN)

Beberapa keuntungan menggunakan energi radiasi matahari di Indonesia adalah :

a. Sumber energi tersedia melimpah
b. Bebas polusi
c. Tidak bising
d. Tidak memerlukan sistem transmisi yang rumit
e. Tidak menyebabkan efek pemanasan global
f. Dapat ditempatkan di daerah terpencil
g. Aman
h. Perawatannya sangat mudah

Pada tahun 1946 dilakukan perekaman spektrum radiasi matahari, dari ketinggian di atas lapisan ozon untuk pertama kalinya. Selanjutnya pada tahun 1949 dilanjutkan untuk panjang gelombang yang lebih pendek dari ketinggian 100 km. Dari eksperimen tersebut diperoleh bahwa untuk daerah yang memiliki panjang gelombang di atas 2900 Angstrom suhu radiasi matahari antara 5500 sampai 6000 ^{0}K (Soegeng,1996). Penyinaran ialah penerimaan oleh energi yang berasal dari matahari ke permukaan bumi, yang berupa sinar-sinar bergelombang pendek yang menembus atmosfer. Sinar tersebut sebagaian hilang karena absorbsi sebelum mencapai permukaan bumi. Sinar-sinar yang berhasil mencapai bumi

dilepaskan melalui refleksi, hal ini terutama terjadi pada daerah kutub bumi, dan di daerah bersalju serta perairan (Daldjoeni,1983).

Abdul Kadir (1990:213) menyatakan pelaksanaan pemanfaatan energi surya, dapat dibedakan menjadi tiga cara. Cara pertama adalah prinsip pemanasan langsung. Dalam hal ini sinar-sinar matahari memanasi langung benda yang akan dipanaskan atau memanasi secara langsung medium, misalnya air yang akan dipanaskan. Cara kedua adalah, bahwa yang dipanaskan adalah air, akan tetapi panas yang terkandung dalam air itu, akan dikonversikan menjadi energi listrik. Cara ketiga adalah cara photovoltaik, dengan cara ini maka energi sinar matahari langsung dikonversikan menjadi energi listrik.

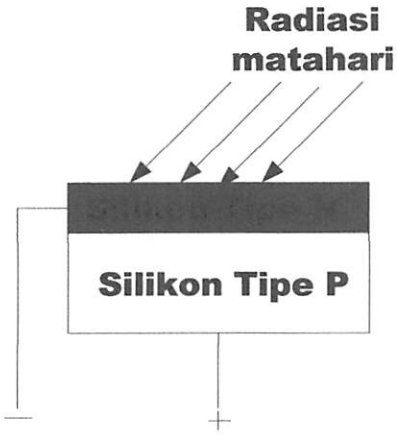
2.3 Sejarah Sel Surya

Efek fotovoltaik pertama kali ditemukan oleh seorang ilmuan Fisika asal Prancis yang bernama Alexandre Edmond Becquerel pada tahun 1839. Atas prestasinya tersebut beliau mendapat hadiah nobel fisika pada tahun 1903. Namun sel surya pertama kali berhasil dibuat oleh seorang Charles Fritts pada tahun 1833. Charles Fritts pada saat itu membuat semikonduktor selenium yang dilapisi dengan emas yang sangat tipis, sehingga membentuk sebuah rangkaian semikonduktor bertipe p dan n. Namun efesiensi yang dihasilkan hanyalah 1 %. Perkembangan selanjutnya ialah keberhasilan seorang Russel Ohl mematenkan sel surya modern pada tahun 1946 (U.S Paten 2,402,662, "Light Sensitive device").

2.4 Sel Surya

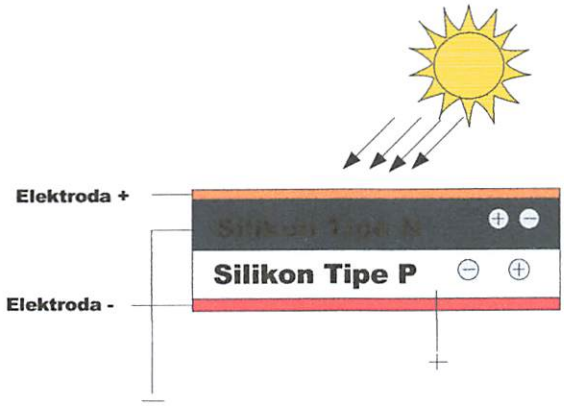
Sel surya adalah perangkat yang terbuat dari semikonduktor yang terdiri dari sebuah dioda p-n *junction*. Sigalingging (1994:1) menyatakan bahwa pada umumnya sel surya memiliki ketebalan minimum 0.3 mm, yang terbuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub Positip dan Negatif. Wasito (1995:164) menyatakan bahwa dioda listrik surya / sel surya merupakan suatu dioda yang dapat mengubah energi surya / matahari secara langsung menjadi energi listrik (berdasarkan sifat foto elektrik yang ada pada setengah penghantar). Sel surya ini biasanya berbentuk dioda pertemuan P – N yang memiliki luas penampang tertentu. Semakin luas permukaan atau penampang sel, semakin besar arus yang akan diperoleh. Satu sel surya dapat menghasilkan beda potensial sebesar 0.5V

DC (dalam keadaan cahaya penuh). Beberapa sel dapat dideretkan guna memperoleh tegangan 6, 9, 12, 24V, dan seterusnya. Sel surya dapat pula dijajarkan guna memperoleh arus keluaran lebih besar. Bahan dasar dari sel surya adalah Silikon, dimana Fosfor digunakan untuk menghasilkan Silikon tipe – N dan Boron digunakan sebagai pencemar untuk memperoleh bahan tipe – P.



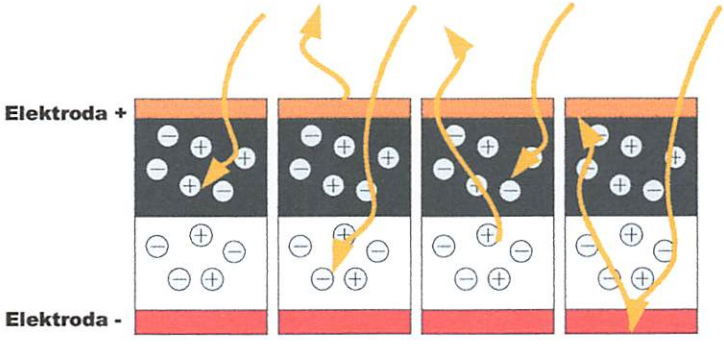
Gambar 2.3
Struktur sel surya

Pembangkitan energi listrik pada sel surya terjadi berdasarkan efek fotolistrik, atau disebut juga efek fotovoltaik, yaitu efek yang terjadi akibat foton dengan panjang gelombang tertentu yang jika energinya lebih besar daripada energi ambang semikonduktor, maka akan diserap oleh elektron sehingga elektron berpindah dari pita valensi (N) menuju pita konduksi (P) dan meninggalkan *hole* pada pita valensi, selanjutnya dua buah muatan, yaitu pasangan elektron-hole, dibangkitkan. Aliran elektron-*hole* yang terjadi apabila dihubungkan ke beban listrik melalui penghantar akan menghasilkan arus listrik. Sederhananya solar cell terdiri dari persambungan bahan bertipe semikonduktor bertipe P dan N. Yang jika terkena sinar matahari maka akan terjadi aliran elektron, aliran elektron inilah yang disebut arus listrik.



Gambar 2.4
Prinsip kerja sel surya

Absober merupakan bagian utama dari *solar cell*. Bila sinar matahari menimpa permukaan solar cell maka akan diserap,dipantulkan, atau dilewatkan begitu saja. Foton dengan level energi tertentu akan membebaskan elektron dari ikatan atomnya, sehingga mengalir arus listrik. Level energi itu disebut *band gap* (Eg), yaitu sejumlah energi yang dibutuhkan untuk mengeleuarkan elektron dari ikatan kovalennya sehingga timbul arus listrik.



Gambar 2.5.
Transisi radiasi matahari pada *solar cell*

Agar efesiensi *solar cell* tinggi maka foton yang diserap harus sebanyak-banyaknya dengan memperkecil refleksi dan memperbesar konduktivitas dari sisi bahan pembuat *solar cell*. Untuk bisa membuat foton dapat diserap sebanyak-banyaknya, maka harus memiliki energi *band gap* dengan jarak yang lebar sehingga memungkinkan menyerap lebih banyak foton.

2.4.1 Faktor Perancangan dan Pengoperasian Sel Surya

Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya dipengaruhi beberapa faktor yaitu :

a. Jumlah daya yang dibutuhkan dalam pemakaian sehari-hari (Watt).
b. Tingkat radiasi, dan suhu yang terpancar dari matahari.
c. Berapa besar arus yang dihasilkan panel surya / solar cell (dalam *Ampere hour*), dalam hal ini memperhitungkan berapa jumlah panel surya / *solar cell* yang harus dipasang.
d. Berapa unit baterai yang diperlukan untuk kapasitas yang diinginkan dan pertimbangan penggunaan tanpa sinar matahari. (*Ampere hour*).

Hal – hal yang mempengaruhi efektifitas dan keandalan suatu sel surya dapat bekerja secara maksimum yakni :

a. Temperatur
b. Radiasi Matahari
c. Posisi letak sel surya
d. Keadaan atau cuaca pada atmosfer bumi, cerah,mendung atau hujan.

2.4.2 Komponen Pembentuk Panel Surya

Berdasarkan tipe bahan *solar cell*, modul surya yang umum digunakan, mempunyai 3 tipe dengan efisiensi konversinya, yaitu perbandingan antara daya yang dihasilkan modul surya dengan radiasi matahari yang ditangkap oleh modul surya, antara lain :

1. Tipe *Mono Crystalline*, terbuat dari silikon kristal tunggal, dengan efesiensi paling tinggi (12%-18%). Secara *visual* dapat dilihat dimana warna *solar cell* merata. Harga untuk tipe ini relatif paling mahal.

2. Tipe *Poly Crystalline,* terbuat dari silicon kristal banyak (*poly*), paling banyak dipakai sat ini, efesiensinya lebih rendah dari *Mono Crystalline* tetapi lebih tinggi dari *Amorphorus* (10%-15%). Untuk visualisasi warna permukaan *solar cell* tidak merata dan seragam. Harga tipe ini relatif lebih murah dari *Mono Crystalline.*

3. Tipe *Amorphorus*, terbuat dari silicon yang tidak berbentuk kristal, oleh karena itu disebut sebagai non kristalin. Untuk visualisasinya tipe ini berupa *solar cell* yang berbentuk lembaran (*sheet,* bukan kotak-kotak kecil seperti tipe kristalin). Karena efesiensinya paling rendah (8%-12%), ukurannya modul surya ini hampir ± 2 kali lipat ukuran modul kristalin dengan kapasitas yang sama. Tipe ini paling murah di antara dua tipe lainnya.

2.4.3 Pemasangan Sel surya

Terdapat beberapa jenis pemasangan sel surya, diantaranya :

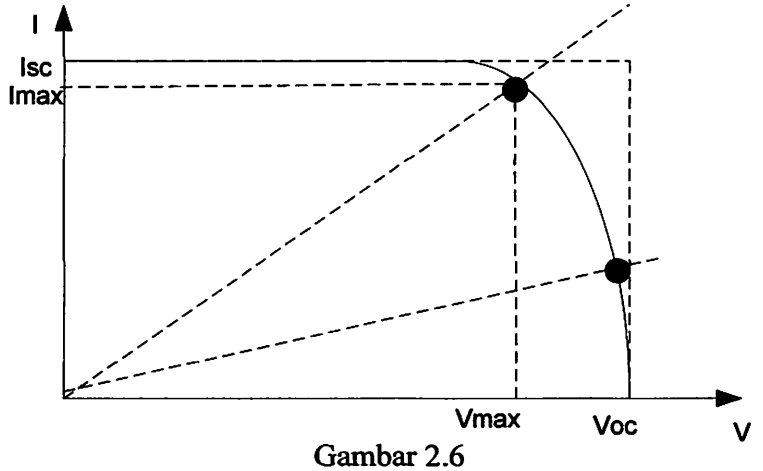
1. Tipe *stand alone*, tipe ini biasanya digunakan pada daerah yang terpencil, dan kapasitasnya kecil.

2. Tipe *isolated grid*, tipe ini dapat dikombinasikan dengan sumber lain, atau dalam sistem hibrid.

3. Tipe *grid connected*, tipe ini digunakan pada daerah yang memiliki system jaringan listrik, sehingga outputnya dapat langsung masuk dalam jaringan tersebut.

2.5 Karakteristik Sel Surya

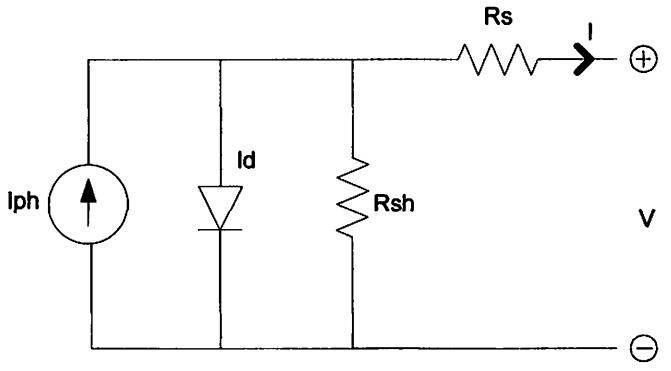
Sigalingging (1994:10) menyatakan bahwa sel surya pada keadaan tanpa penyinaran, mirip seperti permukaan penyearah setengah gelombang dioda.



Gambar 2.6
Karakteristik sel surya

Dari gambar karakteristik di atas menggambarkan keadaan sel surya, dari gambar karakteristik di dapat titik maksimum dari penyerapan energi radiasi matahari apabila berada pada titik *Vmax* dan *Imax*.

Sel surya memiliki rangkaian ekivalen sebagai berikut :



Gambar 2.7
Rangkaian ekivalen Sel surya

Dari rangkaian ekivalen pada gambar 2.7 di dapat persamaan umum yang digunakan yaitu :

$$I = Iph - Is\left(exp\frac{q(V+RsI)}{NKT} - 1\right) - \frac{(V+RsI)}{Rsh} \quad \text{.....(2.1)}$$

dimana :

I_{SC} : *Short-circuit current*

I_{ph} : *Light-generated current*

I_D : *Diode current*

I_S : *Diode reverse saturation current*

I_{sh} : *Current through the shunt resistance*

I_r : *Irradiation*

V_{OC} : *Open-circuit voltage*

R_s : *Series resistance*

R_{sh} : *Shunt resistance*

q : *Electron Charge constant,* $1.6*10^{-19}$

n : *emission coefficient, ideality factor (Si = 1.2)*

a : *diode ideality constant.*

K : *Boltzmann's constant* $1.38*10^{-23}$

T : *Cell temperature*

Untuk efek dari variasi radiasi matahari mempunyai persamaan sebagai berikut, yang dapat digunakan apabila menggunakan model dengan variasi radiasi matahari :

$$Iph = [I_{sc} + K_i(T \quad - 298)]H \qquad (2.2)$$

Dalam persamaan (2.2) *Light-generated current* di dapat dari hasil pengurangan $T - 298$ kemudian dikali dengan koefisien temperature arus dan dijumlahkan dengan *Short-circuit current* serta dibagi dengan radiasi matahari.

dimana :

K_i : $0.0017\ A/°C$ merupakan koefesien temperature arus.

H : radiasi pada solar sel (W/m^2).

Sedangkan untuk efek dari perbedaan temperatur dari sell surya, di dapat :

$$I_s(T) = I_s\left(\frac{T}{T_{nom}}\right)^3 exp\left[\left(\frac{T}{T_{nom}} - 1\right)\frac{E_g}{N.V_t}\right] \qquad (2.3)$$

Dalam pemodelan *solar cell* digunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_{ph} = I_r \frac{I_{sc}}{I_{ro}} \qquad (2.4)$$

$$I = I_{ph-I_d-I_{sh}} \qquad (2.5)$$

$$Is = I_{sc}.(e^{\frac{V_{oc}}{n.Vt}-1}) \qquad (2.6)$$

$$Id = I_s.(e^{\frac{V+IRs}{n.Vt.Ns}-1}) \qquad (2.7)$$

$$V_t = \frac{k.T}{q} \qquad (2.8)$$

Dalam persamaan (2.4) sampai (2.8) berturut-turut digunakan untuk mencari arus, *Light-generated current* , *Diode reverse saturation current, Diode current* dan *thermal voltage*.

2.6 Energi Listrik dalam Sel Surya

Sebelum mengetahui daya yang dihasilkan, perlu diketahui jumlah energi yang diterima, dari persamaan di dapat bahwa hasil perkalian antara intensitas radiasi dengan luasan akan menghasilkan energi, sehingga di dapat :

$$E = I_r \times A \qquad (2.9)$$

Dimana

I_r : *Irradiation* (W/m^2)

A : luas permukaan (m^2)

Untuk besarnya daya yang dihasilkan di dapat dari hasil kali tegangan dengan arus *photovoltaic* yang dihasilkan, sehingga diperoleh :

$$P = V \times I \qquad (2.10)$$

P : daya (watt)

V : tegangan (V)

I : arus (ampere)

Efesiensi pada sel surya ialah perbandingan daya yang dapat dibangkitkan oleh sel surya dengan energi input yang diperoleh dari radiasi matahari, sehingga di dapat persamaan :

$$\eta = \frac{output}{input} \times 100\% \qquad (2.11)$$

Apabila diinginkan tegangan maupun arus yang lebih besar, sel surya dapat dirangkai secara seri ataupun secara paralel. Apabila diparalel arus yang naik, apabila dirangkai seri maka tegangan yang naik. Energi yang dihasilkan oleh sel surya perlu dimanfaatkan secara maksimal dengan memanfaatkan media penyimpanan seperti aki, karena pada malam ataupun sore hari tidak terdapat sinar matahari sebagai energi utama sel surya.

2.7 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Di dalam pengoperasian PLTS terdapat komponen pendukung dalam pengoperasian PLTS, antara lain :

a. Rangkaian kontrol pengisian

Rangkaian kontrol pengisian merupakan rangkaian elektronik yang mengatur proses pengisian akinya. Alat ini dapat mengatur tegangan aki dalam selang tegangan 12 volt ± 10 %. Bila tegangan turun sampai 10,8 volt, maka kontroler akan mengisi aki dengan panel surya sebagai sumber energinya. Proses pengisian itu terjadi pada siang hari. Namun, jika penurunan tegangan itu terjadi pada malam hari, maka secara langsung kontroler akan memutus pemasokan energi listrik. Setelah proses pengisian itu berlangsung selama beberapa jam, tegangan aki itu akan naik. Bila tegangan aki itu mencapai 13,2 volt, maka kontroler akan menghentikan proses pengisian aki itu.

Gambar 2.8
Solar Charger Control

b. Aki

Rusdianto (1999:11) menyatakan bahwa akumulator atau aki adalah salah satu elemen sumber arus listrik searah. Aki termasuk elemen elektrokimia yang dapat mempengaruhi zat pereaksinya, sehingga disebut elemen sekunder. Kutub positif aki menggunakan lempeng oksida dan kutub negatifnya menggunakan lempeng timbal sedangkan larutan elektrolitnya adalah larutan asam sulfat. Ketika aki dipakai, terjadi reaksi kimia yang mengakibatkan endapan pada anode (reduksi) dan katode (oksidasi). Akibatnya, dalam waktu tertentu antara anode dan

katode tidak ada beda potensial, artinya aki menjadi kosong. Aki temasuk sel sekunder, karena selain menghasilkan arus listrik, aki juga dapat diisi arus listrik kembali. secara sederhana aki merupakan sel yang terdiri dari elektrode Pb sebagai anode dan PbO2 sebagai katode dengan elektrolit H2SO4. Aki berfungsi sebagai mediator pembangkit listrik atau sebagai tempat penyimpanan energi radiasi yang diserap oleh panel surya kemudian dikontrol melalui rangkaian pengontrol untuk mengisi aki. Dalam standar internasional setiap satu cell akumulator memiliki tegangan sebesar 2 volt. sehingga aki 12 volt, memiliki 6 *cell* sedangkan aki 24 volt memiliki 12 *cell.*

Gambar 2.9
Aki (*accumulator*)

c. Inverter

Budiman (2003:127) menyatakan bahwa inverter adalah rangkaian / alat yang dapat membalikkan harga *input* atau *output* dan Sigalingging (1994:42) menyatakan bahwa inverter adalah peralatan listrik yang dapat mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak – balik (AC).

Gambar 2.10
Inverter

2.8 Pemodelan Sistem

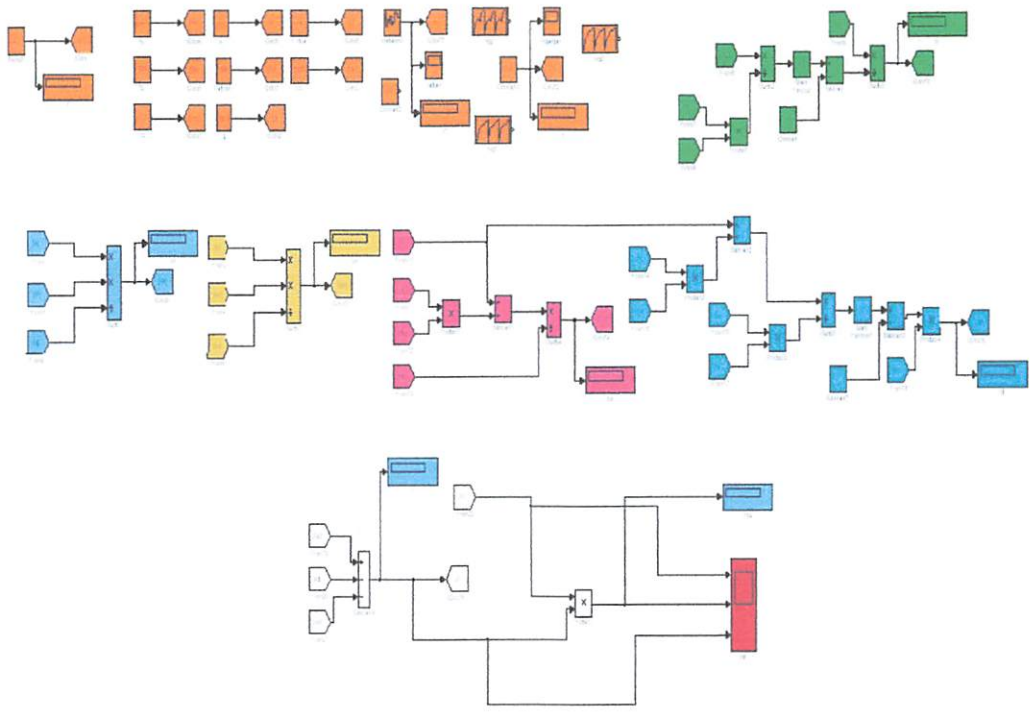
Model merupakan rencana, representasi, atau deskripsi yang menjelaskan suatu objek, sistem, atau konsep, yang seringkali berupa penyederhanaan atau idealisasi. Bentuknya dapat berupa model fisik (maket, bentuk *prototipe*), model citra (gambar, komputerisasi,grafis dan lain-lain), atau persamaan matematis. Sedangkan **Sistem** adalah suatu kesatuan yang terdiri komponen atau elemen yang dihubungkan bersama untuk memudahkan aliran informasi, materi atau energi. Menurut **Anatol Rapoport** Sistem adalah *"satu kesatuan yang berfungsi sebagai satu kesatuan karena bagian-bagian yang saling bergantung dan sebuah metode yang bertujuan menemukan bagaimana sistem ini menyebabkan sistem yang lebih luas yang disebut sistem teori umum".*

Karakteristik dari Pemodelan Sistem, adalah sebagai berikut :

1. Dibuat dalam bentuk grafis dan tambahan keterangan.
2. Dapat mempresentasikan tingkah laku sistem dengan cara yang transparan.

Prinsip pemodelan sistem tidak terlalu menitik beratkan kepada bentuk model apa untuk merancang sebuah sitem, bentuk model ini bebas, bisa menggunakan bentuk apa saja, sesuai dengan keinginan kita, contohnya bisa berupa narasi, prototipe, maupun gambar, yang terpenting adalah harus mampu merepresentasikan visualisasi bentuk sistem yang diinginkan oleh pengguna, karena sistem akhir yang dibuat bagi user akan diturunkan dari hasil model tersebut. Menurut Grady Booch, James Rumbaugh dan Ivar Jacobson prinsip dari pemodelan adalah:

1. Memilih model apa yang di gunakan, bagaimana masalahnya dan bagaimana juga dengan solusinya.
2. Setiap Model dapat dinyatakan dalam tingkatan yang berbeda.
3. Model yang terbaik adalah yang berhubungan dengan realitas.
4. Tidak pernah ada model tunggal yang cukup baik, setiap sistem yang baik memiliki serangkaian model kecil yang independen.



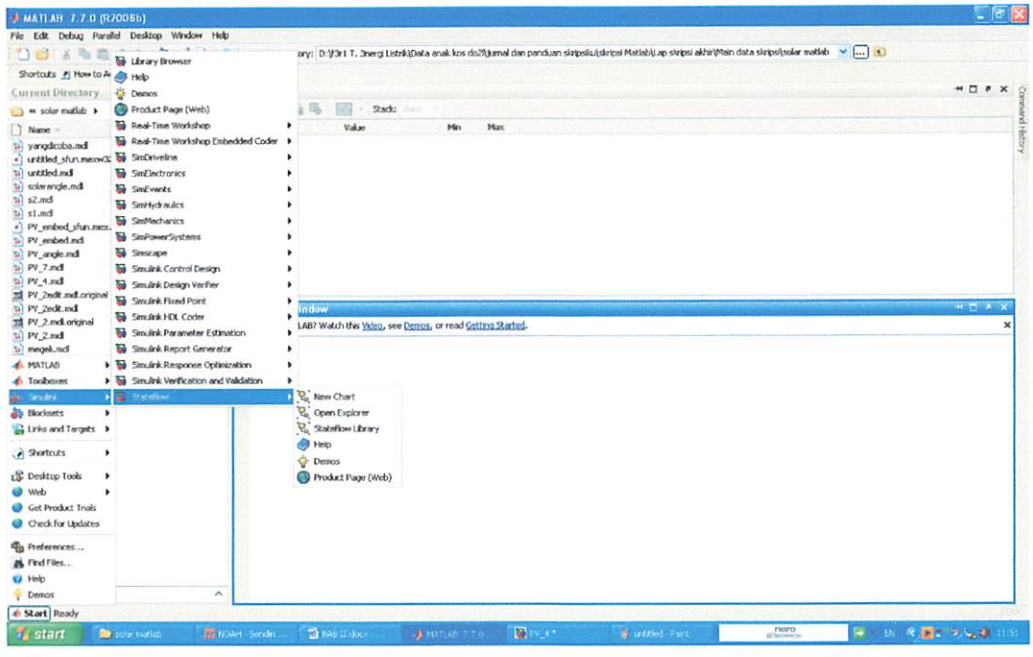
. Gambar 2.11
Tampilan model *solar photovoltaic* pada Simulink

Pada pemodelan ini digambarkan bahwa terdapat beberapa parameter dan konstamta diantaranya suhu,radiasi, serta konstanta seperti perubahan electron maupun faktor ideal suatu diode, hal tersebut sangat berpengaruh dan digunakan sebagai suatu input untuk rumusan model yang digunakan dalam pemodelan solar pv.

2.9 Definisi Matlab

Matlab (*Matrix Laboratory*) merupakan salah satu bahasa pemrograman sederhana yang banyak digunakan khususnya dalam bidang teknik, yang menggambungkan antara pemrograman, komputasi, dan visualisasi menjadi satu kesatuan. Kombinasi dari ketiga hal tersebut membuat Matlab jauh lebih hebat, lebih mudah digunakan, dengan fasilitas lebih lengkap dari bahasa pemrograman lain seperti PASCAL, C++, FOTRAN. Matlab sendiri merupakan suatu wadah dimana anda dapat melakukan apa saja yang berkaitan dengan pengerjaan visualisasi data, memproses suatu sinyal, ataupun anda melakukan peramalan dengan menggunakan alat bantu di Matlab. Di samping itu pemakaian Matlab di bidang teknik meliputi :

a. Matematika dan komputasi
b. Pengembangan algoritma
c. Akuisisi data
d. Pemodelan, simulasi dan *prototype*
e. Grafik
f. Perluasan pemakaian, seperti *graphical user interface* (GUI).



Gambar 2.12
Tampilan Utama Matlab 7.7.0 (R2008b)

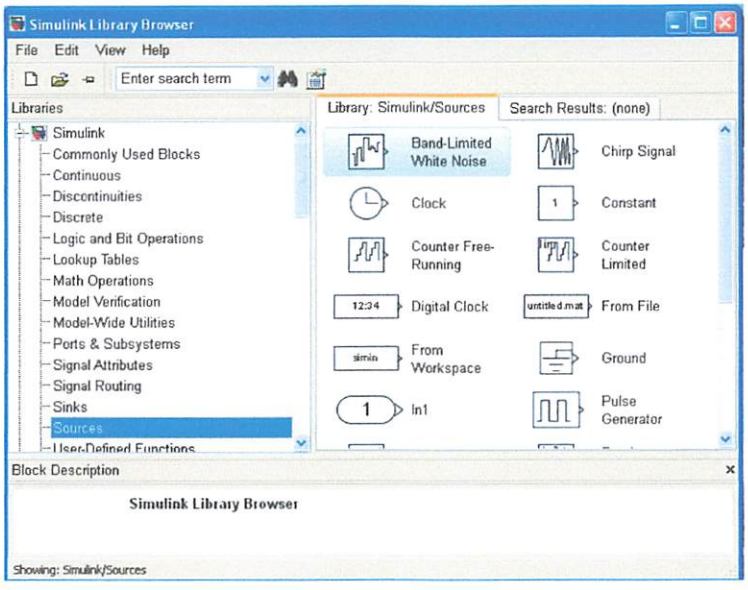
Dalam Matlab terdapat beberapa alat bantu (*toolbox*) untuk penyelesaian beberapa masalah – masalah khusus seperti *Control System, Instrumen Control, Signal processing, Optimization, Filter Design, Fuzzy Logic*, serta anda dapat membuat *toolbox* sendiri. Matlab merupakan suatu sistem interaktif dimana basis datanya tidak membutuhkan dimensi, sehingga memungkinkan kita dalam menyelesaiakan masalah yang berkaitan dengan formulasi matrik dan vektor.

2.13 Penggunaan Simulink dalam Matlab

Simulink merupakan fitur atau alat bantu yang terdapat di Matlab. Simulink digunakan sebagai sarana untuk membuat suatu pemodelan, simulasi atau memproses suatu sinyal, dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka grafis (GUI). Dalam simulink terdapat *toolbox* yang digunakan untuk

membuat suatu bentuk model atau diagram blok, seperti *math operations,port and subsystems,*dan *source*. Gambar 2.13 merupakan tampilan *source* pada *Simulink Library Browser.*

Alat bantu yang terdapat di dalam *Simulink Library Browser* di antaranya *source* digunakan untuk memproduksi signal atau sebagai sumber input data masukan.



Gambar 2.13
Tampilan *source* pada *Simulink Library Browser*

Selain itu terdapat *math operations dan port and subsystems* fungsi dari alat bantu ini ialah untuk membuat suatu bentuk model rumus serta *subsystems* berfungsi untuk membuat suatu model dalam model, atau dapat diartikan sebuah grup yang terdiri dari beberapa model suatu sistem.

BAB III
PEMODELAN *SOLAR PHOTOVOLTAIC* DENGAN SIMULINK DI MATLAB

3.1 Data Sel Surya

Sebelum dikerjakannya suatu model perlu adanya pengambilan data, hal ini bertujuan untuk membuat perbandingan dari hasil pengukuran dan hasil simulasi. Untuk pengambilan data dilakukan beberapa tahap, tetapi untuk data yang digunakan diambil sampel selama 2 hari, yaitu pada tanggal 29 November 2012 dan 12 Desember 2012, sedangkan data yang digunakan untuk diuji pada model yaitu pada tanggal 29 November 2012.

3.1.1 Data Sheet Sel Surya

Untuk data *sheet* solar pv diambil berdasarkan *nameplate* yang tertera pada *solar photovoltaic*. Dalam data *sheet* terdapat parameter jenis *photovoltaic*, Pmax, Isc yang melewati dioda, Voc, berat,panjang, dan lebar.

Tabel 3.1 Data *sheet solar photovoltaic*

Standart Test Condition	1000 W/m2
Model	ST-50W(P)
Pmax	50±5%
Vpm	17.5±5%
Ipm	2.86±5%
Voc	21.5±5%
Isc	3.25±5%
Rs	0.001 ohm
Rsh	1000 ohm
Max system	DC 1000 v
Length,width and Weight	84 X 53.5cm^2 and 5.8 kg

3.1.2 Data Pengukuran Sel Surya

Data pengukuran pada solar pv diambil dari rentang waktu pukul 08.00 pagi sampai 16.00 sore. Pada saat pengukuran kondisi pagi hari cerah, menjelang siang dan sore dalam keadaan mendung dan hujan. Peralatan – peralatan yang

digunakan dalam pengukuran yaitu berupa, *multimeter*, *solar meter*, dan *thermometer*. Berikut merupakan data hasil pengukuran :

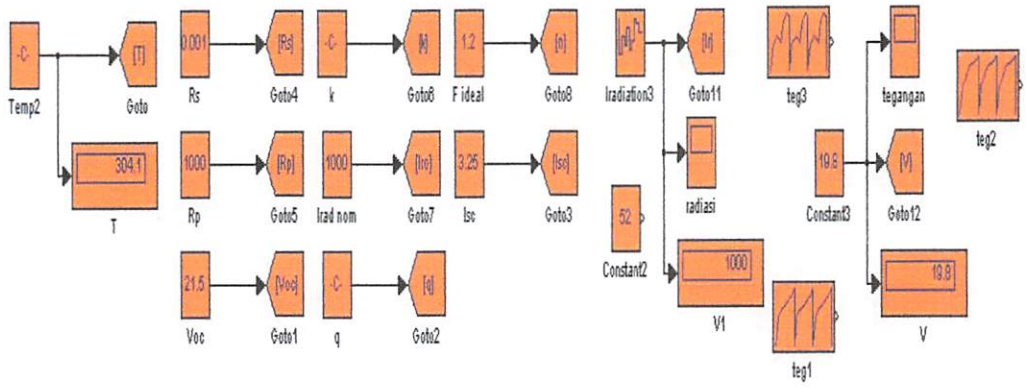
Tabel 3.2. Data pengukuran *solar photovoltaic* 29 November 2012

Waktu	Suhu °C	Radiasi W/m2	Tegangan	Arus	Daya	Cuaca
08.00	29	215	10.0	0,62	6,2	cerah
08.15	29	284	12.4	0,6	7,44	cerah
08.30	30	357	17.5	0,91	15,92	cerah
08.45	30	365	20.0	0,91	18,2	cerah
09.00	31	433	20	1,23	24,6	cerah
09.15	31	515	19.6	1,54	30,18	cerah
09.30	31	665	20.3	1,87	37,96	cerah
09.45	31	810	20.5	2,49	51,04	cerah
10.00	31	823	20.5	2,49	51,04	cerah
10.15	31	702	19.8	2,18	43,16	cerah
10.30	31	620	19	1,85	35,15	cerah
10.45	31	752	19.2	2,18	41,85	cerah
11.00	31	1030	19.3	3,13	60,4	cerah
11.15	31	1080	19.5	3,13	61,03	cerah
11.30	31	1030	19.5	3,13	61,03	cerah
11.45	31	1035	19.3	3,13	60,4	cerah
12.00	31	1042	19.8	3,13	61,97	cerah
12.15	32	1021	18.6	3,11	57,86	cerah
12.30	32	1020	18.7	3,11	58,15	cerah
12.45	31	1018	18.5	3,11	57,35	cerah
13.00	31	147	19.5	0,42	8,19	mendung
13.15	29	132	19.4	0,37	7,17	mendung
13.30	29	125	19.1	0,34	6,49	mendung
13.45	27	122	17.4	0,33	5,74	mendung
14.00	27	117	17.4	0,32	5,56	mendung
14.15	27	102	17.5	0,31	5,45	hujan
14.30	27	55	18.2	0,14	2,54	hujan
14.45	26	80	18.7	0,21	3,92	hujan
15.00	26	80	18.7	0,21	3,92	hujan
15.15	26	30	15.8	0,06	0,94	hujan
15.30	26	55	17.9	0,14	2,5	hujan
15.45	26	52	17.5	0,13	2,27	hujan
16.00	26	50	17.5	0,13	2,27	hujan

Tabel 3.3 Data pengukuran *solar photovoltaic* 12 Desember 2012

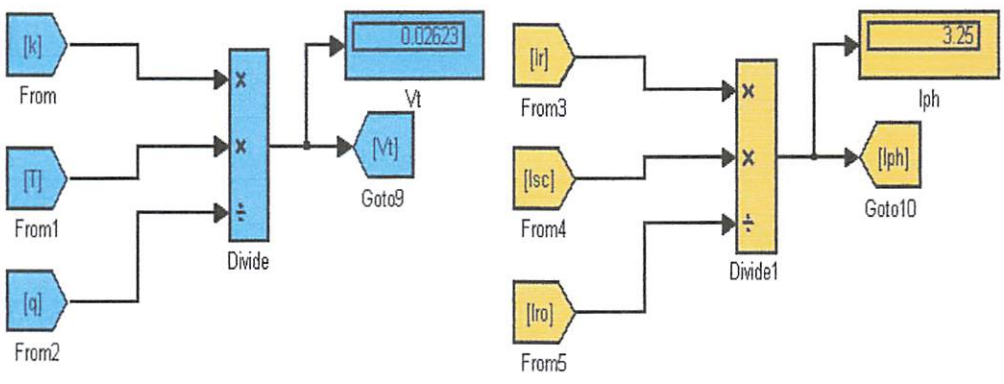
Waktu	Suhu °C	Radiasi W/m2	Tegangan	Arus	Daya	Cuaca
08.00	29	215	18.5	0,62	11,47	cerah
08.15	29	284	19.3	0,61	11,77	cerah
08.30	30	357	19.5	0,92	17,94	cerah
08.45	30	365	19.6	0,92	18,03	cerah
09.00	31	433	19.6	1,26	24,69	cerah
09.15	31	515	19.6	1,58	30,96	cerah
09.30	31	665	19.7	1,9	37,43	cerah
09.45	31	810	18.9	2,54	48	cerah
10.00	31	823	19.9	2,54	50,54	cerah
10.15	31	702	19.7	2,2	43,34	cerah
10.30	31	620	19.7	1,9	37,43	cerah
10.45	31	752	19.8	2,2	43,56	cerah
11.00	32	1025	20	3,16	63,2	cerah
11.15	32	1018	19.8	3,16	62,56	cerah
11.30	31	1012	19.5	3,18	62,01	cerah
11.45	32	1011	19.6	3,18	62,32	cerah
12.00	31	1019	19.8	3,19	63,16	cerah
12.15	32	1022	19.8	3,17	62,76	cerah
12.30	30	967	20	2,84	56,8	mendung
12.45	30	997	19.7	2,84	55,94	mendung
13.00	29	147	19.8	0,43	8,51	mendung
13.15	29	132	19.8	0,38	7,52	mendung
13.30	29	125	19.8	0,36	7,12	hujan
13.45	28	122	18.9	0,35	6,61	hujan
14.00	28	45	15.7	0,11	1,72	hujan
14.15	27	52	19.2	0,12	2,3	hujan
14.30	27	55	18.4	0,14	2,57	hujan
14.45	26	80	18.3	0,22	4,02	hujan
15.00	26	80	17.9	0,22	3,93	hujan
15.15	26	30	18.2	0,09	1,63	hujan
15.30	26	55	18.5	0,14	2,59	hujan
15.45	26	52	18.5	0,13	2,4	hujan
16.00	26	48	18.5	0,13	2,4	hujan

3.2 Rangkaian Pemodelan Sel Surya

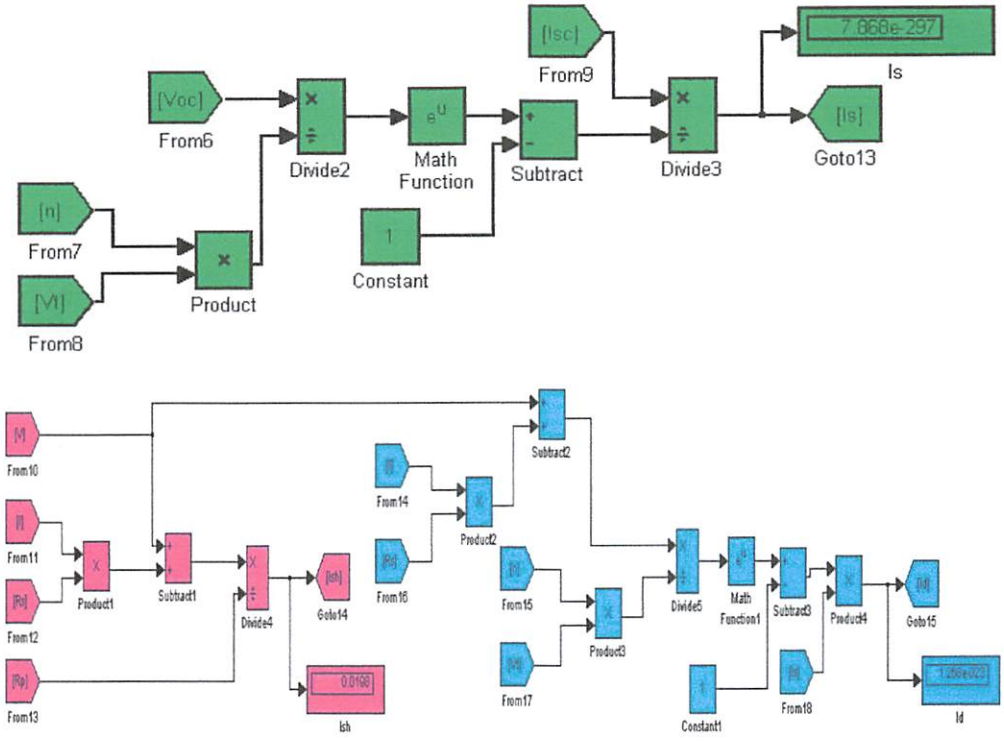


Gambar 3.1
Data parameter pada model *solar photovoltaic*

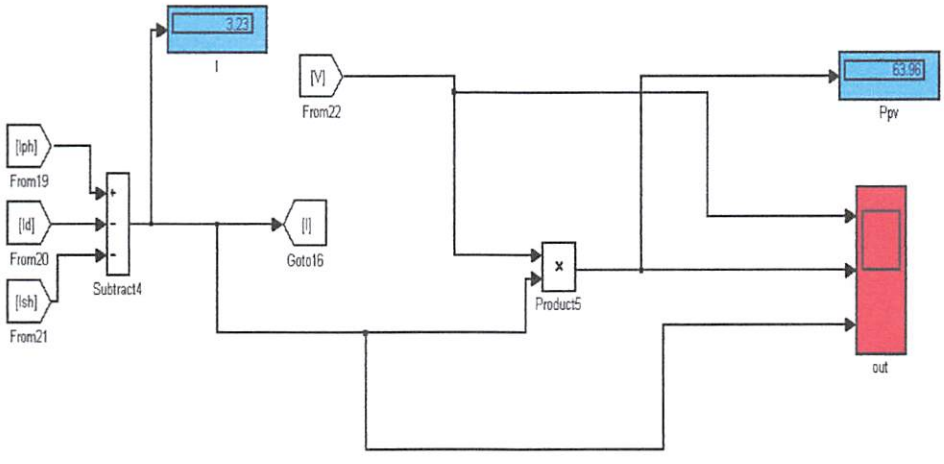
Data parameter pada gambar 3.1, yaitu konstanta suhu, Rs,Rsh,Voc,konstanta Boltzman, perubahan electron, radiasi matahari nominal, faktor ideal diode, Isc, radiasi matahari. Data – data tersebut nantinya menjadi masukan untuk model yang digunakan dalam pemodelan sel surya. Untuk menggambar model di atas dengan cara membuka *library* pada Simulink.



Gambar 3.2
Rangkaian untuk pemodelan Vt dan Iph



Gambar 3.3
Rangkaian untuk pemodelan Is, Ish dan Id



Gambar 3.4
Rangkaian untuk pemodelan I dan P

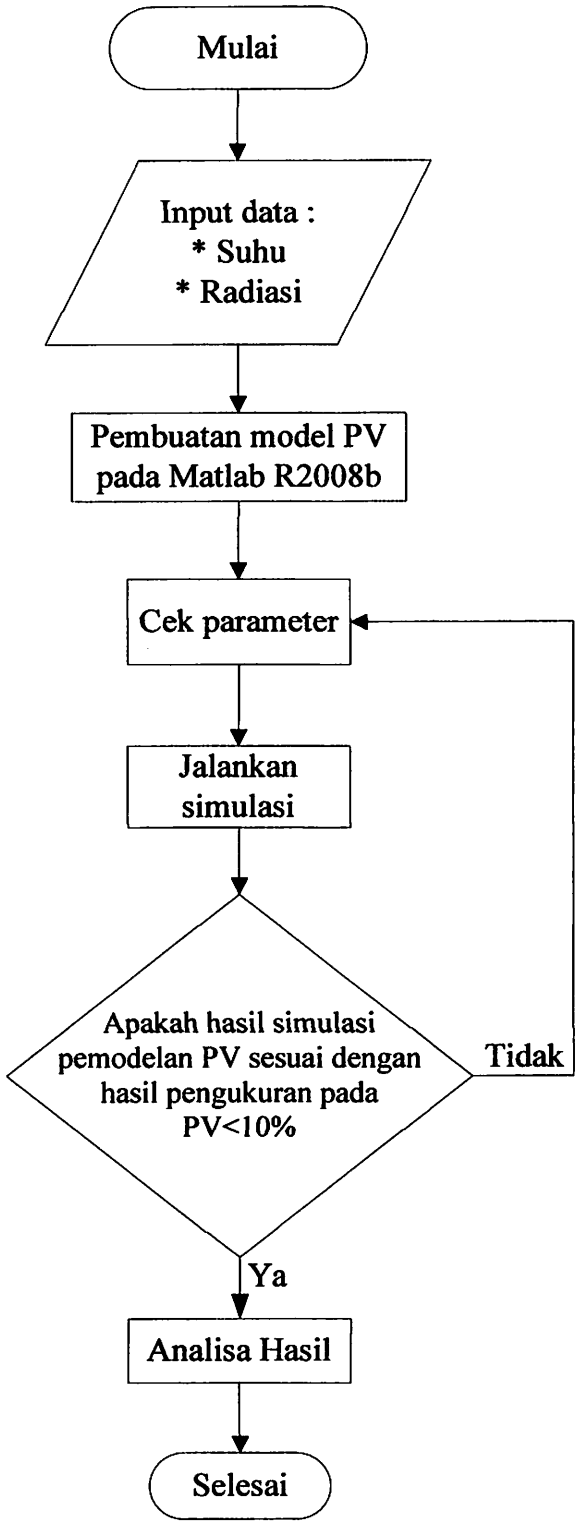
Untuk gambar 3.2, 3.3, dan 3.4 menerangkan model rangkaian untuk mencari nilai dari Vt,Iph,Is,Ish,Id,I, dan P. Persamaan yang digunakan dalam model ini mengacu pada (persamaan 2.4 sampai persamaan 2.8).

3.3 Alur Penelitian

Alur yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Memulai penelitian
2. Studi literature. Melakukan pengumpulan berbagai materi yang berkaitan dengan pemodelan *solar photovoltaic* dalam Simulnik – Matlab R2008b.
3. Pengumpulan data berupa data pengukuran suhu, radiasi dan output keluaran *solar photovoltaic*.
4. Memasukkan data input ke dalam kolom tertentu sesuai sheet input pada software Matlab R2008b.
5. Melakukan analisa data dari hasil validasi yang telah di dapatkan.
6. Menganalisa kesalahan model,terhadap rumus yang diterapkan dalam model validasi.
7. Mengambil kesimpulan dari hasil yang di dapatkan.
8. Penelitian selesai.

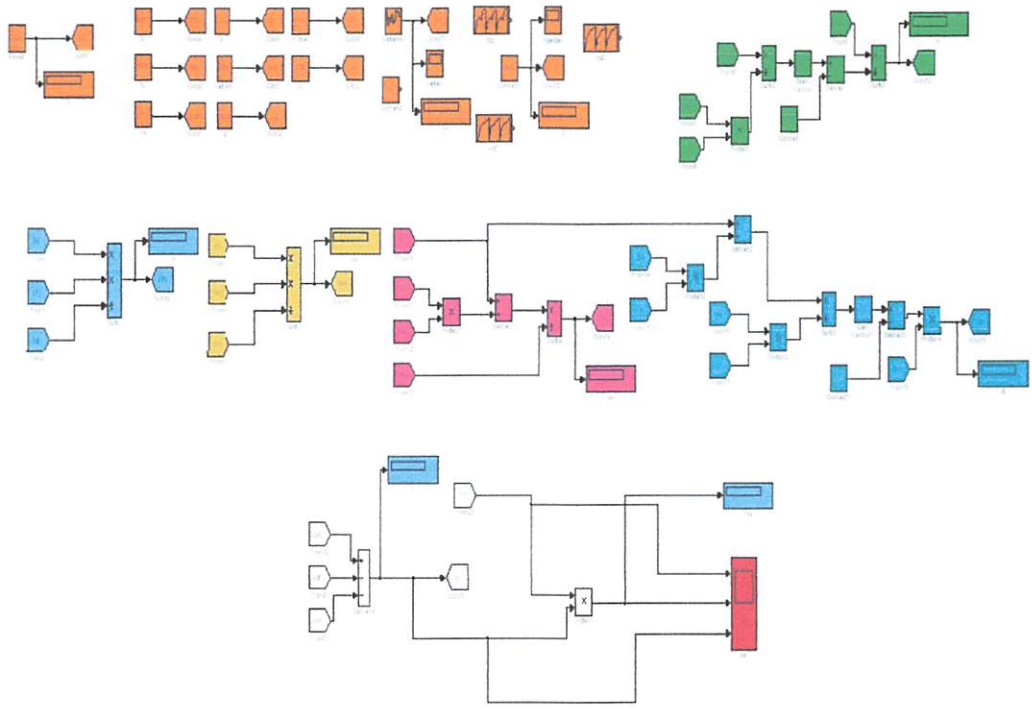
3.4 Flowchart Simulasi Pemodelan



BAB IV
HASIL DAN ANALISA HASIL

4.1 Model Sel Surya

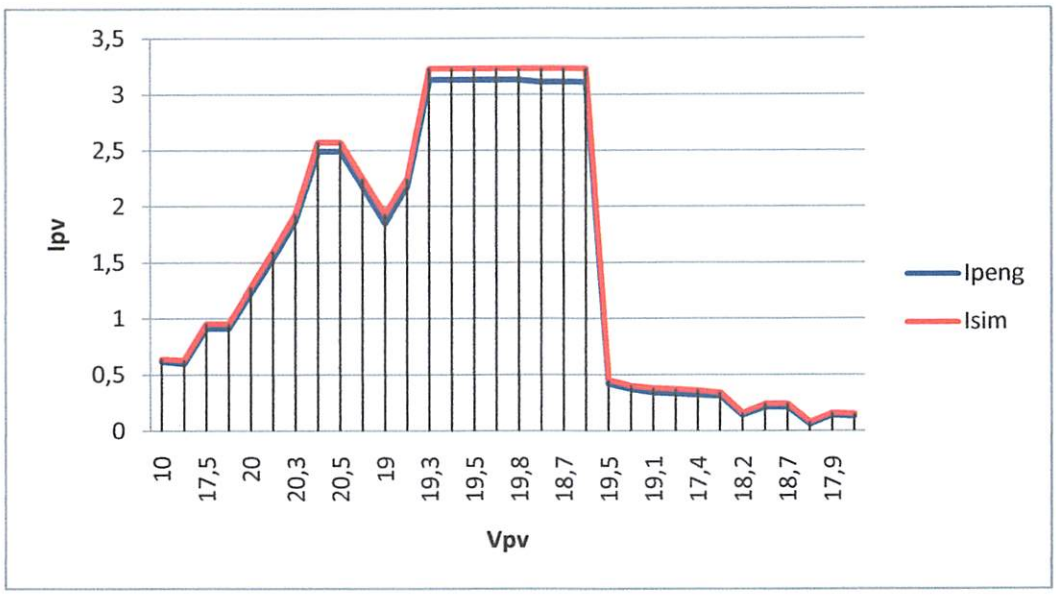
Model ini mempresentasikan model *solar photovoltaic* yang terdapat di Teknik Elektro ITN Malang, dengan memasukkan data parameter dan konstanta-konstanta yang digunakan untuk perhitungan maka di dapat hasil seperti gambar di bawah ini, yang berupa gambar grafik karakteristik *solar photovoltaic* saat pengukuran dan hasil dari simulasi. Proses cara kerja dari pemodelan ini ialah pembacaan parameter sesuai input data yang dimasukkan, setelah input data dimasukkan, dibuat model untuk rumus menghitung nilai tiap besaran yang dicari, untuk proses yang lainnya sama halnya, hingga di dapat keluaran berupa grafik, serta nilai dari hasil pemodelan. Berikut merupakan gambar rangkaian pemodelan *solar photovoltaic*.



Gambar 4.1

Model rangkaian *solar photovoltaic* pada Matlab

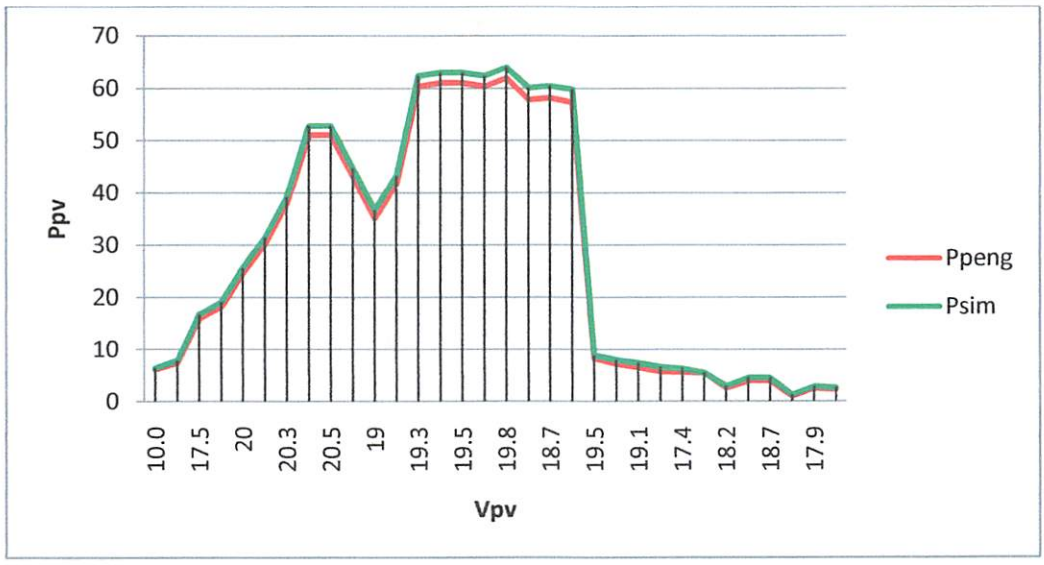
4.2 Hasil Perbandingan Simulasi dan Pengukuran *Solar Photovoltaic*



Gambar 4.2

Grafik V-I hasil pengukuran dan simulasi pemodelan *solar photovoltaic*

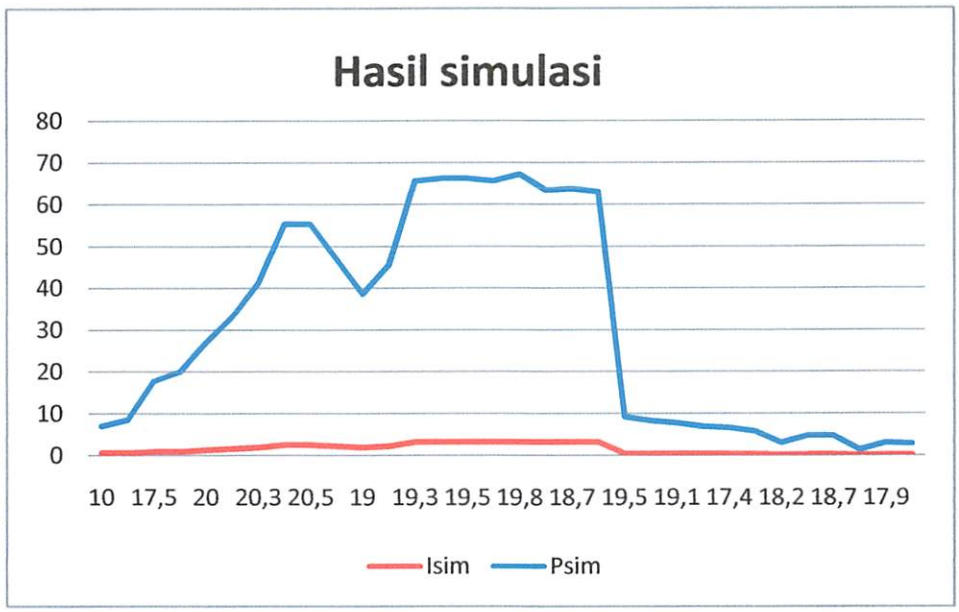
Gambar 4.2 menerangkan hasil dari pengukuran dan simulasi *solar photovoltaic* yang kemudian dibuat suatu grafik perbandingan karakteristik tegangan terhadap arus.



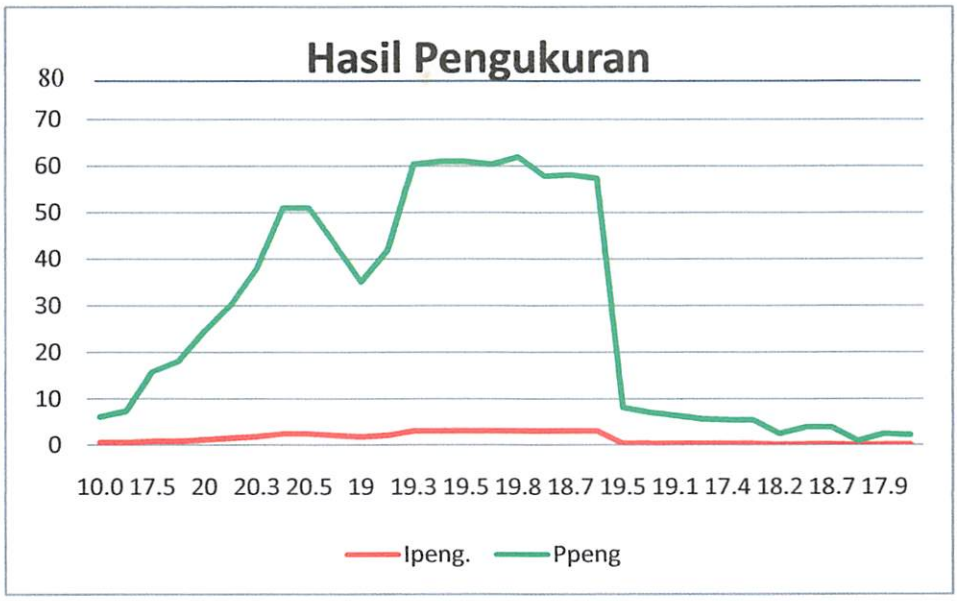
Gambar 4.3

Grafik P-V hasil pengukuran dan simulasi pemodelan *solar photovoltaic*

Gambar 4.2 menerangkan hasil dari pengukuran dan simulasi *solar photovoltaic* yang kemudian dibuat suatu grafik perbandingan karakteristik tegangan terhadap arus. Dari hasil simulasi dan pengukuran di dapat daya maksimum yaitu 61.97 watt pada saat pengukuran, dan 63.96 watt pada hasil simulasi.

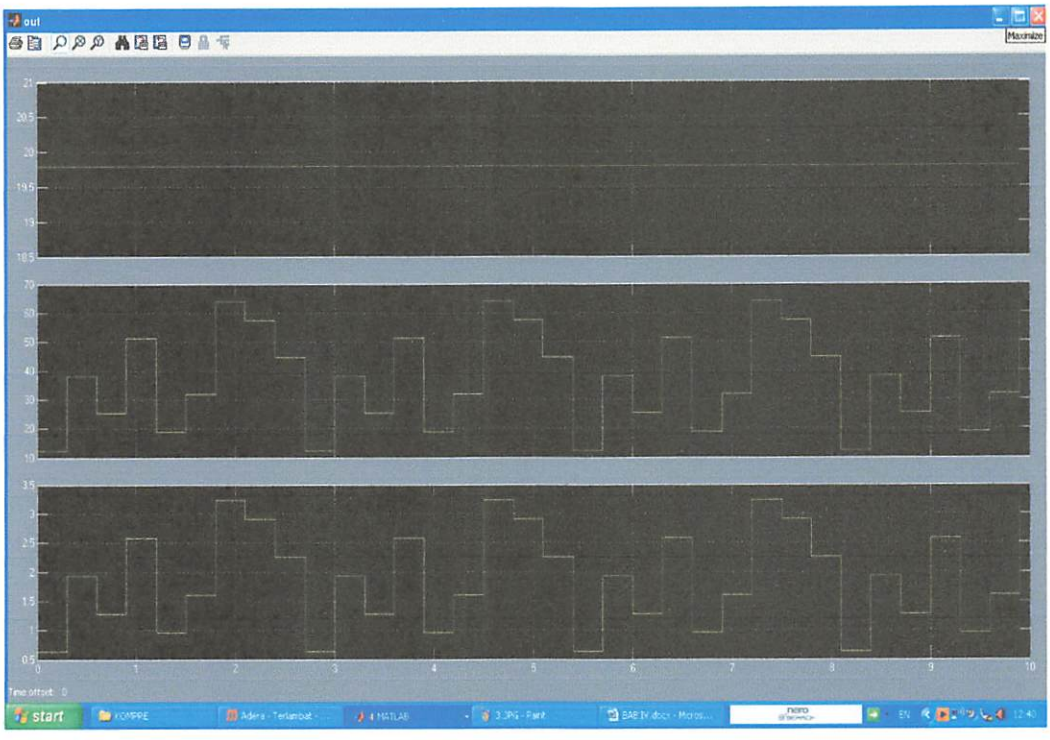


Gambar 4.4
Grafik P dan I hasil simulasi *solar photovoltaic*



Gambar 4.5
Grafik P dan I hasil pengukuran *solar photovoltaic*

4.3 Hasil Simulasi *Solar Photovoltaic*



Gambar 4.6
Hasil simulasi pemodelan sel surya

Dari gambar 4.6 merupakan hasil simulasi model sel surya pada Matlab, data yang dijadikan simulasi ialah pada saat titik puncak pengukuran yaitu pada pukul 12.00, dengan daya 61.97 watt pada saat pengukuran, dan 63.96 watt pada hasil simulasi. Pada grafik pertama merupakan tegangan,grafik kedua daya hasil simulasi, sedangkan grafik yang ketiga ialah arus yang dihasilkan oleh sel surya. Dari grafik dapat dilihat bahwa tegangan berubah-ubah sesuai dengan input suhu dan radiasi yang berubah-ubah sesuai dengan hasil pengukuran. Setelah dilakukan simulasi maka dibuat tabel perbandingan hasil simulasi dan pengukuran, untuk mengetahui nilai *error* dari model yang telah dibuat.

4.4 Perhitungan Nilai Error

Tabel 4.1 Perbandingan hasil pengukuran dan simulasi

Waktu	Suhu °C	Radiasi W/m2	V	I	P	Cuaca	V	Arus	P
08.00	29	215	10.0	0,62	6,2	cerah	10	0,64	6,4
08.15	29	284	12.4	0,6	7,44	cerah	12,4	0,63	7,9
08.30	30	357	17.5	0,91	15,92	cerah	17,5	0,95	16,76
08.45	30	365	20.0	0,91	18,2	cerah	20	0,95	19,1
09.00	31	433	20	1,23	24,6	cerah	20	1,28	25,6
09.15	31	515	19.6	1,54	30,18	cerah	19,6	1,6	31,47
09.30	31	665	20.3	1,87	37,96	cerah	20,3	1,93	39,17
09.45	31	810	20.5	2,49	51,04	cerah	20,5	2,57	52,8
10.00	31	823	20.5	2,49	51,04	cerah	20,5	2,57	52,8
10.15	31	702	19.8	2,18	43,16	cerah	19,8	2,25	44,65
10.30	31	620	19	1,85	35,15	cerah	19	1,93	36,69
10.45	31	752	19.2	2,18	41,85	cerah	19,2	2,25	43,31
11.00	31	1030	19.3	3,13	60,4	cerah	19,3	3,23	62,35
11.15	31	1080	19.5	3,13	61,03	cerah	19,5	3,23	62,99
11.30	31	1030	19.5	3,13	61,03	cerah	19,5	3,23	62,99
11.45	31	1035	19.3	3,13	60,4	cerah	19,3	3,23	62,35
12.00	31	1042	19.8	3,13	61,97	cerah	19,8	3,23	63,96
12.15	32	1021	18.6	3,11	57,86	cerah	18,6	3,23	60,1
12.30	32	1020	18.7	3,11	58,15	cerah	18,7	3,23	60,43
12.45	31	1018	18.5	3,11	57,35	cerah	18,5	3,23	59,78
13.00	31	147	19.5	0,42	8,19	mendung	19,5	0,45	8,8
13.15	29	132	19.4	0,37	7,17	mendung	19,4	0,4	7,94
13.30	29	125	19.1	0,34	6,49	mendung	19,1	0,38	7,39
13.45	27	122	17.4	0,33	5,74	mendung	17,4	0,37	6,59
14.00	27	117	17.4	0,32	5,56	mendung	17,4	0,36	6,31
14.15	27	102	17.5	0,31	5,45	hujan	17,5	0,34	5,49
14.30	27	55	18.2	0,14	2,54	hujan	18,2	0,16	2,92
14.45	26	80	18.7	0,21	3,92	hujan	18,7	0,24	4,51
15.00	26	80	18.7	0,21	3,92	hujan	18,7	0,24	4,51
15.15	26	30	15.8	0,06	0,94	hujan	15,8	0,08	1,29
15.30	26	55	17.9	0,14	2,5	hujan	17,9	0,16	2,87
15.45	26	52	17.5	0,13	2,27	hujan	17,5	0,15	2,65
16.00	26	50	17.5	0,13	2,27	hujan	17,5	0,15	2,65

Tabel 4.1 menerangkan perbandingan hasil pengukuran dan simulasi pemodelan sel surya, hasil yang telah di dapat kemudian dilakukan perhitungan untuk nilai error. Dapat dilihat pada tabel yang diberi warna dari hal tersebut dapat dijelaskan bahwa pengukuran yang dilakukan pada pukul 12.00 merupakan daya maksimum yag dihasilkan. Dalam hal ini perlu diperhatikan bahwa walau radiasi pukul 11.15 lebih tinggi dari pukul 12.00, namun tegangan yang dihasilkan juga berbeda, hal ini disebabkan karena foton yang diserap oleh suatu panel surya, hal ini tentu berpengaruh dari segi efisiensi suatu panel surya, karena apabila tingkat radiasi tinggi belum tentu jumlah foton yang diserap juga semakin banyak, hal ini dapat diatasi dengan penggatian bahan pembuat sel surya, atau dapat digunakan sistem MPPT untuk pengembangan panel surya ke depannya.

Tabel 4.2 Perhitungan perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran

Waktu	Suhu ℃	Radiasi W/m2	V	I	P	Cuaca	Arus Simulasi	Daya simulasi	% ERROR DAYA	% ERROR ARUS
08.00	29	215	10.0	0,62	6,2	cerah	0,64	6,4	3,13	3,13
08.15	29	284	12.4	0,6	7,44	cerah	0,63	7,9	4,76	5,82
08.30	30	357	17.5	0,91	15,92	cerah	0,95	16,76	4,21	5,01
08.45	30	365	20.0	0,91	18,2	cerah	0,95	19,1	4,21	4,71
								JUMLAH ERROR	4,08	4,67

$$Error = \frac{Sim_{out} - Peng_{out}}{Sim_{out}} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$Jumlah\ kesalahan = \frac{jumlah\ error}{jumlah\ percobaan} \quad (4.2)$$

$$Error = \frac{0.64-0.62}{0.64} \times 100\% = 3.13\ \%$$

$$Jumlah\ kesalahan = \frac{16.31}{4} = 4.08\ \%$$

Tabel 4.2 menerangkan contoh perhitungan untuk membandingkan nilai error dari hasil simulasi dengan pengukuran. Dengan menggunakan persamaan di atas maka untuk menghitung nilai error dari hasil keluaran arus dan daya berturut-turut ialah 4.08% dan 4.67 %. Sedangkan untuk jumlah kesalahan arus dan daya berturut – turut ialah 6.69 % dan 6.95%.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Pemodelan ini dapat dijadikan model untuk percobaan karakteristik *solar photovoltaic* tipe ST-50W(P).

2. Pemodelan yang dibuat dapat dijadikan referensi untuk pengembangan *solar photovoltaic* pada sistem hibrid di Teknik Elektro ITN Malang.

3. Di dapat hasil grafik karakteristik perbandingan arus dan daya yang dihasilkan *solar photovoltaic* melalui pengukuran dan hasil pemodelan.

4. Dari hasil simulasi di dapat jumlah kesalahan model yaitu untuk daya 6.95 %, arus 6.69 %.

5.2 Saran

Sel surya merupakan energi yang ramah lingkungan, oleh karena itu pengembangan untuk teknologi ini harus terus dilakukan, untuk mendapatkan efsiensi yang tinggi dalam hal daya keluaran. Dalam membuat suatu pemodelan *solar photovoltaic* perlu mempertimbangkan beberapa faktor lain selain suhu dan radiasi diantaranya faktor ideal suatu dioda, sudut elevasi matahari, jenis dioda yang digunakan, serta faktor cuaca, dimana dengan semakin banyaknya keadaan yang digunakan pemodelan tersebut dapat lebih mewakili kondisi nyata di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Astrawan Putra Putu Yudi, 2007 *Perancangan Dan Pembuatan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts).*

Francisco M. González - Longatt, 2005. *Model Of Photovoltaic Module In Matlab™.* 2 do congreso iberoamericano de estudiantes de ingeniería eléctrica, electrónica y computación, 22 Oktober 2012.

Huan-Liang Tsai, Ci - Siang Tu, and Yi - Jie Su, *Member, IAENG.*2008 *Development Of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink.* San Francisco, USA, WCECS 2008, October 22 - 24, 2008.

J. A. Ramos - Hernanz , J.J. Campayo , J. Larranaga , E. Zulueta , O. Barambones J. Motrico U. Fernandez Gamiz I. Zamora. 2012. *Two Photovoltaic Cell Simulation Models In Matlab/Simulink.* International Journal On "Technical And Physical Problems Of Engineering" (IJTPE).

Kadir Abdul. 1990.*Energi.* Universitas Indonesia.

Moore Holly, 2009. *MATLAB for Engineers Second Edition. Pearson International Edition.*Salt Lake City, Utah.

Mun Ong-Chee, 1998. *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink.* School of Electrical & Computer Engineering Purdue University West Lafayette, Indiana.

M. Abdulkadir, A. S. Samosir and A. H. M. Yatim, Mei 2012. *Modeling And Simulation Based Approach Of Photovoltaic System In Simulink Model.* ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 22 Oktober 2012 Vol. 7, No. 5.

Sonal Panwar, Dr. R.P. Saini.2012 *Development And Simulation Of Solar Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink And Its Parameter Extraction.* International Conference on Computing and Control Engineering (ICCCE 2012), 12 & 13 April, 2012.

Tarak Salmi, Mounir Bouzguenda, Adel Gastli, Ahmed Masmoudi.2012 *Matlab/Simulink Based Modelling Of Solar Photovoltaic Cell.* International Journal Of Renewable Energy Research Tarak Salmi et al., Vol.2, No.2, 2012.

LAMPIRAN

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : YULIANUS FERI KRISMANTO
Nim : 09.12.004
Masa Bimbingan : November 2012 s/d Ferbruari 2013
Judul Skripsi : *PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA PADA SISTEM HIBRID DI TEKNIK ELEKTRO ITN MALANG*

No.	Tanggal	Uraian	Parap Pembimbing
1.	2-02-2013	Konsultasi teori pada Bab I dan II	
2.	5-02-2013	- Revisi Bab I dan II - Tujuan sesuaikan dengan judul - Tambahkan penjelasan mengenai sistem hibrid	
3.	7-02-2013	Konsultasi revisi Bab I dan II	
4.	8-02-2013	Konsultasi Bab III	
5.	9-02-2013	Perbaiki Flowchart	
6.	11-02-2013	- Konsultasi Bab IV dan V - Tambahkan kesimpulan mengenai hasil simulasi	
7.	13-02-2013	Siapkan makalah seminar hasil	
8.	18-02-2013	Konsultasi revisi seminar hasil	
9.			
10.			

Malang, Februari 2013
Dosen Pembimbing,

Ir. Abdul Hamid, MT
NIP.Y. 1018800188

Form.S-4b

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : YULIANUS FERI KRISMANTO
Nim : 09.12.004
Masa Bimbingan : November 2012 s/d Februari 2013
Judul Skripsi : *PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA PADA SISTEM HIBRID DI TEKNIK ELEKTRO ITN MALANG*

No.	Tanggal	Uraian	Parap Pembimbing
1.	28-11-2012	Konsultasi pembuatan program pada Matlab	
2.	4-12-2012	- Membuat grafik dari data pengukuran - Pengambilan data per 15 menit - Mencari kondisi yang berhubungan dengan kerja sel surya	
3.	20-01-2013	Konsultasi simulasi pemodelan	
4.	11-02-2013	Menambahkan pengertian pemodelan pada Bab II	
5.	12-02-2013	- Cari data sheet sel surya yang lengkap - Menampilkan plot/grafik dari hasil simulasi	
6.	13-02-2013	Siapkan makalah seminar hasil	
7.	17-02-2013	Konsultasi revisi seminar hasil	
8.			
9.			
10.			

Malang, Februari 2013
Dosen Pembimbing,

Awan Uji Krismanto, ST, MT
NIP. 198003012005011002

Form.S-4b

PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

T. BNI (PERSERO) MALANG
BANK NIAGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

1. **Nama** : YULIANUS FERI KRISMANTO
2. **NIM** : 09.12.004
3. **Program Studi** : TEKNIK ELEKTRO S-1
4. **Konsentrasi** : TEKNIK ENERGI LISTRIK
5. **Judul Skripsi** : **PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA PADA SISTEM HIBRID DI TEKNIK ELEKTRO ITN MALANG**

Dipertahankan dihadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang Strata Satu (S-1) pada :

Hari : Selasa
Tanggal : 19 Februari 2013
Dengan Nilai : **86.5 (A)**

Panitia Ujian Skripsi

Ketua Majelis Penguji	Sekretaris Majelis
(M.Ibrahim Ashari,ST, MT)	(Dr. Eng. Aryuanto Soetedjo, ST.MT)
NIP. Y. 1030100358	NIP. Y. 1030800417

Anggota Penguji

Penguji I	Penguji II
(Ir.Teguh Herbasuki,MT)	(Lauhil Mahfudz Hayusman,ST,MT)
NIP. Y. 1038900209	1144

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Jurusan Teknik Elektro jenjang strata satu (S-1) yang diselenggarakan pada :

Hari : Selasa
Tanggal : 19 Februari 2013

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

1. Nama : Yulianus Feri Krismanto
2. NIM : 09.12.004
3. Program Studi : Teknik Elektro
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi **PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA PADA SISTEM HIBRID DI TEKNIK ELEKTRO ITN MALANG**

No	Materi Perbaikan	Ket
1	Saran untuk pengembangan sel surya diperlukan sudut penerimaan cahaya atau sel surya dipantau sesuai putaran matahari	

Dosen Penguji I

Ir.Teguh Herbasuki,MT
NIP. Y. 1038900209

Dosen Penguji II

Lauhil Mahfudz Hayusman, ST, MT
1144

Dosen Pembimbing I

Ir.Abdul Hamid, MT
NIP.Y.1018800188

Dosen Pembimbing II

Awan Uji Krismanto, ST. MT
NIP.198003012005011002

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Formulir Perbaikan Ujian Skripsi

Dalam pelaksanaan Ujian Skripsi Janjang Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi T. Energi Listrik / T. Elektronika / T.Infokom, maka perlu adanya perbaikan skripsi untuk mahasiswa :

NAMA : Yulianus F. K
N I M : 09.12.004
Perbaikan meliputi :

Pemodelan yang dilakukan dalam MATLAB pertimbangkan kondisi Solar Cell nya utk. bisa bergerak agar ~~[illegible]~~ diketahui karakteristik yang sbenarnya.

Malang, 19 Februari 2013

(_____)

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Formulir Perbaikan Ujian Skripsi

Dalam pelaksanaan Ujian Skripsi Janjang Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi T. Energi Listrik / T. Elektronika / T.Infokom, maka perlu adanya perbaikan skripsi untuk mahasiswa :

NAMA : Yulianus F. K.
N I M : 0912004.
Perbaikan meliputi :

- Pemodelan solar photovoltaic.
- Dibuat karakt, untuk beberapa sudut penerimaan cahaya atau solarcel diputar sesuai putaran matahari?

Malang,

( )

Gambar Solar meter

Gambar Multimeter

Gambar termometer

SURAT PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama	: Yulianus Feri Krismanto
NIM	: 09.12.004
Program Studi	: Teknik Elektro S-1
Konsentrasi	: Teknik Energi Listrik

Dengan ini menyatakan bahwa Skripsi yang saya buat adalah hasil karya sendiri, tidak merupakan plagiasi dari karya orang lain. Dalam Skripsi ini tidak memuat karya orang lain, kecuali dicantumkan sumbernya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat, dan apabila di kemudian hari ada pelanggaran atas surat pernyataan ini, saya bersedia menerima sangsinya.

Malang, 10 Maret 2013

Yang membuat Pernyataan,

METERAI TEMPEL
PAJAK MEMBANGUN BANGSA
TGL 20
4E296ABF42[illegible]
ENAM RIBU RUPIAH
6000 DJP

Yulianus Feri Krismanto
NIM : 09.12.004

LEMBAR PERSEMBAHAN

Tiada kata yang terindah selain berterima kasih padaMu Yesus, pengorbananku, jerih payahku selama ini kututup dengan lembaran manis penuh kasih.

Di segala keluh kesahku, Engkau hadir dalam bentuk Roh Kudus, menerangiku, membimbingku, menuntunku, hingga ku dapat terus berdiri hingga saat ini. Engkau pernah mengatakan, "Barangsiapa ingin mengikuti Aku, ia harus memanggul salibnya sendiri". Berkaca dari hal tersebut diriku selalu bangun berdiri dikala ku selalu terjatuh.

Terima kasih kuucapkan kepada :

1. Bapak, mama serta adikku tercinta.

2.Tim "Doa Ibu";Khairi, Asep, Yusuf, Gustav, Lucky, dan Abu.

3. Teman – teman asisten laboratorium SSTE.

Dan kepada semua teman-teman yang tidak saya sebutkan satu persatu. Semoga kalian semua selalu dalam berkat dan perlindunganNya.

Bunda Maria pernah berkata "Terjadilah padaku menurut kehendakMu" kata tersebut selalu kuuncapkan dikala semua persoalan selalu mendatangiku. Karna kata-kata itulah semua persoalan tersebut terpecahkan.

Ku doakan semoga di masa depan, kita semua dapat menuai kesuksesan. AMIN

Thanx All, U'r will be in my mind

BIOGRAFI PENULIS

Yulianus Feri Krismanto lahir pada tanggal 14 Januari 1991 di kota Mataram, Nusa Tenggara Barat. Merupakan anak pertama dari dua bersaudara putra bapak Ferdinand Subarman dan ibu Kristina Wastutik. Penulis memulai pendidikan pada tahun 1997 penulis melanjutkan pendidikannya di SDK.ST.Antonius Ampenan dan lulus tahun 2003. Pertengahan tahu 2003 penulis mengenyam pendidikan di SMPK.ST.Antonius Ampenan sampai tahun 2006. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMKN 3 Mataram mulai tahun 2006 sampai 2009. Pendidikan di perguruan tinggi dimulai pada bulan September tahun 2009 di Institut Teknologi Nasional Malang pada Fakultas Teknik Industri Program Studi Teknik Elektro S-1 dengan konsentrasi Teknik Energi Listrik dan di wisuda pada tanggal 23 Maret 2013, dengan judul skripsi "Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada Sistem Hibrid di Teknik Elektro ITN Malang".

LEMBAR PERSETUJUAN

STUDI ARRESTER DAN KAPASITOR SEBAGAI KOMPENSASI SISTEM PENGAMAN GENERATOR TERHADAP SURJA PETIR DI PLTU PAITON

TUGAS AKHIR

Disusun dan Diajukan Untuk Melengkapi dan Memenuhi Syarat-Syarat Guna Mencapai Gelar Ahlimadya Teknik

Disusun oleh :

WHANINDRA KUSUMA
04.52.005

Mengetahui Ketua Jurusan Elektro D-III	Diperiksa dan Disetujui Dosen Pembimbing
Ir. Choiral Saleh, MT **NIP.Y.1038800190**	**Ir. Teguh Herbasuki, MT** **NIP.Y.1038900209**

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO D-III
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
September 2007

Lembar Persembahan

A2Youth.com

Dia mengajarkan kepada manusia apa yang tidak diketahuinya.(Al-Alaq : 5)

Karya ini kupersembahkan tiada lain untuk semua Cinta dalam hidupku, yakni :

Kupanjatkan puja dan puji syukur kehadirat Engkau Yaa Illahi Raabi, semua yang tercapai saat ini tidak lain hanyalah karena karuniaMu yang begitu besar bagi hamba.

Beribu-ribu salam terlantunkan dalam hidupku selalu kepada engkau wahai Rasul, Nabi akhir zaman, Baginda Muhammad SAW.Tiada akhlak yang sempurna kecuali Engkau.Subhanallah.Semoga syafa'at dan doamu selalu terlimpah bagi perjalananku di dunia dan akhirat..Amien

Kedua orang tuaku yang tercinta, tak mungkin ananda dapat melalui semua ini tanpa segala dukungan dan kasing sayang dari engkau.Rasa terimakasih ini tak mungkin bisa berhenti sampai kapan pun.Ku mungkin bukan yang terbaik, tapi ananda selalu berusaha untuk memberi yang terbaik.

Untuk adikku (Maya), terimakasih atas kasih sayangnya dan semoga kebahagiaan selalu menyertaimu.Hati ini selalu mengucurkan rasa sayang padamu walaupun hampir tak pernah ada rasa sayang yang terucap dari bibir.Semoga menjadi keluarga yang sakinnah, mawaddah, warrahmah.Amien.

Keluarga besar Nguni, Pak lek, Bu lek, Pak puh, Bude, Mas, Mbak, dan semua keponakanku, terimasih atas senyum dan sayang yang selalu melekat di kalbuku.Itu merupakan semangatku dalam mencapai semua ini.

Other Thanks To :

All My Friend at National of Institut Technology Malang, specially Electro DIII concentration.Your support and prayer is very important for my step.I hopefully we will meeting in happy future.Amien.I love u guys.

My Dear at waiting place, thanks for love and faithfullnes.You make my life more beautiful, happy, and full a love.My efficacy is dedicated for u too.Ok.I hope u'll never change, still friendliness, keep smile, and sholehah.Amien.

My sister at long place, thanks for your support and advice.I'm very very esteem it.One more, Thanks my sister.

And everyone that impossible I mention it, thanks for aid and support.I'll never forget it.Thanks

By One_Indra

ABSTRAK

Kusuma, Whanindra.2007.*Studi Arrester Dan Kapasitor Sebagai Kompensasi Sistem Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Di PLTU Paiton.*Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Konsentrasi Energi Listrik, Program Diploma Institut Teknologi Nasional Malang.Pembimbing:Ir.Teguh Herbasuki, MT.

Kata Kunci: Arrester, Kapasitor, Surja Petir, Sistem Pengaman

Saat ini, dengan meningkatnya kebutuhan tenaga listrik membuat PLN (Perusahaan Listrik Negara) berupaya meningkatkan pelayanannnya. Oleh karena itu kontinuitas proses penyaluran harus benar-benar handal. Namun dalam sistem tenaga listrik seringkali terjadi gangguan-gangguan baik dari luar maupun dari dalam sistem. Dalam industri tenaga listrik, generator sangat memegang peranan penting sehingga perhatian serta perlindungan terhadap gangguan sangat diperlukan mengingat dari segi ekonomis, generator juga merupakan alat yang paling mahal di dalam sistem pembangkit.

Salah satu gangguan yang dapat terjadi adalah gangguan akibat gelombang berjalan surja hubung maupun surja petir pada sistem.Untuk melindungi belitan dari *stress* akibat tegangan lebih yang ditimbulkan oleh surja petir, maka dilakukan pemasangan *surge absorber* yang terdiri dari kapasitor yang diparalel dengan arrester yang terhubung pada terminal generator dengan tanah.Ini berguna untuk mengalirkan tegangan lebih ke tanah serta kecuraman gelombang pun dapat dikompensasi.

Dari studi evaluasi yang dilaksanakan di PLTU Paiton, maka dapat diketahui bahwa peranan *surge absorber* yang terdiri dari arrester yang diparalel dengan kapasitor sangatlah penting. Tentunya penerapan ini harus benar-benar diperhitungkan baik dari segi penentuan rating dasar arrester maupun penentuan besarnya kapasitor. Ini ditujukan agar hasil kompensasi terhadap surja petir akan benar-benar efektif sehingga sesuai dengan yang diharapkan.Selain itu dapat disimpulkan bahwa pemasangan dari *surge absorber* tersebut tidak terlalu berpengaruh pada penyaluran tegangan dari terminal generator ke transformator.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa dimana atas berkat dan rahmatnya yang selalu dilimpahkan pada kita, sehingga kita tidak kekurangan apapun dan tidak lepas dari kehendak dan ridhanya maka penulis berhasil menyusun dan menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya.Dimana Tugas Akhir ini adalah sebagai salah satu syarat akademik untuk menyelesaikan studi di Fakultas Teknik Industri Jurusan Energi Listrik DIII ITN Malang.

Kami menyadari bahwa terselesaikannya Laporan Tugas Akhir ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak yang membantu penyusunan laporan ini.Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bpk. Prof, Dr, Abraham Lomi, MSEE, Selaku Rektor ITN Malang.
2. Bpk. Mochtar Asroni, Ir, MSEE selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri
3. Bpk. H. Choirul Saleh, Ir, MT Selaku Kajur sekaligus Dosen Wali Elektro DIII
4. Bpk. Bambang Prio Hartono, Ir, ST, MT selaku Sekjur Elektro DIII
5. Bpk. Teguh Herbasuki, Ir, MT selaku Dosen Pembimbing Laporan
6. Kedua orang tuaku dan saudara-saudaraku yang telah banyak memberikan dukungan untuk menyelesaikan studi ini.
7. Teman-teman seperjuangan Jurusan Elektro DIII yang telah banyak membantu.

Dengan terselesaikannya laporan ini, besar harapan penulis agar apa yang tertulis dalam laporan ini bisa memberikan sumbangan dan menjadi bahan masukan serta memberikan manfaat kepada semua pihak pada umumnya dan khususnya bagi penulis sendiri.

Malang, September 2007

Penulis

DAFTAR ISI

Hal

LEMBAR PERSETUJUAN i

ABSTRAK ii

KATA PENGANTAR iii

DAFTAR ISI v

DAFTAR TABEL x

DAFTAR GAMBAR xii

DAFTAR GRAFIK xiv

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang 1

1.2. Rumusan Masalah 2

1.3. Tujuan 3

1.4. Batasan Masalah 3

1.5. Metodelogi Penulisan 4

1.6. Sistematika Pembahasan 5

BAB II TEORI DASAR

2.1. Tegangan Lebih Petir 6

2.1.1. Proses Terjadinya Petir 6

2.1.2. Mekanisme Sambaran Petir 8

2.1.2.1. *Stepped Leader* 8

2.1.2.2. Sambaran Kembali (*return stroke*) 9

2.1.2.3. *Dart Leader* 10

2.1.3. Sambaran Tegangan Lebih Petir 11

2.2. Gelombang Berjalan..... 12

2.2.1 Pengertian Umum..... 12

2.2.2 Bentuk Dan Spesifikasi Gelombang..... 13

2.2.3 Pantulan Pada Gelombang Berjalan 16

2.2.3.1. Gelombang Berjalan Pada Titik Peralihan 16

2.2.3.2. Gelombang Berjalan Pada Kawat Terbuka.... 17

2.2.3.3. Gelombang Berjalan Pada Kawat

Hubung Singkat 18

2.2.3.4. Gelombang Berjalan Pada Titik Sambungan. 18

2.2.3.5. Gelombang Berjalan Melalui Kapasitansi 19

2.2.3.6. Gelombang Eksponensial 20

2.3. Perlindungan Terhadap Sambaran Petir..... 20

2.3.1. Perlindungan Terhadap Sambaran Petir Langsung 20

2.3.2. Perlindungan Terhadap Gelombang Berjalan 21

2.3.2.1. Arrester 21

2.3.2.2. Tahanan Tak Linier..... 30

2.3.3. Kapasitor 33

2.4. Koordinasi Isolasi..... 41

2.4.1. Pemilihan Arrester..... 43

2.4.1.1. Tegangan Dasar Arrester 44

2.4.1.2. Arus Pelepasan Nominal 46

2.4.1.3. Tegangan Pelepasan Arrester 49

2.4.2. Pemilihan Tingkat Isolasi Dasar (BIL) 52

2.4.3. Margin Perlindungan Arrester..... 55

2.4.4. Jarak Arrester Dengan Peralatan 55

2.5. Teori Pantulan Berulang Dan Diagram Tangga..... 56

2.5.1. Arrester Dan Transformator Yang Dihubungkan Dengan Saluran Udara..... 58

2.5.2. Arrester Dan Transformator Yang Dihubungkan Dengan Kabel 61

2.6. Perlindungan Belitan Isolasi Generator Terhadap Surja..... 63

2.6.1. Perlindungan Generator Yang Dihubungkan Langsung Dengan Saluran udara..... 64

2.6.2. Perlindungan Generator Terhadap Tegangan Surja Yang Diimbaskan Melalui Transformator 65

BAB III ARRESTER DAN KAPASITOR SEBAGAI KOMPENSASI SISTEM PENGAMAN GENERATOR TERHADAP SURJA PETIR

3.1. Umum..... 68

3.2. Perlindungan Generator Terhadap Petir..... 69

3.3. Penentuan Besarnya Kapasitor Yang Dipararel Dengan Kapasitor 73

3.3.1. Impedansi Surja Saluran..... 73

3.3.2. Impedansi Surja Generator..... 75

3.3.3. Induktansi Dan Kapasitansi Terminal Efektif 75

3.3.4. Kecepatan Rambat Gelombang 77

3.3.5. Peredam Terpa (*Surge Absorber*) 78

BAB IV ANALISA DATA DAN PERHITUNGAN

4.1. Single Line Diagram Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Di PLTU Paiton 80

4.2. Data-Data 82

4.2.1. Generator 82

4.2.2. *Generator Transformer* 82

4.2.3. Data Arrester Pada Saluran 500 kV 83

4.2.4. Data *Surge Absorber* 83

4.2.5. Data *Isolated Phase Busduct* 84

4.2.6. Data *Busbar* 18 kV 85

4.2.7. Data Penghantar 500 kV (Paiton-Krian) 85

4.3. Analisa Arrester Sebagai Perlindungan Generator 85

4.3.1. Perhitungan Rating Dasar Arrester 86

4.3.2. Perhitungan Jarak Sambaran Petir Yang Bisa Diamankan Oleh Arrester 91

4.3.3. Penentuan Jarak Arrester Dengan Transformator 94

4.3.4. Tegangan Tertinggi Pada Transformator 96

4.3.5. Tegangan Yang Masuk Ke Generator Setelah Di Dipindahkan/Ditransferkan dari Tegangan Tinggi Trafo Ke Tegangan Rendah Trafo 100

4.4. Analisa Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Dengan Menggunakan Arrester Tanpa Kapasitor 101

4.4.1. Penentuan Impedansi Surja 102

4.4.2. Penentuan Tegangan Dasar Arrester 103

4.4.3. Analisa Pemilihan Arrester 104

4.4.4. Penentuan Tegangan Tertinggi Yang Sampai Pada Generator 106

4.5. Analisa Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Dengan Menggunakan Arrester Dan Kapasitor..... 115

4.5.1. Penentuan Impedansi Peralatan Dan Saluran 18 kV .. 115

4.5.2. Penentuan Tegangan Yang Menuju Ke Generator..... 118

4.5.3. Analisa Ketahanan Belitan Generator Terhadap Surja Petir..... 125

4.4. Analisa Saat Kondisi Normal..... 131

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan 134

5.2. Saran..... 134

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

TABEL **Hal**

2.1. Kode Warna Kapasitor 38

2.2. *Specific Current Impuls* 47

2.3. Karakteristik Perlindungan Arrester 48

2.4. Karakteristik Arrester Tipe Katup 51

2.5. Tingkat Isolasi Standar Untuk Vrms Lebih Dari Atau Sama Dengan 300 kV 54

3.1. Contoh Pengujian Impuls Pada Generator 72

3.2. Contoh Karakteristik Arreseter Untuk Generator 72

3.3. Kapasitansi Terminal Efektif Pada Kondisi Gelombang Berjalan 76

4.1. Jarak Antara Arrester Dengan Titik Mula Terjadinya Petir 93

4.2. Impedansi Paralel Kapasitor Dengan Impedansi Surja Generator 120

4.3. Impedansi Total Dari Rangkaian Ekivalen Antara Transformator Dan Generator 121

4.4. Tegangan Peralihan Antara Transformator Dan Generator 122

4.5. Waktu Perambatan Gelombang Persamaan Tegangan Yang Menuju Ke Ke Generator Dan Pelandaian Tegangan Puncak 124

4.6. Pengaruh Pemasangan Kapasitor Dan Arrester 20 kV Terhadap Waktu Perambatan Gelombang Tegangan Yang Menuju Ke Generator Dan Pelandaian Puncak Tegangan 126

4.7. Pengaruh Pemasangan Kapasitor Dan Arrester 22,5 kV Terhadap Waktu Perambatan Gelombang Tegangan Yang Menuju Ke Generator Dan

Pelandaian Puncak Tegangan 127

4.8. Perbandingan Penggunaan Arrester 20 kV dan Arrester 22,5 kV 128

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR **Hal**

2.1. Distribusi Sambaran Petir 7

2.4. Gelombang Berjalan Pada Titik Peralihan 16

2.5. Gelombang Berjalan Pada Kawat Terbuka 17

2.6. Gelombang Berjalan Pada Kawat Hubung Singkat 18

2.7. Gelombang Berjalan Pada Titik Sambungan 18

2.8. Gelombang Berjalan Melalui Kapasitansi 19

2.9. Arrester Jenis *Expultion* 25

2.11. Arrester Tipe Katup 28

2.13. Simbol Sirkit Untuk Kapasitor Nonelektrolitis 36

2.14. Sistem Kode Warna Pada Kapasitor Polyster 37

2.15. Simbol Sirkit Untuk Kapasitor Elektrolitis 39

2.16. Kapasitor Yang Dihubungkan Secara Seri 40

2.17. Kapasitor Yang Dihubungkan Paralel 40

2.18. Diagram Tangga 57

2.19. Arrester Dan Transformator Yang Dihubungkan Langsung Dengan Saluran Udara 59

2.20. Diagram Tangga Antara Arrester Dan Transformator Dihubungkan Dengan Saluran Udara 61

2.21. Arrester Dan Transformator Yang Dihubungkan Dengan Sepotong Kabel 62

2.22. Perubahan Tegangan Pada Belitan Isolasi Generator Dan Cara

Perlindungannya 64

3.1. Hubungan Kapasitor Pelindung 70

4.1. Single Line Diagram Pengaman Generator Terhadap Surja Petir 81

4.2. Jarak Antara Arrester Dengan Titik Mula Terjadinya Petir 92

4.3. Jarak Antara Arrester Dengan Transformator 96

4.4. Pantulan Berulang Dari Arrester Ke Transformator 98

4.5. Jarak Antara Arrester Dengan Generator 102

4.6. Pantulan Berulang Dari Arrester 20 kV Ke Generator 108

4.7. Pantulan Berulang Dari Arrester 22,5 kV ke Generator 112

4.8. Rangkaian Ekivalen Pemasangan Arrester Dan Kapasitor Pada Saluran 18 kV 118

4.9. Gelombang Eksponensial 122

4.10. Rangkaian Ekivalen Saat Kondisi Normal 131

DAFTAR GRAFIK

GRAFIK **Hal**

2.1. Karakteristik Volt-Waktu Petir 11

2.2. Spesifikasi Bentuk Muka Gelombang 15

2.3. Karakteristik Arrester Jenis Expulsi 26

2.4. Karakteristik Arrester Tipe Katup 30

4.1. Grafik Naiknya Tegangan Pada Transformator 99

4.2. Grafik Naik Tegangan Pada Lokasi Arrester 109

4.3. Grafik Naik Tegangan Pada Generator 110

4.4. Grafik Kenaikan Tegangan Pada Lokasi Arrester 113

4.5. Grafik Naik Tegangan Pada Generator 114

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dewasa ini, dengan meningkatnya kebutuhan tenaga listrik maka PLN sebagai perusahaan penyedia tenaga listrik terus meningkatkan pelayanannya kepada masyarakat.Bentuk pelayanan tersebut antara lain dengan mempertahankan kontinuitas proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkit ke beban.Hal ini sangat penting terutama untuk pelanggan yang berasal dari dunia industri, sebab bila terjadi pemutusan, maka industri tersebut akan mengalami gangguan.

Namun dalam sistem tenaga listrik seringkali terjadi gangguan-gangguan baik gangguan dari luar pembangkit maupun dari dalam pembangkit itu sendiri.Dalam industri tenaga listrik, generator merupakan bagian yang sangat penting dan harus mendapat perhatian yang lebih.Hal ini dikarenakan jika generator terganggu maka semua sistem akan terganggu, dan selain itu, ditinjau dari segi ekonomis, generator merupakan alat yang paling mahal.

Salah satu gangguan yang dapat terjadi adalah gangguan akibat gelombang berjalan surja hubung maupun surja petir pada sistem.Apabila gelombang berjalan mengalir pada terminal generator maka akan timbul suatu tekanan atau stress pada terminal generator sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada generator.Demikian juga apabila muka gelombang yang curam, sehingga arus transient yang mengalir pada kumparan-kumparan mesin yang akan menghasilkan tegangan yang relatif tinggi, khususnya pada terminal belitan.

Untuk melindungi belitan isolasi dari tegangan lebih dan kecuraman muka gelombang akibat gelombang berjalan dapat dilakukan dengan pemasangan *surge absorber* yang terdiri dari kapasitor yang diparalel dengan arrester yang dihubungkan antara terminal generator dengan tanah karena dengan adanya arrester maka tegangan lebih tersebut dapat langsung diteruskan ke tanah dan dengan adanya kapasitor maka kecuraman gelombang dapat dilandaikan.

1.2.Rumusan Masalah

Masalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Penentuan rating dasar arrester yang dipasang sebagai pengaman generator terhadap surja petir ?
2. Bagaimana perbandingan arrester yang dipasang tanpa kapasitor dengan arrester yang dipasang paralel dengan kapasitor ?
3. Berapa besarnya kapasitas kapasitor yang dapat dipasang sehingga dapat menghindari tekanan yang berlebih pada belitan mesin ?
4. Bagaimana tegangan yang terjadi pada terminal generator saat dipasang kapasitor sebagai kompensasi sistem pengaman generator terhadap gelombang berjalan akibat surja petir ?
5. Berapa waktu gelombang berjalan dengan pemasangan kapasitor sebagai kompensasi sistem pengaman generator terhadap gelombang berjalan akibat surja petir ?

1.3.Tujuan

Tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah :

1. Menentukan rating dasar arrester yang dipasang sebagai pengaman generator terhadap surja petir.
2. Mengetahui perbandingan penggunaan arrester yang dipasang tanpa kapasitor dan penggunaan arrester yang dipasang paralel dengan kapasitor.
3. Menentukan besarnya kapasitas kapasitor yang dapat dipasang sehingga dapat menghindari tekanan yang berlebihan pada belitan mesin.
4. Mengetahui perubahan tegangan yang terjadi pada teminal generator saat dipasang kapasitor sebagai kompensasi sistem pengaman generator terhadap surja petir

1.4. Batasan Masalah

Mengingat permasalahan dari penggunaan arrester dan kapasitor sangat luas, maka perlu adanya batasan masalah yaitu :

1. Hanya menganalisa pemasangan/penggunaan kapasitor dan arrester yang dipasang secara paralel pada turbo generator yang dipasang sesuai pada sistem pembangkit PLTU Paiton unit 1 dan 2.
2. Hanya membahas pemasangan/penggunaan kapasitor dan arrester sebagai kompensasi sistem pengaman generator terhadap gelombang berjalan yang disebabkan oleh surja petir.
3. Mengetahui lama waktu gelombang berjalan dengan pemasangan kapasitor sebagai kompensasi sistem pengaman generator terhadap gelombang berjalan akibat surja petir.

1.5. Metodelogi Penulisan

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah :

1. Studi literatur

   Yakni dengan mempelajari teori-teori atau buku-buku (referensi) yang ada kaitannya denga masalah yang akan dibahas.

2. Metode observasi

   Metode dilakukan dengan melakukan hal hal sebagai berikut :

   - Melakukan evaluasi data laporan di lapangan..
   - Pengamatan pada masalah yang dibahas melalui lembaran-lembaran kerja/ work order yang ada.
   - Pengambilan data dari buku panduan/manual peralatan yang dibahas.

3. Metode interview

   Yakni dengan melaksanakan wawancara langsung dengan pembimbing mengenai hal-hal yang ada kaitannya dengan masalah yang akan dibahas.

4. Evaluasi Data

   Yakni mengevaluasi serta menganalisa data yang diperoleh melalui perhitungan secara teoritis dengan mengacu pada kondisi sebenarnya di lapangan.

5. Metode Pembahasan

   - Menentukan karakteristik perlindungan arrester dan kapasitor terhadap transformator dan generator
   - Menganalisa perbandingan penggunaan arrester dengan rating sesungguhnya dilapangan (22,5 kV) dengan arrester 20 kV.

1.6. Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan dalam penyusunan tugas akhir ini disusun berdasarkan sistem dari bab ke bab, dengan urutan sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi penulisan dan sistematika pembahasan..

BAB II : TEORI DASAR

Pada bab ini berisi teori dasar sebagai referensial yang menunjang dalam pembahasan selanjutnya.Didalam teori dasar membahas mengenai arrester, kapasitor, dan gelombang berjalan.

BAB III : PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan mengenai teori yang berisi tentang kompensasi sistem pengaman generator dengan arrester yang di paralel dengan kapasitor.

BAB IV : ANALISA DATA DAN PERHITUNGAN

Pada bab ini berisikan data-data yang penunjang perhitungan dan analisa tentang peranan arrester dan kapasitor sebagai kompensasi sistem pengaman generator terhadap gelombang berjalan akibat surja petir.

BAB V : KESIMPULAN

Pada bab ini berisikan kesimpulan dari uraian pembahasan diatas dan saran-saran dalam penyusunan tugas akhir ini.

BAB II

TEORI DASAR

2.1. Tegangan Lebih Petir

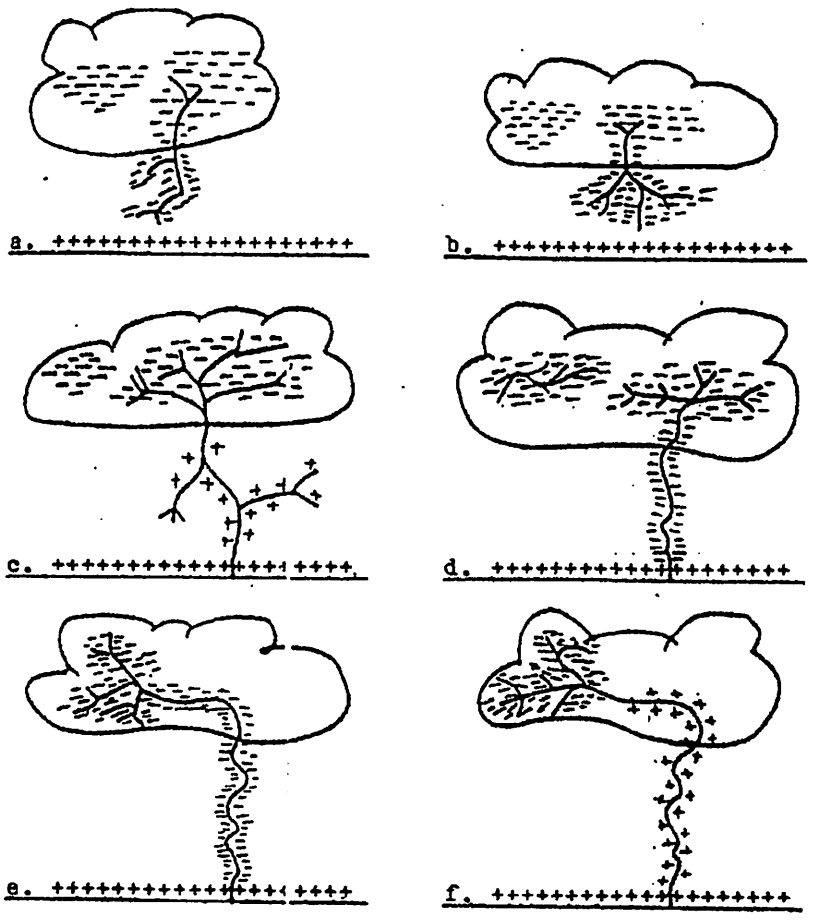
2.1.1. Proses Terjadinya Petir

Pada keadaan tertentu, dalam lapisan atmosfir bumi terdapat gerakan angin ke atas membawa udara lembab.Makin tinggi dari muka bumi, makin rendah tekanan dan suhunya.Uap air mengkondensasi menjadi titik air dan membentuk awan.

Kejadian petir bermula dari mengumpulnya awan diatas bumi dalam ketinggian tertentu.Pada awan tersebut muatan positif mengumpul pada bagian atas dan muatan negatifnya berada pada bagian bawah.Karena bumi dapat dikatakan sebagai benda bermuatan positif pada permukaannya, maka muatan negatif yang berada pada bagian bawah awan akan tertarik oleh muatan dari awan menuju bumi, inilah yang disebut petir.Jadi petir merupakan lompatan/loncatan elektron dari awan yang berupa kilatan dan umumnya disertai dengan suara yang bergemuruh.

Petir lebih cenderung menyambar tempat-tempat yang tinggi di permukaan bumi.Hal ini karena kuat medan disekitar ujung atau puncak bangunan tersebut lebih rapat, dan sifat dari muatan akan cenderung mengumpul pada puncak atau ujung dari bagian yang runcing, begitu pula tepian-tepian runcing bangunan.Bukan pula tidak mungkin sebuah bangunan yang tinggi tidak disambar petir pada puncaknya, tetapi dasarnya ataupun tengahnya.Arus petir akan *discharge* ke bumi dengan jalan yang paling konduktif atau paling kecil

resistifitasnya.Distribusi muatan dari berbagai tingkat pelepasan pada sambaran petir ditunjukkan pada gambar 1 berikut :



Gambar 2.1.
Distribusi Sambaran Petir *)

*)Sirait, K.T dan Zoro, R.1987.Proteksi Sistem Tenaga, Bagian I, Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik.Bandung.ITB

Keterangan gambar diatas adalah :

a) Gambar 1.a, terjadi pemusatan dalam awan, sehingga menyebabkan timbulnya aliran pengemudi (*pilot streamer*) yang menentukan arah perambatan dari awan ke udara.Sesudah *pilot streamer* ini terjadi, maka diikuti oleh titik cahaya yang bergerak secara melompat yang dinamakan *stepped leader*.

b) Gambar 1.b, *stepped* akan mencapai bumi, sementara terjadi kanal muatan positif dari bumi ke awan, karena beda potensial yang tinggi.Kanal muatan positif ini bertemu dengan ujung stepped leader di titik pertemuan yang disebut *point of strike*.

c) Gambar 1.c, sambaran kembali (*return stroke*) terjadi ketika lidah kilat mengenai bumi.Sambaran kembali terjadi karena aliran muatan positif dari bumi ke awan dengan gerakan cepat sekali.

d) Gambar 1.d, pusat muatan pertama telah dilepaskan ke bumi, kanal muatan berkembang menuju pusat muatan kedua.

e) Gambar 1.e, pelepasan (*discharge*) antara muatan pertama dengan pusat muatan kedua.Sesudah *return* yang pertama biasanya masih ada pusat muatan yang lain yang ada di awan untuk memulai sambaran kilat berikutnya.

f) Gambar 1.f, terjadi *return stroke* yang kedua dimana pelepasan (*discharge*) terjadi antara bumi dengan muatan negatif yang terletak di lapisan bawah.

2.1.2. Mekanisme Sambaran Petir

2.1.2.1. *Stepped Leader*

Ada beberapa macam *discharge* dari sambaran petir, tetapi pada umumnya discharge dimulai dari awan menuju bumi.Terjadinya saluran arus kilat dimulai

dengan pelepasan muatan secara bertahap.Permulaan dari kilat ini didahului oleh aliran pengemudi (*pilot streamer*) yang menentukan arah perambatan muatan dari awan ke udara yang ionisasinya rendah.Sesudah *pilot streamer* terjadi selanjutnya diikuti oleh titik cahaya yang bergerak secara bertahap yang dinamakan *stepped leader.*

Kecepatan dari *stepped leader* ini kira-kira 10^5 m/s.Arah tiap tiap langkahnya berubah-ubah sehingga jalannya tidak lurus dan terpatah-patah.Ketika lidah kilat menuju bumi, akan terjadi kanal muatan positif dari bumi ke awan, hal ini disebabkan karena adanya beda potensial yang cukup tinggi.

Karena muatan positif ini bertemu dengan ujung *stepped leader*, titik pertemuan ini disebut *point of strike* yang berada di sekitar 20-70 meter diatas permukaan bumi."Waktu yang diperlukan dari *stepped leader* untuk mencapai bumi adalah 0,01 detik sedangkan *return stroke* hanya memerlukan waktu 50 μ detik."[1)]

2.1.2.2. Sambaran Kembali (*return stroke*)

Saat pelopor mendekati bumi, muatan di bumi bergerak ke atas daerah yang dibawah pelopor dan terutama dikonsentrasikan pada obyek yang tinggi dengan konduktivitas yang cukup untuk melakukan pergerakan muatan.Hal ini berarti aliran-aliran telah dibentuk oleh obyek-obyek sebelum terjadi sambaran.

Meskipun hubungannya tidak dapat dibentuk dengan tepat, sangat mungkin aliran-aliran dibentuk sementara pelopor pada langkah terakhir atau

---

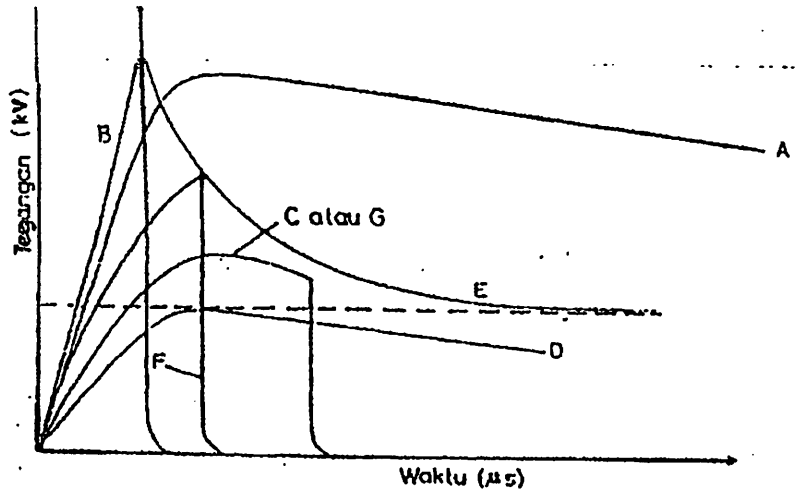
[1)]Sirait, K.T dan Zoro, R.1987.Proteksi Sistem Tenaga, Bagian I, Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik.Bandung.ITB.

kedua terakhir berjalan dari awan ke tanah.Sesudah sambaran kembali yang pertama, biasanya terjadi sambaran-sambaran berikutnya karena pada bagian lain dari awan mempunyai cukup banyak muatan.

2.1.2.3. *Dart Leader*

Sesudah *return stroke* yang pertama, biasanya masih ada pusat muatan yang lain di awan untuk mulai sambaran petir berikutnya, dimana sambaran ini dimulai dengan *leader* yang mengikuti *return stroke* sebelumnya, yang memiliki ciri-ciri tidak mempunyai percabangan, tidak dapat dilihat dengan *boys camera*, mempunyai kecepatan yang sangat tinggi yaitu 0,13-0,10 persen dari kecepatan cahaya.

Mengingat ciri-ciri tersebut diatas yang tidak mempunyai percabangan maka disebut juga lidah panah (*dart leader*).Adapun waktu yang digunakan untuk dapat mencapai bumi kira-kira 1 ms.Biasanya suatu sambaran petir terdapat empat sambaran kembali (*return stroke*).



Grafik 2.1
Karakteristik Volt-Waktu Petir *)

*)Arismunandar, Artono.1978.Teknik Tegangan Tinggi.Jakarta.PT.Pradnya Paramita.

Keterangan Gambar :

A = gelombang impuls

B = gelombang cepat, terpotong pada muka

C = gelombang terpotong pada ekor

D = gelombang penuh

E = lengkung volt-waktu

F = gelombang terpotong pada puncak

G = gelombang terpotong pada ekor dengan kemungkinan lompatan 50 %.

2.1.3. Sambaran Tegangan Lebih Petir

Bahaya tegangan lebih yang dapat terjadi pada sistem pembangkit (hantaran, menara, gardu induk dan peralatan lain) dapat berupa :

a. Sambaran langsung

Sambaran langsung adalah apabila petir menyambar langsung pada kawat phasa (untuk saluran tanpa kawat tanah).Pada saat terjadi sambaran langsung ini, juga diikuti oleh merambatnya gelombang arus yang cukup besar.Arus ini sangat berbahaya terhadap ketahanan isolasi-isolasi dari peralatan pada gardu induk terdekat.Besarnya bahaya yang disebabkan oleh gelombang berjalan ini ditentukan oleh besarnya arus petir dan waktu muka gelombangnya.Jika sambaran langsung mengenai kawat transmisi maka arus petir sepenuhnya mengalir dalam saluran transmisi dan berbentuk tegangan surja yang mengalir melalui kawat tansmisi menjauhi titik sambaran ke segala arah yang mungkin.

b. Sambaran tak langsung

Suatu sambaran tidak langsung berarti sambaran kilat yang menyambar ke tanah dekat dengan saluran transmisi."Arus induksi normalnya mempunyai polaritas positif dan menimbulkan tegangan surja dengan bentuk gelombang yang sama dan mempunyai amplitudo yang besarnya tergantung pada jarak kawat tanah".[2)]

2.2. Gelombang Berjalan

2.2.1 Pengertian Umum

Bila salah satu saluran transmisi tersambar petir maka pada tempat itu akan terjadi tegangan lebih (tegangan impuls) yang disebabkan oleh pelepasan muatan petir.Tegangan lebih ini mempunyai bentuk gelombang aperiodik yang teredam (*damped aperiodic*).

[2,)] ibid.

Sampai saat ini penyebab adanya gelombang berjalan yang diketahui adalah :

a. Sambaran kilat langsung pada kawat.

b. Sambaran tidak langsung pada kawat (induksi).

c. Operasi pemutusan (*arching grounds*).

Semua penyebab di atas menimbulkan surja tegangan dan surja arus.

Dari sudut energi dapat dikatakan bahwa surja pada kawat disebabkan adanya penyuntikan atau penambahan energi secara tiba-tiba pada kawat.Energi yang merambat ini terdiri dari arus dan energi.

Kecepatan merambat gelombang berjalan tergantung dari konstanta-konstanta kawat."Pada kawat di udara kecepatan merambat kira-kira sama dengan kecepatan cahaya yaitu 1000 *feet*.Sedangkan pada kawat tanah kira-kira mencapai 500 *feet* per mikrodetik."[3)]

Bila gelombang mencapai titik peralihan atau diskontinuitas akan terjadi perubahan pada gelombang tersebut sehingga terdapat sedikit perbedaan dengan gelombang asal.

2.2.2. Bentuk dan Spesifikasi Gelombang

Gelombang berjalan mempunyai dua bagian yaitu :

a. Muka gelombang (*wave front*).

b. Ekor gelombang (*wave tail*).

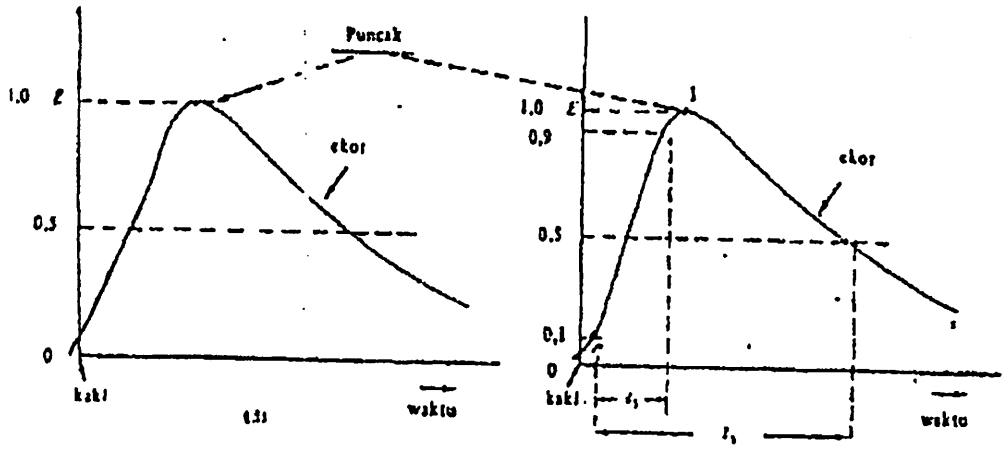
Kesemuanya ini ditetapkan dalam standar-standar sedemikian rupa sehingga kesukaran-kesukaran untuk menetapkan permulaan gelombang dan puncak dapat diatasi.

[3)] ibid.

Muka gelombang didefinisikan sebagai bagian dari gelombang yang dimulai dari titik nol sampai pada puncak, sedang sisanya disebut ekor gelombang.

Istilah-istilah lain yang biasa digunakan untuk menetapkan perlindungan generator terhadap gelombang ini adalah setengah puncak gelombang.Menurut standar lamanya muka gelombang berjalan didefinisikan sebagai hasil bagi antara lamanya tegangan naik dengan harga 10 %.

Waktu sampai setengah puncak (*time to half value*), 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.Gelombang penuh adalah gelombang yang tidak terputus karena lompatan api atau tembusan (*puncture*) mempunyai waktu muka gelombang Tf(μs) dan waktu sampai setengah puncak Tt (μs).Gelombang ini dinyatakan menurut IEC adalah (1,2 x 50 μs).Selama gelombang berjalan ini melalui saluran transmisi bentuknya selalu berubah (menjadi kurang curam, ekornya bertambah panjang dan amplitudonya berubah) oleh karena pengaruh penghantar pada tanah dan efek kulit.



Grafik 2.2
Spesifikasi Bentuk Muka Gelombang*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga hal : 4.

Spesifikasi dari suatu gelombang berjalan :

a. Puncak (*crest*) gelombang, E (KV) yaitu amplitudo maksimum gelombang.

b. Muka gelombang, t1 (mikrodetik), yaitu waktu dari permulaan sampai puncak.Dalam praktek diambil dari 10 % sampai 90 %E.

c. Ekor gelombang, yaitu bagian di belakang puncak.

d. Panjang gelombang, t2 (mikrodetik), yaitu waktu dari permulaan sampai pada titik 50 % pada ekor gelombang.

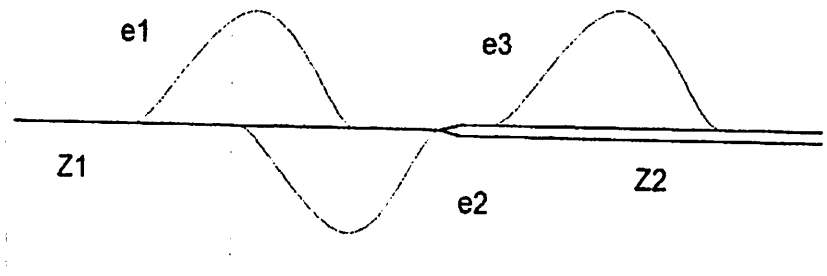
2.2.3. Pantulan Pada Gelombang Berjalan

2.2.3.1. Gelombang Berjalan Pada Titik Peralihan

Bila gelombang berjalan menemui titik peralihan, perubahan impedansi, maka sebagian gelombang berjalan itu akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan ke bagian lain dari titik tersebut.

Pada titik peralihan itu sendiri, besarnya tegangan dan arus dapat dari nol sampai dua kali tegangan gelombang yang dating.

Gelombang yang datang dinamakan gelombang datang atau *incident wave*, dan kedua gelombang lain yang timbul karena titik peralihan itu dinamakan gelombang pantulan atau *reflected wave* dan gelombang terusan atau *transmitted wave*, lihat pada gambar 2.2 :



Gambar 2.2
Gelombang berjalan pada titik peralihan*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Keterangan gambar :

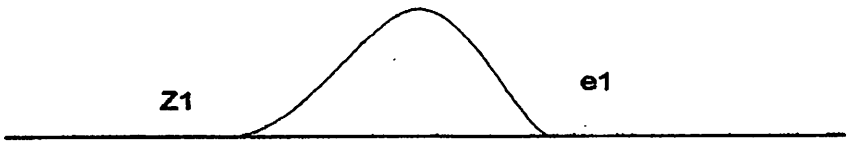
e_I = gelombang datang atau "*incident wave*"

e_2 = gelombang pantulan atau "*reflected wave*"

e_3 = gelombang terusan atau "*transmitted wave*"

$$e_1 = \frac{2.Z2}{Z1 + Z2} e \quad \text{.....(1)}$$

2.2.3.2. Gelombang Berjalan Pada Kawat Terbuka



Gambar 2.3

Gelombang berjalan pada kawat terbuka*)

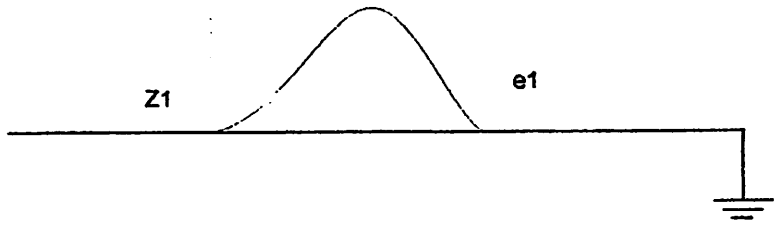
*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Disini $Z_{0 = \sim}$ (tak terhingga)

Maka :

$$e_0 = e_1 + e_2 = 2.e_1 \quad \text{.....(2)}$$

2.2.3.3. Gelombang Berjalan Pada Kawat Hubung Singkat



Gambar 2.4
Gelombang Berjalan Pada Kawat Hubung Singkat*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

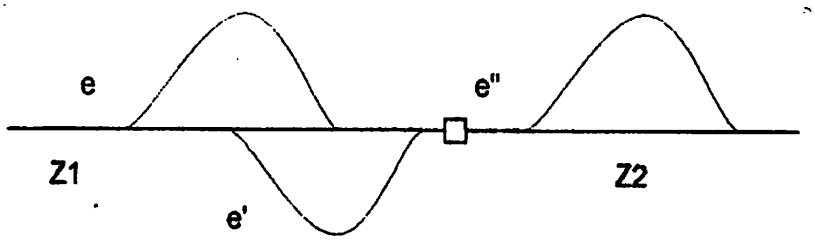
Disini $Z_0 = 0$

Maka :

$$e_1' = \frac{0 - Z1}{Z0 + Z1} e_1 = e_1 \quad \text{.....(3)}$$

$$i_1' = -\frac{e_1'}{Z1} = -\frac{e_1'}{Z1} = i_1 \quad \text{.....(4)}$$

2.2.3.4. Gelombang Berjalan Pada Titik Sambungan



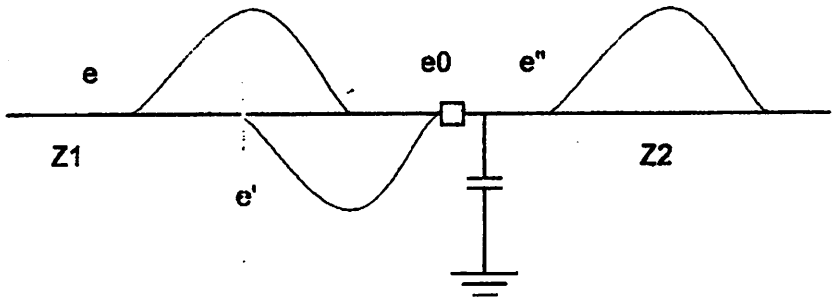
Gambar 2.5
Gelombang berjalan pada titik sambungan*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Persamaan pada gelombang di titik sambungan adalah :

$$i_{1'} = -\frac{2.Z2}{Z1+Z2}e \quad \text{.....(5)}$$

2.2.3.5. Gelombang Berjalan Melalui Kapasitansi



Gambar 2.6
Gelombang Berjalan Melalui Kapasitansi*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Tegangan pantulan e"diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$e_2 = EA\left[\frac{a+\alpha}{\alpha-\beta}e^{-at} - \frac{\alpha+\beta}{\alpha-\beta}e^{\beta t}\right] \quad \text{.....(6)}$$

Dimana :

$$\alpha = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2.Z_1.C} \quad ; \beta = \frac{Z_2 + Z_1}{Z_2.Z_1.C} \quad ; A = -1 \quad \text{.....(7)}$$

Sedangkan gelombang terusan e" adalah :

$$e_2' = -E\frac{\alpha+\beta}{\alpha-\beta}\left[e^{-at} - e^{\beta t}\right] \quad \text{.....(8)}$$

2.2.3.6. Gelombang Eksponensial

Untuk suatu gelombang eksponensial

$E(t) = E\,e^{-at}$

Secara umum penyelesaiannya adalah sebagai berikut :

$$e_2'' = EA\left[\frac{a+\alpha}{a-\beta}e^{-at} - \frac{\alpha+\beta}{a-\beta}e^{-\beta t}\right] \quad \text{.....(9)}$$

Sedangkan waktu puncak muka gelombang dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$de(t) = E(-ae^{-at1} + be^{-bt1)} = 0 \quad \text{.....(10)}$$

Dengan $ae^{-at1} = be^{-bt1}$

Sehingga :

$$t_1 = \frac{\ln\frac{\beta}{a}}{\beta - a} \quad \text{.....(11)}$$

2.3. Perlindungan Terhadap Sambaran Petir

2.3.1. Perlindungan Terhadap Sambaran Petir Langsung

Untuk melindungi terhadap sambaran petir langsung diperlukan :

a. Batang –batang atau kawat tanah pelindung yang berfungsi untuk menarik petir atau menerima sambaran petir.

b. Kawat penghantar atau bagian dari konstruksi dengan impedansi rendah yang berfungsi menyalurkan pelepasan muatan dari petir ke tanah.

c. Tahanan tanah yang rendah (daya hantar dan penampang yang sesuai sambungan-sambungan hantaran yang baik dan bebas dari korosi).

2.3.2. Perlindungan terhadap gelombang berjalan.

Penggunaan kawat tanah pada hantaran udara dan gardu induk selain memberikan perlindungan yang baik terhadap sambaran petir juga dapat mengurangi tegangan lebih yang terjadi akibat induksi elektromagnetis pada hantaran.Tetapi hal ini belum cukup untuk melindungi peralatan-peralatan dari gelombang berjalan yang masih dapat mencapai gardu dan menimbulkan kerusakan.

Kerusakan-kerusakan yang tersebut dapat berupa :

a. Tegangan tembus luar, yaitu merusak isolator, bagian-bagian permukaan peralatan.
b. Tegangan tembus dalam, yaitu merusak isolasi utama dari peralatan ke tanah dan juga isolasi antara bagian-bagian dalam peralatan.
c. Tegangan tembus luar dan dalam, yaitu yang mungkin terjadi sebagai akibat osilasi yang terjadi pada peralatan.

Dengan demikian, digunakan peralatan pelindung untuk melindungi transformator dan peralatan lain terhadap gelombang berjalan.Peralatan pelindung tersebut adalah Arrester dan Peredam terpa (*Surge Absorber*).

2.3.2.1. Arrester

Arrester merupakan alat pengaman bagi peralatan listrik terhadap tegangan lebih yang timbul oleh petir atau *switching*.Alat ini bersifat melalukan arus atau tegangan lebih tersebut ke tanah.

Pada keadaan normal *lightning arrester* bersifat sebagai isolator (mempunyai tahanan yang besar sekali), tetapi bila ada arus tegangan surja pada peralatan listrik yang diamankannya, maka *lightning arrester* akan bersifat

sebagai konduktor (mempunyai tahanan yang kecil).Setelah arus atau tegangan surja itu hilang, *lightning arrester* itu harus dengan cepat kembali bersifat sebagai isolator, sehingga CB (*Circuit Breaker*) tidak sempat membuka.

Arrester yang ideal harus memiliki karakteristik sebagai berikut :

a. Pada tegangan sistem yang normal arrester tidak boleh bekerja.Tegangan tembus arrester pada frekuensi jala-jala harus lebih tinggi dari tegangan yang mungkin terjadi pada sistem.
b. Setiap gelombang transient dengan tegangan puncak yang lebih tinggi dan tegangan tembus arrester harus mampu mengerjakan arrester untuk mengalirkan arus ke tanah.
c. Arrester harus mampu melalukan arus terpa ke tanah tanpa merusak arrester itu sendiri dan tanpa menyebabkan tegangan pada terminal arrester lebih tinggi dari tegangan sumbernya sendiri.
d. Arus sistem tidak boleh mengalir ke tanah setelah gangguan diatasi (*follow current*).*Follow current* harus dipotong begitu gangguan telah lalu dan tegangan kembali normal.

Ada tiga jenis arrester yang umum dipakai :

1) Sela batang (*rod gap*)

Sela batang (*rod gap*) merupakan alat pemotong petir yang paling sederhana berupa batang elektroda yang diletakkan antara hantaran dan tanah.*Rod gap* banyak digunakan di pada :

- *Bushing insulator* dari trafo.
- Pada isolator hantaran udara, berupa tanduk api (*arching horn*) atau ring api (*arching ring*).

➢ Pemutus daya (*Circuit Breaker*).

"Untuk mencegah gelombang petir tembus melalui permukaan isolator, maka tegangan tembus dari sela batang harus diset 20% lebih rendah dari tegangan tembus impuls (*Impuls spark over voltage*) dari isolator"[4].Jarak antara sela dengan isolator tidak boleh dari 1/3 jarak sela untuk mencegah bunga api bergerak ke atas isolator.

Sela batang tergantung pada tegangan operasi dari sistem.Walaupun sela batang sangat murah dan sederhana, tetapi sela ini mempunyai batasan-batasan dalam penggunaannya, yaitu :

a) Sela batang tidak berfungsi jika gelombang datang mempunyai muka yang curam.
b) Sela batang tidak bisa memotong arus ikutan (*follow current*).Bunga api terjadi karena terionisasi udara diantara elektroda batang akibat adanya beda tegangan yang tinggi.Oleh karena itu kekuatan isolasi (*insulation strength*) pada sela udara menjadi turun.Sela yang terjadi dapat menahan tegangan dari frekuensi jala-jala namun arus sistem akan ikut mengalir ke tanah.Akibatnya pemutus daya akan bekerja untuk menghilangkan gangguan.Untuk menutup CB kembali diperlukan waktu cukup lama untuk proses deionisasi diantara sela setelah matinya bunga api.
c) Sela batang dapat meleleh akibat energi panas dengan temperatur tinggi yang dilepas melalui bunga api.Karena tingginya muatan listrik dari terpa maka pada sistem tegangan tinggi diperlukan material-material dengan kekuatan isolasi yang tinggi.

---

[4] Arimunandar, Artono.1978.Teknik Tegangan Tinggi.Jakarta.PT.Pradnya Paramita.

d) Karakteristik tembus dari sela batang sangat dipengaruhi oleh keadaan alam seperti kelembaban, temperatur, tekanan dan lain-lain.

e) Sela batang sedikit banyak juga dipengaruhi oleh polaritas dari terpa.Sela batang merupakan pemotong petir yang paling sederhana karena itu tidak dapat diandalkan sebagai pelindung utama terhadap terpa petir pada sistem tenaga listrik dimana prioritas pelayanan daya dan perlindungan peralatan sangat diutamakan.

f) Namun demikian, sela batang tetap digunakan sebagai pelindung tambahan karena harganya murah.

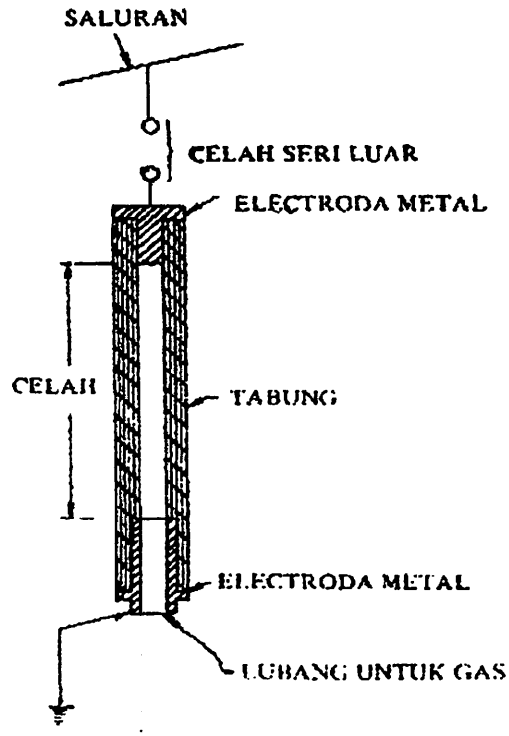
2) Arrester Jenis Expulsi (Expultion)

Merupakan tabung terdiri dari :

a) Dinding tabung yang terbuat dari bahan yang mudah menghasilkan gas jika dilalui arus (*fibre*).

b) Sela batang (*external series gap*) yang biasanya diletakkan pada isolator porselin, untuk mencegah arus mengalir dan membakar fiber pada tegangan jala-jala setelah gangguan diatasi.

c) Sela pemutus bunga api diletakkan di dalam tabung, salah satu elektroda dihubungkan ke tanah.Setiap kawat phasa mempunyai tabung pelindung.

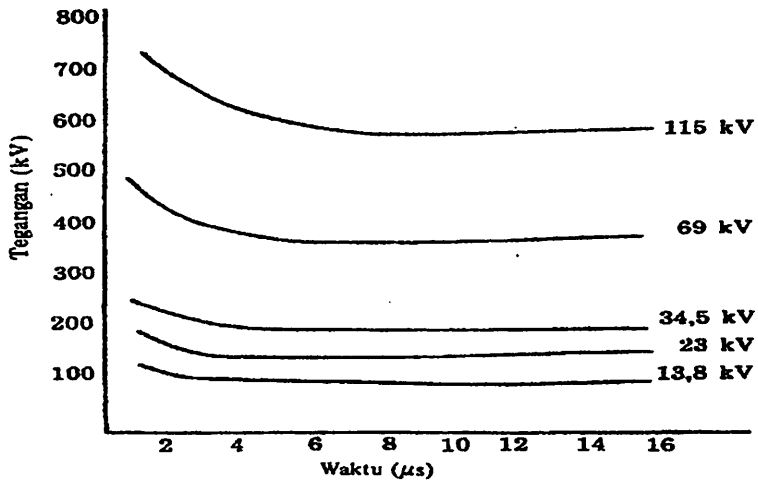


Gambar 2.7
Arrester Jenis *Expultion*

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Pada waktu tegangan terpa melalui sela batang dan bunga api maka impedansi tabung akan menjadi rendah sehingga arus terpa dapat mengalir ke tanah.

Tegangan di antara terminal hantaran dengan tanah turun setelah tembus terjadi.Karena melalukan arus maka terdapat tegangan bunga api pada tabung yang sedikit menghalangi mengalirnya arus.



Grafik 2.3
Karakteristik Arrester Jenis Expulsi*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Bagaimanapun arus yang mengalir akan membakar fiber dan menghasilkan gas yang bergerak cepat kearah lubang pembuangan di bagian bawah arrester.Tekanan gas ini akan mematikan bunga api pada saat arus melalui titik nol pertamanya."Waktu pemadaman busur api ini ½ atau 1 *cycle* sehingga R.R.V (*Rate of Recovering Voltage*) lebih lambat dari *rate of rise* kekuatan dielektrik dari isolasi"[5].

Beda waktu ini cukup pendek untuk dapat dibaca oleh rele pelindung sehingga CB tetap tertutup dan pelayanan daya tidak terganggu.

Segera setelah gas ditekan keluar dan api menjadi padam, sistem dapat bekerja kembali dengan normal.Jenis ini lebih baik dari sela batang karena mampu mencegah terjadinya arus ikutan dari tegangan normal sistem.

[5]ibid.

Kerugian dengan menggunakan arrester jenis ini adalah :

a) Terbatas pada sistem yang mempunyai besar arus sistem kurang dari 1/3 dari besarnya arus terpa.Karena arus yang sangat besar akan menyebabkan filter habis terbakar dan arus yang terlalu kecil tidak mampu menghasilkan cukup gas pada tabung untuk mematikan busur api.

b) Karena setiap arrester bekerja, permukaan tabung akan rusak karena terbakar maka arrester ini mempunyai batasan pada jumlah operasinya dimana arrester ini masih dapat berfungsi dengan baik.

c) Walaupun termasuk pemotong terpa yang murah karena kemampuannya memotong arus ikutan, namun sama sekali tidak sesuai untuk perlidungan peralatan-peralatan gardu yang mahal.

Pemakaian :

a) Umumnya tabung pelindung dipakai untuk melindungi isolator transmisi.

b) Dipakai pada tiang transmisi sebelum memasuki gardu untuk memotong besar arus terpa yang datang, sehingga berfungsi mengurangi kerja dari arrester di gardu.

c) Pada tiang transmisi tertentu yang sangat tinggi dimana kemungkinan disambar petir cukup tinggi.

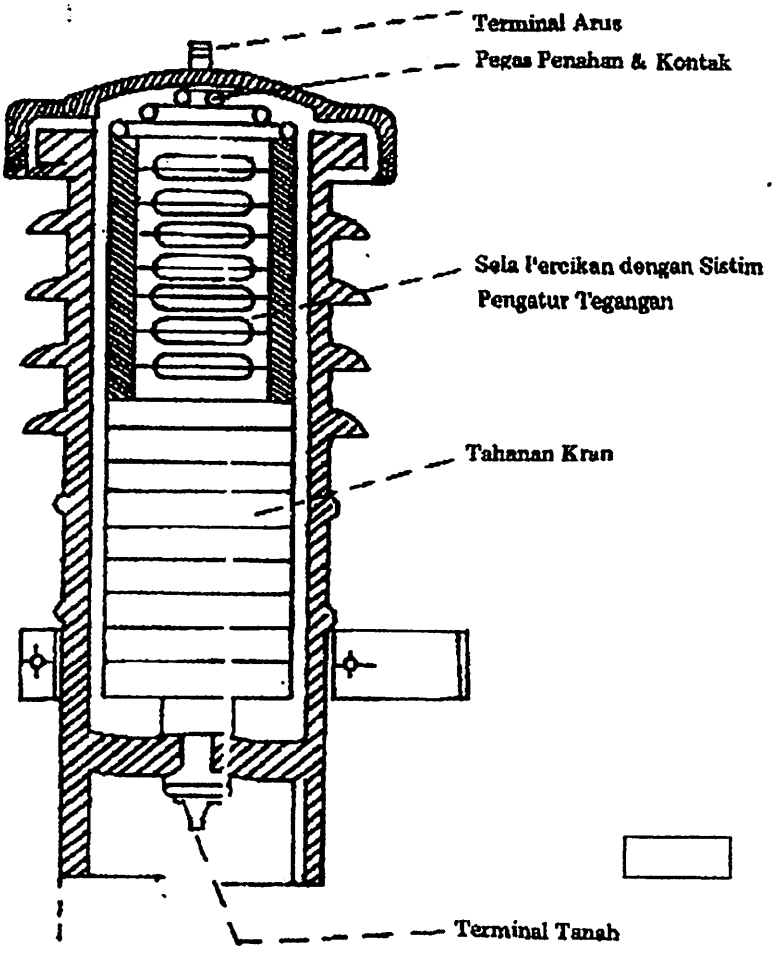
Jenisnya :

a) Jenis transmisi (*Transmision Line Type*) digunakan pada jaringan transmisi untuk melindungi isolator.

b) Jenis distribusi (*Distribution Type*) digunakan untuk melindungi trafo pada jaringan-jaringan distribusi dan peralatan-peralatan distribusi.Arrester jenis ini sangat baik digunakan untuk sistem dibawah 33 KV.

3) Arrester Jenis Katup (*Valve Type Lightning Arrester*)

Arrester jenis ini dikenal sebagai pemotong petir jenis tidak linier (*Non Linier Lightning Arrester*).Arrester jenis ini terdiri dari beberapa sela yang yang tersusun seri dengan piringan-piringan tahanan, dimana tahanan ini mempunyai karakteristik sebagai berikut :



Gambar 2.8
Arrester Tipe Katup *)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Harga tahanannya turun dengan cepat pada saat arus terpa mengalir sehingga tegangan antara terminal arrester tidak terlalu besar dan harga tahanan akan naik kembali jika arus terpa sudah lewat sehingga membatasi *follow current* dari *Power Frequency Voltage*.Sela api (*sparks gap*) dan tahanan linier disusun secara seri dan ditempatkan di dalam rumah porselin kedap air sehingga terlindung dari kelembaban, pengotoran dan hujan .

Sela api terdiri dari beberapa elemen yang tersusun seri, masing masing mempunyai dua elektroda dengan alat pengionisasi awal, diantara dua elemen secara paralel dipasang tahanan dengan impedansi yang tinggi untuk mengatur tegangan antara masing-masing elemen.Jika terjadi perubahan tegangan yang lambat pada sistem, tahanan pengatur (*grading resistor*) akan mampu mencegah terjadinya tembus antar phasa dan antara phasa ke tanah.Dan mencegah terjadinya akibat gangguan pada sistem misalnya tegangan tembus dalam (*internal overvoltage*), gangguan antar phasa atau phasa ke tanah, kenaikan tegangan pada ujung transmisi akibat efek *Ferranti*.

Sebaliknya jika terjadi perubahan tegangan yang cepat pada sistem, tegangan tidak seimbang antara sela yang terhubung seri.Pengaruh dari kapasitansi yang tidak seimbang antara sela dengan tanah terjadi pada seluruh tahanan pengatur.Tegangan terpa yang datang terutama terkonsentrasi pada sela ini dan akan menyebabkan seluruh arrester juga mengalami tembus.

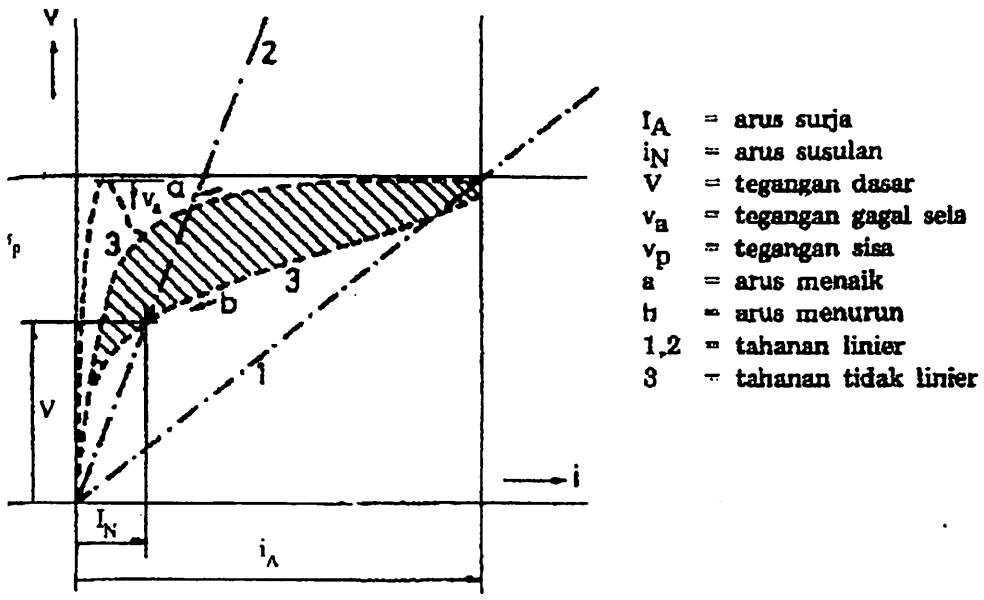
Pengaturan tegangan dengan tahanan menyebabkan juga naiknya kemampuan pemutusan arus oleh sela api."Arus bocor yang mengalir melalui tahanan dalam keadaan operasi normal dari sistem tidak melebihi 0,1 mA"[6].

---

[6]ibid.

Arus ini cukup untuk mempertahankan temperatur dibagian dalam pemotong petir 5 % lebih tinggi dari temperatur sekeliling sehingga mencegah masuknya uap air ke bagian dalam pemotong petir.

Karakteristik dari tegangan dan arus pada arrester tipe katup dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Grafik 2.4
Karakteristik Arrester Tipe Katup*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

2.3.2.2. Tahanan Tak Linier

Piringan tahanan umumnya dibuat dari bahan *Thyrite Matrosil* dan lain-lain dan terdiri dari bahan organis dengan campuran *Silicon Carbide* dan ikatan tanah liat, terbuat lempengan bulat.

Harga dari lempengan ini akan naik dengan cepat jika tegangan dan arus naik.Tegangan sisa (*Residual Voltage*) yaitu tegangan puncak yang timbul diantara terminal penangkal petir pada saat terjadinya tembus) akan dibatasi walaupun arus yang mengalir cukup besar.Segera setelah gelombang arus yang disebabkan tegangan terpa dilepas ke tanah, lempengan resistor ini akan kembali mempunyai harga tahanan yang tinggi, akibatnya arus sistem yang ikut mengalir pada saat terjadinya tembus akan mempunyai harga yang rendah sehingga arus ikutan ini akan dipotong pada saat melalui titik nolnya yang pertama.

Sebelum terpa mencapai trafo, terpa akan melalukan petir, setelah tegangan terpa akan mencapai harga tegangan tembus sela, sehingga penangkap petir akan bekerja.

Tegangan terpa yang naik dengan cepat ini akan menyebabkan elemen non linier mempunyai harga tahanan yang rendah sehingga memungkinkan energi dari terpa dilepas ke tanah, dengan demikian terpa yang masuk ke peralatan yang dilindungi sudah tidak membahayakan peralatan sistem.Seluruh proses ini hanya memerlukan waktu beberapa puluh *microsecond* $(20\mu s - 30\mu s)$.Tegangan maksimum yang terjadi di terminal penangkal petir disebut tegangan kerja atau tegangan pelepasan dari penangkap petir.

Walaupun penangkal petir mempunyai karakteristik yang baik, namun terdapat beberapa kekurangan sebagai berikut :

a) Keandalan dari penangkap petir sangat dipengaruhi oleh uap air yang masuk ke bagian dalam penangkap petir.
b) Masalah ini dapat diatasi dengan menutup rapat-rapat penangkap petir tersebut.Bagian dalam dari beberapa jenis penangkap petir tersebut diisi oleh

gas dan mempunyai peralatan pencegah untuk menghindari terjadi kelembaban

c) Ada juga penangkap petir yang mengijinkan arus bocor mengalir terus menerus pada batas-batas tertentu, sehingga dapat mengurangi kelembaban pada bagian dalam penangkap petir.

d) Ada kemungkinan jenis penangkap petir ini tidak bereaksi cukup cepat dalam mendeteksi gelombang datang dengan muka gelombang yang sangat curam yang menuju ke gardu.

Suatu keuntungan bahwa selama dalam perjalanannya ke gardu , gelombang tersebut akan mengalami peredaman.

Jenis-jenis penangkap petir ini adalah sebagai berikut :

a) Jenis Gardu (*Station Type*)

Jenis ini adalah yang paling efisien dan paling mahal yang umumnya digunakan untuk melindungi peralatan-peralatan penting pada gardu-gardu besar (sistem dengan tegangan diatas 70 KV))

b) Jenis Hantaran (*Line Type*)

Jenis ini lebih murah dan digunakan untuk melindungi gardu-gardu dengan tegangan kerja sistem dibawah 70 KV.

c) Penangkap petir jenis gardu untuk melindungi motor/generator, digunakan untuk sistem-sistem dengan tegangan kerja 2,2 KV sampai 15 KV.

d) Penangkap petir sekunder (*Secondary Arrester*).

Untuk perlindungan peralatan-peralatan tegangan rendah dengan tegangan kerja sistem antara 120 V sampai 750 V.

2.3.3. Kapasitor

Kapasitor banyak digunakan dalam sirkit elektronik dan mengerjakan berbagai fungsi.Pada dasarnya kapasitor merupakan alat penyimpan muatan listrik yang dibentuk dari dua permukaan (piringan) yang berhubungan, tetapi dipisahkan oleh suatu penyekat.Bila elektron berpisah dari satu plat ke plat yang lain, akan terdapat muatan di antara mereka pada medium penyekat tadi.Muatan ini disebabkan oleh muatan positif pada plat yang kehilangan elektron dan muatan negative pada plat yang memperoleh elektron.

Dari keterangan diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa kapasitor dapat dibentuk dimanapun asalkan kondisi diatas terpenuhi.Dengan kata lain, kapasitor dapat dibuat berdasarkan cara ini dan kapasitor "yang tidak diharapkan" juga dapat ditemukan di tempat-tempat tertentu, seperti pada dua jalur kabel terpisah yang bekerja sama atau pada pertemuan alat semikonduktor.

a. Kapasitansi

Muatan (bersimbol Q) diukur dengan satuan *Coulomb* dan kapasitor yang memperoleh muatan listrik akan mempunyai tegangan antar terminal sebesar V volt.Kemampuan kapasitor dalam menyimpan muatan disebut *kapasitansi* (bersimbol C).Kapasitansi ini diukur berdasarkan besar muatan yang dapat disimpan pada suatu kenaikan tegangan.

$$\text{Kapasitansi,} \quad C = \frac{mua\tan, Q}{tegangan, V} \quad \text{.....(12)}$$

atau

$$C = Q/V \quad \text{.....(13)}$$

Permukaan kapasitor yang berhubungan biasanya berbentuk "plat" rata.Ukuran kapasitor tergantung pada luas plat, A, jarak antara plat, d, dan medium penyekat.Kapasitansi dapat dihitung lewat rumus :

$C = \varepsilon A / d$ .....(14)

Dimana $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r ; \varepsilon_0$ = tempat yang tersedia (permitivitas tempat), berupa bilangan konstanta; ε_r = permitivitas relatif, berupa faktor perkalian yang tergantung pada medium penyekat atau bahan dielektris yang digunakan di antara kedua plat.Kapasitansi diukur dalam satuan *farad* (bersimbol F).Sebuah kapasitor dikatakan mempunyai kapasitansi 1 F kalau muatan sebesar 1 C membuat tegangan naik sebesar 1 V.Namun, farad yang terlampau besar, sehingga digunakan microfarad dan satuan yang lebih kecil :

1 mikrofarad = 1 ηF = 1 x 10^{-6} F

1 nanofarad = 1 nF = 1 x 10^{-6} F

1 pikofarad = 1 pF = 1 x 10^{-12} F

b. Karakteristik operasi tegangan

Karakteristik operasi tegangan merupakan salah satu hal yang terpenting dalam kapasitor karena memberitahukan besar tegangan maksimum yang dapat diberikan diantara plat kapasitor tanpa memutuskan hubungan dielektris lewat penyekat.Karakteristik operasi kapasitor juga searah.Dengan kata lain, sebuah kapasitor 200 V dapat dialiri tegangan d.c. sebesar 200 V.

Untuk suplai a.c, tegangan suplai yang ada (misalnya, suplai utama dalam rumah sebesar 240 V) merupakan nilai r.m.s. tegangan.Untuk menentukan karakteristik operasi tegangan sebuah kapasitor yang hendak digunakan pada suplai ini, besar maksimum (atau puncak) tegangan suplai harus dihitung :

$V_{maks} = \sqrt{2} \times 240$ V.....(15)

Akan membentuk suplai gelombang sinusoidal.Oleh karena itu ,

$V_{maks} \approx 340$ V.....(16)

dan dengan demikian, kapasitor yang mempunyai karakteristik operasi 400 V akan dipilih untuk digunakan suplai a.c. 240 V.

c. Energi yang tersimpan

Energi yang tersimpan dalam kapasitor dapat dihitung dengan rumus :

Energi = $\frac{1}{2} CV^2$ joule. .....(17)

Energi ini mampu berada dalam kapasitor selama beberapa waktu, bahkan setelah suplai ke sirkit dimatikan.Perlu hati-hati saat bekerja dengan sirkuit yang kapasitornya mempunyai tegangan tinggi dalam operasi nominal.Kapasitor itu harus dikosongkan lebih dahulu.Setelah suplai dimatikan, kapasitor dapat dikosongkan dengan cara sebagai berikut :

1. Dengan menghubungkan hambatan diantara terminal.Hambatan sebesar beberapa kiloohm sudah cukup rendah untuk mengosongkan kapasitor secara cepat, tetapi tidak terlalu rendah untuk menimbulkan bahaya.
2. Dengan menggunakan resistor penyadap.resistor ini berupa hambatan yang dihubungkan secara permanen di antara beberapa kapasitor besar untuk mengosongkan mereka secara otomatis ketika tegangan suplai sirkit dipindahkan.Ukuran resistor ini biasanya tinggi (sampai satuan *megaohm*) agar tidak mengganggu operasi yang normal.Ini berarti kapasitor membutuhkan waktu, misalnya beberapa menit, untuk mencapai keadaan yang benar-benar kosong.

d. Konstruksi

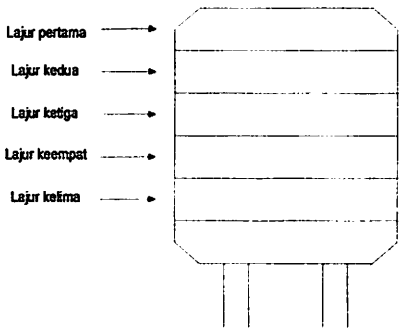
Kapasitor yang dapat digunakan terdapat beberapa macam, tetapi semuanya terbagi dalam dua kelompok : nonelektrolitis, yang tidak mempunyai kutub dan elektrolitis, yang mempunyai teminal positif dan negatif.

1. Nonelektrolis, Simbol sirkitnya terlihat pada gambar 2.9.Untuk memperoleh kapasitor yang mempunyai kapasitansi terbesar dengan volume dan berat terkecil, plat-plat kapasitor dibut dari foil alumunium atau perak yang tipis.Biasanya foil ini digulung dan dipisahkan oleh kertas lilin, polythene, film polikarbonat atau polyster, dan lain-lain, dan dimasukkan ke dalam suatu wadah plastik atau metal.Kalau bahan dielektris itu tidak dapat dilengkungkan, misalnya mika, kapasitor akan berbentuk rata.Kapasitor ini dibuat dalam bentuk yang variable dengan memakai sekrup, yang menekan lapisan-lapisan plat untuk menaikkan kapasitansi.Kalau sekrup dikencangkan, kapasitansi naik, dan sebaliknya.Kapasitor jenis ini mempunyai kapasitansi maksimum sebesar ratusan pikofarad dan menggeser variable dielektris udara untuk penyetelan radio.

Gambar 2.9
Simbol sirkit untuk kapasitor nonelektrolitis yang tetap (a) dan yang variabel (b)*)

*) Woolard, Barry, Electronica Practical.1997. Jakarta.PT.Pradnya Paramitha

Pada umumnya semua jenis kapasitor memiliki kapasitansi yang sama, tetapi barangkali hanya satu yang terbaik untuk mengerjakan fungsi tertentu, seperti menghilangkan gangguan udara pada televisi, radio, dan sebagainya yang disebabkan oleh pemancar lain.dalam hal ini lebih baik pabriknya dihubungi untuk memperoleh data.



Gambar 2.10. Sistem Kode Warna Pada Kapasitor Polyster*)

*) Woolard, Barry, Electronica Practical.1997. Jakarta.PT.Pradnya Paramitha

Ukuran nominal kapasitor dibuat dalam beberapa jenjang yang mirip dengan ukuran resistor, walau tidak setepat itu.Toleransi bervariasi dari ±20% sampai ± 1%.Makin rendah toleransi kapasitor, makin tinggi harganya.

Ukuran kapasitor polyster ditunjukkan lewat sistem kode warna, seperti terlihat pada gambar 2.10.

Kode warna itu dapat diuraikan dalam tabel 2.1

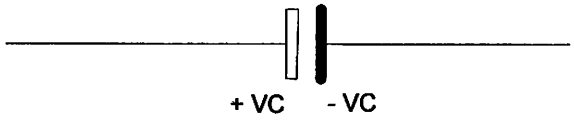
Tabel 2.1 Kode Warna Kapasitor*)

Warna	Lajur pertama dan kedua	Lajur ketiga	Lajur keempat (toleransi)	Lajur kelima (tegangan kerja)
Hitam	0		± 20%	
Coklat	1			
Merah	2			250 V d.c.
Jingga	3	x 0,001 μF		
Kuning	4	x 0,01 μF		00 V d.c.
Hijau	5	x 0,1 μF		
Biru	6			
Ungu	7			
Abu-abu	8			
Putih	9			

*) Woolard, Barry, Electronica Practical.1997. Jakarta.PT.Pradnya Paramitha

2. Elektrolitis.

Simbol sirkitnya diperlihatkan oleh gambar 2.11.



Gambar 2.11. Simbol sirkit untuk kapasitor elektrolitis*)

*) Woolard, Barry, Electronica Practical.1997. Jakarta.PT.Pradnya Paramitha

Kapasitor elektrolitis mula-mula dibentuk dengan mengoksidasi salah satu plat alumunium dan menggantikan medium dielektrisnya dengan elektrolit basah, sehingga namanya menajadi elektrolitis.Di sini kapasitansi dibentuk pada lapisan oksida.Elektrolit pasta menjadi kapasitor yang terbuat dari foil dapat mempunyai kapasitansi yang amat besar dan berukuran kecil, sehingga perbandingannya dengan jenis nonelektrolitis yang konvensional menjadi 100 : 1.Kekurangan utama kapasitor jenis ini adalah bahwa kapasitansi hanya diperoleh dalam satu arah karena adanya kutub positif dan negatif.

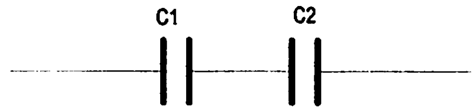
e. Hubungan Seri dan Parelel

Kapasitansi total dapat diubah dengan cara menghubungkan beberapa kapasitor secara seri atau parelel.

Catatan : Berhati-hatilah dengan tingkat tegangan yang digunakan.

Kapasitansi total dapat dikurangi, bila kapasitor dihubungkan secara seri seperti pada gambar 2.12 . Besar kapasitansi C_T dapat dikalkulasi sebagai berikut :

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots \qquad \ldots\ldots(18)$$

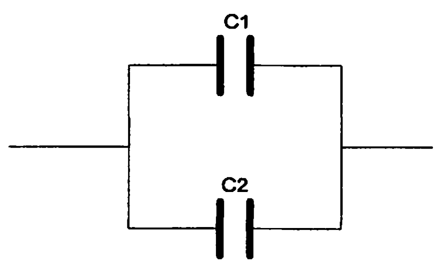


Gambar 2.12 . Kapasitor yang dihubungkan secara seri*)

*) Woolard, Barry, Electronica Practical.1997. Jakarta.PT.Pradnya Paramitha

Kapasitansi total dapat dinaikkan bila kapasitor dihubungkan secara parelel seperti pada gambar 2.13. Besarnya kapasitansi C_T dapat dihitung dengan cara :

$$C_T = C_1 + C_2 + \ldots \qquad \ldots\ldots(19)$$



Gambar 2.13. Kapasitor yang dihubungkan paralel*)

*) Woolard, Barry, Electronica Practical.1997. Jakarta.PT.Pradnya Paramitha

f. Kapasitor dalam sirkit a.c.

Bila dihubungkan dalam sirkit a.c., kapasitor terisi oleh tegangan searah dan kemudian "menutup aliran arus selanjutnya.Dalam sirkit a.c., kapasitor terisi dan kosong secara kontinyu dan arus bolak-balik mengalir dalam sirkit.

Hambatan terhadap aliran arus bolak-balik disebut reaktansi kapasitif (bersimbol Xc).Dinyatakan dalam satuan ohm :

$$Xc = Vc/Ic\ \Omega \quad \text{.....(20)}$$

dan

$$Xc = 10^6/2\pi fC\Omega \quad \text{.....(21)}$$

Dengan C = kapasitansi dalam mikrofarad (μF) dan f = frekuensi dalam hertz (Hz).

2.4. Koordinasi Isolasi

Peralatan listrik dalam gardu induk harus diamankan dari bahaya gangguan tegangan lebih.Hal ini dapat dilakukan dengan memperkuat isolasinya atau dengan bantuan alat-alat proteksi tegangan lebih.Dengan mengatasi bahaya tegangan lebih ini yang diinginkan adalah perencanaan isolasi yang cukup aman dan ekonomis serta koordinasi yang tapat dengan alat-alat proteksinya.

Koordinasi dilakukan dalam bentuk langkah-langkah yang diambil untuk menghindari kerusakan terhadap peralatan listrik karena tegangan lebih dan membatasi lompatan bunga api sehingga tidak menimbulkan kerusakan.Caranya adalah dengan menentukan korelasi yang diperlukan tingkat kekuatan isolasi peralatan listrik dengan karakteristik alat proteksi terhadap tegangan lebih, yang masing-masing ditentukan tingkat ketahanan impuls dan tingkat proteksinya.

Penerapan dari koordinasi isolasi meliputi beberapa prinsip dasar sehingga diterimanya beberapa aturan penting dalam praktek, yaitu :

a. Arrester dipakai sebagai alat proteksi utama, ini berakibat tegangan lebih harus ditentukan untuk peralatan yang harus dilindungi.Karena kepekaan arrester terhadap tegangan, maka pemakaiannya harus disesuaikan dengan tegangan sistem.

b. Tegangan sistem mempunyai tiga macam harga, yaitu :

   1) Tegangan nominal, yaitu tegangan yang membedakan tegangan sistem dengan sistem yang lain.

   2) Tegangan dasar (*rated voltage*), yaitu tegangan perencanaan dimana tegangan tersebut dapat digunakan secara kontinyu.

   3) Tegangan maksimum, yaitu tegangan yang dapat ditahan oleh alat yang bersangkutan dan dimana arrester terpasang.

c. Beberapa macam pentanahan sistem yang umum dipakai adalah :

   1) Sistem netral terisolasi

      Adalah sistem yang jika terjadi gangguan pada sistem maka tegangan lebih ke phasa ke tanah lebih tinggi dari 100% tegangan phasa sistem normal.Sistem yang terisolasi ini mempunyai koefisien pentanahan 1 (satu).

   2) Sistem diketanahkan melalui kumparan *Petersen*

      Adalah sistem yang jika terjadi gangguan tanah maka menggunakan arrester dengan tegangan jala-jala atau arrester 100-105%.

   3) Sistem diketanahkan melalui impedansi

Adalah sistem yang jika terjadi gangguan pada sistem, maka tegangan lebih phasa ke tanah tidak melebihi 80 % dari tegangan phasa-phasa sistem yang normal.sistem ini mempunyai koefisien pentanahan 0,8.

d. Tegangan dasar arrester adalah tegangan dengan frekuensi daya, dimana dibawah tegangan tersebut arrester mampu menahan tegangan sistem dengan baik.

e. Dalam penentuan isolasi trafo, dipakai isolasi yang dikurangi, yaitu tingkat isolasi yang lebih rendah daripada apa yang ditetapkan dalam standar.

f. Dari unsur utama koordinasi isolasi yang penting adalah karakteristik volt-waktu isolasi yang harus dilindungi dan karakteristik arrester.Adapun aturan yang dipakai adalah harus ada selisih yang cukup besar antara tingkat perlindungan dan tingkat isolasi yang harus dilindungi.

2.4.1. Pemilihan Arrester

Pemilihan *lightning arrester* dimaksudkan untuk mendapatkan tingkat isolasi dasar yang sesuai dengan *Basic Insulation Level* (BIL) peralatan yang dilindungi, sehinggga didapatkan perlindungan yang baik.Dalam memilih arrester yang paling sesuai untuk suatu keperluan tertentu, harus diperlukan beberapa faktor, antara lain :

a. *Protective need* (keperluan proteksi)

   Keperluan proteksi ini berhubungan dengan *insulation strength* dari alat yang harus diamankan

b. *Sistem voltage* (keadaan sistem tegangan)

   Sistem ini berhubungan dengan tegangan-tegangan yang mungkin timbul pada jepitan-jepitan arrester.

c. Jenis arrester

Apakah arrester yang dipakai jenis *station*, jenis line, jenis distribution atau arrester yang lainnya.

d. Faktor kondisi luar (normal atau abnormal).

Keadaan yang abnormal biasanya tempat yang tinggi (2000 meter dari permukaan laut), temperatur dan kelembaban yang tinggi serta pengotoran (kontaminasi)

e. Faktor ekonomi

Perbandingan antara ongkos pemeliharaan dan kerusakan bila tidak ada arrester, atau bila dipasang yang lebih rendah mutunya.

2.4.1.1. Tegangan Dasar Arrester

Tegangan dasar arrester adalah tegangan dimana penangkap petir masih dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya.Penangkap petir tidak boleh bekerja pada tegangan maksimum sistem yang direncanakan, tetapi masih tetap mampu memutuskan arus ikutan dari sistem secara efektif."Penangkap petir umumnya tidak boleh bekerja jika ada gangguan phasa ke tanah di satu tempat dalam sistem"[7].Karena itu tegangan pengenal dari penangkap petir harus lebih dari tegangan phasa sehat ke tanah, jika tidak demikian, maka arrester akan melalukan arus ikutan sistem yang terlalu besar yang menyebabkan arrester rusak akibat beban lebih thermis (*thermal over loading*).Untuk mengetahui tegangan maksimum yang mungkin terjadi pada phasa yang sehat ke tanah sehingga gangguan satu phasa ke tanah perlu diketahui.

---

[7] ibid.

Untuk menentukan tegangan dasar arrester harus diketahui :

- Tegangan sistem tertinggi umumnya diambil harga 110 % dari harga tegangan nominal sistem.
- Koefisien Pentanahan

  Didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan rms phasa sehat ke tanah dalam keadaan gangguan pada tempat dimana penangkap petir dipasang, dengan tegangan rms phasa ke phasa tertinggi dari sistem dalam keadaan tidak ada gangguan.Untuk menentukan tegangan puncak antara phasa (Vrms) dengan ground digunakan persamaan dibawah ini :

$$Vrms^2 = \frac{1}{T}\int_0^T V^2$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T Vm^2 \sin^2 \omega t d\omega t$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^{2\pi} Vm^2 \sin^2 \omega t d\omega t$$

$$= \frac{Vm^2}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{1-\cos 2\omega t}{2} d\omega t$$

$$= \frac{Vm^2}{4\pi}\left[\omega t - \frac{1}{2}\sin 2\omega t\right]_0^{2\pi}$$

$$= \frac{Vm^2}{4\pi}\left[\left(2\pi - \frac{1}{2}\sin 4\pi\right) - \left(0 - \frac{1}{2}\sin 2\omega t\right)\right]$$

$$= \frac{Vm^2}{4\pi} \cdot 2\pi$$

$$= \frac{Vm^2}{2}$$

Sehingga :

$$\text{Vrms} = = \frac{Vm}{\sqrt{2}} \quad \text{.....(22)}$$

Dari persamaan diatas maka diperoleh persamaan untuk tegangan puncak phasa dengan ground pada sistem 3 phasa didapatkan persamaan :

$$Vm = \frac{Vrms \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad \text{.....(23)}$$

Keterangan :

Vm = Tegangan puncak antara phasa dengan ground (KV)

Vrms = Tegangan nominal sistem (KV)

2.4.1.2. Arus Pelepasan Nominal (*Nominal Discharge Current*)

Perlu diperhatikan rating arus pelepasan ini sehubungan dengan bila arrester bekerja memotong tegangan lebih tidak akan menyebabkan rusaknya arrester karena melebihi kemampuannya (arusnya).Arus pelepasan dengan harga puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dari penangkap petir sesuai dengan kemampuan melalukan arus, dan karakteristik

perlindungan.Hubungan antara besarnya arus yang mengalir dan parameter yang lain diperlihatkan pada persamaan berikut.

$$I = \frac{2e - E_0}{Z + R} \quad \text{.....(24)}$$

Keterangan :

I = arus pelepasan arrester (A)

E = tegangan surja yang datang (KV)

E_0 = tegangan pelepasan arrester (KV)

Z = impedansi surja saluran (Ω)

R = tahanan arrester (Ω)

Tabel 2.2
Spesific *Current Impulse* *)

Maximum system voltage (KV)	*Surge Current* (A)
362	10000
550	15000
800	20000

*) Standar Handbook for Electrical Engineers, *Lightning And Surge Protection*, 27-10

Harga puncak surja petir yang masuk ke pembangkit datang dari saluran yang dibatasi oleh BIL saluran.Dengan mengingat variasi tegangan *flashover* dan

probabilitas tembus isolator, maka 20% untuk faktor keamanannya, sehingga harga E adalah :

E = 1,2.BIL saluran.....(25)

Keterangan :

e = tegangan surja yang datang (KV)

BIL = tingkat isolasi dasar trafo (KV)

Harga R dan E dapat dicari dengan menggunakan tabel dibawah ini :

Tabel 2.3
Karakteristik Perlindungan Arrester*)

Pengenal Tegangan Arrester KV (Puncak)	Tegangan Impuls Maksimum KV (Puncak)		Tegangan Puncak									
			3000 (Ampere)		5000 (Ampere)		10000 (Ampere)		E_0 (KV)		R (O)	
	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I
121	390	390	301		320	375	350		290	415	6	
133	430		328		350		380		320		6	
145	460		350		375		408		342		6,6	
109	540		423		450		490		410		8	
182	585		440		470		510		430		8	
195	610		470		500		545		455		9	
285	830		645		685		745		625		12	

276	900		685		730		795		665		13	
345	1250		835		855		930		805	670	13	1 5
390	1330		870		920		995		860		17	
440	1550		960		1135		1270		942		19	

*) J.M. Clayton-Powel, Application of Arrester For Complete Lightning Protection of Substation, IEEE, Trans.1984, 873

2.4.1.3. Tegangan Pelepasan Arrester

Tegangan pelepasan arrester adalah karakteristik yang paling penting dari penangkap petir untuk perlindungan peralatan dalam gardu.Tegangan pelepasan atau tegangan kerja ini menentukan tingkat perlindungan dari penangkap petir tersebut.Jika tegangan kerja arrester ada dibawah BIL dari peralatan yang dilindungi, maka dengan faktor keamanan yang cukup perlindungan peralatan yang optimum dapat diperoleh.

Tegangan kerja tergantung pada :

- Arus pelepasan penangkap petir
- Kecuraman gelombang arus

Tegangan kerja penangkap petir akan naik dengan naiknya arus pelepasan tetapi kenaikan ini sangat dibatasi oleh tahanan linier dari penangkap petir.

Tegangan yang sampai pada arrester dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$E = \frac{e}{1 + K.e.x} \quad \text{.....(26)}$$

Keterangan :

e = puncak tegangan surja yang datang (KV)

K = konstanta redaman (0,0006)

x = jarak perambatan (mil)

Jatuh tegangan pada arrester dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$V = I \times R \quad (27)$$

Keterangan :

V = tegangan pelepasan arrester (KV)

I = arus pelepasan (KA)

R = tahanan arrester (Ω)

Sehingga tegangan pelepasan arrester didapatkan sesuai persamaan :

$$e_a = E_0 + (I \times R) \quad (28)$$

Keterangan :

I = arus pelepasan arrester (KA)

E_0 = tegangan arrester pada saat arus nol (KV)

e_a = tegangan pelepasan arrester (KV)

Z = impedansi surja saluran (Ω)

R = tahanan arrester (Ω)

Tegangan pelepasan untuk arrester tipe gardu dapat juga dilihat pada tabel 4 dibawah ini :

Tabel 2.4
Karakteristik Arrester Tipe Katup*)

Tegangan Dasar Arrester (KV)	IR Pada 5000 A (KV)		Tegangan Sela Gagal (KV)
	1940	1955	
3		9	14
6		18	24
9		26	35
12		36	50
15		44	60
20		58	80
25		71	100
30		88	120
37		105	145
40		115	150
50		141	180
60		176	220
73		210	260
97		280	335
109	417	315	410
121		351	445
145		420	525

169		495	620
195		568	700
242		700	880
264		765	960

*) Arismunandar, Artono.1987.Teknik Tegangan Tinggi.Jakarta : PT.Pradnya Paramita.

2.4.2. Pemilihan Tingkat Isolasi Dasar (BIL)

"*Basic Impuls Insulation Level* (BIL) adalah suatu referensi level yang dinyatakan dalam impulse *crest voltage* (tegangan puncak impuls) dengan standar suatu gelombang 1,5 x 40 μs"[8].Sehingga isolasi dari peralatan-peralatan listrik harus mempunyai karakteristik ketahanan impuls sama atau tinggi dari BIL tersebut.

Pemikiran tentang isolasi suatu sistem tenaga listrik dan implementasi dari koordinasi isolasi, pertama-tama adalah penyusunan level umum isolasi pada atau diatas level tertentu, dimana hal ini akan membatasi persoalan pada tiga kebutuhan yang fundamental, yaitu :

a. Pemilihan level isolasi yang sesuai.
b. Jaminan *breakdown* dan *flashover* dari semua peralatan yang diisolasi/isolasi akan sama atau melebihi level yang telah dipilih.
c. Penggunaan peralatan penagaman yang akan memberikan suatu perlindungan pada peralatan-peralatan sistem tenaga listrik dengan baik dan ekonomis.

8) Arismunandar, Artono.1987.Teknik Tegangan Tinggi.Jakarta : PT.Pradnya Paramita

Dengan pembatasan masalah isolasi diatas bias diketahui beberapa tingkat isolasi dasar yang akan digunakan pada peralatan sistem tenaga listrik.Sistem tenaga listrik yang diketanahkan atau yang tidak akan berpengaruh pada lightning arrester yang digunakan.

Tabel 2.5
Tingkat Isolasi Standar Untuk Vrms
Lebih Dari Atau Sama Dengan 300 KV*)

Tegangan Tertinggi Peralatan	Tegangan Dasar	Ketahanan Terhadap Surja Hubung		Perbandingan Ketahanan Surja Petir Dan Surja Hubung	Ketahanan Terhadap Surja Petir
KV	KV	KV	KV	KV	KV
300	245	3.06	705	1.19	850
				1.27	
		3.47	850	1.12	950
		2.06		1.24	
362	296			1.11	1050
		3.21	950		
				1.24	1175
		2.76		1.12	
420	343				
		3.06	1050	1.24	1300
				1.11	
		2.45			
525	429			1.36	
		2.74	1175	1.21	1425
				1.1	
				1.92	
		2.08	1300	1.19	1550
				1.09	
				1.98	
765	625			1.26	1800
		2.28	1425	1.16	
		2.48	1550	1.26	1950
				1.47	2100
				1.55	2400

*)Sirait, K.T dan Zoro, R.1987.Proteksi Sistem Tenaga, Bagian I, Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik.Bandung.ITB

2.4.3. Margin Perlindungan Arrester

Margin perlindungan adalah bagian utama dalam koordinasi isolasi.Koordinasi itu sendiri merupakan perbandingan kekuatan impuls isolasi dengan tegangan yang terjadi melewati apabila terjadi surja petir.Hal ini bertujuan untuk mendapatkan perlindungan yang diinginkan bagi isolasi peralatan.

Untuk menghitung dari margin perlindungan dalam level tegangan pelepasan arus 5 KA, 10 KA dan 20 KA dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

MP = (BIL / KIA-1) x 100%.....(29)

Keterangan :

MP = margin perlindungan (%)

KIA = tegangan pelepasan arrester (KV)

BIL = tingkat isolasi dasar (KV)

Berdasarkan rumus diatas dapat ditentukan tingkat perlindungan untuk trafo daya.Kriteria yang berlaku untuk MP > 20 % dianggap cukup untuk melindungi trafo daya.

2.4.4. Jarak Arrester Dengan Peralatan.

Penempatan lokasi arrester yang baik adalah menempatkan arrester sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi.Jarak antara arrester dengan peralatan yang dilindungi digunakan persamaan sebagai berikut

$$Ep = e_a + \frac{2 \times A \times x}{v} \quad \text{.....(30)}$$

Keterangan :

A = kecuraman gelombang (KV/ μs)

e_a = tegangan pelepasan arrester (KV)

Ep = *Basic Insulation Level Transformator* (KV)

x = jarak antara arrester denga peralatan (m)

v = kecepatan gelombang berjalan (m/ μs)

sehingga waktu perambatan gelombang berjalan adalah :

$$t = \frac{x}{v} \quad \text{.....(31)}$$

Keterangan :

t = waktu perambatan gelombang (μs)

x = jarak arrester dengan peralatan (m)

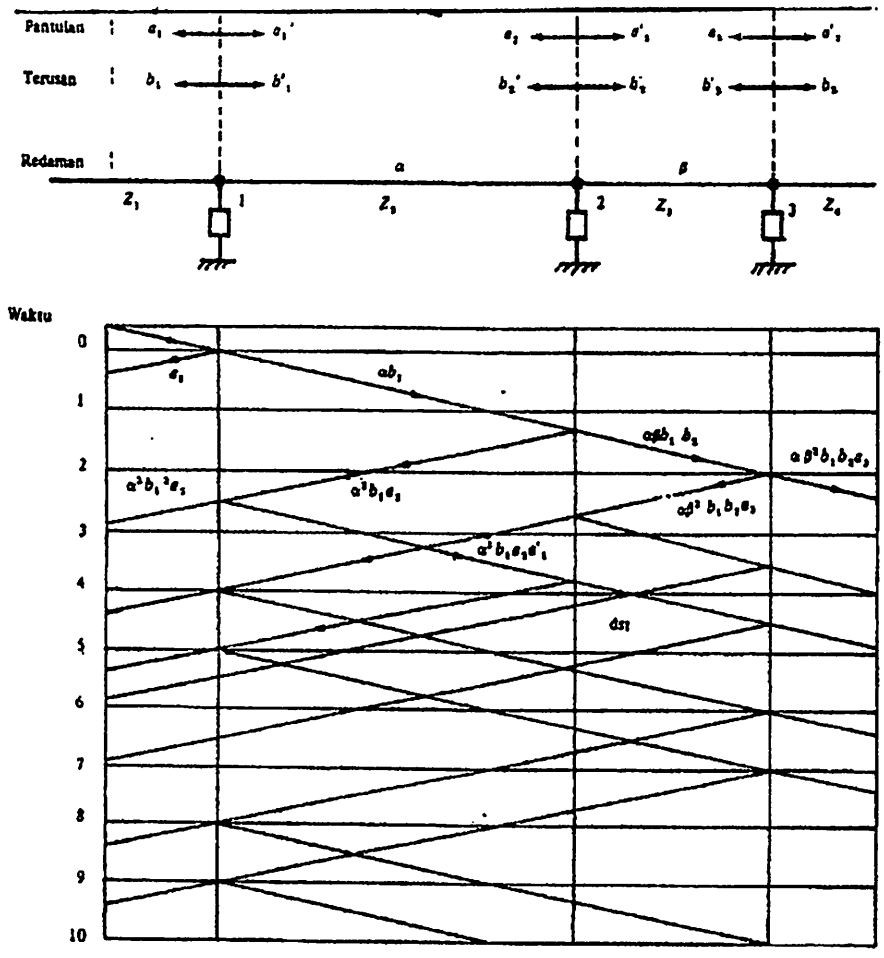
v = jarak gelombang berjalan (m/ μs)

2.5. Teori Pantulan Berulang Dan Diagram Tangga

Dalam banyak persoalan penting, seperti halnya pada teori dari pengaruh-pengaruh sepotong kabel, kawat tanah, penangkap petir dan proses pengisian atau pelepasan suatu kawat transmisi, perlu diperhatikan pantulan berulang dari gelombang berjalan.Sering sangat sulit mengikuti jejak dari begitu banyak gelombang yang disebabkan oleh pantulan berulang itu.Oleh karenanya, untuk dapat mengikuti jejak gelombang-gelombang tersebut pada setiap saat diperlukan diagram atau disebut juga diagram waktu ruang.

Dari gambar 13 diperlihatkan suatu kawat yang diketanahkan di titik-titik 1, 2, 3.Gelombang datang dimisalkan dari kiri setelah menemui titik 1 sebagian dipantulkan dan sebagian diteruskan menuju titik 2, disini sebagian gelombang dipantulkan dan sebagian menuju titik 3 dan seterusnya.

Antara titik sambungan (peralihan) dapat berupa kawat udara atau kabel yang mempunyai impedansi surja, kecepatan merambat dan redaman yang berbeda-beda.



Gambar 2.14.
Diagram Tangga*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Keterangan Gambar

a = konstanta pantulan untuk gelombang yang datang dari kiri.

a' = konstanta pantulan untuk gelombang yang datang dari kanan.

B' = konstanta terusan untuk gelombang yang datang dari kanan.

β, α = konstanta redaman pada saluran.

1, 2, 3 = titik-titik sambungan (peralihan).

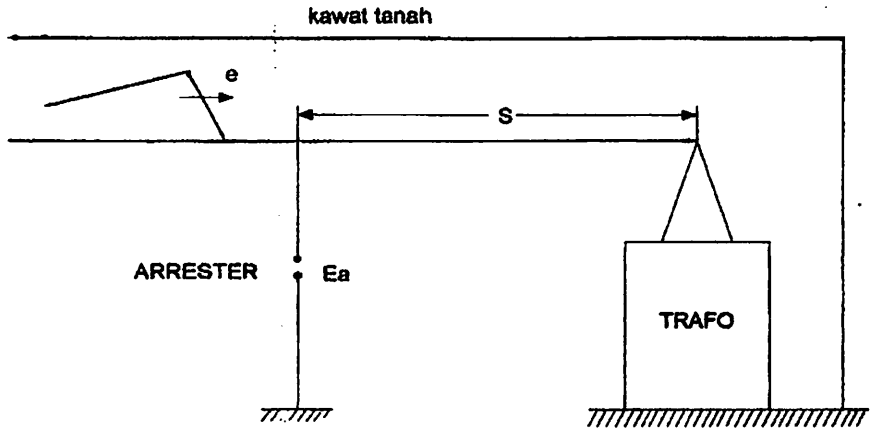
Prosedur dalam membuat diagram tangga :

a. Meletakkan titik peralihan dengan skala yang sesuai dengan waktu yang dilewatkan tiap potong atau seksi.
b. Memilih skala waktu vertikal pada bagian kiri diagram dari diagram tersebut, yang dimulai dari atas dengan waktu pertama nol.
c. Selanjutnya melukiskan jalannya gelombang secara diagonal, dibuat garis-garis gelombang sejaja.

Keuntungan dari pemilihan seksi yang disesuaikan dengan waktu yang diperlukan oleh gelombang seksi itu ialah semua diagonal mempunyai kemiringan (*slope*) yang sama.

2.5.1. Arrester Dan Transformator Yang Dihubungkan Dengan Saluran Udara

Disini akan dibahas jarak maksimum arrester dan transformator bila dihubungkan dengan saluran udara dan transformator dianggap sebagai jepitan terbuka, pada gambar 2.15 menunjukkan hubungan antara arrester dengan transformator.



Gambar 2.15
Arrester Dan Transformator Dihubungkan Langsung
Dengan Saluran Udara*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Perlindungan yang baik diperoleh bila arrester ditempatkan sedekat mungkin pada jepitan transformator.Tetapi dalam praktek sering arrester harus ditempatkan sejarak *s* dari transformator yang dilindungi.Karena itu , jarak tersebut harus ditentukan agar perindungan dapat berlangsung dengan baik.

Pada keadaan ini transformator adalah keadaan yang paling berbahaya, dimana koefisen terusan sama denga 2 (dua).

Apabila gelombang mencapai transformator, terjadi pantulan total, dan gelombang ini kembali ke kawat dengan polaritas yang sama.Waktu yang dibutuhkan oleh gelombang untuk merambat kembali ke arrester = 2 s/v.Bila arrester mulai memercik (*sparkover*) tegangan jepit arrester:

$$e_a = At + a\,(t - 2\,s/v)$$

$$= 2\,At - 2\,A\,s/v \qquad (32)$$

Bila waktu percik arrester t_{s0}, dihitung mulai gelombang itu pertama kali sampai ke arrester, maka didapatkan :

$$t_{s0} = \frac{e_a + 2As/v}{2aA} \quad \text{.....(33)}$$

setelah arrester itu memercik ia berlaku sebagai jepitan hubung singkat, dan menghasilkan gelombang sebesar :

$$-A\,(t - t_0) \quad \text{.....(34)}$$

Ke kedua pihak dari arrester supaya tegangannya tetap e_a.

Gelombang negatif ini yang merambat ke transformator, dan setelah pantulan pertama pada transformator terjadi, jumlah tegangan pada transformator menjadi :

$$Ep = 2\,At - 2\,A\,(t - t_{s0}) = 2\,A\,t_{s0}$$

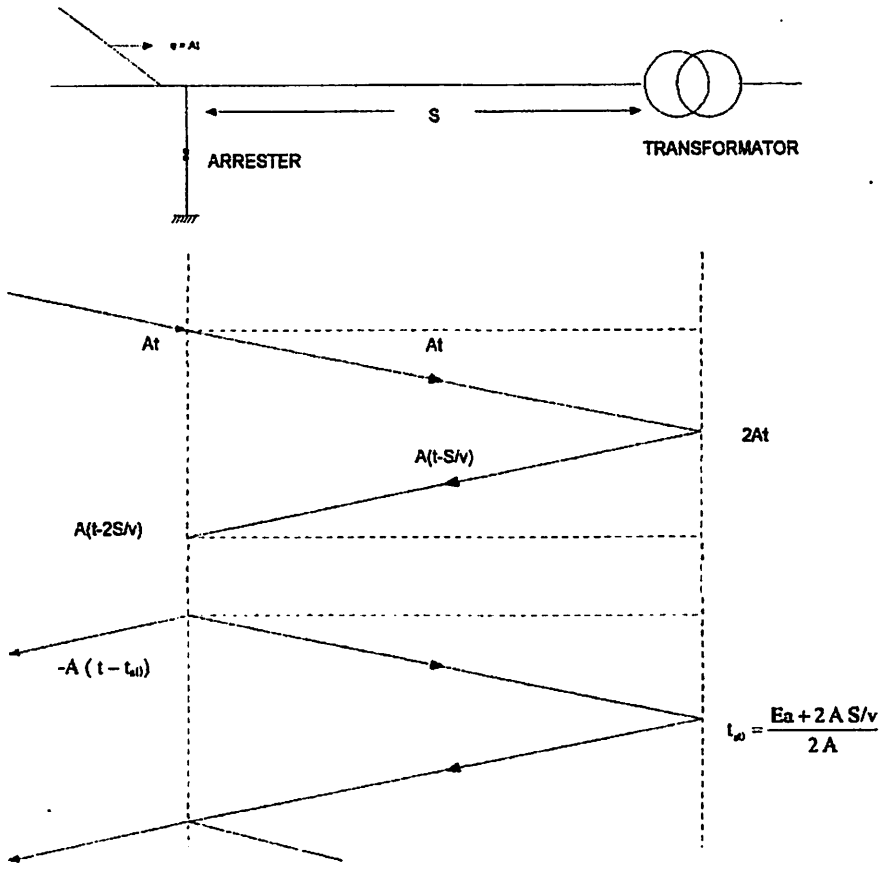
$$= 2A\frac{e_a + 2As/v}{2A} \quad \text{.....(35)}$$

atau

$$Ep = e_a + 2\,A\,s/v \quad \text{.....(36)}$$

Harga maksimum $Ep = 2\,e_a$

Semua kejadian diatas dapat diikuti dengan jelas dengan memperhatikan gambar dibawah ini :



Gambar 2.16
Diagram tangga antara arrester dan tranformator
dihubungkan langsung dengan saluran udara*)

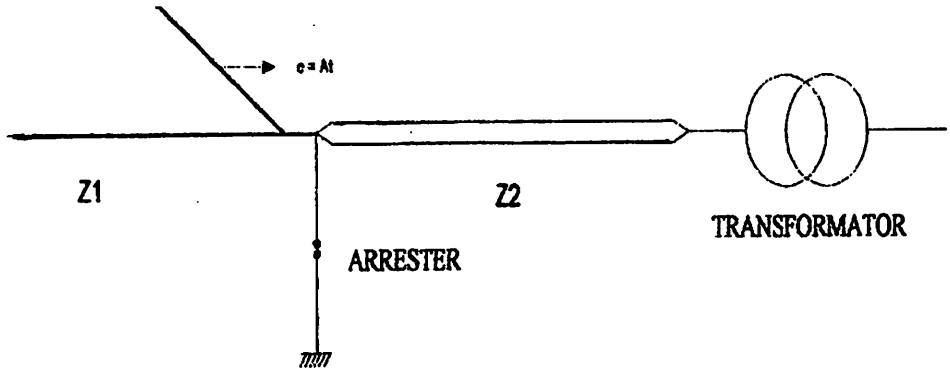
*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

2.5.2. Arrester Dan Transformator Yang Dihubungkan Dengan Kabel

"Untuk memperkecil gelombang surja yang memasuki gardu induk atau transformator sering dipasang sepotong kabel antara kawat udara dan transformator"[9].Transformator itu dianggap sebagai jepitan terbuka.

[9] T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Sedangkan arrester ditempatkan pada titik sambungan kawat udara dan kabel seperti terlihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.17
Arrester Dan Transformator Dihubungkan Dengan Sepotong Kabel*)

*) T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga

Untuk menentukan tegangan tertinggi pada transformator, maka digunakan metode diagram tangga gelombang berjalan.Dengan menggunakan persamaan umum koefisien pantulan dan koefisien terusan untuk arus dan tegangan maka didapatkan :

$$a = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{.....(37)}$$

$$a = \frac{2.Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{.....(38)}$$

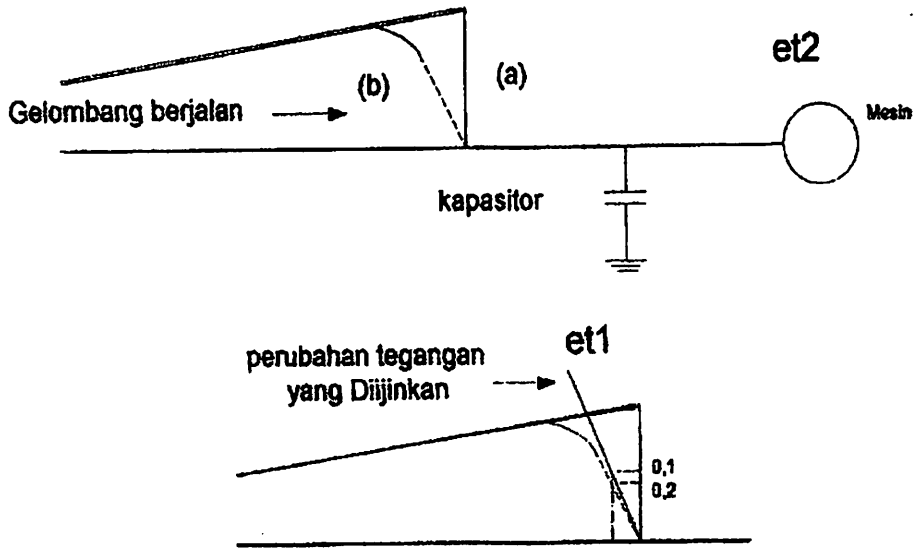
$$a = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad \text{.....(39)}$$

$$a = \frac{2.Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{.....(40)}$$

2.6. Perlindungan Belitan Isolasi Generator Terhadap Surja

Bila gelombang tegangan masuk pada kumparan jangkar, tegangan yang terjadi dekat belitan tergantung dari kecuraman muka gelombang yang masuk dan panjangnya belitan.Tegangan ini dikehendaki harganya kecil tapi waktunya terbatas hanya pada waktu berjalan pada *coil*.Rating perubahan tegangan maksimum muka gelombang pada *coil* tergantung atas kekuatan belitan isolasinya dan panjang kumparan listrik.

Untuk melindungi belitan isolasi dari kecuraman muka gelombang seperti pada bagian a dari gambar 2.18, diusahakan muka gelombang dimiringkan seperti bagian b pada gambar 2.18, sehingga dengan demikian tegangan antara belitan et_2 yang diberikan pada panjang lilitan (L) tidak akan melampaui tegangan pada maksimum yang diijinkan et_1 (dimana et_1 adalah perubahan tegangan maksimum yang diijinkan pada isolasi).Bentuk b dapat dilakukan bila kita memasang kapasitor yang dihubungkan antara terminal generator dengan tanah yang mana kapasitor ini akan dimuati melalui impedansi surja oleh gelombang yang datang pada saluran.(gambar a).Rating pemuatan kapasitor tergantung pada harga puncak gelombang yang datang, impedansi surja saluran dan mesin, serta harga kapasitornya ditentukan dalam microfarad.



Gambar 2.18
Perubahan Tegangan Pada Belitan Isolasi Generator
Dan Metode Perlindungannya *)

*)Buletin Listrik Dan Energi.1980.Vol.I.hal : 193

2.6.1. Perlindungan Generator Yang Dihubungkan Langsung Dengan Saluran Udara.

Penggunaan kapasitor dan arrester yang dipasang paralel pada terminal mesin diharapkan gelombang yang datang pada saluran berjarak 1500-2000 feet dari generator dapat dibatasi tegangannya sampai 2,5 Ea (dimana Ea adalah harga puncak rating tegangan maksimum terminal arrester).Pembatasan ini dapat dicapai apabila dipasang jenis distribusi pada jarak 1500-2000 *feet* dari generator.

2.6.2. Perlindungan Generator Terhadap Tegangan Surja Yang Diimbaskan Melalui Transformator

Bila gelombang datang pada sisi saluran dari terminal transformator, maka tegangan yang terjadi pada sisi generator akan merusak hubungan-hubungan generator, oleh sebab itu, diperlukan perlindungan.

Perlindungan terhadap generator berfungsi untuk membatasi harga puncak dari gelombang yang masuk dan untuk menghindari perubahan tegangan yang tiba-tiba (gelombang curam) yang akan menyebabkan tekanan belitan yang berlebihan.

Tegangan yang masuk kumparan tegangan tinggi transformator adalah tegangan pelepasan dari arrester yang terpasang pada sisi tegangan tinggi transformator.

Tegangan yang ditransferkan melalui transformator tergantung dari tegangan dasar arrester dan rasio dari transformator.Faktor ini sangat penting artinya untuk mengkaji keselamatan serta menentukan besarnya tegangan yang diperbolehkan memasuki kumparan generator.Generator dihubungkan dengan dengan transformator melalui kabel tanah yang merupakan suatu bentuk perlindungan berupa peredaman puncak gelombang surja yang akan merusak kumparan generator.

Isolasi kumparan generator mempunyai kekuatan menahan tegangan surja yang ditunjukkan dalam batas generator *impuls strength*.Diharapkan batas ini mampu menahan tegangan surja yang diimbaskan dari kumparan tegangan tinggi ke kumparan tegangan rendah transformator dimana yang akhirnya akan mengalir masuk ke kumparan generator.

Perhitungan didasarkan pada karakteristik arrester untuk menentukan puncak tegangan surja yang diimbaskan, kecuraman (tingkat kenaikan) tegangan surja dan tegangan pelepasannya.Dengan memperhitungkan perbandingan kumparan-kumparan transformator dan melipat harga-harga tegangan tinggi menjadi satuan harga sisi tegangan rendah, maka perbandingan ini dapat mewakili pelipatan tegangan dari sisi tegangan tinggi menjadi sisi tegangan rendah.

Rumus untuk menghitung tegangan surja yang masuk terminal generator :

a. Perbandingan kumparan tegangan trafo dengan menggunakan persamaan :

$$n = \frac{Vp}{Vs} \quad \text{.....(41)}$$

b. Perbandingan tegangan surja dengan tegangan sistem dengan menggunakan persamaan :

$$p = \frac{Vs}{n \times Vp} \quad \text{.....(42)}$$

c. Tegangan terminal tertinggi trafo dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Vp = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times \text{ tegangan sistem tertinggi} \quad \text{.....(43)}$$

d. Tegangan yang masuk ke generator setelah ditransfer dari tegangan tinggi trafo ke tegangan rendah trafo dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$Es = Ep.n.p + Vs\sqrt{(1 + p^2 - \sqrt{3}.p)} \quad \text{.....(44)}$$

Keterangan :

Ep = tegangan puncak gelombang datang di terminal tegangan tinggi transformator.

Es = puncak tegangan surja yang diimbaskan dari kumparan tegangan tinggi ke kumparan tegangan rendah transformator, gelombang berjalan menuju generator (KV)

Vp = puncak tegangan tinggi sistem (KV)

Vs = puncak tegangan rendah sistem (KV)

n = perbandingan tegangan rendah dan tegangan tinggi transformator kapasitor yang dipasang paralel pada sistem berfungsi untuk melandaikan kecuraman muka gelombang dan mengurangi harga puncak gelombang.

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

BAB III

ARRESTER DAN KAPASITOR SEBAGAI KOMPENSASI SISTEM PENGAMAN GENERATOR TERHADAP SURJA PETIR

3.1. Umum

Saat kondisi terjadi petir pada saluran transmisi yang terhubung ke generator, telah diketahui bahwa gelombang berjalan bergerak melalui transformator dan selanjutnya menuju arrester.Tetapi dalam prakteknya, seringkali kompensasi sistem pengaman generator dirasa perlu ditingkatkan lagi karena pengaruh dari gelombang berjalan yang diakibatkan petir ini masih memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap rangkaian generator.

Sebagai perlindungan generator terhadap surja petir ini, maka digunakanlah arrester dan kapasitor yang bertujuan mengurangi tegangan puncak akibat surja petir serta melalukan tegangan lebih dari surja tersebut dari sisi tegangan rendah transformator tersebut ke tanah. Kemudian kecuraman gelombang dan harga puncak tegangan yang datang akan dilandaikan oleh kapasitor.Selebihnya tegangan tersebut akan masuk pada generator.

Pemilihan nilai kapasitor yang diparalel harus dilaksanakan dengan tepat karena bila tidak, kapasitor ini tidak dapat melindungi generator dari tegangan lebih akibat surja petir.Ini disebabkan kapasitor tidak dapat mengkompensasi tegangan sehingga tegangan yang masuk ke rangkaian ataupun belitan generator akan lebih besar daripada Tingkat Isolasi Dasar generator itu sendiri.

3.2. Perlindungan Generator terhadap Petir

Distribusi tegangan yang disebabkan oleh surja (*surge*) tegangan antara lapisan dalam lilitan generator menunjukkan nilai yang tertinggi dekat ujung ke luar atau pada ujung titik netral lilitan.Untuk meratakan muka gelombang tegangan dan menyeragamkan distribusi tegangan pada gulungan generator dipasang sebuah *kapasitor* pelindung sebesar 0,1-0,5 μF antara setiap terminal dan tanah.

Untuk generator yang dihubungkan langsung dengan saluran transmisi, bila tegangan yang masuk adalah

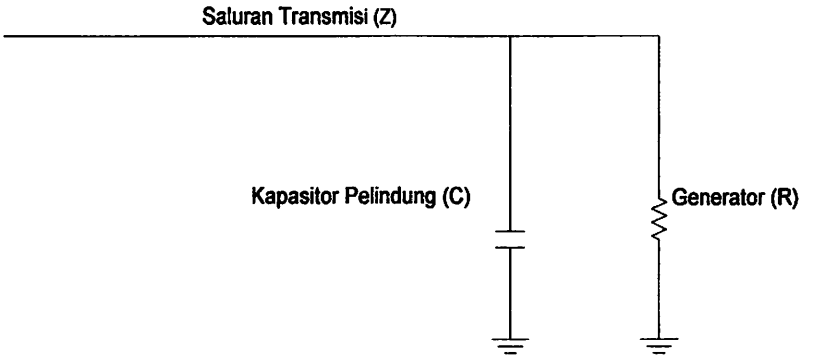
$$E_0 = e^{-at} - e^{-bt} \quad \text{.....(45)}$$

Maka tegangan terminal generator

$$E = \frac{\alpha - \beta}{\alpha - \beta} e^{-at} + \frac{\beta - \alpha}{b - \beta} e^{-bt} + \frac{(a-\beta)(a-b)}{(a-\beta)(b-\beta)} e^{-\beta t} \quad \text{.....(46)}$$

$$\alpha = \frac{Z - R}{CRZ} \quad \text{.....(47)}$$

$$\beta = \frac{Z + R}{CRZ} \quad \text{.....(48)}$$



Gambar 3.1. Hubungan Kapasitor Pelindung

*)Arismunandar.Artono, Kuwahara.S.1979.Teknik Tenaga Listrik, Jilid 1.Jakarta.PT.Pradnya Paramita

Arrester petir bersama dengan kapasitor pelindung dibutuhkan untuk melindungi generator terhadap petir yang dekat menyambarnya atau terhadap gelombang berjalan yang mempunyai jangka waktu yang lama.

Untuk generator yang dihubungkan dengan saluran transmisi melalui transformator, surja tegangan yang dialihkan dari sisi tegangan tinggi ke sisi tegangan rendah dari transformator mengandung komponen alih (*transfer*) elektro-magnetis dan komponen alih elektrostatis.Karena tegangan elektrostatis yang dialihkan mungkin menjadi sangat besar bila transformator tidak dihubungkan dengan generator sehingga mungkin mengakibatkan kekuatan isolasi dari rangkaian tegangan rendah akan dilebihi, maka perlu dipasang sebuah kapasitor pelindung dalam rangkaian generator.Tetapi bila rangkaian tegangan rendah dihubungkan dengan ril phasa yang terisolasikan atau dengan kabel, maka kapasitor ini dapat ditiadakan karena tegangan alih elektrostatis menurun dengan dihubungkannya transformator dan generator, maka kapasitor pelindung kadang-

kadang tidak dibutuhkan bagi generator dengan gulungan dengan kumparan tunggal *(single turn coil)*.

Karena nilai tegangan seperti tercantum pada tabel 3.1 dapat dipakai sebagai tegangan pengujian tegangan impuls dari generator, maka tingkat perlindungan dari arrester petir harus dikoordinasikan dengan kira-kira 80% dari tegangan pengujian tersebut.Karakteristik arrester petir untuk generator dapat dilihat contohnya pada tabel 3.2.

Arus pelepasan (*discharge*) cukup 2500 A karena tegangan di rengkaian generator juga tidak tinggi.Meskipun arrester petir dan kapasitor pelindung dipasang, dianjurkan agar digunakan transformator pengisolasi (*insulating*) bila generator dihubungkan langsung dengan saluran transmisi yang melalui daerah dimana diperkirakan banyak terjadi petir.

Tabel 3.1.
Contoh Pengujian Impuls Pada Generator*)

Tegangan Dasar (kV)	Tegangan Uji (kV)	$(2E + 1kV) \times \sqrt{2} \times 1{,}25$ (kV)
3	25	14 (E = 3,3 kV)
6	35	25 (E = 6,6 kV)
10	55	41 (E = 11 kV)
12	65	48,5 (E = 13,2 kV)
15	80	60 (E = 16,5 kV)
Ringkasan	Bentuk Gelombang : + (3 x 4,0) μs	E ekivalen dengan 1,1 x Tegangan Dasar

*)Arismunandar.Artono, Kuwahara.S.1979.Teknik Tenaga Listrik, Jilid 1.Jakarta.PT.Pradnya Paramita

Tabel 3.2.
Contoh Karakteristik Arrester untuk generator*)

Tegangan Rangkaian (kV)	Tegangan Dasar Arrester (kV)	Tegangan Percikan (kV)	Tegangan Batas (kV)		Tegangan Percikan Impuls (kV)	Tegangan Percikan Surja Hubung (kV) (10-1.000 μs)
			5 kA	1,5 kA		
3	4,2	6,3	13	12	15	14

4	8,4	12,6	25	23	30	27
10	14,0	21	43	40	45	41
15	21,0	31,5	64	60	67	60

*)Arismunandar.Artono, Kuwahara.S.1979.Teknik Tenaga Listrik, Jilid 1.Jakarta.PT.Pradnya Paramita

3.3. Penentuan Besarnya Kapasitor Yang Diparalel Dengan Arrester.

Untuk menentukan besarnya nilai kapasitor yang dipasang paralel dengan arrester, diperlukan suatu pertimbangan dan perhitungan untuk mengetahui impedansi peralatan yakni generator dan transformator, selain itu juga harus diketahui impedansi saluran yang menghubungkan antara transformator dengan pemasangan kapasitor dan antara kapasitor dengan generator.

Berbagai aspek yang harus diperhatikan dalam penentuan kapasitas kapasitor dalam pengkompensasi tegangan yang masuk ke rangkaian generator dapat dilihat dalam penjelasan dibawah.Semua hal ini mempengaruhi di dalam penentuan nilai kapasitor yang diparalel dengan arrester.

3.3.1 Impedansi Surja Saluran

Impedansi surja dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan surja dan arus surja, dimana gelombang surja yang merambat sepanjang saluran akan mempunyai impedansi surja tertentu.Luas penampang (A) pada penghantar dengan jari-jari kawat transmisi (r) atau kawat udara dengan tinggi (h) diatas permukaan tanah, maka dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$A = \pi \times r^2 \quad \text{.....(49)}$$

Dan mempunyai induktansi (L) dan kapasitansi (C), yang dinyatakan dengan rumus :

$$L = 2\left\{\frac{\ln 2h}{r}\right\} x10^{-7} H/m \quad \text{.....(50)}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18\ln(\frac{2n}{r})} F/m \quad \text{.....(51)}$$

Bila terdapat penghantar di dalam tabung yang digroundingkan maka akan terdapat nilai kapasitansi yang besarnya adalah :

$$C = \frac{2 \times \pi \times \varepsilon o \times \varepsilon r \times l}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad \text{.....(52)}$$

Keterangan :

εo = *permitivitas absolute* ($8{,}85.10^{-12}$)

εr = konstanta dielektrik (1,0006)

R1 = jari-jari *busbar* (m)

R2 = jari-jari IPB (m)

L = induktansi saluran (H/m)

C = kapasitansi saluran (F/m)

r = jari-jari penghantar (m)

sehingga saluran udara akan mempunyai impedansi surja (Z) sebesar :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{.....(53)}$$

Harga impedansi surja untuk saluran udara dengan kawat terbuka berkisar antara 400 sampai 600 Ohm.

3.3.2 Impedansi Surja Generator

Impedansi dasar pada generator dapat dihitung dinyatakan sesuai dengan persamaan berikut :

$$Zb = \frac{kV_b.1000}{\sqrt{3.I_b}} = \frac{(kV_b)^2.1000}{kVA_b} = \frac{(kV_b)^2}{MVA_b} \quad \text{.....(54)}$$

Keterangan :

kV_b = tegangan dasar dalam kilovolt

kVA_b = daya dasar kilovolt-amperes

MVA_b = daya dasar dalam megavolt-amperes

Impedansi generator biasanya dalam bentuk persen (%) dari impedansi dasar, sehingga impedansi dari generator tersebut adalah :

$$Z_G = Z(\%) \times Z_b \quad \text{.....(55)}$$

Keterangan :

Z_G = impedansi generator

$Z(\%)$ = impedansi dalam persen

Z_b = impedansi dasar

3.3.3 Induktansi Dan Kapasitansi Terminal Efektif

Kapasitansi terminal efektif pada kondisi gelombang berjalan seperti terlihat pada Tabel 2 berikut ini :

Tabel 3.3
Kapasitansi Terminal Efektif
Pada Kondisi Gelombang Berjalan*)

	Kapasitansi		
	Maksimum	Minimum	Rata-rata
Generator (kutub menonjol)	0,001	0,0002	0,0006
Generator (Turbin)	0,001	0,0001	0,0005
Transformator (distribusi)	0,002	0,0002	0,0010
Transformator (tenaga)	0,001	0,0001	0,0005
Bus	0,015	0,0020	0,0050

*) Bewley, L.V.Travelling Waves on transmission system.Newyork.1058 :69.

Nilai konduktansi diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$L = \frac{1{,}59(\%IX) \times (KV)^2}{f(KVA)} \quad \text{.....(56)}$$

Keterangan :

L = induktansi transformator (H)

KV = tegangan nominal (KV)

KVA = daya nominal (KVA)

IX = tegangan impedansi (Ω)

f = frekuensi (Hz)

sedangkan untuk nilai induktansi pada generator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$L = \frac{X'd}{2\pi.f} \quad \text{.....(57)}$$

Keterangan :

L = induktansi generator

X'd = reaktansi generator (Ω)

F = frekuensi (Hz)

3.3.4 Kecepatan Rambat Gelombang

Untuk gelombang surja yang merambat pada saluran yang mempunyai parameter L dan C, maka gelombang tegangan dan arus merambat dengan kecepatan yang sama, yaitu :

$$v = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \text{.....(58)}$$

Keterangan :

v = cepat rambat gelombang (m/s)

L = induktansi saluran/peralatan (H/m)

C = kapasitansi saluran/peralatan (F/m)

"Kecepatan surja yang merambat dalam kabel adalah antara ½ sampai 2/3 kecepatan cahaya dalam ruang hampa."[4)]

Untuk kecepatan surja yang cepat, gelombangnya akan semakin curam, sehingga akan mempengaruhi tegangan gagal (*break down voltage*) arrester yang digunakan pada sistem tenaga listrik.

3.4. Peredam Terpa (*Surge Absorber*)

Kerusakan pada peralatan yang disebabkan oleh gelombang terpa tidak saja tergantung pada amplitudo gelombang yang datang tetapi juga tergantung pada kecuraman muka gelombang.

Perlindungan dapat dilakukan dengan menggunkan peralatan-peralatan yang mampu mengurangi kecuraman gelombang datang tersebut.Alat-alat ini dikenal dengan nama : "peredam terpa (*Surge Absorber or Surge Modifier*)"

Peredam surja (*surge absorber*) dihubungkan antara generator dan transformator sisi tegangan rendah.Surge Absorber ini terdiri dari kapasitor dan arrester yang pemasangannya di paralel.Penempatan *surge absorber* di dalam ruangan dengan jarak 200 meter dari transformator dan 10 meter dari generator.

a. Kondensator

Jika diletakkan antara phasa dengan tanah akan mengurangi kecuraman muka gelombang datang sehingga mampu melindungi gulungan trafo atau generator dari stress tegangan tinggi yang terjadi di gulungan.Kondensator juga memberikan perlindungan terhadap gelombang dengan amplitudo rendah tetapi mempunyai frekuensi tinggi, hal ini disebabkan karena impedansi kondensator yang berbanding terbalik dengan frekuensi.Zc akan tinggi jika f rendah dan Zc akan rendah jika f tinggi."Kondensator murni tidak dapat menyerap energi dari gelombang berjalan atau menyerap energi karena terjadinya pelepasan dengan frekuensi tinggi"[8].Energi ini akan dipantulkan dari peralatan yang dilindungi ke sistem yang nantinya akan diserap oleh tahanan dari hantaran dan tahanan pentanahan.

---

[8] T.S, Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, 1991.Jakarta:Erlangga.

b. Induktor

Pemasangannya seri dengan hantaran udara dan paralel dengan tahanan. Gelombang dengan muka curam dan gelombang dengan frekuensi tinggi akan menghadapi induktor dengan impedansi tinggi, sehingga gelombang ini akan dipaksa melalui pentanahan.Pada tahanan energi gelombang tersebut akan diserap.

BAB IV

ANALISA DATA DAN PERHITUNGAN

4.1. Single Line Diagram Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Di PLTU Paiton

Single line diagram PLTU Paiton dapat dilihat pada lampiran.generator yang digunakan adalah berkapasitas 473 MVA dengan tegangan nominal 18 KV dan faktor daya sama dengan 0,85.Saluran menuju transformator mempunyai tegangan 18 KV dengan arus nominal 15172 A.

Transformator tiga phasa mempunyai 470 MVA dengan lilitan hubung bintang ditanahkan pada sisi tegangan tinggi dan lilitan hubungan delta pada sisi tegangan rendah dengan tegangan nominal 18/525 KV.

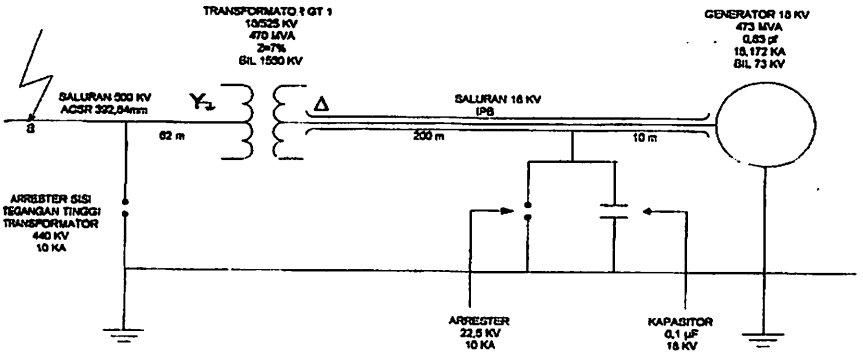
Generator yang terdapat di PLTU Paiton baik unit 1 dan unit 2 dihubungkan ke saluran udara melalui transformator rating tegangan 18/525 KV.Antara generator dan transformator ini dihubungkan dengan *Isolated Phase Busduct* (IPB).*Isolated Phase Busduct* (IPB) merupakan isolasi penghantar yang melindungi dari gangguan, salah satunya adalah gangguan yang disebabkan oleh tegangan lebih petir.Sehingga kemungkinan terjadi sambaran petir pada saluran generator dan transformator adalah kecil sekali.Sehingga kemungkinan terjadinya sambaran petir adalah pada saluran tegangan tinggi transformator yaitu saluran 500 KV.Sebagai perlindungan transformator terhadap surja petir, maka dipasang arrester pada saluran 500 KV.Pemasangan arrester pada sisi tegangan tinggi transformator ini adalah untuk melewatkan tegangan surja ke tanah yang datang dari arah saluran transmisi 500 KV.Selebihnya tegangan surja tersebut akan

menuju ke transformator sisi tegangan tinggi yang kemudian ditransferkan atau dipindahkan ke sisi tegangan rendah dan akhirnya menuju ke generator.

Dan untuk melindungi generator dari bahaya tegangan lebih surja petir ini, maka dipasang arrester yang dipasang pararel dengan kapasitor.Tegangan dari transformator sisi tegangan rendah yang menuju ke generator akana dilepas menuju pentanahan oleh arrester.Kemudian kecuraman gelombang dan harga puncak tegangan yang datang akan dilandaikan oleh kapasitor.Selebihnnya tegangan tersebut akan masuk pada generator.

Di PLTU Paiton antara unit 1 dan 2 merupakan unit pembangkit yang terpisah satu sama lain dengan single line diagram yang sama, maka untuk mempermudah analisa pada laporan akhir mengenai arrester dan kapasitor sebagai pengaman generator terhadap surja petir di PLTU Paiton ini dianalisa salah satu unit pembangkit saja.

Single line diagram pengaman generator terhadap surja petir pada PLTU Paiton Unit 1 dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4.1
Single Line Diagram Pengaman Generator Terhadap Surja Petir

4.2. Data-Data

Data-data yang digunakan dalam menganalisa arrester dan kapasitor sebagai pengaman generator terhadap surja petir ini adalah diambil di PLTU Paiton unit 1 dan 2.Data-data menunjang dalam analisa Tugas Akhir ini adalah :

4.2.1. Generator

- *Merk* : Thosiba E-KC00491
- *Nominal Rated Capacity* : 473 MVA
- *Nominal Current* : 15172 A
- *Terminal Voltage* : 18 KV
- *Rated Speed* : 3000 Rpm
- *Frequency* : 50 Hz
- *Power Factor* : 0,85 lagging
- *Number of Phase* : 3
- *Number of Pole* : 2
- *Insulating Class Stator* : Class B
- *Insulating Class Rotor* : Class B
- *Basic Insulating Level* : 73 KV
- *Grounding* : Netral Grounding Reactance (NGR)
- *Transient Synchronous Reactance* : 33 %

4.2.2. Generator Transformer

- *Rated Power* : 470 MVA
- *Rated Rasio* : 18/525 KV
- Jumlah Fasa : 3

- *Frequency* : 50 Hz
- *Basic Insulation Level* : 1550 KV
- *Impedansi Voltage* (%) : 7,3

4.2.3. Data Arrester Pada Saluran 500 KV

Arrester yang digunakan pada saluran 500 KV pada sisi tegangan tinggi transformator adalah jenis arrester type gardu jenis katup (*valve*) dengan jarak antara arrester dengan transformator adalah 62 meter.Dengan pentanahan langsung.Dan penempatan arrester ini adalah di outdoor.

- *Nominal Discharge Current* : 10 KA
- *System Voltage* : 500 KV
- *System Frequency* : 50 Hz
- *Connecting* : outdoor
- *Grounding* : solid
- *Type* : Station
- *Rated Voltage* : 440 KV

4.2.4. Data *Surge Absorber*

Peredam surja (*surge absorber*) dihubungkan antara generator dan transformator sisi tegangan rendah.Surge absorber ini terdiri dari kapasitor dan arrester yang pemasangannya di pararel.Penempatan surge absorber di dalam ruangan dengan jarak 200 meter dari transformator dan 10 meter dari generator.Data-data kapasitor dan arrester adalah sebagai berikut :

a) Kapasitor

- *Merk* : Siemens
- *fn* : 50 Hz
- *Cn* : 0,1 μF
- *Un* : 18 KV
- *Temp* : 20/-40 °C
- *R discharge* : *non*
- *Connection* : *mono*

b) Arrester

- Merk : Siemens
- Rating tegangan : 22,5 KV
- Arus : 10 KA
- Frekuensi : 15-62 Hz
- Tahanan saat kondisi normal : 20000 MΩ

4.2.5. Data IPB (*Isolated Phase Busduct*)

Isolated Phase Busduct (IPB) merupakan isolasi dari busbar.IPB menghubungkan antara generator dan transformator.IPB terbuat dari bahan logam non magnetic.Pentanahannya adalah langsung.Setiap penghantar phasa dimasukkan ke dalam satu tabung IPB

- Diameter tabung : 1,02 meter
- Panjang tabung : 210 meter
- Tegangan isolasi : 50/125 KV

- Tahanan tabung dengan bumi : 200 MΩ
- Sistem grounding : Solid Grounding

4.2.6. Data *Busbar* 18 KV

- Tinggi : 0,55 meter
- Lebar : 0,5 meter
- Panjang total : 210 meter
- Jarak *busbar* dengan IPB : 23, 5 cm
- Induktansi : 2,5312 μH/m

4.2.7. Data Penghantar 500 KV (Paiton-Krian)

Panjang circuit : 2144,24 KmS

Panjang *Route* : 145 Km

Jenis : ACSR Gannet

Luas penampang : 392,84 mm^2

26 urat aluminium 4,07 mm

7 urat *steel* 3,16 mm

Phase : 3

4.3. Analisa Arrester Sebagai Perlindungan Generator

Lihat Gambar 4.1, kemungkinan sambaran petir yang datang adalah dititik a, yaitu pada saluran 500 KV atau pada saluran tegangan tinggi transformator.Untuk melindungi transformator dari tegangan lebih akibat surja petir, dipasang arrester pada sisi tegangan tinggi trafo.Hal ini bertujuan untuk

menghindari terjadinya tegangan lebih yang tiba-tiba akibat serja petir yang dapat merusak transformator.Tegangan surja yang datang dari arah saluran transmisi 500 KV akan melalui arrester yang dipasang pada sisi tegangan tinggi trafo yaitu 525 KV.Oleh arrester tegangan surja tersebut akan dilepas menuju pentanahan, dan selebihnya akan masuk ke transformator, dimana pada awalnya ke sisi tegangan tinggi transformator kemudian diimbaskan atau ditransferkan ke sisi tegangan rendah transformator, yang akhirnya tegangan tersebut menuju ke generator.

4.3.1. Perhitungan Rating Dasar Arrester

a. Impedansi Surja Saluran

Dari data-data yang diperoleh, didapatkan data bahwa tinggi tap arrester dari tanah adalah 16 m.Sedangkan penghantar yang digunakan adalah jenis ACSR dengan luas penampang 392,84 mm^2.Maka dapat dicari jari-jari (r) penghantar dengan menggunakan persamaan no 49 :

$$A = \pi \times r^2$$

$$r^2 = \frac{A}{\pi}$$

$$r^2 = \frac{392,84}{3.14} = 125mm^2$$

$$r = 11,2mm$$

$$r = 0,0112m$$

Dengan diketahuinya jari-jari penghantar, maka harga induktansi saluran dapat dicari sesuai dengan persamaan no.50 :

$$L = 2\left\{\frac{\ln 2h}{r}\right\} \times 10^{-7} H/m$$

$$L = 2\left\{\frac{\ln 2.16}{0,0112}\right\} \times 10^{-7} H/m$$

$$L = 15,92 \times 10^{-7} H/m$$

Kapasitansi saluran dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan no 51 :

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} F/m$$

$$C = \frac{10^{9}}{18 \ln\left(\frac{2.16}{0,0112}\right)} F/m$$

$$C = 6,98.10^{-12} F/m$$

Dengan diketahuinya harga dari induktansi (L), dan kapasitansi (C) maka impedansi surja saluran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no. 53 :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$Z = \sqrt{\frac{15,92 \times 10^{-7}}{6,98 \times 10^{-12}}}$$

$$Z = 477,57\Omega$$

b. Menentukan Cepat Rambat Gelombang

Untuk menentukan cepat rambat gelombang (v) dalam penghantar, yaitu dengan menggunakan persamaan no.58 :

$$v = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{15{,}92.10^{-7} \times 6{,}98 \times^{-12}}}$$

$$v = \sqrt{9.10^{16}}$$

$$v = 3.10^{8} m/s$$

$$v = 300 m/\mu s$$

c. Menentukan Tegangan Dasar Arrester

Arrester tidak boleh bekerja pada tegangan sistem, tetapi masih mampu untuk memutuskan arus ikutan dari sistem secara efektif.Untuk menentukan rating tegangan dasar arrester, harus diketahui tegangan sistem dan tegangan maksimum sistem.

Dari data diketahui bahwa :

Tegangan sistem = 500 KV

Tegangan maksimum sistem = 110% x 500 KV

= 550 KV

Cara yang baik untuk menentukan tegangan dasar pengenal arrester adalah ditinjau dari sistem pentanahan titik netralnya.Pada transformator sisi tegangan tinggi 500 KV titik netralnya ditanahkan secara langsung, sehingga koefisien pentanahannya adalah 0,8 atau disebut penangkap petir 80% (lihat lampiran).Sehingga didapatkan :

Tegangan dasar arrester = koef.Pentanahan x tegangan maksimum sistem

= 80% x 550 KV

= 440 KV

Dengan tegangan dasar 440 kV, maka dipilih arrester dengan tegangan dasar 440 kV.

Dari tabel 2.3, dengan tegangan dasar arrester 440 KV, didapatkan :

Tegangan arrester pada arus nol (E_0) = 942 KV

Tahanan arrester = 19 Ω

Sedangkan untuk menentukan tegangan puncak antara phasa dengan tanah. digunakan persamaan no.23 :

$$Vm = \frac{Vrms \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$Vm = \frac{500 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$Vm = 408{,}25KV$$

Dari perhitungan tegangan puncak phasa ke ground dapat diketahui bahwa tegangan arrester lebih besar dari VLG (440 > 408,25).Hal ini menunjukkan bahwa arrester tidak bekerja saat terjadi gangguan phasa ke tanah.

d. Menentukan Puncak Tegangan Surja yang datang

Dari data diperoleh BIL transformator = 1550 KV, sehingga harga puncak tegangan surja yang datang adalah sesuai dengan persamaan no.25

$$e = 1{,}2 \times BIL$$

$$e = 1{,}2 \times 1550KV$$

$$e = 1860KV$$

e. Arus Pelepasan Arrester

Arus pelepasan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.24 :

$$l = \frac{2e - E_0}{Z + R}$$
$$l = \frac{2.1860 - 942}{477{,}57 + 19}$$
$$l = 5{,}6KA$$

Maka arus pelepasan maksimum pada arrester adalah disesuaikan dengan standar, sehingga didapatkan besar rating arus adalah 10 KA.

f. Menentukan Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan arrester dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.27

$$V = I \times R$$
$$V = 5{,}6 \times 19$$
$$V = 106{,}3KV$$

g. Tegangan Pelepasan

Tegangan pelepasan arrester dapat dihitung dengan persamaan no.28 :

$$e_a = E_0 + (I \times R)$$
$$e_a = 942 + (5{,}6 \times 19)$$
$$e_a = 1048{,}3KV$$

h. Menentukan Margin Perlindungan *(Protective Margin)*

Besarnya margin perlindungan yang diberikan oleh pengaman arrester terhadap surja petir dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.29 :

$$IM = \left(\frac{BIL}{KIA} - 1\right) \times 100\%$$
$$IM = \left(\frac{1550}{1048{,}3} - 1\right) \times 100\%$$
$$IM = 47{,}86\%$$

Dari perhitungan penentuan rating dasar arrester diatas, maka untuk arrester yang tepat digunakan untuk melindungi transformator di PLTU Paiton baik unit 1 maupun unit 2 adalah arrester dengan rating sebagai berikut :

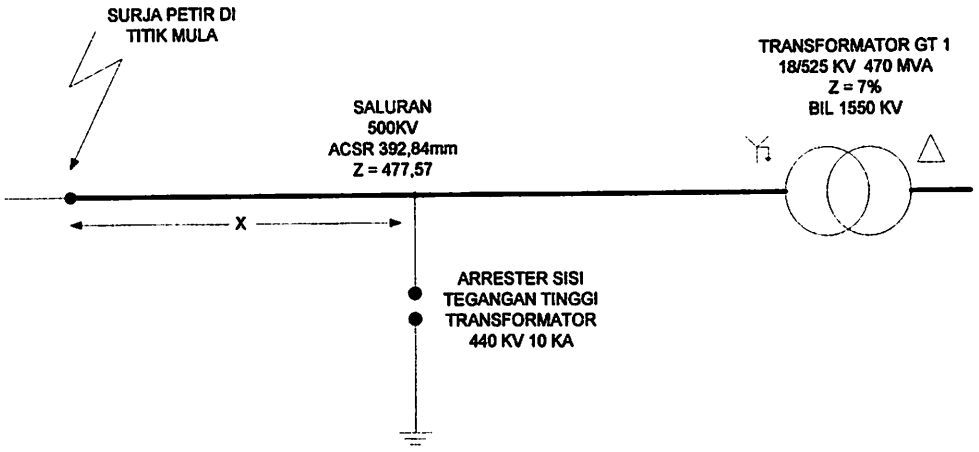
1) Rating tegangan : 440 KV
2) Arus pelepasan : 10 KA
3) Tegangan pelepasan : 1048,3 KV
4) Margin perlindungan : 47,8%

Dari perhitungan diatas, maka dapat dianalisa bahwa :

1) Dengan diketahui bahwa tegangan pelepasannya adalah 1048,3 KV, sehingga pada saat tegangan lebih yang datang adalah kurang dari 1048,3 KV, maka arrester tidak bekerja, namun jika tegangan yang dilaluinya adalah lebih besar atau sama dengan 1048,3 KV, maka arrester tersebut bekerja melalukan tegangan lebih tersebut ke tanah.
2) Dengan margin perlindungan sebesar 47,86% berarti arrester tersebut telah dapat melindungi transformator dengan baik karena memenuhi syarat perlindungan sebesar ≥ 20%

4.3.2. Perhitungan Jarak Sambaran Petir Yang Bisa Diamankan Oleh Arrester

Petir dapat terjadi dimana saja, baik itu di titik terdekat dengan arrester maupun dari titik yang jauh dari arrester.Untuk analisa ini, diambil suatu jarak dimana arrester mulai bekerja.



Gambar 4.2
Jarak Antara Arrester Dengan Titik Mula Terjadinya Petir

Tegangan yang sampai pada arrester dapat diperoleh dengan persamaan no.26 :

$$E = \frac{e}{1 + K.e.x}$$

$$E = \frac{1860}{1 + 0{,}0006 \times 1860 \times x}$$

Untuk analisa ini dilakukan perhitungan dengan perubahan pada jarak antara arrester dengan titik mula terjadinya petir, untuk itu diambil x = 2 km = 3,218 mil, maka didapatkan :

$$E = \frac{1860}{1 + 0{,}0006 \times 1860 \times 3{,}218}$$

$$E = \frac{1860}{1 + 3{,}59}$$

$$E = 405{,}23KV$$

Waktu perambatan gelombang dari titik mula sampai arrester dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.31 :

$$t = \frac{x}{v}$$

Untuk nilai x = 2 km maka didapatkan waktu perambatan :

$$t = \frac{2000}{300}$$
$$t = 6{,}6\mu s$$

Dengan cara yang sama, maka untuk jarak arrester dengan titik mula terjadinya petir yang lain dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.1
Jarak Arrester Dengan Titik Mula Terjadinya Petir

X(m)	E(KV)	T(μs)
2000	405,23	6,66
1500	504,06	5
1000	666,67	3,33
750	798,28	2,5
500	984	1,66
450	1028,76	1,5
430	1049	1,43
400	1087,72	1,33
350	1148,15	1,16
300	1282,78	0,83

Dari tabel diatas dapat dianalisa bahwa :

a. Pada jarak tidak melebihi 430 m dari penempatan arrester, maka tegangan yang akan sampai pada arrester adalah lebih dari 1049 KV yang menunjukkan bahwa pada tegangan tersebut arrester mulai bekerja, karena tegangan tersebut

melebiihi tegangan kerja atau tegangan pelepasan arrester, yaitu 1048,3 KV.Tegangan lebih tersebut akan diteruskan ke tanah melalui arrester, dan selebihnya akan diteruskan menuju transformator sisi tegangan tinggi.

b. Pada jarak lebih jauh dari 430 m, dimana tegangan yang akan sampai pada arrester adalah lebih kecil dari tegangan arrester.Sehingga pada jarak ini arrester belum bekerja dan tegangan tersebut akan langsung menuju transformator sisi tegangan tinggi, namun tegangan ini masih aman atau tidak membahayakan bagi transformator karena tegangan tersebut adalah lebih kecil dari *Basic Insulation Level* dari transformator yaitu 1550 KV.

c. Untuk jarak yang lebih dekat dengan arrester, membutuhkan waktu perambatan yang lebih singkat untuk sampai ke arrester daripada jarak yang jauh.Sehingga dengan petir yang datang lebih dekat dengan arrester akan sangat berbahaya bagi peralatan.

4.3.3. Penentukan Jarak Arrester Dengan Transformator

Penempatan lokasi arrester yang baik adalah menempatkan arrester sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi.Pada bagian ini akan ditentukan jarak perlindungan yang diijinkan antara arrester dengan transformator sehingga arrester dapat melindungi transformator dengan baik.

Dari data dan perhitungan didapatkan :

A = kecuraman gelombang sesuai dengan lampiran : 1200 KV/ μs

e_a = tegangan pelepasan arrester : 1048,3 KV

Ep = *Basic Insulation Level Transformator* : 1550 KV

Jarak perlindungan yang diijinkan antara arrester dengan transformator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.36 :

$$Ep = e_a + \frac{2 \times A \times s}{v}$$

Sehingga didapatkan :

$$1550 = 1048{,}3 + \frac{2 \times 1200 \times s}{300}$$

$$501{,}7 = \frac{2400 \times s}{300}$$

$$s = \frac{501{,}7}{8}$$

$$s = 62{,}71m$$

Apabila jarak yang digunakan adalah lebih dari 62,71 m, misalnya 70 m, maka tegangan yang sampai pada transformator adalah :

$$VT = 1048{,}3 + \frac{2 \times 1200 \times 70}{300}$$

$$VT = 1608{,}3KV$$

Dan jika jarak yang digunakan adalah kurang dari 62,71, misalnya 50 m, maka tegangan yang sampai pada transformator adalah :

$$VT = 1048{,}3 + \frac{2 \times 1200 \times 50}{300}$$

$$VT = 1448{,}3KV$$

Dari perhitungan diatas, maka dapat dianalisa sebagai berikut :

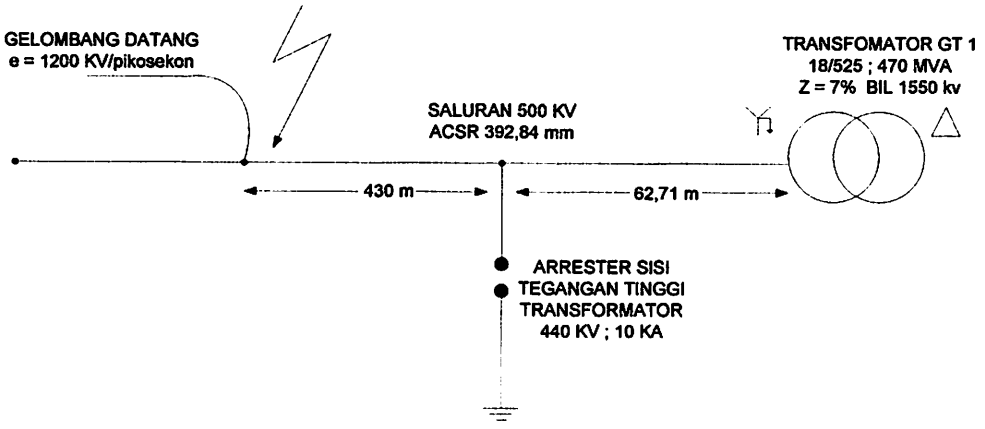
a. Bahwa dengan jarak antara arrester dan transformator 62,71 meter tersebut arrester masih dapat melindungi transformator dengan baik.Dengan jarak tersebut, maka tegangan maksimal yang akan sampai di transformator tidak akan melebihi BIL transformator (1550 KV).

b. Jika arrester tersebut dipasang melebihi 62,71 m, maka arrester tidak akan dapat melindungi transformator dari tegangan lebih surja petir, karena tegangan yang akan sampai pada transformator akan melebihi BIL.

c. Dan jika arrester dipasang kurang dari 62,71 m, akan lebih baik karena tegangan yang sampai pada transformator akan lebih kecil dari 1550 KV.

4.3.4. Tegangan Tertinggi Pada Transformator

Untuk menentukan tegangan tertinggi yang menuju transformator, maka perlu diketahui waktu penempatan gelombang antara arrester dengan transformator serta waktu percik arrester.Untuk analisa ini digunakan metode pantulan berulang dan diagram tangga.



Gambar 4.3
Jarak Antara Arrester Dengan Transformator

a. Waktu Perambatan Gelombang Dari Arrester Ke Transformator

Waktu prambatan gelombang dari arrester ke transformator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.31 :

$$t = \frac{s}{v}$$

$$t = \frac{62,71}{300} = 0,2\mu s$$

b. Penentuan Waktu Percik Arrester

Waktu percik arrester dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.33 :

$$ts_0 = \frac{e_a + 2 \times A \times s/v}{2 \times A}$$

$$ts_0 = \frac{1048,3 + 2 \times 1200 \times \frac{62,71}{300}}{2 \times 1200}$$

$$ts_0 = 0,64\mu s$$

c. Diagram Tangga

Untuk mengetahui tegangan tertinggi pada transformator, maka digunakan pantulan berulang dan diagram tangga,sehingga dapat dihitung :

Gelombang yang datang ke trafo = A x t

= 1200 KV/μs x 0,2 μs

= 240 KV

Pada trafo gelombang dipantulkan dengan kecuraman

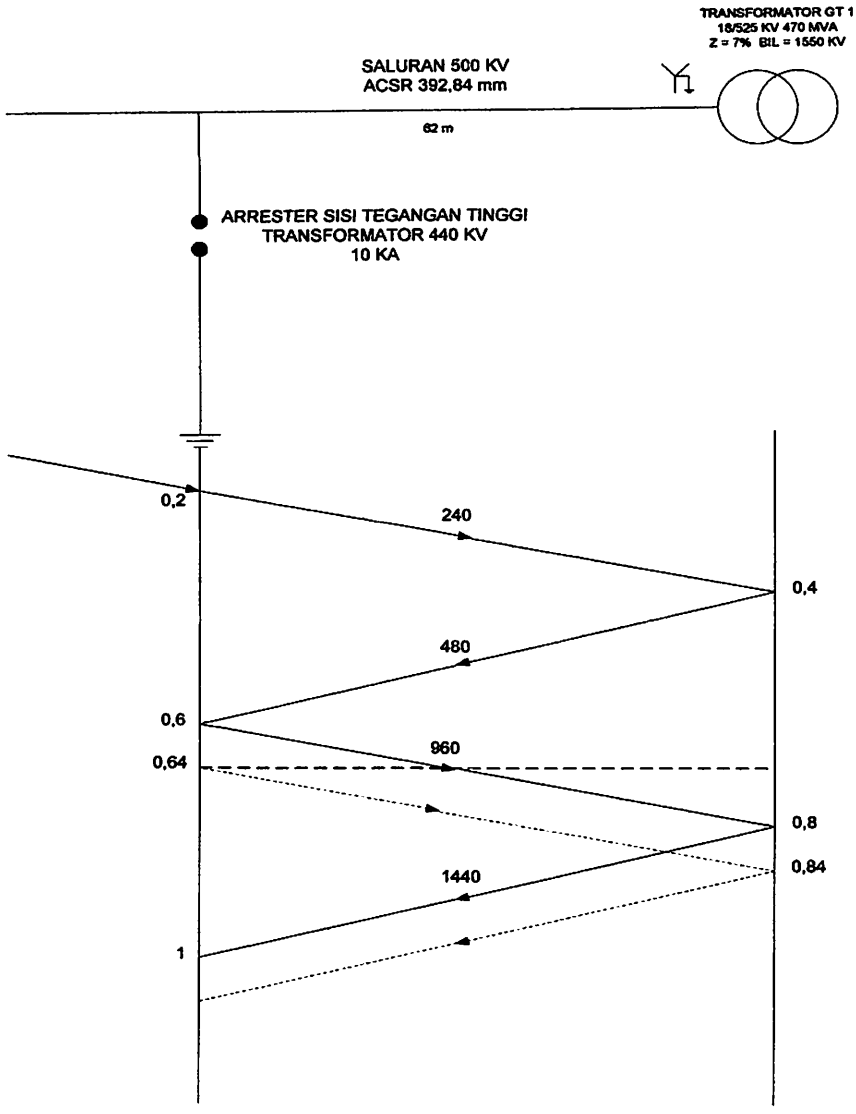
= 2 x 1200 KV

= 2400 KV/μs

Dengan waktu yang sama, sehingga gelombang pantul

= 2400 KV x 0,2

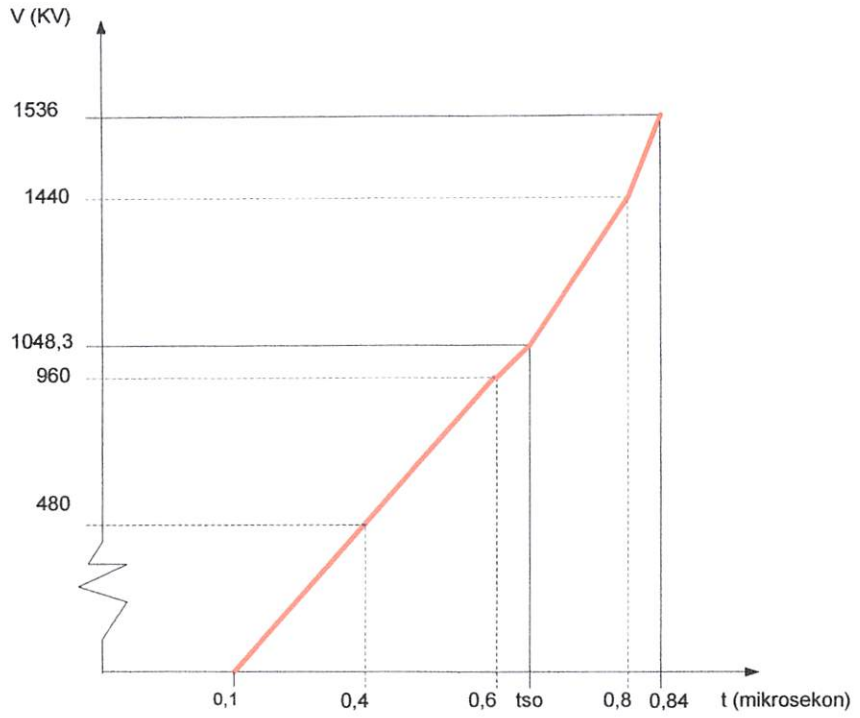
= 480 KV



Gambar 4.4
Pantulan Berulang Dari Arrester Ke Transformator

Dari diagram diatas dapat diketahui, setelah waktu percik arrester 0,64 μs, yaitu 0,84 μs tegangan tertinggi yang akan sampai pada trafo adalah sebagai berikut $= 1440 + (0{,}64-0{,}6) \times 2400$

$= 1440 + 96 = 1536$ KV



Grafik 4.1
Grafik Naiknya Tegangan Pada Transformator

Dari diagram tangga dan grafik diatas, maka dapat dianalisa tegangan tertinggi pada transformator.Setelah waktu percik arrester, yaitu 0,64 μs dan dengan jarak 62,71 m, maka tegangan tertinggi yang sampai pada transformator adalah 1536 KV.Dengan BIL 1550 KV, maka arrester tersebut dapat melindungi transformator dengan baik.

4.3.5. Tegangan Yang Masuk Ke Generator Setelah Dipindahkan/Ditransferkan Dari Tegangan Tinggi Trafo Ke Tegangan Rendah Trafo

Dari data-data diketahui :

Tegangan tinggi transformator (Vp) = 525 KV

Tegangan rendah transformator (Vs) = 18 KV

a. Perbandingan kumparan trafo dengan menggunakan persamaan no.41 :

$$n = \frac{Vp}{Vs}$$

$$n = \frac{525}{18} = 29{,}17$$

b. Perbandingan tegangan surja dengan tegangan sistem menggunakan persamaan no.42 :

$$p = \frac{E_2}{n \times E_1}$$

$$p = \frac{18}{29{,}17 \times (1084{,}3 - 525)} = 0{,}0012$$

c. Tegangan terminal tertinggi trafo dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 43 :

$$Vp = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 525 = 429$$

$$Vs = \frac{Vp}{n} = \frac{429}{29{,}17} = 14{,}7KV$$

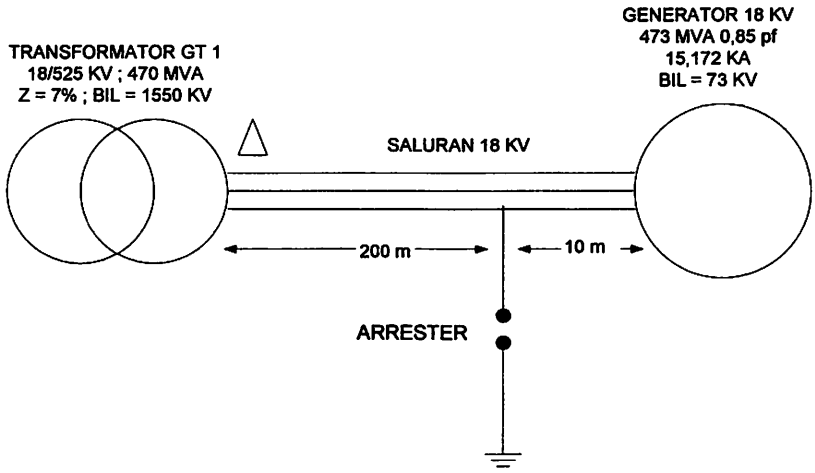
d. Tegangan yang masuk ke generator setelah ditransfer dari tegangan tinggi trafo ke tegangan rendah trafo dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.44 :

$$Es = Ep \times p \times n + Vs\sqrt{\left(1 + p^2 - \sqrt{3} \times p\right)}$$
$$Es = 1536 \times 0{,}0012 \times 29{,}17 + 14{,}7\sqrt{\left(1 + 0{,}0012^2 - \sqrt{3} \times 0{,}0012\right)}$$
$$Es = 53{,}76 + 14{,}68$$
$$Es = 68{,}45KV$$

Dengan besar tegangan yang menuju ke transformator 1536 KV dan setelah ditransfer ke tegangan rendah transformator, diperoleh tegangan 68,45 KV.Dan tegangan inilah yang akan menuju ke generator.Sedangkan Tingkat Isolasi Dasar (TID) dari generator adalah 73 KV sehingga tegangan tersebut masih aman bagi belitan generator.Namun karena generator merupakan peralatan yang utama di pembangkit (*power plant*) dan merupakan peralatan yang paling mahal, maka tegangan yang menuju ke generator harus diturunkan lagi sehingga tidak melebihi tegangan sistem.

4.4. Analisa Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Dengan Menggunakan Arrester Tanpa Kapasitor

Untuk analisa ini dipakai dua analisa yaitu analisa dengan menggunakan arrester tanpa kapasitor dan penggunaan arrester paralel dengan kapasitor.Untuk menentukan penggunaan arrester sebagai pengaman generator terhadap surja petir,maka harus diketahui impedansi saluran, dimana saluran antara transformator tegangan rendah dengan arrester adalah menggunakan IPB (*Isolated Phase Busduct*).



Gambar 4.5
Jarak Antara Arrester Dan Generator

4.4.1. Penentuan Impedansi Surja

Jarak arrester pada generator dengan transformator : 200 m

Jarak arrester dengan generator : 10 m

Jari-jari *busbar* (R_2) : 0,275 m

Jari-jari IPB (R_1) : 0,51 meter

a. Nilai kapasitansi saluran

Kapasitansi saluran antara transformator dan generator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.52 :

$$C = \frac{2 \times \pi \times \varepsilon o \times \varepsilon r \times l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

$$C = \frac{2 \times 3.14 \times 8{,}85.10^{-12} \times 210 \times 1{,}0006}{\ln \frac{0{,}51}{0{,}275}}$$

$$C = \frac{17239{,}52}{0{,}6176} = 27913.10^{-12}$$

$$C = 0{,}018 \mu F$$

b. Nilai induktansi saluran

Induktansi pada busbar sesuai data = 2,5312 $\mu H / m$

Untuk 210 meter = 2,5312 $\mu H / m \times 210 = 531{,}552\ \mu H$

c. Impedansi surja

Dari data diatas, maka impedansi surja dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.53 :

$$Z_1 = \sqrt{\frac{2{,}5312 \times 200}{0{,}018}} = 167{,}7\Omega$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{2{,}5312 \times 10}{0{,}018}} = 37{,}49\Omega$$

$$Z_t = \sqrt{\frac{2{,}5312 \times 210}{0{,}018}} = 171{,}84\Omega$$

4.4.2. Penentuan Tegangan Dasar Arrester

Dari data diketahui :

Tegangan sistem = 18 KV

Sehingga didapatkan :

Tegangan maksimum sistem = 110% x 18 = 19,8 KV

Pada generator pentanahannya adalah menggunakan *Netral Grounding Resistance* (NGR) atau dengan menggunakan kumparan Petersen,sehingga untuk

koefisien pentanahannya adalah 105 % (lihat lampiran).Sehingga didapatkan tegangan dasar arrester : 105 % x 19,8 = 20,79 KV.

4.4.3. Analisa Pemilihan Arrester

Dari perhitungan didapatkan tegangan dasar arrester yang sesuai adalah arrester 20,79 KV maka disesuaikan dengan yang ada dipasaran sehingga terdapat dua pilihan arrester yaitu dibawah tegangan dasar dan diatas tegangan dasar .

- Untuk tegangan dibawah 20,79 KV maka dipilih arrester dengan tegangan dasar 20 KV.
- Untuk tegangan diatas 20,79 KV maka dipilih arrester dengan tegangan dasar 22,5 KV.

a. Arrester dengan rating tegangan 20 KV

Dari data arrester tegangan 20 KV tipe gardu untuk generator (tabel 2.4) diketahui bahwa :

Tegangan pelepasan : 58 KV

Tegangan percikan : 80 KV

Tegangan yang datang : 1,2 x 73 = 87,6 KV

Arus pelepasan dihitung dengan menggunakan persaman no.24 :

$$I = \frac{2 \times e - e_a}{Z}$$

$$I = \frac{2 \times 87{,}6 - 58}{171{,}84}$$

$$I = 0{,}68$$

Faktor perlindungan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.29 :

$$MP = \left(\frac{BIL}{KIA} - 1\right) \times 100\%$$

$$(\%) = \left(\frac{73}{58} - 1\right) \times 100\% = 25{,}86\%$$

b. Arrester dengan rating tegangan 22,5 KV

Dari data arrester tegangan 22,5 KV tipe gardu induk untuk generator diketahui bahwa :

Tegangan pelepasan :

$$e_a = 58 + \left(\frac{22{,}5 - 20}{25 - 20}\right) \times (71 - 58)$$

$$e_a = 64{,}5KV$$

Tegangan percikan

$$e_a = 80 + \left(\frac{22{,}5 - 20}{25 - 20}\right) \times (100 - 80)$$

$$e_a = 90KV$$

Tegangan yang datang : 1,2 x 73 = 87,6 KV.

Arus pelepasan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 24 :

$$I = \frac{2 \times e - e_a}{Z}$$

$$I = \frac{2 \times 87{,}6 - 64{,}5}{171{,}84}$$

$$I = 0{,}64$$

Faktor perlindungan :

$$(\%) = \left(\frac{73}{64{,}5} - 1\right) \times 100\% = 13{,}18\%$$

Dengan adanya dua pilihan arrester, maka untuk mendapatkan perlindungan yang baik bagi generator harus ditinjau dari beberapa segi, antara lain :

- Tegangan pelepasan

  Dengan tegangan yang menuju generator adalah 68,45 KV, maka kedua arrester tersebut masih baik digunakan sebagai pelindung generator karena dengan tegangan 68,45 KV, arrester tersebut akan bekerja untuk mengalirkan tegangan ke tanah, baik untuk rating 22,5 KV dengan tegangan pelepasan 64,5 KV maupun rating 20 KV dengan tegangan pelepasan 58 KV.

- Faktor perlindungan

  Jika ditinjau dari faktor perlindungan, rating arrester 22,5 KV adalah sudah cukup untuk melindungi generator, namun arrester rating 20 KV lebih baik karena sudah memenuhi persyaratan perlindungan yang benar-benar aman yaitu lebih besar dari 20 %.

4.4.4. Penentuan Tegangan Tertinggi Yang Sampai Pada Generator

Untuk menentukan tegangan tertinggi pada transformator, maka digunakan metode diagram tangga gelombang berjalan.Dengan menggunakan persamaan umum koefisien pantulan dan koefisien terusan untuk arus dan tegangan maka didapatkan :

$$a = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{37{,}49 - 167{,}7}{37{,}49 + 167{,}7} = 0{,}63$$

$$a' = \frac{2.Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2.37{,}49}{205{,}19} = 0{,}365$$

$$b = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{167{,}7 - 37{,}49}{167{,}7 + 37{,}49} = 0{,}63$$

$$b' = \frac{2.Z_1}{Z \ + Z_2} = \frac{2.167{,}7}{205{,}19} = 1{,}63$$

Dari koefisien pantulan dan terusan untuk tegangan, maka dapat kita buat diagaram tangga dengan mengasumsikan :

a. Transformator dianggap sebagai sebuah jepitan terbuka yaitu keadaan yang paling berbahaya dimana koefisien terusan = 2

b. Gelombang surja yang datang mencapai transformator, terjadi pantulan total dimana koefisien pantulan = 1.

Sehingga dapat ditentukan besarnya tegangan baik tegangan pada titik arrester maupun yeng menuju ke generator.

$$e_1 = a'e$$
$$e_1 = 0{,}365.68{,}45 = 24{,}98$$
$$e_2 = a'b.c = 0{,}365.0{,}63.68{,}45 = 15{,}74$$
$$e_3 = a'b^2.e = 0{,}365.(0{,}63)^2.68{,}45 = 9{,}92$$

Selanjutnya dapat dianalisa dengan penggunaan arrester :

a. Penggunaan Rating 20 kV

1) Waktu perambatan arrester ke generator

$$t = \frac{x}{v} = \frac{10}{300} = 0{,}03\mu s$$

Pada saat dimana arrester mengalami percikan, tegangan pada titik sambungan pada penghantar antara arrester dengan generator adalah :

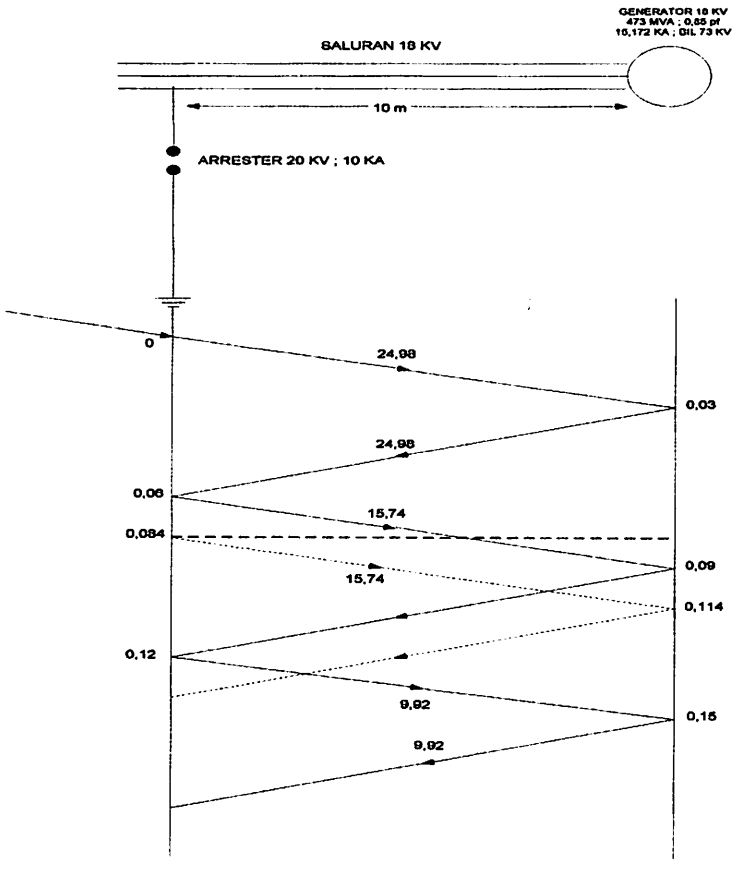
t = 0	e = 0
t = 0,03 μs	e = 24,98 KV
t = 0,06 μs	e = 24,98 KV
t = 0,09 μs	e = 24,98 + 24,98+15,74
	= 65,7 KV
t = 0,12 μs	e = 65,7 KV
t = 0,18 μs	e = 65,7 + 15,74+9,92
	= 91,36 KV

2) Waktu percik arrester

Dikarenakan pada saat e = 58 KV, arrester mulai memercik, dan karena tegangan 58 KV berada diantara t = 0,06 μs dan t = 0,09 μs, maka persamaan waktu percik dapat dituliskan sebagai berikut :

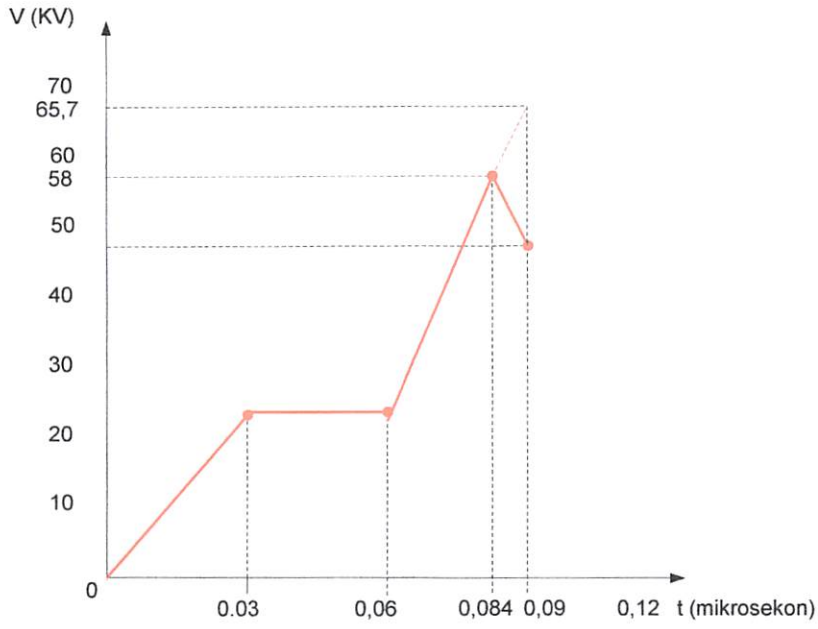
$$58 = 24{,}98 + 1{,}63 \times \frac{24{,}98}{0{,}03} \times \Delta t$$
$$33{,}02 = 1357{,}25 \times \Delta t$$
$$\Delta t = 0{,}024$$
$$t = 0{,}06 + 0{,}024 = 0{,}084 \mu s$$

3) Diagram tangga



Gambar 4.6
Pantulan Berulang Dari Arrester 20 KV Ke Generator

Naik tegangan pada lokasi arrester dapat digambarkan dalam sebuah grafik:



Grafik 4.2
Grafik Naik Tegangan Pada Lokasi Arrester

Naik tegangan pada generator adalah sebagai berikut :

t = 0	e = 0
t = 0,03 μs	e = 24,98 + 24,98 = 49,96 KV
t = 0,006 μs	e = 49,96 KV
t = 0,09 μs	e = 49,96 + 15,74 = 65,7 KV
t = 0,12 μs	e = 65,7

$$t = 0{,}114\ \mu s \qquad e = 49{,}96 + \frac{65{,}7 - 49{,}96}{0{,}03} \times 0{,}024$$

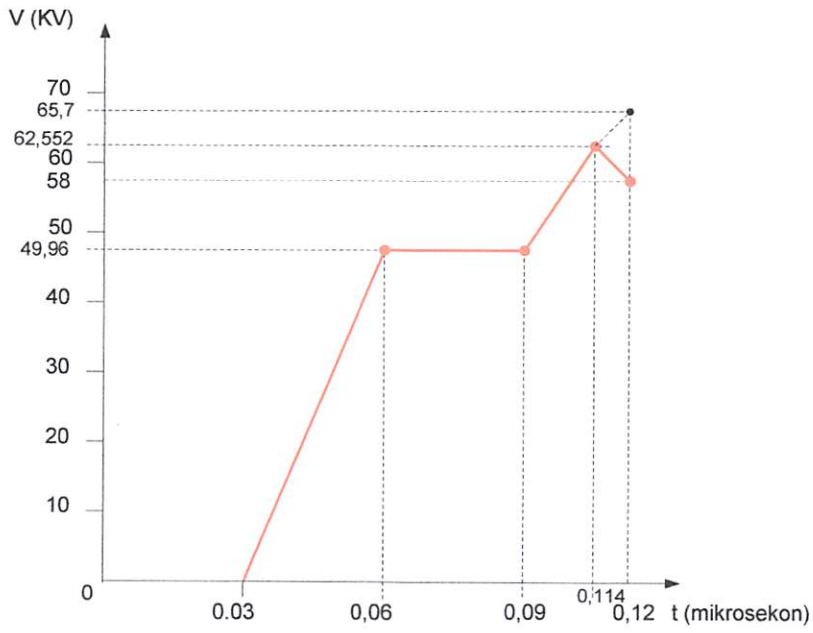
$$e = 62{,}552 \text{ KV}$$

Tegangan diatas adalah tegangan maksimum gelombang petir pada generator, selanjutnya gelombang tersebut akan mengalami penurunan hingga gelombang petir tersebut hilang, tegangan pada saat t = 0,12 μs menjadi :

$$e = 62{,}552 - \frac{65{,}7 - 49{,}96}{0{,}03} \times 0{,}006$$

$$e = 59{,}4 KV$$

Kenaikan tegangan pada generator dapat digambarkan dalam sebuah grafik berikut :



Grafik 4,3
Grafik Naik Tegangan Pada Generator

b. Penggunaan Rating 22,5 KV

1) Waktu perambatan arrester ke generator

Waktu perambtan arrester ke generator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.31 :

$$t = \frac{x}{v} = \frac{10}{300} = 0{,}03\mu s$$

Waktu dimana arrester mengalami percikan, tegangan pada titik sambungan pada penghantar antara arrester dengan generator adalah sama dengan penggunaan arrester rating 20 KV.

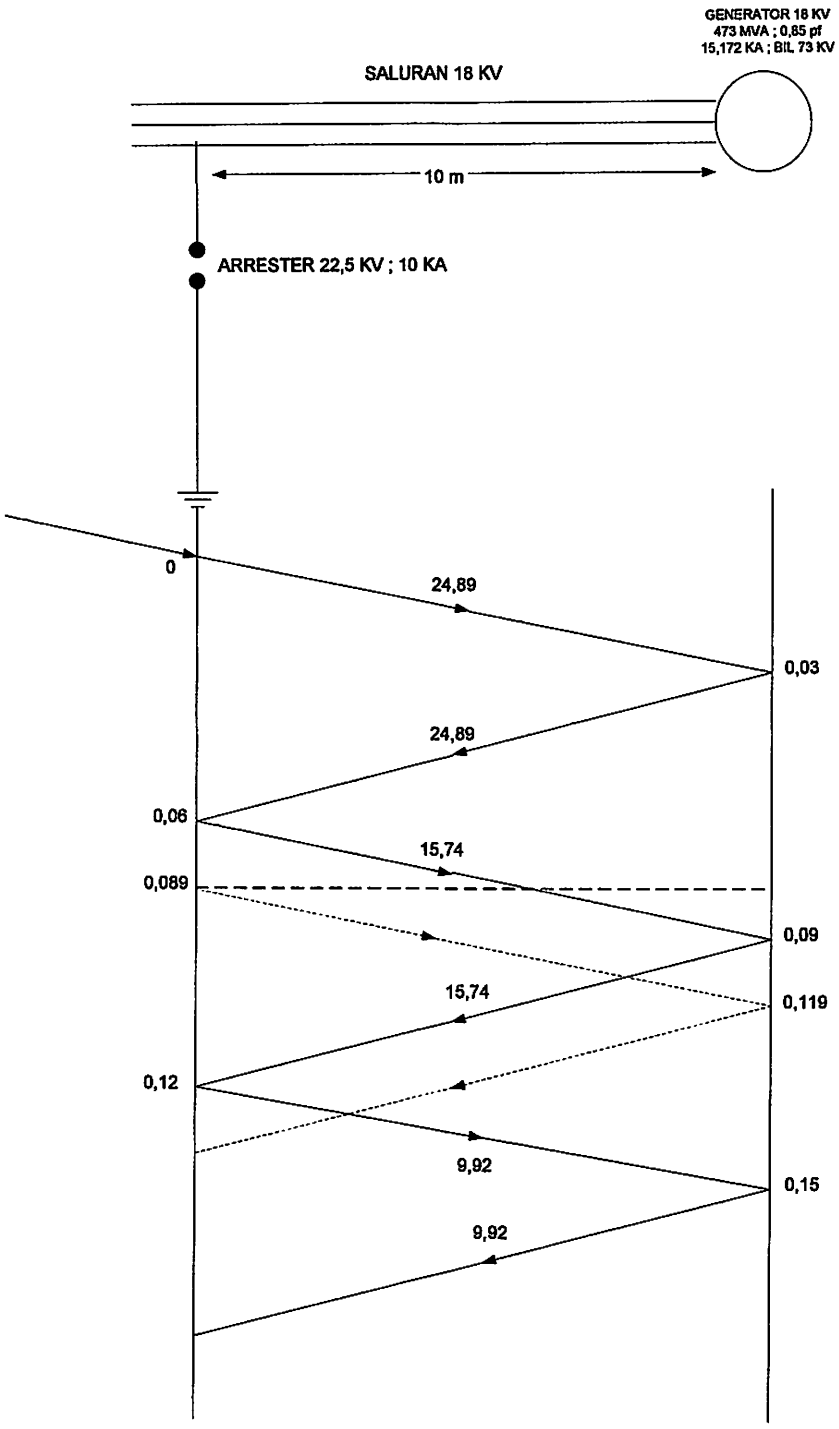
2) Waktu percik arrester

Dikarenakan saat e = 64,5 KV, arrester mulai memercik, dan karena tegangan 64,5 KV berada diantara t = 0,06 μs dan t = 0,09 μs, maka persamaan waktu percik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$64{,}5 = 24{,}98 + \frac{24{,}98}{0{,}03} \times \Delta t$$
$$39{,}52 = 1357{,}25 \times \Delta t$$
$$\Delta t = 0{,}029$$
$$t = 0{,}06 + 0{,}029 = 0{,}089\mu s$$

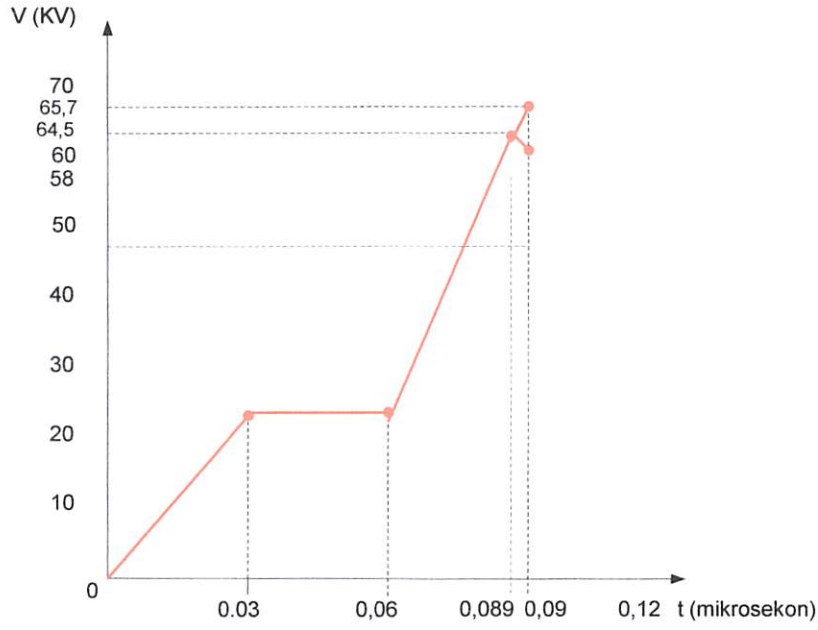
3) Diagram tangga

Dengan didapatkannya harga-harga tegangan pada perhitungan diatas, maka selanjutnya dapat dibuat diagram pantulan berulang :



Gambar 4.7
Pantulan Berulang Dari Arrester 22,5 KV Ke Generator

Naik tegangan pada lokasi arrester dapat digambarkan dalam sebuah grafik



Grafik 4.4
Grafik kenaikan tegangan pada lokasi arrester

Naik tegangan pada generator adalah sebagai berikut :

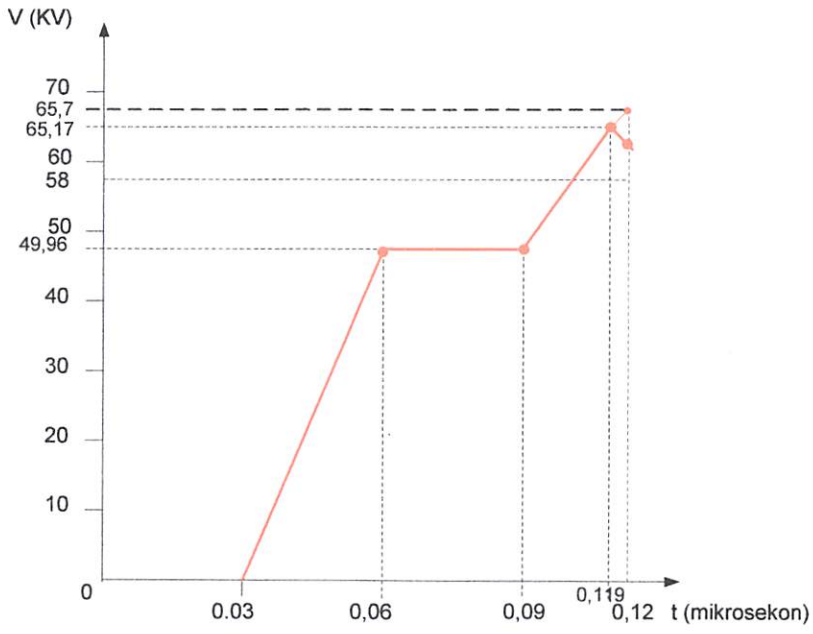
t = 0	e = 0
t = 0,03 μs	e = 49,96 KV
t = 0,06 μs	e = 49,96 KV
t = 0,09 μs	e = 65,7 KV
t = 0,12 μs	e = 65,7 KV
t = 0,119 μs	$e = 49{,}96 + \frac{65{,}7 - 49{,}96}{0{,}03} \times 0{,}029$
	e = 65,17 KV

Tegangan diatas adalah tegangan maksimum gelombang petir pada generator, selanjutnya gelombang tersebut akan mengalami penurunan hingga gelombang petir tersebut hilang tegangan pada saat t = 0,12 μs menjadi :

$$e = 65{,}17 - \frac{65{,}7 - 49{,}96}{0{,}03} \times 0{,}006$$

$$e = 64{,}65KV$$

Kenaikan tegangan pada generator dapat digambarkan dalam sebuah grafik yaitu :



Grafik 4.5
Grafik Naik Tegangan Pada Generator

Dari kedua rating arrester tersebut, tegangan yang akan sampai ke generator adalah sama-sama aman, yaitu untuk rating 20 KV adalah 62,552 KV dan untuk rating 22,5 KV adalah 65,17 KV karena masih dibawah *Basic Insulation Level* (BIL) Generator yaitu 73 KV.Namun karena generator adalah peralatan yang utama dalam pembangkitan tenaga listrik, maka perlindungan generator pun harus sangat diperhatikan.Untuk lebih amannya, tegangan yang akan sampai ke generator adalah mendekati dari tegangan sistem yaitu 18 KV.Dan untuk itu perlindungan generator dengan menggunakan arrester adalah cukup aman, namun masih jauh dari tegangan sistem.

4.5. Analisa Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Dengan Menggunakan Arrester dan Kapasitor

Dengan pemasangan kapasitor yang diparalel dengan arrester adalah bertujuan untuk dapat mengurangi besarnya tegangan yang menuju ke generator dan untuk mengurangi kecuraman gelombang akibat surja petir yang dapat menyebabkan tekanan atau stress pada isolasi kumparan generator.Untuk menentukan besarnya kapasitor yang akan digunakan, harus diketahui impedansi peralatan, yaitu generator dan transformator, selain itu juga harus diketahui impedansi saluran yang menghubungkan antara transformator dengan pemasangan kapasitor dan antara kapasitor dengan generator.

4.5.1 Penentuan Impedansi Peralatan dan Saluran 18 KV.

a. Impedansi Transformator

Dari data diketahui bahwa :

Tegangan impedansi (%IX) = 7,3

Daya nominal : 470 KVA

Frekuensi : 50 Hz

Angka transformasi : 512/18 = 29,17

Untuk menentukan besar induktansi pada belitan primer transformator adalah dengan menggunakan persamaan no.56 :

$$L = \frac{1{,}59(\%IX) \times (KV)^2}{f(KVA)}$$

$$L = \frac{1{,}59 \times (7{,}3) \times (525)^2}{50 \times 470 \times 10^3}$$

$$L = 0{,}1361H$$

Karena dalam analisa perhitungan ini dalam tegangan sekunder, maka induktansi (L) dibagi kuadrat angka transformasi (a^2).Sehingga didapat harga induktansi sebesar :

$$L = \frac{0{,}1361}{850{,}8889} = 1{,}5995 \times 10^{-4}$$

Sedangkan untuk sisi sekundernya :

$$L = \frac{1{,}59(\%IX) \times (KV)^2}{f(KVA)}$$

$$L = \frac{1{,}59 \times (7{,}3) \times (18)^2}{50 \times 470 \times 10^3}$$

$$L = 1{,}60028 \times 10^{-4} H$$

b. Impedansi Surja Generator

Dari data diketahui bahwa :

Tegangan nominal : 18 KV

Daya : 473 MVA

Transient Synchronous Reactance (X'd) : 33 %

Frekuensi : 50 Hz

Sesuai dengan data generator maka impedansi dasar pada generator adalah sebagai berikut :

$$Z_b = \frac{KV^2}{KVA}$$

$$Z_b = \frac{(18 \times 10^3)^2}{473 \times 10^6} = 0{,}6850\Omega$$

Reaktansi sinkron transient adalah :

X'd = 33 % x 0,6850 = 0,221 Ω

Induktansi generator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.57 :

$$L = \frac{X'd}{2.\pi.f} = \frac{0{,}2261}{2 \times 3{,}14 \times 50} = 7{,}1954 \times 10^{-4}$$

Sehingga impedansi surja generator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan no.53 :

$$Z_G = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$Z_G = \sqrt{\frac{7{,}1954.10^{-4}}{0{,}5.10^{-9}}}$$

$$Z_G = 1199{,}62\Omega$$

c. Impedansi Saluran

Impedansi saluran antara transformator dengan pemasangan arrester dan kapasitor dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan no. 53 :

$$Z_1 = \sqrt{\frac{2{,}5312 \times 200}{0{,}018}} = 167{,}7\Omega$$

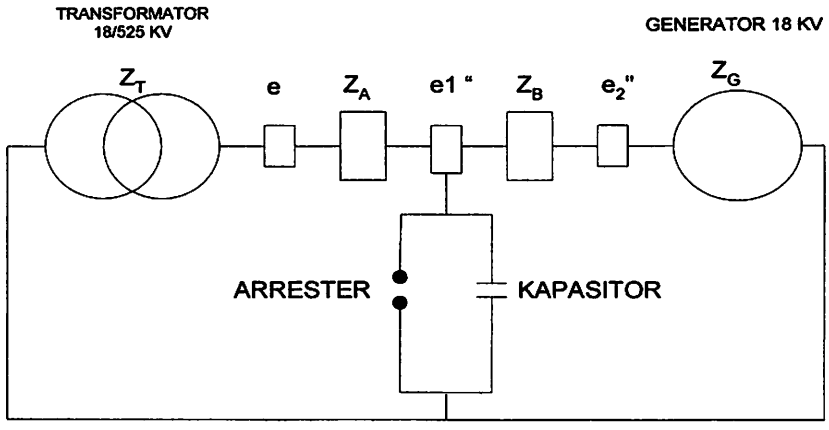
Impedansi saluran antara generator dengan pemasangan arrester dan kapasitor dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan no.53 :

$$Z_1 = \sqrt{\frac{2{,}5312 \times 10}{0{,}018}} = 37{,}49\Omega$$

4.5.2. Penentuan Tegangan Yang Menuju Generator

a. Rangkaian Ekivalen

Untuk analisa ini, ditentukan tegangan pada tiap-tiap titik seperti terlihat pada gambar Ekivalen berikut :



Gambar 4.8
Rangkaian Ekivalen Pemasangan Arrester
Dan Kapasitor Pada Saluran 18 KV

Keterangan :

e = tegangan datang

e_1 = tegangan pada titik peralihan

e_2" = tegangan menuju ke generator

Z_A = impedansi saluran sisi trafo

Z_B = impedansi saluran sisi generator

Z_T = impedansi transformator

Z_G = impedansi generator

b. Analisa Tegangan Pada Titik Peralihan

Dari rangkaian diatas dapat ditentukan impedansi saluran total, yaitu :

$$Z_A = Z_T + Z_1$$
$$Z_A = 799{,}97 + 167{,}67 = 967{,}67\Omega$$
$$Z_B = Z_G + Z_2$$
$$Z_B = 1199{,}62 + 37{,}49 = 1237{,}11\Omega$$

Untuk analisa ini, pada awalnya nilai kapasitansi 2,5 nF, yang selanjutnya nilai-nilai kapasitor yang lain, kemudian dapat dianalisa nilai kapasitor yang dapat digunakan sebagai pengaman generator terhadap surja petir.

Untuk nilai kapasitor 2,5 nF, maka didapatkan :

C = 2,5 nF = 2,5 x 10^{-9} F

$$X_C = -\frac{1}{j2 \times \pi \times C}$$
$$X_C = -\frac{1}{j2 \times 3{,}14 \times 50 \times 2{,}5 \times 10^{-9}}$$
$$X_C = -j1{,}27 \times 10^{-6}$$
$$X_C = 1{,}27 \times 10^{6} \angle -90^{o}$$
$$Z_P = \frac{Z_B \times X_C}{Z_B + X_C}$$
$$Z_p = \frac{1237{,}11 \times 1{,}27.10^{-6} \angle -90^{o}}{1237{,}11 + 1{,}27.10^{-6} \angle -90^{o}}$$
$$Z_p = \frac{1571{,}13 \times 10^{6} \angle -90^{o}}{1237{,}11 - j1{,}27 \times 10^{6}}$$
$$Z_p = \frac{1571{,}17 \angle -90^{o}}{1{,}27 \times \angle -90^{o}}$$
$$Z_p = 0{,}00124 \angle 0^{o}$$

Dengan cara yang sama, maka didapatkan untuk nilai impedansi yang lain seperti terlihat pada tabel berikut :

Tabel 4.2
Impedansi Paralel Kapasitor Dengan Impedansi Surja Generator

C (μF)	Zp (Ω)
0,0025	$1237,11 \times 10^{-6}$
0,005	$1237,11 \times 10^{-6}$
0,01	$1237,11 \times 10^{-6}$
0,025	$1237,11 \times 10^{-6}$
0,05	$1237,11 \times 10^{-6}$
0,1	$1237,11 \times 10^{-6}$
0,15	$1237,11 \times 10^{-6}$
0,2	$1237,11 \times 10^{-6}$
0,25	$1237,11 \times 10^{-6}$
0,3	$1237,11 \times 10^{-6}$

Untuk mendapatkan impedansi total dari rangkaian Ekivalen diatas, yaitu :

$$Z_s = Z_1 Z_p$$

Untuk nilai kapasitor 0,025 μF maka didapat :

$$Zs = 967,67 + 0,00124$$
$$Zs = 967,67124\Omega$$

Dengan cara yang sama maka untuk nilai impedansi seri yang lain dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.3
Impedansi Total Dari Rangkaian Ekivalen
Antara Transformator Dan Generator

C (μF)	Zs (Ω)
0,0025	967,671
0,005	967,671
0,01	967,671
0,025	967,671
0,05	967,671
0,1	967,671
0,15	967,671
0,2	967,671
0,25	967,671
0,3	967,671

Untuk menentukan besarnya tegangan yang sampai pada titik peralihan maka dapat menggunakan persamaan no.1 :

$$e_1'' = \frac{2 \times Z_A}{Z_B + Z_A} e$$

$$e_1'' = \frac{2 \times 967,67}{1237,11 + 967,67} e = 0,88e$$

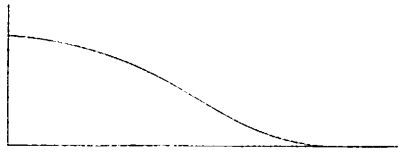
Dengan menggunakan cara yang sama, didapatkan nilai tegangan pada titik peralihan lain yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.4
Tegangan Peralihan Antara Transformator Dan Generator

Zs (Ω)	e_1''
967,671	0,88e
967,671	0,88e
967,671	0,88e
967,671	0,88e
967,671	0,88e
967,671	0,88e
967,671	0,88e
967,671	0,88e
967,671	0,88e
967,671	0,88e

c. Analisa Tegangan Yang Menuju Generator

Bila gelombang berjalan memiliki waktu 50 μs, maka :



Gambar 4.9
Gelombang Eksponensial

$$e^{-at} = 0{,}5$$
$$\ln e^{-at} = \ln 0{,}5$$
$$-at = 0{,}6931$$
$$-a = \frac{0{,}6931}{50 \times 10^{-6}} = 13862$$

Untuk gelombang E $\left(e^{-at} - e^{-\beta t}\right)$, maka muka gelombang tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan no.11 :

$$t_1 = \frac{\ln \frac{\beta}{a}}{\beta - a}$$
$$t_1 = \frac{\ln \frac{834392}{13862}}{834392 - 13862} = 4{,}99 \mu s$$

Tegangan yang menuju ke generator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan no.8 :

$$e_2 = EA\left[\frac{a+\alpha}{a-\alpha}e^{-at} - \frac{\alpha+\beta}{a-\beta}e^{-\beta t}\right]$$

Dimana :

$$\alpha = \frac{Z_G - Z_T}{Z_G.Z_T.C} \quad ; \beta = \frac{Z_G + Z_T}{Z_G.Z_T.C} \quad ; A = -1$$

Sehingga :

$$e_2'' = -E\frac{\alpha+\beta}{\alpha-\beta}\left[e^{-at} - e^{-\beta t}\right]$$

Pada penggunaan dengan kapasitor sebesar 2,5 nF, maka akan didapatkan :

$$\alpha = \frac{Z_G - Z_T}{Z_G.Z_T.C} = \frac{1199{,}62 - 7999{,}97}{1199{,}62.799{,}97.2{,}5.10^{-9}} = 167376$$
$$\beta = \frac{Z_G + Z_T}{Z_G.Z_T.C} = \frac{1199{,}62 + 7999{,}97}{1199{,}62.799{,}97.2{,}5.10^{-9}} = 834392$$

Sehingga tegangan yang menuju ke generator :

$$e_2" = -E\frac{\alpha+\beta}{\alpha-\beta}\left[e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right]$$
$$e_2" = -E\frac{167376+834392}{167376-834392}\left[e^{-13862.13,92.10^{-6}} - e^{-834392.13.92.10^{-6}}\right]$$
$$e_2" = -E. - 1,5(0,93 - 0,015)$$
$$e_2" = E.1,377$$

Bila :

$$E = e_1" = 0,88e, maka$$
$$e_2" = 0,88.e \times 1,377$$
$$e_2" = 1,2.e$$

Sehingga akan terjadi pelandaian/pengurangan tegangan puncak akibat adanya pemakaian kapasitor sebesar :

$$E = 0,88.e - 1,377.e$$
$$E = -0,32.e$$

Dengan cara yang sama akan didapatkan tegangan yang menuju ke generator dan pelandaian tegangan puncak seperti terlihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.5
Waktu Perambatan Gelombang Persamaan Tegangan
Yang Menuju Ke Generator Dan Pelandaian Tegangan Puncak

$C(\mu F)$	$t_1(\mu s)$	$e_1"$	$e_2"$	E
0,0025	4,99	0,88.e	1,2.e	-0,32.e
0,005	8,44	0,88.e	1.13.e	-0,25.e
0,01	13,92	0,88.e	0,92.e	-0,02.e
0,025	25,79	0,88.e	0,77.e	0,11.e

$C(\mu F)$	$t_1(\mu s)$	e_1''	e_2''	E
0,05	39,55	0,88.e	0,469.e	0,411.e
0,1	58,4	0,88.e	0,205.e	0,675,e
0,15	72,02	0,88.e	0,002.e	0,878.e
0,2	82,88	0,88.e	-0,138.e	1,018.e
0,25	91,99	0,88.e	-0,238.e	1,118.e
0,3	99,86	0,88.e	-0,278.e	1,158.e

4.5.3. Analisa Ketahanan Belitan Generator Terhadap Surja Petir

Untuk menentukan tegangan yang sampai pada generator, maka dapat dianalisa dengan pilihan dua arrester, yaitu arrester dengan rating 20 KV dan 22,5 KV.

a. Tegangan Yang Sampai Pada Generator Dengan Menggunakan Arrester Rating 20 KV Dan Kapasitor

Dari perhitungan di atas, didapatkan bahwa tegangan bahwa tegangan yang sampai pada generator dengan penggunaan arrester 20 KV adalah 62,289 KV sehingga setelah penggunaan kapasitor yang diparalel dengan arrester, maka didapatkan tegangan yang sampai pada generator adalah :

$$e_2'' = 1{,}2 \times 62{,}289$$
$$e_2'' = 74{,}747 KV$$

Dan peredaman puncak tegangan akibat penggunaan kapasitor sebagai kompensasi pengaman generator adalah :

$$E = -0{,}32 \times e$$
$$E = -1{,}37 \times 62{,}289$$
$$E = -19{,}93KV$$

Dengan cara yang sama dapat ditentukan untuk nilai kapasitansi lain yang dapat dilihat pada tabel :

Tabel 4.6
Pengaruh pemasangan kapasitor dan arrester 20 KV terhadap waktu perambatan gelombang tegangan yang menuju ke generator dan pelandaian puncak tegangan.

$C(\mu F)$	$t_1(\mu s)$	$e_2''(KV)$	$E(KV)$
0,0025	4,99	74,747	-19,932
0,005	8,44	70,386	-15,572
0,01	13,92	57,305	-1,246
0,025	25,79	47,962	6,852
0,05	39,55	29,213	25,6
0,1	58,4	12,764	42,045
0,15	72,02	0,1245	54,689
0,2	82,88	-8,596	63,410
0,25	91,99	-14,825	69,639
0,3	99,86	-17,316	72,131

b. Tegangan Yang Sampai Pada Generator Dengan Menggunakan Arrester Rating 22,5 KV Dan Kapasitor

Dari perhitungan diatas, didapatkan bahwa tegangan yang sampai pada generator dengan penggunaan arrester 20 KV adalah 65,17 KV.Sehingga setelah penggunaan kapasitor yang diparalel dengan arrester, maka didapatkan tegangan yang sampai pada generator adalah :

$$e_2^{"} = 1{,}2 \times 65{,}17$$
$$e_2" = 78{,}204 KV$$

Dan peredaman puncak tegangan akibat penggunaan kapasitor sebagai kompensasi pengaman generator adalah :

$$E = -0{,}32 \times e$$
$$E = -0{,}32 \times 65{,}17$$
$$E = -20{,}85 KV$$

Dengan cara yang sama dapat ditentukan untuk nilai kapasitansi yang lain, yang dapat dilihat dari tabel :

Tabel 4.7
Pengaruh pemasangan kapasitor dan arrester 22,5 KV terhadap waktu perambatan gelombang tegangan yang menuju ke generator dan pelandaian puncak tegangan

$C(\mu F)$	$t_1(\mu s)$	$e_2"(KV)$	$E(KV)$
0,0025	4,99	78,204	-20,854
0,005	8,44	73,642	-16,293
0,01	13,92	59,637	-1,303

$C(\mu F)$	$t_1(\mu s)$	$e_2''(KV)$	$E(KV)$
0,025	25,79	50,637	7,168
0,05	39,55	30,564	26,78
0,1	58,4	13,359	43,989
0,15	72,02	0,13	57,219
0,2	82,88	-8,993	66,343
0,25	91,99	-15,510	72,860
0,3	99,86	-18,117	75,466

Dengan perhitungan analisa diatas, perbandingan antara penggunaan arrester dapat dilihat pada tabel sebagai berikut :

Tabel 4.8
Perbandingan Penggunaan Arrester 20 KV Dan Arrester 22,5 KV

Rating Tegangan Arrester	20 KV	22,5 KV
Tegangan Pelepasan	58 KV	64,5 KV
Tegangan Percik	80 KV	90 KV
Arus Pelepasan	0,6 A	0,66 A
Margin Perlindungan	22,86%	13,18%
Waktu Percik	0,084 μS	0,089 μS
Tegangan Tertinggi Yang		

Sampai Pada Generator Tanpa Penggunaan Kapasitor	62,55 KV	65,17 KV
Tegangan Tertinggi Yang Sampai Pada Generator Dengan Menggunakan Kapasitor	12,796 KV	13,359 KV
Peredaman Kecuraman Muka Gelombang	42,045 KV	43,989 KV

Dari tabel diatas menunjukkan perbandingan antara arrester dengan rating dasar 22,5 KV dengan arrester 20 KV, untuk penggunaan kapasitor yang nilai kapasitansinya sama, maka untuk rating dasar arrester 20 KV tegangan yang sampai pada generator adalah lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan arrester rating 20 KV.Diambil contoh, untuk nilai kapasitansi kapasitor 0,1 μF.Dengan arrester rating 22,5 KV, maka tegangan yang sampai pada generator adalah 13,389 KV.Sedangkan untuk rating dasar arrester 20 KV, maka tegangan yang sampai ke generator adalah 12,769 KV.Sehingga dari pertimbangan tegangan yang sampai pada generator, maka arrester untuk rating 20 KV adalah waktu aman.

Selain itu arrester rating 20 KV memiliki waktu percik yang lebih singkat daripada arrester rating 22,5 KV, pada arrester 20 KV memiliki waktu percik 0,084 μS, sedangkan arrester 22,5 KV memiliki waktu percik 0,089 .Waktu percik arrester ini sangat penting dalam menentukan rating arrester yang aman

digunakan karena waktu percik arrester menentukan lama waktu arrester tersebut bekerja.

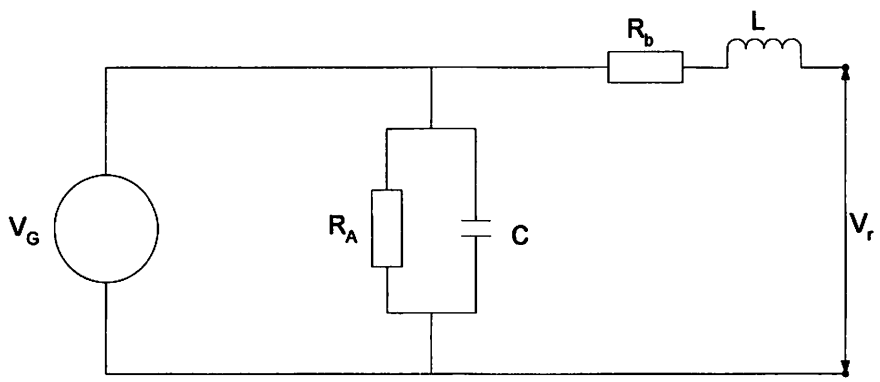
Untuk pemasangan kapasitor yang diparalel dengan arrester, sebagai pengaman generator terhadap surja petir, maka untuk nilai kapasitansi kapasitor yang lebih kecil dari 0,025 μF tida dapat melindungi generator dari tegangan lebih akibat surja petir, karena dengan pemasangan kapasitor kurang dari 0,0025 μF, tegangan yang sampai pada belitan generator adalah lebih besar dari ketahanan belitan isolasi generator.Dimana tingkat isolasi dasar belitan generator adalah 73 KV.Sedangkan tegangan yang masuk ke generator adalah lebih dari 74 KV ke atas (sesuai tabel perhitungan).Hal ini sangat membahayakan bagi belitan isolasi generator.Sedangkan untuk nilai kapasitansi kapasitor lebih besar dari 0,0025 μF, tegangan yang sampai pada generator adalah lebih kecil dari Tingkat Isolasi Dasar Generator sehingga dengan pemasangan kapasitor dengan nilai kapasitansi ini dapat digunakan sebagai pengaman generator terhadap tegangan lebih akibat surja petir.Namun generator merupakan peralatan yang utama dan paling mahal di pembangkit tenaga listrik, maka untuk tegangan lebih akibat surja petir yang masuk ke generator,harus mendekati tegangan nominal generator.Dimana tegangan nominal generator adalah 18 KV.Hal ini dimaksudkan untuk keamanan dari belitan generator.Untuk itu di PLTU Paiton dipilih kapasitor dengan nilai kapasitansi 0,1 μF yang diparalel dengan arrester dengan rating tegangan 22,5 KV, maka tegangan yang sampai pada generator adalah 13,369 KV.Sehingga tegangan tersebut tidak berbahaya bagi belitan generator.Selain itu, waktu gelombang berjalan adalah 58,4 μs.Dimana waktu muka

gelombang berjalan ini menunjukkan waktu gelombang dari awal terjadinya petir hingga puncak tegangan.Dengan waktu muka gelombang berjalan 58,4 μs ini akan lebih aman bagi generator.

Dengan pemasangan kapasitor 0,1 μF ini, peredaman/pelandaian puncak tegangan surja adalah 43,989 KV.Peredaman atau pelandaian puncak gelombang dpat menjadi lebih besar dengan pemasangan kapasitor dengan nilai kapasitansi yang lebih besar, namun pemakaian kapasitor dengan kapasitansi yang lebih besarpun dapat berbahaya bagi generator.

4.4. Analisa Saat Kondisi Normal

Dengan pemasangan arrester rating 22,5 KV paralel dengan kapasitor 0,1 μF di PLTU Paiton dapat dihitung sesuai rangkaian pengganti berikut ini :



Gambar 4.10
Rangkaian Ekivalen Saat Kondisi Normal

Keterangan :

VG = Tegangan terminal generator (KV)

Ra = Tahanan arrester (Ω)

Rb = Tahanan busduct (Ω)

C = Nilai kapasitansi *busduct* dan *surge absorber* (μF)

Vr = Tegangan sisi terima/transformator (KV)

Dari data-data diketahui :

Tahanan arrester saat kondisi normal : 20000 MΩ

Tegangan nominal saluran : 18 KV

Arus : 15172 A

Frekuensi : 50 Hz

Panjang busur 18 KV dari generator ke arrester : 210 m

Induktansi : 2,5312 μH /m x 210 = 531,552 μH

Kapasitansi saluran : 0,018 μF

Perhitungan impedansi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Zp = \frac{Ra \times \frac{1}{j.2.\pi.f.C}}{Ra + \frac{1}{j.2.\pi.f.C}}$$

$$Zp = \frac{20.10^9 \times \frac{1}{j.2.3{,}14.50.0{,}118.10^{-6}}}{20.10^9 + \frac{1}{j.2.3{,}14.50.0{,}118.10^{-6}}}$$

$$Zp = \frac{20.10^9 \times j0{,}0269.10^6}{20.10^9 - j0{,}0269.10^6}$$

$$Zp = \frac{0{,}538.10^{15} \angle -90^o}{2.10^{10} \angle -7{,}7.10^{-5}}$$

$$Zp = 0{,}179.10^5 \angle -89{,}9^o \Omega$$

Arus yang mengalir pada arrester dan kapasitor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$I = \frac{V}{Zp} = \frac{18.10^3 \angle 0^o}{0{,}179.10^5 \angle -89{,}9^o} = 0{,}1\angle 89{,}9^o\, A$$

Sehingga arus yang mengalir menuju ke transformator adalah :

$$Ir = 15{,}172 - 0{,}1.10^{-3}$$
$$Ir = 15{,}171 KA$$

Tahanan pada saluran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$R = \frac{\rho.L}{A}$$
$$R = \frac{0{,}032.210}{50.55} = 2{,}24.10^{-3}\Omega$$

Drop tegangan pada saluran dapat dihitung sebagai berikut :

$$Vd = I.R.\cos\theta + I.L.\sin\theta$$
$$Vd = 15{,}171.2{,}24.10^{-3}.0{,}85 + 15{,}171.531{,}552.0{,}53.10^{-6}$$
$$Vd = 0{,}028 + 0{,}0043$$
$$Vd = 0{,}0323 KV$$

Sehingga tegangan yang menuju ke transformator adalah :

$$Vr = VG - Vd$$
$$Vr = 18 - 0{,}0323$$
$$Vr = 17{,}96 KV$$

Dari perhitungan diatas, dapat dianalisa bahwa pada saat kondisi normal, pemasangan arrester 22,5 KV yang diparalel dengan kapasitor dengan nilai kapasitansi 0,1 μF tidak mempengaruhi terhadap besarnya tegangan dari generator menuju transformator sisi tegangan rendah.Hal ini disebabkan drop tegangan pada saluran 18 KV adalah :

$$Vd(\%) = \frac{0{,}0323}{18} \times 100\% = 0{,}0179\%$$

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

1. Rating dasar arrester yang digunakan sebagai pengaman generator terhadap surja petir di PLTU Paiton unit 1 dan 2 adalah 20,79 kV.
2. Perbedaan yang paling signifikan antara pemasangan arrester tanpa kapasitor dan arrester dengan kapasitor adalah tegangan tertinggi yang sampai ke generator yakni 65,17 kV (tanpa kapasitor) dan 13,359 kV (dengan kapasitor).
3. Kapasitor yang dipasang harus lebih besar dari 0,0025 μF yakni dengan batasan paling tinggi sampai 0,15 μF agar tegangan yang datang tidak mengganggu belitan generator.
4. Tegangan pada terminal generator saat dipasang kapasitor pelindung surja petir hanya mengalami drop tegangan sebesar 0,0179%, sehingga tegangan nominal menjadi 17,96 kV.

5.2. Saran

1. Arrester dengan Rating 20 kV lebih handal dalam melindungi generator bila ditinjau dari segala sisi perlindungannya.Melihat hal tersebut, maka disarankan untuk penggunaan arrester dengan rating tegangan 20 kV pada PLTU Paiton Unit 1 dan 2.

2. Dikarenakan waktu penelitian dan pengerjaan tugas akhir yang sangat singkat, penyusun menyadari banyak kekurangan pada tugas akhir ini.Maka diharapkan semoga tugas akhir ini dapat menjadi bahan referensi dalam penyempurnaan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

Arismunandar, Artono.1987. *Teknik Tegangan Tinggi.Jakarta* : PT. Pradnya Paramita

Arismunandar, Artono dan Kuwahara.1979. *Teknik Tenaga Listrik, Jilid III, Gardu Induk*.Jakarta: PT. Pradnya Paramita.

Clayton and Powel, *Aplication of Arrester For Complete Ligthning Protection Of Substation*, Vol.169.

Hutauruk, T.S.1991.*Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja*.Jakarta: Penerbit Erlangga.

Hutauruk, T.S.1987.*Pengetanahan Netral Dan Pengetanahan Peralatan*.Jakarta: Penerbit Erlangga.

L.V.Bewley, *Travelling Waves on Transmission System*, New York.1951.

Sirait, K.T. dan Zoro, R.1987. *Proteksi Sistem Tenaga*, Bagian I, *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*.Bandung: ITB.

Weedy, B.M.1972, *Electric Power System*.Second Edition.

Woolard, Barry, *Electronica Practical*.1997. Jakarta.PT.Pradnya Paramitha

LAMPIRAN

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO D-III
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

BERITA ACARA UJIAN TUGAS AKHIR
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO D-III
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

1.	**Nama**	: WHANINDRA KUSUMA
2.	**NIM**	: 04.52.005
3.	**Jurusan**	: Teknik Elektro D-III
4.	**Konsentrasi**	: Teknik Energi Listrik
5.	**Judul Tugas Akhir**	: STUDI ARRESTER DAN KAPASITOR SEBAGAI KOMPENSASI SISTEM PENGAMAN GENERATOR TERHADAP SURJA PETIR DI PLTU PAITON

Dipertahankan dihadapan Tim Penguji Tugas Akhir Jenjang Diploma Tiga (D-III)

Pada Hari : Sabtu
Tanggal : 22 September 2007
Dengan Nilai : **85,50 (A)**

Panitia Ujian Tugas Akhir

Ketua

Ir. Mochtar Asroni, MSME
NIP.Y.1018100036

Sekretaris

Ir. Choirul Saleh, MT
NIP.Y.1018800190

Anggota Penguji

Penguji I

Ir. Choirul Saleh, MT
NIP.Y.1018800190

Penguji II

Komang Somawirata, ST, MT
NIP.P.1030100361

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO D-III
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

PERSETUJUAN PERBAIKAN TUGAS AKHIR

Dari hasil ujian Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro jenjang Diploma Tiga (D-III) yang diselenggarakan pada :

Hari : Sabtu
Tanggal : 22 September 2007

Telah dilakukan perbaikan Tugas Akhir oleh :

1. Nama : WHANINDRA KUSUMA
2. NIM : 04.52.005
3. Jurusan : Teknik Elektro
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik D-III
5. Judul Tugas Akhir : STUDI ARRESTER DAN KAPASITOR SEBAGAI KOMPENSASI SISTEM PENGAMAN GENERATOR TERHADAP SURJA PETIR DI PLTU PAITON

Perbaikan meliputi :

NO	Materi Perbaikan	Ket
1	Istilah-istilah asing dicetak miring.	
2	Kesimpulan.	

Mengetahui

Ir. Teguh Herbasuki, MT
Dosen Pembimbing

Diperiksa dan Disetujui oleh

Komang Somawirata, ST, MT
Dosen Penguji

YAYASAN PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK
KAMPUS : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431(Hunting) Fax. (0341) 553015 Malang 65145

NI (PERSERO) MALANG
ANK NIAGA MALANG

Nomor : 0045/EL-05/TA/2007
Lampiran : -
Perihal : Bimbingan Tugas Akhir

Kepada : Yth. Ir. Teguh Herbasuki,MT
Dosen Institut Teknologi Nasional
Malang

Dengan Hormat,

Sesuai dengan permohonan persetujuan dalam Tugas Akhir untuk mahasiswa:

Nama : Whanindra Kusuma
No. Mahasiswa : 0452005
Program Studi : Teknik Elektro D-III
Judul Tugas Akhir : Studi Arrester Dan Kapasitor Sebagai Kompensasi Sistem Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Di PLTU Paiton

Maka dengan ini pembimbingan Tugas Akhir tersebut kami serahkan sepenuhnya kepada saudara, terhitung mulai tanggal 02/05/2006 s/d 05/09/2007

Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami ucapkan terima kasih.

Malang, 2 MEI 2007
Ketua Jurusan Jurusan Teknik Elektro D-III

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI JURUSAN TEKNIK ELEKTRO DIPLOMA

Ir. Choirul Saleh,MT
NIP. 1018300190

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO DIPLOMA TIGA (D-III)
MALANG

UT - 1

Lampiran : 1(satu) berkas Proposal
Perihal : Permohonan Kesediaan Dosen Pembimbing

Kepada : Yth. Bapak/Ibu. Ir. Teguh Herbasuki,MT
Institut Teknologi Nasional Malang
di
M a l a n g

Dengan hormat,

Kami yang bertanda tangan dibawah ini :

N a m a : Whanindra Kusuma

No. Mahasiswa : 0452005

Program Studi : Teknik Elektro D-III

Dengan ini mengajukan permohonan, sekiranya Bapak/Ibu bersedia menjadi Dosen Pembimbing Utama/Pendamping*), untuk penyusunan Tugas Akhir .

Judul Tugas Akhir : Studi Arrester Dan Kapasitor Sebagai Kompensasi Sistem Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Di PLTU Paiton

Adapun tugas tersebut adalah salah satu syarat untuk menempuh Ujian Tugas Akhir Program D-III.

Demikian permohonan kami dan atas kesediaan Bapak/Ibu kami ucapkan terima kasih.

Mengetahui
Ketua Jurusan
Teknik Elektro D-III

Ir. Choirul Saleh,MT
NIP.Y.1018800190

Malang, 2 MEI 2007

Whanindra Kusuma

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO DIPLOMA TIGA (D-III)
MALANG

UT - 2

KESEDIAAN PEMBIMBING
TUGAS AKHIR

Sesuai permohonan dari mahasiswa :

N a m a	:	Whanindra Kusuma
No. Mahasiswa	:	0452005
Program Studi	:	Teknik Elektro D-III
Judul Tugas Akhir	:	Studi Arrester Dan Kapasitor Sebagai Kompensasi Sistem Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Di PLTU Paiton

Bahwa kami bersedia membimbing Tugas Akhir dari mahasiswa tersebut.

Jangka waktu penyelesaian Tugas Akhir selama 4 (empat) bulan mulai tanggal 02/05/2006 s/d 05/09/2007 dan apabila dalam jangka waktu tersebut belum selesai maka tugas akhir tersebut dinyatakan **GUGUR**

Malang, 2 MEI 2007
Dosen Pembimbing,

Ir. Teguh Herbasuki,MT
NIP.

Nb :
Setelah disetujui agar formulir ini diserahkan Mahasiswa yang bersangkutan kepada sekretaris jurusan Teknik Elektro D-III

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
JL. BENDUNGAN SIGURA–GURA 2
MALANG

FORMULIR BIMBINGAN TUGAS AKHIR

Nama : **Whanindra Kusuma**
Nim : **04.52.005**
Masa Bimbingan : **02 Mei s/d 05 September 2007**
Judul Tugas Akhir : **Studi Arrester Dan Kapasitor Sebagai Kompensasi Sistem Pengaman Generator Terhadap Surja Petir Di PLTU Paiton.**

NO	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	07/05-07	Konsultasi judul, isi dsb	
2.	20/05-07	Kons. Arrester & Kapasitor	
3.	06/06 07	Konsultasi bab I & II	
4.	15/06 07	Revisi bab I	
5.	28/06 07	Konsultasi bab III	
6.	02/07 07	Konsultasi bab IV	
7.	07/07 07	Konsultasi bab V	
8.	11/07 07	Acc ujian.	
9.			
10.			

Malang, **2007**

Ir. Teguh Herbasuki, MT