

SYAMSIR ABDUH

TEKNIK TEGANGAN TINGGI



DASAR PEMBANGKITAN DAN PENGUKURAN

USTAKAAN
WA TIMUR

31

D



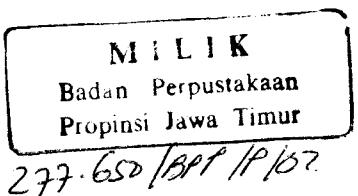
Penerbit
Salemba Teknika

Syamsir Abduh

DASAR PEMBANGKITAN DAN PENGUKURAN
TEKNIK TEGANGAN TINGGI



**Penerbit
Salemba Teknika**



DASAR PEMBANGKITAN DAN PENGUKURAN
TEKNIK TEGANGAN TINGGI

Syamsir Abduh

PROYEK. T.A. 2002



© 2001, **Penerbit Salemba Teknika**
Grand Wijaya Center Blok D-7
Jl. Wijaya 2, Jakarta 12160
Telp. : (021) 721-0238, 725-8239
Faks. : (021) 721-0207
Email : salemba@centrin.net.id
Website : <http://www.salembateknika.com>

Hak cipta dilindungi Undang-undang. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Abduh, Syamsir

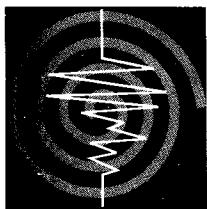
Teknik Tegangan Tinggi/Syamsir Abduh

– Edisi Pertama - Jakarta: Salemba Teknika, 2001
1 jil.: 26 cm

ISBN 979-9549-01-9

I. Judul

1. Teknik



KATA PENGANTAR



Tiada kata yang teramat mulia penulis sampaikan melainkan mengucapkan Alhamdulillah atas selesainya penyusunan Buku "Dasar Pembangkitan dan Pengukuran: Teknik Tegangan Tinggi" edisi pertama ini. Sebenarnya keinginan untuk menyusun sebuah buku telah lama penulis nantikan, terutama sekali pada saat penulis menjadi Asisten kuliah Tegangan Tinggi Prof. Dr. Artono Arismunandar (alm.), bahkan bersama dengan Ir. Pamudji Iskandar (alm.) mantan Kepala Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Penyaluran Energi FTI Universitas Trisakti penulis telah menyusun diktat Tegangan Tinggi untuk mahasiswa Jurusan Teknik Elektro FTI Universitas Trisakti, khususnya konsentrasi Teknik Tenaga.

Penyusunan buku ini dimaksudkan untuk mengisi kelangkaan buku acuan di bidang Teknik Tegangan Tinggi sebagai salah satu kuliah wajib pada program studi teknik tenaga. Buku ini lebih ditekankan pada pembangkitan dan pengujian tegangan tinggi (arus bolak-balik, arus searah dan impuls) dan di bagian lain penulis juga menyampaikan teknik pengukuran tegangan tinggi. Berhubung dengan terbatasnya waktu, pada kesempatan ini penulis baru dapat menyelesaikan edisi pertama, *Insya Allah* semoga dalam waktu yang tidak terlalu lama penulis dapat menyelesaikan edisi selanjutnya.

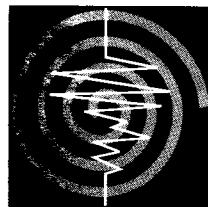
Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sehingga penyusunan buku ini dapat terlaksana. Terutama kepada Prof. Ir. Abdul Kadir, Guru Besar Teknik Elektro pada Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti yang telah banyak mengarahkan dan memotivasi penulis untuk terus berkarya.

Juga ucapan terima kasih ini penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ing. H. Faraz Umar selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri yang telah memberikan banyak kesempatan untuk mengembangkan diri termasuk mendorong penulis untuk menulis buku ini, serta rekan-rekan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Penyaluran Energi Teknik Elektro Universitas Trisakti.

Tiada gading yang tak retak, itulah ungkapan yang paling tepat untuk menggambarkan bahwa betapa pada buku ini masih terdapat kekurangan-kekurangan. Karenanya saran-saran perbaikan, kritik maupun komentar akan penulis terima dengan segala senang hati dan tangan terbuka.

Jakarta, Maret 2001

Syamsir *Alilah*



DAFTAR ISI



KATA PENGANTAR	v
-----------------------	----------

DAFTAR ISI	vii
-------------------	------------

BAB I PENDAHULUAN	I
--------------------------	----------



1.1 Pengantar Tegangan Tinggi	2
1.2 Dasar Pengujian	3
1.3 Pengujian Yang Bersifat Merusak	4
1.4 Pembangkitan Sumber Tegangan Tinggi	5

BAB II SUMBERTEGANAN ARUS BOLAK-BALIK	7
--	----------



2.1 Menentukan Kapasitas Transformator Penguji	II
2.2 Pembangkitan Tegangan Tinggi Dengan Rangkaian Resonansi Seri	III
2.3 Seri Resonan	IV
2.4 Pengaruh Impedansi Beban Kepada Sifat Beban Rangkaian Resonansi Seri	VI
2.5 Sumber Tegangan Tinggi Arus Bolak-balik Frekuensi Tinggi	VIII

BAB III SUMBER TEGANGAN TINGGI ARUS SEARAH	22
---	-----------



3.1 Rangkaian Yang Dipakai Sebagai Sumber Tegangan Tinggi Searah	22
3.2 Bentuk Rangkaian Penyearah	22
3.2.1 Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang	22
3.2.2 Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh	24
3.3 Rangkaian Villard	24
3.4 Rangkaian Pengganda Tegangan Greinacher	25
3.5 Rangkaian Penyearah Bertingkat Susunan Kaskade	27
3.6 Rangkaian Penyearah Diberi Beban	29

BAB IV SUMBER TEGANGAN TINGGI IMPULSE	35
4.1 Rangkaian Dasar Sumber Tegangan Tinggi Impulse	36
4.2 Analisa Generator Impulse Dengan Rangkaian R- C	36
4.3 Generator Impulse Susunan Bertingkat	40
4.4 Cara Menentukan Kapasitas (Daya) Generator (Secara Praktek)	43
4.5 Pengaruh Tahanan R1 Dan R2 Terhadap Bentuk Gelombang Impulse	44
4.6 Pembangkitan Impulse (Surja) Hubung	46
4.7 Pembangkitan Arus Impulse	48
4.8 Rangkaian Untuk Menghasilkan Gelombang Arus Impulse	48
BAB V PENGUKURAN TEGANGAN TINGGI	51
5.1 Pengukuran Tegangan Puncak Menggunakan Sela Percikan	52
5.2 Bentuk Susunan Pengukuran	53
5.3 Pengukuran Tegangan Searah dan Bolak-balik	53
5.4 Pengukuran Tegangan Impulse	53
5.5 Bentuk Kondisi Elektroda Bola	54
5.6 Ketepatan Nilai Tabel Percikan di Udara	55
5.7 Pengaruh Dari Udara di Sekitarnya	55
5.8 Pemakaian Pembagi Tegangan Sebagai Sarana Pengukuran Tegangan Tinggi	59
5.9 Pembagi Tegangan Berisi Tahanan	60
5.10 Pembagi Tegangan Berisi Kapasitor	64
5.11 Pengukuran/ Alat Ukur Tegangan Tinggi	66
5.12 Pengukuran Tegangan Puncak	67
5.13 Perkembangan Rangkaian Pengukuran Pada Peak-voltmeter	69
5.14 Rangkaian Pengujian Tegangan Tinggi	70
5.15 Rangkaian Pengujian Tegangan Tinggi Bolak-balik	71
5.16 Rangkaian Pengujian	72
5.17 Pengukuran Tegangan	72
5.18 Pengujian/ Rangkaian Pengujian Dengan Tegangan Tinggi Searah	74
5.19 Rangkaian Pengujian	74
5.20 Pengaruh Polaritas Pada Elektroda	75
5.21 Rangkaian Pengujian Tegangan Searah Bertingkat Banyak	78

5.22 Pengujian/Rangkaian Pengujian Dengan Tegangan Tinggi Impulse	79
5.23 Tegangan Petir Yang Utuh (Impulse Petir)	80
5.24 Gelombang Standard Dari Impulse Yang Terpotong	81
5.25 Rangkaian Pengujian Tegangan Impulse	81
5.26 Cara Pengukuran Tegangan Tinggi Impulse	83
5.27 Rangkaian Tegangan Tinggi Impulse Bertingkat Banyak	84

BAB VI PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN (PARTIAL DISCHARGE) 87

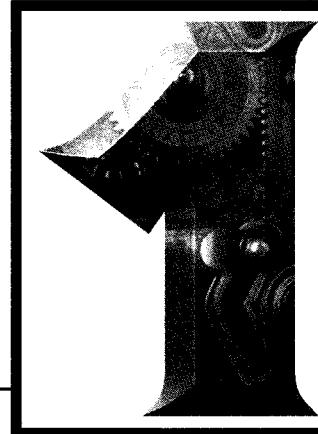


6.1 Pelepasan Muatan Sebagian Internal	88
6.1.1 Proses Terjadinya Pelepasan Muatan	88
6.1.2 Pengukuran Partial Discharge	89
6.1.3 Teknik Pengukuran Partial Discharge	89
6.1.4 Bentuk Pelepasan Muatan pada Rongga	90
6.1.5 Energi Pelepasan Muatan	91
6.2 Pelepasan Muatan Sebagian Permukaan (<i>Surface Discharge</i>)	93
6.3 Korona (<i>Corona Discharge</i>)	94
6.4 Gejala Treeing	95

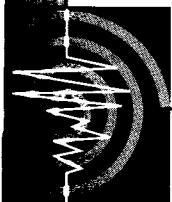
DAFTAR PUSTAKA	97
INDEKS	99
TENTANG PENULIS	101

B A B

PENDAHULUAN



- PENGANTAR TEGANGAN TINGGI
- DASAR PENGUJIAN
- PENGUJIAN YANG BERSIFAT MERUSAK
- PEMBANGKITAN SUMBER TEGANGAN TINGGI



I.I PENGANTAR TEGANGAN TINGGI

Dalam dunia teknik yang digolongkan tegangan tinggi adalah mulai dari tegangan 0,6 KV (600 Volt) sampai dengan tegangan yang mempunyai nilai ribuan Volt. Untuk jenis tegangan tinggi ini, masing-masing negara mempunyai batas pembagian yang agak berbeda. Misalnya di dunia Barat tegangan tinggi ini dibagi atas beberapa bagian :

1. Tegangan Tinggi (*High Voltage*)
2. Tegangan Tinggi Menengah (*Medium High Voltage*)
3. Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*)
4. Tegangan Ultra Tinggi (*Ultra High Voltage*)

Batas-batas penjelasan tegangan tinggi ini tidak sama, tergantung pada kemajuan suatu negara. Misalkan, yang dinamakan tegangan tinggi Eropa adalah mulai dari tegangan 0,6 / 1,0 KV sampai dengan 2,4 KV. Untuk tegangan menengah dari 3 KV sampai dengan 30 KV. Untuk tegangan yang lebih tinggi dari 60 KV sampai 100 KV, dinamakan Tegangan Ekstra Tinggi (E.H.V) dan untuk tegangan 240 KV s/d 1000 KV dinamakan Tegangan Ultra Tinggi (U.H.V). Di Eropa Barat penyelidikan untuk pemakaian tegangan tinggi ini baru mencapai 1000 KV, sedangkan untuk Amerika dan Rusia sudah lebih dari itu.

Untuk menentukan pemakaian tegangan E.H.V dan U.H.V selalu dipertimbangkan keperluannya, kondisi Ekonomi dan juga faktor-faktor teknis seperti pelaksanaan, pemeliharaan, faktor sosial budaya, dan pengaruh gangguan yang akan terjadi. Dalam penyaluran energi, tegangan yang dipakai biasanya adalah tegangan tinggi AC (tegangan tinggi bolak balik). Akan tetapi dengan adanya kemajuan teknologi maka tegangan tinggi DC (arus searah) sekarang mendapatkan perhatian yang lebih, sebab mempunyai banyak keuntungan bila dibandingkan dengan sistem yang menggunakan tegangan AC. Di samping tegangan tinggi yang sifatnya kontinyu, ada juga tegangan tinggi yang sifatnya periodik/aperiodik. Pada umumnya tegangan tinggi ini disebabkan oleh suatu gangguan. Misalnya gangguan petir pada kawat transmisi, gelombang aperiodik yang disebabkan oleh surja hubung (*switching surge*), akibat hubung singkat, hubung tanah dan lain-lain. Oleh karena itu, tegangan tinggi dapat digolongkan menjadi:

1. Tegangan tinggi normal
2. Tegangan tinggi lebih

Bila digolongkan menurut bentuknya maka tegangan tinggi dibagi menjadi:

1. Tegangan tinggi periodik
2. Tegangan tinggi aperiodik

Bila digolongkan menurut sebab kejadiannya:

1. Tegangan tinggi dari luar sistem (alamiah)
2. Tegangan tinggi dari dalam sistem (buatan)

Tegangan tinggi yang normal adalah tegangan tinggi yang dapat ditahan oleh sistem untuk waktu yang tak terhingga. Di sisi lain tegangan tinggi yang tidak normal yang umumnya menyebabkan **tegangan lebih** (*over voltage*) hanya dapat ditahan untuk waktu tertentu. Tegangan tinggi dapat berupa periodik atau aperiodik seperti diterangkan di atas. Persoalan yang mencakup bidang tegangan tinggi ini sangat luas, kadang-kadang berkaitan dengan bidang yang sifatnya khusus seperti: bidang fisika, elektro magnet,

elektro statis dan lain-lain. Karena itu, sangat sulit untuk menulis buku mengena: tegangan tinggi tanpa menyinggung persoalan-persoalan bidang lain tersebut dan tanpa mengetahui latar belakang teorinya. Biasanya yang dicakup dalam mata pelajaran Teknik Tegangan Tinggi adalah permasalahan pokok yang mencakup hal-hal berikut:

1. Teknik pembangkitan, pengujian, pengukuran termasuk di dalamnya klasifikasi pengujian di dalam laboratorium. Yang dimaksud dengan pembangkitan, pengujian dan pengukuran di sini adalah pembangkitan tegangan tinggi AC, DC dan tegangan impulse.
2. Pengetahuan mengenai instrumen yang dipakai untuk pengukuran dalam teknik tegangan tinggi seperti: meter tegangan puncak, meter elektrostatik dan lain-lain. Pengaruh keadaan sekeliling terhadap pengukuran dan faktor koreksi yang diperlukan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang benar.
3. Surja hubung dan pengaruhnya, impulse arus dan pemakainya.
4. Kadang-kadang dibahas juga cara pengujian alat-alat listrik yang sering dilakukan di dalam laboratorium tegangan tinggi.

I.2 DASAR PENGUJIAN

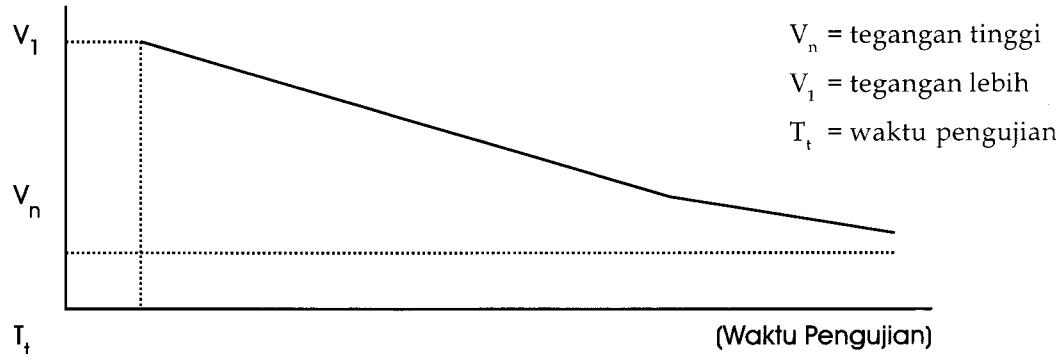
Pada umumnya kegagalan dari alat-alat listrik yang sedang dalam operasi disebabkan karena tegangan pada isolasinya dalam menjalankan fungsinya sebagai isolator tegangan tinggi. Kegagalan isolasi ini (*isolation failure*) dapat disebabkan oleh beberapa hal antara lain:

1. Isolasi sudah lama dipakai (mendekati kelupukan).
2. Kerusakan karena faktor mekanis, terbentur waktu transportasi atau waktu diperbaiki.
3. Berkurangnya kekuatan dielektrik karena isolasi tersebut dikenakan tegangan lebih, dalam waktu yang lama.

Oleh sebab itu pengujian dengan tegangan tinggi dimaksudkan untuk:

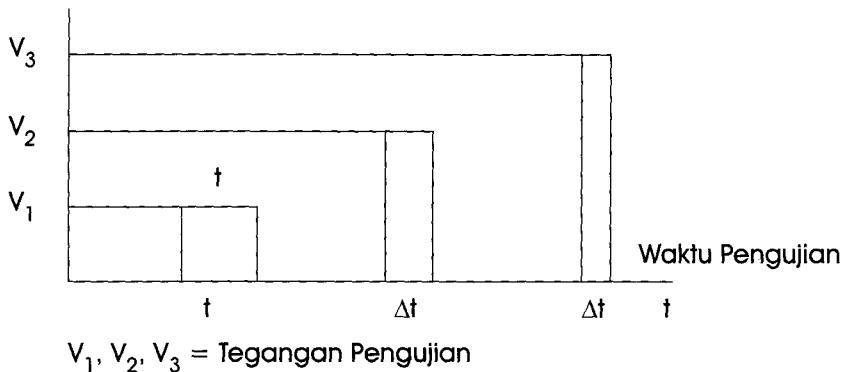
1. Mencari jenis bahan yang kualitasnya tidak baik atau ada kesalahan pada waktu pembuatannya.
2. Dapat dipakai sebagai jaminan bahwa alat-alat yang dihasilkan dapat dipakai dalam waktu yang lama bilamana tidak terjadi tegangan lebih yang berkelanjutan.
3. Memberikan jaminan bahwa isolasi alat listrik ini tahan terhadap tegangan lebih untuk waktu yang terbatas.

Sifat pengujian dapat dilakukan sebagai pengujian yang merusak (alat uji sampai rusak) ataupun pengujian yang tidak merusak (*non destructive test*).



I.3 PENGUJIAN YANG BERSIFAT MERUSAK

- | | |
|-----------|---|
| Tahap I | : Pengujian Ketahanan (<i>Withstand Test</i>) |
| Caranya | : Tegangan tertentu diterapkan untuk waktu tertentu misalnya dalam 1 menit. Bila dalam waktu itu tidak terjadi loncatan api, maka alat itu dianggap lulus ujian. |
| Tahap II | : Pengujian Pelepasan Muatan (<i>Discharge Test</i>) |
| Caranya | : Bilamana tegangan dinaikkan maka terjadi pelepasan muatan pada benda yang diuji (tegangan ini biasanya lebih tinggi dari tegangan ketahanan). Pengujian dapat dilakukan dalam keadaan kering ataupun keadaan basah (seperti keadaan pada waktu ia dalam operasi). |
| Tahap III | : Pengujian Kegagalan (<i>Breakdown Test</i>) |
| Caranya | : Tegangan dinaikkan lagi sampai terjadi <i>breakdown</i> di dalam benda yang diuji. |



Dalam teori tegangan tinggi selalu dipakai istilah: *DISCHARGE* (pelepasan muatan), dalam hal ini isolasi mengalami kegagalan karena adanya tekanan pada dielektrik di mana kemudian menyebabkan hilangnya tegangan dan sekaligus mengalirnya arus.

Ada dua jenis pelepasan pada tegangan tinggi yaitu *SPARK-OVER* dan *FLASH-OVER*. *Spark-Over* (percikan api) terjadi pada udara atau gas yang tidak menyangkut permukaan isolasi. *Flash-over* (lompatan api) yaitu percikan api atau gas di sepanjang atau di dekat permukaan isolasi.

PEMBANGKITAN SUMBER TEGANGAN TINGGI

Sumber tegangan tinggi utama yang diperlukan dalam suatu laboratorium adalah sumber tegangan tinggi arus bolak-balik. Sumber tegangan ini dapat diubah menjadi sumber tegangan tinggi arus searah, sumber tegangan tinggi *impulse* dan sumber tegangan tinggi bolak-balik dengan frekuensi tinggi.

Alat yang dipakai untuk menghasilkan tegangan tinggi ini biasanya adalah transformator satu fasa, yang mengubah tegangan rendah menjadi tegangan tinggi yang diperlukan. Transformator ini mendapat suplai tenaga listrik dari saluran yang terdapat di dalam laboratorium atau dari sumber tenaga yang khusus dibangkitkan untuk tujuan ini. Pembangkitan sumber ini diperlukan untuk mendapat tegangan dengan bentuk gelombang sinus yang murni dan juga untuk mengurangi perubahan bentuk gelombang dari transformator penguji. Karena itu untuk menentukannya diperlukan pengetahuan dasar dari generator rangkaian pengujian, serta pengaruhnya terhadap berbagai beban yang sedang diuji. Kebanyakan sumber tenaga ini dapat dipakai secara terus-menerus dan alat ini dipakai untuk menguji alat-alat listrik seperti transformator, kabel tanah, isolator bushing, pin, suspension dan kapasitor tegangan tinggi lainnya. Dengan pengujian, haruslah dipastikan tingkat-tingkat kepercayaan dari alat yang diuji, sesuai dengan keadaan di mana alat tersebut akan digunakan dan mengikuti norma-norma yang berlaku di negara yang akan memakainya. Untuk merencanakan kapasitas dari sumber tegangan tinggi, perlu dipikirkan rencana penggunaan mendatang baik berdasarkan keanekaragaman penggunaannya maupun dalam pemilihan sistem dan batas-batas kapasitas dari alat yang akan diuji. Di samping itu, karena hasil pengujian dapat juga ditentukan dengan cara penyusunan dari rangkaian pengujian, maka perlu pemahaman mengenai cara penyusunan alat, yang akhirnya dapat menentukan bentuk dan luas bangunan dari laboratorium itu sendiri. Bermacam-macam pengujian yang dilakukan terhadap alat-alat listrik haruslah disesuaikan dengan macam-macam tekanan (stress) yang akan dialami alat tersebut pada waktu operasinya.

Misalnya:

- 1) *Endurance Test.*
Dilakukan pada nilai tegangan nominal dan pada frekuensi yang ditentukan untuk mengetahui pengaruh suhu, kerugian dan juga untuk mengetahui terjadinya *discharge* sebagian (*partial discharge*) dari alat tersebut.
- 2) Pengujian selama 1 menit pada nilai tegangan yang lebih tinggi untuk mengetahui nilai isolasi dari alat.
- 3) Pengujian dengan tegangan bolak-balik atau tegangan searah untuk waktu yang singkat.
- 4) Pengujian dengan tegangan *impulse* adalah untuk menguji pengaruh surja (*surge*) yang terjadi baik karena pengaruh luar (*External*) maupun pengaruh dari dalam (*Internal*).

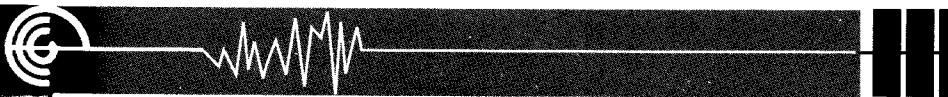
Laboratorium Tegangan Tinggi yang lengkap akan dilengkapi dengan sumber tegangan tinggi sebagai berikut :

1. Sumber tegangan tinggi arus arus bolak-balik 50 Hz.
2. Sumber tegangan tinggi arus bolak-balik frekuensi tinggi.
3. Sumber tegangan tinggi arus searah.
4. Sumber tegangan tinggi tegangan *impuls* dan arus *impuls*.

Alat-alat ini mempunyai fungsi yang berbeda-beda.

B A B

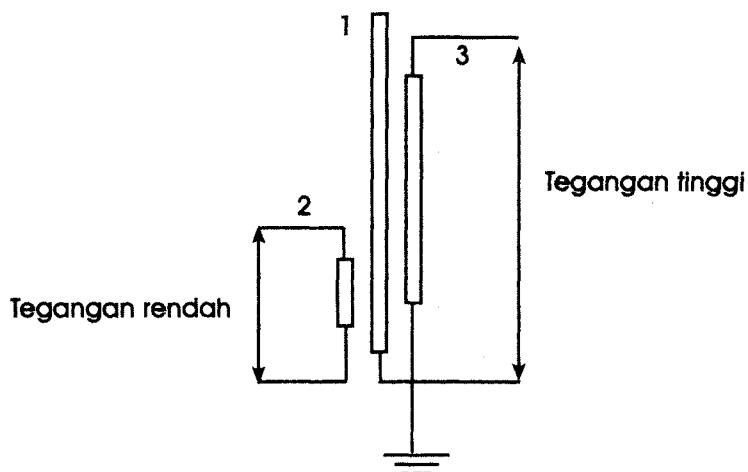
SUMBER TEGANGAN TINGGI ARUS BOLAK-BALIK



- 🌀 MENENTUKAN KAPASITAS TRANSFORMATOR PENGUJI
- 🌀 PEMBANGKITAN TEGANGAN TINGGI DENGAN RANGKAIAN RESONANSI SERI
- 🌀 SERI RESONAN
- 🌀 PENGARUH IMPEDANSI BEBAN PADA SIFAT BEBAN RANGKAIAN RESONANSI SERI
- 🌀 SUMBER TEGANGAN TINGGI ARUS BOLAK-BALIK FREKUENSI TINGGI



Sebagai sumber tegangan tinggi arus bolak-balik biasanya menggunakan sebuah transformator satu fasa. Hal ini disebabkan karena pengujian biasanya dilakukan untuk setiap fasa, dan setiap kali yang diuji hanyalah satu fasa. Cara ini akan memudahkan pengukuran dan pengamatan hasil pengukuran. Bentuk rangkaian belitan dari transformator tenaga satu fasa adalah sebagai berikut: Belitan tegangan rendah adalah belitan untuk tegangan lebih kecil atau sama dengan tegangan 1 KV, sedangkan belitan tegangan tingginya mempunyai tegangan mulai dari 80 KV sampai 400 KV bahkan sudah mencapai 800 KV. Teras (Inti) besinya diusahakan mempunyai tegangan sama dengan tegangan bumi, karena itu selalu disambung ke bumi bersama-sama dengan salah satu terminal dari kedua belitan (lihat gambar di bawah ini).

GAMBAR 2.1Ran
Peng

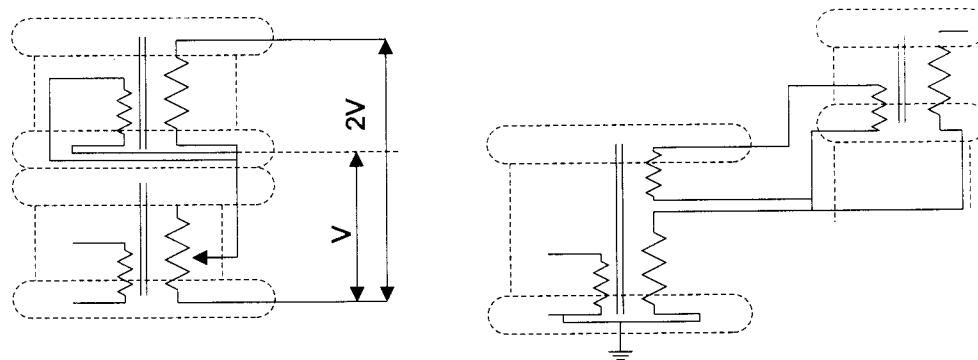
Kadang-kadang terdapat beberapa terminal pada belitan tegangan rendah yaitu, agar dapat disambungkan dengan beberapa macam tegangan.

Ini dibuat sedemikian rupa sehingga fluks medan magnet yang mengalir tidak sampai jauh sehingga tidak mengubah bentuk dari gelombang bolak-balik yang terdapat pada belitan tersebut. (Diusahakan bentuk gelombang adalah sinus murni).

Untuk menghilangkan penggunaan bushing, maka tangki transformator dibuat dari bahan isolasi yang berbentuk silinder. Tabung ini diisi dengan minyak transformator yang bermutu tinggi. Bentuk reka semacam ini mempunyai banyak keuntungan karena di samping tidak perlu menggunakan bushing, bentuknya juga ramping (menghemat ruangan). Untuk pembangkitan yang lebih tinggi dari 200 KV, bentuk transformator ini dapat dipasang bersusun dan belitan dapat disambung satu sama lain. Susunan semacam ini dinamakan susunan *cascade*. Bila tegangan tinggi dari masing-masing transformator adalah 100 KV maka susunan ini dapat menghasilkan tegangan 2×100 KV = 200 KV.

GAMBAR 2.2

Diagram sirkuit rangkaian dua tingkat



Dalam hal ini impedansi hubungan singkat untuk setiap belitan pada masing-masing transformator adalah X_g , X_q , X_t di mana:

X_e = impedansi belitan eksitasi

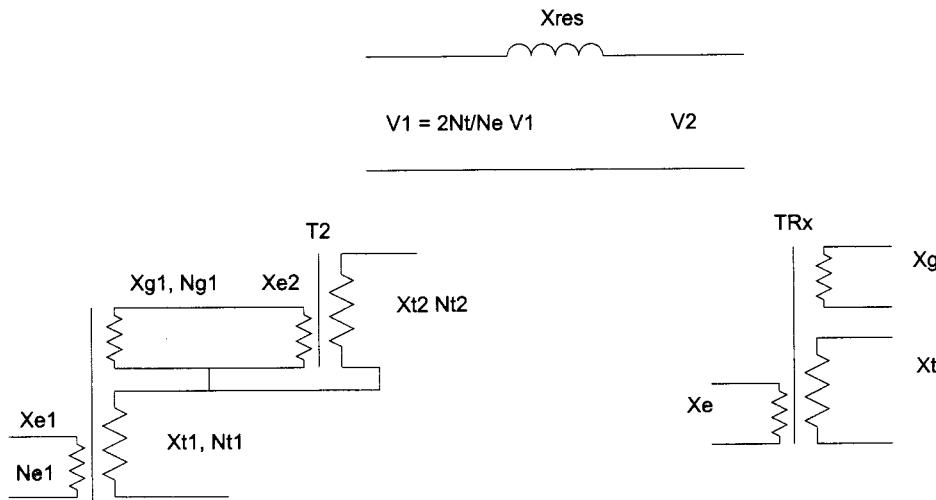
X_g = impedansi belitan gandengan (*coupling*)

X_t = impedansi belitan tegangan tinggi

Bila tahanan dan kerugian untuk setiap belitan diabaikan, maka sebagai pendekatannya transformator disusun secara *cascade*, sehingga impedansi pengganti dari susunan ini menjadi sebagai berikut :

GAMBAR 2.3

Diagram sirkuit rangkaian dua tingkat



Secara praktis, untuk menentukan kapasitas dari masing-masing transformator praktis adalah seperti berikut, anggap semua kerugian di dalam transformator diabaikan. Untuk transformator tingkat (1) berlaku:

$$N_c I_c = N_t I_t + N_g I_g \quad (\text{amper lilit}) \quad (2-1)$$

di mana:

N_c = jumlah lilitan eksitasi;

N_t = jumlah lilitan tegangan tinggi;

N_g = jumlah lilitan belitan gandeng.

Pada transformator berlaku:

$$\frac{V_{g1}}{V_{e1}} = \frac{N_{g1}}{N_{e1}} \text{ dan } \frac{V_{t1}}{N_{e1}} = \frac{N_{t1}}{V_{e1}} \quad (2-2)$$

Bila $V_{e1} = V_{g1}$ dan persamaan (2-2) dikalikan dengan V_{e1} maka hasilnya menjadi:

$$N_{e1} \cdot I_{e1} \cdot V_{e1} = N_{t1} \cdot I_{e1} \cdot V_{t1} + N_{g1} \cdot I_{e1} \cdot V_{g1} \quad (2-3)$$

Bila (2-3) dibagi dengan N_{e1} maka;

$$V_{e1} \cdot I_{e1} = \frac{N_t}{N_{e1}} \cdot V_{e1} \cdot I_{t1} + \frac{N_{g1}}{N_{e1}} \cdot V_{e1} \cdot I_{g1}$$

$$\text{dan ubah nilai, } \frac{N_t}{N_{e1}} = \frac{V_{t1}}{V_{e1}} \text{ dan } \frac{N_{g1}}{N_{e1}} = \frac{V_{g1}}{V_{e1}}$$

$$\text{jadi: } I_{e1} \cdot V_{e1} = \frac{V_t}{V_{e1}} \cdot V_{e1} \cdot I_{t1} + \frac{V_{g1}}{V_{e1}} \cdot V_{e1} \cdot I_{g1}$$

$$I_{e1} \cdot V_{e1} = V_{t1} \cdot I_{t1} + V_{g1} \cdot I_{g1} \quad (2-4)$$

Sedangkan $V \cdot I = S$ (tenaga/daya dalam VA)

$$S_{c1} = S_{t1} + S_{g1} \text{ Bilamana } S_{c1} = S_{t1}$$

$$S_{c1} = 2S ; S = S_{t1} = S_{g1}$$

Dengan demikian bahwa daya yang diperlukan transformator tingkat pertama dalam susunan 2 transformator secara *cascade* diperlukan daya sebesar 2 kali dari daya transformator pada tingkat kedua.

Jadi perbandingan antara $\frac{T_1}{T_2} = \frac{2}{1}$

Bila dalam susunan *cascade* terdapat 3 buah transformator maka perbandingan daya pada tingkat 1 : 2 : 3 adalah $3S : 2S : 1S$.

SYARAT DARI SUMBER TEGANGAN

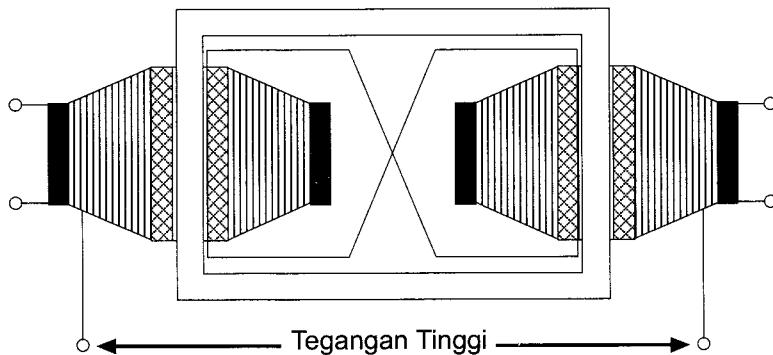
Sumber tegangan yang dipakai untuk men-supply transformator tegangan tinggi diperlukan persyaratan :

1. Mempunyai tegangan yang stabil tanpa ada fluktuasi tegangan bila dibebani.
2. Tidak ada gelombang harmonik akibat beban semi konduktor, sebaiknya berbentuk sinyal murni.
3. Energi lebih baik berasal dari transformator yang kapasitasnya besar guna meminimumkan efek dari beban pada transformator tersebut.

RANGKAIAN SEDERHANA UNTUK TRANSFORMATOR PENGUJI

Gambar 2.4

Tegangan
Trafo Penguji



2.1 MENENTUKAN KAPASITAS TRANSFORMATOR PENGUJI

Pemilihan kapasitas suatu transformator penguji ditentukan oleh kapasitas dari semua yang dianggap beban (kapasitas dari beban dan alat pengukur lainnya, semuanya dianggap beban). Dengan perkataan lain pemilihan ditentukan oleh alat apa yang hendak diuji dan juga berapa tegangan pengujian yang diperlukan. Untuk itu, nilai kapasitas dari beban atau kelompok beban harus diketahui. Setiap alat listrik tentu mempunyai nilai kapasitasnya sendiri seperti tertulis di bawah.

Nilai kapasitansi dari :

Isolator, Isolator Pasak

$$C = \text{beberapa } \mu\text{F}$$

Bushing

$$C = 150 \text{ s/d } 400 \mu\text{F}$$

Transformator Arus

$$C = 200 \text{ s/d } 600 \mu\text{F}$$

Transformator Distribusi $\leq 1000 \text{ KVA}$

$$C = 1000 \mu\text{F s/d } 10000 \mu\text{F}$$

Transformator Distribusi $> 1000 \text{ KVA}$

$$C = \text{s/d } 30000 \mu\text{F}$$

Kabel setiap M panjang

Berdasarkan gambar ini maka kapasitas transformator penguji dapat dihitung dari persamaan berikut :

$$P = V^2 \cdot \omega \cdot C_b \cdot 10^{-9} (\text{KVA}) \quad (2-5)$$

di mana:

P = daya dalam KVA;

$\omega = 2\pi f$ dan f = frekwensi;

V = tegangan pengujian pada transformator paguji dalam KV;

C_b = kapasitas dari seluruh beban (μF).

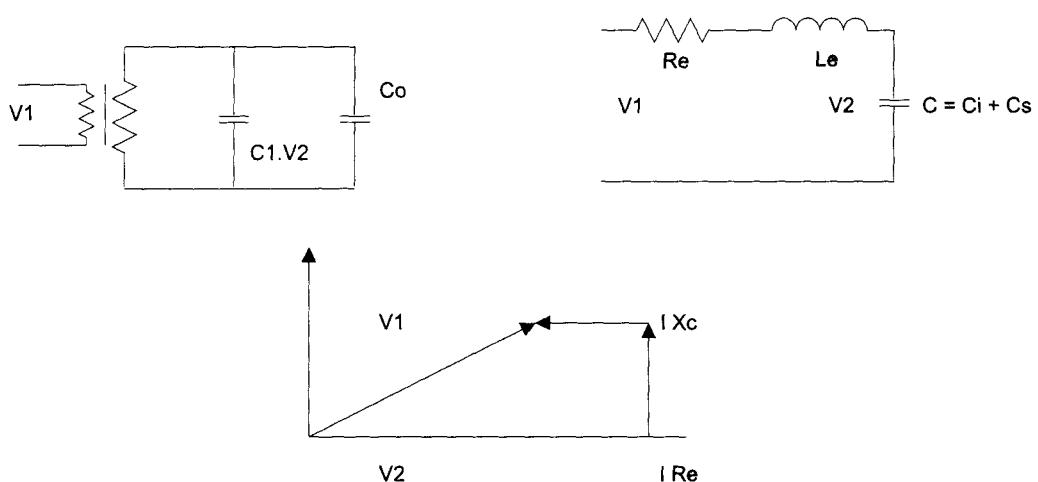
Untuk menentukan kapasitas dari beban C_b termasuk di dalamnya kapasitas dari transformator penguji, kebocoran kapasitansi dari rangkaian penguji dan pelindung terminal dari masing-masing alat harus diuji. Untuk pengujian dalam keadaan basah nilai yang diperoleh di atas masih harus ditambah beberapa persen lagi untuk mengatasi kebocoran arus yang disebabkan oleh tahanan yang sangat besar. Kelakuan dari transformator penguji tidak cukup dengan menganggapnya seperti transformator biasa. Ini disebabkan karena perbandingan jumlah lilitan tegangan rendah dan lilitan tegangan tingginya besar, sehingga kapasitansi lilitan tegangan tinggi C_i sudah cukup besar. Di samping itu kapasitansi dari rangkaian yang terdapat di luar transformator semuanya harus ditambahkan pada nilai C_i di atas.

Pengaruh eksitasi medan magnet pada inti transformator adalah kecil, karena ia tidak pernah mencapai titik kejemuhan, karena itu nilai ini dapat diabaikan.

Bilamana kapasitansi dari rangkaian luar dan beban adalah C_c maka seluruh kapasitas menjadi $C = C_i + C_c$. Diagram pengganti dari transformator penguji secara umum menjadi seperti berikut:

GAMBAR 2.5

Rangkaian Pengganti dan Diagram Pengganti Penguj



Bilamana nilai $R_o \leq \omega L_o$ maka nilai dari V_2 menjadi:

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{1/\omega C - \omega L} = \bar{V}_1 \cdot X_c / (X_1 - X_c) \quad (2-6)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{1 - \omega^2 L C} \cdot \bar{V}_1$$

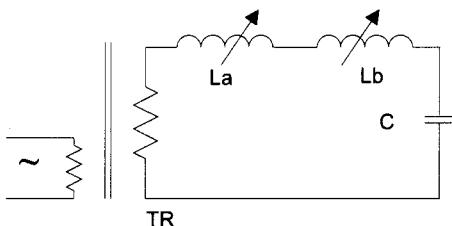
Karena nilai $1 - \omega^2 LC$ selalu lebih kecil dari 1 (satu) maka nilai V_2 lebih besar dari V_1 . Ini berarti rangkaian transformator ini mendekati keadaan resonansi seri.

2.2 PEMBANGKITAN TEGANGAN TINGGI DENGAN RANGKAIAN RESONANSI SERI



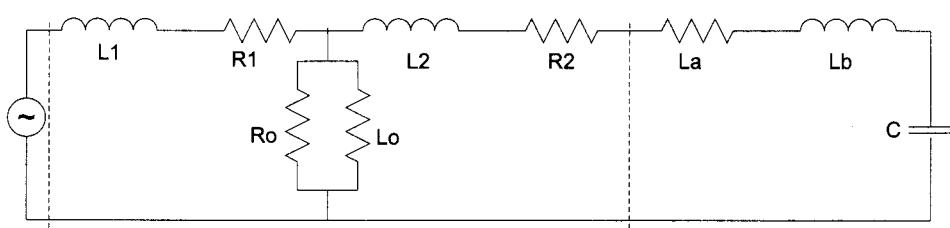
Bentuk rangkaian sumber tegangan ini terdiri dari transformator yang dihubungkan secara seri dengan beberapa reaktor yang dapat diubah nilai impedansinya dan dihubungkan secara seri dengan beban yang kapasitif.

GAMBAR 2.6
Rangkaian Resonansi Seri



Rangkaian pengganti dari susunan diatas adalah seperti berikut ini :

GAMBAR 2.7
Rangkaian Pengganti Resonansi Seri



Keterangan :

L_1 dan L_2 induktansi bocor dari transformator;

R_1 dan R_2 tahanan dari belitan transformator;

L_o induktansi pemagnetan;

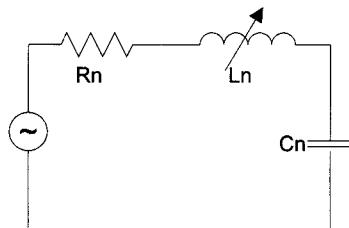
R_o tahanan pengganti kerugian inti;

L_a dan L_b reaktor yang nilai induktansinya dapat diubah;

C kapasitas beban dan terminal rangkaian.

Bilamana kebocoran dan kerugian transformator diabaikan terhadap nilai reaktor, maka rangkaian dapat disederhanakan menjadi seperti berikut:

GAMBAR 2.8
Rangkaian Sederhana



Bila induktansi reaktor seluruhnya = L_n dan tegangan dari transformator adalah V_n dan kapasitansi seluruh rangkaian adalah C_n (nilai tinggi dari kapasitas beban), maka rangkaian tersebut akan mencapai resonansi bila :

$X_L = X_C$ atau $\omega L = 1/\omega C$, maka:

$$\omega = 2\pi f ; f_n = 1/2\pi\sqrt{L_n \cdot C_n} \quad (2-7)$$

Nilai L_n diperoleh dari $L_n = 1/\omega_n \cdot C_n$

Bilamana tahanan dari belitan reaktor adalah kecil, $R \leq \omega L_n$, maka nilainya dapat diabaikan, sehingga arus yang mengalir pada reaktor menjadi:

$$I_n = \frac{V_n}{X_1} ; I_n = \frac{V_n}{\omega_n \cdot L_n} ; I_n = \frac{V_n}{2\pi f_n \cdot L_n} \quad (2-8)$$

Dalam hal ini $2\pi f_n = 1/\sqrt{L_n \cdot C_n}$, jadi

$$I_n = \sqrt{C_n / L_n} \quad (2-9)$$

Bila kapasitor dari rangkaian beban adalah sebesar C_t (tidak sama dengan C_n), maka frekuensi dari rangkaian tersebut adalah:

$$\frac{F_t}{F_n} = \sqrt{C_n / C_t} \quad (2-10)$$

Jadi nilai frekuensinya berubah sesuai dengan nilai C dari beban. Dari persamaan (2-9) dapat digambarkan hubungan antara arus pada saat $C_t < C_n$.

$$\frac{I}{C_n} = \frac{C_n}{f} = \sqrt{\frac{C_1}{C}} \quad (2-11)$$

Di sini menunjukkan bahwa arus I selalu *lebih kecil* dari I_n untuk nilai $C_t < C_n$.

Keuntungan menggunakan cara resonansi seri adalah :

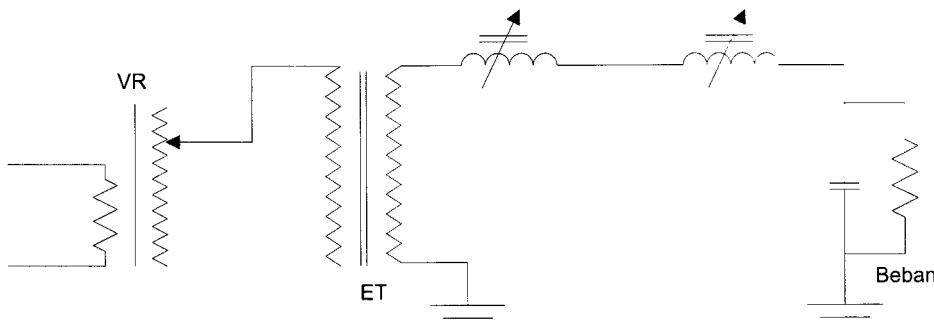
1. Gelombang output dapat dipertahankan dalam bentuk sinus murni.
2. Daya yang diperlukan untuk pengujian sangat kecil, antara 5% s/d 10% dari daya yang diperlukan.
3. Tidak terjadi arka atau arus surja yang besar bila alat yang diuji mengalami kegagalan.
4. Untuk mendapat tegangan yang tinggi dapat disusun secara *cascade*.
5. Susunannya sederhana dan kokoh.

2.3 SERI RESONAN (SISTEM TEGANGAN TINGGI DENGAN RESONANSI)



Untuk menghasilkan tegangan tinggi dipakai rangkaian seri dalam keadaan resonan.

Rangkaianya terdiri dari:

GAMBAR 2.9Rangkaian
Seri Resonan

$$\text{Tegangan output: } V_o = V_{ex} \cdot Q \quad (2-12)$$

di mana:

V_{ex} = tegangan penguatan (exitasi) dalam KV.

V_o = tegangan output dalam KV.

Q = faktor kualitas dari rangkaian dalam resonansi.

$$Q = \frac{X}{R} = \frac{\text{VAR}}{\text{Watt}} = \frac{I_{\text{reaktif}}}{I_{\text{aktif}}} \quad (2-13)$$

Dalam fisika : $Q = \frac{\text{Energi yang disimpan}}{\text{Energi yang diperlukan}}$ untuk $1/2 \text{ Cycle}$

Oleh karena itu, rangkaian dapat menghasilkan daya reaktif yang diperlukan untuk pengujian yang mempunyai kapasitansi besar dari *power supply* yang cukup kecil. Q yang diperoleh dari harga $Q = 15$ untuk objek test berupa mesin listrik yang besar sampai $Q = 80$. Untuk pengujian gardu induk, dapat menggunakan gas SF_6 sebagai isolasinya. Oleh karena itu, dengan alat ini power input yang kecil dapat dicapai untuk menguji alat yang berkapasitas besar. Rangkaian resonansi mempunyai pengamanan diri (*natural protection*) terhadap tegangan lebih, pada terminal dari benda yang diuji yaitu bila percikan api dari terminal itu telah padam. Pada waktu terjadi percikan, tegangan dari sistem jatuh (padam) akan turun. Tegangan dari sistem yang terjadi resonansi ini akan turun sampai mencapai sama dengan tegangan transformator penguatan. Setelah api padam maka tegangan penyembuhan (*recovery voltage*) dari sistem seri ini dapat dituliskan seperti berikut :

$$V_o(t) = V_{ex} \left[1 - e^{\left(\frac{\omega t}{2Q} \right)} \cos 10t \right] \quad (2-14)$$

di mana:

V_{ex} = tegangan eksitasi (KV);

t = waktu diukur dari permulaan padamnya api;

ω = faktor kualitas dari rangkaian resonansi seri.

Nilai dari $\left(\frac{\omega t}{2Q}\right)$ dapat diganti dengan menggunakan faktor jumlah cycle (N) dari terjadinya *flashover*, $f.t = N$.

$$\frac{\omega t}{2Q} = \frac{2\pi f.t}{2Q} = \frac{\pi f.t}{Q} = \frac{\pi N}{Q} \quad (2-15)$$

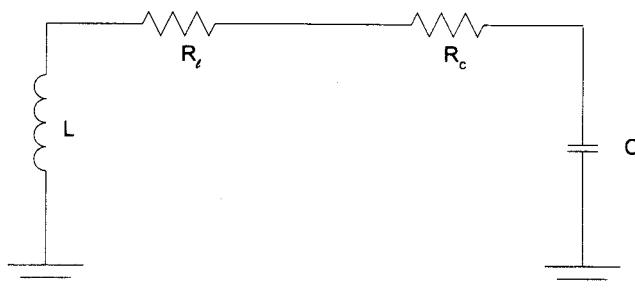
dari sini diperoleh bahwa tegangan penyembuhan $V_o(t)$ dapat mencapai nilai 96% dari tegangan sebelum *flashover* pada saat $\pi N/Q = 3$ atau dengan kata lain bila $N \approx Q$, artinya diperlukan Q cycle bagi transformator untuk kembali mempunyai tegangan sampai terjadinya *discharge* berikutnya. Ini berarti melindungi baik benda yang diuji maupun alat pengujinya (transformator yang menghasilkan tegangan resonansi) dari bahaya tegangan lebih. Dalam kenyataannya, alat sensing (*arc sensing system*) akan mematikan (memutuskan) rangkaian selama 3 s/d 5 cycle.

2.4 PENGARUH IMPEDANSI BEBAN PADA SIFAT BEBAN RANGKAIAN RESONANSI SERI



Pada rangkaian resonansi seri harga Q mempunyai peranan yang penting, karena akan mempengaruhi nilai *voltage gain* dari sistem tersebut. Faktor Q ditentukan oleh hasil bagi dari energi yang disimpan dengan energi yang diberikan untuk setiap setengah cycle. Sebagian rangkaian pengganti dapat digambarkan seperti berikut :

Gambar 2.10
Rangkaian pengganti impedansi



Rangkaian terdiri dari bagian induktif yang menampilkan induktansi dari reaktor yang dapat diubah dan transformator penguatan dan bagian kapasitif yang menampilkan kepastian dari alat yang diuji, pembagi tegangan, kapasitansi bocor dari alat-alat yang terdapat pada rangkaian. Masing-masing bagian mempunyai tahanan kebocoran. Oleh karena itu, faktor kualitas efektif dari rangkaian dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_e = \frac{Q_L \cdot Q_c}{Q_L + Q_c} \quad (2-16)$$

Di mana:

- Q_e = faktor kualitas dari sistem
- Q_ℓ = faktor kualitas dari bagian induktif
- Q_c = faktor kualitas dari bagian kapasitif

Masing-masing, $Q_\ell = \frac{\omega L}{R_\ell}$, merupakan bagian induktif

$$Q_c = \frac{1}{\omega C R_c} \text{ merupakan bagian konduktif}$$

Sehingga:

$$Q_e = \frac{\frac{\omega L}{R_\ell} \cdot \frac{1}{\omega C R_c}}{\frac{\omega L}{R_\ell} + \frac{1}{\omega C R_c}} \quad (2-17)$$

Di mana:

- L = induktansi sebagian rangkaian
- C = kapasitas dari kapasitas rangkaian
- R_ℓ = tahanan induktansi
- R_c = tahanan seri kapasitansi

Dapat disederhanakan menjadi:

$$Q_c = \frac{\omega L}{R_\ell + R_c} \quad (2-18)$$

Karena parameter dari reaktor dalam prakteknya adalah tetap bila rangkaian ada dalam resonansi, maka:

$$Q_c = f(R_c)$$

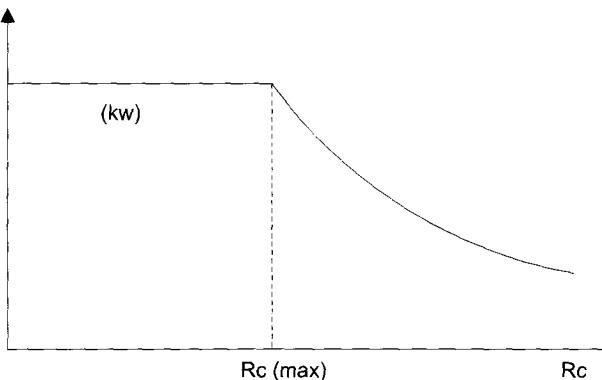
Dengan catatan, dengan naiknya komponen tahanan dari beban, faktor Q dari rangkaian resonansi seri akan mengalami penurunan. Misalkan tegangan pengujinya adalah tetap V_t dan bila tegangan maksimum dari transformator penguat $V_{ex}(\max)$, maka $Q_c(\min)$ dapat ditentukan:

$$Q_e(\min) = \frac{V_t}{V_{ex}(\max)} = \frac{V_t}{R_L + R_c(\max)} \quad (2-19)$$

Persamaan ini menunjukkan nilai (max) untuk daerah operasi suatu rangkaian seri yang resonan.

GAMBAR 2.11

~~Pengantar Sesi~~
Resonansi



Pada Kurva V (output) untuk rangkaian seri terhadap perubahan nilai R_c , bila nilai R_c ternyata melebihi $R_1(\text{max})$ maka pertimbangan lain (menggunakan rangkaian parallel) harus dipikirkan.

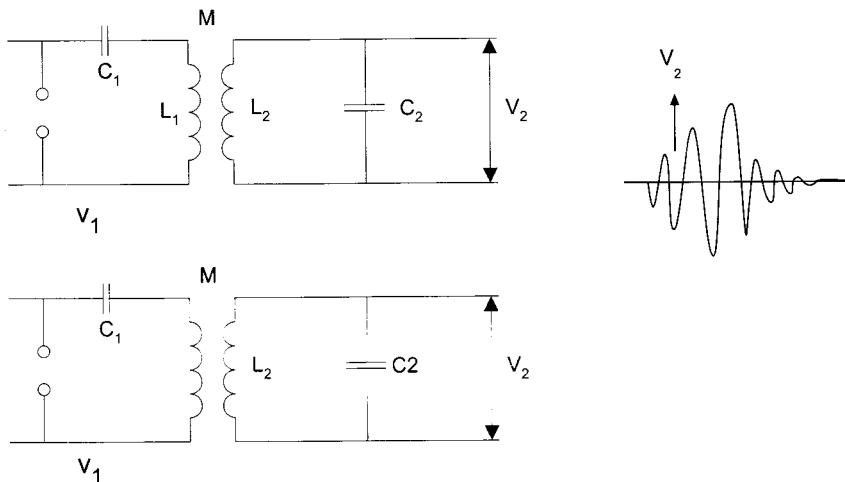
2.5 SUMBER TEGANGAN TINGGI ARUS BOLAK BALIK FREKUENSI TINGGI

Sumber tegangan tinggi dengan frekuensi diperlukan untuk menguji adanya ketidakrataan bahan yang terdapat pada isolator, terutama isolator yang terbuat dari porselin. Hal ini karena kerugian dielektrik akan menunjukkan nilai yang berbeda bila diuji dengan tegangan ini. Karena adanya efek kulit (*skin effect*) maka bunga api yang terjadi pada masa pengujian akan merambat melalui kulit isolator, bila dalam keadaan baik. Tetapi bila ada kerusakan atau cacat, maka sebagian dari api akan menembus bagian yang cacat dari isolator tersebut. Adapun keuntungan menggunakan transformator ini adalah:

1. Transformator ini tidak menggunakan inti besi, sehingga menghemat biaya dan bentuknya lebih kecil.
2. *Output* gelombangnya adalah sinus murni.
3. Tegangan naik secara perlahan dan pada pengujian dengan surja hubung tidak akan merusak.
4. Tegangan didistribusikan merata pada belitan karena belitan dibagi menjadi beberapa unit yang disusun bertumpuk.

Belitan ini dinamakan belitan TESLA di mana rangkaian ini dalam keadaan resonansi berganda.

GAMBAR 2.12
Belitan Tesla dalam Keadaan Resonansi



Tegangan lilitan pertama adalah 10 KV dan tegangan lilitan kedua dapat mencapai 500 KV atau 1000 KV. Lilitan pertama di-suplai dari sumber searah atau bolak-balik melalui kompensator C_1 . Sela bola dipasang melintang lilitan pertama yang dapat disulut (trigger) pada sembarang nilai V_1 yang akan mempengaruhi lilitan kedua sehingga membangkitkan tenaga yang tinggi. Belitan pertama dan kedua dibelitkan pada transformator yang tidak mempunyai teras besi (teras udara), yang ditempatkan di dalam minyak. Bilamana kedua belitan ini mempunyai induktansi sendiri sebesar L_1 dan L_2 maka kedua rangkaian ini dapat diatur sehingga mencapai resonansi dengan mengubah C_1 dan C_2 . Tegangan output adalah fungsi dari L_1 , L_2 , C_1 , C_2 dan juga tergantung pada mutual induktansi M . Biasanya tahanan belitan adalah kecil sehingga hanya berpengaruh sebagai peredam dari oscilasi yang terjadi.

Analisa dari bentuk gelombang output dapat diterangkan seperti berikut. Bila tahanan dari belitan diabaikan, bila kapasitor C_1 diberi muatan sampai dengan tegangan mencapai V_1 dan bila sela udara disulut (triggered), arus i_1 mengalir melalui belitan pertama L_1 maka pada belitan kedua akan mengalir i_2 melalui L_2 dan C_2 , sehingga:

$$V_1 = 1/C_1 \int_0^t i_t \cdot dt + M \frac{d_i}{dt} \quad (2-20)$$

$$\text{dan } Q = 1/C_2 \int_0^1 i_2 \cdot dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (2-21)$$

Bila dituliskan dengan menggunakan persamaan Laplace, maka :

$$\frac{V_1}{s} = (L_1 + 1/C_1 s) I_1 + M s I_2 \quad (2-22)$$

$$Q = (M s) I_1 + (L_2 s + 1/C_2 s) I_2 \quad (2-23)$$

Di mana I_1 dan I_2 adalah nilai transformasi Laplace dari i_1 dan i_2 . Tegangan output dari kapasitor C_2 adalah :

$$V_2 = 1/C_2 \int_0^t i_2 dt$$

dengan bentuk Laplace menjadi: $V_2(s) = I_2/C_2 s$

Penyelesaian untuk V_2 dari persamaan di atas adalah :

$$V_2 = \frac{MV_1}{\sigma L_2 C_1} - \frac{1}{\sigma_2^2 - a_1^2} (\cos a_1 t - \cos a_2 t)$$

$$\text{di mana : } \sigma^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1, L_2} = 1 - K^2 \quad (2-24)$$

K = koefisien gandeng antara belitan L_1 dan L_2

$$a_1 \cdot a_2 = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2} + \sqrt{\frac{(\omega_1^2 + \omega_2^2)}{2} - \omega_1^2 \cdot \omega_2^2 (1 - K^2)} \quad (2-25)$$

di mana:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad \text{dan} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

Analisa yang lebih sederhana untuk kumparan TESLA dapat dilakukan dengan memperhitungkan bahwa energi yang disimpan pada rangkaian primer yaitu pada kapasitor C_1 ditransfer ke kapasitor C_2 melalui gandengan magnet. Bila W_1 adalah energi yang disimpan pada C_1 dan W_2 energi yang disimpan pada C_2 dan bila efisiensi dari transformator adalah h maka :

$$W_1 = 1/2 C_1 V_1^2 = h(1/2 C_2 V_2^2) \quad (2-26)$$

Dapat pula dilihat bahwa bila koefisien K besar, frekuensi oscilasi rendah, dan ditambah dengan tahanan kumparan yang besar, maka bentuk gelombang menjadi satu arah (*unidirectional*).

Tegangan tinggi arus searah biasanya dipakai untuk penyelidikan pada fisika dan fisika terapan laboratorium untuk menyelidiki sifat isolasi dari kabel atau kapasitor. Generator tegangan *impulse* juga menggunakan tegangan tinggi ini untuk alat pemuatnya.

Tegangan ini juga dipakai untuk X-Ray dan juga untuk *precipitator* dari publikasi I.E.C. 60-2, maka nilai dari tegangan ini V diturunkan dari fungsi tersebut, yaitu:

$$V = 1/T \int_0^T V(t) d(t) \quad (3-1)$$

di mana:

T = periode waktu di mana $f = 1/T$

f = frekuensi gelombang

Tegangan rata-rata ini nilainya tetap, akan tetapi bila dipasangkan pada alat pengujian atau diberi beban listrik maka akan terjadi perubahan harga rata-ratanya. Ia sedikit bergelombang sehingga terjadi suatu *ripple*: Amplitudo dari *ripple* ini $9V = 0,5(V_{max} - V_{min})$. Faktor *ripple* ini ditentukan sebagai hasil bagi antara amplitudo dari *ripple* dengan nilai rata-rata dari gelombang atau $9V/V$, faktor ini menurut publikasi tidak lebih dari 5%.

3.1 RANGKAIAN YANG DIPAKAI SEBAGAI SUMBER TEGANGAN TINGGI SEARAH



Sebagai alat untuk mengubah tegangan bolak-balik menjadi tegangan searah dipakai alat penyearah yang menggunakan semi konduktor. Semi konduktor ini ada yang terbuat dari selenium, germanium atau silikon yang masing-masing mempunyai kemampuan menghasilkan arus dan tegangan sendiri, karena itu untuk pemakaian di laboratorium di mana hanya diperlukan arus yang kecil (mA) maka biasanya dipilih selenium. Semi konduktor ini dapat disusun sehingga tahan sampai ratusan kilo volt (tidak menggunakan grading kapasitor).

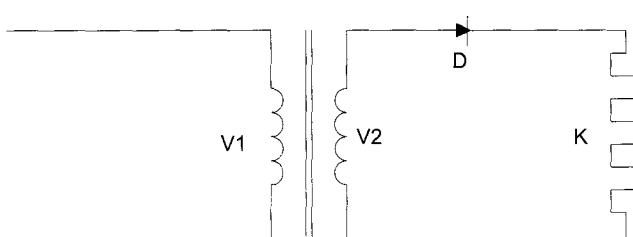
3.2 BENTUK RANGKAIAN PENYEARAH



3.2.1 RANGKAIAN PENYEARAH SETENGAH GELOMBANG

GAMBAR 3.1

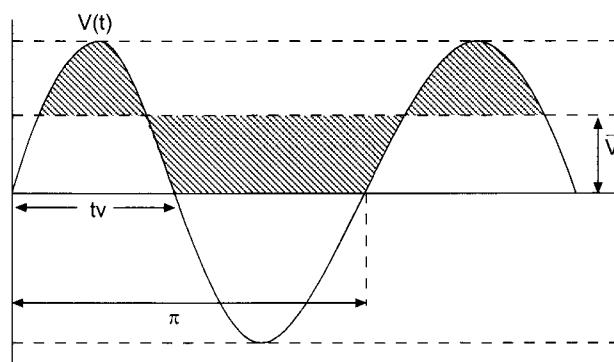
Rangkaian Penyearah
½ Gelombang



Rangkaian penyearah $\frac{1}{2}$ gelombang tanpa kapasitor pelicin. Bentuk gelombang sesudah diode atau terminal beban adalah sebagai berikut :

GAMBAR 3.2

Bentuk Gelombang
Penyearah $\frac{1}{2}$
Gelombang Tanpa
Kapasitor Pelicin



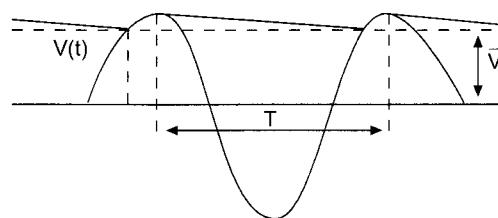
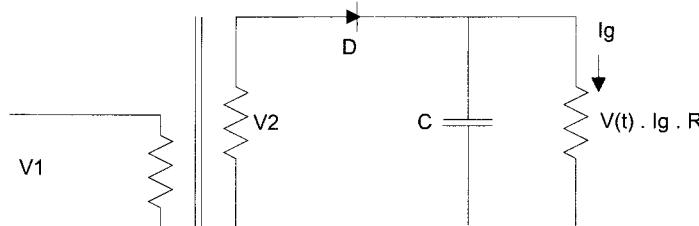
Jika $\bar{V} = \text{harga rata-rata}$, maka:

$$\bar{V} = 1/\pi \bar{V} \cdot V_{\text{RMS}} = \frac{1}{2} \hat{V}, t_v = \frac{1}{2} T \quad (3-2)$$

Penyearah $\frac{1}{2}$ gelombang dengan kapasitor pelicin

GAMBAR 3.3

Bentuk Gelombang
Penyearah $\frac{1}{2}$
Gelombang dengan
Kapasitor Pelicin



Misalkan t_v adalah waktu di mana pada periode tersebut terjadi konduktansi (pengaliran) dan t_2 adalah waktu di mana muatan dari kondensator C melepaskan muatannya $t_1, t_2 = T$. Besarnya *ripple* dan pengaturan tegangan dari alat penyearah ini dapat diperkirakan seperti berikut. Bila I_L tidak sama dengan nol, maka tegangan rata-rata (arus searah):

$$V = V \cdot \Delta V = (V_{\max} - nV_1) - kI_g \text{ di mana } V_{\max} = V_2, V_1 = (0,6 \text{ s/d } 1,2V), \quad (3-3)$$

n = jumlah diode dalam seri dan K = konstanta (Tangent dari jenis penyearah yang dipakai).

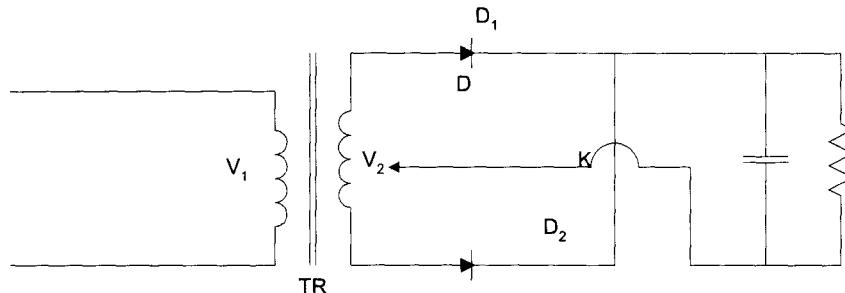
3.2.2 RANGKAIAN PENYEARAH GELOMBANG PENUH



Dalam rangkaian ini, gelombang positif seolah-olah terlihat pada gambar di bawah ini.

GAMBAR 3.4

Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh

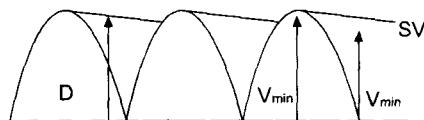


Dalam rangkaian ini, pada waktu gelombang tegangan bernilai positif ($1/2$ cycle yang pertama), diode D_1 meneruskan arus, dan kapasitor C diberi muatan dan bila gelombang mencapai nilai negatif ($1/2$ cycle kedua) diode D_2 meneruskan arus dan D_1 tidak mengalirkan dan kapasitor C diberi muatan. Besarnya *ripple* pada rangkaian ini lebih kecil dari pada rangkaian $1/2$ gelombang, karena itu dV tergantung pada:

1. Frekuensi tegangan;
2. Konstanta waktu $R_p C$;
3. Reaktansi dari transformator.

GAMBAR 3.5

Bentuk Gelombang Penyearah Gelombang Penuh



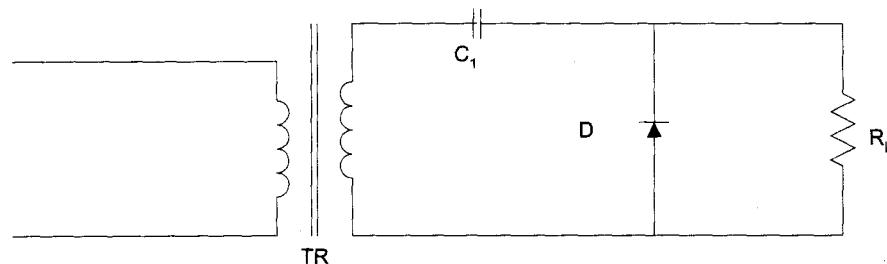
3.3 RANGKAIAN VILLARD



Pada rangkaian ini tegangan *output* diambil dari titik jepitan yang terdapat pada diode D . Tegangan diode ini bernilai antara 0 sampai dengan $2V_{max}$. Bila rangkaian ini diberi R_L , maka nilai tegangan V tidak lagi tetap.

GAMBAR 3.6

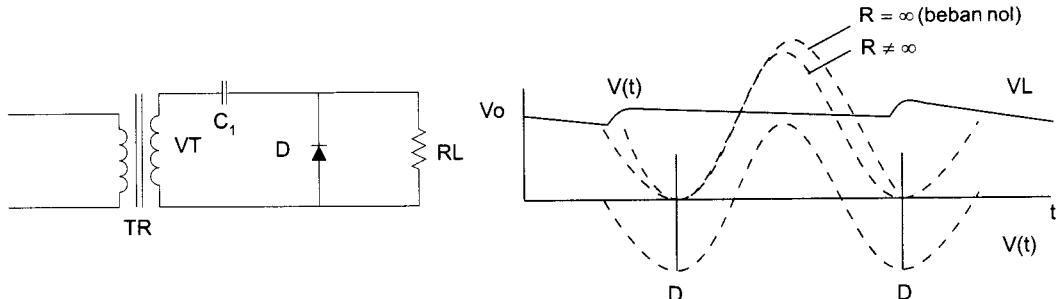
Rangkaian Villard



Rangkaian Villard adalah rangkaian sederhana dari sistem penggandaan tegangan. Kapasitor C dimuat sampai nilai tegangan puncak V_{max} yang menyebabkan output dari tegangan tinggi akan menaik bila dibandingkan dengan tegangan dari transformator. Bila beban kosong $I_L = 0$, maka $V_o - V_{max}$ dari diode, sedangkan V_{max} dari diode D adalah $V_{D(max)} - 2V_{max}$. $V_{D(max)} = 2V_{max}T$ dari transformator. Karena itu bila tidak ada pelicin maka tegangan tidak mungkin rata.

GAMBAR 3.7

Rangkaian dan
Bentuk Gelombang
Villard



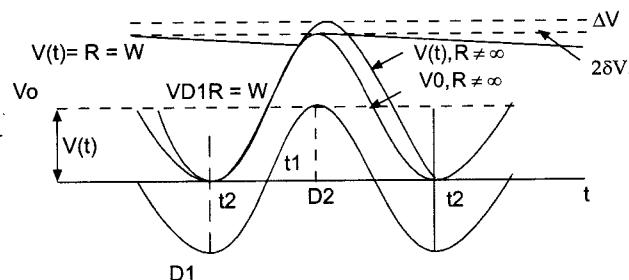
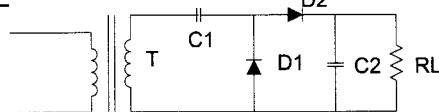
3.4 RANGKAIAN PENGGANDA TEGANGAN GREINACHER



Rangkaian ini dipakai untuk menghasilkan tegangan searah yang lebih tinggi dari sumber tegangan biasa. Rangkaian ini diciptakan oleh Greinacher dan dinamakan *Greinacher Doubler Circuit*, seperti terlihat dibawah ini :

GAMBAR 3.8

Rangkaian dan
Bentuk Gelombang
Greinacher



Pada rangkaian $\frac{1}{2}$ gelombang dan gelombang penuh, hanya dapat dihasilkan tegangan searah yang maksimumnya tidak akan dapat melebihi harga maksimal dari tegangan bolak-balik yang digunakan. Pada rangkaian penggandaan seperti di atas, kondensator C_1 akan diberi muatan oleh D_1 sampai tegangan mencapai V_{max} pada saat gelombang tegangan bolak-balik mencapai nilai $(-) V_{max}$ (waktu $\frac{1}{2}$ cycle). Bilamana tegangan transformator naik sehingga $(+) V_{max}$ pada waktu berikutnya maka tegangan C_1 - yang satu lagi mempunyai tegangan $(+) 2V_{max}$ dan kapasitor C_2 mendapat giliran dimuat oleh D_2 sampai tegangan mencapai $2V_{max}$ (biasanya tegangan searah yang terjadi lebih rendah dari $2V_{max}$). Turunnya tegangan yang disebabkan adanya tegangan *ripple* besarnya tergantung pada nilai konstanta waktu $C_L R$ dan konstanta pemuatan sebelumnya. Bilamana $R_L/r \leq 10$ dan $X/r \leq 0,25$, maka tegangan *ripple* akan lebih kecil dari 2% (R_L = tahanan beban, r = tahanan dalam transformator dan X = reaktansi dari transformator). Jadi, disini dioda dan kondensator haruslah mempunyai *rated* yang sama yaitu sebesar $2V_{max}$. Untuk mengetahui lebih lanjut mengenai tegangan *ripple* dari penyearah maka kita tinjau rangkaian penyearah

sebelumnya. Bila rangkaian ini diberi beban R_L , maka tegangan V tidak lagi tetap. Selama satu periode $T = 1/f$ dari tegangan bolak-balik, muatan sebesar Q dipindahkan dari sumber ke beban yang menyebabkan arus mengalir :

$$Q = \int_T i_L(t) \cdot dt = 1/R_L \int_T V(t) \cdot dt = I \cdot T = I/f \quad (3-4)$$

Dimana kurva pelepasan muatan dari kapasitor dianggap suatu garis lurus (sebenarnya berbentuk garis eksponensial). Perubahan muatan pada kapasitor C_2 menyebabkan penurunan tegangan sebesar tegangan *ripple*. Jadi, karena $Q = C \cdot V$ maka;

$$2dV \cdot C = \int_0^T i(t) \cdot dt = I \cdot T; \text{ jadi } 2\delta V \cdot C = I \cdot T \quad \text{berarti:} \quad (3-5)$$

$$dV = \frac{I \cdot T}{2 \cdot C}, \quad T = \frac{1}{f} \quad 2\delta V = \text{tegangan ripple}$$

Pada penyearah gelombang penuh, waktu yang diperlukan pelepasan untuk muatan yang berurutan menyebabkan *ripple* menjadi lebih kecil. Jadi, cara yang biasa dipakai untuk mengecilkan *ripple* dari rangkaian penyearah adalah seperti berikut:

- a) membesarkan nilai C
- b) membesarkan frekuensi
- c) menambah jumlah fasa

Pada rangkaian penyearah, muatan mengalir dari kapasitor pelicin ketajaman R_L . Arus yang mengalir ini adalah arus rata-rata I yang berasal dari $i(t)$, sedangkan tegangan $v(t)$ adalah tegangan bolak-balik yang di dalamnya termasuk tegangan *ripple*.

Bila tegangan *ripple* diambil dari persamaan:

$$dV = \frac{1}{2} (V_{max} - V_{min}), \text{ maka } V_{max} \geq V(t) \geq V_{min} \quad (3-6)$$

$$\text{atau, } V_{min} = (V_{max} - 2dV)$$

Di samping muatan Q yang dipindahkan dari kapasitor C , terdapat pula muatan yang asalnya dari transformator, dan ini terjadi pada waktu diode sedang mengalirkan arus (*conducting time*) yaitu pada waktu $t_v = aT$ untuk setiap *cycle*. Sehingga itu besarnya muatan ini juga sama dengan :

$$Q = \int_{aT}^T i(t) \cdot dt = \int_T i_L(t) \cdot dt \quad (3-7)$$

Karena t_v atau (aT) sangat singkat maka arus dari transformator ini sama seperti $i(t)$, tetapi mempunyai amplitudo yang lebih besar dari $i_L = I$. Tegangan *ripple* dV dapat dihitung secara tepat untuk rangkaian ini, berdasarkan penurunan tegangan yang berbentuk garis eksponensial dari $V(t)$. Dalam prakteknya, kerugian atau penurunan tegangan di dalam

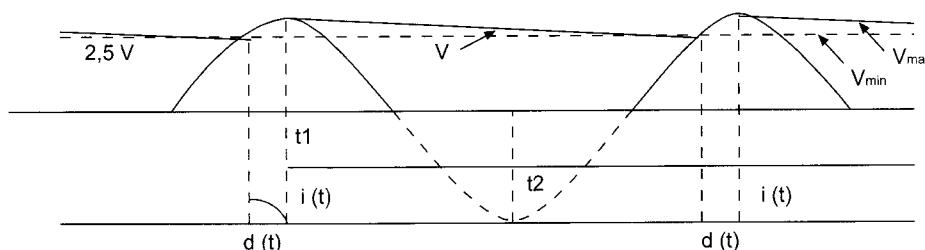
transformator dan penyearah harus diperhitungkan. Kita anggap $a = Q$. Jika hal ini dilakukan maka dapat diperoleh:

$$Q = 2dV = I \cdot T, \quad dV = I / (2fC)$$

Disini dapat dilihat hubungan antara besarnya *ripple* dengan arus beban I dan parameter perencanaan seperti (f) dan (C). Lihat gambar di bawah ini:

GAMBAR 3.9

Bentuk Gelombang
Tegangan Penyearah $\frac{1}{2}$
Gelombang



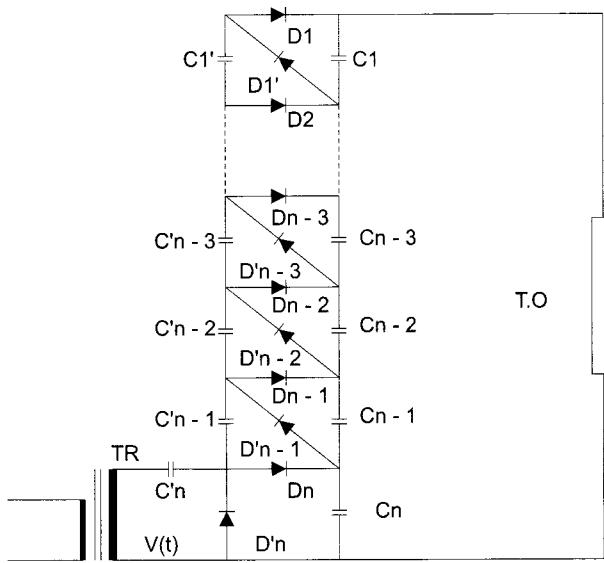
3.5 RANGKAIAN PENYEARAH BERTINGKAT SUSUNAN KASKADE



Rangkaian Penyearah yang disusun secara bertingkat (kaskade) dapat dilihat pada gambar berikut ini :

GAMBAR 3.10

Rangkaian Penyearah
Kaskade



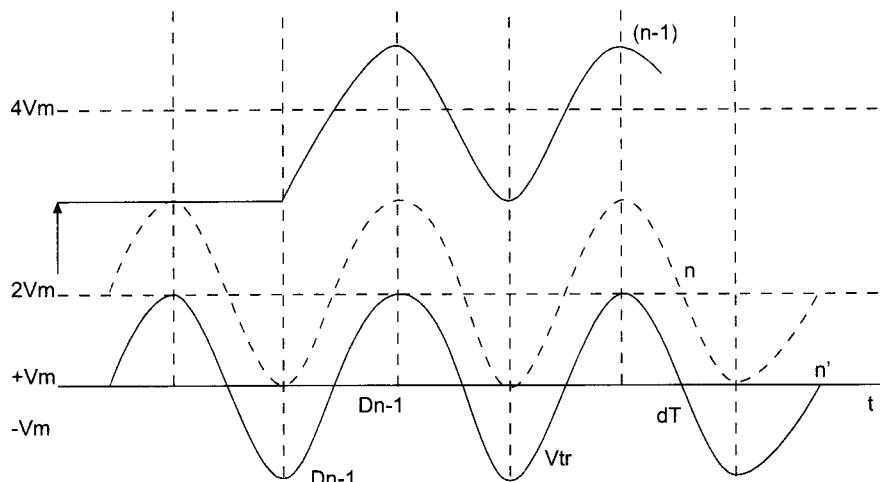
$D'_n, D_{n'}, D'_{n-1}, D_{n-1} \dots, D_1$ adalah diode yang disusun menurut rangkaian GREINACHER. Sedangkan C_n, C_{n-1}, \dots, C_1 adalah kapasitor pelicin. Tegangan searah dapat dinaikkan dengan menggunakan rangkaian penyearah yang bertingkat seperti terlihat pada gambar sebelum ini. Rangkaian ini dinamakan rangkaian "Cockcroft & Walton". Tingkat pertama di mana terdapat D'_n, D_n, C_n, C'_n dan transformator yang bentuknya sama besar dengan rangkaian GREINACHER. Untuk mendapatkan tegangan searah yang tinggi, maka rangkaian GREINACHER ini dapat disusun secara "Kaskade".

CARA KERJA DAN ANALISANYA

Tegangan output dari transformator $V(t)$ adalah tegangan bolak-balik bilamana rangkaian ini tidak disambung dengan beban berarti $R_L = (\text{infinity})$ jadi $I_L = 0$.

GAMBAR 3-II

Bentuk Gelombang
Rangkaian Kaskade



Kita lihat rangkaian penyearah pada bagian antara titik $0 - n - T_r$. Bagian ini adalah semacam penyearah $\frac{1}{2}$ gelombang. Kapasitor C_n diberi muatan sampai tegangan mencapai maksimum V_{\max} , pada saat $V(t)$ mencapai nilai $-V_{\max}$ (pada $\frac{1}{2}$ cycle pertama). Bilamana C_n masih kosong (belum dimuati) maka D_n akan mulai mengalirkan arus pada saat tegangan $V(t)$ mulai naik. Bilamana tegangan pada titik n' naik sampai nilai $2V_{\max}$, yaitu setelah $V(t)$ mencapai nilai $+V_{\max}$, maka titik tegangan n akan menaik sampai $2V_{\max}$. Rangkaian $0-n'$ dapat juga dianggap rangkaian $\frac{1}{2}$ gelombang di mana tegangan pada $D_{n'}$, tetapi dari transformator $V(t)$ dan C_n . Jadi kalau kita mempunyai anggapan bahwa Cc tidak melepaskan muatan itu tidak benar.

Hal ini perlu diketahui, terutama bila penyearah ini diberi beban. Kita juga dapat menganggap tegangan pada titik n' berubah dari 0 volt sampai $2V_{\max}$. Bila tegangan pada titik n' menjadi 0, maka kapasitor C_{n-1} juga diberi muatan sampai sama dengan tegangan pada titik n , yaitu sebesar $2V_{\max}$. Kemudian karena berubah-ubahnya tegangan $V(t)$ dari $-V_{\max}$ sampai $+V_{\max}$, maka kesimpulannya, tegangan pada titik n' , $(n-1)', (n-2), \dots$ berubah karena perubahan tegangan $V(t)$. Sedangkan titik-titik n , $(n-1)$, $(n-2)$, \dots tetap terhadap tegangan tanah. Tegangan pada masing-masing kapasitor adalah tegangan searah dan besarnya sama dengan $2V_{\max}$, kecuali kapasitor C_n yang tegangannya hanya V_{\max} . Setiap diode $D_{n'}, D_n, D_{n-1}, D_{n-2}$ dan seterusnya tahan terhadap tegangan $2V_{\max}$ atau dua kali tegangan puncak dari tegangan bolak-balik, dan untuk jumlah n tingkatan tegangan *output* dapat mencapai $2.n. V_{\max}$ pada beban kosong.

3.6 RANGKAIAN PENYEARAH DIBERI BEBAN

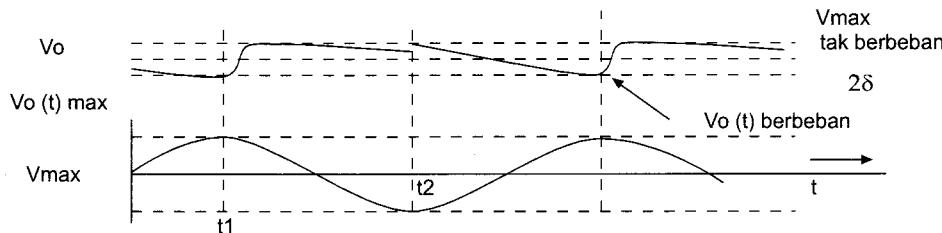


Karena adanya beban $L_L = 0$ dan $L_L \neq 0$, maka output dari sumber tegangan tidak akan mencapai nilai $2nV_{max}$. Sehingga akan terjadi ripple pada gelombang tegangan. Oleh karena itu, kita akan menghadapi dua masalah:

1. Tegangan akan menurun.
2. Terjadinya *ripple* pada gelombang tegangan.

Bilamana besarnya penurunan tegangan adalah ΔV_0 dan besarnya ripple dari puncak ke puncak sebesar $2dV$, maka pada gambar berikut ini.

GAMBAR 3-12
Rangkaian Penyearah
Yang Diberi Beban



Harga puncak dari $V_{0(max)}$ terjadi pada t_1 bilamana $V(t)$ jatuh pada nilai $+V_{max}$ di mana dioda $D_{n'} D_{n-1'} D_{n-2'} \dots D_2' D_1'$ baru saja berhenti mengalirkan arus kapasitor pelicin $C_{n'}, C_{n-1'}, \dots, C_2, C_1$. Setelah arus mengalir secara terus menerus dari kolom pelicin tersebut, maka kemudian akan terhenti sejenak sebelum waktu t_2 yang disebabkan oleh tegangan yang mendadak turun. Penurunan tegangan ini disebabkan oleh karena dioda $D_{n'}, D_{n-1'}, \dots, D_2', D_1'$ mulai mengalirkan arusnya (melepaskan muatannya) ke kolom oscilasi (susunan kapasitor $C_{n'}, C_{n-1'}, C_{n-2'}, \dots, C_1'$). Bilamana muatan yang dipindahkan adalah (q) , maka muatan ini dipindahkan ke beban setiap *cycle*, nilai $q = I/f = I.T$. Muatan ini berasal dari susunan kapasitor pelicin (kolom pelicin). Bilamana tidak ada muatan yang dipindahkan (selama waktu T) dari kolom pelicin lewat $D_{n'}, D_{n-1'}, D_{n-2'}, \dots, D_2', D_1'$ ke kolom oscilasi (kelompok $C_{n'}, C_{n-1'}, C_{n-2'}, \dots, C_1'$) maka nilai puncak dari gelombang *ripple* akan menjadi:

$$2dV = T.I \sum_{i=1}^n (1/C_i) \quad (3-9)$$

Akan tetapi sesaat sebelum waktu t_2 , setiap dioda $D_{n'}, D_{n-1'}, \dots, D_2', D_1'$ juga mulai memindahkan muatannya yang besarnya sama (q), dan semua muatan ini diambil dari kolom pelicin di antara titik dioda yang bersangkutan. Oleh karena itu, seluruh *ripple* yang terjadi akan menjadi:

$$dV = 1/2f (1/C_1 + 2/C_2 + 3/C_3 + \dots n/C_n) \quad (3-10)$$

Dari sini terlihat bahwa pada susunan "Kaskade" kapasitor yang terletak dipaling bawah akan bertanggung jawab menampung semua *ripple* yang terjadi. Dengan begitu orang cenderung untuk menaikkan kapasitansi kapasitor yang terletak pada tingkat bawah. Tetapi

harus diperhitungkan juga bila terjadi kegagalan pada beban, maka kapasitor yang kapasitasnya kecil akan mendapat tekanan yang melebihi kemampuannya. Karena itu, untuk menghindari terjadinya hal seperti di atas, maka dipilih nilai kapasitansi yang sama untuk setiap kondensor.

Dengan $C_n = C_{n-1} = C_{n-2} = C_{n-3} = \dots = C_1 = C$; maka persamaan menjadi :

$$\partial V = 1/2 fC \left(\frac{n(n-1)}{2} \right) \quad (3-11)$$

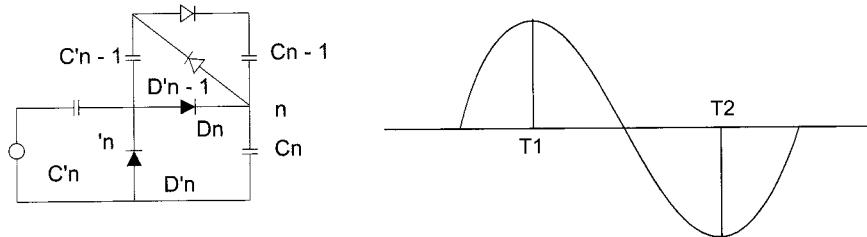
Dalam hal ini faktor ripple dapat dituliskan:

$$FR = \frac{\partial V}{2nV_{max}} \times 100\% \quad (3-12)$$

Akan tetapi, dalam praktik transformator tidak ideal dan diode pun terdapat kerugian. Oleh karena itu bila alat ini diberi beban maka tegangan akan turun. Misalkan penurunan tegangan adalah sebesar ΔV_o , maka untuk menghitung besarnya penurunan tegangan yang terjadi kita lihat dahulu tingkatan n dari susunan ini.

GAMBAR 3.13

Rangkaian Kaskade
Dua Tingkat



Pada saat $t = t_1$, C_n dimulai sampai dengan V_{max} . Bila D_n adalah ideal dan kerugian hanya berasal dari bagian sumber arus bolak-balik maka kapasitor C_n akan diberi tegangan mencapai nilai:

$$(VC_n)_{max} = 2V_{max} - nq/C_n = 2_{max} - \Delta V_n \quad (3-13)$$

Hal ini disebabkan karena C_n akan kehilangan muatan sebesar (nq) selama satu cycle sebelum C'_n mengantikannya. Pada saat $t = t_2$, selain memberikan muatan (q) pada beban selama T , C_n juga memberikan muatan kepada C'_{n-1} , C'_{n-2} , C'_{n-3} , ... juga sebesar (q). Dengan demikian, C_{n-1} hanya dapat dimuat lagi sampai mencapai nilai maksimal sebesar:

$$(VC_{n-1})_{max} = (VC_n)_{max} - nq/C_n \quad (3-14)$$

Demikian juga kapasitor C_{n-1} akan hanya dapat diberi muatan sebesar:

$$(VC_{n-1})_{max} = [(VC_n)_{max} - nq/C_n] \frac{(n-1)q}{C'_{n-1}} \quad (3-15)$$

Bilamana semua kapasitor memiliki kapasitansi yang sama, maka

$$C = C_1 = C'_1 = C_2 = C'_2 = \dots = C_n = C'_n \quad (3-16)$$

Penurunan tegangan pada masing-masing tingkatan sebesar:

$$\Delta V_n = (q/c) \cdot (n)$$

$$\Delta V_{n-1} = (q/c) \cdot [2n + (n - 1)] \quad (3-18)$$

$$\Delta V_1 = (q/c) \cdot [2n + (n - 1) + 2(n - 2) + \dots + 2, 2 + 1] \quad (3-19)$$

Di mana $q = I/f$, sehingga keseluruhan penurunan tegangannya menjadi:

$$\Delta V_0 = I/fc \cdot \left[2n^3/3 + n^2/2 - n/6 \right]^* \quad (3-20)$$

***) Catatan:**

Di sini terlihat bahwa penurunan tegangan ΔV_0 pada umumnya berasal dari kapasitor yang paling bawah seperti halnya pada tegangan ripple. Untuk nilai tingkatan $n \geq 5$, maka dari persamaan di atas nilai $n^2/2$ dan $n/6$ lebih kecil bila dibandingkan dengan $2n^3/3$, sehingga dapatlah diabaikan.

$$\Delta V_0 = \frac{I}{fc} \cdot \left(\frac{2n^3}{3} \right)$$

Oleh karena itu tegangan output menjadi:

$$V_{0(\max)} = 2nV_{\max} - \frac{I}{fc} \cdot \left(\frac{2n^3}{3} \right)$$

*Rumus di atas berlaku bila nilai ∂V (ripple) diabaikan, bila nilai **ripple** diperhitungkan maka tegangan **output rata-rata** V_o :*

$$V_o = (V_{0(\max)} - \partial V) = 2nV_{\max} - \frac{I}{fc} \cdot n \left(\frac{n+1}{y} \right)$$

Di sini terlihat bahwa makin besar arus I yang mengalir maka frekuensi tetap tegangan akan turun. Jadi nilai V_o pertama akan naik dengan naiknya n . Suatu ketika nilai ini akan mencapai optimum. Nilai optimum terjadi pada

$$N_{opt} = \sqrt{\frac{V_{\max} \cdot f \cdot c}{I}}$$

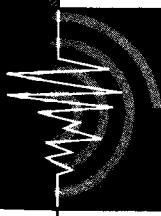
n = jumlah tingkatan yang diperlukan.

BAB

SUMBER TEGANGAN TINGGI IMPULSE



- RANGKAIAN DASAR SUMBER TEGANGAN TINGGI IMPULSE
- ANALISA GENERATOR IMPULSE DENGAN RANGKAIAN R-C
- GENERATOR IMPULSE SUSUNAN BERTINGKAT
- CARA MENENTUKAN KAPASITAS (DAYA) GENERATOR (SECARA PRAKTEK)
- PENGARUH TAHANAN R1 DAN R2 TERHADAP BENTUK GELOMBANG IMPULSE
- PEMBANGKITAN IMPULSE (SURJA) HUBUNG
- PEMBANGKITAN ARUS IMPULSE
- RANGKAIAN UNTUK MENGHASILKAN GELOMBANG ARUS IMPULSE



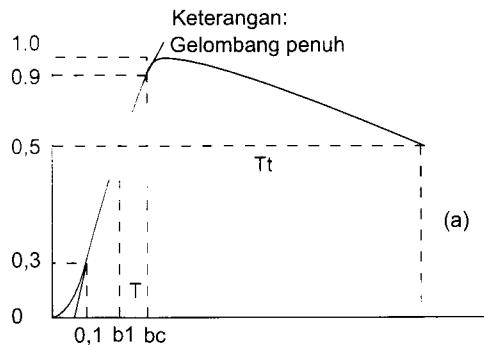
Gangguan tegangan lebih pada sistem transmisi daya dan distribusi daya umumnya disebabkan oleh dua macam tegangan transient yang berasal dari luar atau dari dalam sistem itu sendiri. Tegangan lebih yang berasal dari luar menyebabkan amplitudo gelombang tegangan melebihi puncak tegangan bolak-balik yang normal. Jenis gangguan dari luar ini biasanya disebabkan oleh sambaran petir yang mengenai kawat atau amengenai bangunan disekitar kawat tersebut. Amplitudonya bisa mencapai 1000 KV, dan arus yang mengalir kadang-kadang melebihi 100 K.Apm. Setiap sambaran petir selalu diikuti dengan merambatnya gelombang tegangan yang berjalan. Dimana amplitudonya dibatasi oleh ketahanan isolasi dari sistem transmisi tersebut.

Bila tegangan ini melebihi tegangan ketahanan sistem maka akan terjadi suatu kegagalan dari salah satu isolasinya, dan nilai tegangan selanjutnya akan sama dengan ketahanan tersebut. Semua kerugian yang disebabkan oleh gelombang ini dan pengaruh dari alat seperti *surge arrester* dan lain-lain, dapat menyebabkan perubahan bentuk gelombang. Tegangan lebih yang berasal dari dalam sistem itu sendiri, terjadi karena berasal dari fenomena pemutusan hubungan (*switching phenomena*).

Amplitudo gelombang ini selalu ada hubungannya dengan besarnya tegangan operasi dari sistem, dan bentuknya dipengaruhi oleh adanya impedansi dari sistem itu sendiri, dan juga dipengaruhi oleh keadaan pada waktu terjadinya pemutusan. Waktu kebangkitannya agak lambat bila dibandingkan dengan impulse petir, tetapi bentuknya menyebabkan terjadinya sesuatu yang membahayakan bagi isolasi sistem ini. Kadang-kadang dapat merusak alat elektronik karena nilai puncak tegangannya dapat mencapai beberapa Kilo Volt. Walaupun bentuk gelombang penyebab terjadinya tegangan lebih agak berbeda, tetapi untuk tujuan pengujian kedua bentuk gelombang ini dapat juga disimulasikan. Bentuk gelombang impulse yang disebabkan oleh petir dapat diwakilkan dengan persamaan gelombang eksponensial ganda;

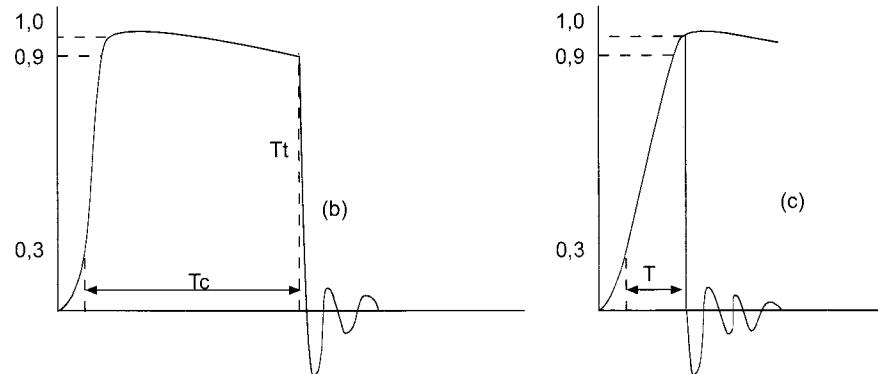
$$V = V_0 [e^{-at} - e^{-bt}] \text{ Volt (Kvolt)} \quad (4-1)$$

Dimana a dan b adalah suatu nilai yang tetap dengan unit micro-detik (mS). Persamaan ini menunjukkan bahwa gelombang ini merupakan gelombang yang kenaikannya cepat dan penurunannya melandai. Dalam standar internasional (IEC) gelombang dibagi menjadi bagian yang menaik atau bagian depan dan gelombang ekor yang waktunya ditentukan sampai tegangan bernilai 50% dari tegangan puncak gelombang. Dalam standar tersebut gelombang depan ditentukan harus mencapai waktu $T_f = 1,2 \mu S \pm 30\%$, sedangkan waktu pada gelombang ekor ditentukan $T_t = 50 \mu S \pm 20\%$. Untuk negara maju seperti Amerika, dipakai, $T_f/T_t = 1,5/40 \mu S$ sedangkan Inggris memakai $T_f/T_t = 1/50 \mu S$. Cara menentukan besarnya waktu tersebut dapat dilihat dari gambar di bawah ini :

Gambar 4.1**Bentuk Gelombang Impuls**

T_1 diukur dari 0' sampai titik puncak ; dan T_t dari 0' sampai titik tegangan 50% atau 0,5.

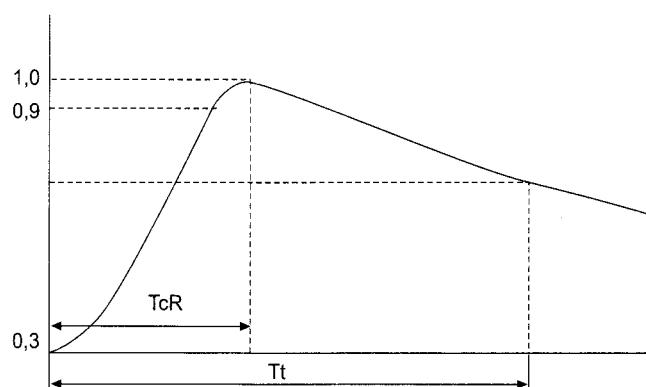
GELOMBANG TERPOTONG

Gambar 4.2**Bentuk Gelombang Impuls Yang Terpotong**

Pada gelombang impulse yang berasal dari pemutusan aliran (surja pemutusan) penentuan waktu gelombang depan (*time to crest*) ditentukan mulai dari gelombang menaik sampai dengan titik puncak gelombang. Sedangkan gelombang ekor, waktu ditentukan sampai nilai tegangan mencapai 50% dari harga puncaknya. Menurut standar IEC surja pemutusan ini besarnya:

$$T_{cr} = 250 \mu S + 20\%, \text{ sedangkan}$$

$$T_t = 2500 \mu S \pm 60\% .$$

Gambar 4.3**Bentuk Gelombang Impuls Menurut IEC Standard**

Bilamana bentuk gelombang ini dirasa tidak mencukupi, maka dapat dipilih gelombang surja dengan $100/2500$ S, atau $500/2500 \mu\text{S}$.

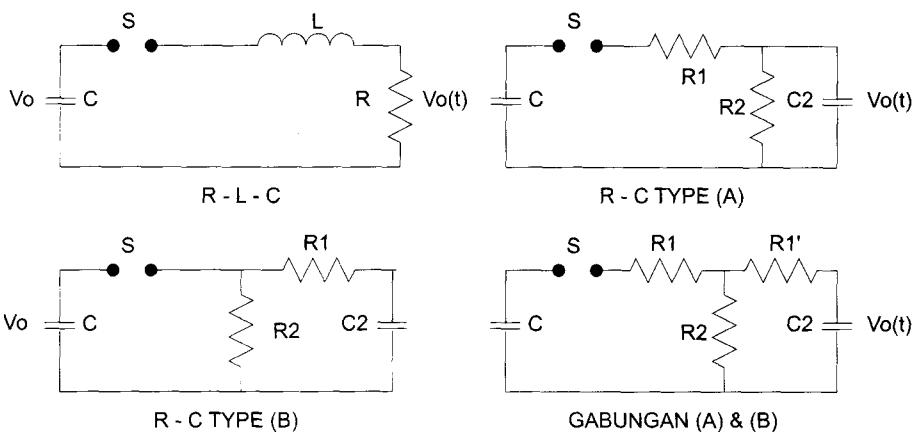
4.1 RANGKAIAN DASAR SUMBER TEGANGAN TINGGI IMPULSE



Gelombang eksponensial ganda seperti terlihat pada bentuk gelombang impulse yang dipakai pada pengujian, dapat dihasilkan di Laboratorium dengan menggunakan kombinasi rangkaian seri R-L-C pada keadaan peredaman yang lebih atau kombinasi rangkaian R-C seperti dibawah ini.

Gambar 4.4

R
Pem...
Gelombang Impuls
Berbagai tipe



Prinsip kerja rangkaian ini adalah seperti berikut: kapasitor C_1 diberi muatan dari sumber tegangan searah, setelah muatannya penuh kemudian muatannya ke rangkaian sebelah kanan yang disebut rangkaian pembentuk gelombang, yang terdiri dari elemen-elemen L - R , R_1 , R_2 dan C_2 , setelah sambungan (percikan) pada S terjadi. Tegangan buang muatan ini [$V_O(t)$] bentuknya adalah gelombang eksponensial ganda. Tahanan R_1 berfungsi meredam gelombang dari rangkaian yang mengendalikan waktu T_f (waktu bagian depan dari gelombang). Tahanan R_2 mengendalikan ekor dari gelombang C_2 , yaitu kapasitansi dari semua peralatan yang disambung paralel dengan benda yang diuji, sila kapasitansi dari benda yang diuji, pembagi tegangan, sela bola, kawat sambungan dan lain-lain, menggunakan bentuk rangkaian R-C baik bentuk (A) atau (B) atau rangkaian bentuk (C).

4.2 ANALISA GENERATOR IMPULSE DENGAN RANGKAIAN R-C



Dari rangkaian seri R-C ini, yang banyak dipakai adalah rangkaian (A) dan (B). Keuntungan dari rangkaian ini adalah, bahwa bila kita ingin mengubah waktu yang diperlukan oleh gelombang pengujian, bagian depan atau bagian belakang yang terpisah, dapat dilakukan secara berasingan, dengan mengubah-ubah nilai tahanan R_1 dan R_2 secara terpisah.

Alat yang akan diuji biasanya bersifat kapasitif, nilainya harus digabung dengan kapasitansi dari benda atau alat lain sehingga menjadi C_2 . Bila kita melihat rangkaian R-C bentuk (A), maka tegangan output yang terdapat pada jepitan (C_2) adalah:

$$V_o(t) = 1/C_2 \int_0^t i_2(t) dt \quad (4-2)$$

Atau bila dituliskan dengan fungsi (s) menjadi:

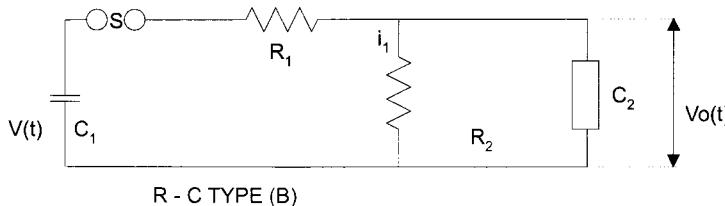
$$V_o(s) = I_2(s) \frac{1}{C_2 s} \quad (4-3)$$

Di mana I_2 adalah arus yang melewati C_2 dan arus yang melewati C_1 adalah i_1 atau $I_1(s)$ jadi sehingga:

$$I_2(s) = \left[\frac{R_2}{R_2 + 1/C_2 \cdot s} \right] I_1(s) \quad (4-4)$$

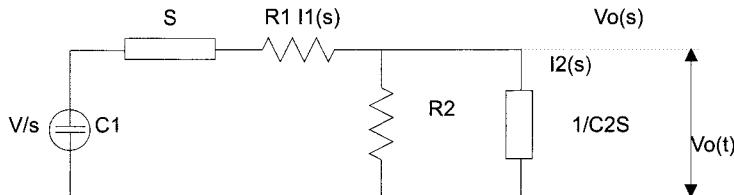
Lihat rangkaian dibawah ini:

Gambar 4.5
Rangkaian Impuls Tipe B



Dengan menggunakan impedansi operasional, rangkaian menjadi:

Gambar 4.6
Rangkaian Impuls
dengan Impedansi
Operasional



Tegangan output adalah $V_o(s)$:

$$V_o(s) = V/s \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} \quad (4-5)$$

Di mana:

$$Z_1(s) = R_1 + 1/C_1 \cdot s \quad \rightarrow \quad Z_1(s) = \left[\frac{1 + R_1 C_1 \cdot s}{C_1 \cdot s} \right] \quad (4-6)$$

$$Z_2(s) = \frac{(R_2)(1/C_2 \cdot s)}{R_2 + 1/C_2 \cdot s} \quad \rightarrow \quad Z_2(s) = \left[\frac{R_2}{1 + R_2 C_2 \cdot s} \right] \quad (4-7)$$

Bila dimasukkan ke dalam persamaan V_o , maka:

$$V_o(s) = \frac{V}{S} \left[\frac{\frac{R_2}{1+R_2C_2s}}{\frac{1+R_1C_1s}{C_1s} + \frac{R_2}{1+R_2C_2s}} \right] \quad (4-8)$$

$$V_o(s) = \frac{V}{S} \left[\frac{R_2C_1s}{(1+R_1C_1s)(1+R_2C_2s) + R_2C_1s} \right] \quad (4-9)$$

$$V_o(s) = \frac{R_2C_1s}{R_1R_2C_1C_2} \left[\frac{1}{S^2C + s \left[\frac{1}{R_2C_2} + \frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_2} + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2} \right]} \right] \quad (4-10)$$

Bilamana :

$$a = \left[\frac{1}{R_2C_2} + \frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1C_2} \right]$$

$$b = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2} \quad \text{dan} \quad k = R_1C_2 \quad (4-11)$$

Maka,

$$V_o(s) = \frac{V}{S} \left| \frac{1}{s^2 + sa + b} \right| \frac{s}{k}$$

Dari $s^2 + as + b$ penyelesaiannya:

$$s_1 = -\frac{a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b}$$

$$s_2 = -\frac{a}{2} - \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b}$$

Jadi persamaannya menjadi:

$$V_o = \frac{V}{k} \left(\frac{1}{s_1 - s_2} \right) \left(\frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right) \quad (4-12)$$

diubah menjadi fungsi (t) :

$$V_o = \frac{V}{k} \left[\frac{1}{s_1 - s_2} \right] \left[\frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right] e^{s_1 t} - e^{s_2 t} \quad (4-13)$$

Di dalam praktik $R_2 \gg R_1$ dan $C_1 \gg C_2$ oleh karena itu $1/R(R_1C_1) + 1/(R_2C_2) \ll 1/R_1C_2$ persamaan dari (s) dapat disederhanakan menjadi:

$$s^2 + \left[\frac{1}{R_1C_2} \right] s + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2} = 0 \quad (4-14)$$

$$s_1 = \frac{1}{2R_1C_2} - \sqrt{\left[\frac{1}{2R_1C_2} \right]^2 - \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \quad (4-15)$$

$$s_1 = \frac{1}{2R_1C_2} - \frac{1}{2R_1C_2} \sqrt{1 - \left[\frac{4R_1^2C_2^2}{R_1R_2C_1C_2} \right]}$$

$$s_1 = \frac{1}{2R_1C_2} - \frac{1}{2R_1C_2} \left[1 - 1/2 \frac{4R_1C_2}{R_2C_2} \right] \quad \text{fungsi expansi Taylor}$$

Karena biasanya $R_2 \ll R_1$ dan $C_1 \gg C_2$, maka:

$$\text{dan } s_1 \approx -1/(R_2 \cdot C_1)$$

$$s_2 = \frac{1}{2R_1C_2} + \frac{1}{2R_1C_2} \left(1 - \frac{2R_1C_2}{R_1C_2} \right) \quad (4-16)$$

$$s_2 \approx -1/(R_1 \cdot C_2)$$

Karena $R_2 \gg R_1$ dan $C_1 \gg C_2$, maka :

$$s_1 \gg s_2 \text{ dan } s_1 - s_2 \approx s_1$$

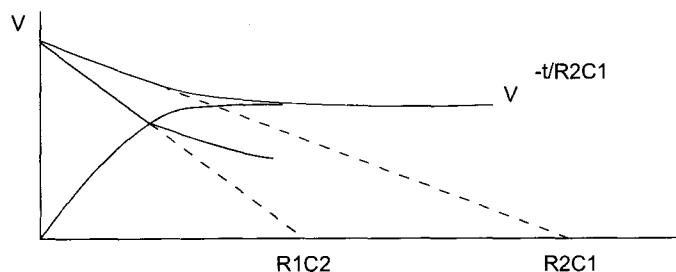
$$\text{dan } V_o(t) = V/k \cdot 1/s \cdot [e^{s_1 t} - e^{s_2 t}]$$

$$V_o(t) = \frac{V}{R_1C_2} \left(-\frac{1}{1/(R_1 \cdot C_2)} \right) \left[e^{-t/R_1C_2} - e^{-t/R_2C_2} \right] \quad (4-17)$$

$$V_o(t) = -V \left[e^{-t/R_1C_2} - e^{-t/R_2C_2} \right]$$

Secara Grafik :

Gambar 4.7



4.3. GENERATOR IMPULSE DENGAN SUSUNAN BERTINGKAT

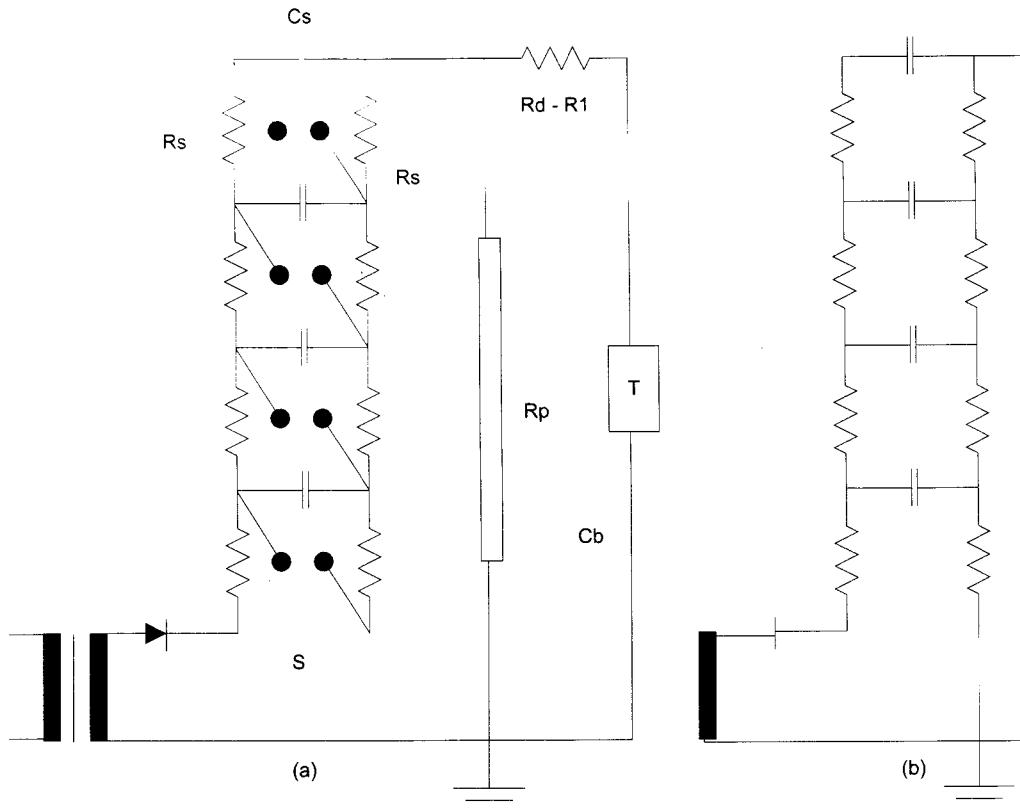
Rangkaian pengujian tegangan impulse yang sederhana hanya dapat membangkitkan tegangan maksimum di bawah 300 kV. Untuk mendapatkan tegangan yang lebih tinggi, maka dapat dipakai rangkaian yang bertingkat, atau "Kaskade". Pertama kali yang berhasil membuat rangkaian ini adalah seorang pakar yang bernama Marx. Dengan susunan tegangan impulse yang rendah dapat dihasilkan tegangan impulse yang tinggi. Pada pembahasan sebelumnya, (lihat rangkaian bertingkat satu) pada permulannya kapasitor C_s diberi muatan dari sumber tegangan bolak-balik yang telah disearahkan, bila kapasitor telah dimuat dengan tegangan maka akan didapat nilai tertentu misalkan V_c maka muatan dapat dilepaskan kerangkaian pelepasan yang terdiri dari kapasitor C_b sebagai pengganti dari kapasitansi beban dan tahanan R_d atau R_l tahanan peredam, dan tahanan paralel R_p . Rangkaian ini terpisah dengan kapasitor pengisi C_s . Oleh sebab itu adanya sela bola, (tergantung pada jarak kedua bola) maka akan terjadi loncatan api, dan arus mengalir kerangkaian pelepasan muatan dimana terdapat C_b di dalamnya. Kemudian C_b akan dimuat, bersamaan dengan ini maka arus juga mengalir melalui R_p . Besarnya tegangan (amplitudo tegangan) yang melalui R_d ditentukan oleh jarak dari sela bola tersebut.

DASAR RANGKAIAN MARX

Biasanya nilai tahanan R_s (tahanan pemuat) dipilih, sehingga arus pemuat mencapai nilai $I_s = 5\text{mA}$ sampai 10mA , dan kapasitor dari generator ini C_s dipilih sehingga ia dapat memuatinya selama 10 detik sampai 1 menit. Oleh karena itu hasil perkalian $C_s \cdot R_s$ mempunyai nilai tertentu (ketetapan waktu), $\tau = C_s \cdot R_s$. Untuk susunan dengan n tingkatan, $\tau = C_s \cdot R_s / n$. Sela udara s dipilih sehingga tegangan tembus dari udara antara kedua bola tidak lebih besar dari tegangan pemuat V . Cara kerja dari rangkaian Marx adalah seperti berikut (lihat gambar).

Gambar 4.8

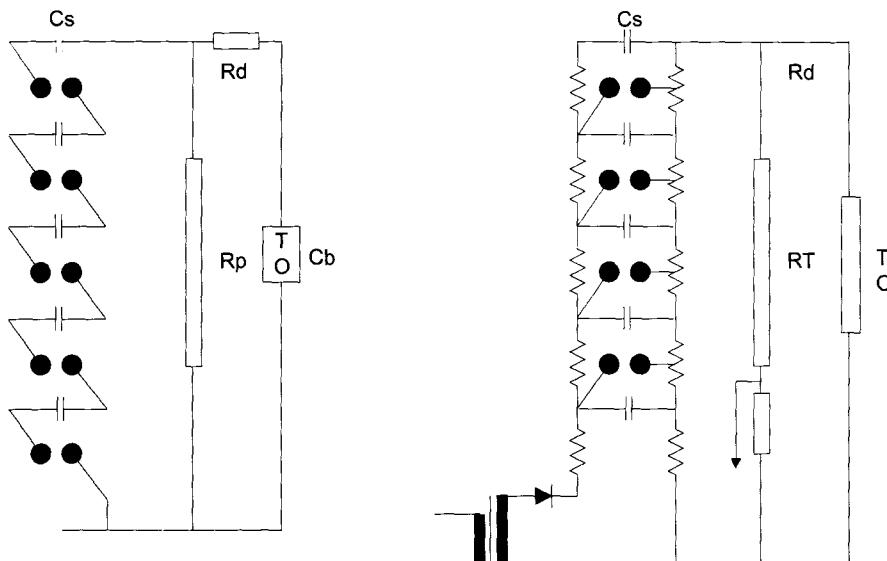
Rangkaian Marx pada saat pengisian Kapasitor



Kapasitor dimuat secara sama-sama, sehingga rangkaian seolah-olah disambung paralel (lihat gambar b). Kemudian setelah mencapai tegangan V , muatan dapat dibuang dengan melewati sela menuju ke rangkaian pembentuk gelombang yang terdiri dari R_d dan R_p . Ini berarti kapasitor C_s disambung secara seri (lihat gambar c). Waktu pembuangan muatan dapat diatur melalui rangkaian pengatur yang terpisah dengan rangkaian generator ini. Konstanta waktu generator ini bila ia mempunyai n tingkatan adalah $t_n = R_s C_s / n$ dan nilainya sangat kecil (dalam micro detik). Pada waktu pembuangan muatan tidak ada arus yang melewati tahanan R_s . Pada rangkaian Marx di atas, rangkaian pembentuk gelombang letaknya terpisah dari generator impulse, sehingga memerlukan ruangan yang agak besar. Karena rangkaian menjadi panjang maka dapat terjadi induktansi pada rangkaian tersebut, ini akan mengubah bentuk gelombang impulse. Karena itu akhirnya sistem ini dianggap kurang memuaskan. Perubahan dibuat dengan menyatukan rangkaian pembentuk gelombang dengan rangkaian generator impulse.

Gambar 4.9

Diagram rangkaian pada
saat Melepas muatan



di mana:

R'_2 = Tahanan pembentuk gelombang ekor (R_2).

R'_1 = Tahanan pelepasan muatan.

R_{se} = Tahanan pembentuk gelombang depan (R_1/n).

R_{se} = Tahan luar untuk penambah tahanan pembentuk gelombang depan.

$$Cs = \text{Kapasitor pemuat } 1/C_s = \sum^n 1/C_1 \quad (4-18)$$

Pada reka bentuk seperti ini, untuk mendapatkan breakdown yang tepat maka sela bola S_1 letakkan dibawah sela bola S_2 , dan seterusnya sehingga merupakan susunan bola yang diatur keatas. Ini dimaksudkan bila terjadi percikan pada sela bola S_1 , maka bunga api akan memancarkan sinar ultra ungu dan sinar ini akan mempengaruhi medan listrik dari sela udara bola S_2 , sehingga dalam waktu yang singkat pasa sela S_2 terjadi percikan api. Demikianlah seterusnya percikan ini akan mempengaruhi sela bola yang lain sehingga dalam waktu yang singkat terjadi percikan pada bola yang ada. Pada gambar rangkaian Marx yang belum diubah, tahanan R_1 dan R_2 diletakkan diantara generator dan beban (T.O). Karena R_1 dapat mempengaruhi bentuk gelombang bagian depan, maka harganya cukup besar sehingga bentuk tahanan ini agak panjang. Hal ini dapat memerlukan ruangan yang besar dimana dapat menambah nilai induktansi rangkaian pengujian. Hal ini dapat diperbaiki dengan cara menyebarkan tahanan R_1 pada rangkaian generator impulse seperti terlihat diatas (rangkaian yang sudah diperbaiki). Dengan menyebarkan R_1 masih diperlukan tahanan R_{se} yang nilainya kecil untuk dapat menghasilkan bentuk gelombang yang baik. Tetapi penyebaran R_1 akan mengubah kontruksi dari sela bola.

$$\text{Nilai tahanan } R_1 \text{ berubah ; } R_1 = R_{se} + \sum^n R'_1 \quad (4-19)$$

R'_1 = Tahanan pembentuk gelombang depan yang dibesarkan.

R_{se} = Tahanan pembentuk gelombang tambahan di luar generator.

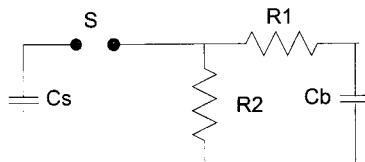
Sedangkan tahanan pembuang muatan mempunyai nilai efektif seperti berikut:

$$R_2 = nR'_2 = \sum^n R'_2 \quad (4-20)$$

Untuk keperluan analisa maka rangkaian bertingkat ini dapat disederhanakan menjadi rangkaian satu tingkat tetapi dengan nilai elemen-elemen yang berubah.

Gambar 4.10

Rangkaian Pengganti
Pembentuk Gelombang
Impulse



Bila n adalah jumlah tingkatan maka nilai elemen-elemen menjadi :

$$1/C_s = \sum^n 1/C_1 \quad (4-21)$$

$$R_1 = R_{se} + \sum^n R'_1 \quad (4-22)$$

$$\text{dan } R_2 = n.R'_2 = \sum^n R'_2 \quad (4-23)$$

4.4. CARA MENENTUKAN (DAYA) GENERATOR (SECARA PRAKTEK)

Dalam praktek, pencantuman daya (kapasitas) dari generator penguji ini ditentukan oleh kapasitas dari beban yang diuji. Setiap benda atau alat mempunyai kapasitansi sendiri-sendiri. Sebagai contoh, kapasitas dari transformator distribusi sampai berdaya lebih dari 1000 KVA mempunyai nilai kapasitas sampai 8000 pF. Semua nilai kapasitas dari benda yang dihubungkan di dalam suatu rangkaian pengujian seperti *test-object*, pembagi tegangan, kabel pengukur dan lainnya disatukan dan dinamakan kapasitansi dari beban C_b .

Untuk mendapatkan hasil pengukuran yang baik diperlukan C_s yang besar. Kapasitor pemuat haruslah mempunyai kapasitansi minimum $C_s = 5 C_b$. Biasanya nilai C_s adalah antara 5 s/d C_b , karena itu energi yang diperlukan oleh generator adalah sebesar :

$$W = \frac{V_e^2 C_s}{2} \times 10^{-9} \text{ (KJ)} \quad (4-24)$$

W = energi keseluruhan dalam K. Joule.

W_e = jumlah tegangan tegangan pemuat (KV).

C_s = kapasitansi dari kapasitor impulse dari generator (pF).

Bila beban sangat induktif, seperti halnya pada transformator yang besar, maka untuk menghindari terjadinya oscilasi pada ekor gelombang impulse maka nilai C_s haruslah sebesar :

$$C_s = \frac{8 \cdot T_2^2}{L} \quad (4-25)$$

C_s = nilai minimum impulse kapasitor

T_2 = waktu yang diperlukan untuk mencapai 50 % tegangan gelombang.

L = induktansi dari alat yang diuji (*test - object*)

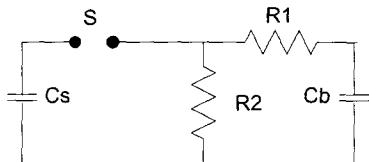
4.5. PENGARUH TAHANAN R_1 DAN R_2 TERHADAP BENTUK GELOMBANG IMPULSE



Untuk menentukan pengaruh dari tahanan seri R_1 dan tahanan paralel R_2 dari rangkaian pembentuk gelombang, dapat ditentukan secara praktis dan cukup teliti. Lihat rangkaian di bawah ini:

Gambar 4.11

Rangkaian Pengganti Generator Impulse



Mari kita lihat rangkaian pengganti dari generator impulse sesuai dengan gambar di atas.

C_s = pengganti kapasitor yang ada di generator. (μF)

C_b = pengganti kapasitor dari beban dan pembagi tegangan dll. (μF)

R_1 = tahanan gelombang depan, adalah sama dengan jumlah tahanan seri dari generator dan tambahan tahanan R_{se} (bila ada).

R_2 = tahanan gelombang ekor, jumlah tambahan paralel yang ada pada setiap tingkatan.

S = sela udara dari elektro bola.

T_1 = waktu yang diperlukan oleh gelombang bagian depan dari impulse (μS).

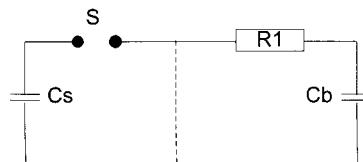
T_2 = waktu yang diperlukan pada bagian gelombang sampai nilai tegangan mencapai 50% dari puncak gelombang impulse (μS).

$\eta(\%)$ = Efisiensi dari generator, yaitu output dari tegangan puncak dibandingkan dengan hasil perkalian dari tegangan pemuatan untuk setiap tingkatan.

Misalkan bentuk gelombang yang akan dihasilkan adalah gelombang yang sesuai dengan gelombang standar I.E.C yaitu $T_1 / T_2 = 1,2 / 50 \mu S$. Untuk menghitung gelombang bagian depan, maka pendekatan rangkaian dapat diubah seperti berikut:

Gambar 4.11

Modifikasi Rangkaian
Tipe B



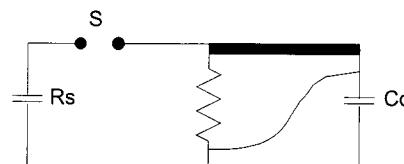
Kapasitor C_s dimuati sampai tegangan mencapai E (volt). Kemudian muatan dilepas ke kapasitor C_b dengan melalui tahanan R_1 . Setelah seimbang tegangan turun hingga mencapai V , yang nilainya lebih rendah dari E . Jadi $h = V/E = C_s/(C_s + C_b)$. Untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi, diperlukan nilai C_s dan C_b . Ini berarti harga dari energi yang diberikan pada generator sudah tertentu. Pertukaran muatan antara C_s dan C_b adalah berbentuk eksponensial, sehingga didapat ketetapan waktu t sebesar:

$$t_d = \frac{C_s \cdot C_b}{C_s + C_b} \quad (4-26)$$

Dari sini terlihat bahwa ketetapan waktu tergantung pada R_1 dan C_s yang disambung dengan C_b . Oleh karena itu waktu yang diperlukan untuk gelombang bagian depan adalah $T_1 = K_1 t_d$. Karena $C_s \gg C_b$ maka $C_s \cdot C_b \approx R_1 \cdot C_b$. Bila $C_s = 10C_b$ maka menurut pengalaman $T_d \approx 2,9 R_1 \cdot C_2$ dan untuk gelombang $T_d = 1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ nilai dari $R_1 \cdot C_2$ diantara $0,35 < R_1 C_2 < 0,65$. Untuk menghitung waktu T_2 buat rangkaian menjadi seperti berikut:

Gambar 4.12

Modifikasi Rangkaian



Kapasitor C_s dan C_b mula-mula dimuati sampai tegangan mencapai V dan kemudian muatan dibuang melalui R_1 yang grafiknya berbentuk eksponensial. Konstanta waktu adalah $\tau_2 - R_2(C_s + C_b)$. Jadi $T_2 = k_2 \tau_2$ dapat dituliskan, sebagai $T_2 = 0,7 R_2(C_s + C_b)$. Bilamana $C_s = 10 C_b$ maka untuk mencapai $V = 0,5 V$.

$t_2 \approx R_1 C_1$ dan $T = 0,8 R_2 C_1$ dan untuk gelombang ekor sebesar $50 \pm 20\%$ nilai dari $R_2 C_1$ biasanya $50 < R_2 C_1 < 75$. Bila rangkaian generator seperti dibawah ini (rangkaian tipe A), maka penyelesaiannya dalam praktek sama seperti sebelumnya, hanya saja nilai t adalah seperti berikut:

$$\tau_1 = \frac{R_2 R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{C_s \cdot C_b}{C_s + C_b} \quad \text{dan untuk } t_2 = (R_1 + R_2)(C_s + C_b) \quad (4-27)$$

$T_1 = K_1 t_1$ sedangkan $T_2 = K_2 t_2$. Nilai efisiensi mendekati:

$$\eta = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{C_s}{C_s + C_b}$$

Di sini terdapat unsur R_1, R_2 dan C_s, C_b . Bila $C_s = 10 C_b$ dan R_1 maka nilai yang diperlukan pada perhitungan pendekatan ini sama seperti pada rangkaian yang terdahulu. Untuk impulse petir nilai T_1/T_2 dimana $T_2 = k_1 \tau_1$ dan $T_2 = k_2 \tau_2$, menurut pengalaman adalah

Tabel 4.1

T_1/T_2	1,2/5 μ s	1,2/50 μ s	12/200 μ s
k_1	1,49	2,96	3,15
k_2	1,44	0,73	0,7

TEGANGAN OUTPUT MAKSUMUM

Tegangan pemuatan maksimum dari generator impulse adalah $2.nV_{\text{mak}}$ untuk generator dengan rangkaian pengandaan. Tetapi berhubung banyak kerugian pada rangkaian, maka nilai tegangan maksimum yang dikeluarkan (output) untuk bentuk gelombang 1,2/50ms adalah :

$$V_o = 2.nV_{\text{mak}} \cdot (0,95 - C_b / (C_b + C_s)) \quad (4-29)$$

4.6. PEMBANGKITAN IMPULSE (SURJA) HUBUNG

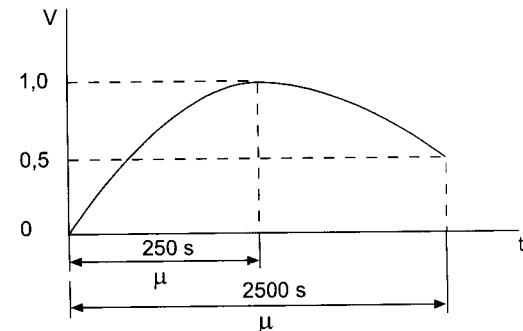
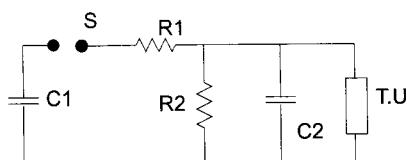
Dengan bertambah tingginya tegangan yang dipakai pada sistem transmisi daya, maka surja hubung atau peristiwa yang diakibatkan oleh surja hubung lebih mempunyai peranan yang penting dari pada akibat yang disebabkan oleh impulse petir. Karena itu, ini mempunyai pengaruh pada reka bentuk dari alat-alat listrik. Semua kawat transmisi daya yang mempunyai tegangan lebih tinggi dari 200 KV sangat memperhitungkan pengaruh surja hubung dalam setiap reka bentuknya. Surja hubung adalah suatu transient tegangan yang terjadi pada waktu yang singkat. Di mana ia berasal dari pemutusan atau penyambungan dari suatu saklar tegangan tinggi atau pemutusan rangkaian, atau mungkin disebabkan gangguan pada rangkaian yang bertegangan tinggi. Tegangan transient ini mungkin berbentuk gelombang bolak balik atau oscilasi yang diredam dengan frekuensi antara Hz sampai K.Hz kadang-kadang gelombang ini dinamakan gelombang impulse yang diperlambat. Surja hubung ini mempunyai energi yang lebih besar dari impulse petir. Waktu yang dianggap standar untuk gelombang surja hubung ini dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned} T_{er} &= 250 \mu S \pm 20\% \\ T_1 &= 2500 \mu S \pm 60\% \end{aligned} \quad (4-30)$$

Dari gambar dibawah ini terlihat suatu rangkaian impulse generator diubah menjadi generator surja hubung. Rangkaian ini sama dengan generator impulse petir dari R_1 dan R_2 . Hanya saja untuk menghasilkan gelombang yang mempunyai waktu besar harus digantikan dengan tahanan yang bernilai besar. Nilai R_1 dapat mencapai 1 K. Ohm sedangkan tahanan R_2 dapat mencapai 5 K.Ohm sampai 20 K.Ohm. Sedangkan efisiensinya turun menjadi kira-kira 50 % atau lebih rendah dari itu. Bentuk gelombang yang keluar dari rangkaian apabila beban adalah C_x dapat berbentuk seperti di bawah ini:

Gambar 4.13

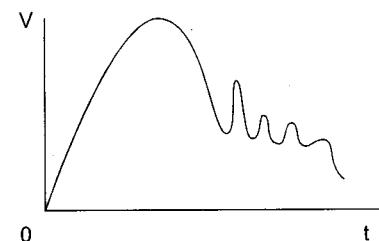
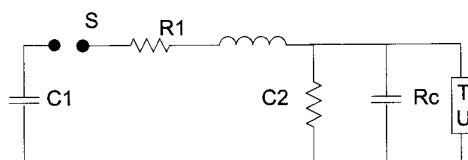
Bentuk Gelombang Setelah Rangkaian Dibebani



Pada rangkaian seperti dibawah ini dapat diproduksi gelombang yang sangat diredam. Dengan menggunakan L maka nilai R_1 dapat dikurangi dan efisiensi dapat diperbaiki.

Gambar 4.14

Gelombang Oscilasi



Oscilasi yang diredam mempunyai frekuensi antara K.Hz sampai 10 K.Hz tergantung dari nilai parameter yang ada di dalam rangkaian. Secara praktis untuk menentukan harga dari T_{er} dan T_h adalah seperti berikut (harga $T_h \geq T_{er}$):

T_{er} = waktu yang diperlukan sampai pada puncak gelombang.

T_h = waktu yang diperlukan sampai gelombang mencapai nilai 50 %.

$$T_{er} = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \ln(t_1/t_2) \quad T_{er} \approx t_1 \cdot \ln(\eta) \quad (4-31)$$

Sedangkan harga dari t_1 dan t_2 tergantung pada bentuk rangkaian pengganti. Misalnya untuk rangkaian (b):

$$t_1 = R_1 \cdot (C_b + C_s) \quad (4-32)$$

$$t_2 = \frac{C_s \cdot C_b}{C_s + C_b} \quad (4-33)$$

$$\eta = \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (4-34)$$

4.7 PEMBANGKITAN ARUS IMPULSE



Bilamana terjadi sambaran petir pada transmisi atau jala-jala listrik maka terjadilah suatu tegangan yang tinggi berupa impulse pada jaringan tersebut. Bersamaan dengan itu arus impulse mengalir. Alat pengaman seperti Surge - Diverter, atau Lightning - Arrester harus dapat menyalurkan arus impulse ini ke tanah dengan mudah, tanpa merusak alat-alat yang dipasang. Karena itu pembangkitan arus impulse yang nilai puncaknya tinggi ($\pm 100k.A$) diperlukan untuk pengujian dan penelitian dasar dari elemen-elemen ini, terutama elemen tahanan yang sifatnya tidak linear. Alat ini juga berguna untuk menghasilkan reka listrik dan dapat juga dipakai untuk penyelidikan elektrik plasma di dalam peristiwa pembuangan muatan listrik yang tinggi. Arus yang diperlukan untuk pengujian arus impulse pada surge diverter *dab lightning arrester* harus mempunyai bentuk gelombang standar $T_1 / T_2 = 4/10mS$, sedangkan toleransi yang diperlukan adalah $\pm 10\%$. Di samping gelombang arus yang berbentuk eksponen ganda maka gelombang persegi yang mempunyai waktu yang panjang juga dipakai untuk menguji alat-alat listrik. Waktu yang diperlukan untuk gelombang persegi biasanya antara 0,5 m.detik sampai 5,0 m.detik dengan waktu gelombang naik dan gelombang turun lebih rendah dari $\pm 10\%$. Untuk pengujian diperlukan $T_d = 2000 mS$. Gelombang ini dapat terjadi pada pelepasan muatan kawat transmisi yang panjang. Gelombang ini dapat dipakai untuk menguji alat lightning - arrester dan surge diverter.

4.8 RANGKAIAN UNTUK MENGHASIKAN GELOMBANG ARUS IMPULSE



Besar arus impulse dapat diperoleh dengan beberapa cara:

1. Dengan menyimpan energi di dalam suatu kondensor, kemudian suatu waktu energi dilepaskan ke luar seketika.
2. Dengan menyimpan energi listrik di dalam suatu induktor dan kemudian dilepas keluar.
3. Dengan menyimpan energi secara mekanis biasanya gaya sentrifugal.

Dalam hal ini hanya dibahas cara pertama saja yaitu cara penyimpanan energi dengan menggunakan kondensor. Dalam cara ini, gelombang impulse arus diperoleh dari sekelompok kondensor yang disambung paralel dan diberi muatan sampai nilai tegangan tertentu. Kemudian muatan itu dilepaskan pada satu rangkaian R-L. Cara melepaskan muatan ini dengan menyulutkan (trigger) sela bola, sehingga arus akan mengalir ke rangkaian tersebut. Bila arus yang mengalir adalah i_m , maka:

$$V = Ri_m + L \frac{di_m}{dt} i/C \cdot \int_0^t i_m \cdot dt \quad (4-36)$$

R = tahanan dinamik dari benda yang diuji dan tahanan shunt dari rangkaian (bila ada).

L = Induktansi induktor dan rangkaian (induktor berintikan udara).

Persamaan di atas dapat ditransformasikan dengan Laplace menjadi:

$$V/s = R \cdot I(s) + (L \cdot S) \cdot I(s) \cdot \frac{I(s)}{C \cdot s} \quad (4-37)$$

Bila kapasitor dimuati sampai E. Volt, maka:

$$E/s = I(s)R + sL + 1/C.s \quad \text{atau} \quad I(s) = \frac{E/s}{R + sL + 1/Cs} \quad (4-38)$$

$$I/(s) = \frac{E/s}{\left(s^2 + \frac{R.s}{L} + 1/LC \right)} S^2 + R/L.s + 1/LC \quad (4-39)$$

Sehingga didapat S1 dan S2:

$$S1, S2 = -R/2L \pm \sqrt{(R/2L)^2 - 1/LC} \quad (4-40)$$

Gelombang yang dihasilkan akan direndam (Under damped) bila mana nilai $R/2 < \sqrt{L/C}$.

Bila ini terjadi maka $i_m = V/wL \cdot e^{-at} \cdot \sin wt$

Di mana $a = R/2L$ dan $w = \sqrt{1/LC - (R/2L)^2}$.

Jadi sebenarnya S1, S2 dapat dituliskan $= -a \pm jw$

Untuk membangkitkan arus gelombang persegi yang sesuai dengan gelombang yang merambat pada hantaran tegangan tinggi yang panjang, maka kelompok kondensor disambung dengan induktor-induktor.

BAB



PENGUKURAN TEGANGAN TINGGI



- 🌀 PENGUKURAN TEGANGAN PUNCAK MENGGUNAKAN SELA PERCIKAN
- 🌀 BENTUK SUSUNAN PENGUKURAN
- 🌀 PENGUKURAN TEGANGAN SEARAH DAN BOLAK-BALIK
- 🌀 PENGUKURAN TEGANGAN IMPULSE
- 🌀 BENTUK KONDISI ELEKTRODA BOLA
- 🌀 KETEPATAN NILAI TABEL PERCIKAN DI UDARA
- 🌀 PENGARUH UDARA DI SEKITARNYA
- 🌀 PEMAKAIAN PEMBAGI TEGANGAN SEBAGAI SARANA PENGUKURAN TEGANGAN TINGGI
- 🌀 PEMBAGI TEGANGAN BERISI TAHANAN
- 🌀 PEMBAGI TEGANGAN BERISI KAPASITOR
- 🌀 PENGUKURAN/ALAT UKUR TEGANGAN TINGGI
- 🌀 PENGUKURAN TEGANGAN PUNCAK
- 🌀 PERKEMBANGAN RANGKAIAN PENGUKURAN PADA PEAK-VOLTMETER
- 🌀 RANGKAIAN PENGUKURAN TEGANGAN TINGGI
- 🌀 RANGKAIAN PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI BOLAK-BALIK
- 🌀 RANGKAIAN PENGUKURAN
- 🌀 PENGUKURAN TEGANGAN
- 🌀 RANGKAIAN PENGUJIAN DENGAN TEGANGAN TINGGI SEARAH
- 🌀 RANGKAIAN PENGUKURAN
- 🌀 PENGARUH POLARITAS PADA ELEKTRODA
- 🌀 RANGKAIAN PENGUJIAN TEGANGAN SEARAH BERTINGKAT BANYAK
- 🌀 RANGKAIAN PENGUKURAN DENGAN TEGANGAN TINGGI IMPULSE
- 🌀 TEGANGAN PETIR YANG UTUH (IMPULSE PETIR)
- 🌀 GELOMBANG STANDAR DARI IMPULSE YANG TERPOTONG
- 🌀 RANGKAIAN PENGUJIAN TEGANGAN IMPULSE
- 🌀 CARA PENGUKURAN TEGANGAN TINGGI IMPULSE
- 🌀 RANGKAIAN TEGANGAN TINGGI IMPULSE BERTINGKAT BANYAK



Pengukuran tegangan tinggi arus searah, arus bolak balik, dan impulse yang dipakai di dalam laboratorium tegangan tinggi berbeda dengan yang dipakai di industri atau pembangkitan tenaga listrik. Di dalam industri maupun laboratorium, pengukuran arus, tegangan dan lainnya adalah sangat penting, karena itu diperlukan alat pengukur yang tepat dan kadang-kadang presisi. Manusia yang menangani alat-alat ini harus dilindungi dari kejutan aliran listrik atau dari induksi yang berasal dari *stray-coupling*. Oleh karena itu cara meletakkan alat pengukur juga harus diperhatikan. Alat pengukur sistem tegangan tinggi harus selalu dikalibrasi. Gangguan elektromagnet sangat besar akibatnya terutama pada pengukuran tegangan impulse dan arus impulse, sehingga pengaruhnya harus dihindari atau dikurangi pengaruhnya. Oleh karena itu, meskipun dasar pengukurannya sama tetapi untuk pengukuran tegangan tinggi dan arus tinggi di dalam laboratorium mempunyai prinsip yang berbeda dengan alat pengukur sistem tegangan rendah. Di bawah ini ditunjukkan macam-macam alat pengukur yang biasa dipakai untuk pengukuran di dalam laboratorium tegangan tinggi.

Tabel 5.1

Teknik Pengukuran Pada Sistem Tegangan Tinggi	Jenis Tegangan	Cara atau Teknik Pengukuran
	Tegangan Searah	Mikro ampere meter dengan tahanan seri, pembagi tegangan, meter pembangkit tegangan, bola dan percikan dalam udara.
	Tegangan bolak-balik	Meter arus dengan impedansi seri. Pembagi tegangan berisi kapasitor dan tahanan. Transformator tegangan (Electrostatic Voltmeter, sela bola (dua bola)).
	Tegangan bolak-balik frekuensi tinggi, tegangan impulse dan tegangan yang berubah	Pembagi tegangan dengan kapasitor/tahanan, osciloskop, volt-meter puncak sela dua bola.

Dari daftar di atas ternyata sela dua bola adalah alat yang dapat dipakai sebagai alat pengukur tegangan untuk segala jenis tegangan. Dan sebagai alat penurunan tegangan dipakai pembagi tegangan dengan bermacam-macam elemen di dalamnya.

5.1. PENGUKURAN TEGANGAN PUNCAK MENGGUNAKAN SELA PERCIKAN (SPARK GAP)



Sela dua buah bola, bila diberi tegangan akan menghasilkan medan listrik yang merata pada ruang antara kedua bola tersebut. Ia selalu mempunyai tegangan percikan yang nilainya sama, sesuai dengan yang telah ditetapkan, pada keadaan udara yang tetap. Oleh karena itu sela bola ini dapat dipakai untuk mengukur tegangan puncak dari suatu tegangan sesuai dengan jarak sela udara yang diketahui. Tegangan percikan sebesar 30 KV (harga puncak) untuk setiap cm jarak sela udara terjadi bila suhu udaranya 20°C dan tekanan barometer

udara sebesar 760 mmHg (TORR) terjadi bila bentuk medannya adalah medan yang rata (homogen). Tetapi dalam praktik hal ini hanya terjadi pada keadaan tertentu, yaitu medan yang terdapat diantara dua elektroda dua batang atau bentuk lainnya sehingga bentuk medannya tidak rata. Nilai tegangan tembus (*breakdown*) pada sela percikan, terutama tegangan tembus dari sela bola (dua elektroda berbentuk bola) biasanya tidak tergantung pada bentuk gelombang tegangan yang digunakan, tetapi sesuai demam pengukuran tegangan dengan bermacam-macam bentuk gelombang seperti: tegangan searah, bolak-balik, dan impulse. Ini juga dapat dipakai untuk mengukur tegangan bolak-balik berfrekuensi tinggi, sampai ± 1 Mhz.

5.2 BENTUK SUSUNAN PADA PENGUKURAN



Sela bola dapat disusun secara vertikal atau horizontal. Pada susunan vertikal, bola yang terletak di bawah disambung dengan tanah (Bumi). Sedangkan pada susunan yang mendatar, salah satu bolanya disambung ke tanah, biasanya bola yang tidak bertegangan. Bentuk dan besar kedua bola harus sama. Tegangan yang akan diukur disambungkan pada salah satu bola yang bertegangan dengan melalui suatu tahanan. Tahanan ini adalah untuk membatasi arus yang mengalir bila terjadi hubungan singkat antara kedua bola tersebut. Jarak antar kedua bola tersebut (s) sebanding dengan harga tegangan yang diukur. Disamping untuk mengurangi besarnya arus, tahanan tersebut juga dapat dipakai untuk menekan terjadinya percikan pada sela bola. Nilai tahanan ini bernilai sekitar 100 sampai 1000 K Ohm untuk tegangan searah dan tegangan bolak-balik, sedangkan untuk tegangan impulse nilainya tidak lebih dari 500 Ohm. Tahanan ini harus memiliki induktansi yang rendah (tidak lebih dari 30 mH).

5.3 PENGUKURAN TEGANGAN SEARAH DAN BOLAK BALIK



Mula-mula diterapkan tegangan yang rendah kemudian tegangan dinaikan perlahan-lahan sehingga terjadi percikan pada sela udara antara dua elektroda berbentuk bola. Dengan kata lain tegangan nilainya ditentukan oleh jarak kedua buah elektroda bola tersebut. Bilamana pada permukaan bola terdapat debu atau serat (fiber), maka spark over akan terjadi pada nilai tegangan yang lebih rendah, terutama bila jenis tegangan adalah tegangannya searah (*fiber bridge*). Oleh karena itu pengujian harus dilakukan beberapa kali untuk mendapatkan nilai rata-rata yang baik. Nilai sebenarnya dapat diambil dari nilai rata-rata untuk tiga pengukuran yang hanya berbeda 3%.

5.4 PENGUKURAN TEGANGAN IMPULSE



Dalam pengujian tegangan handalan (*Withstand Voltage*), untuk mendapatkan tegangan percikan pada 50% tegangan handalan dari elektroda bola, jarak sela bola (s) dari elektroda atau tegangan pemuatan dari generator impulse harus diubah secara bertahap (biasanya dinaikkan sedikit demi sedikit) sehingga nilainya mencapai 2% di bawah tegangan spark-over sela bola.

Untuk mendapatkan nilai 50% dari tegangan handalan, dapat diperoleh dengan beberapa cara pengujian. Salah satu cara ialah dengan melakukan dua set percobaan. Set pertama terdiri dari 10 kali pengujian dan diharapkan terjadi 2 spark-over pada set tersebut. Set yang kedua juga dilakukan dengan 10 kali pengujian dan diharapkan menghasilkan 7 atau 8 kali spark-over. Beda kedua tegangan itu ditentukan $\pm 2\%$. Kemudian untuk menentukan nilai tegangan dengan 50% percikan, diambil nilai rata-rata dari kedua hasil tersebut. Pada sela bola yang berdiameter di bawah 12,5 cm, untuk mendapatkan yang tepat dianjurkan menggunakan radiasi. Cara ini sangat perlu untuk pengukuran tegangan impulse dan tegangan bentuk lain seperti tegangan searah, bolak-balik, bila menggunakan elektroda bola untuk tujuan pengukuran tegangan.

5.5 BENTUK KONDISI BOLA ELEKTRODA



Bola tersebut secara teliti dan hati-hati dibuat (dibentuk) sehingga permukaannya licin dan lengkungannya sangat rata, diameternya tidak akan dengan 2% dari nilai nominalnya. Permukaan bola harus bebas dari debu, minyak atau bahan lain yang menutupinya. Permukaan bola harus dijaga agar tetap licin, bila terjadi lubang-lubang karena terjadinya percikan api haruslah dilicinkan kembali dengan cara dipolis. Kawat tegangan tinggi yang dipakai sebagai penghubung harus dipasang sehingga tidak akan mempengaruhi medan listrik yang ada. Tahanan peredam dipasang seri dengan kawat ini dengan jarak minimum $2D$ dari bola diukur dari titik dimana terjadi percikan. Di mana D adalah diameter dari elektroda bola. Nilai dari tahanan seri tergantung pada jenis tegangan yang dipakai. Sebagai contoh, bila tegangan penguji adalah tegangan searah atau tegangan bolak-balik maka harga tahanan yang dipakai antara 100 K Ohm s/d 1000 K Ohm . Akan tetapi bila tegangan penguji adalah tegangan impulse, maka besar tahanan adalah 500 Ohm . Bila digunakan lampu untuk menyinari elektroda maka jarak lampu sampai ke elektroda bola tidak lebih kecil dari harga B pada tabel di bawah ini.

Tabel 5.2

Batas Jarak Antara Elektroda Bola dengan Benda Lain

Diameter Bola (D) dalam cm	Jarak dari (A) (maks)	Jarak dari (A) (min)	Jarak dari (B) (minimum)
10 s/d 15	8D	6D	12S
25	7D	5D	10S
50	6D	4D	8S
100	5D	3.5D	7S
150	4D	4D	6S
200	4D	3D	6S

S = jarak antara elektroda bola

D = diameter dari elektroda bola

A = jarak antara titik P dengan bidang tanah

B = jari-jari dalam ruang diameter elektroda yang bebas dari benda atau bangunan lain.

5.6 KETEPATAN NILAI TABEL PERCIKAN DI UDARA

Untuk mengukur tegangan bolak-balik, searah dan impulse petir, sampai jarak sela udara maksimum sebesar 0,5D maka angka di dalam tabel masih dianggap tepat dengan kesalahan sebesar $\pm 3\%$. Untuk sela udara yang lebih dari itu sampai 0,7D angka yang dituliskan ketepatannya dapat diragukan karena itu ditulis didalam kurung. Untuk pengukuran tegangan searah bila digunakan sela bola biasanya mengundang banyak kesalahan. Ketepatan pengukuran mencapai $\pm 5\%$ bilamana jarak sela udara tidak lebih dari 0,4D. Hal ini disebabkan karena pada permukaan bola biasanya terdapat debu atau adanya serat fiber di udara. Tegangan flash-over dapat terjadi walaupun nilainya lebih rendah dari biasanya. Pada pengukuran dengan sela bola, makin tinggi nilai perbandingan dari s/d medan listrik yang terbentuk diantara kedua elektroda tersebut akan mendekati bentuk medan yang tidak rata (homogen), dan dalam waktu yang bersamaan pengaruh dari keadaan di sekitar celah bola akan bertambah dan ini akan menyebabkan tegangan breakdown, nilainya tidak sama seolah-olah terjadi scattering (merupakan titik yang tersebar). Sedangkan besar diameter elektroda bola yang dipakai untuk mengukur amplitudo tegangan kegagalan dapat diperkirakan mempunyai hubungan seperti berikut:

$$D_{(mm)} \geq V \text{ dalam kV}$$

Di sini ditekankan bahwa nilai tegangan yang dihasilkan pada daftar ini dalam dipenuhi bilamana jarak minimum antara celah bola dengan benda lain di sekitarnya harus dipenuhi.

5.7 PENGARUH DARI UDARA DISEKITARNYA

Nilai tegangan yang terdapat di dalam tabel hanya berlaku untuk:

1. Suhu di sekitarnya (ambient temperatur) sebesar 20°C .
2. Tekanan udara di sekitarnya sebesar 1013 mbar atau 760 mm Hg atau Torr.

Tabel 5.3

Standar Internasional
Salah Satu Bola
Disambar Tanah
Tanah

Sphere gap spacing (mm)	Voltage Sphere 6,25	kV Peak diameter (cm)	25
5	17,2	16,8	
10	31,9	31,7	
15	45,5	45,5	
20	58,5	59,0	
25	69,5	72,5	72,5
30	79,5	85,0	86,0
35	(87,5)	97,0	99,0
40	(95,0)	103,0	112,0
45	(101,0)	119	125
50	(107,0)	129	137
55	(112)	138	149
60	(116)	146	161
65		154	173
70		(161)	184
80		(174)	205
90		(185)	226
100		(195)	244
110		(203)	261
120		(212)	275
125		(214)	282
150			(314)
175			(342)
200			(366)
225			(385)
250			(400)

(Sumber: E.Kuffel dan FWS Zaengl)

Catatan: Harga puncak *disruptive voltage* (50% untuk *impulse test*) berlaku bagi: *alternating voltage*, *negative lightning impulse voltage*, *negative switching voltages*, tegangan langsung salah satu polaritas (*polarity*). Kondisi referensi atmosfir: 20°C dan 101,3 kPa (mmbar).

Tabel 5.4

Satuan Suhu = °C
Satuan Tekanan = mm Hg
Satuan Jarak = mm
Sumbang ke Tabel

Sphere gap spacing (mm)	Voltage Sphere 6,25	kV Peak diameter (cm) 12,5	25
5	17,2	16,6	
10	31,9	31,7	31,7
15	45,9	45,5	45,5
20	59	59	59
25	71,0	72,5	72,7
30	82,0	85,5	86
35	(91,5)	98	99
40	(101)	110	112
45	(108)	122	125
50	(115)	134	138
55	(122)	145	151
60	(127)	155	163
65		(164)	175
70		(173)	187
80		(189)	211
90		(203)	233
100		(215)	254
110		(229)	273
120		(234)	291
125		(239)	299
150		(337)	

(Sumber: E.Kuffel dan FWS Zaengl)

Catatan: Harga Puncak *disruptive discharge voltage* (50% values) berlaku bagi: *positive lighting impulse*, *positive switching impulse*. Kondisi referensi atmosfir: 20°C dan 101,3 kPa (Torr)

Bila ternyata besarnya tekanan udara lebih besar atau lebih kecil dari nilai yang tertera dalam daftar standar ini maka harus diadakan koreksi. Bilamana kolom barometer = H mm Hg dan suhu udara setempat = t°C, maka tekanan atmosfer menjadi:

$$\frac{10133}{760} \cdot (1 - 1,7 \times 10^{-4} \cdot t) \text{ milibar} \quad (5-1)$$

KOREKSI KARENA PERBEDAAN KERAPATAN UDARA

Tegangan percikan (*Flash-Over*) yang tertulis pada tabel menyebutkan bahwa angka ini berlaku pada kondisi tertentu, yaitu pada suhu t = 20°C dan p = 760 mm Hg atau = 1013 mmbar. Bila dalam suatu pengujian keadaan udara sekelilingnya berbeda kondisinya, maka nilai-nilai tersebut harus dikoreksi. Apabila angka koreksi adalah (k1) maka tegangan yang sebenarnya adalah:

$$V_s = k_1 \cdot V_t$$

dimana :

V_s = tegangan yang sebenarnya

V_t = tegangan dari tabel

k = faktor koreksi

Faktor koreksi ini ada hubungannya dengan faktor kerapatan udara (d). Sedangkan faktor (d) berasal dari :

$$d = \frac{b}{1013} \cdot \frac{273 + 20^\circ}{273 + 1} = 0,289 \frac{b}{273 + 1} \quad (5-3)$$

dimana:

b = tekanan udara (dalam mbar)

t = suhu udara setempat $^\circ\text{C}$

273 = derajat dari Kelvin

Tabel 5.5

Hubungan Antara
Faktor Koreksi (k_1)
Dengan Kerapatan
(d)

Kerapatan Udara Relatif (d)	Faktor Koreksi (k_1)
0,70	0,72
0,75	0,77
0,80	0,82
0,85	0,86
0,90	0,91
0,95	0,95
1,00	1,00
1,05	1,00

Catatan: Tekanan sebesar 101,3 kPa sesuai dengan tinggi kolom barometer air raksa sebesar 760 mm pada 0°C , sama dengan mbar.

FAKTOR KOREKSI UNTUK PERUBAHAN KELEMBABAN UDARA (HUMIDITY)

Menurut ketentuan standar I.E.C terdapat faktor koreksi bilamana kelembaban berubah dan faktor ini dinyatakan dengan:

$$k_n = (k)^w \quad (5-4)$$

dimana:

k_n = nilai faktor koreksi karena kelembaban berubah.

k = suatu konstanta yang menunjukkan hubungan antara faktor koreksi dan kelembaban, dan ia tergantung dari jenis tegangan yang dipakai. Nilainya kira-kira sama seperti fungsi nisbah dari kelembaban mutlak terhadap kerapatan relatif udara.

Nilai dari w pada umumnya adalah 1,0 yaitu hanya elektroda yang menghasilkan medan listrik yang merata. Untuk medan listrik yang tidak merata seperti pada elektroda batang nilai $w = 8,0$, bila alat ini diuji dengan tegangan impulse. Jadi, pada umumnya $w = 1,0$ dan untuk mudahnya faktor kelembaban jarang sekali diperhitungkan. Nilai dari (k) = 1,0 hanya bila kelembaban udara normal artinya udara mengandung uap air sebesar 11 gram per meter kubik.

Kesimpulan:

Pengukuran dari sela dua buah bola sangat tergantung pada beberapa hal, oleh karena itu tegangan percikan juga dipengaruhi oleh hal-hal seperti berikut :

1. Tergantung pada keadaan udara di sekitarnya (tekanan, suhu, kerapatan) dan kelembaban.
2. Jarak bola dengan bangunan/benda lain yang terhubung dengan tanah.
3. Penyinaran (radiasi) dari sinar ular - violet dan kosmis.
4. Polaritas tegangan (untuk tegangan A, S dan Impulse) dan waktu yang diperlukan (waktu yang diperlukan/waktu kenaikan gelombang tegangan).

5.8 PEMAKAIAN PEMBAGI TEGANGAN SEBAGAI SARANA PENGUKURAN TEGANGAN TINGGI



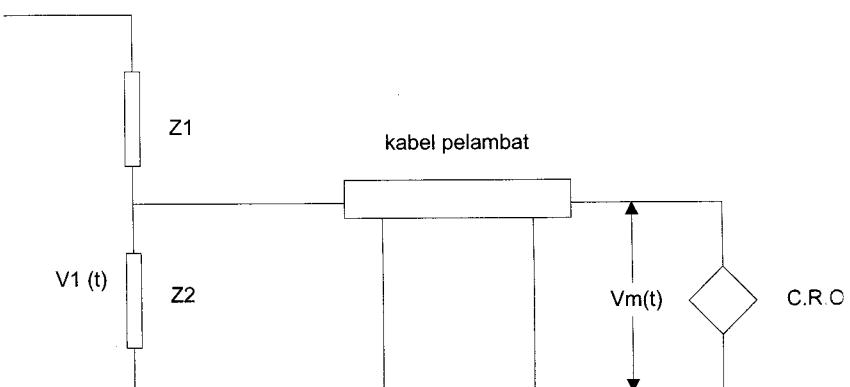
Untuk mengukur tegangan bolak-balik, tegangan searah dan tegangan impulse yang tinggi diperlukan pembagi tegangan. Alat ini dipakai untuk menurunkan tegangan yang tinggi menjadi tegangan yang rendah, sehingga dapat disambungkan ke dalam meter atau CRO. Nilai tegangan ini cukup besar sehingga tidak akan membahayakan alat ukur itu sendiri atau si pemakai. Berdasarkan elemen-elemen yang dipakai, pembagi tegangan ini dapat dibedakan seperti berikut :

- 1) Pembagi tegangan resistif, berisi elemen tahanan yang tidak induktif.
- 2) Pembagi tegangan kapasitif, berisi elemen kapasitor.
- 3) Pembagi tegangan campuran antara tahanan dan kapasitor.

Pembagi tegangan untuk pengukuran tegangan impulse, tegangan berfrekuensi tinggi atau tegangan yang berubah dengan cepat biasanya dipakai pembagi tegangan yang resistif, kapasitif atau campurannya. Bagian tegangan rendah, biasa disambung dengan osiloskop atau alat pengukur tegangan puncak dengan melalui kabel Coaxial yang dinamakan kabel penghambat gelombang (*delay cable*) seperti terlihat di bawah ini.

Gambar 5.1

Pembagi Tegangan dengan Kabel Pelambat



Bergantung pada jenis pembagi tegangan maka Z_1 dan Z_2 dapat berupa tahanan, kapasitor atau campuran R-C, karena setiap elemen ini, bila diterapkan pada tegangan tinggi selalu terdapat pengaruh tahanan dan kapasitansi. Selain itu tahanan yang dipakai harus mempunyai induktansi yang kecil. Pada kapasitor selalu terdapat kebocoran ke tanah, pada terminalnya dan juga kapasitansi antara terminalnya. Oleh karena itu bila tegangan yang perubahannya sangat cepat diterapkan pada terminal suatu pembagi tegangan maka bentuk gelombang yang terdapat pada Z_2 bentuknya akan sedikit berubah. Kabel penghambat dapat menghasilkan perubahan bentuk gelombang. Oleh karena itu elemen-elemen tersebut dapat menjadi sumber distorsi atau kesalahan dari pengukuran.

Sumber kesalahan pengukuran adalah sebagai berikut :

- 1). Adanya induktansi yang tinggal pada setiap elemen
- 2). Kapasitas kebocoran
 - a). Antara elemen
 - b). Dari bagian elemen dengan tanah
 - c). Dari saluran tegangan tinggi dengan elemen
- 3). Kesalahan impedansi karena :
 - a). Kawat sambungan antara pembagi dengan T.O
 - b). Kawat sambungan yang mengalirkan arus yang kembali melalui tanah

5.9 PEMBAGI TEGANGAN BERISI TAHANAN

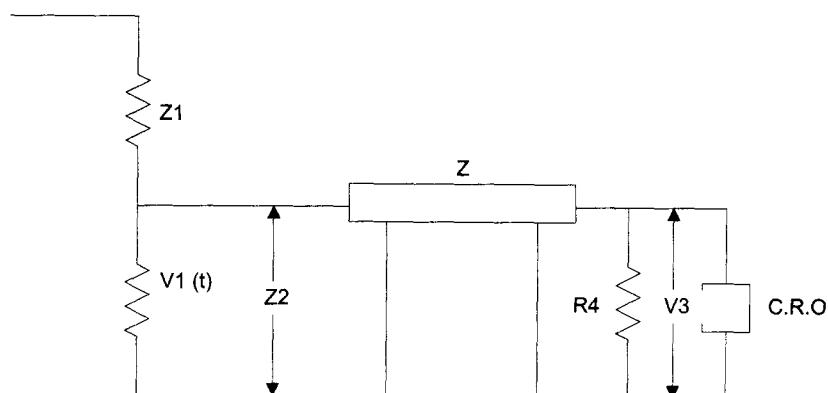
Diketahui:

V = tegangan yang diterapkan pada pembagi tegangan

V_2 = tegangan yang masuk ke C.R.O atau meter tegangan maka

Gambar 5.2

Pembagi tegangan dengan tahanan R



$$V_2 = \left[\frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \right] \cdot V \quad (5-5)$$

Bila \bar{Z}_1 dan \bar{Z}_2 adalah tahanan murni maka $\bar{Z}_1 = R_1$ dan $\bar{Z}_2 = R_2$ jadi :

$$V_2 = \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V \quad (5-6)$$

Bilamana \bar{Z}_1 dan \bar{Z}_2 adalah kapasitor murni maka :

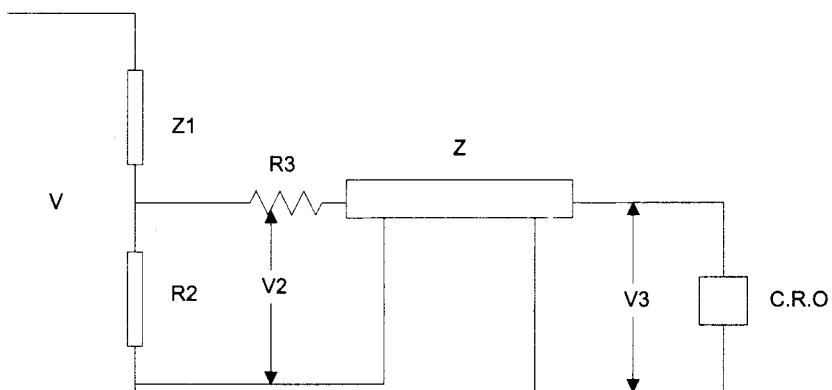
$$V_2 = \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right] \cdot V \quad (5-7)$$

PEMBAGI TEGANGAN YANG BERISIKAN TAHANAN MURNI

Tahanan seri (untuk proteksi) Z = delay cable dengan nilai sebesar impedansi surja

Gambar 5.3

Pembagi Tegangan dengan Tahanan Murni



Perbandingan dari Pembagi Tegangan $m = \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right]$ (5-8)

Bilamana pengukuran menghasilkan nilai yang tepat maka nilai Z harus seimbang (matching) dengan tahanan yang terletak di depannya sehingga:

$$Z = R_3 \left[\frac{R_2 R_1}{R_1 + R_2} \right] \cdot V \quad (5-9)$$

Biasanya nilai $R_1 > R_2$ maka secara pendekatan :

$$Z = R_3 + \frac{R_2}{1 + R_2/R_1}, Z = (R_3 + R_2) \quad (5-10)$$

Bila impedansi pada bagian pengukuran (alat ukur dan kabel) adalah Z_1 maka

$$Z_1 = \frac{R_2(Z + R_3)}{Z + R_3 + R_2} \quad (5-11)$$

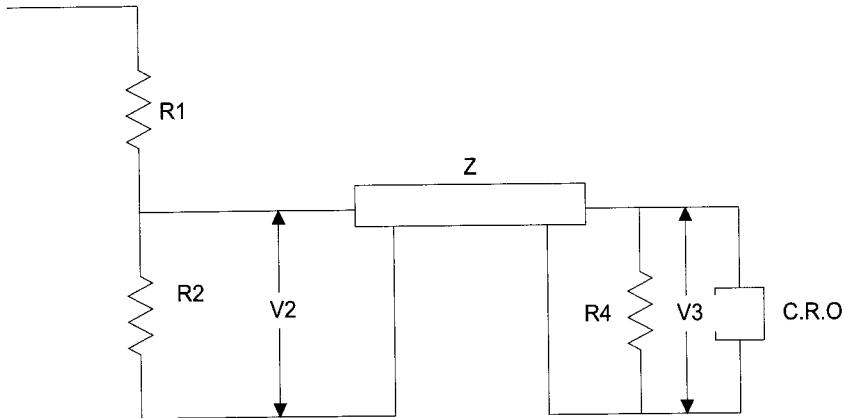
$$\text{karena } Z \approx R_3 + R_2 \text{ maka } Z_1 = \frac{R_2(Z + R_3)}{Z + Z} = \frac{R_2(Z + R_3)}{2Z} \quad (5-12)$$

$$\text{Bila } Z_1 + R_1 \approx R_1 \text{ maka } V_3 \approx \left(\frac{R_2}{R_1} \right) V \quad (5-13)$$

Bila pembagi tegangan ini disambung dengan kabel pelambat gelombang (*delay cable*) dan juga tahanan R_4 paralel dengan C.R.O seperti terlihat dibawah ini,

Gambar 5.3

Pembagi Tegangan
dengan Impedansi Z



$$\text{Dengan demikian } V_2 = \left[\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot V \right]. \text{ Jadi, } V_2 = \left[\frac{R_2(Z + R_2)}{2Z(R_1 + Z_1)} \cdot V \right]$$

Tegangan V_2 akan merambat ke CRO melalui *delay cable*.

Bila tegangan pada CRO adalah V_2 , maka :

$$V_3 = \left[\frac{Z}{Z + R_3} \right]$$

$$\text{Jadi, } V_3 = \left[\frac{Z}{Z + R_3} \right] \left[\frac{R_2(Z + R_3)}{2Z(R_1 + Z_1)} \cdot V \right]$$

$$V_3 = \left[\frac{R_2}{2(Z_1 + R_1)} \right] V$$

$$V_3 = 1/2 \left[\frac{R_2}{(Z_1 + R_1)} \right] V \quad (5-14)$$

Tegangan ini terdapat pada pelat elektroda tabung CRO. Karena kedua paket ini merupakan ujung yang terbuka maka terjadi refleksi gelombang dan tegangan V_3 menjadi dua kali lebih besar, sehingga:

$$V_3 = 1/2 \left[\frac{R_2}{(Z_1 + R_1)} \right] V \quad (5-15)$$

Disini terlihat bahwa gelombang yang dipantulkan akan diserap oleh pembagi tegangan. Bilamana $Z_1 + R_1 \approx R_1$, maka:

$$V_3 = \left[\frac{R_2}{R_1} \right] V \quad (5-16)$$

Bila $m = \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right]$ maka syarat supaya terjadi matching (keseuaian)

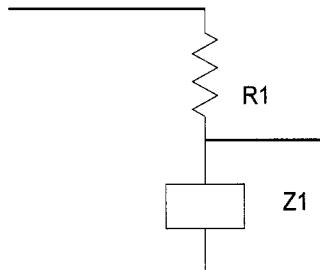
$$R_4 = \left[\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right] \quad (5-17)$$

Biasanya $R_1 \gg R_2$

$$\longrightarrow Z + \left[\frac{R_2}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \right]$$

Jadi $R_4 = (Z + R_2)$, sedangkan $V_2 = \left[\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right] V$. Bilamana Impedansi pengganti dari rangkaian V_2 adalah Z_1 maka :

Gambar 5.4
Rangkaian Impedansi Pengganti



Sedangkan $Z_1 = \frac{(Z + R_4)R_2}{Z + R_4 + R_2}$ (5-18)

Jadi Tegangan $Z_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + R_1}$ (5-19)

Tegangan ini merambat ke CRO, sehingga tegangan pada CRO :

$$V_3 = \left[\frac{R_4}{Z + R_4} \right] \cdot V_2$$

Jadi, $V_3 = \left[\frac{R_4}{Z + R_4} \right] \left[\frac{R_1}{Z_1 + R_1} \right] V$ (5-21)

Bila nilai Z dimasukkan ke dalam persamaan di atas dan bila nilai $Z = R_4$ maka akhirnya terdapat tegangan pada C.R.O = V_3 , yaitu:

$$V_3 = \left[\frac{ZR_2}{2Z(R_2 + R_1) + R_1R_2} \right] V \quad (5-21)$$

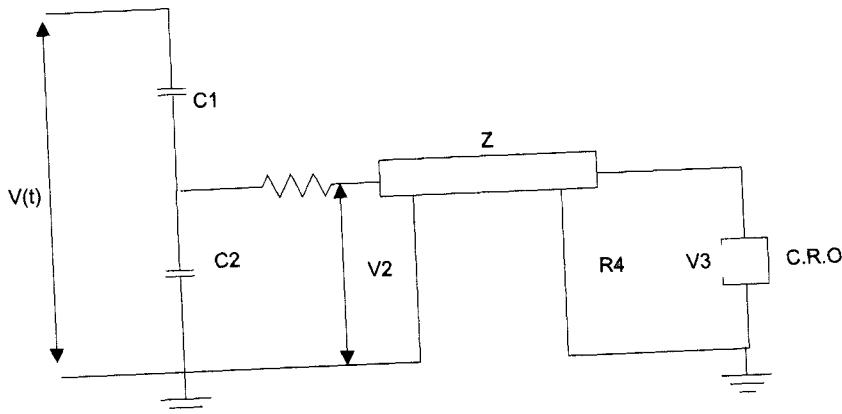
5.10 PEMBAGI TEGANGAN BERISI KAPASITOR



Rangkaian yang dipakai adalah seperti berikut :

Gambar 5.5

Pembagi tegangan dengan kapasitor



Pembagi tegangan ini baik untuk sistem tegangan yang sangat tinggi. Rasio hasil bagi tegangan ini adalah:

$$\frac{V_2(t)}{V(t)} = m = \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_k} \right] \quad (5-22)$$

C_k = kapasitansi kabel pelambat

Bila C_k dianggap kecil dibandingkan dengan C_1 dan C_2 maka ia boleh diabaikan. Jadi bila C_k diabaikan maka nilai m menjadi:

$$m = \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right] \quad (5-23)$$

Jadi tegangan pada kabel penghambat adalah sama dengan :

$$V = \left[\frac{C_1}{2(C_1 + C_2)} \right] \text{ (gelombang yang dipantulkan)}$$

Akibat terjadinya pantulan gelombang pada pelat C.R.O menyebabkan nilai tegangan nya berganda. Jadi tegangan pada pelat C.R.O menjadi:

$$V_3^+ = Z \left[\frac{C_1}{Z(C_1 + C_2)} \right] V \quad (5-24)$$

Tegangan pada pelat CRO:

$$V_3^+ = \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right] V \quad (5-25)$$

Setelah $t = \infty$ maka sistem ini tampak seperti mempunyai kapasitor dan tegangan pada C_2 menjadi stabil. Oleh karena itu tegangan paling tinggi yang terdapat pada pelat CRO menjadi:

$$V_3^+ = \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_k} \right] V \quad (5-26)$$

Hal ini disebabkan karena adanya kabel pelambat. Karena adanya kabel pelambat maka tegangan berubah dan dengan demikian sudut tegangan menjadi:

$$= V_2 - V_3$$

$$= \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) V - \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_k} \right) V$$

$$V_2 - V_3 = \frac{C_1 C_k}{(C_1 + C_2)(C_1 + C_2 + C_k)} V \quad (5-27)$$

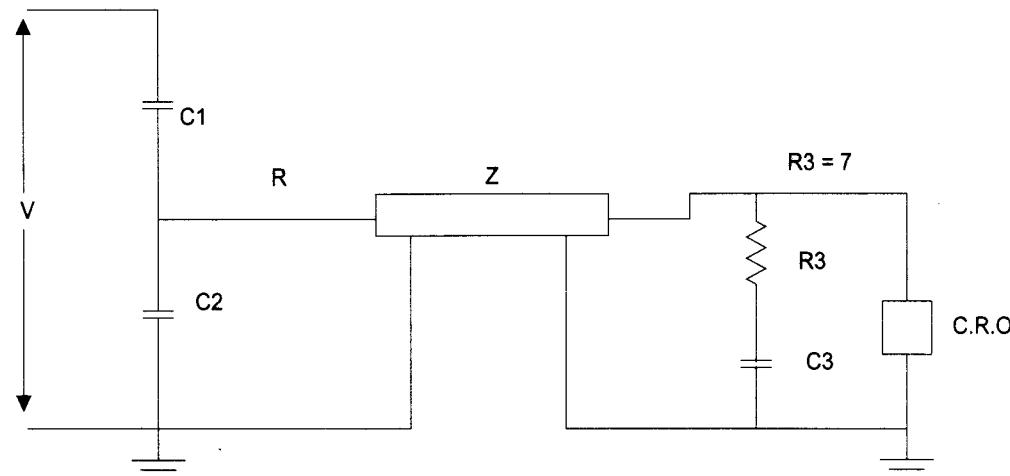
Bilamana $C_2 \gg C_1 \gg C_k$ maka ini akan menyebabkan suatu kesalahan (ketidaktelitian), bila C_k tidak diabaikan, jadi:

$$V_2 - V_3 \approx \frac{C_1 C_k}{C_2^2} \quad (5-28)$$

Ketidaktelitian atau kesalahan ini dapat dikurangi dengan membagi kapasitansi kapasitor tegangan rendah dari pembagi tegangan diberikan kepada sebagian CRO dan disambung seri dengan tahanan yang nilainya sama dengan impedansi karakteristik (surge impedance) kabel pelambat. Ini dinamakan susunan kapasitor terbagi.

Gambar 5.6

Pembagian Kapasitansi Kabel Pelambat



Syarat pembagian kapasitor adalah :

$$C_1 + C_2 = C_3 + C_k \quad (5-29)$$

Dengan syarat permulaan $t = 0+$ sama dengan syarat akhir t sama dengan tak terhingga.

Bila $\frac{C_k}{C_1 + C_2} = 0,10$, maka $V_2 - V_3 = 0,15$ Volt , untuk susunan pertama.

Bila $\frac{C_k}{C_1 + C_2 + C_k} = 0,10$, maka $V_2 - V_3 = 0,15$ Volt, untuk susunan rangkaian terakhir

Pembagi tegangan untuk pencatatan tegangan transient yang tinggi dapat berisi tahanan, kapasitor atau campuran. Yang sangat penting ialah bahwa bentuk gelombang sesuai dengan aslinya, hanya saja bentuk gelombang yang diproduksi (dihasilkan) sekarang bentuknya lebih kecil dari aslinya. Sumber utama dari kesalahan yang terdapat pada semua pembagi tegangan adalah:

1. Induktansi yang tinggal dari elemen tahanan maupun kapasitor (elemen kapasitansi).
2. Kapasitansi bocor yang terdapat pada setiap bagian dari pembagi dengan:
 - a. Kapasitansi dengan tanah,
 - b. Kapasitansi dengan bagian yang bertegangan, dan
 - c. Kapasitansi dengan bagian lain dari kapasitor atau antara bagian dari pembagi tegangan.
3. Penyusutan impedansi pada bagian sambungan kabel antara pembagi tegangan dengan obyek uji.
4. Penyusutan impedansi pada kabel tanah dari pembagi tegangan yang disebabkan oleh arus yang mengalir pada kabel itu.
5. Oscilasi terdapat pada pembagi tegangan dan rangkaian yang disebabkan karena induktansi kabel dan adanya tegangan tinggi antara rangkaian dan terminal.

Bentuk sederhana dari pembagi tegangan adalah berisi tahanan, yang sering kali dipakai untuk merekam bentuk impulse standar. Untuk merekam tegangan transient yang lambat atau cepat, pembagi tegangan yang berisi kapasitor juga suatu yang ideal. Pembagi tegangan yang berisi campuran tahanan dan kapasitor berguna untuk merekam transient lambat yang dilakukan oleh bagian elemen tahanan dan bagian kapasitor dipakai untuk mengukur transient yang cepat.

5.II PENGUKURAN/ALAT UKUR TEGANGAN TINGGI



Cara pengukurannya adalah dengan menggunakan:

1. Sela dua buah elektroda berbentuk bola.
2. Dengan menggunakan Peak Voltmeter untuk mengukur tegangan puncak.
3. Menggunakan Electrostatic Voltmeter untuk mengukur tegangan Vrms.
4. Mengukur arus impulse/transient dengan alat khusus.

5.12 PENGUKURAN TEGANGAN PUNCAK



Meter tegangan puncak ini dapat dipakai untuk mengukur:

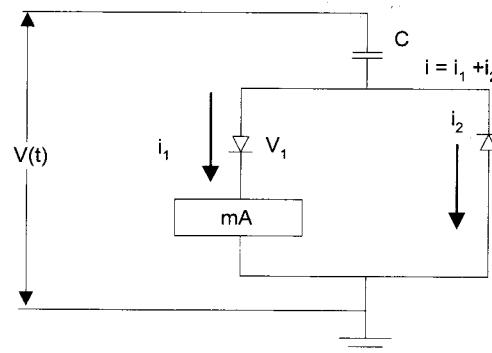
- tegangan bolak-balik
- tegangan searah dan,
- tegangan impulse.

A) TEGANGAN BOLAK-BALIK

Dapat diukur dengan meter tegangan puncak, cara yang dianjurkan oleh Fortesque adalah seperti berikut: digunakan seri kapasitor dan dua dioda, dimana untuk mengukur tegangan digunakan meter miliamper.

Gambar 5.7

Meter Tegangan Puncak



Arus pemuatan yang mengalir bila tegangan $V(t)$ diterapkan, mengalir melewati kapasitor C (kapasitor tegangan tinggi). Kemudian dibagi dua melewati penyearah yang "anti paralel" V_1 dan V_2 menuju ketanah. Nilai rata-rata dari $i_1 \rightarrow I_1$ diukur dengan meter milimeter. Arus ini sebanding dengan nilai puncak dari tegangan tinggi. Bila searah maka pada waktu pemuatan dari V_1 arus i mengalir:

$$\begin{aligned} i_1 &= i = C \frac{dv}{dt} \text{ untuk } t = 0 \longrightarrow T/2 \\ T_1 &= 1/T \int_0^f i_1 dt = 1/T \int_{V(0)}^{V(T/2)} C dv = [V(T/2) - V(0)] \end{aligned} \quad (5-30)$$

Bila tegangannya simetris dengan garis nol maka:

$$-V_o + V(T/Z) = 2V \text{ dan } T + 1/f$$

$$V(T/Z) - V_o = 2\hat{V} \text{ dan } T + 1/f$$

$$V(T/Z) - V_o = 2V \quad \hat{V} = I_1 \frac{1}{2fc} \quad (5-31)$$

Bilamana rangkaian adalah penyearah gelombang penuh (GRAETH) maka nilai dari tegangan puncak adalah :

$$V = \bar{I}_1 \frac{1}{4fC} \quad (5-32)$$

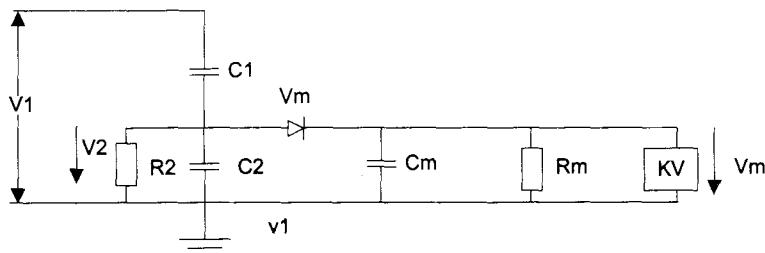
Bentuk gelombang tegangan tidak perlu berbentuk sinus, hanya saja bentuk gelombang tinggi ini jangan sampai mempunyai dua buah puncak pada saat $\frac{1}{2}$ cycle. Pengukur tegangan bolak-balik yang simetris menggunakan cara ini dapat menghasilkan hasil yang tepat, kadang-kadang dapat dipakai untuk pengukuran yang presisi. Hanya saja pengukuran menggunakan alat ini harus disertai dengan pengukuran f = frekuensi dan perlu memperhatikan bentuk gelombang.

B) PENGUKURAN TEGANGAN PUNCAK DENGAN PEMBAGI TEGANGAN YANG KAPASITIF

Beberapa rangkaian penyearah telah dimajukan sehingga dapat dipakai untuk mengukur tegangan tinggi puncak dari tegangan bolak-balik dengan menggunakan pembagi tegangan. Bila dibandingkan dengan rangkaian Chubb & Fortesque rangkaian ini banyak kebaikannya, dimana bacaannya tidak tergantung pada f dan nilai lebih dari satu puncak pada waktu $\frac{1}{2}$ cycle dapat dilayani. Rangkaian pengukuran ini adalah seperti berikut ini :

Gambar 5.8

Rangkaian Pengukuran
Tegangan Tinggi Puncak
Kapasitif



Rakaian $\frac{1}{2}$ gelombang diatas ini adalah sederhana dan cukup teliti untuk semua kebutuhan. Disini kapasitor pengukur C_m dimuati sampai nilai puncak $V_2(t)$. Tahanan R_m yang menampung pelepasan muatan dari C_m perlu untuk menyakinkan response bila ada penurunan tegangan dari tegangan yang diterapkan. Penentuan konstanta waktu dari proses pelepasan muatan ditentukan oleh keperluan (keinginan) dari susunan pengukuran ini dimana tahanan dalam dari alat pengukur yang dihubungkan harus pula diperhitungkan. Pada umumnya dipilih $R_m C_m < 1$ sec

Disamping itu konstanta waktu ini harus lebih besar dari $T = 1/f$ dari tegangan bolak-balik yang akan diukur sehingga tengen V_m pada C_m tidak turun dengan banyaknya pada waktu antara saat pemuatan kembali; nilai $V_m(t)$ yang tergantung pada waktu dapat dilihat pada gambar, karena itu nilai dari $R_m C_m \gg i/f$

Tahanan R_2 yang paralel dengan C_2 diperlukan untuk mencegah terjadinya pemuatan pada C_2 oleh arus yang mengalir melalui V_m . Harga dari R_2 dipilih sedemikian rupa. Susut tegangan pada R_2 yang menyebabkan pemuatan arus searah dari C_2 sangatlah kecil nilainya untuk itu haruslah $R_2 \ll R_m$

Dilain hal, perbandingan dari pembagi tegangan yang kapasitif ini sangat sedikit dipengaruhi oleh R_2 , jadi $R_0 \gg 1/wC_2$

Bilamana hal ini dapat dipenuhi maka hubungan antara nilai puncak dari tegangan tinggi dengan tegangan yang ditunjukkan pada V_m adalah :

$$V = \frac{C_1 + C_2}{C_1} V_m \quad (5-33)$$

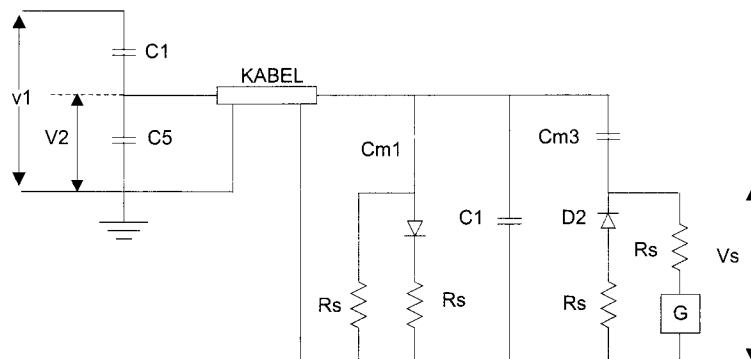
5.13 PERKEMBANGAN RANGKAIAN PENGUKURAN PADA PEAK VOLTMETER



Perusahaan Haevely telah memperbaiki cara kerja Peak Voltmeter agar dapat dipakai untuk mengukur tegangan tinggi bolak-balik. Adapun rangkaianya adalah seperti berikut:

Gambar 5.9

Rangkaian Pengukuran Peak Voltmeter



Pembagi tegangan terdiri dari C_4 dan C_5 unit pengukuran disambung dengan perantara Coaxial cable atau kabel pelambat. C_{M2} dimuat sampai tegangan V dari V_2 . Tegangan ini ditambah dengan tegangan bolak-balik menyebabkan V_s dari Galvanis meter berubah dari $2V_2$ sampai 0.

Galvanometer menunjukkan nilai rata-rata dari tegangan V_s (yang nilainya sama dengan V_2). C_{M2} melepaskan muatannya melalui R_G dan kerugian muatan dikompensasikan lagi pada setiap gelombang negatif untuk setiap $\frac{1}{2}$ cycle. Untuk mendapatkan nilai simetris, D_1 dimuat melewati C_{m1} , kapasitor ini melepaskan muatannya melalui R_B dan kerugian dari muatan dikompensasikan lagi pada setiap gelombang positif pada gelombang $\frac{1}{2}$ cycle. Galvanometer G diatur dengan menggunakan R_G dan R_B dimana R_s bekerja sebagai tahanan pelindung. Perbandingan dari pembagi tegangan dapat diatur secara tetap dengan merubah C_1 . Tegangan pada $C_5 \rightarrow V_2$, yaitu:

$$V_2 = V_1 \frac{C_4}{C_4 + C_5 + C_1} \quad (5-34)$$

Sedangkan tegangan pada rangkaian galvanometer adalah:

$$V_G = V_2 + \hat{V}_2 \text{ (superposisi)}$$

karena,

$$V_1 = \hat{V}_1 \sin wt (\text{tegangan bolak-balik})$$

$$V_G = V_2 + \hat{V}_2 = V_1 \frac{C_4}{C_4 + C_5 + C_1} + \hat{V}_1 \frac{C_4}{C_4 + C_5 + C_1} \sin wt$$

maka:

$$\begin{aligned} V_G &= (V_1 + V_1) \frac{C_1}{C_4 + C_5 + C_1} \\ &= \frac{C_4}{C_4 + C_5 + C_1} (\hat{V}_1)(1 + \sin wt) \end{aligned} \quad (5-35)$$

nilai rata-ratanya:

$$V_{GM} = 1/T \int_0^T \frac{C_4}{C_4 + C_5 + C_1} \hat{V}_1 (1 + \sin wt) dt$$

$$V_{GM} = \hat{V}_1 \frac{C_4}{C_4 + C_5 + C_1}$$

Jadi nilai yang ditunjukkan oleh Galvanometer G adalah nilai yang sebanding dengan nilai puncak dari V_1 .

5.14 RANGKAIAN PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI



Dalam teknik tegangan tinggi dibedakan dua macam pengujian:

1. Pengujian sampai alat itu rusak (bila perlu), yaitu menguji kemampuan alat/bahan sampai dimana ia dapat tahan terhadap adanya tegangan tinggi (*withstand voltage*).
2. Pengujian yang lain dinamakan pengujian tidak merusak (*nondestructive test*). Pengujian ini dipakai untuk mengetahui karakteristik suatu bahan/alat sampai dimana kekuatan atau kemampuan isolasi alat ini berfungsi sebagai isolasi murni yang murni (kerugian sedikit) dan kapan bahan/alat ini menunjukkan perubahan sifat.

Pengujian jenis pertama dilakukan terhadap alat/bahan isolasi, dielektrik yang dipakai pada alat-alat listrik. Karena alat ini kadang-kadang mengalami gangguan ataupun mendapatkan tegangan yang mempunyai sifat berbeda, maka dalam pengujian alat-alat ini pada umumnya ia akan diuji dengan menggunakan tegangan yang sesuai dengan tegangan yang akan dialaminya. Misalnya: suatu transformator distribusi tegangan tinggi. Alat ini dioperasikan dengan menggunakan tegangan tinggi bolak-balik disamping itu kadang-kadang kawat distribusi mengalami gangguan petir atau mengalami tegangan lebih karena surja hubung, maka hal ini patutlah diuji sesuai dengan jenis tegangan yang mungkin terjadi pada saat operasinya. Karena itu untuk pengujian alat-alat listrik diadakan empat macam pengujian yang berdasarkan jenis tegangannya:

1. Pengujian dengan tegangan bolak-balik

2. Pengujian dengan tegangan tinggi searah
3. Pengujian dengan tegangan tinggi impulse petir
4. Pengujian dengan tegangan tinggi surja hubung

Sedangkan untuk alat tertentu misalnya "Lighting Arrester" atau investor diuji dengan arus impulse tinggi.

5.15 RANGKAIAN PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI BOLAK-BALIK



BESARAN YANG DIUKUR

Harga puncak dari tegangan bolak-balik

Harga (R.M.S) (Efektif)

Bilamana bentuk gelombang sinus murni.

Harga R.M.S adalah akar dari nilai rata-rata kuadrat tegangannya untuk waktu satu cycle.

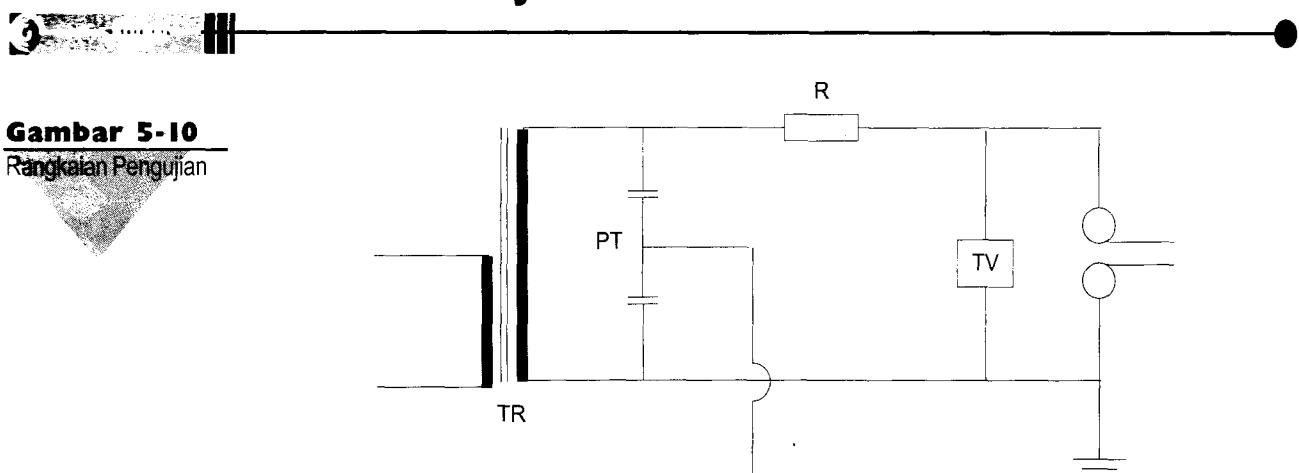
HARGA DARI TEGANGAN UJI

Harga ini ditentukan dari nilai puncak yang dibagi dengan $\sqrt{2}$

SYARAT DARI TEGANGAN UJI

Nilai dari frekuensi tegangan haruslah antara 40 Hz s/d 62 Hz. Untuk frekuensi di luar ini mungkin perlu pengujian yang khusus. Bentuk gelombang harus mendekati bentuk sinus dengan kedua bentuk gelombang $\frac{1}{2}$ cycle nilainya tidak sama. Sehingga perbandingan antara nilai puncak dan nilai R.M.S sama dengan $\sqrt{2}$ dengan $\pm 5\%$. Hasil dari pengujian tegangan tinggi tidak akan terpengaruh oleh penyimpangan bilamana keadaan ini dipenuhi. Kalibrasi sebaiknya dilakukan pada nilai 100% dari nilai tegangan uji, tetapi untuk benda yang terdiri dari bahan non-self restoring insulation dapat dilakukan interpolasi dari nilai yang besarnya tidak boleh kurang dari 80% dari tegangan uji. Ekstrapolasi juga dengan tidak dapat dibenarkan bilamana arus yang mengalir tidak berubah secara linear sebanding perubahan tegangan.

5.16 RANGKAIAN PENGUJIAN



Gambar 5-10

Rangkaian Pengujian

Tegangan pengujian dapat dibaca dari transformator atau kadang-kadang dari rangkaian yang dalam resonansi. Nilai tegangan ini haruslah stabil, praktis tidak terpengaruh oleh adanya perubahan yang disebabkan oleh adanya arus bocor, pelepasan muatan sebagian (P.D) atau pra pelepasan muatan pada objek uji tidak akan mengurangi tegangan. Hal ini dapat mempengaruhi harga tegangan tembus dari objek uji. Hal-hal semacam ini biasanya terjadi bila:

1. Jumlah kapasitas dari obyek uji dan kapasitor yang lain (P.T dan kabel) nilainya tidak kurang dari 1000 pF.
2. Arus steady akan dihasilkan oleh transformator bilamana obyek uji disambung singkat pada tegangan pengujian tidak kurang dari 1 ((satu) R.M.S.).

Kecuali :

- a) Pengujian pada benda yang kecil, misalnya alat yang kecil, minyak isolasi dll.
- b) Untuk pengujian polusi buatan, besar arus hubung singkat tergantung pada nilai dari R_s (tambahan seri) dan X_s pada keadaan steady state.

5.17 PENGUKURAN TEGANGAN

Pengukuran tegangan dapat dilakukan dengan alat pengukur yang sudah diakui IEC. Alat itu adalah pengukur tegangan puncak dan tegangan R.M.S. Termasuk didalamnya semua penyimpangan bilamana tegangan tidak berbentuk sinus murni. Cara lain pengukuran tegangan puncak adalah dengan menggunakan jarak antara celah bola dimana terjadi percikan dengan suatu rangkaian yang berubah (*variable circuit*) yang dikaitkan dengan tegangan. Hubungan ini mungkin terjadi dan juga tergantung pada adanya objek uji dan celah bola dan juga tergantung adanya presipitasi pada waktu dilakukan pengujian basah untuk isolator. Bila rangkaian pengujian sudah terbentuk, maka rangkaian ini tidak boleh diubah selama pengujian, baik pada waktu kalibrasi maupun pada waktu pengujian yang sebenarnya. Hanya perbedaannya, untuk menghindari terjadinya percikan pada celah bola maka pada waktu itu jarak celah bola dibesarkan.

Kesimpulan:

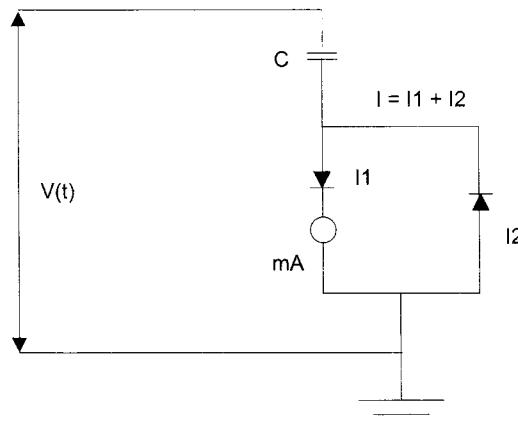
Pengukuran tegangan bolak-balik dapat dilakukan dengan:

1. Pengukuran tegangan tembus dengan mengukur celah dari dua elektroda berbentuk bola (tegangan puncak).
2. Tegangan puncak juga dapat diukur dengan pengukuran menggunakan Volt meter puncak yang disambung pada bagian tegangan rendah dari pembagi tegangan.
3. Pengukuran tegangan V (R.M.S) dengan menggunakan Volt meter elektro-statik.
4. Pengukuran tegangan puncak dengan menggunakan rangkaian Chubb & Fortesque.

Cara pengukuran menurut C & F sebenarnya adalah pengukuran arus bolak-balik yang diubah menjadi arus searah dengan rangkaian seperti berikut:

Gambar 5-11

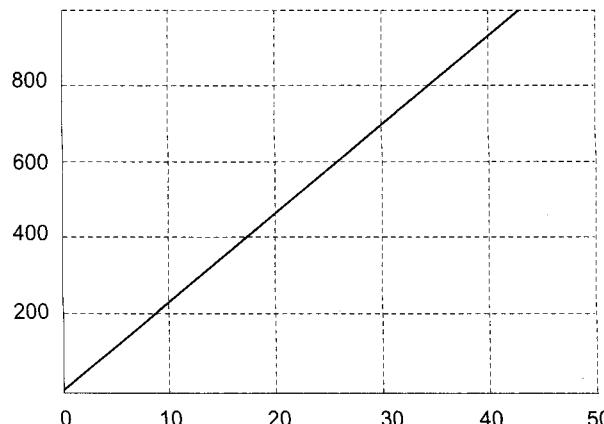
Pengukuran Arus
Searah



Bila $T = 1/f$, maka $V = I_1 \cdot 1/2fc$. Jadi arus yang mengalir pada mA meter sebanding dengan tegangan puncak dari sistem.

Gambar 5-12

Grafik Pengukuran
Tegangan Puncak



Tegangan tembus V_d dari celah bola sebagai fungsi dari jarak celah udara pada bermacam-macam diameter dari bola. Dari sini dapat dilihat bahwa bilamana hendak mengkalibrasi tegangan yang lebih tinggi haruslah menggunakan elektro bola dengan diameter yang lebih besar.

5.18 RANGKAIAN PENGUJIAN DENGAN TEGANGAN TINGGI SEARAH

Definisi atau pengertian yang berkaitan dengan pengujian ini:

- a) *Ripple*

Ripple adalah suatu penyimpangan yang periodik dengan nilai-nilai tegangan searah. Amplitudo dari *ripple* nilainya ditentukan sebesar $\frac{1}{2}$ dari perbedaan nilai tegangan maksimum dan minimum. Faktor *ripple* adalah perbandingan (hasil bagi) dari amplitudo *ripple* dengan nilai rata-rata tegangan. Jadi $dV = \frac{1}{2}(V_{max} - V_{min})$ (Volt). Sedangkan faktor *ripple* :

$$F. = dV/V \cdot 100\% \quad (5-36)$$

- b) Harga Dari Tegangan Penguji

Harga tegangan pengujian adalah nilai rata-rata dari tegangan pengukuran.

- c) Kalibrasi

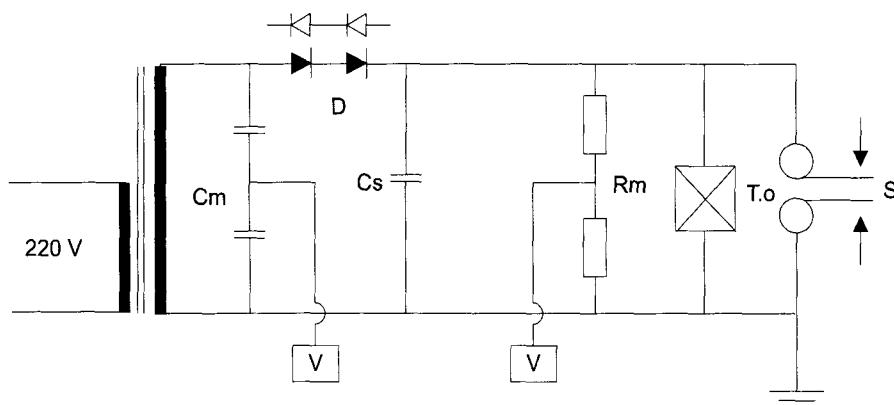
Kalibrasi dianjurkan memakai 100% dari tegangan pengujian (tegangan kehandalan), akan tetapi untuk pengujian pada bahan non-self restoring dapat dilakukan ekstrapolasi. Hal ini dapat dilakukan bila titik permulaannya tidak lebih rendah dari harga 80% dari tegangan pengujian. Ekstrapolasi sangat tidak sesuai bilamana arus yang mengalir pada waktu pengujian tidak berubah secara linear sejalan dengan kenaikan tegangan.

5.19 RANGKAIAN PENGUJIAN

Di bawah ini digambarkan contoh rangkaian pengujian dengan rangkaian penyearah $\frac{1}{2}$ gelombang.

Gambar 5-13

Rangkaian Penyearah
 $\frac{1}{2}$ Gelombang



Keterangan gambar:

- CM = Pembagi tegangan kapasitif.
- CS = Kapasitor untuk gelombang.
- RM = Pembagi tegangan berisi tahanan.
- T.O = Objek uji.
- TR = Transformasi pengujian.
- D = Diode tegangan tinggi.
- s = Celah dari elektroda bola.
- CM dipakai untuk mengatur tegangan bolak-balik.
- RM dipakai untuk mengukur tegangan searah.

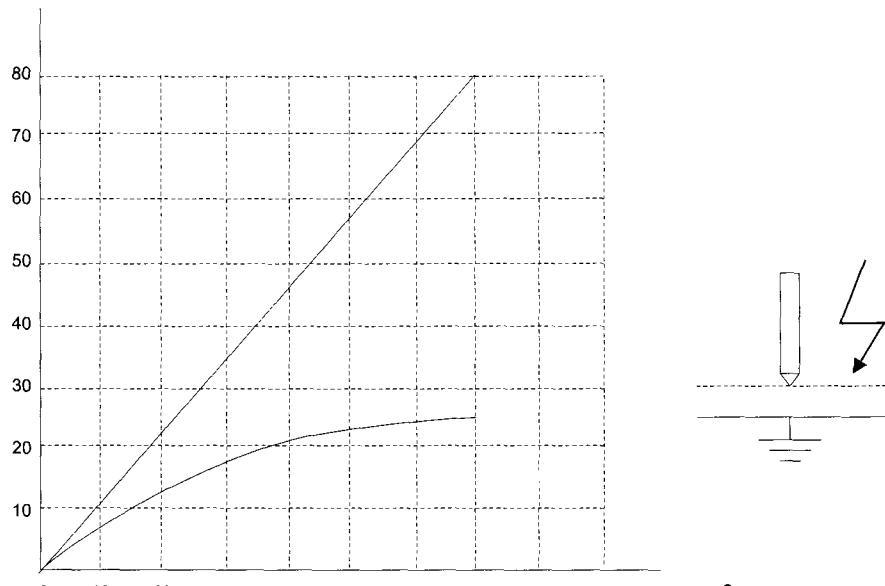
Elektroda bola dipakai sebagai alat untuk kalibrasi dari meter V dan V. Untuk mengubah polaritas maka D dapat diubah letaknya.

5.20 PENGARUH POLARITAS PADA ELEKTRODA

Untuk menyelidiki pengaruh polaritas dapat dipakai elektroda batang dan pelat. Percobaan pertama, elektroda batang disambung dengan kutub (+) dari sumber tegangan searah dan elektroda pelat disambung dengan kutub negatif (-) dan ketanah. Kemudian jarak celah udara diantara kedua elektroda diubah-ubah dari $s = 10$ mm s/d 80 mm. Dengan demikian dapat dilihat hubungan antara besarnya tembus dengan jarak celah udara $9s$. percobaan selanjutnya, polaritas tegangan ditukar sehingga polaritas batang menjadi negatif (-), dan polaritas pelat menjadi positif (+). Kemudian jarak celah elektroda diatur seperti pada percobaan pertama. Di sini ternyata hubungan antara V dan tidak sama seperti pada percobaan pertama. Ternyata nilai tegangan tembus lebih rendah bila dibandingkan dengan percobaan pertama. Pada percobaan pertama, pada waktu batang mempunyai polaritas negatif (-), hubungan antara nilai tegangan dengan celah udara $9s$ merupakan garis lurus (hampir linear) ini dapat diterangkan sebagai berikut:

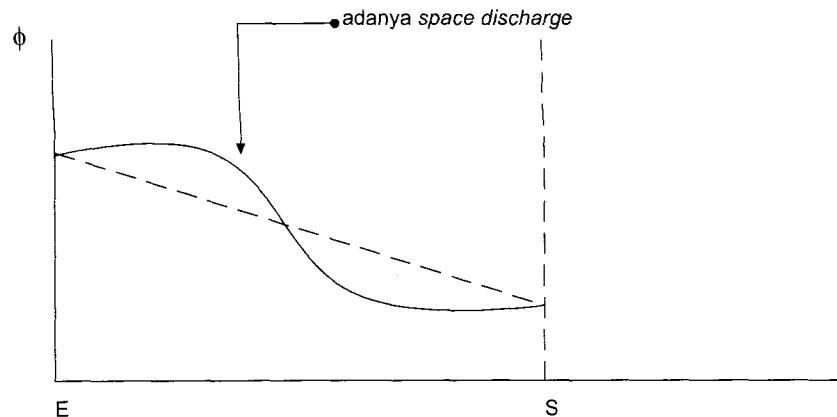
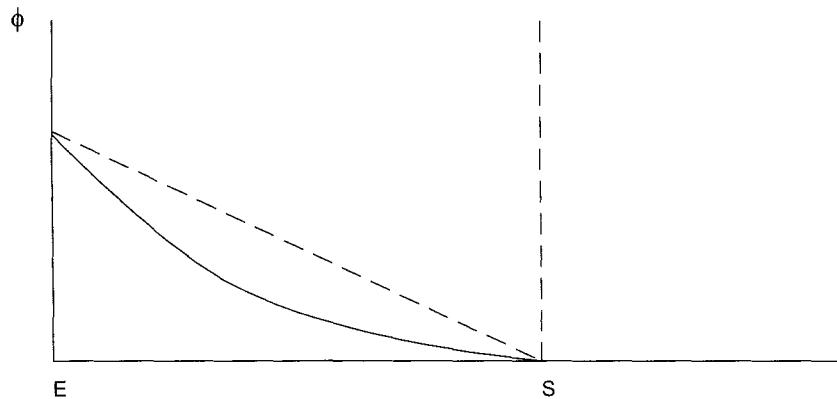
Gambar 5.14

Grafik Pengaruh
Polaritas terhadap
Elektroda



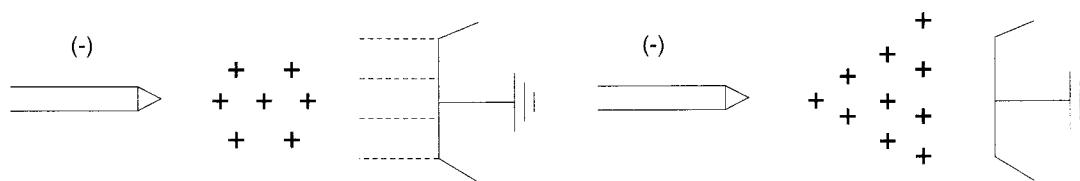
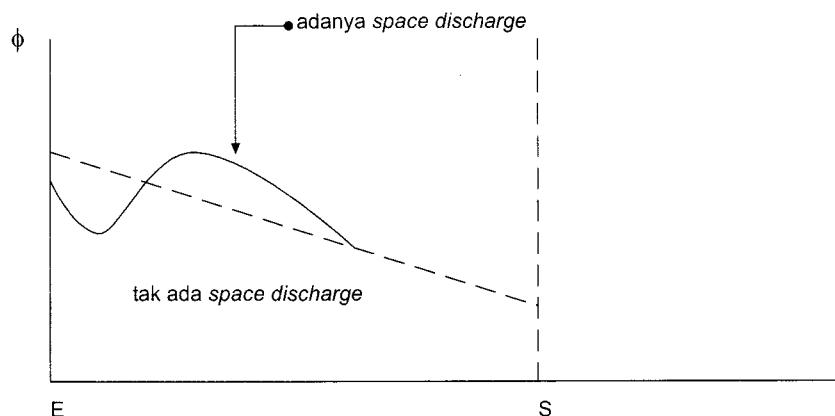
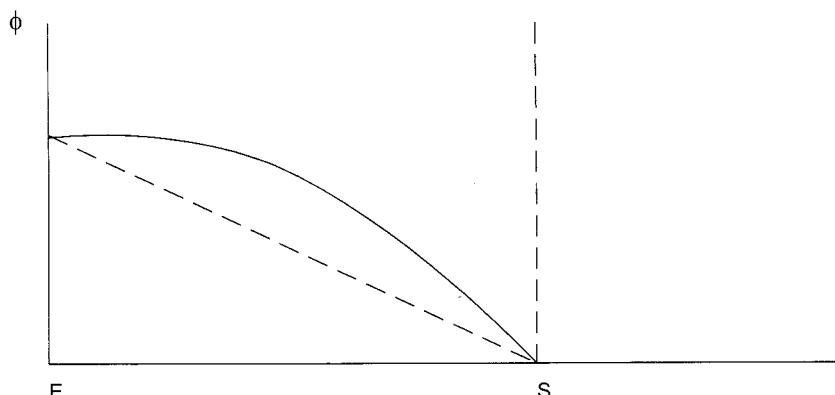
Pengaruh Polaritas terhadap Elektroda

Pada suatu elektroda yang runcing di udara, jika tegangan yang diterapkan pada elektroda itu dinaikkan harganya, maka elektron di udara sekitar elektroda itu mulai melepaskan diri dan mulailah terjadi tabrakan sehingga terjadi ionisasi di dalam udara. Karena mengingat kelincahan dari elektron maka ia dengan cepat meninggalkan daerah yang diionisasi, mereka berkumpul di sekitar noda. Ion yang lambat geraknya membentuk space-charge di depan ujung elektroda yang runcing dan mengubah distribusi tegangan. Bila elektroda yang runcing bermuatan negatif maka elektron akan bergerak ke arah pelat. Ion-ion yang tertinggal menyebabkan adanya medan yang tinggi. Pada daerah ujung elektroda tersebut, sisa daerah medan menunjukkan adanya perbedaan tegangan yang kecil. Hal ini mendorong tumbuhnya kanal pelepasan muatan ke arah pelat. Bila muatan pada ujung elektroda yang runcing adalah positif, maka elektron bergerak menuju elektroda tersebut dan sisa ion menyebabkan pengurangan kekuatan medan listrik dekat dengan ujung elektroda runcing, karena kekuatan medan listrik dekat dengan ujung elektroda runcing. Karena kekuatan medan arahnya menuju elektroda pelat, kekuatan medan kemudian naik, ini merangsang bertambahnya kanal pelepasan muatan.

Gambar 5.15Bentuk Gelombang
Space Discharge

Gambar 5.16

Bentuk Space Discharge pada Elektroda Runcing



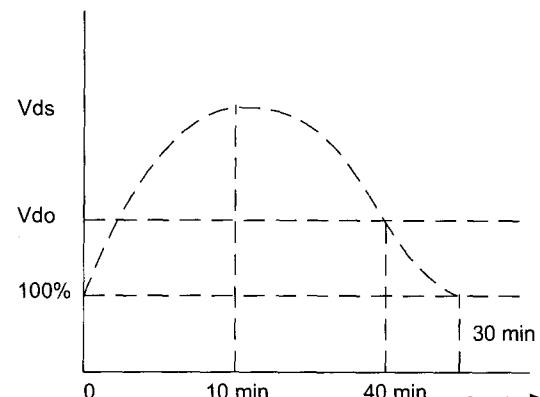
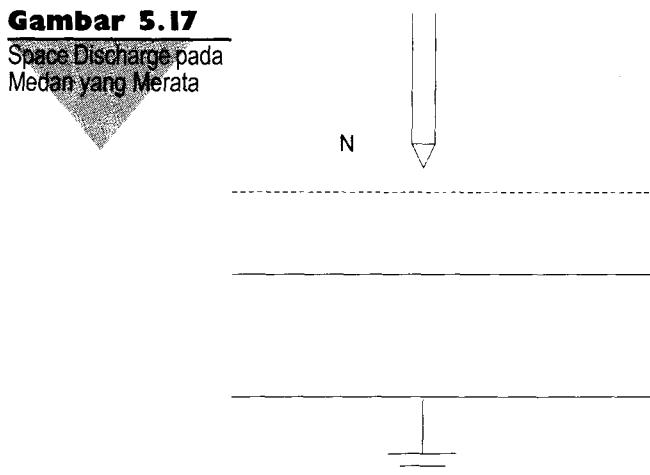
Karena adanya distorsi pada medan listrik maka untuk mencapai *break-down* diperlukan tegangan yang lebih rendah pada elektroda runcing yang bermuatan negatif (-). Untuk membuktikan adanya *space-charge* maka dapat dilakukan percobaan seperti berikut :

Digunakan dua buah elektroda yaitu elektroda ujung jarum dan elektroda pelat. Kedua elektroda ini bila diberi tegangan listrik maka akan menghasilkan medan listrik yang tidak merata. Pada elektroda ini dimana dapat menghasilkan medan listrik yang tidak merata, *space-charge* akan timbul sebelum terjadinya tembus total dan distribusi medan listrik yang terjadi akan mempengaruhi harga dari tegangan tembus. Hal ini dapat dilihat bila diberikan perisai yang dibuat dari bahan isolasi yang tipis dan diletakkan antara kedua elektroda itu sejajar dengan elektroda pelat. Bahan ini berfungsi sebagai penghalang bagi tersebarnya muatan ruangan ini kemana-mana sehingga dapat mengakibatkan (mendorong) perubahan bentuk kekuatan medan listrik. Ini disebabkan karena ion/elektron akan berkumpul pada

permukaan perisai tersebut dan akibatnya terdapat muatan ruang seperti berasal dari elektroda runcing. Karena itu perisai isolasi ini (tergantung pada letaknya pada medan listrik ini) dapat mengubah besarnya tegangan tembus. Bila perisai ini diletakkan pada salah satu elektroda ia tidak akan berpengaruh terhadap tegangan tembus. Pada medan yang rata perisai. Hal ini tidak berpengaruh ini disebabkan pada medan ini tidak menimbulkan *space-charge*. (lihat gambar berikut).

Gambar 5.17

Space Discharge pada
Medan yang Merata



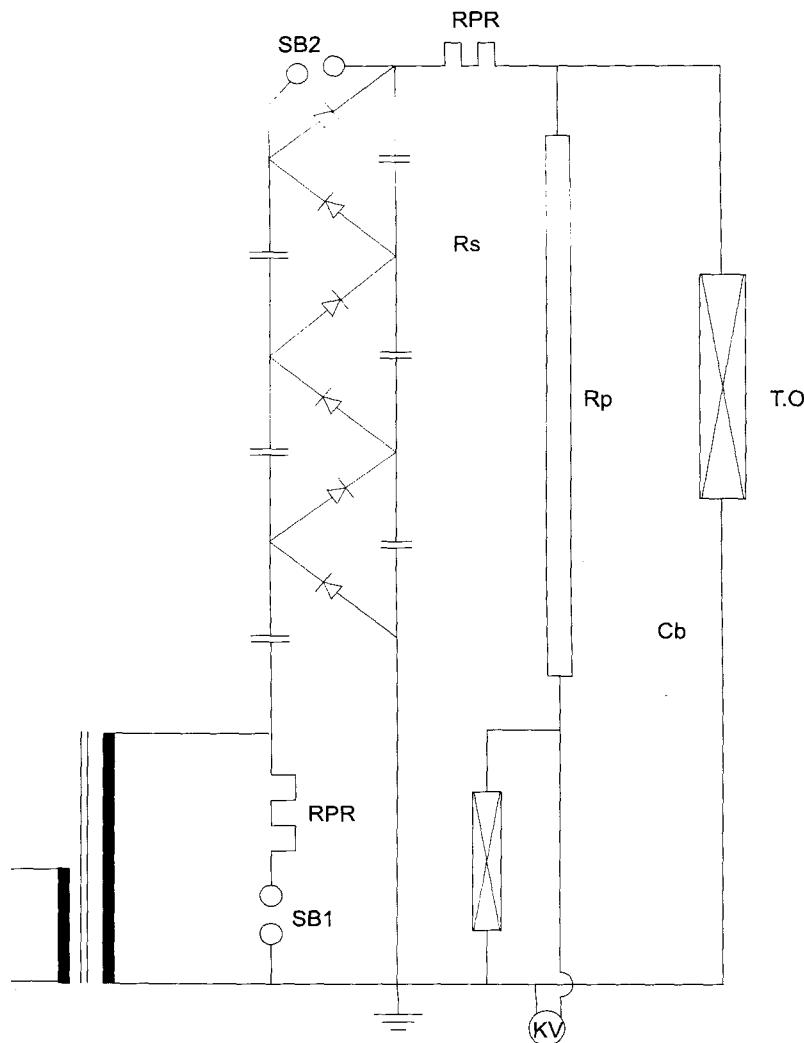
5.2I RANGKAIAN PENGUJIAN TEGANGAN SEARAH BERTINGKAT BANYAK



Alat ini digunakan bila kita ingin menghasilkan tegangan searah lebih tinggi dari tegangan asalnya. Rangkaian yang terkenal adalah rangkaian yang diciptakan oleh Cockcroft Walton yaitu generator Kaskade. Rangkaian ini dapat berupa penyusunan kaskade dari rangkaian penyearah $\frac{1}{2}$ gelombang atau penyusunan kaskade dari rangkaian pengganda Greinacher.

Gambar 5.18

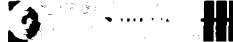
Rangkaian Greinacher



5.22 RANGKAIAN PANGUJIAN DENGAN TEGANGAN TINGGI IMPULSE

Alat-alat yang bertegangan tinggi harus tahan terhadap tegangan yang berasal dari dalam maupun dari luar. Ini disebabkan karena pada waktu operasi dari alat ini, ia akan mengalami hal-hal yang serupa. Untuk mengetahui nilai ketahanan sistem isolasi dari alat tersebut maka alat-alat ini harus diuji dengan tegangan yang bentuknya serupa dengan tegangan yang menyebabkan tegangan lebih tersebut di atas.

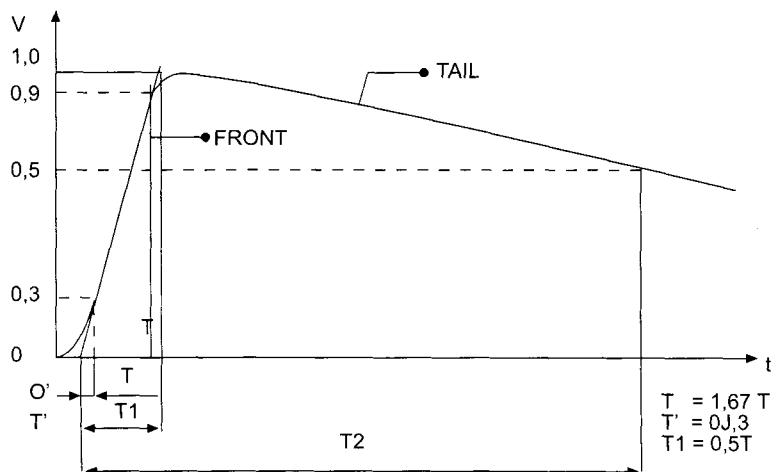
5.23 TEGANGAN PETIR YANG UTUH (IMPULSE PETIR)



Yang dimaksud dengan tegangan impulse utuh adalah tegangan impulse (yang bentuknya menyerupai impulse) yang tidak terganggu atau terpotong karena adanya pelepasan muatan di sepanjang lintasannya. Bentuk Impulse petir adalah seperti berikut ini :

Gambar 5.19

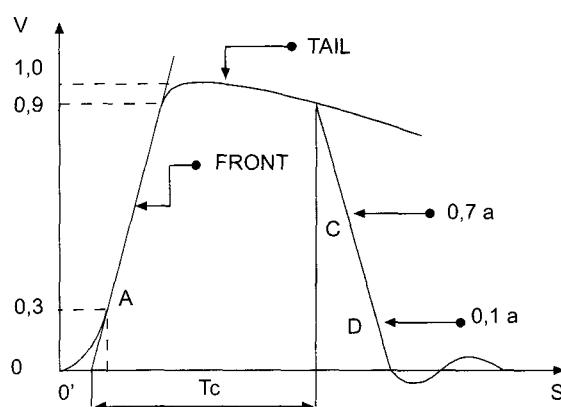
Gelombang Impuls Petir



Tegangan impulse yang terpotong adalah impulse petir yang secara mendadak terpotong karena disebabkan adanya pelepasan muatan yang terjadi. Menyebabkan tegangan jatuh ini terjadi pada gelombang bagian depan atau bagian belakang (ekor) seperti pada gambar berikut

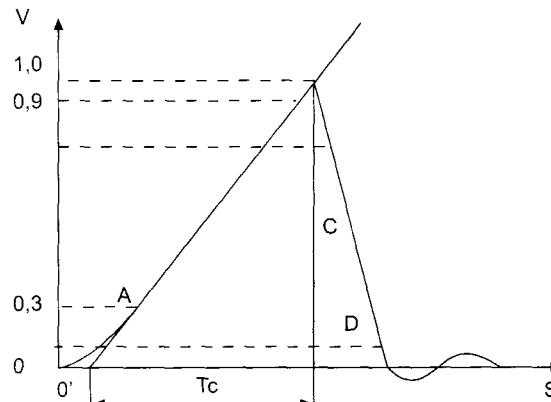
Gambar 5.20

Gelombang Terpotong
Pada Ekor



Gambar 5.21

Gelombang Terpotong
Pada Bagian Depan



Untuk menguji benda dengan tegangan impulse bentuk gelombang harus memenuhi gelombang standar internasional. Gelombang standar yang disetujui adalah gelombang yang utuh yang mempunyai waktu sebesar $1,2 \mu\text{S}$ pada bagian depan gelombang, dan untuk bagian ekor gelombang sampai nilai 50% dari harga puncak gelombang, waktunya harus $50 \mu\text{S}$. Jadi gelombang dapat dituliskan sebagai gelombang dengan $T_1/T_2 = 1,2/50 \text{ mS}$. Karena untuk mencapai nilai tersebut kadang-kadang amat sulit, oleh karena itu masih diberi toleransi sebesar berikut: Untuk nilai puncak gelombang toleransinya $\pm 30\%$. Waktu gelombang depan toleransi $\pm 30\%$. Waktu gelombang ekor mencapai 50% dari harga puncak $\pm 20\%$. Karena kadang-kadang terjadi kelebihan pada puncak (*overshoot*) atau terjadi oskilasi di sekitar gelombang puncak maka toleransi diizinkan asal puncak gelombang oskilasi tidak melebihi 5% dari harga gelombang impulse. Bilamana oskilasi terjadi pada bagian bawah gelombang impulse (dibawah nilai 50% dari gelombang puncak), hal ini masih diizinkan asal puncak gelombang oskilasi tidak melebihi dari 25% dari nilai puncak gelombang impulse.

5.24 GELOMBANG STANDAR DARI IMPULSE YANG TERPOTONG



Yang dipakai sebagai gelombang standar dari impulse petir yang terpotong adalah gelombang standar impulse yang dipotong menggunakan celah udara yang terletak di luar benda yang diuji. Gelombang ini dipotong oleh sela udara tersebut sesudah $2\mu\text{S}$ s/d $5\mu\text{S}$ dari permulaan gelombang dihasilkan. Waktu yang diperlukan untuk turunnya tegangan sampai mencapai tegangan nol tidak dipersoalkan di dalam standar tersebut.

5.25 RANGKAIAN PENGUJIAN TEGANGAN IMPULSE



Rangkaian pengujian tegangan impulse dapat dibagi menjadi beberapa bagian yang disesuaikan dengan fungsinya:

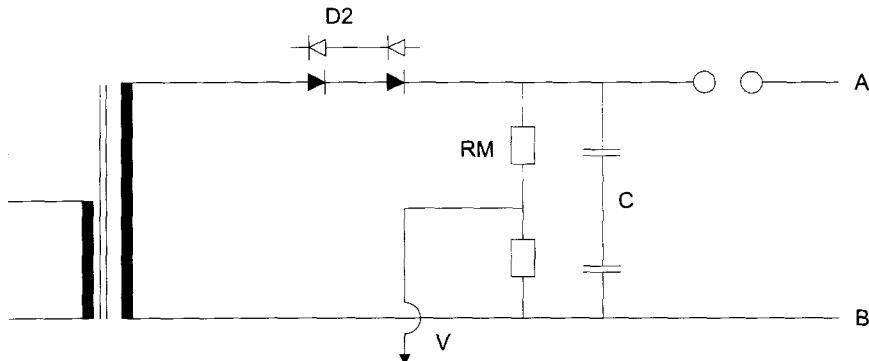
1. Rangkaian pembangkit tegangan impulse
2. Rangkaian pengaturan bentuk gelombang dan pengukuran
3. Rangkaian bahan pengujian

RANGKAIAN PEMBANGKIT TEGANGAN IMPULSE

Rangkaian ini terdiri dari transformator penguji dengan pengaturan tegangan, tegangan pada belitan tegangan rendah dan rangkaian penyearah tegangan tinggi dan pengukuran tegangan searah yang dipakai sebagai tegangan kapasitor C (lihat rangkaian berikut).

Gambar 5.22

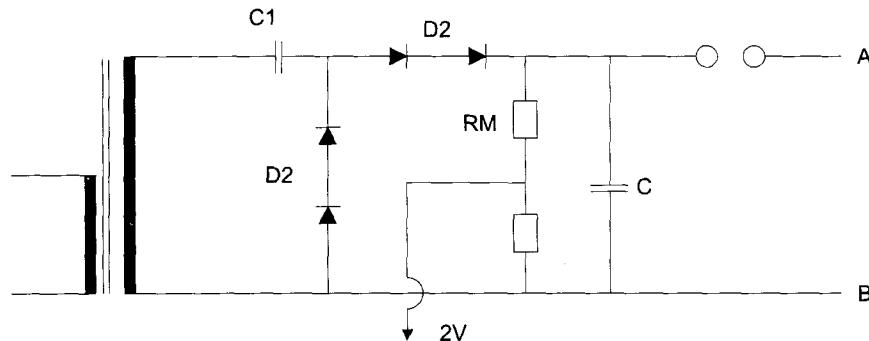
Rangkaian Penyearah
1/2 Gelombang



Bila menggunakan rangkaian *Greinacher Double Circuit*, maka rangkaian menjadi seperti berikut:

Gambar 5.23

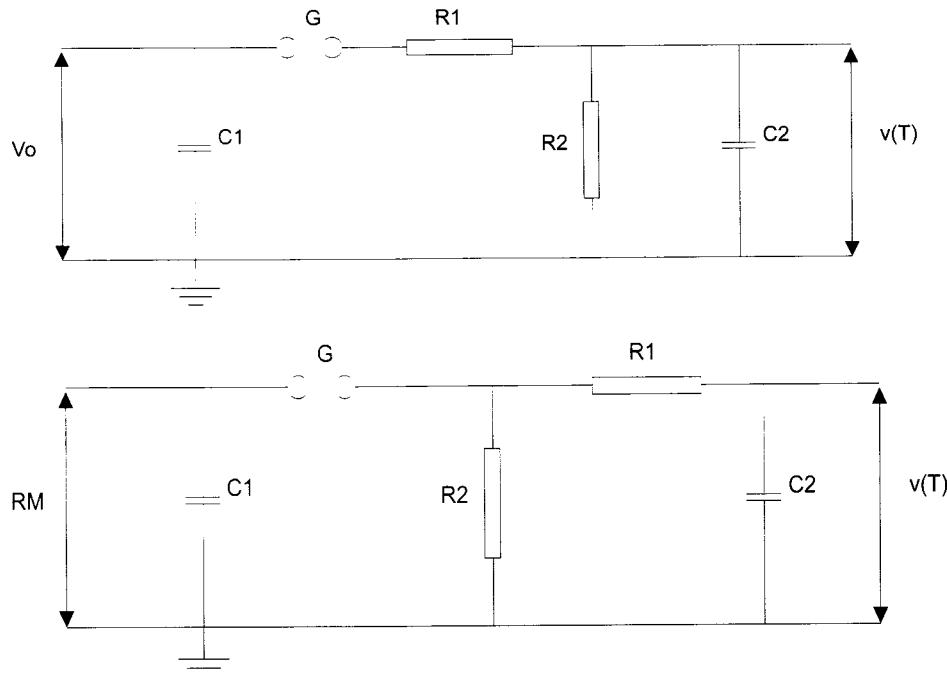
Rangkaian Greinacher
Double Circuit



Rangkaian ini menghasilkan gelombang impulse yang terbentuk dari dua gelombang eksponensial dengan tegangan yang berlipat. Bentuk dari gelombang ini dapat diatur dengan rangkaian pengatur bentuk gelombang dan pengukuran.

RANGKAIAN PEMBENTUK GELOMBANG DAN PENGUKURAN

Bentuk gelombang dapat diatur dengan sebuah rangkaian pengaturan yang terdiri dari tahanan seri. Terdapat dua macam rangkaian pengaturan gelombang yang biasa dipakai, yaitu rangkaian tipe (A) dan tipe (B) seperti berikut:

Gambar 5.24Rangkaian Tipe A
dan Tipe B

5.26 CARA PENGUKURAN TEGANGAN IMPULSE

Pengukuran dilakukan terhadap nilai puncak dari tegangan impulse, dan parameter yang lain seperti waktu, gelombang lebih atau nilai oskilasi yang terjadi pada tegangan pengujian harus diukur dengan menggunakan alat yang sudah diakui/disetujui oleh IEC. Pada kalibrasi pengukuran ini dan juga pengukuran selanjutnya harus dilakukan dengan beban (TO) yang dipasang pada rangkaian tersebut. Bentuk dan semua perubahan bentuk gelombang impulse harus diperiksa terlebih dahulu sebelum pengujian yang sebenarnya dilakukan. Dan ini harus dilakukan untuk setiap benda yang akan diuji.

Catatan: Alat-alat yang disetujui di dalam IEC adalah:

Penggunaan:

- Bagian tegangan tinggi:
 1. Pembagi tegangan tinggi impulse atau *shunt*.
 2. Saluran/rangkaian tegangan tinggi yang menghubungkan alat dan beban.
- Bagian tegangan rendah:
 1. Kabel coaxial yang mempunyai surge impedansi sama dengan impedansi dari alat ukur.
 2. Osiloskop atau Voltmeter puncak.
 3. Sistem pembumian yang baik.

Cara lain yaitu dengan menggunakan elektroda bola yang mempunyai diameter yang sesuai dengan tegangan yang akan diukur.

PEMBAGI TEGANGAN

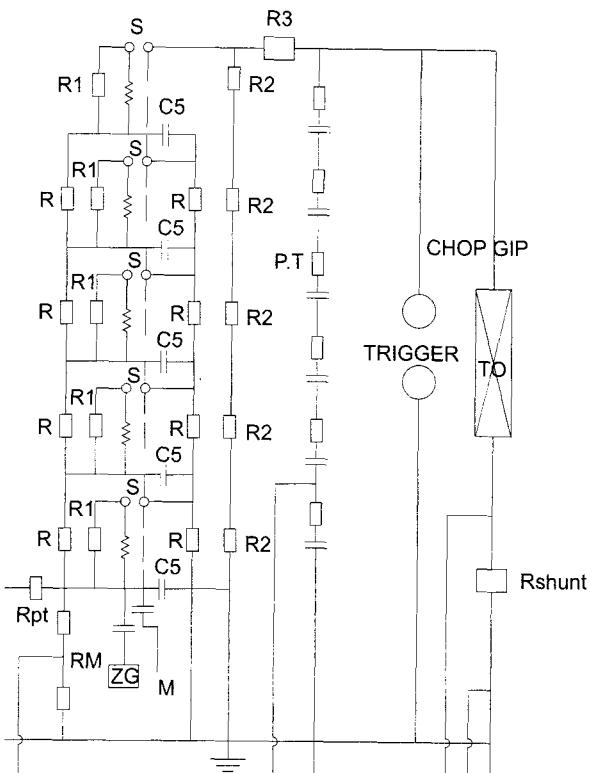
Kebanyakan pada pembagi tegangan terdapat stray kapasitansi yang terbagi menjadi: *stray* terhadap tanah (benda yang bertegangan sama dengan tanah), *stray* terhadap benda yang elektroda bola ini harus dikalikan dengan faktor koreksi yang disebabkan adanya perubahan suhu udara dan kerapatan udara atau mungkin juga terpengaruh oleh kelembaban udara. Untuk pengujian bahan yang *Non-Self Restoring* maka ekstrapolaris terpaksa dilakukan, hal tersebut masih diijinkan asalkan titik ekstrapolasi dimulai pada titik yang lebih besar dari titik 50% dari tegangan pengujian. Ekstrapolasi dapat dilakukan pengujian berbanding lurus dengan besaran yang terkait.

5.27 RANGKAIAN TEGANGAN TINGGI IMPULSE BERTINGKAT BANYAK

Rangkaian ini pada dasarnya sama dengan rangkaian satu akan tetapi perbedaannya adalah untuk menghasilkan tegangan yang lebih tinggi disusunlah secara bertingkat dan dapat

Gambar 5.25

Rangkaian impuls
Bertingkat Banyak



disambung secara seri atau paralel atau gabungan dari itu. Tahanan pengatur gelombang disebarluaskan setiap tingkat untuk mengurangi induksi yang parasitis.

- R1 = tahanan gelombang depan
R = tahanan muatan
S = celah udara pada elektroda bola
Rsh = tahanan untuk mengukur arus impulse
R3 = tahanan tambahan diluar
R2 = tahanan gelombang ekor
Rpr = tahanan proteksi ZG = alat trigger
P.T = pembagi tegangan

B A B

PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN (Partial Discharge)



PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN INTERNAL

- PROSES TERJADINYA PELEPASAN MUATAN
- PENGUKURAN PARTIAL DISCHARGE
- TEKNIK PENGUKURAN PARTIAL DISCHARGE
- BENTUK PELEPASAN MUATAN PADA RONGGA
- ENERGI PELEPASAN MUATAN



PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN PERMUKAAN (SURFACE DISCHARGE)



KORONA (CORONA DISCHARGE)



GEJALA TREEING



Pada umumnya, kegagalan alat-alat listrik pada waktu operasi disebabkan karena kegagalan isolasi dalam menjalankan fungsinya sebagai isolasi tegangan tinggi. Isolasi dapat berupa bahan padat, cair, dan gas. Kegagalan yang terjadi pada isolasi bahan padat adalah kegagalan yang permanen (termasuk bahan yang *non-self restoring*). Sedangkan pada bahan cair dan gas, kegagalan isolasinya adalah kegagalan yang sementara (termasuk bahan yang *self restoring*). Dalam pembuatan isolasi padat pada kabel tanah kadang-kadang tidak sempurna, sehingga terdapat rongga dalam isolasi tersebut.

Rongga ini dapat berisi udara atau benda lain yang mempunyai kekuatan medan atau kekuatan dielektrik yang berbeda dengan kekuatan dielektrik dari bahan isolasi. Kekuatan medan di dalam rongga ditentukan oleh perbandingan dari permitivitas dan bentuk dari rongga. Bila rongga berisi udara maka akan terdapat konsentrasi medan listrik. Karena pada nilai tegangan yang normal kekuatan medan pada rongga dapat melebihi kekuatan tembus tegangan isolasi, maka dapat terjadi tembus tegangan. Pada setiap pelepasan muatan sebagian, terjadi panas/kenaikan suhu didalam rongga sehingga menyebabkan kerusakan sifat/susunan kimia isolasi. Istilah pelepasan muatan meliputi beberapa kelompok fenomena yaitu:

1. Pelepasan Muatan Sebagian Internal (*Internal Partial Discharge*)
2. Pelepasan Muatan Permukaan (*Surface Discharge*)
3. Korona (*Corona Discharge*)

6. I. PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN INTERNAL (INTERNAL PARTIAL DISCHARGE)



6. I. I PROSES TERJADI PELEPASAN MUATAN

Pelepasan muatan sebagian internal adalah jenis pelepasan muatan yang terlokalisir disebabkan ionisasi gas pada sistem isolasi disaat tegangan dalam keadaan nilai kritis. Ionisasi dibatasi sebagai bagian dari jarak antara sistem dan elektroda. Rongga-rongga tempat terjadi ionisasi ini berada dalam bahan dielektrik atau diantara dielektrik dan lapisan penghantar. Pelepasan muatan sebagian terlihat sebagai pulsa yang cepat naik mulai dari besaran kecil dalam bentuk sebuah gelombang sinus yang tidak beraturan dari hasil pengujian isolasi tegangan tinggi.

Pelepasan muatan sebagian menyebabkan kerusakan pada bahan isolasi dan kegagalan isolasi pada tegangan tinggi.

Unit yang dapat dipakai pada pelepasan muatan sebagian adalah *picocoulomb*. Pada perhitungan unit muatan diutamakan daripada tegangan karena penggunaannya untuk pembebasan energi pada daerah pelepasan muatan. Pulsa tegangan tidak diinginkan, karena tergantung dari pelepasan muatan dengan bentuk gelombang yang tidak beraturan.

Bentuk gelombang pelepasan muatan sebagian tergantung pada tempat terjadinya pelepasan muatan dan perubahan-perubahan ketika pulsa menyebar ke rangkaian. Muatan menjadi seimbang untuk sejumlah ion yang terbentuk pada daerah pelepasan muatan dan diwakili oleh daerah dimana terjadi bentuk gelombang pada pelepasan muatan sebagian. Daerah ini selalu konstan berdiri sendiri pada daerah pelepasan muatan sebagian.

Energi yang dibebaskan sebanding dengan ion yang terbentuk dari tegangan kritis pada daerah pelepasan muatan. Karena itu, respon dari sistem deteksi pelepasan muatan harus seimbang dengan daerah pada saat pelepasan muatan sebagian terjadi .

6.1.2 PENGUKURAN PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN

Tegangan dimana timbul breakdown untuk pertama kalinya dikenal sebagai tegangan pelepasan muatan pertama (*discharge inception voltage*). Tekanan yang terjadi pada rongga secara langsung proporsional terhadap permitivitas relatif dari isolasi padat dan karena kekuatan tembus tegangan gas sedikit lebih kecil dibanding isolator padat, maka rongga dapat mengalami tembus tegangan dan menyebabkan pelepasan muatan pada tegangan yang lebih rendah daripada tegangan operasi kabel.

Pelepasan muatan sebagian menyebabkan kerusakan pada bahan isolasi melalui pengaruh energi elektron yang berenergi besar atau ion yang terakselerasi, sehingga menyebabkan perubahan kimia pada berbagai jenis.

Pelepasan muatan pada rongga akan menghasilkan penetrasi elektron ke satu permukaan rongga dan penembakan ion ke permukaan yang lain. Jika tegangan AC. diberikan, maka permukaan rongga akan menerima penembakan ion dan elektron terus menerus secara bergantian.

Pelepasan muatan dalam rongga polyethylene yang diberikan tegangan AC, telah ditemukan akan menghasilkan deposit (penumpukan kerak) pada permukaan rongga. Deposit ini mula-mula diameternya berukuran $1 \mu\text{m}$. Tetapi kemudian ukurannya membesar sebanding dengan lamanya waktu dari timbulnya pelepasan muatan di dalam rongga dan akan diikuti erosi setempat pada permukaannya. Daerah yang mengalami erosi menjadi saluran aliran arus sehingga menyebabkan kenaikan tegangan pada daerah sekitarnya. Proses ini berjalan secara terus menerus sehingga mengakibatkan terjadinya tracking.

Pengujian pelepasan muatan sebagian mendeteksi kesalahan yang terjadi karena adanya kekosongan/rongga dalam isolasi pada proses produksi. Deteksi pelepasan muatan sebagian dan teknik pengukurannya didasarkan pada pengamatan. Yang termasuk dalam pengamatan adalah :

- Deteksi, menentukan pelepasan muatan dan tegangan pada saat terjadi.
- Lokasi, pemilihan tempat terjadinya pelepasan muatan.
- Evaluasi dan pentingnya areal pelepasan muatan

Proses pendekripsi pada pelepasan muatan didasarkan pada transfer/pertukaran energi yang terjadi pada proses pelepasan muatan. Pertukaran energi dapat dimanifestasikan sebagai (1) arus impulse listrik dengan beberapa pengecualian, misalnya beberapa jenis glow discharge, (2) kerugian dielektrik, (3) radiasi (cahaya), (4) suara desis (noise), (5) peningkatan tekanan, (6) reaksi kimia.

6.1.3 TEKNIK PENGUKURAN PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN

Tujuan dari pengukuran pelepasan muatan adalah untuk mendeteksi dan mengukur disipasi energi dengan tembus tegangan pada ruang kosong yang dipenuhi gas dalam isolasi padat.

Bentuk tiap detektor beraneka ragam berdasarkan parameter untuk perhitungan yaitu:

1. Perhitungan besar muatan yang dilepaskan dengan menggunakan input rangkaian yang dapat diukur.
2. Perhitungan perubahan tegangan.
3. Perhitungan rugi/energi yang dilepaskan karena banyak daerah pelepasan muatan.

Metoda deteksi yang paling banyak digunakan dan paling berhasil adalah metoda yang pertama. Keuntungannya ialah tingkat sensitivitasnya lebih tinggi daripada metode-metode lain, karena memakai input rangkaian yang dapat diatur .

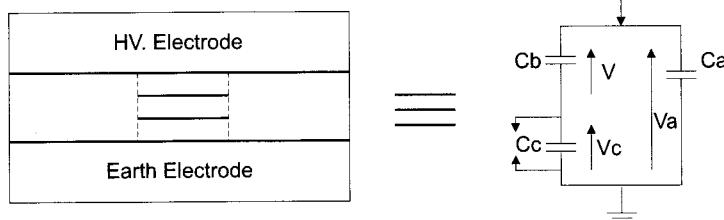
6.1.4 BENTUK PELEPASAN MUATAN PADA RONGGA

Rangkaian ekivalen dapat dipakai untuk mewakili atau memisalkan rongga dalam suatu dielektrik (gambar 3.1). C_c adalah kapasitansi rongga itu sendiri, C_b adalah kapasitansi dari dielektrik yang diseri dengan rongga, dan C_a adalah kapasitansi dari sisa keseluruhan dielektrik.

Spark gap yang diparalel dengan C_c akan menjadi konduktif jika ada pelepasan muatan melalui rongga.

Gambar 6.1

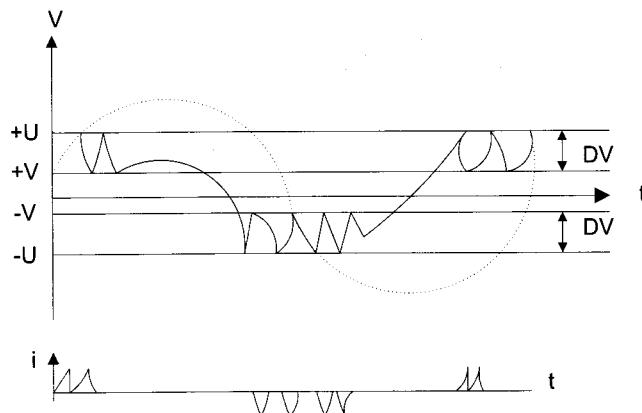
Rangkaian Dari
Rongga Dalam
Dielektrik



Misalkan diperlukan tegangan untuk tembus tegangan gas pada rongga sebagai $\pm U$ (Gambar 6.2). Jika terjadi pelepasan muatan, maka perpindahan muatan pada rongga mengurangi tegangan V_c menjadi $\pm V$ dan pelepasan muatan berakhir.

Gambar 6.2

Bentuk Pelepasan
Muatan Pada Rongga
Dielektrik

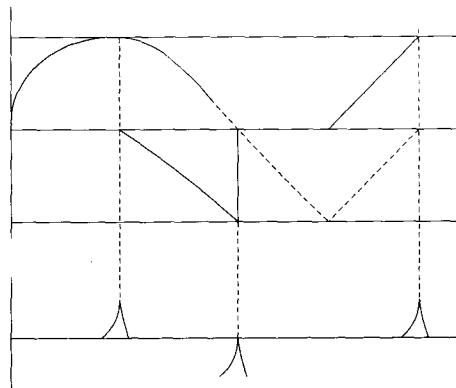


Jika tegangan AC masih meningkat, tegangan yang melalui rongga akan meningkat lagi sebagai superposisi dari medan listrik utama pada medan yang dihasilkan melalui rongga oleh perpindahan muatan dalam pelepasan muatan dan jika V_c mencapai U lagi, maka pelepasan muatan baru akan timbul.

Pelepasan muatan harus tetap jika ditampilkan dalam time base frekuensi yang sama pada saat supply DV+ dan DV- sebanding, seperti terlihat pada gambar 6.2. Jika puncak tegangan yang diberikan adalah tegangan awal dari pelepasan dan tidak memperhitungkan tegangan residu yang tertinggal pada rongga setelah pelepasan muatan, maka akan didapatkan empat pelepasan muatan per cycle. Gambar 6.3 menunjukkan bahwa secara teoritis harus ada empat discharge per cycle pada saat permulaan dan pulsa-pulsa arus harus timbul pada puncak-puncaknya dan menunjukkan nol pada saat bentuk gelombang tegangan.

Gambar 6.3

Bentuk Ikonis
Pelepasan Muatan
Pada Saat Permulaan



6.1.5 ENERGI PADA PELEPASAN MUATAN

Pada rangkaian ekivalen (gambar 6.1), akan terjadi perpindahan muatan q melalui rongga yang dihasilkan oleh pelepasan muatan. Perubahan tegangan yang disebabkan oleh pelepasan muatan (ΔV_c pada gambar 6.2) akan timbul pada C_c yang paralel dengan kombinasi seri C_a dan C_b , dengan total kapasitansi:

$$C_c + \frac{C_c C_b}{C_a + C_b} \quad (6-1)$$

Jika rongga lebih kecil dibanding dengan sampel $C_a >> C_b$ dan

$$q \approx (C_a + C_b) \Delta V_c \quad (6-2)$$

Walaupun demikian perpindahan muatan ini tidak dapat diukur secara langsung. Kuantitas yang dapat diukur adalah muatan transfer q_a yang merupakan perpindahan muatan pada penyambungan eksternal ke sampel.

ΔV_c pada C_c menghasilkan ΔV_a pada C_a . C_b dan C_a berfungsi sebagai pembagi tegangan untuk ΔV_c , sehingga:

$$\Delta V_a = \Delta V_c \frac{C_b}{C_a + C_b} \quad (6-3)$$

dan q_a sebagai hasil dari ΔV_a dan kapasitansi total antara terminal tegangan tinggi dan grounding (pembumian),

$$q_a = \Delta V_a \left(C_a + \frac{C_b C_c}{C_b + C_c} \right)$$

$$= \Delta V_a C_a \quad (6-4)$$

oleh karena itu :

$$q_a = \frac{C_b C_c}{C_b + C_c} \Delta V_c \quad (6-5)$$

tetapi $C_b \ll C_c$ sehingga

$$q_a = C_b \Delta V_c \quad (6-6)$$

Dari gambar 6.2

$$\Delta V_c = U - V \quad (6-7)$$

Dan energi pada suatu pelepasan muatan (W) adalah perbedaan energi yang tersimpan dalam kapasitansi rongga sebelum dan sesudah pelepasan muatan, yaitu:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} C_c (U^2 - V^2) \\ &= \frac{1}{2} C_c (U - V)(U + V) \end{aligned} \quad (6-8)$$

$$W = \frac{1}{2} C_c \Delta V_c (U + V) \quad (6-9)$$

Jika tegangan residu V pada rongga diabaikan, maka:

$$W = \frac{1}{2} C_c \Delta V_c U \quad (6-10)$$

Untuk pelepasan muatan awal pada tegangan puncak V_r , tidak ada pelepasan muatan sebelumnya dan tidak adanya muatan pada permukaan rongga, sehingga:

$$U = \frac{C_b}{C_b + C_c} V_{ipcak} \quad (6-11)$$

Dari (6.10) dan (6.11) didapat:

$$W = \frac{1}{2} C_c \Delta V_c \frac{C_b}{C_b + C_c} V_{ipcak} \quad (6-12)$$

Tetapi $C_b \ll C_c$ sehingga:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} \Delta V_c C_b V_{ipcak} \\ &= \frac{1}{2} q_a V_{ipcak} \end{aligned} \quad (6-13)$$

Atau dalam nilai r.m.s (*rate means square*) dari V_r

$$W = 0.7q_a V_i \quad (6-14)$$

Oleh karena itu energi pada pelepasan muatan diberikan oleh pelepasan muatan yang terlihat sebesar q_a dan tegangan pelepasan muatan permulaan V_i . Energi inilah yang akan menyebabkan rusaknya dielektrik.

6.2 PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN PERMUKAAN (SURFACE DISCHARGE)



Pelepasan muatan permukaan dapat disebabkan oleh penyamaan tekanan yang tidak cukup atau dapat dihasilkan oleh arus bocor melalui lapisan konduksi pada permukaan isolasi listrik.

Pelepasan muatan permukaan dapat dianggap sebagai suatu sistem yang terdiri dari suatu bahan isolasi mempunyai lapisan yang konduktif dan dua elektroda didalamnya. Dalam prakteknya, lapisan konduktif ini biasanya terbentuk karena adanya kelembaban. Bila tegangan diterapkan, lapisan tipis ini mulai mengalirkan arus, dan menyebabkan terjadinya panas sehingga permukaan isolasi mengering.

Bila bahan isolasi ini adalah bahan organik seperti: kertas, maka terjadilah karbonisasi pada permukaan dielektrik ini di tempat terjadinya percikan.

Daerah yang mengalami karbonisasi menjadi saluran aliran arus sehingga menyebabkan kenaikan tegangan pada daerah sekitarnya. Proses ini berjalan terus menerus sehingga akhirnya terjadi suatu kegagalan. Gejala ini dinamakan gejala *tracking*.

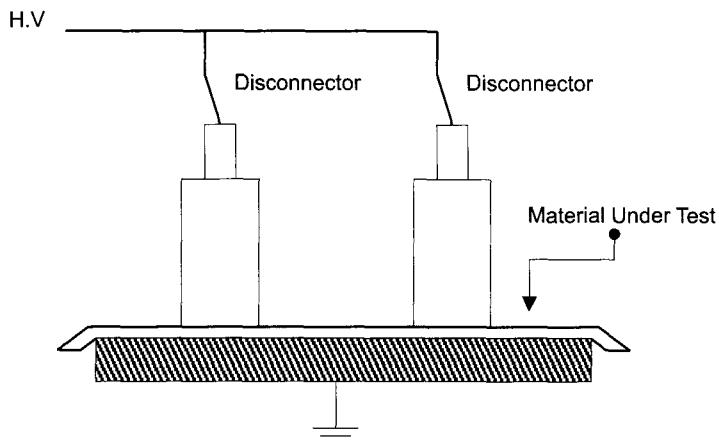
Jika percikan tracking menyebar ke kiri dan ke kanan seperti membuat cabang maka disebut treeing. Treeing terjadi karena erosi pada bahan isolasi. Erosi mengakibatkan permukaan isolasi menjadi kasar dan cepat menyimpan kotoran yang akhirnya mengakibatkan bertambahnya arus mengalir sehingga dapat terjadi kegagalan dari isolasi tersebut.

Treeing dapat dicegah dengan membersihkan permukaan isolasi dan melapisi isolasi dengan bahan yang tahan terhadap *tracking*.

Beberapa susunan pelepasan muatan permukaan telah dikembangkan untuk menguji ketahanan relatif terhadap pelepasan muatan pada bahan-bahan isolasi yang berbeda. Susunan yang paling umum (gambar 6.4) merupakan sistem *rod-plate electrode*.

Gambar 6.4

Rancangan Sirkuit
Untuk Pengujian
Pelepasan Muatan
Permukaan



Sejumlah elektroda ini dihubungkan ke suplai tegangan tinggi, yang mengirimkan tegangan ke daerah yang berbeda pada lembaran isolasi yang sama. Suatu elektroda secara otomatis memutuskan suplai jika terjadi kesalahan isolasi pada titik yang terdekat. Pengujian ini adalah pengujian waktu terhadap *breakdown*.

Pelepasan muatan permukaan pada peralatan dapat dideteksi melalui emisi cahaya, dengan teknik pulsa listrik, yang akan memberikan urutan pulsa asimetris (gambar 6.5) dengan tinggi pulsa meningkat bersama dengan tegangan yang dimasukkan.

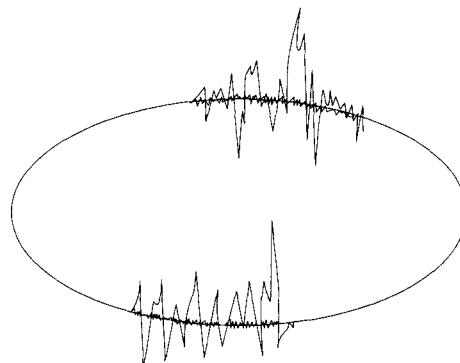
6.3 KORONA (CORONA DISCHARGE)



Pelepasan muatan ini pada umumnya terjadi pada gas atau udara. Pelepasan muatan ini terjadi karena adanya tumbukan yang menyebabkan ionisasi di dalam gas/udara bila tegangan melebihi nilai tertentu (pada sepasang elektroda hal ini menyebabkan terjadinya medan listrik yang tidak homogen). Elektron yang bebas bergerak di udara, umumnya berasal dari radiasi radio aktif yang terdapat di alam bebas dan sinar kosmik. Pada medan listrik seperti ini, photo-ionisasi dan kabut elektron menyebabkan tembus tegangan yang tidak sempurna. Korona disifatkan sebagai terjadinya pelepasan muatan yang bermula pada permukaan dari suatu kawat bila nilai medan listrik pada permukaan itu melampaui nilai tertentu.

Gambar 6.5

Pulsa Pelepasan
Muatan Permukaan
Dalam Elliptical Time
Base



Apabila yang bekerja adalah tegangan bolak-balik, maka impulse ini akan bangkit kembali bila tegangannya berganti. Gejala ini menunjukkan adanya pelepasan muatan di luar, biasanya dinamakan *corona discharge*. Pelepasan muatan ini sering terjadi pada kawat transmisi tegangan tinggi. Pelepasan muatan ini dapat terjadi pada bagian perbatasan dua permukaan dari dua dielektrik. Sifat-sifat dari pelepasan muatan ini (*corona discharge*) adalah:

1. Medan listrik tidak merata dan berbentuk tajam.
2. Dapat terjadi radiasi magnetik sehingga menyebabkan gangguan radio.
3. Menyebabkan kerugian pada kawat transmisi.

6.4 GEJALA TREEING



Treeing merupakan suatu gejala/fenomena yang timbul dalam isolasi yang berbentuk padat. *Treeing* yang terjadi pada isolasi yang menggunakan bahan dasar polimer digolongkan menjadi tiga bagian:

ELECTRICAL TREEING

Electrical Treeing terjadi akibat lepasan parsial internal dan ketidak sempurnaan pembuatan bahan isolasi seperti: terdapat rongga-rongga kecil ataupun partikel-partikel kecil pada bahan isolasi.

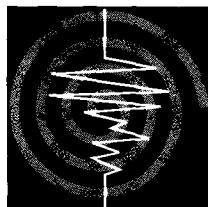
WATER TREEING

Terjadi akibat merembesnya zat cair kedalam isolasi padat, Apabila bahan isolasi tersebut berada dalam medan yang cukup tinggi. Pada keadaan kering *treeing* ini tidak terlihat, tetapi dalam keadaan basah *treeing* ini akan terlihat.

CHEMICAL TREEING

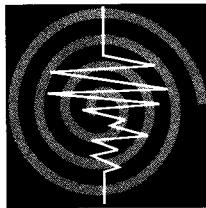
Terjadinya sama seperti dengan water *treeing* tetapi, khususnya jenis zat cair yang merembes mengandung larutan kimia tertentu, yang dapat menembus lapisan isolasi dan kemudian akan berionisasi dengan bahan lain.

Timbulnya gejala *treeing* pada isolasi padat belum dapat diketahui dengan pasti. Tetapi gejalanya lebih banyak muncul pada bagian isolasi yang lemah yaitu pada bagian yang mempunyai tekanan listrik tinggi (*high electrical stress*), bagian yang mengalami kerusakan mekanis akibat tekanan dari luar, bagian yang kurang rata dan juga pada bagian isolasi yang terdapat kantong udara (*void*). Gejala *treeing* ini mengakibatkan terjadinya pelepasan muatan dalam isolasi (*internal partial discharge*).



DAFTAR PUSTAKA

- Abduh, Syamsir, "Penentuan Kapasitas Arus Hubung Singkat Berdasarkan Metode Non-Adiabatik, Temperatur Kerja, dan Pengaruhnya Terhadap Kabel Bawah Tanah XLPE 150 kV", Jurnal Ilmiah, Teknologi dan Disain, No. 9/Th.IV/VIII/2000 pp58\68, Jakarta, 2000.
- Abduh, Syamsir, "Impuls Test pada Jointing Kabel Bawah Tanah XLPE Tipe Ciut Panas Tegangan Menengah 12/24 kV", Proceedings: Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi III, pp. SN/M/A-18/E, UI, Jakarta, 2000.
- Abduh, Syamsir, "Penggunaan Rangkaian Resonansi Seri pada Pembangkitan Tegangan Tinggi Sebagai Solusi Dalam Mengatasi Timbulnya Bahaya Resonansi", Jurnal Ilmiah, Teknologi dan Disain, No. 7/Th. VII/1999 pp. 16-28, Jakarta, 1999.
- Abduh, Syamsir, "Pengukuran Partial Discharge", Jurnal Ilmiah Trisakti, No. 14/Th.IV/4/1994 pp. 40-45, Jakarta, 1994.
- Abduh, Syamsir, "Partial Discharge Test pada Terminal Kabel XLPE 3 Inti Tipe Slipon Tegangan Menengah 12/24 kV, Proceedings: Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi, pp. B-24, ITB, Bandung, 1998.
- Artono, Arismunandar, "Teknik Tegangan Tinggi" Pradnya Paramita, Jakarta, 1990.
- Cabburn, RJT., "A Review of The Application and Uses of Shrinkable Materials of The Electricity Supply Industries, Raychem Corporation, Oak Regde, USA, 1995.
- Dissado, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", Peter Pregrinus Ltd, London, UK, 1992.
- Kind, D and Kaerner H., "High Voltage Insulation Technology" Fried, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1991.
- Kreuger, FH., "Discharge Detection in High Voltage Equipment", Heyword, London, 1987.
- Kuffel, E and Zaengl, W.S., "High Voltage Engineering", Pergamon Press, 1986.
- Kuffel, E. and M. Abdullah, "High Voltage Engineering" Pergamon Press, 1970.
- Naidu, Karamaju V., "High Voltage Engineering Fundamentals", Mc. Graw-Hill, 2nd Edition, New Delhi, 1985.
- Schwab, A.J., "High Voltage Measurement Techniques", MIT Press, Cambridge, 1972



INDEKS



A

Arc sensig system 16

B

Belitan tesla 18, 20
Breakdown test 4

D

Delay cable 61, 62
Discharge 4, 16
 patrial 5, 72

E

Endurance test 5

C

Chubb & fortесque 67
 rangkaian 68, 73

F

Flash-over 4, 16, 55
Fortesque 67
Fungsi expansi taylor 39

G

gejala tracking 93
Greinacher double circuit 25, 82

I

IEC 34, 35, 44, 58, 83

K

Kegagalan isolasi 3

N

Non destructive test 3, 70
Natural protection 15

P

Pengujian
 Ketahanan 4
 Kegagalan 4
 Pelepasan Muatan 4
Persamaan laplace 19

R

Rangkaian 68
Rangkaian "Cockroft & Walton" 37, 78
Rangkaian marx 40
Recovery voltage 15
Ripple 22, 23, 24, 25, 26, 29, 31, 74
Rod-plate Electrode 93, 94

S

Skin effect 18
Spark-Over 4, 53, 54
Space discharge 76, 77
Surja hubung 2

T

Tegangan tinggi 2
Tegangan tinggi menengah 2
Tegangan ekstra tinggi 2
Tegangan ultra tinggi 2
Tegangan lebih 2, 34

W

Withstand test 4
Withstand voltage 53, 70



Syamsir Abdurrahman lahir di Soni, Sulawesi Tengah, 16 Desember 1968. Setelah menyelesaikan S1 Teknik Elektro tahun 1991 di Universitas Hasanuddin, Ujung Pandang, beliau meraih gelar Magister Manajemen dengan konsentrasi Manajemen Keuangan pada tahun 1998 di Universitas Persada Indonesia "YAI." Saat ini, dalam usia yang relatif muda beliau tengah menyelesaikan program Ph.D (S3) di Universiti Utara Malaysia, Kedah Darul Aman, Malaysia. Karirnya sebagai dosen dimulai sebagai asisten Prof. DR. Arismunandar (alm.) pada matakuliah Teknik Tegangan Tinggi. Sejak tahun 1992 hingga sekarang beliau adalah dosen tetap di Universitas Trisakti, Jakarta. Saat ini beliau menetap di Villa Bintaro Indah, Ciputat, bersama istri dan ketiga anaknya.

