

II. TEORI DASAR

I. ISOLASI PADAT

Pada umumnya sistem isolasi menggunakan bahan padat yang dapat dikelompokkan dalam tiga kelompok, yaitu :

- Bahan organik : kapas, kertas, karet, dll.
- Bahan inorganik : keramik, kaca, mika, asbes, dll.
- Polimer sintetik :
 - *Thermoplastic* : polythylene, perspex, dll.
 - *Thermosetting* : bakelit, *epoxy resin*, dll.

Bahan organik dihasilkan dari tumbuhan atau hewan dan memiliki karakteristik yang sama. Bahan organik adalah isolator yang baik dan dapat dengan mudah digunakan dalam praktek. Namun properti mekanis dan listriknya selalu cepat memburuk pada suhu 100 ° C keatas. Karena itu mereka umumnya dipakai setelah dipernis.

Bahan inorganik tidak seperti bahan organik. Bahan inorganik tidak memperlihatkan penurunan properti mekanis dan listrik hingga suhu 250° C. Bahan inorganik yang paling banyak digunakan adalah keramik dan kaca. Baik dalam pembuatan isolator, *bushing*, dan lain-lain, sebab resistansinya terhadap polutan atmosfer dan performanya sangat baik dalam berbagai kondisi temperatur dan tekanan.

Polimer sintetik adalah bahan polimer yang memiliki properti isolasi yang sangat baik dan dapat dengan mudah diproduksi dan diaplikasikan ke peralatan. Walaupun memiliki temperatur leleh yang rendah (antara 100° – 120° C), bahan ini sangat fleksibel dan dapat dicetak/dibentuk dibawah titik leleh.

2. TEORI ISOLATOR

Isolator adalah gawai yang berfungsi sebagai isolasi listrik dan pemegang mekanik dari perlengkapan atau penghantar yang dikenai beda tegangan.

Karakteristik isolator terdiri dari karakteristik listrik dan karakteristik mekanis.

2.1 Karakteristik Listrik

Tegangan lompatan api (*flashover voltage*) pada isolator terdiri atas tegangan lompatan api frekuensi rendah (AC), tegangan lompatan api impuls dan tegangan tembus (*puncture*) dalam minyak (AC frekuensi rendah).

2.1.1 Tegangan lompatan api frekuensi rendah kering (AC) adalah tegangan lompatan api yang terjadi bila tegangan diterapkan di antara kedua elektroda isolator yang bersih dan kering pemukaannya. Tegangan ini bernilai konstan dan merupakan nilai dasar dari karakteristik isolator.

2.1.2 Tegangan lompatan api frekuensi rendah basah (AC) adalah tegangan lompatan api yang terjadi bila tegangan diterapkan di antara kedua elektroda

isolator yang basah karena hujan atau dibasahi untuk menirukan keadaan hujan.

2.1.3 Tegangan lompatan api impuls adalah tegangan impuls dengan gelombang standar diterapkan pada kedua elektroda isolator.

2.1.4 Tegangan tembus (*puncture*) frekuensi rendah (AC) terjadi bila tegangan frekuensi rendah diterapkan di antara kedua elektroda isolator yang dicelup kedalam minyak sampai tembus. Tegangan ini untuk menunjukkan kekuatan dielektrik isolator.

2.2 Karakteristik Mekanis

Kecuali harus memenuhi persyaratan listrik tersebut diatas, isolator juga harus memiliki kekuatan mekanis guna memikul beban mekanis penghantar yang diisolasiannya. Porselin, sebagai bahan utama sebuah isolator, mempunyai sifat seperti besi cor, dengan kuat-tekan (*compressive strength*) yang besar dan kuat-tarik (*tensile strength*) yang lebih kecil. Kuat tariknya biasanya $400-900 \text{ kg/cm}^2$, sedang kuat tekannya 10 kali lebih besar.

3. PENGUJIAN ISOLATOR

Pengujian (*testing*) isolator terdiri dari :

- ✓ Pengujian lompatan api kering (AC)
- ✓ Pengujian lompatan api basah (AC)
- ✓ Pengujian ketahanan (AC)
- ✓ Pengujian tembus (AC)
- ✓ Pengujian ketahanan lapisan (AC)

- ✓ Pengujian lompatan api impuls
- ✓ Pengujian ketahanan impuls
- ✓ Pengujian frekuensi tinggi
- ✓ Pengujian tegangan tinggi DC

3.1 Pengujian Lompatan Api Kering (AC)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tegangan lompatan api pada isolator yang bersih dan kering.

3.2 Pengujian Lompatan Api Basah (AC)

Pengujian dilakukan untuk mengetahui tegangan lompatan api pada isolator yang basah karena hujan atau salju.

3.3 Pengujian Ketahanan (AC)

Pengujian ketahanan digunakan untuk memeriksa apakah pada spesimen terjadi kerusakan atau hal-hal yang abnormal. Pengujian ini dapat dilakukan dalam udara dan dalam minyak.

3.4 Pengujian Tembus (AC)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan dielektrik bahan dalam keadaan kering.

3.5 Pengujian Ketahanan Lapisan (AC)

Pengujian ini dilakukan pada isolator yang terdiri dari dua lapisan atau lebih untuk mengetahui daya tahan isolasi masing-masing lapisan.

3.6 Pengujian Lompatan Api Impuls

Pengujian lompatan 50 % dilakukan dan lengkung volt waktu diambil hanya untuk keadaan kering dengan memperhatikan juga faktor-faktor koreksi keadaan udara.

3.7 Pengujian Ketahanan Impuls

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui ketahanan isolator terhadap tegangan impuls. Pada pengujian ini, faktor-faktor koreksi udara juga harus diperhatikan.

3.8 Pengujian Frekuensi Tinggi

Pengujian ini digunakan untuk mengetahui adanya kerusakan-kerusakan mekanis (keretakan, kantong udara, dan sebagainya) pada isolator, terutama isolator porselin.

3.9 Pengujian Tegangan Tinggi DC

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya arus bocor pada isolator karena pencemaran.

4. BASIC IMPULSE INSULATION LEVEL

Penentuan tingkat isolasi impuls dasar (*Basic Impulse Insulation Level*, yang disingkat BIL) yang didefinisikan sebagai tingkat-tingkat patokan (*reference level*) dinyatakan dalam tegangan puncak impuls dengan gelombang standar.

Dalam penentuan isolasi trafo, dipakai isolasi yang dikurangi (*reduced insulation*), yaitu tingkat isolasi rendah daripada apa yang telah ditetapkan dalam

standar. Bila tingkat isolasi penuh dinyatakan oleh kolom 2 (BIL) dalam Tabel 2.1, maka tingkat isolasi yang dikurangi adalah semua tingkat yang kurang dari harga-harga yang ditetapkan dalam kolom-kolom tersebut.

Tabel 2.1¹*Basic Impulse Insulation Level (BIL)*

Kelas Referensi (KV)	<i>Basic Impulse Insulation Level (BIL)</i> (KV)	80 % <i>Basic Impulse Insulation Level (BIL)</i> (KV)
1,2	30	24
8,7	75	60
12	95	76
23	150	120
34,5	200	160
66	250	200
80	350	280
92	450	360
115	550	440
138	650	520
161	750	600
180	825	660
196	900	720
230	1050	840
260	1175	940
287	1300	1040
345	1550	1240

5. FAKTOR KOREKSI KEADAAN UDARA

Menurut *Japanese Industrial Standard (JIS) C3801* dan *Japanese Electrotechnical Committee (JEC)* keadaan standar adalah :

Tekanan barometer = 760 mm Hg (1013 mbar)

¹ Artono Arismunandar. *Teknik Tegangan Tinggi*. (Jakarta : Paradnya Paramita, 1997). p.

Suhu sekeliling = 20 ° C

Kelembaban mutlak = 11 gram/m³

Untuk mengoreksi hasil pengujian terhadap tekanan dan suhu dipakai rumus :

$$V_s = \frac{V_B}{d} \dots\dots\dots(2.1)^2$$

dimana :

V_s = Tegangan lompatan api standar

V_B = Tegangan lompatan yang diukur pada keadaan sebenarnya

d = Kepadatan udara relatif (*relative air density*)

$$= \frac{0,386b_B}{273 + t_B}$$

b_B = Tekanan udara pada waktu pengujian (mm Hg)

t_B = Suhu sekeliling pada waktu pengujian (° C)

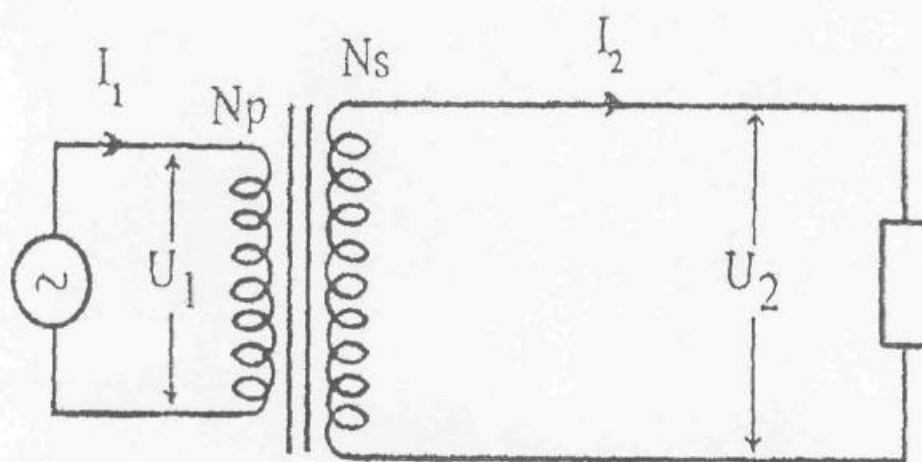
6. PEMBANGKITAN TEGANGAN TINGGI AC (FREKUENSI RENDAH)

Alat yang dipakai untuk membangkitkan tegangan tinggi AC ialah sebuah trafo, yang disebut trafo penguji (*testing transformer*).

6.1 Prinsip Kerja Trafo

Trafo adalah suatu alat untuk memindahkan daya listrik AC dari suatu rangkaian ke rangkaian lainnya secara induksi magnetik.

² Ibid. p. 17.

Gambar 2.1³

Rangkaian Pengganti Trafo

Keterangan :

 N_p = Jumlah lilitan kumparan primer trafo. N_s = Jumlah lilitan kumparan sekunder trafo. e_p = GGL induksi kumparan primer. e_s = GGL induksi kumparan sekunder. U_1 = Tegangan sisi primer. U_2 = Tegangan sisi sekunder. I_1 = Arus yang mengalir pada kumparan primer. I_2 = Arus yang mengalir pada kumparan sekunder. ϕ_b = Fluks magnet bersama (mutual fluks). Z = Beban trafo.³ Sumanto. *Teori Trafo*. (Yogyakarta : Andi Offset, 1991). p. 1.

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan sumber, maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, maka arus I_1 menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya. Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah pada kumparan primer akan timbul GGL induksi e_p .

Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah :

$$e_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt} \dots\dots\dots(2.2)^4$$

dimana :

$d\phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Wb).

dt = Perubahan waktu (detik)

Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi e_p juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (mutual fluks) yang menginduksikan GGL induksi e_s pada sekunder sebesar :

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt} \dots\dots\dots(2.3)^5$$

Fluks pada saat t dinyatakan dengan pernyataan :

$$\phi(t) = \phi_m \sin \omega t \dots\dots\dots(2.4)^6$$

dimana :

ϕ_m = fluks maksimum dalam satuan Weber.

sehingga GGL induksi pada kumparan primer adalah :

⁴ Ibid.

⁵ Ibid.

⁶ Ibid.

$$\begin{aligned}
 e_p &= -N_p \frac{d\phi_m \sin \omega t}{dt} \\
 &= N_p \omega \phi_m \sin (\omega t - 90^\circ) \dots\dots\dots(2.5)^7
 \end{aligned}$$

Tegangan efektif dapat dihitung dengan persamaan :

$$\begin{aligned}
 e_p &= \frac{(e_p)_{maks}}{\sqrt{2}} \\
 &= \frac{N_p \cdot \omega \cdot \phi_m}{\sqrt{2}} \\
 &= 4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \phi_m \dots\dots\dots(2.6)^8
 \end{aligned}$$

dengan cara yang sama didapatkan :

$$e_s = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \phi_m \dots\dots\dots(2.7)^9$$

6.2 Rasio Transformator

Rasio transformator (α) adalah perbandingan jumlah lilitan primer terhadap jumlah lilitan sekunder yang dirumuskan dengan persamaan dibawah :

$$\alpha = \frac{N_p}{N_s} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \dots\dots\dots(2.8)^{10}$$

6.3 Ciri-Ciri Trafo Penguji

Transformator untuk keperluan pengujian memiliki ciri-ciri sebagai berikut :

⁷ Ibid.

⁸ Ibid.

⁹ Ibid.

¹⁰ Ibid.

- Perbandingan jumlah lilitannya (α) lebih besar daripada trafo daya (*power transformer*).
- Kapasitas KVA – nya kecil jika dibandingkan dengan kapasitas trafo daya oleh karena untuk keperluan mengadakan lompatan api tidak diperlukan daya yang besar. Yang diperlukan adalah tegangan, bukan daya.
- Karena biasanya pengujian dilakukan phasa demi phasa, maka hanya trafo satu phasa yang dipakai. Kecuali untuk pengujian – pengujian khusus.
- Biasanya satu lilitannya (terminal) ditanam dalam tanah (*grounded*) untuk keperluan keamanan dan pengamanan.
- Pada waktu merencanakan isolasi untuk trafo penguji hanya diperhitungkan terhadap tegangan penguji maksimum, oleh karena tidak diharapkan bahwa trafo tersebut akan mengalami tegangan lebih.
- Konstruksi lilitan dan isolasinya harus direncanakan sedemikian rupa sehingga gradien tegangannya seragam.

6.4 Regulasi Tegangan Trafo

Regulasi Tegangan transformator (VR) dinyatakan dalam persen yaitu sebesar :

$$PersenVR = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100 \dots\dots\dots(2.9)^{11}$$

¹¹ Ibid.

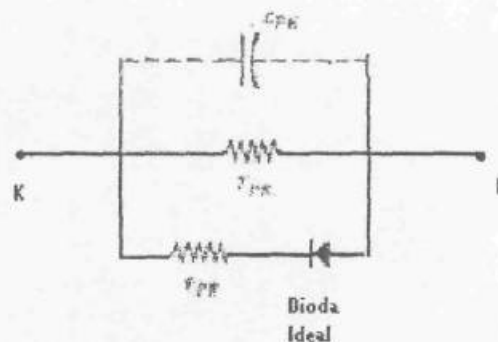
7. PEMBANGKITAN TEGANGAN TINGGI DC

Pembangkitan tegangan tinggi DC dapat dilakukan dengan cara menyearahkan tegangan tinggi AC dengan menggunakan dioda.

7.1 Teori Dioda

Dioda merupakan elemen unilateral dua terminal (satu *port*) yang dianggap resistif. Dioda ideal adalah suatu model dioda yang mempunyai resistansi maju (polaritas resistif rendah) dan resistansi balik tak terhingga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Meskipun dioda ideal tidak ada, namun dioda ideal merupakan model yang berguna untuk menyatakan dioda praktis. Dioda terdiri atas plat (atau anode) dan katode sehingga kedua elektroda tersebut juga berupa terminal dioda praktis.



Gambar 2.2.¹²

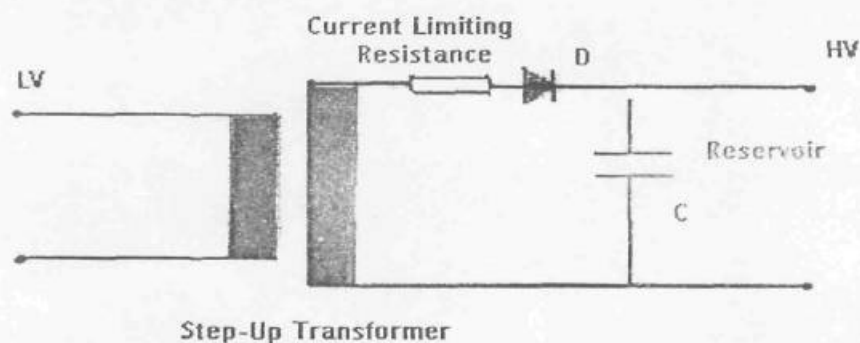
Rangkaian Ekuivalen Dioda

¹² Edwin C. Lowenberg. *Rangkaian Elektronik*. Translated by Sutisna (Jakarta : Erlangga, 1995). p. 25

Pada beberapa aplikasi dioda, tegangan pada dioda berubah sedemikian rupa sehingga dioda mendapat bias maju dan bias balik. Bila dioda mendapat bias maju, maka dioda tersebut dinyatakan sebagai resistor yang mempunyai harga resistansi maju sesaat. Bila dioda mendapat bias balik, maka dioda tersebut dinyatakan sebagai resistor dengan resistansi balik sesaat. Jadi, dioda muncul sebagai kombinasi resistansi tinggi (bias balik) dan resistansi rendah (bias maju) yang dihubungkan dengan dua saklar posisi.

7.2 Penyearah Setengah Gelombang

Penyearah setengah gelombang adalah yang paling sederhana dan menggunakan sebuah dioda seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 2.3.

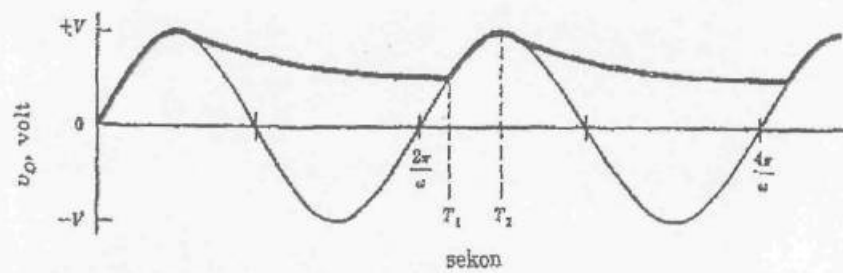


Gambar 2.3¹³

Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang

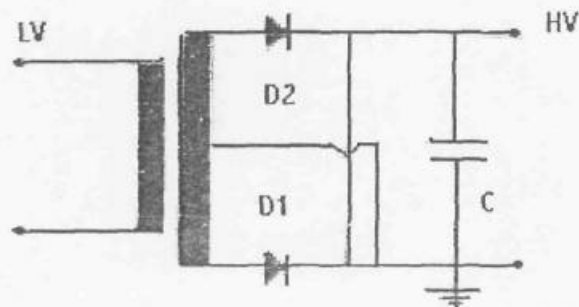
Adapun bentuk tegangan *output* V_o pada rangkaian penyearah setengah gelombang dipelihatkan oleh Gambar 2.4 di bawah.

¹³ T.J. Gallagher and A.J. Pearmain. *High Voltage Measurement, Testing and Design*. (New York : John Wiley and Sons Ltd., 1983). p. 100.

Gambar 2.4.¹⁴

Tegangan *Output* Penyearah Setengah Gelombang

7.3 Penyearah Gelombang Penuh

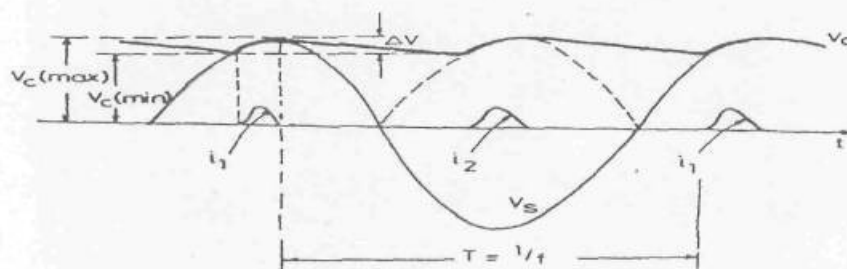
Gambar 2.5¹⁵

Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh

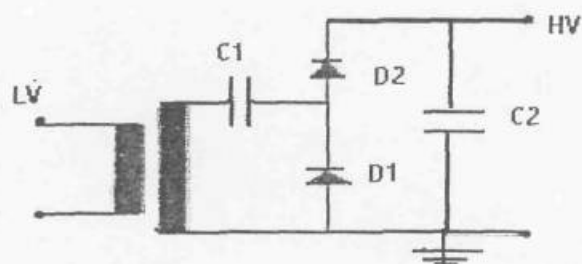
Untuk penyearah gelombang penuh digunakan dua buah dioda seperti pada Gambar 2.5. Kumparan kedua bercabang tengah (*center-tapped*), sehingga tegangan V_1 dan V_2 mempunyai beda fasa 180° , dengan cabang tengah sebagai acuan. Tegangan *output* V_o digambarkan pada Gambar 2.6.

¹⁴ Edwin C. Lowenberg, Op. cit., p. 15.

¹⁵ T.J. Gallagher and A.J. Pearmain, Op. cit., p. 16.

Gambar 2.6¹⁶

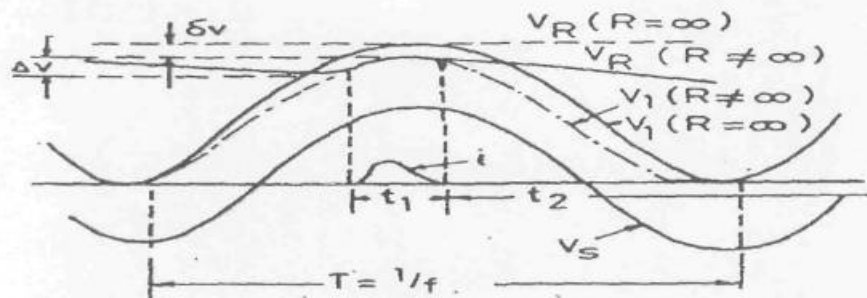
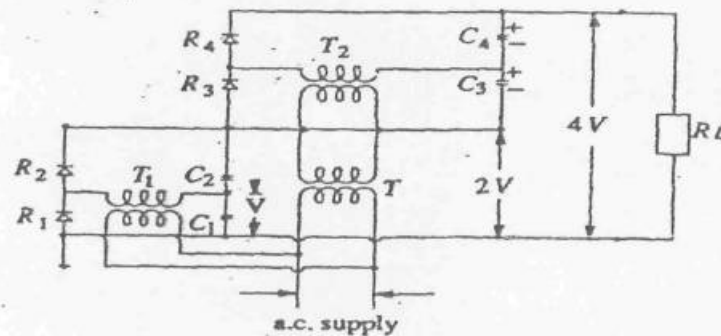
Tegangan Keluaran Penyearah Gelombang Penuh

7.4 *Voltage Doubler* dan Rangkaian *Cascade*Gambar 2.7¹⁷Rangkaian *Voltage Doubler*

Pada rangkaian *voltage doubler* yang diperlihatkan oleh Gambar 2.7 diatas, kapasitor C_1 diisi melalui dioda D_1 sebesar $+V_{\max}$ saat tegangan input negatif. Ketika tegangan trafo naik ke positif $+V_{\max}$, tegangan pada terminal C_1 naik menjadi $+2V_{\max}$ ($+V_{\max}$ sumber dijumlahkan dengan $+V_{\max}$ Kapasitor C_1), sehingga kapasitor C_2 diisi melalui dioda D_2 sebesar $2V_{\max}$.

¹⁶ M. Khalifa. *High Voltage Engineering Theory and Practice*. (New York : Marcel Dekker, 1990). p. 417.

¹⁷ T.J. Gallagher and A.J. Pearmain, Op. cit., p.16

Gambar 2.8¹⁸Tegangan Output *Voltage Doubler*Gambar 2.9¹⁹Rangkaian *Cascade*

Rangkaian *cascade* pada Gambar 2.9 digunakan apabila diperlukan tegangan output (DC) yang lebih besar tanpa perubahan level tegangan trafo input. Rectifier R_1 dan R_2 dengan trafo T_1 dan kapasitor C_1 dan C_2 menghasilkan tegangan output 2V dengan cara yang sama pada *Voltage Doubler* diatas. Rangkaian ini diduplikasi lalu dihubungkan seri (*Cascade*) untuk mendapatkan tegangan ganda selanjutnya sebesar 4V. Trafo T adalah

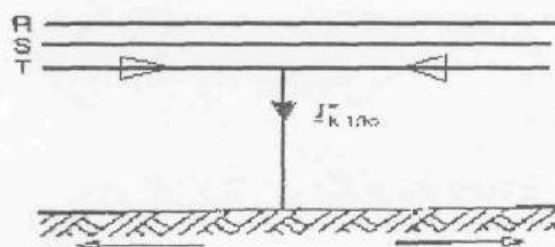
¹⁸ M. Khalifa, Op. cit., p. 18.

¹⁹ M.S. Naidu and V. Kamaraju. *High Voltage Engineering*. 2nd ed. (New Delhi : McGraw-Hill, 1995). p. 108

trafo pemisah untuk memberikan isolasi sebesar $2V_{\max}$ ketika trafo T_2 bertegangan $2V_{\max}$ terhadap *ground*.

8. TEORI GANGGUAN

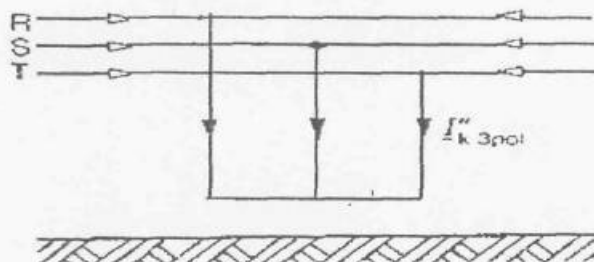
8.1 Gangguan Satu Fasa ke Tanah



Gambar 2.10²⁰

Gangguan Satu Fasa ke Tanah

8.2 Gangguan Tiga Fasa



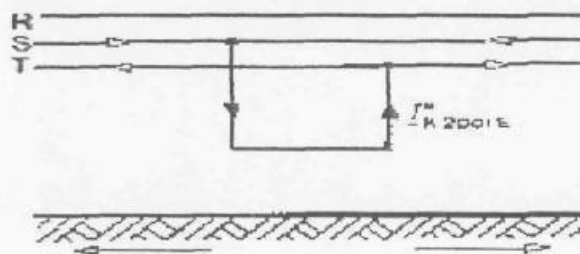
Gambar 2.11²¹

Gangguan Tiga Fasa

²⁰ Siemens. *Electrical Installations Handbook*. Vol. 1. p. 32.

²¹ Ibid.

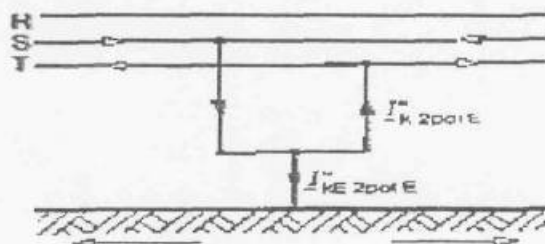
8.3 Gangguan Phasa ke Phasa



Gambar 2.12²²

Gangguan Phasa ke Phasa

8.4 Gangguan Dua Phasa ke Tanah



Gambar 2.13²³

Gangguan Dua Phasa ke Tanah

9. ARUS BOCOR (*LEAKAGE CURRENT*) PADA ISOLATOR

Arus bocor adalah arus yang melewati permukaan isolator isolator dan sebagian lagi melewati tubuh (volume) isolator apabila tegangan diterapkan pada isolator tersebut. Apabila terjadi pencemaran pada isolator tersebut, baik berupa pencemaran garam, debu maupun pencemaran kimia, maka resistansi permukaan isolator akan berkurang karena arus bocor yang melewati permukaan isolator

²² Ibid.

²³ Ibid.

tersebut makin besar. Arus bocor ini akan mengalir ke bumi melalui *travers* lalu ke cross arm dan selanjutnya ke kawat ground yang ada dalam rongga tiang beton. Apabila tiang jaringan terbuat dari besi, maka arus bocor mengalir ke bumi melewati tiang tersebut. Hubungan antara besarnya arus bocor dan kekuatan resistansi isolator tersebut diperlihatkan oleh persamaan dibawah :

$$V = I \times R \quad \dots\dots\dots(2.10)^{24}$$

dimana :

V = Tegangan yang diterapkan pada isolator (V).

I = Arus bocor yang mengalir pada isolator (A).

R = Resistansi isolator (Ω).

10. SUSUT ENERGI PADA ISOLATOR

Jika ada arus bocor yang mengalir pada isolator, maka pada isolator tersebut akan terjadi susut energi sebesar :

$$P = I^2 \times R \times t \quad \dots\dots\dots(2.11)^{25}$$

dimana :

P = Susut energi pada isolator (KWh)

V = Tegangan yang diterapkan pada isolator (V).

I = Arus bocor yang mengalir pada isolator (A).

R = Resistansi isolator (Ω).

t = Waktu (jam)

²⁴ Ibid.

²⁵ Ibid.

11. TEORI KEANDALAN

Keandalan suatu sistem jaringan distribusi listrik dinyatakan oleh 2 (dua) indikasi dibawah, yaitu :

- SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*)

$$SAIFI = \frac{JumlahPemadamanDalamSetahun}{JumlahPelanggan} \dots\dots\dots(2.12)^{26}$$

- SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*)

$$SAIDI = \frac{JumlahLamanyaPemadamanDalamSetahun}{JumlahPelanggan} \dots\dots\dots(2.13)^{27}$$

²⁶ James J. Burke. *Power Distribution Engineering*.

²⁷ Ibid.