

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Arus Gangguan ke Tanah

Arus gangguan ke tanah yang mengalir di tempat gangguan maupun ditempat pengetanahan peralatan akan menimbulkan perbedaan tegangan di permukaan tanah yang dapat mengakibatkan terjadinya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang dapat melampaui batas-batas keamanan manusia dan binatang (Hutauruk, 1999:148). Maka dari itu, besarnya arus gangguan ke tanah yang terjadi berpengaruh besar dalam penentuan desain sistem pengetanahan peralatan.

Dalam sistem tenaga listrik terdapat 3 jenis arus gangguan ke tanah antara lain adalah gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa ke tanah, dan gangguan tiga fasa ke tanah. Berdasarkan penelitian, gangguan satu fasa ke tanah memiliki probabilitas terjadinya mencapai 80%. Sedangkan gangguan dua fasa ke tanah kurang lebih mencapai 15% dan sisanya kurang dari 5% merupakan probabilitas terjadinya gangguan 3 fasa ke tanah (Stevenson, 1994:380).

Berdasarkan IEEE std 80 penentuan arus gangguan yang akan digunakan untuk mendesain sistem pengetanahan berdasarkan besarnya nilai arus gangguan tanah terbesar yang terjadi dan probabilitas terjadinya arus gangguan ke tanah tersebut. IEEE membatasi analisis arus gangguan ke tanah sebagai dasar penentuan desain pengetanahan berdasarkan probabilitas terjadinya yaitu gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah.

Besarnya arus gangguan sangat bergantung pada nilai dari impedansi urutan sistem tersebut. Dengan adanya rangkaian impedansi urutan ini, arus gangguan ke tanah terbesar yang terjadi di suatu titik pada sistem dapat dicari yaitu dengan mendapatkan nilai penyederhanaan dari impedansi ekuivalen urutannya. Perhitungan nilai arus gangguan ke tanah untuk arus gangguan satu fasa dan dua fasa ke tanah menggunakan persamaan berdasarkan jenis gangguan yang terjadi, yaitu :

2.1.1 Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Gambar 2.1 menunjukkan hubungan jaringan urutan untuk gangguan satu fasa ke tanah. Persamaan - persamaan saat gangguan ke tanah terjadi pada salah satu fasa, contoh pada fasa a (Sulasno, 1993 : 183) adalah :

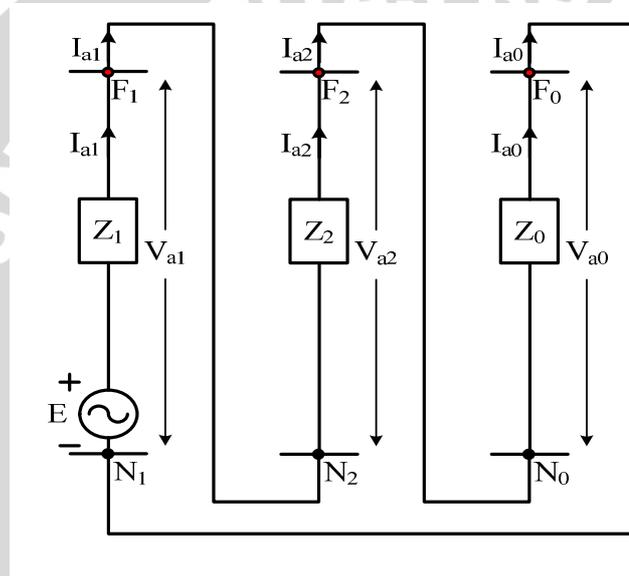
$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.1)$$

Karena :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}, \text{ sehingga } I_a = 3 \cdot I_{a1} \quad (2.2)$$

Maka besar arus gangguan ke tanahnya :

$$I_{f(1\phi - G)} = I_a = \frac{3 \cdot V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.3)$$



Gambar 2.1 Hubungan Jaringan Urutan Gangguan Satu Fasa ke Tanah.
Sumber : Sulasno, 1993 : 184.

2.1.2 Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Gambar 2.2 menunjukkan hubungan jaringan urutan untuk gangguan dua fasa ke tanah. Persamaan-persamaan saat gangguan tanah terjadi pada dua fasa, contoh fasa b dan c (Sulasno, 1993 : 196) adalah :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{(Z_1 + (Z_2 // Z_0))} \quad (2.4)$$

$$I_{a2} = - \left(\frac{Z_0}{(Z_2 + Z_0)} \right) \cdot I_{a1} \quad (2.5)$$

$$I_{a0} = - \left(\frac{Z_2}{(Z_2 + Z_0)} \right) \cdot I_{a1} \quad (2.6)$$

Karena :

$$I_a = 0 \quad (2.7)$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (2.8)$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \quad (2.9)$$

Maka besar arus gangguan ke tanah nya :

$$I_{f(2\phi-G)} = I_b + I_c \text{ atau } I_{f(2\phi-G)} = 3 \cdot I_{a0} \quad (2.10)$$

dengan :

V_f = Tegangan fasa Pembangkit atau generator

Z_1 = Impedansi ekivalen urutan positif

Z_2 = Impedansi ekivalen urutan negatif

Z_0 = Impedansi ekivalen urutan nol

I_a = Arus yang mengalir pada fasa a

I_b = Arus yang mengalir pada fasa b

I_c = Arus yang mengalir pada fasa c

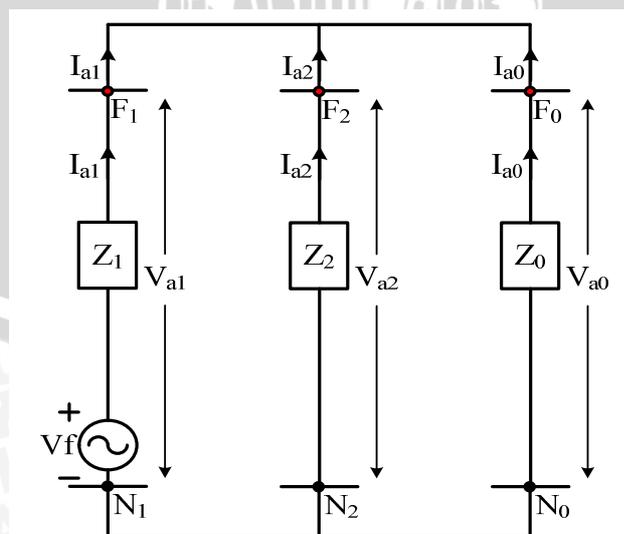
I_{a1} = Arus urutan positif fasa a

I_{a2} = Arus urutan negatif fasa a

I_{a0} = Arus urutan nol fasa a

$a = 1 \angle 120^\circ$

$a^2 = 1 \angle 240^\circ$



Gambar 2.2 Hubungan Jaringan Urutan Gangguan Dua Fasa ke Tanah.

Sumber : Sulasno, 1993 : 195

Impedansi urutan positif dan negatif biasanya memiliki nilai yang identik. Sedangkan untuk rangkaian ekivalen urutan nol untuk Transformator tiga fasa sepantasnya kita berikan perhatian khusus. Berbagai kombinasi yang mungkin dari gulungan primer dan sekunder yang terhubung Y atau Δ akan mengubah pula jaringan urutan nolnya. Berbagai kombinasi hubungan Transformator diperlihatkan pada Tabel. 2.1.

Jika impedansi Z_n disisipkan di antara netral dan tanah rangkaian yang terhubung Y, maka impedansi sebesar $3 \cdot Z_n$ harus ditempatkan di antara netral dan rel pedoman jaringan urutan nolnya.

Tabel 2.1 Berbagai macam hubungan Transformator

CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

Sumber : Stevenson,1994:450

2.2 Arus Fibrilasi

Arus Fibrilasi adalah arus yang dapat menyebabkan kerja otot jantung berhenti bekerja (*ventricular fibrillation*) yang berakibat pingsan hingga kematian. Tegangan sentuh dan tegangan langkah besarnya harus dibatasi agar arus yang mengalir ke dalam tubuh manusia tidak melebihi nilai arus fibrilasi dalam waktu tertentu. Lama dan besarnya arus fibrilasi yang diijinkan tergantung pada berat tubuh seseorang. Dari hasil percobaan yang telah dilakukan Dalziel disimpulkan bahwa orang dengan berat 50 kg

masih dapat bertahan terhadap besar arus dan waktu yang ditentukan oleh Persamaan 2.11. (Hutaaruk, 1999:135)

$$I_k^2 \cdot t_f = K \text{ atau } I_k = \frac{k}{\sqrt{t_f}} \quad (2.11)$$

dengan :

I_k = nilai efektif (rms) arus yang melalui tubuh manusia dalam A

t_f = durasi/lama gangguan (waktu pemutusan) dalam detik

K = konstanta energi kejutan

k = \sqrt{K}

k_{50} = 0,116 A (untuk manusia dengan berat 50 kg)

k_{70} = 0,157 A (untuk manusia dengan berat 70 kg)

Lama waktu gangguan (t_f) tergantung dari beberapa faktor, yaitu stabilitas sistem, tipe *Switchyard*, tipe rele dan pemutus daya (CB) yang digunakan. Umumnya waktu t_f terdiri dari waktu CB bekerja membutuhkan 0,06 detik dan waktu rele beroperasi membutuhkan 0,2 detik atau total waktu yang dibutuhkan untuk membebaskan gangguan adalah 0,26 detik. Dengan memberikan faktor keamanan 2 hingga 3 kali, maka waktu t_f dapat diambil rentang 0,52 – 0,78 detik. Jadi pengambilan waktu t_f sebesar 0,52 detik sampai 0,75 detik adalah realistis (Hutaaruk, 1999:149). IEEE membatasi pemilihan lama waktu gangguan (t_f) antara 0,25 detik sampai 1 detik. (IEEE std 80, 2000:87).

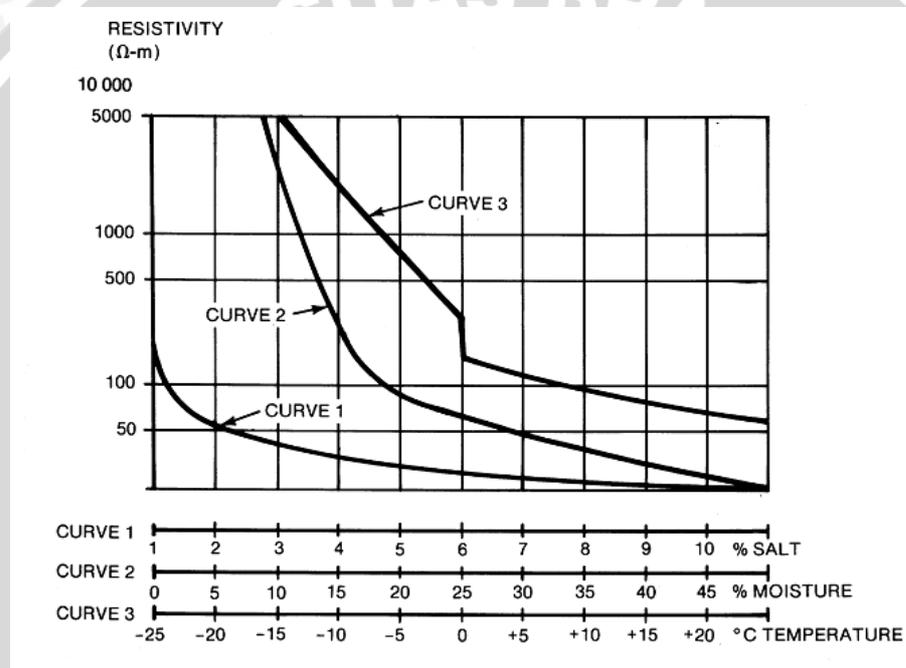
2.3 Tahanan Jenis Tanah dan Pengukurannya

Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tidaklah sama. Beberapa faktor yang mempengaruhi tahanan jenis tanah yaitu : (Hutaaruk, 1999:141)

- a. Jenis tanah, seperti tanah liat, tanah rawa, tanah berbatu, tanah berpasir, tanah gambut dan sebagainya.
- b. Lapisan tanah, seperti berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan atau dengan tahanan jenis tanah seragam (*uniform*).
- c. Kelembaban tanah seperti basah atau kering.
- d. Temperatur tanah.
- e. Unsur kimia yang terkandung dalam tanah, seperti garam, logam dan mineral – mineral lainnya.

Tahanan jenis tanah mengalami kenaikan yang drastis ketika kadar air menyumbang kurang dari 15% dari berat tanah. Kadar air tergantung pada ukuran butir, kepadatan, dan keragamannya dari ukuran butir tanah. Namun, seperti yang ditunjukkan pada kurva 2 dari Gambar 2.1, tahanan jenis sedikit terpengaruh setelah kadar air melebihi sekitar 22%, seperti yang ditunjukkan pada IEEE Std 142-1991

Pengaruh suhu pada tahanan jenis tanah hampir diabaikan untuk suhu di atas titik beku. Di 0° C, air dalam tanah mulai membeku dan peningkatan tahanan jenis cepat. kurva 3 menunjukkan ini khas variasi untuk tanah lempung berpasir yang mengandung 15,2% kadar air.



Gambar 2.3 Pengaruh dari kadar air, suhu, dan kadar garam tanah.
Sumber : IEEE std 80, 2000:50

Komposisi dan jumlah garam larut, asam, alkali yang ada dalam tanah dapat mempengaruhi tahanan jenis nya. Kurva 1 Gambar 2.3 mengilustrasikan efek khas garam (natrium klorida) pada tahanan jenis tanah yang mengandung 30% kadar air.

Pengukuran tahanan jenis tanah dapat dilakukan berbagai cara, salah satunya adalah menggunakan metode geolistrik tahanan jenis. Pengukuran metode geolistrik tahanan jenis memanfaatkan sifat kelistrikan daya hambat bumi yang mengasumsikan bahwa jika di permukaan bumi diinjeksikan suatu arus listrik, maka bumi sebagai penghantar yang mempunyai hambatan akan menimbulkan adanya respon beda potensial tertentu.

Metode geolistrik tahanan jenis merupakan salah satu metode aktif dalam geofisika, oleh karena itu pengukuran tahanan jenis bumi dilakukan dengan cara menginjeksikan arus ke dalam bumi melalui 2 konduktor arus (C1 dan C2), dan mengukur hasil respon bumi terhadap arus injeksi yang berupa beda potensial dan resistansi yang ditimbulkannya pada 2 konduktor potensial (P1 dan P2). Untuk susunan sederhana pengukuran diperlihatkan Gambar 2.4.

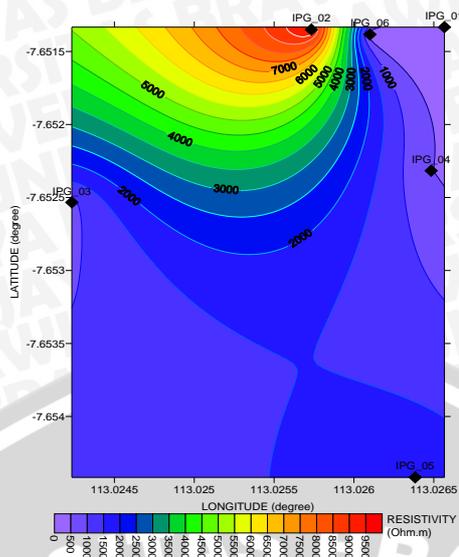
Nilai tahanan jenis yang dihitung bukanlah nilai tahanan jenis bawah permukaan yang sebenarnya, namun merupakan nilai tahanan jenis semu (*apparent resistivity*) yang merupakan hasil respon tahanan jenis kontribusi dari bumi secara keseluruhan, sesuai jangkauan arus injeksi dan ekuipotensial yang dianggap homogen yang memberikan nilai resistansi yang sama untuk susunan konduktor yang sama. Untuk selanjutnya nilai tahanan jenis semu (*apparent resistivity*) harus diproses untuk menjadi nilai tahanan jenis sebenarnya (*true resistivity*) untuk masing-masing lapis *Vertical Electrical Sounding (VES)*. (Laporan investigasi PLTG Grati 300 MW, 2013:V-3)



Gambar 2.4 Susunan sederhana 4 konduktor untuk mengukur tahanan jenis bawah permukaan

Sumber : Laporan investigasi PLTG Grati 300 MW, 2013:V-3

Pengolahan data nilai untuk menentukan tahanan jenis sebenarnya (*true resistivity*) menggunakan perangkat lunak komputer. Perangkat lunak ini menggunakan pencocokan kurva metode *forward* untuk mendapatkan parameter model yang berupa jumlah lapisan dan nilai tahanan jenis sebagai inisial. Sedangkan untuk mendapatkan pencocokan kurva lapangan terhadap kurva model yang terbaik digunakan metode *invers*. Untuk selanjutnya dilakukan analisis dan interpretasi dengan mengkorelasikan nilai tahanan jenis sebenarnya terhadap geologi setempat. (Laporan investigasi PLTG Grati 300 MW, 2013:V-7)



Gambar 2.5 Contoh hasil akhir dari pengolahan data geolistrik
 Sumber : Laporan investigasi PLTG Grati 300 MW, 2013:V-21

Hasil akhir dari pengolahan data ini adalah didapat kurve-kurve *iso-resistivity* pada setiap lapisan. Contoh hasil akhir dari pengolahan data geolistrik diperlihatkan seperti Gambar 2.5. Terlihat pada Gambar 2.5 nilai tahanan jenis tanah ditunjukkan dengan kurva-kurva warna yang berbeda sesuai besarnya nilai tahanan jenis yang terukur.

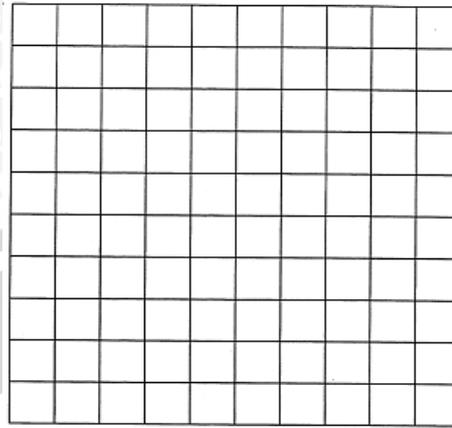
2.4 Pengetanahan Peralatan Sistem Grid

Pengetanahan grid merupakan salah satu sistem pengetanahan yang banyak digunakan pada Pembangkit dan Gardu Induk karena mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan sistem pengetanahan rod. Beberapa keuntungan tersebut antara lain pemasangannya lebih mudah terutama pada daerah berbatu serta gradien tegangan pada sistem pengetanahan grid akan lebih rata.

Sistem pembumian grid dilakukan dengan cara menanamkan batang-batang konduktor sejajar dengan permukaan tanah pada kedalaman tertentu. Kedalaman penanaman konduktor biasanya diantara 0,5 sampai 1,5 meter. Batang-batang konduktor tersebut terhubung satu dengan yang lainnya, sehingga membentuk beberapa buah mesh dengan jarak antar konduktor 2 meter atau lebih (IEEE std 80, 2000:88).

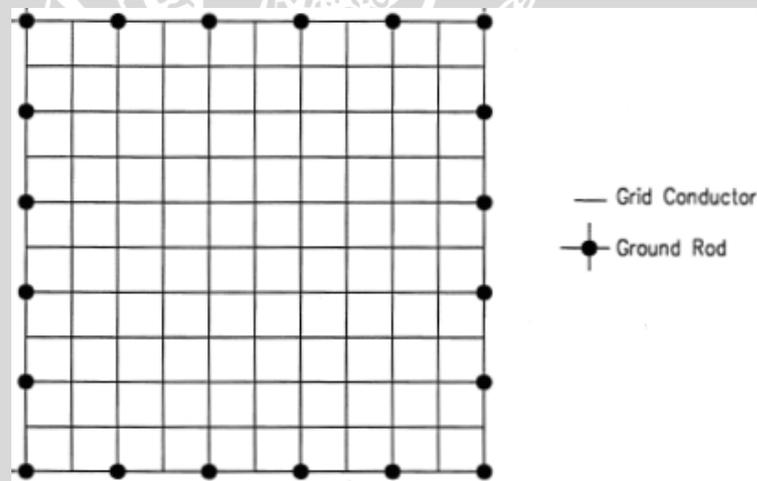
Distribusi tegangan tergantung pada jarak konduktor paralel, makin besar jarak konduktor maka distribusi tegangannya makin tidak rata dan makin dekat jarak konduktor paralel maka terdistribusi tegangannya semakin merata. Dengan jarak konduktor semakin rapat maka kondisi konduktor pengetanahan *plate* semakin tercapai.

(IEEE std 80, 2000:95). Gambar 2.6 merupakan contoh desain sistem pengetanahan grid .



Gambar 2.6 Sistem pengetanahan *grid* tanpa *rod*
Sumber : IEEE std 80, 2000:132

Untuk mengurangi nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah digunakan sistem pengetanahan kombinasi antara grid dengan rod. Gambar 2.7 merupakan contoh desain sistem pengetanahan grid dengan rod.



Gambar 2.7 Sistem pengetanahan grid dengan rod
Sumber : IEEE std 80, 2000:135

Menghitung nilai tahanan pengetanahan adalah salah satu langkah pertama dalam menentukan ukuran dan dasar tata letak dari sistem grounding. Resistensi tergantung terutama pada area yang akan ditempati oleh sistem pengetanahan, yang biasanya dikenal dalam tahap desain awal. Untuk mencari tahanan sistem pengetanahan

grid dengan kombinasi dengan rod dapat digunakan Persamaan 2.12 dari Laurent dan Nieman untuk keadaan tanah seragam sebagai berikut :(IEEE std 80, 2000:64)

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A} + \frac{\rho}{L_T}} \quad (2.12)$$

Keterangan:

R_g = Tahanan pengetanahan (Ω)

ρ = Tahanan jenis tanah (Ω -m)

A = Luas area yang dicakupi pengetanahan grid (m^2)

L_T = Panjang total konduktor yang tertanam (m)

Selanjutnya dari Persamaan 2.12 digunakan untuk menghitung efek dari kedalaman grid. Persamaannya berubah menjadi persamaan 2.13 (Agrawal, 2001:710)

$$R_g = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (2.13)$$

Keterangan :

h = kedalaman dari grid (m)

Untuk Gardu Induk yang besar , nilai tahanan pengetanahan yang baik sekitar 1 Ω atau kurang. Sedangkan untuk Gardu Induk distribusi kecil, nilai tahanannya diperbolehkan sekitar 1 Ω sampai 5 Ω . (IEEE std 80, 2000:64)

2.5 Penentuan Ukuran Konduktor Pengetanahan

Luas penampang konduktor minimum pengetanahan dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2.14. (IEEE Std 80, 2000:23)

$$A_{mm^2} = I_F \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_f \cdot a_r \cdot p_r} \right) \ln \left(\frac{K_O + T_m}{K_O + T_a} \right)}} \quad (2.14)$$

Tabel 2.2 Beberapa Jenis Material dan koefisiennya

Description	Material conductivity (%)	α_r factor at 20 °C (1/°C)	K_0 at 0 °C (0 °C)	Fusing ^a temperature T_m (°C)	ρ_r 20 °C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP thermal capacity [J/(cm ³ ·°C)]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod ^b	20.0	0.003 78	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	61.0	0.004 03	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.003 53	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.003 47	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.003 60	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.001 60	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod ^c	9.8	0.001 60	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	7.4	0.001 30	740	1400	72.00	4.03

Sumber : IEEE Std 80, 2000:42

Bila luas penampang konduktor dan jenis konduktor sudah ditetapkan, maka dapat dicari arus terbesar yang dapat dialirkan oleh konduktor dengan merubah Persamaan 2.14 menjadi Persamaan 2.15. Konstanta berbagai macam bahan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

$$I_F = A_{mm^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_f \cdot a_r \cdot p_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)} \quad (2.15)$$

Dengan :

A_{mm^2} = penampang konduktor (mm^2)

I_F = arus gangguan 1 fasa atau 2 fasa ke tanah terbesar (A)

t_f = lama waktu gangguan (detik)

T_m = suhu terbesar konduktor tembaga yang diijinkan (°C)

T_a	= suhu sekeliling tahunan terbesar ($^{\circ}\text{C}$)
T_r	= suhu referensi untuk konstanta material ($^{\circ}\text{C}$)
a_o	= koefisien panas tahanan jenis pada 0°C ($1/^{\circ}\text{C}$)
a_r	= koefisien panas tahanan jenis pada suhu referensi T_r ($1/^{\circ}\text{C}$)
ρ_r	= tahanan jenis konduktor pada suhu referensi ($\mu\Omega\text{-cm}$)
K_0	= $1/a_o$ ($^{\circ}\text{C}$)
TCAP	= kapasitas panas per unit volume ($\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$)

2.6 Bahaya yang Timbul Saat Terjadi Arus Gangguan ke Tanah

Secara umum bahaya–bahaya yang mungkin ditimbulkan oleh tegangan atau arus listrik terhadap manusia mulai dari yang ringan sampai yang berat yaitu pingsan sampai kematian. Ringan atau berat bahaya yang timbul, tergantung dari faktor–faktor dibawah ini sebagai berikut : (Hutauruk, 1999:129)

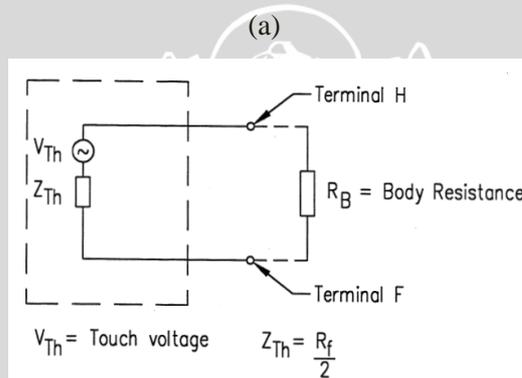
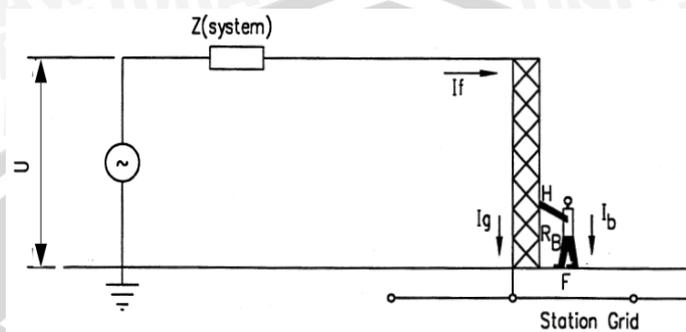
- Tegangan dan kondisi orang terhadap tegangan tersebut.
- Besarnya arus yang melewati tubuh manusia.
- Jenis arus, searah atau bolak – balik.

Pada sistem tegangan tinggi sering terjadi kecelakaan terhadap manusia, dalam hal terjadi tegangan kontak langsung atau dalam hal manusia berada didalam suatu daerah yang mempunyai gradien tegangan yang tinggi. Sebenarnya yang menyebabkan bahaya tersebut adalah besarnya arus yang mengalir dalam tubuh manusia.

Arus gangguan ini akan mengalir melalui bagian–bagian peralatan yang terbuat dari logam dan juga mengalir dalam tanah disekitar area yang dilingkupi sistem pengetanahan. Arus gangguan tersebut dapat menimbulkan gradien tegangan diantara peralatan, peralatan dengan tanah dan juga gradien tegangan pada permukaan tanah itu sendiri. Untuk menganalisa lebih lanjut akan ditinjau beberapa kemungkinan terjadinya tegangan dan kondisi orang yang sedang berada di dalam dan sekitar area yang dilingkupi sistem pengetanahan tersebut. Untuk menganalisis keadaan ini maka diambil beberapa pendekatan sesuai dengan kondisi orang yang sedang berada didalam atau sekitar area yang dilingkupi sistem pengetanahan tersebut pada saat terjadi arus gangguan ke tanah. Pada hakekatnya tegangan selama mengalirnya arus gangguan tanah dapat dibedakan menjadi 2 yaitu Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah.

2.6.1 Tegangan Sentuh

Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat diantara suatu obyek yang disentuh dan suatu titik berjarak 1 meter, dengan asumsi bahwa objek yang disentuh dihubungkan dengan konduktor pengetanahan yang berada di bawahnya (T.S. Hutaeruk, 1999:130), seperti yang terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 (a) Tegangan sentuh dan (b) rangkaian penggantinya
Sumber : IEEE Std 80, 2000:17-18

2.6.1.1 Tegangan Sentuh yang Diizinkan

Manusia dengan berat badan 50 dan 70 Kg yang berada diantara satu objek dapat dihitung tegangan sentuh yang diizinkan pada Persamaan 2.16 dan 2.17 : (IEEE Std 80, 2000:27)

$$E_{t50} = (1000 + 1,5 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_f}} \quad (2.16)$$

$$E_{t70} = (1000 + 1,5 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_f}} \quad (2.17)$$

Keterangan :

E_{t50} = Tegangan sentuh untuk berat badan manusia 50 kg,

E_{t70} = Tegangan sentuh untuk berat badan manusia 70 kg,

- C_s = Faktor reduksi nilai tahanan jenis permukaan tanah
 ρ_s = Tahanan jenis permukaan material (lapisan batu koral), Ω -m
 t_f = Waktu gangguan tanah (waktu kejut), detik

Apabila tidak ada pengaman (seperti lapisan koral) yang digunakan pada lapisan permukaan dimana $C_s=1$ and $\rho_s = \rho$.

Nilai C_s dapat digunakan 5 % dari nilai analisa metode menurut Thapar, Gerez, dan Kejriwal. Faktor reduksi dari nilai tahanan jenis permukaan tanah diformulasikan pada Persamaan 2.18. (IEEE Std 80, 2000:23)

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot (1 - (\frac{\rho}{\rho_s}))}{2h_s + 0,09} \quad (2.18)$$

Keterangan:

h_s = Ketebalan lapisan batu koral antara 0,08 sampai 0,15 meter.

ρ = Tahanan jenis tanah (Ω -m)

ρ_s = Tahanan jenis permukaan material lapisan batu koral (Ω -m)

2.6.1.2 Tegangan Sentuh Terbesar yang Sebenarnya

Tegangan sentuh terbesar yang sebenarnya merupakan tegangan peralatan yang diketanahkan terhadap tengah-tengah daerah yang dibentuk konduktor grid (*center of mesh*) selama gangguan tanah. Tegangan sentuh terbesar ini menyatakan tegangan tertinggi yang mungkin timbul sebagai tegangan sentuh yang dapat dijumpai dalam sistem pengetanahan peralatan, dan inilah yang diambil sebagai tegangan untuk desain aman (Hutauruk, 1999:152). Tegangan sentuh terbesar dapat dihitung dengan Persamaan 2.19. (IEEE Std 80, 2000:91)

$$E_t = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_F}{L_M} \quad (2.19)$$

Faktor geometri K_m dapat dihitung dengan Persamaan 2.20. (IEEE Std 80, 2000:93)

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \quad (2.20)$$

Untuk sistem pengetanahan grid dengan rod berlaku $K_{ii} = 1$ dan

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (2.21)$$

Apabila sistem pengetanahan grid tidak menggunakan rod menjadi seperti ditunjukkan pada persamaan 2.22.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (2.22)$$

dan untuk K_h tidak berubah seperti ditunjukkan pada persamaan 2.21

Faktor ketidakmerataan kerapatan arus dapat dihitung dengan hubungannya dengan jumlah konduktor (n) dengan Persamaan 2.23. (IEEE Std 80, 2000:94)

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (2.23)$$

Dengan :

- K_i = Faktor ketidakmerataan kerapatan arus
- D = jarak antar konduktor paralel (m), pada sistem pengetanahan dengan jarak antar konduktor tidak seragam, untuk penentuan K_m diambil jarak antar konduktor yang terbesar.
- h = kedalaman penanaman konduktor (m)
- h_0 = referensi penanaman grid = 1 meter
- n = jumlah konduktor paralel (m)
- d = diameter konduktor pengetanahan (m)
- ρ = Tahanan jenis tanah (Ω -m)
- I_F = besar arus gangguan tanah
- L_M = penanaman konduktor efektif (m)

Menggunakan empat komponen bentuk grid dikembangkan di Thapar, Gerez, Balakrishnan, dan Blank, jumlah konduktor paralel efektif grid n dapat berlaku untuk

empat persegi panjang atau bentuk grid yang tidak beraturan yang dapat diwakili dengan jumlah konduktor paralel yang setara dari grid persegi panjang.

Jumlah konduktor paralel (n) dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.24 .(IEEE st 80, 2000:93)

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (2.24)$$

Dengan:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (2.25)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{2 \cdot \sqrt{A}}} \quad ; n_b = 1 \text{ untuk grid persegi} \quad (2.26)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0,7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}} \quad ; n_c = 1 \text{ untuk grid persegi dan persegi panjang} \quad (2.27)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 \cdot L_y^2}} \quad ; n_d = 1 \text{ untuk grid persegi, persegi panjang,} \quad (2.28)$$

dan bentuk persegi

A = Luas area sistem pengetanahan ($meter^2$)

L_x = Panjang grid terbesar sumbu x (meter)

L_y = Panjang grid terbesar sumbu y (meter)

D_m = Jarak antar konduktor paralel terbesar (meter)

Untuk grid dengan grounding rod dipojok atau diseluruh percabangan konduktor grid, panjang total penanaman konduktor efektif (L_M) dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.29. (IEEE st 80, 2000:94)

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 \cdot L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (2.29)$$

Dimana :

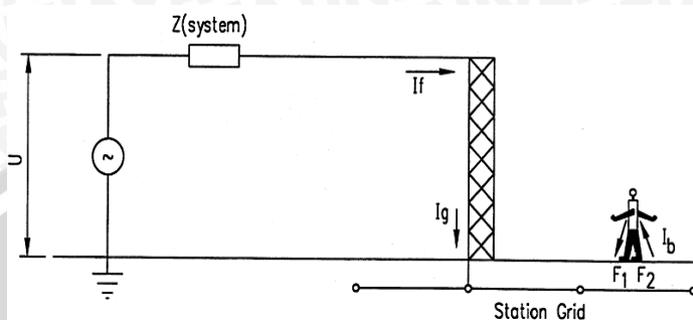
L_r = panjang masing-masing konduktor rod

L_R = panjang total konduktor rod

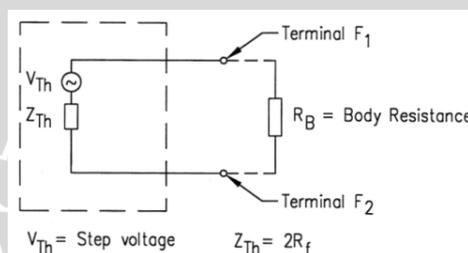
L_C = Panjang total konduktor grid

2.6.2 Tegangan Langkah

Tegangan langkah adalah tegangan yang timbul di antara dua kaki orang yang sedang berdiri diatas tanah yang sedang dialiri oleh arus gangguan ke tanah (T.S. Hutauruk, 1999:131), dapat dilihat pada Gambar 2.9.



(a)



(b)

Gambar 2.9 (a)Tegangan Langkah dan (b) Rangkaian Penggantinya
Sumber : IEEE Std 80, 2000:19

2.6.2.1 Tegangan Langkah yang Diizinkan

Tegangan langkah yang diizinkan untuk manusia dengan berat badan 50 dan 70 Kg dapat dihitung pada Persamaan 2.30 dan 2.31 : (IEEE Std 80, 2000:27)

$$E_{s50} = (1000 + 6 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_f}} \quad (2.30)$$

$$E_{s70} = (1000 + 6 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_f}} \quad (2.31)$$

Keterangan :

E_{t50} = Tegangan sentuh untuk berat badan manusia 50 kg,

E_{t70} = Tegangan sentuh untuk berat badan manusia 70 kg,

C_s = Faktor reduksi nilai tahanan jenis permukaan tanah

ρ_s = Tahanan jenis permukaan material (lapisan batu koral), Ohm-m

t_f = Waktu gangguan tanah (waktu kejut), detik

2.6.2.2 Tegangan Langkah Terbesar yang Sebenarnya

Tegangan langkah terbesar sebenarnya dapat dihitung dengan Persamaan 2.32 :
(IEEE std 80, 2000:94)

$$E_S = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_i \cdot I_F}{L_S} \quad (2.32)$$

Untuk pengetanahan grid menggunakan atau tidak menggunakan rod, total panjang efektif konduktor yang ditanamkan L_S adalah : (IEEE st 80, 2000:94)

$$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (2.33)$$

Menurut Sverak tegangan langkah terbesar diperkirakan terjadi lebih dari jarak 1 m, dimulai dan diperluas dari konduktor terluar pada sudut yang membagi dua sudut paling ekstrim dari grid. Untuk kedalaman biasa dari 0,25 m < h < 2,5 m faktor geometri, K_S dinyatakan pada Persamaan 2.35. (IEEE st 80, 2000:94)

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right) \quad (2.35)$$

Keterangan:

- D = jarak antar konduktor paralel (m), pada sistem pengetanahan dengan jarak antar konduktor tidak seragam, untuk K_S diambil jarak antar konduktor yang terkecil.
- h = kedalaman penanaman konduktor (m)
- n = jumlah konduktor paralel efektif (m)
- d = diameter konduktor kisi-kisi (m)
- ρ = tahanan jenis tanah rata-rata (Ω -m)
- I_F = arus gangguan 1 fasa atau 2 fasa ke tanah terbesar (A)