

FAKTOR REDUKSI ARUS GANGGUAN PADA KABEL 150 KV FASA TIGA BERINTI TUNGGAL

Rinna Hariyati¹⁾, Retno Aita Diantari²⁾, Abi Cristian³⁾

Teknik Elektro, STT-PLN

¹rinna.hariyati@sttpln.ac.id

²retno_aita@yahoo.co.id

³abi.chritian90@gmail.com

Abstract : *In urban areas the use of underground cables is growing rapidly in recent. Cable line are used to distribute electrical energy is called high voltage cable line. When a ground fault occurs in a power network, a ground fault current flow towards the sources through the earth and the other flow through mettalic sheath of the cable. For safety in substation reduction factor must be small. In this paper present the method for calculate reduction factor value at three single core cable. This method can give the value of reduction factor for different distance and different ground fault locations,happened between source substation and supplied substation.*

Keywords : *reduction factor, ground cable, grounding Generator.*

Abstrak : Di daerah perkotaan pemakaian kabel bawah tanah dewasa ini semakin meningkat. Saluran kabel yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik dari satu gardu ke gardu lain disebut saluran kabel tegangan tinggi. Apabila terjadi gangguan kawat ke tanah maka arus akan mengalir kembali ke sumber melalui tanah dan akan mengalir melalui selubung kabel. Untuk keselamatan di gardu induk faktor reduksi ini harus kecil. Pada penulisan ini akan dibahas metode untuk menghitung nilai faktor reduksi pada kabel tiga fasa berinti tunggal. Metode tersebut dapat memberikan nilai faktor reduksi untuk jarak dan lokasi gangguan yang berbeda, yang terjadi antara gardu induk sumber (*Source Substation*) dan gardu induk penerima (*Suplied Substation*).

Kata Kunci : faktor reduksi, kabel tanah, pembumian

1. PENDAHULUAN

Di tengah era globalisasi dan kemajuan perekonomian menyebabkan meningkatnya kebutuhan pasokan tenaga listrik yang mencukupi bagi seluruh konsumen masyarakat baik umum, industri, maupun gedung-gedung perkantoran. Pada proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit ke gardu induk atau dari gardu induk ke gardu induk diperlukan transmisi. Transmisi tersebut dapat berupa SUTT atau SKTT. SKTT banyak dipergunakan pada daerah perkotaan yang membutuhkan keandalan penyaluran daya yang tinggi. Selain lebih aman terhadap gangguan alam, kawasan yang didistribusi tampak lebih rapi karena tidak terdapat saluran-saluran udara dan tiang-tiang listrik.

Kabel tanah harus mampu mengalirkan arus secara maksimum tanpa adanya pemanasan berlebih. Pemanasan tersebut dapat disebabkan oleh besarnya rugi-rugi dengan memperhatikan kondisi suhu tempat pemasangan kabel tanah tersebut.

Kabel tanah yang banyak digunakan pada jaringan distribusi 150 kV yaitu *Single Core* (kabel tanah berinti satu). *Three Single Core* (kabel tanah berinti tiga).

Tujuan dan manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui cara menghitung faktor reduksi apabila terjadi gangguan satu fasa ke tanah pada kabel tanah.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Transmisi Tegangan Tinggi Menggunakan Saluran Kabel

Untuk menyalurkan tenaga listrik diperlukan transmisi, transmisi tersebut dapat berupa saluran udara tegangan tinggi (SUTT) atau saluran kabel tegangan tinggi (SKTT). Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT), merupakan jenis saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam didalam tanah. Kategori saluran seperti ini adalah yang sering digunakan untuk pemasangan didalam kota. SKTT digunakan di perkotaan dengan beberapa pertimbangan:

1. Di tengah kota besar tidak memungkinkan dipasang SUTT, karena sangat sulit mendapatkan lahan untuk lapak tower.
2. Untuk ruang bebas juga sulit dan timbulnya protes dari masyarakat karena padat bangunan dan banyak gedung-gedung tinggi.
3. Pertimbangan keamanan dan estetika.

2.2 Kabel Tanah

Salah satu penghantar tenaga listrik dilakukan melalui kawat udara, akan tetapi sesuai dengan kemajuan perkembangan kota, maka kawat listrik yang bergantung di tengah-tengah kota dirasakan sangat mengganggu pemandangan, lagi pula berbahaya bagi keselamatan umum. Mengingat bahwa sebagian besar pemakai tenaga listrik tinggal di kota dan kebutuhan akan tenaga listrik terus meningkat, sehingga pemasangan kawat udara terus bertambah. Sehingga lama kelamaan kawat penghantar tenaga listrik tersebut akan mengganggu pemandangan di jalan-jalan kota, oleh karena itu dirasa perlu untuk membuat kabel yang dapat ditanam di dalam tanah. Namun penyambungan kabel di dalam tanah juga banyak menimbulkan bahaya, sehingga harus diperhatikan cara penanamannya dan penyambungannya agar dapat terhindar dari gangguan yang akan terjadi.

Sesuai dengan penggunaannya, telah dikembangkan banyak sekali desain kabel dengan konstruksi bahan, kemampuan dan level tegangan yang bermacam-macam. Karena banyaknya jenis maka

perlu diadakan pembatasan, yaitu pada kabel-kabel tegangan menengah. Kabel-kabel ini banyak dipakai di Indonesia.

2.3 Konstruksi Kabel Tanah

Sebagai hantaran berisolasi, konstruksi dibagi menjadi:

- Bagian Utama

Bagian utama merupakan bagian yang harus ada (dimiliki) oleh kabel tenaga listrik, yaitu:

1. Penghantar (Konduktor)

Dilihat dari inti kabel (*core cable*) maka kabel dapat juga dibedakan dengan kabel yang mempunyai satu inti (*single core*), tiga inti (*three core*) dan sebagainya. Setiap inti kabel merupakan hantaran, bentuk dari hantaran dapat direncanakan sesuai dengan kebutuhannya.

2. Isolasi

Isolasi merupakan faktor penting pada sistem tenaga listrik. Salah satu gangguan penyaluran tenaga dengan mempergunakan kabel adalah terjadi kerusakan pada isolasinya. Dengan demikian perencanaan kabel harus disesuaikan dengan penggunaannya sehingga bahan isolasinya dapat disesuaikan dengan kemampuan kabel tersebut.

3. Tabir (*screen*)

Tabir ini berfungsi untuk meratakan distribusi tegangan (potensial), oleh karena itu tabir harus dibuat dari bahan semikonduktor.

4. Selubung (*Sheath*)

Selubung berfungsi untuk melindungi inti kabel dari pengaruh luar dan juga berfungsi sebagai:

- Pelindung terhadap korosi
- Penahan gaya mekanis
- Pelindung/pengaman terhadap gaya listrik
- Mencegah keluarnya minyak pada kabel kertas yang diresapi minyak (*impregnated paper*) dan mencegah masuknya uap air/cairan ke dalam kabel.

5. Bagian pelengkap

Sedangkan bagian pelengkapnya ialah bagian yang hanya melengkapi kabel jika dipergunakan untuk memperkuat/ memperbaiki sifat-sifat kabel untuk melindungi kabel. Bagian-bagian tersebut adalah sebagai berikut:

- Bantalan (*bedding*)

Bantalan adalah lapisan yang terbuat dari serat-serat. Baik yang diresapi minyak atau tidak dipasang/dipakai kompon kedap air dan diletakkan di bawah perisai (*armoured*). Guna bantalan kedap air adalah untuk kedudukan perisai dan mencegah proses elektrolisa, sehingga tidak merusak bagian dalamnya. Beberapa bahan dari bantalan di antaranya:

- Pita kapas (*cotton tape*)
- Pita kertas (*paper tape*)
- Jute

- Bahan pengisi (*filler*)

Untuk konstruksi kabel berinti tiga atau lebih (*multi-core*) bila setelah pemasangan ketiga intinya masih ada ruang/celah yang tertinggal sehingga diperlukan suatu bahan yang dapat mengisi ruangan tersebut, sehingga didapatkan bentuk kabel yang bulat. Bahan yang mengisi celah ini dinamakan bahan pengisi (*filler*)

- Perisai (*armoured*)

Karena bahan isolasi mempunyai sifat mekanis yang kurang sempurna sehingga diperlukan suatu lapisan yang berfungsi melindungi bahan dari kerusakan mekanis, lapisan ini dinamakan perisai (*armoured*)

- Sarung kabel

Sarung kabel adalah suatu lapisan bahan serat yang diresapi dengan kompon kedap air. Pemasangan sarung kabel biasanya dipasang di atas *armoured*. Fungsi sarung kabel adalah selain sebagai bantalan bagi *armoured* juga sebagai komponen yang berhubungan langsung dengan tanah sehingga sarung kabel merupakan bagian yang pertama sekali berhubungan/terkena pengaruh-pengaruh luar. Bahan sarung kabel yang paling banyak dipergunakan adalah sarung goni (*jute*).

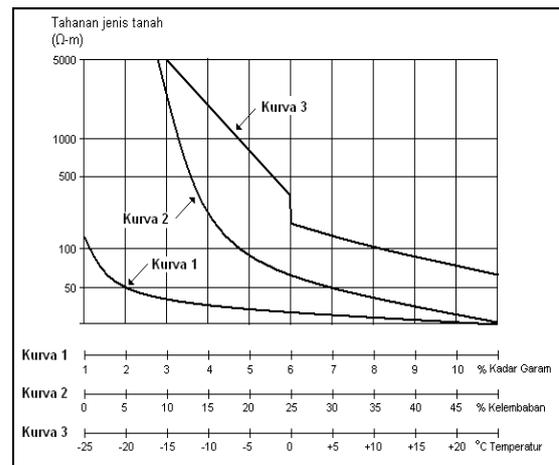
2.4 Tahanan jenis tanah

Tahanan jenis tanah adalah nilai resistivitas tanah pada permukaan bumi. Menurut IEEE 80-1986, besarnya tahanan jenis tanah pada bumi digolongkan 4 golongan besar seperti yang ditunjukkan oleh tabel berikut ini:

Tabel 2.1. Tahanan Jenis Tanah menurut IEEE 80-1986

Jenis Tanah	Resistivitas Tanah ($\Omega\text{-m}$)
Tanah basah organik	10
Tanah basah	100
Tanah kering	1000
Tanah berbatu	10000

Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai tahanan jenis tanah ditunjukkan pada gambar berikut ini :



Sumber : IEEE Guide For Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 80-1986

Gambar 2.1 Pengaruh garam, kelembapan dan temperatur pada tahanan jenis tanah.

Dalam persyaratan Umum Instalasi Listrik tahun 2000 (PUIL 2000) nilai tahanan jenis tanah (*soil resistivity*) dapat dilihat pada table 2.2 berikut ini:

Tabel 2.2 Nilai Tahanan Jenis Tanah menurut PUIL 2000

Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah ($\Omega\text{-m}$)
Tanah Rawa	30
Tanah Liat dan Tanah Ladang	100
Pasir Basah	200
Kerikil Basah	500
Pasir dan Kerikil kering	1000
Tanah Berbatu	3000

Sumber : Persyaratan Umum Instalasi Listrik, SNI 04-0225-2000, hal 80.

2.5 Instalasi kabel tanah

Metode yang umum digunakan untuk instalasi kabel tanah adalah meletakkan kabel tanah langsung di dalam tanah dengan kedalaman 2,5 meter. Penanaman kabel tanah harus memperhatikan syarat-syarat yang telah ditentukan sebagai berikut :

- a. Penentuan jalur lintasan kabel
 1. Kabel-kabel sebaiknya ditanam pada tanah umum (Negara), di bawah trotoar, atau berm jalan (melintang jalan raya).
 2. Membelokkan arah kabel dengan aturan, jari-jari belokkan adalah sekurang-kurangnya 15 kali diameter kabel bagian luar.
- b. Lebar galian
Faktor utama yang harus diperhatikan adalah jalur yang akan digunakan penggalian, dimana lebar galian harus disesuaikan dengan kondisinya. Diantaranya adalah sebagai berikut :
 1. Lebar galian minimum 0,40 meter, dan jika kabel yang akan digelar lebih dari satu maka lebar galiannya harus disesuaikan. Untuk penggelaran kabel sebanyak 6 buah, lebar galiannya adalah 1,6 meter.
 2. Untuk jalur penggalian lebih dari satu harus diberikan jarak minimum 260 cm atau diberikan isolasi pelindung menggunakan batu yang diletakkan antara kabel dan dipasang miring.
- c. Kedalaman galian
Kedalaman galian yang disarankan bertujuan untuk menghindari kerusakan kabel akibat kesalahan mekanis. Berikut ini syarat kedalaman galian kabel, diantaranya :
 1. Kedalaman penggalian kabel harus cukup (minimum 2,5 m).
 2. Dasar lubang galian harus diratakan dan diberi lapisan pasir setebal $\pm 0,1$ m.
 3. Pada galian yang menyebrang jalan aspal yang tidak dibuat terowongan kabel, maka kabel harus dimasukkan di dalam pipa PVC sebagai pelindung kabel.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Menentukan Faktor Reduksi Arus Gangguan Pada Kabel Fasa Tiga Berinti Tunggal

Pada kabel tenaga terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya kuat hantar arus karena panas yang diakibatkan oleh :

1. Arus yang mengalir pada penghantar
2. Arus induksi pada selubung kabel
3. Rugi-rugi dielektrik

Ketika terjadi gangguan pada satu saluran penghantar biasanya yang diperhatikan hanya saluran yang mengalami gangguan dengan memperhitungkan keberadaan selubung logam. Akibatnya untuk mendapatkan kondisi yang aman (tegangan langkah dan tegangan sentuh) di Gardu Induk (GI) diperlukan usaha dengan cara memperbesar luas penampang selubung. Usaha untuk memperbesar luas penampang mungkin tidak diperlukan jika memperhitungkan selubung logam pada penghantar-penghantar yang tidak mengalami gangguan.

Dalam merancang Gardu Induk yang disuplai melalui saluran kabel tanah, penting memperhatikan faktor reduksi pada kabel tersebut. Faktor reduksi ini menyatakan rasio antara bagian dari arus gangguan yang mengalir ke tanah dengan arus gangguan total. Arus gangguan total adalah arus yang mengalir ke sumber dari titik gangguan. Arus gangguan total terdiri dari arus gangguan yang mengalir melalui selubung kabel menuju ke sumber dengan diasumsikan bahwa selubungnya dihubungkan ke bumi dengan nilai hambatannya diabaikan dan sebagian arus gangguannya mengalir melalui bumi. Maka nilai reduksi pada kabel sangat penting terutama dalam memperkirakan kondisi yang aman untuk keselamatan di sekitar gardu induk.

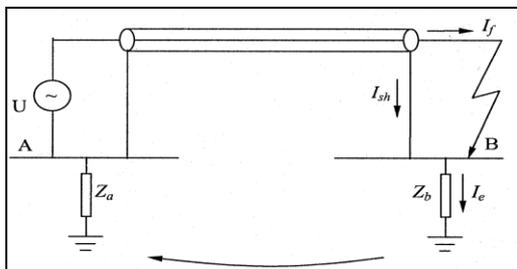
Titik netral di dalam jaringan tegangan tinggi umumnya dihubungkan langsung ke tanah dan arus gangguan tanah nilainya sangat tinggi, dalam beberapa kasus nilai arus melebihi 20 kA. Karena sulitnya untuk memastikan kondisi yang aman, pemilihan kabel penyulang dengan nilai reduksi yang rendah itu mungkin

merupakan salah satu solusi. Penurunan nilai reduksi suatu kabel dapat dicapai dengan memperbesar luas penampang selubung kabel. Akibatnya harga kabel akan bertambah mahal.

3.2 Saluran kabel berinti tunggal

3.2.1 Gangguan yang Terjadi Pada Sumber

Dalam menganalisa permasalahan faktor reduksi arus gangguan pada suatu penyulang yang menggunakan kabel tanah, diasumsikan bahwa penyulang terdiri dari satu kabel berinti tunggal, dan selanjutnya dikondisikan bahwa tempat gangguan berada di Gardu Induk B. Arus gangguan fasa ke tanah akan terbagi seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1.

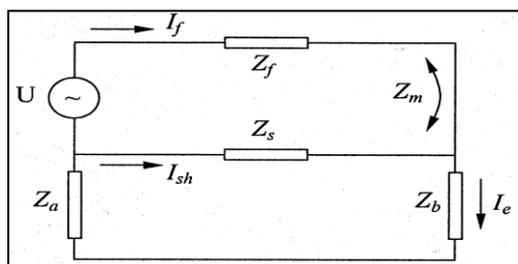


Gambar 3.1 Gangguan terjadi di GI B

Keterangan :

- U = tegangan sumber pada gardu induk A;
- I_{sh} = arus gangguan pada selubung kabel;
- I_e = arus gangguan yang mengalir kembali ke tanah;
- Z_a = impedansi sistem pembumian pada gardu induk A;
- Z_b = impedansi sistem pembumian pada gardu induk B.

Pada gambar 3.2 dapat dilihat bahwa penghantar dan selubung kabel membentuk dua rangkaian arus dengan tanah sebagai jalan arus balik.



Gambar 3.2 Rangkaian ekuivalen untuk gangguan pada gardu induk

Keterangan :

- Z_f = impedansi sistem
- Z_s = impedansi diri selubung kabel
- Z_m = impedansi bersama antara penghantar dan selubung kabel

Pada rangkaian ekuivalen diatas, rangkaian arus pada penghantar dengan tanah dan selubung logam dengan tanah, dicouple secara induktif melalui impedansi Z_m dan dicouple secara konduktif melalui impedansi-impedansi Z_a dan Z_b . Dengan menggunakan Hukum Kirchoff pada gambar 3.2 maka didapat persamaan sebagai berikut :

$$I_{sh} = I_i I_c \dots\dots\dots(3.1)$$

Berdasarkan loop 1 pada gambar 3.2 maka didapat persamaan:

$$\begin{aligned} Z_s I_{sh} + Z_b I_e + Z_a I_e &= 0 \\ Z_s I_{sh} + (Z_a + Z_b) I_e &= 0 \\ Z_s I_{sh} + (Z_a + Z_b)(I_{sh} + I_f) &= 0 \\ (Z_s - Z_m) I_{sh} + (Z_a + Z_b + Z_m)(I_{sh} + I_f) &= 0 \\ (Z_s - Z_m) I_{sh} + (Z_m + Z_a + Z_b) I_{sh} + (Z_m + Z_a + Z_b) I_f &= 0 \\ (Z_s + Z_a + Z_b) I_{sh} + (Z_m + Z_a + Z_b) I_f &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots(3.2)$$

Dari persamaan (3.2) maka dapat dinyatakan bahwa arus selubung I_{sh} merupakan fungsi dari arus gangguan I_f . Arus pada selubung kabel terdiri dari 2 komponen dan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$I_{sh} = I_i + I_c \dots\dots\dots(3.3)$$

Dimana :

$$I_i = -\frac{Z_m}{Z_s + Z_a + Z_b} I_{sh} \dots\dots\dots(3.4)$$

$$I_c = -\frac{Z_a + Z_b}{Z_s + Z_a + Z_b} I_{sh} \dots\dots\dots(3.5)$$

Pada persamaan (3.3) dijelaskan bahwa I_i merupakan komponen yang menunjukkan arus gangguan yang muncul di dalam selubung kabel akibat pengaruh dari kopling induktif dengan penghantar kabel (Z_m) sedangkan I_c merupakan komponen yang menunjukkan arus gangguan yang muncul di dalam selubung kabel akibat pengaruh dari kopling konduktif antara impedansi di gardu induk A (Z_a) dan impedansi di gardu induk B (Z_b).

Rangkaian ekuivalen pada gambar 3.2 diatas dengan menggunakan

persamaan (3.1) dan (3.2) distribusi arus gangguan dapat dinyatakan dengan koefisien r_t sebagai berikut:

$$r_t = \frac{I_e}{I_f}$$

Dari persamaan (3.1) yaitu $I_e = I_f + I_{sh}$ maka didapat r_t :

$$r_t = \frac{I_e}{I_f} = \frac{I_f + I_{sh}}{I_f} \dots\dots\dots(3.6)$$

Dari persamaan (3.2) maka diperoleh I_f sebesar :

$$\begin{aligned} (Z_s + Z_a + Z_b)I_{sh} + (Z_m + Z_a + Z_b)I_f &= 0 \\ (Z_m + Z_a + Z_b)I_f &= -(Z_s + Z_a + Z_b)I_{sh} \\ I_f &= -\frac{(Z_s + Z_a + Z_b)}{(Z_m + Z_a + Z_b)} I_{sh} \dots\dots\dots(3.7) \end{aligned}$$

Distribusikan persamaan (3.7) ke persamaan (3.6) dan diperoleh:

$$r_t = \frac{I_e}{I_f} = \frac{-\frac{(Z_s + Z_a + Z_b)}{(Z_m + Z_a + Z_b)} I_{sh} + I_{sh}}{-\frac{(Z_s + Z_a + Z_b)}{(Z_m + Z_a + Z_b)} I_{sh}}$$

$$r_t = \frac{\left(-\frac{(Z_s + Z_a + Z_b)}{(Z_m + Z_a + Z_b)} + 1\right) I_{sh}}{-\frac{(Z_s + Z_a + Z_b)}{(Z_m + Z_a + Z_b)} I_{sh}}$$

$$r_t = \frac{-\frac{Z_s + Z_a + Z_b}{Z_m + Z_a + Z_b} + 1}{-\frac{Z_s + Z_a + Z_b}{Z_m + Z_a + Z_b}} + \frac{1}{\left(-\frac{Z_s + Z_a + Z_b}{Z_m + Z_a + Z_b}\right)}$$

$$r_t = 1 - \frac{Z_m + Z_a + Z_b}{Z_s + Z_a + Z_b}$$

$$r_t = \frac{Z_s + Z_a + Z_b}{Z_s + Z_a + Z_b} - \frac{Z_m + Z_a + Z_b}{Z_s + Z_a + Z_b}$$

$$r_t = \frac{Z_s - Z_m}{Z_s + Z_a + Z_b} \dots\dots\dots(3.8)$$

Koefisien r_t ini termasuk pengaruh dari koefisien (Z_m) yang bersifat induktif dan (Z_a dan Z_b) yang bersifat konduktif. Karena pengaruh dari kopling konduktif bergantung pada faktor setempat (impedansi pada setiap gardu induk (Z_a dan Z_b)) maka koefisien tidak dapat direpresentasikan oleh parameter kabel itu sendiri. Untuk menghilangkan pengaruh ini maka diasumsikan bahwa nilai impedansi Z_a dan Z_b dapat diabaikan ($Z_a \approx 0$ dan $Z_b \approx 0$). Maka persamaan (3.8) menjadi:

$$r_1 = \frac{Z_s - Z_m}{Z_s} \dots\dots\dots(3.9)$$

Impedansi Z_s adalah suatu fungsi kompleks parameter yang merupakan

rancangan dari kabel, frekuensi jaringan dan tahanan jenis tanah di sepanjang kabel. Karena selubung kabel relatif tipis dan reaktansi karena fluks di dalam selubung itu diabaikan. Dengan demikian, kita dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Z_s - Z_m \approx R_{sh} \dots\dots\dots(3.10)$$

Dimana : R_{sh} adalah resistansi selubung kabel.

Dari persamaan (3.9) dan (3.10) maka didapat persamaan:

$$r_1 = \frac{R_{sh}}{Z_s} \dots\dots\dots(3.11)$$

Dengan mensubstitusikan nilai $Z_s = R_{sh} + R'_e + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{\delta}{r_{sh}} \right]$ ke persamaan (3.11) maka persamaannya menjadi :

$$r_1 = \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R'_e + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{\delta}{r_{sh}} \right]} \dots\dots\dots(3.12)$$

Dimana :

$$\delta = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \dots\dots\dots(3.13)$$

Keterangan :

ρ = tahanan jenis tanah ($\Omega \cdot m$)

f = frekuensi satuan (Hz)

R_{sh} = hambatan selubung kabel per meter satuan (Ω/m)

R'_e = hambatan tanah sebagai suatu lintasan hasil per

Kilometer (R'_e pada frekuensi 50 Hz = 0,05 Ω/m dan R'_e

Pada frekuensi 60 Hz = 0,06 Ω/m)

r_{sh} = jari-jari luar dari selubung kabel satuan (m)

ω = kecepatan sudut ($\omega = 2\pi f$)

μ_0 = permeabilitas udara ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am)

μ_r = permeabilitas relatif.

Tabel 3.1. Tahanan resistivity dan koefisien suhu dari logam yang digunakan berdasarkan konstruksi kabel

Material	Resistivity (ρ) Ohm.m at 20°C	Temperatur Coefficient (α_{20}) per K at 20°C
a. Conductor		
Copper	1.7241 x 10 ⁻⁸	3.93 x 10 ⁻³
Aluminium	2.8264 x 10 ⁻⁸	4.03 x 10 ⁻³
b. Sheaths and		
Armor	21.4 x 10 ⁻⁸	4.0 x 10 ⁻³
Lead or lead alloy	13.8 x 10 ⁻⁸	4.5 x 10 ⁻³
Steel	3.5 x 10 ⁻⁸	3.0 x 10 ⁻³
Bronze	7 x 10 ⁻⁸	Negligible
Stainless steel	2.84 x 10 ⁻⁸	4.03 x 10 ⁻³
Aluminium		

Nilai R_{sh} dapat ditentukan yaitu dengan menggunakan persamaan dibawah ini

$$R_{sh} = \frac{\rho_{20} 10^6}{\pi \cdot d_r \cdot t_s} [1 + \alpha_{20} (\theta_s - 20)] \dots\dots\dots(3.14)$$

Keterangan :

ρ_{20} = tahanan jenis selubung pada 20°C (Ωm)

α_{20} = koefisien suhu

θ_s = suhu maksimum selubung (°C)

t_s = ketebalan selubung (m)

d_r = diameter rata-rata selubung (m)

Dimana:

$$d_r = D_s - t_s$$

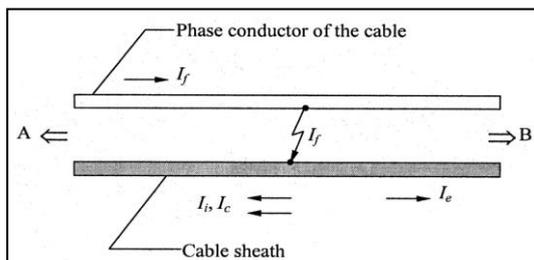
Keterangan :

D_s = diameter selubung

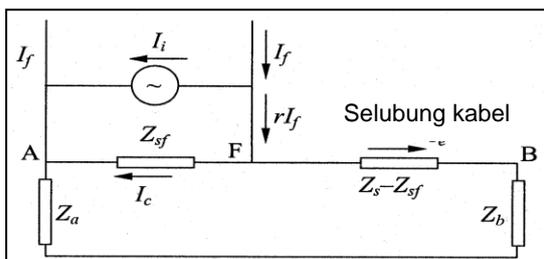
t_s = ketebalan selubung

3.2.2 Lokasi Gangguan Sepanjang Saluran Kabel

Suatu gangguan yang diasumsikan terjadi pada kabel di titik F seperti pada gambar 3.3. Total arus gangguan I_f hanya berasal dari gardu induk A. Maka pengaruh yang bersifat induktif hanya ada pada bagian kabel antara gardu induk A dan lokasi gangguan, untuk menentukan arus gangguan yang melalui bumi dapat menggunakan rangkaian ekuivalen seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.3. gangguan pada kabel



Gambar 3.4. rangkaian ekuivalen gangguan pada kabel

Di dalam rangkaian ekuivalen pada gambar 3.4, impedansi Z_{sf} menunjukkan impedansi diri dari selubung kabel antara gardu induk A dan lokasi gangguan. Dan dapat dinyatakan kedalam suatu fungsi panjang dengan menggunakan rumus dibawah ini :

$$Z_{sf} = lZ' \dots\dots\dots(3.15)$$

Dimana :

l = panjang kabel dari gardu induk A ke lokasi gangguan (m)

Z' = impedansi selubung kabel per satuan panjang (Ω/m)

Pada rangkaian ekuivalen diatas bagian arus dari arus gangguan I_f dapat dibagi menjadi dua komponen yaitu arus I_c dan I_e . Arus I_c langsung mengalir ke gardu induk A dan arus I_e mengalir ke gardu induk A melalui gardu induk B dan bumi. Karena impedansi Z_a dan Z_b diasumsikan sama dengan nol ($Z_a \approx 0$ dan $Z_b \approx 0$). Maka dapat ditulis persamaan sebagai berikut :

$$I_e = (L - l)Z' = (rI_f - I_e)lZ' \dots\dots\dots(3.16)$$

Dimana : L adalah panjang keseluruhan kabel.

Dengan menggunakan persamaan (3.16), faktor reduksi untuk gangguan di sepanjang kabel dapat ditulis :

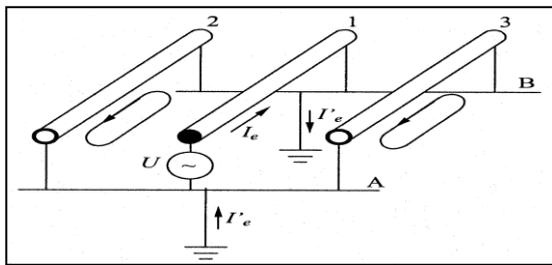
$$r_1(l) = \frac{I_e}{I_f} = \frac{l}{L} r_1 \dots\dots\dots(3.17)$$

Dari penjelasan diatas maka dapat disimpulkan bahwa nilai faktor reduksi secara linier bertambah besar dengan bertambahnya jarak dari tempat gangguan ke gardu induk A. Perhatikan rangkaian ekuivalen pada gambar 3.3 arus I_f , I_i dan I_c akan menginduksikan medan magnet disekitar kabel. Medan magnet juga diinduksikan oleh arus I_e . Kedua medan magnetitu besarnya sama.

Arus I_e besarnya sama dengan ($I_e = I_f - I_i - I_c$). Ini berarti bahwa ditinjau dari pengaruh induktif, kabel (penghantar dan selubung logam) seolah-olah dapat diganti dengan satu penghantar yang memiliki dimensi yang sama (panjang dan jari-jari luar).

3.2.3 Saluran tiga kabel berinti tunggal

Dengan menggunakan analisa-analisa yang telah dibahas sebelumnya, yaitu tentang saluran kabel yang terdiri atas satu kabel berinti tunggal maka selanjutnya dapat dijelaskan tentang karakteristik dari saluran kabel yang terdiri atas 3 (tiga) kabel berinti tunggal. Gambar 3.5 berikut ini mendeskripsikan kondisi gangguan satu fasa ke tanah pada saluran kabel yang terdiri atas 3 (tiga) kabel berinti tunggal.

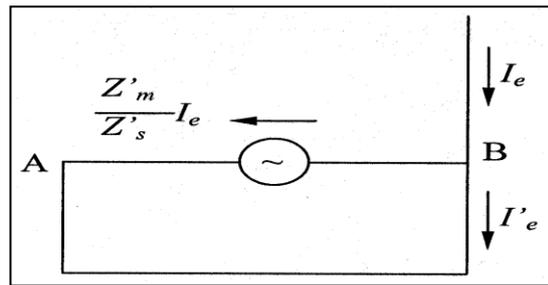


Gambar 3.5 Model ekuivalen gangguan di saluran kabel

Keterangan :

- 1 = menyatakan kabel berinti tunggal yang mengalami gangguan
- 2,3= penghantar yang menyatakan selubungdari kabel 2 dan 3
- I'_e = bagian arus gangguan I_e yang mengalir kembali ke gardu induk A melalui tanah

Penghantar-penghantar dari saluran kabel yang tidak mengalami gangguan (fasa 2 dan fasa 3) keberadaannya dapat diabaikan. Oleh karena itu, kondisi saluran kabel yang terdiri atas 3 (tiga) kabel berinti tunggal seperti terlihat pada gambar 3.5 dapat dibandingkan dengan suatu saluran udara yang terdiri atas 3 penghantar dan 2 kawat tanah. Pada saluran udara terjadi gangguan fasa ke tanah pada salah satu fasanya. Penghantar 1 merupakan penghantar dari fasa yang mengalami gangguan dan penghantar 2 dan penghantar 3 merupakan kedua kawat tanah. Maka gambar 3.5 itu dapat direpresentasikan ke dalam rangkaian ekuivalen seperti terlihat pada gambar 3.6 berikut ini :



Gambar 3.6 rangkaian ekuivalen

Keterangan :

- Z'_s = impedansi diri dari dua selubung kabel (penghantar 2 dan 3) per satuan panjang (Ω/m)
- Z'_m = impedansi bersama antara kabel yang mengalami gangguan (penghantar 1) dan selubung kabel (penghantar 2 dan 3) per satuan panjang (Ω/m)

Dari gambar 3.6 diperoleh suatu persamaan yang memuat faktor reduksi dari arus gangguan yang mengalir ke bumi (earth current) sebagai akibat dari adanya selubung kabel pada kedua konduktor yang tidak mengalami gangguan yaitu :

$$r_{23} = \frac{I'_e}{I_e}$$

Dimana I_e dan I'_e dari gambar 3.6 :

$$I_e = I'_e + \frac{Z'_m}{Z'_s} I_e$$

$$I'_e = I_e - \frac{Z'_m}{Z'_s} I_e = \left(1 - \frac{Z'_m}{Z'_s}\right) \cdot I_e$$

$$I'_e = \left(\frac{Z'_s - Z'_m}{Z'_s}\right) \cdot I_e$$

Maka r_{23} adalah :

$$r_{23} = \frac{I'_e}{I_e} = \frac{\left(\frac{Z'_s - Z'_m}{Z'_s}\right) \cdot I_e}{I_e} = \frac{Z'_s - Z'_m}{Z'_s}$$

$$r_{23} = \frac{I'_e}{I_e} = \frac{Z'_s - Z'_m}{Z'_s} \dots\dots\dots (3.18)$$

Nilai-nilai impedansi yang terdapat pada persamaan (3.18) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini :

$$Z'_s = \frac{R_{sh}}{2} + R'_e + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} x \left(0.125 + \ln \frac{\delta}{r_e}\right) \dots\dots(3.19)$$

$$Z'_m = R'_e + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_e} \dots\dots\dots(3.20)$$

Dimana :

$$r_e = \sqrt{r_{sh} d_{sh}} \dots\dots\dots(3.21)$$

$$d = \sqrt{d_{12} d_{23}} \dots\dots\dots(3.22)$$

Keterangan :

d_{sh} = jarak antara kedua kabel yang tidak mengalami gangguan.

d = GMD antara kabel 1 yang mengalami gangguan dengan selubung pada kabel 2 dan 3

d_{12} = jarak antara konduktor 1 dan 2

d_{23} = jarak antara konduktor 2 dan 3

Dengan demikian, faktor reduksi dari saluran kabel yang terdiri dari 3 kabel berinti tunggal dapat diperoleh dengan menggabungkan persamaan (3.17) dan (3.18), yaitu dapat ditulis sebagai berikut :

$$r(l) = \frac{I_e}{I_f} \cdot \frac{I'_e}{I_e} = \frac{I'_e}{I_f} = r_1(l)r_{23} \quad \dots\dots\dots(3.23)$$

Persamaan (3.23) diaplikasikan pada setiap jarak gangguan sepanjang saluran kabel, termasuk bilamana gangguan terjadi di gardu induk yang disuplai (gardu induk B), dalam hal ini $l = L$.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil penelitian didapat sebuah tabel dan kurva :

Tabel 4.1 Perbandingan Antara Lokasi Gangguan dengan $r(l)$ dan $r_1(l)$

Lokasi gangguan (m)	$r(l)$	$r_1(l)$
1000	0,103	0,103
2500	0,2576	0,2576
6000	0,6183	0,6183
9000	0,9275	0,9275

4.1 Pembahasan

Tabel 4.2 Data Kabel

Tegangan	150 KV
Konduktor	Tembaga
Luas penampang (A)	1000 mm ²
Diameter konduktor (d_c)	38,7 mm
Ketebalan isolasi XLPE (t_1)	18 mm
Diameter isolasi XLPE (D_i)	79,1 mm
Ketebalan selubung luar (t_s)	3,1 mm
Diameter selubung (D_s)	92,3 mm
Temperatur selubung (θ_s)	70°C
Ketebalan armour (pelindung) (t_2)	0,16 mm
Diameter armour (D_a)	98,4 mm
Jumlah kawat armour (n_a)	64
Diameter kabel keseluruhan (D_e)	110 mm ; $r = 55$ mm
Kuat Hantar Arus	1110 A
Tahanan DC pada 20°C	$0,0176 \times 10^{-3}$ Ω /m
Suhu maksimum penghantar (θ_{max})	90°C
Kedalaman penanaman kabel (Z)	2500

4.2 Menentukan nilai faktor reduksi

Setelah diperoleh nilai $r_1(l)$ dan r_{23} maka dengan menggunakan (3.23) dapat diperoleh nilai faktor reduksi $r(l)$, yaitu :

$$|r(l)| = \frac{I_e}{I_f} \cdot \frac{I'_e}{I_e} = \frac{I'_e}{I_f} = r_1(l)r_{23}$$

Dimana :

$$r_1(1000) = 0,103 \angle - 5,555 \times 10^{-5}$$

$$r_2(2500) = 0,2576 \angle - 5,555 \times 10^{-5}$$

$$r_3(6000) = 0,6183 \angle - 5,555 \times 10^{-5}$$

$$r_4(9000) = 0,9275 \angle - 5,555 \times 10^{-5}$$

$$r_{23} = 0,999 \angle - 3,7062 \times 10^{-4}$$

A. Faktor reduksi ketika gangguan terjadi pada $l = 1000$

$$|r(1000)| = r_1(1000)r_{23}$$

$$|r(1000)| =$$

$$(0,103 \angle - 5,555 \times 10^{-5})(0,999 \angle - 3,7062 \times 10^{-4})$$

$$|r(1000)| = 0,103$$

B. Faktor reduksi ketika gangguan terjadi pada $l = 2500$

$$|r(2500)| = r_1(2500)r_{23}$$

$$|r(2500)| =$$

$$(0,2576 \angle - 5,555 \times 10^{-5})(0,999 \angle - 3,7062 \times 10^{-4})$$

$$|r(2500)| = 0,2576$$

C. Faktor reduksi ketika gangguan terjadi pada $l = 6000$

$$|r(6000)| = r_1(6000)r_{23}$$

$$|r(6000)| =$$

$$(0,6183 \angle - 5,555 \times 10^{-5})(0,999 \angle - 3,7062 \times 10^{-4})$$

$$|r(6000)| = 0,6183$$

D. Faktor reduksi ketika gangguan terjadi pada $l = 9000$

$$|r(9000)| = r_1(9000)r_{23}$$

$$|r(9000)| =$$

$$(0,9275 \angle - 5,555 \times 10^{-5})(0,999 \angle - 3,7062 \times 10^{-4})$$

$$|r(9000)| = 0,9275$$

5. KESIMPULAN

Simpulan yang didapat dari penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Nilai faktor reduksi arus gangguan pada kabel tanah dipengaruhi oleh spesifikasi kabel tanah, konstruksi penanaman, dan tahanan jenis tanah.

2. Nilai faktor reduksi arus gangguan pada kabel sebanding dengan jarak lokasi gangguan.
3. Metode yang digunakan untuk menghitung faktor reduksi arus gangguan pada kabel tanah tidak bergantung pada besar kecilnya arus gangguan yang terjadi.

6. REFERENSI

1. Lj. M. Popovic, "Determination of the reduction factor for feeding cable lines consisting of three single-core cables," IEEE Trans. Power Del., vol.18, no. 3, pp.736-743, Jul.2003.
2. Lj. M. Popovic, "Efficient reduction of fault current through the grounding grid of substation supplied by cable line," IEEE Trans. Power Del., vol.15, no 2, pp. 722-727, Apr. 2000.
3. R. Rudenberg, "Fundamental consideration of grounding currents," Elect. Eng., 1945.