

**PENGETANAHAN KAWAT TANAH SALURAN UDARA  
TEGANGAN EKSTRA TINGGI DENGAN METODE  
SKEMA LOOP TERBUKA**

**TUGAS AKHIR**

**O  
L  
E  
H**

**ALI USMAN**

**95 812 0034**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN AREA  
M E D A N  
2001**

**UNIVERSITAS MEDAN AREA**

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 26/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
  2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
  3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
- Access From (repository.uma.ac.id)26/12/23

## ABSTRAK

Dilihat dari segi penggunaan tenaga listrik di Indonesia semakin berkembang dari masa-kemasa, serta dibarengi pusat-pusat tenaga listrik yang letaknya sangat berjauhan dari pusat-pusat beban. Maka penyaluran daya menjadi masalah utama yang harus diperhatikan baik dilihat dari segi teknis maupun ekonomis. Dana yang dibutuhkan untuk hal itu tidaklah sedikit hal ini yang menjadi penyebab utama dalam penyaluran daya listrik.

Pemakaian / penggunaan saluran udara tegangan tinggi atau ekstra tinggi menjadi alternatif utama yang dapat digunakan dalam meningkatkan efisiensi dari sistem tenaga tetapi dalam hal ini tidak jarang terjadi gangguan dari alam, misalnya hujan, taupan dan sambaran petir. Dan ini sangat sulit dihindari, maka untuk melindungi saluran transmisi tegangan tinggi atau ekstra tinggi kita dapat menggunakan kawat tanah dengan metode skema loop terbuka.

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI .....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Umum.....	1
1.2. Tujuan Penulisan.....	4
1.3. Pembatasan Masalah.....	4
BAB II INDUKSI DAN IMPEDANSI PADA TRANSMISI.....	6
II.1. Umum.....	6
II.2. Fluksi Pada Satu Kawat Penghantar.....	6
II.3. Induktansi dan Reaktansi Induktif Saluran Transmisi .....	15
II.4. Impedansi Sendiri dan Impedansi Bersama Dengan Tanah Sebagai Jalan Kembali .....	18
BAB III BESARAN-BESARAN YANG MEMPENGARUHI RUGI-RUGI DAYA PADA KAWAT TANAH .....	21
III.1. Umum.....	21
III.2. Tegangan Induksi Elektromagnetis Kawat Tanah .....	22

III.3. Arus Induksi Kawat Tanah.....	28
III.4. Rugi-rugi Daya Pada Kawat Tanah.....	31
III.5. Parameter-parameter Lain Yang Mempengaruhi Rugi-rugi Daya Pada Kawat Tanah.....	35
<b>BAB IV PENGETANAHAN KAWAT TANAH DENGAN METODE SKEMA LOOP TERBUKA .....</b>	<b>37</b>
IV.1. Umum.....	37
IV.2. Rangkaian Kawat Tanah Dengan Metode Skema Loop Terbuka .....	37
IV.3. Tegangan Induksi Kawat Tanah Pada Rangkaian Metode Skema Loop Terbuka.....	41
IV.4. Menentukan Arus Induksi Kawat Tanah Dengan Metode Skema Loop Terbuka.....	41
IV.5. Perhitungan Rugi-rugi Kawat Tanah Dengan Metode Skema Loop Terbuka.....	43
IV.6. Algoritma Penyelesaian Dan Contoh Perhitungan .....	44
<b>BAB V KESIMPULAN.....</b>	<b>57</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>58</b>

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I. 1. UMUM.

Mengingat pemakain tenaga listrik di Indonesia terus berkembang dari masa ke masa, serta pusat-pusat tenaga listrik letaknya berjauhan dari pusat beban, maka penyaluran dan menjadi salah satu masalah yang perlu diperhatikan baik ditinjau dari segi teknis maupun ekonomis. Biaya yang dibutuhkan untuk membangkitkan energi listrik semakin hari semakin meningkat. Hal ini menyebabkan efisiensi menjadi masalah utama dalam penyaluran daya listrik.

Penggunaan saluran udara tegangan tinggi atau saluran extra tinggi menjadi alternatif yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi dari sistem tenaga. Pemilihan dilakukan untuk memperbesar daya pengiriman sekaligus memperkecil rugi - rugi saluran transmisi ( $I^2 R = Pr$ ), walaupun harus dengan infestasi dan teknologi yang tinggi untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan.

Pada umumnya saluran udara ini melewati tempat terbuka, sehingga gangguan dari alam berupa cuaca buruk, taupan, hujan, maupun petir sulit untuk dihindarkan. Untuk melindungi saluran dari gangguan petir maka biasanya saluran dilengkapi dengan kawat tanah.

Kawat tanah dipasang disebelah atas susunan kawat-kawat penghantar dengan jarak tertentu.

Fungsi utama pemasangan kawat tanah :

1. Ditujukan untuk melindungi kawat-kawat penghantar dari tegangan lebih atmosfer (sambaran petir langsung). Kawat-kawat tanah ini menangkap kilat dan mengalirkan arus kilat melalui tiang-tiang (menara) ataupun melalui kawat pentanahan langsung ke tanah.
2. Berfungsi memperkecil tegangan lebih yang diinduksikan oleh sambaran petir tidak langsung.

Selain melindungi sistem dari gangguan luar kawat tanah ternyata menimbulkan efek sampingan yaitu rugi - rugi transmisi tambahan yang tidak dapat diabaikan begitu saja. Rugi-rugi ini akan semakin dirasakan jika daya yang disalurkan semakin besar dan jarak penyaluran semakin jauh ke pusat-pusat beban.

Rugi-rugi kawat tanah disebabkan mengalirnya arus pada kawat fasa. Arus pada kawat fasa ini menimbulkan fluks lingkup magnetis pada kawat tanah.

Fluks lingkup magnetis ini menyebabkan terjadinya tegangan induksi pada kawat tanah, dan karena kawat tanah membentuk rangkaian tertutup dengan menara dan tanah sebagai jalan kembali maka arus induksi akan mengalir pada kawat tanah. Arus inilah yang menimbulkan rugi - rugi transmisi tambahan tersebut.

Untuk mengurangi rugi - rugi para peneliti berusaha mengatasinya dengan menemukan metode - metode yang dapat mengurangi rugi - rugi tanah ini tanpa mengabaikan fungsi utamanya sebagai alat proteksi.

Memang dengan ditemukannya metode - metode untuk pengurangan rugi-rugi daya ini dibutuhkan biaya tambahan dalam pelaksanaannya. Tetapi bila dibandingkan dengan kerugian yang terjadi bila tanpa metode ini biaya tersebut masih dapat ditolerir karena penggunaan saluran transmisi ini berlangsung untuk waktu yang lama.

Adapun metode yang digunakan untuk mengurangi rugi-rugi tersebut adalah sebagai berikut :

- Metode transposisi.
- Metode seksionalisasi.
- Metode skema Loop Terbuka.

Dibandingkan dengan metode pemasangan kawat tanah yang biasa digunakan yaitu mengetanahkan langsung kawat tanah pada tiap-tiap menara, metode-metode diatas mempunyai kelemahan dan keunggulan masing - masing.

Pada prinsipnya cara kerja metode-metode diatas antara lain :

- Mengurangi fluks magnetik yang melingkupi kawat tanah.
- Berusaha mengurangi rangkaian tertutup.
- Memperbesar tahanan kawat tanah.

## 1. 2. TUJUAN PENULISAN

Sehubungan dengan peningkatan efisiensi saluran udara tegangan ekstra tinggi dalam Tugas Akhir ini penulis memperkenalkan salah satu metode pengetanahan kawat tanah yang tersebut diatas yaitu peneketanahan kawat tanah dengan metode skema loop terbuka.

Adapun tujuan penulisan adalah untuk mengetahui perbandingan rugi - rugi kawat tanah pada pengetanahan biasa dan dengan pengetanahan kawat tanah dengan metode skema loop terbuka. Jadi diharapkan diperoleh gambaran secara teknis, sehingga bisa dilakukan perhitungan ekonomis dimasa-masa yang akan datang.

## 1. 3. PEMBATASAN MASALAH

Dalam tulisan ini penulis membahas penegtanhan kawat tanah pada saluran udara tegangan ekstra tinggi, karena penerapan tegangan yang lebih tinggi dapat meningkatkan kemampuan transmisi (Transmission Capability). Saluran transmisi yang sama panjang kemampuan transmisinya akan berubah sesuai dengan kuadrat dari tegangan yang diterapkan. Dan untuk rugi-rugi yang sama panjang saluran dengan tegangan lebih tinggi akan menjadi lebih panjang.

Untuk menghitung rugi-rugi transmisi pada kawat tanah penulis perlu membatasi beberapa hal antara lain :

- a. Penulis membatasi untuk tidak membahas perhitungan ekonomis, tetapi menitik beratkan pada masalah perhitungan teknis.
- b. Jarak antara menara (span) dianggap sama pada setiap saluran.



- c. Sistem dalam keadaan seimbang (besar arus fasa seimbang).
- d. Kapasitansi kawat tanah terhadap kawat penghantar tidak ditinjau.
- e. Tahanan jenis tanah merata.
- f. Tahanan kaki menara sama.
- g. Jaringan transmisi tidak ditransposisi.



## BAB II

### INDUKSI DAN IMPEDANSI PADA SALURAN TRANSMISI

#### II. 1. UMUM

Besar kecilnya rugi - rugi kawat tanah tergantung kepada impedansi sendiri kawat tanah dan impedansi bersama antara kawat tanah dan kawat fasa dan tanah sebagai jalan kembali.

Impedansi bersama mempengaruhi besarnya tegangan induksi yang timbul pada kawat tanah. Sedangkan impedansi sendiri menentukan besarnya arus kawat tanah yang timbul.

#### II. 2. FLUKSI PADA SATU KAWAT PENGHANTAR

Pada penurunan rumus - rumus untuk mendapatkan nilai induktansi dan reaktansi induktif suatu penghantar kita harus memandang suatu kawat lurus bulat , uniform dengan kawat yang sangat jauh .

Ada dua faktor yang biasanya diabaikan yaitu :

- Skin effect ( efek kulit ) dan
- Proximity effect ( pengaruh sekitar ).

Skin effect adalah gejala pada arus bolak balik dimana kerapatan arus dalam penampang penghantar ( konduktor ) akan semakin besar ke arah permukaan kawat.

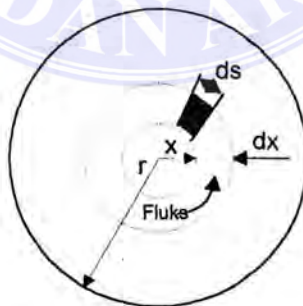
Tetapi bila ditinjau frekwensi kerja 50 Hz dan 60 Hz maka pengaruh skin effect sangat kecil dan dapat diabaikan .

Proximity effect adalah pengaruh dari kawat yang berada di samping kawat yang ditinjau sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi bila radius konduktor kecil terhadap jarak antara ke dua kawat, maka pengaruh sekitar (proximity effect) ini sangat kecil sekali.

### II.2.1. Fluks Magnet Pada Suatu Kawat Penghantar, Kawat Balik Berada Di Tempat Tak Berhingga

Untuk mendapatkan nilai induktansi yang teliti dari saluran transmisi , perubahan garis - garis fluksi di dalam penghantar harus di perhitungkan. Karena gari fluksi ini mempengaruhi tegangan imbas pada rangkaian.

Dalam menganalisanya kita meninjau sebuah penghantar lurus dengan saluran kembali letaknya tidak berhingga arus kembali tidak berpengaruh besar pada medan magnet penghantar yang digambarkan seperti gambar 2.1.



Gambar 2. 1. Penampang Suatu Penghantar Berbentuk Silinder Dengan Kawat Balik Pada Jarak Tak Terhingga

Magnetomotive force (= mmf - atau gaya gerak magnet) dalam ampere turn sepanjang jalur tertutup yang manapun adalah sama dengan arus dalam ampere yang dikelilingi oleh jalur tersebut.

$$\text{Mmf} = \oint H \cdot ds = I (At) \dots\dots\dots( 2. 1 )$$

Dimana :

H = Kuat medan magnet (At/m).

S = Jarak sepanjang jalur (m).

I = Arus yang dikelilingi ( A ).

Titik di antara H dan ds menunjukkan bahwa nilai H adalah komponen kuat medan kearah garis singgung dari ds.

Misalkan kuat medan pada jarak x meter dari titik tengah penghantar adalah konstan untuk semua titik yang terletak pada jarak yang sama dan titik tengah penghantar.

Sehingga hasil integrasi dari persamaan (2.1) adalah

$$Ix = Hx ds$$

Bila jalan yang dipilih berjari-jari x maka :

$$ds = 2 x$$

dan

$$Ix = 2 Xhx \dots\dots\dots( 2. 2 )$$

dimana  $I_x$  adalah arus yang dikelilingi oleh jalur. Dengan menganggap bahwa kerapatan arus adalah sama maka :

$$\frac{I_x}{\pi x^2} = \frac{I}{\pi r^2}$$

sehingga didapat :

$$I_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} I$$

dimana  $I$  adalah arus total di dalam penghantar. Dengan mensubstitusikan persamaan di atas ke persamaan (2.2) diperoleh :

$$H_x = \frac{x}{2 \pi r^2} I \quad \text{A/m} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Kerapatan fluks ( fluks density ) pada jarak  $x$  meter dari titik tengah penghantar adalah :

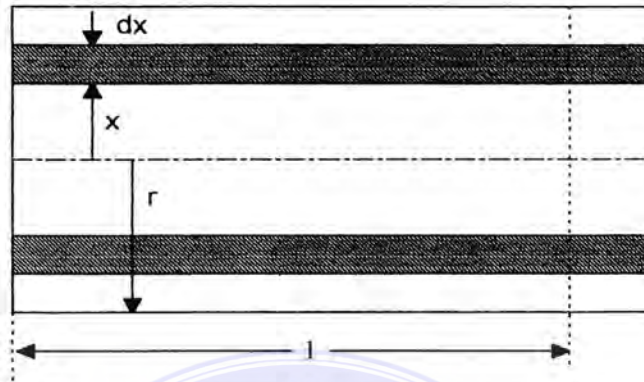
$$B_x = \mu H_x = \frac{\mu x I}{2 \pi r^2} \quad \text{Wb/m}^2 \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana  $\mu$  adalah permeabilitas dari penghantar.

$\mu_r$  adalah permeabilitas relatif dari bahan penghantar

$\mu_0$  adalah permeabilitas ruang hampa  $= \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$

## II. 2. 2. Fluks Dalam Kawat Penghantar



Gambar 2 .2. Potongan Elemen Fluks Yang Berbentuk Pipa Dan Konduktor.

Dalam elemen berbentuk pipa dengan tebal  $dx$ , fluks magnet adalah  $B$  kali luas penampang elemen yang tegak lurus pada garis fluks dimana luas tersebut adalah  $dx$  kali panjang axial.

Fluks per meter panjang adalah :

$$d\phi = \frac{\mu x l}{2\pi r^2} dx \text{ Wb/m}$$

Fluks gandeng yang ditimbulkan oleh fluks pada elemen berbentuk pipa tersebut adalah :

$$d\psi = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} d\phi = \frac{\mu l x^2}{2\pi r^4} = dx \text{ Wbt/m} \dots\dots\dots(2, 5)$$

Fluks dalam penghantar ( fluks internal ) total diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan ( 2 . 5 ) dari titik tengah sampai ke tepi luarnya sehingga diperoleh :

$$\psi_{i n t} = \int_0^r \frac{\mu I x^3}{2 \pi r^4} dx$$

$$\psi_{i n t} = \frac{\mu I}{8 \pi} \text{ Wbt/m}$$

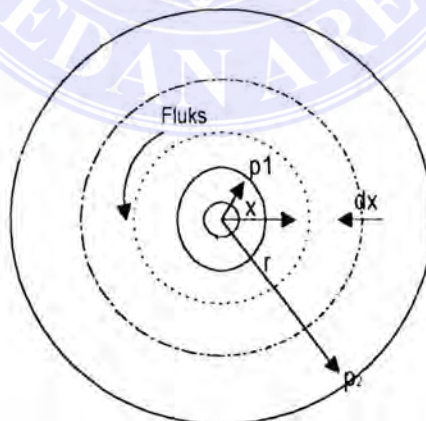
Untuk permeabilitas relatif  $\mu_r = 1$ , maka  $\mu = 4 \times 10^{-7} \text{ H/m}$

sehingga :

$$\psi_{i n t} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \text{ Wbt/m} \dots\dots\dots (2. 6)$$

### II . 2 . 3 . Fluks Luar Kawat Penghantar

Untuk mengetahui pengaruh fluks luar terhadap induktansi suatu penghantar seperti yang terlihat pada gambar 2 . 3 .



Gambar 2 . 3 . Suatu Penghantar Dan Titik Luar P1 Dan P2.

Misalkan pada penghantar mengalir arus sebesar  $I$  Ampere . Karena jalur -jalur fluks merupakan lingkaran -lingkaran konsentris di sekitar penghantar, maka seluruh fluks antara  $P_1$  dan  $P_2$  terletak pada permukaan - permukaan berbentuk silinder yang konsentris melalui tutup  $P_1$  dan  $P_2$  .

Pada elemen berbentuk tabung pada jarak  $x$  meter dari titik tengah penghantar kuat medan adalah  $H_x$  . Mmf disepanjang elemen ini adalah rumus (2.2).

$$2 \pi x H_x = I$$

Kerapatan fluks  $B_x$  pada elemen itu adalah :

$$B_x = \frac{\mu I}{2\pi x} \text{ Wb/m}$$

Fluks magnet  $d\phi$  pada elemen berbentuk pipa dengan tebal  $dx$  adalah:

$$d\phi = b_x dx$$

$$d\phi = \frac{\mu I}{2\pi x}$$

fluks gandeng  $d\phi$  per meter dalam angka adalah sama dengan fluks  $d\phi$  karena fluks yang berada diluar pengantar menggandeng seluruh arus penghantar hanya sekali saja. Fluks gandeng total diantara  $P_1$  dan  $P_2$  diperoleh dengan menghitung integral  $d$  dari  $x = D_1$  sampai  $x = D_2$ .

Diperoleh :

$$\psi_{ext} = \psi_{12} = \int \frac{\mu I}{2\pi x} dx = \frac{\mu I}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} \text{ Wbt/m}$$



Untuk permeabilitas relatif = 1 adalah:

$$\psi_{\text{ext}} = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D_2}{D_1} \text{ Wbt/m} \dots\dots\dots(2.7)$$

Jadi jumlah fluks lingkup kawat 1 yang disebabkan oleh arusnya sendiri:

$$\psi_{\text{tot}} = \psi_{\text{ext}} + \psi_{\text{int}}$$

$$\psi_{\text{tot}} = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{I}{2} \times 10^{-7}$$

$$\psi_{\text{tot}} = 2 \times 10^{-7} I \left[ \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{4} \right]$$

$$\psi_{\text{tot}} = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D_2}{D_1 e^{-1/4}} \text{ Wbt/m}$$

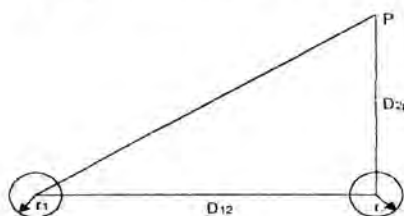
Misalkan  $D_1 = r_1 \longrightarrow r^1 = r_1 e^{-1/4}$

Maka persamaam di atas dapat ditulis:

$$\psi_{\text{tot}} = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D_2}{r^1} \text{ Wbt/m} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana  $r^1$  = adalah jari-jari khayal kawat konduktor.

## II. 2. 4. Fluks Lingkup Pada Kawat Penghantar Dengan Kawat Balik Dekat Dengan Kawat Penghantar Tersebut



Gambar 2. 4. Penghantar Dengan Kawat Balik Yang Dekat

Untuk menghitung fluks lingkup kawat 1 terhadap kawat lain yang dialiri arus kitalihat gambar 2.4 di atas.

Misalkan  $I_1$  adalah arus yang mengalir pada kawat 2 dengan jari-jari  $r_1$  dan  $r_2$ . Sekarang kita teliti  $\psi_{1p1}$  yaitu fluks yang ditimbulkan oleh arus  $I_1$  termasuk fluks gandeng dalam, tetapi tidak termasuk fluks yang berada diluar titik P.

Dari persamaan (2.8) didapat:

$$\psi_{1p1} = 2 \times 10^{-7} I_1 \ln \frac{D_{1p}}{r_1}$$

Fluks gandeng  $\psi_{1p1}$  adalah fluks gandeng yang disebabkan arus  $I_2$  terhadap penghantar 1 tetapi tidak termasuk fluks yang diluar titik P.

$$\psi_{1p2} = 2 \times 10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{2p}}{D_{12}}$$

Fluks gandeng penghantar 1 yang disebabkan oleh arus  $I_1$  dan  $I_2$  adalah  $\psi_{1p}$  dimana:

$$\psi_{1p} = \psi_{1p1} + \psi_{1p2}$$

$$\psi_{1p} = 2 \times 10^{-7} \left[ I_1 \ln \frac{D_{1p}}{r_1} + I_2 \ln \frac{D_{2p}}{D_{12}} \right]$$

Dengan memisah faktor-faktor logaritma persamaan di atas dapat ditulis:

$$\psi_{1p} = 2 \times 10^{-7} \left[ I_1 \ln \frac{1}{r} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_1 \ln D_{1p} + I_2 \ln D_{2p} \right] \text{ Wbt/m....(2. 9)}$$

Kita tinjau suatu keadaan khusus dimana kawat II adalah penghantar balik dari kawat pertama dan jarak titik P dibuat tidak berhingga, sehingga persamaan (2.9) menjadi:

$$\psi_{1p} = 2 \times 10^{-7} \left[ I_1 \ln \frac{1}{r'} - I_1 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_1 \ln D_{1p} - I_1 \ln D_{2p} \right]$$

$$\psi_{1p} = 2 \times 10^{-7} I_1 \left[ \ln \frac{1}{r'} + \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln D_{1p} + \ln D_{2p} \right]$$

$$\psi_{1p} = 2 \times 10^{-7} I_1 \left[ \ln \frac{1}{r'} + \ln D_{12} + 0 \right]$$

$$\psi_{1p} = 2 \times 10^{-7} I_1 \ln \frac{D_{12}}{r_1'} \text{ Wbt/m} \dots\dots\dots (2.10)$$

Hal ini berlaku untuk penghantar ke 2 dimana fluks gandeng penghantar 2 yang disebabkan oleh  $I_2$  dan  $I_1$  adalah  $\psi_{2p}$ .

$$\psi_{2p} = \psi_{2p1} + \psi_{2p2}$$

$$\psi_{2p} = 2 \times 10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{12}}{r_1'} \text{ Wbt/m} \dots\dots\dots (2.11)$$

### II.3. INDUKTANSI DAN REAKTANSI INDUKTIF SALURAN TRANSMISI

Nilai induktansi yang sesungguhnya yang disebabkan oleh fluks dalam dapat dihitung sebagai perbandingan dari fluks gandeng terhadap arus

dengan memperhitungkan juga bahwa setiap garis fluks dalam ahnya menggandengkan sebahagian kecil dari arus total.

### II. 3. 1. Induktansi Sendiri Dan Reaktansi Sendiri Saluran Transmisi

Defenisi dar induktansi sendiri dari suatu rangkaian ialah:

$$L = \frac{\text{Fluks lingkup yang ditimbulkan oleh arus}}{\text{Arus}}$$

$$L = \frac{\Psi}{I}$$

Jadi induktansi dari suatu penghantar dengan kawat balik yang tak berhingga adalah:

$$L = \frac{\Psi_{\text{tot}}}{I} - 2 \times 10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{12}}{r_1'} \text{ Henry/meter} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dan reaktansi sendiri dari penghantar ialah:

$$X_L = 2 \pi f L$$

$$X_L = 4 \pi 10^{-7} f \cdot \ln \frac{D_{12}}{r_1'} \text{ Ohm/meter} \dots\dots\dots(2.13)$$

### II. 3. 2. Induktansi Bersama Dan Reaktansi Bersama Saluran Transmisi.

Induktansi sendiri dari kawat pertama:

$$L_1 = \frac{\Psi_{1P}}{I_1}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2 \times 10^{-7} \frac{I_1}{I_1} \ln \frac{D_{12}}{r_1'} \\
 &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{12}}{r_1'} \text{ Henry/ meter}
 \end{aligned}$$

Induktansi kawat ke dua:

$$\begin{aligned}
 L_2 &= \frac{\Psi_{2P}}{I_2} \\
 &= 2 \times 10^{-7} \frac{I_2}{I_2} \ln \frac{D_{12}}{r_2'} \\
 &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{12}}{r_2'} \text{ Henry/ meter}
 \end{aligned}$$

Induktansi total saluran adalah:

$$L_{\text{Total}} = L_1 + L_2$$

Karena kawat identik, maka  $r_1' = r_2' = r'$  dan jarak  $D_{12}$  adalah sama, maka persamaan menjadi:

$$L_{\text{Total}} = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{12}}{r'} \text{ Henry/ meter} \dots\dots\dots(2.14)$$

Reaktansi bersama saluran adalah:

$$X_L = 8 \pi \times 10^{-7} f \ln \frac{D_{12}}{r'} \text{ Henry/ meter} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dalam prakteknya jarang sekali ditemukan saluran transmisi yang menggunakan penghantar pejal tunggal. Pada umumnya saluran transmisi menggunakan kawat pilin (strand conductor) sehingga untuk mendapatkan

jaris-jari khayal  $r^l$  dari 4i penghantar dipakai GMR (Geometric Mean Radius) yaitu, radius rata-rata geometrik dan dinotasikan dengan  $D_s$ .

$D_1$  jarak antara konduktor adalah GMP (Geometric Mean Distance) yaitu jarak rata-rata geometris antara konduktor yang satu dengan konduktor yang lain dan dinotasikan dengan  $D_m$ , sehingga persamaan (2. 4) dan (2. 5) dapat ditulis menjadi:

$$L_{\text{Total}} = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ Henry/ meter}$$

$$X_L = 8 \pi \times 10^{-7} f \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ Henry/ meter} \dots\dots\dots(2.15)$$

#### II. 4. IMPEDANSI SENDIRI DAN IMPEDANSI BERSAMA DENGAN TANAH SEBAGAI JALAN.

Untuk suatu saluran transmisi diatas permukaan bumi , bumi dapat digunakan sebagai penghantar kembali. Oleh karena itu besar arus yang mengalir tergantung kepada resistivity tanah, distribusi arus didalam tanah disamping tahanan dan impedansi dari konduktornya pada sistem yang menggunakan tanah sebagai saluran kembali.

Hal yang penting dalam menganalisa tanah jalan sebagai jalan kembali adalah:” arus yang mengalir didalam tanah terkonsentrasi di dalam tanah sebagai konduktor dengan kedalaman tertentu didalam permukaan

tanah". Dalam menganalisa rangkaian tersebut Carson mengasumsikan bahwa tanah mempunyai resistivitas yang homogen dan merupakan dataran dan dalamnya tak terhingga.

#### II. 4. 1. Impedansi Sendiri Konduktor Dengan Tanah Sebagai Jalan Kembali.

Impedansi sendiri konduktor  $a$  dinyatakan sebagai berikut:

$$Z_{aa} = R_c(a) + 0,00159f + j 0,004657 \log \frac{D_e}{GMR} \quad \text{Ohm/mile}$$

Atau:

$$Z_{aa} = R_c(a) + 0,00098f + j [ 0,002895 \log \frac{D_e}{GMR} ] \quad \text{Ohm/Km}$$

Dimana:

- $R_c$  : Tahanan kawat persatuan panjang.  
 $F$  : Frekwensi sistem  
 $D_e$  : Jarak kawat dengan konduktor equipalent dalam tanah.  
 $D_e$  :  $658 \sqrt{\rho/\Gamma}$  (m) –  $2160 \sqrt{\rho/\Gamma}$  (feet).  
 $\rho$  : Tahanan jenis tanah  
 $GMR$  :  $D_s =$  Radius rata-rata geometris.

#### II. 4. 2. Impedansi Bersama Konduktor

Impedansi bersama konduktor  $a$  dan  $b$  dinyatakan sebagai:

$$Z_{ab} = 0,0159f + j 0,004657f \log \frac{D_e}{d_{ab}} \quad \text{Ohm/mile}$$

Atau

$$Z_{abg} = 0,000988f + j 0,002895f \log \frac{De}{d_{ab}} \quad \text{Ohm/Km.}$$

Diman:

$d_{ab}$  adalah jarak spasi antara kawat a dan b





### BAB III

## BESARAN-BESARAN YANG MEMPENGARUHI RUGI-RUGI DAYA PADA KAWAT TANAH

### III. 1. UMUM

Arus yang mengalir pada kawat fasa menyebabkan timbulnya medan magnet disekitar kawat penghantar. Fluks magnetis ini melingkupi kawat tanah sehingga terjadi di tegangan induksi pada kawat tanah, karena kawat tanah ditanahkan pada tiap-tiap menara, maka terbentuklah rangkaian tertutup sehingga timbul arus induksi  $I_f$  pada kawat tanah.

Arus pada kawat tanah ini menimbulkan rugi-rugi kawat tanah sebesar  $I^2 R$ .

$$P_c = I^2 R$$

Rugi-rugi kawat ini dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu:

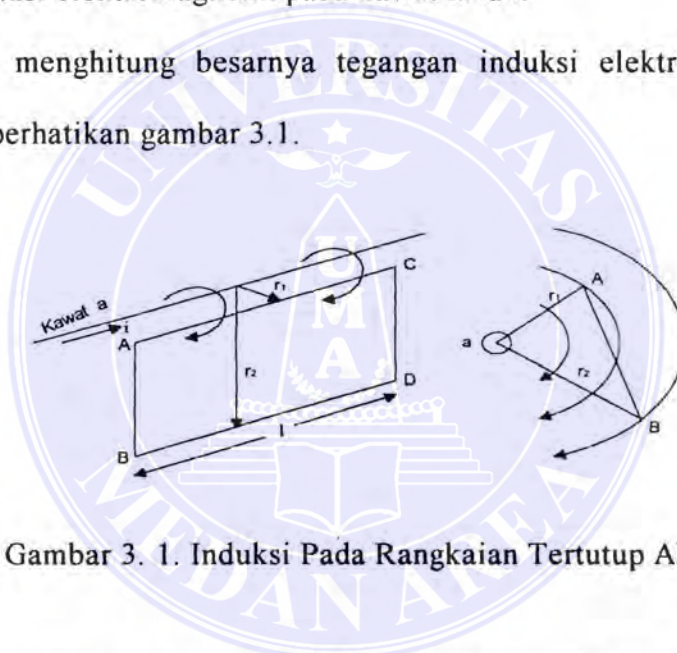
- Tahanan kawat tanah.
- Tahanan jenis tanah.
- Arus beban.
- Konfigurasi saluran dan kawat tanah.

### III. 2. TEGANGAN INDUKSI ELEKTROMAGNETIS KAWAT TANAH.

Arus yang mengalir pada kawat tanah menimbulkan medan magnet ini berubah terhadap waktu mengikuti perubahan arus fasa terhadap waktu mengikuti perubahan arus fasa terhadap waktu.

Fluks yang dilingkupi kawat-kawat tanah itu merupakan penjumlahan fluksi yang dihasilkan oleh masing-masing kawat fasa sehingga terjadi tegangan induksi elektromagnetik pada kawat tanah.

Untuk menghitung besarnya tegangan induksi elektromagnetis pada kawat tanah perhatikan gambar 3.1.



Gambar 3. 1. Induksi Pada Rangkaian Tertutup ABCD

Dalam gambar 3.1. diperhatikan suatu rangkaian tertutup yang berbentuk empat persegi panjang ABCD berkedudukan sejajar dengan kawat a yang dialiri arus bolak balik.

Dimana:

$r_1$  = Jarak antara kawat a dengan bagian AD.

$r_2$  = Jarak antara kawat a dengan bagian BC.

$i$  = Arus yang mengalir di kawat a.

$I$  =  $I_a \sin \omega t$

Dari hukum Bio-savart bahwa kuat medan  $H$  yang dihasilkan oleh kawat a pada umumnya berbentuk tabung dengan jarak  $r$  adalah:

$$H = \frac{I_a}{2 \pi r} \sin \omega t \dots\dots\dots (3.1)$$

Dan kerapatan fluks magnetik adalah:

$$B = \mu_0 H$$

Menurut hukum Gauss, banyaknya fluks yang menembus rangkaian tertutup yang disebabkan oleh arus dukawat a adalah :

$$\Phi_a = \int B \cdot ds$$

Sedangkan  $ds = 1 dr$

Jadi :

$$\Phi_a = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu_0 I_a \sin \omega t}{2 \pi r} 1 dr$$

$$\Phi_a = \frac{1 \mu_0 I_a \sin \omega t}{2 \pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

$$\Phi_a = \frac{1 \mu_0 I_a}{2 \pi} \sin \omega t \ln \left[ \frac{r_2}{r_1} \right]$$

$$\Phi_a = \frac{1 \mu_0 I_a}{2 \pi} \ln \left[ \frac{r_2}{r_1} \right] \sin \omega t \dots\dots\dots (3.2)$$

Menurut hukum Faraday, perubahan magnetis terhadap waktu akan menimbulkan tegangan pada rangkaian ABCD. Dengan mengidentifikasi persamaan ( 3,2) terhadap waktu maka di peroleh :

$$V = \frac{d\phi}{dt}$$

$$V = - \frac{1\mu_0 I_a}{2 \pi} \ln \left[ \frac{r_2}{r_1} \right] \frac{d(\sin \omega t)}{dt}$$

$$V = - \frac{1\mu_0 I_a}{2 \pi} \ln \left[ \frac{r_2}{r_1} \right] \cos \omega t$$

$$V = - 1 \mu_0 I_a f \ln \left[ \frac{r_2}{r_1} \right] \cos \omega t$$

Atau dengan cara vektor tegangan induksi persatuan panjang dapat ditulis:

$$V = - j \mu_0 I_a f \ln \left[ \frac{r_2}{r_1} \right] \cos \omega t \dots\dots\dots (3. 4)$$

Dari rumus diatas dapat dilihat bahwa tegangan induksi elektromagnetis sebanding dengan impedansi rangkaia bersama kawat fasa dengan tanah sebagai jalan kembali.

Secara umum persamaan ini dapat ditulis dengan:

$$V = Z_{abg} I_1 \quad \text{Volt/meter}$$

Dimana:

$Z_{abg}$  = adalah impedansi bersama antara kawat fasa dan kawat tanah dengan tanah sebagai jalan kembali.

$V$  = adalah tegangan induksi pada kawat a akibat adanya arus  $I_1$  pada kawat fasa.

Tegangan induksi pada kawat tanah bila terdapat sejumlah kawat fasa adalah:

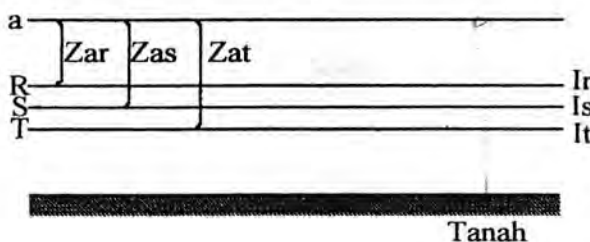
$$V_a = Z_{a1g} I_1 + Z_{a2g} I_2 + \dots + Z_{ang} I_n \dots \dots \dots (3.6)$$

$Z_{s1g}, Z_{a2g}, \dots, Z_{ang}$  = adalah impedansi bersama antara kawat tanah dengan tanah sebagai jalan kembali dengan kawat fasa 1, 2, ... n.

$I_1, I_2, \dots, I_n$  = adalah arus pada fasa 1, 2, ... , n.

### III. 2. 1. Tegangan Induksi Kawat Tanah Untuk Saluran Tunggal

Untuk menghitung tegangan induksi saluran transmisi tunggal yang dilindungi dengan sebuah kawat tanah a, perhatikan gambar 3,2.



Gambar 3. 2. Transmisi Saluran Tunggal Dengan 1 Kawat Tanah

Tegangan induksi yang terjadi pada kawat tanah (a) adalah

$$V_a = V_{arg} I_r + V_{asg} I_s + V_{atg} I_t \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

Bila beban dalam keadaan seimbang maka :

$$I_r = I = \text{Arus beban}$$

$$I_s = a^2 I$$

$$I_t = I$$

Dengan mensubstitusikan persamaan arus ini kedalam persamaan maka diperoleh:

$$V_a = (Z_{arg} + a^2 Z_{asg} + a Z_{atg}) I \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

Dimana :

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j 0,866$$

$$a^2 = 1 \angle 140^\circ = -0,5 - j 0,866$$

### III. 2. 2. Tegangan Induksi Pada Kawat Tanah Saluran Tunggal.

Pandanglah suatu saluran transmisi tunggal dengan dua buah kawat tanah pelindung yaitu (a) dan (b) seperti yang diperlihatkan pada gambar 3. 3.

Besar tegangan induksi pada kawat a dan b adalah:

$$V_a = Z_{arg} I_r + Z_{asg} I_s + Z_{atg} I_t + Z_{abg} I_b$$

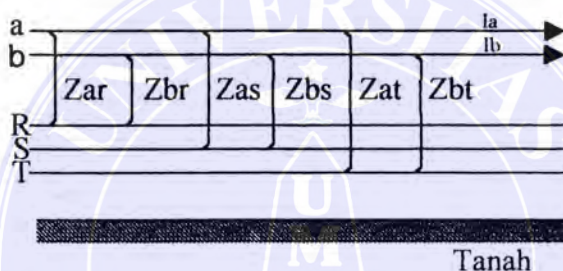
$$V_b = Z_{brg} I_r + Z_{bsg} I_s + Z_{btg} I_t + Z_{bag} I_a \quad \dots\dots\dots (3. 9)$$

Dimana:

$I_a$  : Adalah arus yang mengalir pada kawat tanah a.

$I_b$  : Adalah arus yang mengalir pada kawat tanah b

Bila dibandingkan besar arus  $I_a$  dan  $I_b$  terhadap arus fasa (arus beban) maka  $I_a$  dan  $I_b$  kecil sekali sehingga pengaruh  $I_a$  dan  $I_b$  terhadap tegangan induksi dapat diabaikan.



Gambar 3. 3. Jaringan Transmisi Saluran Tunggal Dengan Dua Kawat Tanah.

Jika beban dalam keadaan seimbang maka persamaan (3.9) menjadi:

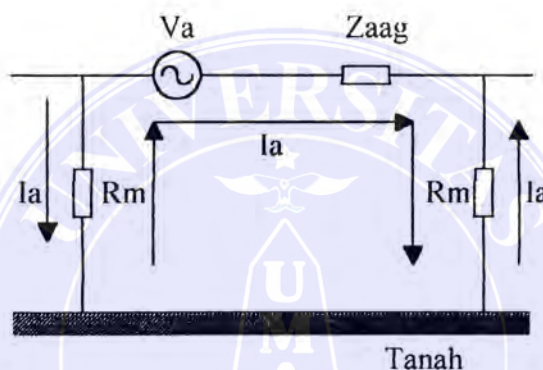
$$V_a = [ Z_{arg} + a^2 Z_{asg} + a Z_{atg} ] I$$

$$V_b = [ Z_{brg} + a^2 Z_{bsg} + a Z_{btg} ] I \dots\dots\dots(3. 10)$$

### III. 3. ARUS INDUKSI KAWAT TANAH

#### III. 3. 1. Arus Induksi Kawat Tanah Untuk Jaringan Transmisi Saluran Tunggal Dengan Satu Kawat Tanah.

Kawat tanah yang ditanahkan tiap-tiap menara merupakan suatu rangkaian tertutup dan bila ada tegangan induksi pada kawat tanah akan mengalir arus induksi di kawat tanah seperti terlihat pada gambar 3. 4.



Gambar 3. 4. Rangkaian Ekuivalen Kawat Tanah.

Besar arus  $I_a$  yang mengalir sebagai berikut:

$$V_a = [ Z_{aag} + R_m + R_m ] I_a - R_m I_a - R_m I_a.$$

Dimana:

$Z_{aag}$  = adalah impedansi sendiri kawat tanah a dengan tanah sebagai jalan kembali.

$R_m$  = Tahanan kaki menara.

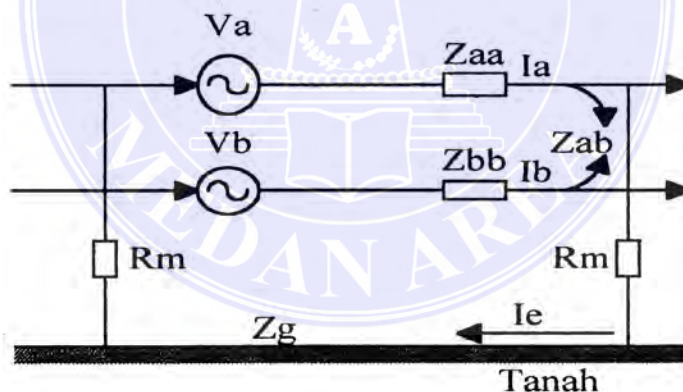


Dari persamaan diatas di dapat:

$$I_a = \frac{V_a}{Z_{aa}} + \frac{V_b}{Z_{bb}}$$

### III. 3. 2. Arus Induksi Kawat Tanah Untuk Jaringan Transmisi Saluran Tunggal Dengan Dua Kawat Tanah.

Jaringan saluran transmisi yang dilindungi oleh dua kawat tanah saluran ganda disusun secara vertikal atau saluran tunggal yang disusun mendatar seperti yang akan dibahas dalam contoh perhitungan pada Bab IV. Rangkaian rangkaian pengganti untuk jaringan transmisi saluran tunggal dengan dua kawat tanah dapat di gambarkan seperti gambar 3. 5.



Gambar 3. 5. Rangkaian Pengganti Kawat Tanah Pada Saluran Tunggal Dengan Dua Kawat Tanah.

Drop tegangan yang timbul di kawat tanah adalah drop I. R di kawat tanah di ketanahkan. Hal ini juga berlaku untuk kawat tanah yang ditransposisi dan diisolasi.

Arus induksi yang timbul pada kawat tanah adalah :

$$V_a = I_a [Z_{aa} + Z_g] + I_b [Z_g - Z_{ab}]$$

$$V_b = I_b [Z_{bb} + Z_g] + I_a [Z_g - Z_{ba}]$$

dimana :  $Z_{aa} + Z_g = Z_{ag}$  adalah impedansi sendiri kawat tanah dengan tanah sebagai saluran kembali

$Z_g - Z_{ab} = Z_{bg}$  adalah impedansi bersama antara kawat tanah a dan b dengan tanah sebagai jalan kembali

Dengan memasukkan harga  $Z_{ag}$  dan  $Z_{bg}$  maka persamaan menjadi :

$$V_a = Z_{ag} I_a + Z_{bg} I_b$$

$$V_b = Z_{bg} I_a + Z_{bg} I_b \dots\dots\dots (3. 11)$$

Dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ag} & Z_{bg} \\ Z_{bg} & Z_{bg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ag} & Z_{bg} \\ Z_{bg} & Z_{bg} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3. 12)$$

Atau secara umum:

$$[ I ] = [ Z ]^{-1} [ V ] \quad \dots\dots\dots ( 3. 13 )$$

di mana :

$[ I ]$  = adalah matriks arus kawat tanah.

$[ Z ]$  = adalah matriks impedansi.

$[ V ]$  = adalah matriks tegangan induksi.

### III. 4 . RUGI-RUGI DAYA PADA KAWAT TANAH

Untuk mempermudah perhitungan rugi-rugi daya pada kawat tanah diasumsikan bahwa jarak antara menara (span) sama lebarnya. Sehingga arus kawat tanah yang terjadi adalah sama pada tiap-tiap rangkaian tertutup. Dalam keadaan normal tidak ada arus yang mengalir pada kaki menara karena saling meniadakan.

Rugi-rugi daya untuk sebuah kawat tanah adalah :

$$P_c ( a ) = I_a^2 ( R_a + R_e / 3 ) \quad \text{watt / mile}$$

di mana :

$R_a$  = Tahanan kawat tanah a ( $\Omega$  / mile).

$R_a ( a )$  = adalah rugi-rugi kawat tanah a konvensional (cara biasa).

$R_e$  = Tahanan ekivalen tanah =  $0,0047 f \ \Omega/\text{mile}$ .

Rugi-rugi daya untuk n jumlah kawat tanah adalah :

$$P_c = \sum I ( i )^2 [ R_a ( i ) + R_e / 3 ] \text{ watt/mile} \quad \dots\dots\dots ( 3. 14 )$$

di mana :

$I (I)$  = adalah arus induksi pada kawat tanah I.

$R_a$  = adalah tahanan kawat tanah (I)

$n$  = adalah jumlah kawat tanah.

### III. 5. PARAMETER - PARAMETER LAIN YANG MEMPENGARUHI RUGI-RUGI DAYA PADA KAWAT TANAH.

Untuk mengetahui beberapa parameter yang mempengaruhi rugi-rugi daya pada kawat tanah dalam Sub Bab berikut akan diuraikan satu persatu.

#### III. 5. 1. Pengaruh Impedansi Ekuivalen Tanah

Rugi-rugi kawat tanah semakin kecil bila impedansi ekuivalen tanah semakin besar. Besar kecilnya impedansi ekuivalen tanah tergantung pada frekwensi sistem dan tahanan jenis tanah.

$$Z_e = R_e + j X_e$$

di mana :

$R_e$  = Tahanan ekuivalen tanah

$X_e$  = Reaktansi ekuivalen tanah.  $\square$

$D_e$  = Jarak kawat tanah dengan konduktor ekuivalen dalam tanah.

$$D_e = 2160 \sqrt{\rho/f} \text{ (feet)}$$

$f$  = Frekwensi.

$\rho$  = Resistivitas tanah

Tahanan jenis tanah bergantung kepada keadaan tanah itu sendiri, antara lain :

- Komposisi tanahnya
- Komposisi air (semakin banyak kandungan air, tahanan tanah akan semakin kecil).
- Unsur kimia tanah.
- Temperatur di sekitarnya.

Tahan jenis tanah bervariasi antara 1 - 10000  $\Omega$ - meter. Dalam perhitungan, tanah dianggap homogen dengan tahanan jenis tanah konstan yaitu 100  $\Omega$ - meter.

### III. 5. 2. Pengaruh Arus Fasa

semakin besar arus fasa, semakin besar juga tegangan induksi yang ditimbulkannya. Arus fasa yang dimaksud yaitu arus rata-rata yang mengalir tiap harinya.

### III. 5. 3. Pengaruh Konfigurasi Saluran

Tegangan induksi besarnya tergantung dari besarnya impedansi bersama antara kawat tanah dengan kawat fasa. Besar kecilnya impedansi bergantung pada jarak antara kawat-kawat tersebut.

### III. 5. 4. Pengaruh Tahanan Kawat Tanah

Untuk kawat tanah yang terbuat dari bahan feromagnetik, besar tahananannya tergantung pada besarnya arus yang mengalir pada kawat tersebut. Semakin besar arus yang mengalir semakin besar pula tahanan kawat tersebut. Dalam keadaan normal arus kawat tanah di pergunakan data. Untuk arus yang kecil, demikian juga untuk reaktansinya.

Untuk memperlihatkan hubungan antara tahanan kawat tanah dengan rugi-ruginya dengan asumsi reaktansinya tetap.

$$\begin{aligned}
 I_a &= \frac{V_a}{Z_{aag}} \\
 &= \frac{V_a}{(R_a + R_c / 3) + j(X_c / 3 + X_a)} \\
 &= \frac{V_a}{((R_a + R_c / 3) + j(X_c / 3 + X_a))^2}
 \end{aligned}$$

Nilai ini disubstitusikan kedalam persamaan rugi-rugi sehingga rugi-rugi pada kawat tanah :

$$P_0 = \frac{V_a^2 R_a}{((R_a + R_c / 3) + j(X_c / 3 + X_a))^2}$$

Untuk nilai  $R_a$  yang kecil terhadap  $X_a$   $R_c / 3$  harga arus  $I_a$  praktis hanya tergantung pada harga reaktansi kawat tanah dan impedansi ekivalen tanah.

Sedangkan rugi-rugi kawat tanah akan merupakan fungsi linier dari tahanan kawat tanah.

Penambahan harga tahanan sapai pada suatu nilai tertentu akan menambag rugi-rugi kawat tanah. Tetapi untuk penambahan nilai tahanan kawat tanah sehingga boleh megabaikan bilangan imajiner  $j (X_e /3 + X_a)$ , maka rugi-rugi  $P_c$  akan merupakan fungsi kebalikan dari kawat tanah. Penambahan harga tahanan kaat tanah memperkecil rugi-rugi kawat tanah yang terjadi.

Untuk  $R_a$  yang kecil :

$$P_0 = \frac{V_a^2 R_a}{\left( (R_e /3) + j(X_e /3 + X_a) \right)^2}$$

Untuk  $R_a$  yang besar :

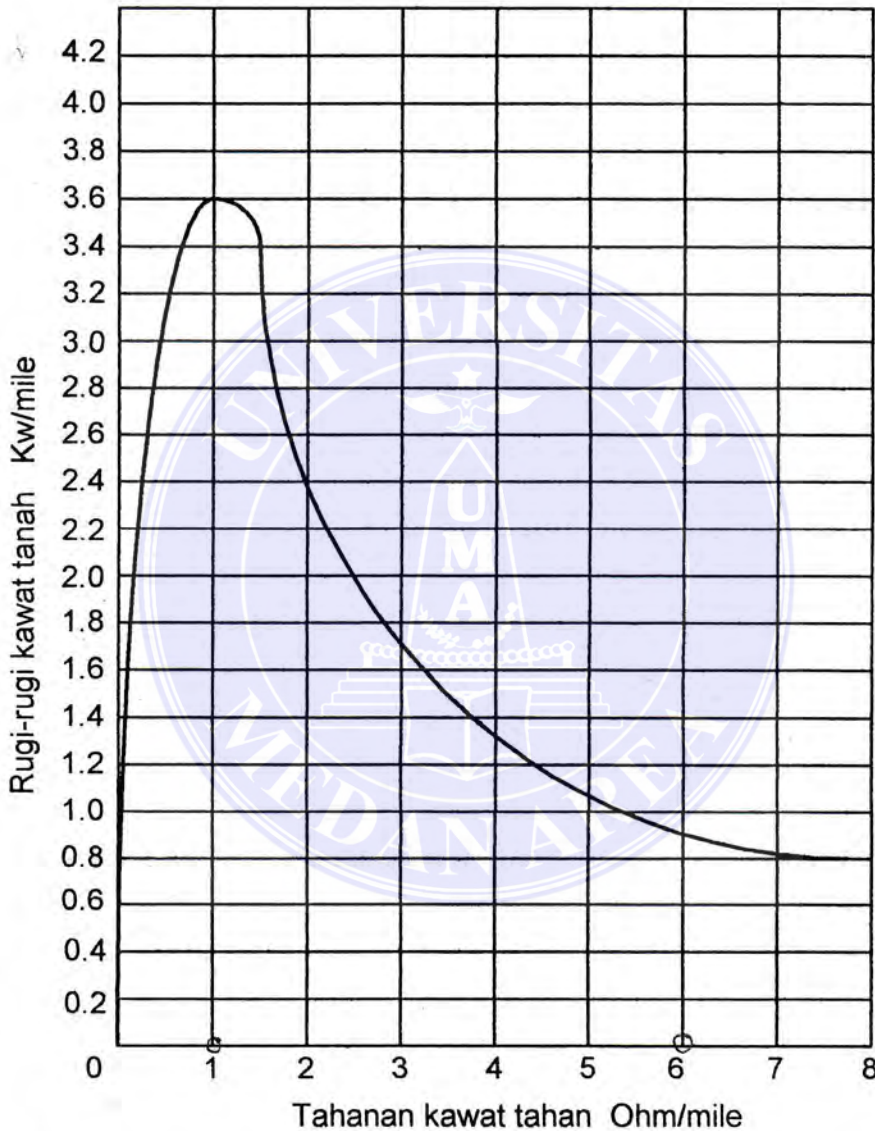
$$P_0 = \frac{V_a^2 R_a}{(R_a + R_e /3)}$$

Garafik rugi-rugi kawat tanah merupakan fungsi dari tahanan kawat tanah dapat dilihat seperti kurva pada gambar 3. 6.

Dari gambar 3. 6 dapat diperoleh kesimpulan bahwa untuk mengurangi atau menurunkan rugi-rugi kawat tanah dapat dilakukan dengan memperbesar tahanan kawat tanah. Dengan memiliki jenis kawat tanah yang mempunyai tahanan yang besar dan reaktansinya kecil.

Jenis-jenis kawat tanah yang sering digunakan sebagai proteksi saluran transmisi terhadap sambaran petir adalah kawat baja yang lebih murah seperti

High Strength Steel (Hs Steel) atau Extra High Strength Steel (Ehs Steel), tetapi tidak jarang juga digunakan kawat tanah ASCR ataupun kawat baja berlapis Aluminium (Alumoweld).



Gambar 3. 6. Grafik rugi-rugi kawat tanah Vs tahanan kawat tanah



## BAB V

### KESIMPULAN

Berdasarkan kepada pembahasan dan perhitungan pada Bab-bab sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan:

1. Adanya koupling induktif antara kawat fasa dan kawat tanah menyebabkan timbulnya induksi pada kawat tanah dan karena adanya rangkaian tertutup, maka mengalir arus induksi pada kawat tanah sehingga menimbulkan rugi-rugi tambahan saluran transmisi.
2. Besar kecilnya rugi-rugi kawat tanah dengan metode skema loop terbuka dipengaruhi oleh arus beban, tahanan kawat tanah, tahanan kaki menara, frekwensi kerja, tahanan jenis tanah dan konfigurasi kawat tanah dengan saluran.
3. Dengan metode skema loop terbuka kawat tanah tetap dapat berfungsi sebagai mana mestinya dan arus urutan nol tetap mempunyai jalan belik mata!

## DAFTAR PUSTAKA

1. Keri (SM) A. I. F, Nourai (M) A, Segneider J. M, The Open Loop Schene : An Effective Methode Of Ground Wire Loss Reduction, IEEE Trans. On Power Apparatus and System, vol. PAS-103. No. 12, December 1984.
2. Dale E. Hedman and Henry C. Sampers, 345 KV Line 60 Hz Ground Wire loss, IEEE Trans On Power Apparatus and System, vol. PAS-87. No.2, Februari 1968.
3. Hesse M.H. Electromagnetic and Electrostatic Transmision Lina Parameter by Digital Computer, IEEE Trans. On Power Apparatus and System, vol. PAS-82. Juni 1963.
4. Electrical Transmision and Distribution reference Book, Westinghouse Electric corp. East Pitsburgh, 1950.
5. Analisa Sistem Tenaga Listrik, Edisi ke-empat, William D. Stevenson Jr, Penterjemah Ir. Kamal Idris.
6. Hutahuruk T. S, Transmisi Daya Listrik, Cetakan ke-tiga, Jurusan Elektro teknik Fakultas Teknologi Industri ITB.
7. Hutahuruk T. S, Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja.
8. Anderson Paul M, Analysis of Faulted Power Sistem, the IOWA state University Press, 1983.
9. Sectionalizing Static the Prevonts 500 Kv Outages, by Ben Fachner and Pete Tomas Arizona Public Service co. September 1978.