

Analisa Perambatan Gelombang Surja Berjalan Pada Belitan Trafo Distribusi

Hery Purnomo dan Mahfudz Shidiq

Abstract—These instructions give you guidelines for preparing papers for *EECCIS Journal*. This document based on *IEEE Transaction and Journal*. Use this document as a template if you are using *Microsoft Word 6.0* or later. Otherwise, use this document as an instruction set. The electronic file of your paper will be formatted further at *EECCIS*. Define all symbols used in the abstract. Do not cite references in the abstract. Do not delete the blank line immediately above the abstract; it sets the footnote at the bottom of this column.

Index Terms—About four key words or phrases in alphabetical order, separated by commas.

Abstrak—Sambaran petir pada kawat saluran menimbulkan tegangan lebih dan gelombang surja yang merambat hingga mencapai dan mengalir dalam belitan trafo distribusi. Tegangan lebih dalam trafo sangat membahayakan isolasi yang digunakan antar belitan maupun antar belitan dengan bagian aktif lainnya. Sedangkan gelombang surja dengan frekuensi dominan membuat belitan memberikan respon yang berbeda dengan ketika kondisi normal ($f = 50$ Hz). Analisis terhadap gelombang surja dalam belitan trafo bertujuan untuk mendapatkan model transien dari belitan trafo dan mengetahui respon belitan terhadap perambatan gelombang surja, serta untuk mengetahui titik kritis pada belitan yang ditimbulkan oleh tegangan lebih gelombang surja berjalan. Hasil analisis menunjukkan bahwa model transien secara pendekatan dalam susunan kapasitansi paralel dan kapasitansi seri yang sama setiap bagian, kemudian dinyatakan dalam impedansi surja belitan trafo yang juga sama untuk setiap bagian dari model transien belitan, sehingga tidak menyebabkan respon pada perambatan gelombang surja dalam belitan. Tetapi berpengaruh pada pangkal dan ujung belitan untuk hubungan bintang terasa tegangan lebih yang secara berturut-turut mencapai nilai 83,40 % (104 kV) yang terjadi pada saat $t = 58 \mu s$ dan 84 % (105 kV) yang terjadi pada saat $t = 67 \mu s$. Hal yang sama terjadi pada belitan hubungan delta pada ujung dan pangkal belitan terasa tegangan lebih hingga masing-masing titik mencapai nilai 102,10 % (127,60 kV) yang terjadi pada saat $t = 95,72 \mu s$, titik ini merasakan nilai yang lebih tinggi dari titik yang lain dalam belitan trafo karena adanya pantulan dan penerusan gelombang surja berjalan.

Kata Kunci—surja berjalan, belitan trafo distribusi.

Hery Purnomo adalah dosen Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang Indonesia (korespondensi dapat dilakukan melalui; email heryp@brawijaya.ac.id)

Mahfudz Shidiq adalah dosen Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang Indonesia.

I. PENDAHULUAN

GANGGUAN petir pada saluran distribusi berdasarkan jenis sambarannya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu sambaran petir langsung dan sambaran petir tidak langsung atau induksi. Sambaran petir langsung dapat terjadi apabila petir menyambar langsung pada kawat penghantar. Gangguan ini merupakan gangguan yang paling berbahaya jika terjadi pada sistem, tetapi gangguan ini jarang terjadi pada saluran distribusi salah satunya disebabkan oleh rendahnya ketinggian kawat penghantar saluran terhadap tanah. Akibat sambaran tersebut maka akan timbul tegangan lebih dan gelombang berjalan yang merambat pada kawat penghantar. Tegangan lebih dan gelombang berjalan dapat membahayakan serta merusak peralatan pada sistem distribusi. Salah satunya trafo distribusi 20 kV / 380V-220V. Akan dianalisis bagaimana respon belitan trafo terhadap gelombang surja berjalan.

- Bagaimanakah model transien dan tanggapan belitan trafo yang dialiri gelombang surja petir.
- Dimanakah letak titik kritis pada belitan trafo ketika dialiri gelombang surja petir

Dalam penelitian dibatasi:

- Menggunakan trafo distribusi 3 fasa, 20 kV, 160 kVA, dengan frekuensi kerja 50 Hz.
- Menggunakan gelombang tegangan surja jenis 1.2/50 μs , dengan dasar tegangan BIL untuk isolasi pada saluran distribusi yaitu 125 kV.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh model analisis transien dari trafo distribusi dan tanggapannya ketika belitan dirambati oleh gelombang surja berjalan.

Dari hasil penelitian dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan kemampuan trafo distribusi terhadap tegangan abnormal dan pemilihan proteksi surja.

II. TINJAUAN PUSTAKA

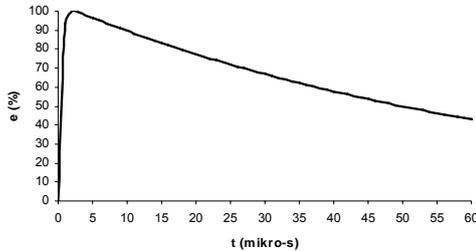
Pada kondisi normal, model transien atau rangkaian ekuivalen dari belitan trafo merupakan komponen RL seri. Sedang pada kondisi belitan yang sedang dialiri gelombang surja maka frekuensi tinggi gelombang surja membuat komponen kapasitansi ikut berperan dari belitan trafo.

A. Gelombang Surja Petir

Gangguan alam seperti sambaran petir merupakan bahaya yang tak dapat dihindari oleh trafo distribusi.

Sambaran petir yang terjadi pada saluran distribusi akan menyebabkan tegangan lebih serta gelombang surja berjalan pada kawat penghantar saluran, yang membahayakan isolasi serta trafo itu sendiri. Gelombang surja petir adalah gelombang surja bentuk eksponensial ganda berdasarkan standar IEC yang merupakan model gelombang tegangan lebih tipe 1,2/50 μ s.

Gelombang bentuk eksponensial ganda seperti diperlihatkan Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Bentuk Gelombang Eksponensial Ganda

Bentuk gelombang eksponensial ganda dengan persamaan gelombang berjalan dinyatakan berikut:

$$v(t) = A_v \cdot V_p \left(1 - e^{-t/t_a}\right) e^{-t/t_b} \quad (2-1)$$

Dimana :

A = 1,037

V_p = amplitudo atau puncak gelombang tegangan surja (%)

t_1 = 0.04074 μ s

t_2 = 68.22 μ s

B. Impedansi Surja Petir

Gelombang surja petir yang merambat pada kawat penghantar akan melewati impedansi kawat penghantar yang dialirinya, yang disebut juga impedansi surja. yang diperlihatkan oleh persamaan :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \Omega \quad (2-2)$$

Dimana pada saluran udara jaringan distribusi, L dan C adalah induktansi dan kapasitansi saluran

$$Z = 60 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad \Omega \quad (2-3)$$

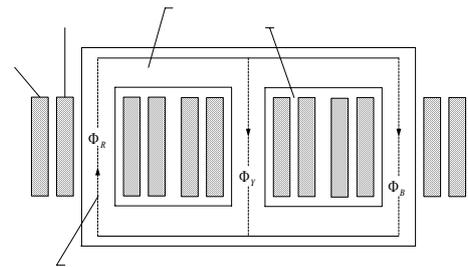
2.1 Struktur Belitan Trafo Distribusi 3 Fasa.

Trafo distribusi 3 fasa yang digunakan dilapangan didesain untuk bekerja dalam keadaan normal dan sesuai dengan ketentuan yang diberlakukan dilapangan, dalam kondisi ini hanya komponen R dan L belitan yang dominan dalam kerja trafo distribusi.

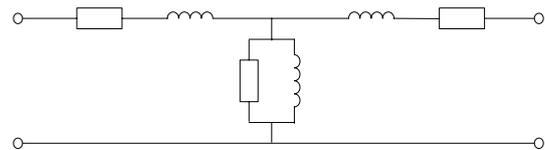
Pada Gambar 2.2 terlihat bahwa inti trafo terdiri dari tiga kaki dan dua pikulan. Kumbaran TT dan TR pada satu fasa digulung pada satu kaki. Ditunjukkan juga pada gambar 2.3, model transien trafo yang paling sederhana yang hanya memperlihatkan unsur dari kawat belitan yaitu R dan L seri.

Tegangan dan frekuensi tinggi ini membuat unsur kapasitansi dari sebuah belitan sangat diperhitungkan

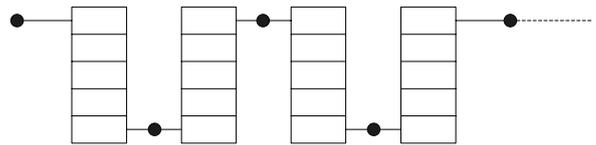
baik kapasitansi antar belitan dengan belitan yang lain dalam suatu kumparan ataupun kapasitansi antar kumparan dengan tanah.



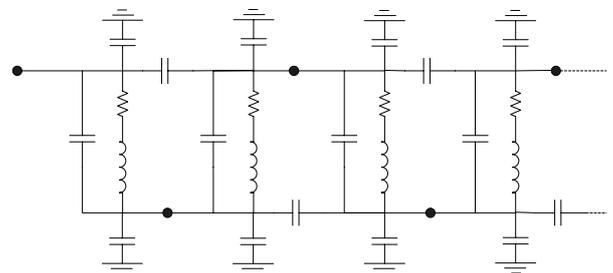
Gambar 2.2 Transformator Tiga Fasa Tipe Inti.



Gambar 2.3 Model Transien Trafo.

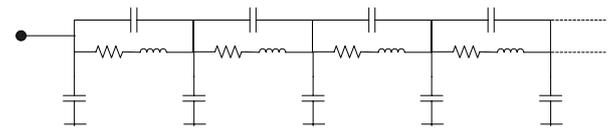


Gambar 2.4 Belitan dalam Bentuk Lapisan.



Gambar 2.5 Penyederhanaan Model Transien Belitan.

Penyederhanaan model pada Gambar 2.5 dilakukan dengan menggabungkan C tiap-tiap belitan dalam satu lapisan, kapasitansi kumparan dengan tanah digabung menjadi satu pada setiap ujung-ujung bagian kumparan.



Gambar 2.6. Model Transien dari Belitan Trafo.

Gambar 2.6. terlihat bahwa model transien belitan trafo mirip dengan model transient dari saluran transmisi sama, perbedaan hanya terletak pada penambahan kapasitansi seri pada model.

III. METODE PENELITIAN

A. Pengambilan Data Penelitian

Pengambilan data dengan langkah sebagai berikut:

- Pencarian data R, L, dan C dari trafo distribusi 20 kV.
- Pembuatan model analisis transien trafo.

B. Tempat Pengambilan Data

Data awal berupa data spesifikasi trafo dan data-data lainnya seperti data kumpulan serta data pengujian elektrik diambil pada PT. PLN Unit Pendidikan dan Latihan (UDIKLAT) Pandaan, Kab. Pasuruan, Jawa Timur.

C. Evaluasi Data

Data yang telah diperoleh tak dapat digunakan secara langsung untuk mendapatkan variabel-variabel yang dibutuhkan dalam pembuatan dan analisis model transien trafo. Sehingga data yang telah diperoleh akan diolah lebih lanjut dengan perhitungan-perhitungan pendekatan.

D. Penentuan komponen model analisis transien trafo.

Komponen model analisis trafo terdiri dari komponen tahanan (R), induktansi (L), kapasitansi antara belitan dengan belitan (C_s), dan kapasitansi belitan dengan tanah (C_g) dari belitan trafo distribusi.

E. Pembuatan model analisis transien trafo.

Model analisis transien trafo dibuat dengan memasukkan nilai dari komponen-komponen model seperti R, L, C_s dan C_g yang terlebih dahulu telah dinyatakan kedalam per satuan panjang kawat.

IV. ANALISIS PERAMBATAN GELOMBANG PADA BELITAN TRAFODISTRIBUSI

Komponen gelombang frekuensi tinggi yang merambat pada belitan trafo akan menyebabkan reaktansi induktif pada L cenderung bernilai sangat besar, sedang reaktansi kapasitif pada C cenderung semakin kecil. Pada kondisi frekuensi yang sangat tinggi nilai reaktansi induktif belitan trafo akan mendekati tak berhingga, menyebabkan rangkaian terbuka pada L dan arus tidak dapat mengalir pada L. Sebaliknya pada frekuensi yang sangat tinggi nilai reaktansi kapasitif pada belitan mendekati nol atau menyebabkan rangkaian hubung singkat pada C.

A. Frekuensi Gelombang Surja Petir

Gelombang tegangan surja petir merupakan gelombang impuls eksponensial ganda. Bentuk gelombang menurut standar internasional IEC adalah tipe 1.2/50 μ s dengan persamaan:

$$v(t) = A_v V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2} \quad \text{kV} \quad (4-1)$$

Dimana :

$$A_v = 1.037$$

$$E_m = \text{amplitudo atau puncak gelombang tegangan surja (\%)}$$

$$t_1 = 0.04074 \mu\text{s}$$

$$t_2 = 68.22 \mu\text{s}$$

Persamaan gelombang impuls dapat dinyatakan :

$$v(t) = A_v V_p (e^{-at} - e^{-bt}) \quad \text{kV} \quad (4-2)$$

Dimana :

$$a = \frac{1}{t_2} = \frac{1}{68.22 \times 10^{-6}} = 0.0147 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$b = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} = \frac{1}{0.04074 \times 10^{-6}} + \frac{1}{68.22 \times 10^{-6}} = 24.561 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

Dengan menggunakan integral fourier, spektrum frekuensi gelombang impuls eksponensial ganda dapat ditentukan yaitu :

$$\begin{aligned} V(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j\omega t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} A_v V_p (e^{-at} - e^{-bt}) e^{-j\omega t} dt \end{aligned} \quad (4-3)$$

Karena interval gelombang impuls eksponensial ganda dari 0 hingga ∞ , maka integral menjadi :

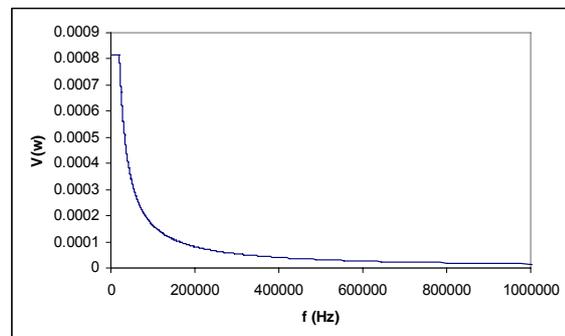
$$\begin{aligned} V(\omega) &= \int_0^{\infty} A_v V_p (e^{-at} - e^{-bt}) e^{-j\omega t} dt \\ &= A_v V_p \left[\frac{1}{-(a+j\omega)} e^{-(a+j\omega)t} - \frac{1}{-(b+j\omega)} e^{-(b+j\omega)t} \right]_0^{\infty} \\ V(\omega) &= A_v V_p \left[\frac{1}{-(a+j\omega)} - \frac{1}{-(b+j\omega)} \right] \\ &= A_v V_p \left[\frac{b-a}{(a+j\omega)(b+j\omega)} \right] \end{aligned} \quad (4-4)$$

Besar dari tegangan fungsi frekuensi adalah :

$$\|V(\omega)\| = A_v V_p \frac{|b-a|}{\sqrt{(a^2 + \omega^2)(b^2 + \omega^2)}} \quad (4-5)$$

Dengan memasukkan nilai $a = 0.0147 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ dan $b = 24.561 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, maka :

$$\|V(\omega)\| = A_v V_p \frac{|(24.561 \times 10^6) - (0.0147 \times 10^6)|}{\sqrt{((0.0147 \times 10^6)^2 + \omega^2)((24.561 \times 10^6)^2 + \omega^2)}}$$

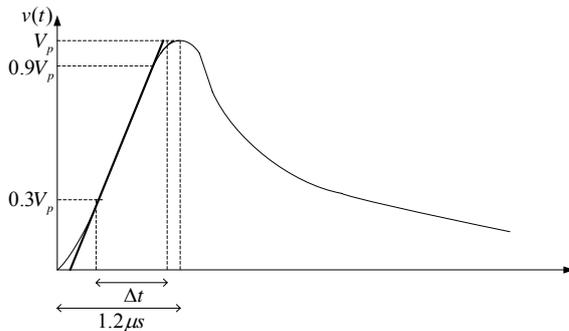


Gambar 4.1. Grafik Spektrum Frekuensi dari Tegangan Fungsi Frekuensi.

Dari Gambar 4.1 dapat diamati bahwa spektrum dari gelombang surja impuls eksponensial ganda adalah kontinu dan mengandung semua frekuensi. Apabila waktu untuk mencapai puncak adalah Δt , maka frekuensi dominan dari gelombang impuls eksponensial ganda tipe 1.2/50 μs didekati dengan persamaan :

$$f = \frac{1}{\Delta t} \text{ Hz} \quad (4-6)$$

Perhitungan nilai Δt dalam standar IEC diperlihatkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Kurva Gelombang Berjalan Standar IEC tipe 1.2/50 μs .

Dalam gelombang impuls 1.2/50 μs , nilai Δt mendekati 0.8 μs . dengan menggunakan nilai ini frekuensi dominannya adalah :

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{0.8 \times 10^{-6}} = 1.25 \times 10^6 \text{ Hz}$$

B. Tahanan, Induktansi, dan Kapasitansi Belitan Trafo

Data spesifikasi trafo distribusi 3 fasa.

- Daya nominal: 160 kVA,
- Tegangan : 20 kV/ 400-231 V
- Hubungan Δ/Y
- Arus : 4,60 A / 231-299 A,
- Rugi tembaga: 2360 Watt,
- Rugi besi: 460 Watt

Spesifikasi trafo diatas ditunjang dengan data-data seperti data tentang kumparan dan data tentang pengujian belitan trafo secara elektrik seperti pengujian hubung singkat dan pengujian tanpa beban. Data tersebut diperlihatkan Tabel 4.1

TABLE 4.1.
DATA KUMPARAN TRAF0.

No	Data Kumparan	Primer	Sekunder
1	Rugi tembaga per fasa (Watt)	437.3	349.3
2	Tebal isolasi antar lapis	2 x 0.04	(4x0.04) + (1x0.03)
4	Panjang konduktor (cm)	149940	1865.71
5	Ukuran konduktor (cm)	0.115 (diameter)	0.3x(2x1.0)
6	Isolasi konduktor	PVF 0.0037	Kertas 0.03
7	Jumlah belitan tiap lapis	152	20
8	Jumlah lapis	12	2

C. Tahanan Belitan Trafo

Tahanan belitan trafo (R) pada tiap fasa dapat ditentukan dalam persamaan :

$$R = \frac{P_{cu} / fasa}{I_{cc}^2 / fasa} \quad (4-7)$$

Maka tahanan pada belitan trafo tiap fasa disisi primer adalah :

$$R = \frac{437.3}{3.333^2} = 39.365 \ \Omega$$

Nilai tahanan dari kawat belitan pada tiap fasa dinyatakan dalam per satuan panjang kawat (a), dengan panjang total kawat belitan yang didapatkan dari perhitungan dimensi kumparan TT trafo adalah :

$$\frac{R}{a} = \frac{39.365}{152,819.29} = 0.258 \times 10^{-3} \ \Omega/cm$$

Tahanan kawat belitan adalah $0.258 \times 10^{-3} \ \Omega/cm$.

D. Induktansi Belitan Trafo

Induktansi (L) belitan trafo ditentukan dari data dimensi kumparan TT trafo, hubungan parameter tersebut dengan induktansi belitan kumparan TT trafo ditunjukkan oleh persamaan :

$$L = 4\pi\mu \frac{w}{\ell_{cp}} N^2 \frac{bd}{b+d} (.10^{-9}) \text{ H} \quad (4-8)$$

Induktansi L pada persamaan ini merupakan induktansi pada setiap lapisan dari kumparan TT trafo, sehingga jika diketahui pada lapisan pertama kumparan TT trafo N dan d adalah 152 belitan dan 0.08 cm sedang nilai w, b dan ℓ_{cp} secara berturut-turut adalah 38.394 cm, 2.52 cm, dan 38.21 cm. Maka induktansi pada lapisan ini adalah :

$$L = 4 \times \pi \times 1 \times \frac{38394}{38.21} \times 152^2 \times \frac{2.52 \times 0.08}{2.52 + 0.08} = 22620.4326 \times 10^{-9} \text{ H}$$

Dengan cara yang sama dapat menentukan nilai induktansi untuk lapisan-lapisan lainnya.

TABEL 4.2.
NILAI INDUKTANSI PADA SETIAP LAPISAN

Lapisan 1	22620.4326 x 10 ⁻⁹ H	Lapisan 7	25119.5311 x 10 ⁻⁹ H
Lapisan 2	23047.7818 x 10 ⁻⁹ H	Lapisan 8	25525.4667 x 10 ⁻⁹ H
Lapisan 3	23469.6304 x 10 ⁻⁹ H	Lapisan 9	25929.5394 x 10 ⁻⁹ H
Lapisan 4	23887.0197 x 10 ⁻⁹ H	Lapisan 10	26332.0050 x 10 ⁻⁹ H
Lapisan 5	24300.7441 x 10 ⁻⁹ H	Lapisan 11	26733.0746 x 10 ⁻⁹ H
Lapisan 6	24711.4194 x 10 ⁻⁹ H	Lapisan 12	27132.9237 x 10 ⁻⁹ H

Dimana pada masing-masing gulungan dibuat dalam 12 lapis. Untuk memperjelas susunan belitan pada kumparan TT trafo distribusi ini, susunan belitan dapat dilihat pada gambar 4.3.

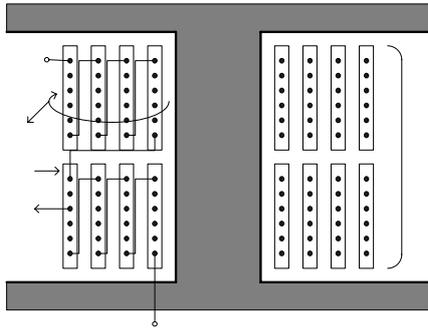
Dari gambar susunan tersebut, maka diperoleh L total pada kumparan TT adalah :

- L total = 2 (L₁ + L₂ + L₃ + ... + L₁₂)
- L total = 2 x 0.00029881 = 0.000597619 H

Nilai induktansi per satuan panjang kawat adalah

$$L/a = (5.976 \times 10^{-4})/152819 = 3.91 \times 10^{-9} \text{ H/cm}$$

Jadi nilai induktansi kawat belitan yang dinyatakan dalam H/cm adalah $3.91 \times 10^{-9} \text{ H/cm}$.



Gambar 4.3. Bentuk Susunan Belitan Sisi TT

E. Kapasitansi Belitan Trafo

Kapasitansi belitan pada kumparan trafo (C) terdiri dari kapasitansi seri (C_s) dan kapasitansi parallel (C_g). C_s = 1.51973 × 10⁻⁷ F

Sedang nilai kapasitansi antar belitan dengan tanah pada setiap lapisan dapat diperoleh dari persamaan :

$$C_g = \frac{\epsilon wh}{4\pi v_0^2} \frac{b+d}{bd} \cdot 10^9 \text{ F} \quad (4-9)$$

Sehingga nilai kapasitansi C_g pada lapisan pertama adalah :

$$C_g = \frac{3.5 \times 38.94 \times 38.321}{4 \times \pi \times 3 \times 10^{10}} \times \frac{2.52 + 0.08}{2.52 \times 0.08} = 5.8552 \times 10^{-9} \text{ F}$$

Nilai C_g untuk lapisan-lapisan yang lain nilainya dapat dilihat pada tabel 4.3.

TABEL 4.3. NILAI KAPASITANSI PADA SETIAP LAPISAN

Lapisan 1	5.8552 × 10 ⁻⁹ F	Lapisan 7	6.3736 × 10 ⁻⁹ F
Lapisan 2	5.9385 × 10 ⁻⁹ F	Lapisan 8	6.4616 × 10 ⁻⁹ F
Lapisan 3	6.0233 × 10 ⁻⁹ F	Lapisan 9	6.5511 × 10 ⁻⁹ F
Lapisan 4	6.1094 × 10 ⁻⁹ F	Lapisan 10	6.6416 × 10 ⁻⁹ F
Lapisan 5	6.1963 × 10 ⁻⁹ F	Lapisan 11	6.7313 × 10 ⁻⁹ F
Lapisan 6	6.2841 × 10 ⁻⁹ F	Lapisan 12	6.8213 × 10 ⁻⁹ F

Jika kapasitansi belitan terhadap tanah tersusun secara parallel pada tiap belitan disetiap lapisan dengan tanah sehingga C_g total dari belitan kumparan TT trafo pada gulungan pertama adalah :

$$\frac{1}{X_{C_g}} = \frac{1}{X_{C_{g1}}} + \frac{1}{X_{C_{g2}}} + \dots + \frac{1}{X_{C_{g12}}}$$

$$\frac{1}{(1/\omega C_g)} = \frac{1}{(1/\omega C_{g1})} + \frac{1}{(1/\omega C_{g2})} + \dots + \frac{1}{(1/\omega C_{g12})}$$

$$C_g = C_{g1} + C_{g2} + \dots + C_{g12}$$

maka C_g total untuk belitan kumparan TT trafo adalah :

$$\frac{1}{X_{C_g}} = \frac{1}{X_{C_g}} (\text{gulungan1}) + \frac{1}{X_{C_g}} (\text{gulungan2})$$

$$C_g = C_g (\text{gulungan1}) + C_g (\text{gulungan2})$$

Jika C_g pada gulungan pertama sama dengan C_g pada gulungan kedua maka C_g total kumparan TT trafo adalah :

$$C_g = 2 \times C_g \text{ gulungan 1}$$

$$C_g = 2 \times 7.599 \times 10^{-8} = 1.52 \times 10^{-7} \text{ F}$$

Seperti kedua nilai komponen model diatas, nilai kapasitansi C_s dan C_g juga dinyatakan dalam per satuan panjang kawat belitan a, sehingga didapat :

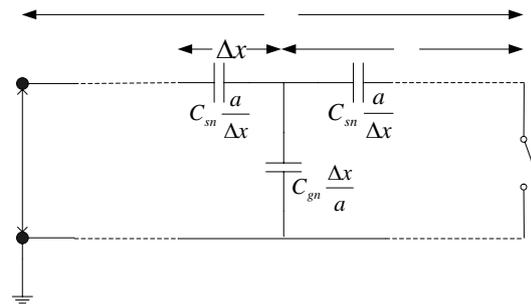
$$\frac{C_g}{a} = \frac{1.52 \times 10^{-7}}{152,819.26} = 0.994 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$$

$$C_s \cdot a = 1.52 \times 10^{-7} \times 152,819.26 = 0.0232 \text{ F-cm}$$

Jadi nilai kapasitansi kawat belitan yang dinyatakan secara berturut-turut F/cm dan F-cm adalah 0.994 × 10⁻¹² F/cm dan 0.032 F-cm.

F. Model Transient Belitan Trafo Distribusi

Setelah mendapatkan nilai dari masing-masing komponen model transient (R, L dan C), nilai-nilai tersebut dapat dimasukkan kedalam model transient.



Gambar 4.4. Tegangan Surja dan Komponen Belitan Trafo

Dari Gambar 4.4. Dimana Δx atau dx merupakan panjang pada tiap bagian model, yaitu :

$$\Delta x = \frac{152,819.26}{5} = 30,563.8 \text{ cm}$$

Jika setiap bagian dari model mempunyai panjang 30,563.8 cm, dan komponen-komponen persatuan panjang adalah :

$$\frac{R}{a} = 0.258 \times 10^{-3} \quad \Omega / \text{cm}$$

$$\frac{L}{a} = 3.91 \times 10^{-9} \quad H / \text{cm}$$

$$\frac{C_g}{a} = 0.994 \times 10^{-12} \quad F / \text{cm}$$

$$C_s \cdot a = 0.0232 \quad F - \text{cm}$$

Maka pada setiap bagian tersebut memiliki komponen-komponen model sebesar :

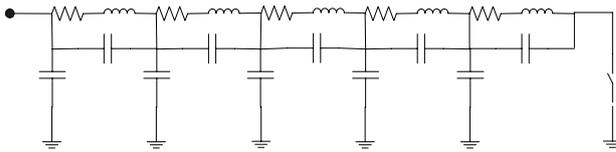
$$C_{g1} = \frac{C_g}{a} \Delta x = 0.994 \times 10^{-12} \times 30563.8 = 30380.42 \text{ pF}$$

$$C_{s1} = C_s a \frac{1}{\Delta x} = \frac{0.0232}{30563.8} = 759100 \text{ pF}$$

$$L_1 = \frac{L}{a} \Delta x = 3.91 \times 10^{-9} \times 30563.8 = 0.119 \text{ mH}$$

$$R_1 = \frac{R}{a} \Delta x = 0.258 \times 10^{-3} \times 30563.8 = 7.88 \text{ } \Omega$$

Sehingga rangkaian model analisis secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.5. Rangkaian Model Analisis Transien Trafo Distribusi.

G. Impedansi Surja Saluran

Impedansi surja saluran dapat ditentukan dengan mengetahui data-data sebagai berikut :

- Ketinggian kawat dari atas tanah = 850 cm
- Jenis kawat = AAAC
- Luas penampang kawat = 70 mm²

Dimana jari-jari (r) dari penampang kawat adalah :

$$r = \sqrt{\frac{70}{\pi}} = 4.72 \text{ mm atau } 0.472 \text{ cm}$$

Sehingga impedansi saluran yang memenuhi persamaan :

$$Z = 60 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \text{ } \Omega$$

Maka :

$$Z = 60 \ln\left(\frac{2 \times 850}{0.472}\right) = 491 \text{ } \Omega$$

H. Impedansi Surja Trafo

Sedang impedansi surja trafo dapat ditentukan ditentukan. Yakni :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_g}} \text{ } \Omega \tag{4-10}$$

Dengan memasukkan nilai L dan C_g maka Z₂ adalah :

$$Z_2 = \sqrt{\frac{0.000597619}{1.51973 \times 10^{-7}}} = 62.7 \text{ } \Omega$$

Jadi nilai impedansi surja setiap kumparan belitan fasa adalah 62.7 Ω.

I. Faktor Pantul dan Terusan Gelombang

Ketika gelombang surja melewati titik terminal trafo dengan impedansi surja trafo Z₂ sebesar 62.7 Ω dari saluran yang memiliki impedansi surja sebesar 491 Ω, gelombang surja akan mengalami pantulan dimana

besarnya ditentukan oleh koefisien pantulan yang dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{4-11}$$

Sehingga jika nilai-nilai impedansi surja dimasukkan ke dalam persamaan tersebut, maka :

$$\Gamma_1 = \frac{62.71 - 491.35}{491.35 + 62.71} = -0.77$$

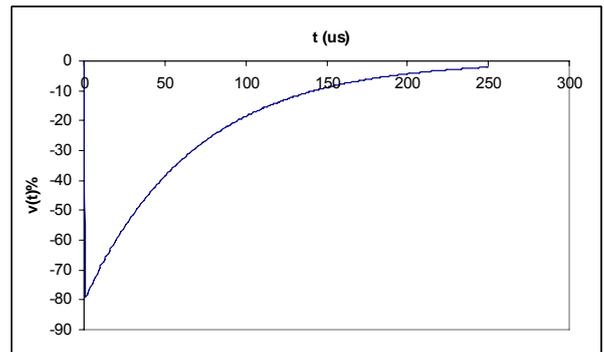
Dari nilai ini terlihat bahwa gelombang tegangan yang dipantulkan akan bernilai negatif. Jika persamaan untuk gelombang tegangan surja yang dipantulkan adalah :

$$v_r(t) = \Gamma_1 A_v V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2}$$

Sehingga persamaan gelombang tegangan surja yang dipantulkan adalah :

$$v(t) = -0.77 \times 1.037 \times 100 (1 - e^{-t/(0.04074)}) e^{-t/(68.22)} \text{ } \% \\ = -79.85 (1 - e^{-t/(0.04074)}) e^{-t/(68.22)} \text{ } \%$$

Bentuk kurva dari persamaan gelombang tegangan surja pantul terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Kurva Gelombang Tegangan Pantul.

Persamaan faktor terusan itu adalah :

$$n_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Sesuai persamaan :

$$V_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} v_i = n_t V_i \tag{4-12}$$

Sehingga nilai dari faktor terusan gelombang tersebut adalah :

$$n_t = \frac{2 \times 62.71}{491.35 + 62.71} = 0.23$$

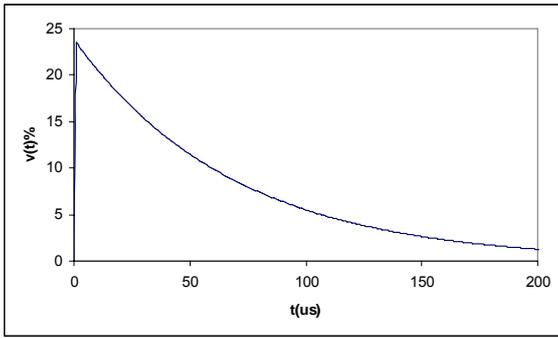
Dengan nilai faktor terusan tersebut persamaan gelombang yang diteruskan menjadi :

$$v_t(t) = n_t A_v V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2}$$

Jika dimasukkan nilai dari parameter-parameter yang ada dalam persamaan tersebut, maka :

$$v(t) = 23.85 (1 - e^{-t/(0.04074)}) e^{-t/(68.22)} \text{ } \%$$

Dimana bentuk dari gelombang tegangan surja terusan yang merupakan persamaan fungsi waktu diperlihatkan oleh gambar 4.7 berikut ini.



Gambar 4.7. Kurva Gelombang Tegangan Surja Terusan Terhadap Waktu.

J. Kecepatan Gelombang Surja dalam Belitan Trafo.

Kecepatan gelombang surja pada kawat belitan ditentukan dengan persamaan :

$$v = \frac{a}{\sqrt{LC_g}} \text{ cm/s}$$

$$v = \frac{152819.2912}{\sqrt{0.000597619 \times 1.51973 \times 10^{-7}}} = 16035515147 \text{ cm/s atau } 160 \text{ m}/\mu\text{s}$$

K. Waktu Tempuh Gelombang Surja dalam Belitan Trafo

Dengan mengetahui kecepatan rambat gelombang surja yaitu 160 m/μs maka waktu yang dibutuhkan gelombang untuk mencapai satu titik ke titik lainnya dapat ditentukan dengan :

$$T = \frac{a}{v} \tag{4-13}$$

Jika diketahui a = 152,819.29 cm atau 1,528.193 m maka waktu tempuh gelombang surja berjalan dari titik A ke titik F (T) adalah :

$$T = \frac{1,528.1929}{160} = 9.55 \text{ } \mu\text{s}$$

dimana jarak setiap titik dengan titik lainnya adalah Δx = 30,563.8 cm atau 305.638 m. Jika waktu yang diperlukan untuk menempuh tiap bagian dari model transient belitan adalah ΔT, maka :

$$\Delta T = \frac{305.638}{160} = 1.91 \text{ } \mu\text{s}$$

L. Perambatan Gelombang Surja di Tiap Titik Pada Belitan Trafo

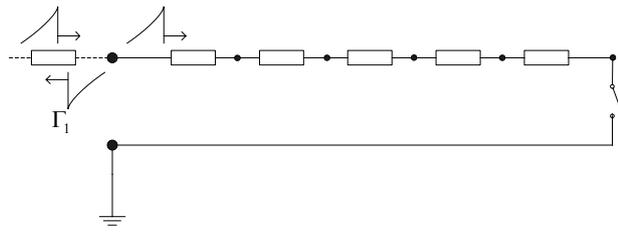
Gelombang tegangan surja yang mengalir dari saluran distribusi dan mencapai titik terminal trafo akan dipantulkan oleh titik tersebut, akan tetapi ada juga yang diteruskan kedalam belitan adalah :

$$v_t(t) = n_t A_v V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2} \%$$

$$v(t) = 23.85 (1 - e^{-t/(0.04074)}) e^{-t/(68.22)} \%$$

Model transien belitan. diperlihatkan oleh Gambar 4.8.

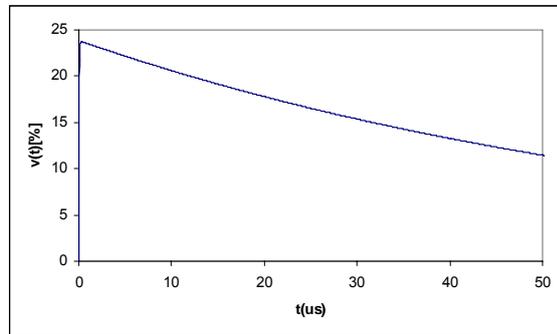
Z₅ hingga Z₁ pada Gambar 4.8 merupakan impedansi surja pada tiap-tiap bagian model transien yang memenuhi persamaan :



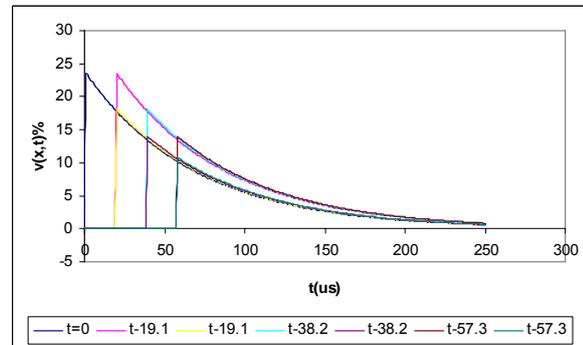
Gambar 4.8. Model Transient Belitan untuk Perambatan Gelombang Surja Berjalan.

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_g}}$$

$$Z = \sqrt{\frac{0.119 \times 10^{-3}}{30380.42 \times 10^{-12}}} = 62.71 \text{ } \Omega$$



Gambar 4.9. Kurva Gelombang Tegangan Surja pada Titik A.

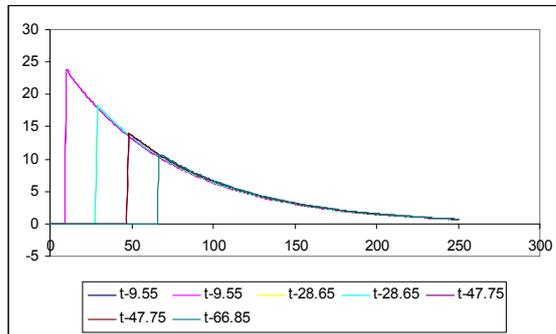


Gambar 4.10. Gelombang Tegangan Surjadi Titik A.

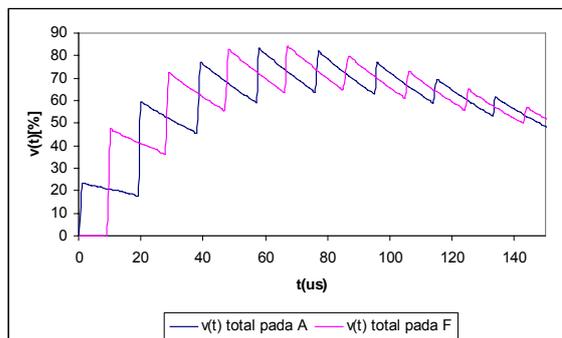
Waktu yang tertera pada gambar merupakan saat dimana gelombang teras pada titik-titik tersebut, baik ketika tiba maupun ketika dipantulkan. Saat t = 0, titik A hanya merasakan gelombang tunggal yang diteruskan dari saluran udara. Saat t = 19.1 μs gelombang yang dirasakan merupakan gelombang yang datang dari titik F, dan juga gelombang yang dipantulkan oleh titik A itu sendiri.

Hal yang sama juga terjadi di titik F, akan tetapi saat t = 9.55 μs gelombang tidak hanya gelombang datang tetapi juga gelombang yang dipantulkan. Diperlihatkan pada Gambar 4.11 bahwa tumpang tindih gelombang telah terjadi mulai awal gelombang tiba dititik F.

Sehingga tegangan total yang terasa pada tiap waktu di titik F lebih tinggi dari pada titik A. diperlihatkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.11. Gelombang Tegangan Surja di Titik F.



Gambar 4.12. Tegangan Surja Total yang Terasa pada Titik A dan Titik F.

Terlihat pada Gambar 4.16. bahwa walaupun pada titik A terlebih dahulu merasakan gelombang tegangan surja, akan tetapi nilai tegangan surja total yang terasa dititik A masih lebih kecil dari pada tegangan yang terasa dititik F. Titik F merasakan gelombang tegangan surja mulai saat $t = 9.55 \mu\text{s}$, tetapi saat itu juga titik F merasakan gelombang tegangan surja yang dipantulkan oleh titik F itu sendiri sehingga yang terasa dua kali lebih besar dari pada yang dirasakan titik A saat $t = 0$.

V. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini adalah :

- Komponen frekuensi tinggi yang dominan dari gelombang tegangan surja tipe 1.2/50 μs adalah 1.25 MHz yang selanjutnya dijadikan dasar untuk pendekatan model dari belitan trafo distribusi 20 kV.
- Kecepatan rambat gelombang surja pada kawat belitan trafo adalah sebesar 160 m/ μs , amplitudo gelombang tegangan surja yang diteruskan kedalam belitan trafo sebesar 23% (28.75 kV).
- Tekanan terbesar pada isolasi belitan transformator yang titik netralnya tidak ditanahkan ketika dialiri gelombang tegangan surja terjadi pada ujung dan pangkal belitan trafo distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arismunandar, Artono. 2001. Teknik Tegangan Tinggi. Jakarta: Pradnya Paramita.
- [2] Electric Utility Engineers. Distribution System. East Pittsburgh, Pennsylvania: Westinghouse Electric Corporation.
- [3] Hutaaruk, T.S. 1991. Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja. Edisi kedua, Jakarta: Erlangga.
- [4] Kind, Dieter. 1993. Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi. Bandung: ITB.
- [5] Pabla, A.S. 1994. Sistem Distribusi Daya Listrik. Jakarta: Erlangga.
- [6] Paul, Clayton R dan Nasar A. Syed. 1987. Introduction to Electromagnetic Fields. International Edition, Singapore: McGraw-Hill Book Company.
- [7] Rudenberg, Reinhold. 1968. Electrical Shock Waves in Power Systems. Massachusetts: Harvard University Press.
- [8] Greenwood, Allan. Electrical Transients In Power System. A Wiley-Interscience Publication : New York
- [9] Van Valkenburg, M. E. 1994. Analisis Jaringan Listrik. Jakarta : Erlangga.