

Pengaruh Penyisipan Induktor dan Kapasitor pada Sambungan Saluran Udara dan Kabel Distribusi 20 kV terhadap Perambatan Gelombang Tegangan Surja

Moch. Dhofir

Abstrak– Dalam tulisan ini dipaparkan pengaruh sisipan L seri atau C paralel diantara dua saluran berbeda terhadap perilaku perambatan gelombang surja dari berbagai bentuk gelombang datang. Bentuk gelombang datang yang diujikan adalah bentuk langkah ideal, langkah tidak ideal, eksponensial, eksponensial ganda dan sinusoida. Saluran pertama berupa kabel dengan impedansi surja 50Ω dan saluran kedua adalah saluran udara dengan impedansi surja 500Ω . Arah rambat gelombang datang dapat dipilih bebas, tetapi dalam tulisan ini arahnya ditentukan dari kabel menuju saluran udara atau dari saluran dengan impedansi surja rendah menuju saluran impedansi surja tinggi. Untuk penyelesaian gelombang terusan dan gelombang pantul, dilakukan penyelesaian terhadap model sisipan L seri atau C paralel yang biasanya melibatkan penyelesaian persamaan diferensial atau integral. Dari analisis didapat hasil bahwa sisipan L seri atau C paralel secara signifikan mempengaruhi pelandaian muka gelombang terusan dan tingkat pelandaian ini semakin besar ketika nilai L dan C semakin besar. Respon pelandaian gelombang terusan oleh L seri atau C paralel semakin besar (pelandaian semakin cepat) apabila muka gelombang datang semakin curam seperti yang dimiliki gelombang langkah ideal dan eksponensial. Sisipan L seri dan C paralel juga memberikan pengaruh pada amplitudo gelombang terusan. Untuk gelombang datang sinusoida, pelandaian muka gelombang dan peredaman amplitudo dipengaruhi oleh nilai L atau C dan frekuensi gelombang datang. Semakin besar nilai frekuensi dan nilai komponen yang disisipkan, maka tingkat peredaman dan pelandaian gelombang terusan juga semakin besar.

Kata kunci : Sisipan, induktor, kapasitor, kabel, saluran udara, perambatan, gelombang surja

I. PENDAHULUAN

Bentuk gelombang surja tegangan yang merambat pada suatu saluran udara maupun kabel adalah spesifik yaitu memiliki muka gelombang yang curam atau waktu yang dibutuhkan hingga mencapai nilai puncak gelombang sangat singkat. Gelombang tegangan surja terdiri dari beberapa bentuk model, yaitu langkah ideal, langkah tidak ideal, eksponensial, dobel eksponensial dan sinusoida.

Moch.Dhofir adalah dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Jl. Mayjen Haryono 167 Malang.

Perambatan gelombang surja tegangan melalui saluran yang tidak kontinu akan selalu mengalami proses pemantulan gelombang. Saluran tidak kontinu banyak ditemui pada jaringan listrik distribusi 20 kV, dimana saluran udara disambung dengan kabel.

Gelombang surja yang datang menemui saluran berbeda, sebagian akan dipantulkan dan sebagian lainnya akan diteruskan. Amplitudo gelombang yang dipantulkan dan yang diteruskan tergantung pada nilai impedansi surja masing-masing saluran, tetapi bentuk spesifik dari gelombang tetap sama.

Apabila pada sambungan dengan saluran berbeda disisipkan suatu induktor atau kapasitor, maka pada titik sambungan, bentuk gelombang pantul dan terusan akan berbeda dari gelombang datang atau mengalami distorsi gelombang.

Perubahan bentuk gelombang pantul dan terusan karena penyisipan induktor atau kapasitor disebabkan oleh perilaku masing-masing komponen tersebut. Komponen frekuensi tinggi dari gelombang surja akan dihambat (*choked off*) oleh sebuah induktor dan mudah diloloskan (*by pass*) oleh sebuah kapasitor.

Pada tulisan ini akan dilakukan suatu analisis terhadap pengaruh penyisipan induktor dan kapasitor pada sambungan dua saluran berbeda terhadap perilaku perambatan gelombang tegangan surja.

Dalam kajian ini, induktor dan kapasitor diasumsikan merupakan komponen yang ideal yang tidak mengandung komponen resistor dan impedansi surja kabel 50Ω dan impedansi surja saluran udara sama dengan 500Ω .

II. DASAR TEORI

A. Model Penyisipan Induktor L

Gambar 2.1 menunjukkan suatu induktor yang disisipkan secara seri diantara dua saluran berbeda. Saluran kabel pada sisi kiri mempunyai impedansi surja Z_1 dan saluran udara disebalah kanan memiliki impedansi surja Z_2 serta induktor yang disisipkan mempunyai nilai induktansi L.



Gambar 2.1 Penyisipan L seri diantara dua saluran berbeda
Sumber : Rudenberg, 1968: 101

Induktor L diasumsikan ideal dan tidak mengandung komponen resistansi dan secara fisik dimensinya sangat pendek sehingga dapat dimodelkan sebagai komponen terkumpul (*lumped*).

Karena induktor disisipkan secara seri, maka menurut Hukum Kirchoff Arus harus dipenuhi hubungan,

$$i_1 = i_2 \quad (2-1)$$

dan persamaan tegangan pada titik sambungan harus memenuhi hubungan,

$$e_1 = e_2 + L \frac{di_2}{dt} \quad (2-2)$$

Pada titik peralihan, tegangan pada saluran pertama e_1 sama dengan tegangan pada saluran kedua e_2 dan jatuh tegangan pada induktansi L .

Dengan pemisahan tegangan dan arus kedalam komponen gelombang datang, gelombang pantul dan gelombang terusan, maka persamaan (2-1) dapat diuraikan menjadi,

$$e_i - e_r = \frac{Z_1}{Z_2} e_t \quad (2-3)$$

dan persamaan (2-2) menjadi,

$$e_i + e_r = e_t + \frac{L}{Z_2} \frac{de_t}{dt} \quad (2-4)$$

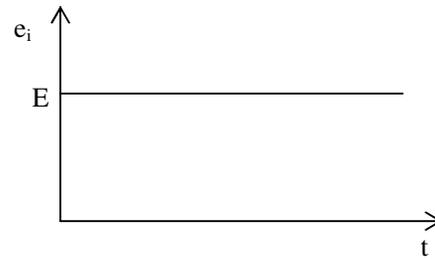
dimana :

$$\begin{aligned} e_i &: \text{gelombang tegangan datang} \\ e_r &: \text{gelombang tegangan pantul} \\ e_t &: \text{gelombang tegangan terusan} \\ i_i &= e_i/Z_1 \\ i_r &= -e_r/Z_1 \\ i_t &= -e_t/Z_2 = i_2 \text{ dan } e_t = e_2 \\ e_1 &= e_i + e_r \\ i_1 &= i_i + i_r \end{aligned}$$

Eliminasi e_r dari persamaan (2-3) dan (2-4) diperoleh hubungan antara gelombang datang dan gelombang terusan sebagai berikut,

$$\frac{de_t}{dt} + \frac{Z_1 + Z_2}{L} e_t = 2 \frac{Z_2}{L} e_i \quad (2-5)$$

Persamaan (2-5) merupakan sebuah persamaan diferensial linier orde satu, dengan koefisien-koefisien konstan.



Gambar 2.2 Bentuk gelombang langkah ideal
Sumber : Rudenberg, 1968: 101

Apabila gelombang langkah ideal dengan amplitudo E pada Gambar 2.1 dinyatakan sebagai,

$$e_i = E \quad (2-6)$$

Substitusi persamaan (2-6) kedalam persamaan (2-5) dan kemudian dicari penyelesaian untuk e_t , didapat

$$e_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left(1 - e^{-\left(\frac{Z_1 + Z_2}{L}\right)t} \right) \quad (2-7)$$

Dari persamaan (2-7) dapat diketahui bahwa gelombang langkah ideal yang datang menemui induktor seri L akan diteruskan ke saluran udara dengan bentuk yang berbeda. Muka gelombang datang naik secara spontan, tetapi muka gelombang terusan naik lebih pelan untuk mencapai nilai puncaknya atau mengalami pelandaian di bagian muka gelombang.

Kecepatan naik gelombang terusan ditentukan oleh konstanta waktu T_L yang didefinisikan oleh,

$$T_L = \frac{L}{Z_1 + Z_2} \quad (2-8)$$

Nilai T_L naik apabila nilai L dinaikkan atau nilai impedansi surja saluran diturunkan.

Gelombang arus yang merambat maju dalam saluran-2 diturunkan dari persamaan (2-7) dengan membagi kedua ruas persamaan (2-7) dengan Z_2 , didapat

$$i_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} I \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (2-9)$$

Dalam persamaan (2-9), E sudah diganti dengan perkalian I dan Z_1 .

Jadi gelombang arus terusan pada saluran-2 juga naik tidak secara tiba-tiba. Persamaan (2-7) dan (2-9) menunjukkan bahwa factor dalam kurung besarnya sama dengan 0 pada saat $t = 0$ dan mencapai nilai akhir sama dengan 1.

Dalam hal ini dapat diamati bahwa induktor yang disisipkan secara seri beraksi hanya sebagai pelandai muka gelombang. Namun demikian untuk beberapa nilai konstanta waktu T_L , nilai tegangan dan arus tidak tergantung induktor.

Induktor memerlukan pengaruh terhadap penyimpanan energi magnetik yang mengurangi kenaikan muka gelombang yang curam, tetapi tidak memberikan pengaruh yang sama pada bagian ekor gelombang yang landai.

Pemantulan terjadi ketika gelombang datang sampai pada induktor. Dengan memasukkan e_t pada persamaan (2-7) kealam persamaan (2-3), persamaan gelombang tegangan pantul dapat diperoleh, yaitu

$$e_r = E - \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} E \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (2-10)$$

Dengan membagi kedua ruas persamaan (2-10) dengan $-Z_1$, persamaan gelombang arus akan didapat, yaitu

$$i_r = -I + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} I \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (2-11)$$

Pada $t = 0$ suku kedua dari persamaan (2-10) dan (2-11) adalah nol. Jadi pada saat gelombang sampai pada induktor, gelombang tegangan pada saluran kabel akan diganda dua, sedangkan gelombang arusnya direduksi menjadi nol.

Jadi induktor yang disisipkan beraksi pada bagian muka gelombang yang curam sebagai suatu sisi akhir saluran terbuka. Setelah beberapa konstanta waktu, suku kedua yang ada dalam kurung mempunyai nilai 1 dan gelombang tegangan pantul mencapai nilai akhir (*steady state*) mendekati nilai,

$$(e_r)_\infty = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} E \quad (2-12)$$

dan nilai akhir gelombang arus pantul mendekati,

$$(i_r)_\infty = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} I \quad (2-13)$$

Setelah beberapa konstanta waktu, nilai gelombang tegangan dan arus pantul ternyata sama dengan nilai gelombang tegangan dan arus pada sambungan dua saluran bila tanpa sisipan L.

Pelandaian gelombang tegangan terusan meningkat dengan peningkatan nilai induktansi L, tetapi gelombang tegangan pantul mempunyai dua kali amplitudo gelombang datang dan nilainya turun lebih lambat menuju nilai akhirnya ketika nilai induktansi L meningkat.

Jika kedua saluran mempunyai impedansi surja yang sama, persamaan menjadi sedikit lebih sederhana, tetapi secara esensial perilaku transien karakternya tetap, yaitu nilai akhir gelombang pantul dan terusan secara eksak sama dengan yang dimiliki gelombang datang.

Jika gelombang persegi tunggal yang merambat pada saluran udara menemui sebuah induktor, maka gelombang terusan akan dilandaikan dan lebih panjang, sedangkan gelombang pantulnya terdiri dari dua

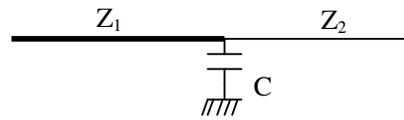
lonjakan (*spike*) yang sangat tajam dan berlawanan polaritas pada kedua ujung gelombang.

Gelombang persegi tunggal dapat dinyatakan oleh komposisi sebuah pulsa langkah positif dan sebuah pulsa langkah negatif yang tertunda dengan amplitudo sama.

B. Model Penyisipan Kapasitor C

Gambar 2.3 menunjukkan sebuah kapasitor C yang disisipkan secara paralel diantara dua saluran berbeda. Kapasitor dipertimbangkan sebagai komponen terkumpul dan ideal tanpa induktansi diri dan resistansi. Karena kapasitor dihubungkan secara paralel pada titik sambungan, maka harus berlaku kesamaan tegangan berikut,

$$e_1 = e_2 \quad (2-14)$$



Gambar 2.3 Penyisipan C paralel diantara dua saluran berbeda
Sumber : Rudenberg, 1968: 104

Kapasitor akan menyerap arus dari saluran yang besarnya sama dengan perkalian kapasitansnya dengan turunan tegangan terhadap waktu. Persamaan arus pada titik sambungan adalah,

$$i_1 = i_2 + C \frac{de_2}{dt} \quad (2-15)$$

Persamaan (2-14) dapat diuraikan kedalam komponen gelombang datang, gelombang pantul dan gelombang terusan menjadi,

$$e_i + e_r = e_t \quad (2-16)$$

dan persamaan (2-15) menjadi

$$e_i - e_r = \frac{Z_1}{Z_2} e_t + Z_1 C \frac{de_t}{dt} \quad (2-17)$$

Dengan mereduksi komponen gelombang pantul dari dua persamaan terakhir, didapat

$$\frac{de_t}{dt} + \frac{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}{C} e_t = \frac{2}{Z_1 C} e_i \quad (2-18)$$

Persamaan (2-18) juga merupakan persamaan deferensial orde satu seperti pada model sisipan induktor seri untuk gelombang tegangan terusan.

Untuk gelombang datang e_i berbentuk gelombang langkah ideal, maka penyelesaian gelombang terusan dari persamaan (2-18) adalah,

$$e_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E (1 - e^{-(1/Z_1 + 1/Z_2)t/C}) \quad (2-19)$$

Bila dibandingkan, bentuk gelombang tegangan terusan dengan sisipan C paralel setipe dengan bentuk gelombang terusan dengan sisipan L seri. Disini gelombang terusan juga naik secara perlahan dan mendekati suatu nilai akhir sama dengan kondisi tanpa kehadiran kondensator.

Kecepatan naik gelombang juga tergantung pada konstanta waktu T_c yang yang dinyatakan oleh persamaan,

$$T_c = \frac{C}{(1/Z_1) + (1/Z_2)} = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} \quad (2-20)$$

Dari persamaan (2-20) diketahui bahwa semakin besar kapasitas C, maka semakin besar konstanta waktu T_c dan berarti semakin lama waktu yang diperlukan gelombang pantul untuk naik hingga mencapai puncak.

Persamaan gelombang arus terusan dapat diturunkan dari persamaan (2-19), yaitu

$$i_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} I(1 - e^{-t/T_c}) \quad (2-21)$$

Sekali lagi bentuk persamaan gelombang arus terusan dengan sisipan C paralel serupa dengan kasus untuk sisipan L seri, hanya berbeda dari nilai konstanta waktunya.

Persamaan gelombang pantul untuk tegangan dengan mudah dapat diperoleh dari persamaan (2-16) dengan hasil,

$$e_r = -E + \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E(1 - e^{-t/T_c}) \quad (2-22)$$

dan ini memberikan persamaan untuk pulsa arus pantul sebagai,

$$i_r = I - \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} I(1 - e^{-t/T_c}) \quad (2-23)$$

Pada $t = 0$, nilai dalam kurung dari persamaan (2-23) adalah dan tegangan pada sambungan ($e_i + e_r$) sama dengan nol, sementara arusnya meningkat hingga $2I$. Jadi kondensator beraksi pada bagian muka gelombang sebagai suatu rangkaian hubung singkat.

Tegangan pantul secara perlahan naik dan arus pantul jatuh hingga nilai akhir yang ditentukan oleh persamaan (2-23). Jadi seperti induktor, sebuah sisipan kapasitor menyimpan energi dari bagian muka gelombang. Dengan demikian setelah beberapa saat, model dengan penyisipan kapasitor paralel akan membangkitkan tegangan dan arus sulit melaluinya.

Untuk saluran dengan impedansi surja yang sama, sekali lagi persamaan menjadi lebih sederhana, tetapi fenomenanya tetap.

Seperti pada sisipan L seri, pada sisipan C paralel, gelombang persegi tunggal yang menemui kapasitor akan dipantulkan dan diteruskan. Gelombang terusan akan dilandaikan dan gelombang pantul mengandung dua lonjakan (spike) dengan polaritas berlawanan.

Dalam kasus sisipan L seri polaritas tegangan pantul sama dengan polaritas tegangan datang sehingga meningkatkan tegangan, sebaliknya pada kasus sisipan C paralel polaritas tegangan pantul berlawanan dengan polaritas tegangan datang sehingga mengurangi tegangan hingga nol. Ini menunjukkan bahwa sisipan kapasitor paralel efektif sebagai proteksi tegangan lebih.

Sedangkan untuk maksud pelandaian muka gelombang datang yang curam, induktor maupun kapasitor sama-sama efektifnya. Agar memberikan efek pelandaian yang sama antara sisipan L seri dan sisipan C paralel, maka konstanta waktu keduanya harus dibuat sama atau harus memenuhi hubungan

$$L/C = Z_1 Z_2 \quad (2-24)$$

Kondisi ekivalen sisipan L seri dan C paralel dengan impedansi surja kabel 50Ω dan saluran udara 500Ω adalah,

$$L = 25000 C$$

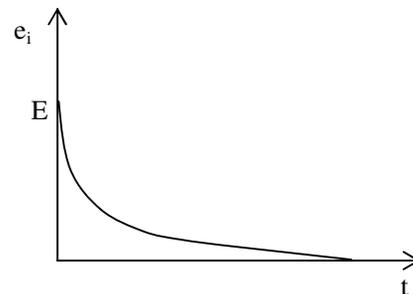
Jadi induktansi dan kapasitansi ekivalen hanya dikaitkan dengan perkalian impedansi surja saluran dan bukan oleh parameter-parameter lainnya.

C. Respon Model Rangkaian dengan Gelombang Datang Berbentuk Eksponensial

Gambar 2.4 menunjukkan sebuah gelombang eksponensial tunggal yang dapat dinyatakan oleh persamaan

$$e_i = Ee^{-t/\tau} \quad (2-25)$$

Muka gelombang eksponensial seperti muka gelombang langkah dan bagian ekornya turun secara eksponensial dengan konstanta waktu τ .



Gambar 2.4 Bentuk gelombang eksponen
Sumber : Rudernberg, 1968: 106

Penyelesaian gelombang tegangan terusan mengacu persamaan (2-4) untuk sisipan L seri dan mengikuti persamaan (2-17) untuk sisipan C paralel.

Dengan menggunakan konstanta waktu T untuk kedua kasus sisipan, didapat persamaan diferensial yang sama, yaitu

$$T \frac{de_i}{dt} + e_i = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} e_i \quad (2-26)$$

Penyelesaian persamaan (2-26) mengandung sebuah komponen tegangan e'_i , yang didasarkan pada pulsa datang dari persamaan yang diberikan oleh persamaan (2-25),

$$e'_i = K_1 e^{-t/\tau} \quad (2-27)$$

Substitusi (2-27) kedalam persamaan (2-26) didapatkan,

$$-\frac{T}{\tau} K_1 + K_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E \quad (2-28)$$

dan amplitudonya adalah

$$K_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{E}{1 - T/\tau} \quad (2-29)$$

Komponen kedua dari penyelesaian persamaan (2-26) adalah e''_i , yang diturunkan dari persamaan (2-27) dengan mengambil fungsi pemaksa,

$$e''_i = K_2 e^{-t/T} \quad (2-30)$$

Pada $t = 0$ tegangan e_i sama dengan nol dan tidak dapat naik secara tiba-tiba, sehingga jumlah persamaan (2-30) dan (2-27) harus nol, yang dipenuhi untuk

$$K_2 = -K_1 \quad (2-31)$$

Penyelesaian lengkap pulsa tegangan yang ditransmisikan menjadi

$$e_i = e'_i + e''_i = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{E}{1 - T/\tau} (e^{t/\tau} - e^{t/T}) \quad (2-32)$$

Dari persamaan (2-32) diketahui bahwa untuk $T < \tau$, muka gelombang dilandaikan dengan kenaikan muka yang ditentukan oleh T dan bagian punggung jatuh secara eksponensial yang ditentukan oleh konstanta waktu τ . Jika $T > \tau$ amplitudo pulsa yang ditransmisikan akan menjadi sangat kecil. Kenaikan gelombang pantul pada $t = 0$ diperoleh dengan menurunkan e_i terhadap waktu, yaitu

$$\left(\frac{de_i}{dt} \right)_{t=0} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{E}{T} \quad (2-33)$$

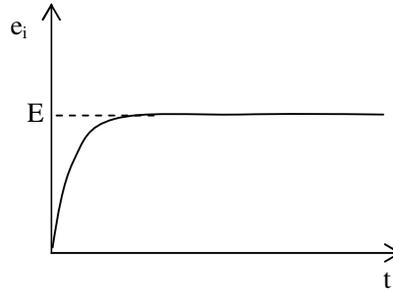
Dengan demikian kenaikan tegangan pada muka gelombang merupakan fungsi yang hanya ditentukan oleh konstanta waktu T .

Nilai puncak puncak tegangan terusan akan selalu lebih kecil dari nilai puncak pulsa datang.

D. Respon Model Rangkaian dengan Gelombang Datang Berbentuk Langkah Tak Ideal

Gambar 2.5 menunjukkan gelombang langkah tak ideal. Gelombang ini merupakan gelombang eksponensial yang dibentuk dari gelombang langkah positif dan gelombang eksponensial negatif dengan konstanta waktu τ , yaitu

$$e_i = E(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3-34)$$



Gambar 2.5 Bentuk gelombang langkah tak ideal
Sumber : Rudernberg, 1968: 106

Penyelesaian persamaan (2-6) dengan gelombang datang langkah tak ideal adalah penjumlahan (2-7) atau (2-19) dan persamaan (2-32), yaitu

$$e_i = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left[(1 - e^{-t/\tau}) - \frac{e^{-t/\tau} - e^{-t/T}}{1 - T/\tau} \right] \quad (3-5)$$

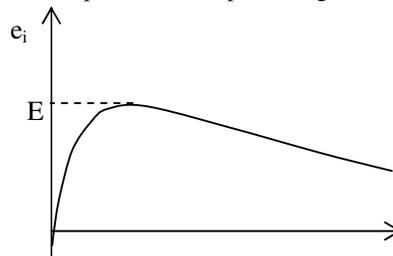
Sekarang bentuk penyelesaian e_i memiliki beberapa fungsi eksponensial. Untuk $T < \tau$ gelombang terusan naik sangat pelan hingga mencapai nilai akhirnya. Nilai akhir gelombang terusan hanya ditentukan oleh impedansi surja kedua saluran. Demikian juga untuk nilai $T > \tau$ gelombang terusan juga naik pelan.

E. Respon Model Rangkaian dengan Gelombang Datang Berbentuk Eksponensial Ganda

Jika gelombang datang mempunyai kenaikan tajam dengan konstanta waktu τ yang kecil dan ekor dengan konstanta waktu θ yang besar, maka gelombang datang tersebut diberikan oleh,

$$e_i = E(e^{-t/\theta} - e^{-t/\tau}) \quad (2-36)$$

Gelombang ini sering disebut dengan gelombang eksponensial ganda yang grafiknya ditunjukkan pada Gambar 2.6. Kecuramannya berada diantara kecuraman pulsa eksponensial dan pulsa langkah tak ideal.



Gambar 2.6 Bentuk gelombang eksponensial ganda
Sumber : Rudernberg, 1968: 107

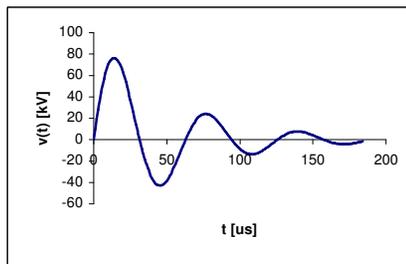
Untuk gelombang datang ini, pulsa yang ditransmisikan terdiri dari dua bagian, masing-masing ditentukan menurut persamaan (2-33) dan menghasilkan

$$e_i = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left[\frac{e^{-t/\theta} - e^{-t/T}}{1 - T/\theta} - \frac{e^{-t/\tau} - e^{-t/T}}{1 - T/\tau} \right] \quad (2-37)$$

F. Respon Model Rangkaian dengan Gelombang Datang Berbentuk Sinusoida

Gelombang datang sinusoida ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan persamaan matematisnya dinyatakan oleh

$$e_{v1} = E e^{-t/T} \cos(\omega t + \varphi) \quad (2-38)$$



Gambar 2.7 Bentuk gelombang sinusoida
Sumber : Rudemberg, 1968: 107

Apabila gelombang datang berbentuk sinusoida diterapkan pada persamaan diferensial (2-26), akan diperoleh penyelesaian untuk e_i sebagai berikut,

$$e_i = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{E}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} [\cos(\omega t + \varphi) - e^{-t/T} \cos \varphi] \quad (2-39)$$

Penyelesaian ini mengandung dua suku, yaitu suku eksponensial dan suku sinusoida dan keduanya juga tergantung pada parameter φ . Parameter φ menentukan kecuraman muka gelombang datang. Ketika $\varphi = 0, \pi, 2\pi, \dots$ muka gelombang datang paling curam, dan dalam keadaan ini dapat menghasilkan tegangan lebih transien yang berbahaya.

Parameter φ merupakan sudut fasa pada saat gelombang datang menemui komponen sisipan L atau C.

Amplitudo gelombang terusan tergantung pada frekuensi angular ω dan konstanta waktu T. Semakin besar nilai ω dan T, maka semakin kecil amplitudo gelombang terusan dan ini merupakan keuntungan. Dengan demikian semakin besar nilai L seri atau nilai C paralel yang disisipkan, maka semakin menguntungkan.

Pada nilai t yang besar didapat nilai keadaan mantap gelombang pantul yang sinusoida.

Bila gelombang datang memiliki frekuensi 10^6 Hertz dengan nilai konstanta waktu $T = 0,55 \cdot 10^{-6}$ detik akan menghasilkan pengurangan amplitudo gelombang menjadi,

$$\frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot 10^6 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6})^2}} = 28\%$$

Untuk frekuensi lebih rendah, reduksi ini tidak efektif. Pada frekuensi 10^5 Hertz, amplitudo gelombang turun menjadi 95% atau menghasilkan penurunan 5%.

III. HASIL DAN DISKUSI

Berikut akan diamati dan didiskusikan perilaku perambatan gelombang pada dua saluran berbeda dengan sisipan induktor L dan kapasitor C. Perilaku ini akan diuji menggunakan beberapa bentuk gelombang surja, yaitu bentuk langkah ideal, langkah tak ideal, eksponensial, eksponensial ganda dan sinusoida.

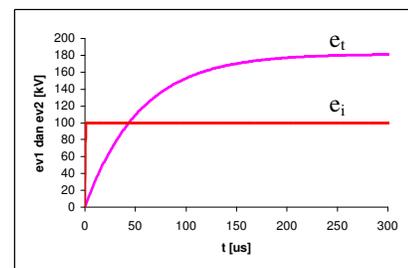
Gelombang surja bisa datang dari sisi kabel (Z_1) menuju saluran udara (Z_2) atau sebaliknya dari saluran udara ke kabel. Karena untuk kedua arah perilakunya serupa, maka dalam tulisan ini akan dianalisis gelombang datang dari kabel ke saluran udara.

Agar dapat dibandingkan, amplitudo gelombang datang (E) dari semua bentuk dibuat sama yaitu 100 kV (100%). Dalam semua kasus, nilai impedansi surja kabel diasumsikan 50Ω dan impedansi surja saluran udara 500Ω . Variabel yang dirubah adalah nilai L dan C, sedangkan yang diamati adalah gelombang tegangan pantul dan terusan.

A. Respon dengan Sisipan L Seri

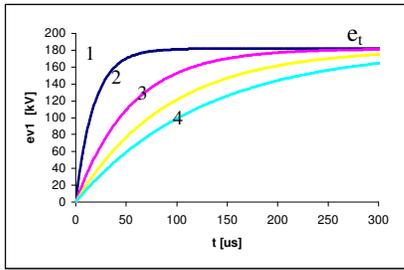
Gelombang datang langkah ideal

Apabila gelombang datang langkah ideal dari sisi kabel menemui L, maka gelombang akan dipantulkan dan diteruskan ke saluran udara. Gambar 3.1 menunjukkan gelombang datang dan gelombang terusan untuk sisipan induktor dengan $L = 3$ mH. Dari gambar dapat diamati bahwa gelombang terusan mengalami perubahan bentuk dan mempunyai nilai akhir mendekati dua kali amplitudo gelombang datang.



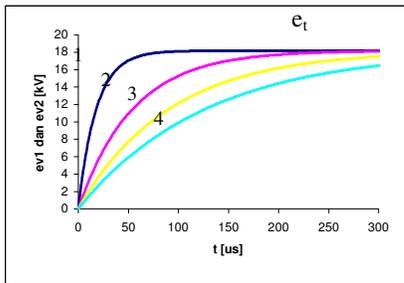
Gambar 3.1 Gelombang datang langkah ideal dan gelombang terusan untuk $L = 3$ mH.

Gambar 3.2 menunjukkan gelombang terusan untuk empat nilai induktansi L, yaitu 1 mH, 3 mH, 5 mH dan 7 mH. Pada gambar dapat diamati bahwa semakin tinggi nilai L, semakin landai muka gelombang terusannya. Nilai akhir gelombang terusan untuk setiap nilai L menuju suatu nilai yang sama yaitu dua kali amplitudo gelombang datang.



Gambar 3.2 Gelombang terusan untuk gelombang datang dari kabel
(1) L = 1 mH; (2) L = 3mH;
(3) L = 5 mH; (4) L = 7 mH

Dari Gambar 3.2 dapat diketahui gelombang yang datang dari saluran dengan impedansi surja lebih kecil (kabel) menuju saluran dengan impedansi surja lebih besar (saluran udara) dengan sisipan L seri menghasilkan gelombang langkah ideal dengan amplitudo diperbesar.

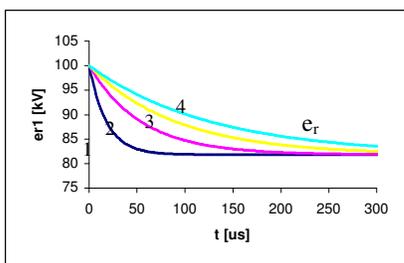


Gambar 3.3 Gelombang terusan untuk gelombang datang dari saluran udara
(1) L = 1 mH; (2) L = 3mH;
(3) L = 5 mH; (4) L = 7 mH

Bila arah gelombang datang dibalik yaitu dari saluran udara ke kabel akan dihasilkan gelombang terusan dengan tipe sama tetapi amplitudonya lebih kecil dari amplitudo gelombang datang seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.

Dengan demikian induktor berfungsi sebagai pelandai muka gelombang terusan tidak tergantung pada arah darimana gelombang datang. Sedangkan amplitudo gelombang ditentukan oleh nilai impedansi surja kedua saluran dan arah rambat gelombang datang.

Sedangkan gelombang pantul untuk berbagai nilai L ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Gelombang pantul (1) L = 1 mH; (2) L = 3mH; (3) L = 5 mH; (4) L = 7 mH

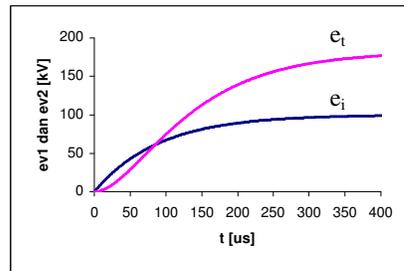
Berbeda dengan bentuk gelombang terusan, gelombang pantul berbentuk eksponensial dengan nilai awal sama dengan nilai awal gelombang datang (100 kV) dan menurun secara eksponensial menuju suatu nilai akhir yang sama, yaitu

$$(e_r)_\infty = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} E = 81,82 \text{ kV}$$

Nilai akhir ini tidak tergantung pada nilai L, tetapi hanya tergantung pada nilai Z_1 , Z_2 dan amplitudo gelombang datang E.

Gelombang datang langkah tak ideal

Apabila gelombang langkah tidak ideal diterapkan sebagai gelombang datang dan nilai sisipan seri L = 3 mH, maka akan dihasilkan gelombang terusan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5.

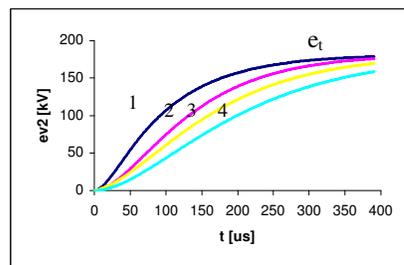


Gambar 3.5 Gelombang datang langkah tak ideal dan gelombang terusan untuk sisipan L = 3 mH

Dari Gambar 3.5 diketahui bahwa gelombang terusan lebih landai khususnya didaerah kaki gelombang namun amplitudonya meningkat hampir dua kali amplitudo gelombang datang. Sekali lagi sisipan induktansi seri berfungsi melandaikan muka gelombang terusan.

Grafik gelombang terusan untuk berbagai nilai L diperlihatkan pada Gambar 3.6. Dapat diamati bahwa semakin besar nilai induktansi seri, semakin landai muka gelombang terusannya. Untuk setiap nilai L, dapat diamati bahwa nilai akhir gelombang terusan juga menuju suatu nilai yang sama, yaitu

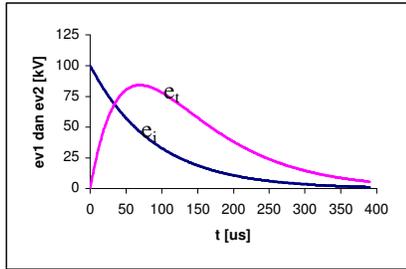
$$(e_t)_\infty = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E = 181,82 \text{ kV}$$



Gambar 3.6 Gelombang terusan untuk gelombang datang langkah tak ideal dari kabel
 (1) L = 1 mH; (2) L = 3mH;
 (3) L = 5 mH; (4) L = 7 mH

Gelombang datang eksponensial

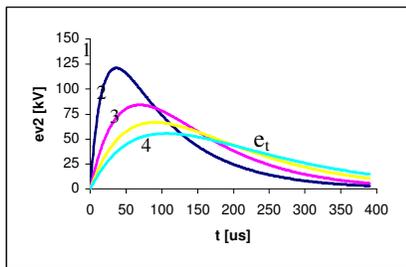
Dengan menerapkan model sisipan L seri dan gelombang datang berbentuk eksponensial, akan diperoleh gelombang terusan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7. Gelombang terusan ini merupakan gelombang eksponensial ganda.



Gambar 3.7 Gelombang datang eksponensial dari kabel dan gelombang terusan untuk sisipan L = 3 mH

Muka gelombang datang eksponensial yang sangat curam setelah melalui sisipan L seri, menjadi gelombang terusan dengan muka yang sangat landai. Disini nampak bahwa induktansi seri sangat efektif dalam melandaikan muka gelombang yang sangat curam.

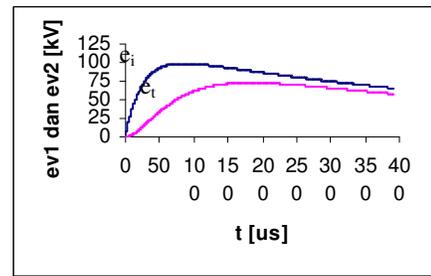
Variasi pelandaian gelombang terusan untuk berbagai nilai L ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Gelombang terusan untuk gelombang datang eksponensial dari sisi kabel
 (1) L = 1 mH; (2) L = 3mH;
 (3) L = 5 mH; (4) L = 7 mH

Gelombang datang eksponensial ganda

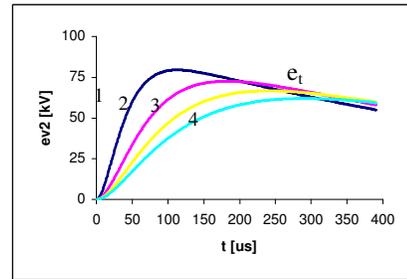
Dengan menerapkan model sisipan L seri dan gelombang datang eksponensial ganda, akan diperoleh gelombang terusan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Gelombang datang eksponensial ganda dari kabel dan gelombang terusan untuk sisipan L = 3 mH

Dari Gambar 3.9 dapat diamati bahwa induktansi seri melandaikan dan mereduksi amplitudo gelombang terusan sangat signifikan. Penurunan amplitudo gelombang terusan semakin kecil ketika arah rambat gelombang dari saluran udara ke kabel.

Gelombang terusan untuk berbagai nilai L ditunjukkan pada Gambar 3.10. Pelandaian semakin efektif apabila nilai L semakin besar.



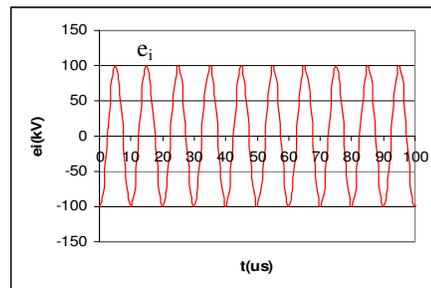
Gambar 3.10 Gelombang terusan untuk gelombang datang eksponensial ganda dari kabel
 (1) L = 1 mH; (2) L = 3mH;
 (3) L = 5 mH; (4) L = 7 mH

Gelombang datang sinusoida

Persamaan gelombang datang sinusoida dengan frekuensi 100 kHz dan amplitudo 100 kV adalah

$$e_i = 100 \cos(2\pi 100000.t + \pi) \text{ kV}$$

Nilai sudut fasa dibuat sama dengan π agar gelombang datang menghasilkan muka yang paling curam.

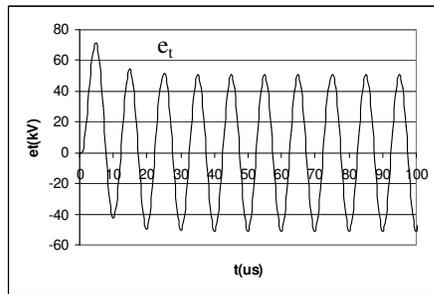
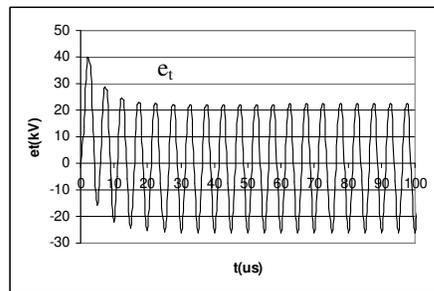
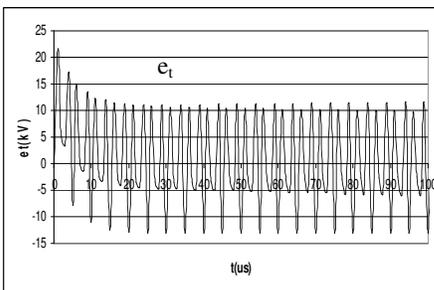


Gambar 3.11 Gelombang datang sinusoida dengan frekuensi 100 kHz

Penerapan gelombang sinusoida pada model sisipan L seri menghasilkan gelombang terusan untuk tiga variasi

frekuensi dan $L = 3 \text{ mH}$ ditunjukkan pada Gambar 3.12. Adanya L seri menyebabkan gelombang terusan menunjukkan gejala transien yang terdiri dari dua komponen gelombang, yaitu komponen AC dan komponen DC yang eksponensial.

Dari Gambar 3.12, durasi transien dipengaruhi oleh frekuensi gelombang datang. Durasi transien terjadi hingga 30 us untuk frekuensi 100 kHz , 25 us pada frekuensi 200 kHz dan 15 us pada frekuensi 400 kHz dan setelah itu menunjukkan keadaan mantap. Durasi ini menyatakan lamanya kehadiran dari komponen DC.

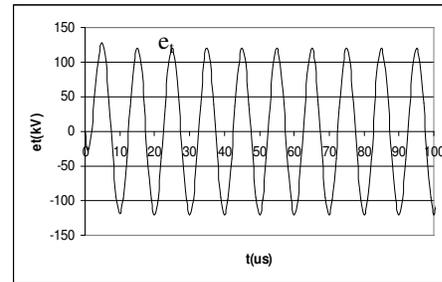
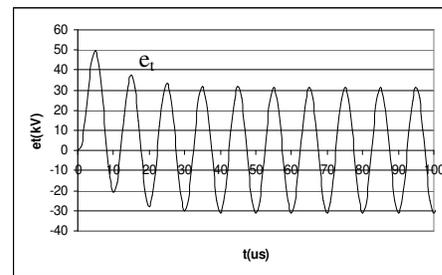
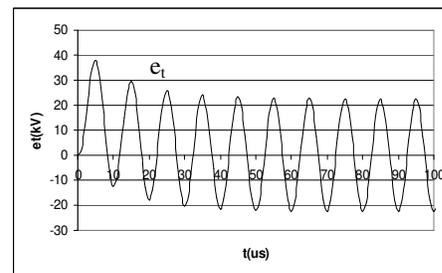
(a) $f = 100 \text{ kHz}$ (b) $f = 200 \text{ kHz}$ (c) $f = 400 \text{ kHz}$

Gambar 3.12 Gelombang terusan untuk gelombang datang sinusoida dari kabel dengan nilai $L = 3 \text{ mH}$

Gelombang terusan teredam mengikuti fungsi eksponensial dan peredaman semakin cepat untuk frekuensi yang semakin tinggi.

Variasi frekuensi ternyata memberikan pengaruh sangat signifikan terhadap penurunan nilai gelombang terusan. Untuk $L = 3 \text{ mH}$, peningkatan frekuensi dari 100 kHz ke 200 kHz menyebabkan penurunan nilai gelombang hingga 30 kV (30%) dan dari 200 kHz ke 400 kHz hanya turun sebesar 10 kV (10%).

Sedangkan grafik gelombang terusan karena pengaruh variasi nilai L dengan frekuensi tetap 100 kHz ditunjukkan pada Gambar 3.13. Dari gambar ditunjukkan bahwa nilai awal gelombang terusan selalu sama dengan nol tidak tergantung pada frekuensi maupun nilai L .

(a) $L = 1 \text{ mH}$ (b) $L = 5 \text{ mH}$ (c) $L = 7 \text{ mH}$

Gambar 3.13 Gelombang terusan untuk gelombang datang sinusoida $f = 100 \text{ kHz}$

Dapat diamati bahwa nilai induktansi mempengaruhi nilai gelombang terusan. Pada nilai $L = 1 \text{ mH}$, nilai puncak gelombang terusan lebih tinggi dari nilai puncak gelombang datang, tetapi gejala transienya tidak begitu nampak, sedangkan untuk nilai induktansi 3 mH hingga 7 mH gejala transien gelombang terusan semakin terlihat dan penurunannya semakin besar.

Dengan frekuensi tetap 100 kHz , amplitudo gelombang terusan turun sebesar 55 kV ketika nilai L naik dari 1 mH ke 3 mH , turun 20 kV ketika nilai L naik dari 3 mH ke 5 mH dan turun sebesar 12 kV ketika nilai L naik dari 5 mH ke 7 mH . Nampak bahwa penurunan nilai gelombang terusan tidak linier ketika L naik secara linier.

B. Respon dengan Sisipan C Paralel

Dalam menyelidiki perilaku perambatan gelombang dengan sisipan C paralel digunakan parameter saluran yang sama dengan yang ada pada sisipan L seri, yaitu $Z_1 = 50 \Omega$ untuk kabel dan $Z_2 = 500 \Omega$ untuk saluran udara dengan gelombang datang dari kabel menuju saluran udara.

Respon model dengan sisipan C paralel untuk sembarang gelombang datang sebenarnya serupa dengan respon model dengan sisipan L seri. Perbedaannya hanya pada nilai konstanta waktu yang diberikan. Kedua keadaan dapat dibuat sama persis apabila kedua konstanta waktu nilainya sama atau memenuhi persamaan (2-24).

Dengan menggunakan persamaan (2-24), dapat dihitung nilai kapasitansi paralel yang berkaitan dengan nilai L seri agar dihasilkan gelombang pantul dan terusan yang sama. Nilai-nilai kapasitansi paralel yang memenuhi kondisi ini diperlihatkan pada Tabel 3.1.

TABEL 3.1 NILAI C PARALEL UNTUK MASING-MASING NILAI L SERI YANG BERKAITAN

No	L (mH)	C (uF)
1	1	0.04
2	3	0.12
3	5	0.20
4	7	0.28

Bila nilai $C = 0,12 \mu\text{F}$ disisipkan paralel diantara kedua saluran dan gelombang datang adalah langkah ideal, maka bentuk gelombang terusannya akan persis sama dengan bentuk gelombang terusan pada model sisipan L seri dengan $L = 3 \text{ mH}$ seperti telah ditunjukkan pada Gambar 3.1, sedangkan untuk nilai-nilai C lainnya, grafik gelombang terusan bersama-sama ditunjukkan pada Gambar 3.2. Hal ini juga berlaku untuk bentuk gelombang datang yang lain.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari analisis dihasilkan beberapa kesimpulan yaitu :

1. Sisipan L seri atau C paralel secara signifikan mempengaruhi pelandaian muka gelombang terusan dan tingkat pelandaian ini semakin besar ketika nilai L dan C semakin besar. Respon pelandaian gelombang terusan oleh L seri atau C paralel semakin besar (pelandaian semakin cepat) apabila muka gelombang datang semakin curam seperti yang dimiliki gelombang langkah ideal dan eksponensial.
2. Sisipan L seri dan C paralel juga memberikan pengaruh pada amplitudo gelombang terusan. Untuk gelombang datang langkah ideal dan tidak ideal dari sisi kabel, kedua sisipan hampir tidak memberikan pengaruh pada peredaman gelombang, tetapi untuk bentuk gelombang datang lainnya proses peredaman terjadi.

3. Pelandaian muka gelombang dan peredaman amplitudo untuk gelombang datang berbentuk sinusoidal ditentukan oleh nilai L seri atau C paralel dan frekuensi gelombang datang. Semakin tinggi frekuensi dan nilai komponen yang disisipkan, maka tingkat peredaman dan pelandaian gelombang terusan juga semakin besar.
4. Arah gelombang datang tidak mempengaruhi bentuk atau tipe gelombang terusan untuk gelombang datang yang sama, tetapi hanya mempengaruhi besarnya amplitudo. Bila arah gelombang datang dari saluran dengan impedansi surja lebih kecil (kabel) menuju saluran dengan impedansi surja lebih besar (saluran udara), maka amplitudo gelombang terusannya akan diperbesar, dan untuk arah sebaliknya amplitudo gelombang terusan akan diperkecil.

B. Saran

Beberapa saran yang perlu disampaikan adalah :

- a. Perlu adanya kajian lebih lanjut terhadap pengaruh dimensi dari induktor atau kapasitor yang memungkinkan menggunakan model komponen yang tidak terkumpul.
- b. Kajian ini juga mengabaikan adanya resistansi, kapasitansi dan induktansi pada komponen sisipan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bazelyan & Raizer. 2000. *Lightning Physics and Lightning Protection*, Institute of Physics Publishing, Philadelphia.
- [2] Greenwood, A. 1991. *Electrical Transient on Power Systems*, second edition, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- [3] Horvath, T. 2006. *Understanding Lightning and Lightning Protection*. John Wiley & Sons, Ltd. England.
- [4] KEMA Laboratory. 2001. *Transient in Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd. Netherlands
- [5] Martinez, J.A., Velasco. 1997. *Computer Analysis of Electric Power System Transient*. Published by IEEE. New York
- [6] Rudenberg, R. 1968. *Electrical Shock Waves in Power Systems*, Harvard University Press. Massachusetts.
- [7] Rudenberg, R. 1950. *Transient Performance of Electric Power Systems*, McGraw-Hill. New York.
- [8] Vijayaraghavan, Brown, Barners. 2004. *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*. Elsevier. New York.