

# Menentukan Parameter Generator Impuls Untuk Gelombang Impuls Petir

Yusmartato, Ramayulis Nasution

Dosen Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, UISU-Medan

[yusmartato@ft.uisu.ac.id](mailto:yusmartato@ft.uisu.ac.id); [ramayulis@ft.uisu.ac.id](mailto:ramayulis@ft.uisu.ac.id)

## Abstrak

Jenis tegangan yang mungkin diuji terhadap suatu peralatan adalah tegangan tinggi searah, tegangan tinggi bolak-balik dan tegangan tinggi impuls. Untuk membangkitkan simulasi tegangan tinggi impuls dibutuhkan rangkaian generator impuls RLC satu tingkat dengan parameter-parameter yang sesuai dengan standar IEC. Tegangan yang dihasilkan rangkaian ini menyerupai tegangan yang dihasilkan oleh petir dan surja hubung. Gelombangnya berekor pendek dan bermuka curam selama gelombang ini berjalan melalui kawat transmisi bentuknya berubah, mukanya menjadi kurang curam, ekornya bertambah panjang dan amplitudonya berkurang. Besarnya tegangan impuls yang harus diterapkan pada alat-alat listrik untuk menguji ketahanan petir dan surja hubung ditetapkan dalam standar IEC. Dahulu pengujian tegangan tinggi impuls hanya berlaku untuk transformator tenaga yang langsung terkena bahaya petir oleh karena bahaya itu mungkin juga mengancam mesin (terutama surja hubung), maka pengujian impuls juga perlu dilakukan terhadap alat tersebut. Dalam merencanakan suatu generator impuls terlebih dahulu ditentukan spesifikasi tegangan keluarannya, yaitu: tegangan puncak ( $V_{maks}$ ), waktu muka gelombang ( $T_f$ ), dan waktu ekor gelombang ( $T_t$ ). Disamping itu, ditentukan juga kapasitas generator ( $W$ ) dan efisiensi tegangannya ( $\eta$ ), dengan diketahuinya semua spesifikasi di atas, maka besarnya nilai komponen  $R$ ,  $L$ , dan  $C$  dapat ditentukan, Dengan diketahui semua spesifikasi tegangan keluaran generator, maka besarnya nilai RLC dapat ditentukan dimana dalam penentuan parameter ini didapat nilai untuk RLC adalah : nilai resistansi ( $R$ ) =  $1498 M\Omega$ , Nilai induktansi ( $L$ ) =  $303 MH$ , dan Nilai kapasitansi ( $C$ ) =  $0,05 \mu F$

**Kata Kunci :** Generator Impuls, Petir, Parameter, Nilai

## I. PENDAHULUAN

Gangguan tegangan lebih pada sistem transmisi daya dan distribusi daya umumnya disebabkan oleh dua macam tegangan transient yang berasal dari luar atau dari dalam sistem itu sendiri. Tegangan lebih yang berasal dari luar menyebabkan amplitudo gelombang tegangan melebihi puncak tegangan bolak-balik yang normal. Jenis gangguan dari luar ini biasanya disebabkan oleh sambaran petir yang mengenai kawat atau mengenai bangunan disekitar kawat tersebut amplitudonya bisa mencapai 1000 kv, dan arus yang mengalir kadang-kadang melebihi 100 ka. Setiap sambaran petir selalu diikuti dengan merambatnya gelombang tegangan yang berjalan dimana amplitudonya dibatasi oleh ketahanan isolasi dari sistem transmisi tersebut.

Bila tegangan ini melebihi tegangan ketahanan sistem maka akan terjadi suatu kegagalan dari salah satu isolasinya dan nilai tegangan selanjutnya akan sama dengan ketahanan tersebut. Semua kerugian yang disebabkan oleh gelombang ini dan pengaruh dari alat seperti (*surge arrester*) dan lain-lain, dapat menyebabkan perubahan bentuk gelombang.

Tegangan lebih yang berasal dari dalam sistem disebut Surja Hubung, amplitudo gelombang ini selalu ada hubungannya dengan tegangan operasi dari sistem, dan bentuknya dipengaruhi oleh adanya impedansi dari sistem itu

sendiri dan juga dipengaruhi oleh keadaan pada waktu terjadinya pemutusan. Waktu kebangkitannya agak lambat bila dibandingkan dengan impulse petir tetapi bentuknya menyebabkan terjadinya sesuatu yang membahayakan bagi isolasi sistem.

Dalam standar IEC (*International Electrotechnical Commission*), gelombang dibagi menjadi bagian yang menaik atau bagian depan dan gelombang ekor yang waktunya ditentukan sampai tegangan bernilai 50% dari tegangan puncak gelombang. Dalam standar tersebut gelombang depan ditentukan harus mencapai waktu  $T_f = 1,2 \mu s \pm 30 \%$ , sedangkan waktu pada gelombang ekor ditentukan  $T_t = 50 \mu s \pm 20 \%$ . Untuk negara maju seperti Amerika, dipakai  $T_f/T_t = 1,5 / 40 \mu s$  sedangkan Inggris memakai  $T_f/T_t = 1/50 \mu s$ .

Untuk tegangan lebih yang mengikuti sambaran petir maka dibutuhkan waktu sekitar  $1 \mu s$  untuk mencapai nilai puncak, tegangan itu disebut sebagai tegangan lebih luar atau atmosfer. Untuk tegangan lebih dalam yang terjadi akibat proses pembukaan ataupun penutupan saklar (*switching*) dalam jaringan kerja tegangan tinggi, maka waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai puncak paling sedikit sekitar  $100 \mu s$ .

Jenis tegangan yang diuji pada suatu peralatan tergantung pada tegangan kerja peralatan dari jenis tegangan lebih yang mungkin dipikul peralatan tersebut. Jenis tegangan yang mungkin

diuji terhadap suatu peralatan adalah tegangan tinggi searah, tegangan tinggi bolak-balik dan tegangan tinggi impuls.

Untuk membangkitkan simulasi tegangan tinggi impuls dibutuhkan rangkaian generator impuls RLC satu tingkat dengan parameter-parameter yang sesuai dengan standar IEC. Tegangan yang dihasilkan rangkaian ini menyerupai tegangan yang dihasilkan oleh petir dan surja hubung. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada bab-bab berikutnya.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Tegangan tinggi impuls adalah suatu fungsi yang berharga sangat besar dalam selang waktu yang sangat singkat. Diluar selang waktu itu fungsi impuls berharga nol. Didalam sistem tenaga listrik, tegangan tinggi impuls dapat terjadi dalam bentuk tegangan yang disebut impuls tegangan dan dapat juga dalam bentuk arus disebut arus impuls. Umumnya, yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah tegangan impuls.

Tegangan impuls pada sistem tenaga listrik dapat terjadi oleh surja hubung (*switching*) dan dapat juga disebabkan oleh muatan awan (petir). Impuls tegangan pada sistem tenaga listrik merambat disalurkan transmisi secara gelombang. Tegangan lebih ini mempunyai bentuk gelombang apriodik yang diredamkan (*damped aperiodic*) seperti pada waktu pelepasan muatan sebuah kapasitor melalui sebuah tahanan yang cukup pada tempat yang terkena petir. Gelombangnya berekor pendek dan bermuka curam selama gelombangnya ini berjalan melalui kawat transmisi bentuknya berubah, mukanya menjadi kurang curam, ekornya bertambah panjang dan amplitudonya berkurang. Besarnya tegangan impuls yang harus diterapkan pada alat-alat listrik untuk menguji ketahanan petir dan surja hubung ditetapkan dalam standar IEC.

### 2.2 Pengukuran Tegangan Tinggi Impuls

#### 2.2.1 Mengukur Tegangan Puncak dengan sela bola

Penggunaan sela bola untuk mengukur nilai puncak tegangan tinggi bolak-balik. Penelitian pada tembus gas mengungkapkan bahwa proses tembus ( $V_d$ ) pada sistem seperti ini hanya memerlukan waktu beberapa ( $\mu s$ ) jika tegangan yang diterapkan telah melampaui nilai puncak tegangan tembus untuk tegangan bolak-balik. Telah diketahui pula bahwa sela bola dapat digunakan untuk mengukur nilai puncak tegangan impuls yang memiliki tempo cukup panjang, batas untuk ini sekitar  $T_f \geq 50 \mu s$ .

Disini diandaikan bahwa dalam udara diantara bola-bola terdapat pembawa muatan yang cukup untuk mengawali proses segera setelah kuat medan tertentu tercapai. Dengan radiasi buatan maka daerah tembus dapat diionkan terlebih dahulu

sehingga mengurangi penyimpangan statistik dari waktu tembus.

Spesifikasi yang berkaitan dan ini merekomendasikan iradiasi buatan untuk pengukuran tegangan impuls dengan amplitudo kurang dari 50 kv.

Kelebihan sela bola untuk mengukur nilai puncak tegangan tinggi impuls ialah bahwa jika hanya bertumpu pada ada tidaknya tembus maka tidak dapat dipastikan selisih antara lain puncak tegangan impuls yang diterapkan ( $V$ ) terhadap nilai ( $V_d$ ). Hal ini hanya dapat ditentukan dengan impuls-impuls yang berulang.

Hingga disini amplitudo dari sederet tegangan impuls secara bertahap diubah hingga sekitar setengah dari jumlah menyebabkan tembus, yakni probabilitas tembus  $P(V)$  sekitar 50 %. Untuk tegangan impuls ini diperoleh persamaan berikut :

$$V_{d-50} \approx V_d \approx dV_{d0}$$

Di mana :

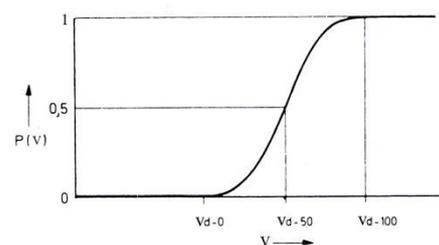
$V_d$  = Nilai Puncak tegangan standar

$d$  = Rapat Udara Relatif

$V_{d0}$  = Tegangan Tembus Pada Kondisi Standar

Dengan ( $d$ ) menyatakan rapat udara relatif dan  $V_{d0}$  ialah tegangan tembus pada kondisi standar, nilai  $V_{d0}$  dapat diperoleh dan tergantung pada diameter bola, polaritas dan besar sela fungsi distribusi  $P(V)$  dari tegangan tembus lihat Gambar 1, dapat ditentukan dengan menerpa suatu susunan elektroda secara berulang, nampak bahwa tegangan ketahanan  $V_d - 0$  dan tegangan pasti tembus  $V_d - 100$ , sesuai dengan probabilitas tembus 0 % dan 100 %, hanya dapat diperkirakan dan karena itu tidak cocok sebagai karakteristik.

Selain probabilitas tembus 50 %, yang biasanya hanya dapat teliti untuk impuls yang banyak, maka dapat dipilih nilai  $P(V)$  yang lebih tinggi dan lebih rendah; nilai  $V_d - 50$  yang dikehendaki kemudian diperoleh dengan interpolasi, sebaiknya secara grafis, dengan ordinasi diukur untuk memenuhi distribusi normal.



**Gambar 1. Fungsi Distribusi dari Tegangan Tembus pada Sela Bola untuk Tegangan Tinggi Impuls.**

Adapun yang dimaksud dengan sela bola standar ialah sela bola yang memenuhi syarat standar mengenai kualitas, jarak (sela) antara bola dan ukuran bola. Dalam keadaan udara tertentu,

sebuah sela bola selalu mempunyai tegangan percikan tertentu pula. Itulah sebabnya ia dapat dipakai sebagai alat pengukur tegangan untuk menetapkan 50 % (sparkovervoltage) ini tiap perbandingan pelepasan diukur dengan menetralkan dua tegangan masing-masing, bila perbandingan ini antara 20 % dan 80 %, maka 50 % ditetapkan secara interpolasi ada cara lain untuk menentukan 50 % SOV ini, yaitu cara naik dan turun.

Pembagi tegangan kebanyakan pada pembagi tegangan terdapat stray kapasitas yang terbagi menjadi stray terhadap tanah (benda yang bertegangan sama dengan tanah), stray terhadap benda yang elektroda bola ini harus dikalikan dengan faktor koreksi yang disebabkan adanya perubahan suhu udara dan kerapatan udara atau mungkin juga terpengaruh oleh kelembaban udara. Untuk pengujian bahan yang (non-self restoring) maka ekstrapolasi dimulai pada titik yang lebih besar dari titik 50 % dari tegangan pengujian. Ekstrapolasi dapat dilakukan pengujian berbanding lurus dengan besaran yang terkait.

**2.2.2 Rangkaian dan Perilaku Transien dari Pembagi Tegangan Impuls**

Andaikan bentuk tegangan hendak diukur dengan osiloskop sinar katoda (KO). Besarnya yang diukur dimasukkan melalui kabel ukur koaksial dengan salah satu ujung dihubungkan pada terminal sekunder pembagi tegangan, pembagi tegangan, kabel ukur dan KO secara bersama membentuk system pengukuran. Jika hanya nilai puncak (V) yang hendak diukur maka suatu piranti penunjuk elektronik dapat dihubungkan menggantikan osiloskop.

**a. Karakteristik perilaku transient**

Untuk meneliti perilaku sistem pengukuran dilakukan serangkaian uji fungsi Perilaku yang dimaksud dapat diturunkan dari pengamatan terhadap fungsi langkah. Metode ini telah terbukti sesuai untuk penelitian baik secara teori maupun praktek. Sistem pengukuran secara umum dapat dipandang sebagai suatu jaringan empat terminal. Tegangan langkah satuan dengan amplitudo  $V_{1\infty}$  diberikan sebagai besaran masukan :

$$V_1(t) = V_{1\infty} - S(t)$$

Tegangan keluaran yang dihasilkan ialah :

$$V_2(t) = V_{2\infty} w(t)$$

dengan  $V_{2\infty}$  sebagai nilai nominal pada keadaan mantap. Dalam persamaan ini  $w(t)$  adalah tanggap langkah terhadap fungsi langkah satuan  $s(t)$ . Dalam sistem yang linier tegangan  $V_{1\infty}$  sebanding dengan  $V_{2\infty}$ . Ungkapkan  $V_{1\infty}/V_{2\infty}$  disebut sebagai perbandingan transformasi. Suatu karakteristik yang penting untuk menyatakan perilaku

pembagi adalah waktu tanggap  $T$  yang dinyatakan dengan luasan berikut :

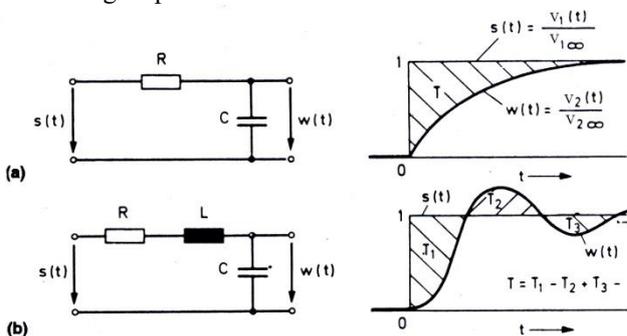
$$T = \int_0^{\infty} [1 - w(t)] dt.$$

Di mana :

$T$  = Waktu Tanggap

$w(t)$  = Tanggap langkah

Dalam Gambar 2a ditunjukkan jaring kerja empat terminal yang paling sederhana dengan respon langkah satuan. Perilaku ini disebut “Perilaku RC”. Dalam Gambar 2.2b ditunjukkan jaring kerja empat terminal dengan respon langkah satuan yang mengandung osilasi transien yang teredam. Bila ditentukan waktu tangap maka diperoleh luasan-luasan dengan tanda yang berlainan. Waktu  $T_1$  dapat ndipandang sebagai ukuran dari pembentukan dahi dari tegangan langkah, dan kuosien  $T/T_1$  sebagai suatu ukuran redaman dari sistem pengukuran. Kurva dari respon langkah yang ditunjukkan digambarkan sebagai “perilaku RLC”.



**Gambar 2. Rangkaian Ekuivalen dan Respon Langkah Satuan dari Pembagi Tegangan (a) Perilaku RC, (b) Perilaku RLC.**

Dalam sistem pengukuran praktis sering digunakan rangkaian elektrik yang jauh lebih rumit dan ditemukan respon langkah satuan yang agak berbeda. Akibat (overshoot) yang besar maka waktu tanggap ( $T$ ) bahkan dapat menjadi negatif.

Untuk sistem pengukuran dengan rentang ukur yang lebih besar serta yang teredam dengan baik, maka  $T_1$  menjadi kecil dan jika mungkin  $T/T_1$  akan cenderung bernilai 1.

Permulaan dari respon langkah satuan sangat sulit dikenali dalam osilogram karena osilasi awal yang lambat atau osilasi yang terkandung. Namun demikian waktu  $T_1$  sangat bergantung pada penentuan titik nol. Dalam hal ini permulaan respon langkah satuan dinyatakan sebagai perpotongan dari perpanjangan garis dahi secara linier dengan garis nol.

Jika galat amplitudo tegangan yang diakibatkan tidak melebihi 5% maka nilai-nilai

berikut dapat digunakan untuk waktu tanggap dari sistem pengukuran.

Untuk impuls kilat penuh dan yang dipotong pada punggung dengan bentuk  $1,2/50$ .  $T = \leq 200 \mu s$ .

Untuk tegangan impuls berbentuk baji yang meningkat hampir linier hingga  $T_d$   $T \leq 0,05 T_d$

### 2.3 Pengujian Tegangan Tinggi Impuls

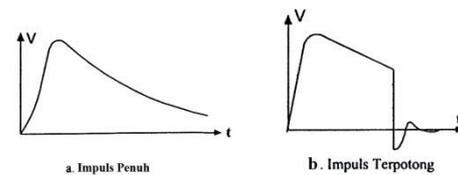
Dahulu pengujian tegangan tinggi impuls hanya berlaku untuk transformator tenaga yang langsung terkena bahaya petir oleh karena bahaya itu mungkin juga mengancam mesin (terutama surja hubung), maka pengujian impuls juga perlu dilakukan terhadap alat tersebut. Tegangan ketahanan dari mesin jauh lebih rendah dari alat tersebut. Tegangan ketahanan dari mesin jauh lebih rendah dari tegangan ketahanan dari transformator, sehingga mesin berputar harus dilindungi secukupnya. Hal ini dapat dilakukan dengan memasang kabel atau kapasitor antara mesin pembangkit dengan trafo dengan maksud untuk mengurangi amplitudo dan kecuraman dari surja yang masuk. Untuk mesin perbandingan impuls (impuls ratio), yaitu perbandingan antara tegangan gagal terhadap impuls dan terhadap AC adalah 1. Untuk isolator perbandingannya adalah 1,2.

Maksud pengujian impuls ialah untuk mengetahui kekuatan isolasi antara lapisan satu dengan lapisan yang lainnya, dan antara gulungan yang satu dengan yang lain. Tegangan impuls diterapkan antara terminal gulungan dengan titik netral dari gulungan tersebut secara berganti-ganti menurut standar jepang bentuk gelombang yang diterapkan adalah  $+ (3 \times 40) \mu s$  untuk semua motor pada umumnya, dan  $+ (5 \times 40) \mu s$  atau  $+ (10 \times 40) \mu s$ . Untuk hal-hal khusus yaitu dimana mesin diperkirakan akan mengalami gradien tegangan yang tinggi pada ujungnya.

#### 2.3.1 Jenis Pengujian Impuls

Transformator yang dihubungkan langsung dengan jaringan transmisi sering terancam tegangan abnormal yang datangnya dari petir atau gangguan lain (misalnya surja hubung). Dengan AC saja, tetapi juga transformator harus dikenakan pengujian impuls. Meskipun demikian tidak semua transformator pengujian suhu dengan memperlihatkan keadaan yang sebenarnya akan dialami transformator yang bersangkutan dalam operasinya.

Macam pengujian impuls yang dilakukan adalah pengujian yang ditanahkan (*Grounded*) dan yang tidak ditanahkan (*Ungrounded*). Untuk pengujian yang ditanahkan, bentuk gelombangnya dua macam : gelombang penuh (*Full-Wave*) dan gelombang terpotong (*Chopped Wave*) kedua bentuk gelombang ini diterapkan pada satu fasa, lihat Gambar 3.



**Gambar 3. Gelombang Tegangan Impuls Penuh dan Terpotong**

Menurut gambar gelombang diatas dapat dijelaskan tegangan tinggi impuls penuh dan impuls terpotong adalah sebagai berikut :

Gambar 3a :

Pengujian ketahanan impuls penuh dilakukan dalam dua keadaan, yaitu dalam keadaan peralatan terpasang sebagaimana dilapangan dan dalam keadaan dicelup dalam minyak. Tegangan pengujian adalah tegangan impuls penuh standar, dengan polaritas yang sesuai dengan spesifikasi. Tegangan impuls diberikan lima kali. Jika terjadi dua kali lompatan api, maka peralatan dinyatakan gagal uji. Jika lompatan api terjadi satu kali, maka diadakan pengujian tambahan sepuluh kali lagi. Jika tidak terjadi lompatan api, maka peralatan dinyatakan lulus uji. Jika peralatan dicelupkan dalam minyak isolasi, maka pengujian dilakukan dengan tegangan impuls standar gelombang penuh dan 15 % lebih tinggi dari tegangan pengujian peralatan di udara. Tegangan impuls diberikan sebanyak lima kali. Peralatan dinyatakan lulus uji. Jika tidak terjadi lompatan api.

Gambar 3b :

Pengujian ketahanan impuls terpotong, adakalanya peralatan diuji dengan tegangan tinggi impuls terpotong pengujian ini biasanya dilakukan pada bushing bertegangan di atas 220 kv.

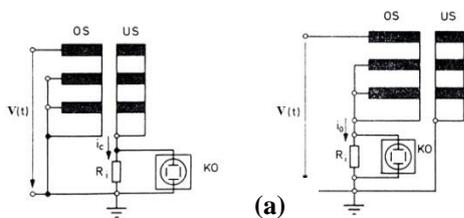
#### 2.4 Kegunaan Tegangan Tinggi Impuls

Adakalanya suatu sistem mengalami tegangan lebih karena adanya operasi hubung buka (*switching operation*) atau karena sambaran petir pada komponen sistem. Oleh karena itu peralatan sistem harus dirancang mampu memikul kedua tegangan lebih tersebut. Untuk meyakinkan bahwa peralatan sistem mampu memikul kedua tegangan lebih tersebut, maka peralatan perlu diuji dengan tegangan lebih impuls yang bentuk gelombangnya menyerupai bentuk gelombang tegangan lebih surja hubung yang mungkin terjadi pada sistem selain untuk pengujian peralatan. Tegangan tinggi impuls dibutuhkan juga untuk penyelidikan mekanisme tembus listrik bahan dielektrik. Alat pembangkit tegangan tinggi impuls antara lain adalah : Generator Impuls RLC, Generator Impuls RC, dan Generator Marx (bertingkat).

**2.4.1 Macam-macam Kegunaan Tegangan Tinggi Impuls**

Untuk pengujian tegangan tinggi impuls pada transformator, maka terutama pengujian antara lilitan yang penting karena dapat terjadinya distribusi tegangan yang tidak merata disepanjang belitan. Kesulitan pengujian ini dalam mengidentifikasi cacat-cacat sebagian yang kecil dan yang berlangsung transien. Dengan tanpa sebab dapat terjadi kerusakan selama pengujian yang akan tetap tidak diketahui dan akan menyebabkan kegagalan dalam operasi nantinya. Biasanya, pengujian tegangan tinggi impuls pada transformator dilaksanakan sebagai uji jenis.

Dalam Gambar 4a, ditunjukkan rangkaian ukur yang disarankan oleh (R. Elsner dalam tahun 1949). Arus  $i_c$ , yang sebagian besar akan dipindahkan pada belitan tegangan rendah (US) untuk proses – proses yang berlangsung cepat, diukur dengan osiloskop dari jatuh tegangan yang diakibatkannya pada resistor  $R_i$ . Tembus parsial pada belitan tegangan tinggi (OS) mengubah osilasi yang diinduksikan oleh tegangan impuls dan selanjutnya teramati dengan superposisi osilasi ferkuensi tinggi. Cacat-cacat dalam belitan tegangan tinggi dapat dikenali dengan membandingkan osilogram arus pemuatan yang diperoleh pada pengujian dengan tegangan tinggi impuls yang cukup rendah sehingga tidak menyebabkan cacat (impuls kalibrasi), dan pada penerapan dengan tegangan uji penuh (impuls uji), lihat gambar dibawah ini dengan perbandingan rangkaian (a). menurut elsner dan (b). menurut hagenguth.



**Gambar 4. Rangkaian untuk Pengujian Tegangan Tinggi Kilat Menurut, (a). Elsner (b). Hagenguth.**

Dalam Gambar 4b Ditunjukkan suatu rangkaian ukur yang diusulkan oleh (J.H. Hagenguth dalam tahun 1944). Disini diukur arus maknetisasi ( $i_o$ ) yang mengalir dari belitan bertegangan menuju bumi. Tanda-tanda terjadinya kesalahan sekali lagi ditentukan dengan membandingkan osilogram yang diperoleh dengan impuls kalibrasi dan impuls pengujian.

Pengujian-pengujian ini umumnya dilakukan dengan tegangan impuls penuh. Dalam kasus khusus maka pengujian dengan tegangan impuls terpotong dapat ditambahkan berdasarkan

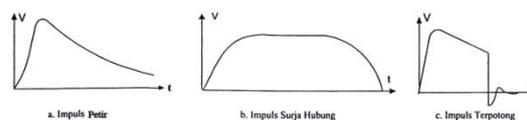
persetujuan dengan pembeli. Dilarenakan hilang tegangan yang cepat maka pengujian ini memberikan terpaku yang sangat tinggi terhadap isolasi.

**2.6 Jenis-jenis Tegangan Tinggi Impuls Standar**

Ada tiga bentuk tegangan tinggi impuls yang mungkin dialami oleh sistem tenaga listrik, yaitu :

- a. Bentuk tegangan tinggi impuls petir
- b. Bentuk tegangan tinggi impuls surja hubung (Switching)
- c. Bentuk tegangan tinggi impuls terpotong

Bentuk dari ketiga jenis tegangan tinggi impuls diatas diperlihatkan pada Gambar 5.



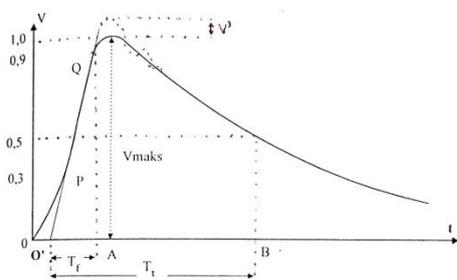
**Gambar 5. Jenis Tegangan Tinggi Impuls.**

Dalam teknologi tegangan tinggi, suatu pulsa tegangan dengan polaritas tunggal dikatakan sebagai impuls; dalam Gambar 5 ditunjukkan tiga contoh penting yang disertai dengan parameter – parameternya.

Ketergantungan terhadap waktu maupun tempo tegangan impuls bergantung pada cara pembangkitannya. Untuk percobaan dasar maka sering digunakan tegangan impuls persegi yang melonjak hingga nilai yang hampir konstan, maupun tegangan impuls berbentuk baji yang dicirikan dengan suatu kenaikan yang selinier mungkin hingga terjadi tembus dan digambarkan dengan kecuraman (S). Untuk keperluan pengujian maka tegangan impuls eksponensial ganda telah dibakukan; tanpa osilasi yang cukup berarti maka tegangan impuls ini cepat mencapai nilai maksimum, nilai puncak (V), dan kemudian meluruh perlahan menuju nol. Jika terjadi tembus secara sengaja ataupun tidak sengaja dalam rangkaian tegangan tinggi selama penerapan impuls (yang menyebabkan hilang tegangan secara mendadak), maka tegangan yang terjadi pada bagian depan, pada puncak atau pada punggung dari tegangan impuls. Dengan demikian gejala transien yang diinduksikan merupakan penyebab osilasi yang ditunjukkan dalam Gambar 5c.

Untuk tegangan lebih yang mengikuti sambaran petir maka dibutuhkan waktu sekitar ( $1 \mu s$ ) untuk mencapai nilai puncak; tegangan lebih itu disebut sebagai tegangan lebih luar atau atmosfer. Untuk tegangan lebih dalam (switching) yang terjadi akibat proses pembukaan ataupun penutupan saklar dalam jaringan kerja tegangan tinggi, maka waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai puncak paling sedikit sekitar ( $100 \mu s$ ). Dalam studi ini menunjukkan bahwa waktu untuk mencapai puncak gelombang dari waktu

penurunan tegangan tinggi impuls petir sangat bervariasi sehingga untuk pengujian perlu dibuat bentuk standar tegangan tinggi impuls, yakni seperti diperlihatkan pada Gambar 6.



**Gambar 6. Gambar Tegangan Tinggi Impuls Petir Standar.**

Keterangan

T<sub>f</sub> = Waktu muka gelombang (O'A)

T<sub>t</sub> = Waktu ekor gelombang (O'B)

V<sub>maks</sub> = Tegangan puncak

V' = Kelebihan tegangan ±0,05 x V<sub>maks</sub>

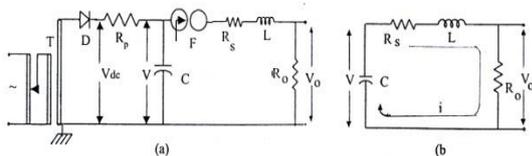
Untuk tegangan tinggi impuls petir ditentukan sebagai berikut :

1. Titik P pada muka gelombang dimana tegangan sama dengan 0,3 kali tegangan puncak, dan titik Q pada muka gelombang dimana tegangan sama dengan 0,9 kali tegangan puncak
2. Garis menghubungkan titik P dengan Q hingga memotong sumbu waktu. Titik potong garis penghubung ini dengan sumbu waktu adalah titik acuan waktu (O').

Pembangkitan tegangan tinggi tersebut dalam laboratorium dipengaruhi oleh tegangan impuls terpa hubung, tegangan ini hampir mirip dengan tegangan impuls petir tetapi memiliki tempo yang lebih panjang.

**2.7 Generator Impuls Rlc**

Rangkaian generator ini ditunjukkan pada Gambar 7a generator ini membutuhkan sumber tegangan tinggi DC yang tegangan keluarannya dapat diatur dan dilengkapi dengan sela picu F.



**Gambar 7. Rangkaian Generator Impuls RLC**

Sumber tegangan tinggi DC melalui resistor Rp mengisi kondensator pemuat (C). Misalkan tegangan kondensator pemuat adalah V. Jika sela picu dioperasikan, maka sela picu (F) terhubung singkat dalam waktu yang singkat. Melalui sela picu, muatan kondensator (C) dilepaskan kerangkaian Rs, L, dan Ro. Tahanan resistor Rp

dibuat besar. Untuk menghambat muatan yang datang dari sumber tegangan tinggi DC selama proses pelepasan muatan berlangsung. Karena pelepasan muatan berlangsung dalam waktu yang sangat singkat dan tahanan resistor yang Rp dibuat besar, maka muatan yang datang dari sumber tegangan DC dapat dianggap tidak ada oleh karena itu selama proses pelepasan muatan, tidak ada muatan yang sempat mengisi kondensator pemuat C. Artinya, hanya muatan kondensator pemuat (C) yang dilepaskan kerangkaian Rs, L, dan Ro dengan demikian, rangkaian ekuivalen generator setelah sela picu bekerja dapat dibuat seperti pada Gambar 7b.

Persamaan tegangan pada rangkaian ini adalah :

$$V = \frac{1}{C} \int i dt + (R_o + R_s) i + L \frac{di}{dt} \tag{1}$$

Tegangan kondensator pemuat (V) adalah konstan, sehingga derivasi Persamaan (1) terhadap waktu adalah sebagai berikut :

$$0 = \frac{1}{C} i + (R_o + R_s) \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2} \tag{2}$$

Atau

$$0 = \frac{1}{C} i + R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2} \tag{3}$$

Di mana :

$$R = R_o + R_s \tag{4}$$

Penyelesaian Persamaan 3 adalah :

$$i = \frac{V(\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} (\epsilon^{-\alpha_1 t} - \epsilon^{-\alpha_2 t}) \tag{5}$$

Di mana:

$$\alpha_1 = \frac{R}{2L} - \sqrt{\left[\frac{R}{2L}\right]^2 - \frac{1}{LC}} \tag{6}$$

Dan

$$\alpha_2 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left[\frac{R}{2L}\right]^2 - \frac{1}{LC}} \tag{7}$$

Harga R,L, dan C dapat diatur sedemikian rupa agar harga di bawah tanda akar positif, sehingga harga α<sub>1</sub> dan α<sub>2</sub> menjadi bilangan nyata dan positif. Hal ini dapat dipenuhi jika :

$$\left[\frac{R}{2L}\right] > \sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{8}$$

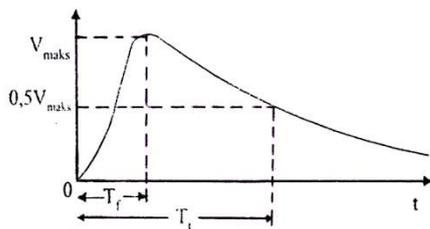
Tegangan keluaran generator adalah tegangan pada resistor  $R_o$ , yaitu :

$$V_o = i \cdot R_o \tag{9}$$

Substitusi Persamaan (5) ke dalam Persamaan (9) diperoleh :

$$V_o = \frac{VR_o(\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} (\varepsilon^{-\alpha_1 t} - \varepsilon^{-\alpha_2 t}) \tag{10}$$

Kurva Persamaan (10) adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kurva Tegangan Keluaran Generator Impuls RLC

Persamaan (10) dapat disederhanakan menjadi :

$$V_o = K(\varepsilon^{-\alpha_1 t} - \varepsilon^{-\alpha_2 t}) \tag{11}$$

Di mana :

$$K = \frac{VR_o(\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} \tag{12}$$

### 3.2 Harga Maksimal dan Efisiensi Tegangan

Harga maksimal Persamaan 3.10 diperoleh dengan membuat turunan pertamanya sama dengan nol ( $dV/dt = 0$ ). Dari derivasi ini diperoleh waktu di mana tegangan mencapai nilai maksimal, yaitu :

$$T_f = \frac{-1}{\alpha_1 - \alpha_2} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \tag{13}$$

Harga  $T_1$  diatas disubstitusi ke Persamaan 10, maka diperoleh tegangan maksimal :

$$V_{maks} = \frac{VR_o(\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[ \varepsilon^{\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} - \varepsilon^{\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \right] \tag{14}$$

Efisiensi tegangan adalah perbandingan harga maksimal tegangan keluaran dengan tegangan dc pada kondensator pemuat C. Dari Persamaan 14 diatas diperoleh efisiensi tegangan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{V_{maks}}{V} = \frac{R_o(\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[ \varepsilon^{\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} - \varepsilon^{\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \right]$$

## IV. ANALISA

Data Spesifikasi Gelombang Impuls Petir dan Surja Hubung dalam Menentukan Parameter Generator Impuls Rangkaian RLC untuk Standar IEC

Tabel 1. Waktu Muka dan Waktu Ekor Gelombang Impuls Petir dan Surja Hubung

No	Tegangan Tinggi Impuls	Waktu Muka ( $T_f$ )	Waktu Ekor ( $T_t$ )
1	Tegangan Tinggi Impuls Petir	1,2 $\mu S \pm 30 \%$	50 $\mu S \pm 20 \%$
2	Tegangan Tinggi Impuls Switching	250 $\mu S \pm 20 \%$	2500 $\mu S \pm 60 \%$

### 4.2 Cara Menentukan Parameter Generator Impuls Rangkaian RLC

Dalam merencanakan suatu generator impuls terlebih dahulu ditentukan spesifikasi tegangan keluarannya, yaitu: tegangan puncak ( $V_{maks}$ ), waktu muka gelombang ( $T_f$ ), dan waktu ekor gelombang ( $T_t$ ). Disamping itu, ditentukan juga kapasitas generator (W) dan efisiensi tegangannya ( $\eta$ ), dengan diketahuinya semua spesifikasi di atas, maka besarnya nilai komponen R, L, dan C dapat ditentukan, dimana tahap-tahap penentuan ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan konstanta waktu (K) untuk gelombang impuls petir, untuk memperoleh

nilai (K),  $K = \frac{T_t}{T_f}$

Di mana :

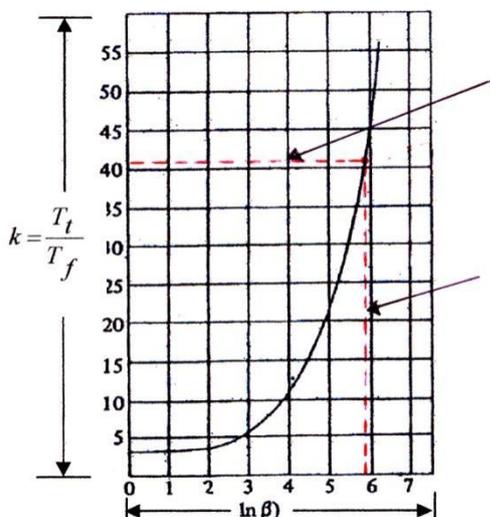
$T_t$  = Waktu ekor untuk gelombang impuls petir dipilih = 50  $\mu S$

$T_f$  = Waktu puncak untuk gelombang impuls petir dipilih = 1,2  $\mu S$

Maka :

$$K = \frac{50 \mu S}{1,2 \mu S} = 41.6667$$

Dari nilai konstanta (K), maka dapat dibuat kurva yang menyatakan hubungan antara K dengan  $\ln \beta$ , lihat Gambar 4.1.



**Gambar 4.1 Kurva yang Menyatakan Hubungan Antara K dengan ln β dan Garis Merah merupakan Tanda Penghubungnya**

2. Dari Gambar kurva 4.1 yang menyatakan hubungan antara K dengan ln β , maka dapat ditentukan juga nilai ln β . Menurut kurva tersebut nilai ln β = 5,9
3. Setelah nilai ln β diketahui, maka dapat ditentukan pula nilai ( δ ).

Dimana :

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{2.T_f} (ln\beta) \\ &= \frac{1}{2(1,2)} (5,9) \\ &= 2,4583 \end{aligned}$$

4. Dari nilai ln β yang telah diketahui, maka dapat ditentukan nilai ( β ).

Dimana :

$$ln \beta = 5,9$$

Maka :

$$\begin{aligned} \beta &= Ln^{-1}(5,9) \\ \beta &= 365,0375 \end{aligned}$$

5. Dari nilai ( δ ) dan nilai ( β ) yang telah diketahui, maka dapat ditentukan nilai ( γ ).

Dimana :

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\beta+1}{\beta-1} (\delta) \\ &= \frac{365,0375+1}{365,0375-1} (2,4583) \\ &= \frac{366,0375}{364,0375} (2,4583) \\ &= 2,4718 \end{aligned}$$

6. Untuk menentukan nilai R, L dan C, terlebih dahulu ditentukan nilai tegangan keluarannya generator yaitu tegangan puncak (V<sub>maks</sub>), K = 41,6667 : (W) dan efisiensi untuk menentukan nilai ln β = 5,9 dapat dimisalkan nilainya

$$\begin{aligned} V_{maks} &= 100 \text{ kv} \\ W &= 1000 \text{ Joule} \\ \eta &= 0,5 \end{aligned}$$

Setelah nilai tegangan keluaran generator diketahui, maka dapat ditentukan nilai kapasitansi (C).

Dimana :

$$\begin{aligned} C &= 2 \cdot W \left( \frac{\eta}{V_{maks}} \right)^2 \\ &= 2(1000) \left( \frac{0,5}{100.000} \right)^2 \\ &= 0,05 \times 10^{-6} \text{ F} \\ &= 0,05 \mu\text{F} \end{aligned}$$

7. Dari nilai kapasitansi (C) yang telah diketahui, maka dapat ditentukan nilai induktansi (L).  
Dimana :

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{C(\gamma^2 - \delta^2)} \\ &= \frac{1}{0,05 \times 10^{-6} (2,4718^2 - 2,4583^2)} \\ &= \frac{1}{0,0033 \times 10^{-6}} \\ &= \frac{10^6}{0,0033} \\ &= 303030303 \text{ H} \\ &= 303 \text{ MH} \end{aligned}$$

8. Dari nilai kapasitansi (C), nilai ( γ ) dan nilai ( δ ), maka dapat ditentukan nilai resistansi (R).  
Dimana :

$$\begin{aligned} R &= \frac{2.\gamma}{C(\gamma^2 - \delta^2)} \\ &= \frac{2(2,4718)}{0,05 \times 10^{-6} (2,4718^2 - 2,4583^2)} \\ &= \frac{4,9436}{0,0033 \times 10^{-6}} \\ &= \frac{4,9436 \times 10^6}{0,0033} \\ &= 1498060606 \Omega \\ &= 1498 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

9. Dari nilai efisiensi ( $\eta$ ), nilai ( $R$ ), nilai ( $\delta$ ), nilai ( $\gamma$ ), nilai ( $\ln \beta$ ) dan nilai ( $\beta$ ), maka dapat ditentukan nilai ( $R_o$ ).

Dimana :

$$R_o = \frac{\eta \cdot R \cdot \delta}{\gamma (\epsilon^{\frac{1}{1-\beta} \ln \beta} - \epsilon^{\frac{\beta}{1-\beta} \ln \beta})}$$

$$= \frac{0,5.1498.2,4583}{2,4718(2,7182^{-0,0162} - 2,7182^{-5,9162})}$$

$$= \frac{1841,2667}{2,4718(0,9839 - 0,0026)}$$

$$= \frac{1841,2667}{2,4255}$$

$$= 759,1287 \Omega$$

10. Setelah nilai ( $R$ ) dan nilai ( $R_o$ ) diketahui, maka dapat ditentukan nilai ( $R_s$ ).

Dimana :

$$R_s = R - R_o$$

$$= 1498 - 759,1287$$

$$= 738,8713 \Omega$$

## KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

- Suatu tegangan impuls dinyatakan dengan besar tegangan puncaknya, waktu muka ( $T_f$ ) dan waktu ekor ( $T_t$ ), menurut standar IEC waktu muka dan waktu ekor tegangan tinggi impuls adalah sebagai berikut :
  - Waktu muka dan ekor untuk tegangan tinggi impuls petir  $T_f \times T_t = (1,2 \pm 30\%) \times (50 \pm 20\%) \mu s$
  - Waktu muka dan ekor untuk tegangan tinggi impuls surja hubung :  $T_f \times T_t = (250 \pm 20\%) \times (2500 \pm 60\%) \mu s$
- Untuk pembangkitan tegangan tinggi impuls diperlukan suatu alat yang disebut sela picu, alat ini terdiri atas dua elektroda, yaitu :
  - Elektroda tegangan tinggi berbentuk bola, dan
  - Elektroda tegangan tinggi berbentuk setengah bola
- Penyebab terjadinya tegangan tinggi impuls disebabkan oleh :
  - Operasi hubung buka (switching operation) dan
  - Dapat juga disebabkan oleh muatan awan (petir)
- Kegunaan tegangan tinggi impuls adalah :
  - Kegunaan dalam pengukuran pada transformator
  - Kegunaan dalam pengukuran pada ioslator dan peralatan listrik lainnya

- Dalam merencanakan suatu generator impuls terlebih dahulu ditentukan spesifikasi tegangan keluarannya, yaitu :
  - Tegangan puncak ( $V_{maks}$ )
  - Waktu muka gelombang ( $T_f$ )
  - Waktu ekor gelombang ( $T_t$ )
  - Kapasitas generator ( $W$ )
  - Efisiensi tegangan ( $\eta$ )
- Dengan diketahui semua spesifikasi tegangan keluaran generator, maka besarnya nilai RLC dapat ditentukan dimana dalam penentuan parameter ini didapat nilai untuk RLC adalah :
  - Nilai resistansi ( $R$ ) = 1498 M  $\Omega$
  - Nilai induktansi ( $L$ ) = 303 MH
  - Nilai kapasitansi ( $C$ ) = 0,05  $\mu F$

### 5.2 Saran

- Untuk menyempurnakan tulisan ini, penulis mengharapkan kepada pembaca untuk mengembangkan lebih lanjut khususnya dalam bidang penelitian (Aplikasi)
- Penulis mengharapkan kepada pembaca yang berminat untuk mengambil mata kuliah pilihan yang terkhusus dalam bidang tegangan tinggi untuk kembali meneliti maupun studi bagaimana cara menentukan parameter generator impuls rangkaian RLC untuk beberapa standar dan berlaku juga untuk rangkaian RC dan rangkaian Marx (bertingkat).

## DAFTAR PUSTAKA

- Artono Arismunandar, 1994, *Teknik Tegangan Tinggi*, Penerbit PT. Pradnya Paramita, Jakarta 1994.
- A.Arismunandar, 1979, *Teknik Tenaga Listrik*, edisi ke -4, Pradnya Paramita : Jakarta.
- A.Arismunandar, 1994, *Teknik Tegangan Tinggi*, Pradnya Paramita : Jakarta.
- A.S.Pabla, 1994, *Sistem Distribusi Daya Listrik*, (Alih Bahasa Abdul Hadi) Erlangga : Jakarta.
- Bonggas L. Tobing, 2003, *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Dieter Kind, 1993, *Pengantar Teknik Eksperimen Tegangan Tinggi*, Penerbit ITB, Bandung.
- Hermagasantos, 1994, *Teknik Tegangan Tinggi*, Penerbit PT. Rosda Jayaputra, Jakarta.
- Syamsir Abduh, 2001, *Teknik Tegangan Tinggi*, Penerbit Salemba Tenika, Jakarta.