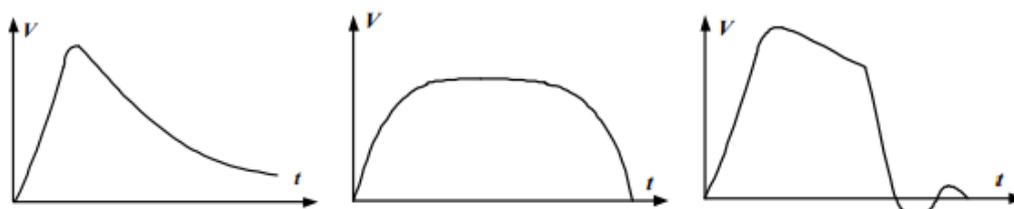


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas tentang pengenalan tegangan tinggi impuls, rangkaian pelipat tegangan *Marx generator*, prinsip kerja rangkaian *Marx generator*, *gas discharge tube* (GDT), karakteristik GDT, tembus pada gas, pengisian kapasitor, dan standar IEC 61000-4-5.

2.1 Tegangan Tinggi Impuls

Tegangan impuls dapat diartikan sebagai tegangan yang naik dalam waktu singkat sekali kemudian menurun yang relatif lambat menuju nol. Ada tiga bentuk tegangan impuls yang mungkin menerpa sistem tenaga listrik yaitu tegangan impuls petir yang disebabkan oleh sambaran petir, tegangan impuls hubung buka yang disebabkan oleh adanya operasi hubung-buka dan tegangan impuls petir terpotong (Tobing, 2012). Gambar 2.1 memperlihatkan bentuk-bentuk tegangan impuls :



Gambar 2.1 Jenis-jenis Tegangan Impuls: (a) Impuls Petir; (b) Impuls Hubung Buka; (c) Impuls Terpotong.

Sumber: Tobing (2012)

Tegangan impuls didefinisikan sebagai suatu gelombang yang berbentuk eksponensial ganda yang dapat dinyatakan dengan persamaan 2-1 :

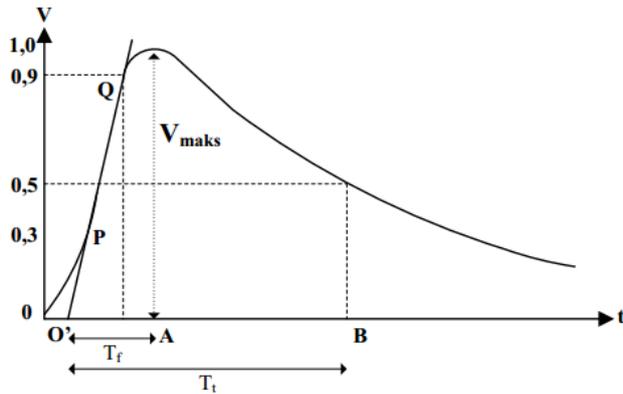
$$V = V_o (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \dots \dots \dots (2-1)$$

dimana,

- V = tegangan impuls (V)
- V_o = tegangan keluaran (V)
- α dan β = konstanta waktu
- t = waktu (μ S)

Persamaan (2-1) diatas merepresentasikan gelombang 1 polaritas yang mempunyai ciri cepat menuju puncak dan kemudiana turun perlahan menuju nol. Dari persamaan (2-1) dapat

dilihat bahwa bentuk gelombang impuls dapat ditentukan oleh konstanta α dan β . Untuk gelombang impuls 1/50 (μs), dapat diketahui bahwa $\alpha = 0,0139$ dan $\beta = 6,1$. Sedangkan untuk standar gelombang IEC 1,2/50 (μs) diketahui bahwa $\alpha = 0,0143$ dan $\beta = 4,87$ (Lucas, 2001).



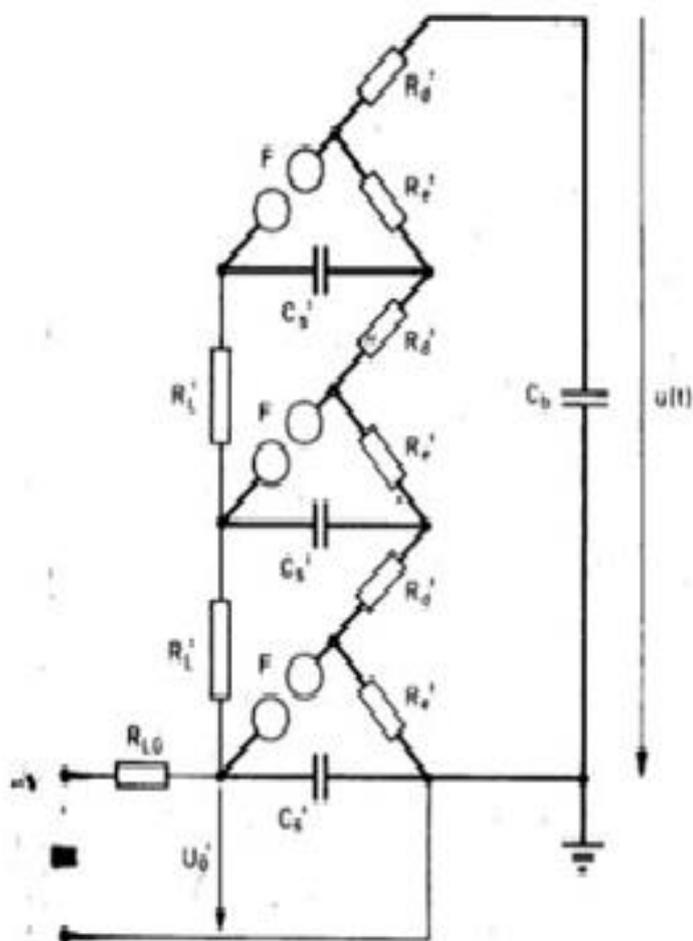
Gambar 2.2 Bentuk Gelombang Impuls Petir
Sumber: Hastanto dan Syakur (2011)

Definisi bentuk gelombang impuls pada Gambar 2.2:

1. Bentuk dan waktu gelombang impuls dapat diatur dengan mengubah nilai komponen rangkaian generator impuls.
2. Nilai puncak (*peak value*) merupakan nilai maksimum gelombang impuls.
3. Muka gelombang (*wave front*) didefinisikan sebagai bagian gelombang yang dimulai dari titik nol sampai titik puncak. Waktu muka (T_r) adalah waktu yang dimulai dari titik nol sampai titik puncak gelombang.
4. Ekor gelombang (*wave tail*) didefinisikan sebagai bagian gelombang yang dimulai dari titik puncak sampai akhir gelombang. Waktu ekor (T_t) adalah waktu yang dimulai dari titik nol sampai setengah puncak pada ekor gelombang (Arismunandar, 1984).

2.2 Rangkaian Pelipat Tegangan Marx generator

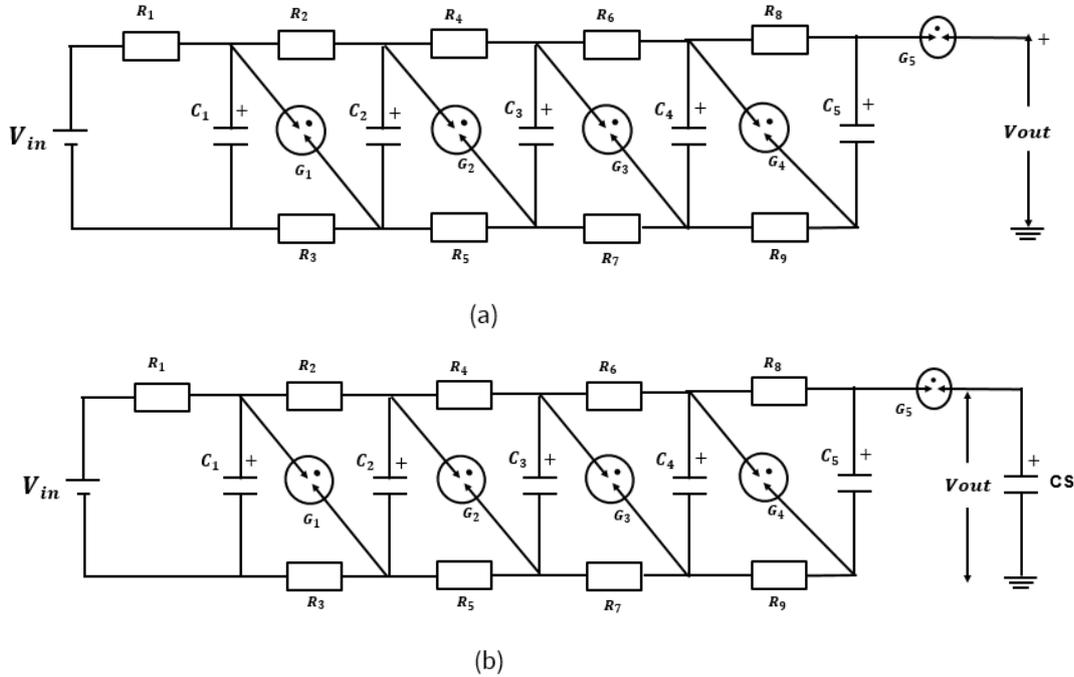
Marx generator merupakan generator impuls RC yang disusun bertingkat untuk memperoleh tegangan keluaran yang lebih tinggi. Beberapa kapasitor dirangkai secara parallel dan diluahkan secara seri sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang berlipat sesuai dengan jumlah tingkatnya (n). Gambar 2.3 menggambarkan rangkaian marx generator 3 tingkat.



Gambar 2.3 Rangkaian Pelipat Tegangan Marx Generator 3 Tingkat
 Sumber : Kind (1993 : 37)

Marx generator yaitu rangkaian pelipat tegangan yang tergolong *simple* karena hanya memerlukan komponen R, C, dan *spark gap*. Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, untuk memperoleh tegangan impuls dengan nilai puncak setinggi mungkin umumnya menggunakan rangkaian marx generator. Sejumlah kapasitor yang dirangkai secara paralel akan menghasilkan tegangan V, kemudian dihubungkan seri terhadap *spark gap switch* yang nantinya akan menghasilkan pengali tegangan terhadap jumlah tingkatnya ($n \times V$). Bila saklar F tembus maka kapasitor-kapasitor C_s' akan terhubung secara seri sehingga C_b akan dimuati melalui hubungan seri dari semua resistor redaman R_d' . Akhirnya seluruh C_s' dan C_b akan meluahkan kembali melalui resistor R_e' dan R_d' .

Gambar 2.4 merupakan gambar rangkaian pelipat tegangan *Marx generator* menggunakan GDT. Pada gambar (a) merupakan gambar rangkaian pelipat tegangan *Marx generator* tanpa beban atau *storage capacitor*, sedangkan gambar (b) merupakan gambar rangkaian pelipat tegangan *Marx generator* dengan *storage capacitor*.



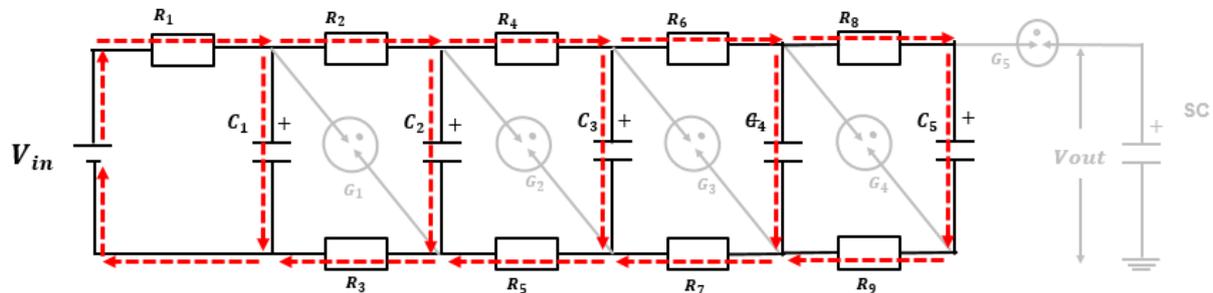
Gambar 2.4 Rangkaian Pelipat Tegangan *Marx Generator* Menggunakan GDT (a) Tanpa Beban dan (b) Berbeban.

2.3 Prinsip Kerja Rangkaian

Prinsip kerja rangkaian *Marx generator* yaitu bahwa sumber tegangan DC yang telah diberikan pada rangkaian akan mengisi semua kapasitor secara paralel. Hal ini disebut sebagai mode pengisian. Proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.5. Kemudian pada level tegangan tertentu atau ketika V mencapai nilai tegangan tembusnya, maka *spark gap* akan bekerja/mengalami tembus dan menyebabkan kapasitor pada tingkat pertama akan terhubung secara seri dengan kapasitor tingkat kedua. Begitu pula untuk tingkat selanjutnya. Dalam kondisi ini *spark gap* berfungsi sebagai saklar yang tertutup. Setelah terjadi *spark*, tegangan setiap tingkat akan ditambahkan dengan tingkat berikutnya karena seri. Kapasitor sekarang bekerja seperti sumber tegangan yang diseri sehingga tegangan keluaran akan sama dengan $n \times V_c$. Hal ini disebut sebagai mode pelepasan. Proses pelepasan muatan ini ditunjukkan pada Gambar 2.6. Setelah kapasitor terisi dengan ditandai adanya tembus pada *spark gap*, maka muatan dari kapasitor akan dilepaskan ke tingkat pada rangkaian selanjutnya. Sehingga tegangan pada tingkat ke-n, maka sesuai dengan persamaan :

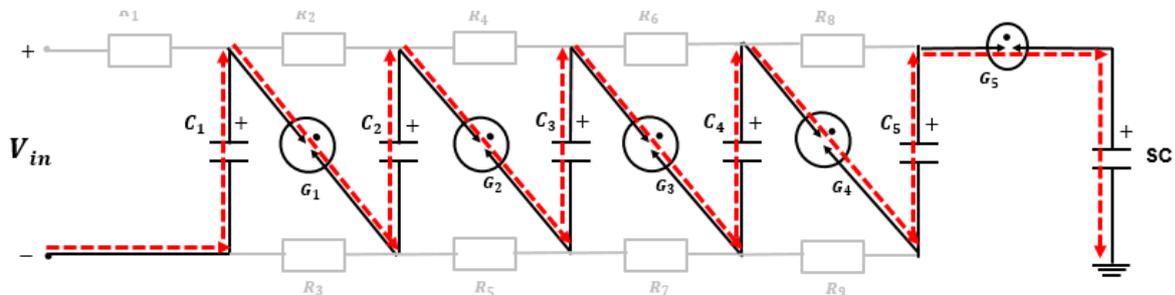
$$V'_{cn} = V_{cn-1} + V_{cn} \dots\dots\dots(2-2)$$

Prinsip kerja rangkaian pada mode pengisian muatan pada kapasitor dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.5 Mode Pengisian Muatan Kapasitor pada Rangkaian *Marx Generator*

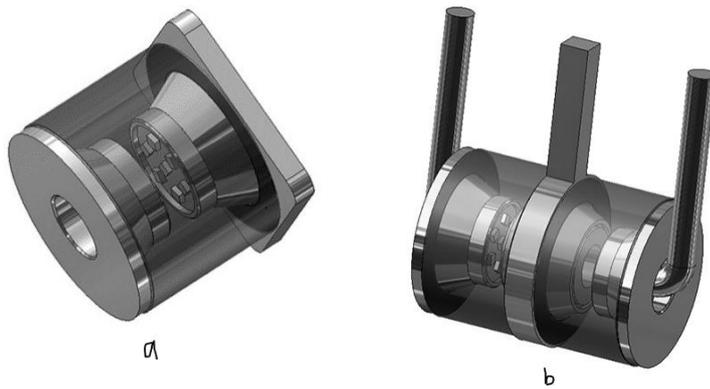
Prinsip kerja rangkaian pada mode pelepasan muatan kapasitor dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



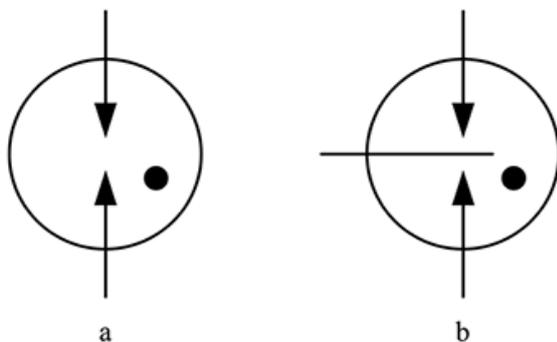
Gambar 2.6 Mode Pelepasan Muatan Kapasitor pada Rangkaian *Marx Generator*

2.4 Gas Discharge Tube (GDT)

Gas Discharge Tube yaitu komponen elektronika yang digunakan untuk menghilangkan tegangan transien melalui gas plasma yang terkandung di dalamnya. GDT memiliki ketahanan insulasi tinggi ditambah kapasitansi rendah dan kebocoran untuk memastikan efek minimal pada operasi peralatan normal. Secara sederhana konstruksi dari *gas discharge tube* terdiri dari dua buah elektroda atau lebih, dan di dalamnya terdapat celah berisi gas yang berfungsi sebagai isolator. Gambar permukaan dan simbol GDT ditunjukkan pada gambar 2.7:

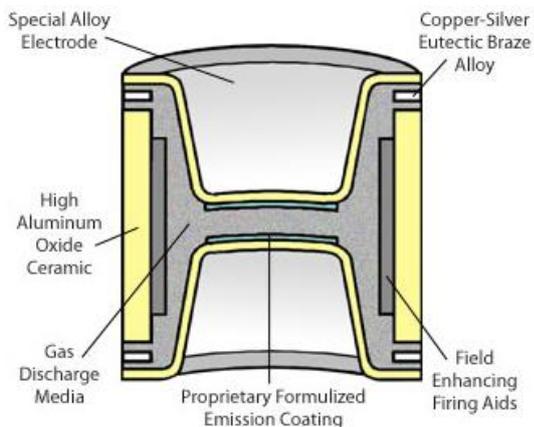


Gambar 2.7 Permukaan GDT a) 2 elektroda b) 3 elektroda
 Sumber : IEEE Std C62.42.1™-2016



Gambar 2.8 Simbol GDT a) 2 elektroda b) 3 elektroda
 Sumber : IEEE Std C62.42.1™-2016

Gas discharge tube memiliki karakteristik respon terhadap surja. adapun kelebihanannya adalah mampu menghantarkan arus dalam jumlah besar (dalam kA), dan tegangan pada fase busurnya rendah. Simbol dan konstruksi dari *gas discharge tube* ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.9 Konstruksi *Gas Discharge Tube* 2 Elektroda
 Sumber : partnership.bourns.com

Gas discharge tube memiliki tiga buah fase pengoperasian utama, yaitu: prebreakdown, breakdown, dan arc.

a) Fase *pre-breakdown*

Pada saat tegangan normal, gas yang berada pada celah antara elektroda bertindak sebagai isolator yang sangat baik ($R > 1\text{G}\Omega$). Saat mencapai tegangan breakdown maka akan mulai terjadi proses ionisasi, yang berlangsung hingga terjadi discharge atau tegangan pada GDT mencapai tegangan breakdown dinamis. Waktu dari tegangan breakdown hingga mencapai tegangan breakdown dinamis disebut *statistical time delay of discharge* (t_d), secara matematis dirumuskan dengan:

$$t_d = a \cdot S^{-b} \dots\dots\dots(2-3)$$

Dimana, t_d adalah waktu tunda, S adalah kecuraman waktu muka gelombang, a dan b merupakan koefisien GDT yang diperoleh dari pengukuran

b) Fase *breakdown*

Setelah terjadi discharge kondisi tegangan akan menurun, dan mengakibatkan terbentuknya jalur konduktif antar elektroda. Pada fase breakdown diameter aliran konduktif akan membesar, karena gas yang berada di antara elektroda menjadi terionisasi, sehingga arus yang mengalir pada GDT mengalami kenaikan, dan saat arus melebihi nilai tertentu maka aliran discharge tersebut mengakibatkan timbulnya busur listrik. Kenaikan arus ini dimodelkan dengan mengubah nilai resistansi sesuai dengan persamaan Toepler:

$$R(t) = \frac{k_t \cdot d}{\int_0^t i dt} \dots\dots\dots(2-4)$$

Dimana k_t merupakan nilai konstanta Toepler yang nilainya bergantung pada tekanan dan komposisi gas, d merupakan diameter aliran konduktif, dan i merupakan arus pada GDT.

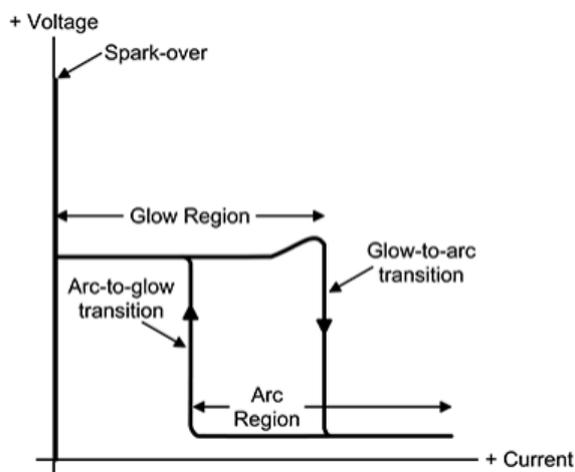
c) Fase *arc*

Aliran konduktif merupakan plasma yang mengandung gas panas dan sangat terionisasi. Pada fase busur ini nilai tegangan akan dipertahankan konstan, hingga suhu pada katoda mendingin atau arus yang mengalir pada GDT menurun sampai 0,03 A. Saat emisi termionik berakhir, busur listrik akan padam, sehingga mengakibatkan tegangan pada GDT meningkat

2.5 Karakteristik *Gas Discharge Tube*

Silinder dilapisi dengan campuran gas mulia. Ketika tegangan yang mencukupi diterapkan pada elektroda, percikan gas terjadi ke dalam mode pelepasan cahaya dan akhirnya kondisi busur tegangan rendah saat arus yang masuk akal tersedia. Bila tegangan yang naik perlahan melintasi celah mencapai nilai yang ditentukan terutama oleh jarak elektroda, tekanan gas, dan campuran gas, proses pengaktifan dimulai pada tegangan percikan (*breakdown*) (IEEE Std C62.42.1™, 2016).

Begitu terjadi percikan, berbagai keadaan operasi dimungkinkan, tergantung pada sirkuit eksternal. Keadaan ini ditunjukkan pada Gambar 11. Pada arus yang kurang dari arus transisi *glow-to-arc*, ada *glow area*. Pada arus rendah di daerah bercahaya, tegangan hampir konstan; pada arus cahaya tinggi, beberapa jenis arester dapat memasuki daerah cahaya (*glow*) abnormal dimana tegangan meningkat. Di luar daerah cahaya abnormal ini impedansi tabung menurun di daerah transisi ke kondisi busur tegangan rendah. Arus transisi *arc-to-glow* mungkin lebih rendah daripada arus transisi *glow-to-arc*. Karakteristik listrik GDT, bersamaan dengan sirkuit eksternal, menentukan kemampuan GDT untuk memadamkan setelah melewati lonjakan, dan menentukan energi yang hilang selama lonjakan. Jika tegangan yang diberikan (misal : transien) meningkat dengan cepat, waktu yang dibutuhkan untuk proses pembentukan ionisasi / busur memungkinkan tegangan transien melebihi nilai yang diperlukan untuk rincian paragraf sebelumnya. Tegangan ini dikalahkan sebagai tegangan impuls impuls dan umumnya merupakan fungsi positif dari laju kenaikan tegangan yang diberikan (transien).



Gambar 2.10 Karakteristik Tegangan-Arus pada GDT
Sumber : IEEE Std C62.42.1™, 2016

2.6 Tembus pada Gas

Tegangan tembus (*breakdown*) merupakan suatu peristiwa apabila medan magnet dinaikkan (tegangan terus-menerus dinaikkan), atom-atom akan terionisasi dan sampai batas kemampuan isolator tersebut menahan tegangan maka isolator tersebut akan berubah menjadi konduktor. Tegangan tembus terjadi karena terjaidnya ionisasi. Ionisasi yaitu proses terbentuknya ion. Ion merupakan atom atau gabungan atom yang memiliki muatan listrik, ion terbentuk apabila pada peristiwa kimia suatu atom unsur menangkap atau melepaskan elektron (Dedy, K, 2004).

Jika diantara dua elektroda yang dimasukkan dalam media gas diterapkan tegangan maka akan timbul suatu medan listrik yang mempunyai besar dan arah tertentu yang akan mengakibatkan elektron bebas mendapatkan energi yang cukup kuat menuju kearah anoda sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi (Arismunandar, 1983). Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan dengan jumlah ion yang ditangkap molekul oksigen. Tiap-tiap elektron ini kemudian akan berjalan menuju anoda secara kontinu sambil membuat benturan-benturan yang akan membebaskan elektron lebih banyak lagi. Ionisasi karena benturan ini merupakan proses dasar yang penting dalam kegagalan udara atau gas.

2.7 Pengisian Kapasitor

Ada dua cara untuk pengisian *storage capasitor* (SC), yaitu pengisian dengan penyearahan tegangan tinggi arus bolak-balik (AC) dan pengisian dengan kapasitor lain (*flash charging*). Kedua cara tersebut memiliki syarat utama agar dapat mengisi CS yaitu potensial kedua sumber tersebut harus lebih besar dari potensial CS. Hal tersebut bertujuan agar arus dapat mengalir dari potensial tinggi ke potensial yang lebih rendah (Irwin, 2011).

Pengisian CS yang pertama adalah dengan penyearahan tegangan arus bolak-balik (AC) yang berasal dari transformator *step-up* menjadi tegangan arus searah (DC). Namun cara ini memiliki berbagai kekurangan khususnya pada transformator. Transformator *step-up* memiliki berbagai kelemahan yaitu harga yang mahal, berat yang besar, dimensi yang lebar, dan memiliki berbagai rugi-rugi elektik.

Pengisian yang kedua adalah dengan kapasitor lain yang memiliki tegangan lebih tinggi. Cara ini memiliki keunggulan dalam waktu pengisian. Untuk tegangan yang sama pengisian dengan kapasitor lebih cepat daripada pengisian menggunakan rangkaian cara pertama

seperti pada grafik tegangan terhadap waktu *Gambar 2.12*, karena kapasitor memiliki karakteristik cepat melepaskan muatan.

Perhitungan waktu pengisian kapasitor pada dengan sumber arus searah didapatkan dari Persamaan 2-5 yang berasal dari analisis rangkaian RC. Ketika sakelar sw terbuka pada *Gambar 2.11* maka tidak ada muatan yang tersimpan pada kapasitor, oleh karena itu tegangan pada kapasitor adalah nol, ketika sakelar sw tertutup maka persamaan tegangan terhadap waktu pengisian seperti pada persamaan 2-5:

$$V_c(t) = V_{maks} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \dots\dots\dots (2-5)$$

dengan:

$V_c(t)$: Tegangan pada *storage capacitor* (Volt)

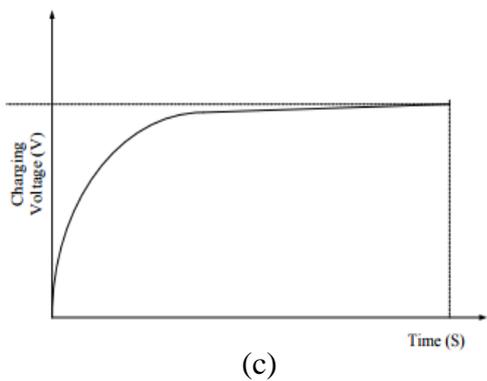
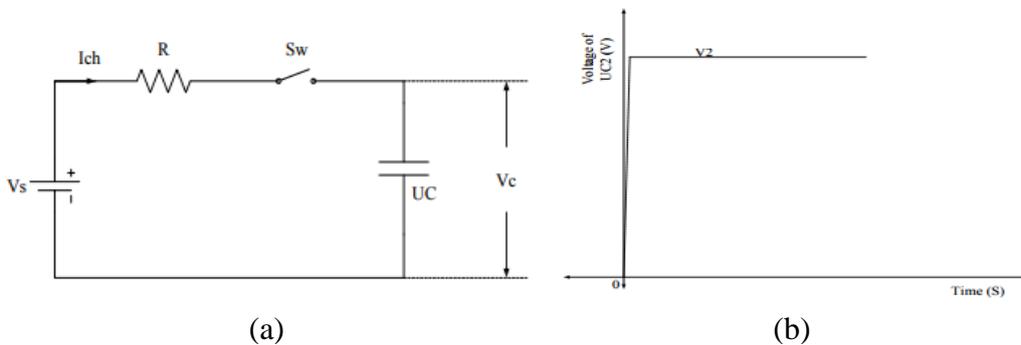
V_{maks} : Nilai tegangan *input* (Volt)

C : Nilai kapasitansi pada kapasitor pelipat (F)

R : Nilai resistansi pada resistor (Ω)

t : Waktu pengisian *storage capacitor*.

(Kirtiwar, 2016)



Gambar 2.11 (a) Rangkaian Pengisian Kapasitor dengan Kapasitor Lain; (b) Grafik Tegangan Terhadap Waktu untuk Pengisian Kapasitor dengan Kapasitor Lain; (c) Grafik Tegangan Terhadap Waktu untuk Pengisian Kapasitor dengan Penyearahan Tegangan AC Menjadi DC.

Sumber: Kirtiwar (2016)

Persamaan tegangan Gambar 2.11 (a), ketika saklar tepat setelah tertutup $t(0^+)$, diberikan:

$$\sum v = 0$$

$$V_S - V_R - V_C = 0$$

$$V_S = V_R + V_C$$

$$V_S = i(t) \cdot R + \frac{q(t)}{C}$$

$$\frac{V_S}{R} = i(t) + \frac{q(t)}{RC}$$

$$\frac{V_S}{R} \times \frac{C}{C} = i(t) + \frac{q(t)}{RC}$$

karena $Q_{maks} = V_S \times C$ dan $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$, maka

$$\frac{Q_{maks}}{RC} = \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{RC}$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = \frac{Q_{maks}}{RC} - \frac{q(t)}{RC}$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = \frac{-1}{RC} (q(t) - Q_{maks})$$

$$\frac{dq(t)}{(q(t) - Q_{maks})} = \frac{-dt}{RC}$$

$$\int_0^{q(t)} \frac{dq(t)}{(q(t) - Q_{maks})} = - \int_0^t \frac{dt}{RC}$$

$$\ln \frac{(q(t) - Q_{maks})}{-Q_{maks}} = - \frac{t}{RC}$$

$$\frac{q(t) - Q_{maks}}{-Q_{maks}} = e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\frac{q(t)}{-Q_{maks}} + 1 = e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\frac{q(t)}{-Q_{maks}} = e^{\frac{-t}{RC}} - 1$$

$$q(t) = Q_{maks} \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}} \right)$$

$$q(t).C = Q_{maks} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right).C$$

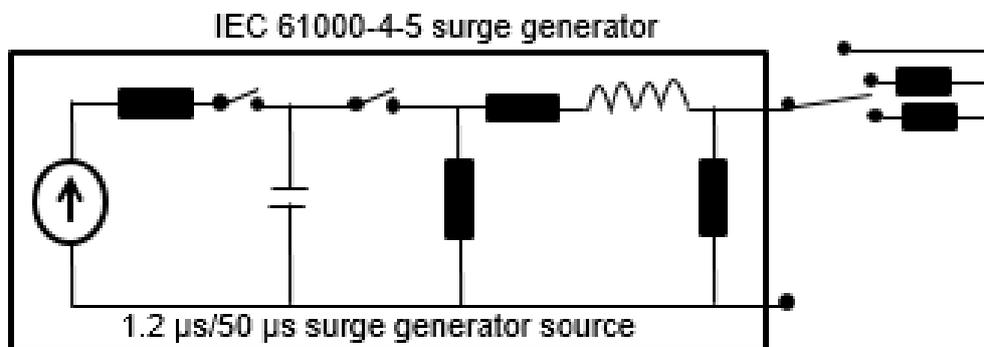
$$Vc(t) = Q_{maks} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right).C$$

$$Vc(t) = V_{maks} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

2.8 Standar IEC 61000-4-5

Standar IEC (International Electrotechnical Commission) 61000-4-5 merupakan standar yang diteapkan pada alat pembangkit kombinasi tegangan-arus impuls atau generator surja harus mengikuti standar yang ditetapkan yaitu, Standar ini menetapkan bentuk gelombang tegangan impuls adalah 1.2/50 μ s dan bentuk gelombang arus impuls 8/20 μ s. Parameter-parameter utama yang perlu ditetapkan di dalam perancangan sumber pembangkit arus impuls antara lain adalah waktu muka dan waktu punggung (Muskita, 2013).

Peralatan yang dibutuhkan untuk membentuk gelombang impuls tersebut terdapat pada *Gambar 2.12*. Terlihat pada gambar tersebut ada salah satu komponen yang memiliki syarat khusus yaitu nilai rating tegangan dan energi pada komponen *storage capacitor*. Nilai tegangan *storage capacitor* dibagi menjadi berbagai kelas seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.



Gambar 2.12 Rangkaian Generator Surja Pembangkit Kombinasi Tegangan dan Arus Impuls
Sumber: IEC 61000-4-5

Pada Tabel 2.1 terlihat setiap kelas memiliki fungsi masing-masing. Semakin tinggi kelasnya maka level tegangan dan alat yang diuji akan juga semakin besar. Untuk membangkitkan kombinasi tegangan-arus impuls dibutuhkan energi 100 Joule, 200 Joule, dan 360 Joule (Maytum, 2012).

Tabel 2.1
Berbagai Jenis Kelas pada Standar IEC 61000-4-5

Class	Environment	Voltage level
0	Well protected environment, often in a special room	25 V
1	Partially protected environment	500 V
2	Electrical environment where the cables are well separated, even at short runs	1 kV
3	Electrical environment where power and signal cables run in parallel	2 kV
4	Electrical environment where the interconnections include outdoor cables along with the power cable, and cables are used for both electronics and electric circuits	4 kV
5	Electrical environment for electronic equipment connected to telecommunication cables and overhead power lines in a non-densely populated area	Test level 4

Sumber: IEC 61000-4-5

