

**PERANCANGAN ARESTER KASKADE BERDASARKAN
DISTRIBUSI ENERGI SURJA**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
MINAT SISTEM TENAGA LISTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



HANIFIYAH DARNA FIDYA AMARAL
NIM. 146060300111027

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2019**

DAFTAR ISI

PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	v
DAFTAR LAMPIRAN.....	vii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Arester Tegangan Rendah	5
2.1.1. <i>Gas Discharge Tube Arrester</i> (GDT).....	5
2.1.2. <i>Metal Oxide Varistor</i> (MOV).....	6
2.2. Distribusi Energi Surja	8
2.3. Transformasi Fourier.....	8
2.3.1. Transformasi Fourier Diskrit.....	8
2.4. Elemen Dekopling.....	9
2.4.1. Penentuan Nilai Induktor.....	9
2.5. Arester Kaskade GDT dan MOV	10
2.6. Penelitian yang Relevan tentang Arester GDT dan MOV	12
BAB III.....	21
KERANGKA KONSEP PENELITIAN	21
3.1. Kerangka Konsep.....	21
3.2. Hipotesis.....	22
BAB IV	23
METODE PENELITIAN.....	23
4.1 Tahapan Penelitian	23
4.2 Simulasi Generator Impuls RLC	24
4.2.1 Generator Impuls RLC	25

4.3. Perhitungan Daya dan Energi	26
4.3.1 Daya dan energi arester impuls	26
4.3.2 Daya dan energi arester GDT	27
4.3.3 Daya dan energi arester MOV	27
4.2.4 Daya dan energi dekopling induktor	28
4.4 Perhitungan induktansi dekopling induktor	29
4.4 Simulasi Arestor Kaskade dengan Dekopling Induktor	30
4.5 Spesifikasi Arestor Kaskade	30
BAB V	33
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
5.1. Distribusi Energi	33
5.1.1. Daya Impuls.....	33
5.1.2. Daya Arestor GDT.....	38
5.1.3. Daya arester MOV.....	43
5.1.4. Daya Dekopling.....	47
5.2. Induktansi dekopling	49
5.3. Hasil Simulasi Rangkaian	52
5.3.1. Hasil Simulasi Generator Impuls RLC.....	52
5.3.2. Simulasi Arestor Kaskade dengan Dekopling	54
BAB VI.....	61
KESIMPULAN DAN SARAN.....	61
6.1. Kesimpulan.....	61
6.2. Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN.....	65

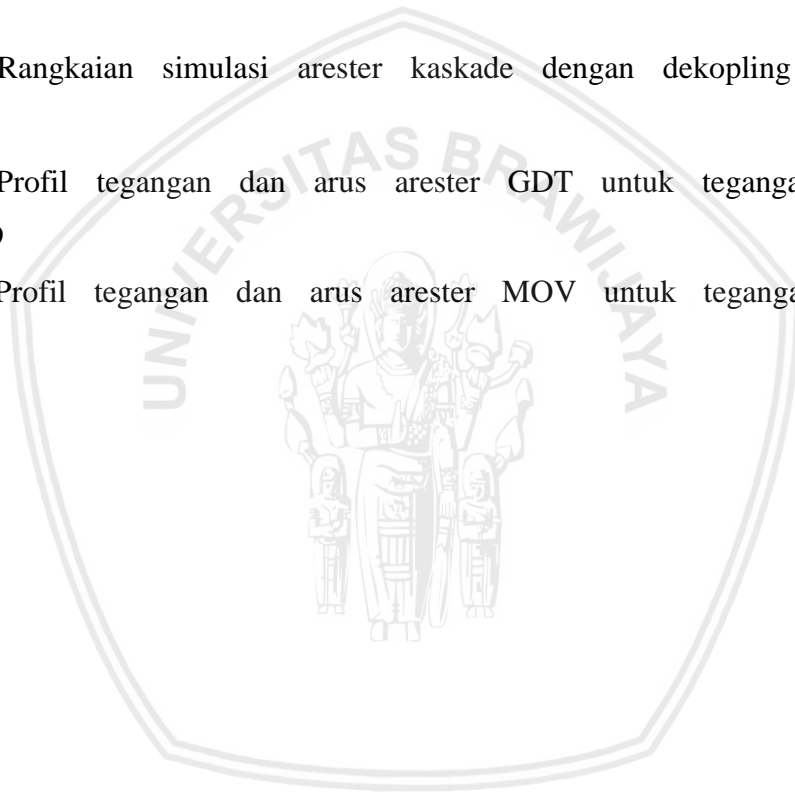
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Karakteristik V – I GDT	6
Gambar 2.2. Karakteristik V – I dari MOV	7
Gambar 2.3. Arester kaskade dengan dekoupling	11
Gambar 3.1. Aliran energi arester kaskade GDT dan MOV.....	21
Gambar 3.2. Tahapan Alur Penelitian.....	22
Gambar 4.1. Diagram alir metodologi penelitian.....	24
Gambar 4.2. Bentuk Gelombang Impuls	25
Gambar 4.3. Generator impuls RLC	26
Gambar 4.4. Rangkaian generator impuls di <i>Ltspice XVII</i>	27
Gambar 4.5. Karakteristik <i>switching</i> dari arester GDT	28
Gambar 4.6. Karakteristik <i>switching</i> dari arester MOV.....	29
Gambar 4.7. Arester kaskade GDT dan MOV	30
Gambar 5.1. Profil tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV.....	34
Gambar 5.2. Profil arus impuls (8/20 μ s) 0.5 kA.....	34
Gambar 5.3. Profil daya impuls 1 kV.....	34
Gambar 5.4. Profil tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV.....	35
Gambar 5.5. Profil arus impuls (8/20 μ s) 1 kA.....	35
Gambar 5.6. Profil daya impuls 2 kV.....	36
Gambar 5.7. Profil tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV.....	36
Gambar 5.8. Profil arus impuls (8/20 μ s) 1.5 kA.....	37
Gambar 5.9. Profil daya impuls 3 kV.....	37
Gambar 5.10. Profil tegangan dan arus GDT untuk tegangan impuls 1 kV.....	38
Gambar 5.11. Kurva v – t impuls.....	38
Gambar 5.12. Profil daya impuls yang dilepas ke dekoupling untuk tegangan impuls 1 kV	39
Gambar 5.13. Profil daya yang terserap GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV.....	39
Gambar 5.14. Profil tegangan dan arus GDT untuk tegangan impuls 2 kV.....	40
Gambar 5.15. Profil daya impuls yang dilepas ke dekoupling untuk tegangan impuls 2 kV...	40
Gambar 5.16. Profil daya yang terserap GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV.....	41
Gambar 5.17. Profil tegangan dan arus GDT untuk tegangan impuls 3 kV.....	42

Gambar 5.18. Profil daya impuls yang dilepas ke dekopling untuk tegangan impuls 3 kV....	42
Gambar 5.19. Profil daya yang terserap GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV.....	42
Gambar 5.20. Profil tegangan dan arus arester MOV untuk tegangan impuls 1 kV	43
Gambar 5.21. Profil daya MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV	44
Gambar 5.22. Profil tegangan dan arus MOV untuk tegangan impuls 2 kV.....	45
Gambar 5.23. Profil daya MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV.....	45
Gambar 5.24. Profil tegangan dan arus MOV untuk tegangan impuls 3 kV.....	46
Gambar 5.25. Profil daya MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV.....	46
Gambar 5.26. Profil daya dekopling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV.....	47
Gambar 5.27. Profil daya dekopling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV.....	48
Gambar 5.28. Profil daya dekopling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV.....	48
Gambar 5.29. Profil impedansi (Z) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV.....	49
Gambar 5.30. Profil induktansi (L) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV.....	50
Gambar 5.31. Profil impedansi (Z) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV.....	50
Gambar 5.32. Profil induktansi (L) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV.....	51
Gambar 5.33. Profil impedansi (Z) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV.....	51
Gambar 5.34. Profil induktansi (L) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV.....	52
Gambar 5.35. Tegangan impuls pada saat open circuit 1.2/50 μ s.....	53
Gambar 5.36. Arus impuls pada saat short circuit 8/20 μ s.....	53
Gambar 5.37. Rangkaian simulasi arester kaskade dengan dekopling (L2) 11.83 μ H.....	54



- Gambar 5.38. Profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls 1 kV.....55
- Gambar 5.39. Profil tegangan dan arus arester MOV untuk tegangan impuls 1 kV.....55
- Gambar 5.40. Rangkaian simulasi arester kaskade dengan dekoping (L2) 12.16 μ H.....56
- Gambar 5.41. Profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls 2 kV.....57
- Gambar 5.42. Profil tegangan dan arus arester MOV untuk tegangan impuls 2 kV.....57
- Gambar 5.43. Rangkaian simulasi arester kaskade dengan dekoping (L2) 12.49 μ H.....58
- Gambar 5.44. Profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls 3 kV.....59
- Gambar 5.45. Profil tegangan dan arus arester MOV untuk tegangan impuls 3 kV.....59



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Daya dari tegangan impuls 1 kV dan arus impuls 0.5 kA
Lampiran 2	Daya dari tegangan impuls 2 kV dan arus impuls 1 kA
Lampiran 3	Daya dari tegangan impuls 3 kV dan arus impuls 1.5 kA
Lampiran 4	Daya GDT untuk tegangan impuls 1 kV
Lampiran 5	Daya GDT untuk tegangan impuls 2 kV
Lampiran 6	Daya GDT untuk tegangan impuls 3 kV
Lampiran 7	Daya MOV untuk tegangan impuls 1 kV
Lampiran 8	Daya MOV untuk tegangan impuls 2 kV
Lampiran 9	Daya MOV untuk tegangan impuls 3 kV
Lampiran 10	Perancangan arester kaskade



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Kaskade perangkat proteksi surja adalah konsep dimana dua perangkat dihubungkan pada dua titik yang berbeda pada sistem elektrikal, yang dipisahkan induktansi antara dua titik. Perangkat primer didesain untuk membuang sebagian besar surja dan perangkat sekunder dekat dengan perangkat yang di proteksi atau berada di tahap pemotongan surja akhir. (Martzloff & Lai, n.d.). Arester kaskade dapat berkoordinasi dengan baik apabila arester yang memiliki tegangan kerja lebih tinggi terletak dibagian depan dan tegangan kerja yang lebih rendah dan di bagian belakang. Arester *Gas Discharge Tube* (GDT) dirancang pada *stage* pertama dan arester *Metal oxide Varistor* (MOV) pada *stage* kedua.

GDT adalah tabung keramik dengan dua elektroda yang dimasukkan di dalamnya dan diisi dengan gas khusus (*gas inert*). GDT konduksi arus listrik setelah terionisasi oleh lonjakan tegangan tinggi. Sedangkan MOV terbuat dari campuran *zinc oxide* dan *metal oxide* lainnya seperti *cobalt*, mangan dan lainnya. MOV akan mulai konduksi pada tegangan spesifik tertentu dan akan berhenti konduksi ketika tegangannya jatuh dibawah tegangan kerjanya.

Arester primer (GDT) cukup membuang energi surja, tetapi arester GDT hanya memotong tegang surja di 1 kV. Arester GDT memotong tegangan surja terlalu cepat karena sifatnya yang seperti switching sehingga ada hantaman energi balik. Arester sekunder (MOV) berfungsi untuk melindungi peralatan dari sisa gangguan arester primer. Arester MOV memotong tegangan surja dengan baik pada bentuk tegangan mendatar serta mempunyai rating dari rendah sampai tinggi. Kelemahan dari arester MOV adalah kapasitas penanganan energi yang rendah. Oleh karena itu, dirancang arester GDT dan MOV secara kaskade.

Perancangan arester kaskade memerlukan perangkat dekopling. Perangkat dekopling diperlukan dalam arester kaskade GDT dan MOV agar GDT beroperasi pertama kali dan menyerap sebagian besar energi input sehingga MOV tidak mencapai tegangan, arus, energi, atau batas dayanya, dan akhirnya gagal. (Uman, 2008). Perangkat dekopling yang digunakan dalam penelitian ini adalah induktor. Pada perancangan induktor memerlukan nilai induktansinya. Nilai induktansi induktor yang tepat diperlukan karena akan mempengaruhi konduksi dari arester GDT dan MOV. Nilai induktansi yang tinggi pada dekopling menyebabkan arester GDT akan beroperasi terlebih dahulu dan menyerap

sebagian besar energi gelombang transien. Sedangkan nilai induktansi yang terlalu rendah pada dekoupling akan menyebabkan arester MOV bekerja terlebih dahulu karena adanya drop tegangan di dekoupling sehingga arester GDT tidak konduksi dan arester MOV lebih banyak menyerap energi dan mengalami kerusakan.

Nilai induktansi dekoupling dapat diperoleh dari pengurangan daya impuls dengan daya arester GDT dan MOV. Daya impuls, arester GDT dan MOV diperoleh dari perkalian tegangan dengan arus. Permasalahan pada penelitian ini, tegangan dan arus impuls, arester GDT serta MOV yang ada berupa profil - profil bukan nilai (angka). Sehingga diperlukan analisis matematik untuk mendapatkan nilai impedansi dekoupling dari profil – profil tegangan dan arus tersebut. Analisis matematik yang dipilih dalam menganalisis profil tegangan dan arus menggunakan metode *Discrete Fourier Transform* (DFT).

Transformasi fourier diskrit atau disebut dengan *Discrete Fourier Transform* (DFT) adalah model transformasi fourier yang dikenakan pada fungsi diskrit, dan hasilnya berupa urutan sinyal diskrit. Urutan sinyal diskrit adalah urutan nilai yang diperoleh dari sampling periodik sinyal kontinu dalam domain waktu.

Pada akhir penelitian, peneliti mengharapkan dapat merancang arester kaskade berdasarkan distribusi energi surja. Dekoupling induktor dapat didesain, dibuat, dan dirancang berdasarkan profil tegangan dan arus impuls, arester GDT dan MOV.

1.2. Rumusan Masalah

Perancangan arester kaskade memerlukan elemen dekoupling (impedansi) agar koordinasi proteksi antar arester dapat berjalan dengan baik. Pada penelitian ini, akan diteliti bagaimana merancang elemen dekoupling jika tegangan dan arus impuls, arester GDT dan MOV berupa profil. Bagaimana profil tegangan dan arus impuls, arester GDT dan MOV dapat menghasilkan nilai impedansi dekoupling.

1.3. Tujuan Penelitian

Perancangan arester kaskade berdasarkan distribusi energi surja bertujuan untuk merancang dekoupling induktor pada arester kaskade untuk sambaran petir dengan puncak tegangan 1 kV, 2 kV dan 3 kV serta menganalisis profil tegangan dan arus arester kaskade.

1.4. Batasan Masalah

1. Arestor yang digunakan adalah arester tegangan rendah GDT dan MOV.
2. Grafik gelombang yang digunakan dalam perhitungan energi berupa tegangan dan arus.
3. Elemen dekoupling yang digunakan berupa induktor.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat digunakan sebagai salah satu metode dalam perancangan komponen dekoupling arester kaskade. Perhitungan dekoupling yang tepat akan memperoleh koordinasi arester kaskade yang sesuai. Arester kaskade yang sesuai akan menghasilkan *Surge Protection Device* (SPD) yang handal untuk sistem listrik dan elektronik yang sensitif.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

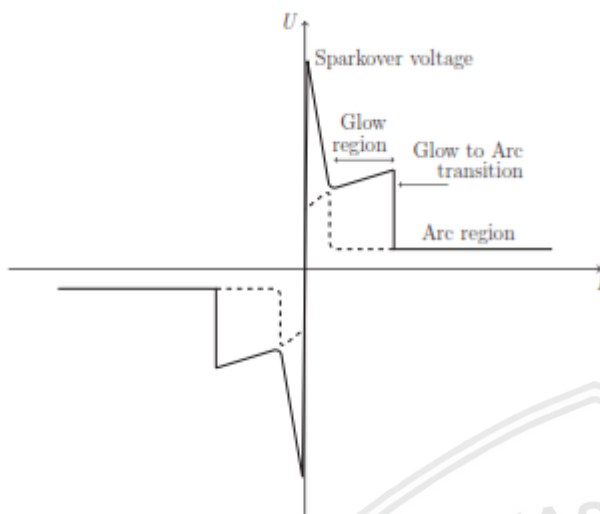
2.1. Arester Tegangan Rendah

Perangkat sistem proteksi dirancang untuk membatasi transien tegangan lebih dan arus lebih yang diinduksi petir dan meyerap energi petir kemudian dibuang ke tanah. Komponen proteksi tegangan lebih pada tegangan rendah dibagi menjadi perangkat *crowbar* dan perangkat *voltage clamping*. Perangkat *crowbar* bekerja dengan *switching* dari keadaan resistansi tinggi ke rendah pada tegangan tembus tertentu dan berperilaku seperti hubung singkat. Perangkat proteksi yang menggunakan prinsip *crowbar* adalah *Gas Discharge Tube* (GDT), thyristor, dan TRIAC. Perangkat *voltage clamping* bekerja dengan memotong tegangan lebih transien yang datang sebelum terkena perangkat elektronik dan listrik. *Metal Oxide Varistor* (MOV) dan zener menggunakan prinsip tersebut. Pada penelitian ini, arester tegangan rendah yang digunakan adalah GDT dan MOV.

2.1.1. Gas Discharge Tube Arrester (GDT)

GDT adalah salah satu elemen penting untuk proteksi tegangan lebih pada tegangan rendah (LV), terhadap dampak berbahaya dari tegangan lebih yang disebabkan oleh fenomena atmosfer. (Ribic, Vorsic, & Pihler, 2014). GDT merupakan salah satu komponen proteksi surja primer. GDT terbuat dari tabung keramik tertutup dengan dua elektroda yang dimasukkan di dalamnya dan diisi dengan gas tertentu (gas mulia, seperti Ar, Ne, atau campuran keduanya). Elektroda – elektroda dipisahkan oleh *gap*, dimana *discharge* terjadi. (Bizjak, Bekovic, & Hamler, 2015). GDT adalah perangkat paling populer yang digunakan untuk saluran telekomunikasi, jaringan sinyal, atau perangkat, dan jaringan listrik dari proteksi surja. Banyak GDT digunakan pada aplikasi tersebut karena dapat menangani lonjakan arus setinggi 10 kA, 8/20, lebih jauh tergantung pada desain dan ukuran GDT. (Society, 2016) (Ngampradit, 2017). Selama operasi normal pada tegangan normal, GDT berperilaku sebagai isolator. (Uman, 2008). Ketika ada tegangan *sparkover* (diatas teganga kerjanya), akan terjadi *electrical breakdown* dalam tabung dan terjadi transisi *glow region* ke *arc region* yang ditunjukkan pada gambar 2.1 (Uman, 2008). Dalam fase arc, GDT akan memotong gelombang tegangan dan membuang gelombang arus ke tanah dari peralatan. Waktu transisi antara fase *glow* dan *arc* tergantung pada arus impuls, jarak dan bentuk elektroda, komposisi gas, dan tekanan gas. GDT akan mereset kembali ke keadaan

impedansi tinggi ketika tidak ada energi yang cukup pada fase *arc*.(Hodžić, Mujčić, Suljanović, & Zajc, 2017).



Gambar 2.1 Karakteristik V – I arester GDT

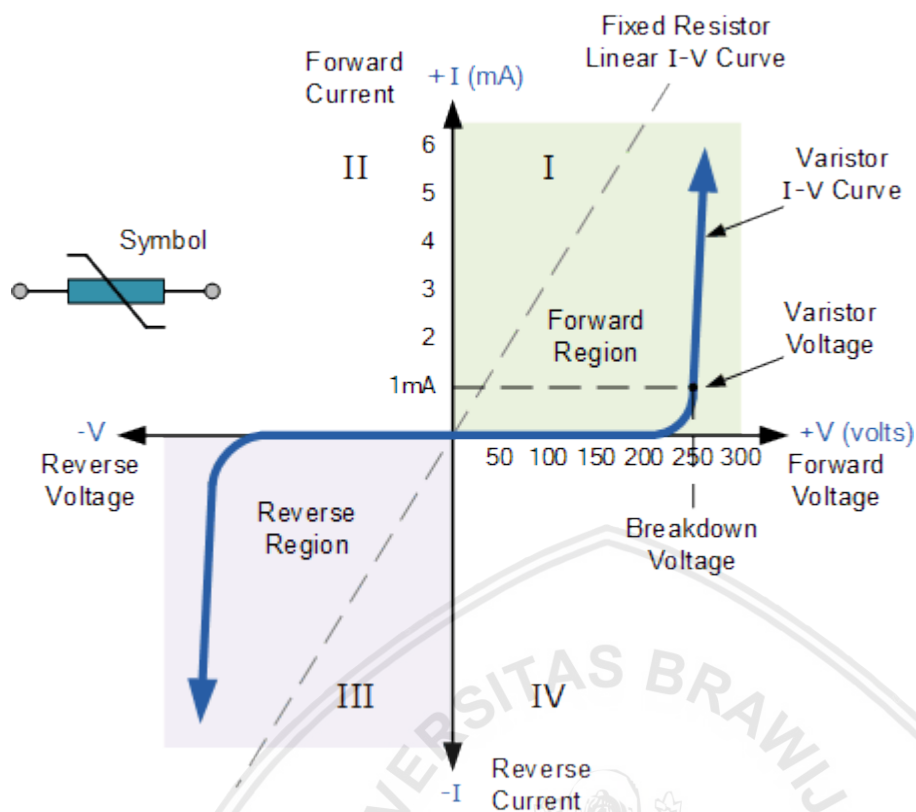
Sumber: (Davis, 2016)

GDT memiliki masa kerja yang terbatas, dan dapat menangani beberapa transien yang sangat besar atau sejumlah kecil transien. GDT memiliki waktu pemicuan yang relatif lama sehingga memungkinkan lonjakan tegangan tinggi melewatinya sebelum GDT konduksi. Dalam beberapa kasus, komponen proteksi tambahan diperlukan untuk mencegah kerusakan beban yang diproteksi, disebabkan oleh berkecepatan tinggi tegangan yang lewat sebelum GDT mulai beroperasi.

2.1.2. Metal Oxide Varistor (MOV)

MOV merupakan salah satu komponen pelindung surja sekunder. MOV merupakan resistor dengan karakteristik V-I tidak linear.(Hodžić et al., 2017). MOV terdiri dari butiran *zinc oxide* dengan sejumlah kecil zat adiktif metal oxide yang dipilih dengan cermat (Bi_2O_3 , MnO , Cr_2O_3 , Sb_2O_3) yang dipadatkan untuk meningkatkan V – I tidak linear. (Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000).

Karakteristik V – I varistor dapat kita lihat pada gambar 2.2. varistor memiliki karakteristik bidirectional simetris, sehingga varistor beroperasi di dua wilayah (kuadran I dan III) dari gelombang sinusoidal seperti perilaku dua dioda zener terhubung *back-to-back*. Ketika tidak konduksi, kurva V – I menunjukkan hubungan yang linear seperti arus yang mengalir melalui varistor tetap konstan dan rendah saat beberapa mikro ampere dari kebocoran arus. Hal ini dikarenakan resistensi tingginya seperti rangkaian terbuka dan akan tetap konstan sampai tegangan yang melewati varistor mencapai tegangan kerjanya.



Gambar 2.2 Karakteristik V – I dari arester MOV

Sumber: (Davis, 2016)

Tegangan kerja atau pemotong adalah tegangan yang melewati varistor diukur dengan arus DC 1 mA. Hal ini dikarenakan tegangan DC yang melewati terminal memungkinkan arus 1mA mengalir melalui badan resistif varistor yang tergantung pada bahan yang digunakan dalam konstruksi. Pada tingkat tegangan, varistor mulai mengubah dari keadaan isolator ke keadaan konduksi.

Ketika tegangan transien melewati varistor adalah sama atau lebih besar dari tegangan kerjanya, resistansi dari perangkat tiba-tiba menjadi sangat kecil mengubah varistor menjadi konduktor yang disebabkan oleh efek avalanche dari bahan semi konduktornya. Arus bocor kecil mengalir melalui varistor mengalami kenaikan yang cepat tetapi tegangan yang melewatinya terbatas pada tingkat tepat di atas tegangan varistor.

Dengan kata lain, varistor mengatur sendiri tegangan transien yang melewatinya dengan memungkinkan lebih banyak arus untuk melewatinya dan karena kurva V- I tidak linier yang curam, hal itu memungkinkan arus yang bervariasi melewatinya selama dalam batas tegangan *clamping - offnya* di setiap lonjakan tegangan.

2.2. Distribusi Energi Surja

Petir merupakan fenomena alam dengan energi yang sangat tinggi yang dapat membahayakan manusia, hewan, struktur bangunan, sistem elektronik dan listrik. Petir melepaskan ratusan mega joule energi sehingga dapat menyebabkan kenaikan gelombang arus dan tegangan yang tinggi di sistem elektronik dan listrik. Energi petir ini, dapat merusak peralatan elektronik dan listrik akibat transien tegangan lebih. Arrester perlu dipasang untuk melindungi sistem elektronik dan listrik dari kerusakan. Arrester kaskade dirancang berdasarkan distribusi energi surja. Analisis distribusi energi dilakukan karena GDT dan MOV memiliki karakteristik yang berbeda dalam memotong tegangan dan penanganan energi surja. Profil tegangan dan arus GDT dan MOV dianalisis sehingga akan menghasilkan nilai energinya. Analisis distribusi energi surja menggunakan metode DFT (*Discrete Fourier Transform*). Nilai energi dari komponen arrester digunakan sebagai salah satu metode dalam perancangan komponen dekoupling (impedansi) kaskade arrester.

2.3. Transformasi Fourier

Transformasi Fourier adalah suatu model transformasi yang memindahkan domain spasial atau domain waktu menjadi domain frekuensi. Transformasi Fourier merupakan suatu proses yang banyak digunakan untuk memindahkan domain dari suatu fungsi atau obyek ke dalam domain frekuensi. Transformasi Fourier untuk sebuah sinyal waktu kontinu $x(t)$ secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

Keterangan:

$X(f)$ = urutan ke- f komponen output ($X(0), X(1), \dots, X(N-1)$)

f = indeks output dalam domain frekuensi ($0, 1, \dots, N-1$)

$x(t)$ = urutan ke- t sampel input ($x(0), x(1), \dots, x(N-1)$)

n = indeks sampel input dalam domain waktu ($0, 1, \dots, N-1$)

j = bilangan imajiner ($\sqrt{-1}$)

n = derajat (180^0)

e = basic logaritma natural (2.718281828459...)

2.3.1 Transformasi Fourier Diskrit

Transformasi fourier diskrit atau disebut dengan Discrete Fourier Transform (DFT) adalah model transformasi fourier yang dikenakan pada fungsi diskrit, dan hasilnya berupa urutan sinyal diskrit. Urutan sinyal diskrit adalah urutan nilai yang diperoleh dari sampling

periodik sinyal kontinu dalam domain waktu. DFT berasal dari fungsi transformasi fourier $X(f)$ pada persamaan 2.1, sehingga diperoleh persamaan DFT sebagai berikut :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.2)$$

Keterangan :

N = jumlah sampel input

$X(k)$ = urutan ke- k komponen output DFT ($X(0), X(1), \dots, X(N-1)$)

k = indeks output DFT dalam domain frekuensi ($0, 1, \dots, N-1$)

$x(n)$ = urutan ke- t sampel input ($x(0), x(1), \dots, x(N-1)$)

n = indeks sampel input dalam domain waktu ($0, 1, \dots, N-1$)

j = bilangan imajiner ($\sqrt{-1}$)

n = derajat (180^0)

e = basic logaritma natural (2.718281828459...)

Persamaan 2.2 kemudian dihubungkan dengan persamaan Euler $e^{j\theta} = \cos(\theta) + j\sin(\theta)$, sehingga diperoleh persamaan :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left[\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] \quad (2.3)$$

Keterangan :

N = jumlah sampel input

$X(k)$ = urutan ke- k komponen output DFT ($X(0), X(1), \dots, X(N-1)$)

k = indeks output DFT dalam domain frekuensi ($0, 1, \dots, N-1$)

$x(n)$ = urutan ke- t sampel input ($x(0), x(1), \dots, x(N-1)$)

n = indeks sampel input dalam domain waktu ($0, 1, \dots, N-1$)

j = bilangan imajiner ($\sqrt{-1}$)

n = derajat (180^0)

2.4. Elemen Dekopling

Elemen dekopling dapat berupa resistor, induktor, dan kapasitor. Pada penelitian ini, elemen dekopling yang digunakan adalah induktor. Koordinasi proteksi arester kaskade memerlukan komponen dekopling agar dapat berjalan dengan baik. Elemen dekopling berfungsi sebagai pembagi tegangan antara arester GDT dan MOV. Perancangan induktor diawali dengan menghitung nilai induktansi sehingga dapat merancang desain induktor.

2.4.1 Penentuan Nilai Induktor

Nilai induktor ditentukan dengan menghitung terlebih dahulu nilai energi dekopling induktor. Persamaan energi dekopling yaitu :

$$E_{petir} = E_{GDT} + E_{MOV} + E_{dekopling} \quad (2.4)$$

$$\int_0^T v_{petir}(t) * i_{petir}(t) dt$$

$$= \int_0^T v_{GDT}(t) * i_{GDT}(t) dt + \int_0^T v_{MOV}(t) * i_{MOV}(t) dt + E_{dekopling}$$

$$E_{dekopling} = \int_0^T v_{petir}(t) * i_{petir}(t) dt - \int_0^T v_{GDT}(t) * i_{GDT}(t) dt$$

$$- \int_0^T v_{MOV}(t) * i_{MOV}(t) dt$$

Keterangan :

$E_{dekopling}$ = energi yang diserap oleh dekopling dalam joule.

E_{GDT} = energi yang diserap oleh arester GDT dalam joule.

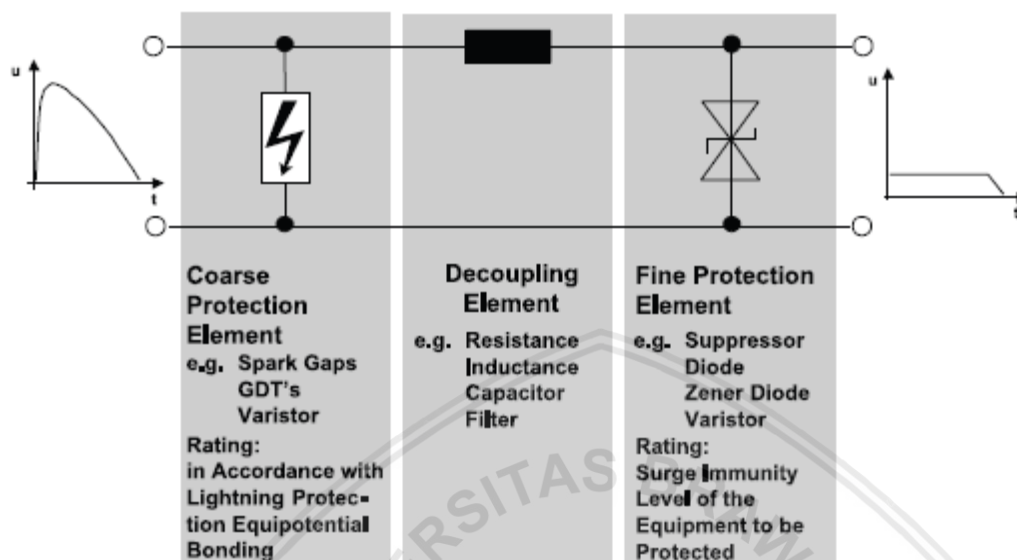
E_{MOV} = energi yang diserap oleh arester MOV dalam joule.

T = batas integrasi waktu total selama *fault current* mengalir di aresters.

2.5 Arestes kaskade GDT dan MOV

Kaskade perangkat proteksi surja adalah konsep dimana dua perangkat dihubungkan pada dua titik yang berbeda pada sistem elektrikal, yang dipisahkan induktansi antara dua titik. Perangkat primer didesain untuk membuang sebagian besar surja dan perangkat sekunder dekat dengan perangkat yang di proteksi atau berada di tahap pemotongan surja akhir. (Martzloff & Lai, n.d.). Arestes primer (GDT) cukup membuang energi surja, tetapi arestes GDT hanya memotong tegang surja di 1 kV. Arestes GDT memotong tegangan surja terlalu cepat karena sifatnya yang seperti switching sehingga ada hantaman energi balik. Arestes sekunder (MOV) berfungsi untuk melindungi peralatan dari sisa gangguan arestes primer. Arestes MOV memotong tegangan surja dengan baik pada bentuk tegangan mendatar serta mempunyai rating dari rendah sampai tinggi. Kelemahan dari arestes MOV adalah kapasitas penanganan energi yang rendah. Oleh karena itu, dirancang arestes GDT dan MOV secara kaskade. Rangkaian arestes kaskade ditunjukkan pada gambar 2.3 yaitu terdiri dari arestes primer (GDT) dan arestes sekunder (MOV) dengan perangkat dekopling. Proteksi primer dihubungkan dengan proteksi sekunder melalui sebuah perangkat dekopling. Perangkat dekopling diperlukan dalam arestes kaskade GDT dan MOV agar GDT beroperasi pertama kali dan menyerap sebagian besar energi input

sehingga MOV tidak mencapai tegangan, arus, energi, atau batas dayanya, dan akhirnya gagal. (Uman, 2008). Bagian awal dari tegangan transien melewati GDT dan impedansi dekoupling sehingga sedikit energi yang mencapai MOV sampai GDT konduksi.



Gambar 2.3. Arester kaskade dengan dekoupling

Sumber: (Hasse, 2008)

Perhitungan nilai induktansi dekoupling induktor diperlukan karena akan mempengaruhi konduksi dari GDT dan MOV. Nilai resistansi yang tinggi pada dekoupling menyebabkan GDT akan beroperasi terlebih dahulu dan menyerap sebagian besar energi gelombang transien. Sedangkan nilai resistansi yang terlalu rendah pada dekoupling akan menyebabkan MOV bekerja terlebih dahulu karena adanya drop tegangan di dekoupling sehingga GDT tidak konduksi dan MOV lebih banyak menyerap energi dan gagal.

2.6 Penelitian yang Relevan tentang Arester GDT dan MOV

No.	Judul Penelitian	Peneliti	Tahun	Permasalahan	Ruang Lingkup Permasalahan	Tujuan	Metode Penelitian	Model dan Metode Pemecahan Masalah	Hasil Penelitian	Kesimpulan
1	<i>Universal SPD coordination towards an effective surge protection of power supply networks</i> (Vladimir, 2010)	1. Murko Vladimir 2. Nermin Suljanović 3. Aljo Mujčić 4. Jurij F. Tasić	2010	Koordinasi SPD sangat dipengaruhi oleh komponen proteksi tegangan lebih dan topologi SPD.	Proteksi petir; <i>Surge Protection Device</i> (SPD); koordinasi SPD; <i>metal oxide varistor</i> .	Mendesain koordinasi SPD yang efektif untuk gelombang impuls 10/350 μ s dan 8/20 μ s.	Menggunakan impedansi dekoupling untuk koordinasi antar SPD.	<ul style="list-style-type: none"> • GDT diletakkan pada <i>stage</i> pertama karena dapat mengatasi energi petir yang besar sedangkan MOV diletakkan di <i>stage</i> kedua. • Koordinasi antara SPD <i>stage</i> pertama 	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinasi antara MOV dan MOV dengan dekoupling induktor berhasil melindungi sambaran kilat langsung dengan pengujian gelombang impuls 10/350 μs • Koordinasi antara GDT dan MOV yang 	<i>Universal SPD coordination towards an effective surge protection of power supply networks</i>

No.	<i>Judul Penelitian</i>	Peneliti	Tahun	Permasalahan	Ruang Lingkup Permasalahan	Tujuan	Metode Penelitian	Model dan Metode Pemecahan Masalah	Hasil Penelitian	Kesimpulan
								<p>dan kedua memerlukan dekopling induktor sebagai drop tegangan sehingga SPD <i>stage</i> kedua tidak bekerja terlebih dahulu.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beberapa pemodelan koordinasi SPD diuji dengan menggunakan 	<p>diseri sebagai proteksi pertama serta MOV sebagai proteksi kedua berhasil memproteksi sambaran kilat langsung dengan pengujian gelombang impuls 10/350 μs dan 8/20 μs</p> <ul style="list-style-type: none"> • Koordinasi antara MOV sebagai proteksi pertama, GDT dan MOV yang 	

No.	Judul Penelitian	Peneliti	Tahun	Permasalahan	Ruang Lingkup Permasalahan	Tujuan	Metode Penelitian	Model dan Metode Pemecahan Masalah	Hasil Penelitian	Kesimpulan
								gelombang impuls 10/350 μ s dan 8/20 μ s untuk memperoleh koordinasi SPD yang efektif.	diseri sebagai proteksi kedua diuji dengan gelombang impuls 10/350 μ s menunjukkan tingkat proteksi yang sangat rendah.	
2.	<i>Energy coordination to the terminal device with built-in varistor</i> (Jun & Hua,	1. Bao Jian Jun 2. Guo Zai Hua	2011	Koordinasi energi antar SPD diperlukan untuk keefektifan proteksi tegangan	Koordinasi energi; SPD; proteksi petir	Memperoleh koordinasi energi yang antara SPD kelas 1 dan S20K275	Menggunakan metode tes koordinasi energi antara SPD kelas 1 dan SPD tipe <i>voltage</i>	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan pengujian koordinasi energi 2 SPD tipe <i>voltage limiting</i> dengan elemen 	<ul style="list-style-type: none"> Hasil pengujian MOV (SPD tipe 1) dengan S20K275 dengan panjang dekopling 0.5 meter dan 10 meter 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinasi antara SPD tipe <i>voltage limiting</i> (MOV) dan <i>voltage limiting</i> (MOV), energi di kedua SPD tersebut relatif

No.	Judul Penelitian	Peneliti	Tahun	Permasalahan	Ruang Lingkup Permasalahan	Tujuan	Metode Penelitian	Model dan Metode Pemecahan Masalah	Hasil Penelitian	Kesimpulan
	2011)			lebih dan petir.		untuk proteksi tegangan lebih dan petir yang efektif.	<i>limiting</i> (varistor) dengan gelombang impuls 10/350 μ s.	dekopling antara 2 SPD tersebut menggunakan gelombang impuls 10/350 μ s. <ul style="list-style-type: none"> Melakukan pengujian koordinasi energi antara SPD tipe <i>voltage switching</i> dan SPD tipe <i>voltage limiting</i> 	menunjukkan arus yang melewati S20K275 sangat besar sehingga menyebabkan S20K275 <i>overload</i> . <ul style="list-style-type: none"> Hasil pengujian spark gap (SPD tipe 1) dengan S20K275 dengan panjang dekopling 0.5 meter dan 10 meter menunjukkan 	sama, arus gelombang akan mengalir melalui kedua SPD sepanjang durasi arus impuls. <ul style="list-style-type: none"> Koordinasi antara SPD tipe <i>voltage switching</i> (<i>spark gap</i>) dan <i>voltage limiting</i> (MOV), sebagian besar energi diserap oleh SPD tipe

No.	<i>Judul Penelitian</i>	Peneliti	Tahun	Permasalahan	Ruang Lingkup Permasalahan	Tujuan	Metode Penelitian	Model dan Metode Pemecahan Masalah	Hasil Penelitian	Kesimpulan
								<p>dengan elemen dekopling diantara 2 SPD tersebut menggunakan gelombang impuls 10/350 μs.</p> <ul style="list-style-type: none"> Melakukan kajian analitik dengan membandingkan kurva tegangan dan arus dari kedua 	<p>arus yang melewati S20K275 sangat kecil sehingga S20K275 tidak <i>overload</i>.</p>	<p><i>voltage switching</i> sehingga hanya sebagian kecil energi yang diserap oleh SPD tipe <i>voltage limiting</i> setelah SPD tipe <i>voltage switching spark over</i> sehingga <i>overload</i> dari oleh SPD tipe <i>voltage limiting</i> dapat dihindari.</p> <ul style="list-style-type: none"> Koordinasi

No.	Judul Penelitian	Peneliti	Tahun	Permasalahan	Ruang Lingkup Permasalahan	Tujuan	Metode Penelitian	Model dan Metode Pemecahan Masalah	Hasil Penelitian	Kesimpulan
								pengujian.		antara SPD tipe <i>voltage switching</i> (<i>spark gap</i>) dan <i>voltage limiting</i> (MOV) lebih memberikan keuntungan dalam hal koordinasi energi.
3	<i>Lightning Surge Response Improvement by Combination</i>	1. Hithozi Kijima 2. Kazuo Murakawa	2012	Kombinasi antara SPD Varistor dan GDT memiliki	<i>Surge Protection Device</i> , Varistor, GDT, gelombang petir, tegangan lebih, arus lebih	Perbaikan respon gelombang petir dari kombinasi varistor	GDT sebanyak tiga atau lebih terhubung secara seri	• GDT dan MOV dibuat dalam beberapa kombinasi. Antara lain	• Hasil pengujian kombinasi 3 buah GDT yang terhubung seri dan 2 buah varistor yang	Menghasilkan metodologi baru untuk proteksi <i>power system</i> terhadap tegangan lebih

No.	<i>Judul Penelitian</i>	Peneliti	Tahun	Permasalahan	Ruang Lingkup Permasalahan	Tujuan	Metode Penelitian	Model dan Metode Pemecahan Masalah	Hasil Penelitian	Kesimpulan
	<i>ns of Varistors and Gas Discharge Tubes(Kijima & Murakawa, 2012)</i>			masalah baik terhubung secara seri maupun paralel		dan GDT untuk memperbaiki masalah tersebut.	dan varistor dua atau lebih terhubung secara paralel	GDT dan MOV terhubung secara seri, secara paralel, GDT sebanyak tiga atau lebih terhubung secara seri dan varistor dua tau lebih terhubung secara paralel. • Sampel – sampel	terhubung paralel waktu respon berkurang sebesar 43% dan tegangan operasi berkurang sebesar 51% dibandingkan hanya menggunakan 3 buah GDT secara seri. • Hasil pengujian kombinasi 5 buah GDT yang terhubung seri	dan arus lebih yang disebabkan oleh gelombang petir. Metode itu menggunakan GDT sebanyak tiga atau lebih terhubung secara seri dan varistor dua atau lebih terhubung secara paralel pada sistem proteksi.

No.	<i>Judul Penelitian</i>	Peneliti	Tahun	Permasalahan	Ruang Lingkup Permasalahan	Tujuan	Metode Penelitian	Model dan Metode Pemecahan Masalah	Hasil Penelitian	Kesimpulan
								kombinasi GDT dan MOV diuji dan hasil pengujian dibandingkan dengan regulasi IEC tentang SPD.	dan 4 buah varistor yang terhubung paralel waktu respon berkurang sebesar 45% dan tegangan operasi berkurang sebesar 60% dibandingkan hanya menggunakan 5 buah GDT secara seri.	

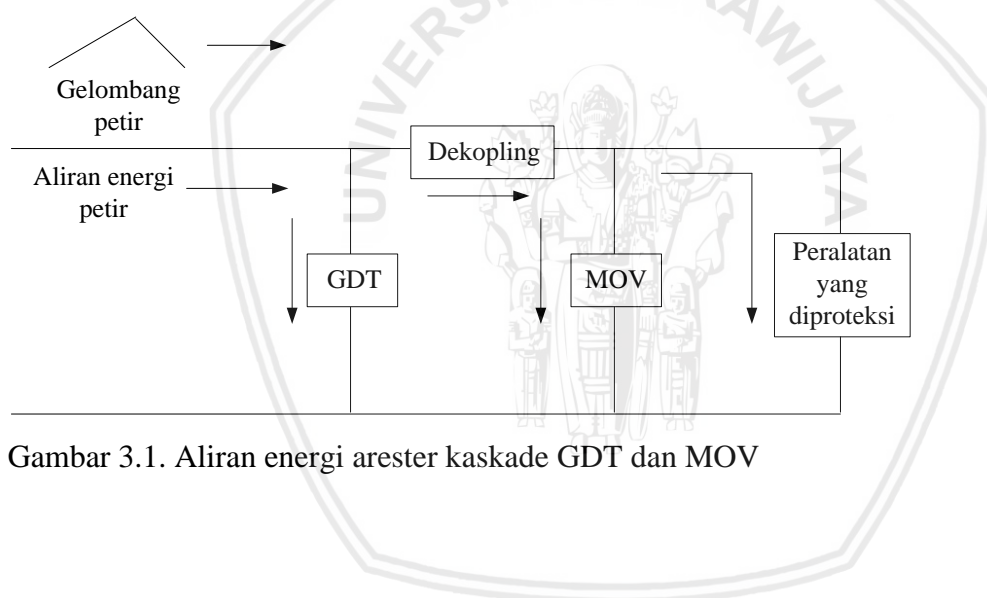


[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN

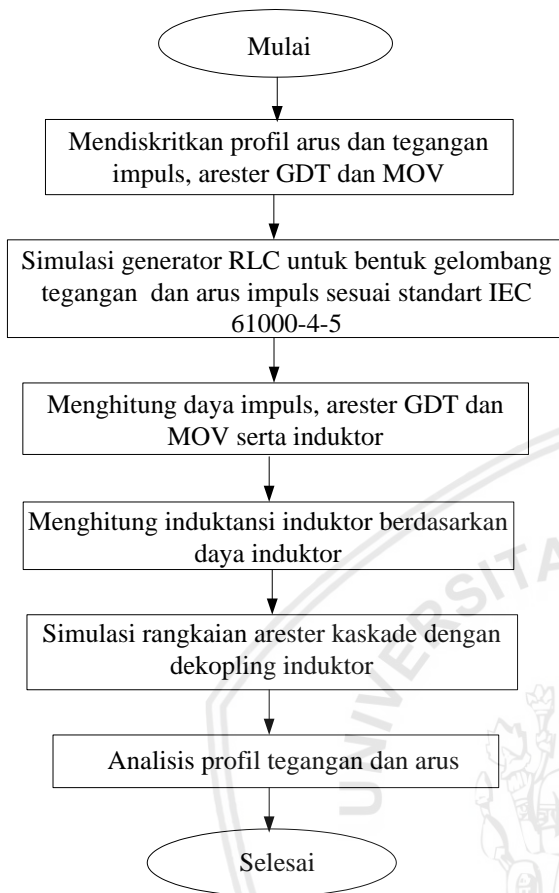
3.1. Kerangka Konsep

Pada penelitian tentang perancangan arester kaskade berdasarkan distribusi energi surja, kegiatan pertama yang dilakukan adalah membuat simulasi generator impuls RLC. Kegiatan kedua membuat simulasi arester GDT dan MOV. Kegiatan ketiga menghitung daya dan energi impuls, menghitung daya dan energi arester GDT, menghitung daya dan energi arester MOV serta menghitung daya dan energi dekopling induktor. Kegiatan keempat menghitung induktansi dekopling induktor menggunakan metode *Discreate Fourier Transform* (DFT) untuk masing – masing tegangan impuls. Kegiatan kelima adalah membuat simulasi arester kaskade dengan dekopling induktor. Gambar rangkaian arester kaskade dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Aliran energi arester kaskade GDT dan MOV

Secara lebih sederhana tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. Tahapan alur penelitian

3.2. Hipotesis

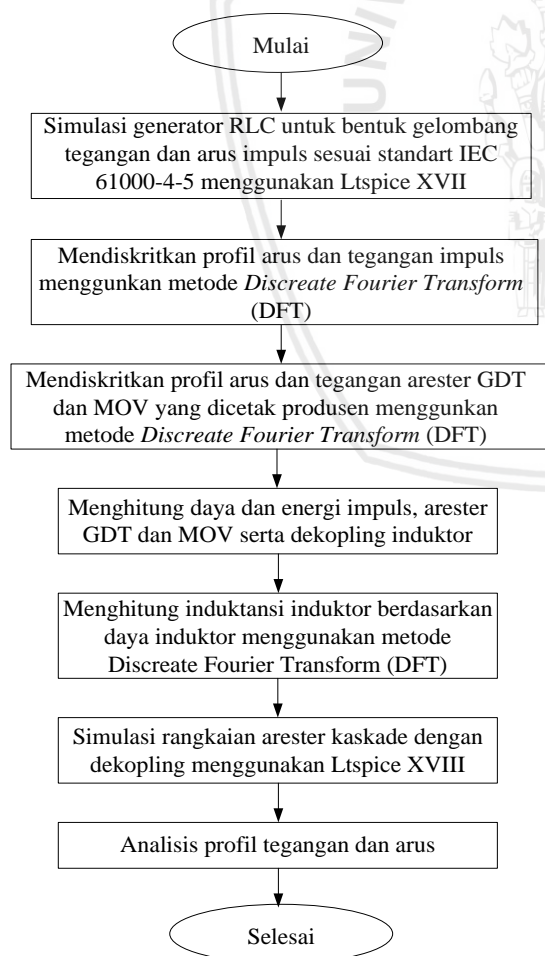
1. Profil tegangan dan arus impuls, arester GDT dan MOV digunakan sebagai analisis matematik dalam perancangan dekoupling.
2. Dapat dirancang arester kaskade berdasarkan distribusi energi surja.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Tahapan Penelitian

Tahap pertama yang dilakukan dalam penelitian ini, yaitu adalah membuat simulasi generator impuls RLC. Bentuk tegangan ($1.2/50 \mu\text{s}$) ketika open circuit dan arus impuls ($8/20 \mu\text{s}$) ketika short circuit mengikuti standar IEC 61000-4-5. Tahap kedua mendiskritkan profil tegangan dan arus impuls output dari generator RLC. Tahap ketiga mendiskritkan profil tegangan arus arester GDT dan MOV keluaran produsen. Tahap keempat menghitung daya dan energi impuls, arester GDT, arester MOV dan dekopling induktor. Tahap keempat menghitung induktansi dekopling induktor menggunakan metode *Discrete Fourier Transform* (DFT) untuk masing – masing tegangan impuls. Tahap kelima adalah membuat simulasi arester kaskade dengan dekopling induktor. Tahap keenam melakukan analisis profil tegangan dan arus. Berikut ini, diagram alir metodologi penelitian :

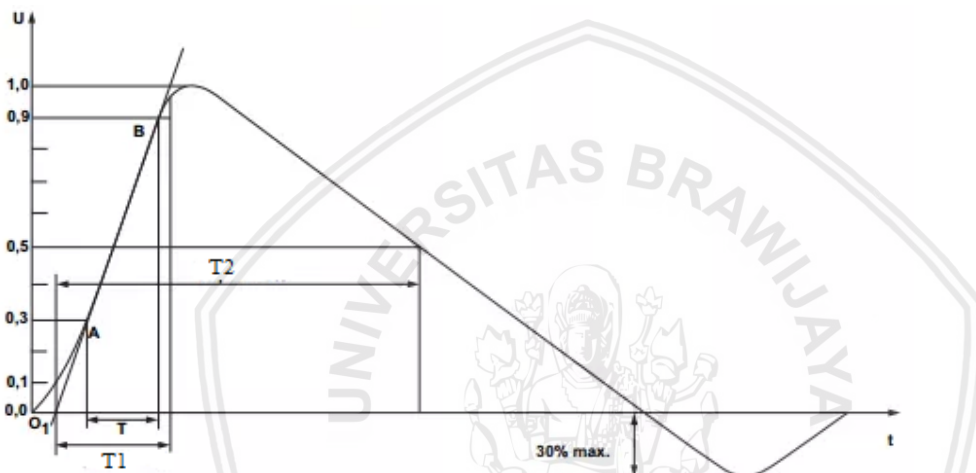


Gambar 4.1 Diagram alir metodologi penelitian

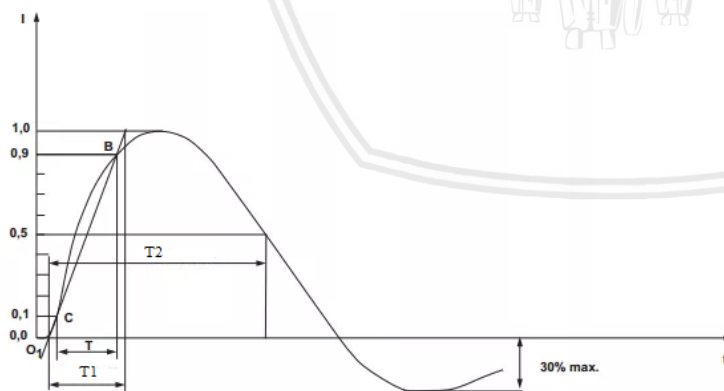
Pada penelitian ini terdapat beberapa tahapan yang akan dilakukan yang terdapat pada gambar 4.1. Berikut ini, penjelasan masing – masing tahapan :

4.2 Simulasi Generator Impuls RLC

Simulasi generator impuls RLC menggunakan program *Ltspice XVII*. Pembangkit kombinasi mengikuti standar yang ditetapkan IEC (International Electrotechnical Commission). 61000-4-5. Standar ini menetapkan bentuk gelombang tegangan impuls 1.2/50 μs pada saat open circuit dan bentuk gelombang arus impuls 8/20 μs pada saat short circuit. Gambar 4.3 merupakan gambar bentuk gelombang tegangan impuls 1.2/50 μs dan gelombang arus impuls 8/20 μs .



(a)



(b)

Gambar 4.2 Bentuk Gelombang Impuls: (a) Tegangan Impuls 1.2/50 μs , (b) Arus Impuls 8/20 μs

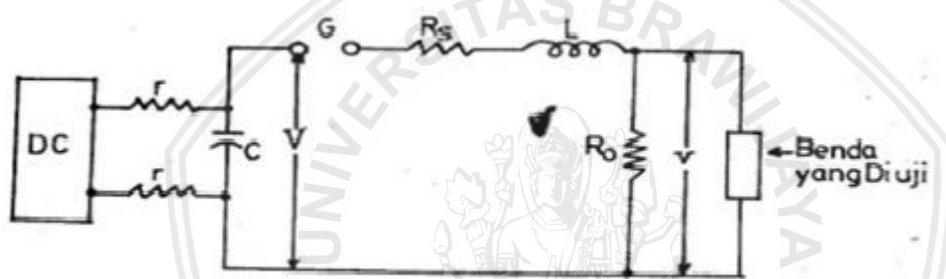
Sumber: (IEC, 2005)

Gambar 4.2 merupakan bentuk gelombang impuls tegangan dan arus. Gelombang impuls tegangan memiliki *rise time* (T_1) 1.2 μs dan *tail time* (T_2) 50 μs . Gelombang

impuls arus memiliki rise time (T_1) $8 \mu\text{s}$ dan tail time (T_2) $20 \mu\text{s}$. Rise time adalah waktu yang terjadi mulai dari titik 0 nominal sampai tegangan puncak, sedangkan sisanya adalah tail time.

4.2.1 Generator Impuls RLC

Gambar 4.3 menunjukkan generator impuls RLC. Sumber DC mengisi kapasitor C. Ketika tegangan V mencapai nilai tertentu, terjadi percikan api (*sparkover*) di sela api G. Muatan pada kapasitor C dilepaskan (discharge) melewati R_s , L, dan R_0 , sehingga terjadi tegangan impuls. R_s bertindak sebagai resistor peredam (damping resistor) untuk menghindari osilasi frekuensi tinggi. Tahanan pelepas muatan (discharge resistor) R_0 dipakai untuk mengatur bentuk ekor gelombang, sedangkan L bersama R_0 mengatur muka gelombang. (Munandar, 2001)



Gambar 4.3 Generator impuls RLC

Sumber: (Munandar, 2001)

Merancang rangkaian generator impuls RLC, terlebih dahulu menentukan nilai komponen R, L, dan C. Nilai kapasitansi kapasitor C dicari dengan menggunakan persamaan:

$$C = 2W \left(\frac{\eta}{V_{maks}} \right)^2 \quad (3.11)$$

Keterangan :

W = energi yang tersimpan pada kapasitor pemuat

η = efisiensi tegangan generator

V_{maks} = tegangan puncak

Nilai L dicari dengan persamaan :

$$L = \frac{1}{C(\gamma^2 - \delta^2)} \quad (3.12)$$

Nilai R dicari dengan persamaan :

$$R = \frac{2\gamma}{C(\gamma^2 - \delta^2)} \quad (3.13)$$

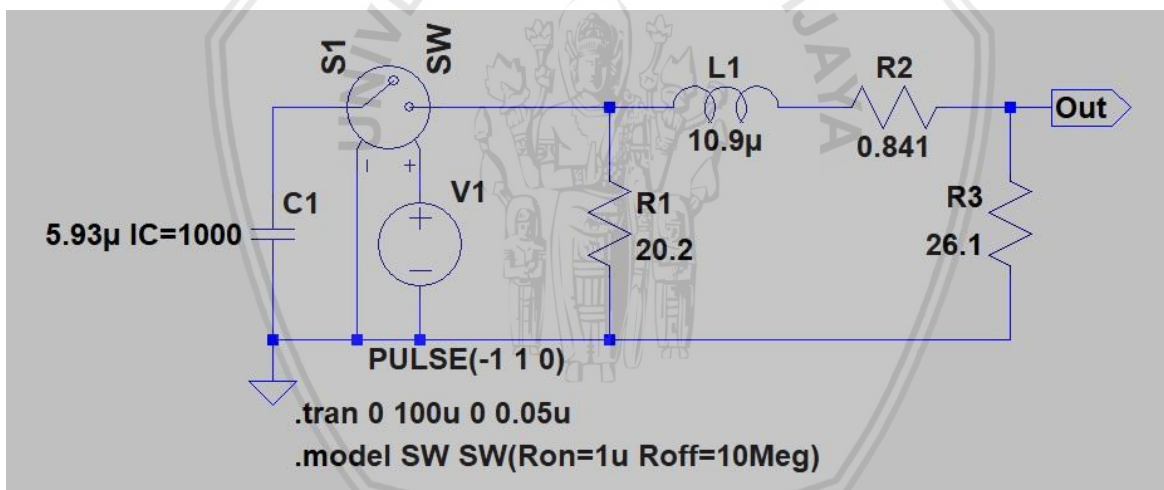
Nilai R_0 dicari dengan persamaan :

$$R_0 = \frac{\eta R \delta}{\gamma(e^{\frac{1}{1-b}} \ln b - e^{\frac{b}{1-b}} \ln b)} \quad (3.14)$$

Nilai R_s dicari dengan persamaan :

$$R_s = R - R_0 \quad (3.15)$$

Gambar 4.4 merupakan rangkaian generator impuls RLC dalam simulasi *Ltspice XVII*. Berdasarkan blok diagram generator impuls RLC, kapasitor C1 telah terisi penguatan tegangan IC (*initial condition*) 1000V. Nilai kapasitansi kapasitor C1 diperoleh dengan persamaan 3.11. Nilai L1 diperoleh dengan persamaan 3.12, nilai R2 diperoleh dari persamaan 3.15 dan nilai R3 diperoleh dari persamaan 3.14. Switch SW bekerja berdasarkan triger tegangan pulse V1. Ketika switch SW bekerja, muatan pada kapasitor C dilepaskan (*discharge*) melewati resistor dan induktor sehingga terjadi tegangan impuls.



Gambar 4.4 Rangkaian generator impuls di *Ltspice XVII*

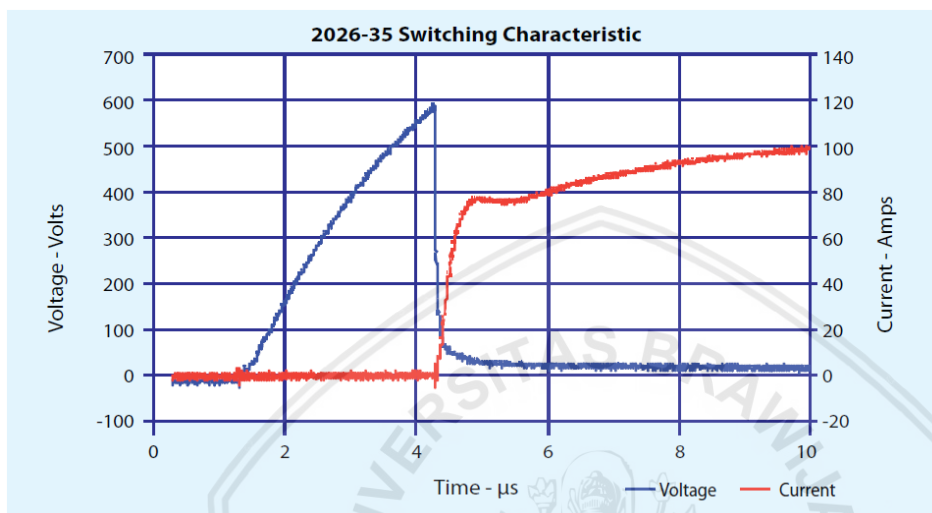
4.3 Perhitungan daya dan energi

4.3.1 Daya dan energi impuls

Hasil simulasi genertor impuls pada gambar 4.4 akan menghasilkan profil tegangan dan arus. Profil tegangan dan arus didiskritkan setiap $1 \mu\text{s}$ mulai dari $0 \mu\text{s}$ sampai $100 \mu\text{s}$, sehingga akan dihasilakn data diskrit sebanyak 101. Nilai – nilai tegangan dan arus akan dikalikan sehingga akan menghasilkan daya impuls. Energi diperoleh dari integral daya dikalikan waktu.

4.3.2 Daya dan energi arester GDT

Gambar 4.5 merupakan gambar karakteristik switching dari arester *Gas Discharge Tube* (GDT). Gelombang tegangan dan arus didiskritkan untuk memperoleh tegangan dan arus tiap 1 μs menggunakan metode Discrete Fourier Transform (DFT) menggunakan persamaan 2.2.



Gambar 4.5 Karakteristik *switching* dari arester GDT

Sumber: (Solutions, n.d.)

Nilai – nilai tegangan dan arus akan dikalikan sehingga akan menghasilkan daya impuls. Energi diperoleh dari integral daya dikalikan waktu. Persamaan energi arester GDT sebagai berikut:

$$E_{GDT} = \int_0^T v(t) * i(t) dt \quad (4.1)$$

Keterangan :

E_{GDT} = energi yang diserap oleh arester GDT dalam joule.

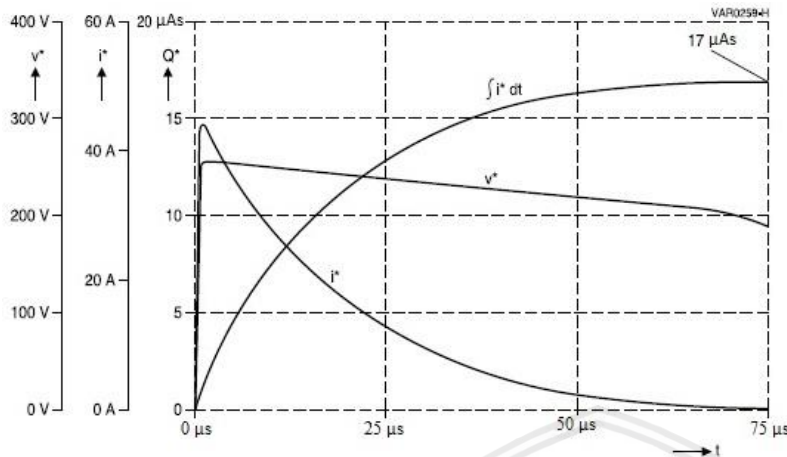
T = batas integrasi waktu total selama *fault current* mengalir di arester dalam *second*.

Parameter – parameter yang terlibat dalam perhitungan energi arester GDT yaitu tegangan terhadap waktu $v(t)$, arus terhadap waktu $i(t)$, dan waktu total selama *fault current* mengalir di arester GDT (T).

4.2.3 Daya dan energi Arestor MOV

Gambar 4.3 merupakan gambar karakteristik switching dari arester *Metal Oxide Varistor* (MOV). Gelombang tegangan dan arus didiskritkan untuk memperoleh tegangan

dan arus tiap 1 μs menggunakan metode Discrete Fourier Transform (DFT) menggunakan persamaan 2.2.



Gambar 4.6 karakteristik *switching* dari arester MOV

Sumber: (Ag, 2011)

Nilai – nilai tegangan dan arus akan dikalikan sehingga akan menghasilkan daya impuls. Energi diperoleh dari integral daya dikalikan waktu. Persamaan energi arester MOV sebagai berikut:

$$E_{MOV} = \int_0^T v(t) * i(t) dt \quad (4.2)$$

Keterangan :

E_{MOV} = energi yang diserap oleh arester MOV dalam joule.

T = batas integrasi waktu total selama *fault current* mengalir di arester dalam *second*.

Parameter – parameter yang terlibat dalam perhitungan energi arester MOV yaitu tegangan terhadap waktu $v(t)$, arus terhadap waktu $i(t)$, dan waktu total selama *fault current* mengalir di arester MOV (T).

4.2.4 Daya dan energi dekoupling induktor

Dekoupling induktor berfungsi sebagai pembagi energi antara arester *Gas Discharge Tube* (GDT) dan *Metal Oxide Varistor* (MOV). Nilai induktansi dekoupling harus tepat karena jika terlalu kecil maka arester MOV tidak dapat bekerja. Nilai induktansi yang terlalu besar juga dapat menyebabkan kerusakan pada arester MOV. Persamaan energi dekoupling yaitu :

$$E_{petir} = E_{GDT} + E_{MOV} + E_{dekopling} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^T v_{surja}(t) * i_{surja}(t) dt \\ &= \int_0^T v_{GDT}(t) * i_{GDT}(t) dt + \int_0^T v_{MOV}(t) * i_{MOV}(t) dt + E_{dekopling} \\ E_{dekopling} &= \int_0^T v_{petir}(t) * i_{petir}(t) dt - \int_0^T v_{GDT}(t) * i_{GDT}(t) dt - \int_0^T v_{MOV}(t) * i_{MOV}(t) dt \end{aligned}$$

Parameter – parameter yang terlibat dalam perhitungan energi dekopling induktor yaitu energi surja, energi arester GDT dan energi arester MOV. Energi surja diperoleh dari integral tegangan surja terhadap waktu $v_{surja}(t)$ dikalikan arus surja terhadap waktu $i_{surja}(t)$. Energi arester GDT diperoleh dari integral tegangan GDT terhadap waktu $v_{GDT}(t)$ dikalikan arus GDT terhadap waktu $i_{GDT}(t)$. Energi arester MOV diperoleh dari integral tegangan MOV terhadap waktu $v_{MOV}(t)$ dikalikan arus MOV terhadap waktu $i_{MOV}(t)$. Nilai energi dekopling diperoleh dari energi surja dikurangi energi yang diserap arester GDT dikurangi energi yang diserap arester MOV.

4.4 Perhitungan induktansi dekopling induktor

Daya induktor akan memperoleh tegangan dan arus induktor. Impedansi induktor (Z) diperoleh dari tegangan dibagi arus. Nilai – nilai impedansi induktor dalam domain waktu diubah ke domain frekuensi dengan metode *Discrete Fourier Transform* (DFT) pada persamaan 2.2. Setelah impedansi dekopling dalam domain frekuensi diperoleh, maka dapat menghitung induktansi dekopling induktor dengan persamaan berikut:

$$L = \frac{Z}{2\pi f} \quad (4.4)$$

Keterangan :

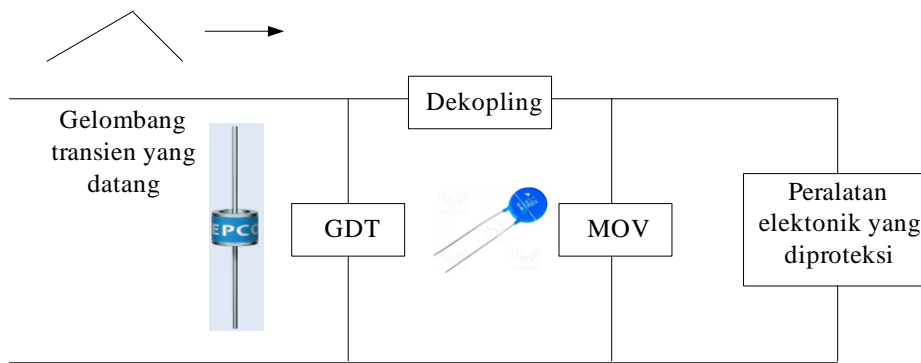
L = induktansi

Z = impedansi (Ω)

$\pi = 3.14$

f = frekuensi

4.5 Simulasi Arester Kaskade dengan Dekopling Induktor



Gambar 4.7 Arester kaskade GDT dan MOV

Gambar 4.7 merupakan gambar rangkaian arester kaskade GDT dan MOV dengan dekopling induktor. Simulasi dilakukan untuk memperoleh profil tegangan dan arus dari arester kaskade.

4.6 Spesikasi Arester Kaskade

Desain arester kaskade menggunakan arester *Gas Discharge Tube* (GDT) merk epcos tipe A71-H10X dan arester *Metal Oxide Varistor* (MOV) merk SVC tipe 471D-14A. Berikut ini, spesifikasi dari arester GDT dan MOV.

Spesifikasi arester GDT :

1. *DC spark – over voltage* : 1000 V dengan *tolerance* : $\pm 15\%$
2. *Discharge current capacity* : 10 kA

Arester *Gas Discharge Tube* (GDT) merk epcos tipe A71-H10X DC memiliki nilai *spark – over voltage* 1000 V. Ketika ada tegangan DC *spark – over* 1000 V maka GDT akan konduksi dengan toleransi $\pm 15\%$ yaitu antara 850 V – 1150 V. *Discharge current capacity* merupakan kemampuan GDT dapat menahan berulang kali (minimum 10 impuls) dengan arus puncak 10kA oleh arus impuls 8/20 μs tanpa mengalami kerusakan atau perubahan spesifikasi dasarnya.

Spesifikasi arester MOV :

1. $V_{acm} = 120 \text{ V}$
2. $V_{dcm} = 107 \text{ V}$
3. $I_{tm} = 125 \text{ A}$
4. $V_c = 120$

Spesifikasi arester MOV merk littelfuse tipe V85MLA1210 memiliki V_{acm} 120 V yaitu tegangan RMS sinusoidal kontinu maksimum pada frekuensi 50/60 Hz. Tegangan

DC kontinu maksimum yang dapat diterapkan (V_{dcm}) yaitu 107 V. Arus puncak maksimum melalui MOV dengan perubahan tegangan MOV sebesar $\pm 10\%$ dengan standart arus impuls 8/20 μs yang diterapkan dua kali pada interval 5 menit. Maksimum pemotongan tegangan (V_c) 120.

Diharapkan arester kaskade GDT dan MOV dapat memotong tegangan impuls mulai 1kV dengan arus puncak hingga 10 kA sehingga dapat menangani energi petir yang besar.



BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Distribusi Energi

Impedansi dekoupling induktor diperoleh dari distribusi energi petir, energi arester GDT dan energi arester MOV. Energi dekoupling diperoleh dari persamaan 4.11, sehingga diperoleh penjabaran sebagai berikut :

$$E_{impuls} = E_{GDT \text{ ke ground}} + E_{impuls \text{ yang dilepas}} + E_{dekoupling} + E_{MOV} + E_{beban} \quad (5.1)$$

Energi impuls merupakan penjumlahan dari energi arester GDT yang dibuang ke *ground* (energi yang terserap oleh GDT), energi impuls yang dilepas ke dekoupling, energi dekoupling, energi arester MOV dan energi yang dilepas ke beban. Memperoleh energi impuls yang dilepas ke dekoupling dengan menjumlahkan energi dekoupling, energi arester MOV dan energi yang dilepas ke beban. Jika dianggap energi yang menuju beban nol (terserap semua di arester MOV) maka energi dekoupling adalah :

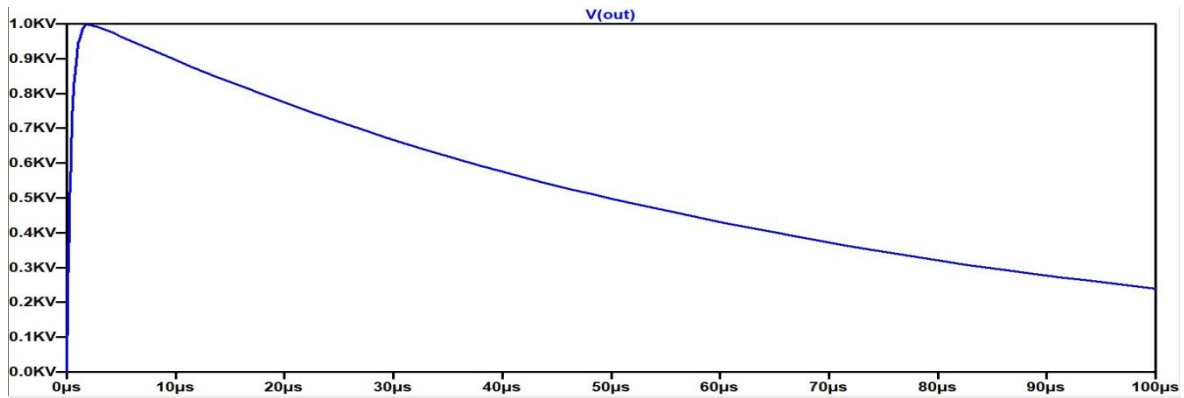
$$\begin{aligned} E_{impuls \text{ yang dilepas ke dekoupling}} &= E_{dekoupling} + E_{MOV} + E_{beban} \\ E_{impuls \text{ yang dilepas ke dekoupling}} &= E_{dekoupling} + E_{MOV} \\ E_{dekoupling} &= E_{impuls \text{ yang dilepas ke dekoupling}} - E_{MOV} \end{aligned} \quad (5.2)$$

5.1.1. Daya Impuls

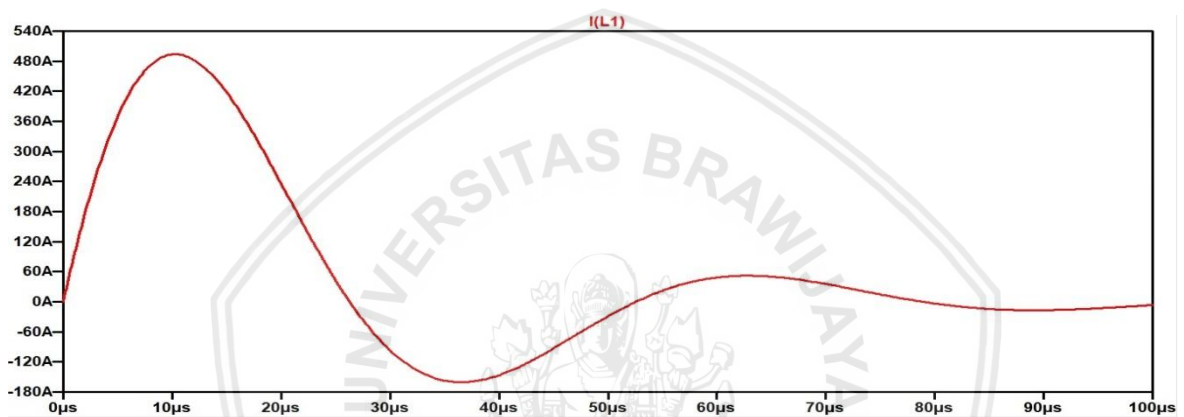
Menghitung induktansi dekoupling memerlukan daya impuls. Sehingga memerlukan profil tegangan dan arus impuls. Profil tegangan dan arus impuls yang digunakan dalam perhitungan energi impuls menggunakan tiga profil. Pertama profil tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV dan profil arus impuls (8/20 μ s) 0.5 kA. Kedua profil tegangan dengan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV dan profil arus impuls (8/20 μ s) 1 kA. Ketiga profil tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV dan profil arus impuls (8/20 μ s) 1.5 kA.

A. Daya tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV

Profil tegangan pada gambar 5.1 dan profil arus pada gambar 5.2 didiskritkan setiap 1 μ s, mulai dari waktu 0 μ s sampai 100 μ s, sehingga akan diperoleh sebanyak 101 data diskrit tegangan dan arus.

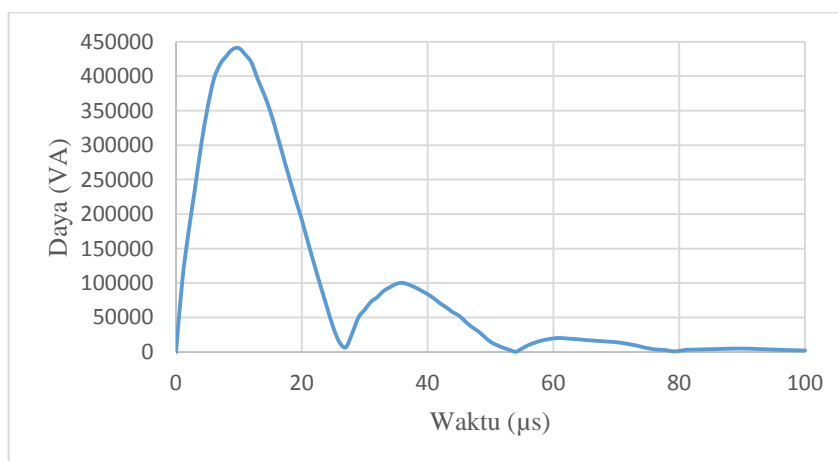


Gambar 5.1 Profil tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV



Gambar 5.2 Profil arus impuls (8/20 μ s) 0.5 kA

Profil tegangan dan arus yang sudah didiskritkan dihitung dengan persamaan *Discrete Fourier Transform* (DFT) pada persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh data diskrit tegangan dan arus pada lampiran 1. Perkalian tegangan dan arus diskrit akan menghasilkan profil daya pada gambar 5.3.

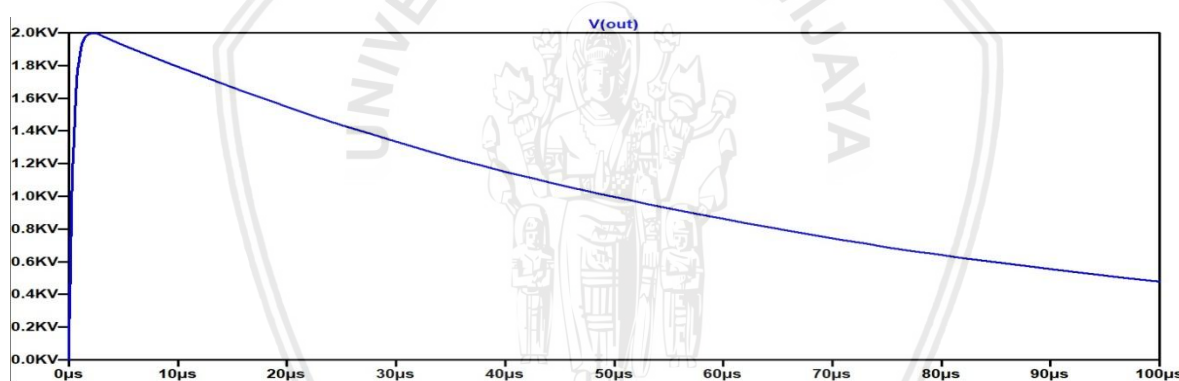


Gambar 5.3 Profil daya impuls 1 kV

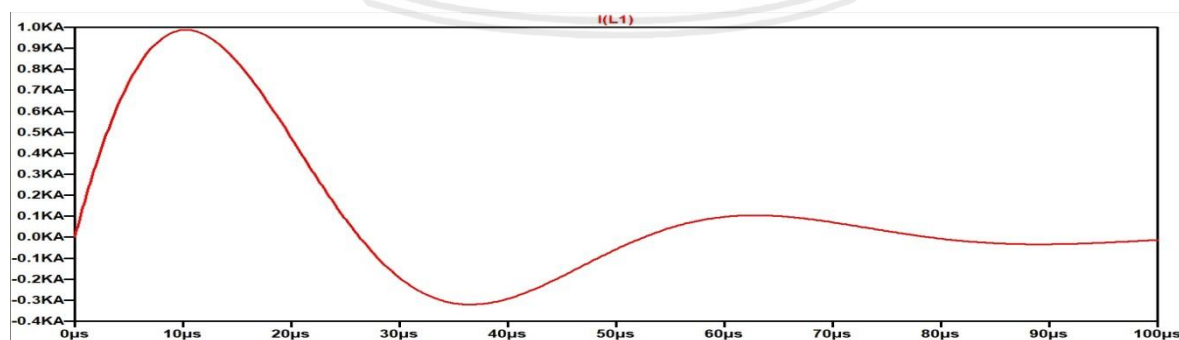
Gambar 5.3 merupakan daya impuls dengan daya puncak 440550 VA. Rangkaian pada gambar 4.7 untuk memperoleh tegangan impuls open circuit 1.2/50 μ s. Berdasarkan rangkain generator impuls RLC pada gambar 4.7, kapasitor C1 telah terisi penguatan tegangan IC (*initial condition*) 1060V (nilai yang ditetapkan). Ketika switch SW bekerja, muatan pada kapasitor C dilepaskan (*discharge*) melewati resistor dan induktor sehingga terjadi tegangan impuls dengan tegangan puncak 1 kV. Untuk memperoleh arus impuls pada saat short circuit dengan cara mengganti R3 menjadi 1 μ (nilai yang ditetapkan) sehingga akan diperoleh arus impuls 8/20 μ s dengan arus puncak 500 A. Energi tegangan impuls 1 kV dengan arus impuls 0.5 kV 2.98×10^{-10} joule.

B. Daya tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV

Profil tegangan pada gambar 5.4 dan profil arus pada gambar 5.5 didiskritkan setiap 1 μ s, mulai dari waktu 0 μ s sampai 100 μ s, sehingga akan diperoleh sebanyak 101 data diskrit tegangan dan arus.



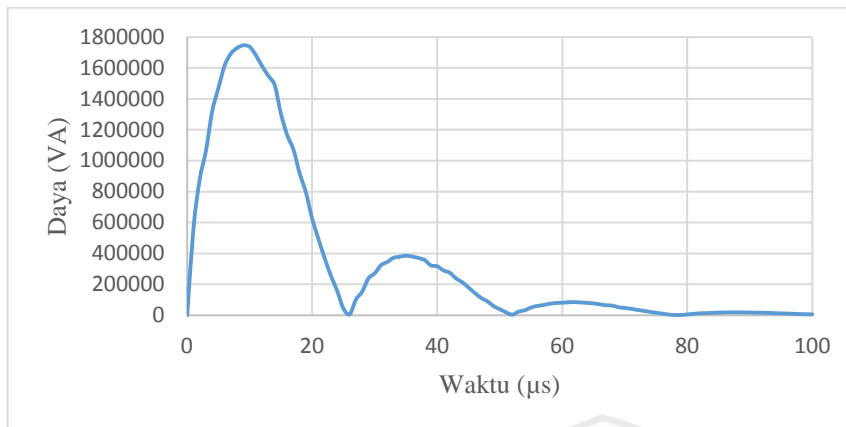
Gambar 5.4 Profil tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV



Gambar 5.5 Profil arus impuls (8/20 μ s) 1 kA

Profil tegangan dan arus yang sudah didiskritkan dihitung dengan persamaan *Discrete Fourier Transform* (DFT) pada persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh data

diskrit tegangan dan arus pada lampiran 2. Perkalian tegangan dan arus diskrit akan menghasilkan profil daya pada gambar 5.6.

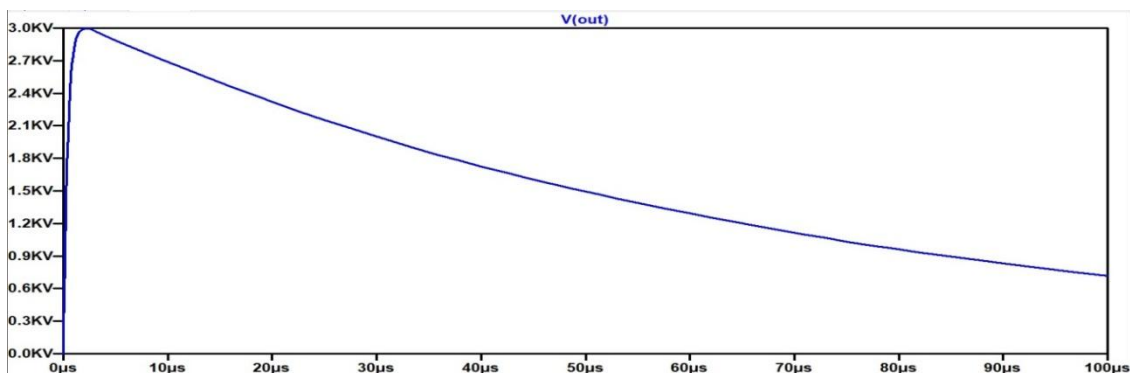


Gambar 5.6 Profil daya impuls 2 kV

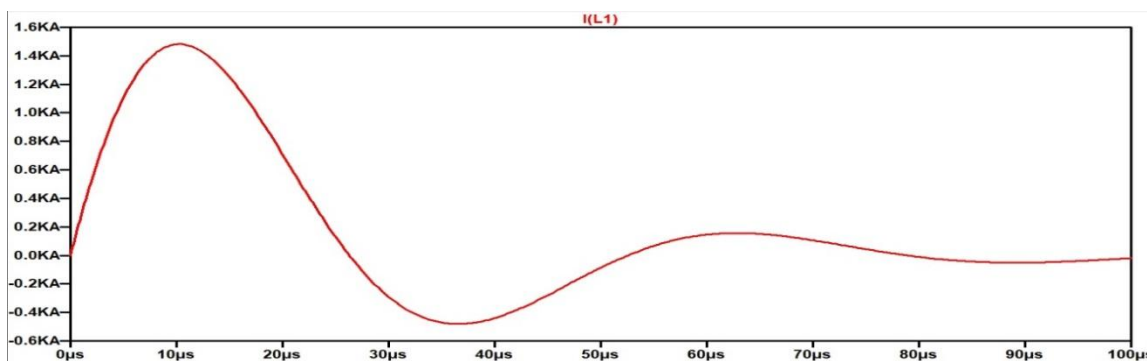
Gambar 5.6 merupakan daya impuls dengan daya puncak 1746000 VA. Rangkaian pada gambar 4.7 untuk memperoleh tegangan impuls open circuit 1.2/50 μs. Berdasarkan rangkain generator impuls RLC pada gambar 4.7, kapasitor C1 telah terisi penguatan tegangan IC (*initial condition*) 2100 V. Ketika switch SW bekerja, muatan pada kapasitor C dilepaskan (*discharge*) melewati resistor dan induktor sehingga terjadi tegangan impuls dengan tegangan puncak V_p 2 kV. Untuk memperoleh arus impuls pada saat short circuit dengan cara mengganti R3 menjadi 1μ sehingga akan diperoleh arus impuls 8/20 μs dengan arus puncak I_p 1 kA.. Energi tegangan impuls 2 kV dengan arus impuls 1 kA 1.16×10^{-9} joule.

C. Daya tegangan impuls (1.2/50 μs) 3 kV

Profil tegangan pada gambar 5.7 dan profil arus pada gambar 5.8 didiskritkan setiap 1 μs, mulai dari waktu 0 μs sampai 100 μs, sehingga akan diperoleh sebanyak 101 data diskrit tegangan dan arus.

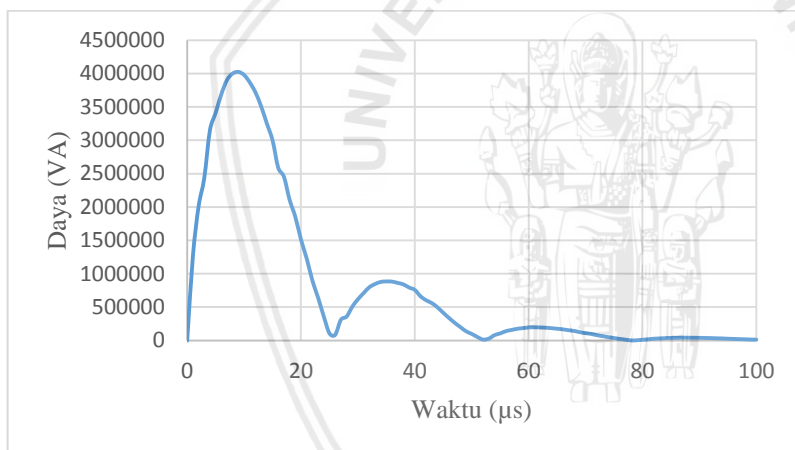


Gambar 5.7 Profil tegangan impuls (1.2/50 μs) 3 kV



Gambar 5.8 Profil arus impuls (8/20 μ s) 1.5 kA

Profil tegangan dan arus yang sudah didiskritkan dihitung dengan persamaan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh data diskrit tegangan dan arus pada lampiran 3. Perkalian tegangan dan arus diskrit akan menghasilkan profil daya pada gambar 5.9.

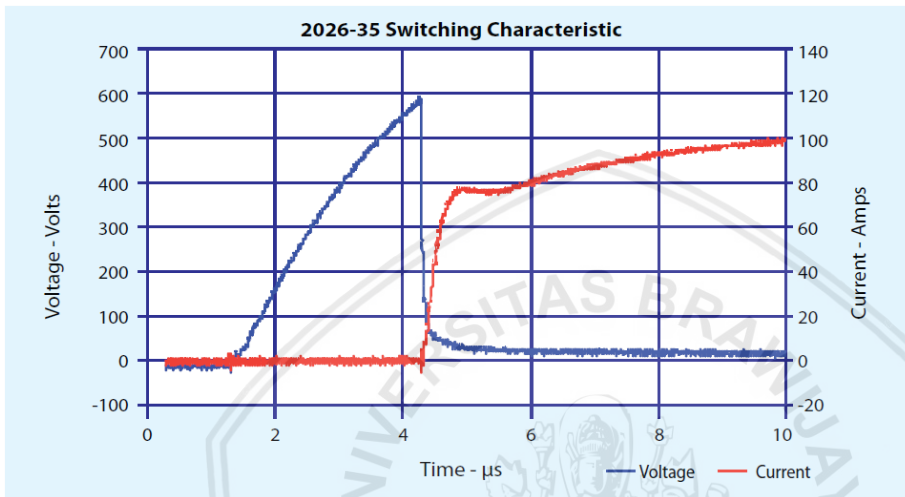


Gambar 5.9 Profil daya impuls 3 kV

Gambar 5.9 merupakan daya impuls dengan daya puncak 4025600 VA Rangkaian pada gambar 4.7 untuk memperoleh tegangan impuls open circuit 1.2/50 μ s. Berdasarkan rangkain generator impuls RLC pada gambar 4.7, kapasitor C1 telah terisi penguatan tegangan IC (*initial condition*) 3150 V. Ketika switch SW bekerja, muatan pada kapasitor C dilepaskan (discharge) melewati resistor dan induktor sehingga terjadi tegangan impuls dengan tegangan puncak V_p 3 kV. Untuk memperoleh arus impuls pada saat short circuit dengan cara mengganti R3 menjadi 1μ sehingga akan diperoleh arus impuls 8/20 μ s dengan arus puncak I_p 1.5 kA. Energi tegangan impuls 3 kV dengan arus impuls 1.5 kA adalah 2.69×10^{-9} joule.

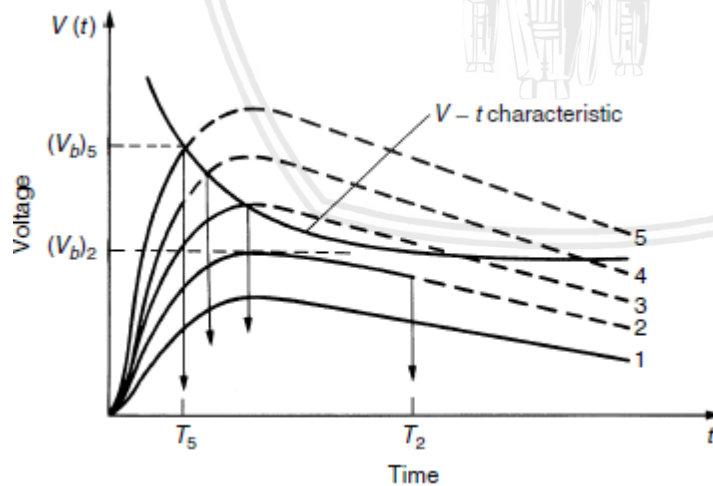
5.1.2. Daya Arestor GDT

Profil tegangan dan arus arester GDT pada gambar 5.10 merupakan profil untuk tegangan impuls 1 kV. Sehingga diperlukan profil tegangan dan arus untuk tegangan 2 kV dan 3 kV. Profil tegangan dan arus arester GDT diperoleh dari profil tegangan impuls 1 kV, 2 kV, dan 3 kV. Gambar 5.11 merupakan kurva $v - t$ impuls. Tegangan breakdown arester GDT untuk masing – masing impuls akan berbeda tergantung dari kecuraman gelombang impuls.



Gambar 5.10 Profil tegangan dan arus GDT untuk tegangan impuls 1 kV

Sumber: (Solutions, n.d.)



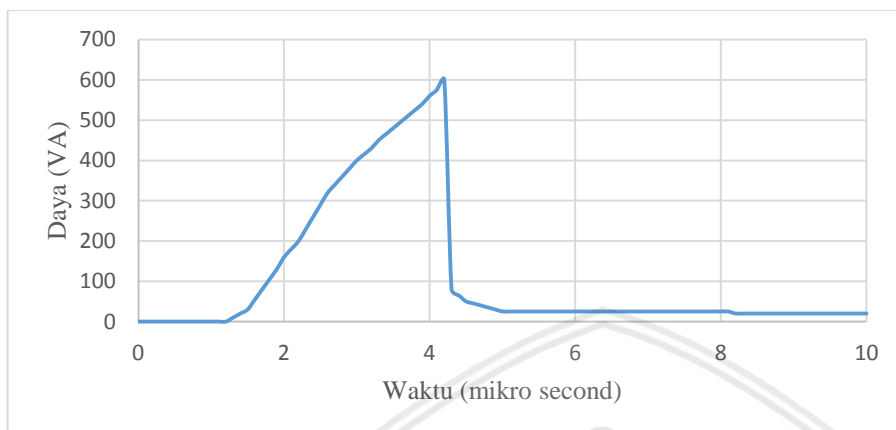
Gambar 5.11 Kurva $v - t$ impuls

Sumber: (Kuffel et al., 2000)

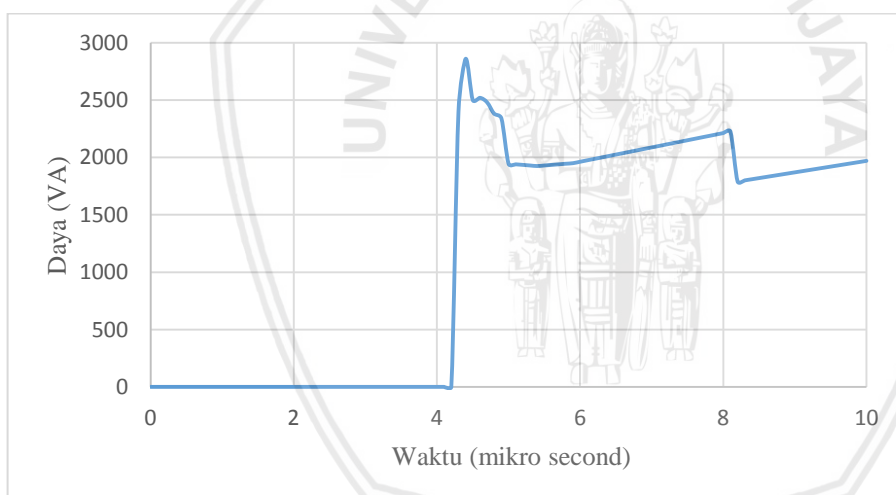
A. Daya arester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 1 kV

Profil tegangan dan arus didiskritkan pada gambar 5.10 didiskritkan setiap 0.1 μs , mulai dari waktu 4.3 μs sampai 10 μs , sehingga akan diperoleh sebanyak 101 data diskrit

tegangan dan arus. Profil tegangan dan arus yang sudah didiskritkan dihitung dengan persamaan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh data diskrit tegangan dan arus pada lampiran 4. Perkalian tegangan dan arus diskrit akan menghasilkan profil daya pada gambar 5.12 dan 5.13.



Gambar 5.12 Profil daya impuls yang dilepas ke dekoupling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV

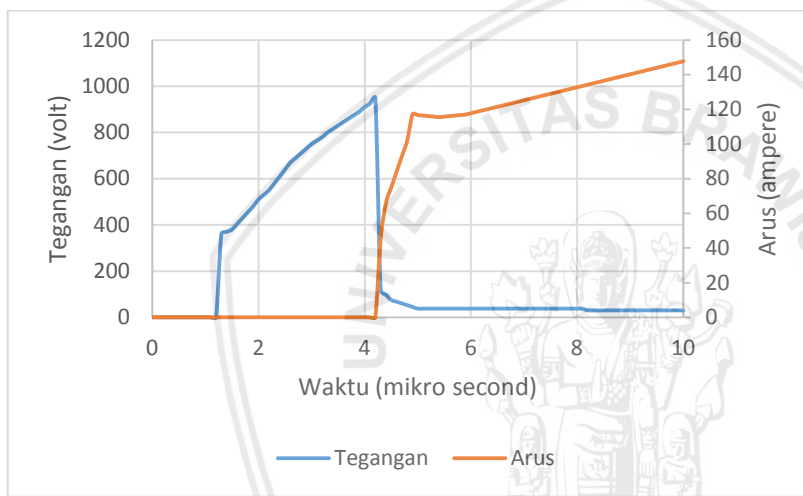


Gambar 5.13 Profil daya yang terserap GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV

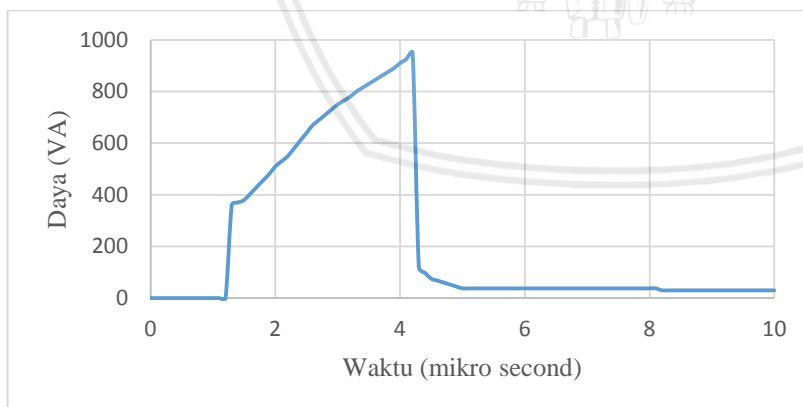
Gambar 5.12 merupakan profil daya impuls yang dilepas ke dekoupling. Profil daya impuls yang dilepas ke dekoupling memiliki persamaan bentuk dengan profil tegangan sisa arester GDT. Pada profil daya ini, memiliki daya puncak 600 VA. Gambar 5.13 merupakan profil daya yang terserap arester GDT (energi yang dibuang ke ground). Profil daya yang diserap arester GDT memiliki persamaan bentuk dengan profil arus arester GDT. Pada profil daya memiliki puncak 2860 VA. Energi yang terserap arester GDT diperoleh dari persamaan 4.1 adalah 3.95×10^{-11} joule.

B. Daya arester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV

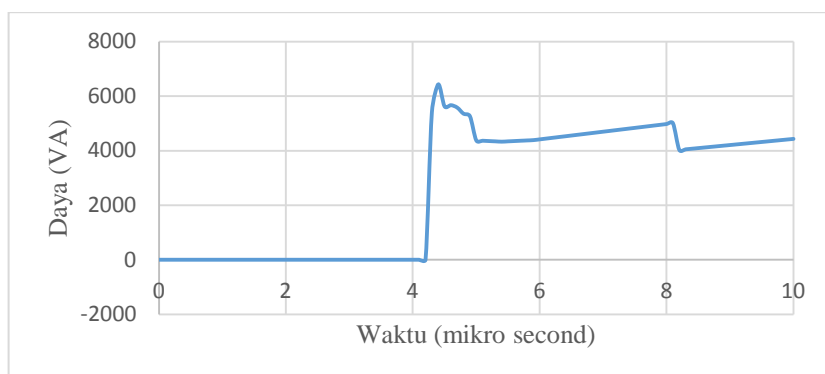
Gambar 5.14 merupakan profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV. Arester GDT memotong tegangan impuls 2 kV di 950 V. Arus mulai mengalir di arester GDT pada rentan waktu 4.3 μ s sampai 10 μ s. Profil tegangan dan arus pada gambar 5.14 didiskritkan setiap 0.1 μ s, mulai dari waktu 0 μ s sampai 10 μ s, sehingga akan diperoleh sebanyak 101 data diskrit tegangan dan arus. Profil tegangan dan arus yang sudah didiskritkan dihitung dengan persamaan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh data diskrit tegangan dan arus pada lampiran 5. Perkalian tegangan dan arus diskrit akan menghasilkan profil daya pada gambar 5.14 dan 5.15.



Gambar 5.14 Profil tegangan dan arus GDT untuk tegangan impuls 2 kV



Gambar 5.15 Profil daya impuls yang dilepas ke dekoupling untuk tegangan impuls 2 kV

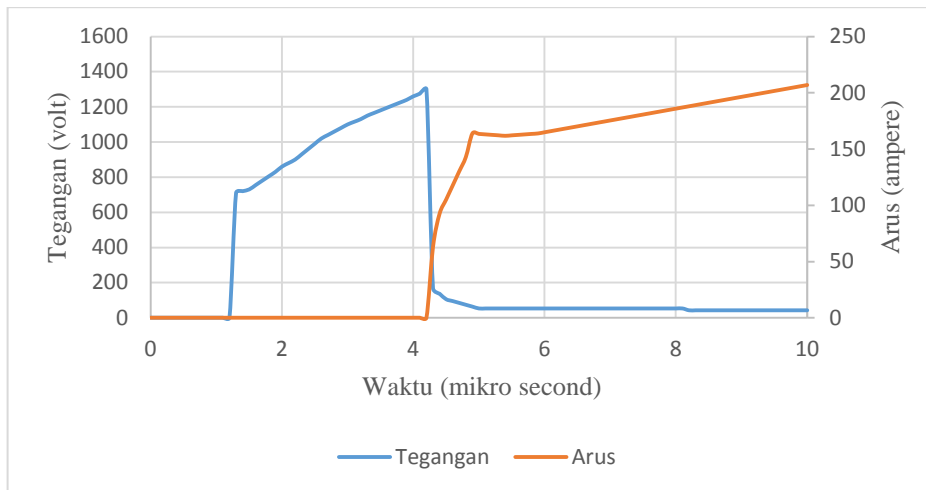


Gambar 5.16 Profil daya yang terserap GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV

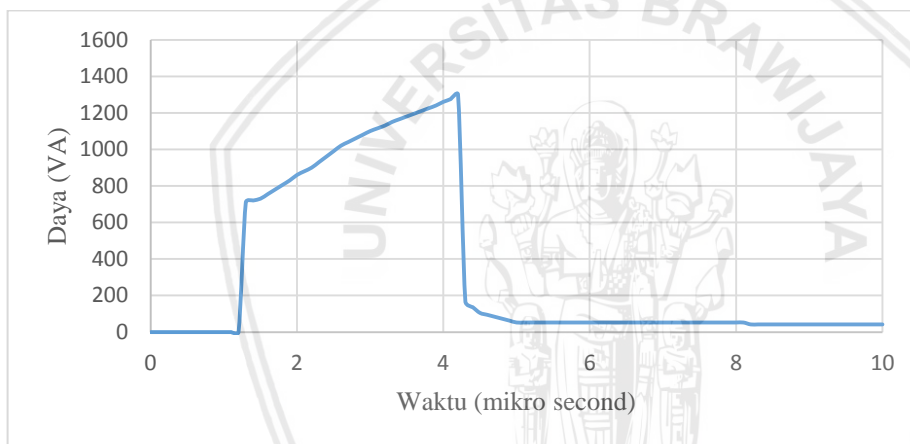
Gambar 5.15 merupakan profil daya impuls yang dilepas ke dekopling. Profil daya impuls yang dilepas ke dekopling memiliki persamaan bentuk dengan profil tegangan sisa arester GDT. Pada profil daya ini, memiliki daya puncak 950 VA. Gambar 5.16 merupakan profil daya yang terserap arester GDT (energi yang dibuang ke ground). Profil daya yang diserap arester GDT memiliki persamaan bentuk dengan profil arus arester GDT. Pada profil daya memiliki puncak 6435 VA. Energi yang terserap arester GDT diperoleh dari persamaan 4.1 adalah 8.89×10^{-11} joule.

C. Energi arester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

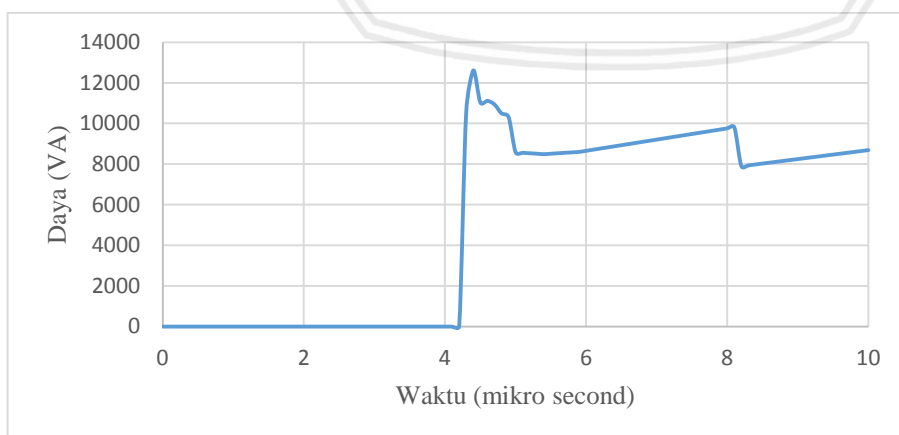
Gambar 5.17 merupakan profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV. Arestor GDT memotong tegangan impuls 3 kV di 1300 V. Arus mulai mengalir di arester GDT pada rentan waktu 4.3 μ s sampai 10 μ s. Profil tegangan dan arus didiskritkan setiap 1 μ s, mulai dari waktu 0 μ s sampai 100 μ s, sehingga akan diperoleh sebanyak 101 data diskrit tegangan dan arus. Profil tegangan dan arus yang sudah didiskritkan dihitung dengan persamaan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh data diskrit tegangan dan arus pada lampiran 6. Perkalian tegangan dan arus diskrit akan menghasilkan profil daya pada gambar 5.18 dan 5.19.



Gambar 5.17 Profil tegangan dan arus GDT untuk tegangan impuls 3 kV



Gambar 5.18 Profil daya GDT yang dilepas ke dekoupling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

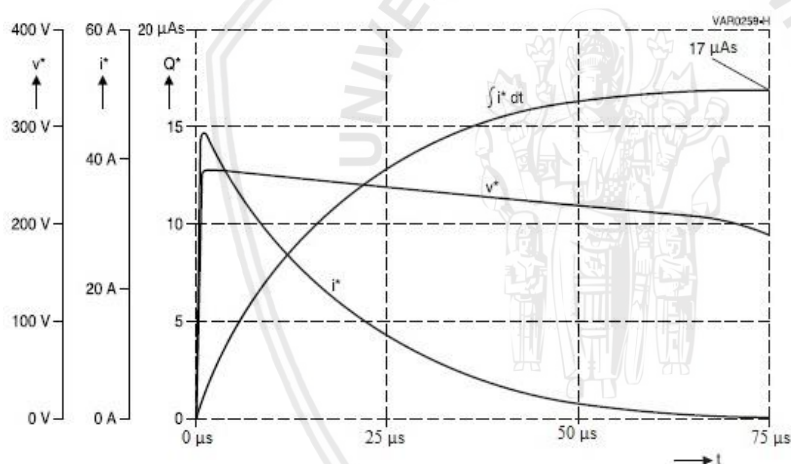


Gambar 5.19 Profil daya yang terserap GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

Gambar 5.18 merupakan profil daya impuls yang dilepas ke dekopling. Profil daya impuls yang dilepas ke dekopling memiliki persamaan bentuk dengan profil tegangan sisa arester GDT. pada profil daya ini, memiliki daya puncak 1300 VA. Gambar 5.19 merupakan profil daya yang terserap arester GDT (energi yang dibuang ke ground). Profil daya yang diserap arester GDT memiliki persamaan bentuk dengan profil arus arester GDT. Pada profil daya memiliki puncak 12612 VA. Energi yang terserap arester GDT diperoleh dari persamaan 4.1 adalah 1.74×10^{-10} joule.

5.1.3. Daya arester MOV

Profil tegangan dan arus arester MOV pada gambar 5.18 merupakan profil untuk tegangan impuls 1 kV. Sehingga diperlukan profil tegangan dan arus untuk tegangan 2 kV dan 3 kV menggunakan kurva $v - t$ sehingga tegangan pemotongan akan berbeda – beda. Profil tegangan dan arus arester MOV diperoleh dari profil tegangan impuls 1 kV, 2 kV, dan 3 kV.

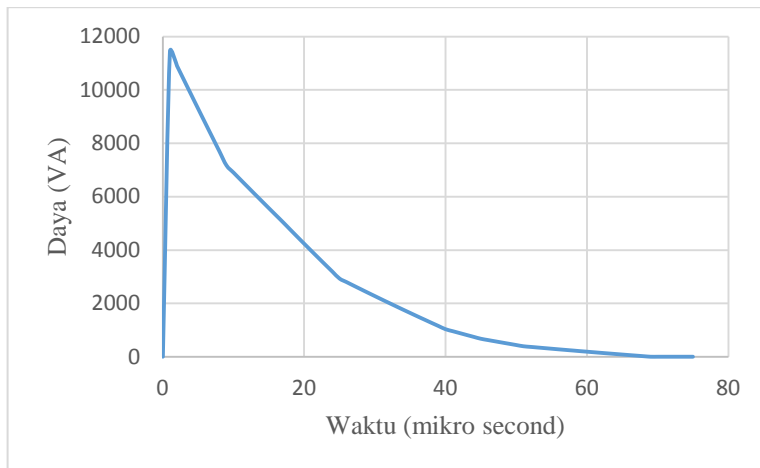


Gambar 5.20 Profil tegangan dan arus arester MOV untuk tegangan impuls 1 kV

Sumber: (Ag, 2011)

A. Daya Arester MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV

Profil tegangan dan arus pada gambar 5.20 didiskritkan setiap 1 μ s, mulai dari waktu 0 μ s sampai 75 μ s, sehingga akan diperoleh sebanyak 76 data diskrit tegangan dan arus. Profil tegangan dan arus yang sudah didiskritkan dihitung dengan persamaan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh data diskrit tegangan dan arus pada lampiran 7. Perkalian tegangan dan arus diskrit akan menghasilkan profil daya pada gambar 5.21.

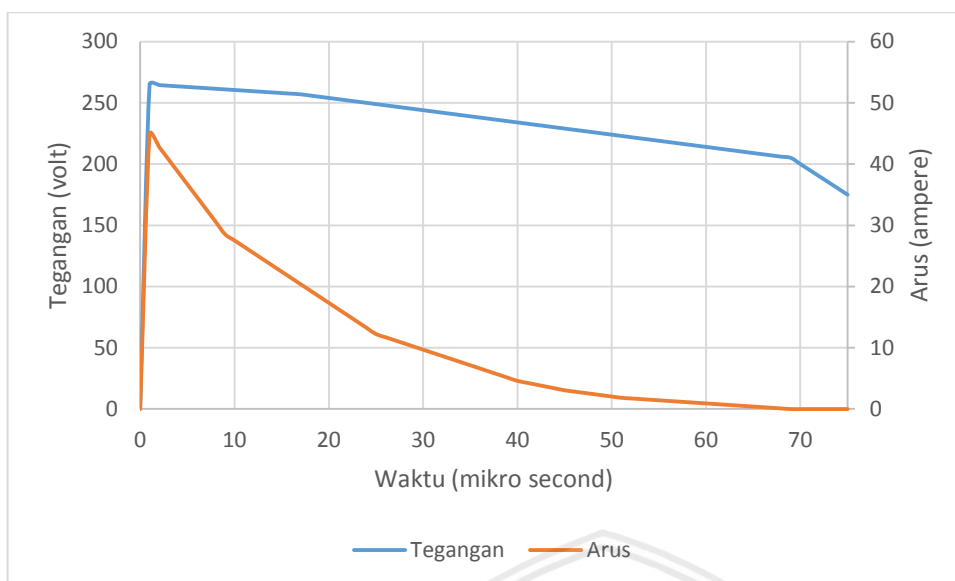


Gambar 5.21 Profil daya MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV

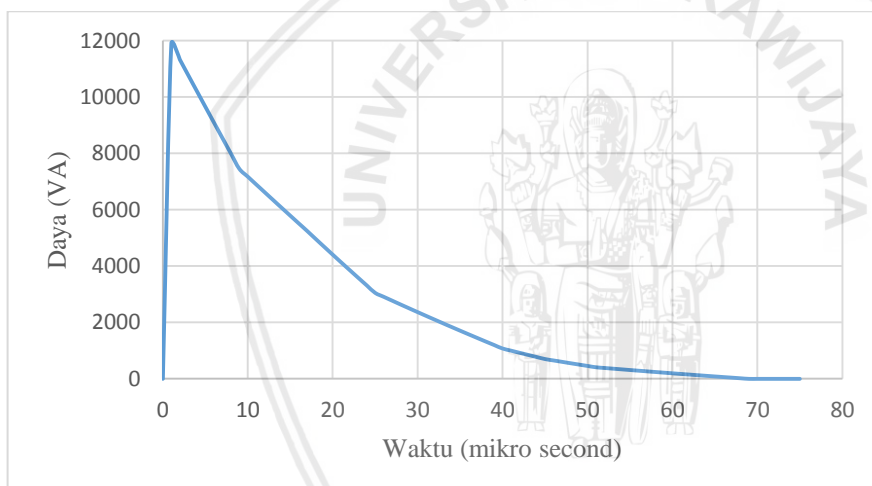
Gambar 5.21 merupakan profil daya arester MOV. Profil daya mengikuti bentuk profil arus yaitu daya naik dari nol VA sampai 11440 VA dan akan menurun di waktu 2 μ s sampai 75 μ s. Energi yang terserap arester MOV diperoleh dari persamaan 4.2 adalah 6.69×10^{-11} joule.

B. Daya arester MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV

Gambar 5.22 merupakan profil tegangan dan arus arester MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV. Arestor GDT memotong tegangan impuls 2 kV di 265 V. Arus mulai mengalir di arester MOV pada rentan waktu 1 μ s sampai 68 μ s. Profil tegangan dan arus didiskritkan setiap 1 μ s, mulai dari waktu 0 μ s sampai 75 μ s, sehingga akan diperoleh sebanyak 76 data diskrit tegangan dan arus. Profil tegangan dan arus yang sudah didiskritkan dihitung dengan persamaan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh data diskrit tegangan dan arus pada lampiran 8. Perkalian tegangan dan arus diskrit akan menghasilkan profil daya pada gambar 5.23.



Gambar 5.22 Profil tegangan dan arus MOV untuk tegangan impuls 2 kV



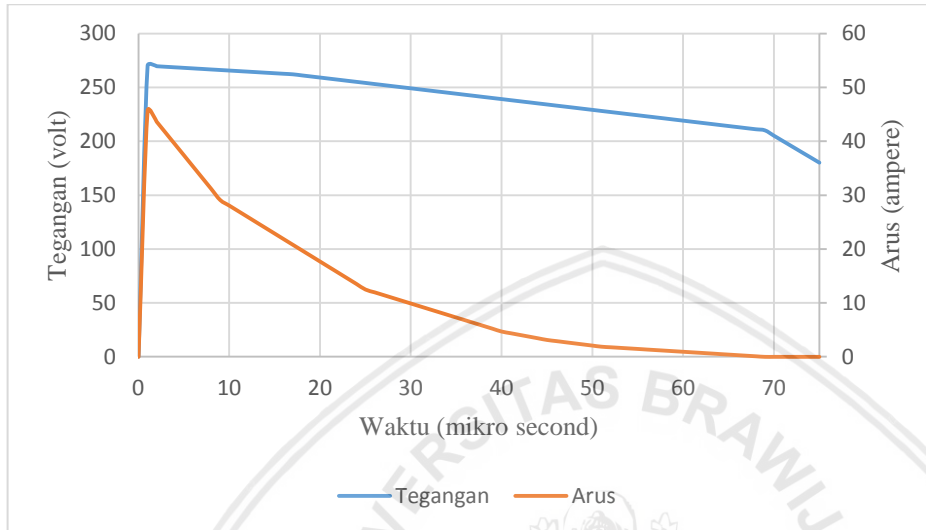
Gambar 5.23 Profil daya MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV

Gambar 5.23 merupakan profil daya arester MOV. Profil daya mengikuti bentuk profil arus yaitu daya naik dari nol VA sampai 11884.2 VA dan akan menurun di waktu 2 μ s sampai 75 μ s. Energi yang terserap arester MOV diperoleh dari persamaan 4.2 adalah 7.79×10^{-11} joule.

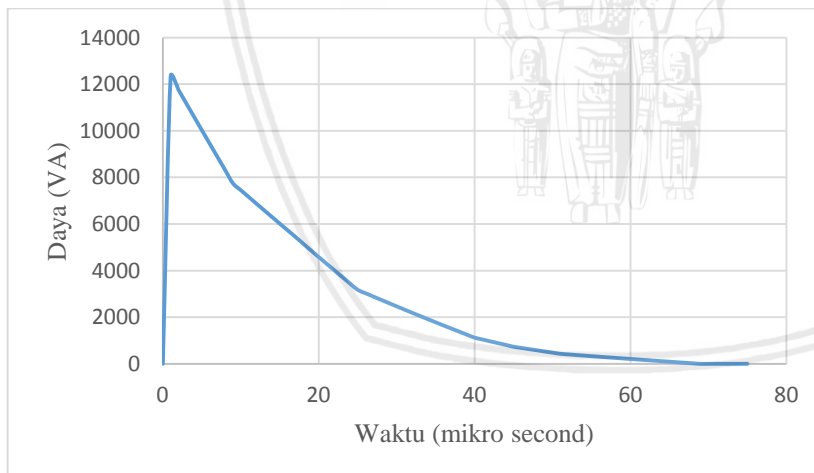
C. Daya arester MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

Gambar 5.24 merupakan profil tegangan dan arus arester MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV. Arestor GDT memotong tegangan impuls 3 kV di 270 V. Arus mulai mengalir di arester MOV pada rentan waktu 1 μ s sampai 68 μ s. Profil tegangan dan arus

didiskritkan setiap $1 \mu\text{s}$, mulai dari waktu $0 \mu\text{s}$ sampai $75 \mu\text{s}$, sehingga akan diperoleh sebanyak 76 data diskrit tegangan dan arus. Profil tegangan dan arus yang sudah didiskritkan dihitung dengan persamaan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh data diskrit tegangan dan arus pada lampiran 9. Perkalian tegangan dan arus diskrit akan menghasilkan profil daya pada gambar 5.25.



Gambar 5.24 Profil tegangan dan arus MOV untuk tegangan impuls 3 kV



Gambar 5.25 Profil daya MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 3 kV

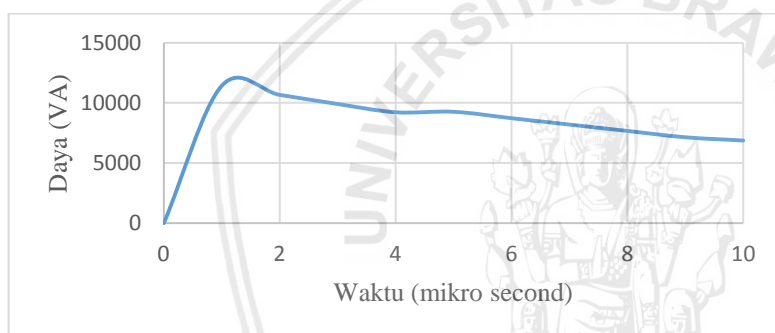
Gambar 5.25 merupakan profil daya arester MOV. Profil daya mengikuti bentuk profil arus yaitu daya naik dari nol VA sampai 12336.9 VA dan akan menurun di waktu $2 \mu\text{s}$ sampai $75 \mu\text{s}$. Energi yang terserap arester MOV diperoleh dari persamaan 4.2 adalah 8.91×10^{-11} joule.

5.1.4. Daya Dekopling

Berdasarkan persamaan 5.2 maka energi dekopling diperoleh dari pengurangan daya impuls yang dilepas ke dekopling dengan daya arester MOV dan energi beban. Ada tiga kondisi yang digunakan dalam menghitung daya dekopling. Tiga kondisi tersebut yaitu daya dekopling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1kV, 2 kV, 3 kV. Sehingga akan diperoleh nilai induktansi dekopling berdasarkan tegangan impuls (1.2/50 μ s).

A. Daya dekopling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1kV

Pertama dalam menghitung daya dekopling, kita menentukan dahulu daya impuls yang dilepas ke dekopling dan daya arester MOV. Daya impuls yang dilepas ke dekopling diperoleh dari gambar 5.12 dan daya arester MOV diperoleh pada gambar 5.21. Dimisalkan daya beban dianggap nol dikarenakan habis terserap arester MOV, sehingga diperoleh profil daya dekopling:

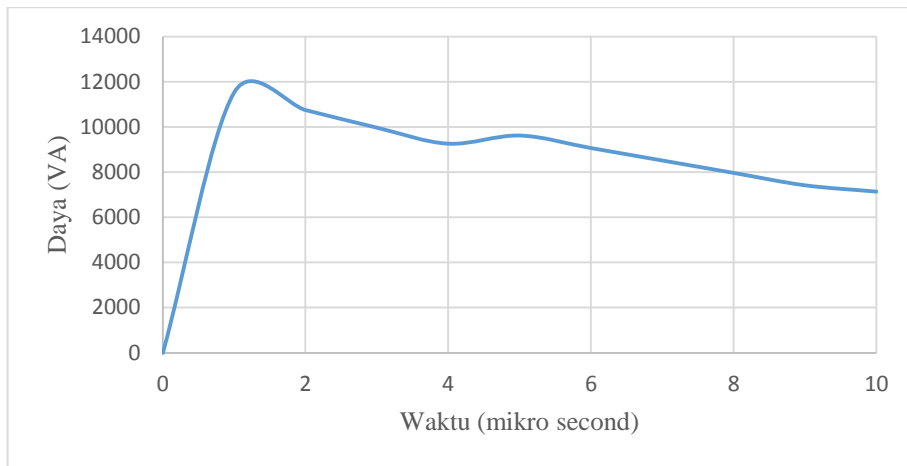


Gambar 5.26 Profil daya dekopling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV

Gambar 5.26 merupakan profil daya dekopling pada rentan waktu 0 μ s sampai 10 μ s. Profil daya dekopling memiliki puncak 11430 VA saat waktu 1 μ s. Waktu 2 μ s diperoleh daya dekopling 10669 VA dan terus menurun hingga 6873 VA pada 10 μ s.

B. Daya dekopling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV

Pertama dalam menghitung daya dekopling, kita menentukan dahulu daya impuls yang dilepas ke dekopling dan daya arester MOV. Daya impuls yang dilepas ke dekopling diperoleh dari gambar 5.15 dan daya arester MOV diperoleh pada gambar 5.23. Dimisalkan daya beban dianggap nol dikarenakan habis terserap arester MOV, sehingga diperoleh profil daya dekopling:



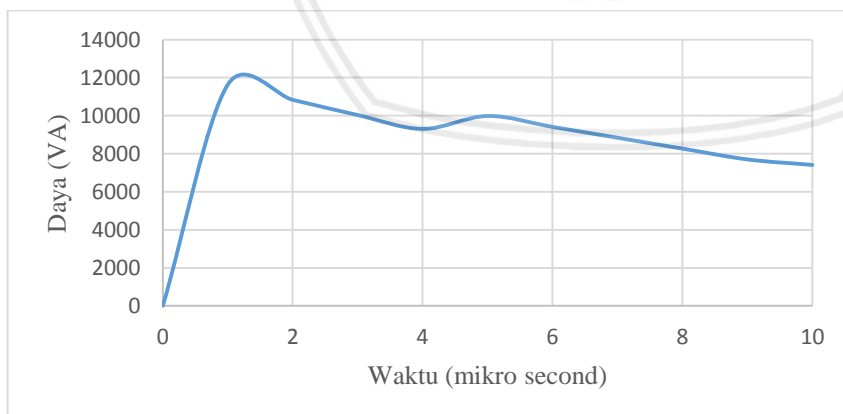
Gambar 5.27 Profil daya dekoupling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV

Gambar 5.27 merupakan profil daya dekoupling pada rentan waktu 0 μ s sampai 10 μ s. Profil daya dekoupling memiliki puncak 11524 VA saat waktu 1 μ s. Waktu 2 μ s diperoleh daya dekoupling 10743 VA dan terus menurun hingga 7136 VA pada 10 μ s.

C. Daya dekoupling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

Pertama dalam menghitung daya dekoupling, kita menentukan dahulu daya impuls yang dilepas ke dekoupling dan daya arester MOV. Daya impuls yang dilepas ke dekoupling diperoleh dari gambar 5.18 dan daya arester MOV diperoleh pada gambar 5.25. Dimisalkan daya beban dianggap nol dikarenakan habis terserap arester MOV, sehingga diperoleh profil daya dekoupling:

:



Gambar 5.28 Profil daya dekoupling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

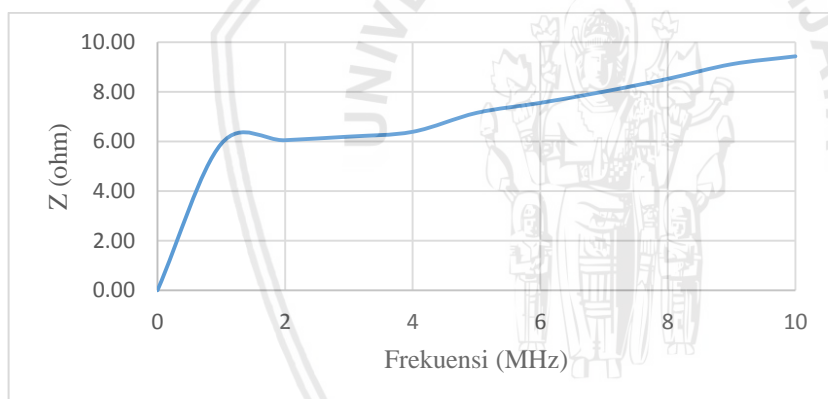
Gambar 5.28 merupakan profil daya dekoupling pada rentan waktu 0 μ s sampai 10 μ s. Profil daya dekoupling memiliki puncak 11626 VA saat waktu 1 μ s. Waktu 2 μ s diperoleh daya dekoupling 10825 VA dan terus menurun hingga 7404 VA pada 10 μ s.

5.2. Induktansi dekoupling

Menghitung nilai induktansi dekoupling berdasarkan profil daya dekoupling. Terdapat tiga profil daya dekoupling yang dihitung, yaitu profil daya dekoupling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1kV, 2kV, 3 kV. Profil – profil tersebut didiskritkan menggunakan metode DFT (Discrete Fourier Transform) pada persamaan 2.3, sehingga akan diperoleh nilai induktansi dalam domain frekuensi.

A. Induktansi dekoupling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV

Nilai induktansi dekoupling induktor diperoleh dari profil daya pada gambar 5.26. Nilai daya dekoupling akan mendapatkan nilai tegangan dan arus dekoupling. Tegangan dan arus diketahui sehingga dapat menghitung impedansi (Z). Impedansi (Z) didiskritkan tiap 1 μ s mulai dari 0 μ s sampai 10 μ s, sehingga akan diperoleh data diskrit impedansi sebanyak 11. Data diskrit impedansi kemudian dihitung menggunakan persamaan 2.3, sehingga diperoleh nilai impedansi dalam domain frekuensi.

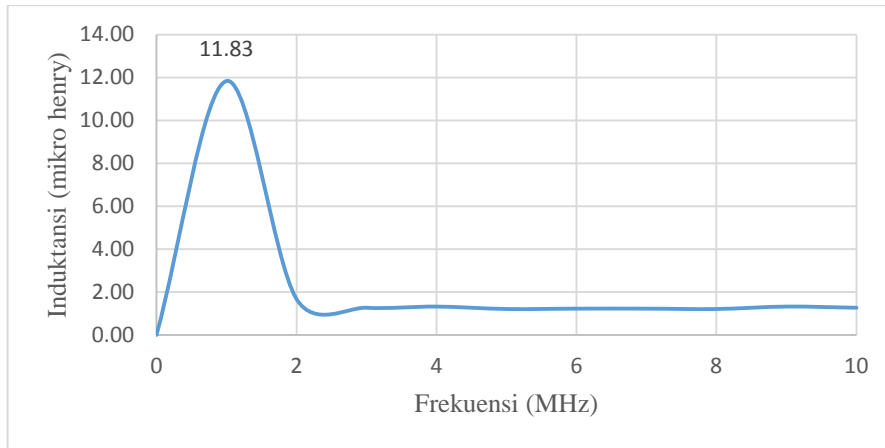


Gambar 5.29 Profil impedansi (Z) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 1 kV

Gambar 5.29 merupakan profil impedansi (Z) dalam domain frekuensi. Nilai – nilai impedansi (Z) digunakan dalam menghitung induktansi (L) dengan rumus sebagai berikut:

$$Z = 2\pi fL \quad (5.3)$$

Nilai π 3.14 dan nilai frekuensi dimulai dari frekuensi ke 0 sampai frekuensi ke 10 MHz, sehingga diperoleh profil induktansi (L):

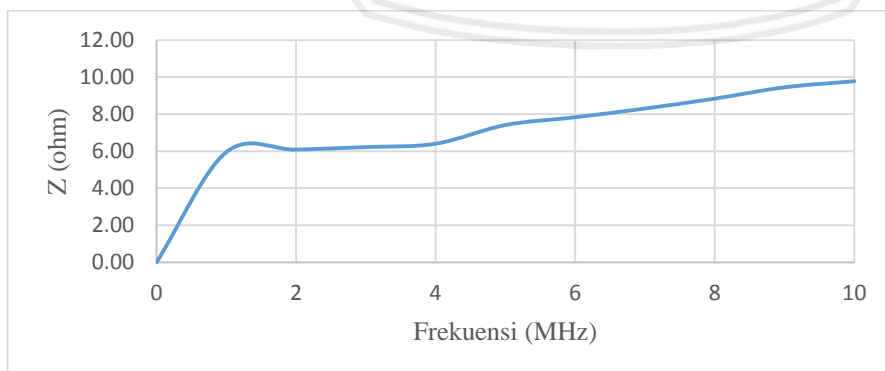


Gambar 5.30 Profil induktansi (L) untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 1 kV

Gambar 5.30 merupakan profil induktansi (L) untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 1 kV. Nilai induktansi puncak 11.83 μH pada frekuensi 1 MHz kemudian menurun 1.68 μH pada frekuensi 2 MHz. Nilai induktansi dekoupling untuk arester kaskade untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 1 kV adalah dipilih induktansi puncaknya yaitu 11.83 μH.

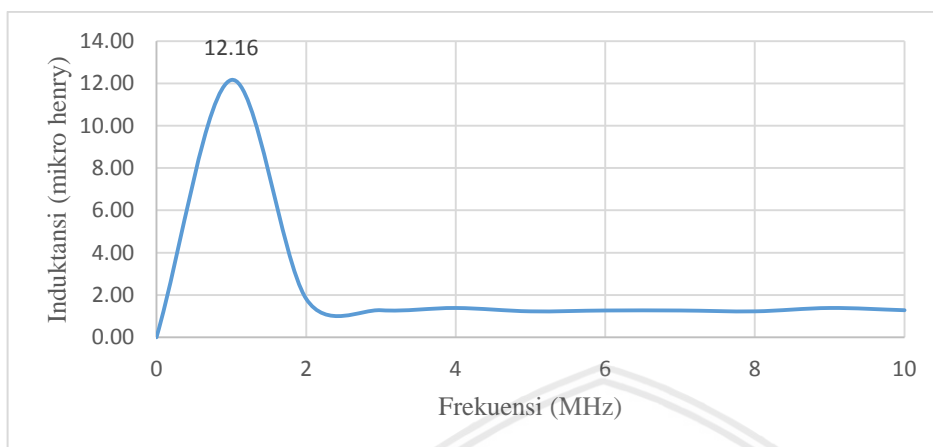
B. Induktansi dekoupling untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 2 kV

Nilai induktansi dekoupling induktor diperoleh dari profil daya pada gambar 5.27. Nilai daya dekoupling akan mendapatkan nilai tegangan dan arus dekoupling. Tegangan dan arus diketahui sehingga dapat menghitung impedansi (Z). Impedansi (Z) didiskritkan tiap 1 μs mulai dari 0 μs sampai 10 μs, sehingga akan diperoleh data diskrit impedansi sebanyak 11. Data diskrit impedansi kemudian dihitung menggunakan persamaan 2.3, sehingga diperoleh nilai impedansi dalam domain frekuensi.



Gambar 5.31 Profil impedansi (Z) untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 2 kV

Gambar 5.31 merupakan profil impedansi (Z) dalam domain frekuensi. Nilai – nilai impedansi (Z) digunakan dalam menghitung nilai induktansi (L) mulai dari 0 MHz sampai 10 MHz dengan persamaan 5.3 sehingga diperoleh profil induktansi (L):

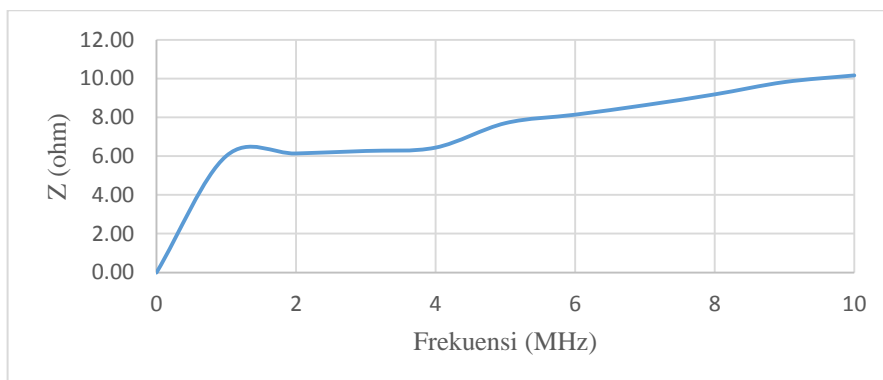


Gambar 5.32 Profil induktansi (L) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV

Gambar 5.32 merupakan profil induktansi (L) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV. Nilai induktansi puncak 12.16 μ H pada frekuensi 1 MHz kemudian menurun 1.83 μ H pada frekuensi 2 MHz. Nilai induktansi dekoupling untuk arester kaskade untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 2 kV adalah dipilih induktansi puncaknya yaitu 12.16 μ H.

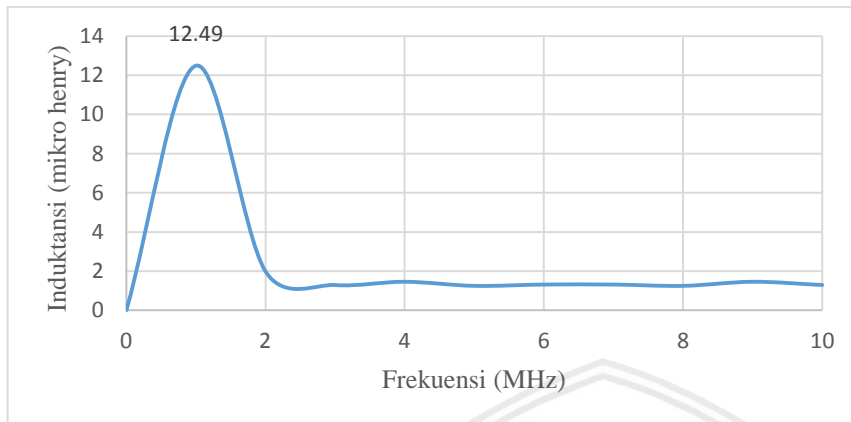
C. Induktansi dekoupling untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

Nilai induktansi dekoupling induktor diperoleh dari profil daya pada gambar 5.28. Nilai daya dekoupling akan mendapatkan nilai tegangan dan arus dekoupling. Tegangan dan arus diketahui sehingga dapat menghitung impedansi (Z). Impedansi (Z) didiskritkan tiap 1 μ s mulai dari 0 μ s sampai 10 μ s, sehingga akan diperoleh data diskrit impedansi sebanyak 11. Data diskrit impedansi kemudian dihitung menggunakan persamaan 2.3, sehingga diperoleh nilai impedansi dalam domain frekuensi.



Gambar 5.33 Profil impedansi (Z) untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

Gambar 5.33 merupakan profil impedansi (Z) dalam domain frekuensi. Nilai – nilai impedansi (Z) digunakan dalam menghitung nilai induktansi (L) mulai dari 0 MHz sampai 10 MHz dengan persamaan 5.3 sehingga diperoleh profil induktansi (L):



Gambar 5.34 Profil induktansi (L) untuk tegangan impuls ($1.2/50 \mu\text{s}$) 3 kV

Gambar 5.34 merupakan profil induktansi (L) untuk tegangan impuls ($1.2/50 \mu\text{s}$) 3 kV. Nilai induktansi puncak $12.49 \mu\text{H}$ pada frekuensi 1 MHz kemudian menurun $1.98 \mu\text{H}$ pada frekuensi 2 MHz. Nilai induktansi dekoupling untuk arester kaskade untuk tegangan impuls ($1.2/50 \mu\text{s}$) 10 kV adalah dipilih induktansi puncaknya yaitu $12.49 \mu\text{H}$.

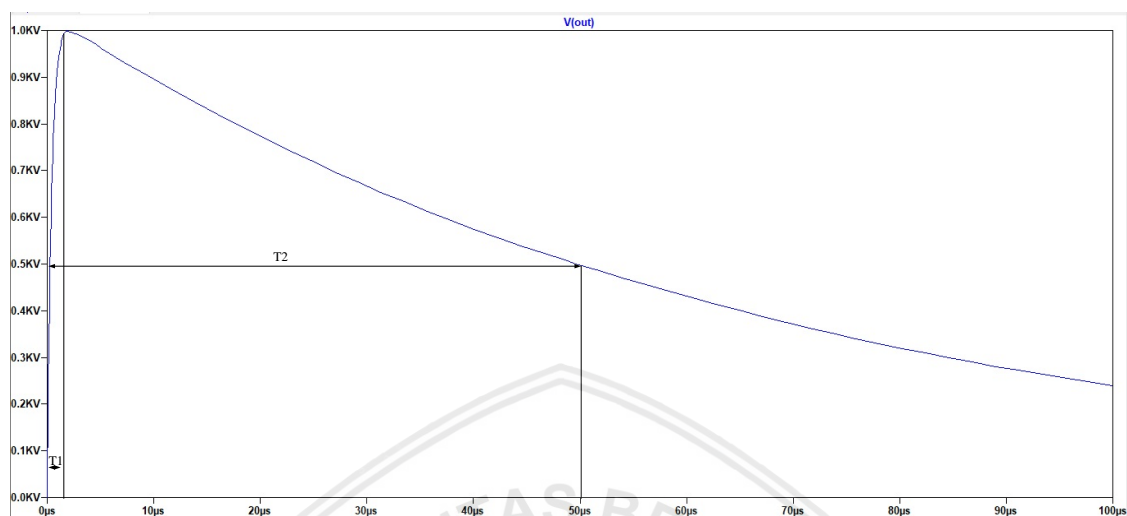
5.3 Hasil Simulasi Rangkaian

Hasil desain perancangan arester kaskade berdasarkan energi surja akan dijelaskan pada bab ini. Koordinasi proteksi antar arester memerlukan elemen dekoupling. Induktansi dekoupling dihitung menggunakan profil energi petir dan arester. Hasil desain arester kaskade akan ditunjukkan untuk melihat profil tegangan dan arus arester kaskade. Hasil penelitian berupa: (1) model simulasi generator impuls RLC beserta profil tegangan dan arus; (2) simulasi arester kaskade dengan elemen dekoupling beserta analisis profil tegangan dan arus.

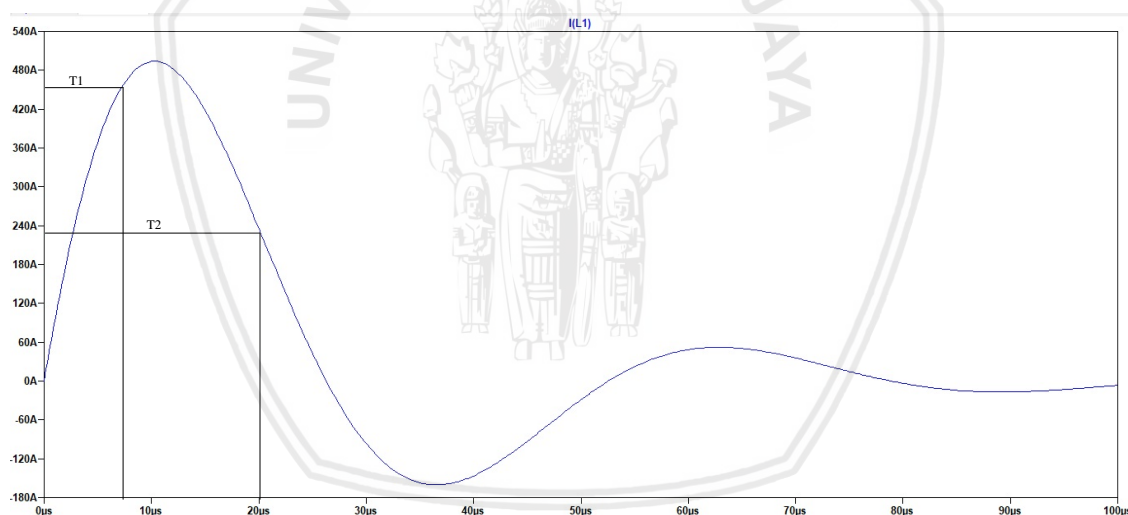
5.3.1. Hasil Simulasi Generator Impuls RLC

Merancang rangkaian generator impuls RLC, terlebih dahulu menentukan nilai komponen R , L , dan C . Nilai kapasitansi kapasitor $C1$ diperoleh dengan menggunakan persamaan 3.11 sehingga diperoleh nilai $5.93 \mu\text{F}$. Nilai induktansi $L1$ diperoleh dari persamaan 3.12 sehingga diperoleh nilai $10.9 \mu\text{H}$. Nilai resistansi $R3$ diperoleh dari persamaan 3.14 sehingga diperoleh nilai 26.1Ω . Nilai resistansi $R2$ diperoleh dari persamaan 3.15 sehingga diperoleh nilai 0.841Ω .

Berdasarkan rangkaian simulasi pada gambar 4.7 maka diperoleh tegangan impuls pada saat open circuit 1.2/50 μs dan arus impuls pada saat short circuit 8/20 μs .



Gambar 5.35 Tegangan impuls pada saat open circuit 1.2/50 μs



Gambar 5.36 Arus impuls pada saat short circuit 8/20 μs .

Gambar 5.35 merupakan hasil simulasi untuk tegangan impuls 1.2/50 μs . Gelombang tegangan impuls memiliki waktu dahi (T1) 1.2 μs dan waktu punggung (T2) 50 μs serta tegangan puncak 1 kV. Gelombang tegangan impuls sesuai dengan bentuk tegangan impuls standart IEC (*International Electrotechnical Commission*) yang ditunjukkan pada gambar 4.5 (a).

Gambar 5.36 merupakan hasil simulasi untuk tegangan impuls 8/20 μs . Gelombang arus impuls memiliki waktu dahi (T1) 8 μs dan waktu punggung (T2) 20 μs serta arus puncak 490A. Gelombang tegangan impuls sesuai dengan bentuk tegangan impuls sesuai

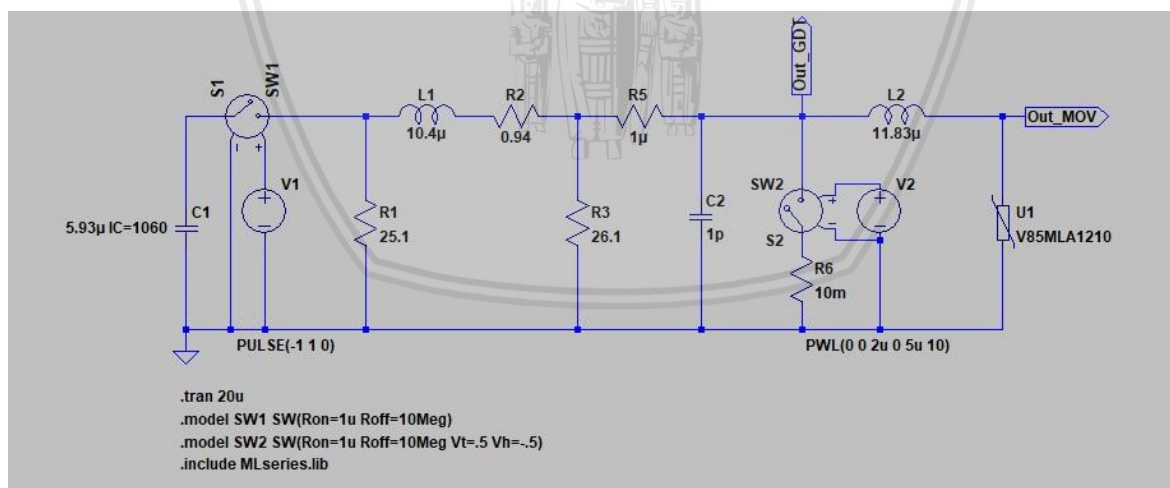
standart IEC (*International Electrotechnical Commission*) yang ditunjukkan pada gambar 4.5 (b).

5.3.2 Simulasi arester kaskade dengan dekoupling

Setelah mendapatkan nilai induktansi dekoupling maka kita dapat melihat profil tegangan dan arus arester kaskade.

A. Simulasi arester kaskade dengan induktansi dekoupling 11.83 μH untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 1 kV

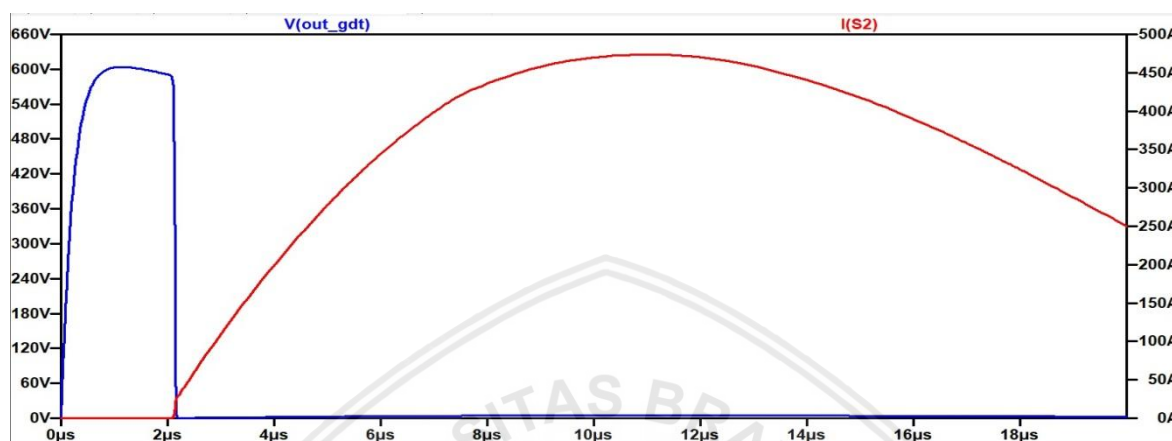
Gambar 5.37 merupakan rangkaian simulasi arester kaskade dengan induktansi dekoupling (L_2) 11.83 μH . Arestor GDT pada rangkaian simulasi dipresentasikan oleh R_5 , C_2 , SW_2 (Voltage Controlled Switch) dan R_6 . Gelombang impuls melalui R_5 dan C_2 kemudian switch SW_2 bekerja berdasarkan triger tegangan pulse V_2 . Ketika switch SW_2 bekerja, maka terjadi pemotongan tegangan impuls. Pada fase ini GDT memasuki *glow to arc region* yang sesuai dengan karakteristik GDT pada gambar 2.1. Berdasarkan karakteristik GDT pada gambar 2.1, R_6 sebagai penahan tegangan GDT dari *spark over* menuju *arc region* agar tidak sampai menuju tegangan nol volt. Arestor MOV (U_1) yang digunakan dalam simulasi adalah merk littelfuse type V85MLA1210.



Gambar 5.37 Rangkaian simulasi arester kaskade dengan dekoupling (L_2) 11.83 μH

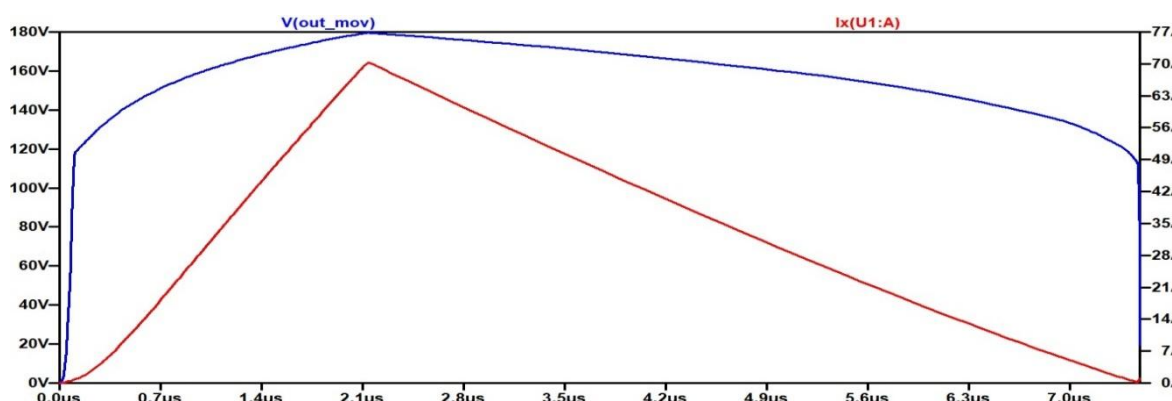
Gambar 5.38 merupakan profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 1 kV yang diukur pada $V(\text{out_GDT})$ dan $I(S_2)$. Ketika tegangan impuls datang GDT mengalami *breakdown* dan memotong tegangan di 600 V pada rentan waktu 0 μs sampai 2 μs . Arestor GDT mengalami fase *glow* ke fase *arc* pada waktu 3 μs yang

menyebabkan tegangan turun menuju 7 V hingga waktu 18 μs . Pada saat arester GDT mengalami tegangan *spark over* sampai menuju fase *arc*, tidak ada arus yang mengalir di arester GDT. Arus mulai mengalir ketika arester GDT berada di fase *arc* pada waktu 3 μs sampai 18 μs . Bentuk profil arus GDT seperti bentuk gelombang impuls arus ketika short circuit 8/20 μs dengan puncak arus 450 A.



Gambar 5.38 Profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 1 kV

Profil tegangan pada gambar 5.39 merupakan output tegangan arester MOV yang diukur pada V(out_mov). Profil arus pada gambar 5.39 merupakan arus output arester MOV yang diukur pada Ix (U1:A). Arestor MOV konduksi pada rentan waktu 0 μs sampai 7 μs dikarenakan tegangan output GDT melebihi tegangan kerja MOV V85MLA1210. Arestor MOV memotong tegangan output arester GDT di 120V pada waktu 0.1 μs dan naik sampai 180 V pada waktu 2.1 μs . Pada waktu 2.2 μs tegangan menurun hingga 0 V pada 8 μs . Arestor MOV berhenti konduksi pada saat 8 μs . Ketika MOV konduksi maka ada arus yang mengalir. Profil arus naik dari 0 μs sampai 2.1 μs dengan puncak arus 70 A. Pada waktu 2.2 μs arus menurun hingga 0 A pada saat 8 μs .

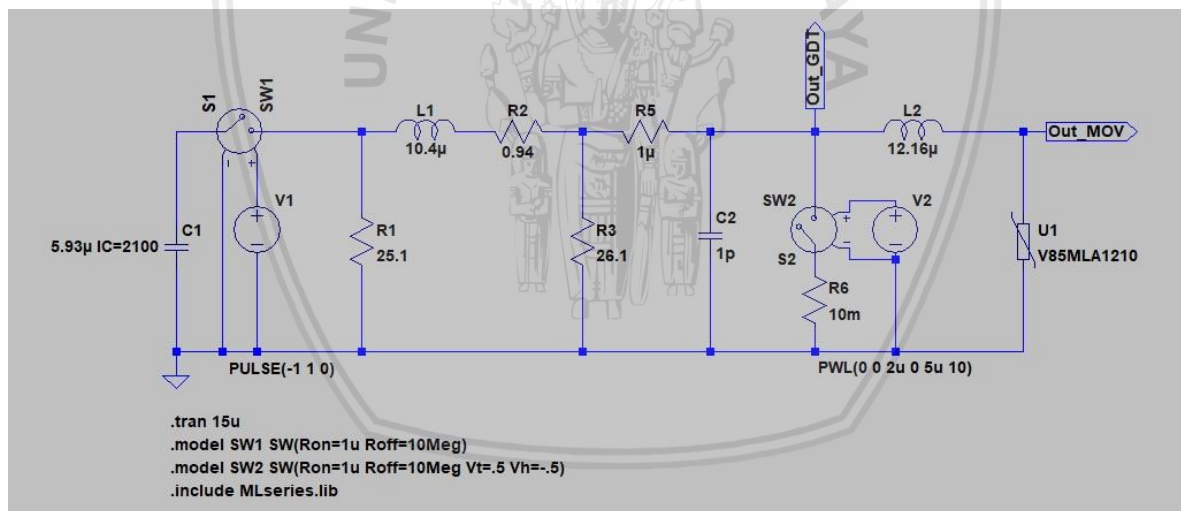


Gambar 5.39 Profil tegangan dan arus arester MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 1 kV

Desain induktor dengan induktansi $11.83 \mu\text{H}$ menggunakan kawat email dengan diameter kawat 0.8 mm . Diameter lilitan 10 mm dengan inti udara memiliki 27 lilitan.

B. Simulasi arester kaskade dengan induktansi dekoupling $12.16 \mu\text{H}$ untuk tegangan impuls ($1.2/50 \mu\text{s}$) 2 kV

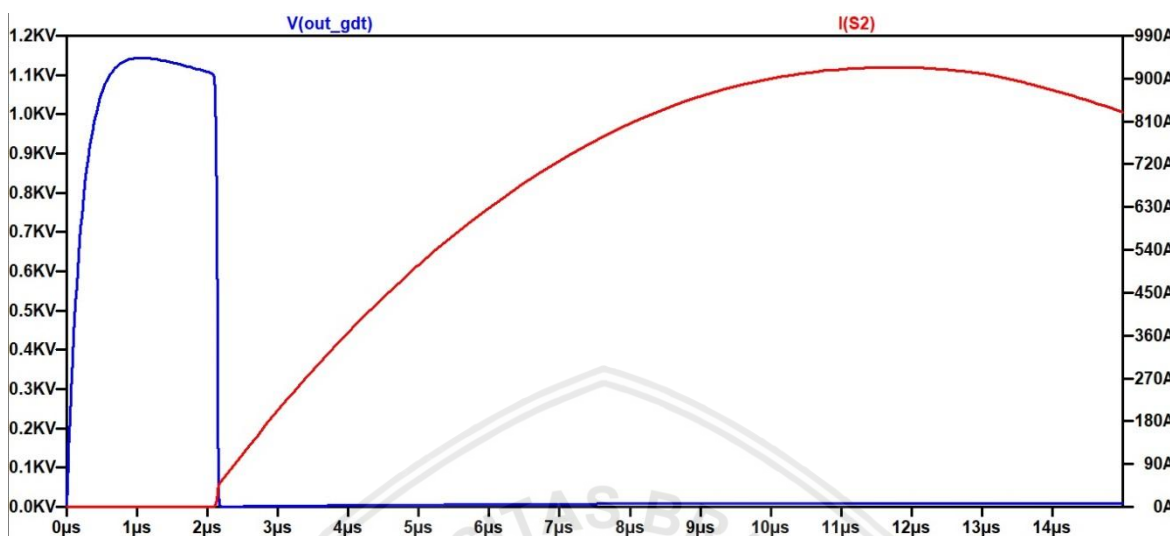
Gambar 5.40 merupakan rangkaian simulasi arester kaskade dengan induktansi dekoupling ($L2$) $11.83 \mu\text{H}$. Arestor GDT pada rangkaian simulasi dipresentasikan oleh $R5$, $C2$, $SW2$ (Voltage Controlled Switch) dan $R6$. Gelombang impuls melalui $R5$ dan $C2$ kemudian switch $SW2$ bekerja berdasarkan triger tegangan pulse $V2$. Ketika switch $SW2$ bekerja, maka terjadi pemotongan tegangan impuls. Pada fase ini GDT memasuki *glow to arc region* yang sesuai dengan karakteristik GDT pada gambar 2.1. Berdasarkan karakteristik GDT pada gambar 2.1, $R6$ sebagai penahan tegangan GDT dari *spark over* menuju *arc region* agar tidak sampai menuju tegangan nol volt. Arestor MOV ($U1$) yang digunakan dalam simulasi adalah merk littelfuse type $V85MLA1210$.



Gambar 5.40 Rangkaian simulasi arester kaskade dengan dekoupling ($L2$) $12.16 \mu\text{H}$

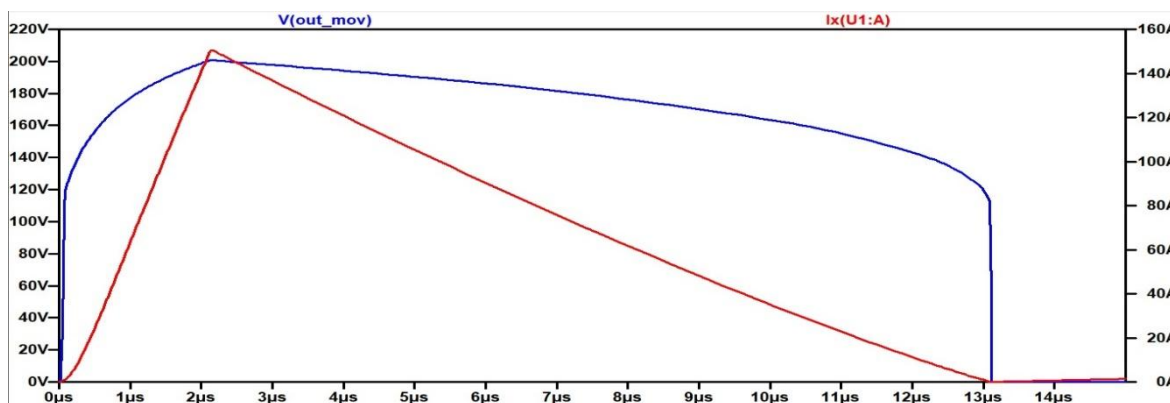
Gambar 5.41 merupakan profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls ($1.2/50 \mu\text{s}$) 2 kV yang diukur pada $V(\text{out_GDT})$ dan $I(S2)$. Ketika tegangan impuls datang GDT mengalami *breakdown* dan memotong tegangan di 1150 V pada rentang waktu $0 \mu\text{s}$ sampai $2 \mu\text{s}$. Arestor GDT mengalami fase *glow* ke fase *arc* pada waktu $3 \mu\text{s}$ yang menyebabkan tegangan turun menuju 15 V hingga waktu $15 \mu\text{s}$. Pada saat arester GDT mengalami tegangan *spark over* sampai menuju fase *arc*, tidak ada arus yang mengalir di arester GDT. Arus mulai mengalir ketika arester GDT berada di fase *arc* pada waktu $3 \mu\text{s}$

sampai 15 μs . Bentuk profil arus GDT seperti bentuk gelombang impuls arus ketika short circuit 8/20 μs dengan puncak arus 900 A.



Gambar 5.41 Profil tegangan dan arus arrester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 2 kV

Profil tegangan pada gambar 5.42 merupakan output tegangan arrester MOV yang diukur pada V(out_mov). Profil arus pada gambar 5.43 merupakan arus output arrester MOV yang diukur pada Ix (U1:A). Arrester MOV konduksi pada rentan waktu 0 μs sampai 7 μs dikarenakan tegangan output GDT melebihi tegangan kerja MOV V85MLA1210. Arrester MOV memotong tegangan output arrester GDT di 120V pada waktu 0.1 μs dan naik sampai 200 V pada waktu 2 μs . Pada waktu 2.1 μs tegangan menurun hingga 0 V pada μs . Arrester MOV berhenti konduksi pada saat 13 μs . Ketika MOV konduksi maka ada arus yang mengalir. Profil arus naik dari 0 μs sampai 2 μs dengan puncak arus 150 A. Pada waktu 2.1 μs arus menurun hingga 0 A pada saat 13 μs .

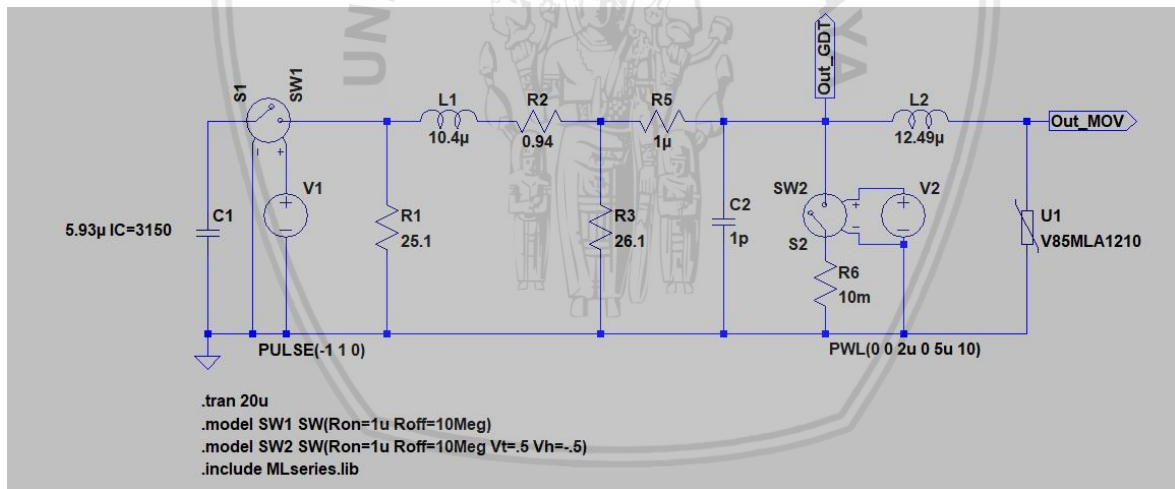


Gambar 5.42 Profil tegangan dan arus arrester MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 2 kV

Desain induktor dengan induktansi 12.16 μH menggunakan kawat email dengan diameter kawat 0.8 mm. Diameter lilitan 10 mm dengan inti udara memiliki 28 lilitan.

C. Simulasi arester kaskade dengan induktansi dekopling 12.49 μH untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 2 kV

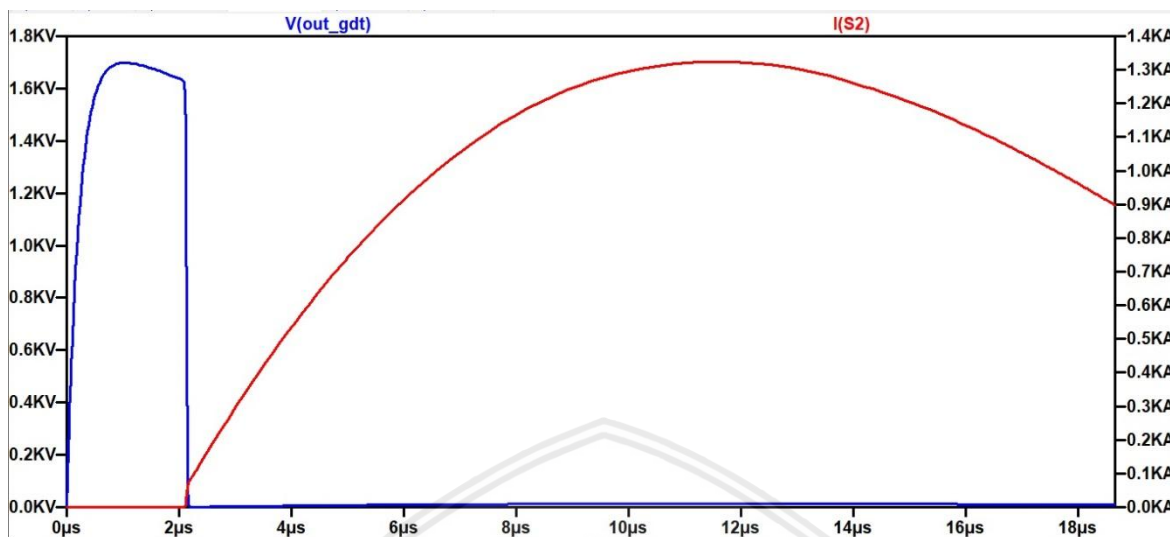
Gambar 5.43 merupakan rangkaian simulasi arester kaskade dengan induktansi dekopling (L_2) 12.49 μH . Arestor GDT pada rangkaian simulasi dipresentasikan oleh R_5 , C_2 , SW_2 (Voltage Controlled Switch) dan R_6 . Gelombang impuls melalui R_5 dan C_2 kemudian switch SW_2 bekerja berdasarkan triger tegangan pulse V_2 . Ketika switch SW_2 bekerja, maka terjadi pemotongan tegangan impuls. Pada fase ini GDT memasuki *glow to arc region* yang sesuai dengan karakteristik GDT pada gambar 2.1. Berdasarkan karakteristik GDT pada gambar 2.1, R_6 sebagai penahan tegangan GDT dari *spark over* menuju *arc region* agar tidak sampai menuju tegangan nol volt. Arestor MOV (U_1) yang digunakan dalam simulasi adalah merk littelfuse type V85MLA1210.



Gambar 5.43 Rangkaian simulasi arester kaskade dengan dekopling (L_2) 12.49 μH

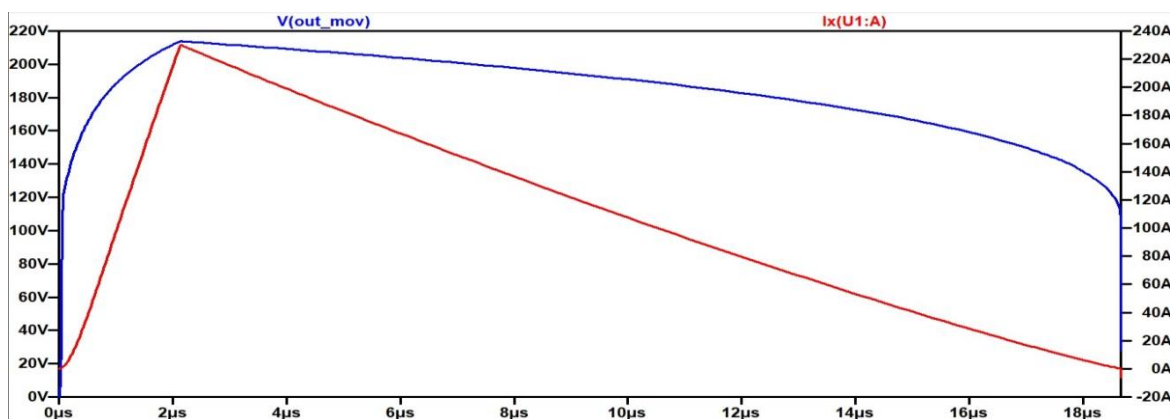
Gambar 5.44 merupakan profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μs) 3 kV yang diukur pada $V(\text{out_GDT})$ dan $I(S_2)$. Ketika tegangan impuls datang GDT mengalami *breakdown* dan memotong tegangan di 1700 V pada rentang waktu 0 μs sampai 2 μs . Arestor GDT mengalami fase *glow* ke fase *arc* pada waktu 3 μs yang menyebabkan tegangan turun menuju 25 V hingga waktu 18 μs . Pada saat arester GDT mengalami tegangan *spark over* sampai menuju fase *arc*, tidak ada arus yang mengalir di arester GDT. Arus mulai mengalir ketika arester GDT berada di fase *arc* pada waktu 3 μs

sampai 18 μ s. Bentuk profil arus GDT seperti bentuk gelombang impuls arus ketika short circuit 8/20 μ s dengan puncak arus 1300 A.



Gambar 5.44 Profil tegangan dan arus arester GDT untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

Profil tegangan pada gambar 5.45 merupakan output tegangan arester MOV yang diukur pada V(out_mov). Profil arus pada gambar 5.46 merupakan arus output arester MOV yang diukur pada Ix (U1:A). Arestor MOV konduksi pada rentan waktu 0 μ s sampai 18 μ s dikarenakan tegangan output GDT melebihi tegangan kerja MOV V85MLA1210. Arestor MOV memotong tegangan output arester GDT di 120V pada waktu 0.1 μ s dan naik sampai 210 V pada waktu 2 μ s. Pada waktu 2.1 μ s tegangan menurun hingga 0 V pada μ s. Arestor MOV berhenti konduksi pada saat 19 μ s. Ketika MOV konduksi maka ada arus yang mengalir. Profil arus naik dari 0 μ s sampai 2 μ s dengan puncak arus 220 A. Pada waktu 2.1 μ s arus menurun hingga 0 A pada saat 18 μ s.



Gambar 5.45 Profil tegangan dan arus arester MOV untuk tegangan impuls (1.2/50 μ s) 3 kV

Desain induktor dengan induktansi $12.16 \mu\text{H}$ menggunakan kawat email dengan diameter kawat 0.8 mm. Diameter lilitan 10 mm dengan inti udara memiliki 29 lilitan.



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Pada penelitian ini, telah dilakukan perancangan arester kaskade berdasarkan distribusi energi surja. Perhitungan induktansi dekopling berhasil dilakukan menggunakan profil – profil impuls, arester GDT dan MOV. Perancangan arester kaskade dengan dekopling dilakukan pada simulasi LtspiceXVII. Profil tegangan dan arus output arester kaskade dianalisis. Berdasarkan pembahasan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Profil tegangan impuls pada saat open circuit ($1.2/50 \mu\text{s}$) dan profil arus pada saat short circuit ($8/20 \mu\text{s}$) yang dihasilkan simulasi generator impuls RLC memiliki profil yang sesuai dengan profil tegangan dan arus impuls standart IEC. 61000-4-5.
2. Berhasil merancang dekopling induktor menggunakan analisis matematik dari profil – profil impuls, arester GDT dan MOV dengan metode *Discreate Fourier Transform* (DFT) untuk tegangan impuls 1 kV, 2 kV dan 3 kV.
3. Profil tegangan dan arus pada simulasi memiliki profil yang sama dengan profil karakteristik tegangan dan arus arester GDT dan MOV.
4. Perancangan dekopling arester kaskade tepat karena arester GDT menyerap sebagian besar energi impuls dibandingkan arester MOV.

6.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang diberikan penulis:

- Perlu dilakukan pengujian tegangan dan arus arester kaskade.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]



DAFTAR PUSTAKA

- Ag, E. (2011). *SIOV metal oxide varistors Application notes*. (April).
- Bizjak, M., Bekovic, M., & Hamler, A. (2015). Spark breakdown in gas-discharge-tube surge arrester at voltage pulse. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(3), 1552–1560. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2377783>
- Davis, S. (2016). *Power Management*. Penton Media, Inc.
- Hasse, P. (2008). *Overvoltage Protection of Low Voltage System* (Second edi). London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology.
- Hodžić, M., Mujčić, A., Suljanović, N., & Zajc, M. (2017). Modelling Overvoltage Protection Components: Verilog Simulations of Combined MOV and GDT Arresters. *Informacije MIDEM*, 47(4), 261–271.
- Jun, B. J., & Hua, G. Z. (2011). Energy coordination to the terminal device with built-in varistor. *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, APL2011*, 125–130. <https://doi.org/10.1109/APL.2011.6111087>
- Kijima, H., & Murakawa, K. (2012). *Lightning Surge Response Improvement by Combinations of Varistors and Gas Discharge Tubes 1 Introduction Problems in the case of using a varistor and a GDT*. 7(2), 60–69.
- Kladar, D., & Martzloff, F. (2006). Facts, fiction, and fallacies in SPD design and applications. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 8 pp. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709258>
- Kuffel, E., Zaengl, W. S., & Kuffel, J. (2000). High Voltage Engineering. In *High Voltage Engineering Fundamentals* (p. 534). Retrieved from http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=FGowLP_IKK8C&oi=fnd&pg=PR7&dq=High+Voltage+Engineering&ots=8E7iOPQjVk&sig=zrIEcCPnZYnSxSGB6oMPvXmb6A4%0Ahttp://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750636346500101
- Martzloff, F. D., & Lai, J.-S. (n.d.). Cascading Surge-Protective Device: Option For Effective Implementations. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*.
- Munandar, A. (2001). *Teknik Tegangan Tinggi* (Cetakan ke). Jakarta: PT. Pertja.
- Ngampradit, V. (2017). Discussion on measured impulse sparkover voltage of Gas Discharge Tubes (GDT). *2010 30th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2010, 2010*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2010.7845884>
- Radulovic, V., Mujovic, S., & Miljanic, Z. (2017). Effects of Different Combination Wave

Generator Design on Surge Protective Devices Characteristics in Cascade Protection Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(3), 823–834.

<https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2632752>

Ribic, J., Vorsic, J., & Pihler, J. (2014). Mathematical model of a gas discharge arrester based on physical parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(3), 985–992.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2302321>

Society, E. (2016). *IEEE Guide for the Application of Surge-Protective Components in Surge Protective Devices and Equipment Ports — Part 1 : Gas Discharge Tubes (GDTs) IEEE Power and Energy Society IEEE Guide for the Application of Surge-Protective Components in Surge Prot.*

Solutions, C. P. (n.d.). First Principles of a Gas Discharge Tube (GDT) Primary Protector Table of Contents. *Engineer*.

Thirteen, S., & Arresters, S. (2009). *Session Thirteen : The need to ensure energy co-ordination of surge arresters in terms of SANS 10142 : 2009 section L . 1 . 3 . 3 Abstract – Energy co-ordination of surge arresters*. 1–7.

Uman, M. A. (2008). The art and science of lightning protection. In *The Art and Science of Lightning Protection*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511585890>

Vladimir, M. (2010). *Universal SPD coordination towards an effective surge protection of power supply networks*. 75(3), 159–164.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Daya dari tegangan impuls 1 kV dan arus impuls 0.5 kA

Waktu (μ s)	Invers DFT Tegangan (Volt) (dalam domain waktu)	Invers DFT Arus (amper) (dalam domain waktu)	Daya (VA)
0	0	0	0
1	988	105	103740
2	1000	175	175000
3	983	240	235920
4	969	310	300390
5	955	370	353350
6	941	420	395220
7	927	450	417150
8	913	470	429110
9	905	485	438925
10	890	500	440550
11	875	493	431375
12	865	485	419525
13	850	465	395250
14	830	450	373500
15	820	425	348500
16	814	390	317460
17	802	355	284710
18	790	320	252800
19	778	285	221730
20	766	250	191500
21	754	210	158340
22	743	170	126310
23	732	130	95160
24	721	90	64890
25	710	50	35500
26	699	20	13980
27	687	-10	6870
28	678	-40	27120
29	669	-75	50175
30	660	-93	61380
31	651	-112	72912
32	642	-124	79608
33	633	-140	88620
34	626	-150	93900
35	617	-160	98720
36	608	-165	100320
37	599	-163	97637

38	590	-159	93810
39	581	-153	88893
40	571	-147	83937
41	563	-138	77694
42	555	-127	70485
43	547	-118	64546
44	539	-107	57673
45	531	-99	52569
46	522	-85	44370
47	514	-71	36494
48	506	-60	30360
49	498	-45	22410
50	491	-30	14730
51	484	-21	10164
52	477	-13	6201
53	471	-7	3297
54	465	1	465
55	459	11	5049
56	453	22	9966
57	447	30	13410
58	441	37	16317
59	435	42	18270
60	430	46	19780
61	425	48	20400
62	420	47	19740
63	415	46	19090
64	410	45	18450
65	397	44	17468
66	391	43	16813
67	385	42	16170
68	379	41	15539
69	373	40	14920
70	367	39	14313
71	362	36	13032
72	357	32	11424
73	352	28	9856
74	347	22	7634
75	342	16	5472
76	337	12	4044
77	330	10	3300
78	326	8	2608
79	322	3	966
80	318	-5	1590

81	314	-10	3140
82	310	-11	3410
83	306	-12	3672
84	300	-13	3900
85	296	-14	4144
86	292	-15	4380
87	288	-16	4608
88	284	-17	4828
89	280	-18	5040
90	275	-18	4950
91	271	-18	4878
92	267	-17	4539
93	263	-16	4208
94	259	-15	3885
95	255	-14	3570
96	250	-13	3250
97	247	-12	2964
98	244	-11	2684
99	241	-10	2410
100	239	-9	2151

Lampiran 2 Daya dari tegangan impuls 2 kV dan arus impuls 1 kA

Waktu (μ s)	Invers DFT Tegangan (Volt) (dalam domain waktu)	Invers DFT Arus (amper) (dalam domain waktu)	Daya (VA)
0	0	0	0
1	1957	286	559702
2	2000	439	878000
3	1970	540	1063800
4	1940	680	1319200
5	1910	770	1470700
6	1880	860	1616800
7	1850	915	1692750
8	1820	950	1729000
9	1800	970	1746000
10	1780	975	1735500
11	1760	955	1680800
12	1740	925	1609500
13	1720	900	1548000
14	1700	875	1487500
15	1670	780	1302600
16	1640	710	1164400
17	1610	665	1070650

18	1580	580	916400
19	1540	515	793100
20	1520	410	623200
21	1493	330	492690
22	1471	250	367750
23	1449	175	253575
24	1427	110	156970
25	1405	30	42150
26	1383	-5	6915
27	1361	-75	102075
28	1344	-114	153216
29	1327	-180	238860
30	1310	-207	271170
31	1293	-250	323250
32	1276	-270	344520
33	1259	-295	371405
34	1240	-305	378200
35	1222	-315	384930
36	1204	-315	379260
37	1186	-312	370032
38	1168	-305	356240
39	1150	-280	322000
40	1131	-280	316680
41	1115	-260	289900
42	1099	-250	274750
43	1083	-220	238260
44	1067	-200	213400
45	1051	-170	178670
46	1035	-140	144900
47	1020	-110	112200
48	1005	-90	90450
49	990	-60	59400
50	975	-40	39000
51	960	-20	19200
52	945	-4	3780
53	933	25	23325
54	921	35	32235
55	909	55	49995
56	897	67	60099
57	885	75	66375
58	873	85	74205
59	863	92	79396
60	850	95	80750

61	837	100	83700
62	824	103	84872
63	811	102	82722
64	798	100	79800
65	787	97	76339
66	775	91	70525
67	763	85	64855
68	751	83	62333
69	739	70	51730
70	727	65	47255
71	717	58	41586
72	706	49	34594
73	695	41	28495
74	684	32	21888
75	673	24	16152
76	662	16	10592
77	653	7	4571
78	645	2.5	1612.5
79	637	-3	1911
80	629	-8	5032
81	621	-15	9315
82	613	-20	12260
83	605	-23	13915
84	596	-26	15496
85	588	-29	17052
86	580	-31	17980
87	572	-33	18876
88	564	-33	18612
89	556	-33	18348
90	545	-32	17440
91	537	-31	16647
92	529	-30	15870
93	521	-29	15109
94	513	-26	13338
95	505	-24	12120
96	496	-22	10912
97	490	-19	9310
98	484	-16	7744
99	478	-14	6692
100	474	-12	5688

Lampiran 3 Daya dari tegangan impuls 3 kV dan arus impuls 1.5 kA

Waktu (μ s)	Invers DFT Tegangan (Volt) (dalam domain waktu)	Invers DFT Arus (amper) (dalam domain waktu)	Daya (VA)
0	0	0	0
1	2900	435	1261500
2	3000	670	2010000
3	2960	823	2436080
4	2920	1080	3153600
5	2880	1185	3412800
6	2840	1300	3692000
7	2800	1395	3906000
8	2760	1450	4002000
9	2720	1480	4025600
10	2680	1485	3979800
11	2640	1465	3867600
12	2600	1430	3718000
13	2560	1370	3507200
14	2530	1285	3251050
15	2500	1200	3000000
16	2465	1050	2588250
17	2430	1010	2454300
18	2395	880	2107600
19	2360	785	1852600
20	2325	650	1511250
21	2275	540	1228500
22	2245	400	898000
23	2215	290	642350
24	2185	165	360525
25	2155	50	107750
26	2125	-40	85000
27	2075	-150	311250
28	2050	-175	358750
29	2025	-250	506250
30	2000	-310	620000
31	1975	-360	711000
32	1950	-410	799500
33	1925	-440	847000
34	1890	-465	878850
35	1865	-475	885875
36	1840	-480	883200
37	1815	-476	863940
38	1790	-470	841300

39	1765	-450	794250
40	1725	-440	759000
41	1700	-390	663000
42	1675	-360	603000
43	1650	-340	561000
44	1625	-305	495625
45	1600	-260	416000
46	1575	-215	338625
47	1565	-170	266050
48	1555	-130	202150
49	1545	-90	139050
50	1535	-65	99775
51	1515	-35	53025
52	1495	-10	14950
53	1475	20	29500
54	1455	56	81480
55	1435	75	107625
56	1410	100	141000
57	1385	115	159275
58	1360	130	176800
59	1335	140	186900
60	1310	150	196500
61	1285	155	199175
62	1260	156	196560
63	1235	156	192660
64	1215	153	185895
65	1200	148	177600
66	1185	142	168270
67	1170	133	155610
68	1155	125	144375
69	1140	110	125400
70	1125	99	111375
71	1092	91	99372
72	1075	75	80625
73	1058	63	66654
74	1041	49	51009
75	1024	37	37888
76	1007	25	25175
77	995	14	13930
78	983	2	1966
79	971	-5	4855
80	959	-13	12467
81	947	-20	18940

82	935	-30	28050
83	923	-35	32305
84	908	-40	36320
85	895	-45	40275
86	882	-45	39690
87	869	-50	43450
88	856	-50	42800
89	843	-50	42150
90	831	-49	40719
91	819	-48	39312
92	807	-46	37122
93	795	-43	34185
94	783	-41	32103
95	771	-36	27756
96	756	-33	24948
97	750	-29	21750
98	744	-26	19344
99	738	-21	15498
100	730	-19	13870

Lampiran 4 Daya GDT untuk tegangan impuls 1 kV

Waktu (μ s)	Invers DFT Tegangan (Volt) (dalam domain waktu)	Invers DFT Arus (amper) (dalam domain waktu)	Daya (VA)
0	0	0	0
0.1	0	0	0
0.2	0	0	0
0.3	0	0	0
0.4	0	0	0
0.5	0	0	0
0.6	0	0	0
0.7	0	0	0
0.8	0	0	0
0.9	0	0	0
1	0	0	0
1.1	0	0	0
1.2	0	0	0
1.3	10	0	0
1.4	20	0	0
1.5	30	0	0
1.6	55	0	0
1.7	80	0	0
1.8	105	0	0

1.9	130	0	0
2	160	0	0
2.1	180	0	0
2.2	200	0	0
2.3	230	0	0
2.4	260	0	0
2.5	290	0	0
2.6	320	0	0
2.7	340	0	0
2.8	360	0	0
2.9	380	0	0
3	400	0	0
3.1	415	0	0
3.2	430	0	0
3.3	450	0	0
3.4	465	0	0
3.5	480	0	0
3.6	495	0	0
3.7	510	0	0
3.8	525	0	0
3.9	540	0	0
4	560	0	0
4.1	575	0	0
4.2	600	0	0
4.3	80	30	2400
4.4	65	44	2860
4.5	50	50	2500
4.6	45	56	2520
4.7	40	62	2480
4.8	35	68	2380
4.9	30	78	2340
5	25	77.8	1945
5.1	25	77.6	1940
5.2	25	77.4	1935
5.3	25	77.2	1930
5.4	25	77	1925
5.5	25	77.2	1930
5.6	25	77.4	1935
5.7	25	77.6	1940
5.8	25	77.8	1945
5.9	25	78	1950
6	25	78.5	1962.5
6.1	25	79	1975

6.2	25	79.5	1987.5
6.3	25	80	2000
6.4	25	80.5	2012.5
6.5	25	81	2025
6.6	25	81.5	2037.5
6.7	25	82	2050
6.8	25	82.5	2062.5
6.9	25	83	2075
7	25	83.5	2087.5
7.1	25	84	2100
7.2	25	84.5	2112.5
7.3	25	85	2125
7.4	25	85.5	2137.5
7.5	25	86	2150
7.6	25	86.5	2162.5
7.7	25	87	2175
7.8	25	87.5	2187.5
7.9	25	88	2200
8	25	88.5	2212.5
8.1	25	89	2225
8.2	20	89.5	1790
8.3	20	90	1800
8.4	20	90.5	1810
8.5	20	91	1820
8.6	20	91.5	1830
8.7	20	92	1840
8.8	20	92.5	1850
8.9	20	93	1860
9	20	93.5	1870
9.1	20	94	1880
9.2	20	94.5	1890
9.3	20	95	1900
9.4	20	95.5	1910
9.5	20	96	1920
9.6	20	96.5	1930
9.7	20	97	1940
9.8	20	97.5	1950
9.9	20	98	1960
10	20	98.5	1970

Lampiran 5 Daya GDT untuk tegangan impuls 2 kV

Waktu (μ s)	Invers DFT Tegangan (Volt) (dalam domain waktu)	Invers DFT Arus (amper) (dalam domain waktu)	Daya (VA)
0	0	0	0
0.1	0	0	0
0.2	0	0	0
0.3	0	0	0
0.4	0	0	0
0.5	0	0	0
0.6	0	0	0
0.7	0	0	0
0.8	0	0	0
0.9	0	0	0
1	0	0	0
1.1	0	0	0
1.2	0	0	0
1.3	360	0	0
1.4	370	0	0
1.5	380	0	0
1.6	405	0	0
1.7	430	0	0
1.8	455	0	0
1.9	480	0	0
2	510	0	0
2.1	530	0	0
2.2	550	0	0
2.3	580	0	0
2.4	610	0	0
2.5	640	0	0
2.6	670	0	0
2.7	690	0	0
2.8	710	0	0
2.9	730	0	0
3	750	0	0
3.1	765	0	0
3.2	780	0	0
3.3	800	0	0
3.4	815	0	0
3.5	830	0	0
3.6	845	0	0
3.7	860	0	0
3.8	875	0	0

3.9	890	0	0
4	910	0	0
4.1	925	0	0
4.2	950	0	0
4.3	120	45	5400
4.4	97.5	66	6435
4.5	75	75	5625
4.6	67.5	84	5670
4.7	60	93	5580
4.8	52.5	102	5355
4.9	45	117	5265
5	37.5	116.7	4376.25
5.1	37.5	116.4	4365
5.2	37.5	116.1	4353.75
5.3	37.5	115.8	4342.5
5.4	37.5	115.5	4331.25
5.5	37.5	115.8	4342.5
5.6	37.5	116.1	4353.75
5.7	37.5	116.4	4365
5.8	37.5	116.7	4376.25
5.9	37.5	117	4387.5
6	37.5	117.75	4415.625
6.1	37.5	118.5	4443.75
6.2	37.5	119.25	4471.875
6.3	37.5	120	4500
6.4	37.5	120.75	4528.125
6.5	37.5	121.5	4556.25
6.6	37.5	122.25	4584.375
6.7	37.5	123	4612.5
6.8	37.5	123.75	4640.625
6.9	37.5	124.5	4668.75
7	37.5	125.25	4696.875
7.1	37.5	126	4725
7.2	37.5	126.75	4753.125
7.3	37.5	127.5	4781.25
7.4	37.5	128.25	4809.375
7.5	37.5	129	4837.5
7.6	37.5	129.75	4865.625
7.7	37.5	130.5	4893.75
7.8	37.5	131.25	4921.875
7.9	37.5	132	4950
8	37.5	132.75	4978.125
8.1	37.5	133.5	5006.25

8.2	30	134.25	4027.5
8.3	30	135	4050
8.4	30	135.75	4072.5
8.5	30	136.5	4095
8.6	30	137.25	4117.5
8.7	30	138	4140
8.8	30	138.75	4162.5
8.9	30	139.5	4185
9	30	140.25	4207.5
9.1	30	141	4230
9.2	30	141.75	4252.5
9.3	30	142.5	4275
9.4	30	143.25	4297.5
9.5	30	144	4320
9.6	30	144.75	4342.5
9.7	30	145.5	4365
9.8	30	146.25	4387.5
9.9	30	147	4410
10	30	147.75	4432.5

Lampiran 6 Daya GDT untuk tegangan impuls 3 kV

Waktu (μ s)	Invers DFT Tegangan (Volt) (dalam domain waktu)	Invers DFT Arus (amper) (dalam domain waktu)	Daya (VA)
0	0	0	0
0.1	0	0	0
0.2	0	0	0
0.3	0	0	0
0.4	0	0	0
0.5	0	0	0
0.6	0	0	0
0.7	0	0	0
0.8	0	0	0
0.9	0	0	0
1	0	0	0
1.1	0	0	0
1.2	0	0	0
1.3	710	0	0
1.4	720	0	0
1.5	730	0	0
1.6	755	0	0
1.7	780	0	0
1.8	805	0	0

1.9	830	0	0
2	860	0	0
2.1	880	0	0
2.2	900	0	0
2.3	930	0	0
2.4	960	0	0
2.5	990	0	0
2.6	1020	0	0
2.7	1040	0	0
2.8	1060	0	0
2.9	1080	0	0
3	1100	0	0
3.1	1115	0	0
3.2	1130	0	0
3.3	1150	0	0
3.4	1165	0	0
3.5	1180	0	0
3.6	1195	0	0
3.7	1210	0	0
3.8	1225	0	0
3.9	1240	0	0
4	1260	0	0
4.1	1275	0	0
4.2	1300	0	0
4.3	168	63	10584
4.4	136.5	92.4	12612.6
4.5	105	105	11025
4.6	94.5	117.6	11113.2
4.7	84	130.2	10936.8
4.8	73.5	142.8	10495.8
4.9	63	163.8	10319.4
5	52.5	163.38	8577.45
5.1	52.5	162.96	8555.4
5.2	52.5	162.54	8533.35
5.3	52.5	162.12	8511.3
5.4	52.5	161.7	8489.25
5.5	52.5	162.12	8511.3
5.6	52.5	162.54	8533.35
5.7	52.5	162.96	8555.4
5.8	52.5	163.38	8577.45
5.9	52.5	163.8	8599.5
6	52.5	164.85	8654.625
6.1	52.5	165.9	8709.75

6.2	52.5	166.95	8764.875
6.3	52.5	168	8820
6.4	52.5	169.05	8875.125
6.5	52.5	170.1	8930.25
6.6	52.5	171.15	8985.375
6.7	52.5	172.2	9040.5
6.8	52.5	173.25	9095.625
6.9	52.5	174.3	9150.75
7	52.5	175.35	9205.875
7.1	52.5	176.4	9261
7.2	52.5	177.45	9316.125
7.3	52.5	178.5	9371.25
7.4	52.5	179.55	9426.375
7.5	52.5	180.6	9481.5
7.6	52.5	181.65	9536.625
7.7	52.5	182.7	9591.75
7.8	52.5	183.75	9646.875
7.9	52.5	184.8	9702
8	52.5	185.85	9757.125
8.1	52.5	186.9	9812.25
8.2	42	187.95	7893.9
8.3	42	189	7938
8.4	42	190.05	7982.1
8.5	42	191.1	8026.2
8.6	42	192.15	8070.3
8.7	42	193.2	8114.4
8.8	42	194.25	8158.5
8.9	42	195.3	8202.6
9	42	196.35	8246.7
9.1	42	197.4	8290.8
9.2	42	198.45	8334.9
9.3	42	199.5	8379
9.4	42	200.55	8423.1
9.5	42	201.6	8467.2
9.6	42	202.65	8511.3
9.7	42	203.7	8555.4
9.8	42	204.75	8599.5
9.9	42	205.8	8643.6
10	42	206.85	8687.7

Lampiran 7 Daya MOV untuk tegangan impuls 1 kV

Waktu (μ s)	Invers DFT Tegangan (Volt) (dalam domain waktu)	Invers DFT Arus (amper) (dalam domain waktu)	Daya (VA)
0	0	0	0
1	260	44	11440
2	259.5	42	10899
3	259	40	10360
4	258.5	38	9823
5	258	36	9288
6	257.5	34	8755
7	257	32	8224
8	256.5	30	7695
9	256	28	7168
10	255.5	27	6898.5
11	255	26	6630
12	254.5	25	6362.5
13	254	24	6096
14	253.5	23	5830.5
15	253	22	5566
16	252.5	21	5302.5
17	252	20	5040
18	251	19	4769
19	250	18	4500
20	249	17	4233
21	248	16	3968
22	247	15	3705
23	246	14	3444
24	245	13	3185
25	244	12	2928
26	243	11.5	2794.5
27	242	11	2662
28	241	10.5	2530.5
29	240	10	2400
30	239	9.5	2270.5
31	238	9	2142
32	237	8.5	2014.5
33	236	8	1888
34	235	7.5	1762.5
35	234	7	1638
36	233	6.5	1514.5
37	232	6	1392
38	231	5.5	1270.5

39	230	5	1150
40	229	4.5	1030.5
41	228	4.2	957.6
42	227	3.9	885.3
43	226	3.6	813.6
44	225	3.3	742.5
45	224	3	672
46	223	2.8	624.4
47	222	2.6	577.2
48	221	2.4	530.4
49	220	2.2	484
50	219	2	438
51	218	1.8	392.4
52	217	1.7	368.9
53	216	1.6	345.6
54	215	1.5	322.5
55	214	1.4	299.6
56	213	1.3	276.9
57	212	1.2	254.4
58	211	1.1	232.1
59	210	1	210
60	209	0.9	188.1
61	208	0.8	166.4
62	207	0.7	144.9
63	206	0.6	123.6
64	205	0.5	102.5
65	204	0.4	81.6
66	203	0.3	60.9
67	202	0.2	40.4
68	201	0.1	20.1
69	200	0	0
70	195	0	0
71	190	0	0
72	185	0	0
73	180	0	0
74	175	0	0
75	170	0	0

Lampiran 8 Daya MOV untuk tegangan impuls 2 kV

Waktu (μ s)	Invers DFT Tegangan (Volt) (dalam domain waktu)	Invers DFT Arus (amper) (dalam domain waktu)	Daya (VA)
0	0	0	0

1	265	44.85	11884.2
2	264.5	42.81	11323
3	264	40.77	10763.9
4	263.5	38.74	10206.7
5	263	36.70	9651.49
6	262.5	34.66	9098.3
7	262	32.62	8547.11
8	261.5	30.58	7997.92
9	261	28.55	7450.73
10	260.5	27.53	7171.14
11	260	26.51	6892.55
12	259.5	25.49	6614.96
13	259	24.47	6338.36
14	258.5	23.45	6062.77
15	258	22.43	5788.17
16	257.5	21.42	5514.58
17	257	20.40	5241.98
18	256	19.38	4960.89
19	255	18.36	4681.8
20	254	17.34	4404.71
21	253	16.32	4129.61
22	252	15.30	3856.52
23	251	14.28	3585.42
24	250	13.27	3316.33
25	249	12.25	3049.23
26	248	11.74	2910.68
27	247	11.23	2773.14
28	246	10.72	2636.59
29	245	10.21	2501.04
30	244	9.70	2366.49
31	243	9.19	2232.95
32	242	8.68	2100.4
33	241	8.17	1968.85
34	240	7.66	1838.3
35	239	7.15	1708.75
36	238	6.64	1580.2
37	237	6.13	1452.65
38	236	5.62	1326.1
39	235	5.11	1200.54
40	234	4.60	1075.99
41	233	4.29	1000.06
42	232	3.99	924.73
43	231	3.68	849.998

44	230	3.37	775.867
45	229	3.07	702.335
46	228	2.86	652.714
47	227	2.66	603.493
48	226	2.45	554.671
49	225	2.25	506.25
50	224	2.05	458.228
51	223	1.84	410.606
52	222	1.74	386.096
53	221	1.64	361.785
54	220	1.53	337.674
55	219	1.43	313.764
56	218	1.33	290.053
57	217	1.23	266.542
58	216	1.13	243.23
59	215	1.02	220.119
60	214	0.92	197.208
61	213	0.82	174.496
62	212	0.72	151.985
63	211	0.61	129.673
64	210	0.51	107.561
65	209	0.41	85.649
66	208	0.31	63.9369
67	207	0.20	42.4248
68	206	0.10	21.1124
69	205	0.00	0
70	200	0.00	0
71	195	0.00	0
72	190	0.00	0
73	185	0.00	0
74	180	0.00	0
75	175	0.00	0

Lampiran 9 Daya MOV untuk tegangan impuls 3 kV

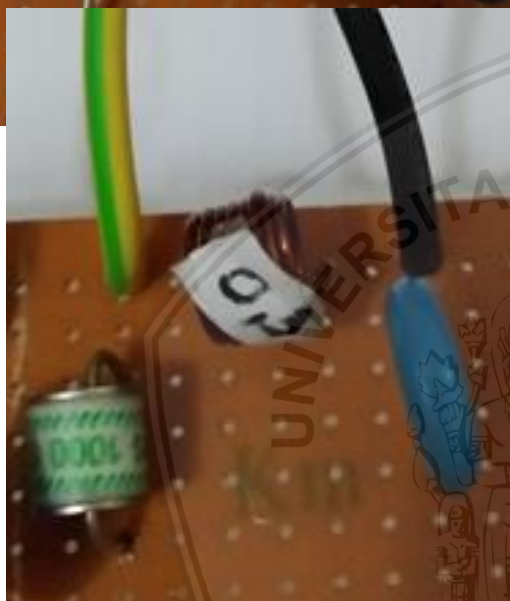
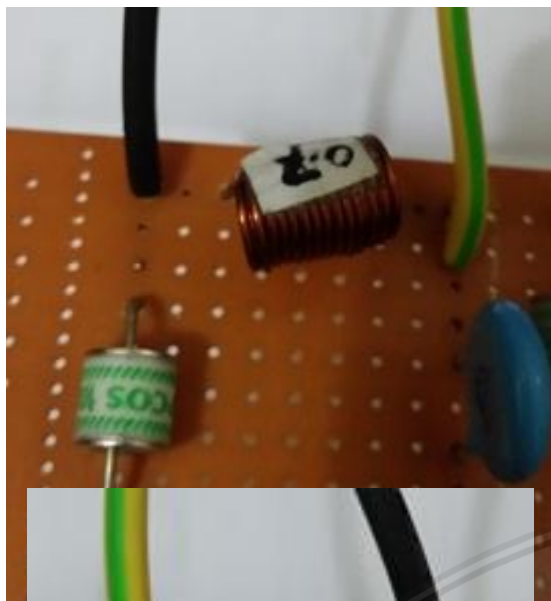
Waktu (μ s)	Invers DFT Tegangan (Volt) (dalam domain waktu)	Invers DFT Arus (amper) (dalam domain waktu)	Daya (VA)
0	0	0	0
1	270	45.69	12336.9
2	269.5	43.62	11755.2
3	269	41.54	11175.4
4	268.5	39.47	10597.7
5	268	37.40	10022

6	267.5	35.32	9448.2
7	267	33.25	8876.45
8	266.5	31.17	8306.7
9	266	29.09	7738.94
10	265.5	28.06	7449.07
11	265	27.02	7160.2
12	264.5	25.98	6872.32
13	264	24.94	6585.45
14	263.5	23.91	6299.57
15	263	22.87	6014.7
16	262.5	21.83	5730.82
17	262	20.79	5447.94
18	261	19.76	5156.57
19	260	18.72	4867.2
20	259	17.68	4579.83
21	258	16.65	4294.45
22	257	15.61	4011.07
23	256	14.57	3729.69
24	255	13.53	3450.31
25	254	12.49	3172.92
26	253	11.97	3029.23
27	252	11.45	2886.55
28	251	10.94	2744.86
29	250	10.42	2604.17
30	249	9.90	2464.47
31	248	9.38	2325.78
32	247	8.86	2188.09
33	246	8.34	2051.39
34	245	7.82	1915.69
35	244	7.30	1780.99
36	243	6.78	1647.29
37	242	6.26	1514.59
38	241	5.74	1382.88
39	240	5.22	1252.17
40	239	4.70	1122.47
41	238	4.38	1043.44
42	237	4.07	965.018
43	236	3.76	887.193
44	235	3.45	809.967
45	234	3.13	733.339
46	233	2.93	681.656
47	232	2.72	630.371
48	231	2.51	579.486

49	230	2.30	529
50	229	2.09	478.913
51	228	1.88	429.226
52	227	1.78	403.683
53	226	1.67	378.341
54	225	1.57	353.198
55	224	1.47	328.254
56	223	1.36	303.51
57	222	1.26	278.966
58	221	1.15	254.621
59	220	1.05	230.476
60	219	0.94	206.531
61	218	0.84	182.785
62	217	0.73	159.238
63	216	0.63	135.891
64	215	0.52	112.744
65	214	0.42	89.7961
66	213	0.31	67.0478
67	212	0.21	44.499
68	211	0.10	22.1498
69	210	0.00	0
70	205	0.00	0
71	200	0.00	0
72	195	0.00	0
73	190	0.00	0
74	185	0.00	0
75	180	0.00	0

Lampiran 10. Perancangan Arester kaskade

Arester kaskade dengan dekopling $1.1 \mu\text{H}$ 



Arester kaskade dengan dekopling $0.7 \mu\text{H}$

Arester kaskade dengan dekopling $0.3 \mu\text{H}$